



普通高中教科书

物理

WULI

选择性必修

第二册



上海科学技术出版社

普通高中教科书

物理

选择性必修

第二册

上海科学技术出版社

主 编：蒋最敏 高 景

本册主编：严 明

编写人员：（以姓氏笔画为序）

王肇铭 严 明 李沫东 陈琪琪 赖佳颖

责任编辑：施 成 金波艳 李林高

美术设计：房惠平

普通高中教科书 物理 选择性必修 第二册

上海市中小学（幼儿园）课程改革委员会组织编写

出 版 上海世纪出版（集团）有限公司 上海科学技术出版社

（上海市闵行区号景路 159 弄 A 座 9F-10F 邮政编码 201101）

发 行 上海新华书店

印 刷 上海新华印刷有限公司

版 次 2023 年 8 月第 1 版

印 次 2024 年 8 月第 2 次

开 本 890 毫米 × 1240 毫米 1/16

印 张 8.5

字 数 180 千字

书 号 ISBN 978-7-5478-5295-8/G · 1033

定 价 10.70 元

版权所有 · 未经许可不得采用任何方式擅自复制或使用本产品任何部分 · 违者必究

如发现印装质量问题或对内容有意见建议，请与本社联系。电话：021-64848025，邮箱：jc@sstp.cn

全国物价举报电话：12315

声明 按照《中华人民共和国著作权法》第二十五条有关规定，我们已尽量寻找著作
权人支付报酬。著作权人如有关于支付报酬事宜可及时与出版社联系。



目 录

第五章 · 磁场	1
第一节 安培力	2
第二节 洛伦兹力	10
第三节 带电粒子在匀强磁场中的圆周运动	16
第六章 · 电磁感应定律	29
第一节 楞次定律	30
第二节 法拉第电磁感应定律	38
第七章 · 电磁感应定律的应用	55
第一节 自感现象和涡流现象	56
第二节 交变电流	62
第三节 变压器	69
第四节 发电机和电动机	77

第八章 · 电磁振荡与电磁波 85

第一节 麦克斯韦电磁场理论	86
第二节 电磁波的产生与发射	91
第三节 电磁波的传播和接收	95
第四节 电磁波的应用	102

第九章 · 传感器 111

第一节 传感器及其敏感元件	112
第二节 常见传感器的工作原理	116
第三节 传感器的应用	122

第五章

磁 场

磁场是广泛存在的，地球、其他行星、恒星、星际空间和星系际空间都存在着磁场。甚至在人体内，伴随着生命活动，一些组织和器官也存在微弱的磁场。磁现象与日常生活密切相关，如磁浮列车、磁条银行卡、发电机、电动机、扬声器……都离不开磁现象。在现代科学技术中磁的应用也比比皆是，如电磁炮、质谱仪、回旋加速器、热核聚变装置、磁传感器……无不与磁现象有关。

必修课程中我们已经学习了磁场、磁感应强度以及磁通量等概念。在本章中将认识安培力和洛伦兹力；通过实验探究安培力；用洛伦兹力分析带电粒子在磁场中的运动；了解安培力和洛伦兹力的应用。本章的学习有助于提升电磁场的物质观念及运动与相互作用观念。本章的内容也是学习电磁感应及其应用的基础。

第一节 安培力

上海科技馆的智慧之光展区有一个叫做“电磁炮”的体验展品，如图 5-1 所示。“炮弹”是一个金属球。当你按下按钮，“炮弹”就会从炮筒中射出，根据“炮弹”击中“目标靶”的情况在屏幕上显示你的得分。

在学习必修课程时我们已经知道通电导体在磁场中会受外力的作用，“电磁炮”就是利用磁场对通电导体的作用力，从而沿导轨加速发射抛射体。



图 5-1 “电磁炮”体验展品

▶ 磁场对通电导体的作用

自主活动

在蹄形磁体的两极之间放置一对平行导轨；导轨两端接在电源上，在两导轨之间垂直于导轨放置一段电阻较小的导体棒。闭合开关，使导体棒通电，观察导体棒的运动情况（图 5-2）。

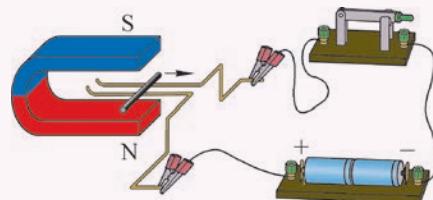


图 5-2 磁场中通电导体棒的运动情况

我们会看到通有电流的导体棒立即沿着导轨加速运动起来，这说明通电导体在磁场中受到力的作用，安培首先通过实验总结出这个力的特点。人们把通电导体在磁场中受到的力称为安培力 (Ampere's force)。下面我们来仔细探究安培力的方向和大小。

▶ 安培力的方向

安培力的方向、磁场方向和电流方向三者之间有什么样的关系呢？

自主活动

继续使用如图 5-2 所示的实验装置，自行设计探究方案。观察导体棒的运动情况来确定安培力方向，填写数据记录表（表 5-1）。表中的方向用“向上”“向下”“向左”“向右”“垂直纸面向里”或“垂直纸面向外”来记录。

表 5-1 数据记录表

实验序号	磁场方向	_____ 方向	_____ 方向
1			
2			
3			
4			

从上述实验现象分析归纳出安培力的方向、磁场方向和电流方向三者间的关系是：

实验表明，安培力的方向既与磁场方向垂直，又与电流方向垂直。或者说，安培力的方向总是垂直于磁感线和通电导体所在的平面。上述活动的实验结果与理论是一致的。

磁场方向、电流方向和安培力方向这三者之间的关系可以用**左手定则 (left-hand rule)** 来判定。如图 5-3 所示，伸开左手，让大拇指跟其余四指垂直，并且都与手掌在同一平面里；把左手放入磁场中，让磁感线穿过掌心，使四指指向电流方向，这时大拇指所指的就是安培力的方向。

如果调整图 5-2 实验装置中蹄形磁体的方位，使其磁场方向与通电导体棒方向平行，我们可以观察到导体棒在磁场中不受安培力作用的情形。

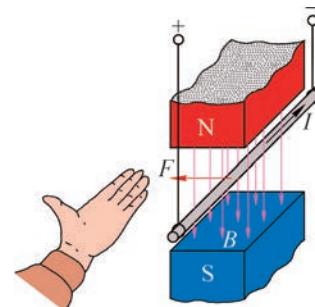


图 5-3 左手定则

► 安培力的大小

安培力的大小与什么因素有关呢？

自主活动

如图 5-4 所示，将线圈放入磁场中，使线圈平面垂直于磁感应强度；线圈上端是测量安培力大小的力传感器，力传感器与线圈连接。由于在磁场中竖直两侧导线的安培力相互抵消，测量到的安培力是磁场中水平导线受到的安培力。利用电流传感器来测量线圈中电流的大小。

把学生电源、滑动变阻器、电流传感器、开关和线圈连接成闭合电路。

闭合开关，调节滑动变阻器阻值改变电路中的电流，得到电流与对应安培力的关系图线，如图 5-5 所示，发现安培力大小与电流成正比。

改变通电导线在磁场中的长度（实验时通过改变线圈的匝数来实现），得到安培力大小与导线匝数关系的图线，如图 5-6 所示，发现安培力大小与导线长度成正比。

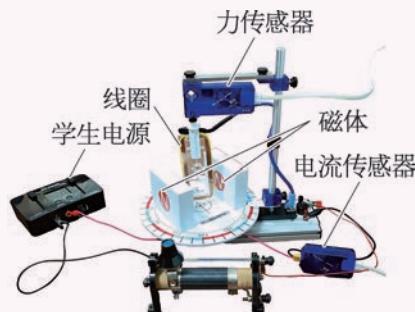


图 5-4 探究安培力的大小

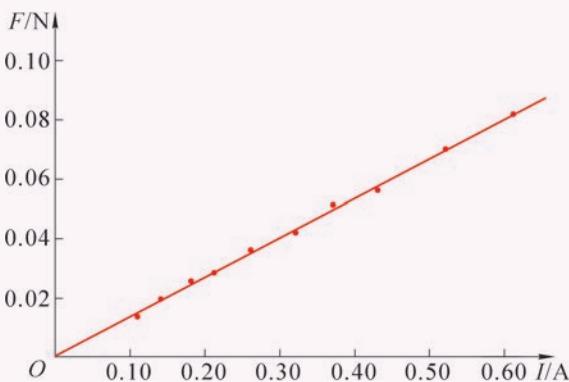


图 5-5 安培力与电流的关系

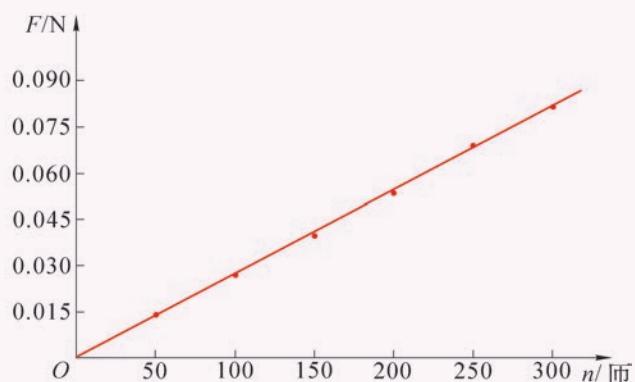


图 5-6 安培力与导线长度（线圈匝数）的关系

科学家发现：在匀强磁场中，当通电导线与磁场方向垂直时，安培力 F 最大，其大小跟磁感应强度 B 、电流 I 和垂直于磁场方向的直导线的长度 L 都成正比。在国际单位制中

$$F = BIL$$

当导线的方向与磁感应强度 B 的方向平行时，导线受力为零。

示例 1 如图 5-7 所示是电流天平原理示意图，使用电流天平可测量通电导线在磁场中所受的安培力。长方形线圈 $abcd$ 共绕 15 匝，底边 bc 长 5 cm，挂在等臂天平的左端，并使线圈的 bc 边水平地悬于某一匀强磁场中，线圈平面跟磁场垂直。先使天平保持平衡，然后在线圈内通入 0.5 A 的电流，天平失去平衡。设此时右盘上升，为使天平重新达到平

衡，需在右端盘内再加入 37.5 g 砝码。求：

- (1) 线圈中电流的方向；
- (2) 匀强磁场的磁感应强度大小。

分析： n 匝线圈通过电流 I 受到的安培力可以等效为单匝线圈通过 nI 大小的电流受到的安培力。

解：(1) 线圈通电流后， ab 边和 cd 边在磁场部分所受的安培力沿水平方向等值反向而彼此平衡； bc 边所受安培力方向应竖直向下，才会导致右盘上升而使天平失去平衡，由左手定则可判断线圈中的电流方向是 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 。

(2) 由于天平两臂等长，为使天平重新平衡， bc 边 n 匝导线所受的安培力应该等于天平右端增加的砝码的重力。设 bc 边长为 L ，通过线圈的电流为 I ，匀强磁场的磁感应强度为 B ，天平右端增加的砝码质量为 Δm ，则有

$$nBIL = \Delta mg$$

由此可得匀强磁场的磁感应强度

$$B = \frac{\Delta mg}{nIL} = \frac{37.5 \times 10^{-3} \times 9.8}{15 \times 0.5 \times 0.05} \text{ T} = 0.98 \text{ T}$$

示例 2 如图 5-8 所示，相距 $L=10 \text{ cm}$ 的两条平行导轨组成的平面与水平面夹角 $\theta=30^\circ$ ，导轨两端 M 、 N 间接一电动势 $E=3 \text{ V}$ 、内阻 $r=0.5 \Omega$ 的电源，垂直于导轨平面有一匀强磁场，将质量 $m=10 \text{ g}$ 的金属棒垂直放在平行导轨上，金属棒恰能静止不动。若两导轨间金属棒的电阻 $R=1 \Omega$ ，试回答：

- (1) 垂直于导轨平面的磁场方向是向上还是向下？
- (2) 磁场的磁感应强度大小是多少？(导轨与金属棒接触良好，导轨与金属棒间摩擦力以及导轨电阻不计)

分析：以平行导轨上的金属棒为研究对象进行受力分析。由闭合电路欧姆定律求电流，由力的平衡条件求安培力，由安培力公式求磁感应强度。

解：(1) 以金属棒为研究对象，金属棒在导轨上处于平衡状态，受到重力 mg 、弹力 F_N 和安培力 F 的作用。因磁场垂直于导轨平面，电流垂直于导轨，安培力 F 的方向平行于导轨。再由力的平衡条件可知，安培力应平行于导轨向上，如图 5-9 所示。而电流方向已知，由左手定则可判断磁感

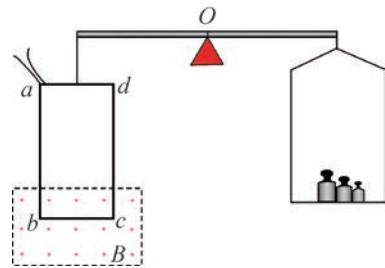


图 5-7 电流天平原理示意图

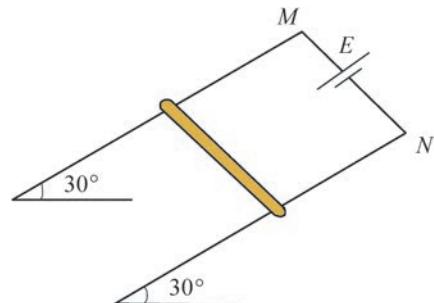


图 5-8 磁场中静置于导轨上的导体棒

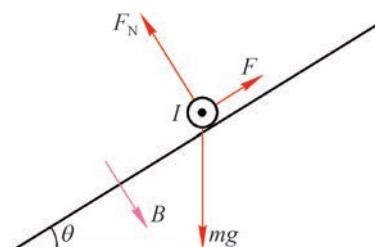


图 5-9 导体棒的受力图

应强度的方向应垂直于导轨平面向下。

(2) 由于金属棒处于静止状态, 则根据力的平衡条件, 金属棒所受重力在斜面方向上的分力与安培力大小相等、方向相反, 设通过金属棒的电流为 I , 则有

$$mg \sin \theta = BIL$$

在电源、导轨、金属棒构成的回路中, 由闭合电路欧姆定律 $I = \frac{E}{R + r}$, 代入得磁感应强度

$$B = \frac{(R + r) mg \sin \theta}{LE} = \frac{(1 + 0.5) \times 10 \times 10^{-3} \times 9.8 \times 0.5}{0.1 \times 3} \text{ T} \approx 0.25 \text{ T}$$

► 安培力的应用

安培力在生产、生活等各方面都有广泛应用, 通过如下几个实例可见一斑。

1. 磁电式电表

磁电式电表是指针式电表。无论是指针式电压表还是电流表或多用电表, 原理都是利用磁场对通电小线圈的安培力使线圈偏转带动指针指示示数, 从而达到测量的目的, 所以这类电表叫做磁电式电表。

这种电表的基本结构如图 5-10 所示。在一个磁场很强的蹄形磁体的两极间有一个固定的圆柱形铁芯, 铁芯外面套有一个可以绕轴转动的铝框, 铝框上绕有线圈, 铝框的转轴上装有两个螺旋弹簧和一个指针。线圈的两端分别接在这两个螺旋弹簧上, 被测电流经过弹簧流入线圈。如图 5-11 所示, 蹄形磁体两极和铁芯间的磁场是均匀地沿半径方向分布的。不管通电线圈转到什么角度, 线圈平面都跟磁感线平行。当电流通过线圈的时候, 线圈上跟铁芯轴线平行的两边都受到安培力, 由左手定则可以判定, 这两个力方向相反, 使线圈发生转动。线圈转动时, 螺旋弹簧变形, 阻碍线圈的转动, 阻力大小随线圈转动角度的增大而增大, 从而使指针稳定在相应的偏转角度。

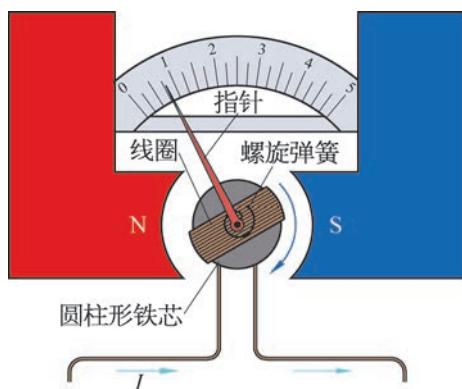


图 5-10 磁电式电表的基本结构图

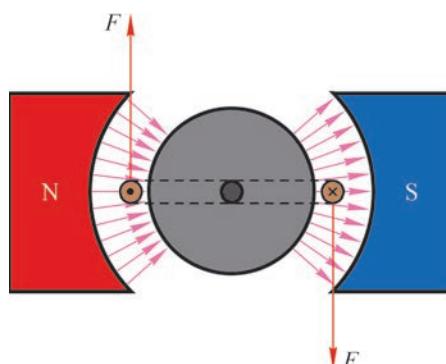


图 5-11 通电线圈在安培力作用下发生转动

磁场对电流的作用力跟电流成正比，因而线圈中的电流越大，安培力也越大，线圈和指针偏转的角度也就越大。根据指针偏转角度的大小，可以知道被测电流的大小。当线圈中的电流方向改变时，安培力的方向也随着改变，指针的偏转方向也随着改变。

磁电式电表的优点是灵敏度高，可以测出很微弱的电流；缺点是由于线圈的导线很细，允许通过的电流很小（几十微安到几毫安）。通过电流较大时，通常需用串联电路限流或并联电路分流。

2. 动圈式扬声器

扬声器是一种将电信号转换成声音的器件，可以是单个或由多个组成音响组。动圈式扬声器的结构如图 5-12 (b) 所示，线圈（音圈）安放在磁体磁极间的空隙中能够自由运动，按音频变化的电流通过线圈，线圈在磁场中受到安培力作用使线圈运动，运动的方向和大小根据输入信号的大小和方向而变化。纸盆与线圈连接，线圈带动纸盆振动，从而产生声音。

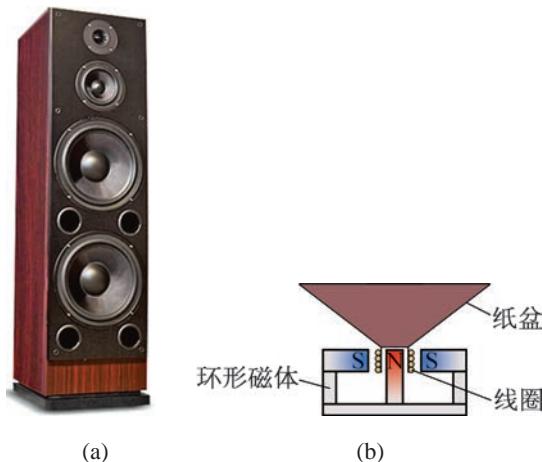


图 5-12 动圈式扬声器及原理简图

3. 电磁炮

传统的化学能火炮在发射过程中，后部的火药被点燃，造成气体体积迅速膨胀，推动弹体在炮膛里加速前进。传统的化学能火炮的射程受到出膛速度的限制。电磁炮是利用电磁系统中磁场产生的安培力来对抛射体（金属炮弹）加速，使其获得打击目标所需的动能。与传统的化学能火炮相比，电磁发射可大大提高炮弹的出膛速度和射程。电磁炮的基本原理如图 5-13 所示，抛射体与导轨有良好的电接触，导轨与电源连接，构成回路。通过给导轨回路通以很大的电流，可使抛射体在导轨电流产生的磁场的安培力作用下沿导轨加速运动，最终以很高的速度将抛射体发射出去。

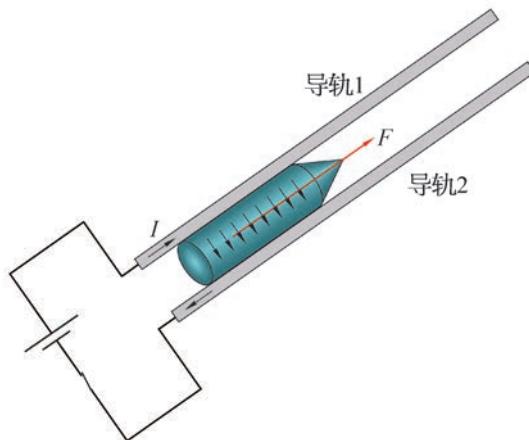


图 5-13 电磁炮原理图

问题与思考

1. 图 5-14 中各图已经分别标明电流 I 、磁场 B 和安培力 F 这三个物理量中的两个量的方向，试在图中标出第三个量的方向。

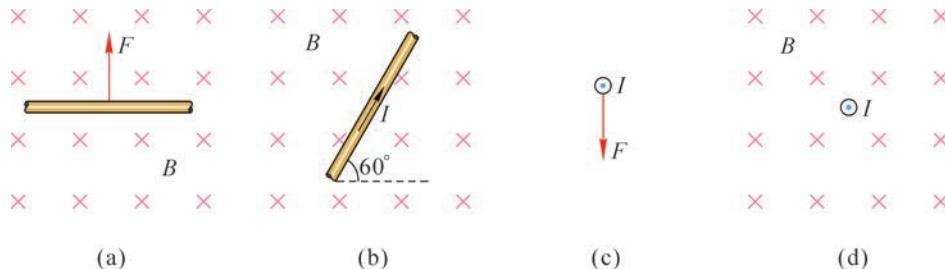


图 5-14

2. 如图 5-15 所示，在磁感应强度为 4×10^{-2} T 的匀强磁场中有一根与磁场方向垂直、长 8 cm 的通电直导线 ab。通电直导线 ab 所受的安培力大小为 1×10^{-2} N，方向垂直纸面向外，导线中电流的大小为多少？方向如何？

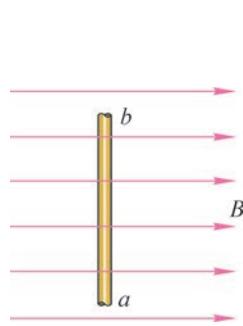


图 5-15

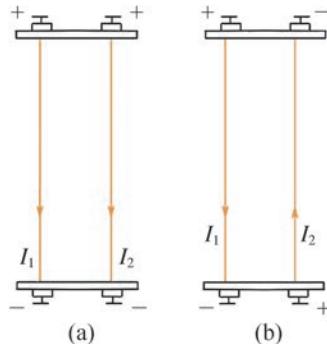


图 5-16

3. 有两根通电平行直导线，分别通入如图 5-16 所示的同方向电流和反方向电流。两根平行直导线之间是否存在相互作用力？如存在，作用力的方向如何？用虚线在图中大致描绘出通电后两根导线的实际形状。

4. 如图 5-17 所示，导线 ab 长 20 cm，用两根平行的、相同的弹簧将 ab 水平挂起，弹簧间有沿水平方向垂直于纸面向里的匀强磁场，磁场区域宽度 10 cm，磁感应强度大小为 0.5 T，导线 ab 所受重力大小为 0.1 N。为了使弹簧不发生形变，导线内电流的方向和大小应如何？

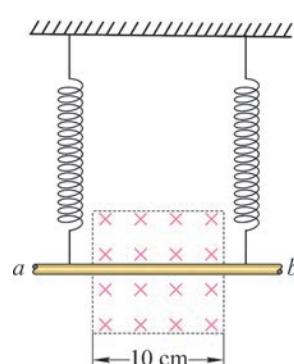


图 5-17

5. 如图 5-18 所示是一种磁电式仪表的原理图，可以用它来测量电流的大小。 P 是带指针绕在铁芯上可转动的线圈，线圈置于磁场中， A 、 B 为两个接线柱。如指针向右偏转，电流从哪个接线柱流入电表？

6. 电磁炮基本原理如图 5-13 所示。抛射体可沿平行轨道自由移动，并与轨道保持良好的电接触。电流从一条轨道流入，通过导电的抛射体后从另一条轨道流回。轨道电流可在抛射体处形成近似垂直于轨道面的磁场，磁感应强度的大小与电流成正比。抛射体在轨道上受到安培力的作用而沿导轨加速射出。如欲使抛射体的出射速度增加，理论上可采用哪些办法？

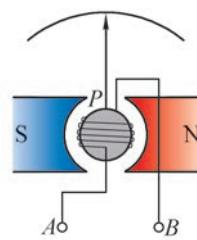


图 5-18

第二节 洛伦兹力

在地球南北两极附近的高空，夜间常会出现美丽灿烂的光辉，这种壮丽动人的光辉叫做极光。如图 5-19 所示就是一张极光照片。大多数极光出现在地球上空 $90 \sim 130\text{ km}$ 处。我们该去哪儿才能欣赏到极光呢？目前公认的是在南北纬 67° 附近的两个环带状区域内。纬度低的地方观察到极光的机会很少。

极光现象的产生与带电粒子在磁场中的运动有关。我们已经知道安培力是磁场对通电导体的作用力，而电流是由于电荷的定向运动而形成的。由此我们也可以设想，磁场对运动电荷会有作用力。

▶ 磁场对运动电荷的作用

如图 5-20 所示的实验装置叫做阴极射线管。如果在阴极射线管的两极间加上高电压，其阴极会发射电子，并会在电场的作用下向阳极高速运动，形成电子束。利用荧光屏可清晰地显示出电子束运动的径迹。当电子束周围没有磁场时，电子束沿直线前进；当蹄形磁体移至射线管旁边时，电子束运动的径迹就发生了弯曲，如图 5-21 所示。电子束在磁场中会发生偏转，运动方向改变说明受到力的作用。这表明电子受到了磁场力的作用。人们把运动电荷在磁场中所受到的力以荷兰物理学家洛伦兹（H. A. Lorentz, 1853—1928）的姓氏命名，称为洛伦兹力（Lorentz force）。

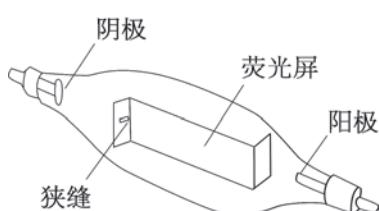


图 5-20 阴极射线管结构



图 5-19 极光现象

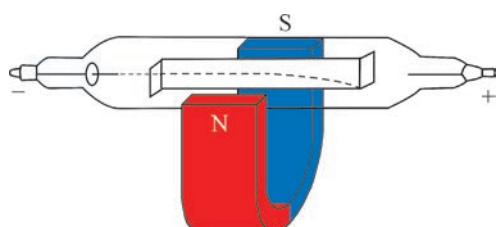


图 5-21 电子束在磁场中偏转

► 洛伦兹力的大小

实验和理论都表明，电荷量为 q 的粒子以速度 v 定向移动时，如果电荷运动方向与磁场方向垂直，那么带电粒子所受的洛伦兹力大小为

$$f = qvB$$

即电荷垂直于磁场方向运动时，磁场对运动电荷的作用力 f 的大小等于电荷量 q 、速率 v 和磁感应强度 B 三者的乘积。

拓展视野

金属导体中自由电子的定向运动形成电流。洛伦兹力作用在载流导线中运动的自由电子上，使其侧向偏转，导致导线侧向负电荷积累。导线另一侧相应积累原子实的正电荷（设为 $+e$ ），由此在导线中形成侧向电场。这一电场对电子的作用力和洛伦兹力方向相反，阻止电荷继续积累。直到侧向电场力和洛伦兹力等值反向，彼此平衡相消；电荷不再继续积累。每个电子所受电场力的反作用力均作用于导线，大小与方向都和电子所受的洛伦兹力相同，其合成就是安培力，从而可从安培力的公式出发推导出洛伦兹力的表达式。

如图 5-22 所示，在磁感应强度为 B 的匀强磁场中，垂直于磁场方向放入一段长为 $L=vt$ ，截面积为 S 的通电导线。设每单位体积的导线中有 n 个自由电子，每个电子的电荷量是 e ，电子定向移动的速度是 v 。

根据以上条件可得出通过导线截面的电荷量与时间之比，即电流

$$\begin{aligned} I &= \frac{Q}{t} \\ &= \frac{nSvt e}{t} = neSv \end{aligned}$$

再由安培力公式 $F = BIL$ 和这段导体中运动电子的总数 $N = nSL$ ，可求得每一个运动电荷所受的洛伦兹力

$$\begin{aligned} f &= \frac{F}{N} \\ &= \frac{BIL}{N} = \frac{BneSvL}{nSL} = evB \end{aligned}$$

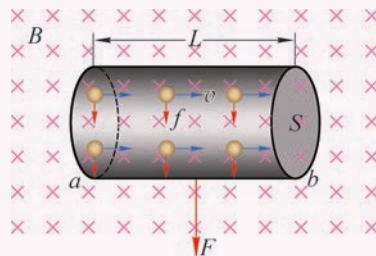


图 5-22 导线内运动电荷的洛伦兹力与宏观安培力

► 洛伦兹力的方向

既然洛伦兹力与安培力存在一定关系，我们曾经用左手定则判断安培力的方向，洛伦兹力的方向能否同样用左手定则来判断呢？

自主活动

如图 5-23 所示，用一个蹄形磁体在阴极射线管中电子束的路径上施加磁场，观察不同方向的磁场对电子束径迹的影响，从而判断运动的电子在磁场中的受力方向。观察并记录磁场方向和电子束的偏转方向。

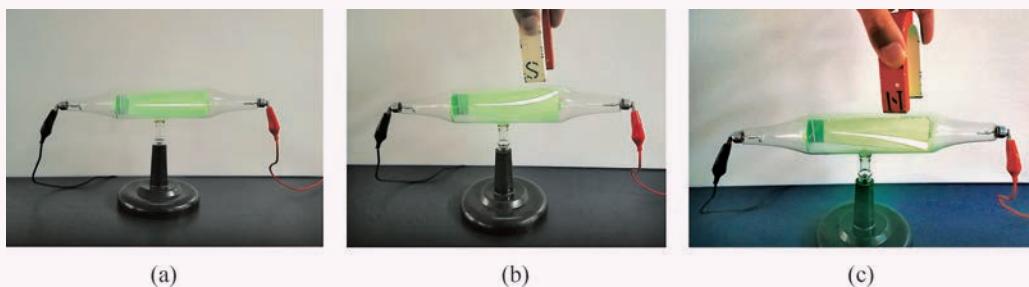


图 5-23 阴极射线在磁场中的偏转

洛伦兹力的方向也可以用左手定则来判断：如图 5-24 所示，伸开左手，让大拇指跟其余四指垂直，并且都与手掌在同一平面里；把左手放入磁场中，让磁感线垂直穿入掌心，四指指向正电荷运动的方向，那么拇指所指的方向就是正电荷所受洛伦兹力的方向。如果负电荷在磁场中运动，那么四指的方向必须和负电荷的运动方向相反，因为电流的方向规定为正电荷的运动方向。拇指所指的方向就是负电荷所受洛伦兹力的方向。上面的自主活动表明，洛伦兹力的方向与电子束的偏转方向相同，洛伦兹力就是运动电荷受到的磁场对它的作用力。

示例 如图 5-25 所示，一束粒子包含有质子（带正电）、电子（带负电）和光子（不带电）三种粒子。粒子束中的粒子沿水平向右的方向射入垂直纸面向里的匀强磁场中。试分析并描述粒子束进入匀强磁场后的偏转情况。

分析：根据粒子束中的粒子所带的电荷和左手定则即可

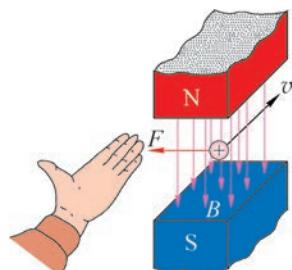


图 5-24 用左手定则判断洛伦兹力的方向

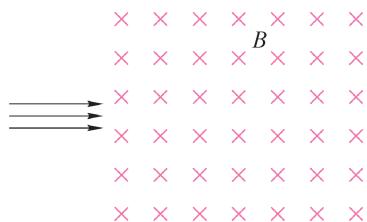


图 5-25 粒子束进入匀强磁场

判断。

解：粒子束内的光子不带电，不受磁场的任何影响。质子和电子带有电荷，会受洛伦兹力作用。粒子束内的光子不发生偏转保持原有速度匀速前进；粒子束内的质子带正电，由左手定则可知所受洛伦兹力向上，所以射入匀强磁场后质子束向上偏转；粒子束内的电子带负电，使用左手定则时，四指方向应与电子运动方向相反，可判定电子束进入匀强磁场后向下偏转。

大家谈

电荷在电场中一定受到电场力的作用，运动电荷在磁场中是否一定受到洛伦兹力的作用？

在磁场中运动的电荷因受到洛伦兹力作用，运动方向会发生偏转。这一点对地球上生命来说十分重要。地球时刻都面临着宇宙空间大量高能粒子流的轰击（这些粒子流总称为“宇宙线”），尤其是离我们最近的恒星太阳辐射出的高能粒子流，又叫做太阳风，对地球影响重大。这些高能粒子流（主要是由电子、质子组成）如果都到达地球，将给地球上的生物带来危害。幸亏地球周围存在地磁场，地磁场改变宇宙射线中带电粒子的运动方向，使其中的大部分不致到达地球，从而保护了地球上的生物。

在低纬度区域，来自太阳风的高能带电粒子由于受到地球地磁场的洛伦兹力的作用，发生偏转未能接近地球。在高纬度区域，来自太阳风的高能带电粒子有部分沿着地磁场方向运动接近地球，可达到离极区地表 80 km 以上的高层大气层。这些带电粒子（主要是电子）与这一高度范围的大气中的原子或分子碰撞，从而使它们受到激发而发光。不同元素的气体受轰击后发出不同颜色的光，因此会产生绚丽的极光。

拓展视野

静止电荷产生电场，仅受库仑力作用。运动电荷除了会产生电场，还会产生磁场。它不仅受到库仑力的作用，还会受到洛伦兹力的作用。因此，我们也可以从运动电荷所受的洛伦兹力出发来定义磁感应强度，即 $B = \frac{f}{qv}$ ，其中 v 为电荷 q 垂直于磁感应强度 B 方向的速度。把 $B = \frac{f}{qv}$ 与 $E = \frac{F}{q}$ 相比较，我们可以更深刻地认识磁感应强度。洛伦兹力 f 和磁感应强度 B 、运动电荷的电荷量 q 及速度 v 都有关系，但其与 qv 乘积的比就只反映磁场自身的性质而与其中的运动电荷无关。

问题与思考

- 电子以 $6 \times 10^6 \text{ m/s}$ 的速率垂直射入磁感应强度为 0.5 T 的匀强磁场中，电子受到的洛伦兹力的大小为何？如果电子射入磁场时的速度 v 与磁感应强度 B 的方向间的夹角是 180° ，则电子所受的洛伦兹力大小为何？
- 如图 5-26 所示，试判断运动电荷在磁场中所受洛伦兹力的方向。

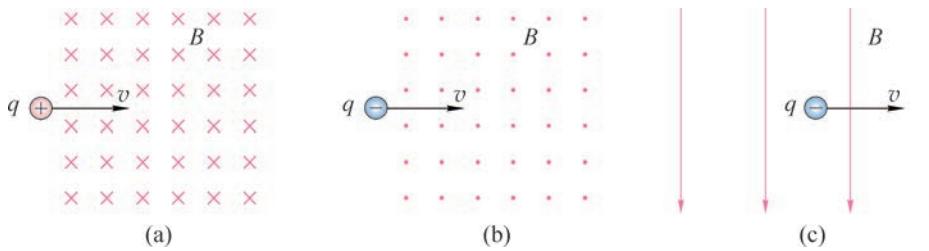


图 5-26

- 如图 5-27 所示，阴极射线管（A 为阴极）放在蹄形磁体的 N、S 两极间，阴极射线管的 A、B 两端分别通过导线连接到直流高压电源的哪个电极？若无磁体，电子的运动方向如何？磁体如图示情境放置，电子束运动轨迹的偏转情况如何？

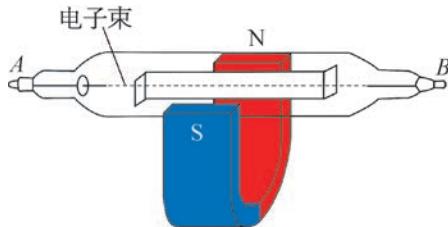


图 5-27

- 如果一个电子在通过空间某区域时不偏转，是否能肯定该区域中没有磁场？如果一个电子在通过空间某区域时发生侧向偏转，是否能肯定该区域中存在着磁场？试说明理由。
- 某区域存在一竖直向上的匀强磁场，磁场的磁感应强度大小为 $1.2 \times 10^{-3} \text{ T}$ 。动能为 5.3 MeV 的质子由南向北水平通过磁场区域，则质子受到的洛伦兹力的大小和方向如何？（质子质量为 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，忽略地球磁场）

6. 如图 5-28 所示，偏转极板间存在匀强电场，匀强电场的电场强度为 1.5 kV/m ，方向竖直向下；线圈系统（图中未显示）产生的匀强磁场的磁感应强度为 0.4 T ，方向垂直纸面向里。若灯丝发射的电子能沿直线匀速通过电场和磁场区域，那么，电子运动的速度大小是多少？（忽略电子所受重力）

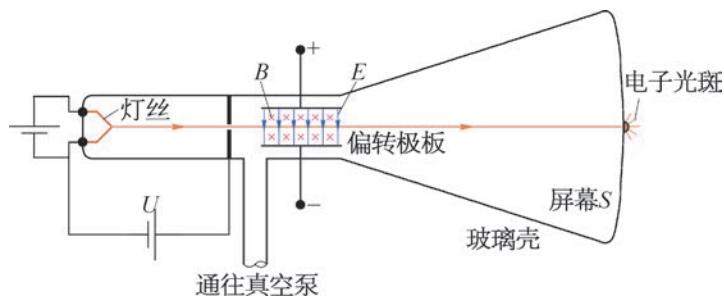


图 5-28

第三节 带电粒子在匀强磁场中的圆周运动

我们已经知道运动电荷所受的洛伦兹力与速度方向垂直，那么带电粒子在洛伦兹力的作用下，在磁场中会如何运动呢？现在我们来更详细地研究磁场中带电粒子的运动。

如图 5-29 所示是洛伦兹力演示仪。由电子枪产生电子束，玻璃泡内充有稀薄气体，当电子通过时能够显示电子的径迹。玻璃泡前后各有一个励磁线圈，它们能够在两线圈之间产生与两线圈中心的连线平行的匀强磁场。电子的速度大小可以通过电子枪的加速电压调节，匀强磁场的磁感应强度则可以通过励磁线圈的电流调节。

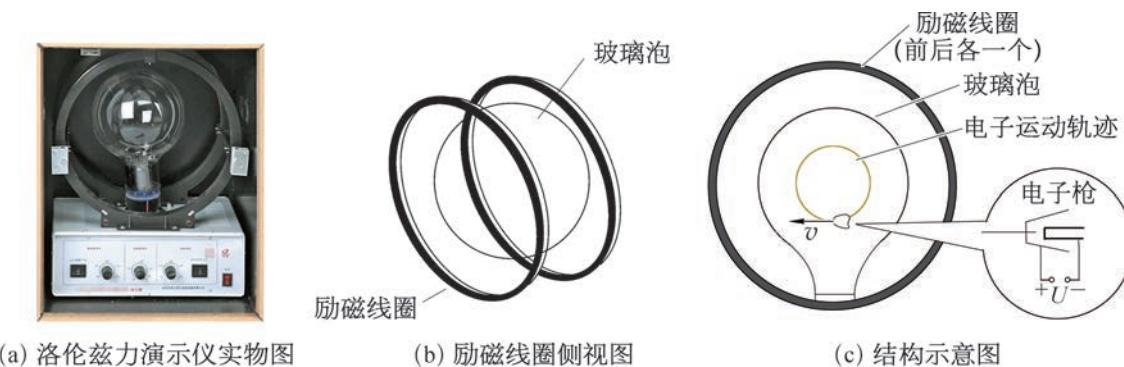


图 5-29 洛伦兹力演示仪

自主活动

通过调节洛伦兹力演示仪（图 5-30）中励磁线圈电流的有无，分别观察在无磁场和有匀强磁场时电子束的运动径迹。

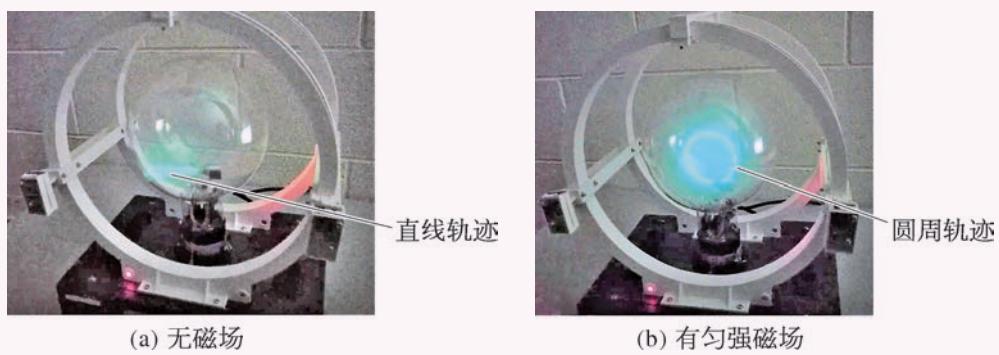


图 5-30 洛伦兹力演示仪

在图 5-30 (a) 中, 洛伦兹力演示仪没有加磁场, 向左射出的电子束的运动径迹是一条直线; 在图 5-30 (b) 中, 通过给洛伦兹力演示仪的两励磁线圈通电, 产生沿两线圈中心连线方向的匀强磁场, 向左射出的电子束在匀强磁场中的运动径迹是一个圆。

▶ 带电粒子在匀强磁场中做圆周运动的原因

我们只讨论最简单的情况, 带电粒子垂直射入匀强磁场。根据左手定则, 洛伦兹力跟粒子运动的速度方向垂直, 使带电粒子的运动方向发生偏转。因为洛伦兹力始终跟粒子的速度方向垂直, 所以, 洛伦兹力只改变粒子运动的方向, 而不改变速度大小。由洛伦兹力公式 $f = qvB$ 可知, 因为 q 、 v 和 B 都不变, 洛伦兹力的大小也不变。

在学习圆周运动时我们就知道, 如果作用在质点上的力大小不变, 方向始终与质点运动速度方向垂直并且指向圆心, 这个质点一定做匀速圆周运动。现在是洛伦兹力作用在带电粒子上, 带电粒子做匀速圆周运动, 洛伦兹力就是带电粒子做匀速圆周运动的向心力。所以, 沿着与磁场垂直方向射入匀强磁场的带电粒子应做匀速圆周运动, 如图 5-31 所示。

不仅如此, 由于洛伦兹力始终与带电粒子的速度方向垂直, 它不可能改变带电粒子速度的大小, 也就不可能对带电粒子做功, 带电粒子的动能不会改变。

▶ 带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的半径和周期

自主活动

让我们继续使用如图 5-29 (a) 所示的洛伦兹力演示仪, 保持出射电子的速率 v 不变, 改变磁感应强度 B , 观察电子做圆周运动的半径 r 的变化; 保持磁感应强度 B 不变, 改变出射电子的速率 v , 观察电子做圆周运动的半径 r 的变化。

我们观察到出射电子的速率 v 不变时, 磁感应强度 B 越大, 电子束做圆周运动的半径 r 越小; 保持磁感应强度 B 不变时, 出射电子的速率 v 越大, 电子束做圆周运动的半径 r 越大。

假设一个质量为 m 、电荷量为 q 的带电粒子, 在磁感应强度为 B 的匀强磁场中做速度大小为 v 、半径为 r 的匀速圆周运动。

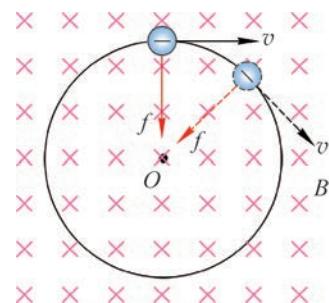


图 5-31 带电粒子在匀强磁场中运动

粒子做匀速圆周运动所需的向心力 $F = m \frac{v^2}{r}$, 这就是磁场作用在带电粒子上的洛伦兹力 $f = qvB$ 。所以

$$qvB = m \frac{v^2}{r}$$

由此得出

$$r = \frac{mv}{qB}$$

上式表明，在匀强磁场中的带电粒子，在洛伦兹力的作用下做匀速圆周运动的轨道半径与粒子的速度、质量、电荷量和磁感应强度都有关。对于给定的粒子， $\frac{q}{m}$ 是一个确定的值，如果 B 也是确定的，则 $r \propto v$ ，即轨道半径 r 与粒子的速率 v 成正比；如果 v 是确定的，则 $r \propto \frac{1}{B}$ ，即轨道半径 r 与磁感应强度 B 成反比。

根据带电粒子做匀速圆周运动的周期 $T = \frac{2\pi r}{v}$ ，将 $r = \frac{mv}{qB}$ 代入，得到

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

由此可见，带电粒子在磁场中做匀速圆周运动的周期跟轨道半径 r 及速率 v 无关，只与粒子的质量 m 、电荷量 q 和磁场的磁感应强度 B 有关。

大家谈

电场和磁场都可以对带电粒子发生作用，试比较这两种场对带电粒子的作用有何差异。

示例 一个初速度为零的质子，经过电压 $U = 1.3 \times 10^3$ V 的电场加速后垂直进入磁感应强度 B 为 0.20 T 的匀强磁场。质子的质量 $m = 1.67 \times 10^{-27}$ kg，电荷量 $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C。求：

- (1) 质子进入磁场时的速度大小；
- (2) 质子在磁场中运动的轨道半径；
- (3) 质子做匀速圆周运动的周期。

分析：电场可以使带电粒子加速，也可以使它偏转；带电粒子垂直进入磁场只能使带电粒子偏转。本题中质子受电场力作用加速，然后在匀强磁场中做匀速圆周运动。

解：(1) 初速度为零的质子在电场中被加速，获得动能。质子在电场中得到的动能等于电场对它所做的功，设质子进入磁场时的速度大小为 v ，则有

$$\frac{1}{2}mv^2 = qU$$

所以

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{2qU}{m}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.3 \times 10^3}{1.67 \times 10^{-27}}} \text{ m/s} \\ &\approx 5.0 \times 10^5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

(2) 质子垂直射入匀强磁场，做匀速圆周运动。设质子做匀速圆周运动的半径为 r ，它在磁场中受到的洛伦兹力提供质子做匀速圆周运动所需的向心力，得

$$qvB = m\frac{v^2}{r}$$

所以，质子在磁场中运动的轨道半径

$$\begin{aligned} r &= \frac{mv}{qB} \\ &= \frac{1.67 \times 10^{-27} \times 5 \times 10^5}{1.6 \times 10^{-19} \times 0.20} \text{ m} \\ &\approx 2.6 \times 10^{-2} \text{ m} \end{aligned}$$

(3) 质子做匀速圆周运动的周期

$$\begin{aligned} T &= \frac{2\pi r}{v} \\ &= \frac{2 \times 3.14 \times 2.6 \times 10^{-2}}{5 \times 10^5} \text{ s} \\ &\approx 3.3 \times 10^{-7} \text{ s} \end{aligned}$$

拓展视野

如果带电粒子的运动速度与磁感应强度平行，则其在磁场中所受的洛伦兹力为零，粒子将做匀速直线运动；如果带电粒子的速度与磁感应强度既不平行，又不垂直，带电粒子将在匀强磁场空间做等螺距螺旋运动，如图 5-32 所示。

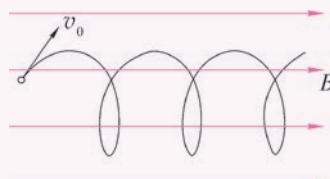


图 5-32 带电粒子做等螺距螺旋运动

洛伦兹力在生产、生活中也有着很广泛的应用，比如质谱仪、电子显微镜、回旋加速器、磁流体发电机等。

► 洛伦兹力的应用

洛伦兹力在现代科学技术中有很多的应用，我们通过如下几个实例来说明。

1. 质谱仪

我们知道，微观粒子的质量都很小，体积也很小。那么怎样测定单个粒子的质量呢？利用洛伦兹力设计的质谱仪就能完成这一任务。

质谱仪结构如图 5-33 所示， P 为一带电粒子源，产生正离子；正离子经 S_1 和 S_2 之间高电压加速后，进入专门设计的速度选择器。速度选择器的作用是使正离子在经过电场和磁场共同存在的空间后（速度选择器中的电场强度为 E ，磁感应强度为 B ，电场方向与磁场方向相互垂直），只有所受洛伦兹力和电场力二力平衡的那些正离子，才能以一定速率 v 从 S_3 缝射出并进入磁场 B_0 ，即

$$qE = qvB$$

由此得出

$$v = \frac{E}{B}$$

S_3 下方有一垂直纸面向外的匀强磁场，磁感应强度为 B_0 。正离子在磁场中只受始终与速度方向垂直的洛伦兹力的作用，粒子在洛伦兹力作用下沿半圆轨迹运动并被质谱仪记录底片收集。

由速度选择器选出的速率 $v = \frac{E}{B}$ 和轨道半径 $r = \frac{mv}{qB_0}$ ，可得出圆周运动轨道半径 r 与带电粒子的质量 m 之间的关系式

$$r = \frac{mE}{qB_0 B}$$

由此得出带电粒子的质量 m 与质谱仪底片上谱线到 S_3 缝间的距离 X 之间的关系式

$$m = \frac{qB_0 Br}{E} = \frac{qB_0 BX}{2E}$$

式中 B_0 、 B 、 E 均为定值。

可见如果粒子的电荷量 q 相同，由质谱仪底片上谱线到缝之间的距离 X 即可确定粒子的质量 m 。这样，不同质量的粒子打在质谱仪底片上的位置就按质量大小的顺序排列，类似于光谱按波长排列，所以把上述仪器叫做质谱仪。

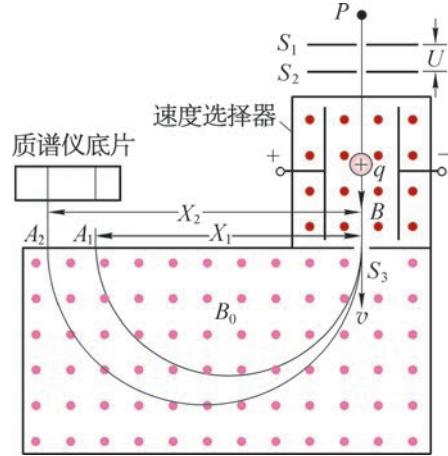


图 5-33 质谱仪工作原理

大家谈

利用质谱仪为什么可区分同位素？

质谱仪最初是由英国科学家阿斯顿设计的，后来经过多次改进，现已成为测量带电粒子的质量和分析同位素的重要工具。

2. 回旋加速器

当我们研究原子核的结构时，往往需要用高能量的微观粒子去轰击原子核进行研究。如何得到能量很高的粒子呢？我们可以想到用加速电场对带电粒子加速。理论分析表明，只要加速电场足够强，加速距离足够长，就可以使带电粒子获得足够高的能量。这样的装置叫做直线加速器。但是在技术上电场强度是不可能无限制地增大的，在真空中的加速距离也有一定限制，建造数千米长的直线加速器已很困难。能不能把带电粒子限制在一定的空间范围内同时又能对它不断加速呢？回旋加速器就可以完成这个任务。

如图 5-34 所示，回旋加速器的核心部分 D_1 和 D_2 是两个中空的半圆金属盒，它们之间有一定的电势差；粒子源 G 产生的带电粒子在两盒之间被电场加速；两个半圆盒处于与盒面垂直的匀强磁场中，粒子在半圆盒内受磁场洛伦兹力的作用做匀速圆周运动。经过半个圆周之后，到达两盒间的缝隙时，控制两盒间的电势差，使其恰好改变正负，于是粒子经过盒缝时再一次被加速。如此，粒子在做圆周运动的过程中一次又一次地经过盒缝，而两盒间的电势差一次又一次地反向，粒子在间隙内总被加速，从而使其沿螺线轨迹逐渐趋近于盒的边缘。达到预期的速率后，用特殊装置把它们引出。

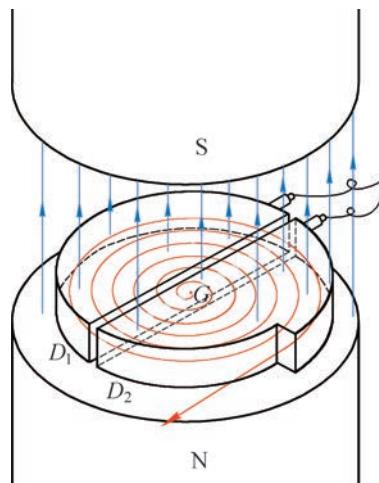


图 5-34 回旋加速器工作原理

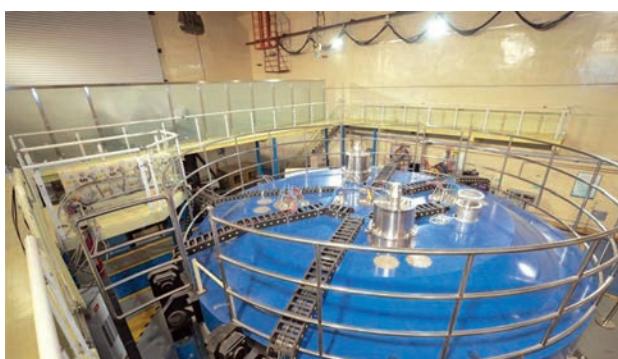


图 5-35 我国 100 MeV 回旋加速器

图 5-35 为中国原子能科学研究院自主研发的 100 MeV 质子回旋加速器。此回旋加速器可以调试出速度接近一半光速的质子束，这标志着我国回旋加速器达到国际同类装置的先进水平。现在回旋加速器已经获得广泛应用，例如可生产治疗癌症的同位素药物。作为放射线源，我国制造的紧凑型回旋加速器已在各地的医院里普遍使用。

STSE

阿尔法磁谱仪又称为反物质太空磁谱仪，是一个安装于国际空间站上的粒子物理试验设备，主要目的是探寻宇宙的奥秘，以尝试理解反物质、暗物质的构成要素以及测量宇宙线。2011年5月16日，阿尔法磁谱仪第2代（“阿尔法磁谱仪2”）随“奋进”号航天飞机升空。



图 5-36 阿尔法磁谱仪 2

“阿尔法磁谱仪2”（图5-36）体内有一颗强大的“中国心”（图5-37），即一块“MADE IN CHINA”、内径约1.2 m、重约2.6 t、中心磁场0.137 T的环形巨大永磁体。它选择新型高磁能积钕铁硼材料，采用独特的“魔环”结构磁路设计，64个磁化方向连续变化的永磁条安装其中。这种

结构使永磁体磁

场约束在阿尔法磁谱仪磁体内部，使它符合太空运行要求，帮助“阿尔法磁谱仪2”寻找反物质和暗物质。

阿尔法磁谱仪项目是诺贝尔物理学奖得主美籍华裔科学家丁肇中教授牵头的一个国际合作项目。我国科学家为磁谱仪作出了巨大的贡献，成功研制了磁谱仪的核心部件磁体系统和磁谱仪量能器结构；参与建立磁谱仪实验系统、反物质探测系统和地面数据处理系统；在热系统的研究和设计过程中解决了磁谱仪在国际空间站运行的关键问题等，获得国际同行的高度认可。

2015年12月17日，我国在酒泉卫星发射中心用长征二号丁运载火箭成功将暗物质粒子探测卫星“悟空”（Dark Matter Particle Explorer，缩写DAMPE，图5-38）发

射升空。它是世界上迄今为止观测能段范围最宽、能量分辨率最优的空间探测器，其观测能段是国际空间站阿尔法磁谱仪的10倍，能量分辨率比国际同类探测器高3倍以上。“悟空”号是人类发现暗物质的“火眼金睛”。

2017年，中国科学院宣布“悟空”号取得首批重大科学成果。利用“悟空”号采集到的数据，科研人员获得了世界上迄今最精确的高能电子宇宙线能谱。

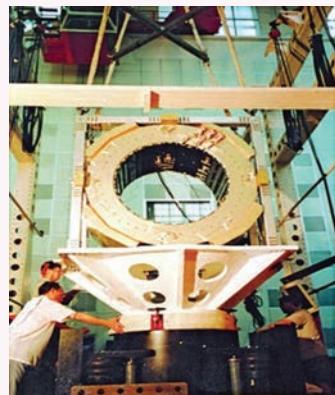


图 5-37 阿尔法磁谱仪 2 的“中国心”

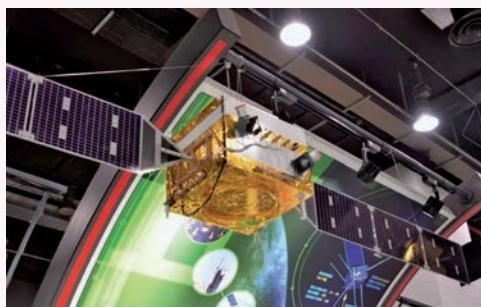


图 5-38 “悟空”号暗物质粒子探测卫星模型

问题与思考

- 如图 5-39 所示是电子在匀强磁场中做匀速圆周运动的轨迹，匀强磁场的方向垂直纸面向里。电子是顺时针还是逆时针运动？试简述理由。
- 足够大的匀强磁场中有两个电子从出发点同时射出，分别以速度 v 和 $2v$ 垂直于磁场方向运动，哪个电子先回到出发点？试简述理由。
- 洛伦兹力演示仪用于观察运动电子在磁场中的运动。判断下列说法是否正确，简述理由。
 - 不加磁场时电子束的径迹是直线。
 - 加磁场并调整磁感应强度可使电子束径迹形成一个圆周。
 - 保持磁感应强度不变，增大出射电子的速度，电子束圆周的半径减小。
 - 保持出射电子的速度不变，增大磁感应强度，电子束圆周的半径减小。
- 一个电子在磁感应强度为 4 mT 的匀强磁场区域中做匀速圆周运动，电子受到的洛伦兹力大小为 $3.2 \times 10^{-15} \text{ N}$ ，电子的质量为 $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 。计算电子做匀速圆周运动的速度大小、轨道半径和周期。
- 如图 5-40 所示，质谱仪的离子源 P 产生的离子经正下方 S_1 和 S_2 之间的电场加速后射入速度选择器。速度选择器中的匀强电场 E 和匀强磁场 B 都垂直于离子速度 v ，且 E 和 B 相互垂直，狭缝 S_3 在离子源 P 的正下方。离子源 P 射出的离子并非都能通过狭缝 S_3 进入磁场 B_0 。试问：通过速度选择器后能射入狭缝 S_3 的离子速率 v 需满足怎样的条件？

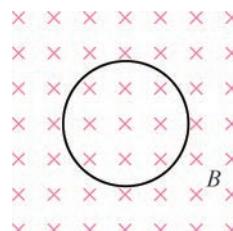


图 5-39

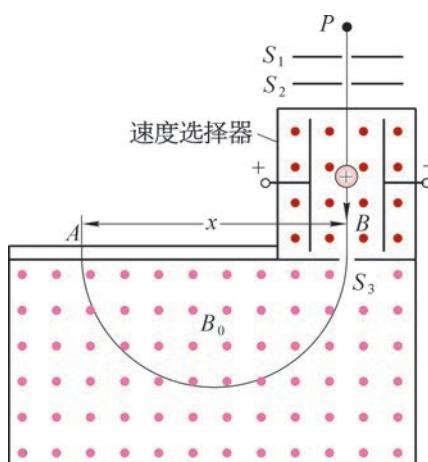


图 5-40

6. 如图 5-41 所示, 中性气体分子在容器 A 中被电离成离子, 离子从 S_1 的狭缝处离开时速度接近于零, 进入 S_1 和 S_2 间电压为 U 的加速电场中被加速, 再从 S_3 的狭缝垂直进入匀强磁场, 沿半圆轨迹运动并使记录底片在 P 处感光。离子的质量为 m 、所带的电荷量为 q , 匀强磁场的磁感应强度为 B , S_3 缝到底片上 P 点的距离为 d 。试证明: $\frac{q}{m} = \frac{8U}{B^2 d^2}$ 。

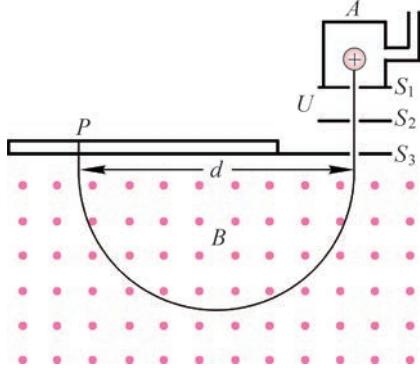


图 5-41

小结

• 基本概念和基本规律

安培力: 通电导体在磁场中受到的力。匀强磁场中, 当通电导线与磁场方向垂直时, 安培力的大小 $F = BIL$ 。

洛伦兹力: 运动电荷在磁场中所受到的力。电荷垂直于磁场方向运动时, 洛伦兹力的大小 $f = qvB$ 。

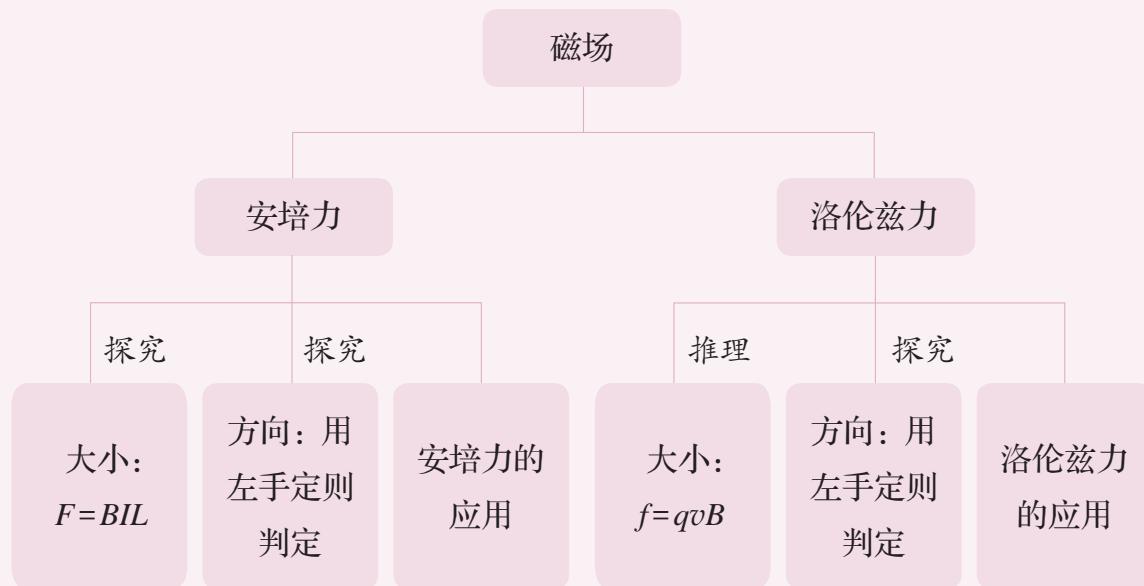
• 基本方法

通过研究安培力与电流、导线长度、磁感应强度的定量关系, 认识控制变量法。

在探究基于导体受到的安培力导出运动电荷所受洛伦兹力的过程中, 感受等效的思维方法。

在得出安培力和洛伦兹力的过程中, 认识实验归纳与理论演绎相结合的方法。

• 知识结构图



复习与巩固

1. 如图 5-42 所示的蹄形磁体水平放置，在磁场中有一水平光滑导轨通过接线夹与导线相连，导轨上面搁有一导体细棒 AB。AB 棒、电源、开关等由导线连成回路。闭合开关，导体棒 AB 将如何运动？简述这一现象中能量的转化过程。

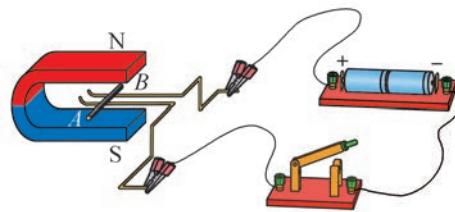


图 5-42

2. 在匀强磁场中的通电导线受到安培力的作用，其中安培力的方向、磁场的方向、通电导线的方向三者间是否都相互垂直？
3. 阴极射线管发射的电子束中的电子由左向右运动，其上方放置一根通有由左向右电流的直导线，直导线与阴极射线管平行。电子束的轨迹是否发生偏转？如偏转，则偏转方向如何？
4. 平行轨道上有一辆平板小车，车上有一个通电线框，如图 5-43 所示。图中虚线框 1、2、3、4、5 等内部是磁场区域，磁场方向垂直纸面向里或向外。要使小车在图示位置时受到向右的安培力，虚线框 1、2 部分的磁场方向如何？平板小车经过磁场区域 2、3 位置时，如果仍要使小车受到向右的推力，此时虚线框 2、3 部分的磁场方向应如何？怎样改变磁场方向才能使小车始终受到向右的推力？实际生活中哪种交通工具的驱动原理与此相仿？

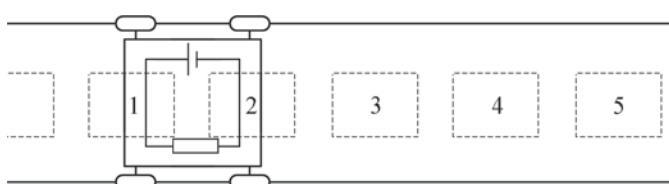


图 5-43

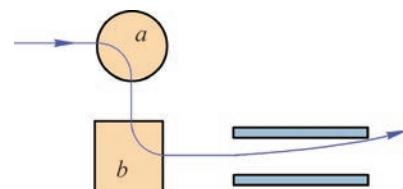


图 5-44

5. 图 5-44 中的曲线显示一带电粒子运动的轨迹。*a*、*b* 区域均为匀强磁场，粒子在 *a*、*b* 磁场内的轨迹均为圆周的四分之一；离开 *b* 磁场区域后，带电粒子在两个带等量异号电荷的平行金属板之间运动，并向正极板偏转。试判断带电粒子带正电荷还是负电荷？*a*、*b* 区域内的磁场方向如何？
6. 如图 5-45 所示为电子通过两个匀强磁场区域的路径，两个区域的磁感应强度分别为 B_1 和 B_2 ，电子在每个区域内的轨迹都是半圆。则： B_1 和 B_2 相比，哪个区域内的磁感应强度较大？ B_1 和 B_2 区域内的磁场方向如何？电子在 B_1 区域运动的时间和在 B_2 区域运动的时间相比，哪个较长？简述理由。

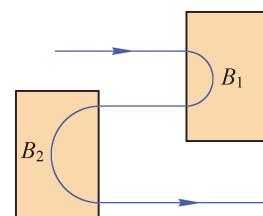


图 5-45

7. 用绝缘细线悬挂的带正电塑料小球做简谐运动。如增加一个如图 5-46 所示的匀强磁场，带电塑料小球每次经过平衡位置时，速率是否发生变化？小球摆动的周期是否改变？简述理由。

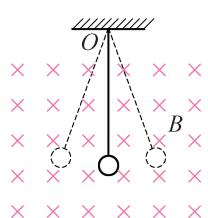


图 5-46

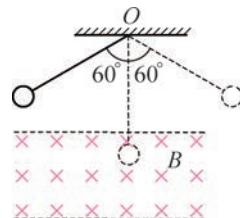


图 5-47

8. 如图 5-47 所示，带电小球质量为 m ，用细线悬挂于 O 点并在竖直平面内摆动，最大摆角为 60° ，磁场垂直于小球摆动的平面向里。当小球从左边最大摆角处摆到最低点时，细线上的拉力恰为零。试问小球带正电还是带负电？小球从右边最大摆角处摆到最低点时，细线上的拉力是否仍为零？简述理由。
9. 质量为 10 g 、电荷量为 $+80 \mu\text{C}$ 的带电小球以 20 km/s 的速度沿直线匀速通过水平方向的匀强磁场，带电小球运动的速度方向与磁场方向垂直。求匀强磁场的磁感应强度大小。 $(g \text{ 取 } 10 \text{ m/s}^2)$

10. 如图 5-48 所示，两平行光滑导轨相距 $L = 0.1 \text{ m}$ ，并与水平面成 $\theta = 37^\circ$ 夹角，竖直向下的匀强磁场的磁感应强度 $B = 0.2 \text{ T}$ ，将一个质量 $m = 10 \text{ g}$ 的导体棒 ab 与导轨相互垂直地搁在导轨上。为了使导体棒 ab 能静止在导轨上，导体棒内的电流的方向和大小应如何？

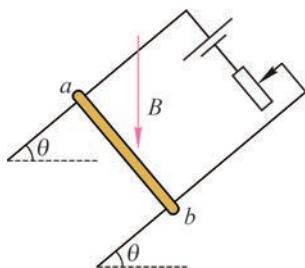


图 5-48

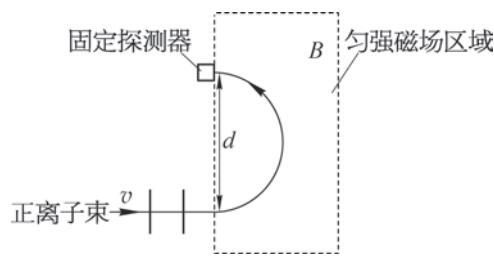


图 5-49

11. 如图 5-49 所示，一束正离子束以速度 v 进入垂直于纸面的匀强磁场，该匀强磁场的磁感应强度为 B ，用固定的探测器测得正离子运动的圆周直径为 d 。已知单个正离子所带的电荷量为 $+e$ ，质量为 20 u (u 为原子质量单位， $1 \text{ u} \approx 1.6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$)，则：
- (1) 该匀强磁场的方向如何？

(2) 若在该正离子束内还有质量为 22 u、电荷量和速率都与质量为 20 u 的正离子相同的另一种正离子。试在图中定性地描绘出质量为 22 u 的正离子在磁场中的运动轨迹。为了在固定的探测器上探测到质量为 22 u 的正离子，匀强磁场的磁感应强度应如何变化？

*12. 如图 5-50 所示，光滑绝缘杆与水平面保持 θ 角，匀强磁场的磁感应强度为 B 。一个可自由滑动的带正电小环套在杆上，质量为 m 、电荷量为 q 。若小环下滑过程中对杆的压力为零，则小环的速度有多大？

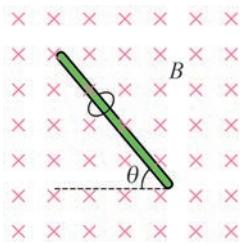


图 5-50

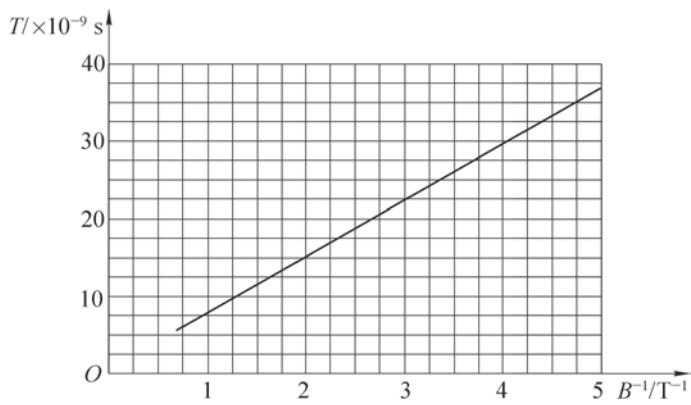


图 5-51

*13. 某个带电粒子进入匀强磁场中，其速度垂直于磁场方向。带电粒子运动的周期 T 与磁感应强度 B 的倒数之间的关系如图 5-51 所示。求此带电粒子的电荷量 q 与质量 m 之比。

第六章

电磁感应定律

电的发现和广泛使用不仅给人类生活带来很多方便，而且使社会生产力大大提高，社会财富大大增加，人们生活变得更加丰富多彩。国防、交通、日常生活等都离不开电。电能是使用效率最高、最方便的能源。电来自发电厂的发电机，发电机的基本原理是电磁感应。电磁感应是电磁学中最重大的发现之一，它进一步揭示了电、磁之间的相互联系。电磁感应在电工技术、电子技术及电磁测量等方面都有广泛的应用。描述电磁感应的楞次定律和法拉第电磁感应定律是电磁场理论的重要组成部分。

必修课程中我们已经学习了电磁感应现象，知道磁通量是一个重要的物理量，懂得磁感应强度能够描述磁场的强弱。本章将学习电磁感应现象的内在物理本质。通过实验，探究影响感应电流方向的因素，理解楞次定律和法拉第电磁感应定律。本章的学习将用到磁通量变化的概念、牛顿运动定律、闭合电路欧姆定律和能量守恒定律。本章的学习将经历科学探究的过程，对电磁感应实验现象和实验结果进行归纳推理，提升科学思维的能力。本章的学习将为交变电流和变压器的探究奠定基础。

第一节 楞次定律

如图 6-1 所示是竖直放置的两根长度相同的空心管，一根是铜管，另一根是塑料管。用左、右手分别握住略小于空心管内径的铝块从两管的上端口同时释放，发现两铝块同时快速下降至下端口。如果将铝块换成同样大小的强磁铁块，重复上述实验，发现在塑料管中的强磁铁块仍然快速下降至下端口，但是在铜管中的强磁铁块下降明显减缓，似乎强磁铁块除了受到重力作用以外还受到了向上的阻力作用。这是由于强磁铁块在铜管中下落时，铜管中产生了感应电流，感应电流的磁场与下落磁体间的相互作用导致强磁铁块下降速度减缓。这个感应电流的方向决定了铜管产生的磁场方向。

那么，感应电流的方向是由什么决定的呢？下面我们通过一个实验来探究一下。



图 6-1 竖直放置的空心铜管和塑料管

学生实验

探究影响感应电流方向的因素

提出问题

在必修课程中我们已学过电磁感应现象，知道穿过闭合回路的磁通量发生变化时闭合回路中就有感应电流产生。感应电流的方向由哪些因素决定？遵循何种规律？

实验原理与方案

将条形磁体的 N 极或 S 极分别插入感应线圈，或从感应线圈中抽出，观察与感应线圈组成闭合回路的灵敏电流计指针的偏转情况。然后分析归纳出判断感应线圈中感应电流方向的规律。

实验装置与方法

首先要确定灵敏电流计电流流入方向与指针的偏转方向之间的关系，可根据如图 6-2 所示的电路图观察电路中的电流方向已知时相应的灵敏电流计指针偏转方向。此后就可以从灵敏电流计指针的偏转方向确定电流的流入方向。图 6-2 中限流电阻取几千欧。采用瞬间闭合开关的方法，尽可能缩短灵敏电流计的通电时间，以保护灵敏电流计。如图 6-3 所示，用导线将灵敏电流计和感应线圈相连。

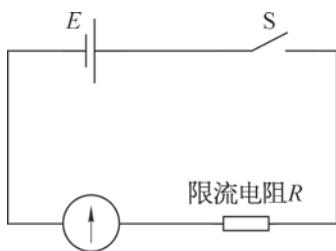


图 6-2 确定电流计偏转方向的电路图

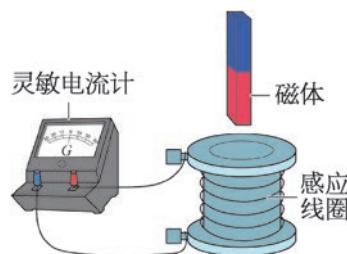


图 6-3 研究感应电流的方向的实验装置

实验操作与数据收集

按照图 6-4 (a)、(b)、(c)、(d) 的顺序，先后将条形磁体的 N 极或 S 极插入和抽出感应线圈，观察灵敏电流计指针的偏转方向和感应线圈中导线的绕向，判断线圈中感应电流的方向，并在表 6-1 中记录。

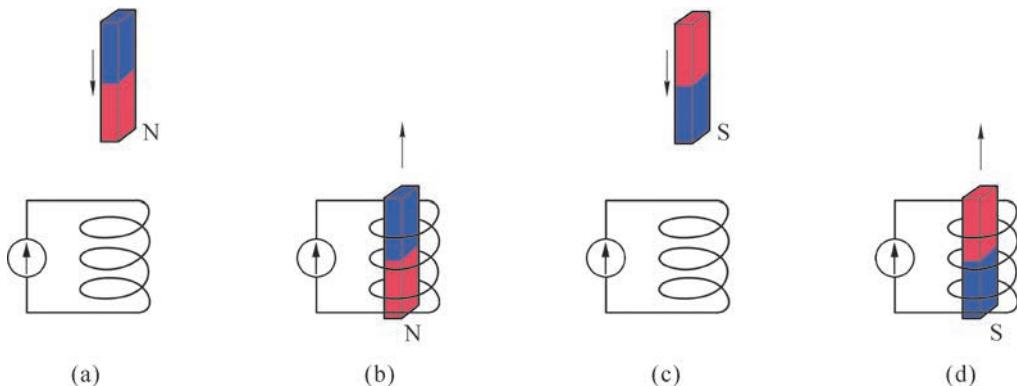


图 6-4 研究感应电流方向的实验过程

表 6-1 实验记录表

记录对象	N 极插入	N 极抽出	S 极插入	S 极抽出
① 原磁场 B 的方向				
②				
③ 感应电流的方向（俯视）				
④				
⑤				

数据分析

条形磁体的 N 极或 S 极插人都使感应线圈内的磁通量增大，而抽出都使感应线圈内的磁通量减小。条形磁体的 N 极插入，感应线圈内磁感线的方向向下；条形磁体的 S 极插入，感应线圈内磁感线的方向向上。

条形磁体的 N 极（或 S 极）插入或抽出时，感应线圈中的感应电流方向相反；条形磁体的 N 极（或 S 极）插入和 S 极（或 N 极）抽出时，感应线圈中的感应电流方向相同。

实验结论

交流与讨论

各组交流如何确定感应电流方向的方法，依据实验事实讨论感应电流的方向是否和原磁场的方向、磁感线的方向和磁通量的增减变化有关。

1834年，物理学家楞次（H. Lenz, 1804—1865）在分析了许多实验事实后，将实验结论用一句话巧妙地表达为：感应电流的磁场总是要阻碍引起感应电流的磁通量的变化，这就是楞次定律（Lenz's law），是电磁学中的一个重要定律。

在必修课程中我们已经知道在磁感应强度为 B 的匀强磁场中，垂直通过一个面积为 S 的闭合回路的磁通量 $\Phi = BS$ 。磁通量变化有多种可能的形式：一是闭合回路所在处磁场的磁感应强度 B 发生了变化；二是闭合回路所围面积 S 发生了变化。无论如何，只要闭合回路的磁通量发生变化，一定会引起感应电流。

根据楞次定律判断感应电流方向的一般步骤为：

- (1) 确定原磁场的方向；
- (2) 确定穿过闭合线圈的磁通量是增加还是减少；
- (3) 根据楞次定律确定感应电流的磁场方向；
- (4) 利用右手螺旋定则确定感应电流的方向。

可以根据楞次定律解释图6-1中的实验现象。强磁铁块在铜管内下降过程中，铜管内的磁通量发生变化，产生的感应电流的磁场总是反抗引起感应电流的磁通量的变化。因此下降的磁铁块将不断受到感应电流产生的磁场磁力的阻碍作用而减小下降速度。铝块在铜管和塑料管中下降，以及磁铁块在塑料管中下降时，都没有感应电流产生，铝块、磁铁块几乎以重力加速度（管壁与铝块、磁铁块之间的摩擦力和空气阻力都很小，可以忽略）匀加速下降。

楞次定律包含着深刻的物理意义，实际上是能量守恒定律在电磁感应现象中的反映。

▶ 楞次定律符合电磁感应现象中的能量守恒定律

按照楞次定律判断的感应电流方向是能量守恒定律的必然结果。如图6-4所示，当条形磁体的N极从上向下插入闭合线圈时，根据楞次定律，线圈内感应电流所产生的磁场应阻碍原磁通量的变化，此时产生感应电流的线圈相当于N极向上的“条形磁体”，同名磁极相斥，从而阻碍条形磁体向下运动。因此，条形磁体向下运动时需克服感应电流的磁场力做功，使机械能转化为线圈中感应电流的电能，感应电流通过线圈电阻再转化为焦耳热。反之，当条形磁体的N极从下向上抽出闭合线圈时，根据楞次定律，在线圈内感应电流产生的磁场的S极向上，异名磁极相吸，同样要阻碍条形磁体的向上运动。条形磁体也

要克服感应电流磁场的阻力做功，使机械能转化为线圈中感应电流的电能，感应电流通过线圈电阻再转化为焦耳热。

总之，在条形磁体插入或抽出线圈的运动而获得感应电流过程中，感应电流的磁场对条形磁体的磁场力总是阻碍条形磁体的运动；外界移动磁体就要克服感应电流的磁场力做功；另一方面导体都存在电阻，感应电流在闭合回路中流动时将释放焦耳热。做功伴随着能量的转化，正是外力克服阻力做功将机械能转化成感应电流的电能，进而转化为内能。设想感应电流的效果不是反抗引起感应电流的“原因”，那么在上述实验中，将条形磁体插入或抽出线圈的过程中，不需要外力做功就能产生感应电流而释放焦耳热。显然这是违反能量守恒定律的。

示例 1 如图 6-5 (a) 所示是法拉第发现电磁感应现象的实验示意图，A、B 是套在同一铁芯上的两个线圈。试标出当开关 S 闭合的瞬间，与线圈 B 相连接的灵敏电流计中电流的方向。

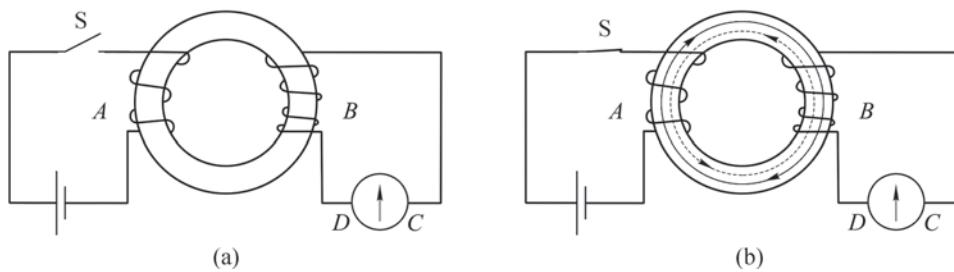


图 6-5 法拉第发现电磁感应现象的实验示意图

分析：线圈 A 与电源接通的瞬间，线圈 A 中的磁通量发生变化，引起套在同一铁芯上闭合线圈 B 的磁通量相应变化，从而在线圈 B 中产生感应电流。

解：根据右手螺旋定则，线圈 A 中的磁感线穿过线圈 B 的方向如图 6-5 (b) 中的实线所示；电路接通瞬间，线圈 B 中的磁场增强，磁通量也增大；根据楞次定律，线圈 B 中感应电流的磁场方向应该与原磁场方向相反，即如图 6-5 (b) 中的虚线所示；再用右手螺旋定则判断感应电流的方向便可确定流过灵敏电流计的电流方向是 $D \rightarrow C$ 。

拓展视野

铁芯是一种导磁能力很强的磁性物质，绕在铁芯上的线圈通以较小的电流就能获得较强的磁场。相对于铁芯中的磁场，其他地方的磁场都很微弱，因此可近似认为磁感线都局限在铁芯内。如果将两个线圈套在同一个铁芯上，就把两个分别与不同线圈相连、彼此绝缘的电路通过铁芯中磁场紧密地联系起来，实现两个电路的电能之间的转移。铁芯一般都是用硅钢片制作的，硅钢是一种含硅的钢材。

大家谈

图 6-5 (a) 中开关 S 断开的瞬间，如何确定线圈 B 中流过灵敏电流计的电流方向。接通电源一段时间后，灵敏电流计的指针是否继续偏转？

示例 2 如图 6-6 所示，导线框 $abcd$ 处在匀强磁场中，匀强磁场的方向垂直于导线框平面，与导线框接触良好的导体棒 MN 在外力作用下向右做匀速运动。试用楞次定律判断导体棒 MN 中感应电流的方向。

分析：通过判断通过闭合回路 $MbcNM$ 的磁通量的变化，依据楞次定律来确定感应电流的方向。

解：当导体棒 MN 向右运动时，闭合回路 $MbcNM$ 面积减小，通过的磁通量下降。根据楞次定律，感应电流产生的磁场跟原磁场同方向，以阻碍原磁通量的减少；用右手螺旋定则可知通过导体棒的感应电流方向是 $N \rightarrow M$ 。

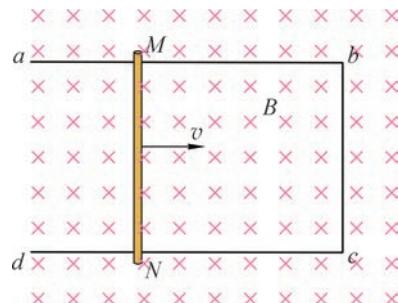


图 6-6 导体棒在磁场中运动

如图 6-6 所示的情景通常称为导体切割磁感线产生感应电流。要判断直导线切割磁感线产生感应电流的方向，除了应用楞次定律以外还可以用**右手定则 (right-hand rule)**。右手定则告诉我们：伸出右手，四指与大拇指垂直且与掌心在同一平面内，使磁感线垂直穿过掌心，大拇指指向导体的运动方向，则四指指向就是感应电流的方向，也就是运动导体（闭合电路的一部分）内部感应电流的方向（图 6-7）。

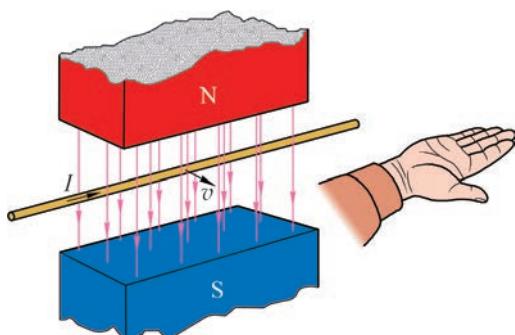


图 6-7 右手定则示意图（说明：图中运动导体是闭合电路的一部分）

尝试用右手定则判断示例 2 导体棒 MN 中感应电流的方向。

大家谈

根据如图 6-6 所示的情景，讨论下列几个问题：

- (1) 如果导体棒 MN 处于静止状态，导线框在外力作用下向左做匀速运动，此时导体棒 MN 中感应电流的方向如何？
 - (2) 如果导体棒和导线框都处于静止状态，要使导体棒仍然能够产生 $N \rightarrow M$ 方向的感应电流，磁感应强度 B 的大小应该如何变化？
 - (3) 如果导体棒和导线框都处于静止状态，磁感应强度 B 的大小也不变，如何使导体棒仍然产生 $N \rightarrow M$ 方向的感应电流？
- 从以上讨论中，你发现了什么内在的规律？

拓展视野

按照分子电流假说，每个分子相当于一个由分子环流形成的小磁针。在条形磁体中，这些小磁针同方向排列，所有分子环流在磁体内部相互抵消，在磁体表面形成环形面电流，称为磁化电流。条形磁体产生的磁场即可看成由磁化电流形成。如图 6-8 所示，当条形磁体向下插入闭合线圈过程中，从俯视角度看，磁体 N 极向下的磁化电流为顺时针方向，对纵切面而言，磁化电流垂直于纸面“左侧向里，右侧向外”；根据楞次定律，闭合线圈内将产生逆时针方向的感应电流，感应电流的磁场为 B' ；承载左右两侧磁化电流元的磁体受到磁场 B' 的安培力分别为 F_1 和 F_2 。承载外侧所有磁化电流元的磁体受到的安培力的方向一定向上，阻碍条形磁体的向下运动。磁体侧面的磁化电流为所有分子电流叠加而成；因此感应电流的磁场对承载着分子电流的条形磁体的安培力。

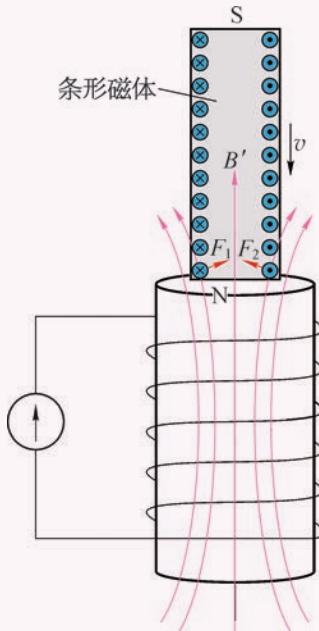


图 6-8 用分子电流假说解释感应电流产生的磁场力

问题与思考

1. 如图 6-9 所示，一个闭合导体圆环 a 和有缺口的导体圆环 b 用细杆连接，可绕细杆中央的光滑转动轴 O 在水平面内自由转动。用条形磁体的任一极插入环 a 时，可观察到环向后退；插入 b 环时，环不动。试解释观察到的现象。

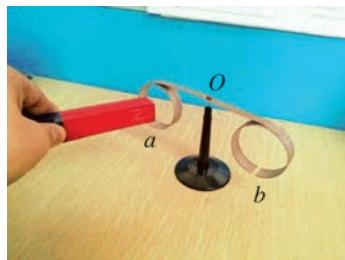


图 6-9

2. 现将电池组、滑动变阻器、带铁芯的线圈 A 、线圈 B 、电流计及开关用导线按如图 6-10 所示连接。在开关闭合、线圈 A 放在线圈 B 中的情况下，某同学发现将滑动变阻器的滑片 P 向左加速滑动时，灵敏电流计指针向右偏转。由此判断下列后续操作是否符合实验事实，简述判断的理由。

- 线圈 A 向上拔出或滑动变阻器滑片 P 向右加速滑动，都能引起电流计指针向左偏转；
- 线圈 A 中铁芯向上拔出或断开开关，都能引起电流计指针向右偏转；
- 滑动变阻器的滑片 P 匀速向左或匀速向右滑动，都能使灵敏电流计指针静止在中央。

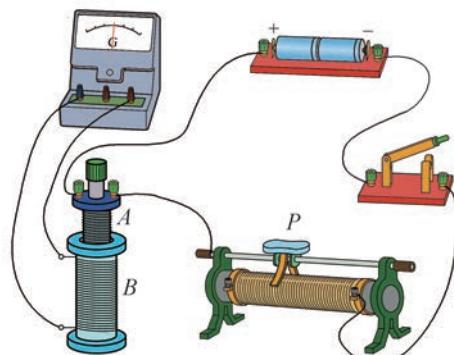


图 6-10

3. 如图 6-11 所示，在 y 轴左侧有一垂直于纸面向里的匀强磁场，一个圆形线圈的一半放在磁场中，圆心与原点 O 重合，线圈平面与磁场方向垂直。若要使线圈中产生顺时针方向的感应电流，通过线圈的磁通量应增大还是减少？感应电流磁场的方向如何？若使上述线圈中的感应电流为顺时针方向，线圈的运动方式有哪三种可能？

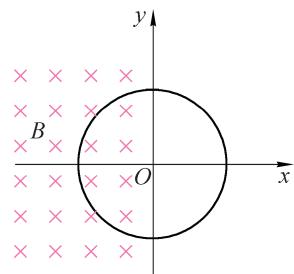


图 6-11

4. 如图 6-12 所示，某教室墙上有一朝南的钢窗，从室内学生的角度看，穿过窗户的地磁场是什么方向？学生推开窗户时，穿过窗户的地磁场的磁通量如何变化？从学生的角度看，窗框中的感应电流沿什么方向？

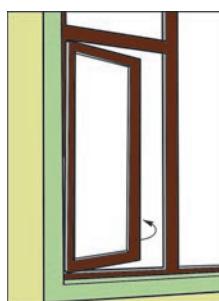


图 6-12

5. 如图 6-13 所示, 闭合铜环与闭合金属框相接触置于匀强磁场中。当铜环向右移动时(金属框不动): 甲同学认为闭合铜环 $egfhe$ 的磁通量没有发生变化, 所以闭合铜环内没有感应电流; 乙同学认为闭合回路 $eadfge$ 的磁通量变大, 根据楞次定律有逆时针方向的感应电流。试根据所学知识判断甲、乙两同学的观点是否正确, 并简述理由。

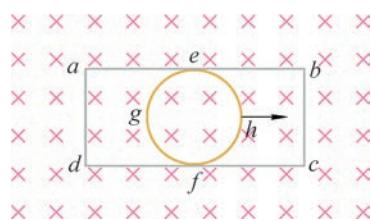


图 6-13

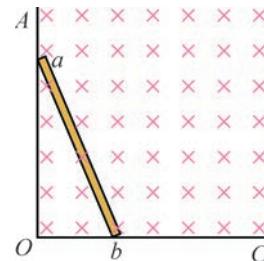


图 6-14

6. 如图 6-14 所示, AOC 是光滑的直角金属导轨, AO 沿竖直方向, OC 沿水平方向。 ab 为靠在导轨上的一根金属直棒, b 端较 a 端更靠近 O 点。金属直棒从静止开始在重力作用下运动, 运动过程中 b 端始终在 OC 上, a 端始终在 AO 上, 直到金属直棒 ab 完全落在 OC 上。整个装置放在一匀强磁场中, 磁场方向垂直纸面向里。则:

- (1) 确定金属直棒 ab 在运动过程中感应电流的方向, 并说明判断的理由;
- (2) 确定金属直棒 ab 所受磁场力的方向, 并说明判断的理由。

第二节 法拉第电磁感应定律

为了使驾驶员及时获取汽车各系统工作状况的相关信息，保证汽车可靠而安全地行驶，在驾驶员前方的面板上装有各种仪表。一般汽车上常见的仪表有车速里程表、发动机转速表、电流表、燃油表、水温表、机油压力表等。如图 6-15 (a) 所示是汽车发动机转速表，用来指示发动机的运行情况。图中转速表的单位以“ $1/\text{min} \times 1000$ ”表示，即转速表显示发动机 1 min 转多少千转，驾驶员可随时知道发动机的运转情况，使发动机保持最佳工作状态。

常见的发动机磁电式转速表的转速测试装置应用了电磁感应原理，如图 6-15 (b) 所示。测试装置中的磁性传感器主要由永久磁体和感应线圈构成。转轮安装在发动机转轴上，感应线圈与其对应并固定在适当位置。汽车行驶时转轮被带动旋转，每转一个齿，齿的凹凸引起感应线圈内产生一个感应电流脉冲，其变化频率等于被测转速与转轮上齿的个数的乘积。测试装置中的信号处理器把 1 min 内接收到的脉冲数转变成相应的电压，应用电磁感应原理驱动转速表指针，驾驶员便可实时观察发动机的转速了。

► 感应电动势

穿过闭合回路的磁通量发生变化，就有感应电流，表明回路中存在电动势。这种由于磁通量的变化而引起的电动势叫做**感应电动势 (induced electromotive force)**。产生感应电动势的那部分导体相当于一个“电源”。在电磁感应现象里，感应电流的大小随回路中电阻的大小变化而变化，但感应电动势的大小则与回路中的电阻大小无关，即使回路断开，感应电动势依然存在，感应电动势比感应电流更能反映电磁感应现象的本质。

在如图 6-16 所示的实验中，每次将条形磁体插入（或抽出）感

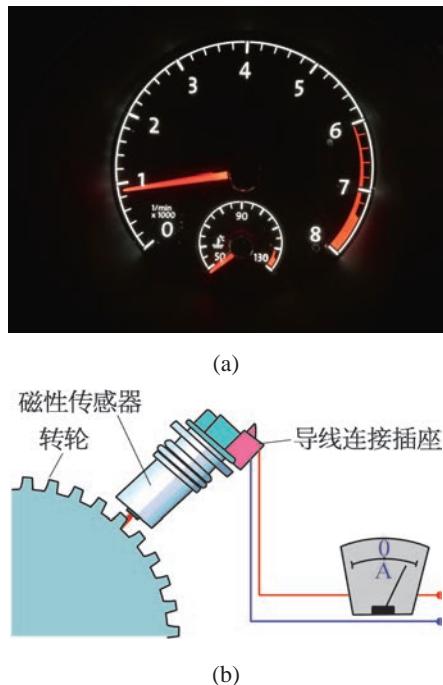


图 6-15 汽车发动机转速表和转速
测试装置

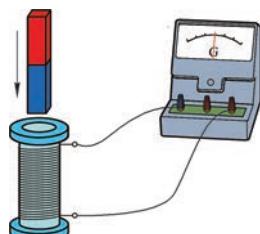


图 6-16 观察磁体快速插入和抽出时感应
电流的大小

应线圈，穿过感应线圈的磁通量变化量均相同。留意磁体插入（或抽出）感应线圈所用时间的长短与观察到的灵敏电流计指针偏转角度大小的关系。实验发现，条形磁体插入（或抽出）感应线圈所用时间越短，磁通量变化得越快，灵敏电流计指针偏转角度越大，表示感应电流越大，即感应线圈中产生的感应电动势越大。反之，感应电动势越小。

若线圈的面积不变，感应电动势大小与线圈内磁感应强度变化有何关系呢？

自主活动

如图 6-17 所示，“智能电源”分别输出“直流电压”“周期性梯形变化的电压”“周期性三角形变化的电压”和“连续的锯齿形电压”。将智能电源的输出端连接线圈 a ，在线圈 a 内就能产生可控的变化的磁场。磁传感器测试端插入线圈 a 的中部，可以用来测量线圈 a 内磁感应强度 B 的大小。线圈 b 套在线圈 a 的中段，内部的磁感应强度与线圈 a 内的磁传感器测量值 B 相同。线圈 b 的截面积不变，磁通量的变化率为 $S \frac{\Delta B}{\Delta t}$ ，连接线圈 b 的电压传感器（内置）测量感应电动势 E 的大小，获得 E 与 $S \frac{\Delta B}{\Delta t}$ 之间的关系。

当线圈 a 输入“直流电压”时，观察线圈 b 是否产生感应电动势；当线圈 a 先后输入“周期性梯形变化的电压”“周期性三角形变化的电压”和“连续的锯齿形电压”时，观察在这些周期性电压的“上升沿”和“下降沿”期间，线圈 b 产生的感应电动势的变化及“上升沿”和“下降沿”的斜率大小对线圈 b 产生的感应电动势的影响。由于线圈 b 的面积不变，容易从实验得到感应电动势 E 与磁感应强度的变化率 $\frac{\Delta B}{\Delta t}$ 之间的关系。

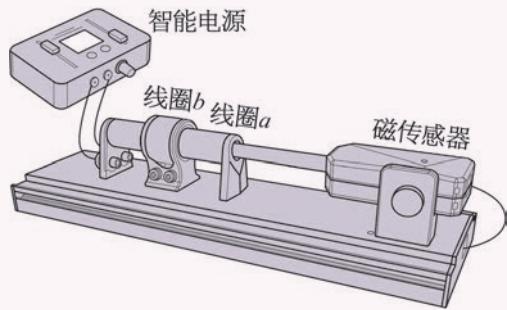


图 6-17 研究感应电动势大小与磁感应强度变化率之间的关系

大量的实验证明，当线圈回路包围的面积保持不变，仅磁感应强度发生变化时，线圈中产生的感应电动势 E 与 $\frac{\Delta B}{\Delta t}$ 成正比，即 $E \propto \frac{\Delta B}{\Delta t}$ 。

实验又发现：在匀强磁场中，当线圈回路包围的面积发生变化时也会产生感应电动势。

可以看出，感应电动势的大小与磁通量变化的快慢有关。磁通量变化的快慢可以用磁通量的变化量与所用时间的比表示，也称为磁通量的变化率；即感应电动势的大小跟磁通量的变化率有关。精确的实验表明：回路中感应电动势的大小，跟穿过这一回路的磁通量的变化率成正比，这就是法拉第电磁感应定律（Faraday's law of electromagnetic induction）。

如果 t_1 时刻穿过闭合回路的磁通量为 Φ_1 ， t_2 时刻穿过闭合回路的磁通量为 Φ_2 ，在较

短的时间 $\Delta t = t_2 - t_1$ 内，磁通量的变化量为 $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ ，则磁通量的变化率为 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 。用 E 表示闭合回路中的感应电动势，则

$$E = k \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

式中 k 是比例常量。在国际单位制中，电动势的单位是伏 (V)、磁通量的单位是韦伯 (Wb)、时间的单位是秒 (s)，这时 $k = 1$ 。于是法拉第电磁感应定律就可以表示为

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

如果闭合回路是由截面积相同的 n 匝线圈密绕而成，这样的线圈可以看成是由 n 个单匝线圈串联而成，因此整个线圈中的感应电动势就是单匝线圈感应电动势的 n 倍，即

$$E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

我们可以用上述公式计算感应电动势的大小，再用楞次定律判断感应电流的方向。

示例 1 一螺线管的匝数 $n = 400$ 、截面积 $S = 0.20 \text{ m}^2$ ，其内部存在向左的匀强磁场，磁感应强度 B 逐渐增加且均匀变化，如图 6-18 所示。设磁感应强度的变化率 $\frac{\Delta B}{\Delta t} = 0.10 \text{ T/s}$ ，电阻 R 为 10Ω ，忽略螺线管导线的电阻，试求：

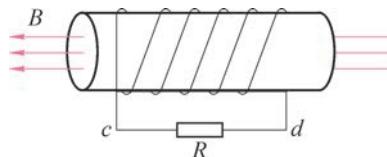


图 6-18 螺线管内产生感应电流

(1) 螺线管内感应电动势的大小和通过电阻 R 的感应电流方向；

(2) 在 $\Delta t = 2.0 \text{ s}$ 时间内通过电阻 R 的感应电荷量。

分析：根据法拉第电磁感应定律可以求螺线管内产生的感应电动势大小，根据楞次定律可以判断感应电流的方向，再通过电流和电荷量的关系求出通过电阻的感应电荷量。

解：(1) 由于螺线管内磁场的磁感应强度均匀变化，根据法拉第电磁感应定律，螺线管内感应电动势

$$\begin{aligned} E &= n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \\ &= nS \frac{\Delta B}{\Delta t} \\ &= 400 \times 0.20 \times 0.10 \text{ V} \\ &= 8.0 \text{ V} \end{aligned}$$

根据楞次定律，通电螺线管感应电流的磁场阻碍原磁场的变化，从而可以判断通过电阻 R 的感应电流方向 $c \rightarrow d$ 。

(2) 螺线管内感应电流的大小

$$I = \frac{E}{R} = \frac{8.0}{10} \text{ A} = 0.80 \text{ A}$$

则在 2.0 s 时间内，通过电阻 R 的感应电荷量

$$\begin{aligned} q &= I \Delta t \\ &= 0.80 \times 2.0 \text{ C} \\ &= 1.6 \text{ C} \end{aligned}$$

大家谈

计算通过 n 匝线圈的电荷量是否还可以这样推理：

$$q = I \Delta t = \frac{E}{R} \Delta t = n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \times \frac{\Delta t}{R} = n \frac{\Delta \Phi}{R} = nS \frac{\Delta B}{R}$$

在上述推理过程中每一个等号成立应该满足什么条件？

▶ 导体切割磁感线运动时感应电动势的大小

在不随时间改变的磁场内，闭合回路的一部分导线做切割磁感线运动而使回路磁通量发生变化，这时运动的导体会产生感应电动势，运动的导体相当于一个电源。这种情况下，法拉第电磁感应定律可以表示为一种更简单的形式。

如图 6-19 所示，在磁感应强度为 B 的匀强磁场中，有一个宽度为 l 的线框 $cabd$ ，线框的平面跟磁场方向垂直。设一可移动的导体棒 MN 以速度 v 向右匀速运动，在 Δt 时间内，由位置 MN 移动到 M_1N_1 ，移动的距离为 $v \Delta t$ ，导体棒与线框包围的面积变化量为 $\Delta S = lv \Delta t$ 。

在 Δt 时间内，闭合回路 $abNMa$ 的磁通量的变化量

$$\Delta \Phi = B \Delta S = Blv \Delta t$$

根据法拉第电磁感应定律，回路中感应电动势的大小

$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = Blv$$

可见，在磁场中导体切割磁感线运动时，导体中产生的感应电动势 E 的大小跟磁感应强度 B 、导线的长度 l 和速度 v 成正比。当 B 、 l 、 v 三者方向相互垂直时，感应电动势的大小为

$$E = Blv$$

根据楞次定律（或右手定则），导线中感应电流的方向为 $N \rightarrow M$ 。

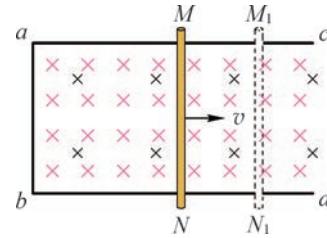


图 6-19 导体棒切割磁感线

如果用一矩形线圈的一条边在匀强磁场中垂直切割磁感线，就能用实验室仪器测量感应电动势，从而验证法拉第电磁感应定律。

自主活动

利用如图 6-20 所示的实验装置就能研究感应电动势与导线运动速度的关系。

图中 n 匝矩形线圈可以沿固定的垂直导轨下落。线圈上固定一个挡光片，当挡光片穿过光电门时，线圈下面的一条边进入磁场。线圈可从不同高度下落。光电门传感器采集线圈的瞬时速度 v ，电压传感器记录此时的感应电动势 E 。作出 $E-v$ 图线就可以判断感应电动势与线圈运动速度之间的关系。

如果 $E-v$ 图线是一条通过原点的直线，就验证了在线圈的下边边长（切割磁感线的导线长度）和磁感应强度均不变的条件下，线圈产生的感应电动势与线圈运动速度成正比。否则，应分析与法拉第电磁感应定律不一致的原因。

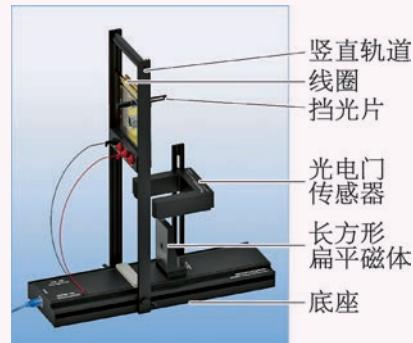


图 6-20 研究感应电动势与导线运动速度间的关系

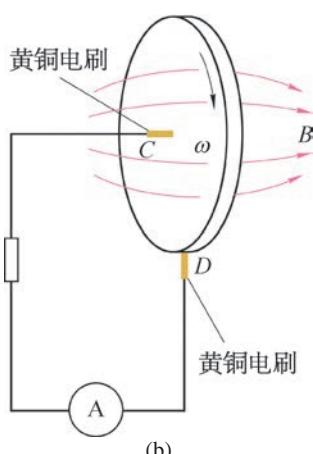


图 6-21 圆盘发电机和原理图

如图 6-21 所示是世界上第一台发电机——法拉第圆盘发电机。紫铜圆盘的圆心安装在水平转轴上，可以通过一个摇柄绕水平轴在竖直平面内转动，让紫铜圆盘放置在蹄形磁体的两个磁极之间，圆盘的圆心 C 和边缘 D 处各与一个黄铜电刷紧贴，再用导线把这两个电刷与电流表连接起来。当法拉第转动摇柄使紫铜圆盘旋转起来时，观察到电流表的指针发生偏转，说明电路中产生了持续的感应电流。

法拉第圆盘发电机是怎样产生电流的呢？蹄形磁体的两个磁极之间存在磁场，把紫铜圆盘看作是由无数根长度等于半径的紫铜辐条组成的，在转动圆盘时，每根辐条都做切割磁感线的运动。辐条和外电路中的电流表构成闭合电路，电路中产生了感应电流。随着圆盘的不断旋转，任何时刻总有某根辐条能够与电刷接触形成回路，便在电路中形成持续不断的电流。

后来，人们在此基础上，将蹄形磁体改为能产生更强磁场的电磁体，用多股导线绕制的线框代替紫铜圆盘，对电刷也进行了改进，就制成了功率较大的可供实用的发电机。目前，即使功率为 100 万千瓦的特大型发电机，也是根据法拉第圆盘发电机的基本原理——电磁感应定律制成的。

从能量角度看，电磁感应现象的本质是通过外力做功将其他形式的能量转化为电能。

在电磁感应现象中，产生感应电动势的那部分导体相当于电源。图 6-19 中导体棒 MN 向右运动时，在导体棒内产生 $N \rightarrow M$ 方向的感应电流。在磁场中，导体棒 MN 因其中通过感应电流而受到向左的安培力作用。为了维持导体棒 MN 做匀速运动，必须有跟安培力大小相等、方向相反的外力克服安培力做功。在外力做功的过程中，外部提供的能量转化为电能。

设 MN 受到的外力为 F ， MN 经过位移 s 所需时间为 Δt ，则 MN 的移动速度 $v = \frac{s}{\Delta t}$ ，可得外力对 MN 所做的功

$$W_{\text{外}} = Fs = Fv\Delta t$$

设感应电动势为 E ，感应电流为 I ，则回路在 Δt 时间内消耗的电能

$$W_{\text{电}} = IE\Delta t$$

由于 MN 做匀速运动， MN 受到外力 F 与 $F_{\text{安}}$ 作用，这两个力大小相等、方向相反。由于 MN 的动能不变，根据能量守恒定律，外力对 MN 所做的功全部转化为回路消耗的电能，即

$$Fv\Delta t = F_{\text{安}}v\Delta t = BIlv\Delta t = IE\Delta t$$

得

$$E = Blv$$

与前面给出的计算感应电动势大小的公式一致。可见，当 B 、 l 、 v 三者互相垂直情况下，用 $E = Blv$ 计算感应电动势的大小，导体棒 NM 相当于一个电源。

拓展视野

如果导体棒的运动方向跟导线本身垂直，但跟磁感应强度 B 的方向夹角 θ （图 6-22），此时可以把速度 v 分解为两个分量：垂直于磁感应强度的分量 $v_1 = v\sin \theta$ 和平行于磁感应强度的分量 $v_2 = v\cos \theta$ 。 v_2 不切割磁感线，不产生感应电动势。 v_1 切割磁感线，产生的感应电动势

$$E = Blv_1 = Blv\sin \theta$$

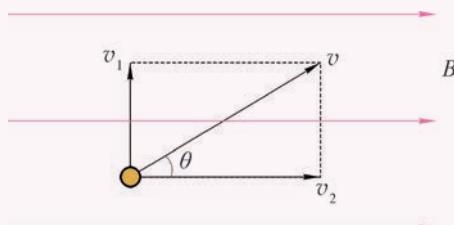


图 6-22 分解导体棒运动速度计算感应电动势

示例 2 如图 6-23 所示, 在一个磁感应强度 $B=0.5\text{ T}$ 的匀强磁场中, 垂直于磁场方向水平放置两根相距为 $l=0.1\text{ m}$ 的平行光滑金属导轨 MN 和 PQ , 导轨电阻忽略不计; 在两根导轨的端点 N 、 Q 之间连接一个阻值 $R=0.3\Omega$ 的电阻; 垂直于导轨放置一根与导轨接触良好的金属棒, 金属棒在接触点 a 、 b 之间部分的电阻 $r=0.2\Omega$ 。若金属棒在水平拉力 F 作用下以速度 $v=4.0\text{ m/s}$ 向右做匀速运动, 试求:

- (1) 通过电阻 R 的电流大小和方向;
- (2) 使金属棒做匀速运动的拉力;
- (3) 回路中的热功率。

分析: 金属棒在水平拉力 F 作用下向右匀速运动垂直切割磁感线, 在金属棒中产生了感应电动势。以金属棒为研究对象, 根据“右手定则”判断感应电流的方向是 $a \rightarrow b$ 。金属棒和电阻 R 组成的闭合回路中金属棒 ab 部分相当于一个电源。金属棒的电阻相当于这个闭合电路的内阻, 外电路的电阻为 R 。根据“左手定则”通有感应电流的金属棒在磁场中受到向左的安培力的作用, 要保持金属棒匀速运动必定受到向右的水平拉力 F 作用, 且水平拉力 F 的大小等于安培力的大小。

解: 根据法拉第电磁感应定律, 金属棒垂直切割磁感线产生感应电动势为 $E_{ab}=Blv$, 在金属棒和电阻 R 组成的闭合电路中内阻 $r=0.2\Omega$, 外电阻 $R=0.3\Omega$ 。

- (1) 根据闭合电路欧姆定律, 通过电阻 R 的电流也就是通过金属棒的电流, 电流的大小

$$\begin{aligned} I &= \frac{E_{ab}}{R+r} \\ &= \frac{Blv}{R+r} \\ &= \frac{0.5 \times 0.1 \times 4.0}{0.3+0.2} \text{ A} \\ &= 0.4 \text{ A} \end{aligned}$$

电流的方向为从 Q 经 R 到 N 。

(2) 由于金属棒做匀速运动, 金属棒受到安培力的方向向左, 外力 F 的方向向右。安培力与外力是一对平衡力, 外力 F 的大小

$$\begin{aligned} F &= F_{\text{安}} = BlI \\ &= 0.5 \times 0.4 \times 0.1 \text{ N} \\ &= 0.02 \text{ N} \end{aligned}$$

- (3) 根据焦耳定律, 回路中电流的热功率

$$\begin{aligned} P_Q &= I^2(R+r) \\ &= 0.4^2 \times (0.3+0.2) \text{ W} = 0.08 \text{ W} \end{aligned}$$

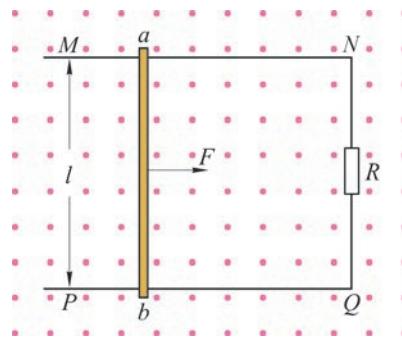


图 6-23 金属棒在外力作用下切割磁感线

其实，根据能量守恒定律，由于金属棒做匀速运动其动能不变；金属棒始终在水平面上运动，重力势能也不变，即金属棒的机械能不变。外力 F 的机械功率等于回路中的焦耳热功率，即

$$\begin{aligned} P_Q &= Fv \\ &= 0.02 \times 4.0 \text{ W} \\ &= 0.08 \text{ W} \end{aligned}$$

示例 3 如图 6-24 所示，边长分别为 l 与 h 、电阻为 R 、质量为 m 的金属线框，自上而下匀速穿过宽度为 h 、磁感应强度为 B 的匀强磁场区域。求在这个过程中线框产生的热量。

分析：线框匀速穿过匀强磁场的过程可分为两段：

(1) 线框刚进入磁场到全部进入磁场， cd 边切割磁感线，根据楞次定律，线框中的感应电流是逆时针方向，根据“左手定则”，由于感应电流， cd 边受到的安培力方向为竖直向上；

(2) 线框从磁场中离开， ab 边切割磁感线。线框中的感应电流是顺时针方向， ab 边受到的安培力方向仍然是竖直向上。

其实，根据楞次定律，感应电流总是起到“阻碍”线框下落的作用。现在线框下落，无论是线框的 ab 边还是 cd 边处于磁场范围内，“阻碍”作用必然表现为线框受到向上的阻力作用，即由于感应电流， ab 边或 cd 边受到的安培力总是向上。重力克服安培力做功使机械能转化为电能，感应电流做功再使电能转化成内能。

解：线框在穿过磁场区域过程中，只有一条边切割磁感线，线框中产生的感应电动势 E 与感应电流大小始终不变。以线框为研究对象，线框所受重力方向竖直向下，安培力方向始终竖直向上。因为线框做匀速直线运动，所以线框所受重力和安培力是一对平衡力，即

$$mg = BIl$$

其中 $I = \frac{E}{R} = \frac{Blv}{R}$ ，得

$$\begin{aligned} mg &= B \frac{Blv}{R} l \\ &= \frac{B^2 l^2 v}{R} \end{aligned} \quad (1)$$

线框进入磁场和离开磁场都做匀速直线运动，所用时间均为 $t = \frac{h}{v}$ 。

电流做的总功

$$W = 2I^2 R t$$

$$= 2 \frac{B^2 l^2 v h}{R}$$

可知线框产生的热量

$$Q = W = 2 \frac{B^2 l^2 v h}{R} \quad (2)$$

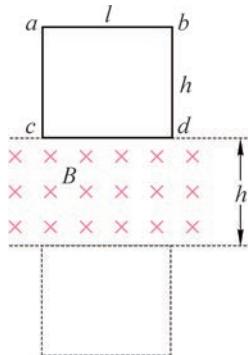


图 6-24 线框穿过匀强磁场

将①式代入②式得

$$Q = 2mgh$$

还可以从能量转化的角度考虑。因为线框下落过程中速度不变，即线框的动能不变，所以线框产生的热量是由重力势能转变成电能再转变而来的。在线框通过磁场的过程中，重力势能减少了 $2mgh$ ，根据能量守恒定律线框产生的热量 Q 一定等于 $2mgh$ 。

由此例可知，在解决与电磁感应相关的实际问题时，有时用能量守恒定律可以相当简单快捷。

问题与思考

1. 在涉及磁通量、磁通量的变化率以及感应电动势的概念时，试列举符合以下说法的实例。

- (1) 磁通量增大，磁通量的变化率减小。
- (2) 磁通量为零，磁通量的变化率不为零。
- (3) 磁通量减小，感应电动势增大。
- (4) 磁通量减小，感应电动势减小。

2. 边长为 0.1 m 的 200 匝正方形线圈处在匀强磁场中，匀强磁场垂直穿过正方形线圈。磁感应强度 B 随时间 t 的变化规律如图 6-25 (a) 所示，在图 6-25 (b)、(c) 中分别画出磁通量 Φ 和感应电动势 E 随时间 t 的变化规律。

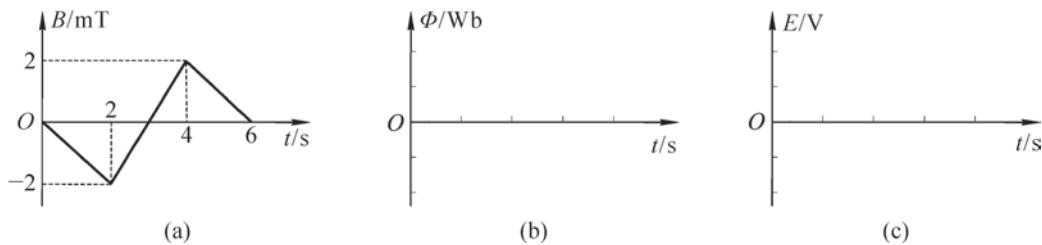


图 6-25

3. 如图 6-26 所示，边长为 L 的正方形导线框 $abcd$ 放在纸面内，在 ad 边左侧有足够大的匀强磁场，磁感应强度大小为 B ，方向垂直纸面向里，使导线框绕过 a 点垂直于纸面的轴在纸面内顺时针转动，经时间 Δt 转到图中虚线位置。试求时间 Δt 内导线框 $abcd$ 中感应电流的方向和平均感应电动势的大小。

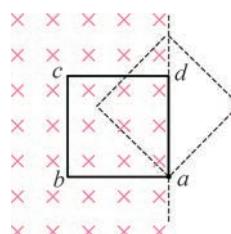


图 6-26

4. 如图 6-27 (a) 所示, 阻值为 R 、匝数为 n 的圆形金属线圈与一个阻值为 $2R$ 的电阻连接成闭合电路; 线圈的半径为 r_1 , 在线圈中有一个半径为 r_2 的圆形匀强磁场区域, 该磁场方向垂直于线圈平面。磁感应强度 B (向里为正) 随时间 t 变化的关系如图 6-27 (b) 所示, 图中 B_1 、 t_1 为已知量。导线电阻不计。判断 t_1 时刻通过电阻的电流方向和大小, 并说明判断的理由。

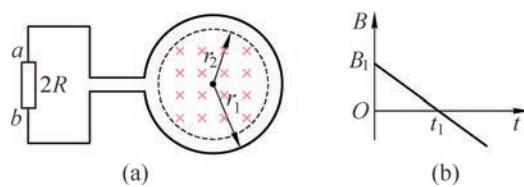


图 6-27

5. 如图 6-28 所示, 一个“ \angle ”形导轨垂直于磁场固定在磁感应强度为 B 的匀强磁场中, ab 是与导轨材料相同的导体棒, 导体棒与导轨接触良好。在外力作用下, 导体棒以恒定速度 v 向右运动。若以导体棒处于图示位置的时刻作为计时起点, 在图 6-29 中定性画出回路中感应电动势 E 、感应电流 I 、导体棒所受外力的功率 P 和回路中产生的焦耳热 Q 随时间变化的图像。

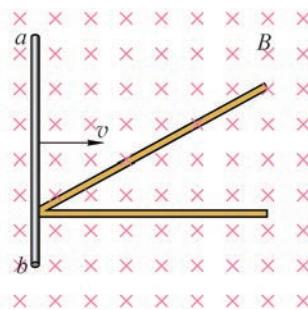


图 6-28

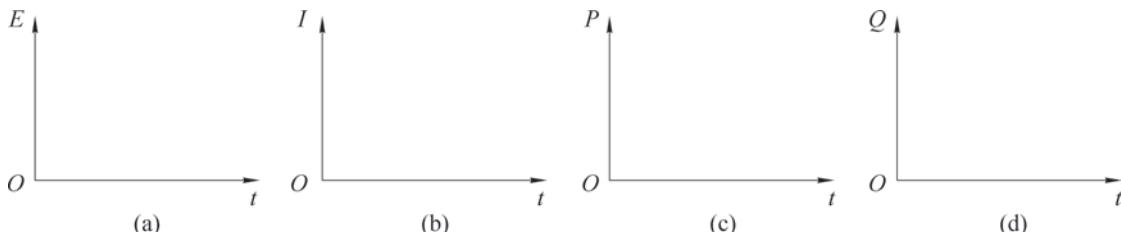


图 6-29

6. 如图 6-30 所示, 虚线框内为磁感应强度 B 为 1.0 T 的匀强磁场区域, 磁场方向垂直纸面向外; 在水平向右的外力作用下, 一个边长为 0.20 m 的正方形闭合导线框 $abcd$ 沿纸面以 0.10 m/s 的速度由左向右匀速进入磁场。导线框每条边的电阻均为 1.0Ω , dc 边相当于“电源”。用电池等符号画出正方形闭合导线框的等效电路图, 图中标注电流的方向, 并计算:

- (1) 在导线框进入磁场过程中 ad 边受到的安培力随时间变化的关系;
- (2) 导线框进入磁场过程中感应电流产生的焦耳热;
- (3) 导线框进入磁场过程中通过导线的电荷量。

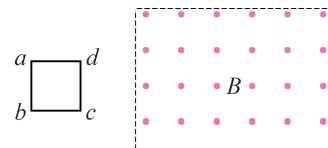


图 6-30

7. 如图 6-31 所示，光滑竖直平行导轨上套有一质量为 m 的导体棒 ab ，导轨上端连接一阻值为 R 的电阻，导体棒 ab 的电阻阻值为 $\frac{R}{2}$ ，其余电阻不计。现导体棒 ab 自由下落，以速度 v 进入高为 h 的水平匀强磁场区域，穿出磁场时的速度为 $\frac{v}{2}$ 。则导体棒 ab 穿过磁场区域过程中产生多少焦耳热？电阻 R 产生多少焦耳热？

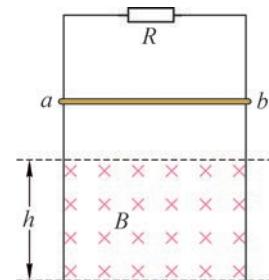


图 6-31

小结

• 基本概念和基本规律

楞次定律：感应电流的磁场总是要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。

感应电动势：穿过闭合回路的磁通量变化而引起的电动势。

法拉第电磁感应定律：回路中感应电动势的大小，跟穿过这一回路的磁通量的变化率成正比， $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 。

• 基本方法

通过对楞次定律的探究和右手定则的应用，认识控制变量的方法和归纳的方法。

通过得出法拉第电磁感应定律的过程，感受实验归纳和理论演绎相结合的研究方法。

• 知识结构图



复习与巩固

1. 如图 6-32 所示, 一长直铁芯上绕有一固定线圈 M , 铁芯右端与一木质圆柱连接, 木质圆柱上套有一闭合金属环 N , N 可在木质圆柱上无摩擦移动, R 为滑动变阻器, E_1 和 E_2 为直流电源, S 为单刀双掷开关。则:
- 在 S 断开的情况下, S 向 a 闭合的瞬间金属环 N 向木质圆柱的哪一端运动?
 - 在 S 断开的情况下, S 向 b 闭合的瞬间金属环 N 向木质圆柱的哪一端运动?
 - 在 S 已向 a 闭合的情况下, 将 R 的滑片向 c 端移动时, 金属环 N 向木质圆柱的哪一端运动?
 - 在 S 已向 a 闭合的情况下, 将 R 的滑片向 d 端移动时, 金属环 N 向木质圆柱的哪一端运动?

2. 扫描隧道显微镜 (STM) 可用来探测样品表面原子尺寸上的形貌。为了有效隔离外界震动对 STM 的扰动, 在圆底盘周边沿其径向对称地安装若干对紫铜薄板, 并施加磁场来快速衰减其微小震动, 如图 6-33 所示。如图 6-34 所示是对紫铜薄板施加恒定磁场的四种方案。试问出现扰动时, 对于紫铜薄板上下、左右震动衰减最有效的方案是哪一个? 说明判断的理由。

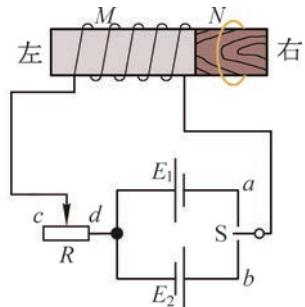


图 6-32

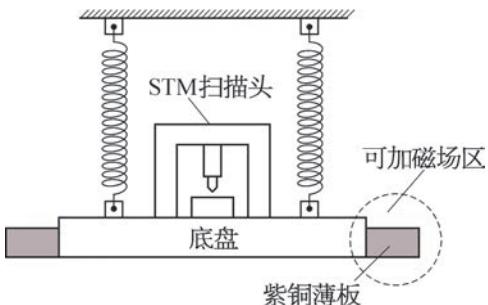


图 6-33



图 6-34

3. 如图 6-35 所示, 虚线框内存在匀强磁场, 磁场方向垂直于纸面向里, 粗细均匀的电阻丝围成的正方形线框置于匀强磁场中, 正方形线框的边与虚线框平行。线框以同样大小的速度沿四个不同方向平移出磁场, 则在正方形线框移出的过程中, 线框的一边 a 、 b 两点间电势差的绝对值 U_{ab} 分别为多大?

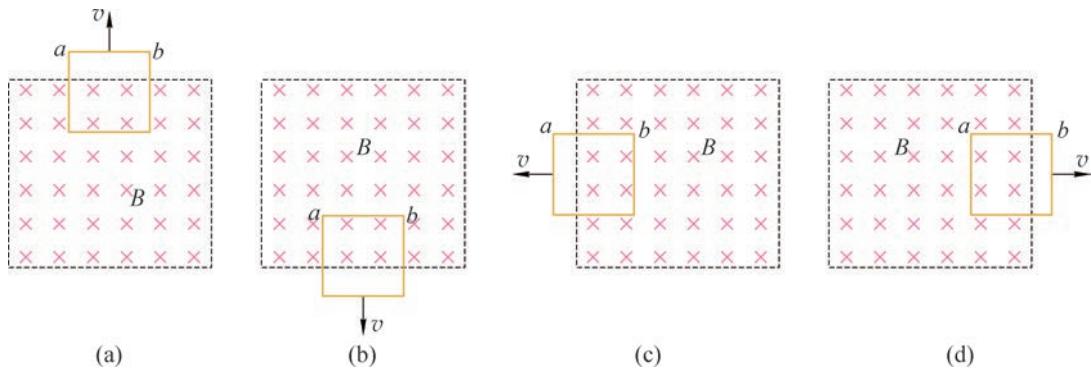


图 6-35

4. 一单匝线圈在匀强磁场中绕垂直于磁场的轴匀速转动时，穿过线圈的磁通量随时间的变化关系如图 6-36 所示。则在 $0 \sim 2$ s 内线圈中感应电动势随时间如何变化？ $0 \sim 2$ s 内线圈中感应电动势的平均值多大？

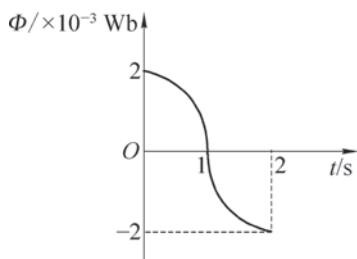


图 6-36

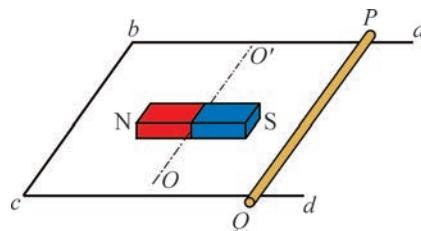


图 6-37

5. 如图 6-37 所示， $abcd$ 是光滑水平放置的金属框， PQ 为导体棒，静止在框架上；一条形磁体绕金属框平面内的 OO' 轴转过 90° 。在此过程中，闭合回路 $QPbc$ 内磁通量如何变化？导体棒将如何运动？条形磁体的转动方向与导体棒的运动方向有没有关系？说明判断的理由。
6. 如图 6-38 所示，匀强磁场中有一个用软导线制成的单匝闭合线圈，线圈平面与磁场垂直。已知线圈的面积为 S 、电阻为 R ，磁场的磁感应强度为 B 。现同时向两侧拉动线圈，线圈的两边在 Δt 时间内合到一起。则线圈在上述过程中感应电动势的平均值多大？感应电流的平均值多大？感应电流的方向如何？通过导线横截面的电荷量多大？

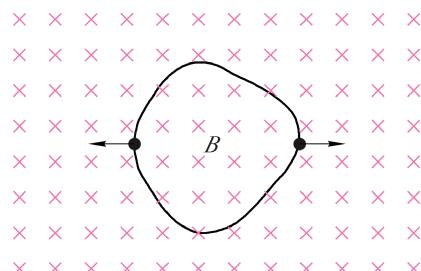


图 6-38

7. 一根长 50 cm 的直导线在磁感应强度为 0.20 T 的匀强磁场中向垂直于磁场的方向匀速运动。如果导线中的感应电动势为 1.0 V，直导线的运动速度多大？如果该直导线连接成的回路总电阻为 2.0 Ω，沿着直导线运动速度方向的拉力为多大？

8. 如图 6-39 所示，由导体组成半径为 r 的水平圆环内有垂直于纸面向里、磁感应强度为 B 的匀强磁场，电路的固定电阻为 R ，线框其余电阻不计，一根长度大于 $2r$ 、电阻不计的导体棒 MN 以速度 v 在圆环上自左端向右端无摩擦地匀速滑动。试求 MN 从左端滑到右端的过程中，通过电阻 R 的电流平均值及通过电阻 R 的电荷量。

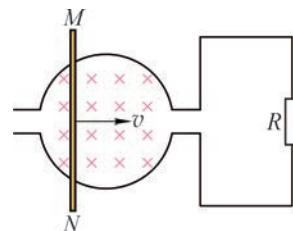


图 6-39

9. 如图 6-40 所示，有两根和竖直方向成 α 角的光滑平行的金属轨道，上端接有可变电阻 R 、下端足够长，空间有垂直于轨道平面磁感应强度为 B 的匀强磁场，一根长为 L （与金属轨道间距近似相等）、质量为 m 的金属杆从轨道上端由静止开始滑下，金属杆与轨道接触良好，且金属杆的运动方向始终与杆垂直，金属杆的电阻为 r 。

- (1) 当金属杆速度为 v 时，求感应电动势、感应电流和金属杆受到的安培力。
 (2) 经过足够长的时间后，金属杆的速度会趋近于一个最大值。求最大速度 v_{\max} 。

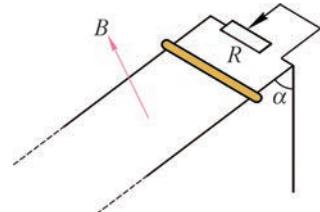


图 6-40

10. 如图 6-41 所示，用两根材料、粗细、长度完全相同的导线绕成匝数分别为 $n_1 = 5$ 和 $n_2 = 10$ 的圆形闭合线圈 a 和 b ，两线圈处于同一平面并与匀强磁场垂直。当磁感应强度随时间均匀变化时，两线圈中的感应电动势之比 $E_a : E_b$ 为多大？感应电流之比 $I_a : I_b$ 为多大？

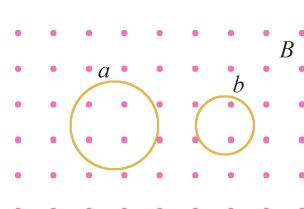


图 6-41

11. 如图 6-42 所示，在磁感应强度大小为 B 、方向竖直向上的匀强磁场中，有一质量为 m 、阻值为 R 的闭合矩形金属线框 $abcd$ 用绝缘轻质细杆悬挂在 O 点，并可绕 O 点摆动，细杆和金属框处在同一平面内；金属线框从右侧某一静止位置开始释放。在摆动到左侧最高点的过程中，细杆和金属框共处的平面始终和纸面垂直。判断线框中感应电流的方向，说明判断的理由。

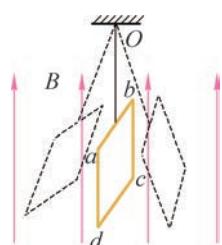


图 6-42

12. 如图 6-43 所示，两同心圆环 A 、 B 置于同一水平面上，其中 A 为均匀带电绝缘环， B 为导体环，两环均可绕垂直于纸面过圆心的轴在水平面内转动。若 A 匀速转动或加速转动， B 中有没有感应电流？感应电流的方向如何？说明判断的理由。

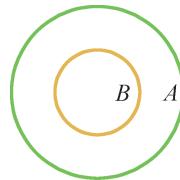


图 6-43

13. 如图 6-44 所示，虚线框内存在垂直于纸面向里的匀强磁场，宽度为 L 的水平导线框 $MNPQ$ 有一部分处在匀强磁场中。光滑导体棒与两根导轨接触良好，接触点分别为 C 、 D 。不计导线框的电阻，导体棒在两接触点之间部分的电阻为 R ，则：

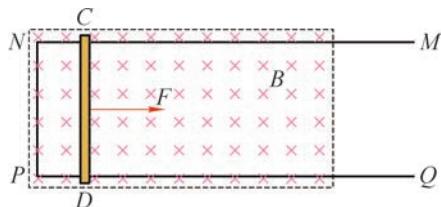


图 6-44

- (1) 导体棒受到向右的恒力作用从静止开始运动，导体棒的感应电动势和感应电流将如何变化？
- (2) 导体棒的运动情况将如何变化？
- (3) 外力做功产生了哪些效果？
- (4) 如果在导体棒还没有拉出磁场时撤去外力，情况又会怎样？

14. 如图 6-45 (a) 所示， MN 、 PQ 为间距 L 且足够长的平行导轨， $NQ \perp MN$ ，导轨的电阻均不计；导轨平面与水平面间的夹角为 θ ， NQ 间连接一个阻值为 R 的电阻；有一匀强磁场垂直于导轨平面且方向向上，磁感应强度为 B_0 ；将一根质量为 m 的金属棒 ab （长度近似与导轨间距相等）紧靠 NQ 放置在导轨上，且与导轨接触良好。现由静止释放金属棒，当金属棒滑行至 cd 处时达到稳定速度。已知在此过程中通过金属棒截面的电荷量为 q ，且金属棒的加速度 a 与速度 v 的关系如图 6-45 (b) 所示，其中 a_m 与 v_m 已知。设金属棒沿导轨向下运动过程中始终与 NQ 平行。求：

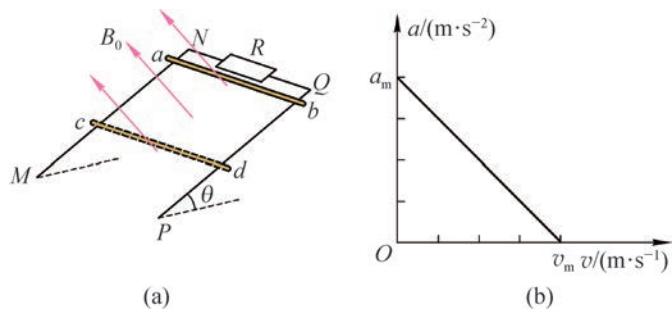


图 6-45

- (1) 金属棒与导轨间的动摩擦因数 μ 。
- (2) 金属棒的电阻 r 。
- (3) cd 离 NQ 的距离 s 。
- (4) 金属棒滑行至 cd 处的过程中，电阻 R 上产生的热量。

*15. 如图 6-46 所示，有一半径为 r 的导电圆环处于磁感应强度为 B 的匀强磁场中，磁场方向垂直纸面向里且与圆环平面垂直，圆环的电阻为 R ， a 、 b 、 c 为圆环上等间距的三点。若磁感应强度 B 在时间 Δt 内均匀减小至零，则此过程中圆环内的感应电动势和感应电流分别多大？ a 、 b 间的电压 U_{ab} 和 b 、 c 间的电压 U_{bc} 分别多大？

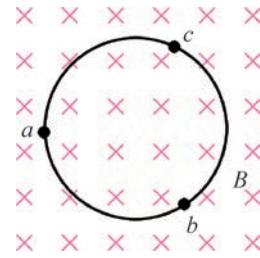


图 6-46

第七章

电磁感应定律的应用

工厂、学校和家庭等用户需要的电能大多数来自发电厂，这就涉及远距离输电的过程。输电的基本过程是创造条件使电能沿着输电线路传送。通过输电，把相距甚远的发电厂和用户联系起来，输电是利用电能的优越性的主要条件。在现代化社会中，输电线路是重要的能源大动脉。

第六章中我们已经学习了楞次定律和法拉第电磁感应定律，既能够判断感应电流的方向，又能够计算某些特殊情况下感应电动势的大小，理解产生感应电动势的根本原因是磁通量的变化。本章将学习交变电流的产生原理和交变电流的特点、变压器的原理和作用、远距离输电的特点以及电动机和发电机的基本原理等；从能量的观念认识电磁感应规律在人类生活和社会发展中的重要作用，为初步了解麦克斯韦电磁场理论的基本思想奠定基础。本章的学习将用到电磁感应、磁通量及其变化的概念，应用法拉第电磁感应定律计算感应电动势。本章的学习将经历探究变压器原理等过程，应用实验归纳和理论演绎的方法研究物理问题，提升科学思维的能力。

第一节 自感现象和涡流现象

家庭常用的日光灯内充有稀薄气体，日光灯发光就要使管内的稀薄气体导电，激发气体导电所需的电压远高于 220 V，在日光灯电路元件中能够在日光灯管两端的电极产生瞬时高电压的是电感镇流器。电感镇流器是一个带铁芯的多匝线圈，在日光灯启动阶段，电感镇流器两端产生瞬时高电压现象的基本原理是自感现象。

在实际问题中，磁场的变化往往是由于电流的变化引起的。磁场变化引起磁通量变化，因此会产生感应电动势。如果一个回路中的电流发生变化，在回路自身也会产生感应电动势，这种电动势就是本节要研究的自感电动势。

▶ 自感现象

我国高铁车厢上方的“受电弓”沿着高压（25 kV）接触线滑行，为电力机车提供稳定的电能（图 7-1）。然而在有冻雨或者电线结冰等气象条件下，受电弓和接触线之间往往接触不良，导致受电弓在高速滑行的过程中容易出现冲击和离线状态，甚至会跳出电火花产生电磁辐射。碰碰车的尾部有一根长导线与顶部带电金属板接触而获得电力（110 V）（图 7-2）。由于碰碰车的尾部长导线与金属板的接触并不牢靠，一旦出现空隙，就会打出“噼噼啪啪”的电火花。正常工作的电风扇（220 V）在调换转速挡时，开关盒中往往也会产生电火花。这些电火花产生的原因是什么呢？



图 7-1 高铁上方的受电弓从接触线获取电能



图 7-2 碰碰车通过尾部的竖直长导线获取电能

下面我们来观察两个实验。

自主活动

在图 7-3 (a) 所示电路中, A_1 和 A_2 是两个同样规格的灯泡, A_1 和带有铁芯的线圈 L 串联, A_2 和滑动变阻器 R 串联, 然后将这两部分电路并联, 再与直流电源 E 、开关 S 和滑动变阻器 R_1 连接。闭合开关 S , 调节变阻器 R , 使灯泡 A_1 和 A_2 亮度相同, 再调节滑动变阻器 R_1 , 使两个灯泡都正常发光, 然后断开开关 S 。

重新闭合开关 S , 注意观察开关闭合后两个灯泡的发光情况。

接通电源的瞬间, 可以看到与滑动变阻器 R 串联的灯泡 A_2 立即正常发光; 而与有铁芯的线圈 L 串联的灯泡 A_1 却是慢慢亮起来的。

我们再来观察图 7-3 (b) 所示的实验, 灯泡 A 与带有铁芯且电阻较小的线圈 L 并联。闭合开关 S , 灯泡 A 正常发光; 断开开关 S , 灯泡 A 的亮度瞬间增大, 然后才熄灭。

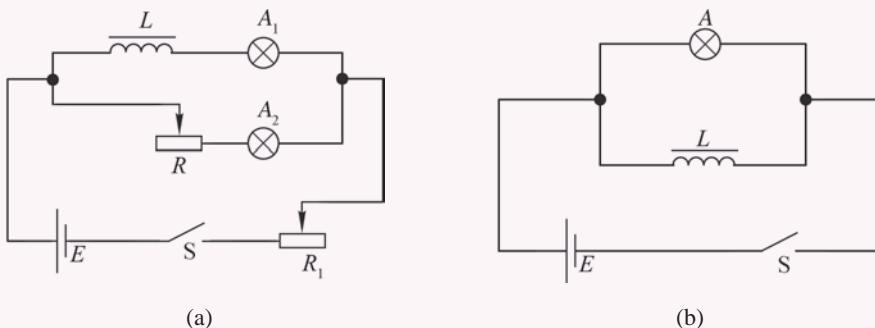


图 7-3 开关闭合或断开时观察灯泡的发光情况

上述自主活动中第一个实验是因为电路接通瞬间, 突然有电流通过线圈, 穿过线圈的磁通量从无到有。根据楞次定律可知, 线圈中会产生感应电动势, 以阻碍线圈中电流的增大, 所以通过灯泡 A_1 的电流只能逐渐增大, 使灯泡 A_1 慢慢地亮起来。

上述自主活动中第二个实验是因为电路断开瞬间, 通过线圈的电流迅速减弱, 穿过线圈的磁通量也迅速减小。根据楞次定律可知, 线圈中会产生感应电动势, 以阻碍线圈中电流的迅速减小。这时线圈相当于一个特殊的电源, 与灯泡 A 组成闭合回路; 线圈产生的感应电动势为灯泡 A 供电。如果感应电动势大于灯泡 A 的额定电压, 灯泡 A 就会突然闪亮一下, 然后熄灭。

由于线圈中的电流变化时所激发的磁场相应变化, 使通过线圈自身的磁通量也发生变化, 从而线圈自身产生感应电动势。这种因线圈中电流变化而在线圈自身引起的电磁感应现象叫做**自感 (self-induction)** 现象, 所产生的电动势叫做自感电动势。因此, 线圈又称电感器。实验表明, 自感电动势的大小跟通过线圈的电流变化率 $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ 、线圈的匝数、长度、面积及线圈中有无铁芯等因素都有关。

自感现象在各种电器设备和无线电技术中也有着广泛的应用。节能灯和高压汞灯的镇流

器就是利用自感现象产生的高电压激发气体导电，正常工作时又可以起到稳流和限流作用，保护节能灯和高压汞灯不被烧毁。利用电感器和电容器组成振荡电路，还可以发射电磁波。

在有些情况下自感现象是有害的，要加以防止。前面提到的高铁通过受电弓从高压接触线输入强电流，使大功率电动机驱动列车行驶。当受电弓与高压接触线之间瞬间脱离时，内部有带铁芯的线圈的电动机就会产生很大的自感电动势，甚至出现电火花。同理，碰碰车内部也是由带铁芯的电动机作为动力，尾部长导线与金属板的瞬间脱离接触同样会产生很大的自感电动势。常见的变压器和电动机等设备中带有铁芯的线圈都有很多匝，当电路中的开关断开时会产生很大的自感电动势，使得开关中金属片与接触点之间的空气电离，产生的电火花容易烧蚀接触点，有时甚至会延伸到开关外壳上，引起人身伤害。因此，电动机等大功率用电器的开关一般都装在接地的金属壳中，有的使用油浸开关，即把开关的接触点浸在绝缘油中，避免出现电火花。

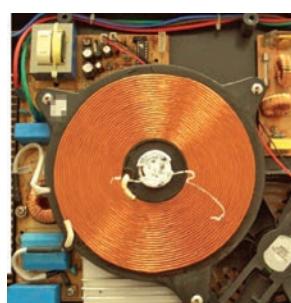
▶ 涡流

块状金属放在变化的磁场中，或者让它在非均匀的磁场中运动时，根据法拉第电磁感应定律，金属块也将产生感应电动势。该感应电动势在金属块内自成的闭合回路中产生感应电流，这种电流很像水的漩涡，因此叫做涡电流，简称涡流 (eddy current)。因为金属块本身的电阻很小，形成的涡流很大，会在金属块内释放出大量的热量。在生产实际中，有些情况下要利用涡流，有些情况下则要设法避免涡流。

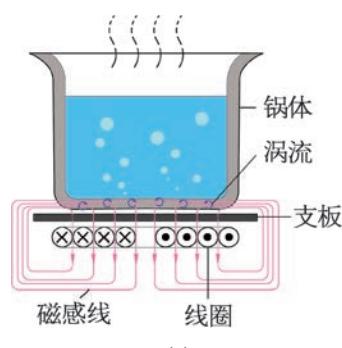
图 7-4 (a) 所示的电磁炉就是利用涡流产生大量的热量烹饪食物的。电磁炉的台面是一块平整度高，而且耐油的非金属板，它的内部结构如图 7-4 (b) 所示。在台面下面有励磁线圈、电力转换装置和控制系统等。电磁炉使用交变电流供电，电流的大小和方向时刻变化。交变电流通过电力转换装置产生 $20 \sim 40$ kHz 的高频电压，再通过底盘上铜线绕制的励磁线圈产生迅速变化的磁场。当铁质锅具放在炉面上时，锅底处在迅速变化的磁场中，从而在锅底内会产生无数基本处在垂直锅底平面内的小涡流，致使锅体本身很快发热，从而加热锅内的食物 [图 7-4 (c)]。



(a)



(b)



(c)

图 7-4 电磁炉利用涡流产生大量的热量

强大的涡流在金属内流动时会产生大量热量。工业上利用这种热效应制成高频感应炉来冶炼金属，图 7-5 是冶炼金属的高频感应炉的示意图。在陶瓷坩埚的外缘绕有线圈，当线圈同大功率高频交流电源接通时，高频交变电流在线圈内部激发高频交变磁场，这一磁场的大小和方向急剧变化，使线圈包围的区域磁通量变化率极高，产生极大的感应电动势，使放在坩埚内的金属内部产生很强的涡流，释放出大量焦耳热，使坩埚内的金属迅速升温熔化。高频感应炉冶炼金属的优点很多，如节能、加热速度快、温度及加热时间可精确控制、没有噪声和粉尘，还能避免有害杂质混入被冶炼的金属中，适于冶炼特种合金和特种钢。

除了上述热效应外，涡流所产生的机械效应在实际中也有广泛应用。把铜（或铝）片通过轻杆悬挂在光滑的轴承上，可以在竖直平面内自由摆动成为一个摆。如果让铜（或铝）片在摆动过程中经过两磁极之间的磁场区域（图 7-6），由于穿过铜（或铝）片的磁通量发生变化，在其内部将产生涡流。由于铜（或铝）片的电阻很小，涡流很强。根据楞次定律，承载这种涡流的导体在磁场中受到的安培力是一种阻力，将使摆很快停下来，这种现象叫做电磁阻尼现象。在许多电磁仪表中采用了类似的电磁阻尼装置，能够使仪表的指针避免左右晃动而直接指示稳定的示数。

涡流给人们带来很多便利的同时，在某些情况下又非常有害。为了增大磁感应强度，电机和变压器中的线圈内部都有铁芯。当电机和变压器的线圈中通过不断变化的交变电流时，铁芯中形成很大的涡流，产生的热损耗了大量的电能，甚至可能烧毁这些设备，这种热损耗称为涡流损耗。为了减小涡流损耗，除了采用高电阻率的硅钢作为铁芯材料之外，还采用多层相互绝缘的硅钢片叠加成铁芯，并使硅钢片平面与磁感应强度的方向平行，以减小涡流的导电截面，如图 7-7 所示。

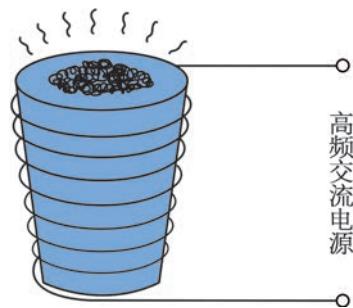


图 7-5 高频感应炉示意图

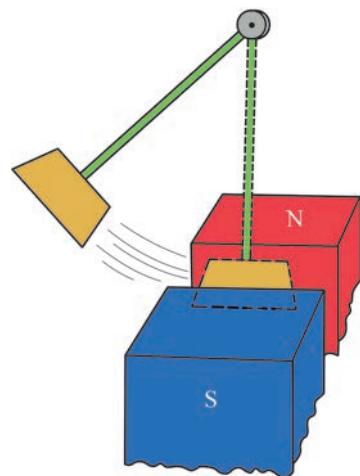


图 7-6 电磁阻尼现象

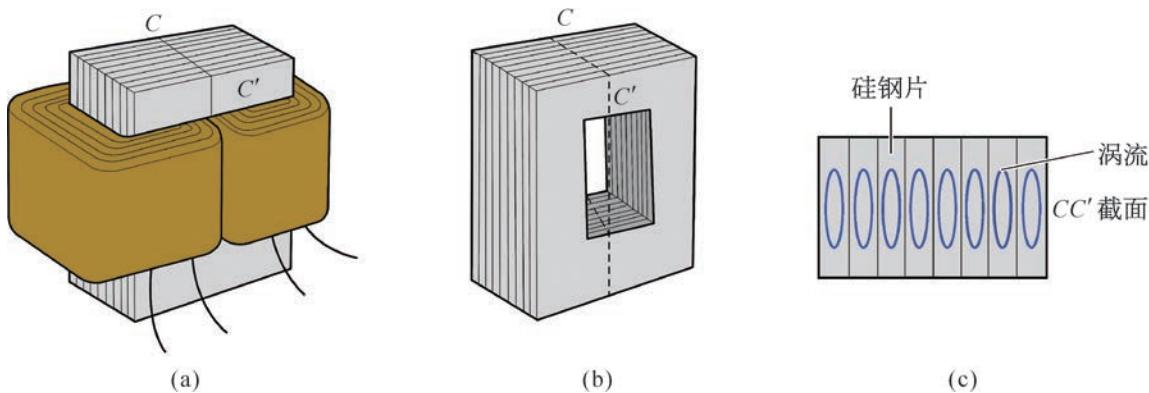


图 7-7 变压器中的硅钢片减小涡流损耗

问题与思考

1. 制造精密电阻时常常采用双线绕法（图 7-8），这种方法有什么优点？

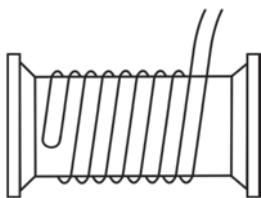


图 7-8

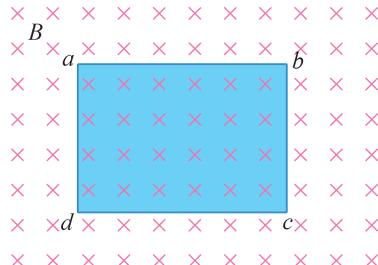


图 7-9

2. 如图 7-9 所示，足够大的匀强磁场垂直于纸面向里，蓝色区域为一处于纸面的金属片。金属片在匀强磁场中垂直于磁感线向右平移，金属片中是否会有涡流？如果将金属片绕 ab 轴旋转，金属片中是否会有涡流？试说明理由。
3. 在图 7-10 所示的电路中，开关 S 先后与位置 1 和位置 2 接通，在这个过程中电路中的能量如何变化？

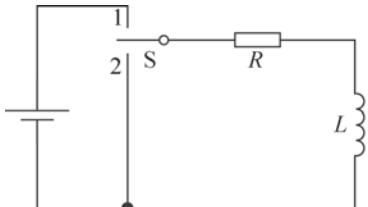


图 7-10

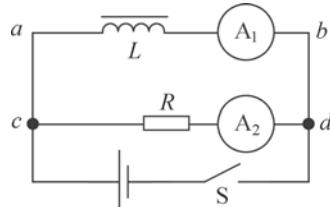


图 7-11

4. 如图 7-11 所示电路中，线圈 L 的电阻与另一支路中电阻器 R 的阻值相同。当开关 S 接通瞬间和断开瞬间，两个电流表的示数是否相同？
5. 工业上制造白炽灯泡时，为了更好地排出灯泡里的空气，必须对灯泡加热，但有时会把灯泡放在频率较高的交变磁场中，此时灯泡玻璃并不发热，为什么这样做能达到加热的目的？

6. 如图 7-12 所示, 进飞机场、火车站之前, 旅客都要过一道安检门, 用来检查旅客是否随身携带金属物品, 包括枪支、管制刀具等。要是携带了金属物品, 安检门就会发出声光警报信号。安检门又称金属探测门, 实际上是一种金属探测器, 在安检门的两侧装有能发射和接收交变电磁场的仪器。一定频率的交变电流通过线圈产生变化的磁场, 该磁场在金属物体内部感生涡电流, 接收传感器检取涡电流发射的电磁波信号, 再经过电路放大处理, 便能以声光形式报警。试列举金属探测器的实际应用。



图 7-12

第二节 交变电流

当今人类生存的环境是一个“电的世界”，我们的生活离不开电。从普通照明灯到节日彩灯，从电视机到洗衣机，从工厂机床到电气化高铁，从家用计算机到中国“天河三号E级”超级计算机系统，从电子收款机到自动化生产线都要用电。现代化的生产和生活都与电密切相关，没有电几乎寸步难行！而这些设备大多数是由交变电流供电，大型交流发电机产生的交变电流通过输电线向城市和农村源源不断输送强大的电能。

▶ 交变电流的产生

大小和方向都随时间做周期性变化的电流叫做交变电流 (alternating current)，简称为交流电。交变电流具有许多特点，在工农业生产、日常生活中有着广泛的应用。例如，交变电流能够通过变压器改变电压，使高效节能的远距离输电成为可能；交变电流能够形成旋转磁场，为交流电动机提供动力；在发电量相同的条件下，交流发电设备比直流发电设备更简单。图 7-13 为上海外高桥电厂具有国际先进水平的 1 000 MW 交流发电机组。

交变电流是如何产生的？

法拉第发现电磁感应现象的一个重大应用就是研制出发电机。交变电流来自交流发电机，图 7-14 是一个简易的交流发电机模型图。



图 7-13 大型交流发电机组

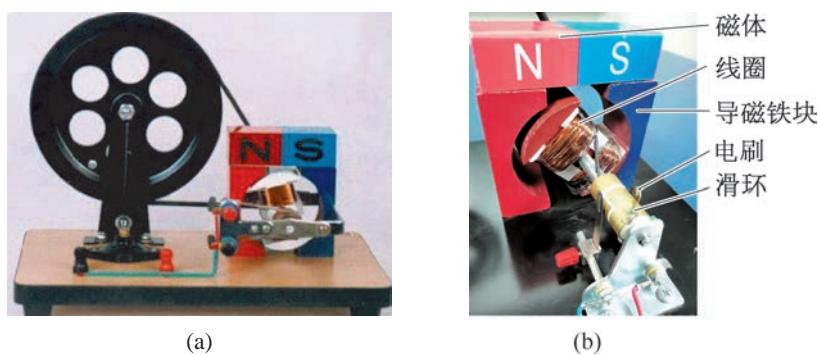


图 7-14 交流发电机模型

在交流发电机模型中，有一个放在匀强磁场中的矩形线圈，线圈两端分别通过滑环、电刷与小灯泡相连。转动发电机的手柄，两个磁极之间的线圈随之转动，这时可以看到小灯泡一闪一闪地发光。如果将灵敏电流计串联在小灯泡的电路中，可以发现电流表的指针左、右摆动。说明发电机产生的是大小和方向都在不断变化的电流，这就是交变电流。

▶ 交变电流的变化规律

我们先用电压传感器来观察几种交流电的电压随时间变化的规律。

如图 7-15 (a) 所示，利用低频信号发生器输出“正弦”“方形”和“三角形”三种交流电的电压信号，用电压传感器采集各时刻的电压值，通过计算机显示这三种信号的电压随时间变化的波形。

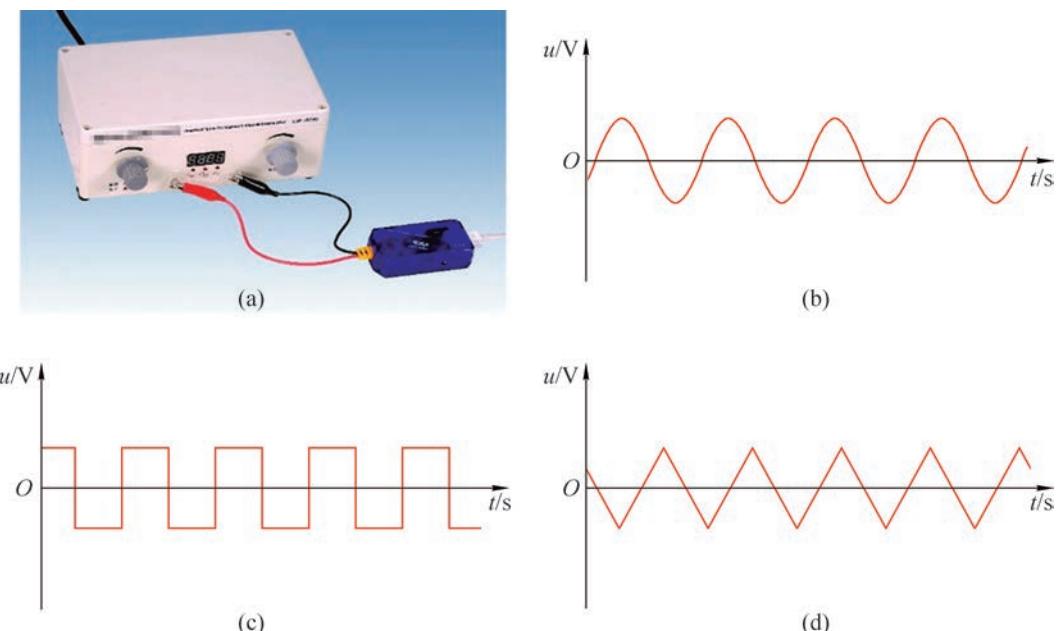


图 7-15 采集几种交流电的电压随时间变化的图像

虽然交流电的电压随时间变化的规律是多种多样的，但如同简谐运动是一种最简单、最基本的振动一样，其中最重要、最基本的是按照正弦规律变化的交流电的电压。

图 7-16 为简易交流发电机模型的原理图。线圈在磁场中转动且切割磁感线而产生感应电动势。当转到线圈平面与磁场方向垂直位置 MN 时，由于线圈不切割磁感线，故此位置线圈的感应电动势为零。我们将该位置叫做中性面。

如果我们匀速转动简易交流发电机手柄，也能够得

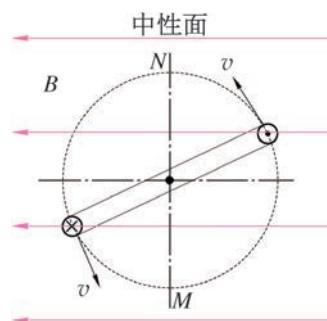


图 7-16 交流发电机模型
原理示意图

到正弦交变电流，简称正弦交流电。如图 7-17 所示，为正弦交流发电机的原理示意图。

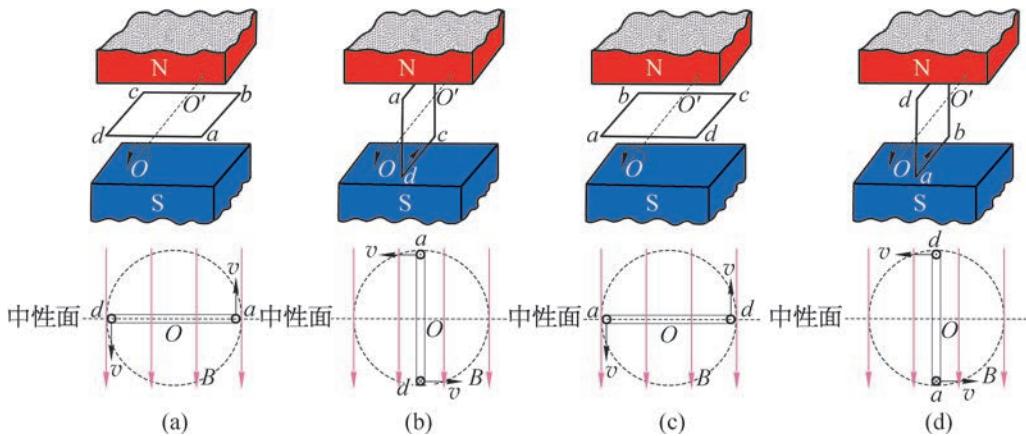


图 7-17 正弦交流发电机的原理示意图

从图中可以看出：线圈中的感应电动势随线圈平面跟中性面之间的夹角做周期性变化。在线圈转动一周的过程中，出现两次最大值（一次正值，一次负值，表示电动势方向相反）；线圈平面每经过中性面一次，电动势的方向就改变一次。

正弦交流电随时间变化的规律可以用如图 7-18 所示的图像表示。以线圈平面处于中性面时开始计时，交流电的电动势 e 按正弦规律相应变化。

正弦交流电任意时刻 t 的电动势可以表示为

$$e = E_m \sin \omega t$$

其中 E_m 称为正弦交流电电动势的最大值， ω 称为交流电的角频率，也就是线圈旋转的角速度， $\omega t = \theta$ 是产生正弦交流电的线圈从中性面转过的角度。线圈匀速转动一周， ωt 从 0 增加到 2π 。

当负载为纯电阻用电器时，负载两端的电压 u 和通过负载的电流 i ，也按正弦规律变化，即

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

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

式中 U_m 和 I_m 分别称为正弦交流电的电压和电流最大值， u 、 i 分别称为正弦交流电的电压和电流瞬时值。

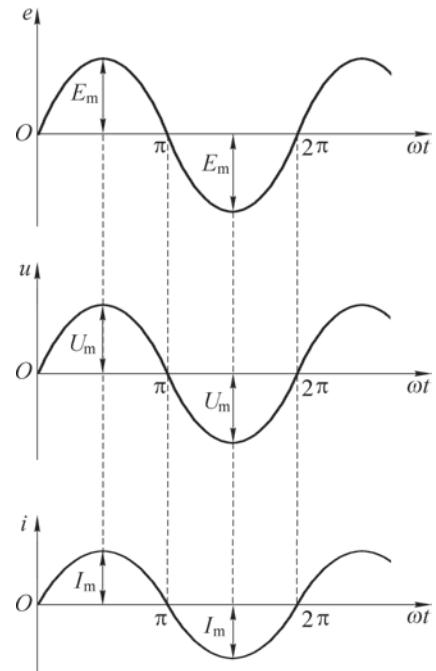


图 7-18 正弦交流电随时间变化的规律

► 正弦交变电流的描述

1. 最大值和有效值

从正弦交流电随时间变化规律中可以发现，交流电在一个周期内电压和电流是不断变化的，交流电一个周期内所能达到的最大值（也叫做交流电的峰值）表示交流电的电压高低或电流强弱。交流电的最大值在实际中有重要意义，例如，把电容器接在交流电的电路中，就需要知道交流电的电压最大值。电容器所能承受的电压要高于交流电的电压最大值，否则电容器就可能被击穿损坏。

在研究交流电的功率时，通常用有效值表示交流电产生的效果。交流电的有效值是根据电流的热效应来规定的：在相同的电阻上分别通过交变电流和恒定电流，经过一个交变电流周期的时间，如果它们在电阻上所产生的热量相等的话，则把该恒定电流的电流、电压的大小作为交变电流（交流电）电流、电压的**有效值 (effective value)**。例如，某一交流电通过一段电阻丝，在一段时间（整数个交变电流周期）内产生的热量为 Q ，如果改用电流大小为 2A 的恒定电流通过同样的电阻丝，在相同的时间内产生的热量也为 Q ，那么，这一交流电电流的有效值就是 2A。

计算表明，正弦交变电流的电动势、电压和电流的有效值 E 、 U 和 I 与它们的最大值 E_m 、 U_m 和 I_m 之间分别存在如下的关系

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 E_m$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 U_m$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 I_m$$

我们通常说家庭电路的电压是 220V，就是指有效值。各种使用交流电的电器设备铭牌上所标注的额定电压和额定电流的数值（图 7-19），一般交流电压表和交流电流表测量的数值，也都是有效值。以后提到交流电的数值，凡没有特别说明的都是指有效值。

型号 ****-*****	额定电压 220V~
星级标志 ★★★	额定频率 50Hz
气候类型 SN-N-ST	额定耗电量 0.38kW·h/24h
防触电保护类别 I 类	噪声(声功率级) 38dB(A)
总有效容积 215L	冷冻能力 3.5kg/24h
冷冻室有效容积 53L	制冷剂 R600a 52g
软冷冻室有效容积 46L	额定输入电流 0.65A
发泡剂 环戊烷	重量 67kg
灯最大额定输入功率	15W

(a)



(b)

图 7-19 家用交流电器的铭牌

2. 周期和频率

交流电的电动势、电压和电流都是周期性变化的。跟所有的周期性变化一样，交流电变化的快慢也可以用周期或频率来表示。我们把交流电完成一次周期性变化所需要的时间叫做交流电的周期，用符号 T 表示，单位是秒（s）。交流电完成周期性变化的次数与所用时间之比叫做交流电的频率，用符号 f 表示，单位是赫兹（Hz）。

在仅有一对磁极的情况下，线圈转一周，感应电动势也变化一周。这种情况下正弦交流电的电动势、电压和电流的角频率与角速度相等，即 $\omega = 2\pi f$ 。我国工农业生产和生活用的是正弦交流电，频率统一为 50 Hz。美国和西欧国家交流电的频率为 60 Hz。

自主活动

用电压传感器测量“学生电源”输出的正弦交流电的电压，得到电压随时间变化的图像（图 7-20）。从图像中读取其最大值 U_m 和周期 T' 。

用数字多用电表交流电压挡测量“学生电源”输出电压的有效值 U ；用数字多用电表测量交流电的周期 T 。通过多用电表测得的交流电的电压有效值 U ，计算其最大值 $\sqrt{2}U$ 并与 U_m 比较；将测得的交流电的电压周期 T 与 T' 比较，分析可能存在的实验误差。

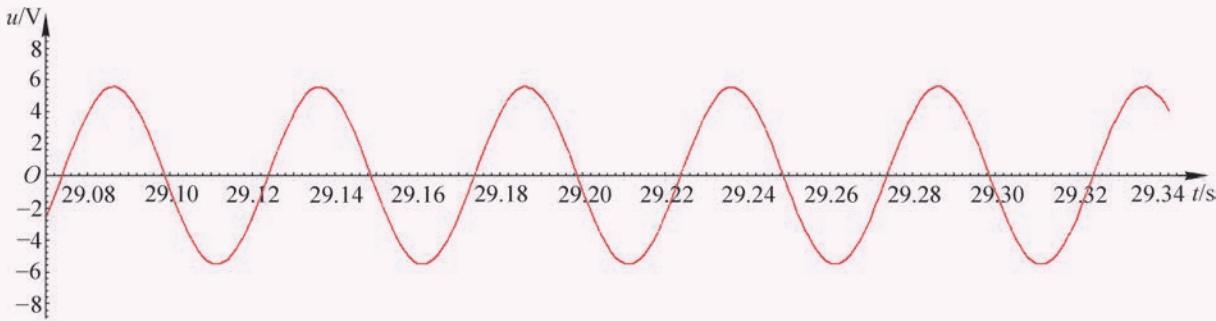


图 7-20 正弦交流电的电压-时间图像

示例 一矩形线圈在匀强磁场中匀速转动。从经过中性面开始计时，每转一周需时 0.02 s，线圈中产生的感应电动势 e 与时间 t 的关系如图 7-21 所示的正弦函数。试求：

- (1) 这一感应电动势的最大值、有效值、周期和频率；
- (2) 写出这一感应电动势随时间变化的关系式。

分析：从感应电动势的图像中可以直接读出电动势的最大值和周期，然后再根据相关公式计算有效值和频率。

根据周期计算频率，结合感应电动势的最大值可以写出感应电动势随时间变化的关系式。

解：(1) 从图中可以读出感应电动势的最大值 $e_m = 28.28 \text{ V}$ ，根据有效值与最大值的关系式，可知电动势的有效值

$$E = \frac{e_m}{\sqrt{2}} = \frac{28.28}{\sqrt{2}} \text{ V} \approx 20 \text{ V}$$

从图像可知感应电动势变化的周期 $T = 0.02 \text{ s}$ ，频率

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.02} \text{ Hz} = 50 \text{ Hz}$$

(2) 因为线圈匀速转动，且从经过中性面开始计时，则 t 时刻线圈平面转过的角度

$$\theta = \omega t = 2\pi f t = 2\pi \times 50t = 100\pi t$$

所以，这一感应电动势随时间变化的关系式为

$$e = 28.28 \sin(100\pi t) \text{ V}$$

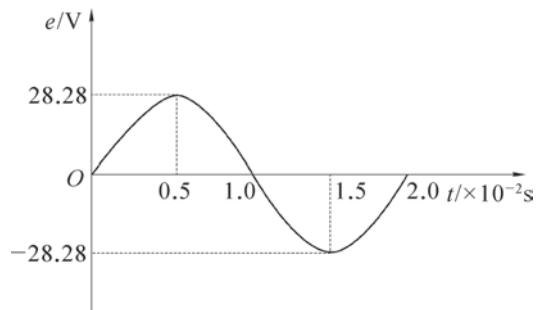


图 7-21 线圈中感应电动势随时间变化的图像

STSE

我国家庭用电的电网统一为 220 V、50 Hz。由于供电频率不变，传统定频空调压缩机的驱动电机转速基本不变，依靠驱动电机不断地“开”“停”压缩机来调整室内温度。这一开一关之间容易造成室温忽冷忽热，并消耗较多电能。

变频空调是在普通空调的基础上选用了变频专用压缩机，增加了变频控制系统。它的基本结构、制冷原理和普通定频空调完全相同。区别是变频空调通过改变压缩机驱动电机的电源输入频率而改变驱动电机的转速，达到改变压缩机输出功率的目的。变频空调的驱动电机可以根据室内实际温度和所设定的温度无级变速，使压缩机能够自动提供所需的制冷（热）量；当室内温度达到设定值后，驱动电机就会以较低的频率运转，实现空调压缩机“不停机运转”，保持环境温度的稳定。

相对于定频空调，变频空调更加高效节能、温控精度高、噪声小、调温快，但是变频空调成本较高。

问题与思考

1. 我国家庭用电一般都是电压为 220 V、频率为 50 Hz 的交变电流，其电压的最大值为多少？每秒内电流方向改变几次？
2. 有人说，在图 7-17 中，线圈平面转到中性面的瞬间穿过线圈的磁通量最大，因而线圈中的感应电动势最大；线圈平面跟中性面垂直的瞬间穿过线圈的磁通量为零，因而线圈中的感应电动势为零。这种说法是否正确？为什么？
3. 为什么模型发电机在接通电路前用较小的力就能摇动手柄，接通电路并输出电流后就需要用较大的力才能摇动手柄？
4. 如图 7-22 所示，电解电容器标注“300 V 1.8 μF”，能够接在这个电容器上的交流电电压有效值不能超过多少？
5. 一台交流发电机产生的电压最大值为 150 V，给纯电阻用电器供电时输出的电流最大值为 30 A。试计算：
 - (1) 发电机的电压有效值；
 - (2) 发电机供给外电路的电流有效值；
 - (3) 电路中消耗的功率。
6. 一只电炉接在电压有效值为 220 V 的交流电源上。求：
 - (1) 电炉使用时，其中的发热元件两端电压的最大值；
 - (2) 如果发热元件的电阻为 11Ω ，通过该元件电流的有效值；
 - (3) 电炉使用 1 h 消耗的电能。
7. 一位学生问：“当电流为正时，能量进入灯泡；当电流为负时，能量流出灯泡。因此净流入为零。那么，交变电流为什么还要消耗功率呢？”说明这种说法为什么是错误的。

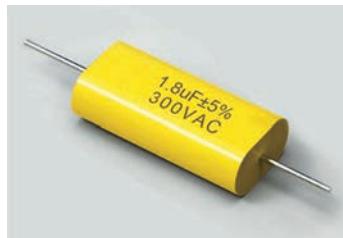


图 7-22

第三节 变压器

交变电流技术的发展使远距离输电成为现实，促进了人类社会的发展。发电厂的大型交流发电机发出的电压可达几十千伏，为了减少电能损耗，远距离输电需要利用几百千伏高压（图 7-23）。实际应用中，不同的用电设备通常需要的交流电的电压不同：家用照明电路的额定电压是 220 V；工厂电动机的额定电压大多是 380 V；电子控制线路中的电压一般不超过 10 V；机床上使用的安全照明灯要接在 24 V 的电源上，而广告霓虹灯的灯管则需要 10 000 V 以上的电压。为此，人们研制出能改变交流电电压的变压器以适应不同的电压需要。变压器是根据电磁感应原理设计而成的能够升高或降低交流电电压的电气设备。图 7-24（a）是油浸式三相电力变压器，图 7-24（b）是单相降压变压器，图 7-24（c）是手机充电器内部元件，其中也包含小型变压器。变压器种类繁多，应用广泛，但基本结构和原理都是相似的。



图 7-23 远距离超高压输电



图 7-24 常见的变压器

▶ 变压器的组成

变压器的原理如图 7-25 所示，由铁芯、原线圈（又称初级线圈）和副线圈（又称次级线圈）组成。

变压器的铁芯由导磁能力强的多层硅钢片组成，硅钢片涂覆了绝缘漆膜，以减

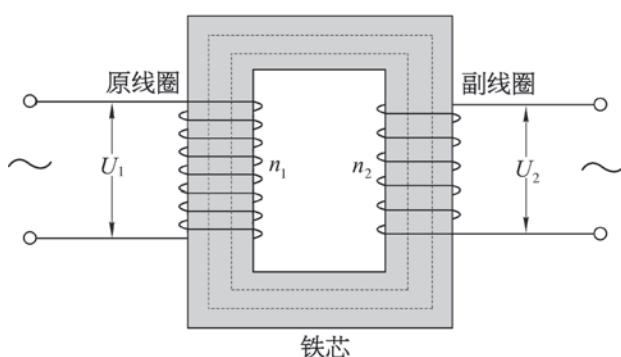


图 7-25 变压器原理图

少铁芯中涡流产生的热损耗。两个线圈匝数不同，但都是用绝缘导线绕制，分别套在同一铁芯的两边。原线圈接电源；副线圈接负载，即用电器。

学生实验

探究变压器原、副线圈电压与匝数的关系

提出问题

变压器输入和输出电压与原、副线圈的匝数有何关系？

实验原理与方案

当原线圈接通交流电源时，其中产生交变电流，所激发的交变磁场的磁感线沿铁芯形成回路，并在副线圈中产生感应电动势。变压器的原、副线圈匝数不同，从而使输出电压和输入电压不相等。探究变压器的匝数比与输入、输出电压之间的关系。

实验装置与方法

记录可拆变压器（图 7-26）两个线圈上不同接线柱标明的原线圈和副线圈的不同匝数。如果 12 V 低压交流电源接原线圈，用多用电表的交流电压挡可以分别测出副线圈不同接线柱的输出电压。



图 7-26 探究变压器原、副线圈电压与匝数关系的实验装置

实验操作与数据收集

将可拆变压器一边套一个标明 12 V 的匝数较多的线圈，并接入 12 V 低压交流电源；另一边套一个标明 6 V 的匝数较少的线圈，并接上一个小灯泡。如图 7-27 所示，接通电源后，观察小灯泡的发光情况。

按图 7-28 连接电路，用多用电表的交流电压挡测出副线圈的输出电压 U_2 。改变副线圈的匝数，再测出副线圈的输出电压 U'_2 。将实验数据记录在表 7-1 中。

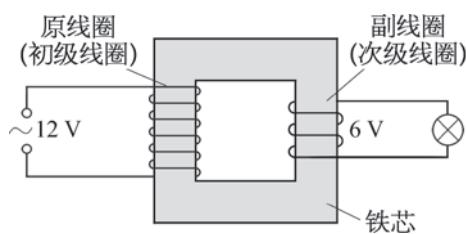


图 7-27 探究变压器的匝数比与输入、输出电压之间的关系

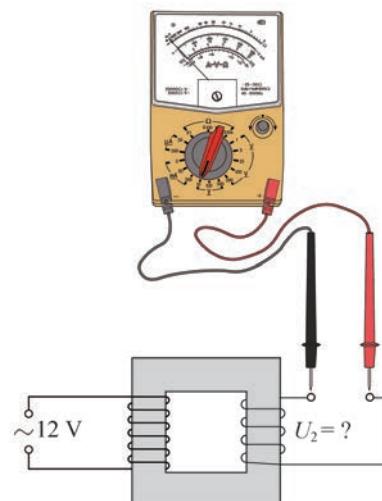


图 7-28 用多用电表测量副线圈的输出电压

表 7-1 实验数据记录表

原线圈的匝数 n_1	原线圈的电压 U_1
副线圈的匝数 n_2	副线圈的电压 U_2
副线圈的匝数 n'_2	副线圈的电压 U'_2

数据分析

实验结论

交流与讨论

交流实验中改变副线圈电压的方法，讨论产生实验误差的原因。

► 理想变压器原、副线圈的电压比与匝数比的关系

带铁芯的理想变压器的符号如图 7-29 所示，通常可以认为交变磁场的磁通量都集中于铁芯内，铁芯外部无磁场。由此，理想变压器中的原、副线圈每一匝的磁通量 Φ 及其变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 都相同，所以在原、副线圈中产生的感应电动势分别为

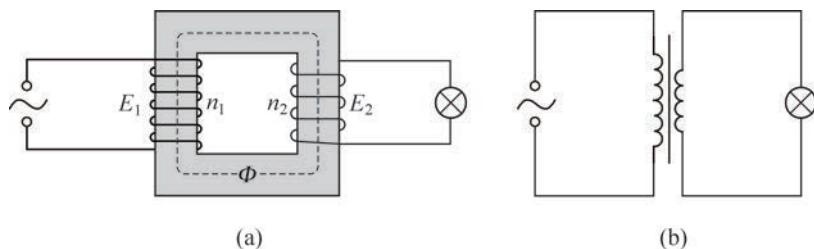


图 7-29 变压器工作原理图

$$E_1 = n_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad E_2 = n_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

得

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

式中 n_1 和 n_2 分别为原、副线圈的匝数。

在不计两线圈的阻抗、忽略各种损耗的情况下，输入电压 U_1 和输出电压 U_2 分别等于其感应电动势 E_1 和 E_2 ，因而有

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

上式说明，理想变压器原线圈的输入电压和副线圈的输出电压之比等于它们的匝数比。所以，要想升高电压，就要使 $n_2 > n_1$ ，这样的变压器叫升压变压器；要想降低电压，就要使 $n_2 < n_1$ ，这样的变压器叫降压变压器。

示例 理想变压器的原线圈匝数 $n_1 = 2\,200$ ，输入电压为 220 V。为了使副线圈得到 36 V 输出电压，副线圈匝数 n_2 应为多少？

分析：根据理想变压器的电压比和匝数比的关系，可以求出副线圈匝数。

解：已知 $n_1 = 2\,200$ ，输入电压 $U_1 = 220$ V，输出电压 $U_2 = 36$ V，由

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

得

$$n_2 = \frac{U_2}{U_1} n_1 = \frac{36}{220} \times 2\,200 \text{ 匝} = 360 \text{ 匝}$$

所以，副线圈需要 360 匝。

实际变压器存在铁芯的涡流损耗、导线电阻产生的焦耳热损耗等，使输出功率小于输入功率。功率转换关系如图 7-30 所示。

变压器实际工作时的能量损耗很小，一般不超过百分之几，特别是大型变压器的效率可达 97% ~ 99.5%。理想变压器没有各种损耗，效率为 100%，理想变压器的输入功率 P_1 等于输出功率 P_2 。

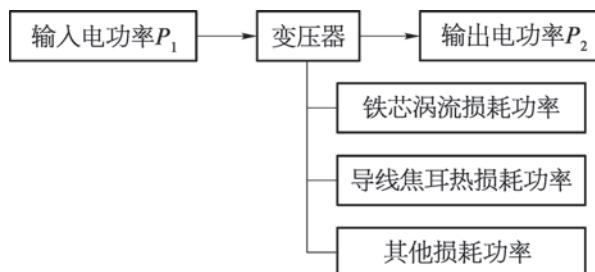


图 7-30 实际变压器的功率转换关系

拓展视野

理论上，根据能量守恒定律，在忽略变压器损耗的情况下，变压器的输入功率 P_1 应等于它的输出功率 P_2 。设变压器的输入、输出电流分别为 I_1 、 I_2 ，因为

$$P_1 = P_2$$

所以

$$I_1 U_1 = I_2 U_2, \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2}$$

可见，升压变压器的输出电流小于输入电流，而降压变压器的输出电流大于输入电流。

▶ 电能的输送

为了便于利用天然的能源，发电厂往往建在水力资源或燃料资源丰富的地方，如水电站建在水库大坝旁，火电站建在煤矿附近等。这些发电厂往往离开大城市较远。工商业发达、人口众多的大城市需要大量的电能，这些电能除由附近的发电厂提供外，往往还需要由远处的发电厂供给。远处发电厂输出的电能只要通过输电导线就能在两地间输送和分配，这么便捷的能量输送形式成为电能的突出优点之一，但输电过程会产生电能的损耗。

▶ 远距离高压输电

电流通过具有电阻的输电线时要产生焦耳热。设输电线的电阻为 R ，通过输电线的电流为 I ，则输电线的焦耳热功率 $P_{\text{热}} = I^2 R$ 。根据电阻定律 $R = \rho \frac{l}{S}$ ，即输电线的焦耳热功率

$$P_{\text{热}} = I^2 \cdot \rho \frac{l}{S}$$

显然，输电线的长度 l 是不能改变的，为了减小焦耳热损失，应该选择电阻率 ρ 较小的材料制造输电线并加大导线的截面积 S 。通常，选用导电本领很好的铜或铝为材料制造输电线，但增大导线的截面积并不现实：这不仅增加材料成本，还会给架设线路带来很大困难。

由于焦耳热功率是与电流的二次方成正比，减小焦耳热损失的最好办法就是减小输电线中的电流。鉴于输送的电功率 $P = UI$ 是一定的，要减小输电电流 I ，就必须升高输电电压 U ，即

$$P_{\text{热}} = I^2 R = \left(\frac{P}{U}\right)^2 R$$

显然，只要 10 倍提升输电电压就能 100 倍降低焦耳热功率。

大型交流发电机的输出电压有 10.5 kV、13.8 kV、15.75 kV 和 18.0 kV 等几种不同等级。这些输出电压都太低，不符合远距离输电的高电压要求。这时变压器就发挥重要的作用，在发电厂内用升压变压器升压后再向远方输送电能。为了减少输送电路上的电能损耗，需要高压输电。尤其在输送电能功率较大和输送距离较远的情况下，高压输电尤为重要。输送相同的电功率时，提高输电电压，输电电流减小，输电线路功率损耗也就相应减小。

我国远距离输电一般将 35 ~ 220 kV 的输电电压叫做高压输电，330 ~ 765 kV 的输电电压叫做超高压输电，1 000 kV 以上的输电电压叫做特高压输电。

高压电输送到用电地区后，先在一次高压变电所降到 110 kV，再由二次高压变电所降到 10 kV，其中一部分直接送往需要高电压的用户，另一部分送到低压变电所降到 220 V

或 380 V 送给一般用户。如图 7-31 所示是从发电厂到用户的输电线路示意图，如图 7-32 所示是远距离输电原理图。

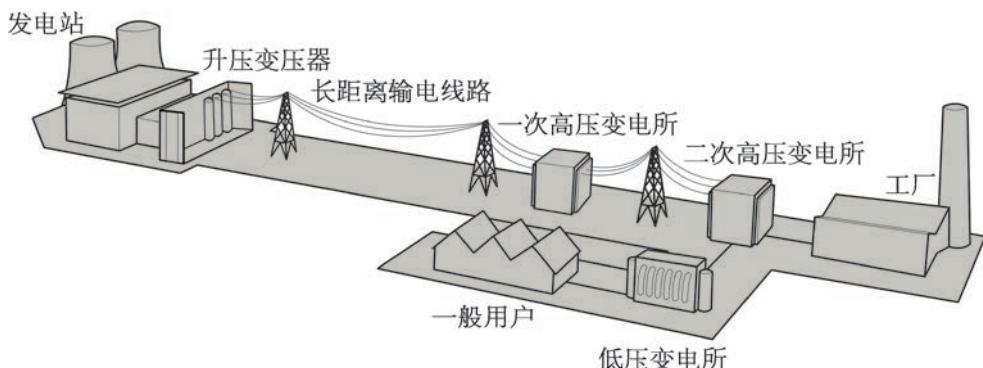


图 7-31 远距离输电

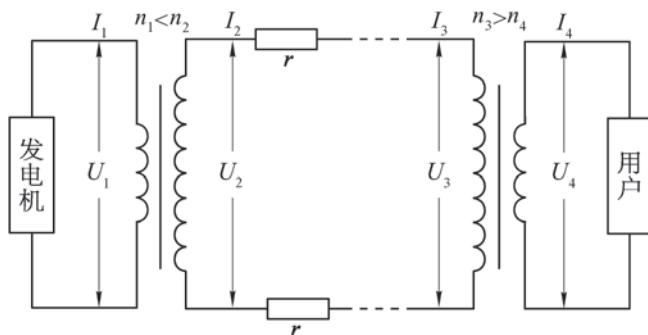


图 7-32 远距离输电原理

STSE

人类历史上最早的输电线路是直流的。开始时输电电压只有 100 V，后来逐步提高，到 1885 年提高到了 6 kV。随着三相交流发电机和变压器的发明和使用，特别是发明了结构简单、运行可靠且成本较低的感应电动机后，交变电流的应用得到普及，输电技术转为发展交流输电。但是，随着电力系统的扩大，输电功率的增加，输电距离的增长，交流输电遇到了一些技术困难，如电网的“同步”问题和电抗作用等。为了克服交流输电的技术困难，直流输电技术重新受到了重视。

大功率、远距离、高压直流输电除了稳定的直流电具有无感抗、无容抗作用和无同步问题的优点以外，还具有线路造价低、运行电能损耗小、传输节能效果显著等优点。虽然输电过程为直流，但是电厂发电仍是交变电流，须由专用换流设备将交变电流转换为高压直流电传输至末端，再由专用的换流设备将直流电转换为交变电流送往用户。

直流输电的额定功率通常大于 100 MW，许多在 1 000 ~ 3 000 MW 之间。至

2010年7月，我国先后建成了葛洲坝至上海总长约1100 km的直流输电工程(± 500 kV)和全长超过2000 km的向家坝至上海直流输电工程(± 800 kV)。如图7-33所示为特高压直流输电工程上海奉贤换流站并联电容器装置。

2018年5月，新疆昌吉至安徽古泉特高压直流输电线路工程(± 1100 kV)建成，途经新疆、甘肃、宁夏、陕西、河南和安徽，线路总长度约3304.7 km，输送容量达12000 MW。如图7-34所示是甘肃段的输电线路。该工程是国家电网在特高压输电领域持续创新的重要里程碑，刷新了世界电网技术的新高度，发展了特高压输电技术。



图7-33 特高压直流输电工程上海奉贤换流站设备



图7-34 特高压直流输电线路

高压直流输电也存在缺点：一是直流输电线路难以引出分支线路，绝大部分只用于端对端送电；二是直流输电的换流站比交流系统的变电所复杂、造价高、运行管理要求高。

问题与思考

1. 变压器为什么不能改变恒定电流的电压？
2. 某同学将一个变压器的原线圈接到6 V的交变电源上，测得副线圈两端的电压为2 V。现将原线圈和副线圈对调使用，则输出的电压为多少伏？
3. 输送相同的电功率，电压越低，电流越大。常见的向用户送电的变压器是降压变压器，它的原线圈和副线圈哪个电压较低？哪个线圈的匝数较多？哪个线圈的电流较大？为什么？

4. 如图 7-35 所示，四种情况中能够将电压降低向电灯供电的变压器是哪一种？说明判断的理由。

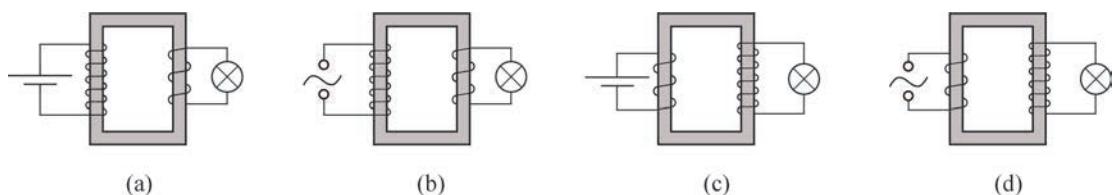


图 7-35

5. 一台笔记本计算机首先从 220 V 的电源通过变压器得到有效值为 9.0 V 的交流电压。如果变压器的初级线圈为 660 匝，次级线圈有几匝？
6. 某理想变压器原、副线圈的匝数之比为 4 : 1。当输入电压为 12 V 时，输出电压为多少？当输入电压减少 2 V 时，输出电压为多少？输入电压的改变量 ΔU_1 与输出电压改变量 ΔU_2 之比为多少？

7. 如图 7-36 所示为输电线路中常用的油浸自冷式变压器。变压器内部的铁芯、线圈浸没于变压器油（一种矿物油，也称导热油）中。变压器工作时，铁芯、线圈会发热。这些热量主要通过导热油流经变压器外部的一根根金属管道散发到空气中，从而使铁芯、线圈的温度不会升高太多，以确保变压器的安全运行。试回答：

- (1) 变压器外部的散热器为什么做成管道状？
- (2) 变压器的上部有个油箱，其侧面有一个油量表。油量表就是一根上、下两端均开口并插入油箱中的玻璃管。电工通过观察玻璃管中油面的高度来判断油箱中油量的多少。设计这一装置利用的是什么物理规律？
- (3) 图示变压器外部的散热管道都是沿竖直方向而不沿水平方向，为什么？
- (4) 正常情况下，变压器油箱中的导热油是绝对不允许装得全满的，为什么？



图 7-36

第四节 发电机和电动机

1820年，丹麦物理学家奥斯特发现了“电流的磁效应”，建立了电和磁的相互联系。1831年，法拉第通过多年的实验研究终于实现了“磁生电”的梦想，发现了电磁感应定律，并且制造了第一台电动机和发电机。

随着时代的飞速发展与人类文明的进步，电的重要性日益凸显起来。家庭生活中的电饭煲、电热水壶、空调、电视机、手机和电子计算机等都离不开电，家庭电路中的电大多来自发电厂里的发电机。家庭生活中的电风扇、油烟机、洗衣机等都要配装各种类型的电动机。发电机和电动机与我们的生活息息相关。

▶ 发电机的主要性能和能量转化

电能是现代社会最主要的能源之一。发电机(generator)是将机械能转化为电能的装置，它由水轮机、汽轮机、柴油机或其他动力机械驱动，将水流、气流、燃料燃烧或原子核裂变产生的能量转化为机械能传给发电机，再由发电机转化为电能。发电机在工农业生产、国防、科技及日常生活中都有广泛的用途。

发电机可以分为直流发电机和交流发电机两种。发电机的种类很多，但其工作原理都源自法拉第电磁感应定律。交流发电机具有体积小、重量轻、维修方便、使用寿命长等优点，目前发电厂的大型发电机几乎都是交流发电机。

交流发电机的构造比较复杂，但是基本部分都是产生感应电动势的线圈和产生磁场的磁极。不论哪种发电机，转动的部分都叫转子，静止的部分都叫定子。

发电机里产生感应电动势的线圈通常叫电枢。电枢转动、磁极不动的发电机叫做旋转电枢式发电机，电枢是转子。这种发电机的原理如图7-37所示。旋转电枢式发电机的转子产生的电流必须经过裸露的滑环电刷引到外电路，如果电压很高，容易发生火花放电，滑环和电刷可能被烧坏。同时，转动的电枢结构不能太大，线圈匝数不能很多，产生的感应电动势也就不会很高。这种发电机输出的电压一般不超过500V，小型发电机通常是旋转电枢式发电机。

如果磁极转动、电枢不动，线圈内磁通量发生改变，电枢同样会产生感应电动势，这种发电机叫做旋转磁极式发电机，电枢是定子。这种发

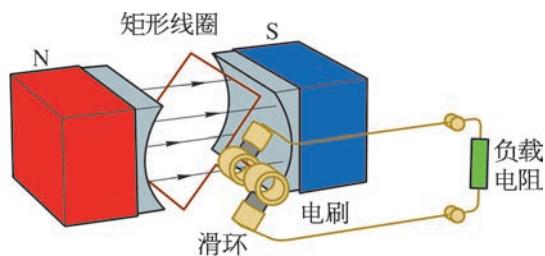


图7-37 旋转电枢式发电机

电机的原理如图 7-38 所示。旋转磁极式发电机由于不通过滑环向外提供电力，所以能输出几千伏到几万伏的高电压，输出功率可达几百兆瓦，因此大型发电机几乎都是旋转磁极式的。

发电机在实际运行过程中还存在各种能量损耗，主要包括铁芯内的能量损耗、导线焦耳热能量损耗、轴承摩擦能量损耗、通风能量损耗等，大部分损耗都以发热的形式表现出来（图 7-39）。不过实际上这些能量损耗都很小，一般不超过百分之几，单就发电机本身而言，它的效率可以达到 95% 以上。

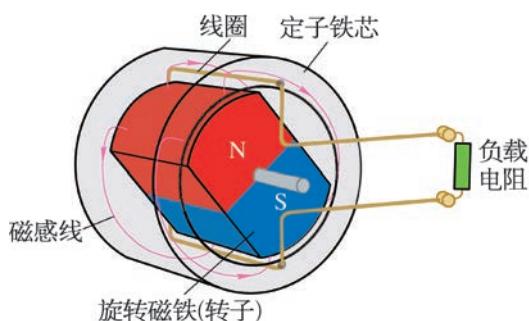


图 7-38 旋转磁极式发电机

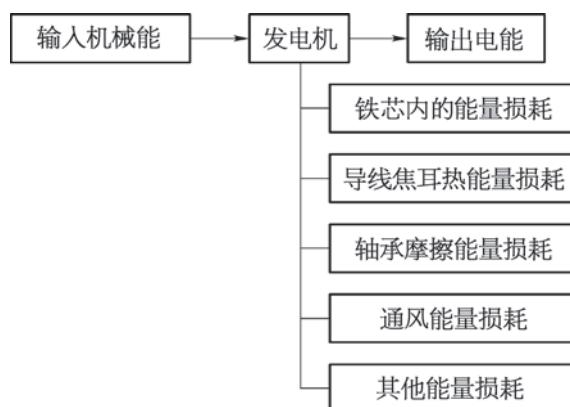


图 7-39 发电机的能量转换关系

► 电动机的主要性能和能量转化

电动机 (motor) 是把电能转化为机械能的装置。电动机的种类很多，从基本结构来说，主要也是由定子和转子构成。定子静止不动，转子可绕轴转动。

实际使用的电动机也分为直流电动机和交流电动机。直流电动机的定子不动，转子按照安培力作用的方向做旋转运动。

交流电动机也是在安培力作用下发生转动。交流电动机具有构造简单、控制方便、体积小、效率高、功率可大可小、无污染源等优点，在生产和生活中应用十分广泛。小到电动玩具，大到高速列车；从家庭电冰箱和空调到工厂企业机床和生产线，都使用不同型号的电动机。

电动机在实际运行过程中也存在各种能量损耗，主要包括铁芯内的能量损耗、导线焦耳热能量损耗、轴承摩擦能量损耗、通风能量损耗等（图 7-40）。一般中小型交流电动机的平均效率约为 87%，甚至可以高达 90% 以上。

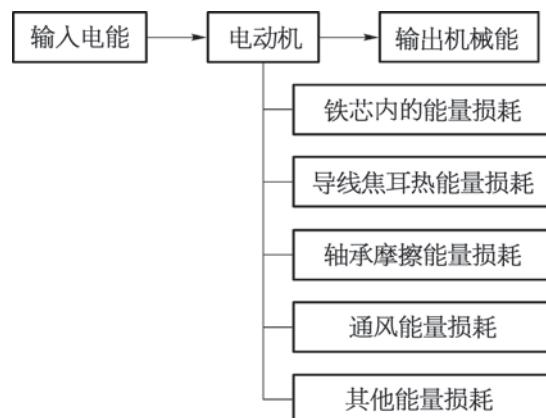


图 7-40 电动机的能量转换关系

► 电磁学促进了社会的发展

发电机和电动机的发明给工农业生产和人们生活提供了操控方便、快捷、安全、经济的源源不断的动力，从而导致了第二次工业革命。麦克斯韦电磁学理论的建立和发展促进了电力技术的革命，并最终引发电力在生产实际中的广泛应用。这说明现代化科学技术的超前性，对生产力发展具有先导作用。这正是科学促进技术进步，进而推动生产发展的模式。科学技术越来越走在社会生产的前面，开辟着生产发展的新领域，引导生产力发展的方向。

电磁现象是一种极为普遍的现象，遍布于我们生活中的每一个角落，在我们日常生活中发挥着重要的作用，从电话、电扇、电冰箱、电梯到广播电视、无线通信、电力机车和人工智能自动控制系统等无所不在。电磁学理论的研究和应用在认识客观世界和改造客观世界的过程中发挥了巨大的作用，以电磁学及电磁技术为基础的许多新技术在不同的领域获得迅速发展。电磁技术给人类创造了巨大的物质财富，促进了社会的发展。

问题与思考

1. 能不能用电动机带动发电机，再用发电机输出的电能驱动该电动机而实现发电机和电动机的连续运转？
2. 我国自行研制的动车组采用了“再生制动”技术，在车速从 200 km/h 下降到 90 km/h 的过程中可以通过发电机发电，此过程中的能量是如何转化的？为什么要采用这种技术？
3. 如图 7-41 所示是实验室用手摇交流发电机。把发电机输出端跟小灯泡连接起来，使线圈在磁场中转动，可观察到小灯泡发光。该手摇交流发电机的工作原理是什么？若增加线圈的转动速度，灯泡的亮度如何变化？把两个发光二极管极性相反地并联起来，再与发电机电源输出端串联，缓慢转动线圈，两个发光二极管是否会同发光？这说明了什么？

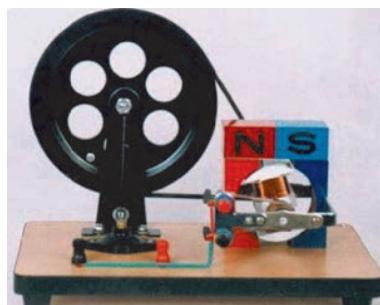


图 7-41

4. 小型电扇接入电路中通电后能转动，其工作原理是什么？在完好的小型电扇的插头处接一小灯泡，用手快速拨动风扇叶片，带动转子转动，发现小灯泡发光，如图 7-42 所示。简要说明产生这一现象的原因。

5. 随着科技发展，越来越提倡节能环保。如图 7-43 所示为一种发电旋转门，该旋转门安装了一个特殊装置，通过人们推动旋转门进出就会产生并存储电能，发电旋转门的工作原理如何？试从能量转换的角度分析。

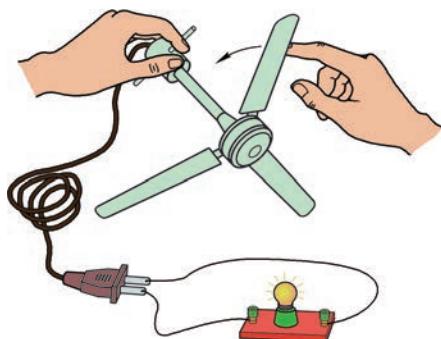


图 7-42



图 7-43

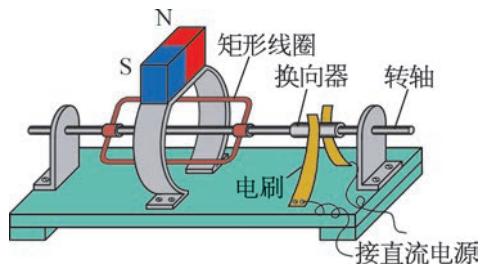


图 7-44

6. 如图 7-44 所示是某同学自制的“小小电动机”，接通电路后线圈开始转动，如果要使线圈反向转动，可采取哪些方法？

小结

• 基本概念和基本规律

自感现象：因线圈中电流变化而在线圈自身引起的电磁感应现象。

涡流：在金属块体内形成的闭合感应电流。

交变电流：大小和方向都随时间做周期性变化的电流，简称交流电。

交变电流的最大值：交变电流一个周期中所能达到的最大值。

交变电流的有效值：让交变电流和恒定电流分别通过相同阻值的电阻，如果在相同时间内产生的热量相等，这一恒定电流的电压、电流的大小就叫做交变电流电压、电流的有效值。

正弦交变电流的最大值和有效值的关系： $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$, $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ 。

变压器：根据电磁感应原理设计而成的能够升高或降低交变电压的设备。

理想变压器的电压比和匝数比的关系： $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$ 。

• 基本方法

通过对自感和涡流现象的观察及正弦交变电流模型的建构过程，感受抽象与归纳的方法。

通过变压器的组装、获取数据、发现规律、误差分析等过程，认识实验探究的方法。

• 知识结构图



复习与巩固

1. 如图 7-45 所示，放在 U 形磁体中的线圈 A 和线圈 B 用导线串联。当用力使线圈 A 向右运动时，悬挂着的线圈 B 如何摆动？此时的线圈 A 和线圈 B 在原理上类似于什么？

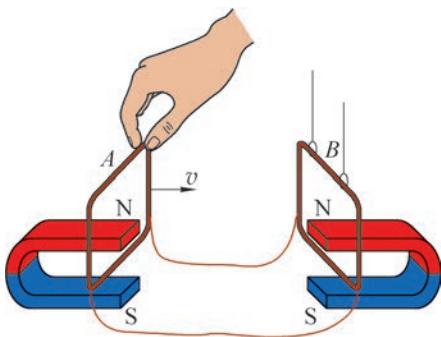


图 7-45

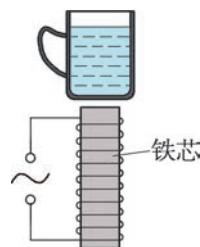


图 7-46

2. 如图 7-46 所示，在线圈上端放置一盛有冷水的金属杯。接通交流电源，一段时间后，杯内的水沸腾起来。若要缩短上述加热时间，线圈的匝数和交流电源的频率应该如何改变？哪种家用电器的原理与此类似？
3. 如图 7-47 所示，矩形线圈 $abcd$ 在匀强磁场中绕 OO' 轴顺时针（沿 OO' 方向看）匀速转动时，线圈中产生正弦交流电。从线圈转过图示位置开始计时，设沿 $adcba$ 方向为电流正方向，则线圈中产生的交流电图像是图 7-48 中的哪一个？说明判断的理由。

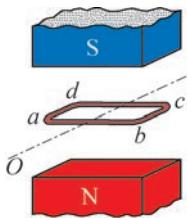


图 7-47

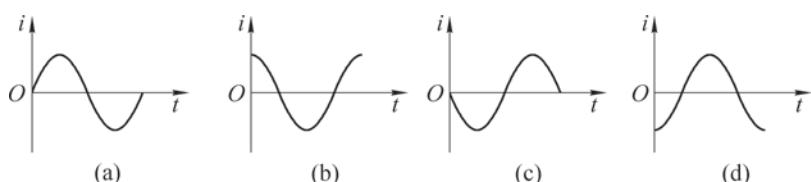


图 7-48

4. 电阻 R_1 、 R_2 和交流电源按照如图 7-49 (a) 所示的方式连接， $R_1=10\ \Omega$ ， $R_2=20\ \Omega$ 。合上开关 S 后，通过电阻 R_2 的正弦交流电的电流 i 随时间 t 变化的情况如图 7-49 (b) 所示，则通过 R_1 的电流的有效值为 _____ A， R_2 两端的电压有效值为 _____ V。

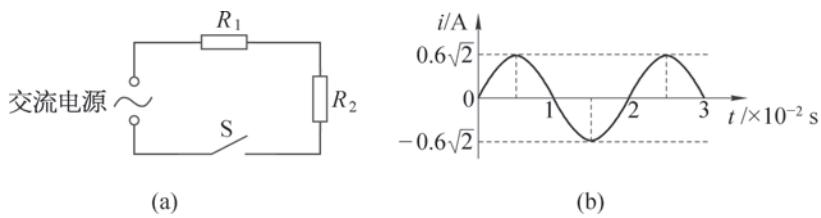


图 7-49

5. 如图 7-50 所示的电路中，开关 S 断开之前通过灯 L 的电流方向如何？断开之后的瞬间通过灯 L 的电流方向如何？

6. 如图 7-51 所示, 用理想变压器给电灯 L 供电, 如果只增加副线圈匝数, 其他条件不变, 则变压器输入电压如何变化? 变压器输出电压如何变化? 电灯亮度如何变化? 变压器输入功率如何变化? 简述理想变压器传输交变电流过程中的能量转化规律。

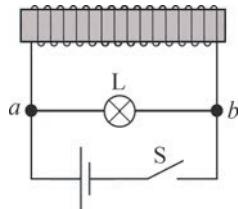


图 7-50

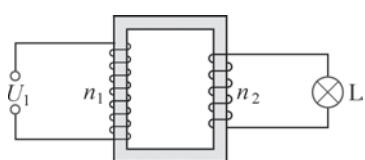


图 7-51

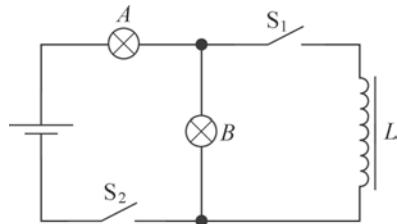


图 7-52

- 如图 7-52 所示, A 、 B 是两盏完全相同的白炽灯, L 是电阻不计的电感线圈。如果断开开关 S_1 , 闭合 S_2 , A 、 B 两灯都能同样发光。如果最初 S_1 是闭合的, S_2 是断开的, 那么, 闭合 S_2 以后, A 灯和 B 灯亮度如何变化? 此时如果断开 S_2 , A 灯和 B 灯亮度又将如何变化?
 - 一个匝数比一定的理想变压器在改变输出交流电的电压大小的同时, 输出交流电电压的频率是否也改变了? 理想变压器输出电压变化的原因是什么? 理想变压器输入电功率变化的原因是什么?
 - 一电热器接在 10 V 的直流电源上, 产生一定大小的热功率。现把它改接到交流电源上, 要使它产生的热功率是原来的 2 倍, 则交流电压的有效值为多少? 交流电压的最大值为多少? (不考虑电阻随温度的变化)

10. 如图 7-53 所示, 交流电的电压 $u=311\sin 314t$ (V),

加在一个“220 V 1 000 W”的电饭煲上。

试问:

- (1) 这个电饭煲能正常工作吗?
- (2) 通过这个电饭煲内部电路的电流多大?
- (3) 电流瞬时值的表达式是怎样的?

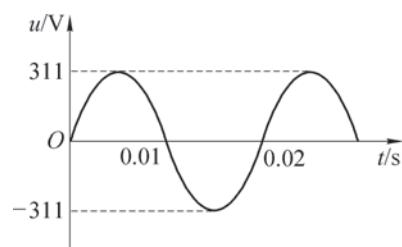


图 7-53

*11. 一小型水电站交流发电机的输出功率为 1 000 kW, 输出电压为 1 000 V。在输电过程中, 要求输电线能量损耗不大于 4%, 已知输电线电阻为 16Ω , 用户处的降压变压器输出电压为 240 V。求送电线路中升压变压器与降压变压器各自的变压比。(设升压变压器、降压变压器均为理想变压器)

第八章

电磁振荡与电磁波

21世纪是信息化时代，电磁波的使用越来越多，越来越广。电磁波用于无线广播、遥感、控制、加热食品、检查身体、探索宇宙奥秘等。手机也是通过电磁波实现通信和互联的。电磁波已经深入到我们生活的各个角落。我们就生活在电磁波的“海洋”里。

在必修课程中我们已学习了电流的磁效应，在前面两章中还学习了电磁感应等知识，本章将了解麦克斯韦电磁场理论；通过实验，了解电磁振荡的过程，知道电磁波的发射、传播和接收的基本原理；认识电磁波谱，知道电磁波的特征及典型应用。本章的学习要用到电场、磁场的性质，并用到电磁感应、电容器充放电、电感器自感等知识。本章的学习有助于进一步领悟物质观念、能量观念，感受自然界的和谐与统一，体会“类比”“统一”等物理学研究问题的基本思想和方法，提升科学思维、科学探究的能力。

第一节 麦克斯韦电磁场理论

科学理论，是人类智慧最璀璨的结晶。一项重大的科学发现，往往不是一个人所能完成的，需要许多人甚至几代人的共同努力。电磁场理论的构建和统一就是一场伟大的科学接力的过程。

电磁场理论既涉及电场，也涉及磁场，更包括电场和磁场的紧密联系。

大家谈

请谈谈磁现象与电现象间的区别与联系。

► 电磁场理论建立的基础

人们对电和磁现象的认识有着很长的历史，但直至19世纪20年代，以奥斯特发现电流的磁效应为开端，人们经过大量的实验发现了一系列重要的规律，才逐步揭示了电与磁的内在联系和转化关系。

为了合理地解释电磁相互作用，法拉第提出电荷和磁体周围存在着一种由电荷和磁体本身产生的连续的介质，称为“场”（图8-1），通过这种介质，电磁相互作用得以传递。场的概念使人们意识到物质的存在有两种形态，一种是分子、原子等实物粒子，另一种则是场。

可以说，场的观念是牛顿时代以来，在物理学基础理论方面最重要的变革和发展。

法拉第借用电场线和磁感线形象地描述场的性质，但因为缺乏精确的数学描述而无法反映电磁现象的内在规律，因而受到了人们的质疑。在同一时期，许多科学家，如德国物理学家韦伯、英国物理学家开尔文等，都在电磁学领域取得突破，这些都为麦克斯韦的电磁学研究准备了良好的条件，为电磁场的数学理论提供了充分的实践和理论基础。

► 麦克斯韦电磁场理论的主要观点

1854年，麦克斯韦通过阅读法拉第的《电学的实验研究》，对电磁学产生了浓厚的兴趣。

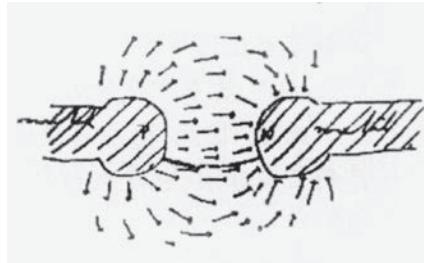


图8-1 法拉第描绘的两个带电导体球间的电场

趣。经过长达十余年的努力，他深入研究了电场、磁场的内在联系，建立了统一的电磁场理论。该理论系统地总结了前人的成果，特别是总结了从库仑到安培、法拉第等人的电磁学说的全部成就。麦克斯韦“变化的磁场产生电场”“变化的电场产生磁场”的假说，是电磁场理论的两个重要思想。

1. 变化的磁场在周围空间产生电场

如图 8-2(a)所示，一个闭合导体回路处于变化的磁场中，由于穿过回路的磁通量发生变化，根据法拉第发现的电磁感应现象，回路中会产生感应电流。麦克斯韦从场的观点进一步想到，产生感应电流时，一定是存在促使导体中自由电荷做定向运动的电场。因此，麦克斯韦认为：这个现象的实质是变化的磁场在空间产生了电场。无论闭合回路是否存在，这个电场总是存在的。这是麦克斯韦电磁场理论的第一个要点。

根据楞次定律判断，当磁场增强时，电场方向应如图 8-2(b)所示。从法拉第电磁感应定律还可以推论：磁感应强度变化率越大，产生的电场强度越大。

如果磁场随时间均匀变化，则产生的电场不随时间变化；如果磁场随时间不均匀变化，则产生的电场随时间变化。所以，随时间周期性变化的磁场能够产生随时间周期性变化的电场。

2. 变化的电场在周围空间产生磁场

既然变化的磁场能够产生电场，那么，相反地，变化的电场是否也能产生磁场呢？这在当时还没有直接的实验证明。但麦克斯韦确信自然界的规律往往是统一的、对称的，他做出了肯定的假设。

在学习磁场时，我们知道电流周围产生磁场。麦克斯韦指出：不但导体中的电流产生磁场，电容器两极板之间的电场在发生变化时也产生磁场。当电场增强时，电场周围磁场的方向和假定两极板之间存在着与电场同方向的电流产生的磁场一样，如图 8-3 所示。电场强度变化得越快，产生的磁场磁感应强度越大。这是麦克斯韦电磁场理论的第二个要点。

如果电场随时间均匀变化，产生的磁场不随时间变化；如果电场随时间不均匀变化，则产生的磁场就是随时间变化的。所以，随时间周期性变化的电场能够产生随时间周期性变化的磁场。

根据麦克斯韦理论的上述两个要点可以得出，电场和磁场紧密相连。不可能在建立周期性变化磁场的同时，在空间不产生周期性变化的电场；反之，周期性变化的电场也不可能脱离周期性变化的磁场而单独存在。变化的电场和磁场是不能分离的统一的场，称之为电磁场 (electromagnetic field)。

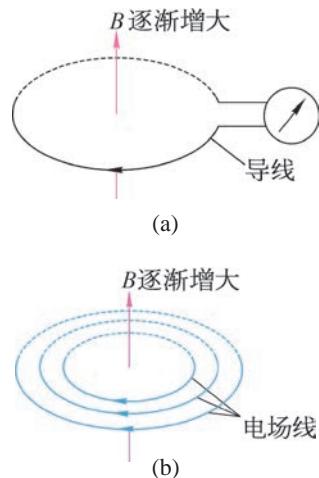


图 8-2 变化的磁场产生电场

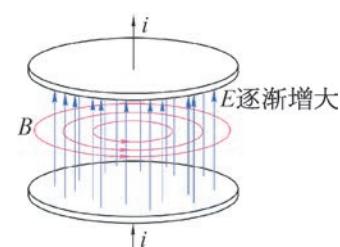


图 8-3 变化的电场产生磁场

► 电磁场理论的意义

一个新理论，不仅要能解释旧理论所解释的现象，还应能扩展到新的范围解决新的问题。而一个伟大的新理论，更要能预言新的物理现象，引导人们走向物理世界的更深层次。这就是伟大新理论强大生命力的表现。

根据上述麦克斯韦的理论，当空间某处存在随时间不均匀变化的电场时，周围空间会产生随时间不均匀变化的磁场，而这又会在空间产生新的电场……这样，变化的电场和磁场就会由近及远地向周围传播，从而形成变化电磁场在空间的传播，这就是**电磁波**(electromagnetic wave)。

麦克斯韦不仅预言了电磁波的存在，他还从理论上推导出电磁波在真空中的传播速度为 3×10^8 m/s。这个速度和真空中的光速相同，麦克斯韦认为，两者相同并非偶然巧合。因此，他做出判断：光在本质上也是电磁波。麦克斯韦把表面上似乎毫不相干的光现象与电磁现象统一了起来，使人类进一步认识了光的本质。

1865年，麦克斯韦的论文《电磁场的动力学理论》给出了电磁场的普遍方程组——麦克斯韦方程组。经后人的简化之后，麦克斯韦方程组用简洁、对称、优美的形式，概括了电磁学中极为丰富的内容。

麦克斯韦出生在电磁学已经打好基础的年代，他没有辜负时代的要求，总结了已有的成就，甩掉一切陈旧的论点，把电磁场作为客观存在摆在电磁场理论的核心地位，从而开创了物理学又一个新的纪元，完成了物理学的第三次大综合。爱因斯坦对他作了很高的评价：“自从牛顿奠定理论物理学的基础以来，物理学的公理基础的最伟大的变革，是由法拉第和麦克斯韦在电磁现象方面的工作所引起的。”麦克斯韦不愧为牛顿之后又一位划时代的杰出物理学家。

拓展视野

物理学理论的发展经历了几次大的综合统一。

17世纪，伽利略研究地面上物体的运动，打开了通向近代物理学的大门。牛顿把地面上物体的运动和天体运动统一起来，揭示了天上地下一切物体的普遍运动规律，建立了经典力学体系，实现了物理学史上第一次大综合。

18—19世纪，经过迈尔、焦耳、卡诺、克劳修斯、玻尔兹曼等人的研究，经典热力学和经典统计力学正式确立；从而把热运动的宏观表现与微观机制统一起来，实现了物理学史上的第二次大综合。

19世纪后半叶，麦克斯韦在前人研究的基础上，经过深入研究，把电、磁、光统一起来，建立了经典电磁场理论，预言了电磁波的存在，实现了物理学史上第三次大

综合。

至此，经典力学、经典统计力学和经典电磁场理论形成了一个完整的经典物理学体系，一座金碧辉煌的物理学大厦巍然耸立。

20世纪，爱因斯坦抛弃了绝对时间和绝对空间的观念，建立了狭义相对论，使力学和电磁学在新的时空观的基础上达到协调，同时将质量与能量联系在一起；广义相对论则把物质、时空和引力统一起来；量子理论实现了波粒二象性的统一；弱电统一理论实现了电磁作用与弱相互作用的统一。现在，物理学家正在追求超统一理论，以期实现四种相互作用理论的和谐统一。

► 电磁波的验证

麦克斯韦的电磁场理论深邃而新颖，以至于在理论提出很长一段时间内没有被大家普遍接受。直至1888年，德国物理学家赫兹（图8-4）通过实验证实了电磁波的存在，才使得这一伟大理论逐渐被世人认可、推崇。

赫兹实验的原理如图8-5所示。他把两根带有金属球的金属杆A和B接在感应圈C上，在两个金属球之间留有一个间隙，感应圈C感应出的高电压可以使金属球间隙中的空气电离而导电，在两球之间产生火花放电；赫兹使用的接收器是一个金属环，在断开处也有两个金属球，中间也有间隙，把这个接收器放在离发射装置有一定距离的地方；当发射装置的金属球间有火花跳动时，几乎同时在接收器的金属球之间也有火花跳动。这个现象只能用电磁波来解释。发射装置中产生的电磁波传到金属圆环处，电磁波的电磁场使金属环感应电荷而在两个金属球之间产生电压，这个电压若足够高，就能使两球之间发生火花放电。



图8-4 赫兹（H. R. Hertz, 1857—1894）

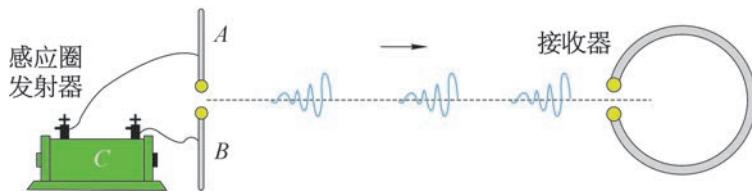


图8-5 赫兹验证电磁波的实验装置

赫兹不但用实验证实了电磁波的存在，还做了一系列的实验证明电磁波和光波一样，

能发生反射、折射、干涉、衍射等现象，并测出了电磁波的传播速度正是光速。赫兹实验不仅证实了麦克斯韦的电磁场理论，更为其后的无线电报、无线电广播、电视和雷达等无线电技术的发展奠定了实验基础、开辟了道路。为了纪念他，后人把频率的单位命名为赫兹。

问题与思考

1. 关于电磁场理论，判断下列说法是否正确，并简述理由。
 - (1) 变化的电场周围产生的磁场一定是变化的。
 - (2) 变化的电场周围产生的磁场不一定是变化的。
 - (3) 任何变化的磁场周围产生的电场一定是均匀变化的。
 - (4) 均匀变化的磁场周围产生的电场才是均匀变化的。
2. 麦克斯韦根据什么现象提出“变化的磁场所能够产生电场”？关于“变化的电场能够产生磁场”的观点是基于什么观念提出的？
3. 利用家用电器，动手实验，研究电磁波的发射、接收、反射等现象，并简单交流。

第二节 电磁波的产生与发射

根据麦克斯韦理论，我们知道变化的电场和磁场会由近及远地向周围传播，形成电磁波。如一根导线中存在周期性变化的电流，在它的周围就会产生周期性变化的磁场，从而形成电磁波向外辐射。电流的微观机制是导体内自由电荷的运动，因此，电磁波就和电荷的运动密切相关。经典电磁理论证明，一切具有加速度的电荷都会向外辐射电磁波。我们已了解电磁波是个大家族，不同的电磁波产生的机理和产生方式不同。无线电波是振荡电路中自由电子的周期性运动产生的；红外线（以及可见光、紫外线）、X射线、 γ 射线可分别由原子的外层电子、内层电子和原子核受激发后产生。

下面我们主要以无线电波来讨论电磁波的产生与发射。无线电波可以通过电磁振荡产生，因此，我们有必要先了解电磁振荡。

► 电磁振荡

什么是电磁振荡？让我们通过一个实验来认识。

自主活动

将电感器、电容器与电池、单刀双掷开关、电流传感器按如图8-6所示的电路连接起来。把开关置于1，先给电容器充电；然后将开关置于2，电容器通过电感器放电，观察计算机记录的电流变化规律（图8-7）。

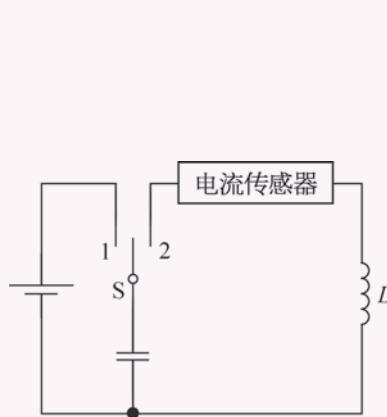


图8-6 实验电路图

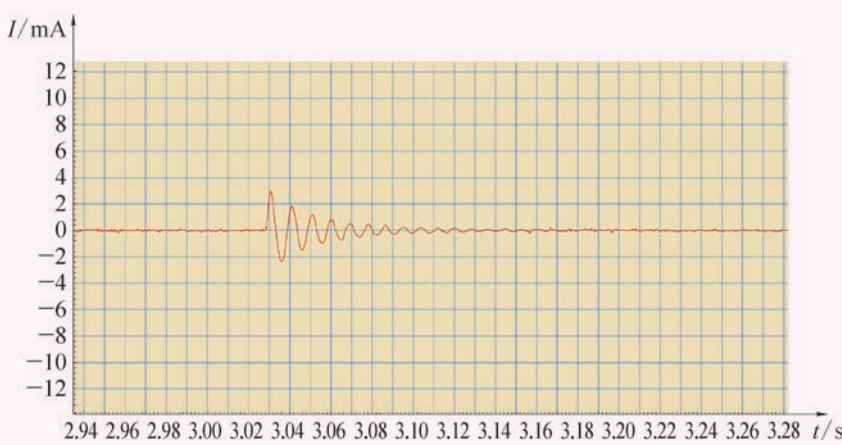


图8-7 实验记录图

通过实验可知，回路中电流的大小和方向都随时间做周期性的变化，该电流被称为振荡电流。能产生振荡电流的电路叫做振荡电路。像这种由电感器 L 和电容器 C 组成的电路叫做 LC 回路，它是一种基本的振荡电路。

研究表明，电容器极板上有电荷时电容器内存在电场，贮存着电场能；电感器的线圈中有电流通过时线圈内存在磁场，贮存着磁场能。在振荡电路中产生振荡电流的同时，电场能和磁场能发生相应的周期性相互转化，这种现象叫做**电磁振荡 (electromagnetic oscillation)**。在上述 LC 回路中发生电磁振荡的过程中，除了最初由电源为电容器充电时供给能量外，没有外界的作用，这样的电磁振荡叫做自由振荡。

► 电磁振荡的周期性过程

电磁振荡的过程就是电场能与磁场能相互转化的过程，其周期性的变化如图 8-8 所示。

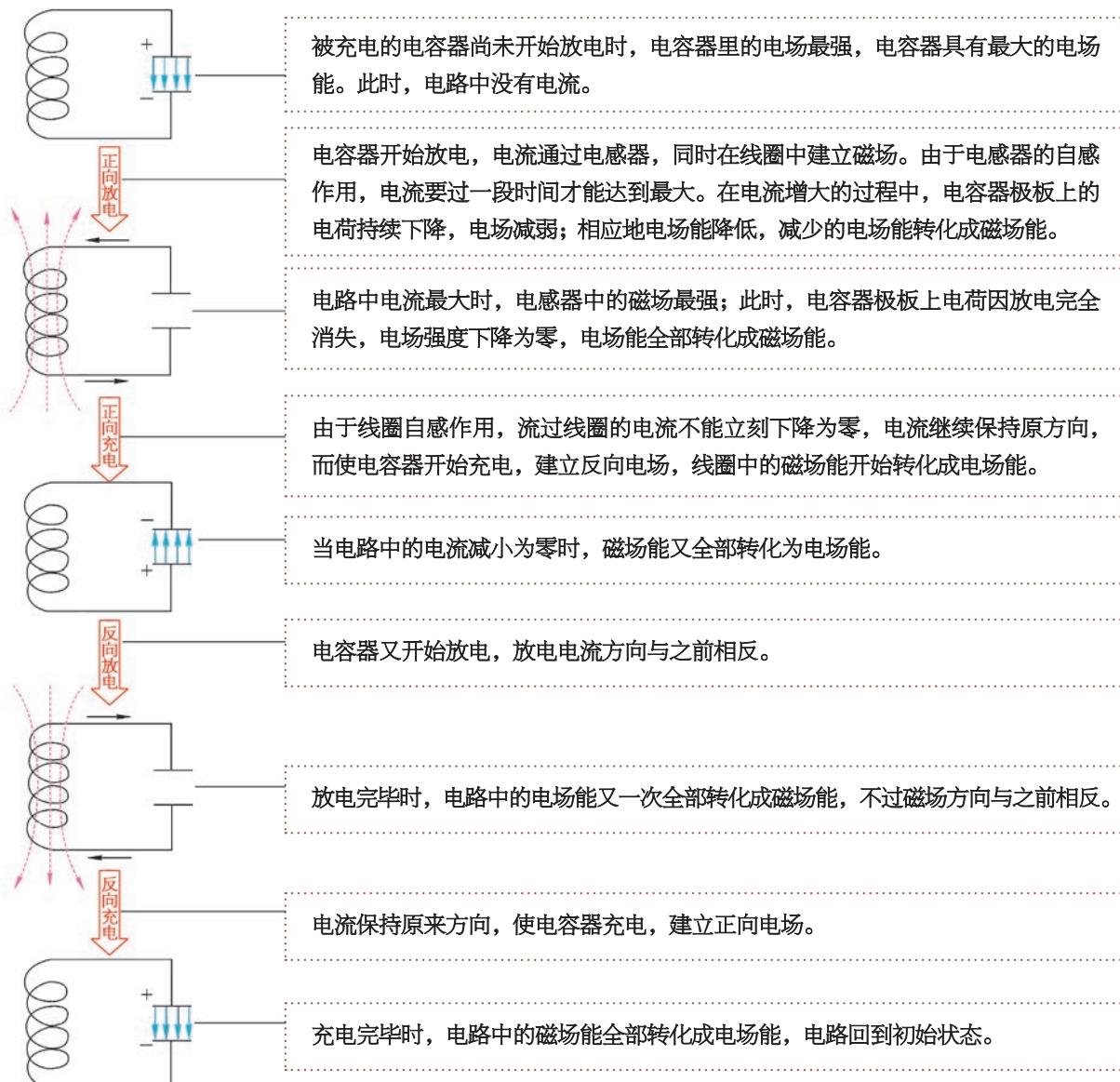


图 8-8 电磁振荡过程

假如电路中没有能量损失，这个过程就能永远周期性地继续下去，这就是 LC 电路中的电磁振荡。

拓展视野

每个振动系统都有由各自自身性质所决定的振动频率，叫做固有频率。研究表明，由电感器和电容器组成的振荡电路也有一定的固有振荡频率，称为振荡电路的频率。它是由振荡电路中电感器的电感和电容器的电容决定的。电路中线圈的电感跟线圈的形状、长短、匝数以及是否有铁芯等因素有关，表示线圈产生自感电动势的能力，用 L 表示。线圈的电感越大，电容器的电容越大，振荡电路的频率就越小。振荡电路的频率 f 跟电感 L 和电容 C 的关系是

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

式中 f 、 L 、 C 的单位分别是赫兹 (Hz)、亨利 (H)、法拉 (F)。

由此可见，只要改变 LC 回路中电感器的电感或电容器的电容，就能改变振荡电路的频率。

► 电磁波的发射

理论上，只要电路中有振荡电流，就能向外辐射电磁波。但是直接利用 LC 回路向外辐射电磁波的效率是很低的，这是因为在闭合的 LC 回路中，电场、磁场几乎全集中在电容器和电感器中，向外辐射的能量很少，这不利于电磁波的发射。要想有效地将电磁波发射出去，需要具备以下条件：

1. 开放电路

把闭合 LC 电路改变为开放电路，按照图 8-9 (a)、(b)、(c) 所示的步骤逐渐将 LC 回路拉开，形成开放电路，使原来集中在两极板之间的电场线分布到电路周围的空间中，从而有利于电磁波的辐射。

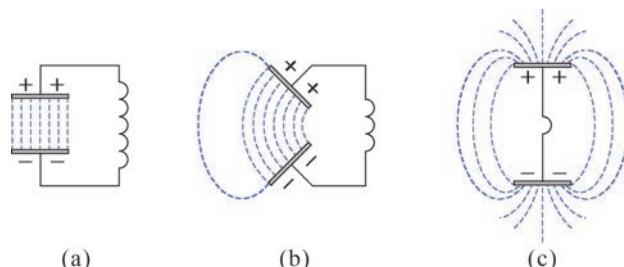


图 8-9 LC 电路的演变过程

2. 提高振荡频率

理论研究表明，电磁波在单位时间内辐射的能量与频率的四次方成正比。因此，要发送较强的电磁波，必须提高振荡频率，这样才能有效地将能量辐射出去。

为了取得更好的发射效果，实际应用的电磁波发射装置如图 8-10 所示，主要由振荡器和开放电路两部分组成。振荡器的作用是产生高频振荡电流和对开放电路供给能量。开放电路由线圈 L' 和天线、地线组成，线圈 L' 上部接在很高的天线上，下部通过电线接地。

为了使开放电路中产生振荡电流，要使线圈 L' 和振荡器电路中的线圈 L 绕在同一铁芯上，并且互相靠近，使 L' 由于电磁感应而获得和 L 相同的振荡电流（这样的方法叫做感应耦合），并传送到发射天线上，天线四周空间便产生了电磁波。

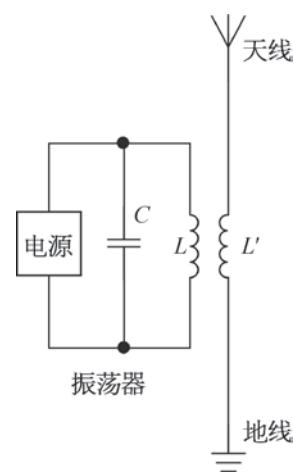


图 8-10 电磁波的发射
电路

问题与思考

1. 电磁振荡的过程和机械振动过程很相似，试将图 8-8 所示的过程与弹簧振子的振动相类比。
2. 实际的电磁振荡电路中有哪些能量损失？
3. 如何理解电磁场是一种物质？简述理由。

第三节 电磁波的传播和接收

当今的无线电通信就是通过电磁波传递信息的。我们走在路上时经常会看到如图 8-11 所示的移动通信基站，它是发射和接收电磁波的装置，也是使无线设备连入通信网络的设备。本节将在了解电磁波的特性的基础上，进一步学习电磁波的传播和接收。



图 8-11 移动通信基站

电磁波虽然也与机械波一样有反射、折射、干涉、衍射等波的普遍特征，不过电磁波与机械波之间却有着本质上的区别。机械波只能在弹性介质中传播，而电磁波的传播不需要空气或其他任何介质，它可以在真空中传播。电磁波在真空中传播的速度就是真空中的光速 c ，约为 3×10^8 m/s。机械波传播时，介质中的质点均在做振动，而电磁波通过的空间则是电场强度 E 和磁感应强度 B 做周期性变化。

电磁波的波长 λ 、频率 f 、波速 c 之间的关系和机械波一样

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

研究表明，电磁波是横波，空间中任意一点的电场强度 E 的方向和磁感应强度 B 的方向总是互相垂直的，并且它们都和电磁波的传播方向垂直，如图 8-12 所示。

利用电磁波的特性，人们即可对电磁波有效地传播和接收。下面我们仍主要以无线电波来讨论电磁波的传播和接收。

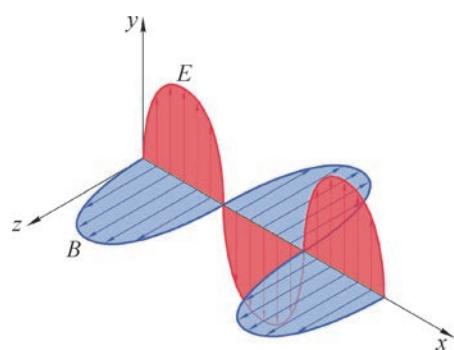


图 8-12 电磁波传播示意图

▶ 无线电波的传播

在无线电通信中使用的电磁波称为无线电波。无线电波的波长从几毫米到几十千米。根据波长或频率的范围，通常把无线电波分为长波、中波、短波等，其参数和用途如表 8-1 所示。

表 8-1 常见无线电波的参数和用途

波段		波长 λ/m	频率 f/MHz	主要传播方式	主要用途
长波		30 000 ~ 3 000	0.01 ~ 0.1	地波	超远程无线电通信和导航
中波		3 000 ~ 200	0.1 ~ 1.5	地波和天波	调幅 (AM) 无线电广播和电报通信
中短波		200 ~ 50	1.5 ~ 6		
短波		50 ~ 10	6 ~ 30	天波	
微波	米波	10 ~ 1	30 ~ 300	近似直线传播	调频 (FM) 无线电广播、电视、导航
	分米波	1 ~ 0.1	300 ~ 3 000	直线传播	移动通信、电视、雷达、导航
	厘米波	0.1 ~ 0.01	3 000 ~ 30 000		卫星通信、电视、雷达、导航
	毫米波	0.01 ~ 0.001	30 000 ~ 300 000		

无线电波的波长差别很大，其衍射和反射能力也各不相同，相应地有三种传播方式：地波（地面传播）、天波（电离层反射传播）和空间波（直线传播）。

1. 地波

沿地球表面空间传播的无线电波叫地波，如图 8-13 所示。波长较长的长波、中波和中短波主要以地波方式传播。地波能绕过地表的山岭和障碍物，能沿着弯曲的地球表面传到地平线以外的地方。地波的传播比较稳定，不受昼夜变化的影响，但传播过程中能量损失较大，特别是波长较短的中波和短波；因此，中波和中短波的传播距离只在几百千米范围内。收音机在这两个波段一般只能收听到本地或邻近地区的电台。长波沿地面传播的距离要比中波和中短波远得多。但是，发射长波的设备庞大、造价高，一般很少用于广播，多用于超远程无线电通信和导航。

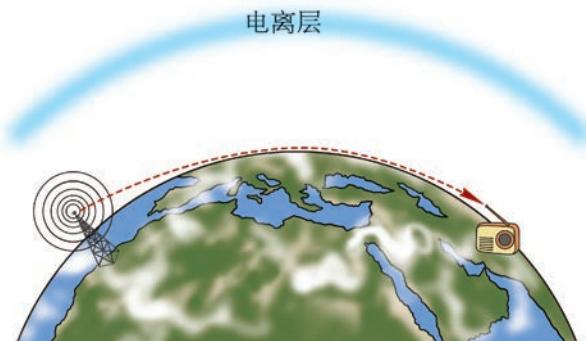


图 8-13 地波示意图

2. 天波

依靠电离层的反射来传播的无线电波叫天波，如图 8-14 所示。在地球表面的大气层中，在离地大约五十到几百千米的范围内存在一个由自由电子、正离子、负离子和中性原子、分子组成的电离层，电离层中的带电粒子是由于气体分子受到太阳辐射中的紫外线、

X射线和高能粒子等的电离作用而产生的。电离层对不同波长的无线电波的作用不同。波长小于10m的微波可以穿过电离层飞向宇宙；波长超过3000m的长波穿过电离层时会被电离层吸收；中波、中短波和短波等遇到电离层时一部分被反射回来，另一部分进入层内被吸收。波长越短，电离层的吸收越少，反射越多。因此，短波最适合以天波形式传播，可以传到几千千米以外的地方。

3. 空间波

从发射点经空间直线传播到接收点的无线电波叫空间波。地面上的高山和高大建筑物都会阻挡微波的传播，微波又会直接穿过电离层，所以，微波既不能以地波形式传播，又不能以天波形式传播，只能直线传播。这种直线传播受大气的干扰小、能量损失少、信号强，所以，电视和雷达采用的都是微波。但因为地球是圆球形的，沿直线传播的距离不大，只有几十千米，要想远距离传送，需要设立中继站。如图8-15所示，中继站接收到微波后，先给予放大，补充能量，再发送给下一站，一站传一站，可传到很远的地方。卫星通信就是利用卫星作为无线电传播的中继站。同步卫星处于赤道上空约36000km高的位置，相对于地面静止，是理想的无线电传播的中继站。只要有三颗通信卫星，就能把微波信号传遍除地球南北极附近以外的全世界。同步卫星轨道是珍贵的空间资源，我国于1984年首次成功发射同步卫星，成为世界上少数几个具有发射同步卫星能力的国家。

► 电磁波的接收

赫兹实验就是最初的电磁波的发送和接收。从理论上说，在空间传播的电磁波，遇到任何导体，都能通过电磁感应使导体中产生与其频率相同的振荡电流，把一部分能量传递给这个导体。但是，在赫兹实验中并不是用任何一个金属环都能观察到由于接收到电磁波而产生的火花。也就是说，接收电路必须具备一定的条件，才能产生显著的振荡电流，那么，这个条件是什么？

下面通过实验来观察电磁振荡，探究产生振荡电流的条件。

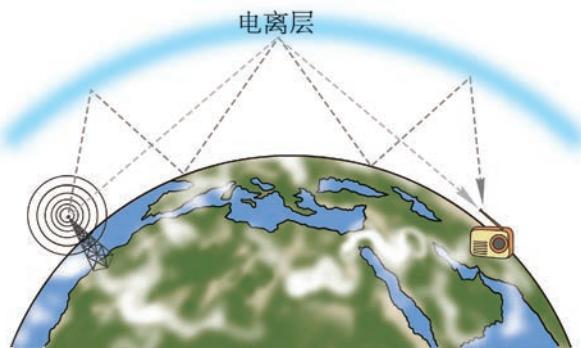


图8-14 天波示意图

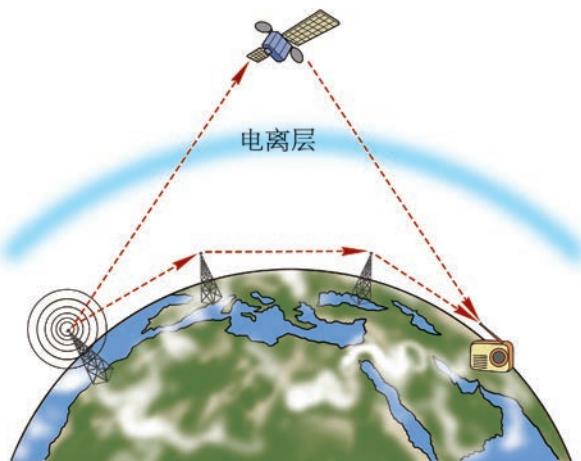


图8-15 空间波示意图

自主活动

给如图 8-16 所示的莱顿瓶甲充电，当两金属球之间的电压达到一定值时，金属球 A、B 间开始放电，出现电火花。

移动莱顿瓶乙的矩形线框中可移动的带有氖管的金属棒，观察它在不同位置时接收电磁波的情况。

最后根据氖管发光的亮度，找出振荡电流最大的位置。

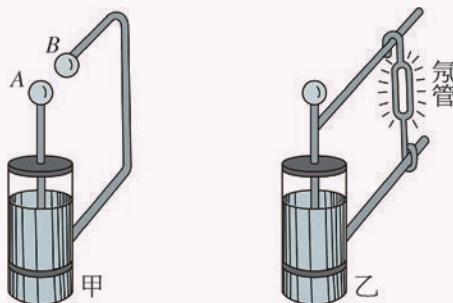


图 8-16 电谐振实验

实验表明，当两个矩形线框面积相等时，振荡电流最大。

对于机械振动，一个振动系统在周期性外力的驱动下产生受迫振动时，如果驱动力的频率和该系统的固有频率相同，就会发生共振，系统的振幅最大。与此相似，振荡电路接收外来电磁波产生振荡电流也是一种受迫振荡。当电磁波的频率和振荡电路的固有频率相同时，振荡电流的振幅最大，接收到的能量最大，这个现象叫做电谐振 (electric resonance)。

上述实验中，甲、乙两个莱顿瓶的电容相同，当矩形线框面积相等时，它们的电感相同。此时氖管最亮，说明接收电路的固有频率等于发射电磁波的频率时，发生了电谐振。调节接收电路的一些电学量如电感 (L) 或电容 (C)，使接收电路与电磁波产生电谐振的过程叫做调谐。上述实验中，调谐是通过改变矩形线框的电感来实现的。

由于空中传播的不同频率的电磁波都会在接收天线上产生不同频率的振荡电流，要从这些电磁波中得到我们需要的信号就需要调谐。以收音机的接收电路为例，收音机里的接收电路大多由一个接收天线和一个与之耦合的 LC 回路组成，如图 8-17 所示。其中电感线圈的电感 L 是一定的，电容器的电容 C 则是可变的。各广播电台发出的电磁波频率不同，它们都可以在接收天线中引起振荡电流，并使与天线耦合的振荡电路中产生相应的振荡电流。调节电容器的电容 C 使 LC 电路的固有频率和某个电台发出的电磁波频率相同，电路中这个频率的电流就特别大。这样，就把这个频率的电信号从其他频率的信号中筛选了出来。

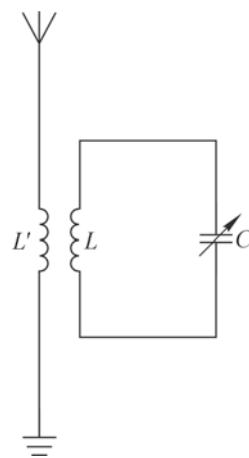


图 8-17 收音机中的接收电路

STSE

无线电通信就是利用电磁波来传递信号，下面以传递声音信号为例对无线电通信作简单介绍。

通过接在电路中的话筒可以把声振动转换成振动规律与之相同的振荡电流，这种电流叫做音频电流。但是，因为音频电流信号的频率太低，必须把音频信号加到高频电流中，才能由高频电流产生的高频电磁波（通常叫做载波）把它发送出去。这个高频电流带上信号的过程叫做调制。

调制可分为模拟调制和数字调制。常见的模拟调制有两种方式，一种是使原为等幅的高频电磁波的振幅按声音的规律变化，这种方法叫做调幅（简称AM）；另一种是使高频等幅电磁波的频率按声音的规律变化，这种方法叫做调频（简称FM）。两种调制方式的示意图如图8-18所示。

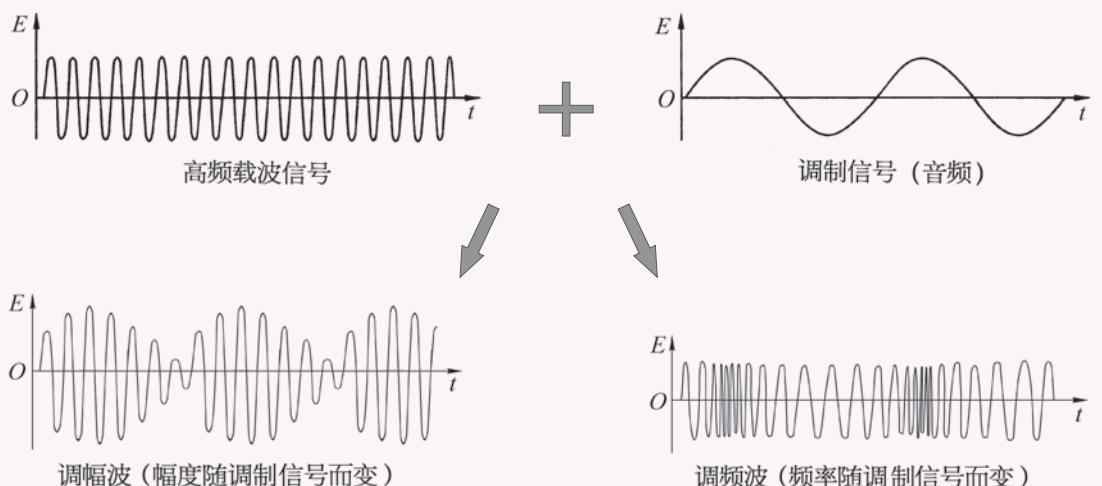


图8-18 模拟调制示意图

数字调制则是将音频信号处理成数字信号，如二进制中的“1”“0”，以控制载波的频率、振幅等方式加载在高频电磁波上。与模拟调制的方式相比，数字调制具有更好的抗干扰性及安全性，适合长距离的传输。数字调制技术在现代通信系统中有着广泛的应用，如手机通信等，如图8-19所示。

在接收高频电磁波时，必须把音频信号从已调制的高频电流中分离出来，得到音频



图8-19 数字调制示意图

电流，然后把音频电流送到扬声器里才能听到声音，这个过程叫做解调。

无线电广播的发射和接收过程，如图 8-20 所示。

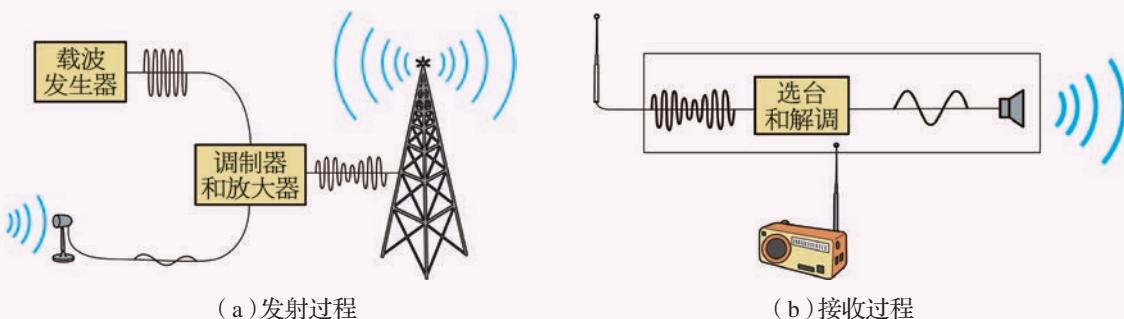


图 8-20 无线电广播的发射和接收过程示意图

示例 广播电视、移动通信等通信方式都需要频率资源，占用一定的频率带宽。通常一套电视信号的频带宽度为 8 MHz，若某多媒体广播电视的中心频率为 411 MHz，计算这一广播电视频率范围对应的波长范围。

分析：根据电磁波的中心频率、频率宽度可得该广播电视的电磁波频率范围。由电磁波频率、波长、波速间的关系，即可求解。

解：由这一电视信号的中心频率 411 MHz、频率宽度 8 MHz 可得，该电视信号的电磁波频率范围是 407 ~ 415 MHz。

当 $f_1 = 407 \text{ MHz} = 4.07 \times 10^8 \text{ Hz}$ 时，对应的电磁波波长

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_1} = \frac{3 \times 10^8}{4.07 \times 10^8} \text{ m} \approx 0.737 \text{ m}$$

当 $f_2 = 415 \text{ MHz} = 4.15 \times 10^8 \text{ Hz}$ 时，对应的电磁波波长

$$\lambda_2 = \frac{c}{f_2} = \frac{3 \times 10^8}{4.15 \times 10^8} \text{ m} \approx 0.723 \text{ m}$$

因此，该广播电视对应的电磁波波长范围为 0.723 ~ 0.737 m。

问题与思考

- 已知地球到月球的距离为 $3.84 \times 10^5 \text{ km}$ ，如果从地球向月球发射电磁波，经过多长时间才能在地球上接收到反射回来的电磁波？

2. 假如某电磁波的频率是 $1 \times 10^9 \text{ Hz}$, 则这一电磁波的波长为多少?
3. 为什么说电磁波是横波?
4. 打开收音机, 在收音机旁边放置一个正在工作的手机或者电动剃须刀。调节收音机的方位和距离, 看看会发生什么情况, 并解释其中的原因。
5. 在验证电磁波存在的实验中, 接收器能够在发射器的附近产生电火花说明了电磁波的存在, 试从能量的角度解释这一现象。

第四节 电磁波的应用

赫兹通过实验证实了电磁波的存在后，各种电磁波被人们陆续发现。正如章首语中所说那样，我们就生活在电磁波的“海洋”里。从卫星通信、定位，再到各式家电设备，电磁波的应用在我们的生活中处处可见。

► 电磁波谱

人们通常把各类电磁波按照波长大小依次排成一列，称为电磁波谱，如图 8-21 所示。

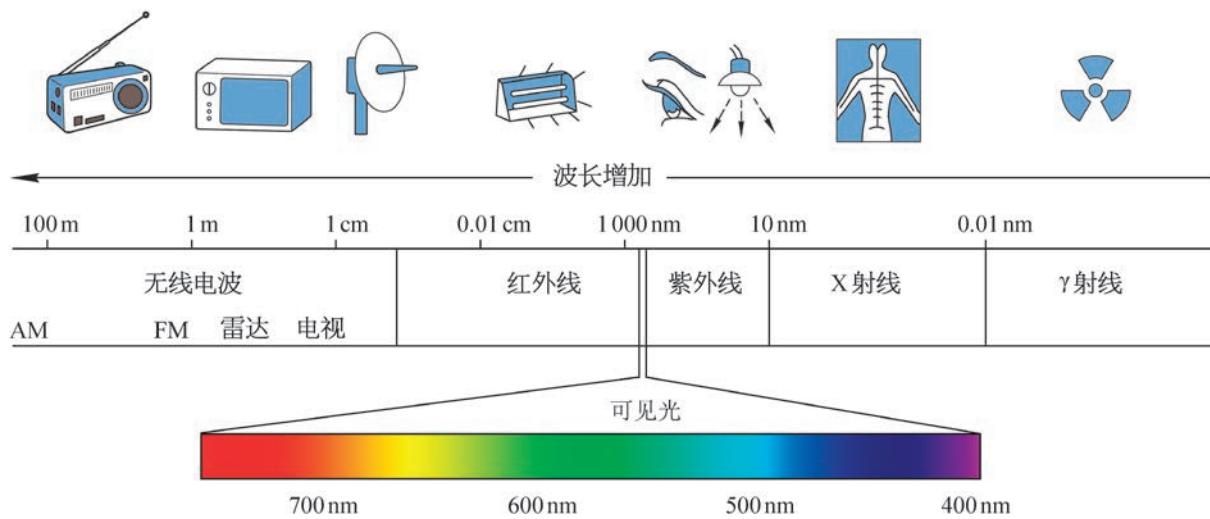


图 8-21 电磁波谱

按照电磁波的波长从小到大排列，依次为： γ 射线、X 射线、紫外线、可见光、红外线、无线电波等。

大家谈

谈谈你身边哪些设备正在发射、接收电磁波？

► 电磁波谱主要成员及其应用

1. γ 射线 (γ -ray)

1900 年，法国物理学家维拉德在研究放射性射线的折射、反射时，发现了 γ 射线，其

波长约在 10^{-11} m 以下，是一种能量很高的光子流。

在医疗上， γ 射线通过会聚可作为“手术刀”，来切除肿瘤，也称为 γ 刀。在农业上， γ 射线可用来培育新种。通过 γ 射线照射，种子、植株会产生各种变异，从中选择可遗传的优良变异，通过几代培育后，便可得到优良品种。在食品加工中，照射 γ 射线可以有效地消灭食品中的微生物。被 γ 射线照射过的食品不易腐烂，被称为辐照食品。图 8-22 为我国的辐照食品标志。



图 8-22 我国的辐照食品标志

2. X 射线 (X-ray)

1895 年，德国物理学家伦琴（图 8-23）在研究阴极射线时发现了 X 射线，他给他妻子的手拍了一张 X 光照片，如图 8-24 所示，故 X 射线又称为伦琴射线。X 射线的波长约为 $10^{-11} \sim 10^{-8}$ m，具有很强的穿透能力。

在机场、车站等地方，常用 X 射线对行李进行透视安全查验，如图 8-25 所示。



图 8-23 伦琴
(W. C. Röntgen,
1845—1923)



图 8-24 伦琴首次拍到的他夫人手的 X 光照片



图 8-25 地铁站的 X 射线安检仪

在医学上，X 射线常被用于人体的透视检查，由于它对不同密度的组织穿透率不同，可以通过成像了解人体的骨骼及脏器等情况。除此之外，X 射线成像技术还被应用在考古、地球物理、纳米科学和电子工业等方面。

3. 紫外线 (ultraviolet ray)

1801 年，物理学家在研究可见光的紫光外侧时发现了紫外线，其波长约为 $4 \times 10^{-8} \sim 4 \times 10^{-7}$ m。太阳光中含有紫外线，能够激起荧光，也能使照相底片感光。

紫外线能够杀死微生物，在医院病房中常用紫外灯杀菌。虽然人眼看不到紫外线，但是一些昆虫的复眼对紫外线特别敏感，因此在农业中，紫外线被制作成黑光灯用来诱杀害虫。紫外线的荧光作用还被利用在照明及防伪技术上。晒太阳时，阳光中的紫外线直接照射人体皮肤，能使人体产生维生素 D，促进钙吸收，维持骨骼健康。但是过多的紫外线照

射会对人体造成伤害，如晒伤皮肤，或令人眼发生病变等。

4. 可见光 (visible light)

可见光是能够引起人的视觉的电磁波，在电磁波谱中只占有很小一部分频率范围。可见光的波长范围约为 $4 \times 10^{-7} \sim 7 \times 10^{-7}$ m，太阳发出的可见光是由不同比例的七色光（红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫）混合而成的。可见光可以使植物发生光合作用，也能令照相底片感光。由于可见光用于遥感技术具有分辨率高、能成彩色影像等特点，现仍被广泛应用于航天摄影上。虽然可见光在电磁波谱中只占有很小一部分频率范围，却为我们呈现了色彩斑斓的世界。

5. 红外线 (infrared ray)

1800年，物理学家发现红光外侧温度上升得更快，由此发现了红外线。红外线的波长范围约在 $7 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-3}$ m。任何物体都在向外辐射红外线，温度越高辐射能力越强。同时，物体也能吸收红外线而导致温度升高。

人们利用红外线显著的热效应研制了热成像技术，被广泛运用于军事侦察、气象探测等多种遥感领域，以及医疗检测（图8-26）等方面。除此之外，红外通信因其成本低、技术成熟等优势，还常被用在短距离通信上，如遥控器等。



图8-26 人头部的红外成像

6. 无线电波 (radio wave)

无线电波的波长范围约为 $10^{-3} \sim 10^7$ m。1895年，马可尼和波波夫分别发明了用电磁波远距离传递信号的技术，开启了无线电通信的先河。无线电波现已成为人们日常信息交流的主要载体，从卫星通信、雷达、手机通信到无线电广播，以及无线局域网（WLAN）等，使用的都是这一波段的电磁波。

► 电磁波应用实例

1. 微波炉

微波炉（图8-27）中的磁控管是一个能够产生大功率微波的元件，最早被用于军用雷达。微波加热的原理是：水分子是极性分子（分子的正、负电荷中心不重合），极性分子在微波电场的作用下会剧烈振动，从而使水温升高。食物中含有水分，因此，食物在微波的作用下温度也会相应升高。微波炉产

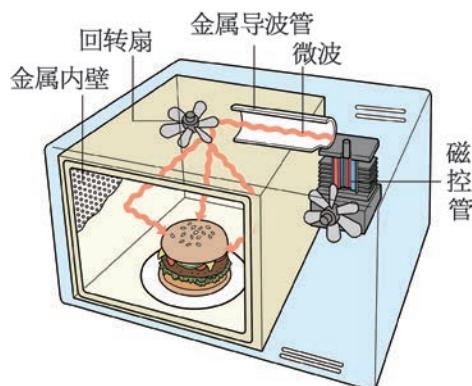


图8-27 微波炉结构示意图

生的微波频率一般为 915 MHz 或 2 450 MHz。微波炉在我国普及率很高，其安全、节能、方便、卫生等优点深受大众喜爱。

2. 无线通信技术与蓝牙、WiFi

无线通信是利用电磁波信号在空间传播的特性进行信息交换的一种通信方式。近年来，应用较为广泛且具有较好发展前景的短距离无线通信技术有蓝牙、WiFi 等。

蓝牙（Bluetooth）实质上是一种短距离无线通信规范，蓝牙技术就是基于该规范的无线通信技术。蓝牙技术使用低功耗、高频率的无线电波（2.4 GHz），能够穿透薄墙或者玻璃窗、抵抗其他电磁波的干扰。由于其功率较小（约为 1 mW），所以工作距离较近，仅为 10 m 左右，但比红外线通信的距离更大，若加大发射功率，蓝牙工作距离可达到 100 m 左右。

WiFi 实质上是一种商业认证，同时也是一种无线电通信技术。WiFi 使用高频无线电波，基于局域网协议，将计算机、手持设备等终端以无线方式互相连接，实现通信和网络连接等功能。WiFi 使用的两种高频无线电波分别为 2.4 GHz（频率范围为 2.4 ~ 2.5 GHz 的电磁波）和 5 GHz（4.9 ~ 5.9 GHz）。电磁波的频率越低，衍射现象越明显，而频率越高，则单位时间内传输的数据（信息）量越大。

与蓝牙相比，尽管 WiFi 技术传输的无线通信质量并不好，数据安全性也较差，但它的传输速度非常快，传输范围可达 100 m 以上，因此仍是目前使用最为广泛的无线电通信技术。同时，蓝牙只能实现点对点通信，而 WiFi 则可实现向多个终端同时传输数据的网络模式。

3. 手机通信的蜂窝网络与 5G 技术

手机，是目前常用的通信工具，也是一个集无线电波发射、接收于一体的设备。

任何一台手机在工作时，都会占用一定频率范围的无线电波，且不可重叠；但可用于手机通信的无线电波的频率资源是有限的。为了解决移动通信系统日益增加的容量与有限的频率资源间的矛盾，美国的贝尔实验室提出了建立蜂窝移动通信系统的建议。

蜂窝移动通信系统由移动设备、基站、移动业务交换中心及与市话网相连的中继线组成，如图 8-28 所示。基站能够为移动设备提供一个双向的无线通路，每个基站覆盖的范围称为一个服务区，服务区被设定为一个个六边形的区域，范围为 1 ~ 35 km，由于服务区的形状类似蜂窝，从而得名“蜂窝移动通信系统”。当人们使用手机通话时，手机会向所在服务区的基站发射无线电波，基站则会将信息传送到移动业务交换中心，由移动业务交换中心将处理后的信息返回基站或者发送到其他基站和市话网中，便可以实现手机

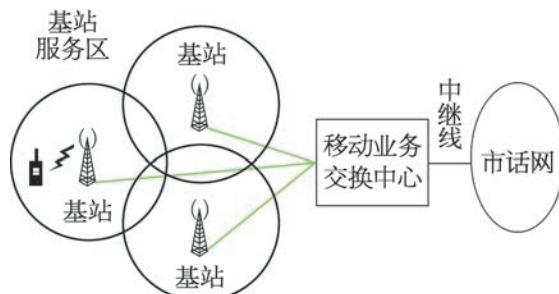


图 8-28 蜂窝移动通信系统

与另一移动设备或者是固定电话用户通话的功能。为了保证通话的质量，每个服务区使用不同频率范围的无线电波通信，但是相隔较远的服务区就可以使用相同的无线电波频率。蜂窝移动通信系统的最大优势就是可以有效节省频率资源，容纳更多的移动用户。

除此之外，提高手机通信频率可以增加频率资源，扩大手机通信容量，提升传输速率。目前全球主流的4G（第四代移动通信技术）网络采用特高频和超高频电磁波（我国主要使用超高频），表8-2所示为4G与5G（第五代移动通信技术）网络对应的频率范围及频率资源。与4G相比，5G网络的通信频率更高，能使用的频率资源更丰富。简单来说，频率资源就像车厢，越高的频率，车厢越多，相同时间内能装载的信息就越多，因此5G网络具有速率高（理论峰值达15 Gbps左右）、容量大等特征。

表8-2 我国4G与5G网络对应的频率范围及频率资源

网络类型	频率范围 /MHz	频率资源 /MHz	合计 /MHz
我国某通信公司的 4G网络	1 880 ~ 1 900	20	130
	2 320 ~ 2 370	50	
	2 575 ~ 2 635	60	
我国的5G网络 (初始的中频频段)	3 300 ~ 3 600	300	500
	4 800 ~ 5 000	200	

根据电磁波的特征，手机通信频率越高，使用的电磁波波长越短，越趋近于直线传播（衍射能力越差），在传播中的衰减也越大。因此，采用5G技术在覆盖同一个区域时，需要的基站数量将大大超过4G。相比于一个大基站具有的离得近辐射大而离得远信号又不强的不足，5G技术采用更多覆盖范围虽小，但功率小、造价低、辐射少的微基站。作为新一代通信技术，5G影响深远，自动驾驶、人工智能、大规模物联网等需要大量数据通信的技术将不再遥远，因此，包括我国在内的很多国家都投入了大量的资金和人力进行开发和研究。5G标准必要专利是发展5G过程中极其重要的一环。如今，我国5G标准必要专利的占比居全球第一，这显示了我国对发展5G极为重视，也意味着我国拥有了发展5G的主动权及世界领先地位。

问题与思考

- 列举家用电器和生活用品中与红外线、紫外线有关的应用。
- 近期的科学发现，南极和北冰洋上空的臭氧层变薄，甚至出现臭氧空洞。试说明为什么科学家非常关注这种臭氧层变薄的现象？

3. 太阳辐射的电磁波中，45% 左右的能量在可见光波段，而红外波段能量占比次之，紫外波段则最少。在电磁波谱中，可见光波段的波长范围很小，但是我们人眼却对它最敏感，这是一种巧合吗？查找资料，试解释这一现象。
4. 简述微波炉与电磁炉加热食物的区别。
5. 在使用微波炉时，很多情况下食物已经热了，但是器皿却不热，试从微波炉的原理出发解释这一现象。有时会发现器皿也比较烫手，为什么会出现这一现象？试从器皿的材质、食物的含水量、微波功率、加热时间等方面考虑进行实验探究。设计一个采用控制变量法的实验方案，在保证安全的前提下开展实验，分析观察，得出结论，并与同学交流。实验前务必仔细阅读微波炉说明书，特别是其中的安全须知。

学期 活动

电磁辐射的研究与测量

在日常生活中，身边的每一台通有交流电的家用电器，或者在发射电磁波的设备都是一个电磁辐射源。虽然电磁辐射对人体的伤害尚无定论，但不少人十分惧怕，科学家们也制定了安全电磁辐射标准。在这个活动中，我们就电磁辐射进行深入研究，正确地认识电磁辐射，辟除谣言；学会有效地减少电磁辐射，健康生活。

为了表示电磁辐射的强弱，人们设立了电磁辐射的计量单位，并制定了电磁辐射警示标志。查找相关的资料，并在此基础上，以小组合作的形式挑选以下内容中感兴趣的一项或几项任务，认真完成后在班级中交流讨论。

1. 查找资料，了解X射线用于医疗检测仪与行李透视时的辐射量的区别；了解我国关于广播电视台发射塔、手机通信基站、高压输电线的电磁辐射量标准及安全距离等，辟除生活中各种关于电磁辐射的谣言。

2. 利用电磁辐射检测仪，测量家用电器的电磁辐射强弱。了解电磁辐射在离用电器不同间距、不同部位以及不同工作状态时的强弱情况，如检测手机待机、充电及在信号较差的环境中使用时电磁辐射的强弱，或检测微波炉在工作时炉箱前后的电磁辐射情况等；测量各种防辐射服在不同物理环境下的防护效果，形成研究报告，合理减少“电磁污染”对自身的危害。

3. 如果你想自制一个电磁辐射检测仪，那你可以尝试用漆包线绕制一个线圈，配合电流传感器，用电吹风、剃须刀等低频设备来观察它检测电磁辐射的情况，并思考如下问题：绕制的线圈尺寸和匝数不同，是否会影响测量的结果？微电流传感器的采样频率约为5 kHz，那么它能否测量到高频的电磁辐射？

活动要求：

1. 可结合活动目标及个人特长选择任务，3~4人组成一个小组合作完成。
2. 活动成果以研究报告或制作实物为呈现方式，你可以根据自身情况选择其一，或者两者皆选。
3. 研究报告需包含摘要、关键字、正文、参考文献等内容，若有研究（调查）数据等内容需翔实记录。
4. 制作实物除了需要递交作品外，还需要与之相配合的制作报告，制作报告应包含设计目的、原理、制作材料及制作过程、检测及使用结果等内容。
5. 每组需在班级内交流，并根据研究报告、制作实物、汇报交流等情况进行互评。

小结

· 基本概念和基本规律

电磁场: 变化的磁场产生电场, 变化的电场产生磁场, 变化的电场和磁场相互联系, 形成一个不可分离的统一场。

电磁波: 变化的电磁场在空间的传播。

LC 回路: 由电容器和电感器组成的电路。

电磁振荡: 在振荡电路中产生振荡电流, 且电场能和磁场能发生周期性相互转化的现象。

电谐振: 当电磁波的频率和振荡电路的固有频率相同时, 振荡电流的振幅最大的现象。

无线电波: 波长范围在 $10^{-3} \sim 10^7$ m 之间的电磁波, 是无线电通信使用的电磁波。

电磁波谱: 将电磁波按照波长或频率大小的顺序排列。

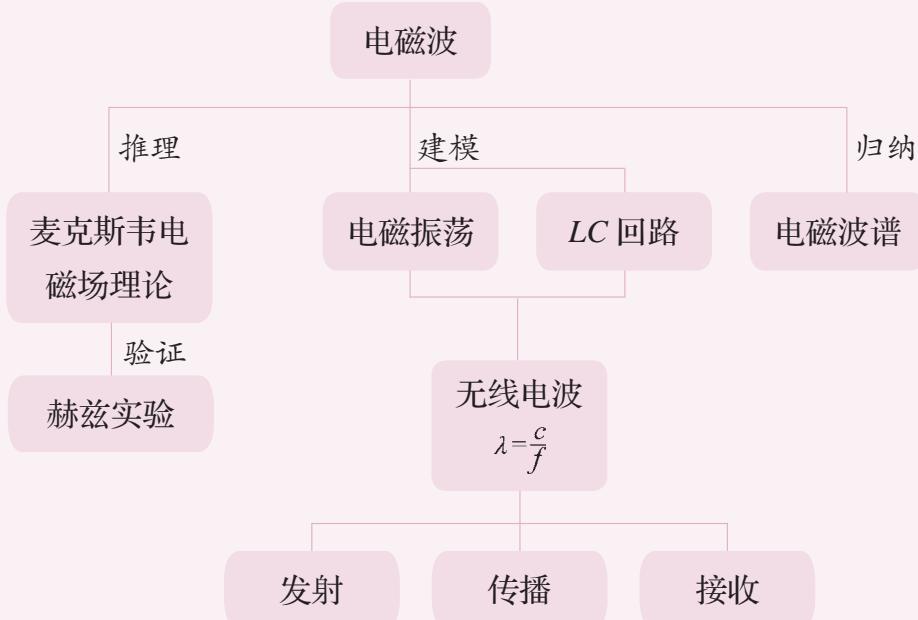
电磁波的波长 λ 、频率 f 、波速 c 之间的关系: $\lambda = \frac{c}{f}$ 。

· 基本方法

通过对电磁场理论的学习, 感受统一和对称的思想方法。

通过对电磁波的产生及其特性的学习, 认识归纳和类比的思维方法。

· 知识结构图



复习与巩固

- 通常电台信号和电视信号能实现同步转播。现在已知传输无线电广播的信号的频率为 600 kHz , 传输电视信号的电磁波频率为 411 MHz , 为了让住在山区的人们也能够听到电台广播, 看到电视转播, 试回答: 人们必须在山上建立哪一种信号的基站, 简述原因。
- 从波的形成、波的传播特性等方面, 列举电磁波与声波的三个相似处或不同处, 并作简单说明。
- 对讲机是一种双向移动通信工具, 因为其在无网络支持的情况下也可以通信, 所以即使是在手机通信如此发达的今天也仍然被广泛使用。若某同学使用对讲机与 5 km 以外的人联系, 对讲机发出的电磁波频率为 470 MHz , 则该电磁波的波长为多少? 使用对讲机接收信息的人至少需要多久才能接收到电磁波信号?
- 北极星是一颗恒星, 距离地球 $1.06 \times 10^{13}\text{ km}$, 则北极星与地球的距离为多少光年? 如果从某天开始, 北极星的燃料耗尽不再发光, 那么多久之后人们就再也看不见它了?
- 某氦氖激光器发出的红光波长范围非常窄, 中心波长为 632.80 nm , 宽度为 0.01 nm 。求该激光器发射的红光中心频率及频率范围。
- 若某种电磁波在真空中的频率为 600 MHz , 试回答下列问题:
 - 该电磁波的波长为多少?
 - 该电磁波属于哪一波段?
 - 若该电磁波从真空射入水中, 判断电磁波的频率、传播速度及波长分别如何变化。
- 查找资料, 了解在哪些环境中不适合使用手机, 简述原因。
- 为了加强电磁环境管理, 保障公众健康, 我国制定了相当严格的电磁辐射标准, 标准规定通信频段每平方厘米电磁辐射功率应控制在 $40\text{ }\mu\text{W}$ 及以下, 远低于一些发达国家标准。若某小型通信发射基站的功率为 1 W , 同时假设能量以球面向外辐射, 试计算: 按照标准规定, 距离该基站多远处为安全区域? (球表面积为 $S = 4\pi R^2$)

第九章

传 感 器

现代人类的研究领域在不断扩展。空间上从粒子世界到茫茫宇宙，时间上从大爆炸到长达亿万年的天体演化；更有一些人类无法直接接触或感知的极端环境，如超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场、超弱磁场等。这些领域的研究往往都需要各种传感器的支持。现代工厂的智能化系统的信息数据传递也越来越依赖于传感器；在智能化生产中，用传感器监控生产过程中的各个环节，使设备工作在最佳状态。展望未来，传感器技术将在自动化控制、人工智能等领域发挥更加重要的作用。

在日常生活和学习中我们已经接触了很多传感器，也感受了使用传感器的便利快捷。本章中我们将进一步了解传感器的基本原理。知道将非电学量转换成电学量是实现自动控制和数字化信息传输的基础。了解传感器在高铁列车、人工智能与无人驾驶汽车、手机等领域的应用，深入认识物理学对现代化生活和社会发展的积极作用。

第一节 传感器及其敏感元件

在大自然神奇的进化过程中，人类已拥有各种感知外界的感觉器官。人们可以用眼睛来观赏缤纷的世界，用耳朵来聆听话语和音乐，用鼻子来感受花草的芬芳，用舌头来品尝食品的美味……其他生物也具有类似的功能，有的甚至超过人类。比如狗的嗅觉特别灵敏，昆虫对天气变化的敏感性远超人类……凡此种种都是亿万年生命进化的结果。但是，人类的器官在感觉范围和灵敏度等方面都有着一定的局限性。目前，人们已经制造出各式各样的传感器来拓展感官的本领，获取大量人类感官无法直接获取的信息。

我们乘坐高铁或动车（图 9-1）时，实时运行速度、车内车外的温度在滚动显示屏上一目了然；马路上的路灯夜晚自动开启、天亮自动关闭；生活中常用的电视、空调、投影仪等都可以远距离操控……所有这些，都离不开传感器。传感器在现代生活、生产和科学技术中的应用非常普遍，而且传感器的研发、生产越来越快，运用也越来越广。

▶ 传感器

传感器 (sensor) 是一种检测装置，能感受到被测量的信息，并能将感受到的信息按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出，以用于信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等方面。

传感器一般由敏感元件、转换元件、变换电路和辅助电源四部分组成，如图 9-2 所示。

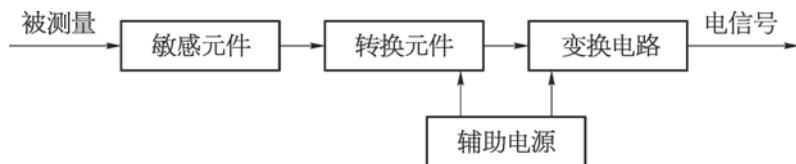


图 9-2 传感器的组成

从使用的诸多传感器来看，它们的作用类似于人的五种感觉（视、听、嗅、味、触）器官（图 9-3）。人们通过五官收集外界信息并传递给大脑，在大脑中处理信息，得出一



图 9-1 和谐号列车

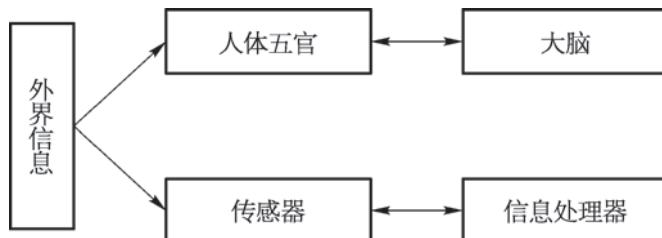


图 9-3 传感器功能和人体五官功能比较

个“结果”，发出指令。在电子设备中完成这一过程时，作为信息处理器的计算机相当于大脑，传感器作为信息的收集部件，就像人的眼、耳、鼻、舌、皮肤那样可以收集各种信息，这些信息送入信息处理器（计算机或电子仪器）进行判断处理后，发出各种控制信号控制相关设备，从而达到人们预期的目的。

在信息社会里，各行各业和人们日常生活中所遇到的信号大部分是非电学量（温度、压力、光强等），对于这些非电学量信号，即使能检测出来也难以处理、存储和传输。而传感器通常是由检测这些非电学量信号并将其转变成便于计算机或电子仪器所接受和处理的电信号（电流、电压等信号）。传感器工作的一般流程为非电学量被敏感元件感知，然后通过转换元件转换成电信号，再通过转换电路将此信号转换成易于传输或测量的电学量。

▶ 非电学量转化成电学量的意义

电学量便于控制、处理（放大、衰减或调整），便于显示或存储，也便于传输与接收。所以非电学量转化成电学量是实现自动控制和数字化信息传输的基础。

▶ 传感器的敏感元件

各种传感器从外形来看差别不大，但其工作的物理原理却各有不同。传感器是如何把测量的物理量转化为电信号的呢？

敏感元件就是直接感知被测量，输出与被测量有确定关系的物理量信号的元件。下面以光敏电阻、金属热电阻和热敏电阻为例来说明。

自主活动

用多用电表的欧姆挡测量一只光敏电阻的阻值，实验分别在暗环境和强光照射下进行。

实验结果： 。

1. 光敏电阻

光敏电阻（图 9-4）的敏感材料是一种半导体材料，例如硫化镉、硒、硫化铝、硫化铅和硫化铋等。这些材料在特定波长的光照下会产生自由电荷并参与导电，从而使光敏电阻的阻值随光照而下降。

光敏电阻对光照十分敏感。在无光照时，光敏电阻呈高阻值状态，光照时阻值迅速降低，比如阻值 $1.5\text{ M}\Omega$ 的电阻被光照射时可降至 $1\text{ k}\Omega$ 以下。光敏电阻的光照特性在大多数情况下是非线性的，并且其阻值有较大的变化范围。

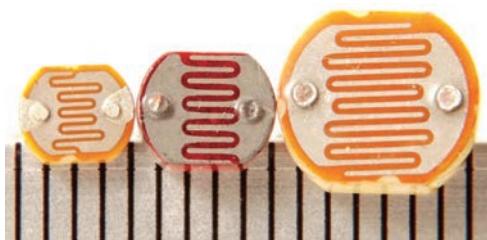


图 9-4 三个毫米尺度的光敏电阻

2. 金属热电阻

我们已经知道，一般金属导体的电阻率随温度的升高而增大，如白炽灯钨丝的电阻在正常发光情况下比常温下的电阻大得多。

如图 9-5 所示，在电路中接一段钨丝，闭合开关，灯泡正常发光，当用打火机给钨丝加热时，灯泡亮度明显降低。这说明钨丝的电阻随温度的升高增大，因此，用金属丝（热电阻）可以制作温度传感器。实际上精密的电阻温度计就是用金属铂来制作的。

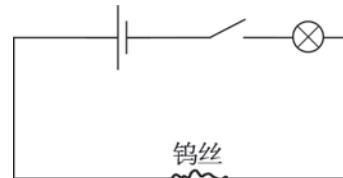


图 9-5 使用钨丝控制灯泡亮度的简单电路

3. 热敏电阻

热敏电阻属于半导体器件，也是一类敏感元件。热敏材料的特点是对温度敏感，不同的温度下表现出不同的电阻值。

自主活动

用多用电表的欧姆挡测量热敏电阻的阻值。第一次直接测量，第二次用手心焐一焐热敏电阻再测量，记录两次测得的阻值。

实验结果：_____。

由实验结果可知，半导体热敏电阻的阻值随温度的变化而变化，且阻值随温度变化非常明显，可以用来制作温度传感器。

大家谈

热敏电阻和光敏电阻在生活中有哪些具体应用？

► 传感器的分类

如图 9-6 所示为各种传感器。对于传感器的分类，通常有如下几种方式：

按测量的物理量分类，可分为位移、力、温度、磁场传感器等；按工作原理分类，可分为热电偶、霍尔器件、光电传感器等；按其基本感知功能可分为热敏元件、光敏元件、气敏元件、力敏元件、磁敏元件、湿敏元件、声敏元件、放射线敏感元件、色敏元件和味敏元件等；按输出信号的性质则可分为输出为开关量（“1”和“0”，或“开”和“关”）的开关型传感器、输出为模拟信号的模拟型传感器和输出为脉冲或代码的数字型传感器。

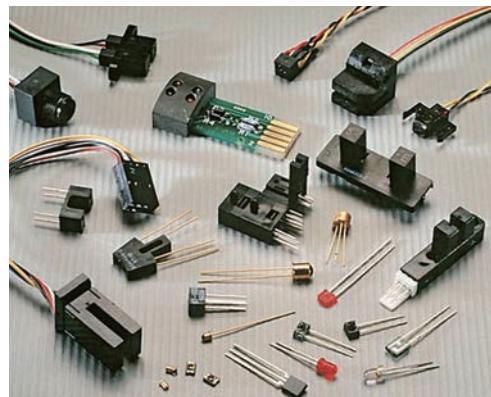


图 9-6 各种传感器

问题与思考

1. 列举一些在生活与学习环境中接触过的敏感元件，并说明各自感知的物理量。
2. 热敏电阻和金属热电阻都可以作为感知温度的敏感元件。简述两者电阻随温度变化的特点。
3. 在地震、海啸等自然灾害发生后，救援人员必须及时深入灾区，争分夺秒抢救被埋人员。有些救援队借助生命探测仪发现深埋在废墟中的伤员。生命探测仪可能应用了哪种传感器？举例并说明理由。

第二节 常见传感器的工作原理

传感器为高新技术与人工智能的发展担当重任。我们对传感器并不陌生，在很多物理实验中我们已使用过传感器，除了电流传感器、电压传感器直接“感知”电学量之外，其他如位移传感器、力传感器等都是把需要测量的物理量转化为电信号而显示出来的。它们究竟是利用哪些物理原理来实现信号转换的呢？下面简介一些常见传感器的工作原理。

▶ 磁传感器测磁感应强度的原理

用来测定磁感应强度 B 的磁传感器的主要部分由半导体材料构成。常用的半导体材料分为两类，一类材料中的自由电荷是正电荷，另一类材料中的自由电荷是负电荷。把这两种半导体薄片放在匀强磁场中，其平面与匀强磁场方向垂直，分别如图 9-7 (a)、(b) 所示。当电流从下往上通过元件时，由于受洛伦兹力的作用，自由电荷在磁场中发生侧向偏转，图 (a) 中正电荷向薄片右边逐渐积累，图 (b) 中负电荷也向薄片右边逐渐积累，使得每块薄片的两侧都产生电势差，这个现象叫做霍尔效应；这两种半导体薄片便叫做霍尔元件。在霍尔效应中，磁感应强度越大，霍尔元件两侧面的电势差越大；于是可以通过测定霍尔元件两侧面的电势差来确定磁感应强度的大小。磁传感器就是运用这个原理制成的。

▶ 温度传感器的测温原理

半导体材料的电阻随温度显著变化，因此常被制成热敏电阻，如图 9-8 所示，用于测量温度。将热敏电阻接在稳压电源两端，测量通过电阻的电流，即可计算阻值，从而推得温度。温度传感器（图 9-9）就是根据这一原理来工作的。热敏电阻包括正温度系数（PTC）、负温度系数（NTC）和临界温度电阻（CTR）三大类。各类热敏电阻的阻值随温度变化的特性曲线如图 9-10 所示。从图中可以看出，PTC 热敏电阻的阻值随温度上升不断增大；NTC 热敏电阻的阻值随温度上升不断减小；CTR 热敏电阻的阻值则在某个温度附近会发生急剧变化。利用不同类型的热敏电阻，可以实现各种情况下的温度测量和自动控制。

热敏电阻灵敏度高、反应快、使用方便，但通电后自身发热影响阻值，因此测量操作

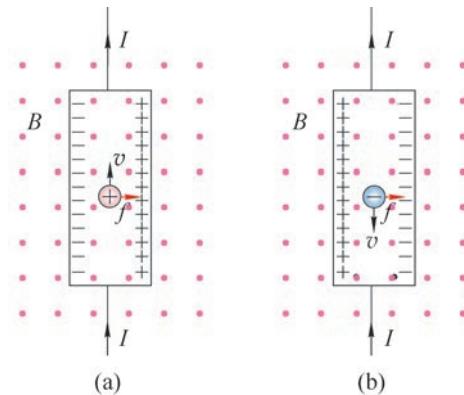


图 9-7 匀强磁场中半导体薄片内自由电荷的受力方向

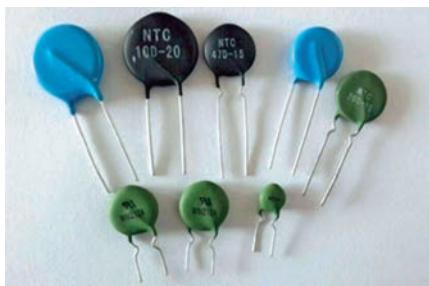


图 9-8 常见热敏电阻



图 9-9 温度传感器

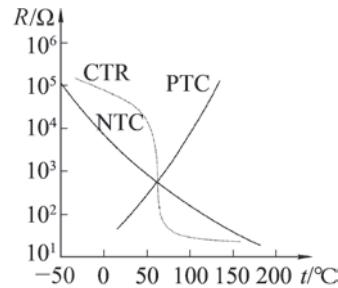
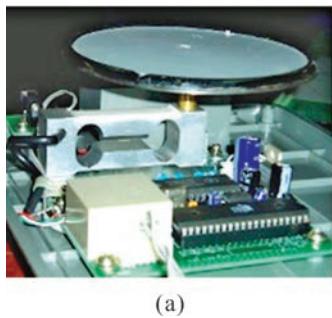


图 9-10 各类热敏电阻的阻值随温度变化的特性曲线

必须迅速，并且通常用于测量精度要求不高的场合。

▶ 力传感器的测力原理

力传感器是一种将力信号转变为电信号输出，即将力学量转换为电学量的电子元件。如图 9-11 所示是电子台秤和实验用的力传感器。力传感器的敏感元件是悬臂梁和应变片。如图 9-12 所示，悬臂梁是一种弹性元件，一端固定，另一端受力。在力 F 作用下，悬臂梁的上、下表面均产生微小的形变，称之为“应变”。



(a)



(b)

图 9-11 电子台秤和实验用的力传感器



图 9-12 弹性元件——悬臂梁

应变片是一种将金属“应变”转换成电学量的转换元件。如图 9-13 所示，这里的金属丝就是一种“应变片”，它将金属片的形变转换成电阻的变化。

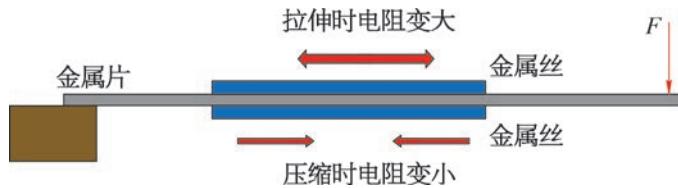


图 9-13 应变片

利用电阻应变片，将金属的应变转换成电阻的变化，从而将力学量转换为电学量。在悬臂梁产生应变的部位粘贴电阻应变片，将悬臂梁的应变传递到应变片上，从而将悬臂梁的应变转换为电阻的变化。配以适当的电桥电路就能输出与作用力成一定关系的电压来显示力的大小。

拓展视野

如图 9-14 所示，悬臂梁的上、下表面各粘贴 2 枚应变片，不受力时这四枚应变片的电阻值相同，构成一平衡电桥。当悬臂梁受力时，梁的上表面伸长， R_2 、 R_3 电阻值增大；梁的下表面压缩， R_1 、 R_4 电阻值减小。此时 A 点处电势 φ_A 与 B 点处电势 φ_B 不相等，电桥失去平衡，而输出电压 $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$ 与压力有确定的关系，从而能显示相应的作用力。

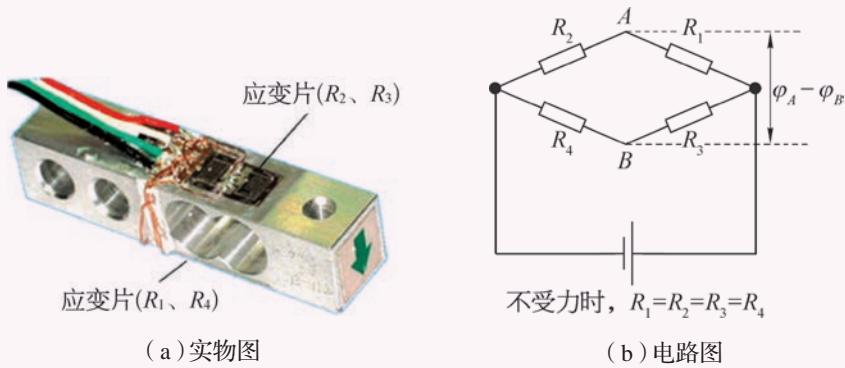


图 9-14 悬臂梁与桥式电路图

STSE

力在生活与技术中有着广泛的应用，测量力大小的力传感器的种类很多。

1. 应变管式力传感器 [图 9-15 (a)]

在管筒壁上贴应变片，当压力作用于管子的内腔时，圆筒变形成“腰鼓形”，使电桥失去平衡，输出电压与压力成一定关系。应变管式压力传感器在火箭弹、炮弹和火炮的动态压力测量方面有广泛应用。

2. 膜片式力传感器 [图 9-15 (b)]

这种传感器的弹性敏感元件为周边固定的圆形金属膜片。膜片受到压力变形时会产生中心处径向应变和切向应变，以及边缘处径向应变和切向应变。膜片式压力传感器是根据弹性敏感元件和应变片的作用，利用集成电路工艺在单晶硅膜片上制作电阻条，从而使传感器的输出电压与压力成一定关系。

3. 组合式应变压力传感器 [图 9-15 (c)]

在组合式应变压力传感器中，弹性敏感元件可分为感受元件和弹性应变元件。感受元件把压力转换、传递到弹性应变元件应变敏感的部位。感受元件有膜片、膜盒、波纹管等，弹性应变元件有悬臂梁、固定梁、环形梁、薄壁筒等。它们之间可根据不同需要组合成多种形式，主要用来测量流动介质动态或静态压力，如动力管道设备的进出口气体或液体的压力、内燃机管道压力等。



(a) 应变管式力传感器



(b) 膜片式力传感器



(c) 组合式应变压力传感器

图 9-15 三种力传感器

► 气敏传感器测气体浓度的原理

气敏传感器是用来检测气体浓度和成分的传感器，如图 9-16 所示。当待测气体与气敏材料发生相互作用（化学作用、生物作用或物理吸附），使得气敏材料的特性发生变化，由此获得待测气体浓度的变化值。如采用氧化锡半导体作为气敏材料，这类半导体器件对乙醇蒸气具有良好的气敏特性，当接触的气体中乙醇气体的浓度增加，它对外呈现的电阻值就降低。半导体型呼气酒精测试仪就是利用这个原理做成的。目前，普遍使用的还有电化学型酒精测试器。电化学型是将采集到的酒精气体在特种催化剂中燃烧而转变为电能，在两个电极上所产生的电压与采集到的酒精气体浓度成正比，由此做成电化学型呼气酒精测试仪。电化学型通常使用于执法交警部门，半导体型通常使用于民用市场。

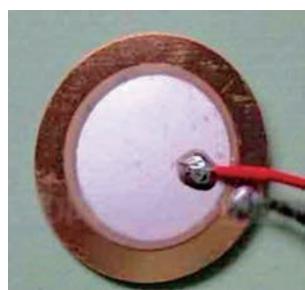
酒精传感器对检测气体乙醇具有很高的灵敏度。可对机动车驾驶人员进行现场检测，以确定被测者呼出气体中酒精含量的多少，以制止和处罚“酒后驾车”及“醉酒驾车”等严重危害道路交通安全和人民生命财产的行为。



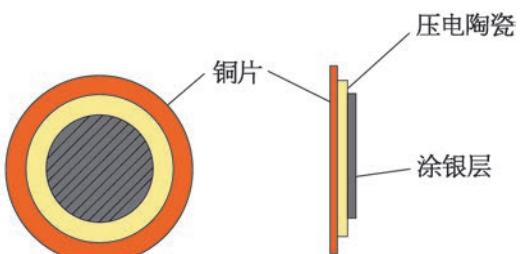
图 9-16 气敏传感器

► 用压电陶瓷片制作传感器的原理

某些晶体在变化的外力作用下，表面会出现等量异号电荷，外力稳定或撤去外力后，表面又恢复电中性，这种现象称为压电效应。压电陶瓷片就是根据这一效应制成的。常用的压电陶瓷材料是锆钛酸钡，简称 PZT，外形如图 9-17 (a) 所示，它的结构如图 9-17 (b) 所示。将一片镀银薄陶瓷片和一片黄铜片黏合在一起，分别作为两个电极。当压电陶瓷片受到机械振动时，两个电极之间就会出现电信号。利用这个特性可以把压电陶瓷片制成传感器，用它测量，得到振动图像。



(a) 实物图



(b) 结构示意图

图 9-17 压电陶瓷片

自主活动

把如图 9-18 所示的压电陶瓷片与电压传感器连接，在计算机上显示电压-时间图像。当用力按压和放开陶瓷片时，得到如图 9-19 所示的图像。



图 9-18 压电陶瓷片连接电压
传感器



图 9-19 电压-时间图像

用力按压陶瓷片时，观察到电压变_____；用恒力按压陶瓷片时，电压_____。由此得出的结论为_____。

将压电陶瓷片固定在音叉的叉股上，再将两根引线连接到电压传感器。敲击音叉，并适当调整采样频率，在计算机上观察采集到的音叉的振动图像，并记录振动频率。

将压电陶瓷片压在胸口，把采样频率调到 50 Hz，适当调整显示的缩放比例，观察你的心动图。

压电陶瓷只能进行动态测量，无法完成静态测量。例如，将 100 N 重物放在压电陶瓷上的瞬间，传感器将输出相应大小的脉冲电压；当重物稳定后，传感器的输出为 0；将重物移开压电陶瓷的瞬间，传感器则输出极性相反的脉冲电压。

问题与思考

- 哪些家用电器中没有传感器？哪些家用电器中有传感器？分别有哪些传感器？试举例说明。
- 为解决楼道的照明，常在楼道内安装一个声控传感器与电灯的控制电路相连接。当楼道内有人走动而发出声响时，电灯即与电源接通而发光，输入传感器的是什么信号？经传感器转换后输出的是什么信号？
- 某种热敏电阻的阻值 R 随温度 t 变化的图像如图 9-20 所示。现将该热敏电阻和电源、电流表串联做成一个电子温度计。为了便于读数，把电流表上的电流值转换成温度值。为使该温度计的变化反应较为灵敏，试判断该温度计测量哪一段范围内的温度较为适宜，并说明理由。
- 磁传感器利用霍尔元件测量磁感应强度。如图 9-21 所示为霍尔元件的测量原理示意图。将一块长方形的半导体薄片放在匀强磁场中， a 、 b 和 M 、 N 为相互两两正对的四个电极，在 a 、 b 间通入恒定的电流，则薄片中可自由移动的电荷受到洛伦兹力的作用，将在两侧形成堆积，使 M 、 N 间产生电压 U_{MN} 。磁场越强，电荷堆积越多。则：
 - 若移动电荷为负电荷，此半导体的 M 面的电势高还是 N 面的电势高？
 - 若通电电流和磁场都不变，仅将电极 N 沿 ab 方向平移至 N' ，则电压 U_{MN} 的数值是否也会发生变化？判断并说明理由。

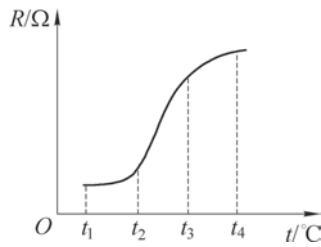


图 9-20

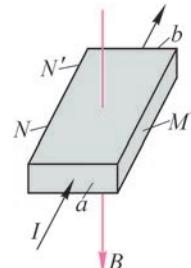


图 9-21

第三节 传感器的应用

传感器为各个领域实现自动化、网络化、智能化提供必需的条件，也为人们的日常生活带来更多便捷。以高铁和动车为代表的先进轨道交通，以运载火箭为代表的航空航天，以智能手机为代表的日用电器等方面，传感器都在其中发挥着极为重要的作用。

▶ 传感技术在轨道交通领域的应用

如图 9-22 所示为轨道交通专用传感器。在新一代列车中，传感器在列车运行状态信息收集、钢轨探伤、轨道状态远程监测及列车内外环境综合检测等方面有着广泛的应用。以我国自主研发的和谐号高铁列车为例，一列列车里的传感器数量达 1 000 多个，平均每 40 个零部件里就有一个传感器，它们承担着状态监视、故障报警、车载设备控制等功能。

2015 年，中国中车首次推出自主化全自动“无人驾驶”地铁列车。该列车可通过感知系统实现自主识别障碍物、道路、交通信号，这套感知系统是机器取代驾驶员的关键。在使用传感器之前，对列车的控制主要是靠信号灯，随着智能传感技术的进一步发展和应用，传感器和人工智能技术已在轨道交通领域实现深度融合，列车在变得更“聪明”的同时，也会变得更安全。

▶ 传感技术在汽车上的应用

传感器在人工智能与无人驾驶汽车方面的应用也是日新月异。如一般的小轿车，为了保证安全，对行驶车辆的状态实时监控的传感器有 100 多个。汽车传感器过去单纯用于发动机上，现在已扩展到底盘、车身和灯光电气系统上了，如图 9-23 所示。

无人驾驶汽车上的传感器就更多了。无人驾驶汽车和传统汽车不同，行驶时不需要人来操控，也就是说传统汽车上方向盘、油门、刹车踏板等配件都不再需要，全由软件和传感器取代。无人驾驶汽车可自动识别交通指示牌和行车信息，具备雷达、相机、全球卫星导航等电子设施，并安装同步跟踪传感器。车主只要向导航系统输入目的地，汽车即可自动行驶，前往目的地。在行驶过程中，汽车会通过传感设备上传路况信息，在大量数据基础上进行实时定位分析，从而判断行驶方向和速度。

2018 年 4 月，无人驾驶清洁车亮相上海市松江区。它可以自动启动、自动清扫、自



图 9-22 轨道交通专用传感器

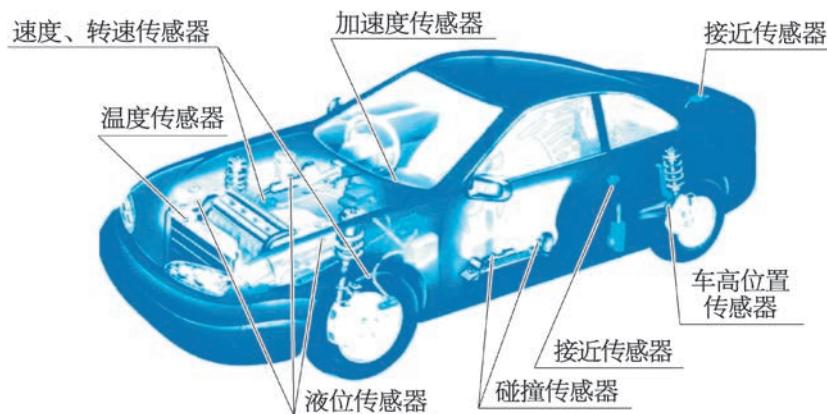


图 9-23 汽车传感器

动通过红绿灯、自动避开路边障碍等。

► 传感技术在手机里的应用

现代生活中，手机已不再是一个简单的通信工具，而是具有综合功能的个人手持终端设备。智能手机可以实现自动旋转屏幕、自动调节屏幕的亮度、自动锁屏等功能，这些自动完成的动作都是传感器的功劳，如图 9-24 所示。

手机里有加速度传感器（重力感应器），加速度传感器可以监测手机的加速度的大小和方向，用于实现手机横竖屏智能切换、拍照时照片朝向切换等。

手机里的光敏传感器用于调节屏幕自动背光的亮度，白天提高屏幕亮度，夜晚降低屏幕亮度，使得屏幕看得更清楚，也提升了电池续航能力，还可用于拍照时自动白平衡。

手机里的距离传感器用于检测手机通话时是否正贴在用户的耳朵上，以便自动熄灭屏幕达到省电的目的；也可用于皮套、口袋模式下自动实现锁屏与解锁动作。

如果你在一个没有无线网络的地方，手机里的惯性传感器仍然可以追踪你的位置。大多数智能手机配有三个惯性传感器：罗盘（或者磁力仪）确定方向；加速度传感器报告前进的速度和方向；陀螺仪既可确定转向动作，还可以感知“摇一摇”（晃动手机实现一些

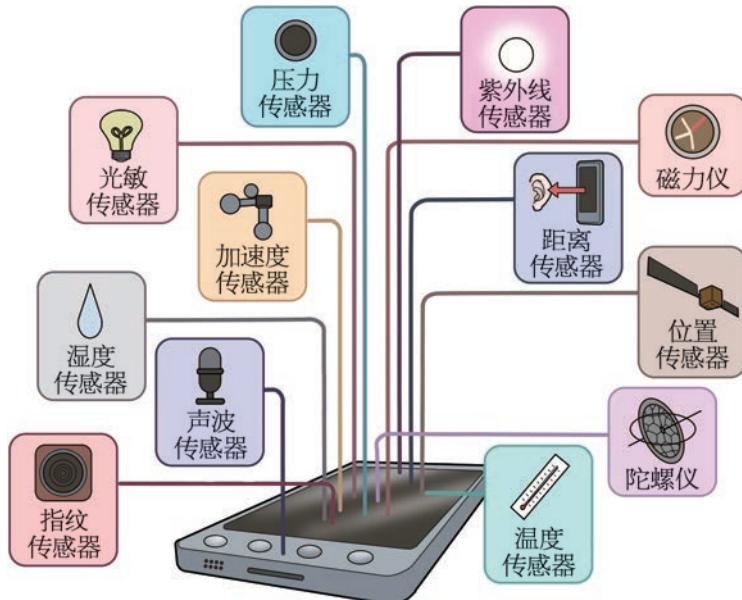


图 9-24 智能手机里的各类传感器

功能)、在游戏中平移或转动手机以控制视角、VR 虚拟现实, 以及在没有卫星定位信号时(如隧道中)也能够根据你的速度和方向来判断位置以实现惯性导航。

大家谈

智能手机里还有哪些传感器? 你用过手机里的哪些传感器?

手机已经逐渐深入并广泛应用到人们的日常生活中, 各种传感器的组合, 使得手机的智能性越来越强大。智能手机里传感器的种类越多, 意味着智能手机能够获得、利用和对外提供的数据越多。随着智能手机不断发展, 其中集成的传感器种类还会不断增多。

利用传感器的不同组合可以实现各种自动化的功能。

学生实验

利用传感器制作走道路灯的自动控制装置

提出问题

走道路灯的作用是为路人提供照明。为节约能源, 只有当光线较暗且有人通过时, 路灯才自动开启, 等路人通过后又自动关闭。如何制作一个节能型走道路灯的自动控制装置呢?

制作方案

1. 使用光敏传感器模块检测环境光的亮度, 设置合适的值, 当光敏传感器模块检测到的光照强度小于设定的值时, 可以判定为需要开灯照明。
2. 使用人体红外感应模块检测附近是否有人经过。
3. 控制模块根据光敏传感器模块和人体红外感应模块输出的信号, 如果判断走道过暗并且有人经过, 控制灯亮起。
4. 灯亮起后, 控制模块等待人走开, 如果人已经走开灯便关闭, 程序重新循环运行。

制作材料

传感器的控制模块、下载模块、电源模块、彩灯模块、光敏传感器模块、人体红外感应模块。

控制模块: 程序运行的核心, 读取光敏传感器模块、人体红外感应模块的数据并控制灯的亮灭。

下载模块: 将计算机编译后的程序上传至控制模块。

电源模块: 为装置提供电源。

彩灯模块：设置有多个 LED 灯，可以分别发出不同颜色、不同亮度的灯光。

光敏传感器模块：可以检测光照强度。

人体红外感应模块：当检测到有人靠近时，输出高电势信号。

制作方法与测试

- 将控制模块与下载模块拼接在一起，下载模块使用 USB 线连接至计算机 USB 口。

- 通过拼接程序块进行编程。读取光敏传感器模块和人体红外感应模块的数据，判断是否亮度过低并且有人经过，控制灯的亮灭。

- 将编好的程序进行编译，如果软件提示编译错误，对错误进行修改。

- 程序编译成功后，将程序上传至控制模块。

- 程序上传成功后，断开 USB 连接，将各个模块按照自己的设计组合在一起。如图 9-25 所示为程序运行逻辑图。

- 注意查看电源模块的电量是否充足，然后打开电源模块的电源开关，测试装置是否能够正常运行。

展示与交流

各组展示完成的作品，交流在制作过程中出现故障的原因，以及排除故障的方法。

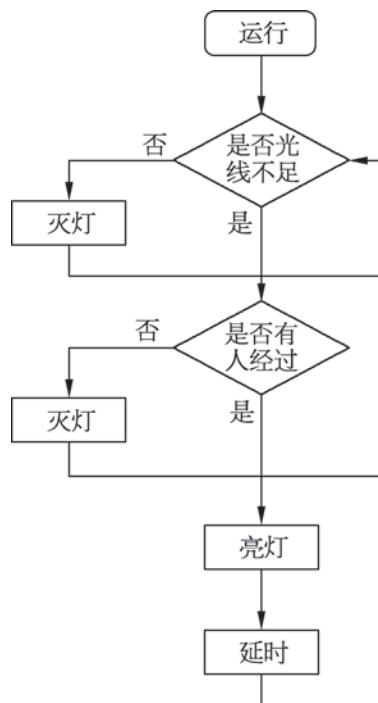
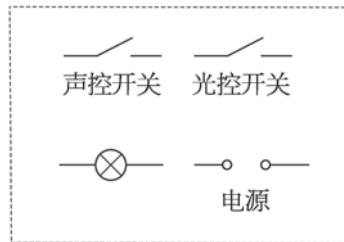


图 9-25 自动控制路灯装置程序逻辑图

问题与思考

- 火灾探测器是火灾自动报警系统的触发装置，在发生火情初期通常会出现哪些可被感知的物理量？通过哪些传感器能变成电信号，传输到火灾报警系统，从而起到对火灾预警与监控作用？
- 为了省电，常见的楼道灯都由两个开关一起控制。一个是利用光敏电阻制成的“光控开关”，它在光线暗时自动闭合、光线亮时自动断开；一个是利用声敏元件制成的“声控开关”，它在有声音时自动闭合，一段时间无声音则自动断开。试将如图 9-26 所示的器材连接成符合省电要求的电路。



3. 如图 9-27 (a) 所示是某生产流水线上的产品输送及计数装置示意图。 S 为激光源， R_1 为光敏电阻（有光照时阻值减小）， R_2 为定值电阻， a 、 b 之间接示波器。水平传送带匀速前进，产品通过时会挡住激光源发出的光线。示波器显示的电压随时间变化图像如图 9-27 (b) 所示。若计数器电路中的电源电压恒为 6 V，电源内阻忽略不计，定值电阻 $R_2=1\text{k}\Omega$ ，求：

- (1) 无光照时光敏电阻 R_1 的阻值。
- (2) 有光照时光敏电阻 R_1 的阻值。
- (3) 每小时通过的产品个数。

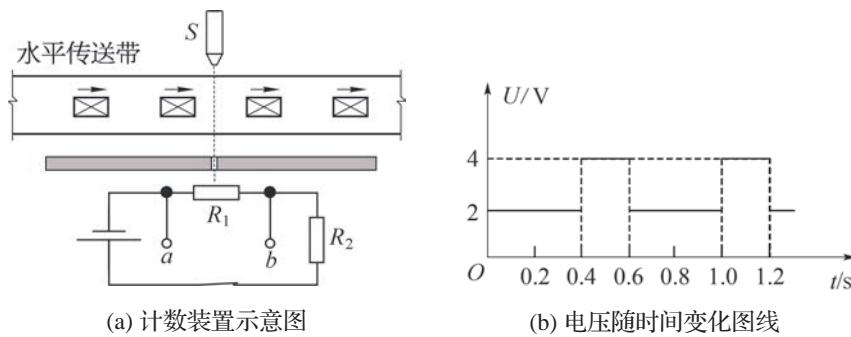


图 9-27

4. 传感器在日常生活中的应用越来越广泛，利用温度传感器制成的温控开关就是其中的一种。烘箱就是利用温控开关来自动控制电路的。常温下，该开关是闭合的；当温度达到某一设定值时，开关自动断开，从而切断整个电路。如图 9-28 所示的四个电路图中，能够实现自动控温的是哪一种？判断并说明理由。

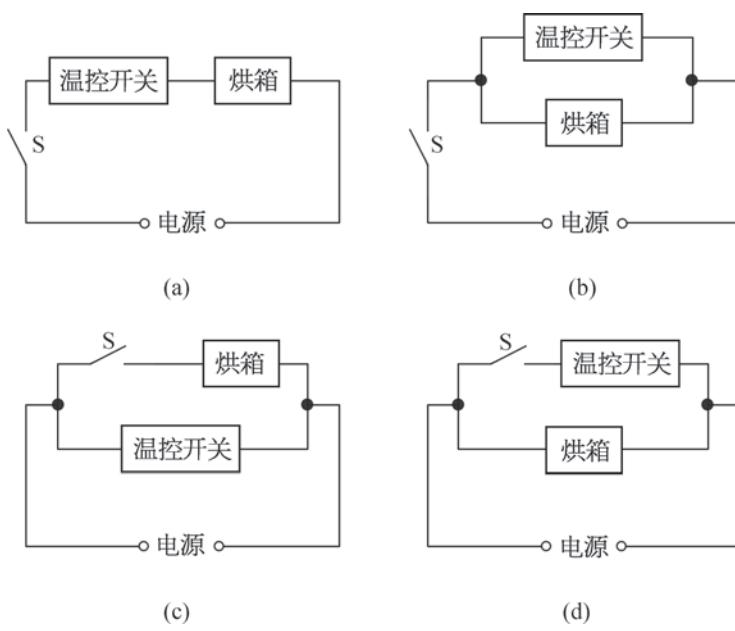


图 9-28

小结

• 基本概念和基本规律

传感器：一种检测装置，能感受被测量的信息，并能将感受到的信息按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出，以用于信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等方面。

敏感元件：直接感受被测量，并输出与被测量有确定关系的物理量信号的元件。

• 基本方法

在了解常用传感器的基本原理的过程中，感受基础科学在生产与技术应用中的创新思维方法。

在简单控制电路的制作过程中，认识逻辑推理的方法。

• 知识结构图



复习与巩固

1. 有些楼道的照明灯是声音控制的，当人过来发出声响就会发光，人离开后就会熄灭。这种照明灯内部至少包含了哪两种传感器？
2. 在生活中使用传感器已很普遍，试问：
 - (1) 电梯超载时会自动报警。这种报警系统通常采用的是什么传感器？
 - (2) 光电式感烟探测器 [简称烟感器，图 9-29 (a)] 由光源、光电元件和电子开关组成。利用光散射原理探测火灾初期产生的烟雾，并及时发出报警信号。烟感器利用的是什么传感器？
 - (3) 在很多洗手间中都装有自动干手机 [图 9-29 (b)]，洗手后将手靠近，自动干手机内的传感器就开通电热器加热，有热空气从内部吹出，将湿的手烘干。自动干手机通常采用的是什么传感器？



(a) (b)

图 9-29

3. 关于敏感元件的特性，判断下列说法是否正确，并说明理由。
 - (1) 热敏电阻是把温度转化为电阻的敏感元件。
 - (2) 金属热电阻是阻值随温度升高而减小的敏感元件。
 - (3) 电熨斗中的双金属片是力敏感元件。
 - (4) 霍尔元件是能够把磁感应强度转换为电压的敏感元件。
4. 将热敏电阻 R_T 、定值电阻 R 、电流表、电源按图 9-30 连接成电路。将烧杯装入 $\frac{2}{3}$ 的水，并用铁架台固定在加热器上。闭合开关 S ，当热敏电阻未放入热水中时，电流表的示数为 I_1 ；将热敏电阻放入温水中，电流表的示数为 I_2 ；将热敏电阻放入热水中，电流表的示数为 I_3 。试判断 I_1 、 I_2 、 I_3 的大小关系。
5. 自 2019 年起，上海新投运的公交车全部采用新能源，近千辆新能源公交车的充电管理都通过云平台自动监控。原先充电主要靠手动和目测，若插歪充电桩，很容易导致枪头温度过高而损害设备甚至引发火灾。为保证安全，试设计一个自动监控新能源公交车充电过程的简要方案。

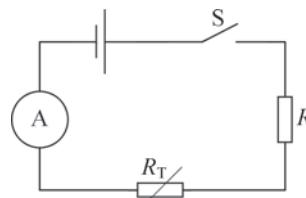


图 9-30

6. 在某创新竞赛中，一位学生设计了一个利用压力传感器、光控开关等元件的机动车超载自动拍照电路。一有车辆通过路口且此车超重，摄像机便会自动拍摄。简述他的设计思路。

7. 如图 9-31 所示， R_T 为负温度系数热敏电阻（阻值随温度升高而减小）， R_1 为光敏电阻， R_2 和 R_3 均为定值电阻，电源电压保持不变， V 为理想电压表。若发现电压表的示数增大，可能是由于温度或者光照情况发生了变化，试判断具体发生了怎样的变化。

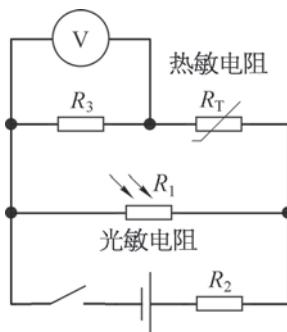


图 9-31

8. 如图 9-32 (a) 所示是一种酒精测试仪，酒精测试仪实际上是由酒精气敏传感器（相当于随酒精气体浓度变化的变阻器）与一个定值电阻及一个电压表组成。如图 9-32 (b) 所示是这种酒精测试仪的原理图，图中 R_0 为定值电阻，酒精气敏传感元件 R_1 的电阻值随酒精气体浓度的增大而减小。简要说明这种酒精测试仪的工作原理。



(a)

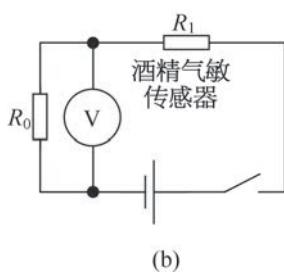


图 9-32

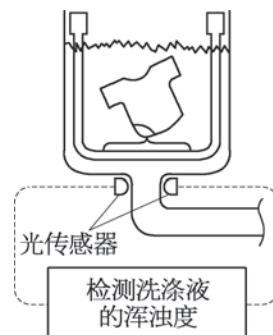


图 9-33

9. 全自动洗衣机中采用了很多传感器。如图 9-33 所示是安装在排水管两侧的浊度传感器，它用于检测洗净程度。洗涤前，排水管中充满清水，光敏电阻的阻值较小。当洗涤开始后，衣物上的污垢不断地扩散到水中。简述全自动洗衣机利用“光控”从开始洗涤到判断何时结束洗涤的设计思路。

*10. 无人驾驶飞机（图 9-34）的飞行控制系统简称“飞控”。无人机悬停还是飞行、上升还是下降等飞行指令都由“飞控”下达，以保持无人驾驶飞机的正常飞行姿态。无人驾驶飞机内通常有陀螺仪、加速度传感器、地磁感应器、气压传感器、超声波传感器、光流传感器、位置传感器等传感器。为实现飞行姿态自动感知、悬停高度控制、低空高度精确控制或避障、水平位置高度定位、悬停水平位置精确确定等功能，分别需要使用哪种传感器？



图 9-34

附录

索引

X 射线 / 103
 γ 射线 / 102
安培力 / 2
变压器 / 69
传感器 / 112
磁传感器 / 116
电磁波 / 88
电磁波谱 / 102
电磁场 / 87
电磁振荡 / 92
电动机 / 78
电流天平 / 4
电谐振 / 98
发电机 / 77
法拉第电磁感应定律 / 39
感应电动势 / 38
红外线 / 104
交变电流 / 62

可见光 / 104
楞次定律 / 32
力传感器 / 117
洛伦兹力 / 10
敏感元件 / 113
气敏传感器 / 119
温度传感器 / 116
涡流 / 58
无线电波 / 104
阴极射线 / 10
右手定则 / 34
正弦交变电流 / 64
中性面 / 63
紫外线 / 103
自感电动势 / 56
自感现象 / 57
左手定则 / 3

后记

本教材根据教育部颁布的《普通高中物理课程标准（2017年版2020年修订）》编写，并经国家教材委员会专家委员会审核通过。

本教材是在上海市高中物理“二期课改”教材的基础上全面改写而成的，当年参加编写的主要人员有张越、徐在新、刘齐煌、谭玉美、唐一鸣、冯容士、蒋元方、倪闽景、王铁桦等。王铁桦、朱广天、汤清修、陈刚、金松、胡卫平、袁芳、桑嫣、潘苏东等给本教材的编写提出了不少宝贵意见。马世红、王祖源、陆昉、陈树德、蒋平、冀敏在本教材编写的各个阶段审阅了书稿。编写过程中，上海市中小学（幼儿园）课程改革委员会专家工作委员会，上海市教育委员会教学研究室，上海市课程方案教育教学研究基地、上海市心理教育教学研究基地、上海市基础教育教材建设研究基地及基地所在单位华东师范大学，上海市物理教育教学研究基地（上海高校“立德树人”人文社会科学重点研究基地）及基地所在单位复旦大学给予了大力支持。在此一并致谢。

本教材出版之前，我们就教材中使用的照片、图片等选用作品，通过多种途径与作者进行了联系，得到了他们的大力支持，在此表示衷心的感谢！对于未联系到的作者，我们也希望作者能及时联系出版社，以便支付相应的稿酬。

欢迎广大师生来电来函指出教材的差错和不足，提出宝贵意见。

2020年5月

本册教材图片提供信息：

本册教材中的图片由视觉中国、IC photo 和中国全球图片总汇（图 5-35，图 5-36，图 5-37，图 8-25）等提供。

物理

选择性必修 第二册



绿色印刷产品

ISBN 978-7-5478-5295-8

9 787547 852958 >

定价：10.70 元