



普通高中教科书

物理

选择性必修

第二册



上海科技教育出版社

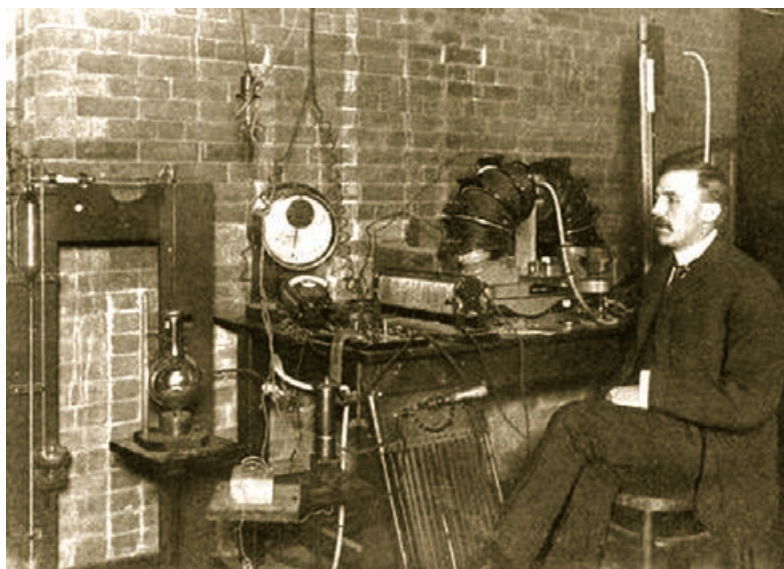
普通高中教科书

物理

选择性必修

第二册

总主编 束炳如 何润伟



上海科技教育出版社

亲爱的同学：

欢迎你学习《物理（选择性必修2）》！

从开始学习物理起，你已经投身于一项激动人心的探索活动。让我们继续携手，在物理学世界中遨游。

你正要跨进《物理（选择性必修2）》的大门。在这里，你将感受到电磁世界的奥妙无穷，了解它对人类文明进程的巨大影响，进而对物理世界的奇光异彩流连忘返。

通过前面的学习，你已领略到物理学的极大魅力。《物理（选择性必修2）》将为你提供继续进行科学探究的机会。你将通过实验探究和理论分析，探究安培力、洛伦兹力、电磁感应定律、交变电流以及电磁波的规律，认识传感器，进一步体会物理学的思想方法，了解物理学在科学技术中的广泛应用及其在人类社会发展中的重要作用。



每章的开头都有一些情境，提出一些问题，让你明确本章研究的主要内容。

第5章 传感器与现代社会

为什么遥感卫星能在高空一览无遗地观测地貌、植被？为什么计算机的显示屏上能实时显示远隔千里的画面？为什么机器人能替代人完成各种复杂的劳动？为什么小小手机会有那么多功能？

这些现代化的设备，有的复杂庞大，有的简单精巧，但它们都需要用传感器来获取信息。

那么，什么是传感器呢？你了解传感器的原理和结构吗？

本章将以生活中常见的一种传感器装置——声光控延时开关为例，让我们认识传感器的基本原理，学习用传感器制作控制装置，了解几种常用的传感器及其在现代社会的广泛应用。

实验探究 洛伦兹力的方向

取一只阴极射线管，用感应圈作电源，将高电压加在它的阴极和阳极之间（图 1-2-2 a）。这时，在阴极和阳极间高电压的作用下，从阴极发射出来的电子束，掠过侧面的荧光屏，发出荧光，显示出电子束的运动径迹。

请观察与思考：

1. 在没有外加磁场时，电子束的运动径迹是怎样的（图 1-2-2 b）？

分析与论证

这里你将进行分析、综合，并运用数学工具进行推理，得出物理学规律和公式。通过这一过程，你将体会科学思维的魅力。

实验探究

这里将要求你提出问题，设计实验方案，动手做一些有意义的实验，进行科学探究。

分析与论证 洛伦兹力的大小

理论推导洛伦兹力大小的公式

图 1-2-4 是运动电荷形成电流的示意图。通电导线放在垂直于纸面向里的磁场中，磁场的磁感应强度为 B 。设每个运动电荷所带的电荷量为 q ，定向移动的平均速度为 v ，单位体积导线中的运动电荷数为 n ，导线横截面积为 S 。显然，时间 t 内，通过导线任一横截面的电荷量 $Q = nqv t S$ ，即在柱体 vtS 内的电荷都通过了横截面。由此可得导线中的电流

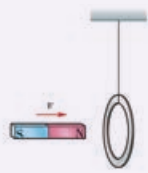


图 2-2-1 探究感应电流方向的实验

学生必做实验

探究影响感应电流方向的因素

设计实验

实验装置如图 2-2-1 所示，用两根细线悬挂一个很轻的、可自由摆动的铝环（直径约为 5 cm），另取条形磁铁一个。

1. 把条形磁铁的一极（如图示的 N 极）向铝环靠近时，观察铝环的运动情况。
2. 当条形磁铁离开铝环时，又会发生什么现象？

收集信息

把实验中观察到的现象记录在下表中。

学生必做实验

这里为你提供了完整的实验活动，让你通过动手实验，探索物理规律，学习物理方法，形成物理观念，提高解决问题的能力，体验成功的喜悦。

信息浏览、STSE

这里为你提供了各种有趣、有用的资料，包括物理学史上的经典事例、科学家小故事等，它们反映了物理学与科学、技术、社会、环境的紧密联系。你的视野将更开阔，你会更加热爱科学。

信息浏览

地磁场与极光

极光是在地球两极常见的一种自然现象。1741 年，瑞典科学家观察到，当极光出现时，罗盘上的指针会跟着发生变化，因而认为极光的出现与磁场有关。

地磁场向地球周围的大空延伸很远，它对来自太空的由质子、电子、 α 粒子等组成的高能粒子流具有阻挡作用，可使地球上的生物免受伤害（图 1-2-7）。但在接近两极的地区，即北纬和

南纬 $65^\circ \sim 75^\circ$ 的地区，有些高能粒子能射向地球的表面（图 1-2-8）。它们通常以 $2\,000\text{ km/s}$ 的高速击穿大气层，并与大气中的氧分子和氮分子相碰撞，使被撞击的分子处于激发状态。当这些分子恢复常态时，其激发的能量就以光能的形式发射出来，从而形成了绚丽多彩的极光。

请思考：为什么两极附近容易产生极光？地磁场的洛伦兹力在这里是怎样起作用的？

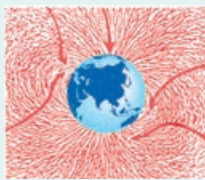


图 1-2-7 地磁场与宇宙射线



图 1-2-8 带电粒子射向地球两极

多学一点

互感现象

若有两个导电线圈，按图 2-5-9 所示放置。线圈 1 中的电流变化所产生的变化磁场，会在邻近的线圈 2 中产生感应电动势；同样，线圈 2 中的电流变化，也会在线圈 1 中产生感应电动势。这种现象叫做**互感**（mutual induction）。互感所产生的电动势叫做**互感电动势**（mutual induction electromotive force），其大小为

多学一点

这里将介绍更多更深的奥秘，以开阔你的视野。你如果有兴趣，可以作进一步的探索。

课题研究

这里提供了一些课题供你选择研究，这种研究将使你的才智得到充分的展示。

课题研究

了解发电机和电动机对能源转化方式和工业发展的重要作用

19 世纪以来，科学家发现了电流的磁效应和电磁感应现象，使电磁学理论得到了极大的发展。随之而来的电力技术的开发利用、电动

机和发电机的发明，以及电能利用，给人类社会的发展带来了巨大影响。

请你通过网络和到图书馆查阅资料，了解发电机和电动机对能源转化方式和工业发展的重要作用，并以此写一篇研究报告，与同学交流。

目 录



第 1 章 磁场力与现代科技 6

- 1.1 安培力 7
- 1.2 洛伦兹力 14
- 1.3 洛伦兹力与现代科技 20



第 2 章 电磁感应与现代生活..... 28

- 2.1 感应电流产生的条件 29
- 2.2 感应电流的方向——楞次定律 34
- 2.3 感应电动势的大小——法拉第电磁
 感应定律 39
- 2.4 电磁感应的案例分析 45
- 2.5 自感现象与日光灯 49
- 2.6 涡流现象与电磁炉 56



第 3 章 交变电流的产生与输送 ... 64

- 3.1 交变电流的产生 65
- 3.2 交变电流的描述 71
- 3.3 电能的输送 75
- 3.4 变压器为什么能改变电压 80

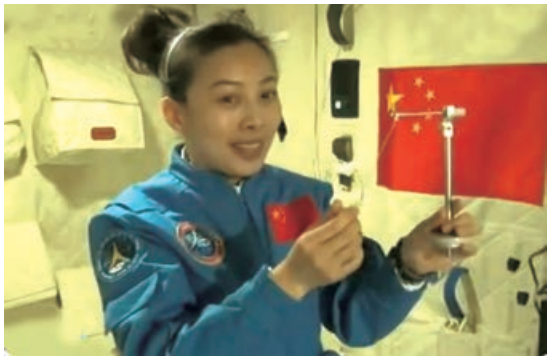
第4章 电磁振荡与电磁波 89

4.1 麦克斯韦的电磁场理论 90

4.2 电磁振荡和电磁波 93

4.3 无线电通信 100

4.4 电磁波家族 106



第5章 传感器与现代社会 112

5.1 传感器的原理 113

5.2 热敏电阻的温度特性 117

5.3 用传感器制作自动控制装置 121

5.4 信息时代离不开传感器 125



总结与评价 课题研究成果报告会 133

研究课题示例 133

评价表 134



上海同步辐射光源(SSRF)是第三代同步辐射光源,已成为支撑多学科前沿基础研究的实验平台。

第 1 章 磁场力与现代科技

我们已经了解磁现象的本质,知道磁与电之间有密切的联系,那么,磁场对电流和运动电荷的作用遵循怎样的规律?人类在利用电磁技术推进现代文明的进程中,产生了哪些奇思妙想?能将带电粒子不断加速,从而使它达到极高能量的回旋加速器是如何工作的?……

本章通过实验探究和分析论证,定量研究安培力和洛伦兹力,进一步认识磁场的物质性,揭示磁场与电流、运动电荷之间的相互作用规律。然后运用匀速圆周运动的模型,深入探究带电粒子在匀强磁场中的运动规律,了解洛伦兹力在现代科学技术中的一些重要应用。

1.1 安培力

通过对初中物理的学习，我们已经知道，通电导线在磁场中会受到磁场力的作用（图 1-1-1）。磁场对电流的作用力称为安培力（Ampère force）。

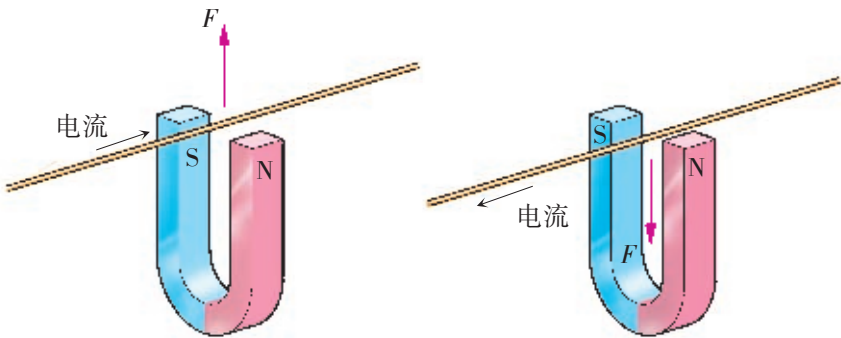


图 1-1-1 磁场对电流的作用力

安培力的应用十分广泛。磁电式电流表、电动机等都是利用磁场对电流的作用力——安培力制成的。

你用电流表做实验时是否想过：为什么电流表的接线不能接反？为什么通过电流表的电流越大，指针偏转的角度就越大？

要搞清楚这些问题，就必须进一步探究安培力的方向和大小。



安培（A. Ampère, 1775—1836），法国物理学家。他以极精巧的实验和高超的数学技能，经过反复研究，确定了磁场对电流的作用力的规律。为了纪念他在这方面的杰出贡献，物理学中把磁场对电流的作用力称为安培力。

探究安培力的方向和大小

实验探究 1 安培力的方向

我们已经知道，安培力的方向跟电流方向、磁场方向有关，但三者间究竟存在着怎样的关系呢？

我们用图 1-1-2 所示的实验装置进一步来研究这个问题。

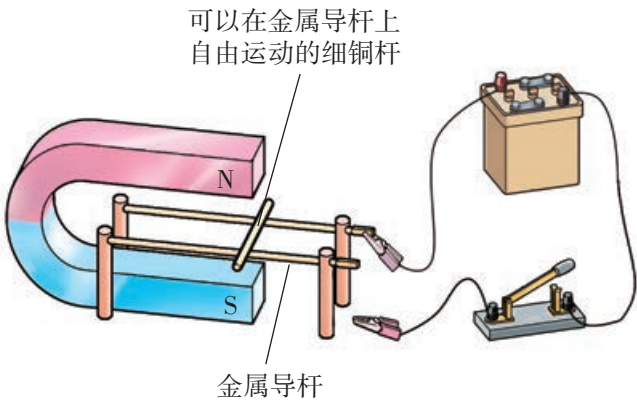


图 1-1-2 探究安培力方向的实验装置

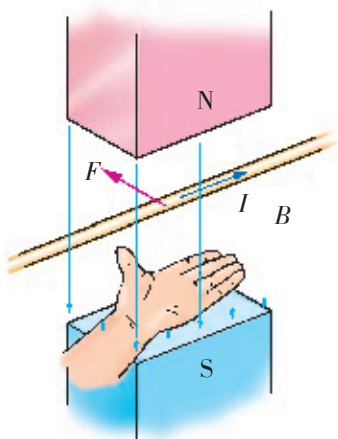


图 1-1-3 左手定则示意图

1. 将实验装置接通电源,金属导杆上的细铜杆会怎样运动?
2. 改变电流方向,细铜杆的受力方向怎样? 改变磁感应强度的方向,细铜杆的受力方向又怎样?

3. 多次改变电流方向和磁感应强度的方向,观察安培力的方向跟电流方向、磁感应强度方向之间存在的关系。把实验中得到的三者之间的关系总结一下,并写出结论。

为了方便地判断安培力的方向,人们总结出了如图 1-1-3 所示的方法:伸开左手,使大拇指跟其余四个手指垂直,且都跟手掌在同一个平面内,让磁感线穿入手心,使四指指向电流方向,则大拇指所指的方向就是安培力的方向。物理学中把这种方法叫做左手定则(left-hand rule)。

你的实验结果跟用左手定则判断得到的结论是否一致?

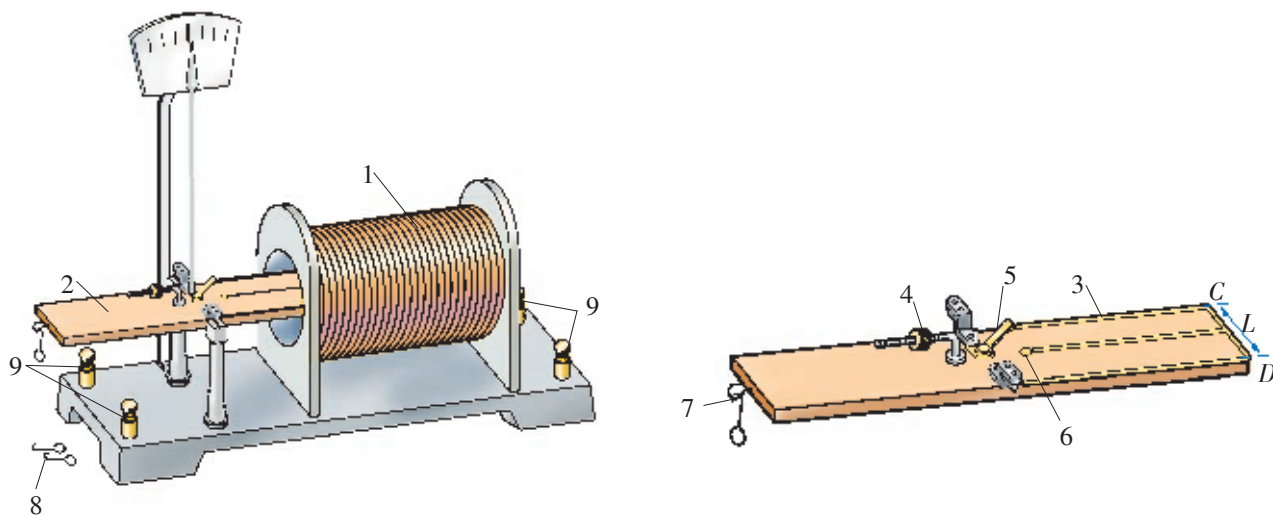
实验探究 2 安培力的大小

要探究安培力的大小,就要有相应的测量仪器。实验室的电流天平就是这种仪器。请对照实物,参阅以下说明,了解电流天平的结构、原理和使用方法。

关于电流天平的说明

一、结构

图 1-1-4 所示的是电流天平的结构。



1. 螺线管 2. 横臂 3. E 形导线 4. 调平螺母 5. 转换开关 6. 中心触点 7. 挂钩 8. 钩码 9. 接线柱

图 1-1-4 电流天平的结构

二、原理

分别给电流天平的 E 形导线和螺线管通电。当磁场方向和 E 形导线中的电流方向如图 1-1-5 所示时, CD 段导线就受到一个向下的安培力,横臂右端因受到安培力作用而下降。在横臂的左端加上适当的钩码,使电流天平恢复水平平衡。电流天

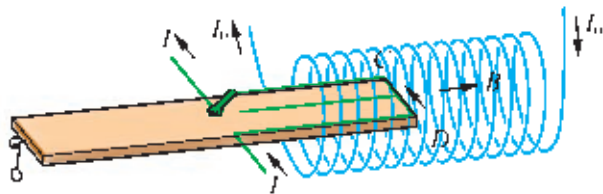


图 1-1-5 电流天平工作原理示意图

平横臂左右两端与支点的距离相等，导线 CD 受到的安培力的大小就等于左端钩码所受的重力大小。

三、使用方法

- 1. 调节电流天平的调平螺母，使电流天平水平平衡。
- 2. 给 E 形导线和螺线管通电，使 E 形导线 CD 段受到的安培力方向向下。
- 3. 通过改变螺线管内电流的大小来改变磁感应强度的大小（注意：螺线管内的磁感应强度与通过螺线管的电流成正比）。
- 4. 在横臂左端的挂钩上挂上适当的钩码，使电流天平恢复水平平衡。

提出问题

由上面的实验我们知道，通电导线在磁场中要受到力的作用。那么，这个力 F 的大小跟电流 I 、导线的长度 L 、磁感应强度 B 存在怎样的关系呢？

制订计划与设计实验

用电流天平研究 F 跟 I 、 L 、 B 的定量关系，设计实验时，需要弄清楚下面几个问题。

- 1. 怎样改变导线中电流的大小？
电流天平的 E 形导线有两个接线柱，应将 E 形导线接入怎样的电路并用什么仪器，才能方便地改变其中电流的大小？
- 2. 怎样改变磁场中导线的长度？
请仔细观察 E 形导线接线板的结构，其中转换开关起什么作用？
- 3. 怎样改变螺线管中磁感应强度的大小？
螺线管的两个接线柱应接入怎样的电路并用什么仪器来控制 and 改变磁感应强度 B 的大小？

请设计测量电路，画出电路图（电流天平可用方框表示）；检查图 1-1-6 中的实验器材，看有无缺漏；再用导线参照你画的电路图将实验器材连接起来。

运用控制变量法，拟定实验步骤，进行实验，测定安培力

下面是探究安培力大小的两种方法，请用电流天平测出对应的安培力 F 。由测得的数据，你能否找出安培力 F 与电流 I 和磁感应强度 B 之间的关系？

第一种方法

导线的有效长度 $L = 4 \times 10^{-2} \text{ m}$ ，螺线管中的磁感应强度 B 保持不变（即螺线管内的电流保持不变）。

序号	I/A	F/N
1	0.5	
2	1.0	
3	1.5	
4	2.0	
5	2.5	

第二种方法

导线的有效长度 $L = 4 \times 10^{-2} \text{ m}$ ，导线中的电流 $I = 2 \text{ A}$ 。

序号	B/T	F/N
1	2.5×10^{-3}	
2	5.0×10^{-3}	
3	7.5×10^{-3}	
4	10.0×10^{-3}	
5	12.5×10^{-3}	

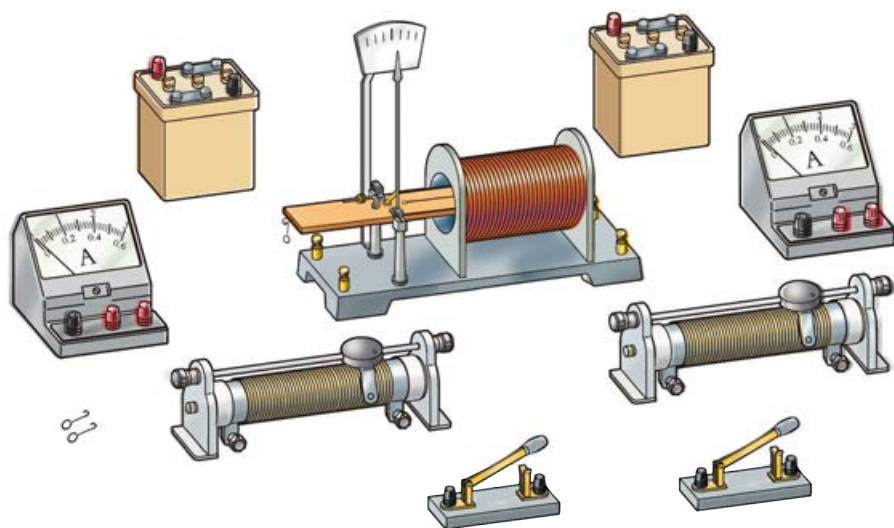


图 1-1-6 用电流天平探究安培力大小的主要实验器材

的大小。

通过实验探究，你得出的结论是什么？你对这一实验方案和探究过程还有哪些想法？

精确的实验表明，通电导线在磁场中受到的安培力 F 的大小，跟导线的长度 L 、导线中的电流 I 、磁感应强度 B 都成正比。用公式表示为

$$F = kBIL$$

在国际单位制中， $k = 1$ ，上式可表示为

$$F = BIL$$

式中磁感应强度 B 的单位为特 (T)，电流 I 的单位为安 (A)，导线长度 L 的单位为米 (m)，安培力 F 的单位为牛 (N)。

磁感应强度的测算

电流周围有磁场，如何测算电流周围磁场的磁感应强度呢？根据上述实验结果，只要测定处于磁场中长度为 L 的通电导线中的电流 I ，同时测定出它所受到的安培力 F ，即可测算出导线所在处磁场的磁感应强度 B 。

在物理学中，用安培力 F 跟电流 I 和导线长度 L 的乘积 IL 的比来定义磁感应强度 B ，即

$$B = \frac{F}{IL}$$

并规定：当与磁场垂直的通电导线的长度为 1 m，通过的电流为 1 A，导线受到的作用力为 1 N 时，该导线所在处磁场的磁感应强度为 1 T。

案例分析

案例 某同学在实验室里，用电流天平测算通电螺线管中的磁感应强度。他将测得的数据记录在下表中，请你计算出通电螺线管中的磁感应强度 B 。

CD 段导线长度 / m	电流天平水平平衡时 钩码所受的重力 / N	通过 E 形导线的电流 / A
4.0×10^{-2}	4.0×10^{-5}	0.5

分析 由题知 $I = 0.5 \text{ A}$ ， $G = 4.0 \times 10^{-5} \text{ N}$ ， $L = 4.0 \times 10^{-2} \text{ m}$ 。

电流天平水平平衡时，导线所受安培力的大小等于钩码所受的重力，即 $F = G$ 。由此可得

$$B = \frac{F}{IL} = \frac{4.0 \times 10^{-5}}{0.5 \times 4.0 \times 10^{-2}} \text{ T} = 2.0 \times 10^{-3} \text{ T}$$

通电螺线管中的磁感应强度为 $2.0 \times 10^{-3} \text{ T}$ 。

上面针对电流天平的案例分析，是在电流方向与磁场方向垂直的情况下作出的，此时， $F = BIL$ 。如果导线中电流方向与磁场方向成 θ 角，那么我们可以把 B 分解为平行于电流方向的分量 $B_1 = B \cos \theta$ 和垂直于电流方向的分量 $B_2 = B \sin \theta$ （图 1-1-7）。 B_1 对通电导线没有力的作用，只有 B_2 才会对通电导线有安培力的作用，因此

$$F = BIL \sin \theta$$

当导线中的电流方向与磁场方向平行时， $\theta = 0$ 或 $\theta = \pi$ ，此时安培力 $F = 0$ ，因此，电流天平中的 E 形导线只有 CD 段受到安培力。

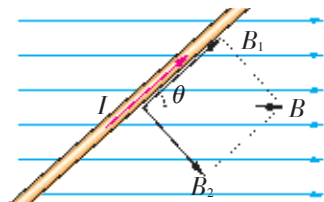


图 1-1-7 磁感应强度的分解

多学一点

磁电式电流表

中学实验室使用的直流电流表是磁电式电流表，它所依据的物理学原理是安培力与电流的关系。

磁电式电流表最基本的组成部分是磁铁和放在磁铁两极之间的线圈。图 1-1-8 a 表示了线圈在磁场中的受力情况。当电流通过线圈时，导线受到安培力的作用。根据左手定则可以判定，线圈左右两边所受的安培力方向相反，于是安装在轴上的线圈就要转动。

从图 1-1-8 b 中可以看出，线圈的轴与一根螺旋弹簧固定在一起，线圈转动时，螺旋弹簧就会变形，产生弹性力，反抗线圈的转动，使线圈转到一定角度就停住了。电流越大，安培力就越大，使线圈停住所需要的弹性力就越大，相应的螺旋弹簧形变也就越大。所以，从线圈转过的角度就能判断通过线圈

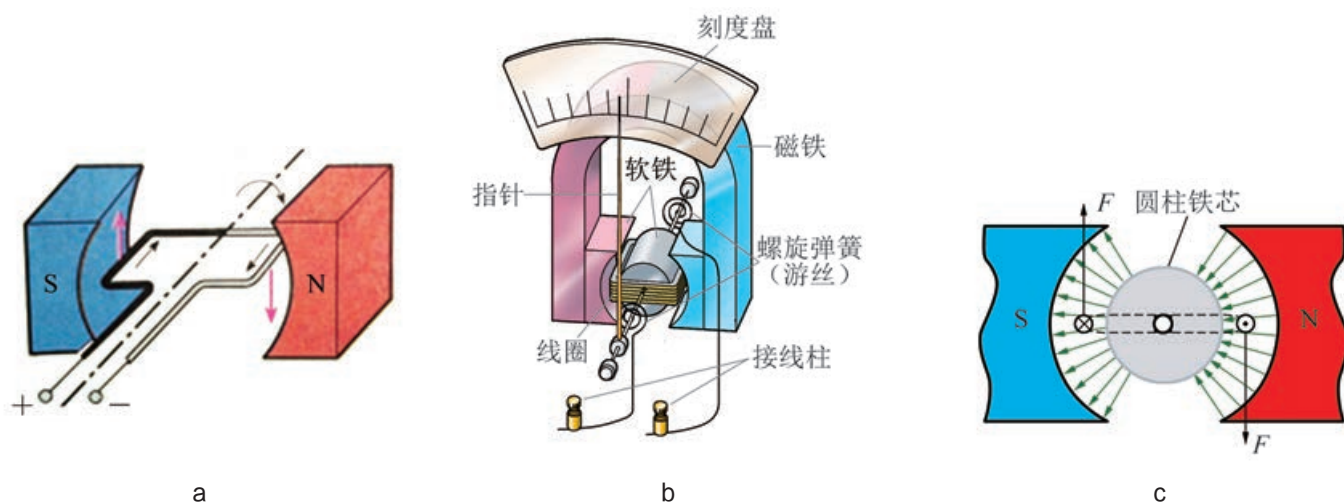


图 1-1-8 磁电式电流表的结构

辐向磁场

如图 1-1-8 c 所示，磁场的磁感线沿着半径方向均匀排列，这样分布的磁场叫辐向磁场。距离轴线相等位置磁场磁感应强度的大小相等，方向均指向（或背离）轴线。

内电流的大小。

由图 1-1-8 c 可知，磁电式电流表中的磁场是辐向磁场，线圈无论转到什么位置，线圈平面都跟磁感线平行。安培力方向总是垂直于磁场，也即垂直于线圈平面，因此这种磁电式电流表表盘的刻度是均匀的。

家庭作业与活动

- 观察磁电式电流表的内部结构（图 1-1-8），想一想：它能不能反接？为什么？
- 在赤道附近沿东西方向放置一根导线。若导线中通以由东向西的电流，则它所受地磁场安培力的方向为（ ）。
A. 向上 B. 向下 C. 向南 D. 向北
- 请根据图 1-1-9 各图中给出的条件，运用左手

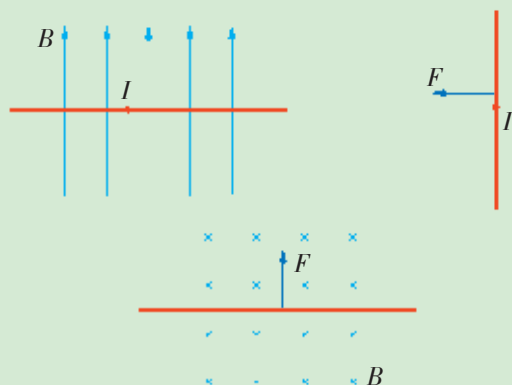


图 1-1-9

定则，在图中标出所缺的物理量的方向（已知 B 与 I 相互垂直）。

- 由磁感应强度的定义式 $B = \frac{F}{IL}$ ，可知（ ）。
A. 长为 L 的通电导线受到的安培力 F 为零时，它所在处磁场的磁感应强度 B 也一定为零
B. 磁感应强度 B 的方向与 F 的方向一致
C. 该定义式只适用于匀强磁场
D. 安培力 F 的方向可以通过左手定则判断
- 图 1-1-10 所示的装置可演示磁场对通电导线

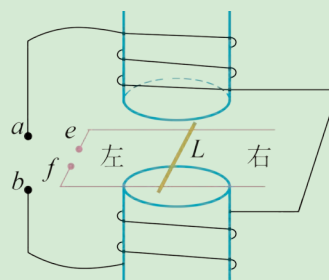


图 1-1-10

的作用。电磁铁上下两个磁极之间的某一水平面内固定着两条平行金属导轨， L 是置于导轨上并与导轨垂直的金属杆。当电磁铁线圈两端 a 、 b ，两条导轨各有一端 e 、 f ，分别接到两个不同的直流电源上时， L 便在导轨上滑动。下列说法中正确的是（ ）。

- A. 若 a 接正极， b 接负极， e 接正极， f 接负极，则 L 向右滑动
 - B. 若 a 接正极， b 接负极， e 接负极， f 接正极，则 L 向右滑动
 - C. 若 a 接负极， b 接正极， e 接正极， f 接负极，则 L 向左滑动
 - D. 若 a 接负极， b 接正极， e 接负极， f 接正极，则 L 向左滑动
6. 电磁炮是一种理想的兵器，它的主要原理如图 1-1-11 所示。1982 年澳大利亚国立大学制成了能把 2.2 g 的弹体（包括金属杆 EF 的质量）加速到 10 km/s 的电磁炮（常规炮弹的速度为 2 km/s）。若轨道宽 2 m，长为 100 m，通过的电流为 10 A，则轨道间所加匀强磁场的磁感应强度是多少（轨道摩擦不计）？

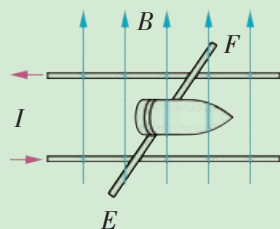


图 1-1-11

7. 如图 1-1-12 所示， AB 、 CD 为两根平行的导线。当导线中通以同方向的电流时，相互间有怎样的作用？请做实验，并说明其中的道理。



图 1-1-12

8. 如图 1-1-13 所示，电源电动势 $E = 2\text{ V}$ ，内阻 $r = 0.5\ \Omega$ ；竖直导轨的电阻可忽略；靠在竖直导轨上的金属棒的质量 $m = 0.1\text{ kg}$ ，电阻 $R = 0.5\ \Omega$ ，它与导轨间的动摩擦因数为 $\mu = 0.4$ ，有效长度为 0.2 m。为使金属棒不下滑，我们施一与纸面夹角为 60° 且与金属棒垂直向外的磁场。设最大静摩擦力等于滑动摩擦力， g 取 10 m/s^2 。问：

- (1) 所加磁场是斜向上的还是斜向下的？
- (2) 所加磁场的磁感应强度 B 的范围是什么？

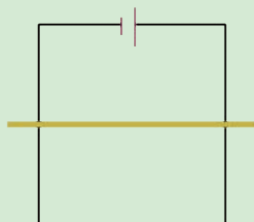


图 1-1-13

1.2 洛伦兹力

在地球的南极和北极地区常出现极光。科学研究告诉我们，极光的产生与地磁场对来自太空的高速带电粒子的作用有关。

图 1-2-1 所示的是我国南极科学考察队员在极光下拍摄到的，画在一排废弃的油罐上的京剧脸谱，这些京剧脸谱已经成为南极中山站的名片。



图 1-2-1 极光下的京剧脸谱



洛伦兹 (H. Lorentz, 1853—1928), 荷兰物理学家, 经典电子论创始人。

我们知道，磁场对通电导线有安培力的作用，而电流是由电荷的定向移动形成的。由此可以推断：磁场对通电导线的安培力，是由作用在运动电荷上的力引起的。

19 世纪末，荷兰物理学家洛伦兹研究了磁场对运动电荷作用力的问题。为纪念洛伦兹对物理学的贡献，物理学中将这种力称为**洛伦兹力** (Lorentz force)。

探究洛伦兹力的方向和大小

实验探究

洛伦兹力的方向

取一只阴极射线管，用感应圈作电源，将高电压加在它的阴极和阳极之间（图 1-2-2 a）。这时，在阴极和阳极间高电压的作用下，从阴极发射出来的电子束，掠过侧面的荧光屏，发出荧光，显示出电子束的运动径迹。

请观察与思考：

1. 在没有外加磁场时，电子束的运动径迹是怎样的（图 1-2-2 b）？

1897 年，英国物理学家 J. J. 汤姆孙 (J. J. Thomson) 通过实验确定了从阴极射线管的阴极发出的射线是高速运动的电子束。

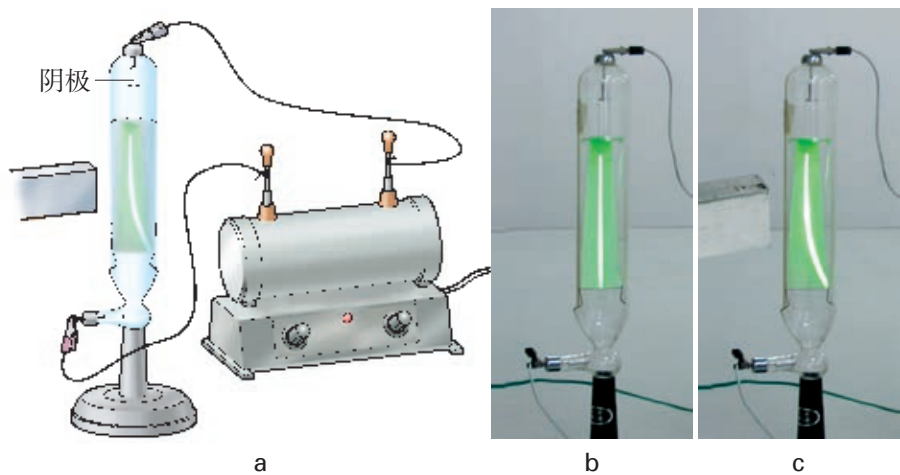


图 1-2-2 探究洛伦兹力的实验装置

你可以采用哪些方法来改变作用于电子束的磁场的磁感应强度？

调节感应圈加在阴极射线管两个电极上的电压，就可改变电子束的运动速度。电压越高，电子束的运动速度就越大。

- 2. 将磁铁的一端靠近阴极射线管，电子束的运动径迹有没有变化（图 1-2-2 c）？怎样变化？
- 3. 改变磁场方向，电子束的运动径迹又将怎样变化？

我们知道,安培力的方向是跟电流方向和磁场方向垂直的。由此可以推断，洛伦兹力的方向也应跟电荷运动方向和磁场方向垂直。

上述实验中，运动电荷是负电荷，你该怎样运用左手定则来判断图 1-2-3 中电荷 q 受到的洛伦兹力的方向呢？请试一试，是否与实验现象一致？

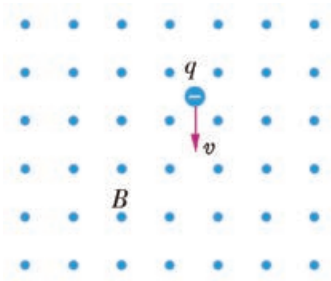


图 1-2-3 确定洛伦兹力的方向

分析与论证

洛伦兹力的大小

理论推导洛伦兹力大小的公式

图 1-2-4 是运动电荷形成电流的示意图。通电导线放在垂直于纸面向里的磁场中，磁场的磁感应强度为 B 。设每个运动电荷所带的电荷量为 q ，定向移动的平均速度为 v ，单位体积导线中的运动电荷数为 n ，导线横截面积为 S 。显然，时间 t 内，通过导线任一横截面的电荷量 $Q = nqv tS$ ，即在柱体 vtS 内的电荷都通过了横截面。由此可得导线中的电流

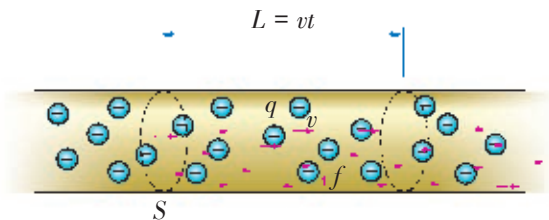


图 1-2-4 导线中运动电荷受到的洛伦兹力

$$I = \frac{Q}{t} = nqvS$$

设磁感应强度为 B 的磁场对每个运动电荷的洛伦兹力为 f ，则长度为 $L = vt$ 的通电导线所受的力 F ，等于其中所有的运动电荷所受的洛伦兹力 f 之和，即 $F = (nvtS)f$ 。而 F 即安培力 $F_{\text{安培}}$ ， $F_{\text{安培}} = BIL$ ，所以 $(nvtS)f = B(nqvS)vt$ ，可得出磁场对运动电荷的洛伦兹力 f 的表达式

$$f = qvB$$

式中各物理量的单位依次是牛 (N)、库 (C)、米/秒 (m/s)、特 (T)。此公式适用于速度方向与磁场方向垂直的情况。

由洛伦兹力的公式可知，洛伦兹力的大小跟电荷的运动速度和磁场的磁感应强度 B 都成正比。请仍用图 1-2-2 所示的装置再观察一次电子束的运动径迹。

1. 保持电子束的运动速度不变，改变作用于电子束的磁场的磁感应强度，比较电子束的弯曲程度。

2. 保持磁场的磁感应强度不变，改变电子束的运动速度，比较电子束的弯曲程度。

实验的结果与理论推导的结论是否相符？

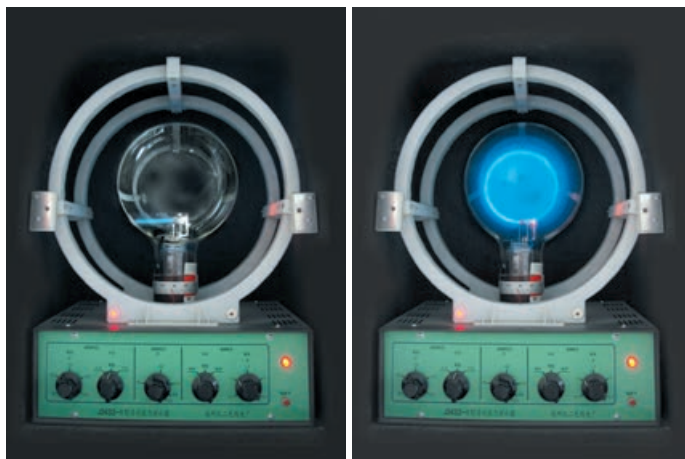
研究带电粒子在磁场中的运动

当一个带电粒子垂直射入匀强磁场时，它将受到洛伦兹力的作用，从而偏离原来的运动方向。那么，它的运动径迹会是怎样的呢？

实验探究

带电粒子在磁场中的运动

洛伦兹力演示仪是一个特制的电子射线管，如图 1-2-5 所



a 无磁场时电子束的径迹

b 有磁场时电子束的径迹

图 1-2-5 用洛伦兹力演示仪研究洛伦兹力

示。球形管内下方的电子枪射出的电子束，使管内的低压水银蒸气（或氢气）发出辉光，我们就能观察到电子的运动径迹。匀强磁场是由管外两个平行且共轴的通电环形线圈（亥姆霍兹线圈）产生的。

请仔细观察：当管外未加磁场时，电子的运动径迹是怎样的（图 1-2-5 a）？在管外加上匀强磁场后，电子束的运动径迹又是怎样的（图 1-2-5 b）？

这个实验进一步证明，洛伦兹力的方向跟电荷的运动方向垂直。

请讨论以下问题：

1. 带电粒子在磁场中做匀速圆周运动的向心力是由什么力提供的？
2. 洛伦兹力对带电粒子做功吗？为什么？
3. 为什么带电粒子只能在图示的平面内运动？

推导带电粒子在磁场中运动的轨道半径和周期

带电粒子在匀强磁场中运动的轨道半径和周期跟哪些因素有关呢？

设一质量为 m 、电荷量为 q 的带电粒子，以速度 v 垂直射入磁感应强度为 B 的匀强磁场中。此带电粒子在洛伦兹力的作用下，将做匀速圆周运动。那么，它做圆周运动的轨道半径 r 和周期 T 是多大呢？

我们知道，带电粒子做圆周运动的向心力是由它受到的洛伦兹力提供的（图 1-2-6），即

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

由此可得

$$r = \frac{mv}{Bq} \quad (1)$$

根据圆周运动的周期公式 $T = \frac{2\pi r}{v}$ ，可得

$$T = \frac{2\pi m}{Bq} \quad (2)$$

由（1）式可知，在匀强磁场中做圆周运动的带电粒子，它运动的轨道半径跟其运动速度的大小成正比。

由（2）式可知，带电粒子在匀强磁场中做圆周运动的周期与其轨道半径和运动速度的大小无关。

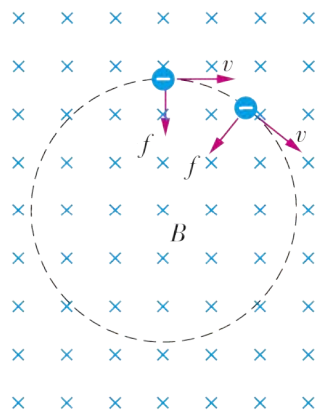


图 1-2-6 带电粒子在磁场中的运动

地磁场与极光

极光是在地球两极常见的一种自然现象。1741年，瑞典科学家观察到，当极光出现时，罗盘上的指针会跟着发生变化，因而认为极光的出现与磁场有关。

地磁场向地球周围的太空延伸很远，它对来自太空的由质子、电子、 α 粒子等组成的高能粒子流具有阻挡作用，可使地球上的生物免受伤害（图 1-2-7）。但在接近两极的地区，即北纬和

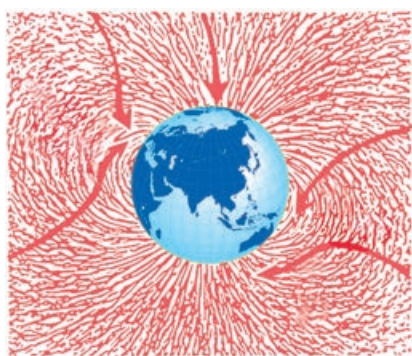


图 1-2-7 地磁场与宇宙射线

南纬 $65^\circ \sim 75^\circ$ 的地区，有些高能粒子能射向地球的表面（图 1-2-8）。它们通常以 $2\,000\text{ km/s}$ 的高速击穿大气层，并与大气中的氧分子和氮分子相碰撞，使被撞击的分子处于激发状态。当这些分子恢复常态时，其激发的能量就以光能的形式发射出来，从而形成了绚丽多彩的极光。

请思考：为什么两极附近容易产生极光？磁场的洛伦兹力在这里是怎样起作用的？



图 1-2-8 带电粒子射向地球两极

家庭作业与活动

- 在图 1-2-9 所示的各图中，匀强磁场的磁感应强度均为 B ，带电粒子的速度均为 v ，带电粒子所带的电荷量均为 q 。试求出各图中带电粒子所受洛伦兹力的大小和方向。

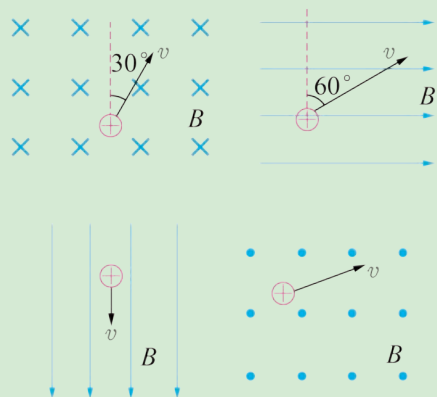


图 1-2-9

- 如图 1-2-10 所示，真空中一束电子沿一螺线管轴线进入管内。不计电子所受的重力，以下关于电子在螺线管内运动情况的描述中正确的是（ ）。



图 1-2-10

- 当从 a 端通入电流时，电子做匀加速直线运动
- 当从 b 端通入电流时，电子做匀加速直线运动
- 不管从哪端通入电流，电子都做匀速直线运动
- 不管从哪端通入电流，电子都做匀速圆周运动

3. 处于匀强磁场中的一个带电粒子，仅在磁场力作用下做匀速圆周运动。该粒子的运动可与环形电流等效，此等效电流（ ）。

A. 与粒子的电荷量成正比
B. 与粒子的速度大小成正比
C. 与粒子的质量成正比
D. 与匀强磁场的磁感应强度大小成正比

4. 如图 1-2-11 所示，空间一圆柱形区域内有一匀强磁场，该圆柱形的横截面的半径为 R ，磁场方向垂直于横截面。一个质量为 m 、电荷量为 q ($q > 0$) 的粒子沿横截面的某直径射入磁场，速度大小为 v_0 ，离开磁场时速度方向偏离入射方向 60° 。不计粒子所受的重力，该磁场的磁感应强度大小为（ ）。

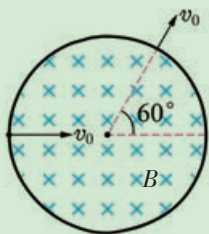


图 1-2-11

- A. $\frac{\sqrt{3}mv_0}{3qR}$ B. $\frac{mv_0}{qR}$
C. $\frac{\sqrt{3}mv_0}{qR}$ D. $\frac{3mv_0}{qR}$

5. 如图 1-2-12 所示，一个质量 $m = 0.1 \text{ g}$ 、所带电荷量 $q = 5 \times 10^{-4} \text{ C}$ 的小滑块，放置在倾角 $\alpha = 30^\circ$ 的光滑斜面（绝缘且足够长）上，斜面置于 $B = 0.5 \text{ T}$ 的匀强磁场中，磁场方向垂直纸面向里。小滑块由静止开始沿斜面下滑，它滑至某一位置时会离开斜面。问：

- (1) 小滑块带何种电荷？
(2) 小滑块离开斜面时的瞬时速度为多大？
(3) 该斜面的长度至少要多长？

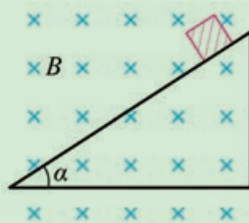


图 1-2-12

1.3 洛伦兹力与现代科技



劳伦斯 (E. Lawrence, 1901—1958), 美国物理学家。因发明回旋加速器并用它产生了人工放射性同位素而荣获 1939 年的诺贝尔物理学奖。照片中劳伦斯拿着他制作的回旋加速器模型。

$1\text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{ J}$
 $1\text{ MeV} = 10^6\text{ eV}$
 $1\text{ GeV} = 10^9\text{ eV}$
 $1\text{ TeV} = 10^{12}\text{ eV}$

洛伦兹力在现代科技中有着广泛的应用。回旋加速器、质谱仪、电子显微镜等现代高科技仪器设备中，都要用到洛伦兹力来控制电荷的运动。

回旋加速器

什么是加速器

加速器 (accelerator) 是使带电粒子获得高能量的设备。科学家在探索物质的微观结构时，通常要用很高能量的带电粒子去轰击各种原子核，以观察它们的变化，所以早期的加速器又被称为“原子击碎机”。

从直线加速器到回旋加速器

使带电粒子获得较高能量的物理学基本原理是，让带电粒子在电场中受力被加速，从而提高它的能量。

早期的加速器是用不断提高电源的电压来使带电粒子加速的。由于实际所能达到的电压是有限制的，因此粒子能量最高只能达到约 10 MeV。为了进一步提高粒子的能量，科学家制成了直线加速器，让带电粒子在多级电场的作用下被多次加速，这就导致整个加速器延伸得非常长，如位于美国斯坦福大学的直线加速器，长度达 3 000 多米。能否在较小的空间范围内让带电粒子受到电场的多次加速呢？

1930 年，美国科学家劳伦斯巧妙地应用带电粒子在磁场中的运动特点发明了回旋加速器，解决了这一难题。

回旋加速器的原理

图 1-3-1 是回旋加速器的主要部件示意图。其核心部分是两个 D 形金属扁盒，它们之间有一间隙，间隙中心 A 处是粒子源。D 形盒装在真空室内，室内有一匀强磁场，方向垂直于 D 形盒的底面。D 形盒屏蔽了外电场，确保盒内的带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动。

两个 D 形盒分别与高频电源的两极相连，使间隙中产生交变电场，加速带电粒子。

要了解回旋加速器的工作原理，先请讨论两个问题：

1. 带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的半径和速度增大时，它的运动周期 T 是否变化？为什么？

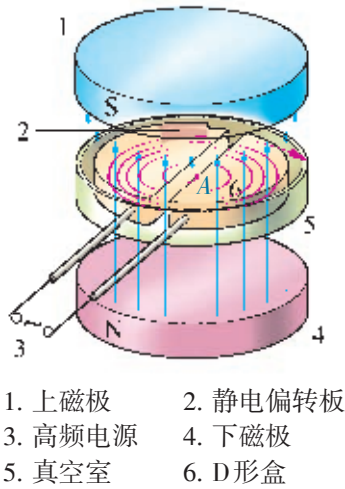


图 1-3-1 回旋加速器的主要部件

2. 要保证带电粒子每次经过 D 形盒的间隙时, 都能受到合适的电场力而被加速, 高频电源的频率应符合怎样的要求?

回旋加速器工作时, 从 A 处粒子源 (图 1-3-2) 发出的带正电的粒子, 以一定速度垂直于磁场方向进入 D_1 , 粒子受洛伦兹力的作用, 在 D_1 中做匀速圆周运动。经过半个周期, 粒子回到 D_1 的边缘, 间隙中的电场使它获得一次加速。然后, 该粒子以增大的速度进入 D_2 做匀速圆周运动。由于粒子的轨道半径跟它的速度大小成正比, 因此该粒子在 D_2 中所做圆周运动的半径有所增大。当该粒子回到 D_2 边缘时, 高频电源正好使间隙处的电场方向与刚才反向, 它又一次获得加速。如此继续下去, 粒子将沿着图示的曲线运动, 速度和能量逐渐增大。当达到预期的速度大小时, 用静电偏转板将高能粒子引出, 用于科学研究。

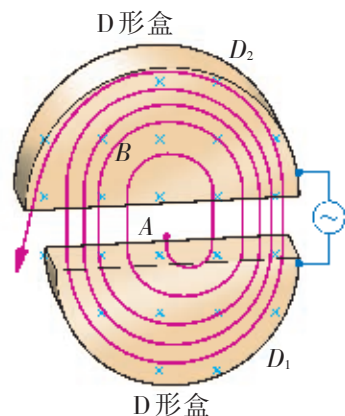


图 1-3-2 回旋加速器工作原理图

信息浏览

加速器的创新历程

粒子物理学中, 必须将带电粒子不断加速, 让它达到极高的能量, 然后去轰击各种原子核, 从被击碎的“散裂物”中发现一些更小的新粒子。为了能够获得更高的能量, 必须不断地对加速器进行变革和创新。

到目前为止, 加速器的发展经历了三次革命。

1945 年, 苏联、美国的科学家对高频加速电场的频率进行调变, 各自研制成同步回旋加速器。这种回旋加速器能将质子的能量加速到 1 GeV。

20 世纪 50 年代, 苏联科学家研制出磁场呈某种分布的回旋加速器, 它能使不同质量的粒子在不同半径的轨道上回旋频率保持不变。这种加速器可以将质子的能量加速到 10 GeV 的数量级。

20 世纪 60 年代, 意大利科学家运用对撞可使加速粒子能量得到充分利用的原理, 建成了一台直径大约 1 m 的对撞机, 从此开创了加速器发展的新纪元。

我国 1989 年研制成的北京正负电子对撞机 (图 1-3-3), 能使电子能量达到 2×2.8 GeV。北京正负电子对撞机重大改造工程于 2004 年 4 月开工建设, 项目建设期为 5 年。改造后的北京正负电子对撞机在世界同类型装置中继续保持领先地位, 已经成为国际上最先进的双环对撞机之一。现代的高能加速器基本上都是对撞机, 它们把产生高能反应的等效能量提高到 10~1 000 TeV。

从 20 世纪 30 年代至今, 加速器的能量提高了 9 个数量级, 每单位能量的造价降低了约 4 个数量级, 全世界有多位科学家因此获得了诺贝尔物理学奖。

加速器发展的主要动力是粒子物理与原子核物理实验的需要。粒子物理与原子核物理推动了加速器理论和技术的进步。

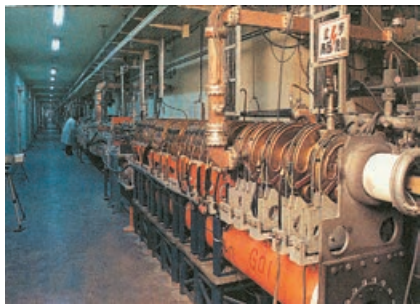


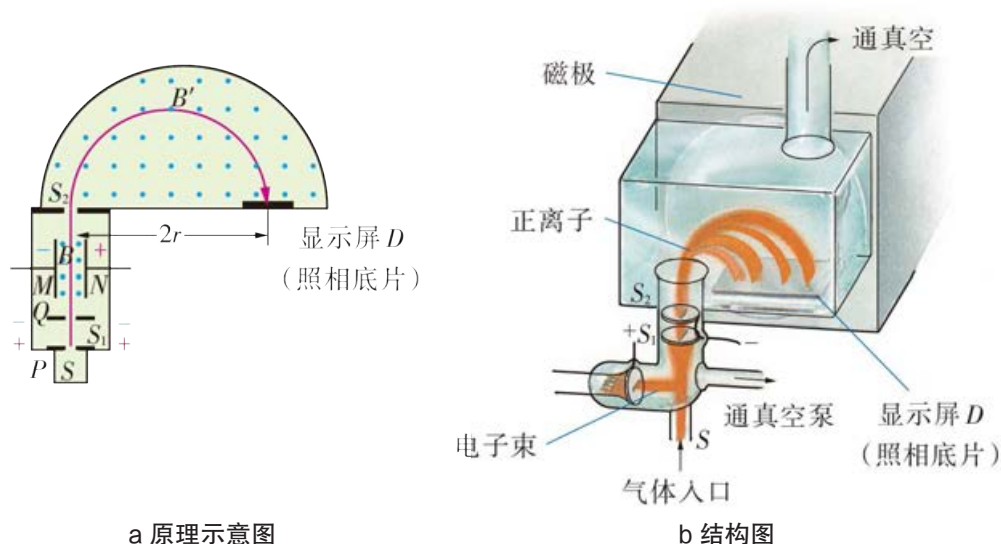
图 1-3-3 北京正负电子对撞机 (BEPC)

质谱仪

质谱仪最初是由 J. J. 汤姆孙的学生阿斯顿 (F. Aston) 设计的。他用质谱仪首先得到了 ^{20}Ne 和 ^{22}Ne 的质谱线，从而证实了同位素的存在。

质谱仪是科学研究中用来分析同位素和测量带电粒子质量的精密仪器。

图 1-3-4 a 是质谱仪的原理示意图，图 1-3-4 b 是它的结构图。从离子源 S 产生的离子经电场加速后，由小孔 S_1 进入一个速度选择器，再经小孔 S_2 进入匀强磁场 B' ，受洛伦兹力作用做匀速圆周运动，最后打到显示屏 D 上。如果带电粒子的电荷量相同而质量不同，那么它们进入磁场后将沿着不同的半径做圆周运动（想一想：为什么？）。因此，那些原子序数相同而相对原子质量不同的同位素离子，将在显示屏上按质量大小排列成若干细条状谱线，每一条谱线对应于一定的质量，故称“质谱仪”。利用质谱仪对某种元素进行测量，可以准确地测出各种同位素的相对原子质量。



a 原理示意图

b 结构图

图 1-3-4 质谱仪

案例分析

案例 如图 1-3-4 a 所示，在间距为 d 的平行极板 M 、 N 上加一定的电压 U_2 ，从而在极板间形成一个匀强电场，同时在此区域加一个与匀强电场垂直的匀强磁场 B 。当带电粒子从 S_1 进入这一区域后，只有具有某个速度大小的粒子才能从 S_2 通过，这样的装置叫做速度选择器。带电粒子在进入速度选择器前，先在一加速电场中加速，加在形成此加速电场的两极板 P 、 Q 上的电压为 U_1 。粒子所受的重力忽略不计。

(1) 试问：从小孔 S_1 进入速度选择器的粒子，需要具有怎样的速度才能顺利通过小孔 S_2 ？

(2) 带电粒子的电荷量与质量的比叫做**比荷**，它反映了带电粒子的一个基本属性，在科学研究中具有重要的意义。试借助本题提供的物理量，计算出该带电粒子比荷的表达式。

■ **分析** 根据题意，带电粒子必须沿 S_1S_2 做直线运动。为了弄清楚粒子做怎样的直线运动，需要对粒子进行受力分析，然后列出关系式。为了求出粒子的比荷，涉及电荷量 q 和质量 m 这两个物理量，可通过动能定理列出相关方程式。

■ **解答** (1) 设只有速度大小为 v 的带电粒子才能顺利通过速度选择器。进入速度选择器时，带电粒子受到的电场力方向与洛伦兹力方向沿同一直线且方向相反，故两力平衡时，粒子才沿 S_1S_2 做匀速直线运动，从小孔 S_2 通过。因此有

$$qE = qvB \quad (1)$$

其中，电场强度为

$$E = \frac{U_2}{d} \quad (2)$$

由 (1)(2) 两式解得 $v = \frac{U_2}{Bd}$ 。

(2) 设带电粒子的电荷量为 q ，质量为 m ，在加速电场中加速后，以速度大小 v 从小孔 S_1 飞出进入速度选择器。由动能定理得

$$qU_1 = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

将 $v = \frac{U_2}{Bd}$ 代入 (3) 式，即得该粒子的比荷为

$$\frac{q}{m} = \frac{U_2^2}{2B^2d^2U_1}$$

有兴趣的同学可以继续分析计算：带电粒子穿过小孔 S_2 ，进入匀强磁场 B' 后，打在显示屏的什么位置上？

STSE

电子显微镜

生物学、医学、材料科学等领域的研究，都要使用电子显微镜。

电子显微镜是用电子束来代替光束，用磁透镜来代替光学透镜工作的。图 1-3-5 是电子显微镜原理示意图。照射在样品上的电子束，经磁透镜放大成像，再投射在荧光屏上供观察或照相。图 1-3-6 是用电子显微镜拍摄的生物细胞照片。

2003 年，人类受到了 SARS 的严重威胁。

SARS 是英语 Severe Acute Respiratory Syndrome 的缩写，意思是“严重急性呼吸综合征”，我国称之为“非典型肺炎”，简称“非典”。在与“非典”的斗争中，病毒学家在实验室夜以继日地工作，用电子显微镜找到了“非典”的病原体——一种特殊的“冠状病毒”（图 1-3-7），为研究与防治 SARS 作出了贡献。

现代的电子显微镜均装备了先进的电子计算机，可以在显示器上扫描出一排排原子的晶格图

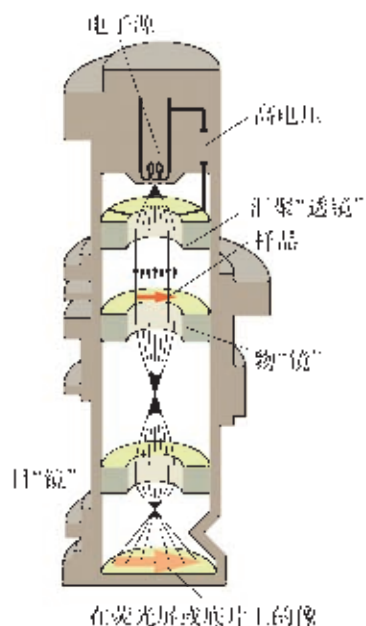


图 1-3-5 电子显微镜原理示意图

像。高级的扫描隧穿显微镜的分辨率已达到 $1.6 \times 10^{-10} \text{ m}$ ，让人们看到了某些重金属原子的投影图像。



图 1-3-6 生物细胞照片

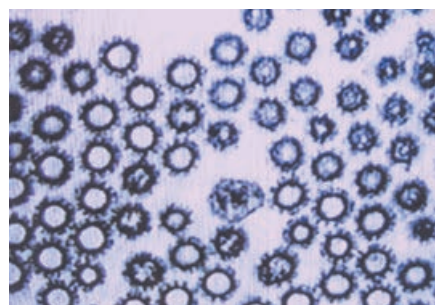


图 1-3-7 “非典”元凶“冠状病毒”照片

家庭作业与活动

1. 我国提供永磁体的阿尔法磁谱仪（图 1-3-8 是它的原理图）由航天飞机携带升空并安装在国际空间站中，它的主要使命之一是探索宇宙中的反物质。所谓反物质，就是质量与正粒子相等、电荷量与正粒子相等但电性相反的粒子。假如使一束质子、反质子、 α 粒子（ ${}^4_2\text{He}$ 核）和反 α 粒子组成的射线，以相同的速度大小沿 OO' 通过匀强磁场 B_1 进入匀强磁场 B_2 而形成图中的 4 条径迹，则（ ）。

- A. 1、3 是反粒子径迹
B. 2 为反质子径迹

- C. 1、2 为反粒子径迹
D. 3 为 α 粒子径迹

2. “人造小太阳”托卡马克装置使用强磁场约束高温等离子体，使其中的带电粒子尽可能地被限制在装置内部，而不与装置器壁碰撞。已知等离子体中带电粒子的平均动能与等离子体的温度 T 成正比。为了约束更高温度的等离子体，需要更强的磁场，以使带电粒子在磁场中的运动半径不变。由此可判断所需的磁感应强度 B 正比于（ ）。

- A. $\sqrt{T}$ B. T C. $\sqrt{T^3}$ D. T^2

3. 下列有关回旋加速器工作原理的说法中，正确的是（ ）。

- A. 电场和磁场都对带电粒子起加速作用
B. 电场和磁场是交替地对带电粒子做功的
C. 粒子做圆周运动的半径与粒子的比荷、速度以及磁场的强弱均有关
D. 交变电场改变的周期与粒子做圆周运动的周期应该同步，才能使粒子正常加速

4. 图 1-3-9 是带电粒子的速度选择器示意图。

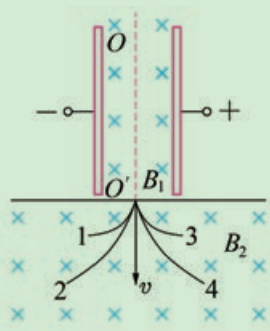


图 1-3-8

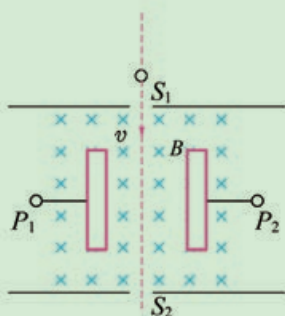


图 1-3-9

若要使该速度选择器正常工作，则下列说法中正确的是（ ）。

- A. P_1 的电势必须高于 P_2 的电势
- B. 匀强磁场的磁感应强度 B 、匀强电场的电场强度 E 和被选择的粒子的速度大小 v 应满足 $v = BE$
- C. 从 S_2 出来的只能是带正电荷的粒子，不可能是带负电荷的粒子
- D. 如果把正常工作时的 B 和 E 的方向都改变为原来的相反方向，那么选择器同样正常工作

5. 磁流体发电是一项新兴技术，它可以把物体的内能直接转化为电能。图 1-3-10 是它的示意图：平行金属板 M 、 N 之间有一个很强的磁场，将一束等离子体（即高温下电离的气体，含有大量正、负离子）喷入磁场， M 、 N 两板间便产生电压。如果把 M 、 N 和用电器 R 连接， M 、 N 就是直流电源的两个电极。设 M 、 N 两板间的距离为 d ，磁感应强度为 B ，等离子体以速度 v 沿垂直于磁场的方向射入 M 、 N 两板之间，则下列说法中正确的是（ ）。
- A. M 是直流电源的正极
 - B. N 是直流电源的正极
 - C. 电源的电动势为 Bdv
 - D. 电源的电动势为 qvB

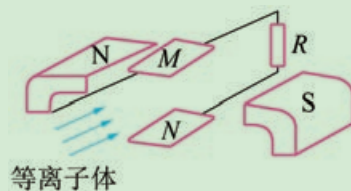


图 1-3-10

课题研究

洛伦兹力在现代科技中的应用研究

洛伦兹力除了在速度选择器、回旋加速器方面有着非凡的应用之外，还有其他更为广泛的应用，例如：磁流体发电机、电磁流量计、同步辐射光源等。

请参考下面的案例，上网或去图书馆查阅相关资料，撰写一篇洛伦兹力在某一方面应用的科学报告。在报告中要详细阐述应用的背景资料和工作原理，说明洛伦兹力在其中发挥的作用，以及该案例的应用前景等。

应用案例：电磁流量计

图 1-3-11 所示的是电磁流量计的原理示意图。电磁流量计是随着电子技术的发展而迅速

发展起来的新型流量测量仪表。电磁流量计的基本原理是：流体流经流量计的磁场区域时，受到磁场对其中带电粒子的作用发生偏移，在两个测量极之间形成一定的电势差（电压），通过测量该电势差，并根据一定的转换公式，可以得知相应的流体流量。

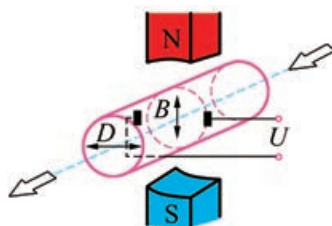


图 1-3-11

第1章 家庭作业与活动

A 组

1. 如图 1-A-1 所示, a 、 b 是两个相同的能在同一个光滑绝缘圆柱体上自由移动的轻质铝环。现将 I_1 、 I_2 两个大小不同的电流按图示方向分别通入 a 、 b 两个铝环, 则两个铝环的运动情况是 ()。

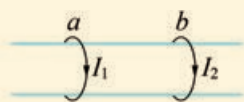


图 1-A-1

- A. 都绕圆柱体运动
B. 彼此相向运动, 且具有大小相等的加速度
C. 彼此相向运动, 且电流大的加速度大
D. 彼此背向运动, 且电流大的加速度大
2. 图 1-A-2 是洛伦兹力演示仪的结构图。励磁线圈产生的匀强磁场方向垂直纸面向外, 电子束由电子枪产生, 其速度方向与磁场方向垂直。电子的速度大小可通过电子枪的加速电压来控制, 磁场的强弱可通过励磁线圈的电流来调节。下列说法中正确的是 ()。

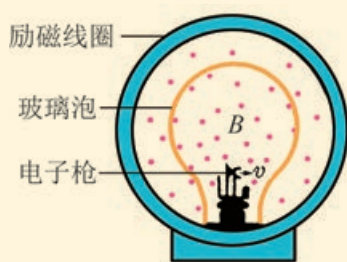


图 1-A-2

- A. 仅增大励磁线圈的电流, 电子束径迹的半径变大
B. 仅提高电子枪的加速电压, 电子束径迹的半径变大
C. 仅增大励磁线圈的电流, 电子做圆周运动的周期将变大
D. 仅提高电子枪的加速电压, 电子做圆周运动的周期将变大

的周期将变大

3. 20 世纪 40 年代, 我国物理学家朱洪元提出: 电子在加速器中做匀速圆周运动时会发生“同步辐射光”, 光的频率是电子回转频率的 n 倍。设同步辐射光频率为 f , 电子质量为 m , 电荷量为 e , 则加速器磁场的磁感应强度 B 的大小为_____。若电子的回转半径为 R , 则它的速率为_____。
4. 图 1-A-3 是质谱仪的工作原理示意图。带电粒子被加速电场加速后, 进入速度选择器。速度选择器内有相互正交的匀强磁场和匀强电场, 匀强磁场的磁感应强度为 B , 匀强电场的电场强度为 E 。平板 S 上有可让粒子通过的狭缝 P 和记录粒子位置的胶片 A_1A_2 , 平板 S 下方有磁感应强度为 B_0 的匀强磁场, 则下列说法中正确的是 ()。

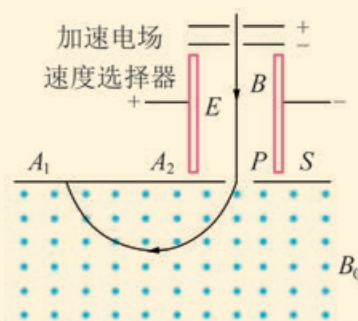


图 1-A-3

- A. 质谱仪是分析同位素的重要工具
B. 速度选择器中的磁场方向垂直纸面向外
C. 能通过狭缝 P 的带电粒子的速率等于 $\frac{E}{B}$
D. 粒子打在胶片上的位置越靠近狭缝 P , 粒子的比荷越小
5. 如图 1-A-4 所示, 将长为 50 cm、质量为 10 g 的均匀金属棒 ab 的两端用两个相同的弹簧悬挂成水平状态, 并置于垂直于纸面向里的匀强磁场中。当金属棒中通以 0.4 A 的电流时, 弹簧恰好不伸长。 g 取 10 m/s^2 。

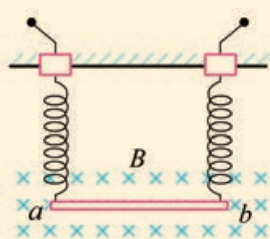


图 1-A-4

- (1) 求匀强磁场的磁感应强度的大小。
- (2) 当金属棒中通过大小为 0.2 A、方向由 a 到 b 的电流时，弹簧伸长 1 cm。如果电流方向由 b 到 a ，而电流大小不变，那么弹簧伸长又是多少？

B 组

1. 如图 1-B-1 所示，两个质量和所带电荷量均相等的带电粒子 a 、 b ，以不同的速度大小沿着 AO 方向射入圆形匀强磁场区域，它们的运动轨迹如图所示。若不计粒子所受的重力，则下列说法中正确的是（ ）。

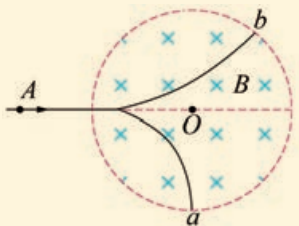


图 1-B-1

- A. a 粒子带正电荷， b 粒子带负电荷
- B. a 粒子在磁场中所受洛伦兹力较大
- C. b 粒子的动能较大
- D. b 粒子在磁场中的运动时间较长

2. 图 1-B-2 是一种测量磁感应强度的简易装置的示意图，虚线框内有垂直于纸面的匀强磁场，矩形线圈匝数为 N ， $ab = dc = L_1$ ， $bc = ad = L_2$ 。当线圈不通电流时，弹簧测力计的示数为 T_1 ；当线圈中通入沿顺时针方向的恒定电流 I 时，弹簧测力计的示数为 T_2 ($T_2 > T_1$)，则磁感应强度 B 的大小为_____，磁场方向垂直纸面向_____。

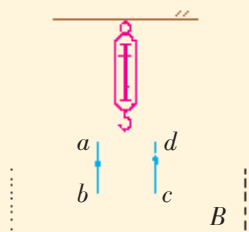


图 1-B-2

3. 如图 1-B-3 所示，在倾角为 37° 的光滑斜面上有一根长为 0.4 m、质量为 6×10^{-2} kg 的通电直导线，其电流大小 $I = 1$ A，方向垂直纸面向外。导线用平行于斜面的轻绳拴住不动，整个装置放在磁感应强度 B 每秒增加 0.4 T、方向竖直向上的磁场中。设 $t = 0$ 时， $B = 0$ ，则需要多长时间才能使斜面对导线的支持力变为零？ g 取 10 m/s^2 。

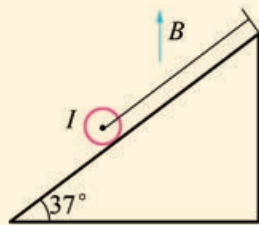


图 1-B-3



第2章 电磁感应与现代生活

走进现代家庭，各种电器琳琅满目。柔和的灯光温馨袭人，优雅的音乐中春意盎然，七彩缤纷的屏幕上风光无限，冰箱里清凉长存。智能化的设备和发达的通信网络更是为你营造出一份悠然和舒适：卧室里扫地机器人正在四处搜寻“扫荡”；客厅里父母亲正在与相隔天涯的亲友亲密交流……

享受着现代化生活的你或许不曾想到，这一切，源于一个物理学的重大发现——电磁感应现象。

本章应用磁感线等模型，探究影响感应电流产生的因素。通过对法拉第电磁感应定律和楞次定律的科学探究，学习从实验归纳和理论演绎研究物理问题，了解电磁感应与现代生活的密切关系。

2.1 感应电流产生的条件

1821年，奥斯特电流磁效应的发现和接踵而来的研究成果，极大地激励了物理学界。法拉第从1822年起即致力于“把磁转化为电”的研究，在漫长艰难的历程中，他经历了一次又一次失败，但是他始终信念坚定，执着探索。

十年磨一剑，1831年10月，法拉第终于找到了开启电能宝库的“金钥匙”：“把磁转变为电”不是一种稳态效应，而是一种在变化、运动过程中才会出现的效应。

法拉第把这种由磁得到电的现象叫做**电磁感应**（electromagnetic induction）现象。在电磁感应现象中产生的电流叫做**感应电流**（induction current）。

怎样才能产生感应电流呢？

探究感应电流产生的条件

在初中我们研究过，当闭合电路的一部分导体做切割磁感线运动时会产生感应电流，如图2-1-1所示。

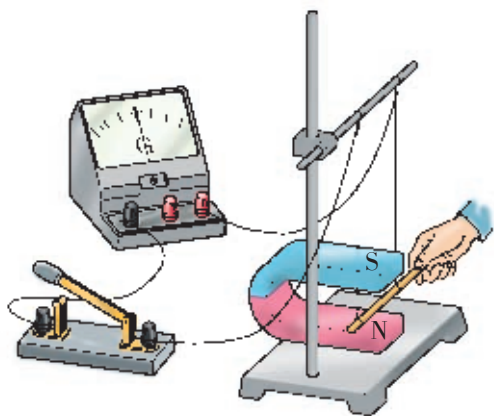


图 2-1-1 导体切割磁感线产生感应电流

“切割磁感线运动”是产生感应电流的必要条件吗？

实验探究 1

实验装置如图2-1-2所示。请观察：在将磁铁的某个磁极插入线圈、静止在线圈中和从线圈中拔出的过程中，线圈中是否有电流产生？如果有，请记录实验现象和线圈中感应电流的方向。

对比图2-1-1中的实验，对产生感应电流的条件，你有什么新的认识？

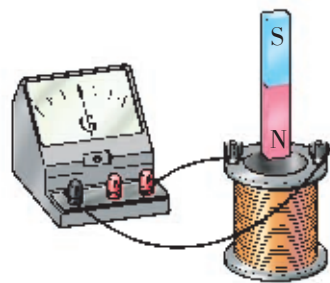


图 2-1-2 条形磁铁和线圈有相对运动，就会产生感应电流

实验探究 2

不做实验，任何预测都没有意义。理论再好，没有实验，预测就没有任何实际意义。

——丁肇中

实验装置如图 2-1-3 所示，原线圈 A 跟滑动变阻器、开关、电源连接成闭合电路，副线圈 B 跟电流计连接成另一个闭合电路。把原线圈 A 放入副线圈 B 中。

请探究：在怎样的情况下，副线圈中有感应电流？感应电流是持续的吗？

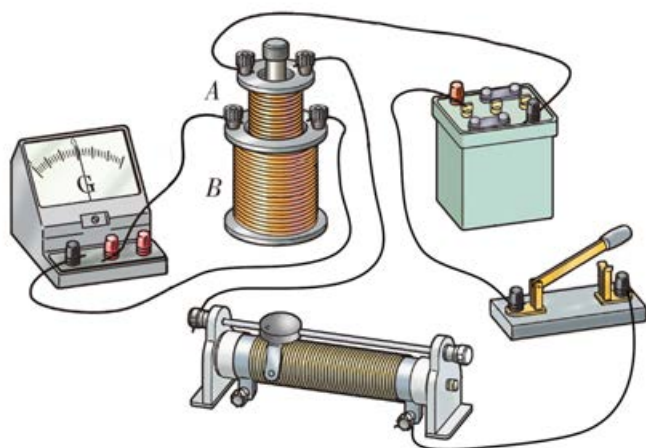


图 2-1-3 改变原线圈中的电流，在副线圈中产生感应电流

请讨论：

1. 在开关闭合和断开的瞬间，副线圈 B 中的磁通量是怎样变化（增加或减少）的？
2. 请从磁通量变化的角度，总结出闭合电路中产生感应电流的条件。

分析与论证

感应电流产生的条件

在实验探究 1 中，在磁铁插入线圈或从线圈中拔出的过程中，穿过闭合线圈的磁通量在增加或减少（图 2-1-4）。

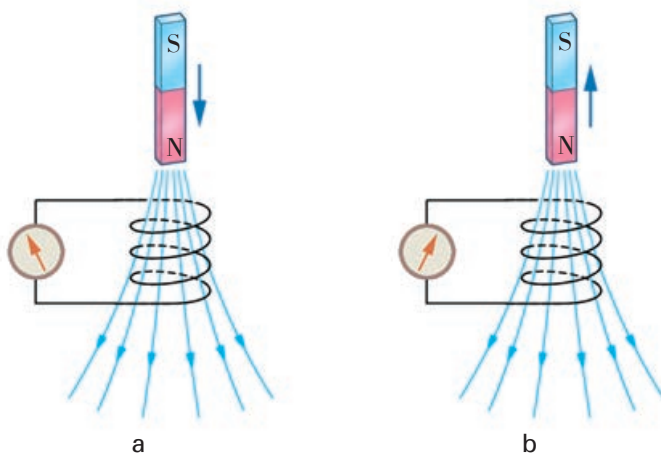


图 2-1-4 磁铁插入线圈和从线圈中拔出时，穿过闭合线圈的磁通量发生变化

在实验探究2中,当开关闭合(或断开),或闭合开关后迅速移动滑动变阻器的滑片(原线圈A中电流发生变化)时,或在闭合开关后拔出(或插入)铁芯的过程中,穿过副线圈B的磁通量都会发生变化(图2-1-5)。

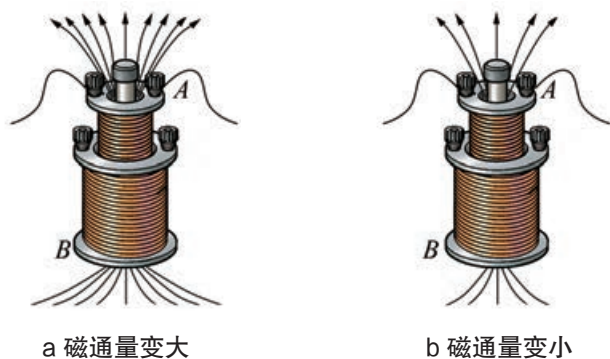


图2-1-5 原线圈A中电流的变化,导致穿过副线圈B的磁通量发生变化

大量实验表明:只要穿过闭合电路的磁通量发生变化,闭合电路中就会产生感应电流。

案例分析

案例 一线圈 $abcd$ 位于如图2-1-6所示的匀强磁场中。要使线圈中产生感应电流,应采取什么措施?

分析 使电路中产生感应电流的条件之一是电路必须闭合,本案例的线圈符合此条件。

使电路中产生感应电流的另一条件是穿过闭合电路的磁通量发生变化。那么怎样才能满足这个条件呢?

请根据以上分析,提出你的解决办法。

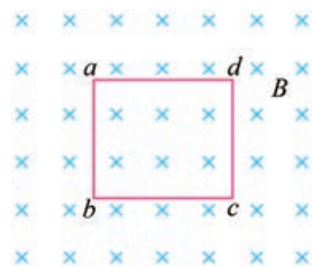


图2-1-6 匀强磁场中的线圈

电磁感应使人类找到了机械能与电能之间转换的途径,为人类打开了通向电气化的大门。一批有才智的发明家,根据电磁感应原理设计制造出了发电机、变压器等一大批造福人类的电器,搭建了从城市到农村的输电网络,改变了人类的生活,促进了社会发展,引发了世界性的技术革命浪潮。



图2-1-7 根据电磁感应原理设计制造的一些电器

与法拉第同时代的一些科学家 对“磁生电”的探索

真理从安培眼皮下溜走

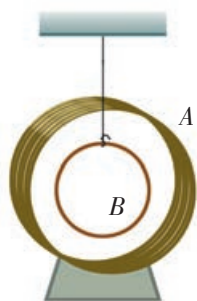


图 2-1-8 安培的实验装置

安培曾于 1822 年做了许多实验，其中的一个实验装置如图 2-1-8 所示。将一个铜质多匝线圈 A 固定在绝缘架上，将另一单匝线圈 B 用细线悬挂起来，两者在同一平面内。然后在线圈 A 中通以强电流，再用一个强磁性磁铁接近线圈 B。安培认为，线圈

B 中应该感应出电流。

在实验过程中，在线圈 A 通电的瞬间，线圈 B 动了一下。由于安培缺乏思想准备，这一瞬间现象所包含着的真理，就从他的眼皮下溜走了。

科拉顿跑失良机

1832 年，瑞士物理学家德拉里夫（A. de la Rive）的助手科拉顿，将一个螺线管与电流计相连。为了避免强磁场的影响，他把电流计用长导线连着放到另外一个房间内。当他把磁铁投入螺线管中后，只好自己跑到另一个房间去观察。十分可惜，他未能来得及观察到电流计指针的偏转。后来有位科学家感叹道：“可怜的科拉顿，在跑来跑去中丢失了良机。”

追悔莫及的亨利

美国物理学家亨利当时是奥尔巴尼学院的教授，由于教学任务繁重，也没有专门的实验室，他主要利用假期在学院的大厅里进行电学实验。

1829 年 8 月的暑假，亨利在研究绕有不同

长度导线的电磁铁所产生磁力的大小时，意外地发现，如果通电导线中电流被突然切断，就会产生强烈的电火花。当时亨利无法解释这个现象，这一重要发现被搁置下来了。

1830 年 8 月的暑假，亨利继续上次的实验。当电磁铁导线中突然通入强电流时，他发现电流计的指针向一个方向偏转；当电磁铁导线中电流突然消失时，电流计的指针反向偏转；当电磁铁导线中电流保持稳定时，电流计的指针不偏转。亨利对这一现象感到很奇怪，但暑假结束了，他只得停止实验。

到了 1832 年 6 月，亨利在杂志上看到了法拉第在 1831 年所做的电磁感应实验的简讯，立即痛苦地意识到，法拉第的发现与自己两年前的发现相类似。他马上用自己的旧仪器进一步完善了过去的实验，并把自己前前后后做的实验做了一个总结，写成论文。即使这样，在发现电磁感应现象这件事上，亨利只能屈居第二了。



亨利（J. Henry, 1797—1878），美国物理学家。从事电磁学方面的研究工作，发明电磁继电器和感应线圈，设计了第一台电动机，发现了自感现象和变压器工作的基本定律。

家庭作业与活动

1. 如图 2-1-9 所示, 在匀强磁场中有一个闭合的弹簧线圈。你能采取哪些措施使该线圈中产生感应电流? 为什么?

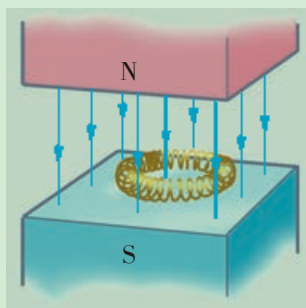


图 2-1-9

2. 关于电磁感应, 下列说法中正确的是()。
- 导体相对磁场运动, 导体内一定会产生感应电流
 - 导体做切割磁感线运动, 导体内一定会产生感应电流
 - 闭合电路在磁场内做切割磁感线运动, 导体内一定会产生感应电流
 - 穿过闭合电路的磁通量发生变化, 电路中就一定有感应电流
3. 如图 2-1-10 所示, 矩形导电线圈 $abcd$ 位于通电长直导线附近, 导电线圈平面跟导线位于同一平面, 且线圈的一组对边跟导线平行。请你设计出尽可能多的方法, 使矩形线圈中有感应电流产生。

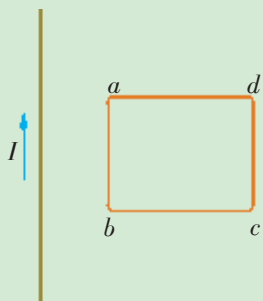
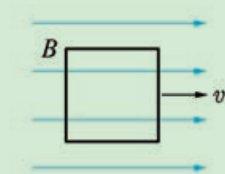


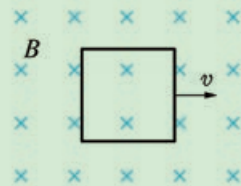
图 2-1-10

4. 如图 2-1-11 所示, 有一矩形闭合导电线圈,

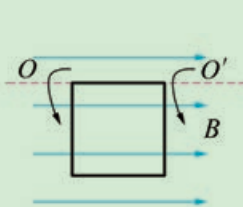
在足够大的匀强磁场中运动, 其中能产生感应电流的是图()。



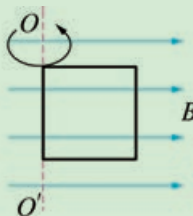
A. 矩形导电线圈平面平行于磁场方向向右平移



B. 矩形导电线圈平面垂直于磁场方向向右平移



C. 矩形导电线圈绕水平轴 OO' 匀速转动



D. 矩形导电线圈绕竖直轴 OO' 匀速转动

图 2-1-11

5. 如图 2-1-12 所示, 两个导电线圈分别绕在一个铁环上, 线圈 A 接直流电源, 线圈 B 接电流计。在下列情况中, 线圈 B 中不可能产生感应电流的是()。
- 在开关 S 接通或断开的瞬间
 - 开关 S 接通一段时间之后
 - 开关 S 接通后, 在改变滑动变阻器 R_P 的滑片 P 位置的过程中
 - 拿走铁环, 再做这个实验, 在开关 S 接通或断开的瞬间

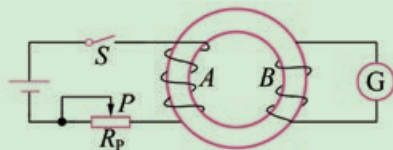


图 2-1-12

2.2 感应电流的方向——楞次定律

在探究产生感应电流条件的实验中，当磁铁插入线圈或从线圈中拔出时，电流计的指针有时向右偏转，有时向左偏转。这说明，在不同情况下，感应电流的方向是不同的。

那么，感应电流的方向与哪些因素有关呢？

探究感应电流的方向

学生必做实验

探究影响感应电流方向的因素

设计实验

实验装置如图 2-2-1 所示，用两根细线悬挂一个很轻的、可自由摆动的铝环（直径约为 5 cm），另取条形磁铁一块。

- 1. 把条形磁铁的一极（如图示的 N 极）向铝环靠近时，观察铝环的运动情况。
- 2. 当条形磁铁离开铝环时，又会发生什么现象？

收集信息

把实验中观察到的现象记录在下表中。

磁铁的运动	N 极靠近铝环	N 极远离铝环	S 极靠近铝环	S 极远离铝环
磁铁的运动示意图				
铝环的运动(选填“被排斥”或“被吸引”)				

实验表明：当条形磁铁（无论是 N 极还是 S 极）靠近铝环时，铝环都被排斥；当条形磁铁远离铝环时，铝环被吸引。

铝环是非铁磁性物体，它为什么会被磁铁排斥和吸引呢？

分析论证

上述实验中，磁铁相对于铝环运动时，穿过铝环的磁通量发生了变化，铝环中产生了感应电流。感应电流也会产生磁场，磁场的方向与感应电流的方向有关。磁铁与铝环之间的排斥和吸引，都是缘于感应电流磁场与磁铁磁场的相互作用。

请讨论：

1. 当磁铁靠近铝环时，铝环中感应电流的磁场方向与磁铁的磁场方向相同还是相反？铝环中感应电流的方向如何？
2. 当磁铁离开铝环时，铝环中感应电流的磁场方向与磁铁的磁场方向相同还是相反？铝环中感应电流的方向如何？

由上面的分析可知：感应电流的磁场方向与条形磁铁的磁场方向有时相同，有时相反。这又是为什么呢？

对这个问题，需要对铝环中引起感应电流的磁通量的变化作进一步分析。

图 2-2-2 a 是条形磁铁靠近铝环时的情况，图 2-2-2 b 是条形磁铁离开铝环时的情况。蓝色细线表示条形磁铁磁场的磁感线；红色细线表示感应电流磁场的磁感线。

请讨论：

1. 当磁铁靠近铝环时，穿过铝环的磁通量是增大还是减小？铝环中感应电流的磁场跟原磁场的方向相同还是相反？
2. 当磁铁离开铝环时，穿过铝环的磁通量是增大还是减小？铝环中感应电流的磁场跟原磁场的方向相同还是相反？

实验证明：当闭合电路中原磁场的磁通量增大时，感应电流的磁场跟原磁场方向相反，阻碍原磁场磁通量的增大；当闭合电路中原磁场的磁通量减小时，感应电流的磁场与原磁场方向相同，阻碍原磁场磁通量的减小。

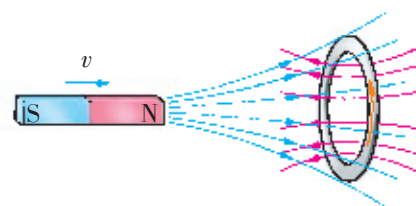
楞次定律

1834 年，俄国物理学家楞次对产生感应电流的许多实验事实进行分析研究，对感应电流的方向得出如下结论：

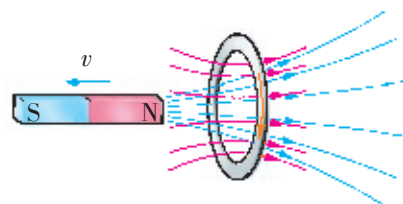
感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。这个结论叫做楞次定律（Lenz's law）。

请讨论：

如何理解楞次定律中的“阻碍”两字？有人认为，阻碍就是感应电流的磁场跟引起感应电流的磁场方向相反；也有人认为，阻碍就是不变化；还有人认为，阻碍就是阻止。请说说你



a 磁铁靠近铝环



b 磁铁离开铝环

图 2-2-2 研究铝环中磁通量变化的示意图



楞次（Э. Х. Ленц，1804—1865），俄国物理学家。生于爱沙尼亚。1836 年起任圣彼得堡大学教授。除发现楞次定律外，还与焦耳各自独立地发现电流通过导体时的热效应定律——焦耳—楞次定律。

的看法。

请思考：

如何利用楞次定律判断感应电流的方向？

电磁感应中的能量转化

在探究楞次定律的实验中，我们已经认识到：感应电流的磁场总要阻碍磁铁相对于铝环的运动。产生电磁感应的过程，是外力克服磁场力做功的过程。通过外力做功，磁铁运动的机械能转化为铝环的电能。

请讨论：

为什么当磁铁靠近铝环时它们总是相互排斥？当磁铁离开铝环时它们总是相互吸引？是否会出现相反的情况呢？为什么？

案例分析

案例1 如图 2-2-3 所示，有一个导电线圈从条形磁铁正上方下落，依次经过 a 、 b 、 c 三个位置。请用楞次定律判断，在经过 a 、 b 、 c 三个位置时线圈中感应电流的方向。

分析 本案例的研究对象是下落的导电线圈。我们知道，条形磁铁周围的磁场分布是不均匀的，越靠近磁极，磁感应强度越强，磁铁中部可认为磁感线方向与磁铁轴线平行。当导电线圈从磁铁上方下落至 a 处的过程中，穿过线圈的磁通量在增大；当导电线圈在磁铁下方下落的过程中，穿过线圈的磁通量在减小。

解答 从导电线圈上方看线圈中感应电流的方向。在条形磁铁上方的 a 位置，条形磁铁的磁场方向向上，导电线圈经过 a 位置瞬间，穿过线圈的磁通量在增大。根据楞次定律，导电线圈中感应电流产生的磁场方向应向下（阻碍线圈中磁通量的增大）；用右手螺旋定则判断出，在该位置导电线圈中的感应电流从上往下看是顺时针方向。

导电线圈经过 b 位置瞬间，因该位置各点的磁场方向平行，穿过线圈的磁通量无变化，故线圈中无感应电流产生。

请你判断导电线圈经过 c 位置瞬间的感应电流方向。

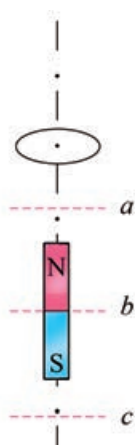


图 2-2-3

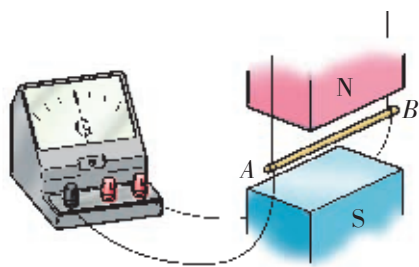


图 2-2-4 导体切割磁感线产生感应电流

案例2 当闭合电路的一部分导体做切割磁感线运动时，怎样确定感应电流的方向呢？在图 2-2-4 中，如果导体棒 AB 向右运动，那么感应电流的方向是怎样的呢？

分析 在如图 2-2-4 所示的电路中，研究对象是导体棒 AB 、导线和电流计组成的闭合电路。导体棒 AB 位于磁场中，

因此磁场的部分磁感线穿过闭合电路。

设导体棒 AB 向右运动，穿过闭合电路中的磁通量将增大。根据楞次定律，导体棒 AB 上的感应电流方向应该是从 A 指向 B 。

英国电气工程学家弗莱明 (J. Fleming) 提出了一种简便的判断方法：

如图 2-2-5 所示，伸开右手，使大拇指跟其余四指垂直，并且都跟手掌在一个平面内。让磁感线垂直从手心进入，大拇指指向导体运动的方向，其余四指所指的方向就是感应电流的方向。此方法叫做右手定则 (right-hand rule)。

请你用右手定则判断图 2-2-4 导体棒 AB (向右或向左运动) 中的感应电流方向，与用楞次定律判断的结果相同吗？如果导体棒 AB 向上或向下运动，有感应电流产生吗？如果做斜向运动呢？

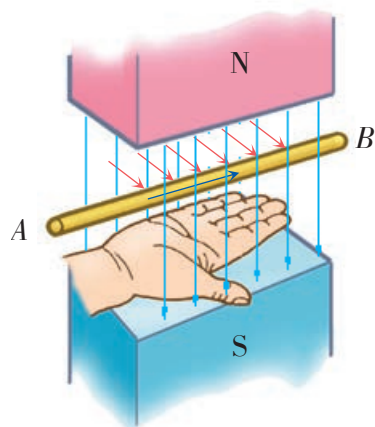


图 2-2-5 右手定则示意图

家庭作业与活动

- 如图 2-2-6 所示，水平放置一个有铁芯的螺线管，在螺线管的一端悬挂着一个轻小的闭合导电线圈，问：闭合开关 S 的瞬间，轻小的闭合导电线圈将怎样运动？

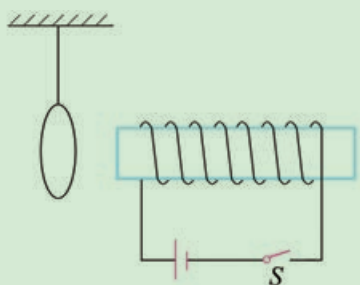


图 2-2-6

- 在图 2-2-7 中， P 为固定闭合电路中一段导体。若使一对异性磁极相对 P 运动，并让 P 始终处于磁场中，则下列说法中正确的是()。

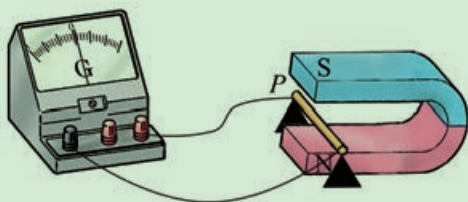


图 2-2-7

- 磁极竖直向上运动时， P 中不产生感应电流
- 磁极竖直向下运动时， P 中产生指向纸面

外的感应电流

- 磁极向左运动时， P 中产生指向纸面内的感应电流
 - 磁极向右运动时， P 中产生指向纸面内的感应电流
- 如图 2-2-8 所示，在一枚长铁钉上用漆包线绕上 A 和 B 两个线圈，将线圈 B 的两端接在一起，并把 CD 段漆包线拉直置于自制的小磁针上方。试判断在用干电池给线圈 A 通电的瞬间，小磁针偏转的方向。做一下这个实验，看看你的判断与实验结果是否一致。

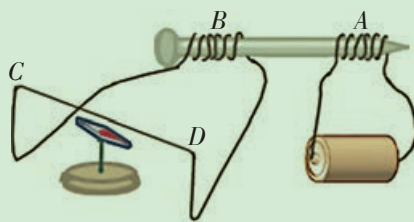


图 2-2-8

- 如图 2-2-9 所示，在水平放置的条形磁铁的 N 极附近，一个闭合导电线圈保持水平地向下运动。在 B 位置线圈平面与 N 极的磁感线正好平行。请判断在从 A 位置到 B 位置、从 B 位置到 C 位置两个过程中，导电线圈中电流的方向。

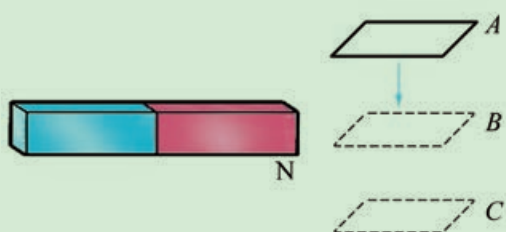


图 2-2-9

5. 某实验小组用如图 2-2-10 所示的实验装置来验证楞次定律。当条形磁铁自上而下穿过固定的导电线圈时，通过电流计的感应电流的方向是（ ）。

- A. $a \rightarrow \text{G} \rightarrow b$
 B. 先 $a \rightarrow \text{G} \rightarrow b$ ，后 $b \rightarrow \text{G} \rightarrow a$
 C. $b \rightarrow \text{G} \rightarrow a$
 D. 先 $b \rightarrow \text{G} \rightarrow a$ ，后 $a \rightarrow \text{G} \rightarrow b$

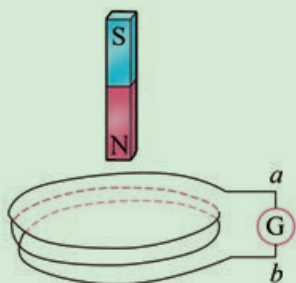


图 2-2-10

6. 如图 2-2-11 所示，光滑的水平桌面上放着 a 和 b 两个完全相同的金属环。如果一条形磁铁的 N 极竖直向下迅速靠近两环，则（ ）。
- A. a 、 b 两环均静止不动
 B. a 、 b 两环互相靠近

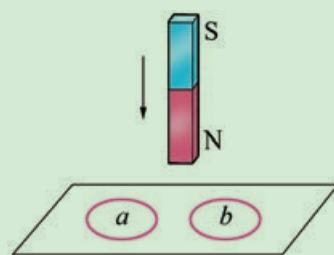


图 2-2-11

- C. a 、 b 两环互相远离
 D. a 、 b 两环均向上跳起

7. 如图 2-2-12 所示，当一块磁体靠近超导体时，超导体中会产生强大的电流，对磁体有排斥作用，这种斥力可以使磁体悬浮在空中。超导磁浮列车就是运用了这个原理。关于这种磁浮现象，下列说法中正确的是（ ）。

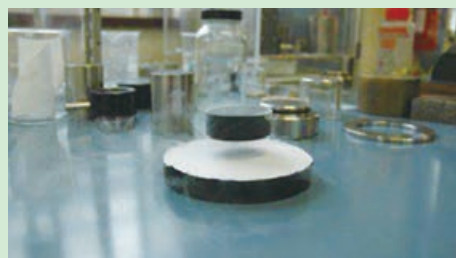


图 2-2-12

- A. 超导体中电流产生的磁场方向与磁体的磁场方向相同
 B. 超导体中电流产生的磁场方向与磁体的磁场方向相反
 C. 超导体使磁体处于失重状态
 D. 超导体对磁体的磁力与磁体受到的重力相平衡

2.3 感应电动势的大小—— 法拉第电磁感应定律

在电磁感应现象中，既然有感应电流产生，那么电路中一定有电动势。电磁感应现象中产生的电动势叫做**感应电动势**（induced electromotive force）。

感应电动势的大小与哪些因素有关呢？

探究感应电动势的大小

只要穿过闭合电路的磁通量发生变化，电路中就会产生感应电动势。那么，感应电动势的大小与磁通量的变化存在怎样的关系呢？

实验探究 感应电动势的大小与磁通量变化的关系

请从图 2-3-1 和图 2-3-2 所示的实验器材组中任选一组进行实验，也可以用 DIS 实验装置（图 2-3-3）进行实验，还可以选择其他实验器材进行实验。

通过实验要弄清以下几个问题：

1. 感应电动势的大小跟磁通量变化的大小有关吗？
2. 感应电动势的大小跟磁通量变化的快慢有关吗？
3. 磁场方向对感应电动势的大小是否有影响？

请写出实验的设计思路和步骤，画出记录表格，记录实验现象，并将你的实验结果与同学讨论交流，得出结论。

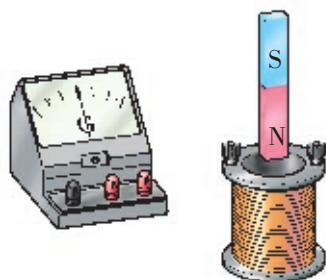


图 2-3-1 探究感应电动势大小的实验器材组之一

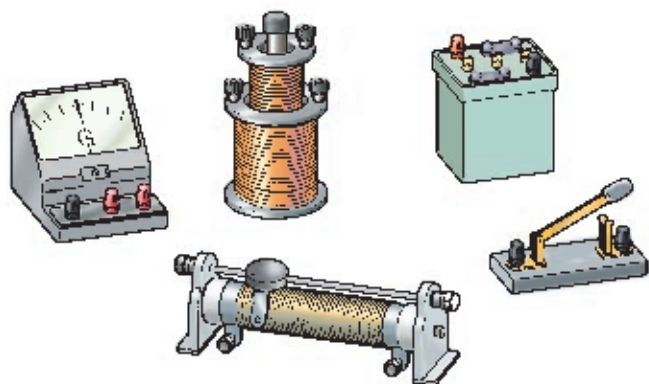


图 2-3-2 探究感应电动势大小的实验器材组之二

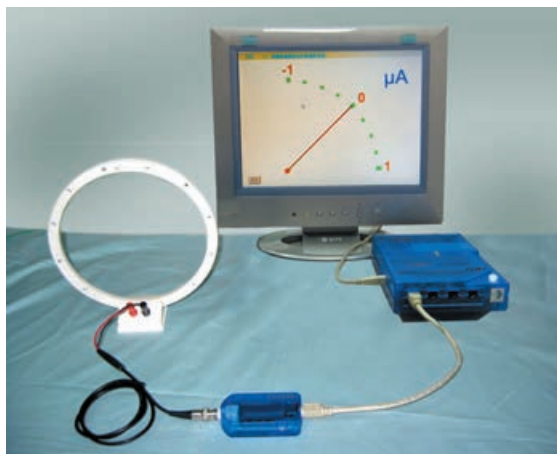


图 2-3-3 用 DIS 实验装置探究感应电动势的大小

法拉第电磁感应定律

实验结果表明，感应电动势的大小只跟穿过闭合电路的磁通量变化的快慢有关。

请思考：

“磁通量变化的大小”与“磁通量变化的快慢”有什么区别？

数学是其他一切科学的理想和模型。

——笛卡儿

精确的实验和理论分析证明：闭合电路中感应电动势的大小，跟穿过这一电路的磁通量的变化率成正比。这就是法拉第电磁感应定律。

感应电动势的大小

用 E 表示感应电动势，用 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 表示磁通量的变化率，则法拉第电磁感应定律的数学表达式为

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

1845 年，德国物理学家诺伊曼（F. Neumann）在法拉第工作的基础上，从理论上导出了感应电动势的定量表达式。5 年后，法拉第又通过实验证明了这个表达式的正确性。

式中， k 是比例系数。在国际单位制中，磁通量的单位是 Wb，时间的单位是 s，感应电动势的单位是 V，采用上述单位时， $k = 1$ 。法拉第电磁感应定律的表达式为

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

在实际的电磁感应电路中，常常采用多匝线圈，多匝线圈可以看成是由多个单匝线圈串联而成。设闭合电路是一个 n 匝线圈，且每匝线圈产生的感应电动势大小相等，则 n 匝线圈产生的感应电动势，就是单匝线圈感应电动势的 n 倍，即

$$E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2)$$

感应电动势的方向

我们知道，感应电流是有方向的，感应电动势也是有方向的，感应电动势的方向跟感应电流的方向相同。也就是说，在电源内部电流从低电势点流向高电势点。

如果感应电动势是由于导体切割磁感线产生的，那么如何计算其大小呢？

导体做切割磁感线运动时产生的感应电动势

如图 2-3-4 所示, 在磁感应强度为 B 的匀强磁场中, 有相距为 L 的两平行金属导轨 dc 和 ef 。 d 、 e 间串联一电流计, 两导轨所在平面跟磁感线垂直。一根金属棒搁在导轨上, 金属棒与导轨垂直。设金属棒经时间 Δt 由位置 ab 以速度 v 匀速运动到位置 a_1b_1 。求金属棒上产生的感应电动势大小。

电流计、金属导轨与金属棒构成一个闭合电路, 穿过此闭合电路的磁通量为

$$\Phi = BS$$

请讨论:

当金属棒从 ab 位置运动到 a_1b_1 位置时, 磁通量 Φ 变化了多少? 磁通量的变化率为多大?

请证明:

金属棒做切割磁感线运动时所产生的感应电动势的大小是

$$E = BLv \quad (3)$$

(3) 式说明, 当导体沿着跟磁感线垂直的方向做切割磁感线运动时, 产生的感应电动势大小等于磁感应强度、导体切割磁感线部分的长度、导体运动速度这三者的乘积。

在国际单位制中, B 、 L 、 v 的单位分别是特 (T)、米 (m) 和米/秒 (m/s), E 的单位是伏 (V)。

如果导体的运动方向与磁感线方向不垂直, 那么此时怎样计算感应电动势的大小呢? 在图 2-3-5 中, 圆点表示金属棒的横截面, 金属棒的运动方向跟金属棒的夹角为 90° , 跟磁感线方向的夹角为 θ 。

请证明:

这时导体做切割磁感线运动时产生的感应电动势大小为

$$E = BLv \sin \theta \quad (4)$$

(1) 式中的感应电动势, 是由于穿过闭合电路的磁通量变化而产生的, 又叫做感生电动势。(3) 式中的感应电动势, 是由于导体在磁场中运动而产生的, 又叫做动生电动势。在一般情况下, 对这两者不加区别, 统称为感应电动势。

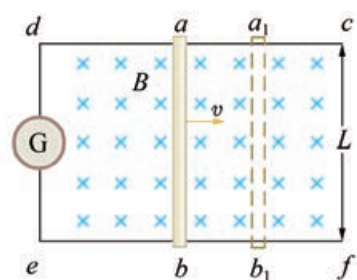


图 2-3-4 金属棒在导轨上移动, 方向跟磁场方向垂直

1851 年, 法拉第在《论磁力线》一文中对电磁感应现象描述道:

“无论导线是垂直地还是倾斜地跨过磁力线, 也无论是沿某一方向或沿另一方向, 该导线都把所跨过的力线所示的力汇总起来……形成电流的力正比于所切割的磁力线数。”(注: 文中的磁力线即我们现在所指的磁感线。)

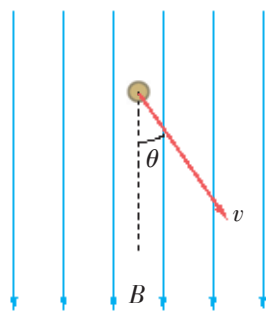


图 2-3-5 导体运动方向与磁感线方向不垂直

案例分析

案例 在图 2-3-4 中, 设电流计相当于一个阻值为 $1\ \Omega$ 的电阻 R , 磁场的磁感应强度 B 为 $0.1\ \text{T}$, 导轨间的距离 L 为 $1\ \text{m}$, 金属棒的电阻为 $1\ \Omega$, 金属棒与导轨接触点的电阻和导轨电阻不计。金属棒在垂直于棒和磁场的恒力 F 作用下, 以 $10\ \text{m/s}$ 的速度从 ab 移动到 a_1b_1 , 移动距离是 $0.5\ \text{m}$ 。

- (1) 求金属棒上产生的感应电动势大小和方向。
- (2) 求施加在金属棒上的外力 F 的大小。
- (3) 求外力 F 的功率和电路电源的总功率。
- (4) 分析在金属棒运动过程中能量的转化情况。

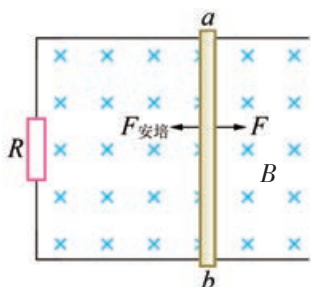


图 2-3-6

分析 从电磁感应的角度看, 由于金属棒切割了磁感线, 闭合电路中有感应电流。当金属棒中有感应电流通过时, 金属棒要受到安培力的作用。由左手定则可知, 安培力的方向与使金属棒运动的外力 F 的方向相反, 如图 2-3-6 所示。

从电路的角度看, 在闭合电路中有电流, 必定有电源。金属棒在磁场中做切割磁感线运动时相当于一个电源, 金属棒中产生的感应电动势就是电源的电动势。金属棒与导轨接触的两点相当于电源的两极, 金属棒与导轨 dc 接触的点相当于电源的正极, 与 ef 接触的点相当于电源的负极。电流计 (电阻为 R) 相当于外电路负载, 金属棒的电阻相当于电源的内阻 r 。这样, 我们可以画出图 2-3-4 的等效电路图, 如图 2-3-7 所示。

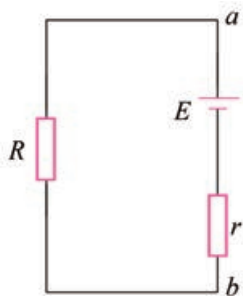


图 2-3-7 等效电路图

■ 解答

(1) 运动过程中金属棒垂直切割磁感线, 金属棒是闭合电路的电源, 产生的感应电动势为

$$E = BLv = 0.1 \times 1 \times 10\ \text{V} = 1\ \text{V}$$

感应电动势的方向从 b 指向 a 。

(2) 电路中的电流

$$I = \frac{E}{R+r} = \frac{1}{1+1}\ \text{A} = 0.5\ \text{A}$$

金属棒在磁感应强度为 B 的磁场中受到的安培力

$$F_{\text{安培}} = ILB = 0.5 \times 1 \times 0.1\ \text{N} = 0.05\ \text{N}$$

安培力的方向向左, 阻碍金属棒运动。

为了保持金属棒做匀速直线运动, 外力的大小 $F = F_{\text{安培}} = 0.05\ \text{N}$, 外力 F 的方向向右。

(3) 外力 F 的功率

$$P = Fv = 0.05 \times 10\ \text{W} = 0.5\ \text{W}$$

金属棒电源的总功率

$$P_{\text{电源}} = EI = 1 \times 0.5\ \text{W} = 0.5\ \text{W}$$

(4) 本例中, 外力 F 克服安培力做了多少功, 就将多少其他形式的能转变成了电能。在电路中, 电流做功, 把全部电能转化成内能。

家庭作业与活动

1. 关于感应电动势, 下列说法中正确的是 ()。

- A. 穿过导电线圈的磁通量越大, 产生的感应电动势越大
- B. 穿过导电线圈的磁通量的变化越大, 产生的感应电动势越大
- C. 穿过导电线圈的磁通量变化越快, 产生的感应电动势越大
- D. 穿过导电线圈的磁通量为零, 产生的感应电动势一定为零

2. 关于感应电动势的计算公式 $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 和 $E = BLv$, 下列说法中正确的是 ()。

- A. 这两个公式是完全相同的
- B. 这两个公式是完全不同的
- C. 后面的公式是由前面的公式在导体垂直切割磁感线情形下推导出来的特例
- D. 前面的公式可求感生电动势, 后面的公式可求动生电动势

3. 有一个 1 000 匝的导电线圈, 在 0.4 s 内通过它的磁通量从 0.02 Wb 增大到 0.10 Wb, 求线圈中的感应电动势大小。如果导电线圈的电阻是 10 Ω , 把一个电阻为 990 Ω 的电热器接在线圈两端, 那么通过电热器的电流是多大? 在这段时间内, 电热器产生的热量是多少? 导电线圈内部产生的热量是多少?

4. 根据法拉第电磁感应定律的数学表达式, 电动势的单位 V 可表示为 ()。

- A. T/s
- B. Wb/s
- C. T $\cdot$ m²/s
- D. Wb $\cdot$ m²/s

5. 如图 2-3-8 所示, 在虚线圆周内有一均匀的磁场, 磁场的磁感应强度 B 正以 0.1 T/s 的变化率减小。现在圆周内放一金属圆环, 圆环平面

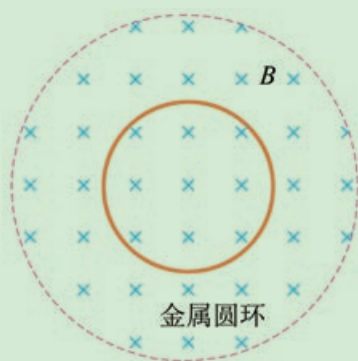


图 2-3-8

垂直磁场。已知圆环的半径为 0.1 m。问:

- (1) 圆环中产生的感应电动势为多大?
- (2) 若圆环的电阻为 1 Ω , 则圆环中的电流为多大?
- (3) 若在圆环上某处断开形成两个端点, 在这两个端点之间接入一个 4 Ω 的电阻, 则这两个端点之间的电压为多少? 设圆环的电阻保持不变。

6. 如图 2-3-9 所示, MN 、 PQ 为两条平行放置的金属导轨, 导轨左端接电阻 R , 磁感应强度为 B 的匀强磁场垂直于导轨平面。金属棒 ab 接触良好地斜放在两导轨之间, 与导轨的夹角 θ 为 60° , 两个触点之间的长度为 L , 电阻为 r 。若金属棒 ab 以速度 v 水平向右匀速运动, 不计导轨的电阻, 则通过金属棒的电流为多大? a 、 b 之间的电压为多大?

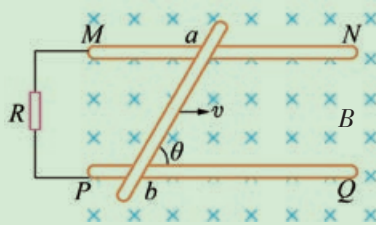


图 2-3-9

7. 1992 年和 1996 年, 美国科学家分别在“亚特兰蒂斯”号和“哥伦比亚”号航天飞机上进行了一种卫星悬绳发电实验。虽然这两次实验都并不太成功, 但是实验目的达到了, 悬绳两端确实产生了感应电动势。

设航天飞机在地球赤道上空的圆形轨道上飞行, 速度为 7.5 km/s ; 地磁场在航天飞机飞行轨道附近的磁感应强度 $B \approx 0.50 \times 10^{-4} \text{ T}$; 从航天飞机发射出的一颗卫星, 由一根长 $L = 20 \text{ km}$ 的金属悬绳与航天飞机相连, 悬绳方向指向地心, 悬绳电阻 $r \approx 800 \Omega$, 结果在悬绳两端产生了感应电动势。问:

- (1) 这种悬绳发电实验的原理是什么?
- (2) 悬绳上产生的感应电动势有多大?

8. 如图 2-3-10 所示, 在磁感应强度为 0.5 T 的匀强磁场中, 让长 $L = 0.2 \text{ m}$ 、电阻 $r = 1 \Omega$ 的导体棒 MN 在无摩擦的框架上以 $v = 5 \text{ m/s}$ 的速度向右做匀速直线运动, 电阻 $R_1 = R_2 = 2 \Omega$, 其

他导体的电阻不计。

- (1) 导体棒 MN 中产生的感应电动势为多大? 流经导体棒 MN 的电流为多少?
- (2) 导体棒 MN 中产生的电功率为多大?
- (3) 驱动导体棒做匀速直线运动的外力为多大? 外力的功率为多大?
- (4) 外电阻 R_1 、 R_2 及内阻 r 上分别消耗了多少电功率?
- (5) 通过定量检验, 说明这个过程中是否符合能量的转化和守恒。

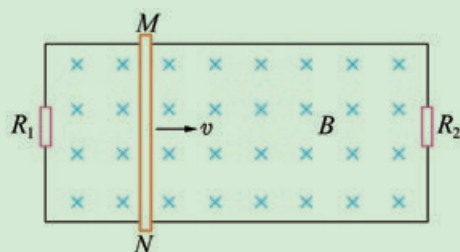


图 2-3-10

2.4 电磁感应的案例分析

案例1 图 2-4-1 是法拉第圆盘发电机的实物图，图 2-4-2 是法拉第圆盘发电机的原理图。由图 2-4-2 可知，法拉第圆盘发电机的铜盘安装在水平转轴上，它的盘面放在两个磁极之间，两块铜刷 C 、 D 分别与转轴和铜盘边缘接触。用动力驱动铜盘转动，闭合电路中的电阻 R 上就有持续的电流通过。请回答以下问题：

(1) 圆盘发电机的原理是什么？

(2) 当圆盘按图示方向转动时，通过电阻 R 的电流方向如何？

(3) 如果圆盘的半径为 r ，两个磁极间的磁感应强度为 B ，圆盘转动的角速度为 ω ，那么这台发电机的电动势是多少？

分析 圆盘可看作是由 N 条长度为半径 r 的导线组成的，这样，圆盘上任一条长度为半径 r 的导线在磁场中转过一角度时（如图 2-4-2 中的蓝实线所示），均会引起磁通量的变化，在沿半径方向产生感应电动势。

这个问题也可从导线切割磁感线角度分析。在图 2-4-2 中，转动的圆盘上任意一条半径 CD 都在切割磁感线，这条半径可以看成是一个电源。

解答

(1) 请根据分析，写出解答。

(2) 如图 2-4-2 所示，根据右手定则可以判定， C 点的电势比 D 点的电势高，也就是说，当在 C 、 D 之间接上用电器时，在外电路上，电流从 C 点流出，流经电阻 R 回到 D 点。

(3) 如图 2-4-3 所示，在 Δt 时间内，半径 CD 扫过的面积为

$$\Delta S = \frac{1}{2} r^2 \omega \Delta t$$

对应的磁通量变化为

$$\Delta \Phi = B \Delta S = \frac{1}{2} B r^2 \omega \Delta t$$

根据法拉第电磁感应定律，这台发电机的电动势是

$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{1}{2} B r^2 \omega$$

整个圆盘的总电动势相当于 N 个相同的 E 并联，所以这台发电机的电动势为 $E = \frac{1}{2} B r^2 \omega$ 。

请讨论：

有同学提出，法拉第圆盘发电机的圆盘整个处在磁场中，



图 2-4-1 法拉第圆盘发电机

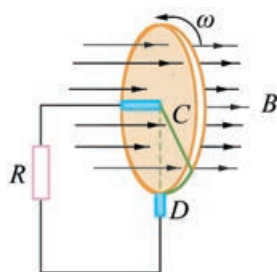


图 2-4-2 法拉第圆盘发电机的原理图

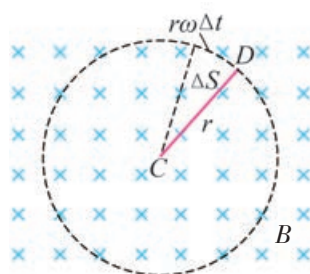


图 2-4-3 法拉第圆盘发电机原理左视图

若将圆盘当作无数个同心圆组成的闭合电路，当圆盘转动时，这些闭合电路中的磁通量没有变化，则每一个同心圆组成的闭合电路都没有感应电动势产生，这样，圆盘发电机就不可能发电。这位同学的分析是否正确？为什么？

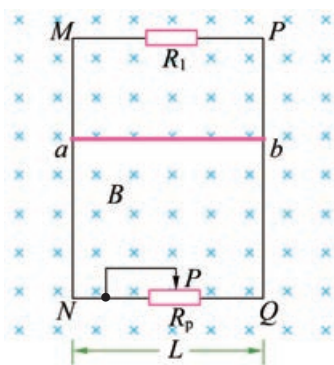


图 2-4-4

案例2 如图 2-4-4 所示， MN 和 PQ 是竖直方向的两平行长直金属导轨，间距 $L = 0.4 \text{ m}$ ，电阻不计，导轨所在平面与磁感应强度为 $B = 0.50 \text{ T}$ 的匀强磁场垂直。导轨两端分别接有滑动变阻器 R_p 和阻值 $R_1 = 3.0 \Omega$ 的电阻。质量 $m = 6.0 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 、电阻 $r = 1.0 \Omega$ 的金属杆 ab 始终垂直于导轨，并与导轨保持光滑接触。当金属杆 ab 以速度大小 v 匀速下滑（与导轨的摩擦不计）时，整个电路消耗的电功率 $P = 0.27 \text{ W}$ 。 g 取 10 m/s^2 。试求速度大小 v 和滑动变阻器接入电路部分的阻值 R'_p ，并分析能量转化的情况。

分析 从电磁感应的角度分析，当金属杆受重力作用沿导轨下滑切割磁感线时，其中产生从 a 流向 b 的感应电流。感应电流随金属杆下落的速度增大而增大。有感应电流通过的金属杆，在磁场中要受到向上的安培力作用，安培力的大小随感应电流的增大而增大。也就是说，金属杆在磁场中运动时受两个力的作用，如图 2-4-5 a 所示：重力，方向竖直向下，大小不变；安培力，方向竖直向上，大小随速度增大而增大。金属杆运动的初期，速度较小，安培力小于重力，金属杆受到的合力方向竖直向下。随着金属杆的速度逐渐增大，感应电流增大，安培力也增大，合力逐渐减小。所以这时金属杆做的是加速度方向向下的变加速直线运动。经过一段时间，安培力增大到与重力大小近似相等，合力与加速度近似为零，这时就可以认为金属杆以某个最大速度向下做匀速直线运动。我们这里研究金属杆做匀速直线运动的情况。

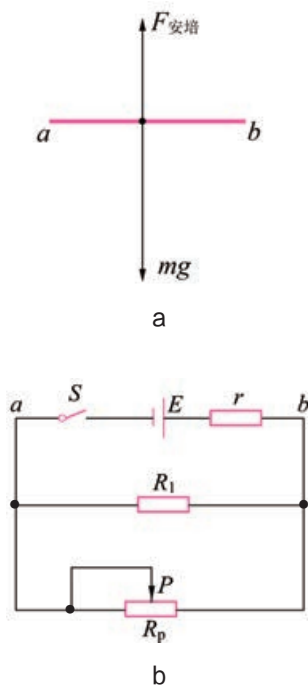


图 2-4-5

从电路的角度分析，金属杆相当于电路中的电源，电阻 R_1 和滑动变阻器 R_p 组成并联的外电路，金属杆的电阻是电源的内阻，它们组成了图 2-4-5 b 所示的电路（图中 r 是电源的内阻，即金属杆的电阻）。

解答 设电路的总电阻为 R 。当金属杆做匀速直线运动的速度大小为 v 时，它产生的感应电流为

$$I = \frac{E}{R} = \frac{BLv}{R} \quad (1)$$

感应电流在电阻上消耗的电功率

$$P = I^2 R \quad (2)$$

当金属杆做匀速直线运动时，金属杆所受的重力 mg 和安培力 $F = BIL$ 平衡，即

$$mg = BIL \quad (3)$$

根据 (1) (2) (3) 式, 可得到金属杆做匀速直线运动时的速度大小

$$v = \frac{P}{mg} = \frac{0.27}{6.0 \times 10^{-3} \times 10} \text{ m/s} = 4.5 \text{ m/s}$$

因为 R 是由 R_1 与 R'_p 并联, 然后再与 r 串联的总电阻, 所以

$$R = r + \frac{R_1 R'_p}{R_1 + R'_p} \quad (4)$$

根据 (1) (2) (4) 式, 可得到滑动变阻器接入电路部分的电阻值

$$R'_p = 6 \Omega$$

在金属杆下落的初期, 重力对金属杆做正功, 安培力对金属杆做负功。金属杆的重力势能减少, 起先减少的势能一部分转化为动能, 另一部分通过重力克服安培力做功转化为电能, 电能又在金属杆、固定电阻, 以及滑动变阻器接入电路部分转化为它们的内能。

当金属杆做匀速直线运动时, 金属杆不断减少的重力势能全部转化为电能, 再转化为金属杆和上述电阻的内能, 因此重力做功的电功率等于整个电路消耗的电功率。按此思路解题, 可以使解题过程更简洁。

请你试一试, 体验用能量转化的观点分析问题的优点。

家庭作业与活动

1. 我们生活的北半球, 地磁场有竖直向下的分量。

如图 2-4-6 所示, 夏天, 我们在教室里抬头就看到正在转动的金属材质的电风扇。已知叶片端点 A 到转轴 O 的长度为 l , 电风扇正在以转速 n 顺时针转动, 则下列说法中正确的是()。

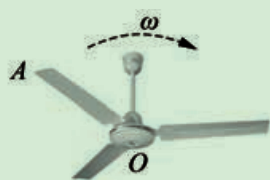


图 2-4-6

- A. A 点的电势比 O 点的电势高
 B. A 点的电势比 O 点的电势低
 C. AO 上的电动势为 $n\pi Bl^2$
 D. 扇叶长度越短, 电势差 U_{AO} 的数值越大
2. 一根上端固定的弹簧, 其下端挂一条形磁铁, 磁铁在上下振动, 磁铁的振动幅度几乎保持不变。如图 2-4-7 所示, 若在磁铁振动过程中把一导电线圈靠近磁铁下方, 则关于磁铁的振幅,

下列说法中正确的是()。

- A. S 闭合时振幅迅速减小, S 断开时振幅几乎不变
 B. S 闭合时振幅迅速增大, S 断开时振幅几乎不变
 C. S 闭合或断开, 振幅变化相同
 D. S 闭合或断开, 振幅都几乎不发生变化

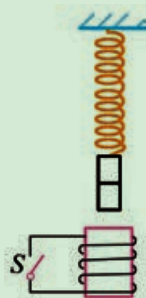


图 2-4-7

3. 如图 2-4-8 所示, 在一蹄形磁铁下面放一个铜盘, 铜盘和磁铁均可以绕 OO' 自由轴转动, 磁

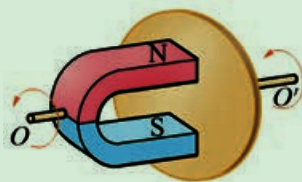


图 2-4-8

铁的两个磁极靠近铜盘，但不接触。当磁铁绕轴转动时，铜盘将（ ）。

- A. 以相同的转速与磁铁同向转动
- B. 以较小的转速与磁铁同向转动
- C. 以相同的转速与磁铁反向转动
- D. 静止不动

4. 如图 2-4-9 所示，动圈式话筒主要由永久磁铁、导电线圈和振动膜片组成。请分析动圈式话筒是怎样把声音信号转变为电流信号的。

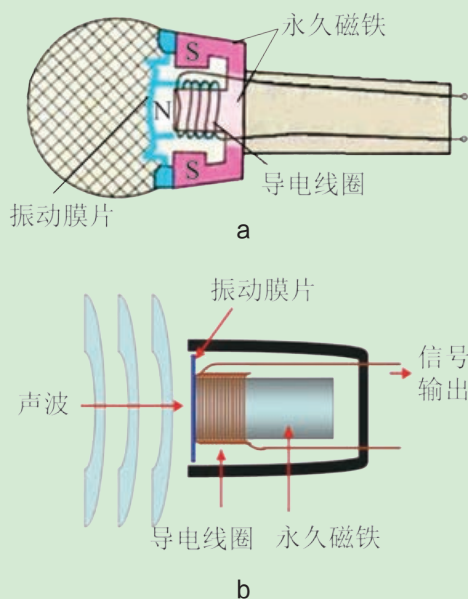


图 2-4-9

5. 电吉他中电拾音器的基本结构如图 2-4-10 所示，磁铁附近的金属弦被磁化，因此金属弦振动时，在导电线圈中产生感应电流，感应电流经电路放大后传送到音箱发出声音。请自制一个简易拾音器，并探究以下问题：

- (1) 应选用什么材质的弦（塑料弦、牛筋弦、铜质弦、钢弦等）？为什么？
- (2) 取走线圈中的磁铁，会产生什么现象？

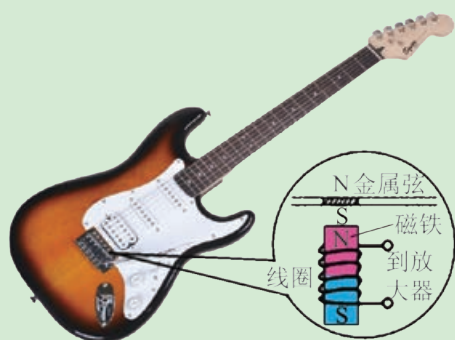


图 2-4-10

- (3) 增加或减少线圈匝数，会对拾音器产生什么影响？
- (4) 用什么方法可以提高音调？

6. 如图 2-4-11 所示，把总电阻为 $2R$ 的均匀电阻丝焊接成一个半径为 a 的圆环，并水平固定在方向竖直向下、磁感应强度为 B 的匀强磁场中。一长度为 $2a$ 、电阻等于 R 、粗细均匀的金属棒 MN 放在圆环上，它与圆环始终保持良好的接触。当金属棒以恒定速度 v 向右移动经过环心 O 时，求：

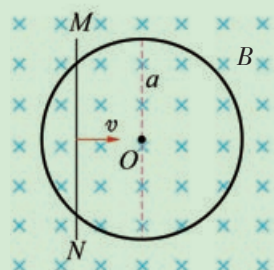


图 2-4-11

- (1) 金属棒上电流的大小和方向，以及金属棒两端的电压 U_{MN} 。
- (2) 圆环和金属棒上消耗的总热功率。

7. 如图 2-4-12 所示，固定在匀强磁场中的水平导轨 ab 、 cd 的间距 $l_1 = 0.5 \text{ m}$ ，金属棒 ad 与导轨左端 bc 的距离 $l_2 = 0.8 \text{ m}$ ，整个闭合电路的电阻为 $R = 0.2 \Omega$ 。匀强磁场的方向竖直向下穿过整个回路。金属棒 ad 通过细绳跨过定滑轮接一个质量 $m = 0.04 \text{ kg}$ 的物体，物体放在水平地面上。不计一切摩擦。现使磁感应强度从零开始以 $\frac{\Delta B}{\Delta t} = 0.2 \text{ T/s}$ 的变化率均匀地增大，问：经过多长时间物体刚好能离开水平地面？ g 取 10 m/s^2 。

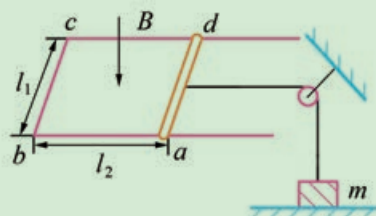


图 2-4-12

2.5 自感现象与日光灯

日光灯是常用的照明灯具。日光灯不仅发光效率比较高，而且发出的是柔和的冷光。

日光灯电路是由哪些元件组成的？你知道这些元件的作用吗？

探究日光灯电路

技术资料表明，一支 40 W 的日光灯管，点亮它需要近千伏的电压（称为起辉电压），而维持它正常发光，只要 108 V 左右的电压（称为工作电压）。我国家庭电路的电压是 220 V。那么，电路中的日光灯是怎么获得起辉电压的呢？

实验探究

研究日光灯电路

按图 2-5-1 连接日光灯电路，进行实验。

1. 闭合开关 S ，观察日光灯管的发光过程。
2. 断开开关 S ，拆除起辉器和镇流器；再闭合开关 S ，日光灯管还能发光吗？

3. 在如图 2-5-1 所示的电路中，用导线将日光灯管的两端与示波器的 Y 输入端连接。闭合开关 S ，观察在日光灯管起辉发光的過程中示波器上的波形（图 2-5-2）。

你能估计出在日光灯起辉的过程中，脉冲电压的最大值约是多少吗？

由上面实验可知，日光灯电路的镇流器可以产生很高的瞬时电压。镇流器是一个带铁芯的多匝导电线圈，它是怎么产生高电压的呢？让我们做进一步的研究。

探究自感现象

实验探究 1

电路闭合时导电线圈的自感现象

在如图 2-5-3 所示的电路中， L 是带铁芯的导电线圈， A_1 、 A_2 是两只规格一样的灯泡。

1. 先闭合开关 S ，调节 R_1 和 R_2 ，使 A_1 、 A_2 两只灯泡的亮度相同，再断开开关 S 。
2. 再次闭合开关 S 。请仔细观察，两只灯泡在电路接通瞬

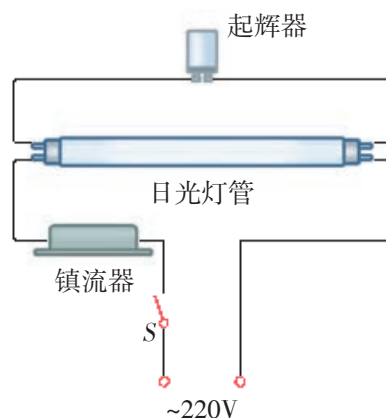


图 2-5-1 日光灯电路

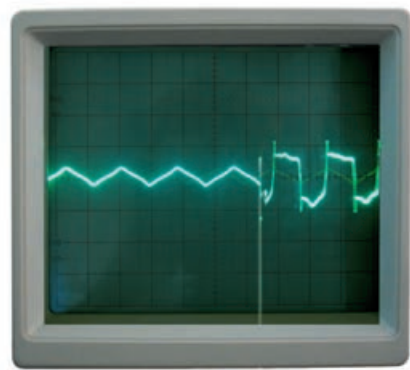


图 2-5-2 日光灯起辉过程中灯管两端的电压波形（左端是灯管两端刚接通电路时的波形，右端是正常发光时的波形。请注意两波形衔接处的脉冲波）

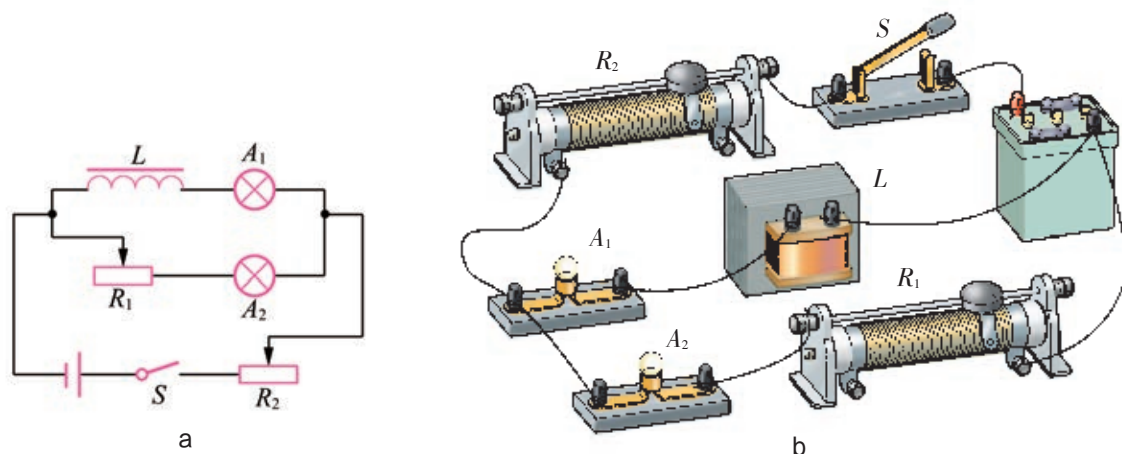


图 2-5-3 探究电路闭合时导电线圈的自感现象

间的发光情况有什么不同？

实验探究 2 电路断开时导电线圈的自感现象

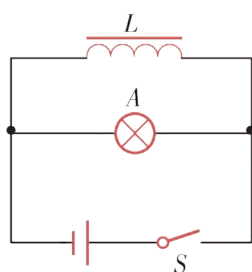


图 2-5-4 探究电路断开时导电线圈的自感现象

按照图 2-5-4 连接电路。闭合开关 S ，待灯泡 A 正常发光后，再断开电路。观察灯泡在电路断开瞬间的发光情况。

请注意：实验中要选用电阻小于灯泡电阻的线圈。当开关断开时，灯泡和导电线圈组成了一个闭合电路。

思考与讨论：

1. 断开开关瞬间，灯泡 A 闪亮一下说明了什么？这时通过灯泡 A 的电流方向发生了怎样的变化？
2. 线圈 L 中的自感电动势跟原电流方向有什么关系？对电流减小起到了什么作用？

分析与论证 自感现象产生的原因

我们先来分析电路接通瞬间，接有线圈 L 的灯泡 A_1 开始发光较暗的原因。

在如图 2-5-3 所示的电路中，电路闭合前，穿过线圈 L 的磁通量为零。在接通电路瞬间，穿过线圈 L 的磁通量突然增加，根据电磁感应定律，只要穿过线圈的磁通量发生变化，线圈中就会产生感应电动势。根据楞次定律，线圈 L 中产生的感应电动势阻碍线圈中电流的增大。这样，通过灯泡 A_1 的电流只能缓慢地增大，故灯泡 A_1 开始发光较暗，直至穿过线圈 L 的磁通量不变化了，灯泡 A_1 才正常发光。电阻 R_1 所在的支路没有线圈，电路一接通，灯泡 A_2 立刻就正常发光。

物理学中，把由于导体本身的电流发生变化而产生的电磁感应现象叫做自感（self-induction）。自感现象中产生的感应

电动势叫做**自感电动势** (self-induction electromotive force)。

请分析实验探究2中开关断开时,灯泡A不立即熄灭的原因。

在做图2-5-4所示的实验中,开关断开后,灯泡闪亮一下再熄灭,它的能量是从哪里来的呢?

这是因为,磁场这种物质是具有能量的。开关闭合时,导电线圈 L 中的电流从无到有,导体中的电场力做功,将电能转化为导电线圈中的磁场能;开关断开时,导电线圈中的电流从有到无,磁场的能又转化为电能。

多学一点

自感电动势的大小

导电线圈内的磁场是由线圈中的电流产生的。根据法拉第电磁感应定律,感应电动势的大小正比于穿过导电线圈的磁通量的变化率,所以磁通量的变化率跟导电线圈中电流的变化率成正比,即 $E \propto \frac{\Delta I}{\Delta t}$, 写成等式,就是

$$E = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

式中, L 是比例系数,叫做自感系数,又称电感。导电线圈的自感系数跟线圈的大小、几何形状、匝数以及有无铁(或磁)芯等有关。导电线圈的横截面积越大、线圈越长、匝数越多,它的自感系数就越大。有铁(或磁)芯的导电线圈,其自感系数比没有铁(或磁)芯的大得多。

自感系数的单位是亨利,简称亨,符号是H。

我们知道,日光灯需要很高的起辉电压,而工作电压比照明电路的电压又低很多。如何实现这个要求呢?

日光灯电路接通电源后,电源电压不能使日光灯管内的气体导电,但可以使起辉器产生辉光放电。起辉器中的U形动触片(双金属片)因放电受热张开与静触片接触,使电流通过镇流器、日光灯管的两个灯丝和起辉器组成回路,灯丝得到预热。经1~3 s后,起辉器两触片分开(因起辉器内辉光放电停止,动触片冷却),使电路中的电流突然中断,于是镇流器(它的自感系数 L 很大)因自感作用产生约1 500 V的瞬时高电压,使灯管内的惰性气体电离,形成气体导电电流,又使管中的水银蒸气电离发出紫外线,激发管内壁的荧光粉发光。日光灯管导通后,由于镇流器的分压,日光灯管两端的电压比电源电压低(一般在50~110 V范围内),不足以使起辉器放电,其触点不再闭合。

由于亨利这个单位较大,技术上常用较小的单位毫亨(mH)和微亨(μH)。

$$1 \text{ mH} = 10^{-3} \text{ H}$$

$$1 \mu\text{H} = 10^{-6} \text{ H}$$

例如,一个密绕3 000匝的单层线圈,若线圈长50 cm,横截面积是 10 cm^2 ,则其自感系数约23 mH。

信息浏览

日光灯管、起辉器和镇流器

日光灯管

如图 2-5-5 所示，日光灯管的两端各有一根灯丝，灯管内充有微量的氩和稀薄的水银蒸气，内壁上涂有荧光粉。灯管内的气体在起辉电压的作用下，从不导电变为导电，从而发出紫外线，射到荧光粉上，激发出可见光。灯管内的气体没有变为导电状态时，电阻很大，可以视为断路；当灯管内的气体变为导电状态后，电阻很小，可认为是纯电阻。

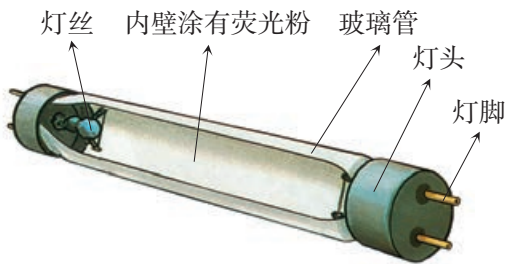


图 2-5-5 日光灯管的结构

起辉器

起辉器的结构如图 2-5-6 所示。充有氖气的玻璃泡壳内有两个金属电极，一个是不动的静触片，另一个是由双金属片构成的 U 形动触片。当两电极间加上电压时，在电极间产生电弧，使动触片受热膨胀张开，与静触片接触，电弧便熄灭；电弧熄灭又使动触片的温度下降收缩，与静触片突然断开。所以起辉器实际上起着自动开关的作用。起辉器旁并联着一个电容器，它可减小动、静触片断开时产生的火花，避免烧坏触点。

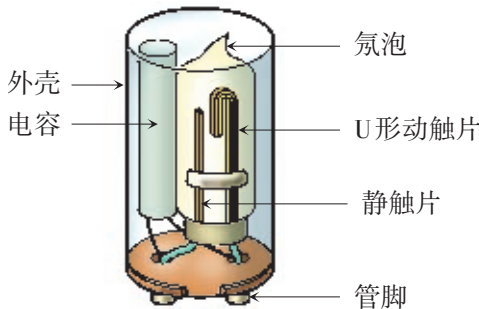


图 2-5-6 起辉器的结构

镇流器

镇流器的结构如图 2-5-7 所示。镇流器是用漆包线紧密绕制的线圈，线圈内是用硅钢片叠制的铁芯。当线圈中的电流突然被切断时，它可以产生很高的电压。

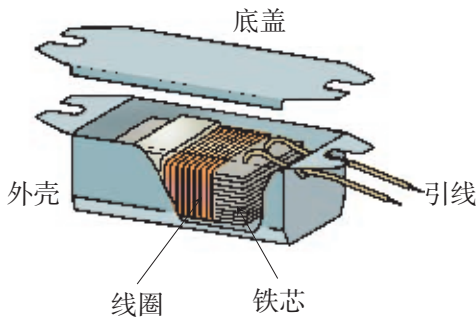


图 2-5-7 镇流器的结构

案例分析

案例 电子设备中常要用一种没有电感的精密电阻，它是用一根电阻线对折后绕制（双线并绕法）成的线圈，如图 2-5-8 所示。为什么这种结构的电阻会没有电感呢？

分析 双线并绕的导电线圈相当于两个线圈一圈隔一圈地绕在同一个线圈架上。通电时，两个导电线圈中的电流方向正好相反，产生的磁场方向也相反。

请进一步分析，得出你的结论。

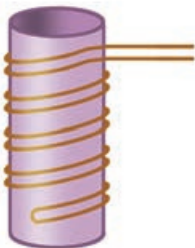


图 2-5-8 无电感电阻

自感现象在电子技术中的应用非常广泛。利用导电线圈具有阻碍电流变化的特性，可以稳定电路中的电流。无线电设备中常用电感器和电容器组合成谐振电路和滤波器等。

但在某些情况下，自感现象也是非常有害的。例如具有大自感系数线圈的电路断开时，电路中会产生很大的自感电动势，它会击穿线圈本身的绝缘保护，或者在电闸断开的瞬间产生强烈的电弧，以致烧坏电闸。在设计电路时，设计人员要想方设法避免这些情况的发生。

多学一点

互感现象

若有两个导电线圈，按图 2-5-9 所示放置。线圈 1 中的电流变化所产生的变化磁场，会在邻近的线圈 2 中产生感应电动势；同样，线圈 2 中的电流变化，也会在线圈 1 中产生感应电动势。这种现象叫做**互感**（mutual induction）。互感所产生的电动势叫做**互感电动势**（mutual induction electromotive force），其大小为

$$E_1 = M \frac{\Delta I_2}{\Delta t}$$
$$E_2 = M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$$

式中， M 叫做互感系数，它是由导电线圈的几何形状、大小、匝数以及线圈之间的相对位置决定的。

互感现象有着广泛的应用，它是变压器的工作基础。利用两个导电线圈间的互感，可以传递交流信号而阻隔直流信号。图 2-5-10 是收音机中利用互感现象，将天线接收的无线电信号传递给调谐部分的接收电路。

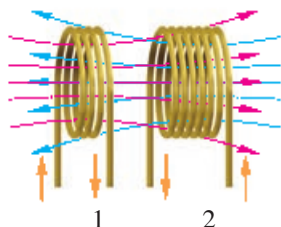


图 2-5-9 互感现象

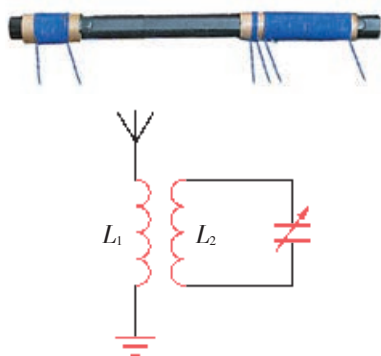


图 2-5-10 收音机的接收电路

STSE

无线充电技术展望

常见的无线充电类型有感应式、共振式、微波传输式，它们的基本原理是一样的，都是利用电磁感应实现能量的无线传输。

目前，很多数码设备的无线充电器都是感应式的，由于这些数码设备空间小，接收线圈也小，加上充电设备功率小，通常充电的距离

都在 5 mm 以内，甚至需要与充电座接触，充电效率一般在 70% 左右。

共振式充电目前处在研发阶段。这种充电类型是在电磁感应基础上，加上电磁共振原理，它能够提升无线充电的效率。图 2-5-11 所示的是电动汽车的无线充电原理。

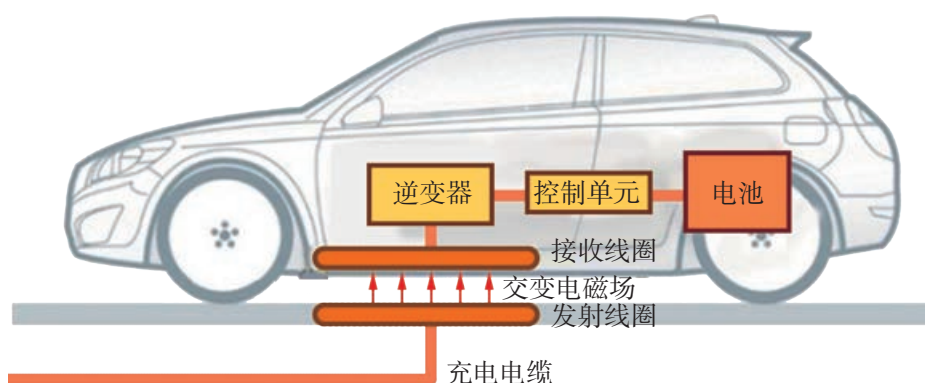


图 2-5-11 电动汽车的无线充电原理

移动终端的发展，使我们在家里、办公室、酒店、咖啡厅、地铁、机场，都能随时连接无线充电网，给移动设备充电，就像我们使用 WiFi 一

样便利。预计在不久的将来，无线充电将覆盖每个领域，无处不在。

家庭作业与活动

- 关于导电线圈的自感系数，下列说法中正确的是（ ）。
 - 线圈中的感应电动势越大，自感系数就越大
 - 线圈中的电流等于零时，自感系数也等于零
 - 线圈插入铁芯后，自感系数会明显增大
 - 把线圈匝数增加一些，自感系数变大
- 在探究自感现象的实验中（图 2-5-4），为了使现象明显，要选择电阻值比灯泡 A 灯丝的电阻小得多的线圈。请分析这样做的原因。
- 在图 2-5-12 a、b 所示的电路中，电阻 R 和自感线圈 L 的电阻值相等，闭合开关 S ，使电路达到稳定状态，灯泡 A 发光，则（ ）。

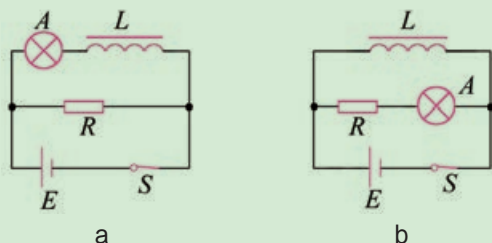


图 2-5-12

- 在 a 电路中，断开开关 S ，灯泡 A 将渐渐变暗
 - 在 a 电路中，断开开关 S ，灯泡 A 将先变得更亮，然后渐渐变暗
 - 在 b 电路中，断开开关 S ，灯泡 A 将渐渐变暗
 - 在 b 电路中，断开开关 S ，灯泡 A 将先变得更亮，然后渐渐变暗
- 在图 2-5-13 所示的电路中，当开关 S 闭合后，通过灯泡 A_1 的电流随时间变化的图像是图 2-5-14 中的 _____，通过灯泡 A_2 的电流随时间变化的图像是图 2-5-14 中的 _____。

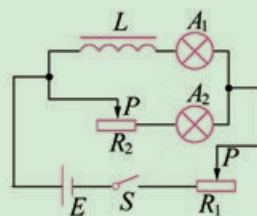


图 2-5-13

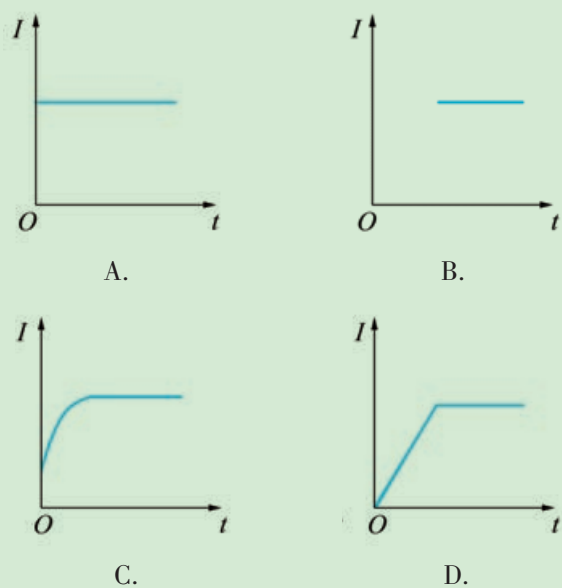


图 2-5-14

5. 在图 2-5-15 所示的电路中, 若线圈 L 的电阻 R_L 与灯泡 A 的电阻 R_A 相等, 则开关 S 断开前后, 通过线圈 L 的电流随时间变化的图像是图 2-5-16 中的 _____, 通过灯泡 A 的电流随时间变化的图像是图 2-5-16 中的 _____. 若 R_L 远小于 R_A , 则开关 S 断开前后, 通过线圈 L 的电流随时间变化的图像是图 2-5-16 中的 _____,

通过灯泡 A 的电流随时间变化的图像是图 2-5-16 中的 _____。

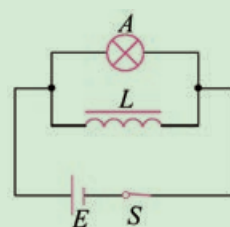


图 2-5-15

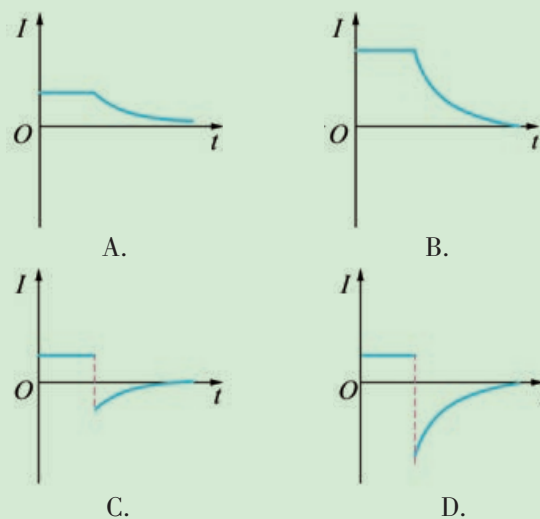


图 2-5-16

2.6 涡流现象与电磁炉

将金属锅放在电磁炉的绝缘面板上，接通电源，锅体的温度就会很快升高。这是怎么回事呢？

变压器的铁芯为什么要用一片片互相绝缘的薄硅钢片叠压而成（图 2-6-1）？为什么不用整块金属呢？

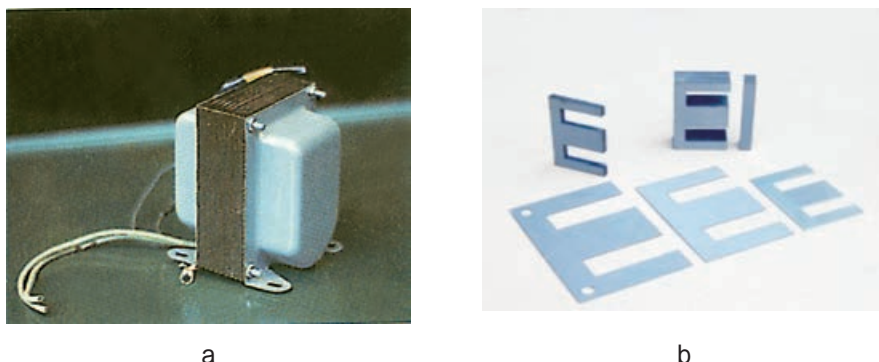


图 2-6-1 变压器的铁芯都是用一片片硅钢片叠压而成的

探究涡电流现象

分析与论证

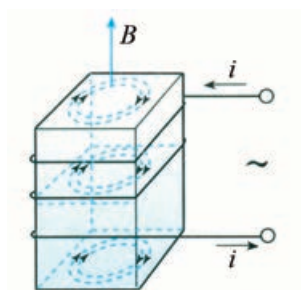


图 2-6-2 涡电流的产生

如图 2-6-2 所示，假设导电线圈中的铁芯是用整块软铁制成的，那么铁芯的横截面可看作是由一圈圈闭合回路组成的。当导电线圈中通有交变电流时，穿过铁芯中这种回路的磁通量就会发生变化，从而在铁芯的这种回路内产生感应电流。这种感应电流呈涡旋状，所以把它叫做**涡电流**（eddy current），简称**涡流**。

由于整块金属的电阻很小，涡电流常常很大。涡电流会引起铁芯发热，这不仅会损耗大量电能，而且还可能会烧坏设备，引起事故。变压器的铁芯用涂有绝缘漆的薄硅钢片叠压而成，而不是用一整块铁制成，就是为了减小其中的涡电流。

请分析思考：

为什么变压器的铁芯用硅钢片叠压而成就可以有效地减小其中的涡电流？

无火之灶——电磁炉

涡电流会使金属发热，电磁炉就是利用这个原理制成的。
图 2-6-3 是某种型号电磁炉的主要结构。

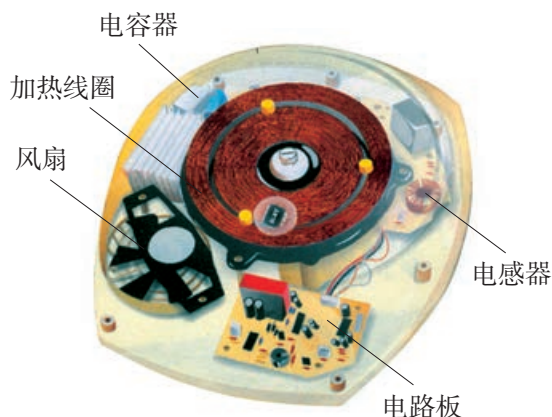


图 2-6-3 某种型号电磁炉的主要结构

常用的电磁炉有工频电磁炉和高温电磁炉。

工频电磁炉

工频电磁炉的结构如图 2-6-4 所示，它的励磁线圈和励磁铁芯构成了工频励磁器。接通交流电源后，在两组线圈中分别通过 50 Hz 的电流 i_A 和 i_B ，从而在锅体中产生涡电流，涡电流的电能在锅体的材料电阻上转化为热能以加热食品。同时，涡电流又在磁场中受到力的作用，可使锅体紧紧地贴在炉面板上，避免产生振动而发出噪声。

高频电磁炉

图 2-6-5 是高频电磁炉的结构，它由加热线圈、炉面板、控制保护电路（图中未画出）三部分组成。接通电源后，50 Hz 的交变电流经过整流和滤波变为直流，然后通过电子开关的迅速导通和截止，使加热线圈中产生频率为 20 ~ 50 kHz 的高频振荡电流。高频振荡电流产生高频磁场，从而在锅体内产生涡电流，涡电流导致锅体发热，加热食品。

请讨论：

1. 哪一类材质的锅具可以在电磁炉上使用，为什么？玻璃器皿如果要在电磁炉上使用，必须采取什么措施？
2. 电磁炉工作时，煮饭的人为什么感受不到热辐射？
3. 目前常用的电磁炉有哪几种？

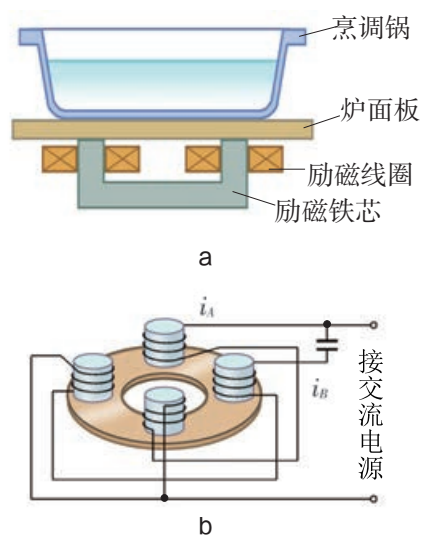


图 2-6-4 工频电磁炉的结构

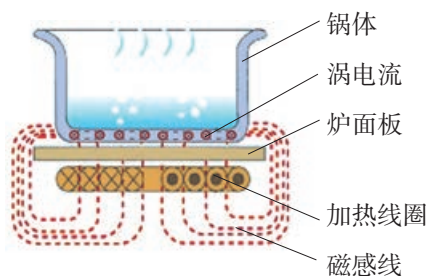


图 2-6-5 高频电磁炉的结构

信息浏览

安全检查报警器

乘坐飞机的乘客登机前都要接受安全检查。图 2-6-6 a 所示的是一种手持式安全检查报警器。当有金属体靠近报警器时，报警器就会发出报警声。这是为什么呢？

原来，在报警器内有一个线圈（图 2-6-6 b），线圈中通有高频电流，因此线圈周围有着高频磁场。当报警器靠近金属体时，线圈的磁场在金属

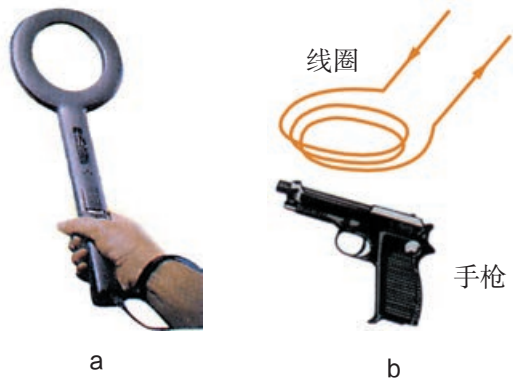


图 2-6-6 手持式安全检查报警器

体中感应出涡电流，涡电流产生的磁场又会穿过线圈，改变线圈中的原磁场，使相关的电子设备发出报警声。

图 2-6-7 所示的是安全检查报警门，当有金属体通过时，它就会发出报警声。你能说出它的工作原理吗？



图 2-6-7 安全检查报警门

STSE

感应式电能表

感应式电能表是常用的记录电能消耗量的仪表，图 2-6-8 所示的是家庭常用的单相感应式电能表。

感应式电能表中有两组导电线圈——电压线圈和电流线圈。电压线圈与负载并联，电流线圈与负载串联。负载工作时，电压线圈和电流线圈产生的磁感线都穿过一个可以转动的铝盘，在铝盘中感应出涡电流。这涡电流又受线圈磁场力的作用，使铝盘发生转动。电能表中有一块永久磁铁，它对铝盘产生制动力矩。当铝盘受到的转动力矩和制动力矩平衡时，铝盘匀速转动，其转速与负载消耗的电功率成正比。这样，铝盘的转数便与电能消耗量成正比。制造电能表时，已设定好每消耗 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电能的铝盘转数，即电能表常数。

通过蜗杆和齿轮，铝盘的转动传递给了计量

器，计量器则按电能消耗量标度。

感应式电能表的结构较复杂，误差相对也较大。随着科学技术的发展，人们利用微电子技术制造了一些新类型的电能表，如机电式单相脉冲电能表、机械式三相四线电能表、单相电子式预付费电能表、三相四线电子式多功能电能表等。

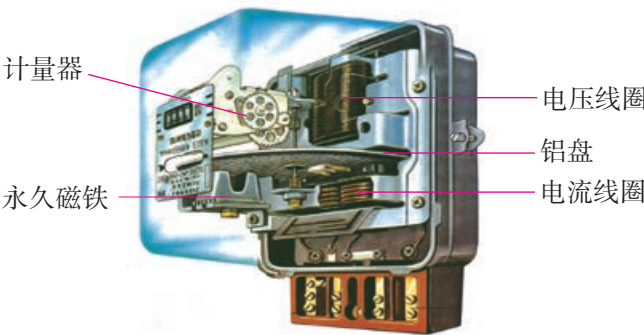


图 2-6-8 感应式电能表

家庭作业与活动

1. 强大的涡电流在金属内流动时, 会释放大量的热能。工业上利用这种热效应, 制成高频电磁感应电炉来冶炼金属, 其结构原理图如图 2-6-9 所示。请分析它的工作原理。

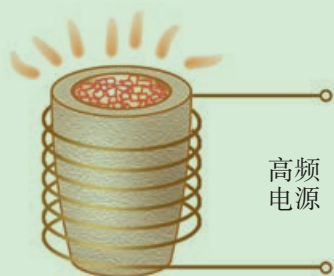


图 2-6-9 高频电磁感应电炉结构原理图

2. 如图 2-6-10 所示, 内壁光滑、水平放置的玻璃圆环内, 有一直径略小于圆环直径的带正电的小球, 以速度 v_0 沿逆时针方向匀速转动(俯视)。若在此空间突然加上方向竖直向上、磁感应强度 B 随时间成正比例增大的变化磁场(设运动过程中小球带电荷量不变), 那么()。

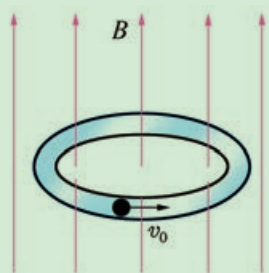


图 2-6-10

- A. 小球对玻璃圆环的压力一定不断增大
B. 小球所受的磁场力一定不断增大
C. 小球先沿逆时针方向减速运动, 后沿顺时针方向加速运动
D. 磁场力对小球一直不做功
3. 关于高频电磁炉, 下列说法中正确的是()。
- A. 它是利用变化的磁场在食品中产生涡电流对食品加热的
B. 它是利用变化的磁场在铁质锅底产生涡电流, 使锅底迅速升温, 从而对食品加热的
C. 它是利用电磁波使食品加热的, 所以有比较强的电磁波辐射, 对人体健康不利

D. 它跟电炉一样, 是让电流通过电阻丝产生热量来对食品加热的

4. 图 2-6-11 是用涡电流金属探测器探测地下金属物的示意图。关于该探测器, 下列说法中正确的是()。

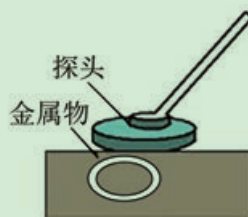


图 2-6-11

- A. 探测器内的探测线圈会产生交变磁场
B. 探测器只能探测到有磁性的金属物
C. 探测器能探测到地下的金属物是因为探头中产生了涡电流
D. 探测器能探测到地下的金属物是因为金属物中产生了涡电流
5. 如图 2-6-12 所示, 在某节实验课上, 李老师把一个带有长铁芯的导电线圈 L 、开关 S 和电源用导线连接起来, 并将一金属套环套过线圈 L 的铁芯后放在线圈上方。闭合开关 S 的瞬间, 套环立刻跳起。

某同学另找来器材再做此实验。他连接好电路, 经重复试验, 导电线圈上的套环均未动。对比李老师演示的实验, 下列四个说法中, 导致套环未动的原因可能是()。

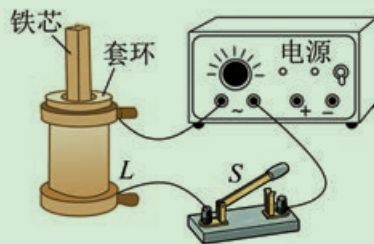


图 2-6-12

- A. 导电线圈接在了直流电源上
B. 电源电压过高
C. 所选导电线圈的匝数太多
D. 所用套环的材料与李老师的不同

6. 如图 2-6-13 所示, 竖直放置的螺线管与导线 $abcd$ 构成闭合电路。电路所围区域内有方向垂直纸面向里的磁场, 螺线管下方水平桌面上有一个导体圆环。则要使导体圆环受到向上的磁场力, 电路所围区域内磁场的磁感应强度 B 随时间 t 变化的图像应该是图 2-6-14 中的 ()。

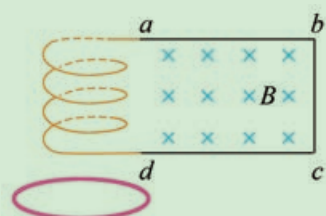


图 2-6-13

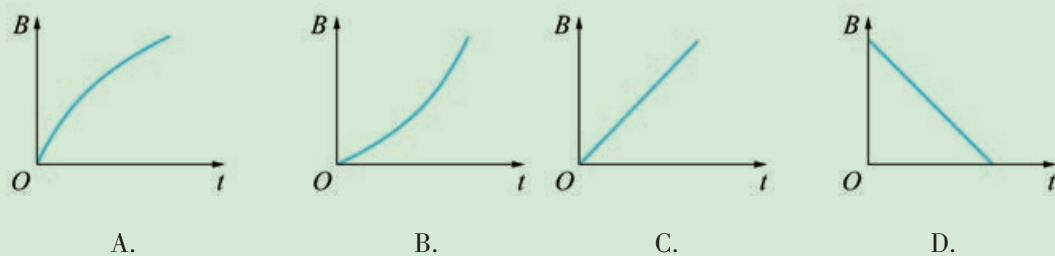


图 2-6-14

7. 把一个面积为 4 cm^2 、电阻为 50Ω 的 160 匝小导电线圈跟阻值为 30Ω 的电流表连接起来后放入磁感应强度 B 为 0.2 T 的匀强磁场中。当

把该小线圈从垂直磁场的位置迅速转到跟磁场平行的位置时, 流过电流表的电荷量为多少?

第2章家庭作业与活动

A组

1. 图 2-A-1 所示的是法拉第最初研究电磁感应现象的装置。关于该装置，下列说法中正确的是（ ）。

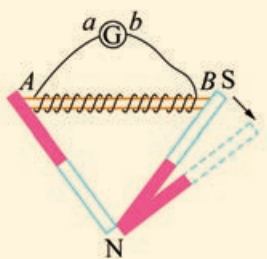


图 2-A-1

- A. 当右边磁铁的 S 极离开 B 端时，导电线圈中产生感应电流
 B. 当右边磁铁的 S 极离开 B 端，并在 B 端附近运动时，导电线圈中产生感应电流
 C. 当磁铁保持图中原来状态不变时，导电线圈中有感应电流
 D. 当磁铁保持图中原来状态不变时，导电线圈中无感应电流
2. 如图 2-A-2 所示，竖直平面内有一半半径为 r 的金属圆环，拉直时两端的电阻为 R ，磁感应强度为 B 的匀强磁场垂直穿过环平面。环的最高点 a 用铰链连接长度为 $2r$ 、电阻为 $\frac{R}{2}$ 的导体棒 ab 。 ab 由水平位置紧贴环面摆下，当摆到竖直位置时， b 点的线速度为 v ，则这时 ab 两端的电压大小为（ ）。

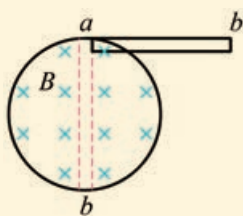


图 2-A-2

- A. $\frac{Brv}{3}$ B. $\frac{Brv}{6}$
 C. $\frac{2Brv}{3}$ D. Brv

3. 如图 2-A-3 所示，两根相距 $L = 0.20 \text{ m}$ 的平行金属导轨固定在同一水平面内，并处于竖直方向的匀强磁场中，磁场的磁感应强度 $B = 0.20 \text{ T}$ 。导轨上面横放着 ab 、 cd 两根金属细杆，构成一矩形闭合电路。每根金属细杆的电阻 $r = 0.25 \Omega$ ，电路中其余部分电阻不计。已知两金属细杆在拉力作用下沿导轨背向匀速平移，速度大小都是 $v_0 = 5.0 \text{ m/s}$ ，不计导轨的摩擦。求：

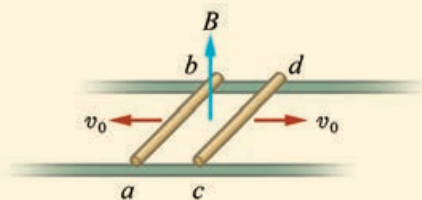


图 2-A-3

- (1) 作用于每根金属细杆的拉力的大小。
 (2) 两金属细杆在间距增大 0.40 m 的滑动过程中产生的总热量。
4. 如图 2-A-4 所示，一边长 $L = 0.1 \text{ m}$ 、质量 $m = 10 \text{ g}$ 的正方形导电线圈 $abcd$ ，自高度 $h = 0.2 \text{ m}$ 处自由下落。下边 ab 进入匀强磁场后，线圈开始做匀速直线运动，直到其上边 dc 刚刚离开匀强磁场为止。已知匀强磁场区域的宽度也是 L 。求正方形导电线圈在穿越匀强磁场区域的过程中产生的热能。 g 取 10 m/s^2 。

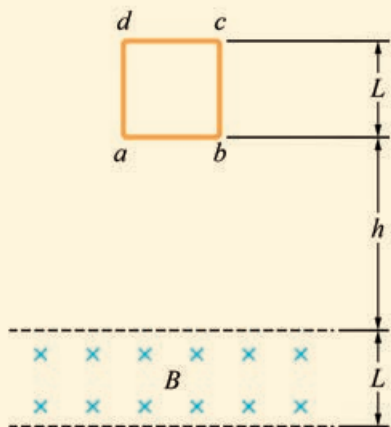


图 2-A-4

B 组

1. 如图 2-B-1 所示, 有两个同心放置的共面金属圆环 a 和 b , 一条形磁铁穿过它们的圆心且与环面垂直。如果穿过金属圆环 a 、 b 的磁通量分别为 Φ_a 、 Φ_b , 那么, 关于 Φ_a 和 Φ_b 的大小关系, 下列说法中正确的是 ()。

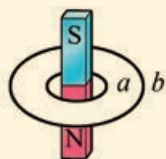
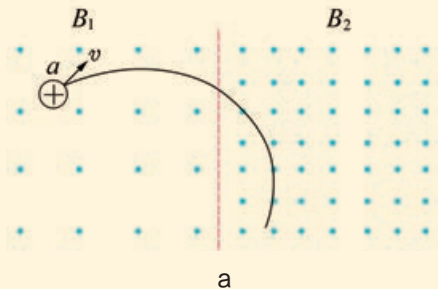
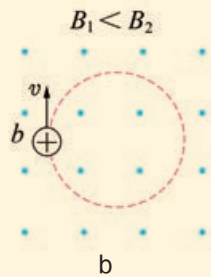


图 2-B-1

- A. $\Phi_a < \Phi_b$ B. $\Phi_a > \Phi_b$
C. $\Phi_a = \Phi_b$ D. 无法比较
2. 如图 2-B-2 所示, 两个比荷相同都带正电荷的粒子 a 和 b 以相同的动能进入匀强磁场中运动。 a 从 B_1 区运动到 B_2 区, 已知 $B_1 < B_2$; b 开始时在磁感应强度为 B_1 的磁场中做匀速圆周运动, 然后将磁场的磁感应强度逐渐增大到 B_2 。 a 、 b 两个粒子的动能将如何变化?



a



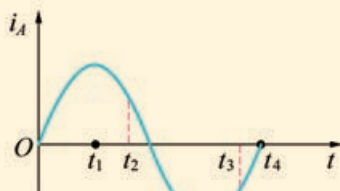
b

图 2-B-2

3. 如图 2-B-3 a 所示, A 、 B 两个绝缘金属环套在同一个铁芯上, A 环中的电流 i_A 随时间 t 的变化规律如图 2-B-3 b 所示。下列说法中正确的是 ()。
- A. t_1 时刻, 两环间的作用力最大



a



b

图 2-B-3

- B. t_2 和 t_3 时刻, 两环相互吸引
C. t_2 时刻两环相互吸引, t_3 时刻两环相互排斥
D. t_3 和 t_4 时刻, 两环都相互吸引
4. 已知某一区域的地下埋有一根与地表面平行的直线电缆, 当电缆中通有变化的电流时, 在其周围就有变化的磁场。我们在地面上用一个闭合试探线圈即可探测电缆的确切位置、走向和深度。

如图 2-B-4 所示, 让试探线圈平面平行于地面进行测量, 这时在地面上 a 、 c 两处测得试探线圈中的电动势为零, 在 b 、 d 两处测得试探线圈中的电动势不为零。当试探线圈平面与地面成 45° 夹角, 且试探线圈平面的法线和 bd 在同一竖直平面上时, 在 b 、 d 两处测得试探线圈中的电动势为零。已知 a 、 b 、 c 、 d 恰好位于边长为 1 m 的正方形的四个顶点上, 问:

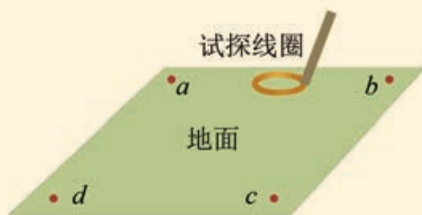


图 2-B-4

- (1) 地下电缆应该处在哪两点连线的正下方?
(2) 地下电缆离地表面的深度为多少?
5. 为了测量列车运行的速度大小, 人们采用了如图 2-B-5 a 所示的装置, 它由一块安装在列车

车头底部的强磁体和设置在轨道底下的一组线圈及电流测量记录仪（未画出）组成。当列车经过线圈上方时，线圈中产生的感应电流数据被记录下来，列车的加速度和速度就能根据这些数据求出。假设强磁体端面磁场的磁感应强度 $B = 0.004 \text{ T}$ ，且全部集中在端面附近，方向与端面相垂直。强磁体的宽度与线圈宽度相同，

且都很小。线圈匝数 $n = 5$ ，长 $L = 0.2 \text{ m}$ ，电阻 $R = 0.4 \text{ } \Omega$ （包括引出线的电阻），记录下来的电流 - 位移图像如图 2-B-5 b 所示。试计算在离 O （原点） 30 m 、 130 m 处列车的速度 v_1 和 v_2 的大小。

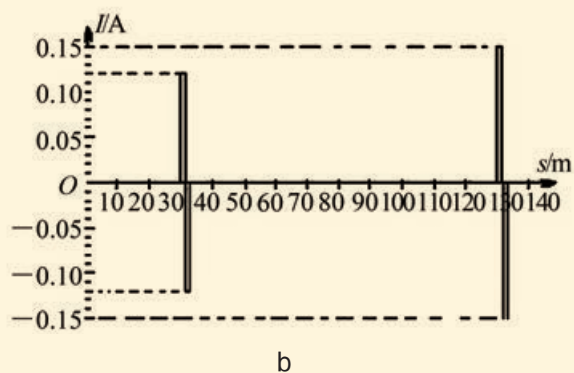
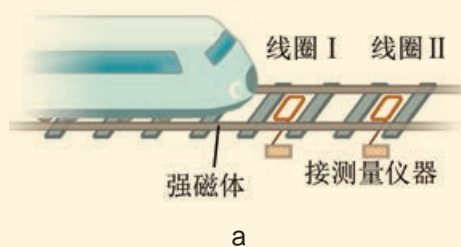


图 2-B-5



第 3 章 交变电流的产生与输送

现代都市之夜，华灯齐放，流光溢彩。街道上，车水马龙，路灯、车灯、霓虹灯、交通信号灯，汇成一片光的海洋。正是法拉第发现的电磁感应定律，开辟了人类通向电气化的道路。

在生产和生活中，供电系统使用的都是交变电流。那么，什么是交变电流呢？它是怎样产生的？它又是如何被输送到千家万户的呢？

本章从研究交变电流的产生开始，认识交变电流的特点，学习描述交变电流的方法，了解远距离输电时应用高电压的原理。通过实验，探究变压器的工作原理，了解变压器在生活和生产中的应用，认识交变电流与我们的生产、生活和社会的关系。

3.1 交变电流的产生

我们知道,电冰箱、空调机等家用电器使用的都是交变电流。图 3-1-1 所示的是某种型号空调机铭牌的一部分,你能说出上面标示的“额定电压 220 V~”“额定频率 50 Hz”等字样和符号的意义吗?那么,什么是交变电流呢?让我们用示波器来观察、研究交变电流。

什么是交变电流

实验探究 用示波器观察交变电流

如图 3-1-2 所示,将小灯泡连接到学生电源的“交流电压 2 V”挡,使小灯泡发光,并将小灯泡两端的电压引至示波器的“地-Y”输入口,调整示波器得到交变电流的电压图像(图 3-1-3),观察得到的图像。

将小灯泡与两节干电池相连接,使小灯泡发光,并将小灯泡两端的电压引至示波器的“地-Y”输入口,调整示波器得到恒定电流的电压图像(图 3-1-4),观察得到的图像。

比较恒定电流与交变电流电压的波形。

请思考:

图 3-1-3 中交变电流的电压图像与数学中什么函数的图像相似?

× × 空调机组 室外机	
额定电压	220 V~
额定频率	50 Hz
制冷/制热 额定功率	919/990 W
最大输入功率	1 370 W

图 3-1-1 某种型号空调机铭牌的一部分



图 3-1-2 认识交变电流

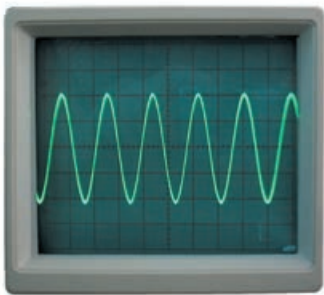


图 3-1-3 示波器显示的交变电流的电压图像

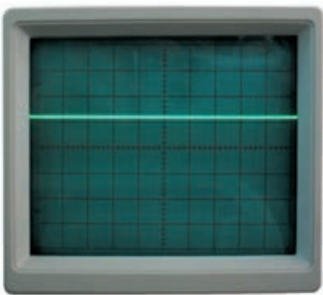


图 3-1-4 示波器显示的恒定电流的电压图像

在交变电流的电路中,交变电流的电压和电流的大小和方向都在随时间做周期性的变化。物理学中把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),简称交流。

图 3-1-3 所示的交变电流的电压和电流是按正弦函数规律

变化的，这种电流叫做**正弦式交变电流**（sinusoidal current），简称**正弦式电流**。

电器产品的铭牌和技术资料中，常用字母“AC”或符号“~”表示交变电流，用字母“DC”或符号“-”表示直流。

家庭电路和动力电路供给的交变电流是由交流发电机产生的。那么，交流发电机是怎样产生交变电流的？交流发电机的基本结构是怎样的？交流发电机产生的电能是由什么能转化而来的？

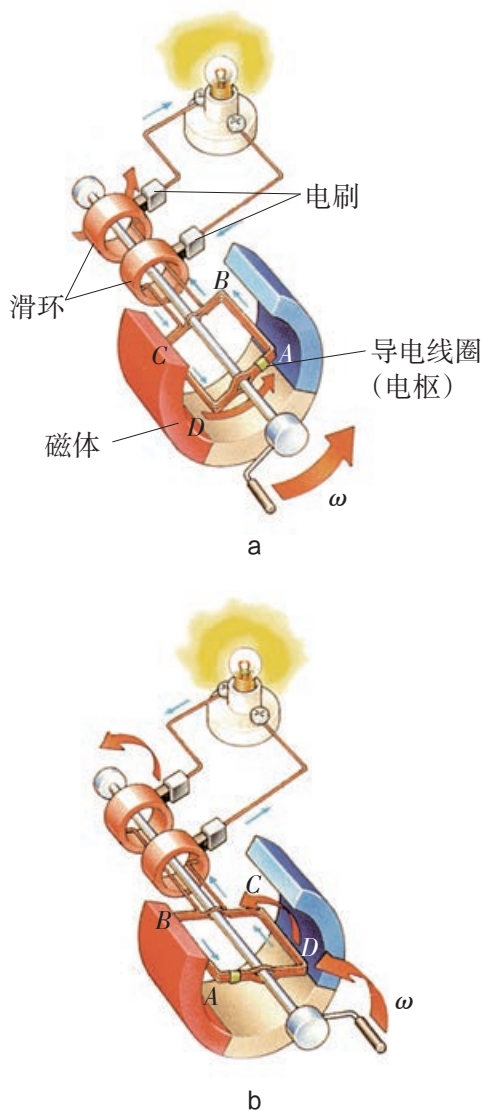


图 3-1-5 交流发电机的结构和原理图

交流发电机

图 3-1-5 所示的是教学用的交流发电机的结构和原理图。从图中可以看出，它由可转动的导电线圈（电枢）和磁体两部分组成，导电线圈在磁场中转动时产生的感应电流经过滑环和电刷输出。

分析与论证

交流发电机的原理

交流发电机是怎样产生交变电流的呢？

定性研究

如图 3-1-5 所示，导电线圈通过滑环和电刷与外电路连接，当导电线圈在外力驱动下在磁场中匀速转动时， AB 边、 CD 边因切割磁感线而产生感应电动势。由于导电线圈在磁场中不同位置时切割磁感线产生的感应电动势的大小和方向不同，因此产生了大小和方向随时间不断变化的交变电流。

在发电机的导电线圈转动一周的过程中，有几个重要的瞬时位置。线圈平面与磁感线垂直时的那个位置叫做**中性面**。线圈处于中性面的瞬间，穿过线圈平面的磁通量最大，但磁通量的变化率为零，所以产生的感应电动势为零。

请讨论：

在发电机的导电线圈转动一周的过程中，导电线圈在哪些位置感应电动势最大？在哪些位置感应电动势的方向会发生改变？

图 3-1-6 所示的是发电机的导电线圈转动一周过程中的几个瞬时位置，请在图 3-1-7 的 $e-t$ 图中，画出导电线圈转动一周的过程中感应电动势随时间变化的一个可能的图像。

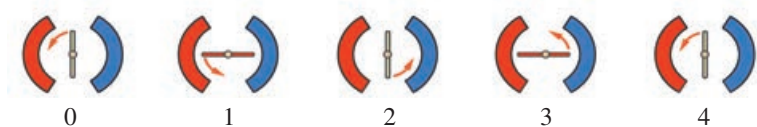
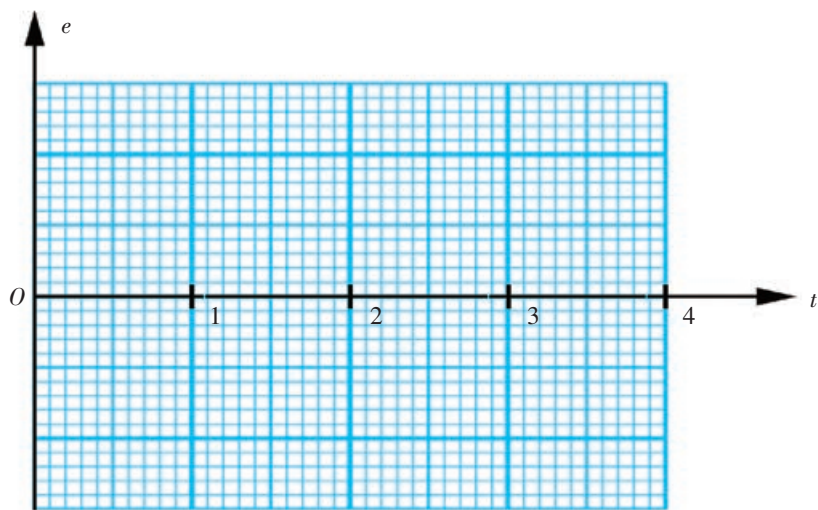


图 3-1-6 发电机导电线圈的几个瞬时位置

图 3-1-7 发电机导电线圈的 $e-t$ 图像

你能用穿过导电线圈的磁通量的变化率来解释发电机的发电过程吗?

定量研究

设图 3-1-5 中的发电机导电线圈 AB 边和 CD 边的长度都为 L , BC 边和 DA 边的长度都为 a ; 导电线圈在磁场中以角速度 ω 逆时针匀速转动, AB 、 CD 两条边转动的线速度为 v ; 匀强磁场的磁感应强度为 B 。

在发电机导电线圈的转动过程中, 当线圈平面从与磁感线垂直的位置 OO' 转过角度 θ 时 (图 3-1-8), 线圈中产生的感应电动势是

$$e = 2BLv \sin \theta \quad (1)$$

请你推导出 (1) 式, 并讨论它的物理意义。

若从中性面开始计时, 则 $E_{\max} = 2BLv$, $\theta = \omega t$, 得

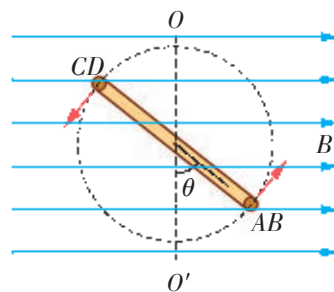
$$e = E_{\max} \sin \omega t \quad (2)$$

式中, e 是感应电动势的瞬时值, $E_{\max}$ 是感应电动势的最大值。

(2) 式表明, 发电机运转时, 导电线圈中产生的感应电动势是按正弦规律变化的。

请讨论:

交流发电机发出的交变电流的周期 T 是多少? 频率 f 是多少? 它们与发电机线圈的转速 n (转/秒) 之间有怎样的关系?

图 3-1-8 线圈平面从与磁感线垂直的位置转过角度 θ 时的正视图

旋转电枢式发电机和旋转磁极式发电机

发电机中，可转动的部分叫做转子，固定的部分叫做定子。

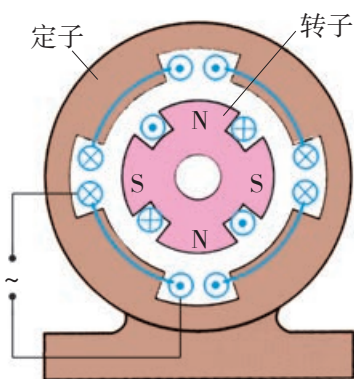


图 3-1-9 旋转磁极式发电机的原理图

前面所述的交流发电机是导电线圈在磁场中旋转的发电机，这种发电机叫做旋转电枢式发电机。

在旋转电枢式发电机中，转子产生的电流必须经过裸露的滑环和电刷引到外电路。如果电压很高，就容易产生火花放电，从而可能烧坏发电机。而且其电枢的大小也受到限制，导电线圈的匝数不能很多。这种发电机能够提供的电压一般不超过 500 V。为了克服旋转电枢式发电机的上述缺陷，人们设计制造了旋转磁极式发电机。

图 3-1-9 是旋转磁极式发电机的原理图。转子上绕有导电线圈，通电后形成 N 极和 S 极，定子内嵌有电枢线圈。当转子在外力驱动下旋转时，转子的磁场和电枢线圈就有了相对运动，即电枢线圈切割了磁感线，在线圈中便产生了感应电动势。转子匀速转动，定子的电枢线圈上就感应出周期性变化的交变电动势。旋转磁极式发电机的电枢嵌在外壳内，占有的空间可以很大，它能提供几千伏到几万伏的电压。大型发电机都是旋转磁极式的。

交变电流的电能从哪里来

从能量转化的角度看，发电机是把机械能转变为电能的机器。那么，发电机的机械能是从哪里来的呢？

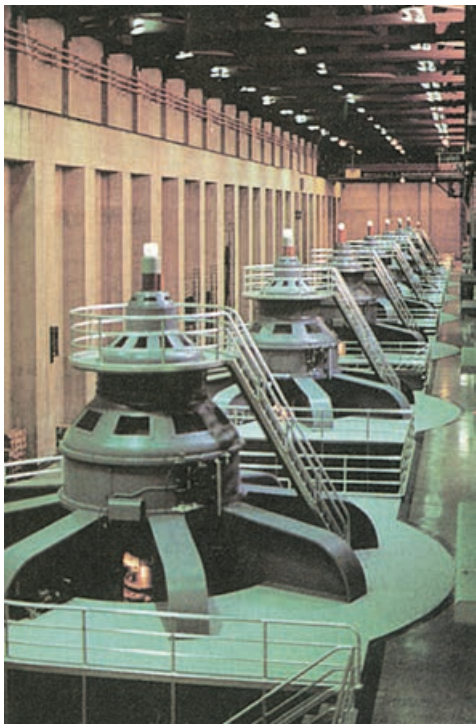
原来，发电机的转子由蒸汽轮机、水轮机等带动。蒸汽轮机、水轮机等将机械能传递给发电机，发电机将机械能转化为电能，输送到外电路。

水力发电站是利用水的机械能驱动水轮机转动的；火力发电站是利用燃烧煤或其他燃料产生的高温高压蒸汽来驱动蒸汽轮机转动的；核电站是利用核反应堆产生的高温高压蒸汽来驱动蒸汽轮机转动的。

图 3-1-10 所示的是目前常见的几种发电站。

针对常见的水力发电站、火力发电站和核电站，通过网络、图书等信息源，收集资料并加以分析整理，说明这几种发电站的工作流程、能量转化流向以及对社会和环境的影响。

你还知道哪些发电方式？它们用的是什么能源？请查阅相关资料，比较它们各自的特点。



b 水力发电站



a 火力发电站



c 核电站

图 3-1-10 目前常见的几种发电站

信息浏览

太阳能光伏发电

光伏发电是利用半导体界面的光生伏特效应而将光能直接转变为电能的一种技术。这种技术的关键元件是太阳能电池。太阳能电池经过串联、并联后形成大面积的太阳能电池组件，再配上蓄电池和功率控制器等部件就形成了光伏发电装置。它产生的是直流电，要经过电子逆变器转换成交流电流才能供家用电器使用或者向电网供电。

图 3-1-11 所示的是光伏发电站，图 3-1-12 是光伏发电站的发电、送电运行图。



图 3-1-11 光伏发电站



图 3-1-12 光伏发电站的发电、送电运行图

家庭作业与活动

1. 图 3-1-13 所示的是交流发电机模型。采取哪些措施可以使它产生的电动势增大？



图 3-1-13 交流发电机模型

2. 一台发电机发出正弦式交变电流，其电动势的最大值为 400 V，导电线圈匀速转动的角速度为 314 rad/s。从中性面开始计时，试写出电动势瞬时值的表达式。电动势的周期是多少？在 1 s 内电流方向改变了多少次？
3. 你知道哪些发电方式？请你从电磁感应的角度总结不同发电方式的共同点。
4. 有人说，在图 3-1-5 中，导电线圈平面转到中性面的瞬间，穿过线圈的磁通量最大，因而线圈中产生的感应电动势最大；导电线圈平面跟中性面垂直的瞬间，穿过线圈的磁通量为零，因而线圈中产生的感应电动势为零。这种说法是否正确？为什么？
5. 在图 3-1-8 中，设矩形导电线圈的 AB 边长 $L = 50 \text{ cm}$ ，线圈在磁感应强度 $B = 0.1 \text{ T}$ 的匀强磁场中匀速转动， AB 边和 CD 边的线速度均为 $v = 4 \text{ m/s}$ 。求导电线圈平面跟磁感线平行时，线圈中产生的感应电动势。若导电线圈与外电路连接后，全电路的总电阻 $R = 0.2 \Omega$ ，则线圈在上述位置时电路中电流的瞬时值为多大？
6. 有一台发电机，它的矩形导电线圈的长和宽分别为 10 cm 和 6 cm，内部匀强磁场的磁感应强度为 0.5 T。当这台发电机的线圈以 314 rad/s 的角速度匀速转动时，它输出的最大电压为 311 V，则其线圈应有多少匝？

3.2 交变电流的描述

恒定电流的大小和方向不随时间变化，因此只要知道电路中电流或电压的数值，就可以予以定量描述了。而交变电流的大小和方向都随时间做周期性变化，这需要用哪些新的物理量来描述呢？

用哪些物理量描述交变电流

周期和频率

为了描述交变电流周期性变化的规律，需要引入周期和频率的概念。交变电流完成一次周期性变化所需的时间，叫做交变电流的**周期**（period），通常用 T 表示，单位是秒（s）。交变电流完成周期性变化的次数与所用时间的比，叫做交变电流的**频率**（frequency），通常用 f 表示，单位是赫兹，简称赫，符号是 Hz。

请思考：

根据周期和频率的定义，交变电流的周期与频率之间有这样的关系？

你能指出图 3-2-1 所示的交变电流的周期和频率吗？

我国工业和照明用的交变电流的周期是 0.02 s，频率是 50 Hz。

这种交变电流的方向每秒改变多少次？

最大值和有效值

由于交变电流的电动势、电压和电流都在随时间而变化，要精确描述交变电流，就必须给出它们在任意时刻的数值。交变电流的电动势、电压和电流在某一时刻的数值，叫做交变电流的**瞬时值**，通常分别用小写字母 e 、 u 、 i 表示。交变电流的最大值是电动势、电压和电流在一个周期内所能达到的最大数值，分别用 $E_{\max}$ 、 $U_{\max}$ 、 $I_{\max}$ 表示。

请指出图 3-2-1 所示交变电流的电压最大值。

交变电流的瞬时值和最大值在电路设计和分析中有着重要的意义，分析电路的工作状态、耐压性能时都要用到。

在实际生产中常用有效值来描述交变电流。交变电流的电动势、电压和电流的有效值分别用大写字母 E 、 U 、 I 表示。

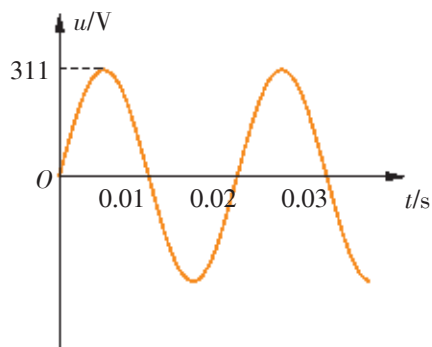


图 3-2-1 交变电流的周期和频率

物理学中是怎样规定交变电流的有效值的呢?

物理学中规定,给阻值相等的两个电阻器分别通以恒定电流和交变电流,如果在相同的时间内产生的热量相等,那么就把这一恒定电流的数值叫做这一交变电流的有效值。

理论计算表明,正弦式交变电流的有效值等于其最大值的

$\frac{1}{\sqrt{2}}$, 即

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{\max} \approx 0.707 E_{\max}$$

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{\max} \approx 0.707 U_{\max}$$

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{\max} \approx 0.707 I_{\max}$$

通常说到交变电流的电流或电压,都是指有效值,例如我国家庭电路的电压 220 V,指的便是有效值。各种使用交变电流的电器的铭牌上所标的额定电压和额定电流,都是指有效值。交流电流表和交流电压表也是按有效值来制作刻度盘的,它们的示数也都是有效值。

图 3-2-1 所示交变电流的电压有效值是多少?

最大值和有效值、周期和频率,都是描述交变电流的物理量。在使用交变电流的电器的铭牌上,一般必须注明所用交变电流的有效值和频率等参数。

信息浏览

日光灯发出的光为什么会闪烁

日光灯不但节能,而且发出的光柔和、明亮。但是,日光灯发出的光有闪烁现象,这是为什么呢?

日光灯的发光原理是受激发光。加在日光灯两端的电压使灯管内的气体发出紫外线,照射到灯管内壁上,激发那里的荧光粉发光。日光灯所用的电源是 50 Hz 的交变电流电源,每秒有 100 个瞬间电压为零。在这些瞬间,管内气体不发出紫外线,荧光粉不发光。因此,日光灯的灯光每秒要闪烁 100 次。

对人眼来说,每秒 100 次是一个很高的频率,

因此我们通常不会觉察到这种闪烁。但是时间长了,这种闪烁对视力还是有影响的。在需要有稳定照明的生产或科研场所,使用日光灯是不利的。人们已经在电路等方面采取了措施,以减少日光灯的闪烁。

使用交变电流的白炽灯发出的光却没有闪烁现象,这又是为什么呢?

白炽灯是利用电流的热效应,使灯丝达到高温状态而发光的。灯丝的温度不会随着电压的剧烈波动而波动,因此发出的光不会闪烁。但是白炽灯的发光效率很低,绝大多数电能都转化成热能损耗掉了。

怎样用数学方法描述交变电流

正弦式交变电流可以用图像和函数表达式两种方法来描述。

用图像描述

家庭电路电压的最大值是 311 V，频率是 50 Hz。

请你在图 3-2-2 所示的坐标纸上描画出两个周期内家庭电路电压的 $u-t$ 图像。

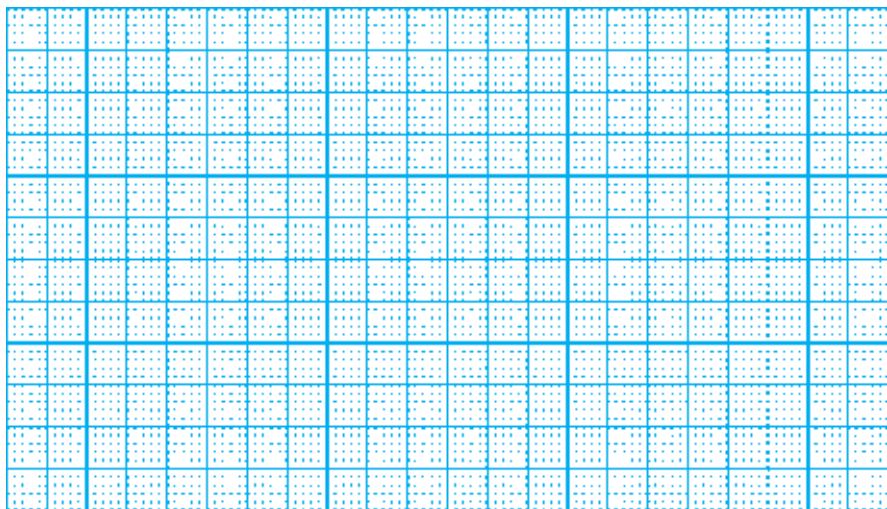


图 3-2-2 家庭电路的 $u-t$ 图像

用函数表达式描述

正弦式交变电流的电压 u 、电流 i 的函数表达式分别为

$$u = U_{\max} \sin \omega t \quad i = I_{\max} \sin \omega t$$

式中的 ω 是正弦函数每秒变化的弧度数，称为角频率，单位是弧度/秒 (rad/s)。它与交变电流的频率 f 和周期 T 的关系是

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

请写出图 3-2-2 中你所描画的家庭电路电压的 $u-t$ 图像的函数表达式。

案例分析

案例 有一盏标着“220 V 60 W”字样的台灯，请计算它工作时交变电流的电压最大值，写出电压的函数表达式（从中性面开始计时），并在图 3-2-3 中画出电压的图像。

分析 使用交变电流的用电器，其铭牌上标示的是该用电器的额定电压有效值，即 $U = 220 \text{ V}$ ，而 $U_{\max} = \sqrt{2}U$ 。又已知

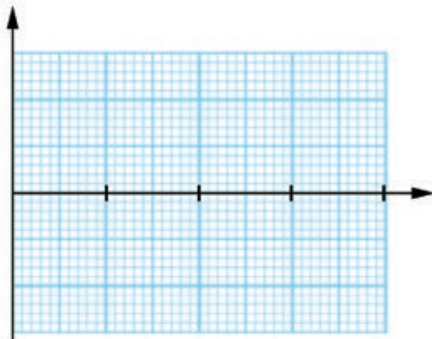


图 3-2-3

从中性面开始计时，也就是说，当 $t = 0$ 时，该交变电流的电压瞬时值 $u = 0$ 。

解答

请完成该案例的解答过程，并与同学交流。

家庭作业与活动

1. 关于家庭电路中的交变电流，下列说法中不正确的是（ ）。

- A. 可以用直流电表来测量交变电流的最大值
- B. 可以用直流电表来显示交变电流的瞬时值随时间变化的规律，并可让你做相应的观察和记录
- C. 可以用示波器来显示交变电流随时间变化的图像
- D. 对交变电流只能做理论计算，无法实际测量或显示

2. 关于交变电流，下列说法中正确的是（ ）。

- A. 使用交变电流的电器设备上所标的电压值和电流值是所用交变电流的峰值
- B. 用交流电流表和电压表测定的读数值是交变电流的瞬时值
- C. 给出的交变电流的电压值和电流值，在没有特别说明的情况下都是指有效值
- D. 跟交变电流有相同热效应的恒定电流的有关数值就是交变电流的有效值

3. 请列举日常生产和生活中能感受到交变电流的大小和方向在变化的实例。

4. 我国家庭电路的电压是 220 V，动力供电线路的电压是 380 V，它们的有效值、最大值各是多少？

5. 一交变电流的电流瞬时值 $i = 5 \sin 100 \pi t \text{ A}$ ，则它的最大值为____ A，有效值为____ A，周期为____ s，频率为____ Hz。

6. 图 3-2-4 是一个按正弦函数规律变化的交变电流的电流图像，请根据图像求出它的周期、频率和最大值，并写出电流的函数表达式。

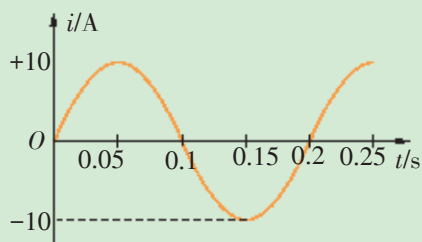


图 3-2-4

7. 交流发电机的矩形导电线圈在匀强磁场中以恒定的角速度 ω 绕垂直于磁场方向的轴转动，线圈的匝数为 n 匝。你能证明该发电机感应电动势的最大值 $E_{\max} = n \omega \Phi_{\max}$ 吗？其中， $\Phi_{\max}$ 为通过每匝导电线圈的磁通量的最大值。

3.3 电能的输送

原野上，一座座高大的铁塔巍然耸立，支撑着一条条高压输电线，越过高山，跨过江河，将电能从发电站输向四面八方。

在人类所利用的各种能源中，没有一种能源的输送能像输送电能那样方便、快速。

那么，电能是怎样输送的呢？远距离输电为什么要采用高电压呢？输配电系统是怎样将电能输送进千家万户的呢？



图 3-3-1 高压输电网

远距离输电为什么要用高电压

用导线把电源和用电器连接起来，就可以实现电能的输送。但是导线有电阻，在远距离输电时，因线路长，电阻较大，造成电能损耗，降低输送效率。因此，在电能的远距离输送中要研究减小损耗的办法。

案例分析

案例1 一台 $1.25 \times 10^5 \text{ kW}$ 的发电机发出的电，若用 10 kV 的电压满负荷输送，输电线上的电流将有多大？假如两条输电线每千米的电阻是 0.1Ω ，那么电流在 1 km 长的两条输电线上将损耗多少热功率？若以这种方式将电能输送 5 km 的距离，输电线路上的损耗的功率占发电机输出功率的百分比是多少？

■ **分析** 在初中物理中我们已经学过电功率的公式 $P = UI$ ，据此，由发电机的输出功率和输送电压，即得输电线上的电流

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1.25 \times 10^8}{1.0 \times 10^4} \text{ A} = 1.25 \times 10^4 \text{ A}$$

这样大的电流，经过 1 km 的输电线（电阻为 0.1Ω ），损耗的热功率

$$P_{\text{损}} = I^2 R = (1.25 \times 10^4)^2 \times 0.1 \text{ W} \approx 1.56 \times 10^7 \text{ W}$$

在 5 km 的距离上，输电线电阻 $R' = 0.5 \Omega$ 。

损耗的热功率 $P'_{\text{损}} = I^2 R' = (1.25 \times 10^4)^2 \times 0.5 \text{ W} \approx 7.81 \times 10^7 \text{ W}$

$$\frac{P'_{\text{损}}}{P} \times 100\% = \frac{7.81 \times 10^7}{1.25 \times 10^8} \times 100\% \approx 62.5\%$$

也就是说，输送 5 km 距离，就有 62.5% 的电能被导线上的电阻损耗了。

由此可见，远距离输电时，必须设法减少输电线上的电能损耗。

由于电能损耗的根本原因是输电线有电阻，因此通常选用电阻率小的金属导线（铜、铝）来制作输电线。

要进一步降低电阻，可采用增大导线横截面积的方法。但是导线的横截面积的增大是有一定限度的，过粗的导线会耗费太多的资源，而且输电线太粗就太重，也给架设输电线带来困难。显然这种方法是行不通的。

这就需要另辟蹊径。是不是可以减小输电线中的电流呢？由 $P = UI$ 可知，当输送的功率一定时，采用升高输电电压的方法，就可以减小输电电流。下面进一步讨论这个问题。

我国目前的远距离输电线路，一般采用 110 kV、220 kV 的高电压，甚至采用 500 kV 的超高压。

分析与论证 高压输电的原理

设某发电系统提供的电功率为 P_0 ，输出的电压为 U ，连接负载的输电线总电阻是 R ，通过输电线的电流为 I 。那么，输电线上损耗的电能与哪些因素有关呢？

输电线上损耗的电功率为 $P_{\text{损}} = I^2 R$ ，而 $I = \frac{P_0}{U}$ 。

由此可得输电线上损耗的电功率

$$P_{\text{损}} = \frac{P_0^2 R}{U^2}$$

由上式讨论：

1. 输电线路上的电能损耗与哪些因素有关？
2. 为了减小输电线路上的电能损耗，采用怎样的方法最为有效？

理论计算表明：提高输送电能的电压，可以有效地减小输电线路上的电能损耗，这就是远距离输电采用高电压的根本原因。

案例2 在案例 1 中，如果采用 500 kV 的超高压输电，那么电流在 5 km 的距离上将损耗多少热功率？输电距离为 500 km 时，输电线路损耗的热功率占发电机输出功率的百分之几？

请你自己对案例 2 进行分析，解出答案。

你找到减小输电线路电能损耗的方法了吗？

交流输电网

采用高压输送电能有效地解决了电能在输电线路上的损耗的问题，但这并不是说电压越高越好，因为电压越高，对输电线路及其有关设备的绝缘性能要求也越高，而且这些材料和设备的绝缘性能也会受到更多因素的影响。



图 3-3-2 变电站

当电能用高电压输送到用电区时，为保证安全用电，还要把电压降低后才能供用户使用。

电能输送是一个系统工程。为了确保电能的输送经济、可靠，人们设计建造了电能输电网。发电机发出的交变电流先送到升压变电站，将电压升高到 220 kV 以上，由高压输电线向远处输送。在用电区，先由第一级变电站将电压降到 110 kV，再输送到第二级变电站，将电压降到 10 kV，送到用电区。如果用电区使用的是普通照明等生活用电，那么还要用变压器进一步将电压降到 220 V。

由各家发电厂、各级变电站、高压输配电线路所组成的系统称为电力网。电力网的任务是分配和输送电能。

供电安全，是关系国家能源安全和国民经济命脉的重大问题。我国已建设运营了国家智能电网，将各家发电厂、变电站、高压输配电线路联网组成“智能电力网”系统，统一调度，分级管理，承担着保障更安全、更经济、更清洁、可持续的电力供应的基本使命。目前我国远距离输电采用的电压有 110 kV、220 kV、330 kV、500 kV 高压，甚至有高达 750 kV 至 1 000 kV 以上的特高压。图 3-3-3 是我国的电力网示意图。

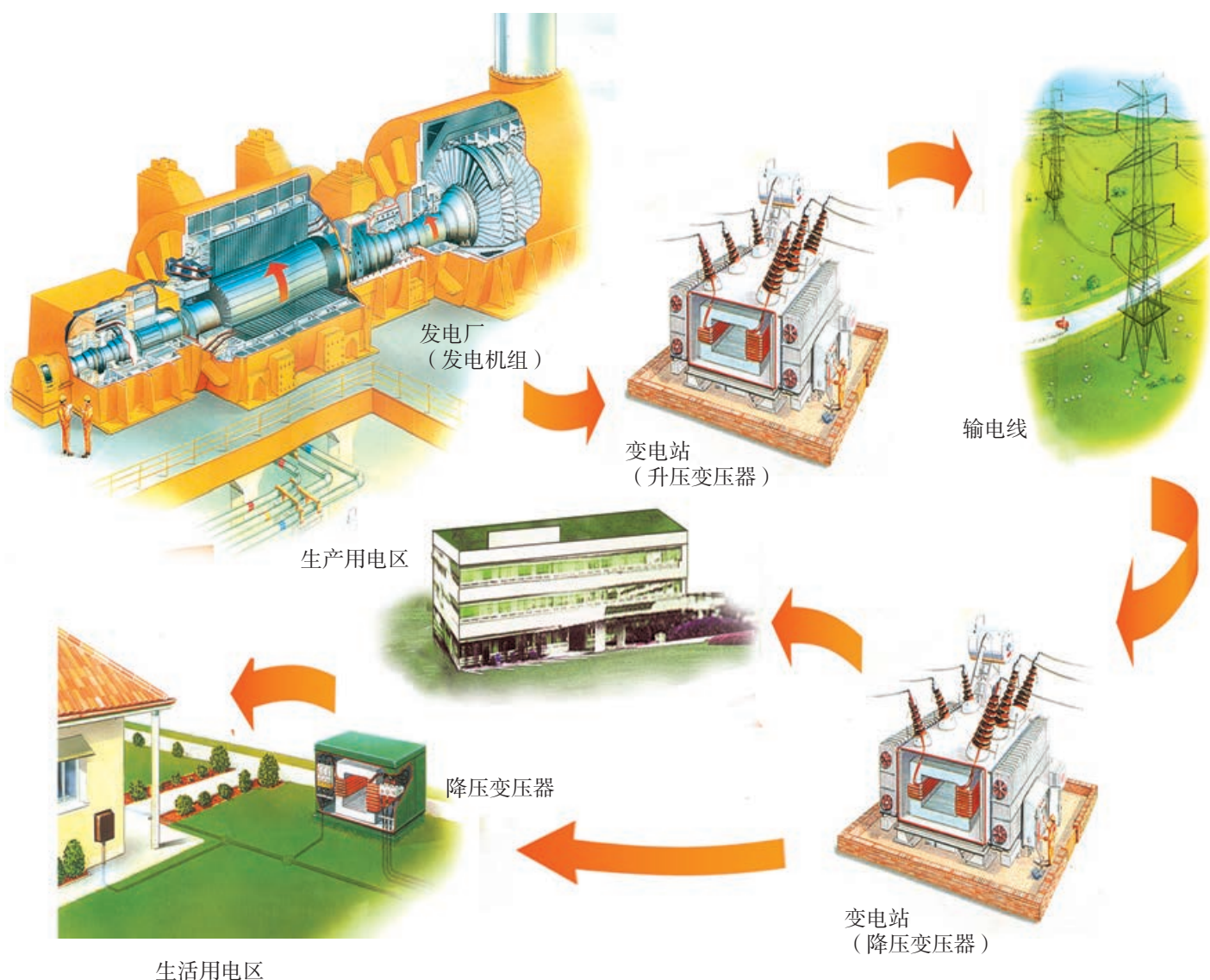


图 3-3-3 电力网示意图

信息浏览

高压输电概况

19世纪70年代末,已有人对远距离输电技术进行研究。1882年,法国物理学家德普雷(M. Deprez)发明了高压输电电路,并架设成功。

1881年在巴黎首届国际电气工程师会议上,德普雷呈交了一篇关于输配电的论文,指出技术上完全有可能解决远距离送电的损耗问题。在1882年慕尼黑博览会上,他展示了第一条试验性直流输电线路,这条线路从德国的米斯巴赫到慕尼黑,长度为57 km,电压为1 500~2 000 V。通过这条输电线路,他把远在米斯巴赫的一台发电机发出的电,输送给慕尼黑博览会上的一台电动机,使这台电动机成功地驱动一台离心水泵工作。

后来,随着交变电流技术的发明,人们可把电压升高到数千伏甚至数十万伏。输电电压越高,输电距离就越远。有了高压输电线路,水力发电技术也发展起来。这样,在第二次工业革命中,

电机就逐渐代替热机成为更重要的角色。

我国电力系统的发展,是世界电力系统发展的重要组成部分。如今,我国电力系统已经进入了大电网、大机组、高电压、高自动化的发展时期。随着经济的快速发展,我国电力需求也在快速增长,特高压输电(指用 ± 800 kV及以上的直流和1 000 kV及以上的交流的电压等级输送电能)逐渐进入到我国电力的建设当中。特高压输电能同时满足电能大容量、远距离、高效率、低损耗、低成本输送的基本要求,而且能有效解决500 kV超高压电网存在的输电能力低、安全稳定性能差、经济效益欠佳等问题。据估计,1条1 150 kV输电线路的输电能力可代替5~6条500 kV线路,或3条750 kV线路,可减少铁塔用材三分之一,节约导线二分之一,节省包括变电站在内的电网造价10%~15%。

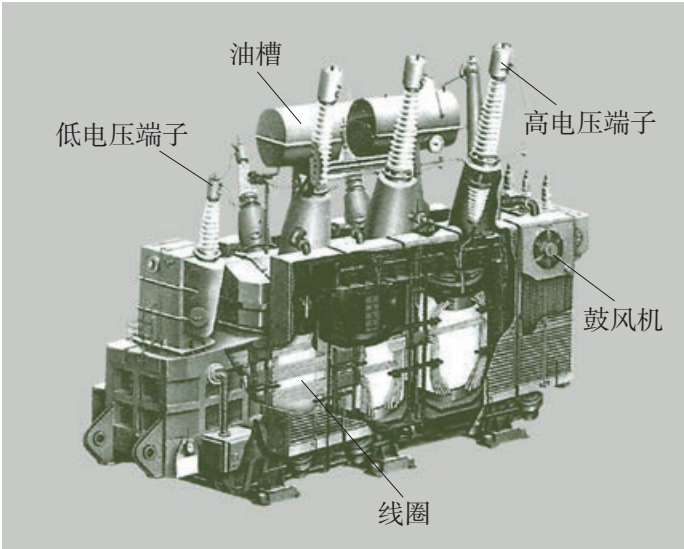
家庭作业与活动

1. 远距离输送交变电流一般采用高压输电。我国正在研究用1 150 kV的特高压进行输电。采用高压输电的优点是()。
A. 可节省输电导线的材料
B. 可加快输电的速度
C. 可根据需要调节输电电流的频率
D. 可减少输电线上的电能损耗
2. “西电东输”是我国实现经济跨地区可持续发展的重要保证。它将西部丰富的自然资源水能转化为电能输送到电力供应紧张的沿海地区,这样既实现了东西部地区双赢的目标,也形成了经济发展与环境保护双赢的局面。为了减少输电线上的电能损耗,需要采用高压输电。若金沙江流域上的向家坝水电站输出的功率不变,输出电压提高为原来的20倍,则输电导线上的电能损耗将减小为原来的()。

- A. $\frac{1}{20}$ B. $\frac{1}{100}$ C. $\frac{1}{200}$ D. $\frac{1}{400}$
3. 某发电厂原来用11 kV的交变电流电压输电,后来改用220 kV输电,输送的电功率都是 P 。若输电线路的电阻为 R ,则下列说法中正确的是()。
A. 由公式 $I = \frac{P}{U}$ 可知,升压后输电线上的电流降为原来的 $\frac{1}{20}$
B. 由公式 $I = \frac{U}{R}$ 可知,升压后输电线上的电流增为原来的20倍
C. 由公式 $P = I^2 R$ 可知,升压后输电线上的功率损耗减小为原来的 $\frac{1}{400}$
D. 由公式 $P = \frac{U^2}{R}$ 可知,升压后输电线上的功率损耗增大为原来的400倍

3.4 变压器为什么能改变电压

在输送电能的过程中，有时要升高电压，有时又要降低电压。升降电压装置的核心设备就是**变压器**（transformer）。在电力、电器世界里，到处都要用到变压器，如输送电能的大型电力变压器（图 3-4-1 a）、各种电子仪器中常用的微型变压器（图 3-4-1 b）等。变压器是由哪些部分构成的？它为什么能改变电压？它在改变电压时，对所传输的电能有影响吗？



a 大型电力变压器



b 各种电子仪器中常用的微型变压器

图 3-4-1 各种各样的变压器

认识变压器



图 3-4-2 实验室用变压器

请观察图 3-4-2 所示的实验室用变压器，然后回答：变压器是由哪些部分构成的？

变压器主要由铁芯和绕在铁芯上的导电线圈两部分构成。铁芯一般是用导磁性能很好的硅钢片叠成，硅钢片之间互相绝缘。线圈有两个或多个绕组。接电源的导电线圈叫做原线圈（或初级线圈），接负载的导电线圈叫做副线圈（或次级线圈）。图 3-4-3 是变压器的结构原理图，图 3-4-4 是常用变压器的图形符号和电路符号。

变压器工作的基本原理是电磁感应。如图 3-4-3 所示，当原线圈加上交变电流电压 U_1 时，原线圈中便有交变电流，并在铁芯中产生交变的磁通量。这个交变的磁通量穿过副线圈，在

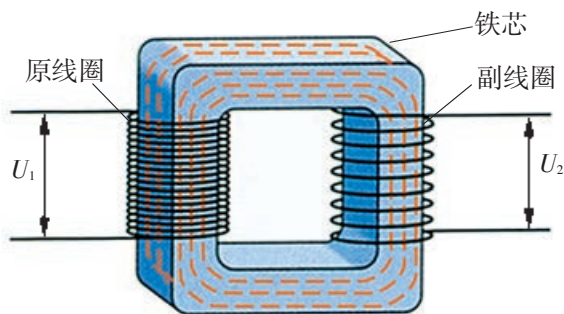


图 3-4-3 变压器的结构原理图(虚线表示磁感线)

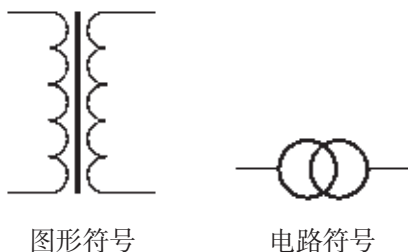


图 3-4-4 变压器的图形符号和电路符号

副线圈中产生感应电动势。如果副线圈电路是闭合的，就会在副线圈中产生交变的感应电流，同样会在铁芯中产生交变的磁通量，从而又在原线圈中产生感应电动势。这种在原、副线圈中因交变电流而产生的互相感应现象，使得电能可以通过交变磁场从原线圈转移到副线圈。

从图 3-4-3 可以看出，原、副线圈的导线并不相连。

请讨论：

电能是以什么为载体从原线圈传递给副线圈的？

探究变压器原、副线圈电压与匝数的关系

图 3-4-3 所示的是理想变压器的结构原理。设它的原、副线圈匝数分别为 n_1 、 n_2 ，电源加在原线圈上的电压为 U_1 ，副线圈输出的电压为 U_2 。输出电压 U_2 与输入电压 U_1 之间有怎样的关系呢？

理想变压器是实际变压器的理想化模型。假设变压器工作时，没有漏磁，没有线圈电阻和铁芯中的能量损耗，这就是理想变压器。



学生必做实验

探究变压器原、副线圈电压与匝数的关系

观察与思考

观察变压器的结构，讨论以下问题：

1. 为什么变压器的铁芯要用相互绝缘的薄金属片（磁导率高的硅钢片）叠合而成？
2. 为什么变压器的线圈是用铜漆包线（表面涂有绝缘漆的铜丝）沿同一方向平绕而成的？
3. 你所用的变压器，各接线柱间的匝数是多少？

实验器材

变压器、学生电源、多用电表（图 3-4-5）。



安全提示：

因副线圈匝数较多，
为避免输出电压过高，
接入原线圈两端的电压
不要超过 8 V！



图 3-4-5 实验器材

设计实验

1. 观察变压器的原线圈和副线圈，了解各接线柱间线圈匝数的分布情况（图 3-4-6）。
2. 用学生电源在变压器的原线圈上接入交变电流电压，用多用电表测量副线圈上不同输出端的电压，探究输入电压、输出电压与原线圈匝数、副线圈匝数的关系。

收集信息

1. 用学生电源在变压器的原线圈接线柱 A、C 之间（400 匝）接入 6 V 电压，用多用电表（交流电压挡）测量该电压的值，填入表 1。
- 用多用电表测量副线圈 D 与 E 之间（200 匝）、E 与 F 之间（600 匝）、D 与 F 之间（800 匝）、D 与 G 之间（1 400 匝）的电压，分别填入表 1。

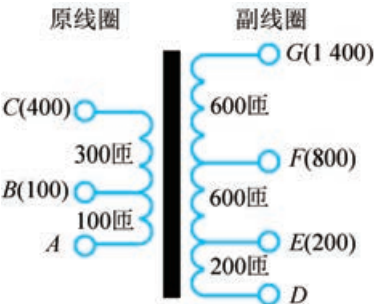


图 3-4-6 变压器原线圈和副线圈的匝数

表 1

原、副线圈 及其匝数	原线圈 (n_1)	副线圈 (n_2)			
	400 匝	200 匝	600 匝	800 匝	1 400 匝
电压 U/V					
每匝电压 $\frac{U}{n}/V$					

2. 用学生电源在原线圈接线柱 A、B 之间（100 匝）接入 4 V 电压，用多用电表测量该电压的值，填入表 2。
- 用多用电表测量副线圈 D 与 E 之间、E 与 F 之间、D 与 F 之间、D 与 G 之间的电压，分别填入表 2。

表 2

原、副线圈 及其匝数	原线圈（ n_1 ）	副线圈（ n_2 ）			
	100 匝	200 匝	600 匝	800 匝	1 400 匝
电压 U/V					
每匝电压 $\frac{U}{n}/V$					

分析论证

1. 根据实验数据，在图 3-4-7 中画出变压器的副线圈电压（输出电压）与副线圈匝数的关系图像，并根据实验数据和图像，分析输出电压与副线圈匝数的关系。

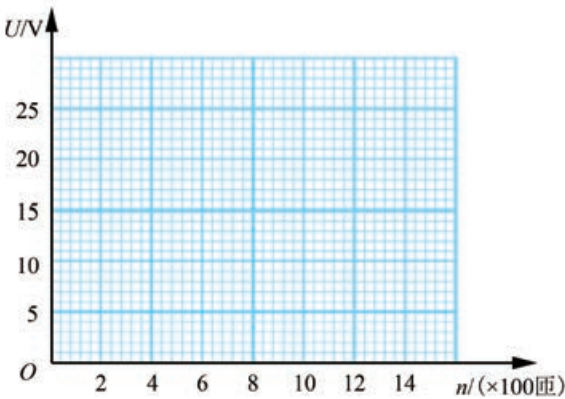


图 3-4-7 变压器的输出电压与副线圈匝数的关系

2. 根据实验数据，计算表 1 和表 2 中原线圈和副线圈上的每匝电压 $\left(\frac{U}{n}\right)$ 值，看看能得到什么结果。

实验结论

变压器原线圈两端的电压 U_1 与副线圈两端的电压 U_2 之比，等于原线圈的匝数 n_1 与副线圈的匝数 n_2 之比，即

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

(1)

如果原线圈的匝数大于副线圈的匝数（ $n_1 > n_2$ ），那么副线圈的电压低于原线圈的电压（ $U_1 > U_2$ ），该变压器为降压变压器；如果原线圈的匝数小于副线圈的匝数（ $n_1 < n_2$ ），那么副线圈的电压高于原线圈的电压（ $U_1 < U_2$ ），该变压器为升压变压器。

多学一点

变压器原、副线圈的电流与
线圈匝数的关系

实际变压器的效率很高，大型变压器的效率可达 97%~99.5%。理想变压器的效率为 100%。

变压器在改变电压的同时，还起了改变电流的作用。

理想变压器没有能量损耗，因此副线圈的输出功率等于原线圈的输入功率，即 $P_{\text{出}} = P_{\text{入}}$ 。

请你证明：对于理想变压器来说，原、副线圈电路中的电流之比，与原、副线圈的匝数成反比，即

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

式中， I_1 、 I_2 分别为原、副线圈电路中的电流。

请思考：

如果变压器有多个副线圈，那么上面的关系式（1）和关系式（2）还成立吗？

案例分析

案例 有一台理想变压器，其原线圈的匝数 $n_1 = 1\,100$ 匝，接在电压为 220 V 的交流电源上。现用该变压器给 11 盏并联的标有“36 V 60 W”字样的灯泡供电，能使这些灯泡正常发光。

（1）该变压器副线圈的匝数和原线圈中的电流分别是多少？

（2）若关闭 5 盏灯泡，则原线圈中的电流是多少？

分析 由题意可知，电源电压 $U_1 = 220$ V。因“灯泡正常发光”，可知变压器的输出电压 $U_2 = 36$ V。由灯泡的数目和额定电压与额定功率，可求得副线圈中的总电流。因为是理想变压器，增减灯泡对输出电压无影响。

解答 （1）变压器原、副线圈的匝数比等于它们的电压比

$$\begin{aligned} \frac{n_1}{n_2} &= \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{36} \\ n_2 &= \frac{U_2}{U_1} n_1 = \frac{36 \times 1\,100}{220} \text{ 匝} = 180 \text{ 匝} \end{aligned}$$

11 盏灯泡并联的总功率

$$P = 11P_0 = 11 \times 60 \text{ W} = 660 \text{ W}$$

副线圈中的总电流 I_2 为

$$I_2 = \frac{P}{U_2} = \frac{660}{36} \text{ A} = \frac{55}{3} \text{ A}$$

因为 $\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$ ，所以原线圈中的电流 I_1 为

$$I_1 = \frac{n_2}{n_1} I_2 = \frac{180}{1\,100} \times \frac{55}{3} \text{ A} = 3 \text{ A}$$

请写出（2）的解题过程和结果，并与同学交流。

常见的变压器

变压器有多种类型，不同类型的变压器用途也不同。常见的变压器有：

电力变压器 这种变压器用于电力网，有升压变压器，也有降压变压器。电力变压器的功率通常较大。

自耦变压器 自耦变压器也叫做调压变压器，它的输出电压在一定范围内连续可调。这种变压器只有一个导电线圈（图3-4-8），线圈的起始端既是原线圈的一端，也是副线圈的一端。线圈上有一边刮去了绝缘漆，当金属触头沿此边滑动时，就改变了副线圈的匝数，从而改变了输出电压。

互感器 互感器也是一种变压器，一般用于测量高电压和大电流。因为高电压和大电流都不能用交流电压表或交流电流表直接去测量，所以用互感器把高电压变成低电压，或把大电流变成小电流。测量时，电表接在副线圈一边（即低电压或小电流线圈的一边），如图3-4-9所示。根据测得的数值，利用已知的电压比或电流比即可计算出原线圈中的电压或电流。

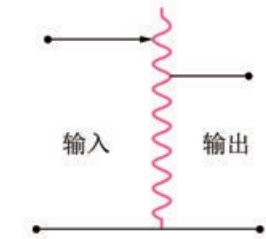


图 3-4-8 可升降电压的自耦变压器原理图

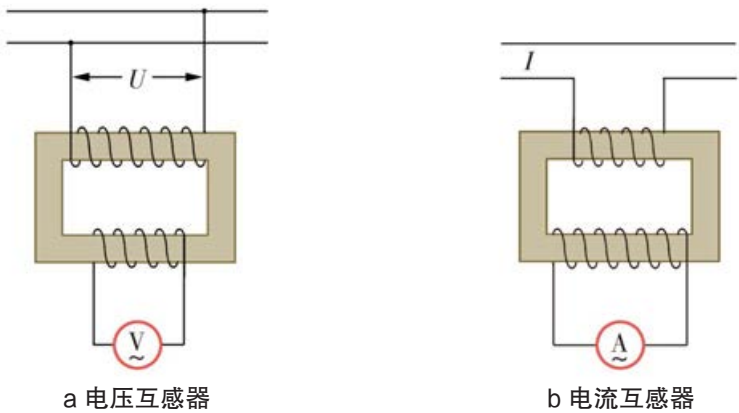


图 3-4-9 互感器原理图

电源变压器 不同的用电器往往需要不同的电压，这就要用电源变压器将 220 V 电压变到所需的电压。

小型电源变压器应用非常广泛，收录机、随身听、手机充电器、扫描仪等一些小型用电器，都要用到电源适配器，以将 220 V 交变电流转换成低压直流。电源适配器中的降压部分，往往就是小型的电源变压器。

多学一点 变压器的能量损耗

实际的变压器在传输电能过程中是有损耗的。变压器的能量损耗有铜损耗、磁滞损耗和涡电流损耗三种形式。这三种形

式的能量损耗都是把电能转化为了内能。

铜损耗来自原、副线圈中铜导线的电阻。铜损耗引起的能量损失为 I^2R ，这是不可避免的。

磁滞损耗是变压器铁芯的磁极极性在不断反转而造成的。利用磁滞损耗较少的材料做变压器线圈的芯子，可减小磁滞损耗。

变压器的铁芯中产生的涡电流也要消耗电能。变压器的铁芯采用薄硅钢片叠合而成，这样可以减少涡电流损耗。

课题研究

了解发电机和电动机对能源转化方式和工业发展的重要作用

19 世纪以来，科学家发现了电流的磁效应和电磁感应现象，使电磁学理论得到了极大的发展。随之而来的电力技术的开发利用、电动

机和发电机的发明，以及电能的利用，给人类社会的发展带来了巨大影响。

请你通过网络和到图书馆查阅资料，了解发电机和电动机对能源转化方式和工业发展的重要作用，并以此写一篇研究报告，与同学交流。

家庭作业与活动

- 如图 3-4-10 所示，一合理想变压器原线圈与副线圈的匝数比 $n_1 : n_2 = 1 : 2$ ，电源电压 $U = 220 \text{ V}$ 。A 是额定电流 $I_0 = 1 \text{ A}$ 的保险丝，R 是可变电阻。为了不使原线圈中的电流超过 I_0 ，调节可变电阻 R 时，其阻值不能小于多少？

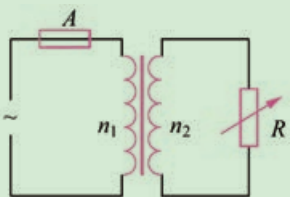


图 3-4-10

- 如图 3-4-11 所示，一合理想变压器有两个副线圈。已知 12 V 的副线圈输出电流是 4.17 A ，匝数是 30 匝； 127 V 的副线圈输出电流是 0.63 A 。

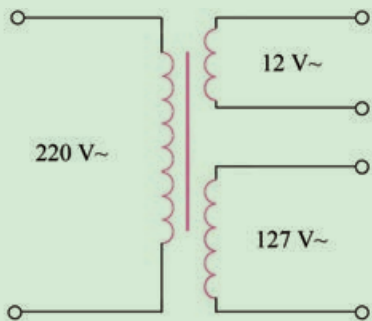


图 3-4-11

- (1) 127 V 的副线圈匝数是多少？原线圈的匝数是多少？
- (2) 原线圈的输入功率是多少？原线圈的输入电流是多少？

- 如果分别用 220 V 和 11 kV 的交流电压输送相同的电功率，而且输电导线的材料、输送距离和线路损耗功率都相同，那么它们所用导线的横截面积之比是多少？

设用 11 kV 的交流电压输电时，所用多股绞合铝线的横截面积为 16 mm^2 ，那么，在用 220 V 交流电压输电时，所用同样导线的直径为多少？这样的导线能行吗？

- 某电站的输送电压为 $U = 6000 \text{ V}$ ，输送功率为 $P = 500 \text{ kW}$ ，这时安装在输电线路的起点和终点的电能表一昼夜内示数相差 $4800 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。
 - (1) 试求输电线的电阻。
 - (2) 若要使输电损失的功率降到输送功率的 2%，电站应使用多高的电压向外输电？升压变压器的匝数比是多少？为满足居民用电，降压变压器的匝数比是多少？

第3章 家庭作业与活动

A 组

- 理想变压器的原、副线圈两侧一定相同的物理量是 ()。
 - 交变电流的频率
 - 交变电流的功率
 - 磁通量的变化率
 - 交变电流的最大值
- 在图 3-A-1 a、b 所示的两个电路中, 当 a、b 两端与 e、f 两端分别加 220 V 的交变电流电压时, 测得 c、d 间和 g、h 间的电压均为 110 V。

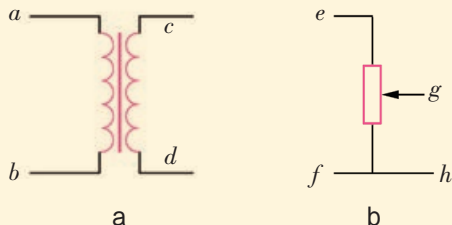


图 3-A-1

- 若分别在 c、d 两端和 g、h 两端加 110 V 的交变电流电压, 则 a、b 间和 e、f 间的电压各是多少?
- 若分别在 c、d 两端和 g、h 两端加 110 V 的直流电压, 则 a、b 间和 e、f 间的电压各是多少?
- 有一台理想变压器, 原、副线圈的匝数比为 100 : 1, 原线圈上所加电压为 23 kV, 副线圈通过总电阻为 $2\ \Omega$ 的输电导线向用户供电, 用户用电器得到的电压是 220 V。求输电导线上损耗的功率。
- 一台交流发电机的转子线圈共有 n 匝, 线圈框长为 l_1 、宽为 l_2 , 转子的转动角速度为 ω , 磁极间磁场的磁感应强度为 B 。根据以上条件, 你能推导出该发电机电动势最大值的表达式吗? 现在知道有一种强永磁材料, 叫铷铁硼, 用它制成发电机的磁极, 磁极间磁场的磁感应强度可增加到原来的 k 倍。如果保持发电机的结构尺寸和转子转动的角速度不

变, 那么要使产生的电动势不变, 转子线圈需要多少匝?

- 一变压器原、副线圈的匝数比为 20 : 1, 原线圈两端的电压 $U_1 = 220\text{ V}$, 副线圈的电阻 $r = 1\ \Omega$, 负载电阻 $R = 19\ \Omega$ 。求: 副线圈的输出电压 U_2 、原线圈的输入功率 P 及变压器的效率。

B 组

- 图 3-B-1 所示的是一与电源相接的理想变压器, 原线圈中的电流是 I_1 , 副线圈中的电流是 I_2 。若副线圈中的负载电阻变小, 则 ()。

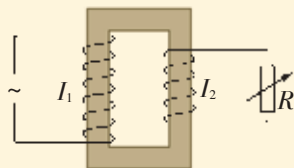


图 3-B-1

- I_2 变小, I_1 变小
- I_2 变小, I_1 变大
- I_2 变大, I_1 变大
- I_2 变大, I_1 变小

- 图 3-B-2 所示的是四个可以控制台灯亮度的电

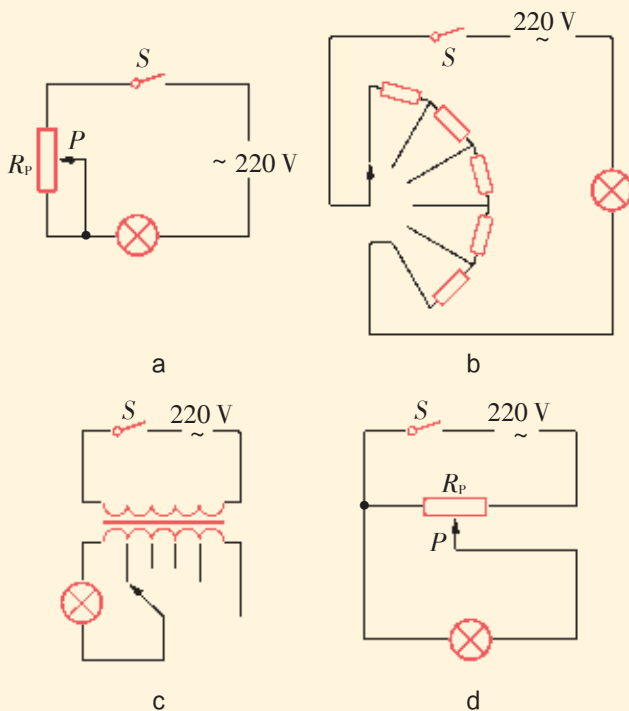


图 3-B-2

路，其中所用的灯泡上都标有“220 V 40 W”字样。当灯泡消耗的电功率都调至 20 W 时，哪个电路消耗的电功率最小？

3. 图 3-B-3 是一种漏电保护器的原理图。在变压器 A 处火线和零线双线并列绕制成线圈，然后接到用电器上；在变压器 B 处有一个输出线圈。一旦发生火线对地漏电事故，变压器线圈 B 中就会产生电流，令继电器 J 切断电源。试讨论该漏电保护器的工作原理。

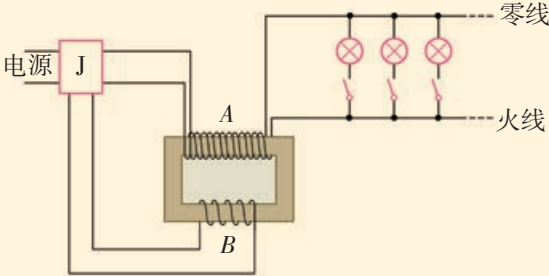


图 3-B-3

4. 有一小型水电站，其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，要求能量损耗不大于 4%。已知输电线的电阻为 $16\ \Omega$ ，用户降压变压器的输出电压为 240 V，则在符合此要求的输电线路中，所安装的升压变压器的匝数比和降压变压器的匝数比各是多少？
5. 图 3-B-4 是某种交变电流的电压图像。若已知它的最大值 $U_{\max}$ ，则你能根据图像运用等效法估算出该交变电流的电压有效值是多少吗？

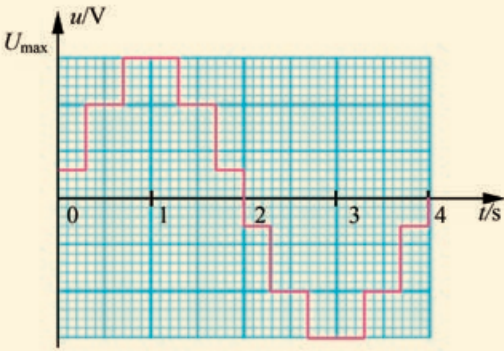


图 3-B-4

6. 图 3-B-5 是常见的配电变压器系统，它将 10 kV 高压转变为 380/220 V 电压供生产和生活使用。你能判断图中 A、B 两组线，哪组线上的电压是 10 kV，哪组线上的电压是 380 V 或 220 V 吗？

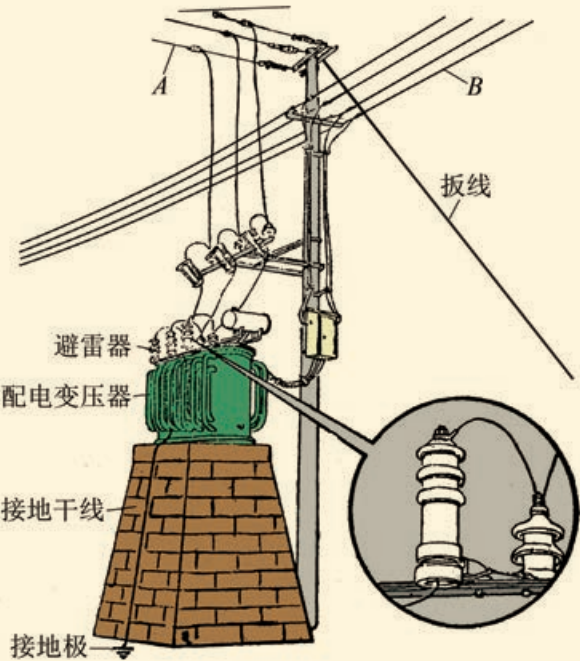
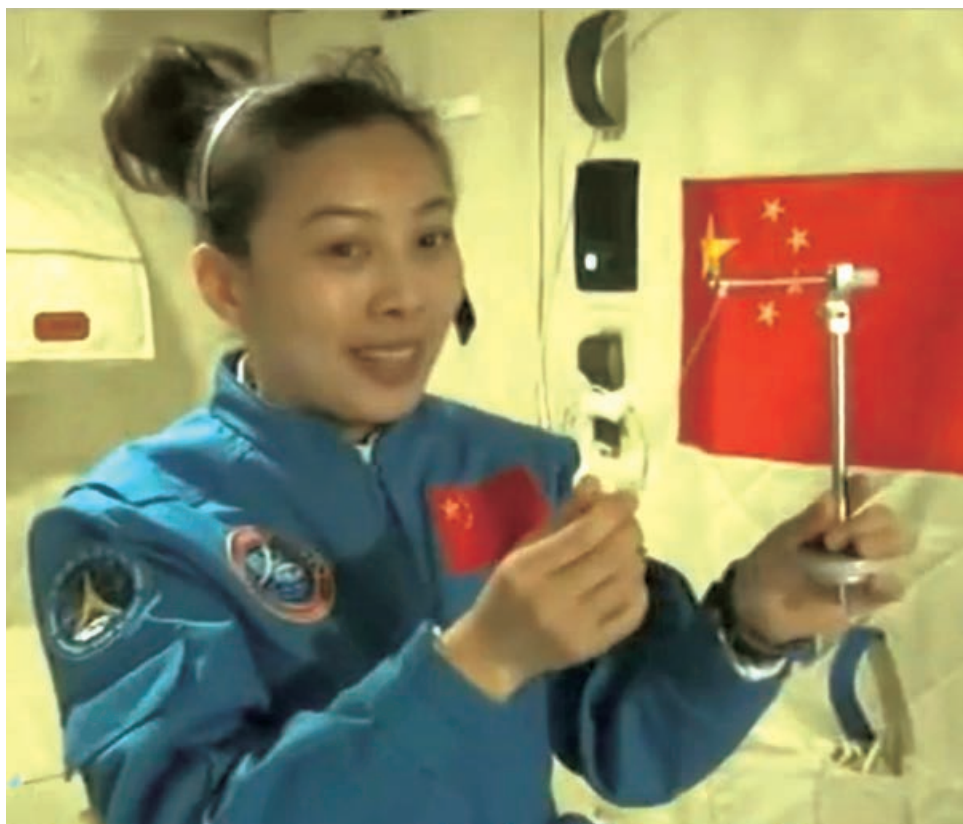


图 3-B-5



第4章 电磁振荡与电磁波

2013年6月20日上午，我国第一次“太空授课”成功举行。“神舟”十号的航天员王亚平在约400 km高空上的“天宫”一号中讲课，330余名中小学生在位于北京的“太空授课”地面课堂听课，全国6 000余万名师生通过电视直播收看。王亚平通过实验，展示了失重环境下物体的运动特性、液体表面张力等物理现象，并回答了学生们关于航天器的一些问题。

为什么学生们能在地面教室里聆听“天宫”一号上航天员的精彩讲课？这与神秘的电磁波有关。

本章将引领你进入这一奇妙的领域——电磁振荡与电磁波。在这里，你将领会麦克斯韦电磁场理论的基本思想，初步了解场的统一性与多样性。通过实验探究，描述电磁振荡的过程，利用场的物质性和场具有能量的性质解释有关电磁波的现象，了解电磁波在生活、生产、科技、国防等方面的重要应用。

4.1 麦克斯韦的电磁场理论

19 世纪上半叶，自奥斯特发现电流周围存在磁场以后，安培、法拉第等人在电磁学领域总结出了多条定律和定理，促进了电磁学的发展。到 19 世纪中叶，人们希望对众多的电磁学定律进行归纳和总结，找到电磁学的基本规律。麦克斯韦出色地完成了这一工作，建立了电磁场理论，实现了物理学的第三次伟大综合，为推进人类文明作出了巨大的贡献。

法拉第的贡献

在法拉第的许多贡献中，最伟大的一个就是力线的概念，我想电场和磁场的许多性质借助它就可以简明而极富启发性地表示出来。

—— J. J. 汤姆孙

在一个现代的物理学家看来，电磁场正和他所坐的椅子一样地实在。

—— 爱因斯坦

在第 2 章中，我们学习了法拉第电磁感应定律。法拉第通过对自己做的电磁实验的深入思考，提出了一种全新的观点：磁体和电荷周围并不是空无一物，而是存在着一种由电荷和磁体本身产生的连续的介质，这种介质传递着电磁相互作用。法拉第把这种看不见、摸不着的介质，称作场（field）。

“场”的概念是牛顿时代以来在物理学概念方面最重要的变革。爱因斯坦甚至认为：“它的价值要比电磁感应的发现高出许多。”

“场”的概念也使人们对物质概念的认识提升到一个新的高度，即物质的存在有两种形态：一种是分子、原子等实物，另一种是场。

法拉第形象化的“力线”和“场”能不能用精确的、定量的数学语言描述呢？

电磁场理论的两大支柱

麦克斯韦在库仑、安培、法拉第等人的电磁学研究成果的基础上，提出了“变化的磁场产生电场”“变化的电场产生磁场”的假说。这是电磁场理论的两大支柱。

变化的磁场产生电场

如图 4-1-1 所示，当磁铁在闭合导电线圈上方向上或向下运动时，根据法拉第电磁感应定律，由于穿过导电线圈的磁通量发生变化，导电线圈中会产生感应电流。

思考与讨论：

1. 电流是电荷的定向移动，闭合导电线圈中的电荷做定向移动，是因为受到什么力的作用？

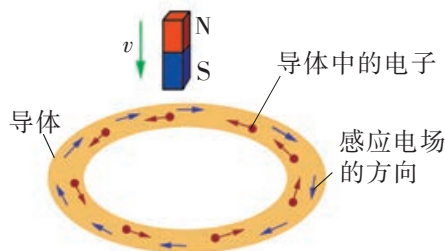


图 4-1-1 变化的磁场使导电线圈中产生感应电流

2. 对图 4-1-1 所示的实验，如果将闭合导电线圈拿走，那么当磁铁运动时，在导电线圈的原位置上还会存在感应电场吗？

麦克斯韦认为：在图 4-1-1 所示的实验中，由于变化的磁场产生感应电场，这个感应电场使导电线圈中的电子做定向移动，从而形成感应电流。进而他设想，在导电线圈所在的空间即使没有闭合导电线圈，也存在感应电场。即空间磁场的变化会产生电场，如图 4-1-2 所示。

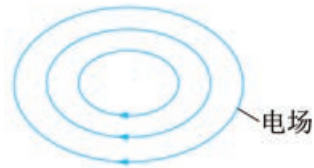


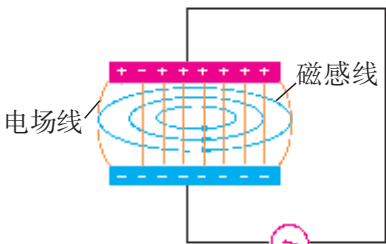
图 4-1-2 变化的磁场产生感应电场

变化的电场产生磁场

变化的磁场能够产生电场，那么，“变化的电场”是否也会“产生磁场”呢？

在图 4-1-3 所示的含有电容器的交变电流电路中，电路闭合时，电路中有交变电流，导线周围存在磁场。那么在这个闭合电路的电容器中有电流吗？电容器两极板间存在磁场吗？

当这个电路中有交变电流时，电容器中虽然没有电荷通过，但是它的两极板上的电荷和极板间的电场都在随时间发生变化。据此，麦克斯韦认为，电路中的电流应该是闭合的，所以电容器两极板间变化的电场应该具有电流的特征。奥斯特的实验表明，电荷定向移动形成的电流能在其周围产生磁场。麦克斯韦推断，变化的电场也能在其周围产生磁场。



交流电源

图 4-1-3 变化的电场产生磁场

电磁场理论

麦克斯韦根据电磁学的实验事实和他的两个假说，用一组方程描述了他的电磁场理论。电磁场理论的主要内容如下表所述：

变化的磁场能够产生电场	变化的电场能够产生磁场
磁场的变化是均匀的，产生的电场是稳定的	电场的变化是均匀的，产生的磁场是稳定的
磁场的变化是不均匀的，产生的电场是变化的	电场的变化是不均匀的，产生的磁场是变化的

麦克斯韦认为，不均匀变化的磁场和电场相互耦合，形成不可分离的统一的电磁场。不均匀变化的电场会在周围的空间产生变化的磁场，这个变化的磁场又会在较远的空间产生变化的电场。电场与磁场相互产生，由近及远地向周围空间传播（图 4-1-4），从而在理论上预言了电磁波的存在。

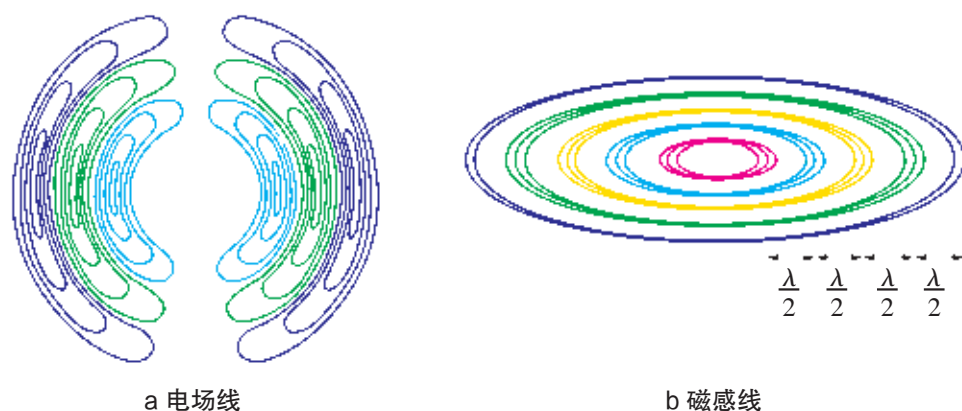


图 4-1-4 电磁波传播范围内电场线和磁感线的分布

量子论的创立者普朗克 (M. Planck) 如此盛赞麦克斯韦：“他的名字永远镌刻在经典物理学的门扉上，永放光芒。从出生地来说他属于爱丁堡，从个性来说他属于剑桥大学，从功绩来说，他属于全世界。”

麦克斯韦从他的电磁场方程组得到：电磁波的电场和磁场的方向相互垂直并且都垂直于传播的方向，即电磁波是横波；电磁波在真空中传播的速度恰好等于光速。

麦克斯韦提出的电磁场理论，把原来相互独立的电学、磁学和光学三个物理学门类结合起来，实现了物理学史上的第三次伟大综合。这是 19 世纪科学界的一件大事，是物理学的又一座伟大丰碑。在当时，麦克斯韦被公认为是“自牛顿以后世界上最伟大的数学家、物理学家”。

家庭作业与活动

1. 麦克斯韦在建立电磁场理论的过程中，提出了什么假设？运用了哪些物理思想？它们对建立电磁场理论有什么意义？
2. 根据麦克斯韦的电磁场理论，变化的磁场可以产生电场。当产生的电场的电场线如图 4-1-5 所示时，可能是（ ）。

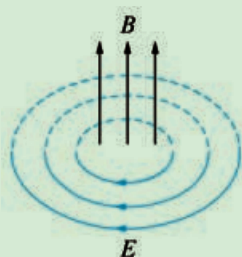


图 4-1-5

- A. 向上方向的磁场在增强
 - B. 向上方向的磁场在减弱
 - C. 向上方向的磁场先增强，然后反向减弱
 - D. 向上方向的磁场先减弱，然后反向增强
3. 根据麦克斯韦的电磁场理论，下列说法中正确的是（ ）。
- A. 恒定的电场周围产生恒定的磁场，恒定的磁场周围产生恒定的电场
 - B. 变化的电场周围产生磁场，变化的磁场周围产生电场
 - C. 均匀变化的电场周围产生均匀变化的磁场，均匀变化的磁场周围产生均匀变化的电场
 - D. 均匀变化的电场周围产生稳定的磁场，均匀变化的磁场周围产生稳定的电场

4.2 电磁振荡和电磁波

麦克斯韦的电磁场理论,特别是电磁波的预言,深邃而新颖,以至在它问世后的相当长时间内没有得到普遍的认同,一些科学家对这一没有通过实验证明的理论表示怀疑。直到 1887 年,德国物理学家赫兹才通过实验发现了电磁波。

电磁波预言的实现——赫兹实验

赫兹设计的实验装置如图 4-2-1 所示。整个装置由两部分组成:一是发射装置,一个开放的振荡器(由装有小铜球的两块金属板、线圈和电池等组成);二是接收器,一个带有两个小铜球的开口金属圆环,它是一个无源的回路。



赫兹 (H. Hertz, 1857—1894), 德国物理学家。通过实验发现了电磁波。

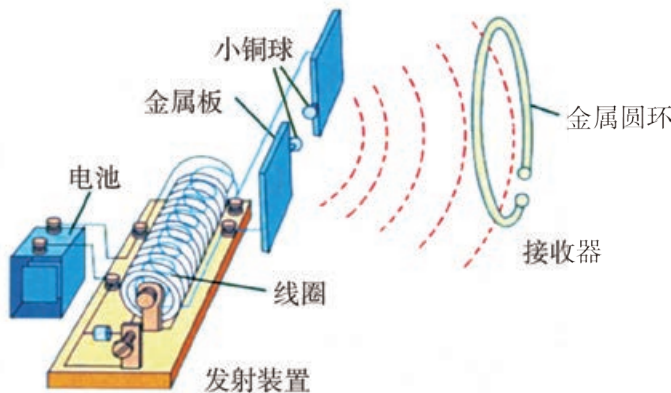


图 4-2-1 赫兹发现电磁波的实验装置

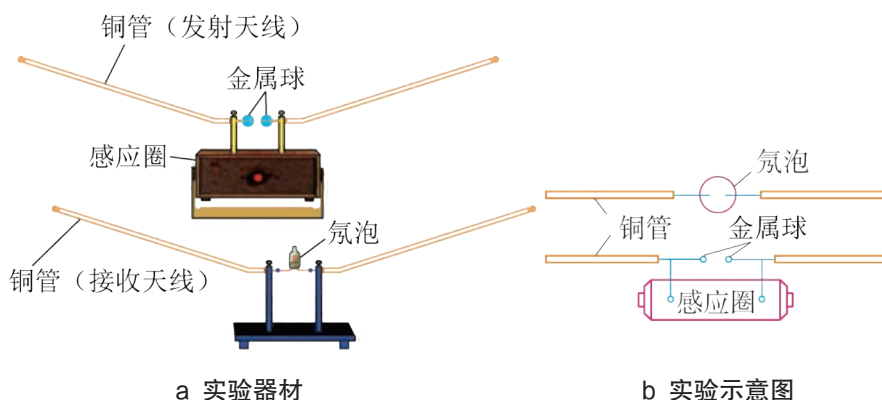
在振荡器两端加上电压时,两块金属板上两个小铜球之间的间隙中就会断续地产生电火花,它周围的空间就产生了**电磁振荡**(electromagnetic oscillation)。赫兹发现,当发射装置产生电火花时,调节接收器的方位以及接收器上两个小铜球之间的距离,这两个小铜球之间也会产生电火花,这表明接收回路中产生了振荡电流。赫兹的实验说明,电磁振荡能在空间向远处传播。赫兹进一步的研究表明,这两个回路中的振荡电流的频率相同。此后,赫兹还用实验测出电磁波的传播速度等于光速。电磁波就这样被发现了。困扰着物理学界 20 多年的难题,被赫兹以卓越的设计思想和高超的实验技巧解决了。

赫兹的贡献在于用实验事实证明了麦克斯韦电磁场理论的正确性,为人类利用电磁波奠定了重要的基础,这预示着广泛利用电磁波技术的时代即将到来。

实验探究

模仿赫兹做实验

实验器材如图 4-2-2 a 所示。用两端接在铜管上的感应圈作振荡器，接收器由铜管制成，中间装有氖泡（图 4-2-2 b）。当振荡器发出电磁波时，移动接收器，改变它与振荡器之间的距离和方位，使接收器上的氖泡变亮。



a 实验器材

b 实验示意图

图 4-2-2 模仿赫兹做实验的实验器材和实验示意图

思考与讨论

1. 接收器上的氖泡为什么会变亮？
2. 接收器与振荡器之间的距离和方位发生变化时，氖泡的亮度如何变化？

由赫兹实验和上述实验可知，要产生电磁波，首要条件是产生电磁振荡。那么，怎样才能产生电磁振荡呢？

电磁振荡——电磁波的产生

实验探究

观察电磁振荡

把自感线圈 L 、可变电容器 C 、示波器、电池组 E 和单刀双掷开关 S 按照图 4-2-3 连成电路。先把单刀双掷开关 S 扳到电池组一边，给电容器充电，稍后再把单刀双掷开关 S 扳到自感线圈一边，让电容器通过自感线圈放电。在放电过程中，我们可以通过示波器观察电路中电压、电流随时间变化的规律。

请讨论：

调节示波器，在显示屏上看到什么图像？这是电流的图像还是自感线圈两端电压的图像？

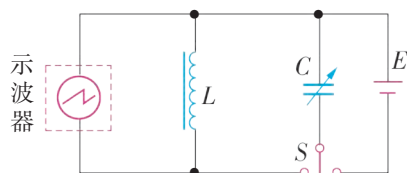


图 4-2-3 振荡电路

此电路中存在能量损耗，实际电路中还有一个补偿电路，用来补充能量。

由上面的实验可以发现,示波器上呈现了周期性变化的电压图像(图4-2-4),这表明电路中产生了大小和方向都做周期性变化的电流,这个电流叫做**振荡电流**(oscillatory current)。能够产生振荡电流的电路叫做**振荡电路**。在振荡电路中,除了电路中的电流发生周期性变化外,电容器极板上的电荷、电容器中的电场强度和自感线圈中的磁感应强度都在发生周期性的变化,这种现象就叫做**电磁振荡**。电磁振荡产生的电场和磁场向周围空间由近及远地传播,就形成了电磁波。

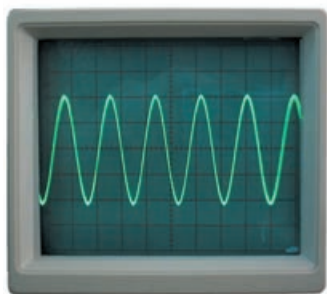


图 4-2-4 示波器显示的波形图

电磁振荡的周期和频率

图4-2-3所示的振荡电路是由自感线圈和电容器组成的,这是一种基本的振荡电路,叫做**LC 振荡电路**。电磁振荡完成一次周期性变化所用的时间叫做**周期**,用 T 表示。1 s 内完成的振荡次数叫做**频率**,用 f 表示。当振荡电路发生电磁振荡时,如果没有能量损失,那么其周期和频率叫做振荡电路的**固有周期**和**固有频率**,简称为**周期和频率**。

理论与实验研究表明,**LC 振荡电路**的周期只跟电容和电感有关,而跟其他因素无关。**LC 振荡电路**的**固有周期**(natural period)为

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

与之对应的**固有频率**(natural frequency)为

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

以上两式中的 T 、 L 、 C 、 f 的单位分别是秒(s)、亨(H)、法(F)、赫(Hz)。

分析与论证 电磁振荡过程中电场能与磁场能的转化

为了讨论方便,将图4-2-3所示的振荡电路简化为图4-2-5所示的电路。

先接通电源,给电容器充电,稍后,将电容器与自感线圈接通(图4-2-6),这样,电路中就会产生电磁振荡。下面结合图4-2-7,将电磁振荡过程同单摆摆球的运动过程作类比分析,讨论电磁振荡过程中电场能与磁场能的相互转化。

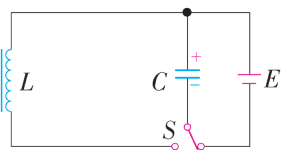


图 4-2-5 给电容器充电

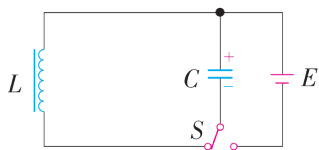


图 4-2-6 电容器放电

开始时，电容器内的电场强度最大，电容器极板上的电荷量最大，电路中没有电流（图 4-2-7 a）。此时，电容器中的电场能最大，自感线圈中的磁场能为零。此后，电容器放电，由于自感线圈的自感作用，电路中的电流由零逐渐增大，电容器极板上的电荷量逐渐减小。这时电容器中的电场能逐渐减小，自感线圈中的磁场能逐渐增大。

到电容器放电完毕时，电容器内的电场强度为零，电容器极板上的电荷量为零，电路中电流最大。此时，电容器中的电场能为零，自感线圈中的磁场能最大（图 4-2-7 b）。电场能全部转化为磁场能。

虽然单摆的振动与电磁振荡本质不同，但是从能的转化角度来说，具有类似之处：在单摆周期性地振动过程中，动能与势能相互转化。在图 4-2-7 a 中，初始时，单摆的势能最大，动能为零，此后势能减小，动能增大，最后势能全部转化为动能。在图 4-2-7 b 中，单摆的势能最小（可视为零），动能最大，此后动能减小，势能增大，最后动能全部转化为势能。

请分析图 4-2-7 c、图 4-2-7 d 所示电容器充放电的过程中磁场能与电场能的相互转化。

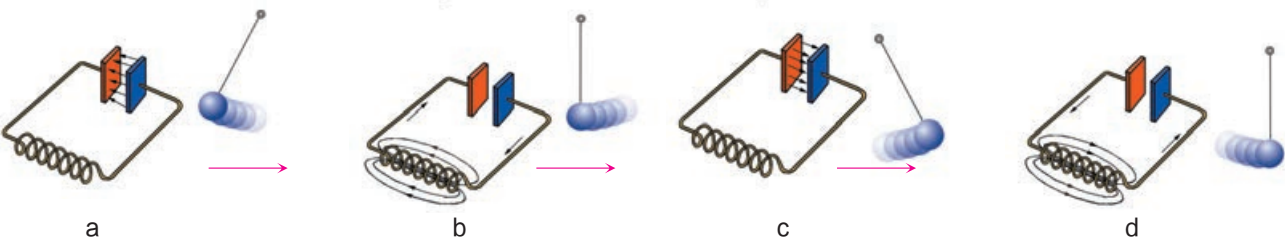


图 4-2-7 电磁振荡的过程与单摆摆球的运动过程类比图

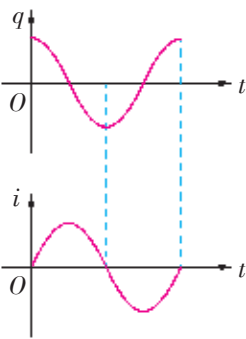


图 4-2-8 LC 振荡电路中电容器极板上的电荷量和电路中电流随时间的变化

电磁振荡过程就是这样一个电场能与磁场能周期性地相互转化的循环过程。

研究表明，在电磁振荡过程中，电容器极板上的电荷量 - 时间图像和电路中的电流 - 时间图像如图 4-2-8 所示。

请结合图 4-2-7，从能的转化角度比较电磁振荡过程与单摆振动过程，并将结果填入下表。

	能量	a	b	c	d
单摆	势能	最大			
	动能	0			
电磁振荡	电场能	最大			
	磁场能	0			

电磁波的发射

在图 4-2-6 所示的振荡电路中，电磁能量主要集中在电路中，辐射出去的较少，不能用来有效地发射电磁波。那么，怎样才能有效地发射电磁波呢？

如果把振荡电路中电容器的两极板拉开，变成两条长的直导线，一条伸入空中成为天线，另一条接入地下成为地线，就可以有效地向外辐射电磁能量了（图 4-2-9）。这种电路叫做**开放电路**（open circuit）。

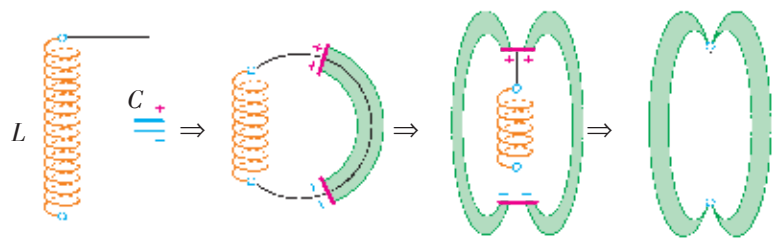


图 4-2-9 由闭合电路变成开放电路

实际应用的开放电路如图 4-2-10 所示。自感系数不大的自感线圈 L' 与产生高频电磁振荡的电路相耦合，产生同频率的电磁振荡，通过天线向四周发射电磁波。

理论与实验表明，要有效地发射电磁波，可以从以下两个方面进行改善：

- 第一，利用开放电路发射电磁波。
- 第二，提高振荡频率。理论研究表明，振荡电路向外界辐射能量的本领，即单位时间内辐射出去的能量，跟频率的四次方成正比。频率越高，电磁波辐射的能量也就越多。

图 4-2-11 描述的是发射天线在振荡过程中所产生的变化的电场（变化的磁场未画出）。

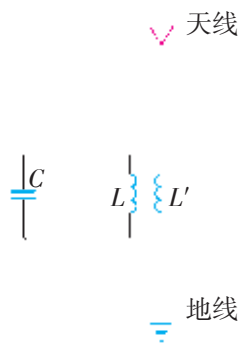


图 4-2-10 实际应用的开放电路

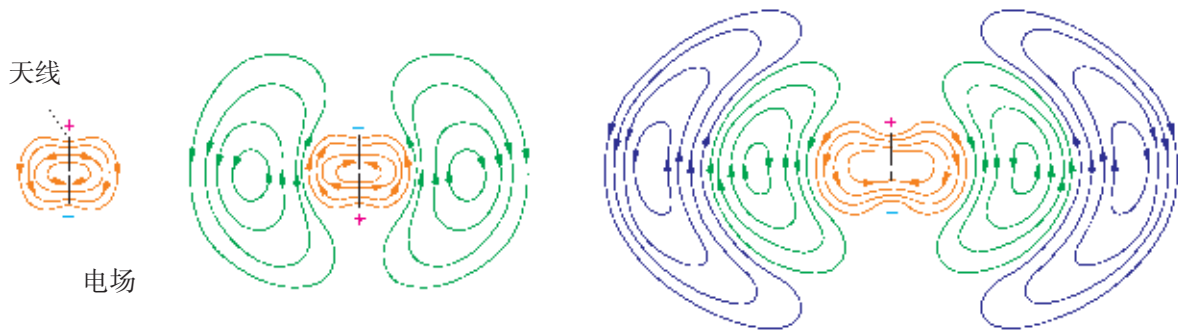


图 4-2-11 天线周围的电场随时间的变化

电磁波的特点

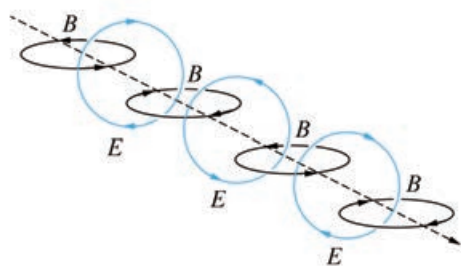


图 4-2-12 电磁波的传播

电磁振荡向四周空间传播（图 4-2-12），就形成了电磁波。

根据麦克斯韦电磁场理论，电磁波是横波。电磁波的电场 E 和磁场 B 相互垂直，电磁波的传播方向跟 E 和 B 都垂直，如图 4-2-13 所示。

在我们知道的各种波中，有哪些波与电磁波相似，也是横波？

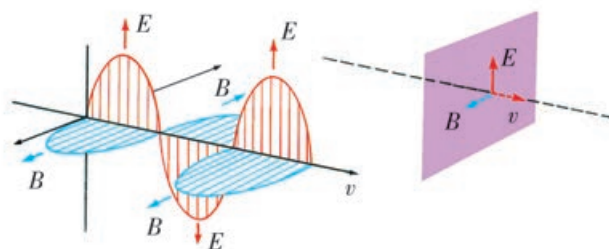


图 4-2-13 电场方向、磁场方向和电磁波传播方向三者相互垂直

电磁波在真空中的传播速度等于光在真空中的传播速度，约为 $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

电磁波具有波的一般特征，它的波长 λ 、周期 T 、频率 f 与波速 v 之间的关系为

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

中央人民广播电台第一套节目的频率是 639 kHz，请计算其波长。

电磁波和其他波一样，也具有能量。电磁波的发射过程就是辐射能量的过程。

思考与讨论

电磁波与机械波相比，有哪些相同点和不同点？电磁波的传播需要介质吗？请举例说明。

家庭作业与活动

1. 麦克斯韦预言了电磁波的存在，但电磁波是否确实存在？这个问题困扰了物理学界几十年。请你谈一谈赫兹实验的意义。
2. 有四个电路，其中的电场随时间变化的图像分别对应图 4-2-14 中的一个，其中能发射电磁波的是（ ）。

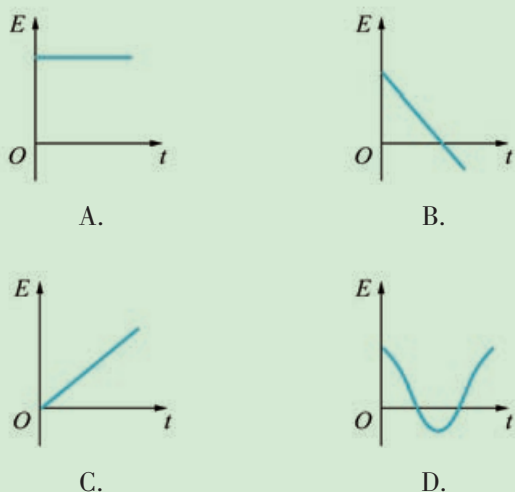


图 4-2-14

3. 关于电磁波, 下列说法中正确的是 ()。
- 电磁波具有能量
 - 电磁波中每一处的电场强度和磁感应强度总是互相垂直, 且与波的传播方向垂直
 - 电磁波和机械波一样依赖介质传播
 - 只要空间某个区域有振荡的电场或磁场, 就能产生电磁波
4. 要提高 LC 振荡电路辐射电磁波的本领, 可以采取的措施是 ()。
- 增大电容器极板间的距离
 - 使振荡电容器的正对面积足够大
 - 尽可能使电场和磁场分散开
 - 增大回路中的电容和电感
5. 设 LC 振荡电路中电容器两端的电压 u 随时间 t 变化的关系如图 4-2-15 所示, 则 ()。

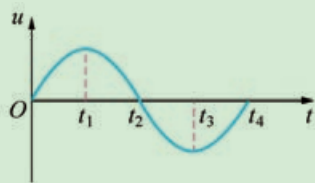


图 4-2-15

- 在时刻 t_1 , 电路中的电流最大
 - 在时刻 t_2 , 电路中的磁场能最大
 - 从时刻 t_2 至 t_3 , 电路中的电场能不断增大
 - 从时刻 t_3 至 t_4 , 电容器的带电荷量不断增大
6. 图 4-2-16 所示的是 LC 振荡电路中振荡电流随时间变化的图像。由图可知, 在 OA 时间内, _____ 能转化为 _____ 能; 在 AB 时间内, 电容器处于 _____ (选填“充电”或“放电”) 过程; 在时刻 C , 电容器的带电荷量 _____ (选填“为零”或“最大”)。

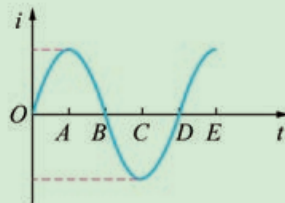


图 4-2-16

7. 图 4-2-17 所示的是 LC 振荡电路某时刻的情况, 则下列说法中正确的是 ()。

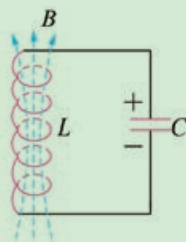


图 4-2-17

- 电容器正在充电
- 电容器两极板间的电压正在增大
- 自感线圈中的电流正在增大
- 此刻自感线圈上的自感电动势正在阻碍电路中电流的增大

4.3 无线电通信

无线电通信是电磁场理论的重要应用。无线电波是怎样发射、传播和接收的呢？

无线电波的发射

无线电广播传递的是声音信号。人们先将声音信号转变成电信号，再将此电信号加载到等幅的高频信号上，并进行放大，再通过发射塔以无线电波的形式发射出去。无线电广播信号发射的整个过程如图 4-3-1 所示。

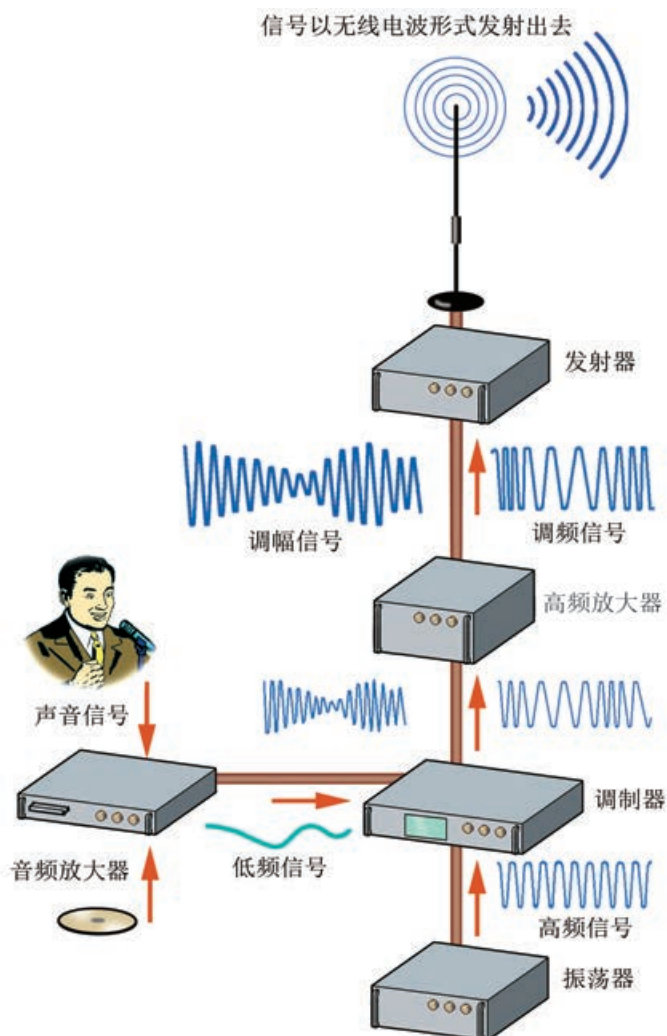


图 4-3-1 无线电广播信号的发射过程

振荡器的作用

振荡器的作用是产生等幅高频信号。低频音频信号只有加载到高频信号上，形成随音频信号而变化的高频信号，才能通过发射天线发射出去。

为什么不用低频信号直接发射呢？

调制器的作用

调制器的作用是把低频信号加载到高频信号上。

常用的调制方式有调幅（amplitude modulation，AM）和调频（frequency modulation，FM）两种（图 4-3-2）。调幅是使高频振荡信号的振幅随低频信号变化；调频是使高频振荡信号的频率随低频信号变化。

调制后的高频信号经过放大后，送到发射天线，再向外发射。

请调查你家乡调频和调幅广播电台的频率和波长。

无线电波的传播

无线电波传播的方式与其自身的波长或频率有关。如下表所示，波长（频率）不同的电磁波，其传播的方式是不同的。

无线电波段及传播方式

波段	波长	频率	传播方式	主要用途
长波	$1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^3 \text{ m}$	$3 \sim 3 \times 10^5 \text{ Hz}$	地波	远距离通信、导航
中波	$1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^2 \text{ m}$	$3 \times 10^2 \sim 3 \times 10^3 \text{ kHz}$	地波和天波	调幅无线电广播、通信
短波	$1 \times 10^2 \sim 1 \text{ m}$	$3 \sim 3 \times 10^2 \text{ MHz}$	天波	调幅无线电广播、通信
微波	$1 \times 10^3 \sim 0.1 \text{ mm}$	$3 \times 10^2 \sim 3 \times 10^6 \text{ MHz}$	直线传播	调频无线电广播、电视、雷达、导航

思考与讨论

为什么在方圆数十千米范围内就有一座移动通信的基站？
卫星转发器能够传递所有的无线电波吗？为什么我们不能收听到外省（市）的调频广播？

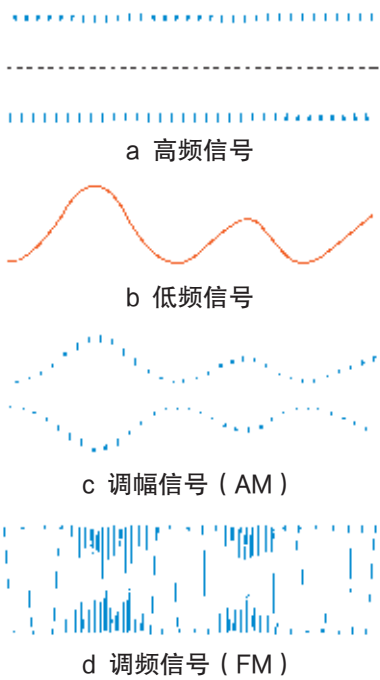


图 4-3-2 调制信号

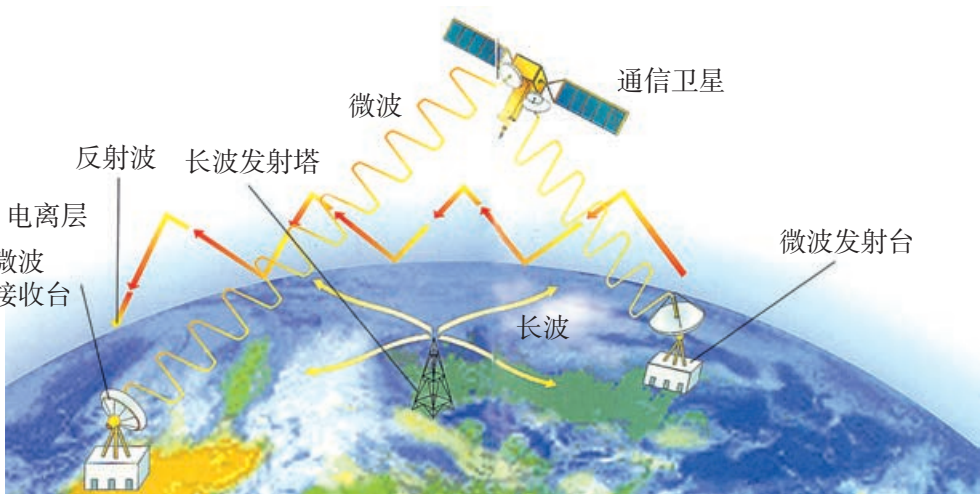


图 4-3-3 无线电波传播方式



图 4-3-4 微波中继站（移动通信塔）

中、长波波长较长，能绕过地球表面上的一般障碍物，因此能够沿着地球的表面进行传播，这种传播方式叫做地波传播。我国收音机调幅波段就是采用地波传播方式进行传播的。

短波和部分中波波长较短，难以绕过地球表面上的一般障碍物，但能够在地面与电离层之间来回反射进行传播，这种传播方式叫做天波传播。由于电离层的物理状态随经度、纬度呈现复杂的空间变化，并与太阳活动有关，所以，以天波方式传播的无线电波容易受到干扰。

微波波长更短，能够穿透电离层，因此只能从发射天线直接传播到接收天线，这种传播方式叫做直线传播。用微波进行远距离传送时，必须建立中继站（图 4-3-4）。微波从微波发射台发射出去后，经过中继站的接收、放大、发射，再传向下一个中继站，这样一站传一站，把微波传向微波接收台。

无线电波的接收

在空间传播的电磁波如果遇到接收天线——导体，就会在接收天线上产生微弱的感应电流，这个感应电流的频率跟接收的电磁波的频率相同。但是空间有多种频率的电磁波在传播，它们都会在接收天线上产生各自的感应电流。要从众多的电磁波中得到所需要的信号，就需要经过调谐、高频放大、检波、音频放大的过程（图 4-3-5）。

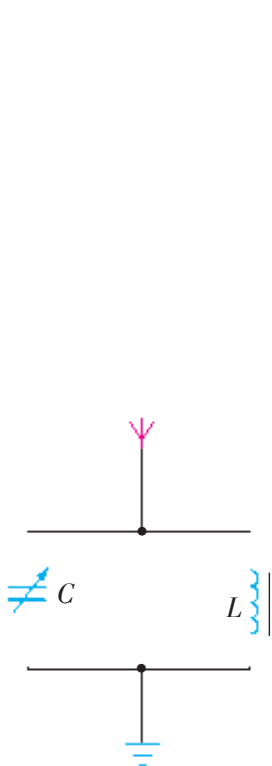


图 4-3-6 调谐电路

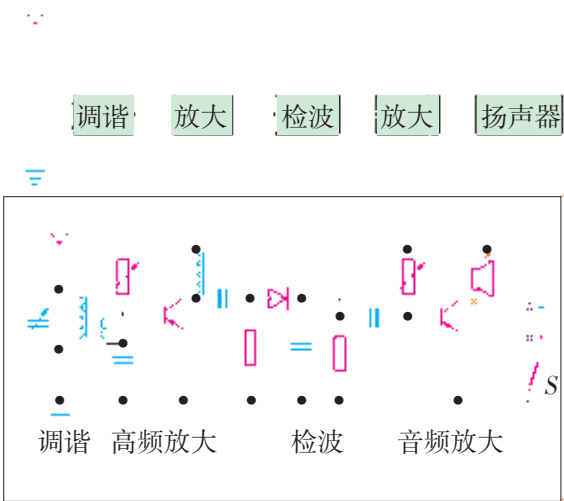


图 4-3-5 无线电广播信号的接收过程

调谐

从众多的电磁波中挑选出某一频率电磁波的过程叫做调谐。调谐就是把图 4-3-6 所示电路的固有频率调节到所需要的某一电磁波的频率，使这一频率的电磁波与此电路产生“共振”——电谐振，从而在此电路中激起较大的感应电流。

根据 LC 振荡电路固有频率的公式，既可以调节可变电容器 C 的电容，也可以调节电感器 L 的电感。

调谐后所获得的高频振荡电流还需要经过放大，得到强度更大的高频振荡电流。

检波

高频振荡电流并不能直接使扬声器振动发出声音，还需要将其中的高频信号滤除，“检”出所承载的低频信号，这一过程叫做检波。

检波是调制的逆过程，也叫做解调，其过程如图 4-3-7 所示。

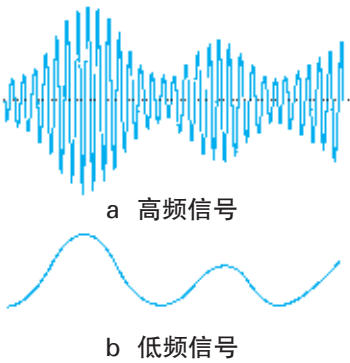


图 4-3-7 从高频信号中“检”出低频信号

实验探究 用示波器观察检波的作用

1. 将高频调幅信号源的“高频输出”端接到示波器的“Y 输入”端。打开示波器的电源，调节示波器的扫描微调，就可观察到调幅信号的波形。

2. 在信号源的输出端与示波器的“Y 输入”端之间，串联一只晶体二极管（检波器），并在信号源的输出端与示波器的接地端之间连接一个电容器（图 4-3-8），就可观察到“检”出来的低频信号的波形了。

检波后得到的信号经过放大处理后，传送到扬声器，便可使其发出声音。

请利用课余时间参观广播电台、移动通信基站、电视台，了解它们的工作过程。

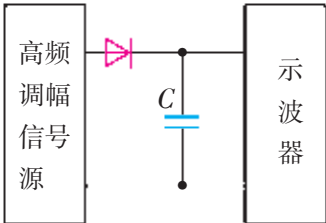


图 4-3-8 观察检波过程的电路

无线电波在我们生活中

今天我们已进入信息时代，微波通信、卫星通信和光纤通信为人类交流信息发挥着巨大的作用。微波通信以其承载的信息量大而得到广泛应用。微波能够畅通无阻地穿越地球上空的电离层，从而可以实现以卫星为中继站的卫星通信（图 4-3-9）。卫星既可以进行地球上两地之间的信息传递，又能用于收集气象信息、检测大气环境、勘探矿藏和发射导航信号等。随着激光器和光纤的发明，人类用激光作为信息载体，以光纤为激光的通道，又实现了光纤通信。光纤通信因其传输过程中能量损耗小、抗干扰能力强而得到广泛应用。

移动通信塔（图 4-3-4）可以用来传送电话、传真和数据信息。塔顶的碟状物体是微波天线，指向远处的其他移动通信塔，从而实现信息的快速传递。



图 4-3-9 通信卫星

请思考：

在两座移动通信塔的碟状物之间能否有障碍物？

现代通信技术正在改变着人与人之间的交往方式、生活方式、工作方式和学习方式。

请调查自己所在地区的微波通信、卫星通信和光纤通信的发展情况。

信息浏览

神通广大的WiFi

WiFi 是英文 Wireless Fidelity 的缩写，中文意思为“无线保真”。它利用射频（Radio Frequency, RF）技术，使用电磁波，取代由铜线（或光纤）构成的局域网（有线局域网），形成无线局域网，在空中进行通信联络。今天，人们已经习惯称无线局域网为 WiFi 网络。WiFi 网络不要布线就能方便快速地通信，其发射信号的功率低于 100 mW，十分安全。

WiFi 网络有三种接入方式：一种是通过接入点（如无线路由器）连入 WiFi 网络，适用于办公室、酒店、家庭中的无线上网；第二种是通过基站接入，一般是电信运营商提供的网络服务；还有一种是设备“自由直接接入”，主要用于应急，如抢险救灾、野战通信等。

实现 WiFi 上网，还需要以下硬件支持：

无线网卡 这是终端无线网络设备，能够收发无线信号。它能在 WiFi 信号覆盖的范围内，通过无线信号与无线路由器进行连接。现在，无线网卡一般都已经内置在电脑、手机等终端设备

中，因此这些电子设备都支持 WiFi 上网。

无线路由器（Router） 又称网关设备（gateway），这是连接互联网中各局域网的设备。路由器具有判断网络地址和选择 IP 路径的功能，它能在多网络互联环境中，以最佳路径，按前后顺序发送信号，建立灵活的连接，因此被称为互联网络的枢纽。路由器又分为有线和无线两种。无线路由器通过 WiFi 技术收发无线信号来与电脑、手机等终端设备通信，因而得到广泛使用。

调制解调器（Modem，“猫”） 这是电脑与电话线之间进行信号转换的装置，由调制器和解调器两部分组成。调制器把电脑的数字信号（如文件、图像等）调制成可在电话线上传输的模拟信号。在接收端，解调器再把模拟信号转换成电脑能接收的数字信号。调制解调器的上述转换，使人们可顺利“上网”（图 4-3-10）。“猫”和路由器之间由一根网线相连，开发人员将两者组合在一起形成“无线路由器—猫”，使用起来更加方便。

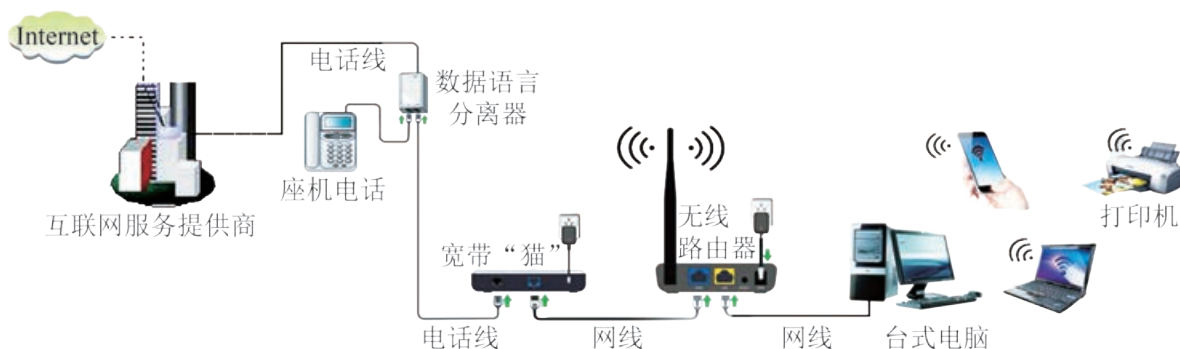


图 4-3-10 个人用户 WiFi 上网路线

家庭作业与活动

1. 无线电波的发射和接收主要经历哪些过程？无线电波传播的方式跟什么因素有关？有哪些传播方式？
2. 已知某广播电台的频率是 20 000 kHz，问：此广播电台发出的电磁波的波长是多少？是属于中波还是短波？（中波波长为 1 000 ~ 100 m，短波波长为 100 ~ 1 m。）
3. 一台简单的无线电收音机，除了天线外，至少必须具备的电路是（ ）。
 - A. 调制电路
 - B. 调谐电路
 - C. 检波电路
 - D. 等幅振荡电路
4. 无线电技术的发展给人类带来了极大的便利。有关无线电技术，下列说法中正确的是（ ）。
 - A. 在通信中被广泛应用的无线电波是电磁波谱中波长最短的
 - B. 当处于电谐振时，只有被接收的电磁波才能在接收电路中产生感应电流
 - C. 为了从高频电流中取出所携带的声音信号，就要进行调制
 - D. 手机使用过程中发射的无线电波都是经过调制的
5. 一台收音机，把它的调谐电路中的可变电容器的动片从完全旋入到完全旋出，仍然收不到某一较高频率的电台信号。要想收到该电台信号，

应该 _____（选填“增大”或“减小”）调谐电路中电感线圈的匝数。

6. 图 4-3-11 所示的是某收音机的调谐电路。当单刀双掷开关 S 置于位置 1 时，电路中线圈的自感为 L_1 ，接收中波段的无线电波；当单刀双掷开关 S 置于位置 2 时，电路中线圈的自感为 L_2 ，接收短波段的无线电波。 C 为可变电容器的电容。已知 LC 电路的周期为 $T = 2\pi\sqrt{LC}$ ，则（ ）。
 - A. $L_1 > L_2$
 - B. $L_1 < L_2$
 - C. 当该调谐电路的单刀双掷开关 S 置于 1，并把可变电容器的电容调到最小时，接收的频率最高
 - D. 当该调谐电路的单刀双掷开关 S 置于 2，并把可变电容器的电容调到最小时，接收的频率最高

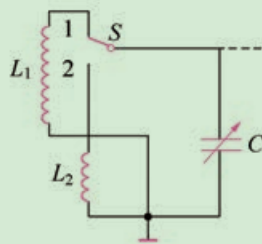


图 4-3-11

4.4 电磁波家族

电磁波是一个大家族,无线电波只是这个大家族中的一员。本节我们对人类发现的各种电磁波按波长(频率)排列,从整体上认识电磁波谱,了解电磁波谱中各波段的应用。

电磁波谱

赫兹发现电磁波后,人们通过许多实验,证明光也是一种电磁波。人们还发现了其他形式的电磁波,如X射线、 γ 射线、红外线、紫外线等。这些电磁波在本质上完全相同,只是波长(频率)不同而已,其中波长最长的波跟波长最短的波之间,频率相差近 10^{20} 倍。把各种电磁波按波长(频率)的大小顺序排列起来,就组成了**电磁波谱**(electromagnetic spectrum),如图4-4-1所示。

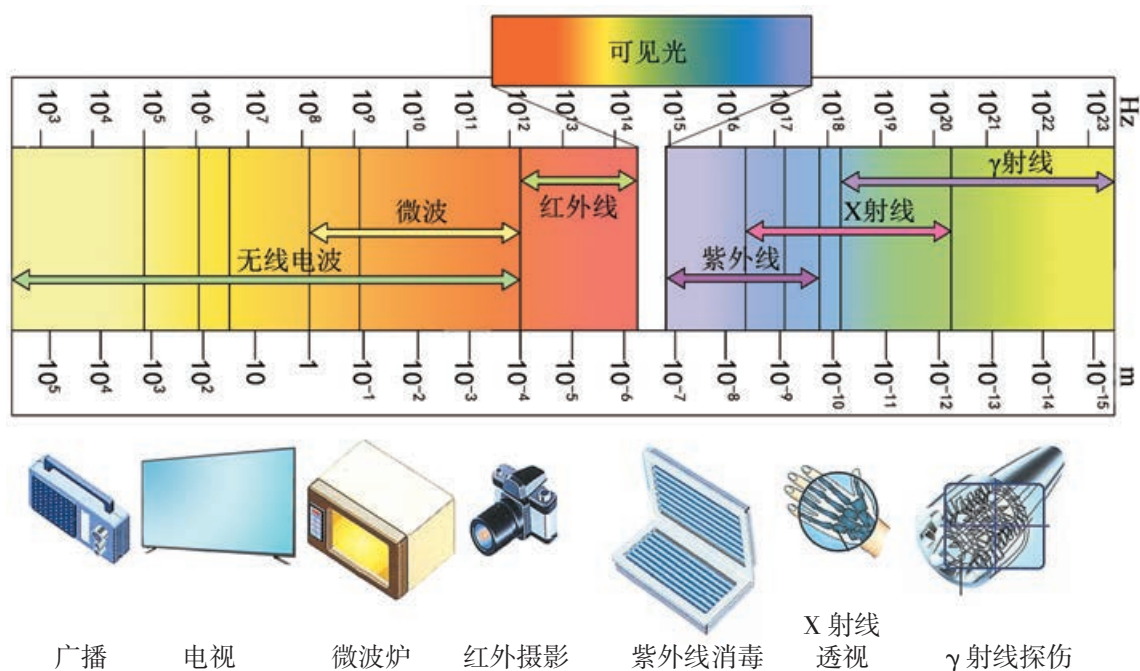


图 4-4-1 电磁波谱及各部分电磁波的主要应用

请根据图 4-4-1, 谈一谈各段电磁波还有哪些应用。

电磁波家族成员的特性

通常人们按用途将电磁波谱划分为无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线、 γ 射线六个波段。

可见光

进入人眼能引起视觉的电磁波叫做可见光。它只占据电磁波中一个很狭窄的波段。真空中,其波长范围为 400 ~ 700 nm。可见光是由原子或分子内电子的跃迁产生的。

如果没有可见光,地球上的生物就难以生存,世界就不会丰富多彩。

红外线

红外线频率比可见光中的红色光低。它是由英国物理学家赫歇尔 (F. Herschel) 于 1800 年发现的。红外线虽然看不见,但是人类可以感受到它的热效应。太阳辐射的电磁波中有较多的红外线。

所有的物体都会辐射红外线。高温物体辐射红外线的本领比低温物体强,低温物体可以通过吸收红外线来提高自身温度。工业上常用红外线来干燥物体。红外线波长较长,衍射现象明显,容易透过云雾、烟尘,因此被广泛应用于红外遥感和红外高空摄影。图 4-4-2 为普通相机拍摄的飘浮着白云的天空照片,中间的小图为红外热像仪拍摄的同一天空的照片,可以看到红外热像照片显示云的温度较高。

紫外线

紫外线频率高于可见光中的紫色光。它是由德国物理学家里特 (J. Ritter) 于 1801 年发现的。

紫外线能够杀死活细胞。医院病房常用紫外线灯杀菌。虽然人类不能看到紫外线,但是有些昆虫 (例如蜜蜂) 却能够看到。红色的虞美人花之所以吸引蜜蜂,是因为它反射紫外线。图 4-4-3 a 是蜜蜂看到的葵花,图 4-4-3 b 是人类看到的葵花。

紫外线还具有较强的荧光效应,即它能使很多物质发出荧光。我们常用的日光灯和农业上消灭害虫的黑光灯,都是用紫外线来激发荧光物质发光的。

X射线

X 射线是比紫外线频率更高的电磁波,又叫伦琴射线。它是由德国物理学家伦琴 (W. Röntgen) 于 1895 年发现的。伦琴当时发现,阴极射线的高速电子流射到电子管壁上,会使管壁发出一种看不见的射线。这就是后来所称的 X 射线。X 射线具有很强的穿透本领,能使荧光物质发出

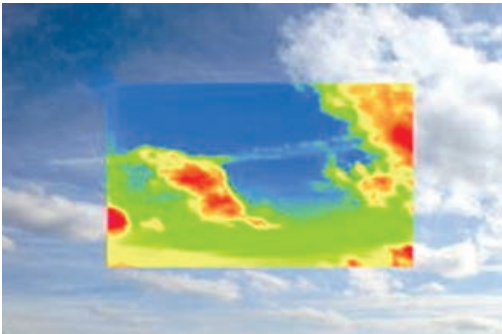


图 4-4-2 天空中的红外热像与光学照片之比较



a 蜜蜂看到的葵花



b 人类看到的葵花

图 4-4-3 蜜蜂和人类看到的葵花

荧光，还能使照相底片感光。后来人们发现高速电子流射到任何固体上都能产生 X 射线。X 射线穿透物质的本领，跟被穿透物质的密度有关。这种特性使得 X 射线在工业上可用来检查部件的裂纹和气孔，在医学上则可用来透视人体和检查体内的病灶。

图 4-4-4 是利用不同波长的电磁波对手进行照射所得到的图像。

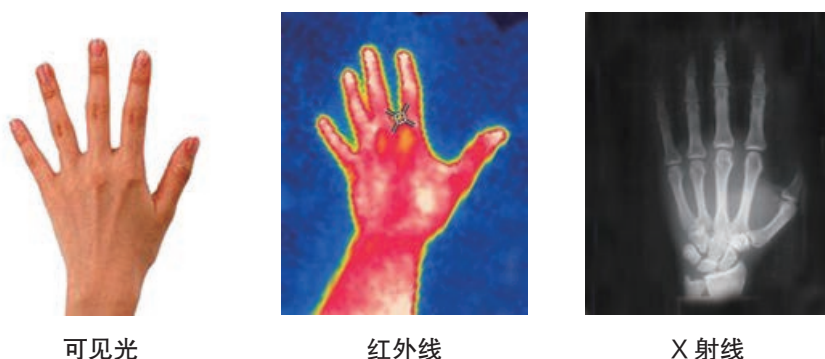


图 4-4-4 各种电磁波照射下手的图像

γ 射线

γ 射线是比 X 射线波长更短的电磁波，它的穿透能力更强，能穿过几厘米厚的铅板或 3 m 厚的混凝土。

你周围的环境中，哪些设备是借助电磁波进行工作的？

信息浏览

电磁辐射的危害与防护

电磁波在给人类带来福祉的同时，也给人类的生存环境带来危害。电磁辐射会引起人体的疾病，这类病被叫做“无线电波病”；电磁辐射引起的环境污染叫做“电磁污染”。

电磁辐射对人体的危害可以是急性的，也可以是慢性的。它会引起人体的心血管系统、神经系统和造血系统的功能紊乱，造成人体免疫力下降。人长时间处于电磁辐射作用下，容易产生头晕、失眠、嗜睡等神经功能上的紊乱症状，也有可能出现人体白细胞下降、视力模糊、心电图不正常。特别是强电磁辐射作用会导致人体多种器官的损坏。

避免或减小电磁辐射危害的方法主要有：

(1) 正确摆放和使用家用电器。

家用电器摆放要合理，不要过于集中放置；卧室内尽可能少放置电器。电器使用的时间不宜过长，且尽可能避免多台电器同时使用；使用时人体与电器之间要保持适当的距离。

(2) 电磁屏蔽。

电磁屏蔽主要是利用导电性能和导磁性能良好的金属板和金属网，通过反射和吸收来阻隔电磁波的传播。例如长期在强电磁辐射环境下工作的人，应穿具备电磁屏蔽功能的衣服。

(3) 注意饮食，多吃些富含维生素 B 或螺旋藻的食物。

课题研究

电磁波谱中的各个波段对人类都有重要意义。请收集有关资料，写一篇关于科学技术与

社会发展的述评。

家庭作业与活动

- 广播电台发射的中波无线电信号、家用微波炉中的微波、可见光、人体透视用的X光都是电磁波，设它们的频率分别是 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 ，则（ ）。
A. $f_1 > f_2 > f_3 > f_4$ B. $f_1 < f_2 < f_3 < f_4$
C. $f_1 < f_3 < f_2 < f_4$ D. $f_1 < f_2 < f_4 < f_3$
- 下列科技应用中没有利用电磁波技术的是（ ）。
A. 无线电广播 B. 移动电话
C. 雷达 D. 白炽灯
- 下列几种波中不属于电磁波的是（ ）。
A. B超检查身体时发出的超声波
B. 微波炉加热食物时发出的微波
C. 电视发射塔发出的无线电波
D. 互联网光缆中传播的激光
- 地震后坍塌的废墟中有大量伤员，为了尽快救出他们，需要使用生命探测仪，这种仪器主要是接收人体发出的（ ）。
A. 可见光 B. 红外线
C. 紫外线 D. 声音
- 下列说法中正确的是（ ）。
A. 用红外线照射时，大额人民币上用荧光物质印刷的文字符号会发出可见光
B. 电焊工用电焊机焊接时要带防护面罩，以防止电弧光中的过强紫外线对人体皮肤造成伤害
C. 红外线应用在遥感技术中是利用了它的穿透本领强的特性
D. 医学上的透视或CT检查都用到了X射线

第4章 家庭作业与活动

A 组

1. 麦克斯韦电磁场理论的基本思想是什么?
2. 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月球反射回来的电磁波? 已知地球到月球的距离为 $3.84 \times 10^5 \text{ km}$ 。
3. 蝙蝠在喉内产生超声波并通过嘴或鼻孔发射出来, 超声波遇到猎物会反射回来, 回波被蝙蝠的耳廓接收, 蝙蝠根据回波就能判断猎物的位置和速度。设洞穴内一只悬停在空中的蝙蝠对着岩壁发出频率为 34 kHz 的超声波, 波速为 340 m/s , 则该超声波的波长为 _____ m , 蝙蝠接收到的回波频率 _____ (选填“大于”、“等于”或“小于”) 它发出波的频率。
4. 关于电磁波, 下列说法中正确的是 ()。
 - A. 电磁波既可以在介质中传播, 也可以在真空中传播
 - B. 赫兹预言了电磁波的存在, 麦克斯韦通过实验发现了电磁波
 - C. 电磁波在真空中传播时, 频率和波长的乘积是一个恒量
 - D. 振荡电路的固有频率越低, 发射电磁波的本领越大
5. 电台将播音员的声音转换成如图 4-A-1 a 所示的电信号, 再加载到如图 4-A-1 b 所示的高频载波上, 使高频载波的振幅随电信号改变 (图 4-A-1 c)。这种调制方式称为 ()。
 - A. 调频
 - B. 调谐
 - C. 调幅
 - D. 解调

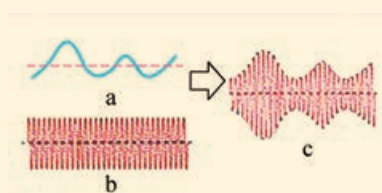


图 4-A-1

6. 古代人们也采用过“无线”通信的方式, 如利用火光传递信息的烽火台, 利用声音传递信号

的鼓等。关于声音和光, 下列说法中正确的是 ()。

- A. 声音和光都是机械波
 - B. 声音和光都是电磁波
 - C. 声音是机械波, 光是电磁波
 - D. 声音是电磁波, 光是机械波
7. 下列说法中正确的是 ()。
 - A. 微波炉中使用的微波是一种电磁波
 - B. 所有物体都会发射红外线, 温度高的物体的红外线辐射比温度低的物体的红外线辐射强
 - C. 可见光也是一种电磁波, 不同颜色的光波长范围不同
 - D. 太阳辐射中含有可见光、红外线、紫外线, 同时还有 X 射线、 γ 射线, 但是没有无线电波
 8. 间谍卫星上装有某种遥感照相机, 可用来探测军用和民用目标。这种照相机能拍摄到晚上关灯行驶的汽车, 这是因为它敏感的电磁波属于 ()。
 - A. 可见光
 - B. 红外线
 - C. 紫外线
 - D. X 射线

B 组

1. 一台收音机的接收频率范围从 $f_1 = 2.2 \text{ MHz}$ 到 $f_2 = 22 \text{ MHz}$ 。设这台收音机能接收的相应波长范围从 λ_1 到 λ_2 , 调谐电容器的相应电容变化范围从 C_1 到 C_2 , 那么, 波长之比 $\lambda_1 : \lambda_2 =$ _____, 电容之比 $C_1 : C_2 =$ _____。
2. 类比是一种有效的学习方法, 通过类比, 能较牢固地掌握新知识, 提高学习效率。在类比过程中, 既要找出共同之处, 又要抓住不同之处。某同学对机械波和电磁波进行类比, 总结出下列内容, 其中不正确的是 ()。
 - A. 机械波的频率、波长和波速三者满足的关系, 对电磁波也适用
 - B. 机械波和电磁波都能产生干涉和衍射现象

C. 机械波的传播依赖介质, 而电磁波可以不依赖介质在真空中传播

D. 机械波既有横波又有纵波, 而电磁波只有纵波

3. 在 LC 振荡电路中, 电容器 C 的带电荷量随时间变化的图像如图 4-B-1 所示, 在 $1 \times 10^{-6} \text{ s}$ 到 $2 \times 10^{-6} \text{ s}$ 内, 关于电容器充放电的判定及由此 LC 振荡电路产生的电磁波的波长, 下列说法中正确的是 ()。

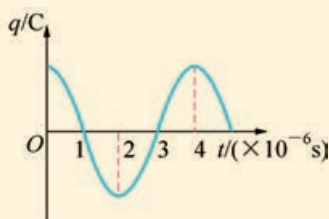


图 4-B-1

- A. 充电过程, 波长为 1 200 m
 B. 充电过程, 波长为 1 500 m
 C. 放电过程, 波长为 1 200 m
 D. 放电过程, 波长为 1 500 m
4. 对 LC 振荡电路, 下列说法中正确的是 ()。
- A. 振荡电路中电容器充电或放电一次所用的时间为 $\pi\sqrt{LC}$
 B. 振荡电路中电场能与磁场能的转化周期为 $2\pi\sqrt{LC}$
 C. 振荡过程中电容器极板间电场强度的变化周期为 $2\pi\sqrt{LC}$
 D. 振荡过程中线圈内磁感应强度的变化周期为 $2\pi\sqrt{LC}$

5. 中央人民广播电台向外发射 500 kHz 的电磁波。

若距该电台 $s = 6 \times 10^3 \text{ km}$ 处有一台收音机, 问:

- (1) 此电磁波的波长多少?
 (2) 从电台发出的信号经过多长时间可以到达此收音机处?
 (3) 其他条件不变, 仅将发射电磁波的频率变大, 第 (2) 问中的时间是否发生变化?

6. 科学技术是一把双刃剑, 电磁波的应用也是这样。电磁波在使人类的生活发生日新月异变化的同时也存在副作用——电磁污染。按照有关规定, 工作场所受到的电磁辐射强度 (单位时间内垂直通过单位面积的电磁辐射能量) 不得超过 0.50 W/m^2 。如果小型无线通信装置的电磁辐射功率是 1 W, 那么在距离该通信装置多少米以外是符合规定的安全区域? 已知球的表面积 $S = 4\pi R^2$ 。

7. 法国科学家拉普拉斯曾说过: “认识一位巨人的研究方法对于科学的进步并不比发现本身有更少的用处……” 在物理学的发展过程中, 科学家们创造出了许多物理学方法, 如观察、实验、建立模型、物理类比和物理假说等方法。其中物理假说, 是根据一定的科学事实和科学理论对研究的问题提出假说性的看法或说明, 如日心说、分子电流、黑洞等。通过本章学习, 你对物理假说是否有了更深的认识? 能再举出几个物理假说的例子吗?



第5章 传感器与现代社会

为什么遥感卫星能在高空一览无遗地观测地貌、植被？为什么计算机的显示屏上能实时显示远隔千里的画面？为什么机器人能替代人完成各种复杂的劳动？为什么小小手机会有那么多功能？

这些现代化的设备，有的复杂庞大，有的简单精巧，但它们都需要用传感器来获取信息。

那么，什么是传感器呢？你了解传感器的原理和结构吗？

本章将以生活中常见的一种传感器装置——光声控延时开关为例，让我们认识传感器的基本原理，学习用传感器制作控制装置，了解几种常用的传感器及其在现代社会中的广泛应用。

5.1 传感器的原理

人用感觉器官来获取外界的信息，通过神经传送给大脑，进行分析处理后，作出反应。如果把人体看作是一个信息系统的话，那么，人的眼睛、耳朵、鼻子、舌头、皮肤等感觉器官就是这个系统的传感器。

随着科学技术的进步和社会的发展，单凭人的感觉器官来获取信息已远远不能满足需要，于是人们研制出了各种传感器，有的传感器的“感知”能力已远远超过人的感觉器官，使人类获取的信息范围更宽广、内容更深入。

什么是传感器

传感器是通过测量外界的物理量、化学量或生物量来捕捉和识别信息，并将测量到的非电学量转换成电学量的装置。传感器一般包括敏感元件和转换电路等（图 5-1-1）。

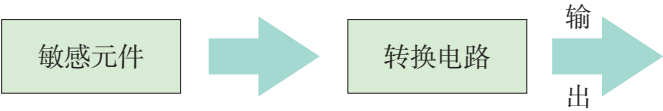


图 5-1-1 传感器的结构

由于电信号具有易测量、易控制，测量精度和速度较高，易放大、反馈、存储和可远距离传输等特点，特别是电信号能方便地与计算机连接，进行信息处理，所以一般传感器都是将非电学量转换成电学量，成为一种电信号。

传感器中的敏感元件是传感器的核心，它可以利用各种材料的物理、化学、生物效应，将非电学参数的变化转换成电学参数的变化。

传感器中的转换电路将敏感元件采集的信息进行处理，以电压或电流的形式输出。

如果转换电路采用计算机进行信息处理，并输出数字信息，那么相应的传感器就叫做智能传感器，如机器人中使用的各种传感器大多是智能传感器。

在用 DIS 系统所做的实验中，我们已经多次使用过传感器。

请讨论：

1. 根据传感器的定义和结构，你认为传感器可以用在哪些地方？
2. 你在哪些地方见到过有传感器的设施？
3. 你认为什么样的传感器才能称得上是智能传感器？

实验探究

认识传感器的结构

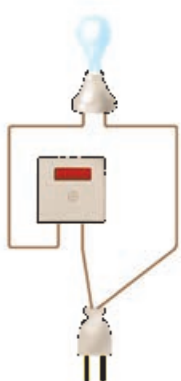


图 5-1-2 光声控延时开关电路实验装置

电子线路的作用是将光敏感元件和声敏感元件获取的电信息放大、调整，以控制电灯线路。

日常生活中传感器几乎处处可见。夜晚，楼梯上漆黑一片。但随着我们的脚步声响，楼梯灯亮了。我们登上一层楼，灯光照亮一层楼，我们走过，身后的灯则依次熄灭。这种楼梯灯好像能“听见”我们的到来，开灯迎接；又好像能“看到”我们的离去，关灯节能。它所以能这样做，是因为在电路中安装了一种能将声、光信息转换成电学量的传感器——光声控延时开关。

让我们用实验来考察光声控延时开关的结构和工作原理。

1. 将光声控延时开关与电灯串联后接到家庭电路中（图 5-1-2）。
2. 对着光声控延时开关拍手，电灯亮不亮？为什么？
3. 你怎样做才能使这电灯亮起来呢？
4. 仔细观察光声控延时开关的面板，哪个位置下面装有光敏感元件？哪个位置下面装有声敏感元件？它们各起什么作用？
5. 拆开光声控延时开关的盖子，观察它的内部结构（图 5-1-3）。识别光、声敏感元件，并请教老师，了解电子线路的作用（图 5-1-4 是光声控延时开关的原理方框图）。

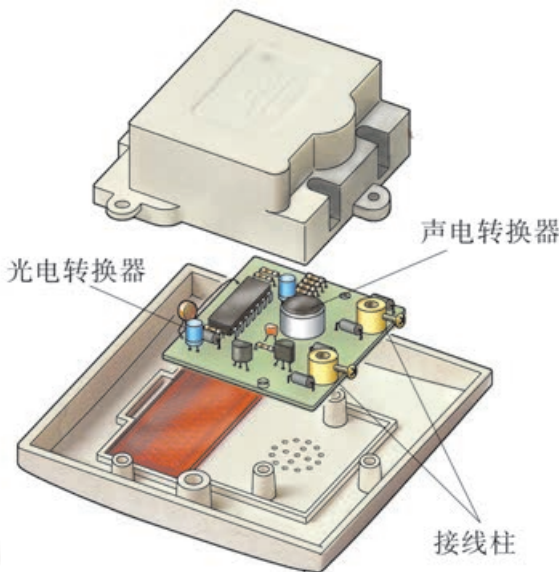


图 5-1-3 光声控延时开关的内部结构

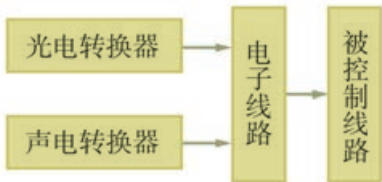


图 5-1-4 光声控延时开关的原理图

光敏电阻是利用阻值随光照强度的变化而变化的材料制成的。光照还能使一些半导体材料产生电压，利用这些材料，可以制成光电池等其他光敏元件。

6. 假如你去商店购买一只光声控延时开关，你应怎样判断它的好坏？
- 由以上实验探究可知，敏感元件是传感器中的关键性元件，它承担着直接“感知”和转换外界信息的任务。下面我们用实验来研究一种光敏感元件——光敏电阻的导电特性，从而认识传感器的原理。

探究传感器的原理

实验探究 研究光敏电阻的导电特性

如图 5-1-5 所示，我们用多用电表来研究光敏电阻的阻值变化。

实验前应该用多用电表的什么挡来测量光敏电阻的阻值？请进行实验，仔细观察，并讨论以下问题：

- 1. 有光照和没有光照时，光敏电阻 R_G 的阻值有何不同？
- 2. 改变光照强度，光敏电阻的阻值有何变化？

将光敏电阻接入图 5-1-6 所示的电路，用光照射光敏电阻，观察电流表的示数变化。

请思考：
光敏电阻作为一种对光的敏感元件能应用在哪些传感器中？

传感器的类型

对传感器有多种不同的分类方法。根据检测量的不同，可以把传感器分成物理型、化学型和生物型三类。

物理型传感器主要利用被测物理量（力学量、热学量、光学量、磁学量等）变化时，敏感元件的电学量（如电阻、电压、电容等）发生明显变化的特性制成的。如力学传感器，就是利用物体在外力的作用下产生形变或位移，从而使敏感元件的电阻或电容发生相应变化的原理制成的。

化学型传感器是用能把化学物质的成分、浓度等化学量转换成电学量的敏感元件制成的。

生物型传感器是利用生物体组织的各种生物、化学和物理效应制成的，有酶传感器、免疫传感器、抗原抗体传感器等。

信息浏览

常见传感器中的敏感元件

能制成传感器的敏感元件有许多，其中利用了物理性质的常用敏感元件如下表所示。

物理量	敏感元件
力学量	半导体压敏电阻、金属应变电阻、驻极式话筒（俗称“咪头”）
热学量	热敏电阻、双金属片控温件
光学量	光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管、光电探测器、CCD（电荷耦合器件）探测器、红外探测器
磁学量	磁敏电阻、磁敏二极管、磁敏三极管



图 5-1-5 光敏电阻导电性实验装置图

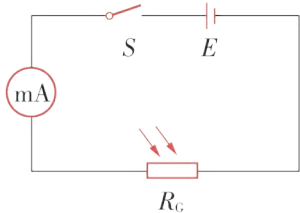


图 5-1-6 光敏电阻导电性实验电路图

双金属片和双金属片温度继电器

双金属片是将两种热膨胀系数不同的金属贴合在一起而构成的。这两种金属分别称为“主动层”和“被动层”。主动层的材料主要有锰镍铜合金、镍铬铁合金等，被动层的材料主要是镍铁合金。这些材料都具有良好的弹性，且能保证控温的精度和高重复使用性。当双金属片受热时，主动层的形变要大于被动层的形变，因而双金属片的整体就会向被动层一侧弯曲（图 5-1-7）。双金属片的这种形变特性有着广泛的应用价值，双金属片温度继电器就利用这个特性，将检测到的温度信息直接转换成开关动作，使触点开关接通或断开。

图 5-1-8 所示的是封装起来的双金属片温度

继电器，它由双金属片、动触点、静触点、玻璃壳及引线等组成。双金属片当它所感受的温度达到预定的控制温度时，便会产生形变，使动触点与静触点断开（或接通），起到温控开关的作用。

双金属片温度继电器在电热取暖器、微波炉、电热水壶（图 5-1-9）、饮水机、洗碗机、消毒柜及烘干机等家用电器上都有广泛的应用。这种温度继电器除了用于自动温度控制外，还可以作为热过载保护器件，用在工业电子设备中。随着双金属片应用领域的扩大和制作技术的进步，已相继出现三层、四层、五层的金属片，它们有更好的预控温度和弹性，但习惯上仍称它们为双金属片。

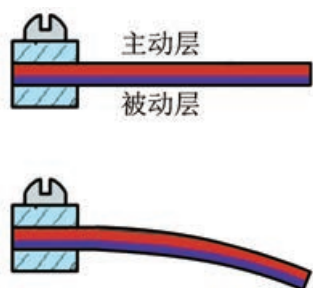


图 5-1-7 双金属片

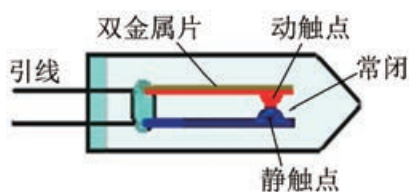


图 5-1-8 双金属片温度继电器



图 5-1-9 电热水壶的蒸汽开关

家庭作业与活动

1. 参考“信息浏览”中所列的敏感元件，到电子元件市场调查有哪些敏感元件可以用来做传感器。观察各种敏感元件，了解它们的型号、价格和用途，写一份调查报告，并与同学交流。
2. 调查学校和你居住的社区里有哪些地方用到了传感器。在老师的指导下，了解其物理原理。

5.2 热敏电阻的温度特性

要利用传感器制作自动控制装置，就要知道所用传感器中敏感元件的特性。只有知道了敏感元件的特性，才能根据特性，选择合适的器材，制作出符合要求的自动控制装置。

物理型传感器中的敏感元件在外界条件（如温度、压力等）发生变化时，其电学量（如电阻、电容、表面电荷量）也会发生变化。那么，我们怎样知道敏感元件的电学量发生了变化呢？敏感元件的电学量与外界条件之间有着怎样的数量关系呢？这些都必须通过实验测量。

下面，我们将研究热敏电阻的阻值跟温度的关系，描绘出它的 $R-t$ 图像。

实验探究

探究热敏电阻的温度特性

设计实验

采用图 5-2-1 所示的器材，用水浴法使热敏电阻的温度在 $1\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间变化，每隔一定的温度，测量一次阻值。

水浴法：把要加热的物体放在水中，通过给水加热达到给物体加热的目的。

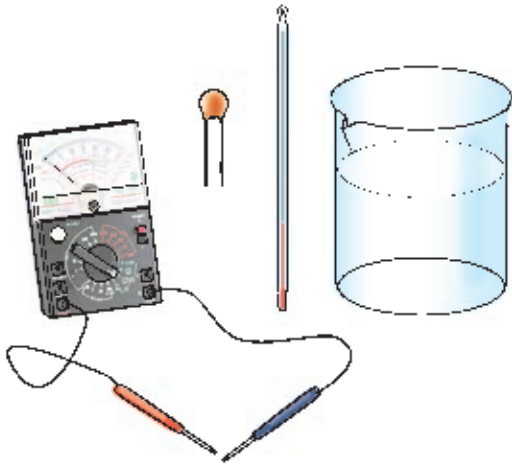


图 5-2-1 探究热敏电阻温度特性的主要实验器材

测量阻值可以采用的方法：

- (1) 用多用电表的欧姆挡直接测量热敏电阻两根引线间的阻值。这种方法虽然比较简单，但是误差较大。
- (2) 用电流表、电压表、电源、滑动变阻器等，按图 5-2-2 所示的电路图连接实验电路。测量时固定被测热敏电阻 R_t 两端的电压 U_0 ，测量它在各温度下的电流值 I_t 。将电流值 I_t 换算成热敏电阻的阻值。这种方法测量结果比较准确。图 5-2-3 是这种方法所用的器材。

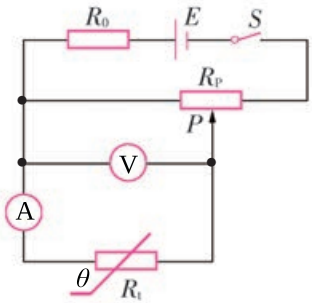


图 5-2-2 测定热敏电阻温度特性的电路图

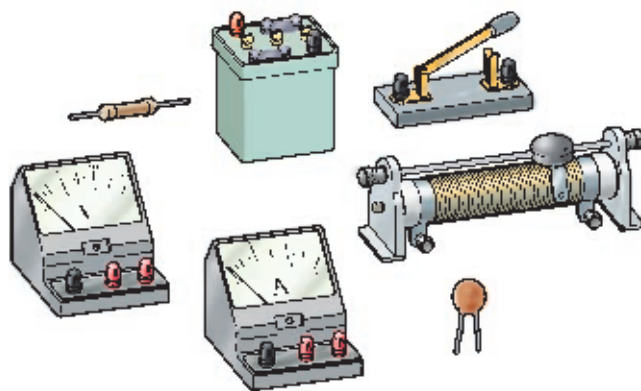


图 5-2-3 测定热敏电阻温度特性的器材

请讨论：

1. 为什么用图 5-2-2 所示的电路测量比用多用电表测量精确？
2. 你还有什么测量方法？
3. 你还需要哪些器材才能完成测量任务？请写出所需要的器材。

测量步骤

1. 用塑料薄膜紧贴着热敏电阻包裹一层，使得水浴时热敏电阻的引线不与水接触。
2. 确定测量阻值的方法：用带有导线的金属夹夹住热敏电阻的引线，并连接好电路。

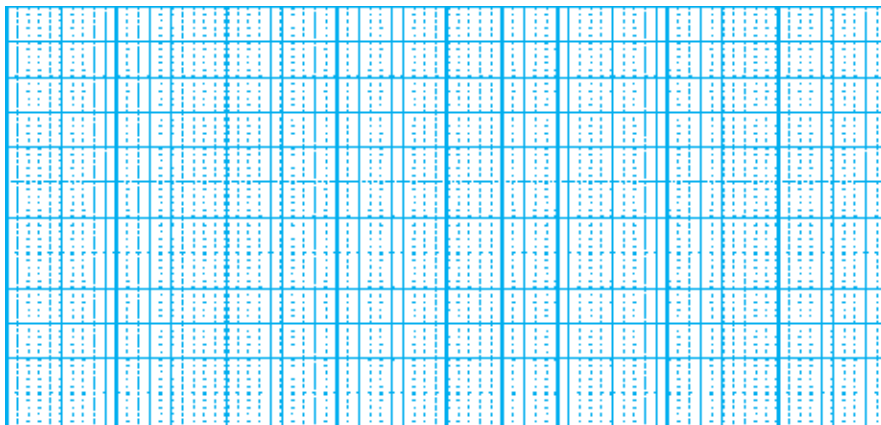
请根据你所选用的测量方法，拟定后面的操作步骤。

请完成实验记录。

数据处理

请根据记录的数据，在图 5-2-4 所示的方格纸上画出所测热敏电阻的阻值随温度变化的图像。

根据所画的图像，你认为你实验中测量的热敏电阻的阻值与温度之间有着怎样的关系。

图 5-2-4 热敏电阻的 $R-t$ 图像

材料的导电性跟温度的关系

常见金属导体的电阻都与温度有关。图 5-2-5 所示的是铜（Cu）、铂（Pt）、铁（Fe）、铅（Pb）等金属的电阻率随温度变化的图像。图像表明,金属导体的电阻率随温度升高而增大,物理学上把材料的这种特性叫做正温度系数。

热敏电阻一般用人工合成的新型陶瓷材料制成。半导体材料的导电性能对温度的变化很敏感,因此也可用半导体材料制作热敏电阻。制作热敏电阻的材料根据其温度特性可分为三类:

正温度系数的热敏材料（PTC），它的电阻率随温度的升高而增大。

负温度系数的热敏材料（NTC），它的电阻率随温度的升高而减小。

临界温度系数的热敏材料（CTC），它的电阻率在很小的温度范围（临界）内急剧下降。

这三类热敏材料的温度特性曲线如图 5-2-6 所示。由图可见, PTC 和 CTC 型热敏电阻在一定的温度范围内, 它们的阻值随温度而急剧变化, 因此常用作开关元件。在温度测量中使用最多的是 NTC 型热敏电阻。

请思考:

- 1. 在实验中你所使用的热敏电阻是用什么特性的热敏材料制成的?
- 2. 根据材料的热敏特性, 怎样将温度转变成可测量的电信号呢? 请设计一个简单的电路。

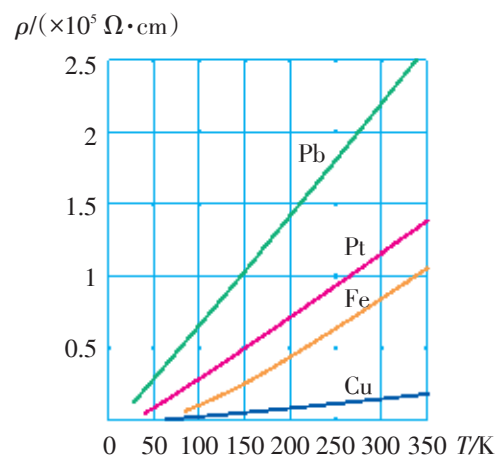


图 5-2-5 几种金属的 $\rho - T$ 图像

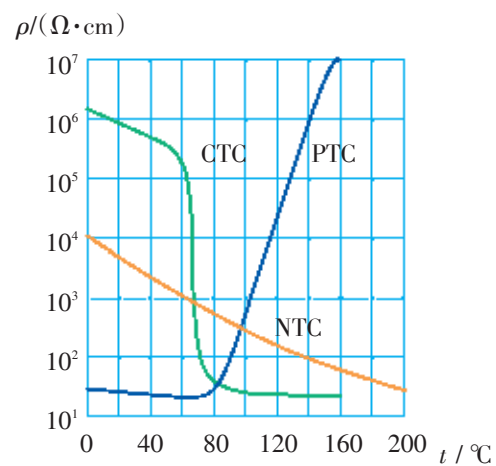


图 5-2-6 三类热敏材料的温度特性曲线

感温磁体 感温磁控开关

图5-2-7所示的是电饭煲的感温磁控开关的结构，它的核心元件是感温磁体。常温下感温磁体具有铁磁性，能够被磁铁吸引，但当温度上升到某个值时，它就失去铁磁性，不能被磁体吸引。图5-2-8所示的是感温磁体的特性曲线，其中使感温磁体失去铁磁性的临界温度在物理学中称为该材料的“居里温度”。可见，感温磁体是通过将检测到的温度转换成铁磁性的有无来达到自动控制目的的。

电饭煲的感温磁控开关是如何工作的呢？

从图5-2-7可以看出，在需要加热时，按下按键，推杆抬起，动、静触头接通，给电热器通电加热；与此同时，连杆将永久磁铁推起，压缩跳起弹簧，永久磁铁被感温磁体吸住。这时放开按键，由于永久磁铁已被感温磁体吸住，电路保持接通，电饭煲处于加热状态。

请讨论：当感温磁体达到“居里温度”时，感温磁控开关是如何动作的？

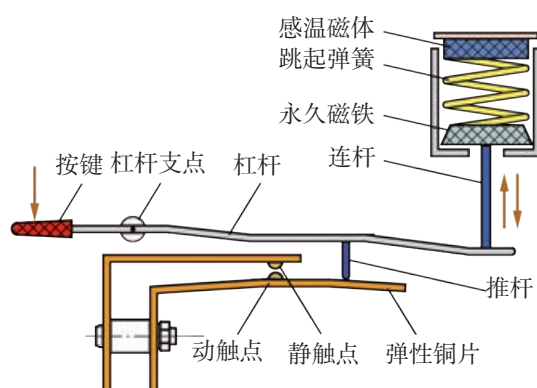


图 5-2-7 感温磁控开关的结构

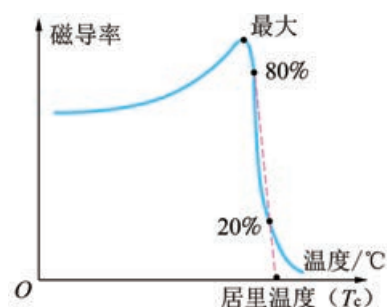


图 5-2-8 感温磁体的特性曲线

家庭作业与活动

1. 请设计测定铜或铁的电阻率与温度关系的实验。
2. 请用热敏电阻设计制作一个温度计。为此你需要做哪些工作？
3. 小明同学想用一只半导体热敏电阻 R_t 制作一支能测量水温的温度计。通过查阅资料，他获得该热敏电阻的 $R-t$ 特性曲线如图5-2-9所示。他要求所制作的温度计的测量范围是 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ ，且在水温是 100°C 时，电压表指针偏转达到最大位置。根据特性曲线，他设计的水温温度计的电路如图5-2-10所示，图中的定值电阻 $R_0 =$

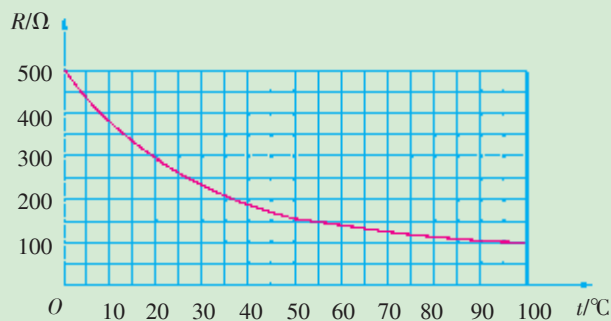


图 5-2-9

$100\ \Omega$ ，电压表的量程是 $0 \sim 3\ \text{V}$ ，电源电压恒定。

- (1) 根据特性曲线，该热敏电阻在 0°C 、 50°C 、 100°C 时，阻值分别为多大？
- (2) 通过计算说明，当水温是 0°C 、 100°C 时，电压表的指针分别指在什么位置？当电压表的指针指在 $2.0\ \text{V}$ 和 $2.5\ \text{V}$ 时，水温各是多少？
- (3) 小明需要将电压表的刻度盘改成直接显示温度的刻度盘。如果每 10°C 画一条刻度线，那么温度刻度线是否均匀分布？请你帮小明画出显示温度的刻度线。已知电压表的指针从 $0 \sim 3\ \text{V}$ 的偏转角是 90° 。

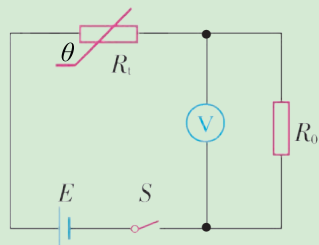


图 5-2-10

5.3 用传感器制作自动控制装置

学生必做实验

利用传感器制作简单的自动控制装置
——用热敏电阻制作高温报警器

制作原理

我们已经知道，热敏电阻的阻值随温度的变化非常明显，因此把热敏电阻接入电路，当温度发生变化时，热敏电阻的阻值也发生变化，引起电路电流变化，从而起到控制电路的作用。

实验器材

热敏电阻 R_t ，电磁继电器，蜂鸣器，小灯泡（2.5 V），保护电阻 r （阻值 $5\ \Omega$ ），变阻箱 R （ $0\sim 9\ 999.9\ \Omega$ ），电池组两组，数字多用电表（有温度挡）、铁架台、烧杯各一个，导线若干。

设计实验

用以上器材设计一个高温报警器，图 5-3-1 是它的电路图。左边部分是控制电路，由热敏电阻 R_t 、变阻箱 R 与 6 V 电池组串联后再与电磁继电器相连组成。右边部分是报警装置，由 3 V 电池组、保护电阻、蜂鸣器和小灯泡组成。根据电磁继电器的技术数据，当热敏电阻 R_t 达到设定温度时，电磁继电器应动作吸合，这时 $R_t + R = 89\ \Omega$ ，报警装置报警。

实验中用的热敏电阻 R_t 是型号为 R 02-68 的负温度系数热敏电阻（NTC），在 25°C 常温下，该热敏电阻的阻值是 $68\ \Omega$ 。负温度系数热敏电阻的阻值随温度的升高而减小。

实验中用的电磁继电器的型号是 SRD-5VDC-SL-C，工作电压为 5 V，吸合电流 $\geq 40\ \text{mA}$ （实测 $37.6\sim 40.2\ \text{mA}$ ）。因为电磁继电器的灵敏度不高，所以实测数据会出现差异。

热敏电阻和电磁继电器的型号种类较多，应根据当地实际，选择合适的器材进行实验。

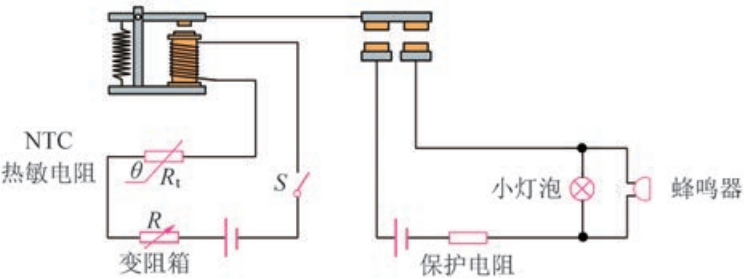
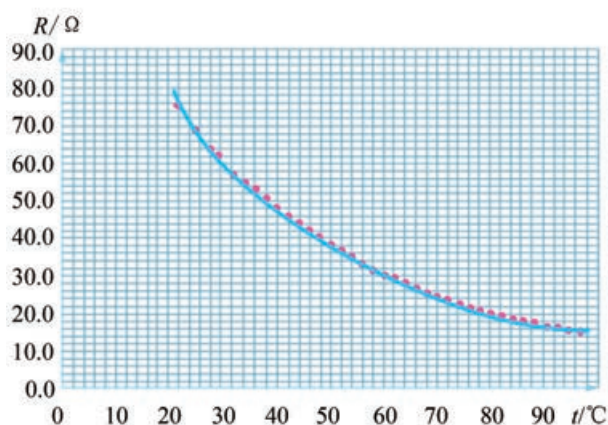


图 5-3-1 高温报警器的电路图

请思考：

图 5-3-2 所示的是实验所用的热敏电阻的 $R-t$ 曲线，如果设置报警温度为 $55\ ^\circ\text{C}$ ，那么由曲线可知 $55\ ^\circ\text{C}$ 时热敏电阻的阻值为多少？我们需将变阻箱的电阻 R 调节到多少？

图 5-3-2 NTC R02-68 热敏电阻的 $R-t$ 曲线

设计制作

按照图 5-3-3，根据要求，写出制作步骤，并进行制作。

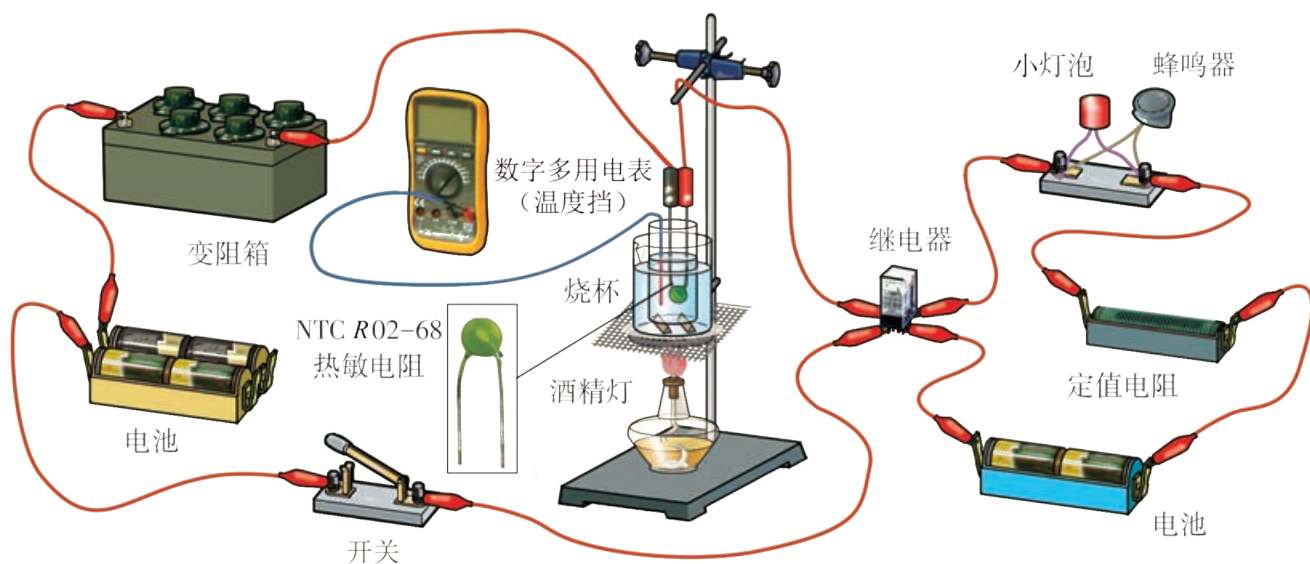


图 5-3-3 高温报警器的实验装置图

分析论证

热敏电阻和变阻箱搭配，总阻值在 $89\ \Omega$ 左右时，可以使电磁继电器工作。因此，想要让负温度系数的热敏电阻在高温报警中比较“敏感”（温度不是太高就报警），需要搭配阻值比较低的外接电阻。反之，想让高温报警器比较“迟钝”（温度比较高的时候才报警），需要搭配阻值比较大的外接电阻。

请思考：

如果设置报警温度为 $80\ ^\circ\text{C}$ ，那么变阻箱 R 的阻值应该调节到多少？（重复以上实验）

交流与展示

请将制作的高温报警器在班级内展示，并与同学交流制作体会。

信息浏览

温度传感器

温度传感器（图 5-3-4）中用于测温的敏感元件是位于金属管内部的热敏电阻，它由铂金属制成。铂电阻的温度系数稳定、电阻率高、测量范围宽，因此被广泛用作工业测温元件。

温度传感器探头的内部结构如图 5-3-5 所示，铂电阻被封装在陶瓷与玻璃之间并放在金属管中。金属管内充满导热硅脂，便于外界温度通过金属管传递到铂电阻。外界的温度变化通过金属管、导热硅脂，再通过封装片传递到铂电阻，引起此热敏电阻的阻值发生变化，进而使得电路中输出的电压发生变化，这样就把温度的变化量转换成电学量输出了。

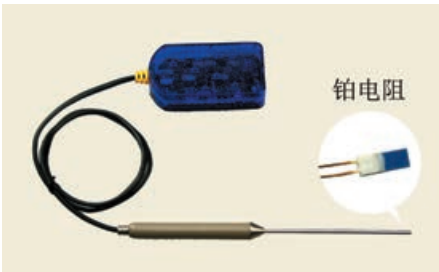


图 5-3-4 温度传感器

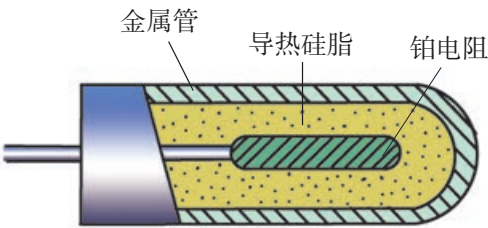


图 5-3-5 温度传感器探头的结构

课外活动

温控电风扇

电脑或路由器等电子设备运行时间长了温度过高，往往会出现死机现象，这时就要设法给它们降温。

将一个常开型温度继电器与电风扇串联，将温度继电器固定在设备的散热口处。正常情况下，温度继电器的开关呈常开状态，电风扇不工作。当散热口温度达到温度继电器的控制温度时，常开触点闭合，电风扇工作，给设备吹风降温。当温度低于控制温度时，触点弹开，电风扇停止工作（图 5-3-6）。

先让电脑工作一段时间，然后用温度计测量电脑设备散热口的温度，以确定合适的控制温度。一般情况下，设置控制温度为 30 ~ 40 ℃。

请你对自己的制作过程进行回顾，总结心得体会，提出改进意见。在你的实验中，“控制温度”设置在多少较为合适？



图 5-3-6 温度继电器的应用

家庭作业与活动

1. 设计制作简易光照强弱检测装置。

读书写字时，光照强弱对视力有很大影响。请你尝试制作一个“简易光照强弱检测装置”，当光照较弱时它能发出光声信号。

(1) 设计实验

图 5-3-7 所示的装置中，当光照较弱时光敏电阻 R_G （型号：625A）的阻值变大，三极管 3DG 导通，使发光二极管 LED 发光，蜂鸣器 HA 发声，提示光照较弱，不适合读书写字。图 5-3-8 所示的是这个装置的电路图。

电阻 R_1 用来调整三极管 3DG 的工作点，

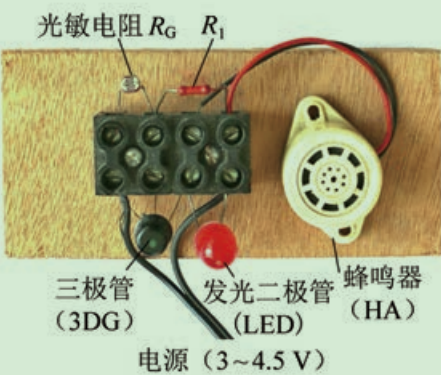


图 5-3-7 简易光照强弱检测装置

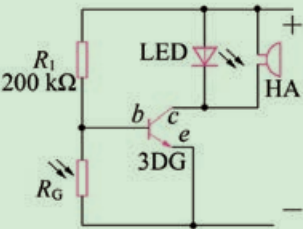


图 5-3-8 简易光照强弱检测装置的电路图

增大 R_1 的阻值，可提高装置的灵敏度。电阻 R_1 的大小也跟光敏电阻的型号有关。

(2) 实验器材

光敏电阻、三极管、发光二极管、蜂鸣器、电阻、四口接线端子。

(3) 进行实验

参照电路图图 5-3-8 安装电路，检查无误后接通电源。

将装置放在灯光下，光照正常时光敏电阻 R_G （使光照变弱），发光二极管 LED 亮，蜂鸣器 HA 发声。必要时可根据实际情况减小或增大 R_1 的阻值。

(4) 分析与论证

对自己的制作做出评价，提出改进意见。

2. 使用光敏电阻制作模拟自动路灯。

问题来源：由于太阳照射角度每天都有变化，每天日出、日落的时间均有变化，路灯由人来定时控制，耗费人力，也不够节能。

原理：图 5-3-9 是模拟自动路灯的原理图，其中 A 为光敏电阻，B 为电磁继电器，C 为照明电路，D 为路灯。

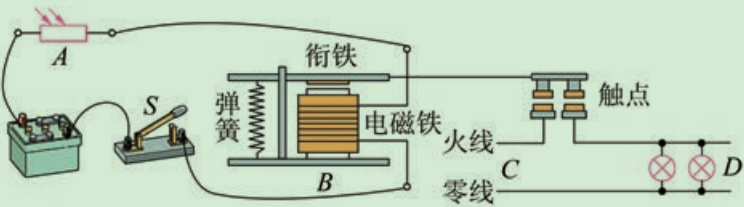


图 5-3-9 模拟自动路灯的原理图

5.4 信息时代离不开传感器

随着信息技术和计算机技术的发展，传感器技术迈入了快速发展时期。我国将传感器技术列为重点发展的尖端技术，投入大量的人力和物力，研制和开发了各种新型的传感器。传感器技术已经深入到日常生活、生产、科学研究和军事技术等各个领域。

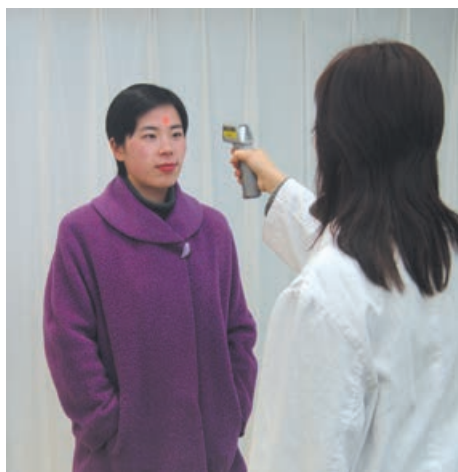
随处可见的传感器

红外测温仪

2003 年，当 SARS 肆虐时，有关部门在机场、车站等公共场所都配备了红外测温仪（图 5-4-1）。这是一种将红外线转换成电信号的传感装置，能非接触快速测温，可帮助机场、车站工作人员快速检测旅客体温，而又不会造成交叉感染。



a 红外测温仪外观



b 用红外测温仪测体温

图 5-4-1 红外测温仪

数码相机和摄像机

在数码摄像器材中，装有一种叫做电荷耦合器件（CCD 或 CMOS）的新型敏感元件，它能将光信号转换成模拟电信号。模拟电信号再通过一种专门的装置——A / D 转换器，转换成数字电信号，以便于计算机处理。经计算机处理后的信号可根据需要或储存或发送出去。

CCD 是一种硅半导体芯片，上面布有数百万个光敏元件。每个光敏元件都把它所接收到的光转换成相应量的电荷，于是整块 CCD 就把一幅图像的光信号转换成相应的电信号了。

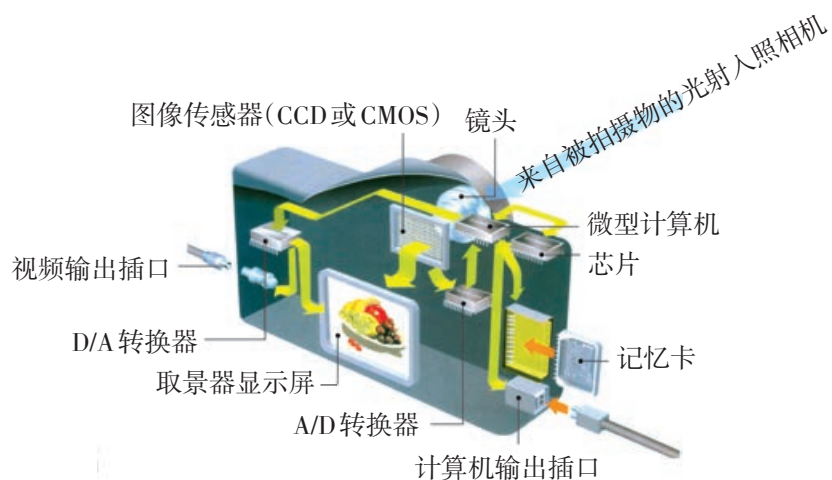


图 5-4-2 数码相机



图 5-4-3 数码摄像机

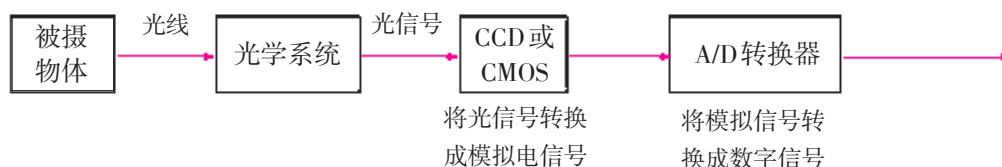


图 5-4-4 数码摄像机工作原理框图

酒精浓度测试仪

机动车驾驶员酒后驾车，极易发生交通事故，严重危害交通安全和人身财产安全。怎样才能判定驾驶员酒后驾车呢？人饮酒后，酒精通过消化系统被人体吸收，经血液循环，约有90%的酒精通过肺部呼气排出，因此通过测量呼气中的酒精含量就可以判断呼气者的饮酒程度。我国已制成对低浓度酒精有高灵敏性的酒精传感器。交通警察使用这样的酒精传感器，能迅速、准确地检查出机动车驾驶员是否酒后驾车。

传感器在现代生活中应用的例子还有很多，如煤气报警器、红外报警器等。

请再举出几个传感器在生活中应用的实例。

蔬菜种植大棚中的传感器

在蔬菜种植大棚中（图 5-4-5），人们需要控制光照强度、温度、空气湿度、空气中二氧化碳的浓度、土壤湿度等影响蔬菜生长的条件。这当然离不开传感器。

请讨论：

1. 在蔬菜种植大棚中要用到哪些传感器？它们的作用是什么？
2. 为了控制大棚中蔬菜的生长条件，还需要哪些设施与传感器配合使用？

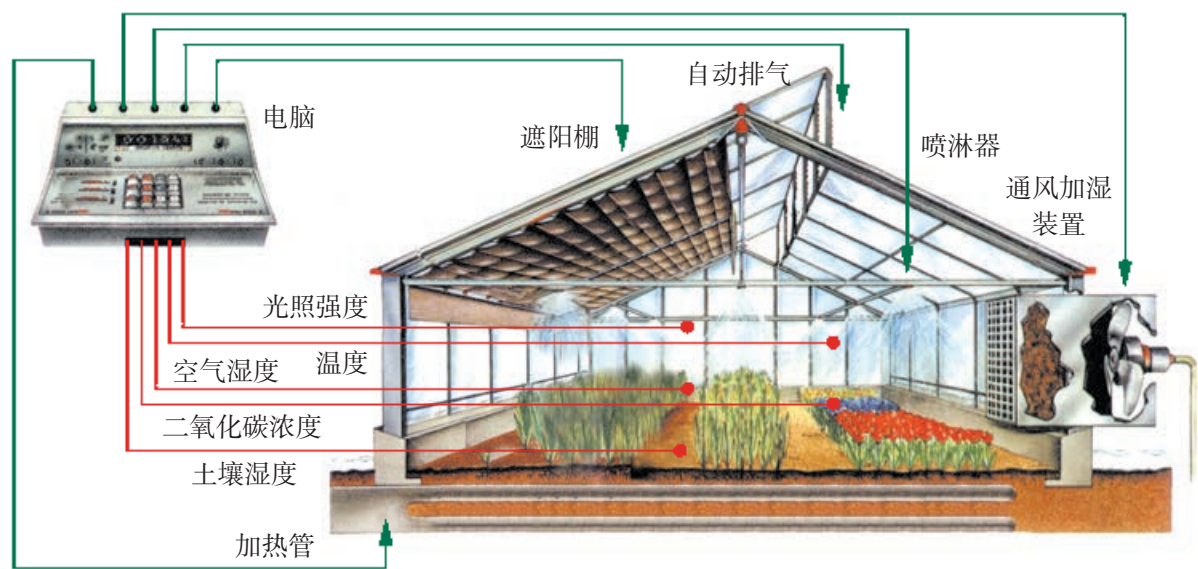


图 5-4-5 有自动控制功能的蔬菜大棚，靠传感器感知作物生长所需的各种信息

信息浏览

传感器在家用电器上的应用

家用电器		彩电	冰箱	吹风机	录像机	电饭锅	煤气用具	室内空调	洗衣机	报警器
温度传感器	压力式		●				●	●		
	双金属							●		
	热电偶						●			
	PTC	●		●	●			●		●
	CTC					●				
	感温铁氧体					●				
	热膨胀元件			●						
	温度保险丝	●			●	●		●		
光传感器		●			●					●
压力传感器									●	
湿度传感器			●		●					
气体传感器							●			●
烟雾传感器										●
接触传感器		●			●				●	●

信息社会离不开传感器

智能传感器

智能传感器源于航天器的开发。对于航天飞机来说，它在太空中的位置、速度、加速度、飞行姿态，以及航天员居住空间的温度、湿度、空气成分、微量气体等，都需要有各种传感器去获取信息，并用电子计算机进行处理。于是人们将传感器与计算机构成一个整体，这就是智能传感器。机器人身上就大量使用了各种智能传感器。

传感器的使用，使人类收集信息的能力得到极大的扩展和延伸，获取信息的手段更方便、更快捷，涉及领域更广阔、更深入。

世界各国都非常重视传感器在信息技术中的作用，将传感器技术列为重点发展的尖端技术。我国从事传感器研究的单位有数千个。

随着信息技术的发展，生活、生产、科研中大量信号的检测、控制 and 处理已成为可能。数字式传感器能将非电学信号直接转换成数字信号，在自动检测和自动控制中得到了日益广泛的应用。智能式传感器集信息检测、信息处理、信息记忆、逻辑思维和判断功能于一身。把计算机、各种用途的传感器和输入输出接口等制作在同一块芯片上，即成为大规模集成电路智能传感器，其功能得到大大提高。现代信息社会离开传感器，就像人类没有了“五官”，将寸步难行。

遥感遥测

遥感遥测就是利用遥感飞机、航天实验室、地球卫星等飞行器上配置的多光谱摄影机、多光谱扫描仪、红外扫描仪、面阵列固体扫描仪等传感器，对远距离目标物进行探测。这是一种不直接接触目标物而能收集信息，并对其进行识别、分析、判断和给出结果的自动化程度很高的监测手段。遥感遥测的范围可以很广、很大、很深、很全面。利用遥感遥测技术，人们可以通过计算机和互联网进行连续的实时监测，并将测得的结果远距离传输。

遥感遥测的基本原理是，通过遥感传感器对观测目标产生的电磁波、热辐射进行远距离收集、转换，用计算机处理、识别，得出结论。

遥感遥测技术应用广泛，它在地球资源勘测、环境监控、

气象预报、军事侦察等方面的突出功能其他测控方法无法取代的。

资源卫星是通过遥感遥测技术来勘测和研究地球的自然资源的卫星，它能“看透”地层，发现人类肉眼看不见的地下宝藏、历史古迹、地层结构，能普查农作物、森林、海洋等资源，预报各种自然灾害。

2002年5月15日，我国第一颗海洋卫星“海洋一号A”发射升空。此后，我国又于2007年和2011年分别发射了“海洋一号B”和“海洋二号”两颗海洋卫星。这些卫星上都携带了多种精密的遥感传感器，可用于海洋环境监测、海洋资源利用、海洋科学研究等。

军事侦察卫星利用可见光遥感器，在白天能跟踪地面上行走的人，在夜晚可精确地测到崇山峻岭中的篝火，一切军事调动都逃不过它的“眼睛”。这些准确的情报对指挥官的正确指挥起到了重要的作用。

遥感遥测技术还能把收集到的关于目标的电磁波信息用图像形式表达出来，如气象云图、遥感地图（图5-4-6）等。



图 5-4-6 卫星拍摄的黄河三角洲遥感照片

传感器与机器人

机器人（Robot）是指能自动执行任务的人造机器装置，可用来取代或协助人类工作。从用途上分，机器人可以分为在制造环境下应用的工业机器人和在非制造环境下应用的服务机器人。因此，机器人既是先进制造业的关键支撑装备，也是改善人类生活方式的重要切入点。

传感器是机器人的核心部件之一。通常机器人中安装有各种传感器，如触觉传感器、温度传感器、距离传感器、视觉传感器、听觉传感器等。机器人利用这些传感器去感知外界环境和本身状态的变化，通过计算机进行决策，完成各种动作。

自1954年世界上第一台机器人诞生以来，机器人产业发展迅猛。目前，世界工业发达国家已经建立起完善的工业机器人产业体系。与此同时，服务机器人发展迅速，应用范围日趋广泛。在以手术机器人为代表的医疗康复机器人领域，已形成了较大的产业规模，空间机器人、仿生机器人和反恐防暴机器人等特种作业机器人的研制，已到了应用阶段。

我国机器人研发起步于20世纪70年代。近年来，在一系列政策支持下及市场需求的拉动下，我国机器人产业发展迅速。自2013年起我国成为全球第一大工业机器人应用市场，在科学考察、医疗康复、教育娱乐、家庭服务等领域已经研制出一系

列服务机器人的代表性产品并实现应用。

大力发展机器人产业，对于打造中国制造新优势，推动工业转型升级，加快制造强国建设，改善人民生活水平具有重要意义。因此，我国已经将机器人作为重点发展领域之一。

机器人是衡量现代科技和高端制造业水平的重要标志，也是抢占人工智能产业发展先机的战略领域。我国正在实施创新驱动发展战略，大力推动大众创业、万众创业，这将有力促进机器人新兴市场的成长，创造世界上最大的机器人市场。

信息浏览

智能手机与传感器

智能手机由掌上电脑演变而来。最早的掌上电脑并不具备手机通话功能。人们出行时往往要携带手机和掌上电脑两种设备，很不方便。于是开发人员将掌上电脑的系统移植到了手机中，这就出现了智能手机这个概念。智能手机就好比是一台缩小版的个人电脑，它拥有个人电脑的各项功能，同时安装了一些如下的特殊性能的传感器，使它的功能更加宽泛，使用更加灵活方便。

重力传感器——根据屏幕方向而转动画面，实现“自动转屏”功能。

近距与环境光传感器——通过红外光来判断物体的位置，当听筒贴近耳朵时，屏幕就会黑屏，避免误操作；离开耳朵，屏幕又亮起后自动关闭以省电。

气压传感器——能够对大气压变化进行检

测，实现大气压及当前地理高度检测，辅助卫星定位等功能。

光线传感器——用来检测周围环境的光线，自动调节手机屏幕本身的亮度，以延长电池使用时间。

温度传感器——监测手机电池的温度和 CPU 的温度等。

有些手机还装配有“地磁传感器”“陀螺仪传感器”等。

手机中的这些传感器，都已微型化、数字化，与手机融合为一体，并可以与互联网进行数据交换。对于个人的工作、生活来讲，智能手机似乎是“无所不能”的生活助手。

请上网调查手机中的各种传感器，了解它们的应用。

家庭作业与活动

1. 你在生活中还见到过哪些用传感器控制电路的例子？它们的工作原理是什么？请将你的观察结果与同学交流。
2. 请从网上或参考资料上查找传感器技术的最新进展，写一篇调研报告。

第5章家庭作业与活动

A 组

1. 图 5-A-1 是一个声光控节能灯座及其电路板, 你能判断出电路板上哪个是光敏电阻, 哪个是声敏电阻元件吗?

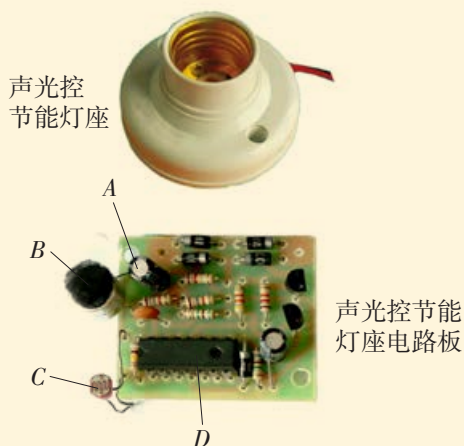


图 5-A-1

2. 某同学想把弹簧振子振动位移的变化情况直观地表现出来。他做了一个实验, 实验装置如图 5-A-2 所示。在陶瓷压电片下挂一个弹簧振子, 陶瓷压电片的两极引线分别与示波器“Y 输入”端相连。让弹簧振子振动起来, 选择适当的 X 扫描频率, 他会观察到什么现象? 分析形成这种现象的原因。

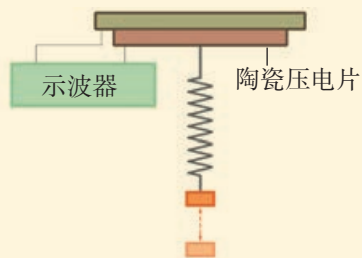


图 5-A-2

3. 图 5-A-3 是一种测定压力的电容式传感器。当待测压力 F 作用于可动膜片电极上时, 可使膜片产生形变, 引起电容的变化。如果将这个电容式传感器、电流计和电源串接成闭合电路, 那么 ()。

A. 当 F 向上压膜片电极时, 电容将变小

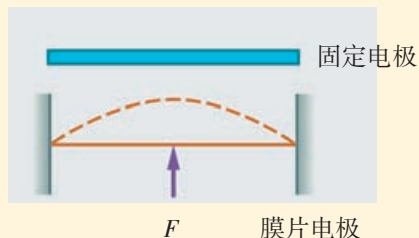


图 5-A-3

- B. 当 F 向上压膜片电极时, 电容将变大
C. 若电流计示数有变化, 则表明压力 F 发生变化
D. 若电流计示数有变化, 则表明压力 F 不发生变化

B 组

1. 图 5-B-1 所示的是应变式传感加速度计的原理图。支架 AB 固定在待测系统上。滑块穿在 AB 之间的水平光滑杆上, 并用轻弹簧连接在 A 端。其下端连有一滑动触头, 可在滑动变阻器上自由滑动。随着待测系统沿水平方向做变速运动, 滑块相对支架将发生位移, 并通过电路转化成电信号, 从电压表输出。已知电压表量程为 $0 \sim 8 \text{ V}$, 滑块质量为 0.1 kg , 弹簧的劲度系数 $k = 20 \text{ N/m}$, 电源电动势 $E = 10 \text{ V}$, 内阻不计, 滑动变阻器的总阻值 $R_p = 40 \Omega$, 有效总长度 $L = 8 \text{ cm}$ 。当待测系统静止时, 滑动触头 P 位于滑动变阻器的中点, 取 $A \rightarrow B$ 方向为加速度正方向。

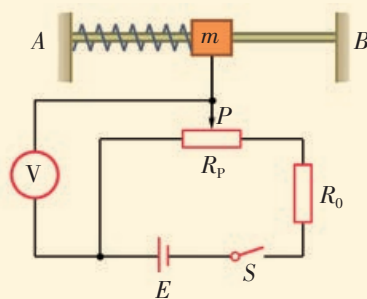


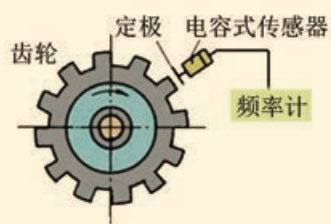
图 5-B-1

- (1) 确定该加速度计测量加速度的范围。

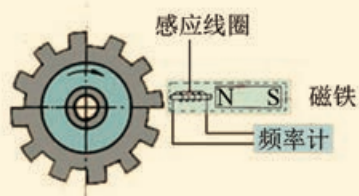
- (2) 为保证电压表能正常工作, 电路中的 R_0 至少为多大?
- (3) 根据 R_0 的最小值, 写出待测系统沿 $A \rightarrow B$ 做变速运动时电压表的示数 U_V 与

加速度 a 的关系式。

2. 图 5-B-2 a、b 分别是电容式转速传感器、电感式转速传感器的结构原理图, 请你分析并说明它们的工作原理。



a 电容式转速传感器的结构原理图



b 电感式转速传感器的结构原理图

图 5-B-2

总结与评价 课题研究成果报告会

亲爱的同学：

祝贺你即将完成《物理（选择性必修2）》的学习。在那些激动人心的探索活动中，你和你的同学经受了困难的考验，也享受了成功的喜悦。在学完本书后，你一定想让同学们分享自己的研究成果，那么，就让我们开一个“课题研究成果报告会”吧！

你可以把你平时做过的最满意的课题拿来，再作进一步的研究，取得更有意义的成果，到这个报告会上去展示；你也可以从下面的研究课题示例中，选择你感兴趣的课题，自己一人或与

同学合作进行研究。当然，你还可以自选其他课题进行研究。

在这个报告会上，也许没有鸿篇大论，也许没有什么重大的发明，但这里展示的成果，铭刻着你们的勤奋，凝聚着你们的心血……这里，最可贵的是真实！

简单就是美丽，巧妙就是智慧！

这个“课题研究成果报告会”，将让你的智慧放出灿烂的火花，让你的才智得到充分的展示！

研究课题示例

电磁感应与我们的生活

从图书、网络等查找资料，调查电磁感应在生活中有哪些应用。可以一个生活用具为例，进行分析，写出调查报告。

研究感应式电动机的工作原理

感应式电动机又叫鼠笼式电动机。参观电机制造厂或电机维修部门，观察这种电动机的构造，请教技术人员，查阅资料，在老师的帮助下做有关的实验，了解感应式电动机的工作原理。

传感器在现代生活中的应用

市场上有许多具有自动控制功能的家用电器，请

调查一下：它们为什么有自动控制功能？它们是否装有传感器？其传感原理是什么？再查阅资料，写出一份关于传感器在现代生活中应用的报告。

利用传感器制作一个测量或控制装置

到电子市场做一些调查，选择一种敏感元件（例如热敏电阻、光电二极管等），再从电子器件手册或传感器手册上查阅有关传感器的性能和有关的电路图，设计并制作一个简单实用的测量或控制装置。为完成这个设计制作，你可能还要学习一些电子线路方面的知识。

评价表

课题名称:

姓名:

完成日期:

合作者:

1. 课题设计思路

2. 课题研究过程

3. 收集的主要资料或证据

4. 分析与论证

5. 研究成果和结论

6. 自我评价

我在课题研究中的表现： 我对小组研究的贡献是： 我擅长的是：

我在研究中遇到的困难是： 我在这些方面应该做得更好：

自我评价等级（在评价的等级上画圈）

A 级（优秀）

B 级（良好）

C 级（合格）

D 级（低于标准）

7. 小组评语

建议从成果的科学性、创造性、实践性，以及从参与课题研究的热情和态度、克服困难的勇气、团队合作精神等方面进行评价。

8. 教师评语

建议从成果的科学性、创造性、实践性，以及从参与课题研究的热情和态度、克服困难的勇气、团队合作精神等方面进行评价。

后 记

我们编写的《普通高中物理课程标准实验教科书》（沪科教版）在实验区已试用十余年了，随着基础教育课程改革的深入，教育部又颁布了《普通高中物理课程标准（2017年版）》，为此，我们根据新课标的要求，对这套教科书进行了全面修订，以适应新时期课程改革的要求。

这次修订旨在落实“立德树人”根本任务，进一步提升学生的物理核心素养，为学生的终身学习、终身发展和做有责任感的社会公民奠定基础。

参加本册修订的编写组成员如下：

总主编：束炳如 何润伟

副总主编：母小勇 仲扣庄

分册主编：陈 聆 梁玉祥

本册作者：李 兴 汪慧琴 丁晓雯 梁玉祥 陈 聆

本教科书于2004年首次出版，当时参加本册书编写的有关人员有（按姓氏笔画为序）：王天骄、王正平、王全、王继珩、母小勇、李文波、杨思峰、路文艳、谢宏、戴结林。随着课程改革的深入，编写队伍的组成人员也发生了一些变化，旨在进一步优化编写队伍，以适应新时期课程改革的需求。

在本书的编写过程中，得到了许多专家、学者、教学研究人员和广大教师的热情帮助和大力支持。江西省九江市的王军、钟鸣老师在实验方面提供了很多帮助。上海科技教育出版社的李桔青、匡志强、李志棣、朱惠霖、汤世梁等同志和有关工作人员为本书的编辑加工、美术设计、排版印刷等方面做了大量的工作，在此，编写组特向关心本书及为本书的出版提供帮助的所有同志表示诚挚的谢意。

研制符合时代要求的、有特色的、高质量的高中物理教科书，始终是我们的追求目标。恳请广大专家、学者、教师、教研员、学生和家长对本套教科书提出宝贵的意见和建议，与我们一起，合作共建这套教科书。

编者

2018年8月

PUTONG GAOZHONG JIAOKESHU WULI

普通高中教科书
物理 选择性必修
第二册

上海科技教育出版社有限公司出版发行
(上海市闵行区号景路159弄A座8楼 邮政编码201101)
各地新华书店发行 上海华顿书刊印刷有限公司印刷
开本 890×1240 1/16 印张 8.5
2019年7月第1版 2021年12月第4次印刷
ISBN 978-7-5428-7044-5/G·4086
定价:9.87元

批准文号:琼发改费管〔2019〕845号 举报电话:12358

ISBN 978-7-5428-7044-5



9 787542 870445 >



致力于用榜样的力量提升学生成绩的共享家教平台

中国家庭教育学会荣誉会员单位

985/211 大学生 1对1 上门辅导

找家教就像叫“代驾”一样简单
家长们都在偷偷用的家教预约神器

记得拍照留存哦



扫码关注 预约上门

关注送200元优惠券

小初高全科辅导

学霸云集任您挑

学历真实可担保



与优秀大学生同行，激发孩子无限潜能



微信搜索公众号：365优教网

咨询热线：4000-711-365

YOUJ 优教

既是找老师，更是找榜样

家教老师全国招募中