

青年自学丛书

物理基础知识

(下册)

上海师范大学物理系 编

2011/26/08



上海人民出版社

目 录

第三编 声学基础

第九章 振动和波	2
第一节 简谐振动的基本规律	2
第二节 简谐振动的合成	16
第三节 阻尼振动和受迫振动	21
第四节 波的产生和传播规律	25
第五节 乐音	35
第六节 声波的反射和吸收	38
第七节 超声波	40
复习题	43

第四编 电 磁 学

第十章 电荷和电场	46
第一节 基本电现象	46
第二节 电的本质	51
第三节 电场 电场强度	54
第四节 电位	63
第五节 电场中的导体	72
复习题	80
第十一章 直流电	81

第一节	电流	81
第二节	导体的电阻	89
第三节	欧姆定律	95
第四节	直流电路	100
第五节	电与热的相互转化	114
复习题	121
第十二章	电流和磁场	123
第一节	磁场	123
第二节	几种通电导体的磁场	134
第三节	磁介质	139
第四节	磁场对电流的作用	146
第五节	电工测量仪表的作用原理	150
第六节	在磁场中运动的带电粒子	162
复习题	168
第十三章	交流电	171
第一节	电磁感应	172
第二节	交流电的产生	186
第三节	几种简单的交流电路	202
第四节	电动机原理	224
第五节	变压器	235
复习题	240
第十四章	晶体管基础知识	242
第一节	半导体	242
第二节	PN 结及其特性	247
第三节	晶体二极管的特性和参数	251
第四节	晶体二极管整流电路	253
第五节	晶体三极管	259
第六节	晶体三极管的静态工作点和偏置电路	268
第七节	晶体三极管在工农业生产中的简单应用	273

复习题	279
第十五章 无线电基础知识	280
第一节 电磁振荡和电磁波	280
第二节 电磁波的发送和调制	288
第三节 无线电接收机原理	292
第四节 超外差式晶体管收音机	297
复习题	308

第五编 光 学

第十六章 几何光学	311
第一节 光度学	311
第二节 光的直线传播	321
第三节 光的反射	326
第四节 光的折射	337
第五节 透镜成象	348
复习题	367
第十七章 光的本性	369
第一节 光的干涉	369
第二节 光的衍射	383
第三节 光的电磁本性	391
第四节 光电效应	398
第五节 光的波粒二象性	403
复习题	409
附录 习题答案	410

第三编 声学基础

敲锣打鼓时,如果用手接触锣面和鼓皮,可以发现它们都在振动。一切正在发声的物体都在振动,这种振动叫做声振动。那么我们又是怎样听到远处的锣鼓声的呢?这是因为锣面或鼓皮的振动引起了周围空气的振动,振动的空气又由近及远地一层层地依次振动起来,最后我们耳边的空气也振动起来了,从而使耳内的鼓膜也发生了振动,再传到内耳,刺激了听觉神经,我们就听到了声音。声振动在介质(如空气、水等)中的传播叫做声波。由此可见,振动和波有着密切的联系。波是振动在物体中的传播;而振动是波的根源。

毛主席教导我们:“人的认识物质,就是认识物质的运动形式”。在物质世界中,振动和波也是一种十分普遍的运动形式。声振动和声波都属于机械振动和机械波的范围。此外象交流电、电磁振荡、无线电波、光波等,它们同机械振动和机械波虽然在本质上完全是两回事,但是它们的某些特征和它们所遵循的某些规律却同机械振动和机械波有着十分类似的地方。因此掌握振动和波的一般规律对今后学习电学、光学也是有帮助的。

本编是在研究振动和波的一般规律的基础上介绍一些有关声学的基础知识及其在工农业生产技术上的应用。

第九章 振动和波

振动和波的知识是学习声学的基础。本章先从最简单的简谐振动讲起,分析它的运动规律,介绍描述振动的物理量和反映振动变化规律的振动方程,并简单介绍振动的迭加性以及受迫振动的共振现象。接着以水波和声波为例,进一步分析波的产生条件和传播方式以及波长与频率、波速间的关系。然后分析乐音的三个特性——音调、响度和音色,分析声波的反射和被介质所吸收的规律。最后简单介绍超声波的特性及其在工农业生产技术上的一些应用。

第一节 简谐振动的的基本规律

一、简谐振动

什么是振动呢?用绳子悬挂在铁钉上的重物,只要轻轻一推,它就左右来回地摆动不停;在挑担时,我们会感到扁担在上下颤动着;拖拉机在运转时,活塞也在汽缸里作来回的往复运动。一般说来,物体在某一平衡位置附近的往复运动叫做机械振动,简称振动。其实振动的现象是很普遍的。火车在过桥时,桥梁在振动;脱粒机的马达在转动时,机座和地基都在振动;一切正在发声的物体都在振动。

“就人类认识运动的秩序说来,总是由认识个别的和特殊的事物,逐步地扩大到认识一般的事物。”下面先来分析一种

最简单而特殊的振动。

将一根螺旋弹簧上端固定，下端系一重物(图 9.1)，这样所组成的系统叫做**弹簧振子**。起初，由于重物的重力和弹簧对重物的弹力相互平衡，因此重物处于它的平衡位置 O 点静止不动(图 9.1a)。如果把重物往下拉到 B 点再放开(图 9.1b)，重物就开始在平衡位置 O 附近的 B 、 C 两点间不停地上下振动起来。

为什么重物会上下振动不停呢？仔细分析重物的受力情况可以看出，重物始终受到重力和弹簧的弹力作用。为了使问题简单，

我们假设弹簧在振动过程中始终处于拉伸状态，因而弹簧对重物的弹力作用方向始终向上，而重物所受的重力方向却始终向下。弹力和重力构成一对矛盾。虽然重力的大小保持不变，但由于弹簧的长度时刻在变化，故重物所受的弹力大小也时刻在变化。通常把重物所受弹力与重力的合力叫做**弹簧的恢复力**，它的方向总是指向重物的平衡位置，企图使重物回到平衡位置。

当重物被往下拉到 B 点时，弹簧由于更被拉长，重物受到的弹力因而也增大而超过重力，成了矛盾的主要方面，从而使重物所受的恢复力的方向向上，开始向上作加速运动。随着重物的上升，弹簧的伸长逐渐减小，弹力也随之而减小，因此恢复力在逐渐减小着，重物向上运动的加速度在变小。等重物回到 O 点时，弹簧的弹力已减小到和重力相平衡，即恢复

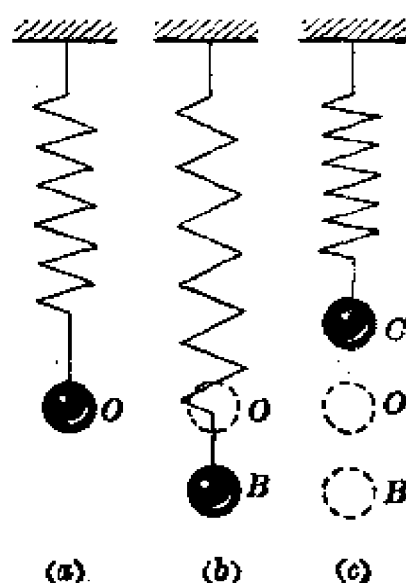


图 9.1 弹簧振子的振动

力减小为零。这时重物的加速度虽为零，但速度却已增大到它的最大值，因此重物不会停止在 O 点而要继续上升。在重物越过 O 点后，弹簧的伸长由于更为减小，重物受到的弹力也更为减小而小于重力。这时重力就成了矛盾的主要方面，因而重物所受恢复力的方向向下，对重物的继续上升起了阻碍作用，使重物作减速运动。随着重物的继续上升，弹簧的伸长越来越小，弹力随着而变得更小，起阻碍作用的恢复力却越来越大，终于迫使重物在到达 C 点时速度减小为零，不再继续上升（图 9.1c）。接着重物又在这个方向向下的恢复力的作用下开始向下作加速运动。与前面分析的情况一样，重物在回到 O 点时并不停止而要继续下降，此后弹力又超过了重力而成为矛盾的主要方面，开始阻碍重物继续下降，直到 B 点为止。重物以后的运动是不断重复上述过程。由此可知，正是在这两个相互联系又相互对立斗争的重力和弹力的作用下，弹簧振子就在平衡位置 O 点上下往复地振动不停。

重物在振动过程中，如图 9.1 所示，每当由平衡位置 O 点向上运动到 A 点，再经过 O 点而向下运动到 B 点，又回到 O 点，这样我们就说它完成了一次全振动。以后的振动不过是这个过程的重复。如果不存在其他阻力，物体每完成一次全振动所需的时间总是相等的。通常把振动物体每完成一次全振动所需的时间叫做振动的周期，用字母 T 表示，单位是秒；而把振动物体在单位时间内完成全振动的次数叫做振动的频率，用字母 f 表示，单位是次/秒，又称赫芝 (Hz)。

很明显，如果物体每秒钟完成了三次全振动，它的振动频率 f 就是 3 赫芝，而它的振动周期 T 就是 $1/3$ 秒。可见振动的周期与频率存在着倒数关系。即

$$T = \frac{1}{f}. \quad (9.1)$$

周期和频率都反映了物体振动的快慢程度。

振动物体离开平衡位置的最大位移叫做振动的振幅，通常用字母 A 表示。例如在图 9.1 中，重物的振幅 A 就等于 OB 或 OC 的长度。振幅反映了物体振动范围的大小。

必须指出：上面所讨论的重物所作的振动并非匀加速运动，因为它的加速度不是一个常量，而是一个大小和方向都在变化的量。下面来具体讨论重物加速度的变化规律。为了简单起见，我们在讨论中略去重物在振动过程中所受的阻力和弹簧本身的质量。设弹簧振子的平衡位置 O 点为坐标轴的原点(图 9.2c)。根据弹簧的性质，可以证明重物在振动过程中，弹簧的恢复力 F 是与重物对于平衡位置 O 点的位移 y 成正比*，即

$$F = -Ky, \quad (9.2)$$

式中 K 是弹簧的倔强系数，它决定于弹簧的材料、粗细和原长等。在米公斤秒制中，它的单位是牛顿/米。但由于恢复力 F 与位移 y 的方向始终相反，故在考虑力的方向后，它们的关

* 假设弹簧原长为 l_0 ，在平衡位置时的长度为 l (图 9.2a、b)，即弹簧伸长 $l-l_0$ 。根据弹簧弹力与其形变成正比的关系，可以列出

$$F_{\text{弹}} = K(l-l_0).$$

同时因为弹簧恢复力 F 是弹簧弹力 $F_{\text{弹}}$ 和重物所受的重力 P 的合力，因此当重物在平衡位置时，弹簧的恢复力 F 应为零，即

$$F = F_{\text{弹}} - P = K(l-l_0) - P = 0,$$

故 $P = K(l-l_0)$ 。

当重物到达平衡位置 O 点下方某一点 N 时，此时弹簧形变增大为 $l-l_0+y$ ，而 y 就是重物这时对于 O 点的位移。于是可以列出这时弹簧的弹力

$$F'_{\text{弹}} = K(l-l_0+y),$$

而这时弹簧的恢复力

$$F = F'_{\text{弹}} - P = K(l-l_0+y) - K(l-l_0) = Ky.$$

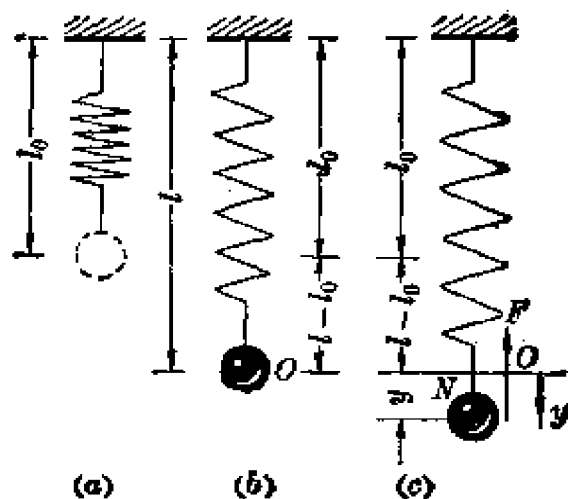


图 9.2 恢复力与位移的关系

系应为

$$F = -Ky. \quad (9.3)$$

再把运动定律公式 (2.29) 代入, 得

$$ma = -Ky,$$

因此重物在振动过程中加速度的变化规律为

$$a = -\frac{K}{m}y, \quad (9.4)$$

式中 m 是振子(重物)的质量。对于任何弹簧振子说来, K 、 m 都有确定的正值, 因此设

$$\omega^2 = \frac{K}{m}, \quad (9.5)$$

那么弹簧振子加速度的变化规律就可以写作

$$a = -\omega^2 y. \quad (9.6)$$

凡是加速度按上述规律变化的运动就叫做简谐振动。或者说, 在简谐振动中, 物体的加速度与它的位移成正比, 但方向与位移相反, 总是指向平衡位置。这就是简谐振动的基本特征。

简谐振动是最简单最基本的振动, 任何复杂的振动都可

* 有关 ω 的物理意义将在后面讨论。

以看作是由几个或许多个频率和振幅都不同的简谐振动的迭加。因此仔细研究简谐振动的规律也是研究复杂振动的基础。

二、简谐振动方程

简谐振动方程是描述作简谐振动物体的位移随时间怎样变化的关系。要了解弹簧振子在各个不同时刻的位置就必须知道它的简谐振动方程。一般说来，简谐振动方程完全可以根据简谐振动的基本特征 $a = -\omega^2 y$ 直接推导出来，但利用运动的迭加原理来得出更直观、更方便。

在生产实践中，我们经常会看到使转动和往复直线运动相互转化的传动装置，如图 9.3 所示。图中滑块 M 是在作以 O 为圆心的匀速圆周运动。整个水平杆 L 却在作水平方向上的往复直线运动，同时滑块又可看作在框架中作铅直方向上的往复直线运动，这表明滑块 M 的匀速圆周运动是由水平和铅直方向上的两个往复直线运动迭加而成的。可见振动和圆周运动间存在着密切的联系。进一步的探讨表明：当滑块 M 在以 A 为半径的圆周上作角速度为 ω 的匀速圆周运动时（图 9.4a）， M 在铅直直径 BO 上的投影点 P 在作以 O 点为平衡位置的简谐振动。具体证明方法如下：

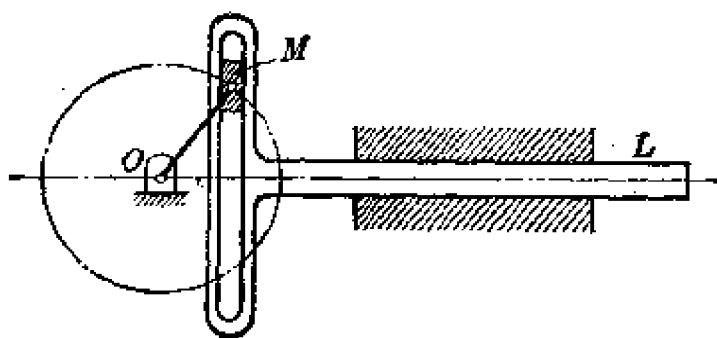


图 9.3

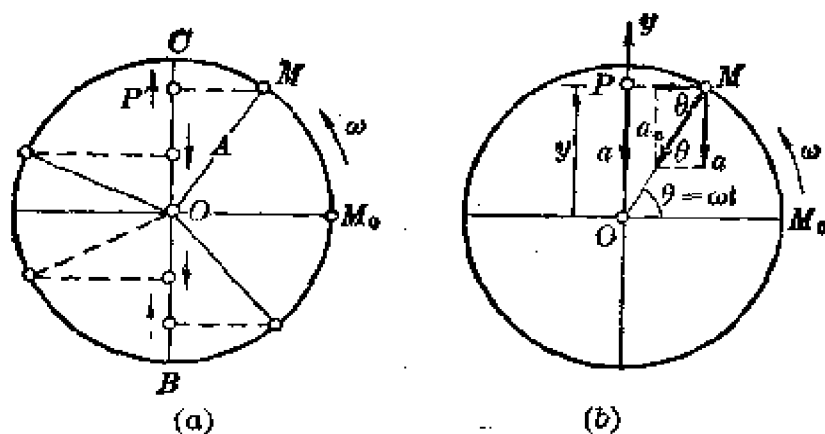


图 9.4 匀速圆周运动与简谐振动的关系

根据匀速圆周运动的加速度公式(2.16)和线速度与角速度的关系公式(2.27),可得到 M 作匀速圆周运动时的向心加速度

$$a_n = \frac{v^2}{A} = \frac{A^2 \omega^2}{A} = A\omega^2,$$

式中 A 是圆半径, ω 是角速度, a_n 的方向指向圆心 O (图 9.4b)。而 M 的投影点 P 的加速度 a 是 a_n 的铅直分量, 即

$$a = a_n \sin \theta = A\omega^2 \sin \theta,$$

式中 $\theta = \omega t$, 是滑块 M 从 M_0 出发 t 秒后转过的角度 (角位移)。这时投影点 P 对 O 点的位移

$$y = OP = A \sin \theta,$$

代入上式得

$$a = -\omega^2 y,$$

式中负号表示 a 与 y 方向相反。这完全符合简谐振动的基本特征, 表明 P 点的运动是简谐振动。因此在具体分析 P 点的简谐振动时, 通常把以它的平衡位置 O 为圆心, 振幅 A 为半径的圆叫做参考圆, 而把 M 叫做参考点。根据 P 点的简谐振动就是 M 点的匀速圆周运动的铅直分运动的关系就可以把简谐振动方程列出来。

假设 P 点是从它的平衡位置 O 点开始向上作简谐振动

的，同时参考点 M 在以 A 为半径的参考圆上从 M_0 点开始作角速度为 ω 的匀速圆周运动。经过 t 秒后， M 转过 θ 角 ($\theta = \omega t$)，而 P 点同时到达图 (9.4b) 的位置。于是可以列出 P 点这时的位移 y 随时间 t 变化的关系式：

$$y = OP = A \sin \theta,$$

即

$$y = A \sin \omega t, \quad (9.7)$$

这就是简谐振动方程的最简形式。

假设 P 点是从铅直直径上某一点 P_1 开始作简谐振动的 (图 9.5)，它的参考点 M 就相应地从圆周上 M_1 点开始作匀速圆周运动。设 $\angle M_1OM_0 = \varphi^*$ ，显然经过 t 秒后， M 转过的角度 (OM 与水平线所夹的角) $\theta = \omega t + \varphi$ ，这时 P 点的位移随时间 t 变化的关系式：

$$y = OP = A \sin \theta,$$

即

$$y = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (9.8)$$

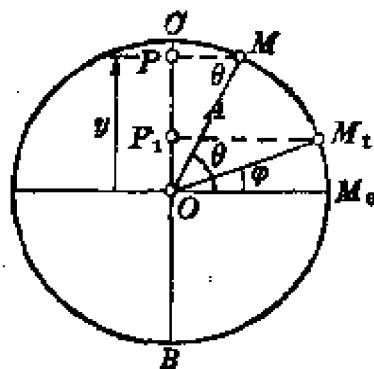


图 9.5

这就是简谐振动方程的一般形式。式中角度 $(\omega t + \varphi)$ 叫做简谐振动的相位角，单位是弧度**；其中角度 φ 是简谐振动在 $t=0$ 时的相位角，叫做初相位。相位角反映了作简谐振动物体的位置和运动状态 (包括运动状态变化的趋势)。例如当相位角等于 0 或 π 时，虽然 P 点都在它的平衡位置 O 点上，但两者运动状态不同，相位角等于零时， P 点的加速度等于零而速度为最大，并将向上运动；而相位角等于 π 时，同样 P 点的加速度为零而速度也为最大值，但它将向下运动。初相位反

* φ 是希腊字母，读作“phi”。

** 有关弧度的定义详见上册第 74 页。

映了物体在开始作简谐振动时的位置和运动状态。因为 $\sin(\omega t + \varphi)$ 只能在 $+1$ 和 -1 的范围内变化，不论时间 t 如何增大，位移 y 只是在 $+A$ 和 $-A$ 之间变化，因此 A 是简谐振动的振幅。

根据简谐振动方程可以看出作简谐振动的物体的位移随时间变化的关系正是正弦函数的关系。这一关系还可以用图 9.6 的装置通过图线直接显示出来。图中的弹簧振子就是由一根铅直悬挂着的弹簧和系在下面的重物 P 构成的。在重物 P 上装有小笔，匀速转动的卷筒使纸条沿水平方向匀速移动，笔尖就把重物 P 的位置记录在此纸条上。于是当重物在作简谐振动时，在纸条上就直接显示出一条正弦曲线。很明显，曲线上各点的纵坐标就是重物 P 在各个时刻 t 的位移。这条曲线生动地表明了简谐振动的位移随时间变化的详细过程。通常把它叫做振动图线。从图线上可以看出任何一点的位移值在每隔一定时间 T 后都会重复出现一次，表明简谐振动是一种周期运动。这个使位移值重复出现的最小时间间隔 T 就是简谐振动的周期。

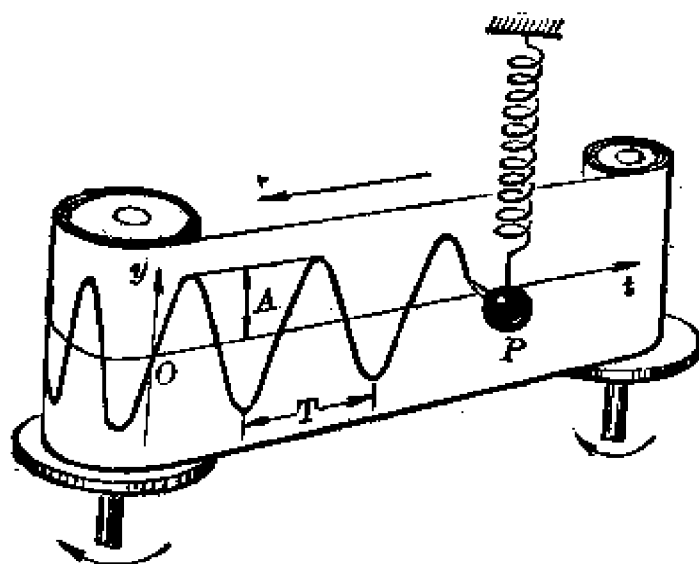


图 9.6

三、简谐振动的圆频率、频率和周期

怎样计算简谐振动的频率和周期呢?从图 9.4 可以看出, P 点作简谐振动的频率和周期就相当于参考点 M 作匀速圆周运动的频率和周期。

我们已经知道,在简谐振动方程中的 ω 是指参考点 M 作匀速圆周运动的角速度,这也就是公式(9.5)、(9.6)中 ω 的物理意义。通常把 ω 叫做简谐振动的圆频率。对于弹簧振子说来,由公式(9.5)可知,它的圆频率

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}}。 \quad (9.9)$$

假设参考点 M 作匀速圆周运动的频率为 f 次/秒,而参考点 M 每转 1 次就转过 2π 弧度,因此这时参考点 M 的角速度 $\omega = 2\pi f$ 弧度/秒。于是可以列出 M 点作匀速圆周运动的频率,即 P 点作简谐振动的频率

$$f = \frac{\omega}{2\pi}。 \quad (9.10)$$

对于弹簧振子说来,由于它的圆频率 $\omega = \sqrt{\frac{K}{m}}$,因此弹簧振子作简谐振动时的频率和周期分别为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}; \quad (9.11)$$

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}}; \quad (9.12)$$

式中 K 是弹簧的倔强系数,而 m 是弹簧振子的质量。对于确定的弹簧振子来说, K 和 m 是确定的,是振动系统的固有特性,因此通常把由式(9.9)、(9.11)所决定的频率叫做弹簧振子的固有频率。

[例题 9.1] 在上端固定的 $K=0.5$ 公斤/毫米的弹簧下端拴一质量为 1 公斤的重物。如果把重物从平衡位置铅直向下拉 2 厘米再放开, 若不计阻力, 它就作简谐振动。列出它的简谐振动方程, 算出频率和周期, 并作出简谐振动图线。

解: 按题意参看图 9.1, 把重物向下拉 2 厘米到 B 点再放开, 表明振幅 $A=OB=2$ 厘米 $=0.02$ 米。再由图 9.4a 可知, 重物由 B 点开始振动, 即相当于它的参考点 M 从 M_0 已转过 $3\pi/2$ 弧度而开始振动, 即它的初相位 $\varphi=3\pi/2$ 弧度。又因弹簧的倔强系数 $K=0.5$ 公斤/毫米 $=4900$ 牛顿/米; 质量 $m=1$ 公斤, 于是可以算出它所作简谐振动的圆频率

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} = \sqrt{4900} = 70 \text{ 弧度/秒,}$$

因此由简谐振动方程的一般形式 (9.8) 得重物的简谐振动方程

$$y = 0.02 \sin\left(70t + \frac{3\pi}{2}\right) \text{ 米。}$$

由公式 (9.11) 和 (9.12) 得振动频率和周期分别为

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{70}{2\pi} \approx 11.1 \text{ 赫芝,}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{70} = 0.0897 \text{ 秒。}$$

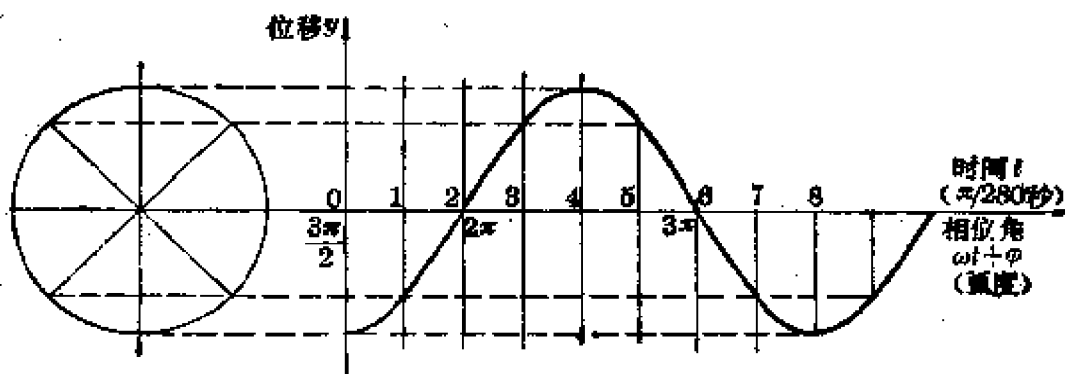


图 9.7 简谐振动图线

为了作出简谐振动图线，根据相位角 $\omega t + \varphi = 70t + \frac{3\pi}{2}$ 的关系，可以列出表 9.1，并利用参考圆可作出如图 9.7 的振动图线。

表 9.1 重物作简谐振动的时间与相位角的关系

时 间 t	0	$\frac{\pi}{280}$	$\frac{2\pi}{280}$	$\frac{3\pi}{280}$	$\frac{4\pi}{280}$	$\frac{5\pi}{280}$	$\frac{6\pi}{280}$	$\frac{7\pi}{280}$	$\frac{8\pi}{280}$...
相位角 $70t + \frac{3\pi}{2}$	$\frac{3\pi}{2}$	$\frac{7\pi}{4}$	2π	$\frac{9\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{2}$	$\frac{11\pi}{4}$	3π	$\frac{13\pi}{4}$	$\frac{7\pi}{2}$...

四、简谐振动的能量

弹簧振子的运动过程还可以运用能量守恒与转化定律来分析。弹簧振子的能量包括动能与弹性势能两部分，其动能与势能均随时间作周期性的变化。当振子从平衡位置被拉到 B 点的过程中（图 9.1），外力对系统作了功，使整个系统获得了弹性势能。振子到达 B 点时，系统的弹性势能就增大到它的最大值。手放开后，随着振子向上的加速运动，弹性势能逐渐减小而相应地转化为振子的动能。当振子回到 O 点时，弹性势能已减小为零，表明已全部转化为振子的动能，因此这时振子的动能最大。在振子越过 O 点继续上升到 C 点的过程中，振子速度逐渐减小，表明振子的动能在逐渐减小而相应地转化为系统的弹性势能。振子到达 C 点时，速度为零，全部动能都已转化为系统的弹性势能。振子以后的运动过程和前面分析的情况一样，系统的弹性势能又逐渐转化为动能，动能再转化为弹性势能。由此可知，弹簧振子的运动过程，实际上就是系统的弹性势能和动能相互转化的过程。如果没有能量损耗，那么不论振子在哪一个位置上，整个系统的机械能（系统

的弹性势能和动能的总和)保持不变,这个恒量就等于外力对系统所作的功。通常把作简谐振动的系统所具有的机械能叫做简谐振动的能量,简称振动能。

怎样计算简谐振动的能量呢?物体在作简谐振动中,运动到平衡位置时的速度最大而位移为零,此时系统的势能为零,整个系统的能量就是物体的动能。因此只要算出这时物体的动能也就找出了系统全部的振动能。从参考圆上可以看出,振动物体 P 在平衡位置上的速度就是它在圆上的参考点 M 的速度(图 9.8),即 $v_{\text{最大}} = v_M = \omega A$, 因此它的动能的最大值

$$(E_K)_{\text{最大}} = \frac{1}{2} m v_{\text{最大}}^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2,$$

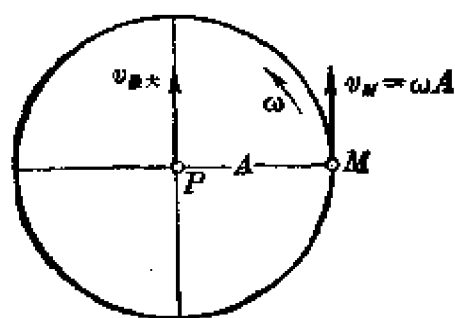


图 9.8 振动物体 P 速度的最大值

式中 m 就是振动物体的质量。从而可得物体作简谐振动的能量

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 = 2\pi^2 m f^2 A^2. \quad (9.13)$$

上式表明:物体作简谐振动的能量与频率的平方、振幅的平方都成正比。可见振幅越大,振动越强烈,系统的振动能就越大。

对于弹簧振子说来,由于圆频率 $\omega = \sqrt{\frac{K}{m}}$, 故振动能

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} m \cdot \frac{K}{m} A^2 = \frac{1}{2} K A^2. \quad (9.14)$$

[例题 9.2] 质量为 0.5 公斤的物体作简谐振动的方程已知为 $y = 0.1 \sin\left(\pi t + \frac{\pi}{3}\right)$ 米, 求它的频率和振动能。

解: 从振动方程中可以看出: 振幅 $A = 0.1$ 米; 圆频率 $\omega = \pi$ 弧度/秒, 因此按公式 (9.10) 可以算出频率

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\pi}{2\pi} = \frac{1}{2} \text{ 赫芝。}$$

又知质量 $m = 0.5$ 公斤, 按公式 (9.13) 可以算出振动能

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \times 0.5 \times \pi^2 \times (0.1)^2 = 0.0247 \text{ 焦耳。}$$

习题 9.1 简谐振动是匀变速运动吗? 为什么?

习题 9.2 试根据简谐振动方程和简谐振动的特征列出简谐振动的加速度随时间变化的关系式。

习题 9.3 已知作简谐振动的物体质量为 0.6 公斤, 振幅为 0.2 米, 圆频率为 4π 弧度/秒, 初相位为 $\frac{\pi}{2}$ 弧度。求它的振动方程, 并算出它的周期、频率和振动能。

习题 9.4 质量为 0.8 公斤的物体作简谐振动的方程为

$$y = \frac{1}{2} \sin\left(3\pi t + \frac{\pi}{4}\right),$$

式中 y 、 t 的单位分别为米、秒。求

- (1) 振幅和周期;
- (2) 起始位移(即 $t = 0$ 时的位移);
- (3) 3 秒末时的位移;
- (4) 简谐振动的能量。

习题 9.5 在一根上端固定的细线下端系一重物, 将重物轻轻一推, 它就摆动不停(图 9.9), 这种装置叫做单摆。理论证明, 在摆动的偏角很小时, 单摆的振动也是简谐振动。它的圆频率

$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$, 式中 g 是所在处的重力加速度, 是从

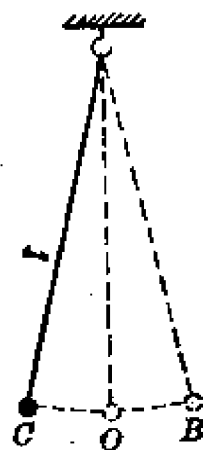


图 9.9 单摆的振动

细线固定点到重物重心的距离叫做摆长。试列出单摆振动的频率和周期公式。

第二节 简谐振动的合成

简谐振动是最简单、最基本的振动,任何复杂的周期性振动都可以看作是由许多个简谐振动合成的。现在就来讨论简谐振动在合成中的一些特殊规律。

一、在一直线上两周期相同的简谐振动的合成

一个物体往往可以同时参与两个振动,这时物体所作的振动实际上就是由它同时参与的两个振动的合成。通常把这两个振动叫做分振动,而把由分振动合成的振动叫做它们的合振动。很明显,如果两个分振动是在一直线上进行的,并且具有相同的平衡位置,那么合振动在某一时刻的位移就等于两个分振动在这一时刻的位移的代数和。

假设两个在一直线上具有相同平衡位置的分振动的振幅分别为 A_1 、 A_2 , 初相位分别为 φ_1 、 φ_2 , 而它们的圆频率都等于 ω , 因而具有相同的频率和周期。于是分振动的振动方程分别为

$$y_1 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$y_2 = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2);$$

而它们的合振动的振动方程就应该是

$$y = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega t + \varphi_2)。 \quad (9.15a)$$

运用数学方法可以把上式化成如下的形式:

$$y = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (9.15b)$$

表明它们的合振动也是一个圆频率为 ω 的简谐振动, 周期没

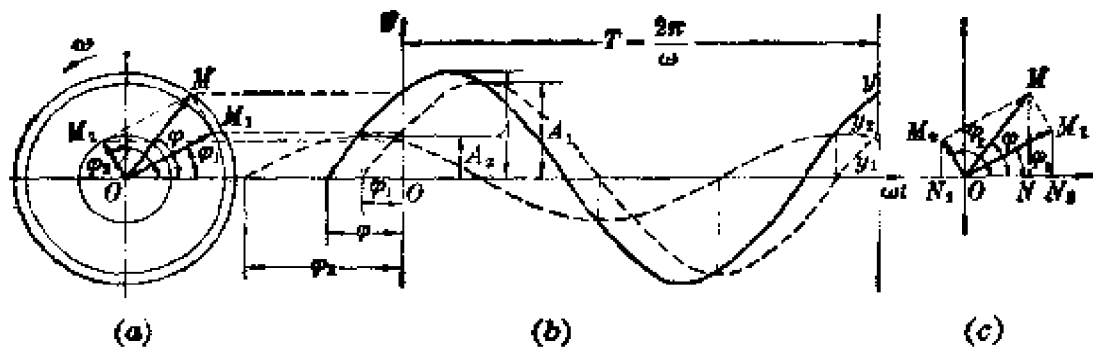


图 9.10 在一直线上两周期相同的简谐振动的合成

有改变，只是振幅和初相位不同。式中 A 、 φ 就分别表示合振动的振幅和初相位。如图 9.10a 所示，通过作图法在同一坐标上按同一比例作出了这两个分振动（图中虚线）以及它们的合振动（图中实线）的图线。至于合振动的振幅和初相位与两分振动的振幅、初相位的关系可从它们的参考圆上找出来。从图 9.10a、c 中可以看出， M 、 M_1 、 M_2 分别表示合振动和两个分振动的参考点的起始位置，而 OM 、 OM_1 、 OM_2 分别等于它们的振幅 A 、 A_1 、 A_2 。这时分振动的相位角依次为 φ_1 、 φ_2 ，而合振动的相位角为 φ 。于是根据 OM_1MM_2 是平行四边形的关系运用三角学中的余弦定理可以列出

$$\left. \begin{aligned} A^2 &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \\ \text{而 } \operatorname{tg} \varphi &= \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2} \end{aligned} \right\} \quad (9.16)$$

上式表明，合振动的振幅 A 与两个分振动的相位差 $\varphi_2 - \varphi_1$ 有着密切的关系。下面来讨论两种特殊情况：

1. 当两个分振动的相位差 $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$ ，或 $\pm 2\pi$ ， $\pm 4\pi$ ， \dots 时，即 $\varphi_2 - \varphi_1 = 2K\pi$ ($K = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) 时， \cos

* 从图 9.10c 中可以看出：

$$A \sin \varphi = A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2 \quad (\text{即 } MN = M_1N_1 + M_2N_2);$$

$$A \cos \varphi = A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2 \quad (\text{即 } ON = ON_1 + ON_2).$$

把以上两式相除，即可得出 $\operatorname{tg} \varphi$ 的关系式。

$(\varphi_2 - \varphi_1) = +1$ 。这时分振动 y_1 和 y_2 同时到达最大值, 又同时到达它们负的最大值, 步调完全一致。这就叫做 y_1 和 y_2 同相。两个同相的分振动合成时, 它们互相加强, 因而它们的合振动 y 最强, 振幅最大(图 9.11a)。其振幅

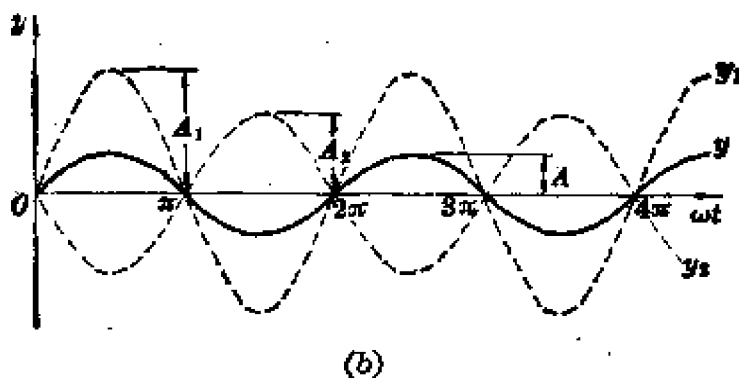
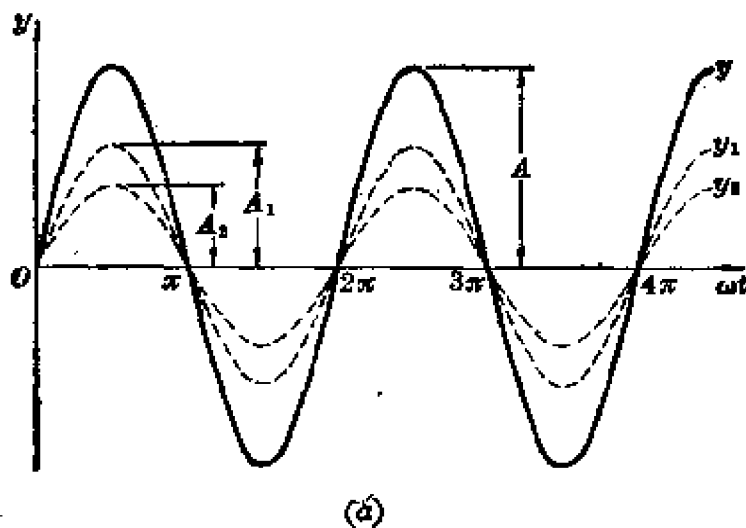


图 9.11

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2} = A_1 + A_2. \quad (9.17)$$

2. 当两个分振动的相位差 $\varphi_2 - \varphi_1 = \pm\pi$, 或 $\pm 3\pi$, $\pm 5\pi$, …… 时, 即 $\varphi_2 - \varphi_1 = (2K+1)\pi$ ($K=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) 时, $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$ 。这时当分振动 y_1 到达它的最大值时, y_2 恰好到达它的负的最大值, 步调完全相反。这叫做 y_1 和 y_2 反相。两个反相的分振动合成时, 它们互相减弱,

因而它们的合振动 y 最弱, 振幅最小(图 9.11b)。其振幅

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2} = |A_1 - A_2|。 \quad (9.18)$$

如果两个反相的分振动振幅相等, 即 $A_1 = A_2$, 那么它们的合振动的振幅 $A = 0$, 表示它们的振动相互抵消了。

二、在一直线上两周期不同的简谐振动的合成

如果两个分振动的圆频率不同, 那么它们的频率和周期也各不相同。实践表明, 在这种情况下它们的合振动已经不是简谐振动, 而是复杂的周期振动。

现在来分析一种特殊情况: 两个在一直线上具有相同平衡位置、振幅相同、且圆频率十分接近的分振动的合成。设它们的振动方程分别为

$$y_1 = A \sin \omega_1 t,$$

$$y_2 = A \sin \omega_2 t,$$

那么它们的合振动的振动方程

$$y = A(\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t)。$$

显然, 我们不可能把上式化成简谐振动方程的形式。但是运用三角函数公式可以把上式变为

$$y = \left[2A \cos \left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \right) \right] \sin \left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \right)。 \quad (9.19)$$

这样, 我们就可以把它们合振动的合振动看作是振幅等于 $2A \cos \left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \right)$ 、圆频率等于 $\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$ 的一种特殊的简谐振动, 它与一般简谐振动的区别在于它的振幅是个变量, 在 0 与 $2A$ 间摇摆。图 9.12a、b 是符合上述条件的两个分振动的图线, 而(c)就是它们的合振动的图线。图中的虚线叫做包络线, 它反映了合振动振幅的摇摆情况。显然, 这个振幅也是按

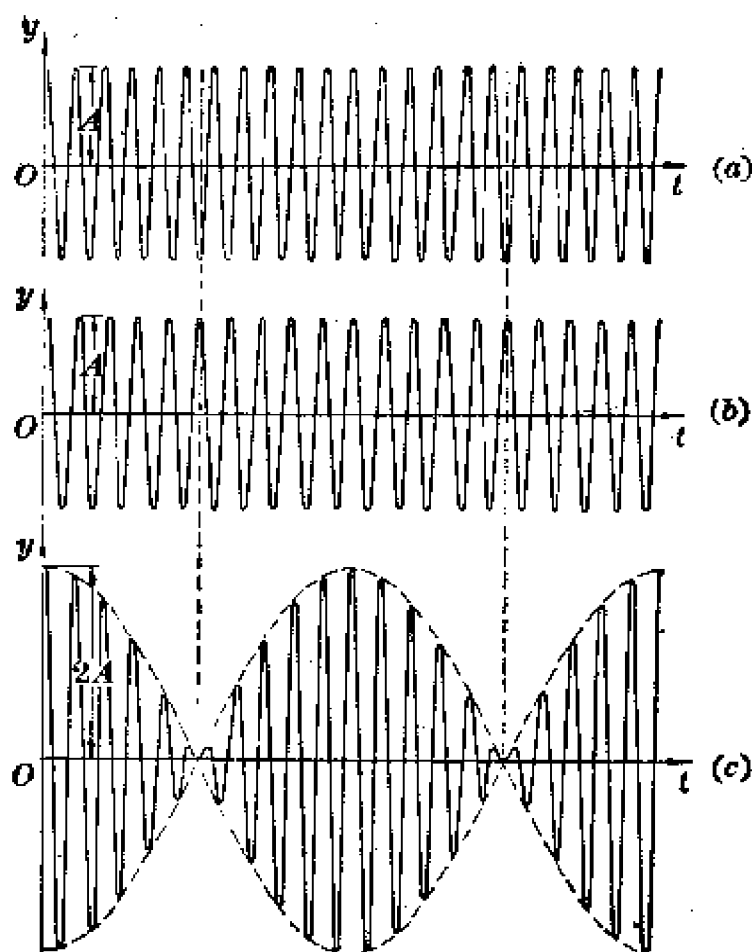


图 9.12 在一直线上两振幅相同而周期相近的简谐振动的合成

简谐振动的规律摇摆的，圆频率等于 $\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}$ *。因此振幅的摇摆周期为 $\frac{4\pi}{\omega_1 - \omega_2}$ ，而它的一半就是合振动（包络线所示）

的周期，即
$$T = \frac{2\pi}{\omega_1 - \omega_2} \quad (9.20)$$

可见合振动的频率就等于两个分振动的频率之差，即

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2\pi} = \frac{\omega_1}{2\pi} - \frac{\omega_2}{2\pi} = f_1 - f_2 \quad (9.21)$$

* 振幅 $2A \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t\right)$ 可以变形为 $2A \sin\left[\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t + \frac{\pi}{2}\right)\right]$ ，故圆频率为 $\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}$ ，而初相位为 $\frac{\pi}{2}$ 弧度。

第三节 阻尼振动和受迫振动

一、固有振动和阻尼振动

一个振动系统从外界得到一定的能量开始振动后，如果不再受到外界的干扰（如摩擦力、空气阻力等），它就自由地振动，系统的能量不会消耗，振幅也不会减小，振动就永远不会停止。象这种理想的等幅振动叫做固有振动。固有振动的频率与周期叫做振动系统的固有频率和固有周期（参看本章第一节三小节）。

实际上物体的振动并不那么简单，外界对物体振动的干扰是不可避免的。如弹簧振子在起振以后，由于空气阻力的存在，振动的机械能就会逐渐耗失（转化为热；同时振动物体的能量，还会因振动的向外传播而把能量辐射出去而减少）。因此，振动物体的振幅也就会逐渐减小，经过一段时间后振动就完全停止。这种现象叫做振动的阻尼。象这种振幅随时间逐渐减小的振动叫做阻尼振动。这种阻尼振动的图线如图 9.13 所示。很明显，它已不再是简谐振动了。停在河面上的小船所

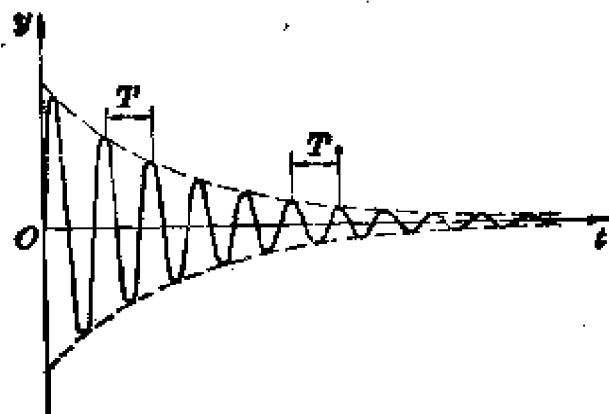


图 9.13 阻尼振动的图线

发生的颠簸会很快停息下来, 铃声持续一段时间就消失, 表明这些振动都是阻尼振动。阻尼振动振幅减小的快慢是由阻尼的大小决定的。同样一只单摆, 在空气中振动可以持续相当长的时间, 而在水中振动持续时间就很短, 甚至连一次全振动也不能完成就停止在平衡位置上。

振动的阻尼现象是普遍存在的。但对阻尼也要一分为二, 有时阻尼是有害的, 而有时却是有益的。例如在钟表里为了使摆的振动减小阻尼, 就要经常在摆轴的轴承里添加润滑油。又如飞机在着陆时会发生剧烈的振动, 如果振动时间持续过长会使飞机受到损害, 因此在飞机起落架上的减震器里, 装有增大阻尼作用的减震油, 使振动很快停止。这时阻尼是有益的。

二、受迫振动和共振

阻尼振动的振幅所以会不断减小是因为在振动过程中物体不断克服阻力做功和向外辐射能量而消耗了自己能量的缘故。如果物体在振动过程中不断受到外力的推动, 那么即使存在阻力和辐射, 振幅也不会减小, 物体就可以连续振动不停。通常把振动系统在周期性变化的外力(简称策动力)的持续作用下发生的振动叫做受迫振动。例如缝纫机上缝针的振动、拖拉机气缸里活塞的振动都是在策动力的作用下进行的受迫振动。

振动系统在作受迫振动时, 它一方面由于策动力对它做功而获得能量, 另一方面又由于阻力和辐射的存在而耗失能量。起初策动力对它所作的功是大于它由于阻尼而耗失的能量, 因而系统的振动能是逐渐增大的。随着振动能的增大, 系统的振动速度也增大, 阻尼也相应地增大, 直到策动力对系统

所作的功恰好补偿了系统由于阻尼而耗失的能量时，系统的振动能就保持不变，振动状态就保持稳定而成为等幅振动。因此在稳定以后，系统作受迫振动的频率（或周期）等于策动力的频率（或周期），而与系统本身的固有频率（或固有周期）无关。这是受迫振动的特点。

图 9.14 是个简单的小实验。在绷紧的绳 UV 上挂着四个单摆 A 、 B 、 C 、 D ，其中 A 的质量大得多，而 A 和 C 的摆长相等，而 B 的较长， D 的较短。如果推一下单摆 A ，使它发生振动，不一会儿就会发现其他三个单摆都跟着振动起来，振动频率也和单摆 A 的一样。这是因为单摆 A 的振动通过绳 UV 对其他三个单摆起了策动力的作用，使它们都作受迫振动。当单摆在自由振动时，它的振动频率决定于它的摆长。摆长越长，振动频率就越小*。为什么现在这三个长短不同的单摆的振动频率却和单摆 A 一样呢？这是由于受迫振动物体的振动频率等于策动力频率的缘故。

在上述实验中还会发现，三个作受迫振动的单摆中， C 的

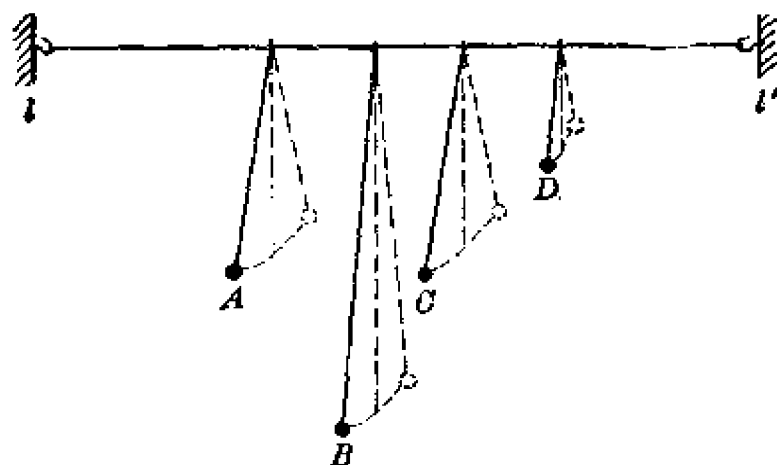


图 9.14 单摆的共振现象

* 单摆的固有频率 $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$ ，式中 g 是所在处的重力加速度； l 是摆长。

振幅最大, B 和 D 的振幅都较小, 这又是为什么呢?

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。对于这三个单摆说来, 它们所受的策动力的频率相同, 说明外因是相同的, 但振幅不同是由于它们本身的性质不同。单摆 C 的振幅最大, 这是因为它的摆长与作为策动力的单摆 A 的摆长相等。单摆 C 在受迫振动中, 由于策动力的频率恰好等于它的固有频率, 因此策动力的方向总是与它的运动方向一致, 策动力总是作正功。所以单摆 A 对 C 作功最多, C 的振动能最大, 振幅就最大。其余两个单摆在受迫振动中, 由于它们的摆长与单摆 A 不同, 固有频率也不同, 因此策动力的方向与它们的运动方向有时不完全一致, 策动力有时要作负功。所以它们获得的能量就较少, 振幅就较小了。由此可知, 系统在作受迫振动时, 如果策动力的

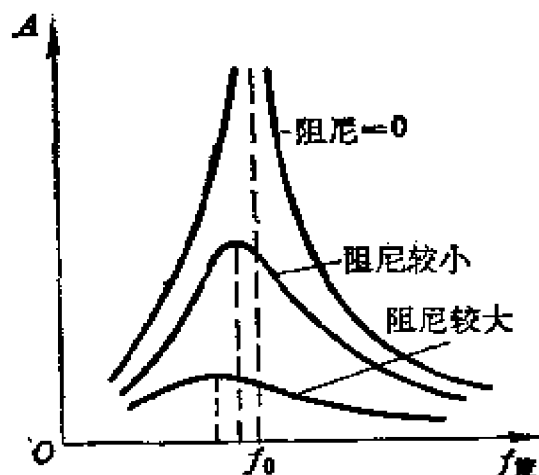


图 9.15 共振曲线

频率等于或接近于系统的固有频率, 此时系统的振动就特别强烈, 受迫振动的振幅最大。这种现象叫做共振。这个与系统的固有频率相等的策动力的频率就叫做共振频率。图 9.15 就是表示这种关系的共振曲线。

对于共振现象, 早在北宋时期, 我国著名的法家和自然科学家沈括 (1031~1095 年) 就已对它进行过研究。沈括在《梦溪笔谈》一书中写道: “予友人家有一琵琶, 置之虚室, 以管色奏双调, 琵琶弦辄有声应之, 奏他调则不应, 宝之以为异物。殊不知此乃常理。”(卷六《乐律》) 这里的“应”就是指“共振”。意

意思是说,琵琶等弦乐器是由弦线的振动而发声的,其音调的高低是由弦线的长度、张力和粗细等因素(弦线振动系统的固有频率)决定的。当外界发出的声音(“管色”所奏之声)中含有这一频率时,该弦线就会振动而发声,这就是共振现象。

在农业机械和矿山机械中的共振筛,就是利用共振原理使小功率的马达可以带动大筛子,产生较大的振幅,提高生产效率。但在某些情况下,共振现象却是有害的,必须设法避免。例如火车过桥时,如果车轮对铁轨衔接处的冲击力的频率和桥梁的固有效率相同或十分接近,就会引起桥梁的共振,使桥梁受到损害,甚至有倒塌的危险。因此火车在过桥时必须放慢速度,使这种冲击力的频率远离共振频率。部队在过桥时也要避免整步走,以防止整齐的步伐对桥梁的周期性的冲击引起桥梁的共振。

习题 9.6 在用扁担挑水时,如果走路的步伐一定,为什么水桶的振动就很厉害?怎样才能使水桶的振动减小?

第四节 波的产生和传播规律

一、波的产生条件

毛主席教导我们:“每一事物的运动都和它的周围其他事物互相联系着和互相影响着。”物体的振动也和周围其他事物互相联系着和互相影响着。一方面周围介质(如空气、水等)的存在对物体的振动有阻力作用;另一方面物体的振动可以影响周围的介质,使它们也相继发生振动。象这种振动在介质中的传播就叫做机械波,简称波。例如当石块落在平静的水面上,就在石块落处的水面会上下振动,而且这种振动还沿着水面向周围传播,形成一圈圈向外扩展的水面波(图9.16)。

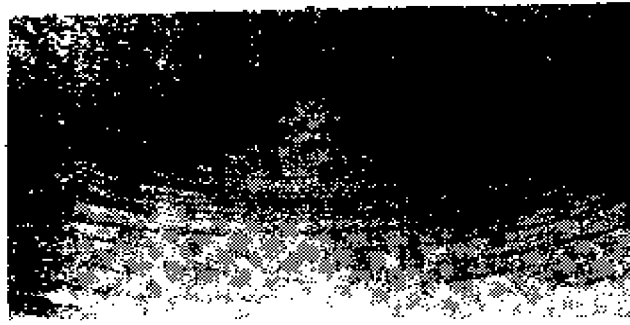


图 9.16 水面波

然而大多数的波并不象水面波那么直观,往往是看不见的。

声振动在介质中的传播叫做声波;声波的波源叫做声源。胡琴、琵琶等弦乐器是靠弦的振动来发声的,因此弦就是声源。不仅固体可以作为声源,液体、气体也可以作为声源。风琴、喇叭、笛子和一切管乐器都是靠管内空气柱的振动而发声的。它们都是气体声源的例子。

介质是由于它本身的弹性而能够传播振动的。由于固体、液体、气体或多或少都具有弹性,因此都能传播振动。例如把耳朵贴在铁轨上可以听到远处火车行驰的声音;鱼在水中能听到岸上人的脚步声而逃走。有经验的工人老师傅能从机器的运转声中判断出机器运转情况是否正常。

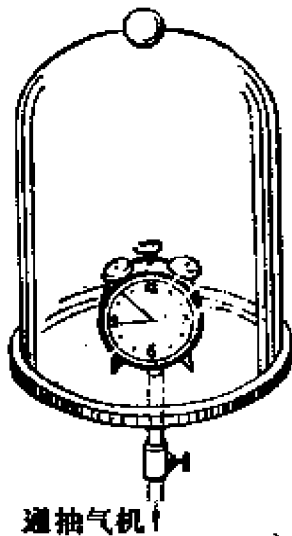


图 9.17

机械波只能在介质中传播。例如把正在发声的闹钟放在跟抽气机连通的玻璃罩内时(图 9.17),闹钟的铃声就会随着罩内空气被抽出而逐渐减弱,当罩内空气十分稀薄时,闹钟的铃声几乎消失。这表明在声源周围没有介质存在时,声波就不能产生。由此可知:要产生机械波,首先要有作机械振动的物体——波

源；同时还必须要存在能够传播这种机械振动的物质——传播介质。

此外，从水面波的例子中还可以发现，如果水面上浮着树叶细枝，当水面波经过时，树叶细枝只是跟着它所在的水面上下振动，而不会顺着水面波的传播方向移动。这就表明，在波动过程中，传播介质的各个部分只是相继在它们各自的平衡位置附近作振动，并不会顺着波的传播方向而移动。这一现象反映了波的实质。实际上随着波动方向传播开去的只是能量，而不是介质本身。正是由于波源把能量传递给了周围介质，介质才会振动起来。所以波的传播过程，实质上就是能量的传播过程。

二、横 波

机械振动为什么能在介质中传播而形成机械波呢？外界波源的振动只是引起机械波的条件，而介质本身的弹性才是形成机械波的根本原因。例如把一根弹性较大的橡皮绳的一端固定，用手拿着另一端作上下摆动，就会看到一个前凸后凹的波形在橡皮绳上传播着(图 9.18)。

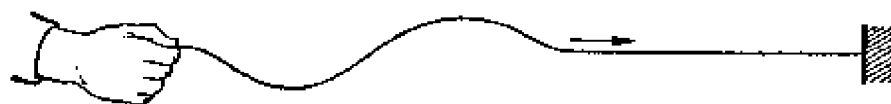


图 9.18

为了具体分析这个波的传播规律，设想橡皮绳是由许多点排列而成，这些点具有弹性，故只要发生形变，它们之间就会产生弹力。起初各点都在它们各自的平衡位置上(图 9.19a)。当离手最近的点 1 在外力作用下开始向上作受迫振动时，由于形变而产生弹力，使点 2 也跟着作完全相同的受迫振动，只

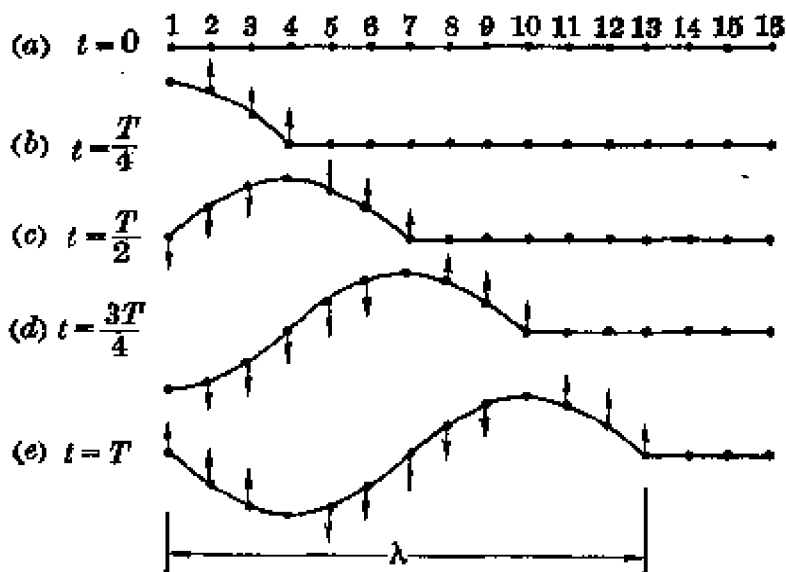


图 9.19 横波的形成

是起始时间比点 1 落后些。点 2 的向上运动同样由于形变而产生的弹力又牵动了点 3，只是点 3 振动的起始时间比点 2 又落后些。假设它们所作受迫振动的周期为 T ，那么当 $t = T/4$ 时，点 1 已到达它的最高点；点 2、3 相继在向上运动；同时点 3 已开始影响到点 4 (图 9.19b)。

当 $t = T/2$ 时，点 1 已回到它的平衡位置，并将继续向下运动；点 2、3 已相继通过它们的最高点而正在向下运动；点 4 正在它的最高点上。同时振动已传到点 7 (图 9.19c)。

当 $t = 3T/4$ 时，点 1 已到达它的最低点，并将开始向上运动；点 2、3 已相继通过它们的平衡位置而正在向下运动；点 4 正在它的平衡位置上；点 5、6 正在向下运动；点 7 正在它的最高点上。同时振动已传到点 10 (图 9.19d)。

当 $t = T$ 时，点 1 已完成一次全振动，且将继续向上运动；点 4、7、10 的振动一个比一个落后 $T/4$ 。同时振动已传到点 13。这样从点 1 到点 13 就排列成一个完整的凹凸波形 (图 9.19e)。如果橡皮绳足够长，以后点 1 每完成一次全振动，都要在橡皮

绳上再往右传出一个完整的波形,越传越远。这就是橡皮绳上波的具体传播过程。可以看出在波动过程中,各点都只是在铅直方向上作振动,而波是沿着水平方向传播的。象这种介质振动方向与波的传播方向互相垂直的波叫做横波。在横波中,凸起最高的部分叫做波峰,凹下最低的部分叫做波谷。图9.20是表示某一时刻介质中各点位移情况的图线,叫做时刻 t 的波形图线。图中横坐标 r 表示各振动点的平衡位置;纵坐标 y 表示这些点在时刻 t 的位移。可以想象在经过 $T/4$ 以后,由于各点位移的变化,波形图线就变成虚线位置。

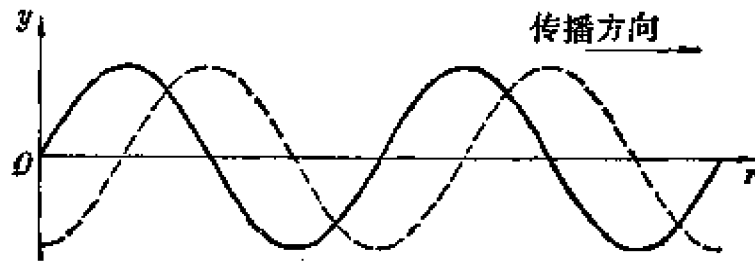


图 9.20 波形图线

三、纵 波

由于各种介质的弹性不同,前面讨论的横波只能在固体介质中传播*。那么在液体和气体介质中机械波又是怎样传播的呢?假设有一个充满气体的玻璃管(图9.21),管的左端有一个能自由滑动的活塞 P 。图中形象地用线条表示一层层气体。起初各线条间隙均匀,这表示各层气体都在各自的平衡位置。在活塞沿着水平方向作受迫振动的过程中,每当活塞向右移动时,在它附近的空气被压缩而形成一个气体密集区;每当活塞向左移动时,在它附近的空气由于松弛而形成一个

* 因为液体和气体都没有切变弹性,不能产生切变弹力,所以横波不能在液体和气体介质中传播。

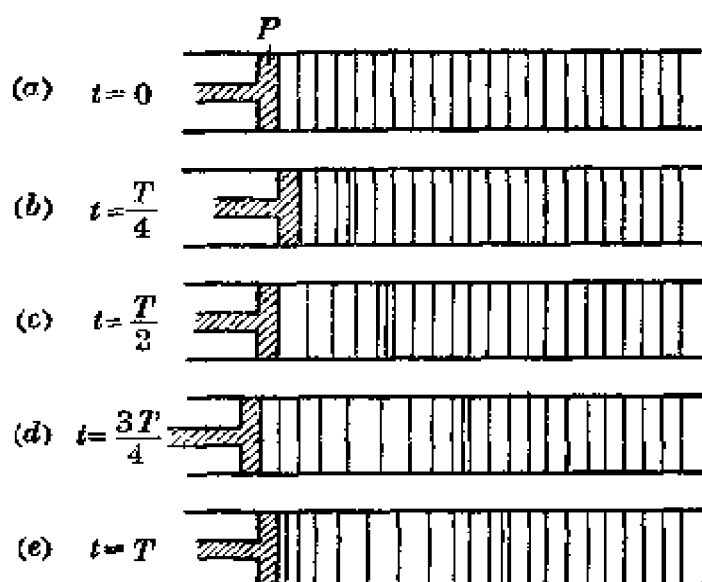


图 9.21 纵波的形成

气体稀疏区。由于气体介质间的弹性作用，这些气体的密集区和稀疏区都将逐渐往右移动。只要玻璃管足够长，随着活塞的不停振动而引起的对气体的周期性的压缩和松弛作用，使气体介质中形成周期性的疏密状态，并不断往右传播开去。但就管中某一层气体而言，只是在自己的平衡位置附近作活塞那样的简谐振动。象这种介质振动方向与波的传播方向一致的波叫做纵波。纵波不仅可以在液体、气体介质中传播，也可以在固体介质中传播。

在气体和液体中，声振动只能按纵波的形式传播，在固体中，声振动可以按纵波，也可以按横波的形式传播。因此一般说来，声波是一种纵波。

四、波长和波速

当波在弹性介质中传播时，介质各点都在作相位不同的振动。但其中也有一些点的振动，相位总是相同的。例如在图 9.19 的横波中，点 1 与 13、2 与 14...，振动的相位总是相

同的；在图 9.21 的纵波中，线条 1 与 13、2 与 14…，振动的相位也总是相同的。一般说来，由于振动的周期性，在波所经过的弹性介质中，如果任取一个振动点，那么沿着波的传播方向每隔一定长度总可以找到与它的振动相位时时相同的一点。

通常把波动中相邻的两个同相的振动点间的距离叫做波长，用字母 λ 表示。在波形图线上，波长 λ 就是一个完整波形的长度（图 9.22）。例如在横波中，相邻的两个波峰（或波谷）间的距离就是一个波长。

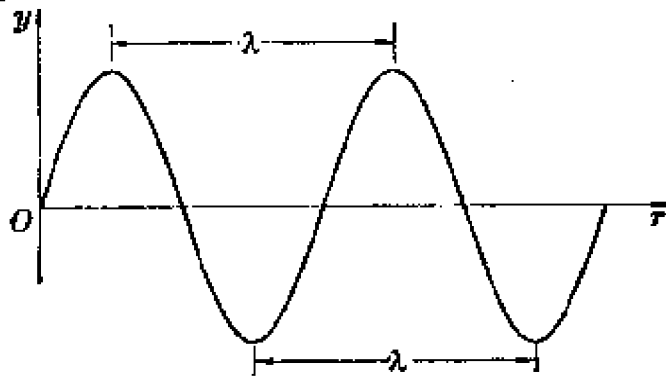


图 9.22 波长

一列波的波长是由哪些因素决定的呢？波长决定于波的频率和波的传播速度。波的频率就是指在单位时间内经过一定点的完整波形的个数，用字母 f 表示，单位是赫芝。波的频率实际上就等于波源的振动频率，因此波的频率是由波源的振动决定的。波的传播速度，简称波速，是指单位时间里波所传过的距离，用字母 v 表示，单位是米/秒。波在介质中传播时，波速决定于介质的性质，而与波源无关。

[例题 9.3] 在一根很长的钢梁一端，有人用锤敲击钢梁一下。如果在另一端用耳紧贴钢梁，就可以先后听到两

下敲击声。为什么？用此方法如果测得从某公路桥钢梁的另一端传来的两次敲击声时间相差 2 秒，求此公路桥的长度。

解：这是由于声波在钢梁中和在空气中的传播速度不同造成的。听到的两次敲击声，前一次是由钢梁中传来，而后一次是由空气中传来的。假设公路桥长 x 米，已知在钢梁中声速（即波速） $v_1 = 5100$ 米/秒；在空气中声速 $v_2 = 344$ 米/秒。根据两次敲击声时间相差 2 秒的关系可以列出

$$\frac{x}{v_2} - \frac{x}{v_1} = 2,$$

因此公路桥长度

$$x = \frac{2}{\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1}} = \frac{2}{\frac{1}{344} - \frac{1}{5100}} \approx 737.5 \text{ 米}。$$

上述例题表明：由同一波源发出的机械波，在不同的介质中其传播速度是不同的。一般说来，介质的弹性模量越大，密度越小，波速就越大，因此在固体介质中的波速要比在液体和气体介质中大得多。在弹性模量相仿的情况下，介质的密度越大，波速就越小。由于气体的密度随温度变化较大，因此在气体介质中波速随温度的变化而略有增减。表 9.2 列出了在几种常见介质中的声速（即波速）。

表 9.2 声波在几种常见介质中的传播速度

介 质	声 速
空 气 (15°C)	340 米/秒
水	1450
钢 铁	5100 (纵波)
玻 璃	5600

因为波的频率 f 就相当于波源每秒钟完成全振动的次数；而波源每完成一次全振动介质中的某一点就通过一个完整的波形，即波传播了一段波长 λ 的距离，所以波每秒钟传播的距离就等于 $f\lambda$ 。于是可以列出波的传播速度

$$v = f\lambda. \quad (9.22)$$

上式表明：波速就等于波的频率和波长的乘积。

五、波的能流密度

波的传播是运动的传播，也是能量的传播。要使波源的振动向外传播，即产生波，波源就必须不断对周围的介质做功。如果波在传播中没有能量损失，那么波在介质中所传递的能量就等于波源对介质所作的功。因此波源也就是波的能源。通常把单位时间里沿波的传播方向通过单位横截面积的平均能量叫做波的能流密度，用字母 I 表示，实用单位是瓦特/厘米²。能流密度反映了波在传播中传递能量的多少，即反映了波的强弱。

怎样来计算波的能流密度呢？我们知道，波在介质中传播到哪里，波的能量就等于那里的介质的振动能。假设介质中每一振动点的质量为 m ，振幅为 A ，振动的圆频率为 ω ，那么根据公式(9.13)可以列出它的振动能

$$E = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 = 2\pi^2 m f^2 A^2.$$

如果每厘米³的介质中有 n 个振动点，那么

$$E = \frac{1}{2} nm\omega^2 A^2 = 2\pi^2 nm f^2 A^2.$$

显然式中 nm 是介质的密度 ρ ，即每厘米³介质所具有的振动能

$$E = \frac{1}{2} \rho\omega^2 A^2 = 2\pi^2 \rho f^2 A^2.$$

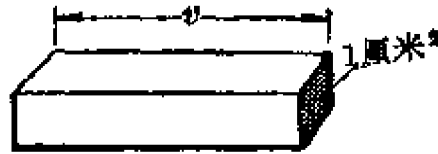


图 9.23

设想在波所传播的介质中，沿传播方向上有面积为 1 厘米²的横截面(图 9.23)，根据波速为 v (厘米/秒)可知每秒钟有 v 厘米长的波通过这个截面，因此每秒钟流过这个截面的能量就相当于以截面为底， v 厘米为高的柱体的介质的振动能，而这个柱体的体积就等于 v 厘米³。所以波的能流密度

$$I = vE = \frac{1}{2} v \rho \omega^2 A^2 = 2\pi^2 v \rho f^2 A^2. \quad (9.23)$$

上式表明：波的能流密度与波速、介质的密度成正比，与振幅的平方、频率的平方也成正比。

声波的能流密度叫做声强。声强反映了声波的强弱。通常能引起人的听觉的最小声强只有 10^{-16} 瓦特/厘米²，而炮声、爆炸声由于振幅大，声强可达 10^{-6} 瓦特/厘米²。

声强由于变化范围很大，如果以瓦特/厘米²为单位从 10^{-16} 到 10^3 可相差千亿亿倍，极不方便，况且在实际应用中声音的强弱，只有相对意义。因此通常是用声强级来表示声强的。

我们规定 $I_0 = 10^{-16}$ 瓦特/厘米²为测定声强的标准，并把它的声强级定为 0 级或 0 贝耳，贝耳是声强级的单位。如某声波的声强 I 若是 I_0 的 10 倍(即 10^1 倍)，它的声强级就是 1 级或 1 贝耳；如果是 I_0 的 100 倍(即 10^2 倍)，它的声强级就是 2 级或 2 贝耳。总之，如果 I 是 I_0 的 10^x 倍，那么 I 的声强级就等于 x 贝耳*。在实用上由于贝耳单位过大而采

* 严格说来是采用对数标度，即 I 的声强级 $S = \log_{10} \frac{I}{I_0}$ (贝耳) = $10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$ (分贝)。

用分贝来量度声强级,用符号 db 表示。而

$$1 \text{ 贝耳(b)} = 10 \text{ 分贝(db)}。$$

[例题 9.4] 已知震耳的炮声的声强 $I = 10^{-3}$ 瓦特/厘米², 求它的声强级。

解: 根据震耳炮声的声强 I 与标准声强 I_0 的比

$$\frac{I}{I_0} = \frac{10^{-3}}{10^{-10}} = 10^{13}$$

可知 I 的声强级等于 13 贝耳, 即 130 db。

习题 9.7 物体在作机械振动时, 在它周围是否一定会产生机械波?

习题 9.8 图 9.24 是某机械波在时刻 t 的波形图线。试用虚线在同一图上作出 $1/2$ 周期后的波形图线。

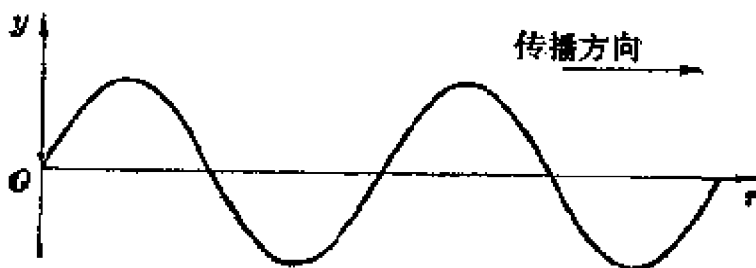


图 9.24

习题 9.9 地震波是沿地壳同时按横波和纵波传播的。已知在地壳内纵波波速为 14 公里/秒; 横波波速为 7.5 公里/秒。根据观测站的地震记录仪数据, 纵波比横波早到 91 秒, 问地震观测站离地震中心有多远?

习题 9.10 频率为 440 赫芝的声波, 在空气中和在水中的波长各是多少?

第五节 乐 音

物体在振动时发出声音, 但只有作周期性振动的声源发

出的声音才是乐音。乐音的波形图线虽然很复杂，却有明显的周期性(图 9.25a)。由爆炸或射击而引起的击发声以及由击发声结合而成的嘈杂声统称噪声。噪声的波形图线是无规则的非周期性曲线(图 9.25b)。下面来具体讨论乐音的三大特性。

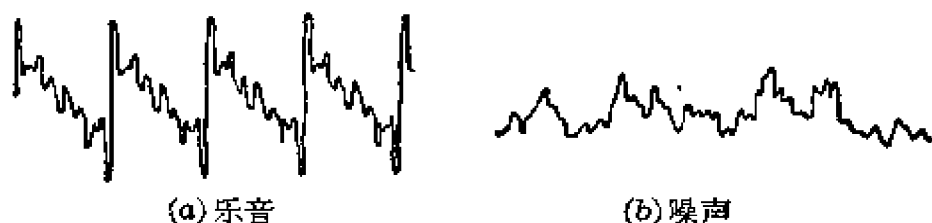


图 9.25 乐音与噪声的波形图线

一、音 调

拉胡琴时手指顺着琴弦越往下揪，发出的乐音就越尖厉，我们就说它的音调越高。音调是指乐音的高低程度。一般说来，女声的音调比男声的高，童声的音调比成人的高。乐音的音调是由声源振动的频率所决定的。频率高，音调就高；频率低，音调低。音调的不同是由声源的频率不同而引起的。例如杂技演员在扯铃时，用力越猛，响铃转得越快，发出的声音音调也越高。

声波的频率范围是在 16~20000 赫芝之间，超出这个范围就由于音调过高或过低而不能引起人们的听觉。通常把频率在 20000 赫芝以上的机械波叫做超声波。

二、响 度

敲锣打鼓时用力大，锣面或鼓皮振动的振幅就大，此时声音就很响；轻轻敲打，振幅小，声音就较轻。人们在主观上感觉到的乐音的强弱程度叫做响度。乐音的响度与声波的振幅

有关。

响度和声强不同,声强是声波的能流密度,是声波强弱的客观反映,完全可以通过声学仪器来测定,而响度只是人们对声音强弱的主观感觉,并不能用任何仪器来测定。但是响度和声强有着一定的联系。一般说来,声强在 I_0 (10^{-10} 瓦特/厘米²) 以下的机械波不能引起听觉,通常把这个响度最小的声强 I_0 叫做闻阈。随着声强的增大,响度也增大。当声强超过一定限度,如 10^{-3} 瓦特/厘米² 时,不仅又不能引起听觉,反而引起了痛觉,通常把这个声强限度叫做痛阈。例如强大的落地雷可以把人耳震聋,就是因为它的声强已经超出了痛阈。因此在响雷或震耳的炮声中,除了用手堵住耳朵,还可以把嘴张开来保护鼓膜。对于不同频率的声波说来,它们的闻阈和痛阈也不同。实验表明,频率为 2000~4000 赫芝的声波,闻阈最低;频率为 800 赫芝的声波,痛阈最高。

虽然响度和声强并不成正比,但一般说来,响度和声强级之间却存在着近似的正比关系。因此通常可以用声波的分贝数来表示它的响度。

三、音 色

胡琴、笛子等乐器发出的乐音,即使音调和响度都相同,我们还是很容易辨认出哪一种是胡琴声,哪一种是笛子声。这就表明除了音调、响度以外,乐音还有另一个特性——音色。正是由于胡琴声和笛子声的音色不同,我们才能辨别它们。又如每个人说话的声音,其音色也是各不相同的,正因如此,我们能听出熟悉的人的说话声。严格说来,除纯音外,音色完全相同的声音是不存在的。

为什么乐音会有不同的音色呢?原来只有作简谐振动的

声源发出的声音最单纯,叫做纯音。一般的乐音都不是纯音,因为一般声源的振动都比较复杂。然而任何周期性的复杂振动都可以看作是由许多简谐振动合成的,所以一般的乐音可以看作是由若干个频率和振幅都不同的纯音所合成的。这种由许多纯音所组成的声音,叫做复音。在复音中,总有一个振幅最大而频率最低的纯音,这叫做基音;其他纯音的振幅都比基音的小而频率都是基音频率的整数倍,叫做倍音或泛音。因此复音是由一个基音和若干个泛音组成的。乐音的音色就决定于其中泛音的多少以及泛音的频率和振幅。

总之,乐音的音调决定于它的基音的频率,而音色决定于它的泛音。

第六节 声波的反射和吸收

一、声波的反射

声波同其他机械波一样,当从一种介质进入到另一种介质时,在界面上就会发生反射。例如在空旷的山谷或向较

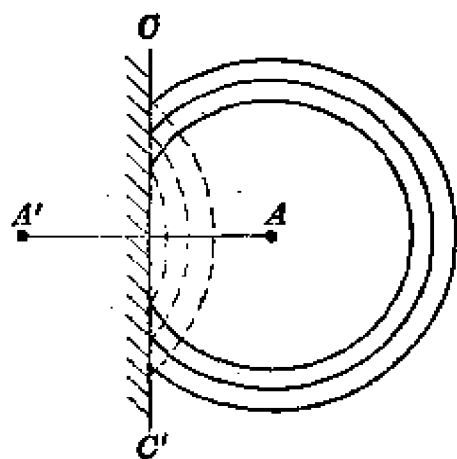


图 9.26 水面波的反射现象

深的井底大喊一声,就能听到回声。回声究竟是怎样形成的呢?先来看水面波的例子。从图9.26中可以看到,水面上由A点激起的水面波在遇到障碍物 CO' 时就被反射回来而往回继续传播。这种现象叫做波的反射。从图中还可以看出,反射回来的水面波就象从障碍物后

而回声就是由从障碍物反射回来的声波所引起的。

实际上并不是所有被反射回来的声波都能使我们听到回声，只有在障碍物离我们相当远时才能听到回声。因为通常人耳听到声音以后，至少要经过0.05~0.1秒的时间，才能第二次感觉声音。如果障碍物离我们过近，对原来声音的感觉还没有消失而反射回来的声波又已传到耳内，这样与原来的声音混在一起，只能加强原来声音的响度，并不会使我们感到回声。我们在房间里叫喊不会听到回声就是这个原因。

二、声波的吸收

声波在反射过程中，不可避免地要损耗一部分能量而被障碍物所吸收。即使在传播过程中，由于介质中摩擦阻尼的存在，声波的能量也会有一部分转化为热。这些现象都叫做声波的吸收。

各种材料反射和吸收声波的能力是不同的。例如大理石、水泥地、玻璃板、砖墙等硬而光滑的材料能把绝大部分的声能反射回去而吸收得较少；而干草堆、泡沫塑料、纤维板等软而粗糙的材料对声波具有较大的吸收能力，而反射能力就较差。

我们在空空的会场里讲话时，虽然听不到回声，但随着刚落的话音，嗡嗡的余音可以延续一段时间，这种在声源停止发声后声音延续的现象叫做混响。由于在会场里，从声源发出的声波要经过墙壁、天花板等多次的反射和吸收以后，它的声强才会降低到闻阈以下。然而对于象会场、公社礼堂、剧院等场所说来，如果混响时间过长，会使声音前后重迭，听起来模糊不清；如果过短，会使声音响度不够，听起来使人感到单调，影响音乐效果。经验表明：最适当的混响时间是在1~2秒之间。因此为了使每个座位上的听众都能听得清楚，除了能听

到直接发来的声音，还要充分利用反射来的声音。通常把台前的侧墙做成人字形而把天花板做成倾斜来提高反射效果；同时把部分墙面做成粗糙不平或装有隔音板来提高吸收能力以减少混响时间。

习题 9.11 为什么在闪电较近处听到的是一声震耳的雷声，而在闪电很远时听到的是隆隆不断的雷声？

习题 9.12 在空空的会场里广播乐曲时，声音较响亮。但当坐满听众时，声音却没有那么响亮。为什么？

第七节 超 声 波

一、超声波的特性

超过人耳的听觉范围，频率在 20000 赫芝以上的机械波叫做超声波。虽然超声波与声波只是频率不同，但量的渐变达到一定程度就会引起质的飞跃。因此超声波具有许多声波所没有的特性，其中最主要的是：

(一) 超声波由于频率很高，可达 10^9 赫芝，因而波长很短，可以容易地聚集成狭小的一束，象光线那样定向发射，这就能被较小的目标所反射，而不象声波那样向四面发散；

(二) 超声波由于频率很高，即使振幅很小而传递给介质的能量要比声波大得多，因而具有很大的功率。

二、超声波的产生和接收

产生超声波的方法很多，最常用的是利用高频率的振荡电流来激发高频率的机械振动，从而形成超声波源。

有些磁性物质，如镍、铁铝合金等，当它内部磁场的强弱发生变化时，它沿磁场方向的长度就会相应地发生伸缩形变。

这种现象叫做**磁致伸缩效应**。利用这种效应，把一个由镍片迭成的窗口形镍芯，绕上线圈，如图 9.27 所示。如果让线圈两端和**高频振荡器**相连，加上交变电流，镍芯就会沿上下方向作相应的高频机械振动，成为**超声波源**。反过来，如果把线圈两端不接电源，而接上一个灵敏度较高的电表，当镍芯在上下方向上受到外来的超声波作用而作机械振动时，它内部磁场的强弱就发生相应的变化，从而线圈产生电磁感应现象而在电表上反映出来，这样镍芯又成了一个**超声波接收器**。象这种既能用来发生超声波，又能用来接收超声波的装置，即可以使电能和振动能相互转化的装置就叫做**换能器**。

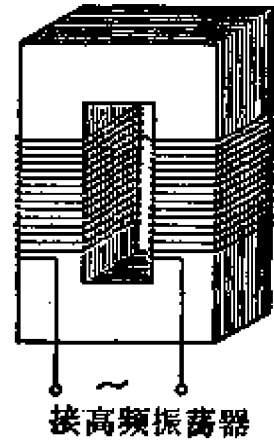


图 9.27 磁致伸缩换能器构造原理示意图

三、超声波的应用

利用超声波定向发射的特性，可以把它作为一种探测工具，用来探测鱼群、测量海洋深度等。一般的超声探测仪由发射、换能、放大和记录等几部分组成。其工作方法这样：如探测鱼群时先由发射器产生一个电脉冲讯号，加到装在船底的换能器上，换能器就向海底某一方向发射一超声脉冲。当此超声脉冲遇到与海水不同的介质——鱼群便反射回来。这时换能器又将微弱的超声脉冲讯号转化成电脉冲，经过放大器放大后，由记录机构记录下来，根据准确测出的超声脉冲来回所用的时间即可将鱼群在水中栖息、回游的位置、数量等在记录纸带上显示出来。这种探测仪还可以在航线上连续地自动记录沿线的海洋深度。此外在国防上还可以用它来探测敌

潜艇。由于海水是导体，一般雷达在海水中不能使用，因此对海面下的侦察工作由这种“超声雷达”来担负。

超声波探伤在工业上有着广泛的应用。所谓探伤就是在不损坏工件的情况下检验金属工件内部是否有裂缝、气泡等缺陷。它的原理与上述检测仪很类似。当一个超声脉冲进入工件，在正常情况下要传到工件底部才会反射回来。如果工件内部存在裂缝、气泡等缺陷，由于超声波对空气的穿透能力很差，故就不能透过而提前反射回来。根据脉冲讯号提前反射回来的时间即可估计出缺陷所在的位置。与探伤相类似，在建筑工程上可用超声波来检查混凝土的质量；在医疗上检查人体内部的病变等等。

利用超声波引起的强烈振动还可对各种物件进行超声处理，使它们发生我们所需的变化，如焊接、清洗、农业上处理种子等等。超声清洗的特点在于可以清洗结构复杂和体积微小的零件，如手表等。方法是在容器中放水或其他洗液，在容器底部装有超声波发生器。工作时，把待清洗的零件放在容器内，接通电源产生超声波，零件表面的污垢就会因受到高频的剧烈振动而脱离。

农业上超声处理种子的方法和超声清洗差不多。根据科学实验表明：使用声强级等于100~110分贝的声波（相当于震耳的声音）刺激湿种子，可使湿种子的萌芽时间缩短10%，并使发芽率提高一倍。超声处理种子的作用在于刺激种皮，促使种皮破裂，这样水和氧气就比较容易进入种子内部，因而能使种子提前萌发。

习题 9.13 在利用超声波探测海洋深度时，测得从发射超声脉冲到接收到反射回来的讯号时间为0.18秒，求测点的海洋深度。（假设超声波在海水中的波速为1500米/秒。）

复 习 题

习题 9.14 火车在铁轨上行驶时, 经过接轨处即受到震动, 使车厢跟着弹簧上下振动。设铁轨每段长 12.8 米, 每个车厢重 50 吨, 在车厢底部装有四根弹簧, 每根的倔强系数 $K=0.44$ 吨/厘米, 问火车速度多大时, 车厢上下振动特别强烈?

〔提示〕 如果把整个车厢看作是个弹簧振子, 它的质量 $m=?$, 整个系统的倔强系数 $K=?$, 固有频率 $f=?$ 。如果火车速度为 x 米/秒, 它通过接轨处引起的震动频率有多大? 在什么情况下会引起车厢的共振?

习题 9.15 根据公式 $v=\lambda f$, 为什么不能通过提高频率 f 的方法来增加波速 v ?

习题 9.16 已知三相交流电的电压随时间变化的规律和简谐振动中位移随时间变化的规律在形式上是相同的。现有三相交流电压:

$$U_A = U_m \sin(100\pi t);$$

$$U_B = U_m \sin\left(100\pi t + \frac{2}{3}\pi\right);$$

$$U_C = U_m \sin\left(100\pi t + \frac{4}{3}\pi\right)。$$

试求它们随时间变化的振幅、周期、频率以及圆频率、初相位各是多少, 并作出它们的波形图线。

习题 9.17 试求在一直线上的两简谐振动的合振动, 已知它们的振动方程为

$$y_1 = 4 \sin 3t;$$

$$y_2 = 2 \sin\left(3t + \frac{2\pi}{3}\right)。$$



第四编 电 磁 学

电磁学所研究的是物质的另一种运动形式——电运动，即通常所说的电。“电和热一样，也具有某种无处不在的性质，只不过方式不同而已。地球上几乎没有一种变化发生而不同时显示出电的现象。”磁现象是电运动的另一种存在形式，因而电和磁联系十分紧密，在一定条件下可以相互转化。它们是同一过程的两种表现形式。

电能是一种重要的能源。与其他形式的能量相比，电能具有不少突出的优点：电能被转化成机械能、内能、化学能、光能等其他形式的能量比较方便；电能可以很快地被输送到离发电站很远的地方去而损失很少；电能容易控制和测量，并且十分适用于远距离控制和自动控制，从而使工业自动化成为可能；电能还可以电磁波的形式在空中传播，按光的速度来传递信息。因此电对国民经济各部门和科学技术的发展都起着十分重要的作用。所以为了建设社会主义新农村，为了缩小三大差别，我们学习和掌握一点电磁学的基础知识是十分必要的。

本编自第十章至第十五章，主要介绍电磁学的基础知识及其在工农业生产技术上的应用。

第十章 电荷和电场

在炎热的夏天,当天空密布着乌云,在云层之间有时就会闪起道道银光,发出隆隆响声,这就是人所共知的电闪和雷鸣。这是自然界中的电现象。把手电筒的开关一按,小电珠就会发亮,这也是一种电现象。随着我国电力工业的不断发展,越来越多的农村和山区已经普遍地点上了电灯,用上了电动机和有线广播。电的应用越来越广泛,人们对电也越来越熟悉,那么电究竟是什么呢?它又遵循着哪些客观规律呢?人们又是怎样应用它来为社会主义工农业生产服务的呢?

在这一章里,我们先通过对一些基本电现象的研究,来阐明电的本质;然后讨论在电荷周围存在着的一种特殊物质——电场,介绍用来反映电场特性的两个物理量,电场强度和电位以及它们之间的相互关系;最后通过对电场中的导体的分析,阐明静电感应现象以及它在工农业生产上的一些应用。

第一节 基本电现象

把自来水笔杆在头发上摩擦几下后,去靠近象木屑、稻草屑等轻小物体时,它就能把轻小物体吸引起来(图 10.1)。这时我们就说自来水笔杆带上了电,或者说它有了电荷。用丝绸摩擦过的玻璃棒,或者用兽皮摩擦过的塑料棒也都具有吸

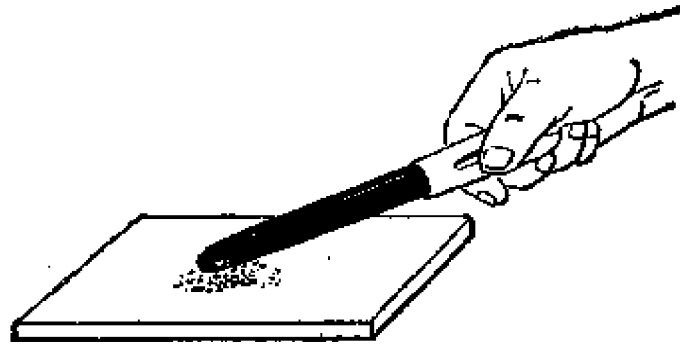


图 10.1 带电体吸引轻小物体

引轻小物体的性质。用摩擦来使物体带电的方法就叫做摩擦起电。象这种处于相对静止状态的电荷叫做静电。

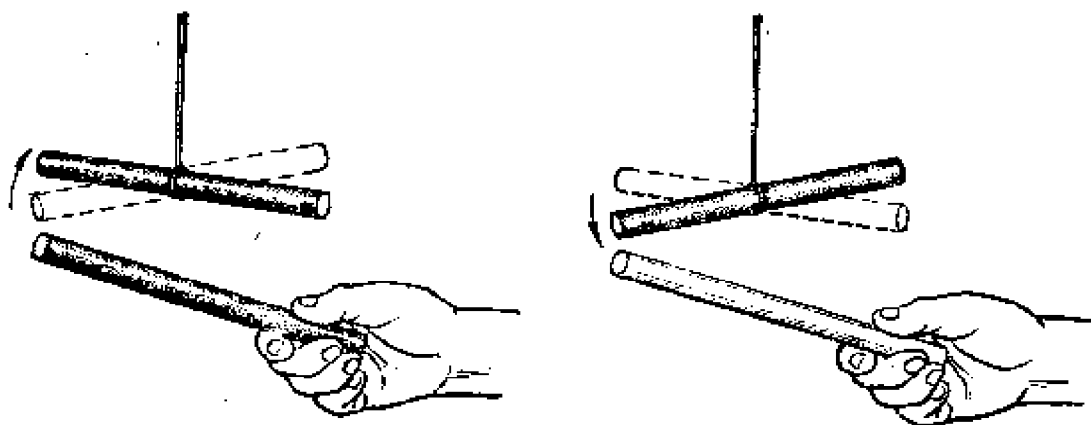
我国东汉的著名法家王充在《论衡》一书中就有过“顿牟掇芥”的记载。顿牟就是琥珀，它是自然界中植物树脂的化石。掇芥就是吸引轻小物体。即用兽皮摩擦过的琥珀能吸引轻小物体。这说明我国古代劳动人民很早就对静电现象有了观察和认识。

摩擦其他物体是否也能使它们带电呢？有人做过这样的实验：一手握住铜棒，另一手用丝绸摩擦它，结果铜棒并不能吸引轻小物体，表明铜棒不带电；但如果戴上橡皮手套，再做上述实验，铜棒就带电了。这是什么原因呢？原来象铜棒、人体以及大地等物体都具有传递电荷的性质，即具有导电性。它们能把由于摩擦而产生的电荷迅速地传递到整个部分。因此无论带多少电荷的物体，只要与大地一接触就显不出带电来。塑料、玻璃、丝绸、橡皮等物体并不具有导电性，因此在玻璃棒的一端由于摩擦所产生的电荷并不会被传递到其他部分去。戴了橡皮手套做上述实验，由于橡皮的缘故，铜棒上的电荷就不能传入大地，因而铜棒就带电了。总之，一切物体都能由于摩擦而带电。

具有导电性的物体叫做导体。金属、碳、大地、人体以及各种酸、碱、盐的水溶液等都是导体。没有导电性的物体叫做绝缘体。橡皮、陶瓷、玻璃、塑料、纱线、油类、空气、干燥的木材等都是绝缘体。绝缘体又叫电介质。一般电线用金属作为芯线,也是因为金属是导体,能够导电,因而又称导线;电线外面包上纱线或橡皮、塑料,是因为纱线和橡皮、塑料都是绝缘体,能够防止漏电和触电。

导体和绝缘体的区分是相对的,有条件的。有些物体原来是绝缘体,当外界条件改变时,它可能转化为导体。温度的变化是促成这种转化的一个重要条件。例如玻璃在常温下是绝缘体,在熔融时就成为导体。另外还有一类物质叫做半导体,如硅、锗、氧化铜等材料,它们的导电性介于导体和绝缘体之间,并能随着外界条件(如加热、光照等)的不同而显著变化。

分别用兽皮摩擦过的两根硬橡胶棒,一根用丝线悬挂起来,而以另一根去靠近它,可以看到它们互相排斥(图 10.2a)。若用丝绸摩擦过的两根玻璃棒来做上述实验,也可以看到它



(a) 带同种电荷的物体相互排斥 (b) 带异种电荷的物体相互吸引

图 10.2 带电体间的相互作用

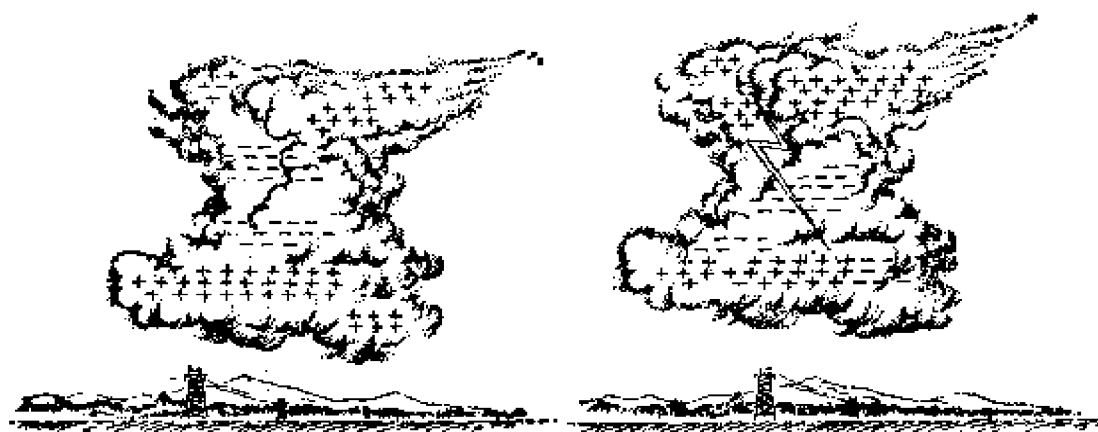
们是互相排斥的。如果改用丝绸摩擦过的玻璃棒去靠近用兽皮摩擦过的硬橡胶棒,那么它们就互相吸引(图 10.2b)。这表明玻璃棒上和硬橡胶棒上所带的电荷的性质是不同的。带同种电荷的物体互相排斥;带异种电荷的物体互相吸引。

进一步的实验结果指出:摩擦其他物体所获得的电荷以及用其他方法所获得的电荷,总是与上述两种电荷中的一种互相排斥,而与另一种互相吸引;同时与上述两种电荷相互排斥,或者同时与上述两种电荷相互吸引的电荷是不存在的。这表明在自然界中只存在两种性质不同的电荷。为了区别起见,习惯上我们把用丝绸摩擦过的玻璃棒上所带的电荷叫做正电荷,或阳电荷,用符号“+”表示;而把用兽皮摩擦过的硬橡胶棒上所带的电荷叫做负电荷,或阴电荷,用符号“-”表示。凡是与正电荷(或负电荷)互相排斥的电荷都属于正电荷(或负电荷)。我们所以如此规定还根据这样一个事实:带等量的正电荷与负电荷的物体接触之后就会相互抵消而中和成不带电的物体。

当带有大量正电荷和负电荷的物体相互接近时,由于正电荷和负电荷这一对矛盾之间的激烈斗争,负电荷和正电荷就要从各自带电的物体上移动而互相接近,使带电物体间原来不导电的空气甚至也会导电,于是正负电荷互相中和。同时正负电荷中和时往往会产生火花,有时还有爆裂声。这种现象就叫做火花放电。

雷电就是自然界中的一种大规模的火花放电现象。夏天太阳光把靠近地面的空气晒得很热,由于空气的对流作用,地面附近的热空气形成了强烈的上升气流。这时如果天空中有云层,云层里的水滴被上升的气流一冲就互相扰动而产生摩擦,从而使水滴分裂而带上电荷,这样就容易形成积雨云。在

积雨云中通常有三个带电区：云顶带正电；云的中部带负电；云底的上升气流比较强烈的区域又带正电（图 10.3a）。云层里的电荷大量积累，而当带异种电荷的云相互接近时就会发生放电现象（图 10.3b）。在放电过程中，负电荷以很高的速度穿过空气，同空气摩擦得很厉害，因而产生了大量的热，这就是我们所看到的很亮的闪电。同时在闪电的通路上，空气由于突然受热而迅速膨胀，闪电一过又很快地冷却收缩，这样一胀一缩，就引起猛烈的振动而发出巨大的声响。又由于声音在云层中间和地面之间来回不断地反射，故就形成了隆隆的雷声。



(a) 积雨云的三个带电区

(b) 云层间的放电现象——闪电

图 10.3 雷电的形成

习题 10.1 当我们用干燥的塑料梳子梳干净的头发时，常常可以看到头发随梳子飘起来。试解释这种现象。

习题 10.2 观察一下室内的电灯装置和室外的电线杆，哪些是导体？哪些是绝缘体？

习题 10.3 在维修电路时，为什么要使用有橡胶柄的工具？为了更安全为什么还应站在木凳上？

习题 10.4 图 10.4 是一种用来检验物体是否带电的仪器——金属箔验电器。它的构造很简单，在一个玻璃瓶的橡皮塞头上开个孔，插

入一根金属棒，在棒的下端贴上两片金属箔。如果用带电的物体接触金属棒的上端，这两片金属箔就会张开一个角度。因此我们可以根据金属箔是否张开来断定与金属棒接触的物体是否带电。试解释它的原理。

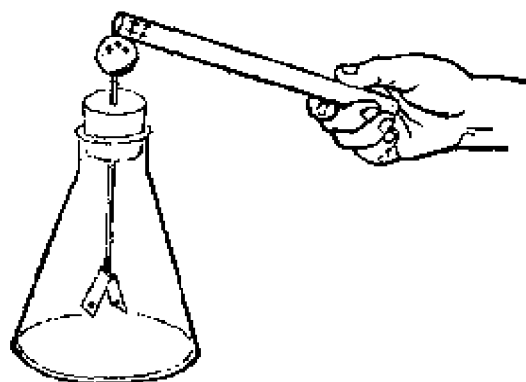


图 10.4 金属箔验电器

第二节 电 的 本 质

摩擦为什么能使物体带电呢？毛主席教导我们：“事物发展的根本原因，不是在事物的外部而是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。”根据这个道理，我们应该从物质本身的结构中寻找摩擦使物体带电的原因。

我们已经知道，任何物质都是由分子组成的，而分子又是由原子组成的。人们进一步的研究还发现任何原子都有一个原子核和若干个在原子核周围运动着的电子构成。例如，最轻的氢原子的原子核外只有 1 个运动着的电子，而铜原子的原子核外就有 29 个电子运动着。原子核带正电荷，电子带负电荷。既然物质的原子都是由带正电的原子核和带负电的电子组成的，为什么在通常情况下各种物质都不显示出电性来

呢？这是因为原子中的原子核还可再分割，它是由带正电荷的质子和不带电的中子组成，质子所带的电量和电子的电量相等。在通常的情况下，原子核内的质子数目和核外电子的数目刚好相等，所以整个原子对外并不显示电性而表现为“电中性”。因此，由这样的原子所组成的物体就表现为电中性。

辩证唯物主义认为：“一切运动都存在于吸引和排斥的相互作用中。”原子中的原子核和电子，一方面由于它们所带的电荷性质不同而互相吸引；另一方面电子由于在绕核作圆周运动而对原子核有离心作用，从而使它们又互相排斥。在通常情况下，这种吸引和排斥的作用是互相平衡的，因而原子处于稳定状态。然而这种对立的统一只是相对的，当外界条件发生变化时，原子的稳定状态就要被破坏。例如两种不同物体的相互摩擦就会使物体中一部分电子的动能有所增加，从而增大了电子的离心作用。在这些原子中，排斥就起了主导作用，电子就有可能脱离原子核的束缚从一个物体跑到另一个物体上去。这样也就破坏了原子的中性状态。失去一个或几个电子的原子叫做正离子，表现为带正电荷；获得一个或几个多余电子的原子叫做负离子，表现为带负电荷。无论是用摩擦的方法还是由其他的方法使物体带电，本质上都是使物体中原有的正、负电荷发生分离。由此可见，电是物质的固有属性，它既不能被创造，也不能被消灭，而只能从一个物体转移到另一个物体。当它们在一定条件下相互分离并发生转移时，物体就显示出电性。

用丝绸摩擦玻璃棒时，玻璃棒上就有一些电子转移到丝绸上去，因而玻璃棒带正电荷，同时丝绸获得电子而带负电荷。用兽皮摩擦塑料棒时，兽皮上就有一些电子转移到塑料棒上去，因而塑料棒带负电荷，同时兽皮带正电荷。总之，物

体在相互摩擦时，一个失去多少电子，另一个就得到多少电子。所以它们总是同时带电的，而且所带电荷的数量也相等。通常我们把带电物体所带电荷的多少叫做电量。既然一切电现象都是由于电子的转移而引起的，那么一个电子所带的电量就是自然界中所存在的最小电量，任何带电物体的电量都只能是它的整数倍。在实用单位制中，电量的单位叫做库仑，它相当于电子电量的 6.25×10^{18} 倍。即

$$1 \text{ 库仑} = 6.25 \times 10^{18} \text{ 电子电量,}$$

$$1 \text{ 电子电量} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ 库仑。}$$

为什么导体具有导电性，而绝缘体却没有导电性呢？导体的导电性是因它内部有可以自由运动的自由电荷。就拿金属导体来说，它的每个原子都有一个或几个与原子核相距较远的最外层电子，他们受原子核的束缚较弱，很容易脱离原子核而在原子之间自由运动。这样的电子叫做自由电子。在通常情况下，金属中存在有大量的自由电子，由于它们在作无规则的运动。因此就整个金属来说并不显示电性。但在一定的外界条件下，如外加一定的电压，自由电子在原来的无规则运动上迭加了一个定向运动，因此自由电子就从导体的一端跑到另一端，对外表现出导电性。绝缘体在一般情况下，内部由于原子核对电子的束缚作用较强，并不存在自由电荷，因而没有导电性。

习题 10.5 试用物质结构来解释为什么互相摩擦的物体会同时带电。

习题 10.6 带等量的正电荷和负电荷的导体为什么只要互相接触一下就会中和成不带电的物体？

习题 10.7 为什么无论带多少电荷的物体只要与大地一接触就显不出电性来？

第三节 电场 电场强度

一、电场是物质的一种特殊形式

我们已经知道，带电物体间存在着相互吸引相互排斥的作用。下面就来具体研究这些作用是怎样进行的。在这个问题上辩证唯物主义者与唯心主义者历来是有斗争的。

唯心主义者认为，相隔一定距离的两个带电体并不需要其他任何物质的媒介，而具有一种能超越空间立即相互作用的所谓“超距作用”。列宁指出：“运动着的物质只有在空间和时间之内才能运动。”“超距作用”论者把带电体相互作用的这种物质运动看作不需要时间，因而也与空间无关。这显然是十分荒谬的。这种错误论点后来已为无数实验事实所否定。实际上带电物体间的相互作用是通过电场作为媒介物质而进行的。

科学研究表明，只要有电荷存在，在它的周围就有电场存在。带电体正是通过它周围的电场而对其他带电体发生力的作用的。对于 A 、 B 两个相隔一定距离的带电体说来，带电体 A 通过它的电场对带电体 B 施加力的作用，同时带电体 A 也受到带电体 B 的电场对它的力的作用。通常把相对于观察者静止的电荷周围的电场叫做静电场。

电场是物质的一种特殊形式。它虽然不象由原子、分子组成的实物那样看得见、摸得着，然而它是客观实在的。这可以从电场对电荷的作用来认识。任何电荷在电场中都要受到力的作用，电场对电荷的作用力叫做电场力。虽然静止电荷通过周围的静电场相互作用的现象还显不出时间的效果，但是变化的电场能以电磁波的形式在真空中按光的速度向外传

播。这表明它的传播不仅需要时间，而且还可以脱离电荷而单独存在。电磁波的发现是对“超距作用”论的一个致命的打击，它有力地说明了带电体之间的相互作用是通过电场这种特殊的物质进行的。科学研究还表明，电场也具有实物的某些属性，如能量、动量、质量等。电场与实物的最大区别就在于它的迭加性。几种实物不能占据同一空间，而由几个电荷形成的几个电场却可以同时占据同一空间。然而实物与电场也具有不可分割的联系，在实物的分子、原子之中就有电磁场存在着。

电场的存在不仅为人们所认识，而且已为人们所利用。例如工业上的静电除尘就是利用强电场对带电粒子的力的作用，把工厂里高大烟囱中冒出来的烟灰收集起来，这样就能防止工厂地区附近空气的污染，同时通过综合利用还可以在烟灰中提炼出稀有元素，如半导体材料锗等。

二、电场强度

电荷在电场中所受到的电场力有多大呢？方向如何呢？是否处处都相同呢？这些都决定于形成电场的电荷本身的性质、分布情况以及它们周围的介质情况。一般说来，同一电荷在电场中的不同点所受电场力的大小和方向并不一定相同。在那一点所受电场力大些，我们就说这一点电场较强。

为了研究电场中各点的强弱程度，我们可以用体积和电量都很小的带正电的物体作为试验电荷*放到电场中去。根据试验电荷在场中各点所受电场力的大小和方向来认识电场

* 试验电荷的体积很小就可以把它看作“点”电荷，从而可反映电场中各点的性质；电量很小是使它本身的电荷所激发的电场不致对被测电场有显著的影响。

的性质。例如在由带电体 A 所形成的电场中(图 10.5), 在 a 、 b 、 c 等点试验电荷所受的电场力 F_a 、 F_b 、 F_c 各不相同。从悬线偏转角的大小可以断定试验电荷在 a 点所受电场力较大, c 点较小; 从而表明 a 点电场较强, c 点较弱。

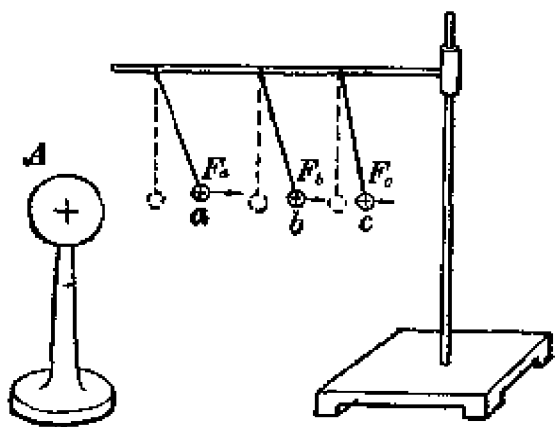


图 10.5 试验电荷在电场中受到的电场力

进一步的实验还表明, 试验电荷在电场中所受电场力的大小还与它本身所带电量的多少有关。把所带电量增加几倍, 它所受的电场力也增加几倍。这就是说, 带电物体在电场中所受电场力的大小和它所带的电量成正比。然而对于电场中每一固定点说来, 无论试验电荷的电量如何改变, 它所受的电场力与它所带电量的比总是一个不变的量。这个比值的大小反映了电场在这一点上的强弱程度, 因此通常把试验电荷在电场中某点所受电场力和它所带电量的比叫做电场在该点的电场强度, 简称场强, 用字母 E 表示。如果电场力用字母 F 表示, 试验电荷所带的电量用字母 q 表示, 那么电场强度

$$E = \frac{F}{q} \quad (10.1)$$

从上式可看出, 电场强度的单位是由力、电量的单位组成的。在实用单位制中, F 的单位是牛顿, q 的单位是库仑, 因此电

场强度 E 的单位是牛顿/库仑。

带电粒子在电场中各点所受的电场力还具有确定的方向, 这表明电场具有方向性。因此电场中各点的电场强度是有方向的, 它是个矢量。通常把正电荷在电场中某点所受电场力的方向规定为这一点电场强度的方向。很明显, 负电荷在电场中所受电场力的方向与正电荷所受的方向恰恰相反(图 10.6), 所以在电场中负电荷所受电场力的方向总是和电场强度的方向相反的。

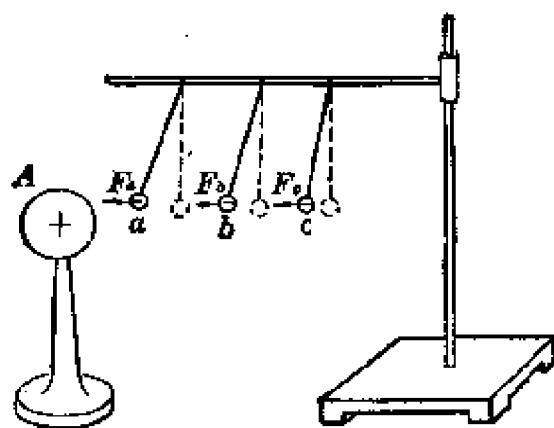


图 10.6 负电荷在电场中所受电场力的方向与正电荷所受的恰恰相反

把电场强度的公式 (10.1) 变化一下, 即可得到电场力的公式

$$F = qE. \quad (10.2)$$

上式表明, 只要知道了电场强度, 即可知道带电物体在电场中所受到的电场力。如果 q 是正电荷, 电场力 F 和电场强度 E 的方向就一致; 如果 q 是负电荷, 方向就相反。

三、电场强度的计算

在各种不同类型的电场中, 各点的电场强度是怎样具体

计算出来的呢？我们先来看一种最基本的情况。

实验表明：在由电量为 Q 的孤立电荷形成的电场中，电量为 q 的带电物体在任一点所受电场力 F 的大小与电量 Q 和 q 的乘积成正比；而与它们之间的距离 r 的平方成反比。电场力 F 的方向就在它们的连线上。这个结论叫做库仑定律。根据上述关系可以列出

$$F = K \frac{Qq}{r^2}, \quad (10.3)$$

式中 K 是比例常数。在实用单位制中，如果电场中不存在其他物质（即在真空中）， $K = 9 \times 10^9$ 牛顿·米²/库仑²。如果电场中还存在其他均匀的电介质，带电物体所受的电场力就会减少。实验表明，这时上述公式应改为

$$F = K \frac{Qq}{\epsilon r^2}, \quad (10.4)$$

式中的 ϵ 叫做电介质的介电常数，它反映了电介质的介电性质。表 10.1 列出了几种常用电介质的介电常数。

表 10.1 几种常用电介质的介电常数

空 气	1.0006	瓷	6
煤 油	2~4	玻 璃	4~7
聚苯乙烯	2.4~2.6	云 母	6~8
硬 橡 胶	4	纯 水	80

把上述公式代入公式 (10.1) 即可得到在由电量为 Q 的孤立电荷形成的电场中各点电场强度的计算公式：

如果电场中不存在其他物质，

$$E = \frac{F}{q} = K \frac{Qq}{qr^2} = K \frac{Q}{r^2}; \quad (10.5)$$

如果电场中还存在着其他均匀的电介质,

$$E = \frac{F}{q} = K \frac{Qq}{q\epsilon r^2} = K \frac{Q}{\epsilon r^2} \quad (10.6)$$

至于电场强度的方向可按图 10.7 确定。由此可见,距 Q 无穷远处的电场强度等于零,即在无穷远处的电荷所受的电场力等于零。



图 10.7 孤立电荷形成的电场中电场强度的方向

上述公式还可以看作是计算任何复杂电场中各点电场强度的基础。在由一系列电荷共同形成的电场中,每一点的电场强度都可以看作是由各个电荷在这一点所激发的电场强度的迭加。

[例题 10.1] 如图 10.8 所示,在由两个异种电荷 A 、 B 形成的电场中,求 P 点的电场强度。已知 $AB=100$ 厘米, $r_A=80$ 厘米, $r_B=60$ 厘米; A 、 B 所带的电量依次为 $+Q$ 、 $-Q$, 而 $Q=3.2 \times 10^{-9}$ 库仑。(电场中不存在其他物质)

解: 很明显, P 点的电场强度可以看作是电荷 A 、 B 分别在 P 点单独激发的电场强度的迭加。按公式 (10.5) 可以列出电荷 A 、 B 在 P 点电场强度

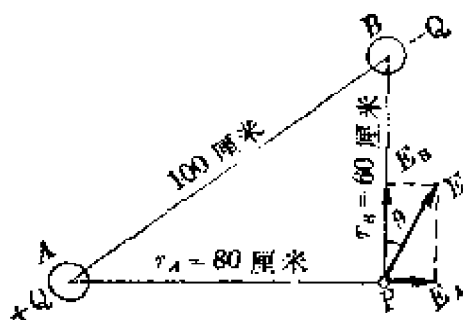


图 10.8

的大小依次为 $E_A = K \frac{Q}{r_A^2}$ 、 $E_B = K \frac{Q}{r_B^2}$ 。它们的方向如图

10.7 所示。再将 E_A 、 E_B 按平行四边形法则迭加即可求出 P 点的合场强 E 。根据已知数据可知 E_A 、 E_B 间的夹角为 90° ，因此 $E^2 = E_A^2 + E_B^2$ 。即 P 点电场强度的大小为

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{E_A^2 + E_B^2} = \sqrt{\left(\frac{KQ}{r_A^2}\right)^2 + \left(\frac{KQ}{r_B^2}\right)^2} \\ &= \sqrt{\frac{K^2 Q^2 (r_B^4 + r_A^4)}{r_A^4 r_B^4}} = \frac{KQ}{r_A^2 r_B^2} \sqrt{r_B^4 + r_A^4} \\ &= \frac{9 \times 10^9 \times 3.2 \times 10^{-9}}{(0.8)^2 (0.6)^2} \sqrt{(0.6)^4 + (0.8)^4} \\ &= 91.79 \text{ 牛顿/库仑,} \end{aligned}$$

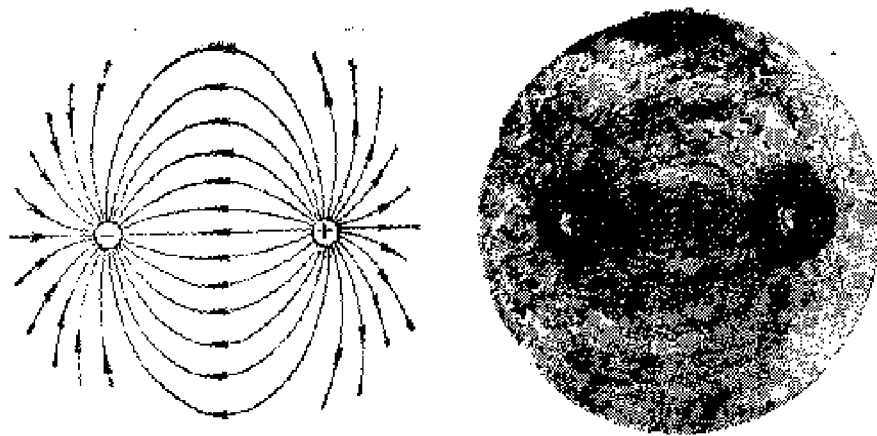
而 $\operatorname{tg} \theta = \frac{E_A}{E_B} = \frac{KQ}{r_A^2} \cdot \frac{r_B^2}{KQ} = \frac{0.36}{0.64} \doteq 0.563$

故 $\theta \doteq 29.4^\circ$ 。

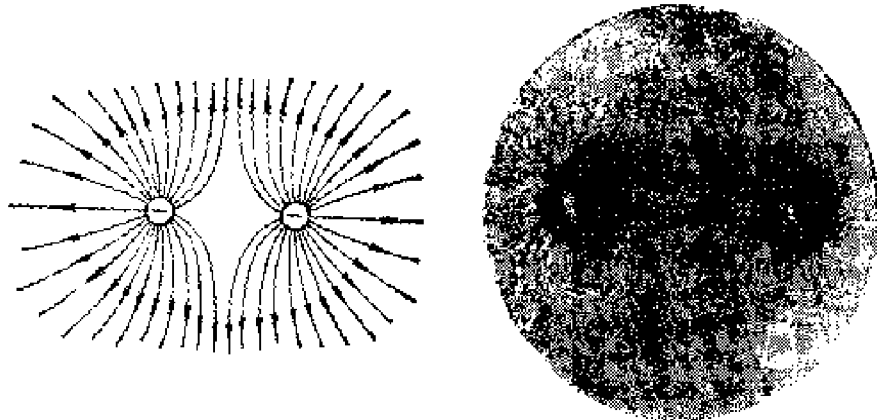
四、电 力 线

把草籽（或木屑等轻小物体）均匀地撒在蓖麻油或煤油上，然后插入带电的金属针，在油中就形成各种不同类型的电场。可以看到草籽在电场的作用下沿着电场强度的方向伸展而排列起来，从而形象地把电场中各点电场强度的方向显示出来，如图 10.9 所示。

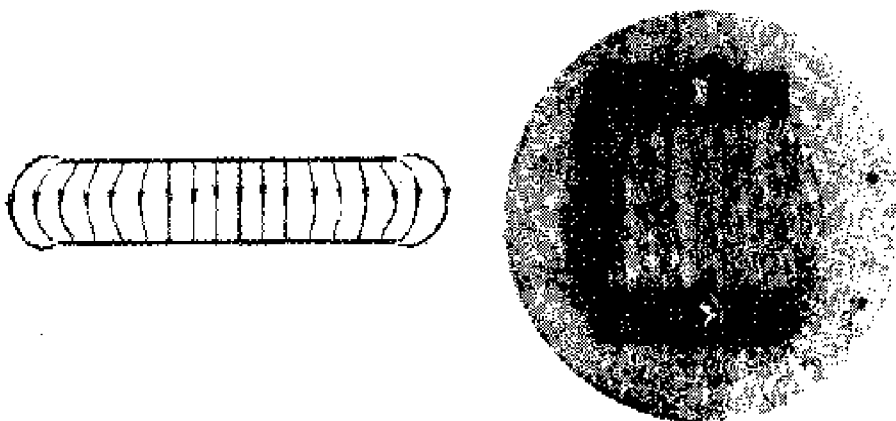
仿照上述方法，也可以用一系列连续的曲线来描绘电场的特性。我们规定画曲线时，其上任一点的切线方向都和所在点电场强度的方向一致（图 10.10），这种曲线叫做电力线。由于在电场中各点电场强度的方向是正电荷受力的方向，因此电力线总是起于正电荷而止于负电荷，或者从正电荷到无穷远处，或者从无穷远处到负电荷，而不会发生中断。任何两条电力线也都不会相交，否则交点处的电场强度就会有两个方向，这是不可能的。此外，我们还规定在与电场强度的方向



(a) 两个等电量异种电荷形成的电场



(b) 两个等电量同种电荷形成的电场



(c) 两块带等量异电荷的平行板形成的电场

图 10.9 电力线

垂直的单位面积上，所通过的电力线的数目和所在处的电场强度成比例。即用电力线的疏密程度来反映该处的电场强度的大小。

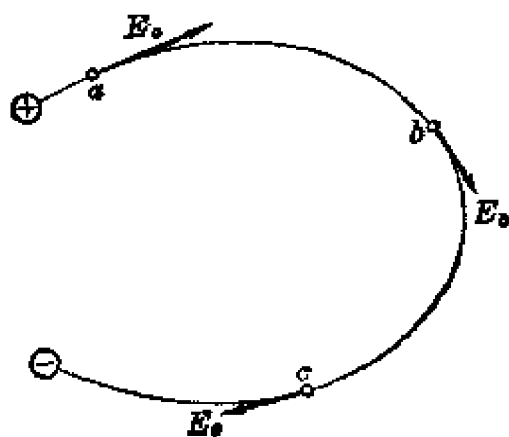


图 10.10

因此掌握了电场中电力线的形状，不仅能知道电场中各处电场强度的方向，而且根据电力线的疏密程度还可以比较各处电场强度的大小。例如从图 10.9a、b 中可以看出，离电荷越远，电力线越疏，表示电场强度越小。

图 10.9c 表示由两块靠得很近的分别带有等量异种电荷的平行金属板所形成的电场。从它的电力线分布情况可以看出这种电场具有集中、匀强等特性。所谓集中是指在两平行板外侧的电场很弱，可以忽略不计，而集中在两平行板间的电场较强。所谓匀强是指除边缘部分外，两平行板间各点的电场强度大小和方向都相同。这样的电场就叫做匀强电场，它在生产实践中应用很广。可以设想，在匀强电场中，原来静止的正(负)电荷将顺(逆)着电力线的方向移动。

用电力线来反映电场中各处电场强度的分布情况，对定性分析问题很有帮助。这是工程上常用的方法。不过要注意，电力线只是人们假想的，它是用来描绘电场的一种方法，在电场中并非真实地存在这些线。

习题 10.8 在氢原子中,原子核和电子带有等量的异种电荷,它们之间的平均距离为 5.3×10^{-11} 米。问在氢原子核所形成的电场中,电子受到多大的电场力?

习题 10.9 试画出孤立正电荷形成的电场的电力线?

习题 10.10 在由两块水平放置的上面一块带正电,下面一块带负电的金属板形成的匀强电场中,一个带电的微小尘粒静止不动而处于平衡状态。问它带的是正电还是负电?为什么?

习题 10.11 图 10.11 是静电植绒装置的示意图。绒毛放在一个带正电的铜丝网上,由绝缘支架支撑着。在需要植绒的织物上事先按照设计图案刷上一层树脂(胶合剂);然后在滚筒的作用下逐渐沿着带负电的金属平板移动过去。铜丝网上的绒毛就会自动下落,接触到织物的绒毛又会自动上升,而只有接触到涂有树脂的部分才被栽植在图案上。经过烘箱烘干,绒毛就牢固地粘在织物上形成各种美丽的图案。试说明它的工作原理。

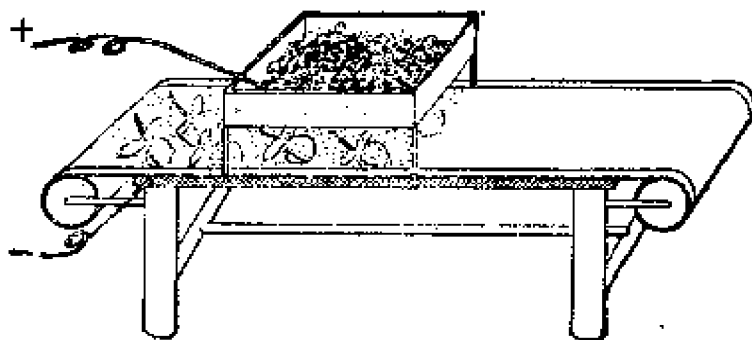


图 10.11 静电植绒装置示意图

第四节 电 位

一、电 位 能

我们已经知道,电荷间的相互作用是通过电场进行的,其实物体间的万有引力也是通过引力场进行的。地球周围的物体所受的重力也并非地球直接作用,而是通过重力场进行的。

引力场、重力场和电场一样，也是物质的特殊形式。

就象一定质量的物体在地面附近的重力场中具有一定的重力势能一样，带一定电量的电荷在电场中也具有一定的电势能。电势能又叫做电位能。

电荷在电场中为什么具有电位能呢？我们知道电荷在电场中始终要受到电场力的作用。例如在由孤立正电荷形成的电场中，如没有其他物体的作用，正电荷就要被电场力推动到无穷远处去，而负电荷就要被电场力推动到孤立的正电荷处。这就好比高处的物体会下落到地面上来一样。由此可见，电场中的电荷所以具有电位能是与电场力能对它做功分不开的。

电位能和重力势能一样，它的数值具有相对性。由于电荷在电场的无穷远处所受的电场力等于零，因此通常把电荷在电场的无穷远处所具有的电位能规定为零。根据这一规定，电荷在电场中某一点的电位能就相当于电场力把它从这一点推动到无穷远处去所作的功，不管它经过怎样的路径*。

理论研究表明，在由电量为 Q 的孤立电荷形成的电场中，电量为 q 的带电粒子在任何一点的电位能 E_p 与电量 Q 和 q 的乘积成正比；而与它们之间的距离 r 成反比。根据上述关系可以列出

$$E_p = K \frac{Qq}{r}, \quad (10.7)$$

式中的 K 是比例常数。在实用单位制中，如果电场中不存在其他物质时， $K = 9 \times 10^9$ 焦耳·米/库仑²。如果电场中还存在着其他均匀的电介质，带电粒子的电位能就会减少，上述公式就改为

* 因为电场力和重力一样，都是保守力。电场力所作的功的多少只与电荷始末两点所在的位置有关，而与它通过的路径无关。

$$E_p = K \frac{Qq}{\epsilon r}, \quad (10.8)$$

式中的 ϵ 是电介质的介电常数。

电位能是个标量, 它没有方向性, 但有正负之分。例如在孤立正电荷 ($Q > 0$) 的电场中, 电场力把正电荷 ($q > 0$) 从任何一点移到无穷远处要作正功, 因此正电荷在该电场任何一点的电位能都是正的 ($E_p > 0$) (图 10.12a); 在孤立负电荷 ($Q < 0$) 的电场中, 电场力把正电荷 ($q > 0$) 从任何一点移到无穷远处要作负功 (即实际上是外力克服电场力而作功), 因此正电荷在该电场任何一点的电位能都是负的 ($E_p < 0$) (图 10.12b)。

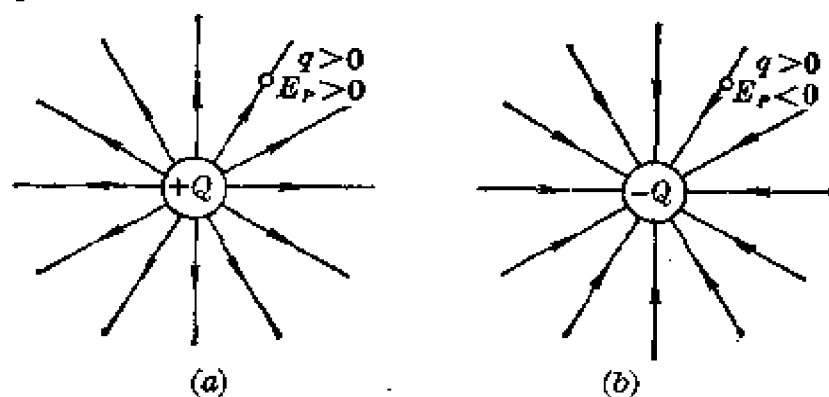


图 10.12 电位能的正、负

上述公式还可以看作是计算任何复杂电场中电荷在各点的电位能的基础。在由一系列电荷共同形成的电场中, 电荷在每一点的电位能就等于它在各个电荷单独形成的电场中处于这一点的电位能的总和。

二、电 位

严格说来, 电场中电荷的电位能是属于电荷和电场共同所有的。这就象在地面附近的物体所具有的势能, 是由地球和物体所组成的系统所共有的一样。如果没有电场, 就没有电

场力对电荷的作用，也就谈不到电场力的作功，因而也就谈不上电位能了。同时电荷的电位能还与它本身所带的电量有关。实践证明，电荷所带的电量越大，在一定的电场中其电位能也越大。然而对于电场中每一固定点说来，无论电荷的电量如何变化，它的电位能与它所带电量的比总是一个不变的量。这个比值的大小反映了电场在这一点特性，通常把电荷在电场中某点的电位能和它所带电量的比叫做电场在该点的电位，又称电势，用字母 U 表示。因此有

$$U = \frac{E_p}{q} \quad (10.9)$$

电位反映了电场中各点的能的特性。同一正电荷在电场中电位较高的地方所具有的电位能也较大。从上式可以看出电位的单位是由能量的单位和电量的单位组成的。在实用单位制中， E_p 的单位是焦耳、 q 的单位是库仑，因此电位的单位是焦耳/库仑，又称伏特，简称伏，用字母 V 表示。还有千伏 (kV)、毫伏 (mV)、微伏 (μV) 等。它们之间的关系：

$$1 \text{ kV (千伏)} = 1000 \text{ V (伏)},$$

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

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

电位和电位能一样，也是标量，但也有正负之分，通常规定电位的正负是与电位能一致的。例如在电场中某一点，正电荷具有正(负)电位能，那么这一点的电位就是正(负)的。

把电位能公式(10.7)、(10.8)代入公式(10.9)，即可得到在孤立电荷 Q 的电场中计算各点电位的具体公式：

如果电场中不存在其他物质，

$$U = \frac{E_p}{q} = \frac{KQq}{qr} = K \frac{Q}{r}; \quad (10.10)$$

如果电场中还存在均匀的电介质，

$$U = \frac{E_P}{q} = \frac{KQq}{qer} = K \frac{Q}{er}。 \quad (10.11)$$

必须指出，电场中各点的电位和电位能一样也具有相对性。上述公式是以规定电场的无穷远处电位为零作为前提的。掌握了电场中各点的电位，我们就可以按下列公式求出电荷在电场中各点的电位能。即

$$E_P = qU。 \quad (10.12)$$

通过以上对于电位能、电位的讨论，我们可以得出如下的结论：在电场中，正（负）电荷在电场力的作用下总是从电位较高（低）的地方向电位较低（高）的地方移动。在这个过程中，电场力作正功；而正（负）电荷的电位能不断减小。如果要使正（负）电荷从电位较低（高）的地方向电位较高（低）的地方移动，外力就必须克服电场力作功。在这一过程中，电场力作负功；而正（负）电荷的电位能不断增大。总之，电场力对电荷作多少正功，电荷的电位能就减小多少。电场力所作的功就等于电荷电位能的增量的负值*。

假设在电场中，电量为 q 的电荷在电场力的作用下由 A 点移动到 B 点。如果电荷在 A 、 B 点的电位能依次为 E_{PA} 、 E_{PB} ，那么根据上面的结论可以列出在这一过程中电场力所作的功

$$W_{AB} = -\Delta E_{PAB} = -(E_{PB} - E_{PA}) = E_{PA} - E_{PB}。 \quad (10.13)$$

如果电场在 A 、 B 点的电位依次为 U_A 、 U_B ，那么根据公式 (10.12) 可知， $E_{PA} = qU_A$ 、 $E_{PB} = qU_B$ 。于是上式可以改写为

$$W_{AB} = qU_A - qU_B，$$

* 这个关系同重力所作的功与物体重力势能的变化关系完全相似，请参看本书上册第 135 页。

$$\text{即} \quad W_{AB} = q(U_A - U_B) = qU_{AB}, \quad (10.14)$$

式中 $U_A - U_B$ 是电场中 A 、 B 两点的电位的差，通常叫做 A 、 B 两点间的电位差，又称 A 、 B 两点间的电压，用字母 U_{AB} 表示。显然，电位差的单位和电位的单位是相同的。

在公式(10.14)中，当 $q = +1$ 时， $U_{AB} = W_{AB}$ 。由此可知：在电场中任何两点间的电位差在数值上就相当于电场力把单位正电荷从一点移到另一点所作的功。上面已谈到电场中每一点电位的数值是相对的，它将随着零电位点的选择而有所不同，但是零电位点的选择并不会影响电场中任何两点间电位差的数值。这就好比在测量高山上某两点的高度差时，并不会由于选择海平面或山脚下某点作为测量的起点而有所影响。可见，当 1 库仑的正电荷从一点移动到另一点时，如果电场力所作的功为 1 焦耳，那么这两点间的电位差就是 1 伏特。例如 1 节干电池的两极间的电位差是 1.5 伏（通常我们把电位高的一极叫正极，电位低的一极叫负极），静电除尘时两块极板间的电位差可达 4 万伏，而闪电时云层间的电位差可达 10 亿伏。

[例题 10.2] 在一次闪电中，两块云层间的电位差约为 10^9 伏，假设被迁移的电量为 30 库仑，问发生闪电时放出多大的能量？

解：闪电的形成上面已经讨论过。云层上的电子在电场的作用下加速运动，以相当大的速度穿过空气时，电子的动能就转化为热和光，而电子动能的获得是电场力对它做功的结果。因此根据公式(10.14)可以算出在闪电中电场力所作的功

$$W = qU = 30 \times 10^9 = 3 \times 10^{10} \text{ 焦耳。}$$

在公式(10.14)中还可以看出，当 $U_A = U_B$ ，即 $U_{AB} = 0$

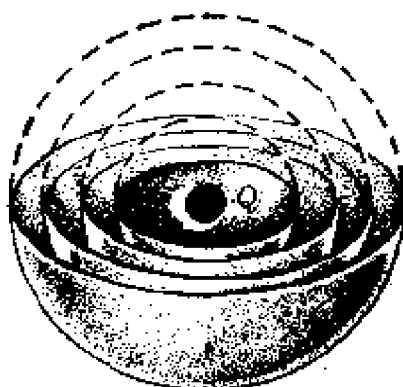


图 10.13 孤立电荷的电场中的等位面

时, $W_{AB}=0$ 。这表明如果电场中两点的电位相同, 那么无论有多少电荷在这两点间移动, 电场力所作的功总是零, 或者说电场力不作功。通常把电场中电位相同的各点所构成的面(或体)叫做等位面(或等位体)。例如在孤立电荷 Q 的电场中, 等位面是一系列以 Q 为球心的同心球(图 10.13)。很明显, 电荷在电场力的作用下不会在等位面上来回移动。

三、电位和电场强度的关系

电位和电场强度都是反映电场特性的物理量。电场强度反映了电场的力的性质, 同一电荷在电场强度不同的点上所受到的电场力就不同; 电位反映了电场的能的性质, 同一电荷在电位不同的点上所具有的电位能就不同。下面就通过匀强电场的例子来分析电位和电场强度之间的关系。

假设某匀强电场的电场强度为 E , 在它的一根电力线上有 A 、 B 两点, 它们之间的距离为 d (图

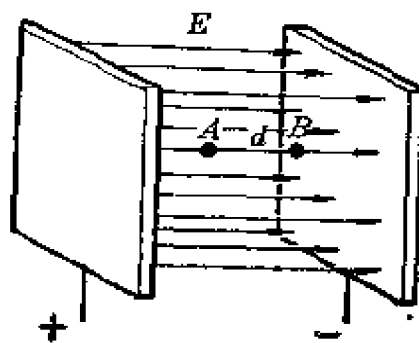


图 10.14

10.14)。且 A 、 B 的电位依次为 U_A 、 U_B 。如果在此电场中,

有一个电量为 q 的正电荷，那么它所受的电场力就是一个不变的力 $F=qE$ ，因此根据功的公式，在正电荷沿着电场力的方向由 A 点移动到 B 点的过程中，电场力所作的功

$$W_{AB} = Fd = qEd,$$

又根据公式(10.14)，得到在这同一过程中电场力所作的功

$$W_{AB} = q(U_A - U_B) = qU_{AB}。$$

由上述两式，得

$$qEd = q(U_A - U_B) = qU_{AB},$$

即
$$E = \frac{U_{AB}}{d}。 \quad (10.15)$$

上式表明：在匀强电场中，电场强度的大小等于单位长度的电位差，电场强度的方向是从电位高处指向电位低处。这就是匀强电场的电位和电场强度的关系。在实用单位制中，由于电位差 U_{AB} 的单位是伏特，长度 d 的单位是米，因此电场强度的单位也可以写作伏特/米。因为 1 伏特 = 1 焦耳/库仑，因此

$$\begin{aligned} 1 \text{ 伏特/米} &= 1 \text{ 焦耳/库仑} \cdot \text{米} = 1 \text{ 牛顿} \cdot \text{米/库仑} \cdot \text{米} \\ &= 1 \text{ 牛顿/库仑。} \end{aligned}$$

从公式(10.15)中还可以看出，当距离 d 一定时，电位差 U_{AB} 就是定值。带有异号电荷的两块平行金属板间的电场就是这种匀强电场，因此在与平行板平行的平面上各点的电位都相等。可见平行板间匀强电场的等位面是一系列与平行板平行而与电力线垂直的平面(图 10.14)。

在非匀强电场中，电位和电场强度的关系要复杂得多。公式(10.15)只能在很小范围内近似适用，即当在电力线上的 A 、 B 两点十分接近时，电场强度可以近似地看作是均匀的，公式(10.15)才成立。但是电力线的方向始终从电位高处指向电位低处的关系却总是成立的，同时等位面也总是与电力

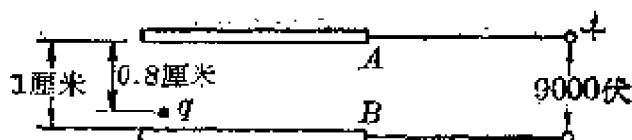


图 10.15

线垂直的(图 10.13)。

[例题 10.3] 某静电除尘装置是由两块相距 1 厘米的平行金属板 A 、 B 制成的(图 10.15)。已知 $U_{AB} = 9000$ 伏, 问: (1) AB 两板间的电场强度有多大? (2) 在距 A 板 0.8 厘米处有一尘埃粒子, 带有电量 $q = -1.6 \times 10^{-17}$ 库仑, 它受到的电场力有多大? (3) 将尘埃粒子移到 A 板, 电场力要作多少功?

解: (1) 由于 AB 两板间的电场是匀强的, 因此根据公式 (10.15), 得电场强度

$$E = \frac{U_{AB}}{d} = \frac{9000}{0.01} = 9 \times 10^5 \text{ 伏/米}$$

方向与板面垂直, 自 A 向 B 。

(2) 根据公式 (10.2), 尘埃粒子在电场中所受的电场力 $F = qE = -1.6 \times 10^{-17} \times 9 \times 10^5 = -1.44 \times 10^{-11}$ 牛顿, “-”号表示电场力的方向与电场强度的方向相反。

(3) 根据功的公式, 电场力 F 所作的功 $W = F \times S = 1.44 \times 10^{-11} \times 0.008 = 1.152 \times 10^{-13}$ 焦耳。

习题 10.12 什么叫做电位能? 电位? 电位差? 它们有哪些区别和联系?

习题 10.13 试利用公式(10.10)来说明为什么在孤立电荷 Q 的电场中, 等位面是一系列以 Q 为球心的同心球?

习题 10.14 假设某电场中 A 、 B 两点的电位依次为 200 伏、150 伏, 计算在下列过程中电场力作了多少功:

(a) $q = -10^{-7}$ 库仑的电荷从 A 点移动到 B 点;

(b) $q = +1.6 \times 10^{-8}$ 库仑的电荷从 B 点移动到 A 点。

习题 10.15 把相距 $d = 5$ 毫米的两块平行金属板 A 、 B 分别接到电位差为 6 伏的电源的正负极上(图 10.16)。若假设 A 板的电位为零, 那么 B 板的电位是多大? 在距 A 板 1 毫米的 C 点处的电位又是多大?

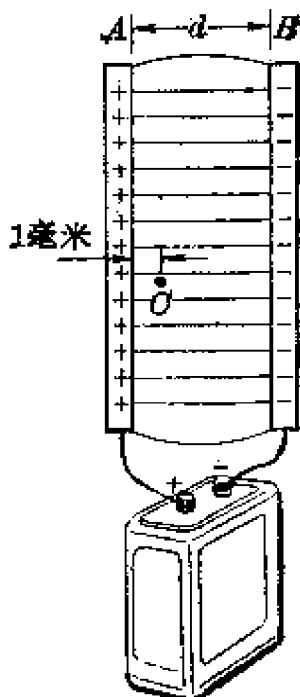


图 10.16

习题 10.16 如果在图 10.16 的两块平行金属板间的电介质是空气, 已知空气可以承受的电场强度的最大值为 $E = 30$ 千伏/厘米, 超过这个数值时空气就要发生火花放电。那么在这两块金属板上至多可以加上多大的电位差?

第五节 电场中的导体

一、静电感应

前面已经讨论过天空中发生的火花放电现象——闪电。可是为什么有时闪电会造成毁坏房屋、烧焦树木、击伤人

畜等现象呢？原来造成人类危害的闪电叫做云地闪电。它是在云和地之间进行的，俗称落地雷。在这种闪电通道所经之处，不仅会造成人畜触电死亡，而且还会因高温而使房屋、仓库、森林燃烧，甚至引起火灾。因此在雷雨时，为了防止雷击，我们千万不要逗留在高处和旷野里，也不要在大树下躲雨。然而雷电对农业生产也有一定的好处，因为它能促使空气中的氧气和氮气反应，产生大量含氮物质，随着雨滴落到地面，增加土壤的肥力。

云地闪电是怎样形成的呢？当带有大量电荷的积雨云靠近地面时，其产生的电场非常强，地面附近的人畜、树木、房屋等物体就进入了积雨云的强电场。于是这些物体内部的自由电子就要在电场力的作用下发生移动。如果积雨云的底部带正电，那么在它的电场作用下，地面和地面附近的物体就带负电；如果云底带负电，地面及地面附近的物体就带正电。这样，原来不带电的绝缘导体在电场的作用下就显出了电性。象这种由于电场的作用在导体内部电荷的重新分布现象叫做静电感应。由于静电感应而出现的电荷叫做感生电荷。云地闪电正是在积雨云和由于静电感应而显示电性的地面间发生火花放电所形成的(图 10.17)。

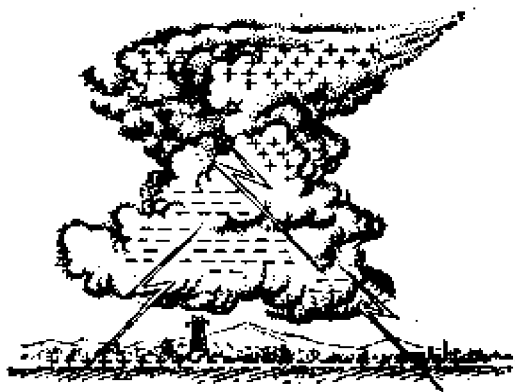


图 10.17 云地闪电

电场中的绝缘导体，在静电感应的作用下，正负电荷虽然发生了重新分布，但就整个导体说来，由于正负电荷数量相等，仍旧是电中性的。因此这时如撤去外电场，导体就恢复了原状。若这时用导线将导体与地面相连接，情况就不同了。因

为与地面相连接的导体在电场中电荷重新分布后，一部分将通过导线流入大地。这时如把接地导线断开后再撤去外电场，导体就不能恢复原状，导体上的正负电荷数量就不再相等而显现了电性。所以利用静电感应能使导体带电。

前面讲过，带电体能吸引轻小物体。如果轻小物体是导体，这很容易用静电感应来解释，如果轻小物体是电介质又如何解释呢？原来电介质内部虽然并不存在自由电子，但是在电场的作用下，原来不带电的电介质通过重新排列也会象导体一样，在它的表面出现类似的感生电荷(图 10.18)。

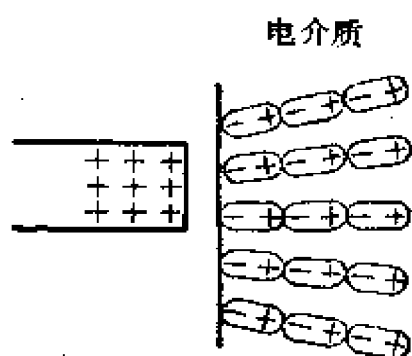


图 10.18 在电场作用下的电介质

例如在图 10.9 所示的实验中，草籽是电介质，原来并不带电。但是它们在电场的作用下显现了电性，沿着它们所受到的电场力的方向排列起来了。

带电体所以能吸引象木屑等轻小的电介质，也是这个原因。

二、静电屏蔽

你也许有这样的经验，原来声音很响的半导体收音机如果带到长途汽车上去收听，效果就差得多，这是什么原因呢？

我们已经知道，导体在电场中会发生静电感应现象。如果我们把一个金属导体放在一个电场强度为 E 的匀强电场中(图 10.19a)，由于静电感应，在金属中的自由电子就要沿着与电场强度相反的方向移动，从而使金属导体两端的表面上分别出现感生的正、负电荷(图 10.19b)。但是这种感生电荷不可能无限地积累下去，因为导体两端一旦出现感生电荷，

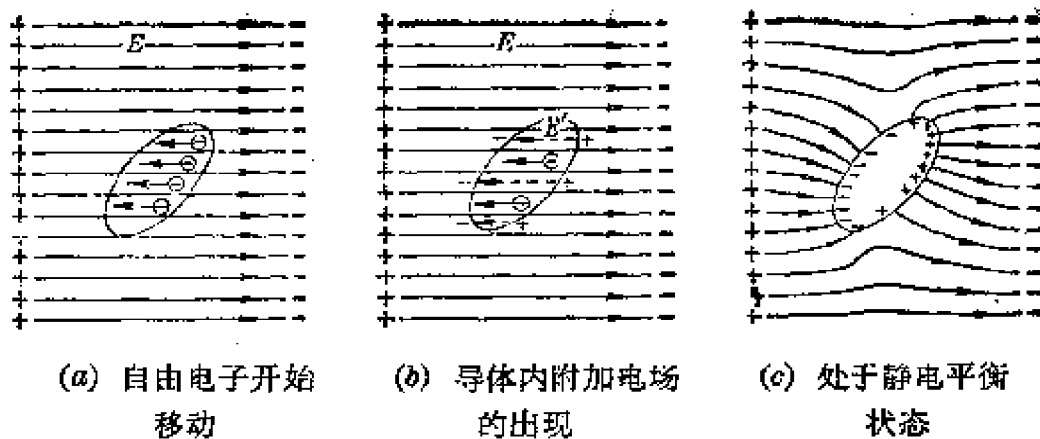


图 10.19 电场中的金属导体

它们在导体内部就要形成一个附加电场 E' (图 10.19b), 它的方向与外电场 E 的方向相反, 阻碍着自由电子的向左移动。于是外电场 E 和导体内的附加电场 E' 就构成了一对矛盾。开始时外电场比附加电场强得多, 是矛盾的主导方面, 因此自由电子可以继续向左端移动。随着自由电子的不断移动, 导体两端的感生电荷也不断地增多, 从而使附加电场 E' 也不断增强, 对自由电子继续移动的阻碍也越来越大。直到这两个方向相反的电场强度大小相等时, E' 与 E 就相互平衡, 从而使导体内部的电场强度等于零。这时自由电子的移动就完全停止 (图 10.19c), 表明导体中各点间不存在电位差, 即导体中各点的电位都相等。通常把导体内部没有电荷移动时所处的状态叫做导体的静电平衡状态。然而导体的这种静电平衡状态只是暂时的, 只要外电场一经发生变化, 它就要被破坏, 导体表面的电荷又要重新分布, 原来的静电平衡状态就要被新的静电平衡状态所代替。例如, 把两个电位不等的导体用导线连接起来, 自由电子就要从电位较低的导体沿着导线向电位较高的导体移动。随着电荷的重新分布, 两个导体的电位差就逐渐减小, 当它们之间的电位差达到零时, 自由电子的移

动也就停止。可见用导线连接的导体的电位也是处处相等的。

理论研究还表明, 电位计算公式(10.10)对于孤立的球形导体也同样适用。式中的 Q 就是导体表面上所带的总电荷; r 就是球半径。因此球体越大, 电位就越小。象地球这样的大导体, 电位是极微小的。所以通常可以把大地的电位规定为零。例如, 把电动机的外壳用导线与大地连接起来, 电动机外壳的电位也就等于零, 这就是通常说的“接地”。一般的电子仪器也常把仪器金属外壳的电位取作零电位。

上述有关导体的静电平衡状态的结论对于空腔导体也同样适用。例如封闭在金属网罩或金属板中间的验电器(图10.20)虽然它处在带电体 A 的电场中, 但金属箔并不张开。

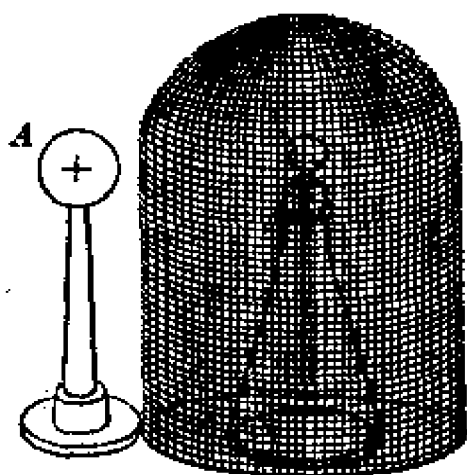


图 10.20 电场中的空腔导体

这表明电场中的金属网与实心导体一样, 在处于静电平衡状态时, 内部空间的电场强度也等于零。换句话说, 金属网罩能把外界的电场“遮住”, 使其内部不受外界电场的影响。半导体收音机所以在长途汽车内收听效果差就是因为外界的电磁波信号被长途汽车的铁皮车壳“遮住”的缘故。因此, 在某些

电子管外面套一个金属套、电缆外面包一层铅皮, 目的都是为了使它们内部不受外界电场的干扰。

另一方面, 金属网罩还可以使带电体的电场不对外界产生影响。例如把带负电的物体 A 封闭在金属罩壳内, 由于静电感应, 在金属罩壳内外表面上就分别带上正、负电荷(图

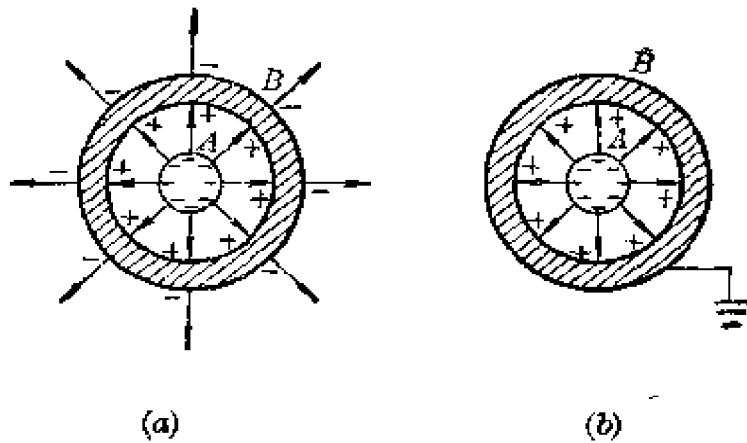


图 10.21 静电屏蔽

10.21a)。这样金属罩壳外表面上负电荷的电场还是要对外界产生干扰。如果把金属罩壳接地(图 10.21b)，外表面上的自由电子就传入大地而被中和掉。于是金属罩壳内的电场对外界就不会发生任何影响。

这种把金属罩接地后,使外部的电场不能影响内部,内部的电场也不能影响外部的现象就叫做静电屏蔽。

过去在维修高压输电、变电设备时,事先必须切断电源。因为这些设备与大地之间存在着很高的电位差,如果用手接触到这些设备,那么手与人体其他部位之间就存在一定的电位差,这样大量的电荷就会通过人体而造成生命危险。然而,“自然科学是人们争取自由的一种武装。”近年来,用毛泽东思想武装起来的我国电业工人,把彻底的革命精神和严格的科学态度紧密地结合起来,经过反复的科学实验,终于打破了“高压禁区”的迷信,创造了高压带电作业(图 10.22)的世界奇迹。他们设计成功一套“等电位服”,穿了它只要与地面绝缘就可以直接接触 22 万伏的高压输电、变电设备,自由地进行维修,同时保证安全地、不间断地供电,为促进工农业生产作出了贡献。

等电位服是利用很多细铜丝和纤维编织而成的空腔导体,它包括衣、裤、手套、袜子等。在操作时穿了它就相当于在人体外包上一层金属网罩。根据静电屏蔽的原理,在等电位服内各处的电场强度都等于零。因此,在接近高压设备时,人体在等电位服的保护下就可以不受强电场的作用。这时如果再从操作时所站立的金属工作台上拖出一根导线出来搭在要维修的高压设备上(图 10.22),那么人、工作台的电位就和高压设备的电位相等了。这样操作起来就不会有电荷流经人体而可以安全地进行高压带电作业。

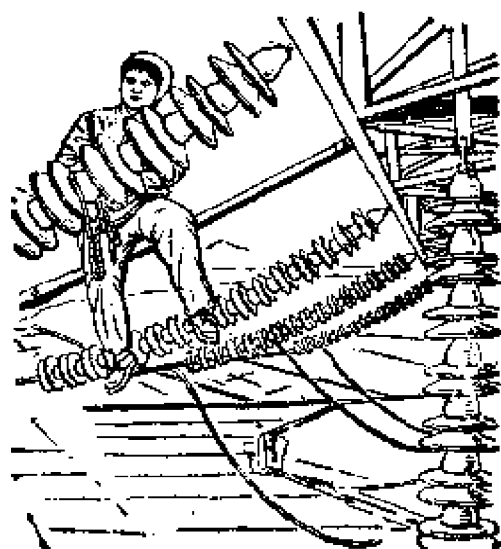


图 10.22 高压带电作业

三、尖端放电

高压输电网的导线表面必须十分光滑,就连支架高压线的金属部件一般也都必须制成球形。这是有道理的。

我们知道,导体的电荷都分布在表面上。然而实验和理论都证明,导体表面电荷的分布是与它的形状有关的。在表面弯曲程度较大的地方,如在凸出的尖端处,电荷的分布就比较密集;而在表面弯曲程度较小的地方,如在光滑处,电荷的

分布就比较稀疏。电荷的疏密将直接关系到导体表面附近的电场强度的大小。在导体的尖端处,由于电荷密集,附近电场就**很强**(图 10.23)。这样在导体尖端附近的原来不导电的空气在强电场的作用下也具有了导电性,从而产生了放电现象。这就叫做**尖端放电**。由此可知,高压输电网的导线和与它相连的金属部件的表面如果不光滑而有棱角,就会发生尖端放电,使大量电荷消失在空气中,造成电能的浪费。

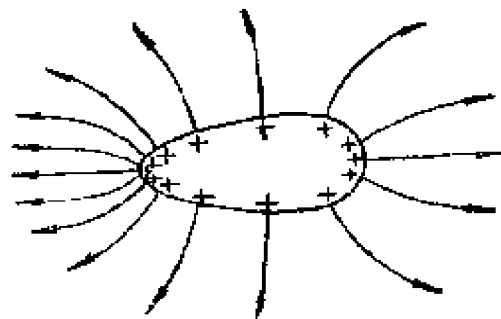


图 10.23

但是事物都是一分为二的。尖端放电既有有害于生产的一面,也有为生产服务的一面。例如用来预防雷击的**避雷针**就是利用尖端放电的原理制成的。它是一根耸立在建筑物顶上尖尖的铜杆,它的下端由一根粗铜丝与一块深埋在地下的铜板相连接,因而有良好的“**接地**”性能。当积雨云靠近建筑物时,由于静电感应,避雷针上的电荷便重新分布而聚集在尖端,不断地产生尖端放电,从而减弱了积雨云与建筑物之间的电场,减少了雷击的可能性。在大雷雨时,即使发生雷击,电荷也会顺着避雷针一直传到地底下,使建筑物不受损害。值得注意的是**避雷针**一定要有良好的接地装置,否则不但不能保护建筑物,反而使建筑物更易遭受雷击。

在输电线路中,为了保护带电导线不受雷击,在它上面悬挂着一根接地良好的架空铜导线,叫做**避雷线**;对于露天的铁道信号、各种遥控装置、室外天线等,往往装有各种类型的**避雷器**。当雷电产生的电场超过安全值时,这些避雷装置就被击穿导通,让闪电通过它传入大地,从而保护了设备的安全。

习题 10.17 导体在静电平衡状态下有哪些特性?为什么?

习题 10.18 为什么在高压设备周围要装上接地的金属网?

习题 10.19 屋内有高压设备时,为什么对近处的仪器装配、调整都有影响?怎样避免?

复 习 题

习题 10.20 为什么带电体能吸引轻小物体,无论这些轻小物体是导体还是电介质?

习题 10.21 试用电位与电场强度的关系分析:

(1) 在电位处处相等的电场中,电场强度处处都等于零吗?

(2) 在电位等于零的地方,电场强度一定等于零吗?

(3) 在电场强度等于零的地方,电位一定等于零吗?

习题 10.22 如果接触到高压设备,为什么会有生命危险?穿上等电位服又为什么能进行高压带电作业?

习题 10.23 两个分别带有 2.0×10^{-7} 库仑的异种电荷 $+q$ 和 $-q$ 相距 6.0 厘米。试计算两电荷连线中点处的(1)电场强度;(2)电位。

习题 10.24 在近代物理中常用电子伏特(用 eV 表示)作为带电粒子的能量单位。1 电子伏特就相当于一个电子通过 1 伏特的电位差时所获得的能量。试求 1 电子伏特的能量等于多少焦耳。

第十一章 直 流 电

我们已经学过处于静止状态的电荷的一些规律。然而静止电荷还不能作功。要想使电动机转动，或点亮电灯还得让电荷作定向移动才行，或者说需要电流。电流有交流、直流之分。在工农业生产和科学实验中，直流电的使用还是非常广泛的。例如工业上的电解、电镀以及我们日常生活中经常碰到的半导体收音机、手电筒、拖拉机上的车灯等用的都是直流电。

本章主要研究有关直流电的一些规律及其应用。

第一节 电 流

一、形成电流的内因和条件

一按按钮，手电筒马上发亮是因为小电珠里有了电流；合上电闸，抽水机马上随着电动机转动起来是因为电动机里有电流通过。那么电流是怎样形成的呢？

“一切运动都存在于吸引和排斥的相互作用中。”电流的产生仍然是正、负电荷这一基本矛盾互相吸引和排斥的结果，而外界条件的不同，只是使其表现形式不同而已。我们已经知道，在通常情况下，金属导体中大量的自由电子是在作无规则的热运动，平均地说，这种无规则的运动在整个金属内部并不引起自由电子在宏观上沿一定方向的迁移。但当导体的两

端与电源接通时，导体内部就有了电场，导体两端就有了电位差。于是这些带负电的自由电子在电场力的作用下，在无规则的运动上迭加了一个沿电场相反方向上的运动，这样自由电子沿电场相反方向的运动就占了优势。因此外加电场的存在就使自由电子运动的矛盾主要方面由无规则性转化为定向性。电荷在导体中的定向移动就形成了电流。

以上分析的主要是金属导体(固体)，但在导电液体中，同样也存在着大量的自由电荷。例如，当盐(氯化钠)溶解在水中时，由于水分子的作用，它就分离成带一个多余电子的氯原子(负离子)和缺少一个电子的钠原子(正离子)。这个现象叫做电离。在外加电场的作用下，正离子将沿电场方向移动，同时负离子沿电场的相反方向移动，这样也形成了电流。原来是中性的气体分子，在紫外线的照射下或在强电场的作用下也能电离成正离子和电子，因而使气体导电而发生放电现象。

由此可知，导体中形成电流的根本原因就在于导体内部存在着大量的自由电荷(自由电子或离子)；而导体两端存在的电位差是形成电流的外部条件。

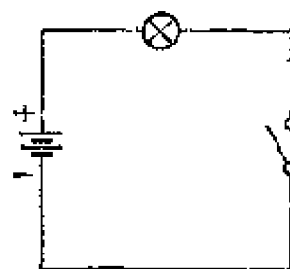
二、形成持续电流的条件——电源

我们已经知道，把导线和两个电位不等的导体连接起来，导线上就会有自由电子的定向移动。但是随着电子的定向移动，导体间的电位差很快就消失，这样形成的电流也就随着很快消失。象这种在一瞬间出现的电流并无实用价值。要在导体中获得持续的电流，就必须在导体两端保持持续的电位差。

电源就是能在导体两端持续保持一定的电位差的装置。例如在手电筒里正是由于装有电源才能使小电珠持续发亮(图 11.1a)。



(a) 实物图



(b) 线路图

图 11.1 最简单的照明电路

电流所经过的路线叫做电路。它主要包括电源、负载、导线和开关等四个部分。电源(如电池、发电机等)是形成持续电流的不可缺少的条件之一;负载,又称负荷(如电灯泡、电动机等用电器)是电流做功的地方,即把电能转化为其他形式的能的地方;导线是用来连接电源和负载的;开关是用来控制电路的接通与断开的。很明显,电路只有在闭合的情况下才有电流通过。通常把电源内部的电路叫做内电路,而把电源以外的电路叫做外电路。用来描述电路的简图叫做电路图。图 11.1b 就是最简单的照明电路图,其中电池用符号 —|—|— 表示,长的一划代表电池的正极,短的一划代表负极;小电珠、电灯等用电器用符号 $\text{—}\otimes\text{—}$ 或 $\text{—}\square\text{—}$ 表示;导线用直线表示;开关用符号 $\text{—}\swarrow\searrow\text{—}$ 表示。在比较复杂的实际电路中,除上述主要元件外,还有各种测量仪表和保险装置等。

为什么电源能在导体两端持续地形成一定的电位差呢?就拿手电筒里的电源——干电池来说,在干电池的顶部带有铜帽处有一个正极,而它的底部是负极。干电池借助于它内部物质的化学作用,即借助于它内部物质的化学力对电荷做功,把正电荷移动到正极、负电荷移动到负极,从而在正极上积聚一定量的正电荷,在负极上积聚一定量的负电荷。这样就在干电池的两极间形成了一定的电场,干电池正极的电位

较高，负极的电位较低。于是在干电池的两极间就形成了一定的电位差。

把小电珠用导线和干电池的两极接通后(图 11.1a)，导线中的自由电子(带负电)就在电场力作用下不断地由干电池的负极经外电路(即在电池外部)流向正极；同时在干电池内部，又借助于它内部物质的化学力不断地把到达正极的电子经内电路而送回到负极上去。这样就在整个闭合电路里形成了循环不息的电子的定向移动，于是在导线中就有了持续的电流，从而使小电珠持续地发亮。由于电子的这种定向移动是循环不息的，它们并不会影响原来积聚在干电池正负极上的电荷，因此在干电池两极间能持续地维持一定的电位差。

从以上的分析可以看出：在图 11.1 的照明电路中，电荷是在作循环不息的定向移动，而电源(干电池)的作用就在于把正(负)电荷由负(正)极经内电路送回到正(负)极上去。这正是干电池内部物质的化学力对电荷做功的过程，也是化学能转化成电能的过程。在干电池的化学能用完后，它内部物质的化学作用也就不存在了，因此就不能再把正(负)电荷送回到正(负)极上去，这样两极间的电位差就消失了，导线中电荷的定向移动也就停止，小电珠当然不亮了。

各种类型的电源都是通过各种不同的方式，即通过各种非电场力(如干电池中的化学力)对电荷做功，从而把各种不同形式的能转化成电能的。例如蓄电池也是通过它内部物质的化学力对电荷做功把化学能转化成电能的；光电池是通过半导体硒利用太阳光的作用对电荷做功把光能转化成电能的；发电机是通过原动力机(如柴油机、蒸汽轮机、水轮机等)的带动以磁作为媒介不断把机械能转化成电能的。因此电源实质上是把其他形式的能转化成电能的装置。

对各种电源来说，其非电场力把一定量的正（负）电荷移到正（负）极上去所作的功是有多有少的。为了反映电源的这种特性，通常把单位正电荷在闭合电路中移动一周的过程中，电源的非电场力对它所作的功叫做电源的电动势，用字母 E 表示。即

$$E = \frac{W}{q}。 \quad (11.1)$$

具体说来，正电荷在闭合电路中移动一周的过程中有两个做功过程：电源的非电场力只是在内电路中对正电荷做功，其结果是提高了正电荷的电位能；至于在外电路中，则是电场力对正电荷做功的过程，其结果是正电荷消耗了它在内电路中所获得的电位能。

电源电动势的单位和电位相同，也是伏特。电源的电动势在数量上就等于电源在没有接通时，正、负两极间的电位差。例如一节干电池的电动势为 1.5 伏；而大型发电机的电动势可达几千伏。

三、电流的强度和指向

原来很亮的手电筒，等干电池用了一段时间后，小电珠就暗得多，这表明原来通过小电珠灯丝的电流强，而后来电流则减弱了。通常把单位时间里通过电路中某一截面电荷的多少叫做通过这一截面的电流强度，简称电流，用字母 I 表示。即

$$I = \frac{q}{t}， \quad (11.2)$$

式中 q 表示通过某一截面的电量， t 表示通电时间。电流强度反映了电流的强弱程度。

电流强度的单位是由电量的单位和时间的单位所组成，在实用单位制中，电流强度的单位是库仑/秒，又称安培，简称安，用字母 A 表示。根据不同的需要，比安培小的单位还有毫安 (mA) 和微安 (μA)。它们之间的关系是：

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

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

例如，农村中常用的小型电动机在工作时的电流约为几安培；普通电灯泡发光时的电流为几百毫安；一般晶体管收音机在工作时，总电路上的电流约为几十毫安。

电流强度是指电流的强弱，并无方向性，因而是个标量。

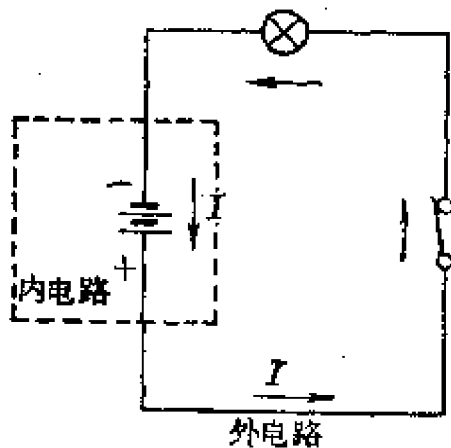


图 11.2 电流的指向

但在电路中，电流却存在着两种不同的指向，不是从这一点流向那一点，就是从那一点流向这一点。虽然导线中的电流是带负电的自由电子的定向移动所引起的，但由于历史上的原因，通常把正电荷在电路中移动的指向规定为电流的指向。例如，在外电路中电流的指向是从电源的正极指向负极；而在内电路中电流的指向是从电源的负极指向正极 (图 11.2)。

电流强度和指向都不随时间变化的电流叫做直流电。在以直流发电机、干电池和蓄电池为电源的电路中的电流都是直流电，而这种电路就叫做直流电路。

在直流电路中的电流，就象流体在管道中的稳流一样，也具有连续性，不会发生中断、淤塞等情况，因此在单线的直流电路中，通过任一截面的电流强度都相等。

四、电流和电压的测量

在生产实践和科学实验中，经常需要测量电路中的电流强度以及某两点间的电压（电位差）。测量电流强度的仪表叫做电流表，用符号Ⓐ表示。根据仪表量程（测量范围）的不同又可分为安培表、毫安表、微安表等。测量电压的仪表叫做电压表，用符号Ⓥ表示。根据仪表量程的不同又可分为伏特表、毫伏表等。象这些仪表统称直流电表（图 11.3）。在每一个直流电表上都有两个分别标有 +、- 号的接线柱，叫做电表的正、负极。

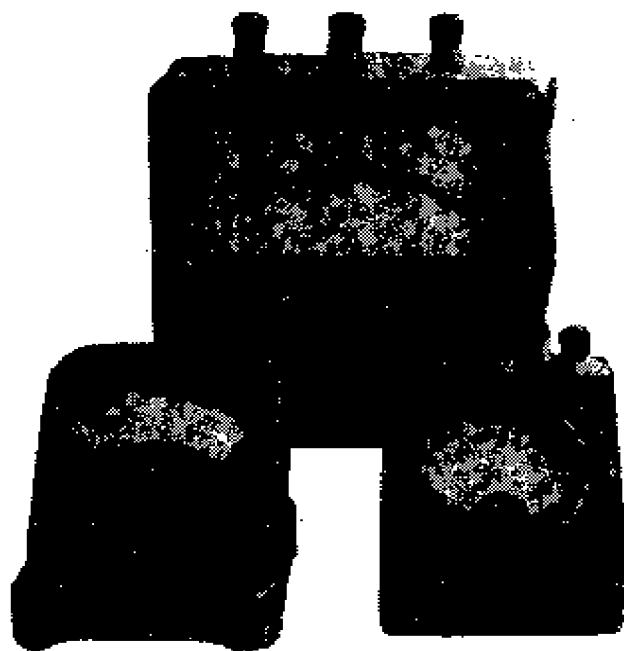


图 11.3 直流电表

在用电流表测量通过电路中某一段导线的电流强度时，只要设想把导线截断，将导线的两端分别接在电流表的正负极上，如图 11.4a 所示，让通过导线的电流全部从电流表中流过。这样的连接方法叫做串联。同时还要注意电流的指向，必须使与电源正（负）极相连的导线和电流表的正（负）极相连

通,以保证正电荷从正极进入电流表,并从负极流出。当电流通过电流表时,表上的指针就会发生偏转,从指针所指的刻度即可读出电流强度的数值。如果接反了,让正电荷从负极进入电流表,表上的指针就要向没有刻度的那边偏转,电流表就有被损坏的可能。在单线的直流电路中,用电流表从一处测得的电流强度的数值就可以代表通过任何截面的电流强度。

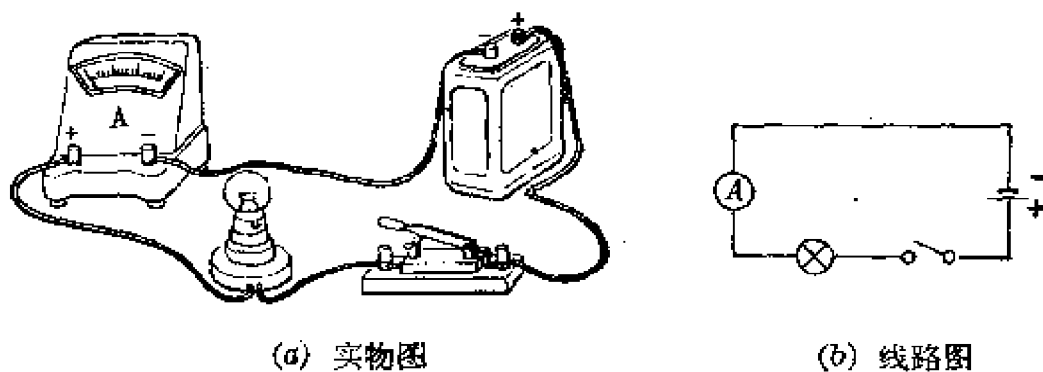


图 11.4 电流表的使用

在用电压表测量电路中某段导线两端的电压时,只要用导线把这段导线的两端分别与电压表的正负极连接起来,如图 11.5a 所示,让电流通过这段导线的同时,也有一部分通过电压表。这样的连接方法叫做并联。同时也应注意电流的指向,必须使导线电位较高(低)的一端与电压表的正(负)极相连通,以保证正电荷从正极进入电压表,并从负极流出。当有

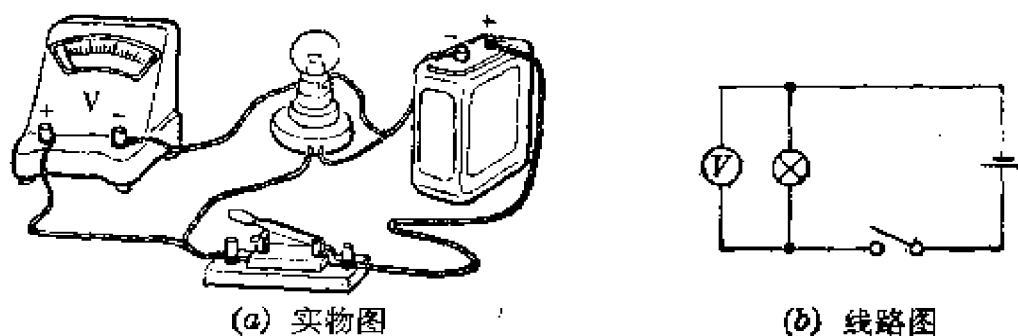


图 11.5 电压表的使用

部分电流通过电压表时,表上的指针也会发生偏转,从指针所指的刻度即可读出这段导线两端的电压的数值。

在使用各种直流电表时,还必须注意到要测量的电流强度或电压的大致数值不应超出电表的量程,否则电表也会有损坏的可能。

有关电流表、电压表的构造和工作原理将在本书第十二章里讨论。

习题 11.1 试分析形成电流的内因和条件。

习题 11.2 在电路中,电源起了什么作用? 什么叫做电源的电动势?

习题 11.3 在单线的直流电路中,电流强度处处相等。那么电位是否也处处相等呢? 为什么?

习题 11.4 为了能同时测量出某电路中通过小电珠的电流强度以及它两端的电压,问在图 11.6 里所示的几种表示接线方法的电路图中,哪一种是正确的? 哪一种是错误的? 为什么?

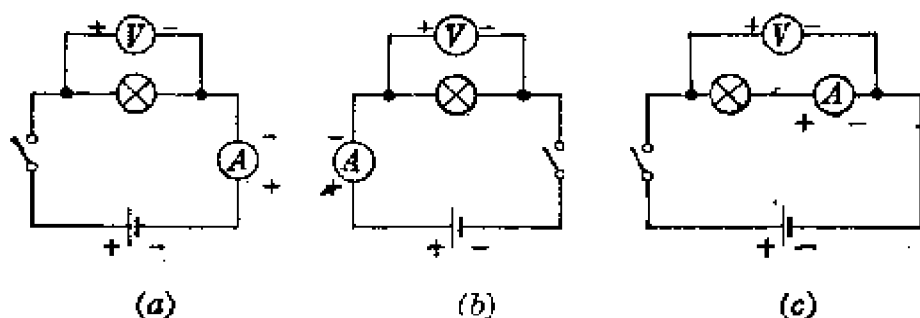
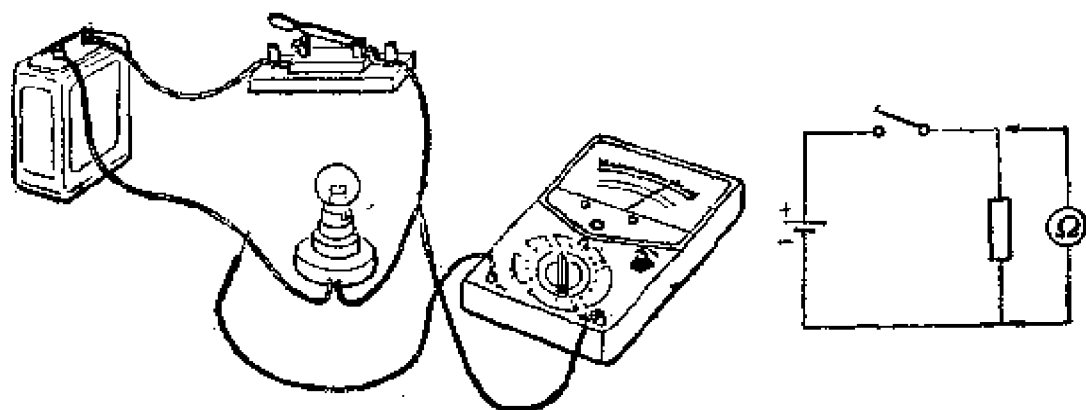


图 11.6

第二节 导体的电阻

一、电阻定律

把两根长短粗细一样的铜丝和铁丝,先后接入同一电路中,如图 11.7 所示。从电流表上可以看出,通过铜丝的电流



(a) 实物图

(b) 线路图

图 11.7 欧姆表的使用

强度要比通过铁丝的大得多。这一事实充分表明任何导体一方面具有导电的性质，另一方面又具有阻碍导电的性质。铜丝和铁丝虽然都能导电，但是铁丝阻碍导电的性质就要比铜丝大得多。

既然是导体，为什么又会具有阻碍导电的性质呢？就拿金属导体来说，我们知道电流是由导体中的自由电子在电场力的作用下作定向移动而引起的。如果没有其他阻碍作用，电子的运动就会不断加速，电流也将不断加强。但实际上金属导体内除自由电子外还存在着由大量的金属离子*构成的空间点阵，它们在各自的平衡位置附近不停地振动。因此电子在作定向移动时必然要和它们发生碰撞，从而使电子的定向运动受到阻碍。由此可知，外加电场对电子运动的加速作用和金属离子对电子运动的阻碍作用是金属导体在导电状态下所呈现的一对矛盾的两个方面，它们既对立又统一，导体中的稳定电流正是在这种情况下形成的。

导体对电流的阻碍作用叫做导体的电阻，用字母 R 表示。在实用单位制中，电阻的单位是欧姆，简称欧，用字母 Ω 表

* 这里说的金属离子就是指缺少了电子的金属原子。

示。欧姆这个单位是这样规定的：当导体两端的电压为 1 伏特，而通过的电流强度为 1 安培时，导体的电阻就是 1 欧姆。根据不同的需要，比欧姆大的单位还有千欧 ($k\Omega$) 和兆欧 ($M\Omega$)。它们之间的关系是：

$$1 \text{ 千欧}(k\Omega) = 1000 \text{ 欧姆}(\Omega),$$

$$1 \text{ 兆欧}(M\Omega) = 1000 \text{ 千欧}(k\Omega)。$$

进一步的实验表明，导体的电阻不仅与导体的材料有关，即使材料相同的导体，只要长短粗细不同，电阻就不同。导体越长，电阻越大；导体的截面积越大，电阻越小。精确的实验结果证明：对于相同材料的导体说来，电阻与长度成正比，与截面积成反比。这个结论就叫做电阻定律。即

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad (11.3)$$

式中 l 表示导体的长度， A 表示导体的截面积。比例系数 ρ 对于不同的材料有不同的数值，它反映了各种材料对电流阻碍作用的大小，因而叫做材料的电阻率。表 11.1 列出了温度在 20°C 时几种常用金属材料的电阻率。如果 R 的单位是欧姆， l 的单位是米， A 的单位是毫米²，则 ρ 的单位为欧·毫米²/米。

表 11.1 几种常用金属材料温度在 20°C 时的电阻率(欧·毫米²/米)

材 料	电 阻 率	材 料	电 阻 率
银	0.016	铜	0.13~0.25
铜	0.0175	铁	0.13~0.3
铝	0.029	黄铜	0.07~0.08
钨	0.056	康铜	0.40~0.51
铂	0.106		

实验表明，金属材料的电阻率是随着温度的升高而有所增大的。

导体、半导体和电介质（又称绝缘体）的区别就在于它们的导电性质不同，这也可以从它们的电阻率表现出来。导体的电阻率一般都在 $1 \text{ 欧} \cdot \text{毫米}^2/\text{米}$ 以下；半导体的电阻率在 $1 \sim 10^{12} \text{ 欧} \cdot \text{毫米}^2/\text{米}$ 之间；电介质的电阻率都在 $10^{12} \text{ 欧} \cdot \text{毫米}^2/\text{米}$ 以上。材料的电阻率不同，用处也不同。例如银的电阻率很小，是很好的导电材料，但较贵重，只用于特殊场合。铜、铝的电阻率也很小，广泛用来制作导线和各种电器，因此在电路中用于连接的导线的电阻与其他用电器的电阻相比往往可以忽略不计。少数合金，如康铜（铜 60%、镍 40%）、锰铜（铜 84%、锰 12%、镍 4%），虽然电阻率较纯金属为大，但它们几乎不受温度影响，因而可以用来制作标准电阻。

【例题 11.1】 在某照明电路中，原来选用截面积为 2.5 毫米^2 的 BX 型铜芯橡皮线，后来为了节约用铜，改用电阻值相同、长度也相同的 BLX 型铝芯橡皮线来代替，问选用的铝芯线截面积应该多大？

解： 根据它们电阻值相同、长度也相同的关系按公式 (11.3) 可以列出

$$R = \rho_{\text{铜}} \frac{l}{A_{\text{铜}}} = \rho_{\text{铝}} \frac{l}{A_{\text{铝}}},$$

因此所选用的 BLX 型铝芯橡皮线的截面积

$$A_{\text{铝}} = \frac{\rho_{\text{铜}}}{\rho_{\text{铝}}} \cdot A_{\text{铜}} = \frac{0.029}{0.0175} \times 2.5 = 4.14 \text{ 毫米}^2。$$

导体的电阻不仅可以利用公式来计算，也可以通过仪表来测量。测量电阻的仪表叫做欧姆表。在使用时，事先必须把电路断开，然后将欧姆表的正负两极通过表棒跨接在待测

电阻的导体两端,如图 11.7 所示。这样即可从表上指针所指的刻度读出导体的电阻值。如果在测量时不把电路断开,欧姆表就有被烧坏的可能。

二、电 阻 器

利用导体具有电阻因而能控制电路中的电流和电压的这一特性,故常把某种导体制成具有一定电阻值的元件,这叫做电阻器,简称电阻。它是自动控制、无线电通信以及半导体收音机等各种电子设备的基本元件之一。电阻是由各种金属材料制成的,按其材料的结构不同,可分为线绕电阻、薄膜电阻和合成电阻等;按其电阻值是否固定,可分为固定电阻和可变电阻等。还有一种作为分压用的电位器有时亦可作为可变电阻使用。有关电阻在电路中的具体作用将在本章第四节里详细分析。

图 11.8 列出了几种定值电阻的外形图及其在电路图上的符号。在一般定值电阻上除标有电阻值外,还标出它的额定功率。当电流通过电阻时,必然有一部分电能转化为热而消耗掉。如果消耗的功率太大,超出了它的额定功率,电阻就有烧坏的可能。

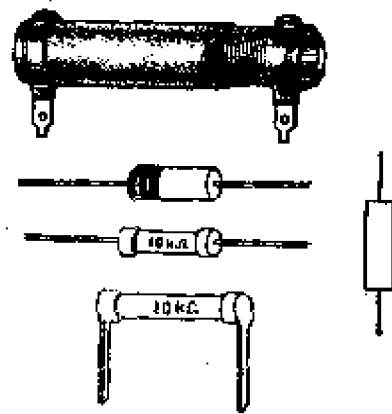


图 11.8 几种定值电阻

图 11.9 列出了几种可变电阻(简称变阻器)的外形图及其在电路图上的符号。变阻器的电阻值在一定范围内可以进行调节。例如滑动变阻器(图 11.9a)是一般实验室里常用来连接在电路中调节电流强度。使用时,只要先将它的固定端 a 、 c 接入电路,然后移动它的滑动铜片 b 即可改变 ac 间的电

阻值。电位器(图 11.9b)是装在收音机里的,通过改变它的电阻值来调节音量强弱。

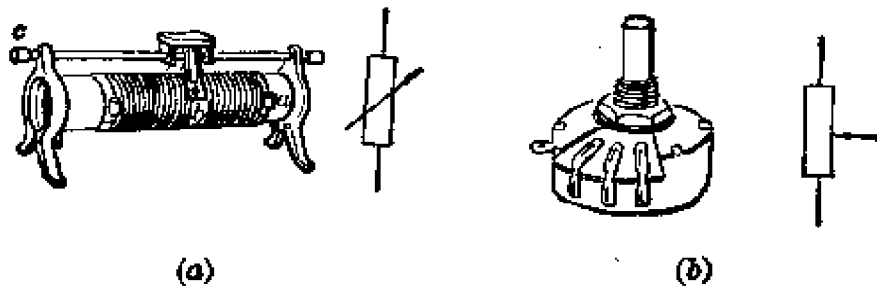


图 11.9 几种可变电阻器

此外,还有一种由半导体材料制成的可变电阻——热敏电阻,它的电阻值随温度变化十分灵敏。热敏电阻与一般由金属导体制成的电阻不同,它的电阻值将随着温度的升高而减小。这是半导体的一个重要特性。热敏电阻可以用来制成灵敏度和精确度都很高的半导体温度计,它也是自动化设备中的重要元件之一。

习题 11.5 有人说:“材料的电阻率就相当于用这种材料制成长 1 米、截面积 1 毫米²的导线的电阻。”这句话正确吗?为什么?

习题 11.6 农村常用铁丝作为有线广播线,问长 500 米,截面积 4 毫米²的这种广播线在常温 (20°C) 下的电阻有多大?(取铁的电阻率为 0.13 欧·毫米²/米)

习题 11.7 某生产队拉电线装电灯,输电线长 2 公里。若采用截面积为 2.5 毫米²的铝芯线,问这根电线的电阻有多大?

习题 11.8 直径为 0.8 毫米、质量为 1 公斤的铜导线在常温下电阻有多大?已知铜的密度为 8.9 克/厘米³。

习题 11.9 图 11.10 是汽车上用来自动测定油箱内液面高低的装置的示意图。图中 R 是个滑动变阻器,它的滑动铜片连在杠杆 L 的一端上, B 是液面上的浮体,油量表 M 是由电流表改装而成的。问为什么从油量表上指针所指的刻度可以了解油箱内的储油量?

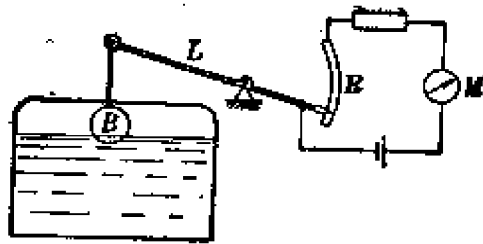


图 11.10

第三节 欧姆定律

一、部分电路的欧姆定律

我们已经知道，如果具有一定电阻值的导体两端的电压（电位差）是一定的，那么通过导体的电流强度也是一定的。如果两端的电压，或导体的电阻发生了改变，则通过的电流强度也要发生改变。那么电流强度、电压和电阻三者之间究竟存在什么关系呢？

如图 11.11 所示，其中 ab 是具有一定电阻 R 的康铜丝。

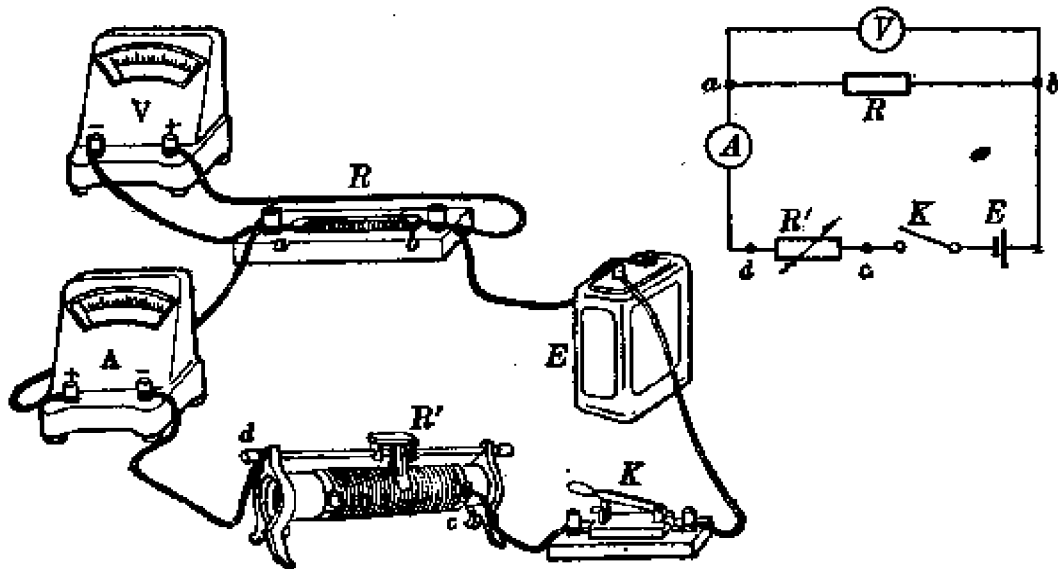


图 11.11

接通电源 E ，从电流表 A 和电压表 V 上即可同时读出通过康铜丝 ab 的电流强度 I 和它两端的电压 V 。若把电路中变阻器 R' 上的铜片渐渐滑动，那就会发现电流表和电压表上的读数会同时发生改变。但是不论电压表上的读数怎样变化，电流表上的读数总是随着电压表读数增大或减小。这表明对于电阻一定的康铜丝 ab 说来，通过的电流强度总是随着它两端的电压增大而增大；或者随着电压的减小而减小。

用电阻率较小的铁丝代替康铜丝来做上述实验，同时渐渐滑动变阻器上的铜片来改变铁丝两端的电压。当电压表上的读数等于前一次实验中康铜丝两端的电压时，电流表上的读数就要比前一次实验中的大得多。这表明在金属丝两端电压一定的情况下，电流强度是随着金属丝电阻的减小而增大的。

进一步的精确实验表明：通过电路上某一段导体的电流强度与它两端的电压成正比；而与它的电阻成反比。这一结论就叫做部分电路的欧姆定律。用公式表示：

$$I = \frac{U}{R}。 \quad (11.4)$$

在实用单位制中，电压 U 的单位用伏特，电阻 R 的单位用欧姆，那么电流强度 I 的单位就是安培。由上式即可得

$$R = \frac{U}{I}； \quad (11.5)$$

$$U = IR。 \quad (11.6)$$

部分电路的欧姆定律反映了在一段通电导体上，电流强度与电压、电阻三者之间的相互关系是电流运动的基本规律。

[例题 11.2] 已知 121 型高灵敏度继电器* 线圈的电阻

* 有关继电器的原理详见第十二章。

为 4000 欧姆，工作电流为 5.4 毫安，问在线圈两端加上多大电压才能使它工作？

解：很明显，要使通过电阻 $R=4000$ 欧姆的继电器线圈的电流强度 $I=5.4$ 毫安 $=0.0054$ 安培，则根据公式(11.6)可知，线圈两端所加的电压

$$U=IR=0.0054 \times 4000=21.6 \text{ 伏特。}$$

二、全电路的欧姆定律

现在再来分析图 11.11 的实验。

我们知道，通过康铜丝的电流是由于它两端的电压所引起的，而它两端的电压又是由于和电源相连接而形成的。那么逐渐移动电路中变阻器上的铜片，只是改变了变阻器所在的 cd 段的电阻，为什么就可以改变通过康铜丝 ab 的电流强度和它两端的电压呢？要解决这个问题，必须首先研究在整个电路中的电流强度的变化规律。

在第一节里已经讲过，在单线的直流电路中，通过任一截面的电流强度都相等。很明显，这个电流强度的大小是与电源的电动势有关的，电动势越大，电流强度也越大。同时，此电流还要受到整个电路中的电阻的阻碍作用。进一步的精确实验表明：电路上总的电流强度与电源的电动势成正比，而与全电路（包括外电路和内电路）的总电阻成反比。这一结论就叫做全电路的欧姆定律。用公式表示：

$$I = \frac{E}{R+r}, \quad (11.7)$$

式中 E 是电源的电动势； R 是外电路上的总电阻； r 是内电路上的电阻，简称内电阻； $R+r$ 是全电路上的总电阻。

根据全电路欧姆定律可知，在图 11.11 的实验中，通过康

铜丝的电流强度不仅与康铜丝的电阻有关，而且与电路上其他部分的电阻也有关系。这就是为什么我们改变了变阻器的电阻值就会影响到通过康铜丝的电流强度的原因。又因为这根康铜丝的电阻值是固定不变的，当通过的电流强度发生变化时，它两端的电压也要跟着发生变化，所以改变了变阻器的电阻值也会影响到康铜丝两端的电压。

[例题 11.3] 在图 11.11 的实验中，已知电源电动势 $E=3$ 伏，内电阻 $r=0.25$ 欧，而康铜丝的电阻 $R_1=25$ 欧。如果把变阻器移到 $R_2=50$ 欧，求通过康铜丝的电流强度 I 以及它两端的电压 U_1 。如果把变阻器移到 $R_2=250$ 欧呢？

解：由于外电路是由康铜丝、变阻器和导线组成的，导线电阻可忽略不计，那么外电路上的总电阻 $R=R_1+R_2$ 。于是按公式(11.7)可以列出，当 $R_2=50$ 欧时，电流强度

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + r} = \frac{3}{25 + 50 + 0.25} \approx 0.0399 \text{ 安,}$$

康铜丝两端的电压

$$U_1 = IR_1 = 0.0399 \times 25 \approx 0.998 \text{ 伏。}$$

当 $R_2=250$ 欧时，通过康铜丝的电流强度和它两端的电压分别为：

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + r} = \frac{3}{25 + 250 + 0.25} \approx 0.0109 \text{ 安,}$$

$$U_1 = IR_1 = 0.0109 \times 25 \approx 0.273 \text{ 伏。}$$

全电路的欧姆定律公式(11.7)还可以写成如下的形式：

$$IR = E - Ir,$$

即

$$U = E - Ir, \quad (11.8)$$

式中 $U=IR$ ，是外电路两端的电压，通常叫做路端电压，又称电源的输出电压； Ir 是电源内部的电压降，简称电源的内压降。上式表明了电源电动势与路端电压的区别与联系。在正

常情况下，任何电源的电动势和内电阻可以认为是不变的*，当电路中有电流时，内压降总是存在的，故路端电压也总是小于电源电动势。然而外电阻越大，电流强度越小，那么路端电压就越是接近于电源电动势。当电路切断时，电流强度就等于零，这时的路端电压就等于电源的电动势。这就是为什么电源电动势在数量上就等于电源在没有接通导体时正、负两极间的电位差的原因。

通常我们可以把电压表直接跨接在电源(如干电池、蓄电池等)的两极间来测量电源的电动势。严格说来，在测量时电路是接通的，因此所得出的读数实际上并非电动势而是路端电压。但由于电压表本身的电阻非常大，测量时的电流强度就很小，而一般电源的内电阻也很小，因而这时电源的内压降很小，这样我们就可以把所得的读数粗略地看作是电源的电动势。

[例题 11.4] 已知某电源的电动势为 1.5 伏，内电阻为 0.12 欧，如果把它与电阻为 1.08 欧的外电路连接起来，求这时的电流强度和路端电压。

解：根据全电路欧姆定律公式(11.7)、(11.8)，按已知条件即可算出这时的电流强度和路端电压。

$$I = \frac{E}{R+r} = \frac{1.5}{1.08+0.12} = 1.25 \text{ 安,}$$

$$U = E - Ir = 1.5 - 1.25 \times 0.12 = 1.35 \text{ 伏.}$$

有些同志为了想知道蓄电池里有没有电，而直接用一根铜丝接触它的正负极来观察有没有火花。这种方法太危险，必须避免采用。用铜丝来连接电源的正负极就是使外电路上的电阻接近于零。这种现象叫做短路。从公式(11.7)可以看

* 干电池在用旧以后，电动势就逐渐减小，而内电阻就显著增大。

出短路时, 由于 $R \rightarrow 0$, 铜丝上的电流强度 I 接近于 E/r , 而一般蓄电池的内电阻很小, 约为 $0.005 \sim 0.1$ 欧, 因此短路时的电流强度可达几安甚至几百安, 显然会把电源烧坏。在电力网或照明电路里, 由于电压很高, 短路时电流很大, 不但要烧坏电机, 还可能引起火灾。为了防止这类事故的发生, 在电路里必须安装保险装置。

习题 11.10 车床照明灯采用 36 伏的安全工作电压, 如果灯丝电阻为 33 欧, 问通过灯丝的电流强度有多大?

习题 11.11 电源的内电阻为 1.6 欧, 路端电压为 110 伏, 外电阻为 18.3 欧, 求电源的电动势。

习题 11.12 灯泡的灯丝断裂之后, 有时为了急用, 可以用搭丝的办法继续使用, 为什么搭丝后的灯泡要比原来亮一些呢?

习题 11.13 已知某电流表的电阻为 0.02 欧, 所能通过的最大电流强度为 10 安, 问能把这样的电流表接到蓄电池上去吗? 假设蓄电池的电动势为 2.2 伏, 内电阻为 0.1 欧。

习题 11.14 查一查在实际工作中哪些地方容易造成短路现象? 如何避免?

第四节 直流电路

在电工和电子技术的各种实际电路中, 往往根据不同的需要以各种方式把许多电阻连接起来。但其最基本的连接方法只有两种: 串联和并联。

一、串联电路

把电阻(或用电器*)一个个顺次首尾相接起来, 这种连接方法叫做电阻的串联。如果在外电路中的电阻都是串联而成

* 用电器是电流做功的地方, 一般都具有一定的电阻。

的，这个电路就叫做串联电路。图 11.12 就是由两个电珠组成的串联电路的电路图。

串联电路由于电流的通路只有一条，是单线的直流电路，因而在串联电路中电流强度处处相等。

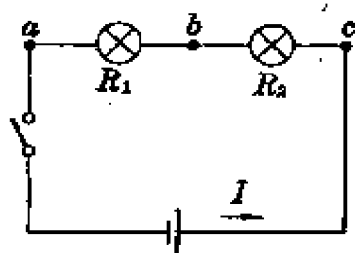


图 11.12 串联电路

在图 11.12 的串联电路中，假设电流强度为 I ，两个电珠的电阻分别为 R_1 、 R_2 ；它们两端的电压分别为 U_{ab} 、 U_{bc} 。很明显，整个外电路的两端电压，即两端的电位差，应该等于各电阻两端电位差之和，即

$$U = U_{ab} + U_{bc} \quad (11.9)$$

这就是说，串联电路上的路端电压就等于各串联电阻两端电压的和。根据部分电路欧姆定律可以列出

$$U = IR; \quad U_{ab} = IR_1; \quad U_{bc} = IR_2.$$

代入公式(11.9)得

$$IR = IR_1 + IR_2,$$

即
$$R = R_1 + R_2. \quad (11.10)$$

上式表明：串联电路的外电阻等于各电阻的和。这是因为电阻串联后就相当于增大了导体的长度，所以总电阻要比任何一个串联电阻大。通常把总电阻 R 叫做这几个电阻的等效电阻。

[例题 11.5] 如图 11.13 所示，把 $R_1 = 100$ 欧、 $R_2 = 200$ 欧两个电阻串联后接到输出电压 $U = 3$ 伏的电池上去（电池的内电阻可以忽略不计）。求：

- (1) 串联电路中的电流强度；
- (2) 每个电阻两端的电压。

解：(1) 根据部分电路的欧姆定律可以算出电路中的电流强度

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{3}{100 + 200} = 0.01 \text{ 安。}$$

(2) 各个电阻两端的电压(图 11.13)分别为：

$$U_1 = IR_1 = 0.01 \times 100 = 1 \text{ 伏,}$$

$$U_2 = IR_2 = 0.01 \times 200 = 2 \text{ 伏。}$$

从上面的例题可以看出，串联电阻具有分压作用。这就是说，外电路上的总电压(即路端电压)是由各个串联电阻一起分担的。较大的电阻就分配到较大的电压，这是因为通过各个串联电阻的电流强度应是相同的。即

$$I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} \quad (11.11)$$

由此可知，在串联电路中，电压的分配与电阻的大小成正比。这就叫做串联电阻的分压原理。

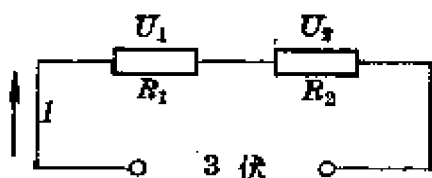


图 11.13

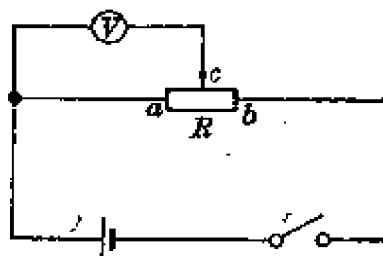


图 11.14

电位器就是根据串联电阻的分压原理制成的，它实际上也是一种变阻器。把电位器的两端 ab 接在电路中，如图 11.14 所示，它的滑动端 c 就把总电阻 R 分为两部分。在这样的电路中，只要移动电位器滑动端 c ， ac 两点间的电压(电位差) U_{ac} 就会随着 c 点的位置变动而增大或减小，即随着位

置的变动 c 点的电位也在改变。因此我们就可以根据实际需要利用电位器来获得一定的电压。

[例题 11.6] 已知 JH-70 型晶体管温度继电器的工作电压 $U_1=8.4$ 伏，而它的线圈的直流电阻 $R_1=600$ 欧。现在电源的输出电压 $U=24$ 伏，因而不能把它直接接电源。问需要串联一个多大的分压电阻才行(图 11.15)?

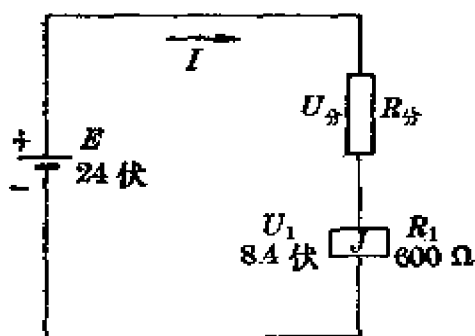


图 11.15

解：很明显，必须串联一个分压电阻 $R_{分}$ ，让它为继电器分担掉多余的电压。而

$$U_{分} = U - U_1 = 24 - 8.4 = 15.6 \text{ 伏,}$$

同时根据串联电阻的分压原理公式(11.11)，可以列出

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_{分}}{R_{分}},$$

因此串联的分压电阻

$$R_{分} = \frac{U_{分}}{U_1} \cdot R_1 = \frac{15.6}{8.4} \times 600 \doteq 1114 \text{ 欧.}$$

二、并联电路

串联电路有个缺点，例如在几个串联的电阻中，只要其中有一个断开，其他所有的电阻都不再有电流通过。为了避免这一缺点，通常把几个电阻的一端连接在一起，另一端也连

接在一起，这种连接叫做电阻的并联。如果在外电路中的电阻都是并联的，则这个电路叫做并联电路。图 11.16 就是由两个电珠组成的并联电路。在这个电路中，如果我们把开关 K_1 断开，虽然电珠 R_1 不亮，但电珠 R_2 依然发亮。

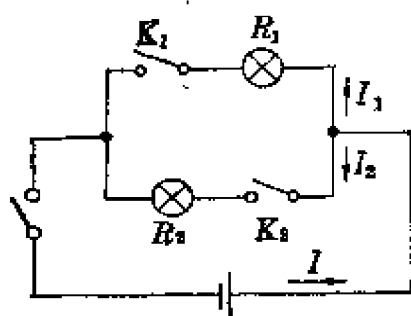


图 11.16 并联电路

并联电路由于各个电阻的两端都是连接在一起的，因而在并联电路

中，各个电阻两端的电压都等于路端电压。

在图 11.16 的并联电路中，假设路端电压为 U ，两个电珠的电阻分别为 R_1 、 R_2 ；通过的电流强度分别为 I_1 、 I_2 。很明显，在并联电路中，电路的通路不止一条。有几个并联电阻，电流就有几个分路，因此在并联电路中，总电流强度就等于各个分路电流强度的和。即

$$I = I_1 + I_2. \quad (11.12)$$

根据部分电路的欧姆定律可以列出

$$I = \frac{U}{R}; \quad I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2},$$

代入公式(11.12)可以得出

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2},$$

即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (11.13)$$

上式表明：并联电路的总电阻的倒数等于各电阻的倒数的和。这是因为电阻并联后就相当于增大了导体的截面积，所以总电阻要比任何一个并联电阻小。

[例题 11.7] 把电阻分别为 800 欧、1200 欧的两个灯

泡并联后接在路端电压为 220 伏的电源上, 求:

- (1) 并联电阻的总电阻;
- (2) 并联电路的总电流强度;
- (3) 通过各灯泡的电流强度。

解: (1) 根据公式(11.13), 由

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

于是并联电路的总电阻

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_2 + R_1} = \frac{(800)(1200)}{1200 + 800} = 480 \text{ 欧}。$$

- (2) 根据部分电路的欧姆定律, 总电流强度

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{480} = 0.458 \text{ 安} = 458 \text{ 毫安}。$$

- (3) 通过各灯泡的电流强度(图 11.17) 分别为:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{220}{800} = 0.275 \text{ 安} = 275 \text{ 毫安},$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{220}{1200} = 0.183 \text{ 安} = 183 \text{ 毫安}。$$

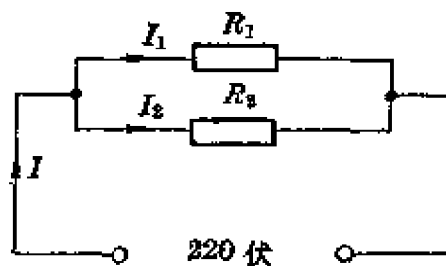


图 11.17

从上面的例题可以看出, 并联电阻具有分流作用。这就是说, 外电路上的总电流分散地通过各个分路。由于并联电阻两端的电压是相同的, 因此有

$$U = I_1 R_1 = I_2 R_2. \quad (11.14)$$

由此可知，在并联电路中，电流的分配与电阻的大小成反比。这就叫做并联电阻的分流原理。

[例题 11.8] 某电阻器的电阻值 $R_1 = 1.5 \text{ k}\Omega$ ，由于额定功率的限制，至多只能通过的电流强度 $I_1 = 100 \mu\text{A}$ 。现在要把它接到电流强度 $I = 1 \text{ mA}$ 的电路中去，为了不使电阻烧坏，需要并联多大的分流电阻才行？(图 11.18)

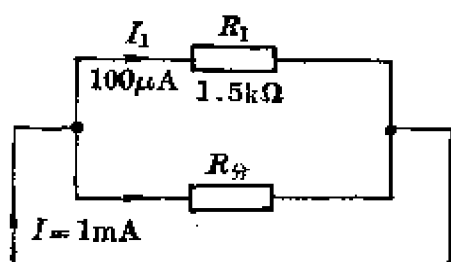


图 11.18

解：很明显，必须并联一个分流电阻 $R_{\text{分}}$ ，让它分担掉多余的电流强度。而

$$I_{\text{分}} = I - I_1 = 1 \text{ mA} - 100 \mu\text{A} = 900 \mu\text{A}。$$

于是根据并联电阻的分流原理公式(11.14)，可以列出

$$I_1 R_1 = I_{\text{分}} R_{\text{分}},$$

因此并联的分流电阻

$$R_{\text{分}} = \frac{I_1}{I_{\text{分}}} \cdot R_1 = \frac{100}{900} \times 1500 = 166.7 \Omega。$$

在一般实际电路中，往往既有串联又有并联的电路，所谓混联电路。在分析这一类电路时，首先应该全面分析电路的结构，找出各电阻间的串并联关系，作出简单明了的电路示意图，然后再求它的等效电阻。

[例题 11.9] 在图 11.19a 所示的电路中， $R_1 = R_2 = R_4 = 2 \text{ 欧}$ ， $R_3 = R_5 = 4 \text{ 欧}$ 。如果电源的电动势 $E = 4.2 \text{ 伏}$ ，内电

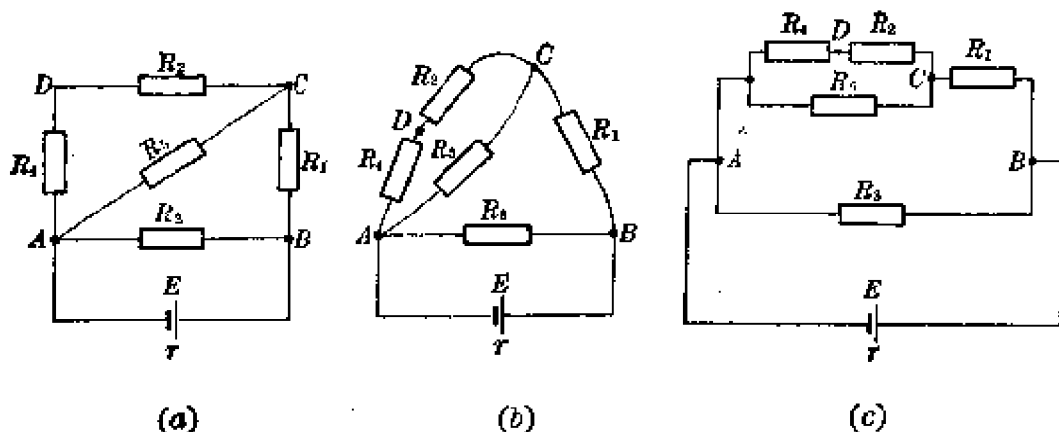


图 11.19

阻 $r=0.1$ 欧, 求通过电阻 R_3 的电流强度和它两端的电压。

解: 把电路图由图 11.19a 经 b 变形为 c, 这样就容易看出各电阻之间的串并联关系。要计算通过 R_3 的电流强度, 首先必须算出电路中的总电流强度 I 。为此, 先要计算外电路上的总电阻 R 。根据电阻的串并联关系:

$$\frac{1}{R_{AC}} = \frac{1}{R_2 + R_4} + \frac{1}{R_5} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2},$$

因此 $R_{AC} = 2$ 欧。

又因 $R_{ACB} = R_{AC} + R_{CB} = 2 + 2 = 4$ 欧,

这样 $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_{ACB}} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2},$

故外电路上总电阻 $R = 2$ 欧。同时根据全电路的欧姆定律公式, 可以算出电路中的总电流强度和路端电压分别为:

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{4.2}{2 + 0.1} = 2 \text{ 安},$$

$$U = IR = 2 \times 2 = 4 \text{ 伏}.$$

再根据部分电路的欧姆定律公式, 算出 R_3 两端的电压和通过 R_3 的电流强度分别为:

$$U_3 = U = 4 \text{ 伏},$$

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3} = \frac{4}{4} = 1 \text{ 安。}$$

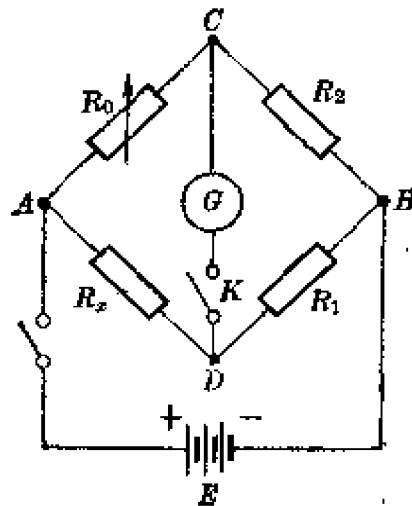
三、桥式电路

在电工和电子技术中往往采用象图 11.20 所示的电路, 这种电路叫做桥式电路, 简称电桥。桥式电路被广泛地应用在测量和控制线路中。它在测量方面除了可以用来精确地测量电阻之外, 还可以用来测量能引起电阻显著变化的其他物理量, 如温度等。但其实质都是测量电阻。因此只要掌握了用它测量电阻的原理和方法, 对它的其他应用就不难掌握了。

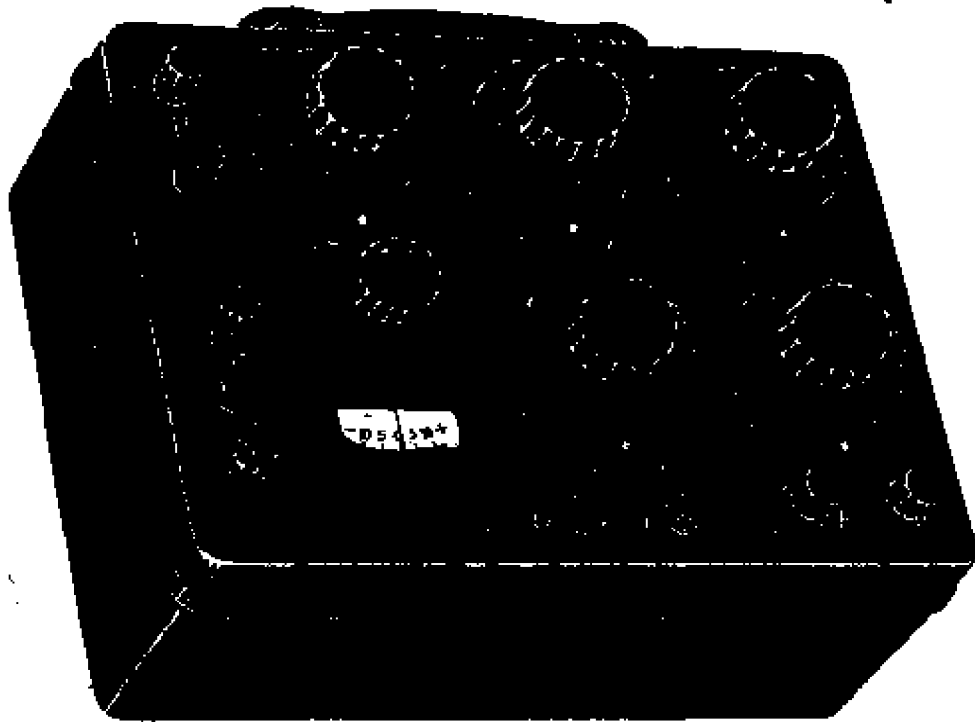
在图 11.20a 的桥式电路中, R_1 、 R_2 是电阻值已知的标准电阻, R_0 是可以调节的可变电阻, R_x 是待测的未知电阻。它们分别接在电桥的四个臂上。 E 是直流电源, G 是一个灵敏度很高的电流表, 又称检流计。检流计指针的零点在刻度的中点上, 因此通过指针的左右偏转可以测量指向不同的电流强度。

当接通电源时, A 点由于与电源正极相连, 电位比 B 点高, 电流从电源正极流到 A 点后分为两股, 分别经过 R_0 、 R_2 ; R_x 、 R_1 流到 B 点汇合后再流入电源负极。至于 C 、 D 间是否有电流通过要看 C 、 D 两点间是否存在电位差。

调节可变电阻 R_0 , 使它由小逐渐变大, 这样就会发现检流计指针偏转的角度从最大减小到零, 又从零反向逐渐增大到最大。这是由于电阻 R_0 的分压作用所引起的。在 R_0 比较小时, 由于它两端的电压 V_{AO} 比较小, 从而使 C 点的电位高于 D 点的电位, 这就有一部分电流从 C 向 D 通过检流计。随着 R_0 的增大, C 点的电位也逐渐降低, 这部分电流也就逐渐减小。直到 C 点的电位降低到和 D 点一样时, CD 间就不再存



(a) 原理图



(b) QJ23 型直流电桥的外形图

图 11.20 桥式电路

在电位差, 检流计指针就回到零点。随着 R_0 的继续增大, 在 C 点的电位就低于 D 点, 这样就有一部分电流从 D 向 C 而通过检流计, 因此指针又从零反向偏转, 角度逐渐增大。

通常把电桥在检流计中没有电流通过，即指针指在零点时的工作状态叫做电桥的平衡状态。根据以上的分析，电桥从不平衡到平衡，又从平衡到不平衡的过程，实际上就是 C 、 D 两点电位高低的转化过程。我们在利用电桥测量 R_x 的电阻值时，就是通过不断调节 R_0 的大小从而使电桥达到平衡状态的。

当电桥在平衡状态时， C 、 D 两点电位相等，同时 A 、 C 间和 A 、 D 间的电位差， C 、 B 间和 D 、 B 间的电位差也分别相等。即

$$U_{AC} = U_{AD}; \quad U_{CB} = U_{DB}。$$

设通过电阻 R_0 、 R_x 、 R_1 、 R_2 的电流强度依次为 I_0 、 I_x 、 I_1 、 I_2 。根据部分电路的欧姆定律公式 (11.6)，可以列出

$$I_0 R_0 = I_x R_x; \quad I_2 R_2 = I_1 R_1,$$

把以上两式相除，得

$$\frac{I_0 R_0}{I_2 R_2} = \frac{I_x R_x}{I_1 R_1}。$$

又由于电桥平衡时检流计指针指在零点，这表明 C 、 D 间没有电流通过，因此 $I_0 = I_2$ ， $I_x = I_1$ 。这样上式可以简化为

$$\frac{R_0}{R_2} = \frac{R_x}{R_1},$$

即

$$R_x R_2 = R_0 R_1。 \quad (11.15)$$

上式就是电桥的平衡条件，即当电桥平衡时，相对的两个臂上的电阻的乘积相等。利用这一关系就可以直接算出待测电阻 R_x 的电阻值，即

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_0。$$

图 11.20b 是 QJ23 型直流电桥的外形图。其中标准电阻的比值 R_1/R_2 是直接给出的，调节好的电阻 R_0 的电阻值可以从

各个刻度盘上读出。由于标准电阻的精确度很高，误差可以小到几万分之一，因此用电桥来测量电阻就比一般电阻表精确得多。

四、电源的串并联

用来使汽车和拖拉机起动的电机往往需要较高的电压和较大的电流。因此在实际应用中，常常需要把几个电池连在一起使用。这种按一定方式连接起来使用的几个电池就叫做电池组。

如图 11.21 所示，把一个电池的负极和下一个电池的正极连结起来，这样一直连结到最后一个电池，这就构成了串联电池组。对串联电池组来说，显然第一个电池的正极和最后一个电池的负极就成为串联电池组的正、负极。根据这个特点，串联电池组的电动势就等于各个串联电池的电动势的和；而它的内电阻就等于各个串联电池的内电阻的和。

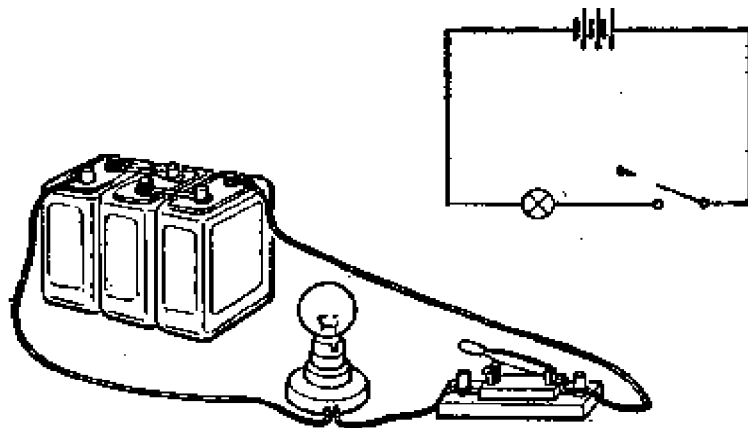


图 11.21 串联电池组

假设三个串联电池的电动势依次为 E_1 、 E_2 、 E_3 ，内电阻依次为 r_1 、 r_2 、 r_3 ，那么由它们组成的串联电池组的电动势

$$E = E_1 + E_2 + E_3, \quad (11.16)$$

而串联电池组的内电阻

$$r = r_1 + r_2 + r_3 \quad (11.17)$$

汽车和拖拉机上用的蓄电池组就是这样串联而成的。如果电池组是由 n 个相同的电动势为 E 、内电阻为 r 的电池串联而成，那么它的电动势就等于 nE ，内电阻就等于 nr 。当外电路上的总电阻为 R 时，电路中的电流强度

$$I = \frac{nE}{R + nr} \quad (11.18)$$

如图 11.22 所示，把几个相同的电池的正极和负极分别连结在一起，就构成并联电池组。并联电池组的正负极就是由这些电池的正、负极分别连成的。根据这个特点，并联电池组的电动势就等于各个并联电池的电动势；而它的内电阻就等于各个并联电池的内电阻的几分之一。

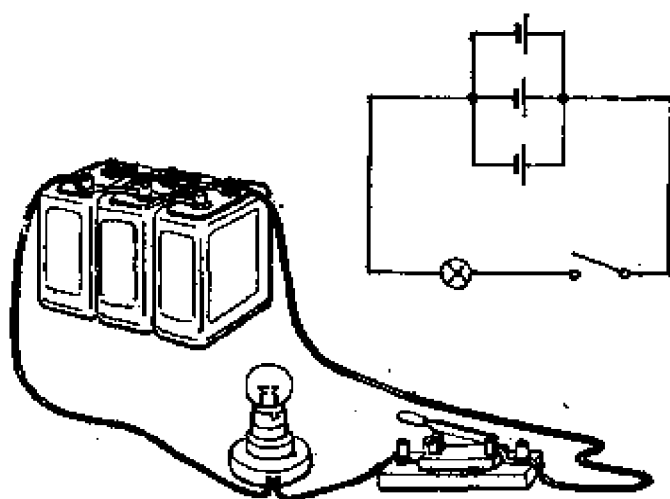


图 11.22 并联电池组

假设电池组是由 n 个相同的电动势为 E ，内电阻为 r 的电池并联而成的，那么它的电动势还是 E ，内电阻则为 r/n 。当外电路上的总电阻为 R 时，电路中的电流强度

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}} \quad (11.19)$$

上式表明，把几个相同的电池并联起来虽然并没有增大电源的电动势，但是可以减小电源的内电阻，从而在电路中获得较大的电流强度。但是要防止把两个电动势不相等的电池并联在一起，不然就会造成电动势较大的电池对电动势较小的电池充电并使它受到损坏。

总之，如果要增大电源的电动势就必须把电池串联起来。如果要增大电路中的电流强度，在外电阻比内电阻大得多的情况下必须把电池串联起来；在外电阻小于内电阻的情况下必须把电池并联起来。

可是在实际工作中，一般外电阻总是比内电阻要大得多，所以使用并联电池组后所获得的电流一般不会比使用单个电池所得的强很多。但使用并联电池组后，外电路里的电流是由几个互相并联的电池共同供给的，这样每个电池供给的电流就不会太强，电池使用的期限就可以延长。

习题 11.15 为什么把 n 个相同的内电阻为 r 的电池串联后内电阻等于 nr ，而把它们并联后内电阻却等于 r/n ？

习题 11.16 在安装一只收音机时，需要一只 $1.1 \text{ k}\Omega$ 的电阻。现在只有几个 $3.3 \text{ k}\Omega$ 的电阻，问是否可以利用？怎样接法？

习题 11.17 汽车上往往要用电动势为 12 伏的电源，而每个蓄电池的电动势只有 2 伏，问需要几个蓄电池才行？怎样接法？

习题 11.18 在图 11.23 所示的电路中，串接一个变阻器 R_0 后为什么可以改变电阻 R 两端的电压？设 $E=1.5$ 伏， $r=0.1$ 欧， $R=5$ 欧，那么当 $R_0=5$

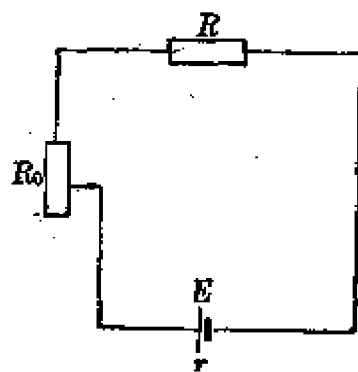


图 11.23

欧时 R 两端的电压有多大? 如果 $R_0=10$ 欧呢?

习题 11.19 某电阻为 $2.7\text{k}\Omega$ 的电流表, 允许通过的最大电流强度为 $50\mu\text{A}$, 现在要把它接到电流强度为 1mA 的电路中去, 为了不使它烧坏, 至少要并联多大的分流电阻才行?

习题 11.20 在图 11.19 的电路中, 按例题 11.9 的已知条件, 继续计算电阻 R_2 两端的电压和通过它的电流强度。

习题 11.21 在图 11.24 所示的电路中, R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 依次为 4、3、9、4 欧; 电源由两个电动势为 2 伏、内电阻为 0.5 欧的电池串联而成。求电路中的总电流强度。

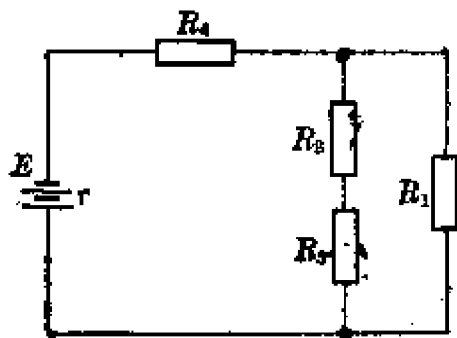


图 11.24

习题 11.22 在图 11.20 的电桥电路中, $R_1=5$ 欧, $R_2=10$ 欧, 调节 R_0 等于 8 欧时, 检流计指针指在零点上。求待测电阻 R_x 的电阻值。

第五节 电与热的相互转化

一、电功和电功率

电流通过电灯, 电灯就会发亮; 电流通过电炉, 电炉就会发热; 电动机里有了电流, 就能带动水泵转动。所有这些现象都表明电能可以转化为光能、内能、机械能等其他各种形式的能。

功是从量方面去看的运动形式的变化。电流通过用电器

使电能转化成其他形式的能的过程,也就是电流做功的过程。电流所作的功,叫做电功,通常用字母 W 表示。在上一章里,我们已经分析过电场力把电荷从一点移动到另一点所作的功就等于电荷的电量与这两点间电位差(电压)的乘积,即公式(10.14)

$$W_{AB} = qU_{AB}。$$

在电流做功的过程中,我们只需把 $q = It$ 代入上式,即可得电流做功的大小

$$W = IUt。 \quad (11.20)$$

上式表明:电流所作的功是与通过用电器的电流强度、用电器两端的电压以及通电时间成正比。在实用单位制中,电功的单位是焦耳。

既然电灯的发光是电流做功的结果,那么为什么有的电灯比较亮,而有的却比较暗呢?原来电灯的亮与暗是与电流在相同的时间内做功的多少有关的。通常把单位时间内电流做功的多少叫做电流的功率,简称电功率,用字母 N 表示。因此有

$$N = \frac{W}{t} = \frac{IUt}{t} = IU。 \quad (11.21)$$

上式表明:电流的功率决定于通过用电器的电流强度和用电器两端电压的乘积。在实用单位制中,电功率的单位是瓦特,简称瓦,用字母 W 表示。比瓦特大的单位还有千瓦(瓩、kW)、马力(HP)等,它们的换算关系可以参看上册第119页表3.3。

在一般用电器上都标有额定电压和额定的电功率。例如有的电动机的铭牌上标有 380V、2.8kW 等字样,表明这台电动机在 380 伏电压下工作时的输出功率为 2.8 瓩;有的电灯泡上标着 220V、25W,表明它在 220 伏电压下工作时电功

率为 25 瓦, 如果把它接在 380 伏的电路中就必须串联一个分压电阻, 否则就会由于通过的电流强度过大而烧断灯丝。

那么额定电功率不同的用电器在结构上有什么不同呢? 取两个额定电压都是 220 伏而电功率分别为 100 W、25 W 的电灯泡来比较一下, 就会发现 100 W 的灯泡内钨丝较粗, 表明它的电阻较小。由此可知, 用电器的电功率还决定于它本身的电阻。至于用电器的电阻与电功率究竟存在什么关系, 这要由具体情况来决定。根据部分电路的欧姆定律公式(11.4)、(11.6), 我们可以把电功率计算公式(11.21)改变成如下的两种形式:

$$N = IU = \frac{U}{R} \cdot U = \frac{U^2}{R}, \quad (11.22)$$

$$N = IU = I \cdot IR = I^2 R. \quad (11.23)$$

公式(11.22)表明, 在电压一定的情况下, 电功率与用电器的电阻成反比。在并联电路中, 由于用电器两端的电压总是相同的, 因此用电器的电阻越小, 电功率就越大。这就是为什么 100 W 的灯泡的钨丝比 25 W 的粗的原因。公式(11.23)表明, 在电流强度一定的情况下, 电功率与用电器的电阻成正比。在串联电路中, 电流强度是处处相等的, 因此用电器的电阻越大, 电功率就越大。灯泡的灯丝部分热得发光, 而与它相连的导线部分, 虽然电流强度也相同, 但是并不发光, 这是因为灯丝的电阻很大而导线的电阻则小得可以忽略不计。

[例题 11.10] 已知 25 瓦高音喇叭的电阻为 16 欧, 问它在正常工作时两端的电压有多大? 通过高音喇叭的电流强度又是多大?

解: 已知高音喇叭的额定电功率 $N = 25$ 瓦, 电阻 $R = 16$ 欧。根据公式(11.22)可以列出

$$U^2 = NR = 25 \times 16 = 400,$$

因此高音喇叭在正常工作时两端的电压(即额定电压)

$$U = \sqrt{400} = 20 \text{ 伏}。$$

再根据部分电路的欧姆定律, 可以算出通过高音喇叭的电流强度

$$I = \frac{U}{R} = \frac{20}{16} = 1.25 \text{ 安}。$$

把电功率公式改变一下可以列出

$$W = Nt。 \quad (11.24)$$

表明掌握了用电器的电功率, 根据通电时间就可以算出电流在这段时间内作了多少功。因此电功还有一种实用单位, 叫做瓦时, 俗称度。它相当于电功率为 1 瓦的用电器在 1 小时里所消耗的电功。表 11.2 列出了一度电的用途, 可见一度电的作用是很大的。我们必须注意节约用电, 让电力用于工农业生产, 加速社会主义的建设。

表 11.2 一度电的用途

供 25 瓦电灯	40 小时
生产电炉钢	1.6 公斤
开采原煤	105 公斤
开采石油	30 公斤
织 棉 布	11 公尺
生产化肥	0.72 公斤
灌溉麦田	0.5 亩
孵育小鸡	30 只
放映电影	1 场

二、电热当量

电流通过导线，导线就会发热，这种现象叫做电流的热效应。然而电流为什么具有热效应呢？在金属导体中，电流是自由电子在电场力作用下的定向移动。当电子在定向移动中与金属离子构成的空间点阵发生碰撞时，一方面电子受到了阻碍作用；另一方面电子又把动能传递给了金属离子，增强了它们的热运动，从而增加了它们的内能，促使金属导体的温度升高。可见电流通过导体，导体发热是由电子的动能转化而来的。

精确的实验结果表明：电流通过一定导线时所放出的热量，与电流强度的平方成正比；与导线的电阻以及通电时间成正比。这个结论叫做焦耳-楞次定律。用公式表示：

$$Q = KI^2Rt, \quad (11.25)$$

式中的比例常数 $K = 0.24$ 卡/焦耳，叫做电热当量。它表明电流通过导体如果只有热效应发生，那么每消耗 1 焦耳的电功，导体就发出 0.24 卡热量。

在日常生产和生活中，除电灯外，各种各样的电热设备，如电炉、电烘箱、电烙铁、电熨斗等也都是根据电流的热效应的原理设计制成的。不仅如此，电流的热效应还可以利用来焊接金属，在开矿时用来引发炸药，在军事上用来引发地雷等。

然而我们对于电流的热效应，也要一分为二。它既有为生产服务的一面，也有危害生产的一面。例如电动机等各种电机在工作时，由于电流的热效应在电机、电缆等内部所产生的热量将使导线的温度升高，过高的温度将加速绝缘体的老化和变质，甚至有烧坏电机和电缆的危险。即使没有造成事

故,所放出的这部分热量也使电能白白浪费。对于这个问题,我国广大电业工人和技术人员采取了各种技术措施,使各种电气设备的温度降低,从而提高工作效率。我国首创的十二万五千瓩双水内冷发电机,采用先进的双水内冷的冷却方式,减少了电流热效应的影响,从而大大提高了发电机的发电能力。

在并联电路中,有时由于负载过多或者短路而引起过大的电流通过导线,这样就会使导线发热燃烧,甚至引起火灾。这也是电流热效应的祸害。为了防止意外,在一般电路的每个分路中都串联一个保险丝装置。它的作用就是在有过大的电流通过分路时能自动切断电路。保险丝是铅锡合金制成的,熔点很低。当过大的电流通过时所产生的热量就能使它熔化,从而使电路断开,避免发生危险。

保险丝按它的粗细程度都有一定的电流限度,叫做保险丝的熔断电流。表 11.3 列出了几种常用保险丝的熔断电流和额定电流。在选用时一般不要使保险丝的额定电流过多地超出电路中最大的正常工作电流,以保证安全用电。

电可以转化为热,热在一定条件下也可以转化为电。热

表 11.3 几种常用保险丝的规格

直径(毫米)	近似英规线号	额定电流(安)	熔断电流(安)
0.52	25	2.00	4
0.71	22	3.00	6
0.98	20	5.00	10
1.25	18	7.5	15
1.75	15	12.00	24
2.78	12	25.00	50

电偶温度计就是根据这个原理设计制成的，目前已被生产上

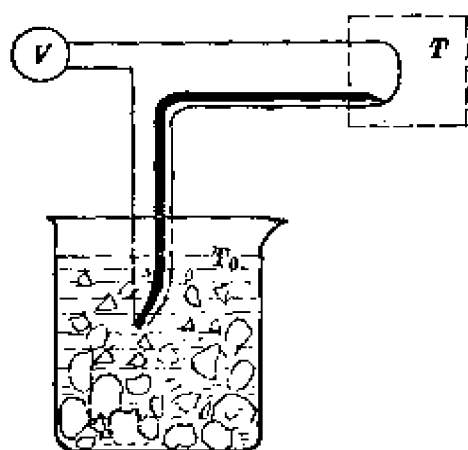


图 11.25 热电偶温度计
结构示意图

广泛地用来测量高温，因为一般水银温度计最高只能测到 360°C 左右，再高水银就要沸腾。

热电偶温度计是由两根不同的金属丝焊接在一起组成的。图 11.25 就是它的结构示意图。为了使它们的一个端点保持不变的温度 T_0 ，通常把它放在冰水中；而它们的另一个

端点则插在待测量的电炉温度 T 处。这样在回路中就产生了温差电动势。两个端点的温度差越大，产生的温差电动势也越大。由于温度 T_0 是已知的，因此只要用电压表量出电路中的电动势，就可以确定待测的温度 T 。一般在电压表上直接刻出温度 T 的度数，使用时就不必计算，可以直接把待测温度 T 的数值读出来。用不同的金属和合金可以制成测量范围不同的温度计。例如测量 300°C 以下的温度时采用铜、康铜热电偶； 800°C 以下温度采用铁、康铜热电偶；在 $200\sim 1700^{\circ}\text{C}$ 范围内采用铂、铂铑合金热电偶；高达 2000°C 的温度采用钨、钽热电偶。

习题 11.23 1 度电相当于电功多少焦耳？

习题 11.24 一电阻器通过的电流强度为 50 安，两端的电压为 24 伏，问工作 4 小时消耗电功多少？

习题 11.25 把 $1000\ \Omega$ 的电烙铁接在 $220\ \text{V}$ 的线路上，问通过的电流强度有多大？电功率又有多大？

习题 11.26 如果把 $220\ \text{V}$ 、 $40\ \text{W}$ 的灯泡接在 $110\ \text{V}$ 的线路上使

用,问它的实际电功率有多大? 这样使用有何缺点? 能把 110 V、40 W 的灯泡用在 220 V 的线路上吗? 为什么?

习题 11.27 某车间装有 80 W 电灯 12 只, 平均每天用电 12 小时, 计算每月消耗几度电? (以 30 天计算)

习题 11.28 已知某电烘箱的电阻为 20 欧姆, 接在 220 伏特的线路上工作, 问 10 分钟发出多少热量?

习题 11.29 某生产队自力更生建成的小型水力发电站的输出总功率为 20 瓩。除了带动 5 台 2.8 瓩的电动机外, 其余的电功率全部供给社员照明之用。问可以供给多少盏 25 瓦的电灯? (假设在输电线上消耗掉的电功率占输出总功率的 5%)

复 习 题

习题 11.30 设想把粗细和长短都相等的铜丝和铁丝串联起来接在电路上, 问其中哪一根比较热? 如果并联起来呢? 为什么?

习题 11.31 把三个分别为 6Ω 、 0.25Ω 、 0.4Ω 的电阻并联, 然后接在电动势为 2 V, 内电阻为 0.05Ω 的电源上。问电路中的总电流强度有多大? 通过各电阻的电流强度又分别多大?

习题 11.32 避雷针接地铁线的截面积为 1 厘米², 打雷时通过这条铁线的电流假设为 10^4 安培, 历时 0.01 秒, 问铁线的温度升高几度? (取铁的电阻率为 0.13 欧·毫米²/米)

(提示: 假设铁线长为 l 米, l 可在计算中消去, 并不影响结果。)

习题 11.33 为了把额定电压为 40 伏, 电流强度为 5 安的弧光灯接到 120 伏的线路上去, 需要串联多大的分压电阻?

习题 11.34 某生产队晚上召开批林批孔大会。从 220 伏的干线上接出两组分路, 第一组分路并联 2 只电灯, 灯丝电阻都是 1936 欧; 第二组分路并联 3 只电灯, 灯丝电阻都是 1200 欧。求总电阻和通过每只电灯的电流强度。(图 11.26)

习题 11.35 在图 11.27 所示的电路中, 如果把开关 K 接通, 电流表和三个电压表的读数是增大还是减小? 为什么?

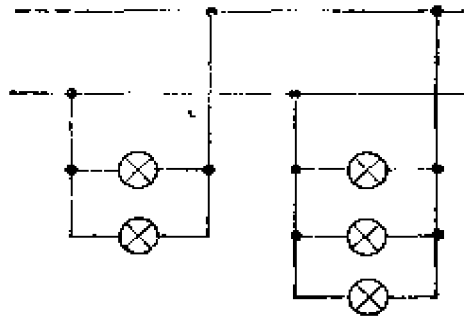


图 11.26

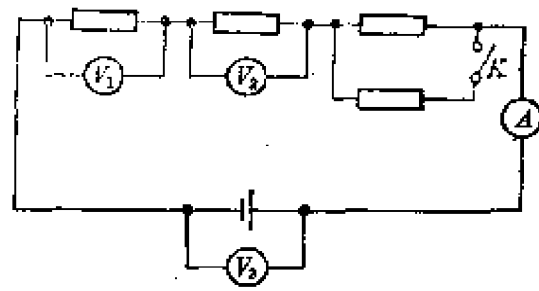


图 11.27

习题 11.36 用电压表去量电动势为 1.5 伏的干电池, 为什么读数只有 1.48 伏?

习题 11.37 把 220 V、60 W 的灯泡和 220 V、40 W 的灯泡串联起来接在 220 V 的线路上, 问哪盏灯泡比较亮些? 为什么?

第十二章 电流和磁场

电和磁是象热和光一样的一对双生子，它们是同一过程的两种表现形式，电离不开磁，磁也离不开电。例如在工农业生产上应用的各种类型的电磁铁，就是利用电流所激发的磁场来作功的；电动机又是利用磁场对电流的作用而产生转动力矩的；在各种示波器、电视接收机的显象管中，也是利用电场和磁场来控制电子束的运动从而进行扫描工作的。

在这一章里主要讨论电流和磁场的相互关系及其在工农业生产上的一些应用。我们先从基本磁现象讲起，接着讨论各种通电导线周围的磁场，描述磁感应强度、磁通量等反映磁场特性的物理量，并对各种磁介质的磁化特性作扼要介绍，电磁铁就是上述原理的实际应用；然后在讨论了磁场对通电直导线和通电线圈的作用的基础上研究磁电式电工仪表的工作原理；最后扼要描述磁场对运动的带电粒子的作用以及霍尔效应的原理与应用。

第一节 磁 场

一、基本磁现象

当把一只走得很准确的闹钟放在收音机旁，过了一段时间就发现它走得很不准了。这究竟是什么原因呢？打开收音机的后盖一看，原来在收音机的喇叭后部有一块环形磁铁，闹

钟所以不能正常运转,正是这块磁铁在作怪,因为它对闹钟内部的零件具有磁化作用的缘故。

环形磁铁只是磁铁中的一种特殊形状,此外常见的磁铁形状还有条形的、马蹄形的和针形的等等(图 12.1)。磁铁都具有吸引铁、镍、钴以及它们的合金的性质,磁铁的这种特性叫做磁性。具有磁性的物体叫做磁体。上述磁铁的磁性可以长期存在,因而叫做永久磁铁。

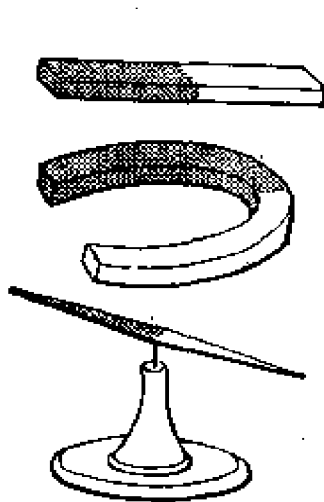


图 12.1 几种常见的磁铁

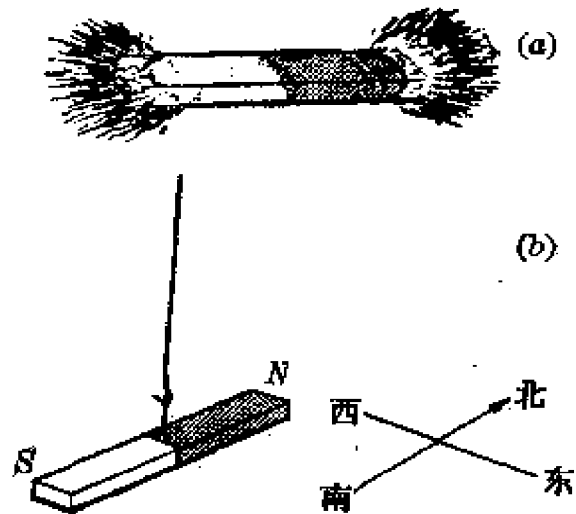


图 12.2 磁极

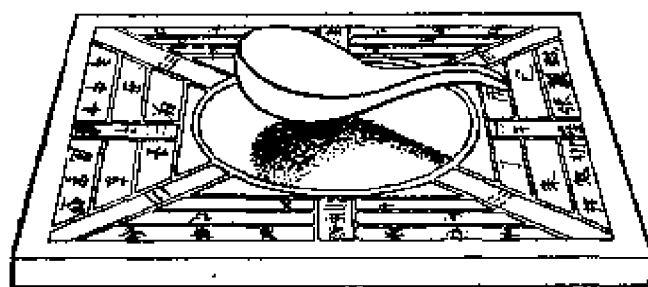
磁铁各处的磁性不同。如果让一根磁铁棒去吸引铁屑粉,就会发现在棒的两端被吸起的铁屑粉最多,而中间几乎没有(图 12.2a)。通常把磁铁两端磁性最强的地方叫做磁极。如果把磁铁棒悬挂起来,让它在水平面内自由转动。等它转动停止后就会发现它一头指南,一头指北(图 12.2b)。这表明磁铁的两个磁极总是指向一定的方向。通常把磁铁的指北的磁极叫做指北极,简称北极,用字母 N 表示(常涂上颜色);指南的磁极叫做指南极,简称南极,用字母 S 表示(常不涂颜色)。利用磁铁的这一特性可以制成指南针。

我国对于磁现象的发现和运用远比世界其他国家为早。

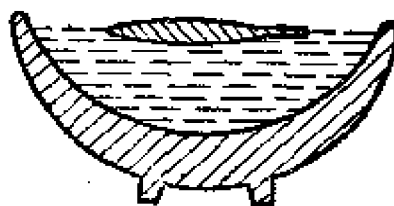
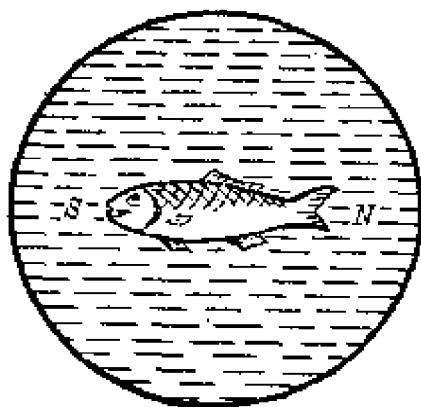
正如毛主席所指出：“在中华民族的开化史上，有素称发达的农业和手工业，……。在很早的时候，中国就有了指南针的发明。”早在公元前三世纪的战国时代，就有了“慈石台铁”的文字记载；在公元一世纪初，即东汉初年又有“磁勺柄指南”的文字记载；到了公元十一世纪，即宋代就创造并使用了航海指南针——罗盘。

“磁勺柄指南”是指一种利用磁石指示方向的仪器。这种仪器在周秦叫做“司南”，在汉代以后叫做“指南”。它是由磁石刻成的勺子放在一个刻有东南西北等方位的铜盘上构成的。由于勺底很光滑，与铜盘的摩擦很小，用手拨动后就转动起来，等它转停以后，勺柄就指南，勺头就指北(图 12.3a)。

图 12.3b 是我国北宋时期的《武经总要》一书上记载的劳动人民用磁铁石(一种铁矿石)制成的指南鱼。它的特点是能



(a) 司南



(b) 指南鱼

图 12.3

浮放在水面上,鱼头指南,鱼尾指北。

此外,磁铁还有一个很重要的特性,就是磁极间存在着相互作用。同性磁极相互排斥;异性磁极相互吸引(图 12.4)。这与电荷间的相互作用十分类似。但进一步的研究表明,无论把磁铁如何分割,在它的两端总会出现两个性质不同的磁极(图 12.5)。可见磁极是不能单独存在的,两个性质不同的磁极(N , S)总是成对地存在,这是磁极和电荷的根本区别。

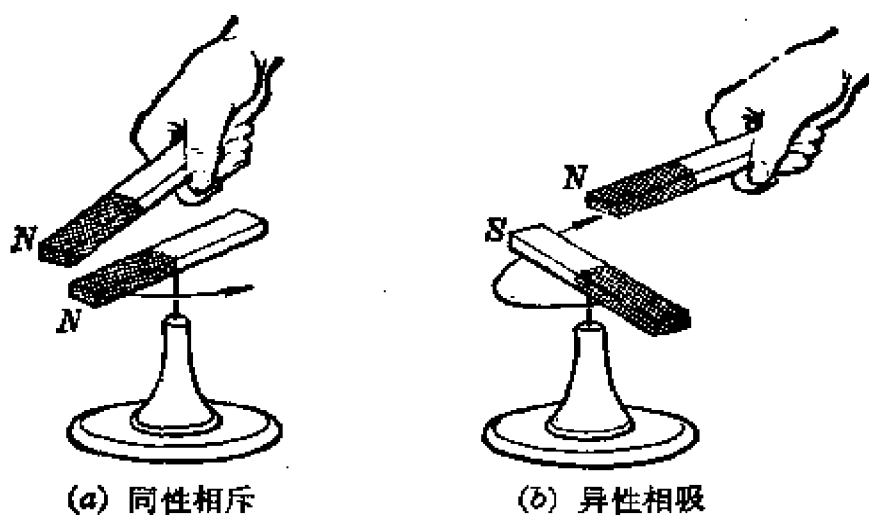


图 12.4 磁极间的相互作用

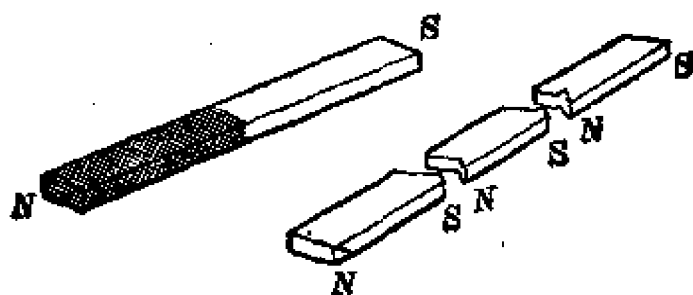


图 12.5 磁极不能单独存在

为什么磁针能指示南北方向呢? 原来地球是个大磁体,通常叫做地磁场,简称地磁。地磁的北极就在地理上的南极附近;地磁的南极就在地理上的北极附近。磁针的南(北)极所以能指南(北),就是由于受到地磁的北(南)极吸引的缘故。

第 12 章 磁 九

但是科学研究表明，地磁的南北极联线与地理上的南北极联线并不重合，而相交成一角度(图 12.6)。因此严格说来，指南针所指的方向并非正南，而有一个偏角，叫做地磁偏角。早在公元 1086 年，我国北宋时期的著名自然科学家沈括就已经发现了地磁偏角，在他的著作《梦溪笔谈》中就有磁针“能指南，然常微偏东，不全南也”的记载，而西方是在哥伦布横渡大西洋发现新大陆时(公元 1492 年)才观测到地磁偏角的现象。

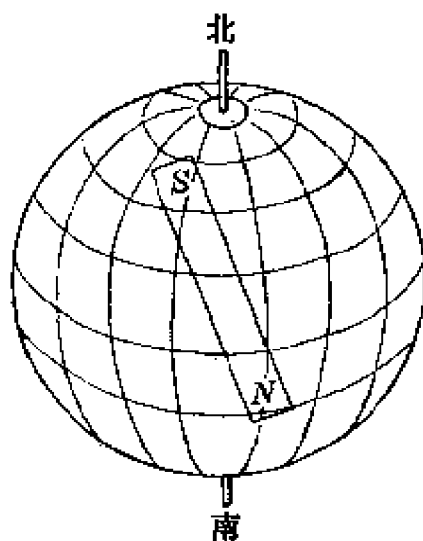


图 12.6 地球的南北极

地球上各地的地磁偏角是不同的，而且还具有周期性的变化。但是从一个地方到邻近地方，这种变化是微小的。如果发现哪里有急剧的突变，所谓地磁异常，那就可能表明附近地下不深处有大量的磁铁矿存在。用观察地磁情况来勘察磁铁矿藏的方法叫做磁法采矿。

地磁异常也是地震的一种前兆现象。地震前，局部地区由于地应力的加强，地下岩石的磁化强度就会发生局部的异常，往往会使这些地区的地磁偏角出现异常变化。因此，经常不断地观察地磁的变化也是做好地震预测工作的有效方法之一。

随着生产的发展，人们进一步认识到通有电流的线圈也具有磁性，也能吸引小铁片；悬挂起来同样能指示南北方向，表明它具有和条形磁铁一样的性质。通常把这种现象叫做电流的磁效应。

“我们看事情必须要看它的实质，而把它的现象只看作入

门的向导”。从电流和磁铁一样也具有磁性这一现象出发，我们认识到磁现象和电荷的运动有着密切的联系，因为电流是由电荷的运动形成的。近代的科学研究进一步表明，磁铁的磁性起源于物质内部的分子、原子中电子的运动。由此可知：一切磁现象都是由运动电荷产生的，电和磁是电荷运动过程的两种表现形式。这个结论揭示了电和磁的内在联系，使人们对各种磁现象的本质有了统一的认识。

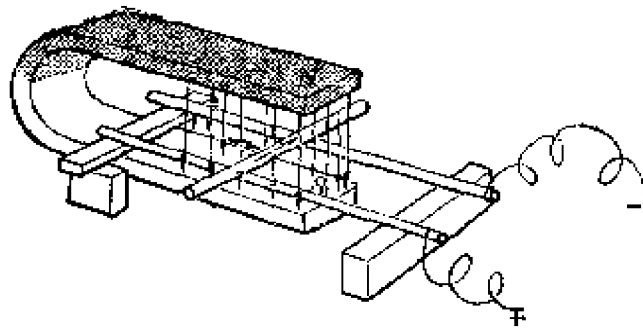
二、磁 场

我们知道电荷间的相互作用是通过它们所激发的电场进行的。同样，磁铁之间、电流(运动电荷)之间以及磁铁与电流之间的相互作用也都是通过它们所激发的磁场进行的。

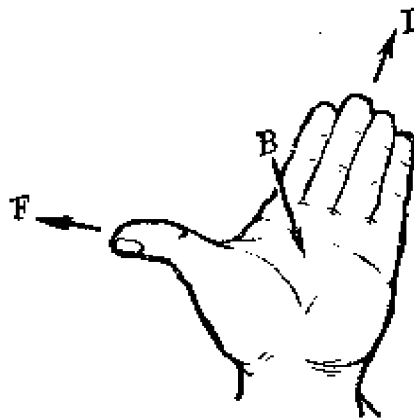
磁场和电场一样，也是一种特殊的物质。它可以和空气、玻璃、纸板等其他物质共存于同一空间，因此磁铁之间即使存在其他物质，而它们之间的相互作用依然存在，只是大小发生变化罢了。

我们已经知道电场对位于场中的电荷有力的作用，我们正是通过电荷在电场中所受到的电场力来研究电场的性质的。同样，磁场对位于场中的电流(运动电荷)也有力的作用。因此我们也可以通过电流在磁场中所受到的磁场力来研究磁场的性质。

把一段裸铜棒放在马蹄形磁铁两极间的磁场中，并且将其两端搁在与电源相连接的两条铜支架上，如图 12.7a 所示。在没有通电前，铜棒静止不动。通电后，就会发现铜棒沿着一定方向在滚动。这表明处于磁场中的铜棒当有电流通过时，就会因受到磁场力的作用而发生移动。两条铜支架只是保证铜棒在移动过程中电流不致中断。



(a)



(b) 磁场方向的确定——左手定则

图 12.7 电流在磁场中所受的磁场力

实验还表明,通过铜棒的电流强度越大,铜棒在支架间的长度越大,铜棒所受的磁场力也越大。进一步的精确实验结果表明,电流在磁场中某一点所受的磁场力 F 是与电流强度 I 以及电流所在导体的长度 l (在图 12.7a 中就相当于支架间的铜棒长度) 成正比的。这个结论叫做安培定律。因此通常把电流在磁场中所受的磁场力叫做安培力。用公式表示,即

$$F = BIl, \quad (12.1)$$

式中的比例系数 B 叫做磁场在这一点磁感应强度,它反映了电流所在处磁场的强弱程度。在实用单位制中, F 的单位是牛顿, I 的单位是安培, l 的单位是米, B 的单位就是牛顿/

安培·米, 或者写作韦伯/米²。实际中常用的磁感应强度的单位是高斯, 它们之间的换算关系是

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

一般永久磁铁在磁极附近的磁感应强度约为几千高斯; 而地球表面附近的磁感应强度只有 0.5 高斯左右。

实验表明, 磁场中各点的磁感应强度 B 就象电场中的 E 一样, 具有一定的方向性, 因此 B 是一个矢量。确定磁感应强度方向的最简便的方法是把一个可以自由转动的小磁针放到磁场中去, 这时小磁针不再指南北而指向一定的方向。通常把磁场中的小磁针北极所指的方向规定为这时小磁针所在点的磁感应强度 B 的方向, 简称这一点的磁场方向。

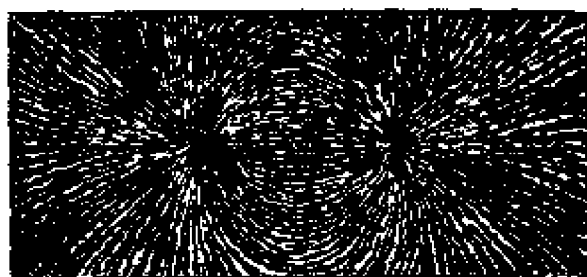
必须指出, 正电荷在电场中所受电场力的方向与它所在点的电场方向是一致的, 但是电流在磁场中所受磁场力的方向与它所在点的磁场方向并不一致。实际上在磁场中某一点的磁场方向(即磁感应强度的方向)和在这一点上电流的指向以及电流所受磁场力的方向三者都是相互垂直的。这三个方向间的关系可以用一个简单的方法来表示。伸开左手掌, 使左大拇指和其余四指垂直(图 12.7b)。这时如果四指指向电流的方向, 大拇指指向电流所受磁场力的方向, 那么由手心穿入手背的方向就是这一点的磁场方向, 即该点磁感应强度的方向。这叫做左手定则。

根据左手定则, 若已知电流、磁场力和磁感应强度方向中的任意两个方向时就可以判断第三个方向。例如在图 12.7 的实验中, 已知铜棒中电流的指向是往里的, 电流所受磁场力的方向是向左的。于是让左大拇指沿着磁场力 F 的方向向左; 同时让四指沿着电流 I 的方向往里, 那么手掌指向手背的方向就向下, 表示铜棒所在磁感应强度 B 的方向是向下的。

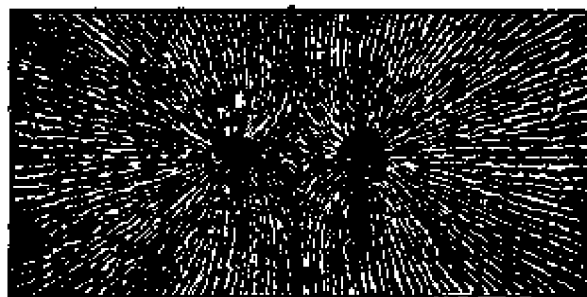
三、磁力线 磁通量

在研究电场时，曾人为地引进电力线来形象地描述电场中各点电场强度的方向和大小。同样，我们也可以假想的磁力线来反映磁场中各点的磁感应强度，即用磁力线上各点的切线方向和磁力线的疏密程度来表示各所在点的磁感应强度。

在条形磁铁上，放一块玻璃板，又在板上撒一层铁屑。于是这些铁屑就在条形磁铁周围磁场的影响下都成了小磁针。用手轻敲玻璃板震动铁屑，让它们自由转动，结果这些铁屑就会逐渐整齐地排列起来，顺着铁屑排列的方向画出的曲线即为条形磁铁磁场的磁力线。在实际工作中也常用这种方法来了解各种磁场中磁力线的大致情况。图 12.8a、b 分别表示用这种方法得出的有关两异性磁极和两同性磁极间磁场的磁力线的大致情况。可见它们和由两异性电荷和两同性电荷形



(a) 两异性磁极间的磁场



(b) 两同性磁极间的磁场

图 12.8 由磁场中的铁屑形成的磁力线的形象

成的电场中的电力线十分类似。

然而磁力线和电力线也有不少区别。例如电力线是起于正电荷而终于负电荷，但磁力线却是闭合曲线。就拿通电螺线管*所激发的磁场来说，在其外部的磁场中，磁力线起于北极而终于南极，而在内部的磁场中，磁力线起于南极而终于北极，因而形成许多闭合曲线(图 12.14a)。又如在电力线的末端确实存在着电荷，是电量集中的地方；而在磁力线上并不存在什么“磁荷”，也不能把磁极看作是“磁量”集中的地方。

磁场中磁力线的疏密程度反映了磁感应强度的大小，通常把在磁场中垂直通过某一截面的磁力线的数量叫做磁通量，简称磁通，用字母 Φ **表示。在实用单位制中，磁通量的单位是韦伯。还有比它小的单位，叫做麦克斯韦，它们的换算关系是

$$1 \text{ 韦伯} = 10^8 \text{ 麦克斯韦}。$$

在磁场较强的地方，磁力线较密，磁通量就大，磁感应强度也大；相反在磁场较弱的地方，磁力线较疏，磁通量就小，磁感应强度也小。通常规定磁感应强度在数值上就等于通过单位截面积的磁通量。假设 A 为磁场中某截面的面积， Φ 是截面上的磁通量，那么截面处磁感应强度的大小

$$B = \frac{\Phi}{A}, \quad (12.2)$$

因而磁感应强度又叫做磁通密度。在上式中， Φ 、 A 的单位如果依次为韦伯、米²，那么 B 的单位就是韦伯/米²；如果依次为麦克斯韦、厘米²，那么 B 的单位就是高斯。

如果截面 M 并不垂直于磁场的方向，即磁力线并非垂直地通过截面，而与截面 M 的法线 N 成一交角 θ ，如图 12.9

* 通电螺线管所产生的磁场详见本章第二节。

** Φ 希腊字母，是 ϕ 的大写，读作“fi”。

所示。这时通过截面 M 的磁通量就等于通过截面 M 在垂直于磁场方向的投影面 N 的磁通量。

假设截面 M 的面积为 A ，则其在磁场方向的投影面 N 的面积 A_0 就是 $A \cos \theta$ ，于是截面 M 上的磁通量

$$\Phi = BA_0 = BA \cos \theta。 \quad (12.3)$$

从式中可以看出：当 $\theta = 0^\circ$ 时，即截面垂直于磁场方向时，磁通量最大， $\Phi = BA$ ；而当 $\theta = 90^\circ$ 时，即截面平行于磁场方向时磁通量最小， $\Phi = 0$ ；当 $\theta = 180^\circ$ 时，即截面 M 的法线方向与磁场方向相反，磁通量为负

的最大值， $\Phi = -BA$ 。这说明磁通量可以有正有负。在非匀强磁场中，只有把平面取得非常小时，按公式(12.3)算出的值才能精确地反映出这个小范围(近似于一点)的磁通量。

[例题 12.1] 在磁感应强度为 7000 高斯的匀强磁场中，求直径为 20 厘米的垂直于磁场方向的圆平面上的磁通量。

解：已知匀强磁场的磁感应强度 $B = 7000$ 高斯，而磁场中垂直于磁场方向的圆平面的面积

$$A = \pi r^2 = 3.14 \times \left(\frac{20}{2}\right)^2 = 314(\text{厘米})^2,$$

于是根据公式(12.3)，圆平面上的磁通量

$$\Phi = BA = 7000 \times 314 = 2.20 \times 10^6 \text{ 麦克斯韦}。$$

习题 12.1 有一根不知极性的小磁针和一块马蹄形磁铁，用什么方法可以把它们的极性判断出来？

习题 12.2 磁力线和电力线在反映磁场和电场的性质上有哪些相似的地方？又有哪些区别？

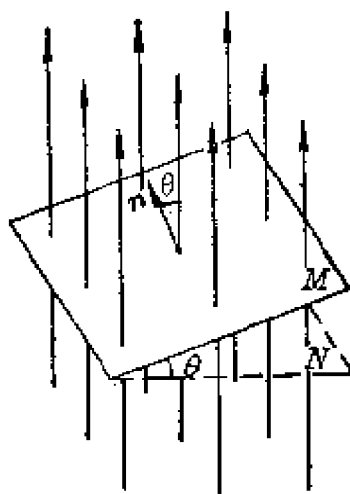


图 12.9 与磁场方向不垂直面上的磁通量

习题 12.3 在匀强磁场和非匀强磁场里, 磁力线的分布有什么不同? 能用小磁针来判别吗?

第二节 几种通电导体的磁场

一、通电直长导线的磁场

把小磁针放在导线周围, 当导线内有电流通过时, 小磁针就会发生偏转, 如图 12.10 所示。表明电流周围存在着磁场。为了研究有电流通过的直长导线周围的磁场, 让一根直长导线垂直穿过硬纸板, 并在板上撒一层铁屑。当导线中有电流通过时, 轻敲纸板。这样从铁屑的排列情况就可看出通电直长导线周围磁场磁力线的大致情况 (图 12.11a)。它是一组环绕着导线的从密到疏, 由小到大的同心圆。这说明靠近导线的地方, 磁感应强度较强, 随着与导线距离的增大, 磁感应强度逐渐减小。至于这些磁力线的方向根据小磁针的检验, 知道是与导线内电流的指向有一定的关系, 可按图 12.11b 所示的右手螺旋法则来确定: 用右手握住导线, 如果竖起的大拇指指向电流的指向, 那么弯屈的四指所示的方向就是磁力线的方向。可见磁力线的方向始终是与电流的指向垂直的。

精确实验和理论计算都表明, 在通过的电流强度为 I 的

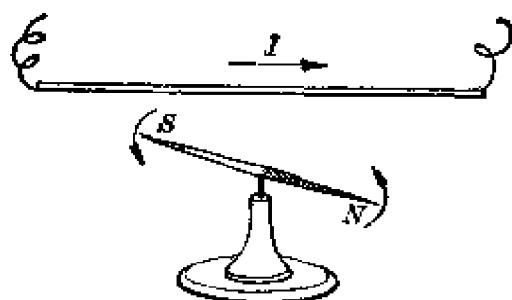


图 12.10 通电导线周围小磁针的偏转

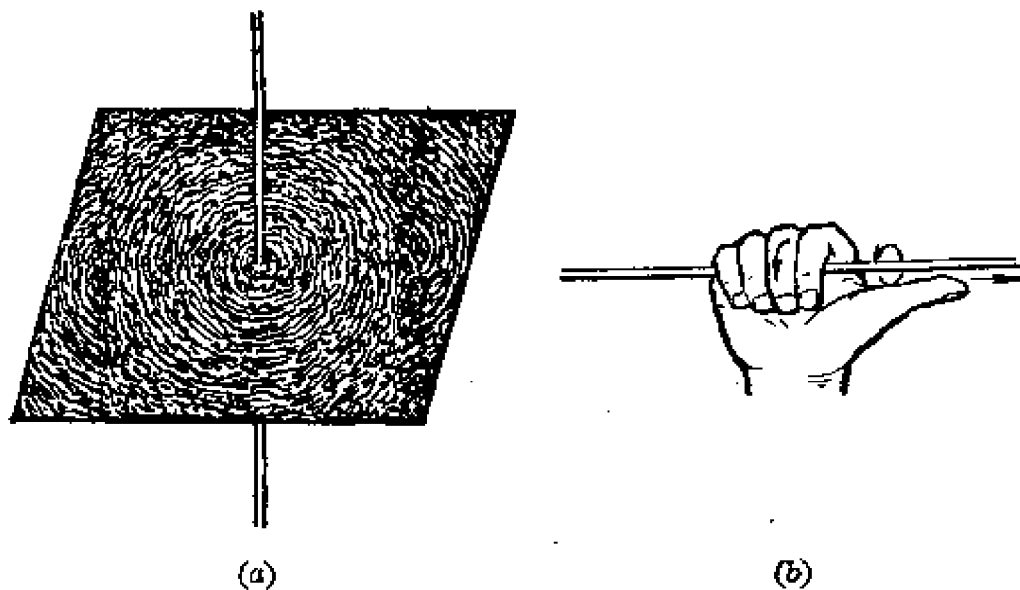


图 12.11 通电直长导线周围磁场的磁力线

直长导线附近, 与导线距离为 r 处的磁感应强度的大小

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r} \quad (12.4)$$

上式表明, 通电直长导线附近的磁感应强度与通过导线的电流强度成正比; 而与导线的距离成反比。式中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 韦伯/安培·米, 叫做真空的磁导率。

[例题 12.2] 图 12.12 所示是两根互相平行的直长导线 a 、 b , 当有指向相同的电流 I 分别通过时, 试分析为什么如虚线所示, 它们要互相吸引?

解: 很明显, 这两根通电平行直长导线之间的相互作用是它们周围的磁场相互作用的结果。为了分析导线 b 为什么会受到导线 a 的吸引, 先按图 12.11b 的右手螺旋法则来确定导线 a 附近导线 b 所在处磁场 B 的方向; 再由左手定则知道导线 b 在导线 a 的磁

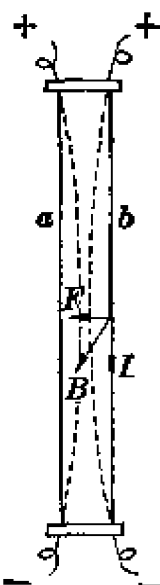


图 12.12

场中所受磁场力 F 的方向是指向导线 a 的。同理可以分析导线 a 在导线 b 的磁场中也受到一个指向导线 b 的磁场力。这就是为什么它们会互相吸引的原因。

二、通电圆环导线、螺线管、螺线环的磁场

用类似的实验方法也可以看出通电圆环导线附近磁场磁力线的大致情况,它的两个平面也具有指南北方向的性质(图 12.13)。因此我们也可以用它来确定磁场的方向。

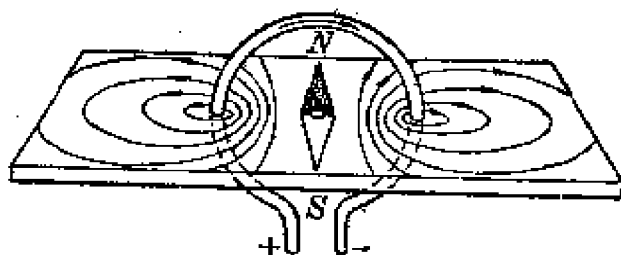


图 12.13 通电圆环导线周围磁场的磁力线

精确实验和理论计算都表明,在半径为 r , 电流强度为 I 的圆环导线中心处的磁感应强度的大小

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r}。 \quad (12.5)$$

上式表明,通电圆环导线中心的磁感应强度与通过导线的电流强度成正比,而与圆环导线的半径成反比。式中 μ_0 是真空的磁导率。

在实际应用中,常把导线一圈圈地密绕在圆筒上制成螺线管。通电以后,在它附近的磁场与条形磁铁的磁场十分类似(图 12.14a)。它的磁力线的方向与导线内电流的指向有关,仍可按右手螺旋法则来确定(图 12.14b)。用右手握住螺线管,使弯曲的四指指向电流的指向,那么大拇指所指的就是螺线管内部磁力线的方向。

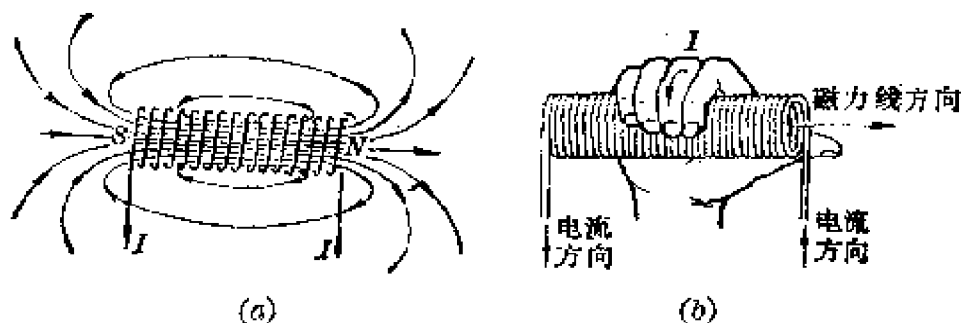


图 12.14 通电螺线管周围磁场的磁力线及其方向的确定

精确实验和理论计算表明，当通电螺线管的长度远大于管径时，它内部的磁场基本上是匀强的，各点的磁感应强度的大小与螺线管中通过的电流强度成正比，并与螺线管单位长度上导线的匝数成正比。用公式表示，即

$$B = \mu_0 n I, \quad (12.6)$$

式中 μ_0 是真空的磁导率， n 是螺线管单位长度上导线的匝数，单位是匝/米， I 是导线中通过的电流强度。如果螺线管上导线的总匝数为 N ，螺线管长度为 l 米，上述公式就改写为

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I. \quad (12.7)$$

实验还表明，在接近螺线管两端的管口处，磁场迅速减弱，磁感强度相当于螺线管内部的一半，即

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 n I = \frac{\mu_0 N I}{2l}. \quad (12.8)$$

把导线密绕在圆环上就形成螺线环，它的截面可以是圆形的，也可以是矩形或梯形的。实验表明，通电螺线环的磁场全部集中在圆环内部，如图 12.15 所示，外部几乎没有磁场。螺线环内部磁场磁力线的方向同样可由右手螺旋法则

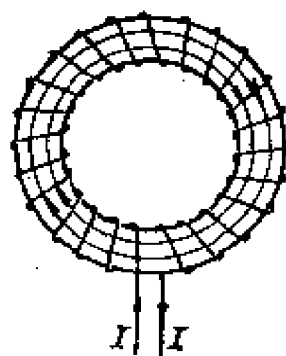


图 12.15 通电螺线环的磁场

确定。当通电螺线环截面的直径远小于它的周长时，它内部

的磁场可以看作是均匀的,各点的磁感应强度

$$B = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{l} I, \quad (12.9)$$

式中 n 是螺线环单位长度上导线的匝数; N 是总匝数; l 是螺线环的平均周长。

[例题 12.3] 有一长度为 30 厘米的细长螺线管,共绕导线 600 匝。当导线中通过 0.2 安培的电流时,问它内部各点的磁感应强度有多大?

解: 已知通电螺线管 $I = 0.2$ 安培, $N = 600$ 匝, $l = 0.3$ 米,根据公式(12.7)可以算出它内部各点的磁感应强度

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{600}{0.3} \times 0.2 \approx 5.02 \times 10^{-4} \text{ 韦伯/米}^2.$$

而磁感应强度的方向可由右手螺旋法则确定。

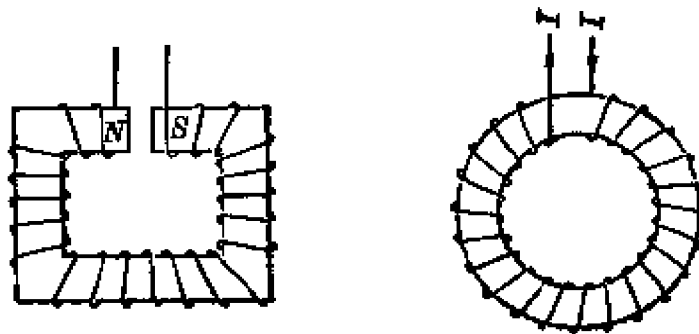


图 12.16

习题 12.4 试标出图 12.16 中通电螺线管和螺线环的电流指向或磁力线方向。

习题 12.5 在图 12.12 的两根互相平行的直长导线中,如果分别通以指向相反的电流,情况又将如何?为什么?

习题 12.6 在图 12.17 的两个线圈中,所通过的电流指向如图所示,问它们将如何偏转?为什么?

习题 12.7 有一螺线管,长 5 厘米,直径为 0.5 厘米,共绕导线 50

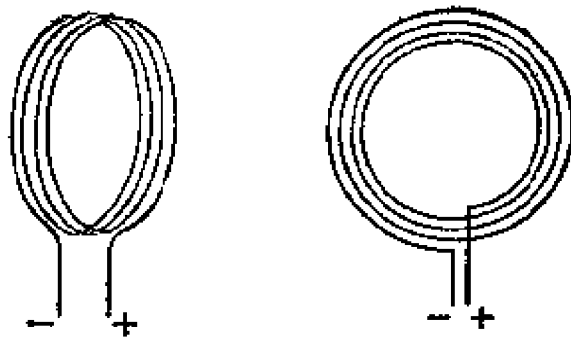


图 12.17

匝。如果通以1安培的电流,问:

- (1) 螺线管内部各点磁感应强度有多大?
- (2) 截面上的磁通量有多大?

第三节 磁 介 质

前面所研究的只是在真空中的电流(包括磁铁等磁体)所激发的磁场。然而实际上电流周围总是有其他物质存在的。完全孤立的磁场是不存在的。一方面电流通过它周围的磁场对其他物质具有磁化作用;另一方面磁场中的其他物质也在不同程度上影响着电流所激发的磁场。一般在真空中的电流产生的磁场是很弱的,为了实际上的应用,就必须设法采用能显著影响磁场的物质,以此来增强磁场。通常把能影响磁场的物质叫做磁介质。

一、磁介质的磁导率

将一根铁棒插入通电螺线管作为芯子,发现螺线管内部的磁感应强度大大增加,这是为什么呢?

我们知道,用磁铁靠近原来没有磁性的小铁针,小铁针在磁场中就会呈现磁性,甚至在拿走磁铁后,小铁针还能保留一些磁性。通常把磁介质在磁场的作用下显示磁性的过程叫做

磁介质的磁化。人造永久磁铁就是把钢条放在通电螺线管中磁化而成的。

磁介质在磁场中一旦被磁化,就要产生磁场,这个由磁介质磁化而产生的磁场通常叫做附加磁场。很明显,由于附加磁场的产生,原来的外磁场就要受到影响。通电螺线管中插入铁芯,正因为磁化的作用,铁芯产生了附加磁场。这时螺线管内部的磁感应强度应是由原来电流所激发的磁感应强度和铁芯磁化产生的附加磁感应强度之和。显然,插入铁芯后,通电螺线管内的磁场增加了。

然而不同的磁介质在磁化后产生的附加磁感应强度是不同的。通常把电流分别在均匀的磁介质中所激发的磁场的磁感应强度和在真空中所激发的磁场的磁感应强度之比叫做这种磁介质的相对磁导率,用字母 μ_r 表示。 μ_r 是没有单位的纯数,它反映了磁介质的磁化性质以及对磁场影响的大小。因此在磁介质存在的情况下,通电螺线管、螺线环内部各点的磁感应强度

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{N}{l} I = \mu \frac{N}{l} I^*, \quad (12.10)$$

* 比较公式(12.10)、(12.7)可以看出,在通电螺线管内部,不论有无磁介质存在,磁感应强度和磁导率的比总是相等的,即

$$\frac{B}{\mu} = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{N}{l} I。$$

通常把磁场中某一点磁感应强度 B 与所在点磁介质的绝对磁导率 μ 的比叫做这一点的磁场强度,用字母 H 表示。即

$$H = \frac{B}{\mu}。$$

一般说来,磁场强度 H 只和产生外磁场的电流强度、通电导体的几何形状有关,而与磁介质无关。当磁场中不存在其他物质时(即在真空中),磁感应强度与磁场强度只差一个常数, $B = \mu_0 H$; 当磁场中存在顺磁质或抗磁质时,磁感应强度与磁场强度成正比, $B = \mu H$; 当磁场中存在铁磁质时,磁感应强度与磁场强度就不是一个简单的正比关系,因为这时 μ 并不是一个常数。在实用单位制中,磁场强度 H 的单位是安培·匝/米。

式中 $\mu = \mu_0 \mu_r$, 叫做磁介质的绝对磁导率, 单位与 μ_0 相同, 也是韦伯/安培·米。

若用铜棒代替铁芯插入通电螺线管, 就会发现螺线管内部的磁感应强度不仅没有增大, 反而有些减小。这又是什么原因呢? 理论研究表明: 这与不同物质的分子电结构有关。原来物质分子内部存在着电子运动, 电子的运动形成通常所说的环形分子电流, 它使每一个分子都呈现磁性。在无外磁场存在时, 这些分子电流的取向是杂乱无章的, 因此对整个物体来说就对外并不显示磁性。但当外磁场存在时, 在外磁场的作用下, 这些分子电流将要取向外磁场的方向, 整个物体对外也就呈现磁性, 这就是通常说的物体被磁化。显然, 物体磁化所产生的附加磁场与外磁场的方向相同, 起了增加原来的磁感应强度的作用。另外在外磁场的影响下, 由于电磁感应*的作用, 在物质分子内部又会出现与外磁场方向相反的感生分子电流, 它所产生的附加磁场与外磁场方向刚好相反, 起了减弱原来磁感应强度的作用。在磁化的过程中, 上述两种作用相反的分 子电流在磁介质内部一般都同时存在, 构成了一对矛盾。在有些磁介质中, 如锰、铬、空气等, 固有的分子电流是矛盾的主要方面, 因此磁化后磁场增强, 相对磁导率 μ_r 就大于 1, 叫做顺磁质; 而在另一些磁介质中, 如水银、铜、氢等, 感生的分子电流是矛盾的主要方面, 因此磁化后磁场不仅不会增强, 反而减弱, 相对磁导率 μ_r 就小于 1, 叫做抗磁质。

无论顺磁质还是抗磁质, 它们的磁化能力都较弱, 相对磁导率都接近于 1。例如空气的 $\mu_r = 1.000038$; 而铜的 $\mu_r = 0.9999912$ 。因此在实际计算中, 它们的绝对磁导率都可用 μ_0 来代替, 表明这些磁介质对磁场影响很小。

* 电磁感应详见第十三章第一节。

二、铁磁性材料

还有一些磁介质,如铁、钴、镍等,它们对磁场的影响特别强,相对磁导率的数值很大,叫做铁磁质。磁铁所以能吸引铁、钴、镍等铁磁质,就是因为铁磁质在磁场中非常容易被磁化,并能产生很强的磁场来同磁铁相互作用。表 12.1 列出了几种常用铁磁质的最大相对磁导率。

表 12.1 几种常用铁磁质的相对磁导率

铁 磁 质		最大相对磁导率
软 磁 材 料	铸铁	200~400
	铸钢	500~2200
	纯铁	5000~18000
	硅钢(含硅4%)	7000
	坡莫合金(镍78.5%,铁21.5%)	100000
	镍锌铁氧体(NXO)	10~1000
	锰锌铁氧体(MXO)	300~500
硬 磁 材 料	镍	30
	钴	175
	钨钢(钨6%,碳0.7%,锰0.3%,铁93%)	110

铁磁质和顺磁质、抗磁质不同,它的相对磁导率并不是一个常数。铁磁质在磁化过程中,随着外磁场的增强,它的相对磁导率也会增大。但在铁磁质的磁化到达饱和状态之后,外磁场即使继续增强,铁磁质的磁感应强度也不会再继续增强。

有些铁磁质即使在外磁场撤消后仍能保留部分磁性,这种现象叫做剩磁;而有些铁磁质在外磁场撤消后容易退磁,即

失去磁性。根据这些不同，铁磁质又可分为软磁材料和硬磁材料两种。

软磁材料(如铸铁、硅钢等)的相对磁导率高，容易磁化，也容易退磁，在外磁场撤消后几乎完全失去磁性，适宜于在交变磁场使用，如用来制造变压器、电磁铁以及继电器的铁芯。表 12.1 中列出的几种铁氧体是电子设备中广泛使用的软磁材料，它们是由几种氧化物的细粉末混合压制成型后烧结而成的，因而可以制成各种所需要的形状。

硬磁材料(如碳钢、铝镍钴合金等)的相对磁导率虽不很大，但一旦被磁化后其剩磁较多，并且能保持很久而不易退磁，适合于制造永久磁铁。例如永磁扬声器、磁电式电表以及耳机内用的永久磁铁都是由硬磁材料充磁而成的。

三、电 磁 铁

在通电螺线管或螺线环内设有软磁材料制成的铁芯，就构成了电磁铁。由于软磁材料具有很大的相对磁导率，因而电磁铁可以具有比一般磁铁强好几百倍的磁性，并且还具有在切断电流后磁性几乎完全消失的特性。所以电磁铁在工农业生产技术中具有极其广泛的应用。

在钢铁企业中常用的电磁起重机就是利用电磁铁的原理设计而成的(图 12.18)。当电磁起重机通电后，它能对铁料产生强大的吸引力，并把铁料吸往熔炉；接着切断电流，铁芯磁性消失，铁料就落在熔炉中。但对高温的钢铁材料，由于不容易磁化就不能用它来起重。在粮食加工厂里，有时也用电磁铁来拣出铁质杂物以防止加工机械的损伤。

在机械加工厂里，电磁铁的应用也十分普遍。例如在各种工作台下装设的电磁卡盘，可以代替各种夹具把待加工的



图 12.18 电磁起重机

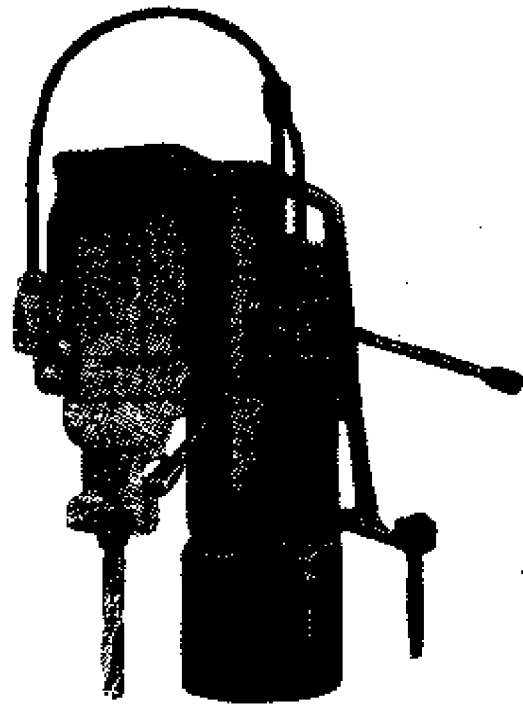


图 12.19 OZ-23型电磁钻孔机

工件牢牢固定在工作台上。图 12.19 是我国自行设计制造而成的 OZ-23 型电磁钻孔机，在它的底座上装有电磁吸盘，通电后可以使整个钻孔机吸附、固着在待加工的工件上进行钻孔加工，既轻便，又灵活。

用来自动控制和遥控的继电器也是以电磁铁作为主要部件的，它利用电磁铁对衔铁的吸、放两个动作来控制工作电路的开关，从而操纵和改变工作电路的工作状态。图 12.20 就是继电器原理的简单示意图。当电磁铁 J 的线圈中有微弱的

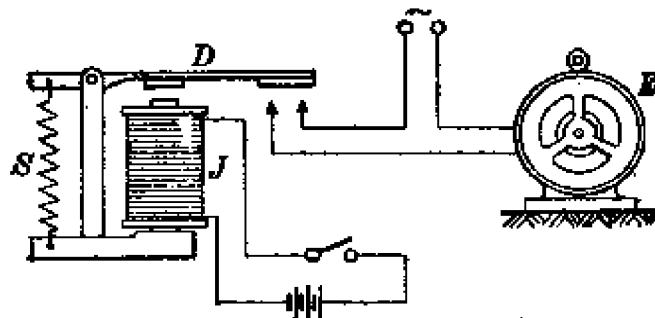


图 12.20 继电器原理示意图

控制电流通过时，它的铁芯就具有磁性而把衔铁 D 吸住，从而接通工作电路使电动机 E 工作起来；当切断控制电路的电源时，铁芯由于磁性消失而放开衔铁，弹簧 S 就把它拉起，从而切断工作电路，电动机就停止工作。

继电器的控制电路还可以用光电管来控制，成为光电控制继电器。例如目前在农业上广泛使用的新型植保装置——黑光灯*就是用它来作为自动控制元件的。

此外，象电铃、电报、电话等通信设备也是利用电磁铁的原理设制而成的。

[例题 12.4] 已知某电器的磁钢是由一带铁芯的通电螺线环制成的。它的截面直径 $D=20$ 厘米，环的平均半径 $R=80$ 厘米，铁芯的相对磁导率 $\mu_r=5000$ ，环上导线的总匝数 $N=50900$ 。问导线中通过多大的电流就能在截面上产生 2.2×10^{-2} 韦伯的磁通量？

解： 通电螺线环铁芯的截面积

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{3.14}{4} \times (0.2)^2 = 3.14 \times 10^{-3} \text{米}^2,$$

要使截面上产生磁通量 $\Phi = 2.2 \times 10^{-2}$ 韦伯，螺线环内部各点所需的磁感应强度

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{2.2 \times 10^{-2}}{3.14 \times 10^{-3}} = 0.7 \text{韦伯/米}^2.$$

假设在导线中通过电流强度 I 时，螺线环内部即可产生上述磁感应强度。于是按公式(12.10)列出

$$\begin{aligned} \text{电流强度 } I &= \frac{Bl}{\mu_0 \mu_r N} = \frac{B \cdot 2\pi R}{\mu_0 \mu_r N} \\ &= \frac{0.7 \times 2\pi \times 0.8}{4\pi \times 10^{-7} \times 5000 \times 50900} \approx 0.011 \text{安培。} \end{aligned}$$

* 关于黑光灯的光电控制器详见本书第十四章第七节。

习题 12.8 为什么电磁铁的铁芯必须用软磁材料来做, 而不能用硬磁材料?

习题 12.9 图 12.21 是电铃的简单构造示意图。图中 1 是马蹄形电磁铁, 2 是衔铁片, 3 是螺钉, 4 是铃锤, 5 是铃, A、B 是两接线柱与电源 6 相连通, 7 是控制开关。当接通开关 7 时, 电铃就响个不停, 这是什么道理?

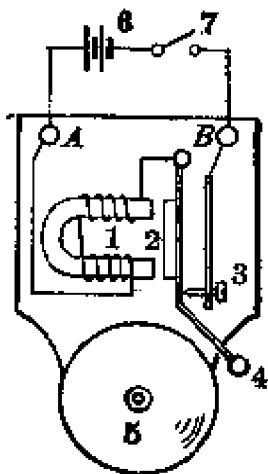


图 12.21 电铃示意图

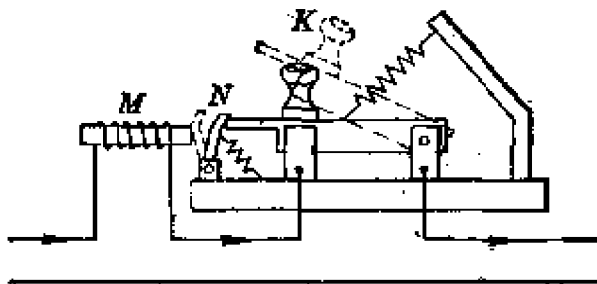


图 12.22 自动断路器示意图

习题 12.10 图 12.22 是利用电磁铁制成的自动断路器, 它的作用与保险丝相似, 也是一种电路保险装置。图中 K 是电键, M 是电磁铁, N 是衔铁。当电路中电流强度过大时, 电键自动弹开, 到图中的虚线位置, 从而使电路断开以避免事故的发生。试分析这种开关的工作原理。

第四节 磁场对电流的作用

一、磁场对直线电流的作用

在第二节里, 我们已经讲过通电直导线在磁场中会受到安培力的作用, 至于它的方向可按左手定则来确定。这实际上就是磁场对直线电流的作用。但是公式(12.1)只反映了当电流指向与磁场方向垂直时的情况。

如果电流指向并不与磁场方向垂直而有一定角度 θ ，如图 12.23 所示。实验表明，这时通电直导线所受的安培力就相当于它在与磁场方向垂直方向上的分量（即图中虚线位置的导线）所受的安培力。假设通电直导线原长为 l ，它在与磁场方向垂直方向上的分量的长度就是 $l \sin \theta$ 。于是根据公式 (12.1) 可以列出这时通电直导线所受的安培力

$$F = BIl \sin \theta。 \quad (12.11)$$

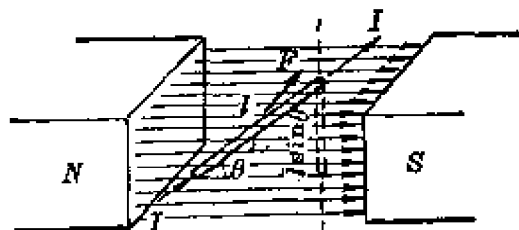


图 12.23 电流指向与磁场方向成 θ 角

上式比公式 (12.1) 更具有普遍性，它表明与磁场方向成任何交角的通电直导线所受的安培力。由上式可知，当通电直导线内电流指向与磁场方向相同或相反时，即在 $\theta = 0^\circ$ 或 180° 时，所受的安培力为零，即 $F = 0$ ；当通电直导线内电流指向与磁场方向垂直时，即在 $\theta = 90^\circ$ 时，所受的安培力为最大，即 $F = BI l$ 。

二、磁场对矩形线圈电流的作用

我们已经知道，通电圆环线圈的磁场和小磁针十分相似，放在磁场中，可以用来确定磁场的方向。现在就来具体分析磁场对通电矩形线圈的作用，即磁场对矩形线圈电流的作用。

假设把通电矩形线圈 1234 放在磁场中，使线圈所在平面与磁场方向平行，如图 12.24a 所示。磁场方向和电流指向如图所示，并设 $12 = 34 = a$ ； $23 = 41 = b$ 。很明显，整个线圈可以看作是由 12、23、34、41 四段通电直导线串联而成的，因此

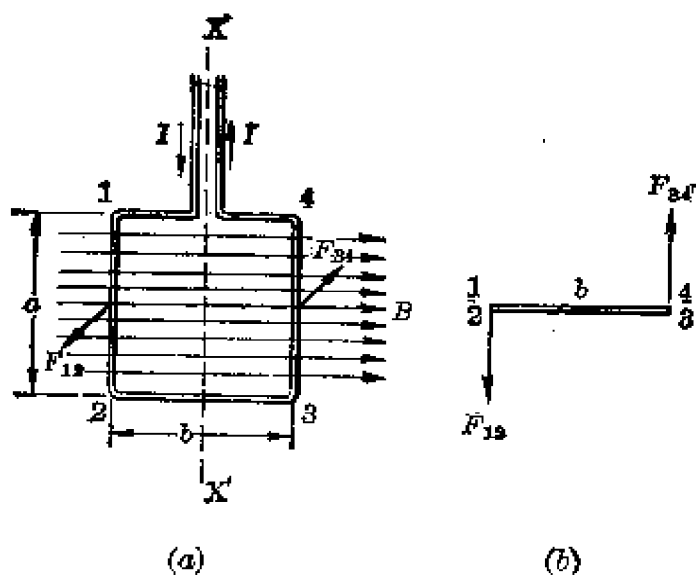


图 12.24 磁场对通电矩形线圈的作用

磁场对它的作用就相当于这四段通电直导线所受的安培力的作用。

在图 12.24a 所示的位置上，根据公式(12.11)可以列出各段通电直导线所受的安培力分别为

$$F_{12} = BIa \sin 90^\circ = BIa;$$

$$F_{23} = BIb \sin 0^\circ = 0;$$

$$F_{34} = BIa \sin 90^\circ = BIa;$$

$$F_{41} = BIb \sin 0^\circ = 0,$$

式中 B 是磁场中各点的磁感应强度， I 是线圈中的电流强度。再根据左手定则可以确定 F_{12} 的方向垂直于纸面而指向读者，同时 F_{34} 的方向垂直于纸面而离开读者往里。这两个力大小相等，方向相反，但不在同一直线上。它们对线圈轴 XX' 将产生一个转动力矩，这就是通电矩形线圈会绕线圈轴 XX' 发生偏转的原因。图 12.24b 就是这时线圈的俯视图。此时通电矩形线圈所受的力矩

$$M = F_{12} \cdot \frac{b}{2} + F_{34} \cdot \frac{b}{2} = BIab = BIA,$$

叫做通电矩形线圈在磁场中所受的安培力矩。式中 $A=ab$ ，是线圈的面积。如果通电线圈不止一圈而总匝数为 N ，那么它所受的总安培力矩

$$M = NBIA。 \quad (12.12)$$

随着线圈的偏转，由于导线 12、34 始终和磁场方向垂直，因而所受的安培力 F_{12} 、 F_{34} ，大小始终不变。但它们之间的垂直距离却越来越小，即 F_{12} 、 F_{34} 使线圈偏转的力臂逐渐在减小，从而使线圈所受的安培力矩越来越小(图 12.25)。等线圈转到与磁场方向垂直的位置时，它的每对直导线中各段所受的安培力大小相等，方向相反，并且在同一直线上，因而都相互平衡(图 12.26)。此时线圈在磁场中无运动，因此通常把线圈平面与磁场方向垂直的位置叫做通

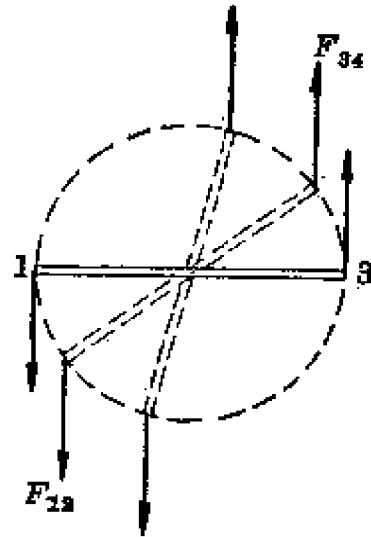
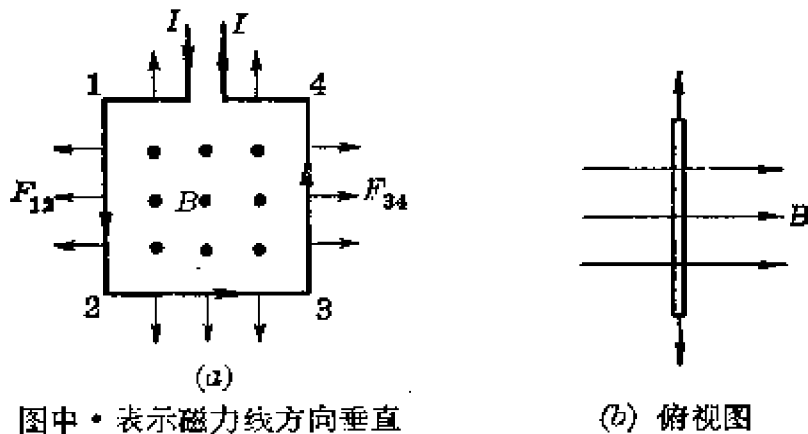


图 12.25 通电线圈在磁场中偏转时的俯视图



图中 \cdot 表示磁力线方向垂直于纸面而由里往外

图 12.26 通电线圈在磁场中的平衡位置

电线圈在磁场中的平衡位置。处于任何位置的通电线圈，如果不受其他力的作用，在磁场中偏转到最后，总是静止在它的平衡位置上。

习题 12.11 图 12.27 表示长 10 厘米的通电直导线在磁感应强度为 5×10^{-2} 韦伯/米² 的匀强磁场中的三种位置，如果电流强度为 0.5 安培，试分别在图上作出它所受安培力的方向，并计算出它的大小。（图 b 中通电直导线与磁场成 45° 角）

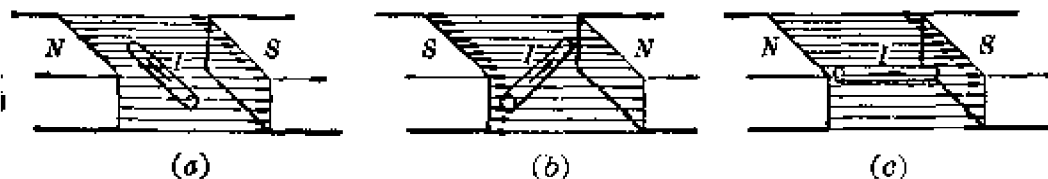


图 12.27

习题 12.12 长 20 厘米、宽 10 厘米的矩形线圈在磁感应强度为 5×10^{-3} 韦伯/米² 的匀强磁场中，如果线圈平面与磁场方向平行，问当通过电流强度为 0.5 安培时，它所受的安培力矩有多大？假设线圈的总匝数为 20。

第五节 电工测量仪表的作用原理

一、磁电式电表——灵敏检流计

从前面的讨论以及从公式 (12.12) 中可以看出，在总匝数 N 、线圈面积 A 固定的情况下，通电线圈在磁感应强度 B 一定的磁场中所受的安培力矩 M 是与通过的电流强度 I 成正比的。利用这一原理就可以设计制造测量电流强弱的仪表。凡是利用这一原理制成的电表统称为磁电式电表。常用的灵敏检流计、电流表、电压表以及万用电表都是属于这一类的电表。

图 12.28a 是磁电式电表内部结构的示意图。它的主要部分是一个钢制凹形的永久磁铁 1 和一个绕在圆柱形铁芯 2 上的可转动的多匝矩形线圈 3，简称动圈，因而磁电式电表又

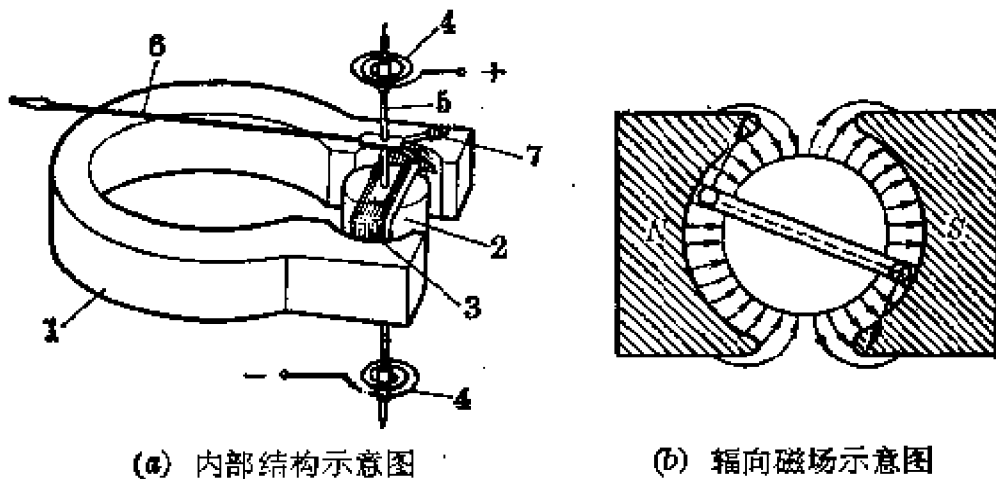


图 12.28 磁电式电表

叫做动圈式电表。线圈被上、下游丝 4 固定在一定的位置上。在线圈的转轴 5 上固定着一根指针 6。当电流从电表“+”极流入，经上游丝流过线圈，再经下游丝从电表“-”极流出时，通电矩形线圈就在安培力矩的作用下发生偏转，从而带动了指针的偏转。

实际上指针在偏转了一定的角度后就停止了。通入的电流越强，指针偏转的角度就越大。这是什么原因呢？

原来在凹形磁极和铁芯的空隙间存在着一个均匀的辐向磁场 (图 12.28b)，它的磁力线都是沿着铁芯的半径方向的。因此无论线圈转到哪一个位置，线圈平面总是和磁场方向平行。所以在电流强度一定的情况下，线圈所受的安培力矩始终不变。假设矩形线圈的总匝数为 N ，辐向磁场的磁感应强度为 B 韦伯/米²，待测的通过线圈的电流强度为 I 安培，线圈面积为 A 米²，那么按公式 (12.12) 可以列出线圈所受的安培力矩

$$M = NBIA \text{ 米} \cdot \text{牛顿}。$$

同时由于线圈的偏转，上下游丝就产生了扭转形变。于

是被扭转的游丝就对线圈产生一个反抗形变的弹性力矩 M' 。随着线圈偏转角 θ 的增大, 弹性力矩 M' 也正比例地增大, 因而可以列出

$$M' = C\theta \text{ 米} \cdot \text{牛顿},$$

式中 C 是游丝的扭转系数, 单位是米·牛顿/度。当弹性力矩增大到与线圈所受的安培力矩大小相等时, 线圈就停止偏转。这时指针就指在一定的刻度上。很明显, 由于 $M' = M$, 因而可以列出

$$C\theta = NBAI,$$

即

$$\theta = \frac{NBA}{C} I = \frac{I}{\frac{C}{NBA}} = \frac{I}{K}, \quad (12.13)$$

式中 $K = \frac{C}{NBA}$ (安培/度)。对于一定的电表说来, N 、 B 、 A 、 C 都是不变的量, 同样 K 也是一个不变的量, 通常叫做电表常数。上式表明, 指针的偏转角 θ 越大, 待测的电流强度 I 就越大。指针偏转的角度与待测的电流强度成正比。这就是磁电式电表的工作原理。根据这个原理可知, 磁电式电表的读数是等间隔刻度的。同时由于辐向磁场很强, 故不易受外磁场的干扰, 读数比较精确, 因此磁电式电表在直流测量中是比较好的一种电表。

上式还表明, 对于一定的电流强度 I 说来, K 值越小, 电表指针的偏转角也越大。由此可见, K 值越小, 电表的灵敏度就越高。为了使电表的 K 值减小, 就必须增强辐向磁场 B 、增多线圈匝数 N 、增大线圈面积 A 或者选择扭转系数 C 较小的游丝, 这样就能提高电表的灵敏度。

当不同指向的电流进入电表, 线圈和指针就要向相反的方向偏转。因此有的磁电式电表(如灵敏检流计)就把指针的

零点设在刻度的中央,使指针可以左右偏转。这样就可以用来测量不同指向的电流。

每个磁电式电表都有两个重要的参数: I_g 和 R_g 。 I_g 叫做电表的满刻度电流,即指针转到满刻度(最大偏转角 θ_g) 时所需的电流强度。它反映了电表的测量范围(量程)和灵敏度, I_g 越小,电表的灵敏度就越高。例如 MF30 型万用电表表头的最大偏转角 θ_g 为 90° , I_g 为 40.6 微安(μA)。 R_g 是电表内部线圈的电阻,叫做电表的内阻。一般磁电式电表的内阻在几百欧姆到几千欧姆左右。

[例题 12.5] 已知 MF40 型万用电表表头的磁钢与铁芯间辐向磁场的磁感强度为 2200 高斯,矩形线圈长 11.7 毫米,宽 11.5 毫米,游丝的扭转系数为 3.1×10^{-6} 米·牛顿/度,线圈总匝数为 700。求指针偏转 60° 、 90° 时通过表头的电流强度有多大?

解: 根据上述已知条件:

$$B = 2200 \text{ 高斯} = 0.22 \text{ 韦伯/米}^2;$$

$$A = 11.7 \text{ 毫米} \times 11.5 \text{ 毫米} = 135 \text{ 毫米}^2 = 0.000135 \text{ 米}^2;$$

$$C = 3.1 \times 10^{-8} \text{ 米} \cdot \text{牛顿/度};$$

$$N = 700,$$

可知电表常数

$$\begin{aligned} K &= \frac{C}{NBA} = \frac{3.1 \times 10^{-8}}{700 \times 0.22 \times 0.000135} \\ &= 1.49 \times 10^{-6} \text{ 安培/度。} \end{aligned}$$

于是按公式(12.13)可以算出指针偏转 60° 时,通过表头的电流强度

$$\begin{aligned} I &= K\theta = 1.49 \times 10^{-6} \times 60 = 89.4 \times 10^{-6} \text{ 安培} \\ &= 89.4 \text{ 微安。} \end{aligned}$$

当指针偏转 90° 时, 通过表头的电流强度

$$I = K\theta = 1.49 \times 10^{-6} \times 90 \doteq 134 \times 10^{-6} \text{ 安培} \\ = 134 \text{ 微安。}$$

如果表头的最大偏转角 $\theta_g = 90^\circ$, 那么它的满刻度电流强度 $I_g = 134$ 微安。

二、电 流 表

灵敏检流计的 I_g 越小, 灵敏度越高, 这固然好。但是它却不能用来测量比 I_g 大的电流强度。为了克服这一缺点, 必须设法扩大它的量程。电流表就是扩大了量程的灵敏检流计。

怎样才能扩大灵敏检流计的量程呢? 我们知道, 并联电阻具有分流作用, 因此用一个分流电阻和灵敏检流计的线圈

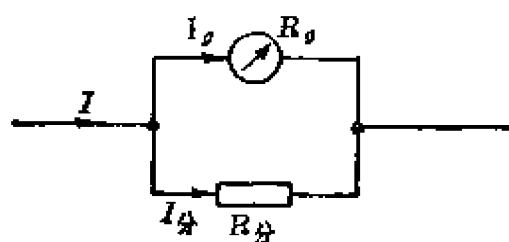


图 12.29 电流表原理线路图

并联起来, 就可以使允许通过电表的电流强度大大超过 I_g , 从而扩大了电表的量程。电流表正是这样改装而成的 (图 12.29)。电流表的表头是一个灵敏检流计, 和它并联的是一个分流电阻。多量程的电流表具有好几个分流电阻。

需要并联多大的分流电阻取决于量程扩大的程度。假设表头的满刻度电流为 I_g , 内阻为 R_g 。现在需要把量程从 $0 \sim I_g$ 扩大到 $0 \sim I$ 。设并联的分流电阻为 R_{sh} , 从图 12.29 可以看出, 需要通过分流电阻的电流强度 $I_{sh} = I - I_g$ 。于是根据并联电阻的分流原理公式(11.14)可以列出

$$I_g R_g = I_{sh} R_{sh} = (I - I_g) R_{sh},$$

因此分流电阻

$$R_{\text{分}} = \frac{I_g}{I - I_g} R_g \quad (12.14)$$

上式表明，在表头线圈上并联一个分流电阻 $R_{\text{分}}$ ，量程就可以从 $0 \sim I_g$ 扩大到 $0 \sim I$ ，简称量程从 I_g 扩大到 I 。

【例题 12.6】 已知电流表表头的满刻度电流 $I_g = 100$ 微安，内阻 $R_g = 1000$ 欧，问把量程扩大到 $0 \sim 5$ 毫安需要并联多大的分流电阻？

解： 根据公式(12.14)可以算出分流电阻

$$R_{\text{分}} = \frac{I_g}{I - I_g} R_g = \frac{100}{5000 - 100} \times 1000 \approx 20.4 \text{ 欧。}$$

【例题 12.7】 如果用 500 欧的分流电阻和上述例题中的电流表表头并联，问量程将扩大到多大？

解： 把公式(12.14)改变一下

$$I - I_g = \frac{R_g}{R_{\text{分}}} \cdot I_g,$$

即
$$I = \left(\frac{R_g}{R_{\text{分}}} + 1 \right) I_g,$$

这样可得到 I 和 I_g 之间的数量关系为

$$I = \frac{R_g + R_{\text{分}}}{R_{\text{分}}} \cdot I_g \quad (12.15)$$

于是把已知数据代入就可以算出

$$I = \frac{1000 + 500}{500} \cdot 100 = 300 \text{ 微安,}$$

即扩大后的量程为 $0 \sim 300$ 微安。

公式(12.15)还表明了表头指针没有偏转到满刻度时通过表头的电流强度和进入电流表的总电流强度之间的数量关系。在用电流表进行测量时，从实际通过表头的电流强度 I_g ，按公式(12.15)即可计算待测的总电流强度 I 。为了测量方

便, 电流表通常都把计算结果标在刻度表上, 因此从偏转后表头指针所指的刻度就可以直接读出待测的电流强度。

[例题 12.8] 图 12.30 是某多量程电流表的实际线路图

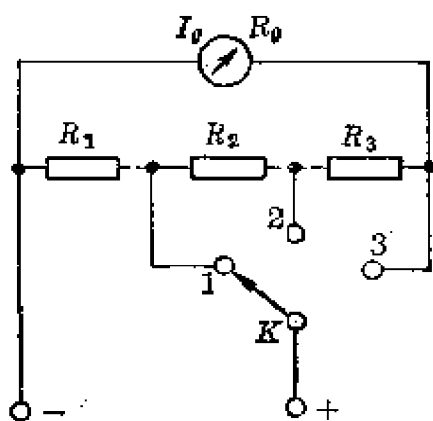


图 12.30 多量程电流表的实际线路图

图。表头满刻度电流 $I_g = 300$ 微安, 内阻 $R_g = 500$ 欧。它的分流电阻是由电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 串联而成的。当开关 K 接通位置 1 时, 量程扩大为 $0 \sim I_1 = 30$ 毫安; 接通位置 2 时, 量程扩大为 $0 \sim I_2 = 3$ 毫安; 接通位置 3 时, 量程扩大为 $0 \sim I_3 = 600$ 微安。求分流电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 的阻值。

解: 当开关接通位置 3 时, 分流电阻 $R_{分} = R_1 + R_2 + R_3$, 根据这时的量程为 $0 \sim I_3 = 600$ 微安, 按公式(12.14)可以列出

$$R_{分} = \frac{I_g}{I_3 - I_g} \cdot R_g = \frac{300}{600 - 300} \cdot 500 = 500 \text{ 欧,}$$

即 $R_1 + R_2 + R_3 = 500$ 欧。

当开关接通位置 2 时, 分流电阻 $R_{分} = R_1 + R_2$, 而 R_3 实际上成为表头内阻的一部分。从 $I_2 = 3$ 毫安, 按公式(12.14)可以列出分流电阻

$$\begin{aligned} R_{分} = R_1 + R_2 &= \frac{I_g}{I_2 - I_g} (R_g + R_3) \\ &= \frac{300}{3000 - 300} (500 + R_3), \end{aligned}$$

即 $R_1 + R_2 = \frac{1}{9} (500 + R_3)$,

把上式代入前式得

$$\frac{1}{9}(500 + R_3) + R_3 = 500,$$

故 $R_3 = 400$ 欧。

当开关接通位置 1 时, 分流电阻 $R_{分} = R_1$, 而 $R_2 + R_3$ 实际上成为表头内阻的一部分。从 $I_1 = 30$ 毫安, 按公式(12.14) 同样可以列出分流电阻

$$\begin{aligned} R_{分} = R_1 &= \frac{I_g}{I_1 - I_g} (R_g + R_2 + R_3) \\ &= \frac{300}{30000 - 300} (500 + R_2 + R_3) \\ &= \frac{3}{297} (500 + R_2 + R_3), \end{aligned}$$

即 $R_2 + R_3 = \frac{297R_1}{3} - 500,$

再把上式代入前式得

$$R_1 + \frac{297R_1}{3} - 500 = 500,$$

即 $R_1 = 10$ 欧。

同时由 $R_1 + R_2 + R_3 = 500$ 欧, 所以

$$R_2 = 500 - R_1 - R_3 = 500 - 10 - 400 = 90 \text{ 欧}。$$

三、电 压 表

灵敏检流计具有内阻。如果把它并联在某一段电路上, 根据通过的电流强度, 由欧姆定律公式 (11.4) 就可知道这一段电路上的电压。因此只要在刻度表上标出通过不同电流时的电压值, 灵敏检流计就可以用来测量电压。电压表就是根据这一原理制成的。但是由于 $I_g R_g$ 很小, 如果用灵敏检流计直接测量电压, 它的量程很小。例如对于 $I_g = 300$ 微安, $R_g = 500$

欧的灵敏检流计说来，它的满刻度电压根据部分电路的欧姆定律可以算出

$$U_g = I_g R_g = 300 \times 10^{-6} \times 500 = 0.15 \text{ 伏,}$$

表明它的电压量程只有 $0 \sim 0.15$ 伏。

怎样才能扩大它的电压量程呢？我们知道，串联电阻具有分压作用，因此用一个分压电阻和灵敏检流计的线圈串联起来，就可以扩大它的电压量程。电压表正是这样改装而成的（图 12.31）。电压表的表头也是一个灵敏检流计，和它串联的是一个分压电阻。多量程的电压表具有好几个分压电阻。

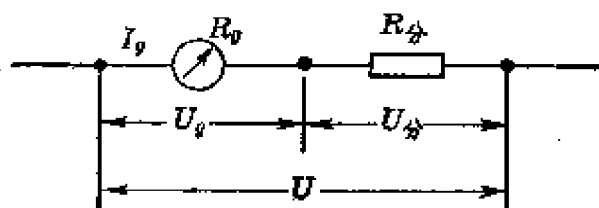


图 12.31 电压表原理线路图

需要串联多大的分压电阻取决于我们要把电压量程扩大到多大。假设表头的满刻度电压为 $U_g = I_g R_g$ ，现在需要把电压量程从 $0 \sim U_g$ 扩大到 $0 \sim U$ 。设串联的分压电阻为 $R_{分}$ ，从图 12.31 可以看出，必须使分压电阻两端的电压 $U_{分} = U - U_g$ 。于是根据串联电阻的分压原理公式(11.11)可以列出

$$\frac{U_g}{R_g} = \frac{U_{分}}{R_{分}} = \frac{U - U_g}{R_{分}},$$

因此分压电阻

$$R_{分} = \frac{U - U_g}{U_g} \cdot R_g. \quad (12.16)$$

上式表明，在表头线圈上串联分压电阻 $R_{分}$ 后，电压量程就可以从 $0 \sim U_g$ 扩大到 $0 \sim U$ ，简称电压量程从 U_g 扩大到 U 。

[例题 12.9] 已知电压表表头的满刻度电流 $I_g = 100$ 微

安, 内阻 $R_g = 1000$ 欧, 问把电压量程扩大到 $0 \sim 5$ 伏, 需要串联多大的分压电阻?

解: 从已知条件可以算出表头的满刻度电压

$$U_g = I_g R_g = 100 \times 10^{-6} \times 1000 = 0.1 \text{ 伏,}$$

于是根据公式 (12.16) 可以算出分压电阻

$$R_{分} = \frac{U - U_g}{U_g} \cdot R_g = \frac{5 - 0.1}{0.1} \times 1000 = 49000 \text{ 欧。}$$

[例题 12.10] 如果用 499 千欧的分压电阻和上述例题中的表头串联, 问电压量程将扩大到多大?

解: 把公式 (12.16) 改变一下

$$U - U_g = \frac{R_{分}}{R_g} \cdot U_g,$$

$$U = \left(\frac{R_{分}}{R_g} + 1 \right) U_g,$$

即可列出 U 和 U_g 之间的数量关系为

$$U = \frac{R_{分} + R_g}{R_g} \cdot U_g \quad (12.17)$$

把已知数据代入就可以算出

$$U = \frac{499000 + 1000}{1000} \times 0.1 = 50 \text{ 伏,}$$

即扩大后的电压量程为 $0 \sim 50$ 伏。

公式 (12.17) 还表明了表头指针没有偏转到满刻度时, 表头两端的电压 U_g 与电压表两端总电压 U 之间的数量关系。在用电压表测量电压时, 根据表头两端的实际电压按公式 (12.17) 即可推算出待测的总电压。为了测量方便, 电压表通常都把推算结果标在刻度表上, 因此从偏转后表头指针所指的刻度就可以直接读出待测的电压。

[例题 12.11] 图 12.32 是某多量程的电压表的实际线

路图。表头的满刻度电流 $I_g = 300$ 微安，内阻 $R_g = 500$ 欧。它的分压电阻是由电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 串联而成的。当开关 K 接通位置 1 时，电压量程扩大为 $U_1 = 5$ 伏；接通位置 2 时，电压量程扩大为 $U_2 = 10$ 伏；接通位置 3 时，电压量程扩大为 $U_3 = 50$ 伏。求分压电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 的阻值。

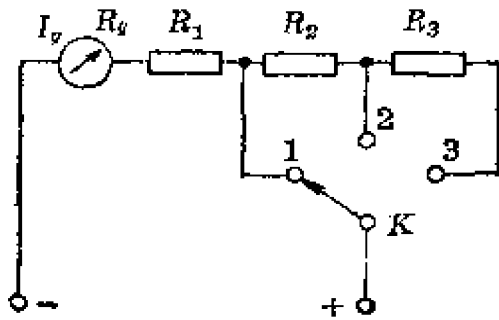


图 12.32

解：当开关接通位置 1 时，分压电阻为 R_1 ，根据 $U_1 = 5$ 伏，表头满刻度电压 $U_g = I_g R_g = 300 \times 10^{-6} \times 500 = 0.15$ 伏，可以按公式 (12.18) 算出

$$R_g + R_1 = \frac{U_1 - U_g}{U_g} \cdot R_g = \frac{5 - 0.15}{0.15} \times 500 \doteq 16200 \text{ 欧。}$$

当开关接通位置 2 时，分压电阻 $R_g + R_2 = R_1 + R_2$ ，同样可以算出

$$\begin{aligned}
 R_g + R_2 = R_1 + R_2 &= \frac{U_2 - U_g}{U_g} \cdot R_g = \frac{10 - 0.15}{0.15} \times 500 \\
 &\doteq 32800 \text{ 欧，}
 \end{aligned}$$

故 $R_2 = 32800 - R_1 = 32800 - 16200 = 16600$ 欧。

当开关接通位置 3 时，分压电阻 $R_g + R_3 = R_1 + R_2 + R_3$ ，同样可以算出

$$\begin{aligned}
 R_g + R_3 = R_1 + R_2 + R_3 &= \frac{U_3 - U_g}{U_g} \cdot R_g = \frac{50 - 0.15}{0.15} \times 500 \\
 &\doteq 166200 \text{ 欧}
 \end{aligned}$$

故 $R_3 = 166200 - (R_1 + R_2) = 166200 - 32800 = 133400$ 欧。

如果把图 12.30 和图 12.32 的线路图，连接在同一个

表头上, 并用一个单刀六掷的转换开关控制, 就可以构成一个既能测量电流强度又能测量电压的直流电表, 图 12.33 就是这种两用电表的线路示意图。当开关转到左边三个位置时, 可以测量三种不同量程的电流强度; 转到右边三个位置时, 可以测量三种不同量程的电压。万用电表就是根据这个原理设制而成的。

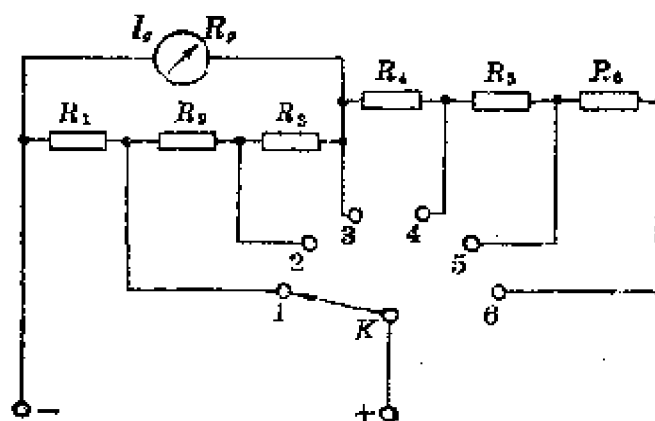


图 12.33 两用电表的线路示意图

必须注意, 开关在接通位置 1、2、3 测量电流强度时, 由于电阻 R_4 、 R_5 、 R_6 都悬空不用, 它们都不影响电流的测定。但当开关接通位置 4、5、6 测量电压时, 由于电阻 $R_1 + R_2 + R_3$ 始终和表头并联着, 因此在确定电阻 R_4 、 R_5 、 R_6 的阻值时必须考虑进去。这时表头的内阻应该看作是由 R_g 和 $R_1 + R_2 + R_3$ 并联而成的。

习题 12.13 在工农业生产中, 为了充分利用现有设备, 往往用串联一只电阻的方法来扩大电压表的量程, 或者用并联一只电阻的方法来扩大电流表的量程:

(1) 现有一量程为 0~10 伏的电压表, 已知内阻为 10 千欧, 若要把它改制成量程为 0~250 伏的电压表, 应串联多大的分压电阻?

(2) 现有一表头, $I_g = 40$ 微安, $R_g = 3.75$ 千欧, 如果要把它改装成量程为 0~500 毫安的电流表, 应并联多大的分流电阻?

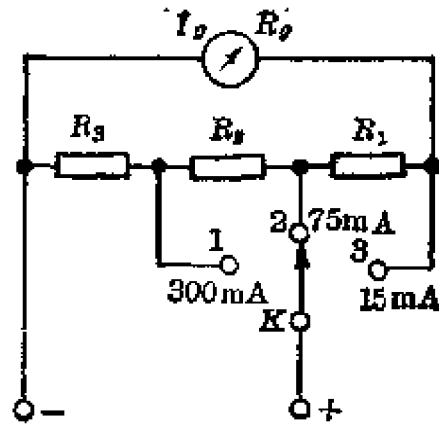


图 12.34

习题 12.14 图 12.34 是 MF3 型万用电表的电流测量部分线路图。已知表头的 $I_g = 250$ 微安, $R_g = 500$ 欧。试根据图上标出的三种量程算出电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 的阻值。

习题 12.15 已知某电压表原来的量程为 $0 \sim 10$ 伏, 在串联一只 2 千欧的分压电阻后, 量程扩大为 $0 \sim 15$ 伏, 求电压表的内阻。

第六节 在磁场中运动的带电粒子

一、罗伦茨力

把阴极射线管*放在磁场中(图 12.35), 就会发现由阴极射出的电子流不再沿直线方向运动, 而要向下或向上发生偏转。外加磁场的磁感应强度越大, 电子流偏转得越厉害。这表明电子流也和通电导线一样, 在磁场中要受到磁场力的作用。我们已经讨论过磁场对通电直导线的安培力的作用, 我

* 阴极射线管是一个抽成真空的玻璃管。它是由灯丝、阴极、阳极、荧光屏和互相垂直放置的两对偏转电极所组成。当接通电源, 从阴极发射出来的电子就加速地向阳极运动。电子在到达阳极后穿过阳极中心的小孔而打在荧光屏上, 使荧光屏上产生一个亮点, 从而显示出电子运动的轨迹。改变偏转电极上的电压就能改变电子的运动, 相应地在荧光屏上显示出电子不同的运动轨迹。

们也知道导线中的电流是自由电子的定向移动，因此归根结底，磁场对通电直导线的安培力实质上就是磁场对定向移动的自由电子的作用力。下面就从安培定律出发，进一步来分析磁场对运动电子的作用力的大小和方向。

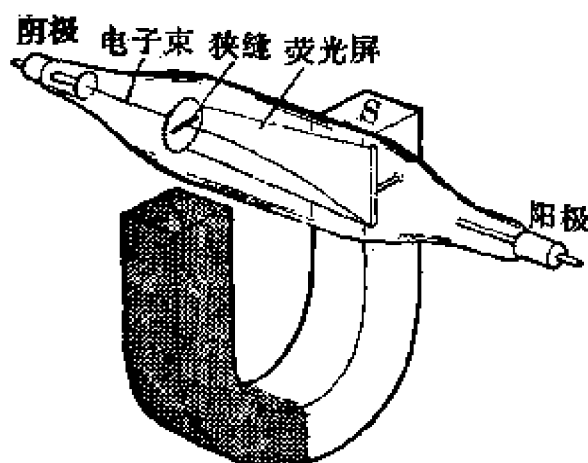


图 12.35 磁场中的阴极射线管

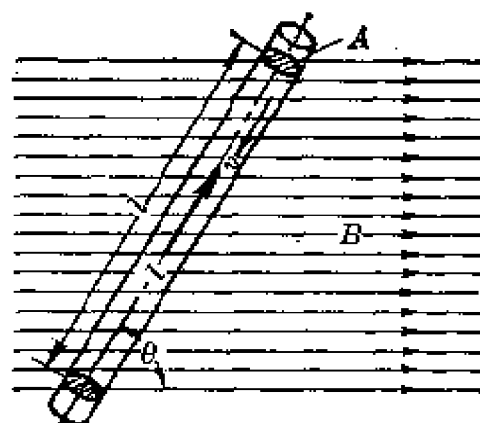


图 12.36

假设在磁感应强度为 B 的匀强磁场中，一段长度为 l 的通电直导线的电流强度为 I ，电流方向与磁场方向成 θ 角(图 12.36)，那么根据安培定律可以列出这段导线所受的安培力

$$F = BIl \sin \theta。$$

很明显，这个安培力也就是作用在导线中所有在作定向移动的自由电子上的作用力的合力。

假设导线的横截面积为 A ，在导线的单位体积内有 n 个带电量为 q 的自由电子在作定向移动，而其定向移动的平均速度为 v 。那么整段导线上共有 $n l A$ 个自由电子，它们所带的总电量 $Q = n l A q$ ；而这些自由电子通过这段导线的的时间 $t = l/v$ 。于是电流强度

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{n l A q}{l/v} = n A q v。$$

因此，导线中每个作定向移动的自由电子这时所受到的作用力

$$f = \frac{F}{nlA} = \frac{BIl \sin \theta}{nlA} = \frac{BnAqvl \sin \theta}{nlA},$$

即 $f = Bqv \sin \theta,$ (12.18)

式中 θ 就是 v 与 B 之间的夹角。其力 f 的方向显然是安培力 F 的方向，可用左手定则来确定。但必须注意，在左手定则中，四指所指的是电流指向，即正电荷移动的方向，而自由电子带负电，它的移动方向和电流指向正好相反，故在运用左手定则时，必须将四指指向电子运动的反方向。进一步的实验表明，任何带电粒子在磁场中运动时所受的磁场力的大小总是和它所在点的磁感应强度、它的带电量以及它的运动速度成正比的；而磁场力的方向不仅与磁场方向垂直，而且与它运动速度的方向也垂直，可按左手定则来确定（图

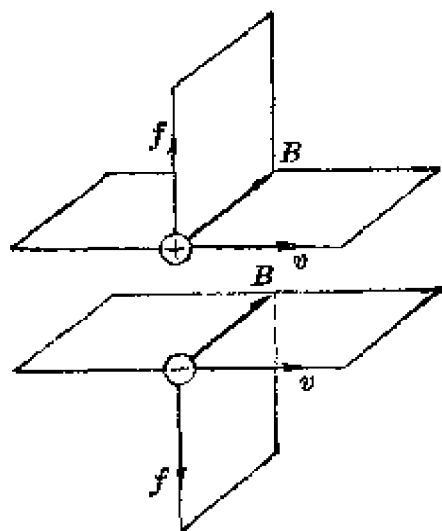


图 12.37 洛伦茨力的方向

12.37)。磁场对运动电荷的作用力通常叫做洛伦茨力。

从公式(12.18)还可以看出，当带电粒子沿着磁场方向或磁场的反方向运动时，即 $\theta=0$ 或 π ，则洛伦茨力 $f=0$ ；当带电粒子沿着与磁场方向垂直的方向运动时， $\theta=\pi/2$ ，则洛伦茨力最大， $f=Bqv$ 。

由于洛伦茨力总是与带电粒子运动的方向垂直，因此它不能改变带电粒子运动速度的大小，而只能不断改变带电粒子的运动方向。

由于洛伦茨力总是与带电粒子运动的方向垂直，因此它不能改变带电粒子运动速度的大小，而只能不断改变带电粒子的运动方向。

[例题 12.12] 当速度为 3×10^6 米/秒的电子沿着与磁力线垂直的方向进入磁感应强度为 1000 高斯的匀强磁场(图 12.38), 开始作匀速圆周运动, 求电子的轨道半径。

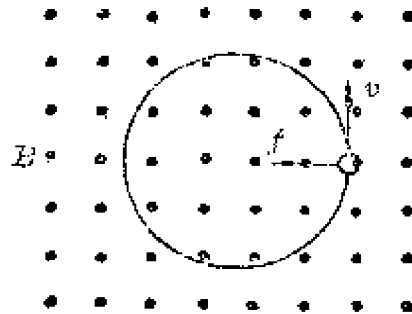


图 12.38

解: 由于运动电子在磁场中所受的罗伦茨力始终与它的速度垂直, 因此罗伦茨力对电子的运动起了向心力的作用。这是运动电子在磁场中作匀速圆周运动的外部条件。由向心力公式(2.35)可知, 向心力

$$f = Bqv = m \cdot \frac{v^2}{R},$$

故电子运动的轨道半径

$$R = \frac{mv}{qB}. \quad (12.19)$$

根据电子质量 $m = 9.1 \times 10^{-31}$ 公斤; 带电量 $q = 1.6 \times 10^{-19}$ 库仑; 速度 $v = 3 \times 10^6$ 米/秒; 而磁感应强度 $B = 1000$ 高斯 = 0.1 韦伯/米²可以算出这一运动电子的轨道半径

$$R = \frac{9.1 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^6}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{-1}} = 1.7 \times 10^{-4} \text{ 米}。$$

在近代的科学研究中, 正是利用罗伦茨力的这一重要特性, 制成回旋加速器。回旋加速器被用来加速带电粒子, 高速带电粒子轰击原子核, 就能研究原子核的内部结构。此外, 在各种示波器以及电视接收机的显象管中, 同样利用罗伦茨力

来不断改变电子束的方向,使它发生偏转,从而进行高速度的扫描运动。

二、霍耳效应

把一块半导体单晶薄片放在磁场中(图 12.39a)。如果在薄片的纵向上通入一定的控制电流,那么在薄片的横向两端间就会出现一定的电位差。这个现象叫做霍耳效应;出现的电位差叫做霍耳电压。如果撤去磁场,或者撤去控制电流,那么霍耳电压就随着消失。

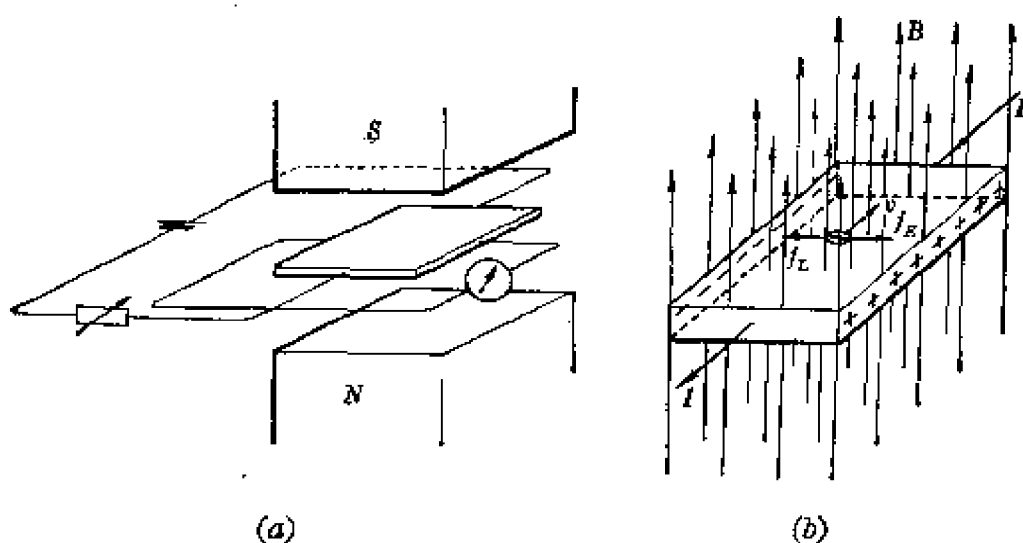


图 12.39 霍耳效应原理示意图

霍耳电压是怎样形成的呢?原来在控制电流从纵向通过N型半导体*薄片的过程中(图 12.39b),就有许多电子沿着与电流相反的方向移动。由于外磁场的存在,这些运动电子显然要受到罗伦茨力 f_L 的作用,从而在薄片的横向左端积聚起来。这样就使薄片横向的左端带负电,右端带正电,在横向两端间形成了电场。这个电场又对后来的电子作用一个与罗伦

* 有关N型半导体的特性详见第十四章第一节。

茨力 f_L 方向相反的电场力 f_E , f_E 阻碍后来的电子向薄片的横向左端继续积聚。因此运动电子要同时受到 f_L 、 f_E 两个方向相反的作用力: f_L 要把运动电子向左推, 而 f_E 要把运动电子往右拉。起初 f_E 比 f_L 小, 随着薄片左端电子的不断积聚, 电子所受的电场力 f_E 也不断增大。直到电子所受的 f_L 、 f_E 大小相等时, 薄片横向左端电子的积累达到了动态平衡, 于是在薄片横向两端间的电场就趋于稳定。这就是在薄片横向两端形成霍尔电压的原因。

具有霍尔效应的半导体薄片叫做霍尔元件。实验表明: 对于任何霍尔元件说来, 它的霍尔电压总是和控制电流以及外磁场的磁感应强度成正比的。用公式表示就是

$$U_H = K_H IB, \quad (12.20)$$

式中比例系数 K_H 决定于元件的材料、尺寸等, 它反映了霍尔元件的灵敏度, 叫做霍尔系数。它的实用单位是毫伏/毫安·千高斯, 相当于外磁场 $B=1$ 千高斯, 控制电流 $I=1$ 毫安时, 元件霍尔电压的毫伏数。

霍尔元件作为一种特殊的半导体器件, 应用十分广泛。例如在控制电流一定的情况下, 可以用来测量垂直于元件平面处的磁感应强度。高斯计就是利用这一原理设制而成的(图 12.40a)。在高斯计探头的头部(图 12.40b)装有 N 型半导体材料制成的霍尔元件, 外面有套子保护着。四根引线中, 两根用来连接输入的控制电流, 另两根用来连接输出的霍尔电压的。测量时只要把探头放在磁场中待测的某一点, 即可从高斯计的仪表上直接读出这一点的磁感应强度。用高斯计不仅可以用来测量几万高斯的强磁场, 也可以测量电机内部气隙间的磁感应强度, 以及磁场随时间变化的情况。

霍尔元件不仅可以用来测量磁感应强度, 而且还可以用

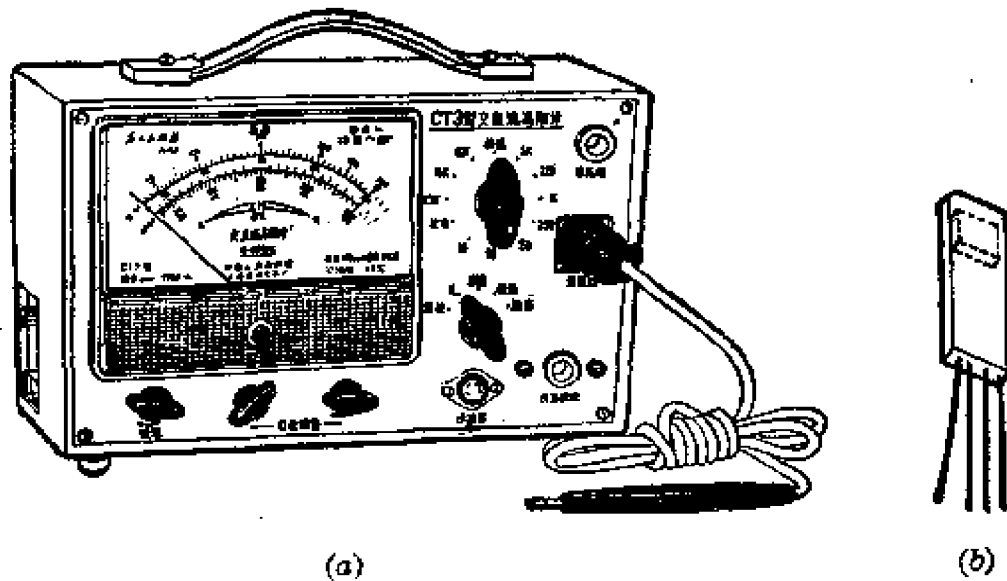


图 12.40 CT3 型高斯计

来测量电流、液位高低和转速等。它是自动控制的元件之一。

习题 12.16 罗伦茨力和安培力有哪些区别与联系？

习题 12.17 假设电子沿着与磁力线垂直的方向进入磁感应强度 $B=70$ 高斯的匀强磁场, 如图 12.38 所示, 若已知电子在这磁场中运动的轨道半径为 $R=3$ 厘米。试在图上作出电子进入磁场后的运动轨道; 算出电子运动的速度和它所受的罗伦茨力。

复 习 题

习题 12.18 为什么说:“一切磁现象都起源于电荷的运动”? 小磁针为什么具有指示南北方向的特性?

习题 12.19 如果输电线中通过的是直流电, 电流强度为 100 安培, 问输电线下方 4 米处的磁感应强度有多大?

习题 12.20 已知一插有 $\mu_r=2000$ 的软磁铁芯的螺线管, 长 60 厘米, 线圈总匝数为 200。要使它内部产生 400 高斯的磁感应强度, 需要通过多大的电流强度? 如果不插软磁铁芯呢?

习题 12.21 已知一通电螺线环的平均周长为 80 厘米, 上面密绕线圈 2000 匝, 如果铁芯的截面积为 0.5 厘米², $\mu_r=1500$ 。问电流强度

为 1.5 安培时:

- (1) 铁芯中的磁感应强度有多大?
- (2) 铁芯截面上的磁通量有多大?

习题 12.22 图 12.41 是农村中广泛使用的舌簧喇叭结构简图。它的主要结构是在用软磁材料制成的舌簧片上套一线圈，嵌装在永久磁铁的磁场中央。当线圈中通过按声音的规律变化的电流时，经传动杆与舌簧片相联结的纸盆便发出声音来。试分析纸盆发音的原理。

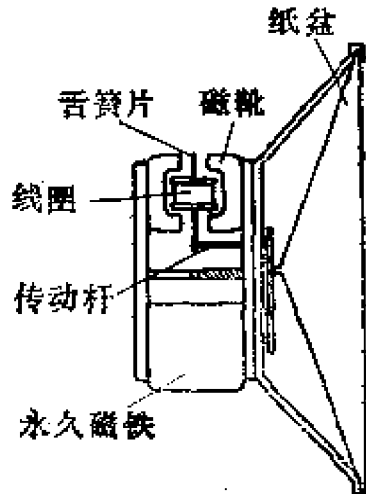


图 12.41

习题 12.23 图 12.42 是一种水位报警器的示意图。 T 是一无底水箱，里面有个浮子 A ， K 是活动接触开关。图中的虚线框表示相连的继电器，其中 P 是电磁铁的衔铁， D 是与 P 装在同一块绝缘板上的金

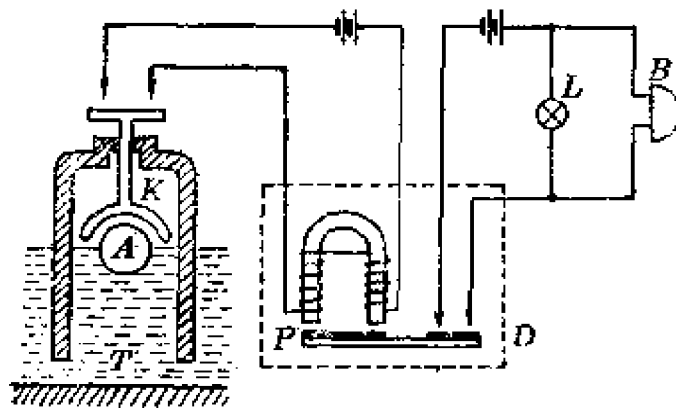


图 12.42

属片。当水位升到一定高度时,指示灯 L 就亮了,电铃 B 也响了。试分析它的工作原理。

习题 12.24 把通电线圈放在磁场中如图 12.43 所示,试标出:

- (1) 图(a)中线圈的偏转方向;
- (2) 图(b)中的磁场方向;
- (3) 图(c)中线圈电流的指向。

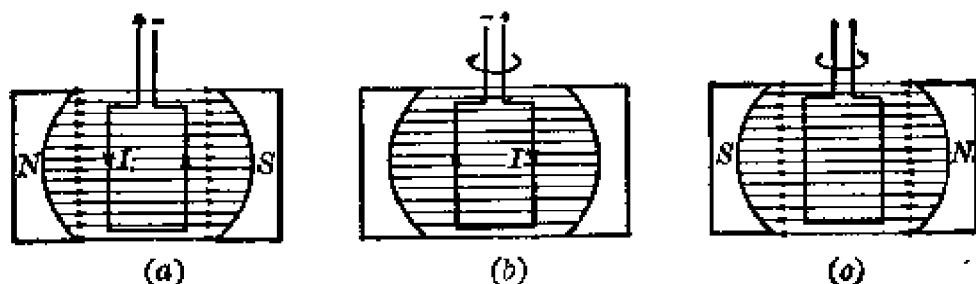


图 12.43

习题 12.25 在磁感应强度为 500 高斯的匀强磁场中有一边长为 10 厘米的正方形线圈(图 12.44),当线圈平面与磁场方向平行时,如果通以 2 安培的电流,指向如图上所示,问:

- (1) 线圈各边所受的安培力有多大? 方向如何?
- (2) 线圈所受的安培力矩有多大?
- (3) 如果线圈共有 20 匝,所受的安培力矩又有多大?

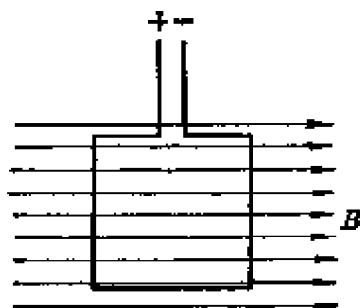


图 12.44

习题 12.26 某表头的参数 $I_g = 400$ 微安, $R_g = 250$ 欧,如果要用它来测量 0~50 毫安的电流,应如何改装? 如果要用它来测量 0~50 伏的电压,又应如何改装?

第十三章 交流电

电流的磁效应表明电荷运动可以转化为磁，那么磁是否也可以转化为电呢？

毛主席教导我们：“矛盾着的双方，依据一定的条件，各向着其相反的方面转化。”事实证明，在一定条件下磁也可以转化为电。今天我们所用的交流电，绝大部分就是从磁转化而来的。

交流电是指电压和电流的大小和指向都随时间有规律地变化。工程上一般所用的交流电是随时间按正弦规律变化的正弦交流电。

交流电具有一系列不同于直流电的特性，同时又具有不少优越性，故在生产实践和日常生活中，它的应用要比直流电广泛。

本章主要研究正弦交流电的一般规律及其在工农业生产上的一些应用。首先从电磁感应现象讲起，阐明变化的磁场产生电场的规律——电磁感应定律；其次在扼要介绍交流发电机工作原理的基础上，具体分析正弦交流电动势的变化规律，并简单介绍三相交流电的产生和联接方法；然后通过介绍几种最简单的交流电路来阐明电感器和电容器在交流电路中的特性；接着扼要介绍直流电动机和三相鼠笼式异步电动机的结构原理；最后分析变压器的构造和工作原理，并简单介绍一下有关远距离输配电的基本知识。

第一节 电磁感应

一、电磁感应现象

如图 13.1 所示, 用手拉着闭合的矩形线圈, 让它的一边在磁场中向上运动。如果在此闭合线圈中串联一个灵敏检流计, 这时就会发现虽然闭合线圈没有连接电源, 但灵敏检流计的指针却稍有偏转, 表明闭合线圈内有电流存在; 当矩形线圈的运动一停止, 检流计指针就立刻回到零点, 表明线圈内的电流就消失。同时还可发现, 磁场越强, 线圈运动越快, 指针的偏转就越显著, 这表明线圈内产生的电流强度越大。

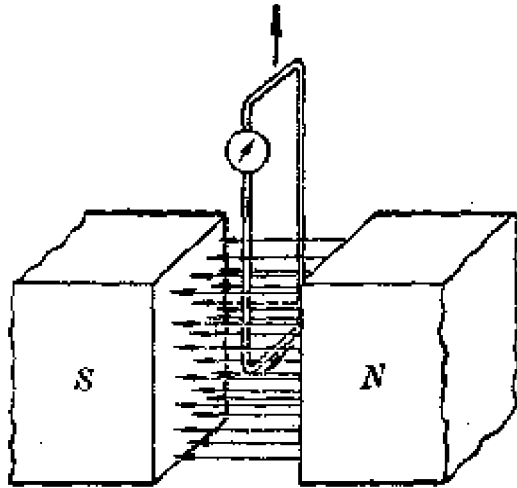


图 13.1

如果让线圈和磁场同时一起运动, 指针并不偏转(图 13.2a); 但若线圈静止不动, 而让磁场运动, 指针又偏转了(图 13.2b)。这表明线圈中电流的产生是与线圈和磁场的相对运动有关。当线圈和磁场同时一起运动时, 它们之间由于不存在相对运动, 因而没有电流产生。

如果让线圈沿着磁场的方向左右运动, 指针也不偏转(图 13.2c)。这表明要在线圈中产生电流, 线圈和磁场之间不仅要有相对运动, 而且还必须让线圈的一边在切割磁力线。线圈在向左右运动过程中, 导线并没有切割磁力线, 因此线圈内没有电流产生。

处在磁场中的闭合线圈, 当有一边在切割磁力线运动时, 穿过线圈所包围面积上的磁通量就要发生改变。例如图

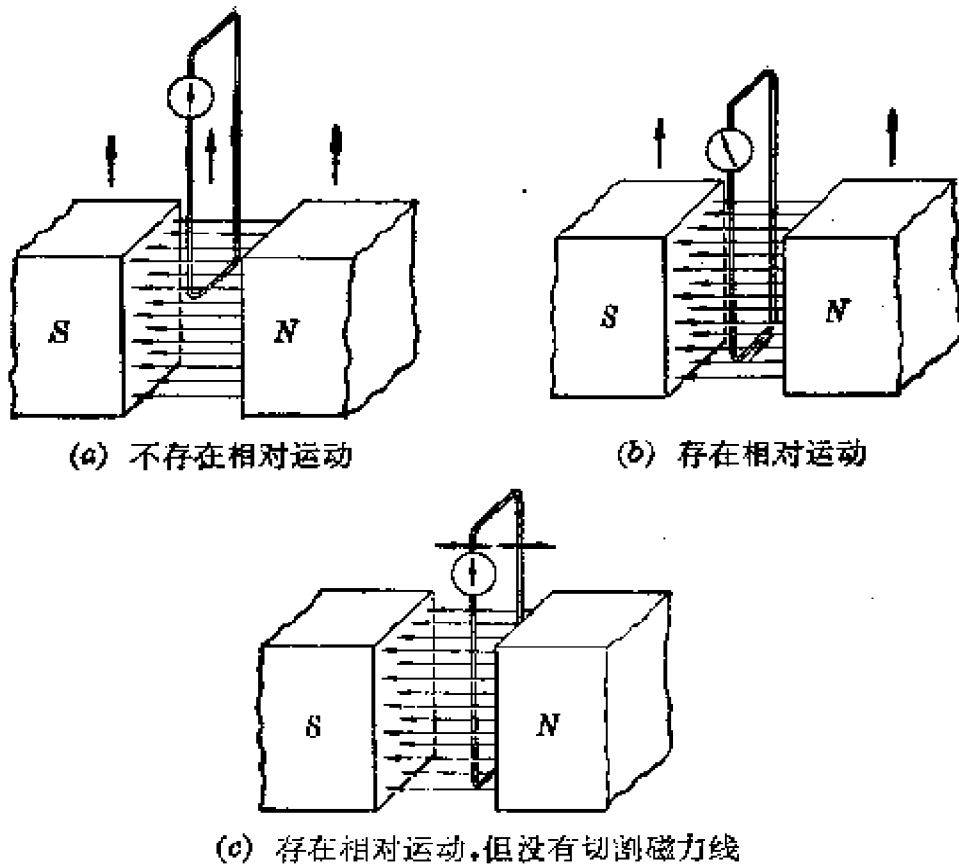


图 13.2 磁场和线圈的相对运动

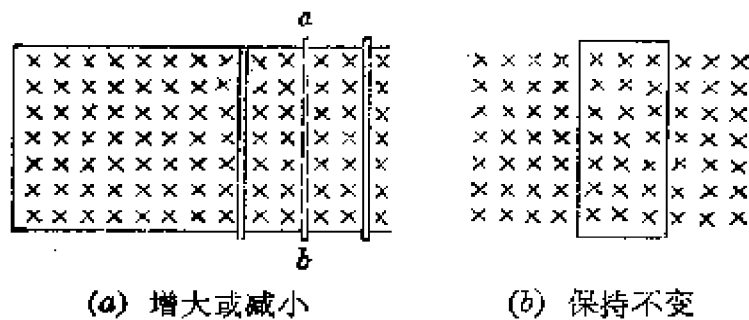


图 13.3 线圈面积上的磁通量

图中“×”表示磁力线方向垂直于纸面而由外向里。

13.3a 所示，原来处于虚线位置的可滑动边 ab 如果向左运动而切割磁力线，线圈面积上的磁通量就要减小；如果向右运动而切割磁力线，线圈面积上的磁通量就要增大。在 ab 边的这两种运动过程中，线圈内都有电流产生。如果整个线圈

都在匀强磁场中运动 (图 13.3b), 那么即使线圈与磁场有了相对运动, 线圈两边同样在切割磁力线, 但线圈内也不会有电流产生, 因为这时线圈面积上的磁通量始终保持不变。由此可见: 在闭合线圈所包围的面积上磁通量发生变化的过程中, 线圈内就有电流产生。这种现象叫做电磁感应现象; 产生的电流叫做感生电流。从电磁感应现象可以看出: 变化的磁场可以产生电场, 或者说, 在一定条件下磁可以转化为电。

电磁感应现象的形式是多种多样的。在把条形磁铁 M 的一端插入或抽出原来不通电的闭合螺线管 A 的瞬间, 螺线管 A 中由于磁通量的变化就有了感生电流 (图 13.4a); 用通

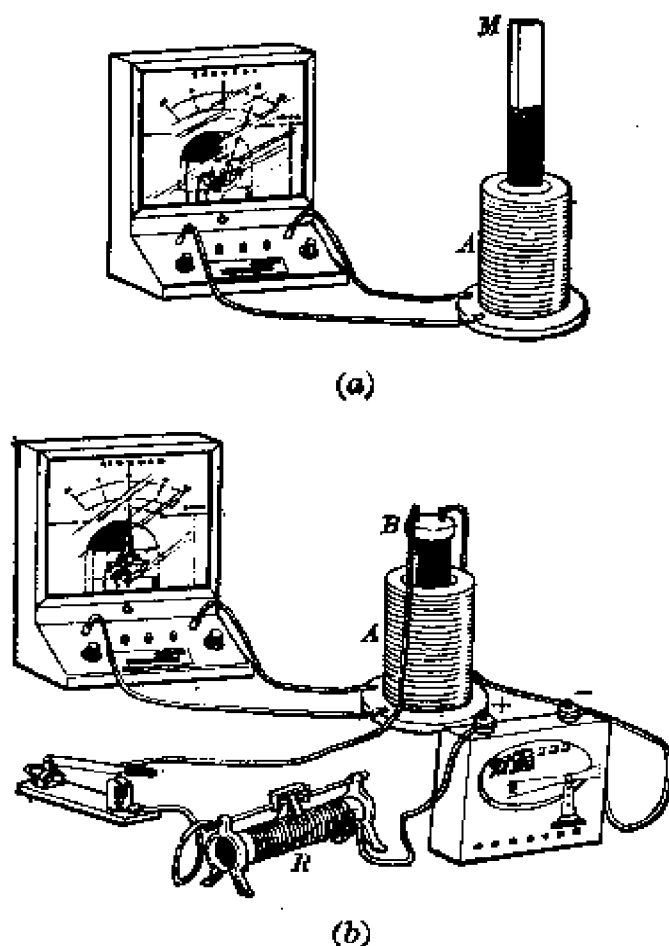


图 13.4 电磁感应现象

电螺线管 B 代替条形磁铁 M 也可以在闭合螺线管 A 内引起感生电流。即使两个线圈 A 、 B 间没有相对运动(图 13.4b), 但只要通过移动线路中变阻器 R 的滑片来改变螺线管 B 中的电流强度, 从而增大或减小螺线管 B 内部的磁感应强度, 那么螺线管 A 中也因磁通量的变化而会出现感生电流。通常把螺线管 B 叫做原线圈, 而把螺线管 A 叫做副线圈。原线圈中的电流叫做原电流, 而在副线圈中出现的电流就是感生电流。

二、感生电流的指向

进一步的实验表明, 在线圈面积上磁通量增大或减小的过程中, 灵敏检流计指针偏转的方向是不同的。如果在线圈面积上磁通量增大时, 灵敏检流计的指针向右偏转, 那么在磁通量减小时指针就向左偏转。如果改变原来磁场的方向, 感生电流的指向也随着改变。因此线圈内感生电流的指向和线圈面积上磁通量的增减以及原来磁场的方向都有着密切的内在联系。

例如图 13.4a 所示的实验。用条形磁铁 M 的 N 极一端插入闭合螺线管 A 时, 灵敏检流计指针向左偏转(图 13.5a), 抽出时指针就向右偏转(图 13.5b); 用 S 极一端插入时指针向右偏转(图 13.5c), 抽出时指针就向左偏转(图 13.5d)。这里是否可以找出规律性的东西来呢?

仔细观察上述四种情况可以发现: 由于感生电流的出现, 在闭合螺线管 A 内部就会产生一个感生磁场, 其方向可按右手螺旋定则来确定。在上述四种情况中, 螺线管 A 的上方会分别出现类似条形磁铁的 N 、 S 、 S 、 N 的磁场, 如图 13.5 所示。而在所有的这些情况中, 感生磁场和原来磁场间的相互

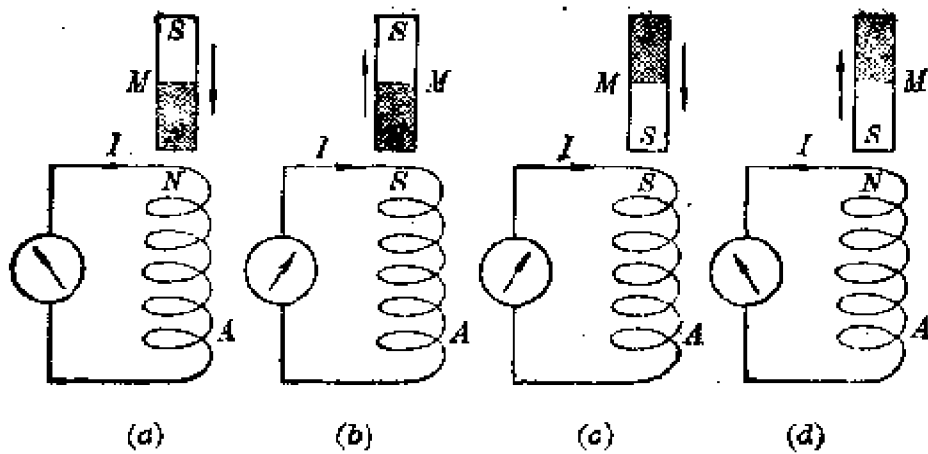


图 13.5 感生电流的指向

作用总是阻碍着它们的相对运动的。例如在图 13.5a 中，两个 N 极的相互排斥就阻碍着条形磁铁向下的运动；在图 13.5b 中， S 极和 N 极的相互吸引就阻碍着条形磁铁向上的运动；在图 13.5c、d 中，情况也是如此。可见，感生电流的指向是要使感生磁场阻碍它和原来磁场间的相对运动。

对于图 13.4b 中的原、副线圈说来，在出现电磁感应现象时，它们之间并不存在相对运动，如何来确定副线圈中出现的感生电流的指向呢？实验表明，这时感生电流的指向是和原线圈中原电流的指向以及磁通量的增减有关的。在原电流

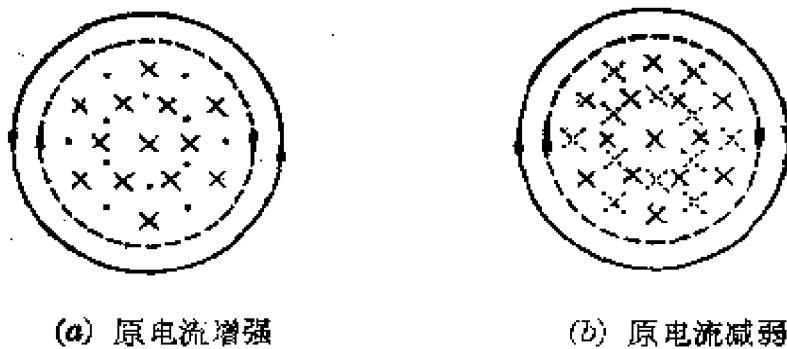


图 13.6 感生电流和原电流间的关系

注：图中实线表示副线圈中的感生电流，虚线表示原线圈中的原电流。符号“ \cdot ”与“ \times ”表示它们的磁场方向。

增强的过程中出现的感生电流,其指向与原电流相反(图 13.6a);而在原电流减弱的过程中出现的感生电流,指向与原电流相同(图 13.6b)。

进一步分析上述实验结果可以看出,在原电流增强时,副线圈面积上的磁通量在增大。副线圈中感生电流的指向就与原电流方向相反,表明感生磁场与原来磁场方向相反,起了抵消作用,阻碍了磁通量的增大。在原电流减弱时,副线圈面积上的磁通量在减小。感生电流的指向与原电流相同,表明感生磁场与原来磁场方向相同,起了补偿作用,阻碍了原来磁通量的减小。因此,感生电流的指向总是要使感生电流所产生的磁场去阻碍原来磁场的变化。这个结论叫做楞次定律。

在各种不同形式的电磁感应现象中,都可以运用楞次定律来确定感生电流的指向。例如在图 13.1 的实验中,当矩形线圈向上运动,其下面一边切割磁力线时,线圈面积上的磁通量是在减小,根据楞次定律可知,这时感生电流的指向是要使感生磁场阻碍这个磁通量的减小。由右手螺旋法则可知,只有当感生电流的指向是由里向外时,在线圈面积上的感生磁场和原来磁场的方向相同,才能对正在减小着的磁通量起补偿作用。因此线圈一边内感生电流的指向应是由里向外(图 13.1)。

从图 13.7a 上可以看出,当闭合线圈的一段直导线在磁场中运动并切割磁力线时,导线上感生电流的指向和磁场方向以及导线运动的方向三者都是相互垂直的。这三者间的关系也可以用一个简单的方法来表示。伸开右手掌,使大拇指与其余四指垂直,让磁场方向从手心穿入,这时如果大拇指所指的是导线运动的方向,那么四指所指的就是导线中感生电流的指向。这就叫做右手定则(图 13.7b)。

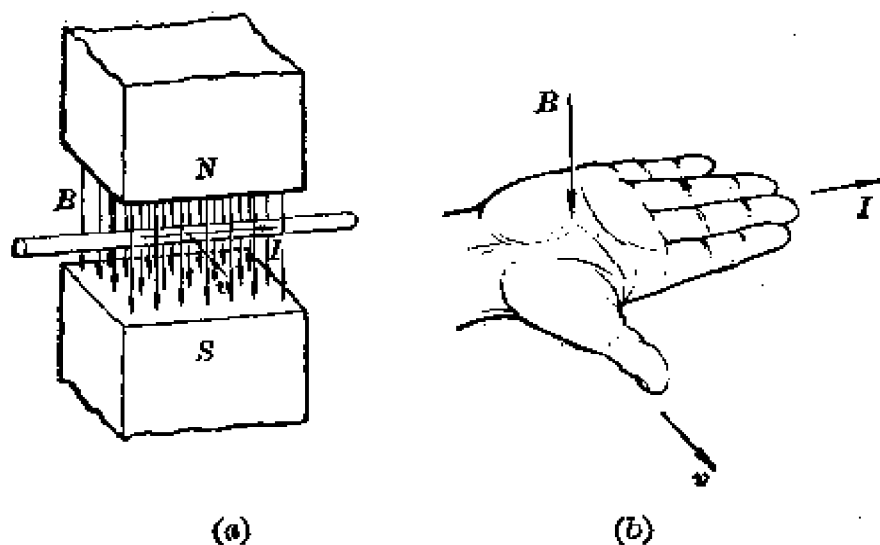


图 13.7 右手定则

楞次定律可以用来确定感生电流的指向，实质上它就是能量转化和守恒定律在电磁感应现象中的应用。因为根据楞次定律，闭合线圈的一边在作切割磁力线运动时，外力必须克服感生磁场的阻碍作用而作功，所以感生电流并非凭空产生的，它是外力作功的结果，而外力作功所消耗的能量就转化为闭合线圈中的电能。

三、电磁感应定律

我们知道，在一段导线内有电流存在就表明在它两端存在着一定的电压；在闭合电路内有电流存在就表明电路内存在着一定的电动势。通常把有感生电流存在的闭合线圈内的电动势叫做感生电动势。感生电动势和通常的电动势在本质上完全相同，但通常的电动势是由电源产生的，而感生电动势只是由电磁感应所产生。

在研究电磁感应现象时，掌握感生电动势要比感生电流更为重要。在进行电磁感应实验时，只要副线圈的材料不同，

感生电流的强度就有所不同，而感生电动势却有确定的值。这表明感生电动势只决定于产生电磁感应的条件，而感生电流除此之外，还决定于副线圈的电阻。在副线圈内，感生电动势可以具有两种不同的指向，而感生电动势的指向就是感生电流的指向，这可由楞次定律确定。

在任何形式的电磁感应现象中，无论副线圈是否闭合，只要副线圈面积上的磁通量有了变化，在副线圈里就有一定的感生电动势产生。如果副线圈是闭合的，这个感生电动势就在副线圈里产生感生电流；如果副线圈是不闭合的，这时的副线圈就是一个开路的电源。

下面根据楞次定律和能量守恒定律来分析感生电动势的大小与副线圈面积上磁通量变化之间的关系。

假设在磁感应强度为 B 的匀强磁场中，长度为 l 的导线 ab 在外力 F 的作用下以速度 v 从左向右运动（图 13.8）， v 的方向既垂直于 l ，又垂直于 B 。很明显，在这过程中闭合线圈 $abcd$ 内磁通量要发生变化，因而要产生感生电动势 E 和感生电流 I ，其指向自 b 到 a 。同时根据楞次定律可知，导线 ab 在运动过程中要受到感生电流的磁场的阻碍，而这个阻碍

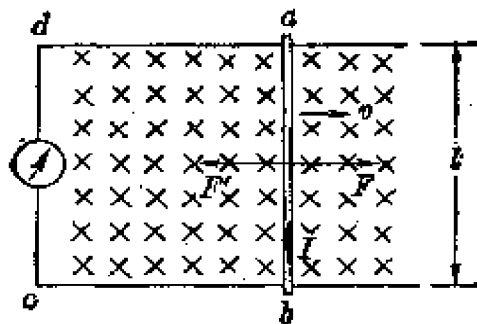


图 13.8 电磁感应定律

作用就表现为感生电流 I 在磁场中所受的安培力 F' ，它的大小与方向根据公式 (12.1) 和左手定则确定。可见导线 ab

在运动过程中,外力 F 正是克服了阻力 F' 而对导线 ab 作功。于是可以列出外力 F 在时间 Δt 内所作的功

$$W = F \cdot \Delta S = F' \cdot \Delta S = BIlv \Delta t,$$

再根据电功公式 (11.20), 可以列出在时间 Δt 内线圈内感生电能的消耗为

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{感}}^* = E^{**} I \Delta t,$$

这部分电能的获得显然是外力作功的结果。因此根据功能定理 $W = \Delta \mathcal{E}_{\text{感}}^*$ 的关系, 可以列出

$$BIlv \Delta t = EI \Delta t,$$

即线圈 $abcd$ 内的感生电动势

$$E = Blv. \quad (13.1)$$

而式中 $lv = \frac{l \cdot \Delta S}{\Delta t}$, 相当于单位时间内导线 ab 所扫过的面积, 因此上述公式还可以改写为

$$E = B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (13.2)$$

上式中应用了磁通量公式 (12.3), 即

$$B \cdot \Delta A = B(A - A_0) = \Phi - \Phi_0 = \Delta \Phi,$$

表示在时间间隔 Δt 闭合线圈面积上磁通量的增量。而 $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ 是单位时间内磁通量的增量, 它反映了线圈面积上磁通量随时间的变化率。因此上式表明: 当线圈面积上磁通量发生变化时, 线圈内产生的感生电动势在数值上就等于线圈面积上磁通量随时间的变化率。这个结论叫做电磁感应定律。至于感生电动势的指向可按楞次定律确定。

* 为了区别于电动势的符号 E , 故能量由花体 $\mathcal{E}_{\text{感}}$ 表示。通常电场强度也用符号 E 表示, 请读者特别注意。

** 这里忽略了内压降, 故 $U \neq E$ 。

电磁感应定律对于任何形状的线圈都适用。对于多匝线圈说来,它可以看作由各匝线圈串联而成,而每匝线圈面积上磁通量的变化率总是相同的,因此总的感生电动势就等于各匝线圈内感生电动势的和。即

$$E = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad (13.3)$$

式中 N 是多匝线圈的总匝数。

[例题 13.1] 在图 13.8 中,设匀强磁场的磁感应强度 $B=0.5$ 韦伯/米²,线圈电阻 $R=0.2$ 欧姆,而可动边的长度 $l=20$ 厘米,当它以 4 米/秒的速度向右运动时,问:(1)求线圈内的感生电动势和感生电流及其指向;(2)可动边向右运动时,外力多大?(3)求外力所作的功率和线圈内感生电流的功率。

解: (1) 根据公式(13.1),把已知数据代入,即可得出线圈内感生电动势

$$E = 0.5 \times 0.2 \times 4 = 0.4 \text{ 伏,}$$

再按欧姆定律公式,可以算出感生电流

$$I = \frac{E^*}{R} = \frac{0.4}{0.2} = 2 \text{ 安,}$$

根据右手定则,可以确定它们的指向是由 b 向 a 。

(2) 这时,可动边所受到的外力 F 在数值上等于感生电流所受的安培力 F' ,而方向则正相反。即

$$F = -F' = -BIl = -0.5 \times 2 \times 0.2 = -0.2 \text{ 牛顿,}$$

式中负号表示方向与安培力相反,是向右。

(3) 根据功率公式(3.7),可以算出外力所作的功率

$$N = Fv = 0.2 \times 4 = 0.8 \text{ 瓦,}$$

* 这里忽略了内压降,故 $U \doteq E$ 。

而根据电功率公式(11.21), 可以算出感生电流的功率

$$N = E \cdot I = 0.4 \times 2 = 0.8 \text{ 瓦}。$$

必须指出, 公式(13.1) 仅适用于直导线的运动方向和磁场方向互相垂直的情况。如果并不垂直, 两者之间有一定的角度 α , 如图 13.9 所示。这时直导线垂直切割磁力线的速度就等于速度 v 在垂直于磁场方向上的分量 $v_{\perp} = v \sin \alpha$ 。因此这时直导线内的感生电动势

$$E = Blv_{\perp} = Blv \sin \alpha, \quad (13.4)$$

上式比公式(13.1) 更具有普遍性。它表明, 当直导线的运动速度与磁场方向平行时, 即 $\alpha = 0^\circ$ 或 180° , 导线内感生电动势为零; 而当直导线的运动速度与磁场方向垂直时, 即 $\alpha = 90^\circ$, 导线内感生电动势最大, 为 $E = Blv$ 。

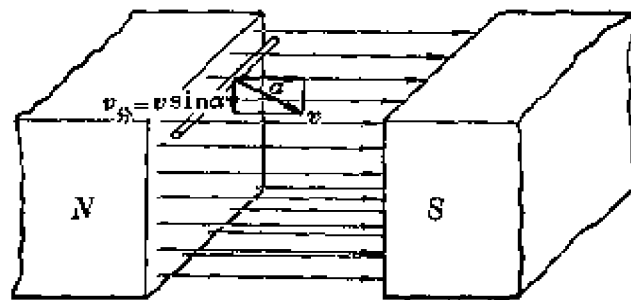


图 13.9 直导线在磁场中运动的方向与磁场方向成 α 角

[例题 13.2] 在 0.2 秒时间内把面积为 100 厘米²、总匝数为 500 的线圈在磁感应强度为 0.1 韦伯/米² 的匀强磁场中从线圈平面平行于磁场方向的位置偏转 90° 到达垂直于磁场的位置(图 13.10)。求在这段时间里感生电动势的平均值。

解: 按题意, 在 0.2 秒前线圈面积上的磁通量 $\Phi_0 = 0$; 在 0.2 秒后, 线圈到达垂直于磁场方向的位置时, 磁通量

$$\Phi = BA = 0.1 \text{ 韦伯/米}^2 \times 0.01 \text{ 米}^2 = 0.001 \text{ 韦伯}。$$

* 这里忽略了内压降, 故 $U = E$ 。

于是按公式(13.3), 可以算出线圈内的感生电动势

$$E = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 500 \cdot \frac{0.001 - 0}{0.2} = 2.5 \text{ 伏。}$$

从图 13.10 可以看出, 当线圈以 cd 为轴线偏转 90° 时, 实际在切割磁力线的是边 ab , 而由于边 ab 的运动方向与磁力线所成的角度时刻在变化, 因此线圈内的感生电动势的大小也时刻在变化, 并不是一个固定的数值。因此上述计算结果只表示线圈在这段时间里感生电动势的粗略平均值。

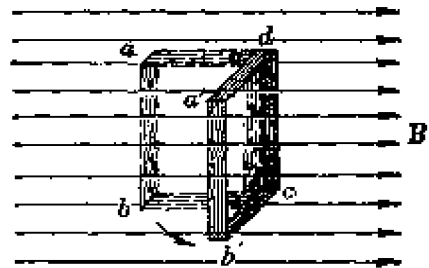


图 13.10

四、涡 电 流

不仅闭合线圈在磁场中的运动会引起感生电流, 即使一块金属在匀强磁场中旋转, 或者放在磁感应强度不断变化的磁场中, 同样也会引起感生电流。图 13.11 就是一个在匀强磁场中旋转的实心的金属圆柱体。我们可以设想圆柱体的各个截面是由许多金属导体的闭合回路所组成(图中虚线所示), 当圆柱体在磁场中旋转时, 这些闭合回路上的磁通量显然要发生变化, 因此在圆柱体内就产生许多环形的感生电流。又由于这种实心导体的电阻很小, 因而沿着环形方向流动的感生电流强度很大, 就仿佛象水中的旋涡一样, 通常把它叫做涡电流, 简称涡流。实验表明, 涡流的强度和方向与金属块本身的形状、材料性质以及磁通量的变化率、变化方向都有关

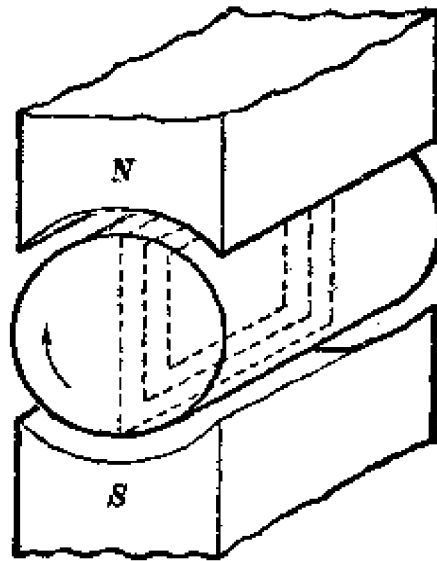


图 13.11

系,而金属块内涡流的分布也是相当复杂的。

一般说来,在电气设备的铁芯中产生的涡流是有害的。涡流引起的热效应会使铁芯发热,增加电能损耗,使电气设备的效率降低。因此为了设法减少涡流,一般电气设备的铁芯都是采用涂有绝缘漆的硅钢片一片片地迭合而成的(图 13.12)。这样涡流就只能被限制在硅钢片极薄的横截面内流动,同时由于硅钢的电阻率很大,从而增大了涡流路径上的电阻,达到了限制涡流的目的。

在认识了涡流的规律之后,人们不仅可以设法限制它,而

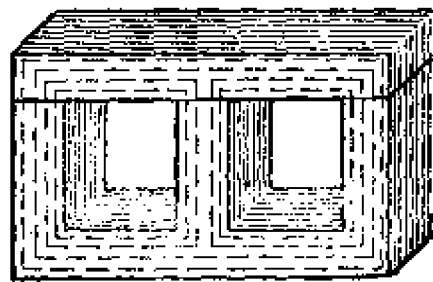


图 13.12

且还可利用它。冶金工业中常用的高频感应炉就是利用放在高频电流线圈中的坩埚内的金属块所产生的涡流的热效应来加热金属本身直到熔化的。又如图 12.28 的磁电式电工仪表, 由于灵敏度高, 在测量时往往指针摆动不停。为了使偏转的指针能很快地稳定在它所指示的刻度上, 需要有一个制动装置, 通常就是把动圈绕在一个铝框上, 利用在指针偏转的同时, 铝框内产生的涡流的磁效应来进行制动的。这一装置叫做电磁阻尼器。

习题 13.1 图 13.13 中 A 是接有电源的原线圈, B 是套在原线圈上的副线圈, M 是插在原线圈内的软铁芯, 它起着增强磁场的作用, 问: (1) 当原线圈里有强度一定的直流电通过时, 副线圈里是否有感生电流? 为什么? (2) 在把软铁芯插入或抽出的一瞬间, 副线圈里是否有感生电流? 在这两种情况下, 如何确定感生电流的指向?

习题 13.2 一矩形线圈在匀强磁场中作平动, 如图 13.14 所示。有人说这时线圈里有感生电流存在, 因为线圈是闭合的, 与磁场存在相对运动, 并且是在切割磁力线; 但也有人说这时线圈里没有感生电流, 因为在平动过程中, 线圈所包围的面积上磁通量没有发生变化。你认为哪一种说法正确?

习题 13.3 在图 13.15 中, B 是磁场方向, v 是在外力作用下的导线的运动方向, 导线中感生电流的指向用符号“ \odot ”或“ \otimes ”表示。试判断图 a 、 b 中导线运动的方向以及图 c 、 d 中感生电流的指向。

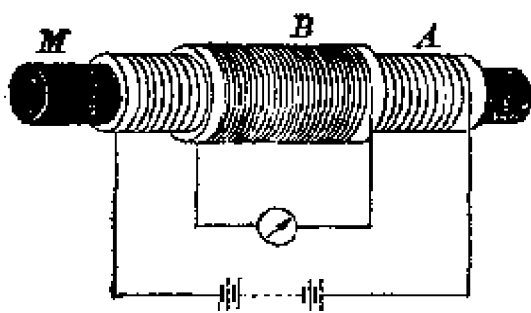


图 13.13

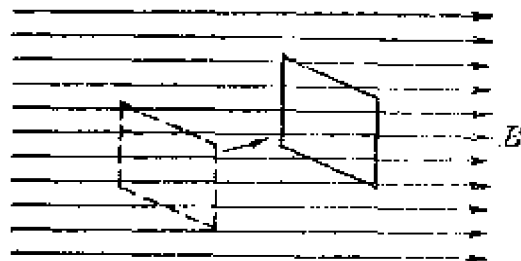


图 13.14

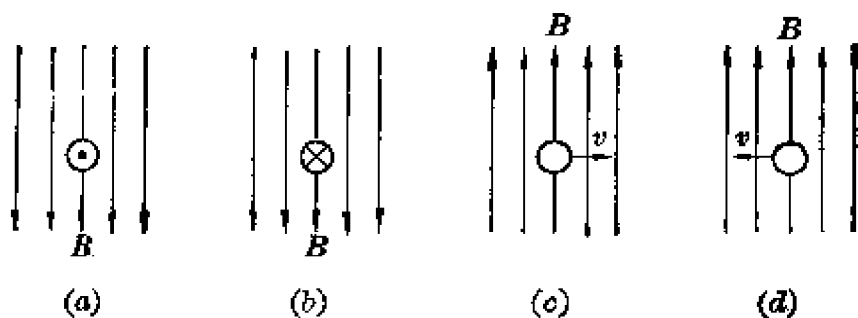


图 13.15

习题 13.4 长 0.3 米的直导线在磁感应强度为 0.05 韦伯/米² 的匀强磁场中在外力作用下沿着与磁力线垂直的方向以 3 米/秒的速度作匀速运动, 求导线两端的感生电动势。

习题 13.5 100 匝的闭合线圈在磁场中运动。已知在 0.5 秒内线圈面积上的磁通量从 0.002 韦伯增加到 0.0095 韦伯, 计算线圈里的感生电动势。如果线圈的电阻为 1000 欧姆, 计算线圈里感生电流的强度。

习题 13.6 在图 13.16 中, D 是一个可以绕固定轴 OO' 转动的铝盘。如果在它的边缘部分安放一永久磁铁, 那么原来在一定力矩的作用下作加速转动的铝盘, 当速度增大到一定程度时, 就不再增加而开始作匀速转动。试分析其原因。

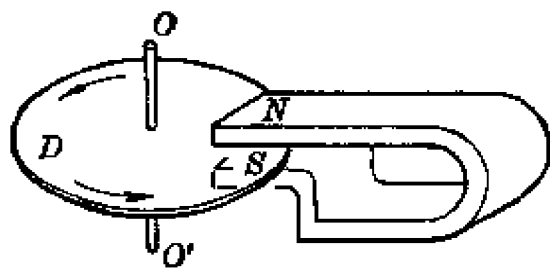


图 13.16

第二节 交流电的产生

一、交流发电机的工作原理

我们已经知道, 电磁感应现象可以把其他形式的能转化

为电能。根据这个原理，人们在长期的生产实践和科学实验中就逐步创造了发电机。

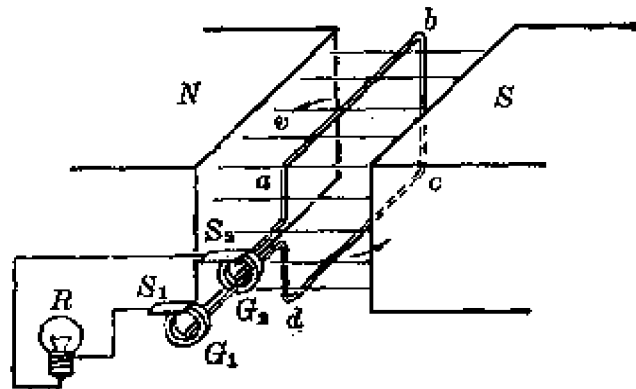


图 13.17 最简单的旋转电枢式发电机模型图

图 13.17 是一个最简单的发电机的模型图。它具有永磁体和电枢两个主要部分。图中 N 和 S 就是永磁体或电磁铁的两极，是固定不动的，因而叫做定子，在它们之间存在着很强的磁场。电枢是产生感生电动势的导体，实际上就是绕在铁芯上匝数很多的线圈，叫做绕组。它可以绕轴转动，因而叫做转子。图中 $abcd$ 表示电枢的一匝线圈。 G_1 、 G_2 是装在电枢转轴上的两个彼此绝缘的金属环，分别与电枢绕组的两端相连接，叫做集流环。 S_1 、 S_2 是固定在机座上的电刷，它们分别与 G_1 、 G_2 相接触，使电枢与外电路相连通。当电枢在原动力机的带动下作匀速转动时，线圈的 ab 和 cd 边在磁场中运动而始终在切割磁力线，从而使线圈面积上的磁通量的大小和方向不断在作周期性的变化，这样就在外电路上得到了强度和指向也在作周期性变化的感生电流。所以我们可以看到外电路上的小电珠 R 的亮度不断地由暗到亮，又由亮到暗地周期性地变化着。象这种强度和指向都在作周期性变化的电流就叫做交流电，上面的这种发电机就叫做交流发电机。

图 13.17 所示的转子是电枢的交流发电机叫做**旋转电枢式**发电机,它不能产生很大的电压,因为电枢内的电流是由裸露着的集流环和电刷通入外电路的,如果电压过高,电刷间就容易发生火花放电,甚至引起火灾。因此实际生产上使用的交流发电机几乎都是**旋转磁极式**的。这种发电机把电枢嵌在固定不动的由硅钢片迭成的铁芯槽中作为定子,而把一个可以旋转的电磁铁作为转子。转子的激磁线圈所需的直流电是通过电刷和类似集流环的滑环由外电源供给的。当电磁铁在原动力机的带动下作匀速转动时,它所产生的磁场也随着一起转动,从而使固定不动的电枢绕组面积上的磁通量不断发生周期性的变化。这样在电枢绕组里产生的交流电就可以直接通到外电路。由于转子(电磁铁)所需的直流电压至多不过 250 伏,不会在电刷间引起火花放电,因此这种发电机能产生 15000 伏以上的高压。

在火力发电站里,发电机是以蒸汽轮机为原动力机带动发电的;在水力发电站里,则利用水轮机带动发电的。所以发电机是以**磁场作为媒介把机械能转化为电能的装置**。

二、正弦交流电的变化规律

图 13.18 是旋转磁极式交流发电机的截面简图。要了解它所产生的感生电动势的变化规律,我们先来分析嵌在定子槽内的电枢绕组中一匝线圈 $abcd$ 的情况。当外来直流电通过电刷、滑环(图中未画出)进入电磁铁的激磁线圈时,由原动力机带动的转子就在定子内部产生了一个旋转的磁场,使定子绕组不断切割磁力线而产生感生电动势。根据电磁感应定律公式(13.1),可以列出线圈 $abcd$ 内的感生电动势

$$E = Blv,$$

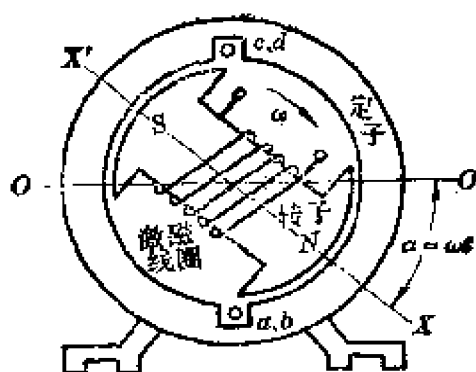


图 13.18 旋转磁板式交流发电机的截面简图

式中 l 是线圈 ab 和 cd 边长度的和 (参看图 13.19), 是个常量。如果转子的转速一定, 其角速度为 ω 弧度/秒, 那么 ab 和 cd 边切割磁力线的速度就等于转子相对于定子的线速度 $v = \omega r$ (这里 $r = \frac{bc}{2}$), 也是个常量, 而只是转子磁极周围的磁感应强度 B 不是常量, 因此线圈中感生电动势 E 只随线圈 ab 和 cd 边附近磁感应强度 B 的变化而变化。根据发电机转子上两个极面形状的设计, 转子周围的磁感应强度是沿着定子的内圆周按正弦函数的变化规律分布的。因此转子在转动中, 线圈 ab 和 cd 边附近磁感应强度的变化规律是

$$B = B_m \sin \alpha, \quad (13.5)$$

式中 B_m 是转子磁极中心线 XX' 处磁感应强度的最大值; α 是在转动中, XX' 与定子绕组中心线 OO' 间的夹角。因此定子线圈 $abcd$ 内的感生电动势也在按正弦函数规律变化。即

$$E = B_m l v \sin \alpha = E_m \sin \alpha, \quad (13.6)$$

式中 $E_m = B_m l v$, 是定子线圈 $abcd$ 内感生电动势的最大值。具体说来, 当转子转到图 13.19a 的位置时, 磁极中心线 XX' 与线圈中心线 OO' 重合, 即 $\alpha = 0$, 线圈内感生电动势

$E=0$ 。随着转子继续作顺时针方向的转动,相对地说线圈在作逆时针方向的运动,于是线圈中心线与磁极中心线间的夹角 α 角逐渐增大, B 也逐渐增大,线圈内开始出现感生电动势 E , 并逐渐增大。

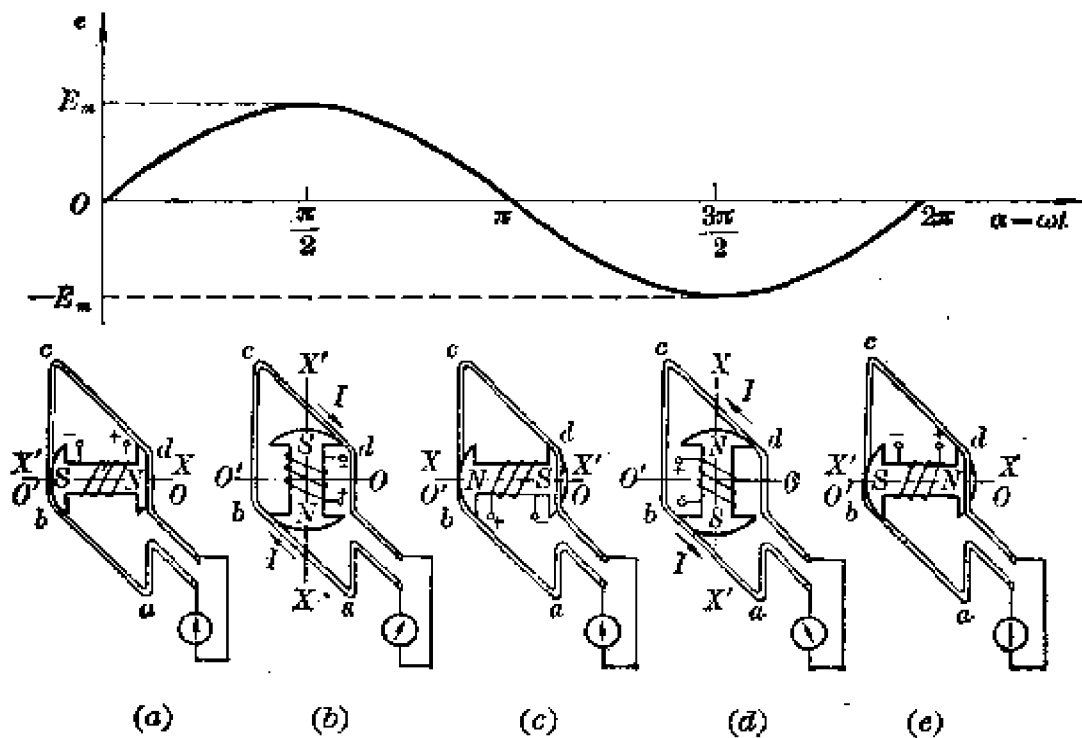


图 13.19 正弦交流电的变化规律

当转子转到图 13.19b 的位置时, $\alpha = \pi/2$, B 达到了它的最大值 B_m , 因而线圈内的感生电动势也达到了它的最大值, 即 $E = E_m = B_m l v$ 。由于转子是作顺时针方向的转动, 因此根据右手定则可以确定这时线圈内感生电动势以及感生电流的指向为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 。随着 α 角的继续增大, B 逐渐减小, 因而线圈内 E 也开始逐渐减小。

当转子转到图 13.19c 的位置时, $\alpha = \pi$, B 已减小到零, 线圈内 E 也减小到零, 但这时情况与位置 a 时并不完全相同。因为转子上两个磁极的位置正相反, 所以随着 α 角的继

续增大, B 虽开始增大, 但方向与前面相反, 从而使线圈内出现指向与前面相反的感生电动势。

当转子转到图 13.19d 的位置时, $\alpha = 3\pi/2$, $B = -B_m$, 因而 $E = -E_m$ 。这表明此时线圈内感生电动势虽又到达它的最大值, 但指向与位置 b 时正相反, 即为 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ 。随着 α 角的继续增大, B 逐渐减小, 因而线圈内 E 也在减小。

当转子转到图 13.19e 的位置时, $\alpha = 2\pi$, 情况就与位置 a 完全相同, 表明线圈内感生电动势的变化完成了一个周期。随着转子继续不断地匀速转动, 在线圈内就能不断获得大小和指向都按上述正弦函数规律作周期性变化的电动势。

以上分析的虽是一匝定子线圈的情况, 但对整个定子绕组说来, 公式 (13.6) 同样适用, 只是在感生电动势的最大值 E_m 的公式中还必须乘以绕组的总匝数 N , 即

$$E_m = NB_m l v_0 \quad (13.7)$$

如果转子在开始转动前, 磁极中心线 XX' 与定子线圈中心线 OO' 已成 φ 角, 那么按角速度 ω 匀速转动 t 秒后, XX' 与 OO' 间的夹角 $\alpha = \omega t + \varphi$, 这时定子线圈内感生电动势的即时值

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi_e) \quad (13.8)$$

实验表明, 把定子绕组与外电路连成闭合电路后, 对外电路的输出电压、电路上的感生电流也都按正弦函数规律变化。即

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u) \quad (13.9)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (13.10)$$

象这种随时间按正弦函数规律变化的交流电就叫做正弦交流电, 它是实际应用中和电工技术上最常用的交流电。

正弦交流电随时间的变化规律与简谐振动的位移随时间

的变化规律十分类似。只要同时掌握了它的最大值、频率(或周期、圆频率)和初相位,就可以作出它的波形图,并把任何时刻交流电的即时值找出来,因此通常把这三个数值叫做正弦交流电的三要素。最大值反映了变化的幅度,通常规定用大写字母并在右下角注 m 表示,如 E_m 、 U_m 、 I_m 分别表示交流电动势、电压、电流的最大值。而用小写字母 e 、 u 、 i 分别表示它们的即时值。频率 f 、周期 T 和圆频率 ω 反映了变化的快慢。正弦交流电的频率、周期与圆频率的关系同样是

$$f = \frac{\omega}{2\pi}, \quad (13.11)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (13.12)$$

在我国电力工业上所用交流电的标准频率 $f=50$ 赫芝。相位角 $\alpha = \omega t + \varphi$ 反映了变化的状态和变化趋势,初相位 φ 反映了变化的起始状态。在交流电路中, e 、 u 与 i 虽然频率相同,但它们在同一时刻的相位角可以不同,因此通常用 φ_e 、 φ_u 、 φ_i 分别表示它们的初相位,而把它们的初相位的差叫做它们的相位差。例如图13.20是某交流电路的交流电压 u 和交流电流 i 的波形图。从图上可以看出 u 的初相位为 $\pi/3$,而

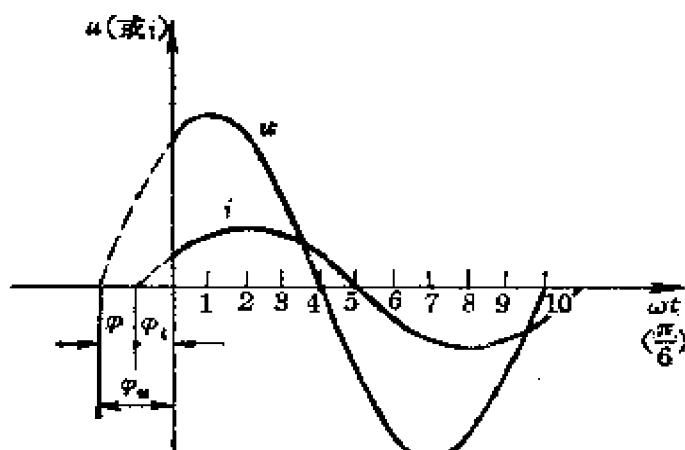


图 13.20 相位差

i 的初相位为 $\pi/6$, 因此 u 与 i 的相位差

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i, \quad (13.13)$$

即 $\varphi = \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{6} = \frac{\pi}{6}$, 表示 u 的相位比 i 超前 $\frac{\pi}{6}$ 弧度, 或 i 的相位比 u 落后 $\frac{\pi}{6}$ 弧度。

交流电的量值由于时刻在变化, 因此在实际应用中或在交流电路的计算中为了方便往往用交流电的有效值来表示。在两个阻值相同的电阻器内, 分别通以交流电 i 和直流电 I , 如果在相等的时间内, 这两个电阻器所产生的热量相等, 那么这一直流电 I 就叫做这种交流电 i 的有效值。同样这一直流电的电动势 E 、电阻器两端的直流电压 U 就分别叫做这种交流电动势 e 、交流电压 u 的有效值。交流电的各种有效值通常是用大写字母 E 、 U 、 I 表示的。实践和理论都表明, 正弦交流电的有效值就等于它的最大值的 $1/\sqrt{2}$ 倍。即

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \doteq 0.707 E_m, \quad (13.14)$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \doteq 0.707 U_m, \quad (13.15)$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \doteq 0.707 I_m. \quad (13.16)$$

通常在交流电器上所标出的以及由电工仪表上所测得的交流电量值都是指它们的有效值。

[例题 13.3] 一交流电源的输出电压 $u = 180 \sin 314 t$ 伏, 求它的频率、周期以及有效值。

解: 从交流电压的即时值 $u = 180 \sin 314 t$ 可以看出, 它的最大值 $U_m = 180$ 伏; 圆频率 $\omega = 314$ 弧度/秒。因此按

公式(13.11)、(13.12)、(13.15)即可算出它的频率、周期和有效值

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{314}{2 \times 3.14} = 50 \text{ 赫芝,}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2 \times 3.14}{314} = 0.02 \text{ 秒,}$$

$$U = 0.707U_m = 0.707 \times 180 = 127 \text{ 伏.}$$

两个直流电的量值相加可以用算术加法,但两个交流电的量值相加就不能简单地用算术加法。由于它们时刻都在变化,而且相位也可能不同,因此例如要找出两个频率相同的正弦交流电压

$$\begin{aligned} & \text{和} \quad u_1 = U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1) \\ & \quad \quad u_2 = U_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2) \end{aligned}$$

的合成电压 u ,就必须先分别作出它们的波形图,然后逐点相加才能得到合成电压 u 的波形图,如图 13.21b 所示。很明显,这种方法不仅麻烦,而且还不准确。如果在它们的参考圆上运用矢量加法来合成就方便多了。

就象利用参考圆作简谐振动图线一样,我们也可以利用

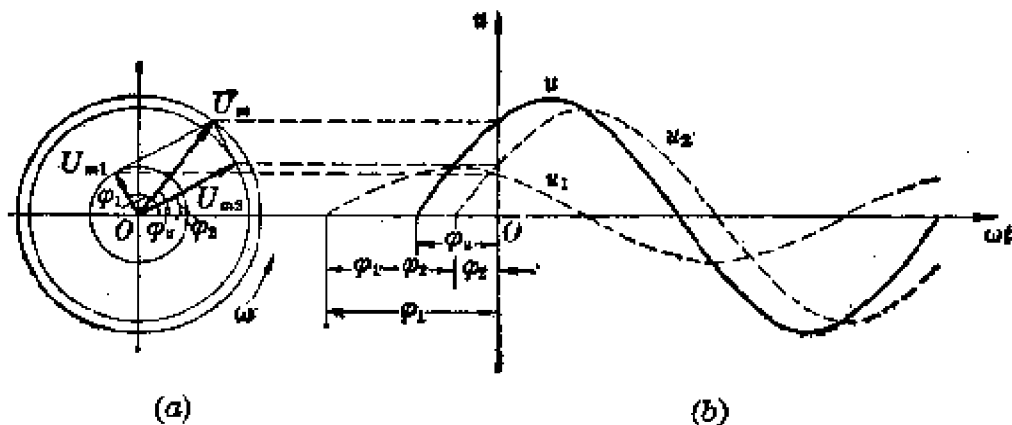


图 13.21 同频率正弦交流电压的合成

旋转矢量来作正弦交流电的波形图。例如取一矢量使其长度为最大值 U_m ，与水平轴成 φ_u 角，并以 ω 为角速度沿逆时针方向旋转，那么在任一时刻 t ，这一旋转矢量在纵轴上的投影就等于交流电压 u 在时刻 t 的即时值。因此在求 u_1 、 u_2 的合成电压 u 时，只要在同一原点上分别作出 u_1 、 u_2 的旋转矢量 U_{m1} 、 U_{m2} ，然后按平行四边形法则作出合矢量 U_m ，这就是它们的合成电压 u 的旋转矢量（图 13.21a），而 U_m 与水平轴的夹角就是合成电压 u 的初相位 φ_u 。可见分电压与合成电压间的数量关系是

$$U_m^2 = U_{m1}^2 + U_{m2}^2 + 2U_{m1}U_{m2}\cos(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (13.17)$$

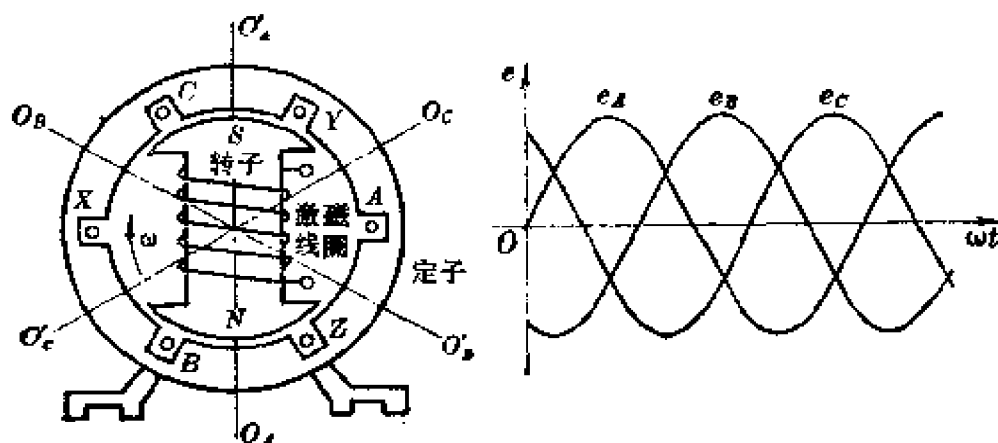
$$\operatorname{tg} \varphi_u = \frac{U_{m1} \sin \varphi_1 + U_{m2} \sin \varphi_2}{U_{m2} \cos \varphi_2 + U_{m1} \cos \varphi_1} \quad (13.18)$$

在实用上由于通常碰到的都是正弦交流电的有效值，因此我们也可以用各分量的有效值作为矢量的长度按上述方法直接找出合成量的有效值。

三、三相交流电

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。随着交流电的使用越来越广泛，为了适应生产发展的需要，人们又在上述交流发电机的基础上设制出一种三相交流发电机，它能同时发出三种相位不同的交流电，叫做三相交流电。

图 13.22 就是三相交流发电机的结构示意图。它的工作原理与图 13.18 的单相交流发电机基本相同，但在定子里嵌着三个形状、匝数、大小完全相同的绕组 AX 、 BY 、 OZ 。这三个绕组的中心线间互成 $2\pi/3$ 弧度。当转子在原动力机的带动下沿顺时针方向匀速转动时，电磁铁磁极周围的磁力线就



(a) 结构示意图 (b) 三相绕组内交流电动势的波形图

图 13.22 三相交流发电机

顺次被三个定子绕组所切割，因而在这三个绕组中都产生了按正弦函数规律变化的感生电动势。三个定子绕组由于结构相同，所产生的感生电动势的最大值都相同；又由于它们是在同一转子转动下产生的，因而周期、频率也完全相同。但三个绕组位置不同，因而它们的初相位就不同。如图 13.22 b 所示，若 AX 绕组内交流电动势的初相位 $\varphi_A = 0$ ，那么 BY、CZ 绕组内交流电动势的初相位依次为 $\varphi_B = -2\pi/3$ ， $\varphi_C = -4\pi/3$ 。由此可知，这三个绕组内交流电动势的即时值依次为

$$e_A = E_m \sin \omega t, \quad (13.19a)$$

$$e_B = E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right), \quad (13.19b)$$

$$e_C = E_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) = E_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right). \quad (13.19c)$$

这样三个电动势合称三相电动势。图 13.22 b 就是三相电动势的波形图。一般三相交流发电机的三相电动势都是对称的，这是指它们的最大值、频率以及彼此的相位差都相等。

三相交流发电机的各相绕组本是相互独立的，可以各自向外输送电能。但这样就需要六根输电线，很不经济。在实际生产中，这三相绕组总是适当联接在一起而向外输电的。具体联接的方法有星形和三角形两种。

星形联接法(又称 γ 接法) 把三相绕组的末端 X 、 Y 、 Z 联接在一起成为一公共的中点 O ，用导线和由三个外电路的一端联成的中点 O' 联接起来叫做**中线**(俗称地线)；再把三相绕组的始端 A 、 B 、 C 分别与三个外电路的另一端联成**相线**(俗称火线)的联接方法(图 13.23)。由于发电机有三相电动势，故在外电路中就有了三相电压和三相电流。这样的输电方式叫做**三相四线制**。

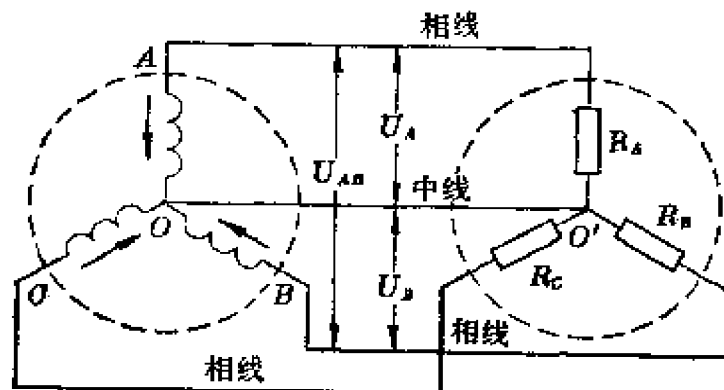


图 13.23 星形联接法——三相四线制

在三相四线制中，我们可以得到两种不同的电压——相电压和线电压。所谓**相电压**是指相线和中线间的电压，也就是每相绕组始端和末端间的电压，分别用它们的有效值 U_A 、 U_B 、 U_C 表示，在对称情况下可用 $U_{\text{相}}$ 表示。如果发电机绕组本身的电压降很小，可以略去，那么相电压就等于该相的电动势。通常规定各相始端指向中点为相电压的正方向。所谓**线电压**是指任意两相线间的电压，分别用它们的有效值 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 表示，在对称情况下可用 $U_{\text{线}}$ 表示。通常规定

U_{AB} 的正方向是由 A 相始端指向 B 相始端, 其余依次类推。因此从图 13.23 中可以看出线电压与相电压之间的关系:

$$U_{AB} = U_A + (-U_B), \quad (13.20a)$$

$$U_{BC} = U_B + (-U_C), \quad (13.20b)$$

$$U_{CA} = U_C + (-U_A)。 \quad (13.20c)$$

很明显, 在上式中我们不能简单地用算术加法, 必须通过它们的旋转矢量按平行四边形法相加, 如图 13.24 所示。因此从图上可以推算出它们之间的数量关系:

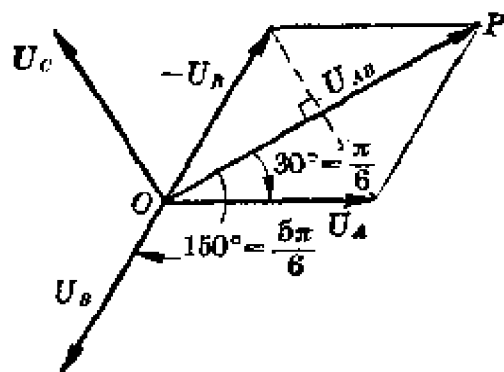


图 13.24 星形联接中相电压与线电压间的关系

$$U_{AB} = 2 U_A \cos 30^\circ = \sqrt{3} U_A,$$

即
$$U_{\text{线}} = \sqrt{3} U_{\text{相}}。 \quad (13.21)$$

而线电压 U_{AB} 的相位比相应的相电压 U_A 、 U_B 依次超前 $\pi/6$ 、 $5\pi/6$ 弧度。例如一般低压供电系统都采用三相四线制, 其线电压 $U_{\text{线}} = 380$ 伏, 由公式 (13.21) 可知其相电压

$$U_{\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ 伏。}$$

常用的照明电路就是从这种三相四线制的输电线路取一根相线和一根中线组成的 (图 13.25)。

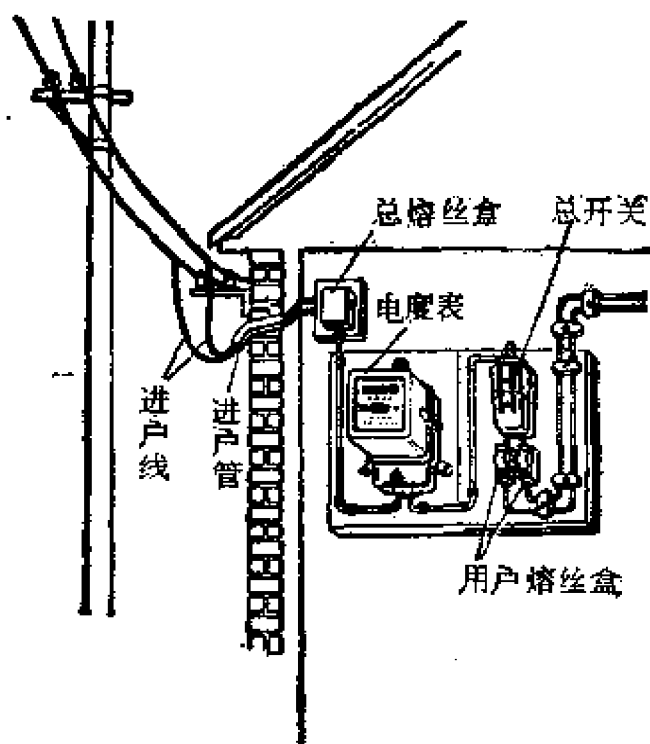


图 13.25 常用照明电路的组成

把外电路和三相电源接通后,就有交流电通过电路。在外电路中,通过各相负载的电流叫做相电流,用有效值 $I_{\text{相}}$ 表示;而通过各相线的电流叫做线电流,用有效值 $I_{\text{线}}$ 表示。

当电源与负载都作星形联接时,从图 13.23 中可以看出,流过负载的相电流就等于相线上的线电流,因此在负载对称时,可以列出

$$I_{\text{线}} = I_{\text{相}} \quad (13.22)$$

此外从图 13.23 上还可以看出:中线上的电流是由各相电流汇聚而成,即

$$I_0 = I_A + I_B + I_C \quad (13.23)$$

根据矢量加法可知,当负载对称时,中线上的电流 $I_0 = 0$ 即中线上没有电流通过。这时中线可以省去。

三角形联接法(又称 Δ 接法) 把各相绕组的末端与相

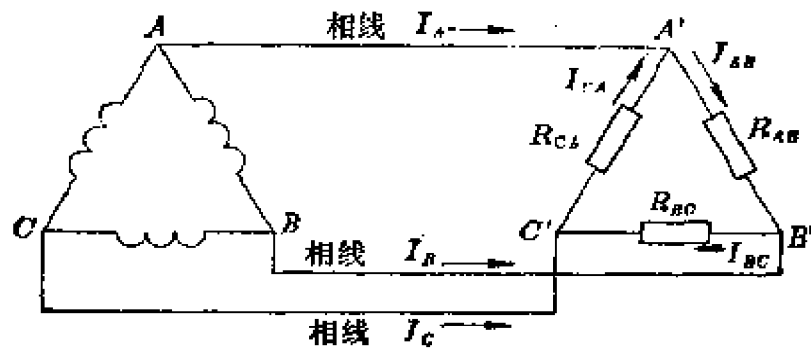


图 13.26 三角形联接法——三相三线制

邻绕组的始端依次联接成三角形回路，同时把三个负载也联接成三角形回路；再从 A 、 B 、 C 三顶点引出三根导线分别与负载三顶点相连的联接方法（图 13.26）。在这种情况下，只有三根相线对外供电。这样的输电方式叫做三相三线制。

在三相三线制中，从图 13.26 可以看出，电源和负载上的相电压就是线电压。于是可以列出

$$U_{\text{相}} = U_{\text{线}} \quad (13.24)$$

但负载的相电流 I_{AB} 、 I_{BC} 、 I_{CA} 却并不等于线电流 I_A 、 I_B 、 I_C 。由于对某一点说来，流进的电流等于流出的电流，因此可以列出如下的关系：

对于 A' 点

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} \quad (13.25a)$$

对于 B' 点

$$I_B = I_{BC} - I_{AB} \quad (13.25b)$$

对于 C' 点

$$I_C = I_{CA} - I_{BC} \quad (13.25c)$$

同样，在负载对称情况下按矢量加法（图 13.27），可以推算出线电流与相电流的数量关系；

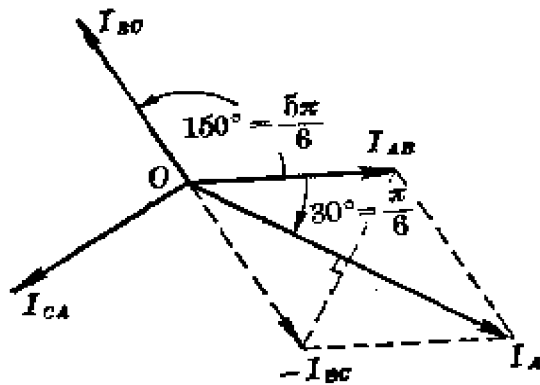


图 13.27 三角形联接中相电流与线电流间的关系

$$I_A = 2 I_{AB} \cos 30^\circ = \sqrt{3} I_{AB},$$

即

$$I_{线} = \sqrt{3} I_{相} \quad (13.26)$$

而线电流 I_A 的相位比相应的相电流 I_{AB} 、 I_{CA} 依次落后 $\pi/6$ 、 $5\pi/6$ 弧度。

以上讨论的是发电机绕组(电源)和外电路负载都按星形联接或都按三角形联接的情况。一般说来,电源按星形联接比较普遍,因为能提供两种不同的电压,随意选用;负载也都是按星形联接的,因为只有三相对称固定不变的负载才能按三角形联接。否则会在电源的绕组回路中引起环电流而使绕组发热,甚至烧毁发电机。此外,电源在按三角形联接时,三



图 13.28 我国首创的 12 万 5 千瓩双水内冷三相汽轮发电机组

个绕组一定要顺次相联,不可接错,否则也会在三角形联接的三个绕组内部引起环电流而烧坏绕组。

大型发电机在发电过程中,定子和转子都要发热,如果温度过高就会烧坏绕组,因此需要冷却设备。图 13.28 就是我国首创的十二万五千瓩双水内冷三相汽轮发电机组。

习题 13.7 已知一单相旋转磁极式交流发电机每匝定子线圈长 35 厘米、宽 30 厘米,共 60 匝。 B_m 为 500 高斯,转子频率 f 为 50 赫芝, φ 为 $\pi/3$ 弧度。求时刻 t 的电动势 e 。

习题 13.8 已知某交流电路上, $u=311 \sin(100\pi t - \pi/3)$ 伏; $i=10 \sin(100\pi t - \pi/6)$ 安。求它们的最大值、有效值、频率、周期、初相位以及电压与电流的相位差。

习题 13.9 说明图 13.29 中的三相负载各是按什么方法联接的。

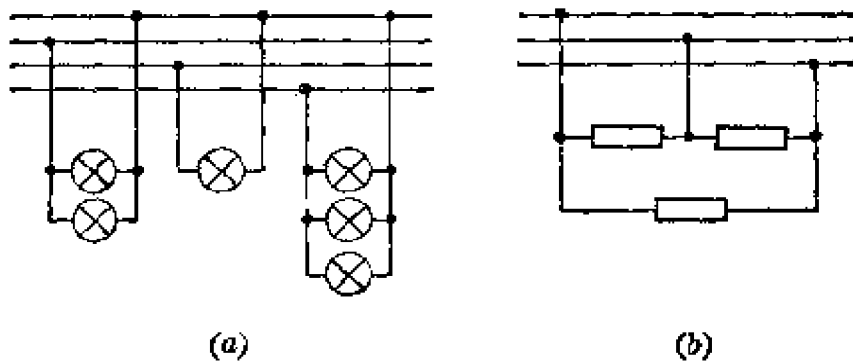


图 13.29

第三节 几种简单的交流电路

我们已经掌握了反映直流电路一般规律的欧姆定律。在交流电路中,由于电流和电压的大小、指向都在作周期性的变化,同时在交流电路里除电阻外还有电感和电容元件,它们对交流电的作用也不相同。因此交流电路里电流和电压的关系要比直流电路复杂得多。为了掌握交流电路的基本规

律, 必须弄清各种元件在交流电路中的性质, 即掌握元件两端的交流电压与通过的交流电流之间的关系以及它在交流电路中所消耗的功率情况。必须特别指出: 这里所谓交流电压与交流电流间的关系不仅包括它们的最大值或有效值间的数量关系, 而且还包括它们之间的相位关系。

一、纯电阻交流电路

从室外输电线上接一根相线和中线到室内来, 并联几盏电灯, 如图 13.30a 所示(图中 R 表示几盏并联电灯的电阻), 这样就组成纯电阻交流电路。

在纯电阻交流电路中, 虽然电流和电压时刻都在变化, 但通过电阻器的电流总是随着电压的增大而增大, 减小而减小的。因此它们始终存在着正比关系, 而且相位完全相同, 并不存在相位差, 即电流和电压同相(图 13.30b)。所以直流电路的欧姆定律对它依然适用。假设交流电压为 $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, 电路中的总电阻为 R , 那么通过电路的电流在时刻 t 的即时值

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t + \varphi) = I_m \sin(\omega t + \varphi)。 \quad (13.27)$$

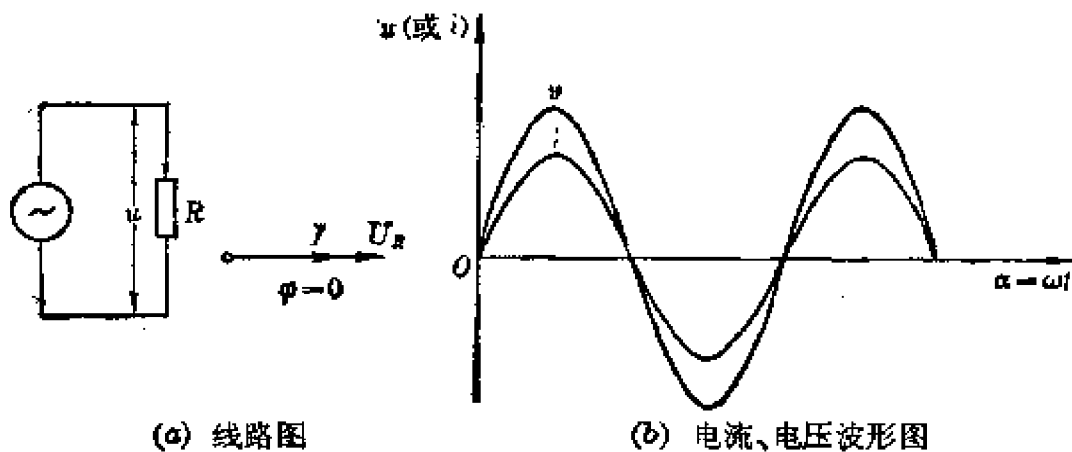


图 13.30 纯电阻交流电路

在实际计算中,为了方便也可按它们的有效值计算,即

$$I = \frac{U_R}{R} \quad (13.28)$$

二、纯电感交流电路

图 13.31 是日光灯照明电路的实物图和线路图。它是由日光灯管、镇流器和起辉器三个主要部件组成的。日光灯管是一种气体放电管(图13.32),管内已抽真空而充有少量的氩气和微量的水银,玻璃管壁上涂有一层荧光粉。在管的两端

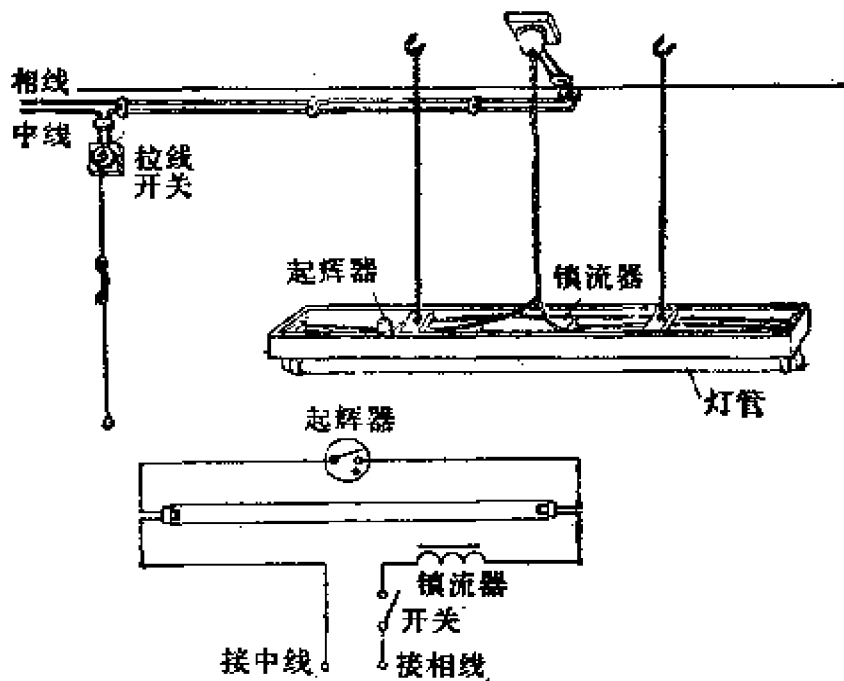


图 13.31 日光灯照明电路

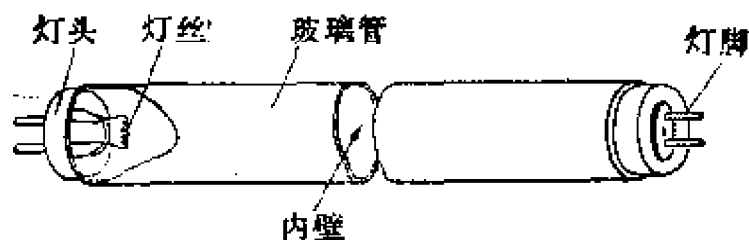


图 13.32 日光灯管的构造

分别装有一组灯丝，灯丝上涂有容易发射电子的电子粉。日光灯就是通过灯管内的气体在放电时将电能转化成光能。

镇流器有什么作用呢？日光灯管在开始启动的一瞬间需要极高的高电压，因为灯管两端的灯丝只有在高电压下才能使管内的水银蒸汽在电子的冲击下电离而发生辉光放电，同时辐射出大量的紫外线。管壁上的荧光粉就在紫外线的激发下发出近似日光的可见光。灯管一旦正常发光后，两端的电压就只需维持在 110 伏以下，否则灯管中电流不断增大，就会把灯丝烧毁。镇流器的作用就是在启动的一瞬间在线路中产生一高电压使灯管产生辉光放电，而在日光灯正常工作时则对灯管起限流作用。

为什么镇流器能起这样的作用呢？把它拆开就可以看到它是一个带铁芯的线圈（图 13.33）。把电灯 A 和镇流器 L

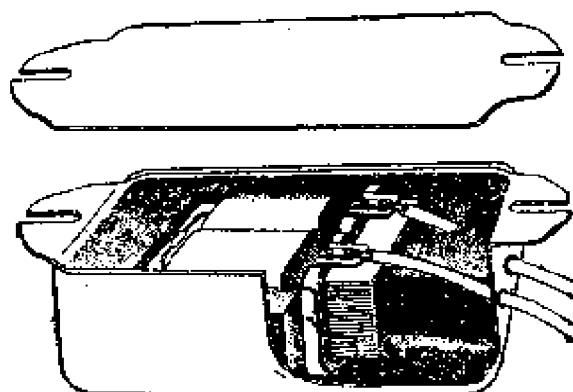


图 13.33 镇流器

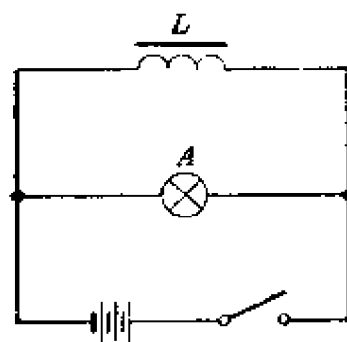


图 13.34

并联后一起接在直流电路中，如图 13.34 所示。可以看到当原来接通的电路突然切断时，电灯 A 并不马上熄灭，而在熄灭之前的一瞬间会发出闪光，表明在切断电路的一瞬间，通过电灯 A 的电流并不立即消失。这是什么原因呢？原来在电路切断的一瞬间，随着通过镇流器的电流的迅速减小，线圈内的磁通量也迅速减小。于是在线圈中就产生感生电流来阻碍原来电流的减小。电灯在电源切断后并不立即熄灭正是由于镇流器线圈中存在感生电流。感生电流是由感生电动势产生的，由于这个感生电动势是线圈自身磁通量的变化而引起的，因而叫做自感电动势，通常用字母 E_L 表示。

根据电磁感应定律可知，自感电动势的大小是和线圈中磁通量的变化率成正比的，而磁通量的变化率又是和线圈内原电流的变化率成正比的，因此自感电动势的大小与线圈内原电流的变化率成正比。即

$$E_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (13.29)$$

式中比例系数 L 叫做自感系数，简称电感。它决定于线圈的几何形状、大小、匝数以及铁芯的磁导率。式中的负号表示自感电动势的指向总是与原电流的变化趋向相反。当原电流增大时，变化率 $\Delta I/\Delta t$ 是正值，自感电动势 E_L 就是负值；当电流强度减小时，变化率 $\Delta I/\Delta t$ 是负值，自感电动势 E_L 就是正值。在实用单位制中，电感 L 的单位是伏·秒/安，又称亨利，简称亨，用字母 H 表示。比亨利小的单位还有毫亨 (mH) 和微亨 (μH)。它们之间的换算关系是

$$1 \text{ 亨 (H)} = 1000 \text{ 毫亨 (mH)};$$

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

电感反映了线圈本身产生自感电动势本领的大小。日光

灯镇流器的电感较大, 约为 $1\sim 2$ 亨, 日光灯在启动时正是利用镇流器在一瞬间的自感作用而获得极高的高电压的, 而起辉器在这中间就起了切断电路的作用。除掉起辉器的铝壳, 就可以看到一个小玻璃泡, 和一个电容器并联着 (图 13.35), 泡内有 U 形双金属片*和静触片。由于这两片原来是分离的, 因此当开始按下开关时 (图 13.31) 电路并不通, 这时氖泡就在电源电压的作用下在两片间产生了辉光放电而发出红光, 同时双金属片由于受热而逐渐弯曲, 直到与静触片接触而接通电路后氖泡内的辉光放电就结束了。于是双金属片又因冷却收缩而自动切断电路。镇流器内的自感电动势就是在双金属片突然切断电路的一瞬间产生的。由于起辉器的起辉电压是 135 伏, 而在日光灯管正常工作时, 起辉器两端电压已降到 110 伏以下, 因此两片间就不能再产生辉光放电。

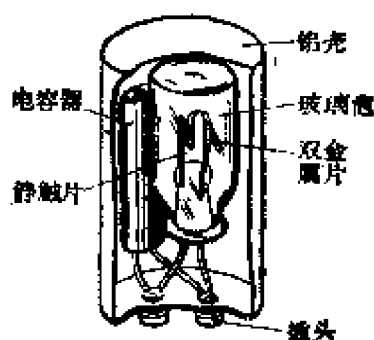


图 13.35 起辉器的结构简图

除镇流器外, 在各种电子仪器如收音机、扩音机中所用的各种线圈, 不论是否带铁芯, 都具有一定的电感。因而统称电感器。此外象电机、变压器、电磁铁等电器在断开电路的一瞬间, 由于自感作用也会产生有害的高电压, 在断路的闸刀开关

* 有关双金属片的原理详见上册第 250 页。

处的空气间隙变成导体而形成电弧，甚至引起事故。因此在这些电路的开关处通常都设有各种灭弧装置，即采用加强冷却电弧的方法，使电弧迅速熄灭。

在日光灯正常工作时，镇流器为什么还具有限流作用呢？把电感器接到交流电路中，由于交流电的强度随时间周期性的变化，因此在电感器中就会产生相应的自感电动势，而它的指向总是阻碍着交流电的变化。所以一切电感器包括镇流器都对交流电有阻碍作用。电感越大，交流电的频率越高，这种阻碍作用就越大。通常把电感器对交流电的阻碍作用叫做感抗，用字母 X_L 表示。精确的实验表明，电感器对交流电的感抗 X_L 与它本身的电感 L 以及交流电的频率 f 存在着下列关系：

$$X_L = 2\pi fL = \omega L。 \quad (13.30)$$

在实用单位制中，当 f 的单位为赫芝， L 的单位为亨利时， X_L 的单位就是欧姆。

[例题 13.4] 一高频扼流圈，电感为 5 毫亨，问它对 550 千赫的高频信号以及对 10 千赫的音频信号的感抗各是多少？它对直流电又有什么影响？

解：已知扼流圈电感 $L = 5$ 毫亨 $= 0.005$ 亨，根据公式 (13.30) 可以算出，当 $f = 550000$ 赫时，其感抗

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 550000 \times 0.005 \doteq 17280 \text{ 欧，}$$

当 $f = 10000$ 赫时，感抗

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 10000 \times 0.005 \doteq 314 \text{ 欧，}$$

对于直流电说来 $f = 0$ ，因而 $X_L = 0$ 。

从上面的例题可以看出：电感器对直流电没有阻碍作用，因此在电路中电感器具有通直流，阻交流的作用；电感器对频率越高的交流电感抗越大，因此在收音机线路中电感器具有

通低频,阻高频的作用。

忽略了电感器的电阻,由这样的电感器组成的交流电路叫做纯电感交流电路(图 13.36a)。在纯电感交流电路中,电压和电流的关系在形式上仍有欧姆定律的形式,即

$$I = \frac{U}{X_L}, \quad (13.31)$$

式中 I 、 U 都是有效值。但是应当注意:在纯电感电流中,电流和电压之间除了大小有一定关系外,它们彼此间还有一定的相位关系。实践和理论表明,在纯电感交流电路中,电感两端的电压 u 的相位要比电流 i 超前 $\pi/2$ 弧度(图 13.36b)。

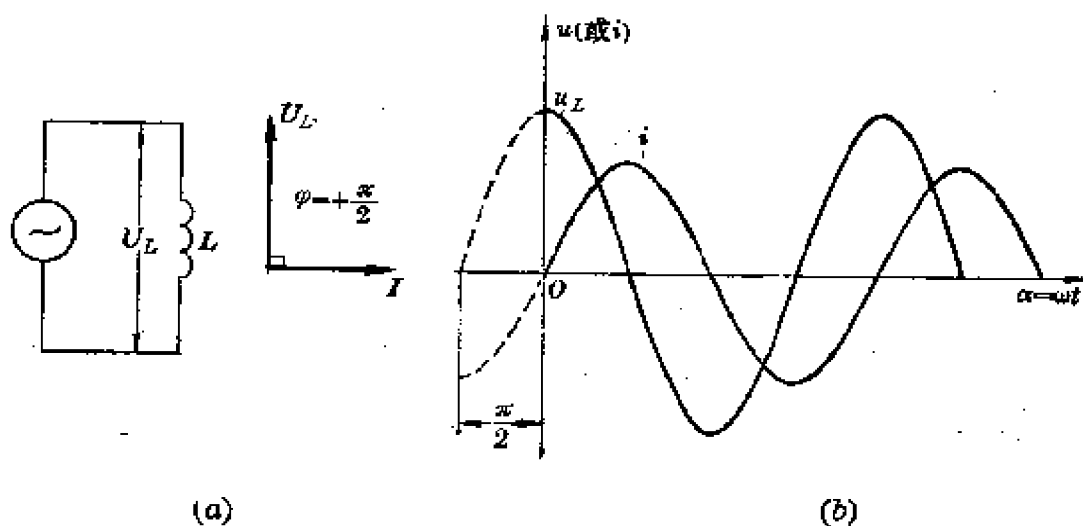


图 13.36 纯电感交流电路

[例题 13.5] 已知某线圈的电感 $L=127$ 毫亨,今在它两端接上交流电压 $u=120\sqrt{2} \sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$ 伏,求线圈的感抗和在时刻 t 时通过线圈电流的即时值。

解: 根据 $u=120\sqrt{2} \sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$ 可知, $U_m =$

120 $\sqrt{2}$ 伏, $\omega = 100\pi$ 弧度/秒, 而线圈的电感 $L = 0.127$ 亨, 因此按公式(13.30), 可以算出线圈的感抗

$$X_L = \omega L = 100\pi \times 0.127 \doteq 39.9 \text{ 欧。}$$

同时从电压的有效值 $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 120$ 伏, 按公式(13.31)可知, 通过线圈电流的有效值

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{120}{39.9} = 3 \text{ 安。}$$

于是可以推知, 通过线圈的电流的最大值 $I_m = \sqrt{2} I = 3\sqrt{2}$ 安。又因这时电流 i 的相位要比电压 u 落后 $\pi/2$ 弧度, 可见在时刻 t 时, 通过线圈的电流的即时值

$$\begin{aligned} i &= 3\sqrt{2} \sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2}\right) \\ &= 3\sqrt{2} \sin\left(100\pi t - \frac{\pi}{4}\right)。 \end{aligned}$$

三、纯电容交流电路

下面先来研究日光灯起辉器内和氖泡并联着的电容器的作用。电容器是储存电荷的容器, 简称电容。它的种类很多, 按其绝缘介质的不同来分, 有空气电容、纸质电容、云母电容和金属膜电容等; 按其电容量是否固定来分, 又有固定电容、可变电容和微调电容等等。但它们的构造基本相同, 都是由两片平行金属片和夹在中间的绝缘介质组成, 而两金属片的引出线即为电容器的两极(图 13.37)。

把电容器接在直流电路中, 如图 13.38a 所示。当开关 K 拨在位置 1 的一瞬间(图 13.38b), 可以看到电流表的指针偏到一定刻度后又很快回复到零点。电容器两极片上原来并

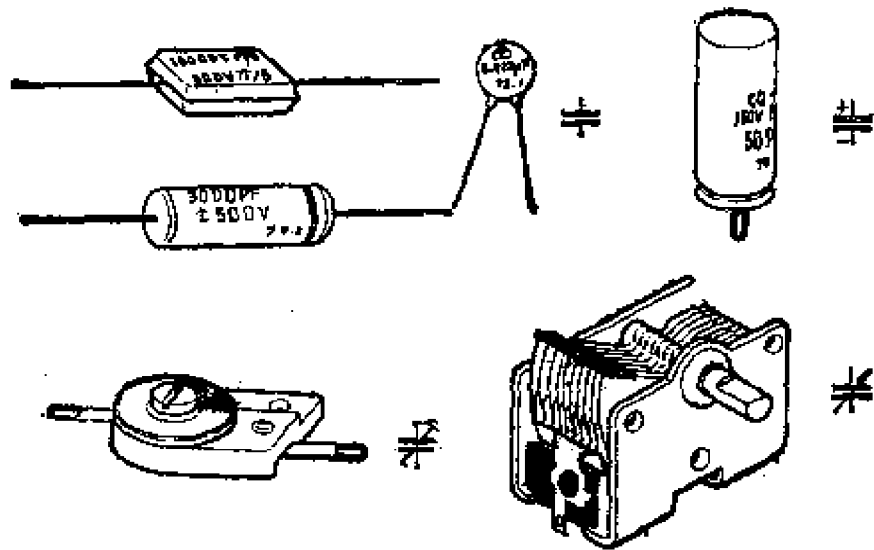


图 13.37 电容器的种类

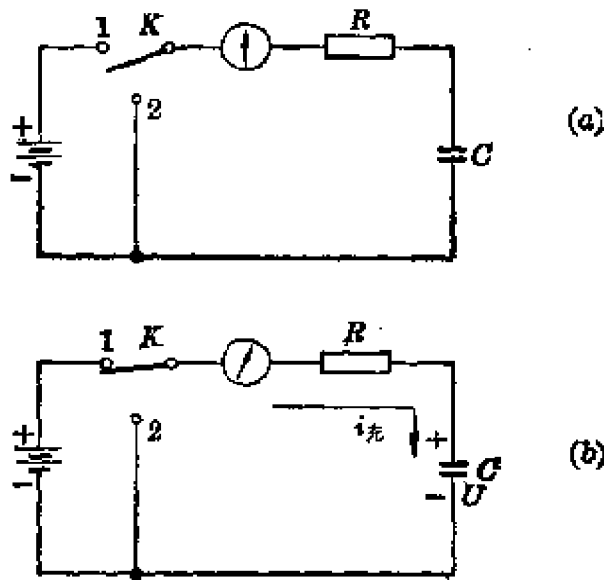


图 13.38 电容器的充电过程

不带电，在接通直流电源的一瞬间，由于电路中电荷的移动，使电容器的上极片失去电子而带正电；下极片堆积电子而带负电。这个过程叫做电容器的充电。这一瞬间形成的电流叫做充电电流 $i_{充}$ 。当电容器两极片间的电压 U 接近于电源的端电压时，充电电流就减小到零，电容器就结束了充电过程。

如果改变电源的端电压,可以看到对于同一电容器说来,所加电压越高,在充电一瞬间电流表指针的偏转越大,表明充电电流越大,电容器两极片上所储存的电量也越多。进一步的实验指出:电容器上的电量 q 是与加在它两极片间的电压 U 成正比的。即

$$q = CU, \quad (13.32)$$

式中的比例系数 C 反映了电容器储存电荷本领的大小,叫做电容器的电容量,简称电容。在实用单位制中,电容的单位是库仑/伏特,又称法拉,简称法,用字母 F 表示。这个单位很大,除了动力网中常用的大型电容器外,一般都以比法拉小得多的微法(μF)、微微法($\mu\mu F$ 或 pF)为单位。它们之间的换算关系是:

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

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

不同的电容器,电容量可以不同。实验表明:组成电容器的两极片的相对面积越大,极片间的距离越小,电容量就越大。此外,电容器的电容量还与极片间的绝缘介质有关。在极片相对面积和极片间距离保持一定的情况下,电容器极片间充满某种绝缘介质时的电容就等于没有介质(真空)时的电容的 ϵ 倍, ϵ 为这种绝缘介质的介电常数。

实际电容器除电容大小外,还有一个耐压性能。这是指电容器的额定工作电压(耐压值),如果超过这个电压,电容器极片间介质的绝缘性就会被破坏,电容器将被击穿。例如纸质电容虽然电容范围可以很大,成本低,但不耐压;而云母电容稳定性好,耐压高,但电容值不太大。

怎样才能提高同类型电容器的耐压性能呢?实验表明把几个电容器串联起来就可以提高额定工作电压。假设把电容

分别为 C_1 、 C_2 的两个电容器串联成电容组后接入电路, 如图 13.39 所示。从图上可以看出各串联电容以及串联电容组所

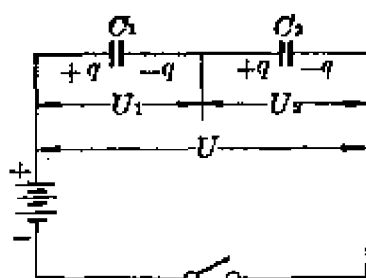


图 13.39 串联电容组

带电量都相等, 设为 q 。由于它们电容不等, 电压就各不相同, 设它们的电压分别为 U_1 、 U_2 、 U 。于是根据公式(13.32), 可以列出:

$$U_1 = \frac{q}{C_1}; \quad U_2 = \frac{q}{C_2}; \quad U = \frac{q}{C},$$

式中 C 就是串联电容组的电容。根据串联电路 $U = U_1 + U_2$, 得

$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2},$$

即

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (13.33)$$

上式表明: 串联电容组的电容的倒数等于各串联电容的倒数的和。可见电容串联后, 额定工作电压可以提高, 但电容减小了。例如两个相同的电容器串联后, 额定工作电压可以提高一倍, 但电容却只有原来的一半。因此当电容器的电容太大或耐压太小时可采用串联的方法。

[例题 13.6] 由 300 pF 、 900 V 和 200 pF 、 500 V 两电容器串联而成的电容组能耐 1000 V 的高电压吗?

解：必须注意，由不同电容形成的串联电容组的耐压值不能简单地用各串联电容耐压值的和来判断，而要分别考虑各串联电容所承担的电压是多少。在电路中，由于各串联电容所带的电量相等，所以它们所承担的电压是与它们各自的电容成反比的，即

$$q = U_1 C_1 = U_2 C_2。 \quad (13.34)$$

按题意：设 $C_1 = 300 \text{ pF}$ 、 $C_2 = 200 \text{ pF}$ ，它们在电路中各自承担的电压的比为

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1} = \frac{200 \text{ pF}}{300 \text{ pF}} = \frac{2}{3}。$$

当外加总电压 $U = U_1 + U_2 = 1000 \text{ 伏}$ 时， $U_2 = 1000 - U_1$ ，代入上式得

$$U_1 = \frac{2}{3} U_2 = \frac{2}{3} (1000 - U_1)，$$

故

$$U_1 = 400 \text{ 伏}； U_2 = 600 \text{ 伏}。$$

可见 U_2 将超过它的耐压值，表明串联电容组不能耐 1000 伏高电压。但如改用两只 200 pF 、 500 V 的电容器串联，则每只电容器承担的电压只有 500 V ，这样的电容组就能耐 1000 V 的高压了。

上面讨论了提高耐压问题，下面来讨论提高同类型电容器的电容量问题。实验表明，把几个电容器并联起来就可以提高电容量。假设把电容分别为 C_1 、 C_2 的两个电容器并联成电容组接入电路，如图 13.40 所示。从图上可以看出并联电容组所带的电量就等于各并联电容所带电量的和，即

$$q = q_1 + q_2。$$

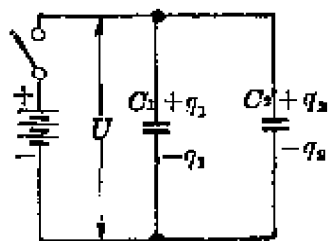


图 13.40 并联电容组

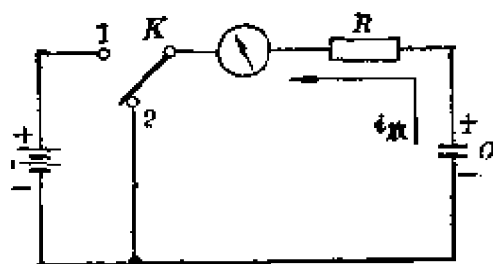


图 13.41 电容器的放电

设并联电容组的总电容为 C ，根据并联电路电压相等，并按公式(13.31)可以列出

$$q = CU; q_1 = C_1U; q_2 = C_2U,$$

代入上式, 可得

$$CU = C_1U + C_2U,$$

即

$$C = C_1 + C_2. \quad (13.35)$$

上式表明: 并联电容组的电容就等于各并联电容的和。因此当电容器电容不够大时, 可采用并联的方法来增大电容。很明显, 电容并联后, 耐压值并没有提高, 并联电容组的耐压值就等于并联电容中最小的耐压值。

由于电容器的两极片间存在着绝缘介质, 因此电容器在直流电路中, 只有在开始一瞬间存在充电电流, 一旦充电过程结束电流就随即消失。所以电容器在电路中具有隔直流的作用。

当电容器的充电过程结束后, 如果把开关 K 拨向位置 2 (图 13.41), 可以看到在开关拨到位置 2 的一瞬间, 电流表的指针反向偏转到一定刻度后又很快回复到零点。原来在充电后的电容器的两极片间存在一定的电压, 当断开电源而电容器两极片接通后, 积累在两极片上的正负电荷就在电

场力的作用下通过电阻 R 各自向相反的极片移动。这一过程叫做电容器的放电。在这一瞬间形成的与充电电流指向相反的电流，叫做放电电流 $i_{\text{放}}$ 。当电容器两极片间的电压减小到零时，放电电流也减小到零，电容器就结束了放电过程。

实验表明，电容器充放电时间的快慢决定于它的电容 C 和电路中的电阻 R 的乘积，即回路的时间常数

$$\tau^* = RC。 \quad (13.36)$$

如果把电容器接在交流电路中，在前半个周期中，电压增大时对电容器充电，电路中有充电电流，而在电压减小时电容器放电，电路中有放电电流；在后半个周期中，情况也一样，只是电容器进行了指向相反的充放电，而电路中依然有电流存在。这表明电容器在电路中具有通交流的作用。然而电容器对交流电也有一定的阻碍作用，通常把电容器对交流电的阻碍叫做容抗，用字母 X_C 表示。精确的实验表明，电容器对交流电的容抗 X_C 与它本身的电容 C 以及交流电的频率 f 存在着下列关系：

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C}。 \quad (13.37)$$

在实用单位制中，当 f 的单位为赫芝， C 的单位为法拉时， X_C 的单位就是欧姆。从上式中可以看出，电容器的容抗与电感器的感抗情况恰恰相反。电容越大，交流电的频率越高，容抗反而越小。因此电容器在收音机线路中具有通高频阻低频的作用。在日光灯起辉器内的小电容就是用来短路在日光灯管工作时产生的高频电流，以免干扰附近的电讯装置。

在忽略电阻和电感的纯电容交流电路中，电流和电压的关系为

* τ 希腊字母，读作“tau”。

$$I = \frac{U}{X_C}, \quad (13.38)$$

式中 I 、 U 都是有效值。我们已经知道, 电容器在交流电路中具有充放电的特性。当电容器两极间存在交变电压时, 在两端电压由零到最大值的的过程中, 电容器充电, 电流由最大到零; 当两端电压由最大值降到零的过程中, 电容器放电, 电流由零到最大。这样就使电路中电流的变化与电压的变化存在一定的相位差。实践和理论计算表明, 在纯电容电路中, 电容两端的电压 u 的相位要比电流 i 落后 $\pi/2$ 弧度 (图13.42)。

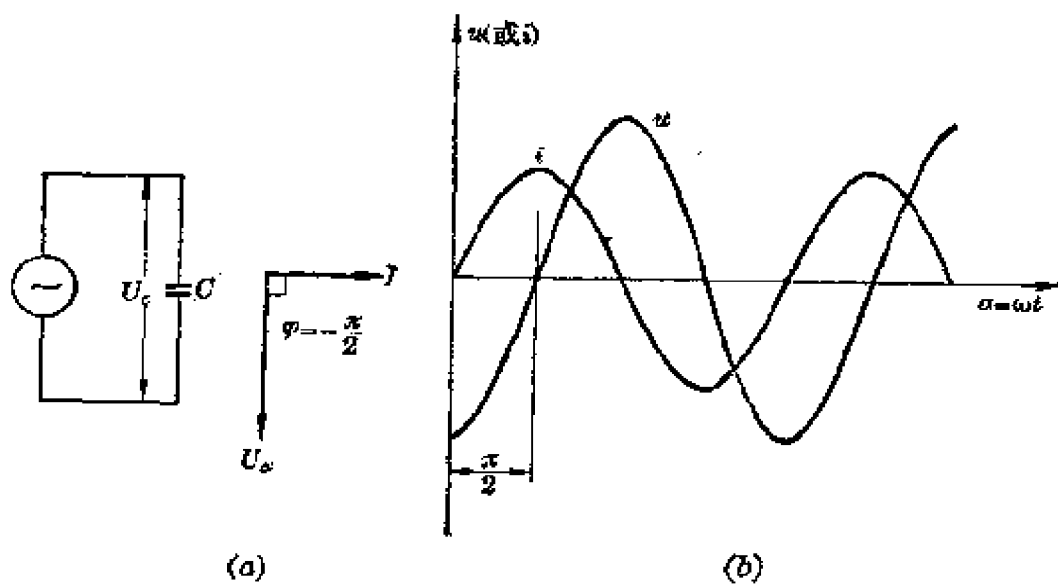


图 13.42 纯电容交流电路

四、电阻、电感和电容串联的电路

在生产实践中的交流电路往往同时具有电阻、电感和电容, 绝对的纯电阻、纯电感、纯电容电路是不存在的。现在就来讨论电阻、电感和电容的串联电路。

假设在由电阻 R 、电感 L 和电容 C 串联而成的电路两端接上交流电压 u , 那么电路中就有交流电流 i (图 13.43a)。

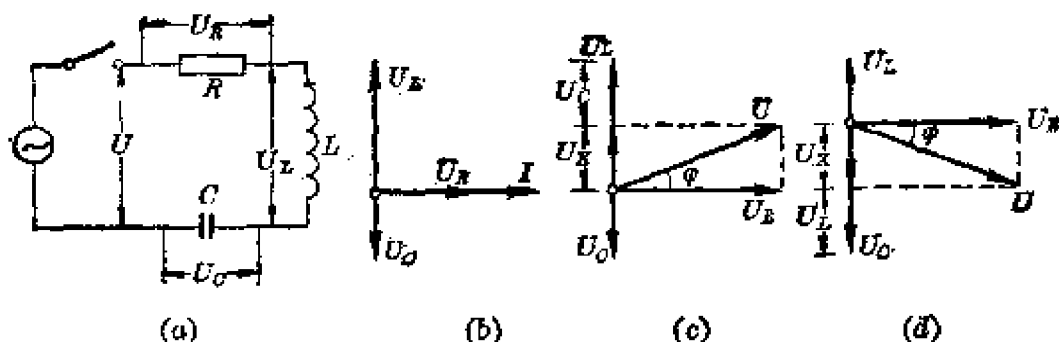


图 13.43 电阻、电感和电容串联的电路

因为串联电路中电流处处相同，所以通过这三个元件的电流都是相同的。设这三个元件两端的电压分别为 u_R 、 u_L 、 u_C ，根据串联电路的特点，可以列出

$$u = u_R + u_L + u_C$$

但由于上式中各个量时刻都在变化，彼此间还存在一定的相位差，因而不能简单地用算术加法，必须通过它们的旋转矢量按平行四边形法则来迭加。如果用电路中的电流 i 作为参考矢量，那么 u_R 与 i 同相； u_L 的相位比 i 超前 $\pi/2$ 弧度； u_C 的相位比 i 落后 $\pi/2$ 弧度。其矢量图如 13.43b 所示，其中各以它们的有效值作为矢量长度。

在电路中，如果感抗大于容抗，即 $X_L > X_C$ ，根据 $I = \frac{U_L}{X_L} = \frac{U_C}{X_C}$ 的关系可以推知 $U_L > U_C$ ，这时电感在电路中起主要作用，这种电路叫做电感性电路。由于矢量 U_L 和 U_C 方向相反，并在一直线上，按矢量加法，先作出 U_L 和 U_C 的合矢量 U_X ，再作出 U_X 和 U_R 的合矢量 U ，如图 13.43c 所示。于是可以列出它们之间的数量关系：

$$U^2 = U_R^2 + U_X^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2,$$

将公式 (13.27)、(13.30)、(13.37) 中的关系代入上式，可以得出

$$\begin{aligned}
 U &= \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \\
 &= \sqrt{I^2 R^2 + (IX_L - IX_C)^2} \\
 &= I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},
 \end{aligned}$$

即

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U}{Z}. \quad (13.39)$$

式中 $X = |X_L - X_C|$, 叫做电抗; 而 $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, 叫做电路中的总阻抗。它们的单位都是欧姆。上式表明, 在串联交流电路中, 电流与电压成正比, 而与总阻抗成反比。形式上这与直流电路中的欧姆定律十分类似。从图 13.43c 中还可以看出, 串联电路两端电压 u 的相位要比电流 i 超前 φ 弧度, 而

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{IX_L - IX_C}{IR} = \frac{X}{R}. \quad (13.40)$$

对于容抗大于感抗的电容性电路说来, 公式 (13.39)、(13.40) 依然适用, 只是由于 $X_C > X_L$, 电抗 $X = X_C - X_L$, 这时串联电路两端电压 u 的相位要比电流 i 落后 φ 弧度 (图 13.43d)。

从上面的讨论还可以看出, 纯电阻、纯电感和纯电容电路实际上可以看作是上述串联电路的特殊情况。即

当 $X_L = 0$ 、 $X_C = 0$ 时, $Z = R$ (纯电阻电路);

当 $R = 0$ 、 $X_C = 0$ 时, $Z = X_L$ (纯电感电路);

当 $R = 0$ 、 $X_L = 0$ 时, $Z = X_C$ (纯电容电路)。

[例题 13.7] 已知 J 27 中间继电器线圈电阻为 2 千欧, 电感为 43.8 亨, 接在 380 伏、50 赫芝的电源上。求通过线圈的电流的有效值以及电压与电流的相位差。

解: 从已知条件 $f = 50$ (赫芝)、 $L = 43.8$ (亨), 可以算

出感抗 $X_L = 2\pi fL = 100 \times \pi \times 43.8 \doteq 13800$ 欧。

又由于电路中不存在电容, 即 $X_C = 0$, 根据公式 (13.39), 可以算出通过线圈的电流的有效值

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{380}{\sqrt{2000^2 + 13800^2}} = 0.0273 \text{ 安,}$$

而

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R} = \frac{X_L}{R} = \frac{13800}{2000} = 6.9,$$

即

$$\varphi \doteq 81^\circ 45' \doteq 1.43 \text{ 弧度。}$$

表明电压 u 的相位比电流 i 超前 1.43 弧度。

五、交流电的功率和功率因数

我们知道, 交流电和直流电一样, 在通过电阻器时会使电阻发热, 表明交流电在对电阻做功。但由于交流电的电流和电压时刻都在变化, 因此它在电阻上所消耗的电功率也时刻在变化。实践和理论计算表明, 我们可以用通过电阻的电流和电阻两端电压的有效值的乘积来表示交流电消耗在电阻上的平均功率。即

$$P = IU_R. \quad (13.41)$$

由此可见, 在纯电阻交流电路中, 电功率的计算方法与直流电路完全相同。在串联交流电路中, 根据图 13.43 c、d 的矢量图, 可以看出 $U_R = U \cos \varphi$, 代入上式可以得出

$$P = IU \cos \varphi, \quad (13.42)$$

式中 φ 是电源电压与电流的相位差。因为这部分功率是在电路中实际消耗的功率, 所以又称有功功率, 单位是瓦、瓩。

交流电在通过电感器和电容器是否也消耗功率呢? 我们知道, 交流电通过电感线圈(不考虑线圈的电阻)时, 在线圈内

要产生磁场,当交流电的即时值增大时,线圈中的磁场亦随之增强,此时电能转化为磁场能量;而当交流电的即时值减小时,线圈中的磁场随之减少,又使磁场能量转化为电能。因此交流电通过电感线圈的过程就是电与磁不断相互转化的过程。当交流电压和电流指向相同时,电功率为正值,表示电能正在消耗;反之,电功率为负值,表示电能正在增加。所以在整个周期中的平均功率为零,表明电感器在电路中并不消耗电能。

当交流电通过电容器时,它会引起电容器不断地充放电。虽然在充电过程中,电容器消耗了电功率;但是在放电过程中,它所储存的电能又归还了电源。所以在整个周期中的平均功率为零,表明电容器在电路中也不消耗电能。

通常把通过电感(或电容)的电流和电感(或电容)两端电压的有效值的乘积叫做电感(或电容)的无功功率,表示这个功率并非实际所消耗的,只是在电源和负载之间不断地相互转化。为了区别于有功功率,用字母 Q 表示,单位用乏、千乏。即

$$Q_L = IU_L, \quad (13.43)$$

$$Q_C = IU_C. \quad (13.44)$$

当电路同时有电感、电容存在时,电路上的无功功率

$$Q = |IU_L - IU_C| = IU_X.$$

从图 13.43 c 、 d 的矢量图,可以看出 $U_X = U \sin \varphi$, 代入得

$$Q = IU \sin \varphi. \quad (13.45)$$

必须指出,通常在各种交流电器的铭牌上所标出的功率,既不是有功功率,也不是无功功率,而叫做视在功率,又称总功率。整个交流电路的视在功率就等于总的电压和电流的有

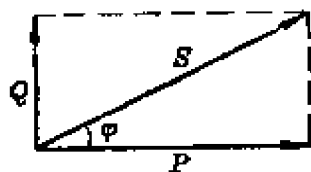
效值的乘积。为了区别起见，通常用字母 S 表示，单位用伏安、千伏安。即

$$S = IU。 \quad (13.46)$$

根据 $I^2U^2 \cos^2 \varphi + I^2U^2 \sin^2 \varphi = I^2U^2(\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) = I^2U^2$ 的关系，可以列出

$$P^2 + Q^2 = S^2。 \quad (13.47)$$

上式表明：视在功率可以看作是由有功功率和无功功率的合成(图 13.44)。由此可见，在电路的



视在功率中，实际所消耗的功率只是有功功率部分。在视在功率中，有功功率所占的比例越大，就表明

这个电路的利用率越高。通常把有功功率在视在功率中所占的比叫做功率因数。即

$$\text{功率因数} = \frac{P}{S} = \frac{IU \cos \varphi}{IU} = \cos \varphi。 \quad (13.48)$$

上式表明：电路中负载的功率因数决定于电压与电流间相位差的余弦。当相位差越小，功率因数越大，表明电路的利用率越高。

[例题 13.8] 一单相变压器的铭牌上已标明容量为 10 千伏安(即视在功率)，电压为 3000/220 伏。现要在它的副绕组电路上接 48 瓦、220 伏的日光灯，如果日光灯的功率因数为 0.5，问在额定情况下可接几盏？如果把功率因数提高到 0.8 呢？

解：当功率因数 $\cos \varphi_1 = 0.5$ 时，每盏日光灯的视在功率

$$S_1 = \frac{P}{\cos \varphi_1} = \frac{48 \text{ 瓦}}{0.5} = 96 \text{ 伏安，}$$

因此在变压器副绕组电路上可以接的日光灯盏数

$$n_1 = \frac{S}{S_1} = \frac{10000}{96} \approx 104。$$

把日光灯的功率因数提高到 $\cos \varphi_2 = 0.8$ 以后,

$$S_2 = \frac{P}{\cos \varphi_2} = \frac{48 \text{ 瓦}}{0.8} = 60 \text{ 伏安},$$

$$n_2 = \frac{S}{S_2} = \frac{10000}{60} \approx 166。$$

从上述例题可以看出,提高功率因数就可以使由变压器输送过来的电能的利用率有所提高。怎样才能提高日光灯的功率因数呢?由于日光灯是电感性负载,从图 13.43c 的矢量图可以看出:若要减小角 φ 、提高 $\cos \varphi$,就必须适当增加电路中的容抗 X_C 来增大 $U_C = IX_C$,从而使 U_X 减小。因此在每个日光灯线路中并联*适当的电容器就可以改善功率因数,提高有功功率所占的比例。所以电容器也是交流电路中常用的提高功率因数的基本元件之一。

习题 13.10 把电灯和镇流器串联后接到直流电路中去,在电路突然切断的一瞬间,镇流器线圈中有自感电动势产生吗?为什么电灯这时不会发出闪光呢?

习题 13.11 某线圈在 0.5 秒内电流从 24 安增大到 32 安,测得自感电动势为 20 伏。求线圈的自感系数;这时自感电动势的指向与线圈内原来电流的指向相同吗?

习题 13.12 在制造电阻箱时要用双线绕法(图 13.45),试分析这种绕法为什么自感作用很小?

习题 13.13 图 13.37 所示中有一种可变空气电容器,其中奇数极

* 通常不采取串联电容器的方法来提高功率因数,因为将电容器与负载串联会影响负载两端的电压。

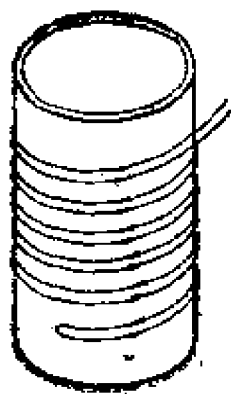


图 13.45

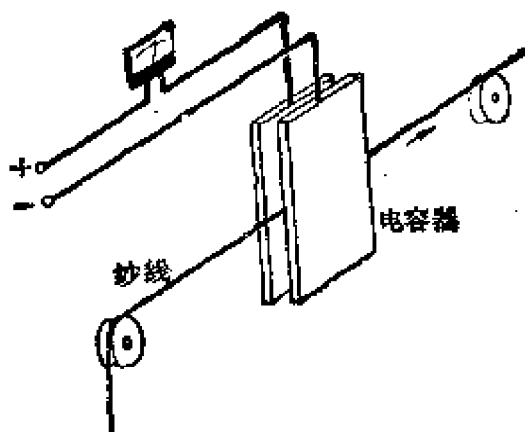


图 13.46

片和偶数极片分别连成两组。一组位置固定的叫定片；另一组可以转动的叫动片，试分析这种电容器为什么可以改变电容量。

习题 13.14 图 13.46 是一种自动检查纱线粗细是否均匀的装置的示意图。试分析这种装置的原理。

习题 13.15 一旁路电容， $C=0.01\mu\text{F}$ ，求它对 550 千赫的高频信号和对 5 千赫的音频信号的容抗各是多少。

习题 13.16 已知某线圈的电阻 R 为 6 欧姆，感抗 X_L 为 8 欧姆，如果通过线圈的交流电流 I 为 5 安培，求加在线圈两端的交流电压 U ，并算出线圈的有功功率和功率因数。

习题 13.17 把由电容 $C=40\mu\text{F}$ 和电阻 $R=60\Omega$ 串联而成的电路接在频率 $f=50\text{Hz}$ 、电压 $U=220\text{V}$ 的电源上，求容抗 X_C 、阻抗 Z 和电流 I 。

习题 13.18 一单相电动机， $P=40$ 瓦， $U=220$ 伏， $I=0.4$ 安，问电动机的功率因数是多少？

第四节 电动机原理

电动机，俗称马达，是一种把电能转化为机械能的动力设备。在接通电源后，电动机就能带动各种工作机不停地转动。电动机可分为直流电动机和交流电动机两大类。

一、直流电动机的工作原理

我们已经知道，在磁场中的通电线圈要受到安培力矩的作用而发生偏转。直流电动机就是根据这一原理制成的。它的构造和旋转电枢式交流发电机很相似，图 13.47 是直流电动机工作原理示意图。图中 N 和 S 是固定不动的电磁铁的两极，通常由激磁线圈绕制而成，叫做定子；在磁场中间是可以绕轴转动的电枢绕组，叫做转子。在图中只画了电枢中的一匝线圈。

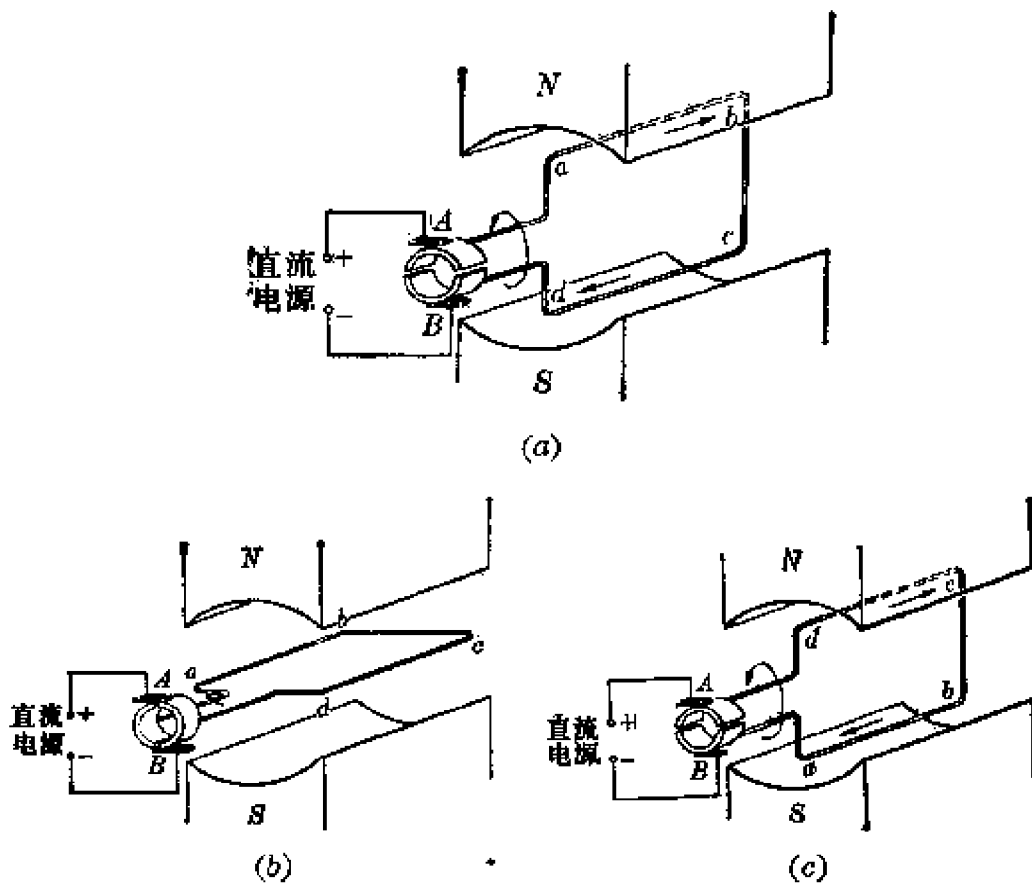


图 13.47 直流电动机工作原理示意图

在上一章里已经知道，磁场中的通电线圈偏转到最后总是静止在它的平衡位置上(图 12.26)。那么为什么直流电动

机的电枢绕组在通电之后能在磁场中不停地转动呢？这主要是换向器的作用。直流电动机的电枢线圈两端分别与两个固定在轴上，并且与轴一起旋转的半圆形铜片相连接（图 13.47），而铜片之间以及铜片与转轴之间都互相绝缘。这两个半圆形铜片组成了一个最简单的换向器，其中每个铜片称为换向片，它们分别与固定不动的电刷 A 、 B 相接触。下面来具体分析电枢的转动情况。

两电刷与直流电源接通，若 A 为正极， B 为负极。而电枢转到如图 13.47a 的位置时，线圈中电流的指向为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 。根据左手定则，可以断定这时电枢线圈在安培力矩作用下将沿逆时针方向转动。当电枢转到图 13.47b 的位置时，两铜片同时与电刷脱离接触，线圈中没有电流通过，故不受安培力矩作用，但由于线圈本身的惯性，电枢将继续转动。等电枢转过此位置时，两铜片又开始分别与另一电刷相接触，线圈中电流的指向变为 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ （图 13.47c）。根据左手定则，可以断定这时电枢将继续沿逆时针方向转动。这样电枢每转动半周，铜片与电刷的接触互换一次，线圈中电流的指向也改变一次，从而保证线圈所受的安培力矩的方向始终不变，电动机就不停地绕同一方向转动起来。

在实际的直流电动机中，电枢有很多匝串联在一起，布满着整个电枢表面，这样不仅增大了电枢所受的安培力矩，同时也充分利用了电枢表面的辐射磁场。

电枢在磁场中转动的同时，根据电磁感应定律可知，在电枢绕组中必然会产生自感电动势，由于它的指向始终与外加电压相反，因而叫做电动机的反电动势。假设电枢的电阻为 R ，外加电压为 U ，反电动势为 E_R ，根据欧姆定律，可以列出通过电枢的电流强度

$$I = \frac{U - E_R}{R}。 \quad (13.49)$$

上式表明,反电动势越小,通过电枢的电流强度就越大。但是反电动势的大小是与电枢的转速有关的,转速越大,反电动势也越大。

当电动机刚起动时,由于电枢转速很小,反电动势也很小,而电枢电阻一般也是很小的,因此通过电枢的电流强度就很大,甚至大大地超过电动机的额定电流,有烧坏电枢的可能。为了避免这种情况,直流电动机在起动时,总要先让电枢和一适当的变阻器串联后才与电源连接,等电枢转速增大到一定程度,反电动势已足够大时,才逐渐撤去电阻。通常把这种在起动时起限流作用的电阻叫做起电电阻。

直流电动机具有容易调节转速,容易改变转向,调速范围广和起动转矩大等特性。因此,对调速要求高的生产机械或者需要起动转矩大的生产机械,往往采用直流电动机来拖动。万吨货轮上的大型卷扬机就是以直流电动机为动力机的。

二、三相交流异步电动机的工作原理

三相交流异步电动机是目前农村中最常用的电动机,它可以用来带动各种机床和水泵以及脱粒机、碾米机等农副产品加工机械。这种电动机所以如此广泛地应用是由于它具有构造简单、工作可靠、坚固耐用、造价低、效率高等许多优点。

图 13.48 所示是 JO (封闭) 型鼠笼式三相异步电动机的结构简图。它的主要结构也是由定子和转子两部分组成。定子是电动机的固定部分,又可分机座、定子铁芯和定子绕组三个组成部分。机座就是定子的外壳,是整个电动机的支架,一

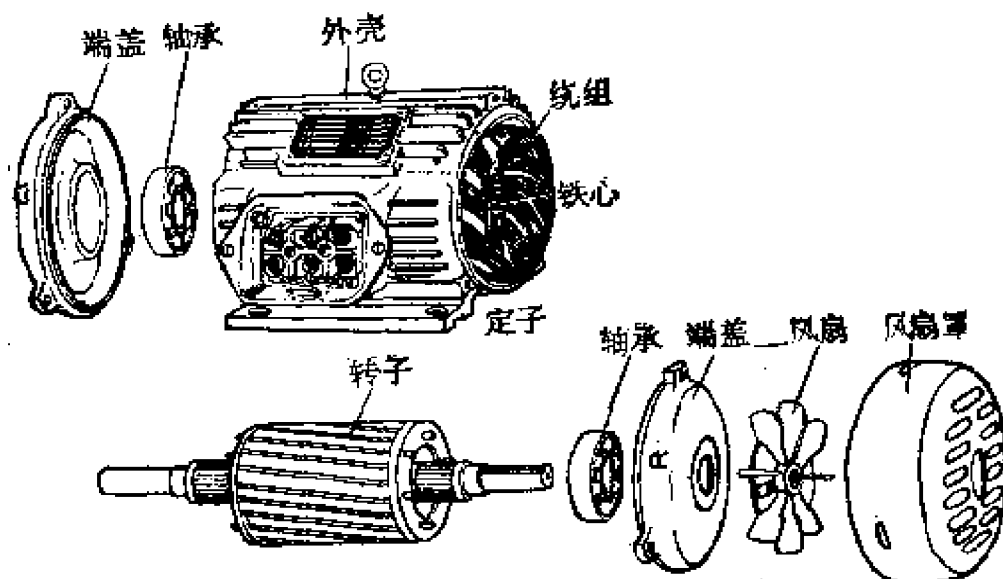


图 13.48 JO(封闭)型鼠笼式三相异步电动机的结构简图

般由生铁铸成，四周有散热片。机座内的定子铁芯由许多圆形硅钢片迭合而成，在定子槽孔内嵌有三组由绝缘导线绕制成的线圈，组成三相定子绕组，为了便于改变接线，它的六个引出线端固定在机座外壳的接线盒内，用来与三相电源相连接，从而在定子内侧空间形成一个很强的旋转磁场。转子是电动机的转动部分，有转子铁芯、转子绕组和转轴等三个组成部分。转子铁芯是由许多圆形硅钢片迭合而成的圆柱体，它直接套在转轴上。在转子槽孔内嵌放着鼠笼式的转子绕组。所谓鼠笼式是指转子上有很多粗金属条，两端用两个短路环焊接起来很象一个抓老鼠笼子(图 13.49)。

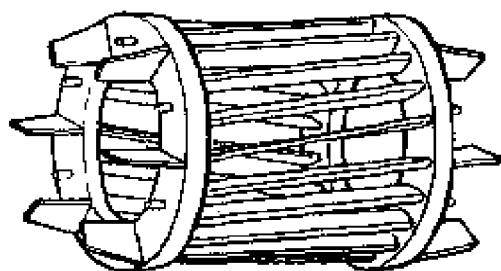


图 13.49 鼠笼式转子绕组

为什么鼠笼式转子在三相定子绕组形成的旋转磁场中会转动起来呢?先来做这样的实验,在马蹄形磁铁中间安放一个可以自由转动的铝框(图 13.50),当手摇转柄旋转磁铁时,可以看到铝框也跟着旋转起来。这是因为磁铁转动时,在磁铁周围的磁场也旋转起来,使通过铝框的磁通量发生了变化从而在铝框内产生了感生电流。根据楞次定律可知,感生电流的磁场是阻碍磁铁磁场的变化。铝框跟着磁铁旋转就是阻碍它们之间的相对运动。

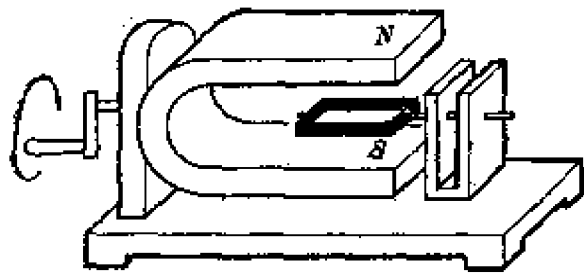


图 13.50

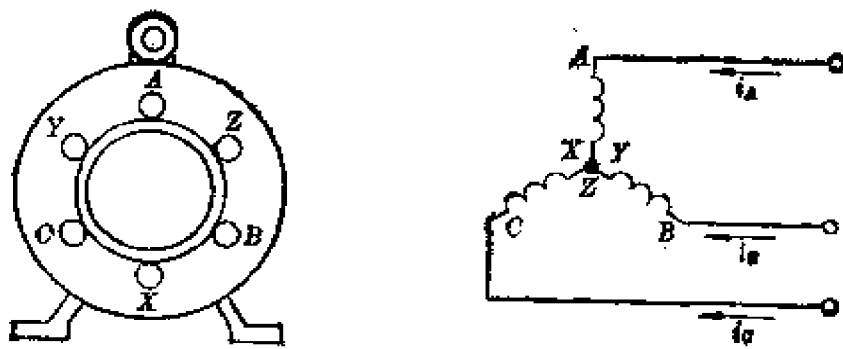
三相交流异步电动机的工作原理与上述实验的原理完全相同。只是它的旋转磁场并不是靠磁铁的转动,而是由三相交流电通过定子绕组产生的。

图 13.51a 中,电动机的三相定子绕组简化为 $A-X$, $B-Y$, $C-Z$ 三个线圈,假定它们是按星形连接的。定子绕组与三相电源接通后,定子绕组内就通过三相对称电流 i_A 、 i_B 、 i_C 。按照三相交流电的规律,可以列出

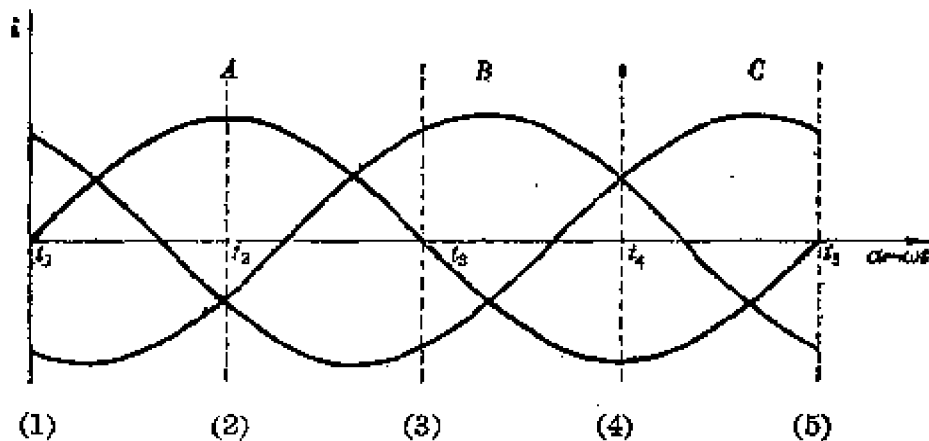
$$i_A = I_m \sin \omega t; \quad (\text{通过 } A-X \text{ 绕组})$$

$$i_B = I_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); \quad (\text{通过 } B-Y \text{ 绕组})$$

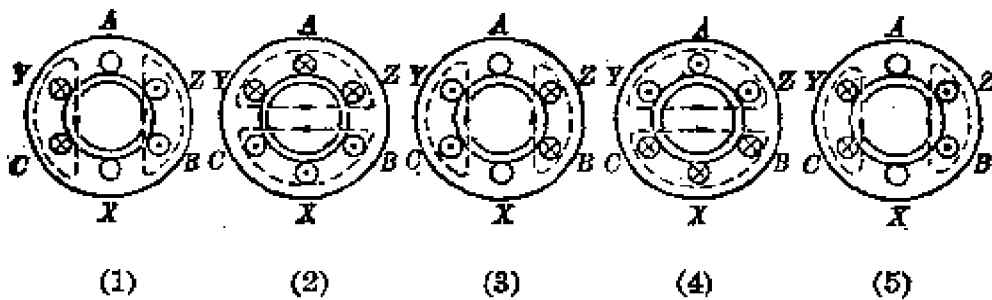
$$i_C = I_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)。 \quad (\text{通过 } C-Z \text{ 绕组})$$



(a) 三相定子绕组



(b) 定子绕组内三相交流电的规律



(c) 不同时刻合成磁场的方向

图 13.51 三相定子绕组内侧空间的旋转磁场

图 13.51b 是表示它们变化规律的图线, 图 13.51c 是表示在相应的不同时刻由这些电流形成的合成磁场的方向。例如当 $\alpha = \omega t = \pi$ 时, 由上式可知

$$i_A = I_m \sin \pi = 0;$$

$$i_B = I_m \sin \left(\pi - \frac{2\pi}{3} \right) = I_m \sin \frac{\pi}{3} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m;$$

$$i_C = I_m \sin \left(\pi + \frac{2\pi}{3} \right) = I_m \sin \frac{5\pi}{3} = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_m。$$

i_B 的指向是 $B \rightarrow Y$ ，而 i_C 的是 $Z \rightarrow C$ 。于是根据右手螺旋法则可以断定周围磁场的方向如图 c 所示。从图 13.51c 可以看出，这个由三相电流分别通过三相对称绕组所形成的合成磁场是一个随时间而旋转的磁场，而它的频率等于三相交流电的频率。因而通常把旋转磁场的变化频率叫做同步转速。

电动机的鼠笼式转子实际上就是一个带铁芯的金属框架，即相当于上述实验中的铝框。在三相定子绕组所形成的旋转磁场中，转子里由于磁通量的变化就有感生电流产生。在感生电流与旋转磁场的相互作用下，转子就跟着旋转起来。然而转子的转速是不可能和旋转磁场的变化频率完全相同的，否则它们之间就不存在相对运动，转子里的感生电流就要消失，转子转速就会大大减小；但是转子转速也不会与旋转磁场的变化频率相差很大，否则随着它们之间相对运动的增大，转子里的感生电流也要增大，从而增大了它的阻碍作用，使转子转速增大而接近旋转磁场的变化频率。

从上面的分析可以看出：转子转速和旋转磁场的同步转速间始终存在着一定的差异，“差异就是矛盾。”转子转速与旋转磁场的同步转速间的矛盾是保证转子旋转的必要条件。正是这个缘故，通常把这种交流电动机叫做异步电动机。在正常运转的情况下，异步电动机的转子转速约为旋转磁场同步转速的 94~98%。

异步电动机是一种使用三相电源的用电器，即三相负载，因而它有星形和三角形两种联接方式。在异步电动机的接线匣里有六个接线柱，上面分别标有 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 、 D_6 （老式电动机也有标 A 、 B 、 C 、 X 、 Y 、 Z 的），其中 D_1 、 D_2 、 D_3 依次为 A 、 B 、 C 三相绕组的始端； D_4 、 D_5 、 D_6 依次为 A 、 B 、 C 三相绕组的末端（图 13.52）。把 D_4 、 D_5 、 D_6 连接在一起，再把 D_1 、 D_2 、 D_3 分别接到三相电源上去，就是星形联接（图 13.53a）；把 D_1 、 D_6 ； D_2 、 D_4 ； D_3 、 D_5 分别连接后，再把三个公共头分别接到三相电源上去，就是三角形联接（图 13.53b）。例如在有些电动机的铭牌上标有 Δ/γ ；220 V/380 V。这表明电源电

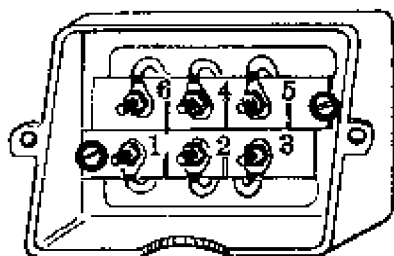


图 13.52 接线匣

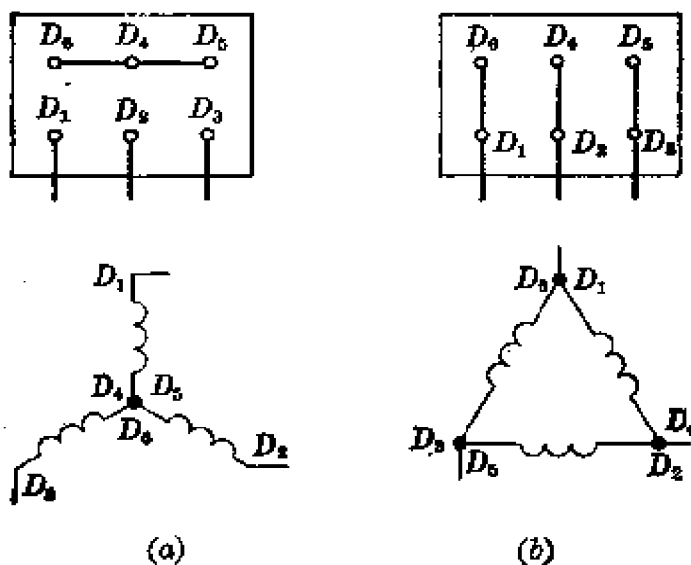


图 13.53 电动机的接法

压为 220 伏时,电动机必须按三角形联接;电源电压为 380 伏时,电动机必须按星形联接。大型异步电动机一般只用三角形联接,电源电压为 380 伏。

[例题 13.9] JO₂-93-4 型三相异步电动机的铭牌上标出额定功率为 100 千瓦,额定电压和电流分别为 380 伏、183.5 安,功率因数为 0.9。求这台电动机的效率。

解: 电动机铭牌上标出的额定功率是指它输出的有功功率* $P_{出}=100$ 千瓦电动机的输入有功功率是指三相电源对它所作的电功率。对于三相电源

$$P=3I_{相}U_{相}\cos\varphi=\sqrt{3}I_{线}U_{线}\cos\varphi, \quad (13.50)$$

而电动机的额定电压、电流是指额定情况下的 $U_{线}$ 和 $I_{线}$, 因此电动机的输入有功功率

$$P_{\lambda}=\frac{\sqrt{3}\times 183.5\times 380\times 0.9}{1000}=108.6 \text{ 千瓦},$$

于是可以算出电动机的效率

$$\eta=\frac{P_{出}}{P_{\lambda}}\times 100\%=\frac{100}{108.6}\times 100\%\approx 92.1\%。$$

上述例题表明,电动机在运转中由于绕组发热、铁芯中涡流的存在以及其他机械摩擦等,不可避免地要损耗一部分电能。一般说来,在负载很小时,电动机的效率很小;随着负载增加效率略有提高。当负载为额定的 75~80% 时,效率最高。异步电动机的满载效率一般为 75~92%。

异步电动机在起动时,其定子电流约为额定电流的 4~7 倍。这对电动机本身倒没有什么危险,却会引起电力网上的电压显著下降,对其他用电设备造成不良影响,因此必须限制起动电流。通常功率在 7 千瓦,以上的异步电动机必须采用

* 通常可以从它的单位是瓦还是千伏安来判断是有功功率还是视在功率。

降压起动,只有功率在7千瓦以下的才能采用直接起动。

对于在正常运转时采用三角形联接的异步电动机可以利用星三角形起动器来降压起动,图13.54是这种起动器的线路图。因为星形联接时的相电压相当于三角形联接时线电压的 $1/\sqrt{3}$,所以电动机在起动时,把开关扳向下方,采用星形联接来降低输入电压;等运转正常时再扳向上方,换接成三角形联接。

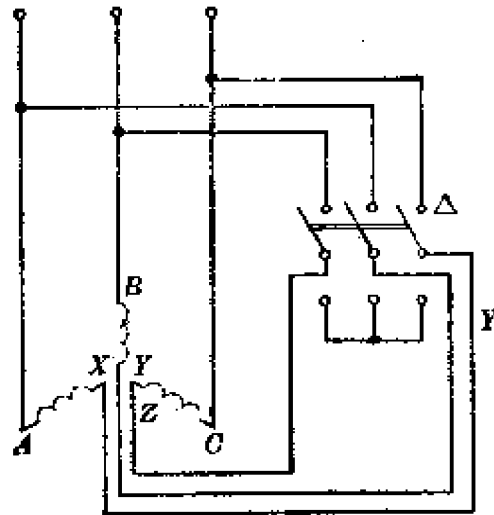


图13.54 星、三角形起动器的线路图

习题 13.19 直流电动机电枢中的反电动势是怎样形成的?为什么在起动时,反电动势很小?

习题 13.20 如果直流电动机电枢电阻为2.5欧姆,当通过电枢的电流强度为20安培时,电枢消耗的功率为2.4千瓦,问这时电枢中的反电动势有多大?

习题 13.21 为什么改变外加电压的指向,或改变定子绕组中激磁电流的指向就可以改变直流电动机电枢转向?

习题 13.22 已知JO₂-32-4型异步电动机按星形联接时额定电压、电流分别为380伏、6.47安,如果功率因数为0.84,效率为83.5%,求它的额定功率。

习题 13.23 为什么在接线时把三相电源线中的任意两根对换一下位置就可以使异步电动机反转?

第五节 变 压 器

变压器是使交流电电压升高或降低的设备，其基本原理是电磁感应原理。在远距离的电力输配系统中，变压器是不可少的设备。

一、变压器的构造和种类

在一个闭合的铁芯上，绕着两组匝数不同的线圈，这就是最简单的变压器。图 13.55 是几种变压器的外形图。

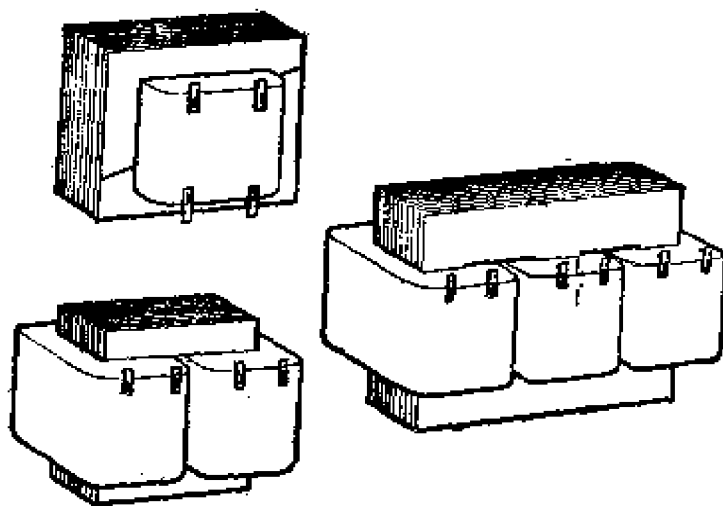


图 13.55 几种变压器的外形图

变压器的种类很多，按其相数来分有单相和三相两种，它们分别可以用来改变单相和三相交流电的电压和电流强度；按其绕组和铁芯的相互排列不同，又可分铁芯式和外壳式两种。铁芯式变压器是以绕组环绕铁芯的；而外壳式变压器则是以铁芯包围绕组的。

与电力网或电源相连接的绕组叫做初级绕组或原绕组；

与负载相连接的或输出的绕组叫做次级绕组或副绕组。单相变压器只有一个原绕组和一个副绕组；而三相变压器具有三个原绕组和三个副绕组。

变压器在工作过程中，一部分电能不可避免地损耗在铁芯和绕组的发热上。小容量的变压器可以利用周围的空气来散热；大型变压器就需要一套油冷却装置，它的铁芯和绕组全部浸没在变压器油中，利用油的对流作用将热量传给油壁和散热管散发出去。这样不仅加快了冷却速度，还提高了变压器的绝缘性能。

二、变压器的工作原理

将变压器的初级线圈与交流电源接通后，在次级线圈中就能获得电压不同的交流电。图 13.56 是单相变压器的原理示意图。把初级线圈与交流电源接通，在初级线圈两端就有交变电压 U_1 ，线圈中也就有了交变电流 I_1 。根据电磁感应定律可知，在初级线圈中要产生指向与 U_1 始终相反的自感电动势 E_1 ，于是可以列出

$$U_1 - E_1 = I_1 X_1,$$

式中 X_1 是初级线圈的阻抗， U_1 、 E_1 、 I_1 分别为交变电压、电

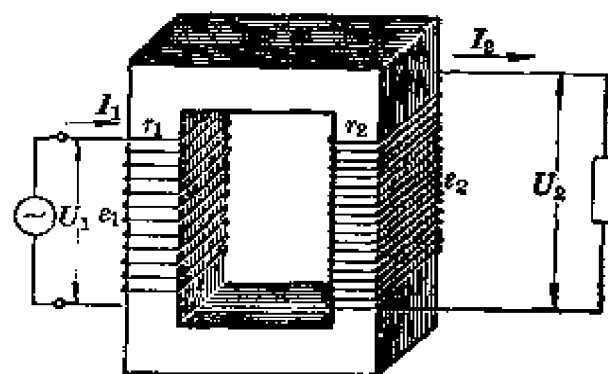


图 13.56 单相变压器的原理示意图

动势、电流的有效值。

由于次级线圈是与初级线圈绕在同一闭合铁芯上的，因此在次级线圈中也有感生电动势产生，这个现象叫做互感。假设次级中的感生电动势为 E_2 ，那么同样可以列出次级线圈两端的输出电压

$$U_2 = E_2 - I_2 X_2,$$

式中 I_2 是与次级线圈相连的负载电路中的交变电流的有效值； X_2 是次级线圈的阻抗。但是一般说来，初、次级线圈的阻抗是很小的，因此可以近似地认为

$$U_1 \doteq E_1; \quad U_2 \doteq E_2.$$

初、次级线圈是绕在同一闭合铁芯上的，在它们各自每一匝线圈两端产生的感生电动势应该相等，假设为 E_0 ，同时若初、次级线圈总匝数分别为 N_1 、 N_2 ，可以列出

$$E_1 = N_1 E_0; \quad E_2 = N_2 E_0,$$

因此

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 E_0}{N_2 E_0},$$

即

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{K}, \quad (13.51)$$

式中 $K = \frac{N_2}{N_1}$ ，叫做变压器的变换系数。上式表明，变压器输入电压与输出电压之比等于初级与次级线圈的匝数之比。因此当 $N_2 > N_1$ 时， $K > 1$ ，变压器起了升压作用；当 $N_2 < N_1$ 时， $K < 1$ ，变压器起了降压作用。

变压器虽能改变交流电的电压，但不能改变电功率的大小。如果不考虑变压器的能量损耗，根据能量守恒定律可知，

从变压器次级线圈输出的电功率等于输入初级线圈的电功率,即

$$U_2 I_2 = U_1 I_1,$$

因此

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = K。 \quad (13.52)$$

上式表明,变压器初、次级线圈中的电流强度之比与它们的匝数成反比。然而实际上变压器在工作时电能的消耗是不可避免的;不过一般说来损耗很小,约为输出功率的5%左右,大型变压器的效率可达94~99.5%。

[例题 13.10] 容量为30千伏安的单相变压器,变换系数 $K=15$, 初级线圈的额定电压为3300伏,若不计损耗,求初、次级线圈的额定电流和次级线圈的额定电压。

解: 变压器的容量就是指它的功率,从它的单位可知是视在功率 S 。今已知 $S=30$ 千伏安, $U_1=3300$ 伏可以列出

$$I_1 = \frac{S}{U_1} = \frac{30000}{3300} = 9.09 \text{ 安。}$$

根据 $K=15$,按公式(13.52)可知次级线圈的额定电流、电压分别为:

$$I_2 = \frac{I_1}{K} = \frac{9.09}{15} = 0.606 \text{ 安,}$$

$$U_2 = K U_1 = 15 \times 3300 = 49500 \text{ 伏。}$$

三、电力输配系统

为什么在远距离的电力输配系统中要用到变压器呢?原来从发电站往远处输送一定功率的电能时,由于输电线本身

的电阻，总要消耗一部分电能，在输电线的发热上。根据有功功率 $P = IU \cos \varphi = I^2 R \cos \varphi$ 可知，在电阻 R 一定时，它是与 I^2 成正比的。要减少这种电能的损耗就必须尽可能减小输电线上的电流。然而为了保证输送电能的功率不变，只有采用高压输电才行。目前我国国家标准所规定的输电线路的额定电压有 110、220、330 千伏三种，而发电站里发电机电压很少超过 15 千伏，因此在电被输送之前必须先把电压升高，然后再送入输电线路，这样就要用到变压器。另一方面，对于用户说来，只需要 380/220 伏的低电压，因此当高压电输送到用电区后，先得经过变电站把电压降到地区电力网的电压 6 千伏，然后再分别经过配电站，把电压降到配电电力网的电压 380/220 伏。图 13.57 是电力输配系统的示意图。

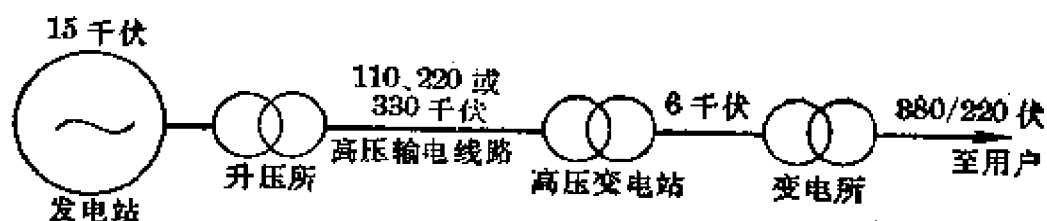


图 13.57 电力输配系统示意图

在变电站里除了有变压器外，还附有控制盘、电工仪表和油开关等保护装置。农村中的中心配电站具有保护、控制和监视各分路用电情况的作用，并且量度总的用电量。

习题 13.24 某火力发电站输出的视在功率为 50000 千伏安，试比较用 220 千伏和 380 伏输电时输电线上的电流强度。

习题 13.25 变压器能用来直接改变直流电压吗？为什么？

习题 13.26 图 13.58 是五灯收音机变压器的电路图，各绕组的匝数如图所示。当初级输入 220 伏交流电时，求次级每绕组两端的输出电压。

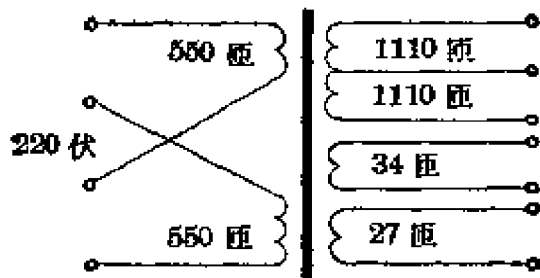


图 13.58

复 习 题

习题 13.27 在断开或合上开关使导线 AB 中的电流从有到无或从无到有的一瞬间(图 13.59), 闭合导线 CD 中都有感生电流产生, 试确定在这两种情况下 CD 中感生电流的指向。

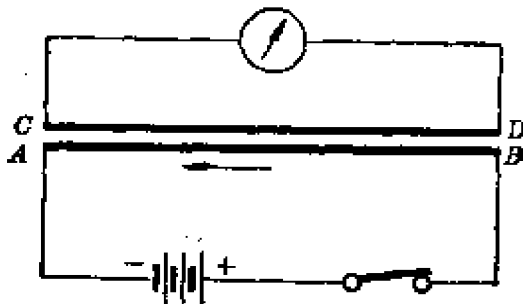


图 13.59

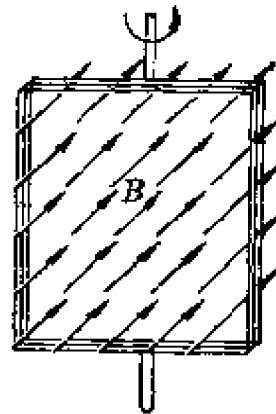


图 13.60

习题 13.28 在磁感应强度 $B=8400$ 高斯的匀强磁场中, 有边长为 5 厘米的正方形线圈在旋转, 转轴与磁场方向垂直(图 13.60), 求转速为每分钟 600 周时线圈中感生电动势的最大值。

习题 13.29 有两只电容量为 $30 \mu\text{F}$ 、耐压值为 450 V 的电容器, 求串联和并联后的电容量和耐压值。

习题 13.30 已知一线圈电阻为 28Ω , 当接以 10 V 的交流电压时, 通过的电流为 100 mA , 求线圈的阻抗和感抗。

习题 13.31 容抗 X_C 为 5Ω 的电容器与一 2Ω 的无自感电阻 R 串联在一起, 两端接以 U 为 100 V 的交流电源后, 求电路中的电流强度 I 、电容器两极间的电压 U_C 以及有功功率 P 。

习题 13.32 在由电阻 $R=40$ 欧姆、感抗 $X_L=90$ 欧姆和容抗 $X_C=60$ 欧姆串联而成的电路两端,接以交流电压 $U=220$ 伏,求电路上的总阻抗 Z 、电流 I 以及有功功率 P 。

习题 13.33 12.5×10^4 千瓦双水内冷汽轮发电机的三相绕组为星形联接,线电压为 15750 伏,求发电机每相绕组的相电压有多大? 如果发电机的视在功率为 18×10^4 千伏安,求它的功率因数。

第十四章 晶体管基础知识

黎明，东方一轮红日磅礴而出。我们打开收音机或扩音机，就能听到激动人心的《东方红》乐曲。收音机是怎样接收到声音的呢？打开晶体管收音机的后盖，就能看到在一块底板上竖立着许多电子元件。如果我们仔细观察一下，并把它们分一分类，发现它们无非就是一些电阻、电容器、电感线圈和晶体管。收音机原来就是由这些元件协调一致地工作，接收来自电台的广播讯号，并把讯号恢复为原来的声音再放送出来的。所以虽然在遥远的边疆，同样能亲切地听到来自我们伟大祖国的心脏——北京的声音。

在收音机的这些元件中，前面三种元件的一些基本性质已经讨论过了，本章我们将介绍一些关于晶体管的基础知识。

第一节 半 导 体

一、什么是半导体

我们已经知道物质根据它的导电性能可以分为导体和绝缘体。例如金、银、铜、铝、铁等金属都是良好的导体；橡胶、陶瓷、云母、塑料和竹木等都是很好的绝缘体。另外还有一类物质，它们既不象导体那样容易导电，又不象绝缘体那样难以导电，它们的导电性质介于导体和绝缘体之间，这类物质称做半导体，例如硅和锗就是常用的半导体材料。

半导体有一些很特殊的性质，例如它的导电能力会受到温度变化、光线照射和掺入某种杂质元素的影响而改变。其中尤其以掺入杂质元素而影响它的导电能力这一特性获得广泛的应用。晶体二极管和三极管就是用掺有杂质元素的半导体制成的。半导体为什么会具有这些特性呢？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。根本的原因在于半导体的内部结构。

在前面第十章“电的本质”中，我们已经知道物质是由原子组成的，而原子又是由带正电的原子核和带负电的电子构成。电子在原子核外分层绕原子核不停地运动，好象行星绕太阳运转一样。原子核所带正电荷的数量和核外电子的负电荷数量相等，所以原子平时不呈现带电性。不同物质的原子核所带正电荷的数量和核外电子数都不一样。

由于电子带负电，原子核带正电它们之间就有相互吸引力，电子被束缚在原子核的周围运动。在金属物质的原子中，外层电子受到原子核吸引力比较小，因此有大量电子能够挣脱原子核束缚而成为自由电子。这些自由电子在外加电场的作用下作定向运动形成电流，所以金属物质容易导电。

绝缘体中原子的外层电子受原子核的束缚力很大，不容易形成自由电子，所以难以导电。

半导体材料的原子结构比较特殊，它的外层电子既不象导体那样容易挣脱原子核的束缚，也不象绝缘体那样被束缚得很牢固，这就决定了它的导电特性介于两者之间。下面以常用的硅半导体为例来说明。

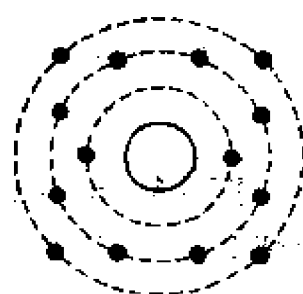
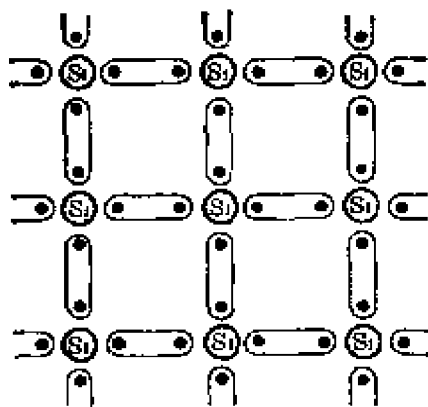


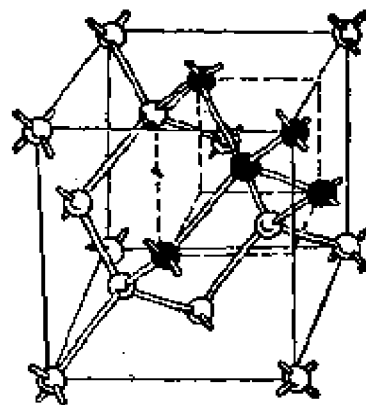
图 14.1 硅原子结构示意图

图 14.1 是硅原子结构示意图。硅原子共有 14 个电子，

分为三层绕原子核而运动,最内层有 2 个电子,第二层有 8 个电子,第三层有 4 个电子。原子的最外层电子叫做价电子,所以硅原子有 4 个价电子。要把硅做成半导体器件,首先要把硅制成单晶体(参考上册第 283 页)。对硅单晶体来说,每个硅原子都跟周围相邻的四个硅原子相联系而排列成图 14.2a 所示的结构。从图可以看出,以一个硅原子为中心,它的四个价电子分别和相邻的四个硅原子共有,而每个相邻的原子亦拿出一个价电子和这个中心原子共有。这样每两个相邻原子之间都共有一对价电子,这一对价电子同时受这两个原子的束缚并为它们所共有。这样的一对价电子就好象起了把两个原子联结起来的作用,原子之间通过共有一对价电子而实现的结合叫做共价键结构(键就是结合的意思)。



(a) 硅单晶的共价键结构



(b) 硅原子排列立体图

图 14.2

图 14.2a 是平面图,实际上原子排列是如图 14.2b 那样立体的。图中原子之间用两条直线联结表示它们的价电子相互共有的关系。

金属导体中运载电荷的粒子是自由电子,也叫载流子。在半导体内,共价键上的价电子受到的束缚并不象绝缘体里

那样紧密。在一般室温下，由于热运动总有一部分价电子获得足够的能量，挣脱共价键的束缚而脱离出来成为自由电子，即成为载流子。所以室温下的半导体亦具有一定的导电能力。

但是，半导体的导电除了跟金属导体一样由于有自由电子外，还有它不同于金属导体的独特的一面。半导体中价电子在挣脱束缚成为自由电子后，在共价键上就留下一个“空位”（图 14.3），这个“空位置”我们把它叫做“空穴”。由于原子本身正电荷和负电荷的数量是相等的，原子失去了电子后，整个原子就带正电，叫正离子。正离子容易吸引邻近原子的价电子来填补所留下的空穴，同时在这个邻近原子中又出现了新的空穴，这些新的空穴又有可能为别的价电子来填补。电子不断地填补空穴，从效果上看就好象空穴在原子间不断地运动。对于空穴的这种运动我们可以作个譬喻，如大家坐在一起看节目，如果前面走了一个人出现了一个空位子，后面的人依次递补空位子向前坐，看起来就好象空位子在向后移动一样。这种空位子的移动和没有坐位的人的走动不一样，后者好比是自由电子的运动，而空位子的移动则好比是空穴的移动。

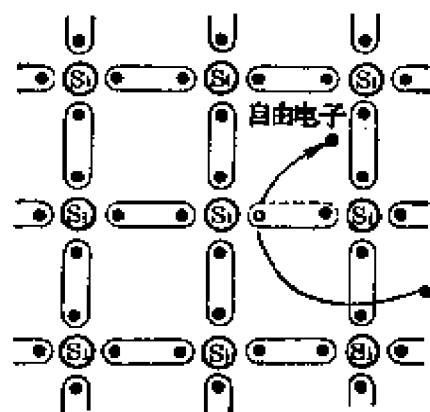


图 14.3

由于空穴的移动总是伴随着正离子的移动，空穴的运动相当于正电荷的运动，所以空穴也可以看做载流子。它同自由电子一样，同样可以传导电流。

在同样电压的作用下，一块半导体里载流子的数目越多，它们作定向运动形成的电流就越大，也就是说半导体里载流

子越多，它的导电能力越强。用升高温度和光线照射的方法都可以使更多的价电子从共价键上挣脱出来，形成更多的电子-空穴对，即形成更多的载流子，所以说半导体的导电能力受温度和光照的影响很大。

二、*N*型半导体和 *P*型半导体

上面讲的是纯净半导体的情况，前面提到半导体材料中掺入杂质元素也会大大地改变它的导电能力，为什么掺入杂质会影响它的导电能力呢？下面我们来说明这个问题。

我们知道磷是五价元素，也就是说磷原子的最外层有五个价电子。把微量的磷掺入硅单晶体中以后，每一个磷原子就会代替一个硅原子的位置而跟相邻的四个硅原子组成共价键。磷原子的五个价电子中，四个电子组成共价键，还多余出

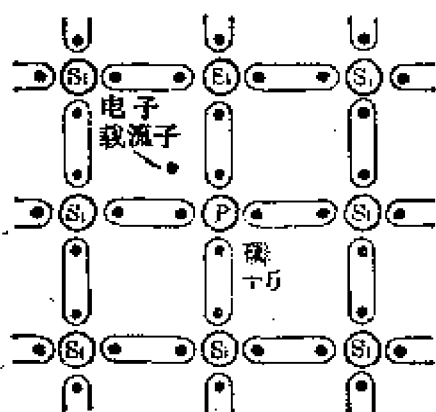


图 14.4

一个电子，它受原子核的束缚力很小，因此很容易挣脱束缚而成为自由电子(图 14.4)。而磷原子本身就带正电成为正离子。这种掺磷的半导体中，虽然掺入的磷与硅原子比较是微量的，但里面含有磷原子的数目却很多。所以掺磷以后半导体中电子载流子的数目就大大增加成为主要的载

流子，这种半导体中虽然仍旧有少量的空穴存在(它们是由于热运动，共价键上电子挣脱束缚逸出以后产生的)，但不是主要的。这种主要靠电子载流子导电的半导体，叫做电子型半导体，通常称做 *N* 型半导体。

如果在纯净的半导体中掺入的杂质不是五价元素而是三

价元素，那么主要载流子的情况就不一样了。例如在硅单晶体中掺入三价元素硼，那么硼原子在取代一个硅原子的位置而和相邻的四个硅原子组成共价键结构时，便缺少一个价电子而留下一个空穴，如图 14.5 所示。这样掺入硼以后空穴的数目就大大超过自由电子，成为主要的载流子。这种半导体主要靠空穴载流子导电，所以叫空穴型半导体，通常称做 *P* 型半导体。*P* 型半导体中，硼原子从附近硅原子夺取一个电子而形成的空穴，相邻硅原子共价键上的电子就可以过来填补这个空穴。硼原子在接受电子后，本身就带负电成为负离子。

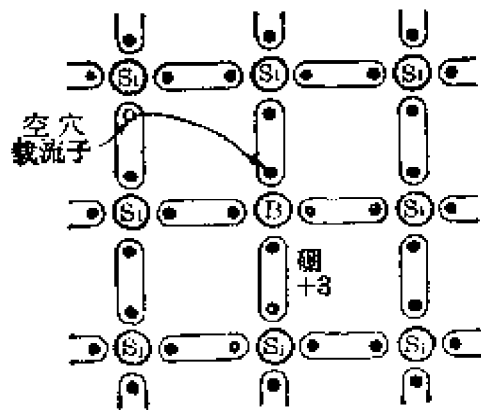


图 14.5

第二节 *PN* 结及其特性

一、*PN* 结的形成

如果在一块半导体内一边制成 *P* 型，一边制成 *N* 型，那么将会产生什么结果呢？

让我们回忆一下几个熟知的现象：把一点蓝墨水滴在一杯清水中，渐渐地一杯清水都会变成蓝色；一瓶汽油，当瓶盖一打开，室内就会充满汽油味；同样在一块田里施氨水，附近就能闻到氨的气味。在日常生活中，可以碰到很多类似这样的现象，这些都是扩散的结果。它说明物质都要从浓度大的地方向浓度小的地方扩散。

当我们用某种工艺把一块半导体制成 *P* 型和 *N* 型两部

分时，在这两个部分的交界处也会发生类似的扩散运动。 P 区中有大量可以移动的空穴，而 N 区中空穴很少，空穴就要从 P 区向 N 区扩散；同时 N 区有大量自由电子，而 P 区中自由电子很少，电子就要从 N 区向 P 区扩散。图14.6a示意地表示了这种扩散运动。

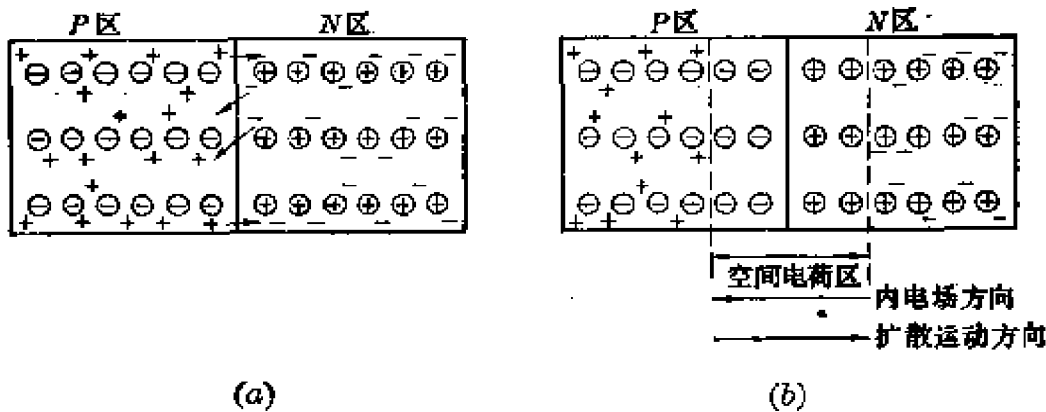


图14.6 在 P 型半导体和 N 型半导体交界处,载流子的扩散运动
图中“-”表示自由电子;“+”表示空穴。

由于载流子浓度的差异引起了扩散,其结果在 P 区靠近 N 区的边界处失去了空穴,留下了带负电的原子(负离子),这样就形成了一个带负电荷的薄层。同样, N 区靠近 P 区的边界处失去了电子,留下了带正电的原子(正离子),形成了一个带正电荷的薄层。于是在边界两侧出现了一个有净电荷的区域,叫做 PN 结(图14.6b)。由于净电荷区的左边带负电,右边带正电,从而产生了电场,电场的方向是从右侧指向左侧,如图14.6b中箭头所示。这个电场的作用:一方面将阻碍 P 区空穴向 N 区扩散、 N 区电子向 P 区扩散,即削弱扩散运动。另一方面这个电场将使 P 区一侧薄层内的电子向 N 区运动, N 区一侧薄层内的空穴向 P 区运动。这种电子和空穴在电场作用下的运动称为漂移运动。漂移运动和扩散运动

方向相反,它们构成了 PN 结内部一对矛盾的两个方面。

在开始时,矛盾的一方扩散运动占优势,但随着扩散的进行, $P-N$ 交界两侧的净电荷不断地积累,其电荷区不断加宽,电场越来越强,相应地漂移运动也不断加强。最后电荷的扩散与漂移运动达到相对的平衡,矛盾的双方得到暂时的统一。这时扩散运动和漂移运动虽然仍在进行,但两者的作用互相抵销,交界两侧薄层中的净电荷不再增加,其电场达到稳定。

由于这个净电荷区的作用是阻碍载流子的扩散运动的,所以又叫做阻挡层。

二、 PN 结的单向导电性

晶体二极管就是由一个 PN 结加上电极引线和管壳做成的。为了便于了解 PN 结的特性,我们先用二极管来做个实验。

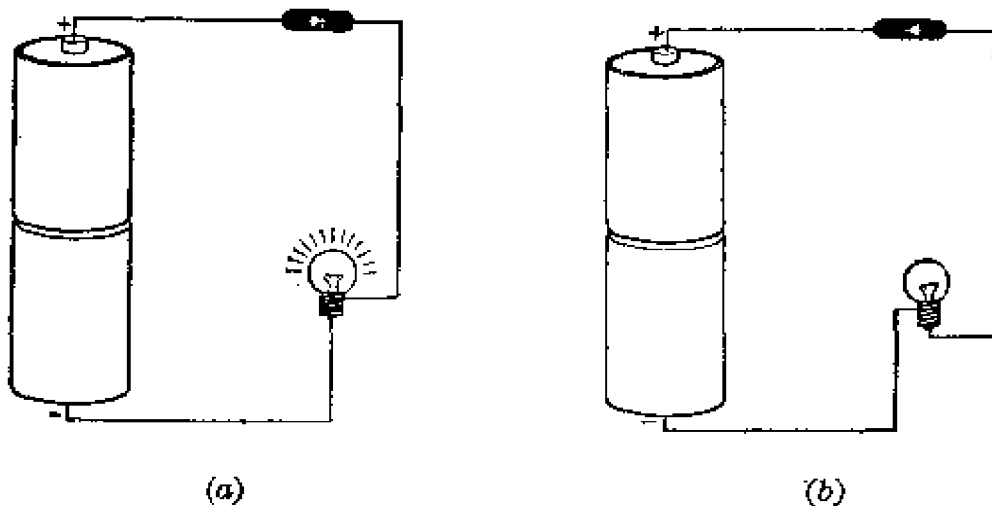


图 14.7

把二节干电池、一只小电珠、一只二极管串联起来,则可以看到二极管在一个方向联接时小电珠发亮(图 14.7a),若

把二极管反向联接时小电珠就不亮(图 14.7b)。这个实验说明二极管能否导电与它所接电池的极性有关, 即二极管只有一个方向是导电的, 另一个方向是不导电的。为什么二极管会有这样的特性呢? 这就要从二极管的组成部分—— PN 结在外加电压作用下的特性来进行分析。

把 PN 结跟电池相联接, 使 P 区接电池正极, N 区接电池负极, 如图 14.8a 所示。这时外接电压在半导体里产生

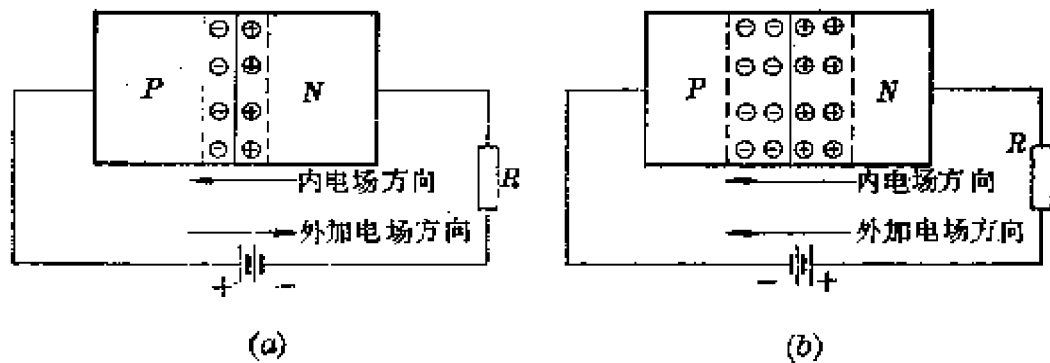


图 14.8 PN 结的单向导电性

一个电场, 它的方向是从 P 区指向 N 区, 跟 PN 结的内电场方向正好相反, 从而削弱了内电场对扩散运动的阻碍作用, 破坏了平衡, 扩散运动超过了漂移运动。 P 区的空穴就不断地越过阻挡层而向 N 区扩散, N 区电子也不断地越过阻挡层向 P 区扩散, 形成了较大的正向电流。这时 PN 结呈现的电阻很小, 处于导通状态。这时加在 PN 结上的外电压叫做正向电压。

若把 PN 结的 P 区跟电池负极相接, 把 N 区跟电池正极相接, 如图 14.8b 所示。那么外加电压在半导体中产生的电场跟 PN 结内电场方向一致, 使扩散运动遇到的阻碍作用增加, 载流子的扩散运动更加难于进行下去, PN 结呈现出很大的电阻。这时加在 PN 结上的外电压叫反向电压。

在外加反向电压作用下, PN 结内部的漂移运动超过扩散运动, 从而形成了一股反向电流。但是由于参与漂移运动的是 P 区存在着的极少量的电子和 N 区存在着的极少量空穴, 所以它们的运动所形成的电流是很微弱的。因此在反向电压下可认为 PN 结电阻很大, 基本上不导电。

当温度升高时, 由于热运动加剧, P 区和 N 区的电子-空穴对都会增加, 这样外加反向电压时, PN 结的反向电流就会增加, 所以 PN 结的反向电流随温度的升高而增加是很明显的。

第三节 晶体二极管的特性和参数

上节已提到晶体二极管就是一个 PN 结, 所以它的主要特性就是单向导电性。图 14.9 是两种二极管的电流随外加电压而变化的曲线。图 14.9a 是用锗半导体材料做的二极管的特性曲线, 而图 14.9b 是用硅半导体材料做的二极管的特性曲线。可以看出: 当二极管两端加正向电压时, 就产生正

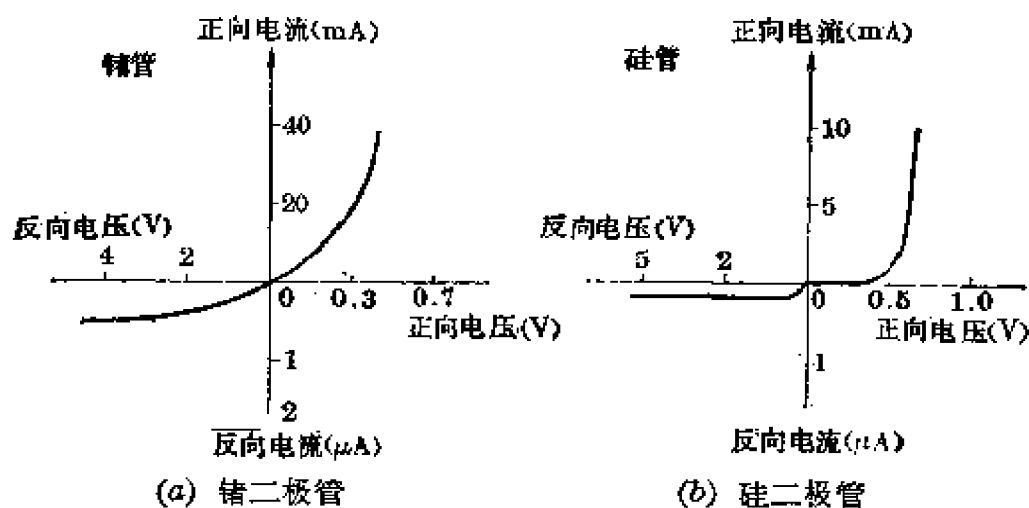


图 14.9 二极管的电流-电压特性曲线

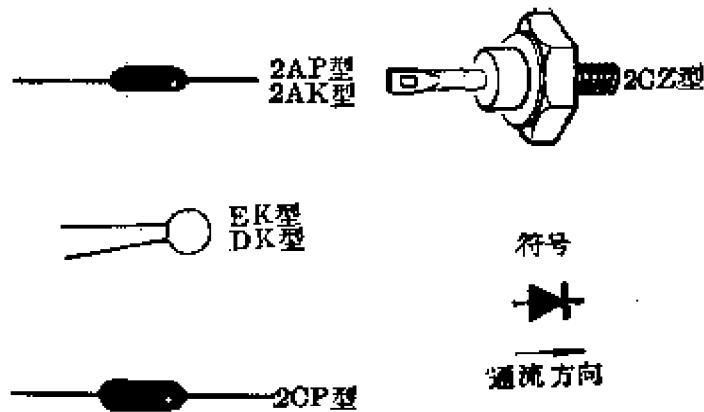


图 14.10 几种二极管的外形图

向电流；同时当外加正向电压比较小的时候，正向电流比较小。因为这时外加电压的电场还不足以克服阻挡层内电场对载流子扩散运动的阻力，扩散运动还比较弱；随着外加电压的增大而超过一定数值以后——这个数值对锗二极管约为 0.3 伏，对硅二极管约为 0.7 伏——内电场被大大削弱，正向电流才显著增加；在反向电压作用下，只有很小的反向电流，并且在一定反向电压范围内这个电流几乎不随反向电压而变化。

图 14.10 是几种常用二极管的外形以及二极管在电路图 中的代表符号。

二极管的性能常用一些参数来表示，主要的参数有两个：

最大整流电流 二极管在长期工作的情况下，所容许使用的最大正向电流，超过这个数值，二极管将因发热过多而改变性能或损坏。

反向击穿电压 二极管在电路中所受的反向电压不能超过一定数值，如果超过这个数值，反向电流将急剧增加，呈现电阻急剧减小，出现反向击穿现象，很容易烧坏管子。一般手册上除了给出反向击穿电压外，还给出最高反向工作电压，它的数值通常是击穿电压的一半，在使用二极管时反向电压都

不希望超过这个数值。

下表给出了几种常用二极管的型号和主要参数。

表 14.1 几种常用二极管的型号和主要参数

参 数	单 位	型 号			
		2AP1 ~2AP29	2CP6A ~2CP6F'	2CP21 ~2CP27	2CZ11 ~2CZ14
最大整流电流	mA	5~50	100	300	1A~10A
最高反向工作电压(峰值)	V	10~150	100~800	100~700	50~800
反向电流	μA	≤ 250	≤ 20	≤ 250	$\leq 0.6 \sim 6\text{mA}$
最高工作频率		40~150 MHz	50kHz	3kHz	3kHz
用 途		检波	整流	整流	大功率整流

二极管按用途不同可分为检波二极管和整流二极管两类,表 14.1 中 2AP 型是检波用的,它的工作频率较高,但容许通过的电流较小。2CP 型和 2CZ 型是整流用二极管,它们的工作频率较低,但容许通过的电流较大。在使用时要根据不同的要求选用二极管。

第四节 晶体二极管整流电路

一、半波整流电路

利用二极管的单向导电特性,可以把二极管用作整流元件将交流电转变为直流电。

最简单的整流电路是半波整流电路,如图 14.11 所示。图中 T 为电源变压器,它把输入交流电 e_1 变换为需要的电压 e_2 , D 为整流二极管, R_L 为负载电阻。

变压器次级电压 e_2 的波形如图 14.12a 所示。当 e_2 处于正半周时(图 14.12a 中 $O \sim t_1$)，设这时变压器次级 A 端为正， B 端为负，二极管 D 处于正向电压作用下， D 导通，有电

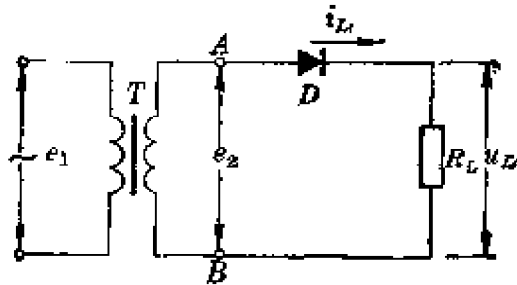
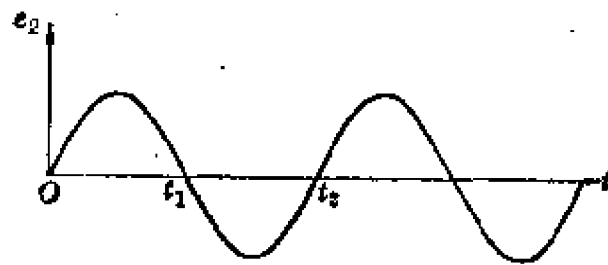
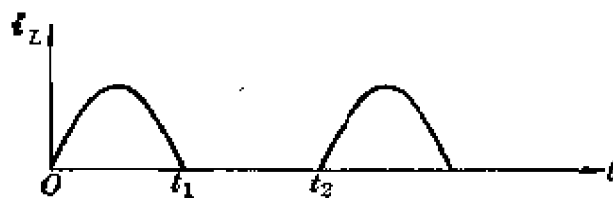


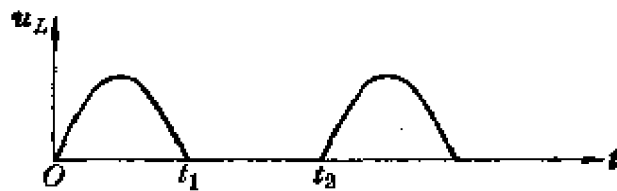
图 14.11 半波整流电路



(a) 输入电压



(b) 输出电流



(c) 输出电压

图 14.12 半波整流波形图

流 i_L 流过负载 R_L , R_L 两端产生电压降 u_L , 它们的波形分别如图 14.12b、c 中 $0 \sim t_1$ 之间一段波形。

在 e_2 的负半周时(图 14.12a 中 $t_1 \sim t_2$), 变压器次级 A 端为负, B 端为正, 二极管 D 处于反向电压作用下, D 不导通, 没有电流通过负载 R_L , R_L 两端没有电压输出(图 14.12b 和 c 中 $t_1 \sim t_2$ 一段波形)。这时加在二极管两端反向电压的最大值(或称峰值)是 $\sqrt{2} E_2$ (E_2 是交流电 e_2 的有效值)。

显然, 半波整流电路只利用了交流电的一半, 所以效率不高, 只用在小功率的场合。

二、桥式整流电路

为了使交流电的正半周和负半周都得到利用, 人们采用了桥式整流电路。它是由四个二极管组成, 如图 14.13 所示。

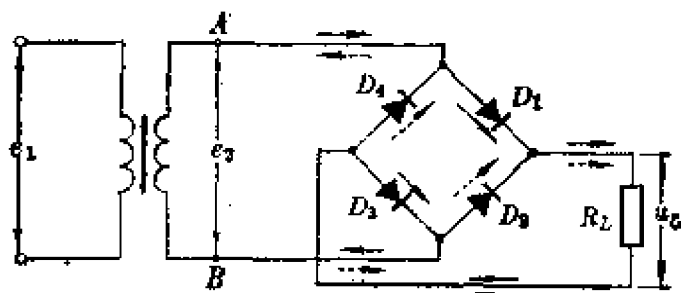


图 14.13 桥式整流电路

在交流电压 e_2 的正半周时(图 14.14a 中 $0 \sim t_1$), 变压器次级 A 端为正, B 端为负, 二极管 D_1 、 D_3 导通。电路中电流从 A 端经 D_1 、 R_L 、 D_3 回到 B 端, 如图 14.13 中实线箭头所示。这时 D_2 、 D_4 上受到的是反向电压, 故不导通。

在 e_2 的负半周(图 14.14a 中 $t_1 \sim t_2$), A 端为负, B 端为正, 电路中电流从 B 端经 D_2 、 R_L 、 D_4 回到 A 端, 如图

14.13 中虚线箭头所示。这时 D_1 、 D_3 受到反向电压而不导通。

因此在交流电压 e_2 的一个周期中， D_1 、 D_3 和 D_2 、 D_4 轮流导通，负载 R_L 上一直有单方向的电流通过。负载 R_L 上的电流和电压的波形如图 14.14 中 b 和 c 所示。

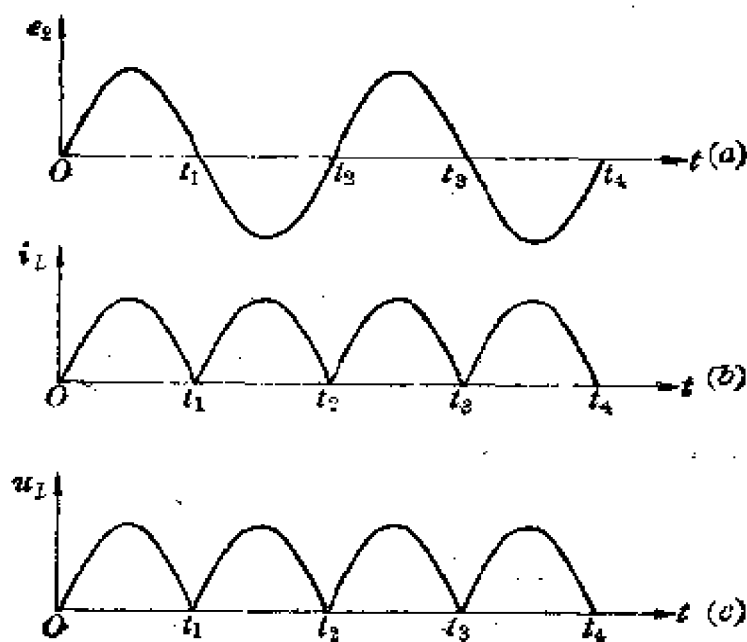


图 14.14

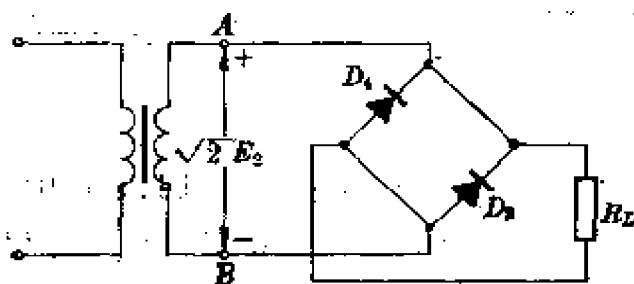


图14.15 D_1 、 D_3 导通时， D_2 、 D_4 所受的反向电压

桥式整流电路中，不导通的二极管所受到反向电压的最大值仍旧是 $\sqrt{2}E_2$ (E_2 是交流电压 e_2 的有效值)。我们通过

重画图 14.13 来说明这一点。在 e_2 正半周, D_1 、 D_3 导通, 它们上面的电压降很小, 可以认为短路, 这时图 14.13 可以改成图 14.15。从图可以看出, D_2 、 D_4 的负极与 A 端相接, 正极与 B 端相接, 所以 D_2 、 D_4 所受反向电压的峰值就是变压器次级电压 e_2 的峰值 $\sqrt{2}E_2$ 。

在整流电路中二极管所受反向电压的峰值的大小是选用二极管型号的一个依据。

三、电容滤波器

不管是半波整流或是桥式整流, 从它们整流后输出的电流或电压波形可以看出, 它们都不是平稳的直流电, 而是大小随时间而变动的所谓脉动直流。这种脉动直流还不能满足收

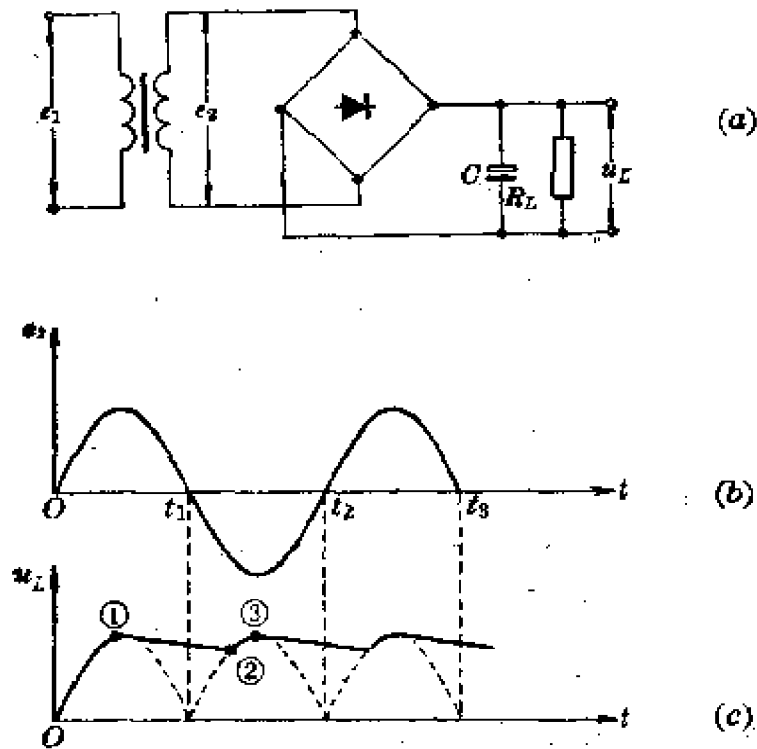


图 14.16 电容滤波器及其输出电压波形

注: 图中(a)方块中画一只二极管是桥式整流的简化画法。

音机或电子仪器的要求。例如晶体管收音机如用这种脉动直流来代替干电池供电，音质就大大变坏，“嗡嗡”的噪声（即交流声）显著增大。

为了使整流后的脉动直流变为比较平稳的直流电，这就需要在整流电路中加入滤波器。最常用的方法是在整流电路负载 R_L 两端并联一只容量比较大的电容器 C 。图 14.16a 就是带有滤波电容器的桥式整流电路。图 14.16b 是交流电压 e_2 的波形，经整流而未用滤波器的输出电压波形如图 14.16c 中虚线所示。当输出端并联上一只电容器以后，由于电容器的充放电作用，输出电压波形如图 14.16c 中实线部分所示。可以看出输出电压的脉动程度大大地减小了。

下面我们具体来分析一下电容器平滑脉动电压的过程。

在 e_2 正半周，二极管 D_1 、 D_3 导通，整流电流的一部分流经负载 R_L ，另一部分对电容器 C 充电， C 上电压随 e_2 的升高而升高，直至达到 e_2 的峰值 $\sqrt{2}E_2$ 。当 e_2 从峰值下降时， C 上电压大于 e_2 ，二极管 D_1 受反向电压作用而截止。电容器 C 通过 R_L 放电， C 两端电压逐渐下降，如图 14.16c 中线段 ①~② 所示。放电可以持续到 e_2 的负半周，当 e_2 的大小大于 C 上的剩余电压时（图 14.16c 中点 ② 处）， D_2 、 D_4 导通，又有一部分电流通过负载 R_L ，另一部分电流再次对 C 充电达到峰值 $\sqrt{2}E_2$ ，如图 14.16c 中 ②~③ 线段所示。以后重复上述过程，从而得到比较平稳的输出电压。

从要求输出电压平稳来考虑，滤波电容器的电容量愈大愈好。对同样的负载 R_L ， C 的容量愈大，放电愈慢，输出电压愈平稳。但电容 C 大了以后，对 C 的充电电流也要增大，这就要求整流管的整流电流要大，提高了对整流管的要求。滤波电容器的电容量通常在几百微法到几千微法的范围内选

用。

表 14.2 摘录了半波整流和桥式整流的一些数据以供参考。

表 14.2 半波整流和桥式整流的一些数据

		半波整流	桥式整流
输出直流电压 U_L	无滤波器	$0.45E_2$	$0.9E_2$
	有电容滤波器	$(0.7\sim 0.83)E_2$	$(1\sim 1.4)E_2$
负载 R_L 上的直流电流 I_L		U_L/R_L	U_L/R_L
流过每个二极管的电流 I_D		I_L	$1/2I_L$
每个二极管所受反向电压峰值		$\sqrt{2} E_2$	$\sqrt{2} E_2$

注：表中 E_2 为输入交流电压有效值。

第五节 晶体三极管

一、晶体三极管的工作原理

晶体三极管简称晶体管，具有放大电信号的作用，从而获得广泛的应用。

晶体管的结构可以示意地用图 14.17 来表示。它由三层半导体组成，中间一层叫做基区，两边两层分别叫发射区和集

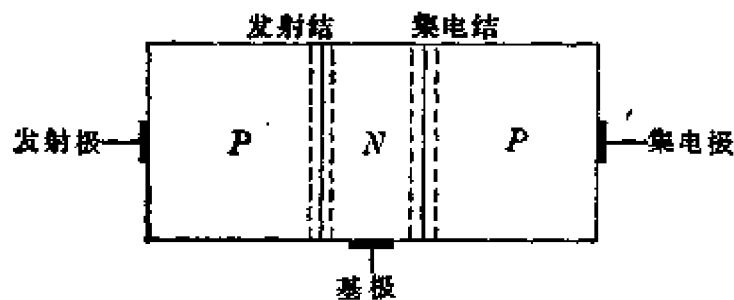


图 14.17 PNP 型晶体管结构示意图

电区。三个区的引出线分别是晶体管的三个极，即发射极 e ，基极 b ，集电极 c 。在发射区和基区交界处形成一个 PN 结，叫发射结，在集电区和基区交界处形成一个 NP 结，叫集电结。

晶体管从结构形式上分有 PNP 型和 NPN 型两种。基区是 N 型半导体，发射区和集电区是 P 型半导体的称为 PNP 型；基区为 P 型半导体，发射区和集电区是 N 型半导体的称为 NPN 型。图 14.18 是两种型式管子在电路中的代表符号。

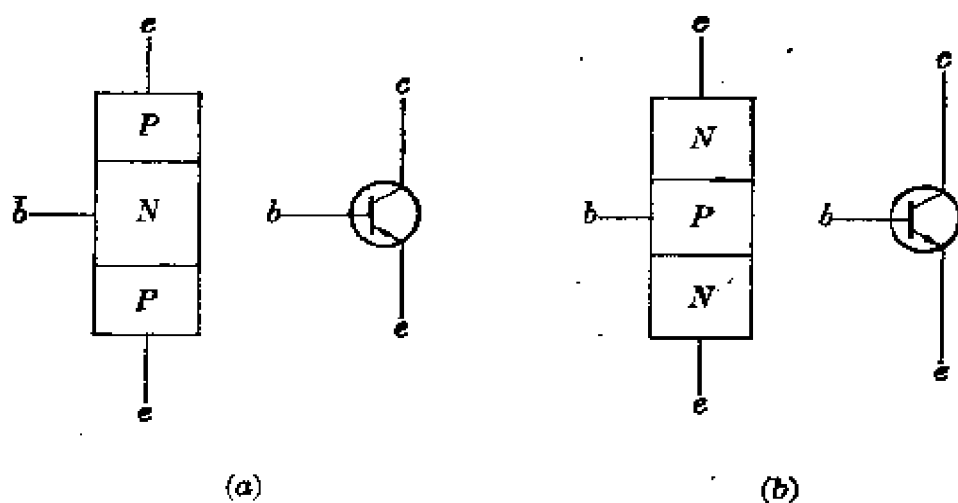


图 14.18 晶体管在电路图中的代表符号

制造晶体管的半导体材料有锗和硅，所以晶体管又有锗管和硅管之分。目前国产晶体管 PNP 型以锗管为多， NPN 型以硅管为多。

二、晶体三极管的工作原理

为了了解晶体管的工作特点，我们先做一个实验。取一个晶体管联接成如图 14.19 所示的电路，电路中三只电流表

可以分别测出发射极电流 I_e ，基极电流 I_b 和集电极电流 I_c 。

测试时先断开开关 K ，测出 I_e 和 I_c ，这时 I_e 和 I_c 的值很小。然后接通 K ，这时基极回路中有基极电流 I_b 流通。调节电位器 R_b ，使 I_b 先取比较小的值，例如 $20\mu\text{A}$ ，读出 I_e 和 I_c ，然后使 I_b 增加，每增加一次 I_b ，读出一次相应的 I_e 和 I_c 的值。下表是对某 PNP 合金型锗管的测试记录。

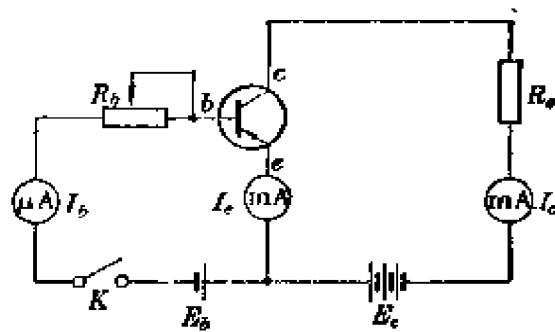


图 14.19

表 14.3 锗管的测试记录

$I_b(\mu\text{A})$	0	0.02	0.04	0.06	0.08
$I_c(\text{mA})$	0.34	1.54	2.74	3.94	5.14
$I_e(\text{mA})$	0.34	1.56	2.78	4.00	5.22

从上面实验的结果可以看出：

1. 没有基极电流，集电极电流等于发射极电流，它们的值是很小的，此电流叫做穿透电流，用 I_{co} 表示。
2. 只要有一点基极电流，就会出现很大的集电极电流和发射极电流，它们的大小要比基极电流大许多倍。
3. 当基极电流 I_b 增加时，集电极电流 I_c 亦增加， I_e 的

增加量比 I_b 的增加量要大得多，这说明晶体管有放大作用， I_b 的微小变化，可以引起 I_c 的甚大的变化。

4. 每次测量中发射极电流总等于集电极电流和基极电流之和，即 $I_e = I_c + I_b$ 。

为什么晶体管内部各个电流之间会有这些规律呢？让我们从晶体管内部载流子运动的规律来加以讨论。下面具体讨论 *PNP* 型晶体管载流子的运动情况。

发射结由电源 E_b 加给正向电压，发射结阻挡层的内电场被削弱，发射区的空穴就源源不断越过 *PN* 结扩散到基区形成发射极电流 I_e 。同时基区的电子当然也会越过 *PN* 结扩散到发射区，但在晶体管制造时都是使发射区掺的杂质较多，空穴浓度很高，而基区掺的杂质较少，电子的浓度很低。这样基区注入到发射区的电子电流与发射区注入到基区的空穴电流相比，小到可以忽略的程度，所以发射极电流 I_e 主要是空穴电流，如图 14.20 中大箭头所示。这就是发射区向基区注入空穴的过程。

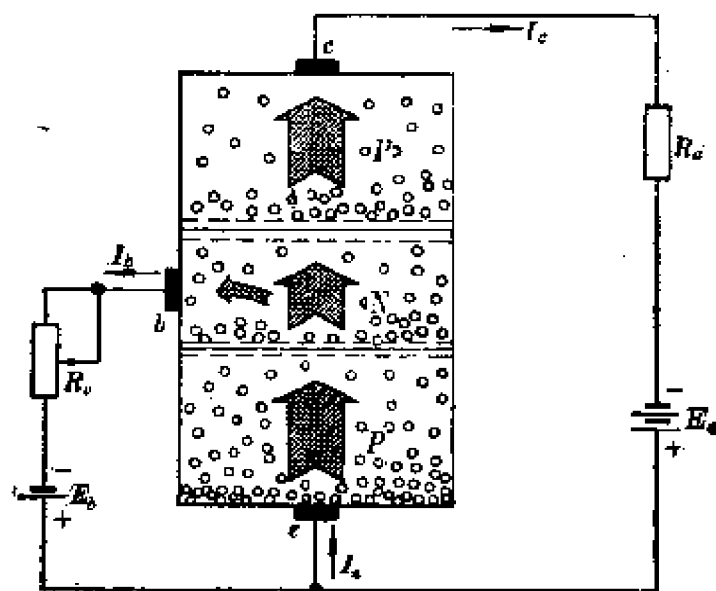


图 14.20 晶体管内部载流子的运动

大量的空穴到达基区后,使靠近发射结的空穴增多,但靠近集电结的空穴很少,在基区中形成浓度差别,空穴就向集电区继续扩散。在扩散过程中,有一部分空穴与基区中的电子相遇而复合,由于基极接 E_b 的负极,所以外电源不断向基区补充复合而失去的电子,形成基极电流 I_b 。因为基区都做得很薄,空穴穿过基区的时间极短,所以复合的数量很小,形成的 I_b 也很小,绝大部分空穴都穿过基区到达集电区。在基区中复合形成的基极电流 I_b 如图 14.20 中分支小箭头所示。这是空穴在基区中的扩散和复合过程。

集电极上接的是负电压,集电结上外加电场的方向跟结的内电场方向相同,都是从基区指向集电区。因此扩散通过基区的空穴,在这个外电场作用下,顺利地越过集电结进入集电区,最后到达电源 E_c 的负极形成集电极电流 I_c ,如图 14.20 中大的分支箭头所示。这是空穴被集电极收集的过程。

由上可知,从发射区注入基区的空穴,大部分越过基区流向集电极形成 I_c ,只有极小一部分空穴在基区与电子复合形成 I_b 。所以发射极电流等于集电极电流与基极电流之和,而集电极电流 I_c 要比基极电流 I_b 大很多倍。

三、晶体三极管的主要参数

晶体管有各种各样的类型,它们的性能亦极不相同,为了便于选用,常用一些参数来表示它们的性能。晶体管的参数很多,这里只介绍主要的几项。

电流放大系数 β 晶体管集电极电流 I_c 与基极电流 I_b 之比叫做直流放大系数,用 $\bar{\beta}$ 来表示(或用 h_{FE} 来表示),即

$$\bar{\beta} = \frac{I_c}{I_b}。$$

例如上节测试中:当 $I_b=0.06\text{ mA}$ 时, $I_c=3.94\text{ mA}$ 时,

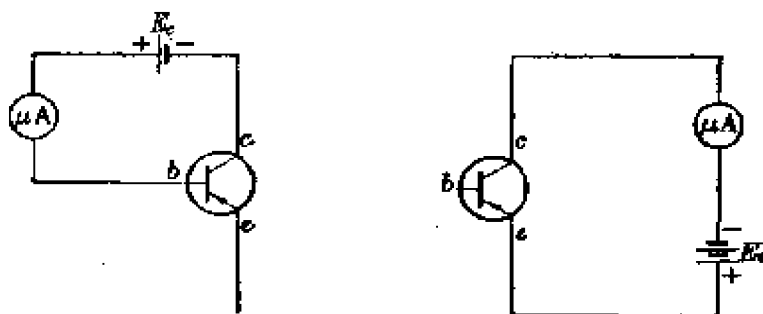
$$\bar{\beta} = \frac{3.94}{0.06} \approx 66。$$

除了直流放大系数外,还有一个动态电流放大系数,用 β (或 h_{fe}) 来表示。它是指在集电极电压保持不变的条件下,集电极电流的变化量 ΔI_c 与基极电流变化量 ΔI_b 之比,即

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}。$$

一个晶体管的 $\bar{\beta}$ 或 β 值跟管子的工作状态有关。在 I_c 比较小时,电流放大系数都比较小;在 I_c 为 1 mA 以上时,在较大一个范围内,小功率晶体管的电流放大系数基本恒定。同一个晶体管的直流放大系数 $\bar{\beta}$ 和动态电流放大系数 β 也有差别,但相差不是很大,在以后的使用中将认为两者是相等的。

集电极反向电流 I_{cbo} 发射极开路时,集电结加反向电压,则集电区的少量电子和基区的少量空穴各向对方区域漂移运动加强,形成漂移电流,这就是集电极反向电流 I_{cbo} 。反向电流通常很小,在一定范围内与反向电压的大小无关,它的测试电路如图 14.21a 所示。



(a) I_{cbo} 的测量

(b) I_{eso} 的测量

图 14.21 晶体管极间反向电流的测试电路

I_{cbo} 受温度的影响很大, 随着温度的增加而增加。在常温下, I_{cbo} 的数值都很小, 小功率锗管的 I_{cbo} 约在数微安到数十微安之间, 硅管的 I_{cbo} 都小于 $1 \mu A$ 。

I_{cbo} 的大小是衡量晶体管质量的标志之一。 I_{cbo} 过大会影响管子的工作稳定性。

穿透电流 I_{ceo} 基极开路时, 集电极和发射极之间的反向电流。例如在前面图 14.19 中, 当 $I_b=0$ 时, 量得的 I_c 即是穿透电流 I_{ceo} 。参照图 14.21b, 当基极开路, 接在集电极与发射极之间的电压 E_c , 对于发射结来说是外加正向电压, 对于集电结来说却是外加反向电压。因此集电区的少量电子漂移到基区形成反向电流 I_{cbo} , 发射区在正向电压作用下有空穴注入基区, 其中除一小部分与集电区漂移过来的电子流 I_{cbo} 复合以外, 剩下的大部分都越过基区为集电极所吸收。根据晶体管的特性, 越过基区到达集电极的空穴数是在基区复合掉的空穴数的 β 倍, 所以总电流

$$I_{ceo} = I_{cbo} + \beta I_{cbo} = (1 + \beta) I_{cbo}。$$

由上述可见穿透电流 I_{ceo} 比 I_{cbo} 大得多, 所以它的影响亦比 I_{cbo} 更大些, 它也是衡量一个管子的质量标准。良好的管子, I_{ceo} 都比较小。

集电极最大允许电流 I_{CM} 当集电极电流 I_c 超过这个数值时, 晶体管的参数开始发生变化, 特别是电流放大系数将下降, 所以使用时应注意不要超过所规定的 I_{CM} 。

集电极-发射极反向击穿电压 BU_{ceo} 基极开路时, 加在集电极和发射极之间的最大允许电压, 超过这一数值, 将使管子击穿而损坏。例如, 图 14.19 中的 E_c 不应超过 BU_{ceo} 。

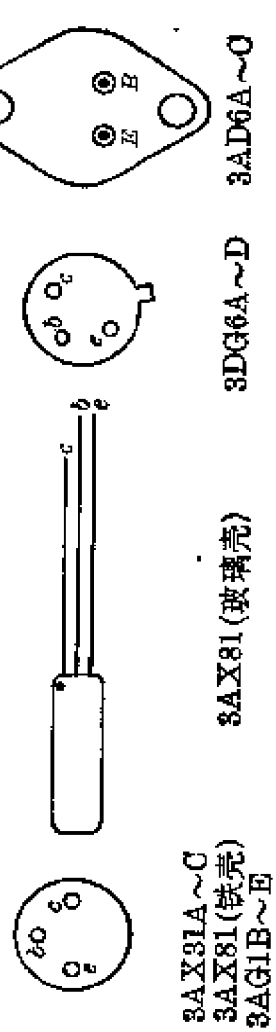
集电极-基极反向击穿电压 BU_{cbo} 发射极开路时, 允许加在集电极和基极之间的最大反向电压, 超过这个数值, 将

表 14.4 几种常用晶体管的参数

型号	参 数						符 号		
	I_{CEO}	h_{FE}	BU_{csc}	I_{CM}	P_{CM}	h_{fe}	f_T		
3AX31A~C	$\leq 500 \sim 1000 \mu A$ ($U_{ce} = -6V$)	$30 \sim 200$ ($U_{ce} = -1V$ $I_c = -100mA$)	$\geq 12 \sim 25V$ ($I_c = -2mA$)	125mA ($U_{ce} = -1V$)	125mW				
3AX81	$\leq 1000 \mu A$ ($U_{ce} = -6V$)	$30 \sim 250$ ($U_{ce} = -1V$ $I_c = -175mA$)	15V	250mA	200mW				
3AD6A~C	$\leq 2.5mA$ ($U_{ce} = -10V$)	≥ 12 ($U_{ce} = -2V$ $I_c = -2A$)	$18 \sim 30V$ ($I_c = -10mA$)	2A	10W 附加 120×120 $\times 4mm^3$ 铝散 热片				
3AG1B~D			10V ($I_c = -1mA$)	10mA	50mW	$20 \sim 200$ ($U_{ce} = -6V$ $I_c = 1mA$ $f = 1kHz$)	$25 \sim 65MHz$ ($U_{ce} = -6V$ $I_c = 1mA$ $f = 10MHz$)		
3DG6A~D	$< 0.1 \mu A$ ($U_{ce} = 10V$)	$10 \sim 200$ ($U_{ce} = 10V$ $I_c = 3mA$)	$15 \sim 30V$ ($I_c = 200 \mu A$)	20mA	100mW		$100 \sim 250MHz$ ($U_{ce} = 10V$ $I_c = 3mA$ $f = 30MHz$)		

注: ① 参数下括号 () 中的电压、电流是测试条件。

② 管脚排列如下图:



造成集电结击穿而损坏。

集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 晶体管在工作时，集电极-发射极之间存在着一定的电压 U_{ce} ，因流过管子的电流为 I_c ，所以集电极耗散的功率为 $P_c = I_c U_{ce}$ 。这耗散的功率将使管子结的温度升高，如果耗散功率过大，管子温度上升太高，就会影响管子性能，甚至损坏。所以晶体管根据散热情况，都规定一个最大集电极耗散功率 P_{CM} 。使用中不应超过此值，以免损坏晶体管。

共发射极截止频率 f_{β} 晶体管在运用时，输入讯号加在基极和发射极之间，输出讯号取自集电极和发射极，这样发射极对输入端和输出端来说是共用的，叫做共发射极接法（这种接法在晶体管电路中用得最多）。这时集电极电流 I_c 的变化量是基极电流 I_b 的变化量的 β 倍。随着工作频率的增加，集电极电流 I_c 将跟不上基极电流 I_b 的变化，从而使晶体管的 β 值下降。工作频率越高，晶体管的 β 值下降越多。当 β 值下降到低频时的 70% 时的频率，称为共发射极截止频率 f_{β} 。根据截止频率的高低，晶体管有高频管和低频管之分。

特征频率 f_T 指 β 下降到 1 时所对应的频率，它能反映出晶体管可以起电流放大作用的最高频率（极限频率）。在 $f_{\beta} < f < f_T$ 的范围内， $f \times \beta = f_T$ 。

表 14.4 给出了几种常用晶体管的参数。

四、用万用表检验晶体管

利用万用电表可以粗略地检查一下晶体管的性能。

如图 14.22 所示进行测量，对 PNP 型管子，把万用表黑棒接发射极，红棒接集电极，电表上转换旋钮置于欧姆档 $R \times 1k$ 。一般良好的管子，指针偏转角度都较小，读数约在几

十 $k\Omega$ 以上。如果电阻值较小,说明 I_{ceo} 比较大,管子温度稳定性较差,如果阻值接近于 0 或阻值很大,指针不动,则管子已经损坏。

用万用表估计电流放大系数 β 的方法,只需跟测量 I_{ceo} 时一样接法,如图 14.22 所示。首先检查 I_{ceo} 的大小,观察指针偏转角度,然后在集电极和基极之间接一 $100 k\Omega$ 的电阻并把图中开关 K 闭合,这时电表指针偏转角度将增加,前后两次指针偏转角度相差愈大,表示管子 β 值愈高。

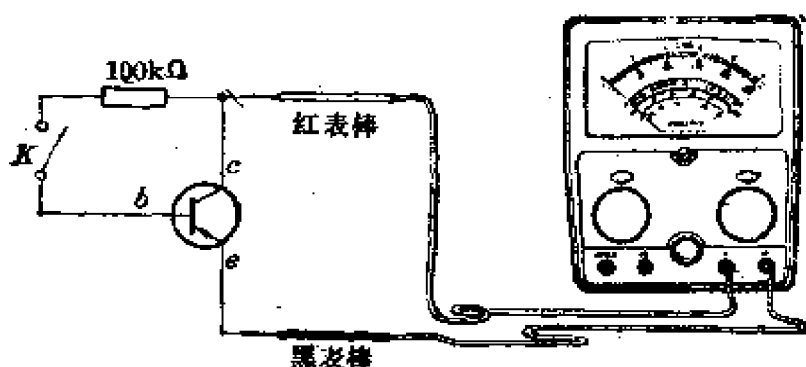


图 14.22 晶体管 I_{ceo} 和 β 的检查

第六节 晶体三极管的静态工作点和偏置电路

一、静态工作点

前面提到晶体管可以用来放大电信号,图 14.23 是一个

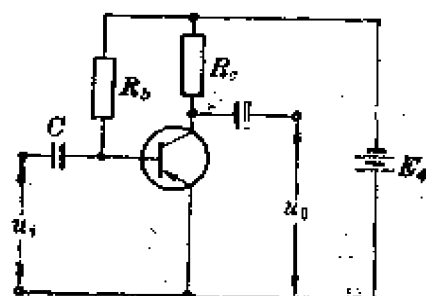


图 14.23 单级晶体管放大电路

简单的晶体管放大器电路，需要放大的电信号（输入信号） u_i 通过电容 C 加在基极和发射极之间，放大的信号（输出信号） u_o 从集电极和发射极之间取出。

图中直流电流有两条通路：一条是从

E_c 正极 → 发射极 → 基极 → R_b → E_c 负极，

发射结被加上正向电压，有基极电流 I_b 流通；另一条是从

E_c 正极 → 发射极 → 集电极 → R_c → E_c 负极。

当基极有电流 I_b 时，此回路中的集电极电流

$$I_c = I_{c0} + \beta I_b,$$

这时集电极和发射极之间的电压

$$U_{ce} = -E_c + I_c R_c.$$

在没有信号输入时， I_b 、 I_c 、 U_{ce} 都不会随着时间变化，称为静态电流和电压，如图 14.24 所示的各自波形图中 A 到 B 的一段。

当有信号电压 u_i 加到基极上时，在 u_i 正向变化时（图 14.24a 中 BC 段），发射结正偏电压将减小，基极电流 i_b 亦减小，在 u_i 向负向变化时（图 14.24a 中 CD 段），发射结正偏电压将增大，基极电流 i_b 亦增大。所以基极电流 i_b 是随着 u_i 而变化的，如图 14.24b 曲线。同时引起相应变化的集电极电流 $i_c = \beta i_b$ ，其波形如图 14.24c 曲线。由于 i_b 是变化的，所以集电极-发射极电压亦是变化的， $u_{ce} = -E_c + i_c R_c$ ，其波形如图 14.24d 所示。

在图 14.24 中， i_b 和 u_{ce} 的波形跟输入信号 u_i 的波形是相似的，仅仅只是把 u_i 放大了一定的倍数。对于一个放大器来说，我们要求它输出波形要尽可能跟输入波形一模一样。如果输出波形跟输入波形不相似则叫做出现了畸变（或失真），这是所不希望有的。

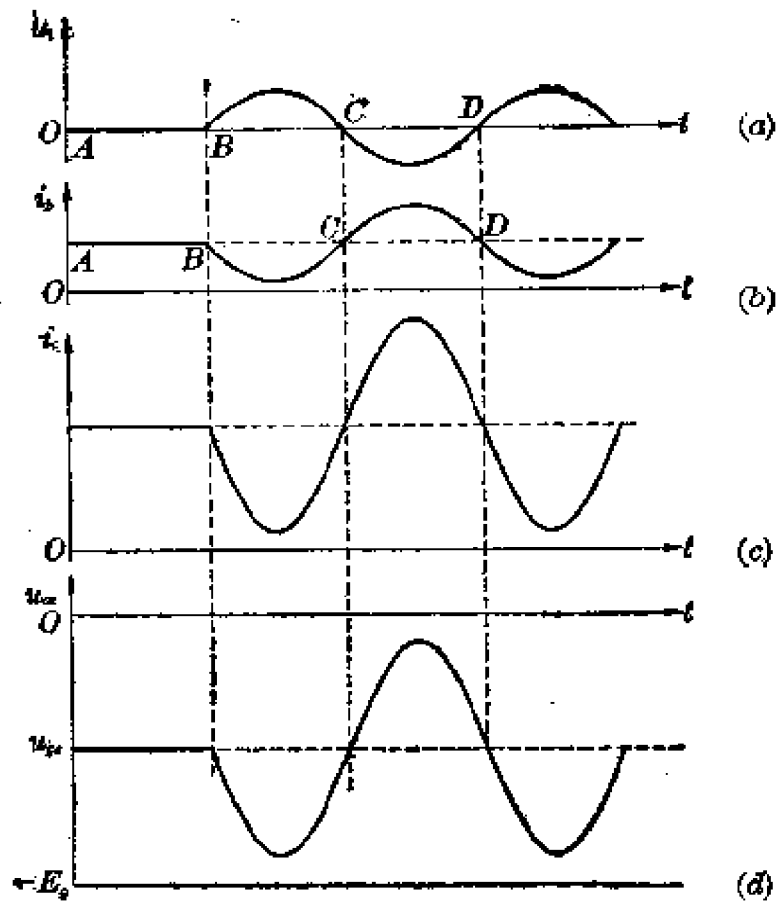


图 14.24 i_b, i_c, u_{ce} 随 u_i 变化的波形图

为了使输出信号没有畸变或畸变尽可能小，必须选择适当的 I_b 和 U_{ce} 。这可以用图 14.25 中的各个波形来说明。如果 I_b 选择得太小，相应的 U_{ce} 就比较大 ($U_{ce} = -E_c + I_c R_c$)，则当 u_i 向正向变化时，在一段时间内可能使 $i_b \approx 0$ ， i_c 也减小到接近于 0， i_b 不再随信号 u_i 的变化而变化， u_{ce} 则增大到近于 $-E_c$ 的值， i_b 和 u_{ce} 的波形如图 14.25a 所示，可见输出波形有明显的畸变。这种现象叫做截止失真。

如果 I_b 选择得太大，相应的 U_{ce} 太小，则当 u_i 向负向变化时， i_b 增大， i_c 增大， R_c 上的电压降 $i_c R_c$ 亦增加，当 i_c 增加到使 $i_c R_c$ 近乎等于 E_c 时，晶体管的电压降 u_{ce} 减小到接近于 0。这时即使 i_b 再增加， i_c 因受 E_c 和 R_c 的限制亦不再

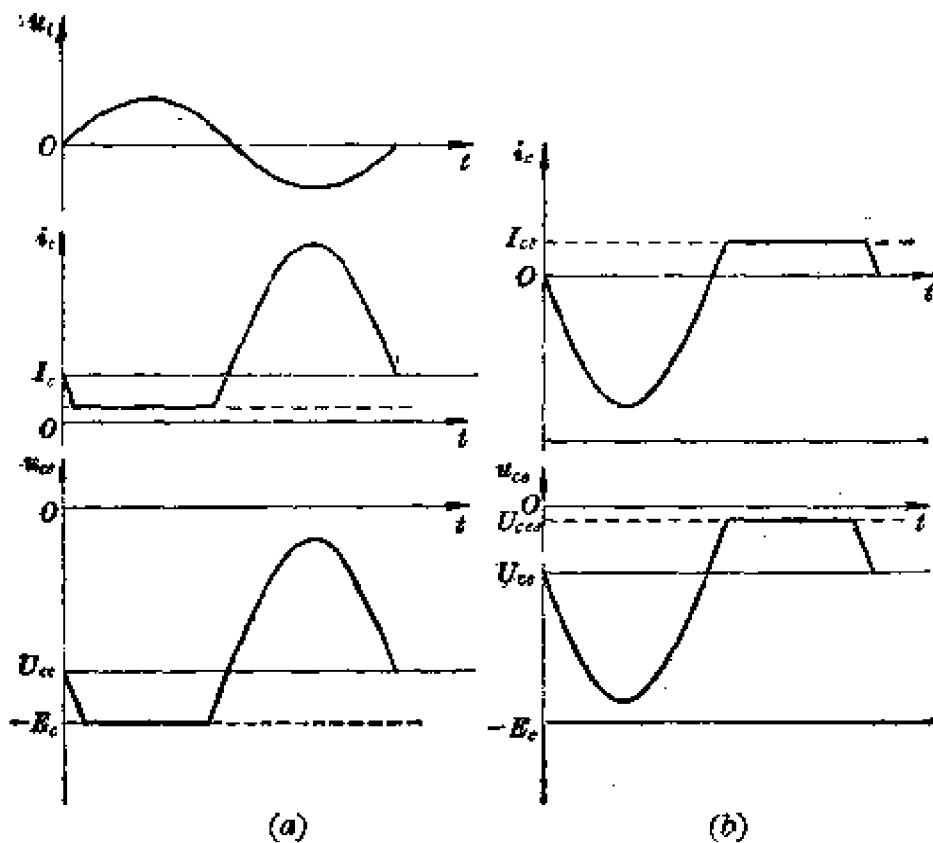


图 14.25 半导体晶体管静态工作点对输出波形的影响

增加。 i_c 和 u_{ce} 的波形如图 14.25b 所示，可见它们的波形亦有明显的畸变。这种现象叫做饱和失真。

由此可见，晶体管用来放大电信号时，必须选择合适的 I_c 和 U_{ce} 。在没有输入信号时，晶体管的 I_c 和 U_{ce} 叫做晶体管的静态工作点。为使晶体管有合适的静态工作点，就要给晶体管加入适当的基极电流 I_b ， I_b 又称做基极偏流。提供偏流的电路叫做偏置电路。图 14.23 中偏流是由 E_c 通过 R_b 提供的，调节 R_b 的大小可以调节 I_b ，从而调整工作点 I_c 和 U_{ce} 。

二、常用的偏置电路

在晶体管工作原理一节中，我们知道当 $I_b \neq 0$ 时，晶体管

集电极电流为穿透电流 I_{ceo} 。当基极电流从 0 增加到 I_b ，则集电极电流增加 βI_b ，即

$$I_c = I_{ceo} + \beta I_b$$

当由于某种原因而使晶体管的温度升高时，将使 I_{ceo} 增加，从而使 I_c 亦增加。这样将改变原来所确定的静态工作点，影响管子的正常工作。图 14.23 的放大器偏流是通过 R_b 而获得的，当温度变化时，无法保持 I_{ceo} 不变，所以静态工作点受温度影响很大。

为了使晶体管的静态工作点比较稳定，大都采用图 14.26 所示的偏置电路。这个电路所以能稳定工作点是由于下列两个特点：

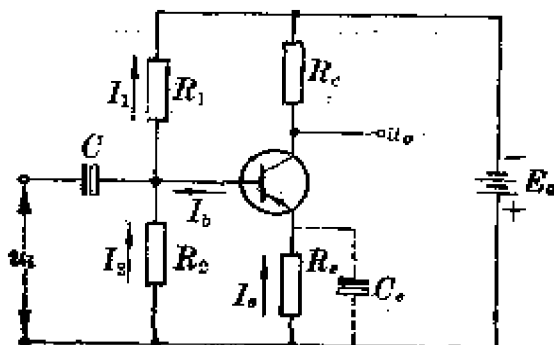


图 14.26 分压式偏置电路

1. 基极通过分压器 R_1 、 R_2 获得电压 U_b ，只要使流过 R_1 、 R_2 的电流 I_1 和 I_2 比 I_b 大得多，则可以认为 I_2 和 I_1 基本相等，即 $I_1 = I_2 + I_b \approx I_2$ 。这样基极电压 U_b 基本上由 R_1 、 R_2 分压确定。而

$$U_b = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_0,$$

只要 R_1 、 R_2 、 E_0 不随温度而变化， U_b 也就不随温度而变。

2. 电路的发射极上接入电阻 R_e ，当温度增加，引起 I_{ceo} 增加，从而使 I_c 、 I_e 增加时， R_e 两端的电压降 $U_{R_e} = I_e R_e$ ，

亦必然增加,在基极电压 U_b 保持不变的情况下,发射结的正向偏压 U_{be} 必然减小,从而使 I_b 减小,于是使 I_c 也减小。这样由于 R_e 的存在就牵制了 I_c 随温度的变化,从而获得比较稳定的静态工作点。

引入发射极电阻 R_e 虽然能够稳定静态工作点,但它同样对于输入信号引起集电极电流的变化也将有减弱作用,即将使 β_0 减弱,从而降低放大器的放大倍数。这个作用叫做负反馈。因此,为了避免 R_e 减弱交流信号,常常在 R_e 两端并联一只大容量的电容 C_e ,如图 14.26 中虚线所示。利用电容器有隔断直流,通过交流的作用,让 C_e 对交流信号起短路作用,这样对交流信号来说,发射极上 R_e 好象不存在一样。

有时为了改善放大器的性能,如减小畸变,提高稳定性,反而要利用 R_e 的交流负反馈作用,这时 R_e 上就不并联 C_e ,这在许多实用电路里亦是常见的。

第七节 晶体三极管在工农业生产中的简单应用

一、简易晶体管恒温控制器

在工农业生产和科学实验中,常常会遇到需要把温度保持在某一数值的“恒温”问题,例如“人工孵鸡”的温度控制,育种室里的种子发芽的温度控制,应用微生物制造农药、菌肥过程中的温度控制等等。这些都需要使用能自动保持温度恒定的温度控制器。

温度控制器跟一般的自动控制装置一样,有三个基本组成部分:1. 检测信号装置,它的作用是将温度变化转变成电信号的变化。热电偶、热敏电阻、温差电池等都是常用的检测元件,它们的电阻阻值或电动势大小随温度的改变而变化,并

有一定的比例关系。此外也有使用双金属片、水银温度计等感温元件的；2. 控制机构，它的作用是接受从检测信号装置送来的信号，经过处理（例如放大）向执行机构发出动作命令（操作指令）。控制机构一般都由一些晶体管电路组成；3. 执行机构，它的任务是接受控制机构送来的控制信号，完成某些操作任务。例如，接通或切断电路的操作，以达到自动控制温度的目的。执行元件通常有继电器、晶体管、可控硅等。

下面介绍一种结构简单的恒温控制器，其电路如图 14.27 所示。它的检测信号装置是一片双金属片，双金属片当温度变化时会发生弯曲形变。控制机构是一个晶体管放大器，执行机构使用一只灵敏继电器 J ，直流电源是由桥式整流电路和一个滤波电容 C 组成，电热器是电炉或电灯泡（直接接在 220 V 市电上）。

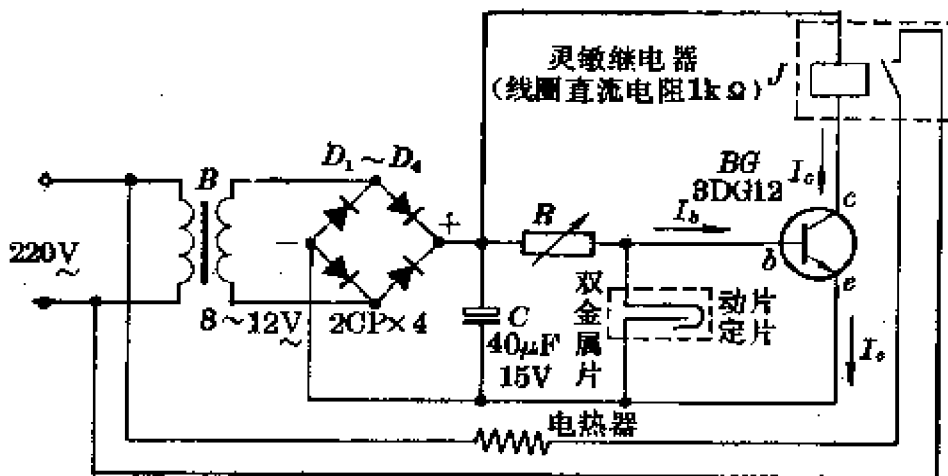


图 14.27 简单恒温控制器

这个控制器的工作原理分析如下：当双金属片所在处的温度低于给定值时，双金属片的动片与定片不接触。桥式整流电路整流后的直流电压经偏流电阻 R 给晶体管 BG 提供基极电流 I_b ，从而有集电极电流 I_c 通过继电器 J 。事先

可以调节 R 的阻值, 使 I_c 稍大于继电器 J 的吸动电流。因此双金属片不接触时, 继电器 J 动作, 使触点闭合, 接通电热器电路, 电热器就向周围空气进行加热。当空气温度被加热到给定值时, 双金属片因受热伸张, 动片和定片恰好接通, 这时晶体管 e 、 b 被双金属片接通, 形成短路, 发射结无正向电压, I_b 立即变为 0, I_c 也减小到接近于 0。继电器 J 释放, 触点断开, 电热器电源切断便停止加热。如果以后空气温度下降, 上述过程又将重复进行。这样一来, 空气温度就可以始终保持在给定温度附近的一个小范围内, 基本上达到恒温自动控制的目的。

如果控制器用来控制不大的容器或箱子里的温度, 控制温度也只在 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 范围内(例如接种箱内进行菌种培育、发酵过程), 则所使用的电热器只要用一只 100 瓦的电灯泡就可以了。

二、光电控制器

光电控制亦是工农业生产中常用的一种自动控制方法。光电控制中常用的检测信号装置有光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管、硅光电池等。这些元件大都具有阻值容易受光照强弱的影响而有显著变化的特点。在有光照时, 电阻很小; 而在无光照或光暗时, 其阻值变得很大。再如硅光电池在有光照时两端会产生一个电位差。利用这些特性可以把光照的强弱转变为电信号。

作为光电控制实际应用的一个例子, 这里介绍一个黑灯光控电路, 如图 14.28 所示。图中检测信号装置是一个光敏二极管, 三个晶体管组成的放大电路起着控制机构的作用, 执行机构是继电器 J 。被控制的对象是一个黑光灯, 它的电

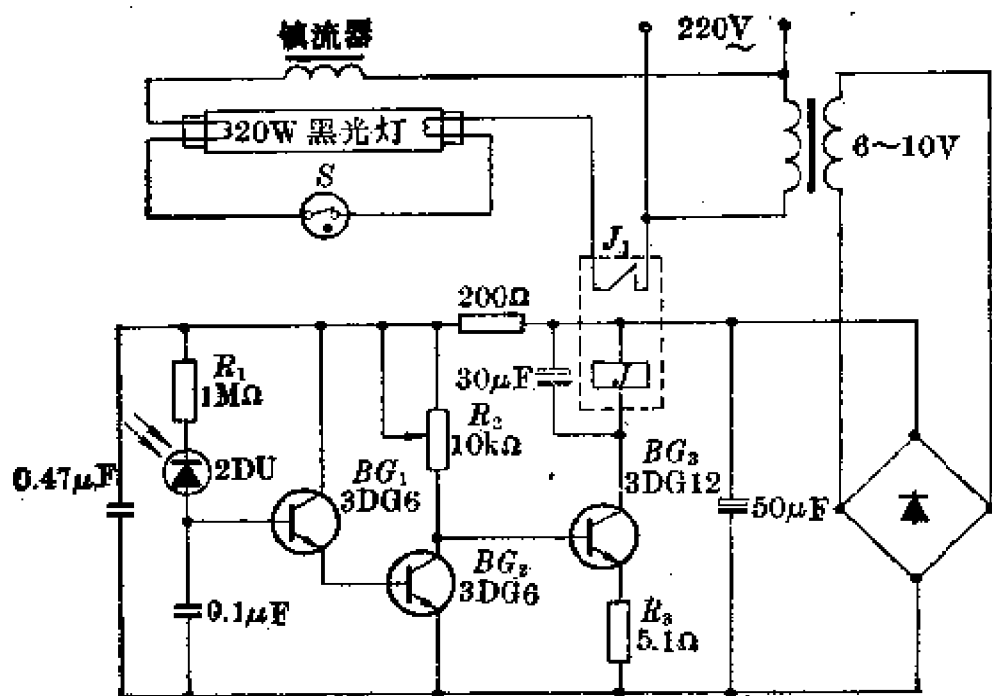


图 14.28 黑光灯光电控制电路

路跟普通日光灯完全一样,这里不再多述。

在夜间光敏二极管 2DU 无光照射,它的内阻很大,这时 BG_1 几乎没有基极电流,当然亦没有集电极电流及发射极电流, BG_2 基极跟 BG_1 发射极连接在一起, BG_1 没有发射极电流, BG_2 就没有基极电流,从而也没有集电极电流,即 BG_1 、 BG_2 这时都不导通。直流电源通过 R_2 给 BG_3 加入一个基极电流, BG_3 就有集电极电流通过继电器 J , 使触点 J_1 接通, 点燃黑光灯。 R_3 是一只电位器, 调节 R_3 可以使 BG_3 导通时的集电极电流略大于继电器 J 的吸动电流。

当天亮时, 光敏二极管受到光照, 它的内阻显著减小, 直流电源通过 R_1 和光敏二极管给 BG_1 加入一个基极电流, 使 BG_1 导通。 BG_1 的发射极电流注入 BG_2 基极, 使 BG_2 也导通。 BG_2 的集电极电流流过 R_2 , 在 R_2 上产生很大的电压

降,使 BG_2 集电极-发射极之间的电压下降。适当选择 R_1 的大小,可以使注入 BG_1 基极的电流所引起 BG_2 的集电极电流足够大,以致这个电流在 R_2 上产生的电压降接近于直流电源电压, BG_3 的 U_{ce} 就很小,使 BG_3 发射结没有足够的正向电压, BG_3 不导通,这样就没有电流通过继电器 J ,使触点 J_1 断开,黑光灯熄灭。

电路中 BG_1 、 BG_2 、 BG_3 组成一个放大器。光敏二极管受光照不同,其阻值发生变化,引起流过它的电流亦发生变化。但这个电流变化是很微弱的,所以必须把它注入 BG_1 基极,经 BG_1 、 BG_2 、 BG_3 放大后再去推动继电器 J 动作,实现自动控制。

三、晶体管黑光灯

黑光灯是利用昆虫的趋光性而诱杀害虫的一种灯具,灯管的构造跟普通日光灯管相似,只是管的内壁涂的荧光物质不同,点燃时能发出波长为 3600 埃的紫外线。因为人眼看不见紫外线光,不觉得它的光亮,所以叫做黑光灯。害虫对于这一波长的光极为敏感,因而可以引诱附近一定范围内的害虫向它扑来,在灯下配以水盆等捕杀装置,可以起到很大的杀虫效果。

黑光灯的供电方式有交流和直流两种,使用交流供电的电路可参考上节图 14.28,在没有交流电源的地区或需要可以移动的场合,可以使用蓄电池或化学电源供电。这时需要通过一个电源变换器将低压直流变换成高压交流以点燃黑光灯。

图 14.29 是一个使用晶体管电源变换器的黑光灯电路,黑光灯用小功率 8 W 灯管,变换器由晶体管 BG 和一只变压

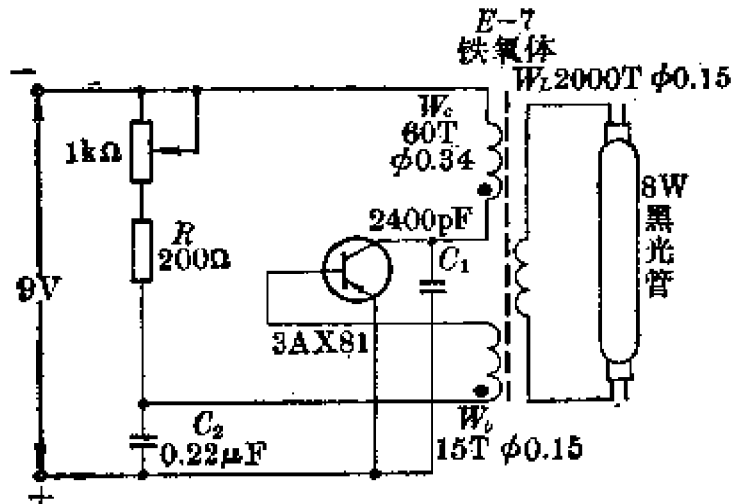


图 14.29 晶体管黑光灯

器组成。变压器铁芯上有三个绕组，绕组 W_c 跟 BG 集电极串接，绕组 W_b 跟基极串接， W_L 是次级绕组用来产生高压点燃黑光灯。图中 R 及电位器串接组成偏流电阻，以调节 BG 的起始基极电流。电源接通以后，经偏流电阻给 BG 一个初始基极电流，从而产生集电极电流 i_c ， i_c 通过 W_c 。在绕组 W_b 中就产生一个感生电动势。只要 W_b 的接线正确，当通过 W_c 的 i_c 增加时， W_b 中的感生电动势使基极电流 i_b 增加，从而促使 i_c 进一步增加；而当通过 W_c 的 i_c 减小时， W_b 中的感生电动势使 i_b 减小，从而使 i_c 进一步减小。这样电路就可以产生所谓“间歇振荡”。晶体管时而导通，时而截止，通过 W_c 的电流 i_c 亦时起时伏地变化，在 W_L 中就感应出一个电动势。 W_L 的匝数比 W_c 多得多，故 W_L 中的感生电动势就很高可以使黑光灯点燃。

当通过 W_c 的 i_c 迅速减小时，在 W_c 上亦会感生比较高的电动势，有可能超过晶体管的 BU_{ceo} ，使晶体管损坏，所以在 W_c 两端并联一只电容 C_1 以减小此感生电动势的数值。

W_0 的下端通过电容 C_2 接到发射极, 目的是为 W_0 到发射极提供一条交流通路, 以使 W_0 中感生电动势产生的 i_0 比较大, 有利于产生振荡。

复 习 题

习题 14.1 半导体里有哪两种载流子? 为什么半导体的导电能力会受到光照或温度变化的影响?

习题 14.2 什么是 P 型半导体? 什么是 N 型半导体?

习题 14.3 PN 结是怎样形成的, 它有什么性质?

习题 14.4 二极管有什么特性? 用于检波应该选用哪种类型的二极管? 用于整流应该选用哪种类型的二极管?

习题 14.5 桥式整流电路是如何完成全波整流作用的? 桥式整流电路中二极管所受反向峰值电压有多大?

习题 14.6 晶体三极管有那两种类型? 要它们正常工作, 基极和发射极之间应该怎样加接电压? 集电极和发射极之间应该怎样加接电压?

习题 14.7 晶体三极管里 I_b 、 I_c 、 I_e 三者之间有何关系? 如何解释 I_e 要比 I_b 大许多倍。

习题 14.8 如何利用万用表来估测晶体三极管的好坏?

习题 14.9 什么是晶体管的静态工作点? 为什么要选择合适的静态工作点?

第十五章 无线电基础知识

在前面几章中，我们比较详细地讨论了电磁场的一系列基本原理，知道变化的电场会产生磁场，而变化的磁场同样会产生电场。这种变化的电场和磁场在空间的传播就是电磁波。电磁波在现代广播通信、生产技术、国防、科研等方面都有着广泛的应用。

本章主要介绍一些有关无线电广播的基础知识，并对作为接收机的超外差式收音机的工作原理作一简单介绍。

第一节 电磁振荡和电磁波

一、电磁振荡

图 15.1 是一个由电感线圈 L 和电容器 C 组成的闭合电路(回路)。先将开关 K 与电源接通，让电池组 E 给电容 C 充电，然后再把 K 拨向线圈 L 一边， C 与 L 就串联成回

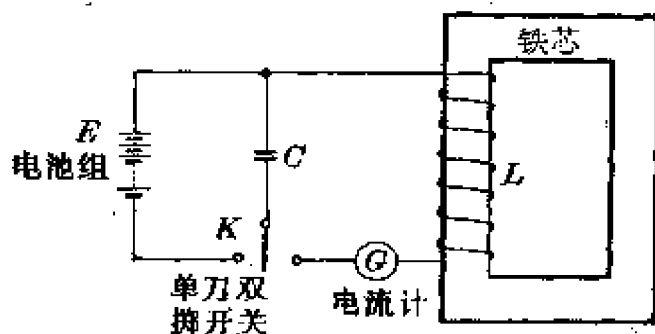


图 15.1 LC 振荡回路

路。这时可以看到回路中电流计 G 的指针会左右摆动,说明回路中有大小和方向都作周期性变化的电流通过。这种电流叫做振荡电流。产生振荡电流的回路叫做振荡回路。图 15.1 中的 LC 回路就是最简单的振荡回路。

下面就具体分析在 LC 回路中产生振荡电流的过程。

当电池组给电容 C 充电时,电容 C 两极板上就逐渐堆积了一定量的电荷,当电容充电而还未放电时两极板间的电场最强,其两端电压也最大(等于电池组电压)(图 15.2a)。这时电路中的能量全部是电能。

开关 K 把 C 和 L 接通, LC 就组成闭合回路。这时 C 便通过 L 放电,由于线圈的自感作用,放电电流 i 不能立刻达到最大值而只能逐渐增大。在放电过程中, C 极板上的电荷逐渐减少,电场逐渐减弱,同时随着通过线圈 L 电流的增大,线圈中的磁场也逐渐增强。在这过程中, LC 回路中的电场能逐渐转变成磁场能。当 C 放电完毕,极板上电荷全部消失,极板之间的电场也随之消失,通过线圈 L 的电流达到最大值,电容器中的电场能全部转变为线圈中的磁场能(图 15.2b)。

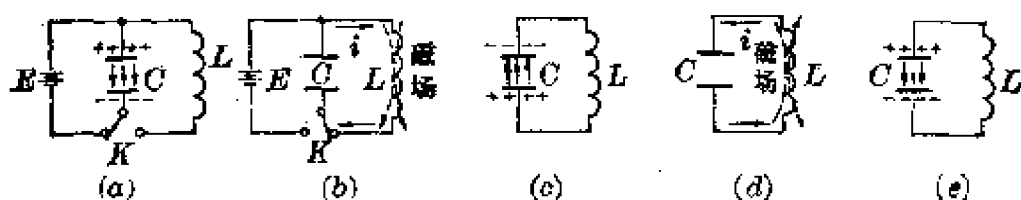


图 15.2 LC 回路中电场与磁场的相互转化

随后,由于线圈 L 的自感作用,电流到达最大值后并不立即消失,而是逐渐减小,线圈 L 中的磁场也开始逐渐减弱。磁场的变化要产生感生电动势,并由此产生与原来电流方向相同的感生电流。因此电容 C 又反方向重新被充电,这时电

容器 C 两极板间的电场方向跟以前相反。在这过程中线圈中的磁场能逐渐转变为电容器中的电场能。最后，线圈中的电流减小到零，磁场完全消失，全部能量返回电容器。此时 C 两极板间的电压又达到最大值，电场亦最强，但方向跟原来相反(图 15.2c)。

接着电容器 C 又要通过线圈 L 放电，产生跟以前放电电流方向相反的电流。放电完毕时，电路中的电场能又再一次的全部转变成磁场能。不过这时线圈中磁场的方向跟图 15.2b 中相反，如图 15.2d 所示。而后，在线圈自感作用下感生电流再次使电容器充电，线圈中磁场能又全部转化成电容器的电场能，如图 15.2e 所示。这样上述过程就反复循环地进行下去。电路中电场和磁场周期性地交替转化产生，从而在电路中得到了周期性变化着的振荡电流。

图 15.3 所表示的是 LC 回路中振荡电流的大小和方向随时间变化的曲线。曲线上 A 、 B 、 C 、 D 、 E 点分别对应于图 15.2 中 a 、 b 、 c 、 d 、 e 各个时刻的电流。此曲线是一条正弦曲线，所以 LC 回路中的电流是作正弦变化的振荡电流。

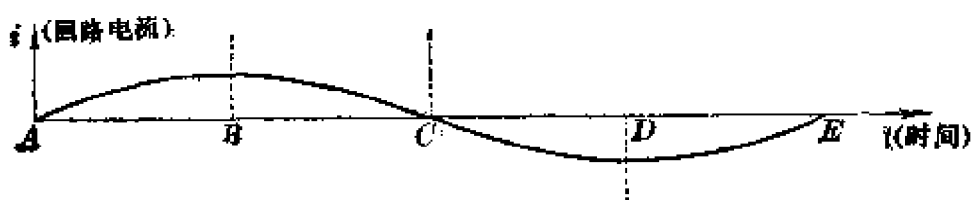


图 15.3 振荡电流变化曲线

从前面的分析可知， LC 回路中振荡电流的变化规律在形式上和弹簧振子的机械振动规律十分相似。电容器带电后在它两极板间产生的电压就相当于弹簧的恢复力，而线圈的自感作用就相当于重物的重力。从能量上来比较，在 LC 回路中是电场能和磁场能的相互转化；而在弹簧振子中则是弹

性势能与动能的相互转化。但本质上它们却完全不同，后者属于机械性质，是机械振动；而前者属于电磁性质，是电磁振荡。然而有关机械振动的某些规律对于电磁振荡却同样适用。例如振荡电流的频率与周期同样是倒数关系，即

$$f = \frac{1}{T}。 \quad (15.1)$$

频率的单位也是赫芝(Hz)，只是在电磁振荡中，为了实用上的方便往往还采用较大的单位千赫(kHz，或称千周、kC)和兆赫(MHz，或称兆周、MC)，其换算关系：

$$1 \text{ 兆赫(MHz)} = 10^3 \text{ 千赫(kHz)} = 10^6 \text{ 赫芝(Hz)}。$$

就象每个机械振动系统都有一个固有频率一样，每个振荡回路在自由振荡时也有一个固有频率。对于LC回路说来，当感抗 X_L 等于容抗 X_C 时的频率就是它的固有频率。于是根据 $X_L = X_C$ 的关系，可以列出

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}，$$

即LC回路的固有频率

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}。 \quad (15.2)$$

如果把LC回路与交流信号源接通，当交流信号源的频率等于或接近于回路的固有频率时，同样会引起振荡回路的共振现象，这时回路中的振荡电流(包括它的振幅值)到达最大值*。通常把这个现象叫做电共振，或称电谐振。因此LC回路的固有频率又叫做共振频率，或称谐振频率，用字母 f_0 表示。如果交流电讯号的频率跟回路的谐振频率相差很远，回路里的振

* 这时由于 $X = X_L - X_C = 0$ ，阻抗最小，因而电流强度最大。

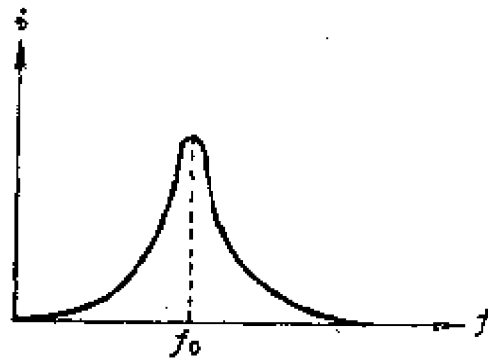
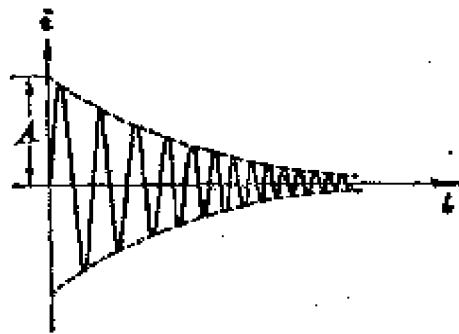


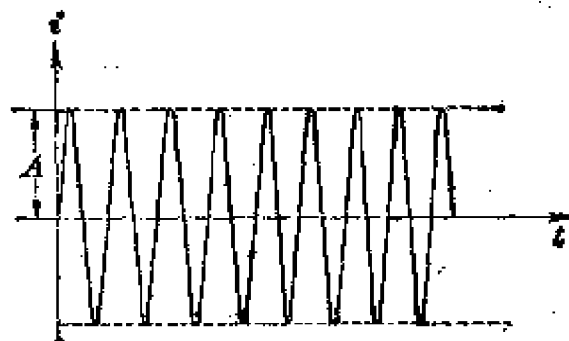
图 15.4 谐振曲线

荡电流就很小。图 15.4 中的曲线反映了电源频率与振荡电流的这种关系,叫做谐振曲线。

和机械振动一样,电磁振荡也有自由振荡和阻尼振荡,等幅振荡和减幅振荡之别。由于在 LC 回路中不可避免地有电阻存在,因此必然会有一部分电磁能量转化为热,同时还有一部分要辐射到周围空间去,所以实际上 LC 回路中的电磁振



(a) 减幅的阻尼振荡



(b) 等幅振荡

图 15.5

荡是减幅的阻尼振荡(图 15.5a), 不可能无限止地进行下去。但是在无线电广播的发送和接收装置中却需要持续不断的等幅振荡(图 15.5b), 这就需要外面不断地向 LC 回路及时地补充所损耗的能量。例如利用晶体管就可以把电源的能量耦合到振荡回路中去, 以获得等幅振荡。这种装置就叫做晶体管振荡器。

图 15.6 是一个晶体管振荡器的电路。它是由晶体管放大器、 LC 振荡回路、正反馈电路和直流电源四个部分组成。图中 R_1 、 R_2 和 R_3 用来建立和稳定晶体管 BG 的直流工作点。 C_2 是旁路电容, 这样 BG 的发射极对高频信号来说是接地的。接通电源以后, 集电极电流通过 LC 回路, 将在 LC 回路中引起电磁振荡, 如果没有能量补充的话, 它的振幅会逐渐减小。但在图 15.6 的电路中, 利用 L 和 L_1 之间的感应耦合, 把 L_1 感应得到的一部分振荡信号送回到 BG 的基极进行放大。选择 L_1 的两个接头的接法, 使经 BG 放大后送给 LC 回路的电流的方向, 跟 LC 回路中振荡电流的方向

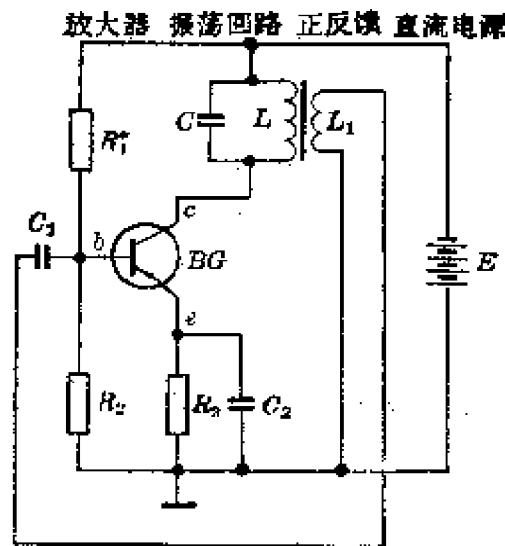


图 15.6 晶体管振荡器

相同，同时选择 L_1 的圈数，使加到基极上的信号电压产生的集电极电流刚好能够补偿 LC 振荡回路的能量损失。这样就可以维持 LC 回路中振荡电流的振幅不变，即得到等幅振荡。

二、电 磁 波

当 LC 回路中有振荡电流时，电容器两极板间的电场就要随振荡电流的变化而变化，这个变化的电场就在周围空间激发变化的磁场，而变化的磁场又会在其较远的周围空间激发新的变化的电场；这个新的变化的电场又要在其周围更远的空间激发新的变化的磁场，……。这种变化的电场和磁场共同存在，相互交替激发，由近及远地向四周空间的传播叫做电磁波。

电磁波在形式上与机械波也十分相似，同样可用频率、波长、波速、振幅等来描述，但在本质上完全不同。机械波只能在弹性介质中传播，而电磁波却能在真空中以光速 c 传播，其波速

$$C=c=2.998 \times 10^8 \text{ 米/秒} \approx 3 \times 10^8 \text{ 米/秒。}$$

电磁波在空气中的传播速度略小于 c ，但一般仍可按 c 计算。在机械波通过的地方，是介质中各点的位移在作周期性的变化；而在电磁波通过的地方，却是空间各点的电场强度和磁感应强度在作周期性的变化。由于各点的电场强度和磁感应强度的方向总是互相垂直的，并且都和电磁波的传播方向垂直（图 15.7），因此电磁波是横波。

电磁波的波长、波速和频率间同样存在着下列关系：

$$C=f\lambda。 \quad (15.3)$$

我国广播电台所发送的电磁波的频率范围是在 $535\text{kHz} \sim 1605\text{kHz}$ ，即其波长范围是在 $560.8\text{米} \sim 186.9\text{米}$ 。在无线

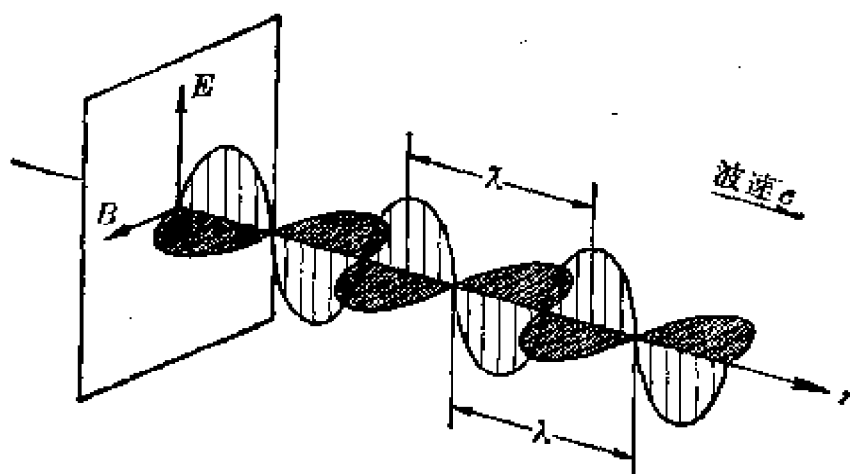


图 15.7 电磁波是横波

电技术中应用的电磁波叫做无线电波，其波长范围是从几毫米到三千米以上，可以划分为几个波段。各无线电波的波段不同，其性质和用途也不同。表 15.1 列出了各波段的无线电波的主要用途。无线电广播一般只使用中波、中短波和短波三个波段；电视广播则使用超短波。

表 15.1 无线电波的波段表

名称	波长	频率	主要用途	
长波	9000 米以上	低于 100 kC	电报通讯	
中波	9000~200 米	100~1500 kC	无线电广播	
中短波	200~50 米	1500~6000 kC	电报通讯、无线电广播	
短波	50~10 米	6~30 MC	无线电广播、电报通讯	
超短波(米波)	10~1 米	30~300 MC	广播、电视、导航等	
微波	分米波	1~0.1 米	300~3000 MC	电视、雷达、导航及其他专门用途
	厘米波	0.1~0.01 米	3~30kMC	同上
	毫米波	0.01~0.001 米	30~300k MC	雷达、导航及其他专门用途

第二节 电磁波的发送和调制

一、发 送

我们已经知道,当 LC 回路中有振荡电流时,电磁波就会从振荡回路中向四周空间辐射出去。振荡电路向四周发送电磁波的过程,也是向外辐射能量的过程。

但是在一般振荡回路中,由于电容器极板间的距离很小,因此回路里的电场几乎完全集中在电容器的两极板之间;同样由于自感线圈是绕成螺线管形状,因而磁场也几乎完全集中在线圈内部。所以这种振荡回路向外辐射的电磁能量极少,是不利于向外辐射电磁波的,通常把它叫做闭合振荡电路。

为了有效地发送电磁波,就要使电场能和磁场能尽可能地分布到周围空间,这就必须对闭合振荡电路进行变革。把电容器的尺寸加大,并且把极板之间的距离逐渐增大,直至最后变成两条长导线,一条伸入高空成为天线,另一条接入地下成为地线;同时把电感线圈也逐渐拉开,最后也变成一条直线。这样振荡回路就由闭合变为不闭合,最后变成了图 15.8 的开放式电路。这种电路天线上各点与地线(大地)之间形成很多小的分布电容,大大地增加了电场所占的空间,因此电磁场就向周围空间散开,有效地向空间辐射电磁波。

在实际应用中,开放电路里还有一个电感不大的线圈(图 15.9 中的 L'),它的作用是与产生高频振荡的回路相耦合,使 LC 回路中的高频率振荡电流通过 L 与 L' 的感应耦合,在 L' 中产生同频率的振荡电流,传送到发送天线上,于是在天线四周空间中产生了电磁波。

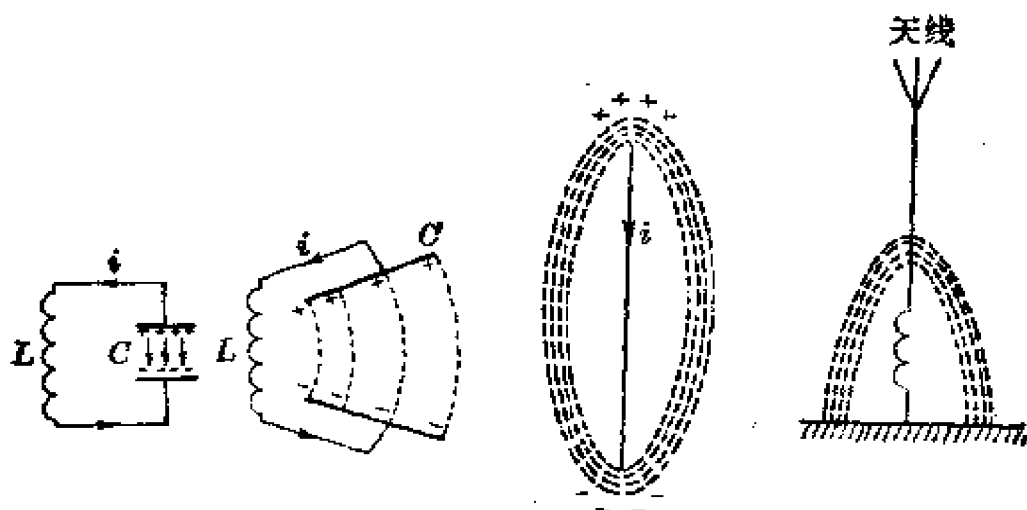


图 15.8 发送电磁波的开放式电路

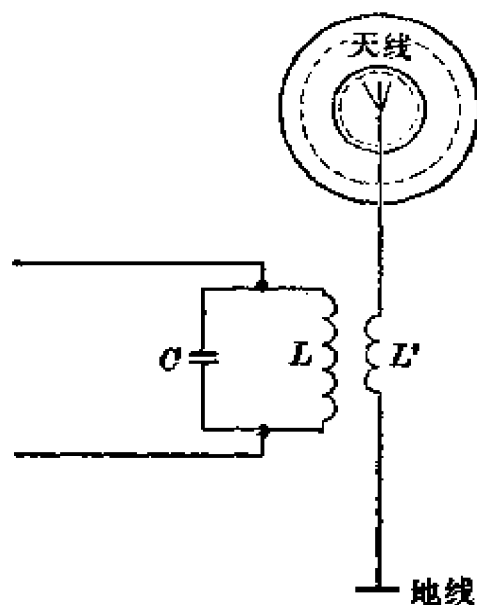


图 15.9 使用天线和地线以发送电磁波

综上所述,要获得电磁波,一方面需要有 LC 振荡回路,另外又必须具备由天、地线组成的开放式发送电路,前者用来产生振荡电流,后者用以发送电磁波。

二、调 制

人们说话的声音,乐器演奏的音乐都是声波,通常都需要

有介质——空气来传播。同时，离开发声的声源愈远，声源发出的声音就愈弱，这样在比较远的地方就不能听到声源所发出的声音了。怎样才能使声音越过山岭、跨过重洋传播到遥远的地方去呢？

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。人们从实践中知道，高频率的电磁波在空间可以传播很远很远。因此如果把声音首先转变成跟声音频率相对应的电信号（称为音频信号），然后把音频信号“装载”到高频率的电磁波上去，就可以利用无线电波这个运载工具，把音频信号载送到很远的地方。用以载运音频信号的无线电波叫做载波。

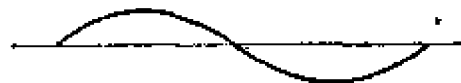
广播电台里所进行的工作就是把声音转变为音频信号，然后再载到无线电波上去加以发送。每一个广播电台都有一个规定的载波频率，电台广播所声称的频率就是指它的载波频率。例如中央人民广播电台第一套、第二套节目所使用的载波频率分别是 560 千周和 630 千周。

把音频信号加载到无线电波上去的过程叫做调制。无线电广播中采用的调制方式一般是用音频电流去调制高频电流的振幅，也就是使载波的振幅随广播的语言、音乐等音频信号的变化而变化。这种调制方式叫做调幅。用以调制高频电磁波的音频信号叫做调制信号，被调制后的高频电磁波叫调幅波。图 15.10a 表示未调制前的高频等幅振荡，b 表示音频调制信号，c 表示被调幅以后的调幅波。可以看出调幅波振幅的包络线（即振幅变化的轨迹）与音频调制信号完全一样。

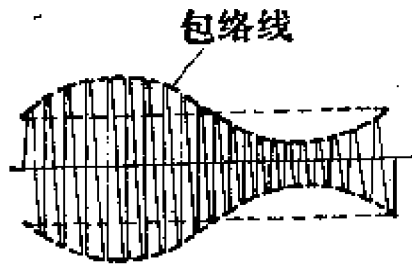
由此可见，一个电台的广播过程：广播节目的声音通过话筒变成音频信号，然后送入音频放大器进行放大，经过放大后的音频信号就跟由高频振荡器（一种产生高频振荡电流的装



(a) 高频等幅振荡



(b) 调制信号(音频信号电压)



(c) 已调幅高频振荡

图 15.10 调幅波的波形图

置)产生的高频载波一起加到调制器中,在调制器的输出电路中就得到了已调幅的高频电流,再通过高频放大获得足够强大的高频电流,然后耦合到发射天线向外发射出去。其整个过程示意地如图 15.11 所示。

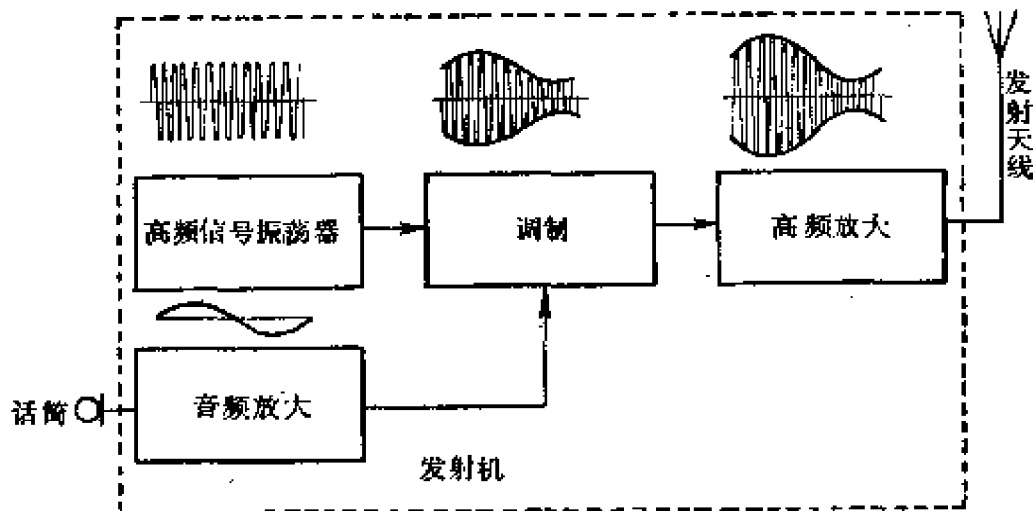


图 15.11

第三节 无线电接收机原理

这个辩证法的宇宙观，主要地就是教导人们要善于去观察和分析各种事物的矛盾的运动，并根据这种分析，指出解决矛盾的方法。由上一节，已经知道实现无线电广播时，必须将音频信号去调制高频载波，然后通过发射天线将调幅波发射到空间去。对于接收无线电波的设备来说，则要求能够把所需要的电台的信号接收下来，并把它还原成声音。

收音机是接收无线电广播的接收设备，要收听电台的播音节目，它应该具有如下的一些基本功能：能够选择接收所需电台的信号。由于空间有许多电台的无线电波在传播，因此收音机必须有一个“选择器”选择所需要的电台的信号；能够从接收到的高频载波中取出音频信号，并使音频信号还原为声音；有接收微弱电台信号的能力。电台发射的无线电波在传播过程中，它的能量会逐渐减弱，离电台越远信号越微弱，良好的收音机应该对微弱信号亦能接收。

上面的这些功能在一台收音机里是分别由输入回路，检波器和耳机(或扬声器)，放大器等来完成。

一、输入回路

输入回路是收音机的大门，它是任何收音机所不可缺少的组成部分。由于空间传播着不同电台发出的各种频率的无线电波，它们同时会在接收天线上产生感应信号电压。输入回路的作用就是要从天线上感应得到的很多信号中，选择出所需要的电台信号来。图 15.12 是一般晶体管收音机的输入回路，它实际上就是一个由一个可变电容器 C_1 和一个电感

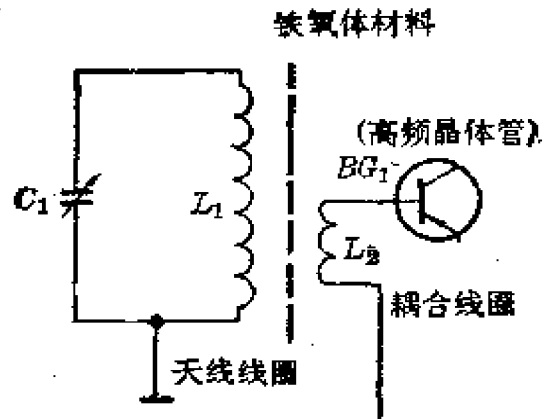


图 15.12 一般晶体管收音机的输入回路

线圈 L_1 所组成的振荡回路。从各个电台发送出来的高频载波都可以在输入回路中感应出高频电流，但是由于回路的谐振特性，只有频率等于输入回路的谐振频率（即它的固有频率）的信号才能在回路中感应出的高频信号电流最强。因此利用 LC 回路的谐振特性，我们只要改变电容 C_1 的电容量，就能改变 L_1C_1 回路的谐振频率，这样就能选择出所需要接收电台的频率。在 L_1C_1 回路中感应得到的该电台的信号电流，经 L_1 耦合到 L_2 ，然后再送到后级去放大或检波。而其他电台在 L_1C_1 回路中产生的电流都很微弱，不起作用。这样输入回路便起了选择电台的作用，所以输入回路亦叫做调谐回路。

晶体管收音机输入回路的线圈 L_1 和 L_2 一起绕在用铁氧体制成的黑色磁棒上，构成所谓磁性天线。这样收音机就不必拖一条天线“尾巴”；同时因为磁棒具有很高的导磁率，它对于磁场具有很强的聚集作用，从电台发射的无线电波中的磁场被磁棒聚集而通过磁棒（图 15.13），这样绕于磁棒上的线圈 L_1 中就能够感应出比较高的信号电压，这就提高了接收效率。

磁性天线还具有明显的方向性。把收音机放置不同的方向,其声音的轻响就有所不同。当把磁棒水平地横放,并且磁棒的轴线与所接收电台的电波传播方向相垂直时,收听到的声音将最响(图 15.14)。这是因为收音机在这个位置时,穿过磁棒的磁力线数目最多,也就是通过 L_1 中的交变磁力线最多,所以感应得到的信号电压最强,收音机发出的声音也就最响。利用磁性天线的方向性,可以选择电台信号,并抑制来自其他方向的干扰信号,从而使那些干扰信号在 L_1 中感应出的信号电压比较小,这样相对地减少了那些讨厌的“杂音”,提高了选择电台和抗干扰的能力。

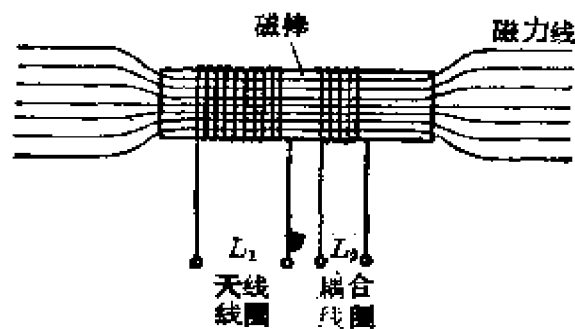


图 15.13

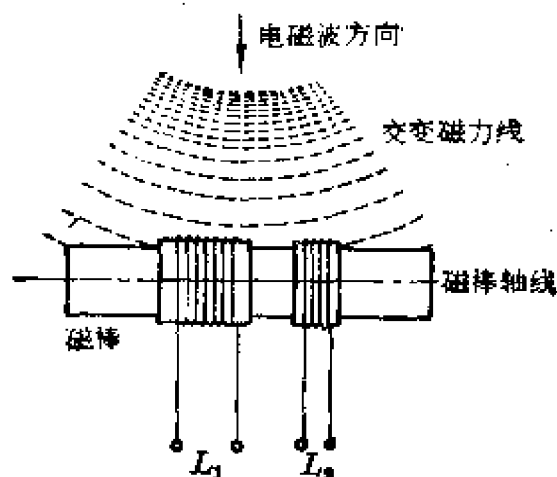


图 15.14

二、检波器

检波就是从接收到的高频信号中，把音频调制信号检取出来的过程。检取出来的音频信号就被送到耳机去还原为声音，或送到音频放大器去再加以放大，以推动扬声器发出声音。检波过程是在检波器（即检波电路）内完成的。图 15.15 是检波器的输入信号和输出信号的波形图，可以看到输出音频信号的波形与输入高频信号的包络线基本上一致，这表明通过检波获得了电台播音中的调制信号，达到了接收的目的。

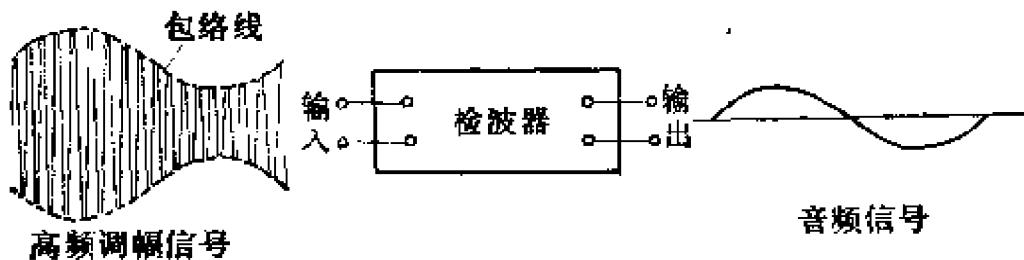


图 15.15 检波器输入波形和输出波形

检波器一般是由二极管、电阻、电容等元件组成，图 15.16 所示是二极管检波器的一个典型电路。图中 R 是负载电阻， C_1 是高频旁路电容器， C_2 是隔直流电容器。我们知道二极管具有单向导电的特性，当其两端加上正向电压时就有电流通过，电压越高，电流越大，反之当加上反向电压时，几乎没有电流通过。因此当有信号输入时，通过二极管 D 的是单向脉动电流，如图 15.17b 所示。这样的脉动电流中既包含有高频电流成份，又包含有音频电流成份，因此在 R 两端并联一个电容器 C_1 后就可把高频电流旁路掉，而音频电流则从负载电阻 R 上流过，从而获得音频信号输出（图 15.17c）。

实际上，流过 R 的信号电流中还有直流成份，所以检波所得的音频电流，可以看做是由直流电流 I 和交变电流 i' 的迭加，如图 15.18 所示。电容器 C_2 就是用来把直流隔开，而只让音频信号输送到后级去。

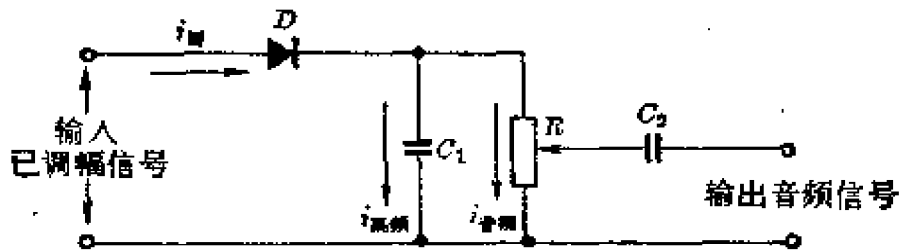


图 15.16 二极管检波电路

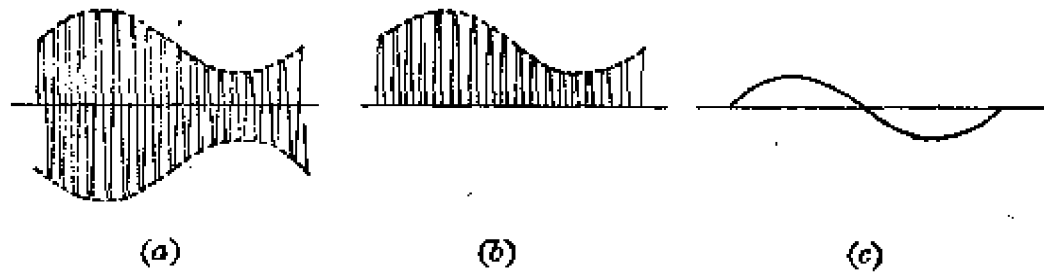


图 15.17 检波后的脉动电流和音频信号

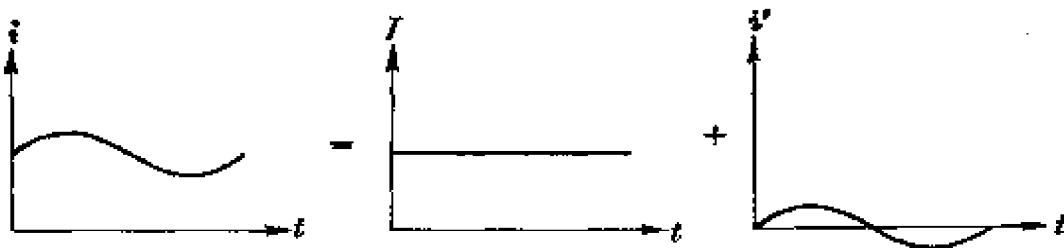


图 15.18 流过 R 的音频电流

如图 15.19 所示，把输入回路的次级线圈 L_2 跟检波器连接，并把检波器负载电阻 R 换为耳机，这就成了最简单的收音机，只要调节可变电容器 C_1 就可以收听电台的广播。由于这种接收机没有对被接收信号进行放大的电路，所以要

用外接天线来增加接收电台的能力。在外接天线和输入回路之间串接一只小电容 C_0 是为了减少外接天线对输入回路分隔电台能力的影响。

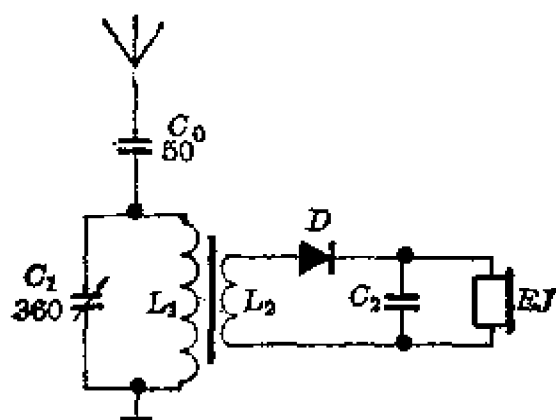


图 15.19 最简单的收音机

第四节 超外差式晶体管收音机

为了提高收音机接收远地电台微弱信号的能力即提高灵敏度,就需要把接收到的微弱高频信号加以放大,以便送到检波器的信号足够强,使检波以后得到的音频信号能够被放大和还原为听得清楚的声音。若放大的方式是把磁性天线接收到的高频信号直接加以放大,再送去检波,这叫直接放大式。直接放大式有一些缺点:如对接收频率范围内的不同频率的信号,其放大倍数不一样;如果要提高放大倍数而增加放大器的级数,则要使每一级都调谐在同一频率上极为困难。因此目前售品收音机已不再采用这种方式。

超外差式收音机是为克服上述缺点而提出的另一种接收方式。它的主要特点:经磁性天线接收到的高频信号,不管原

来频率是多少,一律被变换成一个固定频率的中频信号,然后再对这个中频信号加以放大。这个固定频率比高频载波频率要低,但比音频频率要高,所以叫做中频。我国超外差式收音机采用的中频是 465 kHz。例如,如果输入回路选择 600 kHz 的电台,它在检波以前,首先被变换成 465 kHz 的信号;如果输入回路选择 990 kHz 的电台,它在检波以前同样被变换成 465 kHz 的信号。在把高频载波变换成中频以后,再对中频加以放大。由于只要对 465 kHz 这个固定频率加以放大,所以放大器可以设计得增益比较高(即放大倍数较大),这就提高了收音机的灵敏度。

超外差式收音机的另一个优点是选择性好,即分隔电台的能力好,不容易产生“隔音”。这是由于中频放大部分使用了谐振于 465 kHz 的谐振回路,对于干扰信号有较大的衰减作用,使干扰信号难于传到后面的检波器,所以选择性较好。

图 15.20 是超外差式收音机的方框图。它是由变频级、中频放大级、检波、音频放大级等部分组成。具体的线路则如图 15.21。下面我们简单说明各部分的工作原理。

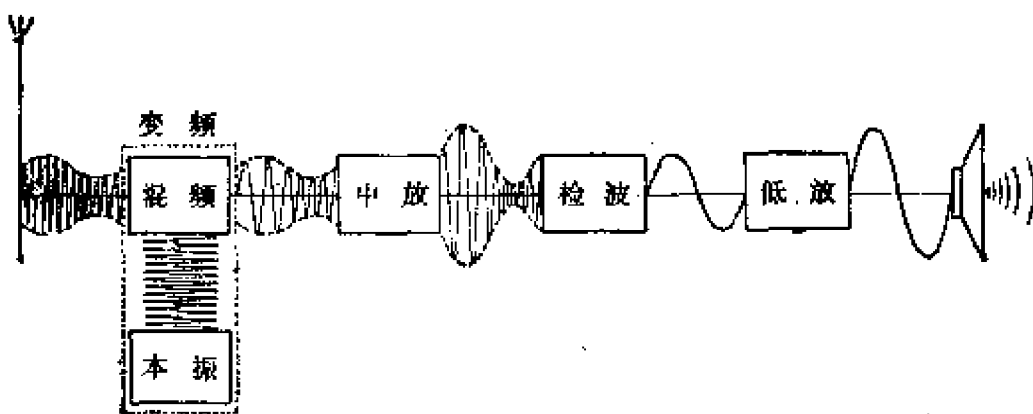


图 15.20 超外差式收音机方框图

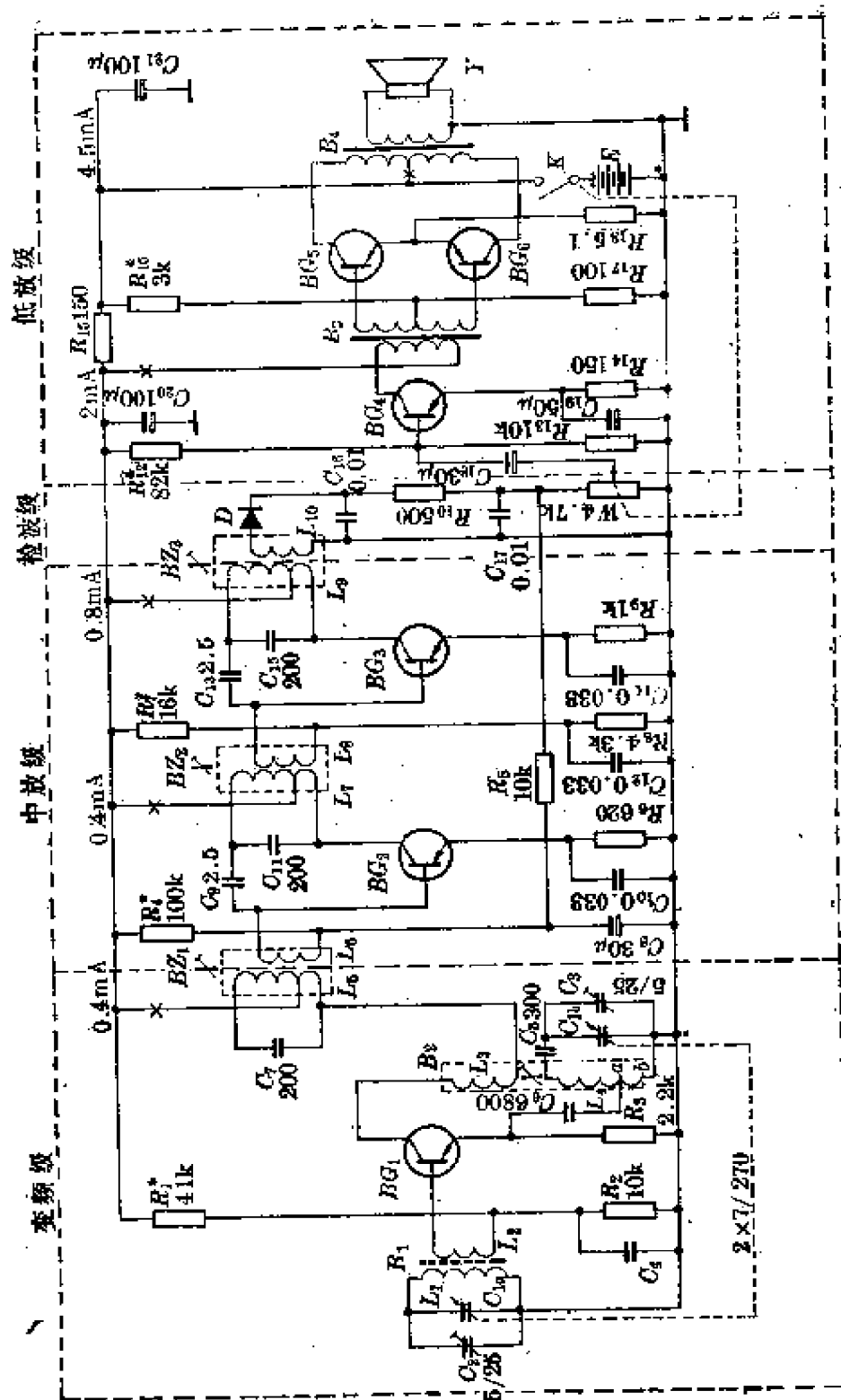


图 15.21 超外差式收音机线路图

注: $100 = 100 \Omega$, $0.01 = 0.01 \mu F$, $5/25 = 5/25 pF$.

一、变频级

把高频载波频率转换成固定中频频率的电路叫变频电路, 又称变频器或变频级。

变频级的主要作用是将调幅的高频信号转换成调幅的中频信号, 变换前后只是载波频率改变, 而信号振幅的包络线不变。这种频率变换是利用晶体管的非线性特性来实现的。实验表明, 把两种不同频率 f_1 、 f_2 的信号同时加在晶体管的输入端, 那么在晶体管的输出端除了有频率为 f_1 和 f_2 的信号外, 还会有频率为 f_1+f_2 、 f_1-f_2 、 \dots 等等的各种信号, 这个过程就叫做混频。因此变频级一般包括本机振荡电路、混频电路和中频选频电路三部分。所谓本机振荡电路是指接收机本身产生振荡的电路, 简称本振。假设经磁性天线接收到的高频信号的频率为 $f_{\text{高}}$, 为了要把它变换成频率为 465 kHz 的中频信号, 首先使本机振荡电路产生频率为 $f_{\text{本}}$ 的等幅振荡, 而 $f_{\text{本}} = f_{\text{高}} + 465 \text{ kHz}$; 然后把频率为 $f_{\text{本}}$ 和 $f_{\text{高}}$ 的信号同时加到晶体管的输入端进行混频。于是在晶体管的输出端就会有 $f_{\text{本}}$ 、 $f_{\text{高}}$ 、 $f_{\text{本}}+f_{\text{高}}$ 、 $f_{\text{本}}-f_{\text{高}}$ 、 \dots 等各种频率的信号, 其中就有一种频率为 $f_{\text{本}}-f_{\text{高}} = 465 \text{ kHz}$ 的信号。因此在输出端用调谐于 465 kHz 的谐振回路(即中频变压器)进行选频, 就可以取出所需要的频率为 465 kHz 的中频信号来。

下面简单介绍变频电路各部分的工作原理。为了便于分析, 我们把变频电路部分从图 15.21 中取出(图 15.22), 其中 R_1 、 R_2 和 R_3 组成 BG_1 的偏置电路; C_4 是高频旁路电容, 对高频信号能起短路作用; C_{1a} 、 C_{1b} 是双连可变电容器。 L_1 和 C_{1a} 组成输入回路, 而 L_4 和 C_{1b} 组成本机振荡回路。

接上电源, 本机振荡电路(图 15.23)就能产生高频振荡。

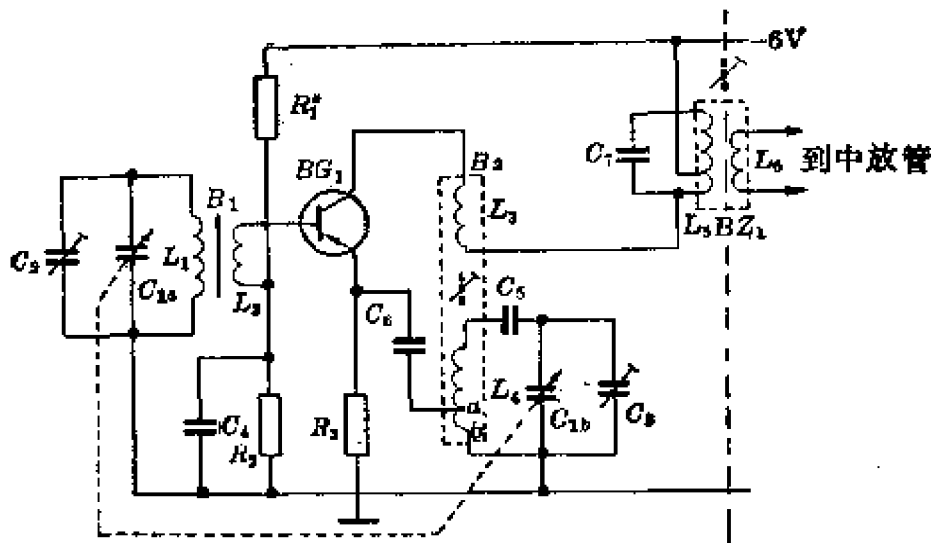


图 15.22 变频电路

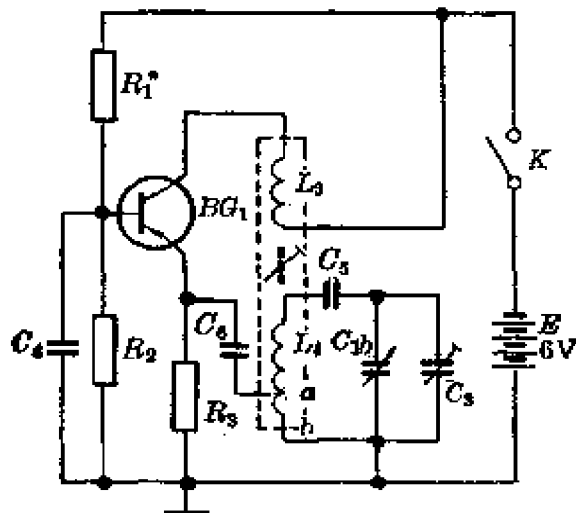


图 15.23 本机振荡电路

其中 L_3 是反馈线圈，它跟 L_4 绕在同一个磁芯上，通过互感耦合，为振荡回路补充能量，使 L_4 、 C_{1b} 的本振回路中产生高频等幅振荡，而它的频率叫做本振频率，主要决定于 L_4 和 C_{1b} 的值。由于本振回路中的可变电容 C_{1b} 和输入回路中的可变电容 C_{1a} 是双连的（图 15.22 中用虚线箭头表示），它们的动片装在同一个轴上，可以同时调节，这样就可以起“跟踪”作

用。无论输入回路中的接收信号的载波频率 $f_{\text{信}}$ 如何改变, 本振回路中所产生的本振频率 $f_{\text{本}}$ 的大小始终比 $f_{\text{信}}$ 高出 465 kHz。为了保证做到这一点, 在电路中还分别接入补偿电容器 C_2 、 C_3 和垫整电容器 C_5 (图 15.22), 都是调节 C_{1a} 、 C_{1b} 用的。

混频是在变频管 BG_1 内进行的。输入回路中的接收信号由 L_1 耦合给 L_2 送到 BG_1 的基极; 本机振荡信号经耦合电容 C_6 加到 BG_1 的发射极。经混频后在 BG_1 的输出端, 即其集电极电路中就有包括 465 kHz 在内的各种频率的信号。

选频电路是由 L_5 、 C_7 组成的, 其固有频率调谐在 465 kHz, 当由 BG_1 集电极输出的信号通过时, 其中只有 465 kHz 的中频信号才能发生谐振, 在 L_5 中产生的电流最强, 其他频率的信号在 L_5 中引起的电流都很微弱, 相对说来 465 kHz 的信号得到了加强, 其他频率的信号受到了“抑制”。这样 465 kHz 的中频信号就由 L_5 耦合给 L_6 送到下级 BG_2 进行放大, 也就是达到了选出中频信号的目的。 L_5 和 L_6 都绕在同一个磁芯上组成中频变压器 BZ_1 (也叫做中周), 它的外形如图 15.24 所示。

二、中频放大级

从变频级输出的中频信号仍旧是很微弱的, 为了使收音机具有足够的灵敏度, 必须把这微弱的中频信号进行放大后再检波。中频放大器就是担任中频信号放大的。一般超外差式晶体管收音机有二级中频放大, 经过二级中放以后, 中频信号的强度就足以使检波器正常工作了。在图 15.21 中, BG_2 、 BG_3 是中放管, 由 L_7 和 L_8 、 L_9 和 L_{10} 分别组成的中频

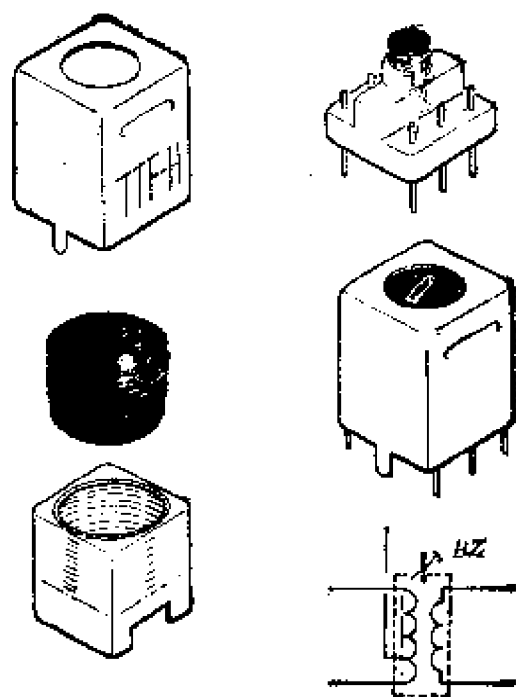


图 15.24 中频变压器外形图

变压器 BZ_2 和 BZ_3 进行级与级之间信号的耦合。 BZ_2 、 BZ_3 的外形如图 15.24 所示。

由变频级中周 BZ_1 耦合到 BG_2 基极上的中频信号，经 BG_2 放大后，由 BG_2 集电极负载 L_7 、 C_{11} 组成的谐振回路对中频信号进一步加以选择，再由中周 BZ_2 的次级 L_8 耦合到第二级中放电路，由 BG_3 进行第二次中频放大，然后再一次对中频信号选择，最后由中周 BZ_3 耦合到检波级去。可以看出，二级中放电路中，前后用了三只中周，中频信号经过三次选择，两次放大，不仅使中频信号得到了足够大的增益，并且对其他频率的信号进行了三次抑制和过滤，因而大大提高了收音机的选择性和灵敏度。图 15.21 中，中放管 BG_2 、 BG_3 的基极上分别接有中和电容 C_9 和 C_{13} 是为了消除可能产生的中频啸叫声，使第一中放和第二中放级工作比较稳定。

三、检波和自动增益控制电路

图 15.25 是图 15.21 中的检波级和自动增益控制电路。图中右边部分是检波级。由 BZ_3 次级线圈 L_{10} 耦合过来的 465 kHz 中频信号加到二极管 D ，进行检波。其工作过程跟第三节所述完全一样。检波后的输出电流的波形亦如图 15.17 和图 15.18 所示，也包含有中频、音频和直流三种成份。其中中频成份已由 C_{16} 旁路到地而滤去，对一些未能滤掉的残余中频成份再通过 R_{10} 、 C_{17} 组成的滤波器加以滤除。剩下的音频成份和直流成份分为两路：一路流经负载 W ，在 W 两端获得音频信号电压；另一路流经 R_5 ，以获得自动增益控制作用。 W 是电位器，可以调节送到后面低频放大器的音频信号的强弱，达到调节收音机放音的音量。另外，电位器 W 上还带有电源开关，用来控制整机电源的通断。 C_{18} 是耦合音频信号的电容器，同时也起着隔断直流的作用。

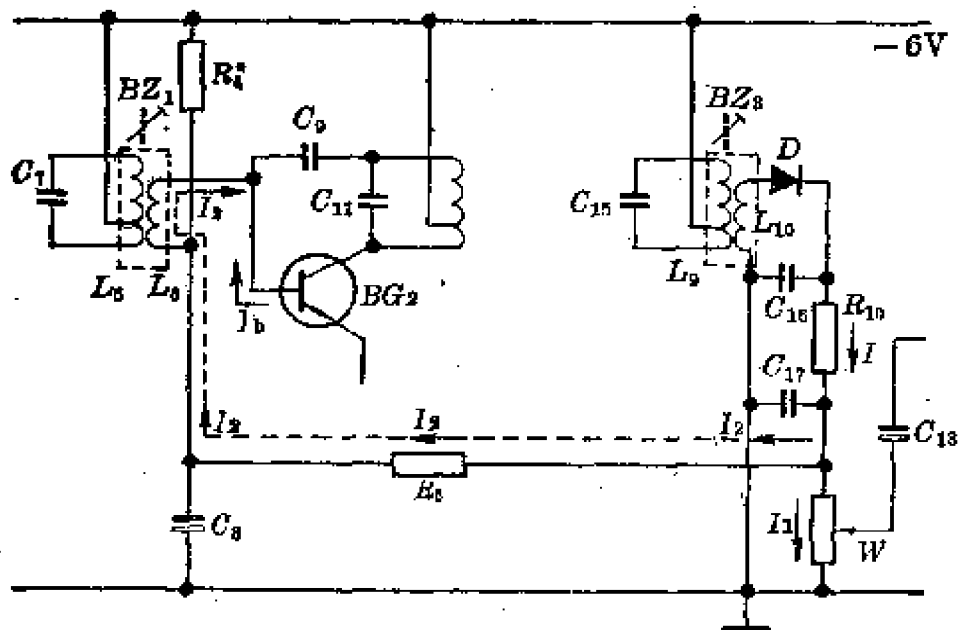


图 15.25 检波和自动增益控制电路

由于超外差式收音机的灵敏度较高，在接收信号强弱不同的各个电台时，音量常常相差很大；同时在接收某一较远地区的电台时，由于信号在传播过程中，受到环境的影响，会发生忽强忽弱的所谓“衰落现象”，使收音机的声音时大时小。为了使收音机在接收信号的强度发生变化时，也能大体保持一定的音量，故采用了自动增益控制电路。图 15.25 左边部分就是实现自动增益控制的有关部分的电路，图中 R_5 、 C_5 起着自动增益控制的作用。 R_5 一端跟检波器的负载 W 上端相连，另一端跟第一中放管 BG_2 的基极相连，检波后输出的音频和直流成份一路流过 R_5 ，其中音频部分被一个大容量的电容器 C_5 旁路到地，直流部分则进入 BG_2 的基极（见图中 I_2 ），它的方向跟 BG_2 静态时基极电流 I_b 的方向相反，抵消了部分 I_b ，结果使 BG_2 的基极电流减少，从而使放大器的增益减少。静态基极电流 I_b 被抵消得愈多，放大器增益也下降得愈多。

当输入信号较强时，加在二极管 D 上的中频信号电压增加，检波后流经 R_5 的直流成份也相应增加， I_b 就被抵消得多， BG_2 的增益也就下降得多，于是强信号受到了抑制。当外来信号较弱时，检波后输出的直流成份也减小，流经 R_5 的电流减小， I_b 被抵消得比较少， BG_2 的增益比强信号时有了提高，于是弱信号获得较大的放大，这样就起到了自动控制增益的作用。

四、低 放 级

由检波器检得的音频信号，它的能量还很小不足以推动扬声器发出声音，因此还需要加以放大，以达到足够大的输出功率推动扬声器。图 15.21 中的 BG_4 、 BG_5 、 BG_6 是用来放大

音频信号的,它们组成收音机中的低放级(因为音频信号相对高频载波或中频来说,频率比较低)。BG₅和BG₆后面接扬声器,这就要有足够的功率输出才能使发出的声音响亮,故称为功率放大;BG₄主要对前面输送来的音频信号有尽可能大的放大倍数,并且畸变(失真)要小,称为前置放大。

电路中R₁₂、R₁₃、R₁₄是BG₄的偏置电阻;C₁₀用来旁路音频的,所以它的容量比旁路高频的C₄或旁路中频的C₁₀、C₁₄要大得多。检波器输出的音频信号经C₁₈耦合到BG₄的基极,经BG₄放大后由输入变压器B₃耦合到功率放大管BG₅、BG₆的基极(B₃接在功率放大级的输入端故叫输入变压器),再次进行放大。

BG₅、BG₆组成的功率放大级是推挽功率放大电路。输入变压器B₃的次级绕组是中心抽头的,故B₃次级为BG₅、BG₆基极提供位相相反的信号电压。BG₅、BG₆输出端接音频变压器B₄,B₄接在功率放大级输出端,故称为输出变压器。B₄初级绕组亦是中心抽头的。R₁₆、R₁₇是公用偏置电阻,它们的分压比($R_{17}/R_{16}+R_{17}$)选择得很小,使没有信号输入时,BG₅、BG₆的集电极电流很小,即两管子的静态工作点接近截止状态。R₁₉是发射极电阻,起稳定工作点的作用,它的阻值很小,对音频信号没有多大影响。

为了说明BG₅、BG₆是如何进行推挽放大的,我们把这一部分电路改画成图15.26(图中略去了对音频信号不起作用的R₁₆、R₁₇和R₁₈)。BG₄的输出信号通过B₃的感应耦合对称地加在BG₅、BG₆的基极上。设输入信号处于正半周时,B₃次级绕组上端为正,下端为负(图15.26a)。BG₅的基极与发射极之间加正向信号电压,不能工作;BG₆的基极与发射极之间加负向信号电压,能够工作。信号经BG₆放大,在

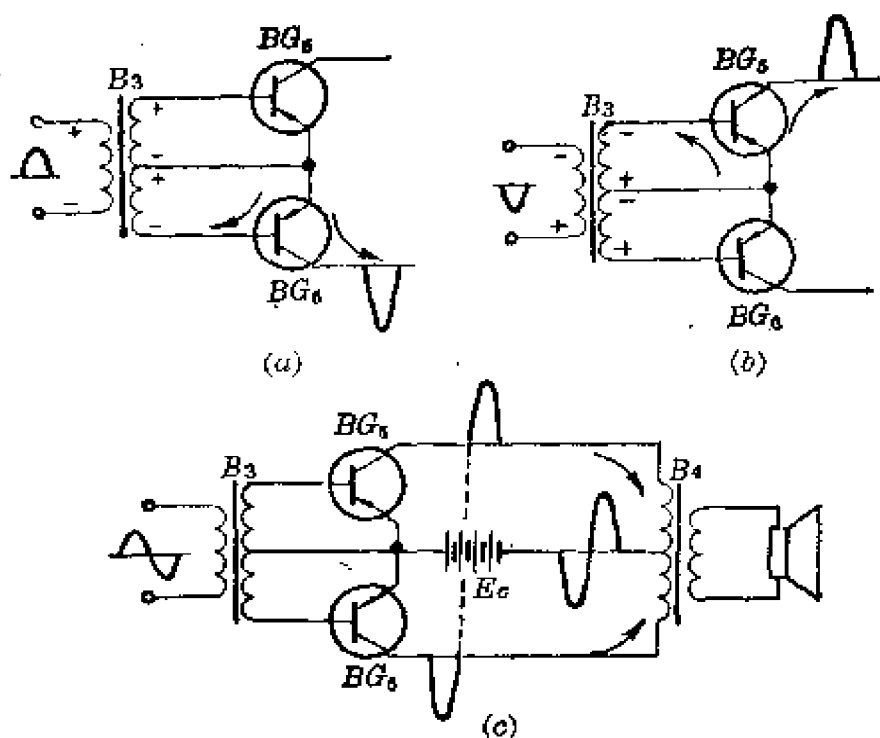


图 15.26 推挽放大电路工作原理

变压器 B_4 的初级有 BG_6 集电极信号电流通过，得到负半周信号(图 15.26a)。在输入信号处于负半周时， B_3 次级上负下正(图 15.26b)。 BG_6 基极与发射极之间加正信号电压，不能工作； BG_5 基极与发射极之间加负信号电压，能够工作。信号经 BG_5 放大，在 B_4 初级有 BG_5 的集电极信号电流通过，得到一个正半周的信号(图 15.26b)。输入信号变化一个周期，两管轮流工作一次，各放大信号的半个波形，互相协作，合成一个完整的波形(图 15.26c)。它们一推一拉，所以叫推挽放大。 B_4 的次级接到扬声器上，次级绕组的匝数比初级绕组匝数要少得多，所以初级绕组中信号电流的变化在次级绕组中感应出较强的信号电流，足以推动扬声器发出响亮的声音。

收音机各级都公用一个电源，在电池用旧时，电池内阻增

加, 信号电流通过电池时要产生电压降, 这个电压降耦合到各级可能引起振荡, 产生啸叫声, 影响正常收音。电路中接入由 C_{20} 、 R_{15} 、 C_{21} 组成的所谓退耦电路, 使信号电流不能通过电池, 而被 C_{20} 、 C_{21} 大容量电容所短路, 这就保证了收音机的正常工作。

复 习 题

习题 15.1 用能量的转化来分析 LC 回路中产生振荡电流的过程。

习题 15.2 LC 回路的固有振荡频率决定于哪些因素?

习题 15.3 电磁波的波长、波速和频率之间有什么关系?

习题 15.4 一台接收无线电广播的接收机必须具有哪些功能?

习题 15.5 输入回路由什么组成? 它能够起到选择电台的作用是利用它的什么特性?

习题 15.6 图 15.15 的检波器是如何检取出音频信号的?

习题 15.7 超外差式晶体管收音机由哪几个部分组成?

习题 15.8 设超外差式收音机输入回路选择 1000 kHz 的电台, 那么本机振荡频率是多少?

习题 15.9 为什么超外差式收音机的灵敏度和选择性都比较好?

第五编 光 学

光是最常见的自然现象之一。人们要看清周围的一切就必须借助于光。只有让足够的光照射在物体上，再反射到人们的眼睛里来，才能引起人们的视觉，使人们看到物体。那么光究竟是什么呢？实际上光就是一种能引起人们视觉的电磁波，它的波长是在4000~7600埃(10^{-8} 厘米)的范围以内，统称可见光。波长不同的可见光，其颜色也就不同，其中红光的波长最长，紫光的波长最短。因此，光也是一种物质，它跟其他形式的物质一样，也具有能量。光所具有的能量叫做光能。近几十年来，随着生产力的发展和科学实验的积累，人们对于光的本性的认识更加深入，发现光不仅具有波动性，而且还具有粒子性，即光是具有波粒二象性的对立统一体。

光学所研究的就是关于光的发生、光的本性、光的传播以及光与其他物质相互作用的规律。“科学的发生和发展一开始就是由生产决定的”。劳动人民在长期的生产实践中积累了丰富的光学知识。今天，光学知识无论在工农业生产、国防、科学研究上都有着极其广泛的应用。例如，人们在掌握了光的传播规律的基础上，利用各种反射镜、透镜等光学元件来改变光路，从而制成各种光学仪器。如用来观察或瞄准远处目标的望远镜、用来观察肉眼无法辨认的病菌的显微镜；又如幻灯机和电影放映机是宣传马列主义、毛泽东思想的有力工具；利用光的干涉可以测定精密工件表面的光洁度；利用光电效应可

以进行自动控制等。

本編包括第十六、十七章, 主要介绍有关光学的基础知识以及它们在工农业生产技术上的应用。在叙述中虽然主要是讨论可见光, 但所得出的结论对于波长与可见光相近的红外线、紫外线也同样适用。

第十六章 几何光学

几何光学是光学中运用几何方法来研究光的传播规律的一个分支。它以光的直线传播为基础，专门研究光在均匀介质中以及在不同介质的分界面上的传播规律。

本章首先从能量方面来讨论光源的发光强度、光通量以及被照明物体表面的照度等有关光的量度问题，简称光度学；然后通过一些实验事实来阐明有关几何光学的三个基本定律；并运用这些规律来分析平面镜、球面镜、棱镜和透镜等基本光学元件的作用和它们在工农业生产技术上的应用。

第一节 光度学

一、光源

参加过民兵夜间值班的同志都知道，在黎明前有一段黑暗时间。那真是一片漆黑，伸手不见五指。直到东方发白，才能逐渐看到物体的轮廓。当红太阳从东方升起时，才给我们带来了光明，阳光普照大地。这时我们不仅能看清四周的树木、庄稼和房屋，还能看到这些物体表面上鲜艳夺目的颜色。象树木、庄稼和房屋等不发光的物体只有在足够的光线照射下才能看得见。一切发光的物体都可以成为光源，而太阳是巨大的天然光源。

科学研究表明，太阳是一个直径为 140 万公里的巨大火

球，它的体积相当于地球的130万倍。太阳表面的温度近6000K，而内部的温度高达 2×10^7 K，因而它虽距离地球1.5亿公里，却能把地面都照亮。然而太阳除了向四周不断辐射可以引起视觉的可见光外，同时还不断辐射波长与可见光相近的红外线和紫外线*。在太阳所辐射的能量中，约有一半是可见光，其次是红外线，紫外线最少。图16.1表示太阳辐射能按不同波长的强度分布情况。

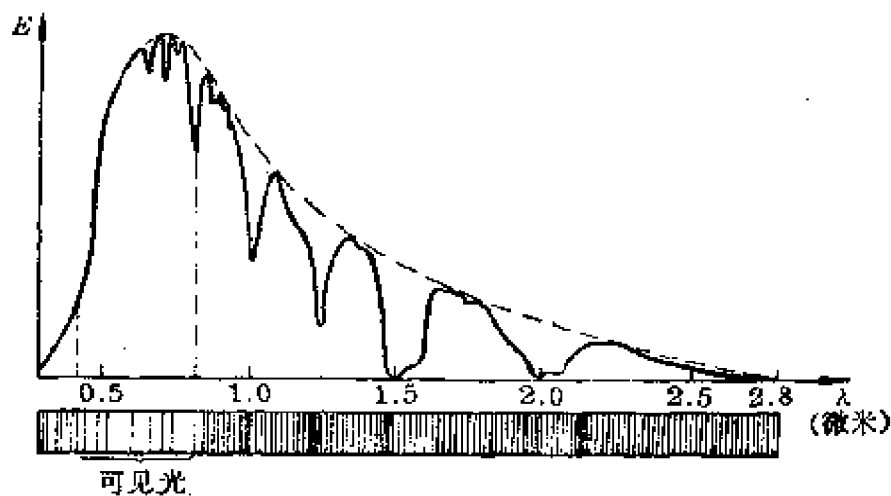


图 16.1 太阳辐射能强度的分布

自古以来，人们为了战胜黑夜，为了在夜晚也能象白天一样生产和生活，曾经采用过各种人造光源。人们发现如果对物体加热，使它保持一定的高温，那么物体就能持续发光而成为光源。煤油灯是燃烧煤油而发光的；白炽电灯是由电流通过钨丝，使钨丝白热而发光的。这些由高温物体辐射发光的光源叫做热光源。白炽电灯的缺点是灯丝温度不能过高，否则钨丝由于蒸发而会很快变细，最后被烧断；同时蒸发出来的钨会使灯泡发黑，影响光效。卤钨灯就是经过改进的白炽电灯，它是利用卤素循环的化学作用，在白炽电灯中充入少量的

* 有关红外线和紫外线的问题详见第十七章第三节。

碘或溴等卤素,就能使蒸发出来的钨又回到灯丝上去,从而使钨丝可以在较高的温度下发光而不致烧断。因此它具有寿命长、光效高的特点,可以用作工厂、车站、广场以及打谷场上的照明光源,也可以作为幻灯机、电影放映机的光源。

日光灯、水银灯都是利用气体放电原理,在常温下把电能转化为光能的电光源,因而又叫做冷光源。在这基础上发展起来被人们称之为“人造小太阳”的长弧氙灯是一种惰性气体放电灯,外形和一般日光灯差不多,但发光特别明亮,功率可达几十千瓦,因此光照面积大,是一种很理想的大广场照明光源。

如果光源本身的尺寸与被它所照射物体的距离相比小得多,这时光源就可以看作一点,叫做点光源。从点光源发出的光是均匀地向四周发散的发散光束。对于地面说来,太阳虽然也是一个点光源,但由于太阳距地球过远,因此照射在地面上的阳光就成了平行光束。一般说来,从远处的光源射来的光束都可以看作平行光束。这样的光源就叫做平行光源。

二、发光强度和亮度

白炽电灯比煤油灯亮得多,日光灯又比一般白炽电灯亮些。这些都表明各种不同光源发光的强弱是不同的。发光强度就是用来反映光源发光强弱程度的物理量,简称光强。

发光强度的单位是烛光。按照最初的规定,所谓1烛光是指一支标准蜡烛以一定速度燃烧时的发光强度。但实际上这种标准是很不稳定的,因此国际上后来又重新规定:面积等于 $1/60$ 厘米²的绝对黑体(即能吸收全部外来光线而毫无反射能力的理想物体)在纯铂(Pt)凝固温度 2042.1K° 时,沿垂直方向的发光强度叫做1烛光。太阳的发光强度是在 10^{24} 烛

光以上。表 16.1 列出了几种电光源的电功率和发光强度。可见白炽电灯所消耗的电功率的瓦数和它的发光强度的烛光数(俗称几支光)并不一致。从表中还可以看出日光灯的发光效率(光效)比一般白炽电灯高得多。在同样消耗40瓦电功率的情况下,日光灯的发光强度为 136 烛光,而白炽电灯只有 35 烛光。这是因为在白炽电灯所辐射的能量中,只有很小一部分是可见光,其余大部分都是不能引起视觉的红外线。因此用白炽电灯来照明是很不经济的。

表 16.1 几种电光源的电功率和发光强度

白 炽 电 灯		日 光 灯		长 弧 氙 灯	
电功率(瓦)	发光强度(烛光)	电功率(瓦)	发光强度(烛光)	电功率(瓦)	发光强度(烛光)
25	20	8	20	1000	2600
40	35	15	40	6000	16000
100	110	40	136		

然而即使两个光源的发光强度完全相同,它们对人的视觉引起的明亮程度也可以不同。例如两个电功率相同的白炽电灯,一个是普通玻璃,另一个是磨砂玻璃,那么磨砂玻璃的灯泡看起来就不如普通玻璃的灯泡那样明亮。这是因为磨砂玻璃泡表面上凹凸不平,发光面积较大的缘故。可见光源的明亮程度还与发光面积有关。通常把光源表面沿法线方向每单位面积的发光强度叫做光源的亮度。即

$$L = \frac{I}{A} \quad (16.1)$$

如果光源的发光强度 I 以烛光为单位,发光面积 A 以厘米²为

单位,那么光源的亮度 L 的单位就是烛光/厘米²,或称熙提。例如一般白炽电灯的亮度为 200 熙提,表面磨砂的白炽电灯为 2.5 熙提;日光灯为 15 熙提。从地球上看来,太阳的亮度为 1.5×10^3 熙提。亮度反映了光源的明亮程度。

磨砂白炽电灯、日光灯等光源发光面积较大,亮度较小,但光照范围大,光线柔和而均匀,比较适宜于用作照明光源。

三、光 通 量

太阳光照射在物体上,能使物体发热。这表明一部分光能已经转化为物体的内能,因此太阳光的照射会直接影响到地温和水稻田里的水温。我们生活所必需的粮、棉、油、蔬菜等绿色作物把由根部吸收来的水分和由叶子气孔里吸收进来的二氧化碳,通过光合作用合成为有机物质(糖、淀粉等),同时放出氧气。这是光能转化为化学能的例子。不少农业生产上的措施,如合理密植、间作套种等,都是为了提高对太阳光的利用率,从而来提高产量的。

由于光源是不断地在向四周空间辐射光能,为了量度物体吸收光能的多少,通常把单位时间里通过某一面积的光能的多少叫做这一面积上的光通量,用字母 F 表示。

光通量的单位是流明。它是这样规定的:以点光源为中心作一个半径为 1 米的球面。当点光源的发光强度为 1 烛光时,那么通过球面上每一平方米面积上的光通量就是 1 流明。由于半径为 1 米的球面的表面积等于 4π 米²,因此发光强度为 1 烛光的点光源向四周空间辐射的总光通量为 4π 流明。于是可以进一步推算出:发光强度为 I 烛光的光源向四周空间辐射的总光通量

$$F = 4\pi I \text{ 流明。} \quad (16.2)$$

四、照 度

我们能不能看清物体，能不能分清物体上极其细小部分都决定于物体表面的被照明程度。照度就是用来反映物体表面被照明程度的物理量，通常用字母 E 表示。

物体的照度不仅与它表面上的光通量有关，而且与它本身表面积的大小也有关。通常是用照射在物体表面单位面积上的光通量来量度物体的照度，即

$$E = \frac{F}{A}。 \quad (16.3)$$

如果光通量的单位为流明，表面面积的单位为米²，那么物体照度的单位就是流明/米²，又称勒克司。例如，我国南方夏日中午在太阳光直射下的田野的照度大约为 10^5 勒克司；多云天室外的照度约为 $10^3 \sim 10^4$ 勒克司；没有月亮的夜晚，旷野的照度为 0.0003 勒克司。在我们学习和工作的场所，必须保持一定的照度，并且保持照度的均匀和稳定，否则会损害视力。一般从事细小精密的工作，需要照度 100 勒克司，阅读和书写时的标准照度依次为 50 和 75 勒克司。

物体的照度固然与光源的发光强度有关，但是在光源的发光强度一定时，物体的照度与它离光源的距离也有关系。为了找出它们之间的定量关系，假设以发光强度为 I 烛光的点光源为中心，以距离 r 米为半径作一球面。根据公式(16.2)可知，这个点光源向四周空间辐射的总光通量，即辐射在整个球面上的总光通量为 $4\pi I$ 流明，而整个球面的表面积为 $4\pi r^2$ 米²，因此根据公式(16.3)，可以列出距点光源 r 米处物体的照度

$$E = \frac{F}{A} = \frac{4\pi I}{4\pi r^2} = \frac{I}{r^2}。 \quad (16.4)$$

上式表明：在点光源的垂直照射下，物体被照表面的照度与光源的发光强度成正比；而与光源的距离平方成反比。

我们在灯下看书时，如果灯在书的正上方或者在书的斜上方，即使距离相等，被照明的程度也不相等。这表明物体表面的照度与光源是直射还是斜射有关。

若从光源发出的光线与被照矩形平面 $BCDG$ 的法线（即垂线）成 i 角（图 16.2），则角 i 叫做光线的入射角。如果被照面上的光通量为 F ，可以列出被照面上的照度

$$E = \frac{F}{A} = \frac{F}{BC \times CD}。$$

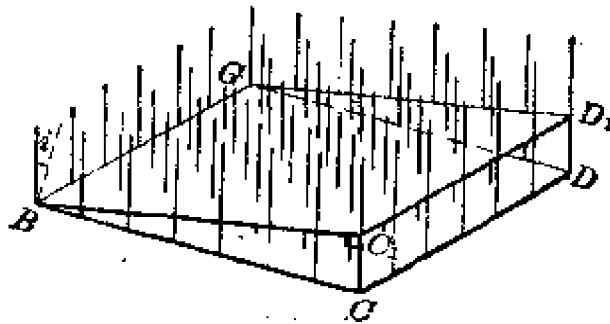


图 16.2

沿着与光线垂直的方向作矩形平面 BC_1D_1G ，由于这一平面上的光通量仍为 F ，于是可以列出这一平面上的照度

$$E_0 = \frac{F}{A_0} = \frac{F}{BC_1 \times C_1D_1}，$$

比较这两个照度，就得到：

$$\frac{E}{E_0} = \frac{F}{BC \times CD} \cdot \frac{BC_1 \times C_1D_1}{F} = \frac{BC_1}{BC} = \cos i$$

即

$$E = E_0 \cos i。 \quad (16.5)$$

上式表明：用平行光源照射物体时，被照面上的照度与光线的

入射角的余弦成正比。

[例题 16.1] 电灯 S 挂在离桌面 0.5 米高的地方 (图 16.3), 已知电灯正下方桌面上 A 点的照度为 80 勒克司, 问离电灯 1 米的桌面上 B 点的照度有多大?

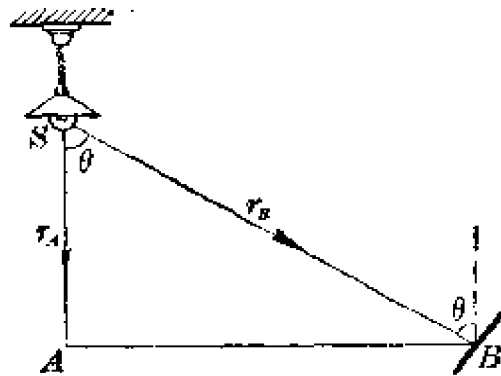


图 16.3

解: 由于桌面上 A 点受到电灯的垂直照射, 可以从 A 点的照度 $E_A = 80$ 勒克司、与电灯的距离 $r_A = 0.5$ 米, 根据公式 (16.4) 求出电灯的发光强度

$$I = E_A r_A^2 = 80 \times (0.5)^2 = 20 \text{ 烛光,}$$

于是可按公式 (16.4), 电灯垂直照射到桌面上 B 点的照度

$$E_{OB} = \frac{I}{r_B^2} = \frac{20}{1^2} = 20 \text{ 勒克司。}$$

又因为实际上电灯光线在 B 点的入射角的余弦

$$\cos \theta = \frac{SA}{SB} = \frac{0.5}{1} = 0.5,$$

所以根据公式 (16.5), B 点处实际的照度

$$E_B = E_{OB} \cos \theta = 20 \times 0.5 = 10 \text{ 勒克司。}$$

五、太阳的照度

地球绕太阳公转的轨道是个椭圆 (图 16.4), 因此太阳与

地球的距离并不是一个常量，通常所说的太阳与地球的距离是指它们之间的平均距离，即指地球在远日点（距太阳最远位置）和在近日点（距太阳最近位置）与太阳距离的平均值，约为 1.49675×10^8 公里。当地球与太阳的距离等于它们之间的平均距离时，在地球表面上受太阳垂直照射的每平方厘米面积上，每分钟所得到的太阳辐射能叫做太阳常数，通常是用热量来表示的，即为 1.94 卡/厘米²·分。如果用功率来表示，应为 0.135 瓦特/厘米²，相当于 8.4×10^5 勒克司。

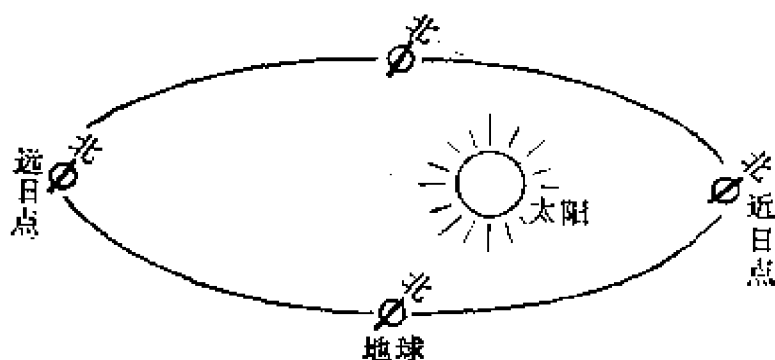


图 16.4

实际上只有在每年的春分和秋分的正午时刻，地球与太阳的距离才正好等于它们之间的平均距离。这时太阳光也正好垂直地照在赤道地区上，因此这时地球赤道上的照度恰好等于太阳常数。一般说来，地球表面所受太阳的照度总是小于太阳常数，而是随着纬度、季节和时间的不同而有所不同。

日照时间是指太阳光照射地面的时间。它不仅与各个地区的纬度、季节有关，而且还随着天空云量的增加而减少。因此不断观测本地区日照时间的长短，对于保证农作物正常生长和发育是极为重要的。

我国各地全年的日照时间大致上具有南少于北的特点。在西南四川盆地最少，但也有 1200 小时；在整个华南地区平

均约为 1500~2000 小时;长江流域在 1500 小时左右;而华北平原长达 2500 小时;东北平原约为 2500~3000 小时;西北黄土高原在 2000~3000 小时之间;而塔里木、吐鲁番盆地高达 3200~3400 小时,这在全世界来说也是少见的多日照地区。

根据农作物的发育与光照的关系,我们可以把农作物分为长日照作物和短日照作物两种。大豆、棉花、玉米、水稻等都属于短日照作物,它们在昼愈短夜愈长的条件下发育愈快;元麦、小麦、亚麻等都属于长日照作物,它们在昼愈长夜愈短的条件下发育愈快。此外,象黄瓜、西红柿、茄子、辣椒等作物在长日照或短日照的条件下都能顺利渡过光照阶段,因此这些作物在任何季节都可以种,即使在冬天,只要保证适宜的温度,也能在温室里开花结果。

由于被照面的照度与太阳光的入射角也有关系,因此即使在同一地区、同一季节,不同方向的斜坡所受的日照时间也是不同的。有人在北纬 35° 的地区对斜坡的日照情况作过实验,结果表明:在夏至前后,朝东和朝西的斜坡所受的日照最多,而朝南和朝北的斜坡则较少;但在春分、秋分以及冬至前后,朝南的斜坡所受日照最多,朝东和朝西的少些;而朝北的在冬至前后简直没有日照,春分、秋分时也很少。斜坡的坡度越大,受到的日照就越小,而且上述差别也越显著。所以果树和喜暖作物都应该栽植在朝南斜坡上;我们在建造温室时,最好选用朝南的斜坡;开畦的方向也应考虑到日照的因素,冬作物以东西向为好,夏作物以南北向为好。

习题 16.1 当太阳光对地面的照度为 10^5 勒克司时,问地面上 1米^2 面积上的光通量有多大?

习题 16.2 如果已经测得距离点光源 3 米处与光线垂直的被照面

上的照度为 10 勒克司, 求点光源的发光强度。

习题 16.3 要在标准的照度下阅读, 问应该把一盏 25 烛光的电灯吊在离书面多高的地方?

习题 16.4 在直径为 1 米的大圆台正上方吊一盏 100 烛光的电灯, 如果要使坐在圆台周围的人都能在标准照度下书写, 问电灯应该吊在离桌多高的地方?

第二节 光的直线传播

一、光的直线传播定律

当我们在室内, 如果有阳光从门窗狭缝里射进来, 照在飞扬的尘埃上, 就可以清楚地看到阳光在空气中传播的路线是笔直的。正是由于光是直进的, 因此无论室内的光线如何充足, 我们总不能直接看到门背后的东西。从点光源发出的光束所以是发散的, 而从远处的光源发来的光束所以是平行的, 也都是这个原因。

人们从长期的实践经验中总结出一条光的传播规律: 在真空中, 或者在均匀的介质中, 光是沿着直线传播的。这条规律就叫做光的直线传播定律。因此, 我们通常可以用几何直线来表示光的传播方向, 或者表示光路。

[例题 16.2] 在硬纸板做成的暗匣上用细针戳个小孔, 把它正对着一个发光的烛焰。适当调节暗匣的位置, 暗匣另一侧就会出现一个倒立的烛焰的象(图 16.5)。为什么光线穿过小孔而形成的象是倒立的呢?

解: 这可以用光的直线传播定律来解释。我们知道, 从发光的烛焰上各点发出的光束都是发散的, 但是从每一点发

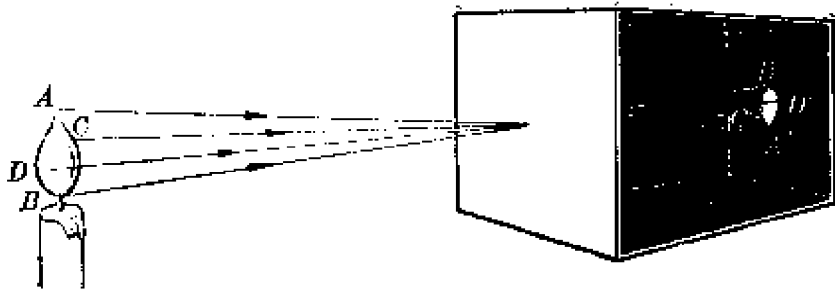


图 16.5 小孔成象

出的发散光束中,都只有一束可以穿过小孔,其他的光束都被纸板挡住了。由于光是直线传播的,从烛焰上方各点发出的光束穿过小孔后就射向下方,而从烛焰下方各点发出的光束穿过小孔后却射向上方。这些光束射在黑纸片上就形成许多小光点,合起来就构成一个与实物(烛焰)完全相似的倒立的象。

早在二千三百多年前,春秋时代的墨翟在他的著作《墨经》里就有“景倒,在午有端”的记载。表明他对光的直线传播以及小孔成象的实验已有过研究,指出成倒象的原因在于中间有小孔的关系。在西方,最早的要算欧几里德的光学记载。但在他的记载中只是假定光有直进性,而并没有实验,在时间上要比墨翟晚一百多年。可见我国古代的劳动人民对几何光学的研究是有过巨大贡献的。

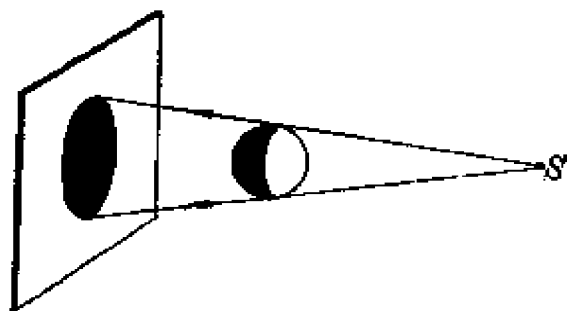
必须指出,把光的传播理解为绝对的直线传播,严格说来是片面的。在一定的条件下,光象声波、水波一样,也会绕到障碍物的后面去。有关光的衍射问题将在第十七章里具体讨论。

二、本影和半影

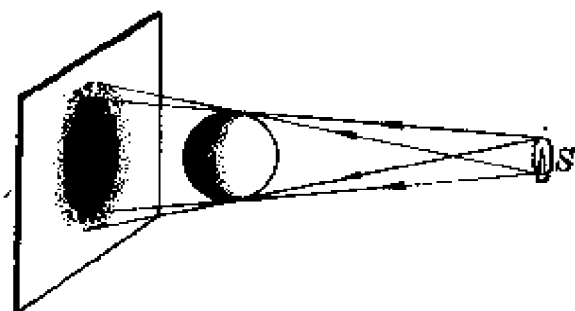
你见过日蚀和月蚀现象吗?一些讲迷信的人胡说什么“月

蚀是天狗吃月亮”，其实天上根本没有什么天狗，日蚀和月蚀都是正常的自然现象，完全可以用光的传播规律来解释。

因为光是沿着直线传播的，从光源发出的光线一遇到不透光的物体，在它后面就会形成一个阴暗区。在物体后面竖立一块纸板，如果光源是点光源 S ，在纸板上就会出现物体的一个边界十分清楚的黑影(图 16.6a)，叫做**本影**；如果光源并非一点，那么纸板上除了有物体的本影外，在本影周围还会出现一个半明半暗的部分(图 16.6b)，叫做**半影**。很明显，本影是没有受到任何光照的地方，而半影是部分受到光照的地方。日蚀和月蚀现象就是月亮或地球在太阳照射下的黑影所造成的。



(a) 本影



(b) 半影

图 16.6 物体的黑影

我们知道，月球是绕着地球运转的；地球不仅自转，而且还在绕着太阳公转。每逢农历初一，月球就要转到太阳和地

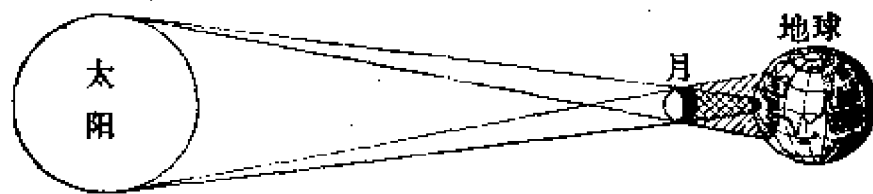


图 16.7 日蚀

球的中间去。如果月球转到太阳和地球的中间且正好与太阳、地球在同一直线上,这时从地球上看来,太阳就要暂时被月球所遮没而发生日蚀现象(图 16.7),即在地球表面上要出现月球的本影和半影区。在本影区内的人们这时完全看不到太阳,叫做日全蚀;在半影区内的人们这时可以看到太阳缺了一部分,叫做日偏蚀;而在本影、半影外的人们就看不到日蚀现象。

每逢农历十五左右,月球就转到背着太阳的一面去。由于月球本身并不是发光体,月球只有在太阳光的照射下才看得见。如果月球转到地球背面且正好与太阳、地球在同一直线上,那么太阳照射到月球上去的光线就要暂时被地球所遮没而发生月蚀现象(图 16.8),即月球这时是在地球的本影或半影区内。从地球上看来,如果月球是在本影区内,月球这时就被一黑圆块完全遮没,叫做月全蚀;如果月球是在半影区内,月球这时就有一部分被一黑圆块遮没,叫做月偏蚀。其实,这个黑圆块就是地球的黑影。

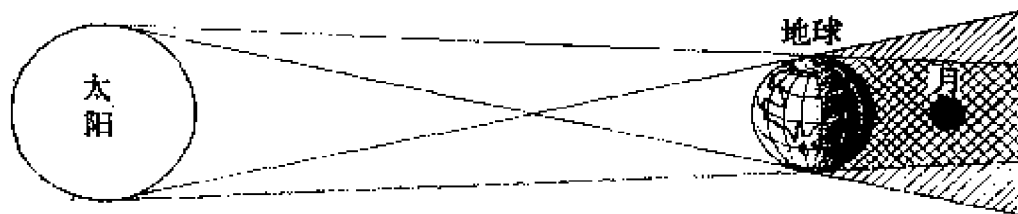


图 16.8 月蚀

由于月球绕地球运转的平面和地球绕太阳运转的平面并不在同一平面上而相互倾斜成 5° 的交角，太阳、月球和地球并不是每个月都有机会在同一直线上，因此日蚀和月蚀现象不可能每月都发生。人们通过对天体的观测和研究，在掌握了光的传播规律和天体运行的规律之后，不仅能对日蚀和月蚀现象进行科学的解释，而且还能准确地推算出即将发生的日蚀和月蚀的时间、地点和情况。目前我国天文台已经推算出未来二百年间月蚀发生的日期和时刻。

三、光的传播速度

雷雨时总是先看到电闪，再听到雷声。这是因为声波的传播需要一段时间。那么闪光的传播是否需要时间呢？起初人们以为无论距离多远，只要一发光就立即可以看到它，即以为光的传播是不需要时间的。这种认为光的传播速度无限大的看法显然是与光的物质性背道而驰的，也是不符合客观实际的。后来随着生产实践和科学实验的发展，人们运用了各种方法终于测出了光的传播速度的量值。根据目前测量最准确的结果，光在真空中的传播速度

$$c = 299,793.0 \pm 0.3 \text{ 公里/秒,}$$

这个量值也就是各种电磁波在真空中的传播速度。在一般情况下可以取

$$c = 3 \times 10^5 \text{ 公里/秒} = 3 \times 10^8 \text{ 米/秒.}$$

可见光的传播速度是很大的，1秒钟通过的距离相当于绕地球赤道7.5周。然而光速虽大，而宇宙更大。根据地球距离太阳1.5亿公里可以算出，从太阳发出的光需经过8分20秒才能照到地球上，这表明我们看到的阳光是8分20秒前从太阳上发出的。从其他恒星发出的光照到地球上所需的时间那

就更长了。因此在天文学上常用光年(即光在一年时间里所经过的距离)作为长度单位来量度星际间的距离。

$$1 \text{ 光年} = 9.46 \times 10^{12} \text{ 公里。}$$

现在人们用射电望远镜已能观察到一百亿光年的空间范围,记录到近四亿个星系。但这决不是宇宙的极限,随着生产实践和科学技术的发展,人类对宇宙的认识还将不断扩大,永远没有止境。自然界是无限的,而且它无限地存在着。

我们知道,声波在各种介质中的传播速度是不同的。同样,光在各种透明介质中的传播速度也各不相同,但都比光在真空中的传播速度小。实验表明,光在空气中的传播速度与在真空中差不多,而在水中的传播速度只相当于在真空中的 $3/4$ 。

习题 16.5 在纸板上挖个圆洞,通过圆洞向外看,为什么圆洞离眼睛越近,眼睛能看到外面的范围就越大?

习题 16.6 北宋时期著名的科学家沈括在他的《梦溪笔谈》中有这样的记载:“若鸢飞空中,其影随鸢而移,或中间为窗隙所束,则影与鸢遂相违,鸢东则影西,鸢西则影东。”意思是说如果在纸窗上戳个小孔,让窗外飞鸢的象成在屋内的纸屏上,那么鸢向东飞,象就向西移动;鸢向西飞,象就向东移动。试分析这一现象的原因。

习题 16.7 织女星距离地球约 2.6×10^{14} 公里,那么我们看到织女星所发出的光实际上是几年前发出的?

第三节 光的反射

太阳不仅是个巨大的光源,也是个巨大的能源。尽管太阳向周围辐射的能量中只有 20 亿分之一是射向地球的,尽管其中有一部分还要消耗在地球的大气层里,但是到达地面的太阳能还是相当可观的。根据粗略的计算,地球表面跟太阳

光垂直的面积上所获得的太阳能约为每平方米一瓩。这就是说,如果把一公里见方的海面上获得的太阳能不断收集起来,就相当于一座发电量为 100 万瓩的发电站。因此对于太阳能的利用有着十分广阔的发展前途。



图 16.9 伞形太阳灶

图 16.9 就是上海无线电十五厂等单位共同协作试制成功的伞形太阳灶。它的形状好比一把倒置撑开的雨伞,其实是一个抛物面形的聚光镜。把它正对着太阳就能使阳光会聚锅底,即使是在上海的冬天,锅底温度仍可超过 500°C 。用这种太阳灶烧水、做饭、炒菜十分方便,一斤米约 15 分钟即可煮熟,特别适用广大农村和野外作业人员使用。

为什么利用抛物面形的聚光镜可以把阳光会聚到锅底上去呢? 这要从光的反射规律讲起。

一、光的反射规律

当你站在镜子前面,或者面对平静的水面时,就能在镜子

里或水面上看到自己的形象。这是光的反射作用。什么叫做光的反射呢？我们知道，光在同一种均匀介质中是沿直线传播的，并不改变传播方向。但是当光从一种介质斜射入另一种介质的分界面上时，光的传播方向就要发生改变。例如当一束光线 AO 从空气中斜射到空气和水的分界面上时（图 16.10），一般说来，就要分成两部分：一部分返回原来的介质，在空气中继续传播而成为反射光线 OB ，这种现象叫做光的反射；而另一部分则进入另一种介质，即在水中继续传播而成为折射光线 OC ，其传播方向也要有所改变，这种现象叫做光的折射。所以，光的反射和折射是光在两种介质的分界面上同时发生的现象。我们站在玻璃窗前，不仅能看到玻璃窗后面的物体，同时又能看到自己的形象，就是这个缘故。这一节主要研究光的反射规律。

为什么通过光的反射就能从镜子里看到镜前物体的象呢？我们先来分析最简单的平面镜。假设在平面镜前有个发光点 S （图 16.11），我们在 P 点向前观察，就感觉到好象在镜面 YY' 背后也有一个发光点 S' 。把发光点 S 靠近镜面一些，镜

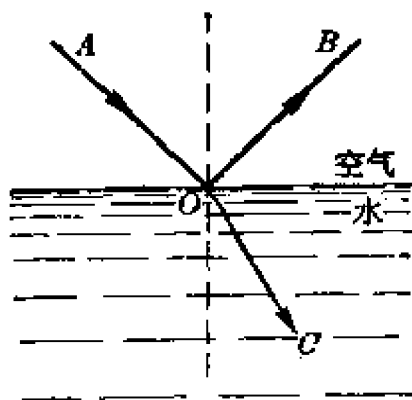


图 16.10 光的反射和折射

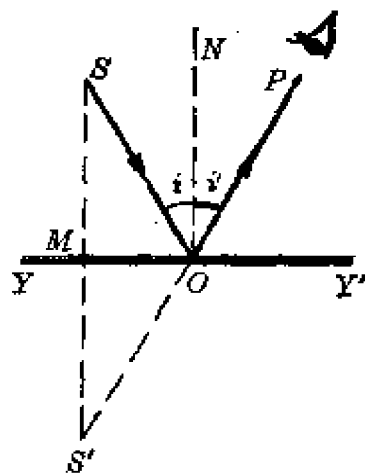


图 16.11 平面镜成象原理

面背后的发光点 S' 也会靠近镜面一些; S 离远一些, S' 也会离远一些。这表明发光点 S 和 S' 与镜面的距离总是相等的。即 $MS = MS'$ 。其实在镜面背后根本就不存在发光点 S' , 我们在 P 点观察到的来自 S' 的光线实际上并不来自 S' , 而是从发光点 S 发出的光线照射在镜面 O 点上反射到 P 点的光线。由于我们在习惯上总以为光是沿直线射来的, 因此就有发光点在镜面背后 S' 点的感觉。通常把镜面背后的 S' 点叫做发光点 S 的虚象。如果镜前的光源不是一点而是一个光亮的物体 (图 16.12), 那么它也可以看作是由许多发光点组成的, 而每一个发光点在镜面背后都有一个与它对应的虚象点, 这些虚象点拼起来就组成整个光亮物体在镜面背后的虚象。这就是平面镜的成象原理。

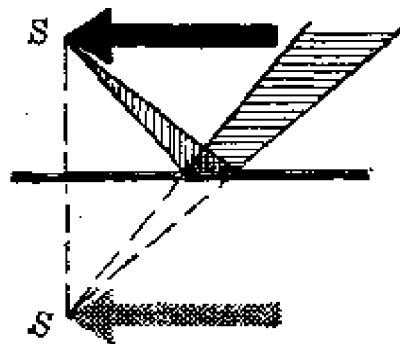


图 16.12

从图 16.11, 还可以看出光的反射所遵循的规律。通常把射到两种介质的分界面 (如镜面) 上的光线 SO 叫做入射线, 把 O 点叫做入射点, 而把反射后的光线 OP 叫做反射线。由入射点 O 作垂直于分界面的法线 ON , 那么入射线与法线的交角 i 就叫做入射角, 而反射线与法线的交角 i' 就叫做反射角。人们从长期的实践经验中总结出光的反射规律如下:

1. 入射线、反射线和法线在同一平面内，反射线和入射线分别在法线的两侧；

2. 反射角等于入射角。

这个结论就叫做光的反射定律。

由于反射角等于入射角，因此如果光线沿着反射线的方向入射，那么必将沿着原来的入射线的方向射出。这表明在反射现象中，光线具有可逆性。所以当你在平面镜中看到你的同学的眼睛时，他也一定看到了你的眼睛。

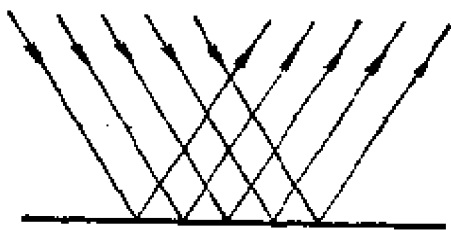


图 16.13 单向反射



图 16.14 漫反射

光的反射定律是一条普遍适用的客观规律，无论两种介质的分界面是光滑平面，还是凹凸不平的粗糙面。当一系列平行光线射向光滑平面时，由于它们的入射点的法线是相互平行的，因此反射后还是一列平行光线(图 16.13)，这种反射叫做单向反射；

但当一系列平行光线射向凹凸不平的粗糙面时，由于它们的入射点的法线不是互相平行，因此反射后就射向各个方向(图 16.14)，这种反射叫做漫反射。我们无论从哪个方向都能看到本身不发光的物体就是因为这些物体表面粗糙不平，在阳光照射下发生了漫反射的缘故。

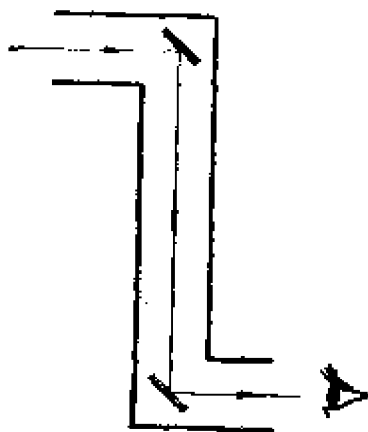


图 16.15 最简单的潜望镜

平面镜是一种最简单的光学反射元件。通常为了提高它的反射能力,在反射面上涂有银、铝、铬等反光物质,这样可使入射光百分之九十以上被反射。平面镜在光学仪器中可以用来改变光束的前进方向。最简单的潜望镜就是由两块平面镜组成的(图 16.15)。西欧最早的潜望镜是在上世纪末出现的,而早在公元前二世纪,我国《淮南子》一书中就有潜望镜原理的记载,它指出:“取大镜高悬,置水盆于其下,则见四邻矣。”

二、球面镜成像

球面镜也是一种光学反射元件。它是把玻璃或金属表面加工成具有一定曲率的球面后经过研磨抛光而成,其中镜面向里凹的叫凹面镜,简称凹镜;镜面向外凸的叫凸面镜,简称凸镜。为了增加镜面的反射效率,往往在镜面上涂有反射薄膜。

凹面镜具有会聚光线的作用。远在公元前的战国时代,人们已经懂得用凹面镜正对太阳来取火的方法,在《淮南子》中就有“阳燧见日,则燃而为火”的记载。“阳燧”是一种凹面的金属镜,把它面向太阳,就能使阳光聚于一点,此点叫做焦点。若把艾绒等易燃物放在焦点处即可点燃。这就是最原始的太阳灶。它比英国人培根第一次用金属制成的凹面镜早了整整

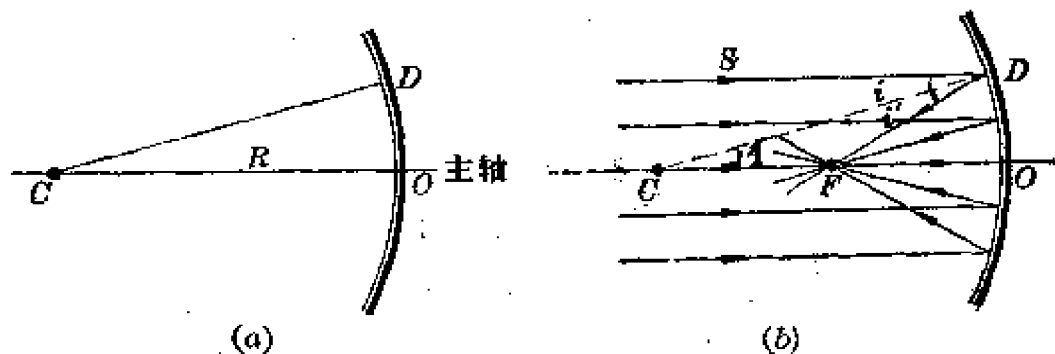


图 16.16 凹面镜

一千年。

为什么凹面镜能会聚光线呢？我们从光的反射定律来研究凹面镜的成象规律。图 16.16a 是凹面镜的截面图。球心 C 和镜面上任何一点的连线（如 CD ）都叫做凹面镜的光轴，其中和镜面中心（或称顶点） O 的连线 CO 叫做凹面镜的主光轴，简称主轴。 CO 间的距离是凹面镜的曲率半径，通常用字母 R 表示。球面上各点的法线都是通过球心的，根据反射角等于入射角的关系知道，靠近主轴的平行于凹面镜主轴的光线经过反射后都将会聚在一点上（图 16.16b）。若把纸片放在此处即可在纸上显出一个光亮的光斑，这一点就叫做凹面镜的实焦点，用字母 F 表示。 FO 间的距离叫做凹面镜的焦距，用字母 f 表示。

如果这些平行光线都是靠近主轴的近轴光线，那么利用几何方法很容易得到凹面镜的焦点 F 是在 C 、 O 的中点上。如图 16.16b 所示，由于 $SD \parallel CO$ ， $\angle i = \angle 1$ ；而根据光的反射定律 $\angle i' = \angle i$ ，因此可以从 $\angle i' = \angle 1$ 推知 $\triangle DFC$ 是等腰三角形，即 $FD = FC$ 。又因平行线靠近主轴， $FO \approx FD$ ，故

$$FO = FC = \frac{1}{2} CO = \frac{R}{2}。$$

由此可知，凹面镜的焦距等于它的曲率半径的一半，即

$$f = \frac{R}{2}。 \quad (16.6)$$

如果这些平行光线并不是近轴光线，它们就不会聚于一点（图 16.17）。因此对于球面镜说来，我们的讨论只能局限于近轴光线。为了使所有的平行光线都会聚在焦点上，就必须把反射面由球面改为抛物面*（图 16.18）。这就是为什么伞形

* 抛物面是一种立体的几何图形，它是由抛物线以它的主轴为旋转轴旋转而成。

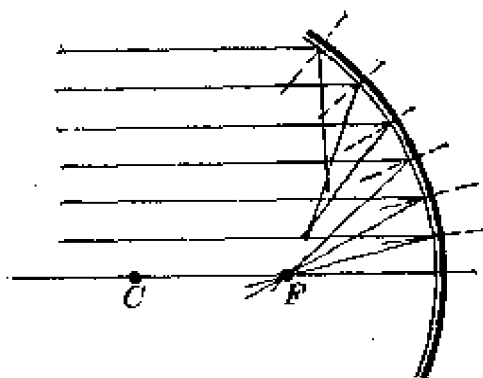


图 16.17 距轴远的平行光线经凹面镜
反射后并不会聚于一点

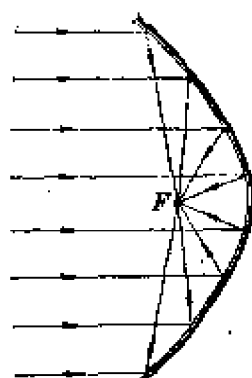


图 16.18 以抛物面为反
射面的凹面镜

太阳灶要采用伞形抛物面来反射太阳光的原因。

然而，科学上的规定向来都是由实践，由经验来检验的。在试制伞形太阳灶的过程中，开始是按理想抛物面来加工的，这样不仅加工困难，而且经过试验，发现理想抛物面焦点集中，太阳光都集中在焦点上，焦点温度过高，热量来不及传导开去，烧饭时就会产生“中间一团焦饭，四周还是生米”的现象。经过实践后，就把太阳灶的反射面做得比理想抛物面稍为平坦些，这样不仅加工方便，在实际使用时，焦点也就从原来的一点变成一个光团，锅底受热就比较平均。

反过来，如果我们把光源放在凹面镜的焦点上，那么根据在反射现象中光线的可逆性可知，这时光源发出的光线经凹面镜反射后就会沿着与主轴平行的方向直射出去(图16.19)。因此利用凹面镜可以使点光源变成平行光源。汽车、拖拉机、火车前的车灯、手电筒以及探照灯的光源后面都装有反射面是抛物面的凹面镜，叫做反光镜，它的作用就是把光源变成平行光源，这样不仅使光线比较集中，而且还可以照得较远。

如果不是把凹面镜正对着太阳，而是正对着远处光亮的景物，那么若把纸片放在焦点处，在纸上就会显出远处景物的

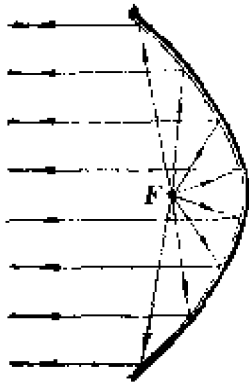


图 16.19 把点光源变成
平行光源的反光镜

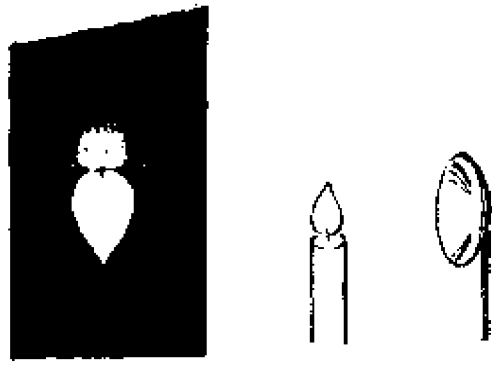


图 16.20

倒立实象。这是因为从远处景物上射来的光线都近似于平行光线，经凹面镜会聚后就能得到实物的象。如果把一光亮物体（如点亮的烛焰）放在凹面镜前，由于物体上发出的光线不是平行光线，因此经凹面镜反射后形成的象的位置就不在焦点上了。但是，如图 16.20 所示，若调节竖立的纸屏到一定的位置，在屏上就会显出物体的象。

这究竟如何来寻找物体象的位置？根据光的反射规律用几何作图法就可以具体地作出来。假定把光亮物体 AB 放在凹面镜的 F 、 C 点之间（图 16.21a）。由于光亮物体可以看作是由许多发光点组成的，从每一个发光点发出的发散光线经过凹面镜的反射都会聚于一点。这些点拼起来就组成光亮物体的实象。例如由 A 点发出的发散光线中，其中有三条的反射线方向是完全确定的（图 16.21b）：

1. 与主轴平行的 AP 反射后必定通过凹面镜的焦点 F ；
2. 通过曲率中心 C 的 AP' ，由于与法线重合，反射后必定由原线返回；
3. 通过焦点 F 的 AP'' ，根据光线的可逆性，反射后必定与主轴平行。

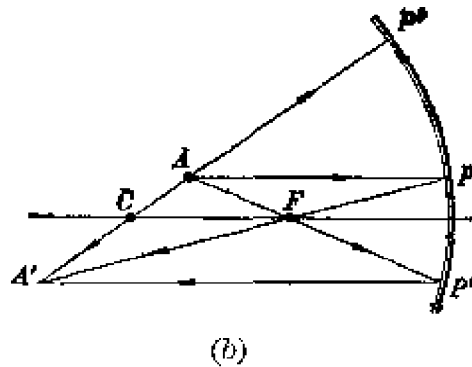
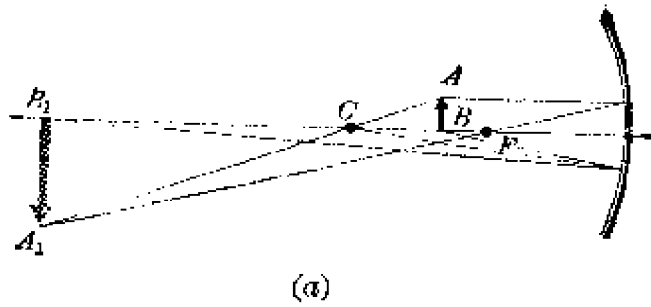


图 16.21

而这些反射线的交点 A' 就是 A 点的实象点, 因此在实际作图时, 只需从上述三条光线中任取两条求出它们反射后的交点, 此交点就是要找的实象点。

[例题 16.3] 已知一凹面镜的曲率半径为 40 厘米, 物体 AB 距凹面镜顶点 28 厘米, 试作出物体的象。

解: 根据公式 (16.6) 可知, 凹面镜的焦点 F 是 CO 的中点 (图 16.22)。按几何作图法依次作出物体上二个特殊点 A 、 B 的实象点 A' 、 B' 。联接 $A'B'$ 就得到物体 AB 的实象。从作图结果表明这时物体具有一个放大的倒立的实象。

通常把物体与镜面顶点的距离叫做物距, 用字母 u 表示; 而把物体的象与镜面顶点的距离叫做象距, 用字母 v 表示。物体的象是放大还是缩小, 是倒立还正立, 是实象还是虚象, 都决定于物体在镜前的位置, 即决定于物距与球面镜焦距的关系。

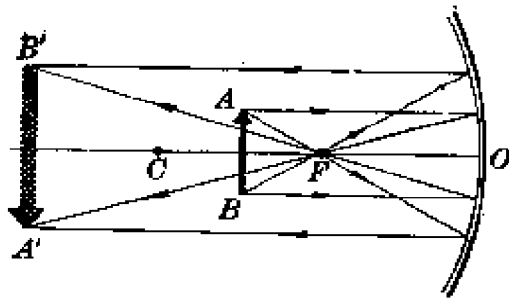


图 16.22

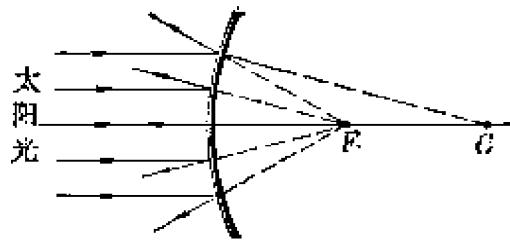


图 16.23 凸面镜的虚焦点

上面讨论了凹面镜的情况，下面来讨论凸面镜。把凸面镜正对着太阳，平行于主轴的近轴光线经过凸面镜的反射就要向外发散(图 16.23)。这时如果向镜面看去，就会感到这些发散光线好象是从镜面背后的一点发出的，这一点就叫做凸面镜的虚焦点。焦距公式(16.6)对于凸面镜也同样适用，只是虚焦点的焦距是负的。利用几何作图法可以知道凸面镜前光亮物体 AB 的象是一个缩小了的正立的虚象 $A'B'$ (图 16.24)。因此与平面镜相比，凸面镜所能看到的范围要大些、远些。所以在汽车、拖拉机驾驶室旁用来了望车后情况的镜子是凸面镜而不是平面镜。

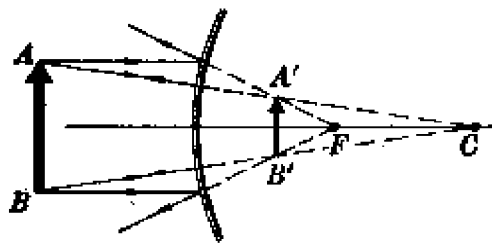


图 16.24

亮物体 AB 的象是一个缩小了的正立的虚象 $A'B'$ (图 16.24)。因此与平面镜相比，凸面镜所能看到的范围要大些、远些。所以在汽车、拖

拉机驾驶室旁用来了望车后情况的镜子是凸面镜而不是平面镜。

我国对球面镜成像原理的研究与应用有着十分悠久的历史。北宋时期的著名科学家沈括在他所著的《梦溪笔谈》中就有这样的记载：“古人铸鉴，鉴大则平，鉴小则凸。凡鉴洼则照人面大，凸则照人面小。小鉴不能全观人面，故令微凸，收人面令小，则鉴虽小而能全纳人面。”意思是：古代劳动人民铸造镜子时，大镜子铸成平的，小镜子铸成凸的。镜面凹的照出人脸的象大，镜面凸的照出人脸的象小。用小镜不能看到

整个人脸，所以把它做得稍微凸一些，以便使人脸的象小些。这样虽用小镜子也能照全人脸。这是对平面镜、球面镜成像原理的最好的总结。

习题 16.8 当一束光线与镜面成 θ 角入射时，如果反射线正好与入射线垂直，问 θ 角多大？如果反射线与入射线成 60° 交角，问 θ 角又是多大？

习题 16.9 我国人民响应伟大领袖毛主席关于“深挖洞，广积粮，不称霸”的号召，修筑地下长城。现有一 V 字形地道（图 16.25），要使在 a 处能看到 b 处，需用几块平面镜，它们应放在什么位置？

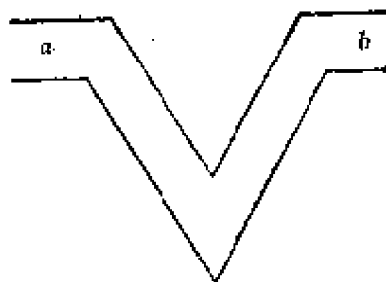


图 16.25

习题 16.10 已知凹面镜的曲率半径为 40 厘米，把物体放在镜面前 80 厘米，试作出物体的象，并确定其性质。

习题 16.11 如果把图 16.22 中的物体 AB 放在距凹面镜顶点 10 厘米处，试作出物体的象。

第四节 光的折射

枪法很好的同志在射击水中的目标时就不一定射得很准，这是什么原因呢？原来我们看到的水中的目标并不是它的实际位置，而有一定的偏差。把一根筷子斜插在水中，看起来就好象折断了似的。这些都是光的折射现象。

一、光的折射规律

在上一节中已经指出，当光线从一种介质斜射到另一种介质的界面上时，除了一部分光线要发生反射现象外，另一部分光线就进入另一种介质，但其传播方向有所改变。象这种

光线在穿过两种介质的分界面时方向发生改变的现象叫做光的折射。通常把进入另一种介质的光线叫做折射线，折射线与法线间的夹角 γ^* 叫做折射角。图 16.26 表示光线在从空气中进入水或玻璃时所发生的折射现象。

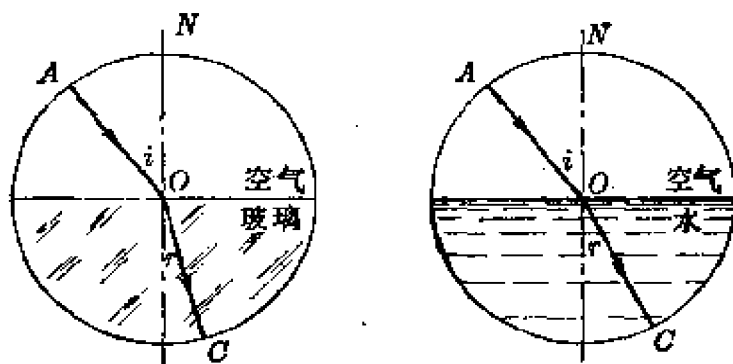


图 16.26 光的折射现象

长期以来,人们发现在光的折射现象中,折射角的大小不仅与入射角的大小有关,而且还与介质本身的性质有关。例如在入射角相同的情况下,光线在从空气进入玻璃时的折射角就比从空气进入水时的折射角小(图 16.26)。这就表明玻璃对光的折射能力比水大。经过不断的实践,总结出光的折射定律如下:

1. 折射线、入射线和法线在同一平面内,折射线和入射线分别在法线的两侧;
2. 入射角的正弦和折射角的正弦的比值,对于确定的两种介质来说是个常数。即

$$\frac{\sin i}{\sin \gamma} = n_{21} \quad (16.7)$$

上式中 n_{21} 叫做第二种介质对于第一种介质的相对折射率,它的大小决定于两种介质的光学性质。通常把一种介质对于真

* γ 希腊字母,读作“ga-ma”。

空的折射率叫做这种介质的绝对折射率,简称折射率,用字母 n 表示。表 16.2 列出了几种透明介质的绝对折射率。从表中可以看出空气的折射率非常接近于 1, 这表明光线从真空进入空气时,几乎不发生折射现象。

表 16.2 几种透明介质的绝对折射率

透明介质	空气	水	普通玻璃	有机玻璃	光学玻璃 (F1)	石英(水晶)	金刚石
折射率	1.0003	1.33	约 1.5	约 1.49	1.6031	1.54	2.40

为什么光线在穿过两种介质的分界面时产生折射现象?这是由于光线在不同介质中的传播速度不同造成的。光线在真空和空气中的传播速度差不多,因而空气的折射率就接近于 1。实验表明:介质的折射率等于光线在真空中和在这种介质中的传播速度的比,即

$$n = \frac{c}{v}, \quad (16.8)$$

式中 c 是光在真空中的传播速度,而 v 是光在介质中的传播速度。假设 v_1 、 v_2 依次是光在两种介质中的传播速度,那么第二种介质对于第一种介质的相对折射率

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}。 \quad (16.9)$$

由此可知,两种介质的相对折射率和它们的绝对折射率的关系是:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} = \frac{n_2}{n_1}。 \quad (16.10)$$

因此光的折射定律公式(16.7)可以写作

$$\frac{\sin i}{\sin \gamma} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (16.11)$$

即

$$n_1 \sin i = n_2 \sin \gamma. \quad (16.12)$$

从公式(16.11)中很容易看出,折射角是随入射角的增大而增大的。同时若 $n_2 > n_1$, 即光线从折射率较小的光疏介质* 进入折射率较大的光密介质, 则折射角 γ 小于入射角 i , 折射后的光线向法线靠拢(图 16.27a)。反过来, 光线若从光密介质进入光疏介质, 即 $n_2 < n_1$ 时, 则折射角 γ 大于入射角 i , 折射后的光线是偏离法线的(图 16.27b)。

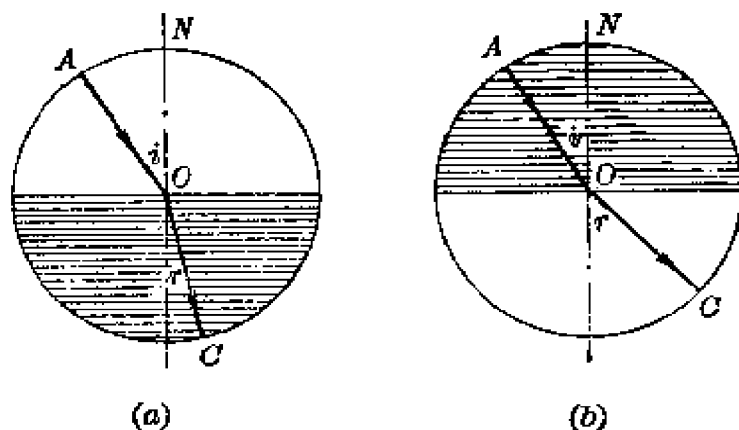


图 16.27

根据光的折射定律, 光线在跨越折射率相等的两种介质的界面时, 将不发生偏折, 犹如在同一种介质中沿着直线方向传播一样, 观察者就不会发现存在两种物质。这种状态在光学上称为光学均匀。

[例题 16.4] 光线以 45° 的入射角从空气中射到水面上, 试用几何作图法作出它的折射线。

* 在光学上, 对于界面两方的介质来说, 其折射率小的一方称为光疏介质, 折射率大的一方称为光密介质, 光疏与光密只是相对而言。

解：由于水相对于空气的折射率 $n_{21} = 1.333$ ，根据光的折射定律可以列出

$$\frac{\sin i}{\sin r} = 1.333 = \frac{4}{3}。$$

于是如图 16.28 所示，先以入射点 O 为圆心，任意长度为半径作一圆，交入射线于 D 点。再由 D 点向法线引垂线 DN_1 ，把 DN_1 等分为 4 个单位。然后按同一比例在法线的另一侧作距法线 3 个单位的平行线，在下方交圆于 E 点。连接 OE ，就是要作的折射线。

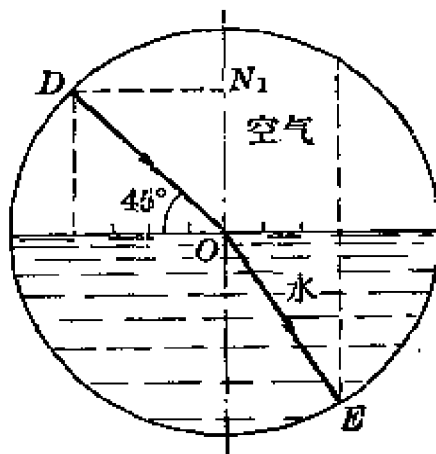


图 16.28

反过来，如果入射线是沿 EO 由水下射到水面上，那么由于空气相对于水的折射率 $n_{12} = \frac{1}{1.333} = \frac{3}{4}$ ，用类似的几何作图法可以作出，光线将沿 OD 折射入空气。可见在折射现象中，光线也具有可逆性。

必须指出，各种色光由于波长不同，虽然在真空中的传播速度是相同的，但是在介质中就不同。因此同一介质对于不同色光的折射率也有所不同。表 16.3 列出了水和玻璃对于几

表 16.3 水、玻璃对于几种色光的折射率

介质	色 光			
	红	黄	蓝	紫
水	1.329	1.338	1.337	1.344
玻璃	1.510	1.515	1.521~	1.531

种不同色光的折射率。严格说来，介质的折射率不仅与介质本身的光学性质有关，而且还与入射光的颜色（即波长）也有关系。

二、全 反 射

在农村清晨起来，时常会看到茁壮成长的农作物叶面上的露珠，在阳光的照射下显得格外明亮耀眼。这是光的全反射所形成的。在一般情况下，光的反射和折射现象总是同时发生的，但是各种物质运动形式中的矛盾，都带特殊性。在特殊的条件下，入射光在两种介质的分界面上会全部反射而不发生折射。这种现象叫做全反射。

下面来讨论发生全反射现象的特殊条件。我们知道，当光从光密介质射向光疏介质时，其折射角大于入射角，并且折射角是随着入射角的增大而增大的。这样就有可能在入射角还没有增大到 90° 以前，而折射角已经增大到 90° （图 16.29），此时折射线就和界面平行，并沿着界面传播。如果继续再增大入射角，入射光就全部反射回光密介质而并不进入光疏介质，这种现象叫全反射。通常把折射角等于 90° 时的入射角叫做临界角。但当光从光疏介质射向光密介质时，其折射角永

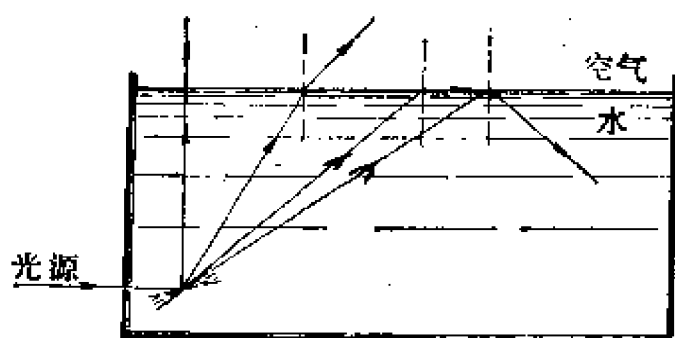


图 16.29 全反射

远小于入射角,因此在入射角增大到 90° 时,折射角不可能等于 90° ,所以不会发生全反射现象。

对于确定的两种介质,其临界角是确定的。由于对应于临界角的折射角等于 90° ,而根据光的折射定律公式 (16.11),可以列出

$$\frac{\sin A}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (16.13)$$

式中 n_1 、 n_2 依次为光密、光疏介质的折射率。当光从折射率为 n 的介质射向空气时,取空气的折射率为 1,那么临界角即可按下列公式计算出来。即

$$\sin A = \frac{1}{n} \quad (16.14)$$

表 16.4 列出了几种透明介质相对于空气的临界角。

表 16.4 几种透明介质相对于真空或空气的临界角

介 质	水	酒精	水晶	金刚石	各种玻璃
临界角	48.5°	47°	40.5°	24.4°	$37 \sim 42^\circ$

阳光照射下的露珠,由于光在进入水珠后在水和空气的界面上发生了全反射,因此看起来就格外明亮。

全反射现象在生产技术上的应用是很广泛的。图 16.30 是一个截面是直角三角形的玻璃柱体,叫做直角棱镜。光线直射到它的斜面上,当入射角大于玻璃的临界角时,就会发生全反射现象,因此又叫做全反射棱镜。用它来代替潜望镜中的平面镜,效果更好。因为平面镜上的反光物质往往容易氧化,时间一长就会发黑,影响反射效果。

最近几年发展起来的光学纤维是利用全反射原理制成的

新型光学元件。它是一种很细的玻璃丝或透明的塑料丝，是

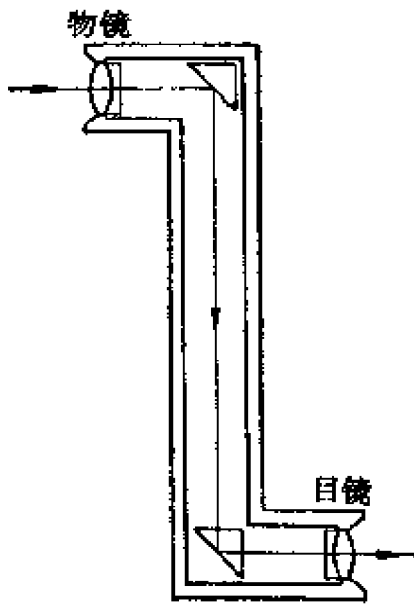


图 16.30 全反射棱镜

由光学玻璃（或塑料）拉丝制成的。一根光学纤维的直径只有 10 微米左右，分内外两层。内芯材料的折射率达 1.8，在它外面裹着一层玻璃薄膜，折射率约为 1.4。当光从纤维一端射入，就会在纤维的内壁上通过多次的全反射而传播到另一端（图 16.31a），这样就可以使光线沿着一条弯曲的路径传播而不会向四周散失。显然内外两层材料的折射率相差越大，临界角就越小，也就越容易产生全反射。

一根光学纤维只能传递一个光点，要传递整个图象就必须将光学纤维一根根整齐地排列起来，使每一根纤维在两端的位置都一一对应。在两端涂上环氧树脂，让它固定之后再磨平抛光，就成为能传递图象的光导线（图 16.31b）。在医学

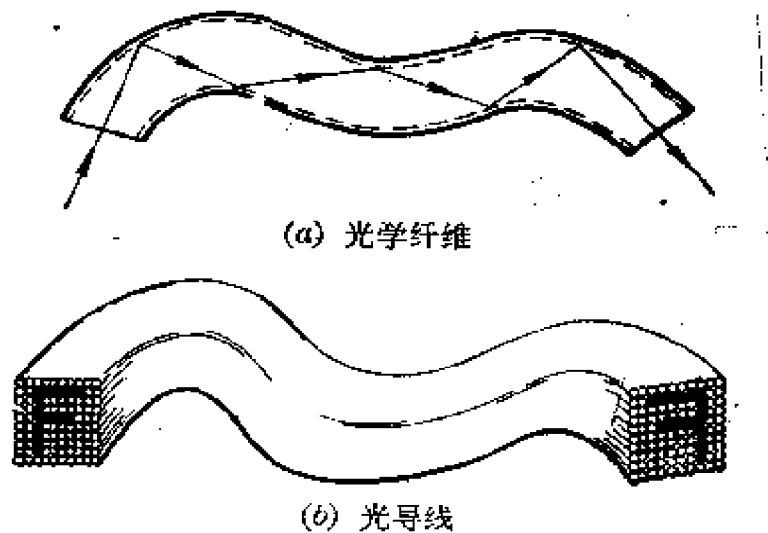


图 16.31

上,光导线可以帮助医务人员诊察人体内部深处的病变,如制成胃镜来检查胃壁等。此外,由于光学纤维柔软,不怕震,无论怎样弯曲都能传光传象,能起一般光学元件所不能起的特殊作用。所以光学纤维的出现,为光学仪器、电子工业和自动控制等各个领域的发展开创了一条崭新的道路。

三、光的色散

赤橙黄绿青蓝紫,谁持彩练当空舞?

在夏日雨后的傍晚,天空中有时会横贯一条光彩夺目的彩虹。这是由于下雨以后,天空中仍悬浮着无数极小的水滴,太阳光沿着一定的角度射入这些水滴时就会引起两次折射和一次全反射(图 16.32a、b),从水滴射出来的光就发散成红、

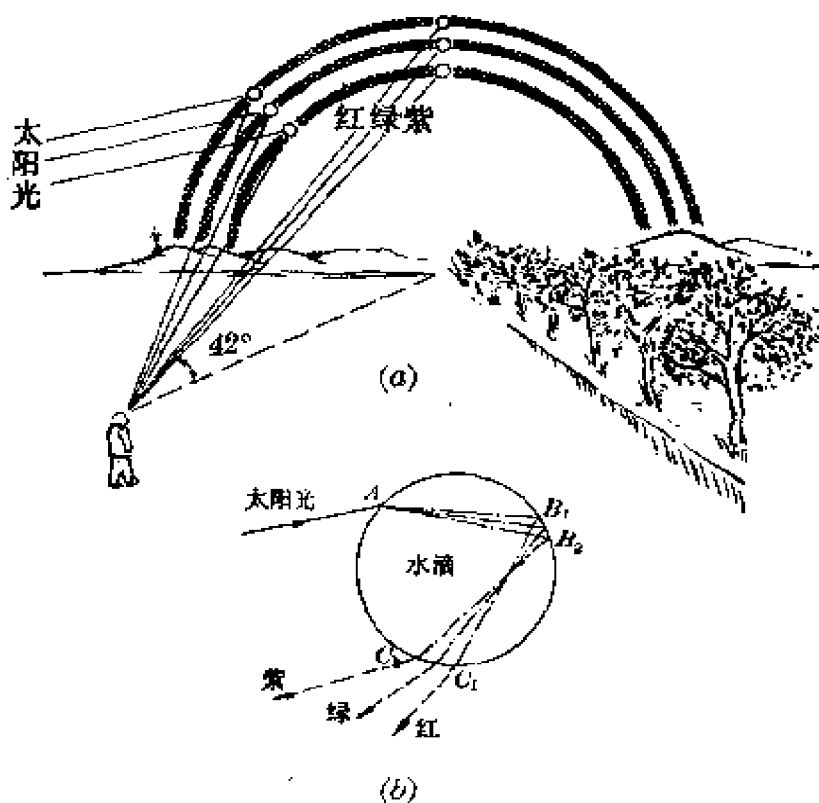


图 16.32 虹的形成

橙、黄、绿、青、蓝、紫等色光。因此当我们背着太阳朝这些水滴看去，就可以看到一条圆弧形的彩色光带。太阳光经过两次折射而发散成各种色光的现象叫做光的色散。

不仅天空中的水滴可以使太阳光发生色散现象，让一束白光射在棱镜面上，经过棱镜的两次折射也会发散成各种色光，在纸屏上形成一条红、橙、黄、绿、青、蓝、紫排列的彩色光带，叫做光谱(图 16.33)。

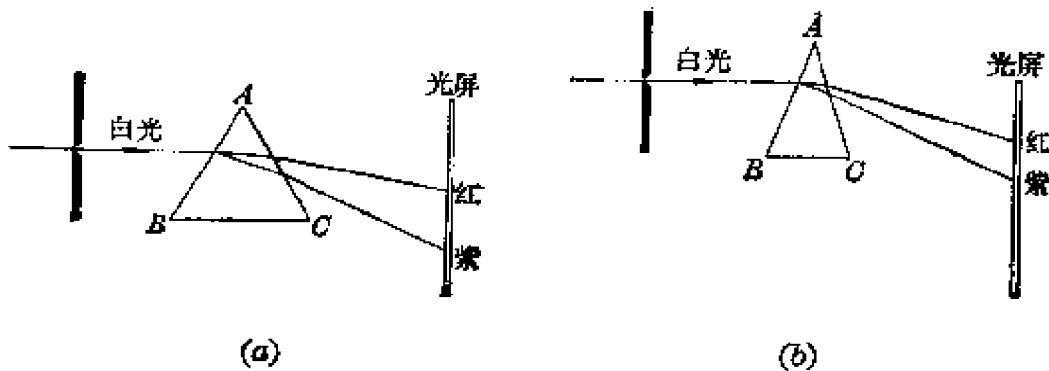


图 16.33 白光的色散

怎样来解释光的色散现象呢？我们已经知道，光的颜色决定于它的波长，波长不同的光射到我们眼睛里就会引起不同颜色的感觉。太阳光(白光)是由各种波长不同的光按一定的比例混合在一起的，其中红光的波长最长，其次是橙、黄、绿、青、蓝，紫光最短。

前已指出，介质的折射率对于波长不同的光说来，是略有不同的(详见表 16.3)。当白光射在棱镜面上时，入射角虽相同，但各种色光的折射角就略有不同。如果只经过一次折射，这种偏差还不很显著，但经过棱镜的两次折射后，色散现象就很明显了。由于玻璃对于红光的折射率最小，因此经过两次折射后，红光偏折也最少，在光谱中排列在最上端；其次是橙、黄、绿、青、蓝；紫光偏折最厉害，排列在光谱的最下端。

比较图 16.33a、b 可以看出, 棱镜的顶角 A 越大, 在纸屏上出现的彩色光带也越宽。这表明棱镜的顶角越大, 通过的光线就偏折得越厉害。这种棱镜不仅可以改变光路, 还可以把不同波长的色光分离开, 因此又叫做分光镜。利用这种分光作用可以制成用来观察和研究光谱结构的分光镜和摄谱仪等。

中国是世界文明发达最早的国家之一, 我国劳动人民对色散现象早有较完整的认识。法家、科学家沈括在他所著的《梦溪笔谈》中对虹的位置就有详细的记述, 指出: “自西望东则见, 盖反夕虹也; 立涧之东望西, 则为日所铄, 都无所睹。”意思是说傍晚的虹要从西向东看才能看得见; 从东向西望, 则由于太阳晃眼, 什么也看不见。他还记载了当时的科学家孙彦先对虹成因的接近正确的解释, 认为“虹乃雨中日影也, 日照雨则有之。”这要比英国人培根对虹的类似的说法早了近 200 年。在宋代的医学家寇宗奭(1119 年)所著的《本草衍义》中, 也有关于菩萨石(一种六棱晶体, 大如麦粟)能把阳光散成五色圆光的记载。这要比牛顿观察光的色散(1666 年)整整早了五百多年。

习题 16.12 当光正直射在两种介质的分界面上时, 即入射角等于零时, 问反射角几度? 折射角又是几度?

习题 16.13 光线从空气射入某种玻璃, 已知入射角为 30° 时折射角为 20° , 问这种玻璃的折射率是多少?

习题 16.14 光线从第一种介质射入第二种介质时, 在界面上同时发生反射和折射。如果反射角为 40° , 折射角为 46° , 问这两种介质哪一种是光密介质?

习题 16.15 已知某种玻璃相对于空气的折射率为 $3/2$, 试用作图法作出光线在空气中以 30° 的入射角射在玻璃面上的反射线和折射线, 并量出折射角的度数。

习题 16.16 求玻璃与水接触时的临界角有多大。

第五节 透镜成像

当你的视力减退需要矫正时，就要去配一副眼镜。眼镜的镜片就是最常见的透镜。此外象放大镜、照相机上的镜头以及显微镜、幻灯机等光学仪器的主要部分也都是由透镜组成的。因此要了解这些光学仪器的原理，首先必须研究透镜的光学性质。

一、透 镜

透镜是基本的光学元件之一。它是由光学玻璃磨成的两面各是球面，或者一面是球面另一面是平面的透明体（图 16.34）。通常把中央比边缘厚的叫做凸透镜；而把中央比边缘薄的叫做凹透镜。这里讨论的只限于薄透镜，即不考虑透镜的厚度，把透镜两球面的顶点 O_1 、 O_2 看作是重合于 O 点（图 16.35），这一点就叫做透镜的光心。所有通过光心的直线都

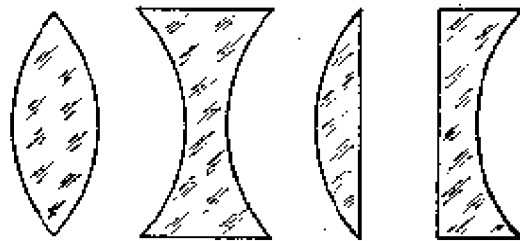


图 16.34 透镜截面图

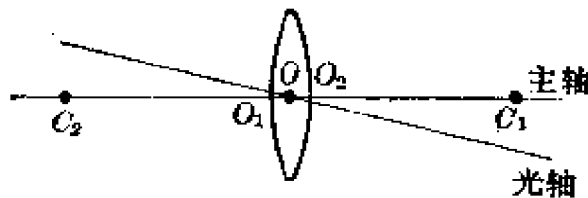


图 16.35 透镜的光心和主轴

叫做透镜的光轴，而同时通过两球心 C_1 、 C_2 的光轴叫做主光轴，简称主轴。

无论用凸透镜的哪一面正对着太阳，平行于主轴的太阳光线通过透镜后就会聚在主轴的一点上（图 16.36），这一点用字母 F 表示，叫做凸透镜的实焦点。实验表明，凸透镜两边的实焦点到光心的距离总是相等的，叫做焦距，用字母 f 表示。凸透镜的焦距不仅与它两面的球面的曲率半径 R_1 、 R_2 有关，而且与玻璃的折射率 n 也有关系。通常可按上述实验方法来测定，或用如下的公式

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^* \quad (16.15)$$

来计算。凸透镜由于能使光线会聚，因而又叫做会聚透镜。

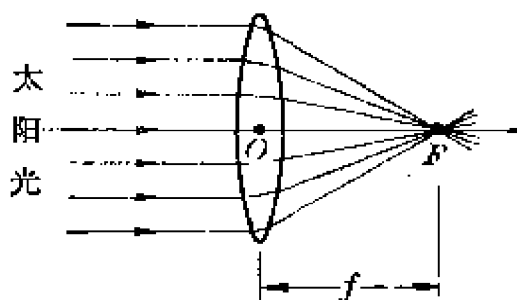


图 16.36 凸透镜的实焦点和焦距

根据在折射现象中光线的可逆性可以知道，把光源放在凸透镜的实焦点上，它发出的光经过凸透镜后就都成为平行于主轴的平行光线。在实用上常利用凸透镜的这一性质把点光源变成平行光源。

* 公式中 R 的选取是这样：对于由透镜向外凸出的球面， R 为正值；对于由透镜向内凹进的球面， R 为负值。如果透镜的一面是平面，就以 $1/R=0$ 代入，因为平面可以看作是半径为无限大的球面。同时计算结果，若焦距为正，则是凸透镜；焦距为负，是凹透镜。

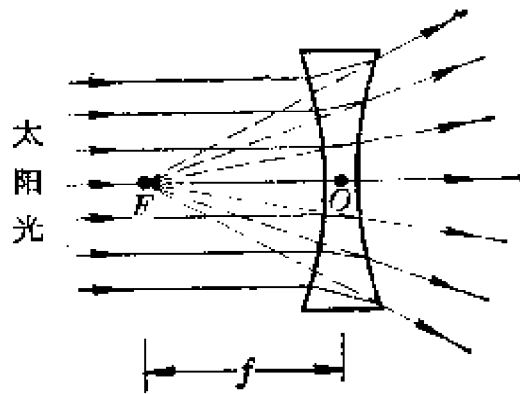


图 16.37 凹透镜的虚焦点和焦距

无论用凹透镜的哪一面正对太阳，平行于主轴的太阳光线通过透镜后就向外发散成为发散光线(图16.37)，而这些发散光线的延长线的交点是在透镜另一侧的主轴上。隔着透镜看这些发散光线就好象是从这一点发出的，其实这一点并不真实存在，因此通常把这一点叫做凹透镜的虚焦点，也用字母 F 表示。凹透镜两边的虚焦点到光心的距离也相等，叫做焦距，用字母 f 表示。公式(16.15)对于凹透镜也同样适用，只是凹透镜的焦距是负的。凹透镜由于能使光线发散，因而又叫做发散透镜。

下面来讨论透镜对光线具有会聚或发散作用的原因。就拿凹透镜说来，可以把它看作是由许多被截去了顶部的棱镜所组成(图16.38a)。其中处于边缘的两个棱镜由于顶角较大，对光线的折射作用也较大，因此平行光线经过后将偏折得最厉害。越是靠近中央的棱镜，其顶角越小，对光线的折射作用也越小。正中央的一个由于两面平行，顶角等于零，因此沿光轴通过的光线并不发生偏折。所以凹透镜具有发散作用。对于凸透镜说来，情况稍有不同，读者可按图16.38b自行分析解决。

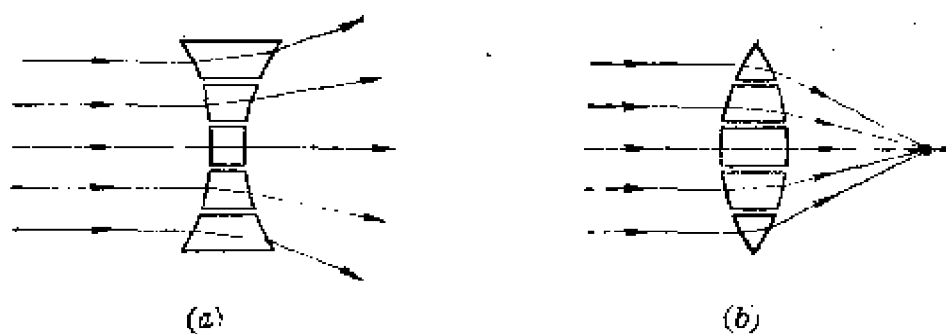


图 16.38

二、透镜的成像规律

透镜的主要作用是成像。幻灯机就是利用凸透镜的成像原理制成的。图 16.39 是幻灯机的示意图。它主要是由强光源 S (功率较大的白炽灯或弧光灯)、聚光镜 L_1 (焦距较小、直径较大的凸透镜)、镜头 L_2 (焦距为 15~20 厘米的凸透镜)、反光镜 R (凹面镜) 以及幻灯片 P (上面画有图案的玻璃片) 等组成的。当强光源 S 发出的光通过聚光镜 L_1 会聚后, 穿过透明的幻灯片 P , 再经过镜头 L_2 射向白幕。如果幻灯片事先是倒插着的, 那么只要适当调节镜头与白幕间的距离, 就能在白幕上映出一个正立的放大的幻灯片上的图象。光源后面的反光镜 R 的作用在于使光尽量集中在幻灯片上, 以增强幻

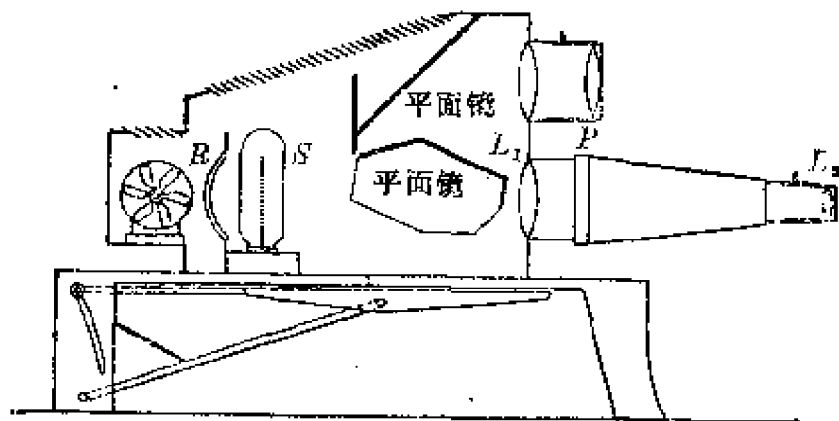


图 16.39 幻灯机示意图

灯片的亮度。风扇是散热用的。

为什么从幻灯片上发出的光线经过凸透镜(镜头)就能在白幕上形成一个放大而清晰的实象呢?为什么幻灯片必须倒插才能白幕上获得正立的象呢?要了解这些问题就必须研究透镜的成象规律。

实验表明,对于从透镜前靠近主轴的任何发光点发出的光线说来,只有三种可能:1.成为收敛光线,会聚于一点,这一点叫做发光点的实象点;2.成为发散光线,而它们的延长线会聚于一点,这一点叫做发光点的虚象点;3.成为平行光线而成不了象。

透镜前的光亮物体都可以看作是由许多发光点组成的,因此只要找出这些发光点的实象点或虚象点,光亮物体的象也就确定了。与球面镜成象的情况相类似,我们用几何作图法来确定透镜前光亮物体的象的位置、大小和性质。

从同一发光点发出的光线虽有无数条,但是根据光的折

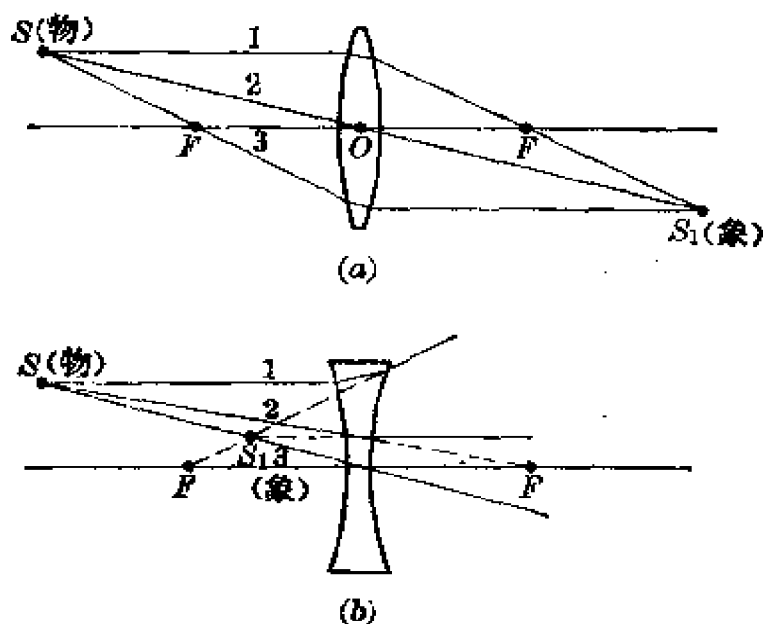


图 16.40

射定律和透镜的光学性质可知，其中有如下的三条特殊光线通过透镜后的方向是完全确定的(图 16.40a、b)：

1. 平行于主轴的近轴光线经过透镜后必定通过实焦点，或者它的延长线必定通过虚焦点；

2. 通过实焦点的光线，或者射向虚焦点的光线，由于光线在折射现象中具有可逆性，经过透镜后必定与主轴平行；

3. 通过光心的光线经过透镜后，传播方向可以看作是不变的。

在实际作图时，只要任意选作其中的两条，找出它们的交点。如图 16.41 所示，把幻灯片 ABC 放在略大于镜头 L_2 焦距的地方，用几何作图法依次作出 A 、 C 的实象点 A_1 、 C_1 ，那么 $A_1 B_1 C_1$ 就是幻灯片象的位置。这时幻灯片的象是放大的，并且是倒立的。因此在放映幻灯时，必须把幻灯片倒插，才能在白幕上获得放大正立的象。通常把实物与透镜光心间的距离叫做物距，用字母 u 表示；而把象与透镜光心间的距离叫做象距，用字母 v 表示。实验表明，象距是由物距和透镜的焦距一起决定的。只有当镜头与白幕间的距离等于象距时，白幕上才会映出清晰的象，否则就会模糊不清，甚至显不出象来。这就是在放映幻灯前必须调整镜头与白幕间距离的原因。

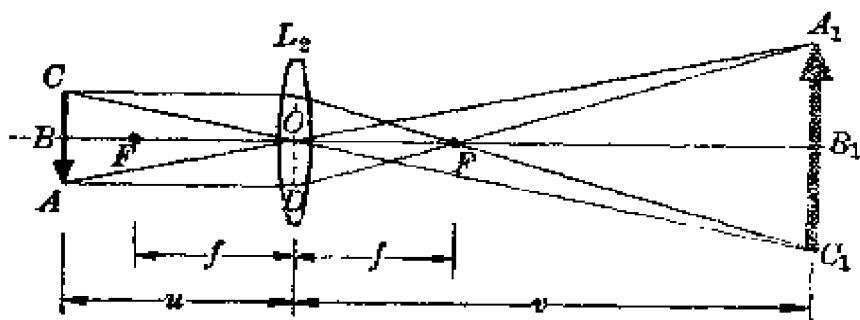


图 16.41 幻灯机光路图

三、透镜成象公式

人的感光器官——眼睛，也是利用凸透镜成象原理来反映客观事物的。图 16.42 是人眼的构造简图。其中睛珠，又叫做晶状体，就相当于一个凸透镜，而视网膜是由许多感光细胞组成的，上面布满着视神经的末梢，它就相当于一个成象的屏。

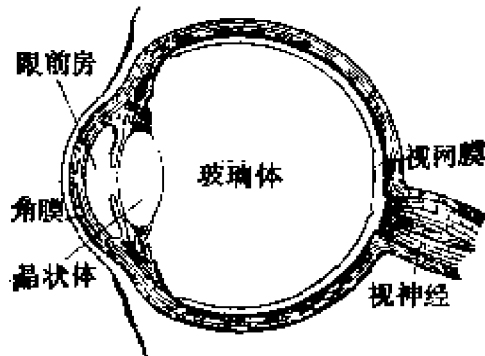


图 16.42 人眼的构造简图

如图 16.43 所示，假设当时睛珠的焦距为 f ，而光亮物体 AB 的物距 $u > 2f$ ，根据几何作图法可以作出物体的象 A_1B_1 是缩小的倒立的实象，而象距 v 是在睛珠的一倍焦距与二倍焦

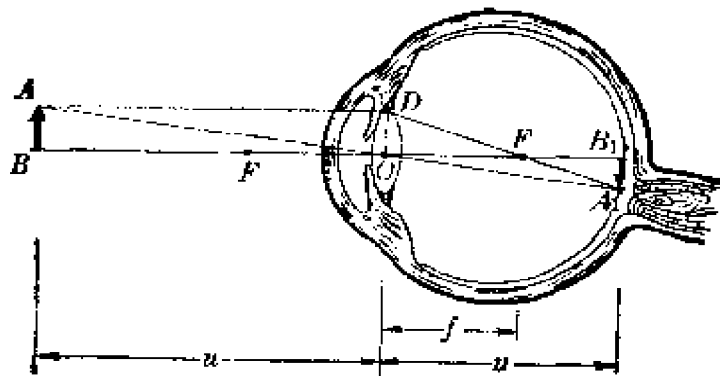


图 16.43

距之间, 即 $f < v < 2f$, 正落在网膜上*, 网膜上的神经末梢就受到光的刺激, 传到大脑, 人们就有了看到的感受。

要弄清眼睛能清晰地看到物距不同的物体, 而不需要象放映幻灯前那样调节距离的问题, 先来研究透镜的焦距 f 与物距 u 、象距 v 之间的定量关系。这可以从图 16.43 或者图 16.41 推导出来。

因为 $\triangle ABO$ 和 $\triangle A_1B_1O$ 是相似三角形, 所以

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{BO}{B_1O},$$

而 $\triangle DOF$ 和 $\triangle A_1B_1F$ 也是相似三角形, 故

$$\frac{DO}{A_1B_1} = \frac{OF}{B_1F}。$$

但 $DO = AB$, 因此

$$\frac{BO}{B_1O} = \frac{OF}{B_1F}。$$

将 $BO = u$, $B_1O = v$, $OF = f$, $B_1F = v - f$ 代入, 得

$$\frac{v}{u} = \frac{v - f}{f},$$

即 $u(v - f) = vf。$

两边同除以 uvf , 就有

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}, \quad (16.16)$$

上式叫做透镜成像公式。它反映了物距、象距与透镜焦距之间的定量关系。在这三个量中, 只要有两个量确定, 那么第三个量也就确定了。这个公式对于凸、凹透镜都适用, 但在使用

* 网膜上成的物体象是经过神经的作用才使人们产生视觉的, 而视觉又是从一开始就同触觉经常联系的, 所以映在网膜上的虽是倒立的象, 但人们仍能得到物体正立的感受。

公式(16.16)时必须注意:物距 u 总是正值;当象与物在透镜的两侧时象距是正值,在同侧时象距是负值;凸透镜的焦距是正值,凹透镜的焦距是负值。

对于幻灯机说来,镜头焦距是固定不变的,因而通常是用调节象距,或者同时调节象距和物距的方法使它们满足公式(16.16),才能在白幕上得到清晰的象。对于眼睛说来,由于象总是落在网膜上,即象距是固定不变的,因此在观看物距不同的物体时,主要靠睛珠周围的有毛肌肉的收缩或放松来改变睛珠的曲率,从而改变睛珠的焦距以满足公式(16.11)的关系,使网膜上得到清晰的象。

人的眼睛虽然有一定的调节能力,但是这种调节也是有限度的。眼睛能看清的最远距离和最近距离分别叫做远点和近点。健全的眼睛的远点在无限远处,即能看到象太阳、月亮等很远的物体。这是由于把肌肉完全放松后,睛珠的焦点几乎是在视网膜上,因此从无限远处射来的光线通过睛珠就落

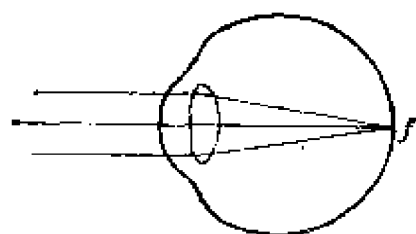


图 16.44 健全眼睛的远点

在视网膜上(图 16.44)。通过不断收缩肌肉来使睛珠逐渐变凸而改小它的焦距,就能使物距变小而看清近处的物体。因此看的物体越近,肌肉就收缩得越厉害。青年人的健全眼睛的近点约为 10 厘米,再近就看不见了。我们看太近的物体时眼睛容易疲劳就是因为收缩肌肉要用力的缘故。一般正常眼睛最适宜于看 25 厘米远的物体而不容易感觉疲劳,这个距离叫做明视距离。所以我们在看书时,不要使眼睛与书本靠得过近,应保持 25 厘米的明视距离。

患近视眼的人的睛珠特别凸,肌肉即使完全放松,睛珠的

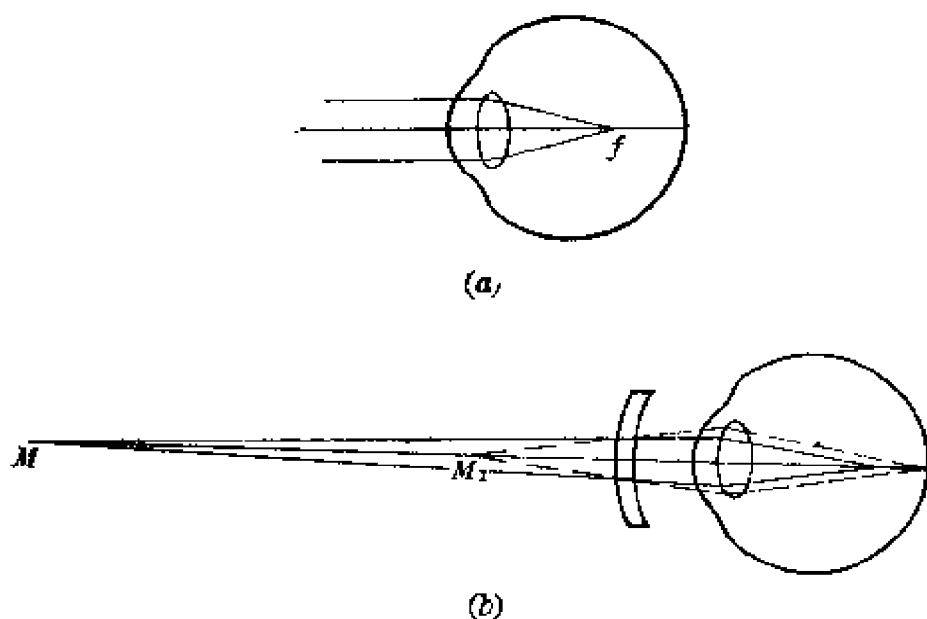


图 16.45 近视眼

焦点还是在网膜的前面 (图 16.45a), 因此他的远点 M_1 较近而不能看清比较远的物体 M 。矫正的方法是配一副曲率适当的凹透镜眼镜。利用凹透镜的发散作用, 使由 M 处射来的光线经过凹透镜和肌肉完全放松的睛珠后恰好落在网膜上 (图 16.45b)。

与此相反, 患远视眼的人的睛珠不够凸, 肌肉完全放松后, 睛珠的焦点在网膜的后面 (图 16.46a), 因此他的近点 N_1 较远而不能看清比较近的物体 N 。矫正的方法是配一副曲率适当的凸透镜眼镜, 利用凸透镜的会聚作用, 使由 N_1 处射来的光线经过凸透镜和肌肉完全收缩的睛珠后恰好落在网膜上 (图 16.46b)。

此外还有一种老视眼, 也看不清近处的物体, 需要配一副老光眼镜。这是由于老年人的有毛肌肉收缩失灵, 不能使睛珠变凸造成的。

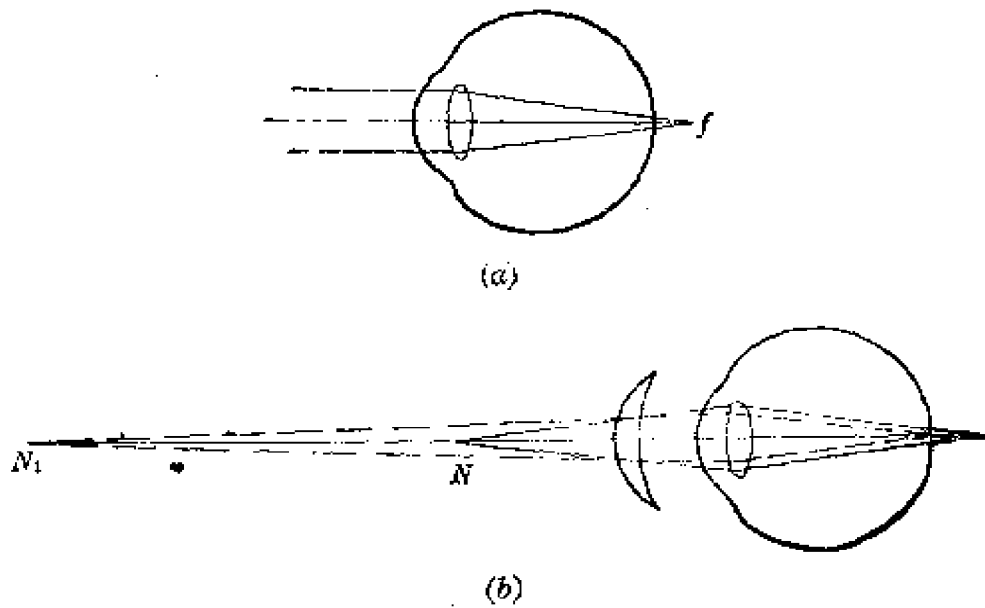


图 16.46 远视眼

我们一般用焦距(以米为单位)的倒数来表示镜片的深浅程度,叫做镜片的屈光度。屈光度越大,凸(凹)透镜的会聚(发散)作用也越强。例如焦距为 50 厘米,即 0.5 米的镜片的屈光度为 2 度,拿它乘以 100,就是我们通常所说的眼镜的度数。因此用上述镜片制成的眼镜就是 200 度。

四、象的放大率

利用透镜所成的象,可以是放大的(图 16.41),也可以是缩小的(图 16.43)。象与实物的长度的比叫做象的放大率,用字母 K 表示。很明显,在这些光路图中, $\triangle ABO$ 和 $\triangle A_1B_1O$ 总是相似的,因此可以得出象的放大率的计算公式:

$$K = \frac{A_1B_1}{AB} = \frac{A_1O}{B_1O} = \left| \frac{v}{u} \right|^* \quad (16.17)$$

[例题 16.5] 已知一幻灯机镜头的焦距为 16 厘米,而

* 绝对值符号表示不考虑象距 v 的正、负号。

白幕距镜头 2.56 米，问幻灯片应调节到距镜头多远时，幕上才能出现清晰的象？这时象的放大率是多少？

解：已知 $f=16$ 厘米， $v=256$ 厘米，根据透镜成象公式，可以列出

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{256} = \frac{1}{16},$$

故 $u = \frac{16 \times 256}{256 - 16} \doteq 17.1$ 厘米。

此时按公式(16.17)，可以算出象的放大率

$$K = \frac{v}{u} = \frac{256}{17.1} \doteq 15 \text{ 倍。}$$

[例题 16.6] 把光亮物体放在透镜前 2 厘米的地方，如果它的象是与物在透镜的同侧，并距透镜 10 厘米的地方，问透镜的焦距有多大？是凸透镜还是凹透镜？放大率多大？

解：按题意 $u=2$ 厘米， $v=-10$ 厘米，根据透镜成象公式可以列出

$$\frac{1}{2} - \frac{1}{10} = \frac{1}{f},$$

故 $f = \frac{10}{5-1} = 2.5$ 厘米。

焦距为正值，表明是凸透镜。再按公式(16.17)，可知放大率

$$K = \left| \frac{v}{u} \right| = \frac{10}{2} = 5。$$

表明象的长度是物的 5 倍，是个放大的象。一般说来，与物在透镜同侧的象总是正立的虚象。这可以用几何作图法来验证(图 16.47)。

根据凸透镜的这种可以成放大的虚象的原理，我们可以用焦距较小的凸透镜来观察微小物体，或者书上的小字。这只要把物体放在透镜焦点以内的地方，隔着透镜就能看到物

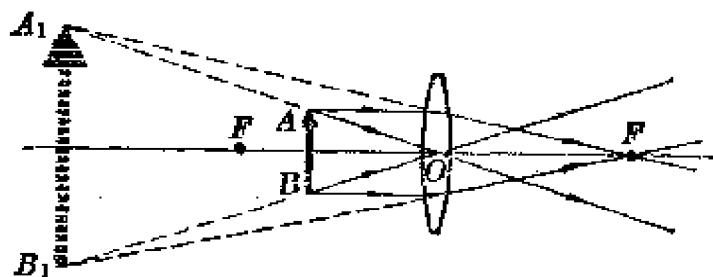


图 16.47 放大镜的光路图

体的放大的正立的虚象。这种凸透镜就叫做**放大镜**。

以上我们讨论了透镜成象的规律。然而单个透镜所成的象还存在不少缺陷。例如，通过透镜边缘的光线要比通过透镜中央的近轴光线偏折得更厉害，这样就使物体上同一点发出的光线并不会聚于一点而使所成的象的边缘模糊不清；又如，象中会出现模糊的彩色，这是因为透镜对各种色光的折射率不同造成的；此外，透镜不同部分的放大率不同将造成象的图形与实物相比往往要走样。通常把这些缺陷叫做**象差**。为了消除象差，比较精密的光学仪器都不是用单个透镜作镜头，而是采用折射率不同的光学玻璃，分别磨成曲率不同的凸透镜和凹透镜，再粘合起来的复合透镜。这样就能使它们的象差相互抵消一部分以提高象的质量。

五、显 微 镜

我们知道，太阳的体积要比月球大得多，但是看起来却差不多大，这是什么原因呢？原来眼睛对物体大小的感觉决定于眼睛对物体所张角的大小(图 16.48)，这个张角叫做**视角**。视角的大小决定于物体的大小和物体距离眼睛的远近。对于距离相同的物体来说，物体越大，视角越大(图 16.48a)；而对于同一物体来说，距离越近，视角越大(图 16.48b)，落在视网

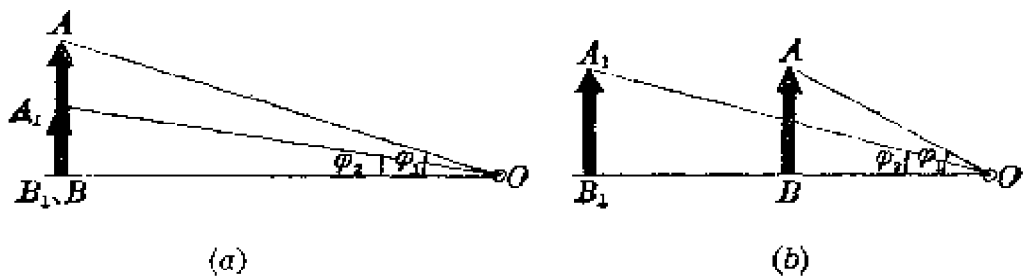


图 16.48

膜上的象也越大,因而眼睛看得越清楚,视神经对物体的感觉也越大;距离越远,视角越小。实践证明,当视角小于约 $1'$ 时,人眼就失去分辨能力,此时即使眼睛是健全的人也不能看清物体。由此我们可以明了,太阳虽然比月球大得多,但它距离地球较远,因而我们对太阳和月球所张的视角差不多大,所以看起来两者就差不多大小了。

根据上面的讨论可以知道,观察物体时,如果增大视角,视网膜上的象也就增大,我们就能辨别物体的细小部分。增大视角的最简单的方法是把物体移近。但是,移近物体是有一定限度的,当物体移到近点以后就不能再用移近物体的方法来增大视角了。同时,如星球等天体,我们又无法缩短它们同我们眼睛的距离来增大视角。

要看清很小或很远的物体,人们就必须借助于光学仪器来增大视角。利用光学仪器所增大视角的倍数叫做光学仪器的放大率,又称视角放大率,用字母 M 表示。

例如,用放大镜来观察近物是增大视角的最简单的方法。假设把长度为 h 厘米的微小物体 AB 放在明视距离上直接观察时的视角为 φ_0 (图 16.49)。于是可以列出

$$\varphi_0 \doteq \text{tg } \varphi_0 = \frac{h}{25}$$

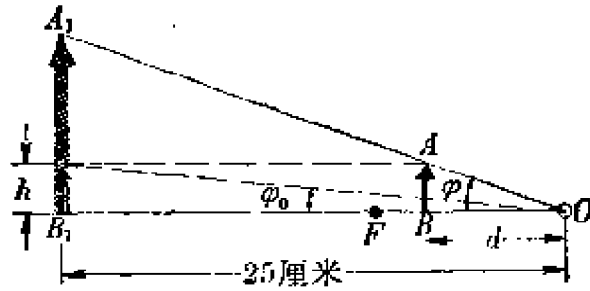


图 16.49

而用了放大镜,把物体 AB 放在焦距以内距离为 d 厘米处,在明视距离上可以看到放大的正立虚象 A_1B_1 ,这时的视角就增大为 φ ,即

$$\varphi \doteq \operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1B_1}{25} = \frac{h}{d}。$$

由于距离 d 非常接近于放大镜的焦距 f ,因此放大镜的放大率

$$M = \frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{h/d}{h/25} = \frac{25}{d} \doteq \frac{25}{f}。 \quad (16.18)$$

上式表明:放大镜的焦距越短,放大率就越大。一般放大镜的焦距是在 $1 \sim 10$ 厘米之间,因而它的放大率一般只有 $2、3$ 倍,至多只有 25 倍左右,远远不能满足生产和科研上的需要。

用显微镜来观察很微小物体时,其放大率就比放大镜大得多。它主要是由两组复合会聚透镜装在一个金属镜筒的两端组成的(图 16.50a)。对着物体的一组焦距较短,叫做物镜;对着眼睛的一组焦距较长,叫做目镜。在物体下方还有一个凹面反光镜,其作用是把光线会聚在物体上。图 16.50b 就是显微镜的光路图。

把光亮的微小物体 AB 放在物镜 O_1 的焦点 F_1 外附近,根据透镜的成象规律可知,在物镜的另一侧二倍焦距外可以得到一个放大的倒立实象 B_1A_1 。按照显微镜的设计,这个实

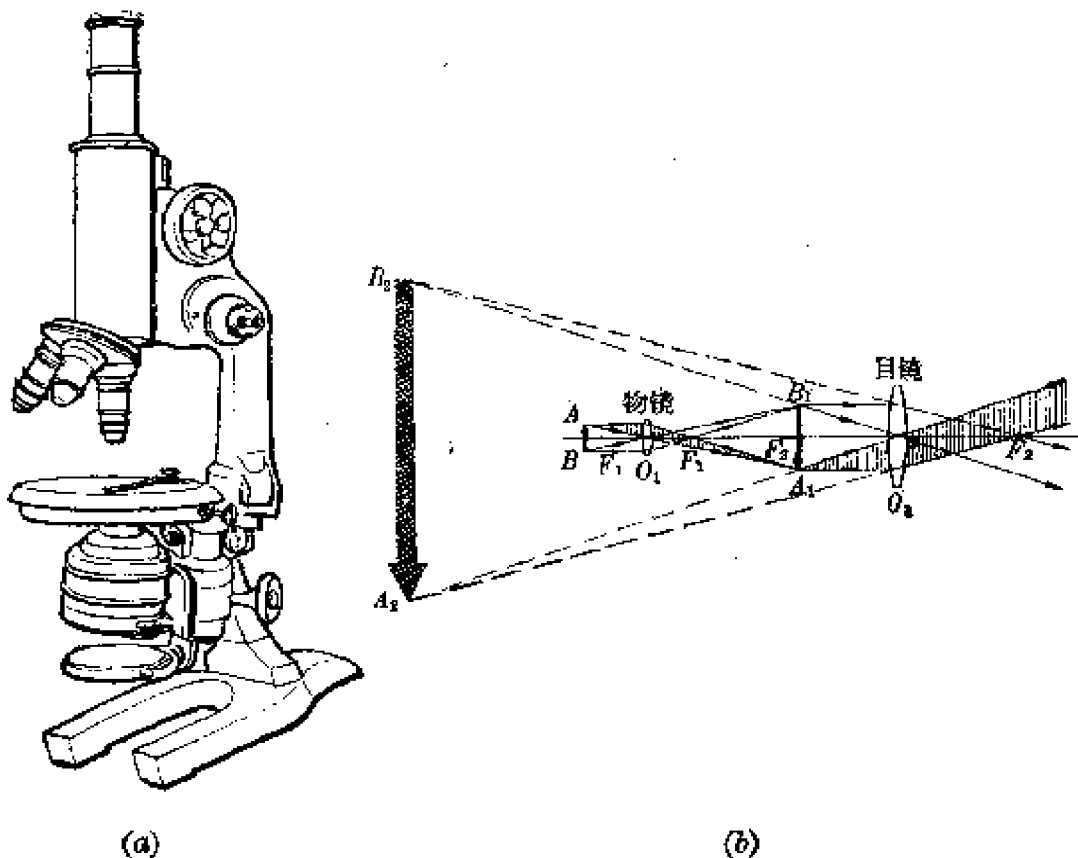


图 16.50 光学显微镜

象 B_1A_1 的位置正好落在目镜 O_2 的焦点 F_2 内。经过调节使实象 B_1A_1 通过目镜后得到一个放大的正立虚象 B_2A_2 。这样，通过目镜观察，看到的是物体的一个放大的倒立的虚象 B_2A_2 。由于物体的这个虚象经历了物镜和目镜的两次放大，因此显微镜的放大率应该等于物镜和目镜的放大率的乘积，即

$$M = K_{\text{物}} \times M_{\text{目}} \quad (16.19)$$

物镜的放大率可按实象 B_1A_1 的放大率公式 (16.17) 来计算。由于物体放在物镜焦点附近，故其物距 u 近似于物镜的焦距 $f_{\text{物}}$ ；象距 v 近似于显微镜的镜筒长度 L^* ，因此有

* 镜筒长度 L 是物镜与目镜间的距离。从光路图上看，物距 v 与 L 相差一段 $f_{\text{目}}$ ，而 $f_{\text{目}}$ 与 L 相比是可以忽略不计的，因此 $v \approx L$ 。

$$K_{物} = \frac{v}{u} = \frac{L}{f_{物}}$$

目镜的作用相当于一个放大镜,故按公式(16.18)其放大率

$$M_{目} = \frac{25}{f_{目}}$$

所以显微镜的放大率

$$M = \frac{25L}{f_{物}f_{目}} \quad (16.20)$$

上式表明:物镜和目镜的焦距越短,镜筒长度越大,显微镜的放大率就越大。

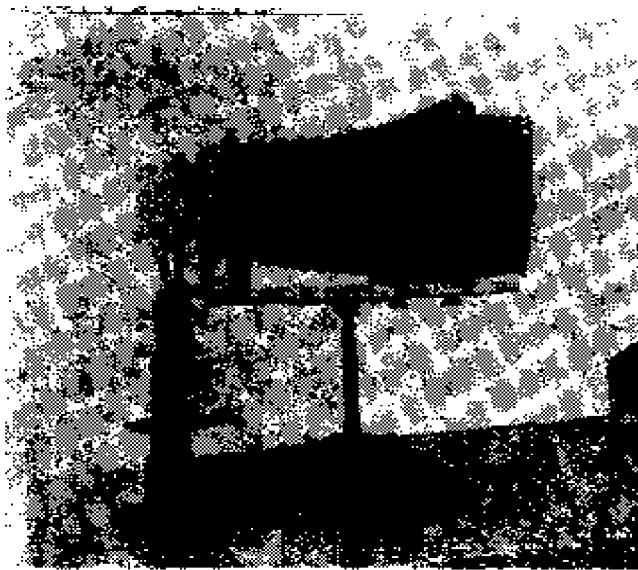
[例题 16.7] 中国科学院制造的三鼻式显微镜,附有物镜四个,其放大率各为 10、20、50 和 100,目镜三个,其放大率各为 6、10 和 14,求此显微镜的最小与最大放大率。

解:因为显微镜的放大率就等于物镜与目镜的放大率的乘积,故按公式(16.19)可以算出

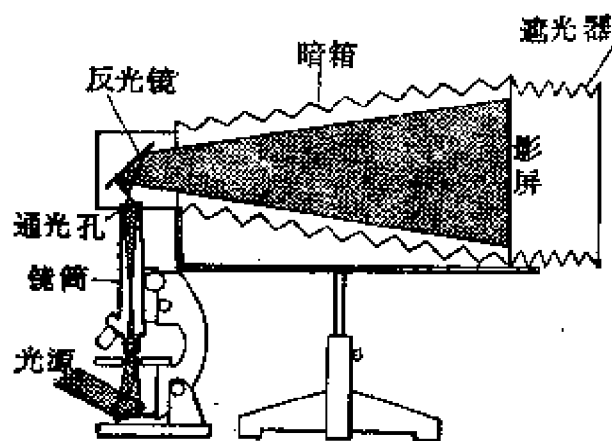
$$M_{最小} = K_{物} \times M_{目} = 10 \times 6 = 60 \text{ 倍};$$

$$M_{最大} = K_{物} \times M_{目} = 100 \times 14 = 1400 \text{ 倍}。$$

在使用光学显微镜时,一般总是把眼睛凑近目镜来窥视放大的物象。如果在显微镜上附加一个显微扩映器,就能使物象进一步放大并投影在影屏上,让许多人同时观察、讨论和进行研究。图 16.51b 就是显微扩映器的原理示意图。它主要由影屏、遮光器、暗箱、反光镜、镜筒和光源等构成。把显微镜竖直放置在暗箱的通光孔下面,同时调节座架的高度,使显微镜的目镜正好套入通光孔。然后让显微镜下方的凹面反光镜对好强光源(天晴可以用太阳光,一般幻灯机光源经过幻灯机镜头的聚光也能满足低倍放大镜的要求),经过调节,在影屏(毛玻璃)上就会出现一个明亮的圆光斑。这时再放上标本,适当调节镜筒的高低,在影屏上就能出现清晰的物象。



(a)



(b) 原理示意图

图 16.51 显微扩映器

光学显微镜的放大率一般不超过 3000 倍。除了受到材料和加工的限制,镜头的焦距不能过短外,最主要的是光的波动性限制了光学显微镜的分辨本领。因为光是一种电磁波,如

果物体的大小可以同光的波长相比拟时，光波就会产生衍射现象，绕过物体而使人们无法在显微镜下观察到物象。因此，即使用可见光中波长最短(4000 埃*)的紫光作为显微镜的光源，能观察到的最小物体也不能小于2000 埃。

人们发现电子在电场中被加速后，也具有波动性。电子的波长极短，只有0.05 埃，因此利用电子束代替可见光来作为显微镜的“光源”，就可以大大提高显微镜的分辨本领，使一些比细菌更小的物体也能看得清清楚楚。图 16.52 就是上

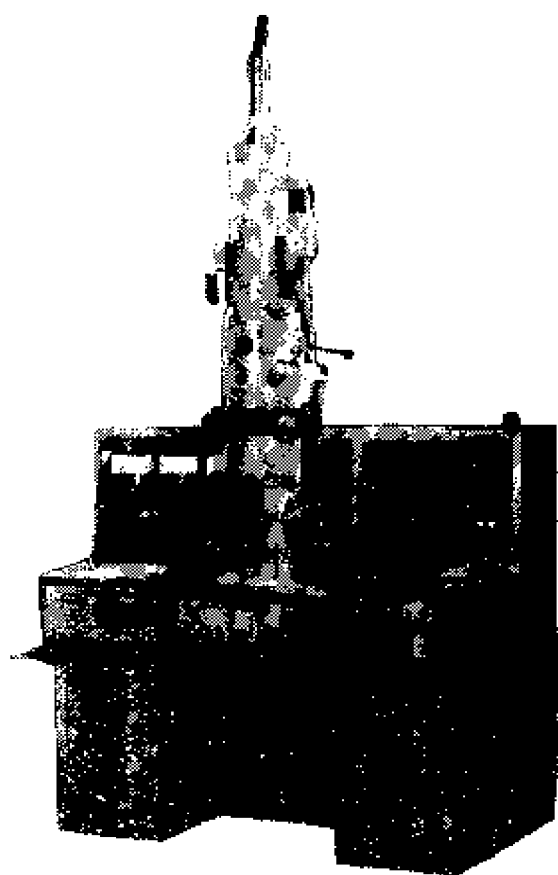


图 16.52 电子显微镜

* 一埃等于 10^{-8} 厘米。

海电子光学研究所广大工人和科技人员自行设计制造成功的大型电子显微镜，它的放大率高达40万倍，分辨本领为5埃。

习题 16.17 放映幻灯时，如果想使屏幕上的象变大些，应该把幻灯机向前移还是往后退？为什么？

习题 16.18 已知幻灯机镜头的焦距为15厘米。如果镜头离屏幕3.6米，问幻灯片应离镜头多远在屏幕上才能显出清晰的象来？象的放大率有多大？

习题 16.19 假设一发亮的灯泡距凸透镜4米远，在凸透镜另一侧的屏幕上显出一个放大的倒立实象。如果象的放大率为10倍，求透镜的焦距。

习题 16.20 远视眼的近点为105厘米。如果想看清明视距离上的物体，需要配屈光度为几度的眼镜？

(提示：这里眼镜的作用是使在明视距离处的物体在近点105厘米处有一个虚象。)

习题 16.21 一放大镜的焦距为10厘米，物体放在距光心7厘米处，求象的位置以及放大镜的放大率。

习题 16.22 一显微镜的筒长170毫米，物镜焦距为17毫米，目镜焦距为25毫米，求它的放大率。

复 习 题

习题 16.23 耳科医生头上戴的反射镜能使灯光会聚入耳内，问这种反射镜是凸面的还是凹面的？

习题 16.24 图 16.53 是一块玻璃直角棱镜的主截面，已知折射率为1.5，试作出垂直于BC面的两条入射光线的光路图。

习题 16.25 已知一双凸透镜（两面都凸出的透镜）的曲率半径为20、30厘米，折射率为1.5，求焦距。

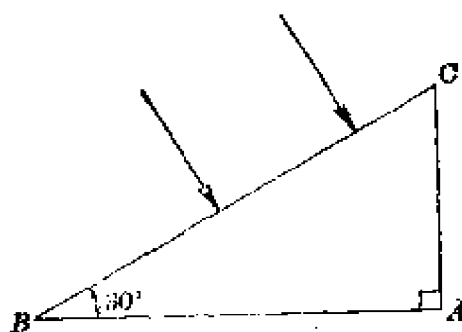


图 16.53

习题 16.26 利用几何作图法或透镜成像公式总结一下凸透镜的成像规律, 把结果填写在下列表中:

表 16.5 凸透镜的成像规律

物 距	象 距	放大率	象的性质
$u \rightarrow \infty$			
$u > 2f$			
$u = 2f$			
$f < u < 2f$			
$u = f$			
$0 < u < f$			

第十七章 光的本性

毛主席教导我们：“人类认识的历史告诉我们，许多理论的真理性的真理性是不完全的，经过实践的检验而纠正了它们的不完全性。”人们对于光的本性的认识就是通过实践不断深化的。

我们已经根据光的直线传播，讨论了几何光学和一些光学仪器的工作原理。然而几何光学的结论只能适用于一定的范围。随着生产实践和科学研究的不断发展，人们逐渐发现光具有明显的波动性，后来认识到光是一种可以引起视觉的电磁波。在光电效应发现后又逐步认识到光在与物质相互作用时表现为粒子性。光的这种既有波动性又有粒子性的性质就叫做光的波粒二象性。

本章将首先通过光的干涉和衍射现象来认识光的波动性，并在此基础上阐明光的电磁本性；然后通过光电效应来认识光的粒子性；最后简单介绍人们对于光的波粒二象性的认识过程。

第一节 光的干涉

我们在河边洗衣或者洗碗，当阳光照在肥皂泡沫上或者照在浮在河面上的油层时，就会看到彩虹似的颜色；从车床上切削下来的钢屑也往往会在阳光照射下泛起一层美丽的蓝色。这些都是日常生活中见到的光的干涉现象。为了便于讨

论光的干涉,我们将先从水波的干涉谈起。

一、波的干涉

在平静的河面上,同时投入两块石子,它们就在各自周围分别引起一系列水面波。可以看到,在这两列波相遇的区域里,有的地方水面的上下振动加强了,而有的地方水面的上下振动却反而减弱了。这是由于在这些区域里的水面同时受到两个波源的影响,同时参与了两种振动的结果。

用两个振动的针尖作为两个点波源,不断接触水面,同样可以在水面上引起两列水面波。如果这两个点波源具有相同的振动方向、频率和相位(或者具有一定的相位差),那么在这两列波相遇的区域里就能看到:某些点的振动始终很强,而另外一些点的振动始终很弱,甚至有些点根本不振动;各点的振动强弱形成一个稳定的分布图象。这种现象叫做波的干涉。引起干涉的这两列波叫做相干波,它们的波源叫做相干波源。图 17.1 是水面波产生干涉现象的照片。

为了更具体地说明波的干涉现象的形成,我们先作出两列相干波在同一时刻的波形简图(图 17.2)。其中实线表示

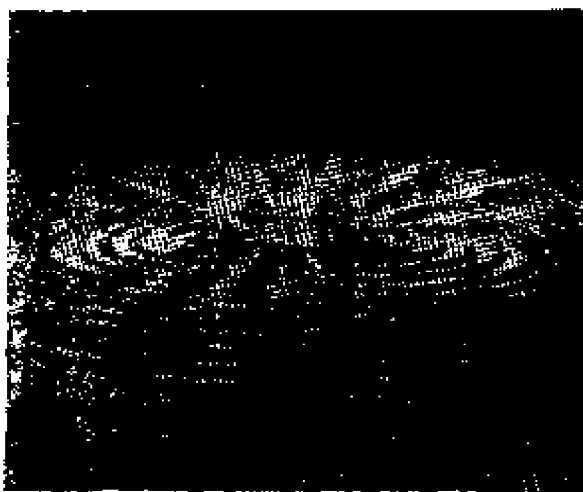


图 17.1 水面波的干涉现象

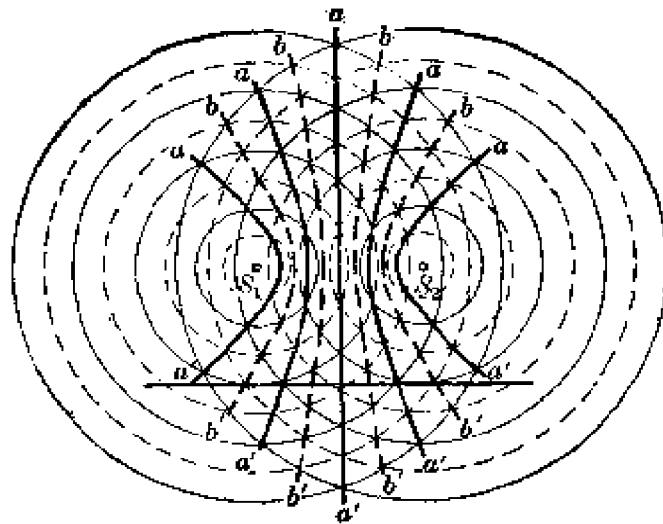


图 17.2 波的干涉的形成

波峰；虚线表示波谷。在某一时刻，如果两列波的波峰与波峰（或者波谷与波谷）在某一点相遇，那么在刚好半个周期后由于两列波各自传播了半个波长的距离，因而现在此点刚好是两列波的波谷与波谷（或者波峰与波峰）相遇。如图中所示，这样把所有波峰与波峰以及波谷与波谷的相遇点连接而成的 aa' 线，其上各点的振动将始终最强。而同样每个波峰与波谷的相遇点，在半个周期后就成了波谷与波峰的相遇点，其振动始终减弱。由波峰与波谷的相遇点而连接成的 bb' 线上各点的振动当然是始终最弱。特别当两列波的振幅相同时，这些点将保持静止不动。从图上可以看出： aa' 线与 bb' 线是相间的。在 aa' 线和 bb' 线之间各点的振动的振幅介于最大（如 aa' 线上各点）和最小（如 bb' 线上各点）的振幅之间。

从上可知道，两列波产生恒定的干涉现象的基本条件是：

1. 两列波的频率必须相同，即波长相等。否则迭加后振动最强点和振动最弱点的位置就不能保持稳定；
2. 两个波源的振动必须保持一定的相位差，否则介质中任何一点所参与的两个振动都没有固定的相位差，各点的合

振幅就不能保持不变；

3. 两列波的振动方向必须相同, 以保证迭加后的合振动的振动方向也在同一方向上。

以上三点叫做波的相干条件。干涉现象是波的基本特征之一。任何两列或多列波只要满足相干条件, 在传播过程中相遇时都会发生干涉现象。把正在发声的音叉放在耳边慢慢旋转, 就会听出从音叉发出的声音中有响、轻相间的情况, 这就是从音叉的两股发出的两列声波的干涉现象。

光的波动性也是首先从光的干涉现象中认识的。

二、光的双缝干涉

让单色光源*发出的单色光通过狭缝 S 成为一束光 (图

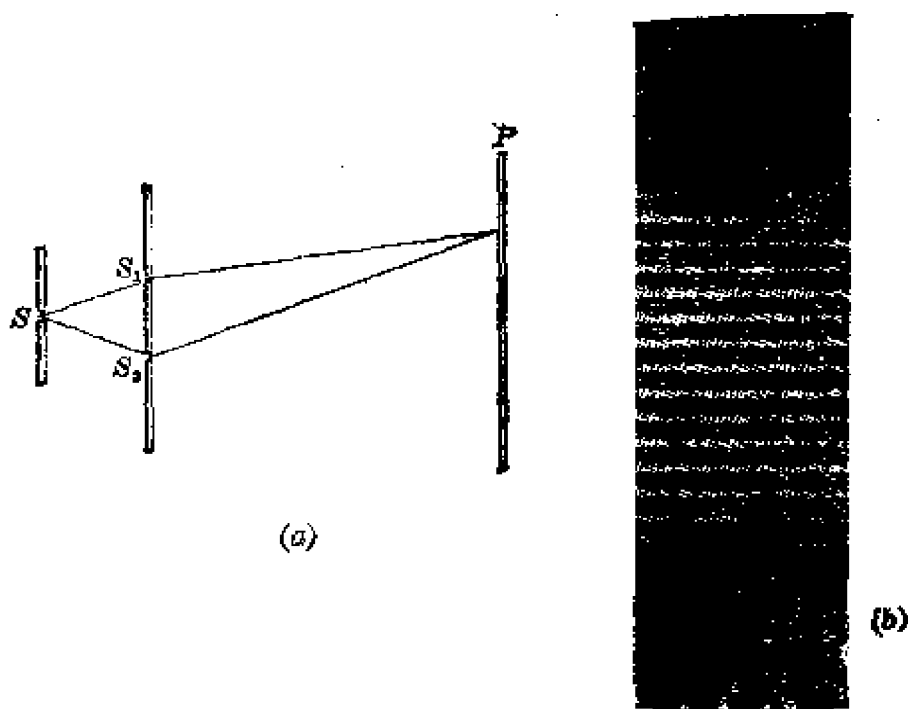


图 17.3 光的双缝干涉

* 最简单的单色光源是在酒精灯芯上洒些食盐, 便可以得到平均波长为 5893 埃的钠黄光。

17.3), 然后再让它通过两个距离很近的相邻狭缝 S_1 和 S_2 , 这样就分成两束光, 这种从同一点光源分出来的两个光源叫做相干光源, 由相干光源发出的光束叫做相干光束。如果在双缝前面放置光屏 P , 在光屏上就可以看到明暗相间的干涉条纹, 这表明这两束相干光束发生了干涉。这种干涉现象叫做光的双缝干涉。

如果分别用红色、黄色或蓝色光来做双缝干涉实验, 就会发现各种单色光所产生的干涉条纹的宽度和间距都各不相同, 但中央 O 点处却总是处在明亮条纹中。

下面就来分析光的双缝干涉中产生明暗相间的干涉条纹的原因和条件。

在第九章讨论同一直线上同频率的两个简谐振动的合成规律时, 曾指出: 当两振动的相位差 $\Delta\varphi = 2K\pi$ [$K = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$], 即两振动同相时, 振动就相互加强 (图 9.11a), 合振幅最大; 当 $\Delta\varphi = (2K + 1)\pi$ [$K = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$], 即两振动反相时, 振动就相互减弱 (图 9.11b), 合振幅最小。当两相干光束在一点相遇时, 情况也一样。如它们是同相的, 就相互加强, 显出明条纹; 如它们是反相的, 就相互减弱, 显出暗条纹。然而两相干光束在某点相遇时的相位差完全决定于这一点到这两个相干光源的距离之差, 叫做光程差, 用字母 δ^* 表示。

在双缝实验中, 由于双缝 S_1 、 S_2 到狭缝 S 的距离相等, 因此从相干光源 S_1 和 S_2 分别出发时的两束光是同相位的。我们只要找出这两束光在光屏上某一点的光程差与波长之比就可以知道它们在这点的相位差, 即

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda_0}, \quad (17.1)$$

* δ 希腊字母, 是字母 Δ 的小写, 读作“dai-er-ta”。

式中 λ_0 表示从光源发出的单色光在真空中的波长。于是可以列出双缝干涉条纹中明、暗条纹的条件：

$$\left. \begin{array}{l} \text{当} \quad \quad \quad \Delta\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda_0} = 2K\pi, \\ \text{即 } \delta = K\lambda_0 \text{ 时, 产生明条纹;} \\ \text{当} \quad \quad \quad \Delta\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda_0} = (2K+1)\pi, \\ \text{即 } \delta = (2K+1) \frac{\lambda_0}{2} \text{ 时, 产生暗条纹。} \end{array} \right\} \quad (17.2)$$

式中 $K = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。

如图 17.4 所示, 假设双缝 S_1 、 S_2 的中点 M 到光屏中央 O 点的距离为 D , 而 S_1 、 S_2 两缝间的距离为 d , 通常 D 远比 d 大。若 P 是光屏上的任一点, 以 O 点为原点, P 点的坐标则为 y , 显然 y 也远小于 D 。联结 M 、 P , 同时从 S_1 作 S_2P 的垂线而交 S_2P 于 N 。由于 $PS_1 \cong PN$, 可见 S_2N 是两相干光束在 P 点的光程差 δ 。又因 $S_1S_2 \perp MO$, S_1N 又可近似地看作垂直于 MP , 故 $\angle S_2S_1N = \angle OMP$ 。于是 $\triangle S_1S_2N$ 和 $\triangle MPO$ 相似, $\delta:d=y:D$, 即

$$\delta = \frac{d}{D}y. \quad (17.3)$$

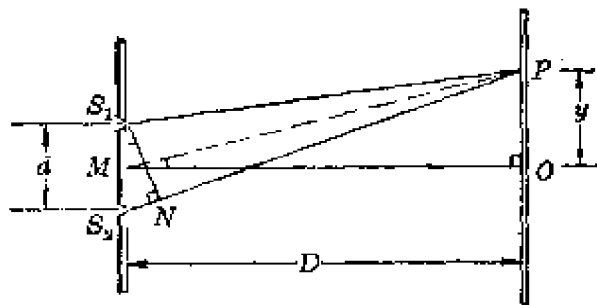


图 17.4

将上式代入公式(17.2), 可以得出光屏上产生干涉明、暗条纹的条件:

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } y = \frac{D}{d} K \lambda_0 \text{ 时, } P \text{ 点处产生明条纹;} \\ \text{当 } y = \frac{D}{d} (2K + 1) \frac{\lambda_0}{2} \text{ 时, } P \text{ 点处产生暗条纹。} \end{array} \right\} (17.4)$$

式中的 $K = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, 叫做干涉条纹的级。例如光屏中央 O 点就是零级明纹; 在 O 点上、下方对称出现的就是各级明暗相间的条纹, 而相邻两明纹间的距离

$$\Delta y = y_{k+1} - y_k = \frac{D}{d} (K + 1) \lambda_0 - \frac{D}{d} K \lambda_0 = \frac{D}{d} \lambda_0. \quad (17.5)$$

如果已经测得 Δy 、 D 、 d , 即由上式可把光源的波长推算出来。

图 17.5 表示双缝干涉的光强分布。其中横坐标为光程差, 纵坐标为光强; 水平实线表示单个光源的光强 I_0 , 水平虚线表示两个相同的非相干光源的均匀光强 $2I_0$; 曲线表示两个相干光源光强的分布情况。根据实验和理论计算表明: 干涉明纹处的光强相当于单个光源所形成的 4 倍, 即 $4I_0$; 而暗纹处的光强为零。从图上还可以看出曲线下方的面积正好等于水平虚线下方的面积, 这清楚地表明了干涉过程既没有创造能量, 也没有消灭能量, 只是把能量重新分布而已。

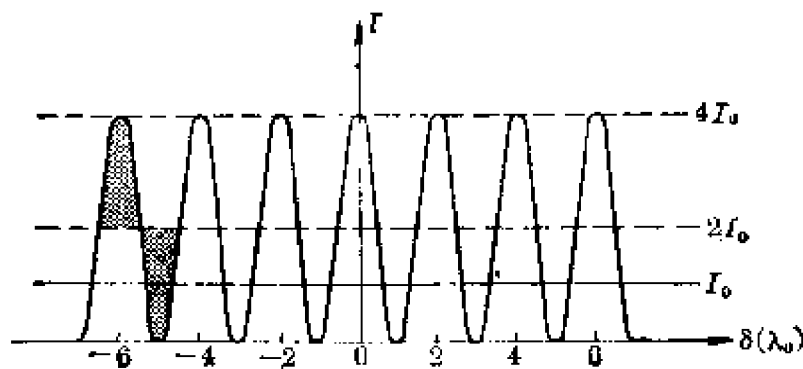


图 17.5

如果让白光代替单色光通过图 17.3 的干涉装置,那么在光屏上就得到彩色的干涉条纹。这是因为白光是由各种波长的单色光混合而成的。当白光通过双缝后,其中各种波长的单色光各自在光屏上形成自己颜色的干涉条纹。在光屏中央 O 点,由于各种波长的光的光程差都等于零,各种颜色的零级明纹都在这里重合,它们按原来的比例混合,因此 O 点的明纹仍然是白色的。在 O 点上方和下方,由于不同波长的干涉条纹的间隔不一样,波长越大,间隔也越大,不同颜色的条纹就这样错开了,而且离 O 点越远,错开得越厉害。所以在光屏上除中央是白色外,其他条纹都是彩色的。

这里必须指出,两个独立光源,即使条件完全相同也不能成为相干光源。例如用两只相同的电灯并排放着,在灯前放上光屏,那么无论怎样移动光屏都只能在屏上看到均匀的一片光亮,而看不到明暗相间的干涉条纹。这是什么原因呢?原来根据近代科学研究表明:光波是由组成光源的大量原子(或分子)在运动状态发生变化的过程中辐射出来的。因此光源的发光实际上是大量原子(或分子)发光的总和。每个原子发光的时间十分短暂,约为 10^{-8} 秒,而各个原子的发光又是相互独立的,时间也参差不齐,不可能存在固定的相位差,即使是同一原子在不同时间发出的光波也因为没有固定的相位差而不能满足相干条件。所以要使两个独立光源满足相干条件显然是不可能的。

在双缝实验的光屏上,离中央 O 点上、下一定距离外就模糊不清,看不到明暗条纹。这是因为在这些区域里的点,光程差太大,相遇的两束光已经不是从同一光源的同一原子发射出来的同一列光波所分成的,所以不能满足相干条件。由此可见,光屏上干涉条纹的级数并不是无限的,要受到光程差的

限制。通常把能产生干涉的最大光程差叫做相干长度，用字母 δ_c 表示。实验表明白光的相干长度最短；单色光较长。例如国际上规定作为长度标准*的氪₈₆发出的波长为 6057 埃的橙色光的相干长度为 38.5 厘米。激光的相干长度最长，如氦氖激光的相干长度可达数十公里。

三、光的薄膜干涉

把两块标准的平板玻璃(叫做平晶)迭在一起，在一边垫上一片铝箔(图 17.6a)，这样在它们中间就构成一楔形空气薄膜。若用单色光照射，就可以从上面观察到一组等距的平行线条纹(图 17.6b)。如果把两块平晶迭在一起，而上面一块的表面上有稍微不平的地方(图 17.7a)，就可以观察到在这些地方的条纹变弯了(图 17.7b)，故从条纹的弯曲程度和弯曲方向就可以检验出表面不平的程度和情况。在生产上就

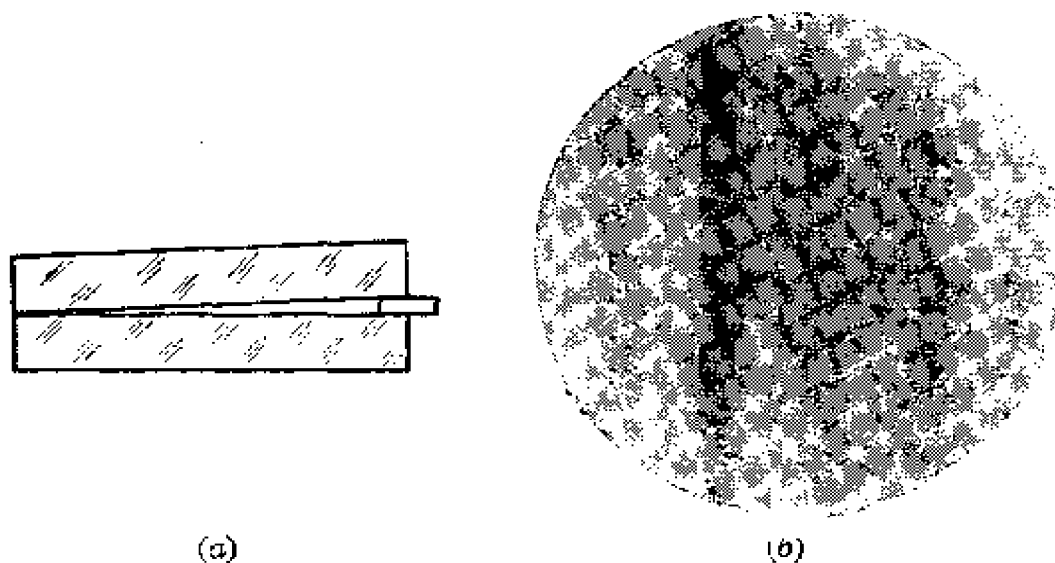


图 17.6

* 1961 年国际上规定采用氪₈₆ 的波长 6057 埃的 1650763.73 倍作为世界长度标准(米)，用来代替铂铱米尺这样世界各国都可以利用干涉法得到长度的原标准。

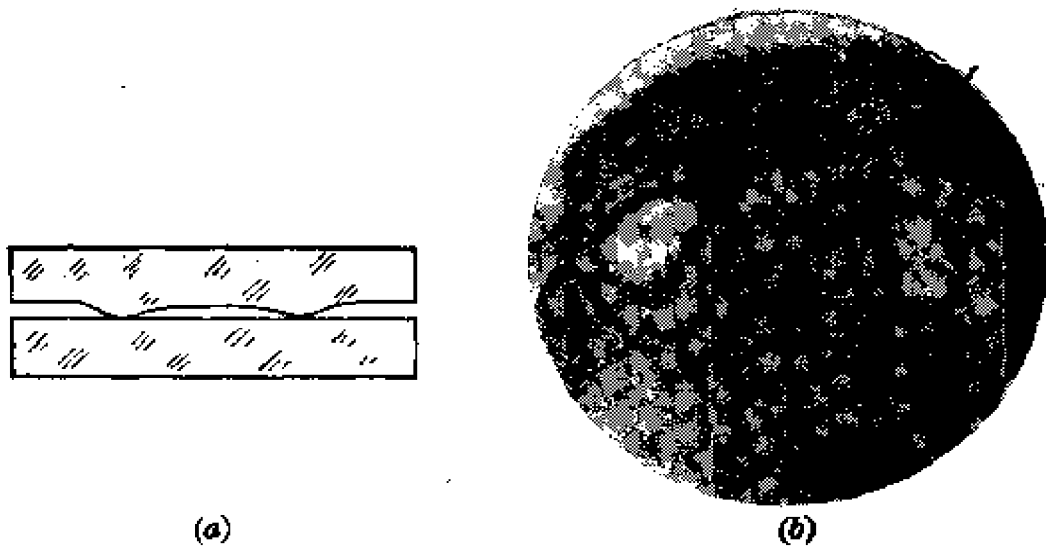


图 17.7

是用这种方法来检验精密工件表面的光洁度的。同样用白光照射这两块平晶就可以观察到彩色条纹；如果其中有一块玻璃表面不太平整，就会看到象图 17.7b 那样的彩色花条纹。这些都同阳光照在肥皂泡沫上、河面的油层上所出现的彩色条纹一样，是由薄膜引起的光的干涉现象。

下面来讨论薄膜是怎样引起光的干涉的。我们知道，薄膜有上下两个表面，光线在这两个表面上都有反射。假设有

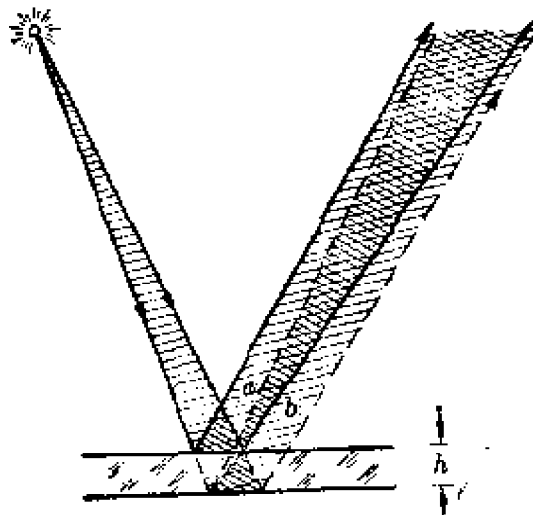


图 17.8 光的薄膜干涉

一束光入射在薄膜上(图 17.8), 一部分光束 a 在薄膜的上表面就被反射, 而其中透入薄膜内的那部分光束在到达薄膜的下表面后又有一部分光束 b 被反射回来并穿出上表面。由于这两束光是来自于同一束入射光, 它们的光程差又很小, 满足相干条件, 故产生干涉而形成干涉条纹。

两光束 a 、 b 在薄膜的上表面分开时, 相位是相同的。在重新相遇时, 由于光束 b 比光束 a 在薄膜里多走了一个来回, 故它们之间就存在一定的相位差。假设入射处薄膜的厚度为 h , 折射率为 n , 那么它们的光程差就是 $2nh^*$ 。于是根据公式 (17.1) 可知, 它们的相位差

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \frac{2nh}{\lambda_0} \quad (17.6)$$

对于不同厚度的薄膜说来

$$\left. \begin{array}{l} \text{在 } h = K \cdot \frac{\lambda_0}{2n} \text{ 处出现明纹;} \\ \text{在 } h = (2K + 1) \frac{\lambda_0}{4n} \text{ 处出现暗纹。} \end{array} \right\} (K = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (17.7)$$

但是如果光程差 $2nh$ 超过入射光的相干长度, 就不能产生干涉条纹。对于薄膜上厚度相同的各点说来, 由于光程差相同而具有相同的明暗程度, 因此在楔形薄膜上的干涉条纹都是明暗相间的平行线, 表示平行线上各点的薄膜是等厚的, 这些平行条纹就叫做等厚条纹。

* 光在折射率为 n 的介质中传播时, 由于光速和波长都相当于在真空中传播时的 $1/n$, 因此通过同样的距离所需要的时间和走过的波长数都相当于在真空中的 n 倍。我们在计算光程时, 通常取真空中的波长 λ_0 作为尺度, 所以必须把光波在介质中传播时的光程看成是在真空中的光程的 n 倍。

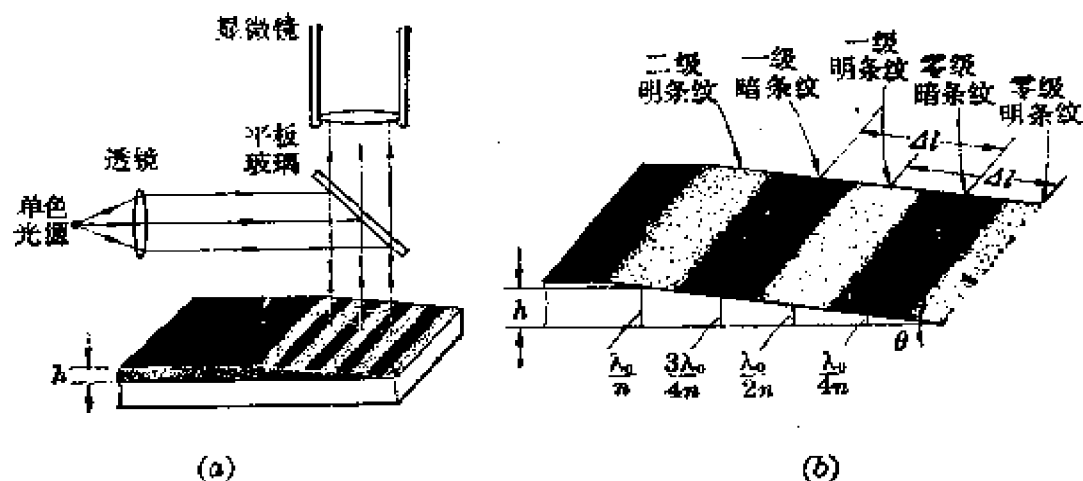


图 17.9

在制造半导体的工艺中,要测定硅片面上氧化膜(二氧化硅)的厚度,工艺要求厚度为 $0.5 \sim 0.8$ 微米。由于二氧化硅是透明薄膜,因此可以利用光的薄膜干涉来测定。生产上常用的方法是先将二氧化硅腐蚀成尖楔形(图 17.9a),然后通过显微镜数出它在一定的单色光照射下的干涉明纹的条数。由于在尖楔形薄膜的尖处厚度 $h=0$,满足公式(17.7)中的明纹条件,出现的干涉条纹叫做零级明条纹($K=0$)。当厚度增至 $h=\lambda_0/4n$ 时,满足暗纹条件,出现零级暗条纹(图 17.9b);当膜厚增至 $h=\lambda_0/2n$ 时,又满足 $K=1$ 的明纹条件而出现一级明条纹;余则类推。这表明每增加一级明条纹,薄膜厚度就增加 $\lambda_0/2n$,因此只要数出尖楔处明条纹数 K ,即可得出薄膜的厚度

$$h = K \cdot \frac{\lambda_0}{2n} \quad (17.8)$$

[例题 17.1] 利用薄膜干涉法测定二氧化硅的厚度(参看图 17.9a)。如果光源用波长为 5893 埃的钠黄光,在显微镜里观察到劈尖的棱边是亮条纹,而左边边缘在第五条暗纹上。已知二氧化硅的折射率为 1.5,求二氧化硅的厚度。

解：根据观察结果从 $K=0$ 级暗纹算起，第五条暗纹表示左边边缘（即劈底边缘）是在 $K=4$ 级的暗纹上。按照公式 (17.7) 可以算出二氧化硅的厚度

$$h = (2K+1) \frac{\lambda_0}{4n} = 9 \cdot \frac{5893}{4 \times 1.5} = 8839.5 \text{ 埃} \doteq 0.884 \text{ 微米。}$$

把一个曲率很小的凸透镜放在一块平晶上，并用平行的单色光从上方垂直向下照射，在凸透镜与平晶间的楔形空气薄膜层上下表面上的反射光束也将产生干涉，而形成一组同心圆形的等厚条纹（图 17.10），叫做牛顿环。光学仪器厂通常就是用这种方法来检查透镜的曲率是否合乎标准的。

牛顿环的中心点 O 处空气薄膜的厚度 $h=0$ ，根据公式 (17.7) 可知， O 点应该是零级明纹点，但实际上却是一个零级暗纹点。这是由于在垂直入射的条件下，光波在界面上反射时所引起的附加光程差造成的。

一般说来，当光波垂直从光疏介质入射到光密介质的界面上时，在相位上，反射光波就要比入射光波落后 π 弧度，即

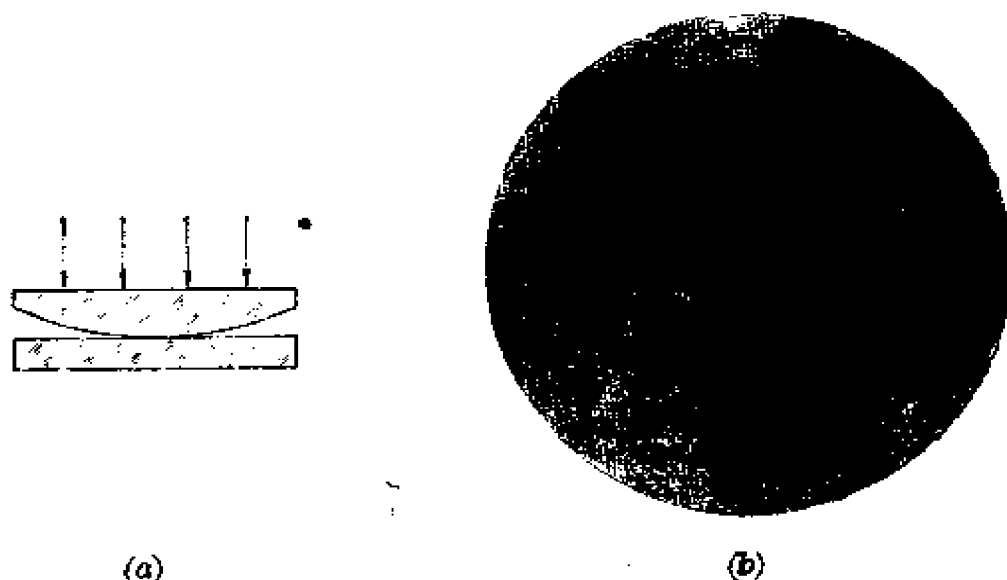


图 17.10 牛顿环

相当于光程差半个波长 $\lambda/2$, 叫做半波损失; 当光波垂直从光密介质入射到光疏介质的界面上时, 反射光波与入射光波就没有相位差, 也就不存在半波损失。对于象图 17.10a 中在凸透镜和平晶间的空气薄膜说来, 从上表面(光密介质到光疏介质)反射的光波没有半波损失, 而从下表面(光疏介质到光密介质)反射的光波就有半波损失, 因此它们的光程差就多了 $\lambda/2$ 。在考虑半波损失的情况下, 公式(17.7)应改写成

$$\left. \begin{array}{l} \text{在 } h = (2K + 1) \frac{\lambda_0}{4n} \text{ 处出现明纹,} \\ \text{在 } h = K \cdot \frac{\lambda_0}{2n} \text{ 处出现暗纹。} \end{array} \right\} (K = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

(17.9)

对于象图 17.9 中的二氧化硅薄膜说来, 由于硅片的折射率大于二氧化硅的折射率, 因此从薄膜上、下表面反射的光波都有半波损失, 所以它们的光程差就不必考虑增加 $\lambda/2$ 的问题, 公式(17.6)可以适用。

[例题 17.2] 某光学仪器厂以标准球面 A 作验规, 用薄膜干涉法来检验一凹面反射镜 B 的曲率半径。如果光源是波长为 6328 埃的氦氖激光, 观察到两个暗环, 问凹面反射镜的偏差有多大?

解: 考虑半波损失, 根据公式(17.9)可知, 在出现暗纹处空气薄膜 ($n=1$) 的厚度 $h = K \cdot \lambda_0/2$ 。又观察到两个暗环 ($K=2$), 因此推算出两球面间的偏差

$$h = 2 \times \frac{6328}{2} = 6328 \text{ 埃} = 0.6328 \text{ 微米。}$$

习题 17.1 由两个钠光管产生的波长为 5893 埃的单色光会产生干涉现象吗?为什么?

习题 17.2 已知双缝间的距离为 0.5 毫米, 今以镧线 ($\lambda_0 = 4799.9$ 埃) 照射, 问把光屏放到离缝多远的地方才能得到间距为 1 毫米的干涉条纹?

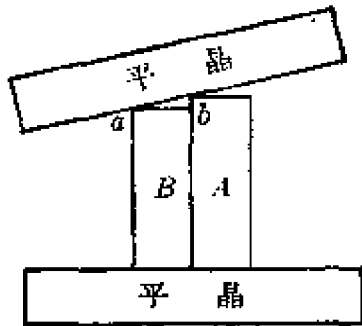


图 17.11

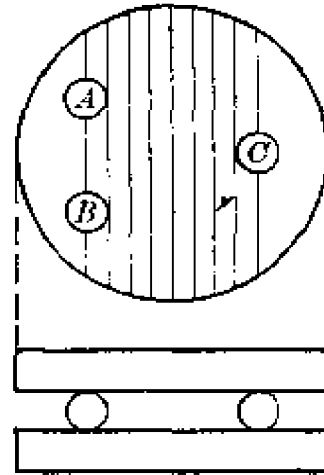


图 17.12

习题 17.3 要检验一精密零件 A 与标准块规 B 在长度上的误差, 先让它们并放在一块标准平晶上, 再放一块标准平晶在其上(图 17.11), 然后用波长 $\lambda_0 = 5893$ 埃的单色光垂直照射, 在显微镜里观察到 ab 间有 5 条干涉明条纹而 b 在明条纹上, 问误差多少?

习题 17.4 用两块标准平晶来检验微型轴承钢珠的直径, 已知钢珠 A 、 B 是合于标准的, 而 C 则略大。按图 17.12 放置后, 用波长为 5791 埃的黄光垂直照射, 从显微镜的视场中观察到 AB 与 C 间出现 9 条干涉明条纹, 问钢珠 C 比标准钢珠直径大多少?

第二节 光的衍射

一、波的衍射

隔开一堵墙可以听到墙外的声音; 只要把门或窗稀开一条缝, 在室内各处都能听到室外的声音。河面上象芦杆、树枝

等障碍物阻挡不了水波的前进；穿过小孔的水波就象把小孔

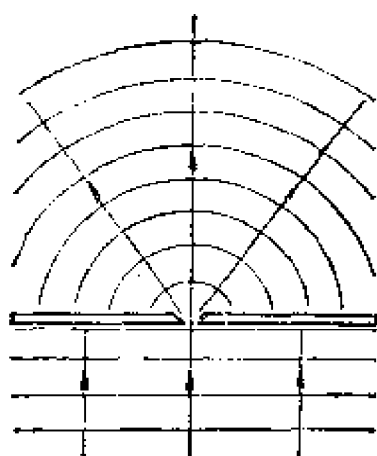


图 17.13 水波穿过小孔

当作新的波源一样，继续在小孔后面传播开去（图 17.13）。这些现象都表明波可以绕过障碍物或者穿过小孔、狭缝而并不沿直线传播。波在遇到障碍物时的这种偏离直线传播的现象叫做波的衍射，或称绕射。

实践表明：障碍物（或小孔、狭缝）越小，或者波长越长，波的衍射现象就越显著。反之，如果障碍物（或小孔、狭缝）的线度大大超过波长，或者波长很短，波的衍射现象就不显著，甚至觉察不到，这时波就可以看作直线传播。例如，当河面上出现水波时，在小船后面的水面还是平静的。因为一般水波的波长只有几十厘米，而小船的长度远大于水波波长，所以水波就不能绕到小船后面去。一般声波在空气中的波长约为几米到几十米，因此站在长度和高度都大于几十米的大墙后面就不容易听到墙外的声音了。

衍射现象也是波的基本特征之一。实践和理论研究表明：波的衍射现象实际上是由一系列波所分成的许多子波相互干涉的结果。因此衍射和干涉是既有区别、又有内在联系的两种反映波的基本特征的现象。

二、光的单缝衍射

让单色光通过较大的圆孔，在光屏上就得到一个亮度均匀的光斑（图 17.14a）；逐渐缩小圆孔的孔径，光斑也就随着减小（图 17.14b）。这些说明光服从直线传播的规律。但是当

圆孔的直径缩小到 10 微米左右时，光斑不仅不随着缩小，反而变大；此时光斑的亮度也并不均匀，而是变成一系列明暗相间的圆环(图 17.14c)。这种现象说明光和机械波，如水波、声波一样，能绕过小圆孔的边界而向外扩展，这就叫做光的衍射。光在衍射中所形成的明暗相间的圆环，叫做衍射图样。

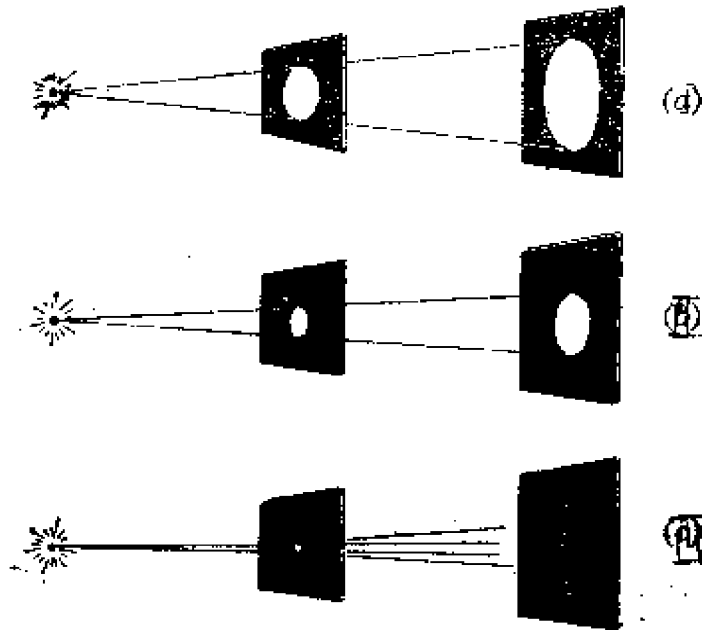


图 17.14 光的圆孔衍射

光的衍射现象再一次证实了光的波动性。但由于光的波长极短，只有 0.4~0.7 微米，因此只有当小孔的直径可以与光的波长相比时才会出现衍射。

下面来研究平行光束通过单狭缝时所出现的衍射规律。图 17.15 是光的单缝衍射的实验装置。把单色线光源 S 放在凸透镜 L_1 的焦点处变成一束平行光后通过一个有狭缝的挡板 AB ，再经过凸透镜 L_2 ，于是在放在凸透镜 L_2 的焦点处的光屏上就出现一组明暗相间的条纹。它的特点是中央有一条

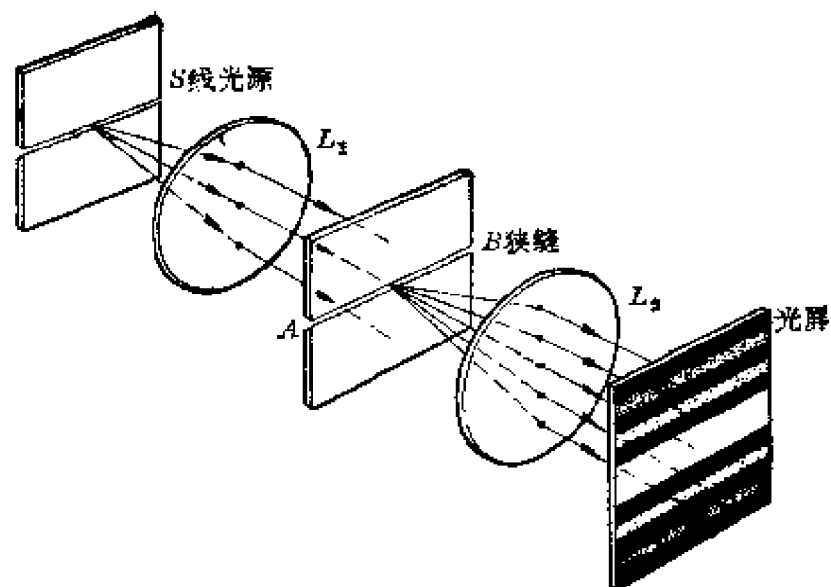


图 17.15 光的单缝衍射

比较宽的特别明亮的明纹，两侧对称地排列着一些较窄的亮度较弱的明纹，相邻的明纹间有一条暗纹。

假设狭缝 AB 的宽度为 a 。垂直入射在狭缝 AB 上的光波将可看作为分成一系列以 AB 上各点为光源的子波，叫做次波，或者叫做衍射光束。显然这些次波都能满足相干条件。通过狭缝后沿原来方向传播的各次波（衍射光束），经凸透镜 L_2 会聚在光屏中央 O 点上（图 17.16），由于它们的光程彼此都相等，即光程差 $\delta = 0$ ，由公式(17.2)可知，中央 O 点处出现明亮条纹。

而通过狭缝后与原来方向成倾角 θ 的一组衍射光束（图 17.16），经凸透镜 L_2 后将会聚在光屏的 P 点处。倾角 θ 叫做衍射角。显然这些衍射光束的光程是各不相同的。若由 A 引这些平行线的垂线 AC ，那么 BC 是它们的最大光程差。根据直角 $\triangle ABC$ 的关系，有

$$\delta = BC = a \sin \theta. \quad (17.10)$$

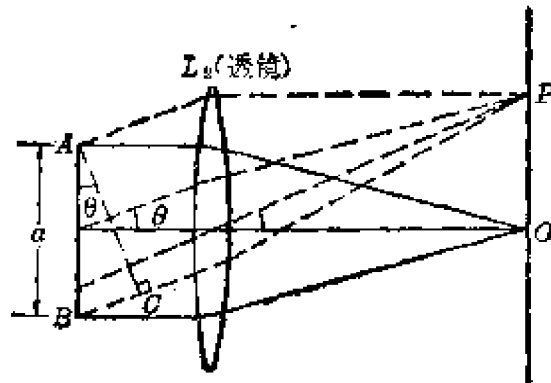


图 17.16

上式表明：每一组衍射光束的最大光程差是随着衍射角的增大而增大的。

实践和理论研究表明，衍射图样上的明暗条纹条件决定于衍射角 θ ：

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{当 } \delta = a \sin \theta = 0, \\
 &\text{即 } \sin \theta = 0 \text{ 时为零级明纹} \\
 &\text{当 } \delta = a \sin \theta = K \lambda, \\
 &\text{即 } \sin \theta = K \frac{\lambda}{a} \text{ 时为 } K \text{ 级暗纹} \\
 &\text{当 } \delta = a \sin \theta = (2K + 1) \frac{\lambda}{2}, \\
 &\text{即 } \sin \theta = (2K + 1) \frac{\lambda}{2a} \text{ 为 } K \text{ 级明纹}
 \end{aligned} \right\} (K = \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (17.11)$$

其中当 K 为正数时，条纹出现在狭缝中点 M 的上方； K 为负数时，条纹出现在 M 的下方。

图 17.17 表示单缝衍射的光强分布。图中横坐标为光程差，以波长表示；纵坐标为光强。从图上可以看出衍射图样的光强大部分都集中在中央明纹上。

根据公式 (17.11) 可以看出：对于波长一定的单色光说

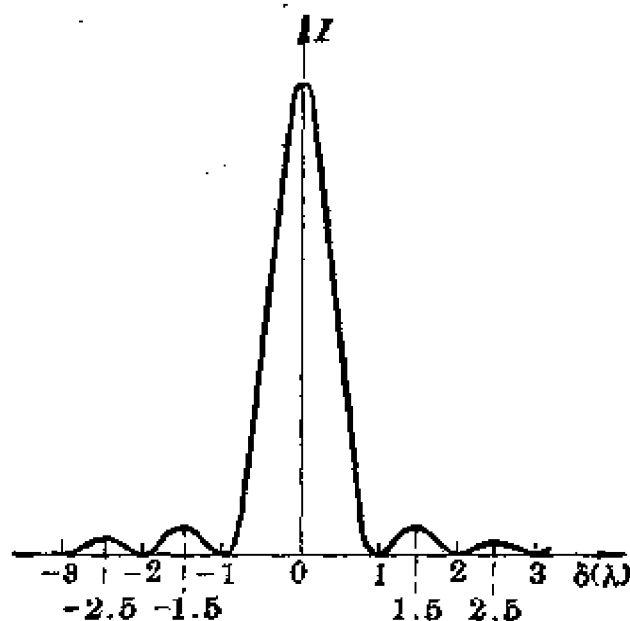
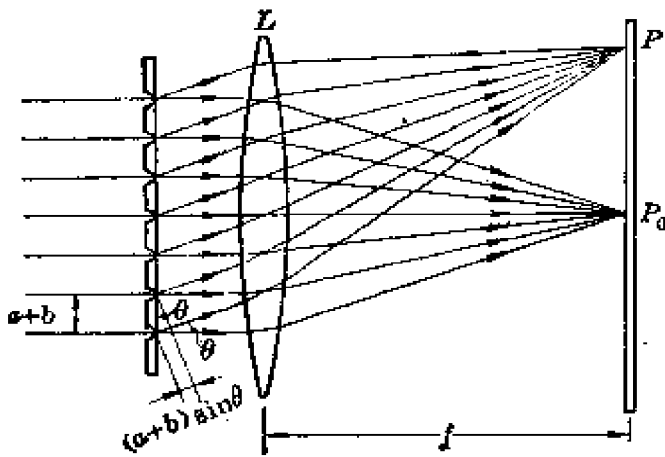


图 17.17

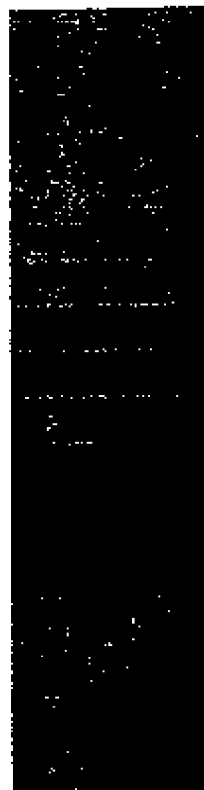
来，狭缝越宽，产生各级衍射条纹的衍射角也越大，因此在光屏上衍射条纹的间隔也越大；对于宽度一定的狭缝说来，入射光波的波长越小，产生各级衍射条纹的衍射角也越小，因此在光屏上衍射条纹的间隔也越小。例如，紫色光在光屏上的衍射条纹就比红色光的要靠得近些。

三、衍射光栅

以上讨论的是单色光通过单缝时的衍射情况。如果用白光(或复色光)的话，由于白光(或复色光)中各种单色光到达光屏中央 O 点时都没有光程差，因此 O 点处的明条纹仍然是白色(或复色)的。但是由于各种单色光的波长不同，各自的衍射条纹的间隔就不同，在 O 点的上、下方就对称地排列出各种单色光各自的衍射条纹，因此它们互相重叠，紫色在里，红色在外，就构成了类似白光通过棱镜而分成的彩色光谱。我们



(a) 部分截面图



(b) 光栅的衍射图样

图 17.18 衍射光栅

把它叫做衍射光谱。从这里可以看到白光衍射后会发生色散现象。衍射光栅就是根据这一原理制成的。

衍射光栅是一系列平行的、等宽、等间隔的狭缝。它的缝数很多，而缝间距离很小。大的光栅可以有十几厘米长，而每毫米中却有几百条甚至上千条狭缝。最简单的光栅是用金刚石在平板玻璃片上刻划出一系列平行的细痕。由于细痕部分象毛玻璃一样不易透光，因此细痕间的狭窄空隙部分是透明的，就起着一条条狭缝的作用。这种光栅叫做平面透射光栅。

图 17.18a 是一个光栅的部分截面，其中 a 是狭缝的宽度， b 是缝间距离。通常把 $a+b$ 叫做光栅常数。当平行单色光垂直照射在光栅上后再通过凸透镜 L 就会聚在焦点处的光屏上，呈现出各级衍射条纹。图 17.18b 就是放大的衍射图

样照片。可见光栅形成的衍射条纹是一些细窄而明亮的明条纹,而明条纹之间是比较宽阔的暗区。

必须注意到:通过同一狭缝的光束就象通过单缝的衍射光束一样,要产生衍射现象;而通过各条狭缝的光束之间还要产生干涉现象。因此在光屏上呈现的衍射条纹实际上是衍射和干涉互相迭加的共同结果。当衍射角 θ 满足

$$(a+b)\sin\theta = K\lambda (K = \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (17.12)$$

时,由所有相邻的狭缝所射出的光的光程差 $\delta = (a+b)\sin\theta$ 是波长的整数倍,根据干涉中的明纹条件(17.2)可知:它们相互加强,在光屏上就出现 K 级明纹。光栅上的狭缝越多,这些条纹就越明亮。通常把这个公式叫做光栅公式。

上式表明:对于波长一定的单色光说来,光栅常数 $(a+b)$ 越小,衍射角 θ 就越大,光屏上各级明条纹就分得越开。

用衍射光栅可测定光波的波长。图 17.19 是测定光波长的装置示意图。具体的测定方法如下:事先用显微镜测出光栅常数,然后将光栅装在分光计上。待测波长的光线是由平行光管射出的,通过光栅后就形成各级衍射条纹,用望远镜观察各级明条纹,同时从分光计上读出相应的衍射角的度数。这样,由公式(17.12)就可知道光的波长。

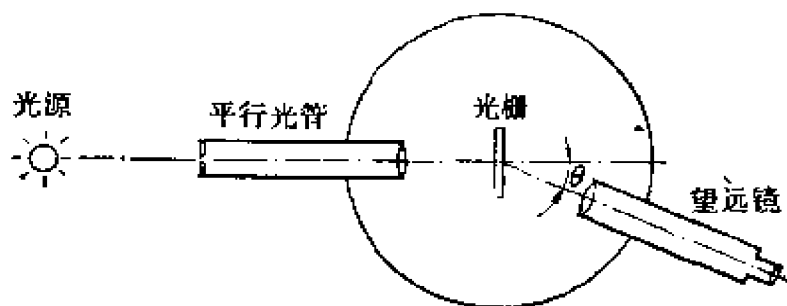


图 17.19 用光栅测定光波波长的装置

用白光代替单色光,通过光栅后,就得到如图 17.20 的光

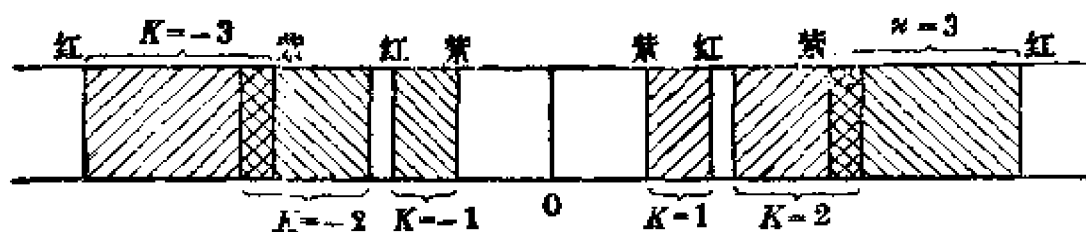


图 17.20 光栅光谱

栅光谱。利用光栅的这种分光特性，可以制成分光元件。光栅光谱具有按波长的顺序等距排列的特点，这是它比棱镜光谱优越的地方，但光栅光谱由于级数多，亮度比较分散，而且各级光谱还有重迭现象。这是不及棱镜光谱的主要缺点。

习题 17.5 在光的单缝衍射现象中，如果(1)增大入射光的波长；(2)增大狭缝宽度，在光屏上的衍射图样有何变化？

习题 17.6 用光栅测定钠光波长，若光栅常数为 1.730×10^{-4} 厘米，测得第一级明条纹的衍射角为 $19^\circ 56'$ ，求钠光波长。

第三节 光的电磁本性

在十七世纪前后，人们在对光的反射、折射等基本定律的认识的基础上，几乎同时提出了对于光的本性的两种截然不同的观点。一种是光的微粒说；另一种是光的波动说。

光的微粒说是牛顿根据光的直线传播特性提出的。他认为光是从光源发出的遵循力学惯性定律以一定速度运动的微粒流。这些微粒就象弹性小球一样可以在光滑的平面上弹跳而形成了光的反射；还可以受到介质的吸引而改变速度，从而在不同介质的界面上发生光的折射。按照牛顿的这种吸引理论，光在光密介质中的速度要比在光疏介质中大，这显然是与客观事实不相符的。由于当时生产技术的限制，还不能

测定光在各种介质中的速度,直到1800年有人测出光在水中的速度比在空气中小时,才发现牛顿的微粒说对光的折射解释是错误的。

光的波动说是由荷兰人惠更斯提出的。他认为发光体在它周围的空間引起弹性振动,而光就是以发光体为中心并靠一种充满整个空间的叫做“以太”的特殊介质来传播的弹性波,即把光看作是机械振动和机械波。在当时按照这种波动观点同样可以完满地解释光的反射和折射现象,只是对于“以太”的存在一直没有得到证实。

在十七、十八世纪中,光的波动说和微粒说的争论从来没有停止过。起初,由于牛顿本人在物理学上的成就和威望,故在光学方面多数相信微粒说。直到十九世纪初,人们发现了光的干涉、衍射等现象之后,光的波动说才占了上风。

到了十九世纪六十年代,电磁学的研究已经发展到比较完善的阶段。麦克斯韦在前人工作的基础上又进一步发展和建立了电磁理论,并且在此基础上,提出了光的电磁说。

下面主要介绍光的电磁本性被人们认识的过程。

一、红 外 线

我们已经知道,太阳光经过三棱镜的两次折射后,就会被分解成包括红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等七种颜色的光带。如果用灵敏的温度计放在光谱中各条色带的位置上,就会发现它们的温度各不相同。在波长最短的紫光一端温度计读数最低,而在波长最长的红光一端读数最高。如果把温度计继续向红光的外端暗区移动,就会发现温度比红光处更高,越往外移,其温度越高,直到出现一个最高的温度后才降低下去。这表明在太阳的辐射中除了可见光外,还存在着一种不可见的辐

射。实验表明,这种不可见的辐射不仅存在于太阳的辐射中,而且在其他物体发出的辐射中也普遍存在着。由于它是在红光的外端发现的,因而叫做红外辐射,又称红外线。

红外线的最显著的特性是它的热效应。当红外线被物体吸收之后,这部分辐射能就转化为物体的内能,物体的温度就会升高。任何物体都在热辐射,温度越高,辐射越强烈。对于一些温度较低的物体,如灼热的炉壁、汽车、飞机排出的废气等,虽然并不发射可见光,但却会发出大量的红外线。因此红外线的发现完全证实了恩格斯关于热和光是“一对双生子”的论断。

在研究光的干涉现象时,人们有意识地测量了其中的温度,证实了红外线也有干涉现象。这就表明红外线和光一样也具有波动性,并由此可以推出红外线的波长比可见光中的红光波长更长。红外线的波长范围是在 $0.75\sim 1000$ 微米之间。

有些物体象玻璃、水等对于可见光说来是透明体,但对于2微米以上的红外线却并不透明而将全部吸收。农业上用来育种或在冬季培育蔬菜的玻璃暖房(或温床)能保持较高的气温就是这个道理。因为在太阳辐射能中极大部分都包含在2微米以下的红外线和可见光中(图 16.1),它们能透过玻璃顶而进入暖房内部,不会有多大的损失。暖房里的土壤和农作物在这些太阳辐射的照射下温度逐渐升高,同时向外辐射波长在2微米以上的红外线。由于这些红外线不能透过玻璃顶,因此暖房内的热量就不容易发散到室外去。所以玻璃暖房就好比是一个能量的“陷阱”,它可以使太阳辐射能只进不出。

红外线是看不见的,但是我们可以用探测器来探测它的

存在。热电偶*是最常用的红外线探测器。在它的焊接点上装一块涂黑的金箔作为接收面,如果受到红外线的照射,金箔温度就要升高,于是在回路中就会产生温差电动势而引起电流,根据回路中电流强度的大小即可探测出红外线的强度。

红外线在工农业生产、国防、科研等各方面都具有广泛的应用。例如,农作物的种子经过红外线处理以后,发芽率高、生长快、产量高。我国东北某科研单位利用红外激光照射稻种,使水稻提前十五天成熟,成功地培育出适应在东北地区播种的水稻新品种。

在十九世纪后半叶,随着生产技术的不断发展,光学和电磁学也有了迅速的发展。通过一系列的实验,人们不仅证实了光的波动性,而且还证实了光波是横波。同时在电磁学方面发现了电磁感应现象,从理论上预示了电磁波的存在,并且证明了电磁波也是一种横波,它的传播速度等于光速。这就使人们很自然地会联想到光波和电磁波是否是一回事?后来人们不仅在实验室里成功地产生了无线电波,并利用类似的电磁设备产生了远红外线**,同时用红外线探测器接收到了微波,后来甚至用无线电振荡器产生了波长为几十微米和几百微米的微波与红外线基本相同。从此人们认识到可见光、红外线和无线电波在本质上没有什么差别,只是属于不同波长范围的电磁波而已。

二、紫 外 线

在太阳光谱紫光外端的暗区中也存在着一种不可见的辐

* 热电偶的装置详见第十一章第五节。

** 波长在0.75~3.0微米称为近红外区,3.0~30.0微米称为中红外区,30.0~1000微米称为远红外区。

射，叫做紫外辐射，或称紫外线。它的波长范围在0.001~0.4微米之间，比紫光还要短。

紫外线比红外线、可见光具有更强的化学效应，它能使感光板感光，因此人们常用照相探测器来研究紫外线。一般说来，高温物体都辐射紫外线，如太阳辐射中具有大量的紫外线；沸腾的钢水、电焊的火花以及日光灯中都具有紫外线。在第十四章中谈到的农业上用来诱杀害虫的黑光灯，也是一种紫外线的光源。紫外线同红外线不同，它不能透过普通玻璃，而要被强烈地吸收，但可以透过石英，因此黑光灯的灯管以及各种紫外线的光学材料多半是用石英玻璃或者高硼玻璃做的。

紫外线的最重要性质之一是能引起荧光现象。有些物质在紫外线的照射下会发出荧光，照射一停止，发光现象也同时消失。能发出荧光的物质叫做荧光物质。例如，日光灯发出的荧光是在它管壁上的荧光物质受到紫外线的照射而发出的。

同样，紫外线在工农业生产上有着广泛的应用。例如，在医学上紫外线常用来消毒、杀菌，许多病菌在紫外线的照射下只需几秒钟就被杀死。我们翻耕土地进行曝晒也是借助于太阳辐射中的紫外线来消灭土壤中有害的细菌。同时紫外线还能使胡萝卜素转化成为维生素甲、丁，因此缺乏紫外线照射的牲畜生长就会很慢，甚至患软骨病。经常让牛、马等牲畜晒太阳就可以促进它们对各种疾病的抵抗力。

一定量的红外线和紫外线对于人体健康是必须的。矿工和经常在室内工作的人员必须在紫外线灯下定时、定期地照射。但是过量地照射紫外线会使人的皮肤受到灼伤，甚至发生水泡。在炼钢和电焊工作过程中还必须避免让眼睛直接受到

紫外线的照射，应使用防护眼镜或防护面罩，以防止烧伤眼球；过量地照射红外线会使人发生热痉挛、中暑等现象。

三、电磁波谱

可见光、红外线、紫外线和无线电波一样都是电磁波。它们在真空中的传播速度都等于光速 C 。但是由于它们的波长范围不同，故根据波速、波长和频率的关系式(9.22)可知，它们在真空中的频率范围也就不同。

根据电磁理论可以得到电磁波在介电常数为 ϵ 和磁导率为 μ 的均匀介质中传播时，其速度 v 与在真空中的传播速度 C 的关系为

$$\frac{C}{v} = \sqrt{\epsilon\mu}。 \quad (17.13)$$

上式对于光波来说，也同样适用。把介质对于真空的折射率公式(16.8)代入上式，可得

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}。 \quad (17.14)$$

上式给出了物质的光学常数 n 、电学常数 ϵ 和磁学常数 μ 三者之间的关系，因而它进一步揭示了光的电磁本性，表明光现象是一种电磁现象，光波是一种波长很短的电磁波。

图 17.21 是按波长的长短(或频率的高低)排列的各种电磁波，叫做**电磁波谱**。它们由于波长和频率的不同，表现出许多不同的性质。例如从传播特性来看，波长越长，频率越低，衍射现象就越显著；波长越短，频率越高，传播的方向性就越强，即沿直线传播的特性就越突出。从能量来看，波长越短、频率越高，能量越大；波长越长，频率越低，能量越小。

无线电波具有显著的电磁效应，因而适用于广播、通讯；红外线、可见光、紫外线统称热辐射，具有显著的热效应；比紫外线波长更短的电磁波是 X 射线和 γ 射线，他们具有的能量

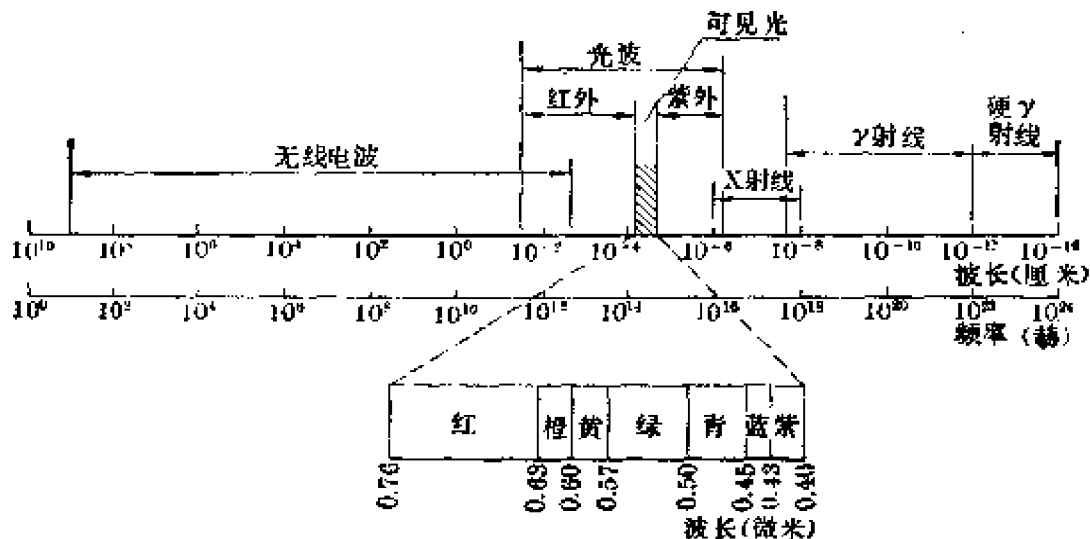


图 17.21 电磁波谱

特别大，对物体有很强的穿透能力。电磁波由于波长或频率范围的不同而引起的这一系列性质上的差别，完全符合自然界量变引起质变的辩证规律。

无线电波、热辐射、X射线和γ射线等电磁波，不仅波长或者频率范围不同，而且在来源上、探测方法上也各不相同。例如无线电波是由电磁振荡器通过天线发射出来的；而热辐射、X射线和γ射线则是由分子、原子、电子或核子等带电粒子在运动状态发生改变时辐射出来的。无线电波可以通过电学方法来探测；热辐射可以通过热学方法来探测；而热辐射与X射线、γ射线等还可以通过照相、荧光现象、光电效应等方法来探测。

习题 17.7 已知下列电磁波在真空中的波长，求其频率以及在水中的波长：

- (1) 无线电波，300 米；
- (2) 雷达波，1 厘米；
- (3) 绿光； 5.5×10^{-6} 厘米。

第四节 光电效应

一、光电保护装置

图 17.22a 是一台高速切纸机。它利用刀片不断地上下作往复运动来裁切迭放在工作台上的纸张。在操作时必须十分小心，否则容易发生切断手指的工伤事故。如果在高速切纸机上装一套光电继电器作为安全保护装置，就可以避免事故的发生。

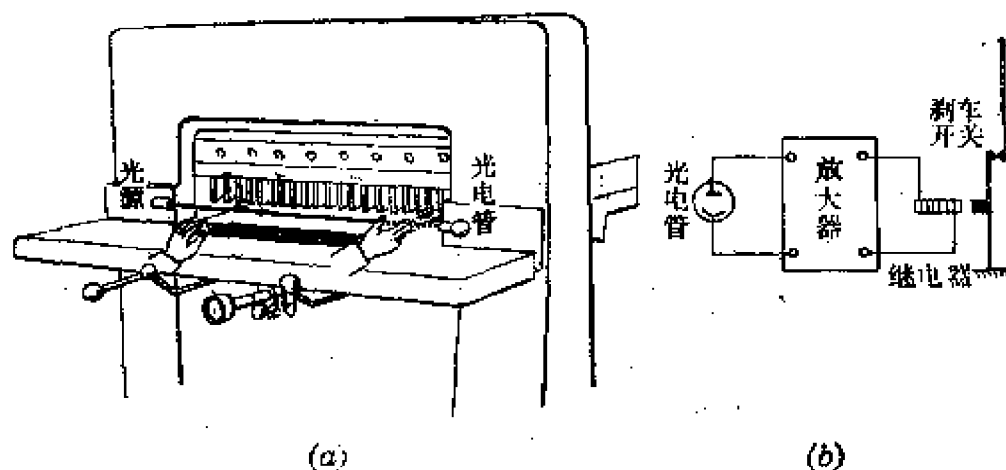


图 17.22 光电保护装置

这套光电保护装置的主要元件是一个装在工作台旁边的叫做光电管的光电转化元件(图 17.22a)。只要对面的光源，发出一道很窄的光束照射在光电管的阴极上，光电管内就有电流通过，线路就被接通(图 17.22b)。电流经放大器放大后，继电器就导通，切纸机就正常运转。如果操作时把手误伸到刀片的危险区内，光束就被手挡住，线路中的电流就由于光电管阴极不受光照而立即减小，继电器随即断开，从而接通了控

制刹车的线路,使切纸机立即停止运转,直到手离开危险区后才恢复运转。

所谓光电转化,就是把光的强弱转化成电流强度的大小,那么光电管是怎样实现光电转化的呢?早在八、九十年前,人们就发现用紫外线照射带负电的极板就会使极板上失去负电荷。后来又发现当光束照射在金属表面上时,也能使电子从金属表面逸出。这种现象叫做光电效应。光电管就是利用光电效应的原理来实现光电转化的。

图 17.23 是国产 GD-4 型光电管的外形和结构简图。它是一个抽成真空的玻璃泡,在玻璃泡的部分内壁上涂有感光金属层,叫做光电管的阴极 K ,与底座上的“-”极相连;玻璃泡中心部分装着一个小的半球形的金属阳极 A ,与底座的“+”极相连。把光电管接在几百伏的直流电路里(图 17.24),由于 K 、 A 间绝缘,电路中几乎没有电流通过。当一定频率的光束照射在阴极 K 上时,电路中就立即出现电流。这是由于在光束照射下阴极 K 的表面上有电子逸出。这些电子叫做光电子,在电场力的作用下向阳极 A 运动,就形成了电路中的电流,叫做光电流。光照一停止,光电流立即消失。

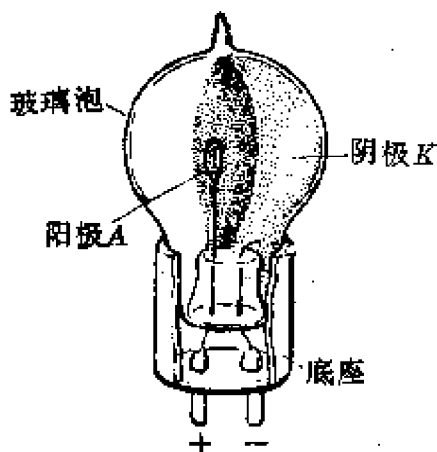


图 17.23 GD-4 型国产光电管

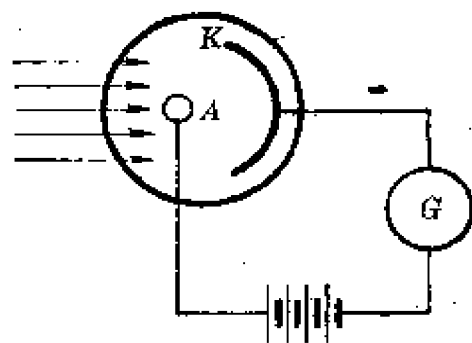


图 17.24

二、光电效应的基本规律

图 17.25 是一个用来研究光电效应基本规律的实验装置的线路图。图中的电压表 V 和灵敏电流计 G 是分别用来测量光电管两端的电压和光电流的；电位器 R 是用来调节光电管两端的电压。在入射光的光通量一定的情况下不断调节光电管两端的电压，同时记下相应的光电流的值。根据实验记录可以作出光电流 I 随光电管两端的电压 V 变化的曲线，叫做**光电流安特性曲线**（图 17.26）。从曲线上可以得出如下规律（其中曲线 a 、 b 、 c 的入射光强度不同， $E_a = 3E_0$ ； $E_b = 2E_0$ ）：

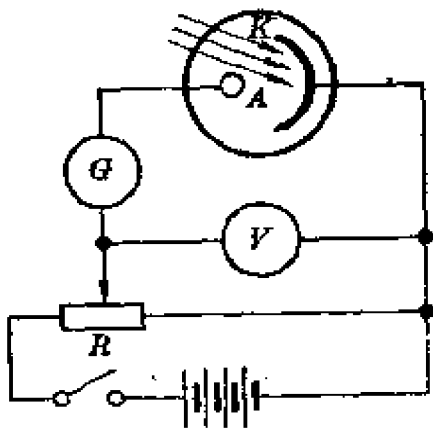


图 17.25

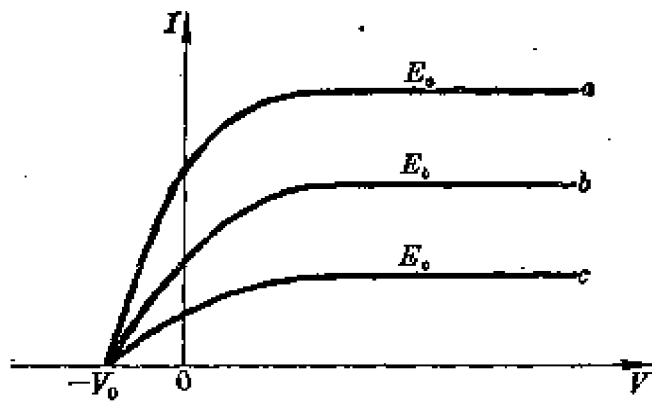


图 17.26 光电流安特性曲线

(1) 曲线 a 、 b 、 c 都趋于水平。表明在强度一定的入射光照射下，光电流 I 随着电压 V 的增大而增大，并趋近于一个饱和值，叫做**饱和光电流**。这是因为电压 V 对于从阴极逸出的光电子说来具有加速作用，随着电压 V 的增大，越来越多的光电子逸出而射向阳极，光电流 I 也随着增大。电压 V 增大到一定值时，所有从阴极逸出的光电子全部射向阳极，此时即使再增大电压 V ，光电流 I 也不再增大，光电流到达饱

和值。由此可见，饱和光电流反映了光电效应的强弱并与入射光的强度成正比。

(2) 曲线 a 、 b 、 c 与纵坐标轴并不交于原点。表明当电压 V 减小到零时，光电流并不等于零，即电路中还有一定的光电流存在。显然这部分光电子并没有受到电场力的作用，而是依靠本身在逸出阴极时的初速度运动而到达阳极的。

(3) 曲线 a 、 b 、 c 继续延伸到纵坐标轴的左方。表明如果改变电压的指向(即把电源正极与光电管阴极相连)，外电场就对光电子起阻力作用，这时从阴极逸出的光电子必须克服一定的阻力才能到达阳极。因此当电压反向增大到 V_0 时，光电流就减小到零。电压 V_0 叫做临界截止电压。曲线 a 、 b 、 c 的截止电压都相等表明截止电压与入射光的强度无关。根据截止电压的大小就可以推算出光电子从阴极逸出时初动能的大小，即

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = eV_0, \quad (17.15)$$

式中 m 、 v_0 和 e 分别表示电子的质量、初速度以及它所带的电量。

进一步的实验表明：如果改变入射光的频率(或波长)，截止电压也随着改变，截止电压随着入射光频率的增大而增大(图 17.27)。但是当入射光的频率低于某一临界值 ν_0^* 时，无论入射光的强度有多大，也不会发生光电效应。因此 ν_0 叫做光电效应的截止频率。对应于 ν_0 的波长 $\lambda_0 = C/\nu_0$ ，叫做光电效应的红限**。截止频率和红限都决定于阴极上感光物质的

* 根据习惯上的用法，光学中频率一般用希腊字母 ν 表示，读作“niu”。

** 红光在可见光中，波长最长，故通常就把“红”字代表长波。而红限是指长波一端的界限，它不一定是在红光波段以内。

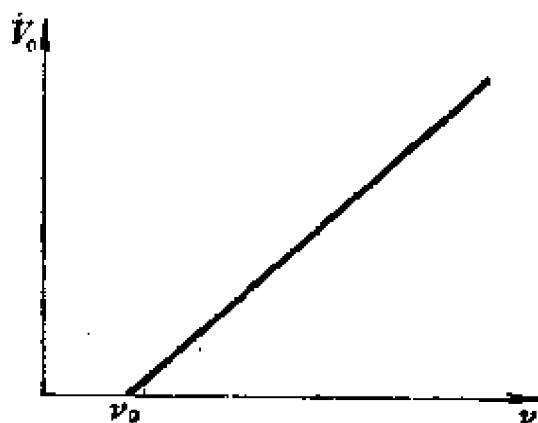


图 17.27

性质。表 17.1 列出了几种纯金属的红限。从表上可以看出，这些纯金属的红限都在可见光和紫外线的范围内。

表 17.1 几种纯金属的光电效应的红限(单位: 埃)

纯金属	铯	钾	钠	锂	锌	银	铂
红限	6600	5500	5400	5000	3720	2610	1962

实验还表明: 光电效应的延迟时间非常短, 几乎在 10^{-9} 秒以下。即使入射光的强度很小, 但只要一照射也就立即有光电子产生。这一特性使光电管非常适用于快速测量。

光电管除了可以用来作为光电保护装置外, 在生产自动控制方面也常用来作为光电计数、光电跟踪装置, 在光度测量和放射性测量方面也要用到它。此外运用光电管还可以把光信号转化为电信号。例如, 在有声电影胶片的边缘上有一条用明暗不同的条纹组成的声带(图 17.28), 在放映电影的同时, 从光源发出的光束通过移动着的声带, 光通量就发生强弱的变化, 由光电管接收后就转化成强弱不同的电流, 经放大器放大后, 由扬声器转化为声音放出, 这就是电影的配音。

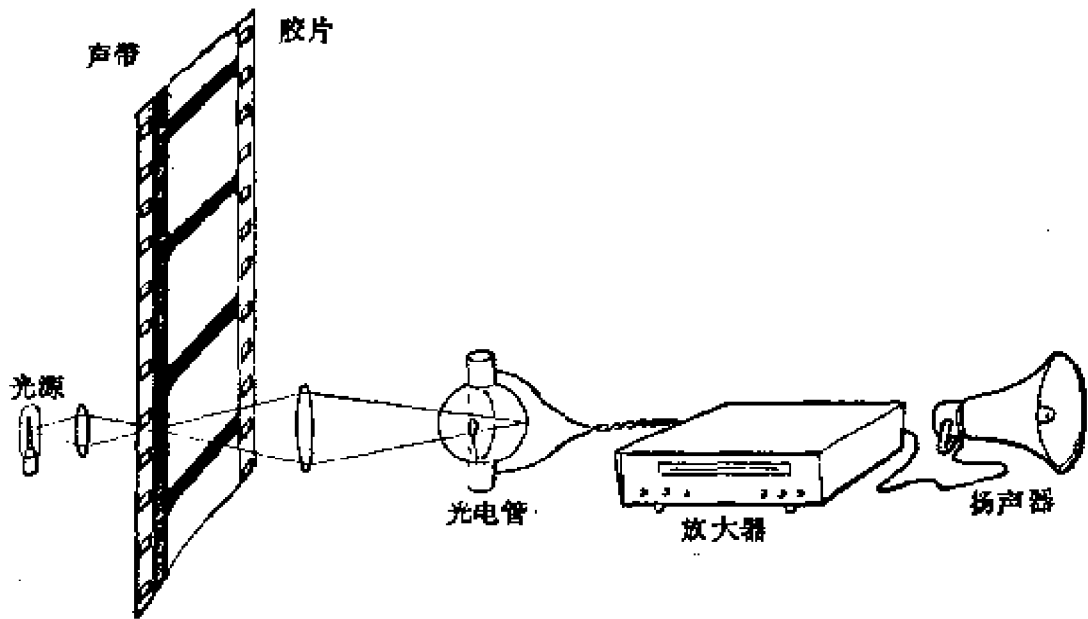


图 17.28

习题 17.8 有些光电管在接受入射光处为什么要装石英窗口?

习题 17.9 频率为 5×10^{14} 赫芝的入射光能使钠阴极发生光电效应吗?为什么?

第五节 光的波粒二象性

一、光电效应与光的波动理论的矛盾

光电效应一发现,人们就企图用光的波动理论来解释,但是都失败了。原来光电效应的实验规律与光的波动理论之间存在着尖锐的矛盾。

从能量上来分析,光电子显然是吸收了入射光的辐射能后才逸出金属表面的。但是电子要从金属内部逸出表面,必须克服金属中正离子对它的吸引而作功,这个功叫做逸出功,用字母 W 表示,通常是用电子伏特 (eV) 作为单位的。1 电子伏特就相当于 1 个电子通过 1 伏特的电位差时所获得的能量,即

1 电子伏特 = 1.6×10^{-19} 焦耳 = 1.6×10^{-12} 尔格。

实验表明：各种金属的逸出功是不同的。表 17.2 列出了几种纯金属的逸出功。如果光电子在逸出金属表面时还具有一定的初动能，那么根据能量守恒定律可知，电子从入射光中所吸收的能量 E 就等于它所作的逸出功和它在逸出金属表面时初动能之和*，即

$$E = \frac{1}{2}mv_0^2 + W。 \quad (17.16)$$

由于光电子的初动能可以按测得的截止电压来推算，因此将公式(17.15)代入上式，即可得出

$$E = eV_0 + W。 \quad (17.17)$$

表 17.2 几种纯金属的逸出功(单位：电子伏特)

金属	铯	钠	锂	银	铂
逸出功	1.90	2.28	3.47	4.73	6.30

另一方面，根据光的电磁波理论就无法解释：按照电磁波概念，当光照射金属板时，金属板内的电子能量应当决定于入射光的振幅，即光的强度，故电子的动能应随入射光强度的变化而变化。但是从公式(17.17)可以看出， W 是常量，电子所吸收的能量 E 只决定于截止电压 V_0 ，而 V_0 与入射光的强度无关；按电磁波的说法，不管什么频率的光，只要有足够的强度照射到金属板，应当都产生光电子。然而光电效应的实验事实表明，如果入射光的频率低于截止频率(或者波长长于红限)时，无论光的强度多大均不能产生光电子。

根据光的电磁波动理论，入射光的辐射能是连续分布的，

* 电子由于热运动而具有的能量甚小，相比之下可以忽略不计。

因而电子从光波中吸收的能量必须积累到一定的程度才能逸出金属表面，这就需要一定的时间。然而光电效应的实验规律表明，它的响应时间非常短，即使入射光的光强度非常小，但只要频率高于截止频率，一照射就立即有光电子产生。

光电效应与光的电磁波度之间的这一系列矛盾，使一些唯心主义者惊慌失措，悲叹“物理学定律和原理的普遍毁灭”，胡说“物理学的危机”来到了。但是唯物主义者却坚定地认为，出现矛盾是好事，人们在解决这些矛盾的过程中，必将进一步认识光的本性。

二、光子说

二十世纪初，爱因斯坦在光电效应的实验基础上，提出了光子说。指出光的辐射能并不象波动理论所认为的那样连续分布，而是一份一份地集中在一些叫做光子的粒子上。光是由大量光子组成的按光速运动的光子流。每个光子所具有的能量与它的频率成正比，即

$$E = h\nu, \quad (17.18)$$

式中比例常数 $h = 6.63 \times 10^{-34}$ 焦耳·秒，叫做普朗克常数。上式表明，对于频率不同的光束说来，它的光子的能量也不同。频率越高，光子的能量越大。

光子说很好地解释了光电效应。

按照光子说，当光照射在金属板上时，光子就与金属中的电子相互作用，电子是通过吸收光子而获得能量。电子吸收一个光子，就获得能量 $h\nu$ 。如果入射光的频率 ν 大于截止频率 ν_0 ，光子的能量就大于金属的逸出功，即 $h\nu > W$ ，电子就立即逸出金属表面，因而不需要积累能量的时间。不考虑电子在其他情况下损失的能量，按公式(17.16)可以列出

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_0^2 + W,$$

即
$$\frac{1}{2}mv_0^2 = h\nu - W. \quad (17.19)$$

这就是光电效应的公式,称为爱因斯坦公式。

按照光子说,入射在金属板上的光的强度就是单位时间内入射光的光子流的密度。光的强度越大,入射光的光子数就越多,金属中吸收光子能量的电子也越多,因而产生的光电子也就越多,饱和光电流就越大。所以饱和光电流与入射光的强度成正比。

把公式(17.15)代入上式,就可以得出截止电压与入射光频率的线性关系:

$$eV_0 = h\nu - W. \quad (17.20)$$

当入射光的频率等于截止频率 ν_0 时,截止电压 V_0 就等于零,于是可以列出截止频率和红限的公式分别为:

$$\nu_0 = \frac{W}{h}; \quad (17.21)$$

$$\lambda_0 = \frac{Ch}{W}. \quad (17.22)$$

[例题 17.3] 已知金属钨的逸出功为 4.5 电子伏特,问用频率为 5.1×10^{14} 赫芝的黄光来照射能产生光电效应吗?

解:要知道会不会产生光电效应,首先必须找出金属钨的截止频率,根据公式(17.21)可以算出金属钨的截止频率

$$\nu_0 = \frac{W}{h} = \frac{4.5 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} = 1.08 \times 10^{15} \text{ 赫芝}.$$

可见黄光频率远小于金属钨的截止频率,因而光电效应不会产生。

三、光的波粒二象性

我们从光的干涉、衍射等现象中得出光具有波动性质,是电磁波;又从光电效应中证实光具有粒子性质。那么光究竟是什么?

多少年来,人们企图用光的波动性来解释光电效应,或者用光的粒子性去解释光的干涉、衍射,结果都没有成功。事实表明光是一种波长很短的电磁波,但又是粒子,具有波动和粒子双重的性质。这种性质叫做波粒二象性。

波动性和粒子性都是光的属性,它们总是同时存在的。但是在某些场合下,可能某一方面的属性比较明显;而在另一些场合下,另一方面的属性又显得比较突出。例如,光在传播过程中,会发生干涉、衍射现象,这时波动性就比较明显;而在与其他物质相互作用发生能量交换时如光电效应,粒子性就比较突出。此外光的波长不同,它的波动性和粒子性的表现也不同。波长越长,越容易发生衍射现象,波动性越明显;但是波长越长,光子的能量就越小,就越不容易发生光电效应,粒子性就越不明显。反过来,波长越短,波动性越不明显,而粒子性却越明显。

恩格斯指出:“辩证法不知道什么绝对分明的和固定不变的界限,不知道什么无条件的普遍有效的‘非此即彼!’”。光的波动性和粒子性既是有区别的,但它们之间也存在着一定的联系。例如光子的能量就是与光束的频率成正比的,因此公式(17.18)就把光的粒子性与波动性联系起来。

近代物理的研究表明,不仅光具有波粒二象性,而且象原子、中子、电子等微观粒子也都具有波粒二象性。可见波粒二象性是一切微观粒子的共同属性。

应当指出，这里我们所谈的光的粒子性和波动性与牛顿的微粒说和惠更斯的波动说是有本质的区别。他们都是在机械运动的基础上来讨论光的本性问题的。在牛顿、惠更斯的那个时代，由于生产技术和科学实验水平的限制，因此人们对光的认识就有一定的局限性，这是很自然的。但是，他们的哲学思想是形而上学的、机械论的，故他们对光本性的认识必然是错误的。同时也清楚地看到，总有一些资产阶级的学者，无论在何时何地总是认为他们已经穷极了物理学的全部内容，故当一些新的物理现象一旦出现就拼命地想方设法要把它纳入原有的理论，死抱住原有的理论不放，这当然是办不到的！接着他们就惊恐失措，散布悲观的论点，对物理学的发展起了阻碍的作用；相反，自觉或不自觉地坚持唯物主义辩证法的人，对原有的理论暴露出来的种种矛盾表示高兴，坚持对原有的理论进行革新，从而抓住了隐藏在新现象后面的新理论，对物理学的发展起了促进的作用。人们对光本性的认识过程是如此，整个物理学的发展何尝不是如此！

自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。今天，人们对于光本性的认识也决不是已经穷极了，随着生产技术和科学实验水平的提高，人们对光的本性的认识必将更加深化。我们必须认真学习马列著作和毛主席著作，坚持辩证唯物主义，识别形形色色的唯心主义和形而上学，认真改造世界观，在农村这个广阔天地里，战天斗地，努力为建设社会主义的新农村而作出贡献。

习题 17.10 光子说是怎样解释光电效应的？

习题 17.11 波长为 7000 埃的光束的光子具有多大的能量？

习题 17.12 已知铜的截止频率为 1.1×10^{15} 赫芝，当频率为 1.5×10^{15} 赫芝的光投射在铜板上，能产生光电效应吗？这时光电子的初动能有多大？

复 习 题

习题 17.13 什么叫做光的干涉现象? 什么叫做光的衍射现象? 试述产生光的干涉和衍射的条件。

习题 17.14 在两块平行平晶的一端夹入一条玻璃丝, 今以波长为 5890 埃的钠黄光垂直照射, 恰好数到 8 条干涉明条纹, 试求玻璃丝的直径。

习题 17.15 光栅衍射和单缝衍射有什么区别?

习题 17.16 红外线、紫外线、X 射线和 γ 射线各有什么重要特性?

习题 17.17 光电效应有哪些规律? 这些规律与光的波动理论有什么矛盾?

习题 17.18 当波长为 4000 埃的单色光照射在金属铯上, 求放出的光电子的初速度有多大。已知电子的质量 $m=9.11 \times 10^{-31}$ 公斤, 忽略电子质量的变化。

附录：习题答案

第九章

- 9.2 $a = -\omega^2 y = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi)$ 。
9.3 $y = 0.2 \sin\left(4\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$; 0.5 秒; 2 赫芝; 1.895 焦耳(取 $\pi^2 = 9.87$)。
9.4 (1) 0.5 米, 0.66 秒; (2) 0.3535 米; (3) -0.3535 米;
(4) 8.88 焦耳。
9.5 $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$; $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ 。 9.9 1470 公里。
9.10 0.77 米; 3.29 米。 9.13 135 米。 9.14 11.9 米/秒。
9.16 \bar{v}_m ; 0.02 秒; 50 赫芝; 100π 弧度/秒; $0, 2/3\pi, 4/3\pi$ 弧度。
9.17 $y = 2\sqrt{3} \sin\left(3t + \frac{\pi}{6}\right)$ 。

第十章

- 10.8 8.2×10^{-8} 牛顿。 10.10 负电。 10.14 -5×10^{-6} 焦耳;
 -8×10^{-7} 焦耳。 10.15 -6 伏; -1.2 伏。
10.16 15 千伏。 10.23 (1) 4×10^6 牛顿/库仑(方向指向
-q); (2) 0。 10.24 1.6×10^{-19} 焦耳。

第十一章

- 11.4 (b) 正确。 11.6 16.25 欧姆。 11.7 23.2 欧姆。
11.8 7.8 欧姆。 11.10 1.09 安培。 11.11 119.6 伏特。
11.13 18.3 安培 > 10 安培, 不能。 11.16 利用 3 个 $3.3\text{k}\Omega$
并联。 11.17 用 6 个蓄电池串联。
11.18 0.743 伏; 0.497 伏。 11.19 $0.142\text{k}\Omega$ 。
11.20 1 伏; 0.5 安。 11.21 0.5 安。 11.22 4 欧姆。
11.23 3600000 焦耳。 11.24 4.8 度。 11.25 0.22 安;
48.4 瓦。 11.26 10 瓦。 11.27 345.6 度。

- 11.28 348.5 千卡。 11.29 200 瓩。 11.30 串联时, 铁丝较热; 并联时, 铜丝较热。 11.31 10 安; 0.25、6、3.75 安。 11.32 3.6°C。 11.33 16 欧姆。
- 11.34 283 欧; 114、183 毫安。 11.35 K 接通后 A 读数增大; V_1 、 V_2 读数都增大, 而 V_3 读数减小。
- 11.37 40 瓦较亮。

第十二章

- 12.7 (1) 1.256×10^{-3} 韦伯/米²; (2) 2.468×10^{-3} 韦伯。
- 12.11 (a) 2.5×10^{-3} 牛顿; (b) 1.77×10^{-3} 牛顿; (c) 0。
- 12.12 10^{-3} 米·牛顿。 12.13 (1) 240 千欧; (2) 0.3 欧。
- 12.14 6.78、1.27、0.42 欧。 12.15 4 千欧。
- 12.17 3.69×10^7 米/秒; 4.13×10^{-14} 牛顿。
- 12.19 5×10^{-8} 韦伯/米²。 12.20 47.7 毫安; 95.4 安。
- 12.21 (1) 7.07 韦伯/米²; (2) 3.535×10^{-4} 韦伯。
- 12.25 (1) 0.01 牛顿; (2) 0.001 米·牛顿; (3) 0.02 米·牛顿。
- 12.26 并联 2.02 欧; 串联 124.75 千欧。

第十三章

- 13.3 (a) 往左; (b) 往右; (c) 往外; (d) 往里。
- 13.4 0.045 伏。 13.5 1.5 伏; 1.5 毫安。
- 13.7 $e = 98.91 \sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{3}\right)$ 。
- 13.8 311 伏, 10 安; 220 伏, 7.09 安; 50 赫芝; 0.02 秒; $-\frac{\pi}{3}$, $-\frac{\pi}{6}$ 弧度; $-\frac{\pi}{6}$ 弧度。
- 13.9 (a) 三相四线制星形连接; (b) 三相三线制三角形连接。
- 13.11 1.25 亨利; 指向相反。 13.15 28.9、3184 欧姆。
- 13.16 50 伏; 150 瓦; 0.6。 13.17 79.6 欧、99.7 欧、2.21 安。
- 13.18 0.4545。 13.20 70 伏。 13.22 2.99 瓩。
- 13.24 227.3、131580 安。 13.26 222 伏、222 伏、6.8 伏、5.4 伏。 13.28 0.132 伏。
- 13.29 15 微法、900 伏; 60 微法、450 伏。

- 13.30 100 欧; 96 欧。 13.31 18.6 安、93 伏、690 瓦。
 13.32 50 欧、4.4 安、774.4 瓦。 13.33 9104 伏; 0.694,

第十六章

- 16.1 10^5 流明。 16.2 90 烛光。 16.3 0.707 米。
 16.4 0.967 米。 16.7 27.5 光年。 16.8 45° ; 60° 。
 16.10 象在镜面前 26.7 厘米处, 是缩小了的倒立的实象。
 16.12 $0^\circ, 0^\circ$ 。 16.13 1.47。 16.14 第一种为光密介质。
 16.15 19.5° 。 16.16 62.7° 。 16.18 15.7 厘米; 23 倍。
 16.19 3.63 米。 16.20 3.04 度。 16.21 -23.3 厘米;
 3.3 倍。 16.22 100 倍。 16.23 24 厘米。
 16.26

物 距	象 距	放 大 率	象的性质
$u \rightarrow \infty$	$v = f$	$K \rightarrow 0$	一点
$u > 2f$	$f < v < 2f$	$K < 1$	倒立实象
$u = 2f$	$v = 2f$	$K = 1$	倒立实象
$f < u < 2f$	$v > 2f$	$K > 1$	倒立实象
$u = f$	$v \rightarrow \infty$	$K \rightarrow \infty$	不成象
$0 < u < f$	$v < 0$	$K > 1$	正立虚象

第十七章

- 17.2 1.04 米。 17.3 (考虑半波损失) 1.326 微米。
 17.4 (考虑半波损失) 2.461 微米。 17.6 5898 埃。
 17.7 (1) 10^8 赫芝, 200 米; (2) 3×10^6 赫芝, 0.66 厘米;
 (3) 5.45×10^{18} 赫芝, 3.66×10^{-5} 厘米。
 17.11 2.84×10^{-19} 焦耳。 17.12 2.65×10^{-19} 焦耳。
 17.14 (考虑半波损失) 2.209 微米。
 17.18 6.63×10^6 米/秒。

