

〔德〕克劳斯·迈因策尔 著



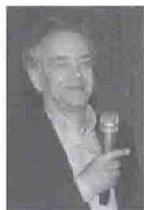
THINKING
IN
COMPLEXITY

曾国屏 苏俊斌 译

复杂性思维

物质、精神和人类的计算动力学

作者



克劳斯·迈因策尔(Klaus Mainzer) 德国科学哲学家。现为慕尼黑工业大学科学哲学中心主席,卡尔·林德学会主任,并任德国复杂系统和非线性动力学学会主席,德-日综合科学学会主席,以及多份国际期刊的编委。研究范围遍及数学、物理学和科学哲学,尤其在复杂系统、非线性动力学等领域多有建树。除本书外,还著有《大自然的对称性》、《对称与复杂:非线性科学的魂与美》等。

译者



曾国屏 清华大学科学技术与社会研究所教授,清华大学深圳研究生院社会科学与管理学部主任。长期从事科学·技术·产业与社会问题、科技传播普及和复杂性科学哲学问题的研究,有著译十余部。



苏俊斌 2008年毕业于清华大学,获哲学博士学位。现任教于厦门大学新闻传播学院,研究方向为新媒体的技术与社会研究,讲授广播电视史、新媒体概论等课程。

主要内容

复杂性科学是与相对论、量子力学齐名的20世纪重大科学突破,在某种意义上,复杂性对整个科学体系的影响,也许比后两者更深刻、更广泛。进入21世纪,探索和理解复杂性,依然是各学科的华彩乐章,将对人们的思维方式产生深刻影响。克劳斯·迈因策尔教授的《复杂性思维》一书,从科学前沿探索与人类心智探险史的结合中,涉猎从物理世界的进化到生命世界的进化,从意识的起源到认知科学的兴起,从社会政治系统到社会经济系统的运行,从哲学史到哲学前沿的反思,说明了探索复杂性将引起人们思维方式的变化,引起世人对共同未来的关怀。这是一本扣人心弦的著作。

辞海译丛书目

宇宙密码——作为自然界语言的量子物理
这本书叫什么——奇诡的逻辑谜题
龙骨山——冰河时代的直立人传奇
旷代女杰——柯瓦列夫斯卡娅传
资本主义的历史——从1500年至2010年
心智——认知科学导论
竞逐富强——公元1000年以来的技术、军事与社会
现代宇宙学中的禅——从万物皆空到无中生有
苦行孤旅——约瑟夫·F·洛克传
复杂性思维——物质、精神和人类的计算动力学
第二次世界大战的起源

上架建议:科普读物 自然科学总论

ISBN 978-7-5326-3892-5



9 787532 638925 >

定价: 85.00元

www.cishu.com.cn

易文网: www.ewen.cc



〔德〕克劳斯·迈因策尔 著



曾国屏 苏俊斌 译

复杂性思维

物质、精神和人类的计算动力学

上海辞书出版社

图书在版编目(CIP)数据

复杂性思维：物质、精神和人类的计算动力学/
(德)迈因策尔(Mainzer, K.)著;曾国屏, 苏俊斌译. —上海:
上海辞书出版社, 2013.12

(辞海译丛)

书名原文: Thinking in complexity: the
computational dynamics of matter, mind, and mankind
ISBN 978-7-5326-3892-5

I ①复… II ①迈… ②曾… ③苏… III ①复杂性理论
IV. ①N941.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第067028号

总策划 彭卫国 潘涛

责任编辑 宋世涛

装帧设计 姜明

复杂性思维——物质、精神和人类的计算动力学

[德]克劳斯·迈因策尔 著

曾国屏 苏俊斌 译

出版发行 上海世纪出版股份有限公司

上海辞书出版社

社址 上海市陕西北路457号 邮政编码200040

网址 www.ewen.cc www.cishu.com.cn

印刷 苏州望电印刷有限公司

开本 635 mm × 965 mm 1/16

印张 39

字数 503 000

版次 2013年12月第1版

印次 2013年12月第1次印刷

印数 1—2 250册

ISBN 978-7-5326-3892-5/B·230

图字 09-2009-411号

定价 85.00元

如有印刷、装订质量问题,读者可向工厂调换,联系电话:0512—66700301

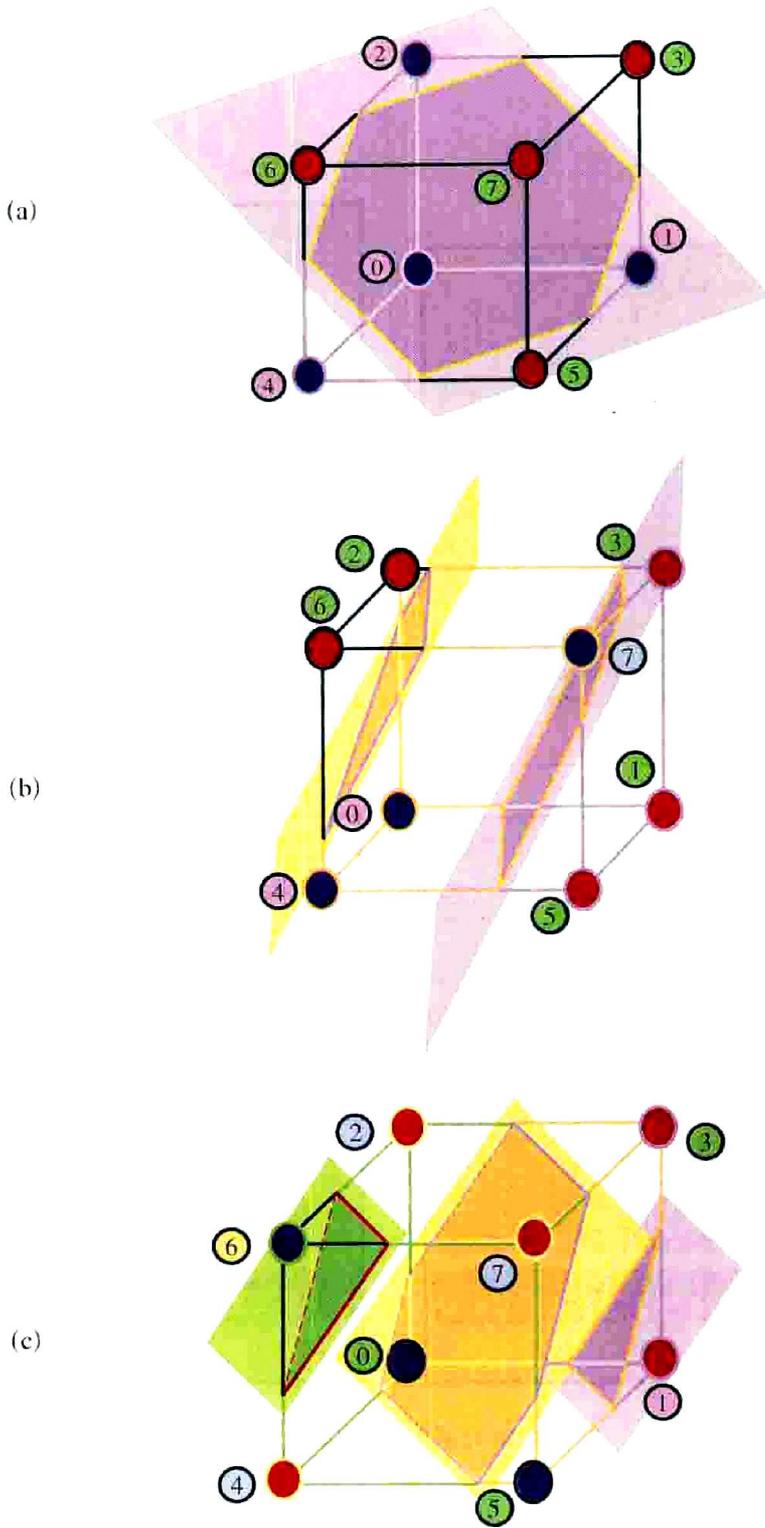


图 6.31 着色布尔立方体分隔平面
 (a) 规则 232; (b) 规则 110; (c) 规则 150。

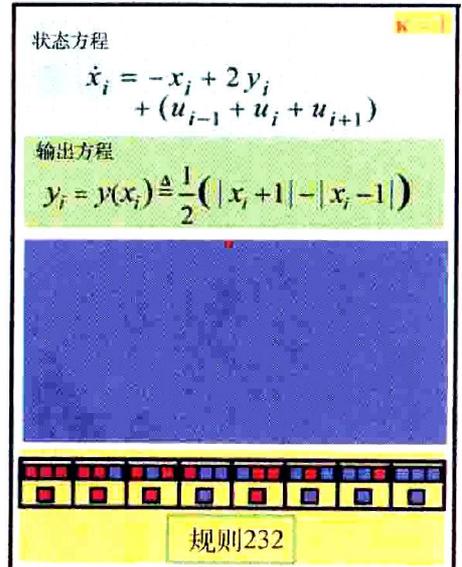
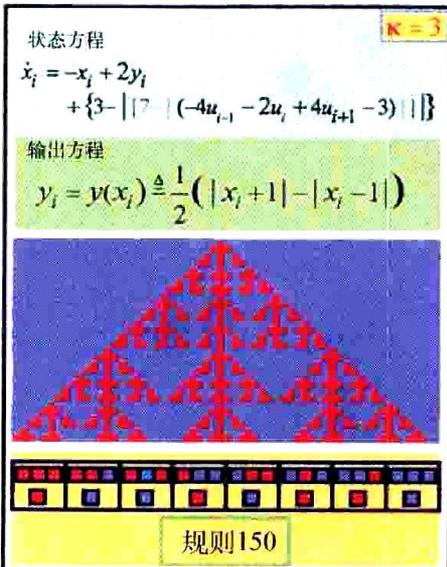
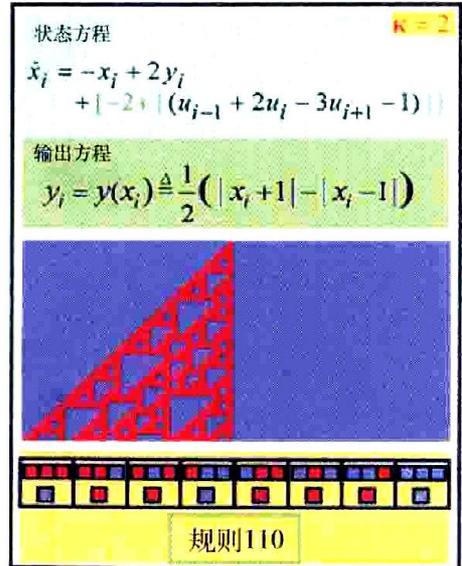
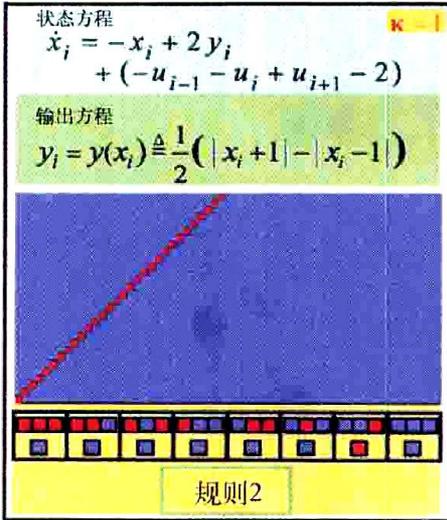


图 6.32 非线性动力系统产生规则 2, 110, 150 和 232

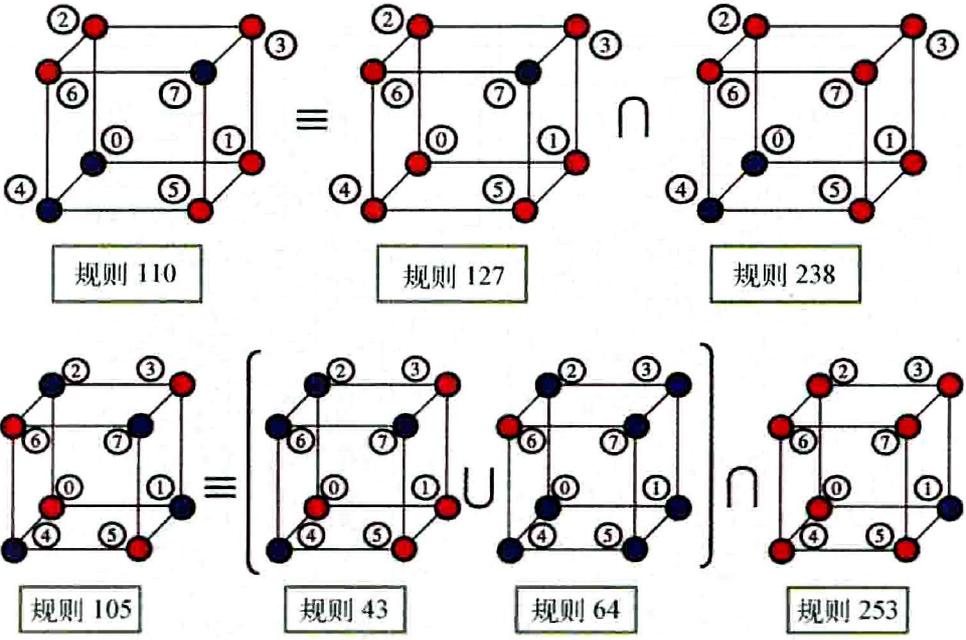


图 6.34 根据线性可分隔规则得出的线性不可分隔规则

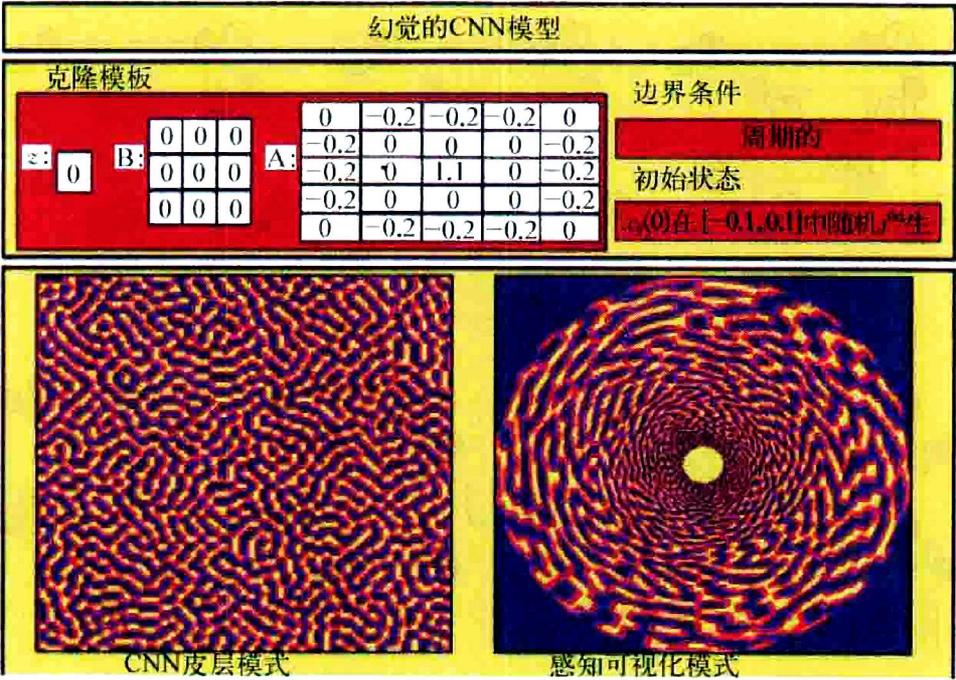


图 6.37 幻觉的 CNN 模型

《辞海译丛》缘起

《辞海》自 1936 年初版以来，风行宇内，历久弥新。本社有幸，负《辞海》修订出版之责，于“十年大修”外，近年亦颇致力于《辞海》品牌之延伸，《辞海译丛》应运而生焉。《译丛》旨在遴选域外学术著作之适于大众阅读者，移译为中文，俾国人快捷获取新知。选目原则有二：一为洽知识性与思想性于一炉，既广见闻，更启深思；二为融学术性与普及性于一体，既具高度，复饶趣味。

《译丛》自 2011 年起陆续推出。初期选目以科学人文类译著为主，今后将尽力拓宽领域，向读者奉献更多佳作。寄望各界博雅君子，以爱护《辞海》之心，垂注《译丛》，助我教我，共育此书苑新葩。

上海辞书出版社谨识

2011 年 6 月

复杂性思维

作者简介 克劳斯·迈因策尔 (Klaus Mainzer, 1947—)

德国科学哲学家。1973年获明斯特大学博士学位,曾任教于明斯特大学、康斯坦茨大学、奥格斯堡大学。现为慕尼黑工业大学科学哲学中心主席、卡尔·林德学会主任,并任德国复杂系统和非线性动力学学会主席、德-日综合科学学会主席,以及《国际应用科学与工程中的分岔与混沌杂志》等多份国际期刊的编委。研究范围遍及数学、物理学和科学哲学,尤其在复杂系统、非线性动力学等领域多有建树。除本书外,还著有《大自然的对称性》、《对称与复杂:非线性科学的魂与美》等。

但全体只是通过自身发展而达于完满的那种本质。

——黑格尔 《精神现象学》(1807)

中文第 2 版序

我愉快地向您介绍这本由修改增订第 5 版翻译成的中译本《复杂性思维》。我的这本书 1994 年首次出版后不久便被翻译成了中文,并得到了中国读者的好评。中国读者对自然、技术、经济和社会的自组织复杂系统表现出了极大的兴趣。为何尤其在中国读者中是这样呢?在我看来,是中国这个伟大国家在世界上的政治、经济和科学等方面日益扩大的影响和责任使然。也正是因为如此,他们才需要一种更为深邃的眼光去审视未来全球的动力学法则、全球治理以及关于未来危机和风险的预警系统。

总的说来,复杂动力学系统理论是一种对自然和社会的非线性过程进行建模的交叉学科方法论。在全球化的时代,它是对于人类生活和文明(如生命科学、环境和气候、全球化、信息洪流等)不断增加的复杂性和敏感性的一种回答。复杂系统由很多微观要素(分子、细胞或有机体)组成,这些要素之间以非线性方式相互作用并产生出宏观秩序。自组织意味着微观要素的非线性相互作用而导致宏观态的涌现。混沌和随机,增长和创新,都是由临界态的相变来建模的具体例证。模型旨在解释和预测其动力学机制。然而在随机和混沌的情况下,即便我们知道其局部行为的一切法则和条件,去推断复杂系统的宏观动力学机制也是要受到限制的。虽然长期的未来预测办不到,但是动态趋势(如序参量)则是可识别、可施加影响的。在数学模型和计算机辅助建模这一方法论之外,我们还需注意实践和伦理的后果:务必要对自然和社会的临界平衡(蝴蝶效应)保持敏感。在对复杂系统的自组织、控制和治理之间寻找均衡,以支撑起人类的可持续的未来。

这个新版本同时也是科学中数学建模新作用的一个例证。在牛顿时代,数学模型主要是作为实在的确定性映象应用于物理学和天文学(如行星系统)。它们旨在对过去的事件做出解释并预测未来。模型和理论被观察、测量和实验室实验从经验上证实或证伪。数学预测,被简化成方程

的唯一确定解,以及对作为实在映象的唯一模型的坚定信念。依照正态分布的原则,极端事件也被低估成不大可能发生的风险。“正态”这个形容词意味着一种成问题的假定是:高斯曲线表征了忽略极端事件的厚尾状况的风险的一种“自然”分布。尚存的风险显得并不重要。最近的金融危机、地震和核灾难已然用一种惊人的方式表明,上述方法论的视角总体上已经不再适合。

复杂模型作为交叉学科的工具,不仅应用在自然科学和工程科学,也应用在金融、经济和其他社会科学中。是否存在某种同时适用于自然界中的湍流和金融市场中的动荡的普适性方法论呢?分子的微观相互作用和人类的微观经济行为之间又有何不同?显然,我们不可能在实验室中对人和市场进行实验。于是,计算机模拟的新作用也就应运而生。

这些模型主要都是随机和概率的,且不再被看作是实在的确定性映象。究其原因,正如我们不能像预测行星位置一样预测金融危机。由于有着方法论上的误解,金融数学的预测不灵受到了来自政治公共领域的指责。诚然,模型的非单值性并不容许我们将某一个模型当作实在的确定性映象。因此,我们就必须通盘考虑有着不同视角的一系列可能的随机模型。现实世界太复杂,难以靠一盏明灯来照亮。在这些形形色色的模型中,最坏的情形将通过压力测试来发现,并在决策时加以重视。通过这种方式,我们才能克服旧的怀疑论对科学建模的反对,并找到合适的未来情境。在存在限制性条件,以及对模型固有的模糊性具有灵敏度的情况下,鲁棒性的随机工具极其有用。科学哲学的任务则是去评价复杂系统的科学建模,并考量其跨学科应用的可能性。

有了复杂系统的工具,中国会更好地为其在世界中的全球性角色做好准备,更好地面对治理、风险管理和可持续发展的重任。我希望并乐见这本书会激励中国人民应对这些未来的挑战。自从中文第1版出版之后,我已经从奥格斯堡大学转到了慕尼黑工业大学(TUM)工作,这是德

国的一所卓越大学,并和清华大学有着正式伙伴关系。现在,我担任着卡尔·林德学会主任一职,该学会是慕尼黑工业大学的交叉学科研究中心,聚焦于复杂性研究和科学技术学(Science and Technology Studies,缩写 STS)领域。最后我还要特别感谢曾国屏教授及其团队的辛勤工作和细致翻译。我还要借此祝愿清华大学科学技术与社会研究中心早日成为世界一流的 STS 研究重镇,并期待着清华大学科学技术与社会研究中心和慕尼黑工业大学卡尔·林德学会的未来合作!

克劳斯·迈因策尔

2011年6月于慕尼黑

第 5 版序

复杂性决定着 21 世纪科学的精神。宇宙的膨胀、生命的进化、人类经济与社会的全球化无不涉及复杂动态系统的相变。在物理与生命科学、经济与社会科学,以及认知与计算机科学领域中,越来越多的学科开展复杂性研究,产生着新成果与新见解。因此,这本《复杂性思维》势必联系着一个学习过程而必须及时更新。尽管从本书第 1 版起,复杂性研究的主要原则就已经得到了强调,然而,第 5 版对以前版本的几乎所有章节都进行了扩充和修改,还包括有关可计算性的演化和新兴的经济物理学的全新章节。

在第 2 章,关于时间序列分析的方法论部分现在也将分形和多重分形看作复杂性的几何标准。更进一步,幂律揭示了所有生物系统的高度复杂性。它们也是有关分形和多重分形的无标度定律的重要标志,这在第 3 章还另有分析。在第 4 章,传统心物二元论通过诉诸具身心智(embodied mind)的概念来克服,这是神经生物学和神经心理学最近出现的概念,其理由是人们在其环境中亲身向经验学习。在神经医学,心智理论以大脑特定部位作为复杂具身过程来解释人们对自己情绪状态的自我意识。最终,通过自我意识器官与其环境的亲身互动产生了感受性,这可以用复杂系统的非线性动力学来建模。

第 5 章讨论可计算性的演化,是全新的一章。在介绍莱布尼茨的历史背景和可计算性与算法复杂性的基本概念之后,我们讨论了信息论和概率论中复杂性的等级。概率吸引子使我们能够对随机过程进行分类。概率态是量子世界的典型。量子态由量子信息编码,由量子计算机处理。量子可计算性导致不同程度的量子复杂性。宇宙是一个日益复杂的、正在膨胀的巨型量子计算机吗?动态系统所有层次的复杂性也都可以用元胞自动机来进行模拟。第 6 章包括有机计算的新观念和成果。生命与智

能的自然进化已经成为计算模型的重要范式。它们不再限制于经典人工智能的符号知识的表征。在自然进化中具身生命与心智的邂逅,已经引发了关于具身人工智能的研究,包括能够亲身经历体验并与所处变化环境进行学习互动的机器人与机器。

第7章讨论复杂系统与经济演化,也是全新的一章。在对经济自组织进行历史评论之后,我们引入了复杂经济系统的非均衡动力学的一些基本概念。经济物理学是一个新近出现的学科,它采用非线性动力学方法来分析经济与金融系统。这种状况令人想起现代分子生物学的起源,当时是如薛定谔这样的物理学家(在他的突破性著作《生命是什么?》中)而不是传统生物学家,运用现代数学物理方法在生命科学中取得突破。这次可能还是物理学家,将从复杂系统理论和非线性动力学中获得数学方法,并在其基础之上找到有用的经济与金融模型。复杂与全球市场显示出与天气和气象动力学所观察到的湍流显著类似的现象,遵循着概率分布的典型幂律。具有概率吸引子的随机过程引起中断或不连续事件(“诺亚效应”)或长期趋势(“约瑟效应”)。时间序列分析能够探测到分形和多重分形结构的典型样式,可以用作危机状态的告警信号。

第8章讨论人类文化与社会进化,本版增加了在万维网、移动和泛在计算的时代中的媒体与传播等内容。这些都是高度复杂自组织网络的典型例子,每个例子都类似于一种超级大脑。数据流量的流动可以用相变和吸引子来进行刻画。为了有效地管理信息的日益流动,我们需要信息检索与个性化信息系统等用户友好的办法。量身定制的电子学习向现代知识社会中信息技术应用提出了挑战。第9章强调了现代复杂性研究中的哲学和伦理要旨。

最后我想要感谢克里斯蒂安·卡伦(Christian Caron)对这个新版本的启动与支持。他发扬了施普林格出版社把“复杂性中的思维”看作 21 世纪关键议题来进行关注的优良传统。

克劳斯·迈因策尔

2007 年 3 月于奥格斯堡

第 4 版序

1994年出版的本书第1版开门见山地指出,复杂性这一新科学将刻画21世纪的科学发展。在本世纪的第一个十年,这个预言已经被物理与生物科学、认知与计算机科学,以及社会与经济科学等学科所取得的前所未有的经验成果和理论洞见所证实。复杂性与非线性仍然是物质、心智以及人类社会演化的主导特征。因此,复杂性科学仍然旨在以普遍原理来解释自然与心智以及经济与社会中秩序的涌现。

然而,有一种新的工程学观念专注于复杂性的探索。一方面,我们需要新的计算设备来分析复杂数据并识别未来趋势。另一方面,复杂动力学的原理正在日益地成为基因、生物以及计算机技术的蓝图。生命与计算机科学正发展成为一种新的复杂工程学,改变着人类生命与社会的基本条件。非线性动力学被运用在微型高速的非线性计算机芯片中,这些芯片不仅分布在我们的技术设备和环境中,也存在于我们的身体和大脑里面。机器人是被嵌入的。纳米技术与新材料,以及人工生命与人工智能对于复杂性科学的未来提出了惊人的挑战。在这个全球化时代,人类与全球信息通信的计算网络一起成长。但我们也处于技术、经济、社会动力学的非平衡相变的危险之下。所有这些新课题在这次扩充修订第4版的补充部分里都得到了考虑。

因此,《复杂性思维》有了一个新的副标题“物质、精神和人类的计算动力学”。我们能够实际地定义算法和动力学复杂性的精确量度。计算动力学的基本定理最近已经得到了证明。但由于混沌和随机性,理解计算动力学并不意味着能够在所有细节上预见和决定未来。虽然我们能够通过计算机实验而从非线性动力学获得经验,但计算机实验也无法取代现实。由于生活是复杂而随机的,我们必须从生活获得经验。从哲学的视角看,本书概括了认识论与伦理行为的新标准,这是自然、心智、经济和社会的复杂问题的要求。

这次新版受益于多项富有成果的合作。本书于1997年被译为日文,

而我也应邀访问东京、大阪、长崎以及福井的大学。1999年,中文版出版,我应邀访问北京、上海等地的大学。2000年汉诺威世界博览会期间,我应德国科学组织的邀请,为“科学与技术——思考未来”会议主持“理解复杂系统”和“全球网络”主题研讨。2002/2003学年,我是德国比勒弗尔德跨学科研究中心的“信息理论与组合数学一般原理”国际研究小组的成员。2002年在法兰克福举办的第7届IEEE“细胞神经网络及其应用”专题研讨会,为模拟神经计算机和芯片技术的新进展打开了一片新视野。作为《国际应用科学与工程中的分岔与混沌杂志》编委会成员,我得以有机会跨学科纵览全世界复杂性科学的探索。我特别要感谢我们期刊的主编蔡少棠(加州大学伯克利分校电气工程与计算机科学系)的鼓励意见和访问伯克利的善意邀请。也感谢斯蒂芬·沃尔弗拉姆(Stephen Wolfram)与蔡少棠允许我在本书第5、6章引用他们著作的一些图表。最后,我想感谢沃尔夫·拜格尔伯克(Wolf Beiglböck)(施普林格出版社)对这次新版的推动和支持。

克劳斯·迈因策尔

2003年3月于奥格斯堡

第 3 版序

与第1版一样,《复杂性思维》第2版也是不到一年就已售罄。同时,第2版的日文译本也已出版。我再次得到出新版的机会来修订和扩充书中的内容。

本版纳入新的第2.5节“复杂系统与物质的自我构建”,以分析复杂系统在超分子化学、纳米技术以及智能(intelligent)物质技术的惊人成功中发挥的作用。这些议题存在于材料科学与生命科学之间的交界处。近年来,生命科学与计算机科学在一个称为“人工生命”的共同研究领域得到了携手成长。新的第5.5节“从人工智能到人工生命”,讨论了复杂系统在人工生命领域中的角色。我也利用新版的机会,评论圣菲研究所探讨复杂系统的进路与本书关键概念协同学和序参量方法之间的联系。

对复杂系统的研究在全世界继续。我必须感谢世界各地读者的友善而富有启发的来信。就在数月之前,德国复杂系统与非线性动力学学会(German Society of Complex Systems and Nonlinear Dynamics)成立了。我要感激的是,尊敬的德国科学院邀请我做了一个关于复杂性的讲演,以阐明我的态度。最后,我要再次感谢施普林格出版社沃尔夫·拜格尔伯克(Wolf Beiglböck)对这个新版的推动和支持。

克劳斯·迈因策尔

1996年11月于奥格斯堡

第 2 版序

《复杂性思维》一书的第1版不到一年即已售罄。显然,复杂性和非线性是自然科学和社会科学都关注的跨学科“热门”话题。伊恩·斯图尔特(Ian Stewart)(英国沃里克大学数学研究所)关于本书的一篇精彩的书评《兴起中的新科学》[Nature 374, 834(1995)]对此进行了很好的概括:“非线性并非万能的答案,但往往是一种更好的思考问题的方式。”

借此出第2版的机会,我对本书进行了修订和扩充。在第2.4节,补充了在超分子化学和材料科学中关于保守自组织的新近的重要成果。文献中补充了一些从自组织角度对宇宙学进行的新近讨论。对于活细胞中的耗散自组织的新成果,增加了一些评注(第3.3节)。对于神经技术中适应性神经修补术的成功和局限,也进行了更详细的分析(第5.4节)。原书的最后一章扩展为“关于未来、科学和伦理学的结语”,该章首先是关于传统预测方法的一个简短导言,接着从自然科学和社会科学受到非线性和复杂性制约的前提,讨论了传统预测方法的局限性和新的预测程序。特别是对科学和技术发展进行预测和建模的可能性,乃是当代关于人类的未来和伦理学的争论中的兴奋点。

非线性复杂系统的一般方法必须在与自然科学和社会科学的结合中,在特定的观测、实验和理论条件下加以发展。因此,我希望借此机会对以下这些同事的极有帮助的建议表示感谢:罗尔夫·埃克米勒(Rolf Eckmiller)(波恩大学神经信息系),汉斯-约尔格·法尔(Hans-Jörg Fahr)和沃尔夫·普里斯特(Wolf Priester)(波恩大学天体物理学系和马克斯-普朗克射电天文学研究所),赫尔曼·哈肯(Hermann Haken)(斯图加特理论物理和协同学研究所),本诺·黑斯(Benno Hess)(海德堡马克斯-普朗克医学研究所),库尔久莫夫(S. P. Kurdyumov)(莫斯科凯尔

迪什应用数学研究所),雷娜特·迈因茨(Renate Mayntz)(科隆马克斯-普朗克社会科学研究所),阿希姆·米勒(Achim Müller)(比勒弗尔德大学无机化学系)。最后,我同样还要感谢沃尔夫·拜格尔伯克(Wolf Beiglböck)(施普林格出版社),他对本书第2版的修订给予了推动和支持。

克劳斯·迈因策尔

1995年11月于奥格斯堡

第 1 版序

复杂性和非线性是物质、生命和人类社会进化中的显著特征。甚至我们的心智也似乎受制于我们大脑中复杂网络的非线性动力学。本书考察了物理科学和生物科学、认知科学和计算机科学、社会科学和经济科学以及科学哲学和科学史中的复杂系统,引入了一种跨学科的方法论,以解释在自然界和精神领域中以及在经济和社会中有相同原理的有序的涌现。

这些方法常常被认为是预示了 21 世纪科学发展特征的新的复杂性科学。本书批判地分析了这种探索进路的成功之处及其局限性,它的系统基础,它的历史背景和哲学背景。最后的结语中讨论了新的伦理学行为标准,这些行为标准是自然和心智、经济和社会的复杂问题所要求的。

本书的“核心”是一篇提交给关于复杂非线性系统的会议的论文,这次会议于 1992 年 10 月在比勒弗尔德的跨学科研究中心举行,是由赫尔曼·哈肯(Hermann Haken)和亚历山大·米哈伊洛夫(Alexander Mikhailov)组织的。同年 12 月,安杰拉·M·莱希博士(Angela M. Lahee)(施普林格出版社)建议我将该文的主题扩展为一本书。因此,我要向莱希博士的友好和有效的支持,以及对哈肯在复杂系统和协同学上的多次合作表示谢意。我还要感谢德国研究基金对我的“计算机、混沌和自组织”(1990—1992;Ma 842/4-1)和“神经信息学”(1993—1994;Ma 842/6-1)课题的支持。奥格斯堡大学的关于“复杂系统”的数学研究生项目和关于“经济和管理中的非线性”的经济学课程的教学使我得到了许多灵感。1991 年和 1993 年,北莱茵-威斯特伐利亚(杜塞尔多夫)科学研究中心邀请我参加了两次关于计算机技术、神经生物学和精神哲学的文化影响的国际会议。

最后,我同样特别要向以英语为母语的罗斯(J. Andrew Ross)(施普林格出版社)对本书的仔细阅读和校正,向许特(Katja E. Hüther)和扬森(Jutta Janßen)(奥格斯堡大学)为本书打字表示感谢。

克劳斯·迈因策尔

1994 年 6 月于奥格斯堡

目录

中文第 2 版序	1
第 5 版序	5
第 4 版序	9
第 3 版序	13
第 2 版序	15
第 1 版序	19
1 第 1 章 导言：从线性思维到非线性思维	
21 第 2 章 复杂系统和物质进化	
2.1 亚里士多德的宇宙和赫拉克利特的逻各斯	22
2.2 牛顿宇宙、爱因斯坦宇宙和拉普拉斯妖	38
2.3 哈密顿系统、天上的混沌和量子世界的混沌	56
2.4 保守系统、耗散系统和有序涌现	68
2.5 纳米世界和自建构材料的复杂系统	88
2.6 时间序列分析、分形、多重分形	96
109 第 3 章 复杂系统和生命进化	
3.1 从泰勒斯到达尔文	110
3.2 玻耳兹曼的热力学和生命进化	116
3.3 复杂系统和有机物进化	124
3.4 复杂系统和种群生态学	141
3.5 复杂系统和生命的幂律	146

153	第 4 章 复杂系统和心-脑进化	
	4.1 从柏拉图的灵魂到拉美特利的“人是机器”	154
	4.2 复杂系统和神经网络	166
	4.3 大脑和意识形成	193
	4.4 意向性和脑爬虫体	205
	4.5 复杂性和具身心智	216
221	第 5 章 复杂系统和可计算性的进化	
	5.1 莱布尼茨和普遍数学	222
	5.2 可计算性和算法复杂度	226
	5.3 信息、概率和 $1/f$ 复杂性	241
	5.4 随机过程、概率吸引子和概率复杂性	249
	5.5 量子信息、量子计算机和量子复杂性	256
	5.6 元胞自动机、混沌和随机性	270
281	第 6 章 复杂系统和人工生命、人工智能的演化	
	6.1 图灵和符号人工智能	282
	6.2 神经网络和协同计算机	301
	6.3 细胞神经网络和模拟神经计算机	322
	6.4 通用细胞神经网络和动力复杂性	337
	6.5 有机计算、神经仿生学和具身机器人	352
	6.6 具身人工智能和人工生命	371
384	第 7 章 复杂系统和经济演化	
	7.1 亚当·斯密的经济学和市场均衡	385
	7.2 复杂经济系统、混沌和随机性	397

7.3 巴舍利耶的金融理论和市场均衡 418

7.4 复杂金融市场、湍流和幂律 428

7.5 经济物理学的展望 448

453 第8章 复杂系统和人类文化、社会的进化

8.1 从亚里士多德的城邦到霍布斯的利维坦 454

8.2 复杂的社会系统和文化系统 461

8.3 复杂通信网络、信息检索和个性化信息系统 480

8.4 复杂移动网络、泛在计算和适应性在线学习 498

511 第9章 关于未来、科学和伦理学的结语

9.1 复杂性、预测和未来 511

9.2 复杂性、科学和技术 521

9.3 复杂性、责任和自由 528

参考文献 541

人名译名对照 569

中文第1版译后记 581

中文第2版译后记 583

图表目录

- 图 2.1 椭圆的均轮-本轮模型 33
- 图 2.2 旋轮线的均轮-本轮模型 33
- 图 2.3 奥雷姆的线性特质的坐标 40
- 图 2.4 动力系统的几何表示 42
- 图 2.5 矢量场中动力系统的轨迹 43
- 图 2.6 经典物理学与狭义相对论中的空-时模型 45, 47
- 图 2.7 单摆 49
- 图 2.8 单摆的相图 50
- 图 2.9 轨迹的环状渐近极限集 51
- 图 2.10 具有两个点吸引子、两个趋向轨迹开放集和一条分界线的相图 52
- 图 2.11 时钟振子及其态空间 53
- 图 2.12 两个振子的组合系统的相图 54
- 图 2.13 刘维尔定理示意图 58
- 图 2.14 点吸引子和涡点 59
- 图 2.15 环面上两个自由度和一条轨迹的封闭轨道的可积系统 61
- 图 2.16 埃农-海勒斯系统的庞加莱映射 62
- 图 2.17 木星对小行星运动的扰动 63
- 图 2.18 玻尔对应原理 65
- 图 2.19 两个耦合振子和氢原子的经典动力学 68
- 图 2.20 贝纳尔实验：加热的流体层 70
- 图 2.21 洛伦茨吸引子 71
- 图 2.22 非线性迭代映射的逻辑斯谛曲线 73
- 图 2.23 逻辑斯谛映射：倍周期分岔与混沌 74
- 图 2.24 不同控制参量的逻辑斯谛映射的吸引子 75
- 图 2.25 概率函数 77
- 图 2.26 在圆柱后的流体动力学的宏观模式 79
- 图 2.27 波的模式 80
- 图 2.28 物理力的统一 82
- 图 2.29 宇宙中从基本粒子到星系的结构多样性的形成 84
- 图 2.30 随复杂性增减的物质进化 85
- 图 2.31 巨大的超分子簇(“大轮子”)的球棍模型：一个复杂近平衡系统的

- 例子 92
- 图 2.32 自组织的纳米晶体(“量子点”) 94
- 图 2.33 洛伦茨系统的时间序列与吸引子 100
- 图 2.34 二次映射与混沌映射 102
- 图 2.35 由李雅普诺夫指数 Λ 衡量的对起始条件的指数依赖性 103
- 图 2.36 科赫曲线的分形维数 106
- 图 2.37 湍流的多重分形过程 108
- 图 3.1 具有对称时间方向的热平衡态玻耳兹曼宇宙中的熵曲线 119
- 图 3.2 编码具有 129 个氨基酸的序列的基因 126
- 图 3.3 自催化与循环催化 127
- 图 3.4 N 维序列空间 129
- 图 3.5 细胞形成状态的形态发生的动力学模型(软泥霉的生命循环) 133
- 图 3.6 细胞动力学模型 134, 135, 136
- 图 3.7 形态发生的计算机辅助模型: 导致一个周期性结构 137
- 图 3.8 形态发生的两个计算机辅助模型 138
- 图 3.9 具有分形递归的心脏分支脉管网络 139
- 图 3.10 规则的心率和混沌的心率 140
- 图 3.11 捕食群体和被捕食群体的生态系统的相图(洛特卡-沃尔泰拉) 143
- 图 4.1 笛卡儿的感知和手臂运动几何模型 158
- 图 4.2 詹姆斯的联想网络几何模型 165
- 图 4.3 中枢神经系统(CNS)中复杂系统的程度 167
- 图 4.4 用神经矩阵相乘建立的小脑模型 170
- 图 4.5 感觉运动协调及其几何模型 171
- 图 4.6 具有隐含单元的 3 层网络 172
- 图 4.7 图 4.6 所示的 3 层网络的突触权重空间与活化向量空间 174
- 图 4.8 联想网络与反馈网络 176, 177
- 图 4.9 两种相变模型 178, 179
- 图 4.10 霍普菲尔德系统的态空间 180
- 图 4.11 从模拟退火到玻耳兹曼机 180, 182
- 图 4.12 进行竞争学习的多层网络 183
- 图 4.13 神经相互作用与神经活性分布 185
- 图 4.14 科霍宁的自组织神经映射模型 186
- 图 4.15 蝙蝠脑 187
- 图 4.16 误差面和梯度下降学习 191
- 图 4.17 后向传播 192

- 图 4. 18 原型-激活 195, 197
- 图 4. 19 进入大脑皮层的输入 199
- 图 4. 20 捆绑问题 201
- 图 4. 21 对称破缺 203, 204
- 图 4. 22 感知的意向性对象(方块) 206
- 图 4. 23 生态系统中的意向性 208, 209
- 图 4. 24 视觉吸引子导致的两条等距平行线的弯曲效应 210
- 图 4. 25 两个手指的相对运动 211
- 图 4. 26 用能量波形模拟运动手指的动力学 211
- 图 4. 27 具有意向性信息的相对相位动力学 212
- 图 4. 28 中文小屋中的艾丽斯 214
- 图 5. 1 手动计算机器 224
- 图 5. 2 图灵机 229, 231
- 图 5. 3 经典的图论问题 235, 236
- 图 5. 4 含有两个符号(状态)的系统的平均信息内容(信息熵) 242
- 图 5. 5 混沌逻辑斯蒂映射的一步信息丢失的信息流和二分割 245
- 图 5. 6 两个周期信号的傅里叶分析及其叠加 246
- 图 5. 7 $1/f^b$ 噪声的复杂度 247
- 图 5. 8 r_n/n 值的分布 250
- 图 5. 9 不同的概率密度函数 251
- 图 5. 10 独立同分布变量的联合概率密度函数 $P(S_n)$ 252
- 图 5. 11 $P(S_n)$ 的模拟 253
- 图 5. 12 独立同分布随机变量之和(依概率)收敛于某些稳定的吸引子 254
- 图 5. 13 经典计算机器和非经典计算机器 257
- 图 5. 14 “薛定谔猫”及其解释 258, 260
- 图 5. 15 量子门的可逆计算 264
- 图 5. 16 量子信息的统计转变 264
- 图 5. 17 量子信息与经典信息的相互转译 265
- 图 5. 18 “量子复制机”的框架 265
- 图 5. 19 利用经典传输的量子复制机 266
- 图 5. 20 量子传输 267
- 图 5. 21 麦卡洛克-皮茨神经元与逻辑关联模型 271
- 图 5. 22 麦卡洛克-皮茨网络 272
- 图 5. 23 康威的元胞自动机模拟 274
- 图 5. 24 一维元胞自动机 275

- 图 5.25 可逆元胞自动机的规则(122R) 278
- 图 5.26 伴有随机模式生成的可逆元胞自动机说明了热力学第二定律 279
- 图 6.1 真实世界状况的符号表达 283
- 图 6.2 人类专家的推理 286
- 图 6.3 数值计算机与人类之间的专家系统 286
- 图 6.4 专家系统的架构 287
- 图 6.5 专家系统中的知识处理 288
- 图 6.6 专家系统的问题类别 290
- 图 6.7 问题解决策略 290
- 图 6.8 MYCIN 中的与/或树 294
- 图 6.9 KEKADA 的架构 299
- 图 6.10 硬件层次和软件层次 300
- 图 6.11 XOR 问题和 OR 问题的求解 304, 305, 306
- 图 6.12 用神经网络区分岩石和矿石的声呐回声 307
- 图 6.13 NETalk 网络 309
- 图 6.14 用神经网络预测股市行情 312
- 图 6.15 用神经网络模拟认知内克尔立方体 315
- 图 6.16 协同计算机 316, 317
- 图 6.17 识别滞后及其模拟 319
- 图 6.18 细胞神经网络 324
- 图 6.19 用 EDGE CNN 图像处理的快照 326
- 图 6.20 THRESHOLD CNN 图集 327
- 图 6.21 EDGE CNN 的真值表 329
- 图 6.22 最小 CNN 真值表 330
- 图 6.23 具有(灰阶)虚拟边界细胞的 1×2 CNN 331
- 图 6.24 1×2 CNN 的周期性动态行为 332
- 图 6.25 1×2 CNN 的非周期性动态行为 333
- 图 6.26 联结性 CNN 传播的快照 336
- 图 6.27 CNN 通用机的结构 339
- 图 6.28 CNN 通用机软件和核心引擎的层次 340
- 图 6.29 CNN 通用芯片的最初原型之一 341
- 图 6.30 用布尔函数的着色布尔立方体表示一维元胞自动机 343
- 图 6.31 着色布尔立方体中的分隔平面 345
- 图 6.32 非线性动力系统产生规则 2, 110, 150 和 232 348
- 图 6.33 CNN 状态方程相空间中的轨迹和吸引子 349

图 6.34	根据线性可分隔规则得出的线性不可分隔规则	351
图 6.35	具有学习神经网络的神经技术假体的一般模式	358
图 6.36	复杂网络的大脑认知活动的实时可视化	360
图 6.37	幻觉的 CNN 模型	362
图 6.38	CNN 神经仿生学模型	363
图 6.39	用于癫痫发作的预测和阻止的 CNN 通用芯片	365
图 6.40	数据手套	367
图 6.41	自认是缸中之脑的缸中之脑	370
图 6.42	带有延伸尾巴的自繁殖兰顿环及其子环的形成	374
图 6.43	扩张着的人工珊瑚集群	375
图 6.44	采用二值编码的遗传算法的交换算子	378
图 7.1	重农主义者的“经济表”及其图示	386, 387
图 7.2	用反馈模式来说明亚当·斯密的供给和需求的自组织过程	390
图 7.3	效用矩阵与风险矩阵	395
图 7.4	创新能力与产出、就业	399
图 7.5	混沌吸引子与商业周期	402
图 7.6	两种竞争技术的非线性动力学	407
图 7.7	竞争厂商的分岔	411
图 7.8	物理与经济系统中的非线性动力学	412
图 7.9	买卖单位(元胞)的市场模型	417
图 7.10	巴舍利耶得出的正态分布曲线及价格变化图	420
图 7.11	20 世纪的道·琼斯工业平均指数	430
图 7.12	道·琼斯指数与布朗运动中的波动	431
图 7.13	自然界中的湍流与金融市场中的“湍气”流	432
图 7.14	德国股票指数(DAX)时间序列	435
图 7.15	巴舍利耶的正态分布金融图的分形重构	436
图 7.16	以施乐股票的高频价格波动的实证数据构建的概率密度函数	438
图 7.17	急剧价格变动的分形重构	440
图 7.18	诺亚效应	440
图 7.19	约瑟效应	441
图 7.20	长期依赖性的复杂性程度	443
图 7.21	长期依赖性的分形重构	444
图 7.22	多重分形的交易时间	446
图 7.23	韦吕勒逻辑斯谛曲线对马尔萨斯指数曲线的偏离	449
图 8.1	奥西里斯(Osiris)的最后审判(埃及:公元前 2 世纪)	457

- 图 8.2 霍布斯著作封面上的“利维坦” 459
- 图 8.3 复杂性的意义 462
- 图 8.4 城市演化的计算机辅助模型 468
- 图 8.5 模拟社会动力学的协同学方法论 470
- 图 8.6 有一个稳定平衡点的迁移动力学 473
- 图 8.7 有两个稳恒不动点的迁移动力学 473
- 图 8.8 具有涡线的迁移动力学 474
- 图 8.9 具有极限环和不稳定源的迁移动力学 474
- 图 8.10 一个固定三层结构中的社会动力学 476
- 图 8.11 流动结构的等级组织中的社会动力学 478
- 图 8.12 20 世纪 90 年代初的全球联网 483
- 图 8.13 互联网的路由节点 484
- 图 8.14 互联网路由器 RTT 数据波动的时序与功率谱 484
- 图 8.15 低、中、高数据流平均密度的相变 485
- 图 8.16 在不同时间标度上(“奇怪吸引子”)信息包波动的自相似性 486
- 图 8.17 以多层神经网络进行信息检索 488
- 图 8.18 用个性化信息系统从复杂信息世界不同来源推出的偏好 497
- 图 8.19 演化架构 EvoArch 中的自 X 特性和汽车功能自组织 501
- 图 8.20 全球知识社会中的个性化信息系统 507
- 图 9.1 雅典国王艾吉斯在特尔菲向预言家咨询未来(古希腊碗:公元前 440—前 430) 512
- 图 9.2 具有稳定点吸引子或极限环且其邻近轨迹收敛的可预测系统 517
- 图 9.3 新科学领域的自繁殖率对邻近领域生长曲线的影响 524
- 图 9.4 问题空间 526
- 图 9.5 康德的三个问题 538
- 表 1.1 非线性复杂系统的交叉学科应用 20
- 表 2.1 三维系统吸引子的动力复杂性 105
- 表 3.1 欧氏标度和生物学标度 150

导言：从线性思维 到非线性思维

在自然科学中,从激光物理学、量子混沌和气象学,直到化学中的分子建模和生物学中对细胞生长的计算机辅助模拟,非线性复杂系统理论已经成为一种成功的求解问题方式。另一方面,社会科学也认识到,人类面临的主要问题也是全球性的、复杂的和非线性的,往往还是随机的。生态、经济或政治系统中的局部性变化,都可能引起一场全球性危机。线性的思维方式,把整体仅看作其部分之和的观点,显然已经过时了。认为甚至我们的意识也受复杂系统非线性动力学所支配,已成为当代科学和公众兴趣中最激动人心的课题。如果这个计算神经科学的命题是正确的,那么我们的确就获得了一种强有力的数学策略,使我们得以去处理自然科学、社会科学和人文学科的跨学科问题。但是,本书的一个主要见解如下:对问题的处理并不总是意味着计算和确定未来。在随机性的情形下,我们能够理解动力学的缘由,但却没有机会做出预测。理解复杂动力

学,比起计算确定的解往往是更为重要的,当不可能计算确定的解时尤其如此。

在这些跨学科的应用中,成功的原因何在?本书表明,非线性复杂系统理论不可能还原成特殊的物理学的自然定律,尽管它的数学原理是在物理学中被发现的,并首先在物理学中得到成功应用。因此,它不是某种传统的“物理主义”,不是用类似的结构定律来解释激光、生态群体或我们的大脑的动力学。它是一种跨学科方法论,以此来解释复杂系统中微观元素的非线性相互作用造成的某些宏观现象的涌现。光波、流体、云彩、化学波、植物、动物、群体、市场和脑细胞团,都可以形成以序参量为标志的宏观现象。它们不能还原到复杂系统的原子、分子、细胞、机体等微观水平上。事实上,它们代表了真实的宏观现象的属性,例如场势、社会或经济力量、情感乃至思想。有谁会否认情感和思想能够改变世界呢?

在历史上,社会科学和人文学科的概念往往受到物理理论的影响。在机械化时代,托马斯·霍布斯把国家描述成一台机器(“利维坦”),其公民就是机器中的嵌齿轮。在拉美特利看来,人的灵魂归结为自动机的齿轮传动装置。亚当·斯密用类似于牛顿万有引力的“看不见的”力来解释市场机制。经典力学中,在牛顿或哈密顿运动方程的意义上,因果关系是确定论的。时间可逆(即对称性或不变性)和能量守恒,是保守系统的特征。天体力学和无摩擦钟摆是著名的例子。耗散系统是不可逆的,例如就像没有摩擦项的牛顿力。

而且,大自然原则上被看作一个巨大的确定论的保守系统,一旦确切知道了它的起始状态,就可以预测其未来或追溯其过去的每一时刻的因果事件(拉普拉斯妖)。亨利·庞加莱则认识到,天体力学并非是一台可以透彻计算的机械钟,甚至在局限于保守性和确定论情况时亦如此。所有的行星、恒星和天体之间的因果相互作用,在其相互影响可以导致混沌轨迹的意义上,都是非线性的(例如三体问题)。在庞加莱的发现之后,又

过了60多年, A·N·科尔莫戈罗夫和 V·I·阿诺尔德和 J·K·莫泽证明了所谓的 KAM 定理: 经典力学的相空间轨迹既非完全规则的, 亦非完全无规的, 但是它们十分敏感地依赖于对初始条件的选择。微小的涨落可能引起混沌的发展(“蝴蝶效应”)。

在20世纪, 量子力学成为了物理学的基础理论。^[1.1]* 在薛定谔的波动力学中, 量子世界被看作是保守的、线性的。用哈密顿算符描述的量子系统, 取代了最初用哈密顿函数描述的量子化经典系统(例如对于电子和光子)。这些系统被假定是保守的, 即是非耗散的, 对于时间逆转具有不变性, 因而是满足能量守恒定律的。量子系统的状态用希尔伯特空间的矢量(波函数)来描述, 希尔伯特空间的距离与其哈密顿算符的本征值相联系。量子状态的因果动力学由确定论的微分方程(薛定谔方程)所决定, 该微分方程合乎叠加原理, 因而是线性的, 即如同经典光学的情形, 该方程的解(波函数或态矢)是可以叠加的。量子力学的叠加或线性原理显示了组合系统的相关(“关联”)态, 这在 EPR 实验(A·阿斯佩, 1981)中得到了高度确证。在一个关联的纯量子叠加态, 一次观测仅可能得到不确定的本征值。量子系统的关联态和测量仪器相应就仅仅可能有不确定的本征值。但是, 实验室的测量仪器却显示出了确定的测量值。因此, 线性的量子动力学难以解释该测量过程。

在玻尔、海森伯等人的哥本哈根诠释中, 测量过程是用所谓的“波包坍缩”来解释的, 即把叠加态分裂成两个独立的具有确定本征值的测量仪器和被测量子系统的状态。显然, 我们必须将量子系统的线性动力学与测量的非线性作用加以区分。这个世界的这种非线性, 有时被解释为人的意识的参与。尤金·维格纳(1961)提出, 薛定谔方程的线性对于有意

* [1.1]系指第1章的第1条参考文献, 下同。在中文版中, 原书参考文献(及附带的说明文字)影印置于正文之后。——编者

识的观察者可能会失效,需要代之以某种非线性程序,据此两个问题都可能得到解决。但是,维格纳的解释迫使我们去相信,线性的量子叠加性仅仅在宇宙的某个角落——在此出现了人的或类似人的意识——才会分裂成独立的部分。科学史上,拟人的或目的论的论证往往表明,科学解释在此软弱无力、难以奏效。因此,一些科学家如罗杰·彭罗斯提出,量子力学的线性动力学不适合用来解释出现了意识的宇宙的进化。他主张,至少是一个把线性量子力学和非线性的广义相对论统一起来的理论,才可能解释这个世界中的宏观系统的分裂状态。一台测量仪器是一个宏观系统,测量过程是远离热平衡的不可逆过程。因此,解释只有在一种统一的非线性理论中才可能成功。即使把薛定谔波动方程推广到量子场论,它也是非线性的。量子场论中,有所谓的二次量子化,场函数被场算符所代替。例如,对于两粒子势场,量子场方程包含有一个非线性项,它相应于基本粒子对的形成。一般地,量子场论中基本粒子的反应本质上是非线性现象。基本粒子的相互作用导致了其量子态只具有有限的寿命,从而破坏了时间的可逆性。因此,一般地,甚至量子世界自身同样既不是保守的也不是线性的。在系统理论中,复杂性不仅仅意味着非线性,还意味着大量的具有许多自由度的元素。^[1.2]所有的宏观系统,如石头或行星、云彩或流体、植物或动物、动物群体或人类社会,都是诸如原子、分子、细胞或有机体这样的组元构成的。具有大量自由度的复杂系统中的单个元素的行为,既无法预测也无法追踪。对单个元素的确定论描述,必须代之以概率分布的演化。

第2章分析了“复杂系统和物质的进化”。前苏格拉底时期以来,自然哲学的一个基本问题是,发现有序是如何从复杂的、无规的和混沌的物质状态产生出来的。赫拉克利特认为,一种产生有序的能力(逻各斯)协调着无规的相互作用,创造出有序的物质状态。现代的热力学以统计力学的数学概念描述了有序的形成。我们区别两种形成有序的相变(自组

织)：保守自组织意味着热力学平衡态的可逆结构的相变。典型的例子是雪花晶体的生长或使铁磁体系统退火到临界温度值时磁性的形成。保守自组织主要是造成低温低能的有序结构,这可以用玻耳兹曼分布来描述。一个现代技术的应用就是材料科学中的样式形成。纳米世界的复杂系统和自建构材料是未来关键技术的挑战。

耗散自组织是远离热平衡的不可逆结构的相变。^[1.3]当耗散(“开放”)系统与其环境的能量相互作用达到某个临界值时,微观元素的复杂的非线性合作产生出宏观模式。从哲学上看,所形成的结构的稳定性是由某种非线性和耗散的均衡来保证的。过强的非线性相互作用或耗散作用会使结构遭到破坏。由于耗散相变的条件是十分普通的,这就使之有了广泛的交叉学科应用。物理学中,激光是一个典型的例子。化学的BZ反应中,当特定的混合在一起的化学物质处于临界值,就出现了浓度环或螺旋卷。各个环波之间的竞争非常清楚地显示出这些现象的非线性,而叠加原理成立时这些环波应该相互穿透,如同光波那样。

非线性的耗散复杂系统的相变由协同学来解释。我们可以用更定量的方式说,旧的结构变得不稳定,并由控制参量的改变而被打破。在微观水平上,旧的状态的稳定模是受到不稳定模的支配(哈肯的“役使原理”)。^[1.4]它们决定着描述系统的宏观结构和模式的序参量。相变的种种不同的最终模式,对应于不同的吸引子。种种不同的吸引子可以形象地描述为流体,其速度逐步加快。在最初的水平上,显示的是均匀平衡态(“不动点”)。在较高速度的水平上,可以观察到两个或两个以上的螺旋,它们是周期的或准周期的吸引子。最后,有序退化成确定论混沌,这是一种复杂系统的分形吸引子。从哲学上看,我希望强调,协同学中物质的微观描述有别于宏观有序状态。于是,协同学的有序概念使我想起赫拉克利特的“逻各斯”或亚里士多德的“形式”,它们在物质的转变过程中产生出自然的有序态。当然,古人在这里用的不是数学描述。

用更数学化一些的语言来说,复杂系统的微观观点是用态矢的演化方程来描述的,方程中每一分量都依赖于空间和时间,这些分量可以代表流体的速度分量,它的温度场,或化学反应中的化学物质的浓度。协同学的役使原理允许我们消除代表着稳定模的自由度。在主要的近似中,相应于这些系统的非线性,演化方程转变成特殊形式,在此出现了模式之间的竞争。不稳定模的主导项的幅度称为序参量。它们的演化方程描述了宏观模式的形成。最后的模式(“吸引子”)通过相变而实现,此过程可以被理解为某种对称破缺。^[1.5]从哲学上看,由对称破缺过程引起的物质的进化,在赫拉克利特那里已经提到了。

关于自然界中复杂系统和非线性动力学的理解似乎要产生物质进化的适当模型。但在实践中我们如何能够找到正确的模型?物理学家、化学家、生物学家或医生在未知领域的研究中从数据挖掘着手。对应于未知动态系统的时间依赖事件,他们只有数量有限的一系列测量数据。从这些时间序列数据出发,他们必须重构系统的行为,以猜测其动力方程的类型。因此,在混沌理论和非线性动力学领域中,时间序列的分析是现代研究中的挑战。

第3章分析“复杂系统和生命进化”。科学史和哲学史上,人们曾相信“死”物和“生”物之间是界线分明的。亚里士多德把生命解释为一种自组织的力量(“隐德来希”),它推动着植物和动物朝向其最终形式生长。一个活系统能够靠自己来运动,而一个死系统只可能从外部来推动。生命用目的论来解释,即用指向某种自然目标的非因果力(“生命力”)来解释。18世纪,康德揭示了,活的有机体的自组织不可能用牛顿物理学的机械系统来解释。他在一段著名的话中说,能够解释青草叶片的牛顿还没有出现。19世纪,热力学第二定律描述了封闭系统朝向最大熵状态或无序态的不可逆运动。人们又如何来解释在生命的达尔文进化中的有序的形成呢?玻耳兹曼强调,活的有机体是开放的耗散系统,与其环境发生着交换,这并不

违背封闭系统的第二定律。然而，在从玻耳兹曼到莫诺的统计解释中，生命的出现仅仅是一种偶遇事件，是“在宇宙边缘”的局部宇宙涨落。

在复杂系统的框架中，生命的形成不是偶遇的，而是耗散自组织意义上必然的和合乎规律的。宇宙中，只有生命出现的条件（例如出现在行星地球上）才可能是偶遇的。一般地，生物学中将个体发生（有机体的生长）与种系发生（物种的进化）加以区别。在任何一种情形下，我们遇上的都是复杂的耗散系统。这种系统的发展，可以用远离热平衡的相变来解释，即由分子、细胞等的非线性（微观）相互作用引起的（宏观）序参量的演化来解释。生物系统（植物、动物等）的形式用序参量来描述。亚里士多德关于自然目的的目的论，用相变的吸引子来解释。但是，这里不需要任何特殊的“生命力”或“目的力”。从哲学上看，生命的出现可以在非线性因果性和耗散自组织的框架中来解释，尽管出于启发式的缘由，它可能会使用目的论语言来描述。

我要向读者指出，生物大分子的前生物进化已经由曼弗雷德·艾根等人进行了分析和模拟。斯宾塞以复杂性增加为标志的生命进化的思想，可以在耗散自组织理论中得到精确化。众所周知，图灵分析了有机体数学模型，将其表示成复杂元胞系统。格里施、迈因哈特等人用关于细胞聚集的演化方程描述了有机体（例如软泥霉）的生长。对于阿米巴，当环境中细胞营养物处于某个临界值，其非线性相互作用引起了形成如软泥霉的宏观有机体。序参量的演化对应于宏观有机体相变过程中的聚集形式。成熟的多细胞体可以解释为机体生长中的“目标”或（更好的）“吸引子”。多细胞机体，例如基因系统、神经系统、免疫系统以及生态系统，是复杂动态系统的例子，是由许多相互作用的要素网络构成的。考夫曼提议研究随机布尔网络，这种网络可以在计算机上编程。在计算机实验中，他发现了具有复杂性递增的不动点和循环的动态行为层次，这种层次性在实际细胞中也可以观察到。

甚至生物群体的生态生长也可以运用协同学概念来说明。生态系统是复杂的耗散系统,包括植物或动物之间以及与其环境之间的相互的非线性代谢作用。两种群体与其营养源的共生,可以用三个耦合的微分方程来描述,爱德华·洛伦茨已经用这种方程描述了气象学中天气的发展。在19世纪,意大利数学家洛特卡和沃尔泰拉描述了两个处于生态竞争中的群体的发展。两个复杂群体的非线性相互作用,由两个耦合的捕食者和被捕食者的微分方程来描述。该耦合系统的演化具有一个稳恒(stationary)的平衡点。此种演化的吸引子是周期振荡子(极限环)。

复杂系统理论使得我们可以对自然界生态系统的非线性因果作用进行分析。自从工业革命以来,人类社会与自然界的生态循环结合得越来越紧密。但是,线性的传统工业生产模式,使复杂的自然平衡受到重大威胁。人们假定自然界中拥有无穷无尽的能源、水源和空气,利用它们时也不会干扰自然界的平衡。工业会生产出无穷无尽的物品,而无需考虑如同臭氧洞或废物利用那样的协同效应。生命的进化转化成为了人类社会的进化。

从方法论的角度看,幂律在生物系统上的可用性说明这样的系统是高度复杂的。生物幂律方程的某些例子,包括有机体对其身体的期望值和代谢率的有关生理变量。尽管并非所有的幂律联系都源自分形,这里联系的存在应当提示我们去检测细胞子系统在不同层次上的自相似性。许多带有分支树状血管的细胞器官,例如肺,至少在统计上是自相似的。分形和自相似概念不仅用于描述生化现象,而且也启发了临床医生所采用的一种新康复方法。非线性动力学中出现的新观念,生物学中的无标度律和幂律表明健康是同源动态的;换句话说,有一束状态在决定着健康。一个健全的生理系统有某些数量的内禀可变性,而且没有固定的状态。

第4章“复杂系统和心脑的进化”,讨论了也许是最有思辨性的复杂系统的跨学科应用。在哲学史和科学史上,已经提出了多种多样的解决

心身问题的主张。唯物主义哲学家如德谟克里特、拉美特利等人主张，把精神还原为原子的相互作用。唯心主义者如柏拉图、彭罗斯等人则强调，精神是完全独立于物质和大脑的。在笛卡儿、埃克尔斯等人看来，精神和物质是相互作用、独立存在的实体。莱布尼茨信奉一种形而上的精神和物质的平行论，因为它们不可能进行物理性的相互作用。在莱布尼茨看来，精神和物质是“前定和谐”的存在，如同两个同步的钟表。现代精神哲学家如塞尔则捍卫一种进化自然主义。塞尔认为，精神以意向性的精神状态为标志，它们是人的大脑的生化作用的固有特征，因而不可能由计算机来模拟。

但是，复杂系统理论不可能归结为这些或多或少有些片面的主张。复杂系统探究方式是一种交叉学科的方法论，适用于讨论诸如大脑这样的细胞器官的非线性复杂系统。精神状态的形成（例如模式识别、情感、思想）用大脑集合体的（宏观）序参量的演化来解释，序参量是远离热平衡的学习策略中由神经细胞的非线性（微观）相互作用造成的。具有精神状态的细胞团被解释为相变中的吸引子（不动点、周期吸引子、准周期吸引子或混沌吸引子）。

如果大脑被看作一个神经细胞的复杂系统，那么它的动力学也就假定由神经网络的非线性数学来描述。例如，通过与应用于描述物理学、化学和生物学中模式涌现的演化方程进行类比，模式识别也就解释为了一种相变。从哲学上看，我们就获得了一种跨学科的研究纲领，由此可以把神经计算的自组织解释为一种具有共同原理的物理学、化学和神经生物学演化的自然结果。正如在模式生成的情形，特定的模式识别（例如一张脸的原型）是用其特征集的序参量来描述的。一旦给出了属于该序参量的部分特征（例如脸的一部分），序参量就会完成其余的特征，使得整个系统以联想记忆方式起作用（例如在给出脸的一部分时重构出所贮存的脸的原型）。按照哈肯的役使原理，所识别的模式的特征相应于模式生成中

受役使的子系统。

对于意识、自我意识和意向性的涌现,情况又如何呢?在协同学中,我们必须对大脑的外部状态和内部状态进行区分。在感知和识别的外部状态,序参量相应于神经细胞团,代表着外部世界的模式。大脑的内部状态只是自指涉状态,即只是包括精神状态的精神状态,而不包括外部世界的状态。在传统的哲学语言中,我们说人可以反映他们自己(自反映),也能够将外部世界的状况反映到他们自己的内部情感和意向(意向性)的状态之中。在新近的神经生物学研究中,科学家们推测,意识和自我意识作为自反映的神经实现,其形成取决于“元细胞团”产生速率的临界值。“元细胞团”即是代表了细胞团的细胞团,这细胞团又代表着细胞团,如此等等。这种假说(如果是成功的),只能解释诸如意识的涌现特征的结构。当然,细胞团的数学演化方程并不能使我们获得的感受与他人获得的感受不同。在此意义上——这是一条负面的消息——科学是盲目的。但是——这也是一条积极的消息——个人的主体性得到了保留:非线性动力学的计算和计算机辅助的模拟原则上是有局限性的。

无论如何,复杂系统探究方式解决了一个传统的形而上学之谜,莱布尼茨曾经以如下方式描述过这个谜:如果我们把大脑想象为一台如碾磨机那样的大机器,我们可以进入其中的内部机制,我们将发现的只不过是如同嵌齿轮那样的一个个机器元件,而不可能找到什么精神,更没有什么人的灵魂。当然,在微观水平上,我们只可能把神经元的发展描述为大脑中的脑部件。但是,在宏观水平上,复杂神经系统中的非线性相互作用引起了有一定序参量的细胞团的形成,而序参量是不可能用单个脑细胞的状态来验证的。整体并非部分之和。

今天,我们能够区分中枢神经系统(CNS)当中几个不同程度的复杂性。从分子、细胞膜、突触、神经元、细胞核、环路、网络、皮层、导图、感官系统以及整个神经系统的等级体系进行考虑。每一层可以由某些决定其

特定结构的序参量来刻画,而序参量是由该特定等级层次上的子要素之间的复杂相互作用所引起。一个机体的大脑所观察、形成导图和监测的,不仅包括外部世界,而且包括机体的内部状态,特别是其情绪状态。“感觉”是对自身情绪状态的一种觉察。在神经医学中,“心智理论”(Theory of Mind,缩写 ToM)甚至分析社会感觉位于大脑皮层特定区域的神经关联。从神经生理学的角度看,“感受性”(qualia)这个古老的哲学问题也是可以解决的。感受性是一个人自觉体验的属性。我们可以解释主观感觉和主观体验的动力学,不过,实际感觉理所当然是一种个人体验。

显然,复杂系统探究方式对于心身问题提供着解答,它们超越了传统的唯心主义、唯物主义、物理主义、二元论、相互作用论等哲学解答。对于所谓的自然智能和人工智能之间的区分,重要的是要注意,非线性复杂系统的原理并不取决于人脑的生物化学作用。在大脑复杂系统是物理和生物进化产物的意义上,人脑是这些原理的一种“自然的”模型。但是,由人的技术生产出其他的(“人工的”)模型也是可能的,尽管它们的实现会遇到技术上的和伦理上的限制。

第5章,我们讨论“复杂系统与可计算性的进化”。通用图灵机和算法复杂性是可计算性的传统概念。计算系统在信息论里也被描述为信息处理机。在信号理论中,信息熵的复杂程度是通过时间序列的傅里叶分析来进行分类的。频率为 f 的信号的 $1/f$ 谱是一些能够自我组织成为一种临界状态的典型过程,在这个临界状态上,许多小的相互作用能够激发某种非预期的新现象的涌现。地震、大气湍流、股市波动、机体的生理过程都是典型例子。自组织、涌现、混沌、分形、自相似性都是复杂系统的特征,显示着非线性的动力学。 $1/f$ 谱作为随机噪声的量度的事实,再次强调了信息理论与系统理论之间的深层联系:任何复杂系统都可以看作一个信息处理系统。

在复杂系统中,单个要素的行为通常是完全未知的。在这种情况下,

随机过程的复杂程度需要予以区分。随机过程(例如:抛硬币)的结果是以不同概率分布方程所刻画的不同概率分布的。一个著名例子就是正态分布的钟型高斯曲线。然而,这只是概率密度函数的函数空间中一个概率吸引子的例子。这一系列以随机变量的独立有穷方差来满足中心极限定理的概率密度函数,构成了高斯分布的吸引盆。概率吸引子将概率密度函数的函数空间分为具有不同复杂度的区间。带有涨落尾巴的分布曲线是幂律的典型,显示着高度复杂的随机行为。幂律分布被用于描述开放系统。在描述诸如复杂的经济系统和生理系统时它们已变得日益重要。复杂金融市场中的动荡也是由具有激烈涨落尾巴的幂律分布来描述的。

尽管确定系统的可计算性受到算法复杂程度的限定(见第 5.2 节),而且随机系统的可计算性受到概率量度的限制(见第 5.3—5.4 节),动态系统仍能被看作有时无法在合理时间内交出结果的计算系统。莱布尼茨的世界是一台巨型计算机的老观点仍然是正确的。以现代物理学的观点来看,量子系统是大自然的基础动力系统。量子力学为新计算系统——量子计算机——提供了一个框架。量子计算机为信息处理、计算和通信开辟了一条新的大道。量子世界的一个本质特征是量子态的叠加性和纠缠态的概率性。然而,量子计算不仅意味着计算能力的指数增长和计算复杂性的降低。所有事物都存储量子信息。因而,任何基本粒子都是量子信息的处理器。宇宙是一个产生量子信息的处于扩展中的量子计算机。

根据哥德尔不完全性和图灵不可判定性的结果,计算机模拟人类心智和大脑有极限吗?如何把人类大脑理解为既是一台信息处理机又是一种基于知识的系统?约翰·冯·诺伊曼的元胞自动机概念重新界定了自组织元胞系统的观念。斯蒂芬·沃尔弗拉姆最近的计算机实验已经表明,所有各种非线性动力学,从不动点吸引子和振荡行为到混沌,都可以用元胞自动机进行模拟。虽然元胞互动的局域规则也许是非常简单而且

广为人知,甚至随机性也可以用适当的元胞自动机来产生。元胞自动机为连续微分方程决定的复杂动态系统提供数字近似值。

计算动力学开辟了一条通往“复杂系统和人工生命、人工智能的进化”(即第6章)的新大道。生命与智能的自然进化已经成为计算模型的重要范式。它们不再限于符号的知识表征和人工智能。自然生命与自然智能决定性地依赖于机体和大脑的进化。具身的(embodied)生命与心智因此通向了具身机器人的具身人工生命与具身人工智能。人工生命与神经网络源自元胞自动机的通用方法。自组织和自学习是神经网络仿制智能系统的主要特征。在协同计算机中,序参量方程允许一种新的(非赫布)学习方式,它是一种最大限度减少突触数目的策略。与自旋玻璃型的神经计算机(如霍普菲尔德系统)不同,神经元并非阈值元件,而是执行一种简单的代数操作(如乘法和加法)。除了确定论的均匀性霍普菲尔德网络以外,还有所谓的玻耳兹曼机,这是一种非确定论处理元件和分布知识表征的随机网络构造,数学上用能量函数来描述。与霍普菲尔德系统运用赫布学习策略不同,玻耳兹曼机倾向于一种后向传播策略(威德罗-霍夫规则),采用具有隐含神经元的多层网络。

一般说,学习算法的目标在于,通过自组织来减少大脑的内部世界模型与真实环境之间的信息理论测量的差距。人们最近对于神经网络领域兴趣的恢复,主要是受到统计力学和非线性动力学技术的成功运用的鼓舞,这些成功运用的领域包括固体物理学、自旋玻璃物理学、化学并行计算机、光学并行计算机以及——在协同计算机的情形——激光系统。另外的原因是,计算资源和技术水平的最新发展,使得对非线性系统进行计算处理越来越可行。从哲学上讲,传统的认识论课题,如感知、想象和认知,都可以在交叉学科的复杂系统框架中进行讨论。

在电气工程、信息理论以及计算机科学中,细胞神经网络(Cellar Neural Network,缩写 CNN)的概念正在成为复杂性研究的一种重要范

式,已落实在信息与芯片技术当中。^[1.6]模拟元胞计算机是对传感革命的技术响应,模仿着感觉和处理器官的解剖和生理结构。细胞神经网络是一种实时处理信号的非线性模拟电路。其架构源自冯·诺伊曼有关元胞自动机的早期范式。与传统元胞自动机不同的是,细胞神经网络通用机(CNN-UM)以实数作为互动数值在连续时间里接受和产生模拟信号。细胞神经网络通用芯片是对细胞神经网络通用机的一种技术实现,类似于数字计算机的通用图灵机。这是信息技术领域中的一个里程碑,因为它是第一个完全可编程的、工业规模的、仿人脑的、存储程序的动态阵列计算机。而且,适当的细胞神经网络能够模拟所有类型的图形生成和图形识别,这在非线性动力学理论中已经用协同学做出分析了。细胞神经网络的两大优点是严密的数学分析及其技术实现。元胞自动机的动态复杂性及其对应的非线性动力系统可由一个精确的复杂指数来描述。在首块细胞神经网络芯片中,计算速度极大提高,耗电显著减少,自从1988年蔡少棠和杨林提出研究建议后,这已经引起当前关于细胞神经网络的密集研究活动。

复杂系统探究方式的一个重要应用是神经仿生学和医学。人脑不仅是一台作为自然界进化产物的脑计算机,而且也是我们身体的一个中心器官,它需要医学上的治疗、康复和保健。例如,神经外科这个医学分支,就专注于保持人的精神的生物载体的健康。神经仿生学的一个基本目标是关注未来的脑-心体(brain-mind entity)的健康。近年来,器官移植中引入了新的诊断手段和技术设施,它们建立在从复杂动力学系统看待大脑所获得的新见解的基础上。在这方面,临床治疗的变化是不可避免的。精神和心理疾病可解释成高度敏感的非线性系统中的复杂状态。甚至医学治疗也必须考虑到这个复杂器官的高度敏感性。另一种更具思辨性的新技术是赛博空间(cyberspace)。感知、情感、直觉和幻想可以是人工神经网络的产物吗?虚拟实在已经成为现代文化哲学中的一个关

关键词。

在物质、生命、心脑以及人工智能的进化之后，我们要考虑人类社会中经济秩序的涌现。第7章题为“复杂系统与经济演化”。从定性的观点来看，亚当·斯密的自由市场模型已经可以用自组织来解释。斯密强调了，个体的良好的或邪恶的愿望都不是本质性的。与集中化的经济系统相反，供给和需求的平衡，并不受程序控制的中央处理器指挥，而是“看不见的手”（斯密）的结果，即只不过是消费者和生产者的非线性相互作用的结果。必须注意的是，亚当·斯密的自由思想是在牛顿物理学的历史背景下构思出来的。就像许多物理学家一样，经济学家相信他们的（线性）模型具有确切的可计算性，而且他们隐瞒了“蝴蝶效应”的可能性，“蝴蝶效应”可以导致混沌并且排斥长期的经济预测。

然而，为了描述经济动力学，有必要为来自成千个部门和几百万个主体的经济量找一个演化方程。因此，在给全球趋势建模时，随机模型常受青睐。在理解经济上的非线性动力学方面，临界点的相变和分岔是至关重要的概念。全球化的一个挑战是为金融市场变化无常的动力学进行建模。现代数学的金融理论，仍然是基于路易·巴舍利耶采用价格变化和适度随机性的（高斯）正态分布所作的有效市场的假设。然而，复杂的全球市场实际上是像气候那样的动荡湍流，遵循着典型的幂律分布。具有概率吸引子的随机过程（见第5.4节）导致突发的和不连续的事件（“诺亚效应”）或长期趋势（“约瑟效应”）。作为这种随机过程的解释已经提出了分形和多重分形。近来，经济物理学在经济学和金融的社会动力学中已经成为富有成果的研究领域。

在经历了从物质、生命、心脑、人工智能和经济的运动之后，本书的第8章“复杂系统和人类文化与社会的进化”进行了黑格尔式的大综合。在社会科学中，人们通常严格地区分生物进化和人类社会史。原因在于，人们假定民族、市场和文化的发展由人的意向性行为所引导，即人的决策是

以意向、价值等为基础的。从微观的角度看,我们当然可以观察到带有其意向、信仰等的一个个的个体。但是从宏观的角度看,民族、市场和文化的发展就不仅仅是其组成部分的加和。正如我们知道的,政治和历史中的单极因果关系是错误的、危险的线性思维方式。对于处理复杂系统甚至包括人文领域这样的复杂系统,协同学表现为一种成功的策略。为了以交叉学科的方式运用协同学,显然不必将文化史还原成生物进化。与任何还原论的自然主义和物理主义相反,我们承认人类社会的意向性特征。因此,复杂系统探究方式可以是一种沟通自然科学和人文学科、消除斯诺曾在著名的《两种文化》中批评过的其间隔阕的方法。

在复杂系统框架中,人群的行为用(宏观)序参量的演化来解释,(宏观)序参量是由人类或人类的子系统(国家、组织机构等)的非线性(微观)相互作用引起的。社会的或经济的有序用相变的吸引子来解释。艾伦等人分析了城市区域的生长。从微观的观点看,城市区域的生长中,人口演化在数学上是用耦合的微分方程来描述的,微分方程的项和函数涉及每一地区的能力、经济生产等。整个系统的宏观发展用计算机辅助作图示意出来,包括了工业化中心、娱乐中心等的变化,它们是由其中的一个个城市区域的非线性相互作用引起的(例如,交通、通信等的远近不等带来的优势和劣势)。此协同学模型的一个基本结论是,城市的发展不可能以单个人的个人自由意志来解释。尽管当地区域中的人们的行动都有其个体的意向性、计划性等,但是全局的发展趋势却是非线性相互作用的结果。

协同学的另一个交叉学科应用的例子是魏德利希的迁移模型。他区分了社会中微观水平上的个体决策和宏观水平上的动力学集体过程。具有随机涨落的概率性宏观过程用人类社会构型的主方程来描述。一个社会构型中的每一组元都涉及一个具有特征行为矢量的子群体。社会中迁移的宏观发展可以用计算机辅助作图来示意,其中的混合、聚居、漫游和

混沌中心的变化,都是由社会子群体的非线性相互作用引起的。在此模型中,人的复杂系统和非人的复杂系统之间的区别是明显的。在微观水平上,人的迁移是意向性的(即受到收益考虑的引导)和非线性的(即依赖于个体和集体的相互作用)。协同学的一个主要的结果又是,国家的和国际的迁移效应不可能用单个人的自由意志来解释。我认为,迁移是当代的一个非常重要的课题,揭示了线性的、单极因果性的思维方式是多么的危险。只有良好的愿望而不考虑到个别决策的非线性效应是不够的。线性的思维和行动能激发起全局性的混沌,尽管我们局部的行动带着最美好的愿望。

在戏剧性的一步,复杂系统方法已经从神经网络拓展到包括像万维网那样的全球技术信息网络。通过带有源地址和目的地址的数据包,信息流动得以完成。互联网本质上是对元胞自动机和细胞神经网络的模拟。计算和通信网络已经成为技术上的超级机体,正在以某种准进化的进程中演化。在多少有些混沌的互联网上的信息洪流是智能信息检索的挑战。我们可以模拟活大脑的自组织和学习特征来为管理互联网上的信息洪流寻找启发性的设备。沿着这个思路,我们需要能自动适应用户电子身份的个性化信息系统。在实际应用的所有领域中都存在着挑战。甚至可以根据用户的学习情况由个性化信息系统来打包在线学习所需的订制知识。

然而,全球网络的复杂性并不限于互联网。在个人计算机的复杂性之下,在我们日常世界的整个智能环境中,还遍布着便宜的低能耗的智能芯片设备。采用无线媒体接入、宽带技术、基于标准网络的实时多媒体性能以及数据包的路由选择等手段构建起来的全球网络化,是泛在计算面临的一个挑战。不仅有数百万计的个人电脑还有数十亿智能设备,在这个互联网之上相互作用着。席卷而来的数据与信息流迫使我们在混沌边缘进行运作。

一般而言,经济信息处理是非常复杂的问题,需要非线性耗散模型。从经济循环到金融混沌的种种不同的吸引子,只能解释为消费者与生产者、财政政策、股票市场、失业等因素非线性作用的协同效应。为了在管理和生产的所有层次上用非线性合作来支持创意与创新,甚至管理领域也在讨论可能的复杂模型。但经验表明,人类决策的理性是有限制的。人类认知能力严重受制于他们需要管理的非线性系统的复杂性与随机性。司马贺*首次提出的有限合理性概念是对人类知识、信息和时间等局限的反应。

人们显然已经获得了一些成功地处理非线性复杂系统的策略。我们将讨论一些应用的例子,包括来自量子物理学、流体动力学、化学和生物学,以及经济学、社会学、神经病学和人工智能中的例子。这些自然科学和人类社会中的成功应用背后,原因是什么?复杂系统探究方式并不归结为某个特定的物理学自然规律,尽管首先从物理学中发现了其数学原理并有了成功的应用(例如激光)。它是一种交叉学科的方法论,可以解释复杂系统中通过微观元素的非线性相互作用造成的某些宏观现象。宏观现象的形式多种多样,可以是光波、流体、云彩、化学波、生物分子、植物、动物、群体、市场、脑细胞团,它们都是用序参量来标志的(表 1.1)。从哲学角度看,重要的是要弄明白,序参量不能归结为复杂系统的微观水平的原子、分子、细胞、有机体等。在某些情形,它们是可测量的量(例如激光的场势)。在另一些情形,它们是定性的性质(例如模式的几何形式)。然而,序参量并不只是一个理论性的、没有任何现实性的数学概念。实际上,它们代表着真实的宏观现象的性质,诸如场势、社会或经济的力量、情感甚或思想。有谁会否认情感和思想可以改变世界呢?如果我们能够理解它们的非线性动力学,甚至有可能在细胞神经网络之类的芯片中对其进行运作。

* 即赫伯特·西蒙(Herbert Simon),司马贺是其自取的中文名。——编者

所以,复杂系统探究方式不是一种形而上学的过程本体论。协同学原理(以及其他原理),对于构造自然科学和人文学科中的非线性复杂系统的模型,提供了一种启发性框架。如果这些模型可以数学化,它们的性质可以量化,那么我们就获得了一种经验性模型,它们可能与数据吻合,也可能不吻合。役使原理表现了另一种优点。由于它减少了复杂系统中的大量的自由度,协同学就不仅仅是启发性的、数学化的、经验的和可检验的,而且也是经济的。这也就是说,它满足了著名的奥卡姆剃刀原理,这一原理告诉我们除掉多余的实体。更进一步,非线性模型也许能够在高速而微型化的非线性计算机芯片中执行。我们也能够证明计算动力学的基本原则。但是,由于混沌和随机性的存在,理解计算动力学并不意味着能够预测和确定未来的所有细节。对计算系统的分析使我们能够从非线性动力学获得经验,也能够洞见和感受现实世界中的未来趋势。然而,生活复杂而随机,我们不得不好好生活以体验生活。

在这层意义上,我们的探索方式认为,物理的、社会的、精神的现实都是非线性的、复杂的、计算的。新认识论的本质结果对我们的行为具有深刻的影响。正如我们所强调的,线性思维在非线性的复杂现实中是危险的。作为一个例子,我们必须记住,我们需要的是一个生态学和经济学之间有良好的复杂系统。我们的医生和心理学家,必须学会把人看做复杂的非线性的身心存在。线性思维可能无法做出成功的诊断。局部的、孤立的、“线性的”医学治疗方法,可能引发负面的协同效应。在政治和历史中,我们必须牢记,单极因果性可能导致教条主义、不宽容以及盲从。由于人类的生态、经济和政治问题已经成为全球的、复杂的、非线性的、随机的问题,传统的个体责任概念就是可疑的。我们需要新的集体行为模式,这种集体行为建立在不同程度的个体机能和见识基础上。简言之:复杂系统探究方式需要认识论和伦理学的新结果。最终,它提供了一个机会来驾驭非线性复杂世界中的混沌和随机性,并利用协同效应带来的创造性潜能。

表 1.1 非线性复杂系统的交叉学科应用

学科	系统	要素	动力学	序参量
宇宙学	宇宙	物质	宇宙动力学	宇宙模式形成 (例如,星系结构)
量子物理学	量子系统 (例如,激光)	原子,光子	量子动力学	量子模式形成 (例如,光波)
流体力学	流体	分子	流体动力学	流的形式
气象学	天气 气候	分子	气象动力学	模式形成 (例如,云彩,飓风)
地质学	熔岩	分子	地质动力学	模式形成 (例如,板块)
化学	分子系统	分子	化学反应 化学动力学	化学模式形成 (例如,耗散结构)
材料科学	智能材料 纳米系统	高分子	高分子动力学	高分子模式形成 (例如,纳米形式)
生物学	基因系统	生物分子	基因反应	基因模式形成
	生物体	细胞	生物体生长	生物体模式形成
	种群	生物体	进化动力学	物种模式形成
经济学	经济系统	经济主体 (例如,生产者, 消费者)	经济互动 (例如,市场机制)	经济模式形成 (例如,供给与需求)
社会学	社群	个体、机构等	社会互动 历史动力学	社会模式形成
神经心理学	大脑	神经元	神经规则 学习算法 信息动力学	神经模式形成 模式识别
计算机科学	元胞自动机 神经网络 全球网络 (例如,互联网, 泛在计算)	细胞处理器	计算规则 进化算法 学习算法 信息动力学	计算网络的 模式生成

复杂系统和 物质进化

有序何以能够从复杂的、无规的和混沌的物质状态中出现呢？古代的典籍中，哲学家试图将自然现象的复杂性追溯到第一原理。天文学家提出数学模型，将无规的、复杂的行星轨道归结为它们经历着规则的、简单的球体运动。简单性被理解为真理的特征，直至哥白尼也是如此（第 2.1 节）。牛顿和莱布尼茨把某些新东西加进了运动学模型的理论中。微积分使得科学家可以计算一个物体的瞬时速度，并将其形象地表示为该物体轨迹的切向量。速度向量场成为了动力系统理论中的一个基本概念。牛顿和爱因斯坦的宇宙理论，使用的是完全确定论的动力模型（第 2.2 节）。

但是，庞加莱发现了，对于较长时期，这些模型可能都是不可计算的（多体问题）。甚至对于一个完全的确定论世界，拉普拉斯妖——它可以长期地对宇宙进行计算——的假设也暴露出只不过是一种幻想的虚构。混沌不仅仅出现在天上，也出现在量子世界中（量子混沌）（第 2.3 节）。

从方法论的观点看,非线性是混沌的必要条件而不是充分条件。它也使有序的出现成为可能。在现代物理学框架中,宇宙中多种多样结构的出现,包括从基本粒子到恒星和活的有机体,都是用平衡态的相变和对称破缺来建模的(第 2.4 节)。在目前的超弦理论和 M 理论中,我们也没有获得一个完整的理论去解释其复杂性不断增长的物质进化。前苏格拉底的惊赞——“存在着某种东西而非一无所有”——仍然没有得到解决。然而,复杂系统理论以材料科学中自建构材料的应用打开了纳米世界中模式生成的新大道(第 2.5 节)。从方法论的角度看,问题出现了,我们如何能够从极其多样的测量数据中检测模式信息吸引子? 时间序列分析、分形、多重分形是当前复杂系统理论中的挑战。本章以关于非线性动力学中不同吸引子复杂度的调查作为结尾(第 2.6 节)。

2.1 亚里士多德的宇宙和 赫拉克利特的逻各斯

前苏格拉底以来,自然哲学的一个基本问题是,发现有序是如何从复杂的、无规的和混沌的物质状态中出现的。^[2.1]前苏格拉底哲学家对待自然现象的复杂性,是将其追溯到“原初”,即“原素”或某种秩序。我们来看一些例子。米利都的泰勒斯(约前 624—约前 547)是第一个自然哲学家,据说他证明了第一条几何公理,他认为只有物质性的基本因才可能是万物的原初因。泰勒斯主张,水或湿是第一因。他的证据来自观察:万物的繁茂和种子都与湿有关,而湿物的自然基质就是水。

阿那克西曼德(约前 610—前 546)被认为是泰勒斯的学生和同事,他扩展了泰勒斯的自然哲学。为何水是万物的第一因? 它只是存在于连续的紧张和对立之中的物质的多种形式之一:热对冷、湿对干……阿那克

西曼德因此主张，“存在物的起源和第一因”是“无限的不定性”的原初物质，相反形式的物质从中产生出来。相应地，我们必须把“无限的不定性”想象为原始状态，此时物质不受限制，也没有对立，因而在任何地方都有相同的特征。因此，这是一种完全均匀的、对称的初始态。对称性后来发生了对称破缺，于是世界及其所有可观测的对立和紧张就产生出来：

不断发生着的物质分裂创造了这个世界，火球从中产生出来，它包围着气，气又包围着土，如同树皮围绕树干；当它进而分裂开来，就形成了一串圆圈，太阳、月亮和星星都各处其所。^[2.2]

阿那克西曼德在其宇宙起源论中所描述的随后的物质状态因此就决非是混沌的；相反它们是由新的部分有序所决定的。阿那克西曼德早期的生物进化思想更有吸引力。他主张，最初的人为海中动物所生，出生后他们很快就能独立谋生，正如他观察到有几种鲨鱼的情形就是如此。一个世纪以后，人们开始寻找海中动物的化石证据，来证明人是从海中诞生的。第三位著名的米利都自然哲学家是阿那克西米尼（约前 588—约前 525），他被认为是阿那克西曼德的同事。他把变化看作是凝聚和稀散的外部力的结果。在他看来，各种形式的物质形式都可以作为基本物质。他选择了气：

稀散，使之成火；凝聚，成风；然后，成云；进一步，更强的凝聚，就成水；再后，成土；最后，成石头；万物都是由这些东西产生出来的。他还主张，永恒的运动是转化的缘由。——他说，冷使物质收缩和凝聚，相反，热却使之稀薄和散开。^[2.3]

因此,阿那克西米尼主张,外部的力量使得多种多样的物质状态从共同的原初物质产生出来,并相互转化。

爱非斯的赫拉克利特(约前 540—约前 480 与 470 之间)常常被称作“晦涩哲人”,他对我们的主题具有特别显著的意义。他的语言的确深奥难懂,多为预言式语言而不是严肃的科学语言,充满着深层隐喻。他采取了阿那克西曼德关于自然界充满斗争和对立面紧张的学说。原初物质——万物之原,自身处于变化中,因而也就是火:

闪电(即火)指引着一切。——这个世界的秩序也是如此,一切都不是任何上帝创造的,也不是任何人所创造的,但它过去、现在都是永恒的活火,按照一定的尺度燃烧和熄灭。^[2.4]

赫拉克利特进一步阐述了所有的物质状态如何能够被理解为原初物质——火——的可熄灭形式。在我们的时代,物理学家维尔纳·海森伯声称:

在这一点上,我们能够以某种方式说,现代物理学十分接近于赫拉克利特的教导。如果我们替换一下“火”这个词,就几乎一字一句地重复赫拉克利特的说法来作为我们现代概念的表达。能量的确是质料,所有的基本粒子、所有的原子、因而万物总的说来都是由它构成,而且同时能量也是那运动着的东西……能量可以转化成运动、热、光和张力。能量可以被看作是世界上的一切变化的原因。^[2.5]

的确,这个质料世界由对立条件和倾向构成,然而它们却借存在于隐藏着和谐而保持着统一性:“对立事物的斗争走向联合,从多样性中产生出最美的和谐,斗争造成万物以这种方式产生出来。”^[2.6]隐藏着对

立面的和谐因而就是赫拉克利特的宇宙规律,他称之为“逻各斯”。

当对立面的斗争结束时情况如何呢?按照赫拉克利特的看法,这个世界就进入到一个绝对的平衡终态。埃利亚的巴门尼德(约前 515—约前 445)描述了这种物质状态,在此不再有(虚空)空间的变化和运动。物质在任何地方都是平均(均匀)分布,没有任何一个方向对于可能运动是优先的(各向同性)。值得注意的是,无限被看成是不完美的,因而假定有限的物质分布。以这种方式,巴门尼德提供了一种世界图像,它是坚固的、有限的、均一的质料球体,没有时间、运动或变化。这种无变化存是的埃利亚哲学,的确是要批判赫拉克利特的永恒变化哲学,将其看作仅仅是一种感官的幻觉。这种埃利亚哲学,在历史上对后来的柏拉图的影响,体现在他对虚假变化的批判中:虚假变化是感官的感知中产生的,而真实的世界是不可改变的理念存是(being of the ideas)。但是从自然哲学的观点来看,巴门尼德描述的世界并不必然与赫拉克利特的教导相对立;在他的宇宙发生论中,它完全可以被理解为最高对称性的奇点终态。

在把水、气和火当作原初元素之后,就容易将它们设想为世界的原材料。恩培多克勒(前 495—约前 435)迈出了这一步,并把土作为第 4 种元素加入到火、水 and 气之列。这些元素可以自由地以各种比例混合和结合,也可以分解和分开。那么恩培多克勒把什么作为自然界的不断变化和运动背后的永久原素呢?首先是存在着 4 种元素,他认为它们来自自然和机遇,而不是来自任何意识意向。变化是这些元素之间的反复作用即混合和分离引起的:“我要告诉你们另一件事:任何质料事物都既不会诞生出来,也不会走向毁灭结局。有的只是:混合和混合物的交换。”^[2.7]元素之间的这些反复的作用,是两种基本的力量引起的;他将吸引称之为“爱”,排斥称之为“恨”。这类似于中国哲学中的阴阳二元论。恩培多克勒教导了一种不断的转化过程,即元素的结合和分离,在此过程中元素则

保持下来。他并没有把这些转化过程设想为完全机械性的(后来的原子论者则这样设想),而是设想为生理性的,特别是他把有机体的代谢过程看得高于无生命的自然界。

在他的医学理论中,平衡被理解为真正的比例关系。因此,健康就意味着相反组分的某种特殊的均衡,只要其中一方占了上风就会引起疾病。如果我们考虑现代细菌学及其对于人体中抗体的理解,那么恩培多克勒的这种观点是多么的贴切。

阿那克萨哥拉(约前 500—约前 428)被认为在许多方面都精炼了前人的教导。他像恩培多克勒一样,发展了一种物质混合理论。但是他将恩培多克勒的 4 种元素代之以数目无限的实体,构成这种实体的是种子微粒或同样大小的微粒。它们数目无限,也无限地小,即假定物质是无限可分的。颗粒连续统的思想就不可避免要产生出来。阿那克萨哥拉也试图以这种方式来解释颜色的混合,他说过雪在一定程度上也是黑色的,不过白色在此处于支配地位。所有的事物都包含在每一事物之中,但是其中一些在混合关系中处于支配地位。

比起他的一些前人,阿那克萨哥拉显然试图在自然哲学中给天体现象和运动以物理解释,在古希腊的数学天文学中它们仅仅是从运动学角度进行描述的。于是在他的宇宙学中,他已不停留在单一的起始态:均匀的物质混合。阿那克萨哥拉把一种非质料的原初力量称作“精灵”,它使得混合物进入旋涡运动之中,并根据它们各自的速度把种种事物分离开来。土聚集在旋涡的中间,而更重的石块则向外猛冲而去,形成了恒星。它们的发光被解释成其群体的发热,并被归结为它们的飞快的速度。阿那克萨哥拉的旋涡理论,近代在笛卡儿那里再现出来,后来又以更精致的形式再现在康德-拉普拉斯行星系统的机械起源理论中。

近代自然科学中,原子论已被证明是一个极为成功的研究纲领。哲学史上,德谟克里特的原子理论常常被看作赫拉克利特的变化哲学和巴

门尼德的不变存是原理的结果。德谟克里特区分了“充满”和“虚空”，最小的不可毁灭的原子和虚空空间相应于巴门尼德的“存是”和“非存是”。赫拉克利特的复杂性和变化性，从原子的不可区分的构型中衍生出来。虚空空间被假设为均匀的和各向同性的。

在质料组合中，原子的不同在于其形式、位置以及种种构型。为了表示出原子的构型，将其比作语词中的字母序列，这导致了这样的假设，即原子思想只有在使用拼音文字的文化中得到发展。事实上，在中国，传统上使用的不是拼音文字而是象形文字，人们不知道粒子的思想，流行的是自然过程的场和波的概念。德谟克里特的原子按照必然性以不断旋转的方式进行运动。在此，与后来的亚里士多德的概念不同，运动仅仅是指虚空中的位置变化。所有的现象，所有的生成和腐朽，都是组合和分离的结果。物质的聚集态如气体、液体或固体，都用原子的不同密度和运动潜力来解释。用今天的结晶学的观点看，德谟克里特的思想——甚至固体中原子在其位置上也发生着振动——是值得注意的。

柏拉图在他的对话《蒂迈欧篇》中，引入了原子论的第一个数学模型。变化、混合和分离，都要追溯到不可改变的数学规则性，说到底前苏格拉底时期已经说过的。在恩培多克勒的四元素即火、气、水和土中，已经有了一种分类，立即就可以借用。泰阿泰德全部采取了完全确定性的规则物体，它们在3维(欧几里得)空间都是可能的：四面体、八面体、二十面体、立方体和十二面体。因此，柏拉图所主张的，也就是要以这些几何构件来解释恩培多克勒的四元素。

柏拉图对其元素有意要避开德谟克里特的“原子”表示法，因为它们可以分解成独立的平面图形。于是，四面体和二十面体具有等边三角形的面，它们分成两半时得到直角三角形，其边长分别是 1 、 $\sqrt{3}$ 和 2 ，而立方体的面分成两半时得到直角三角形，其边长为 1 、 1 和 $\sqrt{2}$ 。结果是，像水、

气和火那样的“流体”是可以相互结合的,而以土作为构件所构成的固体,因其不同的三角形,只可能转变成其他的固体。

于是柏拉图就发展起一种基本粒子的物理学,其中特定的元素是可以相互转变的,“基本粒子”(即相应的组元三角形)可以按照几何定律发生着“反复的作用”。例如,元素的转变是沿其边切开造成的。柏拉图之所以使其成为可能,这有赖于固体角度的锋锐。较为锋锐的平面角可以劈开具有规则角度的多面体。于是,所有的四面体、立方体、八面体、二十面体,排在前面的都可以劈开排在后面的多面体,但不能劈开排在前面的多面体或同样的多面体。这种自然哲学的结论中,火可以分离或分裂所有其他元素,土只可以分离或分裂气和水,气则仅仅可以分离或分裂水。

柏拉图明白地说,元素的大小是不一样的。例如,为了解释火能够引起固态形式的水转变成液态形式的水,他认为,元素在液态时尺寸要小一些,更为活动,而在固态时其尺寸就要大一些。

离开火被称作冷却,在离开火以后,状态固化。火和气可以通过土构件(立方体)中间的间隙而不受阻碍,也不会分裂土元素。气凝聚起来后不可能被分解,也不毁灭此元素。气的凝聚意味着八面体以最佳表面构型积累起来。即使是火也难以穿透进其中必然会留下的间隙,因其体面角度比所有元素的都要小,不会破坏八面体。对于水,只有火才可能破坏最强的凝聚。相邻二十面体的体面角度之间的间隙既不允许土穿透也不允许气穿透。只有火(四面体)可以穿透和分解此种结合。

的确,柏拉图发展了一种内部自洽的数学模型,由此实体的各种聚集态和反复作用都可以得到解释,如果人们接受他的学说——尽管它多少是有些独断的——作为对元素进行解释的起点。这种自然哲学自然会引出一些奇怪的荒谬结论。不过,我们在此遇上了科学史上首次试图以简单的几何定律来对物质及其状态进行解释。这在现代基本粒子物理学中得到了高度发展。海森伯注意到了这一点,“基本粒子具有柏拉图描述的

形式,因为这是数学上最美、最简洁的形式。因此,现象的终极根源不是物质,而是数学规律、对称性、数学形式”。^[2.8]在古代和中世纪,柏拉图的数学原子论没有得到多少支持。对于他的后继者来说,他的几何学物质理论的基本问题在《蒂迈欧篇》中已经是明明白白的了。如何来解释活的有机体的功能呢?一定的肉体形式是为了满足一定的生理目的(例如,食管形状是为了同化食物)这种主张,在任何情形都难以从规则固体的理论中推演出来。此外,以几何图形的“活跃”和“僵死”为基础来解释生命的变化搏动过程,在那时代的人们看来也必定是完全不自然的、推测性的和冷僻遥远的。在我们的时代,人们仍然难以理解这种迂回:今天的科学解释中采取的是复杂的抽象数学理论。亚里士多德的自然哲学就从这里开始了。

亚里士多德主要以活的有机体(如植物和动物)的功能为基础,来阐述他关于自然的均衡或“平衡”的概念。生命的过程和期间是我们从日常经验中所熟知的。用我们熟知的东西来解释这个世界,比起用那些我们不熟悉的陌生的东西来进行解释,不是更清楚一些吗?按照亚里士多德的看法,科学的任务就是对自然的复杂性和变化的原素和功能作出解释。这是对那些自然哲学家的一种批评,他们用个别的实体来作为原素的证明。一个个的植物或一个个的动物,都不仅仅是其质料构件的相加之和。亚里士多德把构成个体存在的东西称作一般形式。由形式塑造的东西称作物质。形式和物质都不是自己能单独存在的,相反它们是通过抽象提取出来的自然的原素。因此,物质也是以使之形成的潜能为标志的。在物质形成之前就已存在着实在。

我们所观察到的真正的活的生物体都处在不断的变化之中。赫拉克利特在此是正确的,而巴门尼德把变化看作幻觉则是错误的。变化是真实的。然而,按照亚里士多德的看法,赫拉克利特用特定实体(火)来证明变化也是不对的。亚里士多德是用第三种原素来解释那些变化,这第三

种原素与物质和形式并列,没有形式就没有适当的变化。幼苗和孩子是弱小的、不成熟的。它们得以生长是因为它们与其自然趋势(形式)相一致,这意味着长大变强和成熟起来。因此,一般地,变化决定着运动,使之从可能变成现实,即“潜能实现”(中世纪人们的说法)。物理学的任务,就是研究自然界中在此综合性意义上的运动。自然——与人所制作的艺术品或技术工具相反——被理解为所有事物,它自己带着运动的原素。如果我们按照亚里士多德的指示来进行思考,则正如日常经验告诉我们的,首先是对于植物、动物和人们的生命过程,他的说法完全是合理的、适当的。自然并非一块巨石,可以任凭人们将其破裂成一块块石头。自然自身被设想为一个理性的有机体,其运动是必然的、合目的的。亚里士多德区别了两类运动,即由大小的增加或减少引起的量变、由特征转变引起的质变,以及由位置改变引起的空间变化。亚里士多德规定了因果性的4个方面作为变化的原因。为何植物会生长?这是因为:①其质料组分使得生长成为可能(质料因);②生理功能决定了其生长(形式因);③外部环境(土、水和阳光等营养物)推动着生长(动力因);④与其终极目的相一致,即奔向其最完美的形式(目的因)。

亚里士多德然后就运用这些同样的原理——它们显然是从植物、动物和人的生命循环中推演出来的,去解释狭义上的物质,即后来被称作无机部分的自然。亚里士多德在此又从直接的经验推进了。我们在此遇到的,不再是作为自然界独立构件的众多元素;而是我们所经验的特性,如温暖和寒冷、湿润和干燥。这些特性的结合,产生出来决定了元素的以下特性对:热—干(火)、热—湿(气)、冷—湿(水)、冷—干(土)。这里排除了作为并列条件的热—冷和湿—干。因此,只有4种元素。这种推演后来受到了批评,说它是主观任意的,但是它表明了亚里士多德的方法,即不是从抽象的数学模型进行推导,而是直接从经验出发进行推导。在真实的物体中,都或多或少、或强或弱地含有火、气、水和土,它们都处在不断的转

化之中。按照亚里士多德的理论,用热的手段来驱除水中的冷就形成了气,而排除气中的湿就形成了火。自然的变化就被解释为成熟和转化过程。

这种处于支配地位的有机自然哲学,在那时已有的程度上,如何能为数学化的自然科学提供物理解释呢?基本的空间运动只有两种,即沿直线的运动和沿圆圈的运动。因此必定有某些元素,使得这些基本运动自然地出现。其他物体的运动是由这些元素及其自然的运动来决定的,每一种运动都受此运动的支配。最完美的运动是圆周运动。它是可以一直运动下去的,这就是为什么要规定一种不朽的元素。这就是第5种元素(精英),它构成了不变的天球和恒星。尘世(月下)世界中的不断变化性,与天上(月上)世界的不变规则性区分开来。这些转变过程中伴随着那4种元素,它们具有独特的直线运动,特别是具有指向世界中心的运动,其中重元素土和水竞相奔向其自然的中心,而指向月球圆周的直线运动中,轻元素竞相向上奔向其自然的归宿。

在这些自然的运动中,还有自由落体运动。但是,亚里士多德并没有像伽利略那样,以理想实验形式从独立的运动出发来进行探讨。在复杂环境中观察到的落体,没有从其摩擦(“耗散”)力中抽象出来。在其自由降落过程中,落体在空气介质中下落如同石头在水中下沉。因此,亚里士多德把自由降落想象为一种流体动力学过程,而不是作为一种真空中的加速过程。他假定了一种恒定的降落速度 v ,它正比于物体的重量 p ,反比于介质(例如空气)的密度 d ,用现代表示法就是 $v \sim p/d$ 。这个比例方程同时也为亚里士多德反对原子论者的虚空提供了一种证据。在真空中,密度 $d=0$,所有的物体都将无限快地降落,而这显然是不会发生的。

(人为)推动的运动的一个典型的例子是投掷,它也是在其复杂的“耗散”力的环境中来考察的。按照亚里士多德,非生命物体的运动只是不断的外部运动因的结果。想象一下,古希腊的颠簸的道路上的两轮车,当驴子(或奴隶)停止推或拉车时它就会停下来。但是为何当一块石头从手中

投掷出去后它还继续运动呢？按照亚里士多德的理论，在虚空中是不可能超距作用的。因此，亚里士多德说，投掷者把运动传递给了石头周围的连续介质，这将石头推到远处。对于推动或拉动的速度 v ，亚里士多德断言，这里有比例关系 $v \sim K/p$ ， K 是所施加的力。当然，这些并非是与测量的量相联系的数学方程，而是定性的决定性因素的比例，在中世纪的亚里士多德派的物理学中它首次被表述成了这种形式。于是，与伽利略-牛顿的动力学相反，在亚里士多德的动力学中，所有的位置（直线）变化都需要有某种运动因（力）。中世纪的冲力论改变了亚里士多德的动力学，把运动因归结到投掷出去的物体中的“冲力”，而不是由外部媒介进行的传递。

亚里士多德派的动力学是如何解释天上的宇宙规律的呢？宇宙模型的中心对称性以（未受力的）球体的圆圈运动——这被认为对于“天上”元素是自然的——为基础，以及以宇宙中心的自然中心理论为基础。托勒玫进一步以这个各向同性模型为基础，用一种三段论的充足理由律来解释地球的位置。假定所有方向都是完全等价的，地球为何要这一方向或那一方向运动就是没有理由的。

地球处于中心的中心对称模型是亚里士多德的老师柏拉图提出来的；在地球周围的整个天空，都围绕着一穿过地球的天轴向右旋转。太阳、月亮和行星都在球面向左旋转，它们与地球的距离依次是：月亮、水星、金星、太阳、火星、木星和土星。最外层是带着恒星的球面。按照柏拉图-毕达哥拉斯概念，自转周期相互之间具有整数关系。所有的自转时间有公倍数，在其结束处所有的行星正好又处在相同位置。它们的运动都会各自产生出一种声音，因此球体运动的音调合在一起就形成了天球的和谐，与校好的音阶一致。宇宙的几何的、算术的和美学的对称性，以一种天球的和谐音乐在环宇中运行。随后，精确的观察使得对这种强调宇宙对称性的模型发生了疑问。一个困难的问题来自不规则的行星轨道，特别是它们的逆行。天空中的不规则性引起了人们的不安，特别对于毕

达哥拉斯传统的哲学家更是如此,他们已经习惯于把天上理解为——与地球相反——永恒对称的、和谐的领域。

柏拉图提出了一个著名的问题,以减少天上运动的复杂性:使用规则的、有序的圆圈运动就能够“拯救”行星现象,即一种运动学的解释?当佩尔加的阿波罗尼奥斯(约前 262—约前 190)建议放弃天球的共同中心时,已经提出来一个观察曲线的精确模型。但是,球体形式的行星运动和等速球体仍然保持着。按照这种主张,行星在球面上作匀速转动(本轮),它们的中心被设想成沿中心点(地球)的一个大圆圈(均轮)上作匀速运动。通过适当地调节速度和两个圆圈运动的直径并变动其运动方向,就有可能作出某种未预料的曲线,而这些在从开普勒到托勒玫的天文学中都找到了部分应用。一个个模型的球体对称性因而得到了保留,甚至它们不再有共同的中心而是种种不同的中心时也如此。

下面的本轮-均轮技巧显示出,通过适当地把匀速的圆周运动结合起来,可以得到多种表观的运动形式。^[2.9]这使得柏拉图派的哲学家的观点更容易理解:在现象的变化背后是永恒的不变的形式。在图 2.1 中,一个椭圆的轨道是由均轮的运动与本轮的运动结合而成的。图 2.2 显示了一种封闭的旋轮线。以这种方式,行星与地球之间的距离的变化也就

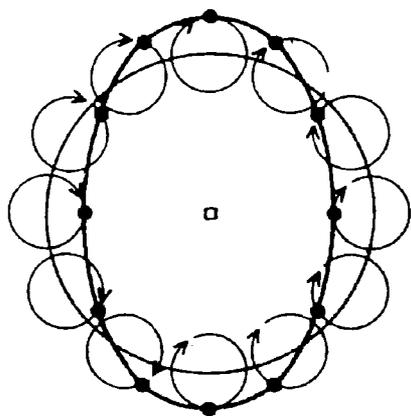


图 2.1 椭圆的均轮-本轮模型

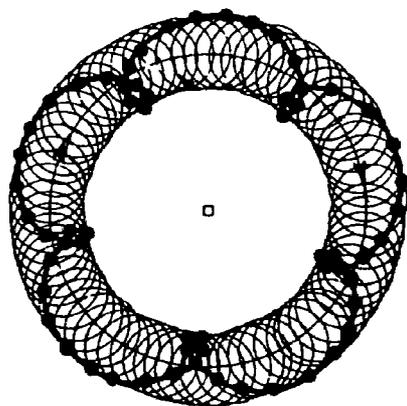


图 2.2 旋轮线的均轮-本轮模型

被表示出来。原则上,甚至角度的形象也可以产生出来。当本轮的直径接近于均轮的直径时,就完全是一条直线了。如果人们改变一个行星的从东到西运动的速度,使之沿一个本轮从西到东运动,那么通过适当地组合一个本轮运动和一个均轮运动,还可以产生出三角形和长方形。

如果人们使天体沿第二个本轮作圆周运动,这第二个本轮的中点是沿第一个本轮运动的,那么就可以产生出多种椭圆轨道、反射对称曲线、周期曲线以及非周期轨道和反对称曲线。从纯粹的数学和运动学的观点看,柏拉图的“拯救现象”问题是完全解决了。因此,柏拉图的在匀速圆周运动(被阿波罗尼奥斯和托勒玫进行了修订)意义上的将复杂性的还原,原则上也许会一直影响科学直至今日。无论如何,它是不可能由曲线途径的现象学描述来否证的。特别是,从这种观点来看,无论是在所谓的哥白尼革命中将地球和太阳的位置对换,还是把圆周轨道改变成椭圆轨道的开普勒变化,都显得是次要的,因为他们的起始动力都可以追溯到与本轮-均轮技巧符合的对圆周运动的组合。这就带来了两个问题:①这种断言是如何在数学上得到支持的?②如果它得到了这种支持,那么它为何在现代科学的曲线理论的应用中却没有起作用呢?为了精确地对第一个问题作出一般性的回答,有必要返回到分析几何的现代结构。但是在历史上,哥白尼和开普勒也知道,他们所用的曲线(例如椭圆)也是可以通过本轮-均轮技巧来重构的。

首先,我们必须记住,平面上的点可以用复数 $z = x + iy = re^{i\theta}$ 来代表,相应的笛卡儿坐标是 (x, y) 或极坐标是 (r, θ) 。复数的加法相当于向量的加法。^[2.10] 一个具有中心 c 、半径 R 和周期 T 的匀速圆周运动可以表示为

$$z = c + Re^{i[(2\pi t/T) + \alpha]} = c + Re^{(2\pi it/T) + i\alpha} \quad (2.1)$$

式中该点的时刻是 t , 初相是 α 。现在假定点 A 按照方程 $z = f(t)$ 运动。让点 B 相对于点 A 作圆周运动, 它有半径 R , 周期 T , 初相 α 。点 B 的运动就由如下方程描述

$$z = f(t) + Re^{(2\pi it/T) + i\alpha} \quad (2.2)$$

于是它就可能描述点 B 沿某个本轮的运动, 其本轮中心绕点 A 运动。新的本轮的加法在数学上是把一个新项 $Re^{(2\pi it/T) + i\alpha}$ 加到 z 的表达式中。显然, $Re^{(2\pi it/T) + i\alpha} = Re^{i\alpha e(2\pi it/T)} = ae^{ikt}$, 其中复数 $a \neq 0$, k 是实数。在逆行情形下, T 或 k 分别为负。 n 个本轮叠加成的运动于是表示为方程

$$z = a_1 e^{ik_1 t} + a_2 e^{ik_2 t} + \dots + a_n e^{ik_n t} \quad (2.3)$$

我们首先考虑平面 $z = f(t)$ 上的周期运动 (例如其周期为 2π)。数学上, 我们假定 f 在有限变化中是连续的。那么对于 f 可以表示为一个均匀收敛级数

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{int} \quad (2.4)$$

因此, 容易从数学上证明 $f(t)$ 可以通过求和获得近似

$$S_N(t) = \sum_{n=-N}^N C_n e^{int} \quad (2.5)$$

其精确度随着 N 的增加而增加。

函数 f 的确是均匀收敛的。因此对于任意小的 $\varepsilon > 0$, 可选择 N_0 使得对于所有的 $N \geq N_0$ 和所有的 t , 都有

$$|f(t) - S_N(t)| < \varepsilon \quad (2.6)$$

在天文学上, 这种结果意味着, 一条 (有限变化的) 恒定运动轨道, 可以用有限的本轮运动的叠加, 获得任意精确的近似。

显然,我们迄今所用的不过是本轮周期的叠加,本轮周期如 $\pm 2\pi$ 、 $\pm \pi$ 、 $\pm (2/3)\pi$ 、 $\pm (1/2)\pi$ 、 $\pm (2/5)\pi$ 、 \dots 。特别是,只有可公度的叠加才是允许的,这可以用整数的比来表达,从而符合毕达哥拉斯传统。但是,如果我们允许不可公度周期,那么事实上非周期曲线也是可用本轮叠加来近似。这种结果在数学上为哈拉尔·玻尔关于近周期函数的命题所支持(1932)。^[2.11]第二个问题是,为何解释运动轨道的本轮-均轮技巧被抛弃了,指出观察中遗漏了曲线是无法作出回答的。数学上,观察曲线——无论它是多么的稀奇,只要用柏拉图-阿波罗尼奥斯的古代的降低复杂性的策略,原则上就是可以解释的(前述是非常宽的数学条件)。

不过,在此决定性的问题是,行星的“真正”运动是什么,它们事实上是不是组合的、匀速的和未受外力的圆周运动,是我们在地球上看起来显示为椭圆轨道,还是受外力被迫循着椭圆轨道运动。这是很难从几何学和运动学上来确定的,而只能从动力学上来确定,即要用相应的受力理论来确定,因而也就是要从物理学上才能确定。

除了本轮-均轮技巧以外,托勒玫还使用了假想的均衡点,相对于它,采取了匀速的圆周运动,即相对于地球作为中心,显示出非匀速的运动。这种技巧被证明在计算上是很有用的,但是违背了中心对称性,因而具有先验假设的效果,这在自然哲学看来是不能令人信服的,后来哥白尼就特别对此进行了批评。哥白尼交换了地球和太阳的位置,其理由来自处于支配地位的运动学。也就是说,对此描述的某种运动学简化是可能以较大对称性来实现的。因此,在日心说模型中,行星的逆行运动可以被解释为地球周年运动的效应,在哥白尼看来它比外层的木星、火星或土星运动得要慢,而比内层的水星和金星运动得要快。但是,哥白尼完全坚持了保守的自然哲学立场,因为他在“自然”圆周运动的意义上把更大的简单性

看作是接近实在的标志。

在近代天文学史上的第一位大数学家约翰内斯·开普勒看来,简单性信念也是颠扑不破的。他在1596年的《宇宙的奥秘》中,开始多次尝试把正多面体引入行星系统中,两行星之间的距离正是此正多面体的内接球面和外切球面。土星、木星、火星、地球、金星和水星这6颗行星所相应的6个球面,是一个恰好处于另一个之中,而且以如下顺序分开:立方体、四面体、十二面体、二十面体和八面体。当然,开普勒的推测不可能推论到适合于一两百年以后发现的天王星、海王星。

开普勒虽然是一位自然科学家,却曾长期过分沉湎于柏拉图式推测之中。他的1609年的《新天文学》(*Astronomia Nova*)是一篇独特的文献,是在精确观测结果的不断压力下,通过一步一步的研究来解决古老的柏拉图简单性概念。与哥白尼不同,开普勒将新颖的动力学论据加进了其运动学研究中。在此,与哥白尼不同还在于,太阳不再被看作是处于运动学的非正圆心点的没有物理学功能的东西,而是被看作行星运动的动力因。新的任务也就是要从数学上来确定这些力。开普勒用磁场进行的动力学解释,只是一次(不成功的)最初尝试。在后来的牛顿引力理论中才取得了成功。

天上(“月上”)世界的简单性和尘世(“月下”)世界的复杂性,在其他文化中也是普遍的。让我们来看一看古代中国道家的自然哲学。它确实是处在神话的边缘,逻辑论证也比古希腊自然哲学要少,更多是激起直觉和神往;然而,两者之间也有共同之处。道家学说把自然描述为巨大的有机体,受控于循环运动和节律,诸如:世代、朝代和个体从出生到死亡的生命循环;由植物、动物和人类构成的食物链;季节的更替;白天和黑夜;行星的升起和降落;如此等等。所有的事物都与其他的事物处于联系之中。一个节律跟着一个节律犹如水波。什么样的力量是自然界中这种模式的终极因呢?如同恩培多克勒那样,道家学说中区别了两种相反的力量,阴和阳,随其节律的增加或减少就支配着这个世界。《鬼谷子》(传说

为公元前 4 世纪作品)一书中写道:“阳远终阴,阴极返阳。”^[2. 12]亚里士多德认为,所有的个体都带着其自然目的而自我运动。这里则是阴阳之道决定着个体的内部节律,那些能量也总是要返回其起点。道家的循环运转模型,可以提供一系列的解釋:天文学中制订历法、气象学中的水循环、食物链和生理学中的循环系统。它对于自然中的生命节律是极富说服力的,人们天天都在体验着这种循环,并可以用来指导他们自己的生活。自然界表现为一个目的性的机体。

值得注意的是,中国自然哲学中没有原子微粒的观念,因而没有开发出西方文艺复兴意义上的数学机制。相反,在它的中心是一个带有节奏性波动与场的和谐自然模型,这使得每个事物与每个事物都是相关联。在这种自然哲学的条件下,对声学问题的偏好和早期对磁场与静电效应的着迷都是可以理解的。道家观点更像斯多亚学派的自然哲学,而不像亚里士多德的自然哲学。这里也有专门关于像水波那样的巨大连续统中扩散效应的讨论。这种连续统就是斯多亚学派的“普纽玛(pneuma)”,其张力和振动据说决定了自然的不同状态。自然界各式各样的形式只是普纽玛不同张力所形成的短暂样式。当然,现代思维跃进到了驻波或声波模式抑或磁场模式。尽管如此,无论是斯多亚派还是道家的启发式背景,都没有导致可以与具有原子论自然哲学背景的伽利略力学相比的声学或磁场物理学理论。对于从物质的复杂、无规则和混沌状态中涌现出秩序的描述,仅仅是定性的描述,而且对地下和天上运用了不同的模型。

2.2 牛顿宇宙、爱因斯坦宇宙和拉普拉斯妖

自古以来,天文学家和哲学家都相信,天上的运动是由简单的几何定

律支配着。简单性不仅仅理解为方法论经济所需,而直至哥白尼也是将之作为真理的一个特征。因此,从柏拉图到哥白尼的天文学学说都声称:要将天上系统的表面的复杂性归结为某种简单的真实运动的框架中!欧几里得几何学的基本概念赋予其以简单的构件:圆周(罗盘)和直线(尺子)。与月上世界的简单性相反,月下的尘世世界倒是真正复杂的。因此它的动力学也就至少是不能在欧几里得几何学的框架中进行数学化的。那就是柏拉图的数学原子论很快就被忘记了的原因,而亚里士多德的见解——复杂的定性的自然动力学在原则上是不可能数学化的——影响着直到文艺复兴的科学研究。

早期的物理学家(如伽利略)克服了月上(“简单”)世界和月下(“复杂”)世界的界限。他们相信,天上和地下的自然动力学都是由同样的数学规律统治着。在技术上,伽利略简化了(例如)自由落体的动力学,他选择了一些可观测的、可测量的量而忽略了另一些约束。简言之,他使用一种理想化实验情形的简化的数学模型。当然,甚至物理定律的天体模型也只考虑了几个参量,诸如行星的角速度和位置,并忽略了其他多种多样的约束条件(例如天球的密度、质量和摩擦)。从现代的观点看,甚至前苏格拉底哲学家,通过选择某些主导“参量”(例如水、火、气和土),也提出了关于自然界的复杂动力学的定性“模型”。

一般地,观测一个系统,无论它是物理的、生物的还是社会的,都可以从不同状态来进行。为观测现象建立模型的策略,自古以来可能已有了变化,但是建模活动的目标在某种意义上却是相同的:观测系统中状态变化的动力学。显然,真实的状态不可能仅仅用几个可观测参量来描述,但是却假定这是可以做到的。在早期的天文学和力学中,这是数学理想化的第一步,并导致了一组理想状态的几何模型,这在今天称作模型的态空间。前苏格拉底的自然“模型”不同于现代模型,不仅仅在于数学化和可观测性方面,还在于真实系统的实际状态与几何模型点之间的关系

被认为是本体论上所需要的,而在现代系统中它却是由于理论、预测等缘故而保留下来的虚构。

最简单的框架是单参量模型。对于哺乳动物的早期医学经验表明,健康或生病的状态与温度这个参量有关联。许多动物对于其他动物的情绪状态是可观测的:狗的耳朵状态相应于害怕状态如何,而犬齿暴露程度则是愤怒程度的定性“参量”。把两者组合起来,就更恰当地代表了狗的情绪状态。行星的状态在中世纪可用其角速度和居所来定义。其他系统的状态可能需要两种以上的特征(例如用温度、血压和脉搏速率来表示哺乳动物的健康状态)。

在任何情况下,如果这些参量是数值的,那么相应的态空间就可以用几何空间来表示。因此二维态空间中的单个点所表示的两个数值参量的值,就可以用表示在欧几里得几何平面上。系统状态的实际变化是可观测的,可以表示成该态空间的一条曲线。如果这条曲线上的每一个点带着记录下观测时间的标志,那么我们就获得了该模型的轨迹。有时,引进另一个时间坐标,用其时间序列来代表参量的变化,这也是很有用的。这种表示叫做轨迹图。

中世纪的动力学概念,包括了这两种表示法。在14世纪50年代,巴

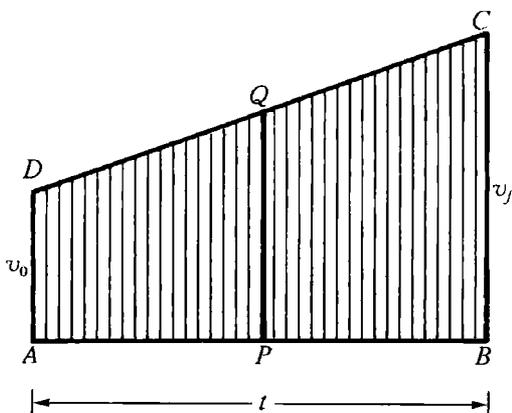


图 2.3 奥雷姆的线性特质的坐标

黎的经院哲学家尼科勒·奥雷姆引入了作图表示法或特质强度的几何构型。他主要是讨论了线性特质的情形,其延拓用空间或时间(“特质经度”)线段来度量。他主张,间隔的每一点的强度,用该点的垂直纵坐标(“特质纬度”)来度量。线性特质的量的图示为两个参量的构型。在图 2.3 中,相应于

经度 AB 的时间间隔中的匀加速运动中, AB 的每一 P 点的纬度是纵坐标 PQ , 其长度是在相应时刻的速度。^[2.13] 此构型的直线 DC 就是代表速度状态的轨迹图。所谓的默顿规则立即就从图 2.3 的几何证明中推导出来: 即从图 2.3 中的梯形的面积公式中得出, 通过的总距离 $s = \frac{1}{2}(v_0 + v_f)t$ 。

也许这种解释是以把这种面积看成是由许多垂直线段(“不可见量”)为基础构成的, 每一线段都代表以非常短(“无限小”)时间中的速度。默顿规则表明, 甚至在这很早的态空间探究方式中, 一个好的几何表示就不仅仅是一种有用的形象化, 而且还给出了关于动力学概念的新洞察。当然, 奥雷姆和牛津大学默顿学院的学者们最初都只是想关于特质的亚里士多德类型的物理学加以数学化。但是, 他们的工作却在欧洲广泛地引起了沮丧, 从而导致了伽利略的工作。伽利略在著名的《关于两门新科学的对话》(*Discorsi*)中, 引入了近代力学的基本概念, 提出了众所周知的关于从静止开始的匀加速运动(自由落体)的距离公式 $s = (1/2)at^2$, 并给出了相应的证明及类似于奥雷姆思想的几何图形。

牛顿和莱布尼茨给动力系统理论加入了新东西。微积分允许人们把瞬时速度计算为速度函数的导数, 并可以图示为相应曲线的切矢量(图 2.4a)。速度矢量场已经成为动力系统理论中的一个基本概念(图 2.4b)。轨迹用微积分的微分程序决定着速度矢量。与此相反, 微积分的积分方式使人们可以通过速度矢量决定轨迹。

动力系统的建模策略首先是选择一个态空间, 观测结果可以用几个参量来表示。连续的观测导致了此态空间内的许多轨迹。在牛顿和莱布尼茨的微积分的意义上, 速度矢量可以在这些曲线上的任意点导出, 并描述它们在该点的固有动力学趋势。对于态空间任意点的速度矢量的描述, 就定义了一个速度矢量场。充满着轨迹的态空间称作该动力系统的“相图”(图 2.4c)。动力系统理论的这个基本概念, 最初是亨利·庞加莱

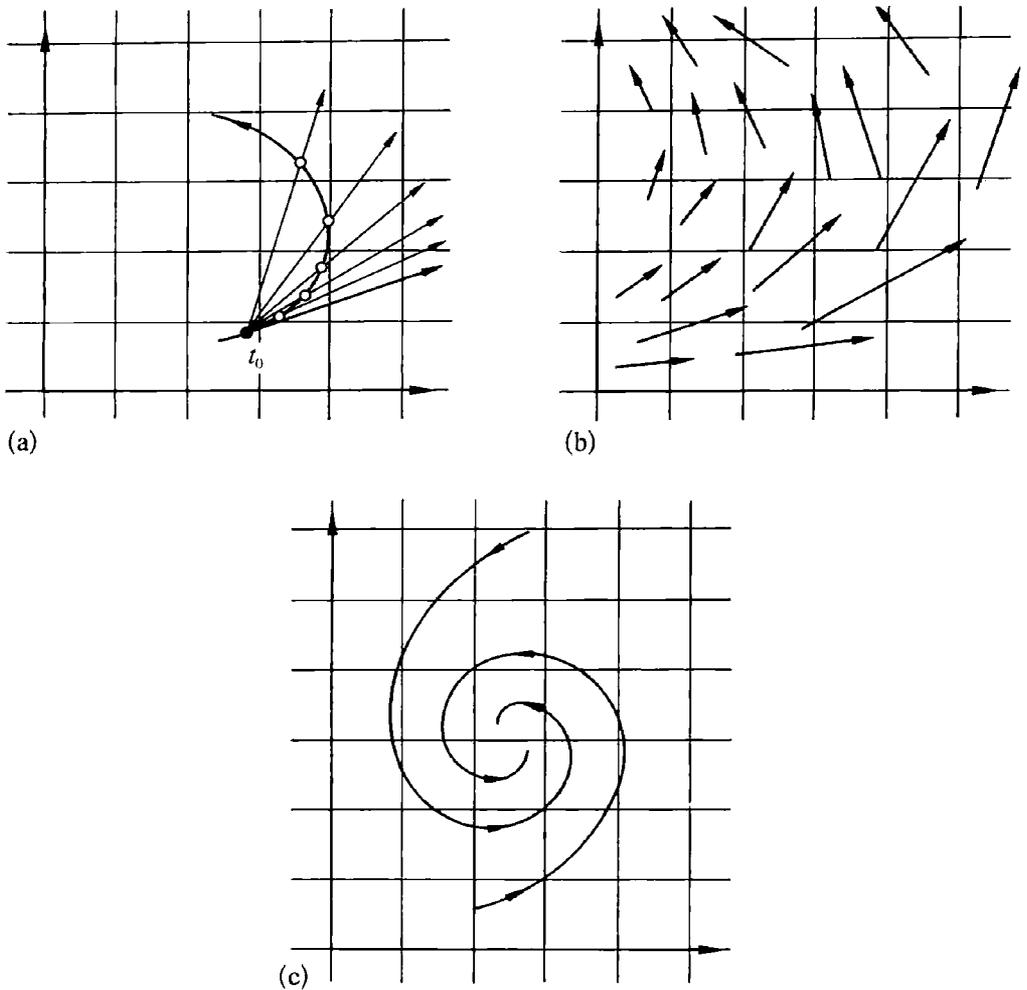


图 2.4 动力系统的几何表示

(a) 在切矢量处的瞬时速度；(b) 速度矢量场；(c) 相图。

引入的。速度矢量场通过微分方法从相图推导出来。^[2.14]

当然，速度矢量场形象地表示了被建模的系统的动力学。实际上，进行长时间的广泛的观测，对于揭示系统——由相应的速度矢量场表示——的动力学趋势是必要的。此建模程序是恰当的，如果我们假定：
(a) 一个观测轨迹的速度矢量在任意一点都精确地等于由该动力系统说明的矢量；
(b) 模型的矢量场是平滑的。“平滑”一词指的是直觉地认为在此不存在跳跃、不存在尖锐的拐角。在一维态空间的情形，矢量场由平

面上的图像来说明。因此,如果此图像连续,其导数也连续,此图像就是平滑的。历史上,条件(b)相当于莱布尼茨著名的连续性原理,它在经典物理学框架中处于某种支配性地位。

一般地,我们把建模程序概括如下。一个动力学模型总是针对某一实验情形。我们可以设想一下物理学家(如伽利略和牛顿)使用过的实验室装置,或者生物学家对某些有机体进行的观察,或者甚至社会学家对某些社会群体的考察。动力学模型由态空间和矢量场构成。态空间是该实验情形的几何空间(例如,欧几里得平面;或一般地,某个拓扑流形)。矢量场代表了状态变化的习惯趋势,被称作该模型的动力学。我们如何才能找出轨迹从而找出系统的行为呢?从技术上看,这个问题是由获得该系统的相图来解决的。这意味着,我们必须构造出该动力系统的轨迹。给定一个态空间和一个(“平滑”)矢量场,如果在切矢量的意义上,其速度矢量与矢量场一致,在态空间的一条曲线就是该动力系统的一条轨迹(图2.5)。相应于零时刻的点叫做轨迹的初态。这些轨迹被认为是,描述了系统的在一定时间间隔中的观测行为。而且,物理学家曾经雄心勃勃地

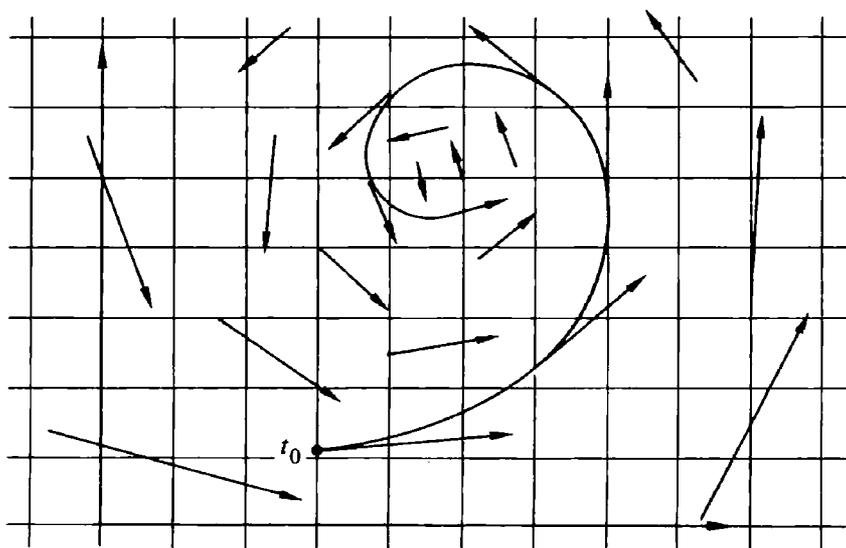


图 2.5 矢量场中动力系统的轨迹

力图实现对无限长时间未来的预测,并计算出大自然的途径,就像大自然是一架大钟一样。

我们扼要回顾一下牛顿的宇宙,它表现为通过使用牛顿、莱布尼茨和欧拉等人的数学工具,对动力系统理论的成功应用。牛顿用3个定律支配着实物物体的行为。第一定律(“惯性定律”)说,一个物体将保持匀速的直线运动,如果没有外力作用于它。如果的确有外力作用于它,那么其质量乘以其加速度就等于该外力(第二定律)。再加上第三定律——对于每一个作用总是有一个相反的大小相等的反作用——就完成了基本框架。牛顿的宇宙由微粒构成,微粒在空间运动,它服从欧几里得几何定律。这些微粒的加速度由作用于其上的力所决定。作用于每一微粒的力,是所有其他微粒的力的矢量加和。如果此种力是一种引力,那么它在两个物体之间的吸引作用的强度,与两个质量的乘积成正比,与它们之间的距离的平方成反比。当然,在此还可能还有其他类型的力。

实际上,牛顿的第二定律被理解为宏观宇宙和微观宇宙——大自然的所有力的一般模式。借助特定的力的定律,牛顿模式就翻译成一组精确的动力学方程。如果已知种种微粒某一时刻的位置、速度和质量,那么它们以后所有时刻的位置和速度都在数学上确定了。简言之,牛顿宇宙中的一个物体的状态,由位置和速度两个参量加以说明。牛顿轨迹由运动的动力方程来确定。如果初态已知,那么牛顿宇宙的行为看来就是完全确定的。这种形式的确定论对18世纪和19世纪的哲学有巨大的影响。牛顿的动力学被理解为大自然建立模型的基础科学。但是,这种力学模型当然只有在忽略了摩擦的极限情形下才是有效的,它们从来没有在实验上完全实现过。大自然是如此的复杂,以致物理学家偏爱于观测非自然的(“人工的”)极限情形。在后面,我们将看见,物理学家的简单定律的信念,完全忽略了初始条件和约束条件的复杂性,因而造成了确定论的、可以彻底计算的幻想模型。

按照牛顿的观点,真实的物质世界只有一个,它处于一种绝对空间-时间框架中,我们可以在其中选择相对的参考系。这意味着,任意两个事件都被看作是客观可确定的,而不论它们是同时发生的还是在同一位置发生的。数学上,牛顿的绝对空间用三维欧几里得空间来表示,其度规用尺子来度量,而时间则被看作是一维的欧几里得空间,其坐标 t 由标准钟来度量。

因为其绝对同时性,牛顿四维空间-时间被同时事件的最大子集划分为不同层次。每一层是一个可能的事件 e 的三维超平面 $t=t(e)$, 将其因果性的未来—— $t>t(e)$ 层,与其因果性的过去—— $t<t(e)$ 层,分隔开来。在图 2.6a 中,忽略了第三维空间坐标,以使每一层都形象地表示为二维平面。这个因果结构包括了牛顿的假设:存在着任意快的以超距同时作用的信号。[2.15]

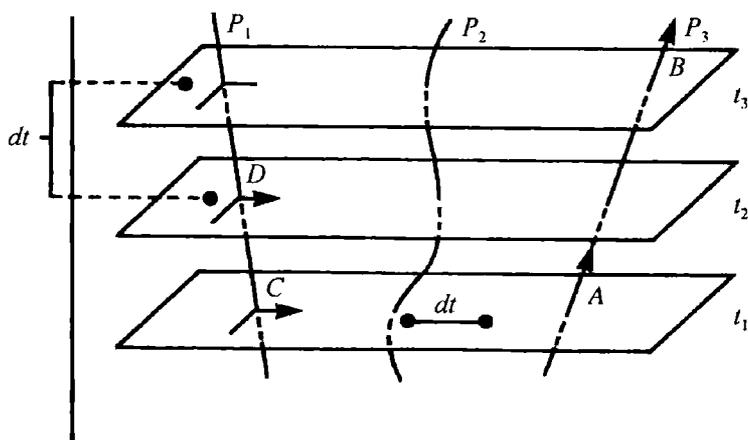


图 2.6 经典物理学与狭义相对论中的空-时模型

(a) 牛顿的空间-时间模型中的同时事件空间分层和匀速惯性运动轨迹(直线)、加速运动轨迹(曲线);

牛顿的相对空间被朗格准确地描述为,不受外力以恒定速度沿直线运动物体的参考系的惯性系。它没有指定使用这许多可能的惯性系的哪一个。从一个惯性系变换到另一个惯性系的特定变换(伽利略变换),给

出了相应的坐标。力学定律对于这些变换是守恒的(不变的)。由于每一伽利略变换都有 10 个连续的参量(时间 1 个,旋转、恒速和平移共 $3 \times 3 = 9$ 个),于是就可以推导出 10 个守恒定律。例如,时间坐标的伽利略不变量意味着能量守恒定律。非惯性系的参考系具有典型的效应。一个相对于固定恒星旋转的圆盘,其径向力是伽利略变换所消除不了的。简言之,在牛顿的空-时中,匀速运动被看作绝对地优先于加速运动。它的结构由伽利略变换群来定义。

20 世纪初,爱因斯坦证明了,牛顿的空-时模型局限于相对于光速 c 低速的力学运动。与任何运动参考系无关的常数 c ,是麦克斯韦电动力学中的一个因子。因此,牛顿的速度加和定律和伽利略的不变量在电动力学中不可能成立。在狭义相对论中(1905),爱因斯坦假定,光速恒定,物理定律相对于所有惯性系具有不变性(“狭义相对性原理”);并为电动力学和力学推导出一个共同的空-时框架。闵可夫斯基用四维几何为爱因斯坦的狭义相对论的空-时建立起来模型。我们不应对于四维性感到吃惊,因为牛顿的空-时中已经是三维(笛卡儿)空间以及一维时间坐标。

因为简单性的缘故,选取单位时规定光速等于 1,从而长度单位和时间单位可以交换。空-时中的每一点都代表一个事件,它意味着在某一时刻的空间的某一点。由于粒子在时间中持续,因此它并不由点来代表,而是由一条线来代表,这条线被称作粒子的世界线。为了把闵可夫斯基模型表示出来,可以画出一个空-时系统,以标准时间坐标来度量垂直方向,两个空间坐标来度量水平方向(图 2.6b)。^[2.16]

匀速运动的粒子由直线来表示,加速运动的粒子由曲线来表示。由于光粒子(光子)以基本速度 c 匀速运动,它们的世界线是直线,与垂直方向的夹角为 45° 。它们形成了一个光锥,具有共同的原点 O 。在所有的空-时点的光锥系统,被称作相对论空-时的闵可夫斯基模型。

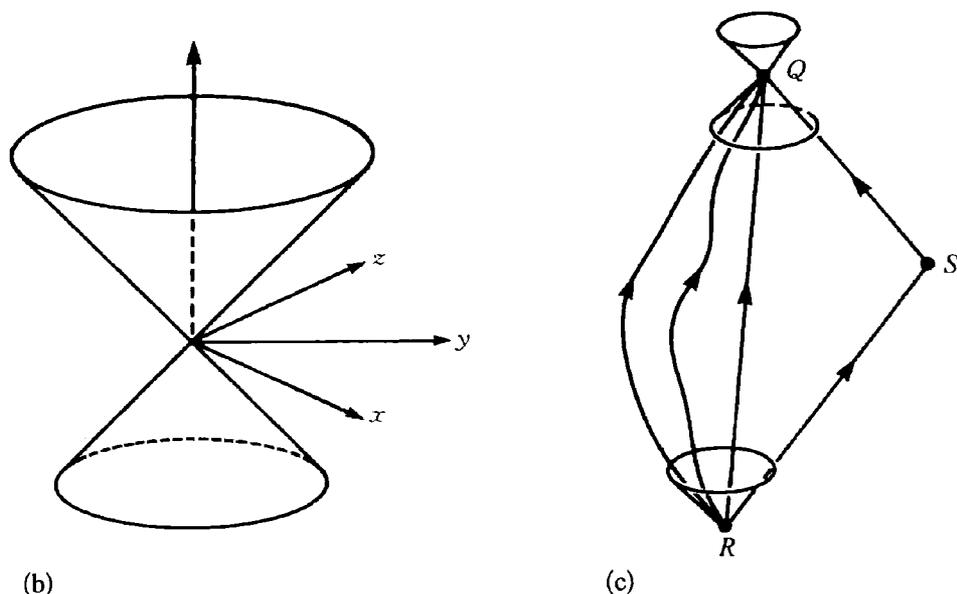


图 2.6 经典物理学与狭义相对论中的空-时模型

(b) 狭义相对论中的闵可夫斯基-时光锥；(c) 狭义相对论中的双生子佯谬，即闵可夫斯基距离 RQ 大于 RS 和 SQ 的长度之和。

光子的世界线的每一点总是处于光锥上，与此不同，任何以低于 c 运动的实物粒子的加速或匀速运动，其世界线每一点都必定总是处于光锥之中。由于实物粒子或光子的运动速度不可能高于光速，因此只有处于光锥上或是落在光锥内部的世界线才是物理上确定的。一个事件被看作是晚于 0 的，如果它处在 0 以上的未来光锥中；它被看作是早于 0 的，如果它处于低于 0 的过去光锥中。因此，光锥决定了相对论空-时的因果结构。

在闵可夫斯基模型与普通的欧几里得表象之间，基本的差异在于，世界线的长度被解释为由物理钟度量的时间。因此，与牛顿的绝对时间假设相反，时间测量成为路径依赖的。所谓的“双生子佯谬”极为形象地表达了这种效应。在图 2.6c 中，一个双生子留在匀速、缓慢运动的地球 R 之上，而另一个双生子以接近光速的极大的速度进行了一次到靠近恒星 S 的地方的旅行。闵可夫斯基几何学预言，进行了旅行的那位双生子在

他从 Q 处返回时仍然年轻,而呆在家中的那一位双生子却变成了一位老人。这当然不是科学幻想,而是闵可夫斯基世界线的时间测量长度的结果:闵可夫斯基距离 RQ 大于距离 RS 和 SQ 之和,这与通常的欧几里得解释相反。今天,对于以接近光速 c 运动的基本粒子,这些效应已经从实验上得到了很好的确证。

在闵可夫斯基空-时框架中,物理定律对于特定惯性系的不变性已经由洛伦兹变换所实现。具有伽利略不变性的牛顿空-时在极限的情形下仍然保持:诸如行星的天体运动或地面上的弹子球的运动,它们的速度要远小于常数 c 。在此意义上,爱因斯坦空-时是经典物理学的顶点,而不是一场打破牛顿空-时的革命。

由莱布尼茨首先引入经典物理学的一个重要概念是能量,它包括系统的动能 T 和势能 U 。使质点从位置 1 移动到位置 2 完成的机械功,相当于在位置 1 和位置 2 之间的动能之差。如果机械功与从位置 1 到位置 2 的路径无关,则相应的力场叫做保守力场。摩擦力不是保守力。在一维情形,忽略掉摩擦力时,所有的力都必定是保守的,因为此时从直线上的一点到另一点只有唯一的路径。总能量 $T+U$ 在保守力场中是一个常量。

牛顿力学的一个重要应用是谐振子,如小振幅的单摆或弹簧上重锤的上下振动。在物理学各个领域甚至在化学和生物学中,谐振子都是一种模型。例如,回忆一下电磁光波,在此发生着电场能和磁场能的振动。谐振荡在技术中也为人们所熟知,例如线圈和电容中振荡的电流,这里摩擦力相当于电阻。在 18 世纪和 19 世纪的哲学中,单摆是机械宇宙的一个象征,它显得是完全确定的,并可由运动的牛顿方程进行计算。

因此,单摆可以看作动力学建模程序的一个经典例子。这种模型假定,摆杆轻巧而又坚固,上端的结合部完全无摩擦,底部的重锤沉重

但体积非常小。重力总是将其垂直下拉。在图 2.7a 中,二维欧几里得平面中的单摆其升高角度为 α ,重力为 F ,沿摆杆的拉力为 $F\cos\alpha$,力 $F\sin\alpha$ 使之回摆。为了形象地表示出单摆的动力行为,必须建立起态空间和相图的动力学模型。单摆的状态是完全由角度变量 α ($\alpha=0$ 和 $\alpha=2\pi$ 表示同样的角度) 和角速度 v 所决定。因此,我们获得一种二维态空间,它可以形象地表示为图 2.7b 中的圆柱。在圆柱中部的垂直圆圈代表了零角速度 $v=0$ 的状态。圆柱下部从前至后的直线是(零倾角 $\alpha=0$) 轴线,单摆在此处于最低点。在起点 $(\alpha, v)=(0, 0)$,单摆处于其最低的静止位置。^[2.17]

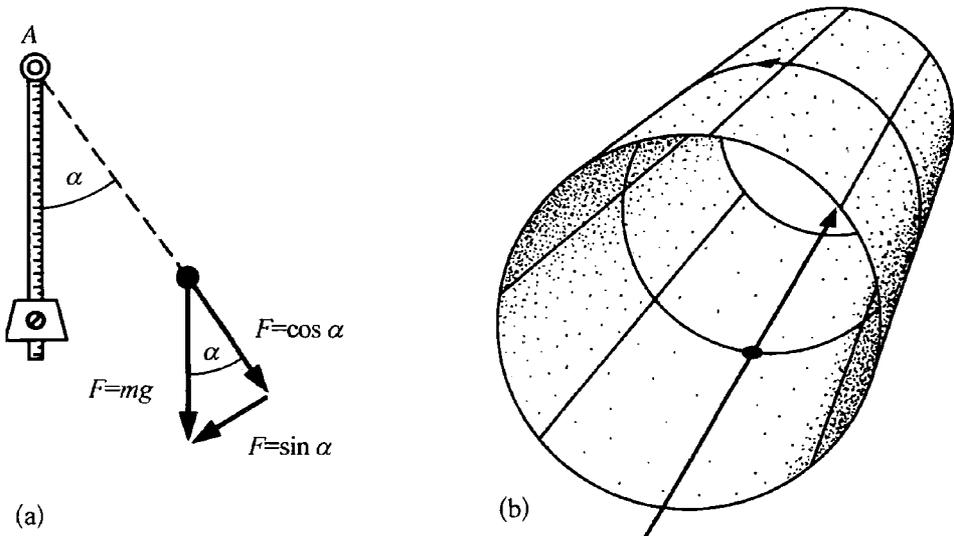


图 2.7 单摆

(a) 受力分析; (b) 二维态空间(圆柱)。^[2.17]

由于在此没有摩擦,没有空气阻力,使单摆稍微向左边动一下后就会使得它不断地来回摆动。在此态空间,相应于这个振荡运动的完整轨迹是一个圆圈,或封闭的环。在下一情形中,单摆在顶部处于平衡,这是不稳定平衡。在左边的一个细微的触动会使得它向右边落下,并得到速度。当单摆通过摆动的底部时,角速度达到其极大值。在再向顶部返回

时,单摆会慢下来。单摆再次在其顶部达到平衡。但是,当其处于旋转始态时,用了较大的力使之向右运动,那么其角速度就要大一些。在再次返回运动时,它会变慢,但是不足以在顶部静止下来。于是,单摆就会不停地顺时针旋转下去。在圆柱态空间的相应轨迹是一个循环圈。与慢的振荡不同,快的循环绕圆柱转动。实施多次的试验将揭示这个动力模型的相图(图 2.8a)。在此有两个平衡点。在顶部是一个鞍点。在起始处是一个涡点,它不是附近轨迹的极限点。当把圆柱沿着直线通过顶部的鞍点从前向后劈开时(图 2.8b),相图就更容易看清楚。

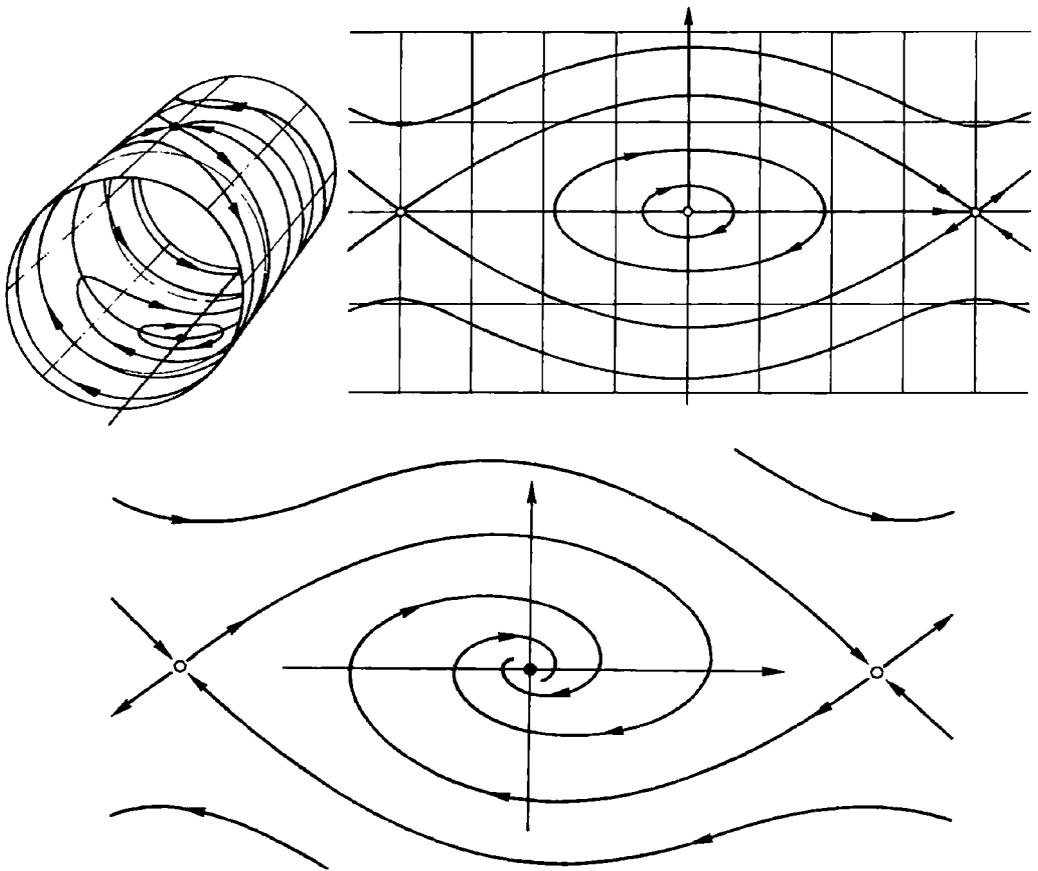


图 2.8 单摆的相图

(a) 圆柱态空间; (b) 劈开为一个平面; (c) 有摩擦时的情形。

如果此系统不是封闭的,而是如同物理现实中包括了摩擦效应,那么起始处平衡点就不再是涡点(图 2.8c)。它成为了螺旋类型的点吸引子。由于摩擦,单摆的任何运动最终都将静止下来,任何代表此单摆接近底部的慢运动,都将渐近地趋向这个极限点。

在二维或更多维的情形,还可以有其他类型的轨迹和极限集。例如,一个环可以是轨迹的渐近极限集(图 2.9);在三维系统中,可能出现环面甚至是其他或多或少有些奇怪的极限集。

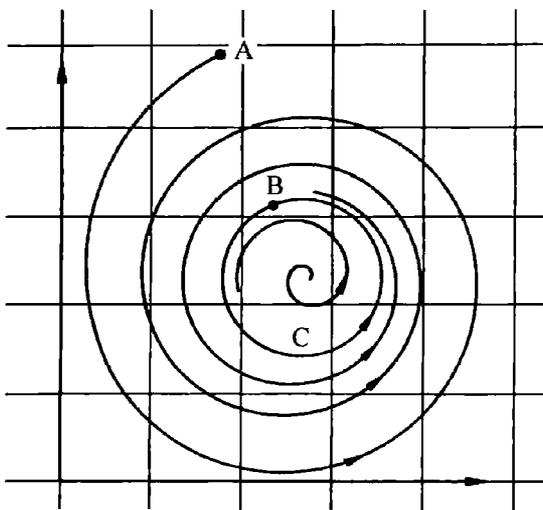


图 2.9 轨迹的环状渐近极限集

极限集使我们能够为一个演化系统建立平衡态的模型。关键的概念是称作“吸引子”的极限集。^[2.18]数学上,一个极限集(极限点、极限环、环面等)若

满足以下条件则称作一个吸引子:渐近趋向于该极限集的所有轨迹的集合是开放的。大致地说,吸引子接受了极限集邻域中的绝大多数轨迹。代表了系统的可能动态平衡点的所有极限集中,吸引子是最引人注目的。对极限点而言,一个吸引子代表了一个静态平衡;而作为吸引子的极限环则标志了一个振荡的周期平衡。单摆、弹簧或乐器的振动只是机械应用的若干种例子。我们在后面还将看到,振荡动力系统的周期平衡在物理学、化学、生物学和社会科学中都起着重要的作用。

在典型的相图中,将有一个以上的吸引子。相图将按趋向(吸引子)的轨迹,划分为不同的区域。划分出的边界或区域被称作分界线。图 2.10中,有两个点吸引子,各具自己趋向轨迹的开放集和自己的分界线。

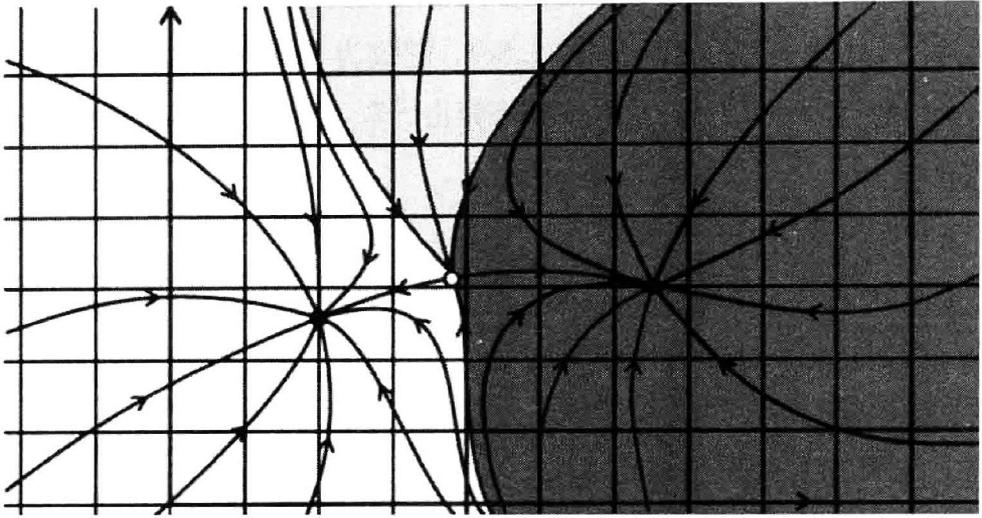


图 2.10 具有两个点吸引子、两个趋向轨迹开放集和一条分界线的相图

在现实中,一个动力系统不可能被看作是独立于其他动力系统的。为了获得更适合的模型,我们将研究两个耦合的系统。一个简单的例子是两个时钟的耦合。历史上,17 世纪克里斯蒂安·惠更斯观察到了这种特殊的系统。他注意到,挂在同一面墙上的两个时钟趋向于同步。这种现象是通过墙壁的弹性由非线性耦合引起的。的确,任何两个动力系统,通过构造出两个相应的态空间的笛卡儿积,都可以组合成一个系统。这种组合系统的一个小的扰动叫做两个系统的一个耦合。这种组合系统的状态的几何模型以如下方式形成。^[2.19]

每一时钟 A 和 B 都是一种振子。为了形象地表示出两个振子的渐进行为,暂态行为被忽略,位移和速度这两个参量绕起点的极限环的欧几里得平面二维状态模型也就用该极限环来代替。振子 A 的状态,用一个相应于它的相的角度 α 来说明(图 2.11a),振子 B 的状态则用角度 β 来说明(图 2.11b)。

为了构造出这两个振子组合系统的态空间,我们考虑水平平面的时钟 A 的极限环。这个平面环中的每一点代表 A 的一个相状态。我们将

这样一个点看作时钟 B 的极限环的中心,时钟 B 垂直于时钟 A 的水平平面(图 2.11c)。垂直环上的每一点代表了 B 的一个相状态。这一对相 (α, β) 就代表了组合系统的状态。[2.20]

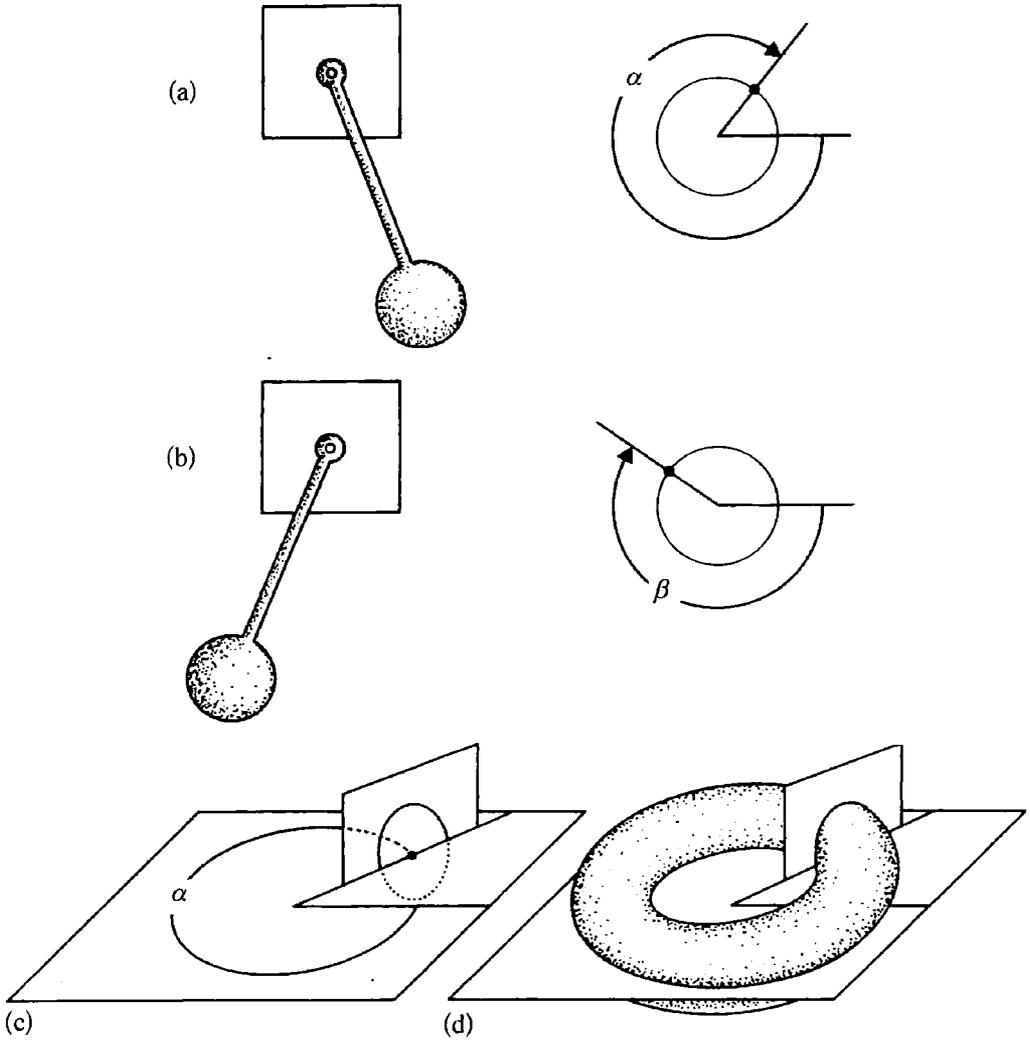


图 2.11 时钟振子及其态空间

(a)(b) 有两个极限环作为相应态空间的两个时钟振子; (c)(d) 两个振子组合系统的态空间(环面是两个环的笛卡儿积)。

如果振子 A 停止在相 α , 振子 B 通过一个完整循环, 那么组合的相点横穿过图 2.11c 中的垂直环。如果振子 A 也运动通过一个完整循环, 那

么图 2.11c 中的垂直环也沿着水平环运动,描出图 2.11d 中的环面。因此,两个振子的组合系统的态空间是环面,它是那两个环的笛卡儿积。当然,两个振子的实际状态的模型是四维的,而不是如我们的简化示意图中仅仅是二维的。

为了获得组合系统的动力学行为的相图,我们必须研究环面态空间的矢量场和轨迹。首先假定,每一个时钟的状态都与另一个时钟的状态完全无关。在这种情形,两个时钟是没有耦合的。相应于每一时钟的时间相的环面上点的轨迹,都围绕环面。如果每一时钟的速率都是恒定的,那么在此环面的方格模型上,轨迹是一条直线(图 2.12)。这条线的斜率是时钟 B 的速率与时钟 A 的速率之比。如果两个时钟具有相同的运行速率,则比值等于 1。给出相同的时间,意味着两个时钟具有相同的相。于是,扁平环面上的轨迹是图 2.12a 中的对角线。

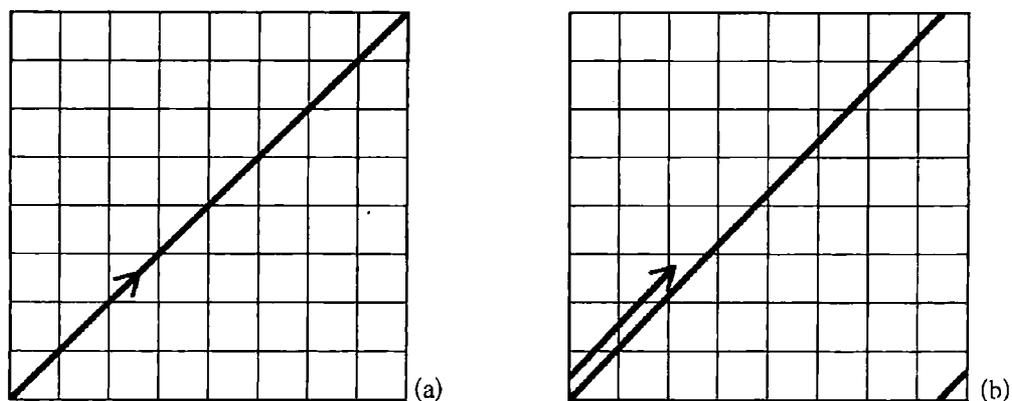


图 2.12 两个振子的组合系统的相图

(a) 具有相同相;(b) 有一个小变化。

系统中的一小点变化,将导致两个振子的速率或频率比值的一个小的变化。于是,在环面上的轨迹从周期轨迹变成准周期轨迹,或变成多次缠绕的而不仅仅是一个周期的轨迹(图 2.12b)。如果两个振子是耦合的(例如惠更斯的两个时钟的共同墙面),那么一个小的矢量场就必须加到代表非耦合系统的动力模型中。几何分析中的一个著名的定理指出,在

小的扰动并不导致相图发生显著变化的意义上,环面上的轨迹边缘是结构稳定的。从实验上看,这个结果已从惠更斯对于同一面墙上两个时钟的同步现象的观察中得到了确证。

对于为大自然建模的程序,振子是一个中心动力学范式。它们并不局限于机械应用。在19世纪,赫尔曼·冯·亥姆霍兹发明了一种电振荡器,瑞利勋爵研究了早期无线电发射器中的真空管振子的耦合系统。在20世纪,范德波尔运用进一步发展起来的无线电频谱电子学来理解耦合振子。

在牛顿的宇宙中,耦合振子提供了多体问题的例子。关于多个运动质点的质点系统,其中质点之间有相互作用时,对此有何共性的东西呢?两个质点的系统有简单的精确解。具有各向同性有心力两个质点的两体问题中,(12个)未知量由关于两个粒子的(10个)守恒量定律和牛顿的运动定律来确定。两个质点的问题可以成功地归结为已经解决了的单质点问题,这里利用了差分矢量 r 和质点 m_1 、 m_2 的归并质量 $\mu = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ 的牛顿运动方程。历史上,伽利略假定,地球围绕太阳运动,太阳是静止的。他从而把天体运动归结为简单的两体问题。正如我们知道的,太阳实际上围绕着地-日系统的组合质心而运动,此质心落在太阳表面之内。但是,这个假设当然仍是不精确的,因为许多行星都在同时围绕着太阳运动,它们相互之间又有相互作用。

这类多体问题的另一个例子是由三个弹子球的三体碰撞给出的。假设碰撞只发生在两个小球之间,而没有三个或更高阶次的碰撞发生,那么情况就简化为二体问题。其结果是以一种持续的方式依赖于初始状态。初始状态足够微小的变化对结果只会引起小的变化。如果三个小球同时碰在一起,其结果行为关键取决于哪些小球先碰到一起。因此,结果不连续地依赖于输入,而与莱布尼茨用来批判笛卡儿碰撞研究的连续性原理相反。在牛顿宇宙里,在过去和未来所有时间的物理行为都可以用小球

或星球的位置和速度从数学上完全确定的意义上,弹子球和星球的多体问题可以用决定论模型来描述。然而,在实践上以及长远来看,这个模型也许是不可计算的。在行星理论的例子中,计算机对几百万年的数值仿真会产生巨大的误差,因为其初始位置和速度并非确切已知的。初始数据上一个非常微小的变化,可能迅速引起结果上的巨大变化。在行为上的此种不稳定性,对于多体问题是典型的。甚至在完全确定性的世界里,能长远计算牛顿宇宙的拉普拉斯妖的假设将最终被揭露出是一个幻象虚构。

2.3 哈密顿系统、天上的混沌和量子世界的混沌

在 18 世纪和 19 世纪,牛顿力学似乎揭示了一个大自然的永恒秩序。从现代的观点看,牛顿系统仅仅是一种在建立实在模型中有用的动力系统。为了说明牛顿系统的起始状态,必须知道其中所有粒子的位置和速度。在 19 世纪中叶前后,数学家威廉·哈密顿引入了一种非常优美的有效的数学形式。^[2, 21]他富有成果的思想是用所谓的哈密顿函数 H 来刻画一个保守系统,此函数 H 用所有位置和动量变量来表达系统的总能量(=动能加上势能)。一个微粒的速度不过是其位置对于时间的变化率,动量则是其速度乘以质量。牛顿系统用牛顿运动第二定律来描述,此定律涉及加速度,即位置变化率的变化率。因此,在数学上,它们由二阶方程来定义。在哈密顿表述中,有两组方程。一组方程描述粒子的动量怎样随时间而变化,另一组描述位置怎样随时间而变化。显然,哈密顿方程描述了量(例如位置或动量)的变化率。因此,我们获得了一种以一阶方程进行数学描述的还原,此方程当然是决定论的。对于具有 3 个独立

空间方向的 n 个未约束粒子的动力系统,就有 $3n$ 个位置坐标和 $3n$ 个动量坐标。

适当地选用哈密顿函数 H ,哈密顿方程就可以用来刻画任何经典动力系统,而不仅仅是牛顿系统。甚至在麦克斯韦电动力学中,就其任一给定时间的数值而言,类哈密顿方程也提供了电场和磁场随时间的变化率。唯一的区别在于,麦克斯韦的方程是场方程而不是粒子方程,描述系统的状态时需要无限数量的参量,在空间在所有点上都使用场矢量,而不是使用无限多个参量——对每一粒子都使用 3 个位置坐标和 3 个动量坐标。对于狭义相对论和(进行了一定修订的形式的)广义相对论,哈密顿方程都成立。玻尔对应原理实现的由经典力学向量子力学转变的关键性步骤,甚至也采取的是哈密顿表达式的框架。这些应用将在后面进行解释。现在只须记住,对于物理学中建立动力学模型,哈密顿方程提供了一种普遍的表达方式。

相应的态空间允许我们把动力系统在每一“相”的演化形象化。因此,它们被称作相空间。对于 n 个粒子的系统,相空间的维数是 $3n + 3n$,即 $6n$ 。相空间的一个点代表着其中有 n 个粒子的可能复杂系统的整个状态。哈密顿方程决定着相空间的相点的轨迹。整体上看,它们描述了所有相点的变化率,因此定义了该相空间的一个矢量场,决定着相应系统的总的动力学。

经验应用中的一个众所周知的事实是,不可能以任意精度测定动力学模型的状态。测量值可能有些微小的差距,它们是由测量仪器、环境的约束等原因造成的。相应的相点集中在某些小的邻域之中。由此引出了一个关键性问题,在其具有邻近终态的意义上,从邻近初态出发的轨迹是否是局部稳定的。在图 2.13a 中,时刻零的初态的相状态区域 R_0 被矢量场的动力学拖到后来的时刻 t 的区域 R_t (当然,实际的大量数目的坐标在这种相空间的形象表示中必须忽略掉)。^[2.22]

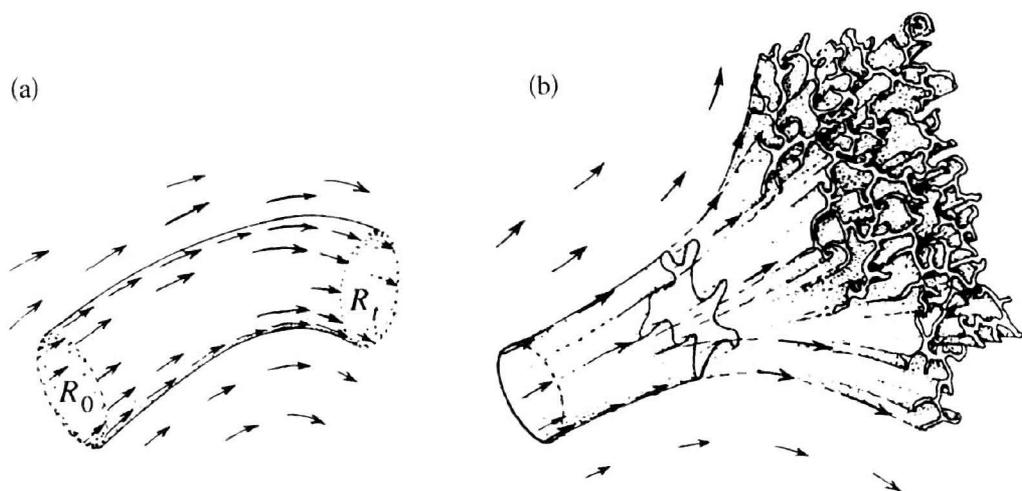


图 2.13 刘维尔定理示意图

(a) 时刻 0 时相状态区域 R_0 被哈密顿动力学拖向后来的时刻 t 的区域 R_t ;^[2.22] (b) 按照刘维尔定理, 一个初始相状态区域的体积, 在哈密顿动力学条件下是守恒的, 尽管其形状可以被扭曲、扩展并向外伸展。^[2.22]

在此情形中, 相似的初态导致了相似的终态。这个假设不过是一种哈密顿动力学语言中的经典性因果关系原理: 类似的原因将导致类似的结果。历史上, 从莱布尼茨到麦克斯韦的哲学家和物理学家都相信这个因果关系原理, 它似乎是保证了测量过程的稳定性以及预测的可能性, 而可以不管需要关注的不精确性差距。

值得注意的是, 哈密顿表达式的表象允许一种关于经典动力系统的因果关系一般性陈述。以数学家刘维尔命名的著名定理, 即在任何哈密顿动力学中, 因而对于任何的保守动力系统, 相空间的任一区域的体积都必定保持不变。于是, 在图 2.13a 中的初始区域 R_0 的大小, 是任何的哈密顿动力学都不可能使之增大的, 如果我们把“大小”正确地理解为相空间的体积。但是, 它的保守性并不排除, 其初始区域的形状被扭曲并扩展到相空间的大范围(图 2.13b)。^[2.22]

我们可以想象一下: 一滴墨水在容器里向大量水中扩散。相空间的可能扩散结果意味着, 刘维尔定理不能保证轨迹的局部稳定性。初始数

据中的一个非常小的变化,可能会引出结果有大的变化。天体力学和弹子球的多体问题仍然是长期不可计算的,尽管其动力学是决定论的。然而,刘维尔定理对于可以由哈密顿动力学从而也就是保守动力系统所显示的最终区域,意味着某些一般性结果。回忆一下,其起点有不同平衡点的有摩擦单摆(这不是保守系统)的相图 2.8c。非保守系统有螺旋型的点吸引子(图 2.14a),而保守系统具有不是吸引子的涡点(图 2.14b)。^[2.23]

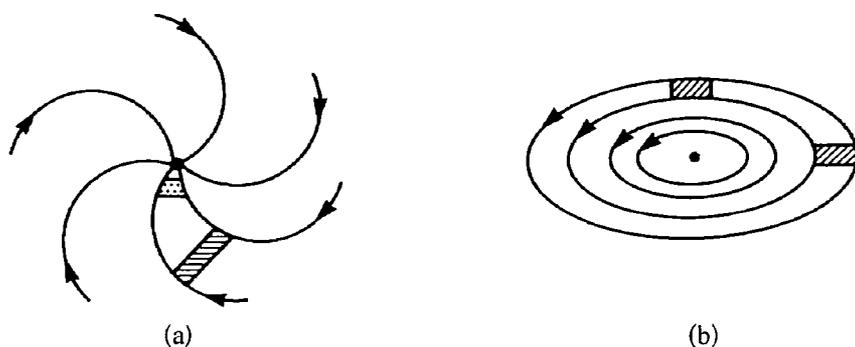


图 2.14 点吸引子和涡点

(a) 没有保守作用的非保守系统的点吸引子;(b) 具有保守作用的保守系统的涡点。

在图 2.14a 中,轨迹收缩到一个域点,而其初始区域的体积发生卷缩。在图 2.14b 中,轨迹沿涡点旋转,初始区域的体积保持不变。因此,据刘维尔定理,我们可以得出一般性结论,在任何保守系统中,吸引点都必须排除掉。初始区域的卷缩效应,对于极限环的轨迹也容易实现可视化。由于同样的数学的(先验)理由,保守系统中也不可能存在作为吸引子的极限环。

这些结果是由哈密顿系统的艰深数学定理先验导出的。我们必须意识到,像行星系统、单摆、自由落体等保守的物理系统,只不过是哈密顿系统的一些经验应用。哈密顿系统是由一类特殊的数学方程(哈密顿方程)来定义的。哈密顿系统的特征是从相应方程的数学理论推导出来的。因此,用哈密顿系统来建立实在的模型意味着,我们可以从认识论上预测某些先验的特征,例如在此不可能存在静态平衡的极限点吸引子,也没有周

期平衡的极限环吸引子。

从哲学上看,这种观点显然在某种变通的意义与康德的认识论相符合。如果我们假定某些动力系统的数学框架,那么我们当然就可以对于我们的经验模型得出某些先验的陈述,而不涉及到它们在若干学科中的经验应用。但是康德的认识论和动力学研究方式在如下的意义上是不同的:在此不仅仅有一种范畴框架(例如牛顿系统),而且有多种系统来为实在建立模型并取得程度不一的成功。因此,甚至把保守系统运用于认知科学、经济科学中,也并非物理主义或还原主义。

哈密顿(保守)系统的进一步的先验结果认为,在此有不规则的、混沌的轨迹。在18世纪和19世纪,物理学家和哲学家都相信,大自然是由牛顿类型的或哈密顿类型的运动方程所确定的,如果现在事件的初态已知,那么宇宙的未来和过去状态都至少是原则上可计算的。哲学上看,这种信念由拉普拉斯妖形象化了,它如同一台没有物理局限的巨大计算机,可以存储和计算出所有的必然状态。数学上,这种拉普拉斯妖的信念必须假定,经典力学中的系统是可积的,从而也就是可解的。1892年,庞加莱已经意识到,经典力学中的不可积的三体问题可能导致完全混沌的轨迹。^[2.24]大约60年以后,科尔莫戈罗夫(1954)、阿诺尔德(1963)和莫泽(1967)证明了他们的著名的KAM定理:经典力学的相空间的运动既非完全规则的,亦非完全无规的,但是轨迹的类型敏感地依赖于对于初始条件的选择。^[2.25]

由于天体力学是经验上很好确证了的一个哈密顿系统的动力学模型,KAM定理拒斥了关于“月上”世界的某些传统见解。天上,既非一个亚里士多德宇宙意义上的规则世界,也非一个拉普拉斯妖意义上的永恒的规则世界。显然,它不是众神的居所。然而,它并非是完全混沌的。天上,如哈密顿系统已经认识到的,具有或多或少的规则性和不规则性。比起前人的信念,它显得更像我们人类的日常生活。这点可能会激起作家

们对于哈密顿系统的好奇心。但是,让我们先看一看一些数学事实。

可积系统的一个最简单例子是谐振子。在实践上,任何有 n 个自由度的可积系统的运动方程,等同于—组 n 个未耦合谐振子。相应的相空间是 $2n$ 维的,其中有 n 个位置坐标, n 个动量坐标。对于 $n=1$ 的谐振子,我们得到了一个循环,对于 $n=2$ 的两个谐振子得到一个环面(对照图 2.11d)。

因此, n 个可积运动的存在,把可积系统的 $2n$ 维相空间的轨迹限制于 n 维流形中,其拓扑是一个 n 维环面。对于两个自由度的和四维相空间的_{可积系统,轨迹可以形象地表示在环面上。轨迹的封闭轨道,只有在两个相应的振荡子的频率比值是有理数时,才可以出现(图 2.15)。}

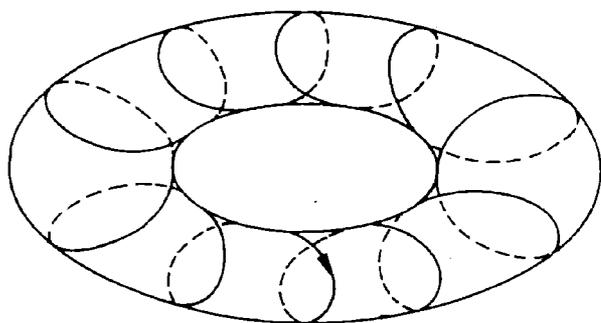


图 2.15 环面上两个自由度和一条轨迹的封闭轨道的可积系统

于无理数的频率比值,轨迹的轨道决不会重复自己,而是无限密切地趋近环面上的所有的点。^[2.26]

埃农和海勒斯于 1964 年研究了一个天体力学的不可积系统。此动力学模型由一对可积谐振子构成,它们之间有不可积的坐标立方项的耦合。如果该模型的初态的两个位置坐标 q_1, q_2 和两个动量坐标 p_1, p_2 都是已知的,那么其总能量 E 就由依赖于这些坐标的相应的哈密顿函数 H 所确定。此系统的轨迹在四维相空间的一个三维超平面上移动,此超平面由 $H(q_1, q_2, p_1, p_2) = E$ 来定义。

E 的值可以用来研究规则运动和不规则运动的共存,这种运动是 KAM 定理所预见了的。对于小的 E 值,动力系统有规则的行为,而对于大的 E 值,它就变得混沌了。为了形象地表示出这种行为的变化,我们考虑具有两维平面坐标 q_1 和 q_2 的轨迹的截面(庞加莱映射)。对于 $E =$

$1/24$ (图 2.16a)和 $E=1/12$ (图 2.16b),庞加莱映射显示出只有规则运动的有些变形的环面的截面。在临界值 $E=1/9$ 以上,绝大多数但不是全部环面都消失了,不规则点也随机地出现了。对于 $E=1/8$ (图 2.16c),庞加莱映射显示出一种规则运动和不规则运动共存的过渡状态。对于 $E=1/6$ (图 2.16d),运动就显示出完全是无规的、混沌的。^[2.27]

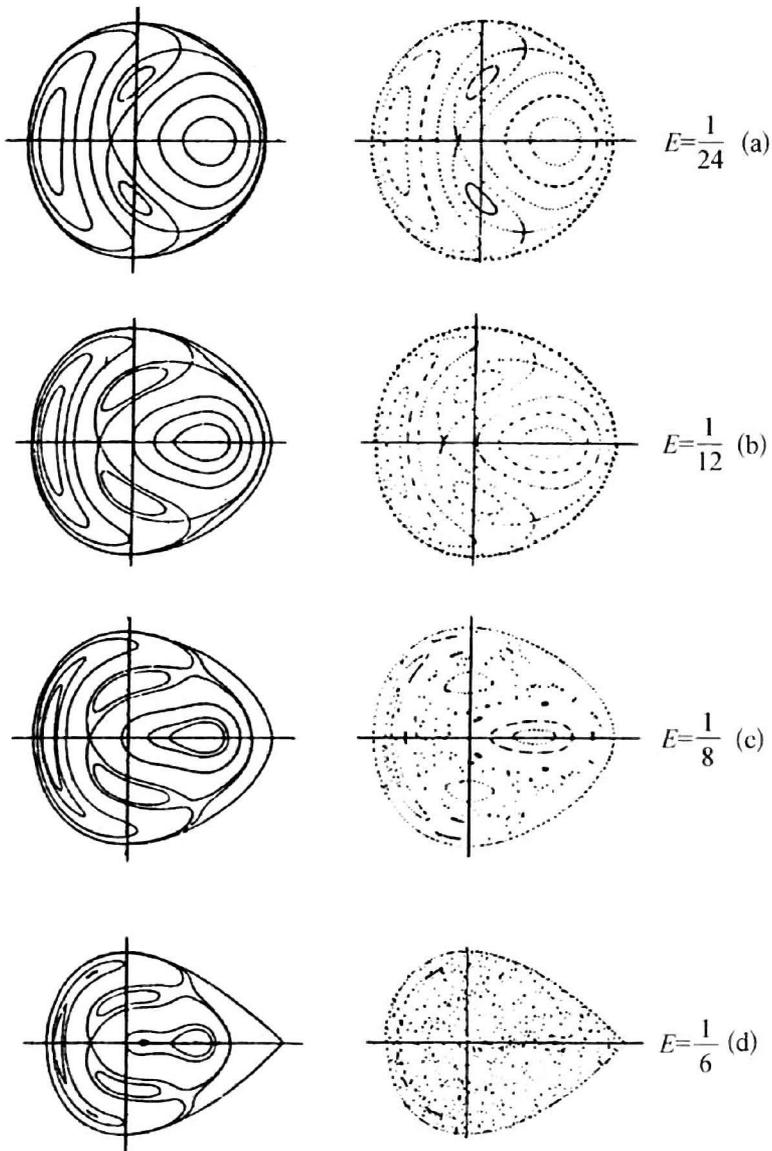


图 2.16 埃农-海勒斯系统的庞加莱映射^[2.27]

如下的天体力学的三体问题中,给出了一个经验应用的例子,它是不可积的。考察了木星运动对于围绕太阳运动的一颗小行星运动的扰动(图 2.17)。

木星和该颗小行星被解释为两个具有一定频率的振子。按照 KAM 定理,小行星的稳定的和不稳定的运动可以根据频率比值来加以区分。

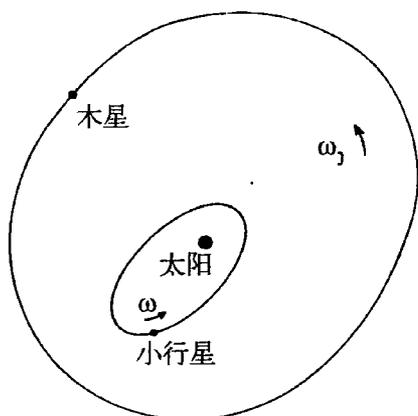


图 2.17 木星对小行星运动的扰动

一般地,我们必须意识到,稳定轨迹以及不稳定轨迹都是数学上明确定义的。于是,甚至不可积的多体问题也描述着世界的确定论模型。打一个比方,我们可以说,本质上(*sub specie aeternitatis*)莱布尼茨和牛顿的上帝都毫无困难地预见了他规则的和不规则的轨迹,而毋需一步一步地计算其发展。观测到的混沌行为,既不是由于大量的自由度(一个天体的三体问题只有不多的自由度),也不是人类知识的不确定性。不规则性是由哈密顿方程的非线性引起的,即起初靠近的轨迹在相区域中指数式地快速分开。由于其初始条件只可能以有限的精确度来测量,而误差是指数式地快速增加,这些系统的长期行为是不可能预见的。在数学上,初始条件由(具有有限数位的无理数)实数值来刻画。因此,计算机辅助的计算,将随着改进了越来越多的测量数字而更快地推动此种误差。

天体力学、小行星世界、行星、恒星和星系的宏观世界,是由规则和无规行为共存所确定的。天上的确定论混沌虽非处处皆有,然而局域可能的,因此可能引起在原则上不能排除的宇宙灾变。量子力学的微观世界,即光子、电子、原子和分子的量子世界中,情况又怎样呢?在量子世界中有混沌吗?为了回答这个问题,我们首先需要了解一些有关量子世界的客体的哈密顿系统和相空间的基本概念。^[2.28]

1900年, 马克斯·普朗克提出, 电磁振荡仅仅以量子方式出现, 其能量 E 对于频率 ν 具有确定的关系 $E = h\nu$, 其中 h 是常数(“普朗克量子”)。在 20 世纪的物理学中, 除了爱因斯坦的巨大光速常数 c 以外, 普朗克的微小量子常数是大自然的第二个基本常数。普朗克关系得到了实验上的支持, 例如黑体辐射实验的支持。1923 年, 路易·德布罗意提出, 甚至物质粒子往往也具有波一样的行为。对于一个质量 m 的粒子, 德布罗意的波动频率 ν 满足普朗克关系。与爱因斯坦相对论中著名的定律 $E = mc^2$ 结合起来(“质量是能量的特殊状态因此可以通过辐射而转变为能量”), 我们获得了一种关系: ν 通过 $h\nu = mc^2$ 而与 m 联系起来。于是, 在量子世界, 场的振动频率, 依赖于普朗克常数和爱因斯坦常数, 只以不连续的质量单位出现。显然, 量子世界中的现象, 既可以看作波也可以看作粒子。这就是所谓的波粒二象性, 它在许多实验得到了很好的确证, 实验中根据所预备的试验条件, 揭示了如光子或电子这样的量子系统的波动或粒子特征。

尼耳斯·玻尔 1913 年引入了他的“行星”原子模型, 从而可以极为精确地解释观察到和测量到的不连续稳定能级和光谱频率。玻尔的规则要求, 绕核运动轨道上的电子的角动量只能以 $\hbar = h/2\pi$ 的整倍数出现。他的成功中, 虽然有些先验要求的规则, 也仅仅提供了一种近似的几何模型, 它必须从量子世界的动力学理论中推导出来, 对应于可以解释开普勒的行星定律的牛顿或哈密顿经典力学。量子世界的动力学是由海森伯和薛定谔的量子力学奠定的, 并成为了 20 世纪物理学的基础物质理论。

量子力学的基本概念可以通过类比启发式地引入, 即以普朗克常数为基础考虑到进行必要的修改, 从而得到相应的哈密顿力学的概念。这个程序叫做玻尔对应原理(图 2.18)。因此, 在量子力学中, 经典的矢量(如位置或动量)都必须用某些算符来代替, 这些算符满足某种依赖于普朗克常数的非对易(非经典)关系。如果 h 消失($h \rightarrow 0$), 我们就获得众所

周知的(例如位置和动量)的经典对易关系,它们允许我们对矢量进行任意精度的测量。量子力学中非对易关系的一个直接结果是海森伯不确定性原理 $\Delta p \Delta q \geq \hbar/2$ 。如果一次测量中,位置 q 精确到 Δq ,那么对于动量 p 的一个扰动是 Δp 。因此,在量子世界中显然不存在轨迹或轨道,轨迹或轨道要求粒子具有精确的位置和动量的值。玻尔的流行的电子轨道只是一种极为粗略的几何形象化。[2. 29]

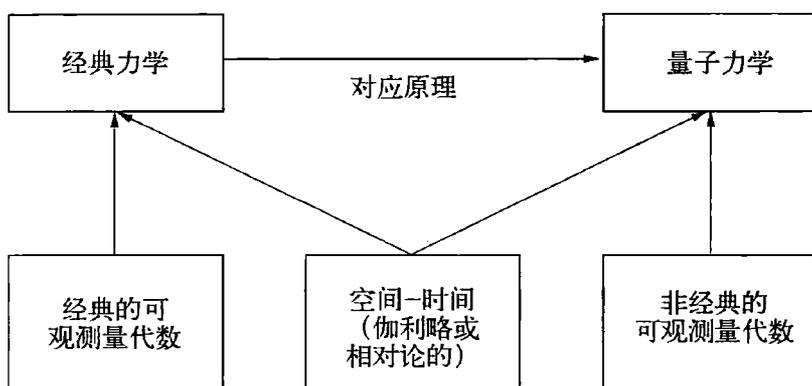


图 2.18 玻尔对应原理

按照玻尔对应原理,哈密顿函数描述的经典系统,必须代之以用哈密顿算符描述的量子系统(例如电子或光子),这里(对于位置和动量)使用的是算符而不是矢量。在经典物理学中,哈密顿系统的状态是由相空间的点来确定的。在量子力学中,恰当的类比概念是希尔伯特空间。量子系统的状态由希尔伯特空间的矢量来描述,其哈密顿算符的本征值决定了此希尔伯特空间的距离。

为了稍稍详尽一些说明这种数学的特点,我们想象一粒量子微粒。在经典理论中,一粒微粒是由它的空间的位置和它的动量来确定的。在量子力学中,微粒可能具有的每一位置,都是所有位置的集合中的一种交换组合,其权重为复数。于是,我们得到了一个关于位置的复函数,即所谓的波函数 $\psi(x)$ 。对每一位置 x , $\psi(x)$ 的值标志了该粒子在 x 处的波幅。在此位置的某个一定的小间隔中找到此粒子的概率,由波幅的平方

模 $|\psi(x)|^2$ 给出。各个可能的不同动量的波幅也是由波函数确定的。因此,希尔伯特空间是一个量子系统的复态空间。

量子态的因果动力学由偏微分方程来确定,此方程叫做薛定谔方程。经典可观测量是可对易的,总有确定的值,与此相反,量子系统的非经典可观测量是不可对易的,一般没有共同的本征值,自然也就没有确定的本征值。对于量子状态的可观测量,只可能计算出统计的期望值。

薛定谔量子表达式的一个基本性质是叠加原理,这表明它是线性的。例如,考虑两个发生相互作用的量子系统(例如一对以相反方向离开共同光源的光子)。甚至当它们在远距离处已没有物理相互作用时,它们也保留着不能分离或局域化的共同的状态叠加性。在这样的关联的(纯的)叠加量子态,两个量子系统的某一个可观测量只可能有不确定的本征值。量子力学的叠加或线性原理提供了组合系统的相关的(关联的)态,这已经在 EPR 实验中得到了高度的确证。从哲学上看,(量子)整体大于其部分之和。非局域性是量子世界的一个基本性质,这不同于经典的哈密顿系统。^[2, 30]我们在讨论心-脑和人工智能的涌现时,将回过来研究这个问题(第 4—6 章)。

玻尔对应原理引出了这样一个问题:经典的哈密顿系统中存在混沌运动是否将导致相应的量子系统中的不规则性^[2, 31]。我们对量子力学基本概念的概括给出了某些线索:在从经典的混沌系统转变成相应的量子力学系统时,可望有些变化。与经典力学相反,量子力学仅仅允许统计期望值。尽管薛定谔方程在叠加原理的意义上是线性的,并可以(例如对谐振子)精确求解,而且波函数是由薛定谔方程严格确定的,但这都并不意味着,量子态的性质可以精确地加以计算。我们只可能计算出,在某个空-时点上找到光子或电子的概率密度。

因为海森伯的不确定性原理,在量子世界不存在轨迹。因此,从接近的轨迹以指数快速分离的确定性混沌,对于量子系统是不可能的。涉及

混沌的不确定性原理的另一个方面是值得注意的：具有如图 2.16 所示混沌区的经典相空间。不确定性原理意味着，体积 h_n 中的 $2n$ 维相空间众多的点是不可分辨的。原因在于，小于 h_n 的混沌行为在量子力学中是无法表达出来的。只是在这些混沌区域之外的规则行为才是可期待的。在此意义上，微小而有限的普朗克常数值可能抑制了混沌。

在量子力学中，人们区分了时间无关的稳恒系统和时间相关的哈密顿系统。对于具有稳恒哈密顿量的系统，薛定谔方程可以归结为所谓的线性本征值问题，它允许人们计算出（例如）氢原子的能级。只要这些能级是离散的，波函数的行为就是规则的，就不会有混沌。这里引出的问题是，具有规则的经典限度的量子系统的能谱，与其相应的经典系统表现出混沌的量子系统的能谱，它们之间是否有区别。时间相关的哈密顿量被用来描述（例如基本粒子和分子）的时间演化。

按照玻尔对应原理，对量子混沌进行考察时，可以从研究某些经典哈密顿系统来入手。它们可以是可积的，近可积的，或者混沌的。因此，能量超平面上的轨迹可以是规则的，近规则的，或者近混沌的。用相应的算符来代替位置矢量和动量矢量，使得哈密顿函数量子化，我们就获得相应量子系统的哈密顿算符。接下来就可以推导薛定谔方程和本征值方程。现在，我们可以问一问：经典系统及其可积、近可积或混沌行为的特性，是否可以转变成相应的量子系统？能谱、本征函数等的情况怎样？这些问题都概括在“量子混沌”的标题下。例如，一些计算表明，运动场中的自由量子粒子的能谱（经典运动对此是混沌的），与圆圈中的自由量子粒子的能谱（经典运动对此是规则的）是完全不一样的。

在图 2.19 中，相邻能级之间距离的分布用两个例子来说明。^[2.32] 图 2.19a, b 中，一个由两个耦合振子构成的系统显示出有两个不同值的耦合系数。图 2.19a 相应的经典动力学是规则的，而图 2.19b 的经典动力学则是近混沌的。

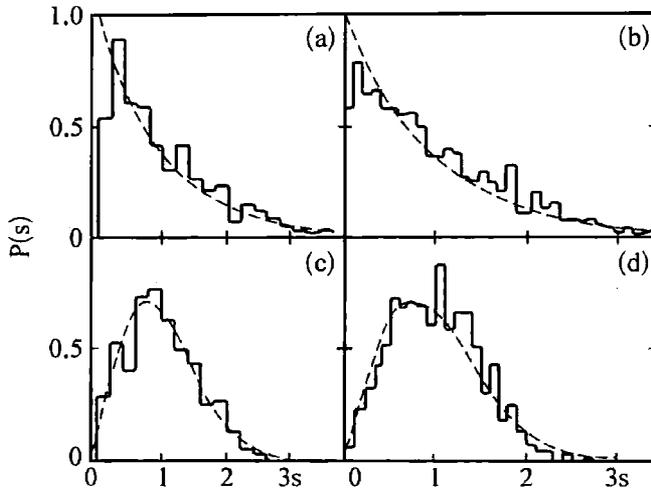


图 2.19 两个耦合振子和氢原子的经典动力学

(a)(b) 耦合振子；(c)(d) 均匀磁场中的氢原子。^[2, 32]

图 2.19c,d 显示了在均匀磁场中的氢原子的例子。图 2.19c 相应的经典动力学是规则的,而图 2.19d 的经典动力学则是近混沌的。规则情形与混沌情形可以由能级的不同分布(泊松分布和维格纳分布)来区分,能级的计算是求解相应的薛定谔方程。它们已经在一些数值模型以及实验室激光光谱的测量中得到了确证。在此意义上,量子混沌不是幻象,而是量子世界的复杂的结构特性。哈密顿系统,对于发现宏观世界和微观世界中的混沌是关键。但是,我们当然不能把确定论混沌的复杂数学结构与通常的无序思想混为一谈。

2.4 保守系统、耗散系统和有序涌现

自从庞加莱发表其天体力学著作(1892)以来,人们从数学上认识到,某些其时间演化受非线性哈密顿方程支配的力学系统可能会出现混沌运

动。但是,只要科学家没有获得适当的工具去处理不可积系统,对确定论混沌就仅仅是保持着一种好奇。在20世纪的最初10年中,发展起来了多种数值程序,用来至少是近似地处理非线性微分方程的数学复杂性。现代高速计算机的计算能力和发展了的试验技巧,支持了自然科学和社会科学中非线性复杂系统探究方式取得了新的成功。计算机辅助技术使非线性模型可视化,推动了交叉学科的应用,在许多科学分支取得了深远的结果。在这种科学情景中(1963),曾是著名数学家伯克霍夫^[2.33]的气象学家爱德华·洛伦茨观察到,3个耦合的一阶非线性微分方程的动力系统可以导致完全混沌的轨迹。数学上看,非线性是混沌的一种必要条件,但不是充分条件。它是必要条件,因为线性微分方程可以用人们熟知的数学程序(傅里叶变换)来求解,这并不导致混沌。洛伦茨用来为天气动力学建模的系统,主要是由于其耗散性而不同于庞加莱所用的哈密顿系统。大致说来,一个耗散系统并非保守系统,而是“开放”系统,由外部控制参量可以将其调整到临界值,从而引起向混沌的转变。

更准确地说,保守系统以及耗散系统都是以非线性微分方程刻画的: $\dot{x} = F(x, \lambda)$; 矢量 $x = (x_1, \dots, x_d)$ 的非线性函数 F 依赖于外部的控制参量 λ 。按照刘维尔定理,保守系统在对应相空间的体积元随时间会改变其形状,但是仍就保持其体积不变,而耗散系统的体积元会随时间的增长而卷缩(参见图 2.13 和图 2.14)。^[2.34]

洛伦茨发现了在模拟全球天气模式中出现扰动的确定论模型。地球在太阳的温暖下,从底部加热着大气。而那寒冷的外部空间,则从大气外壳吸取热量。底层的空气会上升,而上层的空气力图下降。贝纳尔在一些实验中为这种层与层之间的交流建立了模型。大气层中的空气流可以形象地表示为层之间跨越。大量冷暖空气之间的竞相交流,用循环涡旋来代表,叫做贝纳尔元胞。在三维情形,一个涡旋可以是热空气以环状上升,冷空气则从中心下降。于是,大气构成了三维贝纳尔元胞的海洋,如

同紧密堆积的六面体点阵。从沙漠、雪地或冰原的山丘和低谷规则模式中,我们可以窥见这种大气涡旋海洋的踪迹。

在典型的贝纳尔实验中,重力场中的流体层被从底部加热(图 2.20a)。底部被加热的流体会力图上升,而顶部的冷流体则力图下降。这两种受到黏力的运动是相反的。对于小的温度差 ΔT ,黏性占有上风,流体保持静止,均匀的热传导进行着热的输送。该系统的外部控制参量是所谓的瑞利数 Ra ,它与 ΔT 成正比。在 Ra 的临界值,流体的状态失稳,发展起来稳恒的对流卷模式(图 2.20b)。^[2.35]

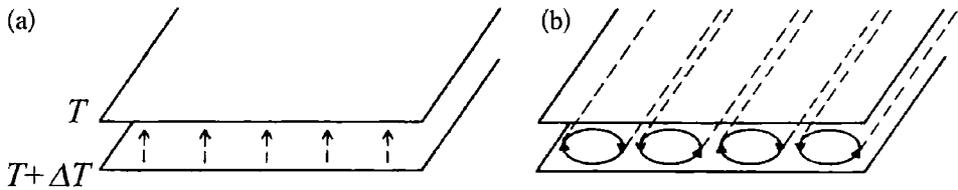


图 2.20 贝纳尔实验:加热的流体层

超出了某个较大的临界值 Ra 时,观察到了向混沌运动的转变。描述贝纳尔实验的复杂微分方程,被洛伦茨简化了,从而得出了他那著名模型的 3 个非线性微分方程。每一个微分方程的 3 个变量中,变量 X 的变化率正比于环状流体的流速,变量 Y 的变化率刻画下降和上升流体元之间的温差,变量 Z 的变化率正比于垂直温度对其平衡值的偏差。从这些方程可以推导出,相应的相空间的某一种表面的任一体积元都是随时间指数收缩的。因此,洛伦茨模型是耗散的。

利用计算机辅助计算,可以使得由洛伦茨模型的 3 个方程产生的轨迹可视化。在一定的条件下,在此三维相空间的特定区域受轨迹所吸引,使得一个圈在右边,然后又有几个圈在左边,再后又跑到了右边,如此等等(图 2.21)。^[2.36]

这些轨迹的路径非常敏感地依赖于初始条件。它们的值的细微偏差,会导致很快偏离开原路径若干圈。因为它的奇怪的形象,看起来形如是猫

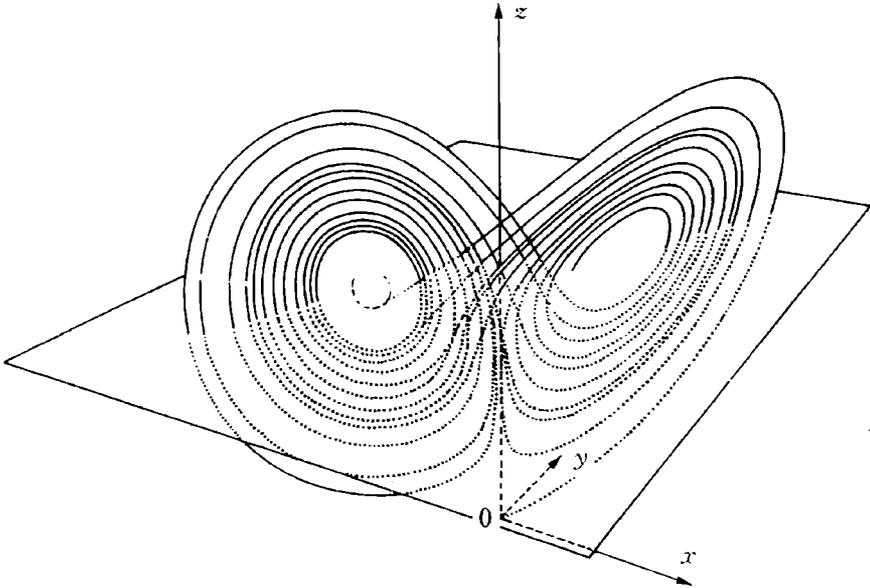


图 2.21 洛伦茨吸引子

头鹰的两只眼睛, 所以将洛伦茨相的吸引区域叫做“奇怪吸引子”。显然, 奇怪吸引子是混沌的。随着轨迹越来越密集而又不相交的缠绕, 轨迹最终将实现何种拓扑结构呢? 这是一个说明了所谓的分形维定义的例子: [2.37]

令 M 是此 n 维相空间的吸引子的子集。现在让相空间被边长为 ϵ 的立方体所覆盖。设 $N(\epsilon)$ 是包含了吸引子 M 片断的立方体的数目。如果 ϵ 收缩到零 ($\epsilon \rightarrow 0$), 那么 $N(\epsilon)$ 的对数与 ϵ 的对数之比的负极限 $D = -\lim \ln N(\epsilon) / \ln \epsilon$ 被称作分形维。

如果此吸引子是一个点 (图 2.14a), 则分形维为零。对于稳定的极限环 (图 2.9), 分形维为 1。但是对于混沌系统, 分形维不是一个整数。一般地, 分形维只可能通过数值计算得到。对于洛伦茨模型, 奇怪吸引子的分形维 $D \approx 2.06 \pm 0.01$ 。

另一个已对其混沌运动进行了实验研究的耗散系统是 BZ 反应。在此化学过程中, 一个有机分子被溴离子氧化, 此氧化被氧化还原系统所催

化。化学反应系统中的反应物浓度的变化率,又是用非线性函数的非线性微分方程组来描述。标志了 BZ 反应中的混沌行为的变量,是此氧化还原反应系统中的离子浓度。实验上观察到,适当地组合反应物的浓度,就得到了不规则的振荡。这些振荡显示为分立的颜色环。这种分立使非线性形象地显示出来。线性的演化会满足叠加原理。在这种情形下,振荡环对于叠加将互相穿透。

相应的微分方程是自治的,即它们并不显式依赖于时间。借助计算机辅助的可视化技术,常常便于对用微分运动方程描述的动力系统中的流进行研究,它们通过离散方程,以 $(d-1)$ 维庞加莱映射构造出相应的 d 维相空间中的轨迹截面点(参见图 2.16)。所构造的点,随时间点 n 的增加标记为 $x(1), x(2), \dots, x(n), x(n+1), \dots$ 。这个相应的方程,对于 $x(n) = [x_1(n), \dots, x_{d-1}(n)]$ 的相继点 $x(n+1)$,具有形式 $x(n+1) = G[x(n), \lambda]$ 。这种保守系统与耗散系统的分类,可以从流推广到庞加莱映射。一个离散的映射方程称作耗散的,如果它导致相空间的体积发生收缩。

离散映射的一个著名的例子是所谓的逻辑斯谛映射,它在自然科学和社会科学中都有许多应用。从非线性到混沌的复杂动力系统的基本概念,可以借用相当简单的计算机辅助方法以这种映射来说明。因此,我们先扼要地说明一下这个例子。数学上,逻辑斯谛映射用二次(非线性)迭代映射 $x_{n+1} = \alpha x_n(1-x_n)$ 来定义;其区间 $0 \leq x \leq 1$,控制参量 α 在 $0 \leq \alpha \leq 4$ 之间变化。序列 x_1, x_2, x_3, \dots 的函数值,可以由简单的袖珍计算器来计算。对于 $\alpha < 3$,序列收敛到一个不动点(图 2.22a)。如果 α 继续增加到超过了临界值 α_1 ,在一定过渡时间之后序列的值就在两个值之间周期地跳跃(图 2.22b)。如果 α 进一步增加,超过了临界值 α_2 ,周期的长度将增加一倍。如果 α 再进一步一增再增,那么周期每次都加倍,相应有临界值序列 $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ 。但是在超过了某个临界值 α_c 以后,此发展就变得越来越不规则和混沌(图 2.22c)。^[2.38]

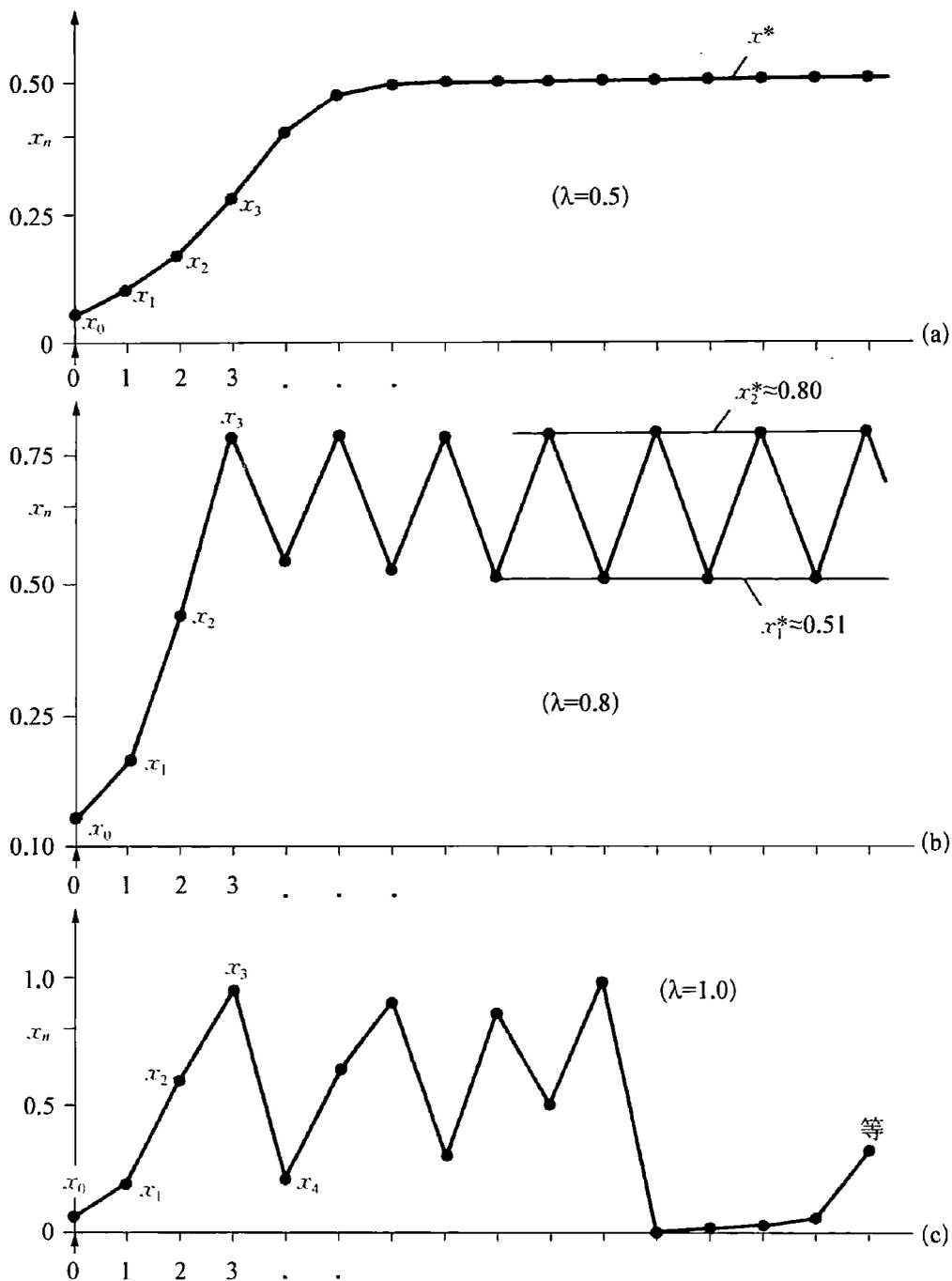


图 2.22 非线性迭代映射的逻辑斯谛曲线

控制参量分别为：(a) $\alpha = 4\lambda = 2$ ；(b) $\alpha = 4\lambda = 3.2$ ；(c) $\alpha = 4\lambda = 4$ 。

图 2.23a 中的倍周期分岔序列受一个常数定律的支配,这是格罗斯曼和托梅在逻辑斯谛映射中发现的,后来又被费根鲍姆重新认识为一整

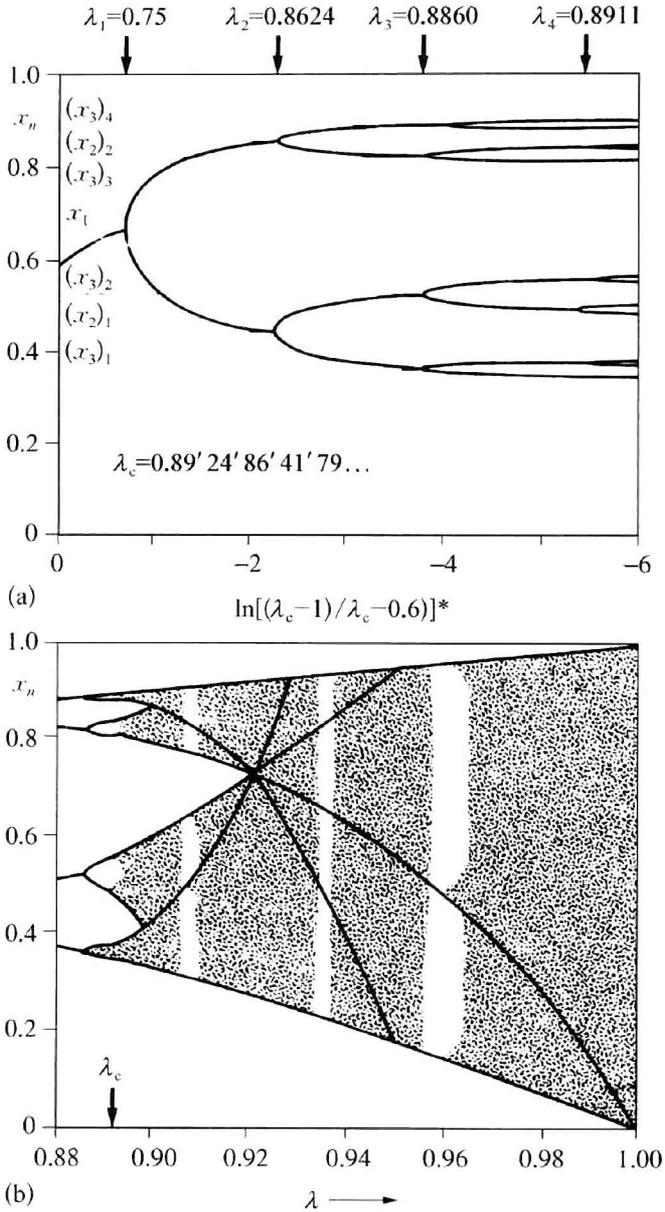


图 2.23 逻辑斯谛映射：倍周期分岔与混沌

(a) 倍周期分岔序列；(b) 超过 $\alpha_c = 4\lambda_c$ 的逻辑斯谛映射的混沌区

* 此式英文原书如此,似误。——编者

类函数的一个普适性质(费根鲍姆常数)。^[2.39]超过了 α_c 的混沌区域示意在图 2.23b 中。

在图 2.24a-c 中,示意了不同控制参量的 x_n 向 x_{n+1} 的映射,以构造出相应的不动点吸引子、两点之间的周期振荡,无任何点吸引子或周期性的完全无规性。

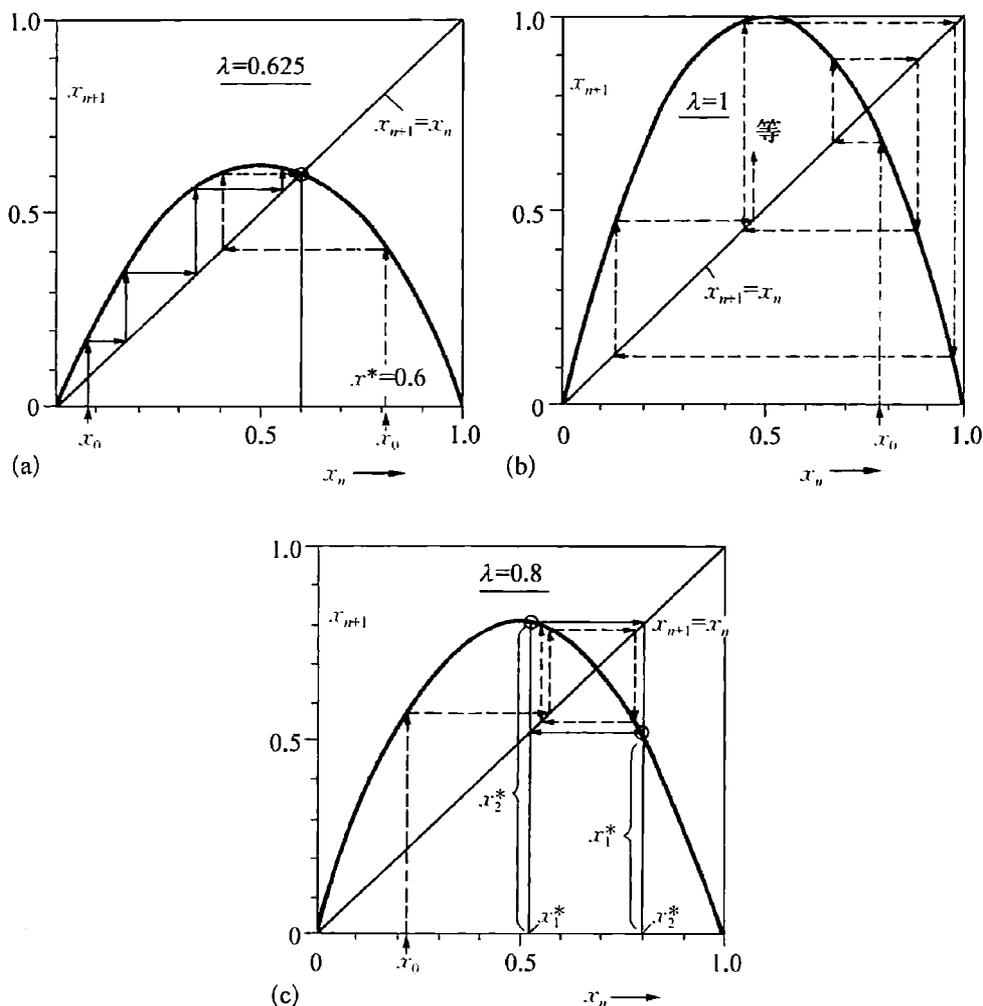


图 2.24 不同控制参量的逻辑斯谛映射的吸引子

(a) 不动点吸引子; (b) 混沌; (c) 周期振荡。

相当令人吃惊的是,像逻辑斯谛映射这样的简单的数学定律也产生

出分岔的复杂性和混沌,其可能的发展示意在图 2.23a, b 中。一个必要的但非充分的原因是此方程的非线性。在此情况下,复杂性增加的程度由分岔的增加来定义,分岔的增加导致了最复杂的分形情景的混沌。每一分岔说明了该非线性方程的一种可能的分支解。物理上,它们标志了从平衡态向新的可能的平衡态的相变。如果平衡态被理解为一种对称状态,那么相变就意味着由涨落力引起的对称破缺。

数学上看,对称性由某种定律的不变性来定义,即对于在相应的观察者的参照系之间的一些变换的不变性。在此意义上,开普勒定律的对称性是由伽利略变换来定义的(参见图 2.6a)。描述从底层加热的流体层的流体动力学定律(图 2.20a)是对于所有水平平移不变的。化学反应方程(在无限延伸的介质中),是对于观察者使用的参照系的所有平移、旋转和反射不变的。^[2.40]

然而,这些高度对称的定律允许相变到具有较少对称性的状态。例如,在贝纳尔实验中,加热的流体层失稳,发展起来稳恒对流涡旋(图 2.20b)。这种相变意味着对称破缺,因为细微涨落引起涡旋卷偏向两个可能的方向中的一个。我们的例子表明,相变和对称破缺是由外部参量的变化引起的,最终导致了系统的新的宏观空-时模式,涌现出有序。

显然,热涨落自身具有不确定性,或更精确地说,具有概率性。一粒随机来回运动的粒子(布朗运动),可以用随机方程来描述,此随机方程支配着概率分布随时间的变化。确定一个过程的概率分布的最重要的手段之一,是所谓的主方程。将此过程形象化,我们可以想象一颗粒子在三维点阵中的运动。

在时刻 t 找到系统在点 x 处的概率,随着从其他点 x' 向该点迁移(“移入”)而增加,但随着迁移离开(“移出”)而减少。由于“移入”构成了所有的从初始点 x' 到 x 的迁移,所以它是这些初始点之和。和的每一项,亦即找到此粒子在点 x' 的概率乘以(单位时间)从 x' 到 x 的迁移概

率。类似地,向外的迁移就是发现了“移出”。因此,一个过程的概率分布的变化率是由随机微分方程所确定的,它是由“移入”和“移出”的差来定义的。

涨落是由大量随机运动的粒子引起的。一个例子是流体与其分子。随机过程的分岔也就只能由概率分布的变化来确定。在图 2.25 中,概率函数从一个吸引子集中的浓度(图 2.25a)变化到扁平的分布(图 2.25b),最终变成了在两个吸引子处的两个极值(图 2.25c),当此控制参量的增加超过了相应的临界值时。图 2.25c 示意了随机的对称破缺。[2.41]

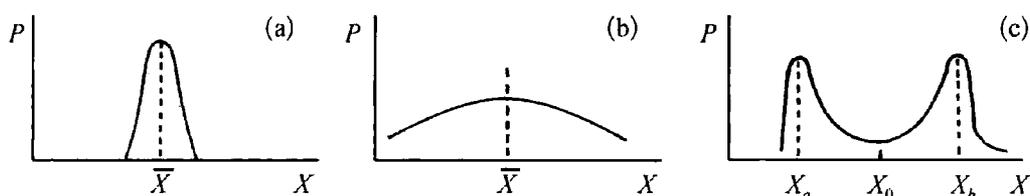


图 2.25 概率函数

(a) 有一个吸引子;(b) 扁平分布;(c) 两个吸引子,发生了随机对称破缺。

在此方面,复杂性意味着,一个系统有大量的自由度。当我们从外部控制一个系统时,我们可以改变其自由度。例如,在升高的温度时,水分子的蒸发变得更自由而不受相互牵扯。当温度降低时,形成液滴。这种宏观现象是分子发生关联运动并保持相互间平均距离的结果。在冰点,水结冰成晶体,具有了固定的分子序。人们很早就已经熟悉了这些相变。水有不同的聚集状态,也许就是将水看作一种物质基本元素的哲学观念的原因(参见第 2.1 节)。

材料科学提供了另一个例子。当铁磁体加热时,超过一定临界值它会失去磁性。但是,当温度降低时,磁体重又获得其磁性。磁性是一种宏观特征,可以从微观水平上用自由度的变化来解释。铁磁体由许多原子磁体构成。当温度抬高时,基元磁体随机地指向种种方向。如果将相应的磁矩加和,它们相互抵消掉了。这在宏观水平上就观察不到磁性。低

于某个临界温度时,原子磁体排列成宏观序,产生出磁化作用的宏观特征(图 4.9a)。在两个例子中,宏观序的涌现都是由降低温度引起的,此结构的低温时形成,不丢失能量。因此,它是一种保守的(可逆的)自组织。在物理上它可以用玻耳兹曼分布定律来解释,这一定律适用于能量较低、主要是在较低温度实现的结构。

另一方面,有一些系统,其有序和功能发挥并非是降低温度来实现的,而是保持某种通过其间的能量和物质流来实现的。熟悉的例子如动植物那样的活系统,它们需输入生物化学能。这种能量加工可以引起宏观模式的形成,如植物的生长、动物的行进等。但是这种有序的涌现,决非是活系统专有的(参见第 3 章)。它是一种远离热平衡的耗散(不可逆)自组织,在物理学、化学和生物学中都可以发现。

正如人们从热力学第二定律熟知的,与其环境没有任何能量和物质交换的封闭系统,将向近热平衡的无序状态发展。无序的程度由一种叫做“熵”的量来度量。热力学第二定律说,封闭系统中,熵总是向其极大值增加。例如,使得一个冷物体与一个热物体接触,热的交换将使得两个物体都获得同样的温度,即一种无序的均匀的分序。把一滴牛奶滴入咖啡中,牛奶最终扩散成一种无序的、均匀的牛奶咖啡混合物。人们从来没有观察到相反的过程。在此意义上,按照热力学第二定律,过程是不可逆的,具有唯一的方向。^[2.42]

液体动力学中的一个例子是贝纳尔不稳定性,它已经在第 2.4 节的开头描述过。当加热流体层(图 2.20a)达到某个临界值,它开始了一种宏观运动(图 2.20b)。因此,一个动态的很有序的空间模式是从无序的均匀的状态中涌现的,只要保持了通过此系统的一定的能量流。

流体动力学中的另一个例子是绕圆柱流动的流体。外部的控制参量是流速的雷诺数 Re 。在低速时,此流以均匀的方式出现(图 2.26a)。高速时,出现了具有两个涡旋的新的宏观模式(图 2.26b)。速度进一步增高,

涡旋开始变成振荡(图 2.26c-d)。在一定的临界值时,在圆柱后出现了湍流的无规和混沌的模式(图 2.26e)。图 2.26a-e 示意了可能的吸引子:一个或多个不动点,分岔,振荡和准振荡吸引子,最终是分形混沌。[2.43]

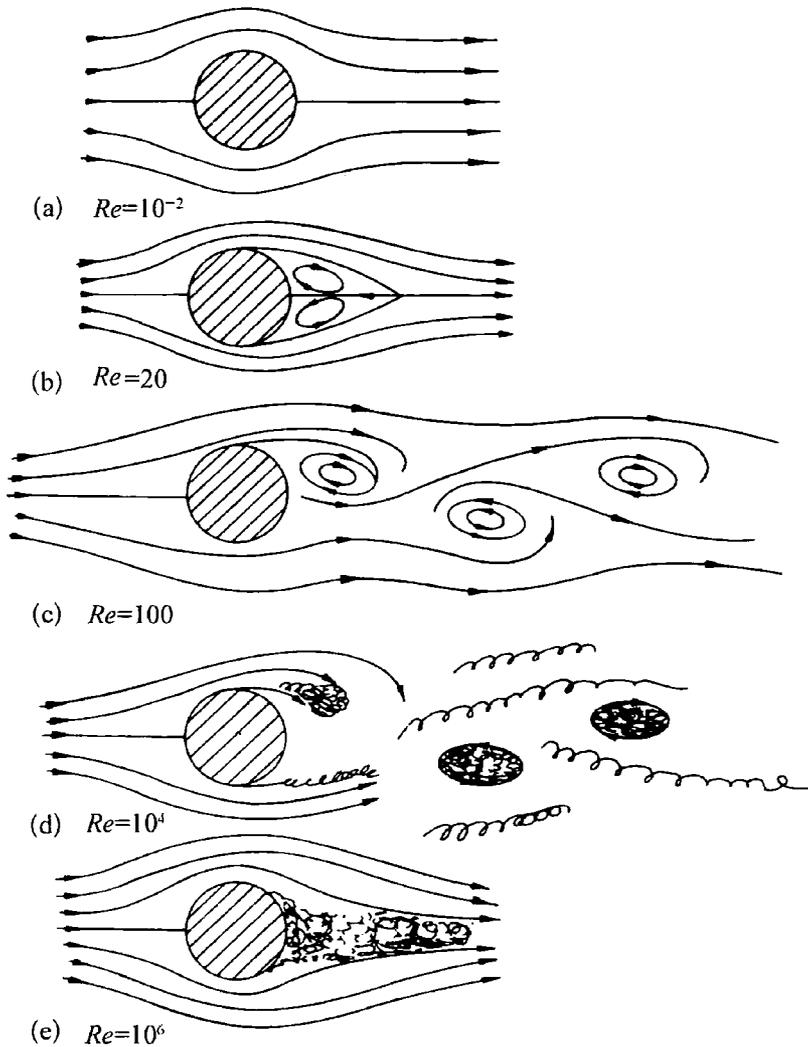


图 2.26 在圆柱后的流体动力学的宏观模式

(a) 均匀状态;(b) 两个涡旋;(c) 振荡;(d) 准振荡;(e) 混沌。

现代物理学和技术中,激光是一个著名的例子。固体激光器中有一根其中嵌进了特殊原子的材料棒。每一原子都可以由外部能量激发,导

致光脉冲的发射。在材料棒末端的镜子用来对这些脉冲进行选择。如果脉冲是沿轴方向的,那么它们就会被多次反射,在激光器中呆的时间较长,而在其他方向的脉冲就会离去。在小的抽运功率时,激光器如同一盏普通白炽灯,因为此时原子相互独立地发射光脉冲(图 2.27a)。到达一定的抽运功率时,众原子同步振荡,形成单一有序的巨大长度的脉冲(图 2.27b)。^[2.44]

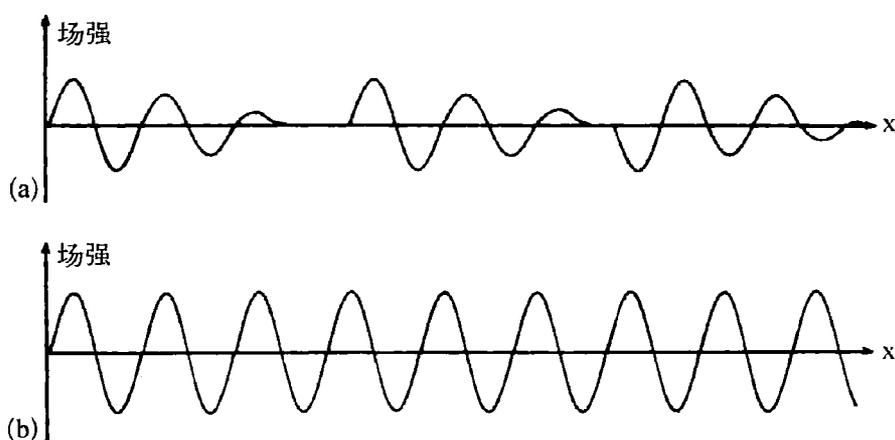


图 2.27 波的模式

(a) 白炽灯;(b) 激光。

激光束是一个由远离热平衡的耗散(不可逆)自组织涌现宏观序的例子。激光的能量的交换和加工表明,它显然是一个远离热平衡的耗散系统。

若是在从前,科学家便会假设是某种妖或神秘的力导致了这些系统的元素变成有序的新模式。但是,正如在保守自组织的情形,耗散自组织可以用一般框架来解释,它具有大家熟知的精确的数学形式。例如,我们从一个旧结构——均匀流体或杂乱发射的激光——出发。旧结构的不稳定性由外部参量的变化引起,最终导致新的宏观空-时结构。在接近失稳点,我们可以区分出稳定的和不稳定的集体运动或波(模)。不稳定模开始影响和决定稳定模,因此稳定模可以被消除掉。赫尔曼·哈肯贴切地

把这一过程称作“役使原理”。实际上,稳定模在一定的阈值受到不稳定模的“役使”。

数学上,这种程序是人们所熟悉的,被称作快弛豫变量的“浸渐消去法”*,例如,从描述相应系统中概率分布变化的主方程进行浸渐消去。显然,这种消去程序可以大量归并自由度。新结构的涌现起因于这一事实:剩余的不稳定模作为序参量,决定了系统的宏观行为。微分方程描述了宏观参量的演化。与微观水平上系统元素(如原子、分子等)的性质不同,序参量标志着整个系统的宏观特征。在激光的情形,一些慢变(“无阻尼的”)模的幅度可以作为序参量,因为它们开始役使该原子系统。在生物学语言中,序参量方程描述了模之间的“竞争”和“选择”过程。但是,这些当然只是一种比喻的说法,它们是可以用上所述的数学程序来精确表达的。[2.45]

一般地,作为概括,一个耗散结构可以在一定阈值处失稳,并被打破,得以涌现新的结构。作为相应的消去了大量自由度的序参量的引入,耗散有序的涌现伴随着复杂性的巨大降低。耗散结构是复杂系统的一个基本概念,它们在本书中被用来为自然科学和社会科学的过程建立模型。耗散结构的不可逆性,可能使我们回想起赫拉克利特的名言:一个人不能两次踏进同一条河流。显然,不可逆性违反了刻画牛顿和爱因斯坦的经典(哈密顿)世界的时间不变对称性。但是这种经典的观点将被表明不过是一个平稳变化世界的特例。另一方面,赫拉克利特还相信,某个生序原理使无规的相互作用得到和谐,并创造出物质的新的有序态。我们必须要进一步看一看,耗散系统的数学框架是否适合于这种规律的普遍特征。

一个物质进化的一般性框架将以所有物理力的统一理论为基础(图2.28)。从爱因斯坦的广义相对论推导出来的宇宙演化的标准模型,必须要能够为量子理论的原理所解释。迄今为止,只有少数几个关于宇宙演

* 英文为 adiabatic elimination, 曾译“绝热消去法”。——编者

化的数学模型差强人意,可以部分地接受实验的检验和确证。然而,这些模型的一般观念是,复杂性不断增加的结构(基本粒子、原子、分子、行星、恒星、星系等)的涌现,可以用宇宙相变或对称性破缺来解释。[2.46]

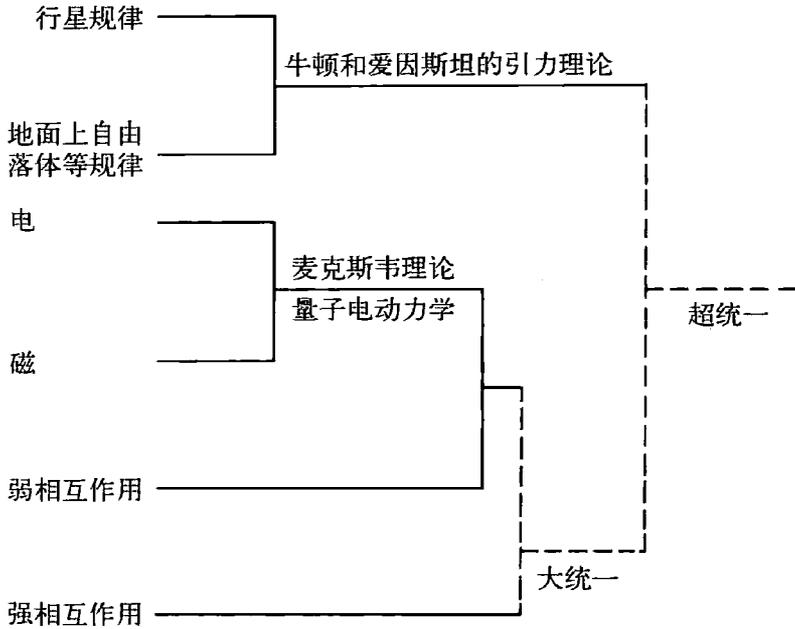


图 2.28 物理力的统一

在宇宙进化中,在不可能一般地区分出基本粒子(尽管它们可以互相转变)的意义上,初态被假定是近均匀的和对称的。在宇宙演化过程中,临界值是随着对称破缺而一步一步地实现的,在此临界值处对称性被偏差和涨落打破,新的粒子和力产生出来,皮埃尔·居里说:“对称创造出现象。”[2.47]但是我们必须意识到,对称破缺和相变的宇宙过程是从高能物理学的实验和理论进行的一种数学外推。

今天,物理学区分了四种基本力:电磁力、强力、弱力和引力。它们在数学上用所谓的规范场来描述。基本粒子物理学力图用一种相应于宇宙初态的基本力把这四种物理力统一起来。电磁力和弱力已经在欧洲核子研究中心(CERN)的加速器中非常高的能量区统一起来了(图 2.28)。统一意味着,在非常高的能量状态,不可能区分开“感觉到的”弱力(电子、中微子

等)与“感觉到的”电磁力。它们可以用同样的对称群($U(1) \times SU(2)$)来描述,即它们对于这种群的变换具有不变性。在较低能量的特定的临界值,此种对称性破缺成相应于电磁力和弱力的部分对称($U(1)$ 和 $SU(2)$)。

物理上,这种对称性破缺意味相变,它与两种新的物理力及其基本粒子的形成相联系。自发的对称破缺过程是众所周知的。例如,我们早餐食用的鸡蛋在其顶部的对称性位置是不稳定的。任何微小的涨落都使得它自发地倒下,变成不对称的但能量上稳定的位置。冷却到临界温度,铁磁体发生从无磁性到有磁性状态的相变。基本的两极自发地采取两种可能磁性方向之一,打破了自旋对称性,形成了新的宏观性质(磁性)。

重子(质子、中子等)与介子通过强力相互作用的复杂多样性,是由所谓的有3个自由度——红、绿和蓝3种“颜色”——的夸克造成的。例如,一个重子由3个夸克构成,这些夸克是可以用3种颜色加以区别的。在其强子对于环境是中性的(没有颜色)意义上,这3种颜色是互补的。刻画了夸克的这种颜色变化的数学对称群($SU(3)$)是人们所熟知的。

在电磁相互作用和弱相互作用成功统一起来以后,物理学家又力图实现电弱力和强力的“大统一”,并在最后实现所有四种力的“超统一”(图2.28)。已经提出了几种超统一的研究纲领,例如有超引力理论和超弦理论。数学上,它们用推广到更一般的对称结构(“规范群”)来描述,其中包括了四种基本力的部分对称性。技术上,统一的步骤应该伴随着非常高的能量值的增加而实现。但是,“大统一”要求的能量状态难以在实验室里实现。因此,大统一的高能物理学只能利用某些后果来确证,这些结果是实验室中可检验的或宇宙中可观测的(例如质子的衰变)。所有力的超统一将要求能量状态的无限增加,其物理原理仍然是未知的。

所谓的“暴胀宇宙”理论假设:宇宙早期状态尺度极小,但是能量极高(“量子真空”),它由于量子真空态的斥力(“反引力”)而非常迅速地膨胀到宏观尺度。这种宇宙相变允许人们解释观测宇宙的一些熟知的性

质, 诸如恒星和物质的相对均匀的分布。在此暴胀期间, 对于对称性和均匀性的某些细微的偏差会得到放大, 直至其充分大以至可解释观测到的宇宙结构。在膨胀的宇宙中, 物质的密度在各处并不完全均匀。因此, 引力就会使得较密区域降低其膨胀速度并开始收缩。这些局域的事件导致了恒星和星系的形成。^[2.48]

一般地, 从基本粒子到恒星和活的有机体的结构多样性的形成, 是用相变来解释的, 它们相应于平衡态的对称破缺(图 2.29, 图 2.30)。在此意义上, 宇宙的物质进化被理解为伴随着保守结构和耗散结构涌现的自组织过程。但是, 我们必须意识到, 宇宙的自组织在今天还仅仅是一种“常规的研究思路”, 正如康德所说: 我们得到的是一些或多或少合理的动态模型, 它们或多或少得到了经验上的确证。宇宙演化的最初开端仍然是未知的。

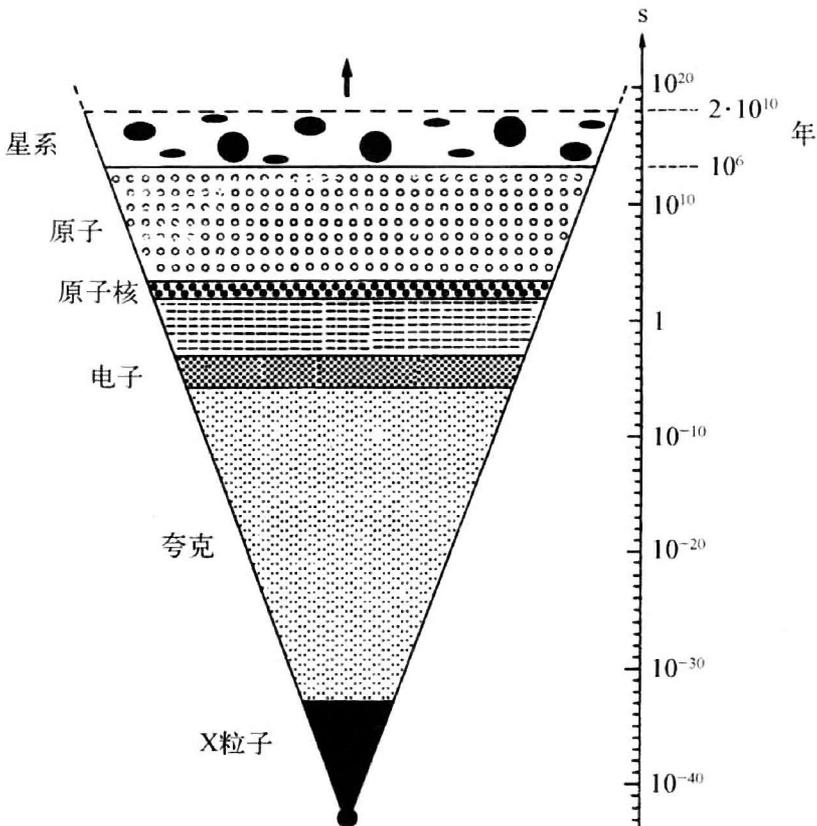
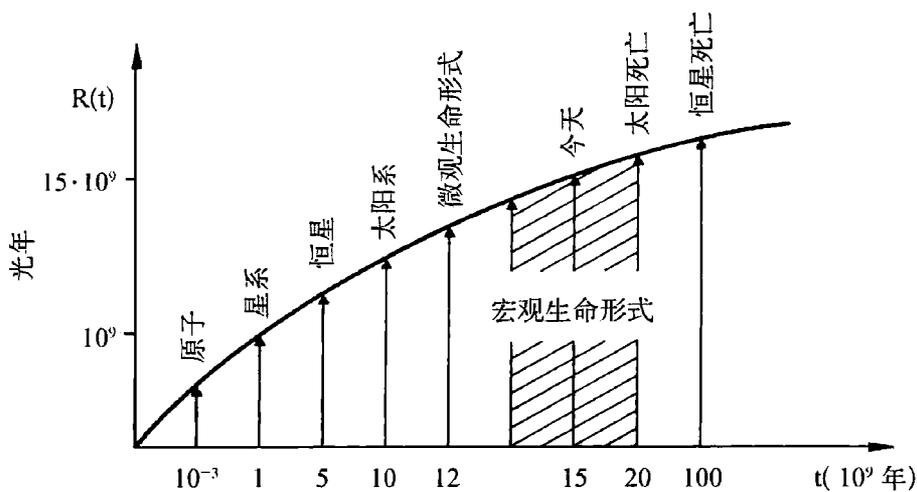


图 2.29 宇宙中从基本粒子到星系的结构多样性的形成^[2.48]

图 2.30 随复杂性增减的物质进化^[2.51]

如果我们仅仅采取爱因斯坦广义相对论的经典原理,那么,如罗杰·彭罗斯和斯蒂芬·霍金从数学上证明的,宇宙演化的标准模型具有一个起始奇点,它可以被解释为大爆炸,即宇宙形成于一个数学点。但是,如果我们假定广义相对论(即爱因斯坦的引力相对论)和具有虚时间(而非实时间)的量子力学的统一,那么,如霍金已从数学上证明的,一个“平滑”而无任何开端的宇宙模型是可能的,它只是一种按照统一的相对论量子物理学的数学原理而存在。^[2.49]

彭罗斯与霍金的奇点定理始于空间小区域的预言,在其中空间-时间是如此弯曲,以至于重力变得无穷大。这类奇点的存在,例如以黑洞的形式,蒙受一种方法论上的不足:经典与相对论性的物理学定律不适用于无限曲率的区域,所以要及时预测事件是不可能的。当然,其后果是比预言混沌系统长远未来所遇到的指数式增长难度更具有戏剧性。那就是为什么哈特尔与霍金提出了无奇点宇宙模型的原因,其中量子理论与广义相对论被统一了起来,而且实时间轴被替换为虚时间轴(在实数与虚数的意义上)。^[2.50]在霍金模型里,与爱因斯坦相对论相反,三个空间轴和一

个复时间轴,导致一个无界无边的封闭早期量子宇宙。这个空间-时间不仅总是存在着,而且每个物理事件可以根据其定律进行解释。在这个模型中,以某种方式“开始”或者“被创造”的传统的万物概念在方法论上是不恰当的,而且被揭示为源自我们对日常经验的有限空-时方面的适应的人类想象。

霍金理论不仅在数学上是自洽的,而且至少在原理上是实验上可检验的。因而,它是科学的理论而不仅仅是猜测。在这个无奇点模型的可检验结果中是关于黑洞的预言,在黑洞中不仅所有光子世界线(“光束”)完全消失,而且被重新发射为大量可测量的辐射。由于在宇宙初始奇点的解释中,其原因存在于源自不确定度关系的量子涨落可能性。然而,辐射的黑洞会失去能量和质量。最终,它们将会解体,对于它们,其恒星史将被遗忘。在此,记忆鸿沟将出现在宇宙中。随着其星系结构的瓦解,一个无特色的宇宙将膨胀成为一个巨洞,被称为“宇宙阿尔茨海默病”。

从哲学上看,霍金没有开端的早期量子宇宙使我们回想起不可变存是的巴门尼德世界。但是,量子力学的不确定性原理意味着,早期的宇宙不可能是完全均匀的,因为那里必定有粒子的位置和速度的某些不确定性或涨落。因此,宇宙可能已经经历了一个由暴胀模型描述的快速膨胀的时期,经过很长时期才导致了我们的复杂的宇宙。假定了“平滑”时间而没有奇点的量子物理学基本原理,将巴门尼德世界的平衡打破了,使之转变成了一个进化的复杂的赫拉克利特世界。

赫尔曼·邦迪、托马斯·戈尔德和弗雷德·霍伊尔已经在1948年引入了一个没有开端、没有终结的“永恒”宇宙的宇宙学模型。这些作者不仅假定宇宙在所有时间都有空间的均匀性和各向同性(大爆炸标准模型的“宇宙学原理”),还假定了时间的均匀性和各向同性:他们的“完全宇宙学原理”提出,宇宙不仅在所有的点和所有的方向,而且在所有的时间

上,从整体看都是相同的,从而导致了一个稳恒态模型。按照哈勃,在红移和膨胀星系的距离增加之间有一种相关性。因此,如果要每个适当单位体积中的平均星系数保持不变,就必须形成新的星系以填补坐标网格同时变宽时出现的空穴。稳恒态宇宙学的一个特设假设,是物质的连续创生的必然性。

在最近的准稳恒态宇宙学中,物质偶然、非局域创生这一奇怪的假设,是用宇宙所有地点和所有时间中都有新星系的局域诞生来进行解释的,局域大爆炸的条件被假定在老星系的超质量中心得到实现。红移也被看作是标志了星系的年龄。在全局大爆炸以后相继出现基本粒子、原子、分子、星系、恒星等的均匀进化(图 2.29),被没有总开端的也没有终极的自催化、自繁殖的宇宙所替代,这里只有星系的局域诞生、成长和死亡。在此情形,老的正在死亡的星系创造出新的星系物质,犹如承载新生命种子的植物和有机物。宇宙动力学将是巨大而永无终极的非线性的物质循环过程。^[2.49]

然而,量子力学定律为逃离我们宇宙的宿命打开了漏洞(“虫洞”)。根据广义相对论,时间旅行不可能快过光速。由于光在引力场中被弯曲,时间旅行者在时空中必须以受到光速限制的高速穿越弯曲的路径。因此,为了克服时空受到引力场的干扰,时空区域必须用大绕弯路来探索。根据海森伯不确定性原理,量子涨落可以在时空中打开短命虫洞。所以,量子力学定律使得虫洞被用作折叠区域之间逃离捷径的想法至少是可以想象的。然而,如果我们的宇宙不是独一无二的而是与分形的多宇宙(fractal multiverse)缠绕一起,连同许多其他的分岔宇宙,正如安德烈·林德的膨胀理论所提出的那样,那么虫洞可以被用作脱身路径,以逃离一个随着宇宙阿尔茨海默病并由于丧失能量而日益不利于生命的宇宙。

从神学的角度看,这些宇宙模型并不需要一个造物主,因为它们的世界只不过已经是而且还将是自包容和自组织的,没有起点也没有终点。

从数学的角度看,这些模型可以是非常优雅的。但是从方法论的角度看,我们必须断定我们还没有一个结合量子力学与相对论引力的完整而且自洽的理论,可解释复杂性不断增长着的物质演化。因此我们只能根据引力场确信某些属性,如此这般的统一理论是可能的。今天,由着弦理论的不同研究进路,以期在基本粒子的亚层次上达到这种统一。如果引力相互作用、强相互作用、弱相互作用以及电磁相互作用的所有类型基本粒子都由振荡弦产生,那么甚至有机会避免老龄化宇宙黑洞中信息的最终丧失:信息可能用物质亚结构上更高维弦的振动膜(vibrating membrane)来存储。[2.52]

2.5 纳米世界和自建构材料的复杂系统

在物质的演化中,从基本粒子层次到星系的宇宙结构都可以观察到自组织过程。它们不仅从认识论的视角看是有意义的,而且对于材料与生命科学中的应用也是有意义的。在材料科学与生命科学的边界,超分子系统扮演着极端重要的角色。这种情况下,分子自组织意味着分子在平衡条件下自发联合成为在 $1\sim 10^2$ 纳米($1\text{ 纳米}=10^{-9}\text{ 米}$)范围内的稳定而且结构上充分确定的聚集。

纳米结构可以看作小的、普通的、或是大的,这取决于相关学科的视角。对于化学家而言,纳米结构是数量从 10^3 到 10^9 个原子、分子量从 10^4 到 10^{10} 道尔顿的分子聚合物。因此,在化学上它们是巨大的超分子。对于分子生物学家而言,纳米结构具有从蛋白质到病毒以及细胞器等普通物体的尺寸。但对于材料科学家和电子工程师而言,纳米结构是当前微观构造物的极限,因而是相当的小。[2.53]

在纳米科学创始之初就有一位天才物理学家的远见。在题为《底部

还有很大空间》，理查德·费恩曼宣称：

以我所见，物理学的原理并不排除逐个原子操作事物的可能性。对于物理学家而言，化学家所提出的任何化学物质在原则上都是可能合成的……怎么做？把原子放进化学家所说的位置，这样你就制造了那种物质。如果我们在原子层次观察我们正在做或将要做的事情的能力得到根本开发——这种开发我想是不可避免的，化学和生物学问题将得到极大的帮助。^[2.54]

在20世纪50年代末，费恩曼正式宣布了他关于纳米世界的物理学思想。这种对新世界的信念需要新的观察与测量仪器来证实。进入80年代以来，人们使用扫描隧道显微镜可以实际探索纳米世界了。到80年代末，埃里克·德雷克斯勒描述了技术应用的革命图景：

自然界显示分子可以充当机器，因为活物就是以此类机器的方式来工作的。酶就是制造、打开、重组使得其他分子结合起来的键的分子机器。肌肉是由纤维拉动互相传过的分子机器驱动的。DNA充当数据存储系统，向分子机器（制造蛋白质分子的核糖体）发送数字指令。而这些蛋白质分子又反过来构成了上述大多数分子机器。^[2.55]

采用纳米技术，原子将能够以类似在活有机体中发现的过程那样的方式特别地放置和连接。诸如植物和动物等复杂有机体，在细胞和亚细胞层次上使用分子机器来制造和维修。一个细胞可以看做是纳米机器的工厂，包含蛋白质、核酸、脂肪、多糖等分子原型。它们被用在能量生产、信息处理、自我复制、自我修复以及搬运。例如，一个核糖体是一种细胞

纳米机器,它从 RNA 链解读信息来构造蛋白质的氨基酸。这让我们想起汽车厂中采用机器人的汽车装配生产。生物学的微观有机体已经被理解为纳米机器驱动和控制的细胞系统。例如,类似大肠杆菌的细菌使用鞭状尾巴在流体中四处移动。尾巴就像由生化纳米机器驱动的螺旋桨。膜中由蛋白质构成的这些纳米机器产生出鞭状尾巴的旋转。它们使用类似电动机的转轴和转子。但纳米机器与电动机的相似只是用来说明问题。一个生化纳米机器并不用电流来产生磁场;它以生化程序改变分子形状,例如分解 ATP 来旋动转轴。[2.56]

遗传工程和计算机编程已经开始启发新材料的研发。使用细菌尺寸的特殊装配设备,纳米技术应该能够对分子结构进行精确控制和快速操纵。快酶几乎达到每秒处理百万个分子,甚至没有传送器和动力驱动机制来将新分子推进旧分子刚刚释放出来的空间。德雷克斯勒设想了一种装配臂,长度仅有人手臂的五千万分之一,其往复移动也相应地快五千万倍。根据费恩曼的设想,这样的机器选择性地使用黏性操纵臂能够抓获个体原子,然后像乐高积木那样把那些原子插在一起直至产生化学键。沿着计算机编程的路线,人们会期待通用化学合成器像通用计算机那样用纳米技术起作用。在电脑屏幕上建模出所需要的分子,然后由适当的装配器来实现所需物质的批量生产。也许某一天,细菌尺寸的特殊设计的纳米设备将能够进行编程以用来摧毁动脉噬菌斑或癌细胞,或用于修复老龄引起的细胞损伤。它们能够被注入身体并通过某种诱引来自我解体或整合进入身体细胞当中。最后,似乎还是科学幻想的是,分布于整个大脑的智能纳米设备将能够进行思想内容的复制和心智上载,因而可以把个人的人格和记忆的备份放在存储器里,或者甚至以自然创造的人工智能的形式运行。

纳米结构是明显存在于固态物理、超分子化学以及分子生物学之间界面的复杂系统。由此可以断定,对纳米结构的探索将能够为生命的涌

现以及新材料的构造提供线索。然而,纳米结构工程学不能以传统的力学建构方式来掌握。没有人造工具或机器能够把纳米结构的构件像钟表、马达或计算机芯片的零件那样装配起来。因而我们必须理解自然界纳米结构所采用的自组织原理。那么,我们只要安排适当的约束条件,纳米结构的原子要素就会以自发的自建构方式把自己联合起来:无需任何人类工程师的操作,要素就会自行调整自己的位置以达到热力学最小值。

在历史上,超分子相互作用的想法可以追溯到埃米尔·费雪(1894)的著名隐喻,他把分子的选择性作用描述为锁钥原理。今天,超分子化学已经远远超过了其起源的思想。分子自装配结合了共价与非共价化合的多种特点,制造更大而且结构充分确定的原子团。相对于典型共价键以及相应的热能,单个范德瓦耳斯相互作用和氢键的力量是比较弱的。所以,为了达到分子在自装配聚集体里的稳定性,必须存在许多弱的非共价作用。在生物学,许多纳米尺度的结构(例如蛋白质和病毒)的复杂系统都是自装配形成的。生命系统把许多化学实体间的弱相互作用加总而制造了更大的实体。人们如何才能制造具有生物结构的尺寸和复杂性的结构,而不用生物催化剂或在基因里编码的信息设备?

许多非生物系统也显示了自组织行为,并进一步提供了有用互动的实例。分子晶体是自组织结构。液晶是介于晶体和脂质之间的自组织的有序相。胶束、乳胶以及脂质呈现种类繁多的自组织行为。一个例子是产生分形序的分子分岔超结构的级联聚合物。^[2.57]它们的合成是基于树形的构造设计。所以,这些超分子叫做树状分子(dendrimer,源自希腊语表示“树”和“聚合物”的词“dendron”)。树状分子的生成是采用单体添加的两个基本步骤。发散的建构从核心开始,通过数量越来越多的重复分岔向外扩散。收敛的建构从边缘开始,通过一定数量的变换向内建造。化学反应中心从中心转换到边缘,生成一个围绕中心的分岔分支网络。分岔指数式地增长到最大尺度的临界状态。它们产生了能够包容较小分

子的类似分子海绵体的分形结构,较小分子可以为了医学用途而通过受控方式弥散。

洞穴状超分子的例子是巴克敏斯特·富勒烯(buckminsterfullerene, 简称富勒烯,亦称巴基球),形成大碳球。^[2.58]这些复杂簇群的稳定性来自其高度的几何对称性。富勒烯的名字来自美国建筑师理查德·巴克敏斯特·富勒(1895—1983)所建造球形大厅的网格网络。60个碳原子的 C_{60} 簇有着高度理想的五角形原子对称结构,形成一个完全封闭的球面。

可以用化学模板和矩阵来排列洞穴状超分子以产生复杂分子结构。通过自装配获得了许多尺寸上接近于小蛋白质的巨簇。图 2.31 显示通

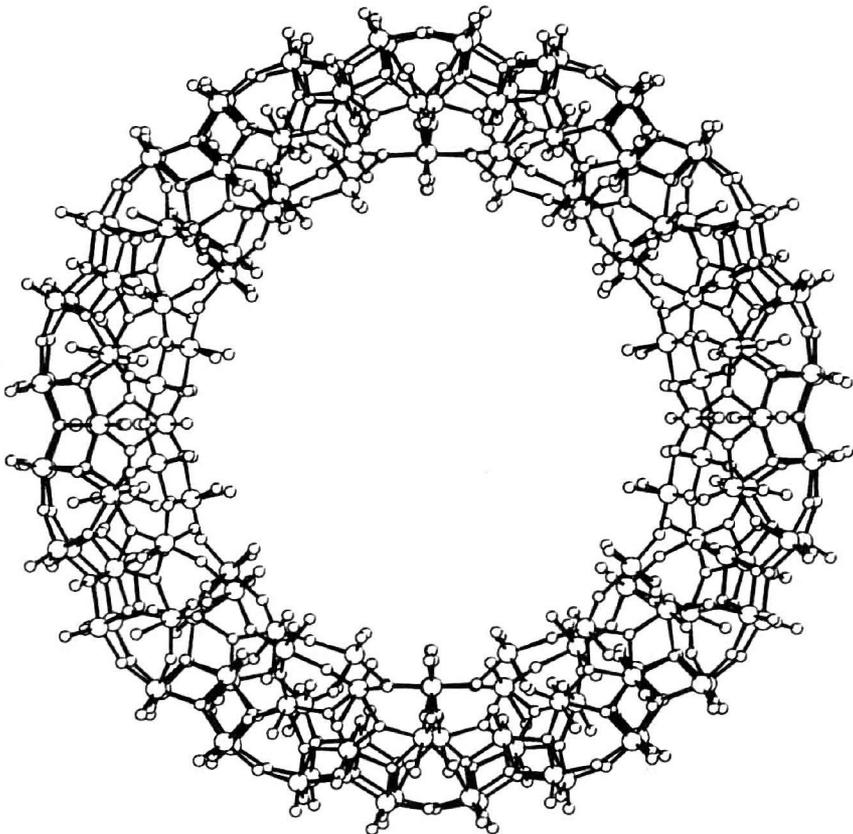


图 2.31 巨大的超分子簇(“大轮子”)的球棍模型:
一个复杂近平衡系统的例子^[2.59]

过X射线结构分析刻画的最大离散簇(700个重原子)的球-杆模型。这个簇包含了154个钼、532个氧、14个氮原子,其相对分子量大约为24 000。这个高度对称的“大轮”由阿西姆·米勒及其合作者合成。^[2, 59]巨簇可能具有罕见的新奇结构和电子特性:存在不同磁化强度的平面,这于特定固态结构是典型的,并对于材料科学具有重大意义。一个显著的结构特性是在巨簇内部出现一个纳米尺度的腔体。模板在这里的用途和适当分子排列的选择,让我们想起费雪的锁钥原理。

分子腔体可以用作化学药品或者甚至需要在人体内输送的药剂的容器。出现在许多高级有机体中的储铁蛋白是一种铁蛋白。这是一种不寻常的主客系统,包含着一个有机的主人(一个反蛋白质)和一个可变的无机的客人(一个铁核)。根据外部的需要,铁或者被这个系统排除出去或者被吸收进去。诸如多金属酸盐的复杂化学聚集物被频繁发现是基于正多面体,例如理想固体。然而它们的群体电/磁特性无法还原为其构件的已知特性。根据“从分子到材料”的行话,超分子化学是应用保守自组织“蓝图”在纳米尺度上构造出新奇催化的、电的、电化学的、光学的、磁的以及光化学的属性的复杂材料。多属性材料是极其有趣的。

纳米世界的探索以及纳米技术的应用取决于更好的观察和测量仪器。扫描力显微镜是扫描隧道显微镜的更进一步发展,可以像自来水笔那样写下纳米尺寸的分子结构。薄层的硫醇分子可以用作“纳米墨水”。在一个微小水滴里,硫醇分子把自己组织成单层。几百个原子的纳米晶体能够把自己与镉离子、硒离子以及有机分子结合成为球状结构(图 2.32)。在紫外线里它们发出带有特定颜色的荧光。所以,它们被用作诸如分子、细胞以及医学物质的标记(“量子点”)。碳分子能够根据某种催化剂和模板把自己组织成为直径1纳米的细管。其键的对称结构导致了巨大的硬度和韧性。碳纳米管可以用作超越硅技术极限的微芯片的导体。

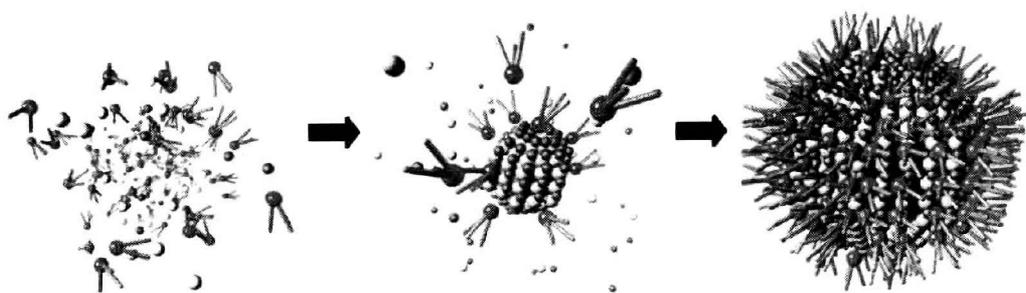


图 2.32 自组织的纳米晶体(“量子点”)[2.60]

超分子晶体管可能是引发化学计算机研发的新的革命性步骤。实际上,在电子系统中有种朝着纳米结构发展的强烈趋势,可能实现更小、更快的器件和高密度信息存储。但人们也能够想象纳米结构的非电子应用。它们可以用作微型传感器中的组件或类似生命系统中的酶和受体的催化剂和识别元件。在自然界的演化中,非常巨大的复杂分子系统也是根据基因指导的逐步程序来产生的。纳米化学的保守自组织过程则是非基因控制的反应。只有保守与非保守自组织的巧妙结合才能够开启基因出现之前的前生物进化。然而甚至在复杂有机体的进化当中,保守自组织也是必定发生了。一旦能量与物质输入停止或者变化(例如,激光,或BZ反应),开放的(“耗散的”)物理化学系统就会丧失其结构。有机系统(比如细胞)至少在相对较长的时间内更能保守其内在结构。另一方面,它们在特定时间段里需要能量和物质以保持其结构或多或少地远离热平衡态。在人类的技术演化当中,保守与耗散自组织原则再次被发现并打开了技术应用的新路子。

复杂系统方法使工程师能够赋予材料越来越多活机体的特性。对变化环境的自我调节和自适应是活系统广为人知的能力。可以把它们看作是变化环境中自组织开放系统的特定形式。同理,工程师旨在创造能够感知其自身状态、环境状态并做出响应的复杂材料系统。惊人的例子有能够在桥塔倒塌之前检测和抵抗腐蚀的桥梁材料,能够抵抗地震波而让自己屹立不倒的建筑,以及能够对危险性材料疲劳做出自发反应的飞机蒙皮。

致动器是能够根据变化的系统状态而改变其特性的材料。^[2. 61]例子是压电陶瓷和聚合物,其作用或者是压力感应器或者是机械致动器。它们的晶体或分子结构的电极性使它们能够把施加在它们之上的机械压力转化为电流,或把电激励转化为振动。压电聚合物可以嵌入机械臂的表皮以得到高度的敏感性(例如,破译盲文)。

其他例子是所谓形状记忆合金,可以用作致动器。在某个相变温度控制值之下,形状记忆导线将会获得它被弯制的任何形状。当导线被加热到相变温度以上,它会回归原状。工程师们提议将形状记忆金属以其低温形状嵌入一个材料系统。一旦加热就会产生一种力。当合金晶粒中的原子被压入不同几何排列之间的连接时,发生了压力生成转换。抗损伤桥梁或机翼将是这些控制结构的可能应用。

有的致动器材料甚至能够从液态到固体可逆地转变它们的机械属性。它们包含悬浮在诸如树脂油的液体中的陶瓷或聚合物可极化的细微粒子。一旦施加强电场,这类液体会把自己组织成为细丝和网络,把材料硬化成为凝胶状固体。撤去电场,组织随即消失,材料重新回归液态。其他应用是充当传感器材料的光学纤维。这些发丝细纤维的属性受到温度、压力以及材料内部物理或化学条件变化的影响。它们被看作“玻璃神经”,提供材料内部“健康”状况的光学信号。

有些时候,现代材料科学家把他们的系统称为灵巧甚或“智能”材料。他们的研究目标有时被称作“非生命世界的生命”。^[2. 62]从哲学的角度看,这个口号似乎是回归炼金术传统。一些科学哲学家也许会批判材料科学家的词汇是不科学的万物有灵论。然而,从复杂系统的角度看,这有一个硬的科学内核。自组织特性并不必然与以神经系统为基础的有意识行为结合在一起。它们甚至不必依靠生物催化剂或编码在基因里的信息设备。因此,在所谓的生命与非生命世界之间并没有断裂。在物质的演化中,我们观察到具有多少不同组织化程度的系统。显然,在理解它们全

部潜力方面我们只是迈出了第一步。

关于技术的未来,提出了一些问题,自我复制纳米机器人的愿景有多现实?它们将等价于新的寄生生命形式。致病细菌和癌细胞是自复制生物系统的危险例子。带有自复制比特串的计算机病毒是人工自组织系统的第一个也是最不值得称道的一个实例。太阳微系统公司(SUN Microsystems)的首席科学家比尔·乔伊已经提出了繁殖纳米机器人的社会意义。^[2.63]乔伊说,在人工进化当中,敌对作用者可能演化到纳米尺寸的具身生化作用者群体里面。作为自主自利的存在,它们可能攻击人类生命的基础。因发现了富勒烯而获得诺贝尔化学奖的理查德·E·斯莫利摒弃纳米机器人失控的观念。^[2.64]循着费恩曼的标题“底部还有很大空间”,斯莫利认为,采用纳米尺寸的原子仪器对原子进行逐个操纵并不需要多少空间。他把这类约束称为又胖又黏的手指问题:操纵“手指”的纳米机器人不仅太大(“胖”)而且太黏,因为它们的原子会与正在搬运的原子黏在一起。斯莫利的手指图景指出了这样的事实,我们今天的技术在纳米尺寸没有对应物。在活系统中,进化已经发展出生化纳米机器的实例,而且没有理由相信在不同材料的地基上没有其他实例。然而技术战略必须遵循适当约束之下自组织的自然观念,而不是用纳米尺度的镊子夹起并放置原子这种过去流行的机械观念。我们不应寻找装配者,而是自装配者。从计算机科学的角度看,任何结构种类(包括它自己)的通用构造理念是不陌生的。通用图灵机(对比第5.2节)已经被我们的通用计算机实现了,能够处理所有各种程序。为什么在纳米尺度就不行呢?

2.6 时间序列分析、分形、多重分形

理解自然界中的复杂系统和非线性动力学似乎要产生物质演化的适

当模型。但我们如何能够确定我们的模型是正确的？非线性动力学的数学理论区分了不同类型的时间依赖方程，这些方程产生不同类型的行为，例如不动点、极限环以及混沌。在应用上，它们涉及到微观、纳米以及宏观世界中的自然系统。我们利用对特定机制的理解写出适当的动力方程。例如，洛伦茨对气象动力学的理解导致他写出著名的非线性方程，这个方程也被熟悉那些领域的人们应用到生物和经济系统。

从方法论的角度看，这是自上而下的建模方法：我们从自然系统的一个假设数学模型出发，通过求解某些初始条件和次级条件下的相应的动力学方程来推演自然系统的行为。这些解可以几何方式表示为动力系统相空间中的轨迹，并以不同类型的吸引子进行归类。它们预见了我们特定研究领域要观察的行为类型。尤其是，如果满足某些标准，混沌动力学是可以从给定方程推导出来的。然而在实践上，我们必须采用相反的、自下而上的方法。对一个未知研究领域，物理学家、化学家、生物学家以及医生从数据挖掘开始着手。他们获得的只是一个有限序列的测量数据，对应于动力系统的时间依赖事件。他们必须从这些数据重建系统的行为，以猜想其动力学方程的类型。因此，自下而上的探究方式被称为时间序列分析。^[2.65]在许多例子里，我们从产生数据的系统那里得到知识。那么时间序列分析就是旨在构建一个黑箱，以测量数据作为输入，而提供一个描述该数据的数学模型作为输出。在实践中，现实的研究策略是采用建模的自上而下进路与时间序列分析的自下而上进路相结合。

自下而上进路始于作为测量结果的数据，而不是模型的理想化变量。测量近似于动力模型的变量，其差异叫做测量误差，可能是由于多种噪声因素所导致。测量噪声是指数据波动，偏离充分定义的平均行为而且随机出现。测量噪声可由真实系统的内在行为引起，系统的外部影响也会影响其噪声类型。为了简化建模的复杂性，必须把许多外部影响的变量排除在外。外部对系统实际行为的影响，被看作是影响模型之测量变量

的随机噪声。

在经典测量理论中,测量误差是用诸如相关系数和自相关函数等统计方法来分析的。但这些标准步骤没有办法区分线性模型与非线性模型的数据。在非线性数据分析中,测量数据被使用在重建的相空间里重建系统动力学的第一步。一个简单例子是我们在第 2.4 节讨论的逻辑斯谛映射的有限差分方程:非线性方程 $x_{t+1} = f(x_t)$ 描述 x_{t+1} 与 x_t 之间的关系。在图 2.24 中,坐标系被标为 x_{t+1} 对 x_t 。如果没有测量噪声,我们在时刻 t 能够识别测量数据 D_t 和变量 x_t 。那么不奇怪,测量数据 D_{t+1} 对 D_t 的散点图提供了与模型一样的关系。

如果数据从连续时间动力系统是以微分方程而不是有限差分方程获取的,那么必须从连续系统的测量数据重建相应的相平面或者相空间。启发性的观念是,重建的相空间中的测量数据显示与动力模型相空间中的轨迹一样的动力行为。比如,考虑具有二阶微分方程 $d^2x/dt^2 = -bx$ 的谐振子产生的数据。由变量 x 和 y 规定相应的相平面,并由两个一阶微分方程 $dx/dt = y$ 和 $dy/dt = -bx$ 决定。我们假设一个时间序列 $D(t) = x(t)$ 被测量而没有测量噪声。为了从测量数据重建相平面,我们记得系统在任何时刻 t 的状态表示为相平面中的位置 (x, y) 。测量的时间序列只给我们产生每个时刻 $D = x$ 的一个坐标。但我们可以从相空间的一阶微分方程计算另一个坐标 $y = dD/dt$ 。一条 dD/dt 对 D 的曲线就产生了一个连续相平面。在测量数据 D_{t+1} 对 D_t 的重建离散相平面上,其轨迹显示了与模型的连续相平面一样的循环行为。

一般地,相平面上的动力学取决于一对耦合微分方程 $dx/dt = f(x, y)$ 与 $dy/dt = g(x, y)$ 。有时我们只能测量 x 。但接着我们可以计算 dx/dt 从而得到 $f(x, y)$ 的值,这也包含着关于 y 的一些信息。要在 (x, y) 相平面中重建轨迹的动力学,这个信息通常是充分

的。要算出时刻 t 上 x 的一阶导数,可使用众所周知的公式:

$$dx(t)/dt = \lim_{h \rightarrow 0} [x(t+h) - x(t)]/h$$

没有噪声的一条时间序列测量 $D(t) = x(t)$ 由离散时刻 $t=0, 1, 2, \dots$ 上的测量数据 D_0, D_1, D_2, \dots 组成。时刻 t 上 x 的导数可近似为相应测量数据之差:

$$dD_t/dt = [D_{t+h} - D_t]/h, \text{ 其中 } h=1, 2, \dots$$

h 的最小有用值是 1。但有时需要选择一个更大的时滞 h 。通过绘制 D_{t+h} 对 D_t , 我们往往可以从 D_t 测量来重建系统动力学的相平面,而不用对模型的变量 y 进行直接测量。在这个例子里,重建的相平面 (D_t, D_{t+h}) 与动力系统的原始相平面 (x, y) 是相似的。

产生混沌的非线性动力系统必须由至少三个方程决定。作为一个例子,洛伦茨吸引子(图 2.21)在相空间里用三个坐标 $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $z(t)$ 来产生,决定于三个非线性微分方程。图 2.33a 显示洛伦茨系统测量数据 D_t 的一个时间序列。只有当一个变量 $D(t) = x(t)$ 可测量,在 (D_t, D_{t-h}, D_{t-2h}) 相空间(图 2.33c)可重建一个洛伦茨吸引子,与 (x, y, z) 相空间(图 2.33b)的原始洛伦茨吸引子具有极大的相似。总之,一个时间序列可用 p 维坐标 $\mathbf{D}_t = (D_t, D_{t-h}, D_{t-2h}, \dots, D_{t-(p-1)h})$ 与时滞 h 嵌入为 p 维空间。根据塔肯斯嵌入定理,^[2.66]重建的动力学在几何上类似于原始的连续时间系统和离散时间系统。通过嵌入时间序列而产生的点序列被称为时间序列轨迹。

在实践中,有关混沌动力学的决策是相当困难的。我们如何决定一个时间序列测量数据不是由噪声不规则性而是由高度结构的混沌吸引子所产生的?混沌吸引子取决于相空间有界区域的轨迹,具有非周期性的行为以及对初始条件的敏感依赖。这些判据——决定论、有界性、无周期

性以及敏感性——可以用几种时序分析技术来检验。当未来的事件在因果上被以前的事件设定,那么一个系统可以称为确定性的。例如,当 $f(x)$ 对于每个 x_t 值都有唯一取值而且未来值 x_{t+1} 可以用函数 f 从过去值 x_t 计算出来,那么有限差分方程 $x_{t+1} = f(x_t)$ 就是确定性的。

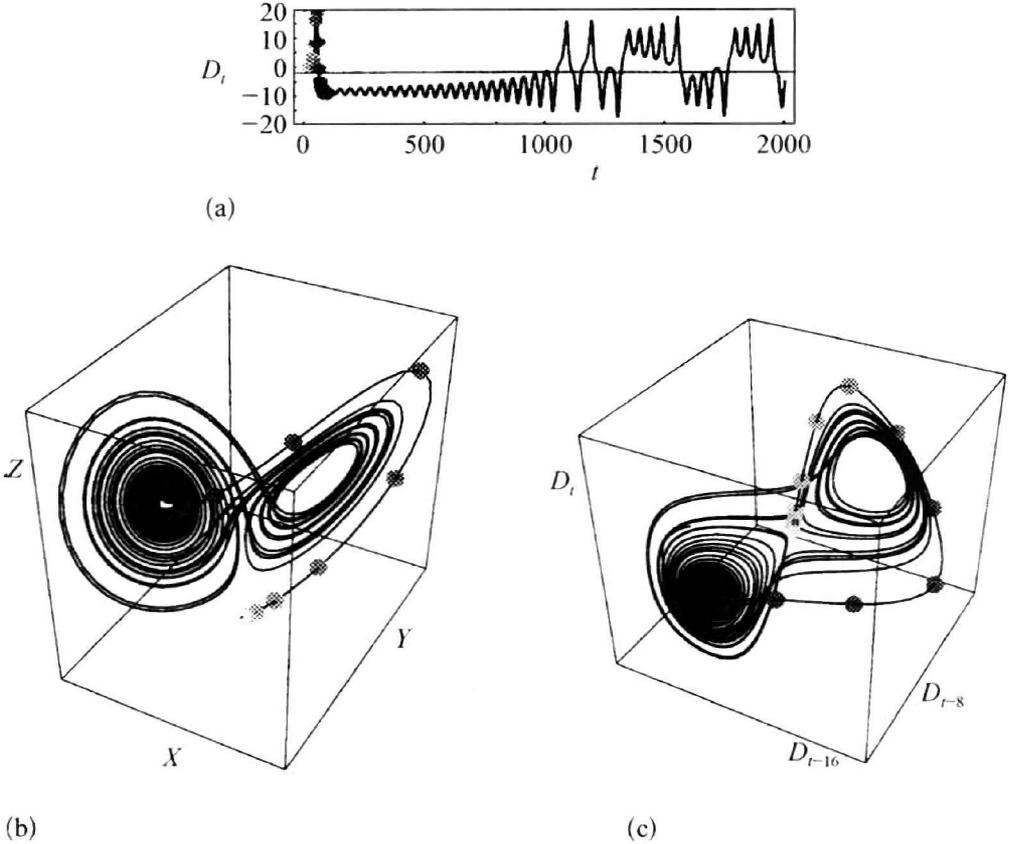


图 2.33 洛伦茨系统的时间序列与吸引子

(a) 洛伦茨系统的测量时间序列;^[2, 67] (b) (x, y, z) 相空间上的轨迹; (c) (D_t, D_{t-h}, D_{t-2h}) 相空间上于时滞 h 重建的洛伦茨吸引子的轨迹。^[2, 68]

我们如何能够确定过去事件 D_t 的测量值决定未来事件 D_{t+1} 呢? 我们假设在时间 T 进行测量, 可获得对时间 $T+1$ 上的值的预测。我们再次用前述步骤于时滞 h 在 p 维空间嵌入的时间序列。时间 T 上的嵌入点, 代表过去事件的测量值, 是 $D_T = (D_T, D_{T-h},$

$D_{T-2h}, \dots, D_{T-(p-1)h}$)。我们检查距离 D_T 最近点嵌入时间序列的有限剩余,叫做时间 c 上的 D_c 。 D_c 表示测量 D_{c+1} 的过去事件。当 D_T 逼近 D_c , 在确定性的动力学中测量值 D_{c+1} 就应该逼近于 D_{T+1} 。因此,预测值 D_{T+1} 就等于测量值 D_{c+1} 。预测值与 D_{T+1} 之差就体现了预测品质的预测误差。一种更有意义的决定论标志是采用多次预测误差的平均值。

如果动力学停留在相空间的一个有限范围或者随时间增长并不趋于 $+\infty$ 或 $-\infty$, 那就是有界的。在噪声的例子, 轨迹在相空间上无界扩展。混沌吸引子在相空间的某个区域总是有界的。然而在实践上, 测量数据理所当然总是在一个有限的范围之内, 因为物理的宇宙是有限的。所以, 测量数据的有界性是与稳态概念有关的。如果平均数和标准差在整个时间序列都保持一致, 这个时间序列是稳态的。无周期性, 意味着动力系统的状态从来不会回到先前的值。但状态值可能多少回到先前值的附近。所以, 无周期性是一个程度的问题。我们如何能够决定测量数据中的非周期程度呢?

我们再次把测量时间序列以时滞 h 嵌入到 p 维空间里。每个点 $D_T = (D_T, D_{T-h}, D_{T-2h}, \dots, D_{T-(p-1)h})$ 表示动力系统在时间 t 上的状态。两个状态之间的距离用时间 i 和 j 上的两点之间距离 $\delta_{ij} = |D_i - D_j|$ 来衡量(图 2.34)。如果时间序列是以时间 T 为周期, 那么状态值在 T 之后会多次重复。在这种情况下, 代表时间 i 和 j 的点之距离 δ_{ij} 对于 $|i-j|=nT$ 为零($n=0, 1, 2, \dots$)。周期性与无周期性的程度可以通过点 (i, j) 的递归图来研究, 如果 D_i 和 D_j 的距离小于给定距离 r 。

这样的图, 显示重建的轨迹如何再现或重复其自身。递归图上的点数, 显示轨迹在距离 r 之内回归先前值的次数。相关积分 $C(r)$ 定义回归线上点 (i, j) 的密度, 对于 $i \neq j$ 其被测时间序列 D_i 和 D_j 的距离接近 r

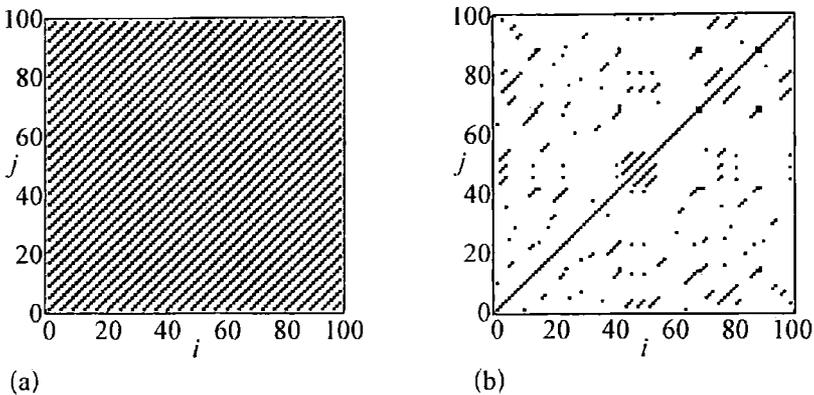


图 2.34 二次映射与混沌映射

(a) 二次映射 $x_{t+1} = 3.52x_t(1-x_t)$ ($p=2, r=0.001$) 具有周期性的递归图; (b) 混沌映射 $x_{t+1} = 4x_t(1-x_t)$ ($p=2, r=0.001$) 具有无周期性的递归图(b)。[2.69]

(图 2.34)。相关积分是混沌时序分析的一个有效概念。[2.70] 如果距离 r 增加,更多的点会以更高的密度 $C(r)$ 出现在递归图上。对于周期系统而言, $C(r)$ 的特征曲线是平坦的,对于混沌系统有较缓和的斜率,而对于随机系统则有较陡的斜率。

相关积分与分形维度概念之间有重要的关系(对比第 2.4 节)。考虑在二维平面(例如半径 r 、面积 πr^2 的圆)或三维空间(例如半径 r 、体积 $4/3\pi r^3$ 的球)与参考点距离 r 以内区域的散点图。总而言之,对于 ν 维空间里散落在整个物体上的点来说,与参考点之间距离小于 r 的点数与 r^ν 成正比。相关积分的引入是作为与递归图上参考点的距离在 r 之内的散点密度的量度。因此,整个 ν 维物体上散点的相关积分是与 r^ν 成正比的,即具有比例常数 q 的 $C(r) = qr^\nu$ 。 ν 维物体的相关维度 ν 可以通过对这个方程取对数来计算,即 $\log C(r) = \nu \log r + \log q$ 。要求得相关维度 ν ,我们可以绘制 $\log C(r)$ 对 $\log r$ 的曲线并且确定结果线的斜率。这个步骤也可以用来求得一个物体的分形维度。

在时序分析中,相关维数有时被用来求得吸引子。众所周知,混沌吸引子通常以分形维数自相似。如果一个时间序列产生于混沌系统,从测

量数据用嵌入而重建的时间序列轨迹与系统的原始吸引子具有相同的拓扑属性,只要嵌入维数有足够大。塔肯斯证明了一种为重构吸引子而求得合适嵌入维数的方法:如果原始吸引子有维数 ν ,那么维数 $p = 2\nu + 1$ 对于重构吸引子的嵌入空间是充分的。然而,这个方法没有提供求得混沌吸引子的步骤,因为其存在是为了从测量数据确定其维数而假设的。

刻画混沌动力学的另一种途径是测量它们敏感依赖初始条件的强度。考虑始于近乎相同初始数据的两条轨迹。在混沌动力学,只要初始条件有微小差异,经过很短的时间段之后就会在相空间中形成指数式迅速分岔的两条轨迹(图 2.35)。在这种情况下,难以计算长期预测,因为只能以有限精度来确定其初始数据。测量数据小数点后极小的数字偏差,可能导

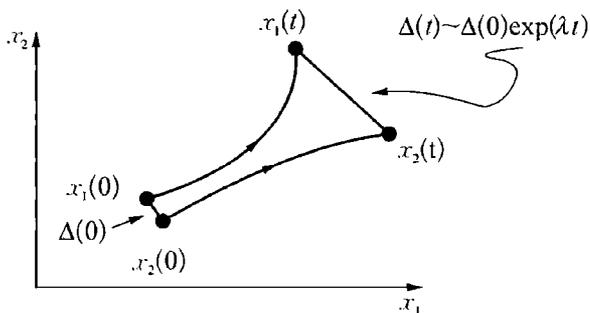


图 2.35 由李雅普诺夫指数 Λ 衡量的对起始条件的指数依赖性^[2.71]

致完全不同的预测。这就是为什么在一种不稳定和混沌的情形气象预报会失败。原理上,蝴蝶翅膀可能引起全球发展的变化。这种“蝴蝶效应”可以用所谓李雅普诺夫指数来衡量。轨迹 $x(t)$ 从初始状态 $x(0)$ 开始。如果它是指数式迅速发展,那么它就近似地由 $|x(t)| \sim |x(0)| e^{\Lambda t}$ 给出。如果轨迹被吸引子(例如稳定点或轨道)吸引,那么指数 Λ 小于零。如果它是发散的而且敏感于初始状态非常小的微扰,那么指数 Λ 就大于零。

我们考虑在相空间里有两个相邻位置 x_0 和 y_0 的有限差分方程 $x_{t+1} = f(x_t)$ 。重复代入函数 f , 我们得到 $t = 1, 2, \dots$ 时 $x_t =$

$f(x_{t-1})=f^t(x_0)$ 和 $y_t=f(x_{t-1})=f^t(y_0)$ 。如果位置 x_t 与 y_t 被迭代以指数式迅速分离,那么它们的距离为 $|y_t-x_t|=|y_0-x_0|e^{\Lambda t}$, 且 Λ 大于零。如果增长的 $t \rightarrow \infty$, 就有 $(1/t)|y_t-x_t|/|y_0-x_0| \rightarrow \Lambda$ 。如果轨迹的路径在有界区域内,指数式分离只发生在初始位置彼此相当接近的情况。在这种情况下,我们在确定增长的极限 $t \rightarrow \infty$ 之前减小差 $|y_0-x_0|$ 。那么轨迹 $x_t=f^t(x_0)$ 的李雅普诺夫指数就由常数

$$\begin{aligned}\Lambda &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \lim_{|y_0-x_0| \rightarrow 0} \ln |y_t-x_t|/|y_0-x_0| \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \lim_{|y_0-x_0| \rightarrow 0} \ln |f^t(y_0)-f^t(x_0)|/|y_0-x_0| \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln |df^t(x_0)/x_0| \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{i=0}^{t-1} \ln |df(x_i)/x_i|\end{aligned}$$

确定。

对于微分方程的连续动力系统,其轨迹是矢量 $x(t)$ 且有李雅普诺夫指数 $\Lambda = \lim \sup 1/t \ln |x(t)|$ 。李雅普诺夫指数提供了衡量一个动力系统相邻轨迹的收敛率与发散率的手段。对于 n 维系统, n 个李雅普诺夫指数 $\Lambda_1 \geq \Lambda_2 \geq \dots \geq \Lambda_n$ 描述了不同类型的吸引子。对于非混沌吸引子,我们可以区分渐近稳定平衡 $\Lambda_i < 0 (i=1, \dots, n)$, 渐近稳定极限环 $\Lambda_1 = 0$ 且 $\Lambda_i < 0 (i=2, \dots, n)$, 渐近稳定 2 维环面 $\Lambda_1 = \Lambda_2 = 0$ 且 $\Lambda_i < 0 (i=3, \dots, n)$, 以及渐近稳定 m 维环面 $\Lambda_1 = \dots = \Lambda_m = 0$ 且 $\Lambda_i < 0 (i=m+1, \dots, n)$ 。混沌系统必须有至少一个正的李雅普诺夫指数。在三维情形,混沌的唯一可能性是 $\Lambda_1 > 0, \Lambda_2 = 0, \Lambda_3 < 0$ 且 $\Lambda_3 < -\Lambda_1$ 。

动力系统可以根据吸引子按复杂性从不动点、周期性与准周期性直至混沌行为的增加来分类。这种吸引子分类可以用不同方法刻画,例如时间序列典型模式及其功率谱、相空间中的相图、李雅普诺夫指数、(分形)维数,以及它们信息流的量度(KS熵),这将在第5.3节详细讨论。表2.1列出这些动力学复杂性的等级概括,这是本书复杂动力探索方式的框架。

表 2.1 三维系统吸引子的动力复杂性^[2,72]

相图	时间-历史响应	功率谱	自相关	李雅普诺夫指数	(分形)维数	KS熵
				(-, -, -)	0	0
				(0, -, -)	1	0
				(0, 0, -)	2	0
				(+, 0, -)	$2 < h < 3$	$e_{KS} > 0$

其中最有一个概念是分形维数,即对一个物体粗糙度的量度。分形性似乎是实在的一个自然特征。岩石海岸线包含着峭壁和缝隙。表面粗糙的岩石遭受到侵蚀。考虑有机体的生长,例如肺气管的生长,重复分支的分形过程是动物发育的遗传法则的自然结果。在欧氏几何学中,

我们熟悉一维的直线和二维的平面。分形维的一个例子是科赫曲线(图 2.36)。为了度量它的长度,人们用物体(曲线)三分之一宽度的尺子开始。这把尺子对应于顶端表面上曲线内的每条线段。线段从内部测量曲线四次。然后尺子缩短到原始长度的三分之一,如图 2.36 所示。由于缩短后的尺子能够放入该曲线的更多“缝隙”,用这把尺子所量到的长度就比原来尺子量到的长度大得多(三分之四倍)。每一次状态的改变,所测得的长度就乘上这个分数(即三分之四)。那么分形维数就是 4 的对数与 3 的对数之比率,为 $1.2618\dots$ 这个“分形”数的直观含义是显然的:曲线是褶皱的,所以它比一维直线填充了更多的空间。然而,它又没有完全填充二维平面。

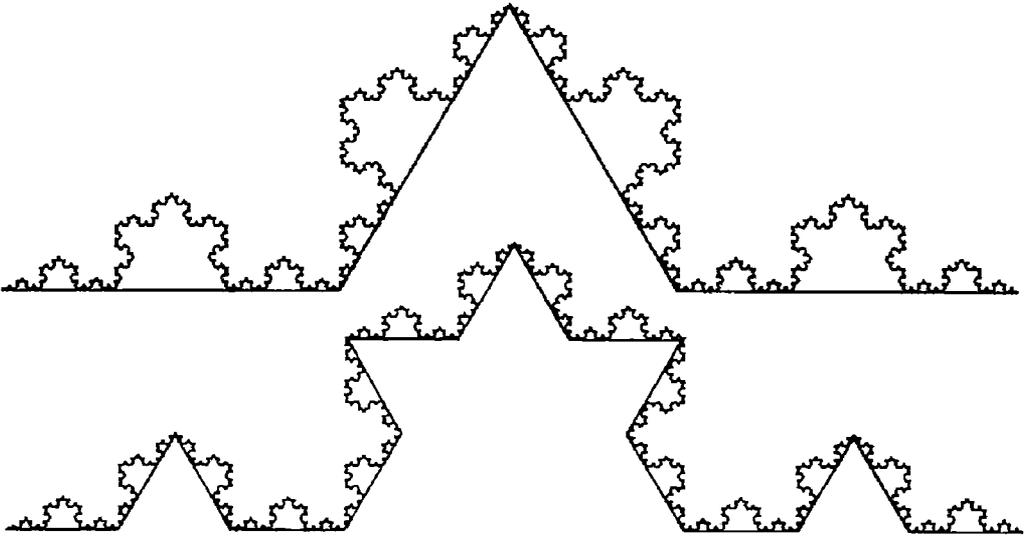


图 2.36 科赫曲线的分形维数

采用类似的递归步骤,我们可以建构希尔伯特曲线和谢尔平斯基曲线,自相似的图案以重复增加密度的步骤填充一个平面。这些曲线似乎不仅是一维的线条而是二维的平面。它们的维数是介于整数 1 与 2 之间的“分数”。这种分形维数可以描述为几何维数 D 的相似性。对于一个维数 D 的欧氏物体,边长 ϵ 物体的长度、面积、体积是正比于 ϵ^D 。例如,边长 ϵ

的正方形面积为 ϵ^2 ,立方体的体积为 ϵ^3 。对于自相似物体,测量其长度、面积、体积的一个办法是计数其自相似拷贝的份数。如果有 N 个拷贝每个具有边长 ϵ ,那么这个物体的长度、面积、体积与其维数相关: N 正比于 ϵ^D 。因此,可得 $D \approx \log N / \log \epsilon$ 。对于科赫曲线,其自相似拷贝数为 $N = 4$ 且其边长 $\epsilon = 3$ 。如果混沌吸引子的相图有一个分形维数(表 2.1),就被命名为“奇怪”吸引子。时间序列有时被刻画为不同尺度上的统计自相似性(例如,图 8.16)。所以,分形维数可能预示着混沌,但只是它出现并不表示混沌。

自相似的数学物体仅仅包含其自身的较小自相似拷贝。只有我们知道自相似拷贝的数目 N 以及与每个拷贝相关的原件尺寸 ϵ ,我们计算分形物体维数的步骤才管用。对于分形应用(例如三维世界中分形物体或真实物体的映射或图像)而言,我们需要更好的步骤来估算分形维数。以下步骤直接来自分形维数的定义。第一步,物体内部所有点被 $N(\epsilon_0)$ 或边长 ϵ_0 的立方体覆盖。这个步骤以边长 $\epsilon_1 = \epsilon_0/2$ 的平方或立方重复,接着以边长 $\epsilon_2 = \epsilon_1/2$,如此往复。通过这个步骤,我们获得一个取值 $\epsilon = \epsilon_0, \epsilon_1 \dots$ 的函数 $N(\epsilon)$ 。理论上,维数 D 被定义为 $\lim N(\epsilon) = k \cdot \epsilon^{-D}$, k 为常数。实践中, D 可以估算为 $D \approx \{\log[N(\epsilon_{i+1})/N(\epsilon_i)]\} / [\log(\epsilon_i)/(\epsilon_{i+1})]$ 。然而,平方或立方不应小于作为物体的构件的细胞或微粒。^[2.73]

直观上,分形是一种其部分反映整体的图案或物体,只是尺度上缩小了而已。反之,多重分形在同一个物体上不只有一个尺寸比例。物体的有些部分缩小得较快,有些部分则较慢。比起分形,多重分形更类似于真实自然物体的多个侧面发生作用的方式。在地球表面上种种不同的簇群都是以多重分形的方式形成的;它们并不总是以同样的方式分布与缩放比例。在暴雨天,形成强风簇的风速被分散为微风。人们可以把多重分形看作是由不同分形集合的无限层级所组成。如图 2.37 所给出的例子,

该图显示分层湍流垂直截面的层级结构。湍流的通有多重分形过程，是一个由许多不同漩涡分布的元胞系列串。多重分形在数学上用两个群定义：第一个决定其统计学(更准确说，它们作为尺度的函数而变化)，而第二个定义其自身尺度的概念。^[2.74]

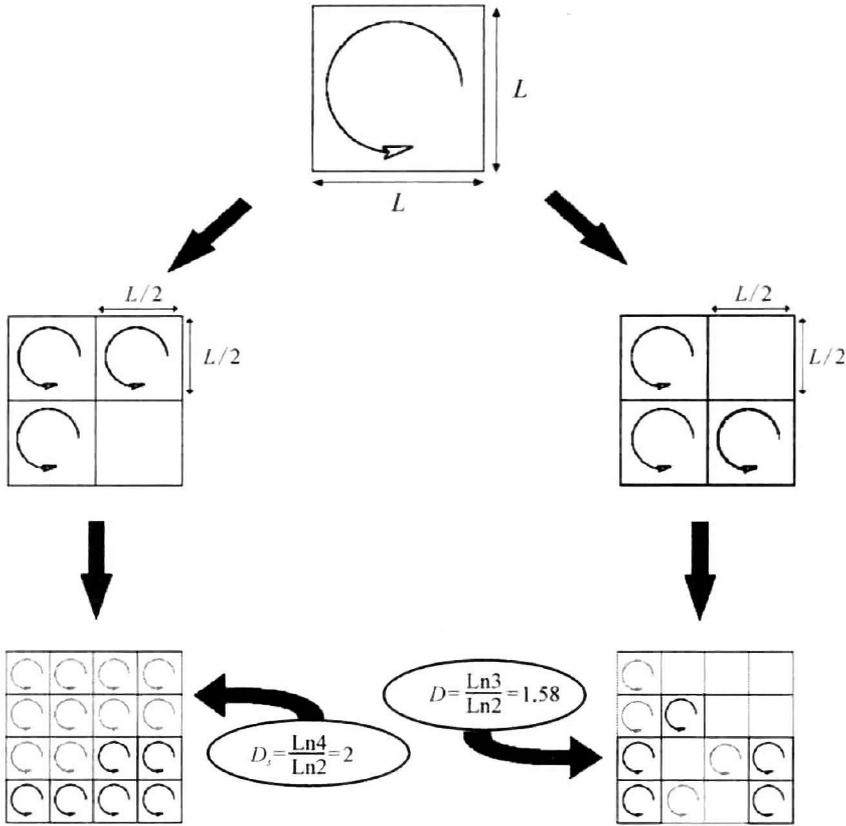


图 2.37 湍流的多重分形过程

复杂系统和 生命进化

如何来解释生命达尔文进化中的有序的形成？在哲学史和生物学史上，生命用指向自然的某种目标的非因果性力（“生命力”）来目的论式地解释。康德有句名言是：“解释青草叶片的牛顿”还没有出现（第 3.1 节）。玻耳兹曼已经表明，活的有机体是开放的耗散系统，它并不违反热力学第二定律：对于解释生命有序的出现，麦克斯韦妖是不必要的，尽管按照热力学第二定律，封闭系统中不断的熵增加将导致无序。然而，从玻耳兹曼到莫诺的统计解释中，生命的出现仅仅是某种偶然的事件，是宇宙边缘的某种局域宇宙涨落的结果（第 3.2 节）。在复杂系统框架中，生命的出现不是偶然的，而在耗散自组织的意义上是必然的、合乎规律的。有机体和物种的生长的建模，是作为远离热平衡的相变中，由分子、细胞等的非线性（微观）相互作用引起的宏观模式的涌现（第 3.3 节）。甚至生态群体也被理解为复杂的耗散结构，发生着植物和动物的非线性相互作用以及它

们与环境的代谢作用(第 3.4 节)。在生命科学中,生理学、形态学或生态学变量之间的关系常常引起幂律,有着其底层的分形过程。复杂器官(如肺和心脏)显然都是分形结构的。而幂律是复杂性的重要判据(第 3.5 节)。因此,斯宾塞认为生命由复杂性增长的结构进化来决定的思想,也可用复杂动力系统进行数学处理。“生命中的牛顿”出现了吗?复杂动力系统理论并没有解释什么是生命,但是它可以为生命形式在一定条件下是如何出现的建立模型。因此,我们的存在,对我们来说如同对于我们的先人一样仍然是未知的,即使我们最终将建立生命的复杂动力学的模型。

3.1 从泰勒斯到达尔文

在讨论复杂系统和生命进化之前,我们先回顾一下早期的生命哲学。^[3.1]一个惊人的事实是,现代生态学的许多方面使我们回想起早期的自组织思想。在神秘的解释中,生命被理解为生长和衰亡、出生和死亡的循环运动。动物和人类,不过是在适应诸如潮起潮落、季节交替、星移斗转、丰产歉收等自然大循环而生存。大自然自身表现为一个巨大的有机体,人类被看作部分包含在其自然的发展之中。自然宗教的神话及其仪式,用来向自然力祈祷,以与自然的秩序和谐地生活。

当人们开始追问生命的基本原理时,当他们不再把妖魔和众神当做人格化的自然力量时,神话就被放弃了,而转向了自然哲学。在公元前 6 世纪,前苏格拉底的哲学家米利都的泰勒斯提出,水是万物的基本源泉。阿那克西曼德看来已经有了某些早期的进化思想:

最初的生命在湿元素中形成,带着有刺的外壳;随着年龄的增

加,它们爬进干元素中,所有的外壳都会脱去,很快就获得了另一种生命形式。^[3.2]

关于人的出现,阿那克西曼德表述了一种完全现代的概念。观察到人类的小孩需要长时期的照料和保护,他得出结论认为,如果他们总是需要那样,人类将就将不能生存。于是他们早期必定是不同的。恩培多克勒以熟悉的元素水、气、火和土的混合和转变来解释生命的过程。

这些生命的有机解释似乎对于那时的人们来说,在直觉上是有说服力的,与此不同,德谟克里特的原子论把生命归结为不可见的原子的相互作用被认为是相当抽象的。甚至人的意识和灵魂也用微小物质元素的微观相互作用来解释。于是,德谟克里特与其学派就不仅仅被攻击为唯物主义,还被攻击为无神论。柏拉图力图用几何图形和构造来给最初的物质元素及其结合建立模型。

从现代科学的观点看,德谟克里特的原子论和柏拉图的数学模型都是早期的还原主义生命纲领。他们力图将生理学和生物学过程归结成物理元素的相互作用。但是这种以僵死的几何图形或物质原子为基础来解释生命的变化和搏动的思想,必定被看作是完全不自然的、推测性的,远离了那时代的人们。总之,“真实”的生命显得是难以理解的“复杂”,而欧几里得的数学则过于“简单”。所以,欧几里得的数学保留给“月上”的恒星世界,而不适用于“月下”的尘世生命世界。

这就是亚里士多德的生命哲学开始的地方。柏拉图属于毕达哥拉斯传统,他从几何中取来概念;亚里士多德则从大自然中提出他的过程概念,他主要是基于生命有机体(如植物和动物)的功能作用。生命的过程和周期是我们日常经验中所熟知的。将世界的其余的未知的陌生的部分用人们熟悉的的东西来解释和比拟,这不就是极为明白的事吗?按照亚里士多德的理论,物理学的任务是对自然的复杂性和变化的原理及其功能

作出解释。用现代术语来说,亚里士多德拒绝了原子还原主义以及推测性的、不现实的将生命数学化。

生命用自我运动的特征来定义,与死的石头要从外部来推动其运动相反。在这种亚里士多德的意义上,生命意味着“有灵魂”,它被理解为一种(生命力论)物质的组织力(隐德来希)。用现代的术语来说,生命的自组织被亚里士多德解释为一种指向一定目的“吸引子”(目的论)的功能控制过程。例如,从种子中长出一棵树,其目的是达到其最终形式。用现代术语来说,刻画有机体生长的形式的变化是某种类似于序参量(定性的)演化的东西,它被亚里士多德叫做有机体的“潜能”。但是,与现代序参量的主要差别在于,亚里士多德批评了任何形式的将宏观形式还原为原子或微观相互作用的做法。

值得注意的是,亚里士多德主张一种连续的程度不同的有生命自然状态(*scala naturae*),拒斥对于“生”和“死”的绝对划分。他总是在寻找不同复杂性的有机体之间的中介或关联。例如,对于像亚里士多德这样的古希腊人,生活在植物和海藻繁茂的地中海边,容易观察到有机体如水莲“到底是植物还是动物,因为从底部生长像植物,但它食鱼又像动物”。^[3.3]以连续性为背景,亚里士多德提出了一种生物遗传规律:“在动物的胚胎初期看来是有一种像植物的生命;在其后来的发育中,才可以谈论敏感性和思维灵魂”。^[3.4]

亚里士多德不仅仅是一位理论家,也是一位早期的观察植物学家、动物学家和生理学家。他设计了根据其不同特征来进行植物和动物的解剖,并力图描述生命的生理学过程。他的主导生命范式是自组织的有机体的思想,拒绝了任何的原子、分子或某种有机还原论。亚里士多德的生命哲学影响了直至今日的生物学的发展。

在罗马时期,甚至医学也受到亚里士多德传统的影响。罗马大帝马可·奥勒留的医生盖仑教导说,在我们的身体中,器官必须完全适应其功

能。他追随亚里士多德的目的论,把消化器官描述为生命过程选择食物的“合目的”部分而分离掉“无用部分”。中世纪,阿尔贝图斯·马格努斯(即大阿尔伯特)把亚里士多德的生命哲学与基督教义结合起来。在亚里士多德目的论的背景下,大阿尔伯特发展起来早期的生态学,要求人的生活必须与其自然环境相和谐。在神的安排下,有机体及其环境通过大量地交换空气、食物、排泄物等而相互关联,并处于自然均衡之中(“平衡态”)。大阿尔伯特认为,甚至人的灵魂的健康也依赖于健康的环境及健康的空气、气候、植物和动物。灵魂和身体不是分离的,而是一个有机整体。

现代物理学的决定性条件是数学、观察、实验和工程的结合,这是文艺复兴中伽利略所实现的。牛顿奠定了一种新的自然的数学和实验哲学,他称之为《自然哲学的数学原理》(1687)。几何和力学变成了自然科学的新范式。在科学史上,这一时期被称作自然的机械化时期,自然被想象为只不过是一台巨大的机械钟。数学家、哲学家勒内·笛卡儿和物理学家克里斯蒂安·惠更斯教导道,所有的自然系统,都是由分离的元素如同钟表的嵌齿轮构成的。自然的所有效应都被看作可以归结到线性的因果链上,如同钟表中的嵌齿轮序列一般。显然,笛卡儿的机械论与亚里士多德的整体论是冲突的。

甚至生命过程的生理活动也应该机械地加以解释。例如,心脏被看作是一台机械泵。一般地说,笛卡儿认为,动物和人体的运动都可以从器官的机理中推导出来,“它们从位置到其重量和齿轮形式都具有如同钟表机制一样的必然性”。^[3,5]自从文艺复兴以来,人体解剖实践是笛卡儿分析方法的一种应用。按照笛卡儿,为了用几何和力学定律来解释其功能,每一系统都可以分离成其基本构件。

意大利物理学家和生理学家博雷利(1608—1679)奠定了所谓的物理疗法,作为早期的一种生物物理学。他把伽利略在物理学中的一段名言

转移到生物学,并写进他的《关于动物的运动》(*De motu animalium*)一书中加以强调:

正如所有这些事物的科学认识都建立在几何学基础上,正确的看法是,上帝用几何学来创造动物机体,我们要理解它们就需要几何学;因此,它是唯一合适的科学,如果人们希望阅读和懂得神在动物世界的杰作。^[3.6]

虽然笛卡儿还相信人有不朽的灵魂,拉美特利——按照他的《人是机器》(1747)的箴言——把人也约化成一种没有灵魂的自动机。人体和动物体仅仅是由其复杂性和组织化的程度来区分的。在物理学之后,亚里士多德传统中的目的论也应该从生理学和医学中驱除出去。在启蒙运动时期,生命的机制从唯物主义哲学和无神论哲学来解释。伏尔泰讲了一个关于拉美特利的颇为逗乐的故事:拉美特利在丰盛的宴席上突然病了,几天后由于消化不良而去世,害怕上帝的世人说,这是值得感谢的,唯物主义者因其贪得无厌而必须死去。

然而,机械化时代也仍然在讨论亚里士多德的一些概念。例如,莱布尼茨假定了一种自然的等级秩序,生机的尺度是连续地从小的构件(“单子”)到复杂的有机体。莱布尼茨试图把亚里士多德的思想与物理力学结合起来,成为了复杂动力学系统理论的早期先驱之一。关于人在自然中的位置,莱布尼茨主张:

因此,所有的活的机体都是一种神的机器或自然的自动机,它无限地超过了一切人工的自动机。^[3.7]

在莱布尼茨的鼓舞下,动物学家博内(1720—1793)提出了一种自然

的等级(“Echelles des êtres naturelles”)作为复杂性的量度,它显得是相当现代的。博内强调“组织”是物质的最重要特征。实现着一定数量的不同部分的最大效果的组织,被看作最完满的组织。^[3.8]

在18世纪末,伊曼努尔·康德批评了牛顿力学运用于生物学:“不可能找到解释青草叶片的牛顿。”康德提出批评的主要原因在于,机器的概念在18世纪只是在牛顿力学框架中得到了精确化。因此,在他的名著《判断力批判》中,康德写道,一个有机体“不可能是一台机器,因为一台机器不过是移动着的力;但是一个有机体却具有组织力……这是不能只用机械运动来解释的”。^[3.9]康德还批评了亚里士多德的目的论和作为隐喻的拟人化的自然“目标”和“目的”的假设。一个有机体的描述必须使用“自组织存在物”的模型来解释。

如康德那样,歌德也拒绝生命的唯物主义-机械论的解释,而这是(例如)法国百科全书学派的学者霍尔巴赫在他的《自然系统》中所坚持的。在歌德看来,自然的机械模型是“灰色的……如同死亡……如同幽灵,没有阳光”。^[3.10]他相信,生命是有机地、和谐地发展的,如同植物变态或人的精神成熟。

在歌德时代和康德对机械唯理论的批判的背景下,19世纪初德国出现了一位浪漫主义自然哲学家。它是反抗机械论的有机论范式的复兴。弗里德里希·谢林(1775—1854)设计了一门“生命的科学”,假定组织和繁殖是生命的主要特征。^[3.11]医生和自然哲学家奥肯(1779—1851)描述了一种“行星过程”,其中生命有机体用磁力、化学过程和流电的综合来解释。从现代的观点看,“自组织”和“自繁殖”是此种浪漫主义自然哲学的概念的进一步引申。但是,在那些日子,他们只有进行思辨或激起的直觉,因为还缺乏实验和数学基础。

一幅有机的、和谐的形态变化的和平图像,很快就被生物学抛在了一边。查理·达尔文的进化理论在解释生命时根本不需要目的性力量。

“适者生存”(赫伯特·斯宾塞)取决于对于一定环境条件(例如食物、气候)的较大选择优势。^[3.12]达尔文受到拉马克(1744—1829)的一些思想的鼓舞,例如获得性遗传。达尔文进化由物种的(遗传)变异性(“突变”)和朝向某一方向发展的自然选择所支配。斯宾塞教导说,生命是推向更大的复杂性,它受到选择的控制。在许多同时代的人看来,达尔文主义不仅仅是一种自然科学的理论。达尔文理论表现为提供了一种与19世纪社会极为相似的生命图像。“适者选择”成为“社会达尔文主义”的政治态度的一条口号。

在19世纪下半叶,海克尔概括了生命从单细胞有机体到人类的进化。但是在那时,进化理论还无法与高度确证了的物理理论和化学理论相比拟。达尔文只可能提供一些形态学的比较研究。他描述了物种的变异和自然选择,但是不可能对此进行数学化的解释,并提供如同物理学那样的可检验定律。孟德尔的遗传定律(1865)还不为达尔文以及许多同时代人所知。然而,19世纪的最伟大的物理学家之一的路德维希·玻耳兹曼的主张,对他的世纪作了一个深刻扼要的概括:

如果人们追问我的最深层信念,问我们的世纪将被称作钢铁的世纪还是蒸汽机的世纪抑或是电气世纪,我都将毫不犹豫地回答,它将被称作达尔文世纪。^[3.13]

3.2 玻耳兹曼的热力学和生命进化

在19世纪,自然科学、社会科学和哲学的主题变成了“进化”和“历史”。而这些思想的生物学来源要追溯到达尔文的进化理论,热力学中也开始讨论物理学的不可逆过程。热力学的最初的原理是由卡诺(1824)发

展起来的。他的原理是在分析蒸汽机产生的机械力中发现的。大体说来,热力学第一定律指出,能量既不能创造也不能消灭。不管是机械功、电能,还是化学转化,自然界中能量在不断地转化,一个封闭系统中的总能量却保持不变。与爱因斯坦的质能相当性相一致(对照第 2.2 节),第一定律在 20 世纪已经扩展为质量能量守恒原理。

克劳修斯(1865)注意到第二定律在物理演化中具有根本性的重要意义,他从古希腊词中借来“熵”这个术语,用于描述演化或转化。^[3.14]数学上,一个系统的熵变化定义为可逆地加到系统的热除以其绝对温度。按照伊利亚·普利高津的理论,人们必须涉及到这样一个事实,所有的系统都有其环境。^[3.15]因此,更一般地,在某一时刻的熵的变化,应是环境供给系统的熵变化率与系统内部熵产生率之和。按照热力学第二定律,系统内部的熵的产生率大于或等于零。对于封闭和孤立系统,熵不会由环境供给(或释放到环境中),我们就得到了经典的克劳修斯陈述:熵不断增加或当热力学平衡达到时就保持不变。换言之,自然界中包括物理、化学、生物或(正如我们将看到的)信息转化的过程,都不会是不以能量为代价——以熵来表述——而自发地发生。

熵是系统的一种宏观性质,如同体积和大小。因此,热力学最初只是一种唯象理论,描述了宏观系统的可能的热分布。玻耳兹曼对这种实证主义态度不满,试图提供一种统计力学的解释,把系统的这种宏观状态归结为(例如)热供给微观分子的力学。受到微观-宏观差别——这是进化理论的关键——区分的驱动,玻耳兹曼赋予热力学最初的统计解释。^[3.16]统计热力学中,不可逆性就以这种差别为基础。

一般地,统计力学用微观态来解释如密度、温度等宏观态。在此意义上,可观测的宏观态被认为是由大量微观态 W 实现的。为了定义数目 W ,大量的同种类的如原子、分子、晶体等独立机制要加以考虑。它们从不同起始相状态按照其运动方程发展其微观态。如果一个宏观态由 W

个这种微观态实现了,那么假定,相应宏观态的玻耳兹曼熵 H 正比于 W 的对数,即 $H = k \ln W$, k 是玻耳兹曼常数。在一个连续的态空间,玻耳兹曼表达式可以用速度分布函数的积分来概括。在玻耳兹曼看来, H 度量相应系统的观测宏观态的分子排列的概率。

玻耳兹曼的还原论在历史上遇到了物理学家、数学家和哲学家的强烈反对。实证主义的物理学家和哲学家如恩斯特·马赫批评玻耳兹曼的分子和原子假设,因为那时它们是经验上无法确证的。但是在分子、原子被成功地发现以后,这种批评就只不过是历史的“遗迹”了。

洛施密特可逆性佯谬是一个最重要的反对意见。由于力学定律对于时间反转具有不变性(对称性),每一过程都是时间可逆过程。这表现出与存在不可逆过程相抵触。玻耳兹曼回答说,对于他所谓的 H 定理形式的热力学第二定律,不可能仅仅从(可逆的)力学定律推导出来,而需要附加上极度不可几的初始条件。第二定律被认为对于非常高度可几事件成立,但是并没有保证。不可逆过程仅仅是频度的、概然的,可逆过程是罕见的、非概然的。因此,第二定律允许局域的涨落偏差(例如布朗运动)。^[3.17]

另一种反对意见是亨利·庞加莱和恩斯特·策梅洛提出来的,他们强调,具有有限多个自由度的力学系统的每一状态,必定在一定时间间隔之后至少会大致地重现。^[3.18] 因此,就不可能有一个与熵增相联系的时间之矢。玻耳兹曼回答道,随着自由度的增加,返回时间变得极其漫长。宇宙学中,在玻耳兹曼意义上有两种观点:(1) 宇宙开始于极其非概然的初始条件;(2) 当宇宙充分大时,就可能在某些地方出现偏离均匀分布。图 3.1 示意了玻耳兹曼的涨落假设。他假定,整个宇宙处于热平衡状态,即最无序状态。玻耳兹曼相信,时间的两个方向是完全对称的。因此,局域熵曲线在两个时间方向上类似地增加,随着熵极大时变成扁平。^[3.19]

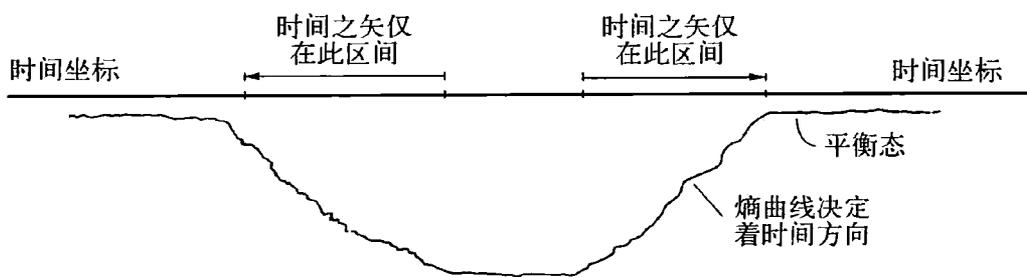


图 3.1 具有对称时间方向的热平衡态玻耳兹曼宇宙中的熵曲线

生命作为发展着的有序系统,仅仅在熵发生强烈变化的区域即图3.1中熵曲线的两个倾斜部分才是可能的。两个箭头标示了玻耳兹曼的局域世界,在此可以出现生命。因此,在玻耳兹曼的意义上,在此不存在客观的唯一的**时间之矢**,只是熵增的两个可能方向之一,熵增是生活在图3.1示意的倾斜区的两个可能局域世界之一的人们的**主观经验**。在我们对玻耳兹曼的观点提出详细批评之前,先扼要回顾一下他以其热平衡热力学为背景的生命理论,直至今日,这一理论仍对科学有着影响。

路德维希·玻耳兹曼(1844—1906)是第一位试图将生物学进化理论归结为19世纪的热力学和化学的科学家。对19世纪末的科学家而言,一个重大的问题是,热力学第二定律看来预见**了自然的最终的无序、死亡和腐朽**,而达尔文的进化论体现了有序活系统的复杂性不断增加的发展。当然,第二定律是针对封闭系统的,活系统必定是开放的,发生着与其环境的不断的能量、物质和信息交换。然而,在一片无序和热平衡的海洋中,局域复杂性的增加如何是可能的?

玻耳兹曼主张的某些解释,已经在向我们提示现代生物化学的分子自催化和代谢概念。最初的原始生命(如细胞)的起源,被归结为对于无生命的分子构件的存在,玻耳兹曼将此设想为类似布朗运动的过程。植物作为细胞的聚集体是有序**的复杂系统**。因此,在热力学第二定律的意义上它们是一种**非概然结构**,因此它们必须在阳光下与它们体内的自发

熵增趋势进行抗争。由于太阳的高温,大地获得了相对低熵的能量,这被用来补偿植物中的自发熵增。这个过程是由光合作用来实现的,玻耳兹曼在 1886 年给出了一种物理学解释:

因此,一般的生存斗争,既不是为了基本材料,……也不是为了能量,……而是为了使熵从灼热太阳那里转移到冷凉大地而变得有用。^[3.20]

玻耳兹曼将他的以物理学为基础的进化理论推广到神经系统的历史和记忆、意识的形成。他认为,原始有机体对外部印象的敏感性,导致了特殊神经和视觉、听觉、感觉、运动等等特殊器官的发展:

大脑被看作建立世界模型的装置或器官。因为这些模型对于种族生存有巨大益处,人的大脑按照达尔文的理论如同长颈鹿脖子或白鹳长嘴那样完美地发展起来。^[3.21]

甚至建立概念和理论的能力也用进化来解释。玻耳兹曼试图论证,人的空间、时间和因果性范畴是大脑为适者种族生存而发展起来的工具。他甚至毫不犹豫地就把生物进化推广到社会文化发展和人类史。1894 年,威尼斯的医生 S·埃克斯纳以玻耳兹曼精神讨论了“作为生存斗争武器的道德”。1905 年玻耳兹曼自己发表了冠以迷人题目的演讲《熵定律解释和用概率演算原理来计算爱情》。显然,玻耳兹曼的达尔文主义达到了其极点。

在 20 世纪之初,生命仍然不可能用物理学和化学基础来解释。经典力学——这个 17 世纪和 18 世纪自然科学的基础——假定了确定论的、时间可逆的自然定律,对生命的不可逆过程提供不了任何解释。一台无

摩擦的摆钟,作为一个振荡的力学系统,时间可逆地运动着,原则上将无限地运动下去。人有出生、成长和死亡——这是为什么? 19世纪的热力学处理的是将被推向极大熵或无序状态的封闭系统的不可逆过程。复杂的活系统的发展如何得到解释? 在玻耳兹曼统计解释的意义上,有序和生物复杂性的涌现只能是一种非概然事件,是(如同雅克·莫诺后来说的)“处于宇宙边缘的”局域宇宙涨落,它们对于处于热平衡的整体宇宙是没有意义的,将会消失掉。^[3.22]在莫诺这种说法之后,我们也只能有一种阿尔贝·加缪存在主义的哲学选择,人类的尊严最终消亡在无意义的生物和文化进化中。天才的路德维希·玻耳兹曼的悲剧性死亡——他1906年的去世被认为是自杀,并被看作是这种态度的一个象征。但是,玻耳兹曼的热力学并没有明确解释生命起源。他仅仅是证明了,他的对热力学第二定律的统计解释与达尔文进化并不抵触。

继17世纪和18世纪的经典力学和19世纪的热力学之后,量子力学成为了物理学的基础理论。尽管有海森伯不确定性原理,量子力学的定律却还与经典力学一样,都是以时间可逆为特征的。在处理复杂性的还原论纲领上,一个极大的成功是分子的量子化学可以用量子力学定律来解释。1927年海特勒和伦敦成功地将适用于原子、亚原子的薛定谔方程,修订应用于分子系统。在化学中除了人们熟知的物理力以外没有其他的特殊的化学力,继物理学之后,目的论看来在化学中也被排除了。

化学是否已经完全归结为物理学了呢?^[3.23]严格地说,这完全没有! 分子轨道的结构模型仅仅是对量子力学相关性的抽象而引入的。相反,例如原子的电子在泡利原理的意义上是不可分辨的,它们被化学家用来作为准经典客体,沿着原子核的明确区分的轨迹运动。有一些众所周知的化学抽象程序(玻恩-奥本海默和哈特里-福克程序),以非经典量子世界的近似准经典模型的方式引入电子轨道。进一步,尽管数值量子化学取得了惊人的成功,我们还必须考虑到,对于复杂分子的薛定谔方程进行

计算是在实践上的局限。这种化学向物理学的弱还原,看来是证明了,科学家应该继续走还原论的道路,以将基本粒子、原子、分子以及最终将有机体统统都归结为物理学和化学。

在 20 世纪 20 年代和 30 年代,在物理学还原论与新活力论之间的斗争很难在实际上得到解决。例如,物理学家海特勒,生物学家德里施,哲学家柏格森、怀特海都明确提出了亚里士多德传统的种种新活力论主张。^[3.24]他们认为,特殊的生物学规律往往使得物理学和化学规律失效。从亚里士多德到歌德和谢林一再提到的是,生命从活细胞到具有自觉意识的人的有目的的自组织性和自发性表明,物理学还原主义是不可能的。整体性是有机体的一个基本特征,它不可能被还原为其构件之和。受到尼耳斯·玻尔所谓的量子力学的哥本哈根解释的鼓舞,一些物理学家试图用玻尔的互补性概念来调和物理主义和活力论。玻尔用互补性来为量子力学中的互斥性概念(如粒子-波动)作辩护。因此,被认为是不可通约的物理学-化学和生物学两类规律,就采取了互补性解释。我们必须记住,互补性不是一种物理规律,而是一种对量子力学的哲学解释,埃尔温·薛定谔是不赞成这种解释的。他知道 20 世纪 30 年代和 40 年代间的物理主义和活力主义之间的斗争并没有得到解决,而互补性仅仅是一种描述所论状态的概念。他在《生命是什么?》一书中写道:

总之,只要我们涉及活物质的结构,就必须面对这样一个事实:它是不能还原成通常的物理学定律的方式起作用的。原因不在于某种“新的力”或某种类似的东西支配着活的机体中的一个一个的原子,而是其结构不同于任何我们已从试验室研究中认识的东西。^[3.25]

薛定谔使人想起工程师的形象,他熟悉蒸汽机,并希望要探索新的电

动机。由于两种发动机以颇为不同的方式工作,他会产生这样的念头:电动机是某种幽灵推动的。薛定谔采取了莱布尼茨传统,期望把活的有机体理解为“按照上帝的量子力学基本原理实现的最精致的杰作”。^[3.26]

薛定谔面对的问题,是他以及莫诺都力图在玻耳兹曼热力学框架中描述有序和生命的出现。他正确地批评了目的论的力或生序的妖,它们是物理学家在19世纪末就提出来的。虚构出来的小妖能够逆转封闭系统中按照第二定律的熵增,没有任何外部效应,因此它如同第二类永动机一样地起作用,这要追溯到詹姆斯·克拉克·麦克斯韦。1879年,威廉·汤姆孙(即开尔文勋爵)引入了“麦克斯韦分类妖”,它可以使封闭容器中处于静态平衡和均匀速度分布的气体分子自发地分离开来,成为快分子和慢分子两部分。^[3.27]

显然,“分类妖”是一种特设的假设,不可能在19世纪的物理学框架中加以解释。玻耳兹曼热力学以及牛顿力学都不足以为复杂序的形成、从而为活系统的起源和生长来建立模型。热力学第一定律和第二定律都有重要的条件,它们并不一般地适用于所有自然。这些定律假定,所有的能量交换都是发生在封闭和孤立的系统中。随着能量流和物质流通过宇宙中的大部分区域,自然系统很少是封闭系统。由于太阳能辐射在地球上,它不可能被看成是一个封闭的和孤立的系统。

尽管热力学第一定律和第二定律并没有错,但是它们在经验上局限于近似孤立的微观子系统、宇宙系统或实验室中制备的条件。这一情形可以与牛顿的经典力学相比拟。在爱因斯坦提出了狭义相对论以后,它并不就是错了,而是不再成为物理学的普适框架了,有了只适用于相对光速较慢运动的限制。自然界的绝大部分现象,都必须用动力系统来建模,动力系统并不存在于玻耳兹曼的一般平衡条件中,因为它们只存在于能量流和物质流之中。

历史上,麦克斯韦或吉布斯的基础性贡献,都只是适用于处理相当于

平衡或无穷逼近平衡的状态。非平衡热力学的先驱工作始于 20 世纪初(例如)皮埃尔·迪昂等人。但是他的工作直到昂萨格(1931),后来的普利高津学派、哈肯学派,以及其他开始研究远离热平衡的复杂系统行为以后才引起人们的注意。从历史的角度看,这个情形堪比混沌理论和复杂哈密顿系统的发展(对比第 2.3 节)。混沌现象已经被发现并为庞加莱、麦克斯韦等人所熟知。但是非线性复杂系统所带来的数学问题却使多数科学家无法探索相应的模型。

3.3 复杂系统和有机物进化

开放系统不仅具有熵产生的内部来源,还有伴随着能量或物质转化进入(或来自)其环境的熵产生的外部来源。这些系统通过耗散和消耗能量而保持其结构,被伊利亚·普利高津称作“耗散结构”。我们已经了解到非生命的耗散系统如流体、激光和云彩,它们都是依赖于外部的能量流来保持其结构和组织。非平衡系统与其环境交换能量和物质,保持自己一段时间处于远离热平衡态,并在局部出现熵减的状态。小的不稳定性和涨落导致不可逆的分岔,从而增加了可能行为的复杂性。

对于亚里士多德的生长着和消亡着自然的“月下”世界,采取非线性演化方程的耗散结构数学理论为此提供了建模框架。人们惊奇地承认,亚里士多德的循环自然的思想,与作为相应微分方程的解的周期吸引子或极限环相适应。这些系统的循环本性,不仅适用于发展起稳定性,而且还适用于发展起其中的复杂结构等级。一个古代已经描述过的活系统循环,成为了借助进化反馈的自催化循环。

其要点已被斯宾塞和玻耳兹曼表述过,他们假定了前生物系统的进化,即可以通过一系列的转化而导致发展起来越来越复杂状态的等级。

但是,与玻耳兹曼的假设相反,这些转化只可能出现在远离热平衡态的非线性系统中。超出了一定的临界值,定态方式就变失稳,系统演化到某种新的构型。通过一系列的不稳定性而进化,一个活系统必定要发展起某种程序,以增加其非线性作用和离开平衡态的距离。换言之,每一转化都必定使得系统增加其熵产生。伊利亚·普利高津、曼弗雷德·艾根等人所研究的进化反馈意味着:系统控制参量变化到超出一定的阈值,就导致了某种通过涨落的不稳定性,这使得耗散增加了,从而又对阈值产生影响。

随之而来的是,生命并非从某种单个极其不可能的事件中起源,生命的进化并不违反物理学规律。如上所述,玻耳兹曼和莫诺的极大地超过生物进化的时间的巨涨落的思想,来自平衡态热力学。在平衡统计力学中发生耗散结构的概率(例如贝纳尔问题的周期性时间过程)是微小的,而在远离平衡态其发生的概率却等于 1。因此,普利高津可以争辩道:

生命的出现遵从适合于特定运动学框架和远离平衡的条件的物理学规律,远离了麦克斯韦妖的全副武装的工作。^[3.28]

在非线性复杂系统的数学框架中,已经提出了许多模拟生命的分子起源的模型。分子尺度上的复杂性,由居于现实的时间和空间的限度之中的大量潜在状态数来刻画。

例如,一个典型的小蛋白质分子所包含的肽链大约有 10^2 个氨基酸残基。已知天然的氨基酸有 20 种,这种长度的可能序列为 20^{100} 或 10^{130} 种。构成单个细菌细胞的全部基因组的 DNA 分子,代表了 $10^{1\,000\,000}$ 种可能序列中的一种或为数不多的几种选择。显然,自然界只可能检验了其中的一小部分。数学上,一条包含了 λ 类 ν

个残基的序列,允许有 $\binom{v}{k} (\lambda - 1)^k$ 种可能拷贝在 k 个位置被取代。

图 3.2 示意一个基因,它编码了 129 个氨基酸的序列。[3.29]

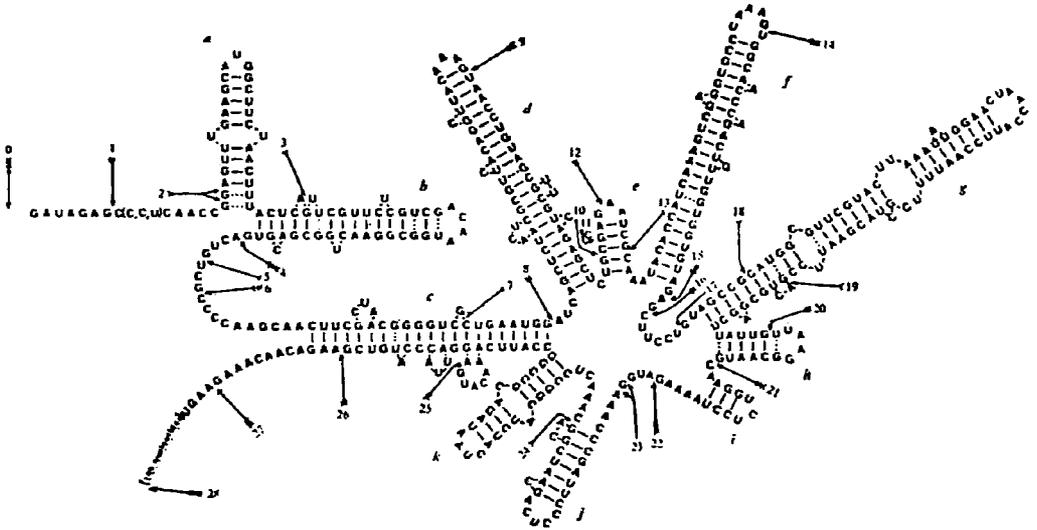


图 3.2 编码具有 129 个氨基酸的序列的基因

某些微观态可能会强烈地影响宏观行为。这样的涨落可能放大并引起先前的稳定态被打破。非线性通过远离热平衡的过程加入进来。

生命的经典的必要条件要求:(1) 自繁殖(以保持物种,而不致被稳步解体);(2) 变异和选择(以放大和完善物种的可能性,偏爱某种价值标准);(3) 代谢(以补偿稳定的熵产生)。[3.30]

曼弗雷德·艾根提出了一种方案,可以通过数学优化过程来实现这些标准。在此模型中,自繁殖的成核和进一步进化的系统,在诸如蛋白质和核酸这样的大分子随机序列的分布中,以一定的期望值出现。自繁殖的起始拷贝的选择是偶然的,但是后继的进化优化到独特效率水平是受物理原理引导的。在此模型中,无论何地,只要物理条件和化学条件得到满足,就可能发现生命,尽管某些分子结构表现出与我们所知的系统没有多少相似性。

最后的结果是一种独特的结构,例如,某种优化了的分子序列。达尔文的适者生存法则被数学化为一种优化准则,即对于可能的分子序列的微观态的优化。这里假定,在简单的情形,生物分子通过自催化而倍增。例如,两种生物分子 A 和 B,从底物 GS 通过自催化而倍增,但是一种分子除了倍增以外,它还得到另一种的支持,反之亦然(图 3.3a)。在有多种生物分子的更复杂情形,后一种采取了循环催化的方式进行倍增(艾根的“超循环”)(图 3.3b)。这种伴随着突变的机制能够实现进化过程。

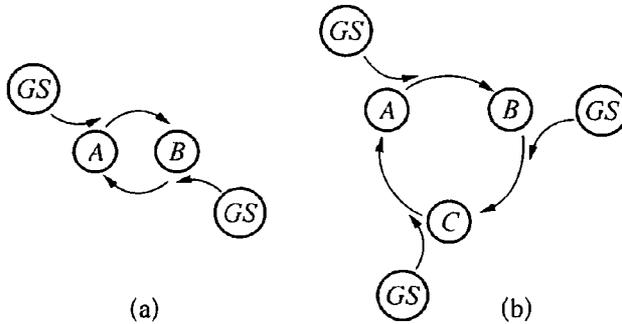


图 3.3 自催化与循环催化

(a) 两种生物分子的自催化;(b) 更多种生物分子的循环催化(超循环)。

艾根提出了一个进化优化的简化模型:^[3.31]生物细胞的机制在由 4 种化学物质 A、T、G、C 组成的序列中编码,基因由这样的化学物质序列构成。每一基因都代表了一个功能单元,功能单元经过优化,适应了其环境的特定目的。自然界的基因的长度一般很少超过 1 000 个序列位置。因此,对于 4 种符号,长度为 1 000,就有 4^{1000} 种可能的基因(“突变”)。用科学记数法来表示,这大约是 10^{600} 种可能性。为了获得对这种巨大数目的一个印象,我们应该记住,整个宇宙中的物质质量相当于 10^{74} 个基因,宇宙的年龄小于 10^{18} 秒。

因此,如果所有的宇宙物质从其一开始(“大爆炸”)就用来进行替换,从而每秒钟产生出一种新的长度为 1 000 的基因,那么至今也仅仅检验了 10^{93} 种突变。艾根得出结论,代表优化功能单元的基因不可能是在随

机过程中产生出来的,而必定是通过自优化过程发展起来的。

数学上,适应过程可以设想为一系列的位置置换,其目标是获得最后的(“优化的”)序列。这是一种典型的计算机科学中的问题求解方式的解释。为了成功地求解一个问题,我们必须找到一种合适的自优化策略的空间表象。研究对象数量之巨,3维空间显然是不合适的。策略的长度,即从基因到其优化变异体的距离,是太长了。人们会误入歧途。再者,高度相似的序列不可能在3维空间的邻域中得到适当的表示。因此,提出了以如下方式来改变维数。

一条具有 n 个位置的序列,定义为 n 维空间的一个点。对于两个符号0和1,有 2^n 种可能的序列,它们是此空间的点。每一点具有 n 个近邻,它们代表了仅有一个位置不同的突变(“1个误差突变”)。在两个仅仅为0或仅仅为1的端点之间,有 $n!$ 个可能的关联。在图3.4a-d中,对此二元情形有一些 n 维序列空间的例子。这些空间的巨大优点在于其非常短的距离和密集的可能关联的网络。作为一个例子,在1000维空间中最长的距离仅仅是1000个单元,在 10^{14} 个点的23维空间中仅仅是23个单元。

以米为单位,23维空间足以代表地球表面所有的点。在这个空间,优化策略可以设计为,在地球上的某个区域中找到最高的山峰。为做到这一点,我们引入价值函数,它与每一点以一个数值“高度”相联系。设想一下去阿尔卑斯山的旅游。你没有一个固定目标(例如去某一特定的山峰),只有大致的去向:你希望领略“上山”而没有失去过多的高度。数学上,你的路径的梯度是知道的,并决定了你去的方向。在真实的阿尔卑斯山,你遇上了山峰的一维的边缘和通道,你达到优化点的机会是受限制的。在23维空间中,你可以走向23个方向,不同的途径具有不同的梯度,即 k 个“上山”方向, $23-k$ 个“下山”方向($k \leq 23$)。在你周围,达到优化点的机会很多。

在基因的 n 维序列空间中,点的价值由“选择价值”给予。突变并非完全无规地或混沌地出现,而是依赖于分布中先前最频繁发生的事件。分布中究竟是哪些事件最为频繁地发生,有赖于它们相对于分布中的优化变异的选择价值。选择价值的分布并非无规地分布,而是分布在关联区域中。例如,地球上的高山像珠穆朗玛峰并非坐落在平坦的大地,而是处于喜马拉雅山脉之中。

对于生命的复制和自我繁殖,艾根预设一个高效的自优化机制。弗里曼·戴森提出一个数学模型,根据这个模型原始生命系统在缺乏适当的复制和选择机制的情况下首次发生,而且仅对其环境履行代谢功能。^[3.32]这种分子系统的本质特征是其稳态,即在变化环境中维持稳定和大致平衡的能力。根据戴森的观点,自复制机制的构型只有到第二步才发生。这一目的所需要的核酸被戴森解释为早期代谢生命过程的“非同化”副产品,它起初在整个系统中处于寄生状态,尔后经过共生的中间状态,最终发展成为能够繁殖和进化的完全整合功能机制。

戴森模型中的代谢和复制的双重功能,在很大程度上已经是考夫曼提出的前生物进化的复杂系统。^[3.33]考夫曼抛弃生命始于某个 RNA 世界的观点。他的似超循环系统是一个复杂的自催化反应网络,这种系统以自催化的方式自组织,其结果是作为系统宏观序参量的新陈代谢成为可能。新陈代谢从周边环境获得物质和能量,以提升和维持内在秩序。因而,这是一个开放的耗散系统。

复杂生物系统的例子有遗传系统、神经系统、免疫系统,以及生态系统,所有这些系统都是由多元互动的元素作为主体的网络所构成的。这些复杂网络的非线性动力学只能通过某些简化来建模。因此,设想时间是离散的,而且一个时间点上网络的行为依赖于先前时间点网络的状态。更进一步,网络的元素只有少数的不同状态,例如基因是打开还是关闭,又如神经元发放还是不发放。一个网络是作为主体的连接元素的集合,

可以表示为一系列结点以及一系列结点对连接而成的边。每个元素可以由单个输出和来自网络元素的多种输入来刻画。每个元素都有一个规则,规定着输入与输出的关系。在布尔元素的情形,只有两个值1(“开”)或0(“关”)。决定着由布尔输入产生布尔输出的规则被称作布尔函数。对于某个 n 种元素的网络,有 2^n 种可能状态。只有单个输入的元素的布尔网络,几何图像只会有弦、简单环,以及带弦的环。因此,它们的动力学被限制于不动点、环和多稳定性。而当元素有一个以上输入时,便会有多重的、连接的环,布尔函数要复杂得多。生物化学中布尔函数的例子是控节机制,其中蛋白质和基因的活性是由环状分子所调节的。生命机体中调节基因网络,可以理解为布尔网络的复杂动力学。

为了管理生命机体中极为复杂的基因网络,S·考夫曼建议进行随机布尔网络的研究。它们是普通的布尔网络,当设计这种网络时,其中的连接和布尔函数的选择都是随机进行的。对于有每一节点有 k 个输入的 n 个节点的网络,有 2^{2^k} 种布尔函数。随机数生成器为每一节点选择输入。考夫曼为计算机编制程序,以重演随机布尔网络动力学。在他的实验中,他发现了具有不动点和复杂性渐增的环的动力学行为等级,这也是可在真实细胞中观察到的。

一般地,可以预期进化过程会产生出新的物种。^[3.34]一种物种可以被看作一种生物分子、细菌、植物或动物的群体。这些群体由基因刻画,基因经历着产生出新特征的突变。突变随机地出现,它们可能受到外部环境因素的影响,诸如温度的变化或化学药物的作用。在一定的临界突变压力下,群体中新的个体出现了。这些个体的变化率用进化方程来描述。随着这些个体取得新的特征,它们的生长和死亡因素也改变了。当群体和环境出现了涨落,一个变化(突变)才是可能的。由此,进化方程确定了变化率,后者取决于生长和死亡因素之差,再加上涨落。

我们可以给选择压力建模,作为种种不同的子物种为相同的生存条件(即相同的食物供应)而竞争。如果一种物种突变体的突变率很小,仅仅是具有最高获得因素和最小失去因素的突变体即最适者才能生存。此种竞争程式可以用役使原理来模拟:不稳定的突变体决定着稳定的突变体。值得注意的是,新物种是由于突变和选择而出现的,这可比拟为激光的非平衡相变。^[3.35]

一个活细胞是一个开放的系统,能量流通过其间。正如埃尔温·薛定谔已经表明的,能量流创造着可以强烈地偏离热力学平衡态的条件。按照普利高津等人的理论,这导致了耗散自组织和模式形成的模型,其参量是由遗传作用以及渐成作用所制约的。不过,它会误解为,预期活细胞中的自组织过程,只不过是提供了宏观反应-扩散系统中的模式生成的还原复本。物理学规律,当运用于不同尺度特别是细胞间过程时,可能会影响所涉及到的机制并产生出大量新性质。以这种反应和扩散为基础的空间模式的生成,不可能出现在非常小的尺度上。化学过程的时间自组织,以不同周期性以及它们之间的相互作用的形成表现出来,在活细胞中起着基本性的作用。^[3.36]因此,从方法论的观点看,只知道耗散自组织的一般框架是不够的。但是,我们必须从实验上探索,它在特定的时间、空间和化学约束条件下在细胞中的应用。

然而,在物理-化学系统与生物结构之间的联系,可以用耗散结构——它可能存在于活细胞之中——来为之建模。一个重要的例子是由免疫系统提供的,它受到干扰会引起许多非常危险的疾病,例如艾滋病。它涉及到抗体-抗原动力学,新的抗体可以相继地产生出来,在此某些抗体作为抗原起作用。这种过程导致一种非常复杂的总系统动力学。^[3.37]

如上所述,在耗散系统的特征中,最显著的是振荡现象。在亚细胞水平上,有一系列的振荡的酶反应。糖酵解是一种具有重要意义的活细胞过程。调节酶给出的振荡,其周期从2分钟到90分钟。关于振荡的实验

表明,当均匀的状态失稳时,就出现了极限环类型的振荡。

另一个代谢振荡的例子是,细胞软泥霉中环状 AMP 的周期合成。这种物种展示了在两个不同组织状态之间的过渡。起初,阿米巴是独立的和分离开来的细胞。饥饿发生时,它们开始转变成聚集体,最终成为了结实的多细胞体。单个的细胞,受到营养的驱动,作为对中心放出环状 AMP 的响应,围绕中心在中心波中聚集起来。环状 AMP 的合成,表现为极限环类型。聚集过程自身代表了超出不稳定性出现的自组织。

在复杂系统框架中对此种过程建模,我们首先考虑分离的、均匀的细胞的群体。一个控制参量标志了营养的供给,它可以转变成饥饿的临界值。然后,放出环状 AMP,并克服阿米巴的随机扩散运动,均匀态失稳。在宏观水平上,细胞开始分化出几种功能并开始合作。在宏观水平上,可以观察到聚集的中间态,这最终将导致新形式的成熟的多细胞体。产生出独立的胞芽,软泥霉的生命循环重复着上述的相变状态(图 3.5)。^[3.38]

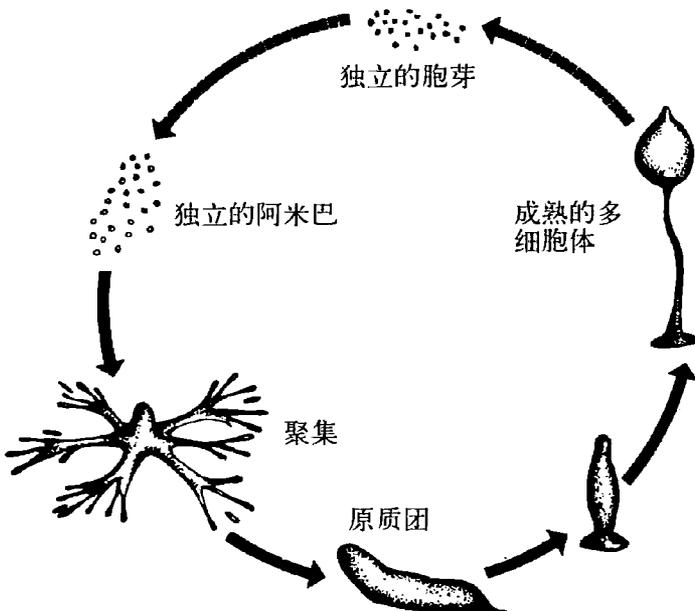


图 3.5 细胞形成状态的形态发生的动力学模型
(软泥霉的生命循环)

机体形式的自发形成,好像是生命的一个奇迹。因此,在科学史上,形态发生是生物学中反对物理学还原论的一个著名反例。今天,形态发生是用复杂动力系统为生物生长建模的著名例子。歌德对于他所喜爱的形态发生的数学模型会说什么呢?在这方面,模式的形成被理解为复杂过程,其中同一细胞发生分化,产生出新的明确定义的空间结构。形态发生的最初的动力学模型是拉舍夫斯基、图灵等人提出来的。我们回顾一

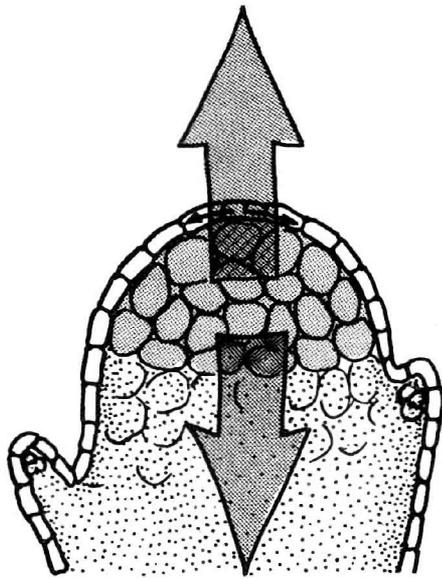


图 3.6 细胞动力学模型

(a) 细胞分化状态的形态发生的动力学模型(拉舍夫斯基的叶序模型);^[3.39]

下拉舍夫斯基的植物生长的形态发生(“叶序”)的模型。^[3.39]

图 3.6a 示意了一个理想化的葡萄茎梗发出一个枝芽的某一时刻,它出现在对于 3 个枝芽对称旋转的方向。在生长中的茎梗的顶部,生长出来一个芽,包含着未分化的全能细胞。叶序问题涉及到作为叶芽细胞、分枝细胞和其他导致叶芽和分枝的分化细胞的生长模式的形成。拉舍夫斯基模型基于围绕着茎梗周围的生长细胞环,靠近顶部的生长芽。

一个细胞被看作是一个流体袋,其中有均匀的化学组分。其中的一种化学组分是生长激素,叫做形态素。这种形态素的浓度 x 是此模型的观察参量。随着参量在 0 和 1 之间变动,模型的态空间是一条线段(图 3.6b)。如果这种形态素的浓度超过了一定的临界值,细胞的生长函数开始起作用,细胞分裂,枝芽开始出现。

接下来,把两个细胞看作开放系统,其一的形态素可以在两系统及其环境之间交换。如果把第二个细胞的形态素浓度记为 y ,那么整个系统

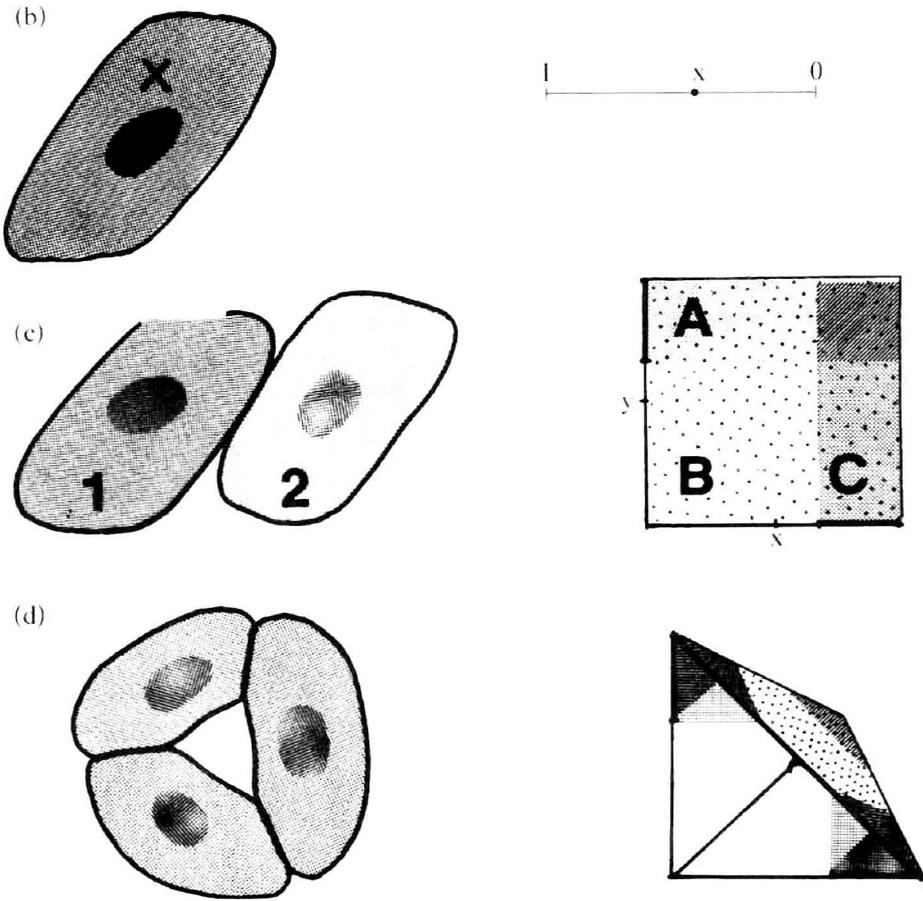


图 3.6 细胞动力学模型

(b) 一个细胞：形态素浓度 x ，相应的处于线段上的状态 x 的态空间；(c) 二细胞系统：具有形态素 x 和 y ，相应的单位正方形的态空间 (x, y) ；(d) 三细胞系统，具有均匀的形态素浓度 x, y 和 z ，相应的单位立方体中的态空间 (x, y, z) 。^[3, 39]

的状态就相应于单位正方形中的一个点 (x, y) ，它被解释为系统的态空间。在图 3.6c 中，态空间划分为 4 个区域，相应于：(A) “细胞 1 停止而细胞 2 生长”；(B) “两个细胞生长都停止”；(C) “细胞 1 生长而细胞 2 停止”；(D) “两个细胞都生长”。

最后一步，把 3 个细胞的系统看作是一个环，每一个都具有均匀的形态素浓度。单位立方体中的点 (x, y, z) 代表了系统的状态。在三维空间中，具有一种形态素的三细胞封闭系统的态空间用 $x + y + z = 1$ 的三

角形来表示,即浓度之和是恒定的(图 3.6d)。

在图 3.6e 中,具有周期性吸引子的动力学系统被加进态空间。3 个细胞周期地相继开始起作用,然后停止。在图 3.6f 中,茎梗建模为一叠三细胞环,每一个环都代表了图 3.6d 的三角形模型的一个精确的拷贝。茎梗不断向上生长由时间与向上方向的结合来表示。图 3.6e 的周期吸引子转变成了不断螺旋向上的周期的时间序列。

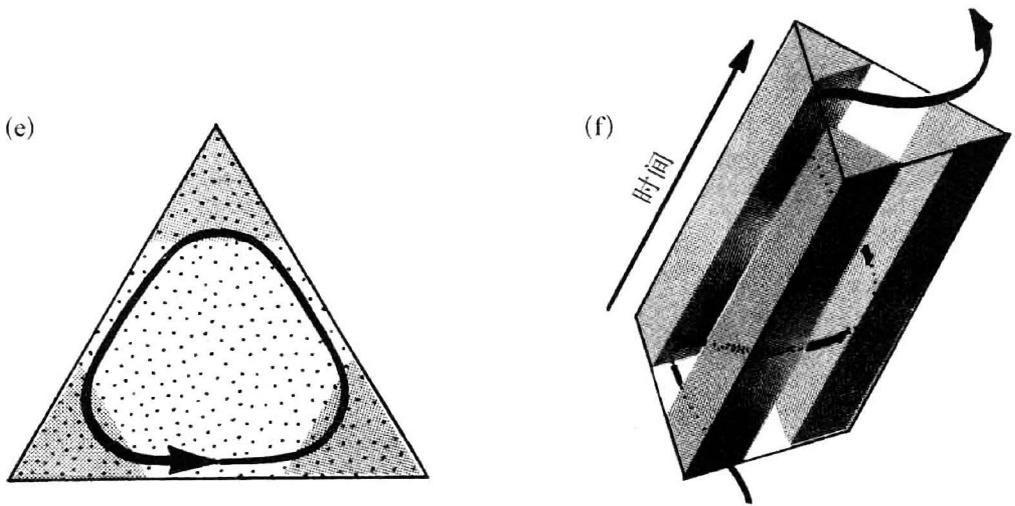


图 3.6 细胞动力学模型

三细胞系统: (e) 周期吸引子; (f) 建模为一叠三细胞环(图 3.6d)、具有周期吸引子(图 3.6e)的茎梗的生长转变成了螺旋时间序列。^[3.39]

在此简化的形态发生的动力学模型中,一个中心问题仍然未解决。起初未分化的细胞是如何知道向何方以何种方式进行分化的? 实验表明,这种信息并非是预先一个个赋予给细胞的,而是在细胞系统中的细胞从其环境中接受到了它的位置信息。一个著名的例子是水螅,它是一种微小的动物,大约由 15 种 100 000 个细胞构成。沿着其长度方向,它分成不同的区域,例如它的头在一端。如果水螅的一部分被移植到接近旧的头区域,由细胞的激活就生长出新的头。一些实验证据表明,激活分子和抑制分子都是实际地存在着。

在吉雷尔和迈因哈特的数学模型中,使用了两个演化方程,描述了激活子和抑制子的浓度变化率,它们依赖于空间-时间坐标。变化率取决于产生率、分解率和扩散项。显然,抑制子和激活子必须能够在某些区域扩散,以影响某个移植的相邻细胞。进一步,还必须为抑制子造成的阻碍自催化效应建立模型。图 3.7 中,激活子和抑制子之间的相互作用导致了生长周期结构,这可以用计算机辅助方法进行计算并作图。^[3.40]

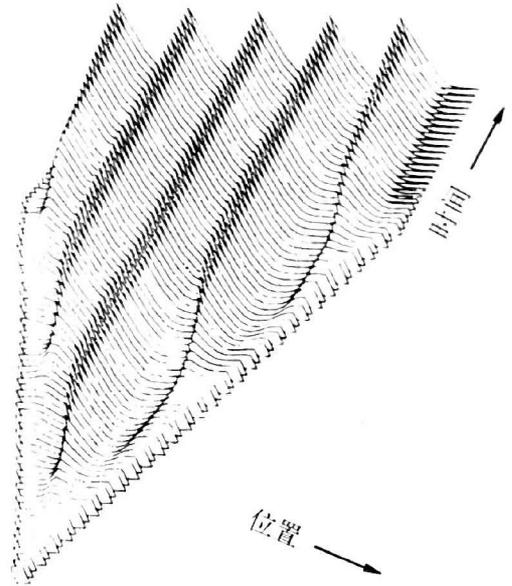


图 3.7 形态发生的计算机辅助模型: 导致一个周期性结构^[3.40]

对于导出这种模式,基本之处在于,抑制子扩散比激活子扩散要容易。长程的抑制和短程的激活是非振荡模式所要求的。通过数学分析方法,用吉雷尔和迈因哈特方程描述的演化模式可以被确定。一个控制参数允许人们区分出稳定构型和不稳定构型(“模”)。

在临界值,按照役使原理,不稳定模开始影响和支配稳定模。数学上,稳定模可被消除,不稳定模提供的序参量决定着实际的模式。因此,实际的模式是通过某种不稳定解的竞争和选择而出现的。按照役使原理,选择意味着减少复杂系统中大量自由度引起的复杂性。

生物化学上,这种形态发生的建模,是基于这样的思想:形态发生场是由一定化学物质的反应和扩散形成的。这种形态发生场导通基因,使之开始细胞分化。与特定的生物化学机制无关,形态发生表现为受物理学和生物学中的一般的模式形成原则所支配。我们从完全对称的全能细胞群体着手。然后,细胞的分化受到控制参量的变化的影响,相应地有对

称破缺。结果是一种远离热平衡的不可逆相变。在图 3.8 中,激活子和抑制子浓度的相变以计算机模拟示意出来。

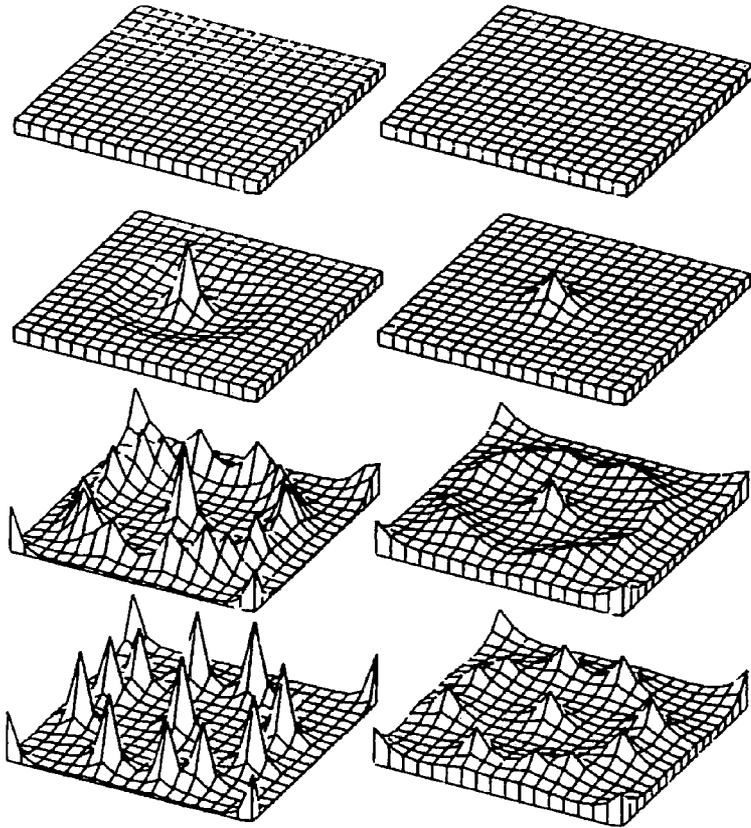


图 3.8 形态发生的两个计算机辅助模型
模型模拟了激活子和抑制子浓度的相变。

与对称破缺的共同原则无关,在物理-化学和生物学模式形成之间有一个重要的区别。物理和化学系统,当能量及物质的输入停止时,就会丢失其结构(例如,考虑激光或 BZ 反应)。生物系统能够至少是在相对长的时间中保持它们的大部分结构。因此,它们近似地表现为保守结构和耗散结构的结合。

自古以来,人们总是假定活系统是为了某种目的和任务的。动物和人的器官是典型的功能结构的例子,是由生理学和解剖学探讨的。医学

的功能结构如何在复杂系统框架中来理解呢?[3. 41]

脉管网的复杂分岔是分形结构的一个例子。树木、蕨类、珊瑚和其他一些生长系统,用分形都可以很好地描述。在第 5 章中,我们还将讨论模拟树木的分形生长的递归和计算机辅助的程序。心脏的血管树向我们显示了分支和主干的复杂网络。人们感叹血管通过毛细管延伸进细胞分裂、分化区而出现生长,这却是相当自然的。

树枝可以伸进开放空间去发展。但是,心脏、肺和其他器官占据了有限的空间。穿过其中的神经网络和脉管是服务于这些空间的基本占据者的。微血管网络的结构实际上完全是由器官的细胞来定义的。在骨骼肌和心肌中,微血管平行于肌肉细胞进行排列,有一些交叉分支。系统的生长受到神经或脉管系统为获取最小阻力线路的需要所引导。

这导致了医学上相当有趣的问题,分形的生长和脉管网络的形式是否导致了观察到的心脏中流的异质性的出现。分支网的一个简单算法示意在图 3.9 中,它给出了局域流的适当的概率密度函数。一个器官的分形系统成为了一种功能结构。[3. 42]

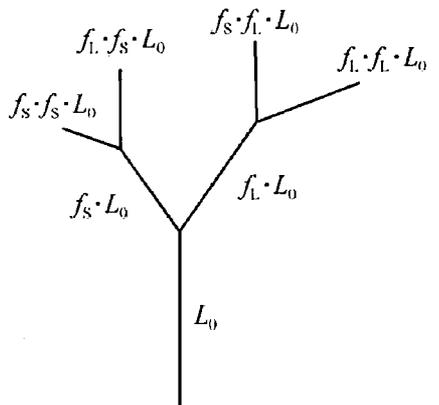


图 3.9 具有分形递归的心脏分支脉管网络

主脉管的长度 L_0 ,子脉管长度的减少乘以因子 f_l 或 f_s (下标 L 和 S 表示较长和较短的脉管)。

支气管网络的分形例子,对于医生把这些探究方式运用于肺部是一个鼓舞。物理系统,从银河星团到分子扩散,常常显示出分形行为。显然,活系统也常常是

可以用分形算法很好描述的。脉管网络、扩散过程和跨膜输送可能具有心脏的分形特征。这些分形特征提供了一个基础,使得医生能够理解更多的整体性行为,如心房或心室纤维震颤和渗透性。

如第 2.4 节所述,非线性动力学允许我们描述湍流的出现,这是动脉

血管中血液流动的一个大的医学问题。湍流可以是极限环的基础,如同水流通过圆柱管时表现出来的那样。有许多种控制系统会产生振荡。也许可以预期,某些振荡控制系统会表现出混沌行为。

心房和心室纤维震颤,是经典的显示出混沌的现象。在临床陈述中,心房纤维震颤中的心率是不规则的无规行为。观察到心房表面以明显混沌的方式脉动。不过,对折返现象和心室纤维震颤的研究表明了激发模式的存在,再一次说明了这是组织起来的(“数学的”)混沌。对此已提出了分形和混沌算法。图 3.10 的两条曲线示意了规则的心率和混沌的心率。^[3.43]



图 3.10 规则的心率和混沌的心率

然而,混沌状态不可一般地看作疾病,而规则状态并不总是代表健康。有限的混沌吸引子保护着有机体免受危险的僵死性。当环境迅速而难以预料地发生变化时,器官必须要能够以灵活的方式作出反应。心脏搏动和呼吸速率决非如同理想化摆的力学模型那样一成不变。

必须把人体的一个个器官以及整个机体都理解为具有高度敏感性的多个非线性复杂动态系统的一个系统。将其控制参量调到临界值可能引起不可逆发展的相变,这对于人体健康多少都意味着危险情况。耗散的复杂结构是与周遭环境不可分割的开放系统。因此,在复杂动态系统探究方式的背景下,把完整的人体分部位进行术业专攻的传统“机械论”医学观点必须引起深刻批判。完整的身体不只是其部分之和。人们惊奇地

发现,从现代复杂动力学的观点看来,古代以来传统医生的古老要求再次获得了支持,即医学不仅是分析的科学也是治疗的艺术,必须考虑健康与疾病的整体性。

3.4 复杂系统和种群生态学

生态系统是自然界物理组分、化学组分和生物组分有结构有功能地组织起来的系统。生态学是关于自然界的这些活组分和死组分如何在功能上结合起来的科学。显然,在复杂系统探究方式的框架中,生态学必须处理高度复杂的耗散结构和保守结构,它们依赖于其中涉及到的个别物理系统、化学系统和生物系统的复杂性以及它们之间的相互作用。^[3.44]

1860年,亨利·梭罗在关于“森林树木的演替”的演讲中,提出了一个对生态进行经验研究的早期案例。他观察到,自然界发生着植物的发展过程,导致了可观察、可预见的树种的序列变化。如果生态系统不受干扰,从荒原出发,会循序形成草原、灌丛、松林,最后是栎树-山黑桃树林,可预见这个周期大约是150年,至少在19世纪的马萨诸塞是这样。^[3.45]

几乎在同一年,查理·达尔文发表了他的著名的以变异和选择机制为基础的进化理论。达尔文把有机体的不断变化看作是,通过竞争和适应去优化地适应其生态生境。来自太阳和化学反应的能量流,使得生命处于运动过程中,并得到保持。玻耳兹曼已经认识到,生物圈为生命组织提取了高能熵作为代价。这些过程不仅仅以一个生态系统的生物组分为基础,而且还影响了非生物组分。

詹姆斯·洛夫洛克已经提出,活系统推动着地球上主要的地球化学循环。他指出,全球的大气组分不仅仅是由活系统发展起来的,而且也是

由全球生态系统控制的。“自然的平衡”，已经成为刻画着地球上人类生态系统的复杂平衡网的一个流行主题。^[3. 46]

复杂系统的数学理论，使得人们可以为某些简化的生态案例的研究建立模型。要解释的现象主要是，物种的丰度和分布。它们可以显示出典型的耗散结构的特征，如时间振荡。在 20 世纪初，亚得里亚海地区的渔民观察到，鱼群数目发生着周期性变化。这些振荡是由捕食鱼类和被捕食鱼类之间的相互作用引起的。如果捕食鱼类过多地吃掉了被捕食鱼类，被捕食鱼类的数目就会减少，然后捕食鱼类的数目也会减少。结果又造成被捕食鱼类数目的增加，然后再导致了捕食鱼类的增加。从而，就出现了这两种群体的循环变化。

1925 年，洛特卡和沃尔泰拉提出了一个非线性的动力学模型。模型的每一个状态由捕食鱼类的数目和被捕食鱼类的数目来决定。于是，模型的态空间就由一个二维欧几里得平面来代表，其坐标分别是捕食鱼类和被捕食鱼类。对两群体的长时间观察结果，在该平面上描出虚线。出生和死亡以整数形式改变着坐标，每次改变一点。为了运用连续的动力学，虚线必须理想化成连续曲线。

态空间的矢量场可以大致用 4 个区域来描述(图 3. 11a)。在区域 A 中，两个群体都相对较小，捕食鱼类由于被捕食鱼类的缺乏而减少，而被捕食鱼类则由于捕食鱼类较少而增加。这种习惯趋势作为受约束的速度矢量，在图中示意为带箭头的曲线。在区域 B 中，被捕食鱼类较多，捕食鱼类较少。当被捕食鱼类较多和捕食鱼类较少时，两个群体都在增长。这用矢量示意在区域 B 中。在区域 C，两个群体都相对较大。捕食鱼类因食物充分而增加，而被捕食鱼群则减少。这种趋势用区域 C 中的矢量来示意。在区域 D 中，被捕食鱼类不多而捕食鱼类较多，两个群体都在减少。这种趋势用矢量示意在区域 D 中。这种系统的相图可以用封闭的轨迹形象地表示出来，因为此种变动趋向于循环。

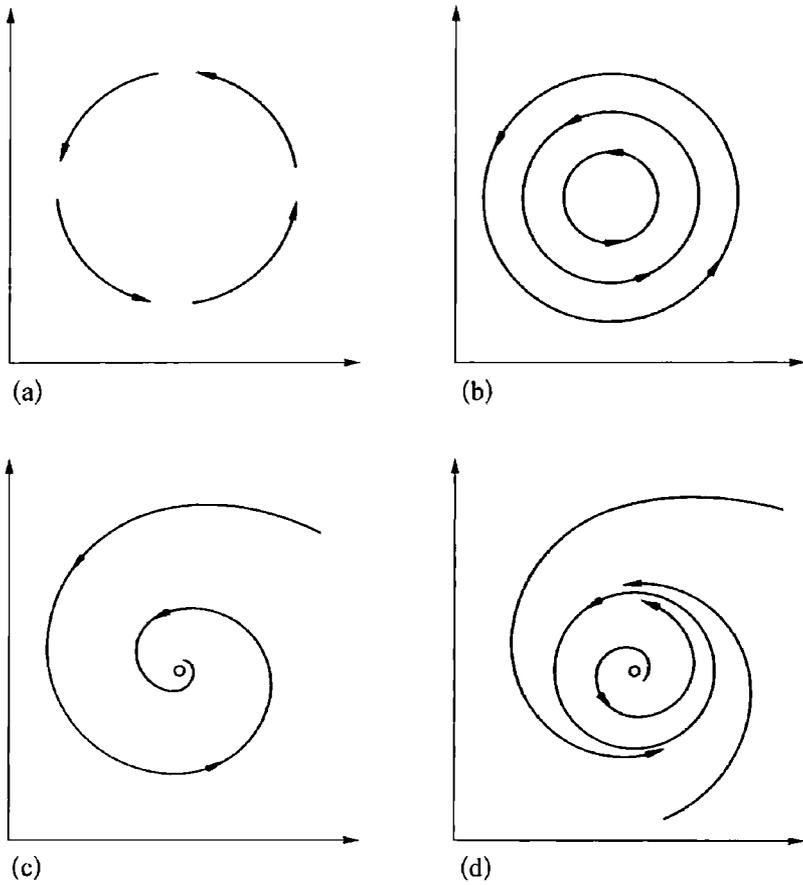


图 3.11 捕食群体和被捕食群体的生态系统的相图(洛特卡-沃尔泰拉)

(a) 一条封闭轨迹;(b) 一组封闭轨迹;(c) 一个点吸引子;(d) 一条周期轨迹。^[3.47]

在图 3.11b 中,相图是一组围绕着一个中心平衡点的封闭轨迹。动力学系统理论告诉我们,长期可期待的是,相图可使得生态学家知道对于两个群体的长期现象是什么。捕食鱼类和被捕食鱼类的起始群体都将周期性地再现。^[3.47]

如果将某种生态摩擦加进模型中,中心就将成为一个点吸引子。这将是一个处于静平衡态的生态系统模型(图 3.11c)。对此模型的一点不同的但是可能更现实的修订,导致了如图 3.11d 的相图,只有一条周期轨迹。

从分析的观点看,群体的演化受群体大小的变化率方程所支配。^[3.48]显然,群体中个体的数目按照其生长率减去其死亡率而变化。进一步的参量必须考虑到有限的食物供给或食物源的耗尽。群体的生活条件有若干种,这些都必须要在模型中加以考虑。如果不同的物种赖以生存的食物不同,不发生相互作用,那么它们就可以共存。

如果不同的物种在类似的条件下生活,那么食物供给的交叠就必须在群体的演化方程中加以考虑。如果把食物供给随时间的变化略而不计,那么就极大地减少了复杂性。所形成的演化方程,达到稳定构型时,允许有几种共存方案。

在生物学上,稳定态相应的生态生境对于物种的生存是重要的。由洛特卡-沃尔泰拉方程实现的两个群体的捕食者-被捕食者关系,由图3.11中的相图所示。自然界的一种特殊的合作形式是两个物种的共生。用演化方程为某种共生建立模型时,必须要考虑到,一个物种的繁殖率也依赖于另一物种的存在。

动物群体可以用其社会行为的复杂性程度来刻画。有一些昆虫群体具有复杂的社会结构,社会生物学对它们颇感兴趣。尼科利斯等人进行了尝试,试图用复杂动力学系统为白蚁的社会组织建立模型。白蚁的个体之间的相互作用,在物理上是借声音、视觉、触觉和化学信号的传递来实现的。

该系统的复杂秩序,是由功能结构如组织等级、巢穴建筑、途径形成、材料或食物输送等来调节的。白蚁合成调节其行为的化学物质。它们有这样的趋势,即追随化学分子密度达到其极大值所处的方向。此种动物集体的和宏观的运动,由这些化学物浓度来调节。

为了给此种集体运动建立模型,需要两个方程,考虑到昆虫和化学物质浓度的变化率。在序参量(“趋化性系数”)的临界值处,稳恒的均匀解失稳。系统于是演化成为一种不均匀的稳恒态。相应地,不同的分支结

构将出现,正如在不同的白蚁社会中观察到的。^[3.49]

昆虫的社会复杂性,也可以用筑巢这样的协调行为来刻画。这种活动早已被观察到,并进行了实验探讨。一个典型的观察是,在特定点的建筑材料的堆积,刺激起昆虫开始在此积累起更多的建筑材料。这是一种自催化反应,它与昆虫的随机堆放一起可以用3个微分方程来建立模型。这些方程包括了这样的观察:白蚁在操作其建筑材料时,放出特定的化学物质气味,它们在大气中扩散,并将此种昆虫吸引到最大密度的地点,在此已有建筑材料的堆积。

因此,第一个方程描述建筑材料浓度的变化率,它正比于昆虫的浓度。第二个演化方程涉及气味的变化率,气味具有一定的扩散系数。第三个演化方程描述了昆虫浓度的变化率,包括昆虫、扩散和朝向气味源运动的昆虫流。

筑巢的复杂社会性活动对应于这些方程的解。因此,最初的不协调的活动阶段对应于这些方程的均匀解。如果某处出现了某个充分大的涨落即较大的建筑材料堆积,那么就会出现某根柱子或某堵墙。宏观序的形成,在此表现为昆虫的巢穴建筑物,是由微观相互作用的涨落引起的。

上述类型的模型现在常常运用于生态学。有必要提到的是,它们仍然处于相当简化的水平。在现实中,人们不得不考虑到许多额外的效应,诸如时间滞后、季节变化、不同的死亡率、不同的反应行为。一般地,出现的往往不仅仅是一种或两种复杂群体及其(简化了的)环境的相互作用,而且还有大量不同的相互作用着的群体。它们的非线性动力学的相图,至少允许进行长时间的总体预测。^[3.50]

在传统的达尔文观点中,生物进化——它们的建模必须采用复杂动力系统——有两种重要的力量在起作用:突变压力和选择。在生物学群体中,个体的行为唯一受其基因支配,新型个体的放大相应于通过突变的自然选择的达尔文进化,这是系统中自发出现的。在高等动物的情形,存

在行为变化(“创新”)和通过信息来适应的可能性。在生态学进化中,新的生态生境出现了,它们为特定的物种所占据。显然,进化没有某种简单的模式,而是某种不同等级的复杂的变化和稳定化策略,它们是从前生物进化到生态学进化中形成的,最终是具有人的学习策略的文化进化(参见第7章)。

复杂系统探究方式显示出大量的可能的进化,其方向难以意料,由随机涨落引起。全局的优化是没有的,全局的效用函数也是没有的,全局的选择函数同样是没有的,其他简化的进化策略仍然是没有的,有的只是一系列的接近分岔点的不稳定性。总之,达尔文的观点仅仅是进化的一个特殊的方面。对于许多的同时代人来说,达尔文是以叫做“进化”的非人格化神代替了叫做“上帝”的人格化神,并以简单规律支配这个世界。这种19世纪的世俗化宗教态度后来得到延续,政治思想家如卡尔·马克思相信一个叫做“历史”的非人格化神,它以简化了的社会规律支配着人类的命运。

在18世纪,康德已经在抱怨“自然”一词似乎是指认一种非人格化神。然而,正如康德所论证的那样,“自然”只不过是人的一种“调节性理想”。以现代观点看,我们实际上只能识别具有复杂程度或高或低的动态模型,这些模型可能以或高或低的精度与观察数据吻合。对自然和人类史的某个显赫的先知的告别,也许留下了担忧危险的混沌涨落的情感。但是,另一方面,这些涨落可能带来真正的创新、真正的选择和真正的自由。

3.5 复杂系统和生命的幂律

与其他领域的科学一样,生物学建模的目标是找到适当模型以捕捉

所研究结构或过程的本质特征。简单线性规律和欧几里得几何学的型与排列通常都不能适用于生物学。甚至在现实生活中也找不到具有几何学自相似性的分形物体,分形物体其组分是本身的准确复制,只是尺寸较小(参见第2.6节)。生物体的组件很少是其本身的小尺度精确拷贝。它们不是几何学意义上的自相似,而是统计意义上的自相似。在这种情形里,组分的统计属性与其全体的统计属性是成比例的。一个例子是生理结构上新血管从母血管中分出的平均比率。这个比率对于大血管和小血管都是一样的。肺动脉或心血管分支网(图3.9)也满足统计意义的自相似性条件。不同空间尺度上具有相似分支样式的更多例子存在于神经元树突,肝脏里的毛细管,循环系统的血管,以及在其中的流体分布。统计意义的自相似性也发生在层级结构中。相邻部分之间的局部互动,产生一种统计意义上全局自相似模式的过程被称为“自组织”。这种模式出现,在分子层次例如配位基对酶的粘合,在细胞层次例如干细胞的分化,在器官层次例如粘菌聚集(图3.5)。

在数学上,统计意义的自相似性意味着,以较高分辨率测量的物体局部属性与较低分辨率测量的整个物体同一属性是成正比的。因此,以分辨率 r 测量的属性值 $L(r)$ 与较高分辨率 ar 测量的属性值 $L(ar)$ ($a < 1$) 是可比较的。统计意义的自相似性表明 $L(r)$ 与 $L(ar)$ 成正比,即 $L(ar) = kL(r)$, k 为依赖于 a 的比例常数。个体特征的尺度取决于测量的分辨率。在分形物体当中,并不存在测量的真值。测量值与测量分辨率之间的联系被称为标度关系。自相似性决定着标度关系。上述自相似关系预示着,存在一种标度关系能够描述测量的属性值 $L(r)$ 是怎样依赖于测量尺度 r 。由自相似性决定的最简单标度关系是采取幂律的形式 $L(r) = Ar^\alpha$, 其中 A 和 α 是任何特定分形物体或过程的常数。对方程式两边取对数,将产生一个线性方程 $\log L(r) = \alpha \log(r) + b$, $b = \log A$ 。因此,当测量值的对数标记在所采用测量尺度的对数坐标上时,幂律的比例

就是一条直线。^[3.51] 尽管并非所有的幂律关系都可以归结为分形,然而这种关系的存在促使我们检验自相似性。

幂律比例的例子还包括肺支气管相续生长的分支通道的直径。另一个例子是贯穿肺内皮细胞之间连接部的运输路径长度。为了判定由于培养基扩散引起的时间延迟是否比酶反应所需时间长,化学反应的时间进程也得到了研究。从像老鼠那样的小动物到像大象那样的大动物,哺乳动物生理学也从新陈代谢和结构的角考察了比例关系。众所周知,小而轻的动物通常行动迅速,大而重的动物则行动迟缓。其心搏频度也是如此,老鼠的心跳比大象快。大象比老鼠活得久。因此,人们猜测动物寿命或者生命活动与其质量之间存在某种关系。

动物的活动取决于新陈代谢速度。所谓新陈代谢率 X_{MB} 就是表示有机体与其环境之间能量交换的速度。有机体的新陈代谢速度与质量有关系吗? 显然,躯体的质量 M 正比于具有典型长度 L 的机体的体积 L^3 。与环境交换能量的新陈代谢发生在机体的表面,因而正比于 L^2 。从 $X_{MB} \sim L^2$ 和 $M \sim L^3$, 可以推出 $X_{MB} \sim M^{2/3}$ 。这个预料中的关系一般表达为异速生长方程 $X = X_0 \cdot M^\gamma$ 。这个幂律方程把生物变量 X (例如,新陈代谢率或者机体的生命期望值) 与其身体质量 M 联系起来。 X_0 是指示标度的参考值,而 γ 则是标度指数。当 X_0 随着机体的个别典型属性变化, γ 只取很小的数值。起初假设 γ 是三分之一的倍数,因为身体的质量取决于其三维体积。然而实验表明新陈代谢率实际上是与 $M^{3/4}$ 成正比。这方面的例子有: 心率,与 $M^{-1/4}$ 成正比; 生命期望值与血液循环,都与 $M^{1/4}$ 成正比。G·B·韦斯特, J·H·布朗, 以及 B·J·恩奎斯特^[3.52] 认为这类幂律可以解释为有机体的分形性。他们的假说基于以下三个原则:

1. 自然界中的自然选择压力, 导致有机体新陈代谢能力的优化需通过对其表面积 α 的最大化以及体内运输距离 l 和运输时间 t 的最小化来

实现。

2. 一个有机体的内部供给网络可以是分形的。

3. 在生物系统中存在着长度 l_m 的最小典型单位, 这个单位并不与有机体的尺度成比例, 而是保持不变。

显然, 如果上述三个原则中只应用两个将得出一个 $1/3$ 或 $1/3$ 倍数的指数(经验上是错的), 但如果应用所有三个原则就会得出 $1/4$ 的倍数(经验上吻合)。那么第四维是从何而来的? 首先, 如果有有机体的所有特征长度 l_i 被因子 Γ 拉伸, 即 $l_i \rightarrow \Gamma \cdot l_i$, 那么这个机体的整体表面积就发生了变化。这种情况下我们得到一个新面积 $a'(l_1, l_2, \dots) = \Gamma^\alpha \cdot a(l_1, l_2, \dots)$ 。如果所有长度都能够标度在有机体内部(即第三原则非真), 那么就有 $\alpha=2$ 。这是一个正常面积的预期标度, 可以简便地用一个例子来表示: 边长 $l_1 = 3\text{ m}$ 和 $l_2 = 2\text{ m}$ 的矩形, 其面积为 $a(l_1, l_2) = 6\text{ m}^2$ 。如果每一条边延长为 3 倍, 则矩形面积增加至 9 倍, 即 $a' = 36\text{ m}^2$ *。对于 $\Gamma = 3$, 则有 $\Gamma^2 = 9$, 并且新面积 $a' = \Gamma^2 \cdot a$, 是旧面积 a 的 9 倍。总之, $\alpha=2$ 表示面积的标度, 不依赖于 a 的分形性。一个类似的证据也适用于有机体长度的典型单位 $l'(\Gamma \cdot l_1, \Gamma \cdot l_2, \dots) = \Gamma^\lambda \cdot (l_1, l_2, \dots)$, $\lambda = 1$ 。

现在让我们假设第三原则也适用于正常面积 $a(l_1, l_2)$, 这就意味着 l_1 不能延伸。这个情况下, 延伸之后的面积 $a' = l_1 \cdot \Gamma \cdot l_2$, 只是旧面积的 3 倍。对于面积, 标度法则 $a' = \Gamma^\alpha \cdot a$ 就没有通常的指数(即 2); 而是, $\alpha=1$, 对应于一个长度。通过面积和长度的标度指数 α 和 λ , 体积的标度以 $v' = \Gamma^{\alpha+\lambda} \cdot v$ 来给出。当组织具有均一密度时, 机体质量 M 与其体积 v 成正比。那么内部面积 a 对机体质量 M 的依赖关系就由 $a \sim M^{\alpha/(\alpha+\lambda)}$ 决定。

对于我们三维世界正常值 $\alpha = 2$ 而 $\lambda = 1$, (经验上错误的) 定律 $a \sim$

* 原文如此。面积增至 9 倍, 应该为 54 m^2 。——译者

$M^{2/3}$ 得出。如果有机体中没有标度抑制单位,这个关系也成立。然而,根据第二原则,生物系统有一个无法标度(例如毛细血管的直径)的最小长度 l_m 。这个情况下,就需要考虑(如第二原则所假设) a 和 l 当中可能的分形结构:指数 α 和 λ 的取值就不必像三维世界那样。根据分形定律,它们会在 1 与 2(对 λ 而言)和 2 与 3(对 α 而言)之间变化。当 $\alpha=3$,我们得到一个填充体积的分形, $\alpha=2$ 则给出了一个填充面积的分形。为了确定方程 $a \sim M^{\alpha/(\alpha+\lambda)}$ 的取值,就必须把第一原则纳入考虑。如果 α 取最大值 3 而 λ 取最小值 1,面积 a 最大。采用这些值,我们得到一个可观察定律 $a \sim M^{3/4}$,以及一般地,1/4 倍数的指数。这个结构满足第一原则:最大的内部面积是一个填充体积的分形。最短运输联系是常态上的几何线,并不被分形结构所放大,所以 $\lambda=1$ 。图 3.13 中,将欧几里得几何学与生物的分形维度进行了比较。与生物质量 M 的关系假设了一个统一不变的组织密度。生命物活动在三维空间里,但其内部生理似乎预示着一种四维的结构。^[3.53] 这些结果依赖于经验观察和测量。因此,未来的研究将改变与改进这些结果。通过更精确的统计,能够鉴别 1/4 指数中更为精确的误差。

变量	欧氏标度	生物学标度
长度	$L \sim A^{1/2} \sim V^{1/3} \sim M^{1/3}$	$L \sim a^{1/3} \sim v^{1/4} \sim M^{1/4}$
面积	$A \sim L^2 \sim V^{2/3} \sim M^{2/3}$	$a \sim l^3 \sim v^{3/4} \sim M^{3/4}$
体积	$V \sim L^3 \sim V^{3/2} \sim M$	$v \sim l^4 \sim a^{4/3} \sim M$

表 3.1 欧氏标度和生物学标度

在任何情况下,幂律的出现表明所有生理系统的高度复杂性。在静态层次上,哺乳动物肺部的支气管系统是解剖学复杂性的有用例子。那种树状网络包含着层次复杂的气管,从呼吸道开始以越来越小的比例向

下分岔直至最小的支气管层次。人肺有两大主导特征,结构与组织的不规则性和丰富性。构成这类受约束随机性基础的必要概念是标度。对应幂律标度类似于异质同晶体的标度原则。

分形概念出现在几何学、统计学和动力学等三个既区别又联系的外观形式。首度发现分形语境的,是复杂的几何形式。分形结构并非光滑而均匀的,而是揭示越来越多的细节层次。肺、心脏以及许多解剖结构也产生分形结构。人们发现分形的第二个语境包括关于过程的统计属性。在这种(不是结构)情况下,统计特征既是非均质的也是不规则的,而不是光滑的。一个分形的统计过程是这样的一个过程,在所有层次的放大过程中存在着统计上的相似性而不是几何上的相似性。所以,好比几何结构满足一种比例关系那样,随机过程也是如此。第三个人们观察到分形的语境涉及时间,而且与动态过程有关。在非线性动力学系统中发生的混沌动态,其出现的部分原因是由于发生动态的吸引子具有一种分形的维度。混沌时间序列与分形结构之间的深层联系在第2.6节中已有介绍。动力学量可以被归于分形的第二个途径,是当被测量量的管道具有一个分形维度。一个例子是以心脏传导系统中出现的心脏脉冲来测量电压。小标度的结构再次相似于大标度的形式。时间序列中特征时间标度的明显缺乏,是传导系统结构所引起的后果。这就是几何结构与动力学之间的一种联系。

当把标度应用于生理学时,我们注意到:必须把不规则性看作基本特性,而不像传统观念那样看作病态的偏离。分形与自相似性概念不仅进入了生物医学现象的描述,也给临床医生带来了新的健康范式。^[3, 54]传统观念所理解的健康是一种自稳态(homeostasis),它基于这样的认识:存在一种理想状态,在这种状态下身体以某种模糊而最有效率的方式运行着。在这个模式中,疾病就是对这种身体状态的偏离。医生的任务就是帮助病人恢复到这个状态。在非线性动力学和生物学标度与幂律

中出现的新观念,则认为健康是同源动态的(homeodynamic);换句话说,健康取决于一组状态。一个健康人在正常活动进程中处于许多这类状态。响应的灵活性和误差的容受性是这个新范式的典型特征。这些概念在生理学和医学中有其最重要影响,在这里人们改变了长期秉持的关于健康与疾病的秩序与可变性的观点。一个健康的生理系统拥有一定数量的内在可变性,而转向更有序或者较低复杂状态则可能诱发疾病。奇怪吸引子可以决定心脑血管健康波动的动态图。

复杂系统和 心-脑进化

怎样来解释心和脑的形成呢？本章首先扼要回顾一下心身问题的历史。除了宗教传统以外，前人所持有的心和身的概念常常受到科学和技术的最高级标准的影响(第 4.1 节)。在复杂系统框架内，大脑的模型是非线性动力学的复杂细胞系统。精神状态(例如模式识别、感情、思维)的形成被解释为大脑集合体中(宏观)序参量的演化，序参量是由远离热平衡的学习策略中神经细胞的非线性(微观)相互作用引起的。例如，模式识别就被解释为某种相变，与决定着物理学、化学和生物学中模式涌现的演化方程有相似之处(第 4.2 节)。在神经生物学和认知心理学的最近研究中，科学家甚至推测，意识和自我意识的形成也取决于作为自反映的神经实现的“元细胞团”的产生率。弗洛伊德的无意识，被解释为关于某些注意状态的序参量的(部分)关闭。甚至我们的做梦和情绪看来也是受非线性动力学支配的(第 4.3 节)。

“人脑和心智问题上的牛顿”出现了吗？当然没有。复杂系统探究方式不能解释精神是什么。但是，我们在一定条件下可以为某些精神状态的动力学建立模型。甚至原则上也不排除为意向性行为建立模型。复杂系统不需要类似于大脑中的“小人”这种虚构的中央处理器。因此，微耳和的富有嘲笑意味的观察是过时了，他的观察中没有发现人体中有任何灵魂，甚至经过了上百次的解剖也是如此。精神气质被理解为复杂系统的一种整体状态，由其部分的局域非线性相互作用引起，但是不可能被还原为其部分（第 4.4 节）。我们的奇妙的情感、想象和创造性，自从人类文明肇始以来一再为诗人和艺术家所赞颂；不过，复杂系统探究方式还没有触及这些问题，尽管我们有时将模拟其非线性动力学的某些方面。

4.1 从柏拉图的灵魂到拉美特利的“人是机器”

自然界中最复杂的器官是人的大脑。今天，我们知道，由于有了大脑，才使得人的精神、意识和人格的形成成为可能，而这一切自从人的思维出现以来一直被看作是人类的最大奇迹之一。运用复杂系统探究方式，我们可以用复杂神经网络的非线性相互作用来为人的感知和思维的形成建立模型。因此，复杂系统模型有助于我们理解：心身过程是如何运作的，是如何在一定条件下的自然进化中出现的。从这种观点看，从长时间来说，对于在众所周知的自然进化规律中意识和精神是如何形成的，人们就用不着吃惊了。但是，人们仍然感到惊奇的是，它已经出现了。

在探讨复杂系统和心-脑的进化之前，我们先回顾一下早期的心灵哲学和神经生理学史。对照历史背景，我们可以看到，传统的心身问题中的哪些问题已经由复杂系统探究方式解决了，哪些问题还没有得到解决。

在前面的几章中,我们已经指出,早期的神话和宗教信念都试图解释人类生活的世界并将其与自然力结合起来。显然,人的欲望、恐惧、愤怒和想象力,如同自然的强制力那样,支配着人所生活的世界。意识,或心灵、精神、灵魂,都是生命中所经历的,它们似乎在人死后就“离开”了躯体。人们已经试图用自己熟悉的关于相互作用着的物理事物的经验,来为这些未知的过程建立模型。精神或意识状态被假定为叫作“灵魂”的特殊实体或某种类似的东西,正是它们造成了人的意向性行为。伴随着这种精神状态的假设,引起了一个问题:灵魂处于身体中何处?通常的回答是:它遍布于身体中,或它集中在某些器官中,例如心脏和肺部。尽管这种惊奇“事物”的效应显然是真实的,但是它像上帝或幽灵那样,是不可见、抓不住的。因此,人们普遍地相信,它具有某种神性的起源。前苏格拉底的哲学家们,在对传统的信仰和宗教信念的批判中,从自然来寻求原因和本原。一些思想家把“灵魂”看作诸如“气”或“火”这样的物质性东西,因为“气”和“火”被认为是最精细、最轻盈的物质形式。在阿那克萨哥拉看来,精神是运动和有序的原则,因此也就是生命的原素。在赫拉克利特看来,灵魂如同火焰,由宇宙的规律(逻各斯)所控制。灵魂,如同火,被水浇灭:“灵魂死后变成水”。^[4.1]这些探索,都是用熟悉的已知的东西来为未知的东西建模。

值得注意的是一位早期的医学思想家、毕达哥拉斯派学者克罗顿的阿尔克迈翁,他看来是第一位把感觉和思维定位在大脑的古希腊思想家。^[4.2]与古希腊早期的太阳中心宇宙中的天体模型一样,这种天才的思想很快就淹没在亚里士多德的权威之中,亚里士多德认为心脏是意识的场所,而大脑仅仅是用空气来进行冷却的机制。尽管亚里士多德深受古希腊早期医学思想家的影响,但是他不同意希波克拉底的卓见:大脑是“意识(sunesis)的信使,并告诉它发生什么”。

德谟克里特捍卫了早期的还原主义精神哲学,他力图把精神状态还

原为最小原子的相互作用。^[4.3]他的还原论的问题,当然就在于:“灵魂”仅仅由特殊的物质性的(但不可观测的)原子来定义。与物质性的定义或类比相反,毕达哥拉斯派哲学家把人的灵魂或精神解释成非物质性的精质,因为可以把灵魂想象为非物质的思想(如数字和关系)。换言之,灵魂是用数学的比例系统来建模的,这一系统的和谐或不和谐代表着如同音乐旋律般的精神状态。

毕达哥拉斯学派的概念影响了柏拉图关于人类灵魂的哲学,这种哲学与柏拉图的形式或理念论相联系。柏拉图在他的对话篇《美诺篇》中论证了,一个未受训练的奴隶是可以求解数学问题的。原因在于,在柏拉图看来,所有人在获得任何经验之前(即先验)都有某种永恒的知识。例如,在数学中,人通过分有永恒的形式和理念而具有这种先验的知识,这些形式和理念是在物先(*ante rem*)的,即与存在物的失真的、暂时的表面现象无关。^[4.4]

亚里士多德批评了柏拉图关于实在背后的理念世界的假说。理念是人对形式的抽象,形式在自然中(*in re*)发挥着作用。灵魂被描述为活物的形式(“实质”),即“原初隐德来希”,它是一种目的性力。但是,它并不与物质分离。灵魂是人体中的一种潜能。按照亚里士多德,人的机体被理解为一个整体。

然而,在亚里士多德和斯多亚传统中,已经发现了神经系统的解剖学。盖仑相信,神经把心灵普纽玛输送到肌肉,从而引起运动。心灵普纽玛不仅仅是一种如同呼吸和空气那样的物质材料,也是一种生命精灵。^[4.5]在中世纪,亚里士多德和斯多亚派的自然哲学对伊斯兰传统中的医学思想家有巨大的影响,如阿维森纳,他建立了一个医学学派,在手术、药理、治疗和康复中都留下了令人印象深刻的活动。^[4.6]后来,这些波斯和阿拉伯世界的医学准则只为少数几个基督教中世纪的思想家(如阿尔贝图斯·马格努斯)所认识。在关于心和脑的哲学方面,(例如,有关人的

意识问题的)科学讨论总是被宗教意识形态所掩盖,解剖尸体长期以来也是相当危险的事情。

与亚里士多德和阿维森纳传统中的整体论哲学相反,笛卡儿的理性主义教导了一种二元论的本体论,把精神和物质、灵魂和肉体严格两分。人体(res extensa)是一台物料机器,是按照力学和几何定律构造起来的。人体受到天赋观念(ideae innatae)的引导和控制,天赋观念体现在人的精神(res cogitans)之中。在《沉思录》中,笛卡儿通过怀疑一切事物的方法而得到人的精神的最基本直觉。方法上的怀疑是要找到那不容置疑的东西。笛卡儿能够怀疑所有科学的结果、常识的结果和感知的结果,但是不可能怀疑他自己的存在,这样的存在使得诸如怀疑等认识过程变得可能。

那我是什么呢?是那进行思考的东西。这个进行思考的东西是什么呢?它是一个进行着怀疑、理解、肯定、否认、下决心、反驳,还进行着想象和感受的东西。^[4.7]

当然,笛卡儿的理论的困难之处在于心与身的相互作用。他假定,人的机体以及它的种种器官,都是由坐落于大脑中的精神所引导的。神经是进出于大脑的消息的通道。它们作为发令的精神和执行的肌肉之间的因果链而起作用。从自己那套力学中的钟表范式出发,笛卡儿相信:所谓“动物精灵”的细微物质粒子在神经通道中快速地运动着,并相互推动着,从而把来自大脑的输入传递给肌肉。

与自然的所有机械效应相反,人的精神可以自发决定运动的方向。因此,精神对动物精灵的作用,就使后者的运动转向。只要“运动的量”是守恒的(即后来所谓的动量守恒定律),这就不违反笛卡儿的物理学规律。图 4.1 示意了笛卡儿的感知模型:微小的光线粒子撞击着人的眼睛,通

过特定的神经及其“动物精灵”的传递,刺激着大脑。手臂的运动与大脑中的精神的感知相协调。[4.8]

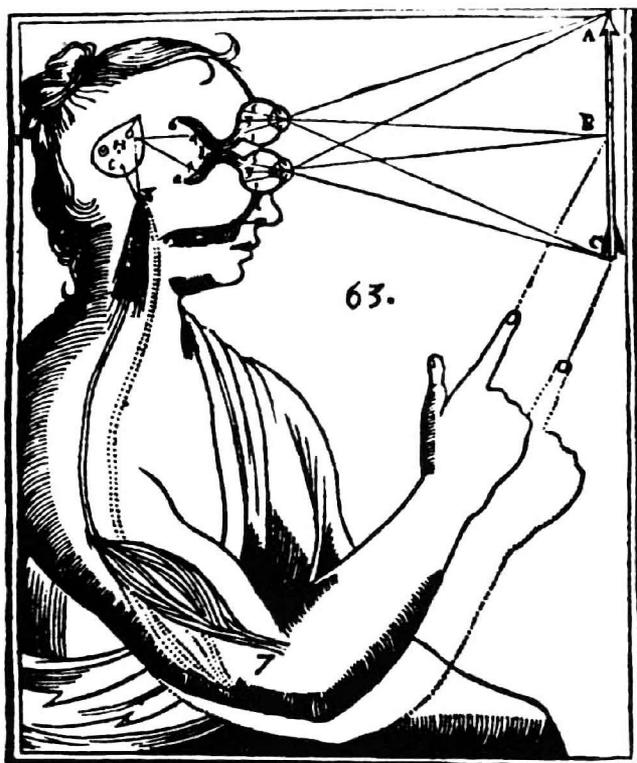


图 4.1 笛卡儿的感知和手臂运动几何模型

在《心灵的激情》一书中,笛卡儿甚至试图把如害怕和热爱那样的所有情绪状态分析为被动的物理结果,种种“动物精灵”的流动都由外部事件引发。如果在笛卡儿的机械模型中,用生物化学物质和电生理效应,如激素和神经递质,来取代动物精灵,那么他的这种神经活动概念就显得是相当现代的。

他的主要的困难是非物质的中介相互作用问题,也就是无广延且不可见的精神(*res cogitans*),与物质性的,亦即有广延且可见的身体(*res extensa*)之间的相互作用问题。笛卡儿把精神植于非常小的脑器官——松果腺,由此驾驭着动物精灵的运动。但是,无广延的精神是如何作用于

有广延的粒子(如动物精灵)的呢?在力学的框架中,这种相互作用问题原则上是无法解决的,从而引起了精神哲学的若干发展。

在偶因论哲学家如马勒布朗什看来,所有的因果关系都是不可思议的。上帝必定干预了所有的特定情形的因果作用。因此,心身问题就被赋予了神学的、特设的假说。斯宾诺莎把笛卡儿的心和身的二元论归结为单一实体的一元论。上帝就是万物的唯一实体。自然、精神和身体的一切外表,都仅仅是宇宙“实体”的属性(“状态”)。任何时候都没有奇迹。但是,上帝和人的精神都自然化了,自然因此也就成为了宇宙泛神论中的神性。^[4.9]

按照复杂系统探究方式,正是莱布尼茨提供了最瞩目的精神哲学。与其自然哲学相联系,我们回想起莱布尼茨的宇宙,它与笛卡儿和斯宾诺莎的宇宙相反,是由无数的实体(“单子”)构成的,这些“单子”相当于空间中不同点的观察,或多或少地透视了整体。因此,单子被看作一种类似灵魂的实体,被赋予了感知和记忆,但是其意识的清晰程度有差别。有些实体例如人,与动物、植物、石头(这三者的意识程度是逐次降低的)相比,具有较强的感知和较高级别的意识。甚至上帝也可以植于莱布尼茨的单子论中:上帝作为中心单子,在整体上具有最高程度的意识和最好的感知,但仍然是一种个体和有差异的实体。^[4.10]

显然,莱布尼茨没有笛卡儿的相互作用论的形而上学问题。事实上,莱布尼茨试图把经典力学与传统的亚里士多德自然目的论结合起来,因为他意识到机械论缺乏合适的精神哲学。从现代的观点看,莱布尼茨的类似灵魂的实体显得有些奇怪,它们具有感知和记忆,具有或多或少的生机。但是,对他来说,在具有或多或少复杂性的自动机框架中,用单子论来建立模型却毫无困难。莱布尼茨提出,每一实体都可以用一种单子的自动机来建立模型,自动机的不同状态相应于单子的不同感知。实体的意识程度是用其复杂性程度来度量的,标志着单子状态空间和信息处理

能力的大小。莱布尼茨的具有不同复杂性的自动机的状态,都在关联网中相互关联,用他的名言来说就是:单子没有“窗户”,也不会相互作用,却像巴洛克宫殿中的镜子一样相互反映。我们在第5章中,将更详尽地讨论莱布尼茨的单子复杂网络。总之,莱布尼茨假定了,精神不仅仅属于人类,而且也是系统的一种特征,这些系统按照其复杂程度表现出不同程度的强度。

英国经验主义哲学家如洛克和休谟批判了笛卡儿-柏拉图的如下信念:精神状态可以用反省和纯粹思维的方式进行分析,而无需感觉经验。在经验主义哲学家看来,精神只不过是一块白板,一个空贮藏室,用来接收感觉数据,以通过联想和抽象而形成概念。想象只是感觉-印象的不那么生动的复本,而感觉-印象可以形象地结合起来,如同独角兽那种概念一样。

从复杂系统探究方式来看,休谟发展了一种著名的联想心理学理论。他主张,自然中没有因果机制,精神中也没有因果规律,只存在一种对于那些感觉-印象的无意识的联想反映,感觉-印象在如闪电和雷鸣那样的一些情形下以关联的方式出现。我们可以说,大脑具有无意识地建造感觉-印象模式的能力。概念只不过是标志具有或多或少复杂性的感觉-印象模式的术语。除了数学以外,再没有建立在感知基础上的明确概念,而只有一些允许对事件作或多或少概率断言的模糊模式。在《人性论》一书中,休谟写道:

在我面前的桌子仅其外表就足以给予我广延的观念。于是,这种观念是从印象中获得并表现的,是在这一时刻显示给感觉的。但是,我的感觉向我传达的印象,不过是有颜色的点,这些点以某种方式排列着。如果眼睛可以更进一步地感知事物,我就希望它可以向我揭示这一切。但如果它不可能进一步显示出任何东西,我们就可

以得出有把握的结论,广延的观念只不过是这些颜色点以及它们的表现方式的复本。^[4.11]

按照笛卡儿的理性主义,人的精神支配着身体的机制,如同他所处的专制主义时代的君主统治着国家。对于休谟来说,不存在分离的人的精神实体,存在的只不过是一个自组织的区域,其中不断地发生着新模式的生成和旧模式的消失,这都由强度不同的感觉-印象的联想所引起。休谟的感觉-印象的自发结合和分离,可以比作民主社会中的自由公民,他们以群体或党团形式结合起来,而不是受到君主的令行禁止。

康德试图把理性主义和经验主义综合起来。按照经验论,认识始于经验和感觉资料。但是,理性论是对的,因为我们需要精神结构、认知模式和范畴,以组织经验和认知。康德试图引入奠定牛顿力学公理基础的哲学范畴。他的认识论的主要特征是,认识并不是我们大脑的白板对外部世界的被动印象所引起的。在康德意义上的认识,是一种主动的过程,由先验的范畴产生着世界的模型。物理事件的空间和时间秩序被归结为直觉的几何形式。在康德意义上的感知,是主动的信息处理过程,受到先验预期的调节。通过先验的因果范畴,事件的因果联系在哲学上成为可能。

休谟也是对的,因为因果关系是不能感觉的。但是,在休谟看来,为了精确预见和计算弹子球弹出的路径,只是重复弹出弹子球几次并联想感觉-印象几次还是不够的。我们必须预期,原因和结果可以由某种确定论的关系联系起来。康德认识论中的一般(确定论的)因果模式实现了这一点。但是,哪一种特定的原因作用是合适的,这个问题要由物理经验来确定和检验。认知模式已经在日常生活中运用起来了。在计算机科学中,甚至用编程语言的数据模式来为认知模式建模(参见第5.2节)。因此,康德的认识论可以解释为现代认知科学的重要先驱,现代认知科学假

定,由认知模式整理大量的经验材料。但是,与康德相反,这些认知模式可以在历史发展中发生变化,正如相对论中从欧几里得空间转变到非欧几里得空间所表明的。^[4.12]

斯宾诺莎主张一种精神的一元论,以跳出笛卡儿的二元论,而拉美特利却支持一种唯物主义一元论。笛卡儿的分离的类似灵魂的实体(res cogitans)的假设被认为是多余的,因为所有的精神状态都应该归结为人体中的机械过程——“人是机器”。拉美特利主张,在人和动物之间并无根本性差异。智能和反映行为都应该用神经的“冲动”来解释,而不能用“机械中的幽灵”来解释。但是,在18世纪的力学框架中,拉美特利的革命性观点只能成为一份令人鼓舞的生理学研究纲领。^[4.13]

著名的数学物理学家和生理学家赫尔曼·冯·亥姆霍兹(1821—1894)是一位后康德哲学家。^[4.14]他支持一种自然化的认知范畴框架,这种框架是构造起任何对世界的特定感知所要求的。当然,康德以后,范畴也发生了变化。然而,仍然有一些基本的模式如空间、数目、测量和因果性概念等,成为19世纪的物理学理论的特征。例如,亥姆霍兹意识到了非欧空间的数学可能性。因此,他认为,正确的物理几何必须由物理测量来确定。

在生理学理论方面,亥姆霍兹师从于约翰内斯·弥勒(1801—1858),后者有时被人们称作现代生理学之父。^[4.15]弥勒坚持一种特殊的神经能定律,该定律要求每一神经都具有其自身特定的能量或品质。他发现,感觉是可以由机械影响或化学影响、热、电等所激发的。在康德意义上的感知现在自然化了,因为大脑显然必须根据其对于神经的效应来重构世界。然而,弥勒坚持了一种非物质的动物精灵的概念。他相信,动物精灵是不可能测量的,因为它们的速度太快了。

亥姆霍兹从数学方面探讨了能量守恒定律。由于能量可以转化,但不可能创造或消灭,生命的非物质的能量超出了守恒定律,显得是没有

意义的。亥姆霍兹偏向于这样的理论,即一旦涉及能量问题,身体就可以看作把能量从一种形式变换为另一种形式的机械装置,而无需特殊的力或精气。化学反应可以产生出机体所产生的所有物理活动和热。肌肉的活动是由肌肉中的化学和物理变化所实现的。进一步,亥姆霍兹测量了神经传导速度,并揭示出,这个速度甚至比声速还要慢。^[4.16]从哲学上看,这些结果被解释为对弥勒的生命力论的驳斥。

埃米尔·杜布瓦-雷蒙(1818—1896)是弥勒的另一个学生,他证明了,神经效应实际上是一种电活动波。在那时,组织学家开始借助显微镜发现独立的细胞体和纤维。按照这些结果,神经活动和大脑看来是神经细胞(“神经元”)的复杂系统,具有复杂联结网络。20世纪初,人们开始描述神经元通信结构,该结构中信号从一个神经元传送到另一个神经元。但是,对于突触联接的观察,在20世纪中叶开始运用电子显微镜之前是不可能的。

感知、思想和情感的出现如何从这些神经解剖学和神经生理学描述中得到解释呢?最先用神经网络的细胞团来解释精神状态的思想家中,有一位是美国哲学家和心理学家威廉·詹姆斯。他在开设短期课程“心理学”(1890)时,坚持达尔文主义和进化观点,认为大脑并非是为了进行抽象思维而构造出来的,而是为了在进化中保证生存才构造出来的。他以实用主义的方式假定,大脑具有许多良好的求解工程问题的特征,这些特征适用于精神操作:

离开了其进行认识的物理环境,精神因素就不可能得到适当的研究……。总之,精神和世界必须一起进化,因此也就是某种相互适合的结果。^[4.17]

大脑组织在进行算术演算和形式逻辑推导时似乎能力很差。但是,

形成概念和联想的能力,提出好的猜想和假说,却是大脑的显著特征。詹姆斯提出了一种关于联想的机械模型,它可追溯到休谟的先驱性工作,并启发了我们后来的联想神经网络。以更定性的方式来看,他表述了某些原理,其中部分为现代复杂神经网络的数学模型所吸收:

1. 詹姆斯认为,联想是机械性的,是大脑皮层的功能。
2. 詹姆斯的联想原理:

当两个基元脑过程一起被激活或随即相继被激活,其中之一,具有将其再现使激发传播给另一个的趋势。

3. 詹姆斯的脑活动加和规律:

脑皮层中任意给定点的活动量,都是所有其他点向它放电的趋势之和,这种趋势:(1) 正比于该点伴随的激活次数;(2) 正比于这种激发的强度;(3) 正比于竞争点的缺少,这种点与第一个点没有功能联系,向其中放电可能转移。^[4.18]

如果在第二个原理中,用“神经元”代替“脑过程”这个术语,那么我们就获得了一种突触的描述,突触是赫布后来引入的(参见第 4.2 节)。如果在第三个规则中,用“神经元”代替“大脑皮层中的点”,我们就获得了突触输入的线性加和规则,这与某些赫布类型的神经网络模型很接近。詹姆斯还讨论了,部分联想的网络具有通过某种特殊的细胞联结程序将遗失部分重建起来的能力。詹姆斯当然是不熟悉计算机辅助建模的,尽管如此,但是他已经抓住了复杂系统探究方式的基本见解,即复杂的事件是由大量子联想构成的,这些子联想是通过诸如突触这样的基本机制联结起来的。

在论述“联想”的一章中,詹姆斯考虑了一个人对一个晚宴集会的思

考。晚宴的所有活动组合起来将提示的唯一的这件事就是,随后就浮现出具体的第一幕。这第一幕的所有细节的组合又只是随后提醒下一幕,如此等等。对于图 4.2,詹姆斯概括地描述了这种过程:

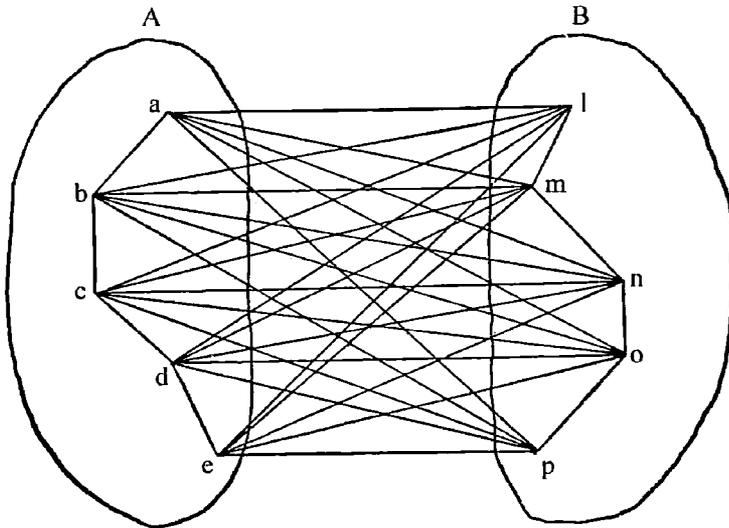


图 4.2 詹姆斯的联想网络几何模型

例如,如果 a、b、c、d、e 是由晚宴聚会最后活动所激发的基元神经迹(nervetracts),我们将其称作动作 A;l、m、n、o、p 是要穿过夜幕回家的基元神经迹,我们将其称作 B,因为 a、b、c、d、e 的每一个和全部,都将通过它们最初放电的路径向 l 放电。同理,它们向 m、n、o、p 放电;这些后来的基元神经迹中的每一个也都将加强另一个的动作,因为在经验 B 中,这些神经迹已经共振起来。图 4.2^[4.19,图57]中的线段表示进入 B 的每一个组元的放电的加和,这些影响的组合随后强化了 B,使 B 作为一个整体被唤醒。^[4.19]

詹姆斯坚信,“心智材料的表达次序只由大脑机能决定”。而根据现代复杂系统探究方法,序参量被用来描述由宏观的神经细胞团引起的精

神状态。在以下的章节中我们将会看到,从前苏格拉底哲学家,到康德与詹姆斯等人,他们关于心智机能的许多基本洞见直至今日仍未受到根本改变。

4.2 复杂系统和神经网络

19世纪,生理学家发现,依赖于个体细胞的神经系统显示出诸如感觉、视觉和肌肉运动等宏观效应。这些细胞通过引发电流或对电流作出反应,从而能够接收和传送信号。显然,神经系统和大脑是自然界进化中的最为复杂的系统之一。人的大脑中至少有100亿个神经细胞(神经元)。每个神经元都接收其他细胞的输入,并把输入整合起来;产生某种输出,并将它发送给其他的神经元。输入由特定的突触所接收,输出由特定的输出线所发送,这种输出线叫作轴突。

神经元自身就是一个复杂的电学装置,其中包含有连续的内部膜电位。如果膜电位超过了一定的阈值,神经元就会传送一个数字动作电位给其他的神经元。神经冲动在细胞体中产生,并沿着轴突传导,具有一个或多个分支。神经学家通常区分出兴奋突触和抑制突触,这使得神经元或多或少可能发放动作电位。围绕着神经元的树突可以接收来自数十个到数千个其他神经元发送来的信号。神经元的活性是用它的发放频率来度量的。生物神经元并非二元的,因为输出是连续的。不过,许多神经网络模型都进行了简化,运用二元计算单位。^[4.20]

大脑就是这种细胞组成的复杂系统。单个神经元不能够看见、推理或记忆,但是大脑却可以具有这些能力。视觉、推理和记忆被理解为较高级的功能。倾向于自下而上研究策略的科学家提出,只有每一神经元和突触的特殊性质都得到探讨和解释以后,大脑的那些较高级功能才能得

到认识和理解。

复杂系统探究方式的一种重要洞见是揭示了,整体系统的涌现效应是一种系统效应,不可能还原到单个元素的层次上。哲学上看,整体大于部分之和。因此,对于大脑的纯粹的自下而上的探索策略是注定要失败的。另一方面,纯粹自上而下策略的拥护者主张,认知完全是独立于神经系统,则遇上了古老的笛卡儿两难问题:“灵魂是如何驱动机器的?”

精神哲学中的传统做法(参见第 4.1 节)总是或多或少地倾向于其中的一种研究策略。18 世纪的莱布尼茨,以及后来的动物学家博内已经主张,自然界中存在着组织发展水平不同的复杂性。图 4.3 示意了神经系统中的组织发展水平。^[4. 21]组织的解剖学层级跨越不同的大小尺度:从

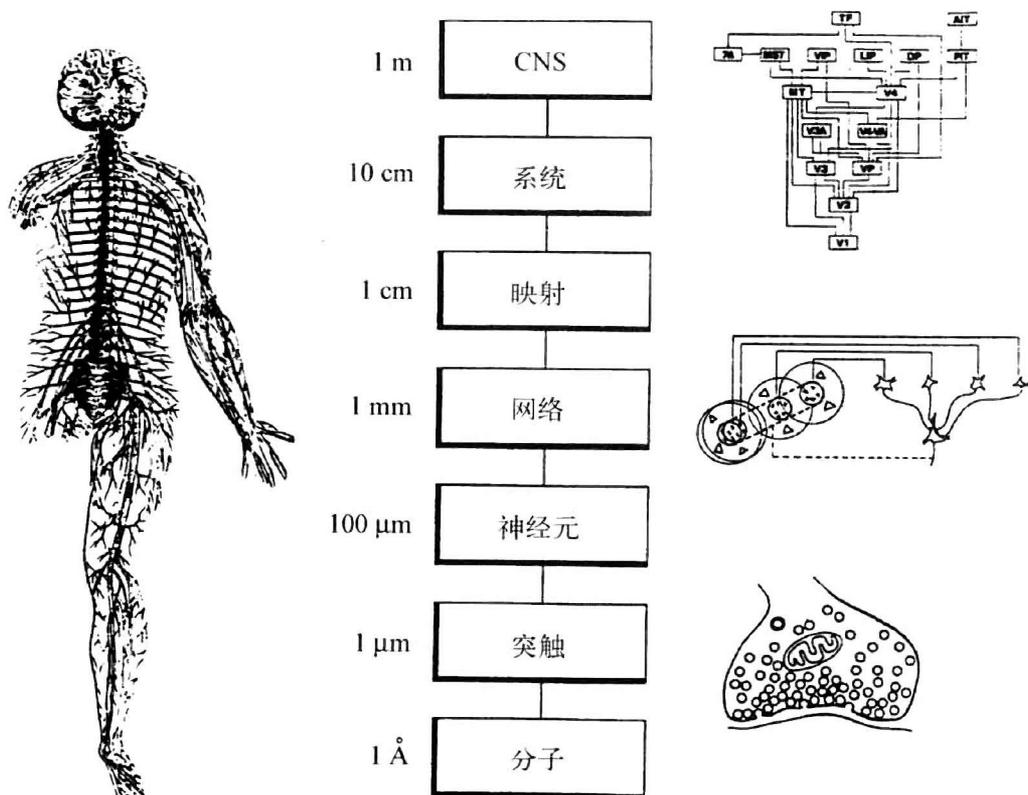


图 4.3 中枢神经系统(CNS)中复杂系统的程度

化学突触,视皮层中的细胞联结网络模型,以及视皮层的子系统。^[4. 21]

分子尺度到整个中枢神经系统(以下缩写为 CNS)。

这种尺度考虑了分子、膜、突触、神经元、核、环路、网络、皮层、映射、系统和整个神经系统。在图 4.3 的右部,最下方表示的是化学突触,中间的网络模型示意了神经节细胞如何连接成简单的视皮层细胞,最上方则表示视皮层的可视区的亚组织;图 4.3 的左部是整个的 CNS。

从这些等级水平出发的研究视角,可能涉及这样一些问题:例如,信号是如何在树突中整合起来的,神经元是如何在网络中相互作用的,网络是如何在如视觉那样的系统中相互作用的,系统是如何在 CNS 中相互作用的,以及 CNS 是如何与其环境相互作用的。每一层都可以用决定其特定结构的一些序参量来标志,特定结构是相对于特定等级层次的亚元素间的复杂相互作用引起的。例如,自下而上,我们可以区分出不同的序:离子运动、通道构型、动作电位、电位波、行进、感觉、行为、情感和推理。

十分显然,神经系统的一种重要功能是支配和控制有机体与其环境相应的生活条件。例如,一个初级可控状态的例子是有机体的温度。而在最高水平上,环境状态的变化需要提前计划和社会互动,在复杂的文化进化过程中,这就使得人类具有了言语交流、艺术创造和解决数学问题等技能。

从达尔文的观点来看,神经系统及其不断增加的复杂性层次的进化,似乎受自然界的最基本目的——适者生存——所推动。一些脑科学家甚至主张这样一种强烈见解:诸如抽象思维这样的精神现象的形成,也仅仅是某种“副现象”,它并非自然起初所倾向的。关于自然的意向性和目的性的信念,当然仅仅是人的一种隐喻,假定了某种世俗化的神性——称之为“自然”——在支配着进化。按照复杂系统探究方式,每一 CNS 水平都具有其自身的功能特征,这些特征是不可还原为较低层次的功能特征的。因此,从像体温控制系统这样的水平的视角来看,抽象思维只能被看作某种“副现象”。

为了给大脑及其复杂的能力建立模型,区别出如下的范畴是十分合适的。在神经元水平的模型中,研究集中在每一神经元的动力学性质和适应性上,以把神经元描述为单元。在神经网络水平上,均一的神经元相互关联起来展示出涌现的系统功能。在神经系统水平上的模型中,若干个网络结合起来展示出更复杂的感知、原动和稳定控制等功能。在精神操作水平的模型中,描述的基本过程是认知、思维和问题求解等等,这些过程的模拟与人工智能框架密切相关(参照第6章)。

从方法论的观点看,我们必须意识到,模型决不可能穷尽一切,也不可能是实在的同构映射。例如,在物理学中,单摆模型忽略了摩擦。在化学中,分子模型将轨道中的电子看作类似于太阳系中的行星,而不顾海森伯不确定原理。然而,这些模型在一定应用条件下都是有用的。大脑模型的条件由大脑组织的水平给出。如果要给一定水平上的大脑组织的功能建模,该模型就应该考虑到该水平之上和之下层次的条件。较高水平的性质常常是无关的。一般而言,建立模型的方法论是通过对方方法论上的成本和收益的计算来决定的。一个试图在各个方面都是现实的人脑模型就需要费用过于高昂的分析和建构。它可能永远难以满足所希望的目的,因此是不实际的。科学家致力于为大脑组织的一个个水平建立模型时,如对于有关的下一层次进行简化,就将更为成功。另一方面,模型必须是富有成果的,以揭示出大脑组织的根本性的复杂特征。

按照复杂系统探究方式,大脑功能的建模应该采用适当的态空间,以及描述了大脑活动的动力学轨迹的相图。法国数学家和哲学家勒内·笛卡儿,已经在(欧几里得)几何框架中描述了知觉、手臂运动和大脑的协作(图4.1)。

今天,神经网络是用向量空间和神经矩阵来进行几何描述的。神经元的电学输入与输出之间由权重联结。在小脑的示意图(图4.4)中,若已知神经矩阵的权重 w_{ij} ,则网络可通过矩阵相乘而由输入向量计算

输出向量^[4.22]。

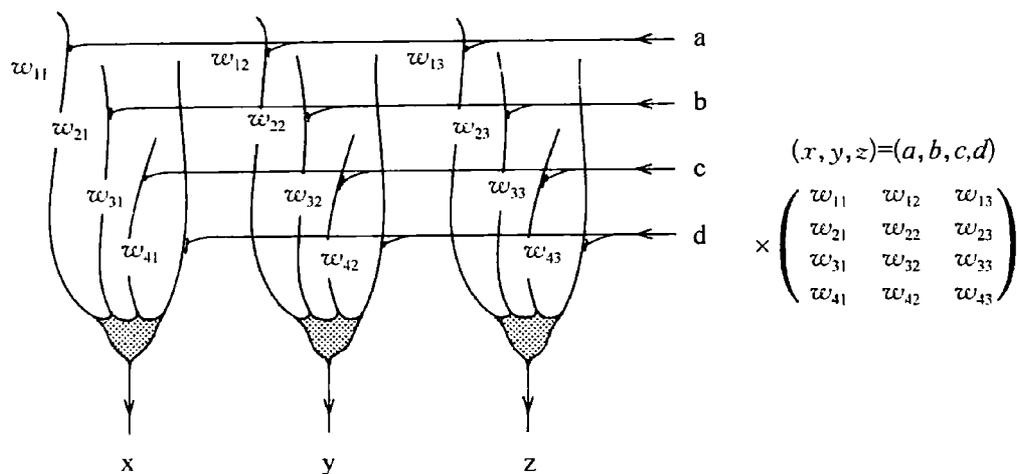


图 4.4 用神经矩阵相乘建立的小脑模型^[4.22]

图 4.4 的例子涉及一个 4×3 的神经元矩阵。神经生理学建模要求巨大的灵活性,因为神经网络可能是相当复杂的。但是,联结矩阵可以将高维态空间变换到具有不同维数的态空间。数学上,这些高维的变换可能引起几何问题,使用初等形式的解析几何难以求解。在这种情况下,就需要广义的张量网络理论,以处理复杂的协调任务。从历史上看,令人惊奇的是,从欧几里得几何转变到更一般的拓扑空间和度量空间后,使用这种几何语言,不仅仅可以在广义相对论中表述外部世界,同时还可以表述神经系统的内部特征。

关于笛卡儿早期的探索,考虑一种基本的感觉运动协调,这种协调用向量或张量变换来表示。动物如何抓住一个被它的感官所感知的对象(图 4.5a)? 在一个简化模型中,两眼的位置最先在一个感知数据的 2 维空间进行编码。这个态空间可以形象表示为一个 2 维地形图。从感觉态空间的某一点发出一个脉冲到相应的运动态空间的一个点,运动态空间也是由一个 2 维地形图来表示的。运动态空间的一个点为相应的手臂位置进行编码(图 4.5b)。^[4.23]

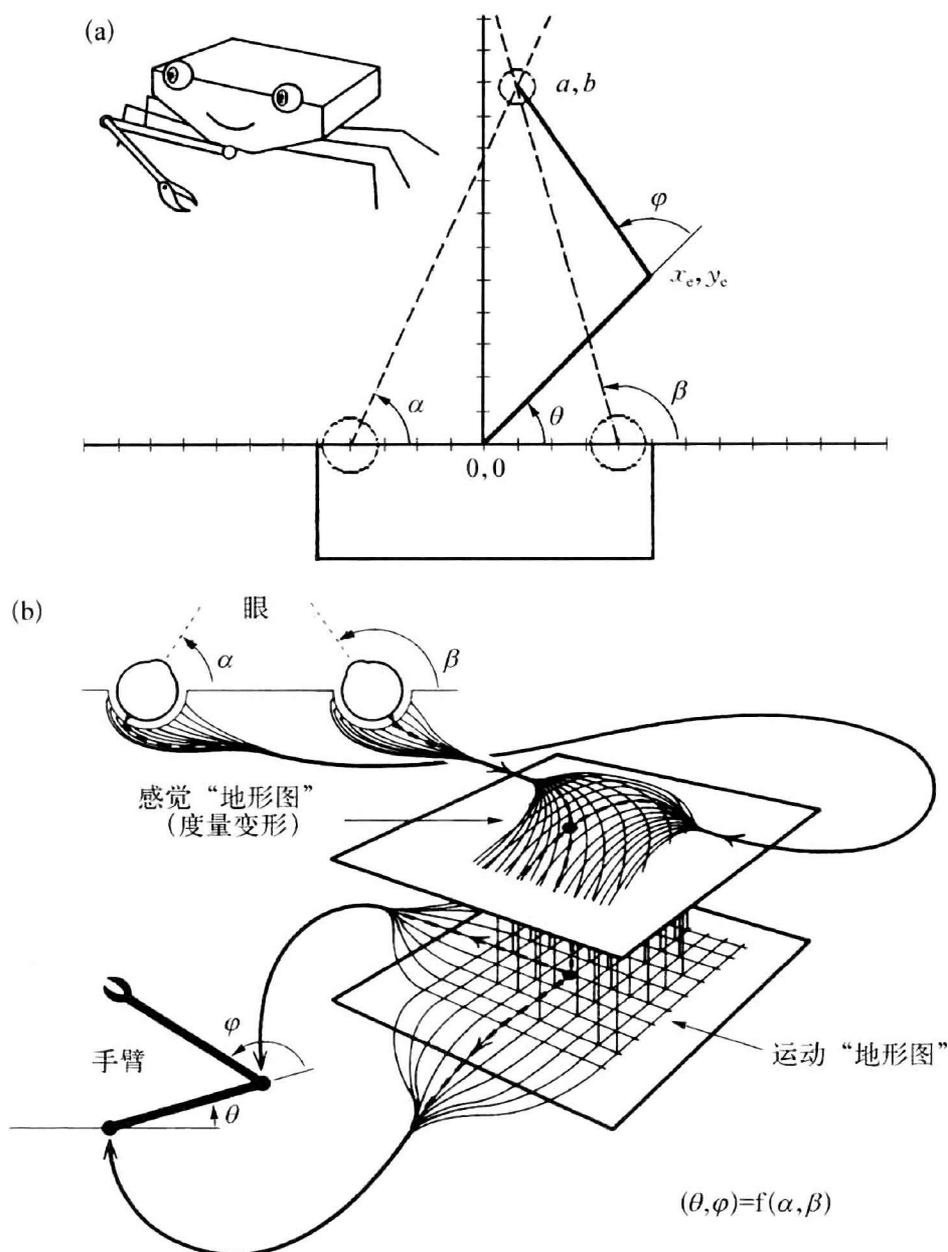


图 4.5 感觉运动协调及其几何模型

(a) 知觉和手臂运动的感觉运动协调；

(b) 以感觉和运动的“地形图”建立的感觉运动协调的几何模型。^[4, 23]

前庭眼反射是感觉运动协调的另一个例子。生物借助此神经排列，通过与头部运动方向相反的眼球的短弛豫运动，从而把影像稳定在视网

膜上。在此神经系统中,涉及两种神经结构,它们可以由 CNS 固有的不同的坐标系来代表。首先,我们必须分析耳前庭器的半规管,每一边有 3 条管,可用 3 维坐标系来表示。其次,每一个眼球都有 6 条眼球外肌,这对应于一个 6 维坐标系。因此,前庭眼反射的感觉运动协调,在几何上用 3 维(共变)向量的张量变换来描述。这种数学框架可以用来计算任何由给定的前庭输入造成的眼肌激活。

在神经元和神经网络水平上,人工单元的网络用来模拟和考察大脑组织。^[4. 24]这些单元被假定在 0 和 1 之间变化。每一单元通过具有不同权重的突触联结,接收来自其他单元的信号。接受表示和发送表示是值的有序集合,而输出单元是适当激活了的。数学上,这种程序可以解释为从作为自变量的某种输入到作为函数值的输出的一个映射。函数规则是由权重的排列所决定的,而权重依赖于神经网络的拓扑。

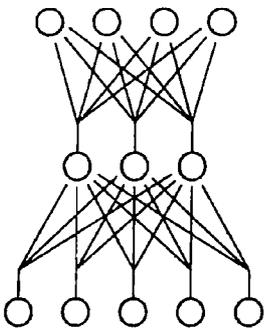


图4.6 具有隐含单元的3层网络

在大脑中,神经元有时构成了作为输入层的群体(图 4.6)。这些细胞的轴突发送到第 2 层神经元。在这第 2 层细胞的轴突又可以投射到第 3 层细胞群体上,如此等等。在所有的输入单元中同时激活的水平构成的组合集,是网络的输入刺激(作为输入向量)的表示。这种输入向量及其活化水平,向上传播到中间层次。结果是一组活化水平,决定着这一活化水平的是,输入层的输入向量,以及从输入单元的分支末端到中间层的那些关联权重。这种中间层的活化向量向上传播到最高的单元层,在 3 层网络的情况下,就产生了一个输出向量。同样,这个输出向量由中间层的活化向量和从中间单元的分支末端到输出单元的关联权重决定。

一个仅仅具有输入层和输出层的两层网络相应于一种简单的刺激-反应模式,具有可观察的、可测量的输入和输出。在 3 层网络的情况下,

中间层的单元及其权重有时难以直接测量,而只是被假设为某种处于黑箱中的隐藏机制。因此,它们被称为隐含单元。

当然,真实的神经系统显示出多得多的单元和层次。例如,对于人来说,大脑皮层的结构包含了至少6层各异的神经元。顺便指出,图4.4所示的小脑的神经矩阵所表示的从输入到输出的映射,可以等价地由具有输入层和输出层的两层神经网络来描述。3层神经网络则等价于顺序相连的两个神经矩阵。但是,这种多层的网络不能推广到整个大脑和神经系统,因为在真实大脑中,细胞群体往往在给定层次中表现出广泛的细胞与细胞的关联,这需要在某些不同的模型中加以考虑。

按照复杂系统探究方式,特定层的神经元可以被解释为态空间轴线,这一态空间表示该层可能的活性状态。状态的发展,即其动力学,由轨迹来说明,而轨迹可由该特定网络的某种学习过程所引起。

例如,知觉可以用神经网络的向量处理来解释。最初,外部世界会对输入神经元带来某种刺激(例如,作用于眼睛的电磁光信号、颜色,或者作用于耳朵的声波),这类刺激经过神经网络的处理,产生出某种输出向量,即对外部世界的诸如视觉或听觉之类的形象。但是神经网络必须学会在大量的输入数据中,区分和识别出正确的形状、颜色、声音等信息。

学习程序只不过是一种对于众多权重的调节,以获得所希望的输出向量(例如知觉)。学习程序可以由数学算法来加以模拟,而算法是人工智能研究中的重要课题(参见第6.2节)。学习程序在每一神经层次上(也是由向量来表示)产生出权重构型。在任一给定的时间,突触值的完整集定义了一个权重空间,其中每一轴线上的点说明了每一特定权重的大小。一般而言,学习意味着使得最适解(知觉、思想等等)和次适解之间的误差或差异最小化。因此,学习过程可以形象表示为权重空间的轨迹,该轨迹从初始随机的集合位置出发,到达最终的最小误差位置(图4.7a)。这种建模的关键意味着,可以通过算法程序使某个函数具体化,从而设定

网络中的权重。业已假定,任何可表征的世界都可以通过权重的构型在网络中得到表示。

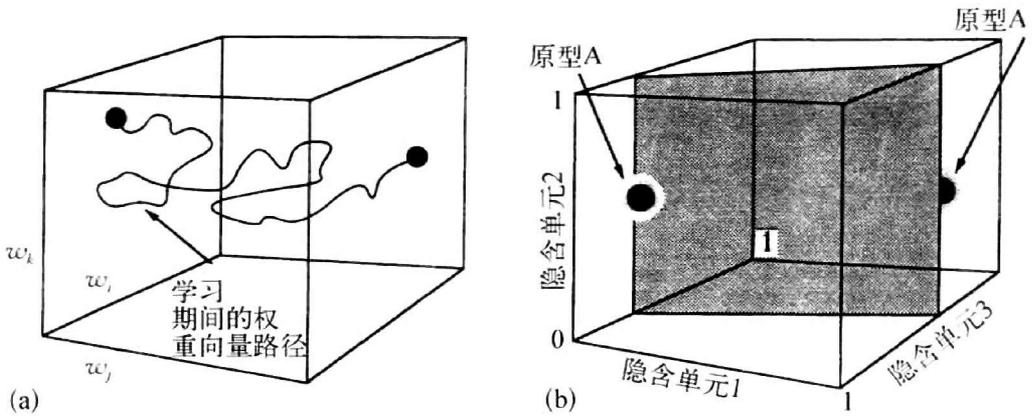


图 4.7 图 4.6 所示的 3 层网络的突触权重空间(a)与活化向量空间(b)^[4.25]

图 4.7a 示意了学习过程中突触权重空间的轨迹。这个空间简化为只有 3 个权重,表示 3 层网络中突触的所有可能的权重值的组合(参见图 4.6)。图 4.7b 示意了相应的活化向量空间,其轴线是 3 层网络中的隐含单元(参见图 4.6)。^[4.25]

权重空间和活化空间是相似空间,因为代表类似事物的类似向量是由位置的近似来反映的。权重构型把类似的事物集合在一起,并考虑到对于事物之间的细微差异的可能有的敏感性。因此,在活化空间,我们可以区分出原型向量,它们代表了具有细微差异的类似事物,这一细微差异由事物到原型向量的距离来度量。在观察和行为的宏观水平上,这些原型向量可以代表特定的范畴,如树木、植物、果实、人等,它们都有或多或少的相似性。在复杂系统动力学的框架中,原型向量可以被解释为把态空间划分为若干个区域的点吸引子。

类似的运动行为(诸如捉拿、行走等等)用运动态空间的类似轨迹来表示。如上所述,学习意味着权重依据某种算法程序重新构型。于是引出了关键性问题:成千上万的细胞和突触如何知道它们何时应该变化其

状态而不需要小妖的指引?

唐纳德·赫布在他的名著《行为组织》(*The Organization of Behavior*, 1943)中提出,学习必须被理解为一种复杂脑模型中的自组织。如同生命有机体的进化,组织“妖”的信念可以去掉,而用复杂系统探究方式的自组织程序来代替。历史上,这是首次清楚地表述了突触修饰的生理学学习规则。赫布在关于复杂脑模型的文章中使用了“联结主义”一词。他引入的突触概念,后来被称为“赫布突触”。如果两个神经元同时发放,两者之间的联结就得到加强。

当细胞 A 的轴突充分靠近细胞 B 使之激发,并可以反复地或持续地向其发放,在细胞之一或两者之中就发生了某种生长过程或代谢变化,使得 A 向 B 发放的效率也增加了。^[4.26]

“赫布突触”在 1949 年还只能是一种假设的实体。今天,它的神经生理学上的存在得到了经验确证。赫布规则并非一种精确的数学表述。后面,我们还将看到,一些赫布式联结主义学习规则是可能存在的。赫布规则的一种简单的数学表述是:神经元 A 映射到神经元 B 的权重 w_{BA} 的变化 Δw_{BA} 正比于 A 的平均发放速率 v_A 和 B 的平均发放速率 v_B , 即 $\Delta w_{BA} = \epsilon v_A v_B$, 其中 ϵ 是常数。

赫布式规则所提出的方案,往往强化了神经元在其外部“没有教师”的倾向。在此意义上,它是一种自组织的方法,使得神经元的发放与成群的刺激模式越来越很好地关联起来。赫布意识到,大脑运用相互联结的神经元的整体模式来表示某种事物。他明确地运用了“细胞团”一词,该词对于现代神经科学是关键性的。激活的细胞团可以相应于复杂的知觉或思维。哲学上,赫布的细胞团的思想使我们回想起休谟的联想概念,但后者仅是心理学上的概念,并无脑生理学的基础。

赫布的生理学概念是如何被纳入现代的神经网络复杂系统之中的？这个联想网络的基本概念，要求输入向量与输出向量用某种变换而“联结起来”。数学上，这两个向量的相似性可以由其内积来度量，内积即两个向量间的一种乘法运算的结果，是将其分量与分量逐个相乘，然后将这些乘积加起来。几何上，内积正比于两向量之间夹角的余弦。在两个向量总相等的情况下，角度为零，这意味着相似性是完全的。

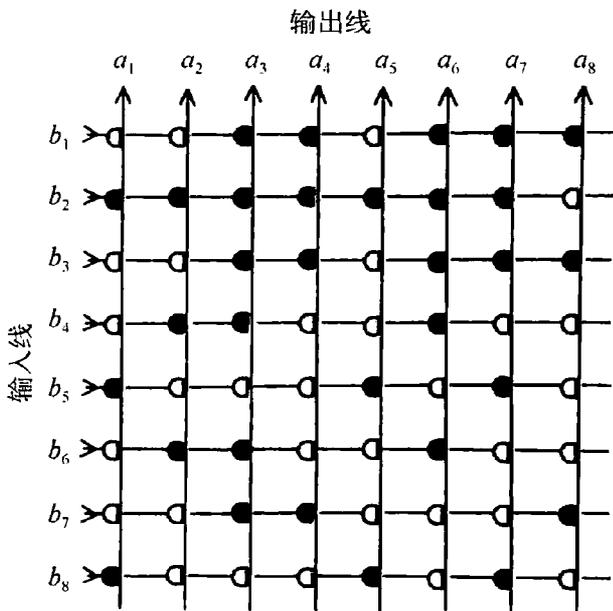


图 4.8 联想网络与反馈网络
(a) 线性联想网络；

因此，所贮存的原型向量（例如典型树的原型图）与输入向量（例如对于特定树的知觉）之间的相似性，就可以在联想网络中由其内积来计算。原型向量假定贮存于联结网络的输入和输出的权重矩阵之中。图 4.8a 示意的网络中，有代表输入分量的水平输入线、代表输出分量的垂直输出线和联结的权重（这里采用二进制，空心圆圈为 0，

实心圆圈为 1）。

一般地，如果输入向量 (x_j) 与输出向量 (y_j) 通过线性变换 $y_j = \sum_i w_{ij} x_j$ 联结起来，其中 w_{ij} 是贮存的权重向量，那么我们就获得了一种简单的线性联想子。这种联想网络，能够对于表示某种范畴例子的向量进行分类，这种范畴是由所贮存的原型向量实现的。对于动物的生存，这个任务实际上是关键性的。在现实中，种种或多或少的类似的感觉（例如怀着敌意的动物）必须被鉴别和归于某一范畴。

另一种联想网络可以进行向量完善或向量校正。所谓的自动联想网络可以产生一种输出,在仅仅给出向量的一部分作为输入时,这种输出将尽可能接近预先贮存的向量。现实中,一个输入向量(例如一个人的图像)的有噪版本,必须根据所贮存的图像来加以完善。赫布式规则,可以通过加强神经元之间相对于其相关活性程度的关联权重来实现这一任务。

一种增加这样的复杂网络的能力的方法是,对于输出单元引入非线性的阈值。线性的联想网络(例如图 4. 8a)具有前馈拓扑,信息从输入单元流向输出单元。赫布式学习程序认为,神经单元的局域相互作用通过自组织而收敛到正确的总输出。网络中的循环信息意味着某种反馈体系结构。在图 4. 8b 中,每一单元都接受来自外部的输入,同时也接受来自网络中内部单元的反馈。权重由水平线和垂直线的交点来表示。^[4. 27]

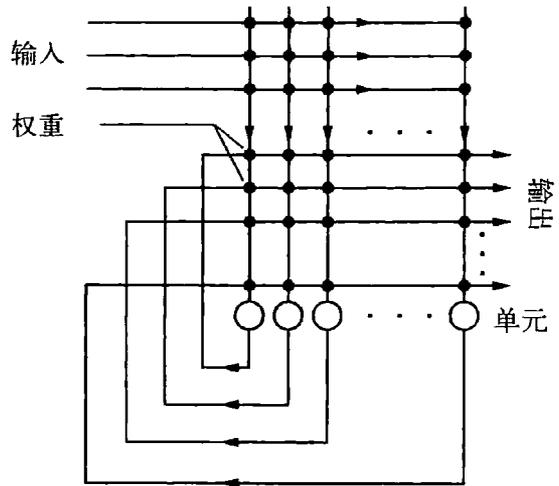


图 4. 8 联想网络与反馈网络

(b) 非线性反馈网络。^[4. 27]

显然,图 4. 8b 中的复杂系统是一种非线性的反馈网络的模型,这种非线性反馈网络容许多种可能的动力学机制。约翰·霍普菲尔德探讨了一个著名的例子(1982)。他提出的非线性反馈网络的类型,其动力学机制是具有收敛解。这种类型的网络引人关注,不仅仅是由于对大脑功能的建模所需,而且是由于(正如我们将在关于人工智能的第 6 章见到的)新的网络技术的发展。对于我们的复杂系统探究方式,值得注意的是,霍普菲尔德是一位物理学家,他把自旋玻璃物理学中的数学方程应用到了神经网络上。^[4. 28]

铁磁体的动力学是大家熟知的一个热平衡态的保守自组织的例子。在伊辛模型中,铁磁体由自旋点阵构成,自旋取向或向上(↑),或向下(↓)。每一自旋都可以与其近邻发生相互作用。最低能量状态中,所有的自旋都以相同方向排列。在高温下,自旋的方向是随机的,因为热能使得涨落大于相互作用能。如果温度降低,自旋就变得按照相同方向排列。显然,自旋的行为类似于磁体(参见第 2.4 节)。动力学上,这似乎是在寻

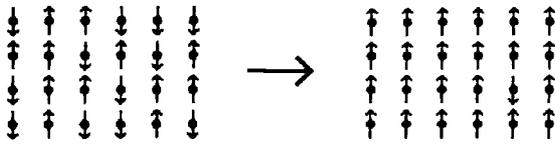


图 4.9 两种相变模型

(a) 铁磁体的 2 维伊辛模型中的相变(退火);

求最近的局域能量极小值,以其作为吸引子(图 4.9a)。但是,只有当所有的相互作用都是吸引相互作用时,才会出现

所有自旋取向一致的单个能量极小值。在吸引相互作用和排斥相互作用混合的情形下,像自旋玻璃这样的复杂系统可以具有多个局域能量极小值。^[4. 29]

霍普菲尔德假定,神经系统的功能是,在态空间发展出一些局域稳定点。态空间的其他点流向作为系统吸引子的稳定点。随着对稳定点的偏离消失,这种动力学是一种自校正程序。另一方面,稳定点适当地将一个不完善的初态向量丢失的部分弥补起来。因此,这种动力学可以用来完善有噪输入。

霍普菲尔德的模型是相当简化的,它包括有阈值的逻辑单元,加和的突触输入,并将此加和与阈值进行比较。如果此加和等于阈值或处于阈值之上,就得出 1;否则就得出 0。在除自联结之外,神经元相互联结的意义上,就认为该网络是回复的。数学上,相应的联结矩阵的主对角线上的元素均为 0。霍普菲尔德提出,运用赫布式学习规则来构建联结矩阵元。复杂系统的演化,如自旋玻璃的伊辛模型那样,遵循非线性的反馈动力学。与能量同构的项逐渐减少,直到它到达某一——可能是局域的——极小值。

字符特征识别问题是人们熟悉的一个简单应用。此复杂网络由相互作用的布尔变量构成,而布尔变量表示在2维网格中。一个模式(例如字母A)可以被联想到网格中,其中黑点代表激活态变量(其值为1),空点代表其值为0的变量。这里假定,字母被联想到作为所希望的动力系统状态的吸引子(“不动点”)。我们可以想象,通过多次看见正确的样本,人的大脑中贮存了正确的字母形状。如果某个不完善的、部分受损的字母显示给该系统,系统应该能够重新构造出以前已经学会的正确的形状(图4.9b)。^[4.30]

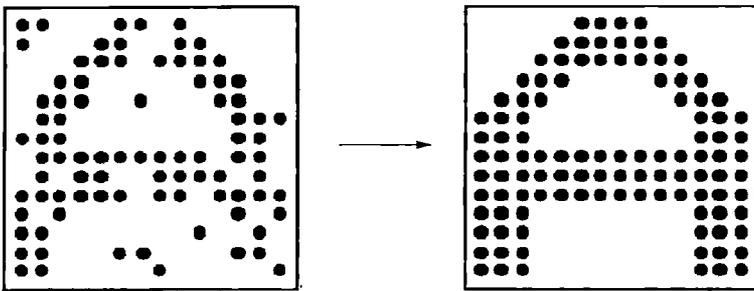


图 4.9 两种相变模型

(b) 模式识别的霍普菲尔德系统中的相变。

因此,模式识别就意味着自组织的模式演化。这种过程指向某些吸引子,作为所希望的系统状态。我们回忆一下,吸引子就是在一定初始条件下,系统将向它演化的状态。吸引盆则由一系列初始条件来定义,这些初始条件推动着系统在吸引子方向的轨迹。如前所述,吸引子可以是唯一状态,即不动点或稳定态,如同霍普菲尔德网络和自旋玻璃系统等例子。但是,一个周期相继的状态(“极限环”)或几种形式的混沌吸引子(在耗散系统中)也是可能的。因此,对于以复杂系统的吸引子来建立神经状态的模型,霍普菲尔德网络仅仅是初级的、简化的方式。

霍普菲尔德注意到了自旋玻璃中的局域能量极小值与联想的大脑原型之间的类似性。在自旋玻璃的形式框架中,吸引子可以被指定为原型向

量。在图 4.10a 中,霍普菲尔德系统的态空间用能量地貌形象地表示出来,这里利用了它与自旋玻璃在热力学上的类似性。网络上所有可能的状态都由平面上的点来代表。表面的高度表示相应的网络状态的能量。

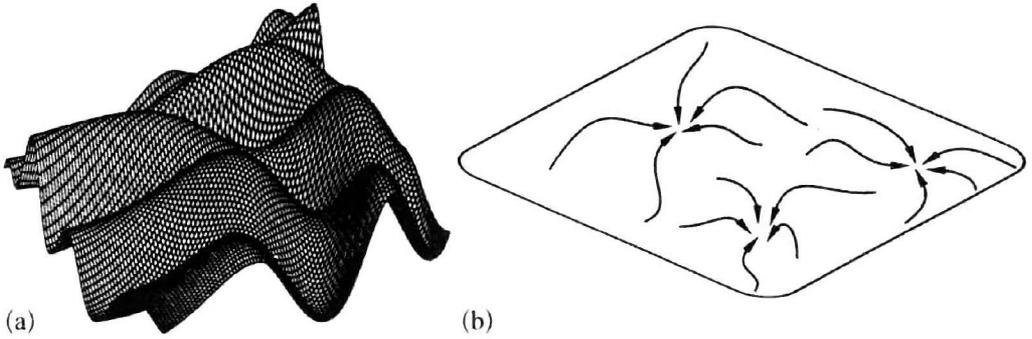


图 4.10 霍普菲尔德系统的态空间

(a) 能量地貌;(b) 作为吸引子的局域最小值。^[4.31]

图 4.10b 中的相图显示了,轨迹从不同的起始点向稳定的局域极小值收敛。平面上的每一点就是该网络的一种状态。能量地貌具有霍普菲尔德动力学轨迹的吸引盆。稳定点(“吸引子”)处于吸引盆的底部。在模式识别的例子中,原型字母与稳定点相关联。因此,模式完善的过程是一种弛豫形式,形式上可与保守自组织的退火过程相比较。在物理学的例子中,终态是自旋玻璃、磁化的铁磁体或冻结的晶体的有序结构。^[4.31]

一般而言,霍普菲尔德网络仅仅收敛到低能态的局域极小值。在某些应用中,局域极小值是与特定的贮存项目相联系的,也许是不必要到达某种全局极小值的。不过,在许多情况下是需要全局极小值的。这种问题的一个解,是由个体单元的随机运动而不是确定性运动来提供的。

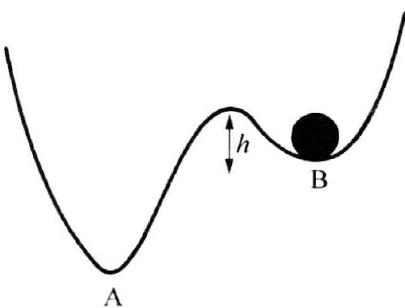


图 4.11 从模拟退火到玻耳兹曼机

(a) 能量地貌图中从局域极小值 B 向全局极小值 A 的相变(模拟退火);

图 4.11a 中,一个沿着能量地貌曲线运动的小球很可能最终落入最深的极小

值,这形象地显示了问题的求解。从给定的初始状态出发,小球将向能量极小值或者说“井”的底部运动。如果能量景貌图中有多个靠得很近的极小值,那么小球的运动结果将取决于初始条件。如何来阻止网络黏在某个局域极小值呢?有这样一种想法,即以一定的能量增量来动摇能量景貌,这个增量是逃离局域极小值 B 低谷而进入全局极小值 A 吸引子所需要的。

于是,力学上,小球从 B 进入 A 的可能性比从 A 进入 B 的可能性要大。平均地说,小球应该终止于低谷 A。在热力学语言中,动摇景貌所增加的动能相应于系统温度的增加。对于相当高的温度来说,在低谷之间的转移概率不再是可忽略的。在热平衡态,处于不同低谷的概率仅仅取决于它们的深度。

实际上,此种模拟退火法是人们所熟悉的,并用于全局优化上。如上所述,退火是加热一种材料(例如金属或玻璃)到高温,然后逐步降温的过程。但是,如果退火过程进行得充分慢,该材料将仅仅终止于其全局能量最低点。例如,金属的突然冷却将使材料仅达到局域极小值,处于易碎状态。模拟退火通过允许跳跃到较高的能量状态,使得有可能从局域极小值逃离。

在热力学中,气体由其相变的概率来描述。玻耳兹曼对于处在均匀温度分布的气体,推导出气体状态的概率分布。欣顿、谢伊诺夫斯基等人认为,这种分布可以运用于描述神经相互作用。在这种情况下建立模型时,加进系统中的低温项被解释为小噪声项。它是气体分子的随机热运动在神经系统中的类似物。

这种形式上的等价,是所考察的网络被称为“玻耳兹曼机”的原因。^[4.32]但是,当然,这里并非是物理主义,把神经相互作用还原为气体分子相互作用。用玻耳兹曼的表述,可以证明,只要冷却得充分慢,玻耳兹曼机就能保证找到所希望的全局极小值。显然,具有模拟退火动力学

的神经网络,是能够通过搜索该模式的态空间而给出全局能量极小值的。

一种遵照这种动力学的可能的学习规则,是与网络及其环境之间的概率相匹配的。该网络的所有可能状态在热平衡时都是可能的,具有玻耳兹曼分布的相对概率。如果网络中状态的概率与环境状态的概率相同,那么网络将得到一个适当的环境模型。因此,学习规则必须能够调整玻耳兹曼机中的权重,以便减少网络模型与环境之间的差距。

最初,学习规则让系统自由地运行。每一单元所取的状态概率可以估计出来。然后,输入和输出单元就被强制或被迫取适当的值。而且,单元状态的概率值是估计出来的。局域的权重变化正比于与该权重耦合的单元的概率之差。^[4.33]

形式上,权重调适规则要求

$$\Delta w_{ij} = \epsilon (\langle s_i s_j \rangle_{\text{强制}} - \langle s_i s_j \rangle_{\text{自由}})$$

式中 ϵ 是比例常数(“学习速率”), s_i 是第 i 个单元的二进制单元, $s_i s_j$ 在网络达到平衡后的时间的平均值是 $\langle s_i s_j \rangle$ 。在强制的条件下,输入和输出单元都固定在其正确值。在自由条件下,这些单元都不是固定不变的。于是,学习规则是未受指导的。如果输入在自由的条件下是固定不变的,学习规则就是受指导的。

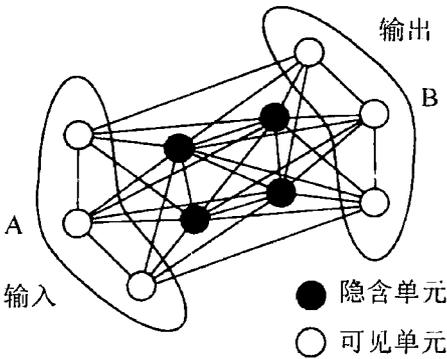


图 4.11 从模拟退火到玻耳兹曼机
(b) 玻耳兹曼机网络。^[4.33]

在图 4.11b 中,玻耳兹曼机的网络中的单元采取了二进制值,它们之间的联结是相互的。^[4.33]连接的权重可以进行训练,也就是把模式提供给存在着和不存在输出模式的输入单元,并应用玻耳兹曼学习规则。在学习过程中,网络中的所有的权重都被调适。并不直

接受外界信息的隐含单元,可以使得该网络在输入模式和输出模式之间产生出复杂的联想。因此,在其中间层有隐含单元的玻耳兹曼机具有对于环境的内部表征,而在仅仅具有可见(输入和输出)单元的网络中,则是不可能有这样的现象的。

从神经生物学的观点看,由“教师”指导的学习在自然界中是颇为不现实的。动物对感觉输入分析中进行的特征提取或范畴划分,必定是自组织的。在输入向量中出现得越是频繁的特征,就越是可能归属于一定的范畴。网络的输出,必须学会使相应的原型向量收敛为吸引子。

如何设计一个网络使得在没有外部教师的指导下产生出分类标准呢?一些作者提出,这种自组织取决于多层系统中的非线性相互作用和选择性强化联结。这种学习程序是在选择和竞争的达尔文过程中组织起来的。

图 4.12 中所设计的竞争学习系统的多层构造,可产生出诸如分类和范畴划分这样的突出的认知任务。^[4.34] 活性单元由实心点来代表,而惰性单元则由空心点来代表。输入层与第 2 层的每一元素的联结是兴奋的。第 2 层可以划分为若干组,每组中每一元素都抑制所有的其他元素。同一组中的元素处于相互竞争之中,以对输入模式作出反应。按照鲁梅尔哈特和齐普泽的规则,同一组中,只有在竞争中获胜的单元才是能够学习的。学习就意味着活性联结的增加和惰性联结的

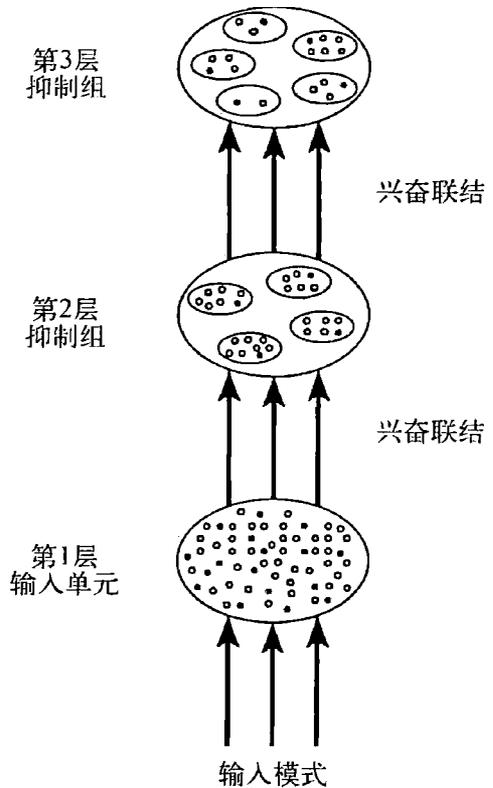


图 4.12 进行竞争学习的多层网络^[4.34]

减少。

一个简单的分类任务是小孩的识字。显然,双字母词 AA, AB, BA 和 BB 可以划分成几个范畴,例如,以 A 开头的词汇集合 {AA, AB} 或以 B 开头的集合 {BA, BB}, 抑或是以 A 结尾的 {AA, BA} 或以 B 结尾的 {AB, BB}。在一个计算机辅助实验中,双字母词被置于多层网络中研究,该网络中的一层包含有两单元一组的竞争单元。该系统能够检测出字母的位置。其中的一个单元自发地作为起始字母 A 的检测器而起作用,而另一个则检测 B 作为起始字母的情形。

进一步的实验中,字母数增加了,网络结构也随之改变了。尽管这些实验看来仅仅是说明了有限的能力,但是它们至少从原则上体现了无指导的神经系统中的认知行为的形成。这些实验引出了某些有趣的研究,在复杂系统的框架中把神经生理学与认知科学联系起来,第 4.4 节将更详细地对此加以讨论。

另一种通过竞争学习进行的自组织认知系统的研究进路,是图沃·科霍宁提出的。这位物理学家,也从生理学上对联想记忆进行了研究。他对神经系统的数学建模,在人工智能的工程应用上已显示出重要性(参见第 5 章)。科霍宁的思想是通过自组织特征映射来给大脑建模,这源于解剖学和生理学上已确证的事实。大脑中的大多数神经网络是二维的层状处理单元,它们可以是细胞或细胞组。这些单元是通过横向反馈而相互联结的。例如,在新皮质中,每一个主要细胞大约有 10 000 个相互联结。

对于神经元与其近邻的突触耦合,只要神经元之间的距离小于一定的临界值,这种耦合就是兴奋的。神经元之间的距离大于此临界值,则是抑制的。而距离更大一些时,耦合又是弱兴奋的。横向相互作用的程度可用曲线来进行数学建模,该曲线形状类似于墨西哥帽子^[4.35](图 4.13a)。

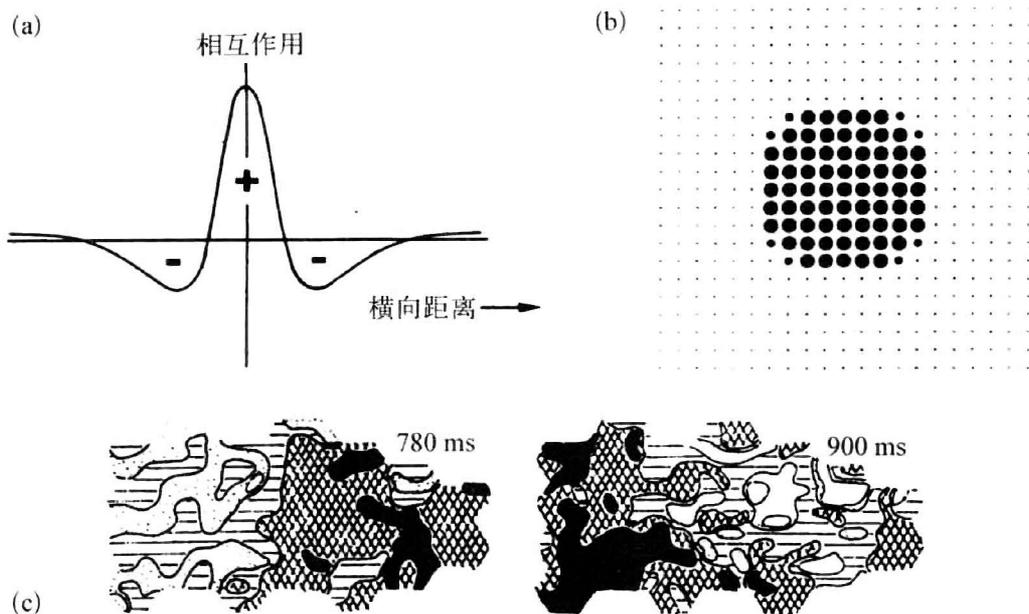


图 4.13 神经相互作用与神经活性分布

(a) 神经相互作用的“墨西哥帽子”；(b) 二维模型中的神经活性分布；(c) 浣熊的脑皮层。^[4.36]

显然,横向耦合的活性倾向于空间有界地聚合。图 4.13b 示意了一个二维聚合的例子,它是用一个 21×21 个处理单元的方格阵来模拟的。这种聚合现象(“活性泡”)取决于正反馈或负反馈的程度,而反馈程度可能受到神经网络中的化学效应的影响。在神经的实在中,“活性泡”并不具备计算机辅助模拟的规则形式。图 4.13c 示意了浣熊的脑皮层中的活性分布,它并非是一个规则形状的形象,而是相当散乱的图像。^[4.36]

然而,聚合现象在大脑的自组织过程中可被证明是有用的。起初,神经网络的活性是均匀分布的,随着自组织学习过程,可以观察到神经区域的逐步特化。在提供了输入模式以后,具有最大活性的神经元及其邻居被选用来进行学习。神经权重被调适,落在以最大活性神经元为中心的一定半径中的环状邻域中。这种学习规则,可以用来检测和划分输入的图形或言语模式数据的相似性。

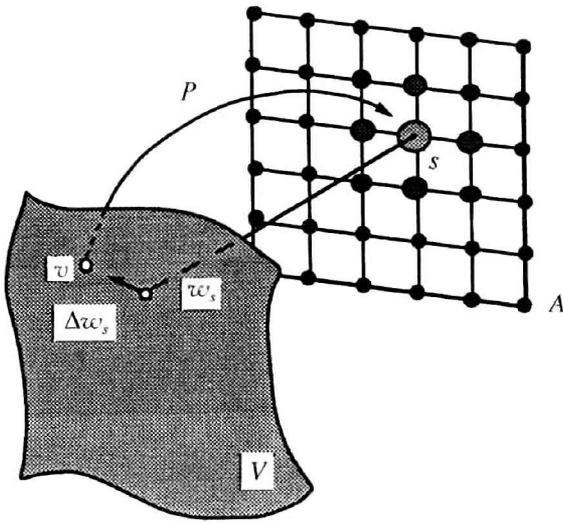


图 4.14 科霍宁的自组织神经映射模型^[4.37] 来表示。^[4.37]

形式上,科霍宁考虑了从输入信号 v 的空间 V 到 2 维映射 A 上的非线性投射 P 。图 4.14 说明了学习的步骤: 输入值 v 选定一种中心 s 。在 s 的领域中,所有的神经元都在 v 的方向上转移其权重 w_s 。转移的程度随着与中心 s 的距离增加而减少,这里用不同的灰度来表示。

映射通过自组织收敛于某个具有不同活性区域的平衡态。投射应该将输入信号的规则性映射到神经映射上。因此, P 在数学上被称为拓扑不变映射。实际上,由感觉输入信号规则性所表示的大脑环境的结构,应该被投射到大脑的神经映射上——大脑应该获得关于世界的适当的模型。

大脑通过自组织映射进行建模的现实性如何? 神经区域的数值是变化的,取决于物种生存所感受到的感觉刺激的重要性。在神经区域中,有一些中枢,它们能够以比环境更大的精确性对刺激进行分析并将其再现出来。例如,在哺乳动物的眼睛中,对于视觉信息的精细分析是由“中央凹”进行的,中央凹是一个沿着视网膜光轴的非常小的区域,其中有非常高密度的光敏受体。因此,信号的分解主要在神经区域的这种中枢进行,这要比在周围的区域强得多。类似的不成比例的表象,也可以在躯体感觉系统和运动皮层中观察到。相对于整个体表而言,手在躯体感觉和运动皮层中占有相当大的一块区域,这体现出手对于人的生存的重要性。

与这些结果相反,猫、狗和猿的听觉皮层并不将外部世界的频率投射到特定的中枢。一个例外是,蝙蝠具有特化的定向系统,这对于它的生存

是必要的。蝙蝠能够发出许多种不同的超声频率,并通过这些信号的反射来测定物体的距离和大小。蝙蝠相对于其他物体的速度,可利用超声波回声测探仪中的多普勒效应来测定。甚至是细微的昆虫运动,也能够被这种灵敏的系统检测出来。

蝙蝠的特化,能够用其听觉皮层上的自组织映射在实验上确证。图 4.15a 将蝙蝠脑中的听觉皮层示意在矩形图中。图 4.15b 中把该矩形图放大了,示意出听觉皮层上的最佳频率分布。从听觉皮层的后区到前区,一维频谱表现为连续且单调的。引起神经元最大兴奋的频率称作该神经元的最佳频率。画斜线区域是初级听觉皮层。图 4.15c 显示了图 4.15a

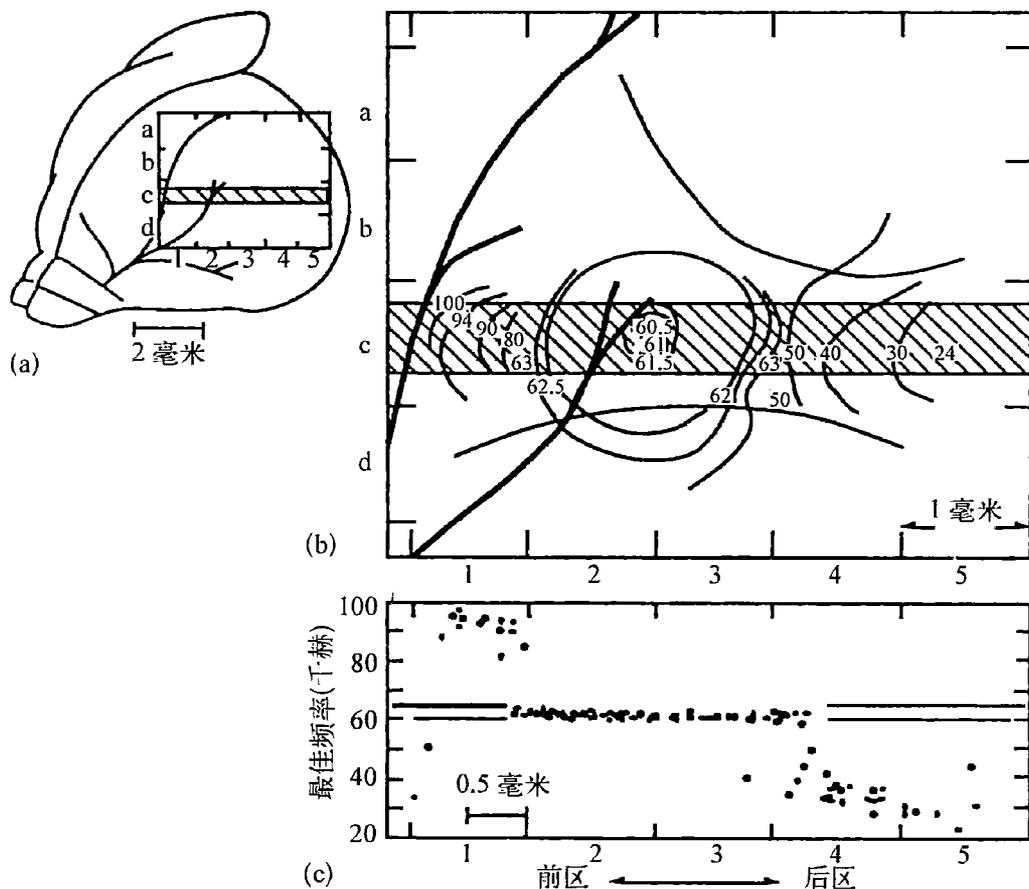


图 4.15 蝙蝠脑

(a) 矩形表示其听觉皮层;(b) 放大的矩形图;(c) 最佳频率分布。[4.38]

中斜线区域中的最佳频率分布。大多数测量点都集中在超声波回声探测频率的周围。从前区到后区,一半以上的区域用来分析超声波回声探测的多普勒效应。十分显著的是,用自组织映射进行的计算机辅助模拟中,产生出如图 4.15c 所示的听觉皮层的实际表象。^[4.38]

灵长目动物的脑由许多区域构成,其中有若干神经网络拓扑。例如,视网膜在个体发生早期已经发育起来。它的神经拓扑有 5 个独立层:光感受器,水平细胞,双极细胞,无长突细胞,视网膜节细胞。人的光感受器层大约有 120×10^6 个感受细胞。视网输出用所有的神经节细胞的脉冲速率的空一时模式来表示,它沿着光神经传向丘脑。人大约有 1.2×10^6 个神经节细胞。因此,视网膜的确是一个复杂系统。然而,人们还没有完全理解大于 200×10^6 个视网膜神经元的复杂性。大脑皮层是系统发育上最年轻的脑区。随着动物种群的进化,大脑皮层在大脑中所占的百分数在增加。鱼那样的低等脊椎动物,并没有进化出大脑皮层。从小部分的爬行动物和鸟类中,到狗、猫,一直到猿和人,大脑皮层的重要性逐渐增加。灵长目动物的大脑皮层分化成了具有多层神经网络拓扑的不同区域,例如视觉、感觉、运动和联想皮层。小脑由小脑皮层构成,其中有许多具有特定感觉运动功能的多层亚区域。

大脑系统的多样性被描述为一个密集的神元集合,其中具有特殊的网络拓扑,通过许多神经而相互通信,神经由数以千计的轴突构成。与数字计算机有独立的中央处理器以及存储器不同,大脑和中枢神经系统可以作为具有多个专用并行处理网络的集合体来建模。每一网络都能够独立地对感觉、运动和联想功能的信息进行处理和存储。

显然,人们熟悉的程控集中式数字计算机原理,并不适用于生物脑。网络自组织的过程对于大脑的结构是基本的。在非常长的系统发育过程中,复杂的结构形式产生出来,而我们往往并不清楚它们的目的。在宏观尺度上,特定的神经区域已特化为针对具有不同的感觉功能的信号,具有

不同水平的信息处理操作,还可以是针对人以及对于有机体的动物性和植物性功能。尽管它们分布在大脑的不同区域,它们却可以理解为自组织的复杂性或集体效应。

作为一种学习程序,自组织揭示了,有机体并非完全由其中包含了详细描述有机体的蓝图的基因所决定。大脑组织化的每一阶段,都涉及到某种自组织。基因难以存储大脑的复杂结构。大脑皮层有大约 10^{14} 个突触,个体发育难以从所有可能性中选择出正确的接线图,如果这些可能性都是类似的。因此,个体发育必须运用神经系统的自组织去处理其复杂性。但是,不了解个体发育的原理,就不能理解其脑皮层的结构。

在前面的章节中,我们已经研究了物理学、化学、生物学、气象学和天文学的复杂系统中有序模式的涌现。整体有序,是在其中有大量局部相互作用元素的复杂系统中形成的。在液体或晶体中有相互作用着的原子或分子,在进化的恒星系统中有相互作用着的子系统,在如同大脑这样的复杂神经网络中有相互作用着的神经元和突触。我们还向读者提示了在液体的热涨落中出现的贝纳尔对流(“滚动柱”)。

整体有序是如何由局部相互作用来安排的?例如,在一定量的液体中,分子间作用力的作用距离非常短,而由分子相互作用引起的对流运动的模式却可以是大规模上的有序。这种有序在物理学、化学和生物学演化中出现的原理,对于大脑具有巨大的重要性,大脑中相邻细胞元素之间的局部相互作用,创造出来整体有序的状态,导致有机体中的相干行为。此种有序模式是由复杂系统中的元素之间的作用力和初始条件、边界条件所安排的。在贝纳尔对流的例子中,作用力是流体相互作用、热传导、膨胀和引力;边界条件,则例如液体的温度。在大脑中,联结的模式是由细胞单元相互作用的若干种规则安排的。因为神经元往往是由非常长的轴突联结起来的,所以,两个神经元间的局部相互作用并不意味着它们在脑解剖结构中的空间接近,而只意味着它们由轴突紧密联结。

尽管这种一般结构对于所有类型的神经元和突触都是普遍的,但是也有许多质的和量的差异。例如,无脊椎动物的神经系统是确定性的,个体神经元的特定部位具有高度编码的信息。而哺乳动物的新皮层中的联想系统,对于特定输入模式的特定反应,却是由促成对输出信息进行反馈的学习规则实现的。

复杂系统模型如何适合于真实的神经网络?从方法论的观点看,我们必须清醒地意识到,模型是不可能素朴地与实在的每一项功能和每一个元素相一致的。模型是为了特定目的而进行的抽象,它能或多或少地解释和模拟中枢神经系统的某一部分,而对其他部分则没有涉及。有时,模型网络受到了批评,说它们如同黑箱,仅仅在一定程度上正确地实现了输入—输出功能。但是,关于生物神经网络是怎样实现其功能的,却什么也没有揭示。隐含单元如同量子物理学中的隐变量仅仅是理论概念,隐变量被假定是系统实现所观察、可测量的输入和输出值之间关系的一种内在因素。除了可能的多层网络的构造之外,动力学和学习程序对于模拟是根本性问题。

模型网络的参数调节程序减少到最小的误差的现实性怎样?许多模型网络的学习规则,收敛到一组正确分类的权重,需要难以接受的过长的时间。尽管有时也会得到一个成功的权重调节,但是这决不意味着确定了最优解。1960年,威德罗和霍夫提出了一种简单而优美的学习规则,提出这一规则的推动力,是最优化技术,而非关于大脑功能的生物学见解。^[4.39]威德罗-霍夫规则及其种种翻版,近年来在技术网络中已经得到了广泛的运用(参见第6章)。

该规则假定,对于一种输入模式,可由适应性神经元对该输入模式的输出进行分类,这个适应性神经元的取值为 $a+1$ 或 $a-1$ 。因此,对于该输入,我们假定有一位“教师”知道其答案应该是什么。适应性神经元计算出一个加权和,即输入活性乘以突触权重。在假定的输出和计算出来的

加权和之间,系统可能给出误差信号,根据这两者之差,对突触权重进行调整,重新计算出加权和,使得误差信号变成零。

威德罗和霍夫的策略的目标在于,把误差信号的平方减少到其最小可能值。所有可能的输入权重系数的值,导致某个误差值。在图 4.16 中,这种情况由权重空间的误差面表示出来。[4.40]

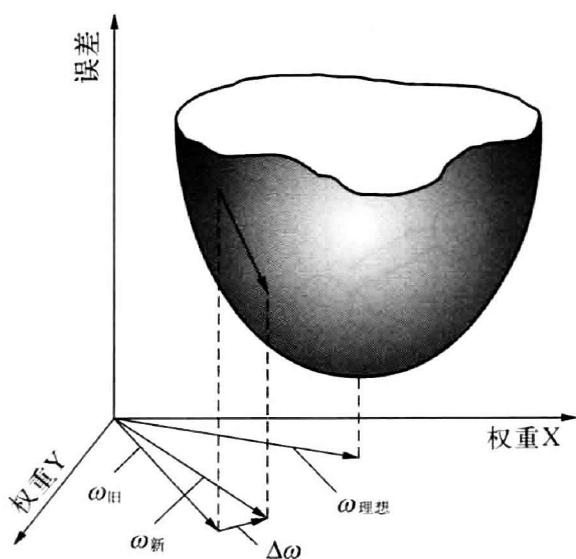


图 4.16 误差面和梯度下降学习[4.40]

误差面的最小值并非精确已知,因为不可能见到整个误差面。但是,其局部的形状则是可以测量的。因此,能最大程度地减少误差的调整方向是可以计算得出的。在微分几何学和物理学中为人熟知的,所谓梯度下降法就是一直在调整着权重,于是权重的变化将使得系统沿着局部最速下降的方向来压低误差面。

在图 4.16 中,我们计算出误差面的梯度,以找到最速下降的方向。权重按增量值 $\Delta\omega$ 沿着这一方向变化。重复该程序,直到权重达到 $\omega_{理想}$,这相应于最小误差。对于非线性的网络,误差面可能有许多个局部极小值。一般地,梯度下降的问题在于,可能落入局部极小值中。此时,谷底并不代表最低的全局误差。

威德罗和霍夫证明,存在着一个简单的二次误差面,其中只有一个全局极小值。数学上,计算出某一点的梯度,意味着求误差平方对于权重的偏导数。威德罗和霍夫证明了,这种导数正比于误差信号。因此,对于误差信号的测量就提供了运动的方向,以能矫正误差。技术上,具有完整知识的“教师”的存在性可以因特定的目的而进行调整。但是,自然界存在

有指导的学习程序这一假设,却似乎是相当靠不住的。

在网络模型中,所谓的后向传播是人们最为熟悉的有指导算法,它是简单的威德罗-霍夫规则的推广。总之,后向传播是神经网络中一种调节

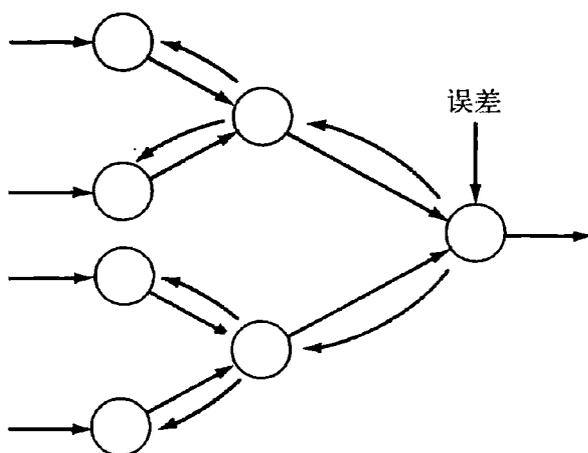


图 4.17 后向传播

权重的学习算法。每一单元的误差,是预期值减去实际输出值,可以在网络的输出端进行计算,并反向递推传回网络中。这种方法使得系统可以决定如何改变网络内的权重,以改进其总体表现。图 4.17 示意了一个多层网络中的后向传播方法。^[4.41]

尽管后向传播的模型可以如同生物学网络一样地发挥作用,但它并没有假定真实的大脑也是由后向传播组织起来的。真实网络中的许多参量值,往往都是通过解剖学、生理学和药理学中的测量和实验获得的。例如,细胞类型和细胞本身的数目可以大致地估计出;拓扑和构造可以得到描述;特定的突触究竟是兴奋的还是抑制的也可以得到确定,如此等等。但是,特定的权重却是未知的。当这些未知的权重数以千计时,大脑网络和模型网络的全局极小值精确地一致,且权重也相等的概率是相当低的。

因此,模型网络的误差极小化策略一般说来可能只是一种假设,但是它们对于处理或许有数千未知参量的复杂性却是必要的。如果模型网络与大脑网络的拓扑、构造和突触动力学的相似度高,运用这种策略就将使人们能够预见大脑网络的某些局域或全局的性质。在神经生理学中,后向传播被证明是一种求得局域极小值的搜索工具,但它不能替代神经生理学分析,后者可以揭示神经网络的真实的学习程序。

误差极小化策略在自然进化中有悠久的传统,而不是在脑的学习程

序中首先形成的。例如,生态种群的自然选择往往可以建模为一个过程,此过程中,误差梯度逐渐减小到代表了某种环境生存生态位的误差极小值。但是,参量调节程序可能仅仅求得某个局部极小值,而不一定是全局极小值。就我们所知道的,进化一般并非找到最好的可能解,而仅仅是某种对于生存而言是充分好的满意解。整个进化过程中,只有局部极小值才可以对其进化生存价值进行实证评估。这种评估取决于所选择的模型的观察约束和测量约束。

因此,从方法论的角度看,全面而理想地优化着的自然这一观念,只是一个形而上学的幻想。被称为“自然”或者“演化”的世俗化的神性观念诞生于乐观的启蒙世纪,旨在以其创世计划取代基督教上帝。康德早已批判道,完全自我优化的自然是人类的幻想,这在任何意义上都不能被经验证实。带有独立的中央处理器,能够完全而且长期地令演化策略最优化的超级计算机并不存在。在实际演化进程中,只存在局部上有一定满意程度的解,甚至还有许多失败和不完善之处。实际演化过程的复杂性与拉普拉斯理想世界的简化模型是相悖的。

4.3 大脑和意识形成

如何用复杂脑模型中的神经相互作用来解释认知特征呢?莱布尼茨已经提出一个问题,如果把大脑解释为只不过是一台机器,那么意识、思维和感情是不可能在大脑的元素中找到的。康德强调,要使得一个物理系统具有生气,组织力是必要的。直到20世纪,一些物理学家、生物学家和哲学家仍然相信某种非物质的组织生命因素:“生命力”(柏格森)或“隐德来希”(德里施)。从复杂系统的观点看,苛勒的格式塔心理学是一种有趣的探索方式,涉及这样一种物理系统,其中复杂的心灵结构自发地从系

统自身的内禀动力学中产生出来。通俗地说,被感知客体的宏观的“格式塔”(形式),大于其原子组件的加和,且不能归结到微观尺度上。

苛勒有这样一种思想,视觉现象的产生不可能在热力学模型的框架中得到解释。但是在那时,他指的是玻耳兹曼的平衡态线性热力学。他提出:“静态视场下的躯体过程是稳恒平衡分布的,从光学系统自身的内在动力学中发展起来。”^[4.42] 苛勒甚至认识到,有机体并不是封闭系统,他还力图把有序态的形成解释成一种直觉理解的协同作用。在这方面,苛勒已经正确地将协同系统中的基本相互作用的微观水平和形成有序态的宏观水平清楚地区分开来。但是,他仍然缺乏适当的复杂动力学系统框架,来为远离热平衡的热力学提供某种形式化处理。

对于微观尺度上的脑过程的神经相互作用和宏观尺度上的认知结构的形成,复杂系统探究方式提供了一种建立模型的可能性。因此,看来有可能填平大脑的神经生物学与心智的认知科学之间的鸿沟,这在传统上被看成是无法解决的难题。

复杂模型包括了描述系统动力学的态空间和非线性演化方程。人的大脑中有大约 10^{11} 个非感觉神经元,可以用 10^{11} 维的态空间来表示。甚至典型的子系统中也包含有 10^8 个元素。在一个只有 10 层神经是激活的 10^8 维态空间中,至少有 10^{10^8} 个不同位置来表示激活向量。如果我们假定,每一神经元与子系统的另外 10^8 个神经元之间有 10^3 个突触联结,那么就必须区别出大约 10^{11} 个突触。因此,对于每一突触仅仅有 10 种相区别的权重,我们仅在一个子系统中就获得了 $10^{10^{11}}$ 个权重这样一个巨大的数字。这种复杂性对于编码、表示和处理信息提供了数目巨大的可能性,在数学上可以用向量和张量变换对此进行建模。^[4.43]

在科霍宁的竞争学习网络中,系统的自组织使得邻近向量映射到邻近的网络点上。业已假定,类似的印象由类似的向量来表示,它们与原型向量之间只有微小的距离。在复杂系统的框架中,原型向量被解释为吸

引子。因此,两个相区别的范畴或类型就由态空间的两类不同的吸引子来表示(图 4.7b)。认知辨识的学习过程,就由网络的训练过程来建模,其中包括调节权重使得输入向量(例如某个视觉或听觉模式)以最大相似性归属于原型向量。

用神经态空间的原型概念,能对某些认知过程作出有趣的解释。当输入印象只是部分地给出时,一个网络如何能够认知一个模式呢?对于在野外生存的动物来说,向量完善的任务是至关重要的。设想一下,一只沙漠中的郊狼察觉到在草丛中的兔子尾巴(图 4.18a)。输入到郊狼的视网膜上的,只是那只兔子的尾巴。郊狼的视觉系统以习得的兔子原型向量来完成输入向量,从而能够假定或“假设”在草丛中有一只兔子。在此意义上,我们可以认为,郊狼有一个由大脑中相应的原型激活模式来代表的兔子的“概念”。^[4.44]

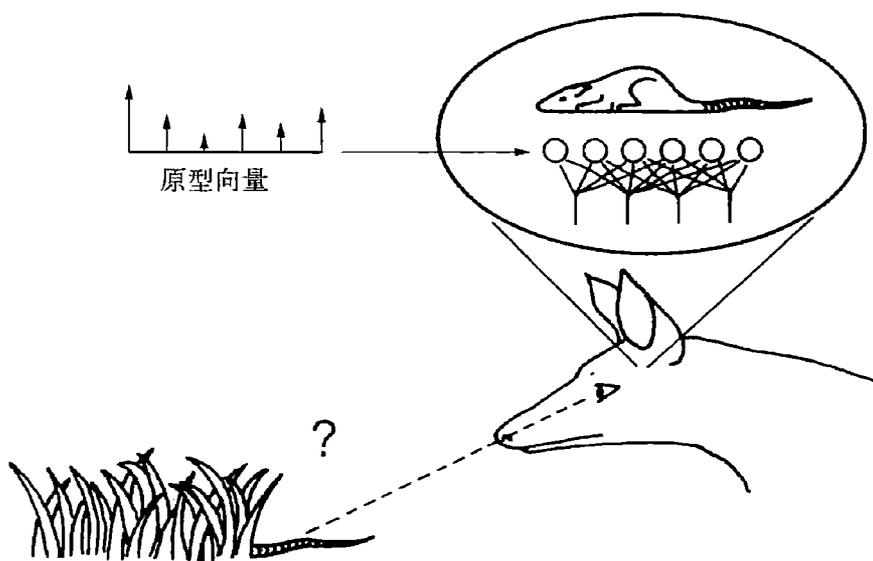


图 4.18 原型-激活

(a) 神经网络中原型-激活的认知: 郊狼认知兔子尾巴,^[4.44]

保罗·丘奇兰甚至提出,用原型向量探究方式来解释人的高级认知能力。因此,解释性的理解就被归结为:在充分训练的网络中的特定原

型向量的激活。原型向量包含巨大的信息量,对于不同的人来说可能是不同的。原因在于,不同的人并不总是拥有相同的项来满足某一原型束的约束。的确,人们很可能有不同程度的解释性理解,尽管他们以几乎相同的方式来划分一种客体或情形。例如,木工比起其他绝大多数人来,对于什么是椅子具有更高程度的理解。然而,他们在绝大多数情况下都将有一致的见解。因此,原型-激活模型是相当现实的,因为它考虑了人的概念和理解的模糊性。

认识论和认知心理学中,通常都对不同种类的解释进行了区分。其中包括:分类解释(“为何鲸鱼是哺乳动物?”),因果解释(“为何石头下落?”),以及功能解释(“为何鸟有翅膀?”)等等,它们相应于集束、因果关系、功能性质等各种原型激活。甚至把握社会状况这件事也是在激活社会相互作用的原型,这是在生活中受到的训练和教育。

在复杂系统探究方式中,精神状态是与大脑的神经激活模式相关联的,这里是用复杂态空间的状态向量来建模的。涉及对于外部世界的感知的外部精神状态,是可以检验的,并与大脑的神经活动关联起来。我们如何来检验和解释意识的内部状态,这并不涉及外部世界的事件,而只是涉及精神状态自身?

众所周知,我们甚至能够反思我们的自我反映,并反思关于我们自我反映的反映,如此不断重复,这个迭代过程原则上是没有极限的(图 4.18b)。自我体验和自我反映导致了自我意识的概念,它在传统上被看作心智哲学和认知心理学的基本概念。自我意识被定义为人格的关键性特征。在历史上已经被讨论过的自我意识的定义,并非只在哲学上受人关注。显然,这些不同程度的思辨性定义,在医学和法律上都有重要的后果。对于人而言,必须满足何种判据才能具有意识,因而应对其行动负责?有没有关于意识的医学判据?意识是如何受到扰动甚至消失的?动物的意识如何?我们的感受是否像我们的邻居或动物?

这带来了两个基本问题：其一，是否存在能引发意识的形成的特定的脑过程？其二，是否可以用复杂系统为脑过程意识形成建立模型？方法论的困难表现为，像疼痛、气味等等主观感受只是内省才是可能的。这些主观的感受和意识状态有时被叫作现象状态。一些哲学家已经批评了，大脑状态的物理学描述没有抓住什么是现象状态的本质。相反的观点则认为，现象状态概念可以归结为大脑的神经生理学状态的概念。这些论据只不过是传统的物理主义和精神主义(或反物理主义)的现代变种。

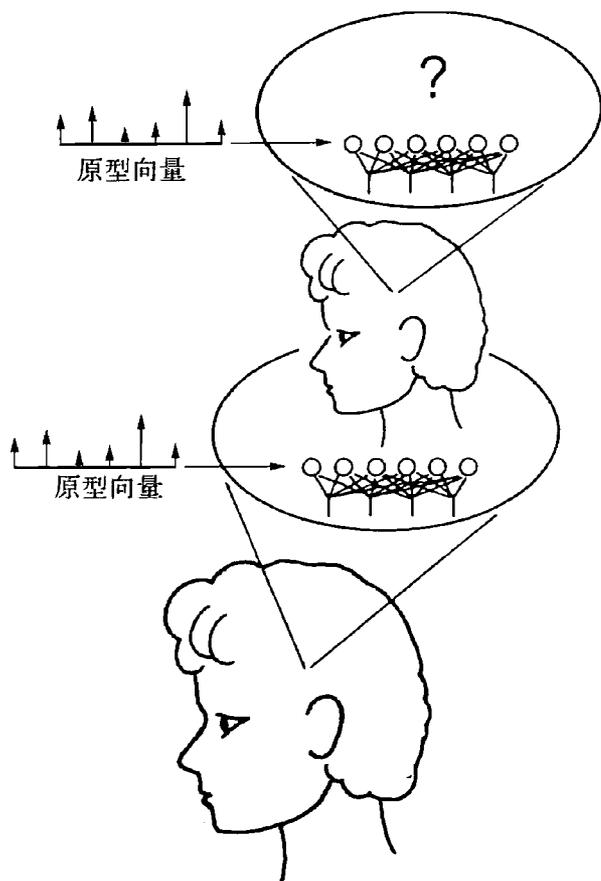


图 4.18 原型-激活

(b) 反复进行自关联原型-激活而产生的自反映。

两种立场都是空想的还原论和夸张，它们既不能得到研究的支持，也不可能对研究有多少帮助。^[4.45]

按照复杂系统探究方式，神经生理学状态和精神状态都用数学公式来建模，这些公式的宗旨并非还原论的。一些哲学家由于对于数学的偏见而遭受严重失误，因为他们似乎相信公式仅仅可以标示“物理”状态。例如，读者可以回想一下，霍普菲尔系统包含着一个“能量”公式，可类比于物理自旋系统的能量公式。然而，切不可将霍普菲尔系统框架中的所谓“能量”公式与固体物理学中的能量混为一谈。数学表达式仅仅决定了网络的动力学，这是可以由神经生物学中的脑，或硅片计算机，抑或

来自某个未知星系的天使般的生物来模拟的。

数学模型如果能与观察到的数据相拟合,它就是经验上可证实的;否则,模型必须要修改或放弃。我们必须意识到,关于精神状态和意识的可检验的、可证实的理论,并不能使我们感同身受。例如,内科医生或外科医生要医治病人的胃痛,却并不需要如同病人那样感受胃痛。他必须拥有关于胃的解剖学、生理学、生物化学、心理学等方面的丰富知识。用复杂系统探究方式的术语来说,他必须知道胃的可能状态及其动力学机制。在此意义上,精神状态和意识的模型可以发展起来并经受检验,而不需要任何的还原主义主张。

显然,在意识的现象状态和大脑的神经生物学功能之间有许多可检验的相关性。人们都知道,短时间的缺氧可以导致意识丧失。电刺激、精神药物、麻醉和器官损害也都可以影响意识的程度,这不仅可以通过自我实验(自动脑病眼底检查)来体验,而且还可以通过对功能缺损的观察和测量来进行临床检验。原因在于,大脑是一个开放系统,其状态依赖于与远离热平衡的环境之间的物理学、化学和生物学代谢。

意识状态和无意识状态似乎依赖于相当复杂的神经生理学系统,其中包含了各种水平上的反馈环和相互关联。图 4.19 示意了大脑皮层及其子系统初级感觉皮层和联想皮层组成的网络。来自感官的特定的输入(“传入”),通过特定的传输子系统和通路,到达初级皮层投影区。非特定的输入则从被称作“中脑网状结构”的子系统到达皮层。网状结构标示了一种复杂的神经元和神经纤维的网络,包括广泛分布的突触联结。众所周知,网状结构在唤醒、觉醒和注意中起着根本性作用。^[4.46]

复杂网络中的损害会导致对意识的种种干扰,这既可以是全局的,也可以是局域的,即在整体觉醒过程中特定的意识经验缺损。神经生理学可以从实验上表明,意识的程度取决于大脑皮层中对特定的和非特定的这两股不同的传入信号流的处理。但是问题就来了:意识的精神状态是

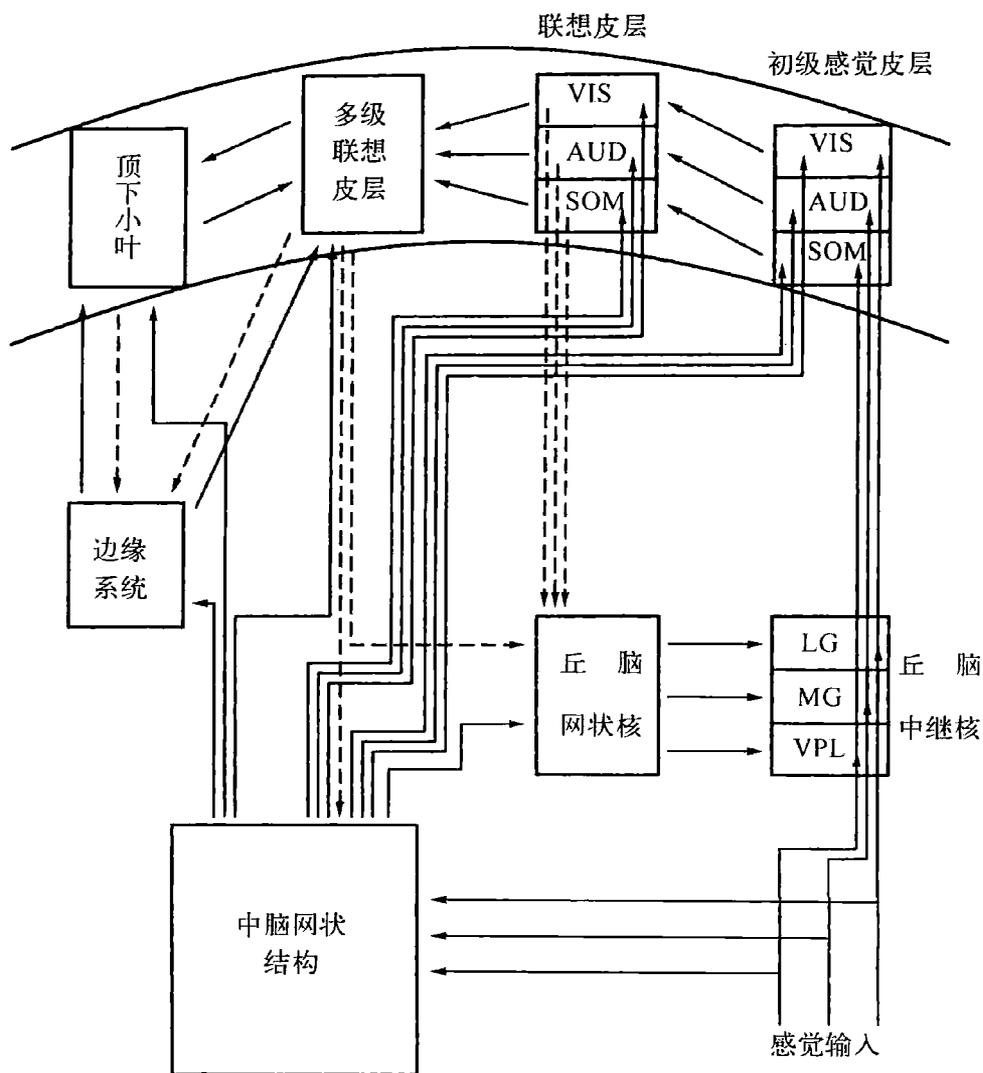


图 4.19 进入大脑皮层的输入

其通路是：体感 (SOM)、听觉 (AUD)、视觉 (VIS)、外侧膝状体 (LG)、内侧膝状体 (MG)、腹后外侧核 (VPL)。^[4.46]

如何从这些网络中形成的？在莱布尼茨的术语中，我们了解到，有一种如同研磨机的嵌齿轮那样的相互作用元素，但是却无法填平神经生理机制与意识的精神状态之间的鸿沟。传统的神经生理学持有约定论观点，认为：如同莱布尼茨的机械论的研磨机模型中的嵌齿轮的严格联结那样，神经网络之间也具有突触的严格联结，电脉冲通过神经元网络的传

播,就使得大脑功能成为可能。

复杂系统探究方式提供了一种自组织网络改变其突触联结的观点,而突触联结由突触的激活引起,并依赖于激活的程度。在神经复杂系统的框架中,相互作用的神经元的微观水平,与自组织产生的细胞团整体模式的宏观水平相区别。我们在前面的章节中已经提到,自组织神经细胞团的概念是赫布引入的,并由克里斯多夫·冯·德·马尔斯堡、科霍宁等人作了改进。如果网络中某些神经元中的同时活动是由具有一定模式的输入所引发的,那么按照赫布式学习规则就会通过同步激活而形成集合体。

由马尔斯堡提出的修改是,集合体的生成并非一个缓慢过程,而是由快速的突触变化产生的。^[4.47]这些所谓的“马尔斯堡突触”被用来给网络建立权重快速调节的动力学模型。今天,经验证据已经表明,大脑中存在赫布型和马尔斯堡型这两种具有高度可塑性的突触,其相互作用规则可以由分子机制来实现。网络中集合体的形成,取决于其神经元的激活程度。

然而,并不存在能感觉、能思想、或至少能协调合适神经的“母神经元”。感知能力中的像素和特征的捆绑问题(binding problem),被解释为在大脑动力学的习得吸引子支配之下同步发放神经元的细胞团。捆绑问题提出:对整个物体的感知如何得以构想,而不至于衰退为发放神经元中的数百万无联系的像素和信号?巴洛的理论^[4.48]假设受感知物体的每一种属性对应于单个神经元,其他神经元对应于属性的集合群,而最终是一个神经元对应于整个物体(“祖母神经元”)。因此,大脑需要数量激增的特化神经元,为变动状况的每一种新感知而作的特别设想中所专门特设的神经元为出发点(图 4.20a)。沃尔夫·辛格^[4.49]等人通过观察与测量,证实了赫布关于同步发放神经元的概念(图 4.20b)。因此,巴洛的理论对于解释格式塔现象并不是必需的。

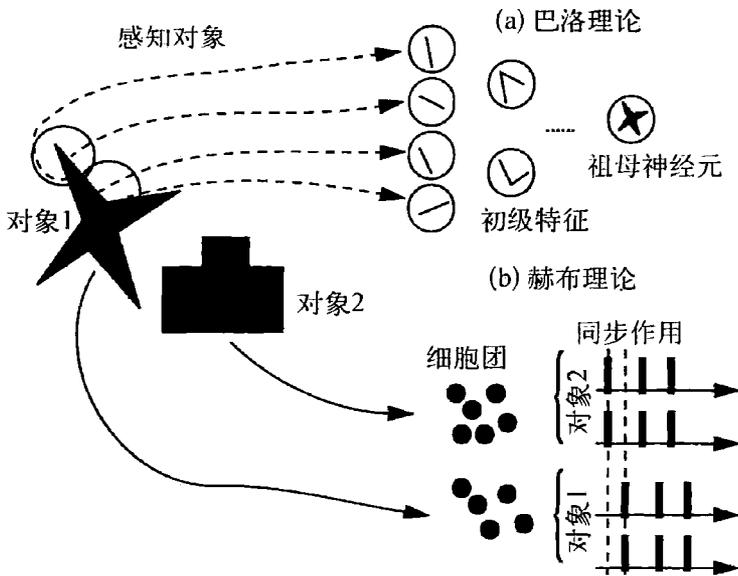


图 4.20 捆绑问题

(a) 巴洛的祖母神经元理论中；(b) 赫布的细胞团理论中。^[4.50]

关于意识状态和无意识状态，业已假定，细胞集合体的整体激活，就像网状结构对皮层所施加的影响那样(图 4.19)，一般将增加集体形成的概率。因此，汉斯·弗洛尔已经提出，意识程度的不同在于其生成集合体的速率不同。例如，细胞团的生成速率，决定着对来自外部世界的感觉模式的表示的数量、复杂性和持续性。意识是自反映的自指涉状态(图 4.18b)。因此，意识状态是以表示内部状态(而不仅仅是外部世界状态)的细胞团为基础的。例如，我不仅仅有一棵绿树的印象，还能意识到自己正在看着这棵树。而且，我对于我意识到我在看着这棵绿树的状态可以进行反思，并连续地重复此过程，产生出元—元表象，……终于从现象的印象和感受达到抽象的、高度精致的自反映状态。一旦超过了产生速率的临界阈值，现象状态就必定形成。意识的缺损出现在临界阈值水平之下。

有一种特殊的脑电图(EEG)，它将随着表示注意程度的集合体的形成速率的增加而变化，利用这种脑电图可以对上述假说进行检验。因为

细胞团的生成速率是以特定的改变着权重的突触为基础的,所以意识的程度可通过对突触联结进行干预而得到检验。实际上,用影响突触可塑性的化学物质麻醉了的病人,体验了生动梦境、虚幻感觉、视听幻觉以及胡思乱想。在此意义上,意识可以被看作系统产生表示和元表示的能力的结果。

集合体形成速率较高的神经网络,比集合体形成速率较低的神经网络,可以产生出更为复杂的表示。因此,在形成速率充分大时,复杂系统将发展起自指涉和元认知活性。我们可以设想一种多少有些意识的系统的尺度,这种系统相应于生命进化中的意识程度,而生命在从昆虫到人的进化中具有复杂程度不同的神经系统。随之而来的是,在复杂系统的框架中,意识的形成决非进化的副现象。它是一种合乎规则的整体状态的出现,即按照复杂系统的动力学,在某些临界条件得到满足时,通过其元素的微观的相互作用而产生出宏观有序模式。

如果复杂系统探究方式是正确的,那么生物进化的神经系统则不过是自指涉系统的特定实现;而其他以不同于人脑的生物化学的物质材料为基础的具有自指涉能力的技术系统,原则上或许不能排除在外(参见第6章)。我们甚至有能力和一种复杂系统的表示翻译成另一种不同系统的表示。由于两种系统的表示并不精确地一致,我们可能难以获得与我们的邻居、动物或其他的不同系统完全一致的感受。但是,我们会得到关于它们的感受或思想的某种知识形式的表示或某种理论。在此意义上,主观性保留了下来,即使在技术模拟的情形下,也保留了对人类交往的宽广解释空间。

关于传统的心身问题,复杂系统探究方式表明,认知活动既不是完全独立和相异于脑活动的,也不是简单地等同于脑活动的,更不是一种副现象。思维和感受被假定为,既是神经过程的产物,也是神经过程的生产者,而又不等同于神经过程。在复杂系统框架中,脑被建模为一种自组织

系统,它处在远离热平衡和接近于作为不稳定点的某些阈值处发挥作用。在神经不稳定期间,不同的集体兴奋模式都向相干宏观模式演化,这样的宏观模式在神经生理学上是以一定的细胞团为基础的,而在心理学上则表示为一定的感受和思想。[4.51]

我们都有这样的经验,在情绪不稳定的情况下,某种感受可以支配着其他的虚幻感受,甚至引导我们的行动。在协同学中,稳定模和不稳定模的竞争用役使原理来解释。读者可能还记得,在进行决策时,一种思想或概念开始“役使”其他可能的思想或概念。这些非平衡的相变,在最小信息的意义上,受非常少的几个序参量所支配。的确,作出决策以后的行动,意味着复杂性的大幅减少。过多的知识对于行动是阻碍,或如歌德所说:“行动的人总是肆无忌惮。”

认知现象被当作脑动力学的宏观性质和序参量,序参量支配着其间的微观过程。因此,所谓的心脑相互作用,不过是一种不适当的、陈旧的形而上学的过时表述而已,它们假定了某些诸如力学中的碰撞球那样的相互作用实体。在复杂神经系统的相变过程中,由微观的神经相互作用而形成宏观性质,这可用来为脑科学和认知科学的交叠领域建立模型。

协同学中把相变解释为某种对称破缺,这可以用对称势中粒子的过阻尼运动来形象地说明(图 4.21a)。[4.52]

在势的极大值处,粒子的位置是对称的,但却是不稳定的,初始的微小涨落决定了粒子将到达两个同等稳定的极小值状态中的哪一个。在复杂系统探究方式中,图 4.21a 中的两个低谷被解释为两个吸引子。显然,知觉的两可性和视觉系统自发地决定采取

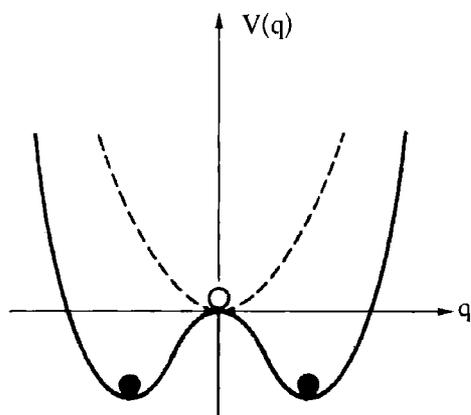


图 4.21 对称破缺

(a) 对称势中粒子的过阻尼运动引起的对称破缺;

其中的一种解释,这是一个人们熟悉的心理学对称破缺的例子。在图 4. 21b中,有一种图形和背景的不稳定性。我们看见白十字还是黑十字?图 4. 21c 显示了一种意义的两可性。图中是一位老妪还是一位少妇?^[4. 53]

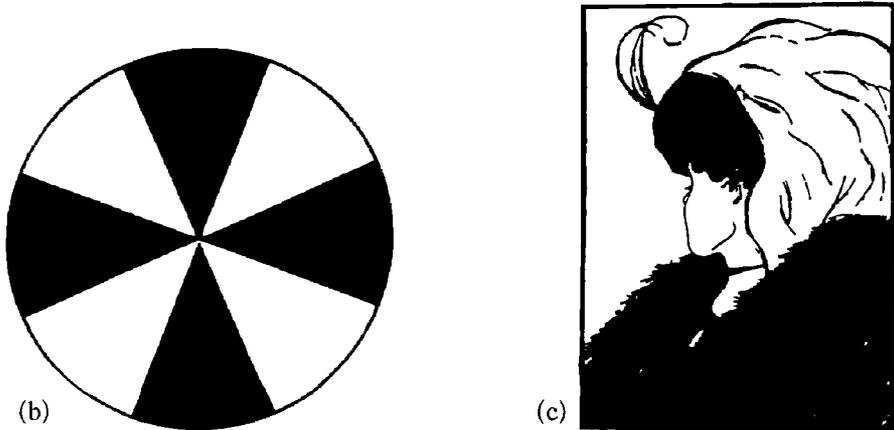


图 4. 21 对称破缺

意义的两可性: (b) 白十字还是黑十字? (c) 老妪还是少妇?^[4. 53]

心理学中的对称破缺,是由复杂系统的非线性因果关系支配的(“蝴蝶效应”),这大体上意味着,一个小的原因将引出大的结果。起始个体透视方式和认知倾向的微小细节,可以“役使”其他的模式,并导致一种支配性观点。一个神经生理学的模型,必须模拟相应的细胞团的相变。

动物行进中的相变是大家所熟知的,例如,马的步态。随着速度的增加,马的运动模式也改变了,从行走变成了小跑再到奔驰,以使能量消耗最小化。这是在非平衡相变中经常观察到的滞后现象,被解释为神经系统中稳定态或吸引子的结果。思维中也出现相变。“啊哈体验”和顿悟却是从涨落和不稳定性情形中出现的令人惊奇的现象。历史上,有许多著名的例子:科学家、工程师、艺术家和作曲家,在“创造性”的不稳定性和困惑情形下,突然发现新的问题答案,作出新的发明,闪现出绘画新思想,创作新旋律,等等。

复杂系统探究方式并未提供封闭的心理学信条,而是提供了一种交叉学科研究纲领,去探索认知科学中的老问题和新问题,并使得它们更靠近经验的和实验的分析。因此,人们提出,要探讨细胞团的变化速率和学习、创造性、认知灵活性和形象化能力之间的相关性。认知不稳定性现象被假定是神经过程的微观不稳定性宏观性质的。当系统在不稳定点附近起作用时,思维和期望被解释为支配着整个系统的活动性的序参量。在心理学实验中可以见到这种理论的确证,实验通过于可测量的生理效应的暗示引起幻觉。区域脑血流量的记录表明,甚至是思维或行动的意向也会增加运动区的神经元活性。

有谁会否认思想可以改变世界而并非仅仅是解释世界?在心身现象领域,例如,安慰剂效应表明,单纯信念或主导思想就不仅仅是可以改变情绪状态,而且还可以改变生理状态。显然,心身状态是接近不稳定点的。相应的序参量并非只是心理学家的理论概念,而是控制和支配着(“役使着”)中枢神经系统活性的真实模。

上例表明,自组织复杂系统在心理学中的应用不能简单地以其预测能力和定量可测量性来评价。在微观尺度上的非线性动力学和对初始状态的敏感依赖性,使系统的最终状态无从预测,这是复杂系统的一个本质特征。在大脑和认知研究中,我们面临着一种巨大程度的复杂性,排除了准确计算或长期预测。尽管如此,复杂系统探究方式揭示了心脑系统的基本定性特征,比如它对外部世界的内在微小涨落和变化的高度敏感性。

4.4 意向性和脑爬虫体

除了意识之外,人的精神还有另一个基本的特征——意向性,这是历

来受到强调的。

意向性是精神状态对于外部世界的事物对象或状态的参照性：我明白了某事物，我相信某事物，我期望某事物，我害怕某事物，我想要某事物，等等。有意向的精神状态可以与没有任何参照物的无意向状态区别开来：我紧张，我害怕，我累了，我开心，我沮丧，等等。

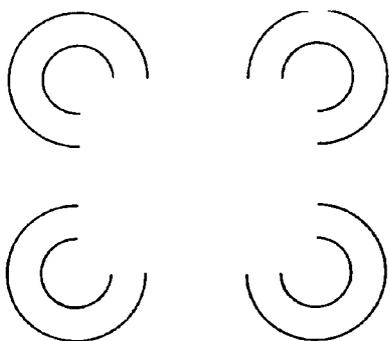


图 4.22 感知的意向性对象
(方块)^[4.54]

意向性现象也可以用简单的例子来形象地说明。在图 4.22 中，每一观察者都看见一个方块，尽管在此并没有给出任何物理上的方块形状。线条的构型对视觉系统提示了，存在着—特殊的封闭对象。在观察者和刺激物构型之间出现了意向性参照。^[4.54]

意向性对象或状态可以是虚构的或真实的。显然，人类文化充满着关于意向性对象或状态的记号和符号，包括从交通信号到宗教符号。甚至从纪念碑和教堂到工厂这样的建筑物，也可以代表意向性对象。在人类文化的长期发展中，语言的意向性意义被构筑起来。在传统的认识论中，某些哲学家（如弗朗茨·布伦塔诺）甚至主张，意向性是人的精神指称世界的一种特殊能力。意向性被理解为精神的一种特性，它不可归结为物理学的、化学的或生物学的性质。

一些现代哲学家（如约翰·塞尔）也主张，意向性是人类精神的一种与众不同的特性。但是，哲学家们同意，人脑的生物学进化也发展了精神参照世界的意向性能力。^[4.55]

实际上，意向性并非大脑所独有。它也是某些复杂系统的特性，这些复杂系统可以用生命进化中的吸引子动力学来为其建立模型。社会昆虫的筑巢就是一个集体意向性动力学的例子。这种复杂系统的特殊的特性

是自催化机制,通过这种机制,建筑巢穴生态系统——每一系统都包括一个白蚁种群与其环境——的目标定向的工作得以进行下去。在复杂系统探究方式中,人们假定,这种社会系统已经说明了诸如大脑和中枢神经系统那样的较高级发展系统中观察到的规范性性质。^[4.56]

在微观水平上,巢穴的构筑过程涉及到500万只以上的昆虫的协调,并导致某些宏观建筑模式的演化。例如,非洲白蚁构筑的巢穴高度超过15英尺,重量超过10吨。每一白蚁都是独立于其他白蚁进行工作的。但是,它们的行动在局部上由白蚁自己分泌出来的某些化学物质的分布所决定。建筑材料被化学物质进行了标记。最初,建筑材料是随机分布的,继而,分布的规律性不断增加,直到形成某种建筑结构,这种结构是从受到化学物质分布支配的昆虫的局部相互作用中出现的。

此模式决定了几个作为集体活动目标中心,在数学上这可以解释为扩散场的吸引子。在前面的章节中,吸引子是作为解引入的,它为从不同初始条件出发的多条轨迹所共有。从吸引子出发,局部的轨迹或是收敛的或是发散的。在物理或化学场的模型中,吸引子定义了局部区域,其中势能梯度呈现下降,指向零。包围吸引子的区域叫作吸引盆,由向吸引子收敛或发散的梯度流来定义。昆虫的流的模式总体上是由它们的工作空间的吸引子的布局来组织的,这是昆虫动力学的相图。众所周知,吸引子并非总能实现的。如果某些控制参量改变了,一种模式也可能失稳而解体,于是随之又出现新的吸引子模式。

图4.23a显示了围绕着两个吸引子的化学扩散梯度,它们将是两根柱子的基础。因为两根柱子对于白蚁是两个竞争吸引子,所以在它们之间就确定了一个鞍点。在后来的建筑步骤中,图4.23a继起初的2维场之后出现了3维场(图4.23b),支配了柱状构造的方向。在图4.23c中,以一个化学扩散梯度的吸引子示意了拱的形成。^[4.57]

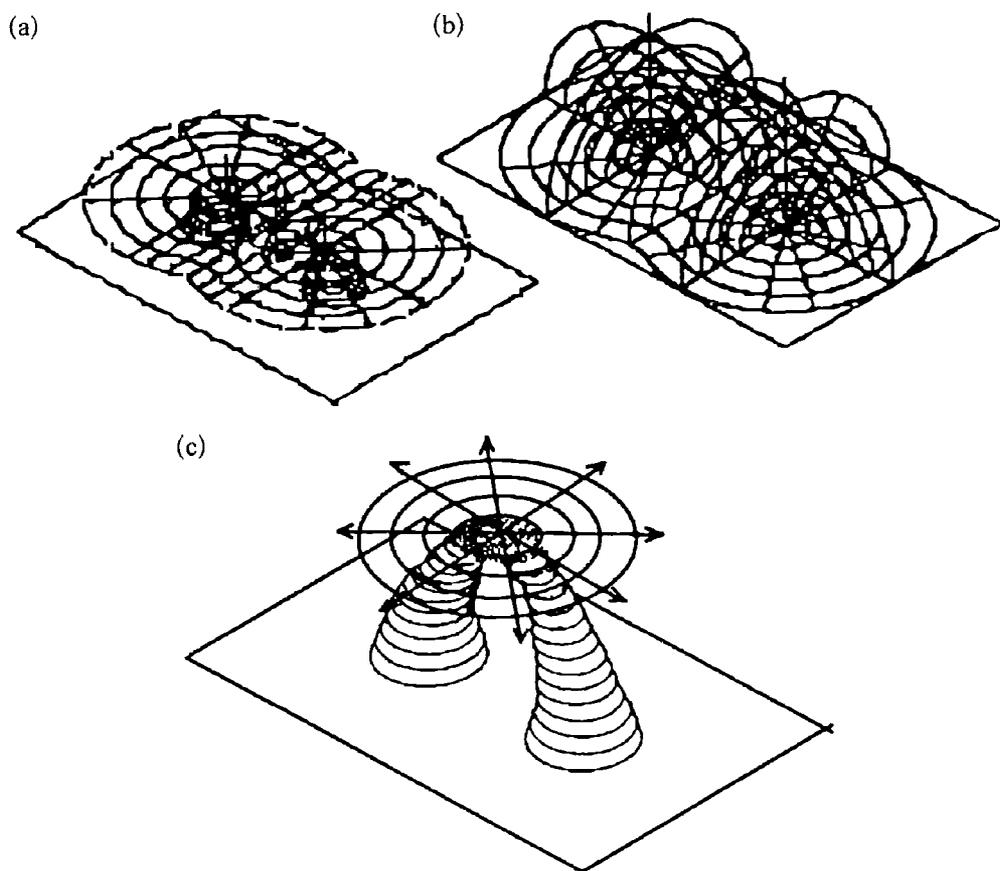


图 4.23 生态系统中的意向性

作为白蚁的意向性动力学的拱的形成：(a) 2 维扩散梯度场中作为两个吸引子的两根柱子基础；(b) 3 维场支配着柱子构筑方向；(c) 一个扩散梯度的吸引子支配拱的生成；^[4.57]

显然，在生态尺度上的意向性并不要求单个的系统组件必须意识到其行动的总体后果。意向性仅仅是系统动力学在较长的发展中从总体上展现出来的。图 4.23d 示意了筑巢的意向性复杂系统的自催化循环。因为它并非是有指导的学习过程，所以那里也就没有诸如“上帝”或“造物主”那样的指导性权威的“目标”或“计划”。那些不过是一种简化的拟人隐喻，它没有正确地描述所论自组织复杂系统的非线性因果关系。然而，总体上，从复杂的非线性相互作用中出现了意向性的集体行为。

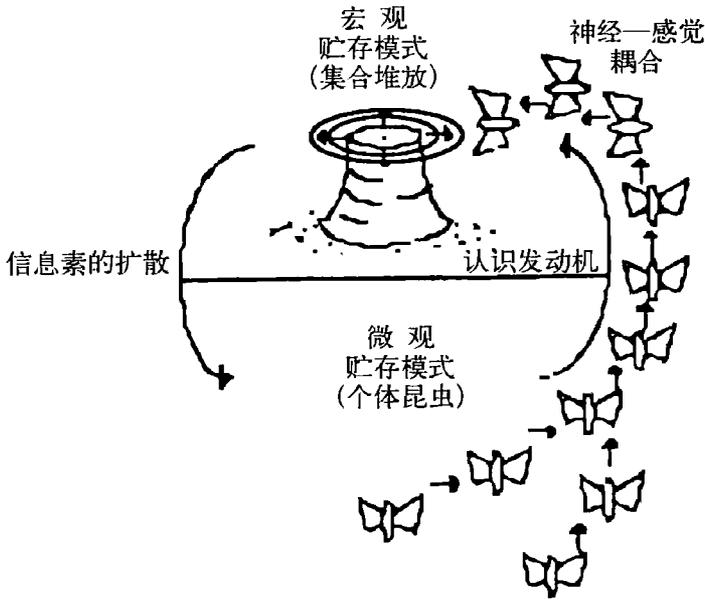


图 4.23 生态系统中的意向性
(d) 筑巢意向性复杂系统的自催化循环。

由于大脑和中枢神经系统都是复杂系统，其神经元和突触受非线性的动力学支配，因此它们实现了意向性行为模式也就不奇怪了。意向性并非是从天上掉下来的一种奇迹，一种引导着人的精神并将其与自然区别开来的奇迹。它是一种整体模式，是由特定的复杂系统在一定条件下形成的。但是，意向性有不同的水平，这取决于增加着的进化复杂性。

意向并非必定是意识。在图 4.22 中，我们视觉系统的意向性对象是一块方块，我们并没有施加有意识的意志。所谓的感知幻觉也是我们的视觉系统的一种意向性模式，它自发地产生出来而没有加入我们的有意识的意志。图 4.24 展示了流形的弯曲效应，它似乎是由不同的视觉吸引子的排斥子梯度引起的。两条等距平行线似乎被左边的一对排斥子梯度和右边的单个排斥子梯度改变了它们的曲率。观察者视觉系统的态空间，由于不同视觉梯度场的作用，表现出不同的曲率，尽管线段在物理图形中仍然保持等距和平行。

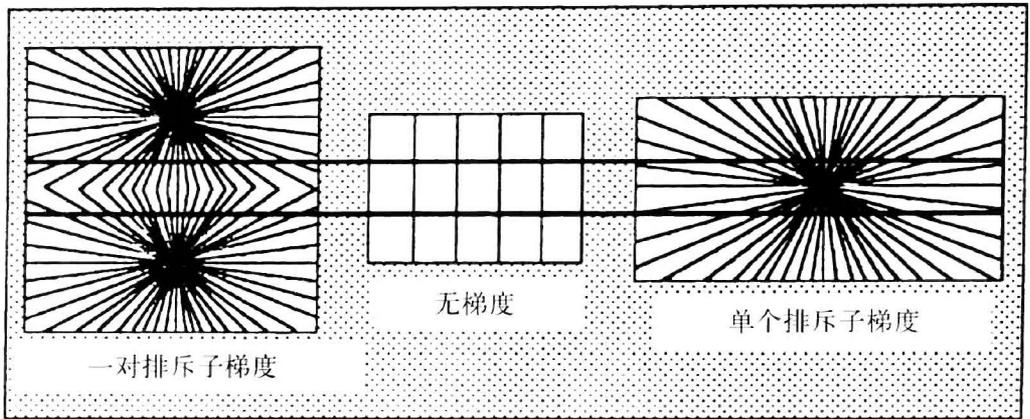


图 4.24 视觉吸引子导致的两条等距平行线的弯曲效应

甚至有意识的意向性行为模式也并非人所独有。狗的跳跃不只是为了跳跃,而是为了捕食、欢迎主人等等。在有意识的目标定向的意义上,意向性是所有动物或多或少都有的特性。随之而来的问题是,意向性行为如何用复杂系统探究方式来建模,模型又如何从实验上进行检验。

在这方面,意向性定义为一种有倾向性的行为模式,它可以改变其内禀行为模式的动力学性质,例如稳定性。因此,心理学家可以为行为模式的内禀动力学建立模型,尽管这样的模式可能被其他有倾向的行为模式的动力学所改变。这里我们提醒读者,支配着某些行为模式的内禀动力学,是可以非平衡相变和序参量来建模的。凯尔索、哈肯等人已经分析了如下的简单例子:要求人们平行地运动他们的手指(图 4.25a),在频率低时他们容易做到;当要求受试人增加其手指运动的频率时,手指会突然地以对称的、反平行的方式运动,失去了有意识的意向性(图4.25b)。^[4.58]

为了给这种行为模式的相变建立模型,频率被解释为一种控制参量,描述手指运动的宏观变量是相位 φ 。该行为可用与相位变化相联系的能量波形建立模型。该波形必定是对称的,因为左手手指和右手手指具有同等的功能。相角必定具有周期性(图 4.26)。如果频率增加了,波形及其起始形状较陡的低谷就会变形。最初的缓慢运动中,模式是稳定的,对应于

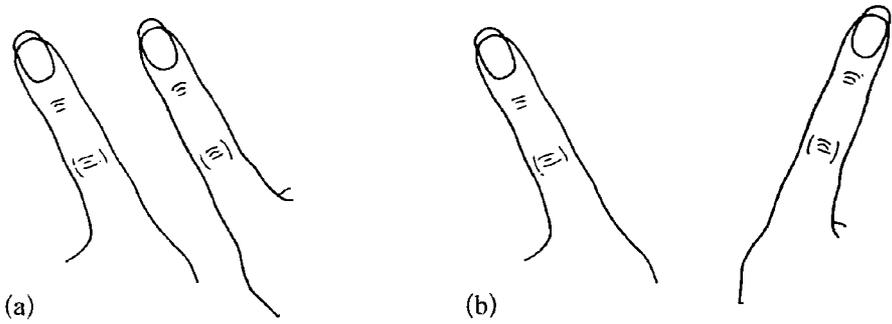


图 4.25 两个手指的相对运动

(a) 平行运动; (b) 反平行运动。^[4.55]

处于 π 值的稳定相(图 4.26 上部)。最后,处于 π 值的低谷消失了,起初处于该低谷的小球也向下滚进到最深的最小值,这对应于手指的对称运动(图 4.26 下部)。

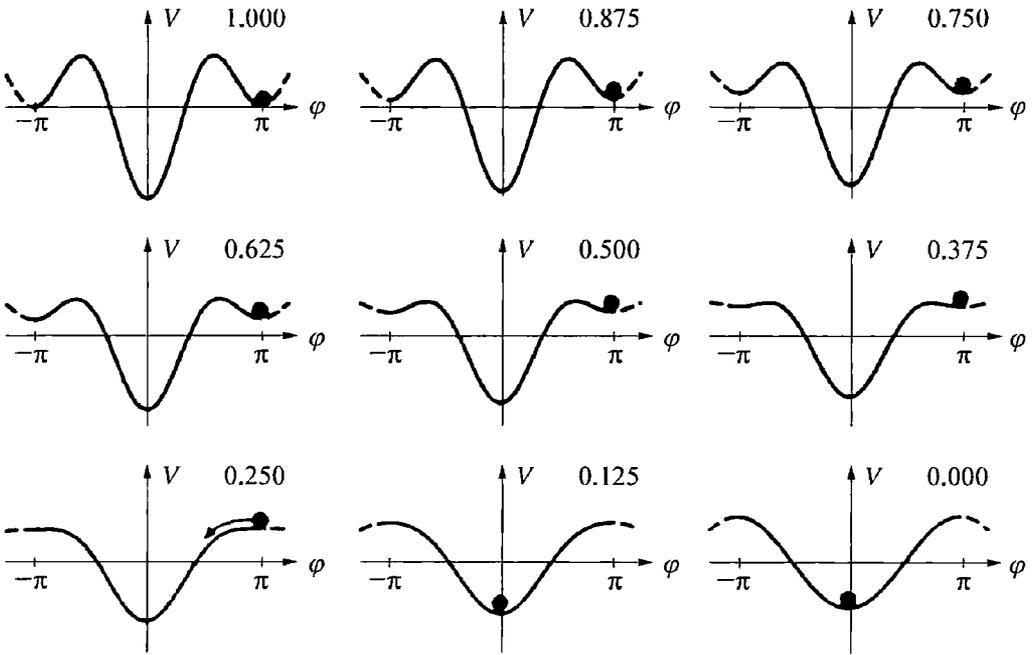


图 4.26 用能量波形模拟运动手指的动力学

以相对相位 φ 为序参量。

在一些实验中,受试者被要求有意向地去实现双手协调的两种模式之间的转变。暂态过程所对应的转变时间,已经进行了测量。两种模式

的稳定性,用序参量的涨落来度量。相对相位的动力学用非线性演化方程来进行建模。

图 4.27a 形象地表示这个具有两个势能极小值的方程的内在动力学。意向性信息对于相对相位动力学的贡献,用图 4.27b 中的势来表示。把内在的和意向性的动力学加和,得到完整的动力学,结果示意在图 4.27c 中。在波形中的小球,当 $\varphi = 0$ 时比 $\varphi = 180$ 时沿着陡峭斜坡要滚动得快一些,这对应于经验上测量的转变时间。显然,意向可以通过使得其中一种模式失稳而另一种模式稳定化,从而改变内在的动力学。意向性信息在此被看作模式动力学的一部分,吸引着系统向意向中的模式运

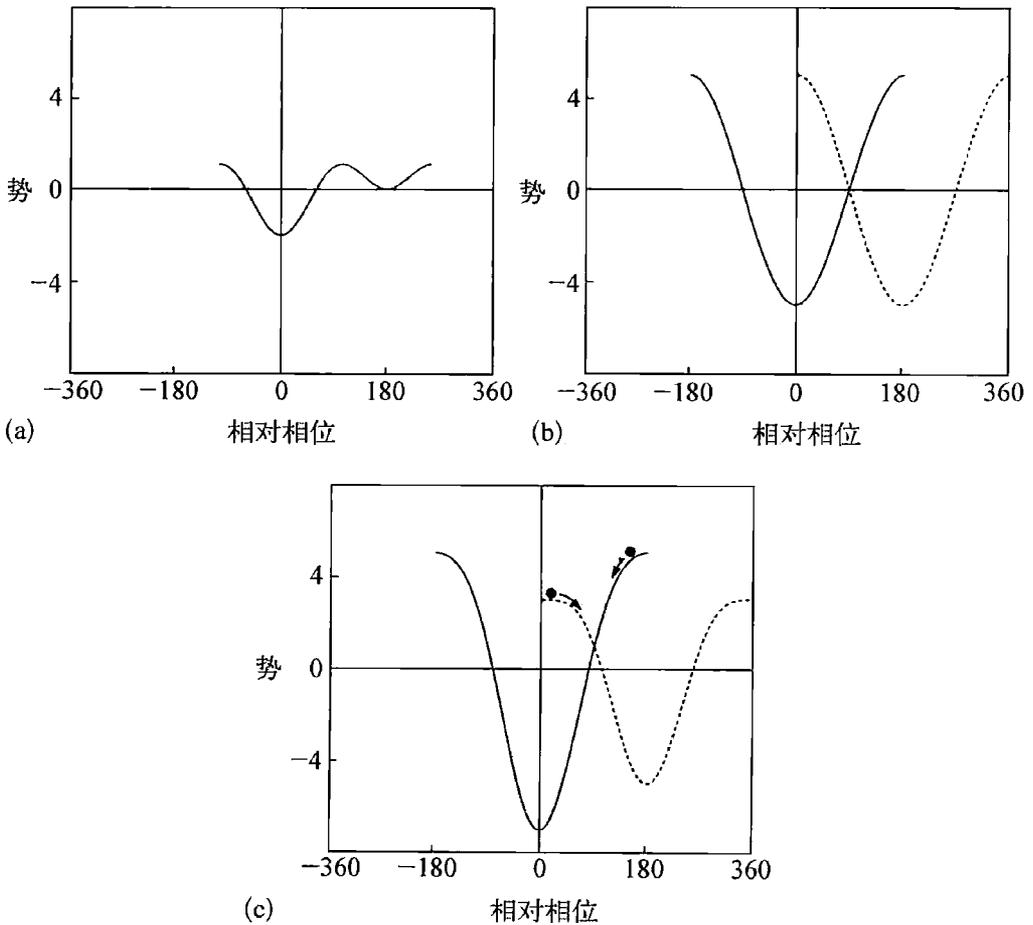


图 4.27 具有意向性信息的相对相位动力学^[4.59]

动。在此意义上,意向性信息定义了同一态空间的一个吸引子,其内在动力学的模型就建立在此态空间中。^[4.59]

意向性和语言的意义,常常被当作人类思维的根本性特征。意向性状态的例子有疼痛、酥痒和瘙痒、信念、害怕、希望、欲望、感觉经验、行动经验、思维、感受等等,它们都使用相应的语句来表达,如“我觉得胃疼”、“我希望得到一辆小汽车”、“我相信上帝”等等。塞尔提出,精神状态与乳汁分泌、光合作用或消化等其他生物现象一样地真实。他认识到,精神状态是生物脑的一种宏观态,由微观尺度上的神经元之间的神经生理相互作用引起的。因此,它们是不可能由单个神经元的神经生理状态来验证的。

大脑的微观态和宏观态之间的区别,可通过类比于液体的微观态和宏观态来加以说明:液体的宏观态不可能还原为单个分子,或换言之,单个分子不可能是液体。在此意义上,信念、欲望、口渴、视觉经验都是大脑的真实因果特征,如同桌子的固体性或水的液体性一样真实。意向性状态自身可以由大脑的结构引起并实现。塞尔主张,此处并不存在形而上学障碍。

然而,他特别指出,任何纯粹的形式模型都不足以充分地模拟意向性,因为形式性质自身并非意向性的组成部分。他持有这种看法的理由是以“中文小屋”思想实验为基础的。把一个只懂得英文的人锁在一间小屋内,室内贮藏了大量的中文字,并有一套用英文写下的复杂的翻译规则,借以对中文字序列进行操作。该人通过一条窄缝定期接收中文字序列(图 4.28),并应用那些翻译规则,以进一步产生出中文字序列,并且也通过窄缝显示出来。^[4.60]

对于小屋中的那个人来说,她并不了解储藏的序列中包含了大量的用中文写下的关于某一主题的信息。通过窄缝输入的序列是关于这些主题的问题或见解。输出的序列是对于这些输入的反应或建议。所用的翻

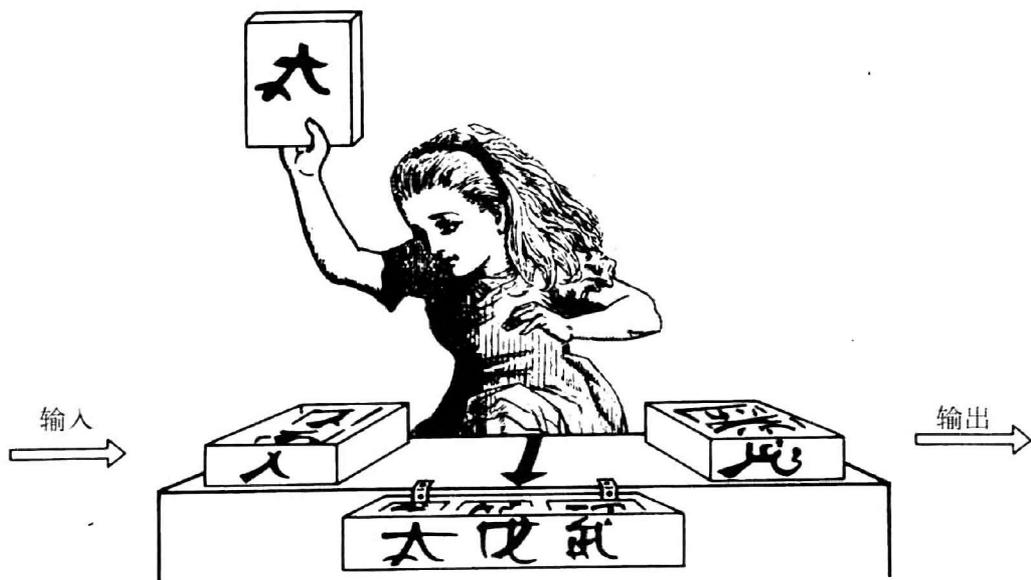


图 4.28 中文小屋中的艾丽斯

译规则是一种形式程序,模拟了以中文为母语的说话人的交谈行为。在中文小屋中的那个人,正确地应用此形式翻译规则,但不理解中文字序列,这些中文字序列对她而言是无意义的。

塞尔坚称,形式符号的操作本身并没有任何意向性,因为它们对于使用者来说是完全无意义的。在此情形,意向性是如字词、句子等形式符号的特征,它们指“所指”的事物(符号的语义关系)以及使用者(符号的实用关系)。塞尔断定,这种特征仅仅是大脑的精神状态所固有的。

如果塞尔把模拟限定在由程序控制的图灵计算机的形式算法中,那么他反对“计算机模拟”的论证就失败了。但是我们已说明,大脑具有典型的自组织、自指涉复杂系统的特征,这与程序控制的计算机完全不同(参见第6章)。复杂系统的自组织和自指涉性并不局限于人类或哺乳动物的大脑。它们仅仅是特殊的复杂结构在生物化学和神经生理学上的实现,这种复杂结构是在生物进化中产生出来的。因此,原则上不能排除下面这种可能性:这些具有特征动力学的复杂结构可能通过人工制造的完

全不同的材料来实现。因此,正如自指涉和自组织的特征使得意向性成为可能,用不同于生物脑的复杂模型来至少是部分地模拟意向性,这种可能性也是原则上不能排除的。

在传统哲学中,意向性常常是以所谓的人的“自我”为基础的,被认为能够涉及到世界和自身(作为自指涉性的“自我意识”)。但是自我隐藏在大脑的何处?传统的哲学立场如种种柏拉图主义或唯灵论或唯物主义,甚至仍然为一些现代的脑研究人员所持有。例如,在约翰·埃克尔斯爵士看来,自我表现为一种与大脑相互作用的心灵实体,但在本性上完全不同。^[4, 61]但是如何来辩护或驳斥这种假说呢?这只是一种以高度形而上学为代价的假说,人们可以相信它也可以不相信它。

假说必须能接受批判,它可能是错误的,但是对于进一步的研究是有益的。因此,形而上学的代价是太高了。哲学上的奥卡姆剃刀要求我们剔除多余的假设,保持对形而上学实体的假设的简练性,把对经验研究而言似乎不可或缺的假设数目限制到最小。复杂系统探究方式是一种交叉学科模型的数学研究纲领,避免了形而上学教条。从长远看,它可能失效。但是这种建模策略已经在若干科学和技术领域中得到许多成功的确证,而且更重要的是,它为进一步的经验研究启示了一些富有成果的概念。另一方面,传统的唯物论,它以单个神经元来解释神经生理学过程的精神状态,则是错误的。

然而,在脑研究中,引出的问题是,大脑中的哪一部分是“自我”中枢。皮层是大脑的一部分,它使我们能够学习、记忆和思考,并创造出所有的人类文化和文明的产物。但是,如果皮层主要作为具有一定学习程序的复杂联想记忆存贮来进行建模,那么它就仅仅是一种复杂的、高度精致的设备,是在生物进化过程中为增进适者生存而进化起来的。

的确,皮层是人脑进化中的最年轻的部分。人脑中有一些老得多却更为初级的结构,这样的结构也可以在鸟类、爬行动物、两栖动物和鱼类

的脑中找到。一些科学家假定,欲望和痛苦之类的基本感受以及为爬行动物的生存所必要的所有伺服机制,从根本上就是在这些早期的大脑结构中实现的。这种中枢将会刺激所有各种活动,把皮层仅仅用作巨大而有效的联想装置。因此,在这种解释中,“自我”就被大脑中的爬虫体代替了,大脑以某些高度复杂的设施(如皮层)来发挥作用,以在越来越复杂的环境中生存下来。^[4. 62]意向性由于皮层而变得可能,但却是由人脑中的爬虫体的基本本能所激起的。

具有高度有效的神经生存手段的爬虫体的概念,与十九世纪流行的达尔文主义信条——猿是人的祖先相比,似乎更加损伤了我们的虚荣心。当然,从科学的观点看,我们的虚荣心不应受损,而是使得我们对“神经爬虫体”概念进行批判。这个概念的主要缺陷在于,我们的感受并不停留在爬虫体水平上,而是在生物和文化的进化中得到了发展。

我们对欲望和痛苦的感受是相当复杂的,因为它们受到人脑所产生的一种相当复杂而精致的文明的刺激的影响。于是迄今,有一种来自爬虫体的复杂的反馈塑造了我们的情感和欲望。文学、艺术和心理学的历史显示,欲望与痛苦是永远处于进化当中的人脑的高度精密状态。因此,甚至多少有些敏感的人类灵魂的传统观念在复杂系统的框架中也是有意义的。但是,我们必须放弃关于人类心智和灵魂的传统观念,它们被看作某种奇异物质,以原则上不可思议的方式控制着人的身体并与之相互作用。

4.5 复杂性和具身心智

有机体中复杂细胞互动和机体互动的协调,需要一种特殊类型的自组织控制。这一点成为可能,是由于神经系统的进化使有机体能够适应

变化的生活条件,并亲身体会其环境。我们把这种情况称为具身心智的涌现。^[4. 63]身体组织的解剖层次在不同尺度范围内变化,从分子维度到整个中枢神经系统(CNS)。对这些层次等级的研究涉及以下这些问题:例如,信号在树突中如何整合,网络中神经元如何互动,在一个诸如视觉这样的系统中网络如何互动,在中枢神经系统中的系统如何互动,以及中枢神经系统如何与其环境互动。每个层次都可用一些决定其特定结构的序参量来刻画,而这些特定结构是由有关特定层次等级的亚要素之间的复杂相互作用所引起的。

在大脑的微观层面,大量地存在着多体问题,需要采用还原策略来处理复杂性。就 EEG 图像来说,一个电极的复杂系统测量大脑的局部状态(电位)。在微观层次上,患者大脑的整体状态被表示为局部的时间序列。比如,在癫痫小发作的情况下,这个时间序列表现为典型的周期性的峰值。微观状态决定一个循环周期中的宏观电场模式。在数学上,宏观模式取决于空间模式和序参量——场波的振幅。在对应的相空间,它们支配着刻画癫痫小发作的一个混沌吸引子。

在细胞和亚细胞层次上的神经自组织,取决于神经元内部和神经元之间的信息处理。化学递质能够使用高度可塑的直接和间接机制来影响神经信息处理。突触互动的长期增强(LTP)是最近大脑研究的一个极其有趣的课题。LTP 似乎在诸如记忆和学习等认知特征的神经自组织当中扮演了必不可少的角色。人们设想,信息存储在以典型宏观模式聚集一起的神经细胞团的突触联结当中。

然而,个别神经元并不能够看见、推理或记忆,而大脑却能如此。视觉、推理以及记忆被理解为较高层次的功能。偏爱自下而上研究策略的科学家建议,只有每个神经元和突触的特定属性得到了探索和解释,大脑较高层次的功能才能够得到表达和理解。从复杂系统探究方式得到的重要洞见是,整个系统的涌现效应是协同的系统效应,不可能还原为单个要

素。涌现起因于非线性相互作用。因此,整体大于各个部分的(线性)加和。所以从方法论的角度看,单纯以自下而上策略研究大脑机能必定失败。另一方面,宣称认知完全不依赖于神经系统的单纯自上而下策略的主张也难逃古老的笛卡儿两难问题:“灵魂是如何驱动机器的?”

我们现在能够辨别中枢神经系统中几种不同程度的复杂性。这些尺度包括分子、膜、突触、神经元、细胞核、环路、网络、层、图谱、感觉系统,以及整个神经系统。从底层开始,我们能够辨别与离子运动、通道构型、动作电位、电位波、行进、感知、行为、感觉以及推理有关的秩序。

大脑的不同能力要求在神经结构和区域的复杂层级中处理并行海量信息。我们拥有视觉和运动系统的复杂信息处理模型。情感系统的动力学甚至以非线性反馈的方式与人脑多个结构产生互动。这些复杂系统产生细胞团的神经图谱。众所周知,躯体感觉图谱的自组织发生在视觉与运动皮层,能够被学习程序放大和改变,就如同训练猩猩的手所使用的学习程序。

正电子发射层描记术(PET)图像显示出大脑不同区域中神经化学的代谢细胞团的宏观模式,它们与认知能力和诸如看、听、说话、思考等意识状态有关。神经细胞团形成的模式甚至与精神状态的复杂过程相关。^[4.64]代谢细胞相互作用的微扰(例如,摄入可卡因引起的)可导致非线性效果,引起行为上的复杂变化(例如,吸毒成瘾)。神经细胞团与认知和意识状态的序参量(吸引子)之间的这些相关性,显示了在最新研究中观察到的神经生物学与认知心理学之间的联系,取决于测量仪器的精度和所采用的研究程序。

还有许多问题仍未获回答。我们能观察到的,只是某人正在思考和感觉,而不是他们正在思考和感觉什么。而且,没有什么独特的物质叫作意识,而只有对感觉、运动或其他功能投以不同程度的注意的大脑的复杂宏观状态。意识不仅意味着我们的看、听、讲、听闻、感觉、思考等等,而且

意味着我们在执行这些认知过程时的认识。我们的自我被看作是状态的一种序参量,从多种自我反思、自我监视以及管理我们意识行动的递归过程中涌现出来。所谓的镜像神经元(例如在大脑的布罗卡区)使自我反思成为可能,它让灵长目动物(尤其是人类)能够模仿和扮演他们同伴所表现的有趣行为。因此,他们能够学会从自己以及同伴的视角看东西,从而能够理解同伴的意向并与其取得共鸣。主体性的涌现在神经心理学上得到了很好的理解。

大脑观察、描绘、监视外部世界和有机体的内部状态,特别是其情绪状态。“感觉”就意味着对主要由边缘系统引起的情绪状态有察觉。在神经医学中,“心智理论”(ToM)甚至分析了位于新皮层的特定区域的社会情感的神经相关性。^[4. 65]例如,患有阿尔茨海默病的某些人由于相关神经区域受损,而在情感上丧失了同情和社会责任感。这样一来,我们的道德理智和决策在大脑动力学方面有了一个清晰的基础。

从神经心理学的角度看,古老的哲学问题“感受性”也是可以解决的。感受性是人有意识地体验的属性。在一个思想实验中,假设一位神经生物学家被关在黑白房间里。理论上,她懂得关于神经元处理色彩的所有知识。然而,她没有机会体验色彩。因此,确切知识无法为知觉体验的性质提供任何帮助。通过具有自我意识的有机体与其环境的亲身互动,感受性在这个意义上出现,对此用复杂系统的非线性动力学来解释。因此,我们可以解释主观感觉和体验的动力学,但实际感觉当然是一种个体的体验。在医学上,某一种疼痛的动力学通常能够完整地得到医生的解释,然而疼痛的实际感觉对于患者而言是一种个体的体验。^[4. 66]

为了给大脑及其复杂能力建立模型,应当辨别以下范畴。在神经元层次的模型中,为了把神经元描述为一个单元,研究主要集中在每个神经细胞或神经元的动态和适应性质。在网络层次的模型中,相同神经元彼此联结,因而具有基本的系统功能。在神经系统层次的模型中,多种网络

的结合表现出感官知觉、运动功能、稳定控制等某些更复杂的功能。在精神操作层面的模型中,认知、思考、解决问题等基本过程得到了描述。

在复杂系统探究方式中,微观层面互动神经元应该表示为耦合微分方程,它们模拟每个神经元神经脉冲的传递。霍奇金-赫胥黎方程是带有一个行波精确解的非线性扩散反应方程的一个特例,它为电压神经脉冲的波形和速度提供精确预测。总之,神经脉冲的出现是像 BZ 反应中的环形波或远离平衡态动力学中的流态(fluid pattern)那样的新动力学实体。简言之,它们是复杂神经动力学的“原子”。在宏观层面,它们产生一个细胞集合体,其宏观动力学取决于序参量。例如,一个同步发放细胞团表达一个植物的视觉感知,它不仅是感知像素的总和,还受到诸如形式、背景或前景等某些典型宏观特征的刻画。在下一个层次,多种感知的细胞团在复杂场景中相互作用。在这个情况下,每个细胞团作为一个发放单元,形成一个细胞团的集合体,其宏观动力学由某些序参量来进行描述。序参量可以表达感知物体的类似属性。

以这种方式,我们获得认知涌现层次的层级结构,始于发放神经元的宏观动力学。假设每个层次的动力学都可以刻画为带有序参量的微分方程。例如,在宏观动力学的第一层,序参量刻画视知觉。在后续的层次,观察者察觉这种知觉。然后知觉的细胞团与负责意识状态的神经区域取得联系。在下一步骤,知觉意识可能是计划活动的目标。在这个情况下,细胞团的细胞团与位于计划皮层的神经区域建立联系,依此类推。它们被表达为带有相应细胞团发放率的耦合非线性方程。甚至像自我意识那样的高层次概念也可以解释为自我反思的自我反思,关联到一种可表示为相应的大脑细胞团的个人记忆。大脑状态涌现,持续一小段时间,然后消失并被另一些状态所取代。正是这个过程灵活性和创造性,使得大脑如此成功地赋予动物适应迅速变化而且不可预测的环境的能力。

复杂系统和可 计算性的进化

自然界和社会中,复杂性的进化可以被看作计算系统的进化。在近代文明之初,莱布尼茨已经形成了这样一个观点:自然系统的层次结构,从石头、植物到动物、人类,都与复杂度逐渐增加的自然自动机对应(见第 5.1 节)。现在的可计算性理论让我们可以把问题分为不同的复杂度类。这意味着,相应函数的阶表明了其算法或计算程序的计算时间。但是,当定义符号模式的算法复杂度的时候,我们还要考虑计算机程序的大小(见第 5.2 节)。

复杂系统中的信息动力学可以用香农的信息熵和科尔莫戈罗夫-西奈依熵(即 KS 熵)来分析。如此,我们便有了良好定义的方法,可以用于区分复杂系统中具有稳定、振荡、混沌或随机等各种动力学机制的信息流。 $1/f^{\beta}$ 噪声的复杂度可以和非线性动力学的吸引子联系起来(见第 5.3 节)。一般来讲,任何随机过程都可以按照概然吸引子的复杂度来分类。这给出了复杂系统幂律的深刻洞见,指明了自然界和社会中的自组织,以

及序的涌现(见第 5.4 节)。进一步,我们思考量子计算机和量子复杂性理论能否提供更有效的信息处理手段。不同复杂度的、“浓缩”的量子信息非常重要吗(见第 5.5 节)? 莱布尼茨关于自然自动机的观点,已经被冯·诺伊曼元胞自动机的概念在数学上精确实现了。复杂系统中的模式生成,可以通过元胞自动机的框架来分析。甚至混沌性和随机性也可以由元胞自动机的简单规则产生出来,正如斯蒂芬·沃尔弗拉姆的计算机实验所示(见第 5.6 节)。

5.1 莱布尼茨和普遍数学

复杂系统最有推测性思辨的应用之一,是人工智能的进化。^[5.1]在经典人工智能的观点中,大脑被看作最先进机械的计算机硬件,而心智则是与之相应的确定性算法的软件程序。甚至基于知识的专家系统,也源于高级人工智能编程语言的算法表示。但是,数理逻辑的理论结果(丘奇、图灵、哥德尔等人)和编程的实际问题,限制了经典人工智能框架下思维的机械化。

作为自然进化结果的“大脑计算机”理论,主张通过复杂神经网络的非线性动力学(“自组织”),来模拟大脑的特性及其精神状态。问题出现了:对复杂神经网络的动力学的洞察是否能够展现新的革命性技术的“蓝图”,并由此来追索大脑和心智的自然进化。实际上,人类知识和知识技术的发展表现为一种技术进化,它导致了如同生物进化中的突变那样的技术创新。

初级水平是通过像锤子、杠杆等等这样简单的工具来实现的。在接下来的水平上,使用力和能量的机器被发明出来了。今天,程序控制的计算机和信息处理的自动机已经成为日常生活的工具。计算机科学家按照

计算机历史上的发展,把硬件和软件分为好几代。在人工智能的研究中,说起“第二个计算机时代”,就意味着从数字处理机向知识处理系统的过渡。这些知识处理系统,例如专家系统,被认为能够模拟人类专家,至少某些情况下如此。^[5.2]

计算机科学的早期历史根源,可以追溯至经典力学时代。思维的机械化起源于能够自动完成基本算术运算的机械设备的发明。机械计算机器能够一步步地执行一系列的指令。这样,它的动力学取决于机械化的单极因果关系,与复杂系统的并行性和自组织有着本质性的不同。一般来讲,机械计算机器的传统设计包括如下设备:

首先,有一个输入设备,数字通过它被送入机器中。选择设备选择并提供机械化的运动,来实现寄存设备上的数值的加法或减法。这个寄存设备是必需的,用以指明储存在机器中的数的取值,这在技术上通过一系列的齿轮或轮盘来实现。如果结果寄存器中的一位数字从9变为0从而产生进位,那么这种进位必须通过进位设备传递到下一位,甚至越过整个结果寄存器。控制设备确保所有的传动装置在每一个加法周期后都处于正确的位置,以避免错误的结果或者机器卡死。擦除设备用以重新设置寄存设备的值为0。

希伯来语、东方语言、数学、天文学、地理学的教授威廉·席卡德(1592—1635),被认为是能够进行基本四则算术运算的机械计算机的第一位发明人。他的机器中的加法和减法部分是通过具有自动进位装置的齿轮设备来实现的。乘法和除法设备则基于耐普尔乘法表。帕斯卡(1623—1662)这位杰出的法国数学家和哲学家,发明了一种能进行加法和减法的机器,其精致的进位装置原则上仍然为今日的路程计所运用。^[5.3]

但是,只有莱布尼茨针对基本四则算术运算所发明的机械计算机器,包括了这些机械设备的每一个部分:从输入、选择、寄存设备到进位、控

制、擦除设备。莱布尼茨机成为手动计算机器的原型。如果我们从莱布尼茨机中去除技术细节和特定的机械构造而进行抽象,那么我们得到了一个理想的计算机器,它在原则上能够计算自然数的所有可计算函数。

图 5.1 是这种理想机器的模型,它带有曲柄 C 和三个数字存储器 SM、TM、RM。^[5.4]自然数可以通过启动手柄 SH 输入启动(输入)装置 SM 中。如果曲柄 C 朝右旋转,那么 SM 的存储内容被加到结果装置 RM 的存储内容中,旋转装置 TM 的存储内容加 1。曲柄 C 向左旋转,则从 RM 的存储内容中减去 SM 的存储内容, TM 的存储内容减 1。

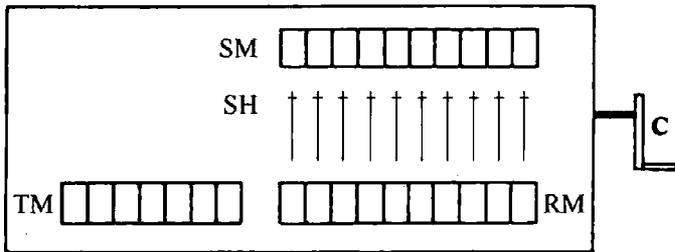


图 5.1 手动计算机器

加法过程如下。计算之初,通过设置 TM 和 RM 为 0 实现擦除过程。然后,第一个数通过 SH 被设置进 SM。曲柄 C 向右旋转,把这个数传送进 RM。换句话说,这个数被加到了 RM 中的 0 上。现在,第二个数被设置进 SM,并通过一个向右的旋转加到 RM 的存储内容中。这两个数字之和可以在 RM 中读取。曲柄向右旋转两次之后, TM 显示 2。乘法仅仅意味着重复相加同一个数。把数字 a 添加到自身 b 次就得到乘积 $b \cdot a$ 。

莱布尼茨甚至针对他早些年发现的、仅包含两个数字 0 和 1 的二进制数字系统,设计了一个机械的计算机器。他描述了一种机制,可把十进制数转换为相应二进制数,反之亦然。现代电子计算机仅有两种状态 1 (电脉冲)和 0(无电脉冲),莱布尼茨是计算机科学的真正先驱之一。^[5.5]

莱布尼茨具有历史性的机器遇到了很多技术问题,因为当时的材料

和技术水平还达不到要求。但是,他的设计是“普遍数学”(mathesis universalis)的一般化研究纲领的一部分,该研究纲领试图通过计算过程(“算法”)来模拟人类的思考,并在机械的计算机器上实现这些算法。莱布尼茨宣布了他的普遍数学的两个基本准则。

“判断的艺术”(ars iudicandi)应该能够让每一个科学问题在经过编码成为数字符号之后,都可以通过合适的算术算法来判定。“发明的艺术”(ars inveniendi)应该能够让科学家去寻找并枚举科学问题的可能解。莱布尼茨的普遍数学看起来已经预示了20世纪著名的希尔伯特纲领,此纲领追求数学知识的公理化、形式化。事实上,莱布尼茨发明了一些程序来对语言进行形式化和编码。对于存在通过机械设备来解决世界上所有问题的通用算法,他深信不疑。^[5.6]

因此,他主张自然系统,像细胞、植物、动物,甚至人类,都多多少少是复杂自动机。在《形而上学谈话》(1686)中,莱布尼茨强调,生命系统的机械描述和因果解释并不与在科学中具有巨大启发价值的目的论相抵触(§ 22)。在他的《单子论》(§ 18)中,引入了一种个体实体(monade)作为基本的自动机(automates incorporels),它由(连续的)系列状态(perceptions)刻画。基本的自动机构成了集合体,其程度不同的复杂性由不同的关联性刻画,并可以解释为复合的自动机。在《神正论》(§ 200)中,莱布尼茨讨论了生命系统中的等级结构和从属关系:

……事物的关联和秩序引起了,每种动物和每种植物的身体都包含了其他动物和其他植物,或其他活的有机体。结果是存在着从属关系,一种身体,一种实体都服务于另一种。

生命系统的统一性是由其组织形式来保证的,对此莱布尼茨采取了亚里士多德的思想,称之为“隐德来希”。但是莱布尼茨仅仅运用了一种

老的形而上学术语,以引出他自己的新概念。对于莱布尼茨来说,只有在从属关系和等级的程度高低不同的意义上,系统才是有一定程度的统一性的。一个其中所有的实体之间有同等关联的集合体,就没有等级秩序,比起初级的细胞有机体,它的结构性就较差,而在植物、动物和人类中,我们都可以观察到一种不断增长的从属关系。

对于莱布尼茨来说,目的论术语具有启发性价值,尽管大自然原则上可以用机械因果性来解释。但是,把莱布尼茨说成是生命力论的信徒是一个基本的错误和误解。主要的区别在于,对于莱布尼茨来说,解释生命系统决不需要新的原理或生命力(force vitale)。在一定程度的复杂性中,目的论术语仅仅是启发性地适用于描述自然系统。但是,与自然系统不同,人造的机械自动机是由人在有限步骤中构造出来的。只有在无限分析中才能够揭示出自然自动机的复杂性,它是与世界上的每一单个自动机(“实体”)相关联的。显然,莱布尼茨设计了一种复杂系统理论,但是仍然是处于经典力学框架中,仍然是一种可判定的通用算法的信念。

在19世纪,英国的数学家和经济学家查尔斯·巴比奇不仅构造了第一台程序控制的计算机器(“分析机”),而且研究了它的经济和社会后果。^[5,7]他的名著《论机械和制造业的经济》(1832)的先声是亚当·斯密的经济规律思想,这与牛顿的力学定律并行不悖(对照第6.2节)。在《国富论》中,斯密把制针业的生产描述为一个算法程序,预见亨利·福特的工业中的程控批量生产的思想。

5.2 可计算性和算法复杂度

弗雷格和罗素的现代形式逻辑以及希尔伯特和哥德尔的数学证明理论,主要受到莱布尼茨的普遍数学纲领的影响。手摇计算机器(图5.1)

是对于 5.1 节的莱布尼茨机的抽象,可以方便地推广到马文·明斯基的所谓的寄存机。^[5.8]它使得在现代计算机科学中可以定义一般的可计算性概念。

一台手摇计算机只有两个寄存器 TM 和 RM,只能输入相当小的自然数。一台理想的寄存机有有限个寄存器,它们都可以贮存期望数量下的任意有限数。寄存器用自然数 $i=1, 2, 3, \dots$ 标记。寄存器 i 的存储内容用 $\langle i \rangle$ 来标记。作为一个例子,装置 $\langle 4 \rangle := 1$ 意味着,寄存器 4 的存储内容为 1。如果其内容为 0,则寄存器为空。

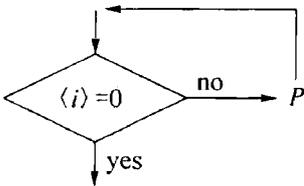
在手摇计算机中,加法或减法仅仅由两个寄存器 $\langle SM \rangle$ 和 $\langle RM \rangle$ 来实现, $\langle SM \rangle + \langle RM \rangle$ 或 $\langle SM \rangle - \langle RM \rangle$ 都将存入寄存器 RM。在寄存机中,减法 $\langle i \rangle - \langle j \rangle$ 的结果应为 0,如果 $\langle j \rangle$ 大于 $\langle i \rangle$ 。这种修改的减法标记为 $\langle i \rangle - \langle j \rangle$ 。一般地,理想寄存机的程序是用如下的基本步骤作为构件来定义的:

- ① 向 $\langle i \rangle$ 中加入 1 并把结果置入寄存器 i ,简记为 $\langle i \rangle := \langle i \rangle + 1$;
 - ② 从 $\langle i \rangle$ 中减去 1 并把结果置入寄存器 i ,简记为 $\langle i \rangle := \langle i \rangle - 1$;
- 这两个基本步骤可以运用如下的概念进行合成:

③ 如果 P 和 Q 都是明确定义的程序,那么 $P \rightarrow Q$ 也是明确定义的程序。 $P \rightarrow Q$ 意味着,机器必须在执行程序 P 之后执行程序 Q。

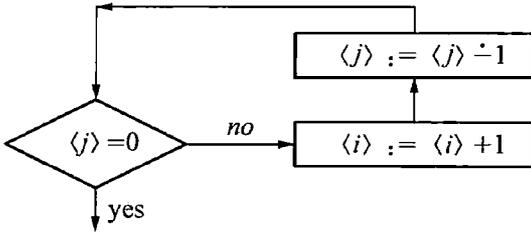
④ 程序的重复迭代,这对于乘法是必要的,例如,重复相加受到如下问题的控制:是否有空的寄存器。

这种反馈可以示意如下:



如果 P 是明确定义的程序,则执行 P 直到寄存器 i 中的内容变成零。

程序的每一基本操作①和②都计为一步计算。一个简单的例子是如下的加法程序：



机器的每一状态都表示为如下的矩阵，它不断地把寄存器<j>的内容 y 加到寄存器<i>的内容 x 中，同时使得<j>的内容逐步减少到零。 $x+y$ 加和的结果显示在寄存器<j>中：

$\langle i \rangle$		$\langle j \rangle$
x		y
$x+1$		$y-1$
\vdots		\vdots
$x+y$		$y-y$

一台具有程序 F 的寄存机定义为，如果对于寄存器 $1, \dots, n$ (对于所有其他寄存器均为零) 中任意的自变量 x_1, \dots, x_n ，执行程序 F ，并在有限次步骤后停止，此时函数的自变量都在寄存器 $1, \dots, n$ 中，函数值 $f(x_1, \dots, x_n)$ 在寄存器 $n+1$ 中，那么就定义给定程序 F 的寄存机能够计算带有 n 个自变量的函数 f ：

以下程序：

$$\begin{array}{c}
 \langle 1 \rangle := x_1; \dots; \langle n \rangle := x_n \\
 \downarrow \\
 F \\
 \downarrow \\
 \langle n+1 \rangle := f(x_1, \dots, x_n)
 \end{array}$$

按照相应的矩阵进行运算。函数 f 称作在寄存机 RM 上是可计算的 (RM-可计算性), 如果存在程序 F 能够计算 f 。

一定程序 F 计算一个函数 f 所需的步骤数, 由该程序所决定, 并取决于函数的自变量。程序 F 的复杂性用函数 $s_F(x_1, \dots, x_n)$ 来度量, 它计算出按照程序 F 进行计算的步骤数。例如, 对于 $x+y$ 的加法程序的矩阵显示了, y 次加上 1 的基本步骤和 y 次减去 1 的基本步骤是必要的。因此, $s_F(x, y) = 2y$ 。由于 RM 可计算函数 f 可以由若干种程序进行计算, 函数 g 称作函数 f 的步骤计数函数, 如果有一个程序 F 去计算 f , 且对于所有的自变量 x_1, \dots, x_n , 有 $g(x_1, \dots, x_n) = s_F(x_1, \dots, x_n)$ 。一个函数的复杂性定义为最优程序的复杂性, 最优程序即进行函数计算时花费步骤最少的程序。

显然, 明斯基的寄存机是一种对于莱布尼茨的手摇计算机器的直觉概括。但是, 历史上, 另一种等价表述的机器是艾伦·图灵和埃米尔·波斯特在 1936 年首先提出来的。图灵机(图 5.2a)可以执行任何有效的程序, 如果该程序是正确编程的。^[5.9] 它的构成是:

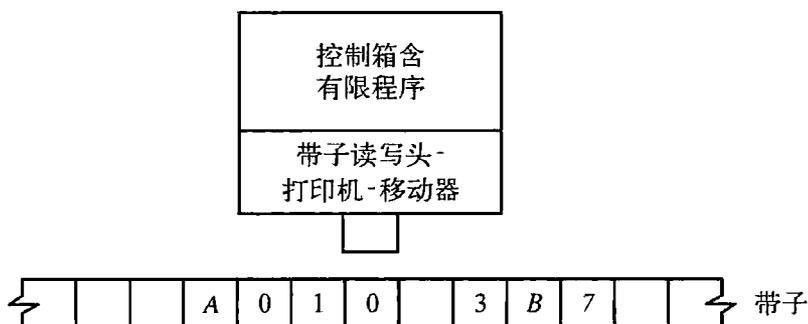


图 5.2 图灵机

(a) 单带;

- a) 控制箱, 其中置入某个有限程序;
- b) 潜在无限的带子, 带子上划分出小方格;
- c) 读写装置, 或将每一结果打印在带子的每一方格中, 对于沿着带

子的移动或停机,所有都处于控制箱的命令下。

如果图灵机使用的符号限制在竖线|和空格*,那么可以证明,RM可计算函数是图灵机可计算的,反之亦然。我们必须记住,每一自然数 x 都可以由 x 条竖线的序列来表示(例如3表示为|||),每一竖线都占据图灵带子上的一个方格。空格*用来标记空的方格(或相应的数字为零)。特别是,空格用以分割表示数字的竖线序列。因此,计算一个自变量为 x_1, \dots, x_n 的函数 f 的图灵机,始于带子上的 $\dots * x_1 * x_2 * \dots * x_n \dots$,停机于 $\dots * x_1 * x_2 * \dots * x_n * f(x_1, \dots, x_n) * \dots$ 。

从逻辑学的观点来看,一台通用目的的计算机是技术上实现了的通用图灵机,如在美国的约翰·冯·诺伊曼的集体所构造的计算机以及与此独立的德国的康拉德·楚泽构造的计算机。它可以模拟任何种类的图灵程序。同理,我们可以定义一种通用的寄存机,它可以执行任何种类的寄存程序。实际上,冯·诺伊曼计算机的通常设计是包括中央处理器(程序控制器),记忆装置,算法单元和输入-输出装置的。它以长序列方式一步一步地运行。一台今天的冯·诺伊曼计算机实际是一台通用化的图灵机。图灵机的效率可以由引进几条带子而增加,这些带子不必是一维的,每一条带子有一个或多个读写头,但是都要报告给单个控制箱,控制箱协调着机器的所有活动(图 5. 2b)。^[5. 10]因此,这种更有效的机器的每一计算都可以由一台普通的图灵机来实施。从复杂系统探究方式看,多维多带图灵机仍然是一种程序控制的计算机,与自组织系统(如神经网络)有本质上的差异。

除了图灵机和寄存机以外,可计算函数还可由许多其他数学上等价的程序来定义。递归函数由函数的代入和迭代程序来定义,它始于某种显然是可计算的基本函数(例如后继函数 $n(x) = x + 1$)。所有这些由图灵机、寄存机、递归函数等等来定义的可计算性,可以被证明是数学上等价的。显然,每一种这样的精确概念都定义了一种程序,这样的程序是直觉上有效的。

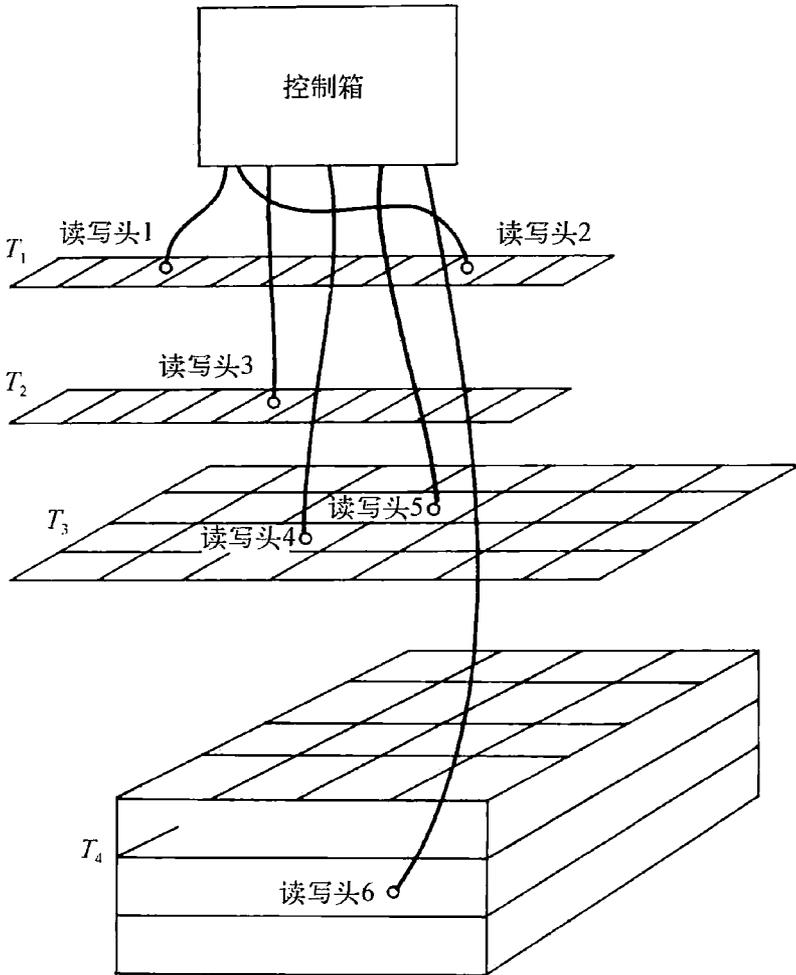


图 5.2 图灵机

(b) 多带。^[5.10]

因此,阿隆索·丘奇提出了他的著名论题:有效程序这个非形式的直觉概念,与图灵机那样精确的概念是等价的。丘奇论题当然是不可能证明的,因为这里是数学上精确的概念与非形式的直觉概念的比较。然而,几种精确的直觉上有效的可计算性概念的数学等价性,证实了丘奇论题。因此,我们可以在不涉及特定的有效程序(“算法”),如图灵机、寄存机、递归函数等的情况下,来谈论可计算性、有效性和可计算函数。按照丘奇论题,我们可以说,每一可计算程序(算法)都可以由图灵机进行计算。所有的递归

函数,作为一种机器程序,都可以由通用计算机进行计算。^[5.11]

现在,我们能够定义判定和可枚举性的有效程序,莱布尼茨的普遍数学纲领就已经提出了这样的要求。自然数集的子集 M 的特征函数 f_M 定义为: $f_M(x)=1$, 如果 x 是 M 的一个元素; 否则 $f_M(x)=0$ 。因此,集合 M 被定义为有效可判定的,如果其特征函数对于一个无论是否属于 M 的数,都是有效可计算的(或递归的)。

集合 M 定义为有效(递归)可枚举的,如果存在有效(递归)程序 f 可相继地产生出其元素(对于 M 中所有元素 x_1, x_2, \dots , 有形式 $f(1)=x_1, f(2)=x_2, \dots$)。容易证明,所有递归(可判定的)集都是递归可枚举的。但是,存在着这样的集合,它是递归可枚举的,但却不是可判定的。这是第一条线索,它意味着,莱布尼茨的基于通用判定程序信念的乐观纲领存在着局限性。

对于自然智能和人工智能,有效可计算性范式意味着,心智是由程序控制机器表示的。精神结构涉及的是符号数据结构,而精神过程也就是实现算法。历史上,人工智能的核心是在 1956 年的达特茅斯会议期间建立起来的,参加会议的约翰·麦卡锡、艾伦·纽厄尔、司马贺以及来自其他的不同学科领域的一流研究人员,组成了新的人工智能科学共同体。他们都受到图灵的问题“机器能否思维?”的鼓舞,这个问题是图灵在著名的文章“计算机器和智能”(1950)中提出来的。

在莱布尼茨的普遍数学的传统中,人们可能会相信,人的思维可以用某种通用演算来形式化。在其现代的翻版中,人们可能会假定,人的思维可以用某种强有力的形式编程语言来表示。无论如何,形式表达式都是符号序列,是可以用自然数进行编码的。于是,对于对象的断言就相应于关于数字的函数,结论就将从某种有效的数值程序中得出,如此等等。实际上,现代计算机的机器语言就是由数字序列构成的,对于机器的每一状态和程序进行了编码。因此,计算机的运算可以描述为有效的或递归的

数值程序。

如果人的思维可以用递归函数来表示,那么按照丘奇论题,它就可用图灵程序表示,而图灵程序可以用通用图灵机计算。因此,人的思维也就可以用通用计算机来加以模拟,在此意义上,对于图灵提出的问题也就必定要回答“是”。人的思维是可以编码的、可用递归程序来表示的,这一前提当然是可疑的。甚至数学思维的过程也可以远比递归函数更为复杂。按照丘奇论题,递归性或图灵可计算性仅仅是可计算性的一种理论限度。

接下去,我们希望考虑在这种限度之下和之上的复杂性程度问题。在这种限度之下,有许多涉及一定限度的实际问题,其限度涉及如何增加算法的速度。特别是,在数学问题中,有一些种类的问题,它们的算法求解内在地要比其他一些问题困难得多。因此,图灵机有不同程度的可计算性,计算机科学中的复杂性理论使之得以精确化。^[5, 12]

问题(或相应的函数)的复杂性分类可以由复杂度来刻画,这给出了函数的阶,描述了依赖于其输入长度的算法(或计算程序)的计算时间(或基本计算步骤的数目)。输入的长度可以用十进制数的位数来度量。按照计算机的机器语言,可以方便地将十进制数字编码成仅仅用0和1的二进制码,并用二进制数字的位数来定义其长度。例如,3的二进制码是11,其长度为2。函数 f 具有线性的计算时间,如果 f 的计算时间不大于 $c \cdot n$,其中 n 是输入长度, c 是常数。

两个(二进制)数的加法显然只具有线性计算时间,例如,对于
 $3+7=10$,相应的二进制计算

$$\begin{array}{r} 0 \ 1 \ 1 \\ 1 \ 1 \ 1 \\ \hline 1 \ 0 \ 1 \ 0 \end{array}$$

其中需要5个基本计算步骤把两个二进制数相加(包括进位)。我们

提醒读者,二进制数字相加的基本步骤是 $0+0=0, 0+1=1, 1+1=10$, 以及进位。可以方便地假定,两个将要相加的数具有同等长度。否则,我们只需把较短的数加上一系列的零,例如,111 和 011 相加,而不是和 11 相加。一般地,如果将要相加的特定的数对的长度为 n ,则一个数的长度为 $n/2$,因此,我们需要不大于 $(n/2) + (n/2) = n$ 个基本计算步骤,其中包括了进位。

函数 f 具有二次方计算时间,如果对于所有的长度为 n 的输入和常数 c, f 的计算时间不大于 $c \cdot n^2$ 。

一个简单的二次方计算时间的例子是两个(二进制)数相乘。例如,对于 $7 \cdot 3 = 21$, 相应的二进制计算:

$$\begin{array}{r}
 1\ 1\ 1 \cdot 0\ 1\ 1 \\
 \hline
 0\ 0\ 0 \\
 1\ 1\ 1 \\
 1\ 1\ 1 \\
 \hline
 1\ 0\ 1\ 0\ 1
 \end{array}$$

按照前面的约定,我们有 $n = 6$ 。基本二进制乘法的步数是 $n/2 \cdot n/2 = n^2/4$ 。包括进位运算,基本二进制相加的步数是 $n/2 \cdot n/2 - n/2 = n^2/4 - n/2$ 。总起来,我们得到 $(n^2/4) + (n^2/4) - (n/2) = (n^2/2) - (n/2)$, 它小于 $n^2/2$ 。

函数 f 具有多项式计算时间,如果 f 的计算时间不大于 $c \cdot n^k$, 假定它是多项式 $p(n)$ 的首项。函数 f 具有指数计算时间,如果 f 的计算时间不大于 $c \cdot 2^{p(n)}$ 。许多实际的和理论的问题都属于复杂性类 P, 所有 P

类函数都是可以用确定性图灵机在多项式时间中加以计算的。

在数学史上,一些优美的图论问题可以说明复杂性理论的基本概念。^[5.13]1736年,著名数学家莱昂哈德·欧拉(1707—1783)解决了图论中首批问题之一。在东普鲁士的首府哥尼斯堡,普雷格尔河的两条支流(即图 5.3 中的新普雷格尔河和老普雷格尔河)在城中汇合。在 18 世纪,河上建造了 7 座桥,把城南(s)、城北(n)、城东(e)与河心岛(i)联系起来(图 5.3a)。是否有这样一条路线,即每座桥只走一次而可以返回到最初的起点?

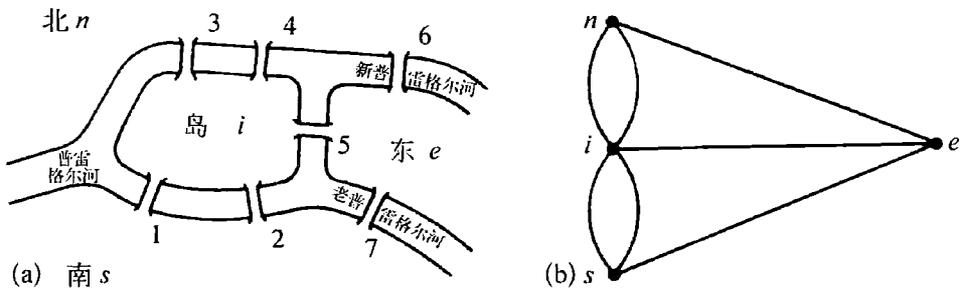


图 5.3 经典的图论问题

(a) 欧拉的哥尼斯堡七桥问题; (b) 哥尼斯堡七桥问题的图论模型;

欧拉把问题归结为图论。区域 n, s, i, e 用图的顶点来代替, 在两个区域之间的桥用相应顶点之间的边来代替(图 5.3b)。

在图论的语言中,欧拉的问题就成为,对于每一顶点,是否存在一条线路(“欧拉回路”),它仅仅通过每一条边一次而最终返回到起点。对于任意的图形,欧拉证明:欧拉回路存在,当且仅当每一顶点都具有偶数条边(“欧拉条件”)。对于图 5.3b,它并不满足这种条件,因此这个欧拉问题不可能有解。一般地,存在用欧拉条件来检验任意的图的算法,看它是否有欧拉回路。算法的输入包括所有顶点 $1, \dots, n$ 的集合 V ,所有边的集合 E, E 是所有顶点对的集合的子集。这种算法的计算时间,线性地依赖于由顶点数和边数之和来定义的图的大小。

1859年,数学家威廉·哈密顿(1805—1865)引入了一个颇为类似的

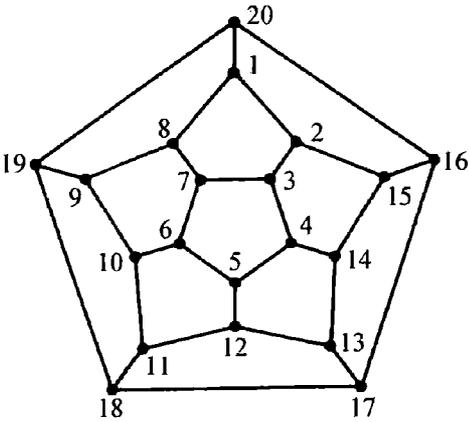


图 5.3 经典的图论问题
(c) 哈密顿问题。

问题,但比欧拉的问题要复杂得多。哈密顿考虑的是任意的图,它仅仅意味着有限的顶点的集合,即通过边联系起来的一定数目的顶点对。哈密顿问题是,是否有一个仅通过每一顶点(而不是欧拉问题中的通过每一边)一次的封闭回路(“哈密顿回路”)。图 5.3c 示意了有一个哈密顿回路的图,其中按照数字顺序通过每一

一顶点。

不过,与欧拉问题的情形不同,我们并不知道这样的条件:它精确地刻画了一个图中是否包含哈密顿回路。我们仅仅能够定义一种算法,来检验任意的图是否包含有哈密顿回路。该算法检验所有的顶点的排列,以确定它们是否形成了一个哈密顿回路。由于 n 个顶点有 $n!$ 种不同的排列,该算法找到某个解的步数不大于 $c \cdot n!$,其中 c 是常数。容易证明, $n!$ 的数量级相应于 n^n 的数量级。因此,对于哈密顿问题,一个算法需要指数的计算时间,而欧拉问题的算法求解需要的是线性计算时间。因此,哈密顿问题实际上是计算机无法解决的,甚至对于小的数目 n 也如此。

计算时间很大的主要原因可能在于,确定性计算机只能一步步地对于其中巨大数量的一个个子情形进行检验。更方便的是运用非确定性计算机,它允许在有限数目的可能适用的计算机程序中随机地选择程序,而不是以序列的方式一步步地进行。我们再一次考虑哈密顿问题。假定一个输入图具有 n 个顶点 v_1, \dots, v_n 。一个非确定性的算法以非确定性的、随机的方式选择了一定的顶点顺序 v_{i_1}, \dots, v_{i_n} 。然后,该算法进行检验:这种顺序是否形成了一个哈密顿回路。问题也就是,对于所有的数字 $j(j=1, \dots, n-1)$,相继的顶点 v_{i_j} 和 $v_{i_{j+1}}$ 以及起初的开始顶点 v_{i_n}

和 v_i 是否是由边联系起来的。这种非确定性算法的计算时间线性地依赖于图的大小。

一般地说, NP 意味着复杂性类函数, 它们以非确定性图灵机进行计算时需要多项式时间。哈密顿问题是一个 NP 问题的例子。另一个 NP 问题是“旅行商问题”, 除了各条边都被赋予了一个数字以外, 它非常类似于哈密顿问题。人们要解决的问题是: 找到这样一个哈密顿回路, 使得该回路各条边上的数字之和为极小, 或更直观地说, 旅行商的旅行距离最短。

由定义, 所有的 P 问题都是 NP 问题。但是, 复杂性理论的关键性问题在于是否有 $P=NP$, 或换言之, 由非确定性计算机以多项式时间解决的问题, 是否也可以由确定性计算机以多项式时间来加以解决。^[5.14]

哈密顿问题和旅行商问题, 是所谓的 NP 完全问题的例子。这意味着, 任何其他的 NP 问题都能够以多项式时间转化成它。于是, 如果一个 NP 完全问题实际上被证明是 P 问题(例如, 如果能够构造以多项式时间来解决哈密顿问题的一个确定性算法), 那么所有的 NP 问题实际上都是 P 问题。否则, 如果 $P \neq NP$, 那么 NP 完全问题就不可能用确定性算法以多项式时间来解决。

显然, 复杂性理论表达了图灵机或图灵型计算机的算法能力的程度。它在科学应用和工业应用中具有实际的用处。但是, 它是否意味着人的思维的极限呢? 复杂性理论的基本问题(例如 $N=NP$ 或 $N \neq NP$) 涉及算法的速度、计算时间、存贮能力等的度量。另一个问题是, 人们如何去发现复杂性程度不同的算法。这是计算机科学家的创造性工作, 是算法的复杂性理论中不考虑的。

另一方面, 哥德尔的著名定理常常被说成是限制了计算机和人的思维的数学能力。他的不完全性定理指出, 对于形式数论的每一一致的公理化扩展, 都有一个(封闭的)表达式是不可判定的。实际上, 他的定理陈

述了,在总是存在着关于整数的真陈述在该逻辑内不可能得到证明的意义上,任何合理的一致的算术逻辑都是不完全的。甚至如果我们用不可判定的表达式来扩展我们的公理化,那么也会有另一表达式在扩展的形式化中是不可判定的。哥德尔的结果表明,在莱布尼茨和希尔伯特传统中对于完整一致的算术逻辑的形式化追求,是注定要失败的。[5.15]

而且,哥德尔还证明,算术逻辑——它可能会是不完全的——使用可以在逻辑自身中表示的方法来得以一致,也是不可能的。在哥德尔的著名结论提出来若干年以后,格哈德·根岑(1909—1945)证明了初等数论的一致性,他运用了所谓的 ϵ_0 归纳法,该方法是通常的针对自然数的归纳法的无限扩展。但是,根岑的扩展的证明法的一致性却和被证系统的一致性一样,还是有疑问的。换言之,证明方法的复杂性并不低于被证系统的复杂性。因此,只可能有相对一致的证明,所用证明方法必须得到证明,而所用来进行后一证明的方法又需要得到证明,以此类推。对于人的思维,不存在绝对的可以由形式算法提供的自洽性基础。

由哥德尔的定理,我们知道了针对算术的一致公理系统不可能是完全的。[5.16]但是仍然可能存在一个判定程序,使得我们能够判定一个给定的命题是对还是错。图灵于1936年证明了,不可能存在像莱布尼茨和希尔伯特宣称的那样通用的判定程序。[5.17]图灵的讨论在某种程度上比哥德尔更为深入,因为他把希尔伯特的判定问题归结为所谓的停机问题,这是一个可计算性和计算复杂性中的基本问题:一个通用的判定程序能够判定任意的计算机程序在有限步之后是否停止。图灵证明了,停机问题在原则上是不可解的。因此,哥德尔的不完全性只是图灵证明的一个推论。

图灵以这样一个问题开始他的证明:实数是可计算的吗?一个实数,例如 $\pi=3.141\ 592\ 6\dots$ 有无限的位数,而且看起来在小数点之后是随机分布的。但是,存在有限的简单程序来逐步计算这些位数,从而增加 π

的精度。在这种情况下, π 被看作可计算的实数。第一步, 图灵构造了一个不可计算的实数。例如, 考虑一个图灵机的计算机程序, 它包含有限列表的符号。这样, 它可以被一个自然数编码, 称为程序数。想象所有可能的计算机程序的列表, 它们按照程序数从小到大排列, 即 $p_1, p_2, p_3 \dots$ 如果一个程序能够计算小数点后有无限多位的实数(例如 π), 那么它们可以按照相应的程序数写下来。否则, 列表中就会有空行。

$$\begin{array}{l}
 p_1 \quad - . \underline{d_{11}} d_{12} d_{13} d_{14} d_{15} d_{16} d_{17} \dots \\
 p_2 \quad - . d_{21} \underline{d_{22}} d_{23} d_{24} d_{25} d_{26} d_{27} \dots \\
 p_3 \quad - . d_{31} d_{32} \underline{d_{33}} d_{34} d_{35} d_{36} d_{37} \dots \\
 p_4 \\
 p_5 \quad - . d_{51} d_{52} d_{53} d_{54} \underline{d_{55}} d_{56} d_{57} \dots \\
 \vdots
 \end{array}$$

按照康托尔的对角化程序, 图灵把列表中对角线上有下划线的位数放在一起, 形成一个新数, 而小数点放在最前面, 即

$$- . \neq d_{11} \neq d_{22} \neq d_{33} \neq d_{44} \neq d_{55} \dots$$

这个新数不可能在这个列表中, 因为它与 p_1 后面第一个数的第一位不同, p_2 后面第二个数的第二位不同, 等等。因此, 它是一个不可计算的实数。使用这个数, 图灵得到了停机问题的不可解性。如果我们能够解决停机问题, 就能够决定第 n 个计算机程序是否在小数点后第 n 位运算。在这种情况下, 我们实际上能够实现康托尔的对角化程序, 从而计算出一个实数。这个实数, 由它的定义, 应该与任何可计算实数都不同。

停机问题的不可解性驳倒了希尔伯特的判定问题。如果存在一个完全的形式化公理系统, 从中可以导出所有数学上正确的结果, 那么它就给我们一个程序来决定一个计算机程序是否会停机。我们只需要跑遍所有可能的证明直到我们找到该程序停机的一个证明, 或者我们找到一个证

明它永不停机。所以,如果希尔伯特的能够导出所有数学结果的有限公理集是可能的话,那么通过跑遍所有可能的证明同时检查哪一个是正确的,我们就能够判定计算机程序是否停机。通过图灵证明,这是不可能的。

形式化公理体系有一个优点,它把大量的理论压缩为少数公理的集合。这样,它给出了数学真理的较短描述。甚至物理理论也可以被看做大量实际数据的较短描述。一般地,形式化理论可以被看作计算真实定理或数据的计算机程序。相对于输出,越小的程序表明理论越好。显然,除了运行时间,计算机程序的大小也是计算复杂性的一个重要度量。因为程序是符号的有限列表,它的长度可以通过其符号的二进制表示的数目来量度。例如,考虑如下二进制位数序列:

$$s_1 = 11111111111111111111$$

$$s_2 = 010101010101010101$$

$$s_3 = 011010001101110100$$

对于 s_1 和 s_2 , 存在比实际输出更短的描述或打印程序: 对 s_1 , “14 乘以 1”, 对 s_2 , “8 乘以 01”。但是对于 s_3 , 看起来没有与实际输出相比更短的描述。格雷戈里·J·蔡廷和安德烈·N·科尔莫戈罗夫提出了这样一种思想: 一个符号序列 s 的算法复杂性, 应该被定义为能够产生 s 的最短的计算机程序的长度(按照位数)。^[5.18] 算法复杂性有时被称作符号序列的算法信息内容。这是算法信息论中的一个主观概念。由于随机序列没有规律, 它们不能被描述为更短的程序。它们不能按照算法复杂度相等来进行压缩。但是, 我们又一次遇到了不完全性和不可判定性。原因是我们永远无法判定一个独立数字串是否满足随机性和不可压缩性。我们永远不可能计算程序大小的复杂性, 因为, 一般来说, 一个确定程序是否是最短的是不可判定的。如果我们得到了产生序列的程序, 那么它的

大小只是该序列程序大小复杂性的上界。但是我们永远无法证明下界，这意味着算法信息论的第一个不完全性结论。

在计算复杂性理论中，相比于程序运行时间，下界比上界困难得多。如果我们找到了一个快速的程序，我们只找到了计算时间的上界。至少在有些情况中，一个确定的程序可以被证明是最快的。但是在算法信息论中，我们永远无法证明任何下界。不过，存在一些相对化的结果。形式化理论的程序大小复杂性和程序，可以联系到书写它们的编程语言。蔡廷选用了人工智能编程语言 LISP。^[5.19] 在 LISP 中，程序大小复杂性 N 的形式化公理系统，不能用于证明对于超过 $N+356$ 个字符的 LISP 表达式不存在相同输出的更小程序。因此，这个形式化公理系统仅可以证明：对于很多有限表达式，不存在更小的程序具有相同的输出。原则上，形式化序列的随机性是不可判定的。但是在实际应用中，我们至少可以使用标准程序来检测序列中的规则性。如果不成功，该序列相对于这些算法来说就被称为随机的。

5.3 信息、概率和 $1/f$ 复杂性

可计算系统可以被描述为信息处理机。算法信息理论研究的是用以确定消息的算法信息内容的计算机程序的大小。按照香农的信息论，^[5.20] 来自发送方(例如，电话、个人电脑)的消息，通过编码为二进制数(比特)，表示为二进制技术信号(如电脉冲)，及消息到达时的解码，被传送到接收方。通信意味着信息的交换。一个符号的信息内容是能够产生这一符号的二元决策的个数。对于 N 个符号，有 $N = 2^I$ 个选择程序， I 个二元决策，也就是说， $I = \log_2 N$ 比特。如果符号 s_i ($1 \leq i \leq N$) 以不同的概率 p_i 出现，那么它们的信息内容就是 $I(s_i) = \log_2 p_i^{-1} = -\log_2 p_i$

比特。一个更常见的符号比一个不常见的符号包含更少的信息内容。在这种理解下,符号的信息内容可以被看作是接收方收到新东西的度量。

带有符号 $s_i (1 \leq i \leq N)$ 的发送方的平均信息内容是每一符号 s_i 的信息内容 $I(s_i)$ 的期望值,即 $H = \sum_i p_i I(s_i) = - \sum_i p_i \log_2 p_i$ 且 $\sum_i p_i = 1$ 。平均信息内容 H 可以被看作是源符号概率分布的不确定性的一种度量(图 5.4)。原因在于,在概率分布为均匀分布的情况下,源的平均信息内容 H_{\max} 是最大的,也就是说,符号的不确定性是最大的。而当 $H = 0$ 时,有 $p_i = 1$, 也就是说,此时符号 s_i 是被源决定的。

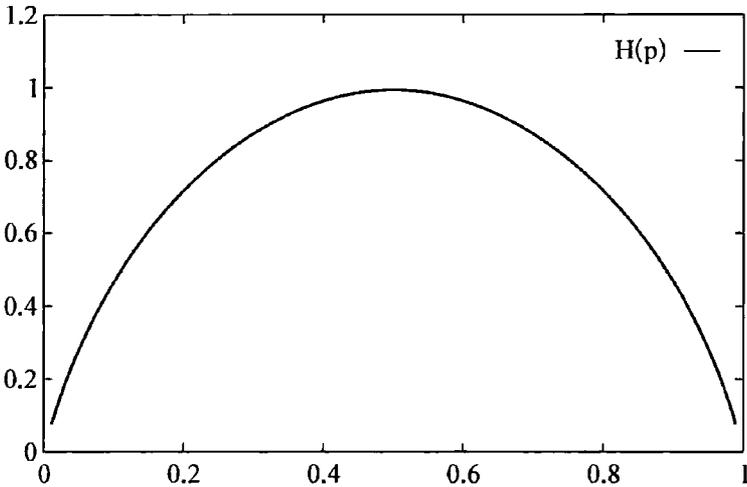


图 5.4 含有两个符号(状态)的系统的平均信息内容(信息熵)

其中: $p_1 = p; p_2 = 1 - p$ 。

香农的信息的概念不仅适用于技术。在进化中,化学和生物的信息是由分子编码的,可以通过合适的分子、细胞或者有机体(分子模式识别)来识别(解码)。有机体的遗传信息是用四种化合物编码的:腺嘌呤 A,胞嘧啶 C,鸟嘌呤 G,尿嘧啶 U。使用二进制编码 $A=00, U=11, G=01, C=10$,我们就得到了用比特表示的基因编码。人体组织的感官刺激是模拟信号(例如,皮肤或肌肉的物理施压,耳朵中的声波,视网膜中的电磁波,鼻子中的化学刺激),这些信号被感觉细胞收到,然后编码为数字动作

电位,并以中枢神经系统(CNS)中的二进制编码的方式(神经元的发放和不发放)传输到大脑中。特定的神经信号(神经信息)通过大脑中的特定区域被编码为感知、情绪、想象或者思维。机械刺激(例如肌肉的拉伸)被感官细胞获取为模拟信号并转换为数字动作电位。刺激的强度被编码为相同动作电位的数目。按照信息论,信息可以被简化为比特,即二元状态0和1的最小单位。按照量子理论,基本粒子(例如,光子)有两种自旋状态 \uparrow (上)和 \downarrow (下),这两种状态可以在相干态上叠加,被称作量子比特。^[5.21]这样,物质的每一个状态都可以被看作一种“浓缩”的量子信息。

物质、生命和大脑的信息存储和信息流都依赖于复杂系统的动力学。根据玻耳兹曼的观点,熵 S 度量一个产生宏观状态(例如气体的温度)的复杂动态系统的元素(例如气体中的分子)的微观状态的概率分布,也就是说 $S=k_B \ln W$, k_B 是玻耳兹曼常数, W 是产生某个宏观状态的微观状态的概率分布的数目。按照热力学第二定律,熵是对孤立系统无序度的一种度量,熵总是在增加的,其可逆过程是绝对不可能的。在信息论中,熵可以被看作随机变量不确定性的度量。随机变量 X 的信息熵 $H(X)$ 是其值 x 的概率分布的期望值,即 $H(x)=-\sum_x p(x)\log p(x)$ 。这样,在热力学系统中, $H(X)$ 是系统微观状态概率分布的期望值。当 $H(X)=0$ 时,过程 X 是确定性的。当 $H(X)$ 为最大时, x 有着最大的不确定性,即为均匀分布。信息熵被看作不确定性的一种度量。

按照香农的研究,信息的进一步概念可以被引入以度量动态系统中的信息流。随机变量 X 和 Y 的联合熵 $H(x,y)$ 是 X 的值 x 和 Y 的值 y 的联合概率分布的期望值。 X 和 Y 的条件熵 $H(Y|X)$ 是 X 出现之后 Y 的不确定度的平均出现。相对熵或者交叉熵是两个分布 $p(x)$ 和 $q(x)$ 之间差别(“距离”)的一种度量。互信息 $I(x;y)$ 量

度具有相关概率分布 $p(x)$ 和 $p(y)$ 的随机变量 X 和 Y 的统计独立性: 如果 X 和 Y 是独立的, 则 $I(X; Y) = 0$ 。互信息是一个对称性度量, 因为 $I(X; Y) = I(Y; X)$, $I(X; X) = H(X)$ 。互信息可以被看作 X 和 Y 之间相关性的一种度量。如果 X 和 Y 分别是一个随机通道的输入和输出, $I(X; Y)$ 就是该随机通道传输的信息量。互信息在脑研究中有一个显著的应用: 在自组织学习过程中, 脑使用同步发放神经元的不同团簇来对不同的刺激做出响应。按照霍布的理论(与第 4.2 节比较), 这些细胞团对于所感知的对象的单个特征的捆绑进行编码。不同刺激和不同团簇之间进行区别的可靠性, 可以用相应随机变量之间的互信息来量度。

一个信息系统产生 N 个不同符号 s_i ($1 \leq i \leq N$) 的时间序列。令 β 为符号动力学的一个分割, p_i^β 是在分割 β 中观测到符号 s_i 的概率。在分割 β 下符号序列的熵定义为 $H^\beta = -\sum_i p_i^\beta \log p_i^\beta$ 。信息流 I_p^β 量度动态步 p 步人未来的可预测性。给定所有的过去 $n \rightarrow \infty$ 步, $I_p^\beta = \lim_{n \rightarrow \infty} I^\beta(n; p)$, 这里 $I^\beta(n; p)$ 是 n 个后继符号和前行 p 步的符号之间的互信息。^[5.22] 因此, 信息流的概念是科尔莫戈罗夫-西奈伊熵的一个扩展(表 2.1), 测量仅仅前行一步的可预测性。^[5.22] 随之有 $0 \leq I^\beta(n; p) \leq H^\beta$, 这里的最小值(0)对应于统计无关, 最大值(H^β)对应于最佳可预测性。对一个混沌时间序列, 我们有 $I^\beta(n; p) > I^\beta(n; p+1)$, 表明预测范围的信息丢失(图 5.5)。

一个动力学系统可以被看作是一个信息处理机, 以过去的初始状态为输入, 计算现在或者将来的状态作为输出。这样, 决定这个系统状态的计算情况刻画了动力学系统的计算复杂性。按照计算复杂性理论中的计算度, 从规则系统到混沌系统的转变对应于计算问题的增加。在统计力

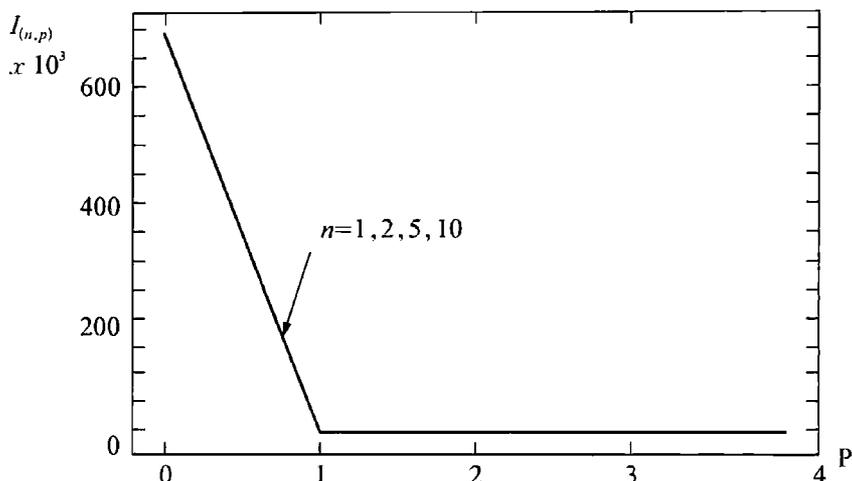


图 5.5 混沌逻辑斯谛映射 $x_{n+1} = 4x_n(1-x_n)$ ($n=1, 2, 5, 10$) 的一步 ($p=1$) 信息丢失的信息流和二分割^[5, 23]

学中,动力学系统的信息流描述了它过去和未来状态之间统计相关性的内在进化。科尔莫戈罗夫-西奈伊(KS)熵在研究动力学系统的可预测信息丢失方面是非常有用的概念,按照它们吸引子的复杂度(表 2.1)。事实上,KS 熵导出一个在整个过去已知时得到未来状态的预测不确定性的度量(以有限精度)。

在不动点和极限环、振荡和准振荡行为的情形中,没有不确定性或信息损失,对未来状态的预测可以从过去情形来计算。在对初始状态有敏感依赖性的混沌系统中,按照过去状态和未来状态之间相关性衰减对未来状态的预测会有一些的信息损失。给定整个过去历史,预测状态的有限不确定度是随着预测步数的增加而线性增加的。但是,在有噪声的情况下,KS 熵变成无穷大,这意味着与过去和未来含噪状态之间所有相关性衰减(也就是统计独立性)对应的预测信息的完全丧失。不确定度变为无穷大。

噪声的复杂度也可以通过信号理论中针对时间序列的傅里叶分析来进行分类。19 世纪的早期,法国数学家傅里叶(1768—1830)证明,任何有限长的连续信号(时间序列)都可以表示为不同频率和振幅的周期振荡

重叠函数之和。频率 f 是周期长度的倒数,这意味着宽度 $1/f$ 是一个完整的循环。这度量了每单位时间有多少周期性循环。图 5.6 显示了两个不同振幅周期信号的一部分(实线)。较小涨落的周期为 10 秒,较大涨落的周期为 20 秒。相应的频率分别为 0.10 和 0.05 周每秒。他们的和(虚线)是两个振荡曲线的合成。

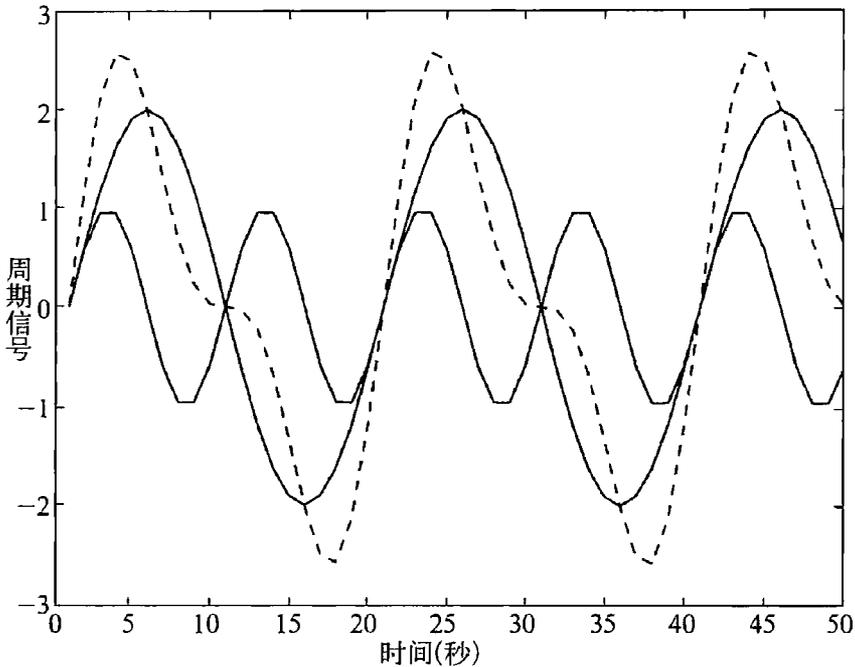


图 5.6 两个周期信号的傅里叶分析及其叠加^[5.24]

每个信号有一个频谱(表 2.1),频谱是该信号呈现其周期性组分有多少变化的度量。频谱通常表示为每个频率处振幅的平方。这表明了每一个周期振荡对于整体信号的贡献。如果一个信号是周期性的,周期为 $1/f$,那么它的频谱除了单独的值 f 之外均为零。在一个信号是有限个周期振荡信号之和的情况下,频谱在构成该信号的周期振荡所在频率处具有有限个数值。例如,图 5.6 中虚线的频谱包含两个孤立的频率值 0.05 和 0.10。

周期性的反面是信号值的统计独立性和不相关性。在信号理论中,

独立的、不相关的值的分布被称为白噪声。它包含了其振幅在宽的频率范围皆均一的振荡的分量。在这种情况下,频谱是一个常量,在频率范围内平坦。周期性组分的贡献不能被区分开来。周期性和白噪声的例子,在第 5.2 节中以二进制序列的方式给出:序列 010101... 显然是一个周期性信号的例子,随机序列给出白噪声。

但是,在复杂系统的非线性动力学中,我们主要是对那些不会到达这两种极端的复杂数据序列感兴趣。它们由很多不同频率、不同振幅的叠加振荡组成,相应的频谱大致与 $1/f_b$ 成正比,其中某些 b 大于 0。在这种情况下,频谱与频率成反比。这样的信号被称为 $1/f$ 噪声。图 5.7 展示了含有粉噪声($b=1$)、红噪声($b=2$)和黑噪声($b=3$)的信号样例。白噪声可以通过设置 $b=0$ 来产生。信号中的不规则度随着 b 的增加而下降。

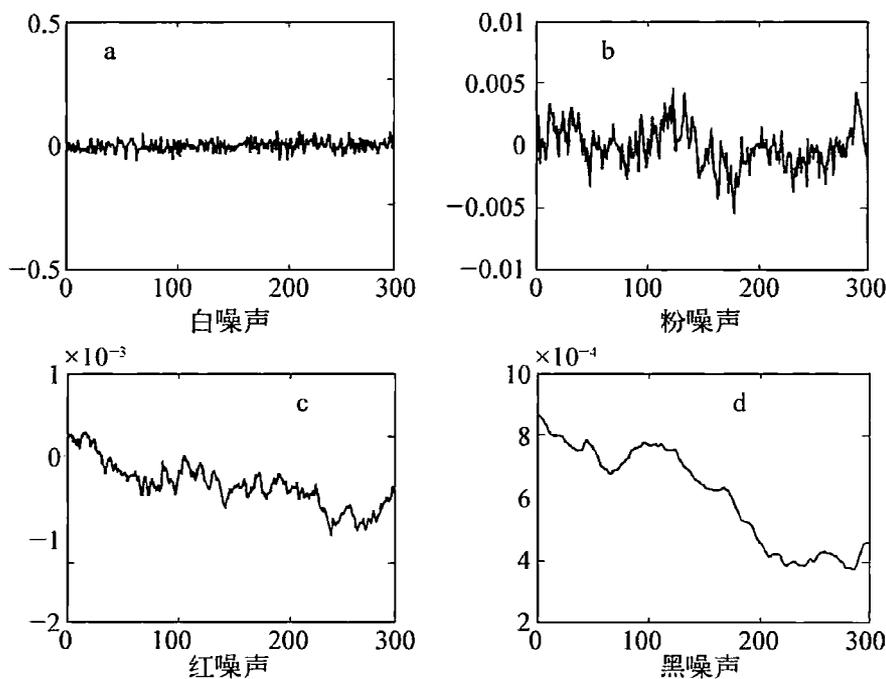


图 5.7 $1/f^b$ 噪声的复杂度^[5.25]

白噪声($b=0$);粉噪声($b=1$);红噪声($b=2$);黑噪声($b=3$)。

当 b 超过 2,相关性得以持续存在,因为向上和向下的趋势是保持它

们自身。一个时间间隔上有某个较大偏移,很可能随之有相同长度的下一个时间间隔上的另一个较大偏移。时间序列仿佛有某种长期记忆,这种记忆有时被称为“约瑟效应(Joseph effect)”。在第 7.4 节,我们将提醒读者注意《圣经》中七年丰收之后七年饥馑的约瑟故事。当 b 小于 2,相关性是反持续的(antipersistent),在此意义上一个上升总是紧跟着一个衰落,反之亦然。当 b 从反持续的情况增加到持续的情况,图 5.7 所示的曲线变得较为平滑。在第 7.4 节,从均匀和反持续行为到持续行为的转变,在数学上由赫斯特参量刻画。

随着频率的增加,频谱逐渐地变小。因此,大幅度波动是与长波长(低频)振荡联系在一起的,而小波动则对应于短波长(高频)循环。在非线性的动力学,当 b 约等于 1 时的粉噪声特别有趣,因为它描述的是介于黑噪声的规则秩序与白噪声的完全无序之间的过程。对于粉噪声而言,频率 $f_1 < f_2$ 之间全部可变性的分数在 c 为任意正的常数时,恒等于 $cf_1 < cf_2$ 区间内可变性的百分数。因此,大幅低频波动肯定少于小幅高频振荡。随着时间序列长度的增加,由于纳入了更长周期的循环,因而会出现越来越多的低频大幅事件。最大循环的周期近似于样本数据的期间。与所有分形图案相似,小的信号变化以所有尺度上的自我相似性叠加在较大信号变化之上(对比图 8.16 万维网上数据包的波动)。

在电子学, $1/f$ 频谱就是闪烁噪声(flicker noise),因为它们与单个信号所引起的白噪声的均匀声音是不同的。^[5.26] 相比大振幅事件,高频事件很少引人注目。 $1/f$ 频谱的一种著名应用,是其在不同音乐种类中的使用。巴赫音乐里相继音符之间的间隙以及音量的波动都有 $1/f$ 频谱。与巴赫的粉噪声音乐相反,白噪声音乐则是由相继不相关的数值所构成。大脑无法识别存在于无结构而令人心烦的声音中的模式。另一方面,黑噪声似乎过于可预测而且乏味,因为持续信号强烈地依赖于先前的数值。显然,创造令人印象深刻的音乐就是要在有序与无序、规则与意外之间寻找平衡。

$1/f$ 频谱是将其自身组织到临界状态的过程的典型,在这种临界状态中,许多小的互动能够触发新的不可预见现象的涌现。地震、大气湍流、股市波动、有机体的生理过程都是典型例子。自组织、涌现、混沌、分形、自相似性都是具有非线性动力学的复杂系统特征。^[5.27] $1/f$ 频谱是随机噪声衡量标准的事实,再次强调了信息理论与系统理论之间的深层联系:任何复杂系统都可以看作一个信息处理系统。在以下的章节,相关信号与无关信号的分布根据概率理论进行分析。白噪声被描述为高斯钟形曲线的正态分布。有着 $1/f$ 频谱的粉噪声决然不是高斯曲线。其模式就是复杂自组织系统的足迹。

5.4 随机过程、概率吸引子和 概率复杂性

在复杂系统中,信号元素的行为通常是完全不知道的,从而被认作是随机过程。在这种情况下,不必要去区分可能存在的某个隐序而引发的机会和盲目的无规律引发的机会。随机过程被假定为不可预测事件的一个序列。但是,整个过程可以被规律和规则来刻画,或者用现代概率论奠基人科尔莫戈罗夫的话说:“概率论的认识论价值基于这样的事实,机会现象被集体考虑,从而在大的尺度上产生非随机的规则性。”^[5.28] 例如,当抛掷硬币的时候,只要硬币是均衡的,正面和反面都被赋予 $1/2$ 的概率。这是因为人们预期正面或反面出现的可能性在每一次抛掷中都倾向于相等。因此,按照大数定律,在大量的抛掷次数之后,正面和反面出现的平均数应该接近于 $1/2$ 。这就是科尔莫戈罗夫所说的意思。

一个随机过程的结果也可能有不同的发生概率。二元结果由概率 p 和 $1-p$ 决定。在最简单的情况中, $p=1/2$,没有一种结果比其他的更有

可能发生,这样的结果被看作是均匀分布的。例如,一个均衡的六面体骰子在一次抛掷后,每一个面都等可能落地朝上,所以每一个面的概率是 $1/6$ 。在这种情况下,随机过程被看作是一个连续的而独立均匀分布的结果。为了把这种直觉转为更精确的陈述,我们考虑抛掷硬币有两种可能的结果,分别用0和1标记。 n 次测试中1的数目记为 r_n ,采样平均 r_n/n 表示了整体 n 次测试中1所占的分数比例。那么,按照大数定律,概率 r_n/n 是在围绕 $1/2$ 的固定区间内,并随着 n 的无限增加趋于1。

在图 5.8a 中,当概率 $p = 1/2$ 时,对于 $n = 15$,经过 10 000 次采样, r_n/n 值的分布被描绘出来。显然,这些值集聚在 $1/2$ 附近,分散程度看起来大体上像一个钟形。图中每一个矩形的高度指示了所有落在水平轴上对应区间的样本平均数。图 5.8b 显示了 r_n/n 值的分布, $p = 1/2$, $n = 60$,采样数 10 000。这些值的分布看起来也像一个钟形曲线,但是曲线比 $n = 15$ 的曲线要窄,而且顶点更高。这个钟形高斯曲线说明了科尔

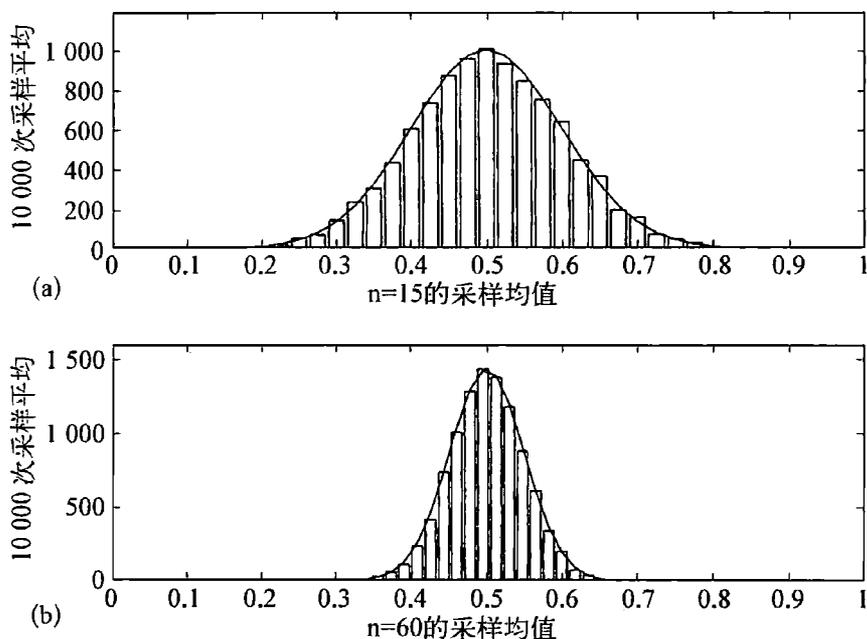


图 5.8 r_n/n 值的分布

采样数为 10 000: (a) $n = 15$; (b) $n = 60$ 。

莫戈罗夫的论断,即考虑大量随机事件组合时,规则性就出现了。

相同的钟形曲线会在一些游戏中以不同的平均结果出现,像玩硬币,掷骰子,或者玩牌。一些钟形更平坦,一些更狭窄,但是每一个都可以被描述为一个高斯曲线。事实上,两个曲线的参量值被用于区别彼此:平均(或者平均误差)和方差(或者标准差),这表示了钟伸展的宽度。

随机过程的另一个例子是随机行走。一个独立的步行者可能实现一些独立同分布的步伐。如果 n 是走过的步数, Δt 是实现一步所需要的时间间隔,步行者在时间 $t = n\Delta t$ 的位置 $x(t)$ 可以被看作 n 个独立同分布随机变量 x_i 之和 $S_n = x_1 + \dots + x_n, 1 \leq i \leq n$ 。对于随机行走,随机过程 $x(t)$ 的方差随着步数线性增加。从离散随机行走开始,令极限 $n \rightarrow \infty$,且 $\Delta t \rightarrow 0$,使得 $t = n\Delta t$ 是有限的,我们可以得到连续性极限。方差对 t 的线性依赖性,是扩散过程(称为维纳过程)的特征。当 $n \rightarrow \infty$,随机行走只是一个高斯分布;高斯形状是渐进形成。概率分布(密度)函数 $P(S_n)$ 依赖于 n ,而且它的形状随着时间变化。 $P(x_i)$ 是任意的。图 5.9 展示了四种

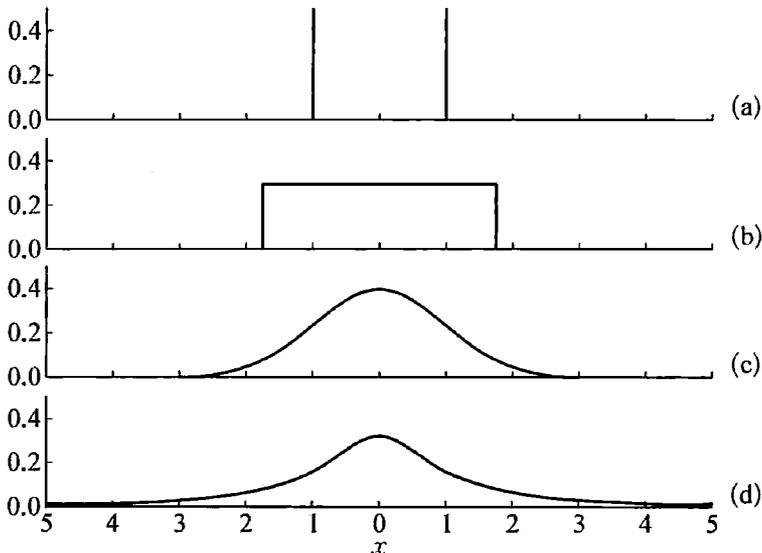


图 5.9 不同的概率密度函数

(a) 德尔塔分布;(b) 均匀分布;(c) 高斯分布;(d) 柯西分布(自上至下)。^[5.29]

不同的概率分布函数：(a) 德尔塔分布；(b) 均匀分布；(c) 高斯分布；(d) 柯西分布。当这些分布之一刻画随机变量 x_i 时，概率分布函数 $P(S_n)$ 随着 n 增加而改变(图 5.10)。

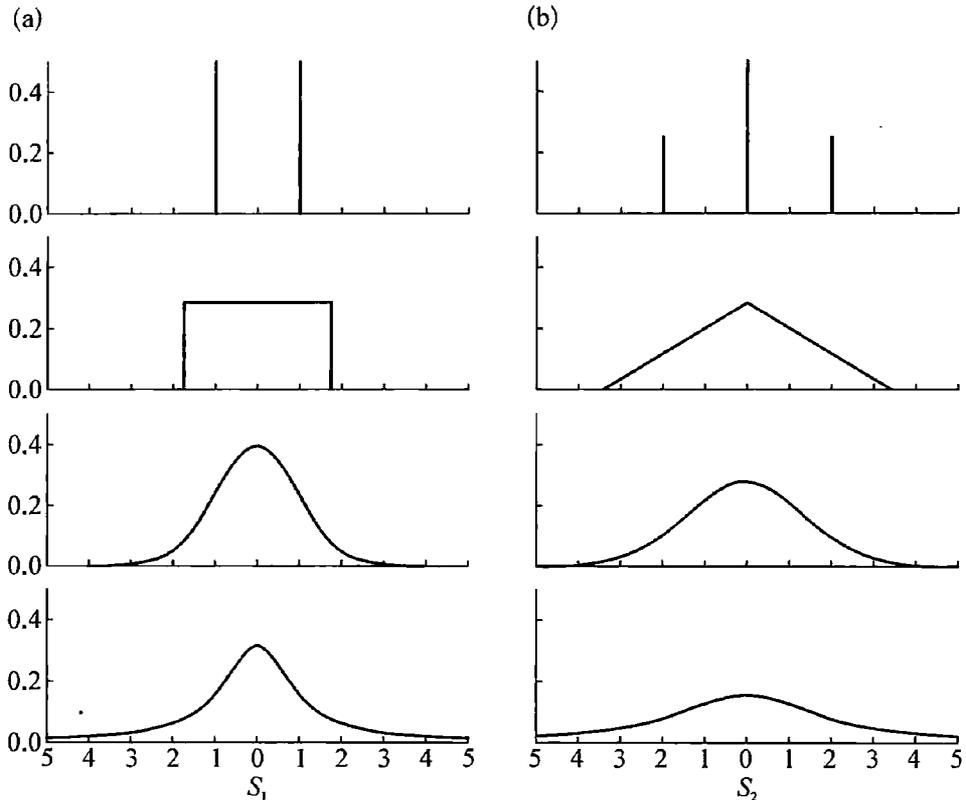


图 5.10 独立同分布变量的联合概率密度函数 $P(S_n)$

(a) $n = 1$ ，即图 5.9 所示的概率密度函数；(b) $n = 2$ 。^[5.30]

从图 5.10 看出，随着 n 的增加，德尔塔分布和均匀分布与高斯分布和柯西分布的行为是不同的。德尔塔分布和均匀分布的函数 $P(S_n)$ 随着 n 增加在尺度和函数形式上变化，而高斯分布和柯西分布不在形状上变化，仅在尺度上。随着 n 的增加，它们变得更宽。当 $P(S_n)$ 的函数形式与 $P(x_i)$ 的函数形式一样的时候，随机过程被认为是稳定的。因此，当高斯过程和柯西过程稳定的时候，随机过程一般不是稳定的。

只要随机变量 x_i 是独立的，同时是有限方差的，那么中心极限定

理^[5.31]就成立：随着 n 的增加，分布 $P(S_n)$ 逐渐收敛于高斯形状。例如，在图 5.11 中，随机过程 S_n 是在 x_i 由均匀分布 $P(x_i)$ 刻画的假设下进行模拟的。显然，随着 n 的增加，分布 $P(S_n)$ 变得更宽。向高斯渐进分布的收敛性可以通过绘制概率密度函数来强调，其中放缩因子 $\tilde{x} = x/n^{1/2}$ ，且 $\tilde{P}(\tilde{x}) = P(\tilde{x})/n^{1/2}$ 。在这种情况下，该分布迅速收敛到单位方差的高斯形式。对于大的 n ，它是一光滑的曲线。

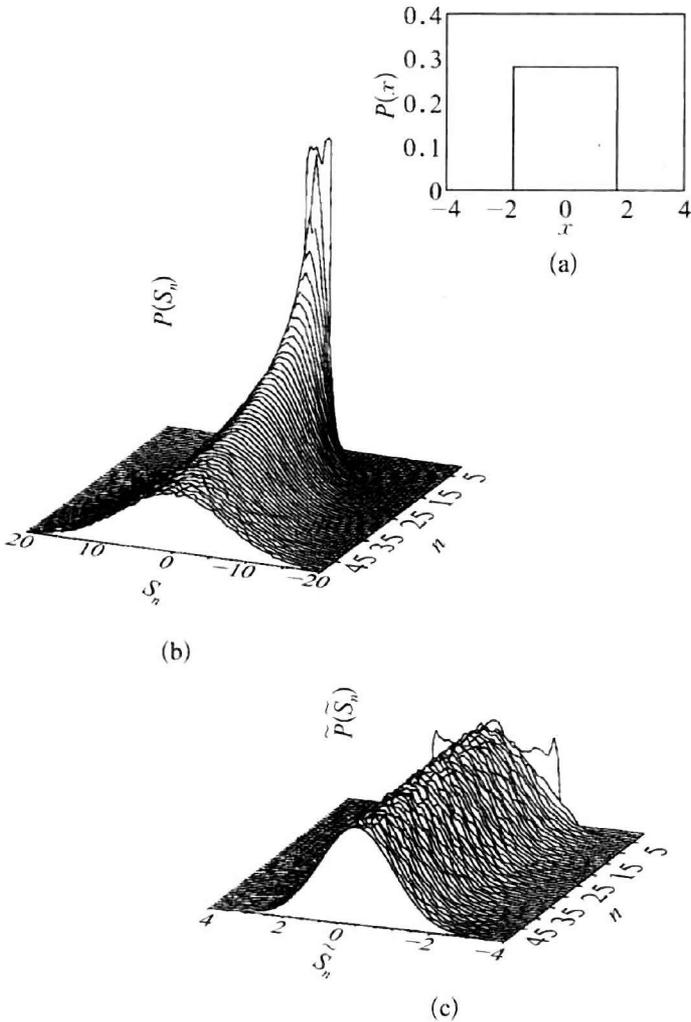


图 5.11 $P(S_n)$ 的模拟

n 从 1 到 50；(b) 图基于 (a) 图所示的均匀分布；(c) 图基于缩放后的同一均匀分布。^[5.32]

如果条件(随机变量的独立性和有限方差)得不到满足,必须考虑其他的极限定理。研究极限定理用到概率分布吸引盆的概念。这一概念与 n 变化时 $P(S_n)$ 的函数形式变化有关。在独立同分布变量 x_i 的情形中, $P(S_1)$ 与 $P(x_i)$ 是一致的,并且通过选择随机变量 x_i 来刻画。随着 n 的增加, $P(S_n)$ 改变它的函数形式并且对渐进的较大值的 n 取得高斯函数形式,如果中心极限定理的条件得到满足的话。所有的概率密度函数定义了一个函数空间。在该空间中,高斯概率函数是随机过程的一个不动点吸引子。满足中心极限定理要求(随机变量的独立性和有限方差)的概率密度函数集合,构成高斯分布的吸引盆。

在该函数空间中,我们可以想象两个随机过程 S_n 如何收敛于高斯吸引子(图 5.12)。两个随机过程都通过对 n 个独立等同分布随机变量 x_i 和 y_i 进行加和得到。如果两个过程中的 x_i 和 y_i 的概率密度函数不同,它们起始于函数空间中的不同区域。随着 n 的增加,概率密度函数 $P(S_n)$

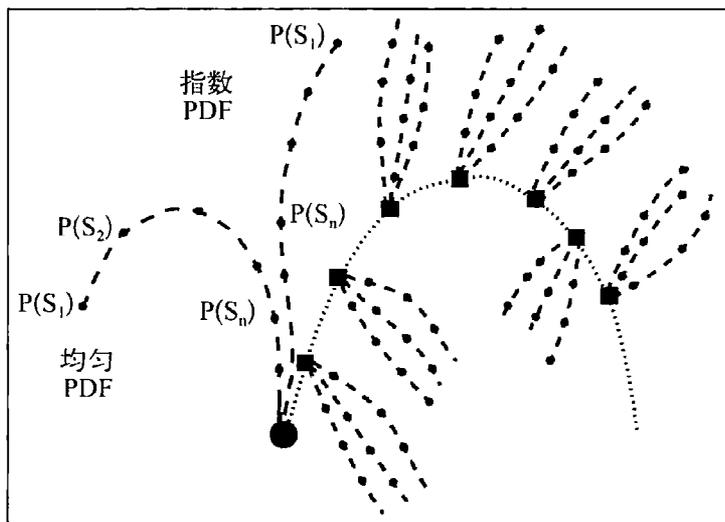


图 5.12 独立同分布随机变量之和(依概率)收敛于某些稳定的吸引子

黑圈表示高斯吸引子 $P_G(S_\infty)$, $\alpha = 2$;黑方块表示利维稳定非高斯吸引子,由不同的 α 值进行刻画, $\alpha < 2$ 。[5.34]

逐步收敛到高斯吸引子 $P_G(S_\infty)$ 。 $P(S_n)$ 收敛到 $P_G(S_\infty)$ 所需要的步数,反映了两个近似之收敛速度。这个函数空间中,高斯吸引子是最重要的吸引子,但是还存在其他的吸引子。

高斯分布和柯西分布是稳定分布的例子。若该分布对于不同的 n 值不改变其函数形式,则得出 n 个独立等同分布随机变量之和的稳定分布。法国数学家保罗·莱维(1886—1971)确定了稳定分布的所有类。^[5.33]一般地,它们通过一个参量 $\alpha(0 < \alpha \leq 2)$ 来刻画, $\alpha=2$ 为高斯分布, $\alpha=1$ 为柯西分布。与高斯分布相比, $\alpha < 2$ 的非高斯(“莱维”)稳定随机过程具有无限的方差。它们的渐进行为由 $P_L(x) \sim x^{-(1+\alpha)}$ 形式的分布来刻画,该分布对于较大的 x 显示出幂律行为。与光滑的高斯钟形曲线不同,它们的(“胖”)尾表现出了尖峰形状的涨落。因此,它们没有一个特征标度,但是他们可以使用自相似进行放缩。像高斯分布一样,非高斯稳定分布也可以成为概率密度函数的函数空间中的吸引子。一个极限定理指出, n 个独立等同分布随机变量 x_i 的和 S_n 的概率密度函数 $P(S_n)$ 以概率收敛于稳定的莱维分布 $P_L(x)$,若随机变量 x_i 的概率密度函数的特定条件得到满足。 $P(S_n)$ 属于 $P_L(x)$ 的吸引盆。

概率密度函数的函数空间由连续参量 α 刻画, $0 < \alpha \leq 2$ 。因此,有无穷多的吸引子构成了所有稳态分布的集合。图 5.12 显示了几个这样的吸引子,有一些随机过程收敛到它们。吸引子将概率密度函数的函数空间划分为不同复杂度的区域。高斯吸引子和稳定非高斯吸引子中的随机过程的复杂性是不一样的。在高斯吸引盆中,出现的是有限方差随机变量。但是,在稳定非高斯分布的吸引盆中,可以出现无限方差的随机变量。因此,带有幂律尾巴的分布出现在稳定非高斯吸引盆中。

幂律分布和无限方差,表明了高度复杂随机行为。^[5.35]具无限方差的随机过程,虽然在数学上良好定义了,但是却极难使用,而且在应用于真实系统时会出现基本的问题。在平衡统计力学的封闭物理系统中,方

差往往与系统的温度有关。在这种情况下,无限方差意味着无限或者未定义的温度。不过,幂律分布被用于描述开放系统。在描述如复杂经济和生理系统时,它们的重要性不断增加。事实上,幂律分布首先是在经济学中,作为帕累托收入定律。复杂金融市场中的动荡(湍动),也可以用带有胖尾的幂数分布来描述。在金融系统中,无限方差可能使风险评估的重要工作更加复杂(见第 7.4 节)。

5.5 量子信息、量子计算机和量子复杂性

一般而言,动力学系统可以被不同复杂度的计算模型表示。计算模型允许从初始条件使用相应的动力学方程来计算关于现在或者未来状态的信息。但是,在确定性系统的情况中,可计算性是受算法复杂度限制的(见第 5.2 节)。随机系统的可计算性是受概率测度限制的(见第 5.3 节和第 5.4 节)。在任何情况下,复杂动力学系统的计算模型并不总是可计算的。记住这些限制,动力学系统仍然可以被看作是在合理时间内有时不能给出结果的计算机。在这一假设下我们可以走多远?这个世界真的是一个莱布尼茨意义上的复杂计算机,现代算法和概率理论不过是有了修正和限制?

显然,图灵机可以在经典物理框架下加以诠释(图 5.13)。这样的计算机是一个物理系统,它们的动力学演化把一组输入状态转为一组输出状态。这些状态被标记以形成一个序列。机器被给定输入值的状态初始化,然后,伴随着确定性的演化,输出状态被测量。对于经典的确定性系统,测量到的输出标记是输入标记的明确函数 f 。原则上,这样标记的值可以由旁观者来测量,该机器被认为是计算了函数 f 。但是经典的随

机计算机器不能计算上述情况中的函数。随机机器的输出状态是随机的;输出与依赖于输入状态的概率分布相对应。

从现代物理的角度看,量子系统是自然界中基本的动力学系统。在这种情况下,一台量子机器的输出状态,虽然完全由输入状态决定,却不是可观测的。因此,一般而言,观测者不能发现其标记。为什么会这样?我们必须回顾一些量子力学的基本概念,这些在第 2.3 节中做了介绍。在量子力学中,矢量(如动量或位置)必须被替换为满足依赖于普朗克量子的非对易关系的操作(图 2.18)。用哈密顿函数描述的经典系统被量子系统替代,例如被哈密顿算子描述的电子和光子。量子系统的状态可以用希尔伯特空间中的矢量来描述,该空间是由哈密顿算子的本征向量张成的。量子态的因果动力学,是通过一个称作薛定谔方程的微分方程来决定的。经典可观测量可对易且总是有明确的价值,量子系统的非经典可观测量不可对易且一般没有本征向量和相应的明确本征值。对于量子态中的可观测量,只可以计算统计期望值。

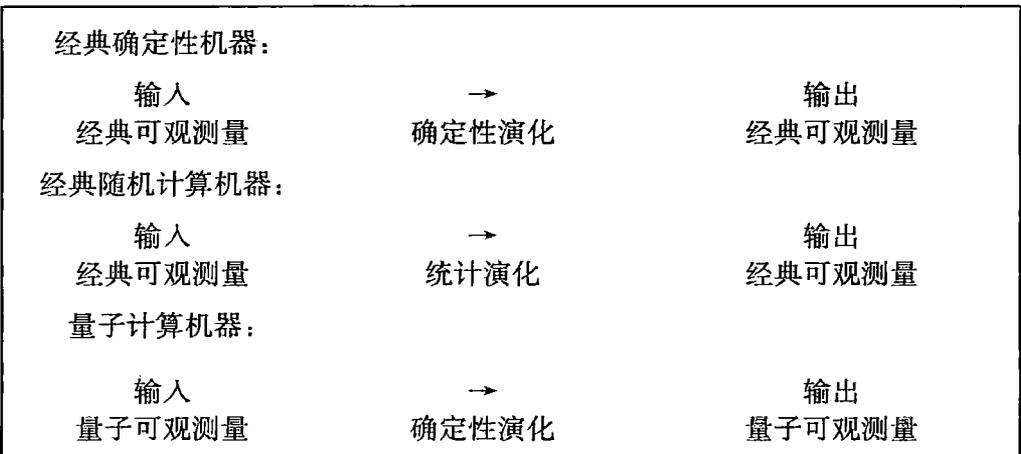


图 5.13 经典计算机器和非经典计算机器

与经典力学的主要区别是由叠加原理给出的,叠加原理表明了量子力学的线性性质。在一个纠缠的纯叠加量子态中,一个可观测量仅有不

确定的本征值。简而言之,量子力学的叠加或者线性原理得出了组合系统的相关(“纠缠”)状态,这已经由 EPR 实验高度确证了(阿斯佩,1981)。从哲学上看,(量子的)整体大于各个部分之和。

叠加原理对于量子系统测量非常重要。在量子形式系统中,一个量子系统和测量仪器可以被表示成两个希尔伯特空间,它们通过张量积 $H=H_1\otimes H_2$ 而组合。在时刻 0 的测量初始状态 $\Phi(0)$ 中,系统 H_1 和 H_2 分别处于分离的两个状态 ψ 和 φ , 并且 $\Phi(0)=\psi\otimes\varphi$ 。两个系统的因果发展由薛定谔方程决定,即 $\Phi(t)=U(t)\Phi(0)$, $U(t)$ 为幺正算子。由于 $U(t)$ 的线性性质,虽然 t 时刻的测量仪器给出确定的测量值,状态 $\Phi(t)$ 仍然受到纠缠具有不确定的本征值。因此,线性量子动力学无法解释测量过程。

以更通俗的方式,测量过程可以通过薛定谔关于猫的思想实验来展示(图 5.14a),其中涉及猫的两个状态“死”和“生”的线性重叠。想象一只猫被锁在一只装有镭样本的封闭盒子中。选取的镭使得在一个小时内

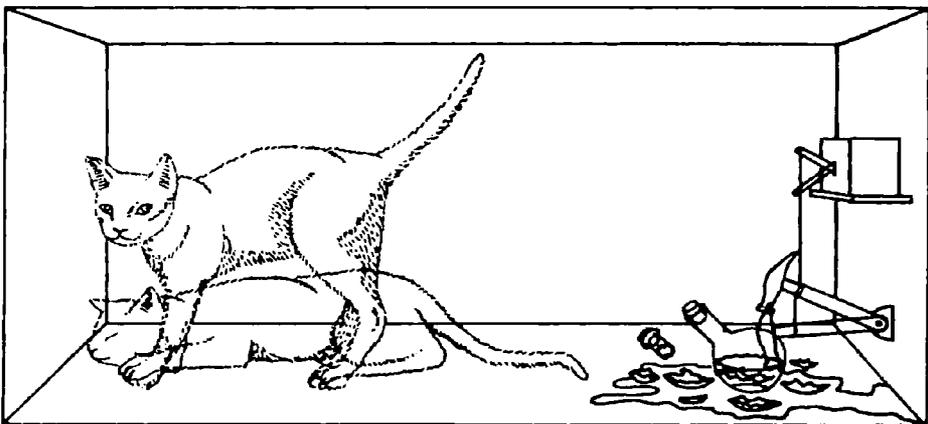


图 5.14 “薛定谔猫”及其解释

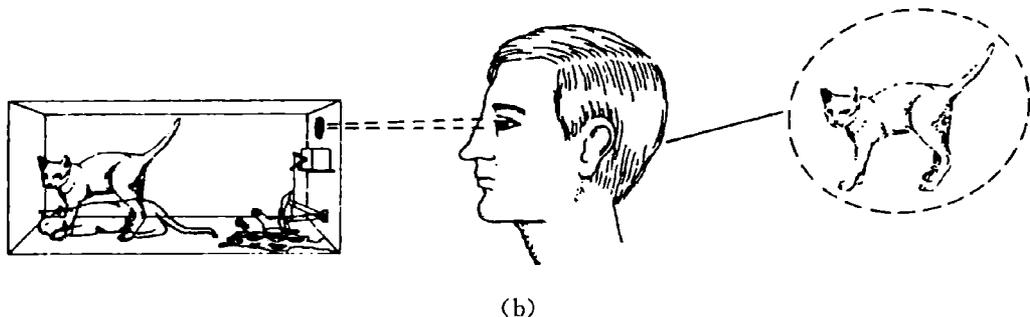
(a) “薛定谔猫”;

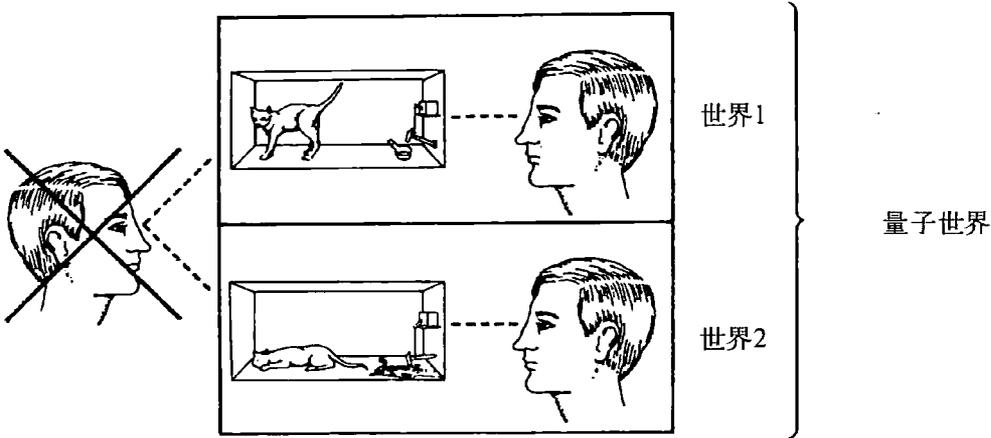
单次衰变以概率 1 : 2 发生。如果衰变发生,电路闭合,引起锤子敲碎装有氢氰酸的瓶子,从而杀死猫。该盒子保持封闭一小时。[5. 36]

按照量子力学,猫的两个可能的状态死和生,在观测者打开盒子做出判定之前仍然是未确定的。对于封闭盒子中猫的状态,薛定谔解释的量子力学预测一个叠加相关(“纠缠”)状态,也就是说,猫同时处于死生各半的状态。按照测量过程,状态“死”和“生”被解释为测量指示器,表示镭的“衰变”或“不衰变”。

在玻尔、海森伯等人的哥本哈根解释中,测量过程被解释为所谓的“波包坍缩”,也就是说把叠加状态分为测量仪器和有确定本征值的被测量子系统的两个分离状态。显然,我们必须把量子系统的线性动力学与测量的非线性行为区分开来。世界上的非线性性质的原因,有时候被解释为人类意识的出现。

尤金·维格纳(1961)主张,薛定谔方程的线性可能对于清醒的观测者失效,应该代之以非线性过程,这样其中一个状态可以被厘清(图 5. 14b)。但是维格纳的解释迫使我们相信,复杂的量子线性叠加,仅在像人一样意识出现的宇宙角落里,才被分解成分离的部分。在台球、行星、星系的宏观世界里,EPR 相关性无法测量,它只在如光子的基本粒子的微观世界中才出现。看起来非常奇怪的是,在可以被经典物理以明确测量值描述的宏观世界中,系统的分离状态是由类人的意识引起的。





(c)

图 5.14 “薛定谔猫”及其解释

(b) 维格纳的解释;(c) 埃弗里特的解释。

埃弗里特的量子力学的“多世界”解释,将人的意识分裂成有分枝的途径,抑制了不同的、互不相容的世界(图 5.14c),避免了非线性简并的问题。

在测量过程中,测量仪器和量子系统的动力学用方程 $\Phi(t) = \sum_i c_i(t) \psi_i \otimes \phi_i$ 描述,式中状态 (ψ_i) 涉及测量仪器的测量值。埃弗里特认为,态矢量 $\Phi(t)$ 绝不分裂成分状态,但是所有的分支 $\psi_i \otimes \phi_i$ 出现了。状态 $\Phi(t)$ 描述了多重的同时存在的真实世界, $\psi_i \otimes \phi_i$ 相应于第 i 个平行世界的状态。因此,所测量的分系统决非一个纯态。在埃弗里特的意义上, ψ_n 可以解释为相对态,它依赖于观察者或测量仪器的状态: $\psi_n = c_n^{-1}(\phi_n, \Phi) H_2$ 。如果 ϕ_n 被看作记忆状态,那么具有一定记忆的观察者可只可能意识到他自己的世界分支 $\psi_n \otimes \phi_n$ 。但是,他绝不可能观测到其他的世界分支。

埃弗里特解释的优点在于,叠加的非线性简并不需要解释。而缺陷在于他的多世界的本体论信念,这样的世界原则上是不可观察的。因

此,埃弗里特的解释(如果数学上相容)需要奥卡姆剃刀。

在科学史上,拟人的或目的论的论据往往表明,科学在此存在着解释的分歧或失败。因此,一些科学家(如罗杰·彭罗斯)提出,量子力学的线性动力学对于解释意识出现的宇宙演化是不够方便的(爱因斯坦说它是“不完全的”)。他认为,线性量子力学和非线性广义相对论的统一理论,至少在原则上可以解释世界上的宏观系统分离状态,而不必援用拟人原理或目的论原理。在彭罗斯主张的统一理论中,物理系统的线性叠加,当系统对于相对论引力效应充分大时,就会分裂成分离状态。彭罗斯计算了在一个引力子水平上,对于这种效应的最小的曲率单位的情况。^[5.37]该思想是,这种水平应该令人满意地落在量子力学线性定律的原子、分子等的量子水平与日常经验的经典水平之间。彭罗斯论据的优点在于,量子世界的线性与宏观世界的非线性将可能用一个统一的物理理论来解释,而不必援用人的任何干预。当然,我们仍然缺乏可检验的统一理论(参照第2.4节)。

关于人的大脑,我们想要指出的是,量子水平上的基本粒子、原子和分子对于其演化是必要的,而不是需要其他的东西——物理学中相关态的简并所必要的大脑精神状态。实际上,相当多的神经元对于单个量子及其叠加和纠缠态的简并是敏感的。但是,这些量子态当然不可能被大脑的精神状态所察觉。我们既不能意识到叠加,也不能意识到它们由非线性随机事件引起的分裂成单个状态。然而,在大脑的精神状态的形成和相互作用中涉及量子效应,其方式还远未被满意地理解。

然而,由此引出的问题是,量子力学是否提供了人的大脑进化的框架,或至少为新的计算机技术去取代经典的计算机系统提供了框架。量子力学的基本思想是量子态的叠加,这种叠加是由某种测量实现的线性量子动力学和叠加简并的结果。^[5.38]因此,量子计算机需要一种逻辑门的量子版本,在此输出将是某种么正算符用于测量的输入和最终测量作

用的结果。量子系统(例如光子)的叠加,提醒我们计算的平行性。如果我们感兴趣的是对于许多计算结果的某种适当组合,而不是其部分的细节,量子计算机将变得有用。在此意义上,量子计算机可以在相对短的时间内实现可能的数量巨大的平行计算的叠加,从而克服经典计算系统的效率问题。但是,量子计算机仍将按照某种算法方式运行,因为它们的线性动力学是确定性的。测量的非线性作用将带来非确定性方面。因此,我们不可能期待,量子计算机将超出图灵机能力而以非算法运算方式运行。所以,量子计算机(如果它们构造出来了)对于复杂性理论和克服实际的计算约束可能更有意义。

量子计算机为信息处理、计算和通信开辟了新的路径。量子世界的本质特征是量子态和纠缠态可能性的叠加。如果二进制信息单元 0 和 1 被当作计算机器的另类状态,那么量子物理允许量子叠加的第三个状态。允许这样状态的比特,被称为量子比特或“量子位”(qubits)。量子力学定律对于计算有巨大的实际应用价值。^[5.39]例如,如果一个问题的一部分子问题有待解决,那么经典计算机必须按照顺序的方式一步步求解它们。对于量子计算机,两个子问题可以被叠加并同时处理。因为这与使用多个处理器的并行计算机相似,叠加量子信息的信息处理被称作量子并行。考虑一个计算机要找到具有特定性质的整数。经典计算机计数整数 1, 2, 3, ... 并逐步测试该数是否满足所要求的性质。如果搜索的数 n 非常大,则该性质要被测试 n 次,导致可观的计算时间。量子计算机可以在一步中同时测试大量的测试数是否有该性质。十进制数被表示为二进制位的序列。在量子计算机中,比特对应于一个另类量子态。一个例子是基本粒子的自旋,可以采取状态 0 和 1。在这种情况下,比特序列表示自旋态的序列。例如,对于 7 个粒子,有 2^7 可能的组合,例如 0000000(十进制 0), 0000001(十进制 1), 0000010(十进制 2) 等等,包括 0 到 127 之间的所有数。

在经典计算机中,二进制数 0000000,0000001,0000010,⋯必须被依次测试。在量子计算机中,自旋态可用一个合适的电脉冲来改变。当这个脉冲太弱,该粒子仅有改变其自旋态的特定概率。与薛定谔猫(在封闭的盒子中同时处于死亡和存活状态)相类似,基本粒子处于另类自旋态的叠加状态,只要它不被测量或者观测。如果每一个粒子接收一个弱脉冲,则所有七个粒子都进入叠加状态,只要它不被测量或者观测。在这种叠加中,所有 128 种不同状态和所有相应的数都可以在同一步计算中被同时表示并测试。但是,保持计算中的叠加状态是一个技术挑战。之所以如此的原因是,微扰和与环境的交互可能导致叠加或者相干态的坍缩。这种现象被称作量子计算中的去相干(decoherence)问题。

经典计算机的寄存器中存储经典的是(1)/否(0)。在量子计算机中,寄存器包含量子系统,系统的状态可以是纠缠的。经典计算机的门是基本的逻辑操作。例如非门,把 0 转为 1,把 1 转为 0,或者与门,把一个 1 比特对(11)转为另一个 1,而其他的组合对(01,10,00)转变为 0,对应于整个命题为真仅当所有部分命题都为真这样的逻辑。一个或命题为真,仅当其中一个子命题为真。因此,或门把除 00 对以外的所有对(01,10,11)转为 1。所有其他逻辑联系都可以被归结为这几种门。经典的程序是门操作的一个序列,可以用逻辑网络来表示。

经典计算机的输入是位的序列,0 或 1。量子计算机的输入是一群初始的寄存器。有时是寄存器中的位状态的叠加。经典计算机的输出状态是唯一确定的。量子计算机可以产生位状态的叠加。在这种情况下,两个叠加值 0 和 1 是由测量确定的。在测量过程中,叠加按照量子力学定律跳到状态 0 或 1。因此,不同类型的处理给出不同的结果。唯有结果的概率可以被预测。量子寄存器与经典寄存器不同在于叠加的加和可能性。在量子力学中,叠加通过幺正算子来改变,但是它们不能通过经典的逻辑门来实现。由于量子定律的时间对称性,幺正算子是可逆的。经典

的门大部分都是不可逆的。例如,经典的或门在三种不同的情况下都给出值 1,与门也在三种不同情况下给出值 0;因此,不可能从输出直接推导出输入。但是,如果门“记住”输入并且产生相应的计算结果的话,可逆性可以被保证。输入 x 和输出 $f(x)$ 的函数 f 的计算,被输入 x 向输出 $(x, f(x))$ 的变换所替代。在图 5.15 中,输入和输出被指定为量子力学的态矢量。在下面的图中,量子态有别于经典状态,经典状态用直线而量子态用波线。

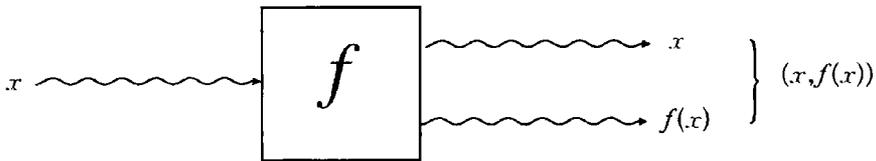


图 5.15 量子门的可逆计算

经典信息可以在发送方和接收方之间传递,通过不同的物理、化学或生物系统实现。但是如果它们最小化到量子尺度时,问题就出现了。在量子世界里,发送方对应于初始量子系统,接收方对应于测量 M(见图 5.16)。从初始状态向测量演变的量子系统(例如,基本粒子)传递量子信息。量子传递的个体结果是随机的,因为在量子力学中只有关于未来事件的统计陈述是可能的。如果相同的实验被重复,可能得到不同的结果。

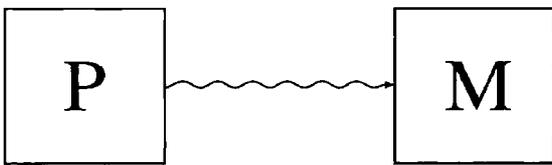


图 5.16 量子信息的统计转变

但是在抛掷硬币的情况中,出现可重复的频率。统计频率可以被用于概率预测。图 5.16 示意了量子信息的统计传递。

因此,量子信息依赖于量子力学中的统计定律。这是一种新类型的信息,不能无损失地转译为经典信息。为什么会这样? 图 5.17 示意了量子信息与经典信息之间的相互转译。包含确定量子信息(第一条波线)的量子系统(例如,某个基本粒子)的测量 M 可以被得到。这种测量导致经典信息(直线),被传递到接收方 P 并用于准备一个新的量子系统(波线)。

事实上,不可能完全将量子信息转译为经典信息来自另一个不可能性陈述:不可克隆定理(no-cloning theorem),按照该定理,没有量子信息能够被复制。不可能量子复制机,如图 5.18 所示。这是以一个量子系统为输入并以两个相同类型的系统为输出的设备。从统计意义上说,这两个拷贝应与输入无法区别。如果这样一个机器是不可能的,重要的结果如下:数据不能通过复制而保证安全,如经典计算机中那样。更进一步,在量子数据库中不可能无改变地读取数据。但是,量子复制机是不可能的这一事实也避免了对量子数据的秘密攻击,因为这样的攻击将改变量子信息。

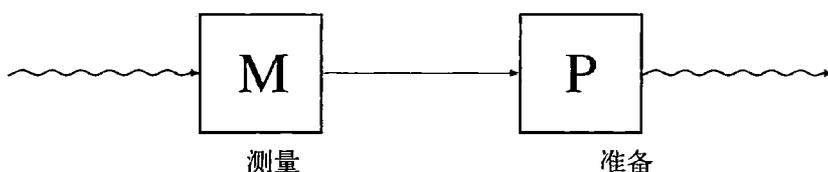


图 5.17 量子信息与经典信息的相互转译^[5.40]

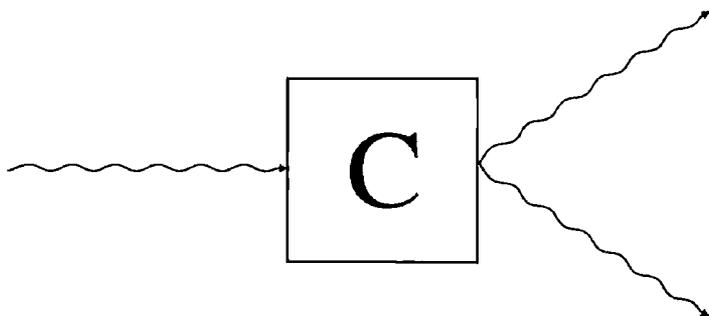


图 5.18 “量子复制机”的框架

量子复制机的不可能性来自于海森伯不确定度关系,该关系说明诸如量子粒子的位置和能量等成对出现的量不能同时被精确确定。

为了论证的需要,让我们假设可能构造一个量子复制机。那么,量子粒子的两个拷贝可以出现,以测量一个拷贝的能量和另一个的位置,且两个都是精确的。由于量子复制机的不可能性,我们立刻就看出经典远程传输是不可能的。如果经典远程传输是可能的,我们可以非常容易地构

造一台量子复制机：如果我们使用如图 5.17 所示的经典远程传输，传递的经典信息可以用经典计算机来复制。这些拷贝可以被传递到接收方 P 和 P' (图 5.19)，以准备新的量子粒子。图 5.19 的系统可以实现如图 5.18 的量子复制机的任务。

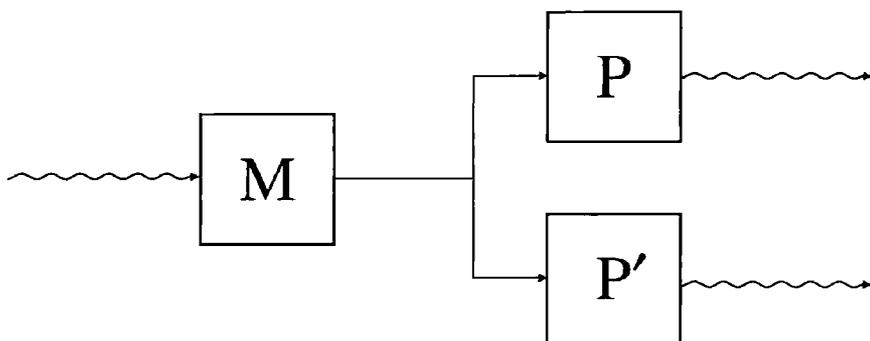


图 5.19 利用经典传输的量子复制机^[5.41]

量子信息不仅与经典远程传输的不可能性有关联，而且与量子远程传输的可能性有关。在科幻电影中，远程传输意味着物体跨大距离的瞬间传输。为此，假定物体的原子结构的信息（软件）可以从材料物质（硬件）中分离；这种信息被“射向”目的地，然后被用来“重建”目标物。但是，这个假设忽略了这一事实：量子世界受制于不确定度原理，在任何时候，不可能精确测量基本粒子的所有性质。量子信息仅当其在信息传递过程中不被测量或者观测时，才可能无改变地传输。

瞬间量子电子传输的神奇方法，可以通过纠缠量子态来实现。按照 EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) 实验，从中央散射元发出的基本粒子对（例如，光子）在纠缠量子态的叠加中仍旧保持相关。如果两个纠缠量子性质之一在一个粒子的位置被测量，那么另一个量子性质的值也同时在另一个粒子的位置被确定，该粒子在相反方向传播了相同的距离。在图 5.20 中，量子信息的发送方被称作甲，接收方称作乙。传输的量子粒子被委派为 1 (波线)。为了实现传输，甲和乙使用产生纠缠量子粒子对的

EPR 源。纠缠粒子对包含粒子 2(对于甲)和粒子 3(对于乙)。甲和乙不知道粒子的个体状态,但是他们确实知道粒子对是关联的:我们假定它们处于可交换的相反状态,就像是图 5.14a 中薛定谔猫的“死”态和“活”态。甲不知道粒子 1 和粒子 2 的传输状态。对于电子传输,粒子 1 与粒子 2 发生纠缠。

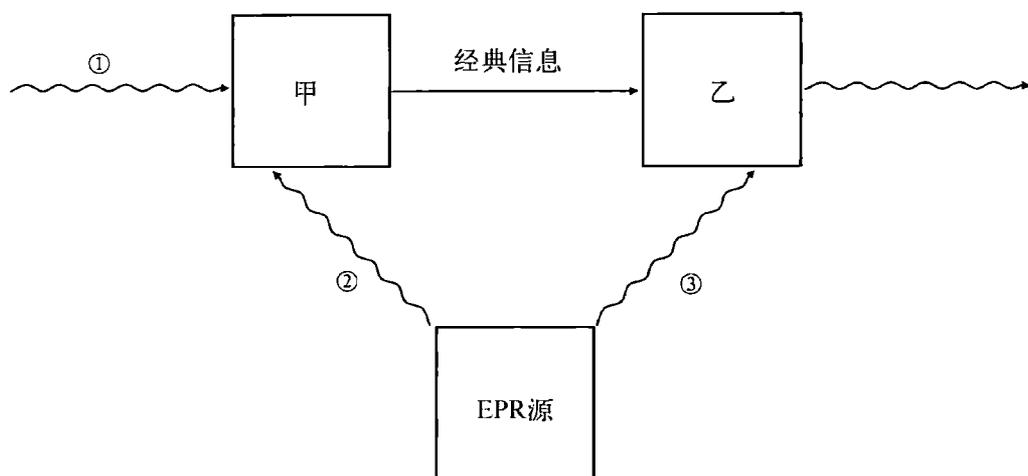


图 5.20 量子传输

在 EPR 实验中,量子粒子(例如,光子)可以有多种量子态,例如水平或竖直极化。在量子力学中,量子态 ψ 由矢量 $|\psi\rangle$ 表示。当经典位值为 0 和 1,相应的量子位值为 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$,它们可以是纠缠的。在纠缠的情况下,量子系统同时以一定概率和剩下的概率来转变位值 $|0\rangle$ 。当量子系统被测量时,量子位值只(随机地)取值 $|0\rangle$ 或 $|1\rangle$ 。^[5.42]

甲准备粒子的纠缠对,粒子 1(她希望传输的)和粒子 2。纠缠对可以获取量子位对,当每个量子位中 0 和 1 以相同概率出现。基于经典位对 00,01,10,11 的概率组合,在这种方案中有四种可能的量子位对的纠缠状态(贝尔态)。^[5.43]甲(随机地)决定她的粒子对 1 和 2 是这四种可能的纠缠状态之一,而不用测量它们的状态。例如,她确定两个量子位处于相反位置的特定的纠缠贝尔态。但是,我们假定 EPR 源的纠缠对 2 和 3(乙

的粒子)也处于相反位置。接下来乙的粒子(3)肯定与甲想要传输的粒子(1)处于相同的状态。因此,传输粒子的经典测量给出乙粒子的量子位值。在这种意义下,能够在发送方甲和接收方乙之间瞬间传输量子信息。

瞬间量子远程传输也是可能的,如果另一个纠缠贝尔态是甲随机决定的。图 5.20 中,粒子 1,2,3 的序列链相关允许乙适当调整他的粒子的量子位的值,例如通过反转光子的方向。乙和甲知道粒子 2 和 3 的 EPR 纠缠。因此,乙的操作仅依赖于粒子 1 和 2 的纠缠状态。粒子 1 和 2 之间的相关作为经典信息从甲发送到乙,例如通过电话(图 5.20)。但是,不像瞬间量子传输,这种经典信息不能快于光速进行传递。

量子远程传输的劣势是被传输的量子信息在它被测量随机地确定之前是未知的。因此,量子远程传输不能用于直接的信息传递。这样,与爱因斯坦的相对论不冲突,而且与他的信号最大速度假设不冲突。但是,只要量子信息没有被测量或者观测,它可以通过纠缠进行瞬时传递。量子纠缠导致量子并行,而且可能增加计算速度。通过大量的量子并行来降低计算时间,也意味着降低计算复杂性。

量子计算不仅仅导致计算能力的指数增长和计算复杂性的降低。任何物质形式都存储量子信息。因此,任何基本粒子是量子信息的处理器。这些处理器的计算规则因量子对称性原理是对称的。由于量子的时间对称性(微观可逆性),任何计算步骤都是可逆的。^[5.44]物质的相变是量子信息处理。宇宙是一个膨胀的量子计算机,它产生量子信息。更进一步,它是一个巨大的数据库,通过对称性来保存所有量子信息。我们不应该忘记,计算机器的概念不仅仅局限于人类具有符号数据动力学的技术。符号仅仅用于表示人类目的的动力学系统状态。信息处理不依赖于人类目的和兴趣。人类知识仅是世界上信息的一微小部分。本质上,量子信息不依赖于观测者或测量过程参与。观测和测量量子系统仅是一个量子系统与另一个量子系统进行交互的一个特例。

量子计算机是量子系统,量子信息与量子状态对应。如果量子系统被看作量子计算机,那么整个宇宙是一个量子计算机,与莱布尼茨对于经典力学的观点类似。但是与莱布尼茨相比,宇宙的量子随机性是这个系统的整体部分。更深入看,与爱因斯坦的确定性世界观是冲突的。根据爱因斯坦的广义相对论,带有强时空曲率吸引并吞噬一切物质(包括光在内)的黑洞是可能存在的。黑洞的中心是一个有来无回的奇点。黑洞同时也摧毁它所吞噬掉的物质系统的结构信息吗?由恒星内爆产生的黑洞是否会擦除宇宙的这部分信息?黑洞是否也会像阿尔茨海默病导致人脑衰变和信息丢失一样,随着宇宙年龄的增加,在时空导致不可逆转的“记忆漏洞”(memory holes)?

根据量子物理学定律,量子信息必须要保持常量。量子系统的波函数包含其状态的所有信息。量子态的时间依赖性演变取决于一种么正变换,该变换允许系统的初态从它的末态被无损失地重构,因此,在量子物理学中没有量子信息的损失。但是,根据爱因斯坦的相对论,在黑洞的奇点肯定是有信息损失的,量子物理学和相对论物理学的这种冲突,被称为量子信息悖论。霍金建议应该考虑黑洞周围的量子真空,根据海森伯不确定关系,这种真空并不是完全“空无”,实际上是充满了量子涨落,促使粒子对和经过非常小的时间后仍未消失的反粒子对自发创生。然而,一些粒子被黑洞吞噬,而其伙伴以热辐射的形式逃离黑洞(称为霍金辐射)。不过在霍金模型里,这些逃逸粒子与其被吞噬的伙伴是完全无关的。这样,为了避免量子信息被抹掉,没有信息能够从黑洞的中心逃脱。

这个问题的一个潜在的解由假设量子纠缠态而得,在霍罗威茨-马尔达西那模型(Horowitz-Maldacena model)里,^[5.45]粒子对是纠缠在一起的。所以,那些逃逸粒子不仅传输物质,同时也传输信息。逃逸粒子和它的伙伴(被黑洞吸收)纠缠在一起。这样,通过量子远程传输,那些被吞噬物质的信息就能够从黑洞的里边“发射向”到黑洞的外边。量子世界不会

遗忘任何事情,只有爱因斯坦的宇宙确定性模型还在承受宇宙阿尔茨海默病的折磨。

5.6 元胞自动机、混沌和随机性

生命和大脑的动力学是对传统计算机科学和人工智能的一个挑战。显然,图灵机式的算法机械化存在严重的缺陷,不能通过增加经典计算机或者量子计算机的能力来克服。例如,模式识别和其他人类感知的复杂工作不能够通过程控计算机来实现。人类大脑的结构看起来完全不同。

科学史上,大脑是以最高级机器的技术模型来说明。^[5.46]因此,在机械时代,大脑的功能被认为是液压,它能够沿着神经操控肌肉。在电子技术开始之初,大脑被比作电网或者电话开关板。随着计算机的发展,大脑被认为是最先进的硬件设备。在上一章,我们看到了即便是量子计算机(假如它们被建造出来)其能力也不能超越图灵算法的复杂度。

不像程序控制的序列计算机,人类大脑和思维的特征是矛盾性、不完整性、鲁棒性、抗噪声,还有对初始条件敏感的混沌状态,同样重要的还有学习过程等。这些特征在复杂性系统探究方式中是众所周知的。考察图灵类与复杂系统构造,经典系统的序列和中心控制存在本质的缺陷,但是复杂动力系统本质上是并行和自组织的。

不过,历史上,神经网络计算机的最初设计还是受图灵机概念的影响。在著名论文《神经活动固有观念的逻辑演算》(1943)中,麦卡洛克和皮茨提出了一个神经元复杂模型作为兴奋和抑制突触的逻辑单元,应用了罗素、希尔伯特、卡尔纳普等人的数理逻辑和图灵机的概念。麦卡洛克-皮茨神经元在 $n+1$ 时刻沿着轴突发放一个脉冲 y ,如果在时刻 n 的输入 x_1, \dots, x_m 和权重 w_1, \dots, w_m 的加权和超过神经元的阈值

H (图 5.21a)。[5.47]

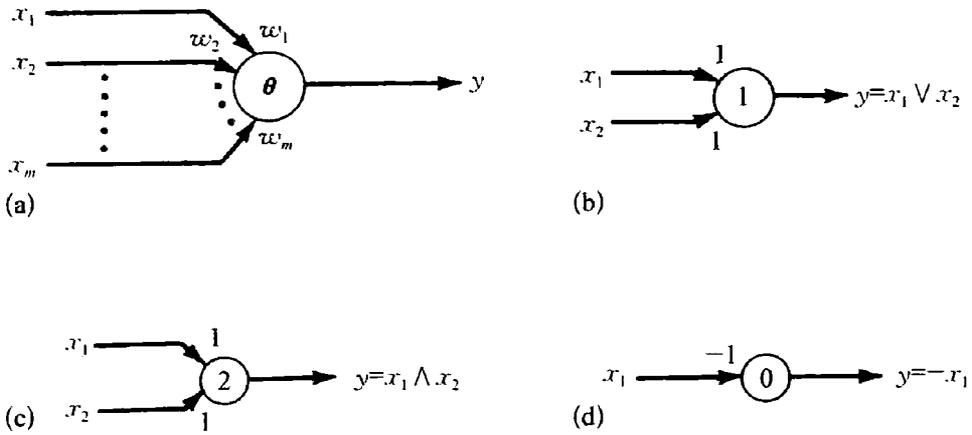


图 5.21 麦卡洛克-皮茨神经元与逻辑关联模型

(a) 麦卡洛克-皮茨神经元; (b) 或门; (c) 与门; (d) 非门。[5.34]

麦卡洛克-皮茨神经元的特别应用是如下的逻辑关联模型：或门(图 5.21b)模拟了语句 x_1 和 x_2 的逻辑析取 x_1 或 x_2 (形式上示为 $x_1 \vee x_2$), 仅当 x_1 和 x_2 为假语句时它为假, 否则它为真。真值以二进制表示 0 (代表“假”) 和 1 (代表“真”)。对于阈值 $\theta=1$ 、权重 $w_1=1$ 和 $w_2=1$, 或门以 $x_1 w_1 + x_2 w_2 \geq \theta$ 的方式发放, 只要 x_1 或 x_2 , 或者 x_1 和 x_2 都是 1。

与门(图 5.21c)模拟了 x_1 与 x_2 的逻辑合取 x_1 与 x_2 (形式上示为 $x_1 \wedge x_2$), 仅当 x_1 和 x_2 是真语句时它为真, 否则它为假。对于阈值 $\theta=2$ 、权重 $w_1=1$ 和 $w_2=1$, 与门以 $x_1 w_1 + x_2 w_2 \geq \theta$ 的方式发放, 仅当 x_1 和 x_2 都是 1。

非门(图 5.21d)模拟逻辑否定非 x_1 (形式上示为 $\neg x_1$), 仅当 x_1 为假时它为真, 否则它为假。对于阈值 $\theta=0$ 和权重 $w_1=-1$, 非门以 $x_1 w_1 \geq \theta$ 的方式发放, 仅当 x_1 为 0。因此如果 x_1 是 1, 那么非门并不发放, 这意味着输出 $y = \neg x_1 = 0$ 。

麦卡洛克-皮茨神经网络是一个麦卡洛克-皮茨神经元系统,把每一个神经元的输出分裂为其他某些神经元的输入(图 5.22)。虽然系统的这一概念可以被简化,任何“经典”冯·诺伊曼计算机可以被这样的神经网络模拟。1945年,冯·诺伊曼写了一个非常有名的草稿,清晰地阐述了存储程序的思想,程序与它所操作的数据一起驻留在计算机的内存里。这个历史性文档表明,冯·诺伊曼完全意识到通过麦卡洛克-皮茨网络计算的可能性。

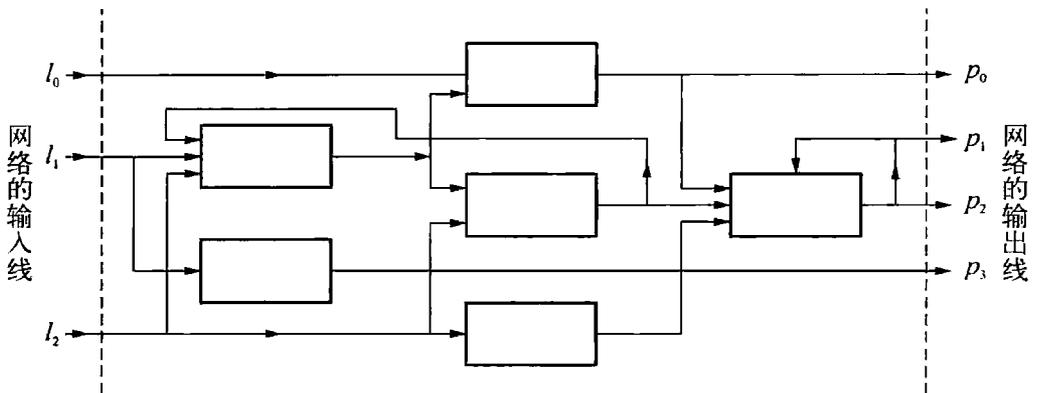


图 5.22 麦卡洛克-皮茨网络

数学上讲,冯·诺伊曼计算机可以被看作一个有限自动机,包含有限集合 X 作为输入,有限集合 Y 作为输出,有限集合 Q 作为状态。有限自动机的动力学是通过下一状态函数 δ 定义的,该函数把 t 时刻的状态 q 和输入 x 转变为下一时刻 $t+1$ 的状态 $\delta(q, x)$ 。输出函数 β 连接状态 q 和输出 $\beta(q)$ 。

冯·诺伊曼计算机的部件,例如输入输出单元、存储、逻辑控制单元、算术单元,很容易被看作有限自动机。即便是由上千元素组成而且被集成到芯片上的现代数字计算机,也可以被看作麦卡洛克-皮茨型的神经网络。一般而言,每一个寄存机器、图灵机或者递归函数可以被有限自动机的合适网络来模拟。但是,麦卡洛克-皮茨网络的这些应用仍然在程序控制序列计算机的框架下工作。

又是冯·诺伊曼第一次试图扩展图灵关于通用计算机的概念到自繁殖自动机的想法。^[5.48]他注意到,一个机器构造其他机器能够降低自身的复杂性,因为看起来不可能使用比构造机器所能给出的更多的材料。与这种传统的机械论观点相对,生物进化中的活组织看起来至少和他们的父母一样复杂,在长期进化中复杂性随之增长(斯宾塞语)。

冯·诺伊曼关于元胞自动机的概念,给出了活组织被看作细胞自繁殖网络的数学模型的最初提示。状态空间是一个被分成相同元胞的均匀格子,像棋盘一样。一个基本的元胞自动机是一个拥有不同状态的元胞,例如“占居”(通过标记)、“空着”或者“染色”。基本自动机的集合称作复合自动机或者配置。每一个自动机都被它的环境(也就是相邻的元胞)刻画。自动机的动力学通过同步的变换规则来确定。冯·诺伊曼证明了,活系统的典型特征——它们趋向于复制自己,可以通过一个(平面中)200 000元胞的自动机来模拟,每一个元胞有29种可能的状态,四个正交的相邻细胞作为环境。^[5.49]

约翰·康威发展了这一观点。他的元胞自动机可以模拟活系统种群的生长、变化、死亡。一个简单的例子通过如下元胞同步规则来定义,元胞有两个可能的状态“占用”(标记)和“空着”:

- 1) 生存规则: 一个被占用的元胞有两个或三个被占用的相邻元胞,它保持不变。
- 2) 死亡规则: 一个元胞丢失它的标记,如果它有多于三个的相邻元胞(“种群过多”)或者不足两个相邻元胞(“孤立”)
- 3) 产生规则: 如果一个空的元胞恰好拥有三个被占用的相邻元胞,那么它得到一个标记。

图 5.23a 展示了一个配置在第三代中的“死亡”的构型,图 5.23b 给出了第二代后的“生存”。康威的理论有更惊人的结果,这些结果是通过计算机实验发现的。

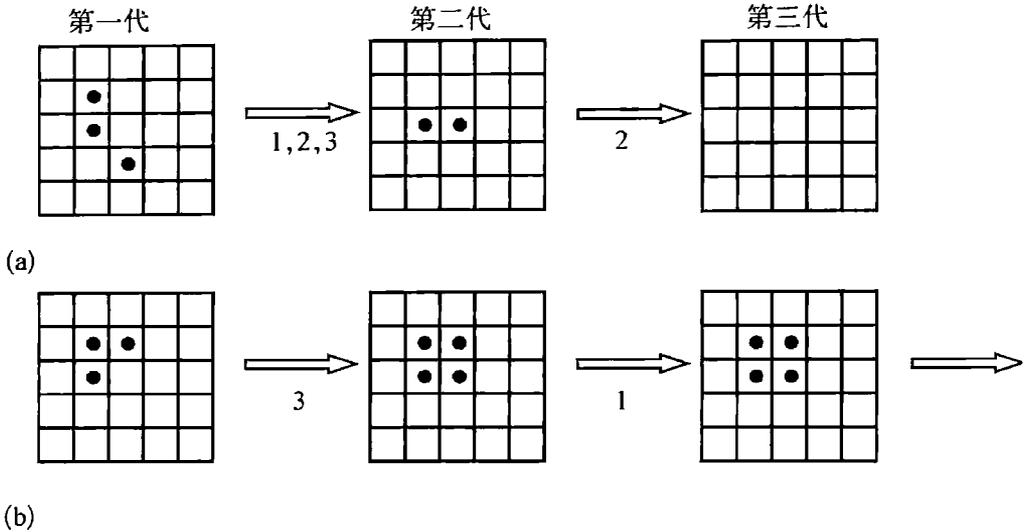


图 5.23 康威的元胞自动机模拟
(a) “死亡”;(b) “存活”。

元胞自动机不仅仅是漂亮的计算机游戏。它们实际上是复杂系统的离散量子化模型,用非线性微分方程来描述它们的演化动力学。再次想象像棋盘一样的平面。一维元胞自动机的状态包含细胞的有限串,每一个细胞取两种状态(“黑”(0)和“白”(1)),仅与最近的两个邻居相连,而且仅与邻居交换它的状态信息。一维自动机接下来的(稍后)状态是时空平面上的串,每一个串包含处于两种状态之一的细胞,处于何种状态取决于它们前面的(稍早)状态和它们邻居的状态。图 5.24b - e 给出了四个自动机 60 步内时间演化的情况。这样,一维元胞自动机的动力学由三变量的布尔函数来决定,每一个变量可以取值 0 或 1。^[5.50]

对于三个变量和两种取值,在最近的三个最近邻居位点共有 $2^3 = 8$ 种可能。在图 5.24a 中,它们按照三位二进制数排序。对于三个最近邻居位点中的一个,肯定有规则决定中间元胞的下一个状态。对于八个序列和两种可能状态,共有 $2^8 = 256$ 种可能的组合。这些规则组合之一决定了一维元胞自动机的动力学,如图 5.24a 所示。

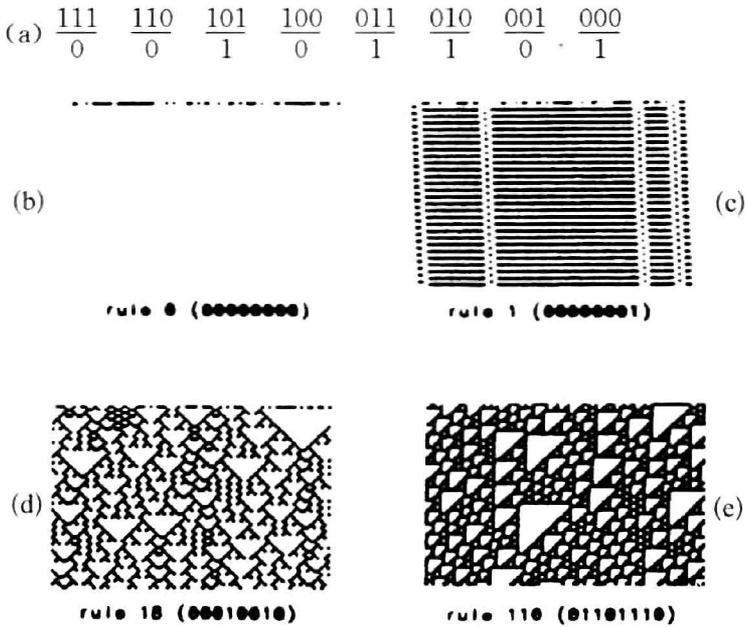


图 5.24 一维元胞自动机

(a) 动力学; (b)-(e) 吸引子。

每一个规则通过状态的八位二进制数刻画, 状态即是在随后的串中可取的每个细胞的状态。这些二进制数可以按照相应十进制数的顺序进行排序。

这些简单规则的时间演化, 决定了一维元胞自动机的特征, 从简单或随机的初始条件产生非常不同的元胞模式。根据斯蒂芬·沃尔弗拉姆的研究, 计算机实验表明演化的元胞模式所指向的以下类型的吸引子。数步之后, 第一类系统达到与初始状态无关的平衡均匀态。这一平衡的最终状态通过全白平面和相应的不动点吸引子显示出来(图 5.24b)。

第二类系统, 经过数步之后, 显示出恒定的或周期的演化模式, 这与初始条件相对独立。该模式的特定位置可能依赖于初始条件, 但不是全局模式结构自身(图 5.24c)。

在第三类中, 元胞自动机产生的模式看起来在网格上随机而不规则地传播(图 5.24d)。在第四类中, 演化模式和偶尔准有机的局部复杂结

构可以被观测到(图 5. 24e)。与第一、第二类自动机相比,第三、第四类中的模式对初始条件比较敏感。显然,这四类元胞自动机模拟非线性复杂系统的吸引子行为,这在自组织过程中是众所周知的事实。这让我们想起对材料的熟悉分类:固体、液体、气体、生物体——例如植物和动物。一般而言,元胞自动机探究方法确认了这样一个直觉的想法:复杂系统介于规则秩序(例如晶体和富勒烯)和完全不规则或噪声(例如热气体中的分子)之间。有机体和大脑高度复杂,但也不是完全有序或者完全随机和无序。^[5. 51]

显然,这四类元胞自动机模拟在自组织过程中周知的非线性复杂系统的吸引子行为。在前几章,我们已经看过许多物质、生命、心脑的演化中的许多例子。在第 7、第 8 章,我们会考虑人类社会进化的相似性。一般而言,自组织被看作复杂系统中的相变。微观元素的复杂非线性相互作用导致宏观模式出现。相应于数学上不同的吸引子,有不同的相变的最终模式。

图 2. 24a - e 中,已经对于流的不同吸引子进行了考察,流速是逐步加快的。这些流模式,与相应的元胞自动机的演化模式有许多相似之处。在最初的水平上,流到达了均匀的平衡态(“不动点”)。在较高速度时,可以观察到两个或多个顶点的分岔,相应于周期的和准周期的吸引子。最后,有序衰退为确定性混沌,它是复杂系统的分形吸引子。元胞自动机的类型三和类型四对于建立过程模型极为有趣。类型三提供了不规则、随机和噪声的演化模式。类型四表现了耗散系统的演化模式,这样的系统有时具有拟有机形式,可以在有机体和群体的进化中观察到。

从信息的角度看,每一类自动机的信息处理都有本质的不同。第一类自动机的模式形成完全独立于初始模式,因此初始条件的信息被迅速遗忘。最终的均一的平衡模式看不到它们的踪迹。在第二类自动机的振荡模式中,初始条件的某些信息得以保留,但仅限于局部的子结构。全局

振荡行为不依赖于初始条件。第三类自动机对初始条件的微小改变高度敏感。因此,它们表现出大范围的信息交流。依照蝴蝶效应,任何模式信息的局部改变都可以被传递到全局中最远的各部分。在第四类自动机中,信息的大范围交换是可能的,但是有时仅限于其模式的局部结构。信息处理的另一方面是可预测信息的丢失,或者用 KS 熵度量的每一类元胞自动机的预测非确定度的丢失。在第一类和第二类自动机的情况中,均一或振荡模式的最终状态是众所周知的,可以从过去的状态预测而且没有信息损失。在第三和第四类自动机的情况中,随机模式的预测有无限的不确定度,而在混沌结构的情况中,以有限的不确定度,未来状态的预测可以通过过去状态来计算。

对于前两种元胞自动机,预测未来的发展是容易的。对于第一类,元胞自动机经过有限步总演化为静态的均一模式,从不动点吸引子的意义上,在未来的步骤中总是重复这一模式。因为在早先的步骤中他们不保持关于元胞排列的任何信息,演化是不可逆:我们无法回去重建自动机实际上开始时的初始状态。对于第二类,对于所有未来的发展,重复模式的建立明显是可逆的。它保留了足够的信息使之可从任何步骤向前或者向后。在第三类的随机模式中,所有的互相关都衰退了,因此,演化是不可逆的。对于第四类局部复杂结构,相比于随机情况下的结构完全损失,我们也许有机会认识奇怪的吸引子(混沌吸引子),它们呈高度复杂的相关的模式。

在 256 种最简单一维元胞自动机(最近邻居,仅有两种细胞状态即两种颜色)中,仅有六种有可逆行为。它们仅仅产生在初始状态的简单重复的变化。在这些情况下,总可以从任何给定构型重新产生所有之前的构型。换句话说,可以调换过去和未来。如果我们增加元胞的状态到三,而不是二种(颜色),我们得到最近三个最近邻居位点的 $3^3 = 27$ 种可能性和巨大数量的 $3^{27} = 7\,625\,597\,484\,987$ 种一维元胞自动机。其中,有 1 800

种可逆自动机,因此从任何元胞构型开始,总可能产生之前所有步的构型。但是这 1 800 种可逆一维自动机中的一些不仅仅是初始状态的简单演绎性重复,而且表现出复杂的模式。因此,可逆的微观规则可以产生复杂的宏观行为。

例如,我们可以构造可逆的规则,甚至当我们上下颠倒的时候,仍然如此。因此,一维元胞自动机的规则受两步之前的颜色的影响。在图 5. 25 中,我们从 256 种最简单的一维自动机中选取基本规则 122。我们添加限制,元胞新的状态(颜色)应该被反转,如果两步之前细胞是黑的(1)。基于两步而非一步的知识,总可以确定未来或过去的元胞配置。

1	1	1	1	1	1	1	1
111	110	101	100	011	010	001	000
1	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0
111	110	101	100	011	010	001	000
0	1	1	1	1	0	1	0

图 5. 25 可逆元胞自动机的规则(122R)

短期发展的可逆性和不可逆性,是自然科学中的重要话题。经典物理学、相对论物理学、量子物理学的所有基础定律都是可逆的:它们对于时间的两个可能方向 t 和 $-t$ 是不变的。我们的日常经验看起来支持一个时间方向的不可逆的发展。按照热力学第二定律,增加的无序和随机性(“熵”)从封闭动力学系统的简单、有序的初始条件产生(与第 3. 2 节比较)。不可逆性是分子定律的微观可逆性的高概然体现。一些带可逆规则的元胞自动机产生随机性增加的模式,始于简单、有序的初始条件。在图 5. 26 中,规则 122R 的可逆元胞自动机可以始于全黑元胞或位于方框中央的完全有序模式中的粒子的初始条件。继续运行下去,按照第二定律,分布看起来变得越来越随机和不可逆。

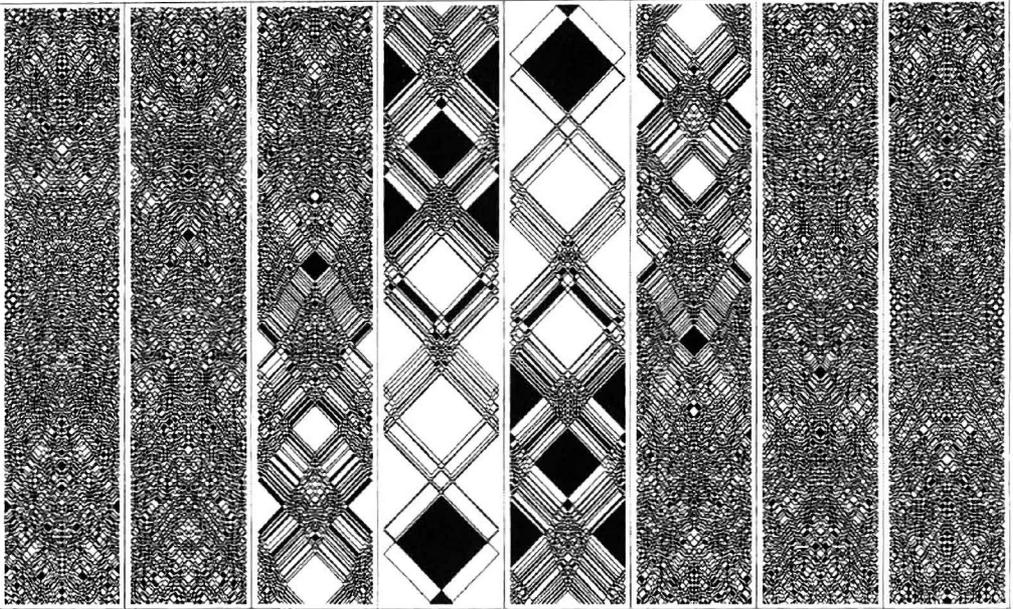


图 5.26 伴有随机模式生成的可逆元胞自动机说明了热力学第二定律^[5.52]

原理上,按照庞加莱在统计力学中关于可逆性的著名理论,可逆性是可能的,但是极难实现。通过起始于简单状态并追踪实际的演化,可以发现初始条件导致随机性降低的方向(图 5.26)。但是对于元胞自动机,返回的计算量和寻找这些条件不能被从简单到随机模式的实际演化所减少:计算不可还原性对应于临时的不可还原性和不可能性。因此,在元胞自动机的计算机实验中,我们得到热力学第二定律的计算对应物。

不同增加的复杂性和随机模式可以由不同的初始状态的同一简单规则元胞自动机产生。在很多情况下,没有有限的程序来预测复杂和随机模式的发展。由于计算不可还原性,算法复杂性(与第 5.2 节对比)是不可压缩的。在这种情况下,关于该系统的行为在未来如何变化的问题是不可判定的,因为不可能以有限的计算来判定它。显然,计算不可还原性是图灵的不可判定性基本问题关联的。元胞自动机的模式是否消失可以被看作图灵机停机问题。

计算不可还原性意味着,没有有限的方法来预测一个体系如何行为,

除非经过实际发展的几乎每一步。在科学史上,假设关于规律的精确知识允许精确地预测未来。即便是在混沌理论中,也有时间序列分析(与第2.6节比较)至少可以决定行为的未来趋势或吸引子。但是在随机性情况下,不存在到实际演化的捷径。斯蒂芬·沃尔弗拉姆指出复杂性科学基本上由计算不可还原性来刻画。^[5, 53]即便我们知道微观层面上的所有行为规律,我们还是不能够在宏观层面上预测随机系统的发展。大脑,作为一个复杂系统,由神经元微观层面上的简单的突触规则(如赫布规则)确定,这已经是多多少少众所周知的了。但是,没有神经细胞团的计算模式生成依赖于所有的细节。哲学地看,计算不可还原性看起来支持个体独立性:我们个人生活受许多不可预测的随机事件的影响。我们生活方式的模式是高度非线性的、复杂的和随机的。因此,没有捷径可以预测生活:如果我们想要了解生活,我们必须生活过。

从方法论的角度看,一维元胞自动机表达了相图的离散量子化模型,描述了以非线性微分方程演化的复杂系统的动力学行为,仅依赖于一个空间变量。将其限制在离散模型上的理由很多。非线性系统的复杂性往往太大以至于在合理的计算时间内无法进行数值近似计算。在这种情况下,离散模型的计算机实验至少给出一个发生了什么的大体想法和感觉;就像是实验室中的实验一样。

二维元胞自动机,已经被用在康威的生命游戏中,可以被看作是非线性演化的复杂系统的离散化模型,依赖于两个空间变量。显然,当非线性系统的复杂度增加的时候,元胞自动机是一个灵活有效的建模方法。通过解微分方程或者计算数值逼近的可能性,变得越来越没有希望。

复杂系统和 人工生命、人工 智能的演化

所有种类的复杂动力系统都可以用计算系统建模。因此,生命与智能的自然演化可以成为计算模型的重要范式。它们不再限于符号知识表征和人工智能(第 6.1 节)。它们的概念受到非线性动力学成功应用在一些领域的启发,包括固态物理学、自旋玻璃物理学、化学并行计算机、光学并行计算机、激光系统以及人脑(第 6.2 节)。元胞神经网络模型最近已经成为复杂性研究中有影响力的范式,并且正在信息与芯片技术领域实现应用。元胞神经网络已经带来了可视计算与模式形成的模拟神经计算领域的突破。元胞神经网络是高度复杂的计算系统,因为它包含着大量具有超级计算机的计算能力的并行焦平面阵列(第 6.3 节)。像数字计算机的通用图灵机模型那样,有一种用于模拟神经计算机建模的元胞神经网络通用机。元胞神经网络不仅用在模式识别,也用在不同类型模式形成的仿真。在计算机实验中通过经验观察找到动力复杂性的等级,也用

缜密的数学方法对其进行定义(第 6.4 节)。人工神经网络令人兴奋的应用已经存在于有机计算、神经仿生学、医学以及机器人学(第 6.5 节)。自然界的生命与智能决定性地依赖于有机体和大脑的演化。因此,具身生命与心智导致具身机器人的具身人工智能与具身人工生命(第 6.6 节)。

6.1 图灵和符号人工智能

当前使用在数据库应用、人工智能、软件工程以及计算机科学许多其他学科的符号知识表达,有其逻辑学和哲学渊源。亚里士多德(公元前 384—322)创立逻辑作为知识搜索中精确推理的手段。引入三段论作为正式形式,表示逻辑演绎的特定形式。根据亚里士多德的学说,本体论的主题是研究存在或可能存在于某些领域的事物的范畴。

更晚近以来,笛卡儿把人脑看作知识的仓库。识别是通过内部几何表达(*ideae*)与外部状况和事件之间的同构对应而成为可能。莱布尼茨深受这些传统的影响。他的“普遍数学”(mathesis universalis)要求一种通用的“形式语言”(lingua universalis)用来表达计算步骤中的人类思想,然后这些计算步骤又能够在机械计算机器中执行。“判断的艺术”(ars iudicandi)允许每个问题表示为数值符号之后用一个算法进行解决,“发明的艺术”(ars inveniendi)能够让使用者搜寻和枚举所需数据以及问题的解。在力学年代,知识表达被还原为机械计算步骤。

在 20 世纪,计算认知主义与图灵的可计算性理论一同出现。在他的功能主义思想里,计算机硬件被联系到人脑湿件(wetware)。心智被看作是计算机的软件。图灵证明,如果人类心智是可计算的,它就可以表达为一个图灵程序(丘奇论题),这用一台通用图灵机来计算,例如技术上可

使用一台常规用途的计算机。甚至不相信图灵强人工智能论题的人们，也常常主张经典计算认知主义的如下观点。计算过程在参考外部世界状况的符号表达之上操作(图 6.1)。这些形式表达应该遵守塔尔斯基的真理解对应论,如下所述。想象一个真实世界的状况 X_1 (比如桌子上有些盒子),被编码为一个符号表达式 $R_1 = \text{编码}(X_1)$ (比如,关于盒子在桌子上的一个描述)。如果符号表达式 R_1 被解码,那么我们就了解到它所表示的真实世界状况 X_1 ,即我们解码(R_1)= X_1 。真实世界的一次操作 T (比如用手操作桌子上的盒子)应该产生同样真实世界的结果 X_2 ,而无论它是在真实世界中还是仅仅在符号表达上执行: 解码(编码(T)(编码(X_1)))= $T(X_1) = X_2$ 。所以,根据笛卡儿传统,外部情况与其形式表达之间存在着一种同构。由于符号操作完全取决于算法,现实世界的过程被假定是完全受控的。因此,传统机器人是以完全确定的控制机制来操作的。

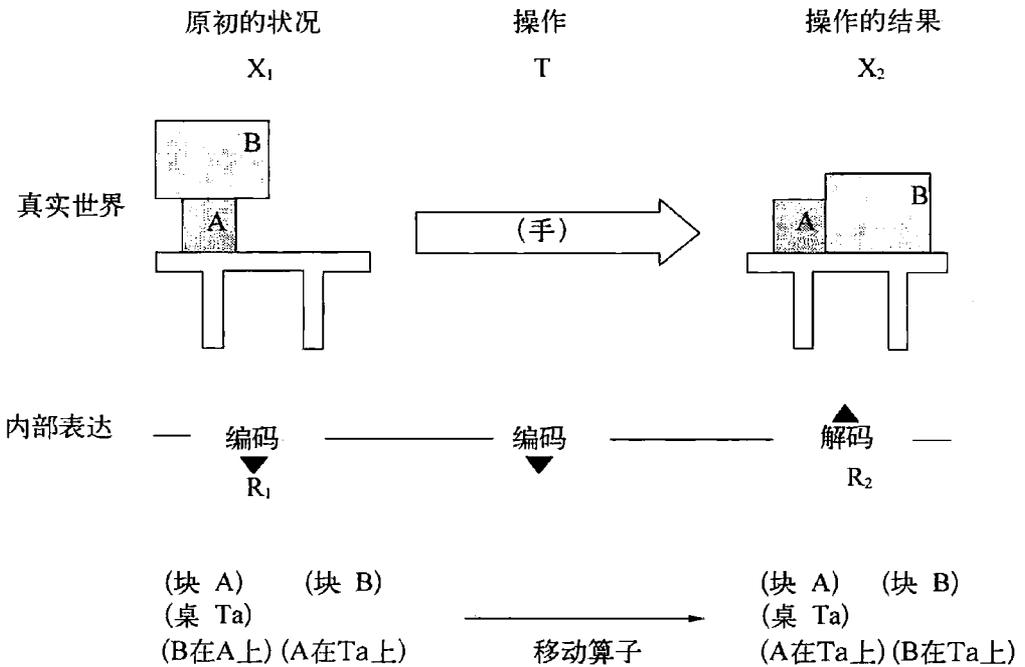


图 6.1 真实世界状况的符号表达^[6.1]

在人工智能发展中,符号知识表达和问题解决已经成为关键的概念。人工智能的第一个阶段(1957—1962)由启发式编程问题主导,这意味着在可能推导之树中自动寻找人类问题的解,用启发法控制和评价。^[6.2]一个例子是纽厄尔、肖和司马贺的《逻辑理论家》(1957),它为罗素和怀特海的《数学原理》前 38 条定理提供了证明。它的启发法是从许多人们在心理测试中使用的经验规则中提取出来的。

在 1962 年,这些仿真程序被通用化,而且放大为所谓的“通用问题解决者”(General Problem Solver, 缩写 GPS),被设想为人类问题解决的启发框架。但 GPS 只能解决形式化微观世界里的某些不重要问题。启发式程序设计的另一个例子,是寻找游戏取胜策略(象棋,棋盘)。首个模式识别程序(比如单词和符号的辞典式和句法式列表)是基于统计方法的。然而对通用认知仿真程序的欣快症式的信仰,终究没有被早期任何编程所证实。至少它的形而上学启发了麦肯锡(McCarthy)编程语言 LISP 的发明,它作为功能性程序设计语言被引入用来轻松处理符号列表,并且已经成为今天知识系统的最强大程序设计语言。

通用方法失败之后,人工智能研究者鼓吹特设的“语义信息处理”程序。人工智能第二阶段(1963—1967)被刻画为专门程序的发展,例如解决简单代数问题的 STUDENT,模拟物体模式识别的 ANALOGY,等等。这个阶段麻省理工学院的领袖人物马文·明斯基放弃心理仿真的主张:他说,“现行方法的特点是精选问题的特设解,给出的是复杂智力活动的假象”。成功的实用编程取决于专门知识首次得到强调,成为后来知识系统的核心理念。

对解决问题通用原则的研究还幸存在理论计算机科学中: J·A·鲁滨逊引入了所谓解题原则,基于谓词逻辑的演算和支持以逻辑反驳步骤找到证明的埃尔布朗完全性定理。

在第三阶段(1967—1972)进入人工智能实用和专门程序设计得到了

促进。其特征是专门化系统、知识表达方法的构造,以及对自然语言的兴趣。成功的数学应用程序 MACSYMA 的发明者 J·摩西阐明了人工智能领域的范式变化:“实际上,1967 年是我思想的转折点,那时有充分的感觉必须抛弃通用原理的旧观念……我为我称为专家至上的想法提出了一个证明。”

这个阶段另一个著名的例子是 DENDRAL 程序,它把一个化学家的专门知识用在质谱学以寻找分子的结构式。这个阶段一个典范式的例子是机器人的 SHRDLU 程序,它可以操纵不同积木的迷你世界。这个系统能够用英语理解并回答有关积木世界的问题,执行操纵积木世界的指令,将指令分解为一系列操作,理解做什么和为什么做,并用英语描述其行动。

第四阶段(1972—1977),对知识的描述、组织和处理成为结合人工智能工程学与哲学的中心范式。米切尔·费根鲍姆为所谓的专家系统开发提出“知识工程学”术语。一个实例是用于医学诊断法的 MYCIN 程序,该程序模拟一个拥有专门细菌感染医学知识的医生。

一个知识表达的新方法是马文·明斯基的框架思想。用于符号知识处理的一个新的程序设计语言是 PROLOG(“逻辑中的程序设计”),可以与 LISP 媲美。

人工智能的第五阶段(1977—1986)可以说是托马斯·库恩意义上的“常规”阶段,意味着专家系统范式得以实现而且得以商业化。工具被开发出来用于建造新的专家系统,像批量生产汽车那样。人工智能正在从实验室和哲学家的研究中出现,并成为世界范围知识产业的关键技术。

以下,重点放在专家系统,因为它们似乎是最有意思的哲学问题。^[6.3]专家系统是计算机程序,内建了使其能够以专家水平运行的知识和能力(例如化学里的 DENDRAL 和医学上的 MYCIN)。人类专家的推理,如图 6.2 所示。

有些专家系统甚至能够解释,它们为什么拒绝某些推理路径而选择

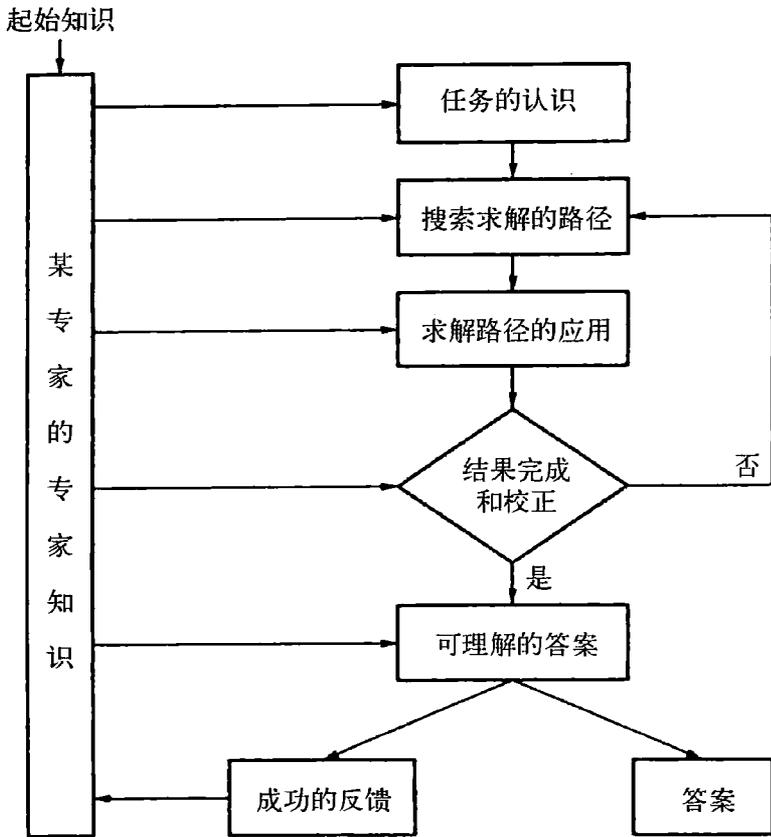


图 6.2 人类专家的推理

其他路径。设计者努力要达到这个目标,是因为他们理解专家系统的最终用途将取决于它对于使用者的可信度,而如果(专家系统)行为是透明并且可解释,其可信度会提高。

然而不像人类那样,专家系统的知识限于一个专门化的信息库而没有关于世界的普遍化和结构化知识。因此,专家系统具有一个在传统数值计算机程序与人类之间的中介功能(图 6.3)。



图 6.3 数值计算机与人类之间的专家系统

专家系统的架构包含以下组件：知识库，解题组件(介入系统)，解释组件，知识获取以及对话组件。它们的协调，如图 6.4 所示。^[6.4]

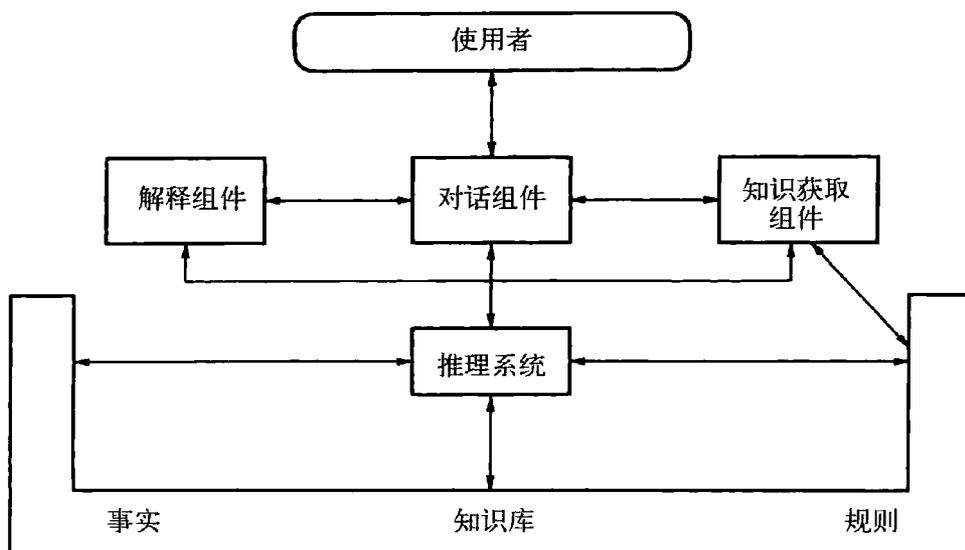


图 6.4 专家系统的架构

在专家系统的性能方面，知识是关键因素。知识有两类。第一类是写在教科书和专业期刊的那个领域的事实。对于一个领域的实践同等重要的是第二类知识，叫作启发式的知识，这是关于一个领域中好的实践和判断的知识。它是实验性的知识，一个人类专家从多年工作中取得的好的悟性。

顺便说明，知识库并不等于数据库。比如，一个医生的数据库是病历，包括病史、健康状况检查、给药以及药物反应。为了继续的诊断与治疗计划，这些数据必须通过医生的医学知识来进行解释。知识库是医生从其医学教育和多年实习、驻院、专业化以及实践中学到的。它包含事实、成见、信念以及启发式的知识。

启发式知识是最难以获得的，因为专家很少有自觉意识鉴别它是什么。因此受跨学科训练的知识工程师必须熟悉专家的规则，以在程序设计语言中表达它们，并将它们放进工作程序中。这个专家系统的组件叫做知识获取。其核心功能是如图 6.5 所示的专家系统知识处理。

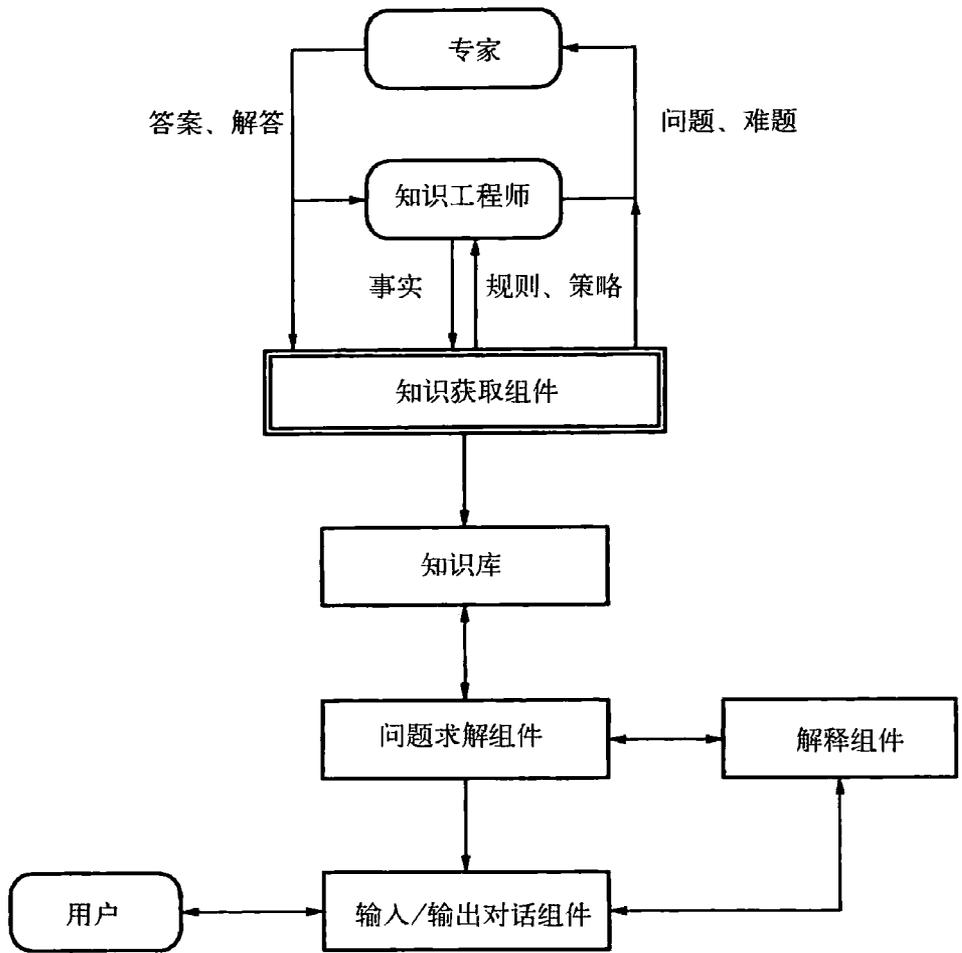


图 6.5 专家系统中的知识处理

知识表达的最重要方法是生产系统、逻辑、框架以及语义网络。知识之外,专家系统需要一个推论程序,即用于对知识和问题数据的结合进行理解和行动的推理方法。这类步骤独立于专门知识库而且是建立在不同的哲学方法论基础之上,这将会在后续的几个专家系统实例进行分析。

专家系统的解释组件有一个向用户解释流程步骤的任务。“如何”的问题旨在解释源自系统的事实或主张。“何时”的问题想要知道的是问题的原因或系统的秩序。

对话组件负责专家系统与用户的沟通。当然,自然语言处理器甚至可以提高不熟练用户的认可。

从技术的角度看,专家系统的局限是明显的。首先是知识表达的问题。工作领域的知识如何表达为计算机存储中的数据结构并支持问题解决?其次是知识利用的问题。如何设计推论引擎?第三是知识获取的问题。如何自动获取对于问题解决如此重要的知识,因而计算机能够从人到符号数据结构轻松传输专门知识?

最后而且最重要的专家系统问题是哲学问题。专家系统的专门化知识库,如何与影响人类专家决策与行动的通用而结构化的世界背景知识相结合?

因此,在决定一个手术的时候,医生也将把他对患者生活状况(比如,家庭,职业等)及其生命态度的非客观印象纳入考虑。尤其对于基本的生死问题,例如当前有关尊严与垂死的争议问题,一个医生的全部态度和见识以不可被编码的方式流入他的决策,尽管立法寻求规定行为的一般标准。比如,法律的专家系统也显示出相同的方面。虽然存在所有一致的规范系统,法官将最终寻找一种可能判决的形式范围,在其中,他将受到他自己的人生观与世界观的指导。这种向着主观性的进入不应抱怨为客观性的欠缺,而应该看作通往更人道的医学和司法的机会。不过,不排除未来计算机科学会致力于扩大基于知识的专家系统,这在当今仍然是非常专门化的。然而源自专家系统本质的内在局限是显而易见的。

专家系统是问题解决流程的技术性实现。因此,实际上存在的专家系统可以根据其意欲解决的特定问题来进行分类。图 6.6 说明了专家系统的最重要问题分类。

一个广受分析的问题类型是关于“诊断法”的,比如医学上。此类专家系统的输入包括测量数据、症状等,而其传递的输出是被数据规律识别

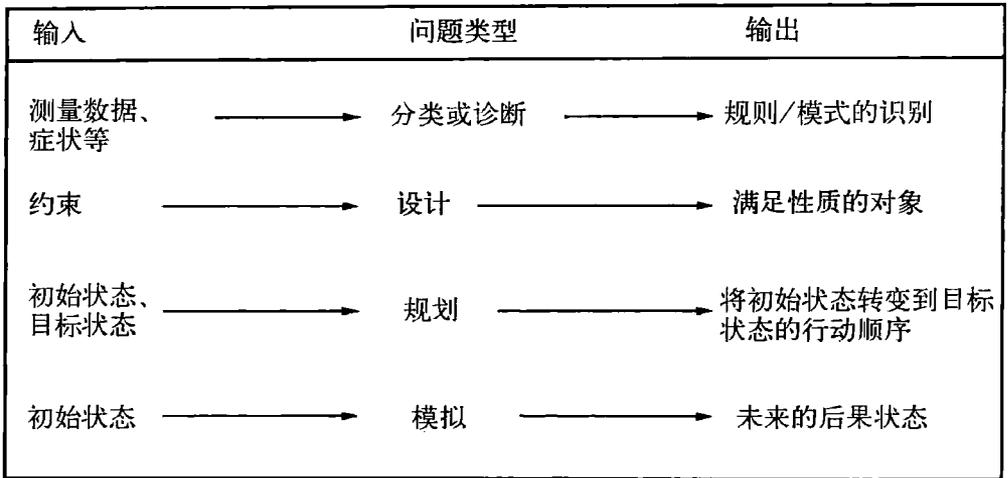


图 6.6 专家系统的问题类别

出来的模式。另一个问题类型是关于“设计”的。其问题是如何找到符合某些约束条件的产品。规划问题的解决,需要一个把初始状态转为目标状态的行动次序。仿真问题始于模型的初始状态,而其后续状态必须被计算和评价。^[6.5]

问题解决策略从产生规则推断,必须用所谓规则解释器来选择。如果有多项规则可以用,那么一个冲突解决策略可以决定哪个规则是合适的。例如,可能的规则可根据优先性或通用性进行排序。那么选择具有最高等级的优先性或针对性可能是合适的。

在一个推理中规则的结合,可以通过所谓前向或后向的链接来实现。前向链接从给定的数据或事实 A 开始并应用演绎机器直至推断出给定的目标 D(图 6.7)。

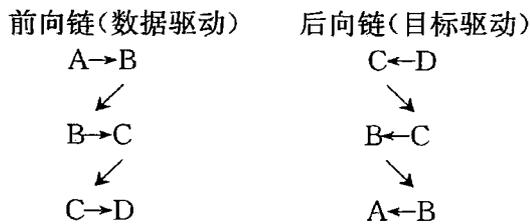


图 6.7 问题解决策略

与数据驱动的前向链接方法相反,后向链接法是目标导向的,这意味着从给定目标出发并努力找到可以推出目标的规则的规则的前提。因此,必须找到一个为“真”或可实现的前提 A(图 6.7)。

从方法论的角度看,专家系统的前向与后向链接步骤只不过是众所周知的古代逻辑学家与哲学家帕普斯用来寻找必要或充分证实理由的方法。毫不奇怪,几乎所有专家系统的推理策略都是建立在广为认知的哲学方法论基础之上。

今天,应用在人工智能的绝大多数哲学理论并非直接来自哲学文献,但这丝毫没有减少其哲学上的意义。尽管如此,著名专家系统的一些作者确实直接受到哲学家的影响。^[6.6]

要看到人工智能是哲学的逻辑和方法论,人们只需要详细考察某些专家系统。它们的问题类型决定了哪种策略适合于问题解决。一般而言,策略的目的是减少问题的复杂性。

DENDRAL 程序考虑解决办法的任务,是从包含化合物分子式以及化合物质谱学的数据确定分子结构。^[6.7]输出是可能分子式的排序列表。其问题解决策略被称为“产生与测试”,而且是用于产生有机分子拓扑结构的一种算法,这些拓扑结构不仅与给定的分子式相一致,也与关于在分子中最有可能解开分子键的规则相一致。简言之,我们可以说,程序是通过修剪不好的分枝而减少生成解决办法之树的复杂性。在方法论上它涉及到一个确证判据。

一般而言,不考虑化学应用,以下几点是重要的:

- a) 存在一个形式客体的集合,解决办法被包含在该集合之内。
- b) 存在一个发生器,即这个集合的一个完全枚举过程。
- c) 存在一个测试,即识别所产生要素是否属于解决办法集合的一个谓词。

这个通用办法被以下算法,即根据丘奇命题的如下递归函数所定义:

函数 GENERATE_AND_TEST(SET)

如果集合 SET 被检验为空集,

那么失败,

否则将 ELEM 赋值为集合 SET 的“随后”要素;

如果 ELEM 是目标要素,

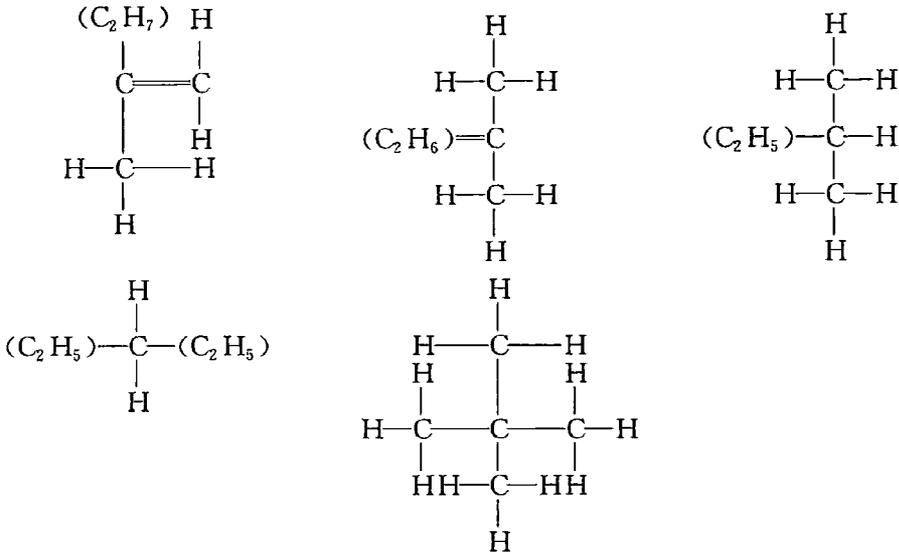
那么给它作为解,否则以集合 SET 重复这个函数

没有要素 ELEM。

要编译为人工智能程序设计语言 LISP,^[6,8]必须引入一些递归的辅助函数,比如 GENERATE(产生给定集合的一个要素),GOALP(是一个谓词函数,如果一个证明是解决办法集合的一部分,那么给出 T(真),否则为 NIL),SOLUTION(为“输出”项提供解决办法元素),而 REMOVE(给出减去给定要素的集合)。考虑用 LISP 语言的通用缩写,例如 DE(定义),COND(条件),EQ(方程),T(真),以及 LISP 规则(例如括弧规则)。当计算一个符号列表时,用 LISP 语言就会收到如下算法:

```
(DE GENERATE_AND_TEST(SET)
  (COND((EQ SET NIL)'FAIL)
    (T(LET(ELEM(GENERATE SET))
      (COND((GOALP ELEM)(SOLUTION ELEM))
        (T(GENERATE_AND_TEST
          REMOVE ELEM SET)))))))
```

第一步,从一个给定化学式(例如 C_5H_{12})会系统地产生所有化学结构,即:



一些化学结构被排除了,因为它们是不稳定或者相互矛盾的。在下一步,相应的质谱图就会被计算,并与经验获得的质谱图进行比较。这个比较就是程序的测试步骤。GENERATE_AND_TEST 因此技术上实现一个排除不可能而产生假设并测试可能变种的方法。

META-DENDRAL 程序是被设计用来改进 DENDRAL 程序的规则,考虑了在质谱仪中将打开分子键。所以 META-DENDRAL 使用 DENDRAL 程序加上曾被亨普尔苛刻地分析过的确证的谓词判据。

用于帮助医生诊断感染的 MYCIN 程序,是一种后向链接的推理系统。^[6.9]大约 300 种产品构成了关于血液细菌感染的 MYCIN 知识池。以下是典型:

如果感染是初级细菌学症,怀疑侵入点是胃肠道,而且培养场所是消过毒的场所之一,那么有证据认为有机体是拟杆菌属。

要利用此类知识,MYCIN 向后运行。对于 100 个可能的诊断假设,MYCIN 尝试达到源自实验室结果和临床观察的原始事实。由于

MYCIN 工作在推理难以确定的领域里,其开发者将合情推论和概率推理理论与基本产生设备进行结合。理论被用来为与/或树中的每个结论建立一个所谓确定性因素(图 6.8)。

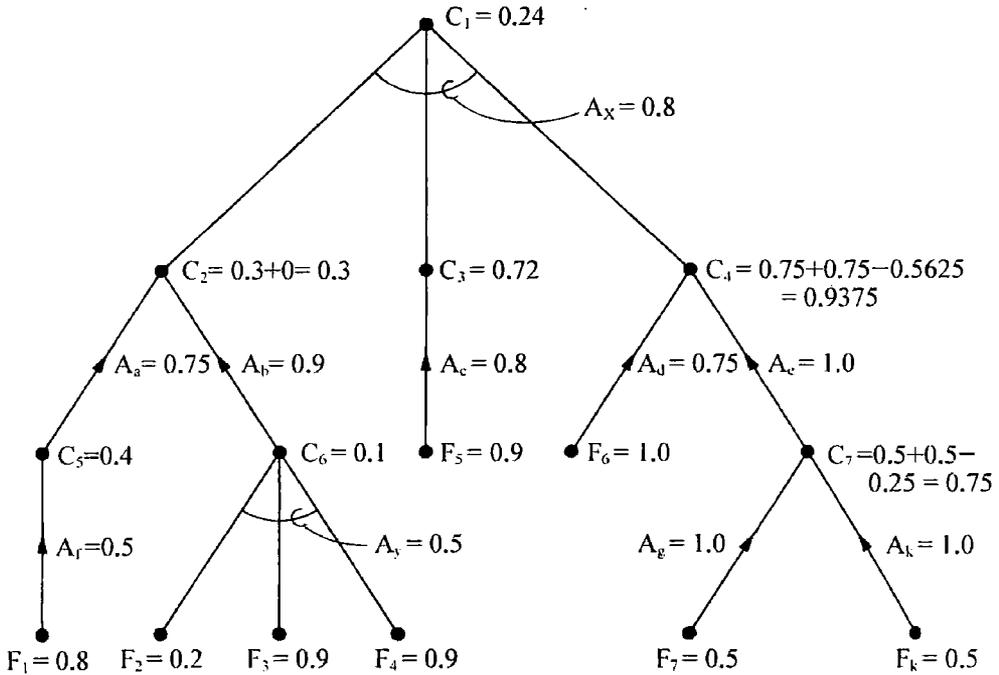


图 6.8 MYCIN 中的与/或树^[6.9]

这里 F_i 是由用户指派给一个事实的确定性因素, C_i 指代一个结论的确定性因素, 而 A_i 是推理规则期望的可信度。根据直接公式计算确定性因素是在“与节点”和“或节点”。如果一个确定性因素是 0.2 以下, 其对应事实的真相被认为是未知, 因而赋予 0 的值。

程序依赖多少有些可靠的事实计算归纳合理性的程度。这个思路让我们想起鲁道夫·卡尔纳普的归纳理论。卡尔纳普天生地不相信培根的一般归纳结论。结论总是演绎的。对此不需要波普尔主义者的建议。否则专家系统无法工作。尽管如此, 在像 MYCIN 那样的系统中采用概率方法使得系统对用户更透明。

另一方面, 可以说存在采用“假设-检验”策略的波普尔主义程序, 它

产生最有趣的假设和严格检验。一些程序有助于构造统计数据的线性因果解释。另一些程序则采用古代哲学家关于归纳推理非单调的认识(nonmonotonic),它意味着从一系列前提归纳得出的结论可能不符合那些前提始终如一的延伸。比如,鸟会飞,而且小鸟是鸟,所以我推断小鸟会飞,殊不知我也知道那只小鸟是一只鸵鸟。^[6.10]

另一种策略是把复杂问题分解为较简单部分或不那么复杂的子问题,如在乔治·波利亚的启发式数学指导书《怎样解题》中所用的那样。因此应用领域必须总是分解为一些独立部分。但是显然,一个复杂依存网络并不总是可以分解而不改变系统的原始状态。例如,考虑人类环境的生态网络或精神病医师需要分析的复杂精神依赖症。系统并非总是部分之和。

科学哲学中的一些特性,可以转译为知识系统的属性。如果一项研究广泛利用有关一个理论本质属性的理论概念,则其发现过程被描述为理论依赖(或“理论驱动”)。相反的观念,通常叫培根主义者,把大量数据作为出发点。那么发现过程就称作数据驱动。理论或数据驱动知识处理之间的区分,在人工智能也是广为人知的。

在此我要概述一下知识系统的一些程序,它们在不同学科实现了前述任务和优点。我的第一个例子是关于数学。AM^[6.11]是从数论递归并且(可以说)重新发现了概念的一个知识系统。与经验科学中的程序相反,AM的成功判据并不是概念与经验数据相一致,而是在产生实例、新问题等的能力方面它是“有意义的”。1977年用LISP写的一个程序,从诸如集合、列表、相等、操作以及启发式建议等基本概念出发,去指导发现过程。启发法是基于既有概念提出新任务并创造新概念。根据意义等级给新任务排序。由许多不同启发法提出的新任务,倾向于比单一规则提出的更为有意义。

使用这个方法来引导其在数学概念空间的搜索,AM界定了整数、乘法以及素数的概念,并且发现若干关于素数的命题(例如唯一析因定理)。

然而,更进一步的分析显示,模拟历史发现进程的需求不能得到维

持。AM 的成功决定性地依赖于 LISP 编程语言的特征。尽管如此,然而一项分析表明对人类研究进程的有意义模拟。

正如 LISP 名称所显示的那样,符号列表是系统地完成的。当两个列表是原子的而且其原子相等时,否则就是两个列表的表头相等而且剩余部分也相等时,两个列表被递归地定义为相等。用 LISP 语言,递归布尔函数被记为如下:

```
(DE LIST-EQUAL (XY)
  (COND((OR(ATOM X)(ATOM Y)
            (EQ X Y))
        (T(AND
            :
            (LIST-EQUAL(CAR X)(CAR Y))
            (LIST-EQUAL(CDR X)(CDR Y)))))))
```

这里 CAR 和 CDR 是从给定符号列表相应地整理表头和剩余列表的 LISP 基本算子。AM 的一个启发式泛化规则泛化了相等术语。如果两个列表是原子的而且其原子相等,那么两个列表被称为“广义相等”,否则剩余列表“广义相等”。用 LISP:

```
(DE L-E-1(XY)
  (COND((OR(ATOM X)(ATOM Y))
        (EQ X Y)
        (T(L-E-1(CDR X)(CDR Y))))))
```

由于泛化,所有相同长度的列表被看作是相等的。它们定义了一个叫做“数”的类。通过转换规则用 AM 模拟儿童对具体物体的发现过程。

引入附件作为两个列表的合并。通过一个用于从既有概念形成反转的启发式转换规则,发现了素数概念。AM 被 EURISKO(1983)沿用,它不仅能发现新概念,也能发现新启发法。

定量经验定律的发现,用叫做 BACON 的系列程序来分析。^[6.12] BACON 系统是以弗朗西斯·培根(Francis Bacon)的名字命名的,因为他们采用了培根有关科学推理本质的理念。它们是数据驱动的知识处理系统,收集数据、发现两个或以上变量之间的规律性,并测试定律。BACON 的基本方法中,没有引用所处理数据的语义内涵,也没有对数据结构作特别假设。如果人们对独立项有实验性的控制,“一次改变一项”的传统方法可以用来隔离每个独立项对依赖变量的影响。BACON 程序重新产生的物理学定律,包括玻意耳定律、开普勒第三定律、伽利略定律以及欧姆定律。

以知识系统做的这种研究至少遵循了这样的要求,不同学科的相关定律应该贯彻相同的方法论的和启发的框架条件。相应的知识系统不仅重新产生在不同历史背景下发现的某些定律,而且系统性地产生完整方法论意义上的概念范围并挑出有意思的应用。迄今为止最新的 BACON 程序也不只是数据驱动因而在严格意义上是“培根主义者”,而且也是理论驱动的。在其对称与守恒的理论要求里,它产生了(比如)动量守恒定律。

另一个系列程序能够从经验数据归纳出定性定律(GLAUBER, STAHL, DALTON)。这些程序也能为某种现象归纳结构与解释模型。定性定律通常是在化学里面。^[6.13]

机器与人类科学家之间的竞争并非有意为之。然而,对科学定律和理论进行系统性和结构性的分类,已经伴随着对科学定律及其发现条件的复杂性的洞察。

称为科学发现的不同活动具有多种方面,例如找到定量定律、产生定性定律、推断物质构成以及阐明结构模型。一个集成发现系统被构思为包含许多个体系统作为组件。每个组件接受一个或多个其他组件的输入。

比如,STAHL 专注于确定化学物质的构成,而 DALTON 则是关于一个反应所涉及的粒子数。所以,STAHL 可以看作是为 DALTON 意义上的详细结构模型提供基础。以这样的方式有可能开发越来越复杂的知识系统,来分析作为知识处理和解决问题的研究。

甚至在诸如研究的扩展框架内,我们还没有表达构成实验计划或新测量设备发明的机制。任何本质概念,有关使测量成为可能的实验安排,可被采纳为科学工具。在这种情况下,工具的发明与概念本身的发现是一致的。

也有专门考虑实验设计及其与其他科学研究活动之间互动的知识系统。图 6.9 是一个叫 KEKADA 的系统(由司马贺的一个研究团队发明),包括假说产生器、试验选择器、预期设定器,等等。^[6.14]它是开发来给生物化学的一个实验设计(1935 年克雷布斯的尿素循环发现)建模。像知识工程师那样,司马贺及其同事分析了克雷布斯的实验室记录本,定义了他方法论的研究规则并将其移植入一个类似 LISP 的程序设计语言中。

如果系统必须决定哪个任务要处理,问题选取者将会决定哪个问题应当开始工作。面临一个新问题时,假说产生器创造假说。假说或策略建议者将选择一个策略来执行。接着实验建议者会推荐一个要执行的实验。两种启发法可能都需要决策制定者。然后预期设定器设定一个期望而试验器执行实验。试验器的结果,由假说修改器和信心修改器进行解释。如果可行,问题产生器会在议事日程上增加一个新问题。如果实验结果违背了对它的期望,那么这个疑难现象的研究会被设置为一项任务,而且增加到议事日程里。

系统的每个组件都是由一张产生规则列表所定义的一个操作员。系统除了专门领域的启发法之外还包含通用规则,它们都是通用研究方法论的组成部分。值得注意的是,一条特别规则定义一种实验结果为“疑难现象”的情况。科学发现由此成为由问题解决启发法指导的进阶过程,而不是一次单独的“灵光闪现”或突然飞跃。知识系统的这些实例可以解释

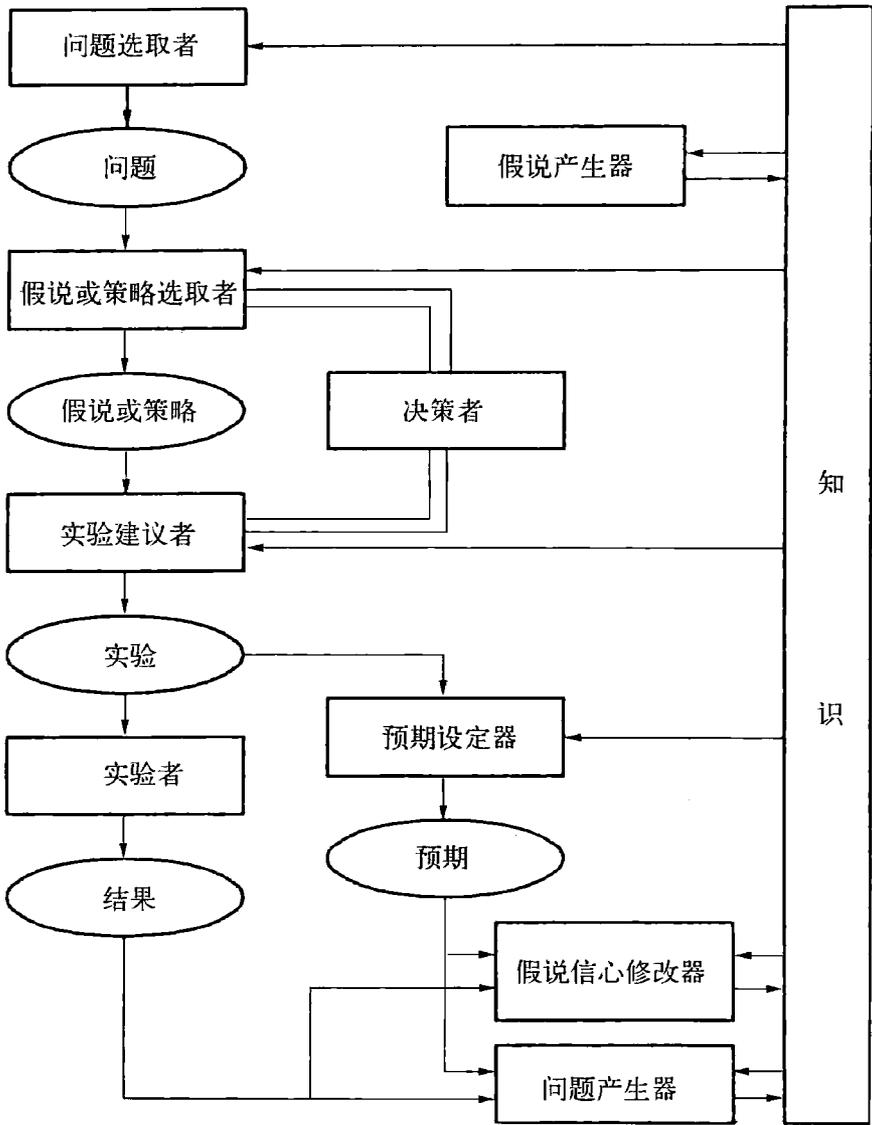


图 6.9 KEKADA 的架构^[6.14]

为科学哲学家研究的助手,在其意义上就比如 DENDRAL 程序是一个化学家的实验室助手。它们能够调查由某些启发规则所产生的可能定律的整个空间。但它们只是精确的助手,而不是主人。它们的“灵光闪现”,系统所能识别的那种“惊奇”,是框架依赖的,由主人赋予。

推动了人工智能的早期研究的图灵问题怎么样? 机器会“思考”吗?

机器有“智能”吗？以我之见，这个问题对于计算机技术而言是个形而上学问题，因为“思考”和“智能”在计算机科学或人工智能都不是充分界定的概念。

这是今天我们能够说的全部。如果一个程序生成一个可以解释为新概念的结构，那么所使用的转换规则隐含了这个概念及其相应的数据结构。一个指导这些规则应用的算法，制造了这些隐含给定的概念以及清晰的数据结构。在关于人工智能的哲学讨论中，人工智能术语引起了更多的混乱，它是在技术的意义被引入，但却涉及某些古老而精致的哲学与心理学含义。而在其他科学里，我们必须依靠传统术语和观念，而它们可能是高度混乱的，如果是从它们的技术背景抽象而来的话。比如，一个例子就是“人工智能”中的“智能”观念。

有时困扰哲学家的一个术语是在人工智能中“知识”的使用。我再次强调在术语“以知识为基础的系统”（知识系统）中的“知识”具有一种技术的意涵，而不声称解释所有哲学的、心理学的、或社会学的知识概念。在

作为实用计算机科学的人工智能技术里，不涉及哲学上的还原论。

在所谓“知识系统”中的“知识处理”意味着一种新型的复杂信息处理，必须区别于较早仅仅数值式的数据处理。它涉及转译和解释的复杂转换规则，在程序设计语言（今天的 LISP 或 PROLOG）等级结构的高层得到刻画。这个层次接近于自然语言，但当然与自然语言不同，而且只掌握人类知识广泛涵意的局部方面（图 6.10）。尽管如此，知识

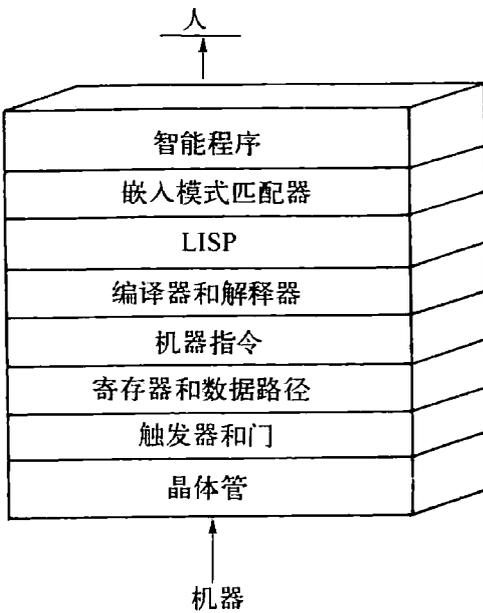


图 6.10 硬件层次和软件层次

处理还停留在受程序控制而且还处于莱布尼茨的思想机器化的传统当中。^[6.15]

6.2 神经网络和协同计算机

借由程序控制的计算机实现思维的算法机械化已经面临着一些严重的障碍,是不可能由计算机能力的简单增长而克服的。例如,模式识别、运动协调以及人类学习等其他复杂任务,不可能由图灵类计算机程序来把握。元胞自动机和人工神经网络利用了复杂动态系统的原理。

历史上,现代元胞自动机的发展可追溯到冯·诺伊曼关于自繁殖自动机的思想。除了自繁殖以外,还有另一个特征,与传统计算机相反,它对于自然复杂系统显得是根本性的。人的大脑具有学习的能力,例如,通过感知进行学习。在麦卡洛克-皮茨网络提供的大脑的一级逻辑模型中,人工神经元的功能对于所有时间都是不变的。麦卡洛克和皮茨成功地揭示出,这一类型的形式神经网络可以计算任何有限的逻辑表示。

但是,为了使得神经计算机能够执行复杂的任务,有必要去发现自组织的机制,使得神经网络进行学习。唐纳德·赫布 1949 年提出的第一个神经生理学习规则,在神经计算机的发展中具有重要意义。神经元突触的敏感性并非一成不变的,而是在改变着自身,以有利于重复出过去已经反复出现过的发放模式。

1958 年,罗森布拉特设计了第一台学习神经计算机,它以“感知机”而闻名。^[6.16]罗森布拉特原先是一位生理学家,专注于人的学习过程的生理学活动。他设计的学习机,具有复杂的适应性行为,对于工程师和物理学家都是极有兴趣的。因此,用不着惊奇,生理学家的新颖思想被工程师抓住了,那些工程师对机器人和计算机技术比对于模拟人脑中的过程

具有更大的兴趣。从技术的观点来看,神经计算机的学习程序是否与心-脑系统的学习过程类似不是根本性的。它们必须在管理复杂的适应行为任务时是有效的,但是可以利用完全不同于已知的生物进化中的方法。

罗森布拉特的神经计算机,是一种前馈网络,采用二进制阈值单元,有三个层次。第一层是感知面叫做“视网膜”,它由刺激细胞(S单元)构成。S单元与中间层相联接,其间的权重固定,在学习巾不发生变化。中间层的元素叫做联想细胞(A单元)。每一A单元都有某些S单元的固定权重的输入。换言之,一些S单元将其输出投射到一个A单元上。一个S单元还可以将其输出投射到几个A单元上。中间层是完全与输出层相联接的,输出层的元素叫做反应细胞(R单元)。在中间层与输出层之间的权重是变量,因此使得系统能够学习。

感知机是一种神经计算机,它可以将感知模式分类成可能的若干组。在两组的情况下,每一R单元学习以激活和去活方式去区别输入模式。感知机的学习程序是受指导的。因此,所希望的每一R单元的状态(激活或未被激活),所相应的要学习的特定模式必须是预先清楚认识了。要学习的模式提供给了该网络,在中间层和输出层之间的权重按照学习规则进行修改。重复此程序,直至所有的模式产生出正确的输出。

学习程序是一种简单的算法:对输出层的每一元素 i ,由一定模式产生出来的实际输出 o_i ,与所希望的输出 d_i 相比较。如果 $o_i = d_i$,那么该模式就已正确地分类。如果所希望的输出 d_i 等于1以及实际输出 o_i 等于0,那么在时刻 t 的所有的权重 $\omega_{ij}(t)$ 以及激活单元($o_j > 0$)在随后的步骤 $t+1$ 中被增大,或更正式地示为 $\omega_{ij}(t+1) = \omega_{ij}(t) + \sigma o_j$ 。常数 σ 是学习速率,它控制着学习速度。如果所希望的输出等于0,实际输出等于1,那么所有具有激活元素的权重被减小,或更正式地示为 $\omega_{ij}(t+1) = \omega_{ij}(t) - \sigma o_j$ 。

感知机起初看来是以神经网络开创了一个计算机技术的新时代，它可以干任何事。感知机小组早期的文章中进行了夸张。但是，1969年，尖锐的批评使得这种早期热情消失了。那一年，马文·明斯基和西摩·佩珀特出版了一本名著《感知机》，书中以数学精确性讨论了感知机的局限性。^[6, 17]对于这一分析的反应是，大多数研究小组都放弃了它们对于神经网络和复杂系统探究方式的兴趣，而转向经典的人工智能和计算机技术，在此看来比感知机迷们的“猜测”要更有益。

但是这种1969年以后的科学共同体的态度，当然是又一次反应过度了。无批判的热情和无批判的谴责，对于科学的演化都是不合适的做法。达尔文进化用了数百万年，才使得我们的大脑具有了模式识别的能力。如果我们的工程师只用几年就成功地构造起来类似的神经计算机，那就是奇迹了。

关键是随后的一些问题。感知机能够干什么？它不能干什么，为何有此局限性？回答这些问题的一个基本步骤是明斯基和佩珀特证明的所谓感知机收敛定理。它保证了原则上可由此种网络学会并可在有限的学习步骤中找到的解。在这种意义上，系统收敛到一个解已经得到了证明。

但是引出了的问题是，特定的解是否原则上可以用感知机进行学会。一般而言，我们必须确定适用于感知机的问题类型。一些简单的问题表明，感知机并非如最初热情中所相信的那样是通用的。例如，感知机是不可能区别偶数和奇数的。一个特例是所谓的奇偶性问题对于初等逻辑的如下应用。

感知机不能学习异或(缩写为 XOR)。这种无法解决的认知任务，是感知机应用于人工智能的一个严重的局限。此原因容易说明。异或门对于 $x \text{ XOR } y$ ，仅当或 x 或 y 为真时输出为真，并非 x 和 y 都为真时为“真”。(或门对于 $x \text{ OR } y$ ，仅当 x 和 y 都为假时输出为“假”，否则为真。)如下的表提供了布尔函数 OR 和 XOR 的值：

x	y	xXORy	xORy
1	1	0	1
1	0	1	1
0	1	1	1
0	0	0	0

现在,设想一个网络,有两个输入单元 x 和 y ,以及一个输出单元 z ,它们可以采取状态 1(激活)和 0(未激活)。要模拟 XOR,对于一个偶的输入(两个输入单元都是激活的或都是未激活的),输出应该为 0,而对于一个奇的输入(一个单元是激活的,另一个是未激活的),输出应该为 1。在图 6.11a, b 中 OR 和 XOR 的可能输入构型示意在一个坐标系中,其中输入 x 和 y 作为坐标。

坐标 x 和 y 的每一对 (x, y) 具有相应的值 z ,它是用白点(0)或黑点(1)来标记的。一个线性的阈值元素 Θ 计算加权输入 x 和 y ,权重是 w_1 和 w_2 ,形式上即是 $\Theta = w_1x + w_2y$ 。一个简单的求导提供了一个直线方程,示意在图 6.11a, b 中。直线的位置是由权重 w_1 和 w_2 确定的。它将阈值元素的激活态和未激活态隔离开来。

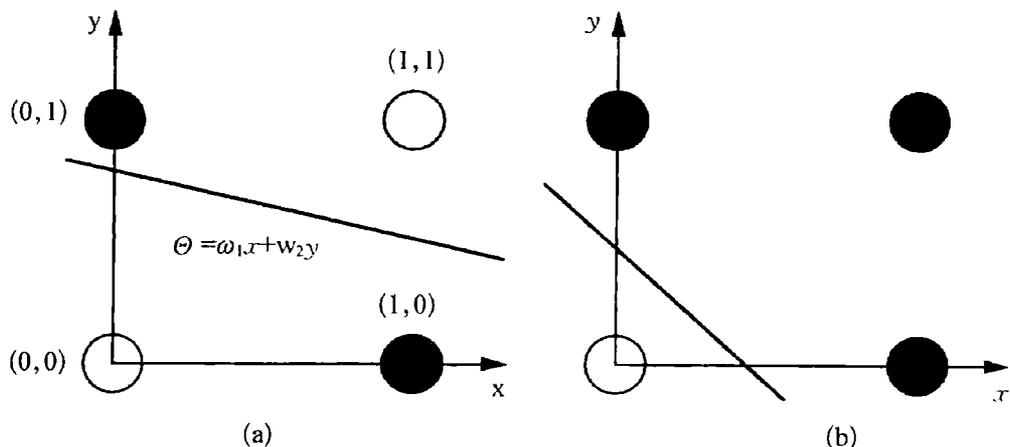


图 6.11 XOR 问题和 OR 问题的求解

激活态与未激活态的线性隔离:(a) 对于 XOR 问题是不可能的;(b) 对于 OR 问题是可能的;

为了求解(“学习”)OR 问题或 XOR 问题,权重 w_1 和 w_2 必须以这样的方式加以调整,使点 (x, y) 以及值 $z = 1$ 与具有 0 值的点隔离开。这种线性隔离对于 OR 问题(图 6. 11b)从几何上是可能的,但是对于 XOR 问题是不可能的。一般而言,由感知机对于输入模式的分类,是限制在线性隔离的模式。

这种结果容易被推广到两个以上输入单元的网络和真值。许多问题,在它们是线性不可隔离的意义上,类似于 XOR。实际上大多数有趣的计算问题都具有这种特征。XOR 问题可以由加上一个隐单元到输入与输出相关联的网络中来解决(见图 6. 11c)。

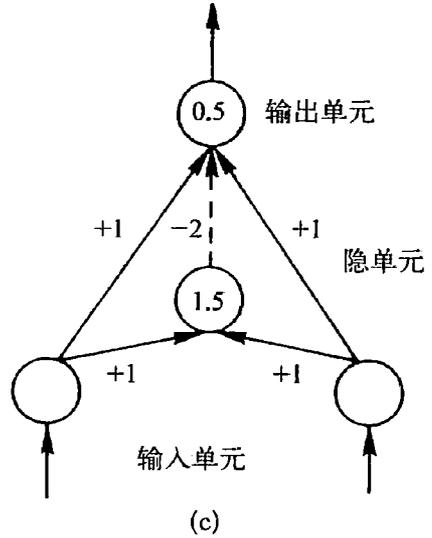


图 6. 11 XOR 问题和 OR 问题的求解

(c) XOR 问题可由具有隐单元的网络来解决;

当两个输入都是 0 时,具有正阈值的隐含中间单元就关闭了。一个 0 信号到达输出,以及由于在这种情况下阈值为正,所以输出为 0。如果两个输入中只有一个为 1,隐单元保持关闭,输出单元由

输入和输出之间的直接关联而接通。最后,当两个输入都是 1,隐单元发放到 1,并以负的权重 -2 抑制了输出的激活。

因此,隐单元允许某种适当的内部表示。XOR 问题已经成为一个在三维坐标系中用二维阈值平面进行线性分隔的问题,此时三维坐标系以输出单元的 3 个输入为坐标。分隔是可能的,因为输入 $(1, 1)$ 现在 z 平面上移动到了点 $(1, 1, 1)$ (图 6. 11d)。

一台感知机只有一个中间层,它是可以学习的处理元素。对于多层网络,问题是,对于与外界没有关联的多层神经元,产生的错误是不可能直接察觉的。错误可以是直接在输出层和其下的中间层之间产生的。

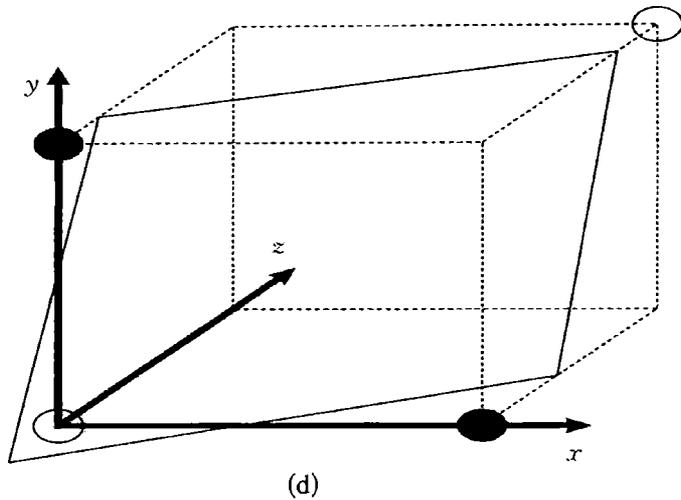


图 6.11 XOR 问题和 OR 问题的求解

(d) 对 XOR 问题,用二维阈值平面进行线性分隔。

多层神经网络可能具有的表示信息能力和问题求解的能力,取决于学习层的数目和在这些层中的单元数目。于是,对于神经计算机的一个至关重要的问题就是要研究计算的复杂性,因为神经网络的复杂性的增加是从感知机的局限性中走出来的方式。

在第 4.2 节中,我们已经讨论了在多层神经网络中的后向传播(图 4.17)。后向传播的学习算法,使得我们去定义甚至处于隐含层上的神经元的错误信号。输出层上的错误,是递归地向后传播给下面的层次的。该算法是能够构造具有许多隐含层的网络的,其所含神经元能够进行学习。比起单层网络,多层网络在其隐含层中可以表示多得多的信息,所以后向传播网络对于克服感知机的局限性是非常有力的模型。

但是,后向传播仅仅从技术上提供了成功的模型,这些模型一般并不与生物进化所产生的神经网络相类似。它们的权重的调整看来是很不同于所知道的生物突触的行为。然而,计算机技术目的并不在于模拟大脑,而是在合理的时间内实现有效的问题求解。另一方面,我们必须放弃小孩式的幻想,认为自然是类似上帝的工程师,进化中总是在求最好的

解。正如我们在前面的章节已经强调的，自然中没有集中化的控制和编程单元。存在着的，常常是局部的解，它们一般并非是“最优的”解。

1988 年，前馈网络的技术应用，由错误后向传播方法进行的训练，由戈尔曼和谢伊诺夫斯基设计来区别岩石与矿石的声呐回声。甚至用受过训练的人耳来承担此种任务也是相当困难的，而这对于海底的工程是相当重要的，海底工程面临着设计能区别爆炸矿石和岩石的声呐系统。这种目的的网络的构造中，输入层有 60 个单元、隐含层有 1—24 个单元以及 2 个输出单元，每一个代表将要进行区别的原型“矿石”或“岩石”(图 6.12)。^[6.18]

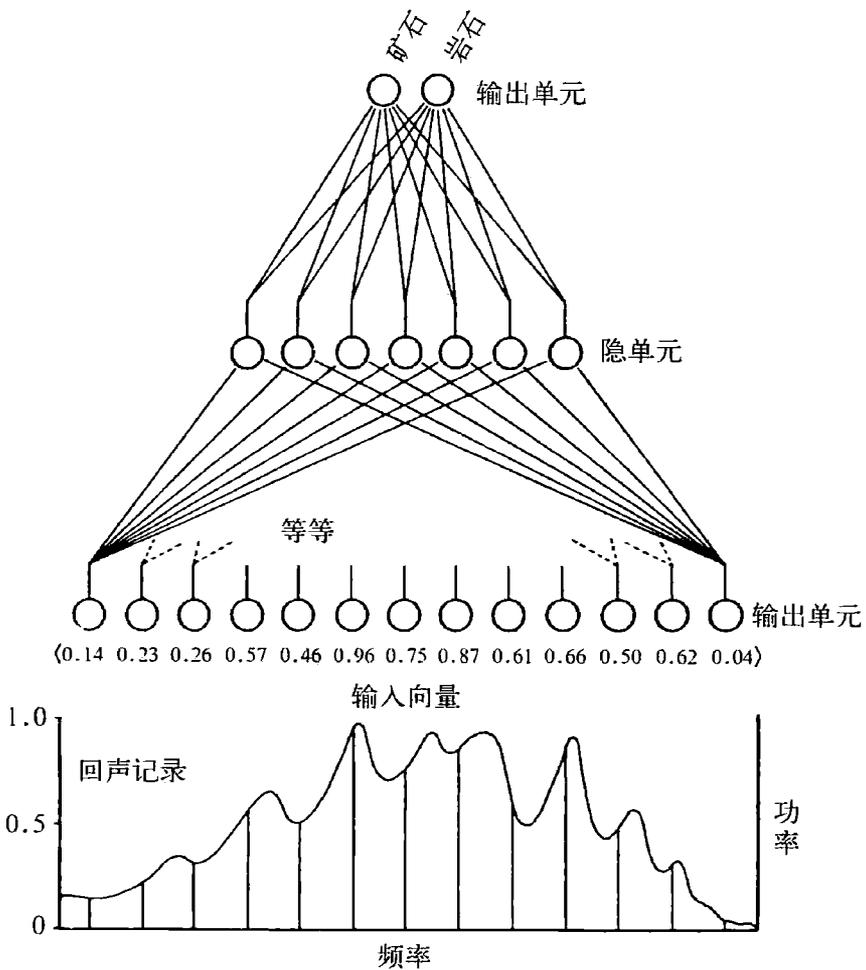


图 6.12 用神经网络区分岩石和矿石的声呐回声^[6.18]

最初,一定的声呐回声是用频率分析器来处理的,它分解成 60 个不同的频带。每一覆盖间隔的值域在 0 和 1 之间。这 60 个值是一个输入向量的组分,输入向量给予相应的输入单元。它们由隐单元进行变换,导致了两个输出单元之一的激活,这里具有的值也在 0 和 1 之间。因此在一个经过训练的很好调节了权重的网络中,一种矿石的回声导致输出信号(1, 0),而岩石的回声则具有输出信号(0, 1)。

为了训练此网络,我们必须向它输入矿石和岩石回声的样品。在每一种情况下,输出单元的实际值,都按照相应的输入,进行了测量并与预期值进行比较。其差异是错误信号,引发单元中的权重发生小的变化。用这种梯度下降的程序,网络的权重就缓慢地调整到正确的水平上。

戈尔曼和谢伊诺夫斯基的矿石-岩石网络,是复杂系统对于人工智能的一种应用。当然,它并没有声称,此系统以模拟人的大脑来进行区分像“矿石”和“岩石”这样两个概念。但是,我们可以说,这种技术系统也具有某种内部表示,即表示了作为其隐含层中原型矢量的这两个概念。在这种限制的意义上,人工系统是有“智能”的,因为它可以解决这样的任务:在人的大脑情况下是用智能来进行评价的任务。不过,人工网络并不局限于对两个概念进行区分。1986 年,谢伊诺夫斯基和罗森伯格设计了一种叫做 NETalk 的网络,它被教会如何阅读。它采取从英语教科书中形成的字符串,并将它们转化成音素串以可以输入到语音合成器中。惊人的事实并不是它像小孩似的口吃的声音,在科普书中它已经被赞扬成壮丽的成功。NETalk 的重要能力是对于若干发音概念的内部表示。对于字母表中的每一字母,至少有一个音素指定给它。对于许多字母,其中有若干音素需要标记,这取决于词汇的上下文。

谢伊诺夫斯基和罗森伯格运用了 3 层前馈网络,它有一个输入层、一个中间隐含层和一个输出层。尽管后向传播与生物学大脑中“自然地”实现颇为不同,但与其他解相比,它都表现为最快的学习程序。输入层注

视课文的七字符窗口,例如,图 6.13a 中的短语“The_phone_is_”中的词“phone”。每一个七字符都被 29 个人工神经元相继地进行了分析,每一神经元代表了字母表中的一个字母,也包括括号和标点。因此,正好是每一具有 29 个元素的神经子系统的神经元被激活。

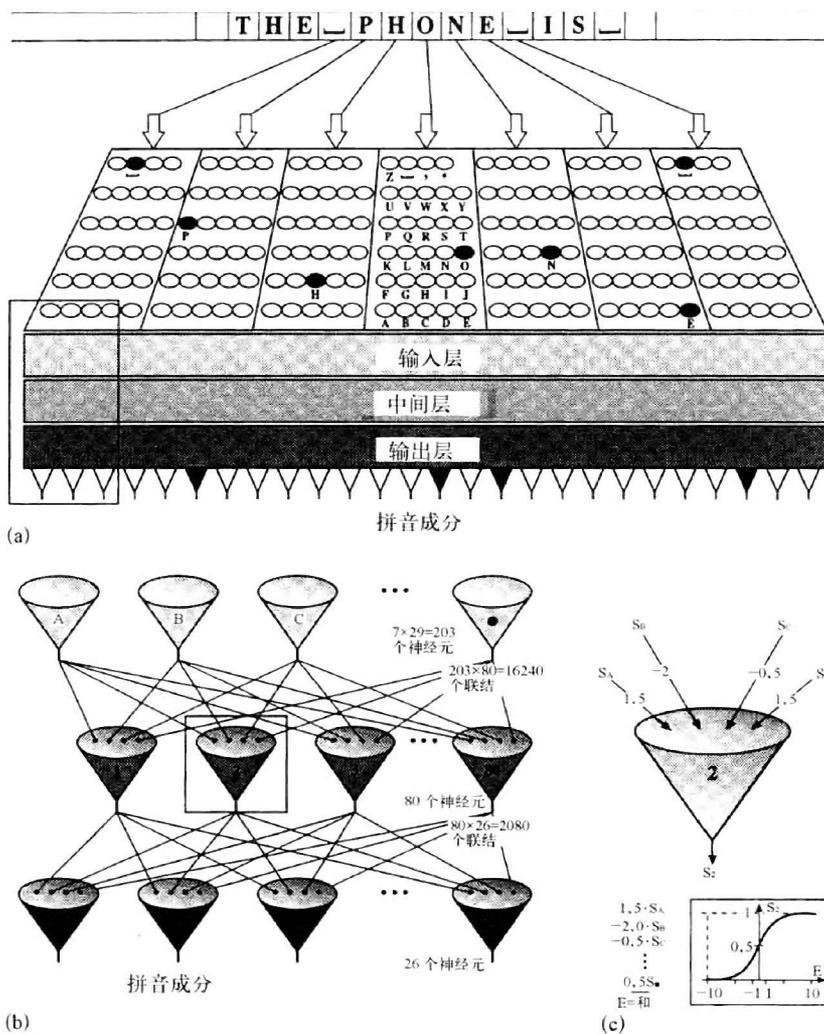


图 6.13 NETalk 网络

(a) NETalk 的构造;(b) 与神经相互作用;(c) 神经激活。[6.19]

输出层包括 26 个神经元,每一个神经元表示一个发音组分。对于拼音的位置有 6 个组分,发音有 8 个组分,音高有 3 个组分,标点法有 4 个

组分,重读和音节划分有 5 个组分。于是,从这 4 组组分中,每一声音都有 4 种特征。输出层有 $7 \times 29 = 203$ 个神经元,与 80 个隐含层的内部神经元联结起来,它又是与输出层的 26 个神经元相互联结的(图 6. 13b)。在同一个层中的神经元是不联结的。输入层和输出层的神经元也是不直接联结的。

隐含层的内部神经元接收来自 203 个输入神经元的信号,但是只把 26 个信号送给输出层。由于内部神经元是阈值单元,具有阈值 T_1, \dots, T_8 ,输出是乘以特定权重的,这些乘积之和的大小决定了此神经元是否激活(图 6. 13c)。现实中,激活的发生是按照一个连续的“S 型曲线”,并非某种数字跃迁。^[6. 19]

在最初,权重是随机固定的。因此,NETalk 始于无意义的结结巴巴的发音。在学习阶段,NETalk 运用了特殊的儿童课文,其拼音是人人皆知的。随机的声音与所希望的声音进行比较,权重由后向传播进行校正。令人瞩目的是,这种程序是一种自组织,而不是一种基于规则的拼音程序。对于由实际输出来近似所希望的输出所引起的权重改变,仅仅存在一种总体上的要求。经过对于小孩课文运行 10 遍以后,网络进行的拼音已可以被理解。经过 50 遍以后,就只有 5% 的错误了。在这一阶段,对于未知的儿童课文的拼音,错误也只有 22%。

迄今,像 NETalk 这样的网络还必须用传统的冯·诺伊曼计算机来模拟,因为还没有可得的复杂网络的硬件。因此,每一神经元必须顺序进行计算。甚至在今天,自组织复杂网络的原理还主要是在软件上实现的,而不是在硬件上实现的。然而,我仍将谈论“神经计算机”,因为硬件的实现只是一个未来的技术发展问题,有赖于诸如固体材料或光学程序这样的新技术,而不是原则性的理论局限问题。

由神经网络进行的映射,看来是颇为成功的,用于财政、保险和股票交易预测中是有利可图的。原因在于,对于股票行情的短期预测是

以混沌时间序列为基础的,如果预测的时段减小,那么它就变得越来越混沌。

常规的统计程序仅仅在长期预测中才是成功的,它假定了股票的发展可以平稳进行,而又不丢失相关信息。好的统计程序的精确性在 60% 和 75% 之间。但是,短期的预测则是颇为有限的。传统的统计程序为了平稳股市的发展,必须要忽略短期预测的基本特性,即经常发生着的小的交换涨落。常规的统计程序中,相关计算因子必须明确给出。一个经过良好训练并适当设计的神经网络能够识别出关联因子,而毋需明确的编程。它能够以自组织的程序权衡输入数据并减少预测的错误。而且,它可以采取改变系统环境的条件,而不像计算机程序是必须由编程者明确改变。为了设计一个用于股票预测的神经网络,必须对股市数据进行二进制编码使之作为输入数据。输入向量的构成中,包括若干分向量,它们代表着交易量,从昨天来的绝对变化,变化方向,从前天来的变化方向,以及与昨天相比的大于 1% 的相关变化。如果输入向量具有固定的长度,例如 40 个单元,那么分向量的长度可以有些不同,依赖于它们所希望的相关。该系统可以有两个输出单元。左边一个激活,标志了股票值的减少,而右边一个激活,则标志了增加。

在学习阶段,网络中输入的是一定时期实际上的每天的交易率,例如对于 1989 年 2 月 9 日至 1989 年 4 月 18 日。以这种学习数据为基础,该网络对于后面的 19 天的发展进行预测。预测结果与实际曲线进行比较,以衡量该系统的精确性。已经用后向传播方法对于几个多层结构进行了考察。它们以自组织方式发展起来对于预测的特定的全面启发性。例如,如果一次预测接近该日期以后某天的实际值,那么错误就是相对小的。这种(经验规则)的启发方式,在于这一事实,行情趋势的变化比起它保持不变更为不可能。图 6.14a, b 示意了,预测曲线(+)和对于(德国商业银行)、(梅赛德斯公司)的实际股票行情曲线(—)。^[6.20]

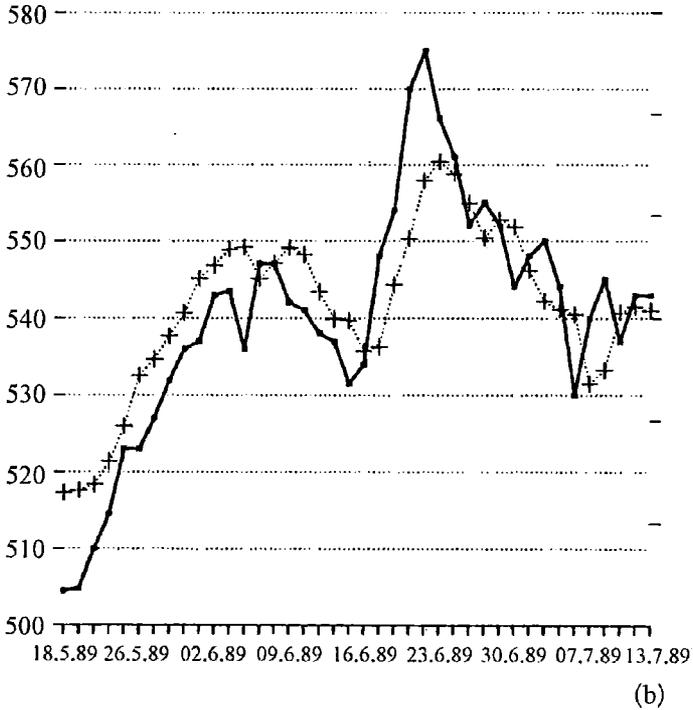
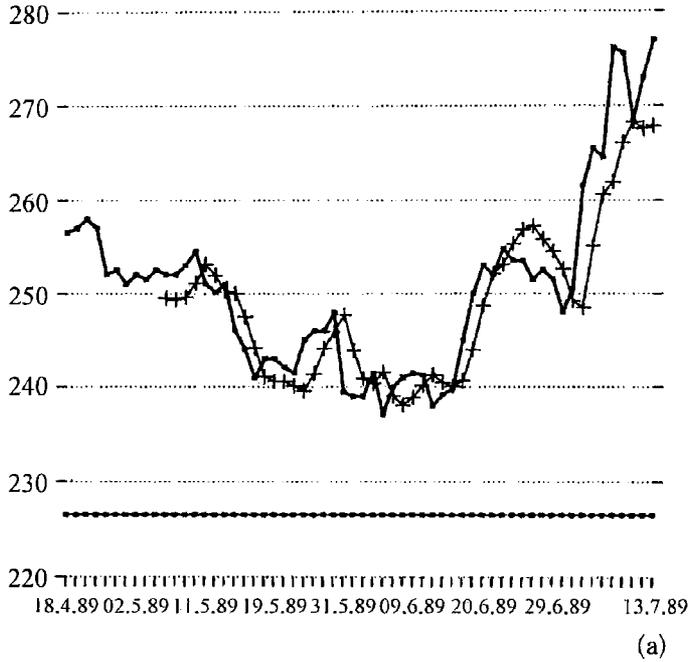


图 6.14 用神经网络预测股市行情

(+)为神经网络预测曲线,(-)为实际股票行情:(a)德国商业银行股票;(b)梅赛德斯公司股票。^[6, 20]

显然,后向传播的前馈网络是技术上非常有趣的,尽管它们看来与生物大脑中的信息处理没有多少相似性。在第4.2节中,我们已经分析了具有反馈(图4.8b)和赫布类型学习(图4.9b)的霍普菲尔德系统,它显得也是由生物大脑所采取的。在均匀的布尔神经网络的情形,神经元的两种状态可以与处于外磁场中的电子自旋的两个可能值联系起来。霍普菲尔德模型是一个动力学系统,它通过与金属退火过程类比被看作是一种能量函数。由于它是非增的单调函数,系统弛豫进入局部能量极小值,相应于局部的稳定定态(不动点吸引子)。

因此,霍普菲尔德系统的动力学演化可以相应于精神识别。例如,一个代表字母“A”的始态噪声图像向代表正确图像的终态的演化,它是用若干个例子来对系统进行了训练(图4.9b)。对此的物理解释使用的是平衡热力学的相变。正确的模式与不动点或平衡终态相联系。一个更灵活的推广是玻耳兹曼机,它具有非确定论处理器元的随机网络构造,以及分布的知识表示,数学上相应于一个能量函数(图4.11b)。

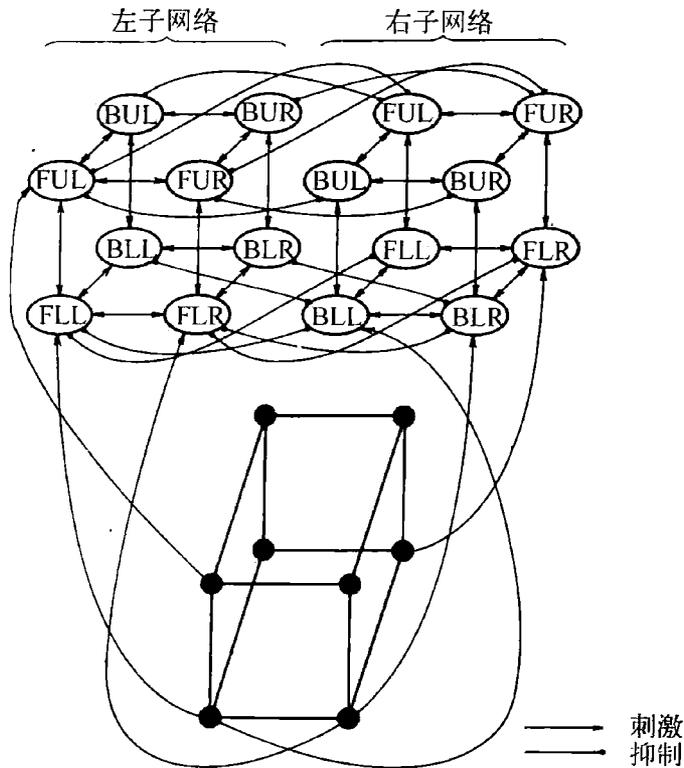
弛豫的一般思想是,一个网络收敛到以局域相互作用为基础的或多或少总体平衡状态。通过反复地修订局部的联接(例如在霍普菲尔德系统中,通过霍布学习策略),网络作为一个整体终于弛豫进入了稳定的、优化的状态。我们可以说,局域相互作用导致了协同寻求,它不是受指导的,而是自组织的。一些网络对于精神类型的活动运用了协同寻求策略,例如,对于寻找可能的假说。设想竞争假说的一定范围由神经元来表示,它们可以激活或抑制自己。于是该系统就离开了不太可能的假说,而奔向更可能的假说。

1986年,麦克莱兰和鲁梅尔哈特把这种认知解释运用于模拟两可图的识别,两可图是在格式塔心理学中为人们所熟知的问题。图6.15a示意了一个协同寻求的网络,模拟识别内克尔立方体两种可能的取向之一。每一单元就是一种涉及内克尔立方体的一个顶点的假设。缩写是B(后)、F(前)、L(左)、R(右)、U(上)、D(下)。假说的网络由两个联接的子

网络构成,每一子网络相应于两种可能解释之一。

不相容假说是负的联接,一致性假说是正的联接。权重的分配使得两个负的输入与三个正的输入相均衡。每一单元都具有3个正的相邻联接和两个竞争的负的联接。每一单元都接受来自刺激的一个正的输入。要寻求的假说子网络是这样的一种网络,它最好地拟合输入。微小的初始涨落(观察者特定视野的某个小的细节)可以决定观察到哪一种长期的取向。

为使网络的动力学形象表示出来,假定所有的单元都是关闭的。然后,一个单元接收了一个随机的正值输入。网络将向一个子网络的所有单元都被激活而所有其他网络的单元都关闭的状态演化。在认知解释中,我们可以说,此系统已经弛豫进入了内克尔(Necker)立方体两可图左面和右面的两种解释之一。



(a)

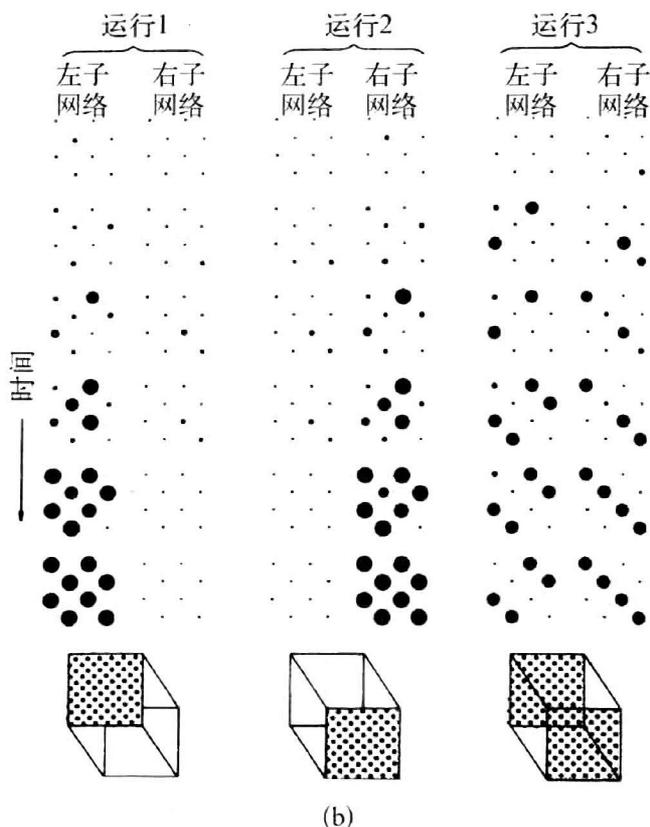


图 6.15 用神经网络模拟认知内克尔立方体

(a) 两种可能取向之一; (b) 三种演化模式。^[6.21]

图 6.15b 示意了三种不同的演化模式，它们敏感地依赖于不同的起始条件。环路的大小表明每一单元的激活程度。在第三种变化中，达到的是一种未确定的终态，然而它仍然处于平衡态。^[6.21]显然，这种网络的构造原理是协同计算，是人们在复杂系统动力学所熟知的一种分布表示和一种弛豫程序。

过去已经提出来许多人工神经网络的设计。它们是受到不同的学科如物理学、化学、生物学、心理学以及有时只是为技术的目的的鼓舞。复杂系统探究方式的共同原理是什么？在前面的章节中，协同学引进了作为处理非线性作用复杂系统的跨学科方法论。对于推动从许多科学学科中确立的共同原理来建立特殊复杂系统的模型，协同学看来是一种成功

的自上而下的策略。其主要思想是：复杂系统整体状态的形成可以解释为，处于远离热平衡的学习策略中系统元素的(宏观的)相互作用的演化。整体的有序状态解释为相变的吸引子(不动点、周期、拟周期或混沌)。

例如，模式识别被解释为类似于应用在物理学、化学和生物学中模式涌现所用演化方程的相变。我们获得了一种跨学科的研究纲领，使我们把神经计算的自组织解释为由共同原理支配的物理、化学和神经生物学演化的自然结果。正如在模式形成的情形，一种特定的识别模式(一张原型的脸)用序参量描述为一组所属特征的集合。

一旦其中属于该序参量的部分特征给定了(例如一张脸的一部分)，序参量将完成所有的其他的特征，所以整个系统是作为联想记忆发生作用的(例如给出脸的一部分使之从贮存的原型脸重建出来)。按照哈肯的役使原理，识别出来的模式的特征相应于模式生成期间受役使的子系统(图 6.16)^[6.22]。

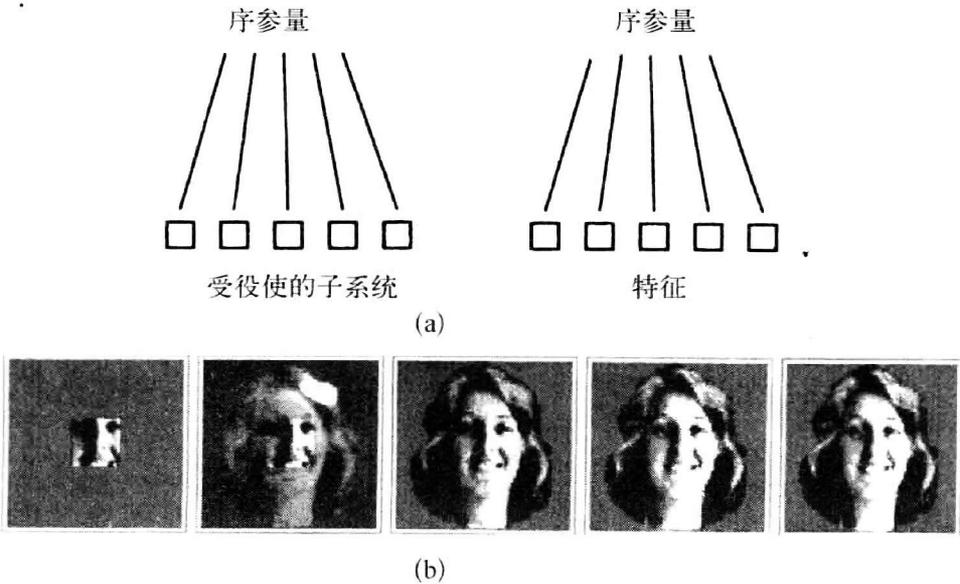


图 6.16 协同计算机

(a) 哈肯关于模式生成和模式识别的役使原理；(b) 协同计算机按役使原理进行的脸的识别；^[6.22]

如果一小部分作为原型学习的脸给予一台协同计算机,那么它就能够用编码了的姓名来完成整张脸(图 6.16b)。不同程度的模糊的图像序列,相应于协同计算机中状态的相变。

当一个不完整的模式提供给神经元,在不同神经元状态——每一状态都相应于一个特定的原型模式——之间的竞争就开始了。这种竞争中取胜的是相应于原型模式的神经元系统的整体状态,它对所提供的检验模式有最大的相似性。在完成类似于模式生成有效的动力学中,当一个检验模式提供给协同计算机时,它将把检验模式从初始状态($t=0$)拉向一个特定的相应于原型模式之一的终态。

检验模式的演化,可以用势貌图中具有一定位置矢量的粒子的过阻尼运动来说明。图 6.16c 示意了一个这种二维势场的例子。这两个原型相应于两个低谷。如果提供了一个模式,它的特征不可能精确地表明与原型的特征一般,那么该粒子的位置就处于势貌图的低谷之外。显然,识别是一种对称破缺,这已在图 4.21a 中的一维例子中进行了说明。

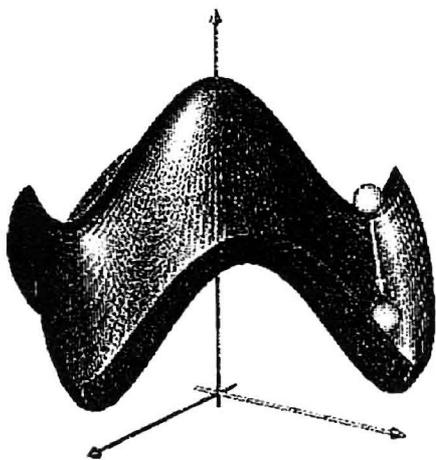


图 6.16 协同计算机

(c) 协同计算机中检验模式(序参量)的演化,以势貌图中粒子过阻尼运动说明。^[6.22]

在协同学系统中,势貌图的形状可以由调整序参量来改变。由于协同学系统是开放的,控制参量可以代表能量、物质、信息或其他来自系统环境刺激的输入。当控制参量低于某个临界值,地形可以具有一个稳定的位置(如图 4.21a 中的用虚线标出的一个低谷)。在涨落引起的每一激发以后,序参量弛豫地向其静止态演化。当控制参量超过了一定的临界值时,先前稳定的状态就失稳了,被图 4.21a 中两个低谷的两个稳定状态所取代。

协同计算机的学习程序相应于势地貌图的构造。势强度用地形形状表示,示意神经连接的突触力。协同学探究方式的一个优点是,刻画一个模式(如面孔)的数量巨大的微观细节是用一个宏观序参量来确定的。因此,协同计算机运用了典型的复杂性简并方法,这已经应用在自然进化的协同学模型中(见第 3.3 节)。

序参量方程允许一种新的(非赫布的)学习,即一种最小化突触数量的策略。与自旋玻璃类型的神经计算机(例如霍普菲尔德系统)相比较,神经元不是阈值元素,而是实施简单的乘法和加法。但是,自旋玻璃类型的神经计算机与协同学计算机的基本区别在于:自旋玻璃类型的复杂系统是物理学上的封闭系统。因此,它们的模式生成是由保守自组织推动的,没有任何的能量、物质或信息从外部输入。由保守自组织形成的典型模式是冬天窗户上的“死的”冰花,它们是在低能低温的平衡态冻结起来的。保守自组织的相变可以完全用玻耳兹曼的平衡热力学原理来解释。

在第 3.3 节中,我们已经解释了活系统的模式生成,只有在远离热平衡时输入能量、物质或信息,才是可能的。这种自组织叫做“耗散”自组织(普利高津)或“协同”自组织(哈肯),然而,它们甚至也是可以在物理学、化学演化中发现的。于是,作为活系统的人脑中的模式形成是敏感地依赖于来自外部世界的影响,它将为协同学框架中的新计算机技术提供“蓝图”或模型。自旋玻璃类型的神经计算机对于特定的技术目的可以是实用的、成功的。但是,由于它们是物理上封闭的系统,它们在原则上不同于如人脑这样的活系统中发生的东西。

协同计算机的模式识别过程,自发地产生出对于平移、旋转和标度变换的不变性。这些识别特征相应于现实的情形。例如,脸部并非总是如同学习阶段给出的那样,但是它们可以平移、旋转、缩小和放大、靠近和置远。协同计算机的一个漂亮的应用,是振荡的识别(例如两可图)和感知滞后现象。图 6.17a 示意了一个人们熟悉的滞后现象的例子。当人们的

注视力开始从图的左边移向右边,从一张男人的脸变成一个女子的图像将在大约 6 幅图以后发生。当人们从相反的方向来进行,从感知到女子变到一张男人的脸只有在接近左端图时才发生。

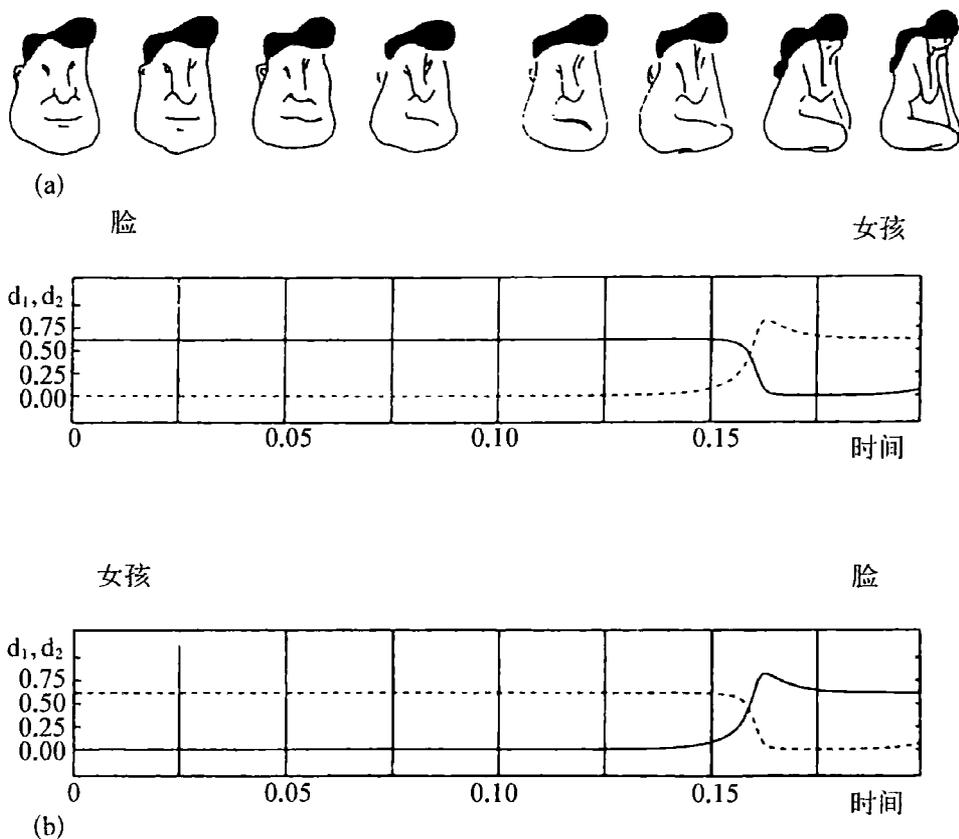


图 6.17 识别滞后及其模拟

(a) 识别的滞后现象;(b) 协同计算机在特征序参量时间演化中识别的滞后现象。^[6.23]

图 6.17b 示意了协同计算机在特征序参量的时间演化中的感知过程。虚线指的是解释“女孩”,实线指的是感知“脸部”。第一幅图示意了从男人脸部的感知向女孩的感知的转移,第二幅图示意了从女孩的感知向男人脸部的感知的转移。^[6.23]

也许可以提出反对意见,认为至今协同计算机仍然必须用传统的串行计算机来模拟。协同计算机的原理仅仅是在软件领域中实现了,而不是在机器的硬件中得到了实现。但是协同学及其跨学科应用将导致它的

材料和技术上的实现。如同激光是一个为人们熟悉的协同学模型(对照第 2.4 节),它可能在运用协同学原理的光学计算机的构造中起着基本性作用。在激光中,不同的模出现了,依赖于激光阈值的临界值。这些模可以由它们的光子数来刻画。在微观水平上,光子数的变化率是用非线性演化方程来描述的,依赖于模的获得、丢失和饱和。在宏观水平上,序参量相应于若干种光波迹的场幅(图 2.27a,b)。

这是主张了一种三层构造,数据的输入层可以用全息图映射到激光上。激光及其序参量是中间层。它利用它的模,通过自组织起着决策装置的作用。在役使原理意义上的生存的模,激发起新的特征集合。这种水平被设想为输出层。协同计算机的激光构造当然必须得到实验的证实和改进。协同计算机是一种真正的远离热平衡的耗散系统。

显然,复杂动力学系统对于模拟认知行为和技术系统也很有用的。人脑可以作为非线性复杂系统来建模,其动力学可以受不动点、周期或拟周期吸引子、甚至混沌吸引子的支配。例如,实验上已经证明,混沌是一种有效的大脑再置的机制。在对兔子的嗅球进行了研究以后,对于种种气味的识别已经用神经网络趋向环状渐进状态的滞后现象进行了建模。混沌态在发散、消除先前气味的记忆时就出现了。在发散期间,特定气味作为输入的存在推动了系统趋向相应于该气味的极限环。

混沌态的技术上的应用是颇为有趣的,因为混沌系统能够产生信息。众所周知,混沌系统敏感地依赖于初始条件。因此,在动力学演化过程中,两条轨迹可以在一定时间惊人地分开,甚至它们的初态仅仅有微小差别时也是如此。由于任何观测都只能是以有限精度来实现,因此就对两种不同的状态其间的距离要小于我们分辨能力。起初,观测者看起来它们是相等的。但是,经过一段时间以后,混沌系统就使得在初始看来等同的状态之间的差异表现出来。

实际上,神经计算机在技术应用上已在若干工业领域中进行了探索。

例子有机器人学、航空学和宇航学(敏感和适应系统,空中导航等)、医学(医疗数据、治疗和诊断等的评价和控制)、工业生产(质量控制、产品优化等)、安全技术、国防、通信技术、银行、邮政等。技术中的复杂系统探究方式,不应该看作是对于经典人工智能的竞争或甚至是对立。在目前的技术发展状态,神经网络和经典的人工智能系统(如专家系统)看来是很有用的,适用于不同的应用领域。对于信号、图像、语音、语音合成、机器人中感觉运动协调等的分析和识别,复杂系统显得比经典的人工智能系统更为合适。显然,这些神经网络应用的例子并非是单个的计算机或机器人,而是指集成在多任务的复合系统中的复杂功能。从拟人的观点看,由神经网络实际上管理的这些问题,可以划分为“低水平”的问题。

在第6.1节中我们了解到,以人工智能类型专家系统为基础的推理模型已经失败了,因为它们精确的串行的程序行为是不大容错、不大灵活的。与专家系统和知识工程相反,自组织的复杂过程不可能由专家知识的明确表述来进行控制。另一方面,具有推理算法的以规则为基础的系统,在所有的具有逻辑结构的问题上都是成功的。例如,与感觉运动的协调相对照,逻辑编程显得是一种“高水平”的知识的例子。然而,低水平的非线性动力学系统的问题却可以具有极其高度的复杂性。当然,如前所述,非线性复杂系统并不局限于低水平的知识。复杂系统的原理看来是颇为适合于为高级功能的建模,例如像概念、思维、自指状态等人脑的功能。但是,神经网络的技术仍然处于其初期阶段。

在现代与未来技术,具有若干模块基于规则与复杂动态系统的异质系统对于专门化的任务是或者将是有意義的。一个演讲理解系统可包括执行演讲识别的神经网络以及用于句法和语义分析的规则符号组件。混合系统结合推理和动态技术,对于不同医学用途是有益的。例如,设想一个能够通过神经网络识别和控制医学参数的系统,结合基于已知数据诊断疾病的规则演绎系统。像自然界一样,一个工程师不应教条地限制于一

个“最优”策略,而是努力寻找有目的的解答,比如可以合并多种解答而不必是最佳的解答。

6.3 细胞神经网络和模拟神经计算机

哈肯的“合作现象”和“役使原理”的协同学概念有其统计物理、量子物理和激光物理的起源。在电气工程学、信息与计算机科学,细胞神经网络(Cellar Neural Network,缩写 CNN,以下使用缩写形式)近来已经成为复杂性研究的重要范式,而且正在信息与芯片技术领域实现。^[6.24]20世纪90年代末传感器革命使得细胞神经网络的出现成为了可能。廉价传感器和MEMS(微电子机械系统 micro-electro-mechanical system 的缩写)阵列正在所有技术基础设施和人类环境中激增。作为人工眼、鼻、耳、味觉和体觉设备,它们已经变得普及。巨大数量的通有模拟信号已经得到处理。因此,需要一种新型的芯片技术,类似于自然有机体的信号处理。模拟细胞计算机是对传感器革命的技术响应,模拟着感觉器官与处理器官的解剖和生理。细胞神经网络芯片是它们的硬核,因为它是一个模拟动态处理器或细胞的阵列。

CNN 的概念是蔡少棠和杨林于1988年在伯克利提出的。^[6.25]CNN 范式背后的主要理念是蔡少棠所谓的“局部活动原理”,该原理断言如果没有局部活动在任何同质媒体中就不会出现复杂现象。显然,局部活动是微电子学的一个根本属性。例如,真空管和(后来的)晶体管成为收音机、电视、计算机电子线路中的局部活跃设备。神经网络的发展,受到实际技术需要的促动。1985年,霍普菲尔德提出他理论上的神经网络,它在原理上可以克服罗森布拉特“感知器”在模式识别方面的失败。但它的全局联结架构对于微电子 VLSI(超大规模集成 very-large-scale-

integrated 的缩写)电路而言,是非常不切实际的应用:一个充分联结的霍普菲尔德网络中的线路数量,随着阵列的规模而呈指数式的增长。CNN 只在指定的影响区域需要电子互联。^[6.26] CNN 芯片计算速度极大提高,耗电显著减少,故自 1988 年以来,CNN 已成为研究热点。

一般而言,CNN 是一种实时处理信号的非线性模拟电路。这是一种多组件系统,其组件是称为细胞的规则分隔的相同(“克隆”)单元,细胞通过最近的邻居进行彼此间的直接通信。然而直接联结的局部性支持全局信息处理。远程连接单元之间的通信,是通过其他单元来达到的。在一个网络中复杂与全局现象能够从局部活动中涌现的想法,可以追溯到冯·诺伊曼的元胞自动机早期范式。在这个意义上,CNN 范式是在信息处理与芯片技术的新条件下元胞自动机范式的一个发展。不像传统元胞自动机,CNN 主机处理器以实数作为互动值在连续时间里接受和产生模拟信号。然而实际上,元胞自动机的离散性并不是与 CNN 的原则性差别。我们可以引入连续元胞自动机(continue cellular automata,缩写 CCA)作为元胞自动机的一般化,在其中每个元胞不只是(例如)黑与白,相反可以在灰度范围内取任何值。CNN 的一个可能规则,是每个元胞的新灰阶是它自己的灰阶与它中间邻居灰阶的平均值。结果是在连续元胞自动机里,简单互动规则会产生日益增加的复杂性、混沌以及随机性,与离散元胞自动机的行为并没有本质上的不同。因此,它们在估算由偏微分方程(PDE)决定的系统动态方面是有用的。

对于 CNN 范式,遗传技术的与神经生物学的语言表达了概念的证明隐喻,它们不过是在数学上定义而且在技术上执行的。根据今天生命科学的主流范式,生物语言传递了未来生物技术与计算机技术之间联结的远景。在数学上,CNN 被定义为:(1) 连续非线性力学态系统(“细胞”或“神经元”)的一个空间离散集合,信息在每个细胞中通过三个独立变量(“输入”、“阈值”和“初态”)进行处理;(2) 一个耦合定律,将每个细胞的

有关变量与预先描述的影响区域内所有相邻细胞联系起来。一个标准 CNN 架构包括一个由细胞 $C(i, j)$ 构成的 $M \times N$ 正交矩阵, (i, j) 为笛卡儿坐标, 其中: $i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N$ (图 6. 18a)。图 6. 18b—c 显示作为 3×3 和 5×5 个邻居的元胞影响范围的实例。细胞状态的动态由非线性微分方程(CNN 状态方程)界定, 该微分方程有标量“状态” x_{ij} , “输出” y_{ij} , “输入” u_{ij} , “阈值” z_{ij} , 以及相关系数, 称为“突触权重”, 对细胞 $C(i, j)$ 的突触联结强度进行建模, 邻居细胞 $C(k, l)$ 的输入(前馈信号)与输出(回馈信号)。CNN 输出方程涉及具有这个输出的细胞状态。

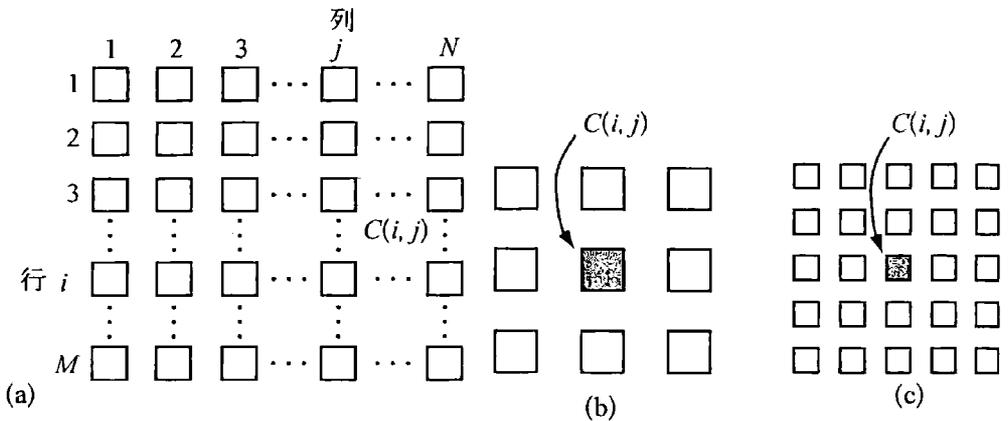


图 6. 18 细胞神经网络

(a) 标准阵列; (b) 3×3 邻居; (c) 5×5 邻居。^[6. 27]

多数 CNN 的应用采用空间不变标准 CNN, 具有 3×3 细胞邻居和细胞空间中不变的突触权重和细胞阈值。网格每个节点上 3×3 影响范围包含 9 个细胞, 其中 8 个邻居细胞和 1 个处于中心的细胞。在这个情况, 输出(反馈)与输入(前馈)权重的分布可以简化为两个固定 3×3 矩阵, 叫做反馈(输出)克隆模板 A 和前馈(输入)克隆模板 B。因此, 每个 CNN 都由两个克隆模板 A 和 B, 以及阈值 z 来唯一地界定, 它包含 $3 \times 3 + 3 \times 3 + 1 = 19$ 个实数。它们可以排列为一串 19 个标量, 有一个均一阈值、9 个前

馈和 9 个反馈突触权重。这一串被称为“CNN 基因”，因为它完全地决定了 CNN 的动态。所以，所有 CNN 基因构成的体系被称为“CNN 基因组”。至于人类基因组计划，通过隔离和分析各类 CNN 基因片段及其对 CNN 基因组的影响可以取得稳定的进展。

关于可视计算，三元 $\{A, B, z\}$ 及其 19 个实数可以看作关于如何把输入图像转变为输出图像的一种 CNN 宏观指令。简单的例子是具有实用相关性的 CNN 子类，例如具有兴奋与抑制突触权重的空间不变 CNN 的类 $C(A, B, z)$ ；CNN 没有细胞反馈的零反馈(前馈)类 $C(0, B, z)$ ；CNN 无细胞输入的零输入(自主)类 $C(A, 0, z)$ ；以及 CNN 无细胞耦合的无耦合类 $C(A^0, B, z)$ 。在 A^0 除了矩阵中心的细胞权重之外所有细胞的权重都是 0。它们的信号流和系统结构可以用图表示，可以容易应用在电子线路以及典型的活神经元。

在可视计算中 CNN 模板对于标准是极其有用的。简单实例是以二进制(黑与白)或灰阶输入图像侦测边的 CNN。图像由对应于 CNN 的二进制或灰阶细胞像素组成。EDGE CNN 是零反馈类 $C(0, B, z)$ 二进制边检测模板的一个实例：

$$A = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \quad B = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & -1 & -1 \\ \hline -1 & 8 & -1 \\ \hline -1 & -1 & -1 \\ \hline \end{array} \quad z = -1$$

输入是黑像素的静止二进制图像。初态是任意的(例如，零)。边界条件(例如，零)决定所谓视觉细胞的输入与输出，该视觉细胞属于一个 3×3 邻居，但在 CNN 网格之外。输出应该是一个二进制图像把所有的边都显示为黑色。EDGE CNN 模板是唯一设计来直接用于二进制输入图像。如果输入图像是一个灰阶图像，输出一般将是灰阶图像，其黑像素对应于锐边、近黑像素对应于模糊边、近白像素对应于噪声。从一个给定输入图

像产生边图像的局部规则,表示如下:

- (1) 白像素→白色,独立于邻居
- (2) 黑像素→白色,如果所有最近邻居都是黑色
- (3) 黑像素→黑色,如果至少一个最近邻居是白色
- (4) 黑、灰、或白像素→灰色,如果最近邻居是灰色

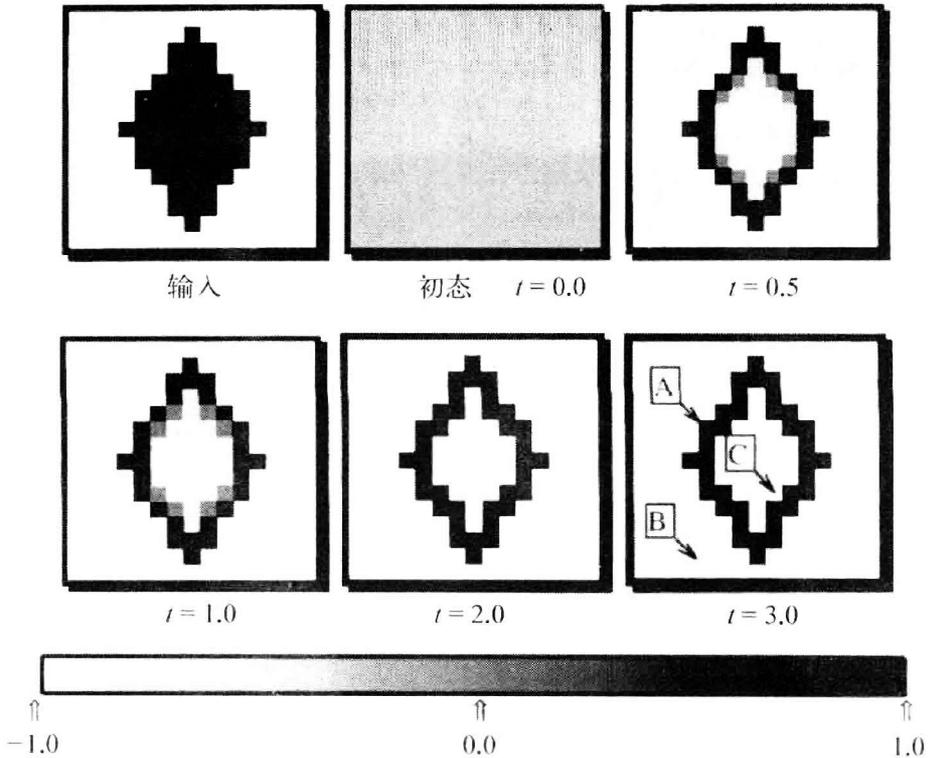


图 6.19 用 EDGE CNN 图像处理的快照^[6.28]

也可以用简单 CNN 模板来实现逻辑算子,以合并视觉计算的 CNN 模板。逻辑非运算,CNN 对所有二进制图形像素进行反转,前景像素变成背景像素,反之亦然。逻辑与(逻辑或,类推)运算,CNN 在两幅二进制图像的对应要素上执行像素方面的逻辑与(逻辑或算子,类推)。这些运算可以被用作某些布尔逻辑算法的要素,对安排在图像形式中的数据进行并行操作。

用于可视计算的 CNN 分析,沿着一个标准的步骤系列。首先(1) 在

完整图像层次上给出输入-输出图像转换的非技术描述。下一步(2)局部规则传递一种关于如何把输入转换为输出像素的精确办法。这些局部规则必须在这个意义上是完整的,即通过把这些规则应用到局部影响区域内所有像素的状态和输入来唯一地确定每个输出像素。然后(3)给出若干个实例,包括(a)输入图像和初始状态,(b)若干连续快照直至在瞬间设定时间内达到一幅静止的输出图像,或(c)输出图像上特别兴趣点的状态和输出的时间波形。最后,用数学分析(4),为每条局部规则给出严密的数学证明。如果没有证明可以利用,那么会给出一个以不同数值研究获取的直观证明草案。用这种方式,为说明可视计算中一种新的解题范式,可用标准途径引入一个 CNN 模板图集。一个例子是 THRESHOLD CNN,它依赖某个灰阶强度阈值把一幅少女的灰阶图像转换为二进制图像(图 6.20)。

名称: THRESHOLD CNN

任务描述: 转换灰阶图像 P (处于初始状态)成为二进制图像,其中每一个 $p_{ij} \in P$ 转换为“黑”(“红”是伪色),当且仅当 p_{ij} 具有灰阶强度超过了预定的 CNN 阈值 z^* 。在两种极端的情形即 $z^*=1$ 和 $z^*=-1$,所有的输出像素都将被分别为黑(红)或白(蓝)。

克隆模板

$z: z^*$

0	0	0
0	0	0
0	0	0

B:

0	0	0
0	2	0
0	0	0

A:

边界条件

固定: $x_i^*=0, u_i^*=0$
(* 标明约束细胞)

初态

$x_{ij}(0)=a$ 给出灰阶图像

例1: 阵列尺寸=30×48; $z^*=-0.5$



输入图像: 任意



初态



输出图像





例2: 阵列尺寸=256×320; $z^*=-0.5$

图 6.20 THRESHOLD CNN 图集^[6.29]

最简单的 CNN 形式可以用布尔函数来刻画。我们考虑一个空间不变量的二进制 CNN,它属于具有 3×3 邻居的无耦合类 $C(A^0, B, z)$,把任何静止 3×3 输入模式映射到一种静止二进制的 3×3 输出模式。它可以用带有 9 个二进制输入变量的布尔函数来唯一地确定,每个变量表示细胞的影响区域内 9 个像素中的一个。尽管类型 $C(A^0, B, z)$ 有无限多的不同模板,黑白细胞的 3×3 模式却只有有限数量的组合, $2^9 = 512$ 。因为每个二进制九输入模式可映射到 0(白)或 1(黑),那么 9 个二进制变量就有 2^{512} 个不同的布尔映射。因此,每个二进制标准 CNN 可以用一个包含 512 行的 CNN 真值表进行唯一描述,每行代表不同的 3×3 黑白模式; 9 个输入列,每列代表每个二进制输入变量; 1 个输出列,代表输出变量的二进制值。

例如,考虑 EDGE CNN 的真值表(图 6.19)。因为 512 行真值表长度超过一页,它被分为 16 个部分,每部分 32 行(图 6.21)。根据惯例,每个真值表的第 5 列表示位于 3×3 邻居中心的细胞输入。根据上述 EDGE CNN 的局部规则,一个白色细胞保持白色而不依赖于它的邻居。因此,由于 16 张真值表中第 5 列的首批 16 个细胞是白色的,其在最后一列对应的输出细胞也是白色的。根据局部规则,黑色细胞如果至少有一个最近邻居是黑色则保持黑色,但是如果所有最近邻居都是黑色则变成白色。因为在真值表中第 5 列从第 17 到 32 行的细胞是黑色的,其在最后一列的对应输出细胞也是黑色,除了最后一行,那里所有最近邻居都是黑色。

因为 16 张真值表的黑白模式在许多部分都保持不变,考虑 32 个细胞的最后 16 列是充分的。因此,我们得到 EDGE CNN 一个最小 16×32 真值表(图 6.22)。只要简单地通过解 512 个不同二进制输入模式的相关微分方程并计算对应的二进制输出,可以构建规定初态的任何二进制 CNN $C(A^0, B, z)$ 的真值表。也容易写出计算机程序来自动生成这些条

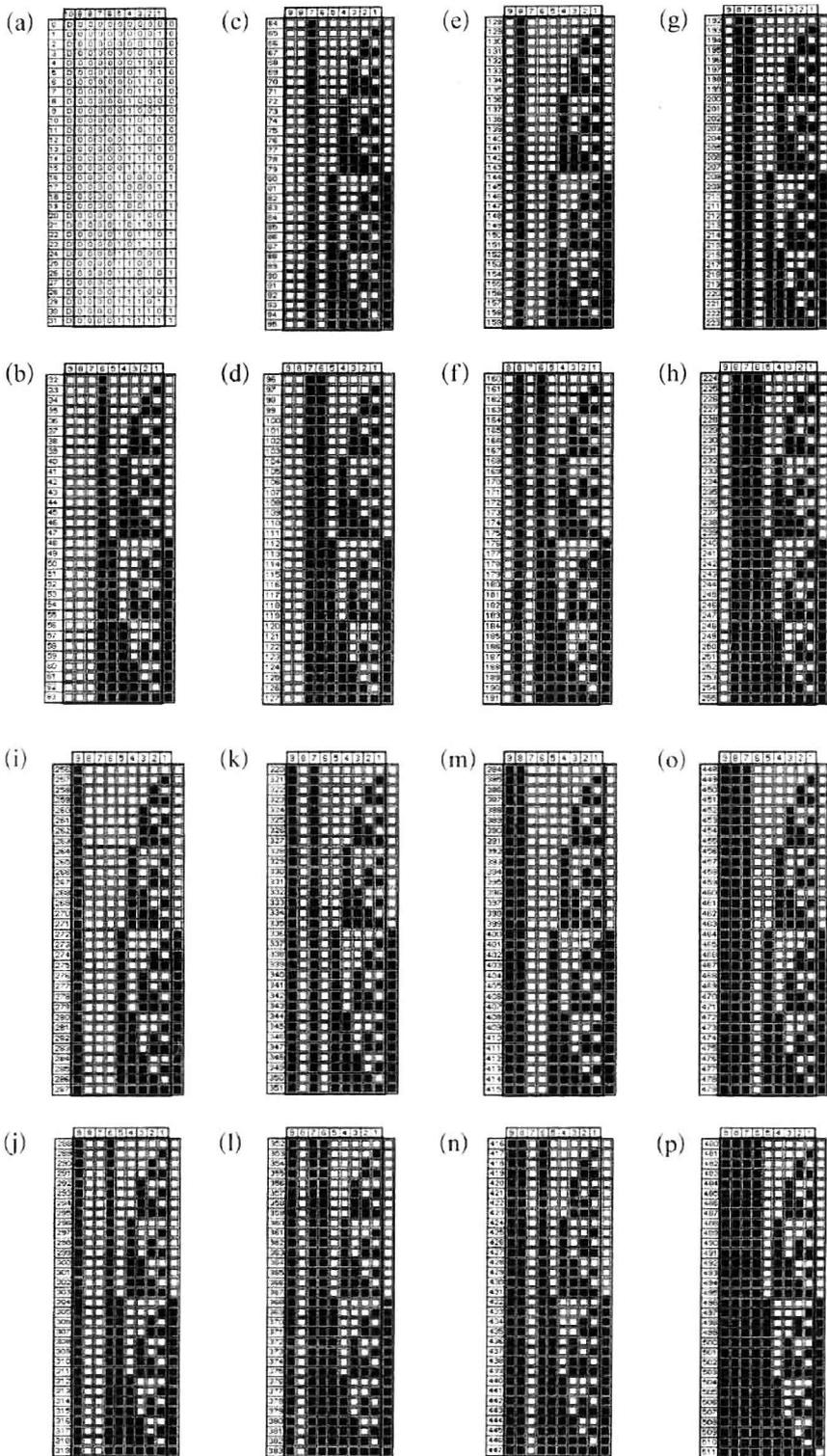


图 6.21 EDGE CNN 的真值表^[6.30]

点单调增加或减少,如果在这点的状态是正的或负的。再者,除了某些衰落情况之外,稳态输出解可以用代数式显式计算,而不用解相关的非线性微分方程。显然,在描述具有鲁棒 CNN 模板的非线性动力学的 CNN 类,这是一个重要成果。完全稳定的 CNN 是最新 CNN 应用的主力。然而甚至简单的 CNN 亦具有振荡或混沌行为。未来应用会开发振荡与混沌操作区域的未知地带的巨大潜力。那么,细胞神经网络实际上会转变为细胞非线性网络(Cellular Nonlinear Networks),具有非线性动力学所有类型的相变和吸引子。

振荡 CNN 只具有模板给定的两个细胞和零边界条件:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \beta & \alpha & -\beta \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

图 6.23 显示 1×2 CNN 的架构,具有零势(a)的虚拟边界细胞(灰阶),和相应的信号流程图。这个 CNN 的两个细胞的状态方程,由两个微分方程给定

$$\dot{x}_1 = -x_1 + \alpha y_1 - \beta y_2$$

$$\dot{x}_2 = -x_2 + \alpha y_2 - \beta y_1$$

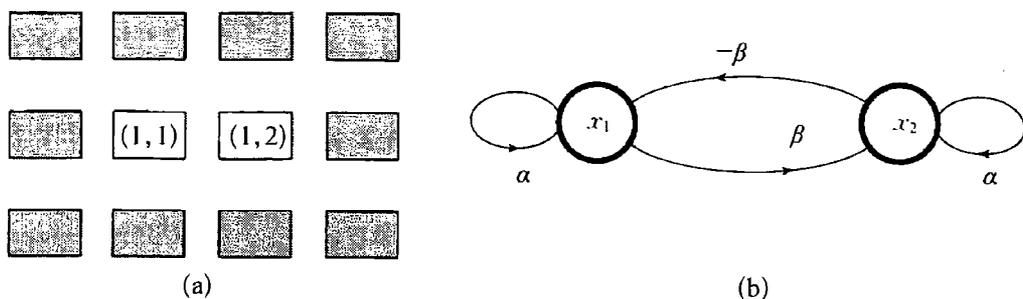


图 6.23 具有(灰阶)虚拟边界细胞的 1×2 CNN^[6.32]

(a) 架构图;(b) 信号流程图。

根据具有分段线性特征的标准非线性方程 $y_i = f(x_i) = 0.5 |x_i + 1| - 0.5 |x_i - 1|$, 相应的输出 $y_i (i = 1, 2)$ 与状态 x_i 相关联。

在图 6.24a, b, 显示相应的时间序列 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$, 例如 $\alpha = 2, \beta = 2$, 初始条件 $x_1(0) = 0.1, x_2(0) = 0.1$ 。在相应的相空间(图 6.24c), 始于原点之外的任意初态的所有轨迹将收敛于一个极限环。

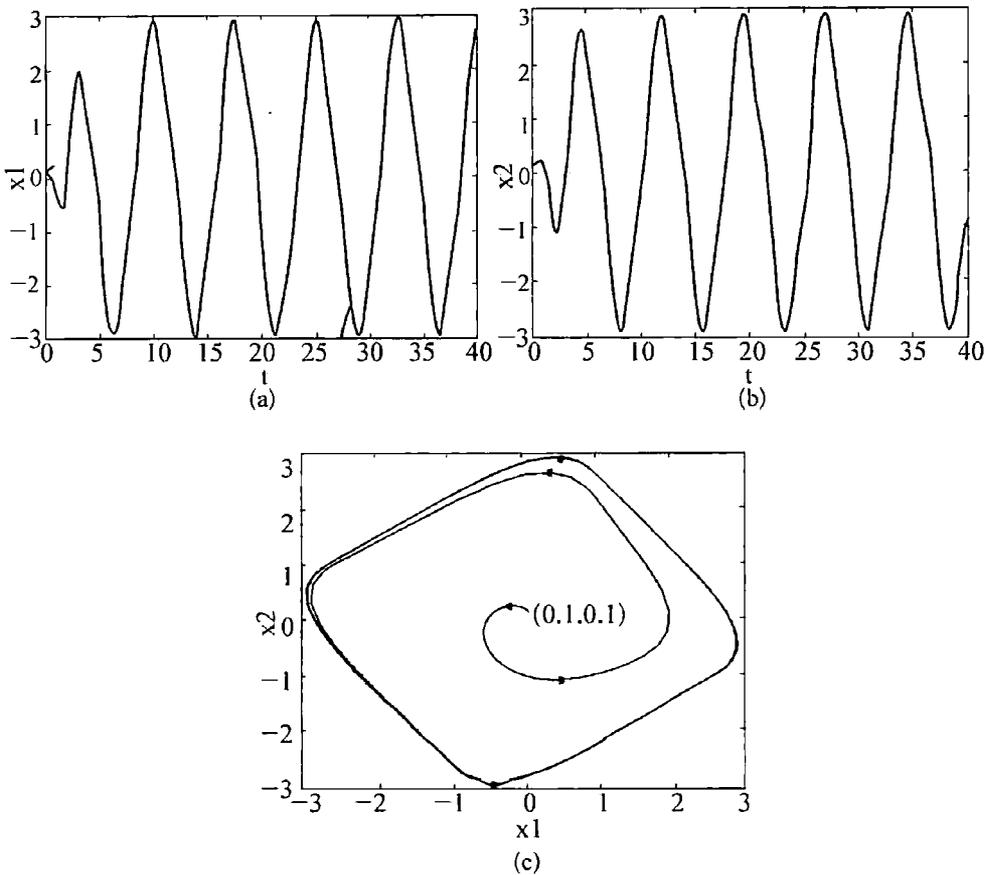


图 6.24 1×2 CNN 的周期性动态行为
(a)(b) 周期性时间序列; (c) 极限环。^[6.33]

只具有模板给定的两个细胞和零边界条件的一个混沌 CNN

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1.2 & 2 & -1.2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

与上述例子相反,这个 CNN 应该是非自主的,对细胞 $C(1, 1)$ 有一个正弦输入 $u_{11}(t) = 4.04\sin(\pi t/2)$,但对细胞 $C(1, 2)$ 有零输入 $u_{11} = 0$ (图 6.18a)。从技术的角度看,双细胞 CNN 的电路由一系列正弦信号驱动,其状态方程由两个非线性微分方程给出

$$\dot{x}_1 = -x_1 + 2y_1 - 1.2y_2 + 4.04\sin(\pi t/2)$$

$$\dot{x}_2 = -x_2 + 1.2y_1 - 2y_2$$

具有以前 CNN 的输出函数 $y_i = f(x_i)$ 。相应的非周期性时间序列 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 具有先前例子的相同初始条件,如图 6.25a、b 所示。在相应的相空间(图 6.25c),轨迹被称作“女士鞋吸引子”的奇异吸引子所吸引,因为其庞加莱映射(图 6.25d)有点像女士的高跟鞋。

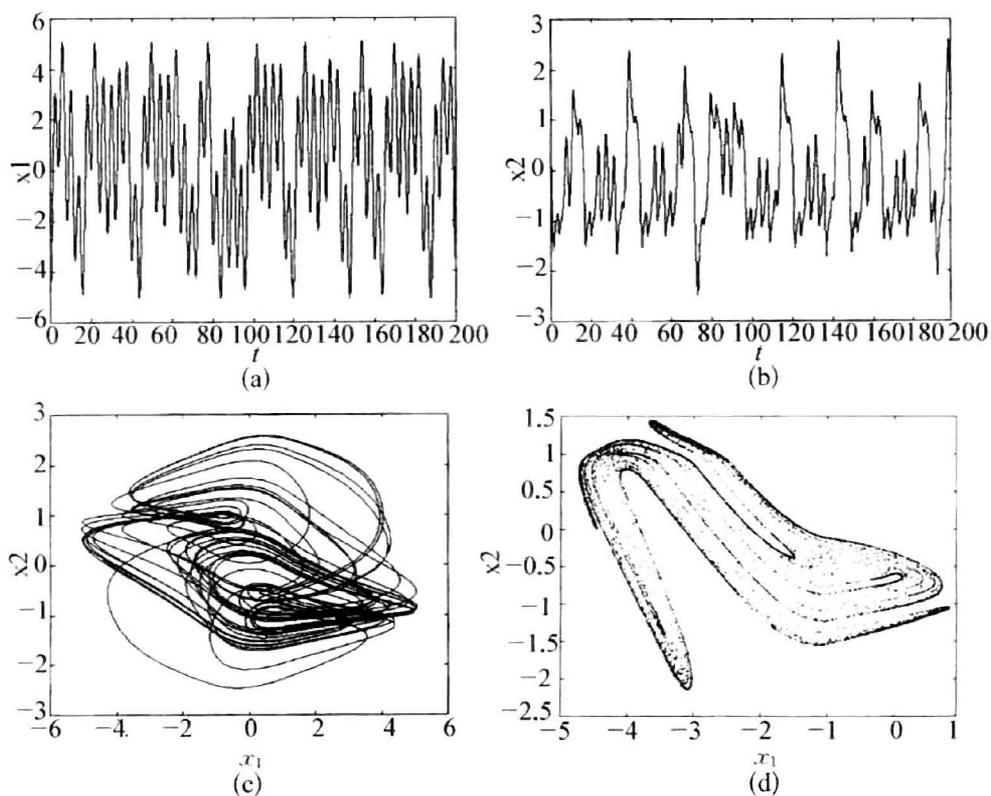


图 6.25 1×2 CNN 的非周期性动态行为^[6.34]

(a)(b) 非周期性时间序列;(c) 混沌吸引子;(d) 庞加莱映射。

从非线性动力学的角度看,把标准 CNN 状态方程看作常微分方程是比较方便的,以其 CNN 基因的组成作为分岔参量。然后可以详细研究标准 CNN 的动力行为。数值实例以极限环与混沌吸引子表达细胞神经网络。对于标准 CNN 的技术实施而言,例如硅芯片,为了避免振荡、混沌和噪声现象必须表述其完整稳定性性质。这些成果对于使用 CNN 进行图像处理也具有实际重要性。由于大脑和计算机以两种独特状态的单元来运行,对其双稳定性条件在脑研究和芯片技术中都得到了探讨。

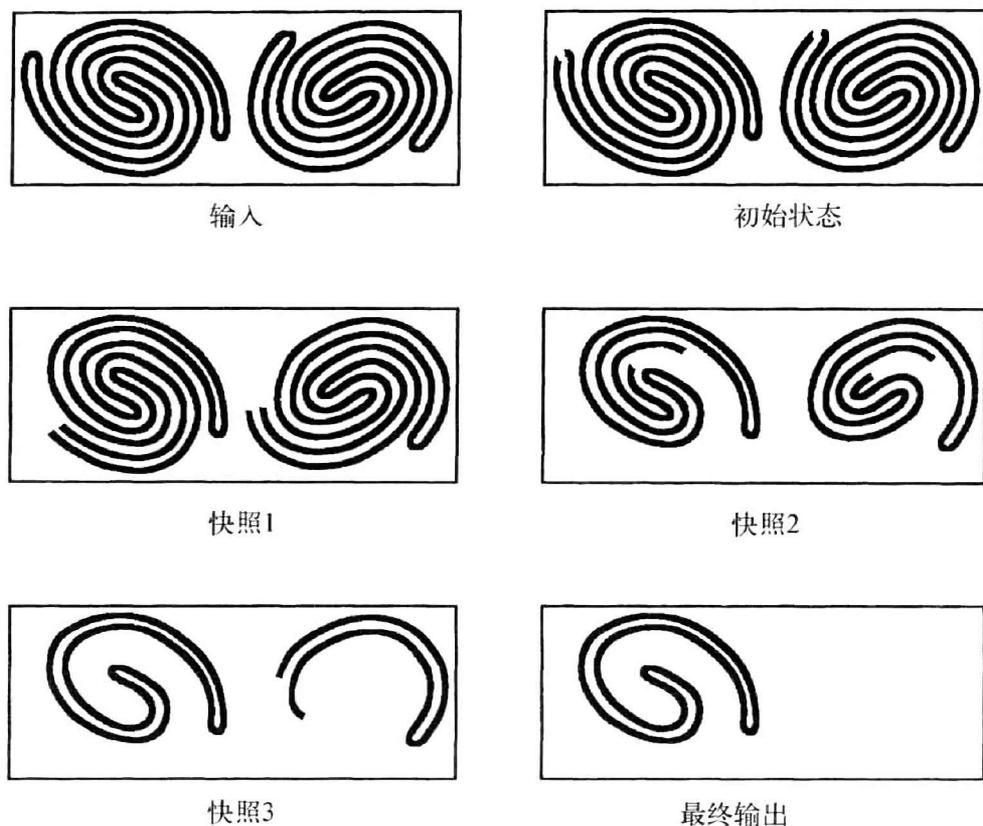
自然界复杂结构的涌现,可以用复杂系统的非线性动力学和吸引子来解释。它们都是复杂系统中互动要素的集体行为引起的。复杂性研究的不同范式,能够用它们的特定机制来解释自然界的模式生成和模式识别。从 CNN 的视角看,研究细胞没有输入的自主 CNN 子类是合适的。这些系统用扩散-反应过程来解释模式是如何出现、演化以及有时收敛到平衡状态。模式生成始于不稳定平衡中的初始均一模式,它被小的随机位移所干扰。因此,在初始状态中,不稳定平衡的对称性被打破,引起相当复杂的模式。显然,在这些应用中,细胞网络不仅指神经系统中的神经活动,一般还包括模式生成。所以,CNN 缩写现在被理解为“细胞非线性网络”。

CNN 是以孤立细胞状态方程和细胞耦合定律来定义的。要模拟扩散-反应过程,耦合定律描述了离散情况下的扩散(有一个离散拉普拉斯算子)。在 CNN 扩散-关系方程中可以合并 CNN 状态方程和 CNN 耦合定律,以确定自主 CNN 的动力学。如果我们将它们的离散函数和算子替代为它们的极限连续统形式,我们会得到关于扩散-反应过程的一个著名的连续偏微分方程,这已在复杂性范式(例如普利高津的非平衡态化学和哈肯的协同学)里已经得到了探讨。CNN 扩散-反应方程的蔡氏版本,表达了这些模式生成在化学和生物学中(例如,同心波、自动波和螺旋波)

的计算机仿真。另一方面,许多适当的 CNN 方程可以与任何非线性偏微分方程关联起来。在许多情况下,为了理解这些复杂系统的非线性动力学,探讨关联 CNN 方程是足够的。有些时候,为了计算机仿真的实用目的,自主 CNN(像数字元胞自动机)只是被看作非线性偏微分方程的近似。然而,蔡少棠主张,非线性偏微分方程是自主 CNN 的极限形式。因此,CNN 只有一个子类具有偏微分方程的极限表达。简言之,复杂性的 CNN 范式超出了微分方程的传统方法。

模式识别被理解为与模式生成有关。与无耦合 CNN 相比,具有线性突触权重的耦合 CNN 打开了具有更丰富的可视计算应用的坦途。在耦合 CNN 里,周边细胞的输出与位于中心的细胞存在耦合。因此,至少反馈(输出)模板 A (不同于中心细胞的系数)有一个要素不是零。例如,耦合 CNN 能够检测周边背景的空隙(例如,一系列邻近像素)。特别是,著名的联结性问题(connectivity problem)原来是可以用一个这种简单耦合 CNN 来解决。这个问题不仅对于实用理由是重要的,而且在认知科学历史上具有悠久的传统。我们如何能够从一系列像素中识别联结模式(“格式塔”),例如形状、人物或脸? 在一个著名的证明中,马文·明斯基表明了某些模式的联结性不能被神经网络(像罗森布拉特的“感知机”)所识别。

在 CNN 范式,CNN 以特定局部活动假设的方式工作。一个局部联结的神经网络如何实现全局功能并识别“格式塔”呢? CNN 策略是删除所有那些像素,它们是白色背景上黑色像素所界定的联结物体的组成。直观的想法是,在一幅复杂图像中联结像素部分是像在蔓延野火中那样被烧掉。在联结模式的情况中(例如,迷宫),模式产生的最后图像是空白,仿佛烧尽之后的郊野一般。在其他情况下,非联结像素像火中幸存的灌木一样保留了下来(图 6.26)。在局部活动原则的意义上,火的波前从像素向相邻像素蔓延而且“检测”联结像素簇。

图 6.26 联结性 CNN 传播的快照^[6, 35]

这种 CNN 也用于探讨非线性波的传播现象(例如,用计算机模拟的疾病感染)。至于罗森布拉特“感知机”的明斯基问题,可以证明全局联结属性可以用任何二进制输入模式下的一个适当的 CNN 来实现。适当的耦合 CNN 能够模拟视幻觉,其中可以用依赖于初始想法和注意力的模棱两可方式感知到一些图像(图 4.22)。这种现象的一个例子是面孔—花瓶幻觉,其图像可以解释为两张对称的面孔或一个花瓶。通过第二个二进制模式来明确说明两个模棱两可的解释区域中一个可以实现的初始注意力。

在线性突触权重的情况下,突触或模板要素的特征是线性的。但在技术应用(例如,电压控制的电源)或用神经递质进行突触通信的活细胞,

它们从来不是完全线性的。如果我们使用非线性模板来模拟突触的动力学特性,分析会变得复杂。因此,一种折中的模型是具有非线性、空间不变量权重的无耦合 CNN 的应用。

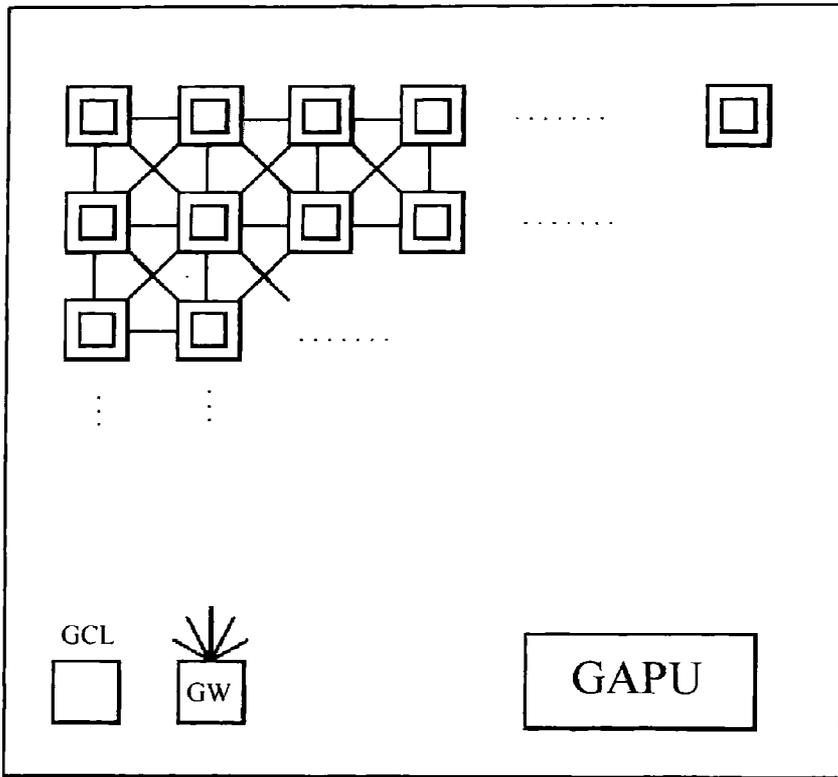
6.4 通用细胞神经网络和动力复杂性

图像处理和模式识别应用有时候是线性不可分离的难题,需要多个细胞神经网络程序。一个 CNN 程序是由一串称为“CNN 染色体”的 CNN 基因定义的。每一个细胞的二进制或布尔状态的元胞自动机,都可以被看作一个 CNN 染色体。尤其,康威的元胞自动机生命游戏元胞自动机(和图 5.23 比较),可以通过由“逻辑与”运算 CNN 来联结的 2 条 CNN 基因组成的一条 CNN 染色体加以实现。因为生命游戏元胞自动机是一种通用图灵机,相应的生命游戏 CNN 也就是一种拥有自繁殖性能的通用图灵机。这些结果使得技术上能够实现模拟输入模拟输出 CNN 通用机器和 CNN 通用芯片,由此以每秒运行一万亿次来解决计算难题。由于其大规模非线性动力学,它和传统的数字计算机不一样。

这种 CNN 通用机结构需要一个模拟和逻辑的储存器,一个局部逻辑单元以及类似任何可编程系统的一个全局时钟来控制一个时钟周期里的指令。如前所述,CNN 模板可以看作是详细规定输入输出的指令。并不是所有的任务,都可以被单个 CNN 模板所完成。这样,当应用几种模板时,我们定义一个 CNN 子程序或函数,正如 C 类型程序语言中那样。有三种等价的方法来实现 CNN:(1) 带有分离硬连线的细胞和附属的局部与全局设备的硬件电路图;(2) CNN 算法的流程图;(3) 带有 CNN 模拟与逻辑运算的模拟(α)CNN 编程语言。

介绍 CNN 通用机是由于实践与理论原因。从工程的观点看,要实现带有不同硬连线 CNN 的不同 CNN 部件或模板是完全不切实际的。历史上,约翰·冯·诺伊曼的通用计算机受到通用图灵机的影响,原因是为了克服 20 世纪 30 年代到 40 年代用于不同用途的硬件机器的难题。从理论的观点看,CNN 通用机开创了一条新的模拟神经计算机的道路。在 CNN 通用机中,阵列计算机中混合和嵌入了模拟(连续的)和逻辑的运算。它是一个复杂的非线性系统,结合了两种不同类型的运算,即连续非线性阵列动力和具有局域与全局逻辑的连续时间。显然,这种模拟和数字部件的结合与活机体处理神经信息是极其相似的。这些存储的程序,作为一系列的模板,可以看作是 CNN 通用机的某种遗传密码。而基本基因就是模板,例如 3×3 的模板有 19 个真实数字的密码。在神经系统中,这些相继的模板在空间上被放置为一层接一层的神经元。

CNN 通用机架构,是由所谓扩展标准 CNN 通用细胞组成的(图 6.27)。通用细胞的主要部件分别是,局部逻辑储存单元(LLM)和局部模拟储存单元(LAM),相应针对数字和连续(模拟)信号的局部逻辑单元(LLU)以及局部模拟输出单元(LAOU)。在每个细胞中,局部交流和控制单元(LCCU)接收来自全局模拟编程单元(GAPU)的编程指令。这些指令包括模拟模板值 $\{A, B, z\}$,用于局部逻辑单元的逻辑函数码与细胞转换配置,规定着信号路径和功能单元的一些设置。因此,GAPU 需要针对 3 种信息的储存元素(寄存器),也就是用于 CNN 模板的模拟指令寄存器(APR),用于 LLU 功能的逻辑指令寄存器(LPR)以及移位寄存器(SCR)。除了全局时钟(GCL)之外,还有一种全局连线(GW),决定是否在处理图像中保留任意的黑色像素。



GCL: 全局时钟

GW: 全局连线

□ 扩展标准CNN通用细胞

GAPU
APR: 模拟指令寄存器
LPR: 逻辑指令寄存器
SCR: 移位寄存器
GACU: 全局模拟控制单元

图 6.27 CNN 通用机的结构^[6.36]

在介绍具有标准 CNN 通用细胞和全局模拟编程单元(GAPU)的架构之后,完整系列的模拟 CNN 程序可以用 CNN 通用机器执行。这种程序的描述包括全局任务,算法的流程图,高阶的 α 编程语言描述的算法,以及由 α 编译器以模拟机器码(AMC)的形式输出的一系列宏指令。在最低层次上,芯片被嵌入它们物理环境的电路中。AMC 码将被转译进入硬件电路和电信号。在最高层次上, α 编译器能够产生宏代码,称为模

拟宏代码(AMC)。 α 编译器的输入是使用 α 语言的算法流程图的描述。图 6.28 描述了软件和核心引擎的层次。AMC 被用于个人电脑中奔腾芯片上运行的软件模拟和带有 CNN 芯片原型系统(CCPS)的 CNN 通用机器芯片的应用。

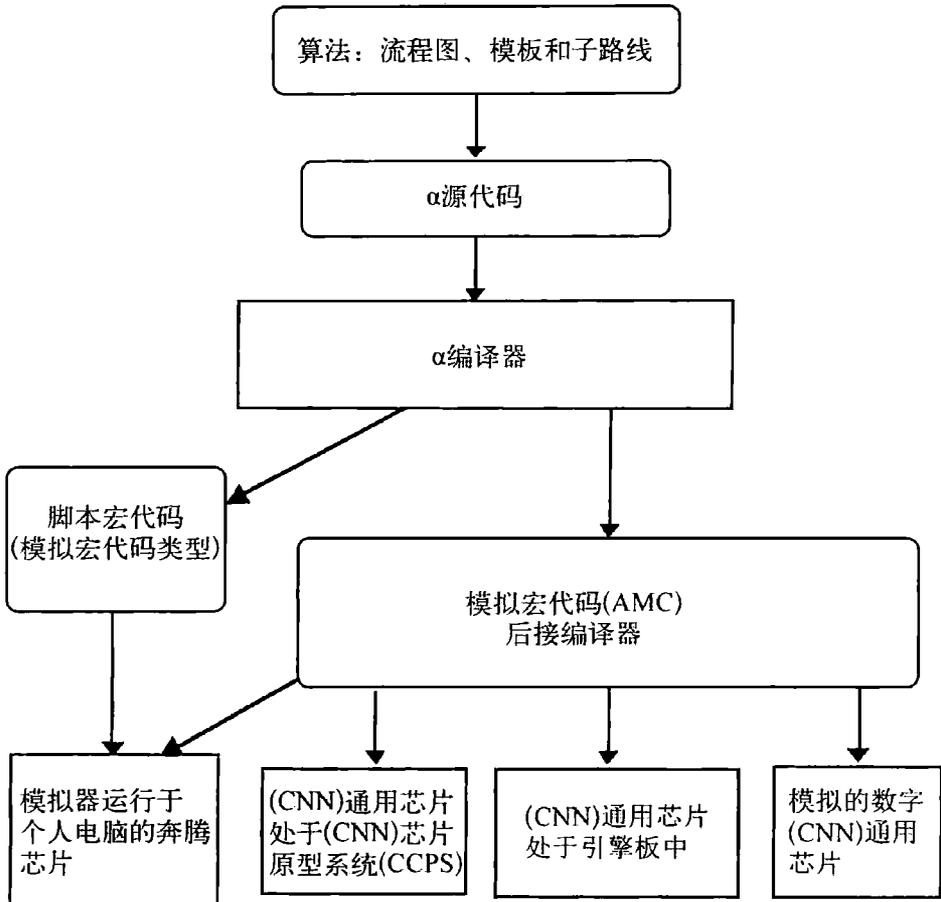


图 6.28 CNN 通用机软件和核心引擎的层次^[6.37]

CNN 通用机器在技术上被模拟和数字 VLSI(超大规模集成)部件所实现。众所周知,通过连线和编程可以从一些执行模块建成任何复杂的数字技术系统。用相同的方法,包含模拟模块的 CNN 通用机器也可以这样构成。蔡少棠和杨林提出了标准 CNN 细胞的电路模型。一个核心细胞只需要 3 个模块:电容、电阻器和 VCCS(压控电源)。如果这三种模

块再加上开关、逻辑寄存器和逻辑门,就可以构造出扩展 CNN 通用机的 CNN 细胞。原理上,6 种模块加上线路已经足以构建 CNN 通用机了:电阻器,电容器,开关,VCCS,逻辑寄存器和逻辑门。正如数字计算机一样,模拟神经计算机也可以引入储存的可编程性,从而使可视的微处理器能够实现。和传统微处理器一样,为了使人类用户能够理解,储存可编程性需要一种复杂的计算基础架构,包括高级语言、编译器、宏代码、解释器、操作系统以及物理代码。使用这种计算基础架构,可视微处理器可以像传统的数字微处理器那样,通过把程序下载到芯片上来执行。写一个用于模拟 CNN 算法的程序和写一个 BASIC 程序一样简单。

关于计算能力,CNN 计算机在处理复杂任务时提供比传统技术高一个数量级的速度。同时,在尺寸、复杂度和功耗方面也有优势。芯片上一个完整的 CNN 通用机,包括一个 64×64 阵列的 0.5 微米 CMOS 细胞处理器(图 6.29)。每一个细胞不仅被赋予图像和视频的直接视觉输入传感器功能,还有通信和控制电路,局部模拟以及逻辑存储的功能。CNN 细胞把离它们最近的邻居以及外界连接起来。一个拥有 4096 个细胞处理器的 CNN 芯片可以达到 3 万亿 OPS(每秒运算次数)的计算能力,比

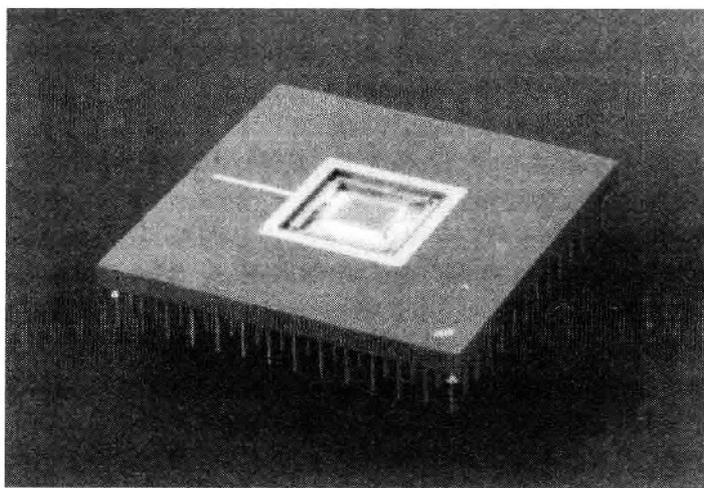


图 6.29 CNN 通用芯片的最初原型之一[6.38]

高级的奔腾处理器要快一千倍。通过开发纵向的成套技术,芯片上由 200×200 阵列组成的 CNN 通用机结构计算能力可以达到 10^{15} OPS。因此,CNN 通用芯片可以实现万亿 OPS 甚至千兆 OPS,这正是高速目标识别和跟踪、制造流程中的实时视觉检验以及智能视觉识别环境和动态所需要的。

CNN 通用芯片是信息技术的一个里程碑,因为它是第一个完全可编程的、工业适宜的、类似人脑存储程序的动态阵列计算机。CNN 是极其复杂的计算系统,因为它包括了拥有超级计算机计算能力的大规模平行焦平面阵列。除了它的计算能力,拥有独特类似人脑架构的 CNN 通用芯片,可以用来执行类似大脑的信息处理任务,这是传统数字计算机迄今无法实现的任务。自适应传感器计算机的发展,未来将成为机器人和高技术医学的挑战。

从理论的角度来看,CNN 通用机给出了关于计算过程的动力复杂性很深刻的见解。第 5.6 节根据元胞自动机的复杂性分类或多或少受到计算机实验中模式生成的经验观察的启发,CNN 方法表达了有关动力复杂性在数学上的精确测量。基本的思想是把元胞自动机理解为 CNN 的一种特例,它可以被非线性动力学系统吸引子的精确代码和唯一复杂性指数所刻画。

一行中每个元胞带有两个近邻的一维元胞自动机(图 5.24a)由一个布尔函数所确定,这个函数有三个变量,分别表示两个近邻和一个元胞本身。我们考虑耦合元胞 C_i ($i = 0, 1, 2, \dots, M$) 的环。在 CNN 的语境下,每一个元细胞都被假设成一个动力学系统,带有状态 x_i , 一个输出 y_i , 以及三个输入 u_{i-1}, u_i, u_{i+1} 。变量 u_{i-1} 表示从左边相邻元胞 C_{i-1} 到元胞 C_i 的输入,变量 u_i 是元胞 C_i 本身的输入,变量 u_{i+1} 表示从右边相邻元胞 C_{i+1} 到元胞 C_i 的输入。布尔函数 B 表示元胞 C_i 的输出 $y_i = B(u_{i-1}, u_i, u_{i+1})$ 。在这个意义上,任何有相邻元胞的一维元胞自动机都可以表示

为含有 3 个二进制变量的布尔函数的真值表(图 6.30)。因为 3 位的字母有 $2^3 = 8$ 种可能,所以布尔函数 B 中有 $2^8 = 256$ 种可能。

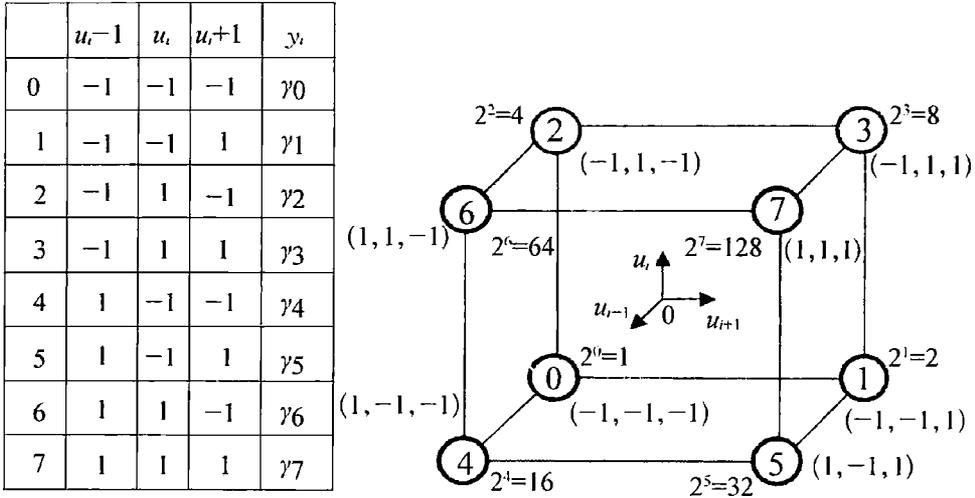


图 6.30 用布尔函数的着色布尔立方体表示一维元胞自动机^[6.39]

为了用具有微分方程的动力系统来刻画元胞自动机,真值表中的二进制变量并没有用常规的 0 和 1 这些符号来表示,而是采用整数 -1 和 1。256 个布尔函数真值表的通用方案,如图 6.30 所示。每个布尔函数可以刻画为一个唯一的代码数,如果我们将输出 $y_i = (\gamma_7, \gamma_6, \gamma_5, \gamma_4, \gamma_3, \gamma_2, \gamma_1, \gamma_0)$ (其中 γ_i 的值为 -1 或 1),替换成 $y_i = (\beta_7, \beta_6, \beta_5, \beta_4, \beta_3, \beta_2, \beta_1, \beta_0)$ (其中 β_i 的值为 0 或 1)。对应的代码数,就是整数 $N = \beta_7 \cdot 2^7 + \beta_6 \cdot 2^6 + \beta_5 \cdot 2^5 + \beta_4 \cdot 2^4 + \beta_3 \cdot 2^3 + \beta_2 \cdot 2^2 + \beta_1 \cdot 2^1 + \beta_0 \cdot 2^0$ (其中 $N = 0, 1, 2, \dots, 255$),因为 256 个布尔函数中 8 位的字有 256 种不同的组合方法。

几何学上,每一个有 3 个二进制变量的布尔函数都可以唯一地被一个带有 8 个顶点的布尔立方体表示(图 6.30)。立方体的中心正是三个向量 u_{i-1}, u_i, u_{i+1} 所表示的三维空间的原点。每一个顶点 $k(k = 0, 1, 2, \dots, 7)$ 的坐标 (u_{i-1}, u_i, u_{i+1}) 与真值表中的 k

行是一一对应的。如果我们用 0 和 1 代替 -1 和 1, 顶点数字 k 就是坐标 (u_{i-1}, u_i, u_{i+1}) 中的二进制码。靠近顶点 k 的数字 2^k 是它的十进制等量表示。如果 y_i 值为 1, 那么顶点颜色是红的; 如果 y_i 值为 -1, 那么顶点颜色是蓝的。很明显, 一个着色布尔立方体跟相应的真值表表示同样的信息。如果我们将十进制数 2^k 与布尔立方体的红色顶点 k 联系在一起, 可以获得布尔函数中的代码数 N 。在一维元胞自动机相应的规则中(图 5. 24a), 红色顶点代表输出 1, 蓝色顶点代表输出 0。例如, 规定 $N=110$ (图 5. 18e) 对应着带有红色顶点 1, 2, 3, 5, 6 和蓝色顶点 0, 4, 7 的布尔立方体。于是, $110=2^1+2^2+2^3+2^5+2^6$ 。

256 种不同颜色的立方体, 对应着 256 个一维元胞自动机的布尔函数。这种着色立方体的空间几何, 开创了刻画布尔函数结构复杂性及其相应元胞自动机与规则的新方法。关于前述章节提到的无耦 CNN 的布尔函数, 我们将区分线性可分隔规则与线性不可分隔规则。在元胞自动机的着色立方体背景下, 可分隔性指的是把顶点分隔为同色族群的(平行)截面数。例如对于规则 110 来说, 我们可以解释为两个分隔的相应着色立方体的平行截面, 它在图 6. 31b 中由两种不同颜色显示出来。红色顶点 2、6 位于黄色平面上方。蓝色顶点 0、4、7 位于黄色和浅蓝色平面之间。红色顶点 3、1、5 位于浅蓝色平面下面。众所周知, 法则 110 的元胞自动机是通用图灵机中的 256 种自动机的几种类型之一。在沃尔弗拉姆第三类计算机实验(图 5. 24e) 的意义上, 它产生出了非常复杂的图案。

规则 232 是一个能产生简单图案的自动机例子。只有一个分隔平面将相应的布尔立方体截成分隔的有色点(图 6. 31a): 红色顶点 3, 5, 6, 7 位于浅蓝色平面上方; 蓝色顶点 0, 1, 2, 4 位于浅蓝色平面下方。一个着色的带有三个平行分隔平面的布尔立方体如图 6. 31c 所示, 它代表着规

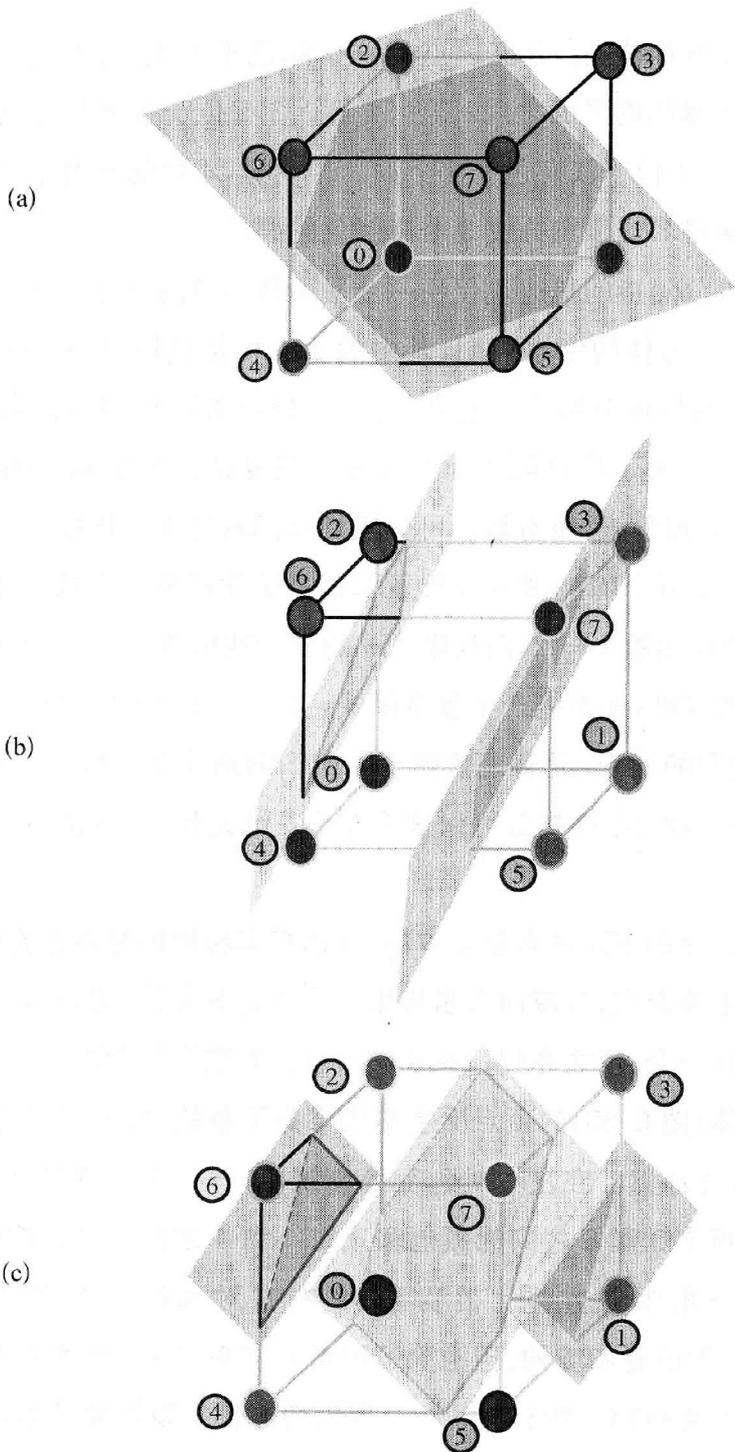


图 6.31 着色布尔立方体中的分隔平面^[6.40]
(a) 规则 232; (b) 规则 110; (c) 规则 150。(见书前彩插。)

则 150 的元胞自动机：蓝色顶点 6 位于绿色平面上方；红色顶点 2, 4, 7 位于黄色和绿色的平面之间；蓝色顶点 0, 3, 5 位于黄色和浅蓝色平面之间；蓝色顶点 1 位于浅蓝色平面下面。很明显，不可能用两个平行的任意位置的平面将 8 个顶点分成 3 个有颜色的群。

线性可分隔指的是通过仅用一个平面将着色的顶点分开的规则。对 256 个布尔立方体的考察表明，其中的 104 种是线性可分隔的。剩下的 152 种不是线性可分隔的。通常，每一个规则都可以被各种各样的平行平面所分隔。为了将分隔平面当作唯一的复杂性指数 κ ，选择最小的数字是必要的。很明显，所有线性可分隔规则都有复杂性指数 $\kappa = 1$ 。剩下的 152 个线性不可分隔规则的分析显示其复杂性指数为 2 或 3。例如，规则 110 的复杂性指数 $\kappa = 2$ ，而规则 150 的复杂性指数 $\kappa = 3$ 。任何复杂性指数 $\kappa = 1$ 的规则，都不能产生复杂模式，甚至其对于随机的初始条件亦如此。复杂现象的涌现，显著地依赖于 $\kappa = 2$ 的最小复杂性。在这个意义上说，数值为 2 的复杂性指数可以被看作是一维元胞自动机的复杂性阈值。

所有的 256 种布尔立方体，可以根据相同的复杂性指数值分类。如果变换存在，对应的布尔规则被认为是等价的，可以将一个规则映射到另一个，反之亦然。在红〈—〉蓝互补变换的情况下，对应的布尔立方体(图 6.30)的顶点颜色彼此都是互补的，即相应的红色顶点变蓝，反之亦然。在左右对称变换情况下，一个布尔立方体(图 6.30)中的顶点 3 和 6 之间的颜色和顶点 1 和 4 之间是可互换的，以获得另一个布尔立方体。很明显，在左右对称性变换下的规则 150(图 6.31c)是不变的，因为除了顶点 3 和 6(蓝)之外顶点 1 和 4 有同样的颜色(红)。所有属于布尔规则的等价类型的成员都有着同样的复杂性指数，并显示出了可以由彼此预测的动态行为。这样，只研究每一个等价类型的一个代表成员就足够了。总之，33 个独立的线性

可分隔规则和 47 个独立的线性不可分隔规则是可鉴明的。这样,带有 3 个二进制输入的 256 个布尔函数的非线性动力学和动态复杂性,只用 80 个独立代表就可以描述。

每个一维元胞自动机或带有规则数 $N(N = 0, 1, 2, \dots, 255)$ 的布尔函数,可以被映射到相应元胞自动机非线性网络的非线性动力系统当中。在 CNN 的语境下,带有相邻元胞的一维元胞自动机可以被认为每个元胞 C_i 带有 1×3 相邻元胞的 CNN,它有着输入 u_{i-1}, u_i, u_{i+1} (来自两个相邻元胞 C_{i+1} 和 C_{i-1} 以及元胞 C_i 本身) 和输出 y_i 。对于这种类型的 CNN 来说,元胞 C_i 中未来状态随着时间的演变依赖于过去的元胞状态 x_i , 三个输入 u_{i-1}, u_i, u_{i+1} , 以及输出 $y_i = y(x_i)$ 。这样,对于产生所有 256 种规则的非线性动力系统由状态方程定义时,其形式: 在时间 $t = 0$ 时有 $\dot{x}_i = f(x_i, u_{i-1}, u_i, u_{i+1})$ 和相同的初始条件 $x_i(0) = 0$ 。元胞 C_i 中的输出 y_i , 是根据输出方程 $y_i = y(x_i) := \frac{1}{2}(|x_i + 1| - |x_i - 1|)$ 从状态 x_i 产生的。

图 6.32 显示规则 2, 110, 150 和 232 的 CNN 中的非线性动力系统。每个规则的真值表是以元胞自动机(与图 5.24a 对比)基因代码的形式来表现的。每一个图案都包含 30×61 像素,由规则数 N 的一维元胞自动机产生。第一行对应于初始图案,除中央像素为“1”(红色)之外所有像素为“0”(蓝色)。接着 29 个迭代的演化,在第 2 行到第 30 行中罗列出来了。显然,这些 CNN 产生的图案等同于相应的元胞自动机。每一个规则的复杂性指数 k 被标注在每个象限的右上角。

这些非线性动力系统的吸引子,精确地编码为与其布尔函数、布尔立方体有关的真值表 $N(N = 0, 1, 2, \dots, 255)$ 。因此,我们在状态方程(例如,图 6.32)中的输出 y_i 代之以其输出方程 $y_i = y(x_i) := (1/2) \times (|x_i + 1| - |x_i - 1|)$, 并且考虑状态方程 $\dot{x}_i = g(x_i) + w(u_{i-1}, u_i, u_{i+1})$,

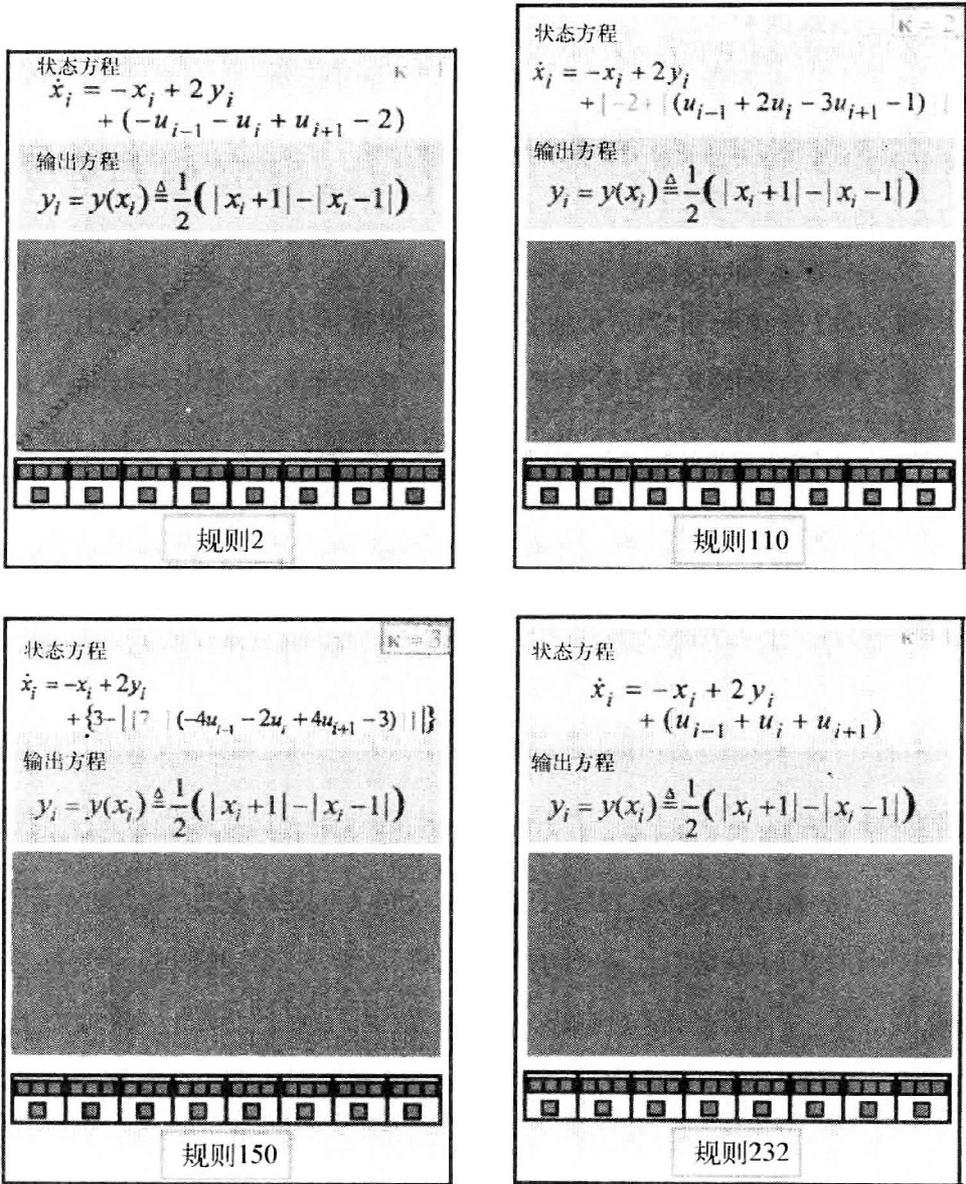


图 6.32 非线性动力系统产生规则 2, 110, 150 和 232^[6.41]

见书前彩插。

$g(x_i) = -x_i + |x_i + 1| - |x_i - 1|$ 以及剩下部分 $\omega(u_{i-1}, u_i, u_{i+1})$ 。因为非线性函数 $\omega(u_{i-1}, u_i, u_{i+1})$ 将实常数传递给相应布尔立方体的坐标为 (u_{i-1}, u_i, u_{i+1}) 的每个顶点 $n (n = 0, 1, 2, \dots, 7)$, 或者给相应真值表 (图 6.30) 的每一行 n , 我们可以写成 $\omega(n) := \omega(u_{i-1}, u_i, u_{i+1})$ 。然后,

状态方程被重新表现 $\dot{x}_i = g(x_i) + w(n) := h_n(x_i)$ ，它们对应着每个布尔立方体的顶点 n 或相应真值表行数 n 。对于这八个微分方程中的任意一个，我们可以在相应的相空间里研究它的轨迹和吸引子。图 6.33 显示 $w(n)$ 分别为正或负的两种典型情况。两个轨迹之间的 Γ 曲线表示 $g(x_i)$ (“驱动点函数”) 的一部分。上方的曲线表示 $w(n) > 0$ 时 Γ 曲线垂直向上平移，下方的曲线表示 $w(n) < 0$ 时 Γ 曲线垂直向下平移。因为初始条件总是假定为 $x_i(0) = 0$ ，如果 $w(n) > 0$ 轨迹从上方的初始点 $P_+(0)$ 开始，或者如果 $w(n) < 0$ 轨迹从下方的初始点 $P_-(0)$ 开始。因为上方曲线上初始点 $P_+(0)$ 右边所有的点都满足 $\dot{x}_i > 0$ ，轨迹必须单调地沿着右边直至到达位于 $x_i = x_i(Q_+) > 1$ 的右端平衡吸引子的点 Q_+ 。相反，如果 $w(n) < 0$ ，轨迹必须从下方的初始点 $P_-(0)$ 开始，向左移动直至到达位于 $x_i = x_i(Q_-) < -1$ 的左端平衡吸引子的点 Q_- 。

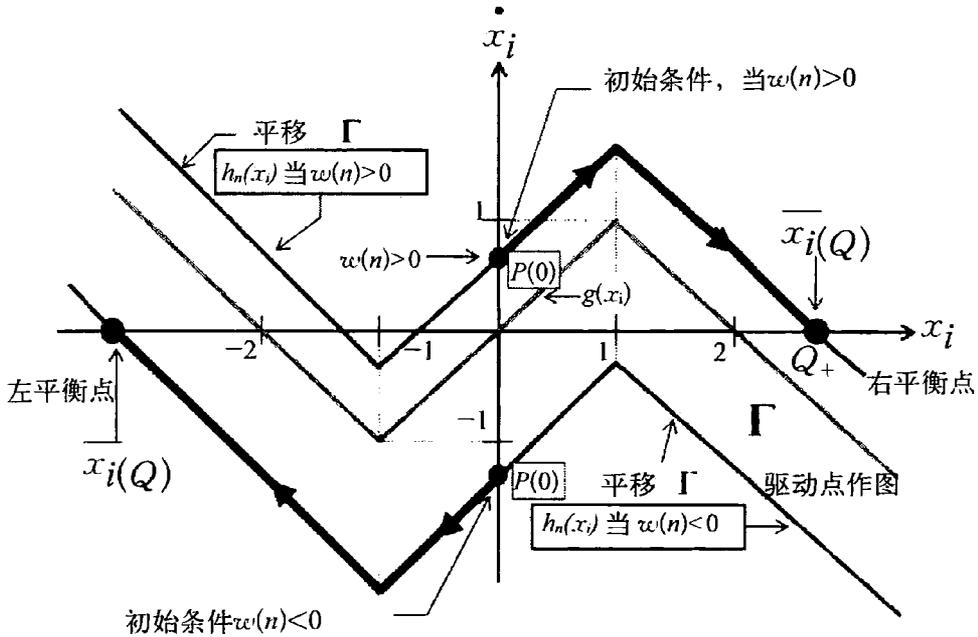


图 6.33 CNN 状态方程相空间中的轨迹和吸引子^[6.42]

在前一种情况，相应输出 $y_i(t)$ 收敛于布尔状态 $y_i = 1$ ，后一种情况则收敛于布尔状态 $y_i = -1$ 。如果我们在它的平衡值 $x_i(Q_+) > 1$ 时将顶

点 n 涂成红色, 在 $x_i(Q_-) < 1$ 时涂成蓝色, 那么所有与布尔立方体相关的 8 个顶点的颜色就唯一地取决于 8 个关联微分方程的平衡解(吸引子)。每个规则都有 8 个吸引子。CNN 芯片可以在几纳秒之间, 实际上就是瞬间解出这些方程。

分隔布尔立方的平面, 可由相应状态方程的非线性函数 $w(u_{i-1}, u_i, u_{i+1})$ 确定。几何学上, 它被解释为一个标量函数 $w(\sigma)$, 其中唯一的变量 $\sigma := b_1 u_{i-1} + b_2 u_i + b_3 u_{i+1}$, 代表着具有向量 b_1, b_2, b_3 的坐标系 (u_{i-1}, u_i, u_{i+1}) 上的轴线(图 6.30)。布尔立方体中的每一个着色顶点, 都可以通过垂直投影而被映射到 σ 轴。如果我们在 σ 轴上绘制 $w(\sigma)$ 曲线, 我们可以观察到, 令 $w(\sigma_0) = 0$ 的零交叉点 σ_0 将投影轴上的着色点分隔为一些相同颜色的簇。因此, $w(u_{i-1}, u_i, u_{i+1})$ 有时候被称为判别函数。 $w(\sigma)$ 的每一个零交叉点在三维坐标系 (u_{i-1}, u_i, u_{i+1}) 中定义一个二维平面 $\sigma_0 = b_1 u_{i-1} + b_2 u_i + b_3 u_{i+1}$, 将布尔立方体中的着色顶点分隔为相同颜色的簇(图 6.31)。如果着色的顶点可以仅仅被一个平面分隔, 我们就将相应的布尔规则称为线性可分隔。现在原因已经很明显: 在这种情况下, 相关的判别函数 $w(\sigma)$ 是一条直线。如果有多个分隔平面, 与非线性判别函数 $w(\sigma)$ 有关的分隔曲线就有多个零交叉点。那么相应的布尔规则被称为线性不可分隔。投影技术为计算布尔规则的复杂性指数及其相关的一维元胞自动机提供了一种精确步骤。

线性可分隔局部规则有一个复杂性指数 $\kappa = 1$ 。我们前面分析了两个输入(第 6.2 节)、九个输入(第 6.3 节)和三个输入(第 6.4 节)的线性可分隔布尔函数。一般而言, 它们是所有维度的布尔函数下最简单的模块。从工程的观点看, 它们也是芯片上执行的最简单模块。所有 104 种

线性可分隔规则被用在 CNN 通用芯片(CNN 通用机)上,并且可以不通过程序作用于硬件。技术上的优点是,线性可分隔规则是芯片上实施最快的。它们借助硅技术仅仅需要几纳秒,如果借助光学技术可以达到光速。相关元胞自动机的速度不依赖于阵列的尺寸。它在 10×10 阵列上运行一个二维线性可分隔规则的时间与在 CNN 芯片上运行元胞自动机 $10^6 \times 10^6$ 阵列的时间是一样的。

在无耦合 CNN(第 6.3 节)的语境中,我们提到仅用几个标准逻辑运算(与、或、非)将有限数量的线性可分隔规则结合在一起,就可以实现九个输入的线性不可分隔布尔规则。作为这种基本见解的特殊情况,具有三个输入的所有 152 种线性不可分隔规则,都可以分解为最多三种线性可分隔规则和仅用“与”、“或”逻辑运算结合的像素。图 6.34 显示规则 110 分解的例子,涉及只有一个“与”运算(a)以及带有一个“与”和一个“或”运算的规则 150(b)。因此,规则 105 是在芯片上执行的最复杂一维

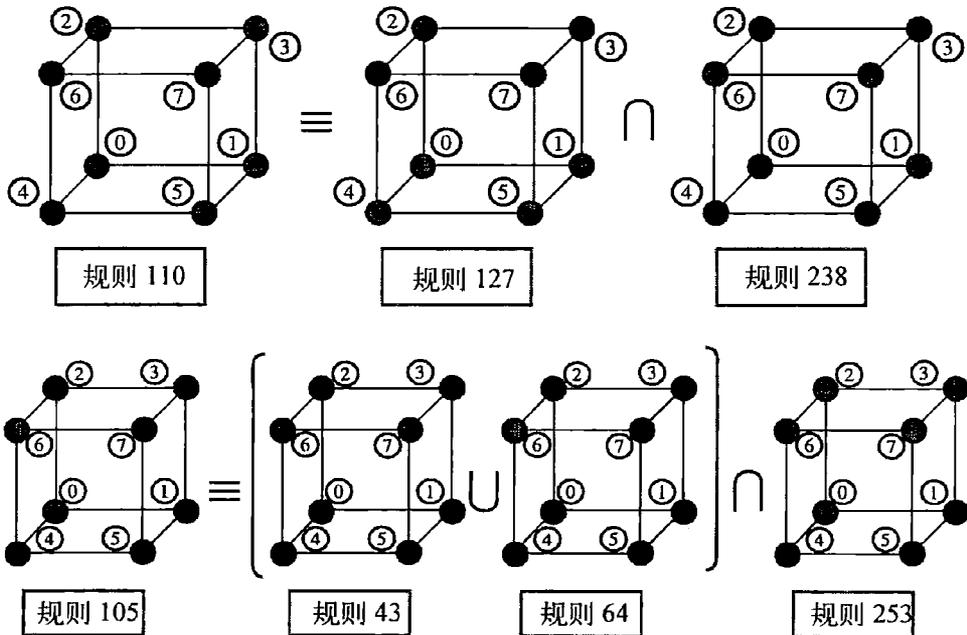


图 6.34 根据线性可分隔规则得出的线性不可分隔规则^[6.43]

见书前彩插。

元胞自动机之一。考虑动态复杂性时,规则 150 拥有最高复杂性指数 3。

6.5 有机计算、神经仿生学和具身机器人

有机体的自然进化已经成为计算和机器人学的一个重要范式。有机计算的最终目标是构造自组织计算系统,该系统能够呈现所期望的涌现行为,正如有机体产生于自然进化那样。^[6.44]涌现是指不与系统的任何一个特定部分关联的系统属性。^[6.45]在非线性动力学系统中,整体大于其部分之和。在机器人学中,它指的是代理者-环境(agent-environment)的相互作用而非事先编程的行为。如果整个行为预先定义,例如规划者预先算好手的轨迹时,一般是不采用这一术语的。使用高水平本体论设计的代理者,并没有为涌现或者新奇行为预留空间。一个领域或者高水平的本体论,是由完整的基础词汇表组成的——原始的元素——在设计系统时使用的。这些是仅仅可以使用的组分:每样东西都是在基本元素的顶上构造成的。领域本体论为一段延长的时间或系统整个寿命期保持常量。众所周知的例子,是专家系统中受缚的知识表现。因此,只要我们知道哪个环境下系统可以被应用时,高水平的本体论就能使用,例如在传统的计算系统或工厂机器人系统中。如果环境是未知的,更好的策略是定义一个低水平的本体论,并引入带有宽广的自组织性能的冗余。

我们可以从自然中学到什么呢?在未知的环境下,更好的策略是定义一个低水平的本体论,引入冗余(例如,在此有很多感知系统),并为自组织留下空间。低水平的机器人本体论去定义系统的如身体、感知系统、运动系统以及在其组分之间的相互作用,这些可能是机械的、电的、电磁的、热的,等等。根据复杂系统的探究方式,这些组分由产生出整个系统宏观动力学的一些微观状态来刻画。

以带腿机器人为例。它的腿有关节,可以呈现不同的角度,其上可以受到各种各样的作用力的作用。依据角度和受力的情况,机器人将呈现不同的位置以及表现不同的行为。进一步,这些腿之间相互联接并跟其他元素联接。如果六条腿的机器人抬起一条腿,这将立即改变所有其他腿的受力情况,尽管其明显联接关系完全不必说明。这种联接是隐含的:它们通过环境被作用,原因是机器人的重量、身体的稳定度以及它站立的面。虽然这些联系都是基础性的,它们并没有明确地加以说明,除非设计者希望这样做。这种联接可能存在于我们甚至没有察觉的基本组分中。电子元件可能通过电磁效应发生相互作用,而设计者并没有意识到。这些联系可能产生具有高度适应性的行为适应模式(序参量)。但是它们也可能引发突然的不稳定性和混沌行为。在我们的例子里,机器人的腿之间的沟通是隐含的。一般说来,低水平说明中的隐含沟通比高水平本体论的要多。以受缚知识表达的严格模拟的代理者中,只存在着已经明白说明了的东西,而在复杂的真实世界中,存在着多种多样的作用力和性质,甚至设计者并没有将它们明显地表示出来。因此,我们必须在试验模拟的条件下研究那些系统的非线性动力学,以找到适合的序参量,并阻止由于不希望的涌现行为导致的吸引子。

在动力系统的探究方式中,我们首先需要定义的是,什么系统是我们想要模拟的,然后我们必须建立的微分方程或差分方程。时间序列分析和数据发掘中的进一步判据,可以有助于建立适当的相空间、轨迹和吸引子。^[6.46]在有机计算中,一种探究方式是将代理者及其环境分别建模,然后使之状态变量相互关联来模拟代理者-环境相互作用。^[6.47]代理者 A 和环境 E 的动力学定律,以微分方程的简化程式来描述: $dx_a/dt = A(x_a, p_a)$ 和 $dx_e/dt = E(x_e, p_e)$, 式中 x_a 和 x_e 代表其状态变量,比如关节的角度、身体的温度或者空间的位置; p 代表诸如阈值、学习速率、营养补给、燃料供应这样的参数,以及其他的变化的关键特征。代理者和环境

可以通过定义感知函数 S 和运动函数 M 而耦合起来。环境通过 S 而影响代理者。代理者通过 M 而影响其环境。 S 和 M 构成了代理者-环境的耦合, 即 $dx_a/dt = A(x_a, S(x_e), p_a)$ 和 $dx_e/dt = E(x_e, M(x_a)p_e)$, 式中 p_a 和 p_e 并不包含在耦合之中。在有障碍的环境中的行走机器人或移动机器人就是这样的例子。在这种情况下, 基本分析的难题可以叙述如下: 给定的环境动力学 E , 代理者动力学 A , 以及感知函数 S 和运动函数 M , 去解释所观察到的代理者行为是怎么产生的。

动力学控制器之一在代理者的角度传感器被关掉而不能感觉到腿的位置时会发生演化。在这种情况下, 神经元的激活层展示出一种极限环, 它使得代理者单腿站立并有节奏地摇荡。由此, 可使机器人走起来。系统的状态再三地改变机器人的姿势, 如从站立地面到摇荡, 从抬起腿再返回。这个例子说明, 动力系统的探究方式可以综合地加以应用, 以设计和建构机器人及其环境。然而, 一般说来, 动力系统是以分析的方式加以应用的: 它从给定的代理者-环境的相互作用出发, 以微分方程的形式以公式来表达。复杂的行为可以通过对方程的求解、近似或者模拟来实现, 以找到其动态吸引子。相互作用系统的动态吸引子可以用来驾驭代理者, 或容许它以所期望的方式进行自组织。

显然, 自组织导致了在进化的相继水平上的新现象的涌现。大自然已经表明, 为了管理在这些进化水平上的不断增长的复杂性, 自组织是必要的。然而, 非线性动力学也可以产生出那些从长期来看是无法预测和控制的混沌行为。在有机体的复杂动力系统中, 监测和控制是分等级实现的。现在依然没有最终的和统一的生物计算理论。我们仅仅知道复杂动力学系统框架下的生物系统、神经系统、认知系统和社会系统的一部分内容。然而, 甚至在物理学中也还没有所有物理力的统一理论, 科学家依然使用一套未完整的拼凑起来的理论而成功地工作。为了深入挖掘有机计算, 我们需要交叉学科的合作, 包括技术科学、自然科学, 计算机科学和

认知科学,以及人文学科。

有机计算的目标是构建自组织的计算系统,由此提供的服务可以帮助我们管理越来越复杂的世界,支持未来世界中人类可持续发展的基础设施。复杂系统探究方式将使我们能够在科学、技术、工业、经济以及甚至在文化生活中,创建一种新的计算机辅助方法论。但是我们决不要忘记,我们必须对技术发展所指向的方向及其伦理学目标作出决定。今天,目标是多种多样的,包括认识论的兴趣和科学的兴趣,还有技术、经济、文化以及最后同样还包括军事上的应用。毫无疑问,医学研究和应用必定在所有这些研究目标列表中处于高端。这里要提醒读者注意一个老观念:医学的目的不仅仅在于从事科学的认知和研究,而且还在于运用。运用也不仅仅是工程意义上知识的技术应用,而且也是为了医治、帮助和康复。知识和研究不过是实现医学的这种基本目的的工具,自从希波克拉底时代以来医学的基本目的就是保护生命。^[6.48]

人的中心器官是大脑。因此,医学上保持大脑健康的任务这种重大责任就落在了神经外科医生身上。他们必须将其医学治疗涉及到针对整个心-脑实体的运作。为了对人的心-脑实体提供最好的可能医学治疗,先导的努力一直在进行中,即通过研究来致力于拓展和提高诊断和治疗能力,包括可能的神经手术、手术计划、手术技术和术后恢复。正如我们已认识到的,人的心-脑实体是进化中产生出来的最复杂的系统。因此包括计算神经科学、物理学、工程学、分子生物学、医学和认识论的跨学科研究纲领,对于处理这种复杂器官是必要的。这也就是为什么,一些科学家已经开始了对于大脑和心智的跨学科研究纲领中,包括伦理学和人类学方面。我们将其称为“神经仿生学”。

一般而言,“仿生学”意味着用技术的和人工的程序和系统来模拟自然功能和过程。众所周知的这种探究方式的例子是,飞机和潜水艇的设计模仿了鸟类和鱼类身体的空气动力学。历史上,仿生学是人类的一种

古老的梦想,即试图以用技术手段去模拟自然原理,从而管理复杂的生命问题。在这种传统中,神经仿生学意味着,阐明普通的技术—生物学如何去加强自然神经元的发生学和功能性质以及发展起神经修复术,制备出以硅片和(或者)有机材料为基础的类似于大脑的计算系统。这并非弗兰肯斯坦的梦想。考虑一下患有大脑肿瘤或受意外伤害的病人的凄凉情景,以及神经仿生学如何有可能帮助他们。

神经外科是关注中枢神经系统和人脑的治疗条件的专门医学学科。^[6.49]由于大脑是人的人格和智能的生物学载体,神经外科医生不仅仅要记住有关大脑的神经学的原理,而且还要具有人的心智及其功能的知识。神经外科已经在病人治疗上取得了进步。通过引入诊断可视程序(如CT和核磁共振断层照相术),在手术中运用微手术程序,这方面已经取得了显著的成功。

不过,关于脑疾病人治疗的根本性问题仍然没有解决。例如,成人的中枢神经系统中,仅仅可以换掉受损区组织中很少一部分功能组织。这是由于与身体中的其他细胞截然不同,神经细胞在胚胎阶段完成以后不可能进一步分裂。只有胚胎的组织才有这样的潜能,可以使自己适合于周围的宿主组织。所以,疾病或事故引起神经细胞组的损坏往往导致永久性功能障碍。在这个应用领域,人工复杂网络及其自组织原理将受到高度关注。

医学史上曾有过用自体移植物来恢复受损的周围神经的尝试。这种方法是以这样的事实为基础的:甚至成人也有能力再生神经细胞的延伸,这种延伸从脊髓伸向目标器官的外周。因此,部分功能上不重要的敏感神经被从身体中的适当地点移走,并插入想要恢复的被离断的神经区域。然而,被离断神经纤维的再生至今还没有得到完全的理解。因此,控制移植物的生长是不可能的,移植物中包括了数百的指向目标器官的单个神经细胞延伸。由于中枢神经系统是不可能再生的,对于非常接近脊

髓的损伤情况,移植也是无效的。

对于外周神经移植的一个改进,是在分子生物学的领域中提出来的。对于神经细胞及它们联接的细胞(如神经胶质细胞和施万细胞)的生理学和生物化学的理解,可能导致新的神经移植方法。一种中枢神经系统中组织替代的高级方法是身体中自己的细胞移植,这样的细胞在移植前已是遗传上选择过并适应了。神经生长因子的效应、在移植源和受体大脑的目标区域之间的关系,以及许多其他分子生物学的问题,都必须加以研究。这些方法是以遗传工程的知识为基础的。

另一个实施外周神经移植的可能的方法,是运用人工的而不是生物的移植体。用人工替代物来恢复神经系统的受损部分,这在医学和神经病学中都已经进行了尝试。

人工移植体配有学习算法作为自然的“蓝本”。与 MCP(麦卡洛克-皮茨)网络不同,它们是实施工作的 BPN(生物脉冲处理)网络。图 6.35 示意了这种神经技术植人体的一般模式:学习神经网络编码感觉和运动控制信号,使之成为许多平行脉冲序列,被一组植入的微接触体接受,以刺激完好的神经(图 6.35a)。由神经寄存的信号,被神经网络解码,用来控制运动假体(图 6.35b)。

人们对于脊髓受损的病人,也尝试了借助于 BPN 系统的电刺激来增进其站立和行走功能。假定外周组织是完好的,外周神经的电刺激引起了肌肉的收缩。这是由适应性学习网络的平行脉冲引起的,学习网络对病人感觉系统的听觉指令进行编码(图 6.35a)。这个系统具有学习能力,因为它通过把感觉反馈到运动的腿上,以适应特定的病人条件。但是,此系统仍然依赖于病人的有意识和能够说话。在下一步的研究中,脑的无意识的意向性必须由脊髓中寄存的信号进行解码。然后这些信号可以被(例如无线电波)送往具有适应性神经编码器的接受器中,再引起如图 6.35a 所示的肌肉收缩。

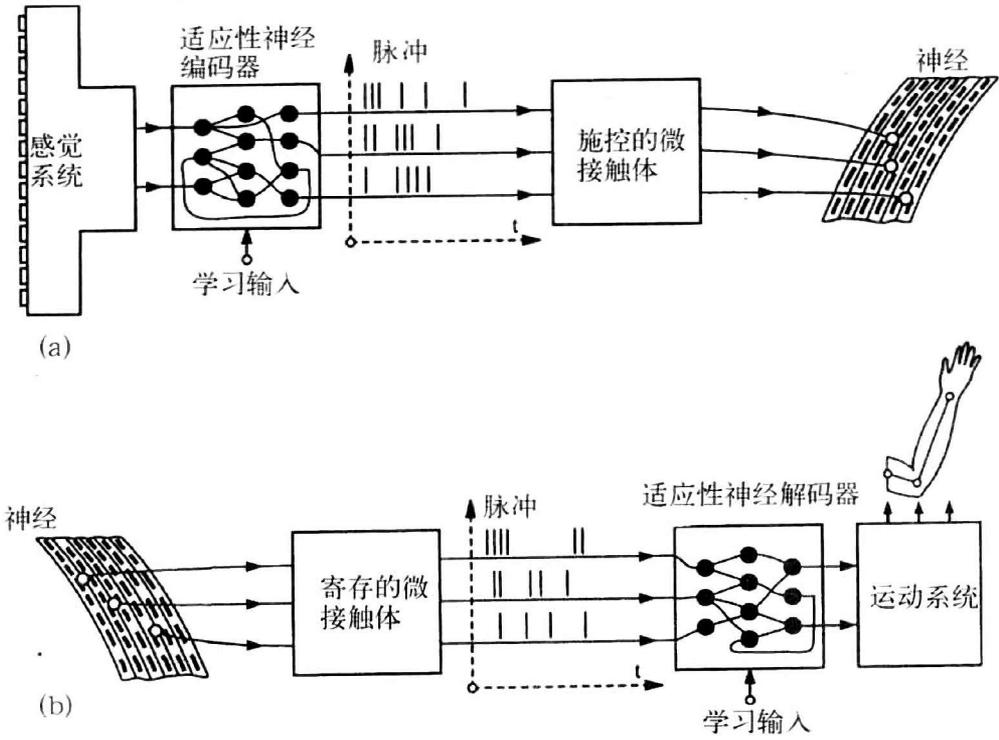


图 6.35 具有学习神经网络的神经技术假体的一般模式^[6.50]

有一个雄心勃勃的神经技术项目，针对的是一定类型的盲人。视网膜色素变性患者的视网膜层受到一定损坏，而视网膜是负责感觉轮廓、表面、颜色和其他视觉特征的。受损的视网膜层由神经假体沟通。在所谓的视网膜植入体的构造中，观景由镜框中的光子接受器（例如半导体）寄存，其中装备了某种适应性神经网络。外部世界的光信号由神经网络（BPN）处理，神经网络能够学习像人眼一样为感受野建立模型。它们的信号被编码，并测距地输给诱导接受器，在此受损视网膜上有电极阵列，以刺激光神经和中枢神经系统（CNS）。随着这种研究的进展，将不再需要视镜排列，具有适应性神经网络的接受单元可以直接地植人眼中。在这些初步的试验中，神经技术不可能完全地取代种种视觉功能；然而，所存贮的轮廓和表面的感知，将有助于病人把握方向，这就是目前努力的目标。

如果不同肌肉组的刺激可以直接在外周神经的末端分枝处进行,而不用无机金属电极,那么就可以获得决定性进展。这就必须要使用分子装置来实现生物技术的传导性,即要使用从有机分子设计制成的电子元件。过程控制器控制着电极并处理信息,它必定要以人工神经网络为基础,才能够实现高速数据处理,满足人的行走和站立的要求。显然,这些复杂神经网络的发展需要分子生物学、计算神经科学和高技术硬件工程的交叉学科合作。

人工替代受损神经功能的例子还有内耳的耳蜗移植。如果听觉神经是完好的,通过显微外科手术植入一个有 25 个极的电极作为皮质器官的代替物。听觉神经现在由适当的电极脉冲来激发,它们模拟了声音模式。脉冲由以语言知识进行了编程的串行微处理器来控制。但是,在进行切除听觉神经肿瘤的困难手术中,有听觉神经受损伤的危险,结果会造成病人失聪。今天有可能把人工神经网络直接连接在中心听觉通道的区域。于是听觉可以得到恢复而不论听觉神经损失与否。为了获得这种进展,生物技术、计算神经科学和工程技术的交叉学科合作再一次表明是必要的。

一般来说,神经外科手术必须要考虑到如下的临床方面:神经外科的诊断、手术计划、手术技术和神经康复,而将复杂系统探究方式运用于生物技术和计算神经科学可使之得以辅助。在诊断方面,CT 的可视化过程已经开创了一个新时代。由于神经外科医生不得不处理一种通过长期进化而成的最复杂器官,手术计划和进行模拟已成为准备取得成功医治的一个基本步骤。在这一方面,复杂性还意味着病人的人格特征,涉及他或她的特定病史,某种致病过程的病理,个体的解剖特征以及一个手术的可能手术后果。

一种新的方法已经用于实践。一个神经外科手术可以用 CAD(计算机辅助设计)辅助技术来进行模拟。借用特别的程序,用计算机产生出一

个病理解剖的三维重构。在模拟中可以发现潜在的困难,从而在实际的手术中得以避免。手术技术的不断发展,将减少需做的大型开放手术。立体视镜和内窥镜技术对于减少手术引起的损伤是重要的方法。激光技术与神经外科内窥镜、术内可视化过程、计算机控制的调节技术的结合的进一步发展,将成为一种未来有广泛应用的复杂手术工具。

在波士顿的麻省总医院的一个研究小组,已经用磁共振成像技术(MRI)揭示了人的任务激活的功能成像图,这种任务激活是在视皮层中对透光刺激的响应。按时间周期地注入造影剂。采用快速 MRI 扫描而不用注射,甚至初级的视觉皮层成像也实现了。图 6.36 显示了作为复杂

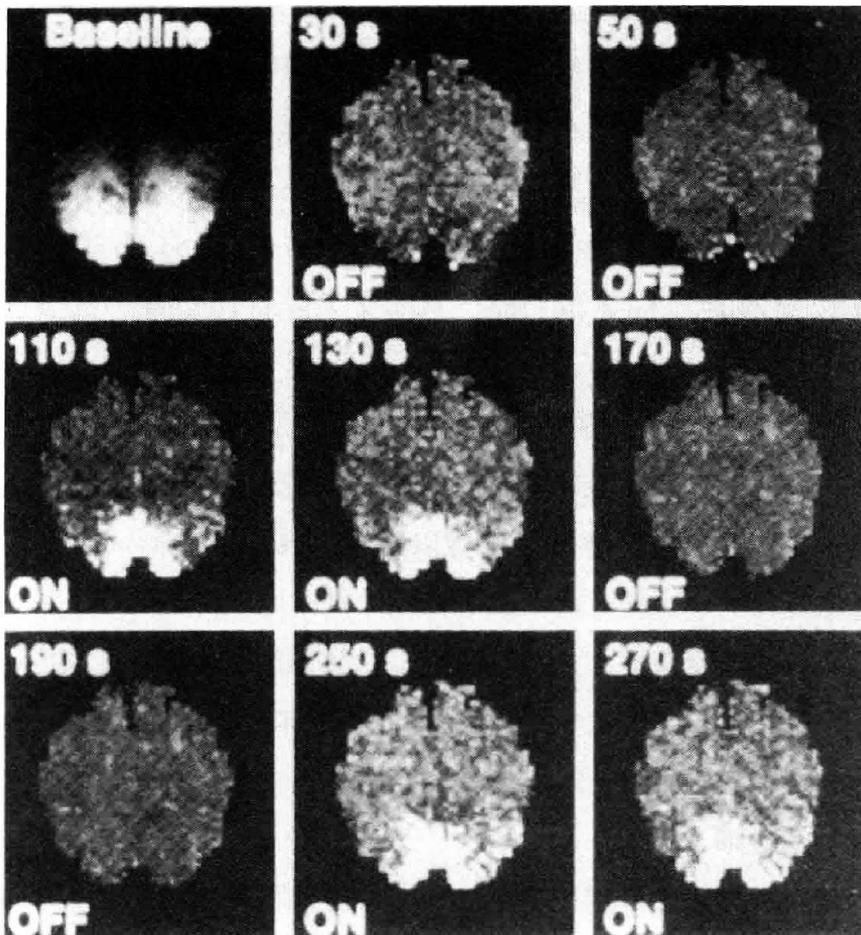


图 6.36 复杂网络的大脑认知活动的实时可视化^[6.51]

网络的脑认知活动的实时可视化。^[6.51]这些高级的基于计算机的复杂神经网络的图像,不仅仅有助于受损的病人,而且最终使我们看见自己的思维、情感和梦想。

幻觉是视觉皮层当中自组织现象所引起的。这种类型的模式感知,相类似于化学或空气动力学中流体的模式形成。在化学里,化学物质的局部非线性互动产生宏观现象,例如振荡化学钟(例如 BZ 反应)。视觉大脑中的模式生成,是由于细胞之间的局部非线性耦合。在活有机体内,视网膜的模式感知与大脑视觉皮层中的模式形成之间有一种空间转换。神经网络的这种皮层-视网膜转换的首次仿真显示出,与主观幻觉体验中的已知模式感知具有显著的相似性。螺旋式隧道模式的感知已经被临床死亡而后复活的人们所描述。隧道尽头的光线有时被解释为某种宗教体验。

细胞神经网络(CNN)是用来模拟产生集体宏观现象的局部神经细胞互动的最佳候选。使用具有局部激活和侧面抑制的模板,设计出一种简单的自主 CNN。同时,也从随机初始条件自发产生一种迷宫模式。在下一个步骤,视网膜皮层图被应用在结果稳定模式上。几何学上,视网膜的一个极坐标点被绘制为大脑皮层笛卡儿坐标点,产生一种螺旋式隧道模式的感知视觉(图 6.37)。CNN 模型的优点是显而易见的:它可以简便地编程到 CNN 通用机器芯片上(见第 6.4 节),在未来的神经外科应用里可以被纳入活体脑中。

发展人工神经网络的一个重要原因在于:以化学元素硅为基础的高度集成电路的生产,不久将达到它的物理极限。硅基电路——微处理器的基础——的进一步微型化,变得不可能了。高度平行计算和自组织的策略对于处理大脑的复杂性是必需的。因此,运用某种新的底物来作为信息处理系统的基础,就显得很关键。在此迈出的第一步,是开始发展以生物元件为基础的分子电子器件。在神经细胞之间的电信号可能通过有

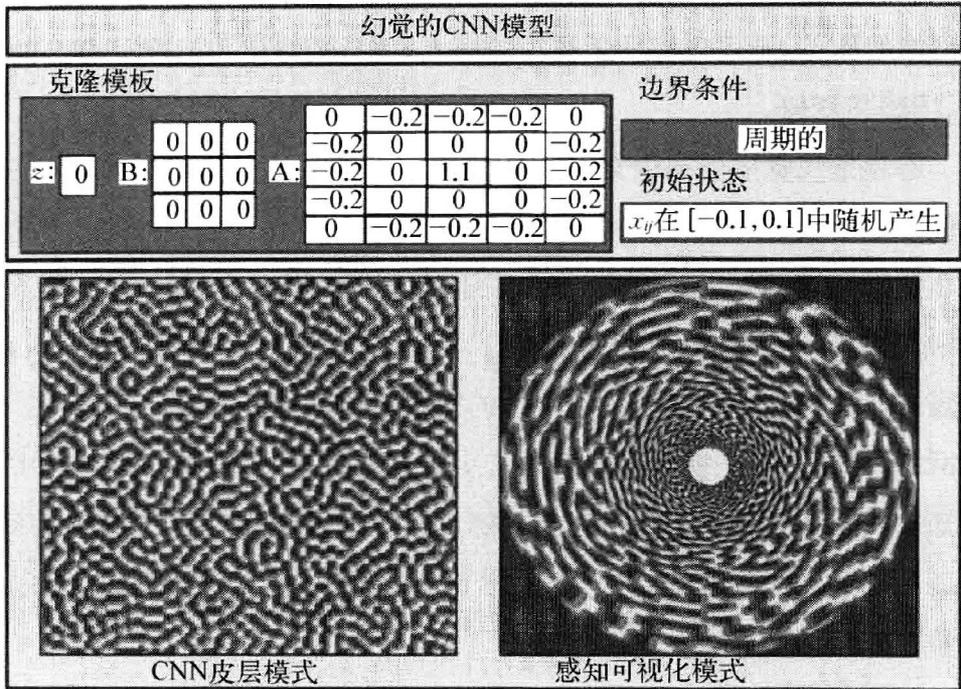


图 6.37 幻觉的 CNN 模型^[6.52]

见书前彩插。

机导体进行传导。

关于计算神经科学,神经网络的计算机模拟可以有助于查明由中枢神经系统和大脑实际运用的算法。现在的人工神经网络模型,主要是用矢量计算机、工作站、特殊的协处理器或阵列处理器(transputer arrays)来进行模拟研究。但是,复杂网络中的空一时平行计算的优点,在用经典计算机来进行模拟时已是全部地或部分地丢失了。只有用特殊设计的神经硬件,才可能满足实时任务的要求。

在纳秒内(标准设计)甚至以光速(在光技术中)处理信息的 CNN,对于神经仿生学的应用来说似乎是最佳选择。例如,CNN 架构与大脑的视觉通路之间具有惊人的相似。一种适当的 CNN 探究方式叫做“仿生眼”,涉及到 CNN 通用机器上结合并执行的视觉模型的形式框架。该分析始于视网膜与视觉通路里一种感受野组织的模型。图 6.38a 显示一个

具有轴突输出的神经细胞,作为许多其他神经元与树突输入的分支。小间隙表示用模板元素模拟的突触。在图 6.38b,位于中心的神经细胞从邻近细胞那里接收到周期性的输出。因此,中心神经元的感受野可以用

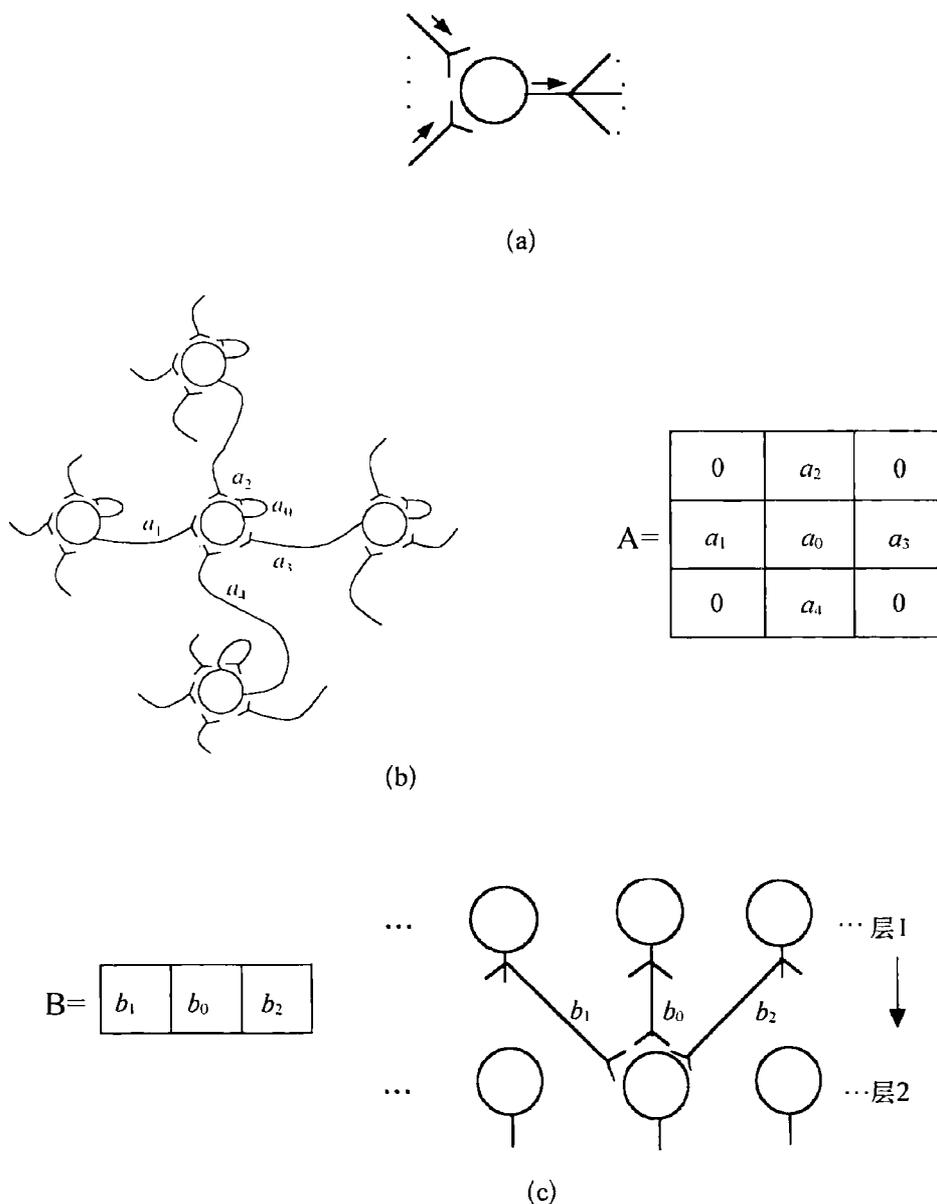


图 6.38 CNN 神经仿生学模型^[6.53]

(a) 神经元; (b) 模板 A; (c) 模板 B。

一个对应 3×3 模板作为其影响的局部区域来模拟。图 6.38c, 显示双层神经网络的一部分, 每一层显示为二维网格的一维表达。位于层次 2 中心的神经元接收到来自输入层 1 的邻居的树突输入。其相应的权重用模板 B 进行模拟。

几种神经解剖学与神经生理学的模型, 可以转译为 CNN 克隆模板。例如, 长度调谐表示在外侧膝状体核(LGN)与视觉皮层中的某个神经元对某个长度的最优导向条做出了最大响应。随着条刺激的长度增加, 响应降低或消失。相应的 CNN 模型检测到水平、垂直、对角方向上长度不超过三个像素的条。视觉皮层的另一个功能是方向选择, 也可以用无耦合 CNN 来实现。认知心理学所研究的视幻觉, 例如箭头幻象, 也可以用一个无耦合 CNN 来模拟。在引入视网膜的“乐高”元素例如用于感受野组织的细胞、突触、模板之后, 一种简化的多层视网膜 CNN 模型可以设计出来并应用在神经仿生学。最终, CNN 通用机器的架构支持许多神经形态时空模型的执行。相同的通用机器架构可以用来模仿动物(例如青蛙、老虎、老鼠、老鹰)的视网膜, 而且也可以为了技术应用来对它们进行合并和优化。在科幻小说中长期与赛博格(cyborg)联系在一起的生物芯片与人工芯片结合现在已经是技术现实, 对于机器人学与医学具有振奋人心的影响。

人们已经设想了 CNN 芯片在癫痫的临床应用。该设想是开发一种缩微芯片装置以预测并阻止癫痫的突然发作。非线性时间序列分析技术已经成熟, 可用来刻画癫痫发作的典型脑电图(EEG)模式并且用来识别引发癫痫神经状态的相变。这些技术主要涉及既有判据的评估, 例如相关维量度、科尔莫戈罗夫-西奈伊熵、李雅普诺夫指数、确定性量度、分形相似性等(见第 2.6 节)。可植入的发作预测与阻止设备已经应用在帕金森病患者。对于癫痫过程, 这样的装置将持续地监护从 EEG 抽取出来的特征, 计算一次眼前发作的概率, 并且提供适当的阻止技术。对于个体患者模式而言, 这两者还应都是高度可调的, 而且应该允许对这些特征进行

实时评估。最终,这种装置应该具有低能耗而且小到足以在缩微的植入系统中运行。这些要求被 CNN 最佳地实现了,借助于它们的大规模并行计算能力、模拟信息处理以及通用计算的容量。图 6.39 显示用于发作预测与阻止的缩微芯片装置。从植入到癫痫区或邻近区域电极所记录的 EEG 数据,输入到时间序列分析系统。该系统使用告警系统(I)抽取迫在眉睫的发作的特征,并支持速效药液的按需提供以阻止发作(II)。

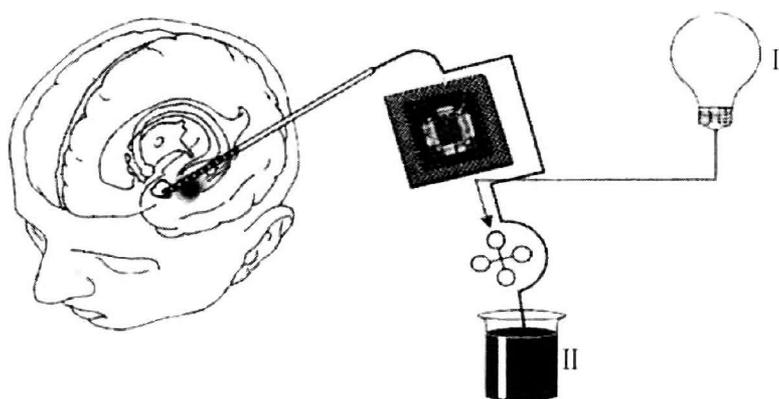


图 6.39 用于癫痫发作的预测和阻止的 CNN 通用芯片^[6.54]

在未来的神经仿生学应用中,神经芯片的训练将引起巨大复杂性的非线性作用动力学,这样的芯片可用作人的神经纤维之间的界面。芯片设计者面临着相互联结的问题:如果成千上万的线路要以物理方式连接成一个神经元,并要执行成所需的数千个神经元,那么这个线路区域将达到这样的数量级,即线路引起的时间延迟将超过代表神经元功能块的运行时间。由于技术结构尺寸的减少受到经济上和物理上的限制,仿生学的设计者现在对相互联结问题倾向于一种构造解。首先,他们要考察神经网络的真实处理时间;其次,要考虑在何种程度上有可能偏离理想的大规模平行计算。

显然,平行计算硬件将显著增加软件的复杂性,并需要新的方法。强大的操作系统、编程工具和灵活的用户界面都必须这样设计,使得容易与系统进行界面通信。这种任务,在由计算机科学知识程度不一的人员组

成的交叉学科队伍中将变得特别重要；以知识为基础的专家系统可以有助于研究小组成员，使之与仿生软件一起工作，并将它们集成进研究小组中。神经网络硬件编程将完全不同于经典的冯·诺伊曼计算机的编程。编程者必须要鉴别必要的网络拓扑和构造，还必须说明具有相互联结模式的神经元的行为。因此，运用异质的混成系统，将神经网络系统和经典的以知识为基础的系统加以集成（在第 6.2 节中已描述），成为神经仿生学中的现实探究方式。

在自然界，运动的复杂模式并不是一个中央处理器计算和控制的，而是通过反馈网的自组织学习算法。一个例子是六条腿蚱蜢以及执行举高、摆动、协调的不同运动模块。关于未知环境的外部信息，由神经网络中突触权重的分布进行隐性地学习和存储。在演化当中，分权的网络模块被用于因条件变迁所形成的不同有机体的构件。对运动信息处理的生物学洞察，已经被应用在机器人学和芯片技术（具身认知）。软计算（soft computing）使用模糊逻辑、遗传与学习算法，以实现灵活性、适应性以及类似人类的信息系统。情感计算（affective computing）旨在识别和模拟人脑作为信息处理的情绪状态。赛博格（控制论的有机体）表达了关于大脑植入神经计算机芯片的远景。神经网络能够识别有关认知与意识状态的大脑活动（例如脑电图信号）模式。接下来的步骤，神经活动模式可以被扫描并下载到超级计算机。接着，当然出现了一个重要的伦理问题：人的个性（不只是 DNA 的基因型）可以被计算系统所克隆和影响吗？

有些人可能担心，混成计算机系统及其复杂性的增长，不经过高度的专门训练是不可能把握的。现在的计算机系统和用户之间的界面必须加以发展。计算机生成图像的操作，应该在“虚拟现实”中直接由语音、视觉和触觉来进行。在这种情形下，用户成了通过技术将其感觉连接于其中的计算机产生的现实的组成部分。

视觉印象是由具有位置传感器的监测器——它可以作为眼罩戴

上——产生的。一个麦克风与言语识别系统联系起来,把口头命令翻译给系统。所谓的“数据手套”把手和手指的运动变换成电信号,产生出触觉并进行建模(图 6.40)。^[6.55]

在数据手套中,在两层布之间埋设了光纤。它们以特定的模式把光信号变换成电信号。例如,这一技术在航空学中已经有了实际的应用。美国国家航空航天局(NASA)对于机器人的研发很感兴趣,通过模拟空间站中宇航员

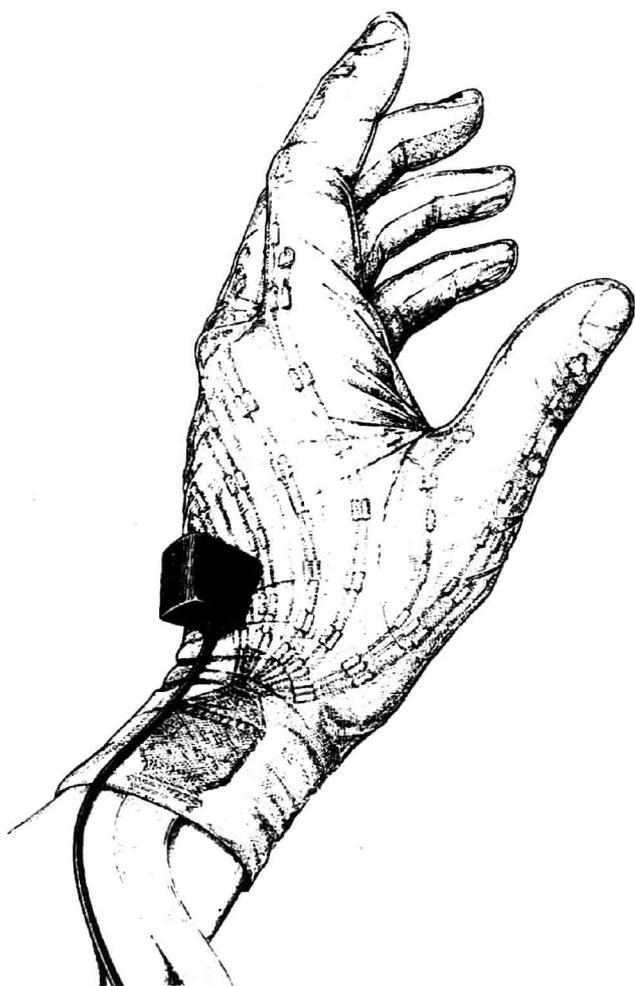


图 6.40 数据手套^[6.55]

手的运动,机器人可以在空间执行复杂而危险的行动。看来可能的是,数据手套原理,甚至适用于去制备可模拟整个身体的运动和反应的数据服。

感觉对于人的想象力有重要的影响。因此,化学中的分子建模,不仅仅可以用计算机辅助制图法帮助实现可视化,而且也可以用引入触觉要素来实现。通过数据手套的手段,化学家可以抓住一个分子,感觉到它的表面并以所希望的方式对它进行操作。工程师试图通过特殊的技术系统,产生出这些接触和用力的效应。在虚拟现实,通过数据手套进行的操作,必定要接受触觉到的影像客体的反馈。经验世界的复杂性,应

该在所有方面被模拟。

宇航学和化学的例子中,模型的虚拟现实相应于宏观的和微观的宇宙中的某种真实现实。但是,图像计算机产生的奇妙世界景色,仅仅是作为电子现实而存在。在技术可能性与科幻小说之间的界限看来是模糊的。在计算机产生的“遥在现实”(telereality)中,人们感觉到如同影像物体。已经有人建议构造一种所谓的“家庭现实引擎机”,它把使用者移入所希望的和不希望的幻想的虚拟世界。有关计算机生成虚拟现实的预言家已经许诺——无论你想做什么都行——与玛丽莲·梦露做爱或与爱因斯坦讨论。科幻作家如威廉·吉布森描述了由计算机产生的“赛博空间”,它将由人们作为惊人的幻觉而经历:

赛博空间。每天由成千上万合法操作者经历的交感幻觉,无论在哪个国家,只要是学习了数学概念的孩子……都可以从人类社会中所有的计算机数据库中提取出来数据图形表示不可思议的复杂性。光线布满精神的非空间中,数据奔流激荡。如同城市照明,缓缓淡去……[6.56]

这些见解,当然对于我们文化的发展提出了根本性的批判。人们被锁在塞满自己隐私的箱子中,或操作着由超级克雷计算机和神经网络产生的虚拟现实,这看来是一幅如同奥威尔笔下的“老大哥”那样的可怕图景。

除了那些伦理学问题以外,还有一些严重的认识论问题,它们随着计算机产生复杂人工世界的可能性而出现。在传统的认识论中,哲学家(如贝克莱和休谟)采取了唯我论和怀疑论的立场,认为任何手段都不可能证明外在世界的实在性。我们所有的印象,也许都是由我们的大脑及其精神状态产生出来的幻觉。这些迷惑人的问题,并非是如同孩子般的不谙

世事的哲学家的玩笑。它们曾经激发我们去考察和分析我们的论据的有效性。现代逻辑学家和心灵哲学家(如希拉里·普特南)已经以如下的方式对这些问题进行了翻译,它使我们想起了著名的图灵实验。

设想一个人被一位“邪恶科学家”动了一次手术。这个人的大脑已经从身体上移去,置入充满营养液的缸子中,保持大脑还活着。其神经末梢与混成的神经计算机连接起来,使此人——他的大脑——仍然获得对一切事物完全正常的幻觉。他所经历的一切,都来自计算机对于神经末梢的电刺激。如果此人想要举起他的手,计算机的反馈将使他“看见”和“感到”手被举起,尽管存在着的仅仅是大脑中相应的模式,而非物理的眼睛或耳朵。那位邪恶科学家可以使这个可怜的人经历任何情形。普特南说:

这个受害者甚至可以觉得自己正在坐着阅读这些令人愉悦的但是相当荒谬的命题:一位邪恶科学家把人们的大脑从身体中移去,并将它置入充满营养液的缸子中,保持此大脑活着。再将其神经末梢与超级科学计算机连接起来,使此人即他的大脑获得幻觉……[6.57]

如果我们的大脑是这种方式的缸中之脑,我们能够说我们还是自己吗?普特南认为,我们不能。我们实际上是置于一缸中之脑这个命题不可能是真的,因为它是自驳斥的。自驳斥的命题是这样一种命题,其真意味着其伪。一个逻辑上的例子是万能定理:所有的普遍陈述都是假的。如果它为真,那么因为它的普遍性,它就必定为假。一个认识论的例子是命题“我不存在”,如果这是由我所思维到的,它就是自驳斥的,因此,笛卡儿指出,人们可以确信自己的存在,只要人一想到它。我们是缸中之脑这一命题,就具有这一性质。

假定我们是置于营养液的缸中之脑,而且传入神经末梢与超级神经计算机连接,产生出大脑的所有感觉输入。由于缸中之脑运行良好,它当

然具有意识和智能。但是,它的关于树、马等等的思想和形象都与实际的树、马等等没有因果联系,因为实际的树、马等等是处于缸子中的大脑的外部世界,而这些观念和图像是由我们的超级神经计算机产生的。因此,如果我们假定,我们是置于具有所有这些条件的缸中之脑,那么词汇“缸子”、“营养液”等等,也就不是指一个实际的缸子、营养液等等,而是指由我们的超级神经计算机产生的一定的观念与图像。因此,“我们是缸中之脑”这个陈述为假(图 6.41)。

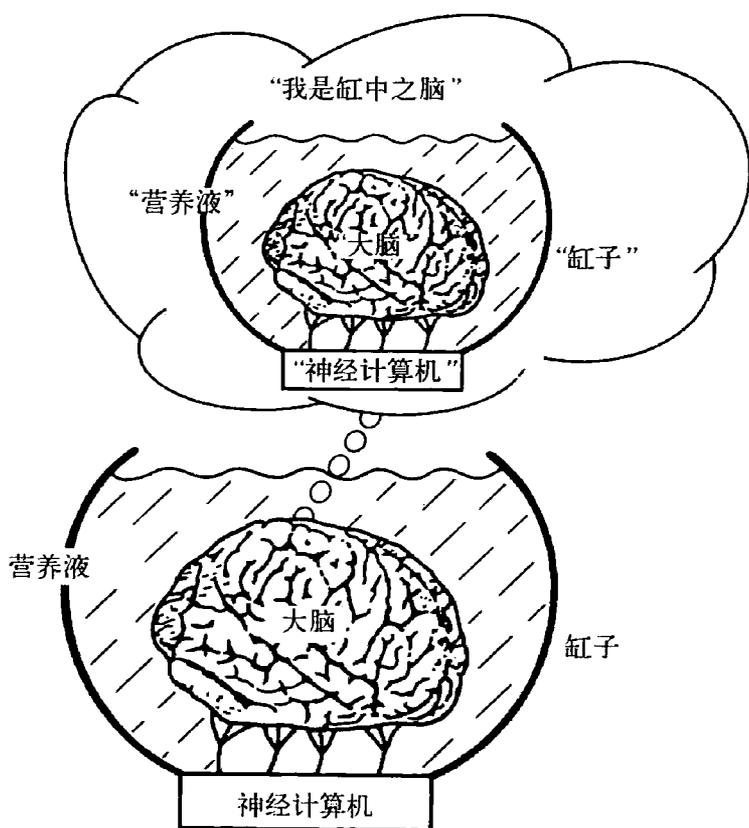


图 6.41 自认是缸中之脑的缸中之脑

我们必须意识到,我们是缸中之脑的可能性的排除,并非靠物理学,而是靠逻辑和哲学。物理学上的可能世界——我们是缸中之脑——与物理学定律是相容的。然而,我们甚至能够使用思想实验(Gedankenexperiment)

来排除物理学上可能世界的存在。

这些特征的原因看来要归于自指称性(self-referentiality)的结构,这是心-脑系统高级能力的典型特征。在第4.3节和第4.4节中,我们已经指出,自指性可能是使得意识和自我意识成为可能的根本特征,不仅仅是对于作为生物进化产物的心-脑系统是如此,而且甚至对于采取了完全不同硬件的人工复杂系统也是如此。

图灵自己提出一个著名的实验,能够用来确定一个如计算机那样的人工系统是否有意识的:让一个人在一个键盘上与计算机进行交谈,以及与一个陌生人进行类似的交谈。如果他根据交谈不能区分出哪一个是计算机,哪一个是人,那么计算机就是有意识的。简言之,一台计算机器,如果它可以通过图灵实验,就是有意识的。

“缸中之脑”思想实验表明,图灵的对话检验必定会在某些特定意义上失效。由人工系统使用的语词和句子,不必涉及我们在人的自然语言中要涉及的实际的对象和事件。语词和句子的使用可以是由句法模式支配的,句法模式能够被以高度精致的方式编程为图灵机。魏岑鲍姆的程序 ELIZA 模拟了病人与心理学家的对话,可以提供这些可能性的最初线索。在此意义上,图灵实验不可能排除,机器的谈话仅仅是一种类似于有智能的人的话语的句法演示。然而,原则上不可能排除,自组织的复杂系统,通过以原型模式和对其环境的经验作为特殊参考,是能够学习它们的合乎句法的语词和规则的。从长远观点看,我们必须回答下述伦理问题:我们是否想要发展那些高度自主的(耗散)系统。

6.6 具身人工智能和人工生命

当生命科学与计算机科学的技术进展在未来被寄予厚望的时候,我

们也可以期望对“人工生命”和“人工进化”有更多的研究。在其《单子论》的一段著名论述(§ 64),莱布尼茨指出每个有机体都是一种“神圣机器”或“无限地包含所有人工自动机的天然自动机”。采用计算系统和复杂动力系统试图模拟智能行为的现代可计算性与复杂性科学,可以回溯到莱布尼茨的著作。

“人工智能”(AI)在计算机科学是一个经典学科,而“人工生命”(AL)则描述了一个在复杂性科学框架内开展的方兴未艾的研究领域。“人工生命”的字面意思,是人而非自然创造的生命。对于曾在1987年组织过第一届人工生命会议的圣菲研究所的克里斯托弗·G·兰顿来说,人工生命还处于定义自己的过程之中。^[6.58] 地球上的自然生命,是在分子、细胞、机体,以及种群-生态系统等层次上组织起来的。关于人工生命的研究力图找到一种足够有力的建模工具,以捕捉这些复杂性不断增长的层次上生命系统的关键概念。

生命系统的一个关键概念,是对基因型与表型之间的区分。在生物学,基因型是编码在机体DNA中的复杂遗传信息(基因)系列。表型是物质机体本身。在基因型的基因指导下,表型的发展被称为形态发生。形态发生在第3.3节中用复杂动力学序参量来刻画。在我们复杂系统的框架内,表型指的是具有序参量的宏观现象,其序参量依赖于系统在微观层面基因的非线性相互作用。遗传动力学的高度非线性,提供了大量可能的表型。另一方面,这阻止了对个体表型未来行为或特性的预测或推断。

在人工生命的探究方式中,基因型与表型的区别并不限于碳链化学基础上的生命进程。在可计算性理论中,基因型可以推广为递归地产生全局表型结构的一系列局部计算器件(“基因”)。

人工生命探究方式的实例是林登迈尔的所谓L系统,这个系统模拟了雄蕊花丝和分枝植物树和其他植物与器官。^[6.59] L系统包含一系列用

于推导符号串的规则,它是乔姆斯基形式语法的类比。例如, $x \rightarrow y$ 表示形式结构中每个符号 x 的出现都用串 y 替代。符号 x 可以出现在某些规则的左边和右边。因此,一系列规则可以递归地应用到先前推导的结构当中。然后我们逐步得到有限结构(“表型”),如此往复。如果不考虑符号替代的语境,规则叫做语境无关(context-free)。替代单个符号的语境无关规则,是等价于有限状态机器的运算(或乔姆斯基语法的正规语言)。这种 L 系统能够生成如图 3.9 所示心血管网络的分枝结构。

当规则左边不止有一个符号时,这些规则构成了语境敏感(context-sensitive)语法,等价于乔姆斯基的图灵语言。显然,在语境敏感语法中,应用本地规则的方式取决于相邻符号,这就对应于复杂系统中要素的非线性相互作用。没有语境敏感性,L 系统所产生的全局结构(“表型”)就是线性可分解的。

L 系统的一个形式优点是其在计算机科学语境中测量复杂性的能力(见第 5.2 节)。表型被解释为一种形式结构,可能属于或不属于某个 L 系统中可导结构的类型。因此,成员归属某个类型的不可判定性,表明这个类型比成员可判定的类型更加复杂。而且,我们可以测量 L 系统中推导的计算时间。在这个情况下,L 系统可以根据复杂性程度从 N 到 NP 完全问题进行排列。

L 系统对模拟植物与机体提供了种类丰富的计算机生成形状。有时,L 系统的形式规则可以由物质中观察到的机制来实现。例如在超分子化学中,诸如树枝状聚合物等(见第 2.5 节)树形聚合物是由重复分岔的发散合成产生的,这种分岔能够由 L 系统的递归规则描述。显然,L 系统高度适用于化学与生物学中用以图示和绘制分子与细胞生长的计算机绘图。然而,分子与细胞生长的实际机制的观察和测量,当然必须在化学家与生物学家的实验室,而不是靠计算机实验。

人工生命探究方式的另一个例子,是在第 5.6 节我们讨论过的元胞

自动机概念。它们局部规则的简单系列可以解释为“基因型”，由此产生或多或少复杂模式的“表型”。元胞自动机支持对生物学关键概念的出色模拟。约翰·冯·诺伊曼关于自繁殖自动机的思想前面已经提及。尽管这个思想已经被数学上严密证据所证明，但是难以用技术计算机实现。其原因是冯·诺伊曼要求自繁殖结构必须是通用计算机，具有通用图灵机的复杂程度。显然，来自前生命进化(prebiotic evolution)(例如，第3.3节所描述的艾根模型)的自繁殖分子，就没有能够是通用建构的。因此，克里斯托弗·兰顿减低了通用性的要求，设计了一个非常简单的能够自我复制的元胞自动机。它包含一系列近邻元胞，是有限态自动机。

在图 6.42 中，每个数字是方格中一个自动机的状态。空白空间代表细胞处于状态 0。2 状态围绕 1 状态数据路径形成一幅图，它是一个终端带尾巴的环形，好像一个 Q 形病毒。内部数据路径引导数据，例如 70 与 40 的状态对，这对于自繁殖是必要的。通过整个元胞自动机的每个新一

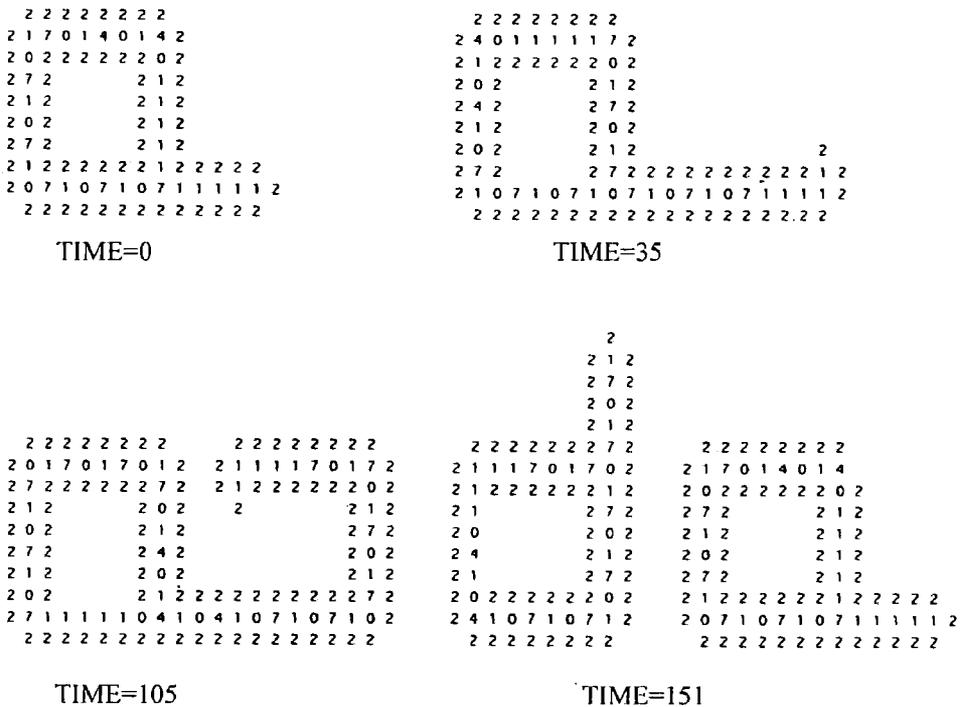


图 6.42 带有延伸尾巴的自繁殖兰顿环及其子环的形成^[6.60]

代,在这个内层的元胞遵循影响近邻元胞状态的规则。它们沿着环形逆时针传递信号。当信号传递到尾巴末端时,每个 70 信号将尾巴延伸一个单位,且两个 40 信号在尾巴末端构成一个左拐。每次信号围绕环形一周,就会形成另外一个边和角。四次循环之后尾巴又自己绕了回来,而且两个环是分离的。于是,环的元胞自动机就复制了自己。

每个环继续生产更多的后代,后代又再复制(图 6.43a, b)。这个发展无限期地继续,产生范围不断扩大的环的集群。当集群核心的环没有空间进行复制,它们就会失去尾巴而“死亡”(图 6.43c)。因此,集群包含一个复制的外围,围绕着一个不断生长的“死”核(图 6.43d)。这个模式类似于珊瑚的生长,死亡骸骨结构在里面而活细胞在外面表层。

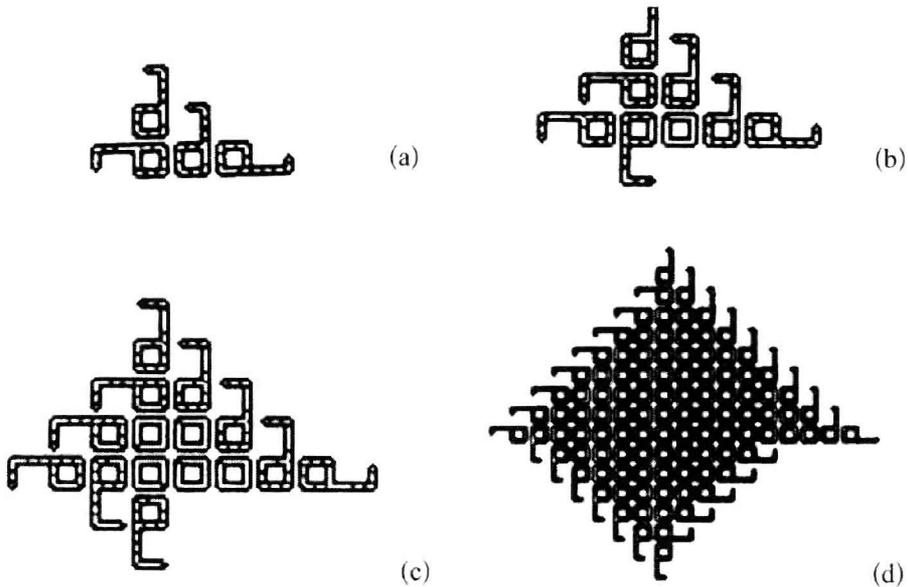


图 6.43 扩张着的人工珊瑚集群^[6.60]

在第 5.6 节中,我们提到元胞自动机可以用作离散的和数字的相图模型,描述复杂系统的全局动力学行为。元胞自动机的复杂性类型(图 5.24b, c)对应于划分动力学系统的吸引子复杂性程度。兰顿引入了某个参量 λ , 依靠其转换规则刻画元胞系统的动力学行为。^[6.61]图 5.24a 显

示一个具有 $8=2^3$ 个转换规则的一维元胞自动机, 因有 3 个近邻元胞和 2 个可能的元胞态。

总之, 当存在 N 个邻居且有 K 个状态时, 元胞自动机具有 K^N 种转换规则。元胞自动机的任意状态都可以作它的休止态。在图 5.24b 中, 休止态是白元胞(“零”)。如果 n_q 是这个特定休止态的转换规则的数目, 那么有 $K^N - n_q$ 种剩余规则应当被随机地且均一地分布于其他 $K - 1$ 个状态。现在, λ 参量被定义为 $\lambda = (K^N - n_q)/K^N$, 取值范围为 0 到 1。如果 $n_q = K^N$, 那么自动机的所有转换规则是到休止态且 $\lambda = 0$ 。如果 $n_q = 0$, 那么没有转换规则到休止态且 $\lambda = 1$ 。

参量 λ 的动力学含义是显而易见的。如果 λ 很小而且趋于零, 那么短时间之后所有动力学都被冻结, 如同凝固态中的分子那样。如果 λ 非常大, 趋于其最大值, 那么其动力学是非常自由而混沌的, 元胞模式难以保持, 像气态中的分子一样。在肉体上, 生命不能维持在这些极端场合中。然而, 在这些极端场合之间存在某种区域, 在其中动力学仍在变化, 但不至于快到丢失先前状态的所有构型。这个区域对应于在生物演化中确实支持了生命出现的液态。

计算机实验显示, λ 参量的发展刻画了从不动点动力学到周期动力学、然后到复杂动力学以及最后到混沌动力学的动力学行为范围。这些程式对应于元胞自动机的复杂性类型, 如图 5.24b(不动点动力学)、图 5.24c(周期动力学)、图 5.24d(复杂动力学)、图 5.24e(混沌动力学)。因此, 参量 λ 对应于刻画动力学系统相变的控制参量。在一个中间临界值 λ_c , 我们观察到周期动力学与混沌动力学之间的相变。在更长的元胞模式意义上, 复杂性在 λ_c 处有一个增长。元胞模式的转变长度在 λ 值域的两端比较短, 而在中间比较长。转变长度在 λ_c 点分开。超出 λ_c , 随着 λ 增加而转变长度变短, 尽管动力学活动更为迅速地随时间扩展直到混沌

出现。在 λ_c 处甚至有二阶相变的迹象,因为元胞生长的平均香农熵没有离散的跳跃,而是平滑的。

从计算机建模的角度看,物体的固态、液态和气态阶段只是动态系统的特殊类型。它们也可以在计算机媒介里用诸如元胞自动机等人工系统来实现。在这种框架中,人工生命在临界值 λ_c 附近是可能的。在第5.6节,我们提出怎样把元胞自动机联系到我们的序参量和协同学概念。序参量对应于诸如不动点、周期、复杂或混沌吸引子等元胞模式的宏观时空属性。

在协同学的探究方式里,稳定与不稳定的集体运动(“模”)可以在靠近不稳定性临界点的地方区分出来。这种不稳定性是由控制参量的变化引起的,它导致新的宏观时空模式。在元胞自动机,稳定与不稳定运动可以用改变或不改变以前状态的转换规则来刻画。稳定模被不稳定模役使并可被淘汰(图6.16a)。剩余的不稳定模充当序参量,决定着系统的全局宏观模式。一般而言,采取役使而淘汰不稳定模,导致自由度的大量减少。序参量的全局动力学可能引起不动点、周期、振荡、脉冲以及混沌的模式。再回顾一下流体动力学模式(图2.26a-e)和激光(图2.27a,b)。

对于元胞自动机而言,不动点动力学是独立于涨落的初始状态的,比如邻近热平衡的有序形成。它对应于控制参量 λ 一个很低的值,接近于零。在临界值 λ_c 附近,元胞动力学敏感地依赖于初始涨落。因此,它模拟了开放耗散系统的复杂动力学,例如物理学上的激光、化学里的BZ反应、生物学中有机体的细胞分化等。兰顿的 λ_c 程式并不因此限制于作为生物学生命的计算机模拟的“人工生命”,而是“人工耗散非混沌系统”。在第3.3节我们强调,从生物学的角度看,知道耗散自组织的一般框架是不够的。我们必须了解更多“碳链化学”的奥秘才能创造生物学生命(尤其是保守与耗散自组织的巧妙组合)。然后,我们也能在计算机媒介中把握“人工生命”的复杂动力学。否则,元胞自动机探究方式对于模拟生命

过程而言就太宽泛了。

自达尔文以来,选择作为生物演化的关键机制一直得到强调。然而,在诸如物理学上的激光或化学里的 BZ 反应等耗散系统中也有选择过程。它们动力学的非线性表明,不存在模式波(pattern wave)的叠加,而只有稳定模与不稳定模的竞争。在 20 世纪 60 年代晚期,英戈·雷兴贝格在优化技术系统时用演化策略作为蓝图。^[6.62] 约翰·霍兰把选择过程应用到算法的学习步骤。^[6.63] 他的遗传算法在人工生命研究领域已经得到了重视。一般而言,遗传算法是从一个基因型的种群移到新的“更适应”种群的方法。基因型可以表达为诸如有机体基因的比特串,或一个问题的可能解。遗传算法的基本概念,工作如下:(1) 从一个随机产生的基因型种群开始。(2) 计算种群中每个基因型的适应度。(3) 把选择与遗传算子应用到这个种群以创建一个新种群。(4) 回到步骤 2。选择就是在种群中选出可以复制并决定每个个体可能有多少后代的基因型;更适应的基因型比更不适应的基因型能在平均值之上产生更多后代。霍兰区分了交换、突变以及倒位的遗传算子。交换就是两个基因型部分互换(图 6.44)。突变就是随机改变基因型中某个位置的取值。倒位就是反转基因型连续环节的次序。

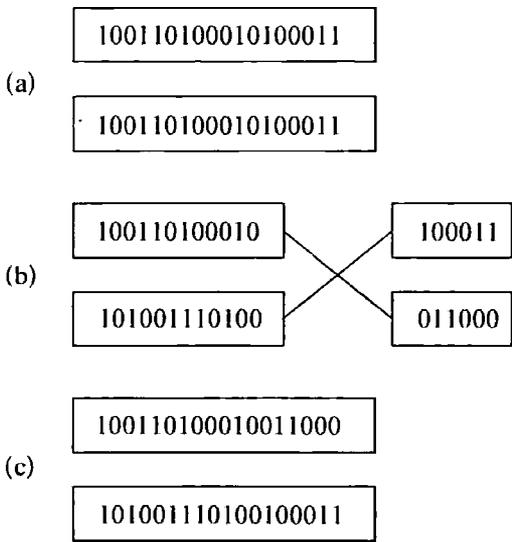


图 6.44 采用二值编码的遗传算法的交换算子

传算子应用到这个种群以创建一个新种群。(4) 回到步骤 2。选择就是在种群中选出可以复制并决定每个个体可能有多少后代的基因型;更适应的基因型比更不适应的基因型能在平均值之上产生更多后代。霍兰区分了交换、突变以及倒位的遗传算子。交换就是两个基因型部分互换(图 6.44)。突变就是随机改变基因型中某个位置的取值。倒位就是反转基因型连续环节的次序。

如果算法步骤(1—4)重复多次,它产生一系列种群(代)直至出现一个或多个高度适应的基因型。遗传算法已经成功应用在许多科学与工程问题上。^[6.64] 在第 4.2 节,我们分析了具有竞争学习步骤与学习分类器

系统的神经网络(图 4.12)。遗传学的艾根自优化策略,也可以看作是一种遗传算法。

我们每个人终身的学习,并不直接影响我们的基因型。然而,如果学习有助于生存,那么最擅于学习的有机体就有最多的后代。它们提高了负责学习的基因频率。这种学习在进化中的间接效应叫做鲍德温效应。计算机实验能够帮助理解并测量这种效应的成功。学习过程不一定受到评价种群适应度的全局功能的监督。然而,它是由种群个体成员体现的个体学习过程的宏观效应。在一个主体生命中的每个时间步 t ,主体使用其评价网络来评价当前状态。这个评价会与时刻 $t-1$ 的评价做比较。比较给出一个增强信号,用于修正行动网络的权重。下一步行动于是被确定了。显然,这种不受监督的学习,可以应用在社会与经济系统的计算机模型。它可以嵌入在神经网络学习步骤之中以改善他们解决问题的能力。

遗传算法另一些极端有趣的例子,包括基因技术领域中的计算机模型与计算机实验。另一个例子是免疫系统的医学仿真,在免疫系统中有学习现象发生。^[6.65]近年来,免疫学已经成为极端重要的医学研究领域,特别是关于癌症的临床治疗。人类免疫系统能够识别 10^{16} 种不同外来分子的序列。负责编码免疫系统建构规则的基因组,只包含 10^5 个基因。因此,免疫系统是复杂动力学系统的一个实例,用相对很少的指导规则实现高度有效的模式识别。没有中央器官控制它。因此,免疫系统的模式识别是局部分子互动的宏观效应。它也可以用序参量刻画。它们表示执行识别(“抗体”)的细胞与外来物质(“抗原”)之间分子键的范围。以二进制字符串来表达抗体和抗原,遗传算法可以用作计算机媒介中的人工免疫系统。二进制免疫系统,已经被用来研究随机分布抗原的环境中检测典型模式或当病原物质因突变而迅速演化时学习新模式的能力。

危险病毒的有机形式广为人知。然而,人工形式不仅对于仿真和模

拟生物免疫系统是有意义的。在过去几年,计算机病毒的应用作为全球计算机辅助网络的安全与社会问题,已经引起了相当的关注。^[6.66]一般而言,计算机病毒是一种代码,可以把自己附着在例如程序、数据文件等其他计算机实体之上,并且可以自我复制,至少是部分自我复制。如今,我们能够辨别不同程度复杂与危险的计算机病毒世代。比方说,壳病毒围绕原始代码形成一层外壳。病毒成为主程序,而原来的主程序则成为病毒代码的子程序。最危险的计算机病毒是多形态病毒或自突变病毒。它们通过自己的修改或者编码版本感染其目标。扫描器通常被用作一种计算机病毒防御或者人工免疫系统。它们从磁盘读取数据并对照已知病毒样式目标来进行样式匹配操作。然而,多形态病毒无法被扫描器检测到,而是需要为进行检测的学习算法。

从人工生命的角度看,计算机病毒确实满足生命的某些判据,但不是全部判据。显然,计算机病毒能够复制自己。另一方面,它不是复制的主体;计算机是主体。显然,计算机病毒把信息存储在自我表达之上。像DNA分子,其代码是一个模板,被病毒用来复制自己。还存在一种转换物质和能量的新陈代谢。然而,电子能量再次不是由病毒而是由其底层的计算机系统所使用。也存在计算机病毒的生态形式,例如那些显示掠夺性的、地域性的、自我保护的行为。然而,直至现在这些行为并没有被病毒自己启动,而是被人类程序员所启动。在未来,赛博空间里虚拟的计算机病毒可能具备生物学生命所具有的全部危险能力。

在生物学,人工生命系统被应用作为软件、硬件以及湿件系统。^[6.67]湿件指的是生化实验室技术,例如被用在进化反应器里模拟前生命演化的分子起源。当然,这些是复制生命的生化演化或创造生物生命的新形式的经验实验。它们只被冠以“人工”,是因为生物生命自组织所需要的条件是由实验者人安排的。软件系统是模拟生命与演化关键概念的计算机程序或网络。我们已经分析了元胞自动机探究方式。也有模拟动物演

化的计算机程序。例如,在程序 GENESYS,动物被表示为神经网络或有限态自动机。每个有机体的基因被表示为编码神经网络权重的比特串或有限态自动机的转换列表。为了提高程序的模拟能力,该程序是在大型并行计算机上运行的。GENESYS 程序使我们想起莱布尼茨在《单子论》中的自然与人工自动机思想。人工生命的硬件模型被用在机器人。在第 6.5 节我们分析了神经仿生学的第一个应用。在第 2.5 节我们提到了灵巧与“智能”新材料的自建构。

在演化机器人学,起初的研究是关于智能系统的人工演化。重要的是意识到传统计算机作为“智能”的观念是不恰当的,因为大脑并不是用简单程序进行运转的。演化理论指出,大脑的进化并非是能产生出形式证明,而是控制我们的行为并确保我们的生存。因此,智能总是在与我们的躯体行为互动以及与环境的互动中证明自己。围绕基于行为的智能的研究已经生长出一个新领域,亦称为具身认知科学、新人工智能、基于行为的人工智能。^[6.68]它旨在为天然与人工智能系统研究提出一个合乎逻辑的框架。它的目标是通过设计、建构和制造机器人来理解复杂性与智能。

人工生命探究方式显然不是一个同质的研究领域。^[6.69]然而,它的确是化学和生物学研究提供了许多有用的建模工具。除了这些实际应用之外,还有一个具有硬科学内核的人工生命远景梦想。实际生物进化不过是一个高度非线性方程所支配的复杂动力学模型。如今,我们只知道这些方程的某些属性,而且知道这些属性时,我们也缺少分析工具精确求解它们。甚至数值近似,也受到其巨大的计算复杂性所限制。虽然如此,计算机模型可以允许计算机实验熟悉多项严格约束条件下的可能情景。计算机实验的这些经验可以被用来创造特定条件,在其条件下新材料可以建构自己,生命新形式可以组织自己。朝着这个目标的第一步已经迈出。甚至在原理上不排除人工意识的出现。^[6.70]如果我们知道意识

状态背后的复杂神经动力学(见第 4.3 节、第 4.4 节、第 6.5 节),那么人脑的湿件和硬件就只是一种特定的模型。要紧的不是制造出新的材料、生命以及可能的意识,而是它的独特组织与动力学定律,对此能够用不同复杂程度的系统来进行模拟。因此从长远看,我将需要表达这样的伦理问题:是否我们需要其结局无法预测的开放结局的人工演化。

显而易见,互动的具身心智与具身机器人产生出自组织的信息与通信系统的具身超机体(embodied superorganisms)。自组织的人与机器人互动(human-robot interaction,缩写 HRI)的意义是什么?自组织意味着更多的自由度,同时也意味着更多的责任。为了防止不想要的副作用,必须确保受控的涌现(controlled emergence)。然而,在复杂动态世界中,决策与执行只可能是在有限合理性的条件下。有限合理性源自我们知识、认知能力与时间的限制。我们的感知是有选择性的,我们关于现实世界的知识是不完全的,我们的精神模型是简化的,我们的演绎与推理能力是微弱而容易犯错的。情绪与潜意识因素影响着我们的行为。深思熟虑需要时间,而我们通常必须在准备好之前作出决策。因此,知识表达必须不限于清晰的宣布。在模拟信息通信系统时,遇到的挑战是隐会背景知识、情绪状态的改变、个人态度以及不断增加复杂性的处境。为了支持一个可持续的信息世界,必须改善以人为本的信息服务。

个人电脑在运行一个计算程序时,我们通常不知道其运行的质量或者当下的进程多大程度接近于我们的预期目标。计算进程很少提供中间结果来告诉我们,现在的进程如何接近于我们希望的行为。例如,在生物系统,人体验一种我们知道答案的感觉。在一种递归自我监视,某些内部进程观察我们认知状态的某些东西,以帮助我们评价我们的进展。自我反思在演化上的选择价值,是显而易见的:如果我们拥有这些观察类型,那么我们可以根据变化的目标和处境改变我们当下的策略。工程系统有某些东西相当于人们在生物系统中发现的运动反馈。然而,挑战是创造

反馈,这种反馈有助于一个能够自反地对其所处环境中自己的计算、资源利用、目标、行为等进行推理的系统所做的决策。工程系统的这类认知设施^[6.71]只能通过人工演化来获得,因为人类具有多种反馈进程的认知过程,只是在进化与个体学习的很长历史之后才发展出来的。

因此,为了解决人与机器人互动的复杂性,我们需要系统的生成进程、认知设施以及反思过程。从分子与细胞再到器官水平,生物系统利用有关自我监视和自我控制的递归处理层次的优点。自我反思导致被系统用来控制其自己进程与行为的知识。自我反思区别于任何执行控制进程的是,这种反思涉及有关系统的推理;该系统由于这种反思能够决定或调节自己的目标。然而,自我反思必须区别于自我意识。意识至少一部分是关于觉察自我的感觉和体验。因此,我们可以建构无意识的自我反思系统,在某些应用上也许比生物系统更好。众所周知,技术设施(例如传感器)已经超过自然机体相应能力许多个数量级。自我反思系统可以在复杂世界中帮助改善自组织与受控涌现。

可是,我们还应该走多远?自我意识和感觉是大脑动力学的状态,至少在原理上可以被计算系统模拟。大脑不仅观察、描绘、监视外部世界,还有机体内部的状态,尤其是情绪状态。“感觉”是对自己情绪状态的觉察。在神经医学中,心智理论(Theory of Mind,缩写 ToM)甚至分析位于大脑新皮层特定位置的社会感觉的神经关联。例如,阿尔茨海默病患者由于相关神经区域受损而失去他们的同情与社会责任感的感觉。因此,我们的道德推理和决策在大脑动力学里有一个清晰的基础,这在原则上可以用自我意识人工系统来模拟。在人口老龄化的高度工业化国家,当从事公共社会福利事务的年轻人数量减少以及人工成本急剧增加时,具有同情心的感觉机器人可以用来照顾老人。^[6.72]

复杂系统和 经济演化

如何解释人类社会中经济秩序的产生呢？本章由 17 和 18 世纪经济体系的简史开始。在这一时期中所理解的经济秩序的概念，通常与这个时期的技术、物理学或者生物学的概念相联系。重农学派基于一个 18 世纪典型的钟表式机械论，建构他们关于绝对主义国家经济体系的模型。亚当·斯密的自由主义观念产生于牛顿物理学的历史背景。主流经济学直到新近之前，通常受线性数学、经典力学、热平衡热力学模型的启发，或有时也受达尔文进化论的启发。如同许多物理学家一样，经济学家相信其(线性)模型的精密可计算性，而排除任何“蝴蝶效应”的可能性，因为这种效应会产生混沌与无法进行长期经济预测等问题(第 7.1 节)。为描述经济动力学，必须具备演化方程，其中有也许是数千个部门与数百万个经济行为人(agents)等许多经济变量。因此，在对全球趋势进行建模的时候，通常喜欢采用随机模型。当试图了解经济的非线性动力学时，在临界

点的相变与分岔是至关重要的概念。混沌与随机性导致有限合理性的行为概念(第 7.2 节)。弄清金融市场的急剧变动是全球化的一个挑战。现代数理金融理论还建立在路易·巴舍利耶具有正态(高斯)分布的价格变化与温和随机性的效率市场假设(1900 年开始)(第 7.3 节)。然而,复杂的全球市场的实际扰动如同气候一般;它们呈现典型的幂律分布。伴随着概然吸引子(见第 5.4 节)的随机过程,导致突发而不连续的事件(诺亚效应)或者长期趋势(约瑟效应)(第 7.4 节)。经济与金融的社会动力学为经济物理学打开了新途径(第 7.5 节)。

7.1 亚当·斯密的经济学和市场均衡

在 17 和 18 世纪,经典力学成为通行的科学范式。经济学的机械观随后由法国学者弗朗索瓦·魁奈(1694—1774)这位重农主义经济学派的创建者详加阐述。^[7.1] 魁奈曾任路易十五的宫廷御医,写了一本关于“动物经济”(oconomie animale)的书,他受到人体启发而形成关于社会机体的经济观念。笛卡儿机械论世界观是重农学派的主要哲学。

因此,经济体系被模型化为一个包含齿轮、发条、钟锤的机械钟。这个钟是伴随着编程功能持续运作的体系。与此类似,重农主义经济无法调控它自己。作为重农主义经济的驱动力的农业进展,被比作如同钟表中的钟锤和发条。经济生产被比作钟表中的复合运转。最后,如同钟表的有规则的经济循环,保证了经济繁荣。

重农主义者利用一种特殊的表格(经济表)来图示财富在农民(“生产阶级”)、店主(“不生产阶级”)与地主等社会阶级间的流转。在图 7.1a 中,一个经济周期开始于地主阶级分配他们所得到的地租(假定是 2 亿金路易)以购买农民(图中左栏,1 亿金路易)的食物和农产品,以及购买店

主(图中右栏,1亿金路易)的产品。[7.2] 这些收入使得农民和店主都能生产新产品。当农民使用店主的产品而店主购买农产品时,货币将在相应

TABLEAU ECONOMIQUE

Objets a considerer 1° trois sortes de Depenses. 2° leur source. 3° leurs avances, 4° leur Distribution, 5° leurs Effets, 6° leur Reproduction, 7° leurs Rapports entr'elles, 8° leurs Rapports avec la population, 9° avec l'Agriculture, 10° avec l'Industrie, 11° avec le Commerce, 12° avec la masse des richesses d'une Nation.

DEPENSES Productives <i>Relatives a l'Agriculture &c.</i>	DEPENSES DU REVENU <i>L'Impot compris se partagent a la Classe productive et a la Classe sterile</i>	DEPENSES Steriles <i>Relatives a l'Industrie &c.</i>
Avances annuelles pour produire un Revenu de 2000 ^{fr} sont 2000 ^{fr}	Revenu Annuel de 2000 ^{fr}	Avances annuelles pour les Ouvrages des Depenses steriles sont 1000 ^{fr}
2000 ^{fr} produisent net	2000 ^{fr}	1000 ^{fr}
Productions	reproduisent net	Ouvrages &c
1000 ^{fr}	1000 ^{fr}	1000 ^{fr}
500	500	500
250	250	250
125	125	125
62 10	62 10	62 10
31 5	31 5	31 5
15 12 6	15 12 6	15 12 6
7 16 3	7 16 3	7 16 3
3 18 2	3 18 2	3 18 2
1 19 1	1 19 1	1 19 1
0 19 6	0 19 6	0 19 6
0 9 9	0 9 9	0 9 9
0 5	0 5	0 5
0 2 6	0 2 6	0 2 6
0 1 3	0 1 3	0 1 3
0 0 8	0 0 8	0 0 8
Total 2000^{fr}	Total 2000^{fr}	Total 2000^{fr}

Il n'est pas necessaire de s'attacher a l'intelligence de ce Tableau avant la lecture des 7 premiers Chapitres, il suffit a chaque chapitre de faire attention a la partie du Tableau qui y a rapport.

图 7.1 重农主义者的“经济表”及其图示

(a) 原表; [7.3]

阶级的两栏之间流通。这个流通形成齿状曲线,直到在表的底部给出的净利润。

但是净利润的花销使得新收入能够进行新的支出,因而可以再生产净利润来开始新一轮的经济流通。有序的流通和净利润反复再生产的机制,可以用滚珠钟来图示(图 7. 1b)。^[7. 3]这种钟采用滚珠齿状地往下滑动来测量时间。一个周期结束后,滚珠会提到系统的上端而重复这个过程。显然,净利润的分配之于流转周期就如同滚珠的齿状路径之于钟表的机械装置。经济流转周期的周而复始,对应于滚珠沿着齿状路径的反

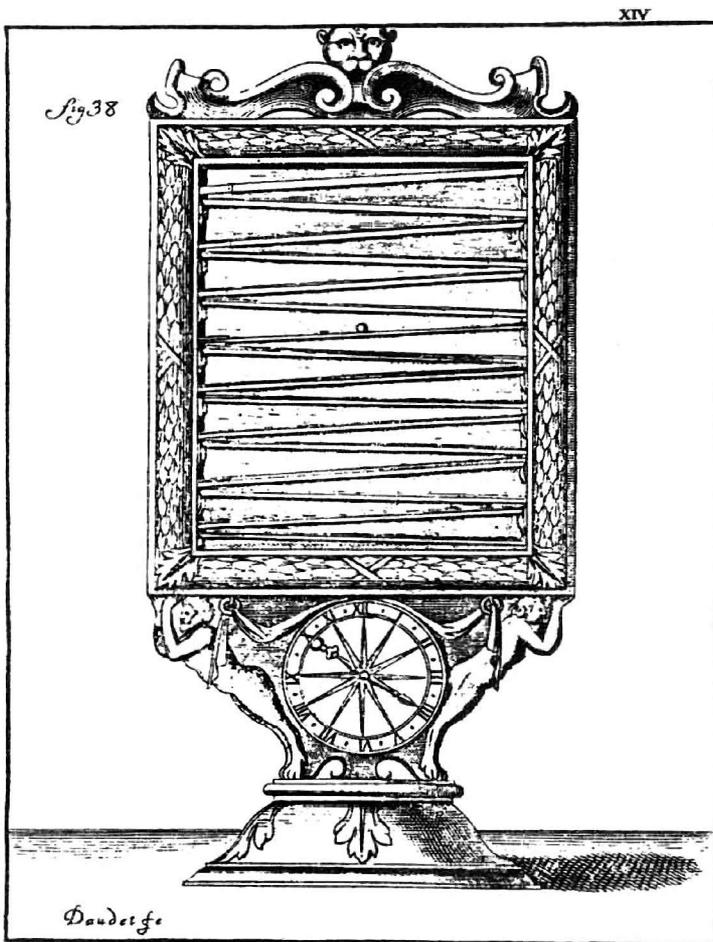


图 7.1 重农主义者的“经济表”及其图示
(b) 以时钟装置中的滚珠和齿状路径来说明。^[7. 3]

复提上与滚下。

重农主义经济学家运用了笛卡儿力学框架的物理模型。他们的因果决定论中排除了任何种类的自我调节或个体自由,完全相应于绝对主义政治系统。公民被归结为一架政治和经济机器中的功能元件。

重农主义者以笛卡儿力学背景来设计他们的经济模型,而亚当·斯密则参照他的伟大先驱艾萨克·牛顿爵士的经典物理学。在笛卡儿的力学中,所有的物理事件都还原为相互作用的元素之间的接触效应,如同钟表中的嵌齿轮或圆球之间的撞击。因此,笛卡儿派物理学家构造出往往是不可观察的假定机制。例如,光的折射作用被解释成如同假设的微小玻璃球一样的小球之间的相互作用。碰撞和冲力定律在笛卡儿的物理学中是基本性的。

牛顿用他的名言“决不虚构假说”(Hypotheses non fingo)来批评笛卡儿的力学。他的万有引力定律是用数学方法从他的力学公设推导出来的,并通过预见和实验接受经验确证。但是,他提出来以某种假设的传递机制来解释虚空中万有引力的长距离效应,这种机制则是不可观察的。

在牛顿的天体力学中,物体在一个由不可见的万有引力确定的动态平衡系统中运动。动态平衡中自由运动个体这一物理概念,相应于政治权力独立的自由经济和社会中的自由主义思想。与自由主义思想不同,笛卡儿的自然时钟机械装置则表现为,对应于把公民作为嵌齿轮的绝对主义的国家机器。

斯密的名著《国富论》(1776)通常被誉为——门独立学科的诞生。然而,斯密是一位道德哲学的教授,牛顿是一位自然哲学的教授。事实上,斯密试图把伦理学、经济学和政治学统一起来,牛顿则力图将其物理学嵌入宇宙学甚至宗教框架之中。在《道德情操论》中,斯密分析了怜悯心在人类中的作用。^[7.4]在他的《国富论》中,人的自利行为被假定为经济学的根本推动力。

在这两本书中,斯密都试图把牛顿方法运用到伦理学和经济学中去。^[7.5]他把牛顿方法描述为,科学家制定了“一些基本的或证明了的原理,从这里出发,我们能够解释多种现象,并把它们联系在同一条链条之中”。以与休谟相类似的方式,斯密也不把科学的起源归功于人对于真理的热爱,而归结到一种素朴的渴望,即最大限度地“好奇、惊讶和敬畏”。人生的伟大目的是始终如一的、亘古不变的和持续不断的努力来改善人的条件。总之,人的自利动机趋向于使福利函数极大化。

按照牛顿的“决不虚构假说”的格言,斯密强调,人的自利动机并非经济学家的理论建构,而是体验的经验事实。自利动机是个人强烈的本能冲动,从而是一种人的权利。但是,若干个人的微观利益的相互作用,通过市场机制造成了共同的宏观福利效果。下面是摘自《国富论》的两段名言:“我从来没有听说过,那些装做为公众幸福而经营贸易的人做了多少好事。”^[7.6]“我们所盼望的晚餐,不是来自屠夫、酿酒商或面包师的恩惠,而是来自他们自利的打算。”^[7.7]

在市场均衡时,由供给和需求决定的市场机制驱使竞争的微观私利转化为福利的宏观效应以及“国民财富”。从机械论的角度来看,微观私利似乎被“经济之妖”或“机械弹簧”引导到均衡的宏观状态。以牛顿的方式,斯密偏好用“看不见的手”引导个体私利这种图像来描述,如同天文学中“看不见的”长距离万有引力。显然,斯密将经济描绘成一个具有许许多多竞争着的微观私利构成的复杂系统。它们交互作用的动态过程是伴随供需平衡最终状态的一个竞争的自组织过程。

商品价值的衡量尺度是货币。但是以货币来衡量必须谨慎。市场机制所形成的“市场价格”与“自然价格”或所谓真实成本的区分是必需的。经济学家必须找到“价值标准”以便能够修正货币的价值。因此,斯密早已锁定了一种基于价值理论的政治经济学。需要用价值来衡量社会产品。图 7.2 借由一个反馈机制图示了斯密关于供需的自组织过程,其产

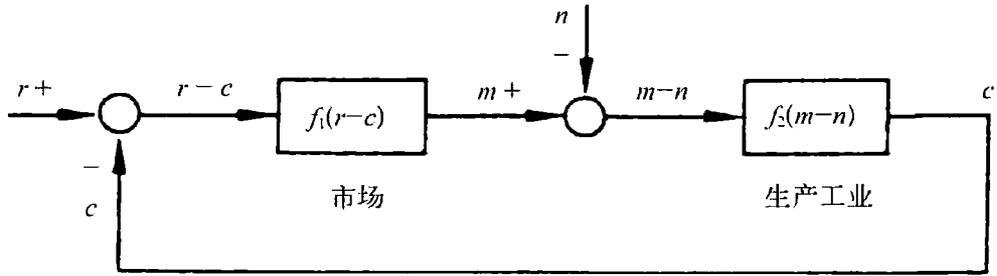


图 7.2 用反馈模式来说明亚当·斯密的供给和需求的自组织过程^[7.8]
 品的需求为 r ，供给为 c ，市场价格为 m ，自然价格为 n 。^[7.8]

但是，斯密并没有像亚里士多德那样基于诸如正义等伦理观念提出“公正”价格。他的研究基于人类本性（如私利）的真正事实，分析了“国民财富”的“性质”和“原因”。关于商品的自然价格，斯密与早期古典经济学家（如大卫·李嘉图）试图寻找价值的绝对尺度，例如黄金、谷物，或者劳动。

对李嘉图而言，一般尺度应该用他的劳动价值论来解释。李嘉图，跟斯密一样，熟悉经典物理学的一般观念。因此，他相信经济学的某些结论与“万有引力原理同样确定”。^[7.9]随着时代的发展以及经济和政治问题的改变，李嘉图的增长、地租、劳动理论受到他当时 19 世纪初的历史条件的影响。主要是日益增加人口的生存问题，而马尔萨斯已经思考了这个经济问题。

约翰·斯图尔特·穆勒（1806—1873），这位英国哲学家与经济学家，对经济学方法论具有浓厚的兴趣。他将“政治经济学”定义成一个不证自明的归纳分析公理体系，这个体系基于假设的心理前提和人类非经济行为的抽象之上。这些抽象堪比力学中摩擦力之类的干扰因素：

干扰因素有自己的法则，就如同被干扰的因素也有自己的法则一般；而且从干扰因素的法则，干扰的性质和数量能够被事先预见预示……然后，特殊原因的效果将加入到或排除出一般原因的

效果。^[7.10]

在这段引言中,穆勒显然借鉴了经典物理学来描述因果关系原理,以便进行长期预测,因为:相似的原因造成相似的结果。因此,穆勒关于经济学的方法论与经典物理学中的拉普拉斯妖是一致的,即当初始条件近似已知时,假设经济法则的预测结果是近似正确的。再者,穆勒不证自明的假设界定了经济行为的简化模型,而非复杂的经济现实。

因此,穆勒是第一个明确运用虚构的“经济人”(homo oeconomicus)设定的经济理论家,而非斯密原本探究的整个复杂体系中的现实人。极大化特定经济效用函数的经济人假说根基于穆勒同僚的自省与观察的经验上,而非从特定观察或具体事件中得出来。类比而言,牛顿的万有引力定律在经验上由自由落体或者天体运行的观测所证实,而非直接从这些事件中获得。穆勒的方法论对应于19世纪物理学中关于形式体系和模型的新认识。

现代数理经济学的先驱,如瓦尔拉斯和帕累托,将物理学中的数理方法推广在经济学上。这两位思想家都是所谓洛桑学派的代表性人物。古典理论家暗中早已受到物理-数学观念的影响。他们或多或少表示出经济力的作用与力学均衡的粗略对应。事实上,数理经济学的先驱们借用了力学和热力学的许多词汇,例如均衡、稳定、弹性、扩张、膨胀、紧缩、流、力、压力、阻尼、反应、运动、摩擦等。^[7.11]

在1874年,瓦尔拉斯遵循斯密的想法,消费者和生产者的极大化行为将造成经济中全部的产品市场以及要素市场的需求量和供给量的均衡。^[7.12]此后,一般均衡理论已经成为最主要的经济观念,必需证明数理经济模型的均衡存在。数理经济学家试图将复杂系统的因素从它的环境中分离出来,这些因素通常设定为外生参数。然而,如果外生参数受到整个系统的影响,则系统与环境的隔离以及忽视真实存在的反馈机制将不

可能产生适当的经济模型。

一般而言,古典经济学家试图利用一些典型的假设来减少真实经济的复杂性,这些假设刻画出线性与机械式的模型。首先,针对每种人类行动,他们都相信理性经济个体(agent)的假定。例如,在市场上个体的个别行为应当被整个隔离开来。人类行为被解释成从个别行为中抽象出来的一般行为模式。因此,个别的人类行为被假设为有规则的、可预测的,就像具有一定运动数学定律的机械系统的元件一样。如果初始条件和环境已知且可精确测量,则环境中的个别行为就会被认为是确定性的,如同气体中的分子一样。

经济模型的线性是根据叠加原理产生的,它假定社会是由它的成员的加和所构成的。叠加原理意味着,社会作为一个整体与个别行动的加和并没有差别。显然,线性模型是从不可预测和非理性的个别行为、环境的限制以及个人与其行动间的非可加(“非线性”)和协作的相互依赖中抽象出来。

这些方法论的线性原则完全对应于拉普拉斯物理世界观。它们仍对今日主流经济学具有很大的影响,虽然物理学本身在 20 世纪中已经进行了一些惊人的革命,例如具有不确定度关系的量子力学。但是,海森伯不确定度关系是量子力学算子间特定关系的结果,依赖于普朗克常数的,似乎不与经济世界的维度相关。不过,薛定谔和海森伯的量子形式化仍保留线性(比较第 2.3 节)。经典线性动力学系统以很规则的方式运转,这个事实允许了精准的预测。非线性模型所显现的混沌行为以及长期无法预测,因而被认为是坏的经济工具。

在 20 世纪中,越来越多的数理经济学家放弃洛桑学派的物理主义,例如这个学派试图如同经典物理体系般地规定经济体系。经济学家试图建立他们自己基本的数学工具。线性动态模型的假设已经由技术原因所证明。约翰·梅纳德·凯恩斯在 1938 年写给罗伊·哈罗德的信中就表

明了这种正式态度：

对我而言,经济学似乎是逻辑的一个分支,一种思考的方法;你没能足够坚强地拒绝……使它变成伪自然科学的企图……经济学是一门思想科学,利用了模型并且结合了选择模型的艺术,所选择的模型则与当代世界相联系。^[7.13]

在典型经济崩溃(例如 20 世纪 20 年代末)的影响下,凯恩斯与其他学者强调,经济体系并不能够自动调节。“资本主义的不稳定性”已经成为所谓的凯恩斯主义学说的通俗版本。因此,经济系统借由特定政策工具(如财政政策)将能够由外部来加以稳定。而运用线性模型的,尤其是新古典理论家,再一次集中在均衡经济学的探究上。

非线性方法主要受到那些对均衡经济学的古典思想感到不满意的经济学家的偏爱。因此,凯恩斯主义学者时常在还没熟悉非线性之数学方法的情况下,批判均衡理论的线性框架。

约翰·冯·诺伊曼和奥斯卡·莫根斯特恩的《博弈论与经济行为》(1943)开创了线性数理经济学的新时代。^[7.14]线性规划以至整个运筹学,甚至数理社会学都曾受过这本名著的影响。在这本书中,冯·诺伊曼和莫根斯特恩假设理性行动的人,试图根据某种效用函数来极大化他们的收益。一般而言,一组可能行动 a_1, \dots, a_m 以及一组可能状态 s_1, \dots, s_n 用来形成一对映射到效用 a_{ij} 的 (a_i, s_j) , 其中 $1 \leq i \leq m$ 及 $1 \leq j \leq n$ 。可能效用 a_{ij} 排序成 $(m \times n)$ 矩阵。

例如,理性的几种判据通常用来在不确定性之下做决策。不确定性意味着可能效用的概率无法得知。主要使用的是所谓的小中取大效用判据(maximin utility criterion)。在这个例子中,每一可能行动 a_i 联系着表示效用值 u_{i1}, \dots, u_{in} 最小值的指标,即效用矩阵 (u_{ij}) 第 i 行中的最小

值。因此,其法则要求:选择指数中最大值的行动。简言之,小中取大法则选择最不利情况中效用最大的行动。这个法则能够非常简单而且机械式地应用在效用矩阵上。

想象哲学家卡尔·古斯塔夫·亨普尔所举的以下例子:^[7.15]假设有两个缸,装着相同大小、无法从触觉上区分的金属球。在第一个缸中的是铅球与铂金球,而在第二个缸中的是金球与银球。每个参与者都允许从两个缸中取出一个球当作礼物带走。缸中金属球的概率分布对参与者而言是未知的,而这些金属球的效用分别估计为1 000(铂金球)、100(金球)、10(银球)和1(铅球)。

小中取大法则建议选择第二个缸。在这个缸中,最不利的情况是银球,但在第一个缸中,最不利的情况是铅球。显然,小中取大法则与悲观主义的世界观相符合。在博弈中,参与者假定为对立的双方,则小中取大法则就能建议最有用的行动。

乐观主义的态度对应于所谓的大中取大效用判据(maximax utility criterion)。参与者相信每个可能行动都有最佳的可能结果。因此,选择最佳的可能结果的行动似乎是理性的,至少与另一种行动的最佳结果相等。在我们的例子中,大中取大法则建议选择第一缸。

一个谨慎的参与者不大可能选择这个法则。但另一方面,如果对手已知是具有敌意的竞争者的话,那么只有小中取大法则才是理性的法则。一些数值例子可以证实以上这些说明。在图 7.3a 的效用矩阵中, s_1 , s_2 表示两种可能状态, a_1 , a_2 表示两种可能行动。

由小中取大法则得出行动 a_2 。纵使降低数字 1,例如减少到 0.000 001,而且增大数字 100,例如增加到 10^{15} (图 7.3b),由小中取大法则依然建议行动 a_2 。这个决策对假定对手是敌意的参与者而言是理性的,因为在任何情形对手都会阻止参与者的相应于最大效用的状态。但在其他情况下,小中取大法则是非理性的,因为 a_1 将会是更佳的选择。

如果实现的状态是 s_1 , 则参与者必须放弃非常小的效用增量。在状态 s_2 的情况下, 行动 a_1 将使参与者得到非常大的效益增长。

为了证明这样一个决策, 萨维奇引进了所谓的大中取小风险判据。他建议将效用 u_{ij} 矩阵(图 7. 3a)代之以风险矩阵值 r_{ij} 矩阵(图 7. 3c)。为了得到第 j 列的效用最大值, 风险值 r_{ij} 必须加到效用值 u_{ij} 中。

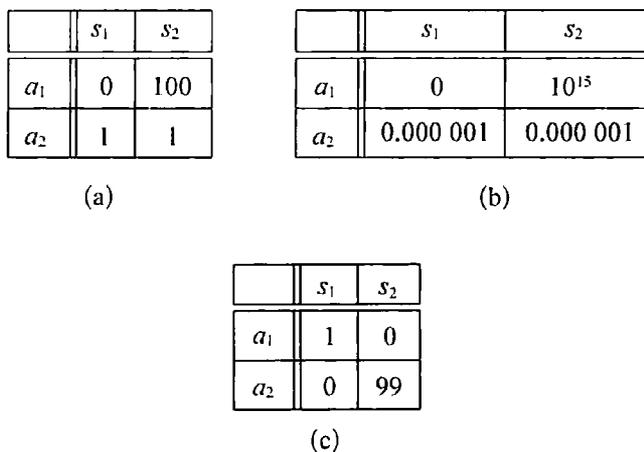


图 7.3 效用矩阵与风险矩阵

(a)(b) 效用矩阵; (c) 风险矩阵。

在矩阵 7. 3a 中, 第 1 列的最大效用值是 1, 第 2 列的最大效用值为 100。因此, 风险矩阵如图 7. 3c。

大中取小风险法则要求: 选择最大风险中最小的行动。当 a_2 的最大风险值为 99, a_1 的最大风险值为 1, 则选择行动 a_1 似乎是一个理性的选择。但是, 这只是某种特定条件下的理性法则, 尚有许多其他的理性判据。

另外一个例子是所谓的悲观乐观判据 (pessimism optimism criterion), 所得出的解介于悲观的小中取大法则与乐观的大中取大法则之间。对行动 a_i 来说, 令 m_i 是效用 u_{i1}, \dots, u_{in} 中的最小值, M_i 是最大值。令 α 为常数 ($0 \leq \alpha \leq 1$), 可称之为乐观悲观指数。则行动 a_i 与所谓的 α 指数即 $\alpha m_i + (1 - \alpha) M_i$ 相联系。悲观乐观法则偏好 α 指数较大的行动,

但是特定的判据仅定义在特定的数 α 已知的情况下。这些例子表明并不存在绝对的理性判据,但在特定环境下,一类判据与不同的乐观悲观程度相联系。

冯·诺伊曼和莫根斯特恩的《博弈论与经济行为》一书认为,社会或市场的稳定是竞争或合作的人或团体的交互作用的结果。在许多情况中,他们接受了对实际经济、社会和心理复杂性的过度简化。每个参与者可以针对特定的状态和可能效用,准确地决定他的可能行动。一般而言,博弈论假定的是线性(叠加)原理,社会(“博弈”)中许许多多人的复杂的相互作用可以简化为少数人许许多多简单相互作用的总和。

因此,在博弈论中,两人博弈占有至关重要的地位。参与者 1 选择行动 a_1 而参与者 2 选择行动 a_2 的这个事件可以用 (a_1, a_2) 表示。在这个事件中,参与者 1 的效用定义为 $u_1(a_1, a_2)$,参与者 2 的效用定义为 $u_2(a_1, a_2)$ 。两个参与者的效用是截然相反的,即 $u_1(a_1, a_2) + u_2(a_1, a_2) = 0$,这种事实情况形成了一类重要的博弈——“零和”博弈。这种博弈排除了任何合作的可能性。如果没有关于对手是非理性的特殊信息的话,小中取大法则似乎是理性的结果。而其他情况,合作有时是理性的。

博弈中均衡点的存在是数学上的基本问题。^[7.16] 如果不存在合作,关于两个参与者的可能行动,其均衡点可以如下定义:对参与者 1 的所有行动 a_1 而言,如果其效用值 $u_1(\bar{a}_1, \bar{a}_2)$ 大于或等于 $u_1(a_1, \bar{a}_2)$,并且对参与者 2 的所有行动 a_2 而言,如果其效用值 $u_2(\bar{a}_1, \bar{a}_2)$ 大于或等于 $u_2(\bar{a}_1, a_2)$,则事件 (\bar{a}_1, \bar{a}_2) 是博弈的一个均衡点。

假设参与者 2 选择了行动 \bar{a}_2 ,如果参与者 1 试图极大化它的效用,则他可以选择 \bar{a}_2 ,反之亦然。参与者知道他或她的对手在均衡点时没有理由改变其行为,在这个意义上,均衡点是稳定的。显然这个均衡的定义没有考量任何动态方面的问题。可是,社会或市场的真实行为决定于随时间的复杂动力学。贸易循环是经济动力学的一个著名例子。问题在于这

些动力学过程是否被吸向均衡以及这些均衡是否稳定。一般而言,博弈论并没有考虑“蝴蝶效应”,即行为的一点小失误有时可能造成全球危机甚至混沌。

冯·诺伊曼和莫根斯特恩的博弈论不仅基于线性数理经济学的传统,它也发展了经济福利理论的观念。一个理性的社会是假定选择帕累托最优的利润分配。没有人可以在不损及其他人的福利下而增进自身的福利,这种利润的分配就称为帕累托最优。满足这个帕累托最优福利的弱条件并非是充分的。潜在联合的力量也必须考量。博弈论中的合作解主要根源于福利经济学、外交权谋以及自利政客的观点,这些人往往也是社会的。构成福利经济学的政治和社会框架的正义、公正或者公平竞赛等观念,在数理上简化成一定的对称原理。

博弈论只是一个精密数学理论,其在经济学上的应用有时被高估了。其缺点主要是它关于社会的典型线性假设。然而,博弈论是一个卓越的数学发明,主要的创始人是冯·诺伊曼。值得一提的是,这位约翰·冯·诺伊曼,是本书中所考虑的20世纪中几乎所有科学发展的中心人物。他曾从事程序控制计算机、自动机理论、量子力学和博弈论的建立。此外,他也对自然科学和社会科学交叉学科数学模型感兴趣。所有这些卓越的发展主要是由线性原理所支配的。但是,约翰·冯·诺伊曼也是首先承认自繁殖和自组织具有重要性的科学家之一。他关于元胞自动机的理论是著名的例子。

7.2 复杂经济系统、混沌和随机性

从方法论的观点而言,主流经济学通常受线性数学、经典力学、热平衡热力学,有时也受达尔文进化论等模型的启发。古典经济学模型中理

性经济人的假设,借由极小化成本和极大化收益来寻求效用的极大化。这些理性的个体之间假定借由市场上商品的交换而相互作用,市场则由特定的价格机制达到供需的经济平衡。

为了描述经济的动力学过程,需有成千个部门以及上百万个个体的经济变量的演化方程。如同其他领域,在经济学中的所有事物决定于其他事物,因而,为了尽可能模型化经济的复杂性,方程必须是耦联和非线性的。但是另一方面,纵使完全确定性模型也可能产生高度不规则的行为而无法长期预测。经济学似乎也具有与气象学同样的缺点。^[7.17]

在数学的混沌理论与气象学的蝴蝶效应尚未发现之前,人们相信气象精准的长期预测的可能性。身为计算机的先驱,约翰·冯·诺伊曼主张,在给与足够的全球的气象数据和超级计算机下,便能够提供某时某地正确的气象预测。他的失败并非是数学上的原因,因为在线性数学的框架下,他与经典天文学家一样都是正确无误的。但是长期下,流体和气候的真实情况与这些模型具有极大的差异。

人们如何处理气象和经济的复杂性呢?在气象学中,爱德华·洛伦茨提出一个非线性动力学模型,这个模型因内禀(“外生”)的扰动而可以产生出混沌行为(比较第2.4节)。类比而言,有两个可能方式来解释经济演化的复杂性。主流探究方式假定一个伴随着特设而未解释的外生冲击的线性模型,而非线性探究方式则是放弃这种过度简化的线性和特设外生冲击的假设,试图以内生非线性动力学来解释实际经济的复杂性。在少数情况中,非线性可能很弱以至于线性逼近不会造成实质误差。

在经济思想史中,20世纪30年代的大萧条引起尝试解释经济无规的理论。但是,这些模型(例如卡莱斯基模型、汉森-萨缪尔森模型)都是线性的,无法解释振荡的发生。^[7.18]因此,经济学家假设外生冲击会产生出他们所观测到的振荡。如果经济学家更加熟悉数学进展的话,他们该早就熟知非线性数学模型的解会出现其极限环。

起先,经济学家只知道稳定均衡就像不动点吸引子。庞加莱将平衡的概念一般化为包含极限环形式的均衡运动。但混沌吸引子如洛伦茨模型(图 2.21)并不存有不动点或是固定运动,而是永不重复的运动。然而,它是有界的运动且非游荡集,吸引特定的动态系统到动态均衡的终态。

从历史的观点而言,在 20 世纪中经济表现成被惊人的崩盘所打断的增长,例如 30 年代(大萧条)和 70 年代(石油危机)。关于增长的结构,创新和技术进步必须要特别注意。一项成功的创新的扩张在经验上可借由第 2.4 节中所介绍的逻辑斯谛函数很好地表现出来。加入整数 t 时间指数和增长因子 $\alpha > 0$ 可表示递归的情形。在初始阶段,创新是相当少见的。随着创新获得认可,它达到其最大的膨胀率。此后,当创新方法完全整合进经济中时,将减缓吸收过程的减速作用。

得出的曲线在图 2.22 中表示。在 $\alpha \leq 3$ 时,我们得到图 2.22a 所示的不动点吸引子。 α 增大时,得出的结果从周期振荡(图 2.22b 和图 2.24c),然后到混沌运动(图 2.22c 和图 2.24b)。在 $\alpha > 3$ 时,当 α 增加时,周期数相继倍增(图 2.23a),直到转化为完全的混沌状态(图 2.23)。

创新与经济产出的联系表现在下列图 7.4 的模型。^[7.19] 初始产出 q 趋向均衡,因此当增长率 Δk 增加,产出也渐渐增加。不过,当创新达到饱和时, Δk 落向零点,产出 q 也降回初始水平。因此创新刺激了繁荣,同

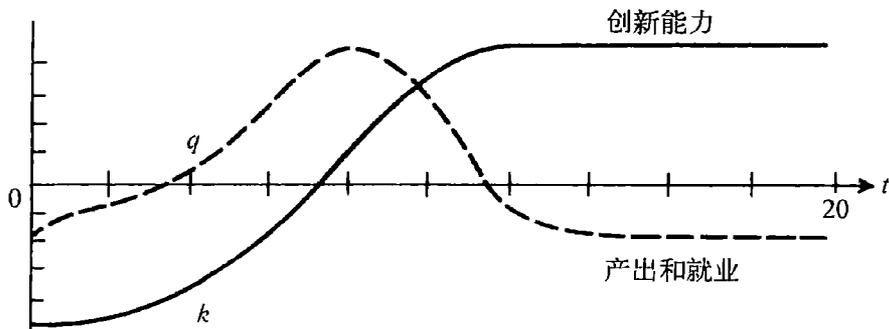


图 7.4 创新能力与产出、就业^[7.19]

时也刺激了随后而来的崩溃。创新可以是节省劳动力的。如果每单位产出的劳动投入下降 20%，就业也会下降。

假设新观念的增长呈指数形式，经济学家（如熊彼特）主张，在一个创新爆发终结后，新的创新将开始。当经济体系继续运作和技术观念每年持续增长大约 4%，然后第二轮的繁荣与崩溃就开始。创新对经济循环理论至关重要，因为在萧条时没有新投资以产生新扩张的其他基础。

新观念稳健地形成。当足够的观念积累起来，一些创新被引进。在刚开始时，它们发展缓慢，然后当方法改进时，加速发展。逻辑斯谛式的发展，描绘出创新的典型轨迹。特定投资必须先于创新的引入。投资刺激需求，而需求的增加助长了创新的传播。然后，当所有创新完全利用殆尽后，其过程将减缓至零。

熊彼特称这种现象为创新的“群集”（swarming）。在他的三循环模型中，第一个短循环与存货循环有关，因而创新没有发挥的余地。接下来的较长循环则关乎创新。熊彼特认识到历史统计的重要而将长波的证据系于最重要的创新，诸如蒸汽、钢铁、铁路、轮船和电力等这些经验事实，这些事实需要 30—100 年才得以完全融入经济当中。

一般而言，他将经济演化描述为以“群集”形式出现的技术进步，这种形式可用逻辑斯谛框架来说明。假定技术群集将使均衡以循环的方式移动到新的不动点。新均衡结果可用更高的实际工资、消费和产出来描述。但熊彼特的分析以确定产出的方式，忽略有效需求的本质问题。

从历史的观点来看，20 世纪 30 年代的大萧条激发了商业周期的经济模型研究。然而，起初的模型都是线性模型（例如汉森-萨缪尔森模型和伦德贝里-梅茨勒模型），因此需要外生冲击来解释经济的不规律。虽然标准的计量经济学方法已经对这种传统观点作了论证，但是借由奇怪吸引子的数学发现，循环的内在分析成为可能。30 年代的传统线性模型

可以容易地以非线性系统的框架重新表现出来。

梅茨勒模型由两个演化方程所决定。第一个方程中,产出变化率 \dot{q} 和真实存量 s 与期望存量 s^* 的差值成正比。期望存量与产出成正比。第二个方程乃关乎存量变动率 \dot{s} , \dot{s} 为产出 q 减需求。需求与产出成正比。由这两个演化方程决定其动力学复杂系统将产生出振幅逐渐增强的简谐运动。

如果以某种非线性方式将这个系统扩展,就会导致另一种不同的行为。第三个方程与净公共盈余和赤字相联系。目的是要产生出经年持续的循环。一种数学模型的提出受到所谓勒斯勒尔带(Rössler band)的启发。^[7.20]将默比乌斯带(Möbius strip)自上而下翻转后给出一面的带子(图7.5a)。遵循其轨迹,由外圈扩展到右上方。然后,它折叠起来,并随着向下运动而收缩为一个内圈,并反复作用下去。图7.5a给出了一个两循环的二维投射。轨线倾向于聚集在其间的空的空间。如果模拟继续下去,这些带子就变得越来越稠密。

图7.5a是混沌(“奇怪”)吸引子的一个简单而显著的例子。虽然每条轨迹都严格地由演化方程所决定,但是其长期是无法计算和预测的。初始条件的细微偏离可能剧烈地改变轨迹的路径,此为蝴蝶效应。图7.5b表示给定特定参数的计算机模拟实验,15年间产出在状态空间的轨迹。图7.5c表示时间序列的相应发展。^[7.21]

这个高度不稳定的行为由一个完全没有任何外生冲击的内生系统所生成。在经济学中,时间序列的不规则性通常借由外生冲击来解释。但这只是随意的特设假说,因而可以解释任何事情的发生。从方法论的观点来看,只有奇怪吸引子的混沌内生模型似乎更令人满意。然而,内生非线性模型和存在外生冲击的线性模型,必须在经济学中加以认真的对待与检验。

显然,一个经济体中包含许多互相联系或个别独立的部分,伴随着内

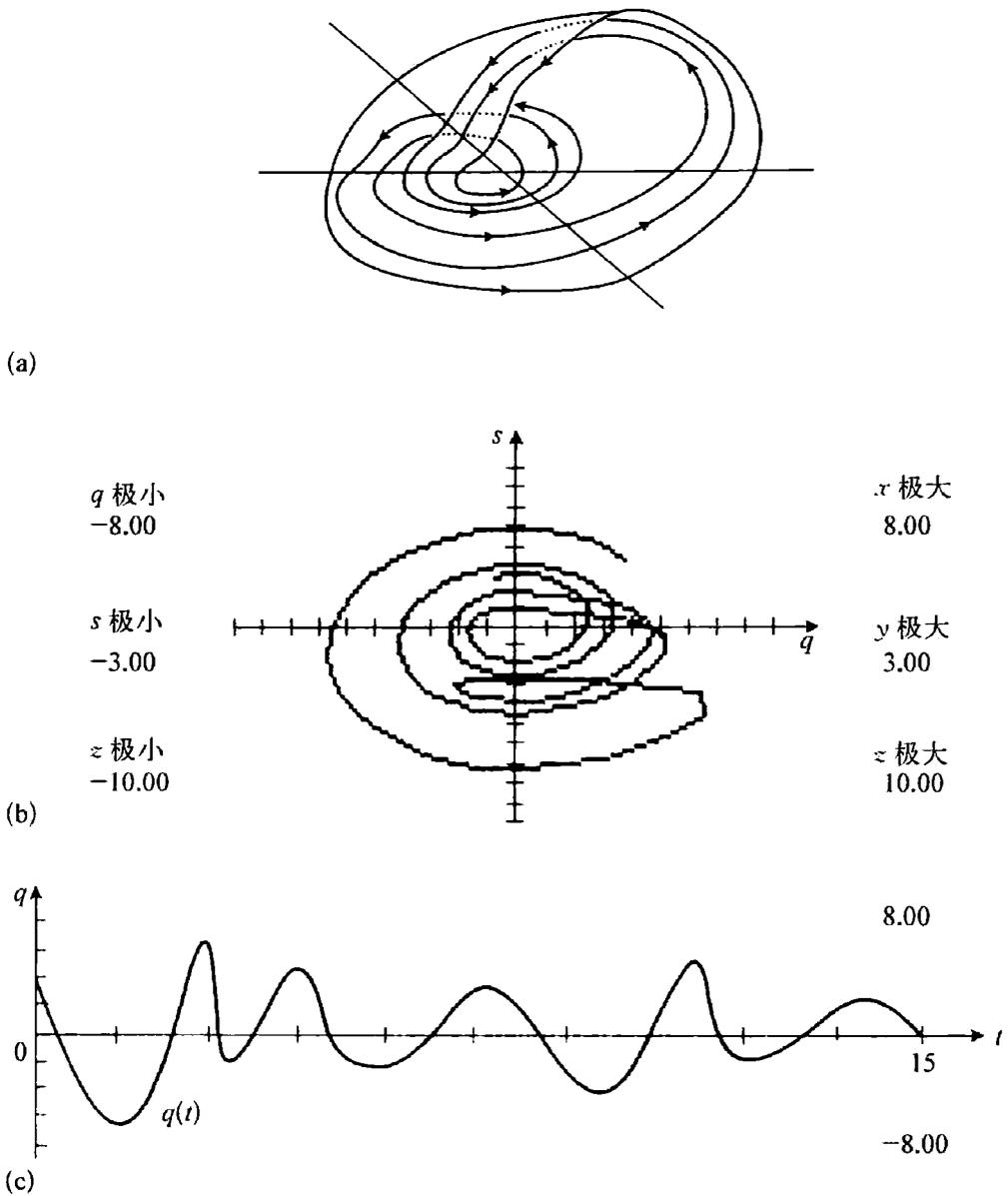


图 7.5 混沌吸引子与商业周期

(a) 勒斯勒尔吸引子; (b) 内生非线性系统的商业周期在状态空间的轨迹; (c) (b) 中商业周期的时间序列输出。^[7.21]

生动力学以及外生力。许多个别国家的经济受到世界经济动向的作用影响。一个经济体中,有数个具特殊动力学的市场。它们受到循环周期的影响,诸如太阳活动周期决定农业、旅游或者燃料市场。猪周期与建筑周

期是两个进一步特别著名的经济例子。因此,伴随外生作用力被动影响的内生非线性系统才是真实的经济模型。外来影响导致了受扰混沌吸引子或者超混沌(super-chaos)。就是这种经济事件的不稳定特性造成经济个体的严重问题,这些个体必须对不可预测的未来做出决策。

在第 2.3 节中,我们看到了自组织的复杂系统可以是保守的抑或是耗散的。这些不同形态的吸引子图示在图 2.14a,b 中。一些自然科学中保守或耗散模型的著名例子,也已经应用到经济学上。在 1967 年,古德温运用保守动态模型来精确描绘 19 世纪关于阶级斗争的观念。他考虑一个包含工人和资本家的经济体,工人将其全部的收入花费在消费上,而资本家保留他们全部的收入。古德温使用的是一个类似洛特卡和沃尔特拉的捕食者-被捕食者模型(见第 3.4 节)的修正模型。^[7.22]

古德温的保守模型支持资本主义经济是恒常动荡的看法。因此,其轨迹如图 3.11b 所描绘的是一条封闭的轨道。古德温的模型被批评是肤浅的,因为它并没有直接涉及资本家与工人的功能性收入份额或人口规模。但主要的还是针对模型的保守特性,这使得古德温的模型在经济上看起来不切实际。其模型由一堆孤立假设所组成,而这些假设并没有反映出其他因素的影响。

因此,这个模型已经借由“经济摩擦”的假设变得更为真实。在生物学的例子中,具有一个点吸引子的洛特卡-沃尔特拉耗散模型描绘在图 3.11c。耗散系统总是以不动点、极限环或奇怪吸引子的形态具有吸引子或者排斥子。当耗散系统具不可逆的时间演化,任何种类的后向预测都被排除。^[7.23]

事实上,一个动力学系统不能被认为是与其他动力学系统中隔离的。因此,在第 2.2 节中我们研究耦合振荡系统,如两个时钟之间(图 2.11a,b)。组合系统的状态空间以环面来表示(图 2.11c,d)。整个系统的动力学特性,以轨迹的相图和环面上的向量场来图示。

国际贸易提供耦合振荡系统经济模型的一个事例。想象一个具有总投资和储蓄的单一经济体的简化宏观经济模型,其中总投资和储蓄由收入和利率所决定。此体系的动力学由收入和利率的演化方程所共同决定,而收入乃根据商品市场上的超额需求来调节,这些方程以模型产生内生波动的方式来构成一个非线性振荡。

例如,三个经济体的相互作用可以由三个独立的二维极限环振子的体系来描述。如果所有三个经济体都振荡,系统的总体运动构成一个在三维环面上运动。非线性振子的耦合,可以理解为在三维环面上自主经济运动的扰动。耦合的步骤已经应用在数个经济例子中,例如国际贸易模型、商业周期模型和相互依赖市场。

当自组织经济系统被允许受到政治干预的影响时,关于实际政策的严重问题便出现了。在某些例子中,市场无法依照福利准则来发展。如果经济任由它本身作用,它有可能表现出波动的特性。但是政策措施可能造成与意愿相反的结果,如果没有考虑经济增长的复杂性和非线性性的话。

关于经济灾难的剧烈的社会和政治后果,在凯恩斯主义和新凯恩斯主义的框架下,若干政策措施已经讨论过了。例如,补偿性的财政政策可视为一种动态控制的类型,它应该用来减小经济波动的幅度。然而,战后的经验显示,将波动减至零或者将失业程度保持固定是不可能的。再者,一项好的政策需要相当多的时间来搜集数据、分析结果、形成立法或行政措施。结果是,任何政策可能由于有效时间而过时。因此,在经济学的复杂非线性世界中,政策措施绝对有可能是抑制生产的。^[7.24]

举例而言,当所假设的经济动力学和政策干预的计划时间路径过于简单时,凯恩斯主义的收入政策可能无效。在复杂系统框架下,经济政策措施可解释为对振荡系统产生影响的外生作用力。因此,不能排除经济变成混沌的可能性。受迫振子系统在物理学中非常著名。例如,如果像

钟摆那样的动力学系统(图 2.7)在振荡中,而且如果它周期地受到外力的影响,结果可能是无法预测的,因为渐增的振幅、振荡的总阻尼和完全的不规则化等原因。

从经济学名著的时代迄今,商业周期理论的目的就是去建立具有典型规则波动的经济动力学模型。根据线性的力学观,真实商业周期借由加入随机外生冲击的规则系统来建立模型,而这些随机的外生冲击必须由或多或少适当的经济假设加以解释。当然,当这些外生力决定了模型主要的定性性质,而没有给与一个合理的经济解释时,这样的情况是令人不满意的。如果真实的系统是非线性和混沌的,那么更多关于影响经济动力学的外生力的信息将可能是多余的。从方法论的观点看,按照奥卡姆的格言“如无必要,勿增(理论)实体”(entia non sunt multiplicanda sine necessitate),他的著名剃刀应该用来切除这些多余的关于经济学的特设假设。

从个体的实践观点而言,无论个体面对的是随机线性过程还是混沌的非线性过程,都是无关紧要的。这两种系统似乎都能使个体无法作出准确的预测。当混沌模型敏感地依赖于初始条件时,再精准的数字计算机原则上也无法计算系统未来长期的演化。轨迹会指数地发散。另一方面,相信随机外生冲击的个体当面对系统行为太复杂的情况时有可能放弃作决策。

然而,具有混沌时间序列的非线性系统并没有排除局部预测。如果非线性系统的吸引子可以重建,则数值技术有希望对短期的演化作出充分精准的预测。短期经济预测或许是复杂系统理论在经济学中一个有趣的应用,虽然尚在它的幼稚期。^[7.25]

从经济学的一开始,经验检验与确证就成为经济模型一个严重的方法论问题。与自然科学在实验室中进行任意多次测量和实验相反,经济时间序列必须涉及时间单位的日数据、年数据、季数据或者月数据等。标

准时间序列长度一般包含几百笔数据。因而,已经具有对经济模型有限可靠性进行经验研究的理由了。当然,经验实验大体上仍然排除在外。

因此,一个关于内生经济动力学的适当知识至少将有助于数学模型的完成,而模型中的未来演化可以借由计算机试验来模拟。政治家和企业家至少得到了另一种经济发展模式的“相图”,如果关于他们经济和政治环境的假设都实现的话。对非线性系统高敏感性的定性洞悉,至少可以避免过激的个体将系统从一个不稳定点进一步推向更大的混沌状态。

在经济学中对非线性模型的主要论证,来自新主导技术的发展导致经济增长的结构性改变。经济学的传统理论假设递减的收入,特定商品的生产越多生产出来并投入市场,它们的生产与销售将变得越困难,从而可以获得的利润也就越少。个体的相互作用决定于稳定经济的负反馈,而这种负反馈借由抵消经济变动所造成的反应来稳定经济。

在一个具有负反馈的经济中,价格的均衡和市场份额能够产生而且能够被预测。20世纪70年代的石油危机是一个著名的案例。在70年代原油价格的突然上升导致储蓄以及寻找替代能源,后者造成80年代油价的下降。在传统经济中,均衡相应于特定环境下的最优结果。递减收入定理隐含着单一均衡点的存在。传统部门(诸如农业、矿业和大规模生产的产品)是典型的具有递减收入的负反馈的经济。

但是,依赖高技术知识的经济部门获得的是递增收入。高技术产品(诸如计算机、软件、飞机、化学制品和电子产品)的发展与生产需要研究、试验、计划和设计的复杂过程,而要求高额投资。可是,一旦高技术产品投入市场,生产能力的扩大是相对便宜的,因而收入将会增加。因此,现代高技术产业必须描述成产生递增收入的正反馈的动态模型。

具有正反馈的系统具有多个均衡状态,而非单一的,因而均衡不一定

是最优的。^[7.26]若产品在市场上具有某些碰巧的竞争优势,则市场的领导者在长期将占有优势,甚至不是更佳的产品也能扩大它的优势。现代高技术产业的许多案例显示,竞争产品在一开始时或许具有相等的市场份额。但是增加某特定产品市场份额的细微波动,决定了此产品最终的成功。有时,最终市场的领导者的商品从技术上看甚至具有较低的质量。

这些效应在传统线性动力学的框架下无法解释,可是在非线性系统中都是常见的。图 7.6 图示了两项具有正反馈的技术的竞争。市场份额的某些轨迹描绘在凸曲面上。一项技术在市场上越占优势,它越容易地获得较大的市场份额。由于市场地位由随机波动来决定,它是无法预测的。在图 7.6 中,左边的曲线表示技术 A 最终的主导优势。在其他两种情况下,在初始波动后,技术 B 将最终主导这个市场。^[7.27]

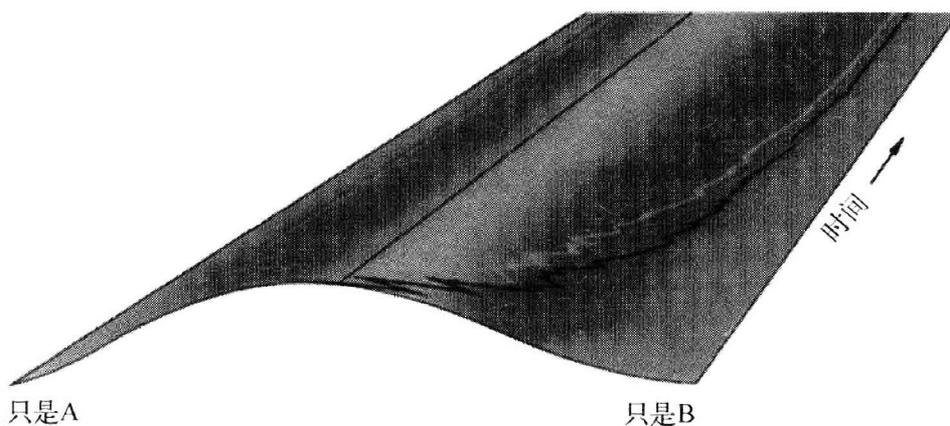


图 7.6 两种竞争技术的非线性动力学^[7.27]

这些经济模型的非线性动力学由最初的随机波动和正反馈所决定。显然,可能路径的分岔是一种初始随机波动引发的对称破缺,这在复杂物理系统中是众所周知的。读者只需要回忆起出现在加热流体中的稳恒对流涡旋(图 2.20b),在那里涡旋方向向左或向右决定于初始随机涨落。

显然,社会中的行为模式与自然的模式生成之间存在许多结构相似性。从微观的角度而言,经济可以视为包含个体之间的交互作用和个体与物质环境的交互作用的复杂多元系统。从宏观的角度而言,行为的集体趋向是从微观的交互作用而产生出来。因此问题就产生了:是否如同在自然之中那样,存在关于社会和经济中集体动态的宏观过程的一般策略和模型方法?但这个建模方法不能简单地从非平衡热力学中直接获得。在这个例子,我们需要经济中交互作用个体的微观水平的运动方程,这是推导相应的宏观变量方程所需要的。只有在相当简单的社会生物学模型中,我们可以观察直接输入刺激和产出在种群内部互动成员间的反应,诸如昆虫的神经化学物质的相互作用或者哺乳动物的巴甫洛夫反射。一般而言,有的只是介于环境输入和个体决策及反应之间间接的估计与评价。

人类行为的复杂性只允许对于个别决策和行动的的概率处理。从随机微观行为,我们由宏观变量的概率分布的主方程得到宏观动力学的随机描述,而宏观变量即经济和社会的序参量。它们主导相应于微观变量的个人态度和活动,并且在宏观水平上主宰行为模式。因此,宏观变量的适当选择在经济学和社会科学的建模上扮演重要的角色。

在经济学中,我们区分集体的物质变量的构型和集体的个人变量的社会构型。物质变量在经济学中众所周知。如同在热力学中,存在着与系统大小无关的强度变量。例如价格、生产力以及商品密度。广延变量与系统的大小成正比,例如生产和投资的范围,或者建筑物的大小和数目。集体的物质变量是可测量的。它们的值受到通常无法直接测量的个体个别活动的影响。一个公司的社会和政治气候,联系到受个人及其小团体的态度、意见或行动影响的社会心理过程。因此,为了引入集体个人变量的社会构型,我们必须考量表现在其态度、意见或行动上的个人状态。再者,存在具有固定特性的小团体(例如公司或机构的部门或分部),

所以每个人都是一个小团体的成员。在特定状态下特定的小团体的成员数,是一个可测度的宏观变量。因此,一个公司的社会构型是宏观变量的集合,描述出在特定时间的态度、意见和行动在小团体中的分布。整个宏观构型,由物质构型和社会构型的联合而得出。

如果宏观构型中所有的宏观变量随着时间而保持固定,则此社会系统在稳恒的宏观均衡,这可以与热力学平衡作比较。如果存在动力学,我们必须透过宏观变量的增减,考虑介于各种宏观构型间的转换率。在物质构型的情况下,基本变动由一个适当选取单位的宏观变量(例如商品的价格)的增加或减少所构成。如果一个小团体中的个人改变他的状态,导致小团体数增加或减少一单位,则社会构型发生了基本变动。因此,邻近构型的转换率描述出每单位时间的概率,若初始构型实现了则个别转换就发生了。它们可以用来设定社会系统的中心演化方程,即所有宏观构型的宏观变量的概率分布的主方程。主方程的分布函数 $P(m, n; t)$ 表示在 t 时刻找到一个特定的宏观构型(物质构型 m 和社会构型 n) 的概率。包含 $dP(m, n; t)/dt$ 的主方程表示整个宏观构型的概率变化,这归因于物质构型和社会构型的转换。[7.28]

作为一个经济案例,考虑一个企业系统制造同一种类的可替代的、耐久的高技术产品,而且针对产品的质量进行竞争。假设增进质量与消费者对质量的反应之间有正反馈。在需求方面,消费者构型由集体个人宏观变量组成,由这些变量可区别特定产品的拥有者数与作为潜在消费者的非拥有者数。供给构型由物质变量组成,涉及由特定厂商在特定时间单位下所生产的商品单位数、商品的价格,以及商品质量的测量。总经济构型 E , 包含消费者构型 n 和供给构型 m 。系统的演化,通过总经济构型和它邻近的经济构型间的基本转换来发生。在消费者方面,相应的转换率计算非拥有者变成特定商品的拥有者的购买步骤,并且整理拥有者变成非拥有者的步骤。在供给方面,转换率涉及厂商改变产出、价格、产品

质量的决策。利用这些转换率,将有可能建立相应的主方程。分布函数 $P(E; t)$ 是在 t 时刻找到经济构型 E 的概率。主方程 $dP(m, n; t)/dt$ 表示在个人变量的消费者构型与供给变量构型的转换效应。

然而,一般而言,由经验数据的比较来穷竭所有包含在主方程的概率分布的信息是不可能的。在这个例子中,最好的方式是忽略宏观变量围绕其均值演化的波动,并且将我们限制在从主方程可推导出的宏观变量的准均值方程。假设我们考虑的是两个竞争厂商的经济系统。在协同学中,系统宏观动力学的序参量由快弛豫变量的浸渐消去法引入(比较第 2.4 节)。其思路是,一个伴随涨落的动力学系统(如激光),依据特定的控制参量(如能量的泵浦)开始于稳定模(波)。如果控制参量变动到一个临界值,失稳的模被当成序参量,因为它们开始支配(“役使”)稳定模。因为它们的弛豫时间倾向于无穷大,快弛豫变量可被浸渐消去。用更通俗的词汇,协同学要求长命的系统役使短命的系统。因此,如果我们假设价格和供给是我们经济系统的快适应变量,依据协同学程序,它们可以被浸渐消去。遗留下来的是,消费者宏观变量的方程和产品的质量宏观变量的方程。这个系统的一个决定性的控制参量,显然是两个厂商间的竞争。如果产品质量的演化相较于消费者购买活动是缓慢的,则根据协同学,快弛豫的消费者变量也可被浸渐消去。唯一存活的演化方程是质量变量方程,这可视为该系统的序参量。

厂商 $i(i = 1, 2)$ 的质量变量方程 q_i 可以用数值方式研究。在图 7.7 中,它们的(稳恒)解 $q_i(\varphi)$ 被描述为竞争参量 φ 的函数。其结果是,只要竞争值 φ 小于临界值 φ_c ,两个厂商都具有相同稳恒质量 $q(\varphi)$ 的产品并且同样的稳恒的市场份额。在 φ_c 处会发生分岔,当 $\varphi > \varphi_c$ 时,存在两个稳定的质量值 $q_+(\varphi)$ 和 $q_-(\varphi)$ 。获胜的厂商如 $i = 1$ 将到达 $q_+(\varphi)$,输掉的厂商 $i = 2$ 到达具相应市场份额的 $q_-(\varphi)$ 。

除了协同系统和耗散系统之外,还存在具有对称性破缺的保守系统。

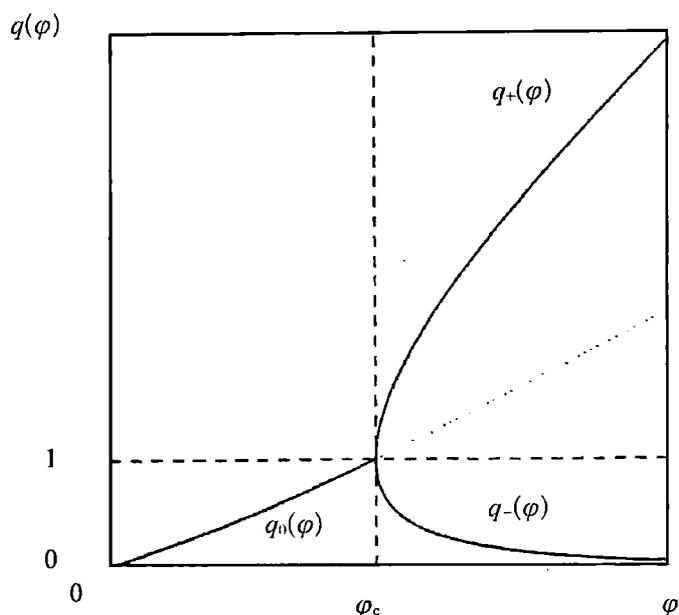


图 7.7 竞争厂商的分岔

两个竞争的厂商在竞争参量 $\varphi > \varphi_c$ 后分岔成为赢家和输家。^[7.29]

考虑一个当温度降低时自旋玻璃中的自组织模型(图 4.9a)。在热平衡时,自旋排列成同一方向,决定于初始的随机涨落。市场份额的动力学,似乎以同样的方式发展。技术因为初始随机波动而一路持续发展的,这样的例子很多。19 世纪,邻近的铁路公司在更大的区域中采用了同一规格。标准规格只是历史随机事件的结果,并非技术的因素所致的区分。

这些复杂系统的行为决定于类似的演化方程,如同自旋玻璃或铁磁体的对称性破缺。图 7.8a 显示出在铁磁体中磁偶极子的演化。每个偶极子或者基本磁极不是指向上(北)就是指向下(南)。偶极子可与其最近邻域相互作用。在高温下,偶极子的方向是随机的。如果温度下降,则基本偶极子排列成同一方向。由于演化是一种对称性破缺,故无法预测在平衡终态何种演化方向是显著的。图 7.8b 显示出铁路公司轨距的类似的自组织过程。

正反馈的自我强化机制,是非线性复杂系统在经济和社会中的典型

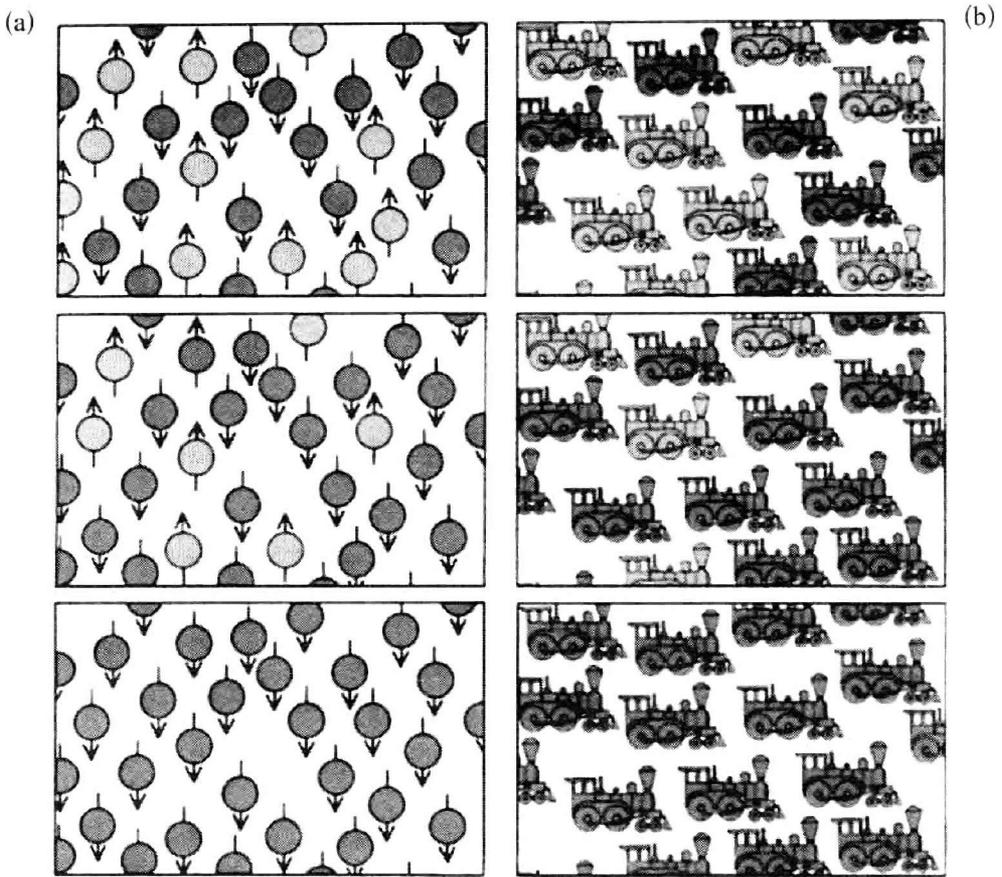


图 7.8 物理与经济系统中的非线性动力学

(a) 铁磁体中磁偶极子的非线性动力学；(b) 经济中竞争技术(铁路公司的轨距)的非线性动力学。^[7.27]

特征。举例而言,我们可以思索为什么加州的圣克拉拉会成为著名的硅谷。在 20 世纪 40 年代和 50 年代,一些关键性个人(如雇主休利特、帕卡德和肖克利)在斯坦福大学的附近创立电子公司。这些先驱者创建了一个高技术工程师和生产的集中地,这变成吸引子,最终超过 900 家厂商进驻。在一开始,就存有一些偏向圣克拉拉的随机波动。因此,它并非奇迹,而在非线性的意义上是合乎规律的,从而解释了硅谷如何兴起。但是,在发生在圣克拉拉这种随机性意义上,它是一个奇迹。

当今,自我强化机制决定了高新技术的国际贸易。^[7.30]汽车工业在

美日间的竞争,可以在这个框架下解释。一开始,日本工业在美国市场上供应小型车,没有受到传统专业化生产大型车的美国汽车工业的抵制。日本工业因而可以获得市场份额、降低成本、提升品质。从而,正反馈使得日本工业能够入侵美国市场。

洞悉这些非线性市场效应,对政治决策具有重大的意义。从传统观点来看(假设收入固定或递减),政府信任市场开放,试图避免垄断,希望企业支持研究和技术开发。它们相信世界市场价格的固定均衡,拒绝以补助或关税来干预。它们的政策在一个递减收入的经济中被认为是正当的,但在依赖高技术收入递增的部门中将有可能是危险的。

递增收入运作机制改变了国际间竞争的均衡。甚至连强大的国民经济都可能错过重要技术的发展。在20世纪60年代西欧与美国间的技术差距(例如计算机工业)是一个著名的例子。技术标准或协定通常由正反馈确立。诸如铁路规格、英语作为飞航的标准语言、FORTRAN作为计算机语言、一种特殊的螺纹等一些例子通常不会改变,甚至当其他的技术或协定有可能较好时也是如此。它们已经获得太多的市场份额了。但是,起初的优势并不保证长期的生存。

复杂系统理论可用以绘制经济动力学的全球相图。时间序列分析提供有用的判据和方法,以识别(如)股票市场的行为模式。但是对于发现经济福利的局部均衡,经验和直觉有时比科学知识更有帮助。经济学家和政治家当处理高度敏感的复杂系统时必须也是高度敏感的,而且必须做出合适的决策。

经验显示,人的决策制定的理性是受限的。人们被迫要去进行管理的非线性系统,其复杂性对人认知能力是很吓人的。传统的数理决策理论,假设经济个体(经济人)完全理性。司马贺,这位诺贝尔经济学奖得主以及系统科学和人工智能的主要先驱者之一,在1959年引进有限合理性

原则(principle of bounded rationality):

人类心智在形成和解决复杂问题的能力与问题的大小相比是非常小的,其问题的解答需要真实世界中的客观理性行为,甚或这种客观理性的一个合理近似。^[7.31]

受限理性不仅来自人类知识、信息和时间的局限。它不仅是由于我们知识的不完全和我们模型的简化。短期记忆和长期记忆的信息储存的约束,都业已明确。在紧急的情况下,人们被信息潮所压制,这些信息潮必须在时间压力下过滤。因此,我们必须涉及人类信息处理和决策制定的实际特征,表现在情绪、潜意识和所有情感的、非理性的因素上。甚至连专家和经理人通常也偏好依赖于经验法则和以往的试探法,这些建立在过去经验的直觉感受。经验表明,人的直觉并非只是意味着信息的缺乏和决策的失败。我们的情感行为和直觉感知都属于我们进化的遗产,这使我们面临生存威胁时能够进行决策。

在传统经济学和决策理论中,情绪和直觉被视为不完全的信息处理,而必须要以计算机和信息技术来克服。但是,我们甚至对自然和生命的计算复杂性的现代洞察,也迫使我们放弃所谓理性的传统标准。事实上,自然和生命的特点不仅在于高度复杂和混沌动力学,而且也在于随机性和噪声。在这个情况下,通向预测未来和减少复杂性的任何程序或法则的捷径是不存在的。减少复杂性的计算总量,至少与该系统的真实行为一样多。计算的不可还原性与不可判定性(比较第 5.6 节)强制我们找寻行为策略,这些行为策略以我们在相似情境下的真实经验为基础。为了找到和评价人们在决策中实际采取的探索法,需要的是进行经验的实验的研究,而非数学上的最优理论。

当最优决策的完美模型不可能存在时,人们发展出许多个别策略来

对受限理性做出反应。^[7.32]它们通常是设法减少真实情况的复杂性。组织的习惯和常规,由厂商的传统和文化证明是正当的。经验法则,建立在过去被证明是正当的简化和不完美的情景模型之上。例如,如果经理人没有信息或时间对每项商品定价以最优化商店的利润,他们有可能将零售成本乘上一个传统的加价比例。当价格显得过高或过低,他们会根据其他的经验法则给予改正。为了决策而求解最优化问题,往往是太复杂了。人们倾向于订立一个他们可以在给定资源和时间限制达成的目标,而非最优化。如果目标达成了,他们就停止努力,虽然他们无法确定是否存在一个更完美的问题解决之道。例如,消费者会停止去搜寻便宜货,如果他们对某种商品找到一个足够低的价格。雇主有时会雇用第一个满足工作要求的候选者,而不是去寻找最好的候选者。将决策问题拆解成子目标,也是一个减少复杂性的策略。但是,一个复杂厂商的局部决策者会遇到忽略子目标认为那与他们并非直接有关的其他方面危险。

如果决策者忽略厂商或市场的非线性动力学下行动的副作用和反馈,他们将可能造成系统的不稳和失调。但是,人们不是完全非理性、无动于衷或气量狭小的。有限合理性原理告诉我们,不存在全局的理性概念。然而,当人们试图基于他们的知识、经验和感受而自觉地行动时,他们的决策就可能是有意的或局部理性的。若一个决策法则在决策者相信并接受的环境下,产生合理和明智的结果,则这个决策法则称为有意的或局部理性的。例如,对一个厂商而言,在产能利用率低时削价以刺激市场份额看起来似乎是合理的。然而,它不是普通的理性法则,因为它依赖于经理人所认为的竞争者将不会(或不能)对他们的削价做出反应这样一个信念。稍后,这个例子将阐明局部理性法则由复杂系统的非线性动力学,将会导致全局的非理性。

竞争厂商的非线性动力学,决定于一些反馈回路。一个公司当产能

利用率降低到一定程度时将消减定价。这是经理人试图遵循的负反馈。在竞争产品价格被认为是外生的意义下,他们只专注于反馈回路并简化整个系统。如果以上为真,则削减价格以刺激需求并提升利润就有意义。然而,经理人的模型只是整个非线性现实的一小部分。竞争者有可能运用同样的反馈回路来定价作为他们的局部策略。在产能利用率下跌,削价引发增强的反馈,即价格的下降导致市场份额和竞争厂商的利用率下降。因此,他们有消减自己价格的动机。公司认为他的市场份额和产能利用率并没有如同预期一样地增进而再次削价,从而闭合了一个正反馈回路。当经理人的外生价格模型有误时,他们的局部的和有意的理性决策导致一个意料外的价格战争,消灭了所有的利润可能性。

为了避免由局部理性决策所致全局失败,必须测试部分模型。在相应的测试中,每个组织职能都与其环境隔离,直到与属于决策法则的模型相一致。显然,在复杂系统中,个别行动者所用的有意的和局部的理性决策法则,无法保证全局的理性行为。一般而言,现代研究对计算复杂性最令人惊讶的洞察之一就是,极其简单和良好确定的局部行为的法则,不仅产生了整个系统的高度复杂的混沌的动力学,也产生了整个系统的随机的动力学(比较第 5.6 节)。

如果我们考察金融市场上的价格发展,我们将看到伴随趋势和模式的时间序列,也看到伴随价格波动的表观随机性。理由是,价格不是如亚里士多德和亚当·斯密所相信的由真实价值决定的;价格在任何给定时刻决定于它们的估计值。这些估计值受到所有事件的影响,这些事件与人们相联系、与人们的情感与直觉相联系。在这个意义上,价格的随机波动反映出外部世界和人性判断的随机变动,可以在不同的时间序列的时间尺度上观察到。因此,价格波动是大量因素的非线性相互作用的结果。这些大量因素如何可以表现在适当的模型中呢?即使是动力学系统的非线性方程,也将复杂性简化为一定数目的连续函数。有时这些波动并不

是为人所熟悉的,或者它们必须以一种理想化的方式从复杂背景中选取、孤立出来。不是直接以选取函数的方式来求解困难的非线性方程,更合适的方式是将复杂系统的计算机程序设想为大量交互作用的实体,用计算机实验来进行分析。

接续第 5.6 节的思路,一个市场可以视为一维的元胞自动机。例如,每个元胞代表着有限数目状态(如颜色)下的单一交易单位,表示它在这一步时选择是买还是卖。所有行为可以用单位状态的改变来说明。市场上的信息流由状态的改变来实现,而状态的改变依赖于前几步其他邻近元胞的行动。在一个简单的沃尔弗拉姆元胞自动机(图 7.9a)中,一个给定元胞的行为决定于对两个相邻元胞在前一步行为的考察,这个考察依据元胞状态 1(黑)或 0(白)的简单法则。

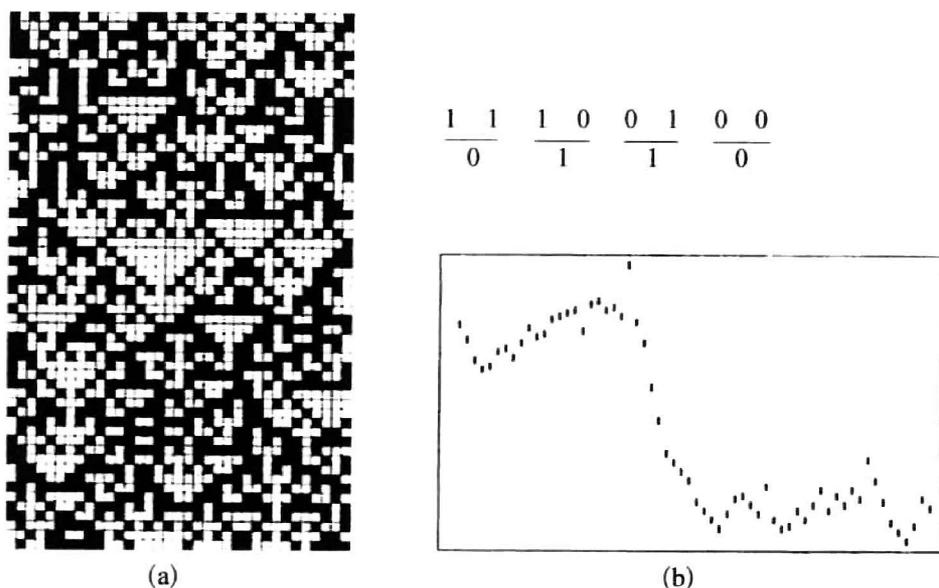


图 7.9 买卖单位(元胞)的市场模型

(a) 由一维元胞自动机的模式生成;(b) 市场价格的时间序列。^[7.33]

作为一个市场价格的粗略比拟,在元胞模式中相继步骤的黑白数目的连续差异绘成时间序列(图 7.9b)。这个图虽看起来是随机的,尽管在系统完全行为的模式中可以看到散布的可预测性。当然,在真实市场中,

我们没有机会像在元胞自动机一样知道每个实体的详细行为。可是,这种理想化也同样在热力学的分子模型中所采取。虽然我们不知道每个气体分子的精确行为,但可以辨识全部气体的行为趋势或完全随机性。对元胞自动机和等价系统而言,众所周知的是,纵使相互作用实体更复杂的局部法则也不会改变行为的全局模式。因此,纵使在一个更接近真实的模型中,也允许个体拥有不同的或改变的法则,全局行为并没有本质上的改变。这些系统可以产生复杂、混沌甚至随机的模式。因此,在经济的情况下,局部的或有意的理性行为可以导致随机波动。结果是,纵使从计算机的观点而言,我们必须支持对于经济个体在变化的情况下真实行为的实验研究。经济学中没有找到哲人石(philosophers' stone)的捷径。

7.3 巴舍利耶的金融理论和市场均衡

在经济学和金融理论中,不确定性和不完全信息使得精确预测成为不可能。在金融理论中的一个广为接受的信念是,资产价格的时间序列是无法预测的。混沌理论已经表明,无法预测的时间序列可以产生在确定性的非线性系统中。在物理、化学和生物系统的研究中所得到的结果提出一个问题:在金融市场上资产价格的时间演化是否可能是有限变量的非线性确定性动力学的结果?如果我们运用非线性动力学工具来分析金融市场,可能会对重建某个吸引子感兴趣。在时间序列分析中(第 2.6 节),重建一个基础吸引子及其维数 d 是相当困难的。对 $d > 3$ 的混沌系统而言,区别一个混沌时间演化与一个随机过程是一个挑战,特别是当基础的非线性确定性动力学无法得知的时候。从经验的角度来看,区分随机性和混沌通常是一项不可能的任务。资产价格的时间演化,决定于对所研究资产产生影响的所有信息。所有这种信息似乎无法轻易地以有限数目的

非线性确定性方程来描述。

因此,资产价格动力学被假设为随机过程。对了解早期所发现的随机过程来说,随机游动是一个重要的概念(见第5.4节)。随机游动在自然科学中最早的理论描述,是1905年爱因斯坦关于分子相互作用的分析。然而,首先对随机游动进行数学化的学科不是在物理学而是社会科学,由法国数学家路易·巴舍利耶(1870—1946)完成。他在1900年发表了博士论文,题目为《投机理论》。^[7.34]在当时,大部分着眼于股票和债券的市场分析都是依照因果关系的方式:某事发生(因)以及价格反应(果)。在成千上万的行动和反应的复杂市场,如果事先的不留心(即试图预测反应)而在反应发生之后要作出因果分析是困难的。人无法得知一切。然而,巴舍利耶却试图去估计价格将会变动的概率。热穿过物质的扩散,启发了他关于债券价格的波动方式。他相信两者都是无法准确预测的过程。在物质中的粒子或者市场中的个人的水平上,细节太过复杂。人将永远无法准确分析所有的相关因素是如何互相联系以扩散能量或者进行能量扩散。然而,描述整个系统概率的大致模式在两个领域中都可以看见。

巴舍利耶由分析债券市场为公平博弈来引入了一个随机模型。每次投掷一个硬币,得到正面或是背面的概率都维持 $1/2$,与前一次投掷所得到的结果无关。在这个意义上,硬币投掷被假设为无记忆。纵使经过多回合的投掷过程,不管是结束还是继续进行下回合的投掷,其结果的可能性都是相等的。在交易最激烈的时候,价格改变也可视为如此。巴舍利耶假设市场已经考量了所有相关信息,而且价格处于均衡状态。即价格与需求相符、卖者与买者成配对。除非某些新的信息产生而改变这个平衡,否则没有任何理由预期价格改变。下一步有可能是上或下,两者的可能性是相等的。

事实上,价格遵循随机游动的过程。设想一个醉汉在一片空地上摇

摇晃晃地行走。一段时间后,他能走多远呢?他可能向左一步,向右两步,后退三步,诸如此类漫无目的地行走。平均而言,就像投掷硬币,他哪都到达不了;他的无规行走绕在起始点的位置。同样,市场价格可能升高或下降,大步向前或者小步徘徊。在没有关于价格向某方推进或者其他方面的新信息的情形,平均而言,价格将在其起始点附近波动。在这种情况下,最佳的预测就是当下的价格。价格的每次变动都与上一次无关。在一个随机模型中,价格改变形成独立的等同分布随机变量的序列。在图 7.10b,价格的变动图或多或少呈现出一个随着时间的均匀分布。大部分的价格变动发生在狭窄的高度范围内。也会出现较大波动,但是比较稀少;这有些像一块未修剪的草坪,在此绝大多数草叶其高度都在一个范围内,但也有少数草叶超出了这个高度。

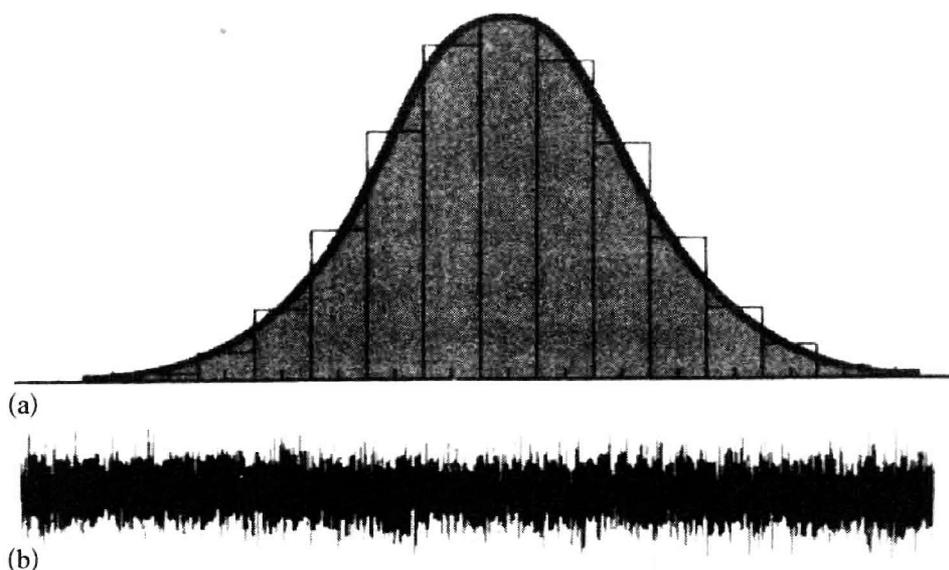


图 7.10 巴舍利耶得出的正态分布曲线及价格变化图^[7.35]

为了图示这个平滑的分布,巴舍利耶在一个图表上绘出以月或年为单位的所有债券价格变动。当这些价格变动是独立同分布变量时,呈现出有名的正态(“高斯”)分布的钟形曲线(见第 5.4 节),即许多的小变动集聚在钟形曲线的中心地带,两边是少数的大变动(图 7.10a)。巴舍利

耶假设价格变动表现如同布朗运动中分子的无规行走。在巴舍利耶和爱因斯坦之前,苏格兰植物学家罗伯特·布朗早就已经研究细小的花粉粒在水中的不规则运动。爱因斯坦解释这个运动乃归因于分子的相互作用,并且所建构的方程与巴舍利耶关于债券价格概率的方程非常类似,虽然爱因斯坦本人不知道这一点。这是一个值得注意的巧合,证券价格的运动、分子运动以及热的传导都用相似的数学模型来描述。简言之,巴舍利耶的模型依赖于三个假设:(1) 统计的独立性(价格的每次改变都与先前的无关);(2) 价格改变的统计稳恒性(产生价格变动的过程不随着时间演变);(3) 正态分布(价格变动发生的概率呈现高斯钟形曲线形状)。

然而,长久以后,经济学家才认识到由机会定律(laws of chance)和布朗运动描述市场的实用价值。在1956年,巴舍利耶公平博弈的观念才由保罗·A·萨缪尔森和他的学生用来表述效率市场假说。^[7.36]他们认为,在一个理想的市场中,证券价格完全反映所有的相关信息。金融市场是一个公平博弈,在其中买者与卖者平衡。解读价格报表、分析公开信息以及依照内部信息行动,市场快速地预计到所形成的新信息。价格升降以达到买者与卖者间的新均衡。下一次的价格改变,一如既往,无论升高或降低都有相同的可能性。因此,人们可以预期一半的时间会赢而一半的时间会输。如果某人对股票有特别的观察,将可因为第一个进入市场依据观察行动而获利。然而,因为市场上有许多与此人同样聪明的人们存在,所以他也就无法确定是否是第一个或是考察正确的人。

遵循萨缪尔森所作的工作,巴舍利耶的理论不仅被阐述成一个描述价格如何变动以及市场如何运作的成熟理论,更重要的是对金融世界来讲,是将该理论转化成实际金融工具。在20世纪50年代,哈里·M·马科维茨受到巴舍利耶的启发,提出现代有价值证券组合理论(MPT),当作投资选择的一个方法。^[7.37]在60年代初,威廉·F·夏普发明一个资产评价方法,称为资本资产定价模型(CAPM)。最后,用来评量期权合同和

估计风险的布莱克-斯科尔斯公式由费希尔·布莱克和迈伦·S·斯科尔斯在 70 年代提出。这三个新发明——CAPM、MPT 和布莱克-斯科尔斯公式——仍是古典金融理论的基础工具，都根基于巴舍利耶关于金融市场的假设。

1990 年获得诺贝尔经济学奖的马科维茨，依据高斯钟形曲线建议证券组合分散投资来极小化投资风险：在给定两个可选择的证券下，寻找最大的平均预期收益与最小方差（即风险）的证券。在数学上，马科维茨主张任何股票的前景都可用两个数字来描述：回报与风险，或者期望在股票卖出时所得到的回报的均值和方差。第一个数字是平均的期望卖价，利用标准股票分析工具来作预测。第二个数字是方差，由回顾在过去的表现以及利用钟形曲线作为检验的标准来作预测。将这两个数字当作坐标，股票将可用平面上的点来表示并系统地比较。这些点分散在平面上形成了以均值（收益）和方差（风险）的范围。最后一步是将这些股票结合成有效投资组合群。

问题是，证券投资风险远比加总这些数字来得复杂。作为一个整体，证券组合有可能大于或小于其各部分的加总。股票有共同上涨或下跌的倾向。马科维茨将之与硬币投掷作比较。如果人们以一组公平的硬币赌博，而且每一次投掷间都是无关的，那么最后得到的结果有可能是平手。正面与背面将势均力敌，而打赌则是多种多样的。然而，如果硬币是相关的，则硬币投掷的结果将以某种形式互相依赖。同理，任何股票或多或少与其他股票相关联，决定于市场部门。马科维茨的有价证券组合理论认为，为了降低与整体有价证券风险的联系，有背面趋势的股票应该与正面趋势的股票一起混合搭配。更多的股票应该加入不同的组合来建立有效的投资组合。一个投资组合是有效的，如果它能以最少的风险赚取最大的收益。投资组合的方差，在数学上可以利用股票的方差来估计。在两种股票的投资组合 P 的简化例子中，其方差定义为公式 $\sigma_P^2 = w_A^2 \sigma_A^2 +$

$\omega_B^2\sigma_B^2 + 2\omega_A\omega_B\sigma_A\sigma_B\rho_{AB}$, 其中 σ_A 和 σ_B 是股票 A 和 B 的标准差, 其平方表示方差, ω 是投资组合中每种股票的权重, ρ_{AB} 是 A 和 B 间的相关系数。利用这些方法, 马科维茨将这种股票投资技巧转化为均值、方差和风险趋避指数的分析。这标志着金融工程学的开端。

但是, 如果在市场上的每个人都使用马科维茨法则的话, 那么将发生什么情况呢? 另一个 1990 年诺贝尔经济学奖得主的夏普下了结论: 在市场上的有效投资组合并没有像市场上的投资者那么多, 那么多人却只有一种投资组合。^[7.38] 理由是, 当股票价格上的波动暗示另一个组合更好时, 每个人都会放弃目前的组合, 将他们的资本移到另一个组合。最后只会留下一种, 称为市场投资组合。市场本身就像一种演示马科维茨计算的计算机。因此, 夏普引进股指期货的概念: 从成千上万的投资者中汇聚成一大笔钱, 每个投资者持有与真实市场同样比例的份额。简言之, 股指期货可视为真实市场的模型。这是夏普资本资产定价模型 (CAPM) 背后的主要概念。

从计算的观点而言, 股指期货是复杂性的一个睿智的简化。为了简化马科维茨对许多复杂的投资组合所设定的数千条算式, 较少变量的股指期货就可以用来模拟真实市场。被用来寻找最佳投资组合的应该是股指期货, 而不是真实市场。股票反应市场变动的量称为 β 。对一个投资组合而言, 对每种股票估算其 β 值就足够了。每种股票各有其本身的 β 值, 即它的价格波动与整个市场的价格波动的联系程度。它定义成股票随着市场除以市场本身的方差 (即风险) 的变动程度 (协方差)。因此 β 的有效性完全依赖于价格是否真的符合所假设的高斯钟形曲线。^[7.39] 夏普的 CAPM 和马科维茨的 MPT 理论, 都建立在巴舍利耶关于价格变动呈正态分布的假设上。

著名的布莱克-斯科尔斯公式的建立是现代金融理论的进一步演进。^[7.40] 美国经济学家布莱克和斯科尔斯提议利用这个公式来定价认股

权证或期权。基于布莱克-斯科尔斯公式的结论,金融家购买保险或对冲来抵抗不必要的市场问题。^[7.41]这个公式允许全新形式的交易,交易的不是股票,而是股票的波动性。一类重要的金融契约、衍生品,包含所有的金融产品,而其价格决定于其他金融产品的价格。衍生品的例子有远期契约、期货、期权和掉期交易。^[7.42]衍生品交易在场外交易市场或是在专业的交易所。最简单的衍生品是远期契约。当一个远期契约订定了,当事人的一方同意以特定的价格(称为远期价格或者交货价格 K)在一特定的未来日期(交货日期 T)购买特定数量的资产。当事人的另一方同意以这个价格在这个日期出售这个数量的资产。同意购买的一方称为多头,同意出售的一方称为空头。潜在的金融资产的真实价格 Y 上下震荡。在交货日期的价格 $Y(T)$ 通常与远期契约上订立的交货价格不同。收益不是正的就是负的,因此,一方所得即另一方所失。

期货契约是在交易所交易的远期契约。这表示契约是标准化的,因为两方的当事人透过交易机构(称为清算所)相互影响。清算所与卖方和买方写下契约,保证契约在交货日期能被执行。

期权赋予持有人在时间 T 以价格 K 购买或出售潜在资产的权利。价格 K 称为购买期权价格或者履约价格。 T 是到期日,有时也称为履约日。期权也可以从履约时间上来划分。如果期权只有在到期日时履约, $t = T$,称之为欧式期权,如果期权可以在任何介于契约开始 $t = 0$ 与 $t = T$ 之间履约,则称之为美式期权。在下面,我们考量的是欧式期权。

有两种期权,购买期权和卖出期权。在购买期权,期权的购买者拥有在到期时以购买期权价格 K 买入潜在的金融资产的权利。这种权利借由支付一定量的金额 $C(Y, t)$ 给期权的卖方而获得。在购买期权,契约订立因此获得在未来履约的权利,卖方虽立即得到金钱,然而在未来面临潜在的责任。在卖出期权,期权的买方拥有在到期时 $t = T$,以特定的价格 K 卖出潜在金融资产给期权卖方的权利。

衍生品是投机者和套头交易者交易的金融产品。投机者感兴趣的是那种提供廉价的方式来使证券组合蒙受很高风险的金融衍生品。套头交易者感兴趣的是那种允许投资者降低已经蒙受市场风险的金融衍生品。显然,套头交易和投机是金融市场中典型的交易策略。套头交易者专注于资产组合风险的降低,而投机者则极大化资产组合的风险。在任一种情况下,期权定价都是金融市场的一种挑战。其任务是寻找合理的、公平的期权价格 $C(Y, t)$ 。因为价格 $Y(t)$ 在每一阶段 t 都是随机变量,因此 $C(Y, t)$ 是随机变量的函数。

布莱克-斯科尔斯公式是期权定价问题的解。^[7.43] 布莱克和斯科尔斯对金融市场假设满足以下若干条件:(1) 在每一阶段 t , 价格 $Y(t)$ 的变动可以用布朗运动的随机微分方程来描述。这个假设隐含着(取对数后的)价格的改变是正态分布的。(2) 证券的交易是连续的。(3) 证券可以随时卖出。(4) 没有交易成本。(5) 市场利率 r 是常数。(6) 在 $t = 0$ 和 $t = T$ 之间没有股息。(7) 没有套利的机会。当试图理解市场时,套利是一个重要的概念。它表示购买和销售同样的或相等的证券以从价格差异中获得收益。股票可以在不同国家的不同股票交易所不同的货币交易。例如,假设一股的时价在纽约是 9 美元,而在法兰克福是 8 欧元,且美元和欧元间的汇率是 0.80(欧元对美元)。通过在纽约购买若干股、在法兰克福销售,套利者可以挣得收益(忽略任何交易成本)。交易者寻求套利的机会,促成市场能够产生最合理的商品价格。理由很明显:如果某人发现一个套利的机会而成功地挣得收益,他将反复进行同样的行动。反复地和系统地实行这个动作若干次之后,价格将改变,减少套利机会。简言之:新的套利机会持续不断地在市场上出现,但是一旦它们被发现,市场就会变动方向,而使得套利机会逐渐消失。

现在,当套利机会不存在时,证券组合价值的改变必须等于投资相等数量的钱在无风险市场中所获得的收益(假设每单位时间提供的报酬是

r)。这个假设使我们能够推导出布莱克-斯科尔斯偏微分方程,这对欧式期权的购买或卖出都是成立的。在某些边界条件和代换下,布莱克-斯科尔斯偏微分方程在形式上与物理学中所使用的可以求得解析解的热传递方程等价。用以期权定价的著名的布莱克-斯科尔斯公式仅是个解析解, $C(Y, t) = YN(d_1) - Ke^{r(t-T)}N(d_2)$, 其中 $N(x)$ 是高斯变量的累积密度函数,此高斯变量的均值为 0 且标准差为 1。^[7.44]

针对期权定价问题的布莱克-斯科尔斯解析解,显然是现代金融理论在数学上的里程碑。然而,他们关于金融活动的模型并没有完全反映出现实市场上所观测到的随机现象。主要的原因是因为使用巴舍利耶关于股票价格改变的假设,即假设股票价格的变动很小,平均而言不超出高斯标准差的区间(图 7.10)。马科维茨也因为描述价格如何变动的高斯钟形曲线的均匀分布,因而相信方差和标准差为风险提供了一个好的代理变量。在下一阶段中,夏普的 β 值和资本成本估计依赖于马科维茨的资产组合概念的正确性,如果巴舍利耶正确,那么它也正确。最后,布莱克-斯科尔斯公式是正确的,如果伴随连续的移动价格的细小变动呈钟形曲线和正态分布是正确的。因此,归根结底,现代金融理论的数学是建立在巴舍利耶的假说上。

然而,在 20 世纪 80 年代末,突然的金融崩溃使得许多投资者震惊。例如 1987 年 10 月 10 日,道·琼斯指数剧跌了 29.2%。根据巴舍利耶关于高斯钟形曲线中细小变化的正态分布,下跌是不应该发生的,而且在数学上认为是“万中无一”(once-in-an-eon)的事件。设计恰当的投资组合爆炸了,基于期权的投资组合保险失败了。接下来,90 年代严重的金融波动强化了对金融理论有效性的质疑。更进一步,潜在资产价格的路径在收到相关经济信息之后可以是不连续的。给定股票或指数和利率的波动性不是衡常的,其本身是随机过程。

经典的布莱克-斯科尔斯公式考虑理想的无摩擦力市场的期权定价

问题。然而,在物理学和经济学中,没有摩擦力的模型完全是理论上的探讨。例如在力学中,形式化没有摩擦力的一般运动规律当然要比试图模型化现实世界容易多了。在热力学中,当比较平衡与非平衡理论时,可以观察到同样的现象。现实市场通常是有效率的,但它们决非理想的。当考虑现实市场方面时,模型化金融市场的复杂性将会增加。市场不完全并不是在理想模型中的形式化。一些“摩擦力”的经济事例将在下一节中考虑。

在没有产生套利机会的假设下决定期权的合理价格,包括风险和无风险资产的组合的存在是至关重要的。然而,为了得到期权的合理价格,尚需其他关于风险趋避和交易双方的价格预期的假设。事实上,潜在资产的价格并不遵循布朗运动,而是一个跳跃—扩散模型。在资产价格路径上的不连续只是不完全之一。真实市场的另一个不完全,与波动性的随机性质有关。再者,在理想化的金融市场中,完全地套头交易一项包含无风险和有风险的资产组合,其策略是已知的。在现实市场中,这个策略是不现实的,因为套头交易的组合的重新平衡并不是连续地表现出来的,而且与布莱克-斯科尔斯公式的条件相反,现实市场中存有交易成本。这些市场的不完全,隐含着资产组合的完全套头交易在现实市场中不被保证,如果假设资产动力学决定于布朗运动的话。

在科学中,模型是用来理解科学问题的基本方面。一个理想化的模型无法描述现实的所有方面,但是它至少可以描述那些被假设为本质的部分。一旦理想化模型的有效性被抨击,就会试图扩展和一般化模型以改进真实系统的描述。在这种情况下,建模的复杂性增加,假设的数目增加,解的通有性减少了。布莱克-斯科尔斯公式是一个有效性受限的理想化模型。^[7.45]布莱克-斯科尔斯公式的扩展,打算放松对真实金融市场不切实际的假设。例子有以随机利率来定价期权、以跳跃—扩散随机股价过程来定价期权、以随机波动性来定价期权、以非高斯价格分布来定价期权。当放宽一个或若干个布莱克-斯科尔斯假设时,对应方程的复杂性也

立即增加。不再有可能找到简单复制的资产组合或者完全套头交易一个最适的资产组合。理想化的布莱克-斯科尔斯解的简单和优雅,输在真实的市场之中。

7.4 复杂金融市场、湍流和幂律

全球化商业的计算动力学,实现在世界各地的金融交易和金融工程中心。这些中心是从巴舍利耶到布莱克-斯科尔斯的金融理论与金融现实相遇的地方。某些理论虽然深植于古典经济学,但却有悖于对现实人类行为的观测:

(1) 假设:在亚当·斯密经济人的意义上,人们是理性的。因此,当出现所有关于股票或债券的相关信息时,投资者将会做出通往最大可能的财富或幸福的理性选择。他们的偏好可以用数学方程即效用函数来表示,效用函数能够被极大化。理性的投资人导致效率市场的理性模型。在现实上,人们不是仅根据数学上的效用函数来思考,不是永远理性和自利的。他们受到扭曲他们选择的情绪的驱使。有时他们错误计算了概率,对得失感受的有异。

(2) 假设:所有投资者都是相同的。因而,人们有相同的投资目标,并且以同样的方式反应和表现。简言之,他们的行动如同物理学中理想气体的分子一般。一个描述这种分子或投资者行为的方程式可以被用来描述任何这样的分子。事实上,人们并非相同的。如果放弃同质性的假设,更复杂的市场模型将会产生。例如,至少有两种不同类型的投资者。原教旨主义者相信每种股票都拥有它的价值,而且最终将以那个价值出售。另一方面,宪章派忽略基本教义,监控价格趋势以便跟随浪潮。这些类型的投资者间的相互作用,会导致价格泡沫和自发的崩溃。市场由平衡良好的线

性系统(其中一个因素以可预期的方式加到另一个)转换到混沌的非线性的系统(其中,因素彼此间相互影响,而产生协同和无法预期的影响)。

(3) 假设: 价格以几乎连续的方式变动。因而, 股票报价或汇率不会上下跳跃, 而是从一点平滑移动到另一点。连续性是经典物理学的一个假设, 莱布尼茨优美地陈述道: 自然没有跳跃(*natura non facit saltum*), 这句话后来重复出现在艾尔弗雷德·马歇尔的经济学教科书《经济学原理》(1890)中。从方法论的角度来看, 认为自然和经济表现出连续现象的这种信念, 因而能够应用连续函数和微分方程以分析方式求解物理学或经济学问题。然而事实上, 经济中的价格以及量子物理学中的量子态都会跳跃, 现实确实是不连续的。与爱因斯坦对量子物理学的反对相反, 上帝真的在掷骰子, 不管在自然界或是社会上。

(4) 假设: 价格变动能用布朗运动描述。如前所述, 布朗运动首先由物理学家阐述, 后来由巴舍利耶应用到金融市场上。布朗运动在经济学上的应用隐含着三个假设: 第一, 价格的每次变动与先前的变动无关(统计独立性)。第二, 产生价格波动的过程不随着时间而改变(统计稳恒性)。第三, 价格变动遵循正态分布——每次改变的频率呈现出高斯钟形曲线的结果。事实上, 金融数据的图中价格变动并没有呈现出平滑的正态分布的结果。运用随机数学和系统理论对于实际分布形式的分析具有某种挑战性, 并且提供了现代社会复杂性一种新的洞察。

道·琼斯工业平均指数是著名的金融时间序列。这是美国三十个最具价值公司的股票价格的简单平均。道·琼斯指数通常显示如图 7.11 的形状, 从 1916 年开始的每日指数值到 2000 年 1 月份的最高点 11 722, 以及紧接下来少数年份的熊市。虽然可看到市场崩盘的情况, 例如 1987 年 10 月 19 日, 但是到 20 世纪末整体的印象是呈指数增长的。

然而, 除了显示指数值之外, 借由绘出指数的每日变化, 很容易就能够研究指数的波动。为了展示符合布朗运动的假设指数与道·琼斯指数

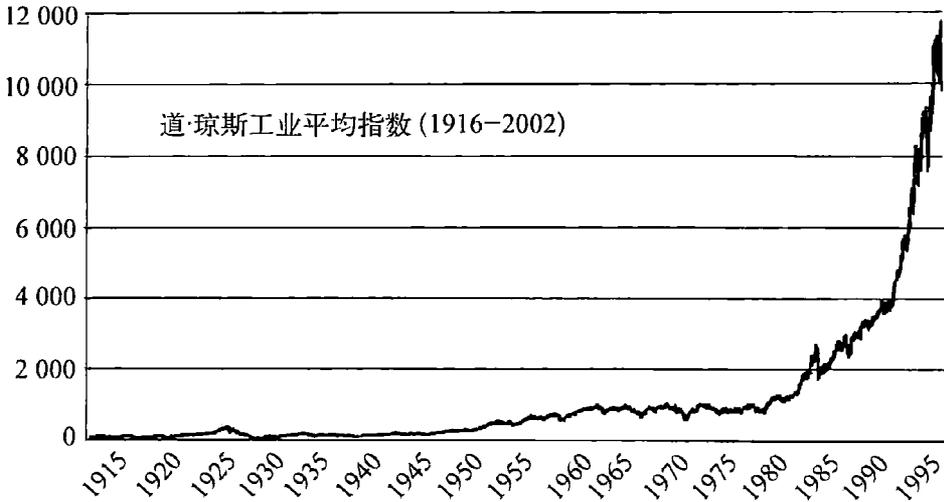


图 7.11 20 世纪的道·琼斯工业平均指数^[7.46]

之间的差异,将每个指数变动转换成超出平均变动的标准差数目。在这个例子中,非常大而且稀少的指数变动将在图中绘成较高的长条。(普通的)小的变化则绘成较短的长条。从图 7.12(a)、(b)两个图的比较中,可以看到,道·琼斯指数的潜在动力学与布朗运动截然不同。数学上,标准差可用希腊字母 σ 表示。在布朗运动的图形(图 7.12b)中,大部分的值在 2σ 之内,只有极少数的超出这个数。然而,在道·琼斯指数的图形(图 7.12a)中显现出巨大的长条:有些是 10σ ,甚至在 1987 年市场崩盘时是 22σ 。

道·琼斯指数的图形显示金融市场的变动不是正态分布的。在实际市场上的价格波动不是轻微的,而是剧烈的。这表示股票比基于正态分布假设的情况更具风险。如果钟形曲线用来作为投资策略指导,股票证券组合将错误地放置在一起,风险管理将可能失败,并且所使用的交易策略可能会误导。更有甚者,道·琼斯指数图显示,当全球化使步调一致时,我们将看到更多的金融危机。因此,我们必须关注于市场上的极端值。

在性质方面,金融市场似乎与自然界的湍流相似。风是自然湍流的一个例子,而它的特性可以在风洞中进行研究。当风洞刚开始时旋片旋

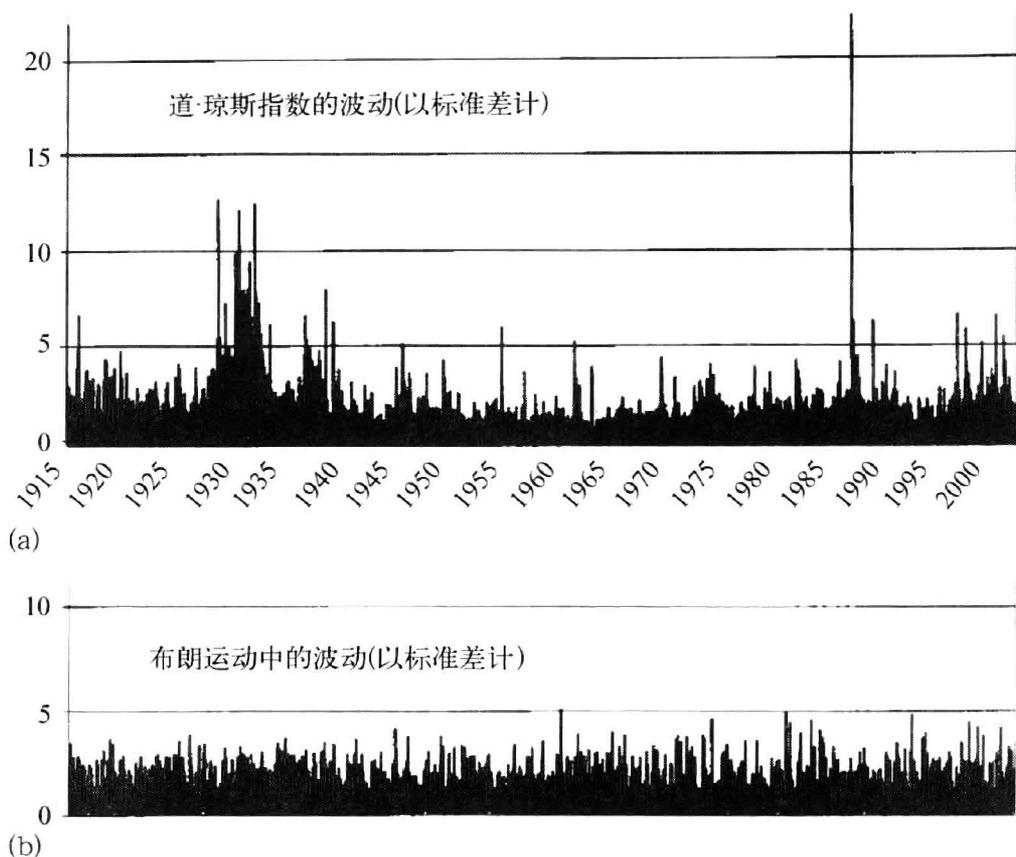


图 7.12 道·琼斯指数与布朗运动中的波动^[7.47]

两者皆按标准差衡量。

转相对较慢,所造成的风速轮廓线是平滑的;而气流形成长的、稳定的直线、平面和曲线。然而,当旋片加速时,风洞中的风速和能量增加,风突然分解成锐利而间断的阵风。涡形和各种不同大小漩涡的喷流自发地出现。相同的模式和吸引子,也发生在水的流体动力学中(图 2.26)。

图 7.13a 显示湍气流的时间序列。图示了当风跃变成阵风(湍流)或相反过程时的风速的变动。湍流在自然中随处可见。湍流发生在云层,也以太阳黑子的形态中出现。所有的信号似乎都表现出湍流记号的特点。图 7.13b 显示股票市场的“湍气流”,在动荡的 20 世纪中变化剧烈。这个图显示股票市场的波动性:每个月价格的波动在规模上变化剧烈。其高点发生在 1929—1934 年和 1987 年。如果将这个模式与风图

(图 7.13a)作比较,可以很容易认出两个图在行为上是同一种类型:在剧烈运动和平静活动间突然陡峭的不连续性,间断的周期,以及时间上事件的同样的聚束。显然,自然界破坏性的湍流在金融市场上也可看见。

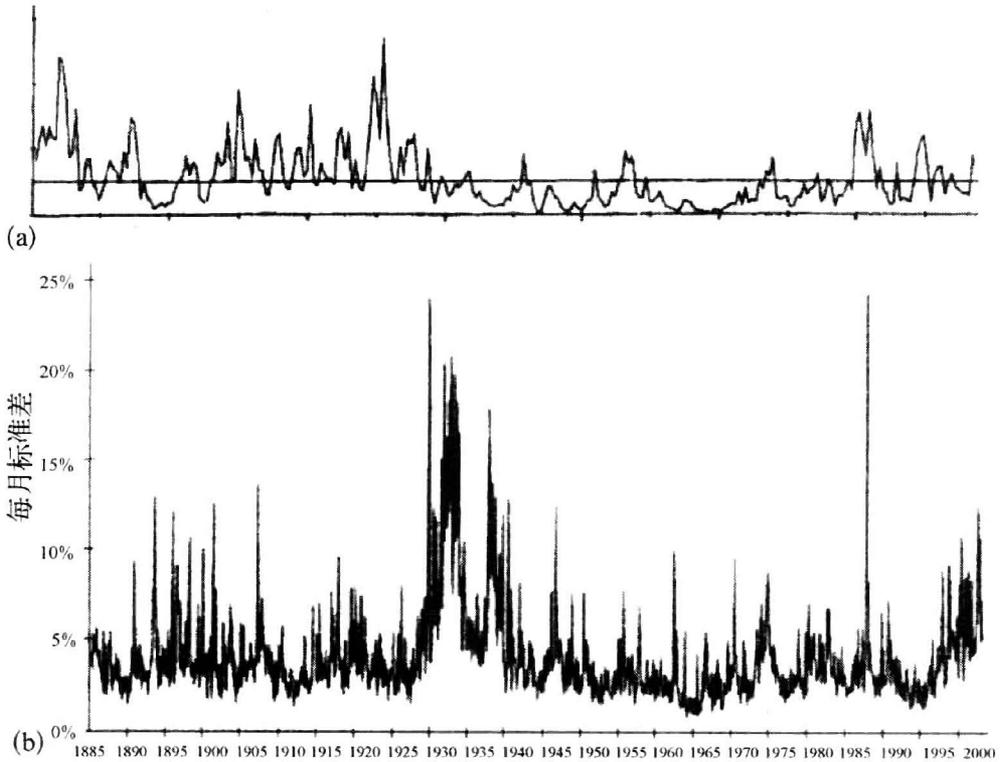


图 7.13 自然界中的湍流与金融市场中的“湍气”流^[7.48]

(a) 自然界; (b) 金融市场。

确实,“湍流”一词甚至被政客使用,因为金融市场的波动在性质上类似自然湍流的速度波动。而问题是,是否这种在性质上的类同在定量的水平上也有用处,以使得我们对湍流的理解有助于我们对价格波动的理解。湍流是一个定义明确,但仍未解决的物理问题。对物理学家而言,它是个相当大的挑战,并且是研究复杂性的核心。一个显现湍流的简单系统,是具有运动黏度 ν 的流体在直径 L 的管中以流速 V 流动。决定这个流动流体的复杂性的控制参量,是雷诺数 $Re = LV/\nu$ (图 2.26)。当 Re 到达特定的阈值时,流体模式的复杂性剧烈地增加,导致湍流的产生。

克劳德·路易·纳维(1785—1836)在1824年研究了描述不可压缩流体的时间演化的方程。纳维-斯托克斯方程表现为以下形式： $\partial/\partial t \mathbf{V}(\mathbf{r}, t) + (\mathbf{V}(\mathbf{r}, t) \cdot \nabla) \mathbf{V}(\mathbf{r}, t) = -\nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{V}(\mathbf{r}, t)$ ，且 $\nabla \cdot \mathbf{V}(\mathbf{r}, t) = 0$ ，其中 $\mathbf{V}(\mathbf{r}, t)$ 是在位置 \mathbf{r} 和时间 t 的速度向量， P 是压力。纳维-斯托克斯方程在高的雷诺数时，完整地表现出充分发达的湍流的特性。然而，已证明分析地求解这些方程是不可能的，甚至连在 Re 数非常大时想得出数值解也是不可能的。

1941年，科尔莫戈罗夫^[7.49]证明了，在无穷大的雷诺数的极限下，对在湍流中均方流速增加存在一个近似解，但他无法描述任何高阶的平均流速增加。在充分发达的湍流中，速度波动表现出间断现象的特征，如同由流速增加的概率密度函数的尖峰形所表示的。科尔莫戈罗夫的理论无法描述流速增加的间断现象。然而，至少存有几乎近似值被实验者所发现，可以用从测量到的速度 $V(t)$ 来估计充分发达的湍流。

湍流展示金融市场上价格之时间演变的相似与相异。^[7.50]如果我们比较股票指数的时间演变和湍流流体在高雷诺数时的速度，两者过程在短的时间段都呈现出间断的、非高斯的特点。两者过程在短的时间尺度下都是非平稳的，但都是渐近平稳的。相似之处是其间断性、非高斯概率密度函数，以及逐渐收敛到高斯概率吸引子(见图5.12)。然而，在这两个系统中，概率密度函数有不同的形状，返回原点的概率是不同的。而且，速度波动是反关联的，而指数波动是不相关的。速度波动的方差演变的特点在于幂律(power law)，这个法则只在特定的系统中才成立，在这系统内动力学演化实质上是由每单位质量的能量耗散率所控制的。在金融市场中，资产没有理由应该展现被相似变量控制的动力学演化。简言之，对价格动力学特性来讲，不存在幂律的相似物。

然而，在现代物理学和经济学中，相变和非线性动力学都联系到幂律、标度律、无法预期的随机性确定性时间序列。从历史观点来说，幂律

分布的首次数学应用是发生在社会科学而不是物理学。回忆先前所言之,随机游动的概念在经济学中的数理阐述(由巴舍利耶)也是先于它被爱因斯坦应用在物理学上(参见第 7.3 节)。经济学洛桑学派的创建者之一的意大利经济学家维尔弗雷多·帕累托(1848—1923),由使用 $y \sim x^{-\nu}$ 分布模型化个人财富来研究稳定经济中个人财富的统计性质,其中 y 是收入大于等于 x 的人数, ν 是帕累托估计为 1.5 的指数。^[7.51]他注意到,他的结论可以一般化到不同的国家。因此,帕累托的收入法则有时被解释为根基于达尔文天择说的普遍社会法则。

在第 5.4 节中,我们提到幂律分布可能缺乏任何的特征尺度。这个特性妨碍了幂律分布在自然科学的使用,直到莱维引进了新概率数学概念,在物理学中对热力学函数和相关函数引进了新标度律概念。在金融市场中,时间尺度不变性意味着,纵使一个股票专家也不能区分每日、每星期、每月价格所提供的时间序列。图 7.14a 显示德国股票指数(DAX)在 1986 年 11 月 4 日到 1993 年 8 月 4 日间每日收盘价的自然对数。三条时间序列显示在图 7.14b 中,其中包含 60 天的每日价格、60 个星期的每星期价格和 60 个月的每月价格;从统计观点来看,所有的这些图看起来都非常相似。

股票价格(s)序列由 $\{X^s(kt)\}_{t_0}^{t_0+60}$ 给出,其中尺度 $k = 1, 5, 20$, 分别表示每日、每星期、每月。如果 $X(t)$ 是时间依赖的股价序列,当价格每 k 天给定一次,则所获得的回报给定为 $Y_k(t) = \ln X(t+k) - \ln X(t) \approx [X(t+k) - X(t)]/X(t)$ 。由于统计上时间序列的自相似性,当价格每 k 天给定,其回报 $Y_k(t)$ 与每 k' 天价格给定的赋范回报 $c(k, k')Y_{k'}$ 具有相等的分布;其中 $c(k, k')$ 是标度因子, k, k' 是自然数。产生于自相似性的可衡量尺度的标度不变性,也隐含着标度间的形式关系是标度不变的。例如,我们考虑 T 个交易日的平均回报 $\langle |Y_k| \rangle = 1/\sum_{t=1}^T Y_k(t)$ 。则可

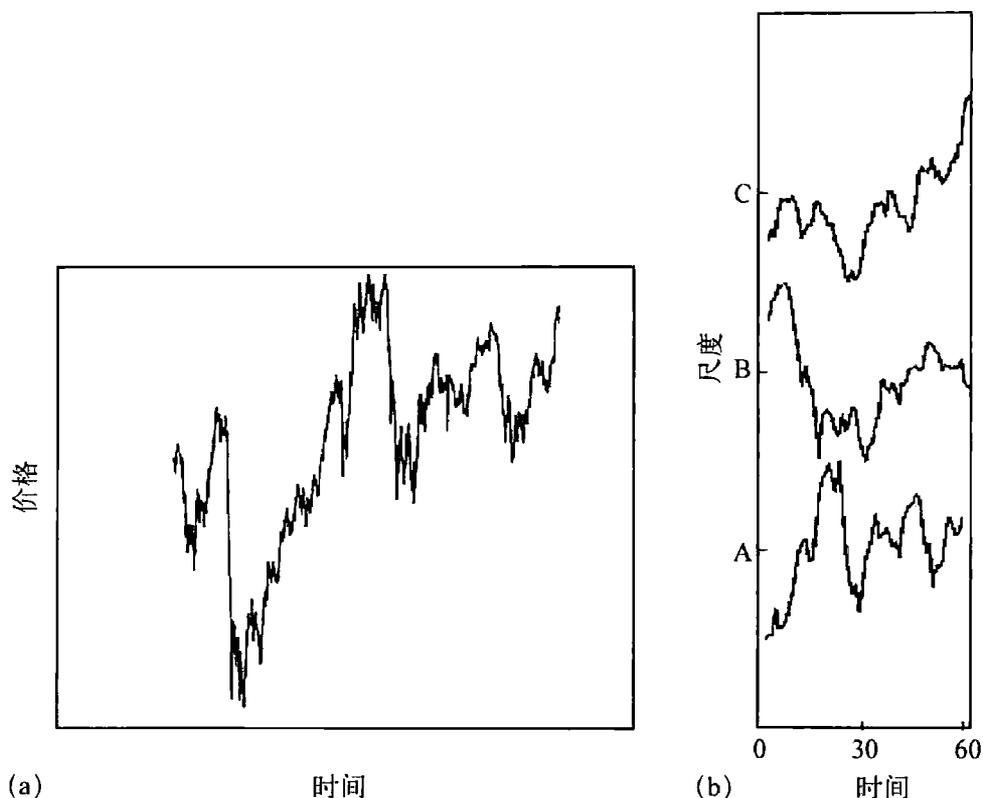


图 7.14 德国股票指数(DAX)时间序列

(a) 每日收盘价的自然对数;(b) 从下到上三个时间序列分别显示每天、每星期、每月股价。^[7.52]

测量的平均回报之比:

$$\langle |Y_k| \rangle / \langle |Y_{k'}| \rangle = \langle |Y_k| \rangle / \langle |Y_{k'}| \rangle$$

上式对所有尺度 $k, k' > 0$ 和标度变换 $\lambda > 0$ 也成立。因而断定标度因子 $c(k, k') = c(\lambda k, \lambda k')$ 是相等的,特别当 $\lambda = 1/k'$ 时, $c(k, k') = c(k/k', 1)$ 。当平均值 $\langle |Y_k| \rangle$ 是 k 的函数,等式的两边可以对 k 微分。当 $k = k'$ 时,我们得到关系式:

$$\partial \ln \langle |Y_k| \rangle / \partial \ln k = \partial \ln \langle |Y_{\lambda k}| \rangle / \partial \ln \lambda k$$

对所有 $\lambda > 0$, 这表示所有 k 有一个固定的尺度,表示成:

$$H = \partial \ln \langle |Y_k| \rangle / \partial \ln k$$

因而产生齐次一阶线性微分方程：

$$\partial \langle |Y_k| \rangle / \partial k - H/k \langle |Y_k| \rangle = 0$$

有解 $\langle |Y_k| \rangle = Ck^H$, $C = \langle |Y_1| \rangle$ 。因此平均 k 天回报满足幂律 $\langle |Y_k| \rangle \sim k^H$ 。这使我们能够为对于 $Y_k = p(k/k')^H Y_{k'}$ 的标度不变性决定标度因子 $c(k, k')$, 其中“ $= p$ ”表示“同分布的”。指数 $0 \leq H \leq 1$ 称为赫斯特指数。对于独立同分布的(以巴舍利耶关于金融市场的随机游动模型的意义)上)随机变量, 由中心极限定理得 $H = 1/2$ (见第 5.4 节)。这称为布朗运动的时间平方根法则。

因为金融图表的自相似性, 芒德布罗主张从中构建分形卡通(fractal cartoon)是有可能的。分形是一种由部分反映整体的模式。^[7.53]图 7.15 示意了关于巴舍利耶金融图表的分形卡通的建构。分形从称为分形产生器的初始方框开始。在方框中, 一条从左下角到右上角的直线, 以动力学的潜在趋势线作为象征。沿着路径的价格波动以锯齿状来表示, 以这种锯齿状拟合直线。锯齿线包含三个部分: 上升、下降及另一个上升(这些

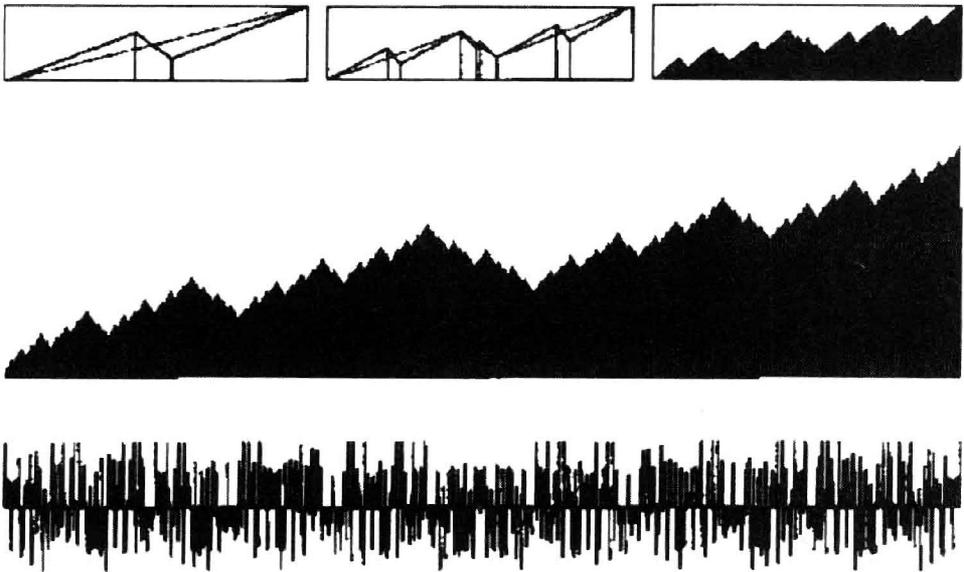


图 7.15 巴舍利耶的正态分布金融图的分形重构^[7.54]

都是直线)。在下一阶段,这些直线的每个片断都用横跨整个盒子的虚线的复制来替代。这种建构递归地重复进行,产生出比先前更小的线与锯齿的图形。图的上方,显示分形建构的第一步。中间是已完成的分形图。图的下方,表示从一时刻到下一时刻的增加。这个建构由随机化以使得更加真实。在这个例子中,该过程从不同的随机选择的初始方框开始,然后运用在后续的递归构建步骤中。

从金融图形中产生的分形,利用不同的锯齿线可能变得更复杂。当然,实际的价格图形并不是这样产生的。实际图形记录了成千上万的交易,这些交易不可能个别地分析。然而,数学模型由模拟趋势的升降来模仿实际过程。从中所建构的分形虽不会确切地沿着与真实价格所依循的相同路径,但是从统计角度来讲,它将展现同样的行为方式。计算机可以容易、迅速地执行数值递归的建构步骤。利用这种探究方式(进路),虽然我们无法如同预测行星的位置一样预测金融事件,但是我们仍然可以研究金融市场上典型的行为模式,以利于理解它们的动力学并作好未来的准备。

巴舍利耶股价动力学的随机模型,假设 $\ln X(t)$ 是一个扩散过程且 $\ln X(t)$ 增量的增加是正态分布的。这个基于布朗运动的模型,提供经验数据的行为的一阶近似。然而,从模型预测中的系统偏差是可观测到的。此种经验分布在形式上较高斯分布来得更加尖高。一个尖峰态分布的特点与高斯分布比较,具有较为狭窄且较多的极大值以及比较胖的尾。对高频数据而言,其尖峰态程度要大得多。图 7.16 显示纽约证券交易所在 1994—1995 年间,施乐(Xerox)股票交易的高频价格波动在经验上的概率密度函数。由测量到的标准差所得出的高斯分布,作为比较也展示在图中。

若干不同于布朗运动,基于不同假设的模型也被提出。这些模型的差异在于概率密度函数的形状与尖峰态,以及重要特性,诸如方差的有限

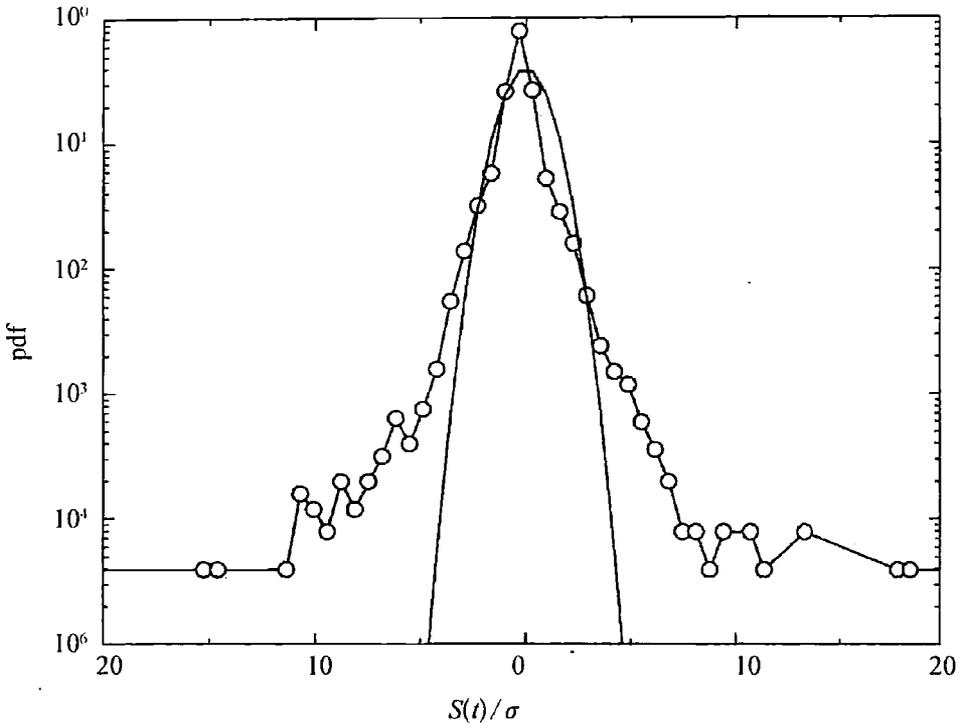


图 7.16 以施乐股票的高频价格波动 $[S(t)]$ 的实证数据构建的概率密度函数(pdf) 注意其厚尾,与根据标准差构建的高斯分布对比。^[7.55]

性或无限性、短时间尺度所呈现的平稳性或渐进平稳、 $X(t)$ 的连续或非连续特征、随机过程的标度不变行为。第一个明确地将经验观察到的尖峰态考虑进概率密度函数的,是1963年芒德布罗所提出的将棉花价格形式化为 $\ln X(t)$ 的模型。纽约棉花交易所保留了超过一世纪的每日价格纪录。几乎所有的跨州交易集中在这个交易所。它是一个巨大的流动市场,保留了丰富的纪录资源。然而,它长久以来成为数量经济学家的梦魇,无论他们如何操作数字,他们都无法符合巴舍利耶的模型。价格的涨跌的幅度太大。价格的波动性和标准差随着时间而变动。价格在某些年份是稳定的,但在其他年份则是剧烈变动的。

芒德布罗的论文《特定投机性价格的变动》(1963)是经济理论的一个突破。^[7.56]因为他第一次在剧烈变化的金融市场中应用莱维稳定非高斯

分布(参见第 5.4 节)以及强调幂律的重要性。莱维稳定非高斯分布最吸引人的性质是它们的稳定性和自相似性,以及它们作为概率空间吸引子的角色(图 5.12)。芒德布罗的莱维稳定假说隐含着 $\ln X(t)$ 是不连续的,以及相继变动 $S(t) = \ln X(t+1) - \ln X(t)$ 在价格的自然对数中的特性是非高斯标度律和具有无限方差的分布。

标度不变性和不连续性的概念也可以转换为分形卡通。分形模式用以刻画在实际金融市场上厚尾和急剧价格变动。在图 7.15 中,我们看到了布朗运动的分形卡通被建构在一个上升的直线引发器和一个锯齿产生器。产生器的缩小化复制,递归地插入到图形中。由重复这个过程,可以产生特定的针对布朗运动的分形。其原因是产生器的特定形状:由点 $(0, 0)$ 开始,它上升至点 $(4/9, 2/3)$,下降至点 $(5/9, 1/3)$,最后到点 $(1, 1)$ 。产生器三个片断的尺寸是决定性的。它们的宽度分别为 $4/9, 1/9, 4/9$,高度是 $2/3, -1/3$ (负数,因为线下降了), $2/3$ 。显然,每个宽度都是每个高度的平方,或者说,每个高度都是每个宽度的平方根。这个宽度与高度的平方根关系刻画了布朗运动的分形。

然而如果这些坐标改变了,结果看起来更像是棉花价格图形。在图 7.17 中,分形结构由五个倾斜段开始,但加上两个垂直的不连续面。与布朗产生器不同,这个模式呈现出尖锐的不连续面。每个建构阶段进一步地增加上下的跳跃。图 7.17 下方展示从某个时刻到下个时刻价值的改变;许多锋区出现,使得这个图形与巴舍利耶正态分布的情况不同。跳跃遵循幂律分布,相应于具有厚尾和尖峰态的曲线。幂律的指数 α 就是莱维稳定非高斯分布的参量 α ($0 < \alpha < 2$)。稳定的高斯分布由 $\alpha = 2$ 刻画(参见第 5.4 节)。

急剧的价格改变被芒德布罗称为“诺亚效应(Noah effect)”,原因在于急剧的价格改变类似《圣经》中诺亚的故事所描述的洪水(参见图 7.18)。在《创世记》第 7 章第 4 节,上帝安排大洪水以净化这个不道德的

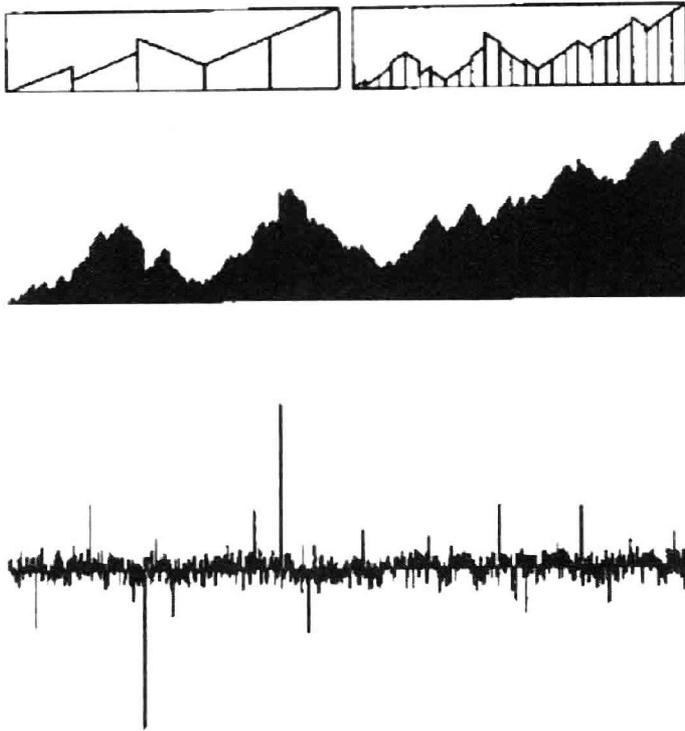


图 7.17 急剧价格变动的分形重构^[7.57]

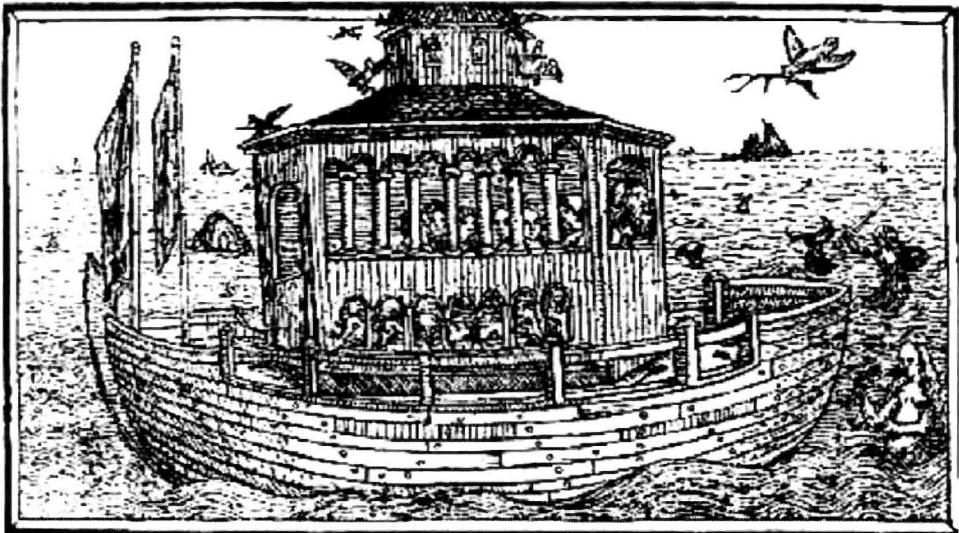


图 7.18 诺亚效应

市场动力学的不连续性被图示为诺亚方舟和《圣经》里的大洪水。^[7.58]

世界：“我要降雨在地上四十昼夜，把我所造的各种活物，都从地上除灭。”诺亚存活下来；神的忠告致使他建造一艘足够坚固的船，为将来临的洪水作准备。洪水来了又走了。它是个短暂的大灾难，如同市场崩盘一样。诺亚无法预测《圣经》上的洪水，但他了解暗示灾难降临的征兆与象征。同理，我们研究时间序列的分形模式以及分布律以便为突发事件作好准备。

还有一个阐述金融市场上第二种形态的剧烈现象的《圣经》故事。在这个故事中，法老梦到七只肥牛在草地上吃草，而七只瘦牛浮出尼罗河并且吃掉那七只肥牛(图 7.19)。《创世记》第 41 章第 28—30 节解释道：“神已将所要作的事显明给法老了。埃及遍地必来七个大丰年。随后又要来七个荒年，甚至埃及地都忘了先前的丰收，全地必被饥荒所灭。”约瑟认为法老的梦是一种预言：七个荒年紧随在七个大丰年之后。因此，他建议法老储存谷物以备荒年的到来。丰收而后饥荒的周期模式类似于金融市场上时常观察到的现象，上升周期之后紧跟着下降周期(“一种似循环”)。



图 7.19 约瑟效应

金融市场的长期记忆图示为约瑟对法老梦的解释。^[7.59]

这种现象芒德布罗称为“约瑟效应(Joseph effect)”，而它的出现暗示着市场波动在某种程度上互相依存(即市场显现出具有长期记忆)。

尼罗河的泛滥启发了英国工程师哈罗德·埃德温·赫斯特，他导出可用来模型化这个长期循环现象的方程。^[7, 60]为了能够建造合适的水坝，洪泛的高度是需要得知的。起先，工程师假定洪泛的水平在某年到次年的变动是统计上独立的，如同巴舍利耶的硬币投掷一样。在这个情况下，在博弈的某时刻的最大赢利边界与另一时刻的最惨损失边界两者间范围的变化依照投掷数的平方根。然而，赫斯特发现，尼罗河洪泛的最高值到最低值间的范围扩大，较硬币投掷法则所预测的来得快。范围扩大并没有按照平方根法则(即 $\frac{1}{2}$ 次幂)，而是按照所测得的洪泛高度数的 $\frac{3}{4}$ 次幂。

长期依赖性也发生在金融数据中，当相关性下降得比预期慢时。这不只归因于物理世界的复杂性，诸如气候、作物、矿物和工厂，也归因于人类心理的复杂性以及他们对将发生或不发生的事物的变化的预期和估计。在这种相互关联的复杂世界中，遥远过去的事件持续回声到现在。受到1929年股市崩盘和大萧条惊吓的金融家，对投机这种最疯狂的形式犹豫再冒风险。在金融市场中他们的记忆导致长期依赖性。1987年的事件或许不是巧合，当大部分那时的金融家都不再到场，他们的智慧也已经被遗忘，另一次的大崩盘发生了。然而，基于温和市场这个巴舍利耶假说的古典金融理论认为，重要的一切是今日的新闻和对明天新闻的预期。

布朗运动为价格发展的估计提供了一个便利的法则。它告诉我们，资产价格将升降的范围以及在特定宽带的限度内波动的可能性。然而，例如，不同国家的汇率在实际上可以游移得较时间平方根法则预测的幅度大。这可能发生在汇率呈现长期依赖性时。一个比率在一个方向的运动，将倾向于在未来几天之内继续这个运动方向。这个比率仍然将日复

一日地波动。但是,在长期它将比布朗法则所预测的更加远离它的起始点。这些比率不再是遵守巴舍利耶假说的简单的随机波动。

巴舍利耶的时间平方根法则,是指数 H 为 $1/2$ 的幂律。事实上,它只是物理学中的粒子或者金融市场上的价格的更一般法则的一个特例:(粒子或价格)传播的距离与消逝时间的 H 次幂成正比, $0 \leq H \leq 1$ (注:幂律的指数记作 H 是为了纪念赫斯特)。如果 H 大于布朗值 0.5 , 粒子或价格将持续较远地游离。这是当存在“记忆”的长期相关性和回声效应的情况。如果 H 小于布朗值 0.5 , 粒子或价格将持续较少地游离,呈狭窄且激烈的锯齿形态。因此,价格变动间的依赖程度(约瑟效应),可以用赫斯特指数 H 来衡量。在图 7.20b 中,每个价格变动都假设与最终无关 ($H = 0.5$)。图 7.20c 显示持续的例子,当 $H > 0.5$ 且造成的明显的价格趋势较宽并显现长期记忆。图 7.20a 显示反持续的例子,当 $H < 0.5$ 且

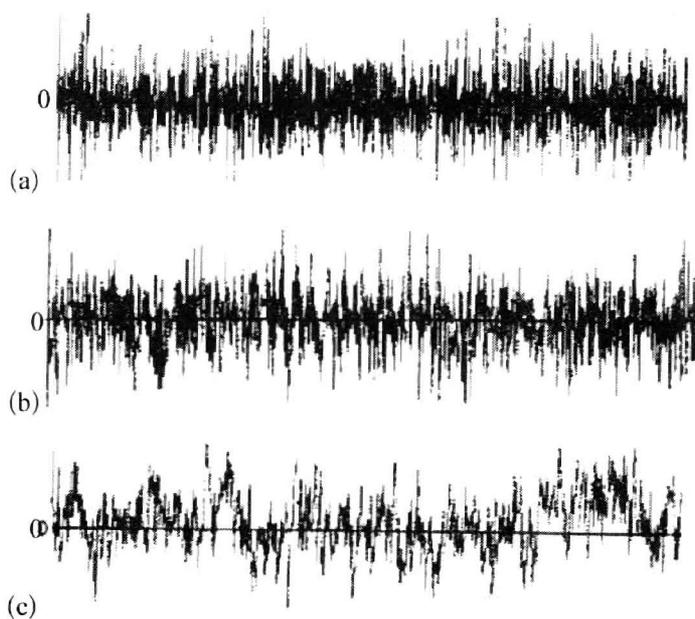


图 7.20 长期依赖性的复杂性程度

(a) $H > 0.5$, 持续行为; (b) $H = 0.5$, 布朗无关性; (c) $H < 0.5$, 反持续行为。^[7.61]

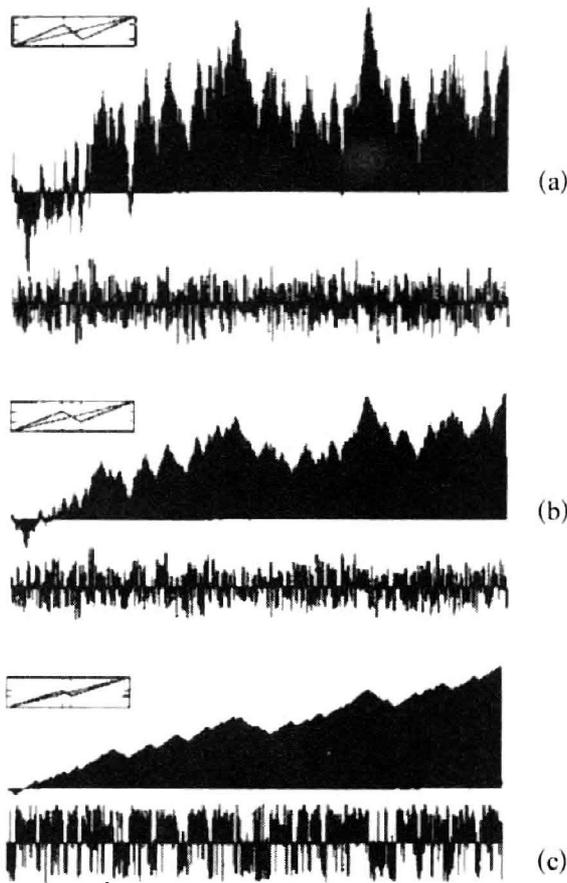


图 7.21 长期依赖性的分形重构

(a) $H > 0.5$, 持续行为; (b) $H = 0.5$, 布朗无关性; (c) $H < 0.5$, 反持续行为。^[7.62]

动作是激烈的,但仍是受限的。

长期依赖性的复杂性程度,也可由图 7.21 中的分形模式刻画。回忆布朗运动的模式(图 7.21 中间部分)刻画为分形引发器的三个片断中的平方根关系,对应于 $H = 1/2$ 。每个片断的高是宽的平方根。因而,当试图分形重构图 7.20a 和图 7.20c 时,每个片断的高应该等于宽的介于 0 次方和 1 次方之间若干次方。使用大于 $1/2$ 的 H 值的结果表现在图 7.21 的底部,这对应于持续行为。使用小于 $1/2$ 的 H 值的结果表现在图 7.21 的顶部,这对应于反持续行为。

分形模式图示出时间序列

的标度不变性。在不同的时间标度中,它们看起来都大致相似。不管图形多么剧烈,它有时在长波中起或伏,或者伴随着小的波叠加到较大的波上。然而,两种形态的剧烈似乎成为锯齿模式的典型:诺亚效应的急剧变动和不连续性以及约瑟效应的似循环。在数学上,这些可以刻画为两个参量:对稳定的莱维分布, $0 < \alpha \leq 2$, 且 $0 \leq H \leq 1$ 。两者都是幂律的指数。小 α 的市场是风险性的,价格激烈震荡。随着 α 增加,市场行为变得接近巴舍利耶的市场行为(其 $\alpha = 2$)。显然,莱维的 α , 在诺亚效应的意义上,是一个用以描述不连续性和急剧变动的合适工具。赫斯特指数 H

为 $1/2$, 隐含着每次价格变动都与前一次无关。^[7.63] 较大的 H 暗示着数据是相关的; 它们持续地朝特定方面移动。较小的 H 隐含着反持续行为。赫斯特参量 H 刻画与约瑟效应相联系的长期记忆。

有时, 两个效应是相互联系的; 例如, 当 $H = 1/\alpha$ 时, 这是布朗型市场 $\alpha = 2$ 的情况。相互联系也可以在投资泡沫中见到。投资泡沫崩溃是约瑟式依赖性产生的诺亚效应。在 20 世纪 90 年代末的因特网繁荣期间, 例如, 思科系统公司的投资泡沫显示狂热的投资者如何将 1999 年的盈利趋势推展到高涨的股价。在 2000 年, 当盈利稳定时, 投资者开始清醒起来, 泡沫开始紧缩。上面讨论的动力学与指数, 解释了为什么经济泡沫在特定环境下有时是不可避免的。它们不是非理性偏离经济规范, 并非臆测者的不道德所致。因此, 我们必须由分析错综复杂的金融市场动力学作好面对泡沫的准备。

复杂动力学系统拥有它们自身异于标准时钟时间的内禀时间尺度。在生理学, 有机体由其自身内禀老化过程所刻画。两个 60 岁的人或许有截然不同的健康状况; 60 年是外在的物理的时钟时间, 而非内在的生物的时钟时间。老化是一组复杂的生理过程和心理过程, 这个过程依赖于或许处于不同健康状况的器官。我们的心智由内在的经验时间刻画。在无趣的环境下, 时间显得缓慢拖沓; 而当我们忙碌于激动人心的工作时, 时间飞逝。同理, 市场也拥有其自身的内在的交易时间。当交易量增加时, 价格就会上涨, 则时间像是飞逝。然而, 当场上交易稀少, 价格平静时, 也存在着缓慢的时间。

分形几何之父芒德布罗主张, 交易时间的混合行为模式可以由多重分形来建模(参见第 2.6 节)。如前所述, 分形是一个模式, 模式的部分反映出整体, 只是按比例缩小而已。多重分形对同样的模式, 拥有一个以上的标度变换比例。模式的某些部分快速萎缩, 其他则缓慢萎缩。多重分形拥有包含尾部的分布, 这个分布遵循幂律。它们都出现诺亚效应(急剧

地不连续变化)以及约瑟效应(长期趋势)。因此,多重分形模型映射出市场的内在动力学。

多重分形模型也可以用多重分形卡通勾画出来。回忆布朗图形展现了在分形产生器中每个片断的宽度与高度的关系(图 7.15)。这联系着幂律的出现,在幂律中一个是另一个的平方根。借由选择不同的幂次,可以产生不同程度的长期依赖性的图形。由加入垂直跳跃到分形产生器,具有胖尾和不连续性的图形也产生出来了。因此,多重分形卡通可以由改变初始产生器而产生出来。

以这种方式,时钟时间就能够在飘忽不定过程中转化成多重分形交易时间。一个倍增级联的简略图形显示在图 7.22: 时间轴的一部分标尺依次渐加精细。上方的四边形是一阶近似。其中,60%的交易活动在左边,40%在右边。每半个时间轴再切成两半,各半各自将其 60%活动置于其左边,40%置于其右边。换言之,第一个四分之一的分布是 60%乘 60%,即 36%的全部交易活动。第二个四分之一包括 40%乘 60%,即

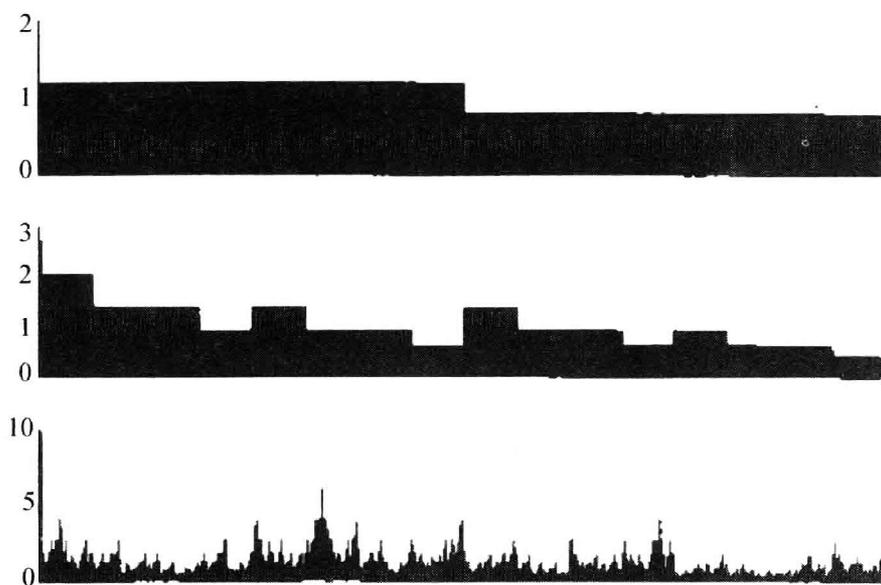


图 7.22 多重分形的交易时间^[7.64]

24%的全部交易活动。当这个操作反复运行时,图 7.22 下方的图形就产生出来了。这是个非常不均匀的分布。交易时间在波峰时集聚且快速变动,而在波谷时稀少且缓慢变动。当然,这只是交易时间更加复杂的多重分形结构的一种简略勾勒而已。

多重分形交易时间的更加精细的形式,已经成功地模拟了实际数据。^[7.65]针对特定的货币市场所出现的价格变动,正如模型所预测的。波动性聚集成串。快速的行动与缓慢的交易交错在一起。借由放大检视这些快速行动的部分,它们似乎也存有快速的子聚集和缓慢的子区间。聚集中的聚集显示了多重分形模式。多重分形模型假设了不变的和基础的市场行为模式。在这个意义上,它们将数学上的不变性映射在金融动力学上。不变性是基本原理,保证了理论和法则在理论的限定条件下时时处处有效性。

我们由总结若干对金融市场动力学的重要洞察以结束本节。金融市场比令我们信服的传统学院型理论更加复杂。说金融市场是震荡的,不是在严格的物理学的意义上说的,而是由于它们内在复杂的随机动力学,而且这种震荡可能造成危险的后果,如同自然界中的地震、海啸或者台风。因此金融系统不是线性的、连续的及可计算的机器;个别的经济事件无法像天文学中的行星位置一样被精确预测。金融系统充满着风险与复杂,但仍可以计算,因为应用合适的随机数学使我们能够分析并认识潜在动力学中典型的模式和吸引子。这些方法支持市场时间作用。然而,并没有保证成功:大的得失,集中在少的时间周期。对连续的经济发展的信念,被价格时常跳跃而增加了风险这样一种事实所反驳。市场决定于内在的交易时间,内在交易时间与自然的时钟时间不同。交易时间是具有弹性的。当价格变动变得更加剧烈的时候,交易时间也过得更快。当价格图形变得更加迟缓时,市场的交易时间也过得更慢。显然,交易时间也符合我们对时间的主观感受,依赖于我们体验的强度。市场的数学特

性在于幂律和不变性。其实际结果,所有市场——无论在何种区位或者任何时间——都相似地运作。如果维持恒常的时间或区位的市场特性能够找到,则有可能建构有用的模型以助益金融决策。但是,我们必须谨慎,因为市场具有欺骗性。它们的动力学有时候似乎提供出事实上并不存在的相关之模式,因为我们下意识地想见到它们。在进化期间,我们的大脑被训练来认知相关模式,因为这个技巧有益生存。因此,我们有时见到并不存在的模式。系统理论和复杂性研究的合适工具,将避免我们看到市场上臆想的相关关系。

7.5 经济物理学的展望

经济物理学是个交叉学科的科学领域,源于物理学家将数学方法应用在经济研究上。物理学家在经济学和金融学上的兴趣,滥觞于20世纪80年代对非线性动力学、复杂系统和混沌理论研究的爆发式增长。从历史的角度来看,物理模型首次应用在社会学发生在更早的19世纪。在1798年,英国牧师马尔萨斯分析了人口的指数增长。^[7.66]他主张人口数量的增加呈几何级数;换言之,人口增加依照一代代的固定比例增加。在数学上,他的增长假设可表示为初等微分方程 $dN(t)/dt = kN(t)$, 其中 $N(t)$ 是 t 时刻的人口,而 k 是刻画人口增加率的常数。马尔萨斯增长方程的解是 $N(t) = N(0)\exp(kt)$, 其中 $N(0)$ 是 0 时刻的人口数量,而 $\exp(kt)$ 是增长未设限而能到无穷大的指数方程。

比利时数学家皮埃尔-弗朗索瓦·韦吕勒(1804—1849)注意到真实的人口增长并非无约束的。他指出,诸如食物、住所、卫生条件的可得性等因素影响并限制人口的增长。因此他提出方程 $dN(t)/dt = kN(t)[1 - N(t)/M]$, 这个方程限制人口增长到 M 的水平。维赫斯特方程的

解,是 S 型的逻辑斯谛曲线 $N(t) = MN(0)/\{N(0) + [M - N(0)\exp(-kt)]\}$ 。两个解在早期是重合的,但在长期两者互相分离(参见图 7.23)。因此,马尔萨斯的动态方程可以认为是在没有任何限制影响下的增长基本法则。偏离这个增长曲线而向 S 型发展的现象,在有影响的“社会力”存在时变得更加明显。这并非不像牛顿关于力的定律,由此定义,除非施力引起变化,否则粒子动量将保持恒定。

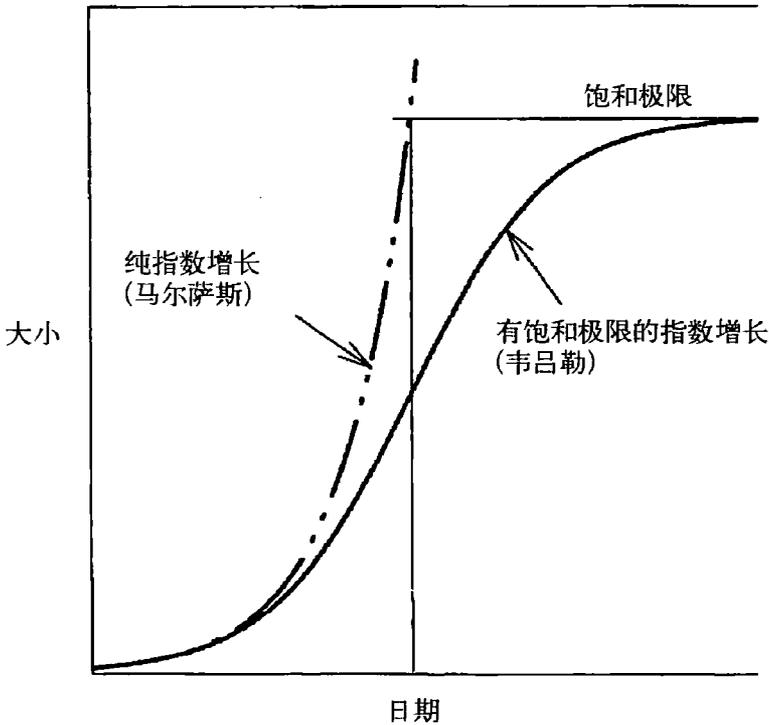


图 7.23 韦吕勒逻辑斯谛曲线对马尔萨斯指数曲线的偏离^[7.67]

事实上,在 20 世纪 70 年代提出的关于社会动力学的三个法则就与牛顿三大力学定律相似。^[7.68]第一法则阐述,当不存在任何社会力、经济力或生态力时,人口数量 $N(t)$ 的对数的变化率是固定的,即 $d\log N(t)/dt$ 是常数。这个法则的第二部分是说,在同样条件下,即不存在任何社会力、经济力或生态力时,维持人口成员的价格 $P(t)$ 的对数的变化率是固

定的,即 $d \log P(t)/dt$ 是常数。对产品来讲, $P(t)$ 是单位成本。显然,法则的第一部分就是马尔萨斯关于人口指数增长的法则,而第二部分是经验观察的表述:物品永远随着时间而变贵。

在牛顿的第二定律中,他定义物理力为造成动量改变的一切。因此,与第一社会法则相联系,第一法则指出,它受到社会力、经济力或生态力的作用而违反。由观测规则违反的发生情况,力可以被测量出来。社会动力学的第三法则是演化提出一连串替代的结果。演化这个词在此语境中的意义较生物意义来的宽广,意指包含社会系统随着时间的改变、经济产品逐代的改变或者运输方式逐年的改进。在生物学上,这个词指突变,但在电脑科技上,它可表示最新芯片的产生,而在运输上,它可指公共马车被火车取代,而后者再被飞机所取代。

牛顿的三大定律直觉上都是真实的公理,这些公理他从未由第一原理推出。稍后,它们变成经典物理学中许多领域的基本法则。从方法论的角度来讲,我们可以提出问题:什么是物理学法则或“自然法则”呢?什么是我们所指的社会法则呢?社会动力学能否归结为基本原理呢?经济学与物理学中是否有公共的法则?这些方法论上的问题,是作为经济与物理研究的交叉学科的经济物理学的核心。

因为它们是自然之数学法则的重要特点,物理学的法则并不随着我们可以观测的任何时间尺度而改变。自然遵守不可违反的数学法则,只因为那些法则根基于对称的基本原理。对称意指关于结构或系统彼此之间以固定的速度运动的不变性,在相对论原理的意义上,即平移不变性、旋转不变性,以及时间平移不变性。这些不变性是相同的,无论我们是讨论牛顿力学、广义相对论,抑或量子力学。^[7.69] 没有这些对称原理,将不可能发现自然的数学原理。这是因为这些不变性为反复执行相同实验形成了理论的基础,实验的结果可以由不同的观察者在不同的地点不同的时间,以及观察系统中不同的相对运动状态下再复制出来。因此,在物理

学中,我们不仅有物质行为的模型,也有由不变性原理证实的法则。基本法则由基本自然常数刻画。

自然法则建立在反复进行相同试验或者观察上。在物理学和天文学中,任何预测在实践上必须是可否证的,否则用以预测的模型或理论不被视为科学的。一个可否证的理论或模型,具有少量足够的参量和足够准确而可用来检验的预言。然而,某些人或许会反对,他们认为在经济学中不存在不可违反的数学法则和“自然”常数。真实的经济法则,如同任何法律或者社会契约,永远可以被愿意如此做的人们和团体所违反。因为物理法则是基于不变性原理的,它们与初始条件(如绝对时间、绝对位置、绝对方向)无关。社会经济行为不必然是普世的,而且可能因国家而异。许多经济物理学家希望单一的普世法则支配市场。是否存有任何社会经济不变性能够支撑起这个希望?[7.70]

在过去,经济物理学家只获得一些有限的成功,对于模拟金融市场是追随巴舍利耶、马科维茨、夏普、布莱克和斯科尔斯的步伐(参见第7.3节)。他们的金融模型至少允许可否证的预测。而且,也满足可被认为是支配复杂系统动力学的一般法则的一般数学方程的条件。举例而言,在第7.4节中,布莱克-斯科尔斯模型是一个修正的物理学热方程的一个数学解。然而,重要之处在于是这些方程只是形式地使用,作为特殊类型的微分和随机方程,不存在任何物理意义。在前一节中,我们强调了物理湍流和经济湍流(震荡)的差异。一般而言,湍流的纳维-斯托克斯方程由于其计算复杂性,并非分析上可解的。然而,在流体动力学中,我们知道了运动方程,因为它们是基于伽利略不变性原理的。在经济学中,我们为了描述人类行为的微观动力学而忽略了这些原理。在物理湍流理论中,我们无法像是利用开普勒定律预测行星运动一样预测长期的天气,但是我们了解到底层的物理原理。

因此,从方法论的角度来讲,“经济物理学”这个名词非常令人容易误

解,因为它似乎提倡一个像物理学般的经济科学。我偏好“社会动力学”这个词,它指在复杂动力学系统的一般数学理论中的一种特殊类别的模型。不论是物理动态系统,或是化学系统和生物系统也好,都被这个一般数学理论中的特殊类别模型所描述。从数学的角度来看,复杂系统和非线性动力学的一般理论涉及特殊的微分和随机方程、吸引子的相空间、数学不变性和群结构。纵使在社会动力学中,我们遭遇典型的不变性,其特征在于概率空间的吸引子(例如,经济震荡的莱维稳定分布)、标度不变性和幂律。它们在经济学和金融学中是可否证的,而且在未来是可以修正的。然而,物理学的不变性原理也必须是可否证的。例如,时间的对称性在物理学中广为接受。可是,它已经被特殊基本粒子(K 介子)的实验结果所驳倒,而其原因仍是未知的。因此,对称性和不变性不是永恒的真理,而是可否证的研究的一般的、形式的框架。简言之,复杂动力学系统理论是数学的一部分,而不是物理学的一部分。它在物理学、化学、生物学、经济学、金融学和社会科学的应用,需要特殊的初始条件和边界条件、基本形式概念的框架和经验解释。这些模型的可证伪性,依赖于所应用的特殊的经验条件。

复杂系统和人类 文化、社会的进化

人们怎样解释人类社会中政治秩序、社会秩序和经济秩序的形成呢？本章首先扼要回顾了从古代到现代政治系统的历史。政治理念通常产生于一个时代占据主导地位的技术、物理、以及生物概念。在 17 世纪，托马斯·霍布斯力图把伽利略和笛卡儿的运动定律从力学移植到人类学和国家理论中。洛克和休谟的自由思想诞生于牛顿物理学的历史背景。像许多物理学家那样，政治思想家、律师、政治家相信线性因果的机械论世界（见第 8.1 节）。然而“蝴蝶效应”怎么样，此时小误差或局部冲突具有全球影响？当局部失败导致全球灾难时，个人或企业、城市或国家应该受到多少谴责（例如在环境政策中）？复杂系统探究方式强调的重点是，从宏观的角度看，政治秩序、社会秩序或文化秩序的发展不仅是单个意向的加和，而是群体非线性相互作用的结果。在第 8.2 节，在复杂动力系统的框架下分析复杂社会与文化问题的例子：城市中心的成长，全球移民问题，

与复杂组织有关的管理议题。

对于非线性动力学,一个挑战是追向全球化时代复杂通信网络的演化(第 8.3 节)。数据流量的流动可以用相变和吸引子来刻画。为了管理日益增加复杂性的汹涌浪潮,我们需要用户友好的信息检索办法和个性化信息系统。在柔性计算当中,信息检索由神经网络和多主体技术提供支持。然而,全球联网的复杂性不只归因于互联网的生长。泛在计算(第 8.4 节)是全球联网、无线媒体接入、大带宽范围、标准网络上的实时多媒体容量、数据分组路由的一种扩展。本章最后将考察复杂通信网络,这提供了一种世界范围“地球村”的前景以及通过现代高技术程序的繁荣所获得的人类解放。

8.1 从亚里士多德的城邦到 霍布斯的利维坦

在讨论了物质、生命、心-脑和人工智能的进化以后,本书最后讨论如下问题:人类社会的进化是否可以至少是部分地在复杂系统的框架中加以描述和建模。在社会科学中,人们通常在生物学进化和人类社会历史之间作出严格的区分。原因在于,国家的、市场的和文化的发展被假定是由人的意向性行为所指引的,即人的决策是以意向性和价值为基础的。

从微观的观点看,我们实际上观察到的是一个有着自己意向、信念等的个体。但是从宏观观点来看,国家、市场和文化发展却大于其部分的加和。政治、社会、经济秩序的形成,表现为是由自组织步骤引起的,从而提示了复杂系统中的某些相变过程。然而,为避免任何种类的自然主义或物理主义的还原论,我们应该考虑人类社会特有的意向特征。在第 3.4 节和第 4.4 节中,已经在复杂系统探究方式的框架中为动物群体的演化

建立了模型。诸如社会秩序、社会行为组织、巢穴的构造等宏观结构,都用复杂系统的吸引子来解释。但是,在动物群体和人类社会之间的复杂性差异数不胜数,尽管它们有共同的起源,存在着共同的特征。因此,在后续的叙述中,诸如“进化”、“本性”都不能限于分子、鱼类、蚂蚁等的机制中。它们意味着某种新的复杂动力学,对此进行的分析必须考虑到社会哲学的长久传统。

柏拉图和亚里士多德是最早试图解释人类社会的政治、社会和经济秩序的形成的哲学家。他们分析了古希腊城邦(polis)的结构,古希腊的城邦成为西方社会和国家的起源。在古希腊典籍中,城邦(πόλις)例如雅典,是一个小城市共和国,可与后来文艺复兴时期意大利的佛罗伦萨和威尼斯的行政区相比较,或许可以与现代瑞士城市州相比较。古希腊的城邦不大,但是在政治上经济上几乎是自主的国家和社会。^[8.1]古希腊的哲学家认为,一种理想的模式,它们或多或少地由这些历史例子实现了。

柏拉图区别了几种转变的阶段,它们是一个城邦在实现和谐社会的最终目标过程中必定要经历的阶段。在第一个阶段,公民必须要学习种种技能和职业、商业和贸易,以满足整个社区的种种不同需要。柏拉图相信,城市的公民必须要根据他们的天赋不同实现不同的专业化。公民为了合作工作必须使自己组织起来。柏拉图提出,通过自发的自组织,他们的产品和服务的交换实现某种工作和需求的平衡。这种平衡的经济状态的特征是“公平”价格。

但是,柏拉图的田园诗般合作工作的世界当然是不稳定的。人们力图追求他们的利益和获得好处。他们是自私的、不正派的,充满着嫉妒、由情欲所驱动。于是就产生了冲突,就必须组织起政治权力以避免城邦的毁灭。柏拉图提出来一种由精英、贤者(“哲学家国王”)管理国家的贵族政治。^[8.2]他们的政府的作用就是要使其中充满着冲突涨落的整个系统保持在某种平衡态。众所周知,柏拉图不相信民主,因为在他的见解

中,没有受过哲学教育的普通人是无法认识到真正的公平的理念的。柏拉图相信,在变化着的短暂的表面世界背后,存在着一种永恒的伦理价值等级。因此,也存在着一种人们必须意识到的客观的价值尺度,以避免混沌,保持系统的和谐状态。

显然,柏拉图在捍卫一种集权式的政治权力系统。用系统理论的语言来说,即有一种中心化的处理者,控制着系统元素的所有行动和反应。如同科学世界中的拉普拉斯妖,这里有一个柏拉图的政治神话,即由理想的、明智的和善良的政治家领导着一种和谐平衡系统。在一个像古希腊城邦的小城市中,在某些批判性气氛下,柏拉图的最佳“哲学家国王”的贵族政治也许是正当的。然而,真实历史的经验已经表明,甚至有教养的、有智慧的政治领导人也难逃滥用其权力的诱惑。今天的世界上,柏拉图的精英的贵族政治犹如以知识为基础的复杂社会中的专家的权力。但是,在现在的高度发展起来信息和计算机技术的条件下,柏拉图的明智和善良政治家的神话容易转变为奥威尔的恐怖剧中具有万能控制力量的“老大哥”。

第二位涉及古希腊城邦的著名哲学家是亚里士多德。^[8.3]他假定,人在本性上是希望求生的社会动物。而且,他们是政治动物,因为他们希望生活得美满幸福。亚里士多德认为,人类社会的有机发展,是由其成员的社会本性和政治本性所推动的。当城邦的社会和政治形式得以实现时,社会的和政治的动力学就达到了一种最终的平衡态。亚里士多德把这种社会的和政治的动力学描述为其本质上是过程。

不过,自然的动力学过程并非被想象为一种因果的机械运动,而是想象为一种像植物和动物那样的有机物生长,从最初的种子的状态开始,目的是最终实现其完整形式的终态(对照第 2.1 节)。于是,在人类是由他们的社会本性和政治本性的冲动所推动的意义上,亚里士多德的社会模型是一种自然主义模型。但是,只是为了生存的目的而进行社会组织的这种人类本能才是与动物是共同的。人类以由其政治本性是要实现一种

公正社会为特征。在他的著名主张中,亚里士多德说,人类是通过科学和哲学追求真理的理性动物,也是一种在社会中追求公正的政治动物。

公正意味着一种完整的自然状态,即社会按照其平衡应具有的和諧比例来安排,犹如阿基米德天平的静态平衡一样(图 8.1)。因此,在亚里士多德社会中的经济平衡是由“公平的价格”来度量的,这样的价格是物品和服务的“自然”价值。经济学也就成为亚里士多德关于公正和国家的道德哲学中的一部分。他区分了交易公平(*iustitia commutativa*)和归属公平(*iustitia distributiva*),前者涉及私人交换和公民事务,后者涉及公民和国家的关系。亚里士多德的经济公正和政治公正模型成为了中世纪的主导思想。显然,它与那时代的亚里士多德的自然概念是一致的。

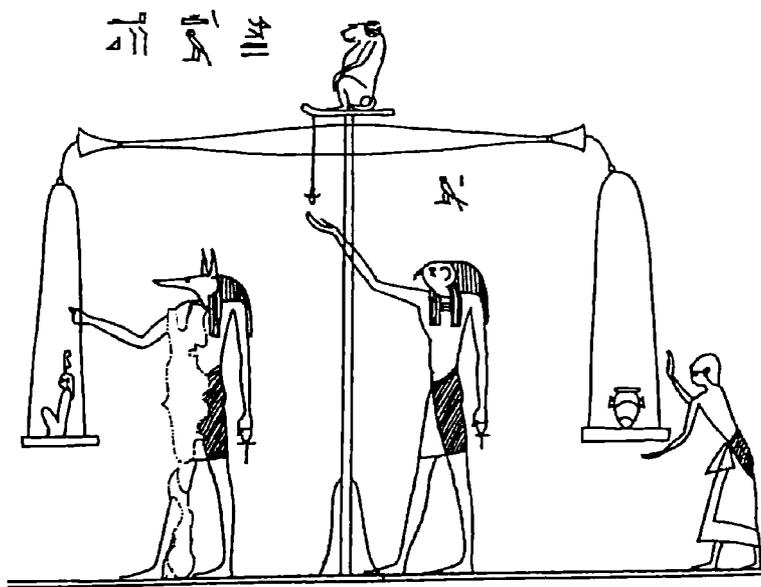


图 8.1 奥西里斯(Osiris)的最后审判(埃及:公元前 2 世纪)

机械自然观是伽利略、笛卡儿等人奠基的,它导致了牛顿的宏大的经典物理学系统。托马斯·霍布斯(1588—1679)在其名著《利维坦,或教会国家和市民国家的实质、形式和权力》(1651)中,提出了一种近代社会和国家的机械论模型。^[8.4]霍布斯生活在一个发生着政治剧变的时期,即中

世纪的结束和近代时代的发轫的时期。中世纪传统的君主政治和贵族政治已经失去了其宗教合法性。在血腥的内战中,欧洲的社会和国家沦为一片废墟,变得混乱不堪。科学上,伽利略的机械论新方法及其在物理学中的成功给霍布斯留下了深刻印象。因此,他力图运用这种方法以发现一种近代社会的机械论模型,其中没有陈旧的传统形而上学来损害它在科学和政治中的合法性。

按照伽利略的力学,有一种把一个系统(“物体”)分解成为其独立元素的分析或分解方法,以及一种再把这些独立的构件装配或统一成整个系统的综合方法。简言之,整体就是其部分之和。显然,伽利略描述了关键性的叠加原理,奠定了线性的机械论世界观。实际上,一个如同钟表一样的机械系统,能够分解成诸如嵌齿轮和其他机械部件那样的独立元件,这些元件装配在一起构成了其完美的功能作用。

霍布斯力图把运动定律从力学转移到人类学和国家理论。人们被假定是由情感和情绪推动的,如同肉体是由机械动力推动的一样。主要的情感因素是个体的自我保护和求生本能。在霍布斯看来,追求生存的本能是人的一种自然权力,并导致对其他人的暴力和侵犯。因此,在霍布斯的人类社会的自然状态中,就存在着一切人反对一切人(*bellum omnium contra omnes*)的永恒斗争,而没有任何平衡态。

另一方面,具有复杂需要的人们只能在社会中生存。因此,他们的理性提供了一种追求和平的第一自然定律。为了实现“和平定律”,就需要第二定律,即需要有一种社会契约。霍布斯指出,在这种社会契约中,所有的公民都必须把他们的自然权力转移给一位绝对君主(“利维坦”),这位绝对君主制定政治权力的法律,并用来统治国家。用现代语言来说,霍布斯的社会契约使得国家的单极权力具有合法性,以保持社会处于某种绝对平衡。

霍布斯把绝对君主定义为制订社会契约的“所有个体之和”。显然,这种思想是伽利略的叠加性或线性的力学原理的运用。霍布斯的著作的

封面(图 8.2)表明,利维坦的身体是单个个体组成的巨大复杂系统,这说明了霍布斯的线性政治原理。



图 8.2 霍布斯著作封面上的“利维坦”

从混沌的自然状态到政治有序和平衡状态的“相变”,是由全体公民的社会契约来实现的,正是在这种意义上也就是由自组织来实现的。但是,利维坦的终态却是一个集权化的确定论系统,其中对其公民不存在任何的政治“自由度”。霍布斯将物品和金钱的经济循环比做血液的循环,血液循环是由英国医生威廉·哈维发现的。心脏是推动整个循环的一台机械泵,收入和消费也就被比作血液的泵入和泵出。

著名英国哲学家约翰·洛克(1632—1704)不仅影响了牛顿物理学的认识论和方法论,而且还影响了现代民主和宪法的政治理论。他提出疑问,人为什么甘愿放弃自己在自然状态下的绝对自由而受制于政治权力呢?洛克认为财产所有者在自然状态下的愉悦享受是非常不安全可靠

的,因为其他人在不受约束的自由状态下都想夺走他的财产。因此,自然状态是不稳定的,会向着政治权力下的平衡状态转化。洛克所说的从自然状态到有政府存在的社会的“相变”,是由人的保护财产的意志推动的。

然而,政府并不意味着绝对君主的不自由的机制,它是各方独立的政治力量(如立法机构和执行机构)的制衡(“平衡”)结果。既然法律是由国会这样可代表社会的机关制定,公民便可以获得必要反馈,而他们只需放弃在自然状态下的自由到能保全自身和财产的程度:“所有这些都将导向唯一的目的,即人民的和平、安全和公共产品。”^[8.5]在历史上,洛克关于民主、分权、财产及宽容的思想主要影响了美国和法国的宪法。

在认识论中,伟大的苏格兰哲学家大卫·休谟(1711—1776)的政治理论比洛克更富批判性,也更准确。休谟的认识论认为,人的知觉是受情感和感觉的联合所役使的,而这种情感和感觉可随着外在经历加强或减弱(参见第4.1节)。因此,即使在牛顿物理学中也没有绝对真理,只有一种带来或多或少可能的结果的有用方法。类似地,没有其他永恒的如同“公正”决定人的行为的伦理价值。伦理观念只能根据其对个人或公众的有益性来评判。^[8.6]一般而言,政治制度是否合法,取决于其有效性是否被一个社会所接受。因此,休谟是功利主义伦理学和政治哲学的先驱。他的朋友和苏格兰同乡亚当·斯密很可能受到休谟的怀疑论人类学启发,这种人类学强调社会的利己主义行为。

巴士底狱被攻陷后,专制主义系统的垮台,一个地区事件改写了全球历史。伊曼努尔·康德(1724—1804)称赞共和自由是公民历史的新篇章。他认为一个自由的公民社会应走向历史发展一直在追求的平衡。简单来说,一个自由的公民社会被看做历史的吸引子。人权宪法是为了保证人们的公民权利处于自由、平等、博爱的平衡之中。康德公设他的定然律令为平衡个人自由和他人自由的普遍性道德原则。然而,康德的完美平衡状态似乎与真实历史世界的冲突和战争不相吻合。因此,黑格尔

(1770—1831)的解释为历史绘出了一个辩证的系统发展。^[8.7]辩证法是关于从存是到演化的相变,现代则表达为系统理论。矛盾、紧张和冲突(“否定”)引起了新秩序的产生(“量变”)。卡尔·马克思(1818—1883)则力图将黑格尔的辩证法运用在政治学 and 经济学上。^[8.8]

8.2 复杂的社会系统和文化系统

在社会科学和人文学科中人们通常严格区分生物进化和人类文化史,主要原因在于民族和文化的发展显然是由人的意向性行为所引导,如态度、情感、计划和理想等,生物进化系统却假定为受非意向性的自组织所推动。从微观的角度看,我们当然可以观察到带有其意向、喜好的不同个体。甚至在动物生态这样的生物系统中,也在某种程度上存在具有意向性行为的个体。

复杂系统探究方法的关键点在于,从宏观的角度看,政治秩序、社会秩序和文化秩序的发展不仅是单一意向的加和,而是非线性相互作用的综合结果。亚当·斯密已经认识到,经济财富和福利的分配并不仅凭着一个个面包师和屠夫的社会美好愿望,个人追求自身利益和自私的意向可能与保持利益相冲突。然而,他们的(非线性的)相互作用却通过“看不见的手”(亚当·斯密)或是“理性的狡黠”(黑格尔),实现了获得集体均衡。

具有意向性行为的个体组成的非线性系统,可能比原子组成的物理系统或是分子的化学混合物更加复杂。在第4.3节和第4.4节中,意向性行为 and 意识的建模,是被看做一种复杂神经系统的自指涉全局状态,是由神经元的非线性相互作用引起的。这种以不同复杂程度出现的集体有序现象,是所有非线性系统的内在普遍特征,而并不必然与意识相联系。政治状态作为人类社会的集体有序,显然并不具有像黑格尔错误地相信

的那种意识或智能,尽管其形成可以借由具有意向行为的有意识的人的非线性相互作用所引起的相变来建立模型。

因此,在这个复杂系统的数学框架中,“进化”的概念不是通常所指的生物进化的独特机制。在一个复杂系统中,所谓的进化方程描述了元素的动态,这些元素可能是基本粒子、原子、分子、有机体、人、公司等等。它的另一个概念有着更广泛的意义,即复杂性本身。在社会科学中有很多方面的复杂性,其中的一些如图 8.3 所示。^[8.9]

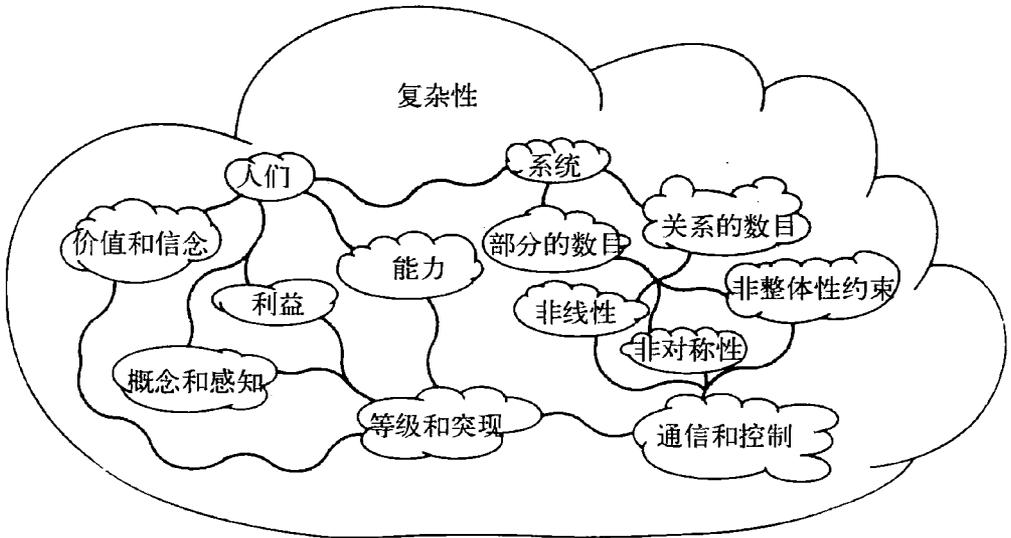


图 8.3 复杂性的意义^[8.9]

在本书中的复杂系统的数学框架下,复杂性起初被定义为非线性,非线性只是混沌状态和自组织的必要非充分条件。另一方面,线性隐含着叠加原理,即如一个流行的口号所说,“整体只是它各个部分的加和”。复杂性的第二个重要方面是由算法结构界定的,这在第 5.2 节中讨论过。计算机科学中的复杂性理论提供了复杂程度的等级区分,例如依据计算机程序或算法的计算时间。因非线性复杂系统有时可由电脑绘图模拟出,算法复杂性的程度可能以其容纳自组织的能力来描述。两者关系已经在元胞自动机理论中讨论过(对比第 5.6 节),这个理论包含了不同种

类的自组织复杂系统的模型。

在社会科学中,一个高度工业化社会的复杂性主要在于它的众多的公民及其关系,在于它的该组织性子结构,以及他们的依赖性。^[8.10]我们应该记得,在一个复杂系统中,元素的大量对出现集体(协同)有序现象并不是必不可少的,重要的是元素间的非线性相互作用。读者可以回想起,具有混沌轨迹的天文学三体问题便是可能的答案。

在复杂系统的数学框架下,人类历史和社会文化发展的物理还原论或生物还原论是无论如何都不可证明的。社会发展和文化发展的模型必须在其约束条件和限制下加以讨论。一个严峻的方法论问题便是对这些模型提供实证测试和确证。这样,计算机辅助的模拟复杂文化系统成为洞悉模型动态的重要工具,这种动态可能对我们的决策和行为产生影响。

历史上,社会科学对非线性问题的兴趣可以追溯到托马斯·罗伯特·马尔萨斯,^[8.11]他认为既然人口以指数方式增长而粮食供给只是线性增长,人口将会超过其食物的供应。在1844年,韦吕勒修正了该指数方程,他指出人口增长速率与人口产出、资源总数与已被现有人口消耗的资源之差成正比。他的著名的带有特征平衡吸引子的逻辑斯谛曲线,已被应用到人口统计学、经济学以及社会科学的其他领域中。它提供了一系列可能的分岔和包括混沌在内的相变。

洛特卡和沃尔泰拉所描述的捕食-被捕食生态系统的进化,是另一种已被应用到社会科学的模型。例如,洛特卡-沃尔泰拉捕食模型帮助我们理解农业社会的出现。人类因拥有学习能力,便可以改变与环境相互作用的系数,而这个过程快于大自然依靠遗传进化的反向措施。人类社会只是为了生存提高捕猎能力,将会减少猎物的数量,进而这个社会的人口也会减少,最终捕食者和被捕食者的族群都将灭亡。然而农业的出现可以增加猎物的出生率,这样人类人口也会增长并保持在某个平衡。

生物系统的进化是由基因控制的。在达尔文进化论中,经由对自发

产生的突变体的自然选择,一种新型个体便出现了。在高等动物的族群中,行为变化和模仿适应的新可能性增加了。在人类社会还存在着可支配行为模式的更精致的学习策略。社会发展出独特的机构,如法律、国家、宗教、贸易等等,以稳固下一代的行为变化。

复杂系统探究方式为我们提供了基本的眼光:基因进化和行为进化均不需要像观测天意、生命力、或是全局最优进化策略这样的总体计划。基因得以保存或是全局行为模式的形成,可由组成系统的个体间的局域相互作用来解释。更清楚地说,这可能是一个宗教或政治的“世界观”的问题,而不论是否存在像上帝、历史或进化这样的“总体计划”。在复杂系统的方法论框架下,这些假设并不是解释的必须,在奥卡姆剃刀原理及他的经济理论中也都是多余的。

显然,如生物有机体、动物种群或人类社会这样的非线性系统已经进化得越来越复杂。与亚里士多德的城邦国家,或是重农主义的政治制度相比,我们现有社会的特征是高度复杂的制度以及信息网络化。19世纪,赫伯特·斯宾塞已经提出复杂性增加通常是进化的标志:“进化是结构和功能复杂性的增加。”^[8, 12]斯宾塞仍然是在热平衡热力学框架下进行讨论。

在远离热平衡的热力学框架下,并没有平衡的不动点,只是有一个或多或少复杂程度的吸引子等级,该等级始于不动点,止于奇怪吸引子的分形结构。因此,不管在生物进化还是社会文化的进化领域,对复杂性都没有固定的限度,只是存在不同复杂程度的吸引子,它们代表某些相变的亚稳平衡。当某些阈值参数实现,这种平衡就被克服。一个社会的结构稳态与这些不同复杂程度的吸引子相联系。

传统机能主义者的体内平衡观点和自调系统,起源于一个技术的恒温器的概念。它可能帮助我们理解为什么社会可以保持不变,却无法解释社会为何还是会变化,均衡为何被推翻。在复杂系统框架下,社会的动力学是依照一个与环境交换物质、能量和信息的耗散系统的相变来理解。

社会制度也是耗散结构,可能出现并在一个特殊的阈值范围内保持不变。例如,在新石器时代的村子里,农耕制度便从旱作变成了灌溉,此时食物供给不再受既定社会结构的控制。

在工业化社会的历史里,我们或多或少可以分辨出强烈的经济波动,这种波动可能使得旧社会制度开始崩溃,新制度即将诞生。例如,1922年美国的经济萧条相对来说比较温和、短期,也并未引起美国社会结构的变化。与此不同的是,同时期1929年的股市崩盘产生了真实的蝴蝶效应,引着美国开始走向1933年的大萧条。^[8.13]这场危机使得很多公司经济崩溃,失业者剧增,当时已有的社会机构已无法处理这些情况。也就是说,既有社会结构的阈值参数被突破了。新的社会机构建立起来,如美国证券交易委员会、联邦存款保险公司、公共工程管理局等,以帮助克服萧条带来的影响,防止将来商业循环的过度波动。美国社会的这种凯恩斯式反应,变得与罗斯福总统的新政立法一样出名。

但是当我们学习新古典主义经济学家以及二战后社会发展的经验,公共福利最大化的策略可能催生一个自动力学的行政官僚机构,这种机构会摧毁经济主动权,阻碍原先的良好意愿。对一个系统的结构稳定性来说,过度反应可能与没有反应一样危险。另一方面,政治革命的历史显示了社会可以完全失去其结构稳定性,进而建立起新的宪政、机构以及社会结构。当然,这也无法保证长久维持。

从方法论的角度来看,出现的问题是如何在复杂系统的数学框架下表示社会文化的进化。识别吸引子和均衡需要社会文化动力学的相图,它假设了“社会文化状态”和“社会文化状态空间”的定义。然而,什么是维多利亚时期的英格兰或魏玛共和国的社会文化状态空间呢?这些问题表明了显著的局限性。复杂系统探究方式在历史和社会科学中的可能性是什么呢?

在一个完全数学的状态空间里表达一个历史时期不是研究的目的。相关数据通常是未知的、偶然的以及非量化的。在最后一节,具有状态空

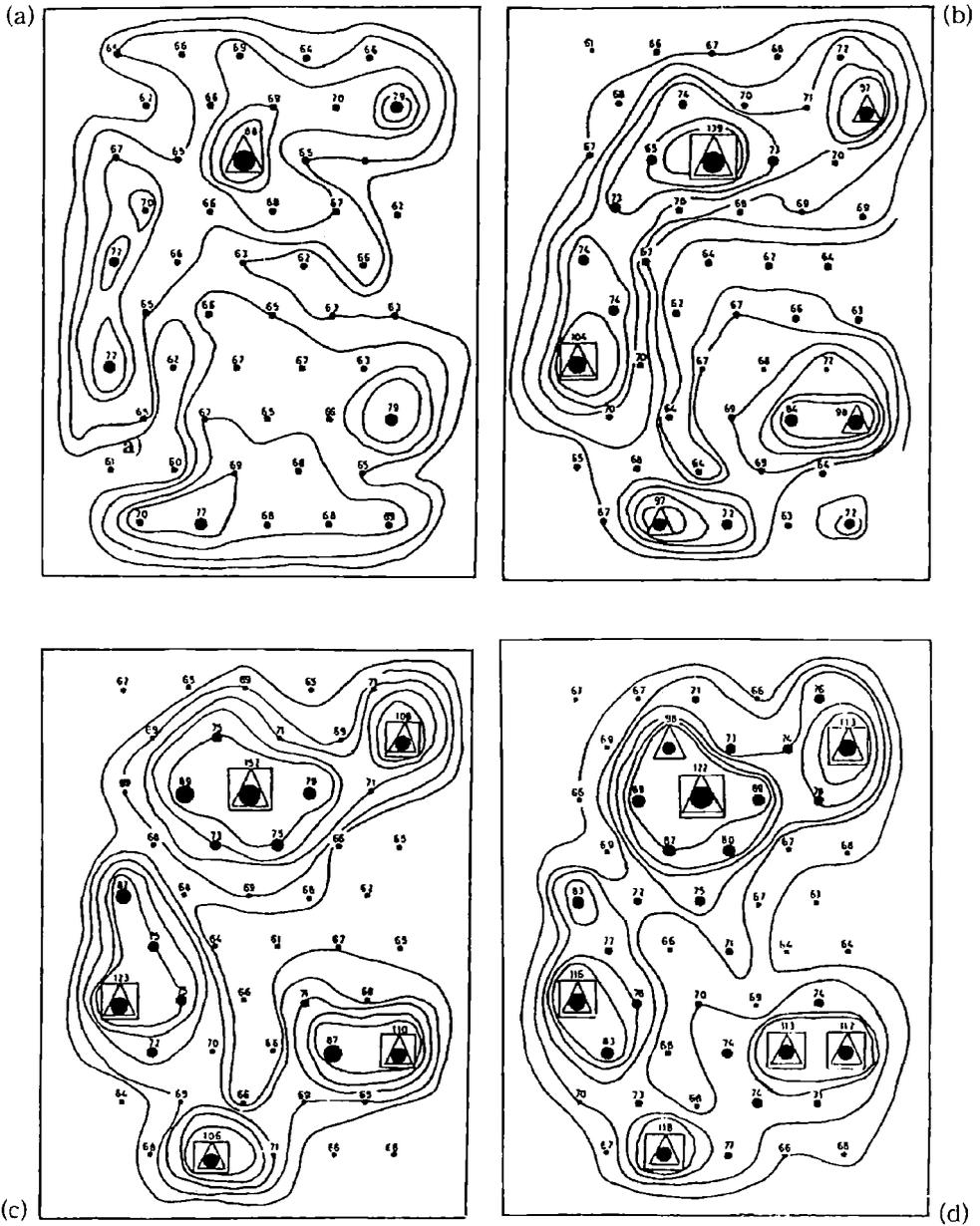
间和动力学相图的复杂系统被用于模拟人类社会的经济演化。比如,经济学家并不要求对魏玛共和国的完全经济发展的再现。然而,商业周期的非线性内生或线性外生模型能够描述典型的经济场景,它们影响或依赖于政治或文化历史上的状况。

经济模型不是为了自己而研究。经济学家想要理解经济动力学,目的是为了用更好的结构洞察力来支持实际决策。一个社会的经济动力学是被嵌入于它的全局社会文化发展之中。考虑到它的复杂性,已经做出的努力只是模拟这种子系统(诸如城市中心)的社会文化发展。这些模型能够把握演化着的城市系统的典型特征,有助政治家和公民在适当的情况下做出更好的决策。

在现代工业化社会里,存在着大量的各种规模、各种形式、各种性质的中心,从具有高密度的大城市到只有少数居民的小村庄。我们也许会问,这些不同中心在空间上分布的原因是什么以及他们随时间的演化将会是什么样。要回答这个问题,我们需要知道一个城市系统的全局时空状态,这个状态是由追求不同的合作或冲突利益的个体、家庭、公司、行政管理人员等行动者的局部非线性互动所引起的。城市中心的结构取决于商业与工业利益、商品与服务流动、交通联系、文化吸引力、生态需求。作为可测量量,这些因素需要精确化。城市系统与外部世界有多种交换。因此,可以解释为复杂动力学系统所模拟的耗散结构。

彼得·艾伦提出了一个具有演化方程的系统,表达其不同行动者的非线性互动。城市系统的时空结构有其变化着的居民中心和聚集,并非其行动者的简单加和。这不是某些全局优化者或某些集体功利功能的结果,而是非线性相变引起相继平衡的不稳定性的结果。在这个意义上,城市系统的演化不是由一个柏拉图式国王(或独裁者)统治的,不是一个笛卡儿建筑师建构的,也不是由拉普拉斯妖预测的。在复杂系统的数学框架里,城市系统的形式似乎像活的有机体那样生长。

在艾伦的分析中,^[8, 14]用一个 50 个局部点的三角形格子模拟城市系统的地理空间(图 8.4)。城市系统的生长决定于描述局域点人口变化和所在局域点提供的就业演化的两个方程。本地人口和当地就业能力用城市乘数作为正反馈联结起来。就业集中提供了外部性和共同基础设施,这反



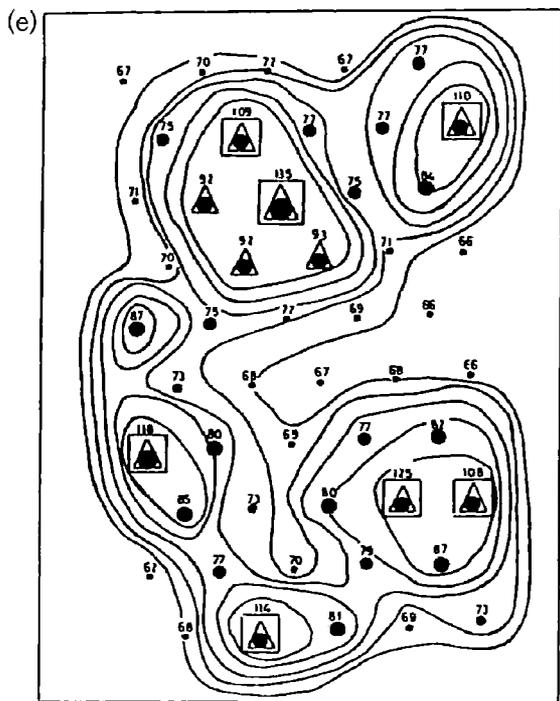


图 8.4 城市演化的计算机辅助模型

(a) $t=4$; (b) $t=12$; (c) $t=20$; (d) $t=34$; (e) $t=46$ 。[8.14]

过来增加了正反馈；而居民与企业家在一个中心争夺空间则提供了负反馈。

计算机绘制的图 8.4a—e 显示了一个区域人口分布的演化，开始时地方中心之间没有互动。城市化进程由变化的本地吸引子相变来揭示。当图 8.4b 的时间 $t=12$ 单元时，结构开始围绕 5 个主要中心而固化。在图 8.4c 中，最大中心的核心趋于最大值。图 8.4d 处在 $t=34$ ，其基本结构在本质上是稳定的。两个中心经历了中央内核衰落。在图 8.4e，基本模式是稳定的。衰退、中心化以及去中心化都是由复杂非线性动力学引起的。

图 8.4a—e 构成了一个城市系统全局演化的加速运动图像。每个图像都是一个特定时间点上的全局动力学状态相图。当然，这个模型是简化的。但可以通过整合更多的功能侧面和研究他们更为复杂的非线性互动来扩展模型。虽然如此，但是探索决策选择的模型的潜力可以采用计

计算机模拟案例研究来进行分析。局部或全局的变化可以加于系统之上。这些模拟,政府极为感兴趣。

一个可能的策略是,可以在某个特定点上施与特定投资来干预城市结构。这个决策策略对应于城市系统中迄今欠开发区域的发展。投资不仅意味着经济手段,比如也意味着文化吸引力和交通联系。有时,一项投资可以启动一个局部蝴蝶效应,带来抵消城市规划者良好意图的全局结果。由此由于模型的非线性,限制了长期预测的可能性。

城市动力学是复杂系统的实例,它显示如果忽略非线性后果,单个个体的良好愿望是不够的甚至是危险的。个体行动的集体效应刻画我们的社会。要尽量地基于意识到集体效应来做决策。这些结果的重要性不仅存在于具体决策及其非线性效应的计算机仿真,甚至没有卷入具体规划活动的公民也必须意识到社会中的复杂相互依赖。

煽动人们要求对有一个能解决所有问题的强力政治领袖,不仅从民主的角度看是危险的。由于刻画现代高度工业化社会的复杂性,还由于数学上的理由这也是错误的。另一方面,我们不应对单个政治家或政党寄予厚望,而后当我们夸张的期望落空时又报以完全的政治沮丧。人类社会是以其成员的意向性为特征的。虽然如此,但是它们也受诸如原子群、分子混合物、细胞组织或生态种群等复杂性的非线性定律所支配。

考虑复杂性和非线性之认识论后果的社会学理论还处于幼稚阶段。能够处理社会问题复杂性的合适统计数学的发展,可以充当通往传统社会学概念的桥梁。在复杂系统探究方式中,社会现象被描述为非线性方程。例如,当涂尔干^[8.15]提到社会中的团结,那么我们会把这个概念的功能方面归结为复杂系统的非线性与集体效应。我们可以辨别政治决策为“线性”,对应于“个体”选择,而“非线性”,则对应于管理者的制度环境,例如大众媒体、政党等。许多公民和机构的行动和反应可以理解为内在社会之统计描述的涨落。社会的确定论性质只反映了分布函数的平均

一个应用例子是城市系统,它可以看作是艾伦和普利高津意义上的演化耗散系统,以及还在协同学意义上的随机系统。宏观变量是物质变量(对比第7.2节),刻画着一个城市的状态。人类影响不是直接由集体人的宏观变量表示的。市政当局、房屋建设者、建筑师以及其他决策者的活动间接地表达为一个城市的状态演化。然后,它们显示为郊区、街道以及城市部分的不同风格和时尚。在一个细节层面,城市的状态可以刻画为履行不同用途的不同建筑类型的数量、位置和分布。一个城市区域被绘制为具有离散坐标的方形格子。我们区分不同的建筑类型,例如出租房、厂房、学校、商店、房屋、公园等。在方格区域上有一些某类建筑单元。例如,方格区域上有出租房或厂房的宏观变量。在所有方格区域上的所有类型建筑单元的数集合被命名为城市布局。

为了应用协同学,需要建立城市布局向邻近布局的转换率。城市布局的基本变化包括根据适当选择的单位体现宏观变量(例如某个方格上出租房的数量)的增加或减少。邻近布局的转换率表示,已知初始布局的条件下每时间单位各种转换发生的概率。转换率与衡量转换前后城市布局的效用差异的效用函数有关。例如,在邻近位置建设出租房和厂房也是不适合的,而这就促使人们把它们在方格区域上保留一定距离以实现更好的效用。根据协同学,转换率可以用来建立时间 t 上的出租房 x 、厂房 y 等宏观变量的概率分布 $P(x, y, t)$ 主方程。而且,通常而言不可能通过对比经验数据来完全枚举概率分布主方程的所有信息。那么,情况表明要忽略宏观变量均值演化的涨落,而且要限于准均值方程,比如从主方程可导出的租屋 x 和厂房 y 等宏观变量。这些方程的演化导致多种依赖初始条件的可能稳恒态。在相应的计算机仿真当中,城市布局的稳恒态被表示为一个城市区域中工业与居住区的不同分布。

协同学的建模概念已经被应用在社会学中的一些问题,例如政治舆论的集体形成、人口统计、人口迁移、区域地理。协同的概念特别适于

整合一个社会类里多个部门的互动,例如经济与政治舆论集体形成之间的联系,或经济与移民过程之间的互动。人口迁移是当今一个非常惊人的议题,而且体现出线性与单因子思维的危险。仅有良好的个体意图而不考虑单个决策的非线性效应是不够的。线性的思维和行动可能引发全局的混沌,尽管我们带着最良好的愿望进行局部地行动。

根据协同学的进路,一个经济社会系统可以刻画为两个层次,个体决策的微观方面以及社会中集体动态进程的宏观方面。具有随机波动的概率性宏观进程用人类社会构型的主方程来进行描述。社会构型的组分指的是具有行为特征矢量的亚群体。关于人口迁移,居留或者离开某个区域的行为与决策可以通过人口的空间分布及其变迁来识别。因此,模型的动力学使我们能够描述不同的全局人口宏观状态之间的相变。

经验的管理数据可以用来检验该理论。模型可以考虑一个国家内部受不同经济与城市发展所驱动的区域性移民,甚至是受政治与经济萧条所驱动的世界范围“南部”与“北部”之间、贫穷国家与欧美高度工业化国家之间惊人的移民。物理交通或动物种群的迁移通常是不可控的、随机的,而且是线性的,要素与集体聚集之间没有相互作用。然而,人类移民是有意向的(受到效用考量的驱使)和非线性的,因为转换率不是线性地依赖于整个社会构型。

两个人群之间的迁移互动可能引起多种协同学宏观现象,例如出现一个稳定混住区,出现隔离而稳定的两个居住区,或出现不断进行的迁移进程。在迁移动力学的数值模拟和相图中,协同学宏观现象可以用相应的吸引子来识别。图 8. 6a, b 显示了具有微弱聚居与隔离趋势的两个群体的均质混居。图 8. 6a 是具有稳定平衡点的均值方程的相图。图 8. 6b 显示主方程的稳恒解和具有初始最大值的稳恒概率分布。图 8. 7a, b 显示两个稳定居住区的出现,人群之间具有微弱聚居倾向和强分离倾向。图 8. 7a 是具有两个稳恒不动点的相图,图 8. 7b 则描述在稳恒点具有最

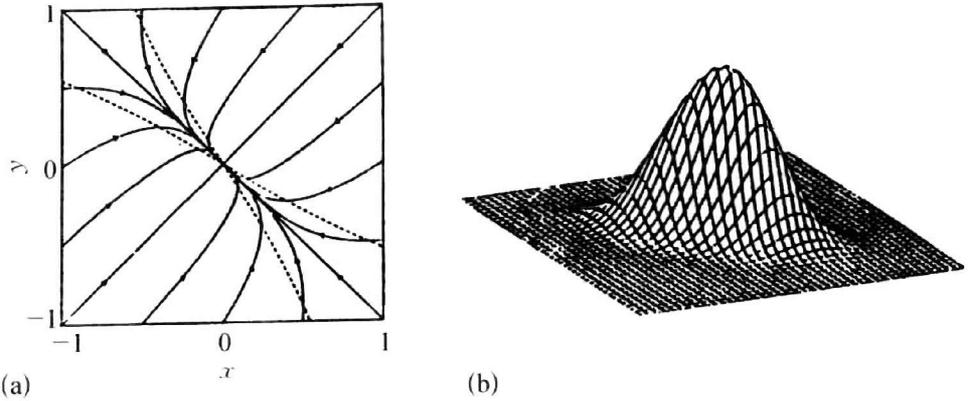


图 8.6 有一个稳定平衡点的迁移动力学

(a) 相图;(b) 概率分布(以下图 8.7、8.8、8.9 同)。^[8.16]

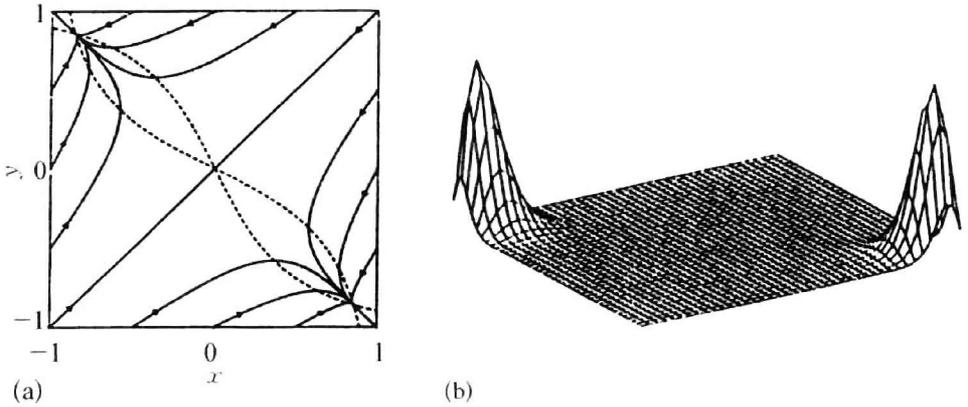
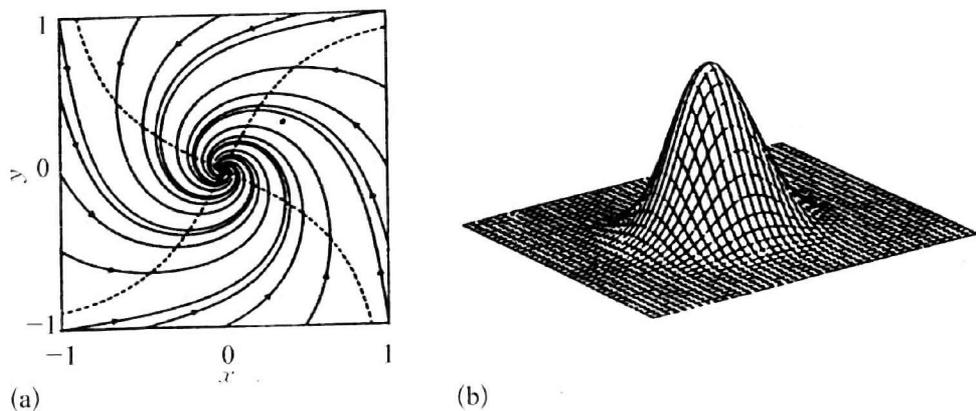
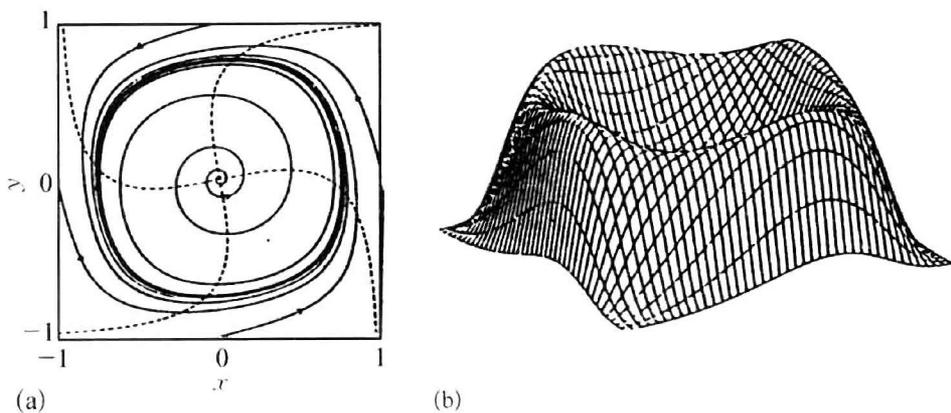


图 8.7 有两个稳恒不动点的迁移动力学^[8.16]

大值的概率分布。

图 8.8a,b 显示每个人群中适当聚集趋势以及人群之间强烈不对称的互动。图 8.8a 表示一个涡图,图 8.8b 是具有初始点最大值的相应概率分布。图 8.9a,b 对应于每个人群都具有强聚集趋势且人群之间具有强烈不对称互动趋势的不断进行迁移进程。相图 8.9a 显示具有不稳定源的极限环。图 8.9b 的稳恒概率分布有四个最大值,沿极限环有相连的脊。在社会学上,这个情况可以解释为通过人口不对称迁入和迁出而形成的区域逐步侵蚀。

图 8.8 具有涡线的迁移动力学^[8.16]图 8.9 具有极限环和不稳定源的迁移动力学^[8.16]

如果我们考虑三个区域的三个人群而不是两个,那么在非线性迁移模型中出现了确定性混沌的现象。某些数值仿真具有一个奇怪吸引子作为轨迹的终态。在其他情形里,相继的分岔以最终向混沌的转换而变得越来越复杂。

复杂系统探究方式的另一个实际应用是管理和组织社会学。^[8.17]实际上,现代企业为了能够在面对它们问题的日益复杂性时能够采取成功的对策,已经开始重新组织并分散它们的庞大组织。它们已经开始支持组织流动性,例如采用在环境需要时项目为中心的团队能迅速形成并重新部署的新路径。流动的组织比具有固定社会结构的组织显示出更高水

平的合作能力。面临社会难题时,流动组织显示出个体对策与结构变化之间非线性交互作用所引发的极其多样的复杂合作行为。

因此,这些社会群体的动力学可以用复杂系统来建模。计算机仿真能够对可能的行为模式发展提供全局洞见,这可能帮助管理者达到适当的发展条件。如果复杂系统模型是适用的,就理所当然地要排除集权管理者的长期预测和全盘控制。

模型包含有意向性的行动者,他们依赖个体偏好、期望、信念以及对过去的不完全知识做出选择。在某些阈值上,个体选择导致出现了合作模式。当主观感受为合作的那部分群体超过临界阈值时,行动者将采取合作。临界阈值取决于群体的规模以及从个体间相互依赖方式中涌现的社会组织结构。如果群体允许改变其社会结构,那么社会难题的合作解决潜力会提高。组织流动性的优点必须以可能的效率损失来平衡。一个组织的效能可以通过它随时间获得整体效用的能力来衡量。

在企业里,有一种通常从行动者之间情感纽带的形式中涌现的非正式结构,也有其层级制度所规定的正式结构。非正式结构是由一种自组织形成的,能够表达为社会网络的社会计量结构。这个方法可以追溯到20世纪50年代关于城市家庭社会网络的社会学探讨,已经被开发成为精致的计算机辅助社会学工具。^[8.18]从个体相互依存的微观视角涌现出一种关于社会结构的全局视角。

在图8.10和8.11中,这些结构被图示为树状。每个分支代表层级结构上更高层次的一个分部。在最低层次的模代表个体,用实心圆表示合作者,用空心圆表示背叛者。隔离两个个体的组织层的数量取决于模的数量,在树上从每个个体回溯直至一个共同的祖先。组织中两个行动者之间的距离用隔离层的数量来衡量。两个行动者之间的距离越大,其行动设想的相互影响越小。因此,这种树表示一个群体中聚类的数量和程度。

至关重要的问题是一个群体的结构和流动性如何影响其合作动力

学。流动性取决于社会结构中个体怎样容易移动,它们如何容易自行摆脱而扩展结构。在复杂系统的框架内,系统的宏观属性源自于组分之间基础性的相互作用,它们用非线性演化方程来进行数学上的模拟。[8.19]

格兰斯与休伯曼提出的图 8.10a—d 显示了固定社会结构中某些相变的计算机模拟,一个三层结构包含三个大聚类,每个聚类又包含由三个主体构成的三个聚类。[8.20]图 8.10a 聚类在一起的少数主体的行动,促发了图 8.10d 的最终整体合作。这些主体互相增强,同时还激励主体远离它们向更高一层次开始合作。这种合作的增加能够影响主体的合作,甚至在结构里更进一步远离。

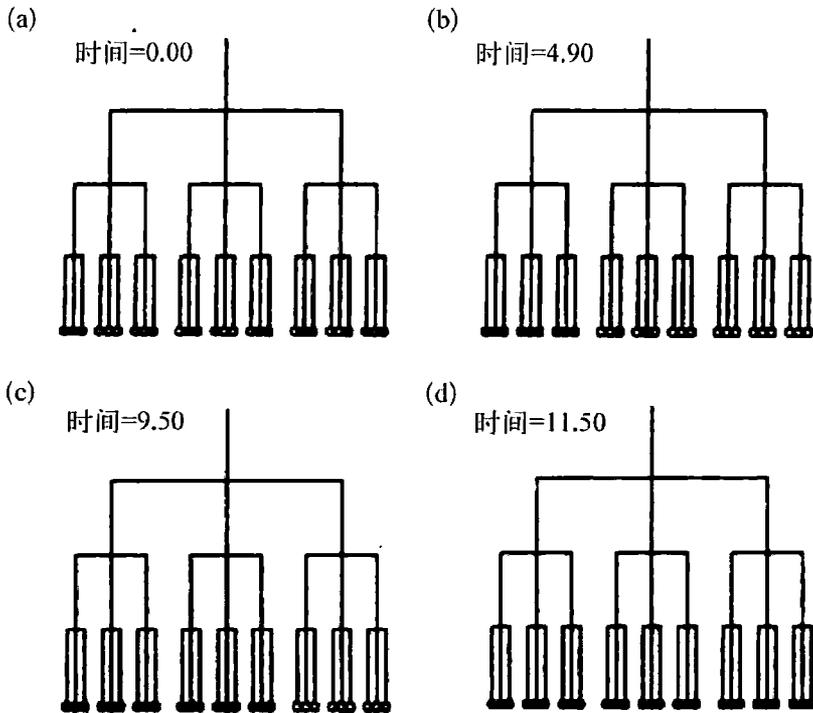


图 8.10 一个固定三层结构中的社会动力学

每个树的最底层结点代表个体,实心圆表示合作者,空心圆表示背叛者。[8.20]

在层级结构中一个微小的合作行动,能够促发广泛的转向整个组织内部的合作。此种增加合作的级联传递导致一个平衡的不动点。然而,

有着固定结构的群体能够轻易地超越合作得以持续存在的约束而生长。在这种情况下,群体迅速向整体背叛的平衡态演化。然而甚至在这些约束之内,在主体保持长时间合作的意义上,合作模式可能是亚稳定的,直至通过转向整体背叛而突然发生一种对称破缺。

在流动结构里,单个主体能够在组织内部移动。个体根据他们期望获得的长期利益来决定合作或者背叛。为了评价他或她在结构中的位置,一个个体会比较他或她保留原状的预期长期报酬与移到其他随机选定位置的预期长期报酬。在评价他或她的位置时,如果他或她感到没有损失的话,个体也会考虑离开以组成一个新聚类的可能性。主体怎样容易受到引诱而离开,取决于离开阈值,这个阈值被假定是随时间最大可能的那部分报酬。

图 8. 11a—e 显示一个流动组织内部相变的快照。^[8. 21]起初(图 8. 11a),分为四个聚类每个聚类四个主体的所有群成员正在叛离。图 8. 11b 显示,几乎所有主体已经自己挣脱。在这种情形里,主体更倾向于转向合作策略,如图 8. 11c 所示。由于不确定性,主体偶尔会在不同聚类之间转换(图 8. 11d)。当一个聚类太大,那个聚类里会开始转向叛离。在这个转换阶段(图 8. 11e),越来越多的主体自我挣脱,而且类似的发展继续重复。在模拟组织中已经观察到这类循环的频繁出现。

在城市生长(图 8. 4)或迁移动力学(图 8. 6—8. 9)的例子,模拟社会组织的计算机实验无法给出关于个体行为的确定性预测,但它们有助于人们理解社会动力学的敏感性和复杂性。因此,有可能达到适合的环境与条件,使得相应社会系统中的人类生存条件得以改善。

社会文化演化的模型必须考虑社会的多种互动部门。如果一个社会包含着耗散结构的重叠层次与部门,我们必须找到一幅适当的图像来说明这些如何发生。在涉及互动耗散系统的复杂发展,新宏观结构的涌现从长远看是一种非集中化的、非计划的事件。而且,每个部门包括多少有些不清晰的人类观念、情感以及推断,从而激励和启发着人的行动。它们

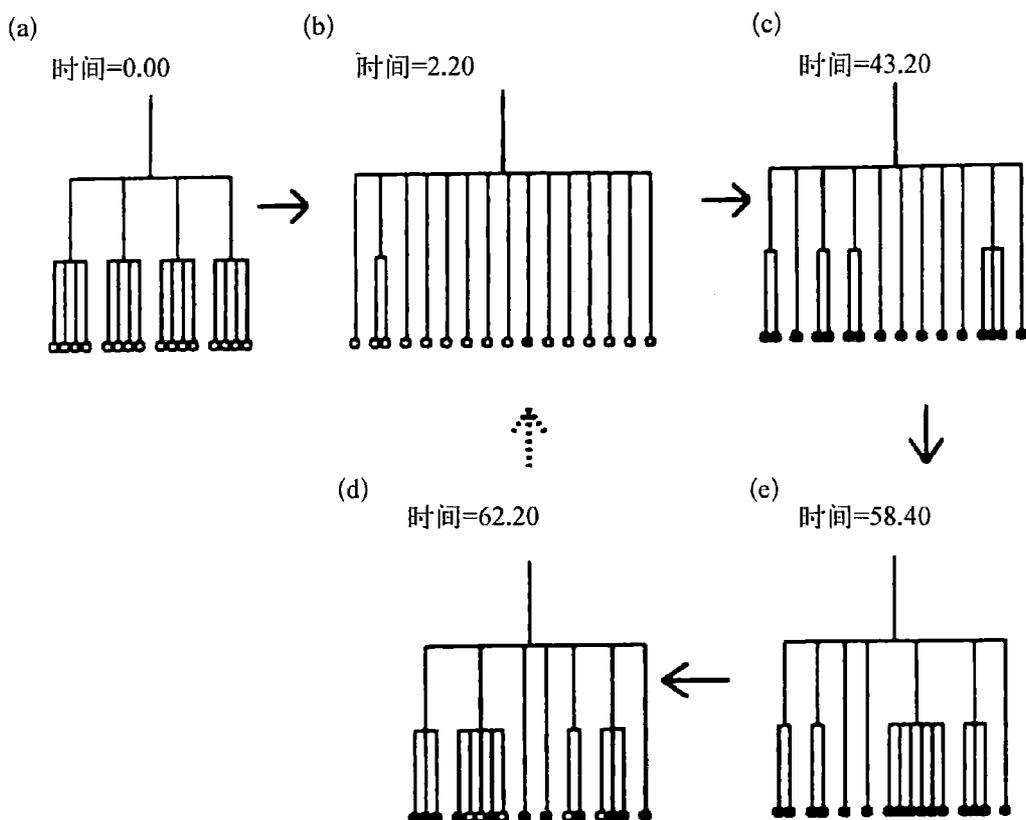


图 8.11 流动结构的等级组织中的社会动力学^[8.21]

不能被直接地鉴别为可测量的量,因为它们融入在一种称为“生活方式”的主流当中。然而,一个社会的生活方式是一种典型的社会文化宏观现象,依赖于多种可识别的互动因素,例如与经济、技术、工作、旅行、生态以及大众媒体有关的条件。

在现代,技术演化已经是变化的一个驱动力量,影响着无数的生活方式的方方面面。考虑到自组织进程,自催化是技术发展的一个显著特征,每个创新都催化着下一代创新。如果技术与社会演化被解释为一项技术、一种主流观念(“范式”)或一种人造物被依次替代的结果,那么从生长到饱和的发展就可以用相互依存的逻辑斯谛曲线形式来进行数学上的模拟。主张技术进步是通过一系列相变和置换的断言,意味着可以把它看

作一连串的逻辑斯谛曲线。每条曲线达到一个饱和水平。通过每个水平上的演化性创新,形成向新逻辑斯谛曲线的转换。

在第7章,我们讨论了技术的这些相变与经济的生长和滑坡有关联。计算机与信息技术的发展已经史无前例地在几乎所有部门都影响了人类的生活方式。生产越来越复杂的计算机和信息系统与一个准演化进程似乎是可比的。计算机科学家在谈及新一代计算机盖过老一代计算机的复杂性时,采用了斯宾塞的专用术语。实际上,系统功能的复杂性已经提高了。然而另一方面,以诸如计算时间来衡量的问题复杂性则降低了。问题复杂性的减少,是这些技术的准演化进程的一个序参量。

计算机与信息系统在社会文化发展中已经成为至关重要的技术,以一种准演化进程演进着。这种进程的复制子,是任一个构成文化的信息模式而且在人与人之间有变异地扩散。因为人不像分子或原始有机体,有着自己的意向性,信息模式的扩散过程的实现不是通过机械的模仿而是通过传播。通过与基因类比,这些复制子有时被叫做“糜母”。^[8.22]它们包括理念、信仰、习惯、道德、时尚、技术等等。

任何通过信息传播能够扩散的模式是一个糜母,甚至当它的人类主人不能描述它或者没有察觉它的存在。重要的是认识到人类文化的复制子是糜母,而不是人。我们改变我们意识的能力使文化演化得以进行,不是通过人的选择,而是通过卡尔·波普尔所宣称的“让理论替我们去死”。^[8.23]

在复杂系统的框架内,我们当然可以在数学演化方程的抽象意义上谈论系统的“演化”。具有其独特生化机制的生物演化,只是刻画复杂系统的通用数学方法的一种特殊模型。因此,人类文化的演化特性不可还原为生物演化的生化机制。然而像“糜母”这样的概念不应被误解为只是一个社会达尔文主义的行话。它们可以描绘复杂系统的基本特征,可以在数学上定义并且在经验上检验。

在这个意义上,一个世界通信网络的发展可以解释为复杂系统的演

化,它帮助人类当中糜母的扩散并且建立一个糜母生态系统。^[8.24]糜母构成的人类文化是多样的,它们的变异和选择机制也是如此。经济市场多多少少是向他们自己的人类社会环境开放的。它们在大范围或多或少严厉强制的规则之下运转,如被加上了各种法律和管理制度。

在人类社会,法律系统和政府活动为市场提供一个框架。在复杂系统的框架内,它们并没有逃脱演化的力量。它们以其法律的变异和选择机制在政治生态系统内演化。^[8.25]一些政治糜母,像政治愿望、口号或纲领,可以成为一个社会的动力学相图里的吸引子。在一个开放的民主社会,它们可能出现,但也可能衰落,如果它们的吸引力因为竞争选项的选择压力而下降的话。

8.3 复杂通信网络、信息检索和个性化信息系统

自然进化并非只专注于基于神经信息处理的具有更高智能的单个有机体。在物种和种群,我们观察到,以群居、群体、机体外信息处理的分散式智能更高的能力实现更高适应性。在社会学,蚂蚁与白蚁群通过群居智能来组织复杂运输系统、信息通信系统。在它们营地之间复杂路径网络的建构上并没有中央督导者。系统的秩序是根据数千个体间化学信号而形成的自组织。在人类历史上,复杂运输与通信网络的出现伴随着或多或少的自组织行为。电话网与铁路网受到全球调度枢纽的监控,而街道网的车流则取决于本地驾驶员的行为。所以,汽车交通可以看作是一种复杂动力系统,具有典型的振荡(“停与走”)、阻塞以及混沌现象。

管理现代社会复杂性的能力,决定性地取决于一个有效的通信网络。像生物大脑的神经网络,这个网络决定了有助于人类生存的学习能力。在

复杂系统框架下,我们必须模拟遍布其经济与文化环境的信息技术动力学。因此,我们论及信息生态与计算生态。实际上已经有实现的例子,像那些应用在航班预订、银行联网或研究实验室,包括由许多不同类型计算机构成的网络。

不完全知识和滞后信息是无中央控制的开放计算系统的典型特征。这些巨大的网络,出现于不同计算机辅助信息中心之间日益增加的连接性,正在成为不同于他们单个程序控制部件的自组织系统。他们非预期的生长导致了技术构成与用途的巨大多样性,伴随着日益增加的相互操作困难。独立机器人世界奴役人类文化的可怕前景,也许是一些令人不安的可能场景的最终后果。

随着不受中央化处理器规划的地方信息与计算机中心在世界范围的成长,似乎有一个应该以复杂系统框架进行研究的非线性动力学。甚至简化的案例研究,也将为现代社会文化演化的复杂动力学提供至关重要的洞察。计算生态的复杂相互依赖违反了把层级结构分解成为技术、产业或行政模块的传统要求,像传统管理中使用的那样。现代技术通信网络是正在成长的开放系统,其使用必定不需要来自其他主体(例如机器或人)的中央控制、同步性或者连贯的数据。因此,包含不完全知识和滞后信息特征的信息生态与计算生态的动力学理论将提供众所周知的演化模式,例如不动点、振荡或混沌。

不完善知识导致一个最优性缺陷,而信息获取的滞后会引发涉及主体数量的振荡。为有限资源而进行的合作与竞争,可能出现协同效应。混沌阻止了任何稳定的解题策略。采用解决一系列相关问题并彼此互动的近乎独立主体,马文·明斯基研究了一种简化的合作解题模型。在20世纪80年代末,这个例子已经被用来为计算机辅助信息系统构成的分布式系统设计模型。^[8.26]

复杂性增加的大量计算系统势将充斥这个世界。^[8.27]其中会有传统

冯·诺伊曼机、向量超级计算机、共享内存多处理器、连接机、神经网络模拟器、像阿米巴那样充塞世界的数百万台个人电脑,以及未来的分子机器。这些计算系统正越来越多地链接到诸如卫星、电话和光缆等信息系统。自组织的全球软硬件系统的观念已经成为现实。在这戏剧性的一步,复杂系统探究方式从神经网络已经被拓展到诸如万维网的全球技术信息网络。在1969年,一个计算机辅助信息网络在美国国防部建立起来。如今它已经成为一个拥有175 000台计算机、936个子网和无数人的剧增网络的核心。互联网的生长并非计划或受控于任何中央处理单位,而是一个多少有些无政府的过程。尽管如此,组织的模式出现在一种全球自组织的混沌或/与衰减之中。

在复杂信息网络,知识与信息分布在多个中心和个体程序员。它们的复杂性排除了中央计划。像所有涉及目标、资源和行动的系统,计算已经以经济术语来描述。显然,已经存在一个采用市场机制的软件与硬件计算市场。如第7.2节所述,市场是自组织复杂生态系统的一种形式。根据亚当·斯密的根本洞察,消费者选择的力量会使计算市场生态系统服务于人类的目的,远超过任何程序员或中央处理器可能计划或理解的程度。其原因是与人类市场关联的计算生态系统的巨大复杂性与多样性。

读者也许会记得具有像细胞、器官和有机体等多个层次生物生态系统的复杂性。计算生态系统的要素也类似地以其计算系统的复杂性增加而在不同层次上聚集。图8.12表示全球USENET网络,其成长源自许多地方主动性。^[8.28]这个网络在20世纪90年代初被作为互联网一小部分的状态,如图8.12所示。

今天,互联网可以被看作一个自主节点(主机、路由器、网关等)的复杂开放计算机网络,没有中央控制机制的自组织。通过互联网与计算机通信,用适当计算机语言(比如,HTML)表达的一条消息(例如,e-mail),在它作为比特包可以通过网络从发送者向接受者发送之前必须在多个协

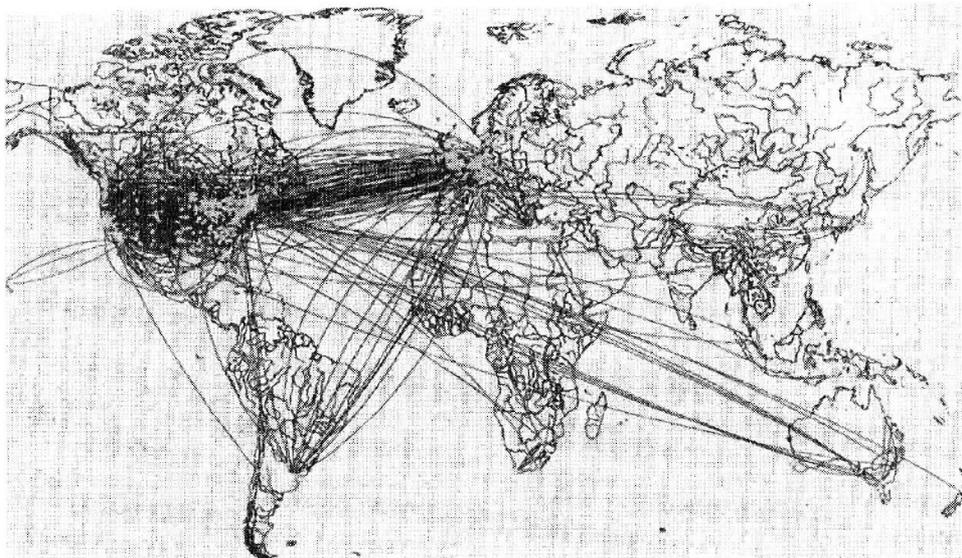


图 8.12 20 世纪 90 年代初的全球联网^[8 28]

议层中被编码和管理。计算机网络中的通信是由(例如)国际标准化组织(ISO)的 OSI 模型来实现的。

信息流是由带有源地址与目标地址(例如,IP 地址)的数据包实现的。互联网与元胞自动机和细胞神经网络在以下意义上具有共同的本地活动概念:路由器是采用到达邻近路由器成本测算的本地路由表决定每个数据包本地路径的网络节点。路由器转发每个数据包给一个相邻路由器,以最低成本,到达目的地(图 8.13)。在元胞自动机和细胞神经网络范式的意义上,本地路由表可以被看作是本地非线性信息处理的“模板”。

由于路由器一次只能处理一个数据包,其他到达的数据包必须存储在缓存区里。如果收到的数据包超过缓存容量,路由器会丢弃那些溢出的数据包。数据包的发送器等待来自目的地主机的确认消息。路由器的这些缓存和发送活动会引起互联网阻塞。信息包阻塞的波动通过相邻路由器之间控制消息的响应实验可以被直接观察。两个路由器之间一台监控主机定期发送一系列响应包给两个路由器。数据包用一个往返时间(RTT)到达目的地并返回。阻塞与高 RTT 值有关。RTT 波动随着互

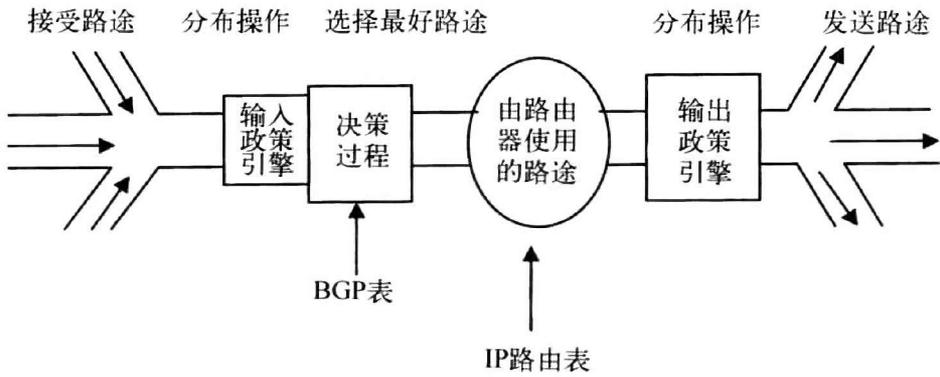


图 8.13 互联网的路由节点^[8.29]

互联网上路由器的顺序增加(图 8.14)。

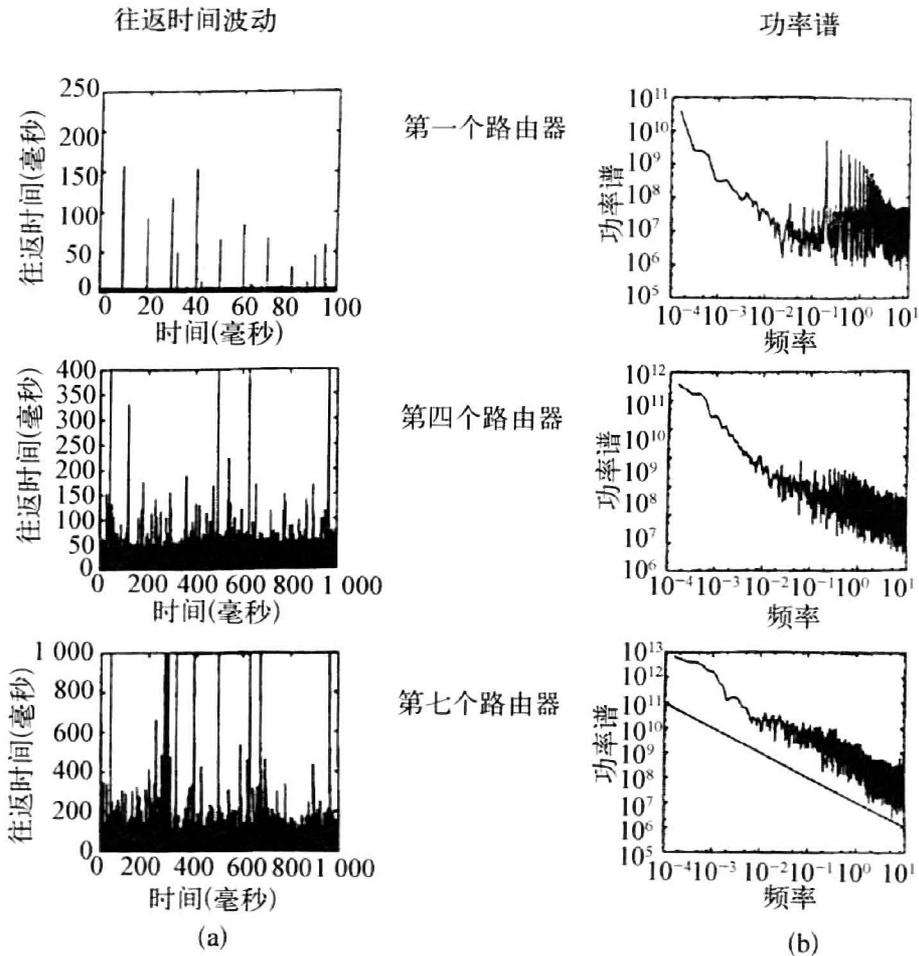


图 8.14 互联网路由器 RTT 数据波动的时序与功率谱^[8.30]

在汽车交通系统里,从非抑制到抑制的相变取决于作为控制参量的平均汽车密度。在一个临界值,可以观察到具有自相似性和幂律分布的波动。从这个类比,用一个路由器到相邻路由器间阻塞的传播与每个路由器阻塞的解除来定义一个数据密度的控制参量。^[8.31]阻塞期间的累积分布,是模式形成的一个序参量。空闲相与阻塞相之间存在相变。空闲相对应于信息系统平均输入小于最大输出的情形。临界点的条件是平均输入率等于最大速率(图 8.15)。

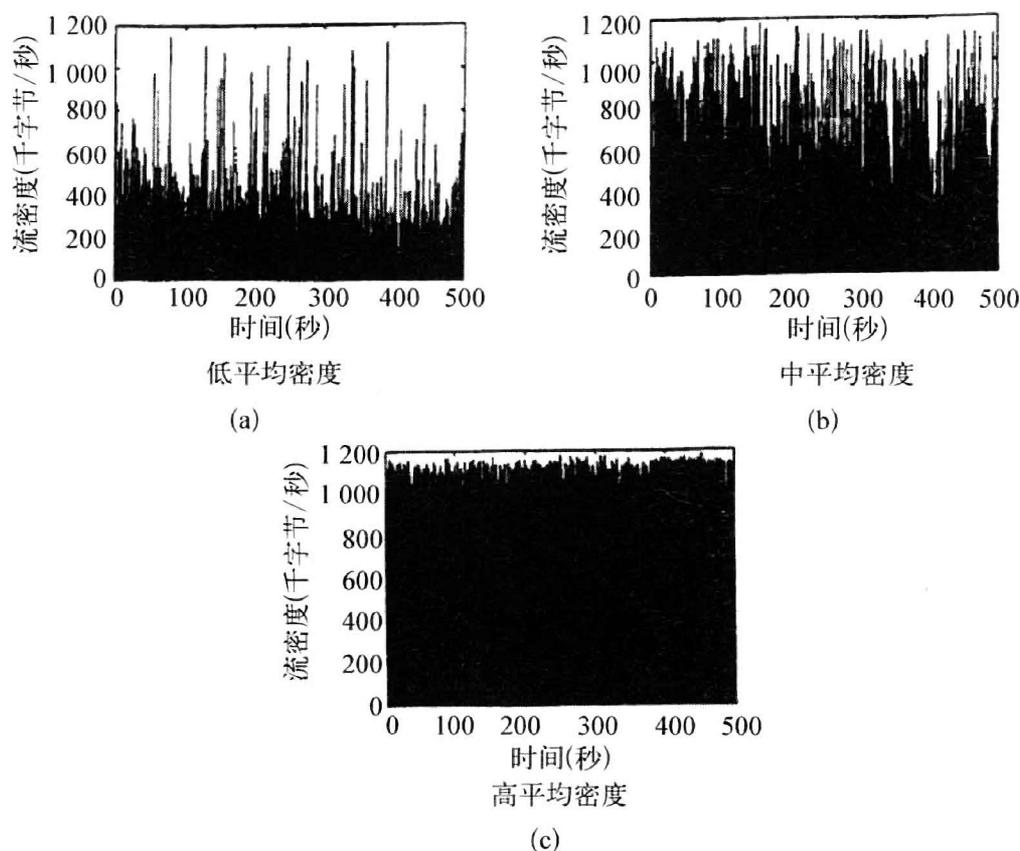


图 8.15 低、中、高数据流平均密度的相变^[8.32]

在临界点处,当阻塞传播率等于阻塞解除时,可以在数据流里观察到分形与混沌特征。在不同的时间标度上,我们可以分析信息包波动的自相似性,它是奇怪吸引子(对比第 2.6 节)的必要(而非充分)条件(图 8.16)。

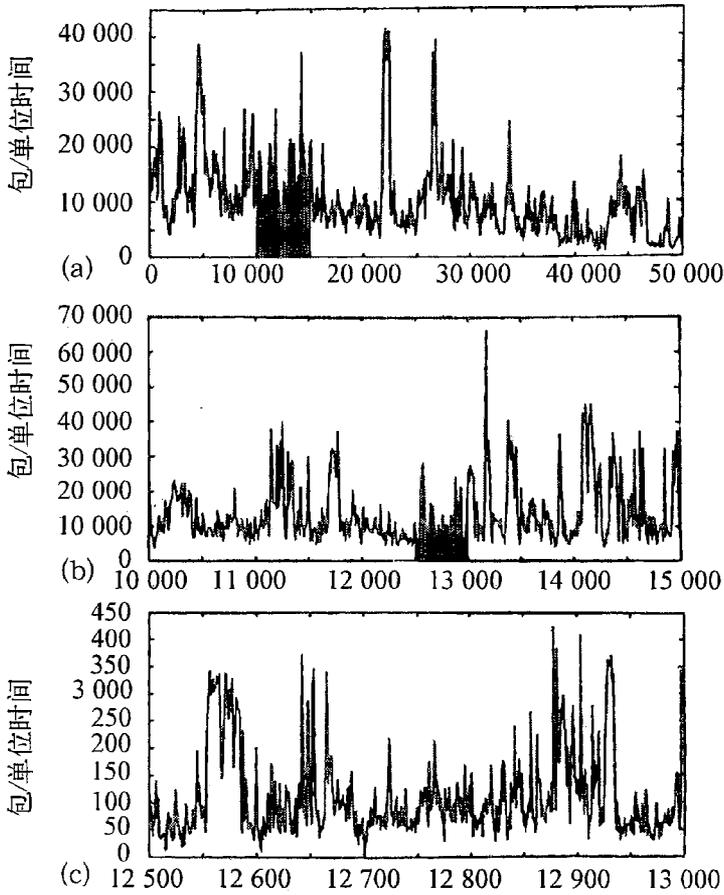


图 8.16 在不同时间标度上(“奇怪吸引子”)信息包波动的自相似性^[8.33]

阻塞缓存区的表现惊人类似于感染人群。如果缓存区变成过载,它会尽力向其相邻路由器发送数据包。因此,阻塞在空间上扩散。另一方面,当进出其子网的阻塞低于路由器的服务率时,路由器会恢复。联系路由器的动力学描述疟疾的流行过程不仅是说明性的隐喻,也提供了一条有关非线性数学建模的线索。所以,产生非线性波传播的适当元胞自动机和细胞神经网络将能够模拟万维网的数据流。^[8.34] 计算网络与信息网络已经变成技术的超机体,以一种准进化的过程演化着。计算机网络是计算生态。如果互联网是高度复杂的信息网络,那么我们必须混沌条件下以信息损失的代价管理信息流动。“丢失在网络”是用来描述此类增

加复杂性问题的一个流行口号。

在多少有些混沌的互联网上,信息洪流是对智能信息检索的一个挑战。^[8.35]互联网上信息检索(IR)可以是用来在某些约束条件下评估和选择最相关文件的决策过程。在二进制(布尔)逻辑,对于一次信息查询而言文件是相关(1)或者不相关(0)。在模糊逻辑,它在 $[0, 1]$ 区间内有一个相关程度。每个文件被特征化为关键词。一次查询是逻辑上关联的关键词的一个命题。如果相同关键词出现在文件里和查询的布尔命题中,这个文件是相关的。查询和文件可以在几何上表达为一个关键词向量空间里的向量。文件或查询中关键词的相关性根据坐标来加权。查询与文件之间相似性,用它们的代表向量之间夹角的余弦(在0和1之间取值)来衡量。

为了改进信息检索,也应用遗传算法。遗传算法以复制、变异和选择在次序世代中优化染色体的种群。在信息检索中,它们被用于优化文件的查询。一条染色体是一个文件序列,被刻画为二进制码的权重关键词。经过扩展,种群是一系列染色体。变异是二进制数的随机变化。相续二进制码被合并。适应性程度衡量文件的相关性。选择就是文件种群的评价。

把互联网看作具有学习和适应等自组织特征的超级大脑,不只是一种隐喻。^[8.36]我们会采用大脑的模拟作为管理互联网上信息洪流的启发式设备。信息检索已经用神经网络实现,它以突触可塑性来适应人类用户的信息偏好。多层神经元网可用来优化文件查询(图8.17)。神经元之间的突触联结(“权重”)根据学习算法而改变。神经网的拓扑学包含用户信息偏好 $q_{ui}^{(s)}$ 在状态 s 以关键词 t_i 查询 u 的输入层、关键词 t_i 的神经元层、文件 d_i 的神经元层、查询结果的输出层。文件中关键词的相关性,对应于关键词与文件神经元之间的权重。若加权输入的总和超过临界阈值,则神经元发放。学习算法用传布来传递第一次查询的结果。用户偏

好的偏离被加权并传回给关键词与输入层(“回传”)而且在多次迭代的期间被改进。

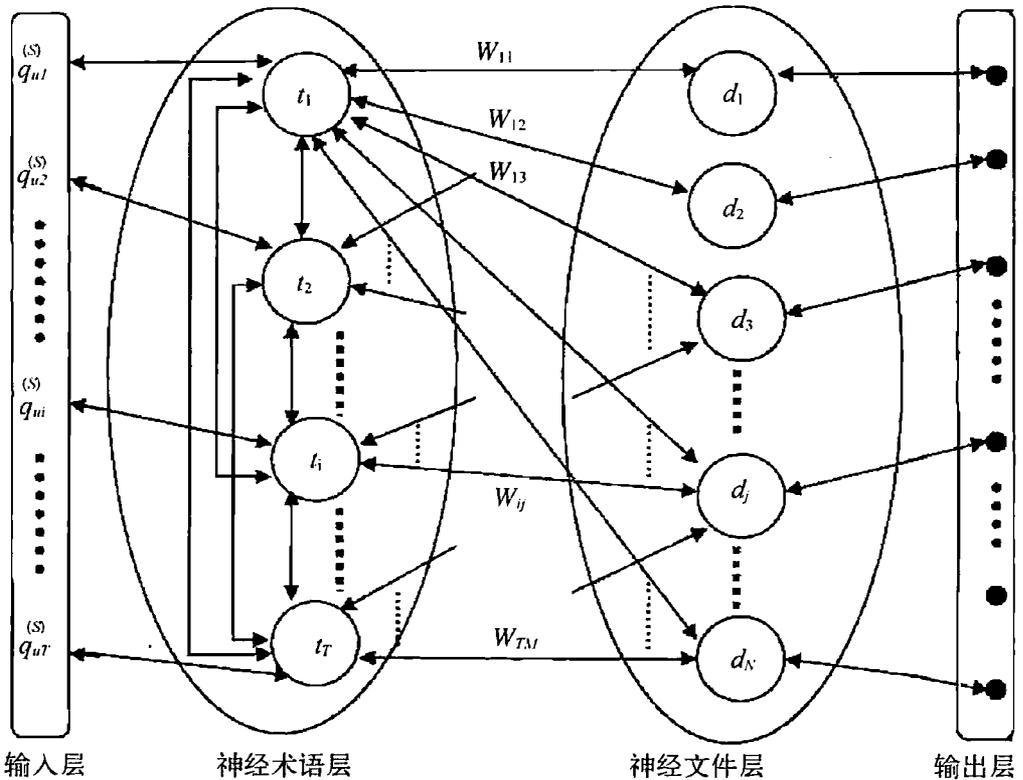


图 8.17 以多层神经网络进行信息检索^[8.37]

大脑中的神经元映射(例如,视皮层)用神经元簇群生成外在世界的表达。科霍宁的自组织映射以同样的方式工作(图 4.14)。它们被用于检测文件之间的语义相似性,簇群中自组织。神经元网中的每个神经元(输出空间)被关联到一个神经元活动的权重(输入空间)。例如,不同国家的 245 个文件被刻画为 952 个加权关键词。在一个 10×10 的映射中,根据文件的输入格式把神经元与国家和地区的名称关联起来。^[8.38]具有相似属性的国家和地区在相邻簇群自组织(例如,岛屿,西欧,东欧,南美,以及非洲)。

在社会学,我们可以向蚂蚁和白蚁种群学习如何通过集群智能来组织交通和信息处理。从技术的角度看,我们需要遍布全网的智能程序。已经有具备不同程度智能的虚拟有机体(代理人),学习、自组织以及对个体信息偏好的适应,帮我们选择电子邮件、准备经济交易,或像人体免疫系统那样防御敌对计算机病毒的攻击。虚拟代理人被设计成具有不同程度的自主性、移动性、反应性以及用于通信的学习能力。它们与作为本地影响范围的虚拟环境进行通信与合作。

定位于特定服务器的静态代理或移动代理可以作为比特码发送到万维网,执行它们的服务而无须客户与服务器之间的在线联系。电子商务对于复杂性研究是一个挑战,因为它只能靠虚拟代理人帮助管理,支持经济交易。在未来,遗传算法会使我们能够在虚拟生命的复杂演化中繁殖代理人种群。为了根据用户查询来优化信息检索,代理人种群可用遗传算法来进行自我复制。代理人从用户资料开始并权衡文件的相关性,例如通过确定关键词与所查询的关键词之间距离(链接数)。代理人的“生命能量”随着查询的成功或失败而增加或减少。成功的代理人获得选择,变异其基因类型,自我复制。^[8.39]

初始化代理;

从用户获取查询;

当(有一个活代理){

 得到当前代理指定的文件 D_a ;

 随机指定代理 a ;

 选择一个链接并获取选择文件 D'_a ;

 计算文件 D'_a 的相关性;

 根据文件的相关性升级能量(E_a);

 如果($E_a > \epsilon$)

适当地设定父代和子代的基因型；

变异子代的基因型；

否则如果($E_a < 0$)

杀死代理 a；

{

更新用户资料；

在计算生态系统与生物生态系统之间的类比^[8.40]并不意味着任何还原主义或生物主义。在复杂系统框架,计算生态系统与生物生态系统只是刻画复杂系统非线性动力学的数学演化方程的模型。根据明斯基的研究,全世界计算机辅助网络可以解释为一种“集市”或“心智社会”。^[8.41]

哲学上,这种新型的全球“知识媒介”或计算机辅助“智能”也许让我们想起黑格尔有关“客观精神”的理念,它嵌入在人类社会及其法律系统、经济、官僚系统中,克服了人类个体的“主观精神”。^[8.42]然而,这些计算生态系统没有人类个体的大脑神经系统所拥有的意识和意向性(对比第4章)。

尽管如此,还是出现了是否可以把计算生态系统在某种程度上称为“智能”的问题。接受智力测验的个体,是根据他们使用为测试目的而提供的时间达到测试设计者所设定目标的能力来判断的。在这个背景下,智力不是形而上学的一般概念;相反,他们是一些或多或少被充分定义而且可测试的行为标准。有些作者提议,判定一个社会的“智力”,类似根据社会使用为此目的而提供的资源达到某个合法子群(例如,国会)所设定目标的能力。“智力”的等级依赖于可以实现的目标范围,目标可以达到的速度,以及所使用工具的效率。这些定义的细节可能改变,但基于这些概念的“智力”实际上是指涉整个系统的宏观特征。这些定义的实践目的

是比较计算生态系统与它们成功解决问题的程度。相反,像国家集体“智力”的术语在意识形态上是危险的。而且,我们应该意识到,从概念(比如意识)来辨别技术上的智力标准,意识实际上在生物演化中已经被某种大脑神经网络的自我指涉性所实现了。

信息生态系统与计算生态系统的生长是与社会的一个根本变迁相联系的,其特征是从解决商品的传统产业到信息的知识产业以及信息服务经济的转化。信息的生产、分配以及管理已经成为现代知识社会的主要活动。所以,人与信息系统之间的界面必须被连续改善,以实现世界范围人类通信的理想。人的表达手段(例如言谈、手势以及笔迹)应该被计算与信息系统迅速理解。“完人范式”和“人机网络”是未来通信世界的重点。

人类通信不仅涉及到信息的比特串,也涉及直觉、情感和情绪。未来通信世界有时又叫“地球村”,以强调被高技术环境所创造的熟悉程度。但它的被认可,决定性地取决于人类友好界面的实现。我们必须考虑与人类直觉与情绪有关新型复杂性。古老理想从这些人类生活本质的合理性抽象是对人类世界的完全忽略。甚至科学研究的过程也受到人类直觉的启发并受人类情绪的驱动,这在未来通信世界里必须被纳入考虑。

有些人担心社会文化演化的最终吸引子将不是地球村或世界城邦,而是庞大的“利维坦”利用现代高技术程序的效能统治着人类。在计算机化的虚拟现实世界里,所有人类表达手段都将被数字化而不留任何私下亲昵的空档。然而社会文化演化的复杂性可允许多种吸引子。它们不能被人类决策所预测或支配,但它们会受到人类能够到达的条件和约束的影响。在高度复杂的世界中,人类自由的机会是什么?在具有高度非线性集体影响的世界里,个人责任的程度是什么?这些问题引出了有关复杂非线性世界伦理议题的结束语。

万维网用户的有限合理性是对信息学的一个挑战,尤其是考虑到有

关提供丰富多样信息资源访问的网页应用与服务的复杂信息。获取有关个体用户想要和打算要什么的精确描述是关乎使命的任务,尤其是在依靠表达其个体需求的用户的一些计算机科学领域,例如根据用户的查询搜索数据库和信息系统、在文件集中检索媒体,或在网页服务或电子商务 workflow 中遭遇选择问题。

在实用系统执行上,这类信息通常是从用户资料或某些明确表达的偏好简化而来的。用户建模牵涉到要力求充分描述用户的那个兴趣会影响一项计算机应用。然而,心理学研究表明,用户通常没有充分意识其确切愿望,甚至在有目的的工作中亦如此。^[8.43]要使出版/订阅系统个性化,通常要求一个乏味的过程(例如服务或兴趣领域)的手工选择。此外,假设有些知识被吸收,其显现信息自然是不完全的,而且如此简单地记录、储存和使用用户叙述关键词/行为有时会导致有悖常识的结果。因此,为了改善个性化系统功能的相关性,一个系统必须不仅专注于清晰的用户说明,而且应该把用户不清晰观念、处境所指示的信息,或假想的共同知识纳入考量。这个信息可以从四个来源获取^[8.44]:

长期偏好: 来自先前互动或一般关于用户的可用知识的相关性观念。

意图: 在对系统进行个性化时,包括特定用户要求互动的理由。

处境: 用户当前状态与环境被用来决定特定偏好或规则是否可用。

领域: 用在一项互动中的特定领域知识(通常指专业知识)。

在以下例子中要考虑典型的个性化信息系统。长期偏好包括代表个体品味的典型常年个体偏好,像颜色、一般兴趣领域或所喜欢的版面设计。这类偏好一般可以用在对个体用户的系统进行个性化,因此这是通常储存在用户资料的那一类数据。然而,系统并不总是依赖于这些偏好,因为不同偏好可应用在不同类别或偏好只是在某些语境中不可用。例如,在电子商务设置中考虑一系列颜色偏好。虽然,一个用户可以被设想

具有某种喜欢的颜色,这将应用在购物决策,然而这个颜色偏好对于衣服和汽车而言也许是不同的:比如,这个用户可以喜欢开红色汽车,但也许不喜欢穿红色衣服。此外,当购买图书时颜色偏好变成完全不可用,因为基于颜色购买图书的情形是有些罕见的。^[8.45]

较不一般但更有趣的是,个性化工作的种类被后三个类别所涵盖。在例如购买图书的现实应用中考虑意图。个性化的书店(包括像 www.amazon.com 那样的互联网门户)通常会维护一个推荐书目,它是基于先前互动(比如,主题类别的长期档案)中读者表示兴趣的话题编排而成的。现在假设同一个用户走进书店意欲购买礼物给一位熟人。在多数情况,这份礼物的购买将会基于该熟人的偏好;因此用户资料在这个情况就不可用,而且所访问的互动或话题不能被用于更新该用户的个人资料。在这个例子里,用户的意图——为他/她自己或为别人买书——是完全不同的。因此,(假想的)用户意图将有助于界定该用户将被个性化提供的选项,以及该用户在与系统互动期间的某一点上会要求哪个特征。把意向纳入网页系统的典型实例是适应性超文本应用,用户以前的互动和当前的导航模式被用来对用户的环境进行个性化。^[8.46]

当下的处境也影响对系统怎样个性化。在执行个性化时,语境敏感系统使用来自用户直接环境(时间、地点)、个人特质(比如情绪状态)、技术特质(例如客户设备容量)的线索,或某种高级处境信息像“用户在一次商务会议上”或“用户在家”(这两个都是社会处境的实例)。使用这种方法的系统的实例有基于位置的服务、基于处境的通信路由或语境敏感的多媒体内容合成。^[8.47]

所谓的“专家系统”是那些基于领域知识,即最后一类个性化偏好的最享有盛誉的实现,“专家系统”包含着源自该领域专家的领域知识,通常还伴随着有关这些知识如何应用于特定情况的演绎规则。然而,绝大多数专家知识并没有根据规则表达出来,而是体现在专家自己身上。^[8.48]

因此,我们不能简单地只在专家系统的意义上考虑领域偏好;相反,我们必须依赖于专门领域的启发法,例如哪些一般偏好可利用(以及用哪种结合),或者在某个特定领域内用户一般在意什么。这背后的理念通常是指共同知识或世界知识——在某一领域内所有互动的人们被假定为了解的或含蓄地共享的关于环境的知识。本体论提供了向这些领域内非专家的人们表达此类知识的一个好途径。在今天的系统里,后面三类偏好——如果完全包括——通常被直接内建为应用逻辑并存在于具身心智,这不同于收集起来的个体长期偏好,即偏好构成了用户个体档案。

让我们考虑两种专门应用研究,在其中我们可以看到为了解决信息洪流的复杂性而被用于改进系统个性化的具身心智的组成,被适当偏好所描述。要达到有效的个性化,来自上述讨论的所有四类来源的知识必须与用于一项个体互动的特定的用户提供的细节/关键词混合。虽然并非所有具身知识都可以用此类途径获得,这个办法在有限合理性观念下还是提供了一个对系统进行个性化的有用途径。

首先考虑数据库与信息系统的个性化信息搜索以及进行检索。仍在主导今天数据库应用的经典关系模型使用关系代数来界定刚性选择谓词,它支持从(通常)大数据集中根据某个特征选择目标。尽管这个模型可应用在一些简单的案例,比如当需要检索某个银行账号的客户信息,而在为用户提供用于完成他/她的任务所需信息的时候现代信息驱动环境需要某种比较模糊的能力。在绝大多数实际应用中,例如网络搜索引擎,信息搜索会出现要么空白要么太多结果。在一项必要模糊的任务(比如信息搜索)中如果用户请求一个非常专门的查询,这次查询也许会过度针对性(比如,选择了过分特定的关键词),导致对用户没有帮助的空白结果。另一方面,请求相当非针对(例如,不够针对性的)的查询注定会导致信息泛滥。在这种情况下,许多项目多少接近于匹配用户的需求。然而,因为用户不知道底层数据库或信息收集的内容,他或她只是不能预期知道

他们的查询应该如何的针对性以检索到有用而且可管理的结果集合。

显示个体用户兴趣结构的偏好或对某个领域话题理解的共同层次进行建模的本体论可以有助于解决这个问题。使用针对用户偏好的查询扩展源自合作解答的观念。^[8.49]在合作检索系统背后的基本理念是,放宽那些用户指定的关键词直到在一个数据集里能够找到一个匹配项。^[8.50]在这个情况,甚至一次过度针对性的查询也能产生一些有用结果,避免空白的结果集而且绕过任何乏味的手工改良查询的需要。作为软约束,这种处理查询谓词的方式,在使用没有清晰表达的个体偏好来为一次特定的互动进行任务个性化的时候这也是必要的。因为它们是为了表示从长期档案、意图、处境或领域查明的共同或具身知识而被系统不清晰地假设,它们必须被看作比任何清晰提供的项目更不重要(即,它们是软约束,可以用来改进太过庞大的结果集合,或当检索得到一个空白集合时可以被放宽)。一个偏好系统可以用单纯“我喜欢 A 胜过 B”语义的严格偏好次序形式引入数据库查询。^[8.51]例如,当搜索租赁汽车时,用户可以指定更喜欢自动挡汽车而不是手动挡。如果检索得到符合所有基本要求的两个供应商,那么可以根据符合换挡偏好的要求对结果集进行排序或甚至将结果集限定于这些换挡要求。单一偏好(例如汽车换挡类型)可以被模型化而且并入更复杂的查询,通过使用派生帕累托集合(即,根据经济学的帕累托原理,所有偏好被看作同等重要),优先化集合(即,次序被强加在偏好之上,比如字典序),以及排序结果集(即,使用合适的效用函数来集中有关数字领域的偏好)等。

作为第二个实例,为了以个性化方式构建复杂工作流程,让我们考虑有用网页服务的发现或适当服务的选择。^[8.52]服务导向的应用基础设施正变得越来越普遍。随着互联网变得无处不在,网页服务范式有望永久地改变现代商业世界。这种新型服务范式的必要构成是基于互联网的模式化应用,它为不同商业单位之间或商家与顾客之间的有效而且有用的

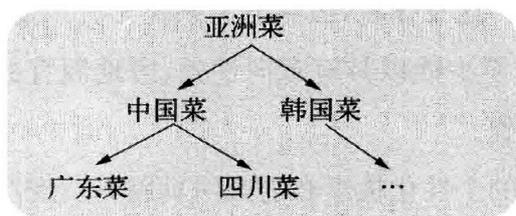
条件提供标准接口和通信协议。在一些工作流程中普遍存在的基本构件(或执行)可复用性,以及可能在复杂工作流程内的简易定制,是这些服务特别吸引人的特征。然而,正如上述我们为了信息搜索所注意的那样,仅仅基于精确匹配的检索模型是不会成功的。用户一般更感兴趣于完成高水平的工作而不是一些明确的中间步骤。因此,确切指定所需服务的全部特征而不是所考虑工作流程的更模糊理解,通常是适得其反的思路。由于网页服务的复杂性与多样性可望增长,将需要用于服务发现与选择的增强技术。

当他们开始设计一项服务时,比如餐厅预订或航空订票服务,供应商对于服务应该提供什么以及期待何种互动已经有了相当有针对性的想法。所以供应商是领域专家,能够提供一系列有用的领域偏好或甚至类型化的本体论,类型化能够促进服务成功执行/构成,甚至对于非专家用户也是如此。此外,供应商也期待服务(可能在不同情境里)可以被使用的不同方式。一般而言,只有某些典型需求/商务过程会在充分界定的服务中存在。这些典型互动对于不同的用户/群体也是偏好模式或使用模式允许有个性化的方法。一种使用模式也许依赖于某个重要用户群体的基本意向。不同意向将要求不同模式,依赖于表达他/她有关服务有用性的观念或愿望特征(像执行成本、质量保证等等)的用户档案,和用来执行实际商业任务的服务档案。为了在合作方式中支持用户,在获得零结果集时放宽需求的基本思路在这种情况下也是必要的。

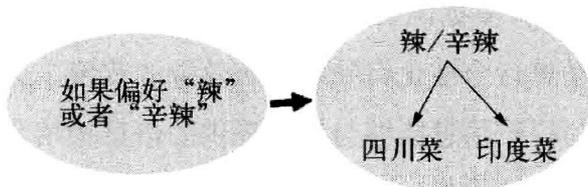
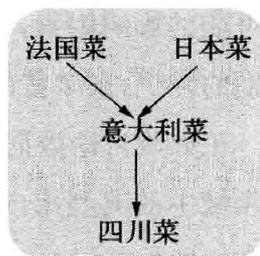
为了说明不同偏好类型的一些实例以及如何获得它们,考虑一种餐厅预订服务。选择餐厅要考虑的最重要参数之一是菜肴类型。任何餐厅使用菜肴参数都可以被适当地特征化,但查询会是一个繁琐的过程,如果它没有得到合作性地支持。例如,如果用户想到坐落于某个特定城区的四川菜餐馆用餐,这样的查询也许是太有针对性而得出一个空的结果集。另一方面,只询问亚洲菜馆也许会得出相当没有针对性的供应,包括中国

菜、日本菜、印度菜或泰国菜选项的大集合。合作系统可以采用的一种东西是明确偏好(以当前服务请求的方式明确指定或源自同样用户的以前互动)。这样一种偏好可以指定比如用户喜欢四川菜胜过意大利菜或胜过法国菜与日本菜(见图 8.18)。

(1) 基于本体论的世界模型



(3) 明确用户偏好



(2) 使用模式/概念倾向

图 8.18 用个性化信息系统从复杂信息世界不同来源推出的偏好^[8.53]

当这种偏好不是明确给定,服务供应商可以猜想一些信息。比方说,可以假设来自地理上邻近地区菜肴之间相似性的一个通用观念,基于这样的推理:相似地理区域的菜肴涉及同类原料、香草以及香料。一种可能的猜想因而是,既然川菜是一种特定的中国菜,其他中国菜(像广东菜)对于查询四川菜的用户而言将会是可接受的替代。要表达这个知识,可提供如图 8.18 所示的一种针对领域的本体论,在查询零结果或没有明确表达偏好的情况下可用来放宽用户的查询请求。作为用户意图的应用实例,考虑图 8.18所示的使用模式(或概念倾向)。如果我们假设一个用户喜欢辣和香辛的食物(即,用户有一种相当基于口味的餐厅类型相似性观念,而不是上述基于地理的观念),那么一些菜肴(像印度菜或墨西哥菜)会比地理邻近的菜肴更接近四川菜(以辛辣闻名)。因此,如果一个用户已知预订某

种特定口味,一种更具针对性的模式会被用来放宽合作性检索请求。

本节集中讨论了用于复杂信息世界中个体化任务的知识表达。讨论始于这样一个理念,即并非所有的用于个体化任务的最相关信息,都可以从专家信息得出。这是因为,信息体现在个体用户之中(这和当前的脑科学研究相符合)。当在有限理性的范式之下使计算机系统个性化时,我们提出,可使用基于偏好的灵活框架。这意味着,虽然电子系统无法预期所有可能的影响因素,但是这个系统至少能以具有意向性的、因地制宜的、各别的常识,来丰富用户相关的过程。

正如所讨论数据库/信息系统的个性化检索和前摄网页服务发现/选择领域中的典型用户互动,根据源自每个个体用户的长期档案、意图、处境和领域的偏好对互动进行个性化将导致系统效能的改善。这是因为对于某项任务所必要的“具身”信息能够与用户提供的信息相结合。因为这种具身信息并不是有意识地提供,这个修饰细节给个性化任务附加了现实的价值。然而,由于与用户信息结合的所有偏好比明确提供的信息(因而可以被忽略——放宽,如果有必要的话)具有较低程度的重要性,用户信息的这种改善尊重了个体用户的需求而且也没有违背明确约束。显然,个性化的计算机系统并不致力于成为具身人类心智的完整计算模型,它是传统人工智能与专家系统不切实际的幻觉。在一个复杂信息世界,我们想要在有限知识的条件下构建有效而适当的工具与服务系统,这需要交叉学科合作,尤其是认知科学与心智哲学。

8.4 复杂移动网络、泛在计算和 适应性在线学习

全球联网的复杂性不只限于个人电脑、工作站、服务器数量的增加,

以及通过互联网流量的超级计算机互动。比个人电脑具有较低复杂性,便宜而灵巧的低效能设备分布在我们整个日常生活的智能环境中。^[8.54] 签(tab)、本(pad)、板(board)都是例子:英寸大小的机器近似即时贴便签,英尺大小的可以像一张纸、一本书或一本杂志,而英码大小的显示器则相当于黑板或公告板。签、本、板只是泛在计算的开始。灵巧设备(smart device)是智能微处理器嵌入在闹钟、微波炉、电视遥控器、立体声音响和电视系统、儿童玩具,等等。泛在计算造就“思考物”,^[8.55] 不仅高度智能的超级计算机,还包括具有“集群智能”的智能有机体。第三代(3G)无线通信服务包括分组网络以及计算机化应用的互联,例如电话、传真、打印机、软件无线电,等等。其使能技术要求更快的数据转换器、更强的处理器、Java 以及其他形式可下载软件。3G 通信业的技术发展是一项交叉学科的系统工程任务。

好比 GPS(全球定位系统)之于汽车交通那样,日常生活的东西可以借助多少有些智能的传感器进行信息技术上的互动。全球定位系统是复杂信息系统实现区域活动概念的一个良好例子。汽车司机使用受到邻近 GPS 网络的引导的 GPS 远程信息服务。在将来,这些灵巧设备的处理器、芯片以及显示器将不需要用户界面(诸如鼠标或键盘),而只有一个友善而有效的部位来让任务完成。所有尺寸的无线计算设备对用户变得越来越隐形。^[8.56] 泛在计算使人们能够生活、工作、使用以及享受事物而无须在意他们的计算设备。

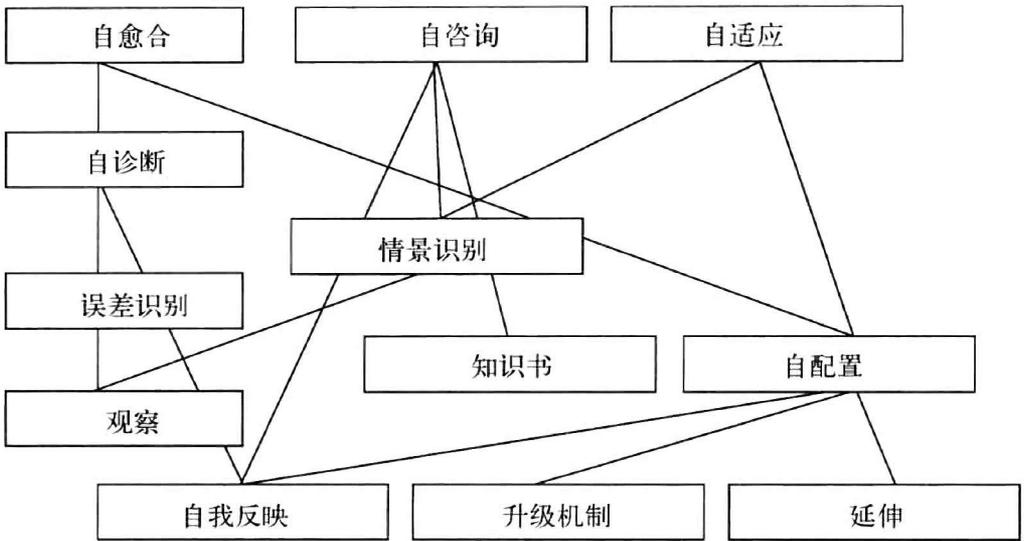
从技术的角度看,泛在计算是使用无线媒体接入、大带宽范围、基于标准网络的实时媒体容量以及数据分组路由的全球网络的一个挑战。不仅上百万台个人电脑,还有数十亿灵巧设备正通过互联网进行互动。它们是真实、有形的不同尺寸的东西,却在互联网上具有虚拟的数据投影,对这些东西的控制要求强有力的、具有复杂性自觉的数据跟踪管理。这席卷一切的数据与信息流,迫使我们操作在混沌的边缘。

全球联网正成为复杂性研究激动人心的挑战之一。在自然界与社会中理解复杂系统,有助于对通信网络的有效管理。在 21 世纪,信息、通信以及生物技术正在共同成长。因此,信息处理要求向自然界学习。在自然界,信息由感觉器官、神经系统以及大脑产生、传递、存储、处理和表达。像学习与思考、语言、肌肉运动、知觉以及沟通等认知过程被模拟,采用了物理、化学、生物的传感器,光波导体,电子、光学存储,微处理器,神经网络,机器人,虚拟现实,泛在计算,人工生命与人工智能。它们共同致力于产生学习、适应以及自组织演化的复杂系统。

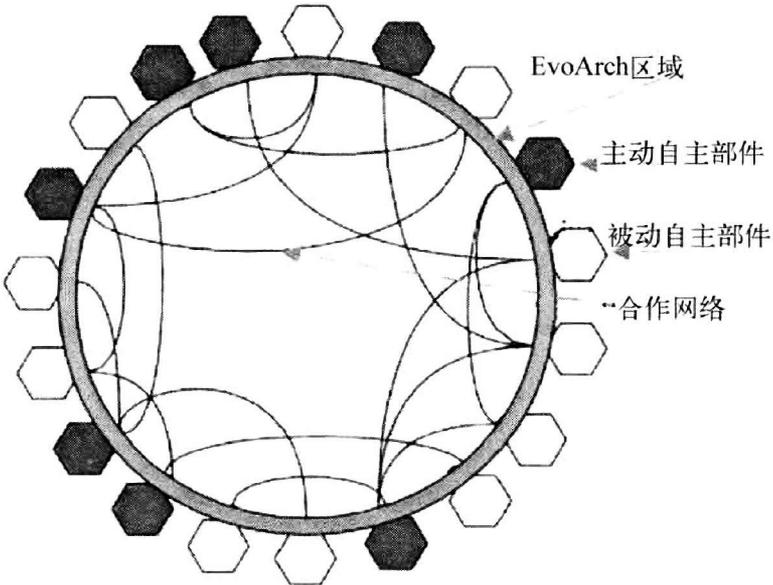
当前研究的一个激动人心的例子是未来汽车的演化结构,集成所有方面的复杂性与自组织。汽车产业仍是全球经济的驱动与主导引擎。所以,复杂性研究在未来汽车作为学习、适应以及自组织演化的复杂系统的生产领域找到一个现实应用。汽车工业的一个挑战是电子系统日益增加的复杂性。如果我们从起点到今天回顾汽车的电子电路系统,那将是与有机体的神经网络的惊人相似,在演化过程中增加复杂性。与生物演化相反,今天的电子系统是刚性、紧密而不灵活的。所以微小的故障都可以导致整个系统崩溃。在一种演化的架构(EvoArch)中汽车的神经系统被划分成一些自主部件(carlets),它们可以在合作功能里配置自己,以解决智能任务。例子是马达、制动以及照明的复杂功能,像 GPS 那样的无线向导系统,用于信息处理的智能设备,以及电子娱乐设施。

万一受伤或者事故,活机体有一种引人注意的自愈与部件灵活转变的能力,通过不同器官的合作来支持生命功能。例如因中风而丧失说话能力的人,其大脑受损部位有时会被神经区域的新配置与联结所替代。如果一辆汽车,比如自主部件“车灯”将要坏掉,那么与损坏车灯相联结的其他自主部件将通过自组织来寻找替代。为了保证汽车的生命功能,它们给自己安排其他部件。在一种演化的电子架构(EvoArch)中,^[8.57]有许多“自 X 特性”,这高度类似于生物演化中的自组织机体系统(图

8.19a): 自愈合需要自配置和自诊断。自诊断意味着误差识别和自省。一辆汽车内部, 自配置包含自省、升级机制以及延伸。自咨询涉及自省、情景识别以及知识手册。自适应是基于情景识别和自我配置。自 X 特性的关系以分类法图示为:



(a)



(b)

图 8.19 演化架构 EvoArch 中的自 X 特性(a)和汽车功能自组织(b)^[8.57]

根据复杂系统探究方式,汽车的功能可以看作从微观层面自主部件的合作与自组织互动涌现起来的宏观特性。汽车自主部件的实例是,比如开关、灯、旋钮、控制器、校准器、喇叭等。汽车功能像“空调”、“转向指示”或“障碍告警”需要必须在一百多个备选项中选取的一个或多个开关。实际上,一项汽车功能(比如“转向指示”)需要转向指示器开关、终端开关、转向指示器闪断以及多个转向指示灯的部件。在演化的架构,合作是在 EvoArch 区域(图 8. 19b)实现的,在其中主动自主部件要求具有适当特性以执行一项汽车功能的被动自主部件的合作。每个部件(carlet)拥有一个自我识别的 ID 数字,此数字代表部件的特性(例如,转向指示)及其意向性(例如,寻找开关)。部件的互动由通信系统(carCom)启动,该系统带有信息检索程序、协议以及在诸如 RMI(远程方法调用)和 RPC(远程过程调用)的互联网中众所周知的合作契约。因为在互联网上,是基于带有路由协议和路由表的路由过程中间件进行网络管理的。

在发出合作请求之后,主动自主部件会得到可能的被动候选部件列表以进行替代,例如一个受损部件。下一步,为了通过合作实现一项汽车功能必须确切地选择一个候选部件。就受损部件和功能故障而言,汽车的灵活性及其自 X 特性的潜力随着其可能候选部件的数量增加而增加。然而,另一方面,所需选择的计算时间数量随候选列表的范围而非线性地增加。今天一辆跑车,大约 30 项功能需要在上百项候选中选择一个以上开关。一般而言,若 n 为主动自主部件数, m 为所需被动候选部件数,可能被动部件数 M 有 $M - m > mn$, 则可能的伙伴配置数 $\text{Con}(m, n)$ 由以下式子给出:

$$\text{Con}(m, n) = n! \sum_i \binom{M - m(n - i)}{m}$$

理由是 $n!$ 个组合对于确定一连串搜寻被动部件的主动自主部件而言是

必要的。不考虑次级序, $\binom{M}{m}$ 个组合是可能的。在 M 个可能部件中选择是每步减少 m , 例如第二步就只有 $\binom{M-m}{m}$ 个可能组合, 第三步就只有 $\binom{M-2m}{m}$ 个可能组合, 等等。对于主动自主部件 $n = 30$, 汽车功能的必要被动部件 $m = 2$, 可能的被动部件 $M = 100$, 我们得到 2.09×10^{17} 个组合。如果一个组合对应于一条计算指令, 10^2 MIPS (每秒一百万条指令) 的处理器将需要 2.42×10^{24} 天来检查所有可能的组合。显然, 信息检索需要减少复杂性。

在互联网上, 信息检索的质量取决于对必要伙伴呼叫的精确度。一个不精确请求 (像“查找开关”) 将导致冗长的可能选项列表。一条较精确请求“查找左车门上的左车窗开关”限定了可能性。我们需要软计算和人工智能领域中著名的权重和偏好程序。在软计算, 特征既非有关也非无关, 不像布尔逻辑。根据其相似度, 它们是或多或少有些相关的。在分类学里, 汽车的特征和功能可根据其相似性的范畴来进行分类: 在底层, 层级结构包括诸如车灯与开关等部件。在下一层次, 一个部件例如车灯可能属于“左后车灯”或“黄灯”, 它们属于后续层次的较抽象范畴“汽车外部功能”或“汽车前部功能”再到下一层的诸如“位置”、“指示”、“输入”、“输出”等抽象范畴。在面向对象的程序设计语言 (例如 Java 或 C++) 意义上, 这些范畴可以看作是具有属性和方法的等级, 表示在节点和边的图上。边的箭头表示不可遗传特征的关系, 可以在演化架构的计算模型中执行。如果一个部件查找可能部件以实现汽车功能, 将根据所请求合作的属性限定可能部件的特征, 在分类图上确定伙伴部件的位置。T (指分类) 选择减少了可能选项的数量, 并促使自 X 特性 (诸如自愈与自适应) 在合适的时候出现。

自愈和自适应不只意味着用新的硬件部件替代受损硬件部件或延伸其架构。在生物演化中,一个有机体发展新的生理安排以保障生命功能或添入新能力。在演化的架构中,汽车的计算系统使得设计虚拟部件来替代受损硬件部件或添入驾驶员所需要的新功能。这个巨大的进步是基于移动网络和泛在计算。用蓝牙技术,部件之间的复杂电缆网络被无线通信所替代。具有适当界面的每个部件都可以参与无线互动。新的电子链接(例如移动电话、GPS 或电子娱乐设备)能够嵌入特定的通信协议(脚本)。但也可能从外部用移动灵巧设备比如 PDA(便携数字助理)对汽车功能进行控制。驾驶员和工程师可以影响所有自主部件,如同医生影响生命躯体的器官那样。所以,汽车网关作为一种自主部件被引入,以实现车内 IT 世界与汽车外部使用泛在计算的移动灵巧设备控制的 IT 世界之间的界面。

蓝牙技术打开了全新的应用之路。在演化架构 EvoArch 中,可根据用户的需要调整甚至创造新功能。比方说,如果收音机面板的操纵杆坏掉了,蓝牙汽车网关就会设计一个虚拟操纵杆模型与硬件版本的逻辑程序相同。虚拟操纵杆模型显示在 PDA 的触摸屏上,能够被驾驶员用来操作收音机。无线链接到 PDA 的新自主部件“虚拟操纵杆”,放大了使用“显示屏”或“扬声器”部件的“收音机行为”功能。用 EvoArch,汽车被转变为自组织信息处理系统,被嵌入到无线移动网络和泛在计算的世界里。

在传统汽车工业,汽车的架构在一辆汽车生产出来之后“终身”保持不变。未来架构必须像演化的有机体一样是开放而灵活的。全球市场的严酷事实,也需要汽车架构的灵活性。一家汽车公司不能几年来限于单一系列的汽车模型。创新循环以及与其他汽车企业的竞争日益加速。如果企业决定在全球市场上彼此合作,那么汽车系列的自主部件必定是可互换的。接下来,公司必须注意市场的政治、经济以及生态条件。消费者的需求、时尚、潮流都在迅速变化。所以,在一部汽车的整个生命期间,自

主部件必须被更换或扩展,就像活机体的再生细胞那样。自适应、自配置和自解释是涉及一个汽车系列整个生命周期的汽车生产的自 X 特性,好比一个种群的生物演化。仿佛活有机体,汽车的演化架构是复杂系统的信息动力学借助信息处理和细胞部件通信进行自组织的实例。

自然界与社会的信息动力学,在信息、可计算性以及非线性动力学理论框架内已经得到了分析。我们已经考察了自然系统动力学(例如,原子、分子、基因以及神经系统),计算系统(例如,量子、分子、DNA、生物、神经计算系统),全球联网(例如,互联网、路由、信息检索、多主体系统),以及泛在计算(例如,移动电话、GPS、PDA、灵巧设备、智能环境)。

全球联网不再只是技术发展的一个挑战。泛在计算能够改善人与信息系统的界面,但它必须不能以技术装备的多样性使人们困惑。全球联网必须发展为一种平静而无形的技术。平静而无形的计算,致力于在人类环境与日常生活中整合全球联网和信息处理,不以技术场景束缚人们。全球联网必须发展成为一项对人类的技术服务,只能是这样。所以,全球网络中的信息处理不能只受技术科学的推动。它必须是一个微电子学、计算机科学、信息科学的交叉学科任务,也是认知科学、社会学以及人文学科的一个挑战。

在这个全球化时代,人们是游牧的而且必须适应于这个变化的信息环境。在游牧而无处不在的计算中,个性化的数字脚本自动匹配区域信息服务。这类例子包括旅行和遇到交通阻塞时所使用的个性化信息服务。旅行者可以用 PDA 与火车站或机场的信息系统联系。票务、预订、支付全部电子化而且无线解决,无需一台个人电脑或者订票窗。信息被自动实施。电子指南把旅行者引导到他所预订的座位。

在一个游牧的世界,移动用户必须能够在当前的位置接入到他们的信息,而无论那是世界的什么地方。^[8. 58]用户的便携 PDA 装载着个性化的用户概况、个人数据和偏好。本地服务器被自动链接,个性化的用户概

况被匹配并适应于变化的位置,支持偏好和需要实现的服务(例如,旅馆、餐厅的信息)。绝大部分人工检索的信息被下意识地获取(例如,通过肢体语言和手势)。所以,与用于明确查询偏好的偏好管理器一样,偏好的溯源需要交叉学科认知研究来为预想用途的形式、领域以及处境建立一个充分的规则基础。查询的认知扩展旨在执行一种基于知识的查询创建器,允许在与用户的合作当中创建复杂的查询。

全球化要求移动性和稳定适应以应对日常生活中变化着的环境。在这一方面必须对一些问题进行追问。我们如何协调技术基础设施和多种多样的移动设备?信息技术的游牧化是否对应于社会的游牧化,而伴随着社会结构的瓦解和本地根基的丧失?个性化信息系统必须适应于人类的条件和需求。在游牧而泛在的计算,个性化信息设备是无线而无处不在的。然而,启动这种计算所需的技术设备必须隐藏在背景(无形计算)并用于扩增我们的生活(增强现实)。

还有例子是超市里的个性化信息服务。^[8.59]用游牧与泛在计算,甚至廉价产品也可以使用高计算机性能来电子化地表达在数据库里。所以,超市可以引入依赖顾客私人信息(例如,购物的频率和总量)和产品(例如,保质日期)的个性化动态价格。个性化价格会带来什么样的社会后果?是社会歧视还是经济竞争?如何防止顾客私人信息的滥用?个性化信息服务也可能改善发生在医院里的复杂通信。^[8.60]使用泛在计算,物理现实可以绘制到数字的影子世界里。在医院,医生和病人受到遍布所有地方的传感器和微处理器的监督和控制。医生和病人的日程和活动被自动协调,改善时间安排。然而如何保障隐私和安全?谁为自动服务的复杂信息与计算机系统的失误负责?

全球信息世界只能由有见识而且受良好教育的人们来驾驭。然而,人们拥有不同的知识能力而且生活和工作在不同的条件之下。^[8.61]因此,知识必须根据他们各自不同的而且随时变化着的知识能力与生存条

件来量体裁衣。我们如何能把个性化信息服务应用在教育？在今天的知识经济里，公民的知识与技能正变得日益重要。基于这个观念，出现了一种个性化按需学习的新范式，任何人、任何时间、任何地方的教育与培训的供给，必须在不同的在线学习（e-learning）和在线工作（e-working）环境下适应于每个个体公民的需求与偏好。人们以不同方式学习，所以学习材料必须根据他们想要学习的那些要求采用个性化信息系统进行打包（图 8.20）。

在这个全球知识社会，必须为不同的用户例如服务提供商、学习材料的作者和出版商、平台提供商以及公民等以一种个性化的途径开发不同的在线学习与在线工

作环境。在这个全球化时代，游牧计算正导致在行动中学习的增大着的需求。移动的学习环境要求适当的学习资源，让学习者随时随地可以利用。通过将内容适应于学习者的偏好、用来与学习材料互动的设备特征（例如，PDA、移动电话或笔记本电脑）和适当选择的叙述模板，这是可以

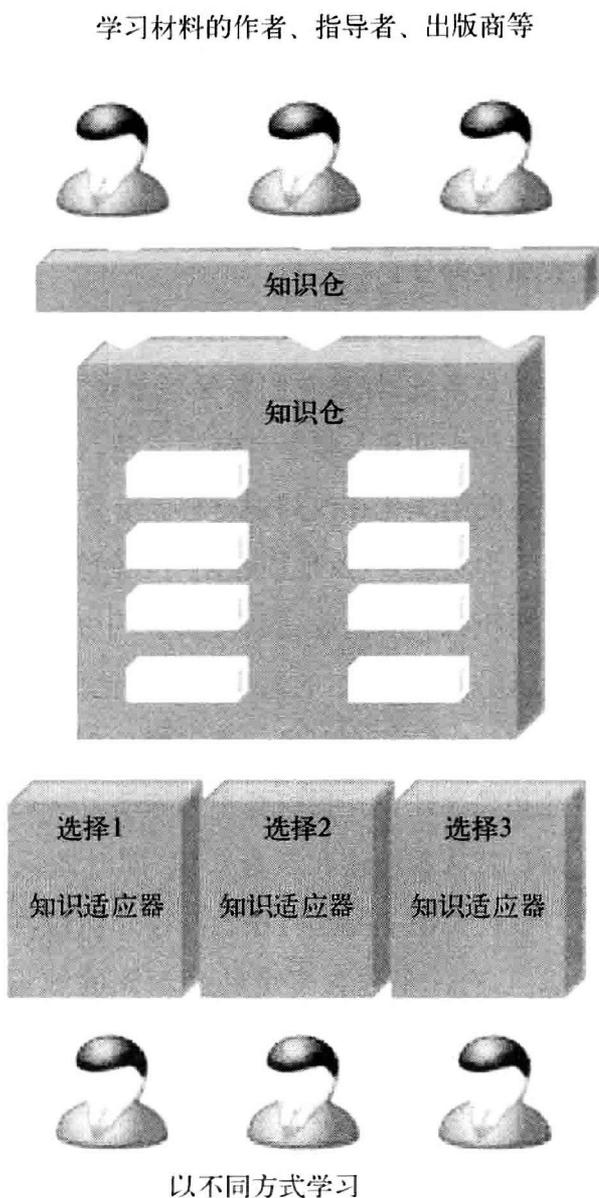


图 8.20 全球知识社会中的个性化信息系统^[8.62]

达到的。在人工智能领域,适应性的和个性化的代理和机器人会被开发来支持适应性的和个性化的学习环境。它们必须不仅能够理解人类的自然语言,而且能够理解人类情绪、动机、偏好以及不同形式的人类创意。随着人类知识复杂性与个性化的增长,它们将是适应性和个性化学习的必要组成部分。

在这个全球化时代,企业和组织必须是不断学习的、适应性的和自组织的信息系统,如果它们要保持市场竞争力的话。学习型组织热衷于为雇员提供个性化与量身订制的方法,让雇员能够获取促进终身学习和培训方案的组织化在线知识材料。唯有个性化的获取方法能够保证组织的所有人力资源,以及他们在创造性创新的个体能力,会得到利用。^[8.63]

组织(例如,企业、政府、大学)中的人不只是反应式主体,而且是有着知觉、认知以及情绪的具身心智。他们的意图和行动决定于有意识的与下意识的实际状况图景。为了指导创新,管理必须识别和利用人们的创造性和隐会知识。我们基于大脑动力学来区别隐会知识与显性知识。隐会知识意味着经验和亲身知识、同时知识(此时此地)、模拟知识以及实践。显性知识主要是有序的符号知识和数字式公开的知识。在复杂人类组织里,有一个包含多个转换步骤的知识转换过程。^[8.64] 第一步,社会化,意味着从隐会知识到隐会知识的转化——隐会知识的积累、组织外收集社会信息、组织内收集社会信息以及隐会知识的转移。下一步,指的是从隐会知识到显性知识的转化。要达到这个目标,管理者必须促进创造性的和实质性的对话、假设性的思维、隐喻的利用并包括组织的设计者。第三步,合并,通过获取与整合(计划、计算机仿真)、综合与处理(手册、文件、数据库)以及传播(报告提呈)把显性知识与显性知识联系起来。最后一步,内在化,通过个人经验、现实世界知识的获取、仿真与试验以及虚拟世界知识的获取等,变显性知识为隐会知识。

人们接下来可以区分组织里的四种知识资产,对应于这个知识转换

过程的四个阶段。实验性知识资产意味着通过共同经验分享的隐会知识,例如个体技能与诀窍、关心、信任以及安全,或精力、感情以及压力。概念性知识资产指的是通过图像、符号和语言表达的显性知识。例子有企业的产品概念,以及设计或品牌价值。系统性知识资产包含系统化的和打包的显性知识,像文件、规格、手册、数据库、专利以及授权许可。惯例知识资产被包含在隐会知识当中,这是惯例化与嵌入在共同工作者的行动和实践中的知识。

当组织(例如,企业、大学、研究实验室、供应商以及顾客)在一种伙伴关系中成为盟友,便增加了新的学习平台。这些被称为交叉组织的。^[8.65]当组织开始适应于更大的网络,学习平台便扩大了。虚拟组织是网络伙伴系统,他们通过共同使命、愿景、项目和产品来协调活动。组织化学习源自于从个体知识到人工记忆、规则以及惯例的转换。言传知识(例如,书写规则、便函)有一个客观的存在,反之意会知识只存在于感兴趣人们的实践中。言传与意会知识不仅是个体的能力,也是虚拟网络的潜力。在这个全球化时代,学习型组织在全球网络中竞争或结盟。因此,我们需要全球自组织和智能知识系统来为员工、伙伴和客户寻找量身定做的解决办法以及管理复杂竞争状况。

在演化过程中,新形式的信息存储已经从遗传信息到神经元信息并最终发展到机体外信息。在人类,大约 10^{10} 比特的遗传信息存储容量让位于大脑约 10^{14} 比特神经信息,粗略对应于突触链接的数目。过去 10^3 年,人类已经发展出机体外信息存储(例如,图书馆、数据库、互联网)。它们的信息容量已经克服了单个大脑的容量。在 21 世纪初,关键技术的指数动力学受到计算机微型化、基因技术以及互联网生长的主导。根据熊彼特(1883—1950),经济成长受基础性的科学技术创新驱动,启动了商业与企业家精神的长波康德拉季耶夫周期。在主要依赖于自然资源的工业社会四个长波之后,主要依靠非物质信息服务产品的第五个康德拉季耶

夫周期已经产生了信息社会。

在工业社会,经济已经被刻画为物质商品的生产、物流、分配、营销与销售。在信息社会,虚拟信息产品与服务的供给与需求具有信息收集、信息系统化、信息检索、信息系统的生产与贸易等环节。因此,经济学家区别工业社会物质的价值链和信息社会虚拟的价值链。根据申农的观点,信息商品的内容是以其对接受者的新颖程度来衡量的。但这还不是足以对付我们生活的全面认识。下一步,高价值信息必须被评价并用于问题解决。信息必须转换为解决问题所需窍门意义上的知识。

除了物质与生命,21 世纪的主要成分是信息与知识。在知识社会里,科学是经济与社会成长的生产力,它需要与经济和政治合作的新策略。^[8.66]“国富”(亚当·斯密语)是其人民的知识。因此在国家社会竞争的全球化进程中,教育必须确保知识社会的可持续未来。信息与知识的技术演进是人类 21 世纪的根本挑战。人类不再是盲目进化的产物,而将会通过使用信息与知识来努力影响他们的发展。

然而,要决定我们的解目标,知识是不充分的。科学技术在 20 世纪的经验毫无疑问地强调了对我们的技术发展进行伦理评估的需要。所以,信息与知识社会的未来不会隔绝于伦理与政治。根据哲学传统,知识与伦理的联系叫做智慧。从数据到信息、知识、再到智慧的转换,是知识社会的交叉学科挑战。^[8.67]

关于未来、科学和 伦理学的结语

复杂系统原理主张,物理的、社会的和精神的世界都是非线性的、复杂的、随机的。这个认识论的本质成果,对于我们当前以及未来的行为都有重要的后果。科学技术对于未来的发展有着至关重要的影响。因此,本书最后就展望一个非线性、复杂和杂乱无章世界中的未来、科学和伦理学。我们对于其未来能够知道什么?我们应当做些什么?

9.1 复杂性、预测和未来

在古代,预测未来的能力似乎是预言家、祭司和占星术士的某种神秘能力。例如,特尔菲神谕中,占卜家皮提亚(公元前6世纪)在迷糊状态之中揭示了帝王和英雄的命运(图9.1)。在现代,人们变得相信拉普拉斯

妖的无限能力：对于无摩擦的不可逆的线性保守世界，预测将是完满的。一个过程，要预测其未来的事件，我们只需要知道其精确的初始条件和运动方程，通过求解其未来时刻的方程就可以办到。科学哲学家们也早已致力于分析自然科学和社会科学中进行预测的逻辑条件。^[9.1]关于人的预测能力的信念，在 20 世纪中由于几方面的科学发展而动摇了。量子理论教导我们，一般而言，我们只能作出概率性预测（参见第 2.3 节）。一大类现象是由确定论混沌支配的：尽管它们的运动服从牛顿物理学定律，但它们的轨迹却是敏感依赖于其初始条件，因而排除了进行长期预测。在耗散系统中，如同贝纳尔实验的流体层（图 2.20），秩序的涌现有赖于微观上小的初始涨落。诸如蝴蝶翅膀扇动那样的微小事件，原则上是可能影响全球的天气动力学的。在混沌系统中，对未来事件的预测受到限制，因为由过去到未来的信息流减少：KS 熵是一个有限值。但是，对于



图 9.1 雅典国王艾吉斯在特尔菲向预言家咨询未来（古希腊碗：公元前 440—前 430）

随机和噪声而言，随着过去和未来的相关性衰减，KS 熵趋于无穷大：预测是不可能的。显然，人类命运的随机性是古代预言家、祭司和占星术士的一大挑战。在第 7 章中，我们已经知道，经济、商业和社会中的模式和关系有时会剧烈地变化。在自然科学之外，人们的行动——这是社会科学中要观察的——能够而且正在影响着未来的事件。因此，预测可以变成自我满

足或自欺欺人的预言,它自己在改变着已经建立的模式或过去的关系。预测是否也就只不过是盯住水晶球呢?

但是,几乎我们的所有决策都联系着未来的事件,需要预测关于未来环境的情景。这对于个人的决策的确如此,例如何时与何人结婚、何时和如何投资储蓄;对于影响着整个组织、公司、社会或全球状态的复杂决策也是如此。近些年来,改进经济和生态、管理和政治中的预测和决策,已经得到越来越多的强调。经济震荡、生态灾变、政治灾难,以及还有诸如新市场的机会、新技术的趋势和新的社会结构,都应该不再是杂乱无章的,不应该是上帝送来的致命事件。人们希望做好准备,因此开始发展起来种种定量的预测方法,它们针对着如商业和管理中的不同的情形。从方法论的观点看,所有的定量预测工具都可标志着特定的预测水平,这限制了它的可靠应用。让我们对一些预测工具的长处和短处进行一些考察吧。

最通行的定量预测方法是时间序列程序。^[9.2]它们假定,在数据系列中的某种模式是可以在时间上再现的,且可外推到未来时期。因此,一个时间序列程序,对于预测环境因素如就业水平或超级市场每周的销售情况——在此个体的决策没有多大的影响——可能是合适的。但是,时间序列方法是不可能对数据模式背后的原因作出解释的。在历史上,巴比伦天文学家就运用着这种方法,他们把月亮升起的数据模式外推到未来,而没有任何基于行星运动模型的解释。在18世纪,物理学家对于太阳黑子的原因知之甚少。但是在太阳黑子的观察中,发现了一种频率和数量的模式,因而通过时间序列分析的连续来进行预测就成为可能。在商业和经济中,数据序列中隐含着多种模式。某种水平模式的出现,在数据中并没有得到体现(例如稳定销售的产品)。某种季节性模式的出现,是按照某种季节因素引起的一系列的涨落,如有些产品的销售依赖于天气。某种循环模式可能不会以恒定的时间间隔再现自身,如金属的价格或国

民生产总值。某种趋势模式,出现在变量值随时间出现某种一般性增减时。在数据序列中有某种隐含模式时,此模式必须要通过将过去的数值平均化和平权化(“平滑化”)而与无规性区分开来。数学上,线性的平滑化方法可以有效地运用于展示了某种趋势模式数据。但是,平滑化方法并不试图去证明基本隐含模式的个体组分。趋势、循环和季节性因素可以是子模式,它们必须在分析数据序列的总模式中分离出来、分解开来。

在时间序列程序中,某种过去的的数据模式被简单地外推到未来,而一个解释性模型则假定了在(“因”)变量 y (这是我们希望预测的)和另一个(“自”)变量 x 之间的关系。例如,因变量 y 是每单位的生产成本,而决定着生产成本的自变量 x 是单位产品的数目。在此情形下,我们可以在 x 和 y 的两维坐标系中建立关系模型,画出一条直线,它在某种意义上将给出这种关系的最好的线性近似。回归分析运用此种最小面积方法,去减少实际观察值 y 和相应的线性近似直线上的点 \hat{y} 之间的距离。显然,有许多的情形,这种方法并非一种有效的方式。一个例子是月销售量的预测,它按照一年的季节发生非线性变化。进一步,所有的经理都知道,销售量并不只受时间的影响,还受到多种多样因素的影响,如国民生产总值、价格、竞争对象、生产成本、税收等。两个因素的线性相互作用,仅仅是经济中的一种简化,类似于经典物理学的线性保守世界中的两体问题。

但是,一个更精确的复杂模型当然是需要更多的努力、更多的经验和更多的计算时间。在许多决策的情形,解释或预测一定的因变量要用到一个以上的变量。一个普通的例子是营销经理,他希望预测下一年的总销售量,并对影响这种销售量的因素有更好的理解。因为他有一个以上的自变量,他的分析就称为多元回归分析。然而,他希望预测的因变量是表达为自变量的线性函数的。回归方程中系数的计算,基于过去的观察样本的运用。于是,基于此种回归方程的预测的可靠性,主要就取决于所

使用的特定的观察样本。因此,可靠程度必定由统计显著性检测来度量。与多元回归涉及一个方程不同,经济计量学模型可能包含多个联立多元回归方程。^[9.3]在线性方程的情形,求解的数学方法是基于线性代数和线性优化方法的(例如,单纯形法)。尽管它们是线性的,经济计量模型可能是非常复杂的,有多个变量,只有用计算机程序和机器来把握。经济学中非线性编程的求解策略常常是将复杂的问题分解成子问题,使之可以近似地作为线性问题来处理。

运用这些方法时的一个隐含的假设是,与历史数据吻合得最好的模型,也就是能最好地超出这些数据作出未来预测的模型。但是,对于大量的真实世界的情形,这种假设并不见得成立。进一步,在经济学和商业中使用的绝大多数数据序列,忽略了测量误差,也难以进行受控试验。因此,有必要理解,当已确立的过去模式发生变化时,种种预测方法是如何成功的。预测在标志着每一方法的不同预测水平上是不同的。显然,不存在可以很好预测所有的序列和预测水平的唯一方法。有时,过去的的数据完全不能显示未来将发生的变化。因此,没有内部知识,要预测一个模式的变化是不可能的。模式变迁或“范式变化”是商人和经理人的日常经验,而非库恩等人的传统中某些科学哲学家的超常洞察。

有没有这样的定量程序,它们可以决定数据序列中的模式或关系何时发生了变化?这种方法的确存在,并运用追踪信号来显示预测误差中的变化,以表明何时发生了非杂乱的迁变。在质量控制流程中,例如,对于小汽车的生产序列,对设备的输出要进行周期取样。只要样本的均值落在控制限度以内,设备的运行就被认为是正常的。当情况不是这样时,就停止生产并采取适当的措施,以使其重新正常运行。一般说来,定量预测方法的自动监测遵循着这种质量控制流程概念。任何时间进行的预测,其误差(即实际值减去预测值)都与控制限度的上限和下限进行对照。如果它落在可接受的范围中,外推的模式就没有变化。如果预测的误差

落在控制限度之外,已确立的模式中就很可能发生了某种系统的变化。当涉及大量的预测时,通过追踪信号进行自动监测可能是合适的。但是在只有一个序列或几个序列时,人们就只能伺机而动,去发现此商业数据的趋势中是否在发生变化。

预测技术趋势和市场、新产品或服务的赢利的未来,以及与相应的就业和失业相联系的趋势,是管理者和政治家面临的最困难但也是最当紧的任务之一。他们决策依赖于大量的技术、经济、竞争、社会和政治的因素。自从20世纪50年代出现了商业计算机以来,燃起了这样的希望,通过计算速度和数据积累的增加,也许人们可以把握这些复杂的问题。的确,任何定量的预测方法都可以编程放进计算机中去运行。因为没有任何一种预测方法可以适用于所有的情形,于是发展起来以计算机为基础的多预测系统,以为管理者提供一组选择方法的清单。一个例子是预测系统SIBYL,它取名自古代的预言家西比尔(Sibyl)。相传库迈的西比尔把著名的《西比尔预言书》出售给罗马国王塔克文·苏佩布。

的确,SIBYL是一个基于知识的系统(参见第6.1节)的计算机化预测方法包。^[9.4]它提供的程序包括进行数据准备和数据处理,筛选可利用的预测方法,所选方法的运用,对预测方法的比较、选取和组合。在预测技术中,基于知识系统的推理组件提示了这样的方法:它们以大范围预测运用和决策规则样本为基础,是最接近于匹配特定的环境及其特点的。SIBYL的最终功能是,检验和比较其中的哪一种方法提供了最好的结果。使用者和系统的界面,要尽量友好和有效,以适用于预测专家,也适合于新手。然而,我们决不要忘记,SIBYL只可能优化所存贮预测方法的应用。原则上,预测方法的可预测性水平,不可能由使用计算机而得到放大。与人的专家具有学习能力相反,如SIBYL这样的预测系统仍然是程序控制的,具有基于知识系统的典型局限性。

一般说来,基于计算机的预测自动机,是遵循线性思维路线的。另一

方面,现代计算机的能力不断增加,鼓舞着研究人员去分析非线性问题。在20世纪50年代中叶,气象学家偏向于使用基于线性回归概念的统计预测方法。这种发展,得到了诺伯特·维纳对于稳恒随机过程的成功预测的支持。爱德华·洛伦茨对这种统计预测思想产生了怀疑,并决定对比非线性动力学模型从实验上来检测其有效性(参见第2.4节)。天气和气候是一个有能量耗散的开放系统的例子。为这种系统建立的模型中,用相空间的点表示其状态,用轨迹来表示其行为。经过一定时间后,轨迹就达到了某个吸引集(“吸引子”),这可以是此系统的某个稳定的点(图2.14a或图3.11c)、某个周期振荡叫做极限环(图3.11b)或奇怪吸引子(图2.21)。如果人们希望预见包含某个稳定点或极限环的系统的行为,人们可以观察到邻近的轨迹会发散,不会生长起来,甚至会消失(图9.2)。这种情形下,一整类初始条件将达到定态,相应的系统也就是可预测的。一个例子是,用非线性的洛特卡-沃尔泰拉方程建模的生态系统,捕食和被捕食群体具有周期轨迹。邻近轨迹的发散和收敛,可以用所谓的李雅普诺夫指数进行数值度量:

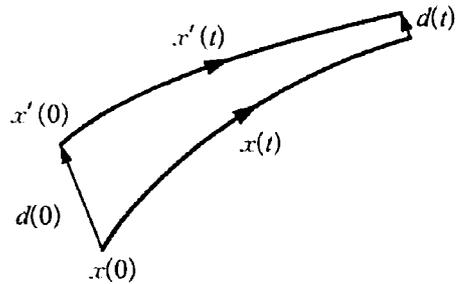


图9.2 具有稳定点吸引子或极限环且其邻近轨迹收敛的可预测系统^[9.5]

我们考虑时刻 $t = 0$ 初始条件为 $x(0)$ 和 $x'(t)$ 的两条邻近轨迹 $x(t)$ 和 $x'(t)$, 矢量 $d(t)$ 的长度 $d(t) = |x'(t) - x(t)|$ 。如果轨迹收敛,那么 $d(t) \approx e^{\Lambda t}$ 且 $\Lambda < 0$ 。量 Λ 叫做李雅普诺夫指数,定义为 $\Lambda(x(0), d(0)) = \lim_{t \rightarrow \infty} \lim_{d(0) \rightarrow 0} [(1/t) \ln(d(t), d(0))]$ 。如果其值为正,李雅普诺夫指数就给出了收敛速率。在图9.2中模型过程 $x'(t)$ 对真实过程 $x(t)$ 提供了可靠的预测,因为假定此系统具有依赖于其初始条件的收敛轨迹。

一个非线性系统的相图,可以具有若干吸引子,分别是不同轨迹趋向的区域(“分区”)(参见图 2.10)。对于预测演化系统的未来,知道所有可能的吸引子及初始条件 $x(0)$ 还是不充分的。除此之外我们还需要知道的是不同吸引子的吸引盆间的分区。如果系统的初态正好是远离一定吸引盆的,那么相应的吸引子终态是不可预测的。

在图 2.22a—c 中,非线性的逻辑斯谛映射描述了,随控制参量的不断增加而发生的从有序向混沌的转移。图 2.23a,b 描述了相应的超出一定临界值而出现的混沌区的分岔序列。如果相应的李雅普诺夫指数为正,系统的行为是混沌的。如果它为零,系统倾向于分岔。如果它为负,系统就处于稳定态或分岔树上的一支。在这种情形,系统是可预测的。在其他情形,对初始条件的敏感性就开始起作用。显著之处在于,在混沌区的非线性系统决非意味着完全不可预测。在混沌未来的灰色区中的白条或“窗口”(图 2.23b),显示了具有负的李雅普诺夫指数的局域有序状态。因此,在混沌的海洋中,我们可以找到可预测的有序岛。在这种情形,至少对于短的特征时间间隔,系统是可预测的。

一般而言,可预测程度的度量,使用的是开始观察后的特定时刻的观察过程和模型过程之间的统计相关。接近一致的值相应于满意的预测,而小的值表明了观察和预测之间存在差距。所有预测模型都有一定的可预测行为的时间,超过了以后可预测性会减少,以或多或少的速度趋向零。对于模型的改进,可能使可预测行为的时间有某种程度的扩展。但是,可预测的范围依赖于涨落参量。局域不稳定混沌系统中弱的微观扰动,可以在短时间中达到宏观规模。因此,局域的不稳定性惊人地减少着对预测行为的改进。预测系统的可预测性水平意味着,可预测行为的有限时间间隔既不能通过改进测量仪器也不能通过精致预测模型来改进。当我们记起洛伦茨的大气模型,使用的是具有局域和全局不稳定性的非线性系统,我们就会意识到气象学家在获取有效的长期或甚至中期预测

中遇到的困难。通过不断增加的计算能力,天气的预报就会直线地进步,这种信念是20世纪50年代的一种幻想。

随着非线性的模型运用于不同的研究领域,我们获得了对于振荡化学反应,物种、群体的涨落,流体湍流和经济过程的一般性洞察。例如,太阳黑子的形成,以前是用时间序列的统计方法进行分析,它决非是一种杂乱的活动。它可以用非线性混沌系统来建模,具有几种特征的周期和奇怪吸引子,对其活动的预测是有限的。例如,在公共舆论形成的非线性模型中,我们可以区分出公共选举(“分岔”)前的可预测的稳定态与向稳定多数的转变,选举前两种可能的意见都没有受到偏爱,而不可预测的微小涨落却可能在很短的分岔间隔中引起突然的转变。这种情形使我们想起在沸腾水中气泡的形成:当一个气泡变得充分大时,它以其向上的方式稳定地生长是可预测的。但是,它的出现和初期的生长却是一种随机涨落问题。显然,非线性建模解释了现代民意测验的皮蒂娅和西比尔的困难。

今天,非线性预测模型并不总能够提供比标准线性程序更好的、更有效的预测。它们的主要优点在于,对真实过程中的实际的非线性动力学的解释,对局域的短期预测水平的证实和改进。但是,为了通过求解方程而预测未来的行为,首先要构造起支配了在时刻 t 的观察的适当的动力学方程。甚至在自然科学中,对于如地震那样的复杂领域的适当的方程是否能够推导出来也还不清楚。我们可以希望在计算机的存贮中放入一张典型非线性方程的表,其观察过程中系数可以自动地得到调节。与对所有可能的相关参量进行穷竭式搜索的做法相反,学习式策略可以从粗略的模型出发,它只经过一段相对短的时间的运行,就可以说明相对窄的值域中的少量参量。通过神经网络的学习策略,已经实现了对于短期预测的改进。以学习数据为基础,神经网络通过自组织程序可以权衡输入数据,并减少对短期股票行情的预测误差(图6.14a, b)。若只是一些股

票市场的顾问使用这种技术支持，他们就可以做得很好。但是如果股票市场上的所有代理人都使用同样的学习策略，那么预测就将成为某种自欺欺人的预言。

原因在于，人类社会不是分子或蚂蚁的复杂系统，而是具有或多或少自由意志的高度意向的人类行为的结果。^[9.6]俄狄浦斯效应是一种特殊类型的自我实现的预言，人们就像传说中的希腊国王的一样徒劳的尝试根据预言来改变他们的未来。从宏观角度看，我们当然可以观察个体活动对表示文化、政治和经济秩序（“序参量”）的社会的集体宏观态的贡献。然而，社会的宏观态当然并非对其所有部分的平均。参量通过定位（“役使”）人类活动，激活人类的态度和能力或使之无效，从而强烈影响着社会中的个体。这是一种对复杂动力学系统的典型反馈。如果环境条件的控制参量达到一个内外部的相互作用临界值，宏观变量可能会进入一个不稳定的领域，其中可能有极为繁多的选择路径。而微小的不可预测的微观涨落（例如，极少数有影响力的人的行动，科学发现，新技术）可能会决定在这个不稳定状态下的社会要在众多路径中选择哪一个分支。

关于复杂系统的最深刻的洞悉之一就是，即使微观互动的完整的知识也不能保证对未来的预测的事实。在本书中，我们了解到，物理、遗传、神经或社会动力学的简单规则能够产生非常复杂甚至是随机的关于材料形成、有机增长、心理认同和社会行为的模式。实际上，随机性只意味着未来形成或行为是不可能被熟悉的和众所周知的模式或程序所探测到。在这种情况下，未来的可计算性并非是可还原为某些模式和程序的。随机性在原则上意味着计算的不可归约性：那么，除非经历几乎所有的实际步骤，否则是有限定的方法来预测系统将如何表现。在随机性的情况下，是没有任何进化的捷径可言的。其实，数学系统像元胞自动机(CA)或者技术系统如细胞神经/非线性网络(CNN)会产生与自然

和社会同等水平的复杂性和随机性。因此,传统的科学观点,即精确的定律知识可以进行精确的预测,在非线性和随机动力学情况下是不成立的。

9.2 复杂性、科学和技术

尽管有上述的困难,我们需要有对于我们的局部的和全球的未来的短期、中期和长期预测的可靠支持。政治上的一个最近的要求是为科学和技术的未来发展建立模型,科学和技术已经成为了现代文明中的一个关键性因素。实际上,这种发展表现为被科学思想和研究群体的复杂动力学所支配,科学思想和科学群体是嵌在人类社会的复杂之网中的。研究群体的共同主题,长时期或短时期地吸引着研究人员的兴趣和能力。这些研究的“吸引子”,表现为支配科学家的活动,如同流体动力学中的吸引子和涡旋。当研究状态失稳时,研究群体可能分解成追求特殊研究途径的小群体,它们可能会以获得答案而告结束,或可能再度分岔,如此等等。科学的动力学表现为由其复杂性不断增加的分岔树中的相变来实现。有时,科学问题得到了明确定义,并导致清楚的解答。但是,也有“奇怪的”和“扩散的”状态,如同混沌理论中的奇怪吸引子。

历史上,对科学成长的定量探索始于统计方式,如赖诺夫关于“18世纪和19世纪的西欧物理学发展中创造性的波型涨落”(1929)的工作。罗伯特·默顿从社会学观点讨论了“科学和技术中兴趣中心的变化”,皮季里姆·索罗金分析了15世纪以来科学发现和技术发明的指数增长。他强调,发明或发现的重要性并不取决于主观的判断,而是取决于由基本创新引起的相继科学工作的数量。早在1912年,阿尔弗雷德·洛特卡已经设想,借助于微分方程来描述诸如疟疾和化学振荡的传播的真正流通过

程。随后,信息科学家威廉·戈夫曼把流行病模型运用于关于科学思想的传播。首先是有一个“感染思想”中心,它以近乎流行型波的形式感染了越来越多的人。因此,从流行病学的观点看,科学领域的积累和浓缩就使用所谓的洛特卡和布拉德福德分布来建模,在此开始于某些个体作者的若干篇文章,它们是发表物群的核心。^[9.7]流行病模型还应用于技术创新的传播。在所有这些例子中,我们发现了众所周知的逻辑斯谛映射的S曲线(图 2.22a),即开始较慢,随后是指数增长,最后又是慢增长到饱和。显然,学习过程也是用S曲线的三阶段来描述的,即个体最初的成功学习较慢,然后是迅速的指数的增长,最后又是缓慢趋近于饱和的阶段。

从统计分析转向动力学模型,具有重大的方法论优点,难以理解现象如科学活动中的奇怪涨落或统计相关,都可以在计算机辅助的模拟实验中获得动态变化的图景。流行病模型和洛特卡-沃尔泰拉方程只是模拟科学共同体的耦合生长过程的最初的尝试。不过,进化过程的基本性质如创造出新的结构要素(突变、创新等等),还没有得到反映。社会系统中的进化过程的描述,必须要包括不稳定的相变,新思想、新研究领域和新技术(如经济模型中的新产品)藉此取代掉已有东西,从而改变了科学系统的结构。在对艾根的前生命进化方程(参见第 3.3 节)的推广中,科学系统由一组领域枚举集(即科学研究领域的子领域)描述,其中每一领域都以一些占据的元素为标志(即科学家在特定的子领域中的工作)。自繁殖、衰退、交换和从外部来源的输入或自发发生等基本过程,都必须要建立模型。每一自复制或死亡过程,都仅仅改变某一个领域的占据状况。对于简单的无交换的线性自繁殖过程,一个领域的选择价值由该领域的“诞生”率和“死亡”率之差给出。当一个新的领域开始被占据,正是其选择价值决定了此系统对于此创新是稳定还是不稳定的。如果其选择价值大于任何此领域中的其他任何选择价值,新领域的生长就将超过其他领域,系统可能会失稳。具有较高选择价值的新领域的演化,标志了一种简

单的选择过程,它遵循达尔文的“适者生存”。

但是我们决不要忘记,这种数学模型并不意味着把科学活动还原为生物机制。进化方程的变量和常数,并不是指称生物化学量及其测量,而是科学计量学的统计表。自繁殖相应于年轻的科学家加入到他所希望从事的研究领域之中。他们的选择受到教育过程、社会需求、个体兴趣、科学学派等的影响。衰退意味着,科学家只在科学领域中活动有限的年头。科学家可能会因种种原因(例如年龄)而离开科学系统。领域变迁意味着科学家在科学领域的交换过程,它遵循迁移模型。科学家也许会偏爱具有较大吸引力的方向的领域,此种领域表现为具有较大的自繁殖率。当过程包括了领域之间的交换,这些领域具有自繁殖和衰退的非线性生长函数,那么一个创新的选择价值的计算就是相当复杂的数学任务。一般而言,一个具有较高选择价值的新领域,是由系统对于相应扰动的不稳定性来标志的。

实际上,科学的生长是一个随机的过程。例如,当仅仅有几个先驱者投身在新领域的初始阶段时,就是典型的随机涨落。科学子领域中可能占据密度的随机动力学,用主方程来建模,它使用由自繁殖、衰退和领域变迁的转移概率定义的转移算符。此随机模型,为科学生长过程的几种计算机辅助模拟提供了基础。相应的确定性曲线,作为对于大量的一致的随机系统的平均结果,也被看作是趋势分析。作为结果,子领域的科学共同体的一般S型曲线的生长规律,具有缓慢的起始阶段、迅速生长阶段和饱和阶段,也在一些模拟中得到了证实。在一系列的模拟中(图9.3),假定了一个研究领域大约有120—160个成员。对于5个领域,选取了100个科学家作为初始条件,此初始条件紧接饱和领域。第6个领域还没有建立起来(其初始条件中成员为零)。在第一个例子中,已经对若干种情形,模拟了自繁殖过程对新领域生长曲线的影响。随着自繁殖率的增加,新领域以邻近领域为代价,增长得更加迅速。

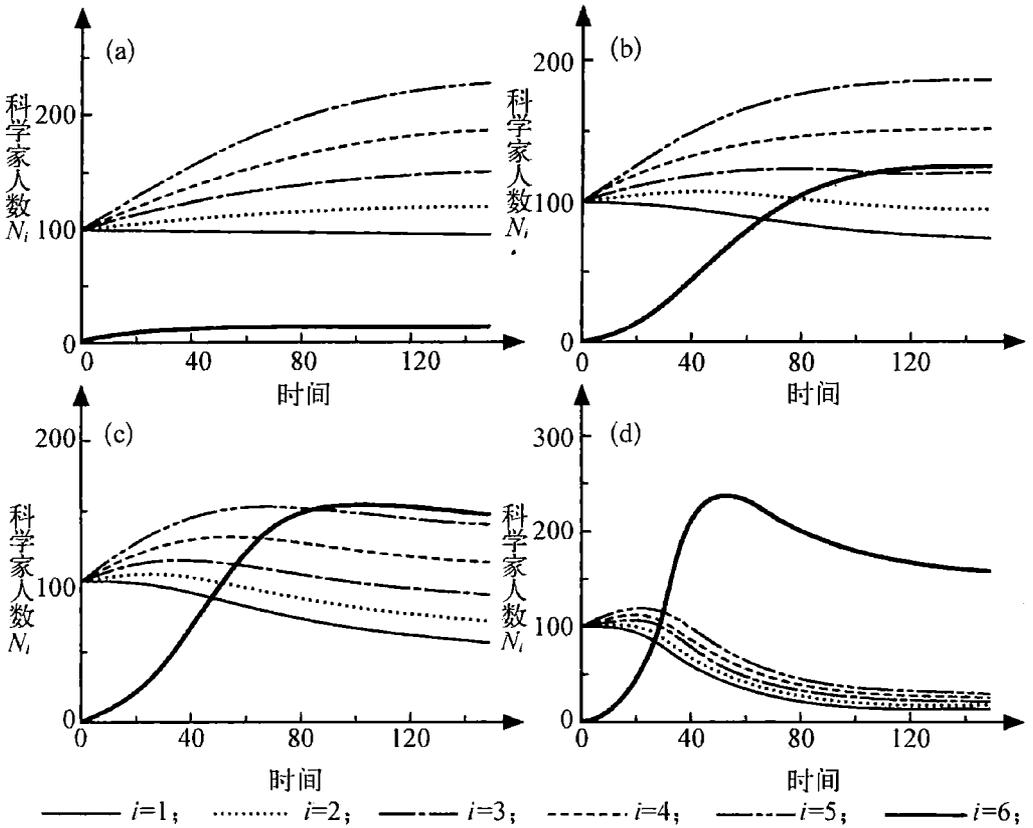


图 9.3 新科学领域的自繁殖率对邻近领域生长曲线的影响^[9, 8]

新领域的形成可能会有更加共存或更加选择的趋势。初始阶段的生长可能会或多或少快一些,或也可能被延缓。科学史上一个生长被延缓的著名例子是混沌理论本身,它在初始阶段只受到非常少的科学家的注意(例如庞加莱)。尽管这个新领域的数学原理是相当清楚的,但是其指数增长是前些年当计算技术可以处理非线性方程时才刚刚开始。有时,一个形成中的领域不可能膨胀成一个真正的科学领域,因为它与众多的环境领域相比仅仅具有弱的选择优势。遗憾的是,有些技术领域如替代能源(例如风能、太阳能),就仍然处于这种可怜状态,它们被强大的传统能源或核能工业所包围。如果一个新的有吸引力的领域出现了,科学家从周围领域争相进来的现象是可以观察到的。这些人正在适应新领域的

风格和问题求解模式。这种直接的领域变迁,有时导致了科学中的时髦现象。

众所周知,S型的非线性逻辑斯蒂映射产生出种种复杂动力学行为,如不动点、振荡、确定性混沌,如果适当控制参量的增加超过一定的临界值(图 2.22)。显然,随机性模型和确定性模型都反映了科学生长的某些典型性质。这些效应,是新领域的结构分化、缺省、创造、扩展,伴随着缓慢、消失、迅速生长、过度时髦和消退。对这些动力学效应的计算机辅助作图模拟中,可以用适当的序参量来刻画,序参量能以科学计量学数据为基础进行检验。在种种条件下的可能图景可以进行模拟,从而去预测未来发展的里程碑和领域。

但是迄今为止,科学研究领域进化的建模,仅仅根据了所选择的领域中科学人力的变化。科学生长的更合适的表示,必须要考虑到科学努力中的问题求解过程。但是,要找到一个合适的态空间来表示科学领域中问题求解的发展,是一个困难的方法论问题。在生物进化的数学理论中,物种可以用生物特征高维空间的点来表示(图 3.4)。一种物种的演化相应于一个点通过表型特征空间的移动。同理,在科学系统中,也必须建立起科学问题的高维特征空间。科学文章的构型以共引用集群(co-citation clusters)的多维尺度技术进行分析,用两维或三维空间的点来表示。研究问题常常用关键词(“宏观术语”)的序列来表示,关键词根据它们在科学叙述中出现或共现的频率来选取。

在连续的演化模型中,问题空间的每一点,都用相应于所研究问题的矢量来描述(图 9.4a)。问题空间由科学领域的所有科学问题构成,其中一些可能是未知的和有待研究的。这种空间是度规空间,因为两点之间的距离相应于所表示的问题之间的主题关联程度。时刻 t 工作于问题 q 的科学家自身在问题空间的分布密度为 $x(q, t)$ 。在此连续模型中, $x(q, t)dq$ 指的是于时刻 t 工作于“问题元” dq 的科学家人数(图 9.4b)。

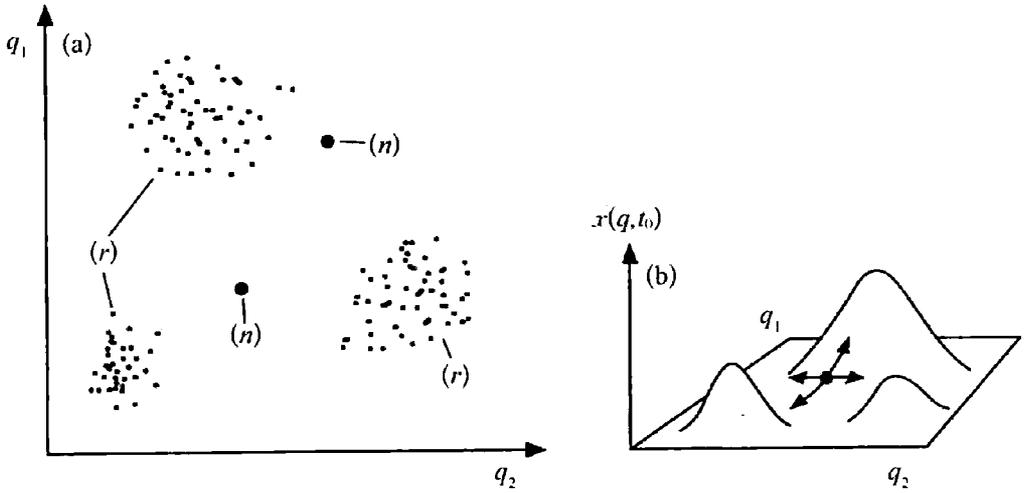


图 9.4 问题空间

(a) 两维问题空间, 研究领域(r)表现为关联问题的密度云, 新研究领域的可能核心(n); 以及(b)势貌, 时刻 t 问题空间的问题 $q=(q_1, q_2)$ 中的研究活动 $x(q, t)$ 。^[9.9]

因此, 此研究领域可能相应于问题空间中种种关联点的密度云。在这些较大密度区域之间的单个点, 相应于科学家工作于独立的研究问题, 它们代表了可能的新研究领域的核心。科学史表明, 一组研究问题成长为一个研究可能要花上数十年之久。在此连续模型中, 领域的变迁过程以密度变化来反映: 如果一位科学家从问题 q 变化到问题 q' , 则密度 $x(q, t)$ 将变小, $x(q', t)$ 将增加。科学家在问题空间的运动, 用一定的繁殖-输运方程来建模。函数 $a(q)$ 表示, 在领域 q 中科学家通过自繁殖和衰退而生长的人数变化率。因此, 它是一个在问题空间具有多个极大值和极小值的函数, 表示了科学领域中问题的吸引力的增加或减小。类似于物理势能(例如图 4.10), 人们可以把 $a(q)$ 解释为具有山地和低谷的势貌, 代表着研究领域的吸引子和停滞区(图 9.4b)。

知识生长的动力学模型已可用科学计量学进行检验。因此, 它们可能在科学哲学的科学生长概念与科学史的科学文献评价之间架起桥梁。在认知科学计量学中, 最近进行了一种尝试, 对研究问题的概念进行量

化,并在由文献计量学的、认知的和社会的特征所构成的适当问题空间中,将它们表示出来。由波普尔、库恩等人提出的科学史的简化模式,就可能用可检验的假说来代替。库恩的具有“常规”科学阶段和“革命”科学阶段的不连续的序列,显然难以解决知识的生长。另一方面,某些历史学家的朴素信念,即认为科学的生长是永恒真理的不断增长,无论如何也是不适合于研究之复杂动力学的。甚至波普尔的精致的后期哲学,认为科学并非通过不可归约的已有定律的单极增长,而是通过假说和批判的学习策略而增长的,也需要更精确和更明晰的变化着的方法论、体制和组织的历史标准。现代计算机的计算能力不断增加,使我们能够在社会科学中进行新的模拟试验的定量探索。动力学模型的巨大优势在于,通过计算机辅助以图形方式显示出改变参量的多种场景。这些场景可能会确证、限制或反驳所选的模型。最后,我们的科学政策决策时同样需要可靠的支持。不同的未来发展图景可能会帮助我们决定,我们的有限的研究预算资源向何处投资,以及如何实现所希望的未来社会状态。

因此,非线性建模和计算机辅助仿真可能使我们推导出多种未来,但是不可能提供一种在其中作出选择的算法。为了实现所希望的未来社会状态,常规的目标必须要包括进来。20世纪60年代以来,罗马俱乐部的一系列报告试图激起一种国际性争论,涉及人类的目标和可选择的未来,并有定量的长期预测的支持。在第7.2节中,我们看见了对于非线性世界进行长期定量模拟的局限。结果是,科学思想和技术创新不可能靠政治决策逼出。但是,它们的发生或不发生却决不是完全随机的事件。我们需要工具来评价所希望的目标和实现它们的机会。

一种非定量的探究方法是所谓的特尔菲法,它通过对专家组的咨询调查来帮助对科学技术的趋势进行决策和预测。“特尔菲”这个名字是传说中的皮提亚(图9.1)的参照物,传说皮提亚为作出预言而收集有关顾客的信息。今天的特尔菲法运用了科学专家的估计。一个个专家之间保

持隔离,使之判断不受社会压力或群体行为的影响。向每个专家征询,一定时期的可能的和(或)有希望的发明和科学突破的名称及其权重。有时,向他们征询的不仅仅是每一种发展的可能性,还要估计出每一种潜在发展的出现将对其他潜在发展的出现的影响的可能性。因此,人们就获得了一种相关的未来发展之网,这是可以用主观条件概率的矩阵来表示的。在下一阶段,专家被告知达成共识的项目。当他们被要求叙述出他们不同意大多数人的意见的理由时,若干个专家就会重新评价他们关于时间的估计,并排列出缩小了的每一种突破的范围。

当然,特尔非法不可能提供唯一的答案。但是,专家意见的分布中集中了有关潜在的主要突破的大量信息。对多数人意见的平均偏离,应该在专家不受到巨大压力的情况下得到缩小。但是,特尔非法因此不可能预见意料之外的东西。有时,特尔非法得到了相关树方法的支持,以从构造的决策树中的多种可能中选择出最好的行动。相关树方法运用了决策理论的思想,以评估一定未来的希望程度,并选择出有关的科学技术的领域,其发展对于实现这些目标是必需的。

显然,在一个复杂的非线性世界,不存在单一的作出预测和决定的方法。我们需要一个定量和定性方法的整合(“杂交”)网络。最后,我们需要用伦理的路标指导我们应用这些工具来掌握我们的未来。

9.3 复杂性、责任和自由

近年来,伦理学已成为吸引力不断增加的主题,感兴趣的广泛领域是多种多样的,包括工程师、医生、科学家、管理者和政治家。这种兴趣的原因是不断增长着的环境、经济和现代技术问题,以及责任、越来越多的警告,以及对于高度工业化世界关键性后果的接受在减少。但是我们必须

意识到,我们的伦理行为标准并非从天上掉到地面来的,也并非是由某种神秘的巨大权威所诏示的。它们已经发生了变化,并将继续变化下去,因为它们是植入我们的社会文化世界的进化之中。

对人类社会的建模中,我们决不要忘记,这里面对的是具有意向性活动的生命,是高度非线性的复杂系统的自指涉性。在社会科学中,有一种特殊的测量问题:对社会行为进行观察和记录的科学家自己也是他们所观察的社会系统中的成员。政治选举中的民意测验统计的效应,是一个众所周知的例子。进一步,社会的理论模型可能具有规范性功能,会影响其成员的未来行为。一个众所周知的例子是19世纪的社会达尔文主义,它试图把人类社会的发展解释成一种生物进化的线性延续。实际上,这种社会理论激发起来一种粗暴的意识形态,把合法性赋予历史上社会、经济和种族的胜利者进行的无情选择。今天,有点时髦的是,用自组织的生物模型来合法化基本民主和生态经济的政治思想。^[9.10]但是,自然既不好也不坏,既无和平也无军队。这些都是人类的评价。经历了多少个百万年之久的生物策略是以无数的群体和物种——它们有基因缺省、癌症等等——为代价的,因此从人类的观点看,其间是充满着其他种种残忍的。它们不可能为我们的政治、经济和社会的发展提供伦理标准。

在本书中,我们已经看到,历史上的生命、精神和社会之历史模型,往往都是依赖于历史的自然概念和技术的技术标准的。特别是,线性的确定论因果观点,在自然、社会和技术科学史上曾经是占支配的范式。它还影响了伦理规范和价值,对于它们的理解不能脱离产生它们的历史时代的认识论概念。认识论和伦理学的历史相互关联性,并不意味着任何种类的相对主义或自然主义。对于科学理论和假说,我们必须把它们的历史的、心理学的发明和发现的内容,与确证和有效性的内容加以区分。甚至人权也有其含义变化的历史发展。^[9.11]黑格尔曾经主张,人类史可以被理解为“向自由的发展”。因此,在我们讨论一种复杂的非线性的随机

世界中可能的伦理后果时,我们需要简要回顾一下伦理标准的历史发展。

伦理学,如同逻辑学、认识论、科学哲学、语言、法律、宗教等,是一门哲学学科。^[9.12]历史上,“伦理学”一词可以追溯到古希腊语中的 $\eta\theta\omicron\varsigma$,它原意是指习俗和实践。起初,伦理学被理解为关于道德习俗和规矩的学说,目的是教会人们怎样生活。伦理学的中心问题也就是,去发现一个好的道德准则,以忠告人们如何更好地生活,更正当行动,以及更合理地决策。苏格拉底以来的古希腊哲学家,已经讨论了其中的一些基本概念。柏拉图,这位苏格拉底的学生,把苏格拉底对于更好地生活的探索推广为对于最大的善的普遍理念,这种理念是永恒的、与历史生活无关的,隐藏在短暂的、不断变化的物质世界背后。^[9.13]

亚里士多德批评了他的老师,认为这种的永恒价值学说忽视了真实的人类生活。在亚里士多德看来,善、正义和合理的有效性都涉及政治社会(城邦)、家庭和个人之间的相互作用。^[9.14]城邦中的正义,靠自由人的自然利益的比例或平衡实现。幸福就是人的最大的善,它的实现是按照城邦和家庭的自然习俗和实践而成功地生活。显然,亚里士多德的伦理学概念相应于他的有机自然观,他的自然观中充满着植物、动物和人类的生长和成熟。

在古希腊城邦解体以后,伦理学也就需要一种新标准框架。在伊壁鸠鲁的伦理学中,强调了个体生活、行动和情感的内在平等,而斯多葛派的伦理学则强调所有人的由自然实现的外在平等。在基督教的中世纪,永恒价值的等级则是由神的世界秩序来保证的。在近代初期,普遍接受为伦理学基础的神学框架的解体时机就成熟了。

笛卡儿不仅主张了一种机械的自然模型,他还主张一种以科学理性为基础的道德系统。斯宾诺莎推导出来一个合理性主义道德公理体系,与确定论的、机械的自然模型相呼应。因为人们相信自然规律与合理性规律的一致,人的自由也就仅仅意味着按照合理性的确定论规律而行动。

最大的善,也就是指合理性对于质料性人体的情感的支配作用。霍布斯捍卫一种机械的自然观和社会观,但是他却怀疑人类的合理性。政治规律和习俗都只能由集权的“绝对君主”来保证。最大的善是和平,即是处于某种绝对主义国家的不动的、最终的平衡。

洛克、休谟和斯密的自由社会,则可以理解为类似于关于可分离的力和相互作用着的天体的牛顿模型。在美国革命和法国大革命中,个体的自由被当作一种自然权利。^[9.15]但是在一个确定论因果关系的机械论世界中,如何来论证个体的自由呢?甚至自然事件也不过是线性因果链的结果,原则上可以从运动的力学方程中推导出来。只有人类才被假定能够自发地、自由地作出决策,激起因果行动链,而不受外部环境的影响。康德把这种人的特征称作“自由因果性”。

人们不受任何一个人的意见和愿望的支配,只有可以为所有人接受的忠告才被看作是有理由的。用康德的话来说,只有那些被普遍接受的“准则”才可以被看作是普遍的道德律。这个正式的道德普遍性原理,是康德的著名的理性范畴规则:我们的行动应该遵从这些规则,它们被正当地看作普遍的道德律。个人的自由受到他或她的邻居的自由所制约。在另一处的著名表述中,康德说,人作为一种自由动物不应该被误解为侵犯别人利益的工具。因此,除了受确定论规律支配的机械论自然界,还有一个具有自由和道德规律的内部理性世界。康德的自由伦理见解,已经融进了所有现代宪法国家的正式原则中。^[9.16]

但是,在真实的政治和经济世界中自由规律如何才能实现呢?在工业化的最初阶段,英裔美国人的功利主义伦理学(源于边沁和穆勒)要求对个人的幸福作出评判。多数人的幸福被看作是最大的伦理学的善。与康德提出的正式的个体自由原理不同,功利主义的幸福原理可以被解释为对于它的物质性完善。美国宪法中,它被明确地解释为自然人权。功利主义的哲学家和经济学家把对于幸福的要求看作一种收益函数,即以

优化的最小代价来实现多数人的最大福利。这种功利主义原理已经成为福利经济学的伦理学框架。^[9.17]

现代哲学家如约翰·罗尔斯认为,功利主义原理与康德的伦理普遍性要求结合起来,有助于实现现代福利政治中的物品公平分配的需要。^[9.18]从方法论的观点看,功利主义的伦理的、政治的和经济的模型相应于一种自组织的复杂系统,其中具有单个的平衡不动点,由社会收益函数的优化来实现,与实现多数人的物品公平分配相联系。

显然,康德的伦理学以及英裔美国人的功利主义,都是判断我们的行动的规范性要求。它们可以为个体所接受,也可能不被接受。黑格尔主张,个体的主观伦理标准是历史中的客观历史过程的产物,是由社会的组织体制来实现的。因此,他把社会中个体的主观道德和主观理性与组织的客观道德和客观理性进行了区分。历史上,黑格尔以市民社会的现实的习俗和道德为基础的伦理学,使我们回想起亚里士多德的现实的古希腊城邦的伦理学。但是,亚里士多德的社会秩序是静态的,而黑格尔假定了一种国家及其组织体制的历史进化。

从方法论的观点看,值得注意的是,黑格尔已经把个体的微观水平与社会及其组织体制的宏观水平进行了区分,宏观水平不仅仅是其中公民的加和。而且,他把社会的进化描述为并非由单个个体的意向性和主观理性所决定的,而是由集体理性的自组织过程所决定的。然而,黑格尔相信的,是一种颇为简化的进化模型,其相继的平衡态导致一个最终的不动点,这个不动点是由一个公平的市民社会的吸引子所实现的。

弗里德里希·尼采抨击了这种客观理性信念以及作为唯心论意识形态的永恒伦理价值的信念,指出它们与真正的生活力量不相符合。尼采的生命哲学受到在19世纪末已经成为一种流行哲学的达尔文进化生物学的影响。尽管尼采已在他的著述中批判了民族主义和种族主义,但是他对生命和生存斗争的胜利者的颂扬却在20世纪的政治中被严重误用

了。然而，他是另一个例子，表明了从自然科学中借用的概念影响了政治和伦理思想。^[9.19]

在20世纪，马丁·海德格尔继续了尼采的虚无主义及其对现代文明的批判。在海德格尔看来，人类的技术进化是一种没有任何取向的自动作用，这就忘记了人和人性的根本基础。如海德格尔这样的哲学家，不可能也不会改变或影响这种进化。他仅仅有容忍这种强加的命运的自由。但是，海德格尔是以什么方式来反对技术文明，而不是屈从、听天由命，要逃匿到某种没有技术的、历史上从未存在过的田园诗式的乌托邦？看来，这是对于自然和社会中的拉普拉斯万能计划和普遍控制能力信念的极端反动。^[9.20]

本书中已经讨论过的复杂系统探究方式的伦理学后果是什么呢？首先，我们必须意识到，复杂系统理论不是一种形而上学的过程本体论。它也不是一种传统哲学意义上的认识论信念。这种方法论的原理，对于自然科学和社会科学中建构非线性复杂系统的模型，提供了一种启发性的模式。如果这些模型不能够进行数学处理，其性质不能够进行量化，那么我们得到一种经验性模型，这样的模型也许与数据符合也许不相符合。而且，它力图在奥卡姆剃刀的意义最小程度地运用假说。因此，它是一种数学的、经验的、可检验的、有启发性的经济方法论。而且，它还是一种交叉学科研究纲领，结合了多种自然科学和社会科学。不过，它并非一种传统哲学意义上的伦理学信念。

然而，我们的自然和社会中的复杂的非线性随机过程的模型，对于我们的行为却具有重要的后果。一般而言，在一个非线性复杂现实中，线性的思维方式是危险的。我们已经认识到，传统的自由概念是以线性的行为模型为基础的。在这种框架中，每一事件都是某种明确定义的起始原因的结果。因此，如果我们采取一种线性的行为模型，那么对一事件或结果的责任就显得是唯一可判定的。但是，由局部的亿万个自利的人的非

线性相互作用造成了全球性生态危害的情形又怎样呢？记住，作为一个例子，我们需要的，是一个生态和经济的良好均衡的复杂系统。由于生态混沌可以是全球性的、不可控制的，汉斯·约纳斯等一些哲学家就主张，我们应该停止一切可能引起某些未知后果的行动。^[9.21]但是，我们却决不可能预见一个复杂系统的长期发展。难道我们因此应该后退到海德格尔那样的屈从态度上吗？问题在于，无所事事不一定稳定一个复杂系统，却可能将它推进到另一种亚稳态。然而，在混沌的情形，对于复杂系统作出短期的预测则是可能的，从而（例如）在经济学中是可以作出努力来加以改进的。但是，在随机性和信息噪声的情形，任何种类的预测都失效了，尽管我们可以是完全了解到复杂系统中互动的局部规则亦如此。

在一个线性的模型中，结果的范围据信类似于其原因的范围。因此，一个该受惩罚的行动，法律上的惩罚就是按照受损程度的大小来进行。但是，微小涨落的蝴蝶效应，最初不过是某个人、某个群体或某个公司引发的，最后却导致了某种全球性的政治和经济危机，对此又该怎样办呢？例如，考虑管理者和政治家的责任，他们的失误可能引起了数以千计或数以百万计的人们的灾难。^[9.22]但是责任在随机事件中又是什么样的情况呢？例如在互联网中干扰信息必须事先加以预防，如果混乱已经出现，则为时已晚。

人类的生态、经济和政治等问题都已经成为全球性、复杂的、非线性和随机性的问题，传统的个人责任的概念也就变得可疑了。我们需要的，是新的集体行为模型，它们依赖于我们有着种种差别的一个个成员及其见解。个体的决策自由并没有被废弃，但却是受到自然和社会中复杂系统集体效果的制约，从长期看复杂系统是不可预测和不可控制的。因此，只有个人的良好愿望是不够的。我们必须考虑它们的非线性效果。全球的动力学相图提供了在一定环境下的可能图景。它们有助于实现合适的条件，去促进所希望的发展，并防止有害的发展。

全球化的动力学,无疑是人类未来面对的最重要的复杂性的政治挑战。柏林墙倒塌后,政治家们相信一种线性的假设,即自由市场和民主的动力学的耦合,将自动产生一个现代化的热爱和平的各个民族——有着公民意识的公民和消费者——的共同体。这是存在于一个复杂的世界的可怕的错误!从我们的角度来看,复杂性是由多组分的动力学所推动的。政治家和经济学家忘了,还有民族和宗教、心理和社会力量的存在,这些力量能够支配一个国家处于一个不稳定的临界点上的整体动力学。由复杂动力学系统可知,我们决不能忘记动力学的初始条件和二次条件。如果自由市场和选举在欠发展条件下实施,不稳定就会出现。

最近的研究^[9.23]表明,在东南亚、南美、非洲、欧洲东南部和中东的许多国家,自由放任的经济和选举自由相结合并没有自动带来更多的公正、福利与和平,而是将这些地区由平衡引向分裂和动乱。原因之一是这些国家的多数人民都没有受过良好的教育,因此少数聪明的种族群体、部落及党派掌控和主宰市场和政治的动力学。用复杂动力学的术语来讲,他们是支配(“役使”)一个国家的整个动力学的序参量。同样,仅有民主和自由市场的良好意愿是不够的,我们必须考虑国家和地区的当地条件。

在古典哲学中,从一个旨在发展过渡到违背哲学精神的发展,已成为著名的辩证法矛盾(如,黑格尔)。良好的愿望,可能会导致不良的后果。但有时人类主体是被历史推动而取得良好结果而非靠主观意愿,黑格尔称它为“理性的狡黠”(List der Vernunft)。事实上,它是一种非线性动力学众所周知的效应。因此,主导市场的少数人并不是先验的恶。少数人也是活动的驱动力。如果他们是开明的、灵活变通的,那么他们也能防止可能只能是短期成功的狭隘的“役使”。从他们自身利益出发,他们必须设法长期稳定整个系统。因此,在向一个大多数人的民主和福利的相变过渡中,他们应该帮助抑制自由市场的社会影响,弥合社会分歧,并超越阶级划分。但是,这些相变可能因世界的不同地区而异。负责任的决定,

需要按照蝴蝶效应对当地条件具有敏感度。

可是在地区和国家中,并非只有当地的少数人存在。在全球化的过程中,少数国家、机构和公司可以掌控和支配整个全球性经济和政治的动力学。近期关于全球化的讨论显示出,很多人对全球化的结果并不满意。但必须认识到,全球化仅仅意味着世界政治经济系统的动力学。因此,最初的时候,它如天气的动力学一样既不善也不恶;但是不同于天气的是,全球化的动力学是由人及其所在机构的相互作用产生的。因此,如果我们考虑到复杂性和非线性的动力学规律,我们还是有机会去影响全球化的。

这是铁一般的事实,全球化的序参量已是由少数国家定义的。无论我们喜欢与否,它们是世界上最主要的政治、经济、军事和技术力量。哲学家、数学家和系统科学家则是没有权力的。但是,再强调一次,我们应该运用黑格尔的“理性的狡黠”:少数人也是居于中心的驱动力,有机会能够促使改变。没有政治权力的概念和想法,都是没有机会的。

全球化意味着世界向着全球治理的关键阶段跃迁。我们需要新的全球结构,根据地球上绝大多数人的利益来管理世界的政治、经济、军事和技术力量。全球结构是从人们、国家和系统的非线性相互作用中出现的。18世纪末,康德就已经提出了通过多国法律带领走向“永久的和平”(1795)。^[9, 24]第一次世界大战后,美国总统威尔逊对国际联盟的基础具有强烈的影响。第二次世界大战后,联合国提呈了处理国际冲突的新的可能性,但往往因为缺乏权力而失败。国际法的困境是,法律需要权力来强制执行权利和道德准则。因此,国家必须放弃部分主权,以便被普遍接受的“序参量”来主导。2001年“9·11”之后,恐怖主义形成的全球网络威胁着世界的主要的政治和经济国家。这就是为什么,特别是在历史上曾帮助建立国际联盟以及联合国的美国,现在在犹豫是否限制国家主权,并倾向于通过全球军事防卫来保证国家安全。

显然,在各个自治国家中达到全球治理这是一条漫长道路。另一方面,我们不能忘记联合国新的社会和人道主义机构所做实际进展。尽管在政治现实中有反对和摩擦,但是新的合作的经济、科技和文化网络等的出现,让人们慢慢成长起来。在通向“永久的和平”的道路上,康德描述了一个自治国家联邦(多组分)共同社会,自治国家自组织其政治、经济和文化事务而没有军事冲突。但他的模型有名的奏效条件,在于按照自由之民法,组织其内部事务的状态。这是历史经验的铁一般的事实,公民意识和教化有时不仅会被军事力量所保护,更会被其强制执行。只要对自由之民法的要求没有在国际上得到满足,军事权力组织就是一个对全球化的紧迫挑战。

全球信息和计算网络,如互联网、无线移动通信系统,加速了全球化和国际合作。另一方面,地球村的电子愿景,可能意味着一种对于个人自由的严重威胁。如果公民的信息可轻易地从巨大的通信网络中获得并对其进行评判,那么就必須老老实实地承认,这有被利益机构滥用的危险。如同在传统的商品经济学中,可能出现信息垄断,而不利于其他的人、阶级和国家。例如,考虑前面讲到的“第三世界”或“南方”,其信息服务系统尚欠发达,它们在一个全球性通信村中就可能得不到如同“北方”那样的公平的机会。

我们的医生和心理学家必须学会把人看作心和身的复杂非线性实体。线性的思维可能有损于作出成功的诊断。医疗中采取局部的、孤立的和“线性的”疗法,可能会引起负面的协同效应。因此,值得注意的是,为了救死扶伤,对于复杂的医学和心理学情形进行建模必须要保持高度敏感性和谨慎从事。复杂系统探究方式不可能给我们解释生命是什么。但是它向我们表明,生命是如何复杂和敏感。因此,它可以帮助我们自觉意识到我们的生命的价值。

但是,如果可以计算,那么我们生命的价值是什么? 本书的最重要的

见解之一就是自然和社会的动力学不仅具有非线性和混沌的特征,也具有随机性的特征。只有在随机性过程中,人的自由意志才有一个真正的机会。^[9.25]在一个完全确定的可计算的机械自然界中,康德不得不假定一个先验的世界,以使自由意志、道德义务和责任成为可能。在自然和社会的随机状态下,一个系统的行为是不以任何方式被确定的。即使在一个动态系统中元素间相互作用的所有规则都已知,仍然可能产生随机动力学。在这种情况下,系统的动力学对应于不可归约的计算,这意味着预测是不可能的。唯一能够了解该系统的未来的方法,就是去实施动力学。例如,即使我们知道所有突触间的相互作用规则,大脑的宏观行为仍是对应到一个不可归约的计算。在这种情况下,我们的人生不存在任何捷径或有限程序,我们只有通过生活来体验生命。令人吃惊的是,人的自由意志似乎是由可计算性数学理论支持的。

显然,对于政治学、经济学、生态学、医学和生物科学、计算科学和信息科学的伦理学,从复杂系统理论可以得到一些结论。这些伦理学结论强烈地依赖于我们关于自然和社会中复杂非线性动力学的知识,但是它们并非是从复杂系统的原理中推导出来的。因此,我们并不捍卫任何的伦理学自然主义或还原主义。城市发展、全球生态、人的器官或信息网络的动力学模型,都仅仅是提供了有不同吸引子的可能图景。问题在于,我们应该评价出,哪个吸引子应是我们从伦理学上所偏爱的,并通过实现合



我能够认识什么?
我必须去做什么?
我可以希望什么?

图 9.5 康德的三个问题

适的条件而有助它的实现。伊曼努尔·康德在三个著名问题中概括了这些哲学问题：^[9. 26]

第一个问题涉及认识论，关系到我们的认知的可能性和限度。对于自然和社会的非线性动力学，复杂系统理论解释了我们能够认识什么而无法认识什么。一般而言，这个问题要求进行科学研究，以改进我们关于复杂性和演化的知识。

第二个问题涉及伦理学和对我们的行动的评价。一般而言，这个问题要求我们，在处理自然和社会中高度敏感的复杂系统时保持敏感性。我们既不要冒进也不要后退，因为冒进以及后退都可能推动系统从一种混沌态变到另一种混沌态。我们既要谨慎也要果敢，遵从演化中的非线性和复杂性的条件。在政治中，我们应该意识到，任何一种单向因果性都可能导致教条主义、狭隘偏执和狂热盲信。

康德的最后一个问题“我可以希望什么？”涉及“至善”。它传统上在宗教哲学中作为至善(*summum bonum*)来讨论。乍一看，这似乎超出了复杂系统理论只允许我们从长远角度追溯全球的情景，在特定条件下进行短期预测的范围。但是，当我们考虑到长远的人类社会文化演变时，至善就是人们一直为之奋斗的个人尊严。这并不取决于个人能力、智力程度或者与生俱来的先天社会优势。在非线性和随机性的历史洪流中，这一直是人类自决的自由行动。我们必须将至善置入复杂性不断增长的持续演化之中。

参考文献

参考文献列表及附带的说明文字据原著影印。

Chapter 1

- 1.1 Mainzer, K./Schirmacher, W. (eds.): *Quanten, Chaos und Dämonen. Erkenntnistheoretische Aspekte der modernen Physik*. B.I. Wissenschaftsverlag: Mannheim (1994)
- 1.2 Stein, D.L. (ed.): *Lectures in the Sciences of Complexity*, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity vol. 1. Addison-Wesley: Redwood City, CA. (1989); Jen, E. (ed.): *Lectures in Complex Systems*, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity vol. 2 (1990); Stein, D.L. (ed.): *Lectures in Complex Systems*, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity vol. 3 (1991); Kurdyumov, S.P.: *Evolution and self-organization laws in complex systems*, *Intern. J. Modern Physics C* vol. 1, no. 4 (1990) 299–327
- 1.3 Nicolis, G./Prigogine, I.: *Exploring Complexity. An Introduction*. W.H. Freeman: New York (1989)
- 1.4 Haken, H.: *Synergetics. An Introduction*, 3rd Edn. Springer: Berlin (1983)
- 1.5 Mainzer, K.: *Symmetries in Nature*. De Gruyter: New York (1995) (German original: *Symmetrien der Natur* 1988); Mainzer, K.: *Symmetry and Complexity: The Spirit and Beauty of Nonlinear Science*. World Scientific: Singapore (2005)
- 1.6 Chua, L.O.: *CNN: A Paradigm for Complexity*. World Scientific: Singapore (1998)

Chapter 2

- 2.1 For historical sources of Sect. 2.1 compare Mainzer, K.: *Symmetries in Nature*. De Gruyter: New York (1994) (German original 1988) Chapter 1
- 2.2 Diels, H.: *Die Fragmente der Vorsokratiker*, 6th ed., revised by W. Kranz, 3 vol. Berlin (1960/1961) (abbrev.: Diels-Kranz), 12 A 10 (Pseudo-Plutarch)
- 2.3 Diels-Kranz 13 A 5, B 1
- 2.4 Diels-Kranz 22 B 64, B 30
- 2.5 Heisenberg, W.: *Physik und Philosophie*. Ullstein: Frankfurt (1970) 44
- 2.6 Diels-Kranz 22 B8
- 2.7 Diels-Kranz 31 B8
- 2.8 Heisenberg, W.: *Die Plancksche Entdeckung und die philosophischen Grundlagen der Atomlehre*, in: Heisenberg, W.: *Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaften*. S. Hirzel: Stuttgart (1959) 163
- 2.9 Cf. also Hanson, N.R.: *Constellations and Conjectures*. Boston (1973) 101
- 2.10 Hanson, N.R. (see Note 9, 113) carried out corresponding calculations.
- 2.11 Bohr, H.: *Fastperiodische Funktionen*. Berlin (1932)

- 2.12 Forke, A.: *Geschichte der alten chinesischen Philosophie*. Hamburg (1927) 486; Fêng Yu-Lan: *A History of Chinese Philosophy vol. 2: The Period of Classical Learning*. Princeton NJ (1953) 120
- 2.13 Mainzer, K.: *Geschichte der Geometrie*. B. I. Wissenschaftsverlag: Mannheim/ Wien/ Zürich (1980) 83; Edwards, C.H.: *The Historical Development of the Calculus*. Springer: Berlin (1979) 89
- 2.14 Mainzer, K.: *Geschichte der Geometrie* (see Note 13) 100; Abraham, R.H./Shaw, C.D.: *Dynamics – The Geometry of Behavior Part 1*. Aerial Press: Santa Cruz (1984) 20
- 2.15 Audretsch, J./Mainzer, K. (eds.): *Philosophie und Physik der Raum-Zeit*. B.I. Wissenschaftsverlag: Mannheim (1988) 30
- 2.16 Audretsch, J./Mainzer, K. (eds.): *Philosophie und Physik der Raum-Zeit* (see Note 15) 40; Weyl, H.: *Raum, Zeit, Materie*. Vorlesung über Allgemeine Relativitätstheorie. Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt (1961) (Reprint of the 5th Edition (1923)) 141
- 2.17 Mach, E.: *Die Mechanik*. Historisch-kritisch dargestellt. Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt (1976) (Reprint of the 9th Edition (1933)) 149; Abraham, R.H./Shaw, C.D.: *Dynamics – The Geometry of Behavior* (see Note 14) 57
- 2.18 Ruelle, D.: Small random perturbations of dynamical systems and the definition of attractors. *Commun. Math. Phys.* **82** (1981) 137–151; Abraham, R.H./ Shaw, C.D.: *Dynamics – The Geometry of Behavior* (see Note 14) 45
- 2.19 For an analytical elaboration cf. Stauffer, D./ Stanley, H.E.: *From Newton to Mandelbrot. A Primer in Theoretical Physics*. Springer: Berlin (1990) 26
- 2.20 Nicolis, G./Prigogine, I.: *Die Erforschung des Komplexen* (see Chapter 1, Note 3) 132; Abraham, R.H./Shaw, C.D.: *Dynamics – The Geometry of Behavior* (see Note 14) 168, 174
- 2.21 For an analytical elaboration cf. Mainzer, K.: *Symmetries in Nature* (see Note 1) Chapter 3.31; Stauffer, D./Stanley, H.E.: *From Newton to Mandelbrot* (see Note 19) 24
- 2.22 Arnold, V.I.: *Mathematical Methods of Classical Mechanics*. Springer: Berlin (1978); Davies, P.C.W.: *The Physics of Time Asymmetry*. Surrey University Press: London (1974); Penrose, R.: *The Emperor's New Mind*. Oxford University Press: Oxford (1989) 181
- 2.23 Lichtenberg, A.J./Liebermann, M.A.: *Regular and Stochastic Motion*. Springer: Berlin (1982); Schuster, H.G.: *Deterministic Chaos. An Introduction*. Physik-Verlag: Weinheim (1984) 137
- 2.24 Poincaré, H.: *Les Méthodes Nouvelles de la Mécanique Céleste*. Gauthier-Villars: Paris (1892)
- 2.25 Arnold, V.I.: Small Denominators II. Proof of a theorem of A.N. Kolmogorov on the preservation of conditionally-periodic motions under a small perturbation of the Hamiltonian. *Russ. Math. Surveys* **18** (1963) 5; Kolmogorov, A.N.: On Conservation of Conditionally-Periodic Motions for a Small Change in Hamilton's Function, *Dokl. Akad. Nauk. USSR* **98** (1954) 525; Moser, J.: Convergent series expansions of quasi-periodic motions, *Math. Ann.* **169** (1967) 163
- 2.26 Cf. Arnold, V.I.: *Mathematical Methods of Classical Mechanics* (see Note 22); Schuster, H.G.: *Deterministic Chaos* (see Note 23), 141
- 2.27 Hénon, M./Heiles, C.: The applicability of the third integral of the motion: Some numerical experiments, *Astron. J.* **69** (1964) pp. 73; Schuster, H.G.: *Deterministic*

- Chaos (see Note 23), 150; Figures 2.16a–d from M.V. Berry in S. Jorna (ed.), Topics in nonlinear dynamics, Am. Inst. Phys. Conf. Proc. vol. 46 (1978)
- 2.28 For mathematical details compare, e.g. Staufner, D./Stanley, H.E.: From Newton to Mandelbrot (see Note 19), 83
- 2.29 Mainzer, K.: Symmetrien der Natur (see Note 1), 423; Primas, H./Müller-Herold, U.: Elementare Quantenchemie. Teubner: Stuttgart (1984) with an elementary introduction to the Galileo-invariant quantum mechanics (Chapter 3)
- 2.30 Audretsch, J./Mainzer, K. (eds.): Wieviele Leben hat Schrödingers Katze? B.I. Wissenschaftsverlag: Mannheim (1990)
- 2.31 Gutzwiller, M.C.: Chaos in Classical and Quantum Mechanics. Springer: Berlin (1990)
- 2.32 Friedrich, H.: Chaos in Atomen. in: Mainzer, K./Schirmacher, W. (eds.): Quanten, Chaos und Dämonen (see Note 1 of Chapter 1); Friedrich, H./Wintgen, D.: The hydrogen atom in a uniform magnetic field, Physics Reports 183 (1989) 37–79
- 2.33 Birkhoff, G.D.: Nouvelles recherches sur les systèmes dynamiques, Mem. Pont. Acad. Sci. Novi Lyncaei 1 (1935) 85
- 2.34 Enz, C.P.: Beschreibung nicht-konservativer nicht-linearer Systeme I–II. Physik in unserer Zeit 4 (1979) 119–126. 5 (1979) 141–144 (II)
- 2.35 Lorenz, E.N.: Deterministic nonperiodic flow, J. Atmos. Sci. 20 (1963) 130; Schuster, H.G.: Deterministic Chaos (see Note 23) 9
- 2.36 Eckmann, J.P.: Roads to turbulence in dissipative dynamical systems, Rev. Mod. Phys. 53 (1981) 643; Computer simulation of Fig. 2.21 from Lanford, O.E., Turbulence Seminar, in: Bernard, P./Rativ, T. (eds.): Lecture Notes in Mathematics 615, Springer: Berlin (1977) 114
- 2.37 Mandelbrot, B.B.: The Fractal Geometry of Nature, Freeman: San Francisco (1982); Grassberger, P.: On the Hausdorff dimension of fractal attractors, J. Stat. Phys. 19 (1981) 25; Lichtenberg, A.J./Liebermann, M.A.: Regular and Stochastic Motions (see Note 23)
- 2.38 Collet, P./Eckmann, J.P.: Iterated Maps of the Interval as Dynamical Systems, Birkhäuser: Boston (1980) (see Figures 2.22–24)
- 2.39 Großmann, S./Thomae, E.: Invariant distributions and stationary correlation functions of one-dimensional discrete processes, Z. Naturforsch. 32 A (1977) 353; Feigenbaum, M.J.: Quantitative universality for a class of nonlinear transformations, J. Stat. Phys. 19 (1978) 25
- 2.40 Mainzer, K.: Symmetrien der Natur (see Note 1)
- 2.41 Cf. Nicolis, G./Prigogine, I.: Die Erforschung des Komplexen (see Note 3, Chapter 1) 205
- 2.42 Cf. Prigogine, I.: From Being to Becoming – Time and Complexity in Physical Sciences, Freeman: San Francisco (1980); Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes. Wiley: New York (1961)
- 2.43 Fig. 2.26 from Feynman, R.P./Leighton, R.B./Sands, M.: The Feynman Lectures of Physics vol. II. Addison-Wesley (1965)
- 2.44 Haken, H.: Synergetics (see Note 4, Chapter 1) 5
- 2.45 Haken, H.: Synergetics (see Note 4, Chapter 1) 202; Haken, H.: Advanced Synergetics. Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices. Springer: Berlin (1983) 187; Weinberg, S.: Gravitation and Cosmology. Principles and Applications of the General Theory of Relativity. Wiley: New York (1972)
- 2.46 Cf. Mainzer, K.: Symmetrien der Natur (see Note 1) Chapter 4

- 2.47 Curie, P.: Sur la Symétrie dans les Phénomènes Physiques, *Journal de Physique* **3** (1894) 3
- 2.48 Audretsch, J./Mainzer, K. (eds.): *Vom Anfang der Welt*. C.H. Beck: München (²1990); Mainzer, K.: *Symmetrien der Natur* (see Note 1) 515; Fritzsche, H.: *Vom Urknall zum Zerfall. Die Welt zwischen Anfang und Ende*. Piper: München (1983) 278
- 2.49 Hawking, S.: *A Brief History of Time. From the Big Bang to Black Holes*. Bantam Press: London (1988); Hoyle, F./Burbridge, G./Narlikar, J.V.: A quasi-steady state cosmological model with creation of matter. *Astrophys. Journal* **410** (1993) 437–457
- 2.50 Hartle, J.B./Hawking, S.W.: Wave function in the universe. *Physical Review D* **28** (1983) 2960–2975; Mainzer, K.: *Hawking*. Herder: Freiburg (2000)
- 2.51 Audretsch, J./Mainzer, K. (eds.): *Vom Anfang der Welt* (see Note 48) 165
- 2.52 Greene, B.: *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. W.W. Norton & Co: New York (1999); Hawking, S.W.: *The Universe in a Nutshell*. Bantam Books: New York (2001); Mainzer, K.: *The Little Book of Time*. Copernicus Books: New York (2002)
- 2.53 Whitesides, G.M./Mathias, J.P./Seto, C.T.: Molecular self-assembly and nanochemistry: A chemical strategy for the synthesis of nanostructures. *Science* **254** (1991) 1312–1319
- 2.54 Feynman, R.: There's plenty of room at the bottom. *Miniaturization* **282** (1961) 295–296
- 2.55 Drexler, K.E.: Nanotechnology summary. *Encyclopedia Britannica Science and the Future Yearbook* **162** (1990); compare also Drexler, K.E.: *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation*. John Wiley & Sons: New York (1992)
- 2.56 Whitesides, G.M.: The once and future nanomachine. *Scientific American* **9** (2001) 78–83
- 2.57 Newkome, G.R. (ed.): *Advances in Dendritic Macromolecules*. JAI Press: Greenwich, Conn. (1994)
- 2.58 Curl, R.F./Smalley, R.E.: Probing C₆₀. *Science* **242** (1988) 1017–1022; Smalley, R.W.: Great balls of carbon: The story of Buckminsterfullerene. *The Sciences* **31** (1991) 22–28
- 2.59 Müller, A.: Supramolecular inorganic species: An expedition into a fascinating rather unknown land mesoscopia with interdisciplinary expectations and discoveries, *J. Molecular Structure* **325** (1994) 24; *Angewandte Chemie (International Edition in English)* **34** (1995) 2122–2124; Müller, A./Mainzer, K.: From molecular systems to more complex ones. In: Müller, A./Dress, A./Vögtle, F. (Eds.): *From Simplicity to Complexity in Chemistry – and Beyond*. Vieweg: Wiesbaden (1995) 1–11
- 2.60 Fig. 2.32 with drawings of Bryan Christie: *Spektrum der Wissenschaft Spezial* **2** (2001) 22
- 2.61 Dry, C.M.: Passive smart materials for sensing and actuation. *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures* **4** (1993) 415
- 2.62 Amato, I.: Animating the material world. *Science* **255** (1992) 284–286
- 2.63 Joy, B.: Why the future doesn't need us. *Wired* **4** (2000)
- 2.64 Smalley, R.E.: Of chemistry, love and nanobots. *Scientific American* **9** (2001) 76–77
- 2.65 Abarbanel, H.D.I.: *Analysis of Observed Data*. Springer: New York (1996); Kanz, H./Schreiber, T.: *Nonlinear Time Series Analysis*. Cambridge University Press: Cambridge (1997)
- 2.66 Takens, F.: Detecting strange attractors in turbulence. In: Rand, D.A./Young, L.S. (eds.): *Dynamical Systems and Turbulence*. Springer: Berlin (1981) 366–381

- 2.67 Kaplan, D./Glass, L.: *Understanding Nonlinear Dynamics*. Springer: New York (1995) 310 (Fig. 6.20)
- 2.68 Kaplan, D./Glass, L.: *Understanding Nonlinear Dynamics* (see Note 67) 310 (Fig. 6.21), 311 (Fig. 6.22)
- 2.69 Kaplan, D./Glass, L.: *Understanding Nonlinear Dynamics* (see Note 67) 316 (Fig. 6.26), 317 (Fig. 6.28)
- 2.70 Grassberger, P./Procaccia I.: Characterization of strange attractors. *Physical Review Letters* 50 (1983) 346–349
- 2.71 Deco, G./Schürmann, B.: *Information Dynamics: Foundations and Applications*. Springer: New York (2001) 17 (Fig. 2.6)
- 2.72 Chen, G./Moiola, J.L.: An overview of bifurcation, chaos and nonlinear dynamics in control systems. In: Chua, L.O. (ed.): *Journal of the Franklin Institute Engineering and Applied Mathematics: Philadelphia* (1995) 838
- 2.73 Peitgen, H.-O., Richter, P.H.: *The Beauty of Fractals: Images of Complex Dynamical Systems*. Springer: Berlin (1986) 32
- 2.74 Mandelbrot, B.B.: *Multifractals and 1/f Noise*. Springer: Berlin (1997)

Chapter 3

- 3.1 For historical sources of Sect. 3.1 compare Mainzer, K.: *Die Philosophen und das Leben*. In: Fischer, E.P./Mainzer, K. (eds.): *Die Frage nach dem Leben*. Piper: München (1990) 11–44
- 3.2 Diels-Kranz (see Note 2, Chapter 2) 12 A 30
- 3.3 Aristotle: *Historia animalium* 588 b 4
- 3.4 Aristotle: *De generatione animalium* II 736 b 12–15, a 35–b2
- 3.5 Descartes, R.: *Discours de la méthode*. Leipzig (1919/20) 39
- 3.6 Borelli, G.A.: *De motu animalium*. Leipzig (1927) 1
- 3.7 Leibniz, G.W.: *Monadology* §64
- 3.8 Bonnet, C.: *Contemplation de la nature* (1764). *Oeuvres* VII, 45
- 3.9 Kant, I.: *Kritik der Urteilskraft*. Ed. G. Lehmann, Reclam: Stuttgart (1971) 340
- 3.10 Goethe, J.W.: *Dichtung und Wahrheit*. In: *Werke* (Hamburger Ausgabe) Bd. IX 490
- 3.11 Schelling, F.W.J.: *Sämtliche Werke* Bd.II (ed. Schröter, M.), München (1927) 206
- 3.12 Darwin, C.: *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. London (1859); *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex*. London (1871); Spencer, H.: *Structure, Function and Evolution* (ed. Andrenski, S.), London (1971); For a modern evaluation of Darwin's position compare Richards, R.: *The Meaning of Evolution*. University of Chicago Press: Chicago (1992)
- 3.13 Boltzmann, L.: *Der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie*. In: Boltzmann, L. (ed.): *Populäre Schriften*. Leipzig (1905) 24–46
- 3.14 Cf. Schneider, I.: *Rudolph Clausius' Beitrag zur Einführung wahrscheinlichkeitstheoretischer Methoden in die Physik der Gase nach 1856*. *Archive for the History of Exact Sciences* 14 (1974/75) 237–261
- 3.15 Prigogine, I.: *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes* (see Note 42, Chapter 2)
- 3.16 Cf. Boltzmann, L.: *Über die mechanische Bedeutung des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie* (1866). In: Boltzmann, L.: *Wissenschaftliche Abhandlungen* (ed. Hasenöhr, F.) vol. I Leipzig (1909), repr. New York (1968) 9–33; *Analytischer Beweis*

- des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie aus den Sätzen über das Gleichgewicht der lebendigen Kraft (1871) 288–308
- 3.17 Cf. e.g., Einstein's famous article 'Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen'. *Annalen der Physik* 17 (1905) 549–560
- 3.18 Poincaré, H.: Sur les tentatives d'explication mécanique des principes de la thermodynamique. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* 108 (1889) 550–553; Zermelo, E.: Über einen Satz der Dynamik und die mechanische Wärmetheorie. *Annalen der Physik* 57 (1896) 485
- 3.19 Cf. Popper, K.R.: Irreversible processes in physical theory. *Nature* 181 (1958) 402–403; Reichenbach, H.: *The Direction of Time*. Berkeley (1956); Grünbaum, A.: *Philosophical Problems of Space and Time*. Dordrecht (1973); Hintikka, J./Gruender, D./Agazzi, E. (eds.): *Probabilistic Thinking. Thermodynamics and the Interaction of the History and Philosophy of Science II*. Dordrecht/Boston/ London (1978)
- 3.20 Boltzmann, L.: Der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie. In: Boltzmann, L.: *Populäre Schriften* (see Note 13) 26–46
- 3.21 Boltzmann, L.: Über die Frage nach der objektiven Existenz der Vorgänge in der unbelebten Natur. In: Boltzmann, L.: *Populäre Schriften* (see Note 13) 94–119
- 3.22 Monod, J.: *Le Hasard et la Nécessité*. Editions du Seuil: Paris (1970)
- 3.23 Primas, H.: Kann Chemie auf Physik reduziert werden? *Chemie in unserer Zeit* 19 (1985) 109–119, 160–166
- 3.24 Bergson, H.L.: *L'évolution créative*. Paris (1907); Heitler, W.H.: Über die Komplementarität von lebloser und lebender Materie. *Abhandlungen der Math.-Naturw. Klasse d. Ak. d. Wiss. u. Lit. Mainz Nr. 1* (1976) 3–21; Driesch, A.: *Philosophie des Organischen*. Leipzig (1909); Whitehead, A.N.: *Process and Reality. An Essay in Cosmology*. New York (1978)
- 3.25 Schrödinger, E.: *Was ist Leben?* Piper: München (1987) 133
- 3.26 Schrödinger, E.: *Was ist Leben?* (see Note 25) 147
- 3.27 Thompson, W.: The Sorting Demon of Maxwell (1879). In: Thompson, W.: *Physical Papers I–VI, Cambridge (1882–1911)*, V, 21–23
- 3.28 Prigogine, I.: Time, irreversibility and structure. In: Mehra, J. (ed.): *The Physicist's Conception of Nature*. D. Reidel: Dordrecht/Boston (1973) 589
- 3.29 Eigen, M.: The origin of biological information. In: Mehra, J. (ed.): *The Physicist's Conception of Nature* (see Note 28) 607; Fig. 3.2 shows a so-called coat gene obtained by nuclease digestion of phage MS2-RNA (Min Jou, W./Haegemann, G./Ysebaert, M./Fiers, W.: *Nature* 237 (1972) 82). This gene codes for a sequence of 129 amino acids. The structure is further spatially folded. Also compare Perelson, A.S./Kauffman, S.A. (eds.): *Molecular Evolution on Ragged Landscapes: Proteins, RNA, and the Immune System*. Santa Fé Institute Studies in the Sciences of Complexity. Proceedings vol. 9. Addison-Wesley: Redwood City (1990)
- 3.30 For a survey cf. Depew, D.J./Weber, B.H.: *Evolution at a Crossroads. The New Biology and the New Philosophy of Science*. MIT Press: Cambridge, MA (1985); Ebeling, W./Feistel, R.: *Physik der Selbstorganisation und Evolution*. Akademie-Verlag: Berlin (1982); Haken, H./Haken-Krell, M.: *Entstehung von biologischer Information und Ordnung*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt (1989); Hofbauer, L.: *Evolutionstheorie und dynamische Systeme. Mathematische Aspekte der Selektion*. Springer: Berlin (1984)
- 3.31 Eigen, M.: Homunculus im Zeitalter der Biotechnologie – Physikochemische Grundlagen der Lebensvorgänge. In: Gross, R. (ed.): *Geistige Grundlagen der Medizin*.

- Springer: Berlin (1985) 26, 36 for Fig. 3.4a–d; Maynard Smith, J.: Optimization theory in evolution. *Annual Review of Ecological Systems* **9** (1978) 31–56; Mainzer, K.: Metaphysics of nature and mathematics in the philosophy of Leibniz. In: Rescher, N. (ed.): *Leibnizian Inquiries*. University Press of America: Lanham/New York/London (1989) 105–130
- 3.32 Dyson, F.: *Origins of Life*. Cambridge University Press: Cambridge (1985)
- 3.33 Kauffman, S.: Autocatalytic sets of proteins. *Journal of Theoretical Biology* **119** (1986) 1–24
- 3.34 For a survey cf. Kauffman, A.S.: *Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press: Oxford (1992)
- 3.35 Haken, H.: Synergetics (see Note 4, Chapter 1) 310
- 3.36 Hess, B./Mikhailov, A.: Self-organization in living cells. In: *Science* **264** (1994) 223–224; *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* **98** (1994) 1198–1201 (extended version)
- 3.37 Susman, M.: *Growth and Development*. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ (1964); Prigogine, Í.: Order through fluctuation. In: Jantsch, E./Waddington, C.H. (eds.): *Evolution and Consciousness. Human Systems in Transition*. Addison-Wesley: London (1976) 108
- 3.38 Gerisch, G./Hess, B.: Cyclic-AMP-controlled oscillations in suspended dictyostelium cells: Their relation to morphogenetic cell interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **71** (1974) 2118
- 3.39 Rosen, R.: *Dynamical System Theory in Biology*. Wiley-Interscience: New York (1970); Abraham, R.H./Shaw, C.D.: *Dynamics – The Geometry of Behavior* (see Note 14, Chapter 2) 110 for Figs. 3.6
- 3.40 Meinhardt, H./Gierer, A.: Applications of a theory of biological pattern formation based on lateral inhibition. *J. Cell. Sci.* **15** (1974) 321 (Figs. 3.7–8); Meinhardt, M.: *Models of Biological Pattern Formation*. Academic Press: London (1982)
- 3.41 For a survey compare Gerok, W. (ed.): *Ordnung und Chaos in der belebten und un-belebten Natur. Verhandlungen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte*. 115. Versammlung (1988), Stuttgart (1989); Mainzer, K.: Chaos und Selbstorganisation als medizinische Paradigmen. In: Deppert, W./Kliemt, H./Lohff, B./Schaefer, J. (eds.): *Wissenschaftstheorien in der Medizin*. De Gruyter: Berlin/New York (1992) 225–258
- 3.42 Bassingthwaite, J.B./van Beek, J.H.G.M: Lightning and the heart: Fractal behavior in cardiac function. *Proceedings of the IEEE* **76** (1988) 696
- 3.43 Goldberger, A.L./Bhargava, V./West, B.J.: Nonlinear dynamics of the heartbeat. *Physica* **17D** (1985) 207–214; Nonlinear dynamics in heart failure: Implications of long-wavelength cardiopulmonary oscillations. *American Heart Journal* **107** (1984) 612–615; Ree Chay, T./Rinzel, J.: Bursting, beating, and chaos in an excitable membrane model. *Biophysical Journal* **47** (1985) 357–366; Winfree, A.T.: *When Time Breaks Down: The Three-Dimensional Dynamics of Electrochemical Waves and Cardiac Arrhythmias*. Princeton (1987); Guevara, M.R./Glass, L./Schrier, A.: Phase locking, period-doubling bifurcations, and irregular dynamics in periodically stimulated cardiac cells. *Science* **214** (1981) 1350
- 3.44 Cf. Johnson, L.: The thermodynamic origin of ecosystems: a tale of broken symmetry. In: Weber, B.H./Depew, D.J./Smith, J.D. (eds.): *Entropy, Information, and Evolution. New Perspectives on Physical and Biological Evolution*. MIT Press. Cambridge, MA (1988) 75–105; Schneider, E.D.: Thermodynamics, ecological succession, and natural selection: a common thread. In: Weber, B.H./Depew, D.J./Smith, J.D. (eds.): *Entropy, Information, and Evolution* (see Note 44) 107–138

- 3.45 Odum, E.P.: The strategy of ecosystem development. *Science* **164** (1969) 262–270; Margalef, R.: *Perspectives in Ecological Theory*. University of Chicago Press: Chicago (1968)
- 3.46 Lovelock, J.E.: *The Ages of Gaia*. Bantam (1990); Schneider, S.H./Boston, P.J. (eds.): *Scientists on Gaia*. MIT Press: Cambridge, MA (1991); Pimm, S.: *The Balance of Nature*. University of Chicago Press: Chicago (1991)
- 3.47 Cf. Rosen, R.: *Dynamical System Theory in Biology* (see Note 37); Freedmann, H.I.: *Deterministic Mathematical Models in Population Ecology*. Decker: New York (1980); Abraham, R.H./Shaw, C.D.: *Dynamics – The Geometry of Behavior* (see Note 14, Chapter 2) 85
- 3.48 Lotka, A.J.: *Elements of Mathematical Biology*. Dover: New York (1925); Volterra, V.: *Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie*. Paris (1931); Haken, H.: *Synergetics* (see Note 4, Chapter 1) 130, 308
- 3.49 Rettenmeyer, C.W.: Behavioral studies of army ants. *Kansas Univ. Bull.* **44** (1963) 281; Prigogine, I.: *Order through Fluctuation: Self-Organization and Social System*. In: Jantsch, E./Waddington, C.H. (eds.): *Evolution and Consciousness* (see Note 37) 111
- 3.50 Prigogine, I./Allen, P.M.: The challenge of complexity. In: Schieve, W.C./Allen, P.M.: *Self-Organization and Dissipative Structures. Applications in the Physical and Social Sciences*. University of Texas Press: Austin (1982) 28; Wicken, J.S.: Thermodynamics, evolution, and emergence: Ingredients of a new synthesis. In: Weber, B.H./Depew, D.J./Smith, J.D. (eds.): *Entropy, Information, and Evolution* (see Note 44) 139–169
- 3.51 Bassingthwaighte, J.B., Liebovitch, L.S., West, B.J.: *Fractal Physiology*. Oxford University Press: Oxford (1994) 16
- 3.52 West, B.J., Brown, J.H., Enquist, B.J.: A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. In: *Science* **276** (1997) 122
- 3.53 West, B.J., Brown, J.H., Enquist, B.J.: The fourth dimension of life: Fractal geometry and allometric scaling of organisms. In: *Science* **284** (1999) 1677
- 3.54 West, B.J., Deering, B.: *The Lure of Modern Science: Fractal Thinking*. World Scientific: Singapore (1995) 219

Chapter 4

- 4.1 Diels-Kranz: B 36
- 4.2 Cf. Guthrie, W.K.C.: *A History of Greek Philosophy vol. I: The Earlier Presocratics and the Pythagoreans*. Cambridge University Press: Cambridge (1962) 349; Popper, K.R./Eccles, J.C.: *The Self and its Brain*. Springer: Berlin (1977) 161
- 4.3 Aristotle: *De anima* 403 b 31
- 4.4 Plato: *Menon*
- 4.5 Cf. Galen: *Galen on Anatomical Procedures. Translation of the Surviving Books with Introduction and Notes*. Oxford University Press: London (1956)
- 4.6 Wickens, G.M.: *Avicenna. Scientist and Philosopher. A Millenary Symposium*: London (1952)
- 4.7 Descartes, R.: *Meditations (1641)*. Eds. E. Haldane, G. Ross. Cambridge University Press: Cambridge (1968) 153
- 4.8 Descartes, R.: *Treatise on Man (1664)*. Harvard University Press: Cambridge, Mass. (1972)

- 4.9 Spinoza, B.: Ethics
- 4.10 Leibniz, G.W.: *Monadology*; Rescher, N.: *Leibniz: An Introduction to his Philosophy*. Basil Blackwell: Oxford (1979)
- 4.11 Hume, D.: *A Treatise of Human Nature* (1739). Penguin: Harmondsworth (1969) 82
- 4.12 Mainzer, K.: *Kants Begründung der Mathematik und die Entwicklung von Gauß bis Hilbert*. In: *Akten des V. Intern. Kant-Kongresses in Mainz 1981* (ed. Funke, G.). Bouvier: Bonn (1981) 120–129
- 4.13 Brazier, M.A.B.: *A History of Neurophysiology in the 17th and 18th Centuries*. Raven: New York (1984); Cf. Clarke, E./O'Malley, C.D.: *The Human Brain and Spinal Cord: A Historical Study illustrated by Writings from Antiquity to the Twentieth Century*. University of California Press: Berkeley (1968)
- 4.14 Helmholtz, H.v.: *Schriften zur Erkenntnistheorie* (eds. Hertz, P./Schlick, M.). Berlin (1921); Mainzer, K.: *Geschichte der Geometrie* (see Note 13 Chapter 2) 172
- 4.15 Müller, J.: *Handbuch der Physiologie des Menschen*. Koblenz (1835)
- 4.16 Helmholtz, H.v.: *Vorläufiger Bericht über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Nervenreizung*. *Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medizin* (1850) 71–73
- 4.17 James, W.: *Psychology (Briefer Course)*. Holt: New York (1890) 3
- 4.18 James, W.: *Psychology* (see Note 17) 254
- 4.19 James, W.: *Psychology* (see Note 17) Fig. 57
- 4.20 Cf. Baron, R.J.: *The Cerebral Computer. An Introduction to the Computational Structure of the Human Brain*. Lawrence Erlbaum: Hillsdale N.J. (1987); Braitenberg, V.: *Gehirngespinnste. Neuroanatomie für kybernetisch Interessierte*. Springer: Berlin (1973)
- 4.21 Churchland, P.S./Sejnowski, T.J.: *Perspectives in cognitive neuroscience*. *Science* **242** (1988) 741–745. The subset of visual cortex is adapted from van Essen, D./Maunsell, J.H.R.: *Two-dimensional maps of the cerebral cortex*. *Journal of Comparative Neurology* **191** (1980) 255–281. The network model of ganglion cells is given in Hubel, D.H./Wiesel, T.N.: *Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex*. *Journal of Physiology* **160** (1962) 106–154. An example of chemical synapses is shown in Kand, E.R./Schwartz J.: *Principles of Neural Science*. Elsevier: New York (1985)
- 4.22 Cf. Churchland, P.M.: *A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science*. MIT Press: Cambridge, Mass./London (1989) 99
- 4.23 Pellionisz, A.J.: *Vistas from tensor network theory: A horizon from reductionalist neurophilosophy to the geometry of multi-unit recordings*. In: Cotterill, R.M.J. (ed.): *Computer Simulation in Brain Science*. Cambridge University Press: Cambridge/New York/Sydney (1988) 44–73; Churchland, P.M.: *A Neurocomputational Perspective* (see Note 22) 83, 89
- 4.24 Cf. Schwartz, E.L. (ed.): *Computational Neuroscience*. MIT Press: Cambridge, Mass. (1990)
- 4.25 Cf. Churchland, P.S./Sejnowski, T.J.: *The Computational Brain*. MIT Press: Cambridge, Mass. (1992) 169
- 4.26 Hebb, D.O.: *The Organization of Behavior*. Wiley: New York (1949) 50
- 4.27 Kohonen, T.: *Self-Organization and Associative Memory*. Springer: Berlin (1989) 105; Churchland, P.S./Sejnowski, T.J.: *The Computational Brain* (see Note 25) 54; Ritter, H./Martinetz, T./Schulten, K.: *Neuronale Netze. Eine Einführung in die Neuroinformatik selbstorganisierender Netzwerke*. Addison-Wesley: Reading, Mass. (1991) 35

- 4.28 Hopfield, J.J.: Neural Network and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **79** (1982) 2554–2558
- 4.29 Hertz, J./Krogh, A./Palmer, R.G.: *Introduction to the Theory of Neural Computation*. Addison-Wesley: Redwood City (1991)
- 4.30 Serra, R./Zanarini, G.: *Complex Systems and Cognitive Processes*. Springer: Berlin (1990) 78
- 4.31 Hertz, J./Krogh, A./Palmer, R.G.: *Introduction to the Theory of Neural Computation* (see Note 29); Hopfield, J.J./Tank, D.W.: Computing with neural circuits: A model. *Science* **233** (1986) 625–633
- 4.32 Ackley, D.H./Hinton, G.E./Sejnowski, T.J.: A learning algorithm for Boltzmann machines. *Cognitive Science* **9** (1985) 147–169
- 4.33 A mathematical elaboration of the learning algorithm for a Boltzmann machine is given in Serra, R./Zanarini, G.: *Complex Systems and Cognitive Processes* (see Note 30) 137. An illustration is shown in Churchland, P.S./Sejnowski, T.J.: *The Computational Brain* (see Note 25) 101
- 4.34 Rumelhart, D.E./Zipser, D.: Feature discovery by competitive learning. In: McClelland, J.L./Rumelhart, D.E. (eds.): *Parallel Distributed Processing*. MIT Press: Cambridge, Mass. (1986)
- 4.35 Kohonen, T.: Self-Organization and Associative Memory (see Note 27) 123
- 4.36 Kohonen, T.: Self-Organization and Associative Memory (see Note 27) 125
- 4.37 Ritter, H./Martinetz, T./Schulten, K.: *Neuronale Netze* (see Note 27) 75
- 4.38 Suga, N./O'Neill, W.E.: Neural axis representing target range in the auditory cortex of the mustache Bat. *Science* **206** (1979) 351–353; Ritter, H./Martinetz, T./Schulten, K.: *Neuronale Netze* (see Note 27) 88
- 4.39 Widrow, B./Hoff, M.E.: Adaptive switching circuits. 1960 IRE WESCON Convention Record. IRE: New York (1960) 36–104
- 4.40 Cf. Churchland, P.S./Sejnowski, T.J.: *The Computational Brain* (see Note 25) 106
- 4.41 Rumelhart, D.E./Hinton, G.E./Williams, R.J.: Learning representations by back-propagating errors. *Nature* **323** (1986) 533–536; Arbib, M.A.: *Brains, Machines, and Mathematics*. Springer: New York (1987) 117
- 4.42 Köhler, W.: *Die physischen Gestalten in Ruhe und im stationären Zustand*. Vieweg: Braunschweig (1920); *Jahresberichte für die ges. Physiol. und exp. Pharmakol.* **3** (1925) 512–539; Stadler, M./Kruse, P.: The self-organization perspective in cognitive research: Historical remarks and new experimental approaches. In: Haken, H./Stadler, M. (eds.): *Synergetics of Cognition*. Springer: Berlin (1990) 33
- 4.43 Cf. Churchland, P.M.: A Neurocomputational Perspective (see Note 22) 209
- 4.44 Cf. Churchland, P.M.: A Neurocomputational Perspective (see Note 22) 211
- 4.45 Cf. Feigl, H./Scriven, M./Maxwell, G. (eds.): *Concepts, Theories and the Mind-Body Problem*. University of Minnesota Press: Minneapolis (1958); Marcel, A.J./Bisiach, E. (eds.): *Consciousness in Contemporary Science*. Clarendon Press: Oxford (1988); Bieri, P.: Pain: A case study for the mind-body problem. *Acta Neurochirurgica* **38** (1987) 157–164; Lycan, W.G.: *Consciousness*. MIT Press: Cambridge, Mass. (1987)
- 4.46 Flohr, H.: Brain processes and phenomenal consciousness. A new and specific hypothesis. *Theory & Psychology* **1**(2) (1991) 248
- 4.47 von der Malsburg, C.: Self-organization of orientation sensitive cells in the striate cortex. *Kybernetik* **14** (1973) 85–100; Wilshaw, D.J./von der Malsburg, C.: How patterned neural connections can be set up by self-organization. *Proceedings of the Royal Society Series B* **194** (1976) 431–445

- 4.48 Barlow, H.B.: Single units and sensatioperceptual psychology. *Perception* 1 (1972) 371
- 4.49 Singer, W.: The role of synchrony in neocortical processing and synaptic plasticity. In: Domany, E./Van Hemmen, L./Schulten, K. (eds.): *Model of Neural Networks II*. Springer: Berlin (1994)
- 4.50 Deco, G./Schürmann, B.: Information Dynamics: Foundations and Applications (see Note 2.71) 229 (Fig. 10.1)
- 4.51 Cf. Pöppel, E. (ed.): *Gehirn und Bewußtsein*. VCH Verlagsgesellschaft: Weinheim (1989); Singer, W. (ed.): *Gehirn und Kognition*. Spektrum der Wissenschaft: Heidelberg (1990)
- 4.52 Haken, H./Stadler, M. (eds.): *Synergetics of Cognition* (see Note 42) 206
- 4.53 Haken, H./Stadler, M. (eds.): *Synergetics of Cognition* (see Note 42) 204
- 4.54 Pöppel, E.: Die neurophysiologische Definition des Zustands "bewußt". In: Pöppel, E. (ed.): *Gehirn und Bewußtsein* (see Note 51) 18
- 4.55 Searle, J.R.: *Intentionality. An Essay in the Philosophy of Mind*. Cambridge University Press: Cambridge (1983); Dennett, D.: *The Intentional Stance*, MIT Press: Cambridge, Mass. (1987)
- 4.56 Shaw, R.E./Kinsella-Shaw, J.M.: Ecological mechanics: A physical geometry for intentional constraints. *Hum. Mov. Sci.* 7 (1988) 155
- 4.57 For Figs. 4.23a–d. Kugler, P.N./Shaw, R.E.: Symmetry and symmetry breaking in thermodynamic and epistemic engines: A coupling of first and second laws. In: Haken, H./Stadler, M. (eds.): *Synergetics of Cognition* (see Note 42) 317, 318, 319, 328
- 4.58 Kelso, J.A.S./Mandell, A.J./Shlesinger, M.F. (eds.): *Dynamic Patterns in Complex Systems*. World Scientific: Singapore (1988); For Figs. 4.24a–b, 4.25 compare Haken, H./Haken-Krell, M.: *Erfolgsgeheimnisse der Wahrnehmung*. Deutsche Verlags-Anstalt: Stuttgart (1992) 36, 38
- 4.59 Kelso, J.A.S.: Phase transitions: Foundations of behavior. In: Haken, H./Stadler, M. (eds.): *Synergetics of Cognition* (see Note 42) 260
- 4.60 Searle, J.R.: Mind, brains and programs. *Behavioral and Brain Science* 3 (1980) 417–424; Intrinsic intentionality. *Behavioral and Brain Science* 3 (1980) 450–456; Analytic philosophy and mental phenomena. *Midwest Studies in Philosophy* 5 (1980) 405–423. For a critique of Searle's position compare Putnam, H.: *Representation and Reality*. MIT Press: Cambridge, Mass. (1988) 26
- 4.61 Eccles, J.C.: *The Neurophysiological Basis of Mind*. Clarendon Press: Oxford (1953); *Facing Reality*. Springer: New York (1970); Eccles, J.C. (ed.): *Mind and Brain*, Paragon: Washington, D.C. (1982)
- 4.62 Palm, G.; *Assoziatives Gedächtnis und Gehirn*. In: Singer, W. (ed.): *Gehirn und Kognition* (see Note 51) 172; Palm, G. (ed.): *Neural Assemblies: An Alternative Approach to Artificial Intelligence*. Springer: Berlin (1984)
- 4.63 Merleau-Ponty, M.: *Phenomenology of Perception*. Routledge & Kegan Paul: London (1962)
- 4.64 Freeman, W.J.: How and why brains create sensory information. In: *International Journal of Bifurcation and Chaos* 14 (2004) 515–530
- 4.65 Förstl, H. (Ed.): *Theory of Mind. Neurobiologie und Psychologie sozialen Verhaltens*. Springer: Berlin (2007)
- 4.66 Dreyfus, H.L.: *Husserl, Intentionality, and Cognitive Science*. MIT Press: Cambridge MA (1982); Searle, J.R.: *Intentionality. An Essay in the Philosophy of Mind*. Cambridge University Press: Cambridge (1983)

Chapter 5

- 5.1 For this chapter compare Mainzer, K.: *Computer – Neue Flügel des Geistes?* De Gruyter: Berlin/New York (1993); Mainzer, K.: *Die Evolution intelligenter Systeme. Zeitschrift für Semiotik* 12 (1990) 81–104
- 5.2 Feigenbaum, E.A./McCorduck, P.: *The Fifth Generation. Artificial Intelligence and Japan's Computer Challenge to the World.* Michael Joseph: London (1984)
- 5.3 Cf. Williams. M.R.: *A History of Computing Technology.* Prentice-Hall: Englewood Cliffs (1985)
- 5.4 Cohors-Fresenborg, E.: *Mathematik mit Kalkülen und Maschinen.* Vieweg: Braunschweig (1977) 7
- 5.5 Herrn von Leibniz' Rechnung mit Null und Eins. Siemens AG: Berlin (1966); Mackensen, L. von: Leibniz als Ahnherr der Kybernetik – ein bisher unbekannter Leibnizscher Vorschlag einer "Machina arithmetica dyadicae". In: *Akten des II. Internationalen Leibniz-Kongresses 1972 Bd. 2.* Steiner: Wiesbaden (1974) 255–268
- 5.6 Scholz, H.: *Mathesis Universalis.* Schwabe: Basel (1961)
- 5.7 Babbage, C.: *Passages from the Life of a Philosopher.* Longman and Co.: London (1864); Bromley, A.G.: *Charles Babbage's Analytical Engine 1838.* *Annals of the History of Computing* 4 (1982) 196–219
- 5.8 Cf. Minsky, M.: Recursive unsolvability of Post's problem of "tag" and other topics in the theory of Turing machines. *Annals of Math.* 74 437–454; Sheperdson, J.C./Sturgis, H.E.: Computability of recursive functions. *J. Assoc. Comp. Mach.* 10 (1963) 217–255. For the following description of register machines compare Rödding, D.: Klassen rekursiver Funktionen. In: Löb, M.H. (ed.): *Proceedings of the Summer School in Logic.* Springer: Berlin (1968) 159–222; Cohors-Fresenborg, E.: *Mathematik mit Kalkülen und Maschinen* (see Note 4)
- 5.9 Turing, A.M.: On computable numbers, with an application to the "Entscheidungsproblem". *Proc. London Math. Soc., Ser. 2* 42 (1936) 230–265; Post, E.L.: Finite combinatory processes – Formulation I. *Symbolic Logic* 1 (1936) 103–105; Davis, M.: *Computability & Unsolvability.* McGraw-Hill: New York (1958) 3
- 5.10 Arbib, M.A.: *Brains, Machines, and Mathematics.* Springer: New York (1987) 131
- 5.11 Mainzer, K.: Der Konstruktionsbegriff in der Mathematik. *Philosophia Naturalis* 12 (1970) 367–412
- 5.12 Cf. Knuth, D.M.: *The Art of Computer Programming. Vol. 2.* Addison-Wesley: Reading, MA (1981); Börger, E.: *Berechenbarkeit. Komplexität, Logik.* Vieweg: Braunschweig (1985)
- 5.13 Grötschel, M./Lovász, L./Schryver, A.: *Geometric Algorithms and Combinatorial Optimization.* Springer: Berlin (1988)
- 5.14 Gardner, A.: *Penrose Tiles to Trapdoor Ciphers.* W.H. Freeman: New York (1989)
- 5.15 Cf. Arbib, M.A.: Speed-up theorems and incompleteness theorem. In: Caianiello, E.R. (ed.): *Automata Theory.* Academic Press (1966) 6–24; Mostowski, A.: Sentences Undecidable in Formalized Arithmetic. North-Holland: Amsterdam (1957); Beth, E.W.: *The Foundations of Mathematics,* North-Holland: Amsterdam (1959); Kleene, S.C.: *Introduction to Metamathematics.* North-Holland: Amsterdam (1967)
- 5.16 Gödel, K.: On formally undecidable propositions of Principia Mathematica and related systems I. *Monatshefte für Mathematik und Physik* 38 (1931) 173–198
- 5.17 Turing, A.: On computable numbers, with an application to the entscheidungsproblem. *London Mathematical Society Series 2* 42 (1936–1937) 230–265; A correction. *Ibid.* 43 (1937) 544–546; cf. Chaitin, G.J.: *The Limits of Mathematics: A Course*

- on Information Theory and the Limits of Formal Reasoning. Springer: New York (1998)
- 5.18 Chaitin, G.J.: On the length of programs for computing finite binary sequences. *Journal of the ACM* 13 (1966) 547–569; On the length of programs for computing finite binary sequences: statistical considerations. *Journal of the ACM* 16 (1969) 145–159
- 5.19 Chaitin, G.J.: *The Limits of Mathematics: A Course on Information Theory and the Limits of Formal Reasoning* (see Note 17) 60
- 5.20 Shannon, C.E./Weaver, W.: *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press: Chicago (1949); cf. also Cover, T./Thomas, J.: *Elements of Information Theory*. John Wiley & Sons: New York (1991)
- 5.21 Bennett, C.H.: *Quantum Information and Computation*. *Physics Today* 10 (1995)
- 5.22 Deco, G./Schlittenkopf, C./Schürmann, B.: Determining the information flow of dynamical systems from continuous probability distributions. *Physical Review Letters* 78 (1997) 2345
- 5.23 Deco, G./Schürmann, B.: *Information Dynamics: Foundations and Applications*. (see Note 2.71) 111 (Fig. 5.2)
- 5.24 Beltrami, E.: *What is Random? Chance and Order in Mathematics and Life*. Springer: New York (Copernicus)(1999) 133
- 5.25 Beltrami, E.: *What is Random?* (see Note 24) 133
- 5.26 Press, W.H.: Flicker noise in astronomy and elsewhere. In: *Comments Astrophys.* 7 (1978) 103–119
- 5.27 Mandelbrot, B.B.: *Multifractals and 1/f Noise*. Springer: Berlin (1997)
- 5.28 Gnedenko, B.V., Kolmogorov, A.N.: *Limit Distributions for Sums of Independent Random Variables*. Addison-Wesley: Cambridge MA (1954)
- 5.29 Mantegna, R.N., Stanley, H.E.: *An Introduction to Econophysics. Correlations and Complexity in Finance*. Cambridge University Press: Cambridge (2000) 16 (Fig. 3.1)
- 5.30 Mantegna, R.N., Stanley, H.E.: *An Introduction to Econophysics* (see Note 29) 16 (Fig. 3.2)
- 5.31 Feller, W.: *An Introduction to Probability Theory and Its Applications*, Vol. 1. J. Wiley & Sons: New York (1968)
- 5.32 Mantegna, R.N., Stanley, H.E.: *An Introduction to Econophysics* (see Note 29) 19 (Fig. 3.4)
- 5.33 Lévy, P.: *Calcul des probabilités*, Gauthier-Villars: Paris (1925)
- 5.34 Mantegna, R.N., Stanley, H.E.: *An Introduction to Econophysics* (see Note 29) 28 (Fig. 4.1)
- 5.35 Lévy, M., Solomon, S.: Power laws are logarithmic Boltzmann laws. In: *Intl. J. Mod. Phys. C* 7 (1996) 595–601
- 5.36 Audretsch, J./Mainzer, K. (eds.): *Wieviele Leben hat Schrödingers Katze?* B.I. Wissenschaftsverlag: Mannheim (1990) 273 (Fig. 5.14a), 274 (Fig. 5.14b), 276 (Fig. 5.14c)
- 5.37 Penrose, R.: Newton, quantum theory and reality. In: Hawking, S.W./Israel, W.: *300 Years of Gravity*. Cambridge University Press: Cambridge (1987)
- 5.38 Deutsch, D.: Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. *Proc. Roy. Soc.* **A400** (1985) 97–117
- 5.39 Nielsen, M.A., Chuang, I.L.: *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press: Cambridge (2001)
- 5.40 Keyl, M.: Fundamentals of quantum information theory. In: *Physics Report* **369** (2002) 435
- 5.41 Keyl, M.: Fundamentals of quantum information theory (see Note 40) 436

- 5.42 Bouwmeester, D., Ekert, A., Zeilinger, A. (eds.): *The Physics of Quantum Information. Quantum Cryptography, Quantum Teleportation, Quantum Computation.* Springer: Berlin (2000) 12
- 5.43 Bouwmeester, D., Ekert, A., Zeilinger, A. (eds.): *The Physics of Quantum Information* (see Note 5.42) 50
- 5.44 Mainzer, K.: *Symmetry and Complexity. The Spirit and Beauty of Nonlinear Science.* World Scientific: Singapore (2005) 110
- 5.45 Horowitz, G.T., Maldacena, J.: The black hole final state. In: *Journal of High Energy Physics* 2 (2004) 8
- 5.46 For this chapter compare Mainzer, K.: *Computer – Neue Flügel des Geistes? De Gruyter: Berlin (1993); Mainzer, K.: Philosophical concepts of computational neuroscience.* In: Eckmiller, R./Hartmann, G./Hauske, G. (eds.): *Parallel Processing in Neural Systems and Computers.* North-Holland: Amsterdam (1990) 9–12
- 5.47 McCulloch, W.S./Pitts, W.: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. In: *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5 (1943) 115–133; Arbib, M.A.: *Brains, Machines and Mathematics* (see Note 10) 18
- 5.48 Neumann, J. von: *The Computer and the Brain.* Yale University Press: New Haven (1958)
- 5.49 Cf. Burks, A.W. (ed.): *Essays on Cellular Automata.* University of Illinois Press (1970); Myhill, J.: The abstract theory of self-reproduction. In: Mesarovic, M.D. (ed.): *Views on General Systems Theory.* John Wiley (1964) 106–118
- 5.50 Wolfram, S.: Universality and complexity in cellular automata. In: Farmer, D./Toffoli, T./Wolfram, S. (eds.): *Cellular Automata. Proceedings of an Interdisciplinary Workshop.* North-Holland: Amsterdam (1984) 1–35; Wolfram, S.: *Theory and Applications of Cellular Automata.* World Scientific: Singapore (1986); Demongeot, J./Golés, E./Tchuente, M. (eds.): *Dynamical Systems and Cellular Automata.* Academic Press: London (1985); Poundstone, W.: *The Recursive Universe. Cosmic Complexity and the Limits of Scientific Knowledge.* Oxford University Press: Oxford (1985)
- 5.51 Mainzer, K.: Komplexität in der Natur. In: *Nova Acta Leopoldina NF 76 Nr. 303* (1997) 165–189
- 5.52 Wolfram, S.: *A New Kind of Science.* Wolfram Media, Inc.: Champaign, Ill. (2002) 443
- 5.53 Wolfram, S.: *A New Kind of Science* (see Note 52) 737

Chapter 6

- 6.1 Pfeifer, R., Scheier, C.: *Understanding Intelligence.* M.I.T. Press: Cambridge MA (2001) 45 (Fig. 2.5)
- 6.2 Mainzer, K.: Rationale Heuristik und Problem Solving. In: Burrichter, C. Inhetveen, R. Köter, R. (eds.): *Technische Rationalität und rationale Heuristik.* Schöningh: Paderborn (1986) 83–97
- 6.3 Mainzer, K.: Knowledge-based systems. Remarks on the philosophy of technology and Artificial Intelligence. *Journal for General Philosophy of Science* 21 (1990) 47–74
- 6.4 Bibel, W. Siekmann, J.: *Künstliche Intelligenz.* Springer: Berlin (1982); Nilson, N.J.: *Principles of Artificial Intelligence.* Springer: Berlin (1982); Kredel, L.: *Künstliche Intelligenz und Expertensysteme.* Droemer Knauer: München (1988)
- 6.5 Puppe, F.: Expertensysteme. *Informatik-Spektrum* 9 (1986) 1–13

- 6.6 For instance, one of the constructors of DENDRAL and MYCIN received a Ph.D. in philosophy for his dissertation "Scientific Discoveries", supervised by Gerald Massey (today Center for Philosophy of Science, Pittsburgh). Also refer to Glymour, C.: AI is philosophy. In: Fetzer, J.H. (ed.): Aspects in Artificial Intelligence. Kluwer Academic Publisher: Boston (1988) 195–207
- 6.7 Buchanan, B.G. Sulherland, G.L. Feigenbaum, E.A.: Heuristic DENDRAL: A program for generating processes in organic chemistry. In: Meltzer, B. Michie, D. (eds.): Machine Intelligence 4. Edinburgh (1969); Buchanan, B.G. Feigenbaum, E.A.: DENDRAL and META-DENDRAL: Their applications dimension. In: Artificial Intelligence 11 (1978) 5–24
- 6.8 McCarthy, J.: LISP Programmer's Manual (Rep. MIT Press). Cambridge, MA (1962); Stoyan, H. Goerz, G.: LISP – Eine Einführung in die Programmierung. Springer: Berlin (1984)
- 6.9 Randall, D. Buchanan, B.G. Shortliffe, E.H.: Production rules as a representation for a knowledge-based consultation program. Artificial Intelligence 8 (1977); Shortliffe, E.H.: MYCIN: A rule-based computer program for advising physicians regarding antimicrobial therapy selection. AI Laboratory. Memo 251. STAN-CS-74-465, Stanford University; Winston, P.H.: Artificial Intelligence. Addison-Wesley: Reading, MA (1977) Chap. 9
- 6.10 Doyle, J.: A truth maintenance system. Artificial Intelligence 12 (1979) 231–272
- 6.11 Lenat, D.B. Harris, G.: Designing a rule system that searches for scientific discoveries. In: Waterman, D.A. Hayes-Roth, F. (eds.): Pattern Directed Inference Systems. New York (1978) 26; Lenat, D.B.: AM: Discovery in mathematics as heuristic search. In: Davis, R. Lenat, D.B. (eds.): Knowledge-Based Systems in Artificial Intelligence. New York (1982) 1–225
- 6.12 Langley, P.: Data-driven discovery on physical laws. Cognitive Science 5 (1981) 31–54
- 6.13 Langley, P. Simon, H.A. Bradshaw, G.L. Zytkow, J.M.: Scientific Discovery: Computational Explorations of the Creative Processes. Cambridge, MA (1987)
- 6.14 Kulkarni, D. Simon, H.A.: The process of scientific discovery: The strategy of experimentation. Cognitive Science 12 (1988) 139–175
- 6.15 Cf. Winston, P.H.: Artificial Intelligence (see Note 9)
- 6.16 Rosenblatt, F.: The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. Psychological Review 65 (1958) 386–408
- 6.17 Minsky, M. Papert, S.A.: Perceptrons. MIT Press: Cambridge MA (1969) (expanded edition 1988)
- 6.18 Gorman, R.P. Sejnowski, T.J.: Analysis of hidden units in a layered network trained to classify sonar targets. Neural Networks 1 (1988) 75–89; Churchland, P.M.: A Neurocomputational Perspective. The Nature of Mind and the Structure of Science. MIT Press: Cambridge MA (1989)
- 6.19 Sejnowski, T.J. Rosenberg, C.R.: NETtalk: A parallel network that learns to read aloud. The Johns Hopkins University Electrical Engineering and Computer Science Technical Report IHU/EECS-86/01 (1986) 32; Cf. Kinzel, W. Decker, U.: Der ganz andere Computer: Denken nach Menschenart. Bild der Wissenschaft 1 (1988) 43
- 6.20 Schöneburg, E. Hansen, N. Gawelczyk: Neuronale Netzwerke. Markt & Technik: München (1990) 176, 177
- 6.21 Rumelhart, D.E. Smolensky, P. McClelland, J.L. Hinton, G.E.: Schemata and sequential thought processes. In: McClelland, J.L. Rumelhart, D.E. (eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition vol. 2: Appli-

- cations. MIT Press: Cambridge MA (1986); Churchland, P.S.: *Neurophilosophy. Toward a Unified Science of the Mind-Brain*. MIT Press: Cambridge MA (1988) 465
- 6.22 Haken, H. (ed.): *Neural and Synergetic Computers*. Springer: Berlin (1988) 5–7
- 6.23 Haken, H.: Synergetics as a tool for the conceptualization and mathematization of cognition and behaviour – How far can we go? In: Haken, H. Stadler, M. (eds.): *Synergetics of Cognition*. Springer: Berlin (1990) 23–24
- 6.24 Chua, L.O.: *CNN: A Paradigm for Complexity*. World Scientific: Singapore (1998); Huertas, J.L. Chen, W.K. Madan, R.N. (eds.): *Visions of Nonlinear Science in the 21st Century. Festschrift Dedicated to Leon O. Chua on the Occasion of his 60th Birthday*. World Scientific: Singapore (1999); Mainzer, K.: CNN and the evolution of complex information systems in nature and society. In: Tetzlaff, R. (ed.): *Cellular Neural Networks and their Applications. Proc. 7th IEEE International CNN Workshop*. World Scientific: Singapore (2002) 483–497
- 6.25 Chua, L.O. Yang, L.: Cellular neural networks: Theory. *IEEE Transactions on Circuits and Systems* 35 (1988) 1257–1272; Cellular neural networks: applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems* 35 (1988) 1273–1290
- 6.26 Chua, L.O. Gulak, G. Pierzchała, E. Rodriguez-Vázquez (eds.): *Cellular neural networks and analog VLSI. Analog Integrated Circuits and Signal Processing: An International Journal* 15 No. 3 (1998)
- 6.27 Chua, L.O. Roska, T.: *Cellular Neural Networks and Visual Computing: Foundations and Applications*. Cambridge University Press: Cambridge (2002) 7 (Fig. 2.1), 8 (Fig. 2.2); cf. also Mainzer, K.: Cellular neural networks and visual computing: foundations and applications according to the book of Leon O. Chua and Tamás Roska. *International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering* 13 (2003)
- 6.28 Chua, L.O. Roska, T.: *Cellular Neural Networks and Visual Computing* (see Note 27) 36 (Fig. 3.1)
- 6.29 Chua, L.O.: *CNN: A Paradigm for Complexity* (see Note 24) 48 (Fig. 2.6.1)
- 6.30 Chua, L.O. Roska, T.: *Cellular Neural Networks and Visual Computing* (see Note 27) 119–120 (Example 5.1)
- 6.31 Chua, L.O. Roska, T.: *Cellular Neural Networks and Visual Computing* (see Note 27) 121 (Example 5.2)
- 6.32 Chua, L.O. Roska, T.: *Cellular Neural Networks and Visual Computing* (see Note 27) 206 (Fig. 8.1)
- 6.33 Chua, L.O. Roska, T.: *Cellular Neural Networks and Visual Computing* (see Note 27) 207 (Example 8.1)
- 6.34 Chua, L.O. Roska, T.: *Cellular Neural Networks and Visual Computing* (see Note 27) 211 (Example 8.2), 213 (Example 8.4)
- 6.35 Chua, L.O. Roska, T.: *Cellular Neural Networks and Visual Computing* (see Note 27) 289 (Fig. 12.9)
- 6.36 Chua, L.O. Roska, T.: *Cellular Neural Networks and Visual Computing* (see Note 27) 243 (Fig. 9.2)
- 6.37 Chua, L.O. Roska, T.: *Cellular Neural Networks and Visual Computing* (see Note 27) 254 (Fig. 9.13)
- 6.38 Chua, L.O.: *CNN: A Paradigm for Complexity* (see Note 24) 159 (Fig. 52)
- 6.39 Chua, L.O. Yoon, S. Dogaru, R.: A nonlinear dynamics perspective of Wolfram's new kind of science. Part I: Threshold of complexity. *International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering* 12 (2002) Fig. 2

- 6.40 Chua, L.O. Yoon, S. Dogaru, R.: A nonlinear dynamics perspective of Wolfram's new kind of science (see Note 39) Fig. 9, Fig. 12, Fig. 14
- 6.41 Chua, L.O. Yoon, S. Dogaru, R.: A nonlinear dynamics perspective of Wolfram's new kind of science (see Note 39) Table 2
- 6.42 Chua, L.O. Yoon, S. Dogaru, R.: A nonlinear dynamics perspective of Wolfram's new kind of science (see Note 39) Fig. 3
- 6.43 Chua, L.O. Yoon, S. Dogaru, R.: A nonlinear dynamics perspective of Wolfram's new kind of science (see Note 39) Fig. 22, Fig. 24
- 6.44 Müller-Schloer, C. (Ed.): Schwerpunktthema: Organic Computing – Systemforschung zwischen Technik und Naturwissenschaften. In: *Information Technology* 4 (2005)
- 6.45 Horn, P., 2001: *Autonomic Computing: IBM's Perspective on the State of Information Technology*. IBM: New York (2002); Kephart, J.O., Chess, D.M.: *The Vision of Autonomic Computing*. In: *IEEE Computer Society* 1 (2003) 41–50
- 6.46 Small, M.: *Applied Nonlinear Time Series Analysis. Applications in Physics, Physiology and Finance*. World Scientific: Singapore (2005)
- 6.47 Pfeifer, R., Scheier C.: *Understanding Intelligence*. M.I.T Press: Cambridge MA (2001) 280
- 6.48 For chapter 6.4 compare Mainzer, K.: *Philosophical foundations of neurobionics*. In: Bothe, H.W. Samii, M. Eckmiller, R. (eds.): *Neurobionics. An Interdisciplinary Approach to Substitute Impaired Functions of the Human Nervous System*. North-Holland: Amsterdam (1993) 31–47
- 6.49 Cf. Samii, M. (ed.): *Peripheral Nerve Lesions*. Springer: Berlin (1990)
- 6.50 Eckmiller, R. (ed.): *Neurotechnologie-Report*. Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie: Bonn (1995); Stein, R.B. Peckham, P.H. (eds.): *Neuroprostheses: Replacing Motor Function After Disease or Disability*. Oxford University Press: New York (1991)
- 6.51 Cosman, E.R.: *Computer-assisted technologies for neurosurgical procedures*. In: Bothe, H.W. Samii, M. Eckmiller, R. (eds.): *Neurobionics* (see Note 48) 365
- 6.52 Chua, L.O.: *CNN: A Paradigm for Complexity* (see Note 24) 227 (Fig. 86)
- 6.53 Chua, L.O. Roska, T.: *Cellular Neural Networks and Visual Computing* (see Note 27) 321 (Fig. 16.1)
- 6.54 Elger, C.E. Mormann, F. Kreuz, T. Andrzejak, R.G. Rieke, C. Sowa, R. Florin. S. David, P. Lehnertz. K.: *Characterizing the spatio-temporal dynamics of the epileptogenic process with nonlinear EEG analyses*. In: Tetzlaff, R. (ed.): *Cellular Neural Networks and Their Applications. Proc. 7th IEEE International CNN Workshop*. World Scientific: Singapore (2002) 238
- 6.55 Foley, J.D. Dam, A. van: *Fundamentals of Interactive Computer Graphics*. Addison-Wesley: Amsterdam (1982); Foley, J.D.: *Neuartige Schnittstellen zwischen Mensch und Computer*. *Spektrum des Wissenschaft* 12 (1987)
- 6.56 Gibson, W.: *Neuromancer*. Grafton: London (1986) 67
- 6.57 Putnam, H.: *Reason, Truth and History*. Cambridge University Press: Cambridge (1981) 6
- 6.58 Langton, C.G. (ed.): *Artificial Life*. Addison Wesley: Redwood City (1989)
- 6.59 Lindenmayer, A. Rozenberg, G. (eds.): *Automata, Languages, Development*. North-Holland: Amsterdam (1976); Lindenmayer, A.: *Models for multicellular development: Characterization, inference and complexity of L-systems*. In: Kelemenová, A. Kelemen, J. (eds.): *Trends, Techniques and Problems in Theoretical Computer Science*. Springer: Berlin (1987) 138–168

- 6.60 Langton, C.G.: Self-reproduction in cellular automata. *Physica D* **10** (1984) 135–144; *Artificial Life*, in: Langton [5.58] Plates 1–8
- 6.61 Langton, C.G.: Life at the edge of chaos. In: Langton, C.G. Taylor, C. Farmer, J.D. Rasmussen, S. (eds.): *Artificial Life II*, Addison-Wesley: Redwood City (1992) 41–91
- 6.62 Rechenberg, I.: *Evolutionstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*, Frommann-Holzboog: Stuttgart (1973)
- 6.63 Holland, J.H.: *Adaption in Natural and Artificial Systems*. The MIT Press: Cambridge, MA (1992, 1st ed. 1975)
- 6.64 Mitchell, M. Forrest, S.: Genetic Algorithms and Artificial Life. *Artificial Life* **1** (1994) 267–289
- 6.65 Forrest, S. Javornik, B. Smith, R. Perelson, A.: Using genetic algorithms to explore pattern recognition in the immune system. *Evolutionary Computation* **1** (1993) 191–211
- 6.66 Highland, H.J. (ed.): *Computer Virus Handbook*. Elsevier Advanced Technology: Oxford (1990); Spafford, E.H.: Computer viruses as artificial life. *Artificial Life* **1** (1994) 249–265
- 6.67 Taylor, C. Jefferson, D.: Artificial life as a tool for biology inquiry. *Artificial Life* **1** (1994) 1–13
- 6.68 Pfeifer, R. Scheier, C.: *Understanding Intelligence*, MIT Press: Cambridge Mass. (2001)
- 6.69 Morán, F. Moreno, A. Merelo, J.J. Chacón, P. (eds.): *Advances in Artificial Life*, Springer: Berlin (1995)
- 6.70 Mainzer, K.: *Gehirn; Computer, Komplexität*. Springer: Berlin 1997; Mainzer, K.: *KI – Künstliche Intelligenz. Grundlagen intelligenter Systeme*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt (2003)
- 6.71 Bellman, K.L.: Self-Conscious Modeling. In: *Information Technology* **4** (2005) 188–194
- 6.72 Mainzer, K.: Computer, künstliche Intelligenz und Theory of Mind: Modelle des Menschlichen? In: Förstl, H. (ed.): *Theory of Mind. Neurobiologie und Psychologie sozialen Verhaltens*. Springer: Berlin (2007) 79–90

Chapter 7

- 7.1 Quesnay: *Œuvres économiques et philosophiques*. Francfort (1988)
- 7.2 Figure 7.3a shows a “Tableau économique” from the “*Eléments de la philosophie rurale*” (1767) of Marquis of Mirabeau; cf. Meek, R.L.: The interpretation of the “Tableau économique”, *Economica* **27** (1960) 322–347
- 7.3 Serviere, G. de: *Recueil d’ouvrages curieux de mathématique et de mécanique, ou description du cabinet de Monsieur Grollier de Serviere, avec des figures en taille-douce*. Seconde édition. Lyon (1733) (Fig. 38); Rieter, H.: Quesnays Tableau Economique als Uhren-Analogie. In: Scherf, H. (ed.): *Studien zur Entwicklung der ökonomischen Theorie IX*. Duncker & Humblot: Berlin (1990) 73
- 7.4 Smith, A.: *The Theory of Moral Sentiments* (1759). Ed. D.D. Raphael/A.L. Macfie. Oxford (1979)
- 7.5 Cf. Skinner, A.S.: Adam Smith, science and the role of imagination. In: Todd, W.B. (ed.): *Hume and the Enlightenment*. Edinburgh University Press: Edinburgh (1974) 164–188

- 7.6 Smith, A.: *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. Ed. E. Cannan. The University of Chicago Press: Chicago (1976) vol. 1, 478
- 7.7 Smith, A.: (see Note 6), vol. 1, 18
- 7.8 Mayr, O.: Adam Smith und das Konzept der Regelung. In: Troitzsch/Wohlauf, G. (eds.): *Technikgeschichte*. Frankfurt (1980) 245
- 7.9 Cf. Marchi, N.B. de: The empirical content and longevity of Ricardian economics. *Economica* 37 (1970) 258–259; Sowell, T.: *Classical Economics Reconsidered*. Princeton University Press: Princeton (1974) 118–120; Blaug, M.: *The Methodology of Economics*. Cambridge University Press: Cambridge (1980)
- 7.10 Mill, J.S.: On the definition of political economy. In: *Collected Works. Essays on Economy and Society*. Ed. J.M. Robson. University of Toronto Press: Toronto (1967) vol. 4, 330; Hicks, J.: From classical to post-classical: The work of J.S. Mill. In: Hicks, J.: *Classics and Moderns. Collected Essays on Economic Theory*. Vol. III. Basil Blackwell: Oxford (1983) 60–70
- 7.11 Georgescu-Roegen, N.: *The Entropy Law and Economic Progress*. Harvard University Press: Cambridge, MA (1971)
- 7.12 Walras, L.: Principe d'une théorie mathématique de l'échange. *Journal des Economistes* 33 (1874) 1–21; Hicks, J.: Léon Walras. In: Hicks, J.: (see Note 10) 85–95
- 7.13 Keynes, J.M.: *The Collected Writings of John Maynard Keynes*. Vol. XIV. *The General Theory and After*. Ed. D. Moggridge. Macmillan: London (1973) 296
- 7.14 Neumann, J. von/Morgenstern, O.: *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press: Princeton, NJ (1943)
- 7.15 Cf. Stegmüller, W.: *Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie* Bd. 1. Springer: Berlin (1969) 391
- 7.16 Cf. Shubik, M. (ed.): *Game Theory and Related Approaches to Social Behavior*. John Wiley: New York/London/Sidney (1964); Nash, J.F.: Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of National Academy of Science (USA)* 36 (1950) 48–49
- 7.17 For a survey compare Anderson, P.W./Arrow, K.J./Pines, D. (eds.): *The Economy as an Evolving Complex System*. Santa Fé Institute Studies in the Sciences of Complexity vol. 3. Addison-Wesley: Redwood City (1988); Barnett, W.A./Geweke, J./Shell, K. (eds.): *Economic Complexity. Chaos, Sunspots, Bubbles, and Nonlinearity*. Cambridge University Press: Cambridge (1989)
- 7.18 Kalecki, M.: *Theory of Economic Dynamics*. Unwin University Books: London (1954); Samuelson, P.A.: *Foundations of Economic Analysis*. Harvard University Press: Cambridge, MA (1947)
- 7.19 Goodwin, R.M.: *Chaotic Economic Dynamics*. Clarendon Press: Oxford (1990) 19
- 7.20 Rössler, O.E.: Chaos und Endophysik. In: Mainzer, K./Schirmacher, W. (eds.): *Quanten, Chaos und Dämonen. Erkenntnistheoretische Aspekte der modernen Physik*. B.I. Wissenschaftsverlag: Mannheim (1993)
- 7.21 Goodwin, R.M.: *Chaotic Economic Dynamics* (see Note 19) 113
- 7.22 Lorenz, H.-W.: *Nonlinear Dynamical Economics and Chaotic Motion*. Springer: Berlin (1989); Goodwin, R.W.: A growth cycle. In: Hunt, E.K./Schwartz, J.G. (eds.): *A Critique of Economic Theory*. Penguin: Harmondsworth (1969) 442–449
- 7.23 This idea stems back to Samuelson, P.A.: Generalized predator-prey oscillations in ecological and economic equilibrium. In: *The Collected Scientific Papers of P.A. Samuelson*. Ed. R.C. Merton. Vol III. MIT Press: Cambridge, MA (1972) 487–490
- 7.24 Cf. Lorenz, H.-W.: *Nonlinear Dynamical Economics and Chaotic Motion*. (See Note 27) 157; Goodwin, R.M.: *Chaotic Economic Dynamics*. (See Note 19) 117

- 7.25 Cf. Farmer, J.D./Sidorowich, J.J.: Predicting Chaotic Time Series. Mineo: Los Alamos National Laboratory (1987)
- 7.26 In his "History of Economical Analysis". J.A. Schumpeter had already discussed the possibility of multiple equilibrium points. But like Poincaré in the physical sciences, he was afraid of chaotic scenarios in economics: Schumpeter, J.A.: Geschichte der ökonomischen Analyse. Vandenhoeck & Ruprecht: Göttingen (1965)
- 7.27 Arthur, W.B.: Positive feedbacks in the economy. Scientific American, February (1990) 92–99
- 7.28 Weidlich, W.: Sociodynamics: A Systematic Approach to Mathematical Modeling in the Social Sciences. Taylor & Francis: London (2002). Chapt. 3.2.3
- 7.29 Weidlich, W.: Sociodynamics: A Systematic Approach to Mathematical Modeling in the Social Sciences (see Note 28) 224 (Fig. 7.1)
- 7.30 Arthur, W.B./Ermoliew, J.M./Kaniowski, J.M.: Path-dependent processes and the emergence of macro-structure. European Journal of Operational Research **30** (1987) 294–303; Helpman, E./Krugman, P.: Market Structure and Foreign Trade. MIT Press: Cambridge, MA (1985)
- 7.31 Simon, H.: Administrative Behavior: A Study of Decision-Making Processes in Administrative Organizations, 2nd edn. Macmillan: New York (1957) 198
- 7.32 Sterman, J.D.: Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. McGraw-Hill: Boston (2000) 597–629
- 7.33 Wolfram, S.: A New Kind of Science (see Note 5.52) 432
- 7.34 Bachelier, L.: Théorie de la spéculation. Dissertation. In : Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure **17** (1900) 21–86
- 7.35 Mainzer, K.: Der kreative Zufall. Wie das Neue in die Welt kommt. C.H. Beck: München (2007) 192
- 7.36 Fama, E.F.: The distribution of daily differences of stockprices: A test of Mandelbrot's stable Paretian hypothesis. Ph.D. dissertation. University of Chicago Graduate School of Business (1964)
- 7.37 Markowitz, H.H.: Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investments. Yale University Press: New Haven CT (1959)
- 7.38 Sharpe, W.F.: Capital asset prices: A theory of market equilibrium under conditions of risk. In: Journal of Finance **19** (1964) 425–442
- 7.39 The expected return-beta equation is $E(r_i) = r_f + \beta_i(E(r_M) - r_f)$. E stands for the mathematical expectation operator. The equation indicates that the expected return r on a security i equals the sum of two numbers. The first of these numbers is the risk-free rate that you would expect to get from something safe like a Treasury bill. The second is Sharpe's beta times the market premium. That is, however much better than the Treasury rate you expect the market M to perform. Each stock has its own beta, or degree to which its price movements correlate to that of the market overall.
- 7.40 Black, F., Scholes, M.: The pricing of options and corporate liabilities. In: Journal of Political Economy **81** (1973) 637–654
- 7.41 The price of a call option to buy a stock at a specific price and time is $C_o = S_o N(d_1) - X e^{-rT} N(d_2)$. Here, C_o is the price of the call option. S_o is the current stock price. X is the exercise price – the price at which the option contract allows you to buy the stock. R is the risk-free interest rate, and T is the time to maturity. The other two functions $N(d_1)$ and $N(d_2)$ are the probabilities of a random number d that follows a bell-curve distribution being less than the quantities $d_1 = [\ln(S_o/X) + (r + \sigma^2/2)T]/\sigma \sqrt{T}$ and $d_2 = d_1 - \sigma \sqrt{T}$, where σ is the standard deviation of the stock price and \ln is the natural logarithm.

- 7.42 Hull, J.C.: *Options, Futures, and other Derivatives*. Prentice-Hall: Upper Saddle River NJ (1997)
- 7.43 Merton, R.C.: Theory of Rational Option Pricing. In: *Bell J. Eco. Management Sci* **4** (1973) 141–183
- 7.44 Mantegna, R.N., Stanley, H.E.: *An Introduction to Econophysics. Correlations and Complexity in Finance*. Cambridge University Press: Cambridge (2000) 120
- 7.45 McCauley, J.L.: *Dynamics of Markets. Econophysics and Finance*. Cambridge University Press: Cambridge (2004) 4
- 7.46 Mandelbrot, B.B., Hudson, R.L.: *The (Mis)Behavior of Markets. A Fractal View of Risk, Ruin, and Reward*. Basic Books: New York (2004) 89
- 7.47 Mandelbrot, B.B., Hudson, R.L.: *The (Mis)Behavior of Markets* (see Note 46) 93
- 7.48 Mandelbrot, B.B., Hudson, R.L.: *The (Mis)Behavior of Markets* (see Note 46) 112–113
- 7.49 Kolmogorov, A.N.: The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. In: *Dokl. Akad. Nauk. SSSR* **30** (1941) 9–13 (reprinted in: *Proc. R. Soc. Lond. A* **434** (1991) 9–13)
- 7.50 McCauley, J.L.: *Dynamics of Markets* (see Note 45) chapter 7
- 7.51 Pareto, V.: *Manuel d'économie politique*. V. Giard and E. Brière: Paris (1909)
- 7.52 Evertsz, C.J.G., Hendrych, R., Singer, P., Peitgen, H.-O.: *Fraktale Geometrie von Börsenzeitreihen: Neue Perspektiven ökonomischer Zeitreihen*. In: Mainzer, K. (ed.): *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*. Springer: Berlin (1999) 404
- 7.53 Mandelbrot, B.B.: *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman & Co.: New York (1982)
- 7.54 Mandelbrot, B.B., Hudson, R.L.: *The (Mis)Behavior of Markets* (see Note 46) 118
- 7.55 Mantegna, R.N., Stanley, H.E.: *An Introduction to Econophysics* (see Note 7.44) 62
- 7.56 Mandelbrot, B.B.: The variation of certain speculative prices. In: *Journal of Business* **36** (1963) 394–419
- 7.57 Mandelbrot, B.B., Hudson, R.L.: *The (Mis)Behavior of Markets* (see Note 46) 171
- 7.58 Google Inc.: Google search for "Arche Noah". <http://www.google.com>. Cited 2nd May 2007
- 7.59 Museo Arcivescovile: *The dream of the pharaoh*. Museo Arcivescovile: Ravenna
- 7.60 Hurst, H.E.: Long-term storage capacity of reservoirs. In: *Transactions of the American Society of Civil Engineers* **116** (1951) 770–799, 800–808
- 7.61 Mandelbrot, B.B., Hudson, R.L.: *The (Mis)Behavior of Markets* (see Note 46) 188
- 7.62 Mandelbrot, B.B., Hudson, R.L.: *The (Mis)Behavior of Markets* (see Note 46) 194
- 7.63 Feder, J.: *Fractals*. Plenum: New York (1988)
- 7.64 Mandelbrot, B.B., Hudson, R.L.: *The (Mis)Behavior of Markets* (see Note 46) 215
- 7.65 Mandelbrot, B.B.: *Multifractals and 1/f Noise: Wild Self-Affinity in Physics*. Springer: New York (1999); Mandelbrot, B.B.: Heavy tails in finance for independent or multifractal price increments. In: Rachev, S.T. (ed.), *Handbooks in Finance 30: Heavy Tailed Distributions in Finance*. Elsevier: Amsterdam (2003) 1–34; Turiel, A., Pérez-Vicente, C.J.: Multifractal geometry in stock market time series. In: *Physica A* **322** (2003) 629–649
- 7.66 Malthus, R.T.: *Population: The First Essay* (1798). Univ. Mich. Press: Ann Arbor (1959)
- 7.67 West, B.J., Deering, B.: *The Lure of Modern Science. Fractal Thinking*. World Scientific: Singapore (1995) 281

- 7.68 Montrol, E.W., Badger, W.W.: *Introduction to Quantitative Aspects of Social Phenomena*. Gordon and Breach: New York (1974)
- 7.69 Mainzer, K.: *Symmetry and Complexity* (see Note 5.44) Chapters 2–3
- 7.70 McCauley, J.L.: *Dynamics of Markets* (see Note 45) Chapter 1

Chapter 8

- 8.1 Ehrenberg, V.: *Der Staat der Griechen*. Zürich (1965); Meier, C.: *Die Entstehung des Politischen bei den Griechen*. Frankfurt (1983)
- 8.2 *Platonis Opera*, 5 vols. Ed. J. Burnet. Oxford (1899–1906) (especially *Politeia*, *Politikos*); Cf. Cross, R.C./Woozley, A.D.: *Plato's Republic. A Philosophical Commentary*. London (1964)
- 8.3 Aristotle: *Ethica Nicomachæa*, *Politica* (Oxford Classical Texts); *Atheniesium Res Publica*. Ed. F.G. Kenyon. Oxford (1920); Höffe, O.: *Praktische Philosophie – Das Model des Aristoteles*. München (1971); Barker, L.E.: *The Political Thought of Plato and Aristotle*. New York (1959)
- 8.4 Hobbes, T.: *The Elements of Law Natural and Politic* (1640). Ed. F. Tönnies. London (1889); *Leviathan, or the Matter, Form and Power of a Commonwealth, Ecclesiastical and Civil* (1651). Ed. C.B. Macpherson. Harmondsworth (1968); Gough, J.W.: *The Social Contract. A Critical Study of its Development*. Oxford (1957); Höffe, O. (ed.): *Thomas Hobbes: Anthropologie und Staatsphilosophie*. Freiburg (1981)
- 8.5 Locke, J.: *Two Treatises on Government* (1689). Ed. P. Laslett. Cambridge (1970). Book II: *Essay concerning the true original, and end of civil government*
- 8.6 Hume, D.: *Essays and Treatise on Several Subjects*. In two Volumes. I. Containing *Essays, Moral, Political, and Literary*. A New Edition. London (1784)
- 8.7 H.-G. Gadamer: *Hegels Dialektik. Fünf hermeneutische Studien*, Tübingen (1971)
- 8.8 G. Gurvitch: *Dialectique et Sociologie*. Flammarion: Paris (1962)
- 8.9 Flood, R.L.: *Complexity: A definition by construction of a conceptual framework*. *Systems Research* 4(3) (1987) 177–185; Flood, R.L./Carson, E.R.: *Dealing with Complexity. An Introduction to the Theory and Application of Systems Science*. Plenum Press: New York (1988); An early inquiry of complexity in social sciences was written by Hayek, F.A. von: *The Theory of Complex Phenomena*. J.C.B. Mohr: Tübingen (1972)
- 8.10 For a survey compare Cambel, A.B./Fritsch, B./Keller, J.U. (eds.): *Dissipative Strukturen in integrierten Systemen*. Nomos Verlagsgesellschaft: Baden-Baden (1989); Tainter, J.: *The Collapse of Complex Societies*. Cambridge University Press (1988); Dumouchel, P./Dupuy, J.-P. (eds.): *L'Auto-Organisation de la Physique au Politique*. Editions Du Seuil: Paris (1983)
- 8.11 Malthus, T.R.: *An Essay on the Principle of Population*. London (1798)
- 8.12 Spencer, H.: *First Principles*. D. Appleton & Co.: New York (1896) 527; Carneiro, R.L.: *Structure, function, and equilibrium in the evolutionism of Herbert Spencer*. *Journal of Anthropological Research* 29 (1973) 77–95
- 8.13 For a review compare, for instance, Carneiro, R.L.: *Successive reequilibrations as the mechanism of cultural evolution*. In: Schieve, W.C./Allen, P.M. (eds.): *Self-Organization and Dissipative Structures. Applications in the Physical and Social Sciences*. University of Texas Press: Austin (1982) 110–115
- 8.14 Allen, P.M.: *Self-organization in the urban system*. In: Schieve, W.C./Allen, P.M. (eds.): *Self-Organization and Dissipative Structures*. (See Note 13) 142–146

- 8.15 Durkheim, E.: *De la Division du Travail Social*. Paris (1893); *Les Règles de la Méthode Sociologique*. Paris (1895)
- 8.16 Weidlich, W.: Das Modellierungskonzept der Synergetik für dynamisch sozio-ökonomische Prozesse. In: Mainzer, K./ Schirmacher, W. (eds.): *Quanten. Chaos und Dämonen*. (See Note 26) Figs. 6.12–16; Weidlich, W.: Stability and cyclicity in social systems. In: Cambel, A.B. Fritsch, B./Keller, J.U. (eds.): *Dissipative Strukturen in Integrierten Systemen*. (See Note 10) 193–222
- 8.17 For a survey compare Scott, W.R.: *Organizations: Rational, Natural, and Open Systems*. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ (1992); Taylor, M.: *The Possibility of Cooperation*. Cambridge University Press: Cambridge (1987)
- 8.18 Bott, E.: Urban families: Conjugal roles and social networks. *Human Relations* 8 (1955) 345–383; Knipscheer, C.P.M./Antonucci, T.C. (eds.): *Social Network Research: Substantive Issues and Methodological Questions*. Swets and Zeitlinger: Amsterdam (1990)
- 8.19 Schelling, T.C.: *Micromotives and Macrobehavior*. W.W. Norton & Co.: New York (1978)
- 8.20 Gance, N.S./Huberman, B.A.: *Organizational fluidity and sustainable cooperation, dynamics of computation group*: Xerox Palo Alto Research Center: March 12 (1993) (Fig. 3)
- 8.21 See Note 20, Fig. 4
- 8.22 Dawkins, R.: *The Selfish Gene*. Oxford University Press: New York (1976)
- 8.23 Popper, K.R.: *Evolutionary epistemology*. In: Miller, D. (ed.): *Popper Selections*. Princeton University Press: Princeton, NJ (1985) 78–86
- 8.24 Miller, M.S./Drexler, K.E.: *Comparative ecology: A computational perspective*. In: Huberman, B.A. (ed.): *The Ecology of Computation*. North-Holland: Amsterdam (1988) 51–76
- 8.25 Compare Luhmann, N.: *The self-reproduction of the law and its limits*. In: Teubner, G. (ed.): *Dilemmas of Law in the Welfare State*. Berlin (1986) 111–127; Mayntz, R.: *Differenzierung und Verselbständigung. Zur Entwicklung gesellschaftlicher Teilsysteme*. Frankfurt (1988)
- 8.26 Minsky, M.: *The Society of Mind*. Simon & Schuster: New York (1985) 314
- 8.27 For a survey compare Kellermayr, K.H.: *Lokale Computernetze LAN. Technologische Grundlagen, Architektur, Übersicht und Anwendungsbereiche*. Springer: Wien (1986); Sharp, J.A.: *Verteilte und parallele Computernetze. Architektur und Programmierung*. VCH-Verlagsgesellschaft: Weinheim (1989); Barz, H.W.: *Kommunikation und Computernetze. Konzepte, Protokolle und Standards*. Carl Hanser: München (1991)
- 8.28 Cerf, V.G.: *Netztechnik, Spektrum der Wissenschaft* Nov. 11 (1991) 76
- 8.29 Halabi, B.: *Internet-Routing-Architekturen: Grundlagen, Design und Implementierung*. Carl Hanser Verlag: München (1998) 122 (Fig. 5.8); Calvert, K.M./Doar, M.B./Zegura, E.W.: *Modeling Internet topology*. *IEEE Transactions Communication* 1 (1997) 160
- 8.30 Fukuda, K./Takayasu, H./Takayasu, M.: *Spatial and temporal behavior of congestion in Internet traffic*. *Fractals* 7 1 (1999) 67
- 8.31 Mainzer, K./Büchs, M./Kundish, D./Pyrka, P.: *Physical and virtual mobility: analogies between traffic and virtual highways*. In: Mayinger, F. (ed.), *Mobility and Traffic in the 21st Century*. Springer: Berlin (2001) 243–318
- 8.32 Takayasu, M./Fukuda, K./Takayasu, H.: *Application of statistical physics to the Internet traffics*. *Physica A* (1999) 3 (Fig. 1)

- 8.33 Takayasu, M./Takayasu, H./Sato, T.: Critical behaviors and 1/f noise in information traffic. *Physica A* 233 (1996) 825 (Fig. 1)
- 8.34 Wang, X.F.: Complex networks: topology, dynamics and synchronization. *International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering* 12 5 (2002) 885–916
- 8.35 Crestani, F./Pasi, G. (eds.): *Soft Computing in Information Retrieval: Techniques and Applications*. Physica Verlag (Springer): Heidelberg (2000); Zadeh, L.A.: From computing with numbers to computing with words – from manipulations of measurements to manipulation of perceptions. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications* 45 1 (1999)
- 8.36 Mainzer, K.: *KI – Künstliche Intelligenz. Grundlagen intelligenter Systeme*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt (2003)
- 8.37 Boughanem, M./Chrisment, C./Mothe, J./Soule-Dupuy, C./Tamine, L.: Connectionist and genetic approaches for information retrieval. In: Crestani, F./Pasi, G. (eds.): *Soft Computing in Information Retrieval* (see Note 35) 179 (Fig. 1)
- 8.38 Merkl, D./Rauber, A.: Document classification with unsupervised artificial neural networks. In: Crestani, F./Pasi, G. (eds.): *Soft Computing in Information Retrieval* (see Note 35) 102–121
- 8.39 Cho, S.B.: Artificial life technology for adaptive information processing. In: Kasabov, N. (ed.): *Future Directions for Intelligent Systems and Information Sciences*. Physica-Verlag (Springer): Heidelberg (2000) 24
- 8.40 Huberman, B.A./Adamic, L.A.: Growth dynamics of the World Wide Web. *Nature* 401 (1999) 131
- 8.41 Minsky, M.: *The Society of Mind*. (See Note 26)
- 8.42 Hegel, G.W.F.: *Phänomenologie des Geistes*. (1807) In: *Werke in zwanzig Bänden*, vol. 3. Suhrkamp: Frankfurt (1972)
- 8.43 Ackhoff, R., Emery, F.: *On Purposeful Systems*. Aldine Atherton: Chicago IL (1972)
- 8.44 Balke, W.-T., Mainzer, K.: Knowledge representation and the embodied mind: Towards a philosophy and technology of personalized informatics. In: Althoff, K.-D. et al. (eds.): *Professional Knowledge Management. Lecture Notes in Artificial Intelligence* 3782. Springer: Berlin (2005) 586–597
- 8.45 Holland, S., Kießling, W.: Situated preferences and preference repositories for personalized database applications. In: *Int. Conf. on Conceptual Modeling (ER'04)*. Shanghai, China (2004)
- 8.46 Kaplan, C., Fenwick, J., Chen, J.: Adaptive hypertext navigation based on user goals and context. In: *Int. J. User Modeling and User-Adapted Interaction*. 3(3) (1993)
- 8.47 Wagner, M., Balke, W.-T., Kießling, W.: An XML-based multimedia middleware for mobile online auctions. In: *Enterprise Information Systems III*. Kluwer, The Netherlands (2002)
- 8.48 Dreyfus, H.L.: *What Computer's Can't Do – The Limits of Artificial Intelligence*. Harper & Row: New York (1979)
- 8.49 Balke, W.-T.: A Roadmap to personalized information systems by cognitive expansion of queries. In: *Int. Workshop on Content-Knowledge Management and Mass Personalization of E-Services (EnCKompass 2002)*. Paris (2002)
- 8.50 Minker, J.: An overview of cooperative answering in databases. In: *Int. Conf. on Flexible Query Answering Systems (FQAS'98)*. Lecture Notes in Computer Science 1495. Springer: Berlin (1998)
- 8.51 Kießling, W.: Foundations of preferences in database systems. In: *Int. Conf. on Very Large Data Bases (VLDB'02)*. Hong Kong (2002)

- 8.52 Balke, W.-T., Wagner, M.: Cooperative discovery for user-centered web service provisioning. In: Int. Conf. on Web Services (ICWS'03). Las Vegas NV (2003); Balke, W.-T., Wagner, M.: Towards personalized selection of web services. In: Int. World Wide Web Conference (WWW'03). Budapest, Hungary (2003)
- 8.53 Balke, W.-T., Mainzer, K.: Knowledge representation and the embodied mind: Towards a philosophy and technology of personalized informatics. In: Althoff, K.-D. et al. (eds.): Professional Knowledge Management. Lecture Notes in Artificial Intelligence 3782. Springer: Berlin (2005) 595
- 8.54 Weiser, M.: The computer for the 21st century. *Scientific American* 9 (1991) 66
- 8.55 Gershensfeld, N.: When Things Start to Think. Henry Holt: New York (1999)
- 8.56 Norman, D.A.: The Invisible Computer. Cambridge University Press: Cambridge (1998)
- 8.57 Hofmann, P.E.H. et al.: Evolutionäre E/E-Architektur. Vision einer neuartigen Elektronik-Architektur für Fahrzeuge. DaimlerChrysler: Esslingen (2002)
- 8.58 Weiser, M.: The computer for the 21st century. In: *Scientific American* 265(3) (1991) 94–104
- 8.59 Müller, G., Torsten, E., Kreutzer, M.: Telematik- und Kommunikationssysteme in der vernetzten Wirtschaft. Oldenbourg: München (2004)
- 8.60 Müller, G., et al. (eds.): Geduldige Technologie für ungeduldige Patienten: Führt Ubiquitous Computing zu mehr Selbstbestimmung? Total vernetzt – Szenarien einer informatisierten Welt. Springer: Berlin (2003); Sackmann, S., Eymann, T., Müller, G.: EMIKA – Real-time controlled mobile information systems in health care applications. In: Proceedings of the Second Conference on Mobile Computing in Medicine. GI-Edition Lecture Notes in Informatics. Springer: Berlin (2002); Scheer, A.-W., Chen, R., Zimmermann, V.: Prozessmanagement im Krankenhaus. Krankenhausmanagement Schriften zur Unternehmensführung. SzU: Wiesbaden (1996)
- 8.61 Paramythis, A., Loidl-Reisinger, S.: Adaptive learning and e-learning standards. In: *Electronic Journal on e-Learning* 2 (1) (2004) 181–194
- 8.62 Sampson, D., Karagiannidis, C., Cardinali, F.: An architecture for web-based e-learning promoting re-usable adaptive educational e-content. In: *Educational Technology & Society* 5(4) (2002) 1–14
- 8.63 Tomaschek, N.: Systemic Coaching. A Target-Oriented Approach to Consulting. Carl-Auer: Heidelberg (2006)
- 8.64 Nonaka, I., Toyama, R., Byosière, P.: A theory of organizational knowledge creation: Understanding the dynamic process of creating knowledge. In: Dierkes, M., Berthoin Antal, A., Child, J., Nonaka, I. (eds.): *Handbook of Organizational Learning & Knowledge*. Oxford University Press: Oxford (2001) 491–517
- 8.65 Hedberg, B., Holmqvist, M.: Learning in imaginary organizations. In: Dierkes, M., Berthoin Antal, A., Child, J., Nonaka, I. (eds.): *Handbook of Organizational Learning & Knowledge*. Oxford University Press: Oxford (2001) 733–752
- 8.66 Dierkes, M., Berthoin Antal, A., Child, J., Nonaka, I. (eds.): *Handbook of Organizational Learning & Knowledge* (see Note 65)
- 8.67 Mainzer, K.: Leben in der Wissensgesellschaft. In: Deutscher Hochschulverband (ed.): *Glanzlichter der Wissenschaft*. Lucius und Lucius: Stuttgart (2000) 133–142; Mainzer, K.: *Computernetze und Virtuelle Realität. Leben in der Wissensgesellschaft*. Springer: Berlin (1999)

Chapter 9

- 9.1 Goodman, N.: *Fact, Fiction and Forecast*. London (1954); Lenk, H.: *Erklärung, Prognose, Planung*. Rombach: Freiburg (1972)
- 9.2 Montgomery, D.C./Johnson, L.A.: *Forecasting and Time Series Data Analysis and Theory*. Holt, Rinehart and Winston: New York (1975)
- 9.3 Abraham, B./Ledolter, J.: *Statistical Methods of Forecasting*. Wiley: New York (1983); Pindyck, R./Rubinfeld, D.: *Econometric Models and Economic Forecasts*. McGraw-Hill: New York (1980)
- 9.4 Makridakis, S./Wheelwright, S.C.: *Forecasting Methods for Management*. Wiley: New York (1989); Makridakis, S./Wheelwright, S.C./Mc Gree, V.E.: *Forecasting: Methods and Applications*. Wiley: New York (1989)
- 9.5 Kravtsov, Y. A. (ed.): *Limits of Predictability*. Springer: Berlin (1993) 82; Sarder, Z./Ravetz, J.R. (eds.): *Complexity: fad or future?* In: *Futures. J. Forecasting, Planning, and Policy* 26 6 (1994)
- 9.6 Mayntz, R.: *The Influence of natural science theories on contemporary social science*. In: Meinolf, D./Biervert, B. (eds.): *European Social Science in Transition. Assessment and Outlook*. Westview Press: Boulder, Colorado (1992) 27–79
- 9.7 Merton, R.K.: *The Sociology of Science. Theoretical and Empirical Investigations*. Chicago (1973); Sorokin, P.A.: *Social and Cultural Dynamics*. New York (1962); Price, D. de Solla: *Science since Babylon*. New Haven (1961); Goffman, W.: *An epidemic process in an open population*. In: *Nature* 205 (1965), 831–832; *Mathematical approach to the spread of scientific ideas – the history of mast cell research*. In: *Nature* 212 (1966), 449–452; Berg, J./Wagner-Döbler, R.: *A multidimensional analysis of scientific dynamics*. In: *Scientometrics* 3 (1996), 321–346
- 9.8 Bruckner, E.W./Ebeling, W./Scharnhorst, A.: *The application of evolution models in scientometrics*. In: *Scientometrics* 18 (1990), 33
- 9.9 Small, H./Sweeny/Greenlee, E.: *Clustering the science citation index using co-citations. II. Mapping science*. In: *Scientometrics* 8 (1985) 321–340; Callon, M./Courtial, J.-P./Turner, W.A./Bauin, S.: *From translation to problematic networks – An introduction to co-word analyses*. In: *Social Science Information* 22 (1983), 191–235
- 9.10 Mayntz, R.: *Soziale Diskontinuitäten: Erscheinungsformen und Ursachen*. In: Hierholzer, K./Wittmann, H.-G. (eds.): *Phasensprünge und Stetigkeit in der natürlichen und kulturellen Welt*. Wiss. Verlagsgesellschaft: Stuttgart (1988) 15–37
- 9.11 Mainzner, K.: *Die Würde des Menschen ist unantastbar. Zur Herausforderung von Artikel 11 Grundgesetz durch den technisch-wissenschaftlichen Fortschritt*. Jahrbuch der Universität 1989. Augsburg (1990) 211–221
- 9.12 *For a historical survey compare Schwemmer, O.: Ethik*. In: Mittelstraß, J. (ed.): *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*. Vol. 1. B.I. Wissenschaftsverlag: Mannheim/Wien/Zürich (1980) 592–599; Abelson, R./Nielsen, K.: *History of ethics*. In: Edwards (ed.): *The Encyclopedia of Philosophy*. Vol. III. New York (1967) 81–117
- 9.13 Irwin, T.: *Plato's Moral Theory. The Early and Middle Dialogues*. Oxford (1977)
- 9.14 Kenny, A.: *The Aristotelean Ethics. A Study of the Relationship between the Eudemian and Nicomachean Ethics of Aristotle*. Oxford (1978)
- 9.15 Compare Raphael, D.D. (ed.): *British Moralists (1650–1800) I–II*. Oxford (1969)
- 9.16 Paton, H.J.: *The Categorical Imperative. A Study in Kant's Moral Philosophy*. London (1947); Williams, B.A.D.: *The Concept of the Categorical Imperative. A Study of the Place of the Categorical Imperative in Kant's Ethical Theory*. Oxford (1968)

- 9.17 Mill, J.S.: *Utilitarianism*. London (1861); Rescher, N.: *Distributive Justice. A Constructive Critique of the Utilitarian Theory of Distribution*. Indianapolis (1966)
- 9.18 Rawls, J.: *A Theory of Justice*. London (1972)
- 9.19 Simon, J.: Friedrich Nietzsche. In: Höffe, O. (ed.): *Klassiker der Philosophie II*. München (1981) 203–224, 482–484
- 9.20 Heidegger, M.: *Die Technik und die Kehre*. Pfullingen (1962); Loscerbo, J.: *Being and Technology. A Study in the Philosophy of Martin Heidegger*. The Hague (1981)
- 9.21 Jonas, H.: *Das Prinzip Verantwortung. Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation*. Suhrkamp: Frankfurt (1979)
- 9.22 Lenk, H.: *Zwischen Wissenschaft und Ethik*. Suhrkamp: Frankfurt (1992); Mittelstraß, J.: *Leonardo Welt. Über Wissenschaft, Forschung und Verantwortung*. Suhrkamp: Frankfurt (1992)
- 9.23 Chua, A.: *World on Fire*, Doubleday: New York (2003)
- 9.24 Kant, I.: *Zum ewigen Frieden* (1795). in: *Kants gesammelte Schriften*, ed. Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften Bd. VIII, Berlin (1912/23)
- 9.25 Wolfram, S.: *A New Kind of Science* (see Note 5.47) 750
- 9.26 Kant, I.: *Kritik der reinen Vernunft* (1787), B 833

人名译名对照

仅列原著正文中出现者。按译名汉语拼音排序,人名据原著。

A

阿波罗尼奥斯
 阿尔克迈翁
 阿那克萨哥拉
 阿那克西曼德
 阿那克西米尼
 阿诺尔德
 阿斯佩
 阿维森纳
 埃尔布朗
 埃弗里特
 埃克尔斯
 埃克斯纳
 埃农
 艾根
 艾吉斯
 艾伦
 爱因斯坦
 昂萨格
 奥卡姆
 奥肯
 奥勒留
 奥雷姆
 奥威尔

Apollonius of Perga
 Alcmaeon of Croton
 Anaxagoras
 Anaximander
 Anaximenes
 V. I. Arnold
 Alain Aspect
 Avicenna
 Herbrand
 Everett
 John Eccles
 S. Exner
 Hénon
 Manfred Eigen
 Aigcas
 Peter Allen
 Einstein
 Onsager
 Ockham
 Oken
 Marcus Aurelius
 Nicole Oresme
 Orwell

B

巴比奇
 巴洛
 巴门尼德
 巴舍利耶
 柏格森
 柏拉图
 邦迪
 贝克莱
 贝纳尔

Charles Babbage
 Barlow
 Parmenides of Elea
 Louis Bachelier
 Bergson
 Plato
 Hermann Bondi
 Berkeley
 Bénard

边沁
波利亚
波普尔
波斯特
玻尔
玻尔
玻耳兹曼
玻意耳
伯克霍夫
博雷利
博内
布拉德福德
布莱克
布朗
布朗
布伦塔诺

C

蔡少棠
蔡廷
策梅洛
楚泽

D

达尔文
戴森
德布罗意
德雷克斯勒
德里施
德谟克里特
迪昂
笛卡儿
杜布瓦-雷蒙

Bentham
George Polya
Karl Popper
Emil Post
Harald Bohr
Niels Bohr
Ludwig Boltzmann
Boyle
Birkhoff
Borelli
Bonnet
Bradford
Fischer Black
J. H. Brown
Robert Brown
Franz Brentano

Leon Ong Chua
Gregory J. Chaitin
Ernst Zermelo
Konrad Zuse

Charles Darwin
Freeman Dyson
de Broglie
Eric Drexler
Driesch
Democritus
Pierre Duhem
Descartes
Emil du Bois-Reymond

E

恩奎斯特
恩培多克勒

B. J. Enquist
Empedocles

F

范德玻尔
费恩曼
费根鲍姆
费雪
冯·诺伊曼
弗雷格
弗洛尔
弗洛伊德
福克
福特
富勒

van der Pol
Richard Feynman
Mitchell Feigenbaum
Emil Fischer
John von Neumann
Frege
Hans Flohr
Freud
Fock
Henry Ford
Richard Buckminster Fuller

G

盖仑
戈尔德
戈尔曼
戈夫曼
哥白尼
哥德尔
歌德
格兰斯
格里施
格罗斯曼
根岑
古德温

Galen
Thomas Gold
Gorman
William Goffman
Copernicus
Gödel
Goethe
Glance
Gerisch
Grossmann
Gerhard Gentzen
Goodwin

H

哈肯
哈罗德
哈密顿

Hermann Haken
Roy Harrod
William Hamilton

哈特尔	James B. Hartle
哈特里	Hartree
哈维	William Harvey
海德格尔	Martin Heidegger
海克尔	Haeckel
海勒斯	Heiles
海森伯	Werner Heisenberg
海特勒	Heitler
亥姆霍兹	Hermann von Helmholtz
汉森	Hansen
赫布	Donald Hebb
赫拉克利特	Heraclitus of Ephesus
赫斯特	Harold Edwin Hurst
黑格尔	Georg Wilhelm Friedrich Hegel
亨普尔	Carl Gustav Hempel
怀特海	Whitehead
惠更斯	Christiaan Huygens
霍布斯	Thomas Hobbes
霍尔巴赫	Holbach
霍夫	Hoff
霍金	Stephen Hawking
霍兰	Holland
霍罗威茨	Horowitz
霍普菲尔德	John Hopfield
霍伊尔	Fred Hoyle

J

吉布森	William Gibson
吉雷尔	Gierer
加缪	Albert Camus
伽利略	Galileo
居里	Pierre Curie

K

卡尔纳普	Rudolf Carnap
------	---------------

卡莱斯基
 卡诺
 开普勒
 凯恩斯
 凯尔索
 康德
 康德拉季耶夫
 康托尔
 康威
 考夫曼
 苛勒
 科尔莫戈罗夫
 科霍宁
 克劳修斯
 克雷
 克雷布斯
 库恩
 魁奈

Kalecki
 Carnot
 Johannes Kepler
 John Maynard Keynes
 Kelso
 Immanuel Kant
 Kondratieff
 Cantor
 John Conway
 Stuart Kauffman
 Köhler
 Andrey N. Kolmogorov
 Teuvo Kohonen
 Clausius
 Cray
 Krebs
 Kuhn
 François Quesnay

L

拉马克
 拉美特利
 拉普拉斯
 拉舍夫斯基
 莱布尼茨
 莱维
 赖诺夫
 兰顿
 朗格
 勒斯勒尔
 雷兴贝格
 李嘉图
 李雅普诺夫
 林德
 林登迈尔

Lamarck
 La Mettrie
 Laplace
 Rashevsky
 Leibniz
 Paul Lévy
 Rainoff
 Christopher G. Langton
 Lange
 Rössler
 Ingo Rechenberg
 David Ricardo
 Lyapunov
 Andrei Linde
 Aristid Lindenmayer

刘维尔
 鲁滨逊
 鲁梅尔哈特
 伦敦
 罗尔斯
 罗森伯格
 罗森布拉特
 罗斯福
 罗素
 洛夫洛克
 洛克
 洛伦茨
 洛施密特
 洛特卡
 伦德贝里

Liouville
 J. A. Robinson
 Rumelhart
 London
 John Rawls
 Rosenberg
 Rosenblatt
 Roosevelt
 Russell
 James Lovelock
 John Locke
 Edward Lorenz
 Loschmidt
 Alfred Lotka
 Lundberg

M

马尔达西那
 马尔萨斯
 马尔斯堡
 马格努斯
 马赫
 马科维茨
 马克思
 马勒布朗什
 马歇尔
 迈因哈特
 麦卡洛克
 麦卡锡
 麦克莱兰
 麦克斯韦
 芒德布罗
 梅茨勒
 孟德尔
 梦露

Maldacena
 Thomas Robert Malthus
 Christoph von der Malsburg
 Albertus Magnus
 Ernst Mach
 Harry M. Markowitz
 Karl Marx
 Malebranche
 Alfred Marshall
 Meinhardt
 McCulloch
 John McCarthy
 McClelland
 Maxwell
 Mandelbrot
 Metzler
 Mendel
 Marilyn Monroe

弥勒
 米勒
 明斯基
 闵可夫斯基
 摩西
 莫根施特恩
 莫诺
 莫泽
 默比乌斯
 默顿
 穆勒

N

纳维
 内克尔
 尼采
 尼科利斯
 牛顿
 纽厄尔

O

欧几里得
 欧拉
 欧姆

P

帕累托
 帕卡德
 帕普斯
 帕斯卡
 庞加莱
 培根
 佩珀特
 彭罗斯
 皮茨

Johannes Müller
 Achim Müller
 Marvin Minsky
 Minkowski
 J. Moses
 Oskar Morgenstern
 Jacques Monod
 J. K. Moser
 Möbius
 Robert Merton
 John Stuart Mill

Claude Louis Navier
 Necker
 Friedrich Nietzsche
 Nicolis
 Isaac Newton
 Alan Newell

Euclid
 Leonhard Euler
 Ohm

Vilfredo Pareto
 Packard
 Pappus
 Blaise Pascal
 Henri Poincaré
 Francis Bacon
 Seymour Papert
 Roger Penrose
 Pitts

皮提亚
普朗克
普利高津
普特南

Pythia
Max Planck
Ilya Prigogine
Hilary Putnam

Q

齐普泽
乔姆斯基
乔伊
丘奇
丘奇兰

Zipser
Noam Chomsky
Bill Joy
Alonzo Church
Paul Churchland

R

瑞利

Lord Rayleigh

S

萨缪尔森
萨维奇
塞尔
司马贺(赫伯特·西蒙)
斯宾诺莎
斯宾塞
斯科尔斯
斯密
斯莫利
斯诺
苏格拉底
梭罗
索罗金

Paul A. Samuelson
Savage
John Searle
Herbert Simon
Spinoza
Spencer
Myron S. Scholes
Adam Smith
Richard E. Smalley
Snow
Socrates
Henry Thoreau
Pitirim Sorokin

T

塔尔斯基
塔克文
塔肯斯
泰阿泰德

Tarski
Tarquinius Superbus
Takens
Theaetetus

泰勒斯
 汤姆孙
 图灵
 涂尔干
 托勒玫
 托梅

Thales of Miletus
 William Thompson
 Alan Turing
 Emile Durkheim
 Ptolemy
 Thomae

W

瓦尔拉斯
 威德罗
 威尔逊
 微耳和
 韦吕勒
 韦斯特
 维格纳
 维纳
 魏岑鲍姆
 魏德利希
 沃尔弗拉姆
 沃尔泰拉

Walras
 Widrow
 Wilson
 R. Virchow
 Pierre-Francois Verhulst
 G. B. West
 Eugene Wigner
 Norbert Wiener
 Weizenbaum
 Wolfgang Weidlich
 Stephen Wolfram
 Volterra

X

西比尔
 西奈伊
 希波克拉底
 希尔伯特
 席卡德
 夏普
 香农
 肖
 肖克利
 谢尔平斯基
 谢林
 谢伊诺夫斯基
 辛格

Sibyl
 Sinai
 Hippocrates
 Hilbert
 Wilhelm Schickard
 William F. Sharpe
 Shannon
 Shaw
 Shockley
 Sierpinski
 Friedrich Schelling
 Sejnowski
 Wolf Singer

欣顿
熊彼特
休伯曼
休利特
休谟
薛定谔

Y

亚里士多德
杨林
约纳斯

Z

詹姆斯

Hinton
Schumpeter
Huberman
Hewlett
David Hume
Erwin Schrödinger

Aristotle
Lin Yang
Hans Jonas

William James

中文第 1 版译后记

20 世纪初以来,相对论拓展了对广袤宇宙的追索,量子力学深化了向物质深层的进军,系统科学、非线性科学、自组织理论则代表着对复杂性的新探索。本世纪科学技术的突飞猛进,特别是 80 年代以来的新技术革命迅速地改变着我们赖以生存的物质条件,改变着我们的生活方式。

科学技术的新动向、新成就必然影响时代的社会生活、社会文化以及人们的思维方式。量子力学和相对论诞生以后,种种系统理论从 20 世纪中叶兴起,自组织理论于 70 年代前后问世,非线性科学 80 年代以来逐渐成为学术热点,90 年代信息技术进入了新的发展阶段。探索和理解复杂性,成为走向 21 世纪的科学技术主旋律,必然对我们走向 21 世纪的思维方式产生深刻影响。

克劳斯·迈因策尔教授的《复杂性中的思维》,从科学前沿探索与人类心智探险史的结合中,涉猎从物理世界的进化到生命世界的进化,从意识的起源到认知科学的兴起,从社会政治系统到社会经济系统的运行,从哲学史到哲学前沿的反思,阐述了探索复杂性将引起人们思维方式的变化,引起世人对共同未来的关怀。《复杂性中的思维》是一本扣人心弦的著作。

有鉴于此,当我完成《自组织的自然观》(北京大学出版社,1996)书稿后见到《复杂性中的思维》(第 1 版)时,有了将它译成中文出版的念头。在中央编译出版社、原书作者以及德国施普林格出版社的积极支持下,按《复杂性中的思维》第 2 版翻译的中文版,现在摆到了我国读者面前。

曾国屏

1997 年元月于清华大学

中文第 2 版译后记

克劳斯·迈因策尔教授的这本书初版于1994年。该书第一个中译本是根据1996年的第2版翻译的,原书名 *Thinking in Complexity: the Complex Dynamics of Matter, Mind and Mankind*, 中译本书名《复杂性中的思维:物质、精神和人类的复杂动力学》。

经过不断修改完善,该书到2007年已经修改增订为第5版。1997年出第3版时,该书已经改用了现在的书名 *Thinking in Complexity: The Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind*。根据这个情况并为了更简洁地反映原书,由第五版译出的新中译本书名相应地改成《复杂性思维:物质、精神和人类的计算动力学》。

应上海辞书出版社潘涛总编辑的邀请,我依据第五版进行相应的中译本增订翻译工作。其间,我邀请苏俊斌博士来共同完成此任务,他又邀请了当时在清华大学就读的苏黎世理工大学计算机科学系博士生龚元浩、清华大学工程物理学系博士生刘伟容、清华大学经济所博士生江永基参加了其中的一些新章节的翻译工作并提供了相应的译稿。在他们工作的基础上,这半年来,我把从头到尾校译一遍作为工作重点。这次翻译工作中,得益于“泛在计算”,互联网的普及使得我们对于其中的涉及多种多样学科的许多知识点和疑问处进行了反复查核,从而提高了译文的准确性。最后,整个五一假期前后十来天,硕士生陈腾一直在协助最后录入、检查等工作。现在,终于可以将译稿提交给出版社了。

曾国屏

2011年5月于清华大学

译者简介 **曾国屏**

清华大学科学技术与社会研究所教授,清华大学深圳研究生院社会科学与管理学部主任。长期从事科学·技术·产业与社会问题、科技传播普及和复杂性科学哲学问题的研究,有著译十余部。

苏俊斌

2008年毕业于清华大学,获哲学博士学位。现任教于厦门大学新闻传播学院,研究方向为新媒体的技术与社会研究,讲授广播电视史、新媒体概论等课程。