



青年自学读物

物理与应用

(下册)

QINGNIAN ZIXUE DUWU

内蒙古人民出版社



FH79

统一书号：7089·31

每册：1.05元

青年自学读物

物理与应用

(下册)

包头市教育局《物理与应用》编写组

内蒙古人民出版社

一九七五·呼和浩特

青年自学读物
物 理 与 应 用
(下册)

包头市教育局《物理与应用》编写组

内蒙古人民出版社出版

内蒙古新华书店发行 内蒙古教育印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 7.5 字数: 160千

1975年12月第一版 1976年1月第一次印刷

印数: 1—50,500册

统一书号: 7089·31 每册: 1.05元

目 录

第三篇 电 学

第八章 直流电路.....	(229)
第一节 正电和负电.....	(230)
第二节 电荷与电场.....	(232)
第三节 电压.....	(238)
第四节 电流和电阻.....	(244)
第五节 欧姆定律.....	(251)
第六节 电功和电功率.....	(257)
第七节 拖拉机电路.....	(265)
第九章 电和磁的相互转化.....	(272)
第一节 电流和磁场的关系.....	(272)
第二节 磁电式直流电表.....	(281)
第三节 磁路.....	(288)
第四节 磁是怎样转化为电的.....	(297)
第五节 调节器.....	(306)
第十章 交流电路.....	(311)
第一节 交流电的产生.....	(311)
第二节 交流电路.....	(322)

第三节	功率因数.....	(345)
第十一章	电能的产生和输送.....	(348)
第一节	农村小型电站概况.....	(343)
第二节	三相交流电路.....	(352)
第三节	变压器.....	(356)
第四节	电能的输送.....	(368)
第十二章	交流电动机.....	(378)
第一节	三相异步电动机的构造.....	(379)
第二节	异步电动机的工作原理.....	(382)
第三节	三相异步电动机的定子绕组.....	(389)
第四节	电动机的选择.....	(406)
第五节	三相鼠笼异步电动机的起动和保护.....	(412)
第六节	电动机的维护与检修.....	(422)
第七节	三相异步电动机绕组的重换.....	(433)
第十三章	无线电基础知识.....	(445)
第一节	波.....	(445)
第二节	晶体二极管.....	(449)
第三节	整流电路.....	(458)
第四节	晶体三极管.....	(466)
第五节	晶体管的简单测试.....	(473)
第六节	低频放大器的工作原理.....	(478)
第七节	晶体管放大器的偏置电路.....	(483)
第八节	放大器的级间耦合.....	(492)
第九节	功率放大器.....	(496)
第十节	晶体管振荡电路.....	(500)

第十一节	电磁波的发送和接收	(505)
第十二节	调谐	(508)
第十三节	检波	(511)
第十四节	直接放大式收音机	(513)
第十五节	超外差式收音机	(519)
第十六节	超外差收音机的维修	(535)
第十四章	农村有线广播	(549)
第一节	扩音机	(549)
第二节	扬声器和传声器	(553)
第三节	唱机	(563)
第四节	扩音机和扬声器的配接	(566)
第五节	广播线路及其维护	(576)

第四篇 光及原子物理简介

第十五章	光的基础知识	(579)
第一节	光的几何传播	(579)
第二节	光学器件	(585)
第三节	常见的光学仪器	(594)
第四节	光的波动性	(604)
第五节	光的粒子性	(612)
第十六章	原子物理简述	(618)
第一节	原子的移式结构	(618)
第二节	原子核的组成	(624)
第三节	原子核能及其释放	(626)
第四节	核武器的防御	(636)
第五节	激光的产生及其应用	(638)

第三篇 电 学

第八章 直流电路

在日常工作和生活中，人们经常使用电灯、电话、电动机等用电设备，我们选择其中一个最常见、最简单的手电筒，给予“解剖”，来研究它的构造及工作原理。

手电筒由电池、金属外壳、小灯泡和按钮等组成，如图 8-1(a) 所示。电池是供给电能的，叫做电源；灯泡是消耗电能的，叫做负载；金属外壳起着连接电源和负载的作用，相当于导线，按钮是导线的一部分，起着接通或断开的作

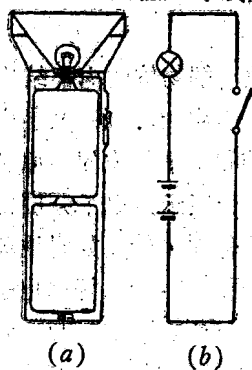


图 8-1

叫做开关。这样，用导线把电源、负载和开关连接起来，就组成了“电路”。通常用一些简单的符号来代表电路中的实物，例如用“ $-|+$ ”代表电池，用“ $\otimes$ ”代表灯泡，用“ $\circ \diagup \diagdown$ ”代表开关，用“—”代表导线，于是就可以把手电筒电路画成图 8-1(b) 那个样子，这就是电路图。电路图比实物图简单、清晰，因此人

们在研究电路时，总是用电路图来代替实物图。

倘若把其它用电设备的电路，如照明电路、电动机电路等跟手电筒电路比较，就会发现，这些电路也都是由电源、负载、导线和开关组成的，只不过是用电器不同而已。

在手电筒电路中，按下开关，灯泡就会发光。看到这种现象，自然会提出许多问题：是什么东西跑到灯泡里面去了呢？灯丝为什么会发光？电筒外壳为什么一定要用带有金属的材料做呢？面对这些问题，首先要了解“电”究竟是什么，继而研究它是怎样产生的，又有哪些规律，以及如何应用这些规律等等。在本章里，我们将解决其中一些主要问题。

第一节 正电和负电

一、两种电荷

要了解电现象的本质，首先必须了解物体的内部结构。

自然界里的一切物质都是由分子组成的，分子又是由原子组成的，每个原子，都是由原子核和电子组成的。原子核比电子大得多，而且带正电（用“+”号表示）。电子分层排列并围绕原子核旋转，同时，它自身也不停地旋转，如同地球或其他行星绕太阳运行一样。太阳好比原子核，行星好比电子。电子带负电（用“-”号表示）。电荷（正、负电也叫正、负电荷）有同号相斥，异号相吸的特性。原子中的正电与负电，就是一对矛盾。不同的物质有不同的原子，它们所具有的电



(a)



(b)

图 8-2

子数也不一样。例如铝原子有13个电子，而氢原子只有一个电子，它们的结构分别如图 8-2 中的(a)和(b)所示。

在通常状态下，原子核所带的正电荷和电子所带的负电荷，在数量上相等，物体对外不显示带电现象。这时候，正电和负电这对矛盾的双方是平衡的。如果由于某种原因，使离原子核较远的外层电子摆脱原子核的束缚，转移到其它物体上，这样，失去电子的物体带正电，得到电子的物体带负电。这时候，矛盾的统一体就失去了平衡。例如用丝绸摩擦玻璃棒，玻璃棒便失去电子而带正电，丝绸得到电子而带负电。总之电在一切物体内部都是普遍存在的，我们通常说的物体带电或不带电，实际上指的是物体的正负电荷是否分离，对外界显示电性或不显示电性。

手电筒各组成部分本身都具有两种电荷。灯泡、导线和开关，通常都不显示电性，但电池是显示电性的，例如用舌头同时去舔它的碳棒和锌皮，就会觉得又酸又麻，这就是电池的两极带电的缘故。

二、库仑定律

物体带电除了有正负之分，还有多少之分。物体带电的数量叫做电量。用 q 或 Q 表示。把 6.25×10^{18} 个电子所带的电量的总和，规定作电量的单位，叫做 1 库仑。

我们知道，物体之间是存在万有引力的。带电体之间也有相互作用，这与万有引力很相似，但万有引力总是互相吸引的，而电荷之间的作用却有吸引和排斥之分。那么，电荷之间的相互作用，遵从什么规律呢？通过实验总结出电荷之间的相互作用的规律是：两个电荷间的相互作用力的大小，跟两个电荷的电量乘积成正比，跟它们之间的距离平方成反比；作用力的方向是在两个电荷的连线上。这个规律叫做库仑定律。

如果用 q_1 和 q_2 表示这两个电荷的电量， r 表示它们之间的距离， F 表示它们之间的作用力，在真空中的库仑定律就可以用下面的公式表示：

$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (8-1)$$

式中 K 是一个比例常数，它的数值决定于公式中 F 、 r 、 q_1 和 q_2 的单位。

如果两个电荷都是同种的，那么 q_1 和 q_2 的符号相同，公式中 F 是正的，这表示两个电荷互相排斥；如果两个电荷是异种的， q_1 和 q_2 的符号相反， F 就是负的，这表示两个电荷互相吸引。

第二节 电荷与电场

一、电场

库仑定律表明了两个电荷间相互作用力的数量关系。但没有说明这种相互作用是怎样进行的。为了说明这个问题，

历史上曾经出现过两种不同的观点。一种看法认为，一个电荷所受到的作用力是另一个电荷直接给的，不需要通过中间物质传递；认为这是“超距作用”。而且，也不需要经过一段时间就能发生作用。它可以用下面的形式表示：

电荷 $\longleftrightarrow$ 电荷。

第二种看法认为，电荷之间的相互作用，是通过某种物质来传递的。没有物质，电荷之间的相互作用就不可能发生。从而肯定电荷周围存在着一种特殊物质，这种物质，叫做电场，一个电荷对另一个电荷的作用力，正是由电场给予的。这种观点可以表示如下：

电荷 $\longleftrightarrow$ 电场 $\longleftrightarrow$ 电荷。

辩证唯物主义观点认为：“世界上除了运动着的物质，什么也没有，而运动着的物质只有在空间和时间之内才能运动。”认为作用力的传递可以不依赖任何物质的“超距作用”、认为运动和物质可以分离的第一种看法，显然是唯心主义观点。而且大量的实验事实证明了电场是一种物质，它具有能量、动量、质量。这就是说，只要有电荷存在，电荷的周围就有电场，电场是一种物质，而不能单纯看作“场所”。

两个电荷间的相互作用力，实际上是一个电荷产生的电场，对另一个电荷的作用，这个作用，叫做电场力。总之，电场是由电荷产生的，而电场又对电荷有作用力。电场与电荷是互相联系的统一体，电荷与电场有着因果关系。

二、电场强度

为了研究电场的性质，我们在一个电荷 Q 所产生的电场

里(图 8-3)，放置另一个体积和电量都很小的正电荷 q (称为试验电荷)。根据库仑定律，电荷 q 要受到电场力的作用，并且距离电荷 Q 越近(如 A 点)，所受的电场力 (F_A) 越大；距离电荷越远(如 D 点)，所受电场力 (F_D) 越小。由此可见，在电场中远近不同的位置上，对同一电荷的作用力不同。这反映了不同位置上电场本身强弱的不同。

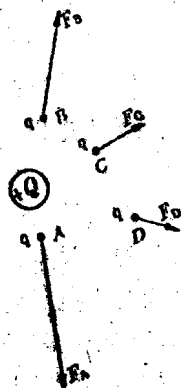


图 8-3

我们用“电场强度”这样一个物理量来描述这种作用的强弱。那么，电场强度的大小是如何量度的呢？

在电场中，电荷所受的电场力除了和位置有关，还和试验电荷本身的电量有关。例如在电场中(图 8-3)的 A 点，当电荷的电量为 q 时所受电场力为 F_A ，当电量为 $2q$ 时，所受电场力也大到两倍，成为 $2F_A$ 。当电量为 $3q$ 时，所受电场力就是 $3F_A$ 。从而不难看出，在电场中的某点 A ，电场力跟电荷的电量的比值，是个不变的量(恒量)，即

$$\frac{F_A}{q} = \frac{2F_A}{2q} = \frac{3F_A}{3q} = \dots\dots$$

同样，在电场中 B 、 C 、 D 各点，电场力跟电荷电量的比值，也分别为不同的恒量。

在电场中的某点，比值 $\frac{F}{q}$ 是个确定的量，它只和电场本身的性质(产生电场的带电体的电量、电场中的位置)有

关，而与试验电荷 q 的电量无关。这说明，比值 $\frac{F}{q}$ 是可以描述电场的固有特性的，我们把它称做电场强度。电场强度用符号 E 表示。

电场中某点的电场强度，在数值上等于放在那点的单位正电荷所受的电场力。用公式表示，则为

$$E = \frac{F}{q} \quad (8-2)$$

电场强度是有方向的。我们规定：电场中某点电场强度的方向，就是正电荷在那点所受的电场力的方向(如图 8-3 所示)。

三、电力线

为了形象地描述电场，我们引入电力线的概念。在电场中画出一系列曲线，使曲线上任何一点的切线方向都跟这点的电场强度方向相同，那么这些曲线就叫电力线。

图 8-4(a)、(b)分别是一个正电荷和一个负电荷的

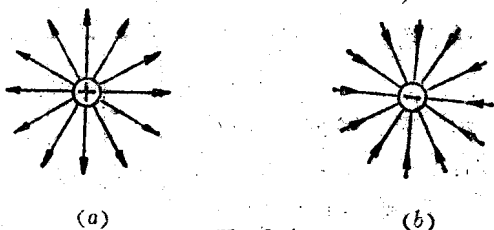
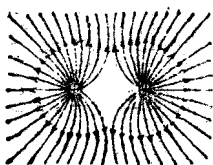
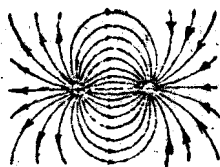


图 8-4

电力线的形状：图 8-5(a)、(b)分别是两个电量相等的



(a)



(b)

图 8-5

同种电荷和异种电荷的电力线的形状。从图中可以看出，在离电荷越近的地方，电力线越密。我们知道在离电荷越近的地方，电场强度越大，这样，电力线越密，就表示电场强度越大。

我们规定电力线的方向是从正电荷出发而终止于负电荷的。这样在电力线的任何一点 P 的切线上，顺着电力线的方向画一个箭头，如图 8-6 所示，箭头方向就表示这一点的电场强度的方向。

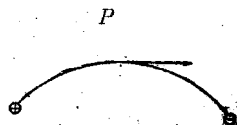


图 8-6

电力线不是电场固有的，而是人为地画出来的，但它能把电场强度的大小和方向清楚地表示出来，所以它的作用还是不容忽视的。

四、匀强电场

图 8-7 是两块平行的金属板，分别带有等量的正电荷和负电荷，除了边缘区域外，它们的电力线是疏密均匀、方向相同的平行直线。这表明，带有等量异号电荷的两块平行金属板之间的

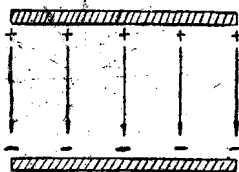


图 8-7

电场强度，大小和方向是处处相同的，这样的电场叫做匀强电场。既然如此，那么电荷在匀强电场中各点所受的电场力，大小和方向也都是相同的。这种电场在生产和科学实验中有广泛的应用，例如纺织工业上采用的“静电植绒”，就是一个例子。

静电植绒的装置如图 8-8 所示。在金属网与金属板间

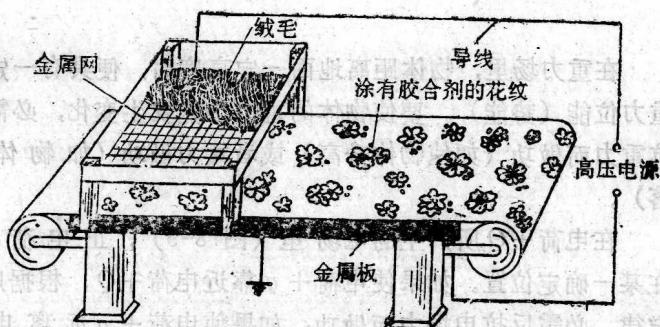


图 8-8

形成一个很强的均匀电场，并且使电场的方向垂直向上，即金属网上带有许多负电荷（接电源负极），金属板上带有等量的正电荷（接电源的正极）。在金属网上的绒毛由于同金属网接触而带负电，于是在电场作用下加速下落，落在金属板上的纺织品上。需要植绒的地方预先涂好胶合剂，绒毛一落上就被粘住；没有涂胶合剂的地方，绒毛落到纺织物上，本身又带上了正电，在电场的作用下，又飞回金属网，重新带上负电而落下。这样，只要几分钟，就可以植好花纹。

到此为止，我们叙述了电荷处在“静止”状态表现出来的一些特性，称作静电现象，如带电体间的相互作用、电荷

的周围有电场存在等等。这里所说的“静止”当然是相对的，因为电荷本身是运动着的微粒。

第三节 电 压

一、 电位能

在重力场里，物体距离地面一定高度时，便具有一定的重力位能（势能）。要使物体的重力位能发生变化，必需反抗重力而做功（如使物体升高）或者重力做功（如物体下落）。

在电荷 $+Q$ 所产生的电场里（图 8-9），正电荷 q 处在某一确定位置。如果使电荷 $+q$ 靠近电荷 $+Q$ ，根据库仑定律，必需反抗电场力而做功；如果使电荷 $+q$ 远离电荷 $+Q$ ，则需电场力做功。这说明电荷 $+q$ 在电场中的某一确定位置时，也具有一定的位能，我们称它为电位能。例如在图 8-8 中的绒毛，除了具有一定的重力位能外，都具有一定电位能。

在图 8-9 中还可以看出： $+q$ 的位置距 $+Q$ 越近，电位能越大；距 $+Q$ 越远，电位能越小。即电荷在电场中的不同位置上具有不同的电位能。

如果试验电荷 q 在某一匀强电场的 A 处（图 8-10），具有电位能 W ，当电量增加到 $2q$ 时，就相当于两个电荷 q 放在一起，每个

图 8-9

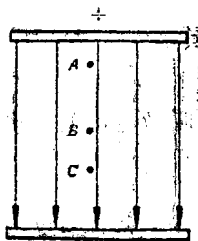


图 8-10

电荷所具有的电位能都是 W ，电荷 $2q$ 所具有的电位能就是 $2W$ 。当电量是 $3q$ 时，则它在 A 处的电位能就是 $3W$ 。可见，在 A 处，电荷的电位能跟它的电量之比是一个恒量。即：

$$\frac{W}{q} = \frac{2W}{2q} = \frac{3W}{3q} = \dots\dots$$

同样，在电场中的其它一些点如 B 、 C 等，电荷的电位能跟它的电量之比，也分别是一些不同的恒量。可见这个比值只与电场在该点的本身性质有关，而与放置在该点的电荷的大小无关，因此这一比值反映了该点电场本身的性质，我们把它称为电场中该点的电位。如果用 U 表示电位，那么，

$$U = \frac{W}{q} \quad (8-3)$$

这个公式说明：电场中某点的电位，等于单位电量的正电荷在该点所具有的电位能。

电位是有高低之分的，例如在图8-10中正电荷 q 逆着电场方向由 B 点移到 A 点，外力要克服电场力而做功，使正电荷 q 的电位能增加。这样， A 点的电位也就高于 B 点的电位。通常把大地的电位规定为“零电位”用来作比较电位高低的标准。

在电场力的作用下，电荷 $+q$ 要从 A 逐渐移到 B ，即从电位高的地方移向电位低的地方；负电荷在电场力的作用下要从电位低的地方移向电位高的地方。但它们都是从本身电位能大的地方移向本身电位能小的地方。

二、电位差

在电场中，两点间电位之差，就叫做电位差，也叫电势差，通常称作电压。

如果电场中 A 点的电位 $U_A = \frac{W_A}{q}$ ， B 点的电位 $U_B = \frac{W_B}{q}$ ，用 U_{AB} 来表示 A 、 B 两点间的电位差，则得：

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_A - U_B \\ &= \frac{W_A - W_B}{q} \end{aligned} \quad (8-4)$$

其中 $W_A - W_B$ 是电荷在电场中 A 、 B 两点电位能的差，就等于把电荷 q 从 A 点移到 B 点时，电场力所做的功。

从上式可以看出， AB 两点间的电位差 $U_A - U_B$ 在数值上就等于单位电量的正电荷从 A 点移到 B 点时，电场力所做的功。

根据上式，可规定出电位差的单位：

如果把 1 库仑电量的电荷，从一点移到另一点，电场力做的功是 1 焦耳，那么这两点间的电位差就规定为 1 伏特。伏特简称作伏，用 V 表示。

此外，我们还规定：

$$1 \text{ 千伏 (KV)} = 1000 \text{ 伏特 (V)},$$

$$1 \text{ 伏特 (V)} = 1000 \text{ 毫伏 (mV)},$$

$$1 \text{ 毫伏 (mV)} = 1000 \text{ 微伏 (}\mu\text{V)}.$$

普通照明灯泡用的电压是 220 伏特，就是电场力把 1 库仑的电量从一条电线经过灯泡移到另一条电线时，做功 220 焦耳。电车用的电压是 6 千伏特，收音机用的电压是 6 伏特

等等，都是这类意思。

电压的大小，可以用伏特表(也叫电压表)来测量。测量时把伏特表跨接在待测部分的两端，如图8-11所示。图中符号⑦即表示伏特表。按下开关，表上的读数就是A、B两点间的电压。测量前要注意仪表的量程(即测量范围)，不能使用量程小于被测部分电压的仪表进行测量；同时还要注意仪表的极性，即伏特表的正极接线柱要接电位高的点，负极接线柱要接电位低的点。不注意上述两点，均会烧毁表头。此外还可以用万用表(图8-12)来测量电压。测量时，把选择开关转到标有“V”

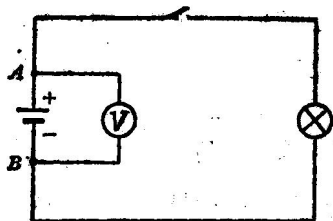


图 8-11

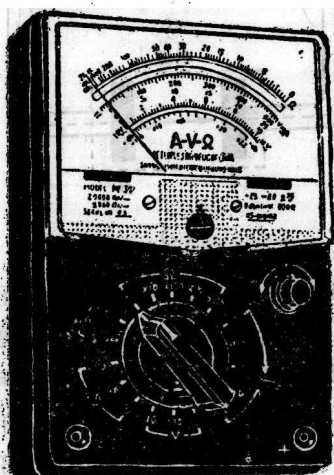


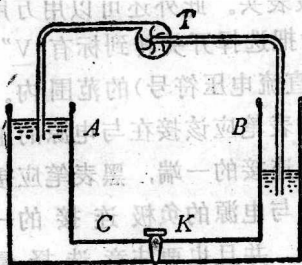
图 8-12

(直流电压符号)的范围内。红表笔应该接在与电源的正极连接的一端，黑表笔应接在与电源的负极连接的一端，并且也要注意选择量程。

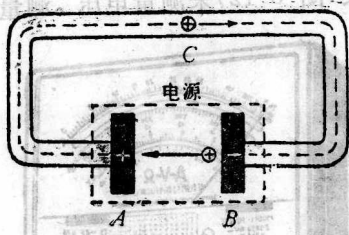
三、电源电动势

通过上面的介绍，我们知道电压并不是压力。诚然，在电场中两点间必须有电压，才能把电荷从一点移动

到另一点。电荷流动就形成了电流。电荷的流动是不能靠压力，而是靠电场力的。电和水本质是不同的，但这并不妨碍我们作个比喻，以便于理解。在图8-13(a)中 A、B 两个水池由 C 管连通。T 是水泵。先不让水泵工作，打开阀 K，因为 A 池的水位高于 B 池水位(即有水位差)，所以水能从 A 池经管 C 流到 B 池。由此可见，水位差(水压)是形成水流的原因。水流动的结果，使 A 池水位降低，B 池水位升高，即两池的水位差降低。与此同时，水流也变得越来越弱。当两池水位相同时，水就不能继续流动。要使水能继续维持恒定的流动，必须用水泵把水从 B 池抽回 A 池，来保持一定的水位差。



(a)



(b)

图 8-13

在图 8-1 的电路中，电池的正极电位高于负极电位，正负两极间存在着电位差(电压)。按下开关接通电路，电荷就能流动，形成电流。当电池能保持一定的电位差时，就有电流通过；当电池两极间没有电位差时，也就没有可以移动电荷的电场力存在，电路就不再有电流通过了。这表明电压是形成电流的原因。

水泵可以维持一定的水位差，那么电源(干电池、蓄电

池、发电机等)两端的电位差是怎么产生和维持的呢?在图 8-1 中,正电荷从正极出发,沿着导线,经过小灯泡流回负极,电位能减少,变成了热和光。这部分电路叫做外电路。电荷在外电路移动的结果,是使电池正极上的正电荷不断减少,正极的电位也随之不断地降低;相应地负极上的负电荷也不断减少,因而负极的电位不断提高。在这个过程中两极的电位差(电压)不断降低,电流也随之变得越来越弱。当电位差降到零时,电荷的流动也就完全停止了。

电池两端的电位差并不是很快就变到零的,例如按下按钮,小灯泡不会立即变暗乃至不发光。这就是说电池能使两极间维持一定的电位差。为了说明这个过程,我们把手电筒电路简化为图 8-13(b),图中 A 、 B 表示电池的正负两极。正象要维持恒定的水位差,必须不断地把水从 B 池送回 A 池一样,要使电池两极维持恒定的电位差,也必须将正电荷不断地从 B 极移到 A 极。这部分电路在电源内部,叫做内电路。正电荷从电位低的负极移向电位高的正极,显然要靠非静电力。在电池中靠的是化学力,即电池内部发生化学变化,正电荷在化学力的作用下从负极移向正极,正极的电位又恢复到原来的数值,负极也是如此,于是两极间便保持了恒定的电位差。这种非静电力反抗电场力做功的结果,把其它种形式的能转变成电能。在电池里是把化学能转变成电能;在发电机里是把机械能转变成电能。

不同的电源把其它形式的能转化成电能的能力是不同的。为了表明电源的这种能力,我们用单位正电荷在闭合电路(内、外电路)移动一周的过程中,电源中的非静电力所做的功来量度,并把它称为电源的电动势。

如果某一电源内把电量为 q （库仑）的正电荷，在闭合电路内移动一周，非静电力所做的功是 A （焦耳），那么电源的电动势 E 就是

$$E = \frac{A}{q}.$$

把上式与计算电压的公式比较，可以看出，电动势 E 的单位也是伏特。

在闭合电路里，把电量为5库仑的电荷移一周，蓄电池中化学力需做功10焦耳，它的电动势就是 $\frac{10\text{焦耳}}{5\text{库仑}} = 2$ 伏特；在一台发电机里机械力需做功2000焦耳，那么这台发电机的电动势就是 $\frac{2000\text{焦耳}}{5\text{库仑}} = 400$ 伏特。一个电源的电动势越大，表示它把其它形式的能转变成电能的本领越大。

测量电源的电动势，也可用电压表，仍如图8-11所示。不过此时需要打开开关，切断外电路，因为只有在外电路断开后，电池两极间的电位差才等于电动势（证明从略）。

第四节 电流和电阻

一、电流

电压是形成电流的条件，但如果把电池和灯泡用皮绳联接起来，尽管电路的两端是有电压的，可是灯泡并不发光。这是为什么呢？毛主席教导我们：“唯物辩证法认为外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因通过内因而起作

用。”因此我们必须分析形成电流的内因。原来，金属如铜、铝、银、铁等，在它们的原子中，最外层的电子和原子结合得比较弱，很容易摆脱原子核的吸引而脱离这个原子，在这种金属的其它原子中间自由运动。这种电子叫做自由电子。这些自由电子在一般情况下，运动是没有规则的，平均看来显不出电流的效果，如图8-14(a)所示。只有在两端接上电源（有了一定的电压），自由电子受到了具有一定方向的电场力的作用，才能做定向运动，形成电流（图8-14b）。金属正因为内部有自由电子，才容易传导电流。通常把金属（包括水银）及合金叫做导体；此外非金属如大地、人体、石墨、酸、碱、盐的溶液等，也都是导体。

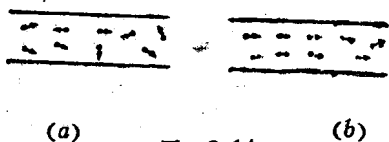


图 8-14

有些物质内部，原子中的电子受原子核的束缚作用比较强，电子不容易脱离出来形成自由电子，因而导电性能很差。这样的物质叫做绝缘体，如橡胶、石蜡、陶瓷等。导电性能介于这两者之间的物质，叫做半导体，如锗、硅等。

从上面的分析可以看出，物体内部有可以移动的电荷（如自由电子）存在，才是形成电流的内部根据。

导体内，电流的方向实际上是电子移动的方向，但是按照习惯，规定正电荷移动的方向为电流方向。所以，电子移动的方向与电流方向相反。

电流的大小，用每秒钟通过导体某一截面的电量来量

度，叫做电流强度，电流强度用符号 I 表示。

若时间用 t (秒) 表示，电量用 q (库仑) 表示，则电流强度

$$I = \frac{q}{t} \quad (8-5)$$

电流强度的单位叫做安培 (用 A 表示)。

$$1 \text{ 安培} = \frac{1 \text{ 库仑}}{\text{秒}}$$

很小的电流，用毫安、微安来计量。

$$1 \text{ 安培} = 1000 \text{ 毫安 (mA)},$$

$$1 \text{ 毫安} = 1000 \text{ 微安 (}\mu\text{A)}.$$

一安培电流究竟有多大呢？如果每秒钟有 6,250,000,000,000,000,000 个电子流过，这样的电流强度就是 1 安培。

测量电路的电流强度，需要使用直流电流表 (安培表)。测量时，先打开开关，切断电源，把安培表④串接在电路里，如图 8-15 所示，然后再合上开关，从安培表的读数来观察电流的大小。测量时，要注意仪表的极性，必须使电流从仪表的正接线柱流入；还必须注意电流表的量程，如果用量程小的电流表去测大电流，就要烧毁仪表。万用表也可以测量小电流。测量时，将选择开关转到标有直流电流符号的范围内，选好

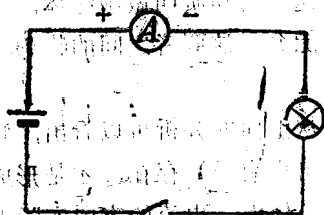


图 8-15

量程，并把它串联在被测电路里，使电流从红笔流入、黑笔流出。倘若误将电表并联在被测电路两端，将会烧毁电表。

二、电阻

1、什么是电阻？

如果认为在一个房间多接一盏灯总比原来亮，于是切断电线，又串入另一盏电灯，如图8-16中所示，结果反而比原来暗。这说明灯丝这个导体对电流是有阻碍作用的；多串一只灯泡，阻碍作用就大一些。我们把导体对电流的阻碍作用叫做电阻。

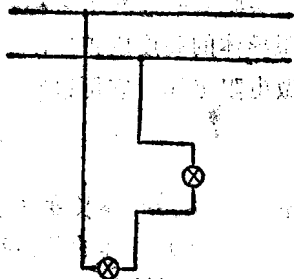


图 8-16

导体里一方面有自由电子，可以形成电流；另一方面这些自由电子在运动过程中，不断地和金属原子发生碰撞。这样对自由电子的运动就起了一定的阻碍作用，形成了导体的电阻。

电阻用符号 R 表示，单位是欧姆(Ω)。还有较大的单位如千欧、兆欧。

1 千欧($K\Omega$) = 1,000 欧姆，

1 兆欧($M\Omega$) = 1,000,000 欧姆。

2、电阻定律

水从管子里流过时，管子对水有阻力，阻力的大小跟水管的长短、粗细、管子内壁的粗糙程度等都有关系。那么，电流通过导体时，电阻的大小都跟哪些因素有关呢？实践证明：

(1) 导体越长电阻越大，导体越短电阻越小。这好象水过长管的阻力大而流过短管的阻力小一样。(2) 导体的截面积越小(越细)电阻越大，而截面积越大(越粗)电阻越小，这好象水流过细管的阻力大，而流过粗管的阻力小一样。

(3) 在长度和截面都相同的条件下，不同材料的导体，电阻的大小也不相同。有的金属（如铜）电阻小，电流容易流过；有的电阻较大（如铁），电流比较地不容易通过。这种情形好象有的水管内壁光滑，水容易流过，有的水管内壁粗糙，水不容易流过一样。

实验表明，对于某种材料，在一定的温度下，导体的电阻跟导体的长度成正比，跟导体的截面积成反比。这个结果叫做电阻定律，它可以写成下面的形式：

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (8-6)$$

式中 l 是导体长度（米），

S 是导体的截面积（毫米²），

ρ 叫做电阻率，单位是欧姆·毫米²/米，实际上就是长 1 米，截面积是 1 毫米² 的某种材料的电阻。

表 8-1 是当温度为 20℃ 时，几种常见材料的电阻率。

表 8-1

材料名称	电阻率（欧姆·毫米 ² /米）
银（Ag）	0.0165
铜（Cu）	0.0175
铝（Al）	0.0262
钨（W）	0.055
镍（Ni）	0.073
铁（Fe）	0.098
镍铬合金	1.1
碳（C）	35

从表中可以看出：银、铜、铝的电阻率比较小，所以常用铜、铝等做为导电材料，如电线、电机和变压器中的线圈等等。虽然铝的导电能力不如铜，可是它比铜轻，价格便宜，来源丰富，所以近年来在电力工业中逐步以铝代铜。

前面曾经提到，大地是导体，所以它既能使电流通过（例如在输送电流时可以用它来代替一根电线），又对电流有阻碍作用。地下土层（又称作岩层）由沙、粘土等颗粒物质组成，这些物质电阻率都很高，不容易导电。但颗粒的孔隙中有盐类的水溶液，地下土层就靠它来导电。因此，土层的电阻率便与湿润度有关，湿润度越大、盐分越多，电阻率越小。例如粘土层，孔隙中的水不易流动，溶解的盐分较多，导电性能好，则电阻率小；砂层孔隙大，水容易流动，溶解的盐分少，电阻率就大。这样的砂层正是含水层，打井时就是要设法找到它。

用仪器测出地下土层电阻率的变化情况，加以分析，就可以知道地下水大致藏在什么地方了。

〔例〕某生产队打谷场需要临时照明线，若采用4〔毫米〕²的铝芯线，打谷场至电源的距离为200米，问两条电线的电阻共是多少？

解 从表 8-1中可以看出铝的电阻率 ρ 是0.0262，所用导线总长度 $l = 2 \times 200 \text{米} = 400 \text{米}$ 。由式(8-6)计算出总电阻

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0.0262 \times \frac{400}{4} = 2.62 (\text{欧姆}).$$

3、常用电阻器

在实际应用中，常常需要具有一定阻值的元件，这些元件由导电材料制成，叫做电阻器，通常简称作电阻。

电阻器的种类很多，按结构来分，有碳质电阻、碳膜电阻、线绕电阻等；按形式来分，有固定电阻、可变电阻及电位器等。

电阻器除了具有一定的阻值外，还有一定的耐热功率。如果实际消耗的功率超过了这个限度，电阻器就会被烧坏。电阻器的阻值，一般是用数字直接标出的（碳质电阻除外），如图 8-17 所示。



图 8-17

电阻器的耐热功率，也多数直接标在电阻器上。在电路图中耐热功率的大小，常用如图 8-18 所示的符号来表示。

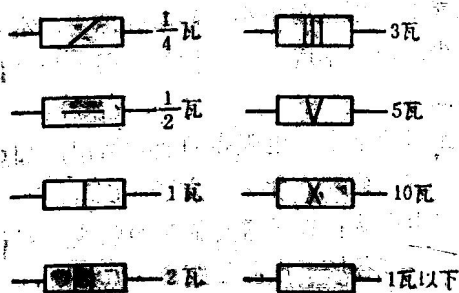


图 8-18

几种常用的电阻器，如图 8-19 所示。



图 8-19

4、电阻的测定

测量电阻时，可以用欧姆表。欧姆表用符号 Ω 表示。在万用表上就有欧姆表。测量前，先把万用表的选择开关转到电阻档的适当量程，如果被测电阻是几百欧时，可以把电表旋钮放在“ $\times 10$ ”处的刻线上，并且先把两根测笔碰在一起，这时看指针是不是指在“0”欧姆处。如果不指“0”欧姆时，可旋动表上的调零旋钮，使指针指“0”。然后再把两笔与被测电阻两端接触，如图8-20所示。从指针的读数($\times 10$)就可以看出电阻数值。如果量程改变，还得重新调零。

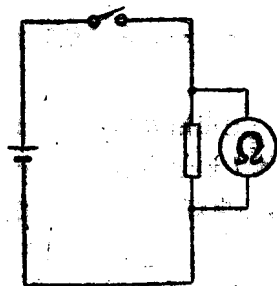


图 8-20

收音机、扩音机里使用许多不同规格的电阻器，这些电阻在使用过程常常发生阻值改变或被烧毁等情况，从而导致收、扩音机工作失常。测量电阻是检修中随时要作的一项工作。如果不切断电源就测量电阻，往往烧坏电表。即使切断电源进行测量，倘若被测电阻两端跟一个大电容器（见第十章）并联，电容器里贮存的电荷也会流经电表，同时测量的数值多半不准确。在测量电阻之前，先把电源切断，最好把电阻焊掉一个接头再测量，这样既能保证电表的安全，又不受并联在电阻两端的其它零件的影响。

第五节 欧姆定律

要使电流通过导体，导体两端必须有电压；当电流通

过导体时，又受到导体本身的电阻的作用。所以，电流、电压和电阻之间，存在着不可分离的关系。找出这三者间有什么内在联系，总结出电流所遵循的客观规律，就可以应用它来解决许多实际问题。

一、一段电路的欧姆定律

把电阻 R 用导线接到电源上，在电压 U 的作用下，就有电流 I 通过电阻（这个电阻代表用电器，如电灯、电炉、电烙铁等），如图8-21所示。

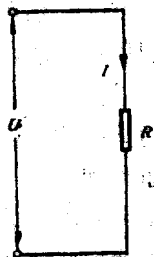


图 8-21

在这个电路里，如果电压 U 增大，电流就增大；如果电阻增大，电流就减小。这是我们已经知道的。通过实验发现，电流强度 I 和这段电路两端的电压 U 成正比，跟这段电路中的电阻 R 成反比。这个规律，叫做欧姆定律。可以用公式

$$I = \frac{U}{R}. \quad (8-7)$$

表示。式中 I 的单位是安培， U 的单位是伏特， R 的单位是欧姆。

〔例1〕一只电炉接到220伏的电源上，电流为4.54安培，求电炉的电阻值。

解 欧姆定律公式的一般形式是 $I = \frac{U}{R}$ ，即电流可以通过电压除以电阻来求得。本题中，电流是已知数，电压是已

知数，电阻才是要求的未知数。这必须先对上式进行数学变换，写成 $R = \frac{U}{I}$ 的形式。这样变换既没有改变了三者的关系，又能明显地表示出如何计算电阻。于是：

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{4.54} \approx 48 (\text{欧姆}).$$

〔例2〕 一条电线，电阻为0.3欧姆，流过20安培的电流，求电线两端的电压。

解 在这个问题里，电流和电阻都是已知的，电压是未知数，我们还得把式(8-7)写成另外一种形式，即用电流和电阻来表示电压：

$$U = IR = 20 \times 0.3 = 6 (\text{伏特}).$$

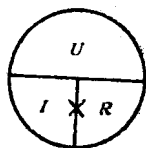


图 8-22

这样，欧姆定律公式，总共可以写成三种形式。 U 、 I 、 R 三个量之间的关系，可以用图8-22来表示。使用这个图时，只要把待求的量遮住，就可以看出另外的两个已知量的关系。例如要求电流 I ，遮住 I 后，剩下的便是 $\frac{U}{R}$ ，这就表示出

$$I = \frac{U}{R}.$$

二、串联电路和并联电路

在实际电路中，往往有很多的用电器接在同一电源上，连接的方法，基本上有两种，即串联和并联。至于一些复杂的电路，也都是串联和并联的组合。

下面分别研究串联、并联电路的特点。

1、串联电路

把两个电阻器 R_1 和 R_2 （它们代表用电器），一个接一个地串接在电路里，就构成了串联电路，如图 8-23所示。

实验表明，在串联电路里，流过 R_1 和 R_2 的电流 I 是相同的，此外，实验还表明电源的电压 U 等于 R_1 两端的电压 U_1 与 R_2 两端的电压 U_2 之和，即：

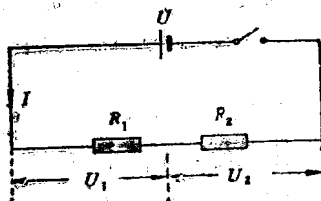


图 8-23

$$U = U_1 + U_2.$$

设 R_1 和 R_2 串联以后的总电阻为 R ，根据一段电路的欧姆定律，读者很快可以推出：

$$R = R_1 + R_2.$$

如果有 n 个电阻串联起来，则有

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n. \quad (8-8)$$

即串联电路的总电阻等于各电阻的阻值之和。并且，电源的电压也就会等于各串联电阻两端电压的和，即：

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \cdots + U_n. \quad (8-9)$$

串联电路的应用是很广的，例如测量电流的电表就是串联在被测电路里的。还有节日用的小彩灯，也是串联的。我们可以用手电筒上使用的小电珠（2.5V的）80-100个串联起来，接在220V的照明线路上，它们就可以正常发光。这些小电珠可以染色并可排成一定的图案或字样，为了能够使它们闪烁，还可以再串联一只日光灯用的继电器，这就做成了一套“闪烁灯”，以增加节日气氛。

〔例3〕如图8-24所示，把一电阻为24欧姆的电炉，用两根各为0.5欧姆的导线接到220伏特的电源上。求：（1）整个电路的总电阻是多少？（2）通过电炉的电流是多少？（3）电炉电阻丝两端的电压是多少？

解 本题要求考虑导线本身的电阻 $R_1 = R_2 = 0.5$ 欧姆，而它们和电炉电阻丝 R_3 是串联的，所以：

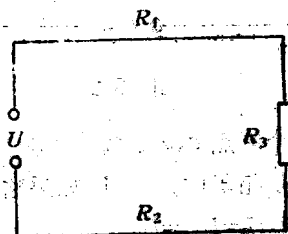


图 8-24

（1）总电阻

$$\begin{aligned} R &= R_1 + R_2 + R_3 \\ &= 0.5 + 0.5 + 24 \\ &= 25 \text{ (欧姆)}. \end{aligned}$$

（2）流过电阻丝的电流

$$I = \frac{U}{R}$$

$$= \frac{220}{25}$$

$$= 8.8 \text{ (安培)}.$$

（3）电阻丝两端的电压

$$U_3 = IR_3$$

$$= 8.8 \times 24$$

$$= 211.2 \text{ (伏特)}.$$

电源电压是220伏特，而电阻丝两端的电压只有211.2伏特，另外的220伏特—211.2伏特=8.8伏特的电压加到哪里了呢？无疑是加在两条导线上了。

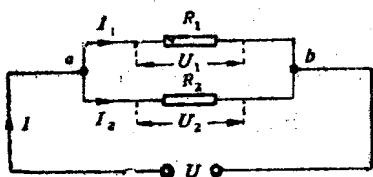


图 8-25

2、并联电路

象图8-25那样，把电阻两端分别连接起来，再接到电源上，就构成了并联电路。并联电路有以下几个特点：

(1) 由于 R_1 和 R_2 的两个端点 a, b 是两个电阻的共同端点，所以它们两端的电压都是相等的。并且，如果略去导线的电阻，就等于电源的电压。即 $U = U_1 = U_2$ 。

(2) 因为电流是连续的，在任何一点（如 a 点），流入的电流必等于流出的电流。这样，并联电路的总电流 I 就等于各分路电流之和，即 $I = I_1 + I_2$ 。

(3) 如设 R_1 和 R_2 并联后的总电阻为 R ，根据一段电路的欧姆定律，立刻可推出：

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

如果有 n 个电阻并联，则总电阻 R 和各并联电阻的关系为：

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n} \quad (8-10)$$

即并联电路中，总电阻的倒数等于各电阻的倒数之和。此时，电路总电流 I 和各分路电流的关系为：

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_n \quad (8-11)$$

在电路里，并联的电阻越多，总电阻越小，电源提供的电流（即总电流）越大，或者说负载越重。因此，并联的电

阻的多少是有限度的，否则就会损坏电源。

我们使用的用电器，多数是并联在电路里的，如电灯、电动机、吹风机、电炉等等。它们彼此独立，停用其中任何一个用电器时，别的用电器还可以照常工作，这是并联电路的一个优点。

〔例4〕为了修复万用表，要一个9.7欧的电阻，现在只有10欧的电阻，应该并联一个多大的电阻才行？

解 设并联电阻为 $R_{并}$ 。根据并联电路的总电阻的倒数等于各电阻倒数之和，即

$$\frac{1}{9.7} = \frac{1}{10} + \frac{1}{R_{并}},$$

得出

$$\frac{1}{R_{并}} = \frac{1}{9.7} - \frac{1}{10}$$

故

$$R_{并} = \frac{1}{\frac{1}{9.7} - \frac{1}{10}} = \frac{97}{0.3} \approx 323 \text{ (欧姆)}。$$

有串联又有并联的电路，叫混联电路，只要按照串联电路和并联电路的计算方法一步一步把电路简化，就可以处理混联电路。

第六节 电功和电功率

电流通过电动机会带动机器转动，通过电灯能使电灯发光，通过电炉能使电炉发热。这些都说明电流做了功，并把

电能转变为其它形式的能。下面我们来分析电流做功的规律。

一、电功

在讲电流做功之前，我们先看一看水流做功的情形。比如在一个水力发电站里，水从高处落下，冲击水轮机，使它转动做功。做功的多少和水位差（水压）的大小有关。如果水位差越大，对水轮机做功也越多。如果水的流量太小，即使水位差很大，做功也不会太多，所以还和水的流量有关。水的流量越大，做功也越多。此外，时间越长，做功越多。这就是说，水流做功和水位差、流量、时间等因素有关。电流做功和这个情形相似。

在第三节里，已经讲到了电场力移动电荷做功的规律，即电场力把电荷从一点移到另一点时所做的功，也就是电流做的功 A ，等于电荷的电量和两点间的电压的乘积。即

$$A = qU. \quad (8-12)$$

其中

$$q = It,$$

所以

$$A = IUt. \quad (8-13)$$

这就是说，电流所做的功和电流强度、电压及通电时间成正比。

式中，如果 I 的单位用安培， U 的单位用伏特， t 的单位用秒，那么 A 的单位就是焦耳。故

$$1 \text{ 焦耳} = 1 \text{ 安培} \times 1 \text{ 伏特} \times 1 \text{ 秒}.$$

计算电功的公式，还可以写成

$$A = I^2 R t \quad (8-14)$$

和

$$A = \frac{U^2}{R} t \quad (8-15)$$

两种形式。

二、电功率

在同一时间内，不同的用电器，电流所做的功是不相同的。例如：电流通过吊风扇的电动机时，每秒钟所做的功只有一百焦耳左右；电流通过电车电动机时，每秒钟所做的功就有几万焦耳；电流通过大型轧钢机的电动机时，每秒所做的功就要高达几百万焦耳。可见，电流做功是有快慢之分的。

在单位时间里电流所做的功，叫做电功率，通常又叫做电力，用 P 表示。于是

$$P = \frac{A}{t} = \frac{IU t}{t} = IU \quad (8-16)$$

这表明电功率等于通过用电器的电流与加在该用电器两端的电压的乘积。事实上计算电功率时，总是用 $P=IU$ 这个公式，而不用 $P=\frac{A}{t}$ 这个公式。因为 I 、 U 都可以从仪表上直接读出，比在一段时间 t 里计量电功 A ，再求功率 P 来得方便。

电功率还可以用另外两种形式表示：

$$P = I^2 R \quad (8-17)$$

及

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (8-18)$$

如果 I 的单位用安培， U 的单位用伏特， P 的单位就是

焦耳/秒，即瓦特(用W表示。显然

$$1 \text{ 瓦特} = 1 \text{ 安培} \times 1 \text{ 伏特}。$$

此外还有

$$1 \text{ 千瓦(瓩, KW)} = 1000 \text{ 瓦特 (W)}$$

$$1 \text{ 瓦特 (W)} = 1000 \text{ 毫瓦 (mW)}。$$

电功率这个物理量，在工农业生产中用得很多，通常说的电气设备的容量，指的就是电功率。例如电动机是1.5瓩，电烙铁是45瓦，灯泡是60瓦等等，都直接标在用电器上，以表明它们在单位时间内消耗电能的多少。前面提到，电阻上除了标明阻值外，还标上瓦数，如 320Ω 1W，表示这个电阻承受的最大功率是1瓦特。在半导体收音机里，一般选用 $\frac{1}{8}$ — $\frac{1}{4}$ 瓦的电阻；而在电子管电路里，要选用功率大一点的电阻，如1瓦、2瓦、5瓦等。

在实际应用中，电功常用的单位是“度”。1度表示功率为1千瓦的用电器使用1小时所消耗的电能，即

$$1 \text{ 度} = 1 \text{ 千瓦} \times 1 \text{ 小时} = 1 \text{ 千瓦小时}。$$

这就可以看出“瓦”和“度”的区别，60W的灯泡，是不能说成60度的。

电度表(图8-26)是一种能自动记录用电器消耗电能的仪表。在图纸上用“KWH”几个字来代替“千瓦小时表”。电度表有1A、3A、5A、10A、50A等多种规格，此外还有单相三相之分(所谓“相”见第十章)。

使用电度表时，将其接线盒盖板打开，对照盖板背面上的线路图接线即可，如图8-26所示。

〔例1〕某生产队有7.5瓩电动机2台，平均每天工作10小时，求一个月内(按30天算)消耗电能多少度。

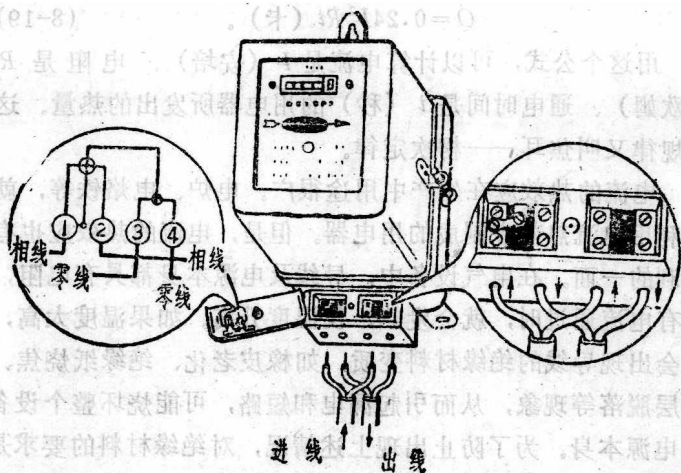


图 8-26

解 先算出 2 台电动机总功率

$$7.5 \times 2 = 15 \text{ (瓩)},$$

再计算一个月的用电时数:

$$10 \times 30 = 300 \text{ (小时)},$$

最后计算消耗的电能:

$$15 \text{ 瓩} \times 300 \text{ 小时} = 4500 \text{ 瓩小时 (度)}.$$

三、电流的热效应

电流流过导体(电炉、电灯等)时要发热,这种现象叫做电流的热效应。

实验证明:每 1 焦耳的电能,可以变成 0.24 卡的热能。如果 $I^2 R t$ 焦耳的电能(见式 8-14)完全转变成热能的话,热量便是

$$Q = 0.24 I^2 R t \text{ (卡)}。 \quad (8-19)$$

用这个公式，可以计算电流是 I （安培）、电阻是 R （欧姆）、通电时间是 t （秒）的用电器所发出的热量。这个规律又叫焦耳——楞次定律。

电流的热效应在生产中用途很广。电炉、电烙铁等，就是利用电流热效应制成的用电器。但是，电流的热效应也有不利的一面。在电气设备中，导线及电源本身都具有电阻，当有电流通过时，就会发热，使温度升高。如果温度太高，就会出现导线的绝缘材料变质，如橡皮老化、绝缘纸烧焦、漆层脱落等现象，从而引起漏电和短路，可能烧坏整个设备及电源本身。为了防止出现上述情况，对绝缘材料的要求是能耐高温，此外还采用对电气设备加强通风、增大散热面积等措施。

四、全电路欧姆定律

前面讲的欧姆定律，研究的是外电路。实际上，在一闭合电路里（如手电筒电路），电流既流过外电路，也流过内电路。我们知道，电源内部也有电阻（叫做内阻），对于电池，就是电池内电解液的电阻，对于发电机，就是它的电枢绕组的电阻。

当然，一段电路的欧姆定律，也适用内电路，即内电路的电压等于电流与内阻的乘积。

设手电筒电路中，外电路的电阻为 R ，电源内阻为 r 。同时，为了研究问题方便起见，把 r 画在电池的外面，如图8-27所示。

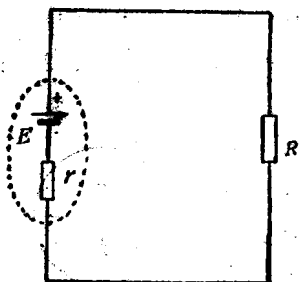


图 8-27

从图中明显地看出，内外电路的电阻 r 和 R 是串联的，因而闭合电路中的电流强度处处相同，都为 I （安培）。在时间 t （秒）内，消耗在外电阻 R 上的电能为

$$W_{\text{外}} = I^2 R t \text{ (焦耳)},$$

消耗在内电阻 r 上的电能为

$$W_{\text{内}} = I^2 r t \text{ (焦耳)},$$

消耗的总电能为

$$W = W_{\text{外}} + W_{\text{内}} = I^2 R t + I^2 r t \text{ (焦耳)}.$$

在时间 t （秒）内，电池中化学力也在做功，并且为

$$qE \text{ (焦耳)}. \quad (\text{参阅第三节})$$

其中 q 为 t 秒内移动的电量，并且

$$q = It,$$

于是，化学力所做的功又可以表示为

$$ItE \text{ (焦耳)}.$$

按照能的转化和能量守恒定律，闭合电路所消耗的电能量，是由电池的化学能转化而成的并且与之相等，即

$$ItE = I^2 R t + I^2 r t.$$

整理上式可得

$$I = \frac{E}{R + r}. \quad (8-20)$$

式中的 E 为电源的电动势， $R + r$ 为闭合电路的总电阻。把上式与一段电路的欧姆定律公式比较，可以看出，闭合电路的电流强度跟电源的电动势成正比，跟电路中的总电阻成反

比。这个结论叫做全电路的欧姆定律（又叫闭合电路的欧姆定律）。在这个规律中各物理量间的关系，可以用图8-28来表示。它的使用方法，与图8-22相同。

对于一个电源来说，电动势 E 和内电阻 r 一般是不变的，因此，影响整个电路的是外电路的电阻 R （负载）。当外电路的电阻增大时，电路中的电流就会减小。当外电路断开时（相当于 R 为无穷大），电流强度 I 等于零，这就是断路。

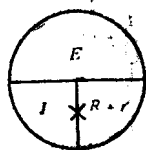


图 8-28

当外电路的电阻减小时，电流就增加。如果 R 等于或接近于零，例如用一根导线把电源两极直接连起来，那么 $I = \frac{E}{r}$ 。一般电源的内电阻都很小，例如蓄电池的内阻只有0.005欧姆，在 $R=0$ 时，电流就是

$$I = \frac{E}{r} = \frac{2}{0.005} = 400 \text{ (安培)}.$$

这种情形就是短路。如果不预防短路，强大的电流就会烧坏电源本身。

〔例2〕 一台发电机的内阻是0.2欧姆，要使农机站得到220伏特的电压和110安培的电流，若输电线路的电阻是0.21欧姆，那么发电机的电动势应该是多少？

解 设输电线路的电阻为 R_1 ，农机站用电器的电阻为 R_2 ，发电机内电阻为 r ，那么外电路的总电阻就是

$$R = R_1 + R_2.$$

其中

$$R_1 = 0.21 \text{ (欧姆)},$$

$$R_2 = \frac{U}{I} = \frac{220}{110} = 2 \text{ (欧姆)},$$

于是

$$R = 0.21 + 2 = 2.21 \text{ (欧姆)}.$$

把式(8-20)改写为

$$E = I(R + r), \quad (\text{参阅图8-27})$$

于是可算出电动势

$$E = 110(2.21 + 0.2) = 265.1 \text{ (伏特)}.$$

第七节 拖拉机电路

在汽车和拖拉机中,有许多用电器,如照明灯、信号灯、电喇叭、起动电机及仪表等等。这些用电设备所消耗的电能,是由直流发电机和蓄电池供给的,因此,汽车电路和拖拉机电路,都属于直流电路(使用交流发电机的为数很少)。

图8-29是铁牛45、55型拖拉机的电系线路。在拖拉机上,发电机的正极及蓄电池的正极,都直接接在发动机的金属外壳上(接地,通称搭铁),省去一条导线,所以图8-29画的也是单线图。

整个电路由电源、照明和信号装置、附属装置等几部分组成。

一、电源

直流发电机3通过三角皮带与风扇连接起来,当风扇随

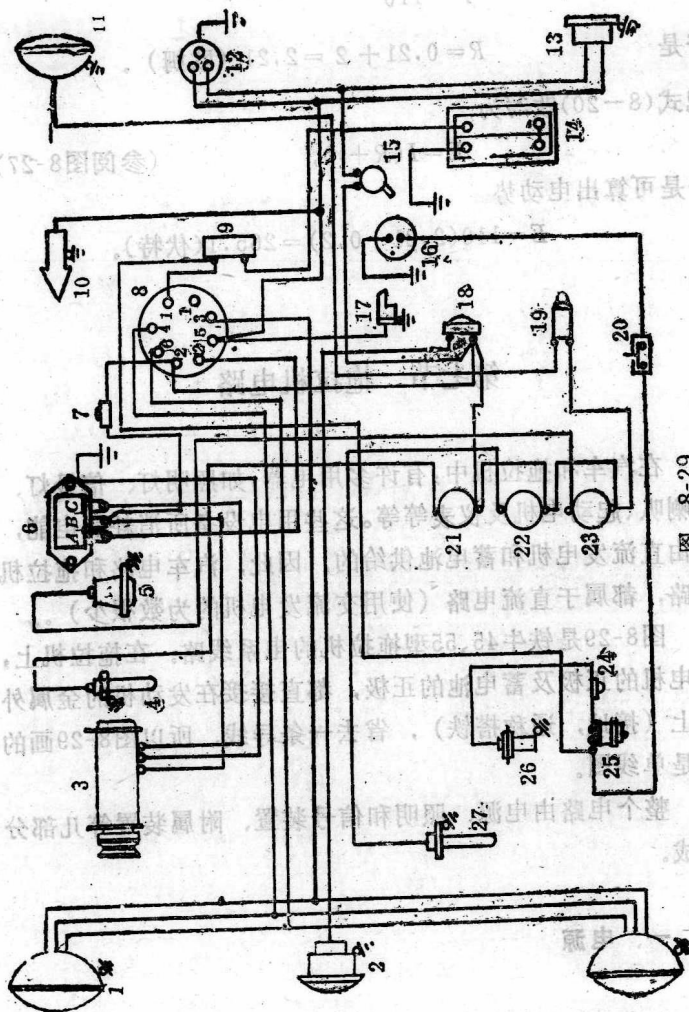


图 8-29

1、前大灯, 12伏35/35瓦, 小灯1.5瓦; 2、喇叭LB35-12/6B型;
 3、充电发电机F29B; 4、油温感应器; 5、油压感应器; 6、调
 节器FT81D-13/12ZN/1型; 7、充电指示灯, 12伏1.5瓦; 8、电
 源转换开关JK865; 9、双金属片保护器BX426; 10、转向指示灯,
 12伏3瓦两灯并联; 11、后大灯, 12伏35瓦; 12、拖车插座; 13、尾
 灯, 12伏21/6瓦; 14、蓄电池6-Q-56; 15、刹车灯开关JK514;
 后灯开关, 12伏3瓦; 17、仪表灯, 12伏1.5瓦; 18、喇叭按钮JK280;
 关JK106; 20、顶灯开关JK811; 21、水温表302型; 22、
 油温表302型; 23、油压表308型; 24、预热指示灯; 25、预热按钮
 JK206; 26、预热器YR-07型; 27、水温感应器。

注: 转换开关电路通断情况

当钥匙完全插入时

档 位 \ 接 线 柱	1	2	3	4	5	6
0						
1						
2						
3						

当钥匙插1/2时

档 位 \ 接 线 柱	1	2	3	4	5	6
0						
1						
2						
3						

发动机主轴转动时，便驱动发电机转动，发出电来。该发电机的功率为150瓦，输出电压为12伏，因此，所有用电设备都是在12伏电压下工作的。

当拖拉机正常行驶时，由发电机向用电设备供电，并给蓄电池14充电，以便把多余的电能贮存起来。当发电机工作或低速运转时，不能给电路供电或输出电压不足，由蓄电池来供电。蓄电池输出电压也是12伏。

调节器6是用来配合直流发电机共同工作的，它能自动控制发电机向蓄电池充电，稳定发电机的输出电压；又能对发电机起保护作用。A、B、C是三个接线柱。关于它的工作原理，将在第九章里予以介绍。

二、照明和信号装置

前灯和后灯 前灯1内装有两个插口灯泡：一个大灯泡和一个小灯泡。大灯泡中有两条灯丝，其中一条是远光灯丝，它在灯泡中的位置高些；另一条是近光灯丝，它在灯泡中的位置低些，功率都是35瓦。小灯泡是单丝，功率为1.5瓦。左右前灯分别装在左、右前灯支架上。后灯11只接通一灯远光灯丝，装在右后档泥板上方。

尾灯 尾灯13内装有一双丝21/6瓦插口灯泡，21瓦灯丝是刹车灯丝，6瓦灯丝是牌照灯丝。它装在左后档泥板上方。

仪表照明灯 仪表灯17装在仪表板上，给各种仪表照明，以便使驾驶员随时通过仪表了解发动机的工作情况。仪表灯内装一个1~1.5瓦插口灯泡。

充电指示灯 充电指示灯7内装一个1~1.5瓦插口灯泡，指示灯亮时表示发电机不给蓄电池充电，指示灯不亮时表示发电机给蓄电池充电。指示灯也装在仪表板上。

转向指示灯 转向指示灯10内装有两个并联的3瓦插口灯泡。它装在驾驶室前风档上。

驾驶室顶灯 顶灯16内装一个3~6瓦插口灯泡，装在驾驶室顶上，作驾驶室照明用。

喇叭 电喇叭2装在水箱防护罩上。用来发出信号。

预热指示灯 预热指示灯24用来观察预热器26内热电阻丝的加热程度，它装在左侧柴油箱预热器支架上。

拖车插座 拖车插座12是用来供给拖车刹车灯和牌照灯电源的。

上述用电器，都并联在电路中。

三、其它附属装置

双金属片保护器 当电路发生故障，电流超过20安培时，保护器9自动断开，蓄电池不再对外放电，以保证电器设备的安全。

后灯开关 后灯开关19与后大灯串联，用来开闭后灯。

按钮 按钮18是用来控制电喇叭的；按钮25是用来控制预热器的。当按下按钮25时，电流从电源正极（搭铁极）经预热器26→指示灯24→按钮25→双金属片保护器9，然后流回电源负极。

电热式仪表 水温表21、油温表22、油压表23都是电热式仪表。电热式仪表均由传感器（也叫感应器，如图中的27、

4、5)和表头两部分组成,传感器与水、油直接接触,发动机的水温、油温和油压的数值便在表头上显示出来。

转换开关 电源转换开关8中,插入钥匙可以旋转。它的正面标有0、1、2、3四个位置;背面有8个接线柱:1、1、2、2、3、4、5、6,其中1、1联通,2、2联通。当未插入钥匙时,电路中只有预热器与顶灯不经开关8跟电源连接。当插入钥匙时,又分两种情况:完全插入和插入一半位置。下面参照图8-29分别予以讨论。

当钥匙完全插入时:

在“0”的位置时,接线柱1与2接通。这时水温表、油温表、油压表、刹车灯、拖车插座、充电指示灯、后灯等接入电路。

在“1”的位置时,接线柱1与2、5、6接通。这时,除了上述用电器外,又有牌照灯、仪表灯、转向指示灯、前小灯接入电路。

在“2”的位置时,接线柱1与2、4、5接通。这时与接线柱6相连的前小灯断开,与接线柱4相连的前远光灯接入电路,其余的仍与“1”的位置相同。

在“3”的位置时,接线柱1与2、3、5接通。这时只是把与接线柱4相连的前远光灯断开,而把与接线柱3相连的前近光灯接入电路,其余的不变。

当钥匙插入 $\frac{1}{2}$ 位置时,各位置除了2对1不通外,其它接线柱通断情况与钥匙完全插入时相同。在“0”位置时,除了预热器和顶灯外,其余电路全部切断。如果有特殊需要,可将钥匙分别拧至“1”、“2”、“3”位置,分别使仪表灯、牌照灯、转向指示灯、前小灯、前远灯及前近灯接

通。

铁牛45、55型拖拉机的电气设备比较完善，其它型号的拖拉机电路，尽管各有特点，但大体上是与它相似的。

第九章 电和磁的相互转化

远在两千多年以前，人们就发现了磁现象，但因为一直把它孤立地看成是某种物质所具有的特殊性质，所以对它的认识不深，应用也不广。直到十九世纪初发现了电流的磁场和磁场对电流的作用之后，才明确了磁现象和电现象之间的联系，并且大大地扩大了它的应用范围。至二十世纪初，由于揭示了原子的内部结构，人们才认识了磁现象的本质。

在这一章里，我们从常见的磁现象出发，引出关于磁场的概念，着重讨论磁和电的对立统一关系。

第一节 电流和磁场的关系

一、磁场是由电流产生的

“认识从实践始”。我国劳动人民，在长期的实践过程中，最先发现并逐渐认识了磁现象：知道磁铁是能够吸铁的；而且有两个磁极，一个指南，另一个指北。并且，根据这个特性制成了指南车。因为指南车能辨别方向，所以它的用途很大，后来用的指南针就是由指南车演变而来的。磁的发现是我国劳动人民对人类历史的重大贡献之一。

1. 磁性与磁极

进一步的观察和实验指出，磁铁不仅能够吸引铁，而

且还能吸引钴、镍及铁、钴、镍的合金（它们又称做铁磁物质）。磁铁的这种特性叫做磁性。磁铁分为天然磁铁和人造磁铁。天然磁铁是磁铁矿的散块。磁铁也可由人工方法制成，例如用天然磁铁沿一定方向去摩擦钢条，就可以得到人造磁铁。天然磁铁和能保持磁性的人造磁铁，都叫做永久磁铁。人造磁铁根据不同用途，做成不同形状，如条形磁铁、蹄形磁铁、磁针等（图9-1）。

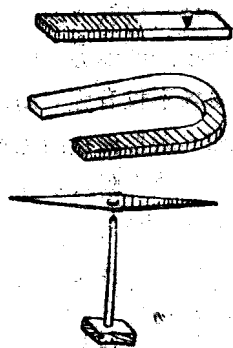


图 9-1

无论用哪种磁铁来吸引铁屑，都是两端吸得最多，这说明两端磁性最强。这两端就是磁铁的磁极。

如果用一条细线把条形磁铁悬挂起来，它静止以后和磁针一样，总是一个磁极指南，一个磁极指北。我们把指南的一端叫南极，用 S 表示，把指北的一端，叫做北极，用 N 表示。

如果用条形磁铁的 N 极去接近小磁针的 N 极，发现小磁针被推开，说明两者互相排斥；如果用条形磁铁的 S 极去接近小磁针的 N 极，磁针就被吸引过来，说明两者互相吸引。这个现象表明磁极有同号相斥、异号相吸的特性。在检修电机时，为了辨别电机绕组的极性，常常用一个指南针与之靠近，观察指南针的动作，就可以间接测出电机的极性。

2、磁场

电荷的相互作用，说明电荷周围存在着电场；同样，通过磁极的相互作用，说明磁极的周围也存在着场——磁场。

磁极与磁极的相互作用，也是通过磁场来进行的，因此可以表示为

磁极 $\longleftrightarrow$ 磁场 $\longleftrightarrow$ 磁极。

一般地说，磁场中各点的强弱是不同的。前面提到，磁铁的两极吸引铁屑的能力大，这说明磁极附近的磁场较强；离开磁极远的地方，吸引铁屑的能力小，说明这里磁场弱。

磁场不仅有强有弱，而且还有方向性。例如把一个小磁针放在一条形磁铁的磁场里，在同一地方，小磁针的指向是固定的，放在附近不同的地方，指向也不相同。

关于磁场的方向，我们是这样规定的：放在磁场中的小磁针，当偏转停止后，它的N极所指的方向，就是小磁针所在处的磁场方向。如果要确定磁场中某点的磁场方向，只要把小磁针放到该处即可测出。

一般都具有这样的经验：把一块玻璃板平放在一根条形磁铁上，在玻璃板上均匀地撒一些铁屑，轻敲玻璃板，铁屑就会规则地排列起来。如果我们顺着铁屑排列的方向，画出一些曲线，使这些曲线的切线方向和该点磁场方向一致，如图9-2所示，这些曲线就叫做磁力线。

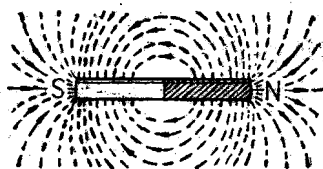


图 9-2

从图9-2中可以看出，磁铁两极附近磁力线密；远离磁极的地方磁力线少。这就是说，磁力线除了能表示出磁场的方向外，还能表示磁场的强弱，磁力线密度越

大的地方磁场越强，磁力线密度越小的地方磁场越弱。因此用磁力线能形象地描绘磁场。

磁场的强弱，通常用磁感应强度来表示。磁场中某点磁感应强度的大小，在数值上就等于垂直通过该处单位面积的磁力线的条数。磁感应强度用符号 B 表示。如果在一磁场里，磁感应强度是处处相同的，也就是说磁力线是一组疏密均匀、方向一致的平行线，这样的磁场叫做匀强磁场。

在磁场里，垂直通过某一面积 S 的磁力线条数，叫做通过面积 S 的磁通量（简称磁通）。磁通量用 Φ 表示。磁通量的单位有两个：一个叫做麦克斯韦，一麦克斯韦，就是垂直通过某面积 1 条磁力线；另一个叫做韦伯，1 韦伯 = 10^8 麦克斯韦，也就是说，垂直通过某一面积的磁力线是 1 亿条，磁通量就为 1 韦伯。

在一个磁感应强度为 B 的匀强磁场里，通过某一面积 S 的磁通量就为

$$\Phi = BS,$$

将上式写成

$$B = \frac{\Phi}{S}, \quad (9-1)$$

就可以规定出磁感应强度的单位：如果 Φ 的单位用麦克斯韦， S 的单位用 $[\text{厘米}]^2$ ，那么 B 的单位就是高斯；如果 Φ 的单位用韦伯， S 的单位用 米^2 ，那么 B 的单位就是韦伯/米²。因为 1 韦伯 = 10^8 麦克斯韦， $1 \text{ 米}^2 = 10^4 [\text{厘米}]^2$ ，所以

$$1 \text{ 韦伯/米}^2 = 10^4 \text{ 高斯}.$$

磁铁的磁场对铁磁物质有磁化作用。例如在检修收音机时，把小螺丝刀在喇叭的磁铁上摩擦几下，就能把螺丝钉吸起来。这说明在磁场作用下，使原来没有磁性的铁磁物质有了磁性，这种现象就叫做铁磁物质的磁化。

3、电流的磁场

通过上面的讲述，可以看出磁与电有许多相似的特点。例如，电荷的周围存在着电场，磁铁的周围存在着磁场；电荷之间存在着同号相斥、异号相吸的作用力，磁极之间也存在着同号相斥、异号相吸的作用力。这种相似性并不是偶然的。

参观钢铁厂和港口时，会看到电磁起重机，它不需要事先捆好物体再起吊，而是把钢铁材料直接吸起来。电磁起重机的主要部分是一个绕有线圈的铁芯，当给线圈通以电流时，铁芯就产生了磁性，从而吸起钢铁材料。这表明此时铁芯被磁化了。前面提到磁化是在磁场里进行的，那么在电磁起重机里磁场是怎么产生的呢？显然是由电流产生的。也就是说，给它的线圈中通以电流，线圈周围就产生了磁场，铁芯由于在磁场里而被磁化，于是产生了磁性。把钢铁材料运到指定地点后，切断电流，便不再有磁场。铁芯的磁性消失，于是放下钢铁材料。

通过上面的分析可以看出，通电线圈能产生磁场，下面我们用一个实验来证明，通电的直导线周围也能产生磁场。

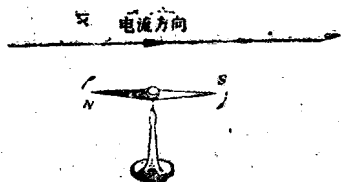


图 9-3

拿来一个指南针或一个可以转动的小磁针，把它移到一条有电流通过的直导线附近，就会发现磁针偏转，如图9-3所示，最后静止在一个新的位置上。如果导线中电流停止，小磁

针就又回到原来指南北的位置。这说明直导线中的电流周围存在磁场。

通电导线周围的磁场方向，是由电流方向决定的，电流方向和磁场方向之间的关系，实验表明可以用右手法则来确定。对于通电直导线，可用右手握住导线，让姆指顺着导线指向电流方向，那么弯曲的四指就表示磁力线的方向，如图9-4所示。对于通电螺线管，可用右手握住螺线管：使弯曲的四指跟线

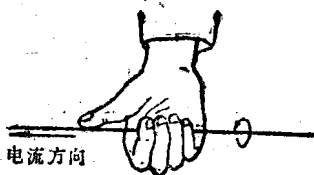


图 9-4

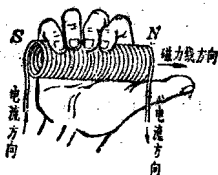


图 9-5

圈中的电流方向一致，则伸直的姆指就表示通电螺线管的N极，如图9-5所示。通电螺线管在实际应用中是很广的，在电机等用电设备中，经常需要用右手法则来判断的，其实就是通电螺线管的电流方向和磁力线方向。

4、电磁铁

在通电螺线管中放一块软铁芯，磁性就会大大增加。这是因为软铁芯被磁化了。被磁化后的铁芯的磁场与通电螺线管的磁场叠加在一起，使磁性大大增强。这种带铁芯的通电螺线管就叫做电磁铁。

电磁铁的应用范围很广，如各种自动化电器中的继电器、接触器，一般工程技术上用的吊车制动器、电磁起重

机，作为机械工具的电动锤，作为机床夹具的电磁卡盘，以及电铃、电报等等都要用到电磁铁。而电动机、发电机和变压器等，其主要部分也是带铁芯的通电线圈。

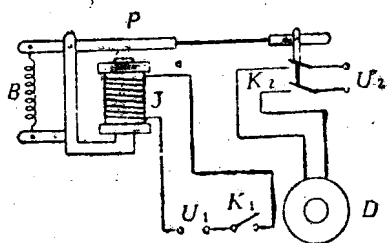


图 9-6

图9-6是最简单的利用电磁继电器的控制电路。由电磁铁 J 电源 U_1 和开关 K_1 组成控制回路；由电动机 D 、电源 U_2 和开关 K_2 组成主回路。当电磁铁线圈中有微弱的控制电流通

过时，电磁铁就吸引铁片 P ，使主回路上的开关 K_2 闭合，把电动机接到电源 U_2 上，开始工作。当切断开关 K_1 后，电磁铁线圈中就没有控制电流，磁性消失。铁片 P 就被弹簧 B 拉起，使 K_2 断开，切断主回路，电动机就停止工作。这样就起到利用弱电流来控制强电流的作用。

二、磁场对电流的作用

在一个蹄形磁铁中间，放置一根与磁场方向垂直的导线。当给导线通电以后（电流方向如图9-7所示），导线就要向外移动，好象被推出一样。这表明通电导线在磁场里受到一个力 F 的作用。如果改变电流的方向，导线就向里运动。反复作几次实验，可以总结出判断导体所受到的磁场力的方向，那就是：将左手伸开，以手心对着 N 极，使伸直的四指指向电流方向，那么姆指的方向就表示导体受力的

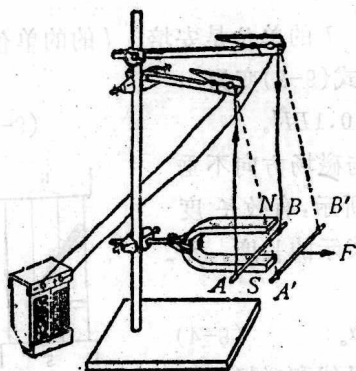


图 9-7

体和磁场方向垂直时，导体上所受的磁场力 F 的大小，与磁感应强度 B 、导体中的电流强度 I 及导体在磁场里的长度（也叫有效长度） l 成正比。如果写成公式，就是

$$F = BIl. \quad (9-2)$$

式中 I 的单位是安培， B 的单位是韦伯/米²， l 的单位是米， F 的单位是牛

方向，如图 9-8 所示。这个判断方法叫做左手定则。

图 9-9 记录了磁场、电流和运动方向这三者之间的关系。符号“ $\odot$ ”表示电流方向指向读者；“ $\otimes$ ”表示电流方向背离读者。

实验还指出：在均匀的磁场里，当通电导

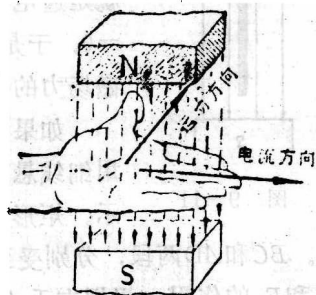


图 9-8

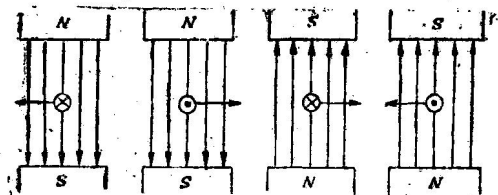


图 9-9

顿。如果 B 的单位是高斯, I 的单位是安培, l 的单位是厘米, F 的单位是达因, 则式(9-2)变为

$$F = 0.1 B I l. \quad (9-3)$$

如果通电导线的方向与磁场方向不垂直, 而成 α 角, 如图 9-10 所示, 有效长度就是 $l \sin \alpha$, 相当于虚线所表示的长度。于是式(9-2)变成

$$F = B I l \sin \alpha. \quad (9-4)$$

当 $\alpha = 90^\circ$, 也就是通电导线和磁场方向垂直时, $\sin 90^\circ = 1$, 式(9-4)与式(9-2)

图 9-10

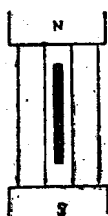


图 9-11

一致这时导体受力最大。当 $\alpha = 0^\circ$, 也就是通电导线和磁场方向平行时, $\sin 0^\circ = 0$, 于是 $F = B I l \sin 0^\circ = 0$, 即导体不受磁场力的作用(图9-11)。

如果把通电导线变成一个矩形线圈, 用细线悬挂在匀强磁场中, 如图 9-12 所示。矩形线圈的四条边就是四段通电导

体。BC和AD两段, 分别受到力 F_1 和 F_2 的作用。根据左手定则可以看出来, F_1 和 F_2 的方向相反并始终与纸面垂直, 而且两者大小相等。在这两个力的作用下, 线圈转动。当转到线圈平面与磁场方向垂直时, F_1 和 F_2 作用在同一直线上, 线圈处于平衡位置。AB和DC两条边在磁场中所受的作

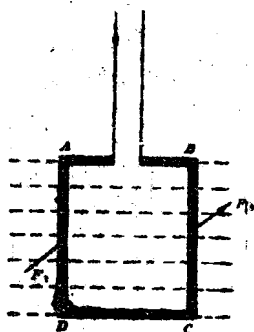


图 9-12

用力，跟线圈的转动无关，这里不予讨论。

通电线圈在磁场里能够转动，这一现象在实际中应用很广，例如电动机、电表等，都是根据这个道理制成的。

第二节 磁电式直流电表

在生产实践和科学实验中，常常需要用仪表来测量电流、电压、电阻和电能等物理量。因为电流有直流和交流之分，所以电表也分为直流电表和交流电表两类。测量直流电流和电压，分别用直流电流表和直流电压表。它们的用途虽然不同，但基本原理是相同的。

一、直流电流表

直流电流表和直流电压表是根据通电导体在磁场中所受的作用力，与导体中的电流强度成正比这个规律制成的。直流电流表基本构造如图 9-13 所示，蹄形永磁铁的两极间有一个圆柱形的铁芯 K 。铁芯与两极靴 d 之间形成一强而均匀的磁场。

可动部分由线圈 a 、指针 c 和两个弹簧 P 组成。线圈是用很细的高强度漆包线，绕在铝框上的，两端分别接在两个弹簧上。

当电流通过弹簧流向线圈时，线圈的两个长边分别受到大小相等、方向相反的两个磁场力的作用，这个转动转矩使线

圈发生偏转。线圈偏转时带动轴转动而扭转弹簧,同时,弹簧给轴以反向力矩。当这两个力矩大小相等时,轴便停止转动,固定在轴上的指针便在刻度盘上指出电流的数值来。通过线圈的电流越大,线圈所受的力矩作用就越大,指针偏转的角度也越大,因而在刻度盘上指出的数值也越大。指针偏转的角度与电流强度成正比,所以刻度是均匀的。

这种仪表是靠永久磁铁的磁场使通电线圈转动来进行测量的,所以叫做磁电式仪表,也叫做电流计。它的灵敏度很高,但因为线圈的导线很细,不能用来测量较强的电流。

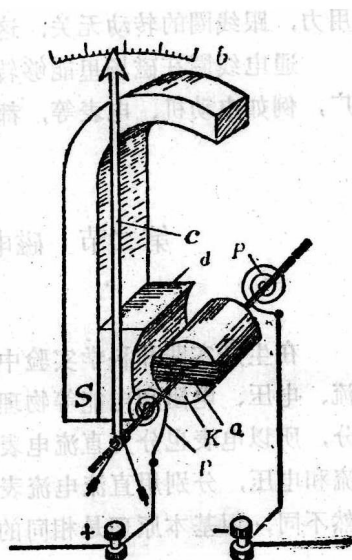


图 9-13

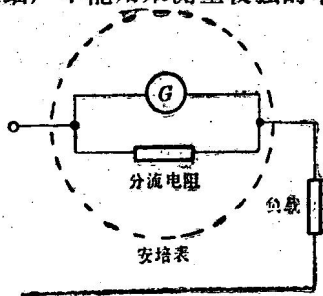


图 9-14

如果要测量大电流,可以在电流计的两端并联一个阻值小的电阻,如图 9-14 所示。使大部电流都流过小电阻,只有小部分电流流过电流计,这就组成了一个电流表,如图中虚线部分所示。并联的小电阻叫做分流

电阻。并联不同的分流电阻就可以得到不同的量程，例如一最大能测量100毫安（0.1安培）的电流计，要让它能测量10安培（也就是使它的量程扩大100倍），分流电阻必须流过9.9安培的电流，而电流计的线圈只能流过0.1安培的电流。由并联电路的特点，读者可以算出，分流电阻的阻值应该是电流计内阻的 $\frac{0.1}{9.9} = \frac{1}{99}$ 。

在使用直流电流表时，如果给转动线圈通过方向相反的电流，根据左手定则，线圈就会受反方向力矩的作用，于是指针反转。因此，必须注意“+”“-”极性。

二、直流电压表

直流电压表也是由电流计改装而成的。因为电流计的指针偏转的角度跟通过线圈的电流强度成正比，根据欧姆定律， $I = \frac{U}{R}$ ，电流计线圈的电阻 R 是个定值，所以通过线圈的电流强度跟加在它两端的电压成正比。那么，电流计指针偏转角度，也跟加在线圈两端的电压成正比。能不能把直流电流计的刻度盘标上电压数值，就直接用来测量电压呢？这显然是不行的。因为它的电阻很小，并联在电路后，总电阻减小了，总电流加大，测量出的电压就不是原来的电压了；此外，电流过大，又会烧坏电表。为了解决这个矛盾，通常给电流计串联一个阻值很大的电阻，如图 9-15 所示。这

就构成了一个直流电压表(图中虚线部分)。当把直流电压表并联在电路上时,因为它的电阻很大,电路只有很小一部分电流流过电表,因而对被测电路影响极小。同样,使用直流电压表时,也要注意极性。

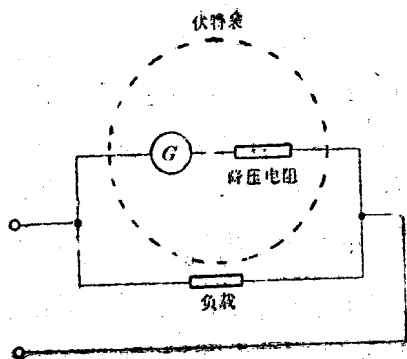


图 9-15

三、万用电表

从直流电流表和直流电压表的构造中可以看出,它们都有一个磁电式测量机构(电流计)——表头,此外根据不同要求再另外加装电阻。为了方便起见,制成既能测量直流电流、电压,又能测量电阻和交流电压的多用电表,叫做万用表。比较高级的万用表,还可以测量交流电流、功率、电感、电容等。

万用表由表头、电阻器和选择开关等部件组成。下面介绍万用表的工作原理。

1、直流电流的测量

如果在表头上并联不同的电阻,就可以测量不同范围的电流。万用表就是通过选择开关 S ,使表头分别与不同电阻

并联的，如图 9-16 所示。当开关投向 1 点时，分流电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 全部接入，与表头并联。这时分流电阻阻值最大，分流作用最小，所能测量的电流最小。当开关投向 2、3、4 各点时，分流电阻逐渐减小，所以测量的电流范围就不断扩大。一般万用表能测量直流的范围，大约从几毫安到几百毫安。

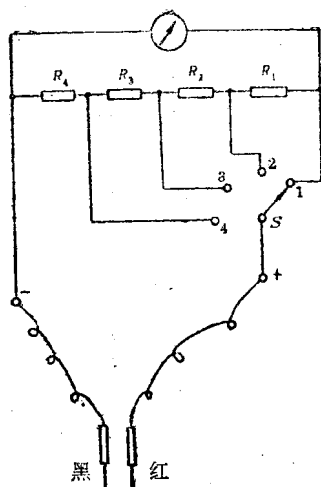


图 9-16

2、直流电压的测量

如果在表头上串联不同的电阻，就可以测量不同范围的直流电压。在万用表中，通过选择开关 S ，使不同的电阻与表头串联，如图 9-17 所示。当开关投向 1 点时， R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 全部接入，与表头串联。这时所能测量的电压范围最大。当开关分别投向 2、3、4 各点时，串联电阻不断减小，测量电压的范围也就不断减小。测量交流电压的线路与原理，基本与测量直流电压相同，只是增加一个整流器，把被测的交流电变成直流电，再送到表头。

3、电阻的测量

测量电路中的电流和电压时，不必另外加电池。表头如果没有电流流过，指针就不发生偏转，因此测电阻时，

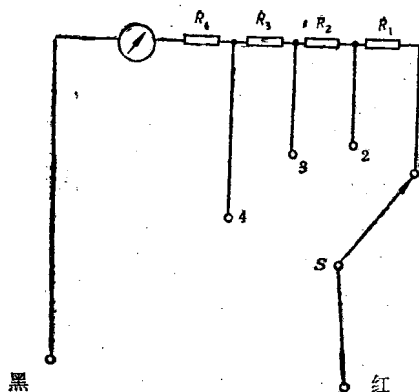


图 9-17

必须另加电池。在万用表中备有电池，并与表头和电阻 R 、 R_1 （或 R_2 、 R_3 等）串联起来，组成测量电阻的电路，如图9-18所示。

电阻 R_1 （及 R_2 、 R_3 ）用来限制电流以便保护表头； R 是可变电阻，用来调整电路中的电流； E 是干电池，它的正极与电表“—”插口连接，负极与电表的“+”插口连接。 E 用来供给测量电路的电流。

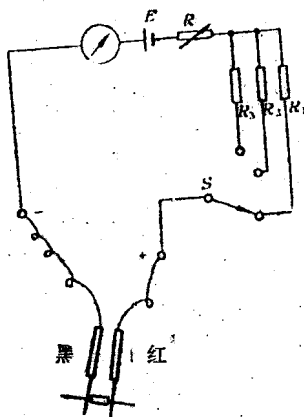


图 9-18

如果把红、黑两支表笔直接接触，这时整个电路的电阻最小，电流最大，指针偏转角度也最大。调整电阻 R ，可以使指针偏转到刻度盘的尽头。这表示被测电路的电阻是 0（短路）。我们把满刻度的这个位置定为 0 欧姆。如果两表笔分开，即被测电路没有接通（断路），或者说电阻无穷大，因而指针不发生偏转，这时在指针处标上符号“ ∞ ”。

如果在两表笔之间加上一个被测电阻，整个电路的阻值增大，通过表头的电流就减小了。指针既不停在“ ∞ ”处，也转不到“0”处，而是偏转到一个相应的位置上。这个位置就表示出该电阻的阻值。被测电阻越大，指针偏转的角度越小。在测量时就可以根据指针的读数，看出阻值大小来。

测量的范围，也同样受选择开关 S 的控制。

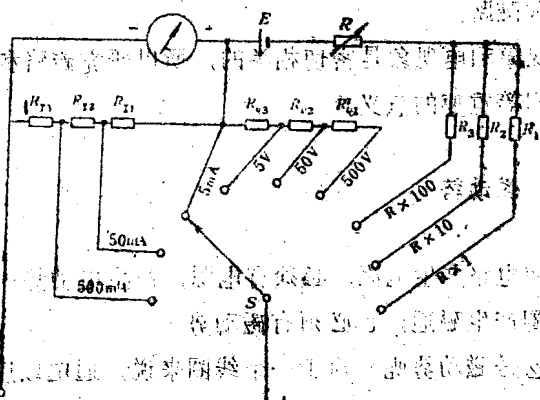


图 9-19

把上述部分合在一起，就组成万用表电路的直流测量部分，如图9-19所示。

第三节 磁路

在电机、变压器、磁力开关和电工仪表等设备中，主要部分由两种材料做成：一部分是导电材料，如电机的绕组、变压器的线圈等；另一部分是铁芯。

在这些设备中，导电材料能使电荷集中地按一定的路径通过，形成电路。同时，电流的周围又会建立磁场，铁芯使磁力线也是集中地按一定的路径通过的。我们把磁力线通过的路径叫做磁路。

磁现象和电现象是密切相关的，所以研究磁路和研究电路有着同等重要的意义。

一、磁动势

要使电路产生电流，必须有电源，产生电动势；同样，要使线圈产生磁通，也必须有磁动势。

什么是磁动势呢？对于一个线圈来说，通电以后才能产生磁通，磁通的大小跟电流强度 I 和匝数 N 有关。实践证明，电流强度越大，匝数越多，磁场就越强，即磁通 Φ 越大。例如电磁起重机的线圈，因为匝数多、电流大，才能产生相当强的磁场。我们把线圈匝数与电流的乘积 NI 叫做磁

动势，简称作磁势。电流 I 的单位用安培，线圈匝数 N 的单位用“匝”，因此磁动势又叫安培匝数（安匝）。

例如，有甲乙两个线圈，甲有100匝，通过的电流为0.4安培；乙有200匝，通过的电流为0.1安培，那么这两个线圈的磁动势分别为

$$N I_{\text{甲}} = 100 \times 0.4 = 40 (\text{安匝}),$$

$$N I_{\text{乙}} = 200 \times 0.1 = 20 (\text{安匝}).$$

许多电气设备，必须具有一定磁动势才能工作，例如在电磁继电器中，必须有足够的安培匝数才能吸动衔铁，发生动作。这就象一盏电灯必须达到额定电压才能正常发光一样。

在研究磁场时，还要引进几个物理量。

1、磁场强度

如果磁路长度为 l （厘米），每单位长的安培匝数，就叫做磁场强度。磁场强度用 H 表示，于是

$$H = \frac{NI}{l} \quad (9-5)$$

从上式得出 H 的单位是安匝/厘米，但在实际磁路计算中，把匝数只当数字处理，因此 H 的单位就是安/厘米。

2、磁导率

磁感应强度与磁场强度之比，叫做磁路材料的磁导率，用 μ 表示。

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (9-6)$$

μ 的单位是韦伯/安培·米。

磁导率 μ 的大小，与磁路材料有关， μ 愈大，说明材

料的导磁性能愈好，也就是说，能用较小的磁场强度（或者说每单位长较少的安培匝数），产生较大的磁感应强度。对于真空来说，它是个常数 μ_0 ， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 韦伯/安培·米。

铁、钴、镍等材料的磁导率 μ 比 μ_0 大几百倍或上千倍，这类材料的导磁性能好，叫做铁磁材料。电气设备中的铁芯都是用铁磁材料做成的。

空气和其它非铁磁材料的磁导率都近似等于 μ_0 ，这类材料的导磁性能差。

【例1】 环形螺线管（图9-20）直径 $D = 14.8$ 厘米，线圈 $N = 1700$ 匝，通过的电流 $I = 0.3$ 安，试求螺线管中的磁感应强度 B 。

解 磁路长度（如图中点划线所示） $l = \pi D = \pi \times 14.8 = 46.5$ （厘米）。

由式(9-5)得出磁场强

$$H = \frac{NI}{l} = \frac{1700 \times 0.3}{46.5} = 10.95 \text{ 安/厘米} = 1095 \text{ 安/米}。$$

由式(9-3)得出，螺线管中的磁感应强度

$$B = \mu H。$$

因为螺线管的导磁材料是空气，所以 $\mu = \mu_0$ ，即

$$B = \mu_0 H = 4\pi \times 10^{-7} \times 1095 = 1.38 \times 10^{-3} \text{ (韦伯/米}^2\text{)}。$$

即磁感应强度 $B = 13.8$ 高斯。

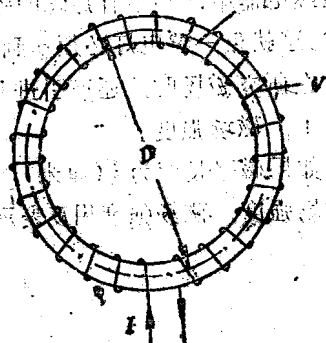


图 9-20

3. 铁磁材料的磁化曲线

在铁磁材料的磁化过程中，磁感应强度 B 的大小与磁场强度 H 有关，它们的比值就是材料的磁导率 μ 。实验指出， μ 是变数，例如对于铸钢 μ 在 $6 \cdot 4 \times 10^{-4} \sim 27.5 \times 10^{-4}$ 韦伯/安培·米之间。如果把 B 和 H 的关系用函数图象表示，即用横坐标表示 H ，用纵坐标表示 B ，那么得到的将是一条曲线而不是直线。不同的铁磁材料，曲线的形状也不相同。这些曲线，就叫做材料的磁化曲线。如图9-21所示。图中 B 的单位是韦伯/米²， H 的单位是安/厘米。

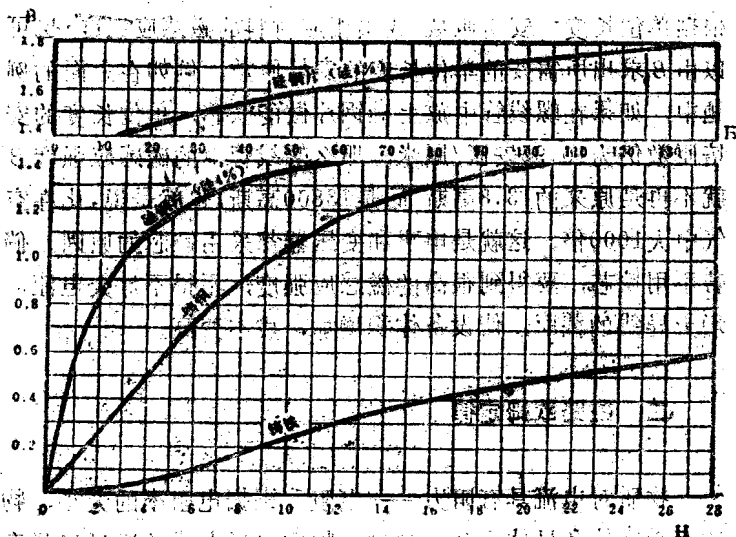


图 9-21

从图中可以看出，在相同的 H 值下，硅钢片的磁感应强度 B 最大，导磁性能最好，所以电机、变压器等都用硅钢片做铁芯。

从图中还可以看到，随着 H 的增加，磁感应强度 B 开始增加得很快，但到后来却缓慢下来。这种现象就称为磁饱和。例如硅钢片中， B 在13000~14000高斯以上，随着 H 的增加（主要是磁化电流的增加）， B 的增加相当缓慢。在许多电器设备中，要求 B 尽量高些，但又不能过高，因为 B 过高势必需要大大增加磁化电流。比如用热轧硅钢片做变压器的铁芯时， B 不应超过14500高斯。

磁化曲线在磁路计算中是很有用的。通过磁化曲线，可以根据单位长度的安培匝数，找出相应材料的磁感应强度；也可以由 B 求出所需要的单位长度的安培匝数。例如在上面的例题中，如果在螺线管中放上硅钢片做的铁芯，单位长度的安培匝数仍为10.95安匝/厘米，那么螺线管中的磁感应强度 B 就不再是原来的13.8高斯而是13800高斯，也就是说，比在空气中大1000倍。这就是电机和变压器都采用铁芯的原因。倘若不用铁芯，要得到很高的磁感应强度，不得不加大电流，增大导线的截面，使设备体积增加，成本变高。

二、磁路欧姆定律

物质对电流具有阻力——电阻。根据电阻率的大小，物质有绝缘体和导体之分。同样，物质对磁力线的通过也具有阻力——磁阻，磁导率小的物质，如空气等，导磁性能差，这就是通常所说的非铁磁性物质；磁导率大的物质，导磁性能

好，这就是通常所说的铁磁性物质。

电气设备的铁芯与空气相比，磁导率大得多，所以磁力线大部分从铁芯中通过，如图9-22所示。我们把这部分磁力线称为主磁通；还有一小部分磁力线通过空气或其它材料而闭合，我们把这部分磁力线称为漏磁通。由于漏磁通比主磁通小得多，在计算时，可以略去不计。

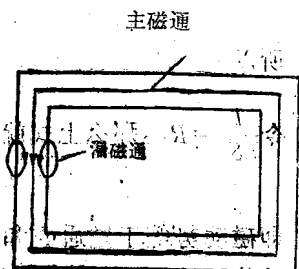


图 9-22

磁路计算与电路计算有很多相似的地方，这可以从下面的分析过程中看出来。

在图 9-23(a) 的磁路中， l 为磁路长度， S 为磁路截面。

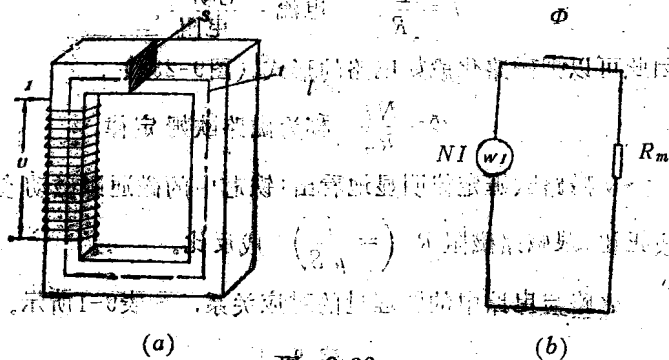


图 9-23

磁场强度 $H = \frac{NI}{l}$ ，所以磁动势还可以表示为

$$NI = Hl.$$

又因为

$$H = \frac{B}{\mu}, \quad B = \frac{\Phi}{S}$$

所以

$$NI = \Phi \frac{l}{\mu S}$$

令 $\frac{l}{\mu S} = R_m$, 那么上式就变为

$$NI = \Phi R_m$$

即磁动势等于磁通 Φ 和 R_m 的乘积。如果和电路相比较, 磁动势 NI 相当于电动势 E , 磁通 Φ 相当于电流 I , R_m 就相当于电阻 R , 它就是磁阻。

上式还可以写成

$$\Phi = \frac{NI}{R_m}, \quad \text{即磁通} = \frac{\text{磁动势}}{\text{磁阻}}$$

相当于电路中的公式

$$I = \frac{E}{R}, \quad \text{电流} = \frac{\text{电动势}}{\text{电阻}}$$

因此可以把磁路化成如电路的形式 (图9-23)。

$$\Phi = \frac{NI}{R_m} \quad \text{称为磁路欧姆定律。}$$

从磁路欧姆定律明显地看出: 铁芯中的磁通跟磁动势 NI 成正比, 跟磁路磁阻 $R_m \left(= \frac{l}{\mu S} \right)$ 成反比。

磁路与电路中的物理量的对应关系, 如表9-1所示。

表 9-1

电 路	磁 路
电 流 I	磁 通 Φ
电 动 势 E	磁 动 势 NI

电 压 降 $U(=IR)$	磁 压 降 $U_m(=\Phi R_m)$
电 导 率 $\frac{1}{\rho}$	磁 导 率 μ
电 阻 $R = \rho \frac{l}{S}$	磁 阻 $R_m = \frac{1}{\mu} \frac{l}{S}$
电 路 欧 姆 定 律 $I = \frac{E}{R}$	磁 路 欧 姆 定 律 $\Phi = \frac{NI}{R_m}$

三、磁路计算

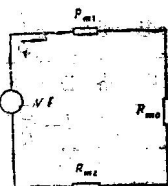
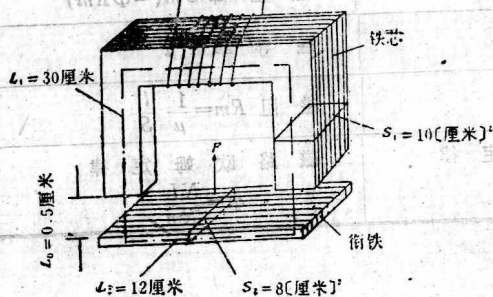
在日常生活中，我们常常需要自制或改装某些简单的带有铁芯的电器。如绕制烧坏的接触器线圈，或者绕制小型变压器等，都需要进行一些简单的磁路计算。

磁阻 R_m 和磁导率 μ 有关。我们知道 μ 不是常数，而是随磁场强度 H 的大小变化的，所以 R_m 也不是常数（这一点和电路电阻不同）。这给计算带来了困难。

为了便于计算，我们将 R_m 仍然化成对应于 B 和 H 的等量关系来表示。例如，铁磁材料的尺寸已定，要求铁芯中某一 Φ 值时，线圈的安培匝数是多少，一般不能直接用 ΦR_m 求出。但是可先求出铁芯的磁感应强度 B ，在所用材料的 $B-H$ 曲线上，查得相应的 H 值，再把 H 和磁路长度 l 相乘，就可求出线圈的安培匝数。

〔例 2〕 一个用硅钢片叠成的电磁吸铁，为了对衔铁有足够的吸引力 F ，要求空气隙的磁感应强度 B 有 10000 高斯，铁芯尺寸如图 9-24 (a) 所示，求需要多大的磁动势。

解 在许多电气设备中，铁芯都是有空气隙的。图 9-24



(a)

(b)

图 9-24

(a) 就是有空隙的磁路，它的等效磁路如图 9-24 (b) 所示。图中 R_{m1} 是铁芯磁阻； R_{m2} 是衔铁磁阻； R_{m0} 是两段空气隙的磁阻。要计算整个磁路的安培匝数，可以先算出每部分的安培匝数，然后再加起来。

因为铁芯和衔铁的磁阻 R_{m1} 和 R_{m2} 都不是常数，所以要用前面介绍的方法求磁动势。

空气隙磁通（也就是整个磁通）

$$\Phi = B_1 S_1 = 10000 \times 10 = 100000 \text{ (麦克斯韦)}$$

铁芯的磁感应强度

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{100000}{10} = 10000 \text{ (高斯)}$$

从图 9-21 硅钢片磁化曲线上找出当 $B_1 = 10000$ 高斯时，对应的 $H_1 = 3.2$ 安匝/厘米。那么铁芯部分的磁压降就是

$$H_1 L_1 = 3.2 \times 30 = 96 \text{ (安匝)}$$

衔铁的磁感应强度为

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{100000}{8} = 12500 \text{ (高斯)}.$$

从硅钢片的磁化曲线上找出 $B_2 = 12500$ 高斯时，对应的 $H_2 = 9$ 安匝/厘米。那么衔铁部分的磁压降就是

$$H_2 l_2 = 9 \times 12 = 108 \text{ (安匝)}.$$

空气隙的磁感应强度 B_0 是已知的，空气的磁导率 μ_0 又是一个已知常数，因此可以直接求出 H_0 的数值。

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{10000}{4\pi \times 10^{-7}} \approx 8000 \text{ (安匝/厘米)}.$$

空气隙长度为

$$2l_0 = 2 \times 0.5 = 1 \text{ (厘米)},$$

那么空气隙的磁压降为

$$2H_0 l_0 = 8000 \times 1 = 8000 \text{ (安匝)}.$$

整个电磁吸铁所需的磁动势为

$$\begin{aligned} NI &= H_1 l_1 + H_2 l_2 + 2H_0 l_0 \\ &= 96 + 108 + 8000 = 8204 \text{ (安匝)}. \end{aligned}$$

从上面的计算看出，空气隙虽然很小，磁压降却相当大，消耗了绝大部分磁动势。所以在制造电机、电器时，要尽量缩小空气隙。一般小型电动机的定子和转子间的空气隙只有 $0.35 \sim 0.5$ 毫米，大型电动机约为 $1 \sim 1.5$ 毫米。

第四节 磁是怎样转化为电的

在发现了电流能够产生磁场之后，人们提出了一个新的问题：能不能利用磁场来获得电流呢？人们在长期的实践过

程中，发现和总结了利用磁场产生电流的现象和规律，并利用这些规律，经过反复实践，制成了发电机。在我国广大城乡，许许多多发电机正在日夜运转，为工农业生产服务。在发电机里，是如何利用磁场来产生电流的呢？换言之，磁是怎么转化为电的呢？

一、电磁感应

图9-25中的 N 、 S 是一个磁铁的两极， G 是电流计， AB 是一导体。 ABG 构成一个闭合回路。这个回路里是否有电流通过，可以从电流计指针是否发生偏转看出来。

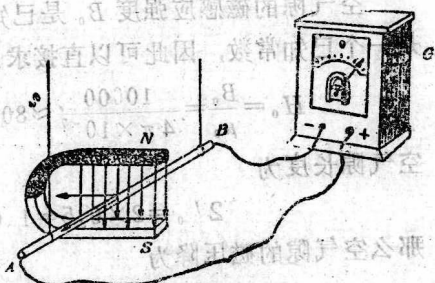


图 9-25

当导体 AB 跟磁场相对静止时，电流计指针不偏转，当导体 AB 沿着磁力线方向作相对运动时，电流计指针也不偏转，即回路里没有电流。

当导体 AB 在不平行于磁力线的方向上和磁场做相对运动时，电流计指针偏转，即包含导体 AB 的闭合回路里有了电流。这个现象叫做电磁感应现象，这样产生的电流叫做感生电流。以前曾经提到，要使导体内有电流通过，闭合回路里必须有电动势，我们把形成感生电流的电动势，叫做感生电动势。

在上述三种情形中，前两次导体 AB 都不切割磁力线，只有第三次导体才切割磁力线。所以，根据上述实验可以得出这样一个结论：当闭合回路中的一部分导体，在磁场里作切

割磁力线运动时，回路里就产生了感生电流。

图 9-26 中， AB 是一个线圈， G 是电流计。当磁棒插入线圈或从线圈中拔出时（即两者作相对运动时），电流计指针偏转，表明回路里也产生了感生电流。磁铁的周围存在着磁场，每当把磁铁移近或离开

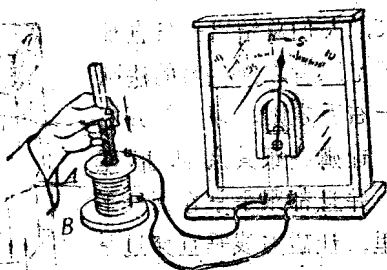


图 9-26

线圈时，通过线圈的磁通量就要发生变化。换言之，闭合回路里磁通量发生变化时，就会产生感生电流。

上面两个实验得出的结论是一致的。因为在图 9-25 中导体作切割磁力线运动时，闭合回路里磁通量也在发生变化。这样，产生感生电流的条件可以表述为：通过闭合回路的磁通量发生变化。依据这一条件，磁转化为电。

发电机和变压器都是根据电磁感应现象做成的。当我们研究发电机里电磁感应现象时，从切割磁力线这个角度来分析比较简便；在研究变压器的原理时，从磁通量发生变化这个角度来分析比较简便。

二、感生电流的方向

1. 右手定则

在电磁感应现象里，磁力线方向、导体运动方向和感生电流的方向之间有着怎样的关系呢？如果重复图 9-25 的实

验，发现改变磁场方向或改变导体运动方向都能引起感生电流方向的改变。根据实验的结果，人们总结出一条直观地记忆三者之间关系的法则——右手定则。即，伸开右手，让姆指跟其余四指垂直，并且都跟手掌在同一平面里。让磁力线垂直穿过掌心。如果姆指指向导体运动方向，其余四指就指向感生电流的方向，如图 9-27 所示。

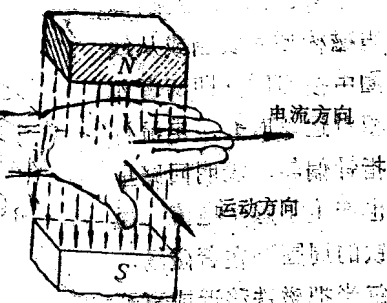


图 9-27

图 9-28 记录了三者的方向关系， $\rightarrow$ 表示导体的运动方向， $\odot$ 表示感生电流指向读者， $\otimes$ 表示感生电流背离读者。

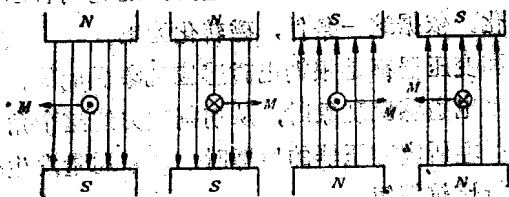


图 9-28

2、楞次定律

闭合回路里磁通量发生变化，就会产生感生电流，而感生电流又会建立新的磁场。实验指出，当闭合回路里磁通量增加时，感生电流产生的磁通量就阻碍它增加；当闭合回路里磁通量减少时，感生电流产生的磁通量就阻碍它减少。即闭

合回路里感生电流有确定的方向，它所产生的磁通量总是阻碍原来磁通量的变化。这个规律叫做楞次定律。

楞次定律是通过大量的电磁感应现象总结出来的，用它可以确定感生电流的方向。有些场合切割磁力线的运动不很显著，用右手定则判定感生电流方向不大方便，就得根据楞次定律进行判断。例如，在图 9-29(a)中，把磁铁的N极插入螺线管时，螺线管中的磁通量增加，于是螺线管中有感生电流产生。根据楞次定律，感生电流的磁场要阻止原来磁场的增强，因此感生电流磁

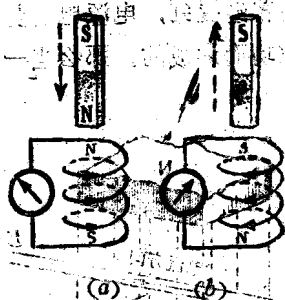


图 9-29

场的方向和磁铁的磁场方向相反，上端是N极，下端是S极。知道了感生电流磁场的方向，可以根据右手螺旋法则确定感生电流的方向，如图中箭头所示。

把磁铁N极从螺线管中抽出的时候（图9-29b），螺线管中磁通量减少，螺线管中有感生电流产生，从楞次定律知道感生电流的磁场方向跟磁铁的磁场方向相同，上端是S极，下端是N极。知道了感生电流的磁场方向，便可以用右手螺旋定则确定感生电流的方向。

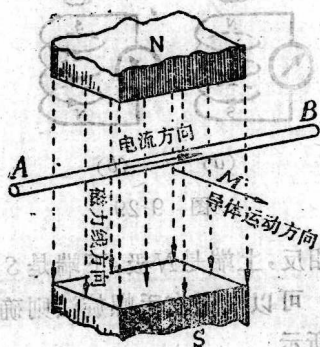
三、感生电动势

对发电机来说，根据不同需要，它的电动势也不相同。那么发电机这个电源的电动势是由什么决定的呢？发电机是

根据电磁感应现象制作成的，它的电动势就是感生电动势。尽管发电机里作切割磁力线运动的线圈构造很复杂，但它总是一段一段的导线连接而成的，因此，我们先从一段作切割磁力线运动的导线的感生电动势开始研究。

1. 感生电动势的形成

我们曾经提到，电源电动势是由外力（非静电力）克服电场力做功而形成的。那么当一段导体在磁场里切割磁力线



运动时，是什么原因使它产生了电动势呢？这也仍然得从导体内部寻找原因。图9-30表示一段导体AB在磁场里作切割磁力线的运动。导体AB原来是中性的，它所带的正、负电荷相等，分布均匀，并且不作定向运动。但是当AB在磁场中沿M方向作切割磁力线运动时，它所带的电荷也跟着沿M方向作定向运动。正电荷沿M方向运动，就形成了沿M方向的电流。负电荷沿M方向运动就形成沿-M方向的电流。按照左手定则，沿M方向运动的正电荷，所受的磁场力是指向B端的。沿M方向运动的负电荷受到的磁场力是指向A端的，这时导体里的自由电子就会向A端运动，使A端的自由电子越来越多，从而带负电，B端的自由电子越来越少，从而带正电。如图9-31所示。外力使AB这段导体在磁场里运动的结果，导体中产

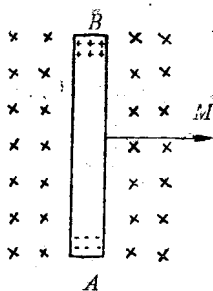


图 9-31

生了电动势，就象一节小电池一样。

在外电路没有接通时，导体中只有感生电动势而没有感生电流。用导线把外电路接通后，感生电流就从B端经外电路流向A端。

2、感生电动势的大小

在设计发电机时，主要是设法增大感生电动势。那么感生电动势的大小跟什么有关呢？

在图9-26的实验里，磁铁相对于线圈运动得越快，感生电流就越大，即感生电动势越大。换句话说，如果穿过闭合回路的磁通量变化得越快，那么，感生电动势也越大。

如果在时刻 t_1 穿过线圈的磁通量为 Φ_1 ，在时刻 t_2 穿过线圈的磁通量为 Φ_2 ，在时间 $\Delta t = t_2 - t_1$ 内，穿过闭合回路的磁通量变化量就是 $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ 。磁通量变化的快慢用单位时间内磁通量的变化 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 来表示，通常把 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 叫做磁通量的平均变化率。精确的实验表明，线圈中的感生电动势的大小，跟磁通量的平均变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 成正比。这个规律叫做电磁感应定律。电磁感应定律可以表示为

$$E = -K \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

式中 K 是一个比例常数，当 E 的单位用伏特、 Φ 的单位用麦克斯韦、 t 的单位用秒时， K 就为 10^{-8} ，上式可写为

$$E = -10^{-8} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (9-7)$$

如果把上式中 Φ 的单位改用韦伯，式中 $K=1$ ，于是上式就可写成

$$E = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (9-8)$$

如果有一个长为 l 的导体 AB ，在匀强磁场里以速度 V （平均速度）沿垂直于磁力线的方向运动（图 9-32），它在单位时间内扫过的面积就是 lV 。若磁场的磁感应强度为 B ，那么导体 AB 在单位时间内所切割的磁力线（在数值上即为整个闭合回路内

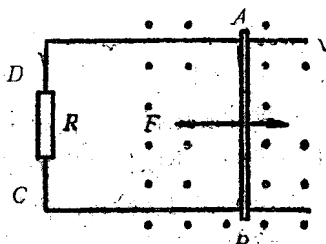


图 9-32

磁通量的平均变化率 $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$) 是 BlV 。所以式(9-8)可以写成

$$E = BlV. \quad (9-9)$$

式中 E 的单位是伏特， l 的单位是米， V 的单位是米/秒， B 的单位是韦伯/米²。如果把式(9-9)中 l 的单位改为厘米， V 的单位改为厘米/秒， B 的单位改为高斯，则

$$E = 10^{-8} BlV. \quad (9-10)$$

如果回路不是一匝而是 n 匝线圈，那么整个线圈就可以看作是 n 个相同的单匝回路串联而成的，线圈中总的感生电动势就是各匝感生电动势的总和，即

$$E = - n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}, \quad (9-11)$$

或

$$\bar{E} = n B l v \quad (9-12)$$

〔例〕在图9-32中，磁场方向指向读者，磁感应强度为1000高斯，导线长是40厘米，并以5米/秒的速度向右移动，问：(1) A、B两端哪一端的电位高？(2) 感生电动势多大？(3) 如果电阻 $R=0.5$ 欧姆（其余部分电阻不计），求出感生电流的大小，并指出感生电流的方向。(4) 磁场对导线 AB 的作用力多大？方向如何？(5) 机械功率和电功率各是多少？

解 (1) 应用右手定则判断出 AB 中的电流方向，是从 A 流向 B 的，所以 B 端的电位高*。

(2) 由式(9-10)可得出感生电动势

$$\begin{aligned} E &= 10^{-8} B l v \\ &= 10^{-8} \times 1000 \times 40 \times 500 \\ &= 0.2 \text{ (伏特)}. \end{aligned}$$

(3) 感生电流

$$\begin{aligned} I &= \frac{E}{R} \\ &= \frac{0.2}{0.5} \\ &= 0.4 \text{ (安培)}. \end{aligned}$$

电流的方向为 $B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 。

(4) 由式(9-3)可得出磁场对导体 AB 的作用力

$$\begin{aligned} F &= 0.1 B I l \\ &= 0.1 \times 1000 \times 0.4 \times 40 \\ &= 1600 \text{ (达因)}. \end{aligned}$$

F 的方向向左。磁场对导体的作用力，就是导体运动的阻

* 这里，导体 AB 相当于一个电源，AB 中通过的是内电路的电流。

力。因此，导体要向右作切割运动，就必须施加外力，并且等于1600达因。

(5) 由式(3-4)可得出机械功率

$$\begin{aligned} N &= FV \\ &= 1600 \times 500 \\ &= 8 \times 10^5 \text{ (尔格/秒)} \\ &= 0.08 \text{ (瓦)}. \end{aligned}$$

由式(8-16)可得出电功率

$$\begin{aligned} P &= IU \\ &= 0.4 \times 0.2 \\ &= 0.08 \text{ (瓦)}. \end{aligned}$$

这表明如果不计损失的话，机械能完全转换成电能。

第五节 调节器

在汽车和拖拉机电路中，发电机输出的多余的电能，贮存在蓄电池里，当发电机输出的电能不足时，蓄电池则帮助供电，这就解决了如何合理地分配电能的问题。但是，当发动机转速变化，发电机的输出电压也随着发生变化时，就产生了新的问题：如果发电机输出电压过高，可能烧毁用电器；如果发电机的输出电压过低，蓄电池就会对发电机放电，烧毁发电机。对此要求有一个控制设备，即调节器，来解决上述矛盾。

一、构造

目前国产直流发电机配用的调节器，多数为三组式，即包括截流

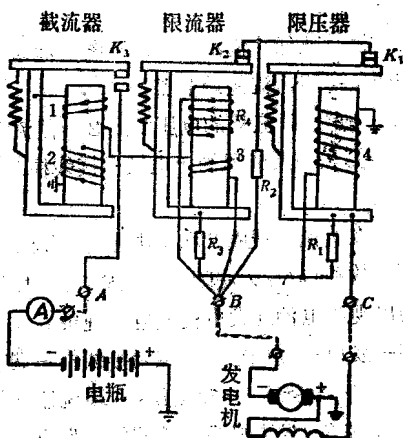


图 9-33

器，限流器、限压器。图 9-33 为 FT81 型调节器的线路图。

1、截流器 在铁芯上绕有电流线圈 1 及电压线圈 2，在截流器架顶上有一个振臂， K_3 的活动触头连在振臂上，固定触头与“电池”接线柱 A 连接。 K_3 是常开触点。

2、限流器 在铁芯上绕有一个线圈 R_4 ，它称为平衡线圈或平衡电阻。

R_4 的一端与铁芯连接，另一端与“电枢”接线柱 B 连接。这个铁芯上还绕有一个线圈 3，它的一端与线圈 1 相接，另一端与“电枢”接线柱 B 相连接。

在限流器架底连接一个加速电阻 R_3 ，另一端与附加电阻 R_1 相连接。限流器架上的振臂与 K_2 的活动触头连接。 K_2 的固定触头与 K_1 的固定触头连接，并与附加电阻 R_2 的一端相连， R_2 的另一端接在“电枢”接线柱 B 上。 K_1 和 K_2 均为常闭触点。

3、限压器 在铁芯上绕有电压线圈 4，它的一端与附加电阻 R_1 连接，另一端与调节器的壳体连接（即接地）。限压器底架与 R_1 的一端连接并与“磁场”接线柱 C 相连接，架顶联一振臂及 K_1 的活动触头。

三组调节器都与壳体绝缘，振臂、触点、支架都用金属做成。振臂与铁芯之间的间隙一空气隙，是可以调整的，使用时必须调在规定的范围内。三个振臂的尾部都有一个可以调节的弹簧。

二、工作原理

按工作过程，可分为以下四种情况：

1、发电机转速低 当发电机转速低，输出电压低于蓄电池电压时，发电机输出的电流主要按两条通路，流经调节器：

第一条为：发电机正电刷→“地”→截流器的电压线圈2→截流器的电流线圈1→限流器的电流线圈3→调节器的“电枢”接线柱B→发电机负电刷。

由于发电机产生的电压低，在截流器线圈2和1中形成的磁场弱，不能把截流器的振臂吸下，故触点 K_3 无法闭合。这样，发电机与蓄电池不成通路，也就不会出现蓄电池向发电机放电的现象。

第二条为：发电机正电刷→发电机励磁线圈→磁场接线柱→调节器“磁场”接线柱C→限压器支架→触点 K_1 →触点 K_2 →限流器支架→平衡线圈 R_4 →调节器电枢接线柱B→发电机电枢接线柱→发电机负电刷。

虽然限流器和限压器线圈中都有电流通过，但因其很小，产生的磁场很弱，不能吸下振臂。所以此时限流器和限压器均不工作。

在电路中，发电机此时不向用电器供电，蓄电池向各用电器供电。

2、发电机转速正常 当发电机转速增高到一定数值时，输出电压高于蓄电池电压。线圈1和2产生的磁场增强，吸下截流器振臂，使触点 K_3 闭合。此时发电机与调节器除了仍有上述两条通路外，又有一条新的通路：

发电机正电刷→“地”→蓄电池（及用电设备）正极→调节器电池接线柱A→触点 K_3 →截流器支架→截流器电流线圈1→限流器电流线圈3→调节器“电枢”接线柱B→发电机电枢接线柱→发电机负电刷。

当电流经线圈1时，所产生的磁场与原有磁场方向相同，加大了铁芯吸引振臂的力，使 K_3 闭合得更紧。在电路中，此时发电机向用电设备供电，并给蓄电池充电。

3、发电机转速高 发电机转速继续增高，致使输出电压过高

时，有可能烧毁用电设备，这时需要降低发电机励磁线圈中电流的数值，使磁通减少，从而使输出电压下降。

发电机与调节器的第三条通路为：发电机正电刷→“地”→限压器电压线圈4→加速电阻 R_3 →限流器支架→平衡线圈 R_4 →电枢接线柱→发电机负电刷。

前面提到，当发电机输出电压低时，限压器不工作，是因为线圈中的电流很小。

当转速增高时，电压增大。但是当输出电压过高时，用电设备有被烧毁的可能，因为必须使过高的电压下降。此时线圈4中的电流增大，磁场增强，达到某一定值时，将振臂吸下，使触点 K_1 分开，于是，原来励磁线圈所在的电路断开，改为：

充电发电机正电刷→励磁线圈→调节器磁场接线柱C→限压器支架→ R_1 → R_3 →限流器支架→ R_4 →调节器“电枢”接线柱B→充电发电机负电刷。

与原来的电路对比，可以看出，此时在电路里串联了电阻 R_1 和 R_3 ，在 R_1 和 R_3 两端产生了电压降，使励磁线圈两端电压降低。如前所述，在发电机转速不变的情况下，它输出的电压却低了下来。电压降低后，电压线圈4中的电流立刻变小，使铁芯磁性迅速减弱，振臂又被弹簧拉起， K_1 重新闭合。于是又会出现上述过程： K_1 分开，电压下降， K_1 再闭合……如此迅速开闭，便把发电机输出电压保持在正常范围内。

4、电流超过规定范围 当用电设备增加或电路中有短路时，就会使发电机输出电流增大。限流器中的电流线圈3，由于电流增大致使磁场很强，于是吸下振臂，使 K_2 分断。 K_2 分开后，在励磁线圈的通路中，便自动加入附加电阻 R_2 ，降低了励磁线圈两端的电压，发电机输出电压也随之下降，电流变小，使发电机不致过热而烧毁。从图中可以看出，励磁线圈通路从发电机正电刷→励磁线圈→磁场接线柱→限压器支架，再分成两条支路，第一条为：

限压器支架→ R_1 → R_3 → R_4 →电枢接线柱→发电机负电刷。

第二条为：限压器支架 $\rightarrow K_1 \rightarrow K_2 \rightarrow R_4 \rightarrow$ 电枢接线柱 $\rightarrow$ 发电机负电刷。

当 K_2 打开后，第二条改为：

限压器支架 $\rightarrow K_1 \rightarrow R_2 \rightarrow$ 电枢接线柱 $\rightarrow$ 发电机负电刷。

假使此时发电机转速极高，如前所述， K_1 也将打开，那么磁场线路就只有第一条通路， R_1 、 R_3 、 R_4 全部接入，使电压显著降低。

截流器在发电机电压达到12.2~13.2伏时，自动将充电电路接通，而当发电机电压低于蓄电池电压0.5伏时，自动将电路切断。

限流器把发电机输出电流限制在12~14安培。

限压器把发电机输出电压保持在13.8~14.8伏。

为了保证调节器能在上述正常范围内工作，必须对它的空气隙进行调整。使触点闭合时，铁芯与振臂间的空气隙分别为：

限压器1.4~1.5毫米；限流器1.4~1.5毫米；截流器0.35~0.45毫米（而在触点分开时为0.7~0.9毫米。触点间隙为0.4~0.6毫米）。

第十章 交流电路

第一节 交流电的产生

现代工农业生产和日常生活中的动力用电和照明用电，大都是交流电。交流电有许多直流电所不具备的优点，例如交流电便于远距离输送；交流电机比直流电机结构简单，运行可靠；如果某些场合需要直流电，象电镀、电解等，还可以用整流设备使交流电转换成直流电。

我们知道，利用电磁感应现象能够产生电流，现在就来分析一下这种电流的产生过程。

一、交流电是怎样产生的？

图 10-1 是一个最简单的发电机模型，它的主要部分是线圈 $abcd$ 和磁极 N 、 S 。此外还有滑环 K 、 L 和电刷 A 、 B 。电流计 G 通过滑环和电刷与线圈 $abcd$ 组成闭合回路。我们使线圈 $abcd$ 在磁场里转动，当线圈的 ab 边和 cd 边切割磁力线的时候，根据电

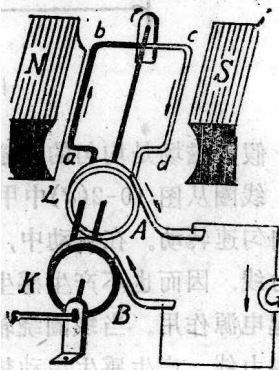


图 10-1

磁感应原理，线圈里就会产生感生电动势，闭合回路里就有了感生电流。线圈里产生的感生电动势和闭合回路里的感生电流具有什么特点呢？下面我们来研究它们的变化规律。

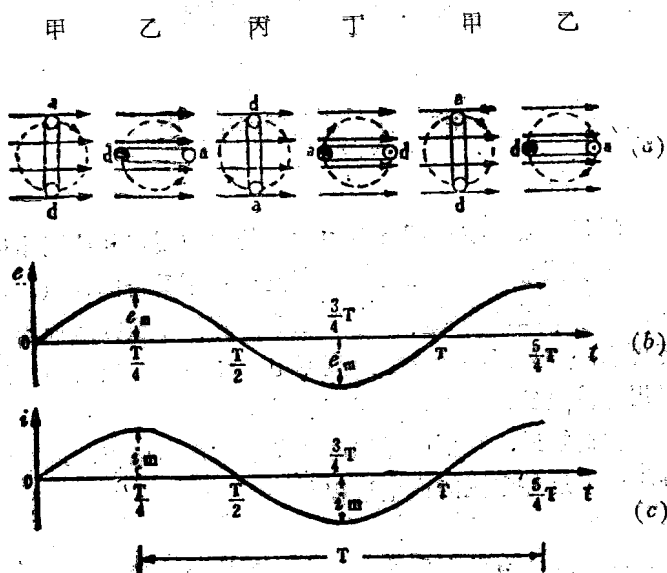


图 10-2

假定磁场是均匀的，磁力线的方向沿水平方向自左向右，线圈从图 10-2(a)中甲的位置开始以角速度 ω 按顺时针方向匀速转动。在转动中，线圈的 bc 边和 ad 边始终不切割磁力线，因而也不产生感生电动势，它们只起导线的作用而不起电源作用。当线圈绕轴转动时，线圈的 ab 边和 cd 边切割磁力线，产生感生电动势，结果就成为两个串联着的电源，并在闭合回路中形成感生电流。

当线圈从位置甲开始转动时, ab 边向右运动, cd 边向左运动, 这时它们的运动方向和磁力线平行, 都不切割磁力线, 因此线圈的感生电动势和感生电流都等于零。转过了这个位置以后, ab 边沿自上而下的方向切割磁力线, cd 边沿自下而上的方向切割磁力线, 因此线圈里就开始有了感生电动势和感生电流。

经过 t 秒钟后, 线圈转过的角度是 ωt , 如图 10-3 所示。此时, ab 边和 cd 边切割磁力线的速度是 $V \sin \omega t$ 。这是由于导线作圆周运动的线速度, 与磁场方向一般情况下是不垂直的, 因而提供感生电动势的切割速度, 只是线圈匀速转动时线速度在垂直于磁场方向的分量 (平

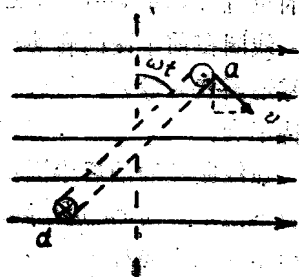


图 10-3

行于磁场方向的分量对感生电动势无贡献), 而垂直于磁场方向的速度分量, 在线圈匀速转动的过程中是按正弦规律随时间变化的。 ab 边和 cd 边的感生电动势都等于 $10^{-8} B l V$ 伏特。这里, l 就是 ab 边或 cd 边的长度。根据右手定则可以看出线圈中电流的方向为 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ 。

随着角度 ωt 的增大, ab 边和 cd 边切割磁力线的速度 $V \sin \omega t$ 也逐渐增大, 产生的感生电动势也增大, 这是因为 B 、 l 、 V 都是恒量, 感生电动势只随 $V \sin \omega t$ 而变化。当 $\omega t = 90^\circ \left(\frac{T}{4} \right)$ 时, 即图中乙的位置, $\sin \omega t = \sin 90^\circ = 1$, 切割磁

力线的速度等于 V 。这时 ab 边和 cd 边里的感生电动势最大，都等于 $10^{-8} B l V$ 伏特。此时线圈里的感生电流也最大。

继续转动线圈， ab 边仍然自上而下地切割磁力线， cd 边仍然是自下而上地切割磁力线，因而线圈里的感生电流方向不发生变化。但是随着切割速度 $V \sin \omega t$ 的逐渐变小，感生电动势和感生电流也逐渐变小。当 $\omega t = 180^\circ \left(\frac{T}{2} \right)$ 时，即图中丙的位置， $V \sin \omega t = 0$ ，于是感生电动势和感生电流也都等于零。线圈在前半圈的转动过程中，感生电动势和感生电流都从零逐渐变为最大，然后又逐渐减小到零，感生电流的方向保持不变。

在线圈转动的后半圈里， ab 边切割磁力线的方向变成了自下而上，而 cd 边切割磁力线的方向变成了自上而下，感生电流的方向变为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 。

在线圈从 $\omega t = 180^\circ$ 转到 $\omega t = 270^\circ$ 的过程中，随着角度 ωt 的增大，反向感生电动势和电流也逐渐增大。当到达图中丁的位置时，它们又重新达到最大值。

线圈从 $\omega t = 270^\circ$ 转到 $\omega t = 360^\circ$ 的过程中，感生电动势和感生电流随着 ωt 的增大而逐渐减小；当 $\omega t = 360^\circ$ ，即线圈回到甲的位置时，它们又都减小到零。

在线圈转动的后半圈里，感生电流的方向和前半圈相反，感生电动势和感生电流都由零逐渐变到反向最大值，然后又逐渐减小到零。

线圈 $abcd$ 转动的时候，每当线圈平面和磁力线垂直，即处在图中甲和丙等位置时，感生电动势和感生电流都为零，我们称线圈所在的这个平面为中性面。线圈经过中性面

后，感生电动势和感生电流的方向就要改变一次。线圈每转一周，两次经过中性面，电流的方向要改变两次。线圈在磁场里不停地转动，感生电动势和感生电流的变化就不断地重复出现。由于线圈的转动是匀速的，每转一周所经过的时间是一定的，所以感生电动势和感生电流每重复一次变化所经过的时间也是相同的。因此我们说感生电动势和感生电流的方向和大小都在作周期性的变化。这样的电流就叫做交变电流。

二、交流电的表示方法

如果分别把感生电动势的每一时刻的数值（瞬时值）记录下来，并且用横坐标表示时间，用纵坐标表示感生电动势，那么就可以画出如图10-2(b)所示的曲线。这条曲线清楚地显示出感生电动势的大小和方向随时间变化的规律。如果横坐标的上方表示正方向的感生电动势，那么横坐标的下方就表示反方向的感生电动势。象这样的曲线，叫做正弦曲线，因为它表示感生电动势是随时间按正弦规律变化的。这样，交流电就可以用正弦曲线来表示。

图 10-1 所示的整个线圈所产生的感生电动势为

$$e = 2 \times 10^{-8} B l v \sin \omega t$$

式中 $2 \times 10^{-8} B l v$ 就是线圈中感生电动势的最大值，并用 E_m 表示，这个值又叫做感生电动势的振幅。把 E_m 代入上式就得到

$$e = E_m \sin \omega t. \quad (10-1)$$

在交流电动势 e 的作用下，闭合回路中就有交流电流 i

通过，如果电路的电阻为 R ，那么

$$i = \frac{e}{R} = \frac{E_m}{R} \sin \omega t.$$

式中 $\frac{E_m}{R}$ 是电流强度的最大值，也叫做电流强度的振幅，用 I_m 表示。把 I_m 代入上式就得到

$$i = I_m \sin \omega t. \quad (10-2)$$

可见交流电流也是随时间按正弦规律变化的，如图 10-2 (c) 的曲线所示。

综上所述，交流电无论用正弦曲线表示，还是用公式表示，都能准确、清晰地揭示出它的规律性。

三、交流电的几个基本概念

交流电的变化规律比直流电复杂，因此必须从几个方面来认识它。

1、交流电的周期和频率

线圈每转动一周，交流电（电动势和交流电流）的变化也重复一次，习惯上我们称为交流电完成一次全振动。交流电完成一次全振动的的时间，叫做交流电的周期，周期用 T 表示，单位是秒。我国发电厂所发出来的交流电，周期是 $1/50$ 秒，也就是说在 1 秒钟内能完成 50 次全振动。在 1 秒钟内交流电振动的次数，叫做交流电的频率。频率用 f 表示，单位是赫兹。显然，周期和频率是互为倒数的，即

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{或} \quad T = \frac{1}{f}.$$

交流电的频率就是

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1/50} = 50 \text{ (赫兹)}.$$

2、交流电的有效值

如果让交流电流 i 和直流电流 I 分别通过阻值为 R 的电阻，在相同的时间内，倘若这两种电流在 R 上所产生的热量相等，例如都是 Q 卡，我们就把直流电流 I 的大小称为交流电流 i 的有效值。换言之，交流电流的有效值，和交流电本身在电路中的热效应方面是等效的。

交流电的瞬时值时刻在变化，所以不能用它来表示交流电的大小；最大值在一个周期里只出现两次，也不能用它来表示交流电的大小。此外它们都不能用仪表直接测量出来。在实际电路中交流电压和电流的数值往往不是由计算得来，而是用仪表测出来的，用仪表测得的数值正是有效值。因此，通常总是用有效值来表示交流电的大小。交流电流有效值用 I 表示。

同样，交流电压的有效值，也就是能够产生同样热效应的直流电压的数值。交流电压的有效值用 U 表示。

适当的计算证明，交流电的有效值等于最大值的

$\frac{1}{\sqrt{2}}$ ($=0.707$) 倍，因此得出

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad (10-3)$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad (10-4)$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}. \quad (10-5)$$

各种交流电气设备的额定电压和额定电流，指的都是有

效值。例如，普通照明电路的交流电压是220伏特，这个“220伏特”就是有效值，线路电压的最大值是 $\sqrt{2} \times 220$ 伏特 ≈ 310 伏特。又如，某电动机的额定电流是5安培，指的也是有效值，其最大值是 $\sqrt{2} \times 5$ 安培 ≈ 7 安培。

3、交流电的相位和相位差

线圈在磁场中按顺时针方向转动的时候，线圈平面与中性面在任一时刻的夹角，叫做该时刻线圈中感生电动势的相位。例如，线圈从中性面开始以角速度 ω 匀速转动，到 t 秒末转过的角度是 ωt 。这个角度 ωt 就是 t 时刻感生电动势的相位（图 10-3）。

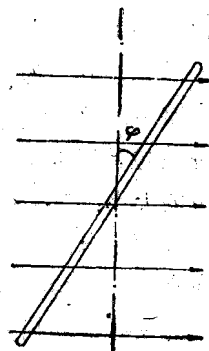


图 10-4

如果在开始转动时，线圈平面不跟中性面重合而有一个夹角 φ ，如图 10-4所示，经过 t 秒钟，它转过的角度虽然仍为 ωt ，但它和中性面的夹角却不再是 ωt ，而是 $\omega t + \varphi$ 。于是线圈中的感生电动势便为

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi).$$

式中 $\omega t + \varphi$ 是 t 时刻的相位， φ 叫做初相位，或者简称为初相。 ω 叫做交流电的角频率。

倘若在同一转动轴上装有两个相同的线圈1和2，它们开始转动时和中性面之间的夹角分别是 φ_1 和 φ_2 （图10-5），那么在 t 时刻的电动势分别是

$$e_1 = E_m \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$e_2 = E_m \sin(\omega t + \varphi_2).$$

这两个电动势的最大值、角频率都是相同的，但它们不能同时达到最大值或零值，如图 10-6 所示。它们的区别，是相位不同。我们把两者相位之差

$$(\omega t + \varphi_1) - (\omega t + \varphi_2) = \varphi_1 - \varphi_2$$

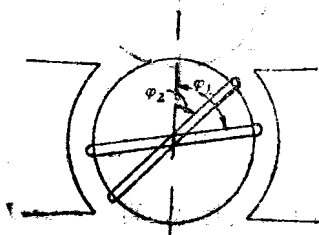


图 10-5

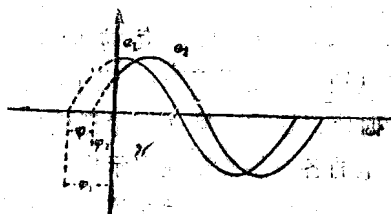


图 10-6

叫做相位差，用 φ 表示。从上式可以看出，频率相同的两个电动势的相位差，也就是两个初相位的差。

从图 10-6 中可以看出，初相大的 e_1 比初相小的 e_2 先达到最大值，通常说 e_1 比 e_2 超前 φ ，或者说 e_2 比 e_1 滞后 φ 。如果两个电动势同时达到最大值（或零值），即 $\varphi = 0$ ，我们就说这两个交流电动势“同相”。

四、交流电的矢量表示法

按正弦规律变化的交流电，除了可以用一个三角函数式或正弦曲线来表示以外，还可以用一个旋转矢量来表示。

用旋转矢量表示交流电（如 $u = U_m \sin \omega t$ ）的方法是这

样的：在横轴上画一矢量，长度等于交流电的最大值 U_m ，使它按反时针方向旋转，旋转的角速度等于交流电的角频率 ω ，如图 10-7 所示。不难看出，在任一时刻 t ，旋转矢量在纵轴上的投影是 $U_m \sin \omega t$ 。即，旋转矢量在纵轴上的投影等于交流电的瞬时值。这样，旋转矢量就把交流电的各个量确切地表示出来。

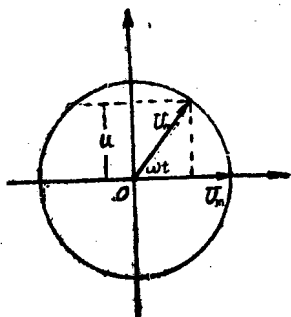


图 10-7

用旋转矢量表示交流电时，为了方便起见，可以不画直角坐标。如果只表示一个单一交流电，那么线段的长度和箭头指向可以任意选取；如果表示两个以上的交流电，应该使矢量的长度分别等于交流电的有效值，而夹角应该等于其相位差。图 10-8 是两个交流电的曲线图和矢量图。

在电路计算中，经常遇到几个交流电的加减运算，如果用矢量表示交流电，电路计算就变得比较简便。但是这里必须再次指出，矢量的加减运算不象标量那样简单，它需要用几何方法——平行四边形法则。

〔例〕 设流经分支点 M 的两个角频率相同的分支电流 i_1 和 i_2 ，它们的有效值分别是 $I_1 = 8$ 安培， $I_2 = 6$ 安培。 i_1 和 i_2 的相位差为 90° ，如图 10-9(a) 所示。试求流经 M 点的合成电流 i 的有效值是多少安培。

解 按照两电流的大小比例和相位差，作一个平行四边形，如图 10-9(b)。从图中可以看出 ABC 为一直角三角形，斜边 AB 的长度即表示合电流 i 的有效值 I 。根据勾股定理可得

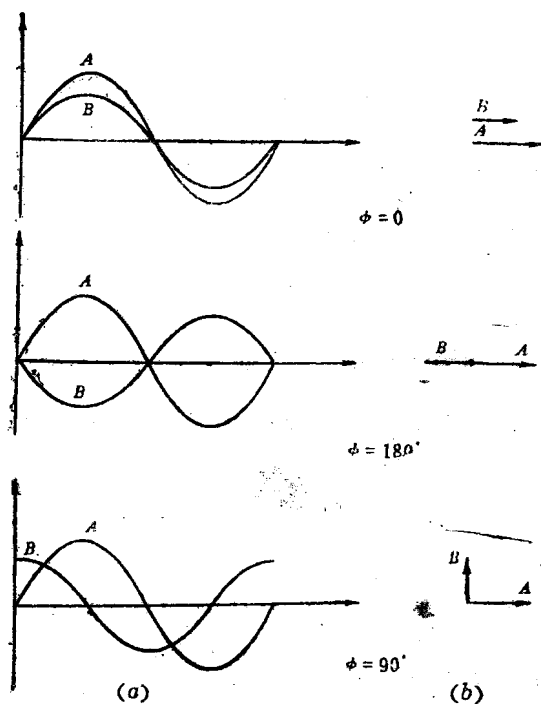


图 10-8

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \text{ (安培)}.$$

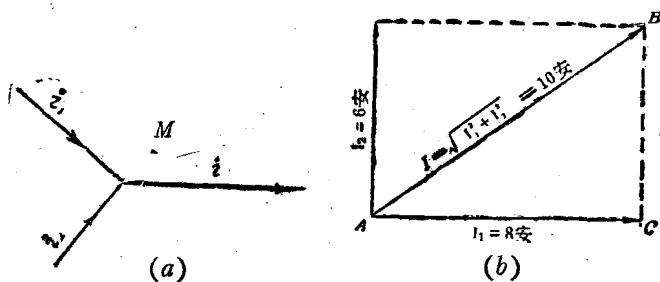


图 10-9

第二节 交流电路

把用电器接在交流电源上所组成的电路叫做交流电路。接在交流电路上的用电器可分为电阻、电感和电容三种基本类型。

一、纯电阻电路

我们经常使用的白炽灯、电炉、电烙铁等，它们的电阻丝是由电阻率高的材料制成的，如钨、康铜等。单把这类用电器接入电路，影响电流大小的主要因素就是负载的电阻 R (图10-10a)。这种电路叫纯电阻电路。

设加在负载电阻 R 两端的交流电压为

$$u = U_m \sin \omega t,$$

它的变化规律如图 10-10(b) 的曲线 u 所示。电路里电流的瞬时值，可根据欧姆定律算出，即

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t.$$

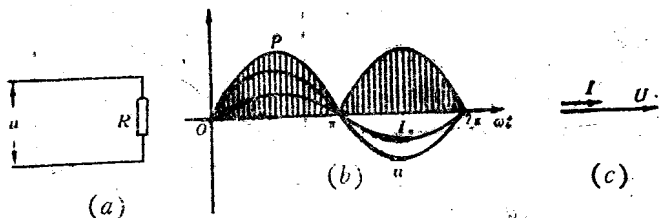


图 10-10

由此可见, i 跟着 u 按同一频率的正弦规律变化, 各个时刻的瞬时值为 u 的 $\frac{1}{R}$ 。它们同一时刻达到最大值, 同一时刻达到零值。也就是说, 在纯电阻电路中, 电流与电压相位相同, 如图中 (c) 的矢量所示。

上式中, 电压的最大值 U_m 与电阻 R 之比就是电流 i 的最大值 I_m , 即

$$I_m = \frac{U_m}{R},$$

因此电路里电流的瞬时值 i 又可写成:

$$i = I_m \sin \omega t.$$

将 $I_m = \frac{U_m}{R}$ 的两端同时除以 $\sqrt{2}$, 就得出电路中电流和电压有效值的关系:

$$\frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{\frac{U_m}{R}}{\sqrt{2}},$$

$$I = \frac{U}{R}. \quad (10-6)$$

其中 $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$, $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ 。 I 和 U 分别为电流 i 和电压 u 的有效值。在纯电阻电路中, 电流的有效值等于电阻两端电压的有效值与电阻之比。在形式上和直流电路中一段电路的欧姆定律完全相同。

在任一时刻, 负载 R 所消耗的电功率 p 等于该时刻电流 i 的瞬时值和电压 u 的瞬时值的乘积, 即 $p = iu = I_m \sin \omega t \cdot U_m \sin \omega t = I_m U_m \sin^2 \omega t$ 。从这可以看出, 功率 p 不再按正弦规律变化了。把这个乘积在图上画出来, 就是图 10-10 中的

曲线 p 。由于 i 和 u 的相位相同，所以 p 在任何时刻的数值都是正的（在负半周里， i 和 u 同为负值，因此它们乘积也是正的），这说明负载总是从电源取用电能的。

瞬时功率 p 时刻在变，既不利于计算又不便于测量，通常总是用一个周期的平均功率来表示，这个功率又叫做有功功率，用 P 表示，单位是瓦（或千瓦）。在纯电阻电路中，有功功率是电流有效值和电压有效值的乘积，即

$$P=IU, \quad (10-7)$$

或者表示为

$$P=I^2R \text{ 及 } P=\frac{U^2}{R}.$$

电源实际消耗的电能，等于有功功率和时间的乘积。

〔例〕在电压 $u=310\sin\omega t$ 伏的交流电路中，接入一盏电阻为 1210 欧的电灯，写出通过电灯的电流瞬时值，并计算电灯的功率。

解 通过电灯的电流瞬时值 i 是电压瞬时值与电阻之比，即

$$i=\frac{310}{1210}\sin\omega t\approx 0.26\sin\omega t(\text{安}).$$

要计算有功功率，必须先求出电流和电压有效值。

$$U=\frac{U_m}{\sqrt{2}}=\frac{310}{\sqrt{2}}=220(\text{伏}),$$

$$I=\frac{220}{1210}(\text{安}).$$

于是可得出有功功率

$$P=IU=\frac{220}{1210}\times 220=40(\text{瓦}).$$

本题中因为已知电阻 R 的数值, 求出电压有效值 U 后, 可以直接用公式 $P = \frac{U^2}{R}$ 进行计算。

通过上面的分析可以看出, 在我们使用的电灯里, 通过的电流时刻在变化, 不仅电流的方向在变, 电流的大小和消耗功率的多少都在变。但是为什么看不出电灯的明暗在发生变化呢? 因为我国(及多数国家)在工业动力及照明中所使用的交流电, 标准频率为50赫兹, 即每秒钟要发生50次变化。这种变化是很快的, 灯丝的温度变化跟不上, 显示出一种“热惯性”, 所以电灯的明暗变化显现不出来。

二、电感电路

电动机、变压器里都有线圈, 如果测量一下它们的直流电阻, 就会发现阻值并不大。例如, 广播上常用的扩音机, 是在220伏的交流电压下工作的, 电源变压器的直流电阻却只有几十欧姆。它能在220伏交流电压正常工作, 如果改接在220伏的直流电源上, 变压器就会因发高热而被烧毁。这种现象应该如何解释呢? 还得从交流电的变化上去找原因。

1. 自感

当把线圈接在交流电源上(图 10-11a), 通过线圈的电流时刻在变, 交变电流所产生的磁通当然也在时刻发生变化。我们知道, 闭合回路里磁通量发生变化时, 就有感生电动势产生, 所以, 接在交流电路上的线圈里, 会出现感生电动势。这个电动势的特点在于: 它是由线圈本身电流的变化而感应出来的, 因此叫做自感电动势, 用 E_L 表示。接在交

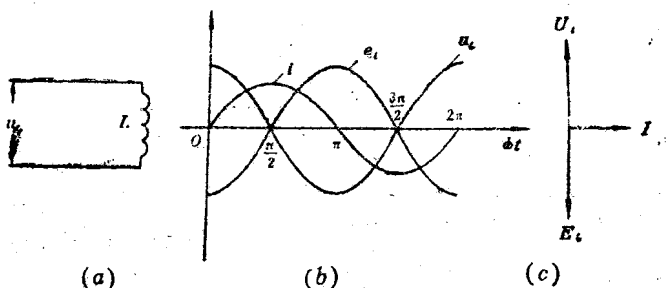


图 10-11

流电路里的线圈中产生自感电动势这个现象，叫做自感现象。平时在拉开闸刀开关时会发生火花，就是因为在拉开开关时，电流突然中断，电路里产生的自感电动势所引起的。

如果通过线圈的电流在时间 Δt 内的变化为 ΔI ，那么 $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ 就叫做电流的平均变化率。实验指出，自感电动势的大小和电流的平均变化率成正比，即

$$E_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (10-8)$$

式中的 L 叫做自感系数，简称电感，单位是亨利。亨利这个单位是这样规定的：

一个线圈，如果通过它的电流在 1 秒钟内变化 1 安培，在它里面产生的自感电动势是 1 伏特，那么这个线圈的自感系数就是 1 亨利。亨利用 H 表示。而且还规定

$$1 \text{ 亨利} = 1000 \text{ 毫亨 (mH)},$$

$$1 \text{ 毫亨} = 1000 \text{ 微亨 (\mu H)}.$$

电感 L 表示线圈产生自感电动势的能力，它与线圈的匝数、长度、截面积和线圈里有没有铁芯有关。

2、感抗

自感电动势总是起着阻碍电流变化的作用：电路里电流增大，自感电动势就阻碍电流增大；电路里电流减小，自感电动势就阻碍电流减小。

自感电动势是由于电流变化而出现的，反过来又阻碍电流的变化，因此自感电动势产生一个时刻反抗电流变化的阻力，不克服这种阻力，正弦交流电就不能通过线圈。因此在线圈两端所加上的正弦交流电压 u_L ，必须大小与 e_L 相等，方向与 e_L 相反，如图 10-11(b)、(c) 所示。

自感电动势所产生的阻力，也就是线圈对交流电的阻力，叫做感抗，用 X_L 表示。线圈感抗的大小和自感系数、频率有关。它们的关系是：

$$X_L = 2\pi fL. \quad (10-9)$$

式中， f 的单位用赫兹， L 的单位用亨利， X_L 的单位是欧姆。感抗与电阻是有共同之处的，它们都是一种对电流的阻力。

在电感电路中，电流的有效值 I 和加在线圈两端的电压有效值 U 及感抗的关系，仍然保持着欧姆定律的形式(参阅图 10-12)：

$$I = \frac{U}{X_L}. \quad (10-10)$$

但是，要注意电流与电压的相位不同，电压的变化在相位上超前于电流 $\frac{\pi}{2}$ 。

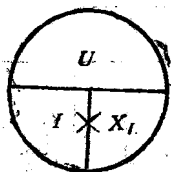


图 10-12

线圈本身是有电阻的，因此纯电感电路实际上并不存

在。但是，如果电路中的电阻很小，可以忽略不计的话，就能看作纯电感电路。例如，无线电电路中常用的高频扼流圈，磁棒上的线圈等，都可以当作纯电感元件。

从公式 $X_L = 2\pi fL$ 中可以看出，当不同频率的电流流经电感线圈时，感抗的大小也不相同。电流的频率越高，感抗也越大，电流的频率越低，感抗越小。也就是说，频率越高的电流，越不容易流过电感线圈，频率越低的电流，越容易流过电感线圈。对于直流电，频率 $f=0$ ，因而感抗 $X_L=0$ ，最容易通过电感线圈（这就是不能把扩音机变压器接在直流电源上的原因）。扼流圈就是利用这个道理制成的。它能阻挡较高频率的电流，不让其通过，而放过直流或频率较低的电流。根据不同需要，又分别设计出高频扼流圈和低频扼流圈。低频扼流圈即使对低频电流也产生很大阻力，使之不能通过，如整流滤波电路中的扼流圈，就起这个作用。图 10-13 是几种常见的电感器。

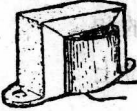
名称	符号	实物
高频线圈		
低频线圈		

图 10-13

3、功率

电感电路的瞬时功率等于电流和电压瞬时值的乘积，即

$$\begin{aligned}
 p &= iu = I_m \sin \omega t \cdot U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \\
 &= I_m U_m \sin \omega t \cos \omega t \\
 &= \frac{I_m U_m}{2} \cdot 2 \sin \omega t \cos \omega t \\
 &= \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \sin 2\omega t \\
 &= IU \sin 2\omega t.
 \end{aligned}$$

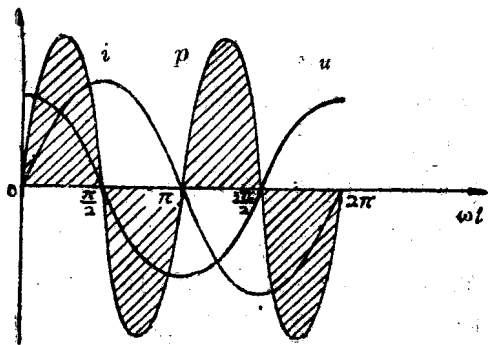


图 10-14

如果将上面的结果用曲线表示，就得到图 10-14 中的瞬时功率曲线 p 。瞬时功率也是正弦函数，但它的频率是电流的两倍。在 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 和 $\pi \sim \frac{3\pi}{2}$ ， p 是正值，这表示线圈从电源吸收能量，并把电能转变成磁场能，储藏在线圈周围的磁场里。

在 $\frac{\pi}{2} \sim \pi$ 和 $\frac{3\pi}{2} \sim 2\pi$ ， p 是负值，这表示线圈向电源回授能

量，即线圈把磁场能转换为电能并送回电源。以后就这样循环不止。显然，瞬时功率在一周内的平均值——有功功率 P 等于零。所以，在纯电感电路中，电流在流动过程中不消耗能量，只是周期性地电能和磁能的相互转换。

在纯电感电路中，瞬时功率的最大值（即其振幅 IU ），叫做无功功率。它表示电源与电路间能量转换的快慢，无功功率用 Q_L 表示，它等于电流和电压有效值的乘积，即。

$$Q_L = IU,$$

或者
$$Q_L = I^2 X_L \quad \text{及} \quad Q_L = \frac{U^2}{X_L}.$$

〔例〕 有两只扼流圈，一只自感系数是10亨利，通过50周/秒的交流电；另一只为2毫亨，通过1000千周/秒的交流电。它们的感抗各是多少？

解 （1）10亨利扼流圈在通以50周/秒的电流时，感抗由式(10-9)可得

$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 50 \times 10 = 3140 \text{ (欧)}.$$

这实际上是一只扩音机电源滤波电路用的低频扼流圈，它的电感量很大，对低频(50周/秒)呈现很大的感抗，使其不易通过。

（2）2毫亨扼圈流在通以1000千周/秒的交流电时，感抗也可由式(10-9)得出

$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 1000000 \times 2 \times 10^{-3} = 12560 \text{ (欧)}.$$

这是无线线路常用的高频扼流圈，它对高频电流呈现极大的感抗，使其不易通过，但可以让低频电流顺利通过。

三、电容电路

两个彼此绝缘而又靠近的导体,就是一个电容器。例如,两块金属板(也叫极板) A 和 B ,中间用绝缘材料(如空气、云母等)隔开,就作成了一简单的电容器——平行板电容器(图10-15a)。电容器是电工和无线电技术中最常用的元件之一。

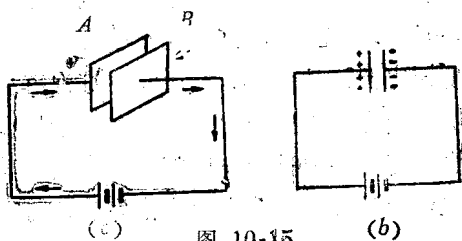


图 10-15

1、电容器的特性

如果把电容器的极板分别接到电池的正、负两极上,那么,与电池正极连接的极板 A 上的自由电子,就会受电池正极的吸引而流向正极,因而使 A 极带正电; B 极从电池的负极得到大量电子而带负电。电容器的 A 、 B 两极间也就会形成电场。电路里电荷继续流动的结果,使 A 、 B 两极带的电量越来越多,电场也越来越强。这个电场的方向是阻止电荷流动的。当 AB 两极间的电压与电池电压相等时,电荷不再流动。上述过程叫做电容器“充电”。如图10-15(b)所示。

如果把电池从电路里取出,用导线把充电后的两极板连接起来,电路中便有电流通过,但方向和充电时相反。随着电流的流动, AB 两极板间的电压逐渐降低。当两极板上的

正负电荷完全消失后，电路中就不再有电流通过。在这个过程中， A 、 B 两极板的作用相当于一个电池。这个过程叫做电容器“放电”，如图 10-16 所示。

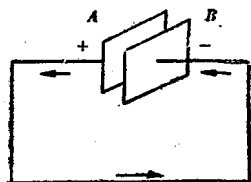


图 10-16

电容器充电完毕以后，电路就不再会有电流通过，相当于开路。因此，我们把一个灯泡与电容器串联后接在电路里（图 10-17），很快就充电完毕，灯泡也不会发光。但如果把直流电源换成交流电源，如图 10-18 所示，灯泡就会亮起来。这是为什么呢？因为交流电的大小和方向不断地变化着，电容器的两端也跟着交替地进行充电放电，电路中就不停地有电流通过。电流流过灯泡，就会使灯泡发光。综上所述，电容器有隔断直流、通过交流的作用。这就是电容器的特性。

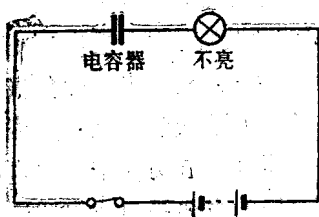


图 10-17

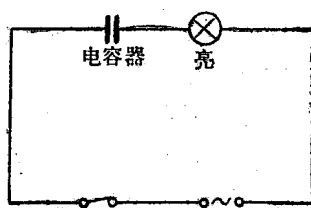


图 10-18

2、电容器的电容量

电容器能够容纳电荷。它容纳电荷的能力，用电容量（简称作电容）来表示。对一个电容器来说，加在它两端的电

压 U 增大几倍，电容器所容纳的电量 Q 便增大几倍，即电量 Q 与电压 U 的比值是常数。如果 C 表示这个比值，则

$$C = \frac{Q}{U}. \quad (10-11)$$

从上式可以看出， C 表示对电容器每加单位电压（1 伏）时，所能容纳的电量的多少（库仑）， C 越大，说明容纳电荷的能力越大。我们把比值 C 叫做电容量。

式中，如果电量单位用库仑，电压单位用伏特，电容的单位就是法拉。法拉用符号 F 表示。

法拉这个单位太大，常用电容器的电容量都很小，因此又规定

$$1 \text{ 微法} (\mu F) = 10^{-6} \text{ 法拉} (F),$$

$$1 \text{ 微微法} (\mu\mu F \text{ 或 } pF) = 10^{-6} \text{ 微法} (\mu F).$$

3、电容器的种类

电容器的种类很多，如果按电容量能否改变，可分为固定电容器和可变电容器；如果按介质材料，又可分为：

- (1) 气体介质电容——如空气可变电容器。
- (2) 液体介质电容器——如油质电容器和电解电容器等。
- (3) 无机介质电容器——如云母、陶瓷等电容器。
- (4) 有机介质电容器——如纸介、聚苯乙烯、玻璃釉等电容器。

图 10-19 是几种常用电容器及其符号。

在固定电容器上，一般都印有一些标志来表示电容器的规格，要懂得这些标志的含义，才能正确地使用电容器。标志是一些符号和数字。

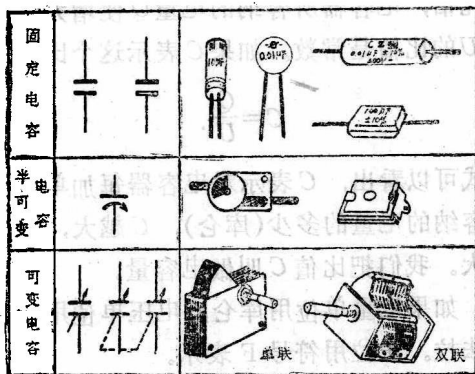


图 10-19

符号：各种符号代表的意义如表 10-1 所示。

表 10-1

类 别	名 称		符 号
介质材料	纸	介	Z
	电	解	D
	云	母	Y
	瓷	介	C
形 状	筒	形	T
	管	状	G
	立	式	L
	圆	片	Y
结 构	密	封	M
大 小	小		X

例如在图 10-20(a) 中，第一个符号 C 代表电容器，第二个代表介质材料，以后的符号分别代表形状结构等。

容量：大多数都在电容器上面用数字直接标明，容易辨认。在电容量的后面还标有误差数如图 10-20(b) 所示。

耐压：电容器上一般都标有电压数值。电容器接到电路里工作，两极板间加有一定的电压。如果这个电压

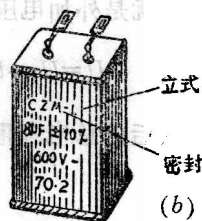


图 10-20

太高，电容器的介质就会被击穿，造成短路，电容器就损坏了。因此，每一电容器，都规定一个耐压数值，在使用时不要超过这个数。

此外，对电容器来说，还要检查它的绝缘电阻。因为任何绝缘体都不能绝对绝缘，电容器的介质也不例外。它的电阻不是无穷大，而是有一定数值，一般在几千兆欧以上。这个电阻称为绝缘电阻，其数值当然越大越好。

4、电容器的连接方法

(1) 电容器的串联 把几个电容器的极板首尾相接而联成一串，这种连接方法叫做串联。图 10-21 中的三个电容就是串联在一起的。在两端接上电源后，两端的极板上分别带电荷 $+Q$ 和 $-Q$ ，中间的各个极板也都分别带有 $+Q$ 和 $-Q$ 的感应电荷。即在串联的情况下，每个电容器所带的电量相等。带电后每一个电容器两端都有一定的电位差，即

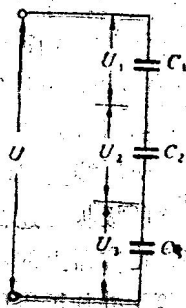


图 10-21

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}, \quad U_2 = \frac{Q}{C_2}, \quad U_3 = \frac{Q}{C_3}$$

它们的和就是外加电压 U

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right) Q.$$

如果串联后的总电容量是 C ，那么就有

$$U = \frac{Q}{C}.$$

将两式进行比较，可以得出

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

如果有 n 个电容器串联，则可得

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (10-12)$$

即串联电容器的总电容的倒数，等于各电容的倒数的总和。

如果各电容的容量相等，即 $C_1 = C_2 = \dots = C_n$ ，总电容量

$C = \frac{C_1}{n}$ ，每个电容器上的电压，只有总电压的 $\frac{1}{n}$ 。综上所述，串

联后电容量减小而耐压增高。

(2) 电容器的并联 把几个电容器的两组极板分别连接起来，如图 10-22 所示，叫做并联。

在两端接上电源后，由于各电容器的极板是连在一起的，所以每个电容器上的电压相等，并且都等于外加电压 U 。每个电容器所带的电量分别是

$$Q_1 = C_1 U,$$

$$Q_2 = C_2 U,$$

$$Q_3 = C_3 U,$$

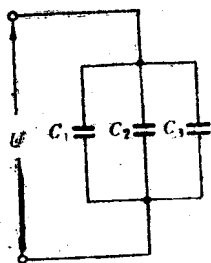


图 10-22

总电量为

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = (C_1 + C_2 + C_3)U.$$

如果并联后的总电容量为 C ，那么

$$Q = CU.$$

比较两式可以得出

$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$

如果有 n 个电容器并联，则可得

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n. \quad (10-13)$$

即并联电容器的总电容量，等于各电容器电容量的总和。如果 $C_1 = C_2 = \cdots = C_n$ ，则 $C = nC_1$ 。综上所述，电容并联后容量加大，但耐压不变。

通过上面的分析可以看出，电容器的串、并联计算，正好跟电阻的串、并联计算相反。在实际应用中，如果单个电容器的耐压或容量与要求不符，就可以通过串联或并联几只电容器来加以解决。

5. 容抗

电容器在通过交流电的时候，是否也对交流电有阻碍作用呢？这可以通过实验来说明。如果把图 10-18 中电容器从电路中取下来，使电灯直接与电源连接，电灯就更亮。这说明电容对交流电有阻碍作用。这种阻碍作用叫做容抗，用 X_c 表示。实验证明，电容量越小，容抗越大；交流电的频率越小，容抗越大。它们之间的定量关系是

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (10-14)$$

式中，频率 f 的单位是赫兹，电容 C 的单位是法拉，容抗 X_c 的单位是欧姆。

加在电容器两端的交流电压的有效值 U 、电流有效值 I 和容抗 X_c 三者间的关系，仍然保持欧姆定律的形式（参阅图10-23）。

$$I = \frac{U}{X_c} \quad (10-15)$$

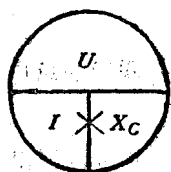
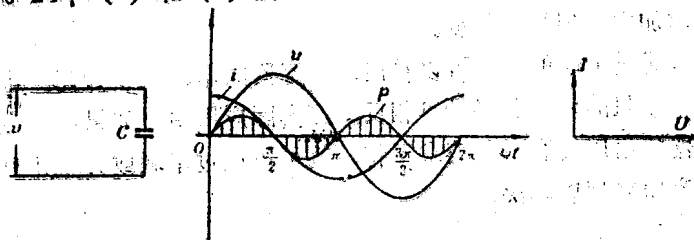


图 10-23

由于电容器的充放电作用，使电路里的电流和电压之间产生了相位差。在纯电容电路里（图10-24 a），电流的最大值总是超前于电压最大值 90° ，如图10-24中（b）和（c）所示。



(a)

(b)

(c)

图 10-24

6. 纯电容电路的功率

把电压和电流的瞬时值相乘，便得出电容电路的瞬时功率，如图中曲线 p 所示。瞬时功率时正时负，正值表示电容器充电，从电源吸取能量，把它储藏在电容器两极板间的电场中；负值表示电容器放电，把储藏在电场中的能量送回电源。显而易见，其平均功率 $P = 0$ ，这说明电容不消耗能量。纯电容电路的无功功率是

$$Q_c = IU,$$

或者表示为

$$Q_C = I^2 X_C \quad \text{及} \quad Q_C = \frac{U^2}{X_C}$$

〔例〕 在收音机里装有作高频旁路的电容器，电容量为250微微法，当通过1000周/秒的电流时，容抗是多少？当通过1000千周/秒的电流时，容抗又是多少？

解 当通以1000周/秒的电流时，容抗 X_{C_1} 由式(10-14)可得

$$\begin{aligned} X_{C_1} &= \frac{1}{2\pi f_1 C_1} \\ &= \frac{1}{2 \times 3.14 \times 1000 \times 250 \times 10^{-12}} \\ &\approx 6.37 \times 10^5 \text{ (欧)} \end{aligned}$$

当通以1000千周/秒的电流时，容抗 X_{C_2} 为

$$\begin{aligned} X_{C_2} &= \frac{1}{2\pi f_2 C_1} \\ &= \frac{1}{2 \times 3.14 \times 10^6 \times 250 \times 10^{-12}} \\ &\approx 637 \text{ (欧)} \end{aligned}$$

四、实际交流电路

1. 实际电路元件

纯与不纯是对立的统一，不纯才是绝对的，纯只是相对的。前面我们在分析交流电路时，讲的“纯”电阻、“纯”电感和“纯”电容，实际上是不存在的。例如我们说的纯电阻，其实并不纯。常用的线绕电阻，一种是用单线绕成线圈的形式，一种是用双线绕成线圈的形式，如图10-25所示。

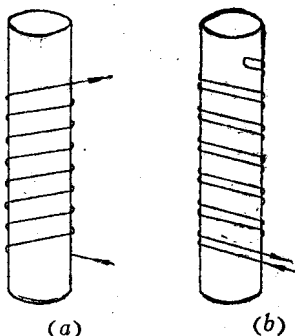


图 10-25

当电流通过电阻器时，电流就会在电阻器周围产生磁场，因而电阻器也具有一定大小的电感。双线绕制的线绕电阻，因为流入线圈的电流和流出线圈的电流所产生的磁场相互抵消，电感比单线绕制时小了些，然而还是具有电感的。此外，线匝间还存在着电容。

对于一个电感线圈来讲，它本身既然是用导线绕成的，就肯定具有电阻。所以说，纯电路是不存在的。那么为什么还要讲纯电路呢？在一定的条件下，可以把某些实际电路元件，看做是“纯”的，例如漏电和损耗都很小的电容器就可以当作纯电容，电感甚小的电阻就可以当作纯电阻，这样便于在分析和解决问题时，抓住事物的主要矛盾。

2、实际电路

有些情况下，一个电路元件可以用电阻、电容和电感的组合来表示。例如，一个电感线圈可以用电感和电阻的串联组合来表示，如图10-26所示；一个损耗较大的电容可以用一个电容和电阻的并联组合来表示，如图10-27所示。

在实际交流电路里，又往往不是一种元件，而连接方法又有串联、并联或混联等，所以，实际交流电路是很复杂的。我们不去一一讨论各种情形，这里只选取在电工和无线

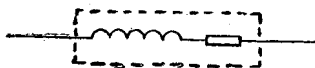


图 10-26

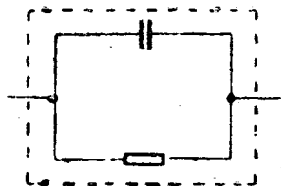


图 10-27

电的计算中常用的电感和电阻相串联的电路，予以分析。

3、电感、电阻的串联电路

在电感电路里，如果电阻不能忽略不计（例如电机绕组的电阻是不能忽略的），则原来的电感电路便成了电感、电阻的串联电路，如图10-28所示。

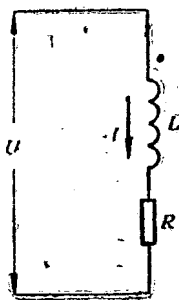


图 10-28

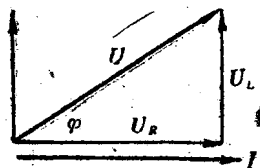


图 10-29

在交变电压 U 的作用下，电路里有电流 I 通过（因为是串联电路，所以流过电阻和电感的电流都是 I ），电阻上的电压 $U_R = IR$ ，并且和电流同相；电感上的电压 $U_L = IX_L$ ，比电流超前 90° ，电流和电压的矢量图如图10-29所示。按照矢量加法，两电压之和即为电源电压 U 。从图上可以看出，电

源电压为

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L)^2} = I\sqrt{R^2 + X_L^2}.$$

令 $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ ，并把 Z 称为电路的阻抗，单位是欧姆。

于是

$$U = IZ, \quad I = \frac{U}{Z}. \quad (10-16)$$

可见电流、电压和阻抗这三者之间仍然保持欧姆定律的形式。从图上还可以看出，电压 U 比电流 I 超前的角 φ ，可以按下式求出：

$$\cos\varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{R}{Z}.$$

在这种电路中，电阻吸取能量，而电感不吸取能量，所以有功功率为

$$P = IU_R.$$

又因为

$$U_R = U \cos\varphi,$$

所以

$$P = IU \cos\varphi. \quad (10-17)$$

令 $S = IU$ ，它是电流和电压有效值的乘积，称为视在功率，单位是伏安。有功功率与视在功率的比就为

$$\frac{P}{S} = \cos\varphi. \quad (10-18)$$

比值 $\cos\varphi$ 称为电路的功率因数。

电路的无功功率为

$$Q_L = IU_L = IU \sin\varphi \quad (\text{参阅图10-29}).$$

把上面所讲到的电压、阻抗和功率，进行一番分析、比较，就会发现它们可以用三角形来表示：

电压 U_R 、 U_L 和 U 正好组成一个直角三角形，如图10-30

(a)所示，它叫做电压三角形。

如果把电压三角形的三条边各除以电流 I ，则成了表示 R 、 X_L 和 Z 之间关系的三角形，如图 10-30(b)所示，它叫做阻抗三角形。如果把电压三角形的三条边各乘以电流 I ，则成了表示各功率之间关系的三角形，如图 10-30(c)所示，它叫做功率三角形。有了这三个三角形，便能帮助我们记忆前面所讲的各种量间的关系。

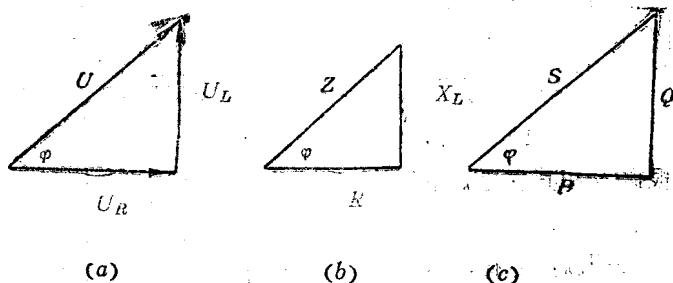


图 10-30

4、交流电路应用举例

交流电路的规律，可以在日常生活和工作中加以利用。下面我们举个利用电容降压的例子，来说明这个问题。

照明电路，电压为220伏。如果现在只有110伏40瓦的灯泡，能否使用呢？当然，直接接在220伏的电源上不行，需要降压到110伏才能使用。根据交流电的规律，很容易想到：可以利用适当的电阻、电感或电容与灯泡串联，以便降压。但串联电阻时，电阻要消耗相当的功率；电感本身也具有电阻，串入电路也要消耗一定的功率；因此最好串联适当的电容来降压。下面我们来计算所要串联的电容容量。

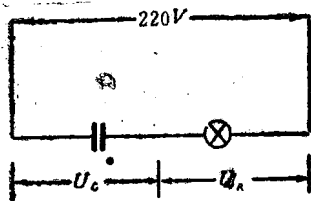


图 10-31

串入电容以后，电路如图 10-31 所示。需要在电容 C 上降掉的电压为 U_C ， U_C 和灯泡电阻 R 上电压 U_R 之间有 90° 相位差，两者的和是矢量和，如图 10-32 所示。 U_C 的大小可按勾股定理算出，

$$\begin{aligned} \text{即} \quad U_C^2 &= U^2 - U_R^2 \\ \text{所以} \quad U_C &= \sqrt{U^2 - U_R^2} \\ &= \sqrt{220^2 - 110^2} \\ &\approx 190 \text{ (伏)}. \end{aligned}$$

再根据 U_C 和其它已知条件求出电容量 C 。

按照欧姆定律，有

$$U_C = I X_C = I \frac{1}{2\pi f C},$$

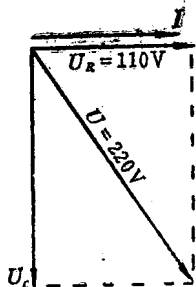


图 10-32

$$\text{所以} \quad C = \frac{I}{2\pi f U_C}.$$

这里 U_C 和 f 都是已知的，电路的电流 I 是未知的，因此需要先算出 I 的大小。电流 I 可根据灯泡的数据求得：因为灯泡的功率 P 和电压 U_R 都是已知的，即

$$P = I U_R$$

$$I = \frac{P}{U_R}.$$

把这个结果代入上式，得到

$$C = \frac{\frac{P}{U_R}}{2\pi f U_0}$$

$$= \frac{40}{110 \times 2 \times 3.14 \times 50 \times 190}$$

$$\approx 6.1 \text{ (微法)}$$

于是可选用6微法左右、耐压为 $\sqrt{2} \times 190 \approx 268$ 伏（电压幅值）以上的电容器。

第三节 功率因数

交流电的功率和直流电的功率不完全相同，直流电的功率决定于电压和电流的大小，而交流电功率，不但决定于电压和电流的大小，还决定于电压和电流的相位差 φ ，即

$$P = IU \cos \varphi.$$

功率因数 $\cos \varphi$ 的大小和负载的性质有关。对于象电灯、电炉这类纯电阻负载，电压和电流同相，即 $\varphi = 0^\circ$ ，这时功率因数 $\cos \varphi = \cos 0^\circ = 1$ ；对于纯电感和纯电容负载，电压和电流相位差 90° （注意两者有超前和滞后之分），这时功率因数 $\cos \varphi = \cos 90^\circ = 0$ ；一般的电感性 and 电容性负载，电压和电流的相位差都在 0° 到 90° 之间，这时 $\cos \varphi < 1$ 。

功率因数 $\cos \varphi = 1$ 时，功率 $P = IU$ ，这时没有无功功率，即在负载和电源间不存在能量互换，负载只从电源吸取能量。若功率因数 $\cos \varphi < 1$ ，也就是 $\frac{P}{S} < 1$ ，则视在功率中只有一部分是有功功率，另一部分是无功功率。有无功功率，

就表明在电路中存在能量的互换，但是又不做功。这势必出现下面的问题：

第一，电源设备的容量不能充分利用。

电源的容量，是根据额定电压和额定电流设计的，如：某电源额定电压为220伏，额定电流为45.5安，它在正常状态下能输送的功率是

$$UI = 220 \times 45.5 = 10000 \text{ (伏安)} = 10 \text{ (千伏安)}。$$

这就是设备的视在功率 S 。电源所带的负载不能超过10千伏安，换句话说，负载电流不能超过45.5安。要使设备得到充分利用，就应该使它在额定工作状态下，可能输送的有功功率等于视在功率(10千伏安)，即 $P=S$ ，这只有在功率因数 $\cos\varphi=1$ 时才有可能。倘若 $\cos\varphi<1$ ，那么电源设备所能送出的有功功率必将减少。例如，在 $\cos\varphi=1$ 时，10千伏安的电源可供220伏100瓦的灯泡100个正常工作。如果供给功率因数 $\cos\varphi=0.8$ 的电感性负载，那么电源能输送的功率 $P=220 \times 45.5 \times 0.8=8$ (千伏安)。这时只能供80个220伏100瓦的灯泡正常工作。10千伏安的电源，只带动8千瓦的负载，电源设备的容量远远没有得到充分利用，这就是低功率因数所带来的不良后果之一。

第二，增加了送电线路的功率损失。例如两个10千瓦的负载，电压220伏，其中一个功率因数 $\cos\varphi=1$ ，通过线路从电源得到的电流为 $I=\frac{10000}{220}=45.5$ (安)；另一个功率因数

$$\cos\varphi=0.8，通过线路从电源得到的电流 $I=\frac{10000}{220 \times 0.8}=56.8$$$

(安)。56.8安与45.5安对比，电流大的线路功率损失大。我们既要使电源设备容量得到充分利用，又要尽可能减少在送电

线路上的功率损失，这就需提高功率因数。

农村中广泛地使用着电动机，使负载多数呈现电感性，它的功率因数是小于1的。用什么办法来提高功率因数呢？

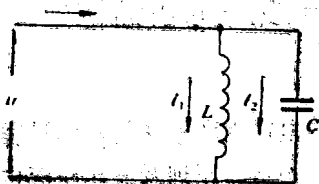


图 10-33

工农群众在长期的实践中解决了这个问题，其办法是给电感性负载并联一个电容器，如图 10-33 所示。这实际上就是电感和电容的并联电路。并联电容器以前，电路里的电流就是流经电感的

电流 i_1 ；并联电容器以后，电路的电流不再是 i_1 ，而是 i_1 和流经容器的电流 i_2 之和 i 了，即

$$I = I_1 + I_2 \quad (\text{均为有效值}).$$

根据电容电路的规律，流经电容的电流

$$I_2 = \frac{U}{X_C}$$

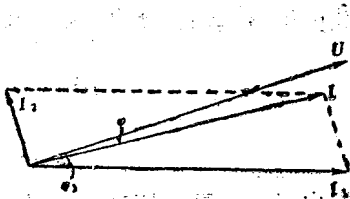


图 10-34

并且超前于电压 90° 。

设原来电感性负载的功率因数为 $\cos\varphi_1$ ，用矢量加法可以求出负载电流 I ，如图 10-34 所示。

从图中可以看出，电流 I 小于 I_1 ，这就减少了

线路上的功率损失。同时 I 和 U 的相位差 φ 也小于 I_1 和 U 的相位差 φ_1 ，即功率因数也提高了。这里需要指出，电容器选择适当可以使 $\varphi=0$ ，即 $\cos\varphi=1$ 。但如果电容器过大，可能变成电容性负载，电流超前于电压，那时功率因数也会小于1。

第十一章 电能的产生和输送

在这一章里，我们介绍交流电产生和输送的实际过程，其中着重介绍发电机和变压器的构造、原理及三相交流电路等方面的知识。

第一节 农村小型电站概况

农业生产中所需要的电能，来源于两个途径：一个是高压电网；一个是自办的小型发电站。

在农村中广泛地应用柴油机作为动力来发电，这种小电站主要由柴油机、发电机和配电盘三部分组成，如图11-1所示。

一、柴油机

不论在哪种发电站里，发电机都需要由原动机带动，才能发出电来。例如在水电站里，发电机要由水轮机带动；在热电站里，发电机要由汽轮机或蒸气机带动。在农村小型电站里，可以使用柴油机来带动发电机。此外还可以用拖拉机上的发动机作为小电站的原动机。

在发电站里，使用什么规格的柴油机，应视发电机而

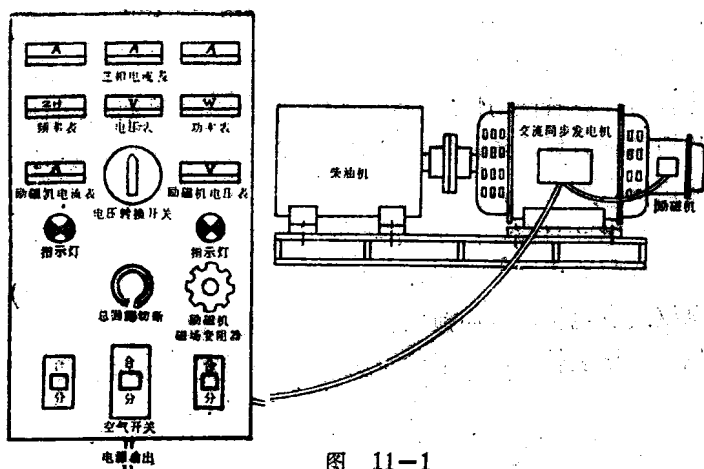


图 11-1

定，而发电机的规格又视用电情况而定。比如，在同时使用的电气设备总功率低于50瓩时，可以选用功率为50瓩的发电机，这时可以选用功率为80马力的柴油机，如4135T-1型柴油机。此外，还要考虑发电机所要求的转速是多少。如果柴油机和发电机的转速不一致，就需要通过传动装置使之一致；如果两者一致，例如发电机所要求的转速是1500转/分，它正好和4135型柴油机的转速相等，就可以用联轴节（俗称靠背轮）将两轴直接连在一起。这样，柴油机就能带动发电机转动，发出电来。柴油机把燃料所生成的热能转变为机械能，发电机再把机械能转变为电能。所以，发电过程也是能的转换过程。

二、发电机

图10-1所示的装置，仅仅是个交流发电机的模型。实际的交流发电机，都是由电磁铁来产生磁场，使磁感应强度

B 增大；把很多线圈串联起来，绕在铁芯上组成电枢，这样就能使切割磁力线的导线长度 l 加长；电枢被原动机所带动快速转动，或者磁场快速旋转而电枢不动，导线以很大的速度 V 切割磁力线，这样发电机就可以产生很高的感生电动势和输出较大的功率。

发电机的构造，分为两部分：转动的部分叫转子，固定的部分叫做定子。电枢旋转，磁场不动的发电机，叫做旋转电枢式发电机，例如拖拉机中的充电发电机便是这种发电机；磁场旋转，电枢不动的发电机，叫做旋转磁场式发电机。

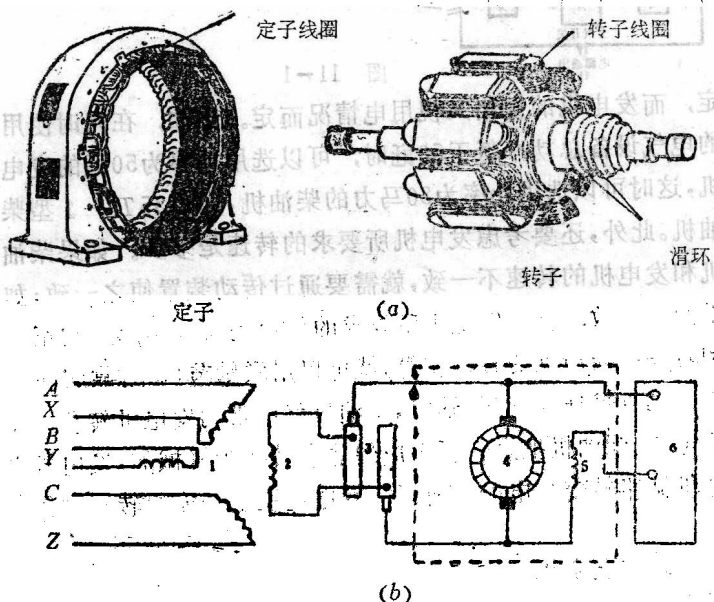


图 11-2

- 1、定子线圈；2、电枢线圈；3、电刷；4、励磁机电枢；
5、励磁机磁场线圈；6、励磁机磁场变阻器。

机。这里我们提到的50千瓦发电机 (72-T2/D, TH型), 就是旋转磁场式发电机。图11-2是它的构造示意图。这种发电机的定子上嵌有三个独立线圈 (绕组) 1, 转子上有明显的磁极 (图11-2a), 磁极铁芯上套着彼此串联的线圈2。线圈的两端通过滑环与电刷3与外面的小直流发电机 (虚线部分) 相连。直流发电机供给线圈2以直流电, 使它产生磁场, 因此称作励磁机。图中的4和5分别是励磁机的电枢和磁场线圈, 6是励磁机的磁场变阻器, 如图11-2b所示。

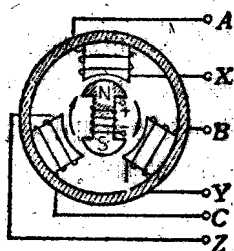


图 11-3

图11-3所示, 所以感生电动势是振幅相同、频率相同、但相位差依次差 120° 的三个交变电动势 (图12-4), 即

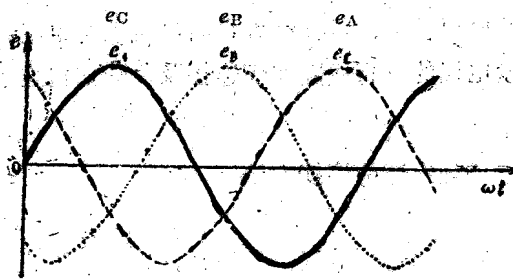


图 11-4

$$e_A = E_m \sin \omega t,$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ),$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ).$$

象这样能够产生三相交流感生电动势的发电机，叫做三相交流发电机。发电厂使用的绝大多数是三相交流发电机。

三、配电盘

配电盘（图11-1）是把发电机所发出的电流进行控制和分配的设备，它由各种仪表（如电流表、电压表、功率表、频率表等）、开关、保护装置和指示灯等所组成，通过这些装置来观察电站的运行情况并进行适当的调节。

第二节 三相交流电路

三相交流发电机所产生的是三相感生电动势，也就是三个独立的电源。它们以什么方式向电路输送电流呢？这里就存在着发电机的三相线圈如何连接及负载如何连接的问题。

一、三相电源的连接方法

我们在前面提到的50瓩发电机，定子有三组线圈，如果把每个线圈分别与负载相连，就需要六根导线，如图11-5

所示。这样做很不经济。实际上是把三个线圈如图11-6所示那样连接起来，用四根导线向外输电，这就是通常所说的三相四线制。发电机线圈（及负载）的

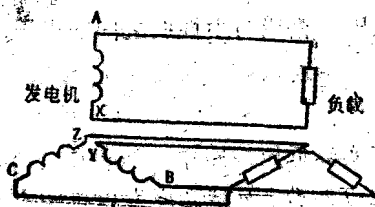


图 11-5

这种连接方法，叫做星形接法，用符号Y表示。72-T2/D₂TH型50千瓦发电机的定子线圈，在出厂时已经接成Y形，如图11-7所示，可以直接使用。

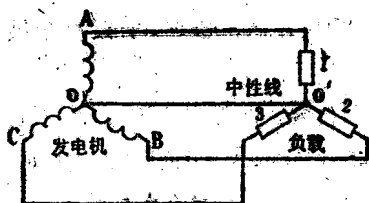


图 11-6

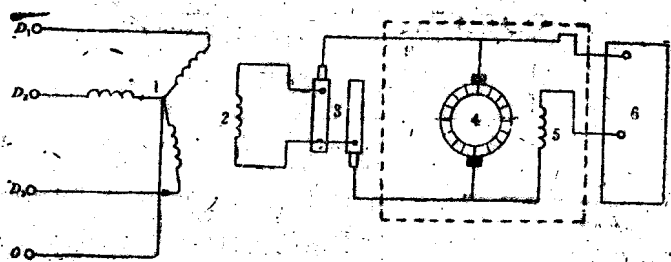


图 11-7

在Y形接法中（图11-6），A、B、C三条线称为相线，又叫火线。如果用试电笔去接触它们，都能使试电笔的氖管发光。OO'所表示的这条导线，叫做中性线，又叫做零线，它不能使试电笔的氖管发光。相线与相线之间的电压，叫做线

电压，相线与中性线之间的电压，叫做相电压（图11-8）。在Y形连接时，线电压 $U_{\text{线}}$ 与相电压 $U_{\text{相}}$ 之间的关系是、

$$U_{\text{线}} = \sqrt{3} U_{\text{相}} \quad (11-1)$$

在实际低压线路中，线电压为380伏，相电压为220伏。72-T2/D₂TH型50瓩发电机输出的线电压（实际上是电动势）为400伏，用它给线路供电时，因为发电机线圈本身具有的电阻（内电阻）及输电导线的电阻上要产生电位降，加在用电器上实际电压数值为380伏左右，因此可以直接供给动力和照明使用。

A、B、C三相电压间的相位差，依次为120°，为了表明这个顺序，每相各以一种颜色作为标志（图11-8），例如，电杆

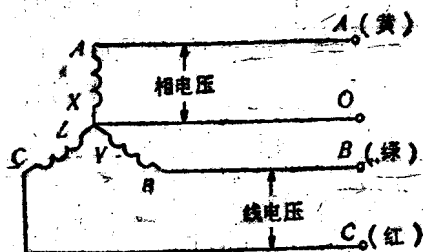


图 11-8

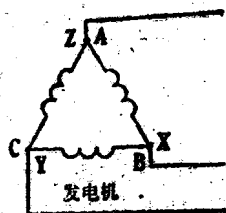


图 11-9

上常涂有黄、绿、红三色，以表明杆上电线中电流的相序。发电机里三个线圈除了接成Y形外，还可以接成如图11-9所示的样子，叫做三角形接法。这种接法用符号 Δ 表示。在 Δ 接法中，发电机输出的线电压与相电压相同，即

$$U_{\text{线}} = U_{\text{相}} \quad (11-2)$$

二、三相负载的连接方法

三相负载也有星形和三角形两种接法。图11-6中的三相负载，就是接成Y形的。相线上的电流叫做线电流，用 $I_{\text{线}}$ 表示；通过每相线圈的电流叫做相电流，用 $I_{\text{相}}$ 表示。在图11-6所示的接法里，显然

$$I_{\text{线}} = I_{\text{相}} \quad (11-3)$$

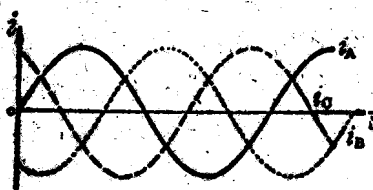


图 11-10

在三相四线制供电线路里，如果三相负载是对称的，例如三相交流电动机、三相变压器或三相电热器等，那么三相电流的变化规律就如图11-10所示。从图

上可以看出，每一瞬间三相电流的和都为零。因为每相电流都要流经中性线，中性线上的电流就是三相电流的和，所以中性线电流为零。这样就可以把中性线省去，变成了三相三线制。我们所看到高压线多数是三根，就是这种供电方法

如果在三相四线制中三相负载不对称，中性线上就有电流通过。照明电路或者照明与单相电动机混合使用的电路，都采用三相四线制，因为这类电路很难使三相负载保持对称。图11-11是负载（电灯）成Y形接法的三相四线制照明电路，如果中性线断开，B、C两相的灯泡接入电路，那么B、C两相的灯泡就串接在380伏（线电压）的电源上。根据串联电路的特点，可以知道，通过B、C两相的电流是相等



图 11-11

的。假使 C 相灯泡的总电阻 R_C 大于 B 相灯泡的总电阻 R_B 即 C 相的灯少, R_C 两端的电压就大于 R_B 两端的电压, 两者阻值相差越大, 电压相差也越大, 以致出现下述情况: C 相电灯承受高于 220 伏的电压而被烧毁; B 相电灯在过低的电压下灯泡发红。在中线断开后, 如果只有 A 相接入电路而 B 、 C 两相没有接入电路, 显然 A 相电灯不会发光。但此时在 B 相或 C 相中有人陆续把电灯接入电路, 就会出现电灯被相继烧毁的现象, 其它用电器如收音机、扩音机等接入电路, 也会被烧掉。

在三相三线制中, 如果再把其中的一条导线用大地来代替, 这就是农村广泛采用的两线一地制。

负载除了接成 Y 形外, 也可以接成如图 11-12 所示的三角形 (也用 Δ 表示), 例如三相交流电动机、三相变压器等有时就采用这种接法。

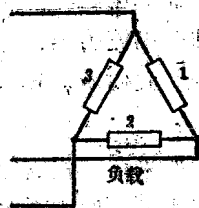


图 11-12

第三节 变 压 器

一般大中型电站, 都建立在动力资源丰富的地方, 而用

电地区有的远在几百公里之外，这就产生了远距离输电的问题。电流流过很长的输电导线会产生热量，从而损耗电能。由于发热而损耗的电能 $W = I^2 R t$ ，在一定的时间内要减少输电线路上的电能损耗，应该注意解决电流强度和电阻两个方面的问题。

电阻 $R = \rho \frac{l}{S}$ ，在输电距离一定时，导线长度 l 是固定的，除了尽量采用电阻率 ρ 小的金属（如铜、铝）作电线外，只有把导线加粗（ S 增大）这个办法，来减小导线的电阻，从而减少能量损耗。但这样要浪费许多金属，并且大大增加了电线本身的重量，给架线工作带来很大困难。这个办法实际上是行不通的，因而需要采用减小输电电流这个办法。从公式 $W = I^2 R t$ 中可以看出，如果电流强度减小到原来的百分之一，电能损耗就减少到原来的万分之一。

要减小电流而又保证输送功率不变，从式 $P = IU$ 中可以看出，必须升高输电电压 U 才行。所以远距离输电都采用高压，如11万伏、22万伏或33万伏等。

发电机受许多条件的限制，不能发出很高的电压，一般都在1万伏左右。所以，发电机发出的电，先得变成高压，输送到用电地点，然后再把电压降低到380伏或220伏，供工厂、农村使用。这个改变电压的工作，是由变压器来担任的。

一、变压器的原理

变压器的种类虽然很多，但是它们的工作原理都是相同的。变压器中最简单的是单相小型变压器，我们用它来说明变压器的工作原理。这种变压器中有两个独立的线圈，分别

称为原线圈和副线圈，绕在一个铁芯上，如图11-13所示。

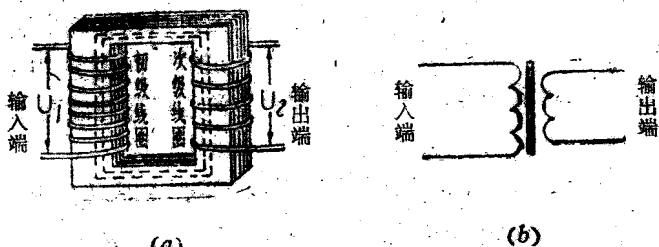


图 11-13

线圈由绝缘导线绕制而成，铁芯由硅钢片叠成，片与片间用绝缘漆隔开。

如果在原线圈的两端加一个交变电压 U_1 ，原线圈中就有交流电流 I_1 通过，于是便产生一个交变磁场。因为铁芯导磁能力很好，所以交变磁场的磁力线几乎全部通过铁芯内部形成闭合回路，即交变磁通不仅穿过原线圈，也穿过副线圈。而且，交变的磁通量以同样大小穿过原副线圈的每一匝。根据电磁感应定律，交变磁通量在线圈的每一匝中产生的电动势的大小为 $E = -10^{-8} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 。若原线圈的匝数为 n_1 ，那么在原线圈上产生的感生电动势

$$E_1 = -n_1 \cdot 10^{-8} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = n_1 E.$$

若副线圈的匝数为 n_2 ，那么在副线圈中产生的感生电动势

$$E_2 = -n_2 \cdot 10^{-8} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = n_2 E.$$

在原线圈的电路里，由于电源以交变电压 U_1 加在原线圈的两端，才产生交流电流 I_1 ，同时也就有感生电动势 E_1 出

现。感生电动势起着阻碍电流变化的作用，它的方向与电源电压的方向相反。根据全电路欧姆定律可以得出 $U_1 - E_1 = I_1 r_1$ ，即 $U_1 = E_1 + I_1 r_1$ ， r_1 是原线圈的电阻。

在副线圈的回路中，由于有了感生电动势 E_2 ，它的两端才能有交变电压 U_2 。当副线圈与外电路闭合时，交变电流 I_2 通过闭合电路。根据全电路欧姆定律可得到 $E_2 - U_2 = I_2 r_2$ ，即 $U_2 = E_2 - I_2 r_2$ ， r_2 是副线圈回路的电阻。

在设计变压器时，总是使线圈的自感系数很大，而电阻很小，所以，两个线圈中的感生电动势 E_1 和 E_2 都很大，而电位降落 $I_1 r_1$ 和 $I_2 r_2$ 都很小。在计算时，可以近似地认为 $U_1 = E_1$ ， $U_2 = E_2$ ，因而得到

$$U_1 = E_1 = n_1 E,$$

$$U_2 = E_2 = n_2 E,$$

于是

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (11-4)$$

这个式子表明，变压器原、副线圈两端的电压比，等于它们的匝数比。因此，只要适当地选择原、副线圈的匝数，就能把交流电从一种电压变成另一种电压。

如果副线圈的匝数比原线圈的匝数少，即 $n_2 < n_1$ ，则副线圈两端的电压就比原线圈两端电压低，这种变压器就是降压变压器。反之，若 $n_2 > n_1$ 时，变压器为升压变压器。

变压器工作时，输入的功率 ($P_1 = I_1 U_1$) 绝大部分都由次级输出 ($P_2 = I_2 U_2$)，小部分损耗在铁芯发热等方面。如果不计算这部分损耗，变压器输出功率就等于输入功率，即

$$I_2 U_2 = I_1 U_1,$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (11-5)$$

上式表明，原、副线圈中电流强度跟它们的匝数成反比。

在变压器中，高压线圈的匝数多，电流小，导线细；低压线圈匝数少，电流大，导线粗。

〔例1〕图11-14是一个五灯收音机电源变压器电路图。各线圈的匝数如图所示。当原线圈接在220伏交流电源上时，求各副线圈的电压。

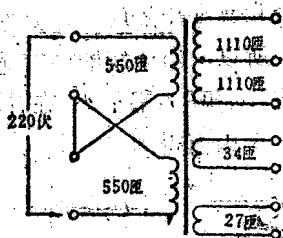


图 11-14

解 设原线圈 $n_1 (=2 \times 550 \text{ 匝})$ 的电压为 $U_1 (=220 \text{ 伏})$ ，副线圈 $n_2 (=2 \times 1110 \text{ 匝})$ 的电压为 U_2 ， $n_3 (=34 \text{ 匝})$ 的电压为 U_3 ， $n_4 (=27 \text{ 匝})$ 的电压为 U_4 。根据式(11-4)得

$$U_2 = \frac{n_2}{n_1} U_1 = \frac{2200}{1100} \times 220 = 440 (\text{伏}),$$

$$U_3 = \frac{n_3}{n_1} U_1 = \frac{34}{1100} \times 220 = 6.8 (\text{伏}),$$

$$U_4 = \frac{n_4}{n_1} U_1 = \frac{27}{1100} \times 220 = 5.4 (\text{伏}).$$

二、三相变压器

目前输配电多采用三相制，需要把三相电压同时升高或

降低，这可以用两种方法来实现：一种是用三台型式一样的单相变压器接成一组，另一种是采用三相变压器。

三相变压器外形如图11-15所示。它的工作原理和单相变压器一样，不同的是三相变压器具有三个铁芯柱，每个铁芯柱上



图 11-15

各装一个原线圈和副线圈。如图11-16(a)所示。高压线圈的始端和末端分别用A、B、C和X、Y、Z表示，低压线圈的始端和

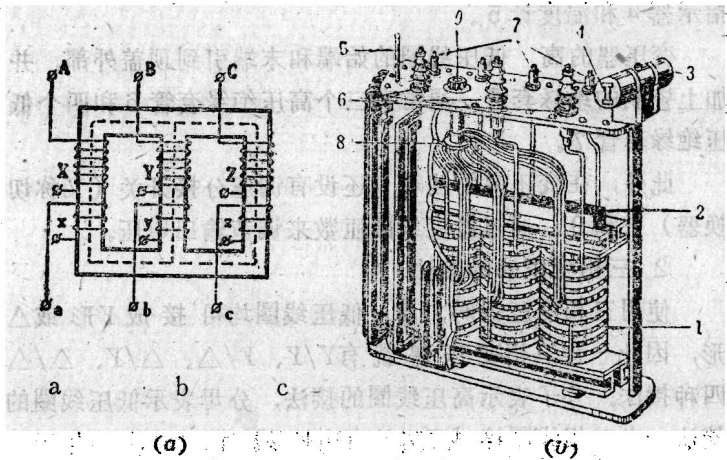


图 11-16

1、线圈；2、铁芯；3、油枕；4、油位指示器；5、温度计；6、高压绝缘套管；7、低压绝缘套管；8、分接开关接线端；9、分接开关。

末端分别用 a, b, c 和 x, y, z 表示。

1、三相变压器的构造

三相变压器的构造如图11-16(b)所示。它的主要部分是上面讲过的绕在铁芯2上的线圈1。绕制时，低压线圈靠近铁芯，高压线圈套在低压线圈的外面。铁芯和线圈都装在盛满变压器油的油箱里。变压器油有两个作用：一是用来增加变压器的绝缘性能，一是用来散热。为了散热效果更好，还在油箱壁上加装散热管或散热片。当油受热膨胀时，就流入变压器上方的油枕3，油枕是个金属容器，用管子 and 油箱连通。当油变冷收缩时，油枕里的油有一部分流到油箱中，因此油箱中始终充满着变压器油。

为了观察油面变化和温度变化，在油箱盖上侧装有油位指示器4和温度计5。

变压器的高、低压线圈的始端和末端引到顶盖外部，并加上瓷制的绝缘套管。通常有三个高压绝缘套管6和四个低压绝缘套管7。

此外，在变压器的油箱上还设有调压分接开关（又称切换器）8和9，通过改变线圈匝数来调节输出电压。

2、三相变压器的接法

使用三相变压器时，高、低压线圈均可接成Y形或 Δ 形，因此一台三相变压器就有Y/Y、Y/ Δ 、 Δ /Y、 Δ / Δ 四种接法。分子表示高压线圈的接法，分母表示低压线圈的接法。当三相线圈接成Y形并有中性线时，则用Y_n表示。用得最广的接法只有三种：Y/Y_n、Y/ Δ 、Y_n/ Δ ，分别如图11-17中的(a)、(b)、(c)所示。变压器出厂时，将接法标在铭牌上。在工厂、企业、学校、农村等基层单位使用的小

容量三相变压器一般采用Y/Y₀接法。高压输电采用的大容量变压器，一般接成Y/△或Y₀/△。

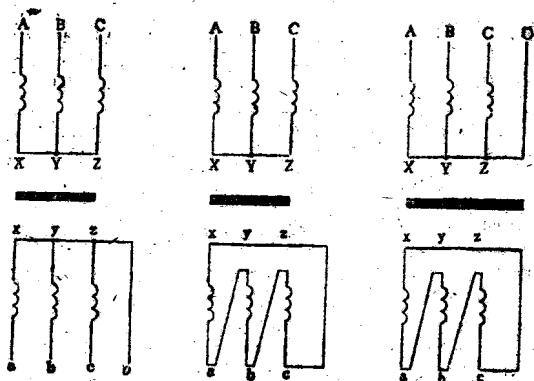


图 11-17

3、变压器的铭牌

变压器铭牌就是一台变压器的简单说明书，它标出了变压器的主要规格和数据，（表11-1）。下面对铭牌所列各项的意义作一简单介绍：

型号 变压器的型号用符号、数字表示，它们表示的意义如下：

S J L — 560/10

表示高压线圈的额定电压（千伏）

表示额定容量（千伏安）

表示附有防雷装置

表示冷却方式 J 代表油浸自冷式
F 代表风冷式

表示极数 S 代表三相
D 代表单相

表 11-1

铝 线 圈 电 力 变 压 器

产 品 标 准			- 型 号 SJL—560/10		
额 定 容 量 560千伏安		相 数 3		额 定 频 率 50 赫	
额 定 电 压	高 压	10000伏		额 定 电 流	高 压 32.3安
	低 压	400—230伏			低 压 808安
使 用 条 件	户 外 式	线 圈 温 升 65°C		油 面 温 升 55°C	
阻 抗 电 压	% 75°C		冷 却 方 式		油 浸 自 冷 式

油 重 370公斤 器 身 重 1040公斤 总 重 1900公斤

线 圈 联 接 图		向 量 图		联 接 组 标 号	开 关 位 置	分 接 电 压
高 压	低 压	高 压	低 压			
				Y/Y ₀ -12	I	10500 伏
					II	10000 伏
					III	9500 伏

额定电压 原线圈的额定电压是指原线圈两端加的正常
工作电压，副线圈的额定电压是指变压器空载时副线圈两端
的电压。在三相变压器中，额定电压是指线电压。

这台变压器是降压变压器，原线圈的额定电压是 10000
伏，此时分接开关处在 II 的位置，即高压线圈的第 2 个抽
头。高压线圈还有两个抽头，当电压分别为 10500 伏和 9500 伏

时,分接开关分别位于Ⅰ和Ⅲ。副线圈的额定电压为400伏(或230伏),可以直接供额定电压为380伏(或220伏)的一般用电器使用。

额定电流 变压器线圈允许长时间连续通过的工作电流就是变压器的额定电流。在三相变压器中指的是线电流。

额定容量 指的是变压器的视在功率。三相变压器的容量 $=\sqrt{3} \times \text{额定电压} \times \text{额定电流}$ (与单相的计算方法不同)。

阻抗电压 阻抗电压表示变压器内部阻抗电压降占额定电压的百分数。

接线图和向量图 上面讲过变压器接法在出厂时标在铭牌上,这就是接线图。三相交流电是存在着相位差的,因此又用向量图来表示变压器每侧的相位差。

变压器种类虽然很多,但铭牌表示方法基本是相同的。

三、自耦变压器和电焊变压器

1、自耦变压器

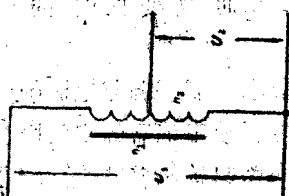


图 11-18

如果将变压器的副线圈与原线圈合并,即用原线圈的一部分兼作副线圈,这种变压器就叫做自耦变压器,如图11-18所示。

自耦变压器的工作原理和普通变压器相同。当交变电压 U_1 加到线圈(匝数为 n_1)两端时,产生交变磁场,使线圈中每一匝都

产生感生电动势，只要从线圈中选取适当的抽头（匝数为 n_2 ），就可以得到我们所需要的电压 U_2 。电压与线圈匝数间的关系仍为式(11-4)所决定。

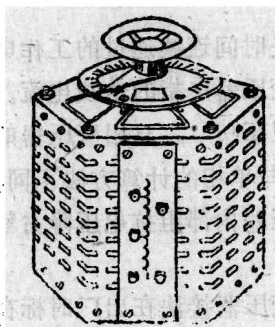


图 11-19

由于自耦变压器的原副线圈是合用的，所以节省了导线和铁芯材料。

低压小容量的自耦变压器，其线圈的一个接头常常做成能沿线圈自由滑动的触头，因而可以平滑地调节电压 U_2 的大小。这种变压器又

叫调压变压器，如图11-19所示。

自耦变压器的应用比较广泛，常用在各种变压和调压设备上，交流电动机起动时，就往往用到自耦变压器。

2、电焊变压器

图11-20是电焊变压器（电焊机）的电路图。电焊变压器的次级和电抗器（一个有铁芯的线圈）串联，再与电焊钳、焊条和工件组成闭合回路。电抗器的铁芯有较大的空气隙，转动螺杆就可以改变空气隙的长度，从而改变回路的阻抗。

焊接时，根据工件大小和焊接要求，需要调节电流的大小。如果需要增大电流，可以转动螺杆使电抗器的空气隙加长，这时电抗器的感抗减小，整个回路阻抗跟着减小，于是电流增大。如果需要减小电流，只要使电抗器的空气隙减短即可。

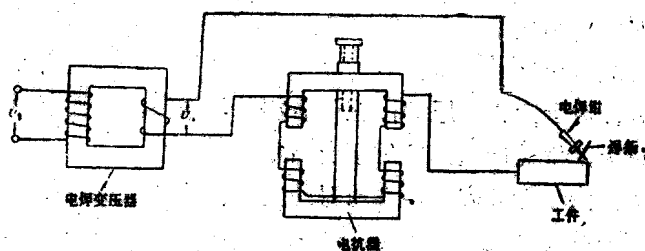


图 11-20

从上面的分析可以看出，电焊变压器只是普通变压器的次级上串联一个可调的电感线圈。

国产CT₂型电焊变压器初级电压有120-220、380、500伏三种，次级电压是60-70伏，电流调节范围在70-300安之间。

四、变压器的使用和维护

变压器是重要电气设备之一。在农村，一台变压器都带有水泵或机磨等许多负载，如果变压器发生故障，必然影响到它所带的负载的正常工作。此外，因为变压器又和电网连接，不可避免地要影响到电网和其它用电单位，因此对变压器必须正确使用和经常维护。

1、变压器在投入运行前，要核对铭牌和线路，看它们的条件是否相符。

2、选用变压器时，应使它的容量略大于负载的容量。如果变压器容量小于负载的功率，有可能损坏变压器，但容量过大，又会造成浪费。

3、对于三相变压器，应使各相负载平衡。若其中一相负载过大，发热严重，有时也会损坏变压器。

4、为了保证安全，变压器外壳应该接地，以免线圈绝缘损坏使外壳带电，造成触电事故。

5、在运行中，应注意其电压、电流、油位、温度等是否正常。此外还应定期检修。

第四节 电能的输送

由发电机、输、配电线、变压设备和用电设备等组成的总体，称为电力系统。在电力系统内，电能的产生和消耗是同时进行的，因此输送电能和分配电能是个十分重要的问题。倘若这部分设备发生故障，即使发、用电设备正常，也会使供电中断。输送、分配电能的线路，在整个电力系统中的作用，就如血管在人体内的作用一样重要。

电力系统是由发电机、输电线路、变电所、配电线路和用电设备等组成的。电力系统的主要任务是：将发电机发出的电能，通过输电线路、变电所、配电线路，输送到各个用户。电力系统的主要设备有：发电机、输电线路、变电所、配电线路和用电设备等。

电力网是电力系统的一部分，它包括变电所、配电所和输配电线路的全部装置。发电厂产生的电能，经过电力网向各个用户输送。整个电力网的线路非常复杂，为了便于说明问题，电力网线路通常只画一相，因其余两相完全相

同，故可以略去。图11-21是一个典型的电力网示意图。一些大型水电站就是利用这样的电力网向周围几百公里供电的。从水电站的发电机组发出的电压是15.8千伏，由水电站内装

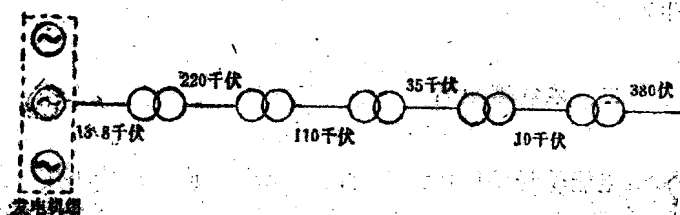


图 11-21

置的升压变压器把电压升高到220千伏。用220千伏电压把电能输送一段长距离之后，就用变压器从220千伏降到110千伏。以110千伏再送一段距离后，又用变压器降到35千伏，继续把电能输送较短的距离，再用变压器降到10千伏，送到用电地点（为排灌站）附近的变压器——配电变压器并降到380伏，供电动机使用。从发电机发电到电动机用电，中间经过五次变压（一升四降）。我国许多地区电网都有这种情况。但是这种形式不是唯一的，应视电力网范围等具体情况而定。

远距离的输电线路大多采用架空线。所用的导线应该有较高的机械强度，通常采用单股或多股绞合裸铜线或钢芯铝线，通过绝缘瓷瓶将导线悬挂在电杆上。每只绝缘瓷瓶能承受10千伏左右的电压，使用时可根据电压的高低串接不同数目的瓷瓶。电杆有木杆、水泥杆和铁塔三种，根据电压高低、线路长短和沿途地理气候条件等选择电杆种类。

在我们伟大的社会主义祖国，大江南北，长城内外，已

经建立起强大的电力网，其中东北电网、华东电网等都是跨越几省的。我区以呼和浩特、包头为中心的高压电网，正在继续扩大，向农村、牧区延伸，有力地支援了工、农、牧业生产。

二、农村变电所

电能输送到厂矿、农村时，每个厂矿、农村都有一套接

电、变电和配电设备，安装这些设备的场所称为变电所。如果用低压供电，只需安装接电和配电设备就行了。

农村变电所，按用途的不同可以分为排灌专用（如扬水站）变电所和农业公用变电所两种。

图11-22是农村变电所的电路图。当电能从35千伏线路送到变电所后，首先经过隔离

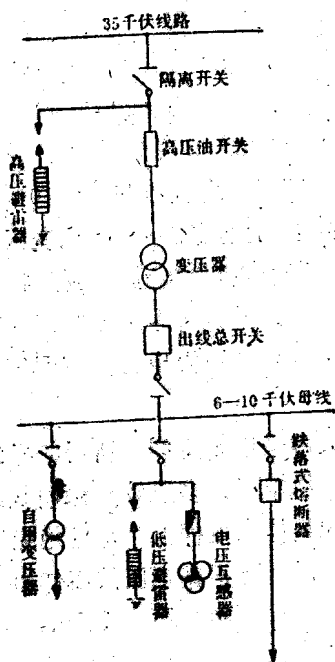


图 11-22

开关和高压油开关送到变压器。变压后再经过出线总开关，把电能送到6-10千伏母线上，然后经过跌落开关把电能输送到配电变压器。为了防止雷击，还设有高、低压避雷器；为了测量电路的电流、电压和功率，装置了电压互感器；为了保证变电所自用电（如照明等）又装有自用变压器，把电压降到380伏（或220伏）。

三、低压配电线路

前面我们简单叙述了高压输电线路的概况。但是，在通常接触得最多的还是低压电（380伏或220伏）。低压配电线路如图11-23所示。它由配电变压器、低压线路和配电盘三部分组成，我们分述如下：

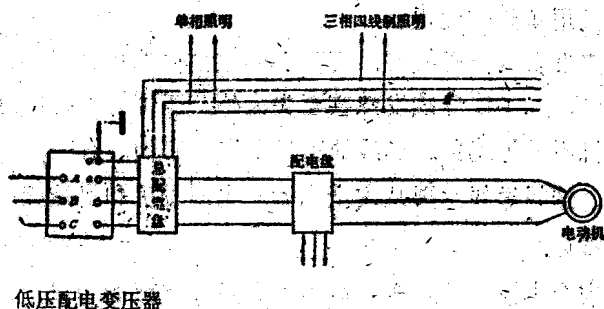


图 11-23

1、变压器台

电力网将电能以6-10千伏的电压送到用电地区后，由配

电变压器降到380伏（或220伏），供电动机等用电器使用。在厂矿里这个任务由配电所（室）来完成，在农村是由“变压器台”来完成的。

50千伏安以下的变压器，一般都采用单杆变台。320千伏安以下变压器，多用双杆变台。大型变压器因为重量大，一般用落地式，称为“地台”。杆上变台不占用耕地、安全，并能减少外力破坏，所以用得较广。

2、低压线路

由于我国低压配电变压器的副线圈采用Y形接法，所以低压配电线路都是三相四线制。一般电动机的额定电压是380伏，应该接在三根相线上；照明电灯的额定电压为220伏，应该接在一根相线和中性线上。前面我们提到，使用变压器时，要使各相负载平衡。在进行照明线路配接时，对于装灯数目多的单位，应采用三相四线制，把各组电灯平均分配到每一相线和中性线之间；对装灯少的零星的居民点，方可采用单相制配电。

架设农村低压线路，首先要知道如何选择导线。如果选用不当，除了使导线发热甚至失火外，还可能引起电灯发暗或电机不转等现象。导线的型号很多，它们各有一定的应用范围。选择导线主要从安全电流、电压损失和机械强度三方面来考虑。

安全电流 对于不同材料和不同截面的导线，都规定其允许通过电流的最大值，叫做安全电流，如果超过了这个值，导线就会发高热。因此，导线的工作电流不能大于安全电流。导线的工作电流，可以根据负载功率（ P ）和电源

电压 (U) 计算出来 ($I = \frac{P}{U}$), 然后到表11-2中查找安全电流略大于工作电流的导线应具有多大的截面积。

表 11—2 在周围空气温度35°C时常用导线安全电流表(安)

导线标准 截 面 积 (平方毫米)	根数/线径 (毫米)	室外架空敷设				室内明敷			
		裸导线		胶麻线		双套 塑料 橡皮线		胶麻线	
		铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
1	1/1.13					6		7	
1.5	1/1.37					10		11	
2.5	1/1.76					15	12	17	13
4	1/2.24	44		36	28	25	19	30	23
6	1/2.73	62		46	35	35	27	40	31
10	7/1.33	84		68	52	57	44	62	48
16	7/1.68	114	97	92	70	77	59	85	65
25	7/2.11	157	125	123	95	103	79	113	87
35	7/2.49	182	155	152	117	128	97	140	108

电压损失 从变压器到用电设备的线路中, 当有电流通过时, 由于导线具有电阻而产生电压降, 电能有一定的损耗, 这种电压降称为线路的电压损失。电压损失过大, 就会引起电灯发暗, 日光灯不能起辉, 电动机不能起动等现象。

电压损失通常用线路中损失掉的电压与额定电压的百分比来表示。如灯泡的额定电压为220伏，用 U 表示，在电路中实际加到灯泡上的电压为210伏，用 U_1 表示，线路中损失掉的电压

$$\Delta U = U - U_1 = 220 \text{ 伏} - 210 \text{ 伏} = 10 \text{ 伏}。$$

电压损失百分数为

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{10 \text{ 伏}}{220 \text{ 伏}} \approx 4.5\%。$$

按规定，动力用电线路电压损失不能超过5%；照明和动力合用的线路，电压损失不能超过6%；农村临时性的供电线路，电压损失最大不能超过10%。

配电变压器的输出电压为400/230伏，高于用电设备的额定电压380/220伏，主要是为了补偿线路的电压损失的。

机械强度 任何导线本身都有一定的机械强度。不同材料的导线机械强度不同，如同样粗细的铜线比铝线机械强度高；同种材料的导线，截面积大的机械强度高。室外架线要求的机械强度要高于室内布线所要求的机械强度，因而要求有较大的截面积。

按上述三个条件选择导线，有时得出三个不同结果。这应该如何处理呢？上述三个条件，在不同情况下，其主次作用不相同。例如在室内的照明电路中，由于导线所受的外力作用小，同时因为线路较短，电压损失不大，因此导线的安全电流便成了选择导线的主要条件；在室外的架空线路，由于经常受到外力的作用，所以机械强度便成了选择导线的主要条件；在线路较长、输送功率较大的情况下，电压损失便成为选择导线的主要条件。

〔例〕 某生产队共用40瓦灯泡25盏，25瓦灯泡40盏，从配电变压器到村内最后一盏电灯的单线长度为200米，要求电压损失不超过6%，如果用胶麻铝线，截面积应该多大？

解 因为架空线路较长，所以主要考虑电压损失，并根据电压损失来选择导线截面积。

设加在最后一盏电灯上的电压为 U ，电源的额定电压为 U_1 ，线路上的电压损失为 $\Delta U = U - U_1$ 。

因为
$$\frac{\Delta U}{U} = 6\%$$

所以
$$\Delta U = U \times 6\% = 220 \text{ 伏} \times \frac{6}{100} \approx 13.2 \text{ 伏}。$$

再根据负载的总功率 P 和电源电压 U 的大小，计算出线路中的电流强度 I

$$I = \frac{P}{U} = \frac{40 \times 25 + 25 \times 40}{220} = \frac{2000}{220} \approx 9 \text{ (安)}。$$

9安培的电流流过电阻为 R 的导线，产生的电压是13.2伏，从中可求出 R 的值。即

$$R = \frac{\Delta U}{I} = \frac{13.2}{9} \approx 1.46 \text{ (欧)}。$$

根据导线电阻公式 $R = \rho \frac{l}{S}$ ，可得

$$S = \rho \frac{l}{R} = 0.028 \times \frac{400}{1.46} \approx 8 \text{ [毫米]}^2。$$

查表11-1，发现没有截面8[毫米]²的铝线，这时应选择比它稍大一些的截面积为10[毫米]²的胶麻铝芯线。

3、低压配电盘

被配电变压器降到380/220伏的低压电，要经过配电盘

才能接到用电器上。配电盘上装有指示灯、保险丝、各种开关、起控制和保护作用的电器设备、测量仪表等。通过它可以监视电源或负载断路、短路及整个供电情况。

农村中使用的配电盘，多数是用木板包上铁皮做成的。

配电盘的形式很多，装置时可根据实际需要来决定装置哪些设备。图11-24是一个小型电灌站的配电盘。在板上装有三相电度表和单相电度表、伏特表、安培表、开关、保险丝和补偿起动器等。

电源线经过开关（实物图中未画出）后，分为两部分：一部分供电动机用，一部分供照明用。为了计量用电多少，两部分分别接一个三相电度表和一个单相电度表。从

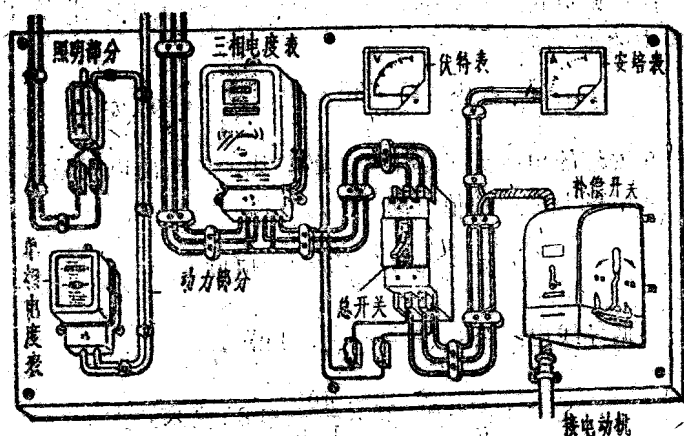


图 11-24

电度表引出的电源线，再分别接一三相开关和一单相闸刀开关，借以控制电动机和照明线路。这种开关是用来切断负载

的。

在开关后，照明线路则通过保险丝接至电灯；动力部分除了通过补偿起动器接电动机外，还接有伏特表和安培表，以便用来测量电压和电流。

配电盘上各电器、仪表和导线的选择，都要根据负载的大小而定。板上所有电器的金属外壳都必须接地。

第十二章 交流电动机

电动机是一种把电能转变成机械能的机器，是工农业生产中常用的动力设备之一。

解放前，我国电机工业非常落后，只是在上海、天津等几个大城市，有少数几个破烂不堪的电机厂，生产的电机数量少，质量也很差。国内使用的电动机，几乎全靠进口。

解放后，在伟大领袖毛主席的英明领导下，我国工人阶级坚决执行“独立自主、自力更生”的伟大方针，使我国电动机工业得到了迅速发展。新建的电机厂遍及祖国各地，我国自行设计、自行制造的具有我国特点的新型电动机（ J_2 、 JO_2 系列电动机），在工农业生产中已被广泛地应用。

在无产阶级文化大革命中，电机工人“抓革命，促生产，促工作，促战备”，又试制成功了具有世界先进水平的新型电动机—— J_3 、 JO_3 系列电动机，和国外同类产品相比，它的容量大、重量轻、体积小。现在我国生产的电动机，不但满足本国工农业生产的需要，还大量出口，支援世界革命。

我区在解放前没有电机厂，根本不能生产电动机。现在，我区生产的电动机畅销国内外。

电动机的种类很多，按其电源分，有直流电动机和交流电动机。交流电动机按相分，有三相电动机和单相电动机；按运行原理分，有同步电动机和异步电动机。异步电动机又按转子形式分为线绕式和鼠笼式两种。

因为交流电比直流电在生产中应用得广，所以我们着重介绍交流电动机，尤其是在农村最常用的鼠笼式异步电动机。学习它的构造、原理、使用方法和维护等方面的知识，以便为工农业生产服务，为社会主义革命和社会主义建设事业服务。

第一节 三相异步电动机的构造

在农村中最常见的三相鼠笼式异步电动机，如果把它拆开，就可以看见主要部分的构造，如图 12-1所示。

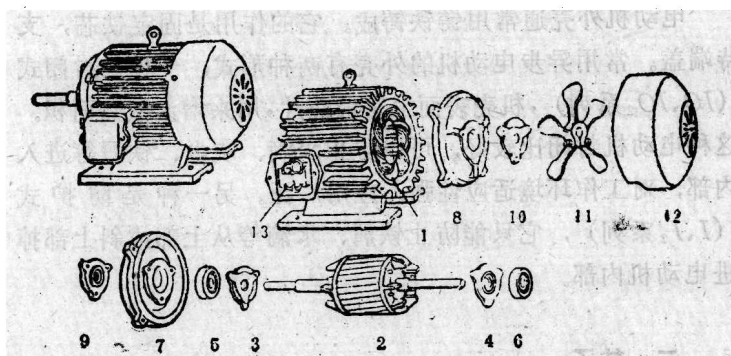


图 12-1

1、定子；2、转子；3、前轴承内盖；4、后轴承内盖；5、前轴承；6、后轴承；7、前端盖；8、后端盖；9、前轴承外盖；10、后轴承外盖；11、风扇；12、风扇罩；13、接线盒。

一、定子

定子是电动机固定不动的部分，它由定子铁芯、定子绕组和机座三部分组成。

定子铁芯的作用是构成磁路以便导磁的，因此要用导磁良好的材料来制造。目前生产的电机铁芯多用0.5毫米厚的硅钢片，叠成圆筒形，并在内圆上冲有一个个下线槽（通常以24槽及36槽为多），槽内放定子绕组。绕组（俗称线包）用绝缘导线绕成，嵌放在槽里时，绕组与槽壁间用绝缘材料隔开。这些绕组的线圈以一定的方式连接，然后组成三个独立的绕组，即三相绕组。使用时，在其中通以三相交流电。

电动机外壳通常用铸铁铸成。它的作用是固定铁芯，支持端盖。常用异步电动机的外壳有两种形式，一种是封闭式（JO、JO₂系列），机壳表面上有散热片，用来增大散热面积。这种电动机封闭比较好，可以防止水滴、灰尘、铁屑等进入内部，对工作环境适应性强，应用广泛。另一种是防护式（J、J₂系列），它只能防止铁屑、水滴等从上部或斜上部掉进电动机内部。

二、转子

转子是电动机的转动部分，由转子铁芯、转子绕组和转轴组成。转子铁芯也是电动机磁路的一部分，它一般用0.5毫米厚的硅钢片叠成，压装在转轴上。转子的外圆上开有许

多槽，槽内安放转子绕组导体。导体材料有铜条和铸铝两种。铜条绕组是把铜条插入转子铁芯的槽内，两端各焊上一个端环，构成通路，如图 12-2(a)所示。铸铝绕组是把铝熔化后，浇铸到转子铁芯的槽内，并将两个端环与冷却用的风叶也浇铸在一起，如图 12-2(b)所示。目前小型鼠笼电动机都采用铸铝转子。

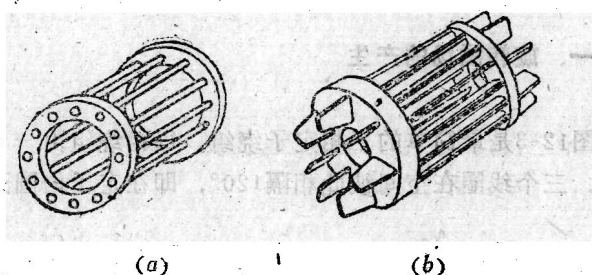


图 12-2

以上所介绍的转子绕组的形状，象个鼠笼，所以这种电动机叫做鼠笼式电动机。

三、端盖

端盖是固定在机座两端，用来安装轴承支承转子的。轴承的内、外盖，用螺丝固定在端盖上，以便对轴承进行维护与检修。在封闭式电动机的轴的一侧还装有风扇，外面加风扇罩，用来加强电动机的散热效果和保证安全运行。

此外，电动机的外壳上还可以看见吊环、接线盒、铭牌等，吊环是用来搬运电动机的；接线盒是定子绕组引出线头的地方；铭牌是关于电动机主要性能的说明。

第二节 异步电动机的工作原理

三相异步电动机是依靠旋转磁场的作用，使转子转动的，因此我们先讨论旋转磁场。

一、旋转磁场的产生

图12-3是最简单的三相定子绕组。每相绕组由一个线圈组成，三个线圈在空间彼此相隔 120° ，即在定子内圆开六个

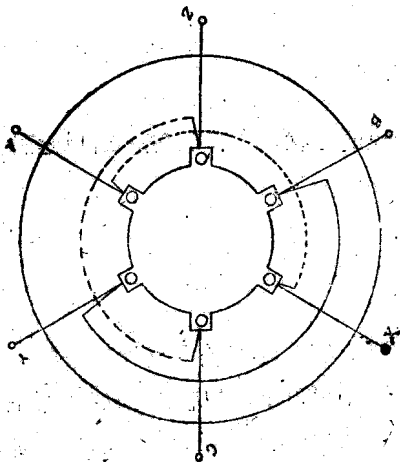


图 12-3

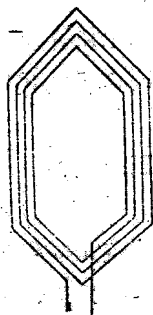


图 12-4

槽，槽距相等，在槽内放上三个绕组A-X、B-Y、C-Z。三相绕组的绕法相同，都如图12-4所示。三相绕组可以作 Δ

形连接，也可以作Y形连接。如果把三相绕组作星形连接，即把三个绕组的末端X、Y、Z连在一起，把三相电源接入三相绕组的A、B、C端，那么在定子绕组中便有三相对称的电流 i_A 、 i_B 、 i_C 通过。它们的幅值相等，相位差是 120° （图12-5）。

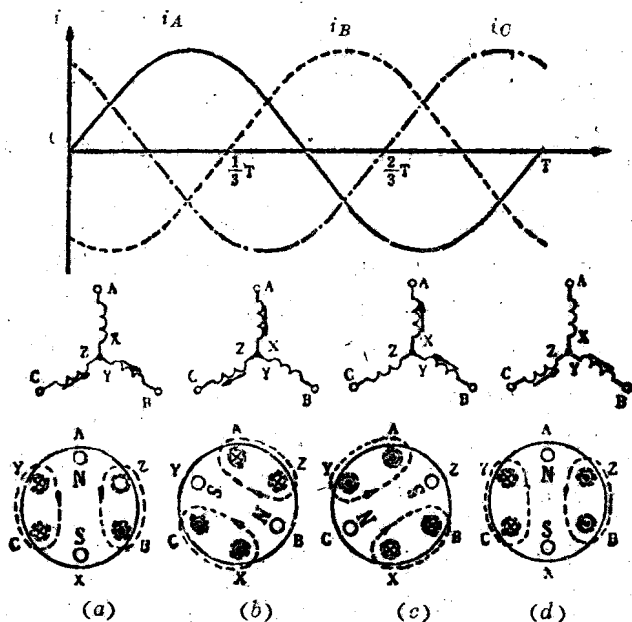


图 12-5

假定三相电流的正方向是从绕组的始端流入，末端流出，下面从几个不同时刻来分析三相电流流入定子绕组产生的合磁场。

当 $t=0$ 时，从图上可以看出 $i_A=0$ ，即A相绕组内没有电流； i_B 是负值，B相绕组电流由Y端流进、B端流出； i_C 为正值，C相绕组电流由C端流进、Z端流出。应用右手螺旋

法则，可以确定出合磁场的方向如图中(a)所示(先用右手螺旋法则确定通电导体磁力线方向，然后根据磁力线在磁场内部是从N极到S极的关系，找出合磁场的极性)。

当 $t = \frac{T}{3}$ 时， $i_B = 0$ ， i_A 是正值，电流由 A 端流进、X 端流出； i_C 为负值，电流由 Z 端流进、C 端流出。这时合磁场的方向在空间按顺时针方向转过了 120° ，如图中(b)所示。

当 $t = \frac{2T}{3}$ 时， $i_C = 0$ ， i_A 是负值， i_B 是正值，合磁场 又按顺时针方向转过了 120° ，如图中(c)所示。

当 $t = T$ 时，合磁场如图中(d)所示。跟 $t = 0$ 时相比，旋转了 360° 。因为三相交流电是周期性变化的，在下一个周期内的变化与上一周期相同，所以磁场仍然如前一周期的那种，继续旋转。也就是说三相交流电通入定子绕组，能够产生旋转磁场。

从图中还可以看出，旋转磁场的旋转方向与三相电流的顺序(相序) $A \rightarrow B \rightarrow C$ 是一致的。如果改变电流的相序，也就是交换任意两根定子绕组与电源的接线，旋转磁场的方向也跟着改变。用这个方法可以改变电动机转向。例如把 B、C 两相的接线对调一下，如图 12-6 中虚线所示。磁场旋转方向改变(但还按从 A 到 B 再到 C 的相序旋转)，电动机就会反转。这在使用电动机时是经常遇到的现象，例如我们接好线后，发现电动机转向不对，那么就可以对调任意两根接线。

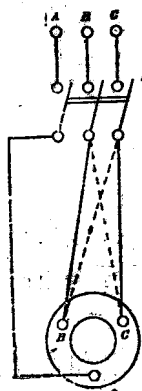


图 12-6

二、磁场的转速与磁极对数

前面讨论的旋转磁场只有一对磁极，当交流电变化一周时，它转一圈，如果交流电的频率是 f （即每秒钟变化 f 次），旋转磁场每秒钟就会转 f 圈。每分钟的转数则为 $60f$ 圈。我国三相交流电源的频率规定为50赫，于是每分钟的转数便为 $60 \times 50 = 3000$ （转），或者写为3000转/分。通常把它称为旋转磁场的转速。

下面来讨论有两对磁极（四极）的旋转磁场。

如果把线圈的数目增加一倍（即六个定子线圈），这时定子铁芯的内圆上得开12个槽。把六个线圈放在槽内，并按图12-7所示的顺序把同相绕组串联起来，如A相绕组的A—X

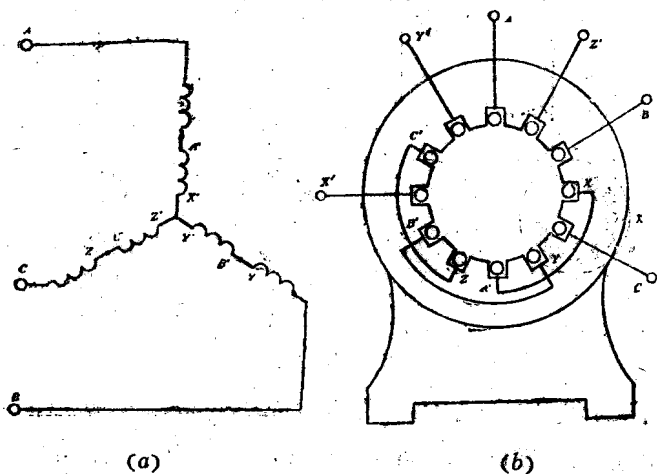


图 12-7

线圈的末端X与A'—X'线圈的始端A'连接，B、C两相

也用同样办法分别把两线圈串联起来。三相绕组的末端 X' 、 Y' 、 Z' 接在一起，构成三相绕组的Y形连接。在这一点上和有一对磁极的绕组情形相同。但是两者是有区别的，这里每相绕组分为两部分，这两部分绕组按同样顺序分别排在半个圆周上，于是各相绕组在空间排列的位置相差 60° 而不是 120° 。

我们仍然采用上述方法并参照图12-5来分析三相绕组电流 i_A 、 i_B 、 i_C 所产生的合磁场，并找出它的旋转与前面讨论过的合磁场旋转时的异同。为了讨论方便，我们只取交流电在一个周期的几个不同时刻进行分析（图12-8）。

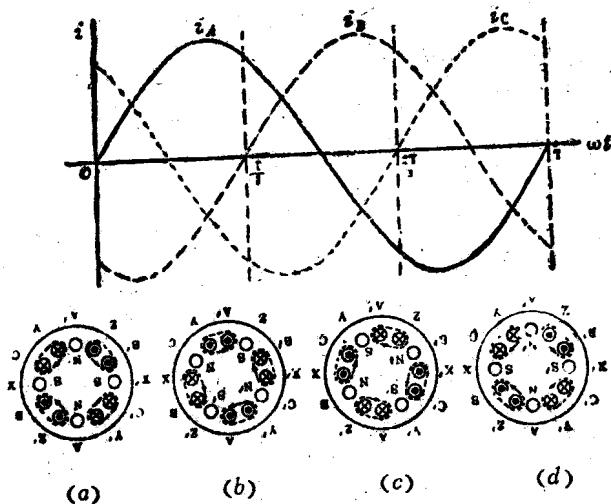


图 12-8

$t=0$ 时， $i_A=0$ ，A相没有电流， i_B 为负值，电流从 Y' 端流入、B端流出。在图12-8中，我们把B相电流的流动情况记录下来：电流从 Y' 端流入，然后流入 B' 端，又从Y端流入，最后从B端流出。此时 i_C 是正值，即电流从C端流入、Z端流

出，再从C'端流入，最后从Z'端流出。用右手螺旋法则，同样可以判断出这些电流的合磁场，如图12-8(a)所示。从中可以看出，这时合磁场有两对磁极。继续分析 $t = \frac{T}{3}$ 、

$t = \frac{2T}{3}$ 及 $t = T$ 三个瞬间的合磁场，情形如图中(b)、(c)、(d)所示。从图中可以看出，合成磁场都有两对磁极，即两个N极，两个S极，所以又叫四极磁场；还可以看出，交流电变化一周，磁场只转了半圈，即两对磁极磁场比一对磁极磁场的转速慢了一半，成了 $\frac{60f}{2}$ 转/分。同理，三对磁极（六极）磁场的转速为 $\frac{60f}{3}$ 转/分。

如果有 P 对磁极，则旋转磁场的转速 n 为

$$n = \frac{60f}{P} \text{ (转/分)}。 \quad (12-1)$$

即磁极对数越多，磁场转速越慢。

当交流电频率 $f = 50$ 周/秒时，可以得出，两对磁极旋转磁场的转速为 $\frac{60 \times 50}{2} = 1500$ 转/分；三对磁极旋转磁场的转速为 $\frac{60 \times 50}{3} = 1000$ 转/分。

三、异步电动机的工作原理

图12-9是一个三相异步电动机在某一时刻工作情况的示意图，里圈上的小圆表示转子导体。当定子绕组接通三相电源之后，在定子内的空间便产生旋转磁场。假定旋转磁场按

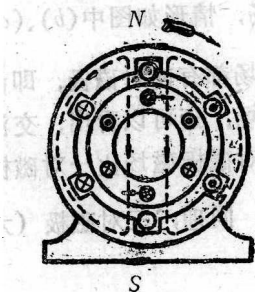


图 12-9

顺时针方向旋转，则转子和磁场之间就有相对运动，转子导体便会切割磁力线而产生电流。根据右手定则，可以判断出转子下半部导体所产生的感生电流的方向是离开读者的，而转子上半部的导体所产生的感生电流方向是指向读者的。由于所有转子导体都被两个铜环（端环）连接在一起，因而构成了闭合回路。感生电流就在这个回路里流动（叫做转子电

流）。通电导体在磁场里是要受力作用的，用左手定则可以判断出转子下半部导体所受到的磁场力是向左的，而上半部导体所受到的磁场力是向右的。结果整个转子受到顺时针方向的力矩的作用，于是转子就追随着旋转磁场按顺时针方向转动起来。因为转子导体中的电流是由旋转磁场感应而来的，所以这种电动机又叫感应电动机。

转子的转速 n 是永远小于旋转磁场的转速 n_s 的。假使 $n = n_s$ ，那么转子导体和旋转磁场之间就不存在相对运动，转子导体不切割磁力线，也就不产生感生电流，于是转子不再受力矩作用而转动。所以转子速度总是落后于旋转磁场的速度。 n 比 n_s 约小 3~5%。这就是异步电动机的名称的由来。例如我们常见的电动机，磁场旋转速度为 1500 转/分，而转子转速一般为 1450 转/分。

根据上述分析，三相异步电动机的工作原理，可以归结为：三相交流电流入定子绕组中，产生了旋转磁场，由于磁场和转子之间的相对运动，在转子导体中产生了感生电流，这个电流和磁场相互作用的结果，转子就在力矩的作用下转动起来。这说明在三相异步电动机的工作过程中，始终贯穿着电和磁的相互依赖和相互斗争，而转子的转动，正是电和磁相互依赖和相互斗争的结果。

第三节 三相异步电动机的定子绕组

前面提到，要产生旋转磁场，定子绕组必须按一定方法安装在定子槽内。本节将介绍几个典型例子，说明有关绕组的基本知识，以便在电机被烧毁后必须重新绕制时，能够有一定的理论知识作为指导。

当打开电动机后，可以看见定子绕组放在定子槽里的情形。绕组导线一般采用高强度漆皮铜线（过去常用纱包线。现在有些工厂为了节省铜材，以铝线来代替铜线）。中、小型电动机下到槽里的线圈都是多匝线圈。线圈由槽里的直线部分和槽外部分组成。这两部分的作用是不同的：槽里的直线部分，当电流流过时，能产生旋转磁场，这部分线圈叫做线圈的有效边；而槽外部分只起连接作用，叫做线圈的端线。每个线圈都有两个有效边。一个槽内如果只放一个线圈的有效边的，叫做单层绕组，如图12-10(a)所示；一个槽内放两个线圈的有效边的，叫双层绕组，如图12-10(b)所示。

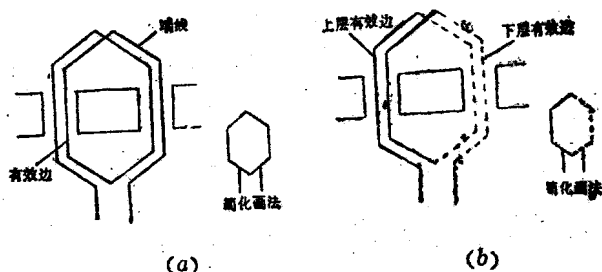


图 12-10

按照绕组的形式，还可以分为同心式、迭式、链式、交叉式等。只要布置得当，不论是哪种绕组形式，也不论是单层还是双层，都能产生我们要求的旋转磁场，只不过电气性能略有差异，材料用得多少不同而已。

一、单层绕组

十瓩以下的小容量电动机中，广泛采用单层绕组。这种绕组线圈比较少，线圈之间的接线也少，工艺简单，绝缘材料用量少。但是它的电气性能不够好。

1、二极单层绕组

凡是额定转速为2900转/分的机械，如4BA型离心泵等，如果直接配用电动机，电机转子轴的转速也必须是2900转/分。这样的电动机旋转磁场的转速应是3000转/分，也就是二级电动机。图12—3画的是一个最简单的二级电动机的示意图，因而它的绕组也是一个最简单的二级单层绕组。前面介绍的是这个绕组怎样产生旋转磁场，现在则来介绍这个

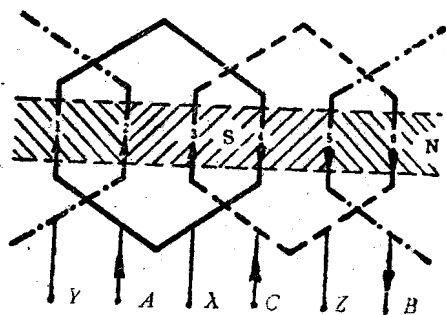


图 12-11

绕组本身的构造情形，并把它作为研究复杂绕组的基础。

从图12—3中看出，A相绕组的两个有效边，在空间位置占了半个圆周。如果把与A端相连的有效边所在的槽规定为第1槽，那么另一个有效边就占了第4槽。B相绕组的两个有效边分别占了第5槽和第2槽，C相绕组的两个有效边分别占了第3槽和第6槽。A、B、C分别称为三相绕组的始端，X、Y、Z分别称为三相绕组末端。

在研究绕组时，为了清楚起见，设想把定子从某两槽（比如1、6两槽）中间切开并拉直，然后把绕组的分布及接线情况对应地画在平面图上，这就成了绕组的展开图。如果用这个办法把上述绕组展开，情形就如图12—11所示。在绕组展开图上，线圈均采用简化画法（图12—10）。在展开图上A、C两相绕组形状是完整，B相绕组被分开两部分画了出来，这种情况在任何展开图上都是存在的。

图12—5中只画出了几个特定时刻绕组中电流流动的情形：三相绕组的六个有效边里，总有一相的两个有效边中没有电流通过，但在一般情况下，六个有效边中是都有电流通

过的，这从表示三相电流的图上是很容易看出来的。与上述几个特定时刻相比，此时六个边中每三个邻边电流方向一致（在特定时刻是每两个邻边方向一致，见图12—5）。

在三相绕组中，分析电流走向时，总是认为在某一时刻电流从始端流入、末端流出的。图12—11中没有画出三相绕组最后是怎样连接的，因为在使用电动时才根据电源来选择接法。

在生产实践中是根据要求的电机转速（还有功率）来安排绕组的。因为旋转磁场的转速和磁场的磁极对数存在着由式(12-1)所决定的关系，所以通常就根据磁极对数来安排绕组。假设铁芯有 Z 个槽，需要得到 P 对磁极，每个磁极所对应的槽数就是 $\frac{Z}{2P}$ 。在上述二极磁场里， $Z=6$ ，于是每个磁极对应的槽数是 $\frac{6}{2}=3$ 。我们把每个磁极对应的槽数称为极

距，用 τ 表示。在我们分析的这个电动机里， $\tau=3$ 。

从图上可以看出，在某一时刻，1、2、3槽里的线圈有效边，虽然不同相，但它们电流的方向是一致的；4、5、6槽的三个有效边，电流方向也是一致的，但与前三槽里的电流方向相反。为了分析方便起见，把电流方向一致的三个相的槽，作为一个极距，于是1、2、3槽是一个极距；4、5、6槽又是一个极距。

安排绕组时，还需要知道每相各有哪些槽。因为每个极距是三相绕组平均占有的，因此，每极每相的槽数为

$$\frac{Z}{2P} \times \frac{1}{3} = \frac{Z}{6P}。对于6槽二极的电动机，每极每相槽数为$$

$\frac{6}{6 \times 1} = 1$ 。从展开图上可以看出A、B、C三相绕组，在每个极距下各占一槽。

此外还需要了解三相绕组的始端所隔开的角度。在只有一对磁极($P=1$)时，三相绕组始端隔开 120° ；当有两对磁极($P=2$)时，三相绕组始端隔开 60° 。从这里可以看出，始端所隔开的角度是 $\frac{360^\circ}{3P}$ ，隔开的槽数为 $\frac{Z}{3P}$ 。

一个线圈的两个有效边的距离称为节距，也叫跨距，用 y 表示。例如三相绕组中某相绕组的一个有效边在第一槽，另一个有效边在第7槽，我们就把这个线圈的节距写成 $y=1 \sim 7$ （读作1到7），或写作 $y=6$ 。

电动机的节距有两种：整节距和短节距，节距和极距相等的，叫做整节距或整距；节距比极距短的，叫做短距。

采用短节距嵌线有以下优点：

(1) 缩短节距也就使端线缩短，从而节省了导线材料，减少了线圈的电阻，不仅降低了铜耗，而且降低了因线圈电阻而引起的温升。提高了电动机的效率。

(2) 便于调节线圈的匝数。例如一台电动机经过计算，每个线圈的匝数为9.5，这在实际嵌线时是办不到的。我们可以把线圈的匝数增加到10，既缩短节距，又不影响线圈所产生磁场的性能。

(3) 因为端线缩短，整个线圈也变得短小坚固。电动机的轴也可以因线圈缩短而相应缩短，增加轴的机械强度，减小了电动机的体积和重量，节省材料，降低了成本。

(4) 理论和实践都证明短节距对电动机的电气性能有

所改善，可以提高功率因数。

所以，一般电动机多采用短节距绕组。

有了上面的知识，就可以分析实际电动机的绕组了。现在来分析一台24槽的二极电动机的绕组。

首再算出极距 $\tau = Z/2P = 24/2 = 12$ ，显然每极相槽数是4。先画一个24槽的定子展开图，并标出槽序，如图12-12所示。把24槽分为二等分，每等分为12槽，用 τ 表示，这就是极距。每个极距再分为三小等分，每分4槽，这就是每极每相槽

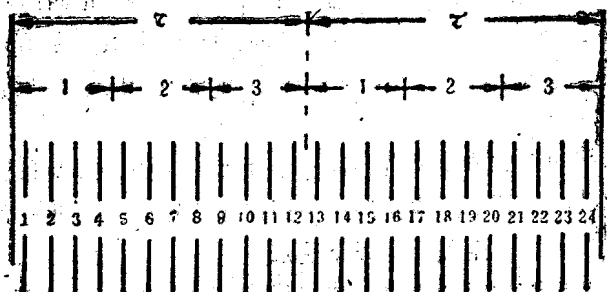


图 12-12

数。从而知道了每极每相各占哪些槽。每个槽都被一个有效边占据，这些有效边，每两个组成一个线圈，根据线圈的不同组合方式和不同的连接方法，就形成了不同的绕组。但不论怎样连接，都应该保证产生旋转磁场，保证产生所要求的极数，并且磁极是一个一个交替出现的。

前面讲到，在异步电动机里常用的绕组有同心式、迭式、链式和交叉式等形式，这些绕组形式各有优缺点，因此各种形式都在应用。它们不受极数的限制。

同心绕组 如果把属于A相有效边3-14、4-13、1-16

2-15分别组成四个线圈，每两个线圈组成一组(极相组)，每个极相组的两个线圈一个套一个，象个“回”字(图12-13)。

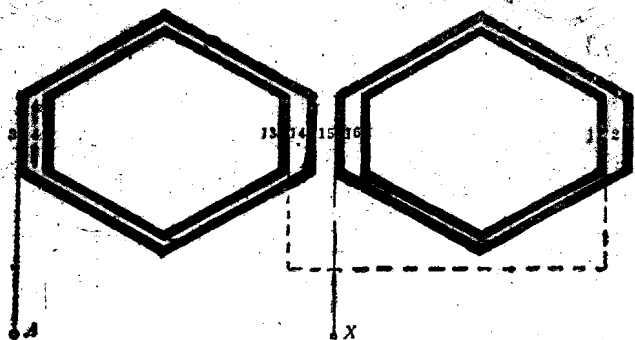


图 12-13

这种绕组叫做同心绕组，又叫回形绕组。为了保持A相绕组形状的完整，在画图时把本来在前面的1、2两条有效边，顺次移到第24槽的后面。

按照绕组的接线规律，A相四个线圈的连接顺序是：
A—3—14—4—13—1—16—2—15—X。

B相绕组的始端，应该和A相绕组的始端隔开 $\frac{Z}{3P} = \frac{24}{3} = 8$ 个槽，即为第11槽的有效边。线圈连接的顺序是：B—11—22—12—21—9—24—10—23—Y。

C相绕组的始端又应该和B相绕组的始端隔开8个槽。接线顺序是：C—19—6—20—5—17—8—18—7—Z。

三相绕组的整个情形，如图12-14所示。

同心绕组的节距有两个，例如在图12-14中， $y_1 = 11$ ， $y_2 = 9$ 。因此同心绕组绕制时比较麻烦，这是同心绕组的缺点。但是它在嵌线时比较容易，小容量(10KW以下)的二极电动机，多数采用同心绕组。

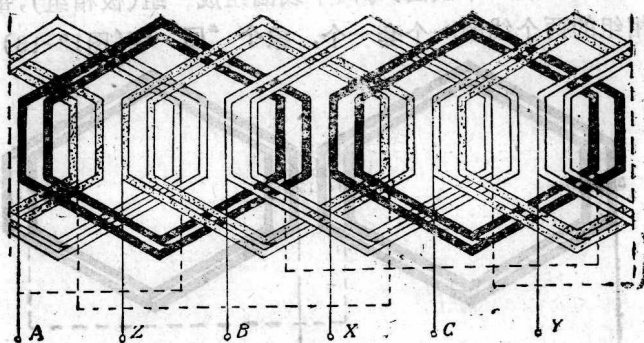


图 12-14

2、四极单层绕组

凡是额定转速为1450转/分的机械，如6 HB型混流泵，如果直接配用电动机，那么电动机转子轴的转速也必须是1450转/分，这样的电动机是四极电动机。因为图12—7表示的是一个最简单的四机电动机，所以它的绕组也是个最简单的四极绕组。

如果把这个绕组展开，就如图12—15所示。每相绕组各由两个线圈组成，两个线圈可以串联，也可以并联。在图12—15中，A相的第一个线圈的两个有效边在第1槽和第4槽，第二个线圈的两个有效边在第7槽和第10槽。从图中可以看出：第四槽的有效边和第7槽的有效边是连接的，即A相绕组的连接情形是1—4—7—10（B相是5—8—11—2，C相是3—6—9—12），不难看出，每相的两个线圈都是串联起来的，三相绕组的始端A、C、B依次隔开两个槽。

比较图12-13和图12-17可以看出，四极绕组的槽数比二极绕组的槽数多一倍，因而槽里所下的线圈也多一倍。如一

个最简单的二极绕组只要六个定子槽和三个线圈即可；一个最简单的四极绕组却需12个定子槽和六个线圈。再比较一下这两个展开图，还可以看出，四极电机的一半绕组，正好相当于一个二极电机的绕组，极距 ($\tau = \frac{Z}{2P} = \frac{12}{2 \times 2} = 3$) 和每极每相的槽数 (是1) 和二极绕组都是相同的。

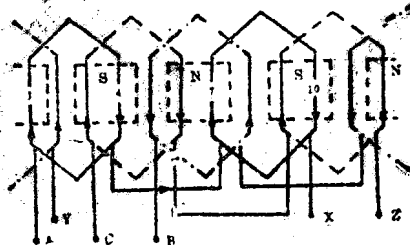


图 12-15

通过上面的对比，对四极绕组的分布就比较清楚了。

下面我们来分析一个36槽的四极绕组布置情况。36槽中，每相绕组占12个槽，即有12个有效边，因此每相绕组有6个线圈，三相绕组共有18个线圈。单层绕组的线圈数是槽数的一半。

仿照二极绕组的布局，把定子槽分为四分，即求出极距 $\tau = \frac{Z}{2P} = \frac{36}{4} = 9$ ，那么，每极每相就占3个槽。

选绕组 如果把属于A相的有效边1-10、2-11、3-12分别组成三个线圈，并把这三个线圈，按照前一个线圈的末端接后一个线圈的始端的规律串联起来，即把10-2和11-3连接起来，便组成了一个极相组。用同样的办法还可

以把属于 A 相的 19-28、20-29、21-30 的六条有效边也连接成一个极相组。然后,再把两个极相组串联起来,便是 A 相绕组,如图 12-16 所示。这种绕组的节距都是一样的,如在图 12-16 中都是 9 (整节距),线圈是一个压一个地放置的,所以叫做迭绕组。

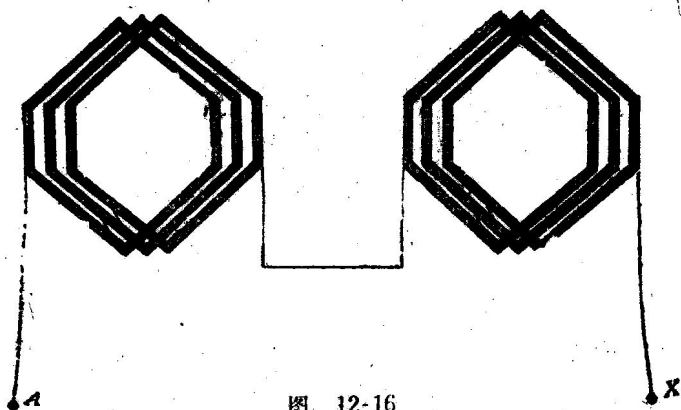


图 12-16

图 12-17 是整个 36 槽四极单层迭绕的展开图。

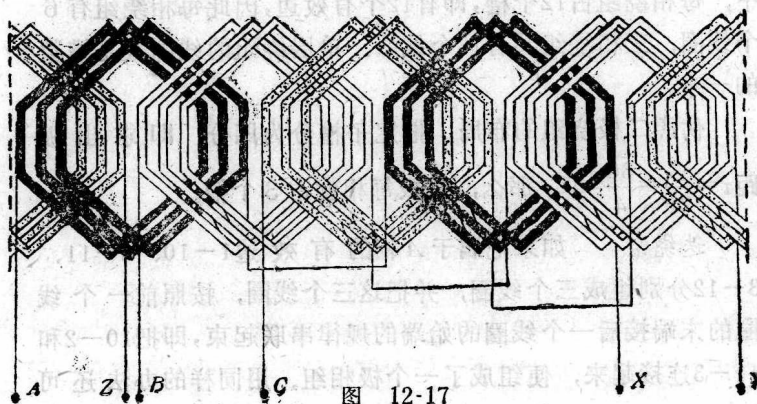


图 12-17

A相绕组的始端是第1槽的有效边，B相绕组的始端与它隔开 $\frac{36}{3P} = \frac{36}{6} = 6$ 个槽，所以应为第7槽的有效边，C相绕组的始端应为第13槽的有效边。

单层迭绕组的电气性能不够好，又费材料，但它简单整齐，绕制和嵌线都很方便。在旧型号的电动机里，还有用这种绕组的。

链式绕组 当线圈采用节距 $y=7$ (短节距)时，A相连接后如图12-18所示，称为链形绕组。

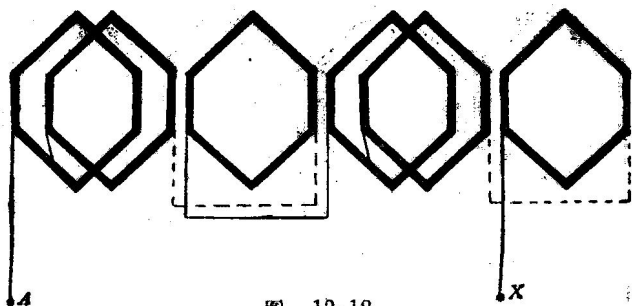


图 12-18

图12-19是36槽四极链绕组的展开图。A相绕组的始端

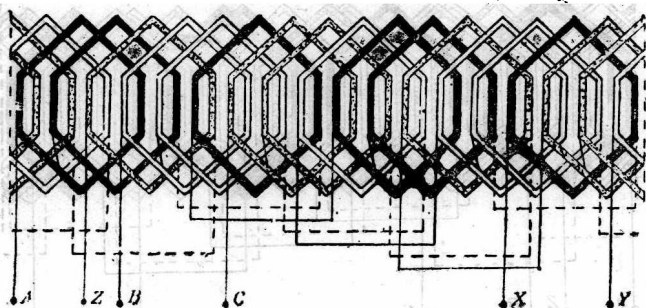


图 12-19

为第1槽的有效边，B相绕组的始端与它隔开 $\frac{36}{3P} = \frac{36}{3 \times 2} = 6$ 个槽，即为第7槽的有效边，C相绕组的始端是第13槽的有效边。

链形绕组的槽外部分比较短，用料省，容易安放，有良好的通风条件，在单层绕组中应用很广。

交叉绕组 如果A相绕组连接后如图12-20所示，即在六个线圈当中，2-10、3-11、20-28、21-29四个线圈类似

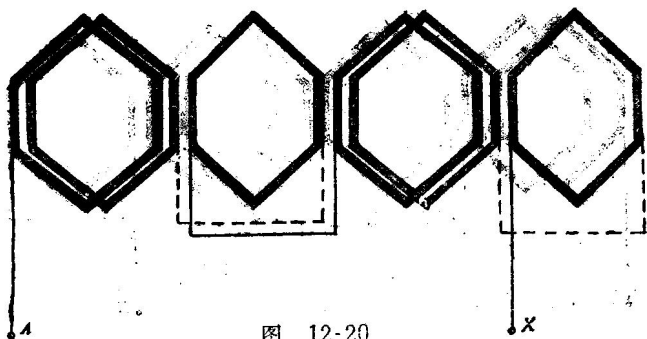


图 12-20

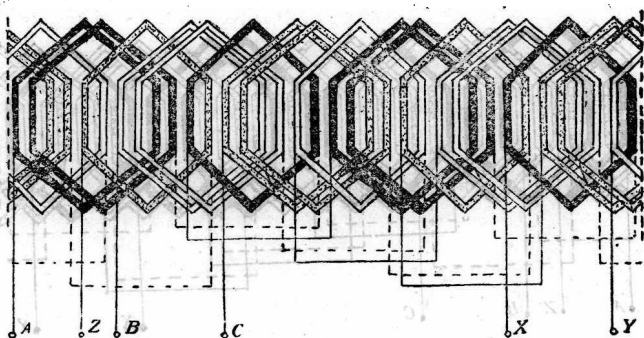


图 12-21

单迭层绕组，节距为 8，12-19、30-1（最后一条有效边的编号是 1）两个线圈的排列又类似链形绕组，而且节距为 7，这类绕组称为交叉式绕组。与迭绕组相比较，这种绕组节省材料，因此应用较为普遍。

三相绕组的完整情形，如图 12-21 所示。三相绕组的始端分别为第 2、第 8、第 14 槽的有效边。

二、双层绕组

前面曾经提到，所谓双层绕组，就是在一个定子槽内放置两个有效边，一个在上层，另一个在下层。每一个槽中上层有效边必须和另一个槽中的下层有效边相连，组成一个线圈。双层绕组都是短距的。我们仍依 36 槽四极绕组为例来说明双层绕组的分布情形。

双层迭绕组 如果把第 1 槽的上层有效边和第 10 槽的下层有效边组成一个线圈，第 10 槽的上层有效边和第 19 槽的下层有效边组成一个线圈……，整个定子就有 36 个线圈（在单层绕组里定子只有 18 个线圈），比单层绕组的线圈数增加一倍。如果线圈的节距是 9，就是整距绕组。

节距可以自由选择。前面提到，整距绕组没有短距绕组电气性能好，在节距 y 与极距 τ 之比为 0.8 时，电动机性能最好。一般比值 $\frac{y}{\tau}$ 都在 0.8~0.9 之间。如极距 $\tau=6$ ，节距则取 $y=5$ ； $\tau=9$ ，则 $y=7$ （或 8）； $\tau=12$ ，则 $y=10$ （或 11）； $\tau=15$ ，则 $y=12\sim14$ 。

图 12-22 是 $y=7$ 时的双层迭绕组的展开图。每相绕组有 12 个线圈。对于 4 相绕组，第一个线圈的上层有效边在第

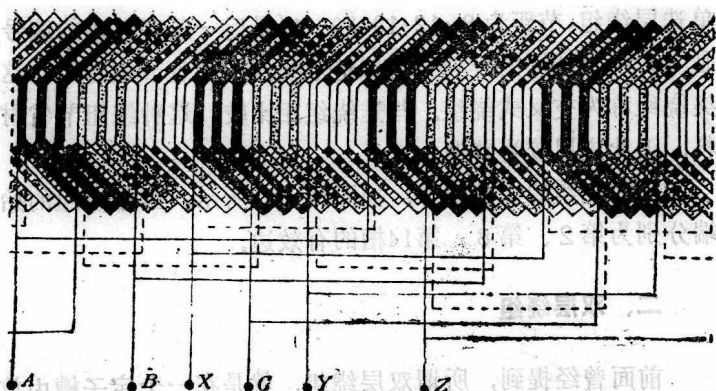


图 12-22

1 槽, 下层有效边在第 8 槽; 第二个线圈的上层边在第 2 槽, 下层边在第 9 槽, 第三个线圈的上层边在第 3 槽, 下层边在第 10 槽。这三个线圈串联起来组成一个极相组。从第 1 槽和第 10 槽各引出始、末两端线。象这样的极相组, A 相还有三个: 即 10、11、12 三槽的上层边与 17、18、19 三槽的下层边, 19、20、21 三槽的上层边与 26、27、28 三槽的下层边, 28、29、30 三槽的上层边与 35、36、1 三槽的下层边, 分别组成的三个极相组。每个极相组, 各有始、末两条引线。如果把这四个极相组引线, 按这样的顺序: 10 槽的下层边—19 槽的下层边, 10 槽上层边—19 槽上层边, 28 槽下层边—1 槽下层边, 分别连接起来, 再从第 1 槽上层边和第 28 槽上层边引出始、末两端线, 也就是把四个极相组串联起来。这种接法叫做一路串联。这样连接后, 1、3 两极相组中的电流和 2、4 两极相组中电流方向相反。它相当于把两个二极绕组再串联起来, 前面讲的绕组, 都是一路串联接法。

如果把 1、2 和 3、4 两个极相组按上述方法分别串联起来后, 再将两者并联起来, 即把 1 和 19 槽上层边, 10 和 28 槽的上层边分别接起来, 做 A 相绕组的始端 A 和末端 X, 这

种接法叫做两路并联，图12-22就是两路并联的。它相当于把两个二极绕组再并联起来。

并联接法在大容量电动机里经常采用，因为电流大，分成几条支路后，每条支路的电流就减小到几分之一。至于到底采用哪种接法，还应考虑电压与支路中串联线圈的匝数，弄错了常常烧毁电机。

双层迭绕组电气性能好，应用很广。

上面我们介绍了绕组的几种形式，我国生产的电动机常用绕组的种类见表 12-1。

表 12-1

绕组型式	电动机型号			槽数	线圈 节距
	系列	容量	极数		
单层同心式	<i>J</i>	10瓩及以下	2	24	1—12 2—11
	<i>JO</i>	7瓩及以下	2		
	<i>JO₂</i>	13瓩及以下	2		
单层链式 (单链)	<i>J</i>	0.6 1.0瓩	4	24	1—6
	<i>JO</i>	4.5瓩及以下	6	36	1—6
	<i>JO₂</i>	1.5瓩及以下	4	24	1—6
		7.5瓩及以下	6	36	
		5.5瓩及以下	8	48	
	<i>JJO</i>	7瓩及以下	4	36	1—8
单层交叉式	<i>JO₂</i>	2.2 1.5瓩	2	18	1—9 2—10
		10瓩及以下	4	36	
双层迭式 (双迭)	<i>JJO</i> <i>JO₂</i> 大部分 <i>J₂</i> 全部				

三、绕组接线的一般规律

我们不能满足于一般地了解绕组的形式，应该学会按要求的自行安排绕组。为此，需要对上面学过的知识，进行总结，找出规律。

1、按极分槽

电动机定子铁芯冲片上已经开好了槽子，所以定子槽数 Z 是固定的。根据磁极对数 P ，按公式 $\tau = \frac{Z}{2P}$ 算出每极下的槽数。每一瞬间，同一极距下的线圈电流方向一致，相邻极距下的电流方向相反，这样才能在相邻极距内产生不同极性的磁场，磁极就一个 N ，一个 S 地交替出现。

2、按相分槽

因为三相绕组都是对称的，每一极距的槽要由三相平均占有，于是每极的槽（即 τ ）要分成三等分，就得出每极每相的槽数 q ， $q = \frac{\tau}{3}$ 。再按 A 、 B 、 C 的相序，在展开图上标出各相所占的槽和线圈有效边。

3、组成线圈和极相组

在展开图上标出各相所占的槽和线圈有效边后，就会看出，如何成线圈和极相组，有着几种不同方法，也就会出现不同的绕组形式，如迭式、同心式、链式、交叉式等。这些不同形式的绕组不受极数的限制，即任何形式都可以采用。这时就按端线最短、最省材料，也就是节距最小的原则（当然还要考虑其它要求）来选取绕组形式。

4、连接极相组

相极组再串联（在较大的电动机中，串联后还要并联几个支路才能使线圈中电流不过大）起来才能形成绕组。在进行极相组连接时，要注意有效边电流走向，也就是要注意磁极的极性，极性是由电流方向决定的。相邻极距下的线圈串联时必须是末端接末端或始端接始端，这样才能保证电流走向相反。同一极距下的线圈串联，则是始端接末端。这样才能保证电流走向相同。

5、接引出线

连接好极相组之后，就形成了三个独立的绕组，每个绕组都有始端和末端。三相绕组始端引出线A、B、C要互差 360° ，即 $\frac{2}{3}$ 极距。末端X、Y、Z也要互差 $\frac{2}{3}$ 极距。

上述过程可以归纳成口诀：

每极槽数三相占，

先标每相有效边。

组成线圈用短距，

极相连接最关键：

邻极电流向不同，

异极串联找同端。

相距三分之二极，

引出A、B、C三线。

第四节 电动机的选择

电动机总是要带动另外一些生产机械的，如带动水泵灌溉田地，带动磨粉机加工粮食等。根据生产机械的特性和要求，要选择适当功率、转速的电动机。并且，电动机又是由变压器供电的，因此还要考虑变压器和电机间电压、容量的配合。

为了正确地选用电动机，首先要了解电动机的性能。

一、电动机的铭牌

电动机的规格性能及使用条件都标在铭牌上，所以铭牌对于电动机的正确使用、维护、修理等都是必不可少的。表12-2是小型异步电动机的铭牌。

表 12-2 异步电动机铭牌

三 相 异 步 电 动 机			
型 号	J03—90S4	标 准 编 号	
功 率	1.5瓩	接 法	Y
电 压	380伏	定 额	连续
电 流	3.68安	绝 缘 等 级	B级
转 速	1430转/分	温 升	75°C
频 率	50赫兹	重 量	24公斤
出 厂 编 号		出 厂 日 期	
× × 电 机 厂			

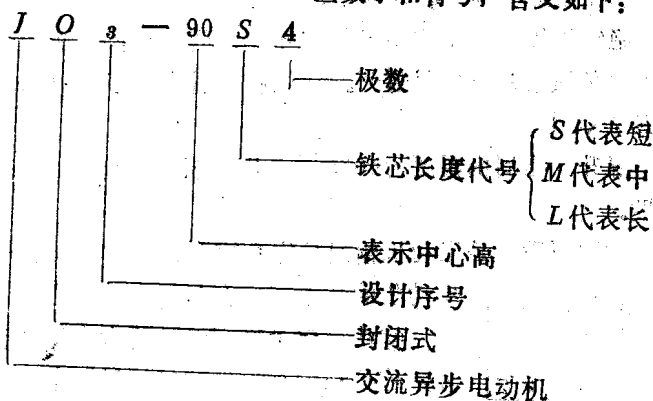
型号 表示机座的结构型式、极数及转子类型等。型号均用汉语拼音，字母含义见表12-3。

表 12-3

汉语名称	字母代号	汉语名称	字母代号
交流异步	J	双鼠笼	S
铝线	L	防爆	B
多速	D	高速	K
线绕式	R	起重、冶金	Z
高起动转矩	Q	高转差率	H

为了适应不同的工作环境，把电动机的外壳做成不同型式。工厂和农村常用的是封闭式和防护式的三相异步电动机，封闭式用JO(或JO₁、JO₂)表示，防护式用J(或J₁、J₂)表示。此外还有其它一些型号的电动机，如外壳没有保护作用的开启式，矿井里用的防爆式，水中用的密封式等。

在字母的后面，还有一些数字和符号，含义如下：



功率 也叫容量，表示电动机所能输出的最大允许机械

功率。

效率 是指电动机的输出功率除以它从电网输入的功率。即 $\eta = \frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}}$ 。一般电动机的效率在0.7~0.9左右。

电压 指在正常运行时，加在定子绕组上的线电压。农村常用的电动机电压为380伏。有的电动机铭牌上标有两种电压值，如220/380伏（这时铭牌上的接法就写 Δ/Y ）。这是对应于三角形和星形接法的额定电压，定子绕组接成三角形(Δ)时，额定电压为220伏，接成星形(Y)时，则为380伏。

电流 是指电动机在额定电压、输出额定功率情况下的线电流。一般也标有两个值，分别表示电动机在三角形接法时和星形接法时的额定电流。

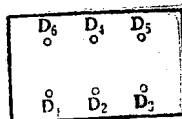
转速 指电动机在正常运行时的转速。

定额 表明电动机在额定功率下允许的使用方式。定额有连续、短时、断续三种。如果定额是“连续”，表明这台电动机可以在额定功率下长期使用。

绝缘等级 在电机中导体与导体之间、导体与铁壳或铁芯间都必须用绝缘材料隔开。绝缘材料种类很多，分Y、A、E、B、F、H、C七级。

温升 指周围温度为40°C时，电动机所允许再升高的温度。

功率因数 是电动机输出额定功率时的功率因数。一般电动机的功率因数在0.8~0.9左右。



接法 定子三相绕组的六个接线头，分别连接在六个接线柱（端子）上，六个端子的排列如图12-23所示。 D_1 、 D_2 、 D_3 、

图 12-23

分别相当于三相绕组的始端 A, B, C ; D_1, D_2, D_3 分别相当于三相绕组的末端 X, Y, Z 。三相绕组可以接成星形，也可以接成三角形。例如一台铭牌上标的电压是220/380伏，当电网电压是220伏时，应该接成三角形，如图12-24所示；当电网电压为380伏时，应该接成星形，如图12-25所示。

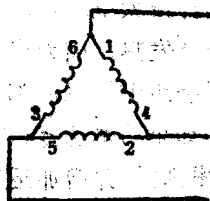
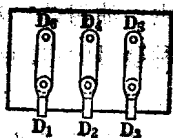


图 12-24

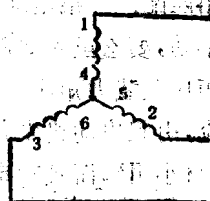
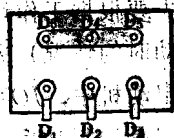


图 12-25

农村常用的是以下几种电动机：

J系列电动机 是防护式鼠笼转子异步电动机。适用于灰尘、水滴较少的地方。

JO系列电动机 是封闭扇冷式鼠笼转子异步电动机。能防止尘埃、水滴、粒屑等飞溅到电动机里。农村中碾米机，磨粉机，水泵等可采用这种电动机。

J_1, JO_1, JO_2 等系列分别是J、JO系列经过改进后的同类型号电动机。

JTB系列电动机 是封闭型立式鼠笼电动机，它是与深井泵配套的专用电动机。

JOB系列电动机 是与潜水泵配套的电动机，电动机和水泵都浸在井水里。

二、怎样选择电动机

首先要根据工作环境（有无灰尘、油污等）和机械性质（如起劫时的情况）来决定采用哪种型号的电动机。在农村使用的电动机中，JO系列占大多数。

第二是选择功率。被选用的电动机的功率必须和机械的功率相匹配。如果电动机的功率选择得太小，电动机要么根本带不动，要么虽然能起动，但很快就发热。因为电动机的额定力矩比负载力矩小，转子和定子绕组中的电流都要超过额定电流，引起电动机发热甚至烧毁。如果功率选择得太大，不仅“大材小用”，而且功率因数和效率都低，并增加运行费用。

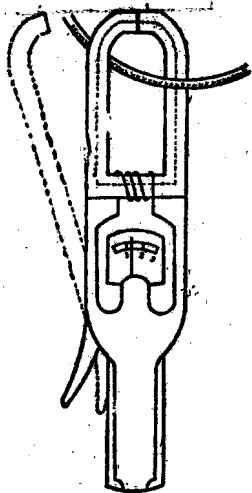


图12-26

当一台电动机带动机械运行时，我们只要测量一下电流就可以知道匹配是否恰当。如图12-26所示，用钳形电流表测量电流，如果电流超过额定值，则说明电动机的功率小了；如果电流低于额定值，则电动机选大了。

为了正确地选用电动机，我们把一些农用机械和应配电动机的功率列成一个表，以供参考。

表 12—4

名 称	型 号	加 工 能 力 公斤/小时	应 配 电 动 机 功率(瓩)
磨 粉 机 (能加工小麦、 玉米、高粱)	MF050-18对辊式	面 粉 50	2.8
	MF260钢片式	面 粉 75	4.5
	M212—65锥形式	玉 米 粉 85	4.5
		面 粉 50	2.8
碾 米 机	LN125—50螺旋式	稻 米125	2.8
	N400	米450	4.5
	LN360F	米700	7
	NL—2.8	子150—175	2.8
铡 草 机	GN189	饲 草350—400	1.7
粉 碎 机	9FZ—35 FS—35	大 豆125—200 玉 米400 小 麦250	10
榨 油 机	60型螺旋式	40	4.5
脱 粒 机	TY—4.5	玉 米4500	7
	TB—520	稻 谷600	4.5

在选用电动机时，对短时工作的电机可以适当提高它的出力，即让电机过载，但过载是有限度的，鼠笼电动机的最大过载能力是1.8~2倍。但对连续工作的电机，不能过载，过载会缩短电机寿命。例如一台A级绝缘的电动机，当电流为额定值，工作温度为100℃时，可以使用10~20年；当电流超过额定值25%，温度升到125℃时，只能用一个月；当电流超过额定值50%，温度升到225℃时，只用3个小时就烧毁了。

第三是选择转速。选用电动机的转速必须和它所带机械的转速相配合。当电动机直接带动农业机械时，电动机的额定转速应该等于农业机械的额定转速。例如一台4BA-18型离心泵，额定转速为2900转/分，可以直接配用10瓩、2极电

机。若电动机和被带动的机械转速不同，就可应用第二章第二节讲过的传动装置（如皮带传动等）使它们转速一致。

第五节 三相鼠笼异步电动机的起动和保护

伟大领袖毛主席教导说：“任何运动形式，其内部都包含着本身特殊的矛盾。”电动机起动时的情况，不同于正常运行时的情况，这就构成了电动机起动时的特殊性。当异步电动机接通电源的瞬间，转子不转动。理论和实践都告诉我们：转子越慢，定子电流越大，当转子不动时，定子电流（即起动电流）最大。起动电流也是由电源供给的，过大的起动电流会引起电源电压的下降，影响接在同一电源下的其它用电设备的正常工作，例如这时出现电灯发红，日光灯闪灭等现象。

小容量（7 瓩以下）的电动机，起动时对电源电压影响不大，可以直接起动；大容量电动机起动时对电源电压影响很大，必须采取相应的措施。

鼠笼式电动机起动有以下几种方法。

一、直接起动

直接起动设备分手动和自动两种。农村常见的手动直接起动设备有闸刀开关、铁壳开关等；自动直接起动设备为磁力起动器。

1. 闸刀开关和铁壳开关

闸刀开关（图 12-27）的规格用额定电压和额定电流来表

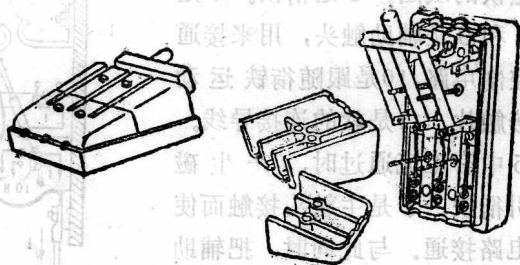


图 12-27

示。三线胶盖闸的额定电压为500伏，额定电流为15、30、60安。三线石板闸的额定电压为500伏，额定电流为60、100、150、200安。

选择闸刀开关时，开关的允许电流应为电动机额定电流的三倍。使用闸刀开关时，面部不可正对开关，动作必须迅速。

把闸刀开关装在铁壳内，就是铁壳开关(图 12-28)。铁壳开关的盖与手柄有联锁装置。它的额定电压仍为500伏，额定电流为10、20、30、60、100、200安。铁壳开关能直接启动28瓩以下的电动机。

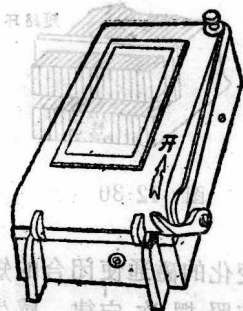


图 12-28

2、磁力起动器

磁力起动器适用于75瓩以下的中、小容量的异步电动机的起动和保护。它是由接触器和热继电器两部分组成的。

接触器 图 12-29是接触器的结构原理图。1是绝缘板。2和3是主接触头，用来接通或分断主电路。4是电磁铁。

5是电磁铁的线圈。6是衔铁。7是转轴。8和9是辅助触头，用来接通或分断控制电路。10是跟随衔铁运动的金属接触片，11是软的连接导线。当线圈5中有电流通过时，产生磁场，吸引衔铁，于是主触头接触而使电动机电路接通。与此同时，把辅助触头8接通、9打开。

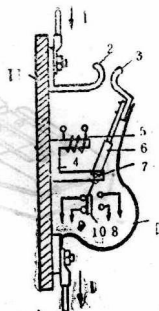


图 12-29

接触器里通入线圈的是单相交流电。为了减少铁芯损耗，因此铁芯用硅钢片叠成。此外，交流电是周期性变化的，每个周期有两次经过零点。在零点时，因为没有电流，磁通为零，吸引力也等于零，衔铁脱落；而当经过零点后，电流增大，磁通增大，吸引力增大，再吸引衔铁。

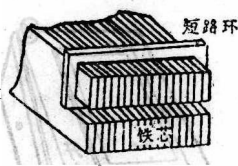


图 12-30

衔铁在连续地被吸、放时要产生振动，发出噪音。为了防止这种现象，在铁芯端部加一个短路环，如图12-30所示。根据电磁感应定律，吸引线圈的交变电流产生交变磁通，这个

变化的磁通使闭合的短路环中产生感生电动势和感生电流。按照楞次定律，感生电流产生的磁通总是阻碍原磁通变化的，因而线圈中的电流在零点时，磁通不能为零，电磁铁的吸引力也不为零，这样，就消除了衔铁的振动。

热继电器 它是保护电机过载的设备，其结构原理如图12-31所示。

热继电器的主要部件是固定在底部的双金属片1和热元

件6。热元件就是一个电阻，其中通过电动机的电流。当负载变化时，电动机的电流发生变化，热元件产生的热量也不同。当电动机过载后，电流增大，热元件产生的热量大，双层金属片被加热膨胀，下面一片比上面一片伸长的多，因而向上弯曲并脱离扣板。这时杠杆2受弹簧4的拉力沿轴3转动，使触头5分断。电动机停止转动，起到保护电动机的作用。但因为双金属片受热弯曲需要一段时间，所以它不能保护电动机的短路。

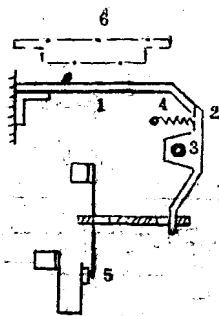


图 12-31

热继电器动作以后，需要经过一段时间等双金属片冷却复原后，才能按复位按钮使它恢复到工作位置。

下面介绍整个磁力起动器的工作原理：

磁力起动器如图12-32所示。当电动机起动时，先合上闸刀开关10，按下起动按钮7，电流就从一条电源线（如A相）通过按钮7和停止按钮8、热继电器的触点6和吸引线圈图1，回到另一条电源线（C相）。这时电磁铁吸引衔铁2，使主触头3闭合，电动机起动，同时，辅助触头4和起动按钮7被短路。当起动按钮复位时，保证接触器吸引线圈继续通电。

要使电动机停止工作，可按下按钮8，切断接触器吸引线圈的电路，电磁铁失掉磁性，在弹簧的作用下，使主触头分断，电动机便停止转动。按钮7和8另装在一个铁壳内。

当电动机过载时，在热元件5的作用下，热继电器的触

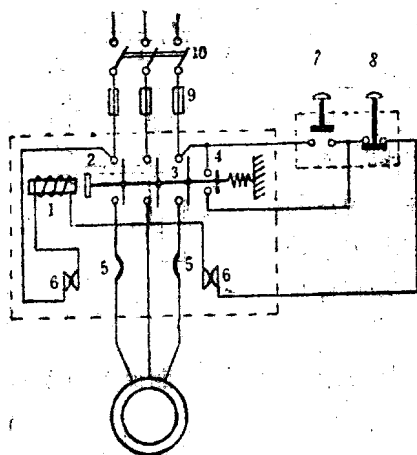


图 12-32

1、电磁铁线圈；2、衔铁；3、主触头；4、控制线路触头；5、热元件；6、热继电器触头；7、启动按钮；8、停止按钮；9、保险丝；10、闸刀开关。

点6断开，其作用相当于按停止按钮8。

电磁铁还能起欠电压保护作用。当电压突然降低或断电时，电磁铁吸引力就减弱或消失，衔铁脱落，切断电动机电路。电源电压恢复正常以后，因触头4已经分断，电动机不能自行启动，必须重按启动按钮，才能启动。

电动机短路时，保险丝9熔断，起保护作用。

国产的QC₁型磁力起动器的规格见表

12-5。常用的磁力起动器与电动机容量以及热元件号数的配合见表12-6。

表 12-5 QC₁型磁力起动器基本数据

起动器等级	在下列电压下电动机最大功率(瓩)				起动器额定电流(安)	
	127伏	220伏	380伏	500伏	保护式	开启式
I	2.5	4	5	5	20	22.5
II	6	11	15	18	40	46
III	10	20	28	40	90	100
V	20	37	55	75	135	150

表 12-6 QC₁型磁力起动器与电机容量及热元件的选用

电动机容量 (瓩)	磁力起动 器 型 号	热 元 件 编 号					
		J 系 列			J O 系 列		
		四极	六极	八极	四极	六极	八极
4.5	QC ₁₂ /6	28	29	29	28	29	29
7	QC ₁₃ /6	31	32	32	31	32	32
10	QC ₁₃ /6	34	35	36	34	35	35
14	QC ₁₃ /6	38	38	39	38	38	39
20	QC ₁₄ /6	45	45	46	45	45	46
28	QC ₁₄ /6	48	49	49	48	48	49
40	QC ₁₅ /6	58	59	59	58	58	59
50	QC ₁₅ /6	61	61	62	61	62	62

二、补偿器降压起动

一般经常起动的电动机，如果它的容量不超过变压器容量的20%，就可以直接起动。如果电机容量太大，电源容量较小，这时可采用补偿器降压起动。补偿器又叫自耦减压起动器，实质就是利用自耦变压器，在起动时降低电压，从而减小电流。补偿器的接法如图12-33。主要部分是自耦变压器（和浸在油里的触头系统）。在电动机起动时经过补偿器，加在电动机定子上的电压不

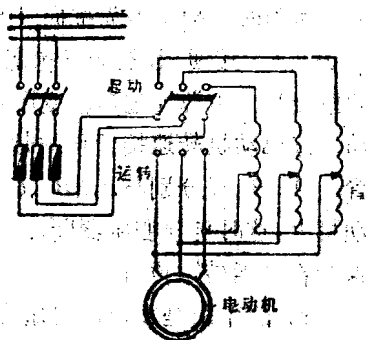


图 12-33

是电源的线电压，而是经补偿器降低后的电压，所以起动电流随之减小。

补偿器的类型很多，常用的QJ₃型补偿器，结构如图12-34所示。

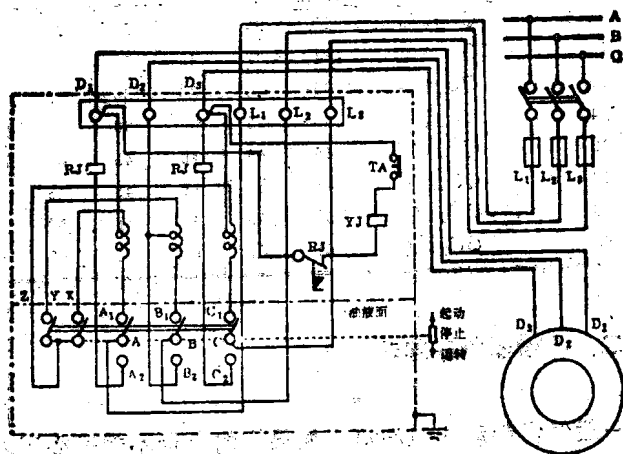


图 12-34

起动时，把手柄先推向“起动”位置，A、B、C分别与A₁、B₁、C₁接通，补偿器三相绕组组成星形连接（末端X、Y、Z短接）。电源经过自耦变压器再接电动机上，进行降压起动。待电动机转速接近正常时，将手柄迅速拉向“运转”位置，A、B、C分别与A₂、B₂、C₂接通，电源电压全部加到电动机上，这时自耦变压器断开，手柄被欠压脱扣器YJ吸住，保持在“运转”位置。

YJ的作用是在电源电压降到一定程度或断电时，本身吸引不住手柄，手柄自动跳回“停止”位置，使电动机停止工作。

RJ 是热继电器，它的发热元件接入电动机定子回路，触点控制欠压脱扣器线圈。当电动机过载时，热继电器动作，将欠压脱扣器断电，使电动机停止工作。

停止按钮 TA 也串在 YJ 线路中，按一下 TA 即可使电动机停止运行。

选用补偿器，可参考表 12-7

表 12-7 QJ_2-QJ 补偿器规格

型 号	额 定 电 压 (伏)	额 定 电 流 (安)	被 起 动 电 机 容 量 (瓩)
QJ_2-75	380	75	40
QJ_2-150	380	150	75
QJ_2-200	380	200	100
QJ_3-40	380	40	10 14 20
QJ_3-75	380	75	28 40
QJ_3-150	380	150	55 75

三、星形——三角变换起动

如果电动的绕组是三角形连接的，每相承受的电压高，在起动时可改为星形连接，每相绕组承受的电压就变得比较低，每相电流也减少到直接起动的 $\frac{1}{3}$ 。因为在星形连接时，

每一相绕组所承受的电压是三角形接法的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ，所以每相绕组中的电流也降到 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ；同时星形接法每相绕组中的电流就是线电流，而在三角接法中，线电流等于每相绕组中电流的 $\sqrt{3}$ 倍，因此，采用星形——三角形变换起动时，线电流只有直接起动时的 $\frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{1}{3}$ 。这就大大地减轻了对电源电压

的影响。

最简单的星——三角起动机可用两只三相开关担任，接线如图 12-35 所示。

操作顺序是：首先合上电源开关 K_1 ，然后合上起动机开关 K_2 ，此时电动机接成星形。待电动机起动后，达到一定转速时，立即拉开开关 K_2 ，接着合上开关 K_3 ，电动机便进入正常运行。 K_1 、 K_2 如能用双投开关就更好。但需注意，一定要先拉开 K_2 ，才能合上 K_3 ，否则会造成电源短路。

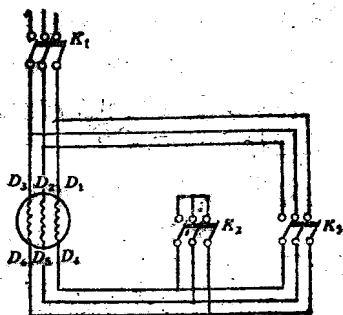


图 12-35

四、电动机的保护

电动机过载、或电源电压降低都会使电流增大，如果超过电机额定电流可能使电动机烧毁。因此，线路上应有保护装置。磁力起动器的热继电器就是保护设备，此外还需对短路、缺相等进行保护。

1. 保险丝

为了避免电动机因短路而损坏，常用保险丝进行保护。保险丝虽然有保护作用，但必须选择适当。如果选择过大，起不到应有的保护作用；如果选择过小，则在电机启动时就会熔断。

农村常用的有管保险和插保险。保险丝的额定电流标准

等级有6、10、15、20、25、30、40、50、60、80、100安培等。

一台电动机直接起动，保险丝的额定电流可选为电动机额定电流的1.5—2.5倍。如果线路装几台电动机，总保险丝的额定电流 $\geq (1.5-2.5)$ 最大容量电动机的额定电流+其余电动机额定电流的总和。

应该注意，保险丝的额定电流不能超过变压器的额定电流，否则有可能烧毁变压器。

表12-8列出了电动机的容量和选用保险丝的配合情况，作为使用时的参考。

表 12-8

电动机容量 (瓩)	电动机额定电流 (安)	保险丝额定电流 (安)
1	2.4	5—8
1.7	3.9	8—10
2.8	6.1	10—15
4.5	9.4	20—25
7	14.2	30—40
10	19.7	40—50
14	27.5	60—75
20	39	80—100
28	54	100—125
40	76	150—200

2、指示灯

电动机三相保险丝有一相熔断后，电动机并不停下来，而是继续转动，这时是缺相运行，有吭吭的响声。此时电流急剧增大，如果没有继电器保护，很容易烧毁绕组。因此，对没有继电器保护的小容量电动机，可安装指示灯监视熔断

器的熔断与否，如图 12-36 所示。

指示灯可采用三只普通灯泡，在正常运行情况下，三只灯泡均不发光；但当一相熔断时，这一相所接的灯泡就会发光。如果发现这种情况，应该立即断电检修。

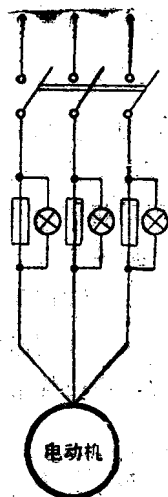


图 12-36

第六节 电动机的维护与检修

电动机是许多机器的“心脏”，它的好坏对机器的工作影响很大，如果管理不好，轻则不能正常运转，重则烧毁电机，不仅造成经济上的浪费，还要影响生产。为了保证电动机能正常运行，必须认真做好维护工作。对于正确使用、维护电机的常识，应该认真学习，切不可片面重视修理知识，轻视维护知识。维护与修理相比，维护是主要的。

一、电动机的维护

1、电动机运行前的检查

(1) 在农村，有些电动机的使用是有季节性的。例如，排灌用的电动机，每年有几个月不用。有些电动机常在使用或存放时受潮，在运行前，对长期存放和受潮的电动机先进行一次烘焙。此外，还要测量它的绝缘电阻。一般电动机的绝缘电阻不应低于 1 兆欧。否则，不能使用。

(2) 根据电动机铭牌和电源电压, 检查电动机接线是否正确。

(3) 检查闸刀开关、保险丝、电源线有无松动和中断现象。

(4) 检查起动设备和外壳接地是否良好。

(5) 隔一段时间未用的电动机, 应检查轴承中的油是否需要更换或补充。

(6) 注意电动机所带设备上(尤其是转动部分)是否有人在工作, 以免出现人身事故。

2. 电动机在运行中的管理和维护

(1) 电动机在运行时, 要经常观察电压表、电流表指示的数值。若电压的波动超出额定电压10%以上时, 电动机会出现发热及输出功率不够的现象。

(2) 电动机运行时, 要经常注意轴承和绕组的温度是否正常, 在一般情况下, 如果机壳烫手, 就应该立即停车。

(3) 要注意监听是否有不正常的噪音和震动。

(4) 经常检查外壳接地是否牢靠。

(5) 电动机应经常保持清洁, 保持良好的通风散热状态。

(6) 轴承的润滑油, 每2—3个月更换一次。更换润滑油时应先用汽油把轴承和轴承盖洗净, 不同牌号的润滑油不能混合使用。

二. 电动机的常见故障

三相异步电动机的故障, 可以分为机械方面的故障和电

气方面的故障两类。机械方面的故障，大部分发生在轴承里面；电气方面的故障，大部分发生在绕组里面。要正确判断故障的原因，必须“对于具体情况作具体的分析”，找出原因，加以正确处理。我们把电动机的常见故障的现象、原因和处理方法，归纳起来，如表12-9。

表 12-9

电动机常见故障的原因及处理方法

故障现象	故障原因	处理方法
电源接通后，电动机不转动	1. 电源断线 2. 开关接触不良 3. 保险丝熔断	检查电源线、保险丝和开关情况，找出断路处，予以接通
	4. 电压过低	测量电压，并通知供电部门调整供电电压
	5. 电动机定子绕组中有一相断路	用万用表、摇表检查断路处，重新接好
电源接通后，电机还未转起，保险丝就熔断或开关脱扣	1. 线路有接地处 2. 相间短路	排除短路故障
	3. 保险丝过细 4. 过载保护选择或调整不当	重新选择
	5. 负载过大	减轻负载或换容量大的电机
电动机启动时响声大，启动电流大，而且三相电流相差很大	定子三相绕组的6根引出线中，有一相的始端和末端接反了	
启动后运转不久，电动机里冒出蒸气	电动机受潮	用摇表检查绝缘电阻，低于1兆欧应停用，然后烘干

故障现象	故障原因	处理方法
空载时正常, 加上负载后转速降低或停止	1. Δ 形连接误接为Y形	改接
	2. 电源电压过低	用电压表测量电压
	3. 转子断条	用转子断路侦察器进行检查。如果是铸铝转子, 可用火碱加水去掉铝条, 然后重新铸铝
电动机空载或加负载时三相电流不平衡	1. 三相电源电压不平衡	用电压表测三相电压
	2. 定子绕组中有部分线圈短路, 这时线圈局部过热	更换短路线圈
	3. 重绕定子绕组后, 部分线圈匝数有错误。	更换匝数错误的线圈
	4. 重绕定子绕组后, 部分线圈的接法有错误	用指南针找出接错的线圈, 然后纠正过来
电动机剧烈发热或冒烟	1. 电动机过载	降低负载或换用一台容量大的
	2. 电源电压较电动机额定电压过高或过低	应调整电源电压 (允许波动范围为5%)
	3. 电动机通风不好	应检查风扇旋转方向, 风扇是否脱落, 通风道是否堵塞
	4. 定子绕组有短路或接地故障	找出短路或接地处, 更换线圈
	5. 重绕线圈后由于接线错误或绕制线圈的匝数有错误	按接线图更正错接线圈, 更换匝数不对的线圈
	6. 电源一相断路或三相绕组一相断路	找出断线处接上
	7. 电动机受潮或浸漆后烘干不彻底	烘干
	8. 定子转子铁芯相摩擦	校正转轴中心线, 锉定子转子内外圆上的硅钢片, 更换新轴承

故障现象	故障原因	处理方法
电动机有不正常的震动和响声	1. 电动机两相运转, 发出连续的象牛叫的声音	1. 一相保险丝熔断, 应重新安上; 2. 检查线路或三相绕组, 并把断路处接通
	2. 定子或转子铁芯压装不紧	有条件的; 可以重新压装
	3. 转子与定子摩擦	
	4. 空气隙不均匀	1. 校正转子中心线 2. 更换新轴承
	5. 安装不良: 电机基础不正, 底脚螺母不紧, 靠背轮等不平衡	
	6. 定子槽数和转子槽数配合不当, (切断电源时噪音立即消失)	这属于设计不良, 一般对电机运行没有妨碍
	7. 轴承响	1. 缺油 2. 轴承损坏需要重换 3. 有杂物, 需要清除

三、电动机的拆装

为了对电动机经常进行维护、修理, 延长它的使用寿命, 必须学会电动机的拆装技术。

电动机的一般拆卸步骤是(图12-37): 1、卸下皮带; 2、拆去接线盒内的电源接线和接地线; 3、卸下底脚螺母、弹簧垫圈和平垫圈; 4、卸下皮带轮, 卸皮带轮时需用拉轮器慢慢卸下; 5、卸下前轴承外盖; 6、卸前端盖; 7、卸下风叶罩; 8、卸下风叶; 9、卸下后轴承外盖; 10、卸下后端盖; 11、下转子; (必须注意不要碰伤定子线圈。转子重量较大, 应用起重设备如倒链等吊起来,

再慢慢移出);12、卸下前后轴承和前后轴承的内盖, 如果需要的话就用拉轮器卸下轴承, 如果没有必要可以不卸轴承。

电动机的安装, 可按与上面相反的步骤进行。

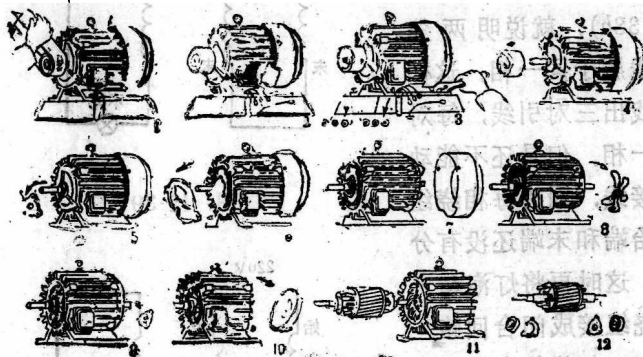


图 12-37

四、电动机绕组故障的检修

三相异步电动机的绕组的故障可以分为接错、通地、短路、断路和完全烧毁等几种情况。

1、怎样检查绕组头尾接反

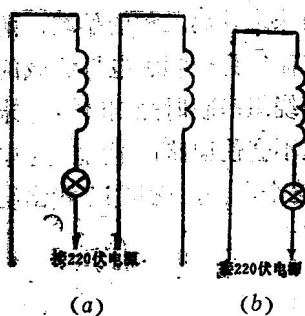


图 12-38

平时往往遇到电动机的六根引线没有标志而混淆的情况。如果有万用表, 可以用电阻档, 通过测量任意两个引线的通断而找出哪两条是一相。

如果没有万用表, 可以用灯泡来测量。如图 12-38所示; 把220伏的灯泡串接在一条引线上再与电源接通。如果灯泡不亮

(如图12-38a)，就说明这两条引线不属于同一相；如果灯亮(如图12-38b)，就说明两条引线属于同一相。这样就找出三对引线，每对是一相。但是还不能动手接线，因为每相绕组的始端和末端还没有分清。这时再将灯泡与一相绕组接成闭合回路，并把三相绕组中的另外两相串联起来，接在220伏的电源上。如果电灯亮(图12-39)，说明电灯所接的一相绕组

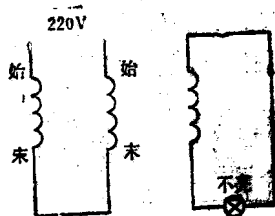


图 12-39

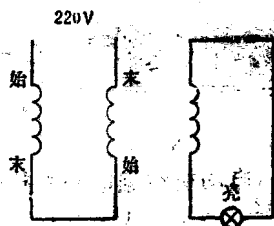


图 12-40

中有感生电流通过，即在串联的两相绕组中产生变化磁场。两相绕组在串联时，必须第一相的末端接第二相的始端，两相绕组产生的磁场才能互相迭加，而在另一相和电灯组成的回路中感应而形成电流。如果两相绕组串联时是末端接末端，它们产生的磁场互相抵消，就不会使回路产生感生电流，因此电灯不亮(图12-40)。用这个办法，就可以找出绕组的头尾。找出头尾后，要做上标志。

2. 绕组接错的检查

这里指的接错是指电机绕组重修时，由于疏忽大意或缺乏接线常识而把线圈或线圈组接错。检修时需要拆开电动机。

如果电动机绕组中某些极相组接反了，那么该极相组就有相反方向的电流流过，并且产生相反的磁极，使电动机不能起动或达不到正常转速，同时使三相电流不平衡（见表12-9）。

应该细心地检查究竟错在哪个部位，检查的方法是给其中一相绕组通以六伏直流电（干、蓄电池均可），该相绕组就应该出现互相交错的磁极（个数就是电机的极数），然后用一只指南针在定子内腔移动，指南针指向就会交替变化，如果指南针在某处指向异常，就是该处极相组接错了。

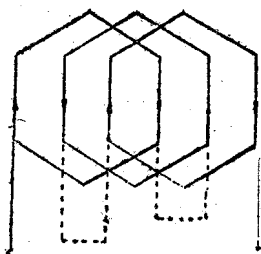


图 12-41

如果不是整个极相组接反，而是一个极相组有几个线圈接反，如图12-41所示，指南针经过这一极相组时，指向不稳，因为接反的线圈也产生相反的磁场，对整个极相组的磁性有所减弱，因此指南针指向不稳。

3、绕组通地

三相电机绕组接地一般是由于电动机长期运行在空气潮湿的地方，或长期超负载运行、绝缘材料老化，绝缘能力丧失，使绕组导线和铁芯相接触而发生的。也有因机械损伤而使绕组接地的。如果一处接地，则使外壳带电；如果两处接地，就会造成绕组短路从而烧毁绕组。

检查绕组接地时，要先把绕组的接线端拆开，然后观察短路的地方。观察无效时，就需用仪表或其它设备检查。最简单的方法是用摇表检查，把摇表的一个接线端与机壳相连，另一个接线端分别与各相绕组相连，然后摇动摇把，如

果指针指零，则说明该相绕组接地(图12-42)。

还可以用灯泡来检查(图12-43)。把一只灯泡接在火线上并用一根硬导线把机壳与零线相连，分别用串接电灯的火线与绕组引线接触，如果灯泡发光，就查出故障所在。

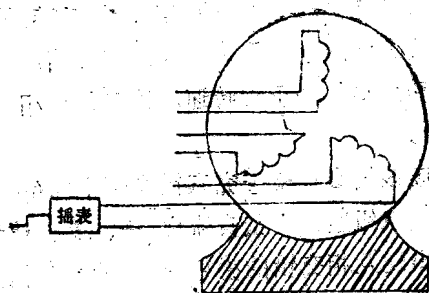


图 12-42

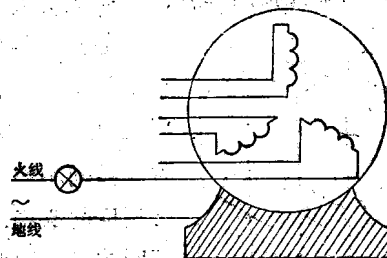


图 12-43

把绕组接地处损坏的绝缘物刮开并拆下来，然后换上同等级的绝缘物。通常接地处多在槽口，这时只要打入竹楔子，接地现象即可排除。

4、绕组短路

电动机发生短路故障后，短路的地方往往因为电流大而产生高温，使导线外面的绝缘焦脆。这时可以观察有无烧焦的痕迹。如果痕迹不明显，可以让电动机空转10分钟左右，再用手摸定子绕组发热是否均匀。发生故障的地方温度较高。

检查绕组线圈短路最有效的是用短路探测器(又叫短路变压器)。图12-44画出了它的工作原理图。探测器的H形(也

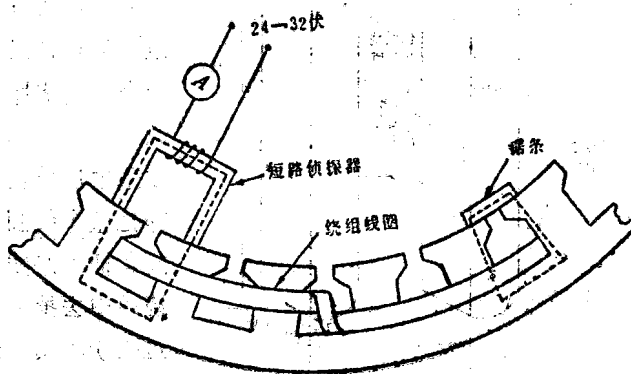


图 12-44

可以做成U形)铁芯上绕有线圈,使用时把铁芯开口放在定子铁芯槽口上,同定子铁芯构成一闭合磁路。这个线圈相当于变压器的原线圈,被测电动机的线圈相当于变压器副线圈。当原线圈接上电源后,如果被测线圈没有匝间短路,相当于变压器空载,原线圈电流很小。如果被测线圈有匝间短路,就相当于变压器副线圈短路,所以原线圈电流很大,它可以通过接在线圈中的电流表观察出来。槽内线圈因为有电流流过,槽齿便会产生磁性。这时如果在线圈的另一边所在的槽上放一铁片,铁片便吸住,并发出“吱吱”的响声。通过这个办法也能判断匝间短路。

短路探测器可按铁芯尺寸做成很多种,图12-45中介绍的是可供一般电机测定子和转子用的短路探测器的数据。

找到短路处后,如果线圈的短路情况不太严重,没有把绕组的绝缘烧坏,可以把线圈隔离或换掉。如果绕组的大部

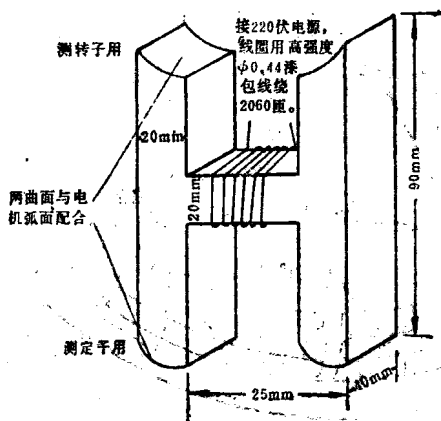


图 12-45

分绝缘都烧坏了，就需要重新更换绕组。但是如果只有一个线圈烧坏而又急于使用，那么可以采取应急措施，即把整个线圈拆去或者把短路线圈从绕组中去掉（跨接过去）不用，这时需要将短路线圈的一端导线全部切

断，不然将产生一种短路电流。最后把两边线头分别扭在一起，用绝缘物包好，就可以临时使用了。

5. 绕组断路

绕组断路可以用摇表、万用表或电灯泡逐相逐段检查。

如果在槽外断路，只要重新焊牢即可；如果断在槽内，必须把断路线圈拆开重新绕制。

五、转子故障的检修

鼠笼式电动机转子的常见故障是断条。用短路探测器检查转子断条，是目前较为方便而又可靠的方法。

把通电后的短路探测器横跨在转子铁芯的槽上，如果线圈串有电流表，当短路探测器沿转子外圆移动到某处，电表读数突然减小，则刚进入短路探测器的一槽，存在着断裂的铝条。这个情况刚好和测定定子绕组短路相反，断条相当于变

压器副线圈开路，因此原线圈中电流减小。倘若线圈里没有串接电流表，还可以将一段锯条放在被短路探测器所跨的槽上，如果锯条不发生振动，就说明该槽有断条。

处理断裂的故障，一般是先把断处挖一个长方形的口，按裂口的大小把适当的材料（铜或铝）嵌入槽内，在它的两端钻孔、绞丝并拧上螺丝，以使其衔接牢靠。

机械部分的故障，主要是轴承磨损、轴颈磨损等，与其它机械故障无异，可根据前面学过的知识进行检查修理。

第七节 三相异步电动机绕组的重换

一、拆线

如果有一台电动机经过检查，确定绕组已经损坏，为了充分地利用定子铁芯和机械部分，必须重换绕组。在拆除旧绕组时，应该同时记录绕组的数据，否则，将给以后的重绕带来困难。需要记录的主要数据是：（1）铭牌上的数据；（2）极数；（3）线圈个数；（4）每个线圈导线的匝数；（5）连接形式；（6）线圈尺寸；（7）线圈节距；（8）导线的种类、线径；（9）绝缘种类；（10）绕组导线的并绕根数；（11）绕组并联的支路数。

拆除旧绕组，是局部拆换还是全拆换，应根据绕组损坏情况而定。在拆线前要量出端线尺寸。

在生产实践中，拆线的方法很多，以下的几种方法可根

据情况使用。

1、火烧法 用柴火烧电机绕组。一般用木材或刨花引火，当绕组的绝缘物开始燃烧后，就让其自行燃烧，不用再加燃料。火力不能太大，加热到有焦味时就应停止，迅速将线圈拆下来。这种方法简单易行，但要掌握“火候”，否则破坏定子硅钢片的绝缘，增加铁芯损耗，使电机出力不够。也有时因对定子四周加热不均匀，使定子变形，无法装进转子。

2、大电流软化法

如果有调压变压器，可以使低压大电流通入绕组，给绕组加热，使绝缘变软。要注意电流的变化和温度，一般在 80°C 左右为宜。如果温度太高，反而使绝缘老化，更不易拆除。

加热后逐个打出竹楔，拆下线圈。拆下的线圈应该保留一个完整的，作为重绕时的样品。如果线圈不能再利用，可将线圈一端剪断，从另一端将线圈拉出。

线圈拆除后，应该仔细清槽和修整个别槽由于敲打引起的歪斜。从槽里取出的绝缘纸也应保存一个作为样品。

二、绕线

重换线圈必须先准备好绕线模。绕线模的尺寸应做的十分准确，因为线圈嵌线的质量，线圈的耗铜量，线圈的外形尺寸以及电机重换线圈后的运行特性都和绕线模的尺寸有关。绕线模的尺寸，最好按原线圈的尺寸，做好模心及上下夹板，如图12-46所示。

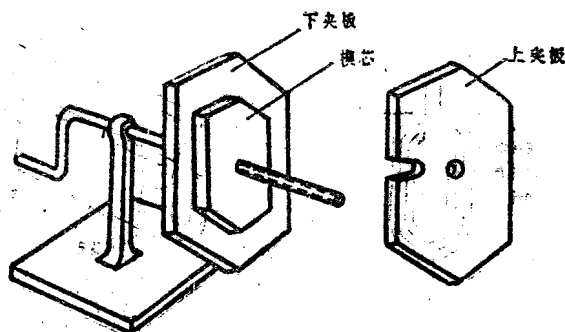


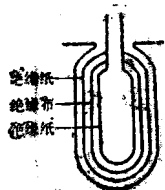
图 12-46

采用的导线的粗细、匝数都应该与原来的线圈相同。如果没有同样的导线，可以用几根并一根的办法，只要截面积相同就行。

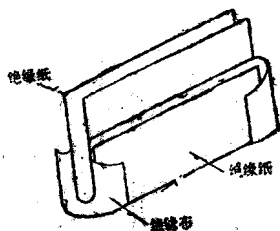
绕线时应该给导线以适当的拉力，使它拉直。这样，各匝间的排列才能整齐。如果排列错乱，下线时就非常困难。因为每个极相组都是串联的，所以一个极相组的线圈都可以一次绕成，中间不要接头，在接线时方便。线圈绕好后用短线绑住，以免散乱。

三、放置绝缘材料

电动机的绝缘是根据电动机的额定电压来确定的。对于新绕组的绝缘材料一般按原来的绝缘材料来裁制。为了防止线圈碰到定子铁芯，先在槽里放置绝缘层，叫做槽绝缘。通常A级绝缘的电动机，槽绝缘一般为两层0.17毫米绝缘漆纸（电缆纸），中间隔一层0.17—0.2毫米的绝缘漆布（玻璃丝布或黄腊绸），如图12-47所示。槽绝缘一般比铁芯长出



(a)



(b)

图 12-47

10—20毫米，中间一层绝缘布是主绝缘，它的两头弯折后包住下面一层绝缘纸，这样既防止绝缘在槽中滑动又能加强槽口绝缘。下面一层绝缘纸保护漆布不被铁芯刺破，上面一层绝缘纸应该伸出槽口10—20毫米，使下线方便，下好线后，可将高出槽口部分剪去。

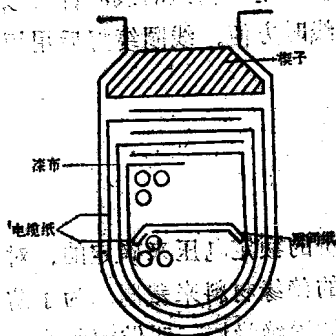


图 12-48

如果是双层绕组，那么上下两绕组之间还要加层间绝缘。A级可采用0.3—0.5毫米绝缘纸；E级可采用0.27毫米的聚酯薄膜青壳纸，折成U型垫在层间。如图12-48所示。

此外，在每两个不同相绕组端线部分，也要加绝缘层，叫做相间绝缘。

相间绝缘一般采用两层绝缘纸中间加一层漆布。J、JO系列的电动机一般采用两层0.12毫米厚的青壳纸和一层0.12—0.16

毫米厚的黄腊布，允许工作温度为 105°C ，是A级绝缘。

I_1 、 IO_2 系列电动机采用E级绝缘。一般都采用一层0.22—0.27毫米厚复合聚酯薄膜青壳纸。允许工作温度为 120°C 。由于这类绝缘较薄，因而增大了槽的有效截面积，能提高电动机的输出功率。

四、下线（嵌线）

在槽里放好槽绝缘，就可按绕组下线图下线了，先从哪一个槽开始均可。我们先介绍双层绕组的下线法。中小型电动机一般都采用半闭口槽，嵌放线圈时，先把线圈一边散开，把导线一根一根地有次序地放在槽内。线圈一边嵌入槽后，另一边暂留在槽外。下线时，不要只求快，而把线圈放入槽中就算了事，要检查线圈两端伸出长度是否一致；导线有没有交叉重叠等现象。

第一个线圈一边嵌入槽后，继续将第二个线圈的一边嵌入槽中，其它线圈都以同样的方法嵌入，直到超过第一个节距内的下层边都嵌入槽后，后来嵌放的线圈就依次先嵌放下层边，填放槽层间绝缘，然后再嵌入上层边。每嵌完一极相组线圈后要填放线圈端部的相间绝缘，最后再把开始时留在槽外面的线圈上层边依次放入槽内，如图12-49所示。

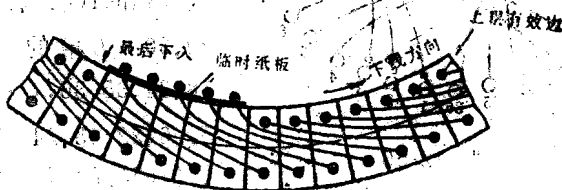


图 12-49

暂时不下。先下线圈1—10的右边10，1暂时不下；再下线圈2—11的右边11，2暂时不下；接着下线圈3—12的右边12，3暂时不下。然后跳过4、5、6，此后则可以把每个线圈的两边同时下到槽里，但要按一定顺序，即下完7—16、8—17、9—18，才能下13—22、14—23、15—24，依此类推，直到下完31—4、32—5、33—6，再将留下的1、2、3下到槽内。整个下线过程便结束了。

五、接线

线圈全部下到定子槽后，还要把它们连接成一个完整的三相绕组线路。首先是把每相的线圈连接成极相组，连接方法我们在本章第三节中已经讲过了。在绕线时，每个极相组通常是一次绕成的（称为一联），因此，在接线时只要连接极相组就行了。

从绕组展开图中可以看出：绕组的极相组数，是极数的3倍（单层迭绕组除外），换句话说，每相绕组中，极相组数与极数相等。例如，在图12-13的二极绕组中，A相有两个极相组；在图12-18、图12-20及图12-22的四极绕组中，A相均有四个极相组。从图中还可以看出：电流流过前一个极相组后，总是以相反的方向流过后一个极相组的，这里需要说明：如果使一相的极相组中电流方向都相同，那么每相极相组数将是极数的一半，如图12-16中的单层迭绕组便是这种情形。找出这个规律之后，可以据此画成接线图，供接线时参考。

图12-51是二极绕组的接线图。二极绕组共有6个极相

组，图中用按圆周均匀分布的6条短线来代替，箭头方向表示极相组中电流的方向。图 12-51表示的是一路串联接法，如

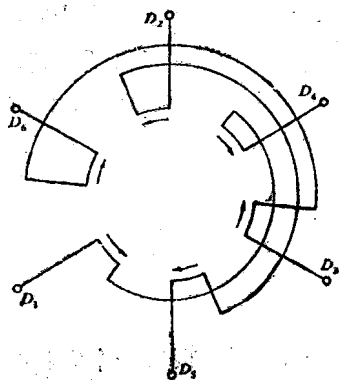


图 12-51

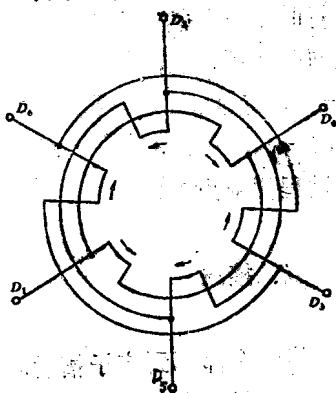


图 12-52

图12-14中的同心绕组，采用的就是这种接法。图12-52所表示的是三相二极绕组的二路并联接法。

三相四极绕组的一路串联接法如图12-53所示，图12-19和图12-21中的两种绕组都用这种接法。图12-54所表示的是

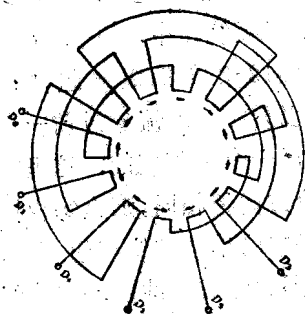


图 12-53

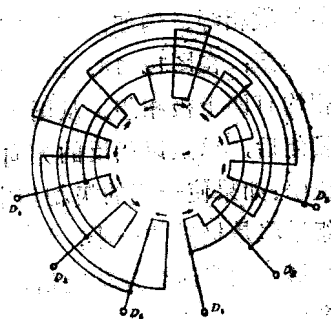


图 12-54

三相四极绕组绕的二路并联接法。图12-22所示四极双层迭绕组，采用的是二路并联接法，只要把A、B、C和X、Y、Z分别看作是D₁、D₂、D₃和D₄、D₅、D₆，就可以看出两图所画的接法是一致的，但图12-54清晰醒目。

接线时，各连接线间的接头，必须用焊锡焊牢，并用绝缘套管套住。连接线一般绑在端部。

按图接完线后，引出每相绕组的始端和末端。将引线A、X、B、Y、C、Z分别接到接线盒中的D₁、D₄、D₂、D₅、D₃、D₆六个端子上，整个接线工作便完成了。

前面提到，在拆线时需要辨认绕组，当懂得绕组的接法后，辨认绕组也就变得容易了。辨认绕组主要有两方面：第一是判断电动机的极数，第二是判断电动机绕组的路数和Y、Δ接法。

判断电动机极数有下列几种方法：

(1) 如果转速已经知道，再根据式(12-1)所决定的磁极对数与转速的关系就可以求出磁极对数。

$$P = \frac{60 \times 50}{n_{\text{定}}}$$

例如铭牌上写着转速为1460转/分，就知道这是四极电动机；假如写着960转/分，这就是6极电动机。

(2) 绕组的每个极相组都有两根跨接引线，而且相邻的两个极相组间有相间绝缘材料，所以极相组是很容易数出来的。把极相组的组数除以相数(3)，就是绕组的极数。

(3) 从绕组的节距也可以看出极数，一般绕组多采用短距，即节距略小于极距。

例如36槽节距为1-8，那么它就是四极($\frac{36}{9} = 4$)。

如何判断绕组连接的路数和接法呢？有的电动机因为容量大，所以绕组由几个并联支路组成，每相有几个支路，就叫几路接法。

电动机绕组的路数，可以由数每根引线连接的极相组数的方法来确定。

若每根引线只与一个极相组相连接，除表明是一路连接外，还表明三相绕组是Y连接，如图12-55所示，此外没有别的接法。

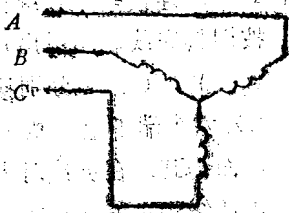


图 12-55

若每根电源线与两个极相组连接，这台电动机的接法可能是一路串联 Δ 连接；也可能是两路并联Y连接。这要看是否有中性点。如果有，是Y连接；如果没有，一定是 Δ 连接。

六、浸漆和烘干

在浸漆之前，应该将电动机进行预烘，目的是排除潮气。预烘的温度一般为 80°C ，时间6-8小时。

在农村一般不具备烘房、浸漆槽等设备，可以采用下面简单实用的方法，用大灯泡烘线圈。

在烘的时候，把灯泡悬在定子中间，不能贴住线圈，以免烤坏线圈的绝缘层。如果定子内腔较大，可以多放几个灯泡。为了不压挤绕组，电动机外壳下面要加垫木块，然后上下盖上木板，以减少热量损失，如果有红外线灯泡，烘烤效

果更好，因为红外线穿透能力强，可以把热直接传到绕组内部，绕组干得快。

预烘后，把定子浸在绝缘漆中，待漆里的气泡停冒后，就可以取出，放在漏板上让余漆滴净。过去浸漆多用T010号沥青漆，现在农村常用的是1032号醇酸树脂和1012号耐油青漆。如果不能浸漆，可以采用浇灌的方法，把电动机立放，下面用盆接着，用碗盛漆从上面浇入槽内，一头浇好了，再浇另一头。连浇二到三遍。再把定子内腔上的绝缘漆用汽油擦去，然后安放灯泡进行烘干。干燥分两个阶段，首先在70-80℃的温度下烘2-8小时，若干的太快，漆容易起皮。其次温度要保持在110℃直到烘干为止。每隔一小时用兆欧表测一次绝缘电阻，当阻值不再发生变化时即可停烘。一般需要10小时左右。

浸漆后，绕组的机械强度、防潮能力、耐压性能均有提高。

倘若在浸漆后没有烘干，在运转时，绕组发热后，绝缘漆开始流动，导致电机不能使用，因此烘干一定要认真。

七、试验

电动机重换绕组后，要进行试验，以检查绕组是否符合要求。

1、测绝缘电阻

对绕组与机壳之间、相与相之间的绝缘电阻不能低于按下式算出的数值：

$$\text{绝缘电阻} = \frac{\text{电动机额定电压}(U)}{\frac{\text{电动机额定功率}(KW)}{100} + 100}$$

注意，对于500伏和500伏以下的电动机，要用500伏的兆欧表。

2. 空载试验

在电动机绕组上加上三相平衡的额定电压，电动机轴上不带负载，测量三相线电压和线电流，观察三相线电流是否平衡。如果不平衡，就表示定子绕组接线有错误，或者是线圈内部短路。

空载电流一般为额定电流的20-50%，如过大，就表示线圈接法有错误，线圈匝数绕少了，或者是定子、转子之间间隙超过了允许值，或者是转子轴向窜动，应予以排除。

空载试验不应少于1小时。试验的同时要测量铁芯、轴承温度是否正常。

第十三章 无线电基础知识

无线电技术广泛应用于工农业生产、科学实验、国防建设和广播通讯等方面。在工业部门实现生产自动化离不开无线电技术。在农业上处理种子, 扑灭害虫, 贮存粮食等方面都在广泛采用无线电技术。此外, 导弹和人造卫星的发射、飞机和军舰的导航通讯以及精密科学数据的测定等等, 也都离不开无线电技术。

在本章和下一章里, 先讲述一些无线电基础知识, 然后重点介绍无线电广播的过程。

第一节 波

打开收音机, 听到中央人民广播电台的节目, 会使人联想到: 这声音究竟是怎么传来的? 换句话说, 声音如何从广播电台经过遥远的空间传到收音机, 又如何从收音机传到人的耳朵? 为了探讨这个无线电广播过程, 我们先从声音谈起。

一、振动

当人在说话的时候, 用手摸摸喉头, 感到微微地发麻;

当敲钟的时候，用手摸钟感觉更为明显。这说明发出声音的物体(声源)在运动。长期观察证明，此时物体在某一中心位置(或者叫做平衡位置)附近来回重复运动，这种运动叫做振动。除了发声体外，象钟摆(图 13-1)、气缸里的活塞等的运动也是振动。在第十章里，讲到交流电是周期变化的，实际

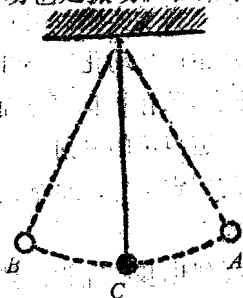


图 13-1

上就是电子流的振动。振动物体离开平衡位置的最大距离，叫做振幅，完成一次全振动(如摆从A开始经过C运动到B，再由B经C回到起始位置A)所需的时间叫做振动的周期(用 T 表示，单位是秒)。单位时间内完成全振动的次数叫做振动频率(用 f 表示，单位是1/秒，又叫做赫兹)。

交流电的一些名词就是这么来的。

二、振动的传播——波

把石头扔进水里，水就发生振动，这可以从浮在水面上物体的上下运动中看出来。同时，振动还向外传播，从侧面看，凸凹变化交替出现并向远处传去，于是形成了水波。波可以用象图 13-2那样的曲线来表示，波完成一次全振动所传播的距离，叫做波长，用 λ 表示，于是波的传播速度

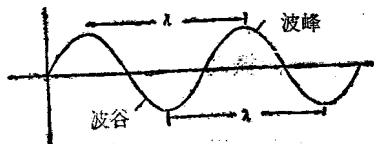


图 13-2

$$V = \frac{\lambda}{T} \quad \text{或者} \quad V = \lambda f$$

三、声波

声音实际上是一种波。当喇叭发出声音时，纸盆便前后振动，迫使邻近的空气时紧时松，形成密部和疏部，然后这种密部和疏部就这一层空气传到那一层空气，很快地传播出去，形成声波，如图 13-3所示。空气的振动形式和喇叭纸盆相同，当这种振动传到人的耳朵里，使耳朵里的鼓膜也振动起来，于是就听到了声音。声波在不同物质里传播的

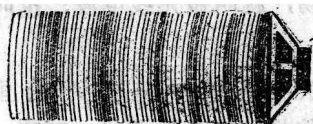


图 13-3

速度是不同的，在空气里传播的速度是340米/秒。声音的大小，称做响度，声音的高低称做音调。如果声波的振幅大，那么响度就大；如果声波的频率高，音调也就高。一般人所能听到的声音，频率范围在20——20000赫兹之间，超出这个范围，人就听不见了。同时，声音的传播又受距离的限制，普通人说话，在较远的地方听不见，是因为声波在空气中传播的能量损失掉了的缘故。

四、电磁波

振动的物体能够在它的四周产生波，波能够传递能量（如声能），并且使受它波及的物体也发生振动（如空气、耳膜等），这是我们已经知道了的。如果在某处产生了变化的电场，比如给一个线圈通以交变电流，那么不均匀变化的电场的周围就会产生变化的磁场，变化磁场又在较远的空间产生变化的电场，这个变化的电场又在更远的空间产生新的

变化的磁场……这样，变化的电场和磁场总是交替产生，并且由近及远地向周围空间传播出去，如图 13-4所示。

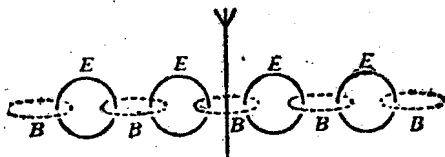


图 13-4

这种向四周空间传播的电磁场，就叫做无线电波，也叫电磁波。

电磁波传播的速度很快，每秒可达30万公里（即 $C=30$ 万公里/秒），电磁波的传播速度是不变的。因而，它的波长随着频率的变化而变化。即

$$\text{波长} = \frac{\text{速度}}{\text{频率}},$$

或写作

$$\lambda = \frac{C}{f}. \quad (13-1)$$

表 13-1

名 称	波 长	频 率	主 要 用 途
长 波	3000米以上	低于100千周	电 报 通 讯
中 波	200~3000米	100~1500千周	无线电广播
中短波	50~200米	1500~6000千周	电 报 通 讯
短 波	10~50米	6~30兆周	无线电广播、电报通讯
米 波	1~10米	30~300兆周	无线电广播、电视、无线电导航
分米波	10厘米~1米	300~3000兆周	电视、雷达、无线电导航、无线电接力通讯和其他专门通讯
毫米波	1~10毫米	30000~300000兆周	

例如中央人民广播电台播送节目使用的电磁波频率是560千周(即560000赫兹), 波长是

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{560000} \approx 536(\text{米})。$$

无线电里应用的电磁波的频率区域很宽(从10千周到30万兆周), 频率不同的电磁波, 特性和用途也不相同, 通常划成几个波段, 如表13-1所示。

第二节 晶体二极管

一、半导体的特性

在第八章里, 我们简单地介绍了半导体, 如锗、硅等, 它们既不象导体那样容易导电, 也不象绝缘体那样不导电, 它们的导电能力介于导体和绝缘体之间, 所以称为半导体。

物质都是由原子组成的。从原子排列的形式上, 可以把物质分为两大类: 一类是原子按着一定的规律整齐地排列着, 具有特殊的外形, 叫做晶体; 一类是原子排列得杂乱无章, 没有规则, 叫做非晶体。

因为绝大部分半导体是晶体, 所以往往把半导体材料就叫做晶体, 晶体管的名称就是这样来的。

半导体做成晶体管应用于无线电设备中, 并不是由于它的导电能力介于导体和绝缘体之间, 而是由于它具有下面的独特性质:

(1) 在纯净的半导体(又叫本征半导体)中, 适当掺入一定种类的极微量的杂质, 则它的导电性能就会成百万倍地增加, 这是半导体最突出的性质。利用这个特性, 制成了各种不同的晶体管。

(2) 半导体的导电能力随着外界条件的变化而发生显著变化。例如, 当照射到半导体上的光线改变时, 半导体的导电能力也跟着改变。有光线照射时, 导电能力强, 没有光线照射时, 半导体不导电。利用半导体的这个性质, 可以做成光敏电阻、光敏二极管和光敏三极管等元件。

半导体所处的环境温度变化时, 导电能力也发生变化。例如温度升高时, 导电能力显著增加, 温度下降时, 导电能力就显著下降。利用半导体的这种特性, 可以制成热敏电阻。

二、P型半导体和N型半导体

半导体所具有的特性, 完全是由它内部结构的特殊性决定的。

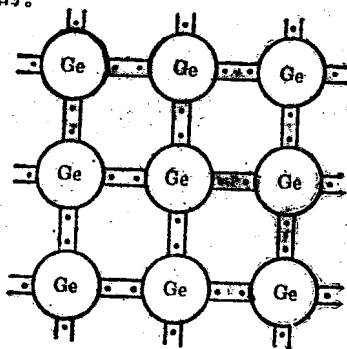


图 13-5

锗(Ge) 是典型的半导体材料, 它处在元素周期表中的碳族, 最外层有四个电子, 叫做价电子。外层如果有八个价电子, 原子就会处于稳定状态, 因此, 一个锗原子就和它周围四个锗原子的价电子组成共价键, 从而达到稳定状态, 如图 13-5

所示。这样每个锗原子的外层价电子都是和其它原子共有的，通常状态下没有自由电子，因此导电性能不如导体。但这些共有的价电子也不象绝缘体中的电子那样被束缚得很紧，有少量电子由于受热或受光的照射能够挣脱原子核的束缚，离开原来的位置。这时候，共价键就出现了空位，我们把这个空位叫做“空穴”。空穴是带正电的。当出现空穴时，附近的价电子就容易前来补充，使附近的原子又出现新的空穴，又有邻近的价电子前来补充，从而形成了价电子的运动。这种运动就好像带正电荷的空穴在移动。

由于半导体内有自由电子和可以移动的空穴这一内在因素，所以给半导体加一个外电场，自由电子就会逆着电场方向移动，形成电子流；空穴就会顺着电场方向移动，形成空穴电流。我们把在外电场作用下参加导电的电子和空穴统称为载流子。

在半导体中存在着的少量的自由电子和空穴可以导电，但在通常状态下，半导体导电能力是很弱的。

如果在纯净的半导体锗中掺入少量的三价元素铟(In)，铟与邻近的四个锗原子结合成共价键时，因为铟外层电子只有三个，所以缺少一个电子，形成一个空穴，如图 13-6 所示。这样一来，半导体中空穴密度增大，空穴的数目大大超过了自由电子的数目，当外加一

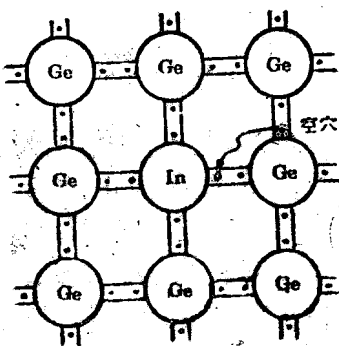


图 13-6

个电场时，导电就主要靠空穴。我们把这种主要靠空穴导电的半导体，叫做空穴型半导体，或者叫 P 型半导体。在 P 型半导体中，主要靠空穴导电，所以空穴称为多数载流子，电子称为少数载流子。

如果在锗里掺入少量的五价元素砷(As)，砷原子占据了锗原子的位置。它有五个价电子，其中四个价电子和邻近的四个锗原子组成共价键，第五个价电子因为不能组成共价键而成为自由电子，如图 13-7

所示。这样半导体锗内自由电子数目增多，而且大大超过了空穴的数目。我们把这种主要靠电子导电的半导体，叫做电子型半导体，或者叫 N 型半导体。在 N 型半导体中，主要靠电子导电，所以称电子为多数载流子，空穴称为少数载流子。

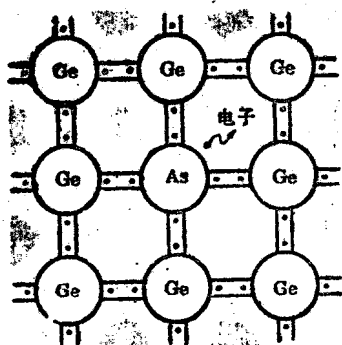


图 13-7

三、 PN 结

在第六章里，我们谈到了扩散现象。例如在一杯水里滴入几滴红墨水，红墨水的分子会扩散到水中，使一杯水呈现红色。

如果把一块 P 型半导体和一块 N 型半导体结合在一起，由于 P 型半导体中空穴密度大， N 型半导体中电子密度大，所以 P 型区域的空穴就向 N 型区域扩散，同时， N 型区域里的电子也向 P 型区域扩散。扩散的结果，如图 13-8 所示：在 P 型半导体和 N 型半导体的界面处，形成了一个特殊的带

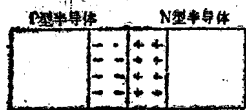


图 13-8

电薄层。这个薄层靠 P 区一边，由于缺少空穴而带负电，在靠 N 区一边，由于缺少电子而带正电，因而在薄层中形成了一个电场。这个电场的方向是由 N 区指向 P 区的，它对 P 区的空穴向 N 区扩散和 N 区的电子向 P 区扩散是起阻碍作用的。这个带电薄层叫做 PN 结，又叫阻挡层，由阻挡层产生的电场叫做阻挡层电场。

在 P 型半导体和 N 型半导体结合的起初，由于阻挡层电场还比较小，它对扩散的阻力也比较小，然而随着扩散的不断继续，这个电场也在不断地增强，对扩散的阻力也越来越大，使扩散逐渐减弱，直到阻挡层的电场力等于扩散力的时候，达到了相对的平衡。 N 区的电子和 P 区的空穴数目不再变化，达到了暂时相对的稳定状态，阻挡层不再加厚。应当指出，这个电场对 P 区的电子向 N 区扩散及 N 区的空穴向 P 区扩散不起阻挡作用。

PN 结是晶体管的最基本的结构，是它使晶体管具备了单向导电的性能。

当 P 区接电池的正极， N 区接电池的负极时

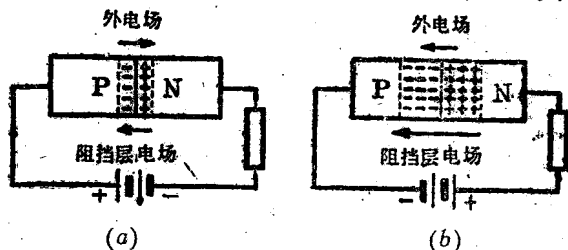


图 13-9

(图 13-9a), 这种接法叫做正向连接, 外加电压叫正向电压。电源加在 PN 结上的电场方向恰好和 PN 结的阻挡层电场方向相反, 阻挡层电场被削弱, 破坏了阻挡层电场力与扩散力的相对平衡, 使扩散力大于电场力, 并使扩散运动继续进行。这相当于 PN 结电阻(正向电阻)减小, 阻挡层变薄。所以 P 型半导体中的空穴和 N 型半导体中的电子在外电场的作用下, 不断通过 PN 结, 形成了正向电流。

反之, 当 P 区接电池的负极, N 区接电池的正极时(图 13-9b), 这种接法叫做反向连接, 外加电压叫反向电压。电源加在 PN 结上的电场方向恰好和 PN 结阻挡层电场方向相同。因此阻挡层电场被加强, 即阻挡层加厚。这相当于 PN 结电阻(反向电阻)加大了, 所以 P 型半导体中的空穴和 N 型半导体中的电子不容易通过 PN 结。这时, 反向电流是非常小的。由此可见, PN 结只允许一个方向的电流通过, 这就是 PN 结的单向导电性。

把 PN 结封在玻璃或金属管内, 从 P 区、 N 区各引出一条引线, 就构成了晶体二极管。

晶体管按其结构可以分为两类: 面接触式和点接触式。

常见的面接触式的二极管, 结构、外形、符号如图 13-10

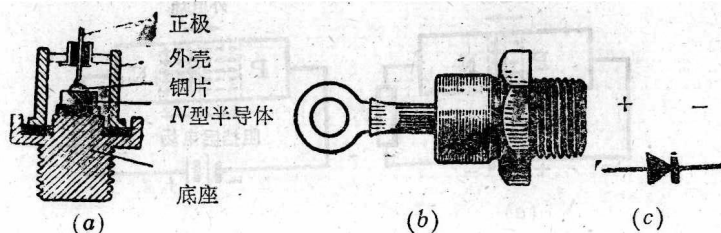


图 13-10

所示。面接触式二极管有较大的接触面积，能够承受较大的正向电流，但是，正因为它的接触面积比较大，所以阻挡层的电容也比较大，因而不能在高频电路中使用，比如不能用来检波，通常只用来整流。

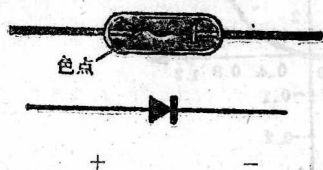


图 13-11

点接触式二极管的结构、外形如图 13-11 所示。它的接触面很小，所以不能承受较大的正向电流，因而不能用来做大功率整流。但因为接触面小。所以阻挡层的

电容很小，能够在很高的频率下工作，可用于检波和微小电流的整流。

四、晶体二极管的伏安特性

前面所讲的二极管的单向导电性，实际上是反映了流过 PN 结的电流和外加电压的关系。通过改变加在 PN 结上的电压数值，来观察流过 PN 结的电流变化，并且记录下两者对应的数值，再绘制曲线。用纵轴代表电流 I ，横轴表示加在二极管上的电压 U 。因为电压的单位用伏特，电流的单位用安培，所以这条曲线就叫伏安特性曲线(图 13-12)。运用我们学过的数学、物理知识，就可以掌握和使用伏安特性曲线，进而按需要选择二极管。

从图 13-12 中看出，在交点处电流为零，即不加电压时二极管中没有电流。横轴以上部分表示出，当加以正向电压时，随着电压不断增高，电流先是缓慢增加，随后是显著增

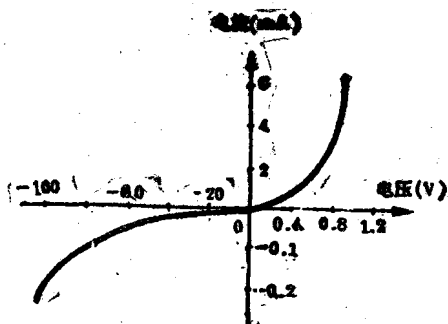


图 13-12

大。横轴以下部分表示出，当加以反向电压时，起初随着反向电压的增高，反向电流也稍有增加，但反向电压继续增加时，反向电流基本上保持一个很小的数值而不再增加，这个电流称为反向饱和电流。当反向电压达到某个数值时，晶体二极管的反向电流会突然增大，这时二极管失去单向导电的性能，即被过高的反向电压击穿了。所加的这个反向电压，叫做反向击穿电压。

为了合理地使用晶体二极管，要掌握两个重要参数，一个是最大正向电流，一个是最大反向电压。使用时，如果超过最大正向电流，二极管将因为过热而损坏；如果外加电压超过最大反向电压，二极管将被击穿。

五、晶体管型号命名方法

目前，我国晶体管型号主要是由四部分组成的：第一部分用数字表示极数，第二部分用汉语拼音字母表示材料和极

第三节 整流电路

从发电厂经过电力网输送出来的都是交流电，但是有些场合恰恰是需要直流电源，例如电解、电镀、直流电动机、电讯设备和电子仪器等。因此就提出了如何把交流电变成直流电这样一个问题。

将交流电变成直流电的过程叫做整流。将交流电变成直流电的设备叫整流器。把交流电经整流变成直流电的供电装置，要比蓄电池、干电池、直流发电机等直流供电装置简单、经济，因而应用广泛。

交流电和直流电是一对矛盾，它们可依据一定的条件相互转化。实践结果证明，利用二极管的单向导电性进行整流是一种简便易行的方法，并据此制作成了整流器，就为这个转化创造了条件。

整流器由整流元件(晶体二极管或电子二极管等等)、变压器和滤波器三部分组成。下面我们介绍晶体二极管整流电路的特点和性能。

一、单相半波整流

这种整流电路如图 13-13 所示。图中 B 是变压器， D 是整流二极管， R 是需要直流电的电阻性负载。

整流的过程是这样的：

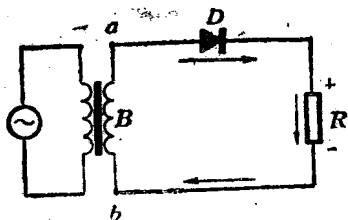


图 13-13

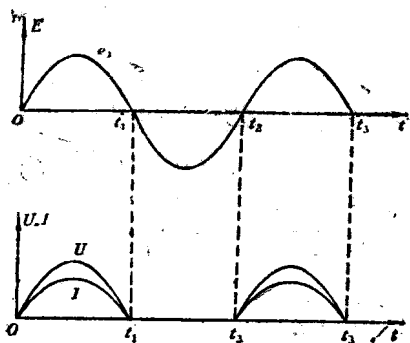


图 13-14

当变压器初级有交流电通过时，次级就有感生电动势 e_2 出现，这个电动势的大小和方向不断变化，如图 13-14 (a) 的曲线所示。在第一个半周内 ($0 \rightarrow t_1$)，若变压器

次级的 a 端为正， b 端为负，这时加在二极管上的是正向电压，二极管导电 (又叫导通)，有电流 I 流过负载电阻 R ，同时在负载电阻 R 上产生电压降 U 。

在 e_2 的第二个半周内 ($t_1 \rightarrow t_2$)，次级的 a 端为负， b 端为正，这时加在二极管上的电压是反向电压，二极管不导通，没有电流流过负载电阻 R ，所以负载电阻的两端也没有电压输出，即 $U = 0$ 。在 0 到 t_1 这段时间内，负载电阻 R 上的电流 I 和电压 U 的变化情形如图 13-14 (b) 所示。

有几个数据，可以通过计算得出，我们只要记住结果就可以了，至于推导过程，这里从略。通常设计整流电路时，要先知道变压器次级电动势 e_2 的有效值 E_2 ，然后按下面公式计算。

$$\text{输出直流电压平均值: } U = 0.45 E_2, \quad (13-2)$$

$$\text{输出直流电流平均值: } I = \frac{U}{R} = \frac{0.45 E_2}{R}, \quad (13-3)$$

$$\text{二极管所承受的反向电压最大值: } U_{am} = 1.41 E_2.$$

由于这种整流电路只利用了单相交流电的半个波，所以

叫单相半波整流。

单相半波整流线路简单，使用的元件少，但因为它只用了半个波，而另外的半个波电能没有送到负载中去，白白浪费掉了。这种线路的利用率很低，而且输出的直流电脉动性很大，只能用在小电流和要求不高的场合。

为了改善上述缺点，人们通过实践，在半波整流的基础上又提出全波整流电路。

二、单相全波整流

这种整流电路如图 13-15 所示。 B 是个有中心抽头的变压器， D_1 、 D_2 是两只二极管， R_z 为负载电阻。

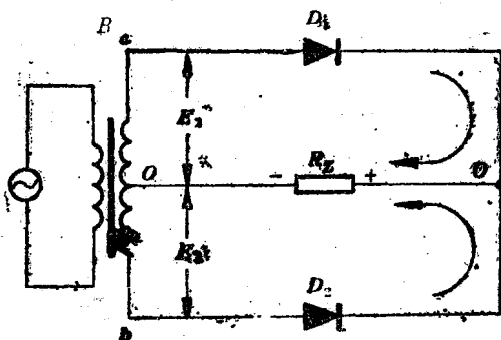
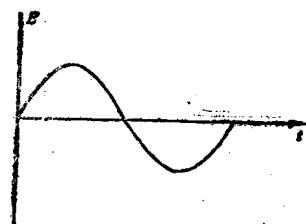


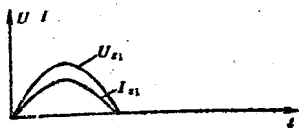
图 13-15

回路 aoa' 和 obo' 各相当于一个半波整流电路。

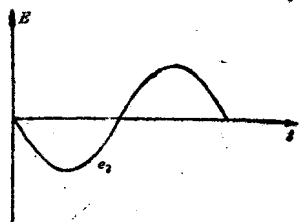
在第一个半周内变压器的次级 a 端为正， b 端为负时，二极管 D_1 在正向电压下导通， D_2 在反向电压下不导通。这时负载电阻 R_z 上有电流 I_{z1} 通过，电流方向是 $a \rightarrow D_1 \rightarrow O'$



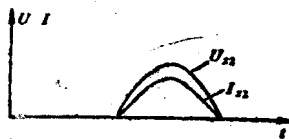
(a)



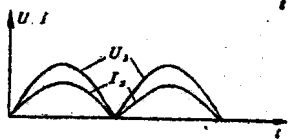
(b)



(c)



(d)



(e)

图 13-16

$\rightarrow R_z \rightarrow O$, 在 R_z 上产生电压降 U_{z1} 。回路中 e_2 、 U_{z1} 、 I_{z1} 的变化情况如图 13-16 (a)、(b) 所示。

在第二个半周内变压器的次级 a 端为负, b 端为正时, D_2 在正向电压下导通, D_1 在反向电压下不导通, 这时负载电阻 R_z 上有电流 I_{z2} 通过, 电流方向是 $b \rightarrow D_2 \rightarrow O' \rightarrow R_z \rightarrow O$, 在负载电阻 R_z 上产生电压降 U_{z2} 。回路 obo' 中 e_2 、 U_{z2} 、 I_{z2} 的变化情形如图 13-16 (c)、(d) 所示。

对于负载电阻 R_z 来说, 不管交流电是在正半周还是在负半周, 都有电流流过, 而且方向是一致的。所流过的电流 (平均值) $I_z = I_{z1} + I_{z2}$, R_z 上的电压 $U_z = U_{z1} + U_{z2}$ 。其波形如图 13-16 (e)

所示。从图中可以看出, 全波整流得到的波形要比半波整流所得到的波形增加一倍。

全波整流时, 负载得到直流电压 U_z 和电流 I_z 分别为:

$$U_z = 0.9 E_2, \quad (13-4)$$

$$I_z = \frac{U_z}{R_z} = \frac{0.9E_2}{R_z} \quad (13-5)$$

二极管所承受的反向电压最大值:

$$U_{am} = 2\sqrt{2}E_2 = 2.82E_2.$$

每只二极管所流过的电流为 $\frac{I_z}{2}$ 。

全波整流利用了全部波形, 输出电流脉动较小, 但变压器必须有中心抽头, 而且线圈要增加一倍。另外二极管所承受的反向电压要比半波整流时增加一倍。

三、单相桥式整流

为了克服全波整流的缺点, 在实际应用中常常采用桥式整流电路。桥式整流电路由四只晶体二极管, 接成一个电桥形式, 如图 13-17 所示。

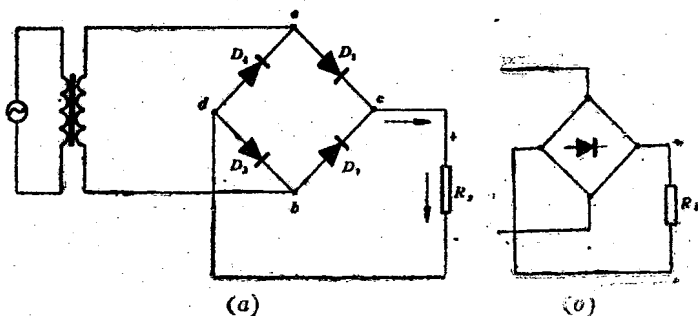


图 13-17

在变压器次级电动势 e_2 的第一个半周内, a 端为正, b 端为负时, D_1 、 D_3 导通, D_2 、 D_4 不导通。电流由 a 经 D_1 、

c 、 R_z 、 d 、 D_3 流回 b 。

在第二个半周内, D_2 、 D_4 导通, D_1 、 D_3 不导通。电流由 b 经 D_2 、 c 、 R_z 、 d 、 D_4 流回 a 。

对于负载电阻 R_z 来说, 在交流电的正、负半周都有电流流过, 而且方向一致, 总是从 c 到 d 。

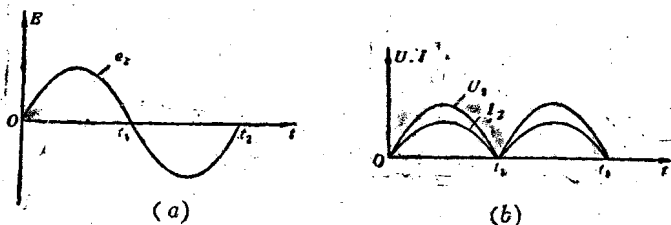


图 13-18

桥式整流时, 电压、电流的波形如图 13-18所示, 也是一种全波整流。它得到的直流输出为:

$$U_z = 0.9E_2, \quad (13-6)$$

$$I_z = \frac{U_z}{R_z} = \frac{0.9E_2}{R_z}. \quad (13-7)$$

二极管所承受的最大反向电压

$$U_{am} = 1.41E_2.$$

每只二极管流过的电流为 $\frac{I_z}{2}$ 。

为了画图方便, 桥式整流线路的四只二极管画成如图 13-17(b)的形式, 箭头指的方向是输出端的正极。

拖拉机、汽车使用的蓄电池(电瓶)是要经常充电的。充电时, 都是用交流电经整流器整流后输出的直流电。每次充电的电瓶数不一定相同, 所以要求输出的直流电压有几种数值。图 13-19是给蓄电池充电用的硅整流器的电路图。

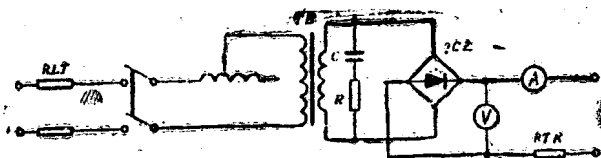


图 13-19

充电整流器的输出电压是0~60伏特,可以通过调节调压变压器 TB 来选取输出电压的大小(即调节 E_2 的值,以改变 U_2 的大小)。直流输出电流可达16安培。

RLT 是熔丝, RTK 为快速熔丝。

R 、 C 串连在一起,并接在整流元件一侧,当电路由于某种原因电压过高时,电流就很快地通过电阻 R 对电容 C 充电,从而减小整流元件上的电流,这种保护装置叫过电压保护。

以上三种整流电路比较起来,各有其优缺点。在具体运用时,可以根据负载的要求和整流元件的参数,合理地选择整流电路。

工业生产上需要较大的直流电源设备,一般是通过把三相交流电整流来获得的,这就是三相整流电路。

上面介绍了利用晶体二极管做的整流元件,此外,还使用其它半导体材料如硒、氧化铜的整流器以及非半导体材料如真空二极管等的整流器。

四、滤波器

交流电经过整流后得到的不是平稳的直流,而是脉动直

流。这种脉动的直流电，实际上包含着平稳的直流电和交流电两部分。许多设备如扩音机、收音机等需要的是平稳的直流电。因此必须设法滤去脉动电流的交流成分，使之由波动较大变得比较平稳，这就叫滤波。下面介绍最常见的 π 型滤波器(图 13-20)。

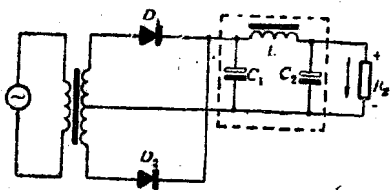


图 13-20

π 型滤波器由一个电感线圈 L 和两个电容 C_1 和 C_2 组成。如图中虚线部分所示。从二极管输出的单向脉动电流，含有直流成分和交流成分，滤波电路要“放过”直流成分，使之流经负载 R_L ；阻挡交流成分，使之尽量不流经 R_L 。因为电容器有隔断直流、通过交流的特性，而电感有易于通过直流、阻碍交流的特性，所以脉动电流中的交流成分受到电感器 L 的阻碍，大部分通过电容器 C_1 滤去，直流成分和一小部分交流成分通过电感器 L ，其中交流成分又通过电容器 C_2 滤去。结果通过负载电阻 R_L 的电流就是比较平稳的直流电。绝对的纯是没有的，因而滤波后的电流不是一点交流成分也没有的，其波动只不过比滤波前变小，更

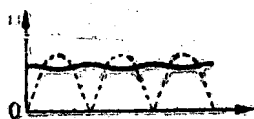


图 13-21

近于理想的直流罢了(图 13-21)。

某些场合，如果负载所需要的电流不大，在滤波器中常用电阻器 R 来代替电感 L (图 13-22)，这样既使整个设备体积减小(电感器比电阻器占的体积大)，而且成本又低。在收音机里就是用电阻来代替电感的。

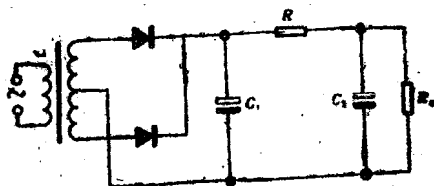


图 13-22

π 型滤波器中, 如果不用电感器 L 和电容器 C_2 , 如图 13-23 所示, 就叫电容滤波器; 如果不用电容器 C_1 、 C_2 , 只用电感器 L , 如图 13-24 所示, 就叫做电感滤波器。电容滤波器运用于负载变动小、直流电压输出高、电流不大的场合;

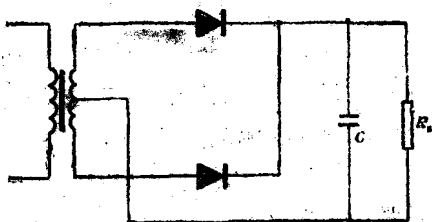


图 13-23

电感滤波器适用于电压变动较小, 负载变动较大的场合。此外还有几种滤波器, 它们特性和应用场合都是各不相同的。

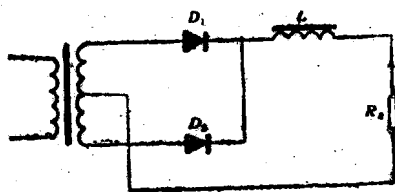


图 13-24

第四节 晶体三极管

晶体二极管具有单向导电的能力, 能用来整流、检波,

但它没有放大信号的能力。人们通过实践发现，两个 PN 结按特定的方式结合在一起就具有这种能力了，并在此基础上制成了晶体三极管。

一、晶体三极管的构造

晶体三极管的内部构造如图 13-25 所示，它的主要部分（图 13-26）是由三层半导体组成的，每层的引出线，就是三个极。

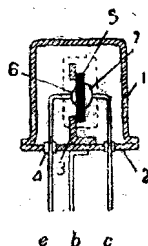


图 13-25

1、外壳；2、底座；3、镍支架；4、绝缘子；5、铅片；6、发射极球（钢铰球）；7、集电极球（钢铰球）。

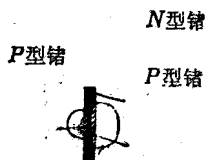


图 13-26

如果两边的材料是 P 型半导体，中间夹着的一层是 N 型半导体，这样的三极管就叫做 PNP 型三极管；如果两边的材料是 N 型半导体，中间夹着的一层是 P 型半导体，就叫做 NPN 型三极管。

无论是 PNP 型三极管还是 NPN 型三极管，都分为三个区和两个 PN 结。中间叫基区，两边分别叫发射区和集电区；两个 PN 结分别叫发射结和集电结。对应的三个引线叫

基极、发射极和集电极，分别用 b 、 e 、 c 表示，如图 13-27 所示。

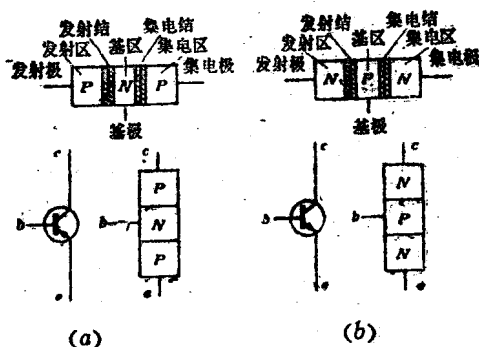


图 13-27

一个三极管好象由两个 PN 结串联而成的，每个 PN 结都具有单向导电性，这一点和二极管相同；但是由于两个 PN 结具有一个很薄的基区，这就构成了三极管不同于二极管的特殊本质。

二、晶体三极管的放大作用

晶体三极管的基本作用是放大。所谓放大，就是把一个微弱的电讯号转换成一定强度的电讯号。例如对着话筒说话，声音通过话筒的作用，变成了微弱的电讯号，如果把这个微弱的电讯号直接作用在喇叭上，喇叭放不出声音来。但是如果把这个微弱的电讯号，经过由三极管组成的放大电路放大（扩音机就起这个作用），喇叭就能发出比讲话时大得多的声音来。例如一台 80W 晶体管扩音机，能将输入讯号放

大24000倍左右。

1、三极管的电流分配

PNP 型三极管和 NPN 型三极管，工作原理都是相同的，只是在使用时电源极性不同，这里我们着重分析 PNP 型三极管。

如同电灯加一定的电压才能正常发光一样，三极管正常工作也需要加上一定的电压。通常，在三极管的发射极 e 和基极 b 之间加一个正向工作电压 U_{eb} ，称为基极电压或偏压。 U_{eb} 一般只有十分之几伏；而在发射极 e 和集电极 c 之间加一个工作电压 U_{ec} ，称为集电极电压， U_{ec} 一般为几伏到十几

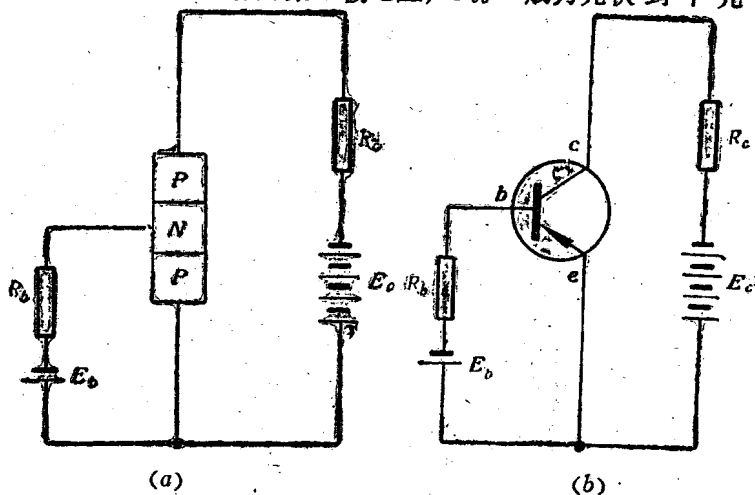


图 13-28

伏。 PNP 型三极管的电位情形是：发射极电位高于基极电位，而基极电位又高于集电极电位（ NPN 型三极管则恰好相反），即在发射结上加的是正向电压，在集电结上加的是反向电压（图 13-28）。

三极管加上工作电压后，晶体管内部电流是怎样流动的呢？这当然得重视电源电压的极性（如果反接不但不能正常工作，甚至损坏三极管），但它只是外因，我们仍然要从三极管内部结构的特点上来分析电流的流动情形，因为外因只能通过内因起作用。

在图13-28 (a) 中，由于发射区是P型半导体，基区是N型半导体，它相当于一个有PN结的二极管。在这个PN结（即发射结）上加上正向电压，阻挡层变薄，于是发射区里大量的空穴就会向基区扩散而形成电流，这个电流叫做发射极电流，用 I_e 表示。应当指出：与空穴由发射区进入基区的同时，也有电子从基区进入发射区。但是在制造晶体管时，在基区少许掺入杂质，使基区电子浓度远比发射区空穴浓度小，因此电子由基区进入发射区形成的电流可以忽略不计，发射极电流的成分主要是由空穴形成的。当空穴由发射区

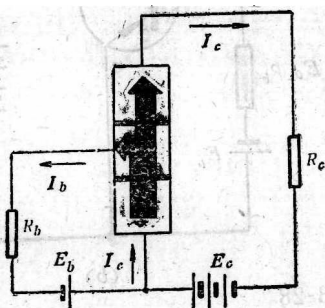


图 13-29

进入基区后，由于基区做得很薄，只有几微米到几十微米，大量的空穴容易挤到集电结的边缘。在集电结上加有很大的反向电压，这个反向电压所形成的强电场是能够帮助空穴进入集电区的，所以从发射结扩散到基区的绝大部分空穴越过集电结进入集电区，形成集电极电

流 I_c ；只有一小部分空穴（约1~10%左右）从基极流回电源负端，即与基区电子复合，从而形成基极电流 I_b ，如图13-29所

示。所以基极电流 I_b 与集电极电流 I_c 之和应该跟发射极电流 I_e 相等，即

$$I_e = I_b + I_c. \quad (13-8)$$

这就是晶体三极管电流分配关系式。

2、晶体三极管的主要参数

(1) 电流放大系数 β 在上面的关系式里，集电极电流 I_c 在数值上约占 I_e 的百分之九十几，而基极电流 I_b 只占 I_e 的百分之几。如果把 E_c 固定，当基极电流有一个很小的变化 ΔI_b 时， I_c 与 I_e 也产生相应的变化 ΔI_c 与 ΔI_e ，这时三者有下面关系：

$$\Delta I_e = \Delta I_b + \Delta I_c.$$

但是， ΔI_c 比 ΔI_b 大得多，即基极电流微小的变化，会引起集电极电流较大的变化。把上面两个变化量之比 $\frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}$ 叫做共发射极电路电流放大系数，并且用 β 表示，于是

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}. \quad (13-9)$$

例如，当基极电流 I_b 从 0.01 毫安变化到 0.018 毫安时，集电极电流从 0.49 毫安变化到 0.982 毫安，那么电流放大系数就是

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \frac{0.982 - 0.49}{0.018 - 0.01} \approx 62.$$

这就是说，集电极电流的变化量是基极电流变化量的 62 倍。如果在基极与发射极之间，加入一个交流信号，如图 13-30 所示，当输入电流 I_b 有一个微小的变化量 ΔI_b 时，集电极电流 I_c 就会有一个较大的变化 $\beta \cdot \Delta I_b$ ，这就是晶体三极管对电流的放大作用。

β 是晶体三极管的重要参数之一，它体现出晶体三极管放大能力的大小。 β 值的大小，除了由半导体材料的性质、管子的结构等决定外，还与管子的工作电流有关，即在不同的工作电流下， β 值也不相同。对于一般面结合型的三极管， β 值约在 9~99 之间。

此外，还有反向饱和电流和穿透电流，对于三极管也是重要的参数。

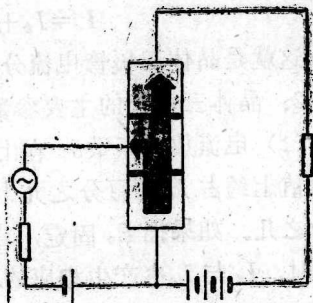
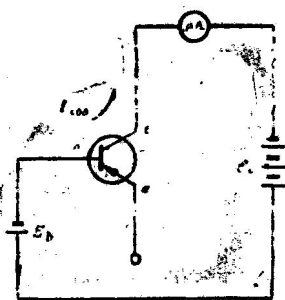
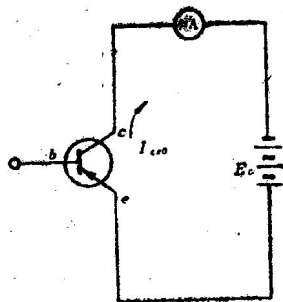


图 13-30

(2) 反向饱和电流 当 $I_e = 0$ (相当于发射极开路)， I_c 不等于 0 时，这个电流称为集电极—基极反向截止电流，又叫做反向饱和电流，用 I_{cbo} 表示 (图 13-31a)。它类似于二



(a)



(b)

图 13-31

极管加上反向电压时漏过的电流。一般锗高频小功率管的 I_{cbo} 在 $10\mu A$ 以下，锗低频小功率管的 I_{cbo} 在 $30\mu A$ 以下。

(3) 穿透电流 当 $I_b = 0$ (相当于基极开路) 而 I_e 不等

于0时, 这个电流称为集电极—发射极反向截止电流, 又称作穿透电流, 用 I_{ceo} 表示 (如图 13-31b 所示)。

实践证明, 反向饱和电流 I_{cbo} 和穿透电流 I_{ceo} 之间的关系是:

$$I_{ceo} = (1 + \beta) I_{cbo}. \quad (13-10)$$

穿透电流也是集电极电流的一部分, 因此, 集电极电流应该是

$$I_c = \beta I_b + I_{ceo}. \quad (13-11)$$

穿透电流对温度最敏感, 温度每升高 10°C , I_{ceo} 就要增加一倍左右。穿透电流增加, 使管子的工作状态发生很大变化, 严重地破坏电路的正常工作, 稳定性差是晶体管的天然缺陷之一。在选用管子时, 要求 I_{cbo} 越小越好。如果 I_{cbo} 大, 工作不稳定、噪音大, 有时甚至不能工作。此外还需在电路中用热敏电阻、负反馈等以减小由于温度升高时穿透电流变大所带来的影响。

第五节 晶体管的简单测试

测量晶体的目的有两个: 一个是判定晶体管的极性 (二极管的正、负极; 三极管的发射极、基极和集电极), 一个是判断晶体管的好坏。测量方法很多, 利用万用表能够辨别晶体管的极性并且能粗略地判断出晶体管的质量, 由于这个方法简单, 所以深受欢迎。用万用表测晶体管的主要根据是 PN 结的正向电阻小、反向电阻大这一特性, 掌握这一点, 测试工作就能顺利进行。

一、利用万用表测量晶体二极管

晶体二极管的极性，通常在外壳上都有标志：有色点的一头是正极；例如 2AP1—2AP7、2AP11—2AP17 等，但有的是负极，如 2AP9、2AP10。倘若是玻璃壳的，能够看到内部的触针和锲片，有触针的一端是正极。

如果管壳不透明或者没有色点，可以用万用表来判别极性。把万用表拨到欧姆档，一般用 $R \times 1K$ 或 $R \times 100$ 这两档（ $R \times 1$ 档电流太大， $R \times 10K$ 档使用的电压太高，都容易烧坏管子）。把万用表的两表笔分别接触二极管的两极，如果量出的电阻只有几百欧姆（图 13-32a），那么电表黑笔接触的一端是二极管的正极，红笔接触的一端是二极管的负极。如果量出的电阻很大，有几百千欧（图 13-32b），那么黑笔接触的是负极，红笔接触的是正极。

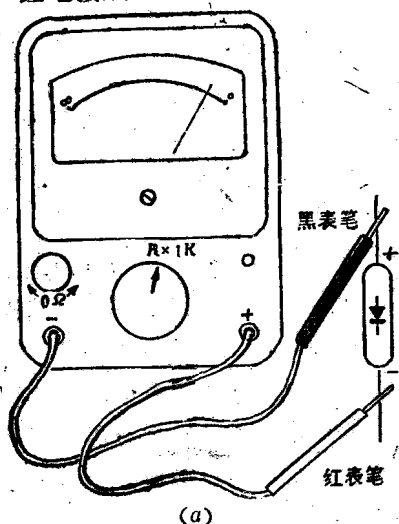


图 13-32

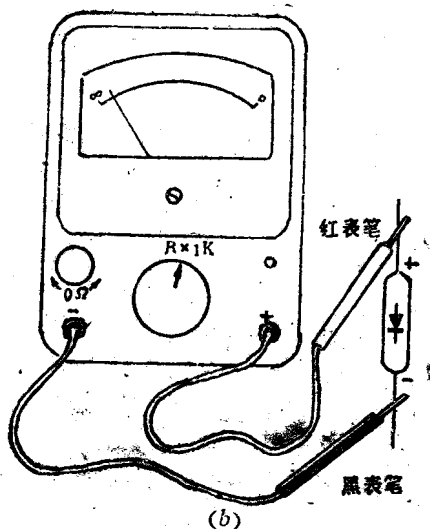


图 13-32

在万用表里，黑笔连接电池的正极，而红笔连接电池的负极，当黑笔接触二极管的正极，红笔接触二极管负极时，二极管上加的是正向电压，量出的是二极管的正向电阻，所以读数很小，反之，加在二极管上的是反向电压，量出的是反向电阻，所以读数大。

测量两次，得出大小两个不同的阻值，两个阻值差别越大，二极管性能越好。如果测出的正向电阻极大，说明这只管子内部已经断路；若测出的反向电阻极小，说明这只管子内部已经短路，这样的二极管都不能使用。

二、利用万用表测量晶体三极管

1、区别是PNP型管还是NPN型管

根据 PN 结正向电阻小，反向电阻大的原理来判别管子是 PNP 型还是 NPN 型。因为 PNP 管的基极倘若接万用

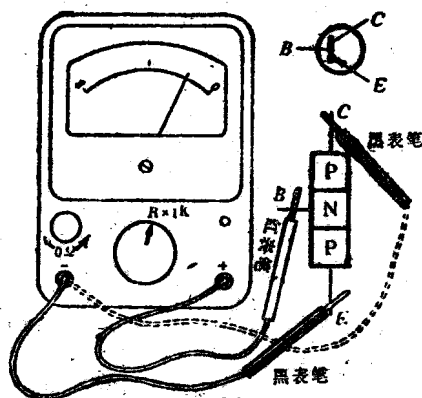


图 13-33

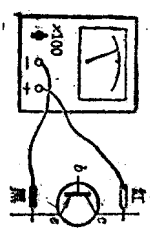
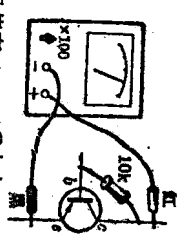
表的红笔（表内电池负极），用黑笔去接触另外两极时，测量的都是正向电阻，所以阻值很小（图 13-33）。如果轮流在三个极中用红笔接触其中一极，然后用黑笔接触另外两极，直到出现上述情况，说明管子是 PNP 型，而且红笔接触的是基极。倘若不能得到上述结果，则用黑笔（表内电池正极）接触其中一极，红笔分别接触另外两极，直到出现上述结果，就说明管子是 NPN 型，而黑笔所接的是它的基极。

2. 识别管脚

先找出基极 b ，方法如前所述。然后再找出发射极 e 和集电极 c 。

假如晶体管是 PNP 型的，基极找出后，红笔不要拿掉，用黑笔去接触另外两脚，量得的阻值一个大一些，一个小一些，小的是集电极 c ，大的是发射极 e 。

表 13-3

方 法 测试内容	类 型	测试内容
估 测 I_{ceo}	PNP小功率管	 阻值应大于几十千欧, 若指针飘移或读数很小, 说明 I_{ceo} 大, 晶体管不稳定。
估 测 β	PNP大功率管	改用 $R \times 10$ 一挡, 测得阻值应大于数百欧。  阻值为 $3-8k\Omega$, 读数越小, β 越大, 但太小管子不稳定。 阻值在 $10-100\Omega$ 左右。

3、判断晶体三极管的性能

用万用表测量的结果可以估计晶体三极管的好坏。测量时, 可按表13-3进行, 如果测得的阻值与表中数据相差不多, 即说明是好管, 如果相差太大, 说明管子质量不好或者已经损坏。

第六节 低频放大器的工作原理

低频放大电路是各种电子设备中最常用的基本电路之一，这里所说的低频信号是指频率从20周到20千周的音频交流信号。低频放大电路用途很广。扩音机就是放大低频(音频)的装置。此外，在工农业生产中常见的转动、振动、光、热等运动变化，都可以用一定的方法转换成交流电讯号，这些信号属于低频信号，对于这些信号放大的低频放大器，广泛地用于控制、检测等设备中。

我们先介绍最简单的单管放大器，然后进一步讨论比较复杂的多级放大器。

一、晶体管放大器的工作原理

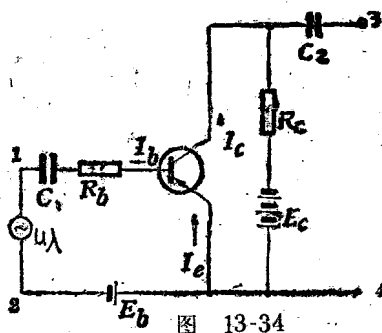


图 13-34是一个最简单的单管低频放大器线路。 E_c 是

集电极电源， R_c 是集电极电阻。 E_b 是基极电源， R_b 是基极电阻，又叫偏流电阻。通常 E_c 、 E_b 都是固定的，改变 R_b 就可以改变发射结上正向电压的数值。

当没有加信号电压时，晶体管的基极电压 U_{eb} 、基极电流 I_b 、集电极电流 I_c 和集电极电压 U_{ec} 都是不变的直流电。

如果不计管子发射结的正向电阻，那么

$$I_b = \frac{E_b}{R_b}$$

若 $E_b = 1$ 伏， $R_b = 25$ 千欧， 则

$$I_b = \frac{1}{25 \times 10^3} = 40 \text{ 微安, (图13-35a)}$$

于是集电极电流

$$I_c = \beta I_b = 40\beta \text{ (微安), (图13-35d)}$$

其中 β 是电流放大系数。

当交流信号电压 u_x 通过电容 C_1 加在放大器的输入端 (1、2) 时，因为交流电压的大小和方向不断变化，有时和发射结的正向电压方向一致，有时和发射结的正向电压方向相反。当两者方向一致时，相当于 E_b 增大，所以 I_b 增加；当两者方向相反时，信号电压抵消了一部分发射结的正向电压，所以 I_b 减小。在图 13-34 中，如果信号电压处在负半周，即上端 1 为负，下端 2 为正时 (图 13-35b)，方向和 E_b 相同，使 I_b 增加。我们知道，基极电流的变化，要引起集电极电流的变化，而这个变化是基极电流变化的 β 倍。当信号电压处在正半周，即上端为正，下端为负时，和 E_b 方向相反，因此使 I_b 减小。集电极电流也随之减小。

如果信号电压按正弦规律变化，如图 13-35(b) 所示，

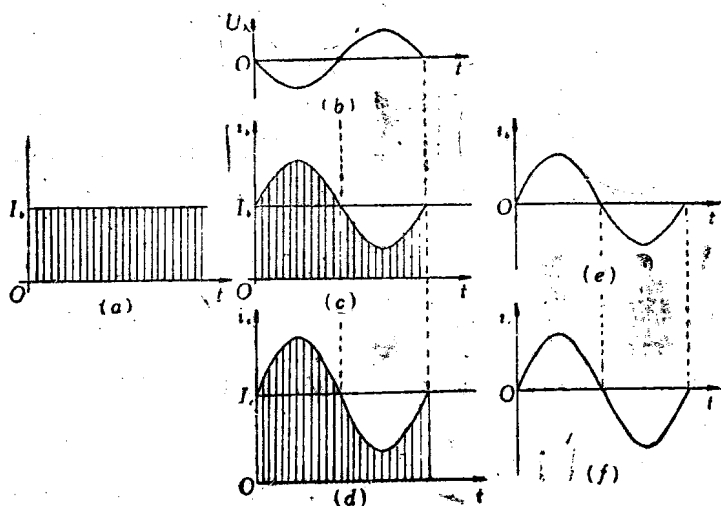


图 13-35

那么基极电流、集电极电流也按正弦规律变化，如图 13-35 (c)、(d) 所示。

变化的基极电流实际上是由两部分组成的，一部分是静止工作状态下的基极电流 I_b ，另一部分是随着信号变化的交流 i_b ，即在直流 I_b 上驮载着交流信号电流 i_b 。 i_b 的波形如图中 (e) 所示。同样，集电极电流也是由直流成份 I_c 和交流成份 i_c 两部分组成的， i_c 的波形如图 13-35 (f) 所示。由于三极管的作用，使 i_c 比 i_b 大得多 (β 倍)，这就起到了放大信号电流的作用。

在低频放大器中，还有电压放大器和功率放大器之分。它们的原理相同，都是利用了三极管对电流的放大作用。

有些场合要求把交流信号电压放大到一定的倍数，有些场合则要求信号除了具有一定的电压外，还得具有一定数值的功率(例如要使喇叭能发声音，信号必须有足够的功率才行)。

二、电压放大原理

在图 13-34 中，负载电阻中流过的电流有 I_o 和 i_o 两部分，分别产生电压降 $U_o = I_o R_o$ 和 $u_o = i_o R_o$ ，这两个电压合成后的波形如图 13-36(a) 所示。其中交流信号电压 u_o 能通过电容 C_2 到达输出端 3、4， U_o (图 13-36b) 不能通过电容 C_2 。电压 u_o 就是被放大的信号电压 u_{out} (图 13-36c)。为什么说 u_o 被放大了呢？我们再从输入到图 13-34 中 1、2 的信号

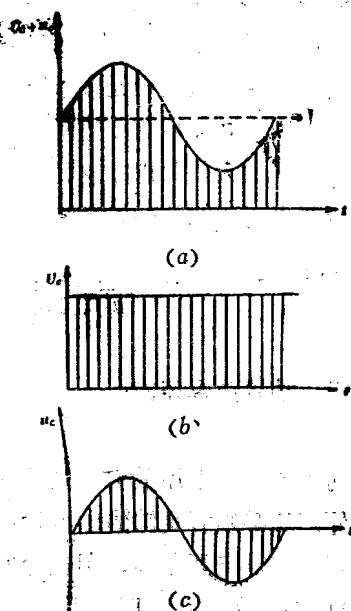


图 13-36

电压 u_{in} 谈起， u_{in} 的数值很小，它引起了基极电流的变化，产生了 i_b ， i_b 是信号电流。如果输入回路的电阻(就是发射结的正向电阻)是 r ， $u_{in} \approx i_b r$ (不考虑其它影响)。输出的信

号电压 $u_o = i_o R_o$ 。两者比较一下：由于三极管对电流的放大作用， i_o 远大于 i_b ；负载电阻 R_o 又大于发射结的正向电阻，因此 u_o 远大于 u_{be} ，或者说 $u_o \gg u_{be}$ 。因此我们说信号电压被放大了。输出信号电压与输入信号电压之比，叫做电压放大倍数，用 K_u 表示，即

$$K_u = \frac{u_o}{u_{be}} \quad (13-12)$$

〔例〕 在图 13-34 中，从基极输入的信号电压最大值是 0.05 伏，经电压放大器放大后，得到的信号电压的最大值是 2.25 伏，电压放大倍数是多少？

解 因为 u_o 、 u_{be} 都是交流电压，在计算时应该用它们的有效值，即最大值除以 $\sqrt{2}$ 。在本题中，每个最大值都除以 $\sqrt{2}$ 后两者再相除，结果相当于最大值相除。即

$$K_u = \frac{u_o}{u_{be}} = \frac{2.25}{0.05} = 45 (\text{倍})$$

三、功率放大原理

功率放大与电压放大不同的地方在于：除了要求电压足够大外，还必须有足够的电流输出。因为功率是电压与电流的乘积，倘若电压很高，但电流微乎其微，两者的乘积（即功率）也不会大。在电压放大器中（如图 13-34），只要在集电极中加入一个阻值大的电阻，电流流过时就能产生一个较大的电压。但这时电流很小，所以它的功率输出也不会大（但不是完全没有）。因此，它不能当作功率放大器使用。功率放大和电压放大都是利用三极管对电流的放大作用，在

这一点上它们又是相同的。功率放大器电路，我们将在以后讲述。

从图13-35和13-36可以看出，当输入信号电压(或电流)增加时，输出信号电压(或电流)就减小；反之，当输入信号电压(或电流)减小时，输出信号电压(或电流)就增加。它们的相位差是 180° 。晶体三极管在放大的同时，又起“倒相”作用。

第七节 晶体管放大器的偏置电路

一、偏流的作用

要使晶体三极管能正常工作，必须加以适当的工作电压，如图13-34中的 E_b 和 E_c 。这样就会产生三种工作电流：发射极电流 I_e 、基极电流 I_b 和集电极电流 I_c 。它们都是直流，叫做静态工作电流。我们把没有输入信号时晶体三极管各极的直流电压、电流的数值，即 U_{ee} 、 I_b 、 I_c 叫做晶体三极管的静态工作点。因为只要确定了 U_{ee} 、 I_b 、 I_c ，三极管的工作状态就确定了。为了避免输入信号影响晶体管的静态工作点，在输入电路中接上电容器(如图13-34中的 C_1)，它只允许交流信号通过，而隔断电容器两边的直流联系。通常把基极静态直流 I_b 叫做偏流，产生偏流的发射结两端正向电压 U_{ee} 叫做基极偏压。前面已经提到， R_b 叫做偏流电阻，它可以调节偏流的大小。

我们知道，集电极电流 I_c 是基极电流 I_b 的 β 倍，即 I_c

直接影响着 I_c 的大小。理论和实践证明 I_c 的大小又影响到三极管的放大性能、放大倍数、质量，即影响到晶体管的静态工作点。因此，选取合适的偏流是三极管正常工作的关键。这就是人们在装置收音机或其它电子仪器时总是要“调偏流”的原因。

能够提供基极偏流的电路叫偏置电路，常用的偏置电路有固定偏置电路、电压负反馈偏置电路、电流负反馈偏置电路等。

二、固定偏置电路

在图 13-34 所示的放大电路中， E_b 和 E_c 需要两个电源，使用起来很不方便，这两个电源可以合并成一个，只要把 R_b 接 E_b 负极的一端，接到 E_c 的负极上就可以了，如图 13-37 (a) 所示。电源 E_c 的负极通过 R_b 接到三极管的基极上，正

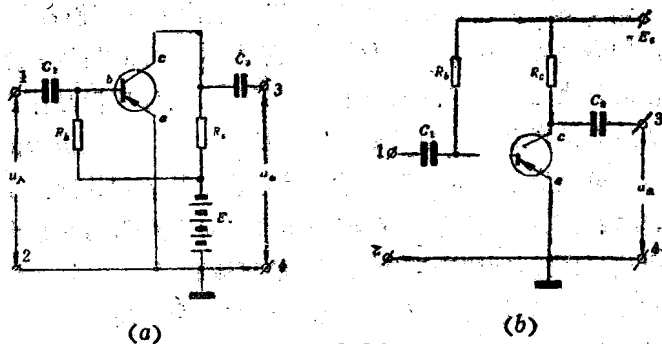


图 13-37

极接到发射极上，发射结得到的仍然是正向电压。当然，因为 $E_c > E_b$ ， R_b 的阻值要相应增加。这种电路的习惯画法如

图 13-37(b) 所示, 比较两图, 可以看出它们是相同的, 只是(b)中没有画出电源而已。

基极偏压 U_{eb} 等于电源电动势 E_c 减去 R_b 上的电压降 $I_b R_b$, 即

$$U_{eb} = E_c - I_b R_b,$$

移项后得:

$$I_b = \frac{E_c - U_{eb}}{R_b}.$$

由于 U_{eb} 很小(锗管约 0.2—0.3 伏, 硅管约为 0.6—0.7 伏), 可以忽略不计, 上式可写为:

$$I_b = \frac{E_c}{R_b}. \quad (13-13)$$

电源 E_c 和偏流电阻 R_b 一经选定后, 偏流和偏压的大小也就固定了, 所以这种电路叫固定偏置电路。

在装晶体管放大器时, 常常是根据偏流、电源电压来确定偏流电阻的大小, 这时上式可写为:

$$R_b = \frac{E_c}{I_b}.$$

在这个式子里, E_c 是预先给定的, 并且 I_o 一般也是预先给定的, 可根据公式 $I_b = \frac{I_o}{\beta}$, 把 I_b 代入上式, 得出

$$R_b = \frac{E_c}{\frac{I_o}{\beta}} = \frac{E_c}{I_o} \beta. \quad (13-14)$$

这种偏置电路虽然能提供一个合适的偏流, 但是, 当环境温度变化或更换三极管时, 工作点将跟着移动, 引起放大器的放大倍数的变化和严重失真(即放大后波形和原来波形不

一样),所以只能用在环境温度变化不大、要求不高的场合。

三、电压负反馈偏置电路

我们在第四节中提到,晶体管对温度是十分敏感的。由于温度变化(譬如升高),穿透电流 I_{ceo} 将急剧增加,因为 I_{ceo} 是 I_c 的一部分 ($I_c = \beta I_b + I_{ceo}$), 所以集电极电流 I_c 也跟着增加。 I_c 的增加又促使三极管本身温度的升高,这就形成了一个恶性循环,不但影响三极管的放大性能,而且还可能烧坏三极管。因此,必须设法稳定偏流。

如果把偏流电阻 R_b 接在基极和集电极之间,如图 13-38 (a)所示,就起到稳定偏流的作用。当环境温度升高时,会

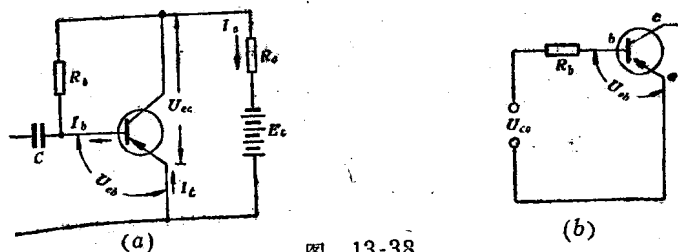


图 13-38

引起集电极电流 I_c 的增加,于是 I_c 在负载 R_c 上的电压降也增加,因为集电极和发射极之间的电压 $U_{ce} = E_c - I_c R_c$ (这是个串联电路, $E_c = I_c R_c + U_{ce}$), 所以 U_{ce} 就减小。由于发射结上的正向压 U_{be} (即偏压)是电压 U_{ce} 通过 R_b 加在 b 、 e 两极上的,如图13-38(b)所示,所以偏压 U_{be} 就等于 U_{ce} 再减去基极电流 I_b 在 R_b 上产生的电压降 $I_b R_b$, 即

$$U_{be} = U_{ce} - I_b R_b.$$

故当 U_{ce} 减小时, 偏压 U_{be} 随之减小, 偏流 I_b 也随之减小, 从而使集电极电流 I_c 减小。这样就自动地稳定了各极的静态工作电流, 不致于出现前面提到的恶性循环。

在上述变化过程中, 电阻 R_b 起了关键作用。它一端接在输出电路上, 一端接在输入电路上, 可以认为能把输出端的一部分电压取出并送给输入端, 这种办法叫做反馈。若反馈的电压(或电流)减弱了输入端的电压(或电流), 叫做负反馈, 反之叫正反馈。

在这里, 反馈电压起了减小输入电压的作用, 所以叫负反馈。这个偏置电路叫做电压负反馈偏置电路。在电压负反馈电路中, R_b 一方面使三极管得到一定的偏流, 另一方面又抑制了集电极电流的上升, 所以它既是偏流电阻, 又是反馈电阻。

由公式 $I_b R_b = U_{cc} - U_{be}$ 可以推出电阻 R_b 的计算公式:

$$R_b = \frac{U_{cc} - U_{be}}{I_b} \approx \frac{U_{cc}}{I_b}$$

将 $I_b = \frac{I_c}{\beta}$ 及 $U_{ce} = E_c - I_c R_c$ 代入上式, 可得

$$R_b = \frac{E_c - I_c R_c}{I_c} \cdot \beta. \quad (13-15)$$

这个电路比起固定偏置电路来并不复杂, 又具有稳定工作点的作用, 因此经常被采用。不过这种电路还是有缺点的, 它不能用于变压器输出的电路。因为变压器的直流电阻很小, 当 I_c 变化时, U_{ce} 变化很小, 这就失去了稳定工作点的作用。

四、电流负反馈偏置电路

在图 13-39 中, 电阻 R_1 和 R_2 串联后再并联在电源 E_c

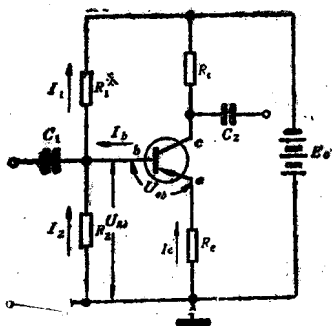


图 13-39

R_2 因为是串联电路(图 13-40), 流过它们的电流 I_1 和 I_2 应该是相等的, 即 $I_1 = I_2$ 。根据欧姆定律可以计算出它们的大小来:

$$I_1 = I_2 = \frac{E_0}{R_1 + R_2}.$$

这个电流在 R_2 上产生的电压降是:

$$U_{R_2} = I_2 R_2 = \frac{E_0}{R_1 + R_2} \cdot R_2.$$

R_2 一端接在三极管的基极上, 另一端通过 R_e 接在发射极上, 它上面的

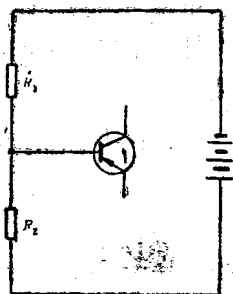


图 13-40

电压就相当于基极电源电压, 起着决定工作点的作用。调节 R_1 就改变 R_2 上分得的电压, 从而改变了偏流。因此 R_1 上通常标有调整记号 *。

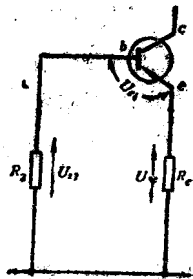


图 13-41

串联在发射极中的电阻 R_e 是起反馈作用稳定工作点的。 R_e 和三极管的 e 、 b 两极串联后接在基极电源 U_{R_2} (R_2 两端的电压)上, 如图 13-41 所示。电阻 R_e 上的电压降 U_{Re} 和 e 、 b 两极间的电压降(偏压)

U_{eb} 之和, 应该和 U_{R_2} 相等, 即

$$U_{R_2} = U_{R_e} + U_{eb}.$$

基极偏压为

$$U_{eb} = U_{R_2} - U_{R_e}. \quad (13-16)$$

由上式可以看出: 基极偏压是 R_2 上的分压和 R_e 上分压之差。

当温度升高时, I_c 上升, 由于 $I_e = I_b + I_c$, 如果略去微小的 I_b , 则 $I_e \approx I_c$, 所以集电极电流增加, 也就是发射极电流增加(因为流入集电极的空穴是从发射极供给的)。于是, R_e 上的电压 $U_{R_e} = I_e R_e$ 也增加。如果这时 U_{R_2} 不变, 从式(13-16)中可以看出 U_{eb} 就会减小。偏流 I_b 当然会随偏压的减小而减小, 进而使 I_c 减小。

在这个变化过程中, R_e 起了关键作用, 输出电流 I_c 增加导致 R_e 上电压增大; R_e 上电压增大又导致了偏流(及偏压)的减小, 这就是电流负反馈。利用它来牵制 I_c , 使之在温度变化时不致于有较大的变动。 R_e 越大, 负反馈越大, 偏置电路稳定性也越好, 不过 R_e 太大使交直流能量损耗同时加大, 因此它不能过大。一般取 U_{R_e} 在 0.5—2 伏之间就可以了。这时, R_e 在小电流情况下约为几百到几千欧, 在大电流情况下约为几欧到几十欧。

为了减少交流信号在 R_e 上的能量损耗, 往往在 R_e 两端并联一只大容量的电

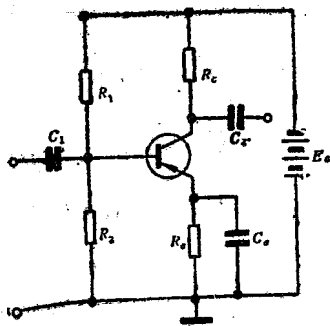


图 13-42

容器 C_e (一般是几十微法), 如图13-42所示, 使交流信号能顺利通过。 C_e 叫发射极电容。

在自动稳定偏流的过程中, 主要使 R_2 上的分压 U_{R_2} 保持不变, 这只有使 I_2 保持不变。如果把 R_1 和 R_2 的阻值选得小些, 从式子 $I_2 = \frac{E_c}{R_1 + R_2}$ 中可以看出, I_2 就会大些。

I_2 越大本身变化越不明显, U_{R_2} 也就基本不变。所以 R_1 和 R_2 用得越小, 稳定性越好, 但对讯号和电源的分流作用也就越大, 使损耗增多。实践证明当 I_2 是 I_b 的5—20倍时, 就可以使 I_2 基本保持不变, 从而 U_{R_2} 也基本保持不变。设 $A=5\sim 20$, 那么 $I_2 = AI_b$, 并且可据此导出计算 R_1 和 R_2 的公式。

前面提到:

$$I_2 = \frac{E_c}{R_1 + R_2},$$

把 $I_2 = AI_b$ 代入上式, 可得:

$$\frac{E_c}{R_1 + R_2} = AI_b.$$

又 $U_{R_2} = U_{eb} + U_{Re}$. U_{eb} 很小, 可略去不计,

则 $U_{R_2} \approx U_{Re}$. 前面还提到 $U_{R_2} = \frac{E_c}{R_1 + R_2} \cdot R_2$

及 $U_{Re} = I_e R_e \approx I_c R_e = \beta I_b R_e$,

所以

$$\frac{E_c R_2}{R_1 + R_2} = \beta I_b R_e.$$

如果 E_c 、 β 、 I_b 、 R_e 都是已知的, 可根据两式:

$$\frac{E_c}{R_1 + R_2} = AI_b$$

及

$$\frac{E_c R_2}{R_1 + R_2} = \beta I_b R_e$$

得出:

$$R_1 = \frac{\beta}{A} \left(\frac{E_c}{I_c} - R_e \right) \quad (13-17)$$

$$R_2 = \frac{\beta}{A} R_e \quad (13-18)$$

电流负反馈偏置电路尽管有使用元件较多, 电路复杂等缺点, 但是由于它具有良好的温度稳定性, 所以它是放大器中最常用一种偏置电路。

五、热敏电阻偏置电路

热敏电阻具有阻值随温度升高而显著减小的特性, 用它来代替电流负反馈偏置电路中的 R_2 , 就组成了热敏电阻偏置电路, 如图 13-43 所示。图中 R_t 就是热敏电阻。这种电路的稳定作用和电流负反馈偏置电路基本相同。

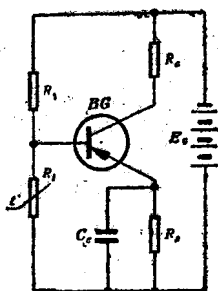


图 13-43

R_t 上的电压 U_{Rt} 就相当于电压 U_{R2} , 即 $U_{Rt} = U_{eb} + U_{Re}$, 因此, 偏压 $U_{eb} = U_{Rt} - U_{Re}$ 。当温度升高时, R_t 的阻值减小, 所以 R_t 上的电压 U_{Rt} 也随着减小; 这时, 随着温度升高, I_c 增加, R_e 上的电压降也增加。在这两个电压同时变化下, 偏压 U_{eb} 更显著地减小, 使偏流 I_b 随之

减小，从而获得了更好的稳定性。正因为如此，这种电路经常被用在推挽功率放大电路中（关于推挽功率放大我们将在后面介绍），并且往往把 R_1 和 R_2 并联在一起，如图 13-44 所示。它的稳定作用也与电流负反馈偏置电路相同。

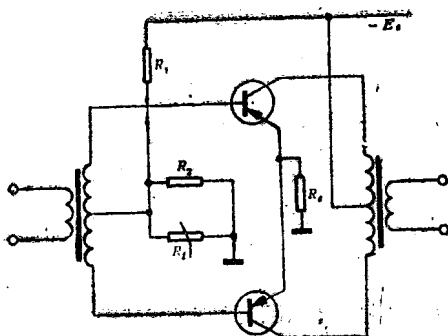


图 13-44

第八节 放大器的级间耦合

前面我们所接触到的，是用一只三极管进行放大的单级放大器，它的放大量不大，一般只有几十倍，在实际应用中，往往需要把一个微弱信号放大几千倍、几万倍，甚至几十万倍。这样，一级放大不能完成任务，必须把若干个单级放大器一级一级地连接起来，组成多级放大器，对输入的微弱信号进行逐级放大，才能使信号达到所要求的强度。所以实用的放大器都是多级放大器。

图 13-45 是一个 N 级放大器的方框图。

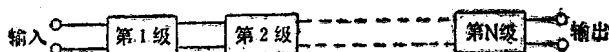


图 13-45

放大器级与级间的连接叫做耦合。耦合要满足两个基本条件，既要有效地把信号送到下一级去，又不要影响前后级的晶体管的静态工作点。耦合的种类很多，我们只讨论其中常用的两种：阻容耦合和变压器耦合。

一、阻容耦合

所谓阻容耦合就是利用电阻电容把前后两级放大器连接起来，如图 13-46 所示。其中 C_2 是起耦合作用的关键元件，故 C_2 称为耦合电容。这是一个两级放大器，第一级由

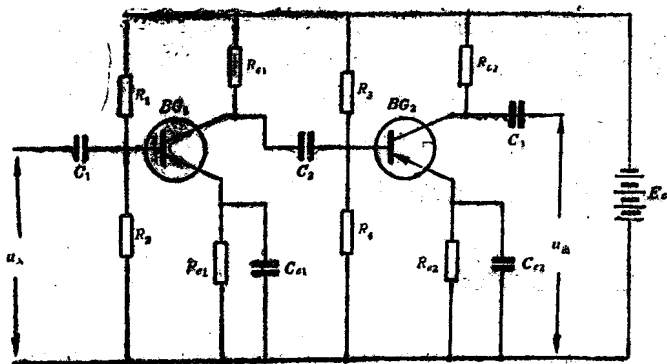


图 13-46

三极管 BG_1 组成，第二级由三极管 BG_2 组成，每一级电路都是我们在第七节中讨论过的电流负反馈偏置电路。

BG_1 的输出电压(集电极对地的电压),包含着交流和直流两种成分,如果不用电容器 C_2 ,直接将 BG_1 的集电极和 BG_2 的基极相连,那么 BG_1 输出电压中的直流成分也输入到 BG_2 这一级了。这样,前后两级互相牵制,不能单独地建立各级的静态工作点。而且,当 BG_2 输入的直流电压过大时,会引起基极电流过大,有可能将 BG_2 烧坏。用了电容器 C_2 情况就不同了:由于电容器有通过交流的作用,前级放大的交流信号可以通过 C_2 传到下一级再行放大;又因为电容器有隔断直流的作用,所以有了电容器 C_2 就可以隔断前后两级的直流联系,各级的静态工作点就不致于互相影响。所以我们说电容器 C_2 是起耦合作用的关键元件。

第一级放大器的负载电阻是 R_{c1} ,输出的交流信号电压从 R_{c1} 取出后,一端经过电容 C_2 加到 BG_2 的基极上,另一端经过电源 E_c (E_c 对于交流的阻抗很小,可视为短路)、电容 C_{e2} 加到 BG_2 的发射极上。所以,第一级与第二级是通过电容 C_2 和电阻 R_{c1} 耦合起来的,因此才叫阻容耦合放大器。

阻容耦合放大器有结构简单、制作方便、体积小、重量轻、失真小等优点。但也有缺点,如放大效率不高等。一般只用在低耦放大器的前置放大级中。

二、变压器耦合

所谓变压器耦合就是利用变压器把级与级间连接起来,如图 13-47 所示。

阻容耦合可以将放大的信号送到下一级,又不影响下一级的工作点,利用变压器耦合,也能达到这两个要求。

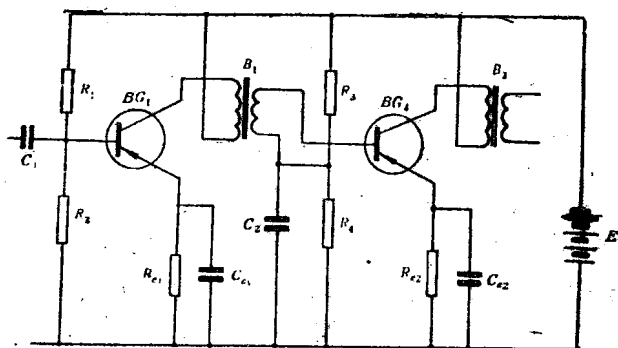


图 13-47

图中前后两级是通过变压器 B_1 耦合的。被 BG_1 放大的交流信号通过 B_1 的初级感应到次级，一端加到 BG_2 的基极上，另一端通过旁路电容 C_2 和 C_{e2} 加到 BG_2 的发射极上，使之再行放大。由于变压器也有隔直流的作用，也就是说前一级的直流成分不能通过变压器感应到次级，所以不影响各级的静态工作点。

变压器耦合的优点是效率高，主要用于功率放大器中。它的缺点是成本高，失真较大。

三、多级放大器电源的退耦电路

对耦合也要一分为二：它有益处，可以使信号被逐级放大；也有害处，使各级之间相互干扰。这种干扰出现在许多地方，这里我们只讨论电源一处。

在多级放大器中，各级都使用同一个电源，因此各级电流都流过电源。电源总是有内阻的，如果使每级输出的交流

成分都通过电源，就会使电源电压不断发生变化。因为交流电在电源内阻上形成了不断变化的电压降，它与原来电源电动势迭加在一起，使电源电压发生变化。电源电压的变化又影响到各级放大器的正常工作(或者理解为前一级的交流在电源内阻上产生变化电压降通过电源耦合到后一级，后一级的交流形成的变化的电压降又通过电源耦合到前一级)，导致放大器各级之间的相互干扰。为了减小这种干扰，通常在各级放大器之间加有“退耦电路”，也就是如图 13-48 中 C_1R_1 、 C_2R_2 和 C_n 组成的阻容滤波电路。这样，各级的交流成

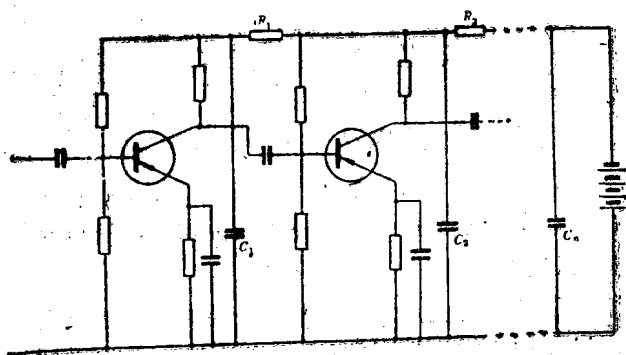


图 13-48

分大部分通过滤波电容而被滤去，从而减小由于共用一个电源所带来的相互干扰。

第九节 功率放大器

功率放大器从本质上来说，与电压放大器是相同的，它

们都是一个能量转换器，就是输入信号通过晶体管的控制作用，把直流电源的电流、电压、功率转换成随信号作相应变化的交变电流、电压和功率。不同的是，功率放大器是用来控制负载工作的，比如让喇叭发出声音，让继电器发生动作等，因而必须有较大的功率输出，即不仅要有较大的电压输出，而且要有较大的电流输出。另外，输入到功率放大器的信号不能太弱，否则输出端得不到应有的功率。如果输入信号太弱的话，在功放级前面要增加一级或几级电压放大器，叫做前置放大器，如图 13-49 所示。



图 13-49

功率放大器又分单管放大器和推挽放大器等几种。现在把单管放大器和推挽放大器分述如下：

一、单管放大器

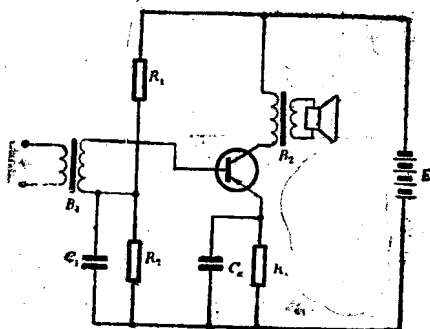


图 13-50

典型的单管功率放大器如图 13-50 所示。图中 B_1 是把前级输入信号输入到功率放大级的变压器，叫输入变压器； B_2 是把功率放大器输出功率送到负载去的，叫做输出变压器。其它元件和电压放大器

一样： R_1 和 R_2 是偏流电阻； R_e 是发射极电阻； C_1 和 C_e 是旁路电容。当信号(如音频信号)从 B_1 输入后，经三极管放大后，再通过 B_2 耦合到负载(喇叭)，负载就能工作(发出声音)。

在功率放大器里，还存在一个效率(就是放大器的输出功率与直流电源的供给功率的百分比)问题。单管放大器在没有信号输入时，静态工作电流较大，所以损耗直流电源功率较大，因而效率低(50%以下)。但因为它结构简单，所以也经常应用。

二、推挽放大器

推挽功率放大器如图 13-51 所示。

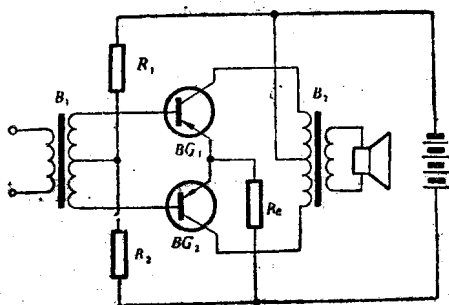


图 13-51

图中， R_1 、 R_2 是共用的偏流电阻， R_e 是共用的电流反馈电阻，为了减少功率损耗， R_2 和 R_e 的数值一般都取得很小，通常 R_2 在25-500欧姆之间， R_e 为几欧姆。

为了便于分析推挽放大器的工作原理，我们把图 13-51

简化成图13-52，信号没有输入前，基极与发射极间的电压为零。当输入信号处于正半周（即 B_1 次级上端为正，下端为负）时， BG_1 的基极为正， BG_2 的基极为负。这时， BG_1 的

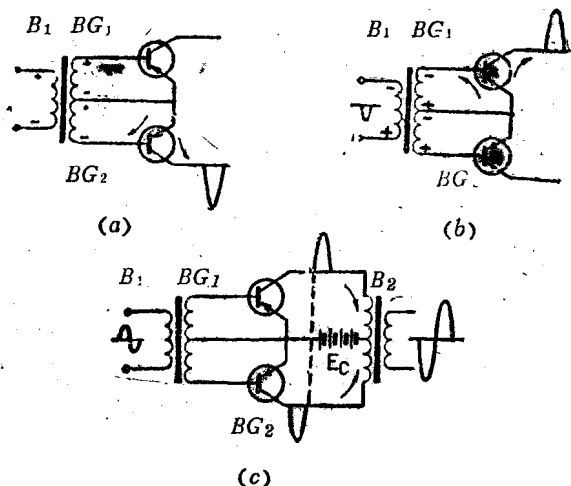


图 13-52

发射结上得到的是外来信号所给予的反向偏压，于是就更没有集电极电流了，所以 I_{c1} 为零。 BG_2 的发射结得到是外来信号给予的正向偏压，能够工作。信号被 BG_2 放大后，在输出变压器 B_2 里得一个负半周信号，相位和输入信号相反（晶体管有倒相作用），如图13-52 (a) 所示。当输入信号处在负半周时， BG_1 不能工作， I_{c1} 为零。 BG_2 发射结得到是正向偏压，能够工作。信号被 BG_2 放大后，在输出变压器 B_2 里得到一个正半周信号，如图13-52 (b) 所示。所以输入信号变化一个周期，两个管轮流工作一次，各放大信号的半个波形，于是在负载上就得到了完整的信号波形，如图13-52 (c)

所示。

为了不使放大后的两个波形合成后产生失真，两个三极管要经过严格挑选，特性相近（ β 和 I_{ceo} 分别相等），变压器 B_1 、 B_2 的中心抽头要对称。

由于推挽放大器只有在讯号输入时才消耗电源能量，因而效率高。推挽功率放大器广泛地应用在收音机、扩音机及其它电子设备中。

第十节 晶体管振荡电路

在本章第一节，我们曾经提到，电磁波就是变化的电场和变化的磁场由近及远的传播。怎样才能获得变化的电、磁场呢？这个任务可用“振荡电路”来完成。

一、电磁振荡

图 13-53 是一个电容器和一个电感线圈所组成的电路。当我们给电容器充电时，电容器两个极板间就形成了一个电

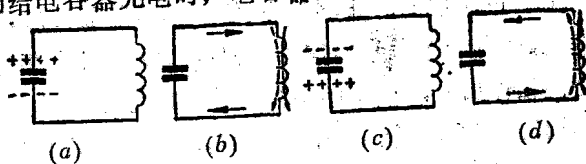


图 13-53

场，如图13-53(a)所示。当充电完毕，尚未放电时，电容器两个极板间的电场最强，电压最大。这时电路中的能量就是储存在电容器中的电场能。

电容器开始放电后，由于线圈的自感作用，电流并不是立刻达到最大，而是逐渐增大，随着电流的增大，线圈中的磁场也逐渐增强，电容器上的电荷则逐渐减少，电压逐渐降低。到电容器放电完毕，电场能全部变成磁场能，如图13-53 (b) 所示。

电容器放电完毕，电感线圈中的电流并不能立即消失，由于线圈的自感作用，电路里又产生一个与原来放电电流方向相同的感生电流，这个电流对电容器重新充电，但电容器两极板所带的电荷与原来恰好相反。在充电过程中，电路的电流逐渐减弱，电容器两极板间的电压随着所带电荷的增多而逐渐升高。当电流消失时，充电完毕，电压又达到最大值，此时线圈中的磁场能全部转变为电容器的电场能，如图13-53 (c) 所示。

然后，电容器又重新放电，产生跟以前方向相反的电流，电场能又逐渐变成磁场能，如图13-53 (d) 所示。此后则不断地重复上述过程。

在这个由电感和电容组成的电路里，电压与电流的大小和方向是成周期性地变化的。我们把这个大小和方向成周期性变化的电流（或电压）称为振荡电流（或振荡电压），能够产生振荡电流的电路叫做振荡电路。图13-53就是一个振荡电路，因为它是由电感 L 和电容 C 组成的，所以又叫 LC 振荡电路。

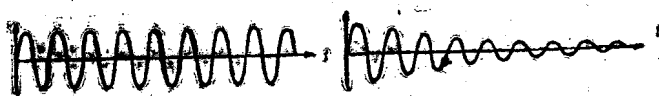
振荡电路有振荡电流时，电容器的电场和电感线圈的磁场虽然发生周期性的变化，但它并不是通常所说的电磁波，这个电场和磁场的周期性交替变化叫做电磁振荡。

电磁振荡过程，就是电和磁这一对矛盾互相联系并且在

一定的条件下互相转化的过程。

二、晶体管振荡器的工作原理

在振荡过程中如果没有能量损失，振荡就应该永远继续下去，电路中的电流振幅应该永远保持不变，如图 13-54 (a) 所示。但是，实际振荡过程中总是有能量损失的，例

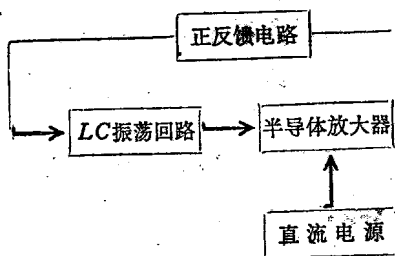


(a)

(b)

图 13-54

如，电感总是有电阻的，电流通过电阻要发热，从而消耗一部分能量。因此，电路中能量逐渐减少，电流的振幅逐渐衰减，电流逐渐减弱，最后消失，如图 13-54 (b) 所示。这样的振荡叫减幅振荡。要使振荡不停地继续下去，即成为等幅振荡，那就必须不断地补充能量。利用三极管把电源的能量变成振荡电流的能量，补充到振荡回路中去，使其维持等幅振荡，这种装置叫做

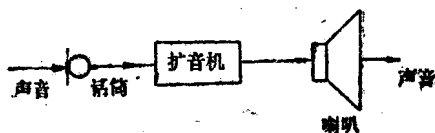


晶体管振荡器。

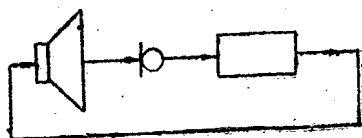
晶体管振荡器可由 LC 振荡回路、晶体管放大器、正反馈电路和电源四部分组成 (图 13-55)。

图 13-55

LC 振荡回路所产生的振荡电流的一部分通过反馈元件送到晶体管放大器的输入端，相位与输入回路电流相同（即正反馈）。晶体管放大器把直流电源的能量转换成交流能量，补充 LC 振荡器的能量损失。总之，振荡器产生并维持振荡必须满足两个条件：一是要正反馈，二是反馈能量要足够大，能补偿 LC 回路的能量损失。



(a)



(b)

图 13-56

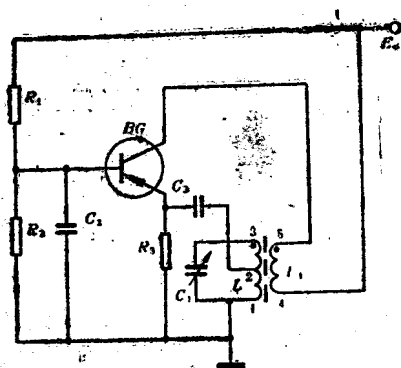
为了便于理解振荡器的工作过程，我们举一个熟悉的例子：正常的扩音过程是声音通过话筒变成电信号之后，送到扩音机中放大，然后由喇叭发出声音来，如图 13-56 (a) 所

示。但是，如果把喇叭对着话筒，如图 13-56 (b) 那样，喇叭发出来的声音，再重新送回话筒去，由扩音机放大，放大的声音再送到话筒去，……这样循环下去，喇叭便会出现啸叫声，这就是扩音系统产生的振荡（自激振荡）现象。

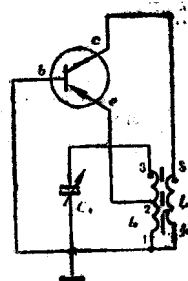
晶体管 LC 振荡电路形式很多，按反馈形式来分，有变压器反馈、电感反馈和电容反馈等；按晶体管接法来分，有共基极、共发射极和共集电极三种组态。我们仅举在超外差收音机中常用的振荡电路，来进一步探讨晶体管振荡器的工作原理。

三、变压器反馈振荡电路

图 13-57 (a) 是收音机中“本机振荡”用的变压器反馈振荡电路。



(a)



(b)

图 13-57

振荡电路比放大电路复杂，但是振荡电路的主要部分还是放大电路，在分析电路时，先找出这个主要部分。图中三极管的偏置电阻是 R_1 、 R_2 和 R_3 ，一望而知为电流负反馈偏置电路。接着找出 LC 振荡电路和反馈元件。从图中可以看出，LC 回路是接在发射极与“地”之间的，反馈元件 L_2 接在集电极回路中。最后找出旁路电容 C_2 和隔直流电容 C_3 ，它们的容量都比较大，因为旁路电容和隔直流电容对交流信号都是通路，在分析电路时可以把它们短路，线路就变得清晰了。例如，我们把电容 C_2 短路后，可以看出对交流来说基极是接地的，从而看出 LC 回路一端是接基极的。当我们把 C_3 短路后，看出电感线圈抽头 2 是接发射极的。同样，

对交流信号来说我们把电源也可看作短路，因此 L_1 的另一端是接地的。在这个基础上，可以画出原来电路的交流等效电路，即图 13-57(b)。因为输入回路接在发射极和基极之间，输出回路接在集电极和基极之间，基极是两回路共有的，所以是共基极变压器反馈振荡电路。

现在按图 13-57(b) 来分析振荡建立的过程。当接通直流电源的瞬间，在振荡回路里产生了电冲击，回路两端出现了一个微小的信号（输入信号），这个信号电压加在三极管的基极与发射极之间，被三极管放大，在输出端集电极所接的反馈线圈 L_1 中得到了放大的信号电压。由于 L_1 与 L 的互感作用，就将这个放大的信号电压反馈到振荡线圈的初级 L 上。如果 L 与 L_1 的绕线方向能使放大器得到正反馈，那么信号就会再次被放大，如此反复循环，信号一次比一次大，最后达到稳定状态，形成等幅振荡。振荡频率 f 由 L 和 C 决定，它们的关系为：

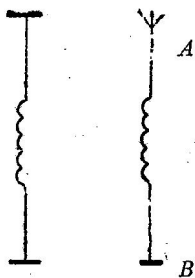
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (13-19)$$

这种振荡电路频率稳定，所以应用最广。

第十一节 电磁波的发送和接收

一、电磁波的发射

(1) 天线和地线 当振荡电路中有振荡电流发生时，电场能和磁场能只在闭合回路内相互转化，向外辐射电磁波



(a)

(b)

图 13-58

的能力很小。如果把振荡电路里电容器的两个极板分开，象图 13-58(a) 那样，电场和磁场就能很好地分散到周围空间去。

这种电路叫做开放电路。通常又把开放电路的下端跟地连接，连接的导线 B 叫做地线；开放电路的空中部分导线 A 叫做天线（图 13-58b）。天线与地线间是有电容

的，这个电容就相当于 LC 回路中的电容。在无线电技术中，就是使用这种开放电路来发射电磁波的，所以天线 A 叫做发射天线。

(2) 调制 人们通过实践发现，如果设法把音频信号加在高频电磁波上，利用电磁波运载音频信号，就象用火车运送货物一样，把音频信号（即广播电台的节目）传到远处。到达目的地后，再把音频信号从电磁波里取出来，通过喇叭把它还原成声音，好象在货物到达目的地后，从火车上卸下来一样。货物好比音频信号，火车好比电磁波。这种把音频信号加在电磁波上的过程，叫做电磁波的调制。用来运载音频信号的电磁波称为载波。如果设法使载波的振幅随着传送的音频信号成比例地变化，那么就可以说是将信号加到载波上去了，这样的过程叫做调幅。图 13-59 是调幅波产生过程的示意图。

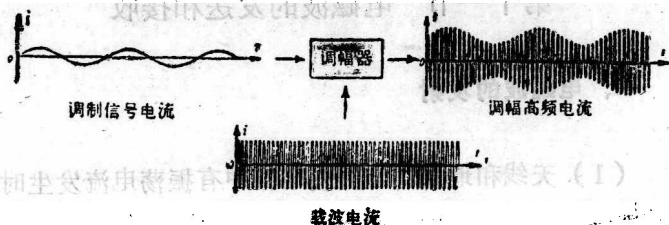


图 13-59

我们平常说的中央人民广播电台的频率是640千周，指的是高频载波的频率，而不是音频信号的频率。各广播电台都有自己的固定的载波频率。我国第一颗人造地球卫星所发射的红色电波是用20.009兆周的载波被《东方红》乐曲的音频信号调幅后的调幅波，它经过电台接收、转播，就可以在普通收音机里听到了乐曲声了。整个无线电广播发送过程，如图 13-60 所示。

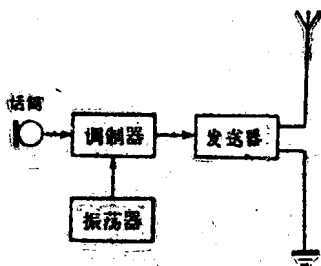


图 13-60

二、电磁波的接收

广播电台的节目是通过发射天线发送出去的；在收听节目时，也需要天线——接收天线用来接收电磁波。接收天线的种类很多，在电子管收音机中，拖在外面的一条导线就是它的天线。在晶体管收音机里，用的是磁性天线。当电台发出的电磁波遇到接收天线时，因为电磁波是周期性变化的电磁场，所以它能在金属导体中感生出一个频率相同的交变电流。

来自各个电台的电磁波，频率（或波长）各不相同，因此在天线中所产生的感生电流的频率也是各不相同的。为了解决电台多而收听时只听一个电台这一矛盾，就需要有个“选择器”，它根据我们的需要，让某一频率的高频电流顺利通过，其它频率的高频电流不容易通过，这样的电路叫

调谐电路。

电台发出的调幅波，通过调谐回路后仍然是调幅波，因此，必须与电磁波的调制过程相反，把高频信号从调幅波里“检”出来，这个过程叫检波。

检波后音频电流还需要用耳机或经过放大器用喇叭才能还原成声音，这又与当初把声音用话筒变成音频信号的过程相反。一个简单的收音机的组成部分，如图 13-61 所示。

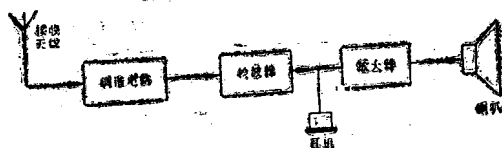


图 13-61

第十二节 调谐

一、串联谐振电路

在第十章里，我们介绍交流电路时，讲了电感电路和电容电路的特点。如果把一个电感 L 和一个电容 C 跟交流电源串联，如图 13-62 (a) 所示，就组成一个所谓电感电容串联电路 (R 表示线圈的电阻)。因为串联电路的电流强度不变，所以通过 L 和 C 的电流都是 i 。我们知道，电流 i 流过电感 L 时，产生的电压降 u_L 超前于 i 90° ，电流 i 通过电容 C 时，产生的电压降 u_C 滞后于 i 90° ，在电阻 R 上产生的电压

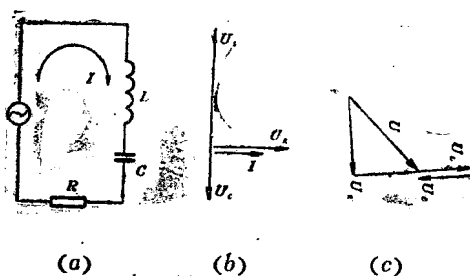


图 13-62

降 u_R 和 i 同相。它们的矢量图如图 13-62 (b) 所示。总电压 U 是 U_L 、 U_C 和 U_R 的矢量和，如图 13-62 (c) 所示。从图上可以看出：

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},$$

式中 $X_L = 2\pi fL$ $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$.

电路中的电流为

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (13-20)$$

当电感线圈 L 的感抗 X_L 和电容 C 的容抗 X_C 相等时，从公式可以看出电流 I 的值最大，等于 $\frac{U}{R}$ 。这时，感抗和容抗的作用全部抵消，起阻碍电流作用的，只有一个很小电阻 R ，因此电流达到最大值。这种现象称为串联谐振。

在串联谐振时，感抗与容抗的作用相互抵消，并不等于它们不存在，测量线圈 L 和电容 C 的两端都有电压，而且往往比电源电压大很多倍（但两者相位相反、大小相等，在整个电路中作用是互相抵消的）。

根据谐振条件 $X_L = X_C$ ，即

$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C} \quad (f_0 \text{ 为谐振时的频率}),$$

整理后得

$$(2\pi f_0)^2 LC = 1$$

于是可算出谐振的频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

二、调谐电路

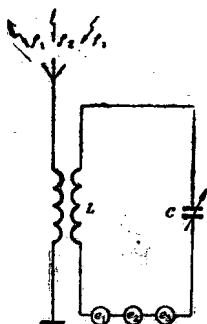


图 13-63

收音机的调谐电路是由一个可变电容器 C 和电感 L 组成的, 如图13-63所示。当接收天线中有各种不同频率($f_1, f_2, f_3, \dots$)的信号电流通过时, 调谐回路中的线圈 L 里就感生出各种不同频率高频信号电动势 $e_1, e_2, e_3, \dots$ 。为了讨论方便, 只取一个电动势 e_1 (它代表一个电台

的信号), 来分析电路中的情况(图 13-64)。把图13-64与图13-62(a)比较, 就会发现两者是一致的。

如果电动势 e_1 的频率 f 恰好与 LC 回路的固有频率 $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 相等, 就会产生谐振。

这时电路里阻抗最小, 电流最大, 可变电容(及线圈)两端的电压也最大。图13-65是调谐电路中电流与频率的关系曲线, 叫做

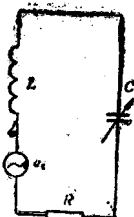


图 13-64

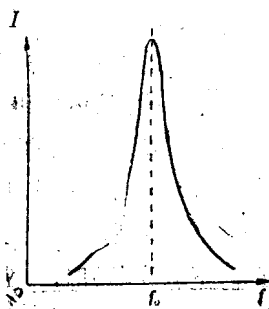


图 13-65

串联谐振曲线。当信号频率为 f_0 时，电路中的电流最大，对于其它频率来说，离 f_0 越远，电流越小，也就是回路阻抗越大。

因为 LC 回路中电容器是可变的，改变电容量，就改变了

$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 的值，也就是改变了 f_0 ，

使调谐回路可以分别与 e_1 、 e_2 、……谐振，从而实现选择电台的目的。在收音机里，调谐回路有中波和短波之分，它们的原理相同，只不过是电感线圈匝数不同而已。

第十三节 检波

前面讲过，把音频信号加到高频载波上去的过程叫调制，而从携带音频信号的高频载波中取出音频信号的过程叫检波，检波是调制的反过程，因此又叫解调。

一、晶体二极管检波器

能够完成检波任务的装置叫检波器。图 13-66 所表示的是晶体二极管收音机的原理图。接收天线收到调幅信号经调谐回路选择后，通过由一个二极管 D 和电容 C_2 组成

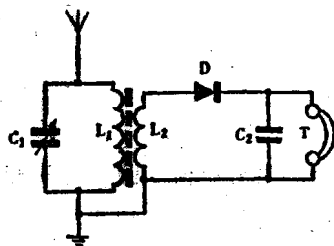


图 13-66

的电路后就能在耳机里发出声音，如果取掉 D 、 C_2 ，耳机就不能发出声音，这是凡装过矿石机的人都有的经验。从这里可以看出二极管 D 和电容 C_2 是担负检波任务的。晶体二极管为什么能够起检波作用呢？这是因为二极管有单向导电的性能。在图13-66中，当调谐回路 L_1C_1 输入调幅波时，在电感线圈 L_2 上就感生一个电压，这个电压通过电容器 C_2 加到二极管 D 的两端。在正半周（上端为正，下端为负）时，二极管在正向电压下导通，有电流流过；在负半周时，二极管在反向电压下不导通，没有电流流过。这样，二极管就把调幅波的半边截去了，如图13-67所示。剩下的半个调幅波里包含

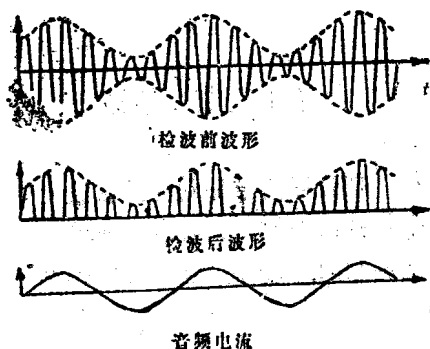


图 13-67

着音频信号电流、载波电流和直流三种成分。因为电容 C_2 对高频电流的容抗很小，所以载波电流通过 C_2 被滤去。剩下的音频信号电流，流过耳机，被耳机还原成声音。至于直流成分的去向，可见本章第十六节。

二、倍压检波

为了提高收音机的效率，常常采用倍压检波。图 13-68 是倍压检波原理图。当高频信号在负半周时，设它为 e_1 （上端为负，下端为正），二极管 D_1 导通，信号电流按实线方向

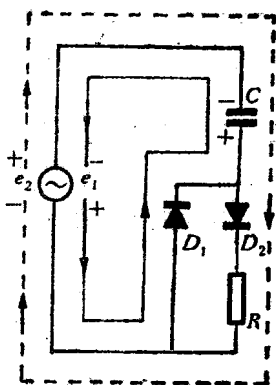


图 13-68

通过二极管 D_1 ，给电容器 C 充电。电容器 C 充电后，两板间电压接近信号电压 e_1 ，极性是上负下正；当高频信号在正半周时，设它为 e_2 ，二极管 D_2 导通，信号电压 e_2 和电容器上的已有电压 e_1 是串联的，并按虚线方向通过二极管 D_2 加在负载电阻 R 上。因此，负载电阻上的电压基本上接近于 $e_1 + e_2$ ，是信号电压的二倍，所以叫倍压检波。因为

倍压检波得到的信号电压大，收音机的音量就会增大很多，所以它在收音机中得到了广泛的应用。

第十四节 直接放大式收音机

晶体管收音机从电路程式上来分，有直接放大式和超外差式两种。所谓直接放大式收音机，就是对检波以前的高频信号直接放大，检波以后的音频信号经过低频放大器放大

后，送到扬声器（喇叭），发出声音。这种电路比较简单，一般用一到四只三极管和一两只二极管即可装成。图 13-69 是直接放大式收音机的方框图。

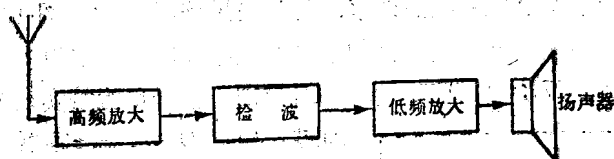


图 13-69

在直接放大式收音机中，来复式电路应用较广。它的特点是一只晶体三极管同时起两个管子作用，因此能节约元件，提高效率。下面我们来分析来复电路的工作原理。

一、来复电路

来复式电路的工作原理如图 13-70 所示。从天线接收到的高频信号，经过晶体三极管进行高频放大，放大后的高频

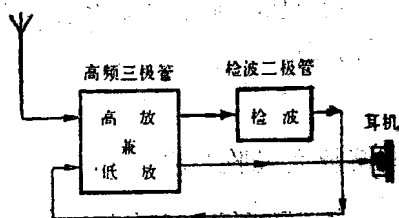


图 13-70

信号送给二极管检波，检波以后的低频信号再放到晶体三极管的输入端，进行低频放大，最后送入耳机。这种一只三极管既作高频放大，又兼作低频放大的电路，就叫做来复式电路。

图 13-71 是一个来复式电路单管收音机。被 L_1C_1 回路

选择出来的高频信号，经过磁棒感应到线圈 L_2 ，再经过电容器 C_1 加到三极管的基极和发射极之间，进行高频放大。放大后的高频信号从集电极输出时，因为不能通过高频扼流

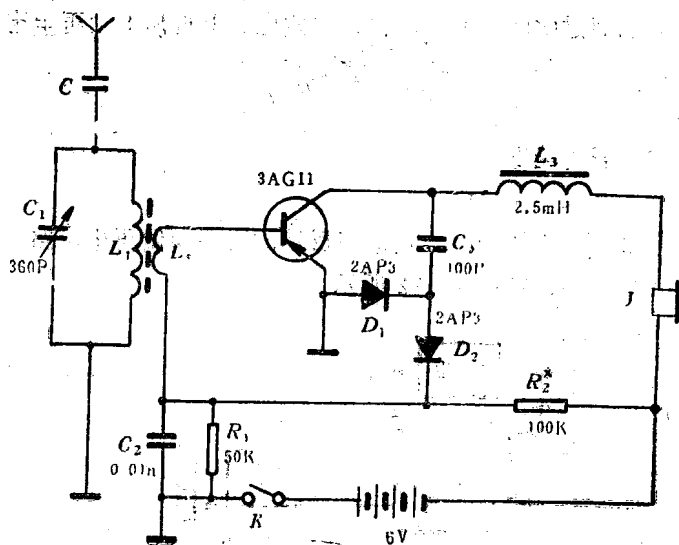


图 13-71

圈 L_3 (L_3 对高频阻抗很大，对低频阻抗很小)，于是通过电容器 C_2 ，经二极管 D_1 、 D_2 检波。检波后在电阻 R_1 上所得的音频信号电压（高频信号经 C_2 滤去）通过线圈 L_2 又加到三极管输入端，进行低频放大。放大后的音频信号从集电极输出时，不能通过电容 C_2 (C_2 容量为100-1000P，对低频信号的阻抗很大)，几乎全部通过 L_3 ，送到耳机 J ，推动耳机发出声音。

电阻 R_2 是三极管的偏流电阻，用来调整三极管的偏流，

C_2 是旁路电容, 用来提供高频信号的通路, 让 L_2 上的高频信号能够顺利地通过它加到发射极上, C_2 还兼作检波器的滤波电容。

人们通过实践又发现, 在来复式电路上再加上“再生电路”, 收音机的性能就会进一步提高。

二、再生电路

使高频放大器产生一定的正反馈的电路叫做再生电路, 再生电路的原理如图 13-72 所示。

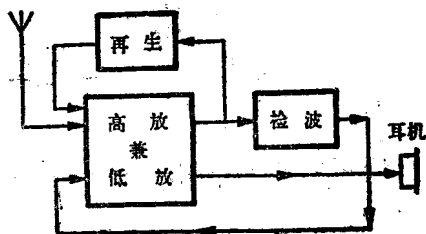


图 13-72

在图 13-71 的来复式电路里, 再加上 L_4C_4 支路, 如图 13-73 所示, 就成为既有来复又有再生的电路, 叫做来复再生式电路。

再生的原理是: 经过晶体三极管进行放大的高频信号, 分成两路, 一路和前面叙述的一样, 经过 C_2 送到二极管去检波; 另一路从集电极经过 L_4C_4 回路通地也就是到发射极, 构成回路。 L_4 与 L_1 、 L_2 同绕在一根磁棒上。经过放大的高频信号通过 L_4 时, 就会在 L_1 中产生感生电动势。如果 L_4

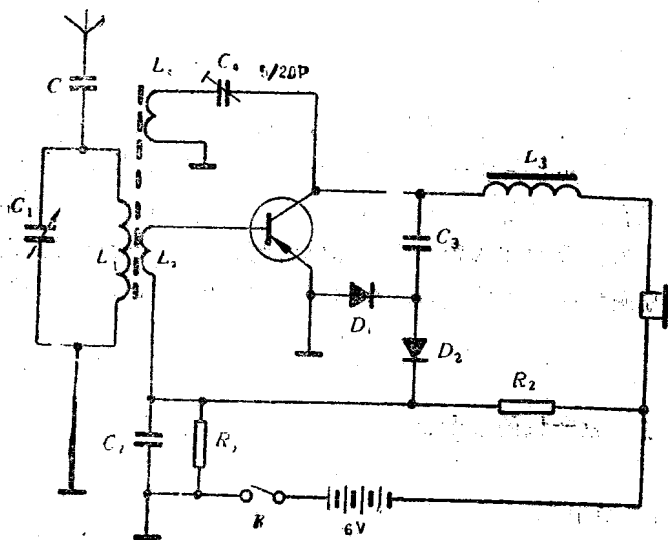


图 13-73

的接法正确，形成正反馈，就会使 $L_1 C_1$ 回路的高频信号得到加强。加强了的信号再送到三极管进行放大，放大后又反馈到 $L_1 C_1$ 回路，这样循环下去，使信号大大加强了，这个过程就叫做再生，由 $L_4 C_4$ 所组成的回路叫做再生回路。

如果再生过强时，放大器就会变成振荡器，这时耳机里就会发生啸叫声，不能正常收音。

再生的强弱可以通过调整微调电容 C_4 的容量或 L_4 的匝数来控制。 C_4 的电容量调得越大，容抗就越小，对高频阻碍作用也越小，再生越强。反之，则再生减弱。

晶体管再生式收音机使用的元件少，构造简单，所以在简单收音机里常采用这种电路。

上面介绍的两种单管收音机，一般不能用喇叭放音，只能用耳机收听。如果再加一级低频放大，就可以用喇叭放音了。

对于收音机，怎么辨别它的好坏呢？常常是从它收到电台的多少，声音好听不好听，声音大小等方面来考虑。国产收音机在出厂前都要经过严格的检查，主要性能均写在说明书里。为使我们在购置和安装晶体管收音机时，能够根据说明书来衡量收音机的质量，在这里把收音机的质量指标介绍一下。

三、收音机的质量指标

1、灵敏度

灵敏度就是收音机接收微弱信号的能力。灵敏度高的收音机，只要天线上能收到一点微弱信号，就能听到电台发出来的声音。有的收音机只能听到强电台或近地电台的广播，其余的便听不见了，这样的收音机灵敏度就低。通常，对于磁性天线，灵敏度用毫伏/米表示，对于外接天线或拉杆天线用微伏表示。数值越小，灵敏度越高。

2、选择性

选择性表示收音机选择电台的能力。在同一个时间里，有许多电台在广播，收音机只选出一个电台来收听，而不让其它台混进来。选择性的好坏用分贝（db）表示，分贝数越大，表示选择性越好。

3、输出功率

通常用毫瓦（mW）或瓦（W）表示，输出功率越大，

声音越响。

此外，收音机的电气指标还有很多，这里就不一一介绍了。

在前面我们介绍的两个单管机，灵敏度和选择性都很差，输出功率微乎其微。在直接放大式收音机中，受欢迎的是四管收音机。灵敏度和选择性比单管机提高了许多，而且输出功率大，业余爱好者所安装的也多半是四管机。

第十五节 超外差式收音机

超外差式收音机，具有灵敏度高、选择性好等一系列优点，颇受工农兵群众的欢迎。我区地处边疆，在城市、农村尤其是广大牧区，使用的绝大多数是超外差式收音机。

一、超外差式收音机概述

前面我们讲的收音机，从天线接收来的高频信号，在检波以前一直不改变它原来的高频频率。这种直接放大式收音机是有许多缺点的，为了克服这些缺点，把收到的高频载波信号，先变成固定的中频载波频率，然后再把中频信号放大、检波。这就是超外差式收音机和直接放大式收音机的根本区别。

超外差收音机的组成，如图 13-74 的方框图所示，同直接放大式收音机相比，高频部分增加了变频级和中频放大级。它是这样工作的：

接收天线收到的高频调幅信号经过输入回路的选择，送入变频级的混频器，如图中A所示。变频级除了混频器外还

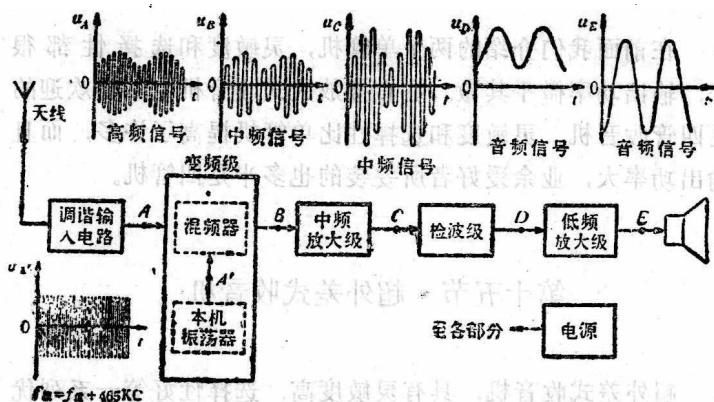


图 13-74

有本机振荡器，振荡器产生的高频等幅振荡电流也送入混频器如图中A'所示。本机振荡的频率高于外来信号频率，高出的数值永远保持一个定值。两种信号在混频器里“混合”的结果，产生了新的频率的信号，这个新的频率等于本机振荡信号频率减去外来信号频率，并且总等于465千周。这就是变频级的“外差作用”。由外差作用产生的中频，它仍然是个调幅波，只是把载波频率由高频转换成中频，而原来的按音频信号调制的规律并没有变（如图中B处所示的波形）。中频信号还是微弱的，需经过中频放大器放大。放大后波形如图中C处所示。但中频信号人耳朵是听不见的，所以还需要进行检波，才能检出音频信号，如图中D处波形所示。再送到低频放大器进行电压放大和功率放大（波形如图中E处所示），最后推动扬声器发出声音。

超外差电路不仅应用于收音机，在电视、雷达、无线电遥控和其它无线电设备中也都普遍采用。

二、变频器

在超外差收音机中，变频级的主要作用是把调幅的高频信号转换为调幅的中频信号。对于音频信号，在变频前后是不发生频率变化的。

变频级由混频器和本机振荡器组成。振荡器的工作原理，在第十一节中已经介绍过了，在分析变频电路之前，我们先介绍一下混频原理。

实践证明，如果将频率分别为 f_1 和 f_2 的信号，同时加在一个含有非线性元件（某一元件两端所加的电压和流过该元件的电流不成正比，即不遵从欧姆定律，这种元件就叫非线性元件。晶体管就有非线性元件的性质）的回路输入端，在这个回路的输出端除了频率仍为 f_1 、 f_2 的电流外，还会产生频率为 $f_1 + f_2$ 、 $f_1 - f_2$ 等的电流，混频器好比一架“计算机”，能对频率进行加、减法运算。

如果外来信号频率是 $f_1 = 1000$ 千周，本机振荡信号频率是 $f_2 = 1465$ 千周，两个信号的频率相减是 $f_2 - f_1 = 465$ 千周，两个信号的频率相加是 $f_2 + f_1 = 2465$ 千周。

这里，465千周的信号就是我们所需要的。那么，怎样从几种频率里挑出我们所需要的465千周的信号呢？这需要通过“选频电路”来选择。选频电路就是一个 LC 回路。

超外差收音机采用晶体三极管来混频时，根据本机振荡信号注入的方式不同，混频可分为三种基本电路：即基极注

入、发射极注入和集电极注入，如图 13-75所示。

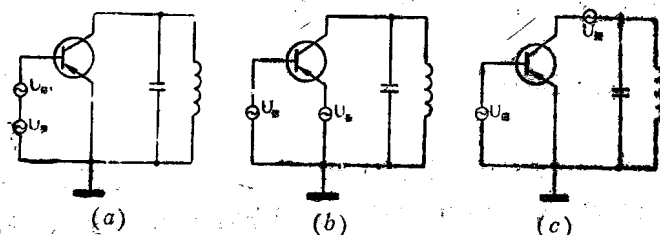


图 13-75

由于在基极注入方式(图中 a)里信号回路和本机振荡回路互相影响较大,而集电极注入方式(图中 c)需要较大的信号,所以都很少采用,应用最广的是发射极注入电路(图中 b)。这种电路中两者相互之间干扰小,工作稳定。

图 13-76是收音机中最常见的变频电路, R_1 、 R_2 、 R_3 是三极管的偏置电阻, 主要部分就是我们学过的共基极变压器

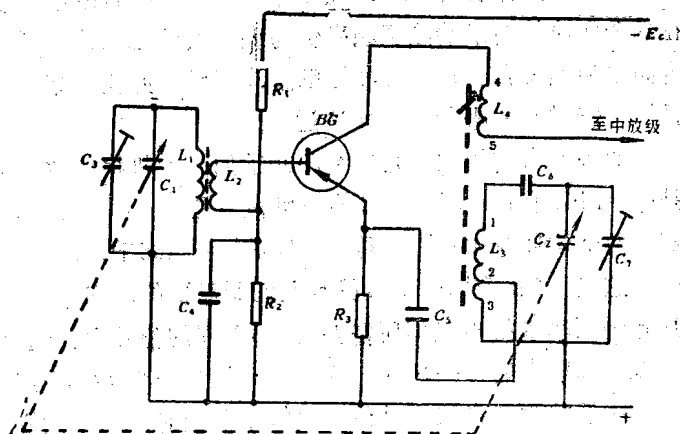


图 13-76

反馈振荡电路，它作为变频级的本机振荡器，用来产生比外来信号高465千周的高频等幅振荡。

L_1 是绕在磁棒上的线圈，与 C_1 组成调谐回路，选择由磁性天线收到信号并通过 L_1 和 C_1 加到变频管的发射极和基极之间；本机振荡产生的信号经电容 C_3 、 C_4 和 L_2 也加在变频管的发射极与基极之间，这就是如图 13-75 所示的外来信号由基极注入，本机振荡信号由发射极注入的混频电路。在超外差收音机中，本机振荡也有中波与短波之分，它们均能产生比输入信号高465千周的等幅振荡。

三极管是个非线性元件，混频电路就是一个包含非线性元件的回路，因此在变频电路的输出端，即集电极——发射极回路中就有多种频率的电流，其中包括我们所需要的中频信号电流。这些不同频率的电流都要流经前面提到的选频电路。它能够把我们所需要465千周的调幅信号挑选出来，而滤去其它各种频率的电流。选出的中频信号再送到中频放大器。

因为振荡电路的频率在任何时候都要要比外来信号频率高465千周，所以两者的频率必须一起变化。为此，可变电容 C_1 、 C_2 用一个同轴双联电容器，每联的电容量相同，均为270PF/7PF（即最大容量为270PF，最小容量为7PF）。由于本机振荡要求的频率高，这就应当减小电容量（因为振荡频率 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，电容量越小，频率越高）。根据电容串联容量减小的道理，在 C_2 上串联一个电容 C_5 ，使总容量减小。又因为本机振荡的电感线圈 L ，电感量也较小，这就使本机振荡电路有了比输入电路高的振荡频率。

本机振荡电路中的 C_2 随着输入回路的 C_1 一起变更，虽然保证了本机振荡的频率始终高于输入信号的频率，但是，这个高出的频率不一定恰好是465千周。要始终高465千周，就必须进行调整。首先看收音机刻度盘上560千周处能不能收到中央人民广播电台的广播，如果收不到的话，可以调节振荡线圈的铁芯；在1440千周处收不到电台，可以调整补偿电容 C_3 。上面的过程叫调整频率复盖。然后进行465千周的跟踪调整（调灵敏度）。在560千周处调整天线线圈在磁棒上的位置，使声音最大；在1440千周处，调整输入回路的补偿电容 C_3 ，使声音最大，这样反复调几次，可获得准确的465千周的同步跟踪。

由于变频管既担任混频任务又担任振荡任务，节省了一只晶体管，而且使线路简化，所以这种变频电路得到了广泛的应用。但是这样的单管变频电路也有它的缺点，混频要求工作电流不能太大，否则变频增益会大大下降，而振荡要求工作电流稍大才能使振荡稳定，这就有顾此失彼的矛盾。用一只管子变频时，集电极电流在0.4—0.6毫安之间比较合适。

三、中频放大器

从变频级输出的中频信号仍然是微弱的，为了使收音机具有较高的灵敏度，必须把中频信号放大后再检波。中频放大器是超外差收音机中极其重要的组成部分。中放级的好坏，对收音机的灵敏度、选择性、失真程度等都有决定性的影响。图 13-77是中频放大器电路。 R_1 、 R_2 为中放管的偏流电阻， R_3 为反馈稳定电阻， C_2 、 C_3 是中频旁路电容。中

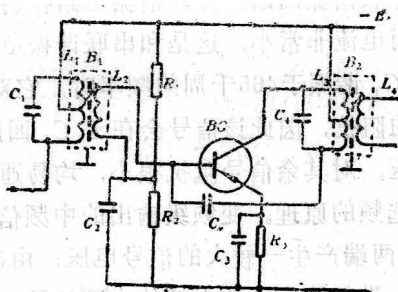


图 13-77

频放大器与我们前面学过的放大器不同的地方在输入回路和输出回路。接在中放级输入回路和输出回路的，都是中频变压器。中频变压器的外形、内部构造和表示符号如图 13-78 所示。晶体管收音机用的小型中频变压器，由绕在磁芯上的

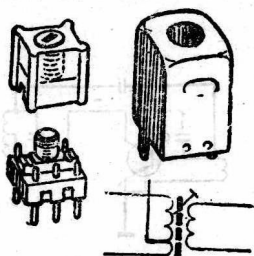


图 13-78

两个彼此不相连的线圈组成，线圈的外面罩有一个上下可调的磁帽，旋动磁帽可以改变磁帽与磁芯间的间隙，从而改变线圈的电感量。整个结构装在金属（铜或铝）的屏蔽罩内，下面有引出脚，上面有调节孔。

小型中频变压器 B_1 、 B_2 分别和电容 C_1 、 C_4 并联，各组成一个 LC 回路。这就是前面讲到的选频电路，为什么能选频呢？它和 LC 串联电路的选频作用相同吗？这都是需要弄清的问题。 LC 串联谐振电路在谐振时阻抗最小而电路里的电流最大； L_1C_1 和 L_2C_2 回路是并联在晶体管的输出端

的，因此，都是并联谐振回路。并联谐振电路在谐振时，回路的阻抗极大，而电流非常小，这是和串联谐振电路不同的。当我们使 L_1C_1 谐振于465千周的频率时，它对465千周的信号呈现极大的阻抗，因此该信号会在 L_1C_1 回路两端产生一个很大的电压，对其余信号阻抗很小，均易通过回路而被滤去。这就是选频的原理。变频级输出的中频信号，经 L_1C_1 选频后，在 L_1 两端产生一较大的信号电压，由次级 L_2 送到中放管的基极，进行放大。放大后的中频信号，在输出回路又与 L_3C_4 组成的并联谐振回路谐振，使中频信号进一步得到选择，再由 B_2 的次级耦合到下一级去。由于中放级的输入、输出端同时采用了选频回路，选择性便大大提高了。因为晶体三极管的输入阻抗很小，而输出阻抗较大，所以中频变压器的初级往往用抽头接电源以及初级圈数多，次级圈数少的办法，来满足阻抗匹配。这就能保证对信号较好的选择性和有较好的传输效果。

由于晶体管内部结构的关系，在基极和集电极之间存在着电容 C_c 。（图 13-79），虽然电容量只有几个 μF ，但它对中频容抗很小，晶体管在中频下工作时就会有一部分中频电流从集电极通过 C_c 返回基极，构成内部反馈，可能使放大器发生自激振荡。

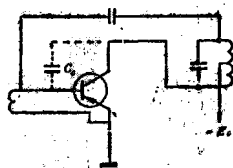


图 13-79

为了不使放大器产生自激振荡，在晶体管的基极和集电极之间并联一个和极间电容 C_c 相等的电容（用符号 C_N 表示）它产生的反馈电流 i_N 和 C_c 产生的反馈电流 i_c 大小相等、方向相反，互相抵消，从而起到消除振荡的作用。电容 C_N 叫中

和电容。

在超外差收音机中，一般都采用两级中频放大，这样可以获得更高的增益和更好的选择性。

四、检波电路与自动音量控制电路

1、检波电路

在超外差收音机中，必须对调幅的中频信号进行检波，才能取出音频信号。与直接放大式收音机的检波过程相比，中频信号经过两级放大，电压比较大，所以它是大信号检波。

一般超外差收音机中，均采用二极管检波。在图 13-80

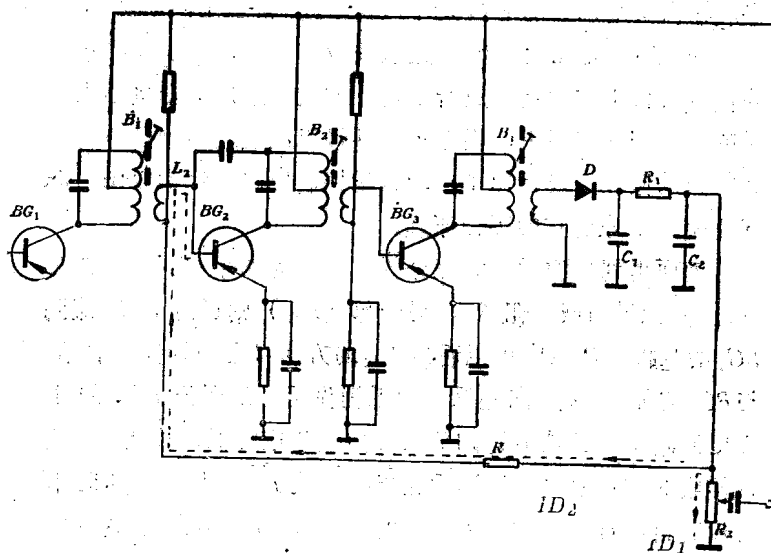


图 13-80

中，由中频变压器 B 次级输送过来的 465 千周的中频信号，经过二极管 D 检波后，音频、中频、直流这三种成分，有三个去向：音频成分不能通过 C_1 、 C_2 （ C_1 、 C_2 对音频阻抗很大而对中频阻抗很小），只能通过 R_1 和负载电阻 R_2 ，并在 R_2 两端产生一个音频信号电压，由 C 耦合到下一级；中频载波成分在检波后已经没有用处了，被由 C_1 、 R_1 、 C_2 组成的中频滤波电路（和第三节中的滤波原理相同，这里是滤掉中频的，因此元件数值不同）滤去；检波后的直流成分大部分被利用到“自动音量控制电路”里，其余部分消耗在负载电阻 R_2 上。 R_2 为一阻值 4.7-10 千欧的电位器。

2、自动音量控制电路

收音机在接收某一个广播电台广播时，信号强弱随时变化，输出功率也会随之改变，声音忽大忽小，听了很不舒服。在收听远地电台，特别是短波段，这种现象更为严重。要使收音机工作稳定，放音平稳，靠人工来调节音量是来不及的。人们在实践中，根据控制基极电流就能控制晶体管放大能力的原理，设计出了自动音量控制电路，我们以图 13-80 为例，来分析它的工作原理。

前面提到检波后的直流分量，又分为两个去向，一部分（ I_{D1} ）流过负载电阻 R_2 ，另一部（ I_{D2} ）则通过 R 、 L_2 流到 BG_2 的基极，从图中可以看出 I_{D2} 的方向（用虚线箭头表示）与 BG_2 的偏流 I_b 方向相反，起抵消作用，从而使 BG_2 的基极电流减小，于是 BG_2 的放大能力也相应降低。如果收音机接收的信号越大，检波后输出的直流 I_{D2} 也越大，这时倘若没有自动音量控制电路，声音就越大。 I_{D2} 增大，就使 BG_2 的基极电流变小，于是放大器的增益减小，这就起了自动控

制音量的作用。当 I_{D2} 一定时, R 越小, 控制能力越强, R 一般选为 $4.7-10K$ 左右。

这种电路简单、经济, 效果较好, 但也有缺点, 这就是当信号过大时, 由于 I_{D2} 很大, 会使 BG_2 基极电流很小, 甚至趋向于截止, 造成严重失真。

“矛盾不断出现, 又不断解决, 就是事物发展的辩证规律。”为了克服上述缺点, 通常采用阻尼二极管的自动音量控制电路, 即所谓二次调节电路, 如图 13-81 所示。

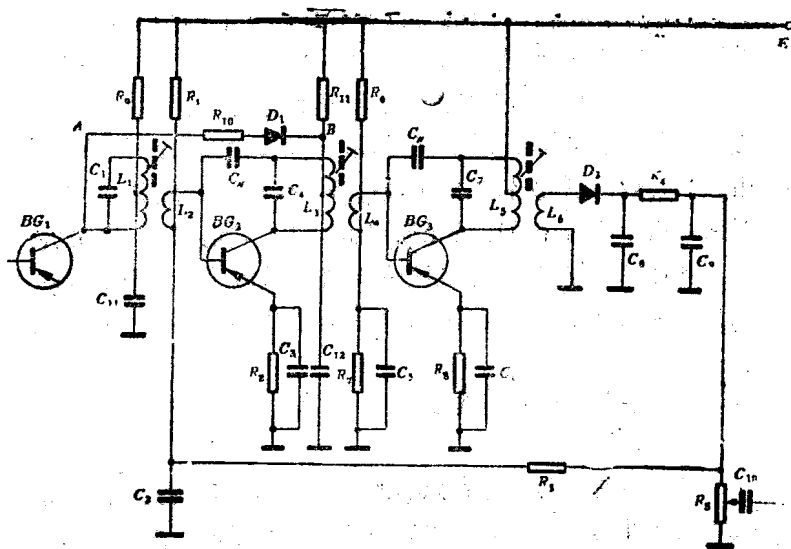


图 13-81

阻尼二极管自动音量控制电路由 R_0 、 C_{11} 、 D_1 、 R_{11} 、 C_{12} 组成。电路的工作原理是: 当外来信号较小时, 检波后

输出直流分量 I_{D2} 控制了第一中放管 BG_2 的集电极电流 I_{C2} ，这时电路的工作状态同上面所讲的情况相似。在电阻 R_{11} 上的电压降为 $I_{C2} \cdot R_{11}$ ，在电阻 R_1 上的电压降为 $I_{C1} \cdot R_1$ 。由于 BG_1 未加入自动音量控制电流，所以 $I_{C1} \cdot R_1$ 基本保持不变。现设在弱信号时 $I_{C2} \cdot R_{11} > I_{C1} \cdot R_1$ ，即 B 点的电位高于 A 点的电位，二极管 D_1 处于反向偏置，不导通，内阻很大，对 $L_1 C_1$ 谐振回路没有影响。但是当外来信号增强时，检波器输出的直流分量 I_{D2} 使 BG_2 的集电极电流 I_{C2} 减小， R_{11} 上的电压降也随着减小，这时可能使 R_{11} 上的电压降等于或小于 $I_{C1} \cdot R_1$ ，即图中 B 点的电位等于或低于 A 点的电位，二极管 D_1 趋向导通。当信号足够大时，使 D_1 更导通，这就是说，随着外来信号强弱的变化，二极管导通的程度也不一样，二极管起着自动可变电阻的作用。在 D_1 导通时，正向电阻很小，这样变频级输出的中频信号电流一部分被 R_1 和 D_1 旁路。由于 R_1 和 D_1 的正向电阻与 $L_1 C_1$ 回路的一部分并联，降低了谐振阻抗，变频级的增益也就减小了，中放级的输出也随之减小，起到自动控制音量的作用。

五、超外差收音机电路

收音机是宣传毛泽东思想的重要工具。我国工人阶级认真执行毛主席关于“要打破洋框框，走中国自己工业发展的道路”的伟大指示，为发展收音机生产做出了重大贡献。从1973年全国收音机评比情况看，收音机性能、结构、工艺、外观等方面都有很大提高。国产收音机造型大方、加工精细、结构牢固、使用维修方便。其中南京生产的“熊猫”、

北京生产的“牡丹”、上海生产的“红灯”和“春雷”等在国内外都享有很高声望。

国产收音机品种很多。1972年全国收音机专业会议，各地送展的样机就有184个品种，1973年参加评比和观摩展出的共有264个品种，其中绝大多数是超外差收音机。超外差收音机尽管种类繁多、电路不同，但它们的基本组成都是相同。在本节，我们只介绍典型的超外差收音机电路。典型的超外差收音机，使用六只晶体管，其电路如图 13-82所示。其中混频、振荡合用一只晶体管3AG1E，中频放大用两只晶体管3AG1B，低频电压放大用一只晶体管3AX31B，推挽功率放大用两只晶体管3AX31B。

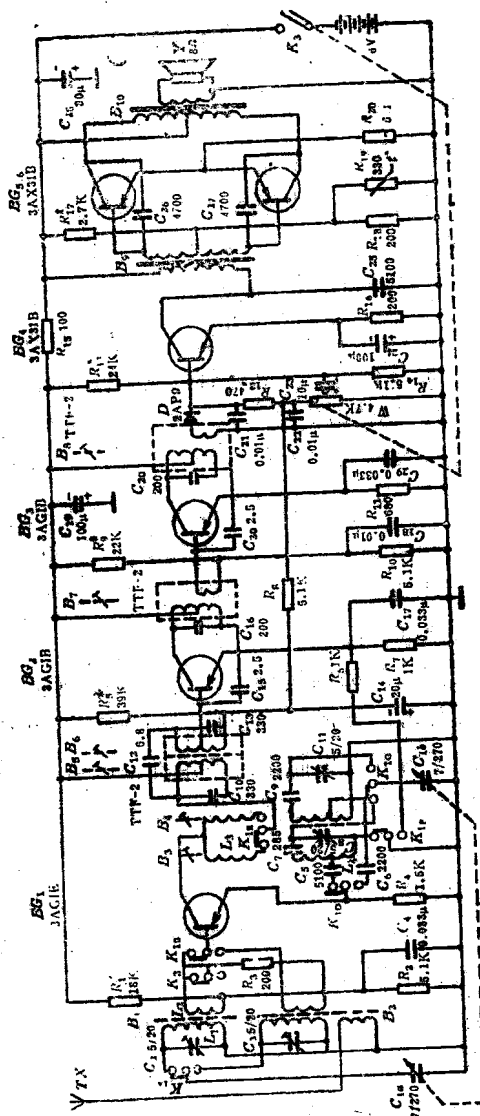
如果在图 13-82的基础上再增加一级低频电压放大，就成了七管机，如红灯2J8、春雷703等；如果再把混频和振荡各用一只晶体管工作，则成为八管机，如春雷804、牡丹8402、熊猫B802等。

倘若在图 13-82的基础上，由一只高频管BG₃担任一级中放和低放任务，就成了五管机，如凯歌4B12等。

如果继续将五管机简化，不用推挽电路，只用一只晶体管进行功率放大，就成为四管机，如春雷401、工农兵403等。

四管机再去掉一级中放(只剩一级中放)，就成为三管机，其中一管担任变频、一管担任中放兼来复低放、一管担任功率放大，如熊猫B302等。

从上述演变过程可以看出，六管机是超外差收音机中最富有代表性的，可以作为我们全面了解超外差收音机的基础。我们就以图 13-82所示六管两波段超外差收音机为对



象，分析其整机电路的工作原理和各主要元件的作用。

图中 K_1 是波段开关，分别控制中波和短波的输入电路与振荡电路(图中的输入回路和振荡回路都接在中波的位置上)。

从天线 TX 接收到的信号，送到调谐回路 L_1C_{1a} ，由于回路谐振在接收的信号频率上，其它干扰信号都相应地被抑制。然后，通过 L_1 与 L_2 之间的互感，将信号送到 BG_1 组成的变频级。本机振荡回路由 L_1C_{1b} 组成， L_1 是反馈线圈。振荡回路所产生的振荡电流通过电容 C_1 注入 BG_1 的发射极。 R_1 、 R_2 、 R_4 是变频管的偏置电阻， C_4 是高频旁路电容，它使高频信号有个顺利的通路，不致于在 R_2 上产生电压降。经过变频之后，高频调幅信号变成频率为 465 千周的中频调幅信号，经过第一中频变压器的初级时，由于第一中频变压器的初级和电容 C_{1a} 组成的选频回路正好谐振于 465 千周(并联谐振)，在回路两端产生一个较大的信号电压，并通过耦合电容 C_{12} 、中频变压器次级和 C_{11} 组成的谐振回路送到 BG_2 组成的第一中频放大级。第一中放级是双调谐中频放大器。由于第一中放级有自动音量控制电路，所以它的偏置电路比较复杂，偏流除了受偏置电阻 R_1 、 R_2 控制外，还受 R_{11} 、 R_{12} 与 W 的影响。 C_{14} 是一个容量较大的电解电容，用它来滤去检波后流经 R_4 的音频电流。 C_{17} 是中频旁路电容， C_{15} 是中和电容。经过第一中放级放大的中频信号电压通过第二中频变压器 B_2 的次级送到第二中放级。 BG_3 组成的第二中放级是单调谐中频放大器。 R_9 、 R_{10} 、 R_{11} 是偏置电阻， C_{11} 、 C_{12} 是中频旁路电容， C_{10} 是中和电容。

信号经过第二中放级的又一次放大，从第三中频变压器

次级输出后，由二极管 D 进行检波。 C_{21} 、 R_{12} 、 C_{22} 是一个中频滤波器，把检波后残余的中频载波信号滤除。信号在电位器 W 上产生的音频电压通过电容 C_2 ，送到 BG_1 组成的低放级。检波后的直流分量通过 R_4 加到 BG_2 的基极作自动音量控制。

音频信号电压经过低放级（或称为推动级）放大后，再由输入变压器 B ，送到由 BG_3 、 BG_4 组成的推挽放大级进行功率放大，最后通过输出变压器 B_1 ，送到扬声器，推动扬声器发出声音。低放部分电路比较简单， R_{13} 、 R_{14} 、 R_{15} 是 BG_1 的偏置电阻。 R_{17} 、 R_{18} 、 R_{19} 、 R_{20} 是功放级的偏置电阻，其中 R_{17} 是热敏电阻。 C_{26} 、 C_{27} 是负反馈电容，使高音频率多衰减一些，以改善音质。

C_{19} 、 R_{15} 、 C_{28} 组成电源滤波器，即去耦电路，防止通过电源内阻引起正反馈，使整机工作不稳定或产生寄生振荡。

K_2 是“本地远程开关”，当接收附近强信号电台时， K_2 拨到“本地”位置（即图中所示位置），这时中波基极线圈并联一个电阻 R_3 ，这就使回路输入给变频级的信号减少，灵敏度虽然低了一些，但因为适当抑制了信号和杂音，可以改善音质。在接收远地电台或弱电台时， K_2 就拨到“远程”位置， R_3 不起作用，灵敏度即可恢复。

当接收短波时，可以把 K_1 转向短波位置。这时电路的工作原理和中波相同。此时电阻 R_4 被 K_1 接地，并和 R_1 并联后作为 BG_2 的稳定电阻。并联后总电阻减小，反馈减小，因而提高了短波的灵敏度。

第十六节 超外差收音机的维修

一、晶体管收音机的使用与维护

1、换用电池时,正负极性不能搞错,而且电压应该符合收音机规定的电压。用外接电源时,更要注意电源的极性(尤其是电源插头处)和电压。收音机长期不用时,应将电池取出,以免日子久了,电池的酸液外流腐蚀机件。

2、在收听本地电台时,可选用中波段,用机内磁性天线,灵敏度就足够了。当收听外地电台时可选用短波段。若机内磁性天线灵敏度不够,再使用拉杆天线。先拉出三、四节,捏住底部,再拉出一、二节,不要猛拉,以免影响拉杆天线的使用寿命。使用室外天线,要采用避雷装置。

3、收音机宜放在干燥通风的地方,防止受潮。不宜放在阳光很强或靠近高温的地方(如火炉、火炕上),以免损坏晶体管和其它机件。

二、晶体管收音机的检修

学习修理收音机并不难,只要坚持在实践中学习,不断总结经验,就能掌握这门技术;为工农兵服务。

修理收音机的步骤,可以概括为三点:(1)认清故障现象。(2)通过检查分析,逐步缩小故障范围,找出产生故障

的原因。(3)“对症下药”，修复损坏的元件和线路，排除故障。

1、故障现象

收音机发生故障时所显现出现象主要有以下几种：

(1) 完全无声 打开收音机电源开关，将音量电位器旋到最大位置，调节调谐旋钮，扬声器没有任何声音，或者在整个波段只有沙沙声而没有电台广播声。

(2) 发音微弱 灵敏度极低，在整个波段中可以听到电台广播声，但音量电位器旋到最大位置时，声音仍然很小。

(3) 啸叫 在整个波段或波段的部分地方，扬声器发出“卜、卜、卜”的汽船声或刺耳的尖叫声。

(4) 失真 扬声器中发出来的声音不象原来播送的讲话的声音(或乐曲声)，音质不良。

(5) 声音时有时无 在收音机发音正常时，忽然声音自行停止，停一会或敲敲机壳又重新发出声音。

2、检查方法

收音机发生了故障，并不是说整个收音机都坏了，只是某一级或某几级出了问题。故障到底出在哪一级，除了直观地看出如脱焊、断线等情形外，一般可采用下面几种方法逐级检查。

(1) 干扰法 当收音机完全无声或发音微弱时，说明某一级或几级传输、放大信号的能力出了问题。为了确定故障究竟发生在哪级，可以先从功放级开始，用手捏住小螺丝刀的铁杆，然后用螺丝刀去碰推挽管BG₁的基极，这相当于给功放级输入一个信号(或理解为在基极回路并联一个电阻，这个电阻引起了基极电流的变化，因而相当于输入了一个干

扰信号),倘若功放级工作正常,扬声器就会发出“咯咯”声。用这种办法依次从功放、低放逐级向前检查,到了哪级扬声器无声,故障就出在哪一级。通常把这种方法叫做干扰法。

还可以用万用表的直流电压档测量三极管的基极与地、集电极与地间的电压(红笔接地,黑笔接待测端),通过扬声器有无声音来辨别工作是否正常。直流电压表本身相当于一个电阻器,当它并联在基极与地或集电极与地之间时,一定会在电路中引起电流变化,从而导致扬声器中发出声响。这种方法一举两得,既检查了晶体管各极电压,又输入了一个干扰信号。

(2) 短路法 当收音机发生啸叫、杂音等故障时,说明一级或几级的工作状态失常,这时可采用短路法进行检查。

短路法就是把某级的输入端对地短路,使这一级和这一级以前的部分都不发生作用,从而缩小故障范围。不难想象,它必须从前级向后依次进行。

检查时,用小螺丝刀或镊子从 BG_1 开始,逐个将晶体管的基极与地短路,到某一级啸叫或杂音消失,表明故障就发生在这一级。

干扰法和短路法具有简单易行的优点,但是只能查出故障大致发生在哪一级和发现断线、脱焊、元件相碰、接触不良等明显的故障。要进一步找出故障原因,是什么元件损坏了,还必须用万用表进行检查。

(3) 使用万用表检查

第一、测量电源电压和整机静态电流。

拿到一台待修的收音机,应该先测量一下电池电压,如果电压过低(低于正常电压的70%),收音机就不能正常工作,

必须换新电池。如果换上新电池开机后，电压又降到原来的80%左右，则说明机内有短路的地方，应先予排除。

将收音机调到没有电台的位置上，关掉电源开关，使用万用表直流50毫安档，把电表两笔接在电源开关的两个端点上，即用万用表来代替电源开关，使电流从红笔流入，从黑笔流出，这就测出了静态电流。在图 13-82所示的六管机中，静态电流应在10毫安左右（一般七管机在7-12毫安左右）。如果电流太大，说明电路中有短路处，如果电流太小，说明电源插口接触不良。

第二、测量各管集电极电流和各极电压。

如果检查电源电压和整机静态电流不能发现问题，就可以进一步测量各级晶体管集电极电流。因为各级晶体管集电极电流是否正常，就表明了工作是否正常。在正常情况下，图 13-82所示的六管机，各级集电极电流如下表：

表 13-4

	变频管	第一中放管	第二中放管	推动管	功放管(两只推挽管的和)
集电极电流 (毫安)	0.5—0.6	中波 0.4—0.6 短波 0.8—1	0.6—0.8	2—2.5	3—4

测量集电极电流的方法如图 13-83所示，要把集电极断开，串入一个毫安表(即万用表中的毫安表)。

用上面这种测量 I_c 的方法检查故障相当可靠，但也有一定缺点，如必须在印刷电路板上烫去焊锡才能测量，既不方便，又容易损坏铜箔，因此在修理中广泛采用测量各极电

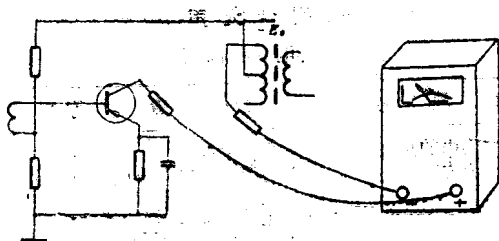


图 13-83

压的方法。例如测量发射极电压，再将这个电压除以发射极电阻，就可以得到发射极电流 I_e 。若在图 13-82 中测得 BG_1 发射极对地电压为 0.75 伏，并且从图上看出发射极电阻为 680 欧，则该管的发射极电流 $I_e = \frac{0.75}{680} \approx 1.1$ 毫安。集电极电流 $I_c \approx I_e$ ，于是就间接得到该管集电极电流的数值。

此外，通过对集电极、发射极、基极电压的测量，同样可以检查三极管的直流工作状态的正常与否，下表列出了上述六管机的各管三个电极对地的电压(皆为负值)。

表 13—5

	变 频 管	第一中放管	第二中放管	推 动 管	功 放 管
发射极电压(伏)	0.9	0.5	0.75	0.4	0.02
基 极 电 压(伏)	0.92	0.65	0.9	0.5	0.17
集电极电压(伏)	5.4	5.4	5.4	5.2	6

检查中发现哪一级电流或电压不正常，就在哪一级做进一步检查。

六管超外差收音机的故障现象和原因，详见下表。

一、完全无声

1. 电源部分

故障现象	故障原因
串入电源回路中的直流电流表指示的总电流为零	① 电池失效。 ② 各节电池之间或电池与电池夹接触不良。 ③ 电源开关 K_3 接触不良。 ④ 电源线内部断开。
串入电源回路中的直流电流表指示的总电流超过100毫安	C_{28} 击穿短路。
电源的工作电压	
在电源开关 K_3 接通时, 电池正负极之间的电压不低于规定电压的70%	

2. 功放级

故障现象	故障原因		
BG_5 、 BG_6 良好, 各电极电压正常	① 喇叭音圈引出线脱焊或音圈断线。 ② 输出变压器次级断线。 ③ 输出变压器初级线圈全部短路。 ④ 输入变压器次级线圈全部短路。		
BG_5 、 BG_6 集电极均无电压	输出变压器初级线圈中心抽头脱焊。		
BG_5 、 BG_6 基极无电压	① 输入变压器次级线圈中心抽头脱焊。 ② 上偏流电阻 R_{17} 开路。		
BG_5 、 BG_6 发射极对地的电压很大	R_0 开路。		
R_{20} 两端电压大大高于正常值, 通电后 BG_5 或 BG_6 发热	BG_5 或 BG_6 的发射极和集电极击穿而短路。		
BG_5 、 BG_6 的静态电压与电流			
集电极电压	发射极电压	基极电压	集电极电流 (两管之和)
6伏	0.02伏	0.17伏	3毫安

3. 推 动 级

故 障 现 象	故 障 原 因		
集电极无电压	① 输入变压器初级线圈断线。 ② C_{25} 短路。		
发射极无电压	① R_{16} 短路。 ② BG_4 失效。 ③ C_{24} 短路。		
发射极电压大大高于正常值	① BG_4 发射极和集电极击穿而短路。 ② 发射极电阻 R_{16} 脱焊或通地不良。		
基极无电压	① R_{14} 对地短路。 ② R_{15} 开路。		
串入电源回路的直流电流表指示总电流在60毫安左右	① C_{19} 击穿。 ② 印刷板接正、负极的铜箔条之间漏电。		
各电极电压正常	① C_{23} 失效。 ② 电位器内部簧片与马蹄形碳膜电阻体没接触。		
BG_4 静态电压与电流			
集 电 极 电 压	发 射 极 电 压	基 极 电 压	集 电 极 电 流
5.2伏	0.4伏	0.5伏	2 毫安

4. 检 波 级

故 障 现 象	故 障 原 因
在线路上对 D 进行测量 正向电阻数值接近	检波二极管 D 损坏。
在线路上对 D 进行测量, 正向电阻 500 欧左右, 反向电阻在 200 千欧以上	第三中频变压器次级线圈断线。
D 在线路上测量的正常阻值	
正向电阻在500欧左右, 反向电阻在5千欧左右。	

5. 中 放 级

故 障 现 象	故 障 原 因
BG_2 、 BG_3 集电极无电压	中频变压器 B_7 、 B_8 初级线圈断线。
BG_2 、 BG_3 基极无电压	① 中频变压器 B_6 、 B_7 次级线圈断线。 ② C_{14} 、 C_{18} 击穿。 ③ R_5 、 R_9 开路。
BG 、 BG_3 基极电压过高	① 中和电容器 C_{15} 、 C_{30} 漏电。 ② B_6 、 B_7 的初、次级线圈碰线。
集电极、基极电压正常，但发射极无电压	① BG_2 、 BG_3 失效。 ② C_{17} 、 C_{29} 短路。
BG_2 、 BG_3 各极电压正常	中频变压器 B_6 、 B_7 、 B_8 初或次级线圈内部短路。
BG_2 、 BG_3 发射极电压太高，而集电极电压低于正常数值	BG_2 、 BG_3 被击穿，发射极和集电极短路。
BG_2 、 BG_3 静态电压与电流	
	集电极电压 发射极电压 基极电压 集电极电流
BG_2	5.4伏 0.5伏 0.65伏 中波0.6毫安 短波1毫安
BG_3	5.4伏 0.75伏 0.9伏 1毫安

6. 变 级

故 障 现 象	故 障 原 因
BG_1 集电极无电压	① 振荡线圈次级断线或波段开关 K_{1E} 未接触。 ② 第一中频变压器初级断线。
基极无电压	① C_4 击穿， R_1 开路。 ② 基极回路线圈断线。
集电极、基极电压正常，发射极无电压	① BG_1 失效。 ② C_5 、 C_6 击穿。 ③ R_4 一端对地短路。

用螺丝刀将振荡线圈短路， R_4 两端的电压不降低		① C_5 或 C_6 失效。 ② 振荡线圈开路。 ③ C_{1b} 定片与动片短路。 ④ 振荡线圈次级开路。	
各电极电压正常		第一中频变压器初级线圈短路。	
BG ₁ 静态电压与电流			
集电极电压	发射极电压	基极电压	集电极电流
5.4伏	0.9伏	0.92伏	0.5毫安

7. 输入回路

故障：① C_{1a} 动片与定片短路。 ② 补偿电容 C_2 、 C_3 短路。 ③ 磁性天线线圈开路。

二、发音微弱

1. 电源部分

故障现象	故障原因
电源开关接通后，电源正、负极间的电压太低	① 电池用旧内阻增大。 ② 电池之间或电池与电池夹之间接触电阻增大。 ③ 整机静态电流太大，内部存在短路或漏电的地方。

2. 功放级

故障现象	故障原因
BG_5 、 BG_6 基极无电压或电压远低于正常值	① 热敏电阻 R_1 内部短路。 ② 上偏流电阻 R_{17} 开路。 ③ 输入变压器 B_9 次级中心抽头开路。
BG_5 或 BG_6 集电极无电压	输出变压器 B_{10} 初级一半开路。
发射极电压高于正常值	① 发射极接地电阻值变大。 ② 晶体管损坏。

各级电压皆偏离正常值	① BG_5 、 BG_6 穿透电流太大。 ② C_{26} 或 C_{27} 漏电。
各级电压正常	① BG_5 、 BG_6 电流放大系数 β 下降。 ② 输入、输出变压器线圈内部存在局部短路。 ③ 喇叭效率太低。

3. 推动级

故障现象	故障原因
BG_4 集电极电压偏低	C_{25} 严重漏电。
基极无电压	R_{13} 开路, R_{14} 短路。
发射极电压高于正常值	R_{16} 阻值增大。
各级电压正常	① 输入变压器初级线圈内部短路。 ② 音频旁路电容器 C_{24} 失效或开路。 ③ BG_4 电流放大系数 β 减小。 ④ 交连电容 C_{23} 容量减小。 ⑤ 音量控制电位器内部簧片与蹄形电阻体接触电阻增大。

4. 检波级

故障现象	故障原因
在机上测量检波二极管正、反向电阻相差不多	检波二极管 D 性能变坏检波效率降低。

5. 中放级

故障现象	故障原因
BG_2 、 BG_3 集电极电压偏低	C_{19} 严重漏电。
基极无电压或电压偏低	① C_{14} 或 C_{18} 漏电或短路。 ② R_6 或 R_9 开路。
发射极电压偏高	R_7 或 R_{11} 阻值增大。

各极电压正常	① 中频旁路电容 C_{17} 或 C_{29} 开路或失效。 ② 中频变压器线圈内部存在短路。 ③ 中频谐振电容 C_{10} 、 C_{16} 或 C_{20} 漏电。 ④ 中频谐振电容 C_{10} 、 C_{16} 或 C_{20} 与中频变压器线圈连接处假焊、接触电阻增大。 ⑤ 中频变压器调乱，中频回路失谐。 ⑥ C_{14} 或 C_8 开路。 ⑦ BG_2 或 BG_3 性能变坏。 ⑧ 中频谐振回路并联电容开路。 ⑨ 中频变压器初级一端开路(不是接集电极的一端)。
--------	---

6. 变 级和输入回路

故 障 现 象	故 障 原 因
BG_1 集电极电流太小	① R_1 过大。 ② R_2 太小。 ③ C_4 漏电。
发射极电压偏低，将振荡线圈短路发射极电压降落不多	① C_5 或 C_6 漏电或容量减小。 ② 波段开关中，有关本机振荡部分的触点接触不良。 ③ BG_1 集电极电流太小。 ④ C_{15} 漏电或动片接触不良。 ⑤ 振荡线圈线头存在假焊增加了接触电阻。 ⑥ 振荡线圈内部存在短路或振荡线圈严重受潮。 ⑦ BG_1 电流放大系数 β 值下降。
各极电压正常	① 磁性天线线圈绞合线断股。 ② 双连可变电容器动片轴与引出簧片之间的接触电阻加大。 ③ 波段开关触点接触不良。 ④ 统调被破坏。 ⑤ 双连可变电容器由于磨损，容量变大，破坏了统调。 ⑦ 磁棒效率降低。

三、汽船声、喇叭声

故 障 现 象	故 障 原 因
“汽船声”或音量控制电位器旋到最大时，喇叭中发出“嘟嘟声”	① C_{10} 失效或开路。 ② C_{28} 失效或开路。 ③ 电池用旧或电池之间接触不良使电源内阻增大。 ④ 输入变压器初级线圈两个接头接反。 ⑤ 音频负反馈成为正反馈。 ⑥ 推动管 β 值太高。
喇叭中一片尖叫，只有调到强电台的位置，尖叫声才停止或减轻	① 中和电容器 C_{15} 漏电。 ② BG_2 的集电极电流太大。 ③ C_{17} 漏电。 ④ C_{17} 脱焊或开路。 ⑤ 第一中放级退耦电容器断开（如果加有退耦电路）。
喇叭中有“吱吱”声，调谐到电台位置附近，便发出尖叫，失真加大，声音难听	C_{14} 开路或失效。
整个波段每个电台附近出现差拍声	① R_8 开路。 ② C_{15} 、 C_{30} 脱焊或容量变化。 ③ C_{15} 、 C_{30} 漏电。 ④ C_{17} 、 C_{29} 漏电。 ⑤ R_{10} 开路或 R_7 、 R_{11} 对地短路。 ⑥ BG_2 或 BG_8 电流放大系数 β 值太高或穿透电流过大。 ⑦ 中频变压器外壳接触不良。
波段的高端出现差拍声	① R_1 太小。 ② BG_1 的 β 值太高或穿透电流太大。

四、音质不良、杂音

故 障 现 象	故 障 原 因
声音沙哑	① 喇叭音圈偏心，磁圈，音圈松散或纸盆受潮。 ② 小垫圈塑料片等杂物粘在纸盆上。

声音含混、吐字不清(失真)	① 推挽功放级有一只功放管损坏或未接入。 ② 功放管的集电极静态电流太小。 ③ 输出变压器初级线圈一半断线或内部部分短路。 ④ 输入变压器次级线圈一半断线或内部部分短路。 ⑤ 低放部分各级之间存在有害的耦合,产生寄生振荡。 ⑥ 推动管 BG_4 的集电极电流太高或太低。 ⑦ 检波二极管性能变坏。 ⑧ 负反馈电路开路。 ⑨ BG_5 、 BG_6 电流放大系数 β 值相差太大。 ⑩ R_{10} 开路。
声音“阻塞”(严重失真)	① 某级上偏流电阻开路使集电极电流为零。 ② 自动音量控制失去作用。 ③ 中放兼来复低放级的三极管 β 值过高。
杂音	① 元件假焊。 ② 输入、输出变压器内部有将断未断、将短路而未短路的地方。 ③ C_{10} 引线将断。 ④ W 内部簧片与马蹄形碳膜电阻体接触不良。 ⑤ 磁性天线有断股。 ⑥ 波段开关触点接触不良。 ⑦ 双连可变电容器定片与动片之间若接若离或因使用日久产生静电噪声。

五、发音时有时无

故障现象	故障原因
拍击机盒能偶然使声音恢复	① 电池之间或电池与电池夹之间接触不良。 ② 某些元件假焊。 ③ 元件引线相碰。
旋转音量控制电位器,声音时有时无,并伴随强烈的“咯咯”声。	电位器内部簧片与马蹄形碳膜电阻体接触不良。

轻轻地翻转收音机，声音减小或消失	① 中频变压器磁芯松动。 ② 振荡线圈磁芯松动。 ③ 中频变压器或振荡线圈内部磁帽破裂，碎片在内部移动。
收听一段时间声音消失，关闭电源休息一段时间，重新接通，又能收听	① 电池即将失效（尤其五号电池和层迭电池）。 ② 某个电容器，如C_4漏电。 ③ 某个三极管热稳定性太差。

第十四章 农村有线广播

在毛主席“努力办好广播，为全中国人民和全世界人民服务”的伟大号召下，随着社会主义革命和社会主义建设的深入发展，我国农村有线广播事业也在蓬蓬勃勃地向前发展。这对于推动农村广大社员、干部学习马列主义、毛泽东思想，学习时事政策，推动农业学大寨以及批林批孔等群众运动，都有很大作用，深受贫下中农和社员群众的欢迎。因此，学习、掌握有线广播知识，正确使用和维护广播设备，对于发展农村有线广播事业是非常必要的。

第一节 扩音机

一、概述

在广播站里，扩音机是用来放大话筒或电唱机输出的音频信号的，所以，扩音机实际上是一个音频放大器。

扩音机的放大原理和收音机的低频放大部分相同。不同的是收音机一般只推动一只或两只小功率扬声器发声，输出功率小；而扩音机一般都是推动几只、几十只或更多的扬声器发声，输出功率大。例如一般公社广播站使用的国产TY250/1000型扩音机输出功率可达1000瓦。因此扩音机需

要多级的音频放大和比较复杂的放大电路，并且采用大功率晶体管或电子管，以获得较大的输出功率。从整个情形看，扩音机就是“大”收音机。

农村常用的扩音机有电子管扩音机和晶体管扩音机两种，每种里又因输出功率不同、设计上差异而分为许多型式。但是不论那种扩音机，结构原理都是相同的。它们多是由话筒放大级、混合放大级、电压放大级、功率放大级和电源组成，多数扩音机还附有收音部分，如图 14-1 所示。

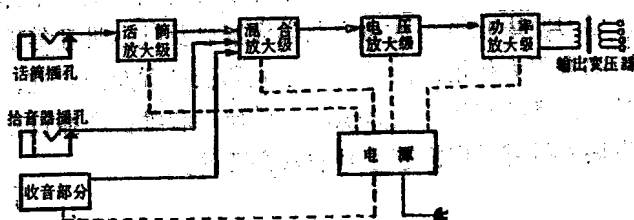


图 14-1

二、扩音机的使用

使用扩音机，首先要根据实际需要选择适当的扩音机。在有交流电源的地方，电子管扩音机和晶体管扩音机都能使用。在没有交流电源的地方，只能使用晶体管扩音机。此外，还应该根据听众的多少和所处的环境来选择扩音机的规格。

其次要了解所使用扩音机的性能。如输出功率是多少；是定压输出还是定阻输出等等。每一台扩音机都有控制面板，如图 14-2 所示。要弄清面板上各旋钮和开关的作用，

如“音量”是调节声音大小用的；“音调”是调节声音高低

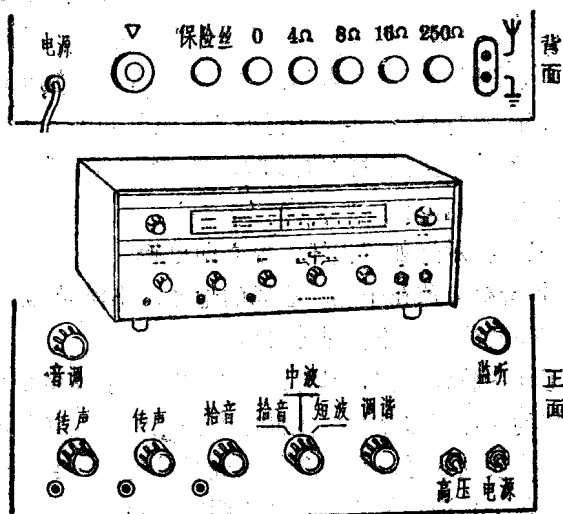


图 14-2

用的；“波段开关”是供选择波段用的；“调谐”是选择电台用的；“监听”是供调节机内监听喇叭音量用的；“话筒”插口是插接话筒的；“拾音”插口是插接电唱机的；交直流开关是变换电源用的；“电源”开关是用来接通电源的，此外还有专门控制高压部分的“高压”开关。

扩音机的种类、结构不同，使用方法也有所不同。下面我们只介绍扩音机一般的使用知识。

1、打开扩音机前，要检查喇叭是否接好，电源(背面的电源变换插头)电压是否相符。

2、使用前，检查一下“高压”和“电源”开关是否处在“关”的位置，各音量调节旋钮是否旋到最小位置。

3、先开“电源”开关(有的写作低压开关)，预热2-3分

钟(电子管扩音机在冬季预热要加长,特别是使用汞气整流管的扩音机,更要注意预热),随后打开“高压”开关。使用完毕,关断时先将“传声”、“拾音”等旋钮旋至最小位置,随后先关“高压”开关,再关“电源”开关。

4、在使用中途短时间休息时,可将“高压”开关关上,使机器暂时休息。

5、机上指示灯如有损坏,要立即更换。

6、扩音机应放在干燥、通风的地方,不使受潮,所有组件都应保持清洁,不要过分受振。

除了功率较大的扩音机外,还专门生产了许多种适合于农村使用的晶体管多用机,既能收音、扩音,又能放唱片,深受贫下中农的欢迎。现在我们以农村常见的“红旗”604型半导体收、扩两用机为例,来说明其使用方法。

红旗604型两用机外型如图 14-3所示。电源电压为9伏,用六节一号电池串联供电。它的额定输出功率为0.5瓦,最大可达1.5瓦。

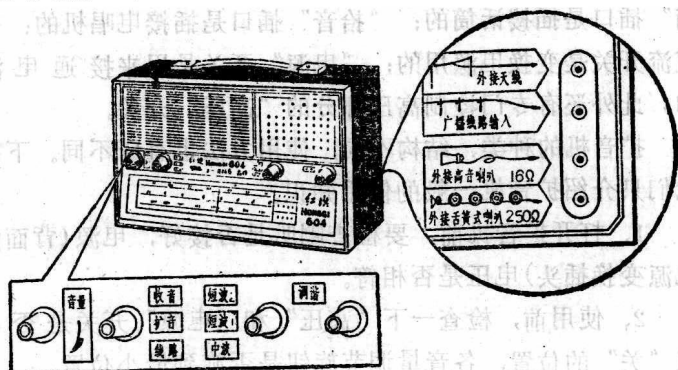


图 14-3

机内有扬声器，供收音用。还可以外接16欧姆的高音喇叭(最好是25瓦的)或者接阻抗为8000-10000欧姆的舌簧喇叭30-40只，当作扩音机使用。如果外接高音喇叭时，可供二、三百人的小型集会使用；接舌簧喇叭时，可供集体单位(如生产队)作小型有线广播用。这时，机内扬声器就可以作为话筒使用。

此外还能作线路接力放大。县广播站信号到达生产队时，由于线路过长，损耗大，用户扬声器不响。这时候可将县广播站的信号送到本机的“线路”插口，进行放大，再送到用户扬声器，声音就会大起来。

收音、扩音及线路接力放大，均由转换开关控制。

红旗604型机，实际上就是一台六管超外差收音机，电路与我们介绍过的六管机差别不大。使用中如果发现故障，可参照本书第540~548页所列的表进行修理。

第二节 扬声器和传声器

一、扬声器

常见的扬声器有舌簧扬声器、压电扬声器、动圈扬声器、高音扬声器等。这些扬声器都是把电能转变为声能的装置，这是它们的“共性”。但由于构造不同，又有各自的“个性”。为了更好地使用扬声器，必须着重了解它们各自的特点。

1、舌簧扬声器

(1) 构造和工作原理 它是农村有线广播中应用相当广泛的一种，构造如图 14-4(a)所示。

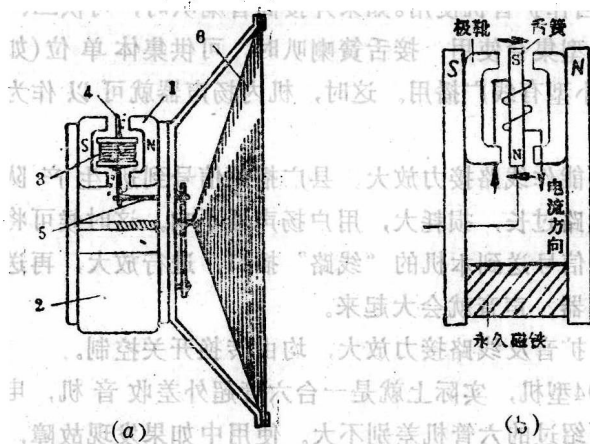


图 14-4

1、极靴；2、永久磁铁；3、线圈；4、舌簧片；5、传动杆；6、纸盆。

极靴 1 被两块铁板连接在永久磁铁 2 上，极靴被磁化后，形成磁场。在极靴中间装嵌着一只线圈 3，在线圈中间装上舌簧片 4，舌簧片通过传动杆 5 和纸盆 6 的锥端相连。

它的工作原理是这样的：音频电流通过线圈时，线圈周围产生磁场，舌簧片被磁化。在某一时刻电流方向如图 14-4(b)所示，舌簧的上端为 S 极，下端为 N 极。在磁场作用下上端向右偏转，下端向左偏转，带动传动杆向里拉纸盆。在另一时刻，舌簧片的上端为 N 极，下端为 S 极，在磁场的作用下，舌簧片的上端向左偏转，下端向右偏转，带动传动杆向外推纸盆。因为音频电流的大小和方向是变化的，所以线圈两端的极性和磁场强度也相应地变化，于是纸盆也就

随着音频电流来回振动而发声。

舌簧喇叭一般规格是：线圈阻抗在8000—10000欧之间（随音频频率而变）；功率为0.1瓦；线圈直流阻抗为1000欧；纸盆直径为200毫米。这种扬声器有灵敏度高、耗电少等优点。

(2) 舌簧扬声器的维修 舌簧扬声器常见的故障有无声、音小和发音沙哑。

舌簧扬声器无声，除了线路上的故障外，往往是线圈断线（霉断或烧断），这时可用万用表测量线圈的直流电阻，如果在1000欧左右，证明是好的，如果表针不动，说明线圈已断。如果没有万用表，可用一节干电池与线圈两引线相碰，如果扬声器发出“咯、咯”声，说明线圈是好的，如果无声，说明线圈已断。

如果是断线，把线圈取出后，边拆边找断头，接好后重新绕上即可；如果绝缘材料损坏很多，或整个线圈已经不能再用，则可用0.08毫米漆包线，仿照原样绕5000匝左右即可。

舌簧扬声器的永久磁铁磁性减弱时，就会出现音小的毛病。检查时，只要拿去和一个好的舌簧扬声器进行比较，即用小螺丝刀分别碰两块磁铁，就能比较出来。如果磁性很弱，只好重换一块磁铁。

舌簧片的位置偏斜，就会引起发声沙哑。这时可将舌簧片连接传动杆的焊点焊脱，把两块厚薄相同的破纸片插在舌簧两边磁极的空隙中，强迫舌簧片恢复到中间位置，焊好后再把纸片抽出来就可以了。

纸盆脱胶或破裂也会使声音发哑。如果是脱胶，可以用小刀刮去铁锈，用胶水粘好；如果纸盆裂缝不大，可用纸条

糊补；倘若破裂严重，就得重换纸盆。重换时，先在纸盆边缘涂上胶水，然后将纸盆放正，从纸盆正中间穿出传动杆，再贴上压框条，扣在桌上，待干后再将传动杆焊牢。

2、压电陶瓷扬声器

它的优点是不用线圈，不用磁铁，可以为国家节省大批铜材和钢材，成本也比较低。

(1) 构造与工作原理

它的构造简单，把圆形压电片和纸盆粘牢，在压电片的两面各焊一条引线，如图14-5所示。

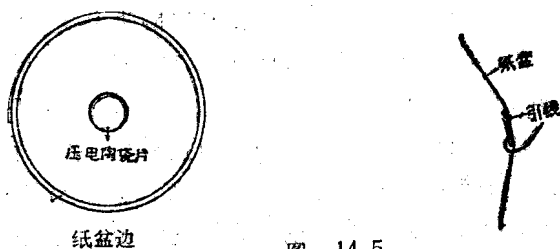


图 14-5

压电陶瓷片是用氧化铅、氧化锆、氧化钛和少量的稀有金属作原料，加进胶合剂，经过混合、轧制、切片、烧结等过程而制成的，所以它叫做锆钛酸铅压电陶瓷片。它具有所谓“压电效应”，即如果把电压加到它上面时，压电片就会发生机械振动；反过来如果给它施加机械压力，使它变形，又会产生出电压来。我们把放大的音频电压加在压电片上，它就会带动纸盆振动，从而发出声音。

压电陶瓷扬声器的规格和舌簧扬声器相似，交流阻抗为8000-10000欧，标称功率为0.1瓦。

(2) 压电陶瓷扬声器的维修

这种扬声器的故障，大多数是压电片破裂。压电片破裂了，可按下面步骤修复。

修理时不必从纸盆上取下压电片，用小刀在压电片前后两面裂口旁边1毫米宽的地方轻轻地刮，使之露出银白色，不能刮得太深，以防刮去镀银层。然后在裂缝外面镀上锡，锡要焊得薄而均匀，牢固可靠。注意不要让焊锡从裂口的这面流到那面，造成压电片短路。

在镀锡或焊接引线时，动作要快，不能把烙铁长时间放在压电片上，以免烫坏。

3、动圈扬声器

它的构造如图14-6所示。主要由环形磁铁1、圆柱形铁芯2、音圈3、纸盆4等组成。音圈先粘在振动网上，然后再和纸

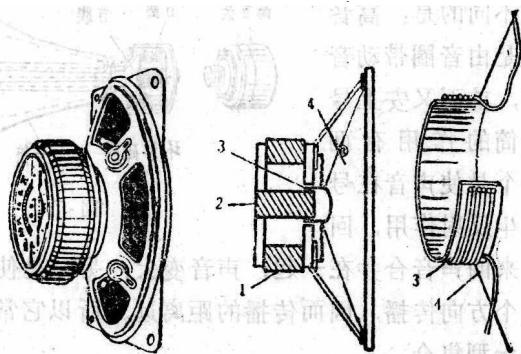


图 14-6

1、环形磁铁；2、圆柱形铁芯；3、音圈；4、纸盆。

盆粘结，纸盆又固定在铁架上。音圈就是绕在圆纸筒上的线圈，它套在圆形铁芯上（但不接触）。音圈处在环形磁铁的磁场中，当音频电流流过音圈时，音圈就会在磁场作用下运

动。纸盆是和音圈连在一起的，所以纸盆也随音频电流的变化而振动，发出声音。

这种扬声器功率大，音质较好，但因为阻抗小，不能直接连在有线广播线路中使用，使用时，要接变压器。

动圈扬声器按纸盆口径大小分为65毫米、100毫米、130毫米、165毫米、200毫米、250毫米、300毫米等多种，标称功率也随纸盆口径增加而增大。

4、高音扬声器

(1) 结构和工作原理

它由高音头和号筒两部分组成，如图14-7所示。高音头又由环形磁铁、音圈和音膜组成。高音扬声器的工作原理基本上与动圈扬声器相同，所不同的是：高音扬声器是由音圈带动音膜发声，前面又安上号筒。号筒的作用有两个，一个是使声音在号筒里发生反射作用，回声和原来的声音合并在一起，声音变大；另一是使声音集中地向一个方向传播，因而传播的距离远。所以它常用于田间广播或大型集会。

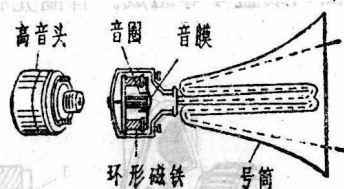


图 14-7

高音扬声器按标称功率可分为5瓦4欧、10瓦8欧、12.5瓦8欧、25瓦16欧等几种。

(2) 高音扬声器的维修

高音扬声器的主要故障是无声、音轻和有杂音。

无声故障，可能是音圈断线。用万用表的 $R \times 1$ 档测量

音圈的两个接线柱，如果表针有指数而且有“咯、咯”声，说明音圈是好的；如果表针不动，又没有声音，则说明音圈断线或引线断线。音圈损坏，只要用同一型号的音圈换上即可。

音轻故障，多半是音圈被卡住或线圈脱胶及磁铁磁性减弱所致。

音圈位置不正，振动时与磁铁相碰，就会产生杂音，这时可拆下高音头，把音圈放正。

二、传声器

传声器俗称话筒，其种类很多，常见的有炭粒式、动圈式、铝带式、晶体式几种。目前使用得最广的是动圈式传声器。

1、动圈式传声器

(1) 构造与工作原理

动圈式传声器如图14-8所示，由永久磁铁、膜片、线圈

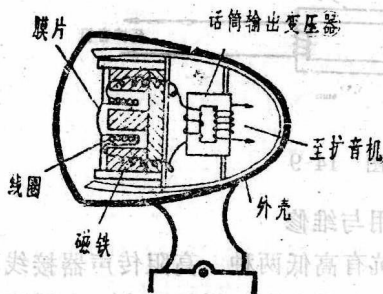


图 14-8

和输出变压器等几部分组成。它的前面是一块膜片，过去是用铝箔做成的，现在多采用塑料来做。膜片上粘有一个用很细的漆包线绕成的线圈，膜片和线圈组成了传声器的振动部分，叫做音膜。音

膜线圈套在永久磁铁的圆柱形铁芯上（但不接触），两条引线接在传声器输出变压器的初级上，输出变压器的次级通过引线、插头接扩音机。

当我们对着传声器讲话时，声波作用于膜片引起振动。线圈在磁场中运动，就会产生随着声音变化的音频电压，经过变压器升压后的音频信号再送到扩音机进行放大。这就是传声器把声能转变成电能的过程。扬声器是把电能变成声能的装置，传声器与扬声器正好是一对矛盾，矛盾是可以转化的，例如扬声器可以转化为传声器，只要把一个动圈扬声器不是通以音频电流让它发声，而是让声波迫使纸盆振动，纸盆便带动音圈在磁场中振动，音圈中就会产生音频电压。再用一个升压变压器升压，这就成了一个动圈式传声器。实际上，如果临时缺少传声器，就可以用上述办法，把一只 3.5Ω 的动圈扬声器接在 6P1 输出变压器的次级（3.5欧）上，初级接上插头，如图 14-9 所示，就组成一个传声器。

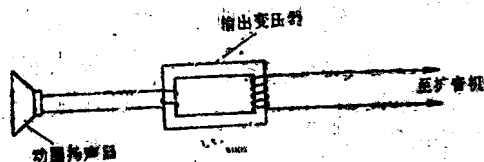


图 14-9

(2) 动圈传声器的使用与维修

动圈传声器的输出阻抗有高低两种。高阻传声器接线不要超过10米，过长容易引起各种杂音并增加失真。在需要较长的接线时，可采用低阻传声器，但不宜超过50米。

传声器膜片又轻又薄，经不起强烈振动，并且要避免潮湿、高温。在使用时不要对它拍打和吹气。

动圈传声器的故障，主要有无声、音小和断续的“卡、卡”声等。

传声器无声，往往是插头和插口接触不好，接线断路或短路等原因造成的。插头与插口接触不好，可以校正插口簧片的位置来加以排除。接线断路或短路，可用万用表测量：如果测两根接线所得电阻是零，证明接线或插头有短路处；如果测得电阻为无穷大，说明接线或变压器有断线的地方。对于低阻传声器，测得的电阻为50—200欧，高阻传声器电阻为500—1500欧，则说明接线和变压器都正常。如果在这种情况下话筒仍然无声，那就是音圈断线或脱焊了。

音圈断线必须换新的。换音圈时，先把旧音膜拆掉，校正铁芯位置，把万能胶水涂到音膜的圆垫圈上，再把音膜轻轻地放进铁芯空隙，校正位置，使音圈不被卡住，等胶水干后，再把音圈引线焊在输出变压器的初级上。

如果音膜中心向下凹、弹性不好，就会出现音小故障，倘若校正无效，就得换一只新的。

如果音圈与磁铁相碰或某处行将断线，就会出现“卡、卡”声，这时需要校正音膜的位置并接好断线。

2、晶体管传声器

在农村进行文艺演出时，舞台扩音如果用普通动圈传声器，效果一般不好。因为动圈传声器方向性强，在它的侧面的音响不能被很好地放大。另外灵敏度不高，距传声器2米以外，也不能很好地放大。此外引线过长还容易引起啸叫。

为了克服上述缺点，可以在图14-9所示装置的基础上，

加装1只晶体低频三极管，组成一个舞台传声器，如图14-10所示。

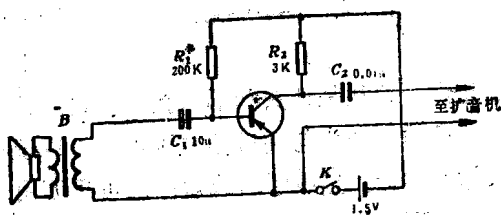


图 14-10

图中B也可以用晶体管收音机用的小型变压器，三极管可采用3AX1或其它型号的低频管。调整偏流电阻 R_1 ，达到音量最大，音质较好为止。这实际上是把传声器输出音频信号，经过三极管进行一次放大，再送到扩音机，因此灵敏度显著增加。用这种扬声器代替传声器，方向性减弱了。把整个装置装入一个木盒，在放扬声器处开一个圆孔，让纸盆露出，并且使圆孔朝下悬在舞台上空，就成了一个比较理想的舞台传声器。如果还嫌灵敏度不够，可以再加一级低频放大，如图14-11所示。此时扬声器可用65毫米8欧小型扬声器。当开会使用的时候，可将另外的传声器从插口J插入，

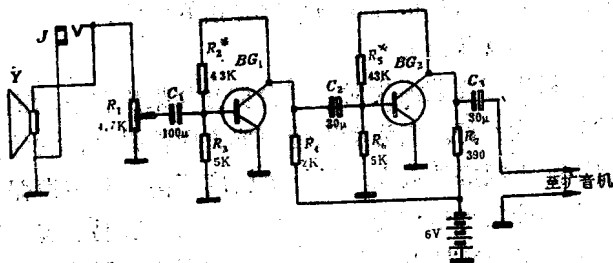


图 14-11

不用扬声器，只用其放大部分。

第三节 唱 机

一、唱机的构造

唱机主要由拾音器、唱盘和电动机三部分组成。

1、拾音器

拾音器俗称唱头，它是把机械能转变成电能的装置，分为磁电式和晶体式两种。晶体式比较轻巧，使用方便，现在被广泛采用。

晶体式拾音器结构如图 14-12 所示。

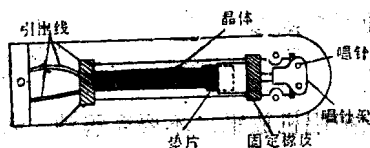


图 14-12

它主要由一块具有压电效应的酒石酸钾钠晶体，一端被固定夹牢，另一端与唱针相连。当唱针在唱片上摆动时，晶体因扭转而变形，于是在晶体的两个极上就产生相应的交变电压，从而完成了能量转换的过程。晶体所产生的音频电压通过引线送到扩音机进行放大，就会发出声音。

2、唱盘

它是用金属或胶木做成的圆盘，中间有一个圆孔，用来

套在支承轴上托住唱片。它的里边与一个胶轮靠紧，当电动机带动胶轮转动时，唱盘也跟着转动。

3、电动机

它是唱机的动力部分。唱机中使用的是小型单相交流电动机，按照工作原理不同，分为同步式和异步式两种。异步式中又分为罩极式和电容式两种。比较常见的是罩极式异步电动机。

现在常见的唱机多是四速唱机，如 206 型等。在电动机的转动轴上装有宝塔轴，宝塔轴上共有四个不同的轴径，当轴径大的靠紧胶轮时，唱盘就转得快，当轴径小的靠紧胶轮时，唱盘就转得慢。改变胶轮与宝塔轴的位置（扳动调速旋钮），可以得到 78 转/分、45 转/分、 $33\frac{1}{3}$ 转/分、 $16\frac{2}{3}$ 转/分四种转速。

二、唱机的使用与维修

(1) 使用方法

使用时，应该把唱机放平，不要受震动，否则就会使唱针发生跳动而产生杂音和失真，甚至划破唱片，震坏唱针。

和使用其它电气设备一样，要注意电源变换插头接得对不对，否则会烧坏电动机。

唱机的转速要跟唱片要求的转速一致。唱针也要根据唱片是粗纹还是密纹来选择粗纹唱针（绿色标志）和密纹唱针（红色标志）。

唱机转动部分要保持清洁，使用 600 小时后，要加缝纫机用的润滑油。

唱机不用时要把调速旋钮转到“0”位，使胶轮与塔轴

脱离接触，以免长期受压变形。

(2) 唱机的检修

唱机故障表现在电气和机械两个方面。故障情形如下：

无声 拾音器损坏或输出线（包括插头）断路或短路时，就会出现无声故障。拾音器损坏时，一般得更换。

发音不正常 拾音器损坏、唱片质量不好或转速不均匀以及唱头臂重量不均衡等，都会造成发音不正常。

唱片转速不均匀 电动机轴承松旷或胶轮变形，都会使转速不匀。这时只有换新的。

三、109型三用两速唱机

上面所讲的唱机，拾音器输出的音频电压很小，须经收音机或扩音机放大后，才能发出声音，所以它不能单独使用。

中华 109 型三用两速唱机，既可以放唱片，又可以收听广播，如果外接一个 25 瓦高音喇叭，可供 500 人左右集会使用；还可以用它带 30 只舌簧喇叭，来建一个小型广播站。唱机是用发条带动的，拾音器是晶体式的。

用它做小型有线广播时，把外接喇叭的开关扳到“外接”的位置上，这时机内扬声器自行断开。此时，话筒输出的音频信号，经过放大，送入外接扬声器发出声音。如果用 25 瓦的高音扬声器，可接在 0 与 16 欧两接线柱间，如果用舌簧扬声器，可接在 0 与 400 欧两接线柱间，即可工作（话筒最好用低阻动圈话筒）。

放唱片时，先把发条按顺时针方向摇 80 圈左右，然后把

唱盘开关扳到“转”的位置，在唱盘转开后，再按要求选择转速。

第四节 扩音器和扬声器的配接

农村有线广播，一般分县（旗）、公社、生产队三级。后一级可以转播前一级的节目，也可以自己进行广播。图14-13就是农村有线广播网的示意图。

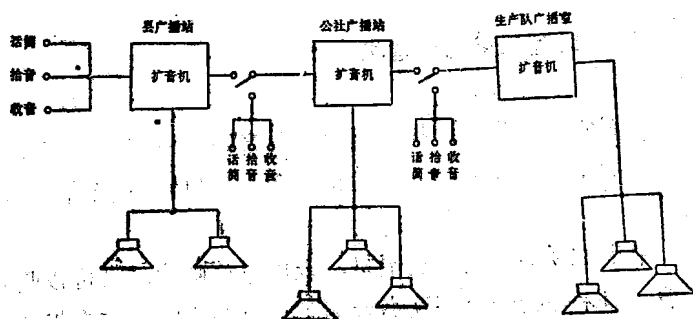


图 14-13

县广播站的线路要通往县内各公社，这里只画出一个公社。同样一个公社广播站的线路也要通往各生产队，这里也只画出一个生产队。这自然会提出一些问题：一个生产队要做到户户有扬声器，需要多大的扩音机？如何把扬声器接在扩音机上？一个公社要用多大的扩音机……等等。总之，要解决扩音与扬声器间如何连接的问题。

我们知道，负载与电源连接时，必须符合一定的条件，

即电源电压必须和负载的额定电压一致。例如 220 伏特的灯泡接在 380 伏电源上要烧毁，接在 110 伏电源上就发暗，只有接在 220 伏电源上才能正常发光。此外，负载消耗的总功率，不能超过电源的功率。例如，一台 2 千伏安的变压器，只能接 25 瓦灯泡 80 个，如果超过此数，灯泡消耗的总功率就会超过 2 千伏安，可能烧毁变压器。综上所述，负载与电源连接，必须考虑它们在电压与功率方面互相配合，才能保证正常工作。对于扩音机来说，它输出的电能供给扬声器，扬声器是负载，而扩音机就相当于一个电源。因此，它们之间也存在着电压、功率的配合问题。这种配合就叫做配接或匹配。

扩音机的输出形式，有定阻式和定压式两种。所谓定阻输出就是扩音机输出端（变压器次级的输出）阻抗是不变的。输出阻抗的大小标在输出接线板上，如图 14-14 (a) 所示。

所谓定压式输出，就是扩音机的输出电压是固定不变的。我国定压式扩音机输出电压一般是 120 伏和 240 伏两种，它也直接标在背面的接线板上，如图 14-14 (b) 所示。

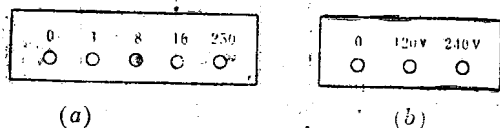


图 14-14

输出形式不同，配接方法也不同，下面我们分别叙述这两种配接方法。

一、定阻配接

1、配接原则 定阻式扩音机与扬声器配接必须同时符合两个原则：

(1) 功率匹配 扬声器的总功率应等于或接近于扩音机的额定输出功率，同时分配到每一个扬声器上的功率应等于或接近扬声器的额定功率。

(2) 阻抗匹配 扬声器的总阻抗与所接扩音机的输出阻抗相等或接近。

2、配接方法

(1) 直接配接

〔例1〕 一台20瓦扩音机与两只10瓦8欧扬声器如何配接？

解 扬声器总功率与扩音机总功率相等，都是20瓦。扬声器负载阻抗的计算与导体串、并联电阻计算相同。如果两只扬声器串联，总阻抗是 $8+8=16$ 欧，可以接在扩音机输出端0-16两接线柱上，如图14-15所示。

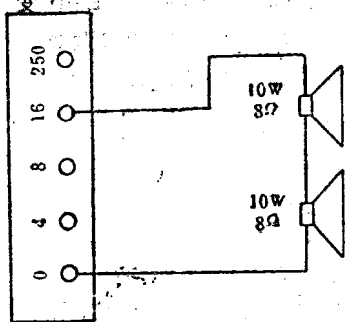


图 14-15

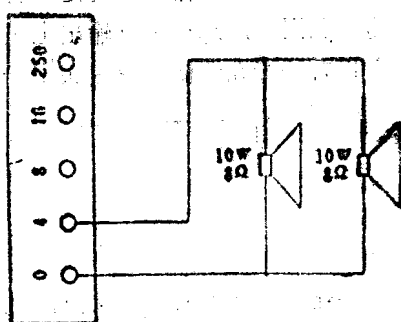


图 14-16

如果两只扬声器并联，那么总阻抗就是4欧。可以接在

扩音机输出端 0-4 欧两接线柱间，如图 14-16 所示。

〔例2〕 一台40瓦扩音机与两只10瓦8欧的扬声器应如何连接？

解 扬声器的总功率为20瓦，与扩音机输出功率相差很大。因此，还必须用电阻来消耗20瓦功率，否则这20瓦功率就消耗在扩音机本身，引起过热，损坏机器。这种电阻器叫做“假负荷”。两只扬声器串联后总阻为16欧，接入的电阻也应为16欧，然后把它们并联。并联后的阻抗为8欧，接在扩音机的相应输出端，如图 14-17 所示。两条支路的阻抗相

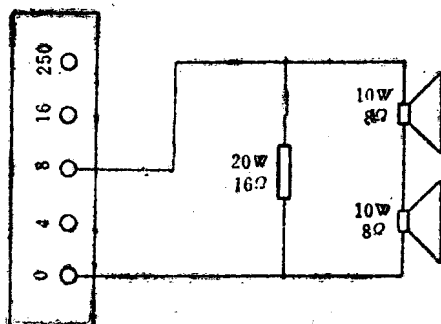


图 14-17

同，各得输出功率的一半，即20瓦；每只扬声器又各得一支路功率的一半，即10瓦。于是既得到阻抗匹配，又得到功率的匹配。

〔例3〕 一台40瓦扩音机，使用15瓦16欧、25瓦16欧扬声器各一只，应该怎样配接？

解 扬声器的总功率为 $25+15=40$ 瓦，正好和扩音机输出功率相等。但这两只扬声是不同规格的（功率不同），所以不能象前面那样简单地进行串联或并联。倘若把它们并联

后接到扩音机的0-8处欧，如图14-18所示，当然，阻抗是匹配的，可是每只扬声器所得到的功率却不正确，这可以从下面的计算中看出：

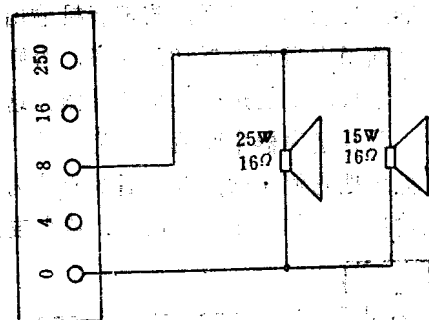


图 14-18

先算出在扩音机的0-8欧两接柱间的输出电压。

根据
$$P = \frac{U^2}{Z},$$

得出
$$U^2 = P \cdot Z,$$

$$U = \sqrt{P \cdot Z} = \sqrt{40 \times 8} \approx 17.6 \text{ (伏)}.$$

这就是加在扬声器两端的电压。进一步看每只扬声器上分配到的功率。

25瓦扬声器上分得的功率数

$$P_{25} = \frac{U^2}{Z_{25}} = \frac{40 \times 8}{16} = 20 \text{ (瓦)},$$

即分得的功率不足。

显然，15瓦扬声器上分得的功率数也是

$$P_{15} = \frac{U^2}{Z_{15}} = \frac{40 \times 8}{16} = 20 \text{ (瓦)},$$

超过了它的额定功率，这会烧毁音圈。所以这种连接方法是错误的。应该这样来考虑：一只25瓦(或15瓦)扬声器要分得应有的功率，应该接在阻抗多少的输出端上。这里我们先讨论一般规律。设扩音机输出功率为 $P_{扩}$ 、输出电压为 $U_{扩}$ 、输出阻抗为 $Z_{扩}$ ，则

$$P_{扩} = \frac{U_{扩}^2}{Z_{扩}}, \quad (14-1)$$

如果扬声器的额定功率为 $P_{扬}$ 、阻抗为 $Z_{扬}$ ，则有下列关系：

$$P_{扬} = \frac{U_{扬}^2}{Z_{扬}}, \quad (14-2)$$

这里的 $U_{扬}$ 就是扩音机的输出的电压 $U_{扩}$ ，即 $U_{扩} = U_{扬}$ ，所以

$$P_{扩} \cdot Z_{扩} = P_{扬} \cdot Z_{扬}, \quad (14-3)$$

式中 $P_{扬}$ 、 $P_{扩}$ 、 $Z_{扬}$ 均是已知的，只有扬声器准备接入的接线柱间的阻抗 $Z_{扩}$ 是未知数，于是，可根据下式计算出 $Z_{扩}$ 的值数：

$$Z_{扩} = \frac{P_{扬}}{P_{扩}} \times Z_{扬}. \quad (14-4)$$

即 扩音机应接的阻抗 = $\frac{\text{扬声器的额定功率}}{\text{扩音机的额定输出功率}} \times \text{扬声器的阻抗}。$

这个公式的正确性，可以用前面的两个例题进行验证。回过头来，我们再应用这个公式解决例3中提出的问题。25瓦16欧的扬声器应接阻抗为：

$$\frac{25}{40} \times 16 = 10 (\text{欧})$$

51瓦16欧扬声器应该阻抗为：

$$\frac{15}{40} \times 16 = 6 \text{ (欧)}。$$

因为扩音机输出端没有10欧与6欧的接线柱，就得分别接在与算得数值接近的0-8及0-4欧的接线柱上，如图 14-16 所示。这种接法只能临时使用。

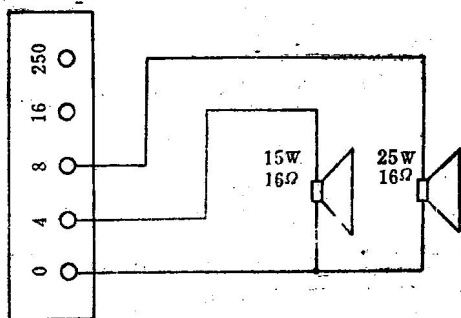


图 14-19

(2) 间接匹配

扬声器数量较多，而且各扬声器的功率阻抗都不相同，线路又比较长(直接匹配损耗大)的情况下，扩音机和扬声器的配接就要通过线间变压器(图 14-20)来实现。线间变压器的作用如前面讲过的配电变压器，它的初级阻抗(或电压)与扩音机配合，次级阻抗(或电压)与扬声器配合，同时又起到传输功率的作用。

选用线间变压器必须跟扬声

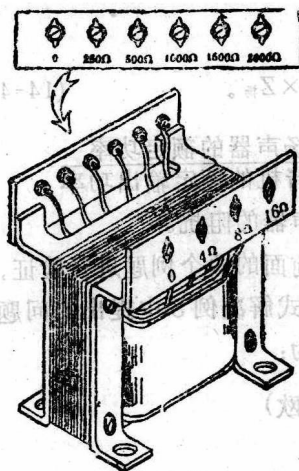


图 14-20

器的额定功率相符合，不能小于扬声器的功率。否则会烧毁线间变压器。

〔例4〕 一台40瓦扩音机，用250欧高阻输出，带动25瓦16欧、10瓦8欧和5瓦8欧扬声器各一只，应如何配接？

解 三只扬声的总功率为

$$25+10+5=40(\text{瓦}),$$

与扩音机输出功率相同。倘若把它们直接接在250 Ω 的输出端上，就会被烧毁。因此，每只扬声器必须配用一个和它功率相同的线间变压器，进行配接。

前面提到，线间变压器的次级必须和扬声器配合，这一点容易作到，只需把每只扬声器接到变压器次级上和它阻抗相同的抽头上就行了。这里着重讨论的是线间变压器的初级和扩音机间的配合问题。

这里，扩音机所输出的电压 U_F ，就是加在线间变压器的初级上的电压 U_1 ，因此，每只线间变压器的待接阻抗 Z_1 ，就是

$$\frac{\text{扩音机的输出功率}}{\text{线间变压器的功率}} \times \text{扩音机的输出阻抗},$$

(参考例3)。

而线间变压器的功率应该等于扬声器的功率，所以

$$Z_1 = \frac{P_F}{P_{\text{扬}}} \cdot Z_F. \quad (14-5)$$

对于25瓦的线间变压器，其初级阻抗为

$$\frac{40 \times 250}{25} = 400(\text{欧}).$$

(因为没有400欧姆的抽头，可以近似地使用500欧姆抽头)。同理，10瓦线间变压器的初级阻抗为

$$\frac{40 \times 250}{10} = 1000 (\text{欧})。$$

5 瓦线间变压器的初级阻抗为

$$\frac{40 \times 250}{5} = 2000 (\text{欧})。$$

整个配接方法，如图 14-21 所示。

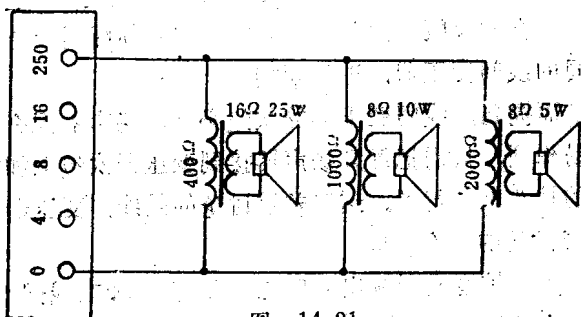


图 14-21

定阻式扩音机的输出阻抗，有低阻与高阻两部分，低阻部分(32Ω 以下)可供直接配接；高阻部分(100Ω 以上)供使用线间变压器配接用。

二、定压配接

定压输出扩音机里，采用了深度负反馈，当负载变化，比如多接或取出一些扬声器时，输出电压变化很小，或几乎不变，所以输出电压稳定。因此，这种扩音机，不用考虑阻抗匹配，也不用接假负载，只要所用的扬声器总功率不超过扩音机的额定输出功率就行。

前面提到定压式扩音机输出的电压，一般为120伏或240伏，而一般扬声器的工作电压都很低，因此，必须通过线间变压器才能配接。线间变压器的初级所标明的电压，应与扩音机输出的电压相同；次级的电压应与扬声器的工作电压相同。扬声器的工作电压，虽然没有直接给出，但是我们可以象例3那样由公式 $U^2=P \cdot Z$ 即 $U=\sqrt{P \cdot Z}$ 求出。另外，线间变压器的额定功率不能小于扬声器的总功率。

〔例5〕某公社有一台250瓦定压式扩音机，用120伏电压输送到四个生产大队，每个大队用舌簧扬声器400只，每只舌簧扬声器为0.1瓦9000欧，公社所在地装一只25瓦16欧的高音扬声器，应如何配接？

解 扬声器的总功率为

$$P=4 \times 400 \times 0.1 + 25 = 185 (\text{瓦}).$$

(不超过扩音机的输出功率)。

每个生产大队的扬声器总功率为 $400 \times 0.1 = 40$ (瓦)，所以每个生产大队各应选用40瓦的线间变压器。

又因舌簧扬声器的工作电压为

$$U = \sqrt{P_{\text{舌}} \cdot Z_{\text{舌}}} = \sqrt{0.1 \times 9000} = 30 (\text{伏}).$$

所以，舌簧扬声器应选用的线间变压器，初级取120伏，次级取30伏，各舌簧扬声器均并联连接在30伏电压下工作。

25瓦扬声器的配接，有两种方法，一是按用25瓦定阻式线间变压器配接，这只要算出线间变压器初级的哪个抽头工作电压与120伏接近即可，这里不再叙述；另一种方法是用一只30瓦定压式线间变压器照图14-22所示的方法连接即可。

从扩音机容量上看，150瓦以上的大、中型扩音机，常采用定压式输出；150瓦以下的通常采用定阻式输出。从负

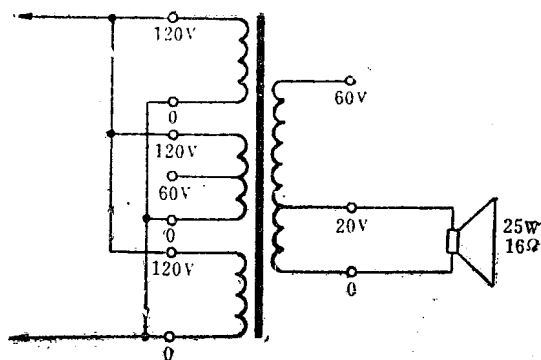


图 14-22

载情况看,负载变动较大的,应该采用定压式输出的扩音机;负载变动较小的,可以采用定阻式输出的扩音机。公社广播站,负载变化很大,因为生产大队和生产队的扬声器,有时需要和公社广播站的线路分开,自己进行广播,或者社员家里通过开关来自行控制,所以不能用定阻输出式扩音机。生产大队、生产队、机关、学校等范围较小,负载变动也小的广播室,可用定阻输出式扩音机。

第五节 广播线路及其维护

广播线路同广播设备一样,是有线广播的重要组成部分。它把人民公社的千家万户联成一片,受到贫下中农热情地赞颂。掌握广播线路的情况,学习广播线路的维护知识,就能更好地办好广播,为人民服务。广大知识青年在这项工作中

做出了积极的贡献。有的还认真总结经验，提出一些有益的建议，例如在《无线电》杂志上就载有知识青年的文章。

一、广播线路

广播线路根据用途不同，分为节目信号线路、馈电线路和用户线路三种。

节目信号线路是县广播站和公社广播站之间传送广播节目用的，为了节省线路投资，多用电话线来代替。县城到公社的电话线一般都采用双线，电话和广播用一双向闸刀开关进行控制。

从公社广播站到用户线间变压器这段线路，称为馈电线路。馈电线路也可以用从公社到生产队的电话线来代替。因为公社到生产队间的电话线多数采用单线，所以馈电线路一根用电话线，另一根导线则用大地来代替，并且用一单刀双向开关来控制。

从线间变压器到用户扬声器这段线路称为用户线路，在这段线路上电压较低，可以直接挂接扬声器。用户线路采用单线。整个有线广播线路如图 14-23 所示。

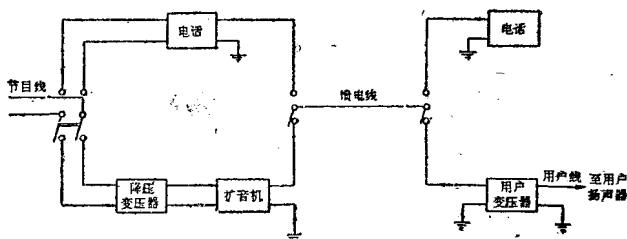


图 14-23

二、广播线路的维护

广播线路采用的铅丝（镀锌的铁丝）是裸线，直接碰到外物的机会多，如树木、墙壁、植物等，往往会造成漏电，使扬声器的音量减小。遇有这种情况，应该设法排除。

广播线时刻和空气接触，风吹雨淋，很容易使它生锈。生锈后的广播线受到外力容易断裂。断线以后部分扬声器不响。

如果广播线与电源线相碰，或者遭到雷击，线间变压器和扬声器均会烧毁。所以在架设、调整线路时，都要注意尽量避开电源线，并且要安装避雷器。

第四篇 光及原子物理简介

第十五章 光的基础知识

光和我们的日常生活有密切的关系。光经过物体的表面反射以后，传到我们的眼睛，使我们得以认识周围的事物，此外，我们还可以借助光和光学仪器的帮助，观察广阔的星际宇宙以及认识物体的微小结构。我们将在本章内向大家简单地介绍光的传播规律以及几种常见光学仪器的工作原理。最后，通过光的干涉和衍射现象的介绍来说明光的波动性，通过光电效应得出光的粒子性，由此认识光是一种具有电磁本质的物质，它既具有波动的性质，又具有微粒的性质。

第一节 光的几何传播

一、光的直线传播

自己能够发光的物体叫做光源。如：太阳、电灯、蜡烛等等。有些物体虽然很明亮但本身并不发光，这样的物体不是光源。如：月亮、反光镜等等。

从光源发出的光，在传播过程中会遇到各种物质，我们

把光能通过的物质叫做光的媒质，如：空气、水和玻璃。除此以外，光在没有物质的空间——真空中，也是能够传播的。

光在不同媒质中的传播速度是不相同的。光在真空中的传播速度最大，其值为 $C=3\times 10^5$ 公里/秒。光在水中的传播速度是光在真空中传播速度的 $\frac{3}{4}$ 。而光在大气里的传播速度与在

真空中的传播速度近似相等。为了研究光在媒质里传播的情况，在两种媒质相比较时，把光在其中传播速度较大的，称为光疏媒质；光在其中传播速度较小的，称为光密媒质。

在同一种均匀媒质中，光是直线传播的。所以，我们通常将光称为光线。木工师傅就是利用光的直线传播来检验木板是否平直的。

二、光的反射

光在同一种均匀媒质里是直线传播的。但是，当光从一种媒质射入另一种媒质，或者，虽然在同种媒质但媒质本身是不均匀、不纯净的（例如媒质本身的密度有变化、或存在其他物质微粒），这时候光的传播方向就要改变。例如光从空气向水中射入时，有一部分光在空气与水的界面上改变了原来的方向，回到空气里继续传播。我们把光射到两种媒质界面时，有一部分光改变了传播方向而返回到原来媒质中的现象，叫做光的反射。

我们把射到界面上的光线叫做入射光线（图15-1），入射光线和媒质界面的交点O，叫做入射点，过入射点并与媒质界面垂直的直线NON'叫做法线，入射光线与法线的夹角 α 叫入射角；从界面上返回到原来媒质的光线，叫做反射光

线，反射光线与法线的夹角 b 叫反射角。

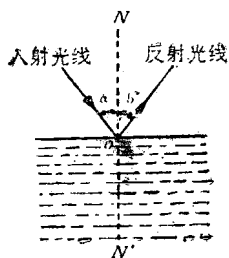


图 15-1

实验证明：（1）反射光线总是在入射光线和法线所决定的平面内，并且与入射光线分居在法线的两侧；

（2）反射角等于入射角。

这就是光的反射定律。

光线沿 AO 入射时(图15-2)沿 OB 反射；由光的反射定律不难看出：当媒质不变，光线若从 BO 入射则反射光线必定与 AO 重合。这就是说，反射现象里，光路是可逆的。

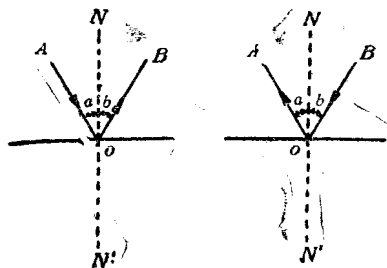


图 15-2

三、光的折射

光射到两种媒质界面上，有一部分光被反射回原来的媒质继续传播；另一部分光改变了原来的传播方向，进入另一种媒质里传播。实验表明：当光垂直入射到两种媒质界面上，进入另外一种媒质的光线传播方向并不发生改变，只有当光斜射到两种媒质界面上时，进入另一种媒质的光才改变其传播方向。例如：一支筷子斜插入水里，从外面看去，好象

筷子在水面处被折断了(图15-3a)。但若将筷子垂直水面插入水里, 筷子露在水面外的半截和水中的半截仍然是一条直线(图15-3b)。

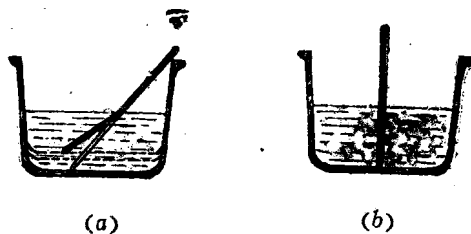


图 15-3

我们把光线从一种媒质斜射入另一种媒质时, 传播方向发生改变的现象称为光的折射。

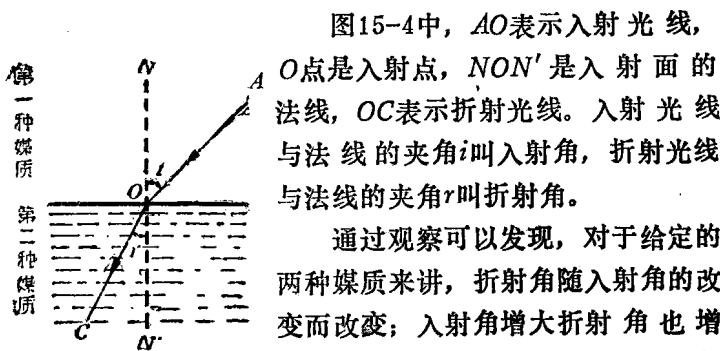


图 15-4

图15-4中, AO 表示入射光线, O 点是入射点, NON' 是入射面的法线, OC 表示折射光线。入射光线与法线的夹角 i 叫入射角, 折射光线与法线的夹角 r 叫折射角。

通过观察可以发现, 对于给定的两种媒质来讲, 折射角随入射角的变化而改变; 入射角增大折射角也增大, 入射角减小折射角也减小。人们

经过长期的实验, 总结出了光的折射定律:

(1) 折射光线总是在入射光线和法线所决定的平面里, 并且与入射光线分居在法线的两侧。

(2) 不管入射角怎样改变, 入射角的正弦与折射角正弦的比, 对于所给定的两种媒质来说, 总是一个常数。

四、相对折射率与绝对折射率

光线从第一种媒质斜射入第二种媒质时，入射角的正弦与折射角正弦的比，对于所给定的两种媒质来讲，是一个常数，这个常数就叫做第二种媒质对于第一种媒质的相对折射率，用 n_{21} 表示：

$$n_{21} = \frac{\sin i}{\sin r}. \quad (15-1)$$

相对折射率 n_{21} 在数值上等于光在第一种媒质里的传播速度 V_1 与光在第二种媒质里的传播速度 V_2 之比，即

$$n_{21} = \frac{V_1}{V_2}. \quad (15-2)$$

如果光从真空斜入射到某种媒质里，那么媒质对真空的相对折射率 n 在数值上等于真空中光速 C 与光在媒质里的传播速度 V 的比，即

$$n = \frac{C}{V}. \quad (15-3)$$

我们把媒质对于真空的折射率 n ，叫做这种媒质的绝对折射率，简称为媒质的折射率。

表 15-1 几种媒质的折射率

固 体	折 射 率	液 体	折 射 率	气 体	折 射 率
金 刚 石	2.42	甘 油	1.47	水 蒸 汽	1.026
重火石玻璃	1.74	酒 精	1.36	氢 气	1.015
二 硫 化 碳	1.62	乙 醚	1.35	空 气	1.0003
岩 盐	1.54	水	1.33		
水 晶	1.54				
轻冕牌玻璃	1.52				
冰	1.31				

光在任何媒质里的传播速度 V 都比真空中光速 C 小，所以任何媒质的折射率都大于 1。因为光在空气中的传播速度与真空中光速可以近似地看成相等，所以我们通常把媒质对于空气的折射率当做这种媒质的绝对折射率。

通过数学推导

的方法可以得到：
对于所给定的两种媒质来讲，相对折射率与媒质的绝对折射率的关系为：

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (15-4)$$

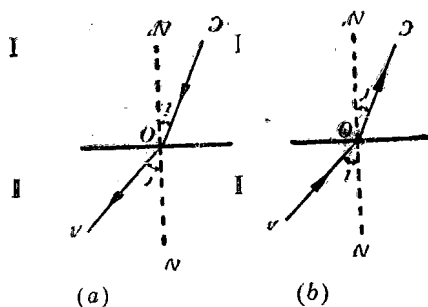


图 15-5

光从媒质 I 斜入射媒质 II 时(图 15-5a), AO 为入射线, OC 为折射线。若两种媒质不变, 而光从媒质 II 斜入射媒质 I (图 15-5b), CO 为入射线而 AO 为折射线, 此时:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{12} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{n_{21}}.$$

由此可知：折射现象中，光路也是可逆的。

五、全反射现象

进一步观察光的折射现象，便可以发现：当光从光疏媒质斜入射到光密媒质时，光线总是靠近法线折射，即折射角 r 小于入射角 i (图 15-6a)；而光从光密媒质斜入射到光疏媒质时，光线总是远离法线折射，即折射角 r 大于入射角 i (图 15-6b)。这样，当光从光密媒质射入光疏媒质时，就会出现这样一种

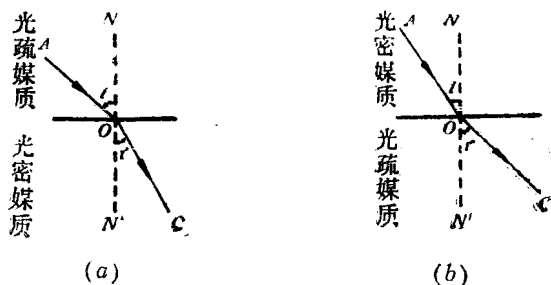


图 15-6

情况：入射角增大，折射角也随着增大；但是，当入射角增大到某一角度时，折射角就成为 90° ，这时的入射角以及入射角再增加，光线都完全不进入到光疏媒质而全部返回到光密媒质里去，这种现象叫做光的全反射。

在全反射现象中，折射角为 90° 时的入射角，叫做临界角。

综上所述，光在两种媒质中传播而发生全反射现象的必要条件是：

- 1、光必定是从光密媒质斜入射光疏媒质。
- 2、入射角 $\geq$ 临界角。

第二节 光学器件

一、平行透明板 棱镜

1、平行透明板：两个表面是平行平面的透明体叫做平行透明板。如平面玻璃、玻璃砖等就属于平行透明板一类的。

光从平行透明板的一个侧面斜射进去时，发生一次折

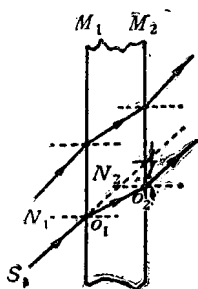


图 15-7

射，从透明板射出来的时候，又发生一次折射。两次折射（图15-7）的结果表明：光线穿过平行透明板后，方向没有改变，只是向侧面平移了一段距离 l 、透明板越薄，平移的距离也越小。对同一透明板来讲，平移的距离与入射角有关。

2、棱镜：主截面*为多边形的透明体叫做棱镜。这里只讲主截面为三角形的棱镜——三棱镜的作用。

光线从棱镜的一个侧面射入，经媒质分界面 AB 和 AC 发生两次折射（图15-8）。我们把光线进、出的两个侧面叫做棱镜的折射面，两折射面的夹角叫做顶角或折射棱角，顶角所对的面，叫做底面。棱镜的折射面、顶角、底面不是固定不变的。

我们来研究空气中的光通过三棱镜时光路的特点。

如图15-8，光从空气射入棱镜（玻璃），又由棱镜射出回到空气里。相比较而言，光是从光疏媒质射入光密媒质，然后再由光密媒质

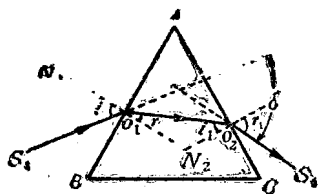


图 15-8

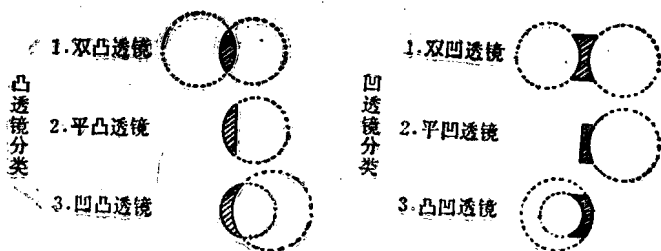
射出回到光疏媒质。所以，光线在 AB 面发生折射时折射角 $r < \text{入射角 } i$ ，折射光线向法线 $N_1 O_1$ 靠拢而偏向底面；光线在 AC 面发生折射时，折射角 $r_1 > \text{入射角 } i_1$ ，折射光线远离法线 $N_2 O_2$ 而再次偏向底面。光线通过三棱镜后，由于两

* 跟棱镜的棱垂直的截面叫做主截面。

次偏向底面折射的结果，光线传播的方向发生了明显的改变，入射棱镜的光线 S_1O_1 与射出棱镜的光线 O_2S_2 之间形成了一个夹角 δ ，这个角叫做偏向角。偏向角越大，说明光线通过棱镜后方向改变得越大。

二、透镜及其分类

折射面是球面，或者一面是球面而另一面是平面的透明体称为透镜。中央比边缘厚的透镜，称为凸透镜，中央比边缘薄的透镜，称为凹透镜。凸透镜和凹透镜可以归纳分类如下：



一个透镜的中央厚度（透镜两球面中心点间的距离，如图15-9中的 O_1 和 O_2 ），如果比两个球面半径小很多，这样的透镜就叫做薄透镜。我们所要讨论的都是薄透镜。

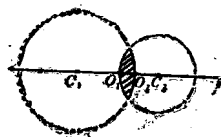


图 15-9

三、透镜的几个概念

薄透镜两球面中心点离得很近，可以近似地看成是重合

成为一个点 O ，凡是通过 O 点的光线，都不改变传播方向且不发生侧向位移，这一点 O 叫做透镜的光心。

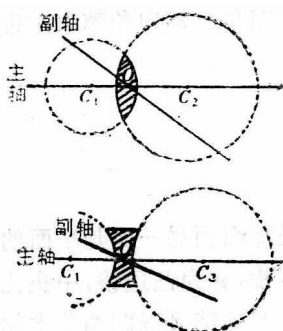


图 15-10

通过光心的直线叫做透镜的光轴。通过球心 C_1 、 C_2 的光轴叫做主光轴，简称主轴，其他的光轴就叫做副光轴，简称副轴（图15-10）。

对于凸透镜和凹透镜来讲，它们的光心、光轴的情况是一样的，但由于凸透镜对于光线有会聚作用，而凹透镜对于光线有发散作用，所以在某些光学性质上是有些不同的。如：焦点、焦距等。

一束平行于主轴的近轴光线射到凸透镜上，经折射后，折射光线都会聚在主轴的某一点 F 上，这一点叫做凸透镜的实焦点（图15-11a）。

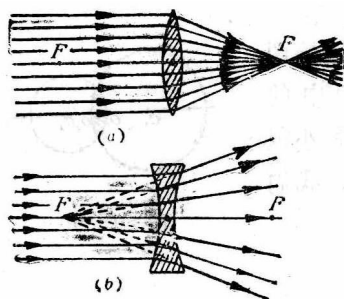


图 15-11

一束平行于主轴的近轴光线射到凹透镜上，经折射后，折射光线就向外发散，而这些发散的折射光线反向延长后与主轴相交于某一点 F 上，这一点叫做凹透镜的虚焦点（图15-11b）。实焦点、虚焦点统称为透镜的焦点。

任何透镜的两侧都各有一个焦点，只要透镜两侧所在的

媒质相同，不管透镜两折射面的曲面半径是否相同，两焦点到光心的距离总是相等的。我们把光心到透镜焦点的距离叫做焦距，用 f 来表示。一般将光心到实焦点的焦距取为正值，而光心到虚焦点的焦距取为负值。主轴上的焦点，叫做透镜的主焦点。任何透镜两侧都各有一个过主焦点并与主轴垂直的焦平面。

四、透镜成象的作图法

通过前面对透镜的介绍，我们对透镜有了一些认识。实践告诉我们：当一个发光体或一个被照明的物体经过透镜折射后，可以得到物体的象。

下面用作图的方法来讨论透镜的成象情况。为简便，我们用图15-12的符号表示凸透镜而用图15-13的符号表示凹透镜，其中 O 点表示薄透镜的光心， F 点表示主焦点。



图 15-12

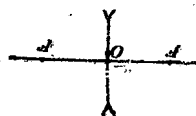


图 15-13

如何用作图的方法得到物体的象呢？实验结果告诉我们：物体上某一点发出的光经透镜折射后，折射光线或折射光线的延长线，只相交于一点。根据这个结果，作图时只要从物体的每一点上任意引出两条光线，经过透镜以后，找出

它们折射光线的交点，这就是物体上那一点的象。物体上同一点发出的光线有无数条，实际作图中，为方便，常常只从下面三条“特殊光线”中，选取其中两条来作图。这三条光线是由透镜的性质所决定的，它们是（图15-14）：

（1）跟主轴平行的光线，经过透镜后，折射光线过主焦点；

（2）过焦点的（或延长线过焦点的）光线，经过透镜以后，折射光线跟主轴平行；

（3）过透镜光心的入射光线，经过透镜后，不改变传播方向。

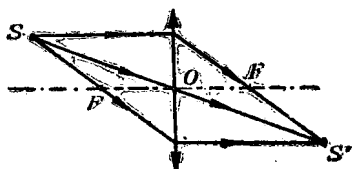


图 15-14

我们先来讨论点光源成象的光路图。

图15-15 (a) 中的 A 为点光源，从 A 处引出一条过凸透镜光心的入射光线，过透镜后，光线不改变传播方向；再从 A 处引出一条与主轴平行的入射光线，它的折射光线必过另一侧的主焦点 F 。两条折射光线的交点 A' ，就是 A 的实象。

图15-15 (b) 中， A 点是点光源，从 A 点引出一条延长线过焦点的入射光线，过凹透镜后，折射光线平行于主

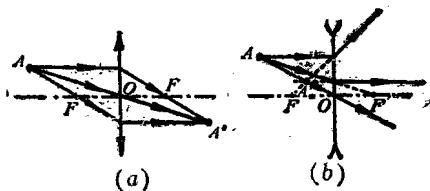


图 15-15

轴，再从 A 点引出一条与主轴平行的入射光线，它的折射光线向外发散，但其延长线过入射线同侧的主焦点 F ，两条折射光线延长线的交点 A' ，就是 A 点的虚象。

由图15-15看出：若选其它两条光线所得象点也相同。

点光源 A 在凸透镜的主轴上时，我们所能利用的三条特殊光线都与主轴重合，所以，在这种情况下，我们还要借助焦平面来解决问题，方法如下：

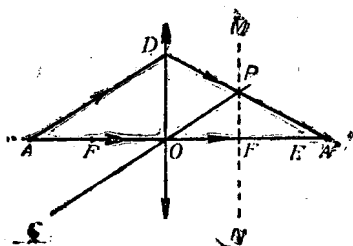


图 15-16

如图15-16所示，从 A 点引出一条过光心的入射线，经凸透镜后，传播方向不改变。做任意副轴 CO ，它与焦平面 MN 相交于 P 点。从 A 引一条入射线 $AD \parallel CO$ ，由凸透镜的性质所决定， AD 的折射光线必过 P 点，过 D

P 的折射线与光线 OE 交于 A' ， A' 就是 A 的实像。

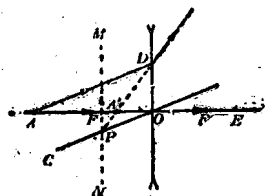


图 15-17

凹透镜成像，也有点光源在主轴上的时候，我们将其成像光路图画出来（图15-17），方法与凸透镜类似，不再赘述。

通过上面的讨论，我们对发光点成像作图法有了了解，在这个基础上，我们就可以来讨论物体成像的作图法了。

一个物体可以看成是许多点的集合，每一点射出的光线经透镜折射后，按作图的方法，可以得到这一点的象点，若将物体所有的象点组合起来，就构成物体的象。为简便，通常只

选取物体的两个端点，找出它们的象点，就能确定物体的象。
图15-18(a)、(b)分别是凸透镜、凹透镜物体成像的光路图。

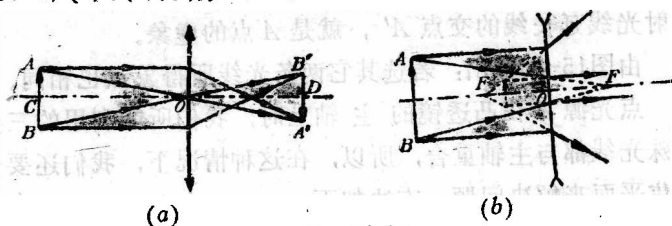


图 15-18

光心到物体的距离 OC 叫做物距，用 u 表示。光心到象的距离 OD 叫做象距，用 v 表示(如图15-18a)。

五、凸透镜的成像规律

实验结果表明，物体经凸透镜所成的象的性质、大小及象距与物距、焦距之间有如下关系：

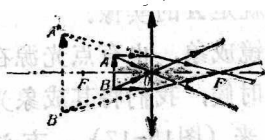


图 15-19

(1) 当 $u < f$ 时，象与物体在凸透镜的同侧，象是正立的、放大的虚象(图15-19)。

(2) 当 $f < u < 2f$ 时，象与物体分别在凸透镜的两侧，象是倒立的、放大的实象(图15-20)。

(3) 当 $u > 2f$ 时，象与物体分别在凸透镜的两侧，象是倒立的、缩小的实象(图15-21)。

除以上三种一般情

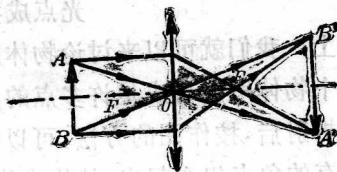


图 15-20

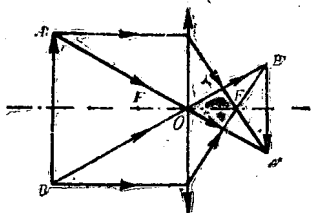


图 15-21

况外，凸透镜成象还有另外两种特殊的情况：

(1) 当 $u=f$ 时，入射光线经透镜折射后，折射光线都与光轴平行，这时既不能成实象，也不能成虚象。

(2) 当 $u=2f$ 时，象与物体分别在凸透镜的两侧，象是倒立的，象距等于物距，象长等于物长。

光路图读者可用上述方法自行练习，其结果与实验必相符合。

六、凹透镜成象规律

实验表明凹透镜成象只有一种情况：无论物体到凹透镜的距离如何，经凹透镜折射所成的象永远与物体在凹透镜的同一侧，象总是正立的、缩小的虚象。作图结果也是如此。

七、透镜成象公式

透镜成象的位置，除了用上述的作图法可以求出之外，还可以用下面的透镜成象公式算出。

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (15-5)$$

利用此公式时请注意下面两点：

(1) 对凸透镜来讲， u 和 f 永为正值； v 为正值时，

象是实象； v 为负值时，象为虚象。

(2) 对凹透镜来讲， u 永为正值； v 和 f 永为负值，说明凹透镜是虚焦点，成虚象。

八、放大率

从透镜成象的情况来看，有的象放大而有的象缩小。我们把象长与物长的比叫做象的放大率，用 K 表示。利用光路图可以得出：

$$K = \frac{|v|}{u} \quad (15-6)$$

$K > 1$ 说明象是放大的， $K < 1$ 说明象是缩小的。

第三节 常见的光学仪器

一、眼睛

人们能够凭借眼睛来观察周围的物体。下面我们通过眼睛的构造来简单地介绍眼睛的光学作用。

眼睛的形状很象一个球体，所以叫做眼球（图15-22）。眼睛的最外层叫巩膜，巩膜前部的透明部分叫角膜，光线就是由这里进入眼内的。巩膜里面是脉络膜。脉络膜的前部是虹膜。虹膜中央的小孔叫做瞳孔。瞳孔的

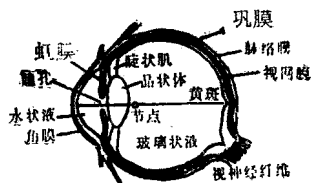


图 15-22

大小可以调节，从而改变进入眼内的光的多少。虹膜后面是晶状体，它的形状很象双凸透镜，它的四周包围着特殊的肌肉——睫状肌，可以调节晶状体的曲率，以改变入射眼球的光线的偏折程度。脉络膜上有一层视网膜，它由一些独立的感光细胞组成，相当于一个成象的屏。视网膜上正对着瞳孔的一点感光最灵敏，叫做黄斑。物体的象成在黄斑上时，看得最清楚。角膜和晶状体之间的无色液体，叫做水状液。晶状体和视网膜间的另一种无色液体，叫做玻璃状液。水状液、玻璃状液和晶状体的共同作用相当于一个“凸透镜”。

正常的眼睛能够在远近不同、光线强弱不同的情况下，看清外界的物体，这是什么道理呢？

当我们想观看某一个物体时，眼球首先转动起来，使得黄斑对着目标，这时瞳孔的大小发生改变，从而控制了从物体射入眼球光线的多寡。同时；晶状体的曲率发生变化，调节了眼球内“凸透镜”的焦距，使得离开眼睛远近不同的物体的入射光线发生不同程度的偏折，而使所成的倒立、缩小的实象都能够成在视网膜的黄斑上。视神经就会把这个印象传给大脑，这时我们就看清这个物体了。但是，并不是任意远近的物体我们都能观察清楚，这是有一定限度的。眼睛经过调节所能看清的最近距离叫做近点，眼睛所能看清楚的最远距离叫做远点，正常眼睛的近点是10厘米左右，远点是无限远。

人的眼睛虽然有一定的调节能力，但假如观察太近或太远的物体时，眼睛很快就会疲劳。正常的眼睛习惯于看25厘米左右的物体，而时间长也不感到疲劳，我们把25厘米叫做眼睛的明视距离。

人的眼睛也有不正常的，如近视眼和远视眼。我们可以用凹透镜矫正近视眼，凸透镜矫正远视眼（图15-23）。透镜焦距 f （以米为单位）的倒数 $1/f$ 乘以100，就是眼镜的度数。如400度眼镜的镜片焦距就等于25厘米。

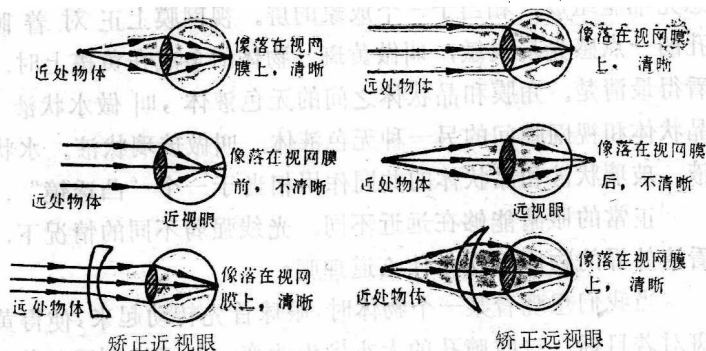


图 15-23

二、照相机

照相机的种类很多，它的构造一般都是由镜头、光圈、快门以及暗箱几个主要部分所组成的。

镜头是照相机中最重要的部件。被拍摄的景物通过它能在照相底片或软片上映出缩小的倒立实象，如图15-24所示。最简单的照相机的镜头是一个凸透镜，但成象不理想，所以一般照相机的镜头是由一组透镜组合而成的。这样，可以通

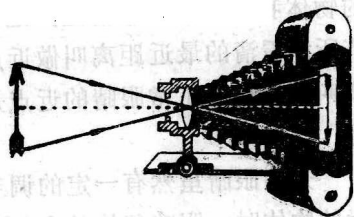


图 15-24

过调节第一片透镜来改变整个透镜组的焦距，使得在不同距离内拍摄时，都能得到被拍景物的清晰的象。

在镜头后面有一个直径可以调节的圆孔，这就是光圈（图15-25）。光圈的作用相当于眼睛的瞳孔，利用不同直径的光圈，我们就能调节进入镜头的光线的多少。



图 15-25

进入照相机光线的多少除了跟光圈的大小有关以外，还跟光线进入机内时间的长短有关。快门就是控制光线进入照相机时间的长短的。在拍摄景物时，要根据被拍景物的亮度以及照相底片的感光性能，选择适当的快门开启时间，以及光圈的大小，这样才能使底片的感光程度适当，拍出的照片才能清楚。例如，天气晴朗在野外拍摄时，一般可选用光圈8或11，曝光时间1/50秒。要掌握好底片的感光程度，更重要的是要在实践中摸索、总结出曝光时间和光圈正确配合的规律来。

照相机的机身部分就是暗箱，底片放置在暗箱对着镜头的后壁上，快门没有开启时，底片受不到光的照射。

当我们调节好焦距、选择好光圈和曝光时间，被拍景物的象清晰地显现在毛玻璃上时，就可以掀动快门，底片立刻感光，被拍景物的象便潜伏在底片上了。把已经感光的底片在暗室里取出，依次在显影液和定影液中浸过，就可得到有被拍景物图象的底片，用它就可以冲洗出被拍景物的相片来了。

三、显微镜

显微镜是用来观察近处微小物体的，它的放大倍数比放大镜大得多。

显微镜是由两组透镜组成的。对着物体的叫做物镜，它的焦距很短。对着眼睛的叫做目镜，它的焦距较长。

显微镜是如何得到物体放大的虚象的呢？这可以用图15-26的光路来说明：

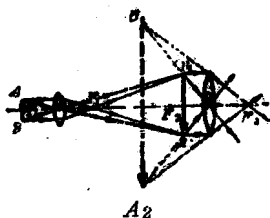


图 15-26

为通过物镜 O_1 得到物体放大的实象，使用显微镜时，应调节物镜，使物体处在靠近焦点 F_1 而在焦距之外($f_1 < u < 2f_1$)的地方，

这样，通过物镜后便能得到物体倒立、放大的实象 A_1B_1 。

为了从目镜 O_2 得到再放大的虚象，应调节目镜的焦距，使象 A_1B_1 靠近焦点 F_2 在目镜的焦距之内($u < f_2$)，这样， A_1B_1 对于目镜成了“物体”，经过目镜所成的象 A_2B_2 应恰好位于明视距离处，象是正立的（对 A_1B_1 来讲）、放大的虚象。

由于光本身的性质所决定，显微镜的放大倍数一般不超过3000倍。若要求放大倍数再高，那么只有采用根据电磁原理制成的电子显微镜才能达到。电子显微镜的放大率可以高达几十万倍。

对于单个的透镜，它成象的放大率是：

$$K = \frac{\text{象长}}{\text{物长}} = \frac{v}{u}$$

对光学仪器来讲，它成象的放大率就是仪器的放大率，用 m 表示：

$$m = \frac{b}{a} \left(\frac{\text{仪器中物体的虚象所张的视角}^*)}{\text{不用仪器时，物体所张的视角}} \right) \quad (15-7)$$

对同一光学仪器来讲，放大率 m 是个定值。

* 物体（或象）两端对眼睛光心所张的角叫视角。

设物镜 O_1 到目镜 O_2 的距离(即显微镜的筒长)为 L , 明视距离为 d , f_1 与 f_2 分别是物镜 O_1 、目镜 O_2 的焦距。

物体 AB 直接放在明视距离 d 处, 所张的视角为:

$$\alpha = \frac{AB}{d},$$

物体经显微镜放大后虚象 A_2B_2 所张的视角为

$$\beta = \frac{A_2B_2}{d} \approx \frac{A_1B_1}{f_2}.$$

因此
$$m = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{A_1B_1}{f_2} \bigg/ \frac{AB}{d} = \frac{d}{f_2} \cdot \frac{A_1B_1}{AB}.$$

$\frac{A_1B_1}{AB}$ 是单个透镜 O_1 的放大率, 从图15-26中可以看出:

$\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{v}{u} \approx \frac{L}{f_1}$, 将它代入上式, 得到显微镜的放大率公式:

$$m = \frac{d}{f_1 f_2}. \quad (15-8)$$

从推导过程可以看出, 显微镜的放大倍数等于物镜放大倍数与目镜放大倍数的乘积。

显微镜的用处很广, 知识青年在农村科学种田也需要用它。懂得了显微镜成象规律后, 我们可以自制简易显微镜, 来为生产服务。

四、望远镜

望远镜是观察远处物体时为了增大视角而使用的光学仪器。望远镜的种类很多, 这里只介绍天文望远镜和地面望远镜两种。

1、天文望远镜:

天文望远镜就是开普勒望远镜或称倒象望远镜，它是由两个凸透镜——目镜和物镜组成的，物镜的焦距长而目镜的焦距短。物镜的后焦点与目镜的前焦点重合，即物镜与目镜的距离（望远镜筒长），等于这两个透镜焦距的和。

用望远镜来观察天体或远方的物体时，物镜 O_1 的作用是得到被观察物体的实象。由于天体 AB 离物镜非常远，天体每一点射到物镜上的光束可以看作是平行光束，所以，经物镜折射后，象 A_1B_1 成在物镜焦平面 MN 之外离焦平面极近的地方；因为 $u > 2f$ ，所以象 A_1B_1 是倒立的、缩小的实象（图15-27）。这个象对目镜 O_2 来讲是“物体”。由于物镜

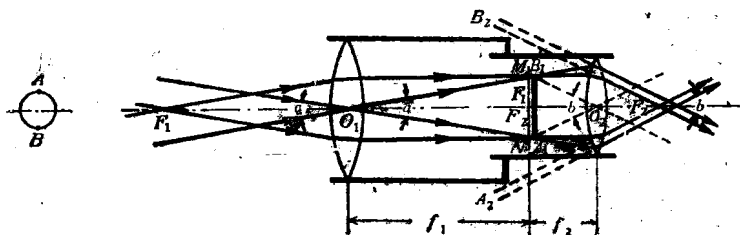


图 15-27

的后焦点与目镜的前焦点是重合的，所以经物镜所成的实象 A_1B_1 落在了目镜的焦距之内，这样，经目镜后，我们就得到对 A_1B_1 是正立的、放大的虚象 A_2B_2 。

如图15-27所示，天体原来对人眼的视角 $a \approx \tan a = \frac{A_1B_1}{f_1}$ ，

经过望远镜折射后的视角为 $b \approx \tan b = \frac{A_1B_1}{f_2}$ ，那么，望远镜

的放大率为：

$$m = \frac{b}{a} = \frac{f_1}{f_2}. \quad (15-9)$$

可以看出，物镜的焦距 f_1 越大，目镜的焦距 f_2 越小，望远镜的放大率也就越大。

天文望远镜的优点，就是物体通过物镜后成实象，于是我们可以在镜筒中成实象的地方安装透明的刻度尺，作定量观测，或安装摄影装置，将天体或远方物体拍摄下来。但是，事情总是一分为二的，天文望远镜最后的象 $A_2 B_2$ 是倒象，用它来观察地面上的物体很不方便，所以，要观察地面上的物体，就得改用地面望远镜，或在天文望远镜筒内，安装一组回转棱镜，这样就可以得到正立的虚象了。

2、地面望远镜

地面望远镜就是伽利略望远镜，它的构造不同于天文望远镜之处，就是目镜不是凸透镜而是凹透镜。

地面望远镜物镜 O_1 与目镜 O_2 的距离，即镜筒长，等于这两个透镜焦距的差，也就是物镜的后焦点 F_1 与目镜的后焦点 F_2 是重合的。

利用地面望远镜是如何得到远处物体正立、放大的象呢？下面用图15-28的光路来说明：

从远处物体 AB 射来的一束近似平行的光线，经物镜 O_1 折射后本应会聚在后焦平面 MN 附近而成实象 $A_1 B_1$ ，但在未成象前，就遇到目镜，这样，本来应会聚的光束，经目镜折射后又变成发散光束，这些发散光束的反向延长线会聚集合而成物体正立的虚象 $A_2 B_2$ 。

从图15-28中也可得到地面望远镜的放大率公式：

$$m = \frac{b}{a} = \frac{f_1}{f_2}. \quad (15-10)$$

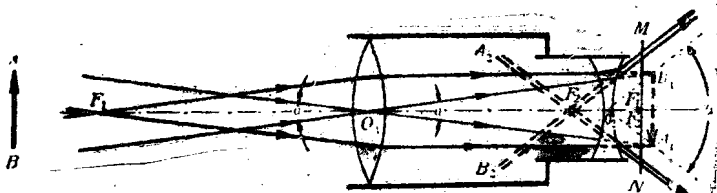


图 15-28

地面望远镜所成的象对物体来讲是正立的，所以便于地面了望。平常所用的地面望远镜都是双筒望远镜，它是由两个图15-28所示的望远镜组成的。

五、幻灯机

幻灯机一般用来放映图片，所以也称映画器。它的主要组成部分有：镜头（凸透镜）、光源（功率较大的白炽灯或弧光灯）、聚光器（又称聚光镜，是一对直径很大、焦距很短的平凸透镜组成的）、反光镜（凹面镜）和幻灯片等。这里主要介绍透射式幻灯机和反射式幻灯机两种。

1、透射式幻灯机

它只能放映透明的图片。其原理就是利用物体处在 $f < u < 2f$ 时，成倒立、放大实象的现象制成的。

使用时将透明图片AB倒插在幻灯片匣内（图15-29），使

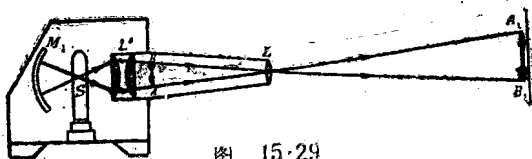


图 15-29

之位于镜头 L 的焦点以外、两倍焦距之内的地方，然后利用聚光镜 L' 和反光镜 M_1 ，使光源 S 所发出的光比较集中地投射到幻灯片上，调节镜头的位置，使得象 $A_1 B_1$ 恰好清楚地成在幕上（幕的位置可按透镜成像公式进行计算），旋紧固定镜头的螺丝，就可以连续换片放映。

2、反射式幻灯机

透射式幻灯机只能把透明的幻灯片放映出去，如果要把书报上的图画等不透明的图片直接放映出来，则可以采用反射式幻灯机（15-30）。

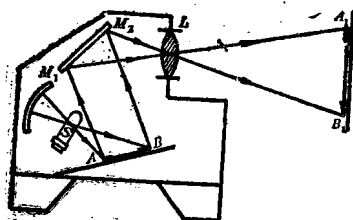


图 15-30

从光源 S 发出的光，投射到图片 BA 上被反射后就射向平面镜 M_2 ，再经 M_2 的反射和镜头 L 的折射，就在幕上得到放大的实象 $A_1 B_1$ 。

由于光线经过两次反射，有很大一部分光线被吸收了，所以映在幕上的象比透射式幻灯机映出的象暗一些。

有许多幻灯机是两用的，既能放映透明图片，又能放映不透明的图片，称为透射、反射两用幻灯机。

六、电影机

电影机是放映电影的，它的基本原理和幻灯机大致相似，电影机放映影片，就相当一部幻灯机在很快地自动更换图片；银幕上得到的是很快更换图片的象。如果每秒钟内在观众眼前出现的象能够连续地变换 20 次以上（一般是 24 次），

那么，由于眼睛的视觉暂留*就会产生一种活龙活现的场面，而并不觉得影片在跳动。这样就要求在拍摄影片时，将活动的景物的每一个动作每隔 $\frac{1}{24}$ 秒就拍出一张照片，即每一个动作在每一秒钟之内被均匀地分拍成24个图片。放映时，电影机让影片以同样的速度（一秒内连续变换24张影片）通过镜头，就可以使活动的景物在观众面前重现。

第四节 光波动性

光和人们的日常生活有着密切的关系。那么，光到底是什么呢？几个世纪以来人们都在不断地进行探索。人们在对光的运动的科学实践长期反复研究的基础上，对光的本性的认识才逐步地得到深化，认识到光既具有波动性又具有粒子性。本节先从光的干涉、衍射等现象来讨论光的波动性。

一、光的干涉

这里指的“干涉”是什么意思呢？

几列波在媒质里相遇时，它们同时激起媒质的振动，因而改变了波的形状，这种现象称为波的迭加。在池塘里扔下

- 当眼睛观看物体的时候，眼睛里就有了这个物体的象。物体移去后，视神经对它的印象并不立即消失，而要延长约0.1秒的时间，这种性质叫做视觉暂留。

几块石头，它们激起的水波都向周围传播，当它们相遇时就会出现波的迭加现象。

在波的迭加现象中有一种特殊情形，就是两列波长相同的波迭加时，在两列波相交的区域内，出现振动最强和振动最弱的位置相互间隔开来的现象，这种波的迭加的特殊现象就叫做波的干涉，这就是“干涉”的含义。干涉是波动的重要表征之一。如果光具有波动性，那末它应该有干涉现象。

我们可以做一个简易的实验来观察。用金属丝做一个小框框，并使它附上一层肥皂液的薄膜，把它放在火焰里洒有钠盐的酒精灯旁，这时就可以在肥皂液薄膜上看到火焰的反射象，象上出现了明暗相间的条纹（图15-31a）。

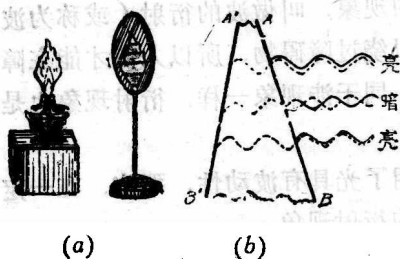


图 15-31

竖立的肥皂薄膜由于受到重力的作用而形成上薄下厚的楔子形状，如图15-31(b)所示。从酒精灯发出的黄色光（洒了钠盐的缘故）照到膜上，

一部分从前表面 AB 反射回来，另一部分透过皂液再从后表面 $A'B'$ 反射回来。这两部分反射光线由于是从同一单色光源发出的，所以波长相同。在薄膜的某些地方，这两列反射波恰是波峰与波峰或波谷与波谷相遇，光波振动加强，形成了明亮的黄色条纹；而在另一些地方，两列波的波峰与波谷相遇，光波振动抵消，便形成黑暗的条纹。这些明暗相间的条纹就是光的干涉现象。

如果照射到薄膜上的光不是单色光而是白光，薄膜就将出现彩色的干涉条纹。白光是由各种颜色的光组成，每一种颜色的光都有自己的波长。薄膜某处的厚度，使某种颜色的光反射光线互相增强，其它颜色的光在该处互相削弱而在别的地方互相增强，于是就出现了彩色的干涉条纹。洗衣服的肥皂泡、水面上的油膜，之所以会呈现出美丽多彩的颜色，都是由于薄膜上光的干涉的缘故。

光的干涉现象表明光具有波动性。

二、光的衍射

波能绕过障碍物的现象，叫做波的衍射（或称为波的绕射）。例如，声波可以绕过障碍物，所以人们才能在障碍物后面听到前面的声音。同干涉现象一样，衍射现象也是波动特性的重要表征之一。

既然光的干涉说明了光具有波动性，那末，在一定条件下也应该能观察到光的衍射现象。

如果用点光源 S 发出的光线，照射大小可以调节的圆孔（图15-32a），当孔比较大时，在孔后面的屏上便得到一个明

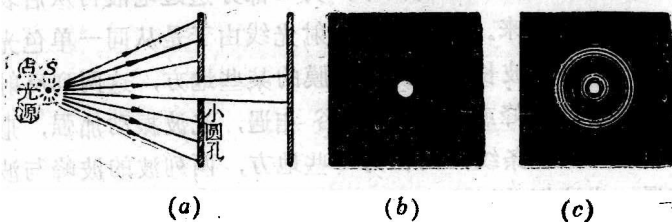


图 15-32

亮的光斑（图15-32b），这说明光是直线传播的。逐渐缩小圆孔的直径，屏上的光斑也随之缩小。继续缩小圆孔，到某程度（直径约为0.01毫米）时，量变达到了质变，光的波动性马上显现出来，在屏上不再是一个小光斑，而是一些明暗相间的圆环，这就是衍射花纹（图15-32c），整个衍射花纹的面积远远超过按光的直线传播所应照明的面积。也就是说，光离开直线传播的路径绕射到几何阴影里面去了。这就是光的衍射现象。

光的衍射现象，再一次证实了光的波动性。

在日常生活中可以毫不费劲地观察光的衍射。通过紧挨着的两本书的窄缝来看细长的光源（例如电灯泡的灯丝）就可以看到衍射的现象。

三、光的色散

在前面光的干涉中提到，白光是由各种颜色的光所组成的。那么白光究竟是由哪些颜色的光组成的呢？

让一束平行白光穿过狭缝射到三棱镜上（图15-33）。光线经过棱镜的折射后，在棱镜另一侧的屏上形成了一条彩色

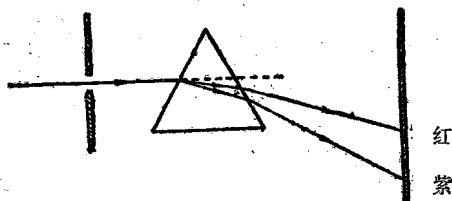


图 15-33

的光带。这条光带靠近棱镜顶角的一端是红色，另一端是紫

色，中间依次排列着橙、黄、绿、蓝、靛等各种颜色，各种颜色的光按一定次序排列的这种光带，叫做光谱。

实验表明，光谱中的每种颜色的光不再分解成其它颜色的光。这种不能再分解的光叫做单色光。由几种单色光混合而成的光叫做复色光。

如果取一个会聚透镜放在上述实验中棱镜与屏的中间，那末各种颜色的光便重新会聚在一起射到屏上，在屏上得到白色的光带。白光可以分解成各种单色光以及各种单色光又可以复合成白光的事实说明：白光是由各种单色光混合而成的，因此，白光是一种复色光。复色光分解成单色光的现象，叫做光的色散。天空出现的虹，就是雨后太阳光通过悬浮在空中很多极小的水滴而发生色散的结果。

如何根据光的波动性来解释光的色散呢？

原来，光的颜色决定于光波的频率，各种单色光的颜色之所以不同，就是由于它们的频率互不相同的缘故。白光就是由频率不同的单色光组成的，红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫就是组成白光的几种重要成分，各种颜色光的频率如下表所示，由红到紫逐渐增大。

表 15-2

光 谱 区 域	频 率 (单位: 10^{14} 赫兹)	在真空中的波长 [单位: 埃(10^{-8} 厘米)]
红	3.9~4.7	7700~6400
橙、黄	4.7~5.2	6400~5800
绿	5.2~6.1	5800~4950
蓝、靛	6.1~6.7	4950~4400
紫	6.7~7.5	4400~4000

毛主席教导我们说：“按照唯物辩证法的观点，自然界

的变化,主要地是由于自然界内部矛盾的发展。”不同频率的单色光在真空中的传播速度都等于 C (在空气中都近似地等于 C),但是不同频率的单色光在其它媒质中的传播速度却是

彼此不同的。式(15-3)告诉我们,媒质的折射率 $n = \frac{C}{V}$, V

是光在媒质中的传播速度。由于各色光在同一媒质中的传播速度 V 不相同,所以同一媒质对不同颜色的光的折射率也不相同。实验指出:同一种媒质,光的频率越大,媒质对这种光的折射率就越大。因此,当白光射入棱镜时,组成白光的频率不同的单色光便按不同的角度折射,并沿不同方向从棱镜射出,这样,白光通过棱镜后便出现色散现象。由于红光的频率最小、媒质对它的折射率最小,因而偏折程度最少,它便处在光谱中靠近棱镜顶角的一端,其他各种颜色的光,按橙、黄、绿、蓝、靛、紫的次序偏折程度依次增大,紫光频率最大,偏折程度也最大,因此,它处在光谱中靠近棱镜底边的一端。所以,光谱中各色光的排列次序和各色光频率大小的排列次序就是一致的。

光谱在生产实践以及科学研究中的应用已经积累了很丰富的知识,并且构成了一门重要的学科——光谱学。在这里不作介绍了,但总的来说,它是研究光的分解的一门科学。

四、红外线、紫外线和伦琴射线

前面讲到的光都是可见光线。在光谱分析的研究中,人们还发现了我们的眼睛看不见的光——红外线、紫外线和伦琴射线。

十九世纪初叶，人们发现在可见光谱的红光外侧以及紫光外侧仍有射线存在，而且这些射线同样遵循可见光的规律。人们就把位于光谱中红光外侧的射线叫做红外线，而把位于光谱中紫光外侧的射线叫做紫外线。

红外线的主要特性就是它的热效应非常强。可以利用它来烘干物体。汽车外壳的油漆现在一般都用红外线烘干，一部汽车用热空气要几十个小时才能烘干，用红外线只需几十分钟就行了。在农业上可以用它来烘干谷物，也可以用它处理种子，使发芽率高、生长快、产量高。

紫外线的显著特性是萤光作用强。日光灯就是利用这个特性设计制成的，日光灯的内壁涂有一种萤光物质，使用时，电流通过日光灯管内的水银蒸汽便产生大量的紫外线，在紫外线的照射下，管壁就发出了白光或其它颜色的萤光来。紫外线的另一个特性是能杀菌，使皮肤发黑。一定量的紫外线照射，对人体的健康是不可缺少的。太阳光线中含有丰富的紫外线，所以人们经常在阳光下活动能促进健康，衣物经常在太阳底下晒晒就可以消毒。

伦琴射线（也叫X射线）是一八九五年发现的（参阅下一章第一节），它也是一种不可见光，也会发生反射、折射、干涉和衍射现象。它的频率比紫外线更高，在固体物理中，可以利用伦琴射线通过晶体以后的衍射花样来研究各种晶体的结构。

跟红外线、紫外线比较，伦琴射线具有更强的贯穿本领。利用伦琴射线可以用来检查金属元件中有无内伤，在医疗上，可以用来作人体的透视，或者拍摄人体内部组织的照片，借以了解患病处的情况。伦琴射线也有杀菌作用，所以

也能利用它来破坏有病的细胞，把病治好。

五、光的电磁说

光的干涉和衍射现象，表明光具有波动性。我们知道，由机械振动产生的波如水波、声波等都必须凭借一种媒质来传播，而光波却可以在没有媒质的真空中传播，这是为什么呢？

十九世纪人们对电磁现象的研究，推动了对光的本性的认识，到了十九世纪六十年代便产生了光的电磁说。它的主要内容是：光现象实质上是一种电磁现象，光波就是一种频率很大的电磁波。

我们知道，电磁波就是变化的电场和磁场在空间的传播，而电场和磁场都是物质。因此，光的电磁说揭示了光的物质性。实验也表明，光确实是一种物质。光本身就是一种物质，因此它自然就可以不依靠其他媒质而在真空中传播了。

现代无线电技术广泛应用的电磁波频率范围大约是 $10^5 \sim 3 \times 10^{12}$ 赫兹，而可见光的频率范围大约是 $3.9 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14}$ 赫兹。红外线的频率介于它们之间，紫外线、伦琴射线的频率比可见光的频率还要高，从放射性元素射出的 γ 射线（下一章将讲到）的频率则是目前所知道的电磁波中频率最高的一种。

各种电磁波由于频率的不同而有着明显不同的性质。把各种电磁波按照频率由小到大依次排列，就组成了电磁波的波谱，如下表。

表 15-3

电 磁 波 种 类	频 率 (赫兹)	在真空里的波长(厘米)
无 线 电 波	$10^5 \sim 3 \times 10^{12}$	$3 \times 10^{-5} \sim 10^{-2}$
红 外 线	$10^{12} \sim 3.9 \times 10^{14}$	$3 \times 10^{-2} \sim 7.7 \times 10^{-5}$
可 见 光 线	$3.9 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14}$	$7.7 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5}$
紫 外 线	$7.5 \times 10^{14} \sim 5 \times 10^{16}$	$4 \times 10^{-5} \sim 6 \times 10^{-7}$
伦 琴 射 线	$3 \times 10^{16} \sim 3 \times 10^{20}$	$10^{-6} \sim 10^{-10}$
γ 射 线	3×10^{19} 以上	10^{-9} 以下

第五节 光的粒子性

前面提到, 光不但具有波动性, 而且还具有粒子性。这一节我们就来讨论光的粒子性。

一、光电效应

当光照射在金属物体上时, 金属中有电子逸出的现象叫做光电效应。

如图 15-34所示, 在抽成真空的玻璃容器 C 中, 装有金属薄片的阳极 A 和金属板的阴极 K, 两极分别与电池、电压计 V 和电流计 G 相接。

当光通过石英窗照射到金属板的阴极 K 上的时候, 从电流计上可以看出电路中有电流通过。

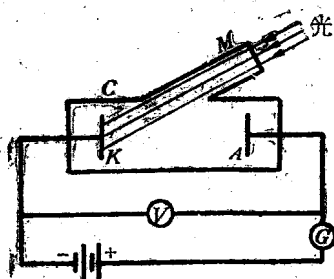


图 15-34

这是由于从金属板上逸出的电子——光电子，受到电场的作用，飞向阳板 A ，便形成了电流——光电流。

当用单色光照射金属板阴极 K 的时候，可以发现：

1、任何金属受到射线照射都能发生光电效应。但有的金属(如锌、铜等)要用频率高的紫外线照射才能发生光电效应；而有的金属(如钠、钾等)甚至用频率较小的可见光照射也能发生光电效应。对于每一种金属都存在这样的一个频率 ν_0 ，只要射线的频率 $\nu < \nu_0$ ，不管射线多强，照射时间多长，也不能使这种金属发生光电效应。相反地，只要射线的频率 $\nu > \nu_0$ ，即使射线很微弱，也能立即使它发生光电效应。不同金属材料的 ν_0 也不同，也就是说， ν_0 是由金属材料决定的，叫做该种金属材料的红限。

2、用大于 ν_0 的频率 ν 的射线来照射同一种金属板，改变入射光的强度，那么光电子数目随光强的变化而变化，入射光越强，光电子的数目越多；反之，光电子数目越少。但光电子的速度和动能却不随入射光强的改变而改变。

3、如果改变入射光的频率，则光电子的速度和动能将随之发生相应的变化。射线的频率越大，光电子的速度和动能就越大；射线的频率越小，光电子的速度和动能就越小。射线的频率小于该金属的红限 ν_0 ，则没有光电子产生。

按照光的波动学说，入射光越强，它的振幅越大，光的能量也越强。那末，用较强的光来照射金属时，金属表面的电子获得的能量越多，电子逸出金属表面以后应该具有较大的速度和动能才对。然而这跟实验结果相抵触。所以，光的波动说无法解释光电效应，这说明光的波动说对光的本性的认识还是不全面的。“矛盾不断出现，又不断解决，就是事

物发展的辩证规律。”正是基于光的波动说与光电效应出现的矛盾，才促使人们对于光的本性去作进一步的探索，一九〇五年提出的光子理论便成功地解决了这个矛盾，人们对光的本性的认识便得到进一步的深化。

二、光子理论

光子理论认为：物质的原子和分子所发射的光，并不是连续的波，而是由特殊物质组成的单个的微粒，这种物质微粒叫做光子（或者叫做光量子）。光子跟其他一般的物质微粒一样，也具有一定的能量。光子的能量 ϵ 跟它的频率 ν 成正比，即

$$\epsilon = h\nu. \quad (15-11)$$

式中的 h 是一个恒量，叫做普朗克恒量，数值等于 6.62×10^{-27} 尔格·秒。

用光子理论可以成功地解释光电效应。光电子要从金属表面脱离出来，就必须克服引力做一定数量的功（叫做脱出功 A ），功的大小随金属的不同而不同。具有 $h\nu$ 能量的光子射到金属上时，把能量传递给金属中的电子，一部分能量用来完成脱离金属表面所需做的功 A ，另一部分变成电子逸出后的动能 $\frac{mV^2}{2}$ 。这就是说，

$$h\nu = A + \frac{1}{2}mV^2. \quad (15-12)$$

根据这个公式，很明显：对一种金属， A 是一定的，如果照射光的频率 ν 小于这种金属的红限 ν_0 ，即 $h\nu \leq A$ ，则 $V=0$ ，光电效应不能产生。这就是说，对一定金属来说，入射光光子的能量必须大于 A （即入射光频率 $\nu > \nu_0$ ），才能

发生光电效应。

另外，从式(15-12)还可以看出，照射光的频率越大，光子的能量 $h\nu$ 也越大，这样光电子的速度和动能也越大（ $\frac{1}{2}mV^2 = h\nu - A$ 的结果），而跟照射光的强度无关。光的强度越大，光子数越多，这样吸收光子的能量而逸出金属表面的光电子数目就越多，因此，光电流就越强。

这样，光子理论就给光电效应以圆满的解释了。

光电效应表明：光具有粒子性。

〔例〕 钠的脱出功是 3.97×10^{-12} 尔格，要使钠发生光电效应，照射光的频率应该大于多少赫兹？

解 根据式 (15-12) 可知，要发生光电效应，必须使得

$$h\nu > A,$$

即

$$\nu > \frac{A}{h}.$$

已知 $A = 3.97 \times 10^{-12}$ 尔格， $h = 6.62 \times 10^{-27}$ 尔格·秒。代入上式，得

$$\nu > \frac{3.97 \times 10^{-12} \text{ 尔格}}{6.62 \times 10^{-27} \text{ 尔格} \cdot \text{秒}},$$

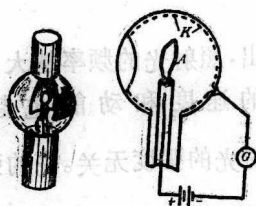
即

$$\nu > 6.0 \times 10^{14} \text{ 赫兹}.$$

所以，照射光的频率应该大于 6.0×10^{14} 赫兹时，才能使钠发生光电效应。

三、光电管

光电效应通过一种叫做光电管的二极管而在技术上



(a) (b)
图 15-35

得到了实际的应用。例如在无线电传真、电视、有声电影、自动控制和其他技术设备中都有着广泛的应用。这里仅介绍光电管的构造及其工作原理。

图15-35(a)是一种光电管的外形。抽成真空(有的为了提高光电管的灵敏度而在管内充入少量的氩、氛等惰性气体)的玻璃泡内,一部分内壁 K 上涂有某种碱金属(如钾、钠等),这层碱金属就是光电管的阴极;管内还有一个固定的金属线圈 A ,这就是光电管的阳极。

把光电管的两极分别接到电源(电压约为80~100伏)的两极上(图15-35b),当阴极受到入射光的照射时,就要引起光电效应,在电路里形成电流。照射光越强,激发出来的光电子数越多,电路中的电流强度越大。这样,我们通过光电管就可以把光的强弱变化变成电流的强弱变化。这就是光电管的工作原理。可以看出:光电管是用来实现光电转换的。

光电管所产生的电流通常都很微弱,应用时,可以把光电管产生的微弱电流信号通过第十三章讲的放大器把它放大。

四、光的波粒二象性

光既是波,又是粒子。近代物理学的研究表明,很多比原子更低一个层次的微粒子,如电子、质子、中子等也都跟光子一样,不仅是波,而且是粒子,这就是微观粒子的波粒二象性。这些微观粒子有时也就叫做“波粒子”,

在不同的条件下，光这种物质显示出不同的性质。在一些情况下，波动性占主导地位，它便向我们显示出波动性来，如干涉、衍射等现象。在另外一些情况下，粒子性跃居为矛盾的主要方面，它便向我们显示出粒子性来，如光电效应。

对光的本性的认识虽然已经历了几个世纪，但它并没有完结，还有待于进一步深化和发展。迄今为止的大量事实向人们表明：光是一种具有电磁本质的物质，它既具有波动的性质又具有微粒的性质，是具有波粒二象性的对立统一物。光的电磁说和光子说都仅仅是部分地反映了光的本性。我们相信，通过人们的实践、认识、再实践、再认识，一定能够建立起一种更臻完善的、能够解释一切光现象的、更深刻地反映光的本性的学说来。

第十六章 原子物理简述

在化学中我们学过：分子是由原子组成的。在这一章里，我们将以物质无限可分的辩证唯物主义观点揭示原子的核式结构以及原子核的组成。同时，对渺小的原子中所蕴藏着的巨大的能——原子能进行讨论。这对于我们了解原子能的利用以及打破超级大国的核讹诈和核垄断将会有所帮助。最后，结合无线电知识、光学知识，对六十年代以后发展起来的一种新颖光源——激光的产生以及激光的应用作一介绍。

第一节 原子的核式结构

一直到十九世纪末叶，原子仍被看成是不可再分的物质最小基元。但是，十九世纪末和二十世纪初，阴极射线、X射线以及天然放射性的相继发现，便把过去人们强加给自然界的这种错误的一成不变的界限彻底地打破了。

一、电子的发现

十九世纪后半期，为了研究低压情况下物质的放电特性，人们在一个压强为百分之一大气压的玻璃管内封入两个电极，并把高压直流电源（几千伏特）接到两极上。这时发现，对

着阴极的玻璃管壁发出了光。研究指出，管壁发光是由于受到阴极发出的一种射线照射的结果，这种射线叫做阴极射线。这种放电管叫做阴极射线管(图16-1)。



图 16-1

进一步的实验还指出，阴极射线有下述的性质：

(1) 阴极射线是一股微粒流；

(2) 阴极射线在电场和磁场里都会发生偏转。

根据阴极射线在电场和磁场中的偏转情况，就可以肯定阴极射线是一股带负电荷的高速微粒流，这种带电微粒就叫做电子。

用不同物质作阴极都能产生阴极射线，而且一切阴极射线的性质都是一样的。这就说明：物质的原子中都含有电子。

电子的发现有力地表明了：原子并不是什么物质的最基本单元，它是可以继续一分为三的。

在电学中我们已经学过，电子的电量是 -1.6×10^{-19} 库仑（1个基本电荷），电子的质量是 9.1×10^{-28} 克（大约是氢原子质量的 $1/1840$ ）。

一八九五年，人们发现：当放电电压足够高时，阴极射线打在物质上能产生具有空前穿透能力的不可见的辐射，它能透过黑色厚纸盒使照相底片感光。这种辐射就是伦琴射线（也叫X射线。X就是未知的意思）。

二、天然放射性

X射线的发现，为医学上的内伤诊断和工业产品内伤的

检验,提供了新的手段。随着X射线应用的逐步广泛,便迫切要求扩大X射线源的问题。由于产生伦琴射线的玻璃管壁上同时发出蓝绿色的磷光,这就启发人们:能产生磷光的物质是否都能发射X射线?一八九六年,人们在研究发出磷光的含铀物质(硫酸钾铀)的过程中,发现含铀物质即使不用日光或其它射线照射,本身也能发出一种看不见的穿透能力相当强的新的射线。这就是天然放射性。

后来,人们进一步发现,不仅所有的含铀物质都具有天然放射性,钍、钋和镭等也有和铀类似的天然放射性,相同重量的镭比铀的放射性强两百万倍。在元素周期表中从84号起的所有元素以及84号以前的某些元素都具有天然放射性,具有天然放射性的元素叫做放射性元素。

为了使新发现的放射性物质更好地为社会实践的需要服务,人们便对这种新发现的物质进行深入的观察和分析。通过大量的科学实验,人们发现:放射性物质辐射出来的射线中含有三种不同性质的射线:

α 射线:这种射线很容易被几张纸就吸收掉。它是由带正电的 α 粒子组成的, α 粒子是带两个正电荷的高速氦离子。

β 射线:这种射线能穿透几毫米厚的铝片。它是由带负电的接近光速的 β 粒子组成的, β 粒子是带一个负电荷的电子。

γ 射线:这种射线的穿透能力非常强,能透过铅板,磁场也不能使它偏转。它是由波长很短(比X射线的波长还短,约在 10^{-9} 厘米以下)的光子组成的,这种光子叫做 γ 光子。

放射性元素在发出射线以后，它本身将变成具有跟原来元素不同性质的新元素。这种新元素如果也具有放射性，它将继续发出射线，直到最后变成不具有放射性的元素为止。我们把放射性元素发出射线而变成另一种新元素的现象叫做放射性元素的蜕变。

放射性元素能放出 α 粒子和 β 粒子的现象，进一步表明原子是可分的；蜕变现象则说明元素的原子是可以转变的，打破了原子是不可分割的最小微粒的形而上学观点。

三、原子的核式结构

阴极射线、X射线和天然放射性的发现，向人们提供了打开原子大门的钥匙。

一九一一年，人们在 α 粒子散射实验的基础上提出了原子的核式结构理论。它的主要内容是：

1、一切元素的原子都是由一个原子核和核外电子组成的。原子核的直径在 10^{-12} 厘米以下，其体积只占整个原子体积的亿万分之一，整个原子所带的正电荷和几乎整个原子的质量都集中在原子核中；

2、象行星绕太阳运行一样，核外电子不停地、高速度地绕原子核转动；

3、序数为 Z 的元素原子，其原子核所带的正电荷为 $+Ze$ ，核外电子数也等于 Z 。

结构最简单的原子是氢原子，如图16-2所示。它的核带一个电子电量的正电荷，核外只有一个电子绕它转动。

又如锂原子，它是由带三个单位正电荷的原子核和三个

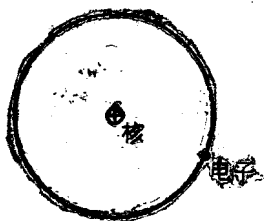


图 16-2

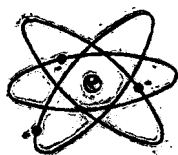


图 16-3

绕核运转的电子组成的（图16-3）。

四、原子的能级

电子绕核运转，具有一定的动能，电子被核吸引则具有一定的势能，这两者之和称为原子的内能。

宏观物体机械运动的能量是可以连续改变的，所以它的运动轨道也可以连续地变化。人造地球卫星的运动轨道就是这样的。

毛主席在《矛盾论》中指出：“任何运动形式，其内部都包含着本身特殊的矛盾。这种特殊的矛盾，就构成一事物区别于他事物的特殊的本质。”在原子内部，核外电子的轨道却不可以是任意的。这就是说，原子的内能是不可以连续变化的，它所允许的能量数值不可以是任意的，而是一系列不连续的、一级一级分开的、特定的数值，这个特性叫做能量的量子化，是微观世界物质运动重要的特殊点之一。能量的不连续性与电子和核之间相互束缚的强弱有关。例如氢原子中，电子越靠近核，则其一级一级的能量值就离得越远；当电子越远离核，则其一级一级的能量值就离得越近。当电子离核很远

(大于 10^{-8} 厘米)时,电子与核的相互束缚就小到可以忽略,分立的能级就几乎变成连续的了,这时的电子实际上已经脱离核的束缚而成为“自由电子”了。

我们把这些分立的不连续的能量数值叫做原子的能级。原子的能级通常是以电子伏特为单位的。图16-4表示氢原子的能级。能级1称为基态,其余的能级2、3、4……称为高能级(或称激发态)。

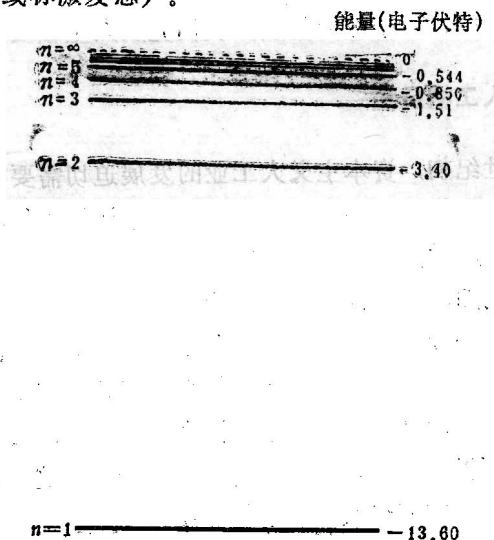


图 16-4

原子处于正常状态时,电子处于基态($n=1$),能量最少,也较稳定。当电子由于某种因素的激发吸收到一定能量时,它就跃迁到其他能量较高($n=2,3,4,\dots$)的可能轨道而处于激发状态,这时电子很不稳定,它能自发地跳回到能量较低的可能轨道上,并发出一个光子,这个光子的能量就等于电子跳回前后所具有的能量差,并由式(15-11)决定这个光子的频率。

第二节 原子核的组成

从上节我们知道，原子虽小，但它是由原子核与核外电子的更小微粒组成。辩证唯物主义的观点认为，物质是无限可分的、不可穷尽的。原子核虽然更小，但是它还可以一分为二。为了探讨原子核的组成，我们先从人工核反应谈起。

一、人工核反应

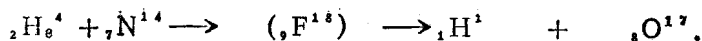
二十世纪初，资本主义大工业的发展迫切需要能源。这就促使人们去找出更多、更大能量而又经济的新能源。

由天然放射性物质辐射出来的 α 、 β 、 γ 射线都携带着很大的能量。例如，每克镭每小时能自动放出一百多卡的热量，这样几公斤的镭就将是个经久不熄的“炉子”。但是，放射性越强的元素在地球上存量越少。每吨铀矿中仅含四分之一克的镭，而且提炼也是十分困难的。因此，要大规模地从原子中获得能量，靠天然放射性是不行的。这就迫使人们去试图用人工的方法获得放射性物质。

一九一九年，人们用天然放射性中的高速 α 粒子作为“炮弹”，轰击氮核。氮核在 α 粒子的轰击下发射出一种贯穿本领很强的新粒子。这种新粒子就是氢原子核， H^1 ，我们把它叫做质子。同时，氮核变成了氧的同位素*。这是第一次人工改变化学元素。这种由于受到外来原因使化学元素发生改变的现象叫做核反应。上述实验的核反应过程可用核反应方程式表示

* 质量不同的同一种元素叫做同位素。

如下：



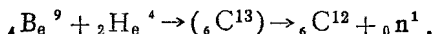
α 粒子轰击氮核形成氟的不稳定同位素放出质子，嬗变成氧的同位素。

后来，人们又陆续用这种人工核反应的方法改变了原子核。到一九三五年就制成了一百多种人工放射性同位素。

二、中子的发现

一九三〇年，人们继续研究人工核反应。在用 α 粒子轰击轻元素铍时，发现没有质子发射出来而发出一种穿透能力非常强的射线；后来又发现 α 粒子轰击硼也产生同样的情况。

经过大量实验的分析和研究，到一九三二年，人们便知道： α 粒子轰击轻元素（原子序数19以下）所辐射的射线是由不带电的粒子组成的，这种粒子的质量，大约等于质子的质量。这种粒子叫做中子，通常用 ${}_0\text{n}^1$ 来表示它。这样， α 粒子轰击铍、硼的原子核时其核反应方程式可以表示如下：



中子是一种不带电的粒子，它与原子核碰撞时不会受到静电排斥力，因而用中子作为“炮弹”能更容易地与原子核起核反应。从一九三三年到一九三八年，人们用中子对几乎所有已经发现的元素的原子核都进行了轰击，大大地推进了对核反应的研究，并人工地制造出很多自然界所不存在的新的放射性同位素。到现在，通过各种方法制备的人工放射性同位素已达一千二百多种，使人们得以摆脱天然放射性元素少的束缚而广泛地使用放射性元素了。

三、原子核的组成

原子是由原子核和核外电子组成的，但原子核又是由什么组成的呢？中子的发现对人们的认识深入到原子核内部具有重大的意义。

自从中子发现以后，人们才知道原子核是由质子和中子组成的。在原子核中，质子的数目等于它的原子序数，中子的数目等于它的质量数减去原子序数的差。质子和中子统称为核子。

例如，碳核， C^{12} 的质量数是12，原子序数是6，所以它是由6个质子和6个中子组成的，氢核， H^1 里只有1个质子而没有中子，因此氢原子核就是质子。

各种元素的同位素中，原子核的质子数相同而中子数不同。例如，在氯的同位素中， $_{17}Cl^{37}$ 是由17个质子和20个中子组成，而 $_{17}Cl^{35}$ 则是由17个质子和18个中子组成的。天然的氯就是由75%的 $_{17}Cl^{35}$ 和25%的 $_{17}Cl^{37}$ 所组成的。

第三节 原子核能及其释放

一、原子核能

核子在原子核中集聚得非常紧密，在直径为 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ 厘米的极小体积之内要容纳所有的质子和中子。因此原子核的密度是十分巨大的，它的数量级达到 10^8 吨/[厘米]³。

我们知道，质子都带正电荷，它们之间的距离又这样

小，因此它们之间的静电斥力是很大的。但是它俩为什么又能那么紧密地结合在一起呢？原来在核子之间存在着极强的引力，它克服静电斥力而将核子紧紧地团结在核内。我们把这种引力称为核子力，简称核力。核力是很强的短程（超出 3×10^{-13} 厘米时，核力就小到可以忽略了）作用力，并且只在相邻的核子之间存在。它是如何产生的，现在还不是非常清楚的。

以前学过，任何两个相互作用着的物体之间都有势能存在。如果它们是相互吸引的，那么当它们彼此靠近时就要放出能量。例如水蒸汽液化变成水滴时，要放出一定数量的能量。同样，若干个核子结合成原子核时也要放出一定的能量，这种能叫做结合能。不同元素的原子核，平均每个核子的结合能也不相同。平均结合能较大的核子结合成原子核时，所放出的结合能也大。前面讲过，化学元素是可以改变的。那末，当从平均结合能较小的核变成为平均结合能较大的新元素的原子核时，就有一定数量的能量被释放出来，这就是原子核能，简称为核能，通常把它叫做原子能。

重核、轻核的平均结合能小，中等质量的原子核的平均结合能大。因而重核分裂与轻核聚合这两种走向中等质量的原子核的过程都将释放出巨大的能量。这就是目前人们找到的大规模释放原子核能的两种途径：重核分裂反应——核裂变与轻核聚合反应——核聚变。

二、核裂变

上一节讲过，中子发现以后，人们便利用中子轰击几乎所

有发现的元素。一九三九年，当人们利用中子轰击铀原子核而企图获得超铀元素时，发现了一个现象：铀原子核分裂成两个原子量中等，质子数相近的原子核，并释放大量的能量和中子，这一现象称为铀核的裂变。每一个铀核裂变时释放出的能量约等于200百万电子伏特，1公斤铀完全裂变时释放出来的能量可以达到 2×10^7 千瓦小时，相当于2000吨最好的煤完全燃烧时所释放出来的化学能。此外，每个铀核裂变时还能放出2~3个中子。

裂变现象不是只有铀核才能发生，其他重原子核如钚和钷等，也能发生裂变。

铀原子核裂变伴随着释放大量的能量和中子，提示人们实现链式反应来大规模地获得原子能。所谓“链式反应”，就是让铀核裂变后所放出的中子去引起其他铀核发生新的裂变，并放出新一代中子，依此类推，便能使裂变连续不断地发生（图16-5）。这样就为人们获得大量的能量提供了实际的可能性。

当利用中子轰击铀核时，除了可能引起铀核裂变外，还可能是中子被铀核吸收而不分裂。天然铀中含99.3%的 U^{238}

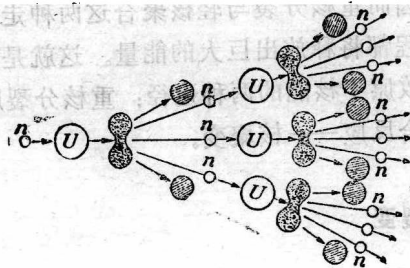


图 16-5

和0.7%的 U^{235} ，任何速度的中子都容易使 U^{235} 分裂，而且速度较慢的“热中子”使 U^{235} 分裂的可能性更大。 U^{238} 则只有当中子的能量大于1.1百万电子伏特（快中子）时，才能引起分裂，能量小于1.1百万电子伏特的中子则不能引起 U^{238} 分裂而可能被它吸收变成 U^{239} 。

另外，核裂变产生的中子有可能由于铀堆体积不够大而飞出铀堆，不再与铀核发生作用。

所以，要实现链式反应必须：在铀堆中增加 U^{235} 的百分比；并使裂变产生的中子减速成为“热中子”，以减少中子被 U^{238} 吸收的机会；使铀堆的体积大于“临界体积”，使中子不容易逃逸，也可以在铀堆外面包上一层反射中子的反射层。

三、原子弹

如果用纯净的 U^{235} 做裂变物质，那么链式反应将进行得特别快，大量的原子能将在极短暂的瞬间以爆炸的形式释放出来。原子弹就是利用这种链式反应的武器。

原子弹的构造如图16-6所示。弹壳内装着在球形外表有

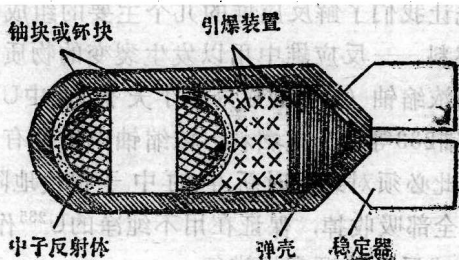


图 16-6

* 通常把裂变物质能够维持链式反应的最小体积称为临界体积。

中子反射层的两个半球形的纯铀 235 （或纯钚 239 ）。每一半的体积小于临界体积，但合起来则大于临界体积，这样当两半分开时不会引起爆炸，而当它们合拢时便组成一个大于临界体积的球体，于是爆炸立刻发生。使它们合拢在一起这个任务是由引爆装置来承担的，当引爆装置爆炸产生的压力迅速地把这两个半球形的原子炸药紧紧地压拢成一整块时，立刻引起原子弹的强烈爆炸。在这极为短暂的瞬间，温度骤增到一百万度以上，放出巨大的能量。在1公斤原子炸药的原子弹中，大约有十分之九的炸药来不及产生核分裂就被炸散，只有十分之一的原子炸药能够产生裂变，但放出的能量也是极为巨大的。

四、原子反应堆

如果链式反应的进行能够控制，那末我们就可以利用原子能作为动力。原子反应堆就是一种可以控制链式反应的装置。原子反应堆简称为反应堆或原子堆。

首先让我们了解反应堆的几个主要的组成部分。

核燃料——反应堆中用以发生裂变的物质叫做核燃料。一般采用浓缩铀（ U^{235} 的成分多于天然铀中 U^{235} 的成分）或钚 239 、钚 233 等作为核燃料。浓缩铀中仍含有一定数量的 U^{238} ，因此必须对裂变时新生的中子很快地降速，以免它们被 U^{238} 全部吸收掉，保证在用不纯净的 U^{235} 作为核燃料的情况下链式反应能顺利地进行。

减速剂——反应堆中用以降低中子速度的物质叫做减速

剂。一般采用石墨（含碳）或重水（含氘）作减速剂。

控制棒——反应堆中用以控制链式反应速度和功率大小的装置。一般采用能大量吸收中子的镉（或硼）做成。因为链式反应很快，一秒钟内可以产生一千代中子，因此在维持链式反应的同时必须控制它的速度，否则反应速度愈来愈剧，释放的能量越来越多，温度越来越高，以至发生爆炸。反应堆中的控制棒由自动控制系统控制着，当反应速度太快时，控制棒（如镉棒）就向反应堆中再伸进去一些，以便吸收掉更多的中子，反应速度便变慢；反之，则把控制棒向外拉出来一些，被吸收的中子数就会减少，反应速度便能加快。

载热剂——把反应堆中核燃料裂变时所释放的大量热量向外输送的传热材料。常用的载热剂有水、重水、液态金属钠等。

保护层——反应堆在工作过程中，要放射出很强的中子流、 β 射线和 γ 射线，为了防止这些射线损害工作人员的健康，因此反应堆总是安放在很厚的水泥保护层里。这些射线穿越保护层时，极大部分都被吸收从而保护了工作人员。

目前原子反应堆的类型很多。有均匀反应堆、非均匀反应堆以及再生反应堆，按所用减速剂的不同，还有石墨型反应堆、重水型反应堆等。

图16-7是石墨型反应堆示意图。燃料采用天然铀或浓缩铀，减速剂采用石墨，镉棒和铀条都插在石墨堆中。当中子穿越石墨时，与碳核碰撞很快地降速，移动镉棒就可以控制链式反应速度。水把反应过程中所释放的大量热量输送到外面，然后传给动力装置。一九四二年十二月在芝加哥建成的

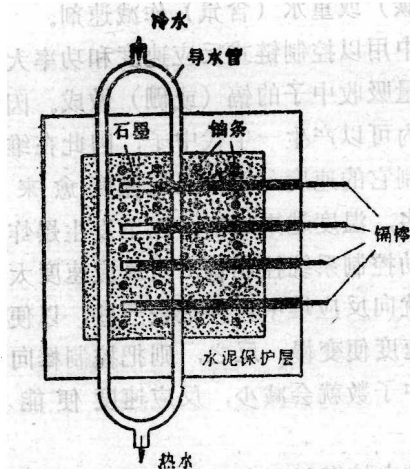


图 16-7

世界第一座原子反应堆就是石墨型的。

重水型反应堆与石墨型反应堆的结构相似，但它采用重水作为减速剂和载热剂。用重水作减速剂比石墨的效果好，不过重水型反应堆的成本比石墨型反应堆高。一九五八年六月十三日我国建成的第一座反应堆就是重水型的，这庄实验性重水型

原子反应堆的功率为7000瓩，最大功率可达10000瓩。

原子反应堆的用途主要有：

(1)原子能发电。载热剂把原子堆中裂变时所释放的热量带出，把水变为高温高压蒸汽推动发电机发电，这就是原子能发电站。

(2)生产大量的中子。这些中子可用来进行各种原子核物理的实验研究工作，也可以用来制取各种元素的放射性同位素。

(3)生产核燃料。反应堆可以制造新的可分裂物质钚239及铀233等，可以用作核燃料或原子爆炸。

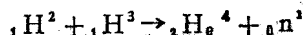
(4)生产放射性同位素。原子堆中的分裂碎片都是放射性同位素，因此反应堆可以说是制造放射性同位素的工厂。

五、核聚变

前面已经指出，除了可以用重核裂变反应来释放原子核能以外，轻核聚变反应也是获得原子核能的途径之一。

一些轻元素的原子核聚合成中等元素的原子核时能释放出大量的原子核能，这种反应叫做聚变。

同样重量的物质参加核反应时，聚变放出的能量远大于裂变所放出的能量。例如氘 (${}_1\text{H}^2$) 和氚 (${}_1\text{H}^3$) 聚变



时，平均每个核子放出3.5百万电子伏特的能量，而当 U^{235} 裂变时平均每个核子放出的能量约等于1百万电子伏特。1立方厘米水中的氢，如果全部聚变为氦，则可以发出二万度电！地球上大量的氢存在，同时，轻原子核聚变反应的产物（基本上是 ${}_2\text{H}_4$ ）是非放射性的，反应本身不至于使周围环境中毒。因此，如果能从氢核的聚变过程中获得能量，那末人类就可以获得一个取之不尽用之不竭的能源。

然而，要实现轻核的聚变却不是一件容易的事。

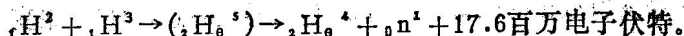
使大量的轻核发生聚变反应的一种方法，就是把反应物质加热到极高的温度（几千万甚至几万万度），让这些原子核获得很大的动能而彼此发生剧烈碰撞，这时就会发生聚变反应。因为这种核反应是在极高温度下进行的，因此把它叫做热核反应。

太阳所以能在几十万万年间不断地向周围空间辐射出巨大得惊人的能量，就是因为在太阳上不断地进行着热核反应的缘故。每秒钟从太阳辐射出来的能量相当于一亿亿吨煤完全燃烧所发出的能量，辐射到地球表面上来的仅占它的20亿

分之一。

六、氢弹

氢弹是利用轻元素的聚变反应（例如氢的同位素氘和氚迅速聚合变成氦的反应）而产生爆炸的武器。反应过程可用方程表示如下：



上面讲过，要使轻核聚变，关键在于需要获得几千万度的超高温，这样高的温度，迄今为止在地球上只有当原子弹爆炸时才能获得。因此氢弹要比原子弹复杂。原子弹用普通炸药引爆而氢弹则必须用原子炸药来引爆，用来引爆的原子炸药还必须用普通炸药引爆。

氢弹的构造如图16-8所示。

氢弹的壳内充满着氘和氚，这些就是氢弹的炸药，壳内还有一个普通的原子弹，原子炸药是两个分开的半球状，每一个半球状的体积小于临界体积，在半球处有为原子炸药引爆用的普通炸药。

当普通炸药爆炸时，两个半球形原子炸药被迅速地压拢在一起，由于超过临界体积发生原子爆炸，产生了超高温，因而氘和氚迅速而剧烈地进行合成氦的反应并释放出巨大的能量，这就是氢弹的爆炸过程。



图 16-8

氢弹的爆炸力比原子弹的爆炸力要强几百倍。氢弹中的炸药（氘和氚）没有临界体积的限制，原则上可以做到很大。但是氘和氚却不容易获得。要把天然氢中含万分之二的氘分离出来必须用复杂的物理方法。另外氚是不稳定的放射性同位素，所以氢弹不能储藏得很久。

七、打破核垄断

第二次世界大战以后，帝国主义竞相开展军备竞赛，大肆宣扬核恐怖，进行核讹诈，炫耀核威慑力量。

我国广大工人、解放军指战员和工程技术人员，牢记毛主席关于“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平”的伟大教导，打破社会帝国主义和帝国主义的重重封锁，克服一道又一道难关，于一九六四年十月十六日，成功地爆炸了我国第一颗原子弹。尔后仅两年多的时间，又于一九六七年六月十七日，成功地爆炸了我国第一颗氢弹。实现了伟大领袖毛主席一九五八年六月的英明预言：“搞一点原子弹、氢弹，我看有十年功夫完全可能。”

我国核武器试制成功，粉碎了社会帝国主义和帝国主义的核垄断和核讹诈的阴谋。我国发展核武器，完全是为了防御，是为了打破超级大国的核垄断。最终目的就是为了彻底消灭核武器和核战争。我国政府多次郑重宣布：“中国在任何时候，任何情况下，都不会首先使用核武器。”

我国核武器的制造成功，表明我国在最新科学技术领域中已经取得了伟大的胜利。是在党和毛主席的英明领导下所

取得的伟大胜利。我们深信，在毛主席革命路线的指引下，必将取得更大的胜利。

第四节 核武器的防御

毛主席教导我们：“原子弹是美国反动派用来吓人的一只纸老虎，看样子可怕，实际上并不可怕。”对核武器，只要我們了解它的性能、特点以及防御的方法，就能正确地认识它和有效地对付它。

一、核武器的杀伤和破坏因素

核武器爆炸时，产生杀伤和破坏的因素主要有四种：

1、冲击波：它是核武器爆炸时的主要杀伤和破坏因素。核武器在百万分之几秒内发生的爆炸，产生了高温高压高速的气浪，象突然刮起的飓风，强烈地压缩周围的空气层，形成力量强大的冲击波，以巨大的超音速从爆炸中心向四方冲去。对没有防护的人，造成耳膜和内脏震破的伤害、把人抛出很远，摧毁建筑物，破坏桥梁，激起石块和建筑物碎片造成杀伤，破坏输电线路引起火灾。

2、光热辐射：核武器爆炸时，形成一个超高温的火球，辐射出极强的光和热，致使各种物体温度迅速上升，烧焦或熔化，引起火灾。在一定距离内，能烧伤暴露人员的皮肤，尤其是使眼睛受到伤害。

3、贯穿辐射：核武器爆炸时产生肉眼看不见的中子射线

和 γ 射线，穿透能力很强。对人畜的器官有破坏作用，人被照射多了，会得不同程度的“放射病”，严重的会造成死亡。

以上三种因素只在爆炸后几秒至几十秒的时间内起作用。

4、放射性沾染：核武器爆炸时产生大量的放射性碎片和尘埃。随烟云漂落到下风方向地区。沾染人体、空气、泥土、水、粮食、物体表面。这种放射性尘埃对人体有伤害作用，落在皮肤上会引起皮肤溃烂，进入体内则损害内部器官，引起放射病。这种因素持续时间比较长，作用范围也较广。

核武器的杀伤破坏作用，集中在爆炸中心附近。离爆心越远，杀伤作用越小。地形、地物和气候对它都有很大影响。只要我们采取各种防御措施，就能大大减轻或避免其伤害的。

二、核武器的防御

毛主席教导我们：“战争的目的不是别的，就是‘保存自己，消灭敌人’”。根据核武器四种破坏因素的各自特点，可以采取相应的防御措施。

1、对冲击波的防御措施：

可以隐蔽在防御性的建筑物内。坚固的地下防御设备，如防空洞、地下室、战壕都可以防御冲击波，此外，各种地坑、沟渠、山洞和坚固的建筑物对冲击波也有一定的防御作用。另一方面，则要注意避开因建筑物的倒塌而造成的间接损伤。

2、对光热辐射的防御措施：

沟渠、战壕等对冲击波和光热辐射都有防御作用；利用各种不透光的物质可以有效地避免光辐射的直接烧伤；利用对

光辐射反射作用强的物质防御，如白色和浅色衣服都比深色衣服的防御效果好；要注意不能面对着核爆炸的方向，更不能着眼睛直接观察核爆炸。

3、对贯穿辐射的防御措施：

射线通过任何物体时都能被削弱，因此一定厚度的物体都能有效地进行防御。例如60厘米以上的水泥层或150厘米以上的土层，对贯穿辐射就有良好的防御效果。在防御冲击波的建筑物上加上足够厚的土层就可以增强防御能力，避免或减轻贯穿辐射的危害。

4、对放射性沾染的防御措施：

密闭的掩蔽部和有空气过滤设备的地下室都能防御放射性沾染，使用防毒面具以及穿着防护衣、防护手套，将湿毛巾、湿手帕盖住鼻子和嘴也可以使进入体内的放射性物质大大减少；有组织地撤离沾染区，缩短在沾染区的停留时间；不吃沾染区的东西；用肥皂和水冲洗身体和衣物。

核武器的四种杀伤因素是同时产生的，因此我们采取防御措施必须综合考虑。我们要按照毛主席关于“我们要有准备。有了准备，就能恰当地应付各种复杂的局面”的教导，做好一切准备，就完全能够粉碎敌人的核战争的。

超级大国的核讹诈和他们手中的核武器，阻挡不住全世界人民革命的滚滚洪流，也挽救不了他们必将灭亡的命运。胜利一定属于全世界的革命人民！

第五节 激光的产生及其应用

激光是六十年代以后发展起来的、以原子物理学、光学技术和电

子技术为基础，并在现代科学技术和现代国防发展需要的推动下，迅速成长起来的一门尖端科学，也是一项新兴的尖端技术。毛主席指出：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。”激光的出现，就是人们在认识自然和改造自然斗争中的又一次飞跃。

一、激光的特性及其意义

激光也是一种光，但它却有着很多优异的特性，这些特性是一般的光所望尘莫及的。

1、它的亮度极高，比太阳表面的亮度还高几亿倍。会聚高亮度的激光，可以产生几百万度的高温、几百万个大气压的高压和每厘米几千万伏的强电场，这样激光就为科学研究提供了一种极为有力的工具，另外还可以用来钻孔、切割，焊接精密、难熔的微型工件。

2、它的方向性极好，在激光器一端发出的是一束很细的平行光束。这样就能把光能在发射方向上高度集中，从而大大提高了激光的亮度。

3、它的单色性很高，比以往最好的单色光源——氪灯还要纯十万倍。这就为各种极其精密的测量和科学实验，提供了极为有利的条件。利用激光的单色性，还可以测量极其缓慢的速度和极其缓慢的角速度。

4、激光有很好的相干性。一般光源中，各发光中心相互独立，因此，很难有恒定的相位差，就不容易显示出干涉现象，就是说相干性很差。而激光器中各发光中心却是相互关联的，在较长时间内存在恒定的相位差，因此激光的相干性很好。激光的这种特性，可以利用来作精密测量。测量几十米的距离其误差小于1微米那是毫无问题的。

由于激光具有这些优异的特性，因而在工农业生产、国防和科研等各个领域中都有着广泛的用途。

二、激光的产生

组成物质的分子、原子、电子、原子核……这些粒子都处于永不停息的运动之中。当它们的运动状态发生变化时，就可能辐射出光子来。在普通光源中，各发光原子是各自独立地发光，这样发出的光子杂乱无章、互不相干，这种发光过程叫做自发辐射。在激光器中，各个原子却是互相关联地发光，以这种方式发出的光子几乎是完全一样的，这种发光过程叫做受激辐射。这就是激光和普通光的最本质的区别。上面讲的激光的优异的特性就是由此而来的。

那么激光是如何实现受激辐射的呢？

我们已经知道，原子的内能是不连续的而是一级一级分开的。正常情况下，低能级上原子数比较多而高能级上的原子数比较少，绝大多数的原子则是处于基态的。处在低能级的原子被激发到高能级时必须吸收一定的能量；而处于高能级的原子“跃迁”到低能级时则要放出一定的能量，这部分能量如果以光的形式辐射出去，就是原子发光。

导致原子从高能级向低能级跃迁的原因很多。第一种是由于原子本身的矛盾发展所引起的。原子被激发到高能级以后，处于不平衡状态，总是力图使自己落到低能级去，以达到新的平衡。因此原子自发地跃迁到低能级去并放出一定能量的光子，这就是自发辐射。

在外来的一定能量的光子的刺激下，处在高能级的原子也能向低能级跃迁，同时放出一个光子，这个光子与刺激它跃迁的外来光子的频率、相位、偏振方向、传播方向完全一样，这就是受激辐射。在这个过程中，外来一个光子变成了两个一模一样的光子，可见，光得到了放大。但与此同时，处在低能级的原子，也会吸收这个外来光子而激发到高能级上去，这就是光的吸收。在吸收过程中，光就减弱了。

可见，外来光子可能被吸收也可能引起受激辐射，前者使光子数减少而后者使光子数增加。这就是说，光吸收和受激辐射是一对矛盾。我们知道，事物的性质，主要决定于取得支配地位的矛盾的主要

方面。在光吸收和受激辐射这对矛盾中，谁取得支配地位决定于原子按能级的分布状况。在正常情况下，处于低能级的原子数总是比处于高能级上的多，因此，光吸收总是远大于受激辐射的。

如果能使处于高能级的原子数大于低能级的原子数（这种状态叫做“粒子数反转”），受激辐射就取得支配地位，而使输出光能超过入射光能。

如何达到“粒子数反转”呢？我们知道，原子从低能级激发到高能级必须吸收能量。如果我们从外界输入强大的能量，就可能把低能级的原子“激发”到高能级上去。例如红宝石激光器中，当脉冲氙灯（外界能源）照射红宝石时，使处于基态 E_1 的铬离子，被大量激发到高能级 E_3 中。由于 E_3 这个能级的寿命很短（ 10^{-9} 秒），原子在这个能级呆不住，很快地就自发跃迁到能级 E_2 中， E_2 是个亚稳态，寿命很长（这里的很长是相对来说的，大约几个毫秒），因此，在 E_2 这个能级上可以积聚大量的铬离子。当照射光足够强时，就可能使处于 E_2 能级的铬离子数超过处于基态的铬离子数，这样就实现了“粒子数反转”。

实现了“粒子数反转”，受激辐射便跃居为矛盾的主要方面，这时如果有能量为 $h\nu = E_2 - E_1$ 的光子引发时，就将产生 E_2 对 E_1 的受激辐射，并放出与引发光子完全一样的光子来。通过共振腔的作用，使光子共振，受激辐射便越来越强，这样激光便产生了。

三、激光器的工作原理

激光器是“光受激辐射振荡器”的简称，也叫“莱塞”。激光器的种类很多，自从一九六〇年出现的第一台红宝石激光器以后，到现在已经研制成功的激光器有几百种。根据不同的要求，可以使用不同的激光器。很自然地我们会提出这样的问题：激光器是如何输出激光的呢？

激光器由三个主要部分组成：激励装置、工作物质和共振腔，如

图16-9所示。

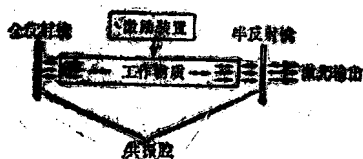


图 16-9

从外界供给激励装置以能量，激励装置通过光照射、气体放电等各种方式，把外界能量传输给工作物质。

工作物质在外界能量的激励下，实现粒子数反转，便能在一定的条件下发出光来，这种光叫受激辐射光，简称为激光。

为了使工作物质受激辐射放大光的过程能持续下去，必须在工作物质两边分别放置一块全反射镜和一块能够部分透光的半反射镜，这就组成了“共振腔”。工作物质的原子受到激励时要发射出一些光子来，这些光子的方向是任意的，其中与共振腔不平行的光子很快地就飞出腔外或被阻挡物吸收，而与共振腔轴线平行的光子，能够在共振腔内来回反射，从而激发其它原子，这样每次经过工作物质，都能由于受激辐射而得到放大，因而受激辐射强度越来越大，使大量的发光粒子相互关联地向着同一个方向发光。光每次到达半反射镜时，其中一部分便透镜子输出，另一部分则又反射回去。当工作物质对光的放大作用在支付激光输出和其他损耗以后能在共振腔内保持一定的光强，就能使受激辐射继续下去而不断地向外输出激光。这时，激光振荡就建立起来了。以上就是激光振荡的工作原理。

可以看出，共振腔在激光振荡过程中起着十分重要的作用，对激光器的工作情况起着决定性的作用，因此，设计和精密调试共振腔是激光技术中一项十分重要的工作。

激光器的工作方式有连续和脉冲式两种。连续激光器能稳定地输出一束激光来，而脉冲激光器则是一闪一闪地发光、每次脉冲的激光

能量集中在极短的时间（现在可以缩短到十亿分之几秒）内输出。激光器的输出功率在不断提高。目前连续激光器最大的输出功率已达到几十千瓦，而脉冲式激光器的脉冲峰值的输出功率已达到几百亿瓦，超过了全世界现有发电站功率的总和。

由于目前激光器的效率较低，外界输入的能量只有一小部分转换为激光能量输出，而其余部分转换为热。为了防止工作物质过热，所以大功率激光器要有冷却装置。

四、激光的应用

由于激光在方向性、亮度、单色性和相干性方面具有其他光源无法比拟的优异特性，因此在工农业生产、国防和科学技术的各个领域中具有极为广泛的用途。

在工业生产上，可以用激光对各种物体进行打孔、切割、焊接等精密加工。激光打孔，实际上就是将激光聚焦到很小范围内把工件“烧穿”。例如，生产化学纤维用的喷头，要在直径为10厘米的难熔硬质金属上钻一万多个直径为60微米左右的小孔，用激光打孔，两个小时就可以加工一个，质量也有保证。如果用机械加工，则需要1个熟练工人工作四、五个星期，而仔细检查这些孔的质量还需要更多的时间。另外，还可以利用激光作为长度标准和精密测量，在精密加工和电子元件制造方面都能应用。激光还可以做为准直工具，还可以测量流体速度、测量大气污染、不必接触就能测出超高压输电线中的电流等等。

在国防建设上，用激光作为辐射武器、能击毁敌方飞来的导弹、击穿装甲车和杀伤人员，并无需估计提前量；可以用作雷达，精密地测出目标的方位、距离和速度，对卫星、导弹等目标进行精密跟踪；还可以利用激光进行保密通讯；用红外激光束围绕警戒区，如果有人进入该地区时，遮断光线，光电接收器就会发出警报，这就是激光报

警器；还可以做成激光陀螺，给火箭、飞船导航。

在医学上，可以利用激光焊接视网膜；利用激光切割代替手术刀，进行细微的外科手术，既没有痛的感觉又不流血，特别适合在血管密集的部位进行微小的手术。

在农业上，用激光照射种子可以缩短生长成熟期，或增加遗传变异的机会，培育新良种。

此外，用激光作为光源，能得到大屏幕的彩色电视；利用它的相干性，可以拍摄一种叫做“全息照片”的立体照相、立体电影和立体电视。

在科学实验中，也有很多用途。例如，目前高功率聚焦，可以把氙加热到近一千万度的高温，这就为人们实现可控核聚变提供了新的希望。如果能够实现可控核聚变并利用它的能量，那末世界上就有一个取之不尽用之不竭的能源了。此外，还可以利用激光进行重力加速度的绝对测量；探测地震和地下核爆炸；进行快速光谱分析；进行宇宙探索。

以上仅仅举了激光应用的一些例子。实际上，由于它比寻常光具有一系列独特的优异性质，因此，它的用途极为广泛。在各个领域里的用途，还在发展之中，潜在的用途不胜枚举，不一而足。我国人民遵照毛主席关于“我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国”的教导，在三大革命运动中，破除迷信，解放思想，敢想敢干，使我国激光技术的发展获得了显著的成绩，必将把激光技术推广到更为广泛的领域中去。