

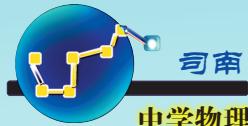


普通高中教科书

物理

选择性必修

第二册



中学物理教材编写组

普通高中教科书

物理

选择性必修

第二册

主编 廖伯琴



山东科学技术出版社

· 济南 ·

主 编：廖伯琴

核心编者：宋树杰 刘 林 周智良 林明华

张正严 黄晓标 赵保钢 廖伯琴

统 稿：廖伯琴 林明华 谢德胜

定 稿：廖伯琴

编务联系：李富强 李洪俊

责任编辑：刘大诚 杨文静 邹淑红

封面设计：孙 佳

版权所有 · 请勿擅自用本书制作各类出版物 · 违者必究

如对教材内容有意见、建议或发现印装质量问题，请与山东科学技术出版社联系

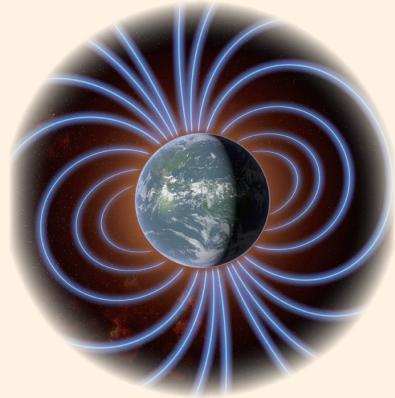
电话：0531-82098030 电子邮箱：sdkjjy@sdcbcm.com

CONTENTS

目 录

第1章 安培力与洛伦兹力

导 入 梦幻极光与神奇加速器	2
第1节 安培力及其应用	3
第2节 洛伦兹力	10
第3节 洛伦兹力的应用	18



第2章 电磁感应及其应用

导 入 奇异的电火花	31
第1节 科学探究：感应电流的方向	32
第2节 法拉第电磁感应定律	39
第3节 自感现象与涡流	46

第3章 交变电流与远距离输电

导 入 两种电源	57
第1节 交变电流的特点	58
第2节 交变电流的产生	63
第3节 科学探究：变压器	70
第4节 电能的远距离输送	77





第4章 电磁波

导 入 无处不在的电磁波	92
第1节 电磁波的产生	93
第2节 电磁波的发射、传播和接收	100
第3节 电磁波谱	105

第5章 传感器及其应用

导 入 从“芝麻开门”说起	113
第1节 常见传感器的工作原理	114
第2节 科学制作：简单的自动控制装置	120
第3节 大显身手的传感器	123



第1章

安培力与 洛伦兹力

导 入 梦幻极光与神奇加速器
第1节 安培力及其应用
第2节 洛伦兹力
第3节 洛伦兹力的应用

►►本章学业要求

- 能认识安培力和洛伦兹力的内涵，会计算安培力和洛伦兹力的大小，并会判断其方向，能用洛伦兹力分析带电粒子在匀强磁场中的圆周运动；能运用洛伦兹力解释一些自然现象，说明磁偏转技术的应用。具有与安培力和洛伦兹力等相关的比较清晰的运动与相互作用观念。 ——物理观念
- 能用磁感线与匀强磁场等模型分析安培力与洛伦兹力问题；能比较安培力与洛伦兹力，能从宏观到微观进行推理，能分析带电粒子在匀强磁场中运动的问题；能用与安培力和洛伦兹力相关的证据解释一些物理现象；能对已有结论提出质疑，能采用不同方式解决物理问题。 ——科学思维
- 能分析物理现象，提出有针对性的物理问题；能调研电磁技术中关于安培力与洛伦兹力的应用；能处理收集的信息，发现特点，形成结论；能与其他人交流，能分享调研的过程与结果。 ——科学探究
- 能认识回旋加速器和质谱仪等对人类探索未知领域的重要性，知道科学发展对实验器材的依赖性；在合作中实事求是，能坚持观点又能修正错误；认识到磁技术应用对人类生活的影响，能了解科学·技术·社会·环境的关系。 ——科学态度与责任

导人

梦幻极光与神奇加速器

梦幻般的极光，不时出现在靠近北极和南极地区的上空。它们呈带状、弧状、幕状、放射状等，变幻莫测，绚丽多彩。自古，人们便不断猜测、想象，在不断探索中，逐渐认识到这美丽的景色是太阳与地磁场等共同创造的杰作。那么，极光与太阳和地磁场到底有怎样的关联呢？



梦幻般的极光



神奇的加速器

在高能物理研究中，粒子加速器起着重要的作用。例如，欧洲核子研究中心的加速器周长达 27 km，可使粒子获得极大的速度，对人类的基础科学的研究以及新技术的发展有着重要的贡献。

看似毫不相干的极光与加速器，其实都与磁场对运动电荷的作用有关。磁场对运动电荷和通电导线的作用存在怎样的规律？本章我们将探讨这些问题。

第1节

安培力及其应用

通过前面的学习，我们知道，磁场对通电导线会产生力的作用。那么，作用力的大小和方向遵循什么规律？本节我们将通过探究得出磁场对通电导线作用的规律。

1. 安培力

物理学中，将磁场对通电导线的作用力称为**安培力**（Ampere force）。安培力的大小和方向可能由哪些因素决定呢？

下面，我们先通过实验来探究安培力的方向。



会动的铝箔“天桥”

如图 1-1 所示，取一段铝箔条，把它折成天桥形状，用胶纸粘牢两端，将 U 形磁铁横跨过“天桥”放置。由电池向铝箔供电，观察“天桥”的变化；改变电流的方向或调换磁铁的磁极时，“天桥”有什么变化？设计表格记录电流、磁场和安培力的方向，尝试从中归纳出安培力方向的规律。

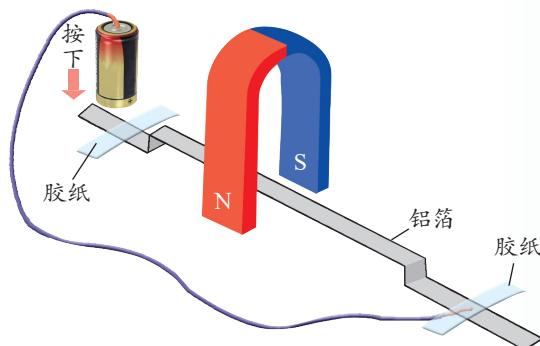


图 1-1 铝箔“天桥”实验装置示意图

由上面的实验结果可知，当通电导线垂直于磁场放置时，导线受到安培力的作用；当电流方向变为反方向或将N、S磁极调换时，安培力的方向也变为反方向。仔细分析电流的方向、磁场的方向和安培力的方向之间的关系后发现，它们遵循左手定则(left-hand rule)：**伸开左手，拇指与其余四指垂直，且都与手掌处于同一平面内，让磁感线垂直穿过手心，四指指向电流的方向，此时拇指所指的方向即为安培力的方向**(图1-2)。

安培力的大小怎样确定呢？研究表明，通电直导线电流方向与磁场方向平行时，导线所受安培力为零；在匀强磁场中，电流方向与磁场方向垂直时，通电直导线受到的安培力 F 跟电流 I 和直导线长度 l 的乘积成正比，比例系数就是磁感应强度 B 。在此情况下，通电直导线受到的安培力可表示为

$$F = IlB$$

式中，电流的单位为安培(A)，直导线长度的单位为米(m)，磁感应强度的单位为特斯拉(T)，安培力的单位为牛顿(N)。

在非匀强磁场中，上述公式可用于很短的一段通电直导线，因为导线很短时，可近似认为各点的磁感应强度相等。

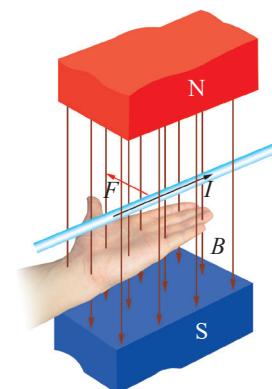


图1-2 左手定则示意图



迷你实验室

两平行通电直导线间的相互作用

在图1-3所示的实验装置中，给两平行直导线通以方向相反的电流，可观察到什么现象？给两平行直导线通以方向相同的电流，又会观察到什么现象？请解释观察到的现象。



图1-3 实验装置图



拓展一步

电流方向与磁场方向成 θ 角时安培力的计算

当电流方向与磁场方向有一个夹角 θ 时，可把磁感应强度矢量分解为两个分量（图1-4）：与电流方向平行的分量 $B_1 = B\cos\theta$ ；与电流方向垂直的分量 $B_2 = B\sin\theta$ 。 B_1 对通电直导线没有作用力，因此通电直导线所受的作用力 F 完全由 B_2 决定，即 $F = IIB_2$ ，由此可得

$$F = IIB\sin\theta$$

当通电直导线和磁场方向平行（ $\theta = 0^\circ$ 或 $\theta = 180^\circ$ ）时，安培力等于零；当通电直导线和磁场方向垂直（ $\theta = 90^\circ$ ）时，安培力最大。

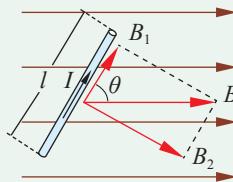


图1-4 分析磁感应强度分量示意图



例题

某工程小组计划在赤道附近架设直流高压输电线路。其中一段长为20 m沿东西方向的直导线，载有 2.0×10^3 A方向由东向西的电流。已知赤道附近地磁场的磁感应强度大小约为 5.0×10^{-5} T，且可视为南北方向的匀强磁场。地磁场对这段导线的作用力有多大？方向如何？

分析

电流方向由东向西，磁场方向由南向北，运用左手定则可判定安培力的方向。由于电流方向跟磁场方向垂直，安培力的大小可直接用 $F = IIB$ 进行计算。

解

由题意可知， $B = 5.0 \times 10^{-5}$ T， $l = 20$ m， $I = 2.0 \times 10^3$ A；电流方向与磁场方向的夹角为 90° 。

根据安培力计算公式

$$F = IIB$$

$$\begin{aligned} &= 2.0 \times 10^3 \times 20 \times 5.0 \times 10^{-5} \text{ N} \\ &= 2.0 \text{ N} \end{aligned}$$

按照左手定则，让磁感线垂直穿过手心（手心朝南），并使四指指向西，则拇指所指方向向下（竖直指向地面），这就是安培力的方向。

策略提炼

分析计算安培力，需要先确定电流 I 与磁感应强度 B 的方向关系。若 I 与 B 平行，则导线所受安培力 $F = 0$ ；若 I 与 B 垂直，则导线所受安培力 $F = IIB$ 。

确定地磁场磁感应强度 B 的方向，可借助地磁场磁感线的分布图。赤道附近地磁场磁感线的方向可视为与地面平行。



讨论

由计算结果可知，一般情况下，地磁场对输电线的作用力很小，可忽略不计。



如图 1-5 所示，一段导线 $abcd$ 位于磁感应强度大小为 B 的匀强磁场中，且与磁场方向（垂直于纸面向里）垂直。线段 ab 、 bc 和 cd 的长度均为 l ，且 $\angle abc = \angle bcd = 135^\circ$ 。流经导线的电流为 I ，方向如图中箭头所示。求导线段 $abcd$ 所受到的磁场作用力的合力。

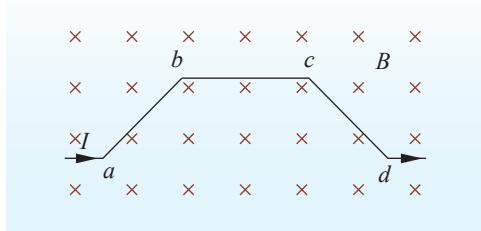


图 1-5 导线位于匀强磁场示意图

2. 安培力的应用

安培力在生活中的应用非常广泛。当你使用电风扇、吹风机、洗衣机，或者玩电动小车、用电钻打孔时，安培力都在发挥作用。正是安培力使这些电器里的一个重要部件——电动机的转子转了起来（图 1-6）。

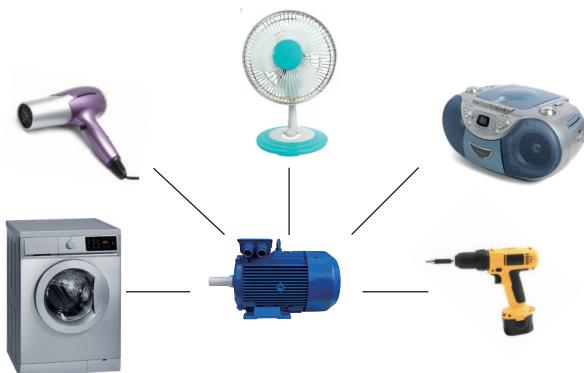


图 1-6 安培力让生活的世界“转”起来



物理聊吧

请根据安培力的有关内容，结合图 1-7 讨论电动机的转动原理。

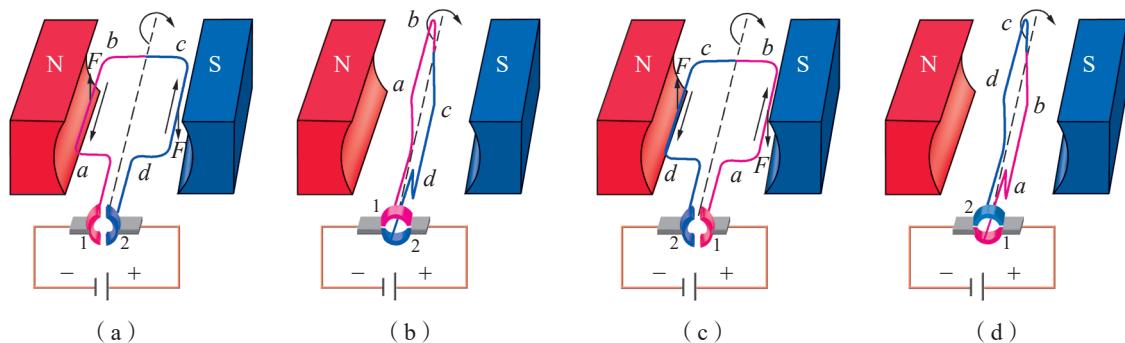


图 1-7 电动机转动原理示意图



多用电表是检修电气设备必不可少的工具，其核心部分由电流计及与其并联或串联的电阻构成。电流计能发挥作用，也应归功于安培力。

电流计等磁电式电表是利用永久磁铁对通电线圈的作用原理制成的。电流计的指针为什么会发生偏转？其指针偏转角度为什么可表示电流的大小？

如图 1-8 所示，在电流计中，有一圆柱形铁芯固定于 U 形磁铁两极间，铁芯外面套有缠绕着线圈并可转动的铝框，铝框的转轴上装有指针和游丝（又称螺旋弹簧）。当电流流入线圈时，线圈受安培力作用而转动，使游丝扭转形变，从而对线圈的转动产生阻碍。当安培力的作用与游丝形变产生的阻碍达到平衡时，指针便停留在某一刻度。电流越大，安培力越大，指针偏转角度越大。可见，正是安培力的作用才使电流计的指针发生偏转，而通过指针的偏转角度便可知道电流的大小。

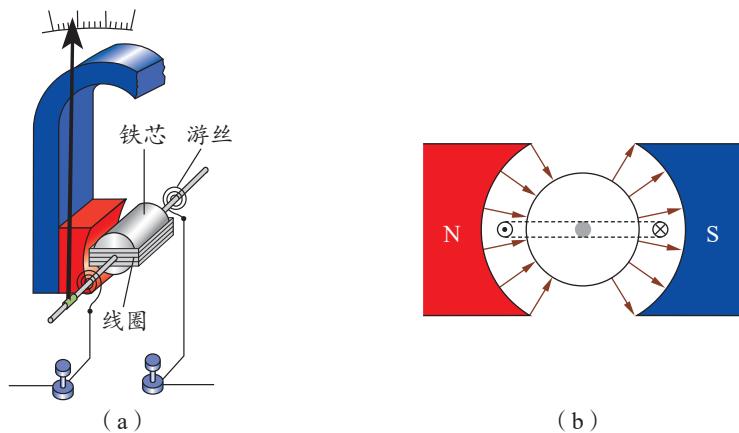


图 1-8 电流计结构示意图



用电流天平“称”安培力

如图 1-9 所示，天平左盘放砝码，右盘下悬挂线圈，线圈处于磁场中。当线圈没有通电时，天平处于平衡状态。

线圈通电后，在磁场中的导线 a 、 b 、 c 段分别受安培力作用。由左手定则可知， a 、 c 段的安培力大小相等、方向相反，互相抵消，而 b 段导线的安培力方向向上，从而使天平的平衡被破坏。通过在右盘加砝码（或移动游码）使天平重新平衡，根据砝码的质量可推知线圈所受安培力的大小。进一步由线圈的匝数、电流的大小、磁场中导线的长度，还可确定磁感应强度的大小。

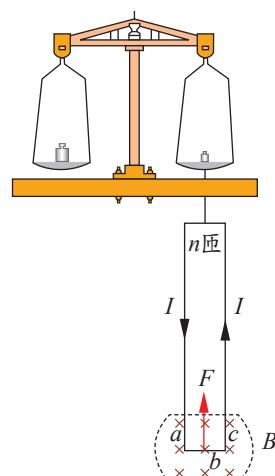


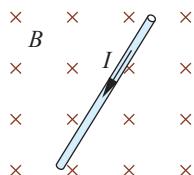
图 1-9 电流天平原理示意图



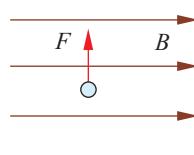


节练习

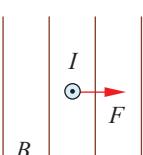
1. 下列图中标出了电流 I 、磁感应强度 B 、安培力 F 这三个物理量中的两个物理量的方向。已知导线垂直于磁场摆放，请标出另一物理量的方向。



(a)



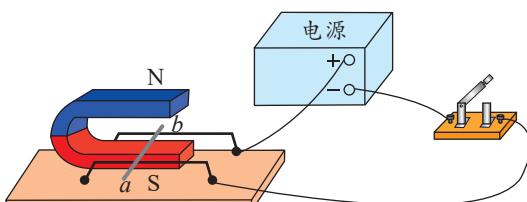
(b)



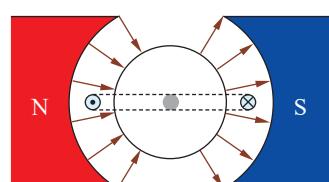
(c)

第1题

2. 某同学探究磁场对通电导体的作用的实验装置如图所示。当闭合开关后，请在图中标出导体所受安培力的方向。若要使导体受到的安培力更大，可采取哪些措施？
3. 在电流计中，当电流通过线圈时，线圈在安培力的作用下转动，游丝被扭动，线圈停止转动时满足 $NBIS = k\theta$ ，式中 N 为线圈的匝数， S 为线圈围成的面积， I 为通过线圈的电流， B 为磁感应强度， θ 为线圈（指针）偏角， k 是与游丝有关的常量。若线圈中通以如图所示的电流时，线圈将如何转动？线圈转动过程中受到的安培力的大小是否变化？该电流计的刻度是否均匀？

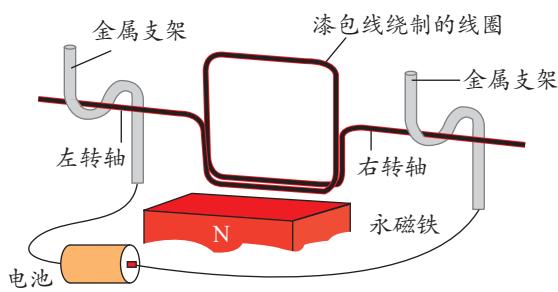


第2题



第3题

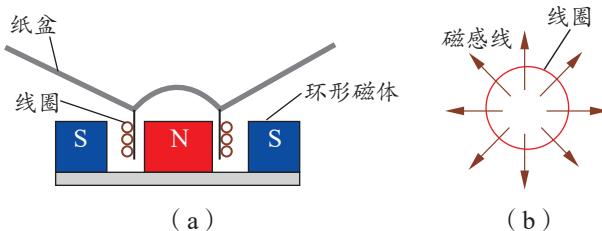
4. 自制的简易电动机示意图如图所示。为了使电池与两金属支架连接后线圈能连续转动，一位同学将左、右转轴下侧的绝缘漆刮掉，另一位同学将左、右转轴上下两侧的绝缘漆都刮掉。哪位同学的方法可行？为什么？



第4题



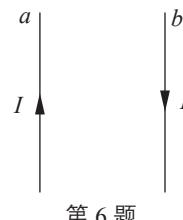
5. 如图(a)所示,扬声器中有一线圈处于辐射状磁场中,当音频电流信号通过线圈时,线圈带动纸盆振动,发出声音。俯视图(b)表示处于辐射状磁场中的线圈(线圈平面即纸面),磁场方向如图中箭头所示。下列选项正确的是



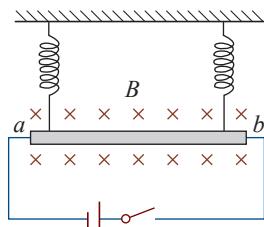
第5题

- A. 当电流沿顺时针方向时,线圈所受安培力的方向垂直于纸面向里
 B. 当电流沿顺时针方向时,线圈所受安培力的方向垂直于纸面向外
 C. 当电流沿逆时针方向时,线圈所受安培力的方向垂直于纸面向里
 D. 当电流沿逆时针方向时,线圈所受安培力的方向垂直于纸面向外
6. 如图所示,两根平行放置的长直导线a和b中通有大小相同、方向相反的电流,a受到的安培力大小为 F_1 。当加入与两导线所在平面垂直的匀强磁场后,a受到的安培力大小变为 F_2 ,则此时b受到的安培力大小变为

- A. F_2
 B. $F_1 - F_2$
 C. $F_1 + F_2$
 D. $2F_1 - F_2$
7. 如图所示,将一根质量为10 g、长为10 cm的铝棒ab用两个完全相同的细弹簧水平悬挂在匀强磁场中。磁场的磁感应强度大小为0.2 T,方向垂直于纸面向里。弹簧上端固定,下端与铝棒绝缘,铝棒通过开关与电池相连。已知开关断开时两弹簧的伸长量均为0.5 cm,闭合开关,系统重新平衡后,两弹簧的伸长量与开关断开时相比均改变了0.3 cm,取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。试判断安培力的方向,并求出电流的大小。



第6题



第7题



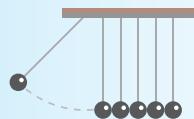
第2节

洛伦兹力

通电导线在磁场中会受到安培力的作用，电流是由电荷定向移动形成的。磁场对运动电荷也会产生作用吗？其作用力的大小和方向有什么规律？本节我们将探究上述问题。

1. 磁场对运动电荷的作用

下面我们通过实验来探究磁场对运动电荷的作用。



实验与探究

探究磁场对运动电荷的作用

阴极射线管发出的阴极射线是一束高速运动的电子流。射线侧面的荧光屏显示了电子的径迹。先观察未加磁场时阴极射线的形状；再把U形磁铁从上方逐渐靠近阴极射线管，观察电子的径迹发生了怎样的变化（图1-10）；最后，调转磁极，观察电子的径迹又发生了怎样的变化。

由观察到的现象可得出什么结论？

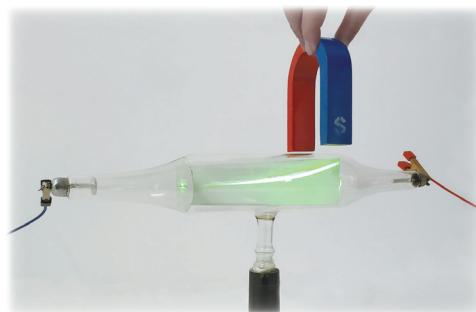


图1-10 磁极靠近阴极射线管

通过实验探究可知，当电荷在磁场中运动时，一般会受到磁场力的作用。物理学中，把磁场对运动电荷的作用力称为**洛伦兹力**（Lorentz force）。研究表明，电荷的速度方向与磁场方向平行时，所受到的洛伦兹力为零。在磁感应强度为 B 的匀强磁场中，电荷量为 q 的电荷以速度 v 垂直于磁场的方向运动时，所受到的洛伦兹力

$$f = qvB$$





式中，电荷量 q 的单位为库仑 (C)，速度 v 的单位为米每秒 (m/s)，磁感应强度 B 的单位为特斯拉 (T)，洛伦兹力 f 的单位为牛顿 (N)。

拓展一步

速度方向与磁场方向成 θ 角时的洛伦兹力

当运动电荷的速度 v 的方向与磁感应强度 B 的夹角为 θ 时，可把速度分解为两个分量 (图 1-11)：与磁感应强度方向平行的分量 $v_1 = v\cos\theta$ ，与磁感应强度方向垂直的分量 $v_2 = v\sin\theta$ 。电荷的速度方向与磁场方向平行时，所受到的洛伦兹力为零。因此，电荷所受的洛伦兹力 f 等于电荷以速度 v_2 垂直于磁场运动所受到的力，即 $f = qv_2B$ ，由此可得

$$f = qvB\sin\theta$$

洛伦兹力的大小和运动电荷的速度与磁感应强度之间的夹角 θ 有关。当 $\theta = 0^\circ$ (或 180°) 时，洛伦兹力为零；当 $\theta = 90^\circ$ 时，洛伦兹力最大。

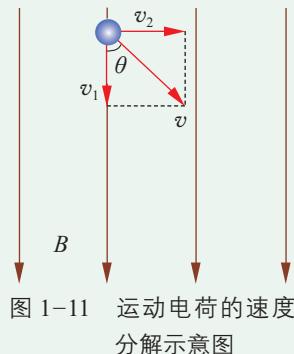


图 1-11 运动电荷的速度分解示意图

2.从安培力到洛伦兹力

通电导线在磁场中受到安培力，运动电荷在磁场中受到洛伦兹力，这二者之间有什么内在联系呢？实际上，安培力可视为大量运动电荷受到洛伦兹力的宏观表现。下面我们尝试由安培力公式推导出洛伦兹力的公式。

如图 1-12 所示，通电直导线垂直于磁场放置，设导线的横截面积为 S ，导线中单位体积内所含的自由电子数为 n ，电子电荷量大小为 e ，自由电子定向移动的平均速率为 v 。截取一段长度 $l = v\Delta t$ 的导线，这段导线中所含的自由电子数为 N ，则

$$N = nSl = nSv\Delta t$$

在 Δt 时间内，通过导线横截面的电荷为

$$\Delta q = neSv\Delta t$$

通过导线的电流为

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = neSv$$

这段导线所受到的安培力

$$F = IlB = neSv^2B\Delta t$$

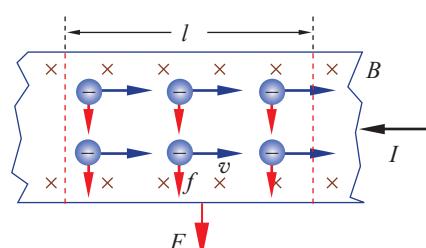


图 1-12 安培力的微观解释示意图

每个自由电子所受到的洛伦兹力

$$f = \frac{F}{N} = evB$$

洛伦兹力的方向也可用判定安培力方向的左手定则来判定：

伸出左手，拇指与其余四指垂直，且都与手掌处于同一平面内，让磁感线垂直穿过手心，四指指向正电荷运动的方向，那么拇指所指的方向就是正电荷所受洛伦兹力的方向（图1-13）。负电荷所受力的方向与正电荷所受力的方向相反。由左手定则可知，运动电荷所受洛伦兹力方向与其速度方向垂直。

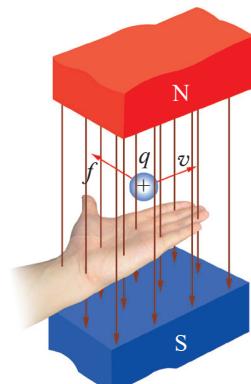


图1-13 用左手定则判断洛伦兹力方向示意图



科学书屋

极光的形成

太阳发射出的带电粒子高速扫过太阳系，形成了“太阳风”。这些带电粒子经过地球时，地球的磁场使它们发生偏转。当“太阳风”中的带电粒子进入极地高层大气时，与大气中的原子和分子碰撞并激发，产生光芒，这就是极光（图1-14）。极光出现在北半球时被称为北极光，出现在南半球时被称为南极光。

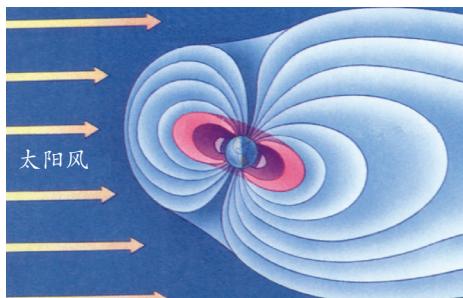


图1-14 极光形成示意图

3. 带电粒子在匀强磁场中的运动

由粒子的运动轨迹照片（图1-15）可看出，在磁场中粒子的运动轨迹有大小不等的圆形、螺旋形等。为什么它们会形成这样的运动轨迹呢？

垂直射入匀强磁场中的运动电荷受到的洛伦兹力不仅与磁感应强度方向垂直，而且总与速度方向垂直，因此洛伦兹力不对运动电荷做功，它不改变运动电荷的速度率，只改变运动电荷的运动方向。由此我们推测，运动电荷垂直射入磁场后，在磁场中做圆周运动。这一推测正确吗？让我们通过实验进行探究。

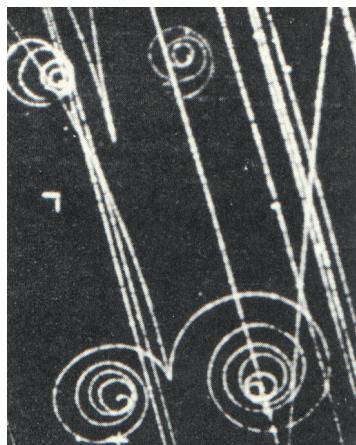
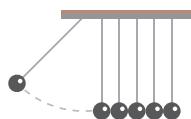


图1-15 粒子在磁场中的运动轨迹



实验与探究

观察运动电荷在磁场中的轨迹

图 1-16 所示的装置称为洛伦兹力演示仪。玻璃泡内的电子枪发射出阴极射线，使泡内的低压惰性气体发出辉光，这样便可显示出电子的轨迹。

观察并回答相关问题：

- (1) 没有磁场作用时，观察电子的运动轨迹，你看到了什么？
- (2) 外加一磁场，电子垂直射入磁场，你观察到的电子运动轨迹是否如图 1-17 所示？为什么？
- (3) 外加一磁场，电子不垂直射入磁场，你观察到的电子运动轨迹是否如图 1-18 所示？为什么？



图 1-16 洛伦兹力演示仪

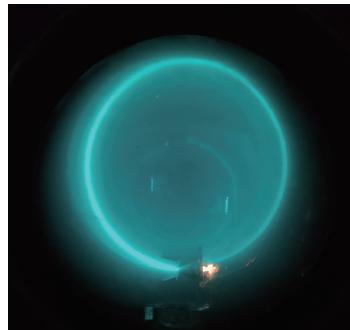


图 1-17 圆形轨迹

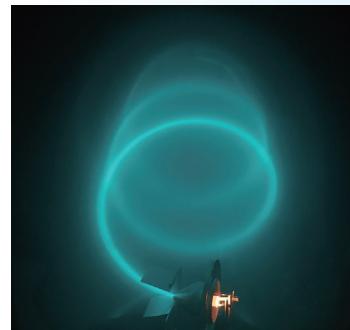


图 1-18 螺旋形轨迹

由实验探究可知，当运动电荷垂直射入匀强磁场后，运动电荷受洛伦兹力作用而做匀速圆周运动。运动电荷做匀速圆周运动的半径、周期与哪些因素有关呢？

如图 1-19 所示，假设有一质量为 m 、电荷量为 q 的带电粒子，以速率 v 垂直入射于磁感应强度为 B 的匀强磁场中。该带电粒子所受的洛伦兹力

$$f = qvB$$

忽略粒子所受重力，带电粒子在洛伦兹力的作用下做匀速圆周运动，半径为 r ，洛伦兹力提供粒子做匀速圆周运动的向心力，因此有

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

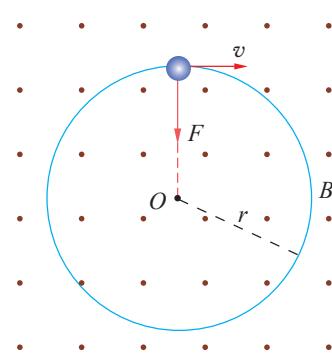


图 1-19 分析带电粒子做圆周运动示意图

由此可得带电粒子做圆周运动的轨道半径

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

带电粒子做圆周运动的周期

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

能用磁感线与匀强磁场等模型分析安培力与洛伦兹力问题；能比较安培力与洛伦兹力，能从宏观到微观进行推理，能分析带电粒子在匀强磁场中运动的问题；能用与安培力和洛伦兹力相关的证据解释一些物理现象；能对已有结论提出质疑，能采用不同方式解决物理问题。

——科学思维

由以上两式可知：带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动时，轨道半径与粒子的运动速率、粒子的质量成正比，与电荷量、磁感应强度成反比；带电粒子的运动周期与粒子的质量成正比，与电荷量、磁感应强度成反比，与轨道半径和运动速率无关。



带电粒子斜射入匀强磁场时的运动情况

带电粒子以某一角度 θ 斜射入匀强磁场时，在垂直于磁场的方向上以分速度 v_1 做匀速圆周运动，在平行于磁场的方向上以分速度 v_2 做匀速直线运动，因此带电粒子沿着磁感线方向做螺旋形运动（图 1-20）。

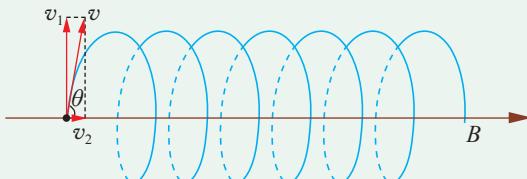


图 1-20 分析带电粒子做螺旋形运动示意图

例 题

在半导体离子注入工艺中，初速度可忽略、质量为 m 、电荷量为 q 的磷离子，经电压为 U 的电场加速后，垂直进入磁感应强度大小为 B 、方向垂直于纸面向里、有一定宽度的匀强磁场区域，在磁场中转过 $\theta = 30^\circ$ 后从磁场右边界射出，如图 1-21 所示。不计磷离子所受的重力，求磷离子在磁场中运动时的半径 r 和运动时间 t 。

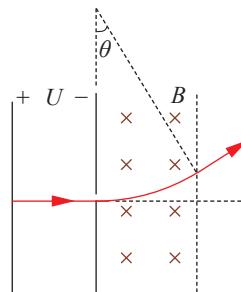


图 1-21 磷离子在电场和磁场中运动示意图



分析

磷离子在洛伦兹力的作用下做匀速圆周运动，洛伦兹力提供做圆周运动的向心力。已知磷离子的质量、电荷量和磁感应强度，要确定磷离子在磁场中运动时的半径，需要知道其速率。磷离子的速率是由加速电场获得的，由已知条件，可根据动能定理求得。

知道磷离子在磁场中偏转的角度，根据周期公式，可求出磷离子在磁场中的运动时间。

解

磷离子经电场加速，有

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

磷离子在磁场中做圆周运动，有

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

由以上两式可得

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$$

磷离子做匀速圆周运动的周期

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

磷离子在磁场中运动的时间

$$t = \frac{2\pi m}{qB} \times \frac{30^\circ}{360^\circ} = \frac{\pi m}{6qB}$$

策略提炼

对于带电粒子在匀强磁场中只受洛伦兹力作用做匀速圆周运动的问题，通常可根据洛伦兹力提供向心力等相关知识求解，有时还需要画出轨迹找几何关系。如果带电粒子还受到其他力的作用，则需要进行全面的受力分析，运用动力学规律求解。

讨论

根据题目中给出的磷离子初速度和末速度的方向，如何确定它做圆周运动的圆心位置？



如图 1-22 所示，在 $y < 0$ 的区域内存在匀强磁场，磁场方向垂直于 xOy 平面并指向纸面外，磁感应强度为 B 。一带正电的粒子以速度 v 从 O 点射入磁场，入射方向在 xOy 平面上，与 x 轴正方向的夹角为 θ 。若粒子射出磁场的位置与 O 点的距离为 l ，忽略粒子所受重力，求该粒子的电荷量和质量之比。

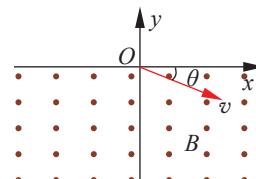


图 1-22 带电粒子射入
磁场示意图



霍尔效应

将一导电薄板（导体或半导体）放在垂直于板面的匀强磁场中，当导电薄板中有电流通过时，运动电荷会在洛伦兹力作用下向导电薄板的某一边偏移，由此便在导电薄板两边分别聚集正、负电荷，从而导电薄板两边间产生电压（图 1-23）。这种现象是美国物理学家霍尔（E. H. Hall, 1855—1938）于 1879 年发现的，因此称为霍尔效应。所产生的电压称为霍尔电压。

利用霍尔效应制成的传感器被广泛应用于自动控制等领域。

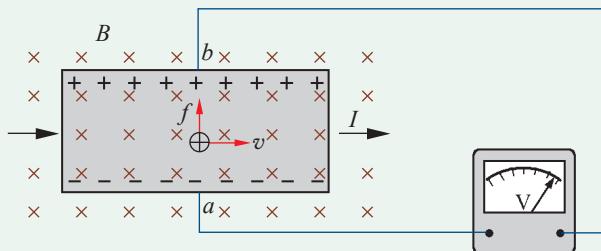
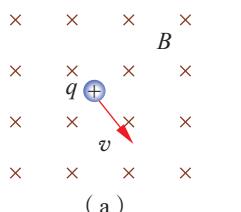


图 1-23 霍尔效应示意图

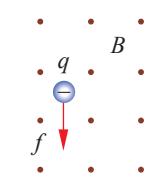


节练习

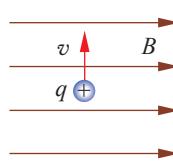
1. 下列图中标明了磁感应强度 B 、速度 v 、洛伦兹力 f 这三个物理量中两个物理量的方向，若已知 B 、 v 相互垂直，请标出第三个物理量的方向。



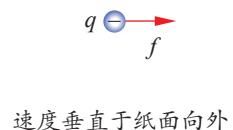
(a)



(b)



(c)



(d)

第 1 题

2. 当条形磁铁从正面靠近阴极射线管时，管内射线出现如图所示的偏转。由上述信息判断：与阴极射线管离得近的是条形磁铁的哪个磁极？请说明理由。



第 2 题





3. 同一匀强磁场中，两个带电量相等的粒子仅受磁场力作用，做匀速圆周运动。下列说法正确的是

- A. 若速率相等，则半径必相等
- B. 若质量相等，则周期必相等
- C. 若动量大小相等，则半径必相等
- D. 若动能相等，则周期必相等

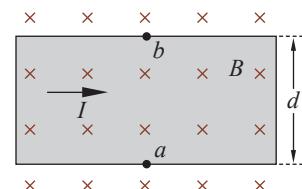
4. 金属板放在垂直于纸面的磁场中，当有电流通过时会产生霍尔效应。如图所示，宽为 d 的金属板放入匀强磁场中，磁场方向与金属板垂直，磁感应强度为 B 。当金属板通入如图所示的电流时，电子定向移动速度为 v 。下列说法正确的是

- A. a 、 b 两点的电势相等
- B. 达到稳定状态时， a 、 b 两点之间的电势差为 Bdv
- C. 导体上表面聚集电子， a 点电势高于 b 点电势
- D. 导体下表面聚集电子， a 点电势低于 b 点电势

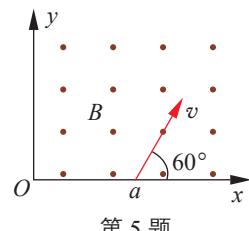
5. 如图所示，一质量为 m 、电荷量为 q 的带电粒子从 x 轴上的 $P(a, 0)$ 点以速度 v 沿着与 x 轴正方向成 60° 角的方向射入匀强磁场，并恰好垂直于 y 轴射出。求匀强磁场的磁感应强度 B 和射出点的坐标。

*6. 一个质量为 m 的负离子，电荷量大小为 q ，以速率 v 垂直于屏 MN 经过小孔 O 射入存在着匀强磁场的真空中室中，如图所示。磁感应强度 B 的方向与离子的运动方向垂直，并垂直于纸面向里。

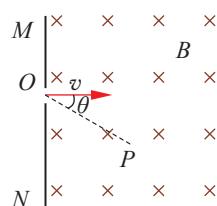
- (1) 求离子到达屏 MN 上时的位置与 O 点的距离；
- (2) 如果离子进入磁场后经过时间 t 到达位置 P ，试求直线 OP 与离子入射方向之间的夹角 θ 和 t 的关系式。



第4题



第5题



第6题

请提问

第3节

洛伦兹力的应用

洛伦兹力有很多应用，在生产生活和科研中是怎样应用洛伦兹力的呢？本节我们以显像管、质谱仪和回旋加速器为例，介绍洛伦兹力的应用。

1. 显像管

我们曾利用电场控制带电粒子的运动方向，能否用磁场控制带电粒子的运动方向呢？

带电粒子在磁场中运动时，只要运动方向与磁场方向不平行，就会受到洛伦兹力的作用，其运动方向会不断变化。因此，我们可利用磁场控制带电粒子的运动方向。通常，把利用电场改变带电粒子的运动方向称为电偏转，把利用磁场改变带电粒子的运动方向称为磁偏转。

显像管是一种电子射线管，广泛应用于电视机、监视器等，它运用的是电子束的磁偏转原理。如图 1-24 所示，由电子枪发出的电子，经电场加速形成电子束，在水平偏转线圈和竖直偏转线圈产生的不断变化的磁场作用下，运动方向发生偏转，从而实现扫描，在荧光屏上显示图像。

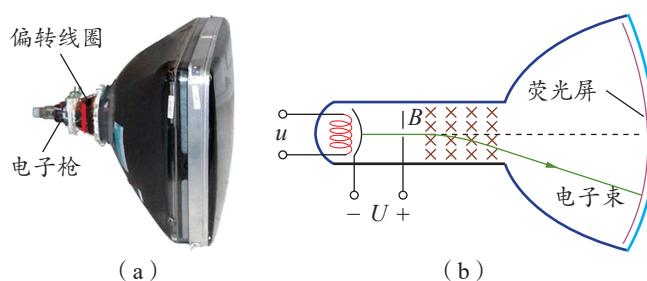


图 1-24 显像管及其原理示意图



2. 质谱仪

具有相同质子数和不同中子数的原子称为同位素。质谱仪是一种分离和检测同位素的仪器，种类较多。图 1-25 是某种质谱仪的原理示意图， I 为离子源， S_1 和 S_2 为两个狭缝，在 S_1 和 S_2 之间加有电压 U 。从离子源射出的离子在通过 S_1 到 S_2 的路径中被电场加速，形成具有一定速度的离子束，离子束以速度 v 由 A 点进入磁感应强度为 B 的匀强磁场后做匀速圆周运动，沿着半圆弧轨迹抵达照相底片，并留下痕迹。

在电场中，电场力做功，有

$$qU = \frac{1}{2}mv^2 \quad ①$$

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}} \quad ②$$

在磁场中，轨道半径

$$r = \frac{mv}{qB} \quad ③$$

又因偏转距离

$$x = 2r \quad ④$$

由②③④式得

$$\frac{q}{m} = \frac{8U}{B^2x^2} \quad ⑤$$

$$m = \frac{qB^2}{8U}x^2 \quad ⑥$$

由⑤式可知，离子的比荷与偏转距离 x 的平方成反比。凡是比荷不相等的离子会被分开，并按比荷的大小顺序排列。由⑥式可知，利用质谱仪还可准确地测出每种离子的质量。

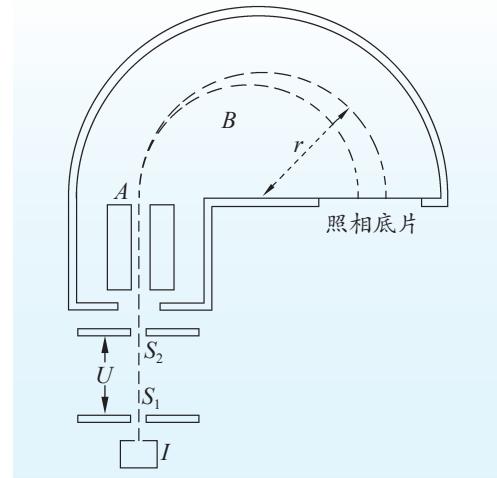


图 1-25 质谱仪原理示意图

3. 回旋加速器

为了探索原子核内部的结构，需要用高速带电粒子充当微型“炮弹”轰击原子核，引起原子核内部的变化。怎样才能使带电粒子获得如此大的能量呢？因为磁场只能使带电粒子偏转而不能使其加速，所以人们首先想到用电场加速带电粒子，由此产生了直线加速器。1928 年，世界上第一台直线加速器问世，但受电源电压的限制，粒子只能获得较小的能量。要想获得更大的能量，只有使粒子在电场中一次又一次地加速。如果粒子一直沿直线加速，那么就要建很长的实验装置，这会使加速设备的体积非常庞大。



能否在较小的范围内使粒子获得多次电场加速呢？美国物理学家劳伦斯（E. Lawrence, 1901—1958）制作的回旋加速器实现了这一设想。如图1-26所示，回旋加速器主要由两个半圆形的中空铜盒 D_1 、 D_2 构成，两盒间留有一狭缝，置于真空中。由电磁铁产生的匀强磁场 B 垂直穿过盒面，由高频振荡器产生的交变电压 u 加在两盒的狭缝处。从粒子源 P 引出的带电粒子在狭缝间被电场加速，垂直进入匀强磁场做匀速圆周运动，半个周期后进入狭缝，此时电场力对带电粒子恰好做正功，粒子加速后又进入磁场。由于轨道半径与速率成正比，而周期与速率和半径都无关，粒子将以较大的速度沿较大的半圆形轨道运动，又经过半个周期，再一次进入狭缝。让电场的周期与粒子运动的周期相同，使粒子每次穿过狭缝时，电场力都对粒子做正功……洛伦兹力使粒子周而复始地沿着半径越来越大的圆弧轨道回旋，而电场则不断给粒子加速，到终点时，粒子就获得了很大的能量。早期的回旋加速器小到可放到裤兜里（图1-27），后来人们为了让粒子获得更大的能量，建造的加速器也越来越大。

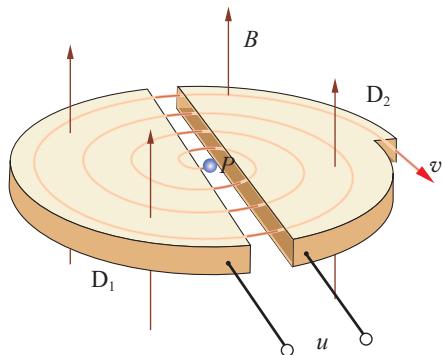


图1-26 回旋加速器原理示意图

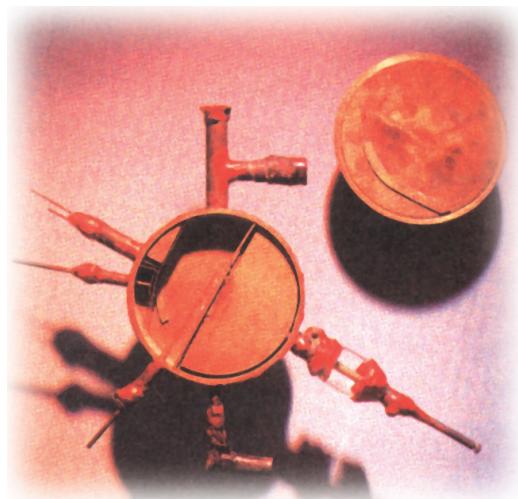


图1-27 早期的回旋加速器



科学书屋

回旋加速器对粒子速度的加速有限度吗

随着人们对带电粒子所获能量要求的提高，回旋加速器的半径越来越大。那么，带电粒子的速度能无限提高吗？根据爱因斯坦的狭义相对论，答案是否定的。因为当粒子的运动速度接近光速时，其运动质量将随速度的增大而增加，绕行周期将变长，从而粒子通过缝间时，电场力并不总是做正功，带电粒子并不总是处于加速状态。因此，通过回旋加速器加速粒子得到的速度是有一定限度的。



例 题

用电源频率为 f 的回旋加速器对电荷量为 q 、质量为 m 的氦核加速，使氦核的能量达到 E_k 。这个回旋加速器的半径 r 为多大？

分析

在不断被加速的过程中，氦核在匀强磁场中做圆周运动的半径也在不断增大，其最后一次做圆周运动的半径就等于回旋加速器的半径，此时氦核动能达到最大。磁感应强度的大小可通过电源频率等于氦核做圆周运动的频率确定。

解

氦核在匀强磁场中做匀速圆周运动，有

$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$

$$\text{得 } r = \frac{mv}{qB}$$

粒子的运动周期

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

氦核粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的频率

$$f = \frac{1}{T}$$

$$\text{得 } B = \frac{2\pi mf}{q}$$

$$\text{又因 } E_k = \frac{1}{2} mv^2$$

$$\text{得 } r = \frac{\sqrt{2mE_k}}{2\pi mf}$$

讨论

回旋加速器加速带电粒子获得的最大动能与哪些因素有关？



迁 移

回旋加速器中带电粒子的运动涉及匀速圆周运动（磁场中）和匀加速直线运动（电场中），有时还需综合运用前面所学的相关知识解决问题。

在上述例题中，氦核在第 n 次加速后进入 D 形盒中的回旋半径与第 $n + 1$ 次加速后进入另一 D 形盒中的回旋半径之比是多少？

策略提炼

交变电源的周期（频率）与粒子运动的周期（频率）相同，以及洛伦兹力提供粒子做圆周运动的向心力，是解决回旋加速器这类问题的关键。

素养提升

能认识安培力和洛伦兹力的内涵，会计算安培力和洛伦兹力的大小，并会判断其方向，能用洛伦兹力分析带电粒子在匀强磁场中的圆周运动；能运用洛伦兹力解释一些自然现象，说明磁偏转技术的应用。具有与安培力和洛伦兹力等相关的比较清晰的运动与相互作用观念。

能认识回旋加速器和质谱仪等对人类探索未知领域的重要性，知道科学发展对实验器材的依赖性；在合作中实事求是，能坚持观点又能修正错误；认识到磁技术应用对人类生活的影响，能了解科学·技术·社会·环境的关系。

——物理观念，科学态度与责任



电磁流量计

电磁流量计是测量导电液体流量的一种仪器。如图 1-28 所示，当导电液体沿测量管运动时，液体中的正、负离子在洛伦兹力作用下偏转，左右管壁电极间出现电势差。当正、负离子所受电场力与洛伦兹力平衡时，电势差就会保持稳定。因此，通过测量左右管壁电极间的电势差，即可间接确定管中导电液体的流量。

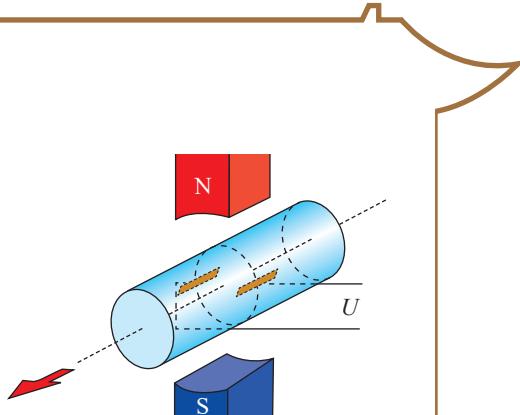
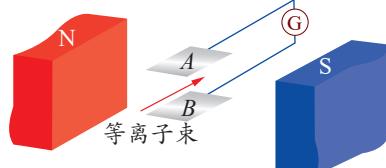


图 1-28 电磁流量计原理示意图

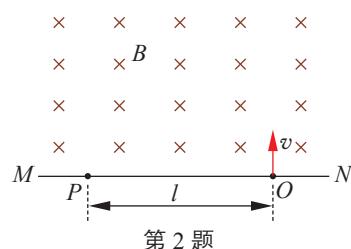


节练习

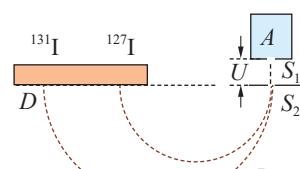
- 磁流体发电机是利用磁偏转作用发电的。如图所示，A、B 是两块在磁场中互相平行的金属板，一束在高温下形成的等离子束（气体在高温下发生电离，产生大量的带等量异种电荷的粒子）射入磁场。请解释其工作原理。
- 如图所示，MN 表示真空中室中垂直于纸面的平板，它的一侧有匀强磁场，磁场方向垂直纸面向里，磁感应强度大小为 B 。一质量为 m 的带电粒子从平板上的狭缝 O 处以垂直于平板的初速度 v 射入磁场区域，最后到达平板上的 P 点。已知 P 、 O 间的距离为 l ，粒子重力忽略不计，求此粒子所带的电荷量。
- 日本福岛核电站的核泄漏事故，使碘的同位素 ^{131}I 被更多的人了解。利用质谱仪可分析碘的各种同位素。如图所示，电荷量均为 q 的带正电的 ^{131}I 和 ^{127}I 质量分别为 m_1 和 m_2 ，它们从容器 A 下方的小孔 S_1 进入电压为 U 的加速电场（初速度忽略不计），经电场加速后从小孔 S_2 射出，垂直进入磁感应强度为 B 的匀强磁场中，最后打到照相底片 D 上。下列说法正确的是



第 1 题



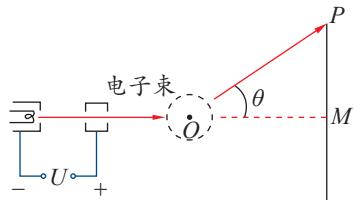
第 2 题



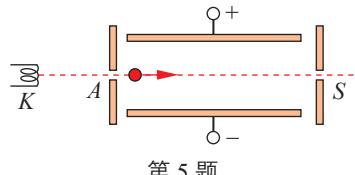
第 3 题



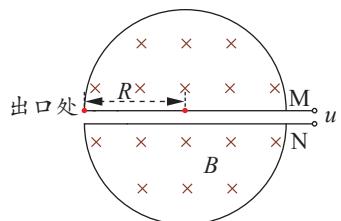
- A. 磁场的方向垂直于纸面向里
- B. ${}^{131}\text{I}$ 进入磁场时的速率为 $\sqrt{\frac{2qU}{m_1}}$
- C. ${}^{131}\text{I}$ 与 ${}^{127}\text{I}$ 在磁场中运动的时间差值为 $\frac{2\pi(m_1-m_2)}{qB}$
- D. 打到照相底片上的 ${}^{131}\text{I}$ 与 ${}^{127}\text{I}$ 之间的距离为 $\frac{2}{B}(\sqrt{\frac{2m_1U}{q}} - \sqrt{\frac{2m_2U}{q}})$
4. 在电视机的显像管中，电子束经电压为 U 的电场加速后，进入一圆形匀强磁场区，如图所示。磁场方向垂直于圆面，磁场区的中心为 O ，半径为 r 。当不加磁场时，电子束将通过 O 点打到屏幕的中心 M 点。已知电子的质量为 m ，电荷量大小为 e ，若使电子束偏转角度为 θ ，此时磁场的磁感应强度 B 应为多少？
5. 某速度选择器的示意图如图所示。 K 为电子枪，电子枪沿 KA 方向射出的电子束中电子的速率大小不一。当电子束通过由平行板电容器产生的匀强电场和同时存在的垂直于电场的匀强磁场后，只有一定速率的电子能沿直线前进通过小孔 S 。设两板间的电压为 300 V ，间距为 5 cm ，磁场的磁感应强度为 $6 \times 10^{-2}\text{ T}$ 。
- 磁场方向应垂直于纸面向里还是向外？
 - 速率为多大的电子能通过小孔 S ？
 - 如果粒子带正电，是否需要改变磁场或电场的方向？通过小孔的粒子速率与第（2）问中的电子速率有无不同？
6. 如图所示，已知回旋加速器 D 形盒内的匀强磁场磁感应强度为 B ，盒的半径为 R ，粒子在盒间加速时的电压为 u 。质量为 m 、电荷量为 q 的粒子从间隙中心附近 M 极的某点以近似为零的初速度在加速器中被加速。求：
- D 形盒间交变电压的周期；
 - 粒子在 D 形盒内获得的最大动能；
 - 粒子在 D 形盒内运行的总时间。（不计在电场中运动的时间）



第4题



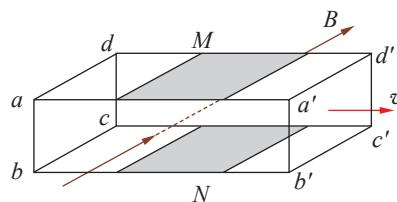
第5题



第6题

7. 如图所示，当液体在矩形管道中流动时，液体中的正、负离子受磁场力作用分别向金属板 M 、 N 偏转，使两板间形成稳定的电压，测出该电压 U 和管道的横截面积 S ，便可计算液体的流量 Q （即单位时间内流过的体积），这就是电磁流量计的工作原理。现已知垂直于侧面的磁场磁感应强度为 B ， M 、 N 两板间的电压为 U ，管道 ab 和 ad 边的边长分别为 l_1 和 l_2 。求：

- (1) 管道内液体流动的速度 v ；
- (2) 管道内液体的流量 Q 。



第 7 题

请提问

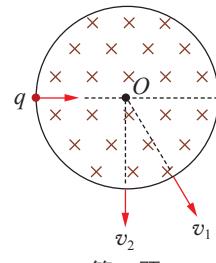




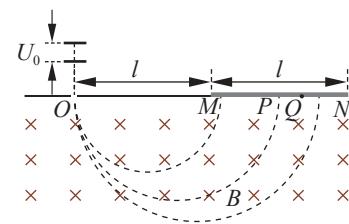
章末练习

科学认知

1. 电子以速度 v 垂直进入磁感应强度为 B 的匀强磁场中，电子的动量、动能会发生变化吗？为什么？
2. 两相邻匀强磁场区域的磁感应强度大小不同，方向平行。一速度方向与磁感应强度方向垂直的带电粒子（不计重力），从较强磁场区域进入到较弱磁场区域后，粒子的
 - A. 轨道半径减小，角速度增大
 - B. 轨道半径减小，角速度减小
 - C. 轨道半径增大，角速度增大
 - D. 轨道半径增大，角速度减小
3. 如图所示，在圆形区域内有垂直于纸面向里的匀强磁场。带电粒子（不计重力）第一次以速度 v_1 沿直径射入，粒子飞出磁场区域时，速度方向偏转 60° ；该带电粒子第二次以速度 v_2 从同一点沿同一方向射入，粒子飞出磁场区域时，速度方向偏转 90° 。带电粒子第一次和第二次在磁场中运动时
 - A. 半径之比为 $\sqrt{3} : 1$
 - B. 速度之比为 $1 : \sqrt{3}$
 - C. 时间之比为 $2 : 3$
 - D. 时间之比为 $3 : 2$
4. 如图所示，电荷量均为 q 、质量不同的正离子飘入电压为 U_0 的加速电场，其初速度几乎为零；这些离子经过加速后通过狭缝 O 沿着与磁场垂直的方向进入磁感应强度为 B 的匀强磁场，最后打在底片上，已知放置底片的区域 $MN = l$, $OM = l$ 。某次测量发现 MN 中左侧 $\frac{2}{3}$ 区域 MQ 损坏，检测不到离子，但右侧 $\frac{1}{3}$ 区域 QN 仍能正常检测到离子。在适当调节加速电压后，原本打在区域 MQ 的离子即可在区域 QN 检测到。
 - (1) 求原本打在区域 MN 中点 P 的离子质量 m ；
 - (2) 为使原本打在 P 点的离子能打在区域 QN ，求加速电压的调节范围。



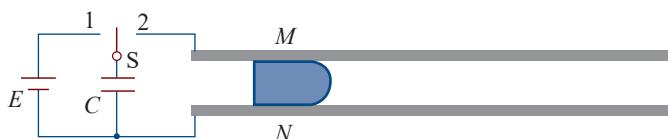
第3题



第4题

5. 电磁轨道炮利用电流和磁场的作用使炮弹获得超高速度，其原理可用来研制新武器和航天运载器。电磁轨道炮示意图如图所示，直流电源电动势为 E ，电容器的电容为 C 。两根固定于水平面内的光滑平行金属导轨间距为 l ，电阻不计。炮弹可视为一质量为 m 、电阻为 R 的金属棒 MN ，垂直放在两导轨间处于静止状态，并与导轨良好接触。首先将开关 S 接 1，使电容器完全充电；然后将 S 接至 2，导轨间存在垂直于导轨平面、磁感应强度大小为 B 的匀强磁场（图中未画出）， MN 开始向右加速运动。当回路中电流为零时， MN 达到最大速度，之后离开导轨。从上述信息中选择适当条件，求：

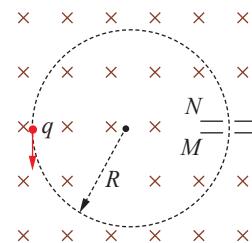
- (1) 磁场的方向；
- (2) MN 刚开始运动时加速度 a 的大小。



第 5 题

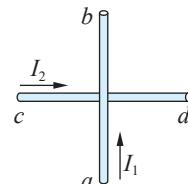
*6. 某同步加速器的简化模型如图所示。 M 、 N 为两块中心开有小孔的平行金属板，质量为 m 、电荷量为 q 的带正电的粒子 A （不计重力）从 M 板小孔飘入两板间，初速度可视 为零。当 A 进入两板间时，两板间的电势差变为 U ，粒子得到加速；当 A 离开 N 板时，两板上的电荷量均立即变为零。两板外部存在垂直于纸面向里的匀强磁场， A 在磁场作用下做半径为 R 的圆周运动， R 远大于板间距离。 A 经电场多次 加速，动能不断增大，为使 R 保持不变，磁场必须相应地变化。不计粒子加速时间及其做圆周运动产生的电磁辐射，不考虑磁场变化对粒子速度的影响及相对论效应。求：

- (1) A 在第一周运动时磁场的磁感应强度 B_1 的大小；
- (2) A 在运动的第 n 周内电场力对粒子做功的平均功率 \bar{P}_n 。



第 6 题

7. 在光滑水平面上放置一根可自由移动的导体 cd ，在其上方附近有一固定的导体 ab 并与之垂直。当两导体同时通以如图所示的电流时，导体 cd 将会怎样运动？



第 7 题

温故知新

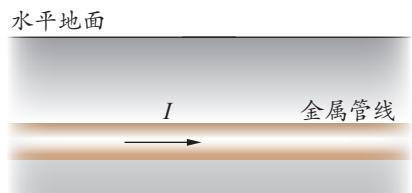
8. 在城市建设施工中，经常需要确定地下金属管线的位置，如图所示。有一种探测方法是，首先给金属管线通入电流，再用可测量磁场强弱、方向的仪器进行以下操作：①用测量仪在金属管线附近的水平地面上找到磁场最强的某点，记为 a ；②在 a 点附近的地



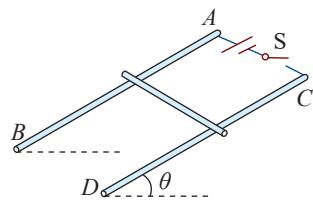
面上找到与 a 点磁感应强度相同的若干点，将这些点连成直线 EF ；③在地面上过 a 点垂直于 EF 的直线上，找到磁场方向与地面夹角为 45° 的 b 、 c 两点，测得 b 、 c 两点距离为 l ，由此可确定金属管线（不计地磁场影响）

- A. 平行于 EF ，深度为 $\frac{l}{2}$
 - B. 平行于 EF ，深度为 l
 - C. 垂直于 EF ，深度为 $\frac{l}{2}$
 - D. 垂直于 EF ，深度为 l
9. 倾角 $\theta = 30^\circ$ 的光滑导体滑轨 AB 和 CD 上端接入一电动势 $E = 3\text{ V}$ 的电源，滑轨间距 $l = 10\text{ cm}$ 。将一根质量 $m = 30\text{ g}$ 、电阻 $R = 0.5\Omega$ 的金属棒水平放置在滑轨上，滑轨处在垂直于滑轨平面的匀强磁场中。当闭合开关 S 后，金属棒刚好静止在滑轨上，如图所示。不计电源的内阻和滑轨的电阻，取重力加速度 $g = 10\text{ m/s}^2$ ，求磁场的方向和磁感应强度的大小。

10. 请根据第 1 章（安培力与洛伦兹力）的内容，结合你的理解，画出概念图。



第 8 题



第 9 题



我的学习总结

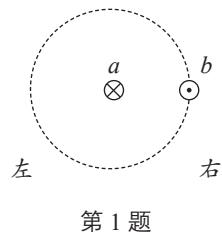


单元自我检测

一、选择题（本题共5小题。在每小题给出的四个选项中，第1~3题只有一项符合题目要求，第4、5题有多项符合题目要求）

1. 两根互相平行的通电直导线a、b的横截面如图所示，a、b中的电流方向已在图中标出。导线a中电流产生的磁场的磁感线环绕方向和导线b所受的安培力的方向分别是

- A. 顺时针，向左 B. 顺时针，向右
C. 逆时针，向左 D. 逆时针，向右



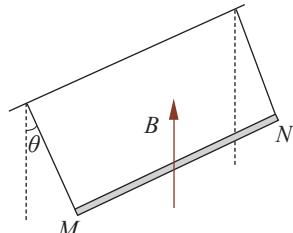
第1题

2. 在赤道的上空，设想有一束自东向西运动的电子流。因受地磁场的作用，它将

- A. 向东偏转 B. 向西偏转
C. 向上偏转 D. 向下偏转

3. 如图所示，金属棒MN两端由等长的轻质细线水平悬挂，处于竖直向上的匀强磁场中。棒中通以由M向N的电流，平衡时两悬线与竖直方向的夹角均为 θ 。如果仅改变下列某一个条件， θ 相应的变化情况是

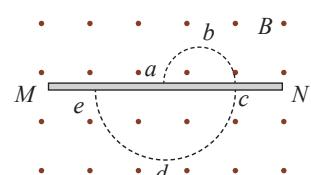
- A. 棒中的电流变大， θ 角变大
B. 两悬线等长变短， θ 角变小
C. 金属棒质量变大， θ 角变大
D. 磁感应强度变大， θ 角变小



第3题

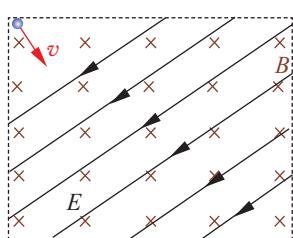
4. 如图所示，MN表示一块非常薄的金属板，带电粒子（不计重力）在匀强磁场中运动并穿过薄金属板，虚线表示其运动轨迹，由图可知粒子

- A. 带负电荷
B. 沿 $e \rightarrow d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ 方向运动
C. 穿越金属板后，轨迹半径变大
D. 穿越金属板后，所受洛伦兹力变大



第4题

5. 地球大气层外部有一层复杂的电离层，既分布有地磁场，又分布有电场。假设某时刻在该空间中有一区域存在如图所示的电场和磁场，电场的方向在纸面内斜向左下方，磁场的方向



第5题

垂直于纸面向里。此时，一带电粒子恰以速度 v 垂直于电场和磁场射入该区域。不计重力作用，在该区域中，这一带电粒子的运动情况可能是

- A. 做直线运动
- B. 立即向左下方偏转
- C. 立即向右上方偏转
- D. 做匀速圆周运动

二、非选择题

6. 某同学设计了一个利用电磁铁来探究安培力的实验，其原理如图所示。

(1) 在 U 形铁芯上缠绕线圈，给线圈通电，为了使线圈产生的磁场对放置在铁芯中间的通电直导线产生图示的安培力 F ，则在 U 形铁芯上的线圈应怎样绕线？请在图中画出线圈绕线方式的示意图。

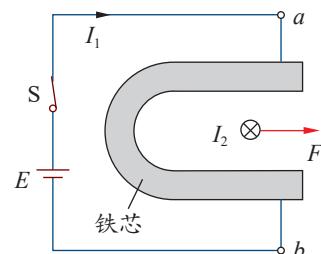
(2) 如果要增大安培力，可采取的措施是 _____、
_____ 或 _____。

7. 音圈电机是一种应用于硬盘、光驱等系统的特殊电动机。某音圈电机的原理图如图所示，它由正对的磁极和正方形刚性线圈构成。线圈边长为 l ，匝数为 n ，磁极正对区域内的磁感应强度方向垂直于线圈平面竖直向下，大小为 B ，区域外的磁场忽略不计。线圈左边始终在磁场外，右边始终在磁场内，前后两边在磁场内的长度始终相等。某时刻，线圈中电流从 P 流向 Q ，大小为 I 。

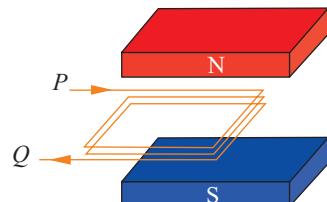
(1) 求此时线圈所受安培力的大小和方向；
(2) 若此时线圈水平向右运动的速度大小为 v ，求安培力的功率。

8. 如图所示，一个质量为 m 、电荷量大小为 e 的电子，以速度 v 从 x 轴上某一点垂直于 x 轴进入上方的匀强磁场区域。已知 x 轴上方磁场的磁感应强度大小为 $2B$ ，方向垂直于纸面向里；下方磁场的磁感应强度大小为 B ，方向垂直于纸面向外。

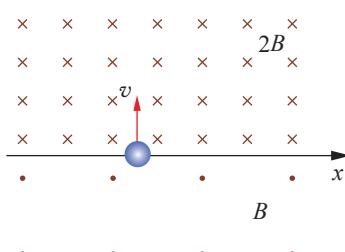
(1) 在图中画出电子运动的轨迹；
(2) 求电子运动一个周期的时间；
(3) 求电子运动一个周期沿 x 轴移动的距离。



第 6 题



第 7 题



第 8 题

第2章

电磁感应

及其应用

导 入 奇异的电火花

第1节 科学探究：感应电流
的方向

第2节 法拉第电磁感应定律

第3节 自感现象与涡流

►►本章学业要求

●能理解楞次定律和法拉第电磁感应定律的内涵，了解自感现象和涡流现象；能说明自感现象与涡流现象在生产生活中的应用，能运用电磁感应定律等解释生产生活中的电磁技术应用。具有与电磁感应定律等相关的比较清晰的相互作用观念和能量观念。

——物理观念

●能用磁感线与匀强磁场等模型综合分析电磁感应问题；能从能量的视角分析解释楞次定律；能恰当使用证据解释生产生活中的电磁现象；能对已有结论提出质疑。

——科学思维

●能完成“探究影响感应电流方向的因素”等物理实验。能分析物理现象，提出并准确表述可探究的物理问题，能进行合理假设；能在他人帮助下制订实验方案，使用螺线管等器材获得信息，能将收集的信息填入表格；能分析表格中的实验信息，归纳总结，形成与实验目的相关的结论；能撰写规范的实验报告，在报告中能呈现数据分析过程及实验结论，能根据实验中的问题提出改进措施。

——科学探究

●通过法拉第电磁感应定律的应用，能体会科学家的不断创造推动了社会的进步；有较强的动手做实验的兴趣，能体会法拉第电磁感应定律等物理定律之美；能体会电磁感应技术的应用对人类生活和社会发展的影响。

——科学态度与责任



导人

奇异的电火花

无轨电车曾是城市常用的交通工具。它拖着两条长长的“辫子”，当道路不平车身颠簸时，“辫子”瞬间脱离电网线，在“辫子”与电网线之间就会闪现出电火花，同时发出“啪、啪”的响声。这是为什么？



无轨电车



从插座拔下电源插头

用电器正在工作时，把该用电器的电源插头从插座上拔下来时，也可能看到插头与插座之间有电火花产生。这又是为什么？

以上现象都与电磁感应现象有着密切的联系。本章我们将深入讨论与电磁感应有关的规律以及这些规律在生产生活中的应用。

第1节

科学探究：感应电流的方向

如果将螺线管两端与电流计连接起来，形成回路，当在螺线管一端来回插入或拔出条形磁铁时，我们会看见电流计的指针时而左偏，时而右偏，这说明由此产生的感应电流方向有变化。那么，感应电流方向与哪些因素有关？感应电流方向遵循怎样的规律？本节我们将通过实验探究，总结出感应电流方向的规律。

1. 探究影响感应电流方向的因素

实验目的

- (1) 探究感应电流方向与哪些因素有关。
- (2) 学习利用电流计判断感应电流方向的方法。

实验器材

电流计、干电池、开关、保护电阻、导线、螺线管、
条形磁铁。

实验原理与设计

将磁铁的不同磁极插入、拔出螺线管，观察感应电流方向的变化。通过分析感应电流的方向与磁铁的磁场方向、通过线圈的磁通量的变化之间的关系，探究影响感应电流方向的因素。

实验步骤

- (1) 先明确电流计指针的偏转方向与通过电流计的电流方向的关系。
- (2) 观察螺线管上漆包线的绕向。
- (3) 将电流计与螺线管按图 2-1 连接好，依次完成以下实验操作，记录观察到的电流计指针偏转情况，填入表中。



安全警示

使用电流计时，注意不要超过它的量程，以免损坏电流计。

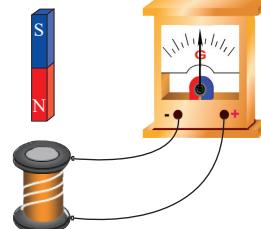


图 2-1 实验装置示意图



- ① 把条形磁铁的 N 极插入螺线管，稍作停留，再从螺线管中拔出；
- ② 把条形磁铁的 S 极插入螺线管，稍作停留，再从螺线管中拔出。

数据分析

将实验中获得的信息填入下表中。请根据实验信息，形成结论。

	N 极插入	N 极拔出	S 极插入	S 极拔出
穿过螺线管的磁通量变化				
感应电流的方向				
感应电流的磁场方向与条形磁铁的磁场方向比较				

实验结论

请写出实验结论。

讨论

若磁铁不动、螺线管动，实验结果如何？若磁铁与螺线管一起动，并保持相对静止，实验结果又如何？

能分析物理现象，提出并准确表述可探究的物理问题，能进行合理假设；能在他人帮助下制订实验方案，使用螺线管等器材获得信息，能将收集的信息填入表格；能分析表格中的实验信息，归纳总结，形成与实验目的相关的结论；能撰写规范的实验报告，在报告中能呈现数据分析过程及实验结论，能根据实验中的问题提出改进措施。

注意提升提出问题能力、猜想假设能力及分析论证能力。

——科学探究



迷你实验室

探索感应电流的方向

将螺线管、磁铁、发光二极管等，连接成如图 2-2 所示的电路，探索感应电流的方向与磁铁的磁场方向、磁通量变化之间的关系。

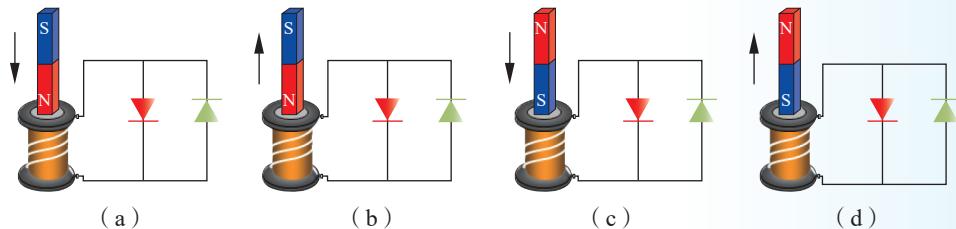


图 2-2 实验电路示意图

2. 楞次定律

在上面的实验探究中，当条形磁铁的任一极移近或插入闭合线圈（螺线管）时，穿过该线圈的磁通量增加，使线圈中产生感应电流，由感应电流激发的磁场 B' 的方向总是与条形磁铁的磁场 B 的方向相反，从而阻碍了线圈中磁通量的增加 [图 2-3 (a)]。反之，当条形磁铁的任一极拔出或离开闭合线圈时，穿过该线圈的磁通量减少，使线圈中产生感应电流，由感应电流激发的磁场 B' 的方向总是与条形磁铁的磁场 B 的方向相同，从而阻碍了线圈中磁通量的减少 [图 2-3 (b)]。

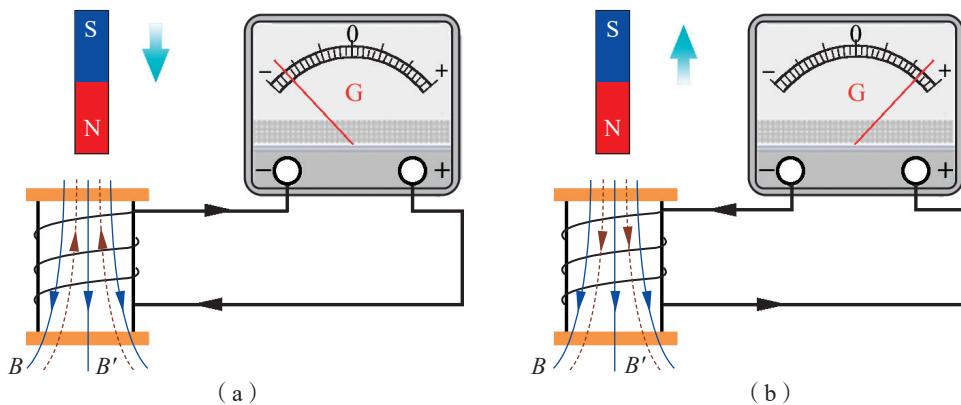
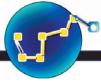


图 2-3 磁极插入和拔出时 B' 与 B 方向的示意图

俄国物理学家楞次 (H. Lenz, 1804—1865) 在总结了大量电磁感应实验结果的基础上，发现并提出了关于感应电流方向的规律：**感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化**。这就是**楞次定律** (Lenz law)。

楞次定律还可这样理解：当磁铁的 N 极移近导体线圈的上端时，由感应电流激发的磁场使线圈的上端也是 N 极，因为同名磁极相互排斥，所以阻碍磁铁相对线圈向下的运动；而当磁铁的 N 极离开导体线圈时，由感应电流激发的磁场使线圈的上端是 S 极，因为异名磁极相互吸引，所以阻碍磁铁相对线圈向上的运动。

从能量转化和守恒的角度来看，把磁体移近线圈时，外力要克服磁体和线圈之间的排斥力做功，使外界其他形式的能量转化为电能；磁体离开线圈时，外力则要克服磁体和线圈之间的吸引力做功，也使外界其他形式的能量转化为电能。在这两种情况下，总能量都是守恒的。



迷你实验室

如图2-4所示，将内径一样的铝管（或铜管）和塑料管竖直放置在垫有毛巾的桌面上方，从同一高度同时释放两块磁性很强的磁体，一块从铝管内下落，另一块从塑料管内下落。进入铝管的磁体将会滞后一段时间落到桌面。

做一做，并说明这是为什么。

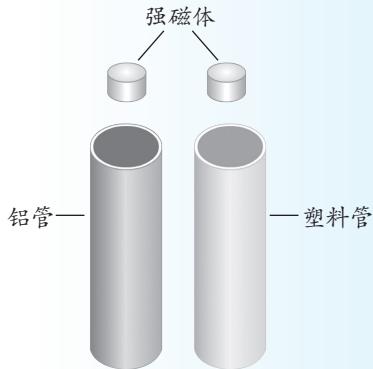


图2-4 实验示意图



例题

如图2-5所示，两平行金属导轨 P 、 Q 水平放置在匀强磁场中，磁场方向垂直于轨道平面，在两导轨之间连接一电阻 R 。当一根垂直于导轨的导体棒 ab 沿着导轨向右滑动时，棒 ab 中感应电流的方向是怎样的？请说明理由。

分析

已知磁场方向和棒 ab 运动方向，可推知穿过闭合回路的磁通量变化情况；根据楞次定律，可判断出感应电流产生的磁场的方向；运用安培定则，即可判断出闭合回路中感应电流的方向。

解

棒 ab 中感应电流的方向由 b 流向 a 。已知原磁场的方向垂直于纸面向里，当棒 ab 向右滑动时，穿过闭合回路 $abPQ$ 的磁通量增加。根据楞次定律可知，电路中产生的感应电流的磁场要阻碍该闭合回路中磁通量的增加，因此回路中感应电流的磁场方向与原磁场方向相反，即垂直于纸面向外。由安培定则可知，感应电流沿逆时针方向流动。

讨论

在图2-5中，若棒 ab 固定不动，垂直于纸面的磁场的磁感应强度增大，试分析闭合回路中感应电流的方向。

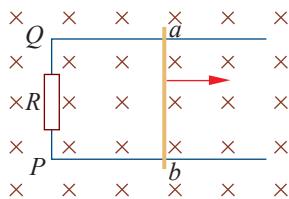


图2-5 导体切割磁感线运动

策略提炼

运用楞次定律判断感应电流方向的步骤一般为：首先明确闭合回路中引起感应电流的磁场（原磁场）的方向；然后判断穿过闭合回路原磁场磁通量的变化；再根据楞次定律判断感应电流的磁场方向；最后运用安培定则，由感应电流的磁场方向，判断出感应电流的方向。



若棒 ab 要保持向右做匀速直线运动，外力的方向应指向哪一边？为什么？请你从能量转化和守恒的角度进行解释。

3. 右手定则

若磁通量的变化是由导体切割磁感线引起的，则感应电流的方向、磁感线方向、导体运动方向三者之间有如下关系：**伸开右手，让拇指与其余四指垂直，且都与手掌处于同一平面内，让磁感线垂直穿过手心，使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**（图 2-6）。这就是**右手定则**（right-hand rule）。

右手定则可视为楞次定律在导体切割磁感线这种特殊情况下的应用。在上面的例题中，当导体 ab 向右滑动时，运用右手定则，也可判断出导体 ab 中感应电流的方向是由 b 流向 a ，与用楞次定律判断的结果完全相同。

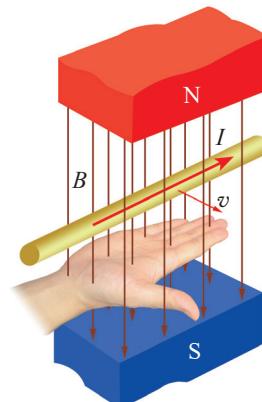


图 2-6 右手定则示意图



科学书屋

楞 次

楞次（图 2-7），俄国物理学家，1834 年被选为圣彼得堡科学院院士。曾担任圣彼得堡大学数学物理系主任。

1833 年，楞次总结了安培、法拉第等人的研究成果，在圣彼得堡科学院宣读了《关于用电动力学方法决定感应电流方向》的论文，提出了确定感应电流方向的定律——楞次定律。1843 年，楞次在不知道焦耳已经发现电流热效应定律（1841 年）的情况下，独立发现了这一定律。他用酒精作为传热介质并改善了实验方法，提高了实验的精度。所以，焦耳定律又被称为焦耳—楞次定律。

另外，楞次还研究并定量地比较了不同金属的电阻率及电阻率与温度间的关系。在电工技术、地球物理与电化学等方面，他也做了大量的工作。



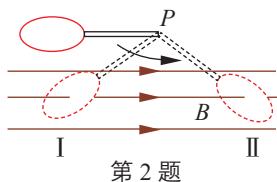
图 2-7 楞次



节练习

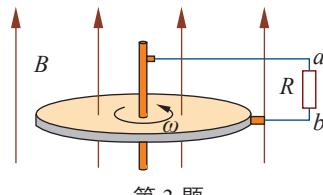
1. 请撰写“探究影响感应电流方向的因素”的实验报告。注意在报告中呈现数据分析过程及实验结论，并根据实验中的问题提出改进措施。

2. 一平面线圈用细杆悬于 P 点，开始时细杆处于水平位置，释放后让它在如图所示的匀强磁场中运动。已知线圈平面始终与纸面垂直，当线圈第一次通过位置Ⅰ和位置Ⅱ时，顺着磁场的方向看去，线圈中感应电流的方向是怎样的？



第2题

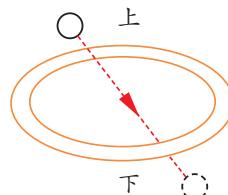
3. 法拉第圆盘发电机如图所示。半径为 r 的导体圆盘绕竖直轴以角速度 ω 旋转，匀强磁场 B 竖直向上，两电刷分别与圆盘中心轴和边缘接触，电刷间接有阻值为 R 的电阻。分析该发电机的工作原理，并确定流过电阻的电流方向。



第3题

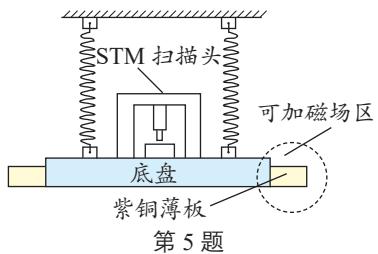
4. 某人拟运用电磁感应的知识，通过实验寻找磁单极子。该实验仪器的主要部分是由超导体制成的如图所示的线圈。若有一磁单极子从上往下穿过超导线圈，则在超导线圈中将产生感应电流。关于感应电流方向，下列说法正确的是

- A. 磁单极子穿过超导线圈的过程中，线圈中感应电流的方向要变化
- B. N 磁单极子与 S 磁单极子分别穿过超导线圈的过程中，线圈中感应电流的方向相同
- C. 磁单极子穿过超导线圈的过程中，线圈中感应电流的方向不变
- D. 磁单极子穿过超导线圈的过程中，从上向下看，线圈中感应电流的方向始终为顺时针



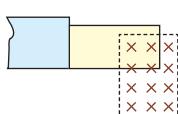
第4题

5. 扫描隧道显微镜（STM）可用来探测样品表面原子尺寸上的形貌。如图所示，为了有效隔离外界振动对 STM 的扰动，在圆底盘周边沿其径向对称地安装若干对紫铜薄板，并施加磁场来快速衰减其微小振动。无扰动时，按下列四种方案对

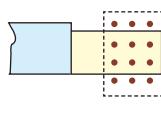


第5题

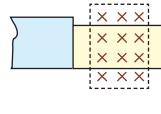
紫铜薄板施加恒磁场。出现扰动后，对于紫铜薄板上下及左右振动的衰减最有效的方案是



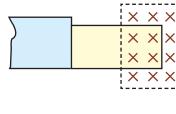
A



B



C

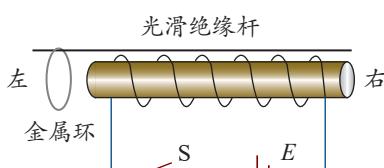


D

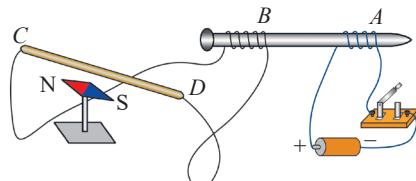
6. 某同学利用电磁驱动原理研究弹射问题。如图所示，当固定线圈上突然通过直流电流时，线圈左侧的金属环被弹射出去。下列说法正确的是

- A. 闭合开关 S 的瞬间，从右侧看，环中产生沿逆时针方向的感应电流
- B. 若金属环固定，开关闭合瞬间，环将有扩张趋势
- C. 若将金属环置于线圈的右侧，环将向右弹射
- D. 若将电池正、负极调换，金属环不能向左弹射

7. 如图所示，在一根较长的铁钉上，用漆包线绕出两个线圈 A 和 B。将线圈 B 的两端与漆包线 CD 相连，使 CD 平放在静止的小磁针的正上方，与小磁针平行。试判断开关闭合的瞬间，小磁针 N 极的偏转情况，并用实验检验你的判断。



第 6 题



第 7 题

请提问

第2节

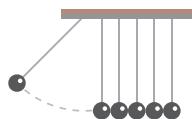
法拉第电磁感应定律

我们知道，穿过闭合回路的磁通量发生变化时，会有感应电流产生。这是为什么呢？学习了本节内容之后，你便知道其中的原因了。

1. 感应电动势

在电磁感应现象里，若闭合回路中有感应电流，则必然存在电动势。这种在电磁感应现象中产生的电动势被称为**感应电动势**（induction electromotive force）。产生感应电动势的那部分导体相当于电源。

感应电动势的大小与磁通量的变化有什么关系呢？让我们通过实验进行探究。



实验与探究

感应电动势与磁通量变化的关系

如图 2-8 所示，用螺线管与电流计组成闭合回路。将条形磁铁以不同速度插入或拔出螺线管，观察电流计指针偏转的角度情况。

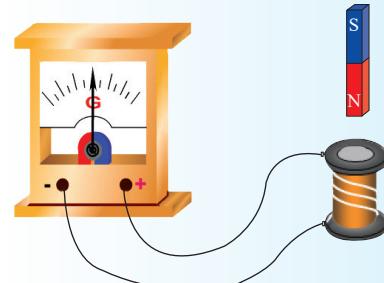


图 2-8 实验装置示意图

由实验探究可知，条形磁铁插入或拔出螺线管的速度越大，螺线管中磁通量的变化越快，电流计显示的电流越大，表明电路中的感应电动势就越大。研究表明，感应电动势的大小与电路中磁通量变化的快慢有关。

进一步的研究表明，当磁通量变化而电路断开时，虽然没有感应电流，但电路中仍有感应电动势，感应电动势的产生与电路是否闭合无关。因此，感应电动势比感应电流更能反映电磁感应现象的本质。



迷你实验室

观察发光二极管亮度的变化

如图 2-9 所示，用一个多匝线圈与发光二极管组成闭合回路。将强磁铁插入线圈中，观察发光二极管的亮度与什么因素有关。



图 2-9 观察发光二极管亮度的变化

2. 电磁感应定律

大量实验表明：电路中感应电动势的大小与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（Faraday law of electromagnetic induction）。

设在 t_1 时刻穿过闭合回路的磁通量为 Φ_1 ， t_2 时刻穿过闭合回路的磁通量为 Φ_2 ，则在 $\Delta t = t_2 - t_1$ 这段时间内，穿过闭合回路的磁通量的变化量 $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ ，磁通量的变化率为 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 。设感应电动势为 E ，则法拉第电磁感应定律可表示为

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

式中， k 为比例常数。在国际单位制中，感应电动势 E 的单位是伏特（V），磁通量 Φ 的单位是韦伯（Wb），时间 t 的单位是秒（s）。此时， $k = 1$ ，上式可简化为

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

在实际应用中，为了获得较大的感应电动势，常常采用多匝线圈。 n 匝线圈可视为由 n 个单匝线圈串联组成，如果穿过每个单匝线圈的磁通量的变化率都是 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ ，则 n 匝线圈的感应电动势为

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

感应电动势是标量，但有方向。其方向规定为从电源的负极经过电源内部指向电源的



正极，与电源内部电流方向一致。因此，运用楞次定律判断出感应电流的方向，也就判断出了感应电动势的方向。

当磁通量的变化量仅由导线切割磁感线引起时，感应电动势的公式还可写成另一种形式。如图 2-10 所示，在磁感应强度为 B 的匀强磁场中，矩形线框 $abcd$ 平面与磁感线垂直。设线框中可移动部分 ab 的长度为 l ，以速率 v 匀速向右做垂直切割磁感线的运动，在时间 Δt 内移动了 Δx ，线框的面积变化量 $\Delta S = l \Delta x = lv \Delta t$ ，穿过闭合回路的磁通量的变化量

$$\Delta \Phi = B \Delta S = Blv \Delta t。 \text{代入公式 } E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \text{ 中，可得到感应电动势}$$

$$E = Blv$$

式中， B 的单位是特斯拉 (T)， l 的单位是米 (m)， v 的单位是米每秒 (m/s)。

如果长为 l 的导体垂直于纸面放置，以速度 v 沿与磁场方向成 θ 角的方向运动。在这种情况下，可将速度 v 分解为垂直和平行于磁场方向的两个分量 $v_1 = v \sin \theta$ 和 $v_2 = v \cos \theta$ (图 2-11)。导体在 v_2 方向不切割磁感线，不会产生感应电动势，在 v_1 方向切割磁感线，产生的感应电动势即为导体中的感应电动势

$$E = Blv \sin \theta$$

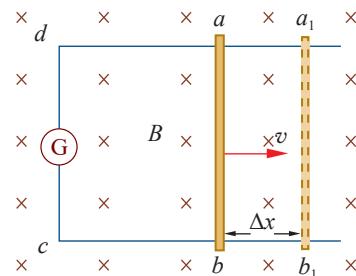


图 2-10 导线切割磁感线示意图

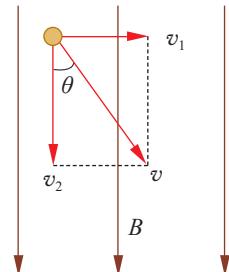


图 2-11 磁场中导线运动速度分解示意图



感生电动势与动生电动势

感应电动势是由回路中磁通量的变化引起的，根据磁通量变化的原因不同，可分为感生电动势和动生电动势。由磁场变化引起磁通量变化而产生的感应电动势称为感生电动势。变化的磁场在其周围空间会激发出感应电场（称为涡旋电场），这种电场迫使导体内的电荷做定向移动而产生感生电动势（图 2-12）。导体切割磁感线产生的电动势称为动生电动势。导体切割磁感线时，导体中的自由电子由于和导体一起运动，因而受到洛伦兹力的作用，使导体两端产生电动势（图 2-13）。



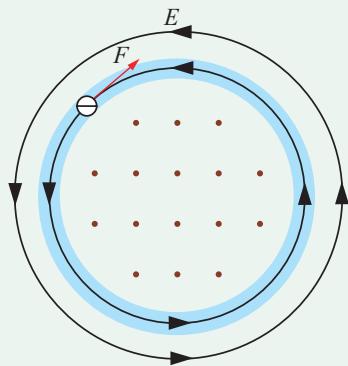


图 2-12 产生感生电动势示意图

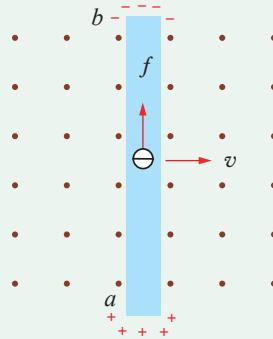


图 2-13 产生动生电动势示意图



例 题

在一个磁感应强度大小随时间变化的磁场中，垂直于磁场方向放一个面积为 0.10 m^2 的线圈。在 0.20 s 内磁场各点的磁感应强度由 0 增大到 0.30 T ，求线圈中的平均感应电动势。

分析

已知线圈与磁场垂直，线圈的面积和磁感应强度在一段时间的初、末时刻的大小，用法拉第电磁感应定律可求解。

解

开始时，穿过线圈的磁通量 $\Phi_1 = 0$ ，经 0.20 s 后穿过线圈的磁通量增大到

$$\Phi_2 = BS = 0.30 \times 0.10 \text{ Wb} = 3.0 \times 10^{-2} \text{ Wb}$$

$$\begin{aligned}\Delta\Phi &= \Phi_2 - \Phi_1 = 3.0 \times 10^{-2} \text{ Wb} - 0 \\ &= 3.0 \times 10^{-2} \text{ Wb}\end{aligned}$$

在这段时间内，线圈中平均感应电动势的大小

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{3.0 \times 10^{-2}}{0.20} \text{ V} = 0.15 \text{ V}$$

讨论

若这个线圈一共有 20 匝，产生的电动势为多大？

策略提炼

运用法拉第电磁感应定律分析求解问题，若感应电动势由导体切割磁感线产生，选择 $E = Blv$ 进行计算比较方便；若感应电动势由磁感应强度的变化产生，则

应选择 $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 进行计算，运用此式求出的一般是 Δt 时间内的平均感应电动势。当磁通量均匀变化或 Δt 趋于零时， E 为瞬时感应电动势。

这类问题常与电路、磁场知识综合，甚至涉及力学知识，这时需要综合相关知识进行分析求解。



迁移

如果感应电动势由导体切割磁感线产生，又应该如何分析求解呢？如图 2-14 所示，两条相距 50 cm 的光滑平行金属导轨位于同一水平面内，左端接一阻值为 0.5Ω 的电阻，一根与导轨垂直的金属棒 ab 置于两导轨上。整个装置置于磁感应强度为 0.5T 的匀强磁场中。线框平面、金属棒速度方向均与磁场方向垂直。假定导体 ab 以 4m/s 的速度向右做匀速运动。不计金属棒及导轨的电阻，求：

- (1) 金属棒中感应电动势的大小及方向；
- (2) 金属棒受到的安培力的大小及方向。

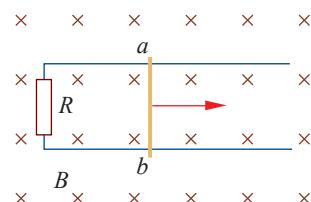


图 2-14 导体切割磁感线示意图

DIS实验室

探究感应电动势与磁通量变化率的关系

实验装置如图 2-15 所示。通过电源使线圈 1 中的电流发生变化，利用传感器即可得到线圈 1 产生的磁感应强度随时间变化的图像 [图 2-16(a)]，以及线圈 2 中对应的感应电动势随时间变化的情况 [图 2-16(b)]。

由此可得，在线圈横截面积一定的情况下，感应电动势与磁感应强度的变化率成正比，即感应电动势与穿过线圈的磁通量变化率成正比。



图 2-15 实验装置

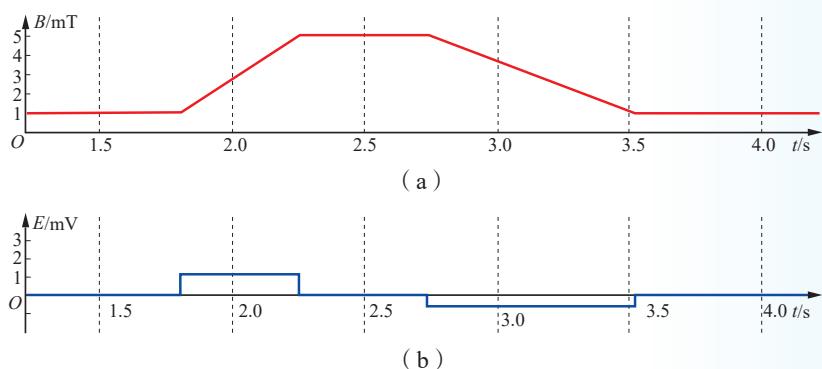


图 2-16 实验图像



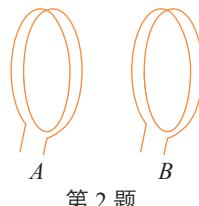
节练习

1. 将长约 15 m 的铜芯双绞线两端接在灵敏电流计上，拉开形成一个长回路。面对面站立的两位同学像甩跳绳那样以每秒 4 ~ 5 圈的频率摇荡半个回路，如图所示。观察电流计指针的摆动情况并解释原因。换一个站位方向，再试一试。两位同学沿南北方向站立还是沿东西方向站立时实验现象更明显？这是为什么呢？



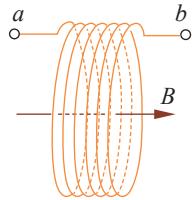
第 1 题

2. 有一种非接触式电源供应系统，这种系统基于电磁感应原理可无线传输电力。其工作原理可用两个左右相邻或上下相对的线圈来说明，如图所示。下列说法正确的是
- 若线圈 A 中输入电流，则线圈 B 中会产生感应电动势
 - 只有线圈 A 中输入变化的电流，线圈 B 中才会产生感应电动势
 - 线圈 A 中电流越大，线圈 B 中感应电动势也越大
 - 线圈 A 中电流变化越快，线圈 B 中感应电动势越大



第 2 题

3. 无线充电技术中使用的受电线圈示意图如图所示，线圈匝数为 n，面积为 S。若在 $t_1 \sim t_2$ 这段时间内，匀强磁场平行于线圈轴线向右穿过线圈，其磁感应强度大小由 B_1 均匀增加到 B_2 ，则该段时间内线圈两端 a 和 b 之间的电势差



第 3 题

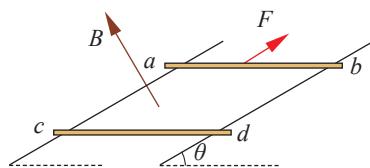
- 恒为 $\frac{nS(B_2 - B_1)}{t_2 - t_1}$
- 从 0 均匀变化到 $\frac{nS(B_2 - B_1)}{t_2 - t_1}$
- 恒为 $-\frac{nS(B_2 - B_1)}{t_2 - t_1}$
- 从 0 均匀变化到 $-\frac{nS(B_2 - B_1)}{t_2 - t_1}$

4. 航天飞机在环绕地球的轨道上飞行时，从中释放一颗卫星。若卫星与航天飞机保持相对静止，二者用导电缆绳相连，这种卫星称为绳系卫星。现有一颗绳系卫星在地球赤道上空自西向东运行，卫星位于航天飞机的正上方，它与航天飞机间的距离是 20.5 km（远小于航天飞机的轨道半径），它们所在处的地磁场的磁感应强度 $B = 4.6 \times 10^{-5} \text{ T}$ ，磁场方向沿水平方向由南向北，航天飞机和卫星的运行速度为 7.6 km/s。
- 求导电缆绳中的感应电动势；
 - 导电缆绳的哪一端电势高？



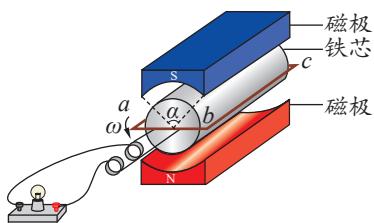


5. 如图所示，在与水平面成 $\theta = 30^\circ$ 角的平面内放置两条平行、光滑且足够长的金属轨道，其电阻可忽略不计。空间存在着匀强磁场，磁感应强度 $B = 0.20\text{ T}$ ，方向垂直于轨道平面向上。导体棒 ab 、 cd 垂直于轨道放置，且与轨道接触良好构成闭合回路，每根棒的质量 $m = 0.20\text{ kg}$ 、电阻 $r = 5.0 \times 10^{-2}\Omega$ ，轨道的宽度 $l = 0.50\text{ m}$ 。现对棒 ab 施加平行于轨道向上的拉力，在棒 ab 匀速向上运动的过程中，棒 cd 始终保持静止，取重力加速度 $g = 10\text{ m/s}^2$ 。求：
- (1) 棒 cd 受到的安培力大小；
 - (2) 棒 ab 运动的速度大小；
 - (3) 拉力对棒 ab 做功的功率。



第5题

- *6. 某兴趣小组设计了一种发电装置，如图所示。在磁极和圆柱状铁芯之间形成的两磁场区域的圆心角 α 均为 $\frac{4}{9}\pi$ ，磁场均沿半径方向。匝数为 N 的矩形线圈 $abcd$ 的边长 $ab = cd = l$ ， $bc = ad = 2l$ 。线圈以角速度 ω 绕中心轴匀速转动， bc 和 ad 边同时进入磁场。在磁场中，两条边所经处的磁感应强度大小均为 B ，磁场方向始终与两边的运动方向垂直。线圈的总电阻为 r ，外接小灯泡的电阻为 R 。当线圈切割磁感线时，求：
- (1) 感应电动势的大小；
 - (2) bc 边所受安培力的大小。



第6题

请提问



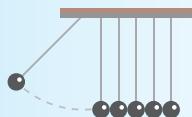
第3节

自感现象与涡流

我们知道，当电流通过线圈时，会在线圈的内外激发出磁场。如果线圈中的电流发生变化，会使穿过自身线圈的磁通量发生变化，则该线圈是否也能产生电磁感应？本节我们将学习与自感现象和涡流相关的内容。

1. 自感现象

我们先通过实验，探究线圈自身电流变化时产生的电磁感应现象。



实验与探究

开关闭合时小灯泡发光的变化

按图 2-17 连接电路。闭合开关，调节 R_0 ，使小灯泡 1、小灯泡 2 的亮度相同，然后断开开关。再次闭合开关，观察小灯泡 1 和小灯泡 2 发光情况有什么不同。想一想：为什么两只小灯泡的发光情况不同？

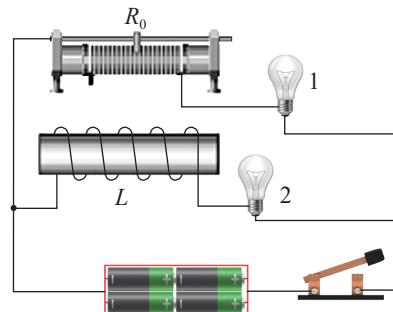
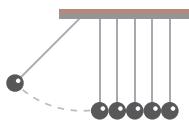


图 2-17 实验示意图

由实验可知，再次闭合开关接通电路时，与变阻器 R_0 串联的小灯泡 1 立刻亮了，而与线圈 L 串联的小灯泡 2 却是逐渐亮起来。这是因为在闭合开关接通电路的瞬间，电流由零开始迅速增大，小灯泡 2 所在支路穿过线圈的磁通量也随之增大，线圈中会产生感应电动势。根据楞次定律，这个感应电动势要阻碍线圈中的电流增大，使小灯泡 2 迟一会儿才与小灯泡 1 同样亮。这种由线圈自身的电流变化所产生的电磁感应现象称为 **自感现象** (self-induction)。

开关断开时，是否也会有自感现象产生呢？





实验与探究

开关断开时小灯泡发光的变化

按图 2-18 连接电路。闭合开关，调节 R_0 ，使小灯泡 1、小灯泡 2 的亮度相同。

断开开关，观察小灯泡 1 和小灯泡 2 发光情况有什么不同。想一想：为什么两只小灯泡的发光情况不同？

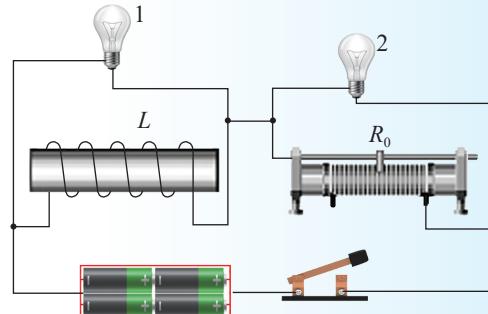


图 2-18 实验示意图

由实验可知，开关断开时，小灯泡 2 立刻熄灭，但与线圈 L 并联的小灯泡 1 没有立刻熄灭，而是过一会儿后才熄灭。这说明在开关断开的瞬间，线圈 L 与小灯泡 1 所构成的回路中仍然有电动势和电流存在。

为什么会出现这样的情况呢？这是因为在开关断开的瞬间，通过线圈的电流突然减小，穿过线圈的磁通量也随之减小，从而发生电磁感应现象，线圈中产生的感应电动势阻碍电流的减小。这样，线圈 L 和小灯泡 1 所构成的回路中仍然有电流通过，因此小灯泡并不立即熄灭。这说明开关断开时，也会有自感现象产生。

2. 自感电动势

上面两个实验中，感应电动势的产生都是由线圈本身电流的变化引起的。这种由线圈自身电流变化所产生的感应电动势称为**自感电动势** (self-induction electromotive force)。自感电动势与电流变化有什么关系呢？

大量的实验和研究表明：当线圈中的电流增大时，自感电动势阻碍电流的增大，自感电动势方向与原电流方向相反；当线圈中的电流减小时，自感电动势阻碍电流的减小，自感电动势方向与原电流方向相同。因此，自感电动势总是要阻碍导体自身的电流发生变化。

人们在实践中发现，自感电动势的大小与线圈本身的一些特性密切相关，物理学中，用自感系数来表示线圈的这些特性。自感系数简称**自感** (self-inductance) 或电感，是线圈的重要参数。

国际单位制中，自感的单位是亨利，简称亨，符号是 H。常用的较小单位还有毫亨 (mH) 和微亨 (μ H)，它们和亨 (H) 的换算关系是

$$1 \text{ mH} = 10^{-3} \text{ H}, 1 \mu\text{H} = 10^{-6} \text{ H}$$

日光灯镇流器的自感大约为几亨，小型收音机所用线圈（图 2-19）的自感大约为几毫亨。

线圈的自感与线圈的形状、横截面积、长短、匝数等因素有关。线圈的横截面积越大，单位长度匝数越多，线圈越长，它的自感就越大。此外，将铁芯插入线圈，会使线圈的自感大大增加。

自感现象有着十分广泛的应用。自感线圈是交流电路中的重要元件，在广播电台和电视台的无线电设备中，用它和电容器组成振荡电路来发射电磁波；而在收音机和电视机中，同样也用这样的振荡电路来接收电磁波。



图 2-19 收音机里的自感线圈



图 2-20 电焊

电焊也利用了自感现象（图 2-20）。电焊时，焊条和金属工件分别用导线通过电焊机与电源连接。先把焊条与被焊的工件短暂接触，然后迅速将焊条提起，与工件保持 4 ~ 5 mm 的距离。在焊条突然被提起的瞬间，电流突然减小，电焊机内的大线圈自感产生高压，使焊条与工件之间的空隙产生电弧火花，电弧火花产生的高温将焊条和金属工件局部熔化，冷却后，焊接处就熔为一体了。



自感电动势公式

根据法拉第电磁感应定律，自感电动势与穿过线圈的磁通量变化率成正比。又因为对于同一线圈磁通量与磁感应强度成正比，磁感应强度又与流过线圈的电流成正比，所以自感电动势应与线圈中的电流变化率成正比，用公式可表示为

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

式中，比例系数 L 就是自感。 L 在数值上等于电流变化率为 1 A/s 时产生的自感电动势的大小。如果通过线圈的电流在 1 s 内改变 1 A，产生的自感电动势是 1 V，那么这个线圈的自感就是 1 H。在电流变化率一定时，自感越大，产生的自感电动势就越大。

自感 L 的大小还表示线圈对电流变化阻碍作用的大小，它反映了线圈对电流变化延时作用的强弱。



迷你实验室

一节电池也能产生电火花

取一根长约1 m的漆包线绕在一把锉刀上，再让一节干电池的正极与锉刀接触，负极则与导线的一端接触。手执导线的另外一端，让裸露的导线头在锉刀上来回刮动（图2-21）。你观察到了什么现象？想想看，为什么会发生这一现象？

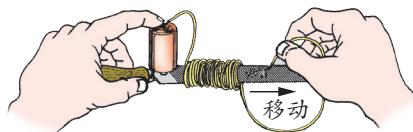


图2-21 实验示意图

3. 涡流及其应用

电磁感应现象在生产生活中有许多应用，如工业生产中使用的高频感应炉、生活中使用的电磁炉等。它们是怎样利用电磁感应来工作的？我们先来做一个实验。



迷你实验室

涡流加热

如图2-22所示，在一个绕有线圈的可拆变压器铁芯上面放一口小铁锅，锅内放少许水，给线圈通入一段时间（通电时间不能过长）的交变电流；再用玻璃杯代替小铁锅，通入相同时间的交变电流。

铁锅和玻璃杯中的水温变化有什么不同？为什么？

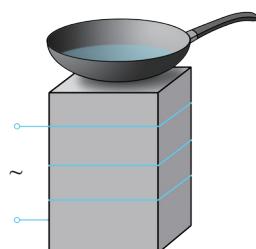


图2-22 涡流加热



实验结果表明，通电后铁锅内的水逐渐变热，而玻璃杯中的水温度却没有变化。为什么会出现这种现象？

将一金属块放在变化的磁场中，穿过金属块的磁通量发生变化，金属块内部就会产生感应电流。这种电流在金属块内部形成闭合回路，就像旋涡一样（图 2-23）。我们把这种感应电流称为涡电流，简称涡流。在上面的实验中，小铁锅的电阻很小，穿过铁锅的磁通量变化时产生的涡流较大，使铁锅很快发热，足以使水温升高；而玻璃杯是绝缘体，不会产生涡电流，所以水温没有明显变化。

现在，不少家庭都有电磁炉。电磁炉的工作原理与涡流有关。当 50 Hz 的交变电流流入电磁炉时，变频装置可将其变为高频电流（20~50 kHz）进入炉内的线圈中（图 2-24）。由于电流的变化频率较高，通过铁质锅底的磁通量变化率较大，根据电磁感应定律可知，产生的感应电动势也较大。铁质锅底是整块导体，能增强磁场，会在锅底产生很强的涡电流，使锅底迅速发热，进而加热食物。

涡流也可能给人们的生产生活带来不利影响。例如，变压器、电动机和发电机的铁芯常会因涡流损失大量的电能并导致设备发热。为了减少发热，降低能耗，提高设备的工作效率，一般先把硅钢轧制成很薄的板材，板材外涂以绝缘材料，再把板材叠放在一起，形成铁芯（图 2-25）。这样，涡流被限制在薄片之内，由于回路的电阻很大，涡流大为减弱，涡流导致的发热大大降低。另外，硅钢的电阻率大，也可进一步减少涡流造成的损失。

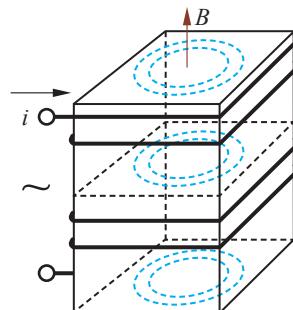


图 2-23 涡流产生示意图

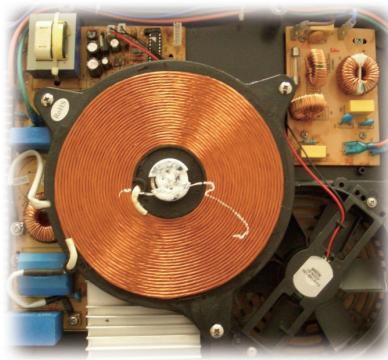


图 2-24 电磁炉内的铜线线圈

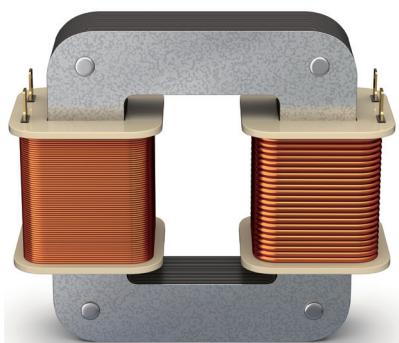


图 2-25 硅钢片铁芯

能理解楞次定律和法拉第电磁感应定律的内涵，了解自感现象和涡流现象；能说明自感现象与涡流现象在生产生活中的应用，能运用电磁感应定律等解释生产生活中的电磁技术应用。具有与电磁感应定律等相关的比较清晰的相互作用观念和能量观念。

通过法拉第电磁感应定律的应用，能体会科学家的不断创造推动了社会的进步；有较强的动手做实验的兴趣，能体会法拉第电磁感应定律等物理定律之美；能体会电磁感应技术的应用对人类生活和社会发展的影响。

——物理观念，科学态度与责任



安检门

乘飞机、高铁的乘客都要通过一道特设的安检门（图2-26）进行安全检查。如果乘客身上有金属物体，通过安检门时就会发出警报声。原来，安检门的金属探测器利用了电磁感应原理：当交变电流通过线圈时，会产生迅速变化的磁场。这个磁场使金属物体内部产生涡电流，涡电流又会产生磁场，反过来影响原来的磁场，进而引发探测器发出警报声。

金属探测器具有探测度广、定位准确、分辨力强、操作简易等特点，广泛用于安检、考古、探矿、寻找废旧金属等，故又被称为“探铁器”或“探宝仪”。

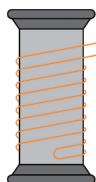


图2-26 安检门

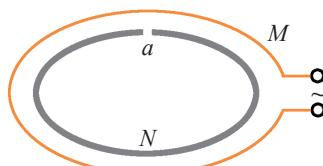


节练习

- 如图所示，用导线制造精密电阻时，往往采用双线绕法。用这种绕法制造的线圈能使自感现象减弱到可忽略不计的程度。请解释这是为什么。
- 利用高频交变电流焊接自行车零件的原理如图所示。图中M是高频交流线圈，N是自行车零件，a是待焊接口。当线圈M中通入高频电流时，把a的两端相接触，接口便会被自动焊接起来。这是为什么？



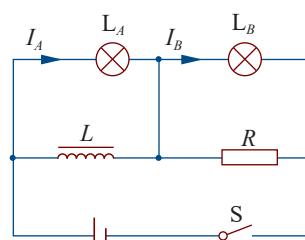
第1题



第2题

- 如图所示， L_A 、 L_B 是两个电阻值都为 r 的完全相同的小灯泡，小灯泡的电阻值大于定值电阻 R 的电阻值。 L 是一个自感很大的线圈，它的电阻值与定值电阻的电阻值相等。由于自感现象，当开关S接通或断开时，下列说法正确的是

- A. S接通时，灯泡 L_A 先亮， L_B 后亮
- B. S接通时， $I_A=I_B$
- C. S断开时， L_B 立即灭， L_A 先闪亮一下再灭
- D. S断开时， $I_A=I_B$



第3题

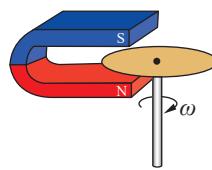
4. 如图所示，有一个铜盘，轻轻拨动它，能长时间地绕轴自由转动。如果在转动时把U形磁铁放在铜盘边缘，但并不与铜盘接触，则铜盘

- A. 不受影响，和原先一样转动
- B. 很快停下来
- C. 比原先需要更长时间停下来
- D. 比原先更快地转动

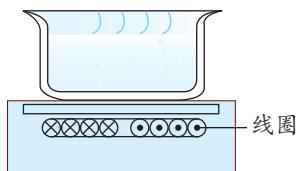
5. 如图所示，电磁炉是利用感应电流（涡流）的加热原理工作的。下列关于电磁炉的说法，正确的是

- A. 电磁炉面板采用陶瓷材料，发热部分为铁锅底部
- B. 电磁炉面板采用金属材料，通过面板发热加热锅内食品
- C. 电磁炉可用陶瓷器皿作为锅具对食品加热
- D. 可通过改变电子线路的频率来改变电磁炉的功率

6. 人造卫星绕地球运行时，轨道各处地磁场的强弱并不相同。因此，金属外壳的人造地球卫星运行时，外壳中总有微弱的感应电流。查找资料，了解这一现象产生的原因和能量转化情况，以及对卫星的运行可能会产生怎样的影响。



第4题



第5题

请提问





章末练习

科学认知

1. 如图所示，无轨电车在行驶的过程中，由于车身颠簸，有可能使车顶上的“辫子”瞬间脱离电网线，这时可观察到有电火花闪现。请说一说电火花产生的原因。

2. 一架直升机停在南半球的地磁极上空。该处地磁场的方向竖直向上，磁感应强度为 B 。直升机螺旋桨叶片的长度为 l ，螺旋桨转动的频率为 f ，顺着地磁场的方向看，螺旋桨按顺时针方向转动。螺旋桨叶片的近轴端为 a ，远轴端为 b ，如图所示。如果忽略 a 到转轴中心线的距离，用 E 表示每个叶片中的感应电动势，则

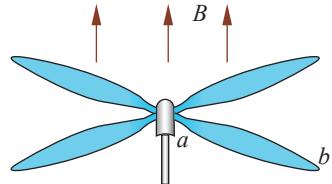
- A. $E = \pi f l^2 B$ ，且 a 点电势低于 b 点电势
 - B. $E = 2\pi f l^2 B$ ，且 a 点电势低于 b 点电势
 - C. $E = \pi f l^2 B$ ，且 a 点电势高于 b 点电势
 - D. $E = 2\pi f l^2 B$ ，且 a 点电势高于 b 点电势
3. 如图所示，在圆柱形区域内存在方向竖直向下、磁感应强度大小为 B 的匀强磁场，在此区域内，沿水平面固定一半径为 r 的圆环形光滑细玻璃管，环心 O 在区域中心。质量为 m 、电荷量为 q 的带正电的小球，在管内沿逆时针方向（从上向下看）做圆周运动。当磁感应强度均匀增大时，会产生涡旋电场，其电场线是在水平面内一系列沿逆时针方向的同心圆，同一条电场线上各点的场强大小相等。此小球的

- A. 动能保持不变，是因为洛伦兹力和管道的弹力对小球始终不做功
- B. 动能减小，是因为洛伦兹力对小球做负功
- C. 动能减小，是因为电场力对小球做负功
- D. 动能增大，是因为电场力对小球做正功

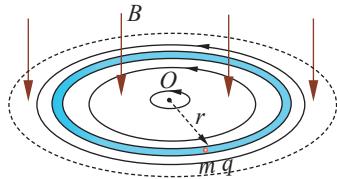
- *4. 在边长为 l 的等边三角形 abc 区域内存在着垂直于纸面向外的匀强磁场，一个边长也为 l 的等边三角形导线框 def 在纸面上以某一速度向右匀速运动，底边 ef 始终与磁场



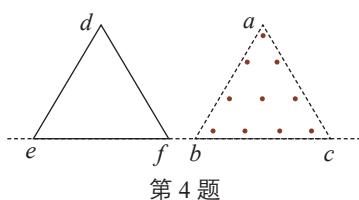
第 1 题



第 2 题

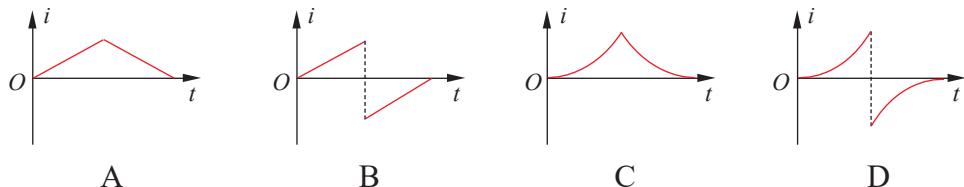


第 3 题

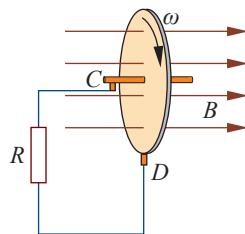


第 4 题

的底边界 bc 在同一直线上，如图所示。取顺时针的电流方向为正，则在线框通过磁场的过程中，其感应电流随时间变化的图像是



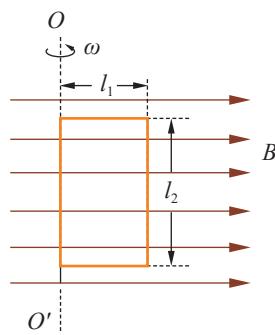
5. 一圆盘发电机的结构如图所示。铜盘安装在水平的铜轴上，整个铜盘处于垂直于盘面的匀强磁场中，两块铜片 C 、 D 分别与转动轴和铜盘的边缘接触。若铜盘半径为 l ，匀强磁场的磁感应强度为 B ，回路的总电阻为 R ，从左向右看，铜盘以角速度 ω 沿顺时针方向匀速转动。求回路中感应电流的大小和方向。



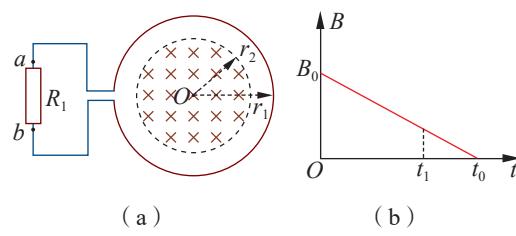
第5题

6. 单匝矩形线圈在匀强磁场中绕 OO' 轴转动。设线圈的两条边长分别为 l_1 和 l_2 ，转动角速度为 ω ，磁场的磁感应强度为 B 。试证明，在图示的位置时，线圈中的感应电动势 $E = BS\omega$ 。式中， S 为线圈的面积， $S = l_1 l_2$ 。

7. 如图 (a) 所示，电阻值为 R 、匝数为 n 的圆形金属线圈与阻值为 $2R$ 的电阻 R_1 连接成闭合回路，线圈的半径为 r_1 。在线圈中半径为 r_2 的圆形区域内存在垂直于线圈平面向里的匀强磁场，磁感应强度 B 随时间 t 变化的关系图像如图 (b) 所示，图像与横、纵轴的截距分别为 t_0 和 B_0 。不计导线的电阻，求 $0 \sim t_1$ 时间内通过电阻 R_1 的电流大小与方向以及电荷量。



第6题



第7题

科学辨析

8. 找一块圆铝片（如铝锅盖），用一根长铁钉支撑在它的中心处，使其平衡。再用一块强磁铁在靠近铝片边缘的上方沿其边缘顺时针迅速移动，看看会出现什么现象。如果改变磁铁的移动方向（逆时针），情况又会发生怎样的改变？请你动手做一做，然后尝试解释其原因。





科学探究

9. 研究电磁感应现象的实验。

(1) 为了能明显地观察到实验现象, 请用实线将如图所示的实验器材连接成相应的实物电路图。

(2) 将原线圈插入副线圈中, 闭合开关后, 下列操作可使副线圈中感应电流与原线圈中电流的绕行方向相同的是
_____。

- A. 在原线圈中插入软铁棒
- B. 拔出原线圈
- C. 使变阻器阻值变大
- D. 断开开关

10. 如图所示, 自感线圈的自感很大, 电阻可忽略不计。开关 S 原来是闭合的, 在开关 S 断开的瞬间, 若 $R_1 > R_2$, 灯泡的亮度怎样变化? 若 $R_1 < R_2$, 灯泡的亮度又怎样变化?

温故知新

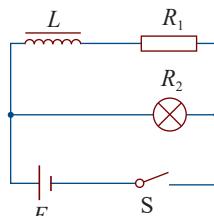
11. 某同学设计了一个电磁推动加喷气推动的火箭发射装置, 如图所示。竖直固定在绝缘底座上的两根长直光滑导轨, 间距为 l 。导轨间加有垂直于导轨平面向里的匀强磁场 B 。绝缘火箭支撑在导轨间, 总质量为 m , 燃料室中金属棒 EF 的电阻为 R , 并通过电刷与电阻可忽略的导轨良好接触。

引燃火箭下方的推进剂, 迅速推动刚性金属棒 CD (电阻可忽略且和导轨接触良好) 向上运动, 当回路 $CEFDC$ 面积减小量达到最大值 ΔS 时, 用时 Δt , 此过程感应出强电流, EF 产生电磁推力推动火箭加速。在 Δt 时间内, 电阻 R 产生的焦耳热使燃料燃烧形成高温高压气体。当燃料室下方的可控喷气孔打开后, 喷出的燃气使火箭进一步加速。

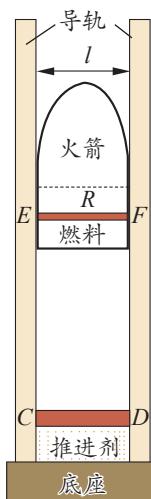
- (1) 求在 Δt 时间内, 回路中感应电动势的平均值以及通过金属棒 EF 的电荷量, 并判断金属棒 EF 中感应电流的方向;
- (2) 经 Δt 时间火箭恰好脱离导轨, 求火箭脱离时的速度 v_0 ; (不计空气阻力)
- (3) 请对该设计谈谈你的看法。



第 9 题



第 10 题



第 11 题

第3章

交变电流与

远距离输电

导 入 两种电源

第1节 交变电流的特点

第2节 交变电流的产生

第3节 科学探究：变压器

第4节 电能的远距离输送

►►本章学业要求

●能了解交变电流的内涵，能用公式和图像描述正弦式交变电流，知道远距离高压输电的原因和变压器的工作原理；能说明发电机和电动机工作过程中的能量转化，能解释生产生活中的远距离输电现象。具有与交变电流相关的运动与相互作用观念和能量观念。

——物理观念

●能用理想变压器模型分析升压降压的问题；能通过控制变量法分析线圈匝数与电压的关系；能恰当使用证据说明远距离输电需要高压的原因；能对交变电流高压输电提出质疑及改进建议。

——科学思维

●能完成“探究变压器原、副线圈电压与匝数的关系”等物理实验。能分析物理现象，能提出并准确表述可探究的物理问题，能作出有依据的假设；能根据实验目的和实验器材设计实验方案，能根据电路图设计实验步骤，用相关实验器材获得数据，能主动注意安全；能分析数据，形成与实验目的相关的结论，作出解释；能撰写规范的实验报告，在报告中能呈现设计的实验方案、实验步骤、实验表格，以及数据分析过程和实验结论，能根据实验中的问题提出改进措施。

——科学探究

●能认识到物理学的理论发展是推动技术进步的源泉；对交变电流及远距离输电等有进一步了解的兴趣；能领会发电机和电动机的发明及应用对人类生活和社会发展的深远影响，能体会基础科学的重大发现在工业革命和社会发展中的作用。

——科学态度与责任

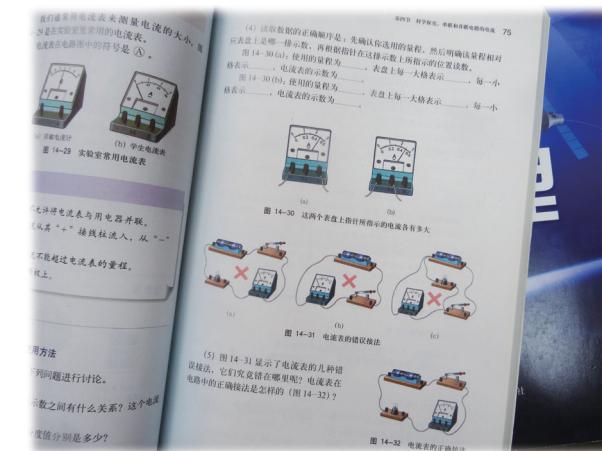


导人

两种电源

放学回家了，小强还在琢磨电源正负极的问题。

物理老师在讲解怎样使用电流表时，强调电流表接入电路，应当使电流表的正接线柱接靠近电池正极的元件，电流表的负接线柱接靠近电池负极的元件。每当小强换电池时，也特别注意电池的正负极。



物理教材写了“当电池作电源时，需要考虑电源的正负极”



使用吹风机时不需考虑电源的正负极

小强有些迷惑了，平时使用家电（如吹风机、电视机、吸尘器等）时，家庭电路中插座的插孔上却没有标注正负极。这是为什么呢？

其实，这是两种不同的电源。电池是直流电源，而家用电器通常使用交流电源。交流电源有什么特点？由它产生的电流与电池产生的电流有什么区别？交变电流又是怎样产生的？学习本章内容之后，你便能找到问题的答案。

第1节

交变电流的特点

直流电源产生直流电流，交流电源产生交变电流。这两种电流各有什么特点？如何描述交变电流？本节我们将先通过实验认识两种电流的特点，然后学习描述交变电流特征的物理量。

1. 直流电流和交变电流

用数字万用电表的交流电压挡测量交流电源的电压，将红表笔连接交流电源插座的一个插孔，黑表笔连接另一个插孔，显示的电压为 220 V；红表笔和黑表笔对调，显示的电压仍为 220 V。可见，与直流电源有正负极不同，交流电源没有正负极。

为了进一步认识直流电源和交流电源的差异，我们用示波器来观察两种电源提供的电压的波形。



实验与探究

观察电压的图像

将 6.0 V 电池组接入示波器的输入端，观察并记录电压波形（图 3-1）。将学生电源的交流输出电压调节至 6.0 V，接入示波器的输入端，观察并记录电压波形（图 3-2）。比较两种电压波形的特点。

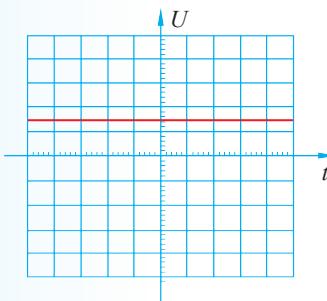


图 3-1 干电池提供的电压波形示意图

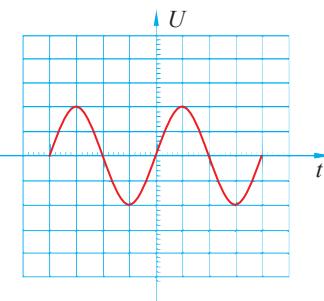


图 3-2 交流电源提供的电压波形示意图



由以上实验可看出，正常工作的干电池提供的电压不变。因而在电路中形成的电流大小和方向都不随时间变化，是恒定电流。我们称方向不随时间变化的电流为**直流电流** (direct current)，俗称直流电。电池供给的恒定电流，就属于直流电流。交流电源提供的电压随时间做周期性变化，因而在电路中形成的电流大小和方向也随时间做周期性变化，我们称这种电流为**交变电流** (alternating current)，俗称**交流电**。



迷你实验室

通交变电流的灯丝在磁场中的抖动

将灯泡和开关用导线连接到交流电源的两接线柱上，闭合开关，灯泡发光后，把U形磁铁置于灯泡的上端（图3-3），仔细观察灯丝出现什么现象。为什么？



图3-3 U形磁铁置于发光灯泡上

2. 交变电流的周期和频率

在物理学中，所有周期性变化的过程，都可用周期和频率来描述其变化的快慢。

交变电流完成一次周期性变化所需要的时间，称为交变电流的周期，用符号 T 表示，在国际单位制中的单位是秒(s)。周期越大，表示交变电流完成一次周期性变化所需要的时间越长，即变化越慢。

交变电流在一段时间内完成周期性变化的次数与这段时间之比称为交变电流的频率，用符号 f 表示，在国际单位制中的单位是赫兹(Hz)。频率越大，表示交变电流在1 s内完成周期性变化的次数越多，也就是变化得越快。

由以上定义可知，周期和频率有如下关系

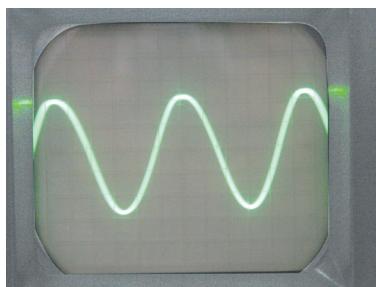
$$T = \frac{1}{f}$$

不同国家和地区市电的频率标准不同。因此，在不同国家和地区使用电气设备时要注意电源的频率是否与之匹配。

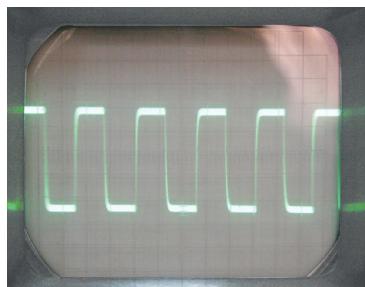


日常生活中所用的市电，电流的大小和方向随时间按正弦规律变化，这种电流被称为**正弦式交变电流**（sinusoidal alternating current），简称正弦交流电。

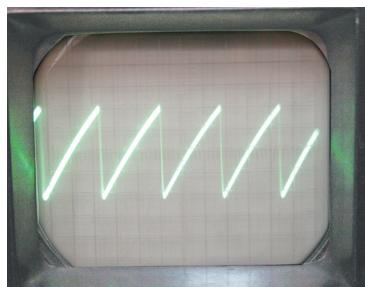
交变电流并不都是按照正弦规律变化的。在许多电子仪器和家用电器的电路中，电流随时间变化的规律可有多种形式（图3-4）。



(a) 正弦波



(b) 矩形波



(c) 锯齿波

图3-4 几种交变电流的波形

3. 交变电流的最大值和有效值

对于交变电流，电压和电流的瞬时值通常会发生变化。那么，生活中常见用电器上标明的“220 V 额定电压”或“5 A 额定电流”又是什么意思呢？

我们用 U_m 、 I_m 分别表示交变电压和电流能达到的最大值，又称**峰值**（peak value）。用峰值有时难以表示交变电流产生的实际效果，因而人们常用有效值来表示交变电流的大小。有效值是根据电流的热效应规定的。让恒定电流和交变电流分别通过阻值相等的电阻，如果它们在相同的时间内产生的热量相等，就把该恒定电流的数值规定为这个交变电流的**有效值**（effective value）。例如，让大小为5 A的恒定电流通过一个电阻，在一段时间内产生的热量是 Q ；如果某一交变电流通过该电阻，在相同的时间内产生的热量也是 Q ，那么该交变电流的有效值就是5 A。同样，交变电压的有效值也可用这种方法来确定。表示交变电压和交变电流有效值的符号通常与表示恒定电压和恒定电流的符号一样，分别是 U 和 I 。

理论计算表明，正弦式交变电压及交变电流的有效值和峰值之间的关系是

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

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

我们平时所说的220 V交流电源，各种电气仪表上所显示或测量出来的交流量值的大小，以及各种交流用电器铭牌上所标示的额定电压、额定电流等，都是指有效值。如果没有特别声明，此后提到的交变电流值都是指有效值。



电气元件、设备对电压或电流有一定的耐受极限，一旦超过这一极限，这些元件、设备就有可能损坏。在这种情况下，就需要考虑交变电流或交变电压的最大值。例如，某电容器的标称电压为300 V，如果要把它接入交流电路，就需要事先知道该电路的交变电压最大值是否会超过300 V。只有电路中的交变电压最大值低于这个耐压值，接入该电容器才是安全的。



物理聊吧

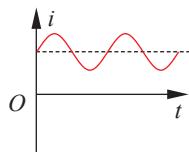
取几种粗细不同的保险丝，看看它们各自的熔断电流是多大。保险丝的熔断电流指的是有效值还是最大值？为什么？

谈谈你的想法，并与同学讨论交流。

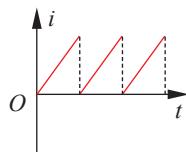


节练习

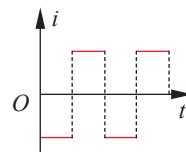
1. 我国交变电流的周期和频率各是多少？家用交变电流电压的有效值、最大值又是多少？
2. 下列电流随时间变化的图像中，属于交变电流的是



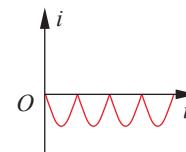
A



B



C



D

3. 一个标有“220 V 60 W”的灯泡能接在220 V的交流电源上吗？一个耐压值为220 V的电容呢？为什么？
4. 关于交变电压的有效值 U 和最大值 U_m ，下列说法正确的是

A. 任何形式的交变电流都具有 $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ 的关系

B. 正弦式交变电流具有 $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ 的关系

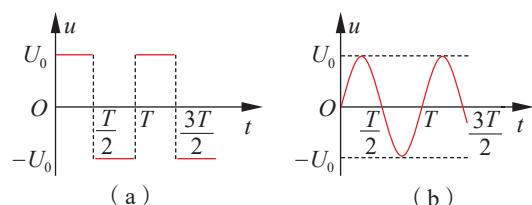
C. 照明电压220 V、动力电压380 V指的都是最大值

D. 交流电压表和交流电流表测的都是最大值

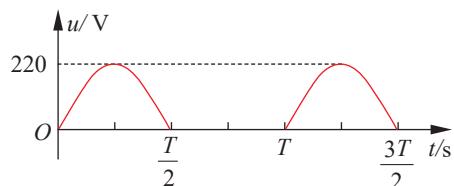


5. 阻值相等的甲、乙两电阻分别接到图(a)和(b)所示的方波交变电压、正弦式交变电压电路中,两种电压的周期和峰值都相等。求两电阻的电功率之比。

6. 家用电子调光灯的调光原理是用电子线路将输入的正弦式交流电压的波形截去一部分来实现的,由截去部分的多少来调节电压,从而调节灯光的亮度。某电子调光灯经调整后的电压波形如图所示,若用交流电压表测灯泡两端的电压,其示数是多少?



第5题



第6题



第2节

交变电流的产生

交变电流的大小和方向都随时间发生变化。它究竟是怎样产生的呢？本节我们将从交变电流的产生原理入手，学习其变化规律。

1.交流发电机

由法拉第电磁感应定律可知，只要通过闭合回路的磁通量发生变化，就可产生感应电动势和感应电流。发电机就是利用这一原理把机械能转变成电能的装置。

发电机主要由线圈（电枢）和磁极两部分组成，磁极有的使用永久磁铁，有的使用电磁铁。

磁极固定不动，让电枢在磁极中旋转，使穿过线圈的磁通量发生变化而产生感应电动势，这种发电机被称为旋转电枢式发电机。电枢固定不动，让磁极在电枢中旋转，使穿过线圈的磁通量发生变化而产生感应电动势，这种发电机被称为旋转磁极式发电机。不论哪一种发电机，转动的部分都称为转子，固定不动的部分都称为定子。图 3-5 是一种早期的手摇交流发电机，当手柄转动时，就会有交变电流产生。



图 3-5 一种早期的手摇交流发电机



迷你实验室

用发电机产生交变电流

如图 3-6 所示，将发电机的两个输出端通过滑动变阻器连接到电流计的两个接线柱上，摇动发电机手柄，让线圈在两磁极间连续转动，注意观察电流计指针的偏转情况。

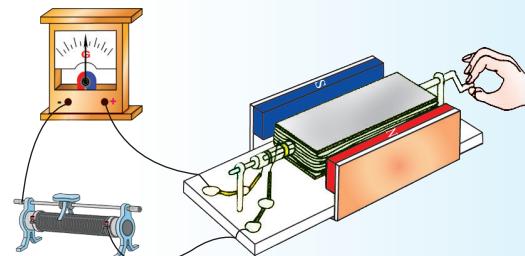


图 3-6 简易发电机示意图

由实验可看出，发电机产生的感应电流的大小和方向是不断变化的。仔细观察可发现，线圈在磁场中转动时，感应电流的大小和方向都随时间做周期性变化，线圈每转动一周，电流方向改变两次。这种能产生大小和方向随时间做周期性变化电流的发电机，称为交流发电机。

2. 正弦式交变电流的产生原理

交流发电机是如何产生大小和方向都随时间做周期性变化的电流的？

我们把手摇发电机的多匝线圈等效为一个矩形线圈，两个磁极产生的磁场近似视为匀强磁场（图3-7）。矩形线圈的两个端头分别连接金属滑环K和L，两个滑环又分别跟电刷E和F接触，并与外电路组成一个闭合回路。矩形线圈abcd在磁场中绕轴OO'匀速转动，ab和cd边在切割磁感线时，使线圈中产生感应电动势，线圈和外部构成的闭合回路中就有了感应电流。请分析导线ad和bc是否会产生感应电动势。

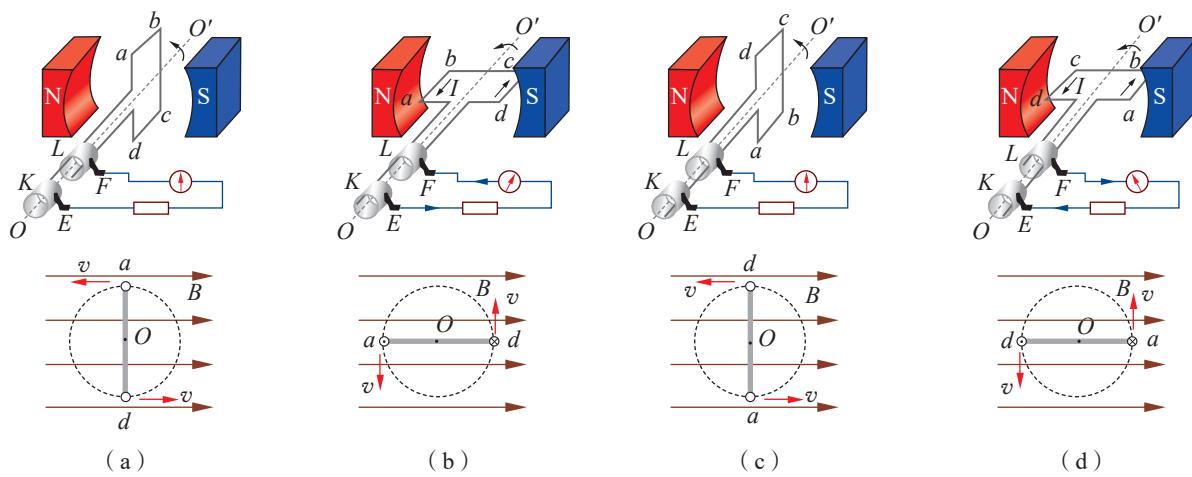


图3-7 交变电流产生示意图

当线圈转到图3-7(a)所示的位置时，线圈平面与磁感线垂直。在这一瞬间，ab边和cd边的速度方向均与磁感线平行，线圈的这两边都不切割磁感线，因此不产生感应电动势，回路中没有感应电流。物理学中，把这个位置称为中性面。

当线圈沿逆时针方向转过 90° 到达图3-7(b)所示的位置时，线圈平面与磁感线平行。这时，ab边向下切割磁感线，而cd边向上切割磁感线，根据右手定则可判定，线圈中的感应电流方向是 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ 。

当线圈继续转过 90° 到达图3-7(c)所示的位置时，线圈平面与磁感线垂直，又到了中性面上。在这一瞬间，线圈的ab和cd两边都不切割磁感线，感应电流为零。

当线圈又继续转过 90° 到达图3-7(d)所示的位置时，线圈平面又与磁感线平行。这时，ab边向上切割磁感线，而cd边向下切割磁感线，根据右手定则可判定，线圈中的感应电流方向是 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 。



当线圈继续转过 90° 时，就回到图3-7(a)所示的位置，又回到中性面上，感应电流为零，交变电流完成了一次周期性变化。接下来，线圈将重复上述转动过程，线圈中的电流也将重复上述变化过程。



物理聊吧

请从磁通量变化的角度，说明线圈在磁场中连续转动时，感应电流的大小和方向都会随时间做周期性变化的原因。

与同学讨论交流你的想法。

通过以上分析可知，在线圈连续转动过程中，感应电流的大小和方向都将随时间做周期性变化。线圈每经过中性面一次，感应电流的方向就改变一次；线圈每转动一周，感应电流的方向就改变两次。因为感应电流是由感应电动势引起的，所以线圈转动所产生的感应电动势也随时间做周期性变化。

3. 正弦式交变电流的变化规律

感应电动势和感应电流随时间的变化究竟遵循怎样的规律？

如图3-7和3-8所示，设矩形线圈ab边的长度是 l ，ad边长为 l' ，磁场的磁感应强度为 B 。若线圈在磁场中从中性面开始以角速度 ω 匀速转动，经过时间 t 之后，线圈平面转过的角度

$\theta = \omega t$ 。这时，线圈ab边的线速度 $v = \frac{1}{2} \omega l'$ ，其在垂直磁感线

方向的分量 $v \sin \theta = \frac{1}{2} \omega l' \sin \omega t$ 。因此，线圈ab边产生的感应电

动势 $e_{ab} = \frac{1}{2} Bl \omega l' \sin \omega t = \frac{1}{2} B \omega S \sin \omega t$ (S 为线圈所围面积)。同

理，在线圈cd边也会产生与ab边产生的大小相等的感应电动势。又因为在矩形线圈中ab边与cd边的电动势是同向串联的，所以在这一瞬间，整个线圈所产生的感应电动势 $e = B \omega S \sin \omega t$ 。如果线圈是由 n 匝相同的矩形线圈组成，则

$$e = nB\omega S \sin \omega t$$

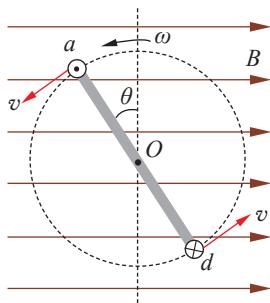


图3-8 矩形线圈在磁场中绕轴转动示意图

当线圈平面转到与磁感线平行的位置时，线圈 ab 边和 cd 边的线速度方向都跟磁感线垂直，这时 $\omega t = \frac{\pi}{2}$, $\sin \omega t = 1$ ，感应电动势达到最大值，用 E_m 来表示，即 $E_m = nBS\omega$ 。因此，感应电动势随时间变化的规律又可表示为

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

上式表明，当 n 、 B 、 l 、 ω 一定时，感应电动势随时间按正弦规律变化，在不同的时刻， e 具有不同的数值，被称为感应电动势的 **瞬时值** (instantaneous value)。

在只含有电阻的交流电路中，欧姆定律也适用。如果回路的总电阻为 R ，那么根据欧姆定律，回路中感应电流的瞬时值为

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

式中， $\frac{E_m}{R}$ 是感应电流的最大值，用 I_m 表示。因此，感应电流的瞬时值可表示为

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

即感应电流也随时间按正弦规律变化。

如果这样的交变电流通过一段电阻为 R' 的导体，那么该导体两端电压的瞬时值 $u = iR' = I_m R' \sin \omega t$ ，其中 $I_m R'$ 是电压的最大值，用 U_m 表示。该导体两端的电压瞬时值可表示为

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

即电路中的电压同样随时间按正弦规律变化。

例 题

在匀强磁场中有一矩形线圈，绕线圈平面内垂直于磁感线的轴匀速转动。线圈中产生的感应电动势随时间变化的图像如图 3-9 所示，试求出该感应电动势的最大值、有效值、周期和频率，写出该感应电动势随时间变化的关系式。

分析

从图 3-9 可看出，感应电动势随时间按正弦规律变化，电动势的最大值为 10 V、周期为 2.0×10^{-2} s，由此可求出有效值和频率，进而算出角速度，得出关系式。

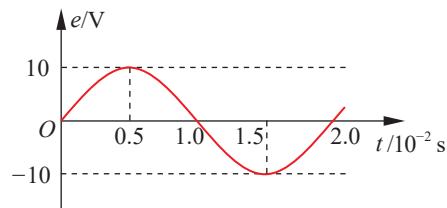


图 3-9 交流电动势图像



解

电动势的最大值

$$E_m = 10 \text{ V}$$

有效值

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{10}{\sqrt{2}} \text{ V} = 7.07 \text{ V}$$

电动势的周期

$$T = 0.02 \text{ s}$$

频率

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

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 100\pi \text{ rad/s}$$

所以，感应电动势随时间变化的关系式为

$$e = 10 \sin 100\pi t \text{ V}$$

讨论

根据感应电动势瞬时值表达式，当 $t = 0.5 \times 10^{-2} \text{ s}$ 时，得到 $e = 10 \sin \frac{\pi}{2} \text{ V} = 10 \text{ V}$ ，与图像相符。此时，线圈平面与磁场方向平行，磁通量为零，感应电动势最大。



迁移

在上例中，如果以 $t = 0.5 \times 10^{-2} \text{ s}$ 为计时起点，其他条件不变，写出感应电动势随时间变化的关系式。



拓展一步

交变电流的相位

如果我们从线圈平面转到与中性面成某一夹角 φ_0 的位置开始计时，那么经过时间 t 之后，线圈平面跟中性面之间的夹角就是 $\omega t + \varphi_0$ （图 3-10），这时交变电动势瞬时值为 $e = E_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ ，它的大小和方向都随时间不断变化。在 E_m 一定时，瞬时值不完全由时间 t 决定，而是由 $\omega t + \varphi_0$ 决定，



策略提炼

由图像确定交变电流的特征量和表达式时，可直接从图像读出最大值、周期，再由相关关系求出其他特征量。确定最大值和周期时要注意弄清坐标轴表示的物理量及其单位。

确定表达式时，要注意图像与瞬时表达式的关系，计时起点决定表达式是正弦函数还是余弦函数。

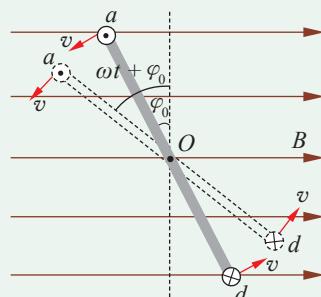


图 3-10 线圈平面与中性面的夹角示意图



$\omega t + \varphi_0$ 称为交变电流的相位或相。 $t = 0$ 时的相 φ_0 称为初相。相位不仅可反映交变电流任何时刻的状态，还可用来比较不同交变电流的变化步调。

图 3-11 表示两个频率相同但初相不同的交变电流， $\varphi_1 > \varphi_2$ 。由图可看出，这两个交变电流的变化步调不一致， i_1 比 i_2 先到达正的最大值、零值或负的最大值，这时我们说 i_1 比 i_2 超前 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ ，或者说 i_2 比 i_1 滞后 $\Delta\varphi$ 。

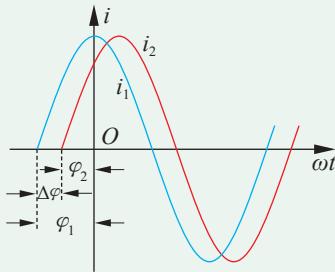


图 3-11 频率相同、初相不同的交变电流示意图

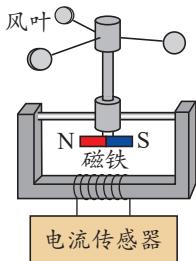


节练习

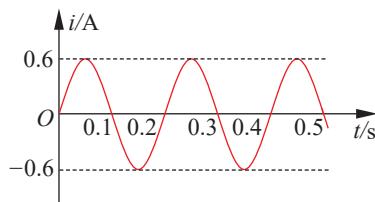
- 有同学认为：在匀强磁场中，矩形线圈绕线圈平面内垂直于磁感线的轴匀速转动时，线圈平面跟中性面垂直的瞬间，穿过线圈的磁通量为零，因此线圈中的感应电动势为零；线圈平面在中性面内的瞬间，穿过线圈的磁通量最大，因此线圈中的感应电动势最大。这种看法正确吗？为什么？
- 一个矩形线圈在匀强磁场中转动，产生的感应电动势大小为 $e = 220\sqrt{2} \sin 100\pi t$ V，则

A. 交变电流的频率是 100π Hz	B. $t = 0$ 时，线圈位于中性面
C. 交变电流的周期是 0.02 s	D. $t = 0.05$ s 时，e 有最大值
- 图 (a) 为风力发电的简易模型，在风力的作用下，风叶带动与其固定在一起的永磁体转动，转速与风速成正比。某一风速时，线圈中产生的正弦式交变电流如图 (b) 所示，则

A. 电流的表达式为 $i = 0.6 \sin 10\pi t$ A
B. 磁铁的转速为 10 r/s
C. 风速加倍时，电流的表达式为 $i = 1.2 \sin 10\pi t$ A
D. 风速加倍时，线圈中电流的有效值为 1.2 A



(a)



(b)

第 3 题



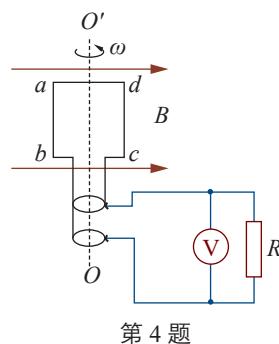
4. 如图所示，一个电阻为 r 、边长为 l 的正方形线圈 $abcd$ 共 n 匝，线圈在磁感应强度为 B 的匀强磁场中绕垂直于磁感线的轴 OO' 以角速度 ω 匀速转动，外电路电阻为 R 。

- (1) 判断图示位置电路中的电流方向；
- (2) 求线圈从图示位置转过 60° 时的感应电动势；
- (3) 线圈转动过程中，电压表的示数为多大？

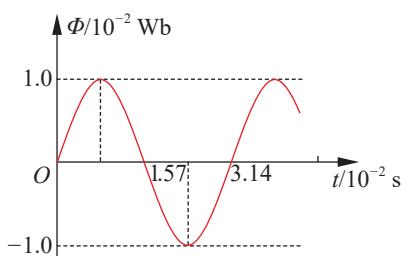
5. 小型发电机内的矩形线圈在匀强磁场中以恒定的角速度绕垂直于磁场方向的固定轴转动，线圈匝数 $n = 100$ ，穿过线圈的磁通量随时间按正弦规律变化，如图所示。已知发电机内阻 $r = 5.0 \Omega$ ，外电路电阻 $R = 95 \Omega$ ，感应电动势的最大值 $E_m = n\omega\Phi_m$ ，其中 Φ_m 为穿过每匝线圈磁通量的最大值。不计电流表的内阻，求串联在外电路中的电流表的读数。

*6. 海洋中蕴藏着巨大的能量，利用海洋的波浪可以发电。在我国南海上有一浮桶式波浪发电灯塔，其原理如图 (a) 所示。浮桶内的磁体通过支柱固定在暗礁上，浮桶内置线圈随波浪相对磁体沿竖直方向运动，且始终处于磁场中，该线圈与阻值 $R=15 \Omega$ 的灯泡相连。浮桶下部由内、外两密封圆筒构成（图中黄色部分），如图 (b) 所示，其内为产生磁场的磁体，与浮桶内侧面的缝隙忽略不计；匝数 $N=200$ 的线圈所在处辐射磁场的磁感应强度 $B = 0.2 \text{ T}$ ，线圈直径 $D = 0.4 \text{ m}$ ，
电阻 $r = 1 \Omega$ 。取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ ，
 $\pi^2 = 10$ 。若浮桶随波浪上下运动的速度可表示为 $v = 0.4\pi\sin\pi t \text{ m/s}$ ，求：

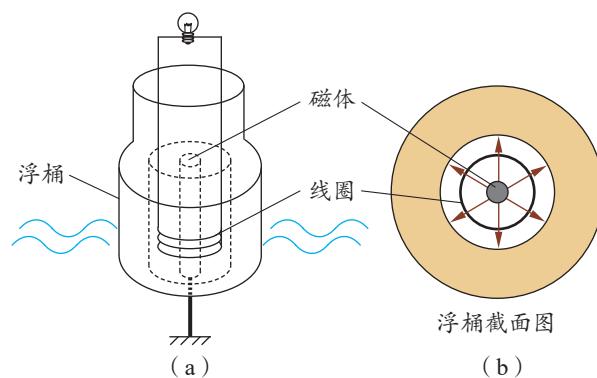
- (1) 波浪发电产生电动势 e 的瞬时值表达式；
- (2) 灯泡两端电压的有效值和灯泡的电功率。



第4题



第5题



第6题

请提问



第3节

科学探究：变压器

发电厂发出的电一般需要先把电压升到高压，传输到用电地区后，再降到一定电压供用户使用。怎样才能实现电压的升高与降低呢？本节我们将了解能实现这种要求的设备——变压器。

1. 变压器的工作原理

变压器（图 3-12）是一种升高或降低交变电流电压的装置。变压器的种类虽然很多，但内部结构基本相似，主要由闭合的铁芯和绕在铁芯上的两个或两个以上的线圈组成（图 3-13）。铁芯由涂有绝缘漆的硅钢片叠合而成，线圈一般用高强度的漆包线绕制，也称绕组。



图 3-12 变压器



图 3-13 一种变压器的内部结构

两绕组变压器的符号如图 3-14 所示。通常把与电源相连的线圈称为**原线圈**或**初级线圈**（primary coil），与负载相连的线圈称为**副线圈**或**次级线圈**（secondary coil）。原、副线圈的匝数分别用符号 n_1 和 n_2 表示。原线圈两端的电压又称为**输入电压**（input voltage），用符号 U_1 表示；副线圈两端的电压又称为**输出电压**（output voltage），用符号 U_2 表示。

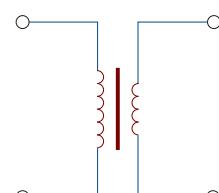


图 3-14 变压器符号



图 3-15 为变压器工作原理示意图。当原线圈两端加上交变电压 U_1 时，原线圈中就有交变电流 I_1 通过，并在铁芯中产生交变的磁场，铁芯中的磁通量就发生变化。由于副线圈也绕在同一铁芯上，铁芯中磁通量的变化便会在副线圈上产生感应电动势。如果在副线圈两端连接负载构成闭合回路，副线圈中就会产生交变的感应电流 I_2 。虽然变压器原、副线圈的导线互不相连，却可通过变化的磁场传送电能。对于负载而言，副线圈上的感应电动势相当于电源电动势。如果副线圈的电阻很小，可近似认为这个电动势就等于副线圈两端的电压。

虽然原、副线圈中电流产生的磁场绝大部分通过铁芯，但也有一些会“漏”到铁芯以外。绕在铁芯上的线圈有电阻，会消耗能量。此外，变压器的铁芯也会因涡流而消耗能量。如果这些损失可忽略不计，这种变压器就称为理想变压器。在理想变压器中，穿过原、副线圈的磁通量变化相同，因此在原、副线圈上，每匝产生的感应电动势相等。



图 3-15 变压器的工作原理示意图

拓展一步

互感现象

在两绕组变压器中，原线圈中电流的变化会在副线圈中产生感应电动势。这种由一个线圈电流的变化导致相邻线圈的磁通量发生变化，而在该相邻线圈中产生感应电动势的现象，称为互感现象，对应的感应电动势称为互感电动势。利用互感现象可将能量由一个线圈传递到另一个线圈。

互感现象在电工、电子测量技术中应用较多。变压器就是利用互感现象制成的，用电压互感器把高电压变成低电压再连接到交流电压表，就可测量高电压（图 3-16）；用电流互感器把大电流变成较小电流再连接到交流电流表，就可测量大电流（图 3-17）。你能用所学的知识解释这两个原理图吗？若现在还不能，没关系，你可带着这些问题学习下面的内容。

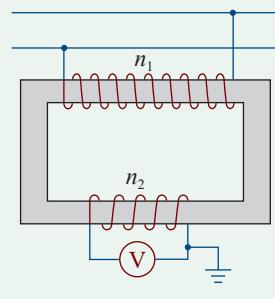


图 3-16 电压互感器原理示意图

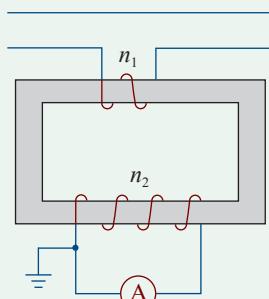


图 3-17 电流互感器原理示意图

2. 探究变压器电压与线圈匝数的关系

利用变压器可升高电压，也可降低电压。其实，影响变压器输出电压的因素很多，那么如何通过调节线圈匝数来改变输出电压？变压器电压与线圈匝数有着怎样的定量关系？我们通过实验进行探究。

实验目的

研究变压器电压与线圈匝数间的定量关系。

实验器材

可拆变压器（图3-18）、低压交流电源、交流电压表、带夹的导线。

实验原理与设计

当交流电压接入原线圈时，它所产生的变化的磁场就会在副线圈中产生感应电动势。请根据实验目的和实验器材，设计实验方案。

实验步骤

图3-19是某同学设计的实验电路图。请根据这个电路图，设计实验步骤。

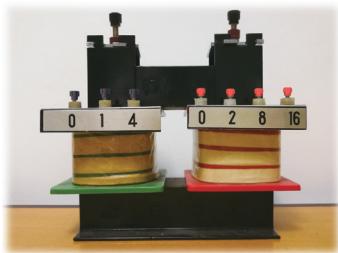


图3-18 可拆变压器

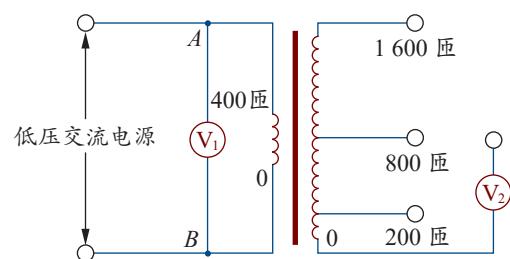


图3-19 实验电路图

数据分析

请将实验数据填入你设计的表格中，并根据数据分析比值 $\frac{U_1}{U_2}$ 和 $\frac{n_1}{n_2}$ 之间的关系。

实验结论

请写出实验结论。

能分析物理现象，能提出并准确表述可探究的物理问题，能作出有依据的假设；能根据实验目的和实验器材设计实验方案，能根据电路图设计实验步骤，用相关实验器材获得数据，能主动注意安全；能分析数据，形成与实验目的相关的结论，作出解释；能撰写规范的实验报告，在报告中能呈现设计的实验方案、实验步骤、实验表格，以及数据分析过程和实验结论，能根据实验中的问题提出改进措施。

注意提升实验操作能力、分析论证能力，有主动注意安全的行为。

素养提升

——科学探究



讨论

在上述实验中，慢慢抽出变压器的铁芯，原线圈和副线圈的电压测量结果如何？为什么？

3.理想变压器的电压与匝数的关系

由实验可知，变压器原、副线圈电压之比近似等于其匝数之比。

大量研究表明，理想变压器原、副线圈的电压之比等于两个线圈的匝数之比

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

当 $n_2 > n_1$ 时， $U_2 > U_1$ ，这种变压器称为升压变压器；当 $n_2 < n_1$ 时， $U_2 < U_1$ ，这种变压器称为降压变压器。



物理聊吧

自耦变压器是只有1个绕组的变压器，它的低压线圈是高压线圈的一部分。请观察图3-20中的两种自耦变压器，哪种起升压作用，哪种起降压作用？为什么？与同学交流你的看法。

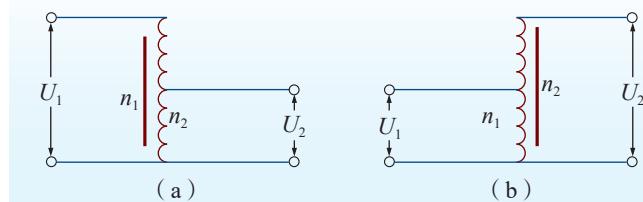


图3-20 自耦变压器原理示意图



例题

如图3-21所示，某理想变压器原、副线圈的匝数比为2:1，副线圈上接一只“220V 40W”的灯泡。原线圈所接电源电压随时间的变化规律如图3-22所示。若灯泡电阻视为不变，灯泡的实际功率是多少？

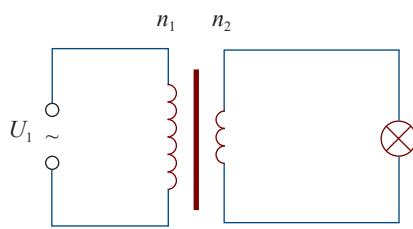


图3-21 某理想变压器示意图

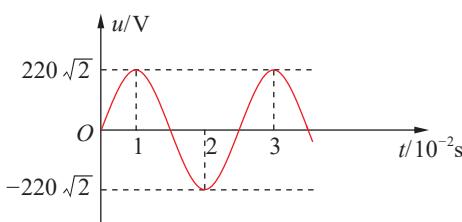


图3-22 原线圈所接电源电压的变化曲线

分析

通过输入电压的有效值及变压器的匝数比可求出灯泡两端所加实际电压的有效值 U ，由灯泡的额定电压和额定功率可求得其电阻 R ，进而可求出灯泡实际消耗的功率 $P = \frac{U^2}{R}$ 。

解

根据电源电压的变化规律，可知原线圈上电压的有效值 $U_1 = 220 \text{ V}$ 。

根据变压器电压与线圈匝数的关系，可知副线圈上的电压有效值

$$U_2 = \frac{n_2}{n_1} U_1 = 110 \text{ V}$$

已知 $U_{\text{额}} = 220 \text{ V}$ $P_{\text{额}} = 40 \text{ W}$

$$\text{灯泡的电阻 } R = \frac{U_{\text{额}}^2}{P_{\text{额}}} = 1210 \Omega$$

$$\text{所以，灯泡的实际功率 } P_{\text{实}} = \frac{U_2^2}{R} = 10 \text{ W}$$

讨论

这是在假设灯泡电阻不变情况下的粗略计算结果，实际上，当灯泡两端电压变化时，灯泡电阻会改变。请查找相关信息，并由此计算灯泡的实际功率。

策略提炼

变压器在电路中有改变交流电压、电流及传输电能的作用。因此，在涉及理想变压器的问题中，可运用原、副线圈的电压与匝数关系以及功率关系求解。



在图 3-23 所示的电路中， P 为滑动变阻器的滑片，保持理想变压器的输入电压 U_1 不变，闭合开关 S ，下列说法正确的是

- A. P 向下滑动时，灯泡 L 变亮
- B. P 向下滑动时，变压器的输出电压 U_2 不变
- C. P 向上滑动时，变压器的输入功率变小
- D. P 向上滑动时，变压器的输入功率变大

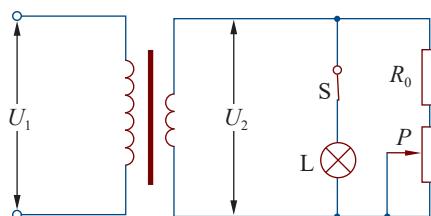


图 3-23 电路图



拓展一步

理想变压器电流与匝数的关系

对于理想变压器，输入功率等于输出功率，即 $U_1 I_1 = U_2 I_2$ ，由 $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$ 可得

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

可见，在变压器工作时，通过原、副线圈的电流与两线圈的匝数成反比。

变压器的高压线圈匝数多而通过的电流小，可用较细的导线绕制；低压线圈匝数少而通过的电流大，一般用较粗的导线绕制。



科学书屋

火花塞如何点火

汽车内燃机利用火花塞产生的电火花来点燃气缸中的燃料空气混合物。要使火花塞产生电火花，两电极间必须要有几千伏的高压，而某种汽车蓄电池的电压只有 12 V，这就要用到变压装置。

火花塞点火原理如图 3-24 所示。当开关由闭合变为断开的瞬间，图中含电池的回路中电流急剧减小，变压器铁芯中磁通量急剧变化，因副线圈的匝数大大超过原线圈，副线圈就会感应产生几千伏甚至上万伏的高压，火花塞立即产生电火花。

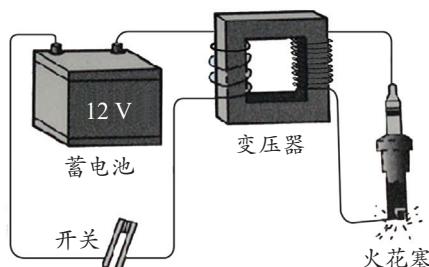


图 3-24 火花塞点火原理示意图

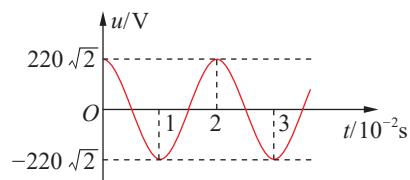


节练习

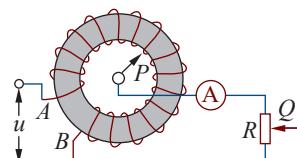
- 请撰写“探究变压器原、副线圈电压与匝数的关系”的实验报告。注意在报告中呈现设计的实验方案、实验步骤、实验表格，以及数据分析过程和实验结论，并针对实验中的问题提出改进措施。



2. 某同学在探究变压器电压与匝数关系时，发现缺少电源，于是就用一个蓄电池代替。他能在实验中观察到什么现象？为什么？
3. 一理想变压器原、副线圈匝数比 $n_1 : n_2 = 11 : 5$ ，原线圈与正弦交流电源连接，其输入电压 u 如图所示。若副线圈仅接入一个 10Ω 的电阻，则
- 流过电阻的电流是 20 A
 - 与电阻并联的电压表的示数是 $100\sqrt{2} \text{ V}$
 - 经过 1 min ，电阻产生的热量是 $6 \times 10^3 \text{ J}$
 - 变压器的输入功率是 $1 \times 10^3 \text{ W}$
4. 某机床上用的照明灯电压为 36 V 。如果要用 380 V 的电压降压得到，机床上变压器的原线圈是 1440 匝，那么副线圈应该是多少匝？
5. 调压变压器是一种自耦变压器，它的构造如图所示。线圈 AB 绕在一个圆环形的铁芯上， AB 间加上正弦交流电压 u ，移动滑动触头 P ，就可调节输出电压。在输出端连接了滑动变阻器 R 和理想交流电流表，变阻器的滑动触头为 Q 。
- 保持 P 的位置不动，将 Q 向下移动时，电流表的读数如何变化？为什么？
 - 保持 Q 的位置不动，将 P 沿逆时针方向移动时，电流表的读数如何变化？为什么？
6. 将一只输入电压为 220 V 、输出电压为 30 V 的变压器，改绕成输入电压为 220 V 、输出电压为 5 V 的变压器。拆下变压器时得知副线圈的匝数是 180 匝，若保持原线圈匝数不变，则改绕时副线圈应绕多少匝？



第3题



第5题



第4节

电能的远距离输送

发电厂一般都远离用户。在我国，常采用 110 kV、220 kV、330 kV 和 550 kV 等高压方式将电能从发电厂经变电站（图 3-25）输送给用户。远距离输电为什么要采用高压方式呢？本节将学习远距离高压输电的原理，并了解发电机和电动机的应用。



图 3-25 变电站

1. 采用高压输电的原因

远距离输电为什么要采用高压输电呢？这与远距离输电中的电功率损失有关。

电流流过输电导线时，电流的热效应会引起电功率的损失。损失的电功率 $P = I^2R$ ，即在输电线上因发热而损耗的电功率与输电线的电阻 R 成正比，与电流 I 的二次方成正比。因此，要减小输电时的电功率损失，需要减小输电线电阻和输电电流。

由电阻定律 $R = \rho \frac{l}{S}$ 可知，在输电线长度一定的情况下，要减小输电线的电阻，可采用电阻率小的材料做导线，如铜、铝等金属材料；还可增大导线的横截面积，但导线的横截面积增大是有限度的，过粗的导线会使输电线太重，给架线施工带来很大困难，还要耗费更多的金属材料。

因损失的电功率与电流的二次方成正比，减少电功率损失的最好办法是减小输电导线中的电流。由 $P = UI$ 可知，在保证输送电功率 P 不变的情况下，必须提高输电电压 U ，才能减小电流 I 。因此，远距离输电通常采用高压输电。实际的输电电压也不能无限制地提高。输电电压过高，会增加绝缘难度，提高架线费用，还容易引起输电线路向大气放电，增加能量损失。

进行远距离输电时，要综合考虑输送功率的大小、技术和经济等各种因素，选择恰当的输电电压。在我国，通常送电距离在 100 km 左右时采用 110 kV 的电压输电，在 100 ~ 300 km 时则采用 220 kV 的电压，更远距离采用更高电压输电。输电电压为 110 kV、220 kV 的线路，称为高压输电线路；输电电压为 330 kV、550 kV 乃至 750 kV 的线路，称为超高压输电线路。输电交流电压为 1 000 kV（直流电压为 ± 800 kV）及以上的线路，称为特高压输电线路，这是在超高压输电基础上发展起来的。

例 题

某发电站输出功率 $P = 2\ 000$ kW，用电阻 $R = 20\ \Omega$ 的输电线向外输送电能。如果用 $U = 10$ kV 的电压输电，输电线上损失的功率是多少？损失的电压是多少？如果改用 $U' = 100$ kV 的高压输电，输电线上损失的功率和电压又是多少？

分析

根据输电功率和输电电压，求出输电电流，进而可求出损失的功率和电压。

解

根据 $P = UI$ ，用 $U = 10$ kV 的电压输电时的输电电流

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2 \times 10^6}{1 \times 10^4} \text{ A} = 200 \text{ A}$$

输电线损失的功率

$$P_{\text{损}} = I^2 R = 200^2 \times 20 \text{ W} = 800 \text{ kW}$$

损失的电压

$$U_{\text{损}} = IR = 200 \times 20 \text{ V} = 4 \text{ kV}$$

改用 $U' = 100$ kV 高压输电后，输电电流

$$I' = \frac{P}{U'} = \frac{2 \times 10^6}{1 \times 10^5} \text{ A} = 20 \text{ A}$$

策略提炼

分析求解远距离输电问题，运用公式时要弄清每个量的物理意义，注意区分输电电压、导线上损失电压和用电器两端电压，明确三者间的关系。对较复杂的输电问题，宜先画出电路图，在图上标出相关物理量。



输电线损失的功率

$$P_{\text{损}}' = I'^2 R = 20^2 \times 20 \text{ W} = 8 \text{ kW}$$

损失的电压

$$U_{\text{损}}' = I' R = 20 \times 20 \text{ V} = 400 \text{ V}$$

讨论

显然，输送一定功率的电能，输电电压越高，输电线中电流越小，导线因发热而损耗的电能越少，线路上电压的损失也越少。

能了解交变电流的内涵，能用公式和图像描述正弦式交变电流，知道远距离高压输电的原因和变压器的工作原理；能说明发电机和电动机工作过程中的能量转化，能解释生产生活中的远距离输电现象。具有与交变电流相关的运动与相互作用观念和能量观念。

——物理观念



迁移

采用高压输电后，在用户端需要降压才能供用户使用。如何确定降压变压器原、副线圈的匝数比？上例中，若采用 100 kV 高压输电，接入城市配电网时需降压到 10 kV，那么，变压器原、副线圈的匝数比为多大？



电容与电感对交流输电线路的影响

电容器具有“通交流、隔直流”的特性。电容器两极间有绝缘介质，直流电流不能通过。但对交变电流来说，在周期性交变电压的作用下，电容器不断充、放电，电路中就会形成持续的交变电流。电容器对交变电流有一定的阻碍作用，物理学上把这种阻碍作用称为容抗。

电感器具有“通直流、阻交流”的特性。当交变电流通过电感器时，电流的变化在线圈中激发出的自感电动势将阻碍线圈中电流的变化，使电路中电流的最大值和有效值都比没有电感器时小，从而产生对交变电流的阻碍作用。物理学中，把这种阻碍作用称为感抗。

交流输电时，输电导线有一定电感。大功率输电时，电感对交变电流的阻碍作用甚至超过电阻。如果输电线架在空中，导线和大地之间就构成了一个电容器；如果输电线铺设在地下（海底），需要用绝缘层隔开导线与大地（海水），因此导线和大地（海水）之间也构成了一个电容器。交变电流通过时，都会产生容抗。感抗和容抗（合称电抗）会造成交流输电线路上的电压和电能的损失。



2. 高压交流输电与直流输电

大型发电机设计输出的电压一般都达不到远距离输电的要求。因此，在发电厂（站）内，要用变压器升压，然后向远处送电；到达目的地后，根据不同的需求，再用降压变压器经过两三次降压，最后输送给用户。从发电厂（站）到用户的输电过程如图 3-26 所示。

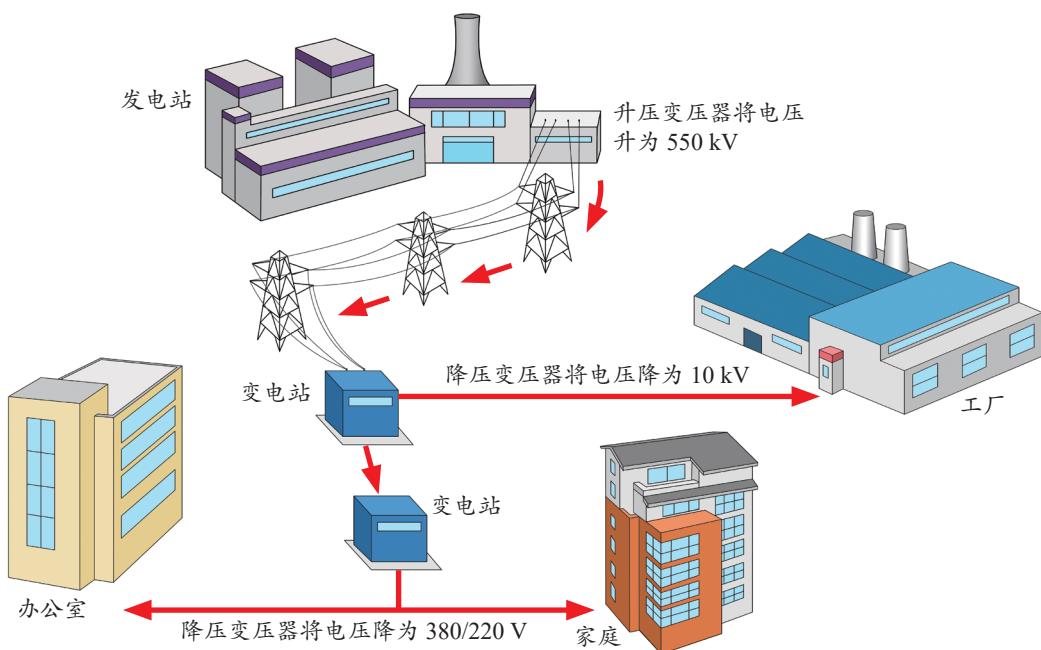


图 3-26 交流输电过程示意图

交流输电时，除输电线路上的电阻外，电感、电容产生的感抗和容抗也会造成交流输电线路上的电能和电压损失。此外，现代供电系统把许多发电站连成一体，构成庞大的交流输电网，这就要求电网中的各台发电机发出的交变电流并网时必须做到同步，即并联输电线中的交变电流必须同时达到最大值和最小值，并且交变电流的频率必须相同，这也是交流输电需要解决的问题。

随着供电系统的迅速扩大、输电功率和输送距离的不断增加，交流输电系统遇到了自身难以克服的技术难题。因此，人们积极探索更合理的输电方式。直流输电作为解决这些技术难题的方向之一，又重新受到人们的重视。

高压直流输电系统的工作程序：交变电流升压后输送到整流器，把高压交变电流变换为高压直流电流，经由高压直流线路输送到用电地区后，将高压直流电流变换为高压交变电流，再经降压变压器降压。

在电能的传输方面，高压直流输电与高压交流输电相比有许多优越性：直流输电适



图 3-27 远距离输电

2005 年开始研究特高压输电技术。2011 年，世界首条商业运营的特高压（1 000 kV）交流输电扩建工程在我国正式投产。2010 年，世界首个±800 kV 特高压直流输电工程在我国正式投运。2018 年，我国开始建造世界上容量最大的特高压多端直流输电工程。特高压远距离输电被人们称为“电力高速公路”，为解决大容量远距离电力输送的难题作出了贡献。

3. 电能的利用与社会发展

蒸汽机的广泛使用使社会生产力得以飞跃发展，引发了第一次工业革命，人类社会进入蒸汽时代（图 3-28）。在此之后，电能的使用又一次推动社会生产力飞速发展，引发了第二次工业革命，人类社会跨入电气时代。

19 世纪是电磁学飞速发展的时期，同时也是引发电力工业及其相关产业飞速发展的一个重要时期。奥斯特、安培、法拉第等人对电与磁的相互作用进行的深入探索，为电动机、发电机的发明和应用奠定了坚实的理论基础。19 世纪中叶，电动机（图 3-29）、发电机应运而生。

于地下和水下电缆输电，不会受到电感和电容的影响；在输送相同电功率的电能时，直流输电所用的线材约为交流输电的三分之二；同时，直流输电杆塔结构也比同容量的交流输电简单，占地面积也小；直流输电时，不需要考虑电网中的各台交流发电机的同步运行问题。

为继续提高输电能力，实现大功率的远距离输电（图 3-27），构建大规模“西电东送”“北电南送”的能源配置格局，我国



图 3-28 蒸汽机车



图 3-29 大型交流电动机



发电机、电动机在工业上的运用，克服了蒸汽机在使用过程中存在的不少难题，体现出许多优越性。例如，电能通过发电厂和电力网实现了集中生产、分散使用，便于传输和分配，工厂可建设在远离煤矿和水力资源的地方；与蒸汽机相比，电动机灵活、小巧、适应力强，更加广泛地应用于工业生产领域。

电能是二次能源，目前使用的电能，主要来自热能、水能、原子能、风能等其他形式的能量，这些能量转换为电能都离不开发电机。例如，火力发电，是利用石油、煤炭和天然气等燃料燃烧时产生的热能将水加热，产生高压水蒸气，推动汽轮机转动，带动发电机的转子转动，将机械能转化为电能，再通过外电路把电能输送出去；水力发电和风力发电则是直接利用水和风带动发电机的转子转动，将机械能转化为电能。把电能转换为动力，离不开电动机。高铁、动力机械等，都是利用电动机的通电线圈受到磁场的力的作用而发生转动，将电能转化为机械能的。图 3-30 显示了发电机和电动机在电能应用中能量转化的作用。

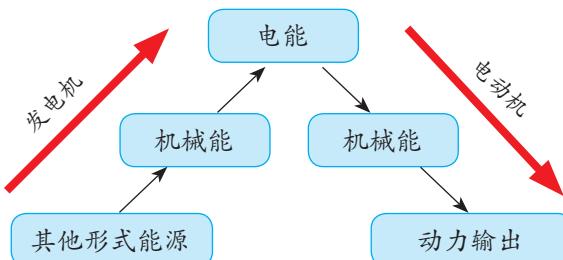


图 3-30 发电机与电动机工作过程中的能量转化示意图

电能的利用提高了劳动生产率，解放了劳动者。大量劳动者汇集于城市，带动了住宅、商业、娱乐、交通等领域的发展，改变了人类社会生活的面貌，现代城市拔地而起。但是，工业化、城市化也带来了一系列的新问题。对自然资源不断增长的需求，引发了对矿产、化石燃料等不可再生资源的过度开发和利用，又带来了水土流失、环境污染、生态失衡等严重后果。如今，可持续发展已经成为人类社会面临的一个重要课题。

能认识到物理学的理论发展是推动技术进步的源泉；对交变电流及远距离输电等有进一步了解的兴趣；能领会发电机和电动机的发明及应用对人类生活和社会发展的深远影响，能体会基础科学的重大发现在工业革命和社会发展中的作用。

——科学态度与责任



科学书屋

极小的电动机

随着科学技术的发展，电动机也在不断地演变，向着轻型化、节能化、低噪声的方向发展。例如，小如米粒的电动机，适用于一些特殊场合。小型电动机容易驱动，在微电脑等高科技领域有着广泛的应用（图3-31）。

近年来，得益于对单个原子、分子层次上的物质进行研究而发展起来的纳米技术，科学家用碳纳米管研制出体积更小的纳米电动机（图3-32）。这种纳米电动机运转灵活，对温度和化学条件要求不高，有很大的应用潜力。

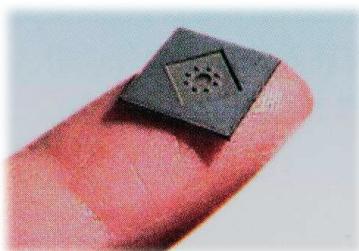


图3-31 放在手指上的电动机

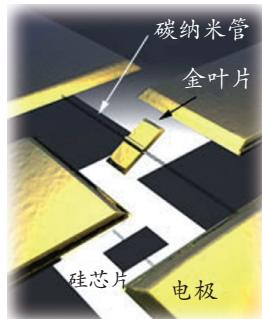


图3-32 纳米电动机
结构示意图



节练习

- 为了减少输电线上的电功率损失，通常需要提高输电电压和减小输电导线的电阻。但有同学从下列论证中得出了相反结论：“设输电电压为 U ，输电电流为 I ，则功率损失 $P = \frac{U^2}{R}$ 。因此，要降低 P 值，就应降低输电电压和增加输电线的电阻。”请问，这位同学的论证过程错在哪里？
- 远距离输电都采用高压输电的方式，其主要优点是
 - 可根据需要调节交变电流的频率
 - 可加快输电速度
 - 可减少输电线上的能量损失
 - 可节省输电线的材料

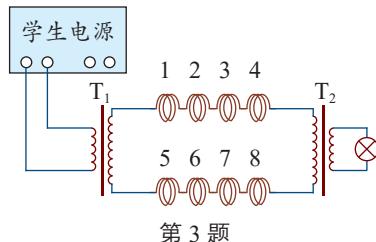


3. 某同学在实验室中研究远距离输电。由于输电线太长，他将每 100 m 导线卷成一卷，共卷成 8 卷来代替输电线路。第一次直接将输电线与学生电源及用电器相连，第二次采用如图所示的电路输电。其中变压器 T_1 与电源相连，变压器 T_2 与用电器相连。下列说法正确的是

- A. 第二次实验也可研究远距离直流输电
- B. T_1 是升压变压器， T_2 是降压变压器
- C. 若输送功率一定，则第二次输电线损失的电功率较小
- D. 实验可证明，增大输电电流能减少远距离输电的能量损失

4. 一小型发电机输出功率为 50 kW，输出电压为 240 V。现用一台升压变压器使其升压，至用户处再用一台降压变压器降到所需要的 220 V。输电线总电阻为 30Ω ，损失电功率为总功率的 6%。若变压器是理想的，求这两台变压器原、副线圈的匝数比。

*5. 三峡水电站是我国最大的水力发电站，若在某时间段水位落差约为 100 m，水的流量约为 $1.35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。船只通航需要约 $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流量，其余流量视为都用来发电。水流冲击水轮机发电时，水流减少的势能有 20% 转化为电能。请根据以上数据估算该时间段的发电功率。



第 3 题

请提问

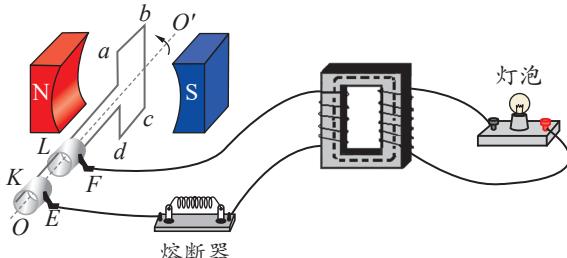




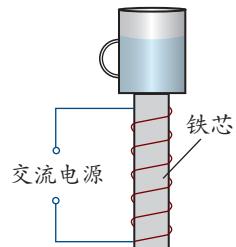
章末练习

科学认知

1. 某兴趣小组利用如图所示的装置给小灯泡供电。矩形闭合导线框 $abcd$ 处于磁感应强度大小为 B 的水平匀强磁场中，线框电阻不计。线框绕垂直于磁场的轴 OO' 以角速度 ω 匀速转动，并通过变压器给小灯泡供电。下列说法正确的是
- 图示位置穿过线框的磁通量为零
 - 图示位置线框产生的感应电动势为零
 - 使用变压器的目的是提高输出功率
 - 若灯泡偏暗，可通过稍微减少原线圈匝数来提高灯泡亮度
2. 如图所示，在线圈上端放置一盛有冷水的金属杯，现接通交流电源，过了几分钟，杯内的水沸腾起来。若要缩短上述加热时间，下列措施可行的有
- 增加线圈的匝数
 - 提高交流电源的频率
 - 将金属杯换为瓷杯
 - 取走线圈中的铁芯

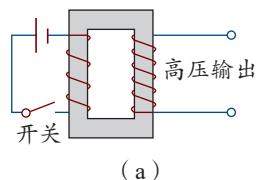


第 1 题

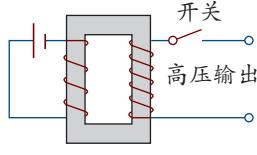


第 2 题

3. 汽油发动机内经过压缩的汽油与空气的混合物，需要火花塞来点燃。某汽油发动机火花塞需要高达 10 kV 的电压才能点火，一同学设计了如图所示的点火电路。已知直流电源的电压为 12 V ，升压变压器的输出端接到火花塞上，开关是自动控制的。下列说法正确的是
- 两电路都不可能使火花塞点火，因为变压器不能改变直流电压
 - 图 (a) 和 (b) 的电路中，保持开关闭合，输出端都会获得持续的高压
 - 图 (a) 的电路中，在开关断开瞬间，输出端会产生高压
 - 图 (b) 的电路中，在开关断开瞬间，输出端会产生高压



(a)



(b)

第 3 题

4. 如图所示，给某山村供电，需设计输电方案。现有用 220 V 和 11 kV 电压输电的两种意见。在输电线的材料、输送距离、输送电功率和线路损耗功率一定的情况下，如果用 11 kV 的电压输电，则使用横截面积为 16 mm^2 的输电线。那么，在用 220 V 电压输电时，所用同材质导线的直径应是多少？你认为哪一种方案更合适？

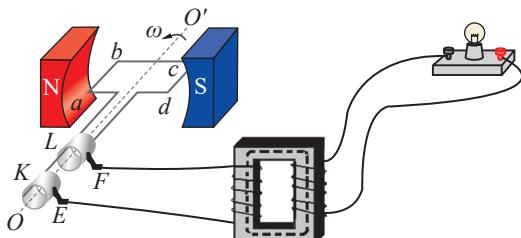


第 4 题

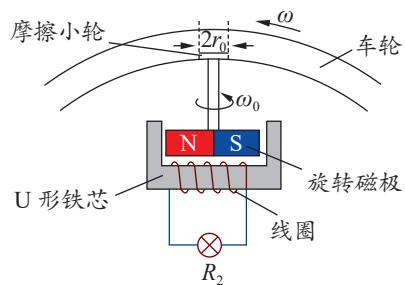
5. 交流发电机模型如图所示。 $n = 100$ 匝的矩形闭合导线框 $abcd$ 处于磁感应强度 $B = \frac{\sqrt{2}}{10\pi} \text{ T}$ 的水平匀强磁场中，线框面积 $S = 0.48 \text{ m}^2$ 。线框绕垂直于磁场的轴 OO' 以角速度 $\omega = 50\pi \text{ rad/s}$ 匀速转动，并与理想变压器相连，变压器副线圈接入一只额定电压 12 V 的灯泡，灯泡正常发光，线框、输电线路的电阻都不计。

- (1) 将图示时刻记为 $t=0$ ，写出电动势瞬时表达式；
- (2) 求变压器原、副线圈的匝数比。

*6. 一种自行车车头灯发电机的结构示意图如图所示。转动轴的一端装有一对随轴转动的磁极，另一端装有摩擦小轮。线圈绕在固定的 U 形铁芯上，自行车车轮转动时，通过摩擦小轮带动磁极转动，使线圈中产生正弦式交变电流，给车头灯供电。已知自行车车轮半径 $r = 35 \text{ cm}$ ，摩擦小轮半径 $r_0 = 1.00 \text{ cm}$ ，线圈匝数 $n = 800$ 匝，线圈横截面积 $S = 20 \text{ cm}^2$ ，总电阻 $R_1 = 40 \Omega$ 。磁极在线圈处产生的磁场可视为匀强磁场，其磁感应强度 $B = 0.01 \text{ T}$ ，车头灯电阻 $R_2 = 10 \Omega$ 。当车轮转动的角速度 $\omega = 8 \text{ rad/s}$ 时，车头灯中电流的有效值大约为多少？



第 5 题



第 6 题

科学辨析

7. 某发电厂原来用 11 kV 的交变电压输电，后来改用升压变压器将电压升到 220 kV 输电，输送的电功率都是 P 。若输电线路的电阻为 R ，下列说法是否正确？请阐述理由。

说法 1：根据公式 $I = \frac{P}{U}$ ，提高电压后输电线上的电流减小为原来的 $\frac{1}{20}$ 。



说法 2：根据公式 $I = \frac{U}{R}$ ，提高电压后输电线上的电流增大为原来的 20 倍。

说法 3：根据公式 $P_{\text{损}} = I^2 R = \frac{P^2}{U^2} R$ ，提高电压后输电线上的功率损失减小为原来的 $\frac{1}{400}$ 。

说法 4：根据公式 $P_{\text{损}} = \frac{U^2}{R}$ ，提高电压后输电线上的功率损失增大为原来的 400 倍。

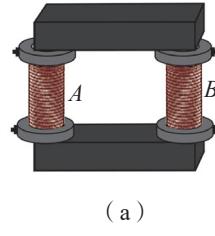
科学探究

8. 某教学用的可拆变压器如图 (a) 所示，它有两个外观基本相同的线圈 A、B，线圈外部还可绕线。

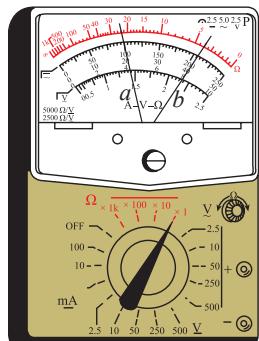
(1) 某同学用一多用电表的同一欧姆挡先后测量了线圈 A、B 的电阻值，指针分别对应图 (b) 中的 a、b 位置，若两线圈导线材料、横截面积相同，由此可推断线圈 _____ (选填“A”或“B”) 的匝数较多。

(2) 如果把它视为理想变压器，现要测定线圈 A 的匝数。提供的器材有一根足够长的绝缘导线、一只多用电表和低压交流电源。请简要叙述实验步骤：_____

_____ (写出要测的物理量，并用字母表示)；线圈 A 的匝数 $n_A = \frac{_____}{_____}$ (用所测物理量符号表示)。



(a)



(b)

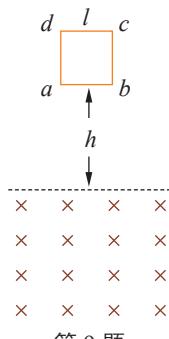
第 8 题

温故知新

9. 如图所示，有水平边界的匀强磁场的磁感应强度为 B ，下方磁场无限大。一个质量为 m 、边长为 l 、总电阻为 R 的正方形导线框 abcd，从磁场上方某处由静止开始下落。 ab 边刚进入磁场时，线框速度的大小为 v_1 。下落过程中，线框平面始终保持在同一个竖直面内， ab 边与磁场的水平边界线平行。在线框运动过程中，不计空气阻力。重力加速度大小为 g ，求：

- (1) 线框 ab 边与磁场上边界的距离 h ；
(2) 线框 ab 边刚进入磁场时，线框中感应电流的大小和方向；
(3) 若线框 cd 边刚要进入磁场时，线框的加速度大小为 $\frac{g}{4}$ ，方向竖直向下，试求此时线框速度 v_2 的大小。

10. 请根据第 2 章 (电磁感应及其应用) 和第 3 章 (交变电流与远距离输电) 的内容，结合你的理解，画出概念图。



第 9 题

单元自我检测

一、选择题（本题共5小题。在每小题给出的四个选项中，第1~3题只有一项符合题目要求，第4、5题有多项符合题目要求）

1. 如图所示，U形磁铁和矩形线圈均可绕竖直轴 OO' 转动。若线圈和转轴之间的摩擦不能忽略，从上向下看，当磁铁逆时针匀速转动时

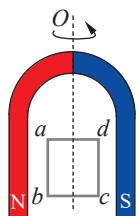
- A. 线圈将逆时针匀速转动，转速与磁铁相同
- B. 线圈将逆时针匀速转动，转速一定比磁铁转速小
- C. 从图示位置磁铁开始转动时，线圈 $abcd$ 中的感应电流的方向是 $a \rightarrow d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$
- D. 在磁铁不断转动的过程中，线圈 $abcd$ 中感应电流的方向不会改变

2. 如图所示，某同学把一个带铁芯的线圈、开关和电源用导线连接起来后，将一金属套环置于线圈上，且使铁芯穿过套环。闭合开关的瞬间，套环立刻跳起。另一同学另找来器材再探究此实验：他连接好电路，经重复试验，线圈上的套环均未动。对比前一位同学演示的实验，下列四个选项中，导致套环未动的原因可能是

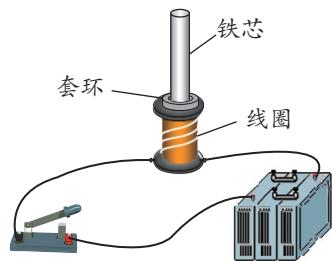
- A. 线圈接在了直流电源上
- B. 电源电压过高
- C. 所选线圈的匝数过多
- D. 所用套环的材料与前一位同学的不同

3. 在如图所示电路中， L 为电阻很小的线圈， G_1 和 G_2 为内阻较小、零点在表盘中央的电流计。当开关 S 闭合时，两表的指针都偏向右方；当 S 断开时，下列情形会出现的是

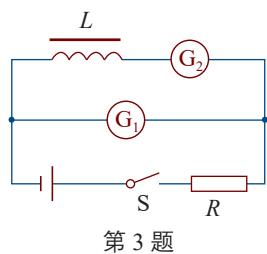
- A. G_1 和 G_2 的指针都立刻回到零点
- B. G_1 和 G_2 的指针都缓慢地回到零点
- C. G_1 的指针缓慢地回到零点； G_2 的指针先立刻偏向左方，然后缓慢地回到零点
- D. G_1 的指针先立刻偏向左方，然后缓慢地回到零点； G_2 的指针缓慢地回到零点



第1题

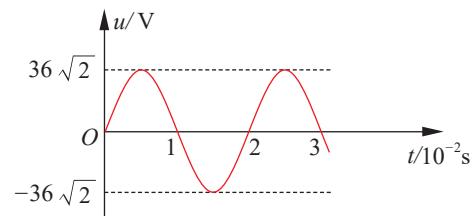
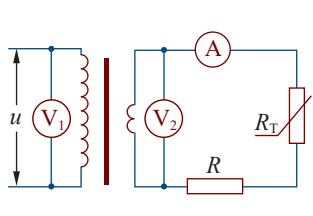


第2题



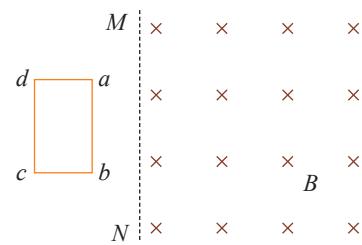
第3题

4. 如图 (a) 所示, 理想变压器原、副线圈的匝数比为 $4 : 1$; R_T 为热敏电阻, 其电阻随温度升高而变小, R 为定值电阻; 电压表和电流表均为理想交流电表, 原线圈接如图 (b) 所示的正弦交流电。下列说法正确的是



第 4 题

- A. 原线圈两端电压的瞬时值表达式为 $u = 36\sqrt{2} \sin 50\pi t$ V
 B. $t = 0.02$ s 时, 电压表 V_2 的示数为 9 V
 C. 变压器原、副线圈中的输入、输出功率之比为 $1 : 4$
 D. R_T 处温度升高时, 电流表的示数变大, 电压表 V_2 的示数不变
5. 如图所示, 纸面内有一矩形导体闭合线框 $abcd$ 。 ab 边长大于 bc 边长, 置于垂直于纸面向里、边界为 MN 的匀强磁场外。线框两次匀速完全进入磁场, 两次速度大小相同, 方向均垂直于 MN 。第一次 ab 边平行于 MN 进入磁场, 线框上产生的热量为 Q_1 , 通过线框导体横截面的电荷量为 q_1 ; 第二次 bc 边平行于 MN 进入磁场, 线框上产生的热量为 Q_2 , 通过线框导体横截面的电荷量为 q_2 , 则
- A. $Q_1 > Q_2$ B. $Q_1 = Q_2$
 C. $q_1 = q_2$ D. $q_1 > q_2$



第 5 题

二、非选择题

6. 请完成下面两个实验。

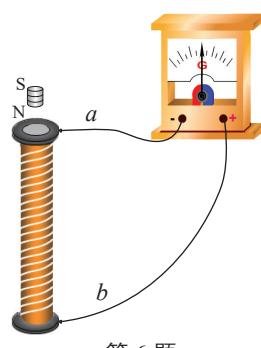
(1) 用如图所示的装置做“探究影响感应电流方向的因素”

实验。磁体从靠近螺线管的上方由静止开始下落, 当磁体运动到如图所示的位置时, 流过螺线管的感应电流方向从 _____ (选填“ a 到 b ”或“ b 到 a ”)。

(2) 为了完成“探究变压器原、副线圈电压与匝数的关系”

的实验, 必须选用的器材是 _____ (选填选项前的字母)。

- A. 有闭合铁芯的原、副线圈 B. 无铁芯的原、副线圈
 C. 交流电源 D. 直流电源
 E. 多用电表



第 6 题

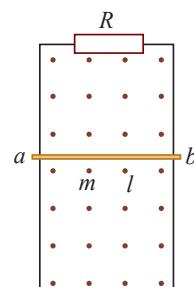
已知该变压器两组线圈的匝数分别为 $n_a = 60$ 、 $n_b = 120$ ，有关测量数据见下表。

U_a / V	1.80	2.80	3.80	4.90
U_b / V	4.00	6.01	8.02	9.98

根据测量数据可判断连接电源的线圈匝数是_____（选填“ n_a ”或“ n_b ”）。

7. 如图所示，竖直放置的 U 形导轨宽为 l ，上端接有电阻 R ，其余导体部分的电阻都忽略不计。磁感应强度为 B 的匀强磁场方向垂直于纸面向外。金属棒 ab 的质量为 m ，与导轨接触良好，不计摩擦。从静止释放后， ab 保持水平下滑。

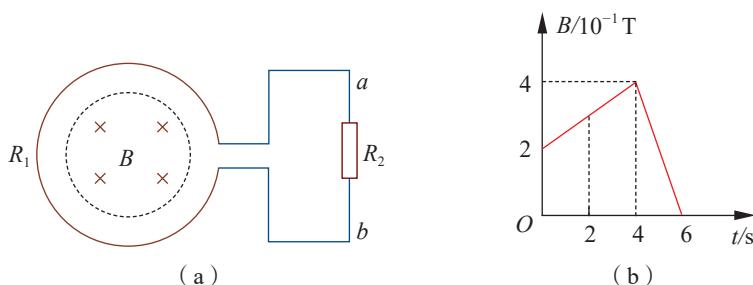
- (1) 判断金属棒 ab 在下滑过程中，棒中产生的感应电流的方向和棒受到的安培力的方向；
(2) 求金属棒 ab 下滑的最大速度 v_m 。



第 7 题

8. 如图 (a) 所示，一线圈匝数 $n = 2000$ ，横截面积 $S_1 = 400 \text{ cm}^2$ ，线圈电阻 $R_1 = 1 \Omega$ ，在线圈外接一个阻值 $R_2 = 4 \Omega$ 的电阻。在线圈内存在与线圈共轴的圆形磁场区域（虚线圆内），横截面积 $S_2 = 200 \text{ cm}^2$ ，该区域内磁场的方向垂直于线圈平面向里，磁感应强度 B 随时间 t 变化的规律如图 (b) 所示。求：

- (1) 在 $t_1 = 3 \text{ s}$ 、 $t_2 = 5 \text{ s}$ 时穿过线圈的磁通量；
(2) 在 $0 \sim 4 \text{ s}$ 和 $4 \sim 6 \text{ s}$ 内电路中感应电流的大小。



第 8 题



单元自我评价

回顾本单元的学业要求和所学内容，结合本次单元自我检测和平时学习情况进行自我评价，写一篇“单元自我评价”报告。说说你学会了什么、存在什么问题及今后努力的方向等。

第4章

电磁波



- 导 入 无处不在的电磁波
- 第1节 电磁波的产生
- 第2节 电磁波的发射、传播
和接收
- 第3节 电磁波谱

►►本章学业要求

●能初步了解麦克斯韦电磁场理论的基本思想，了解电磁振荡、电磁波、电磁波谱的内涵，知道电磁波的产生、传播和接收，知道场的统一性与多样性；能解释生产生活中与电磁波有关的现象，能说明人们对电磁波的应用。具有与电磁波相关的物质观念、相互作用观念和能量观念。

——物理观念

●能用电磁振荡解释电场能与磁场能的相互转化；能分析电磁波的产生、传播和接收等问题；能通过证据说明电场与磁场的相互转化；能从不同角度综合思考电与磁的问题。

——科学思维

●能根据实验现象及结果提出问题；能通过实验收集关于电磁波如何发射与接收的信息；能解释赫兹实验及电磁波的发射与接收；有主动与同学交流的积极性。

——科学探究

●能体会物理学对统一性的追求，能体会理论预言在科学发展中的作用，以及实验证据对新理论的支撑作用；能体会麦克斯韦电磁理论的基本思想，感受麦克斯韦电磁理论的美妙；能体会电磁波的应用对人类生活和社会发展的影响。

——科学态度与责任

导人

无处不在的电磁波

我们能在电视上欣赏到月球车“玉兔号”拍摄的月球表面的高清晰图片，能用智能手机查阅信息、通话、导航……这一切都要归功于电磁波。在我们周围，电磁波无处不在。天空中充满了各种电磁波，它们具有不同的频率，传递不同的信息。电磁波是怎样产生和发射的，又是怎样传播和接收的呢？



利用电磁波进行信息传递



利用电磁波烹制美味佳肴

除了传递信息，微波炉烹饪美味佳肴、医用CT机检查身体……都离不开电磁波。电磁波是一个大家庭，不同的成员有着怎样的特点？它们在生产生活中发挥着怎样的作用？

本章我们将了解电磁波的产生、发射、传播和接收的基本原理，以及电磁波谱的特点和其在生产生活中的作用。

第1节

电磁波的产生

向平静的水面抛一颗石子，水面会出现一圈圈凹凸相间的水波向外传播，这是机械振动形成的机械波。用什么方法可产生电磁波呢？本节我们将学习产生电磁波的原理和方法。

1. 麦克斯韦的预言

1820年，丹麦物理学家奥斯特发现了通电导线会使磁针偏转，揭示了电流的磁效应。1831年，英国物理学家法拉第发现电磁感应现象，表明磁也会“生电”。电与磁究竟有怎样的联系？

19世纪60年代，在总结法拉第等人电磁现象研究成果的基础上，英国物理学家麦克斯韦建立了完整的电磁场理论，精辟地揭示了电场与磁场之间的联系，预言了电磁波的存在，并提出了重要假设。

(1) 变化的磁场周围会产生电场

由法拉第电磁感应定律可知，穿过电路的磁通量发生变化时，电路中会产生感应电动势。为了解释感应电动势的存在，麦克斯韦提出假设：在变化的磁场周围会激发出一种电场——涡旋电场（也称感生电场，图4-1）。只要磁场发生变化，就有涡旋电场。如果磁场随时间均匀变化，则激发的涡旋电场是稳定的，即涡旋电场不随时间变化；如果磁场随时间不均匀变化，则激发的涡旋电场随时间变化。

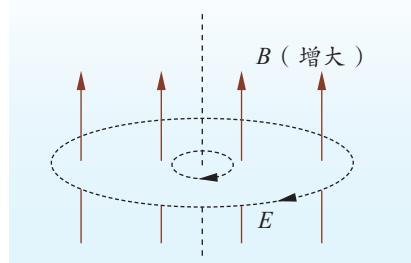


图4-1 变化的磁场产生涡旋电场示意图

(2) 变化的电场周围会产生磁场

奥斯特通过实验发现，电流的周围存在磁场，当时人们认为电流周围的磁场是由电荷定向运动产生的。从场的观点出发，麦克斯韦提出：电荷的定向运动导致周围电场的变化，电流周围的磁场是由变化的电场产生的。因此，麦克斯韦得出了这样一个推论：即使没有电流存在，只要空间某处的电场发生变化，也会在其周围产生磁场。

如图 4-2 所示，电容器在充电过程中，随着电荷的增加，电容器两极板间的电场发生变化，就会在周围产生磁场。如果电场随时间均匀变化，则激发的磁场是稳定的；如果电场随时间不均匀变化，则激发的磁场随时间变化。

根据麦克斯韦的理论可得出：交变的电场周围产生频率相同的交变的磁场，交变的磁场周围产生频率相同的交变的电场。交变的电场和交变的磁场相互联系在一起，就会在空间形成一个统一的、不可分割的电磁场。这种在空间交替变化并传播出去的电磁场就形成了**电磁波**（electromagnetic wave）。自然界存在许多不同频率的电磁波，它们都以光速在空间传播，可见光只不过是人眼可看得见的、频率范围很小的电磁波。

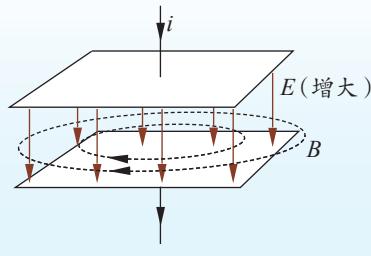


图 4-2 变化的电场产生
磁场示意图



科学书屋

涡旋电场、位移电流与麦克斯韦方程组的意义

涡旋电场与位移电流是麦克斯韦电磁场理论的两个核心概念。

涡旋电场是指变化的磁场在其周围空间激发出的电场。它不同于静电场，静电场的电场线起于正电荷，止于负电荷，涡旋电场的电场线是闭合曲线；静电场做功与路径无关，但涡旋电场做功与路径有关。

麦克斯韦认为，电流能激发磁场，电容器在两极间的电场发生变化时也能激发磁场，就好像两极间存在“电流”一样，他把这种“电流”称为位移电流。位移电流不是由电荷定向移动形成的电流，其本质是变化的电场，它可存在于真空、导体、电介质中，不会产生焦耳热，也不会产生化学效应。

麦克斯韦提出的涡旋电场和位移电流假说的核心思想是：变化的磁场可激发涡旋电场，变化的电场可激发磁场；电场和磁场不是彼此孤立的，它们相互联系、相互激发，组成一个统一的电磁场。麦克斯韦进一步将电场和磁场的所有规律综合起来，建立了完整的电磁场理论体系。这个电磁场理论体系的核心就是麦克斯韦方程组。从麦克斯韦方程组可预见电磁波的存在，确定电磁波的传播速度为光速，且光也是某种频率的电磁波。

牛顿的万有引力定律将力学体系完美统一起来，而麦克斯韦方程组则将电磁学完美统一起来。它所揭示出的电磁相互作用的完美统一，使物理学家相信物质的各种相互作用在更高层次上应该是统一的。



2. 赫兹实验

麦克斯韦提出电磁波的预言后，许多物理学家都持怀疑态度，因为人们无法检验麦克斯韦的预言。

1888年，德国物理学家赫兹注意到感应线圈高压电极间的空隙处有时会产生火花放电现象。他对这种放电现象进行了深入研究，第一次用实验证实了电磁波的存在。

赫兹实验的原理如图4-3所示。左边是电磁波发射器，其中A、B是两根金属杆，两端各带一个金属球，两球间有一很窄的间隙。感应线圈两端产生足够高的高压时，两金属球之间的空气被击穿，在两球间隙处产生火花放电。右边是接收器，即一个留有间隙的金属圆环，在间隙处环的两端也各带一个金属球。

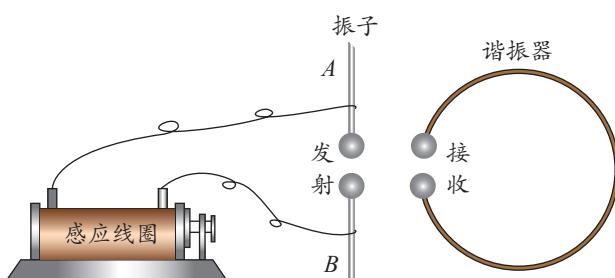


图4-3 赫兹实验原理示意图

赫兹观察到，当与感应线圈两极相连的金属球间有火花跳过时，环的间隙处也有火花跳过。当火花在A、B间跳动时，在周围空间激发出一个迅速变化的电磁场，按照麦克斯韦的理论，这种变化的电磁场以电磁波的形式在空间传播。当电磁波经过接收器时，导致接收器产生感应电动势，使接收器两球间隙处产生电压；当电压足够高时，两球之间就会产生火花放电现象，从而证明了电磁波的存在。

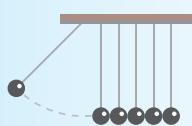
赫兹的实验证明了麦克斯韦的预言，为麦克斯韦的电磁场理论奠定了坚实的实验基础。

麦克斯韦电磁场理论的建立和实验证证是19世纪物理学领域最重大的事件之一。它全面地总结了电磁学研究的成果，在此基础上建立了完整的电磁场理论体系，并且科学地预言了电磁波的存在，从理论上预见了电磁波在真空中的传播速度等于光速，由此揭示了光、电、磁现象的内在联系及统一性，完成了物理学的又一次大综合。

3. 电磁振荡

电磁振荡能产生电磁波。什么是电磁振荡？下面我们先做一个关于电磁振荡的实验。





实验与探究

电磁振荡

按图 4-4 所示电路图连接电路，将开关拨到 1，给电容器充电。然后把开关拨到 2，注意观察灵敏电流计指针如何偏转。你能从中得到什么结论？

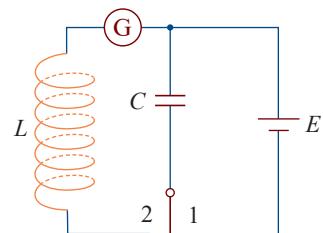


图 4-4 实验电路图

在上面的实验中我们看到，灵敏电流计的指针左右摆动，摆幅逐渐减小，最后指针停在零点位置。电流计指针的来回摆动，表明电路中产生了大小和方向都周期性变化的电流。这种大小和方向都周期性变化的电流称为**振荡电流** (oscillating current)；产生振荡电流的电路称为**振荡电路** (oscillating circuit)。由电感线圈 L 和电容器 C 所组成的电路就是一种基本的振荡电路，称为 **LC 振荡电路**。

在 LC 振荡电路中，已充电的电容器未放电时，电路中没有电流，电容器内电场最强。此时，电路的全部能量是电容器里存储的电场能 [图 4-5 (a)]。

闭合开关，电容器放电，其电荷量减少，由于线圈自感的阻碍作用，电流逐渐增大，磁场的磁感应强度与能量也逐渐增大。放电完毕时，电流最大，电场能全部转化为磁场能 [图 4-5 (b)]。

由于线圈的自感作用，线圈中的电流继续保持原来的方向并且逐渐减小，同时给电容器反向充电，电容器的电荷量逐渐增多，电场的强度与电场能逐渐增大，电流与磁场逐渐减弱。电流减为零时，磁场能全部转化为电场能 [图 4-5 (c)]。

此后，电容器又开始反向放电，两极板上电荷不断减少，电路中的电流逐渐增大，但电流方向与图 4-5 (b)

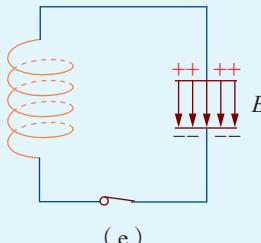
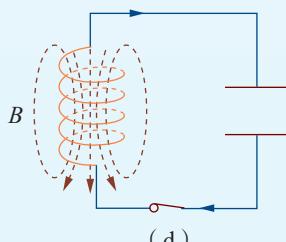
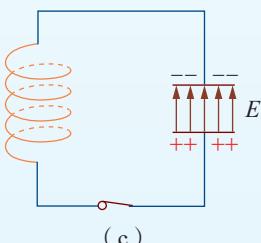
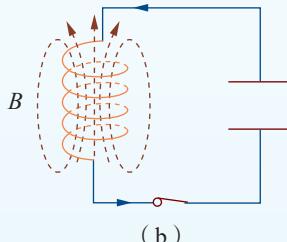
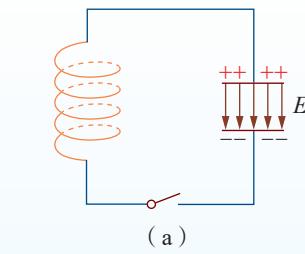


图 4-5 振荡电路中能量转化示意图



所示的电流方向相反。在此过程中，电场能逐渐转化为磁场能，放电完毕的瞬间，电场能又全部转化为磁场能〔图4-5(d)〕。由于线圈的自感作用，电流继续流动，电容器又被充电，磁场能又转化为电场能〔图4-5(e)〕。

上述过程周而复始地进行，就产生了方向和大小随时间做周期性变化的振荡电流，与振荡电流相联系的电场和磁场也周期性交替变化，电场能和磁场能相互转化。这种现象称为**电磁振荡** (electromagnetic oscillation)。

在实际的充、放电过程中，由于电感线圈和电路中存在电阻，电路中有能量损失，灵敏电流计指针摆动一会儿就停止。若不断地补充能量，就能在电路中持续产生大小和方向都随时间做周期性变化的电流，使存储于电容器中的电场能和电感线圈中的磁场能不断地相互转化。

与描述交变电流一样，我们可用周期和频率来表示电磁振荡变化的快慢。完成一次周期性变化的时间称为电磁振荡的周期，一段时间内完成周期性变化的次数与这段时间之比称为电磁振荡的频率。如果没有能量损失，也没有外界影响，这时电磁振荡的周期和频率称为振荡电路的固有周期和固有频率，简称振荡电路的周期和频率。大量的实验表明，振荡电路的周期是由振荡电路中电感线圈的自感和电容器的电容决定的。电感线圈的自感越大，电容器的电容越大，振荡电路的周期就越长。*LC*振荡电路的周期*T*与自感*L*、电容*C*的关系是

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

振荡电路的频率*f*与*L*、*C*的关系是

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

式中，周期(*T*)、自感(*L*)、电容(*C*)和频率(*f*)的单位分别为秒(s)、亨利(H)、法拉(F)和赫兹(Hz)。

只要改变*LC*电路中电感线圈的自感或者电容器的电容，就能改变振荡电路的周期和频率。

能初步了解麦克斯韦电磁场理论的基本思想，了解电磁振荡的内涵，知道场的统一性与多样性。

能体会物理学对统一性的追求，能体会理论预言在科学发展中的作用，以及实验证据对新理论的支撑作用；能体会麦克斯韦电磁理论的基本思想，感受麦克斯韦电磁理论的美妙。

——物理观念，科学态度与责任





谐振腔与石英晶体振荡器

LC 振荡电路中，可减小电感线圈的自感或电容器的电容，以此增大振荡频率。但频率超过 1 GHz 时，由分立元件组成的 *LC* 电路就不再有效。高频振荡可由谐振腔产生，谐振腔是矩形的金属盒，它可替代线圈和电容器的共同作用（图 4-6）。盒子的大小决定了振荡的频率。微波信号源、微波炉等就是通过这种谐振腔来产生微波的。

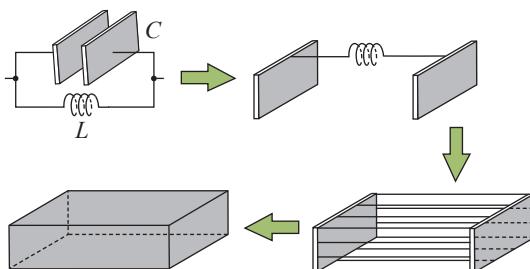


图 4-6 谐振腔可替代线圈和电容器示意图

除 *LC* 振荡电路外，石英晶体振荡器（图 4-7）也能产生振荡电流。石英晶体有一种称为压电效应的特性：当在石英晶体的两侧加上电压时，它就会发生形变；反之，当晶体发生形变时，在相应的方向上也会产生电压。若在石英晶体的两侧施加交变电压，石英晶体就会产生机械振动，同时晶体的振动又会产生交变电压，从而形成振荡电流。石英晶体振荡器的振荡频率非常稳定，被广泛应用于计算机、手表、遥控器等设备中。

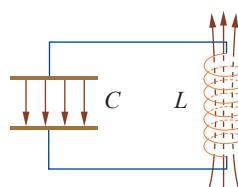


图 4-7 USB 闪存盘中的石英晶体振荡器



练习

- 根据麦克斯韦的电磁场理论，变化的磁场周围会产生电场，均匀变化的磁场产生稳定的电场。根据法拉第电磁感应定律，说明为什么均匀变化的磁场产生的电场是稳定的。
- 在某时刻的 *LC* 振荡电路中，电容器中的电场方向和线圈中的磁场方向如图所示。此时电容器在充电还是放电？电路中电流在增大还是减小？为什么？



第 2 题





3. 减小 LC 振荡电路的振荡周期，可行的办法有

- A. 固定电感 L ，增大电容 C
 - B. 固定电感 L ，减小电容 C
 - C. 电感 L 和电容 C 都增大
 - D. 电感 L 和电容 C 都减小
4. 一台收音机的 LC 调谐电路由电感线圈和可变电容器组成，可变电容器电容的变化范围是 $30\sim 300\text{ pF}$ ，调谐电路能接收的电磁波的最小频率是 550 kHz ，已知光速 $c=3\times 10^8\text{ m/s}$ ，求它能接收的电磁波的最大频率和最小波长。
5. 打开收音机的开关，转动选台旋钮，使收音机收不到电台的广播，然后开大音量。接着，按照如图所示的方式，在收音机附近将电池盒的两根引线反复碰触，你会听到收音机中发出“咔咔咔”的响声。为什么会产生这种现象？
6. 请查询资料，结合牛顿万有引力定律和麦克斯韦电磁场理论，谈一谈你是怎样体会物理学发展过程中对统一性的追求的。写出你的体会，并与大家分享。



第5题

请提问



第2节

电磁波的发射、传播和接收

人们用手机通话、看视频，通过电视欣赏丰富多彩的电视节目……这些都离不开电磁波。那么，电磁波是怎样发射的，又是怎样传播和接收的呢？本节我们将学习电磁波发射、传播和接收的方式。

1. 电磁波的发射

下面让我们通过实验来了解电磁波是如何发射的。



实验与探究

电磁波的发射

(1) 将感应线圈的低压端、6 V 直流电源、开关连接成闭合回路，感应线圈高压端分别连接到金属杆 A、B 上（图 4-8）。

(2) 闭合开关，感应线圈工作，由远及近地把金属杆 C、D 向 A、B 移动，直至看到氖管发光。观察氖管亮度随 C、D 与 A、B 之间距离的变化。

根据上述实验现象，你认为影响电磁波发射的因素可能有哪些？

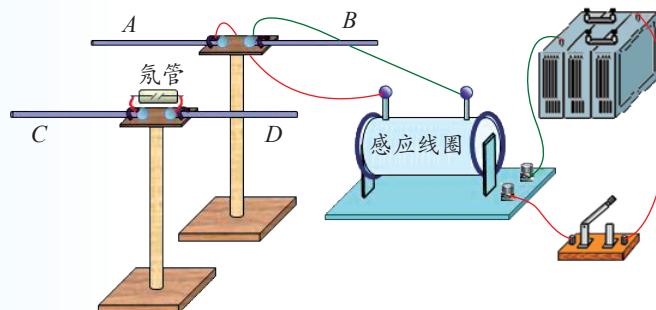


图 4-8 电磁波发射装置示意图





大量实验研究表明，在 LC 振荡电路中，电容器极板间的距离很小，电路中的电场几乎都集中在电容器两极板间，磁场主要集中在电感线圈内，周围空间的电磁场较弱，向外辐射的电磁能量很少，不利于电磁波的发射。为了有效地发射电磁波，振荡电路必须满足两个条件：振荡频率足够高；电场、磁场尽可能分布到较大的空间。

为了满足以上要求，可减小电容器的极板面积，增大极板间距，使电容器变成两条长的直导线，一条深入高空成为天线，另一条接入地下成为地线，形成**开放电路**（图4-9）。

LC 振荡电路通常采用如图4-10所示的感应耦合法。由电容 C 、电感 L_2 构成振荡电路产生的高频振荡电流，通过 L_2 与 L_1 的电磁感应，使线圈 L_1 中产生同频率的振荡电流，传送到发射天线，在天线四周的空间产生电磁波。

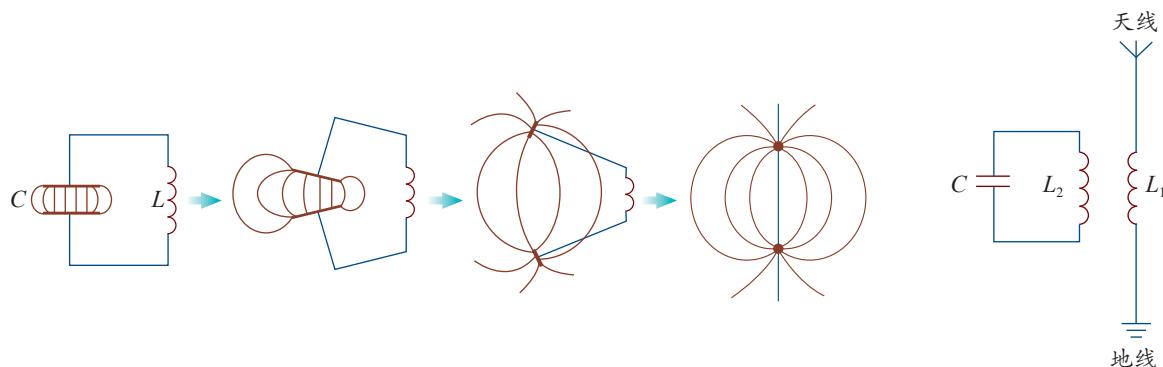
图4-9 LC 振荡电路由闭合回路演变为开放电路示意图

图4-10 感应耦合法示意图

声音、图像等信号要传送出去，首先要将它们转变成电信号。这种电信号频率很低，很难直接向空间发射，必须把低频的电信号“加载”到高频等幅振荡电流上，再发射出去。把低频电信号加载到高频等幅振荡电流上称为调制，常用的调制方式有调幅和调频两种。调幅就是使电磁波的振幅随信号改变，频率始终保持不变〔图4-11(a)〕。调频就是使电磁波的频率随信号而改变〔图4-11(b)〕。与调幅广播相比，调频广播抵抗干扰的能力比较强，在传递过程中的失真较小。

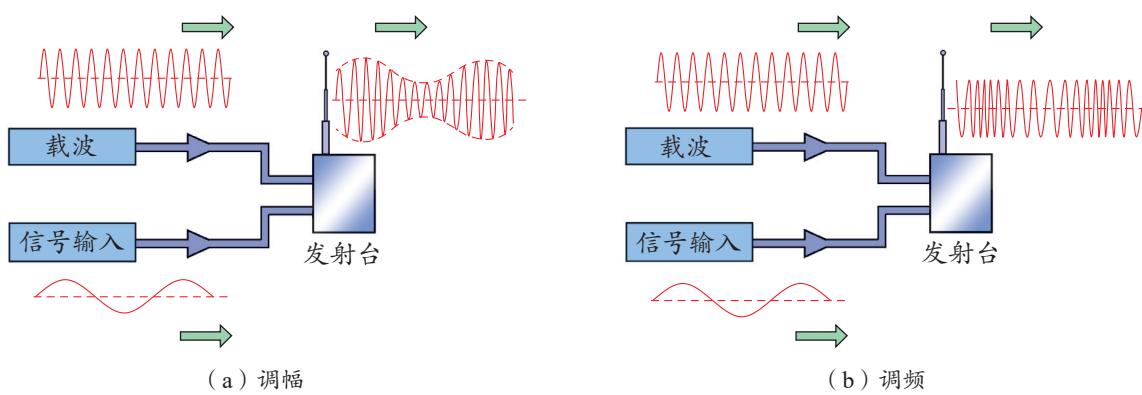


图4-11 调幅和调频示意图

2. 电磁波的传播

波长不同的电磁波有不同的传播特性，这里只介绍无线电波的传播。无线电波通常有三种传播途径：地波、天波和空间波（图 4-12）。

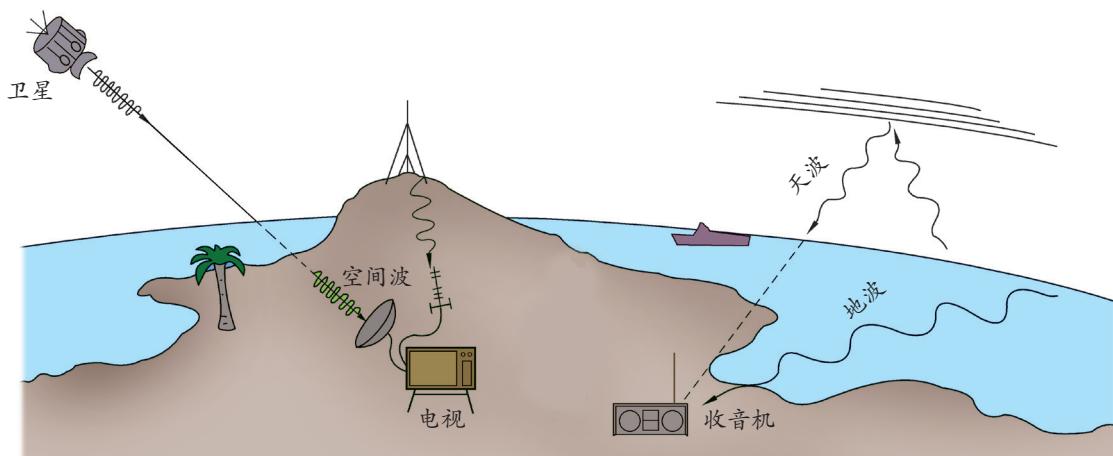


图 4-12 电磁波三种传播途径示意图

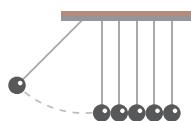
地波 沿地球表面空间传播的无线电波。在无线电技术中，通常采用地波的形式传播长波、中波和中短波。因为地球表面有高低不平的山峰、房屋和树木等障碍物，所以无线电波要绕过这些障碍物才能被接收机接收。当波长与这些障碍物的尺寸相当时，波可以绕过障碍物继续传播。长波能很好地绕过它们，传播比较远的距离；中波和中短波也能较好地绕过障碍物，但能量损失较多。因此，中波段的收音机只能收听到本地或附近省市的电台。短波和微波的波长过短，绕过障碍物的能力很差，不宜采用地波的形式传播。

天波 靠大气中电离层的反射传播的无线电波。电离层对电磁波的反射和吸收与频率有关，频率越高，吸收越少；频率越低，吸收越多。因此，短波最适合采用天波的形式传播。因为电离层容易受到太阳辐射的影响而发生变化，造成反射的天波时强时弱，所以从收音机听到的声音忽大忽小，不够稳定。

空间波 像光束那样沿直线传播的无线电波。这种传播方式适用于超短波和微波通信。发射天线越高，空间波传播得越远，因此电视发射天线和电视接收天线应尽量架得高一些。尽管如此，空间波的传播距离仍受到地球表面弯曲的限制。由于超短波能穿透电离层，我们可利用空间波与发射到遥远太空去的宇宙飞船、人造卫星等取得联系。此外，卫星中继通信、卫星电视转播等也主要以空间波为传输途径。

3. 电磁波的接收

怎样才能有效地接收电磁波，并将其中的信号还原呢？下面我们通过实验进行探究。



实验与探究

电磁波的接收

- (1) 按图 4-13 安装及摆放仪器。
 - (2) 给图 4-13 (a) 装置中的莱顿瓶充电，使两金属球开始放电。
 - (3) 移动图 4-13 (b) 装置矩形线框中带氖管的金属滑杆，你会发现什么？
- 请思考：为什么图 4-13 (b) 装置中的氖管能够发光？

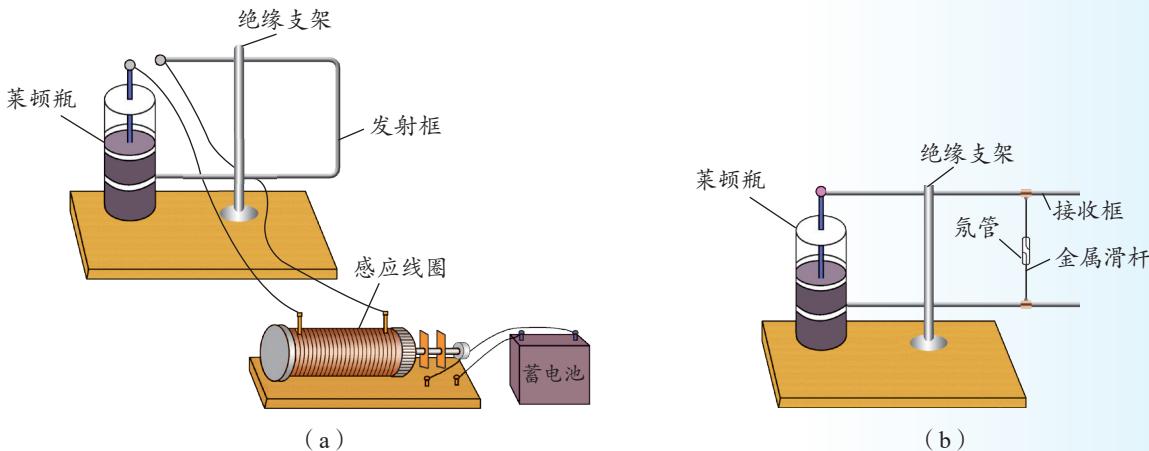


图 4-13 电磁波发射与接收实验装置示意图

在上述实验中，两个莱顿瓶是相同的，它们的电容相同；滑动接收框上的金属滑杆，使两个矩形线框的面积相同，它们的电感也相同。这时，两个电路的振荡频率相同，电磁波会使接收电路中产生最强的电流，氖管最亮。这种现象称为**电谐振现象**，与机械振动中的共振现象类似。

在无线电技术中，对空间存在的各种频率的电磁波，需要选择某一种特定的频率接收，这个选择过程称为**调谐**。调谐的基本原理就是电谐振。

调节谐振电路，使它的固有频率与要接收的电磁波频率相同，就产生了电谐振，此时电路中激起的电流最大。而其他频率的电磁波在这个电路中激起的电流很小，甚至可完全忽略，这样就把需要的无线电波有选择地接收下来。

能进行调谐的接收电路称为调谐电路，各种接收无线电波的设备都有调谐电路。调谐电路有很多种，其中一种是 LC 调谐电路，它的主要部分由电感线圈 L 和可变电容器 C 组成（图 4-14）。改变电容器接入电路的电容，使 LC 回路的固有频率与要接收的电磁波的频率相等，就可接收所需要的电磁波了。

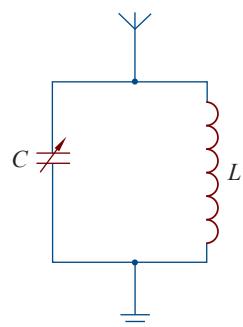


图 4-14 LC 调谐电路





检 波

由调谐电路接收到的感应电流是经过调制的高频振荡电流。如果把这个信号电流直接输入耳机，并不能收听到电台的播音，还需要从高频载波中把音频信号“检”出来，这一过程称为检波，是调制的逆过程，也叫解调。图 4-15 是晶体二极管检波电路。晶体二极管具有单向导电性，高频振荡电流 [图 4-16 (a)] 通过它就变成单向脉动电流，这个单向脉动电流既含有高频成分，又含有低频的音频成分 [图 4-16 (b)]。由于电容器具有“通高频、阻低频”的作用，高频成分基本上从电容器 C_2 通过，剩下的音频电流 [图 4-16 (c)] 通过耳机，使耳机的振动片随信号振动而发声。

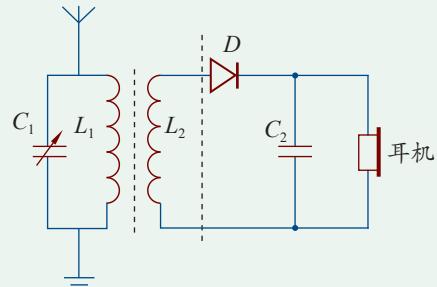


图 4-15 晶体二极管收音机电路

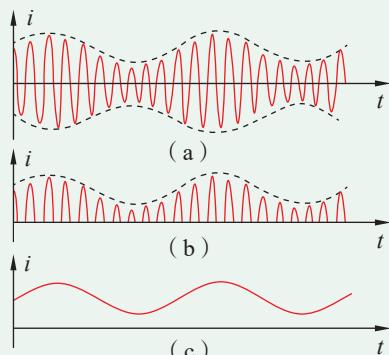


图 4-16 检波前后的电流变化



节 练 习

- 发射电磁波时为什么要使用开放电路？
- 无线电波通常的传播途径有哪几种？它们的传播过程有何区别？
- 收音机选台时，如果调谐不准就会出现“串台”现象，这是为什么？
- 某调谐电路的可变电容器的动片从完全旋入到完全旋出，仍接收不到某较高频率电台发出的信号。要收到该电台的信号，应采用的方法是

A. 增加调谐电路中线圈的匝数	B. 加大电源电压
C. 减少调谐电路中线圈的匝数	D. 减小电源电压
- 电视机的室外天线能把电信号接收下来，原因是

A. 天线处于变化的电磁场中，产生的电流输送给 LC 回路
B. 天线只处于变化的电场中，产生的电流输送给 LC 回路
C. 天线只是有选择地接收某电台信号，而其他电台信号则不接收
D. 天线将电磁波传输到电视机内

第3节

电磁波谱

电磁波的范围很广，我们熟悉的可见光、X射线、红外线、紫外线都属于电磁波。这些电磁波的频率不同，它们各有怎样的特点？本节我们首先从整体上认识电磁波谱，再了解电磁波谱中各波段的应用。

1. 认识电磁波谱

电磁波包括无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线、 γ 射线等，把这些电磁波按波长或频率顺序排列起来，就构成了电磁波谱（图4-17）。电磁波谱中的各种波有一定的波长范围，它们都具有反射、折射、衍射和干涉的特性；它们在真空中的传播速度均等于光速。

图4-17展示了各波段电磁波波长的大致范围及其应用案例。

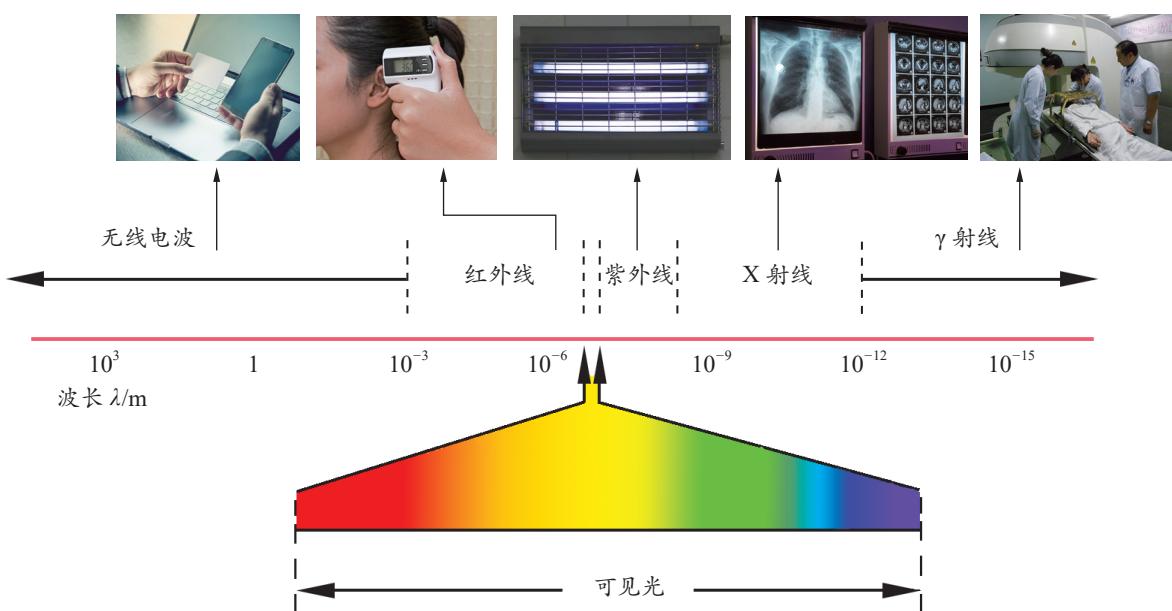


图4-17 不同波段电磁波波长的大致范围及其应用案例

由电磁波谱可看出，可见光是整个电磁波谱中极为狭窄的一段，波长范围为 $4.0 \times 10^{-7} \sim 7.6 \times 10^{-7}$ m，颜色依次为紫、靛、蓝、绿、黄、橙、红。它们之间并没有明显的界限，而是逐渐由紫转为红，紫光的波长最短，红光的波长最长。白光是由不同颜色（波长）的光按一定比例形成的混合光，当白光通过三棱镜时，就会分成不同颜色的光。

红外线的波长比红光的波长要长，一般为 $7.6 \times 10^{-7} \sim 10^{-3}$ m。它的热效应明显。紫外线的波长比紫光的波长短，一般为 $10^{-8} \sim 4.0 \times 10^{-7}$ m。在紫外线的照射下，有些物质会发出荧光。

无线电波的波长最长。无线电波通常是由电磁振荡电路通过天线发射出去的。无线电波按波长的不同被分为长波、中波、短波、微波等波段。

电磁波谱中，X射线和γ射线的波长相比其他波较短。X射线的波长范围为 $10^{-12} \sim 10^{-8}$ m。

电磁波谱中各波段主要是按照产生机理和探测的方式不同划分的。随着科学技术的发展，各波段已冲破界限与相邻波段重叠。例如，X射线的一部分已与紫外线重叠，另一部分也与γ射线重叠。

2. 不同波段电磁波的应用

(1) 无线电波的应用

不同波段内的无线电波具有不同的传播特性。频率越低，传播损耗越小，覆盖距离越远；频率越高，传播损耗越大，覆盖距离越近。

长波波长的范围为 $30\ 000 \sim 3\ 000$ m，频率范围为 $0.01 \sim 0.1$ MHz，主要用于调幅广播及航海导航；中波波长的范围为 $3\ 000 \sim 50$ m，频率范围为 $0.1 \sim 6$ MHz，主要用于调幅广播及通信；短波波长的范围为 $50 \sim 10$ m，频率范围为 $6 \sim 30$ MHz，主要用于远距离短波通信及调幅广播；微波波长的范围为 $10 \sim 0.001$ m，频率范围为 30 MHz ~ 300 GHz，主要用于调频广播、电视、卫星导航和雷达（图4-18），微波炉可利用高功率的微波对食物进行加热。

(2) 红外线和紫外线的应用

1800年，英国天文学家赫歇尔（W. Herschel，1738—1822）在研究光的温度时发现了红外线。从此，人们开始应用这种具有明显热效应的电磁波来加热物体，如使用红外线



图4-18 雷达



烤箱、红外线炉烹饪食物等。人们还利用红外线可使特制底片感光的性质，制成了红外摄影仪、红外遥感器等。

紫外线能使很多物质发出荧光，很容易让底片感光。当适量的紫外线照射人体时，能促使人体合成维生素D，可预防佝偻病。但是，过量的紫外线则会对人体造成伤害，因此我们在日常生活中要注意防护。大气中的氧气和高空中的臭氧层对紫外线都有很强的吸收作用，能吸收掉太阳光中的大部分紫外线，使地球上的生物免受紫外线的伤害。紫外线还具有杀菌作用，如医院常常利用紫外线进行消毒，人们经常在太阳下晾晒被褥等，都是利用了紫外线的这一特性。银行则利用紫外线灯鉴别钞票的真伪。

人们发明了一些特殊的仪器来探测红外线和紫外线。图4-19是用特殊照相机拍摄的花朵在可见光、红外线、紫外线照射下的照片。



(a) 可见光



(b) 红外线



(c) 紫外线

图4-19 用特殊照相机拍摄的花朵的照片



气象卫星

气象卫星装有可见光和红外辐射仪、微波辐射仪等观测气象的遥感仪器。它就像一座运行在太空的气象站，可探测到地球上任何地区的气象信息（图4-20），并能迅速将气象资料传送到地面气象卫星中心和各地的接收站，及时作出天气预报。气象卫星分为太阳同步极地轨道气象卫星和地球同步卫星两类。

在气象预测过程中，卫星云图的拍摄方式有两种，一种是借助地球上物体对太阳光的反射拍摄的可见光云图，另一种是借助地球表面物体和大气层的热辐射拍摄的红外云图。

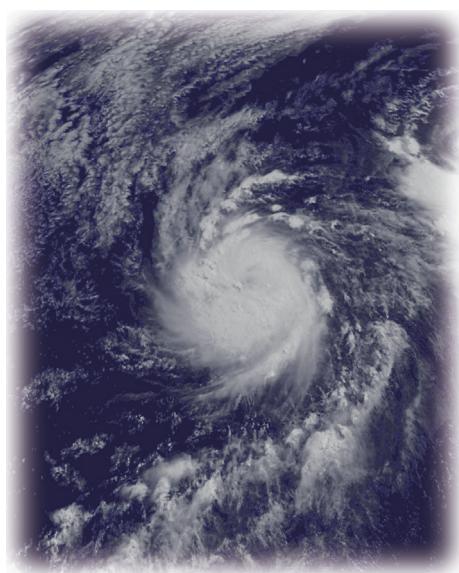


图4-20 卫星云图



(3) X射线和 γ 射线的应用

X射线的穿透力较强，在医学上常用X光照片辅助进行疾病诊断（图4-21）。但长期暴露在X射线下，会对人体造成很大的伤害，如导致自主神经功能紊乱、造血功能低下，甚至诱发肿瘤等。

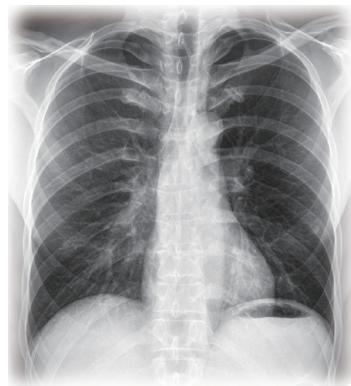


图4-21 利用X射线进行疾病诊断

γ 射线是从原子核内发出来的电磁波，一般的放射性物质或原子核反应都能辐射出 γ 射线。 γ 射线的能量较高，穿透力很强，对生物的破坏力很大。医学上常用 γ 射线来杀死癌细胞。 γ 射线进入人体内部，会干扰人体内正常的化学过程，甚至可使细胞死亡。

能了解电磁波、电磁波谱的内涵，知道电磁波的产生、传播和接收；能解释生产生活中与电磁波有关的现象，能说明人们对电磁波的应用。具有与电磁波相关的物质观念、相互作用观念和能量观念。

能体会电磁波的应用对人类生活和社会发展的影响。

——物理观念，科学态度与责任

素养提升



节练习

- 红外线在现代生产生活中有着广泛的应用。请举例说明。
- 关于电磁场和电磁波，下列说法正确的是
 - 把带电体和永磁体放在一起，可在其周围空间中产生电磁波
 - 手机、电视、光纤通信都是通过电磁波来传递信息的
 - 医院中用于检查病情的“B超”是利用了电磁波的反射原理
 - 车站、机场安全检查时“透视”行李箱的安检装置利用的是红外线



3. 下列说法正确的是

- A. 北斗导航系统利用电磁波进行定位和导航
- B. 微波炉利用红外线的热效应快速加热食物
- C. 常用的电视机遥控器通过发出紫外线脉冲信号来遥控电视机
- D. 红外线探测器通过接收物体发出的红外线来探测被测物体的特征

4. 某微波炉使用波长 $\lambda = 12 \text{ cm}$ 的微波，这种微波的频率是多少？

5. 某地的雷达站正在跟踪一架向雷达站匀速飞来的飞机。设某一时刻从雷达发出电磁波到再接收到反射波历时 $t_1 = 200 \mu\text{s}$ 。经 $t = 4\text{s}$ 后又发出一个电磁波，从发出电磁波到再接收到反射波历时 $t_2 = 186 \mu\text{s}$ 。求该飞机的飞行速度 v 。

请提问





章末练习

科学认知

1. 无线电波有哪些传播途径？这些途径分别适用于传播什么波段的无线电波？

2. 要想提高电磁振荡的频率，下列办法可行的是

- A. 在线圈中插入铁芯
- B. 增大电容器两极板间的距离
- C. 提高充电电压
- D. 增大电容器两极板间的正对面积

3. 我国航天员翟志刚通过“神舟七号”载人飞船首次实现了中国航天员在太空的舱外活动，如图所示，这是我国航天史上的又一里程碑。若舱外的航天员与舱内的航天员进行通话，则需通过

- A. 直接对话
- B. 紫外线
- C. 红外线
- D. 无线电波



第3题

4. 各种不同频率范围的电磁波按频率由高到低的顺序排列，正确的是

- A. γ 射线、紫外线、可见光、红外线
- B. γ 射线、红外线、紫外线、可见光
- C. 紫外线、可见光、红外线、 γ 射线
- D. 红外线、可见光、紫外线、 γ 射线

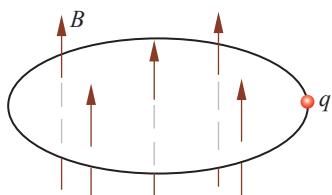
5. 关于电磁波，下列说法正确的是

- A. 电磁波在真空中的传播速度与电磁波的频率无关
- B. 周期性变化的电场和磁场可相互激发，形成电磁波
- C. 利用电磁波传递信号可实现无线通信，但电磁波不能通过电缆、光缆传输
- D. 电磁波可由电磁振荡产生，若波源的电磁振荡停止，空间的电磁波随即消失

6. 英国物理学家麦克斯韦认为，磁场变化时会在空间激发涡旋电场。如图所示，一个半径为 r 的绝缘细圆环水平放置，

环内存在竖直向上的匀强磁场，环上套一电荷量为 q 的带正电的小球。已知磁感应强度 B 随时间均匀增加，其变化率为 k 。若小球在环上运动一周，则涡旋电场对小球的作用力所做的功的大小是

- A. 0
- B. $\frac{1}{2}r^2qk$
- C. $2\pi r^2qk$
- D. πr^2qk



第6题



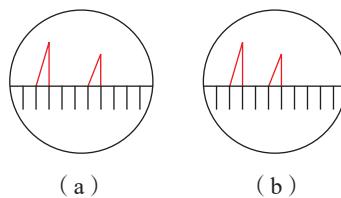


科技交流

7. 通过调研，列举家用电器和生活用品中与红外线、紫外线应用有关的实例。了解这些产品应用红外线、紫外线的原理，完成一篇调研报告。

温故知新

8. 雷达在发射和接收电磁波时，在荧光屏上分别呈现出一个尖形波。某型号防空雷达相邻两次发射电磁波的时间间隔为 5×10^{-4} s。雷达监测到一目标正向其匀速飞来，(a) (b) 两图是雷达跟踪该目标时雷达监视屏上显示的波形图像，两图间隔的时间为 30 s。已知雷达监视屏上相邻刻线间间隔的时间为 10^{-4} s，电磁波在空气中的传播速度为 3×10^8 m/s，求被监视目标飞行的速度。



第 8 题



我的学习总结



第5章

传 感 器

及 其 应 用

导 入 从“芝麻开门”说起

第1节 常见传感器的工作原理

第2节 科学制作：简单的自动
控制装置

第3节 大显身手的传感器

►►本章学业要求

●能了解常见传感器的工作原理，知道非电
学量转换成电学量的技术意义；能解释传
感器在生产生活中的应用。具有与传感器
相关的运动与相互作用观念。

——物理观念

●能尝试将实际问题中的对象与过程转换成
物理模型；能分析传感器中非电学量转换
成电学量的原理；能用证据说明光敏元件、
热敏元件和霍尔元件的作用；能对一些传
感器提出改进措施。——科学思维

●能完成“利用传感器制作简单的自动控制
装置”的物理实验。能针对真实情境提
出与实验有关的物理问题，能对一些传
感器设计提出质疑；能阐述实验原理，设计
实验方案和实验步骤，能动手制作简单的
自动控制装置；能用证据说明自制自动控
制装置的优势与问题；能撰写研究报告，
在报告中能呈现实验原理、实验方案、实
验步骤、实验表格、数据分析过程及实验
结论，能提出改进措施，能与他人分享制
作成果。——科学探究

●能体会传感技术的应用给人类社会带来的
挑战；有较强的将所学内容应用于日常生
活实际的热情；认同物理的技术应用应考
虑道德与规范的要求，能认识传感技术应
用与人类社会发展的关系。

——科学态度与责任



导人

从“芝麻开门”说起

“芝麻开门”的故事反映了人们对某种神奇力量的憧憬。随着科学技术的发展，“芝麻开门”已不再是神话。只要朝自动门走过去，大门就会自动打开。



人走近时，门会自动打开



手靠近时，热风会自动吹出

这种神奇的力量越来越多地出现在我们的生活中：洗完手，将手靠近干手机，热风会自动吹出，手离开干手机，它又会自动关闭；当你走近过道的声控灯时，它会自动亮起，离开后它又会自动熄灭……这神奇的力量来自何处呢？原来它与传感器密切相关。

小小的传感器给我们的生产生活带来了方便与舒适。传感器是如何工作的？它是如何给人们带来方便的？本章我们将一起来探究这些问题。

第1节

常见传感器的工作原理

传感器的功能很神奇。什么是传感器？传感器是怎样实现那些神奇的功能的？本节，我们将从大家熟知的现象入手，认识传感器，了解它的工作原理。

1. 初识传感器

下面让我们先看看与传感器相关的几个实例。

要辨别西瓜的成熟程度，可用手敲击西瓜，听它发出的声音。然而，仅依靠听觉判断是难以把握的。能否用测量仪器来代替人耳，准确地判断西瓜的成熟程度呢？

我们可做这样的实验：把麦克风靠近西瓜，并将麦克风的输出端接入计算机（图 5-1）。敲击西瓜，麦克风能将接收到的声音信号转化为电信号，传输给计算机。计算机通过对信号的处理，就可显示声音的波形（图 5-2）。利用这种方法可设计一种判断西瓜成熟程度的仪器。

在显示和分析声音波形的过程中，麦克风就起到了传感器的作用。麦克风感受声音信号，然后把声音信号转化为电信号。不容易测量的声音信息通过麦克风转化并被计算机处理，便能被准确测量。

以前我们常用杆秤等工具称量物体，需要利用刻度读取数据。现在的电子秤能直接用数字显示物体的质量，非常方便。当我们把重物放在电子秤上时，称重传感器受到压力，并将受到压力大小的信息转化为电信号。通过对电信号的处理，电子秤就能用数字显示出物体的质量了（图 5-3）。

像这种能感受外界信息，并将其按照一定的规律转换成可用输出信号（主要是电信号）的器件或装置，我们称之为**传感器**（sensor）。如果把计算机比喻为人的大脑，传

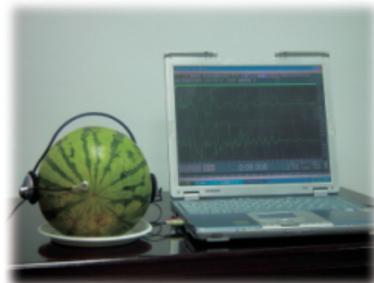


图 5-1 测量敲击西瓜发出的声音

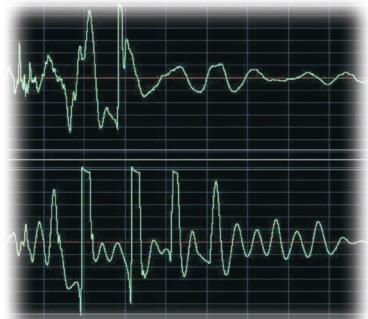


图 5-2 敲击成熟度不同的西瓜时发出声音的波形不同



图 5-3 电子秤



传感器则可比喻为人的感觉器官。

传感器通常应用在自动测量和自动控制系统中，担负着信息采集和转化任务。与压力、位移、流量、温度、浓度等非电学量相比，电压、电流、电阻等电学量更加便于仪表显示和用于自动控制，因此传感器通常需要把非电学量转化为电学量。

比如，在计算机电源内部，应用热传感器（热敏电阻，图 5-4）把探测到的温度信号转化为电信号，通过对电信号的处理，能自动控制散热风扇的转速，保持电源内部温度均衡。监测火警的烟雾传感器在烟雾浓度达到一定程度时，能输出电信号，使警铃发声或使红灯闪烁，自动报警。

传感器主要由敏感元件和转换元件组成（图 5-5）。敏感元件直接感受被测的量，并输出与被测的量有确定关系的信号。转换元件将敏感元件输出的物理信号转换为便于显示、记录、处理和控制的电信号。

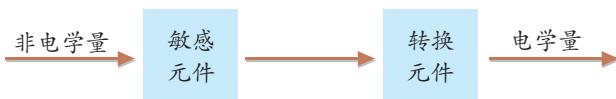


图 5-5 非电学量转换为电学量示意图

2. 敏感元件

敏感元件是传感器的核心部分，是利用材料的某种敏感效应（如热敏、光敏、压敏等）制成的。下面我们介绍几种常用的敏感元件。

(1) 光敏元件

光敏电阻是一种典型的光敏元件，广泛应用于光敏传感器中。下面我们通过实验来观察光敏电阻的特性。



实验与探究

观察光敏电阻的特性

- (1) 将光敏电阻与欧姆表按图 5-6 连成电路。
- (2) 将光敏电阻受光面置于有光线照射的地方，观察欧姆表的读数，记录光敏电阻的阻值。



图 5-4 计算机内部的热传感器

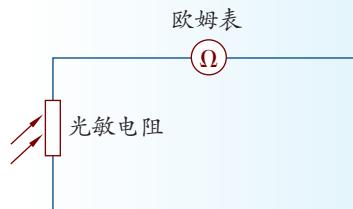


图 5-6 观察光敏电阻特性的电路



(3) 用黑纸片将光敏电阻的透光窗口遮住, 移动黑纸片, 使光敏电阻接收到的光线出现稍暗、较暗、最暗几种情况, 观察这几种情况下光敏电阻阻值的变化, 并把相应的阻值记录下来。

当光照由强变弱时, 光敏电阻的阻值如何变化?

光敏电阻是用金属硫化物等半导体材料制成的。当光照射到这些半导体物质上时, 会激发半导体内部受束缚的电子, 其电阻值就会发生改变。光照越强, 被激发的电子数就越多, 电阻值就越小。不受光照射时, 其电阻值是受光照射时的 $100 \sim 1000$ 倍。例如, 某一型号的光敏电阻, 受光照射时的阻值为 $2\text{ k}\Omega$, 不受光照射时的阻值为 $1000\text{ k}\Omega$ 。图 5-7 是一种光敏电阻。

光敏元件除光敏电阻外, 还有光敏晶体管、光电池等。与光敏电阻相似, 它们都是利用某些物质在光照射下电学特性随之变化的特性制成的。

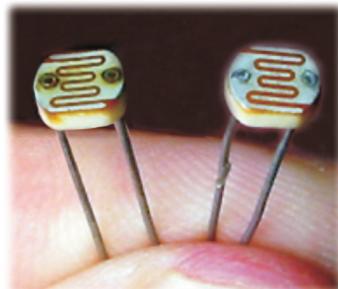


图 5-7 一种光敏电阻



科学书屋

一种简易水污染监测器

用光敏电阻制成的光敏传感器有许多用处。例如, 一种简易的监测水中悬浮颗粒污染程度的监测器就利用了光敏电阻的特点(图 5-8)。被污染的水中常含有悬浮的颗粒, 它们会影响光的通过。当光穿过水照到光敏电阻上时, 到达光敏电阻的光量与水的污染程度有关(图 5-9)。当水污染严重时, 光敏电阻受光量很小, 电阻很大, 指示灯不亮; 当水污染不严重时, 光敏电阻的受光量大, 电阻小, 指示灯变亮。



图 5-8 监测悬浮颗粒污染

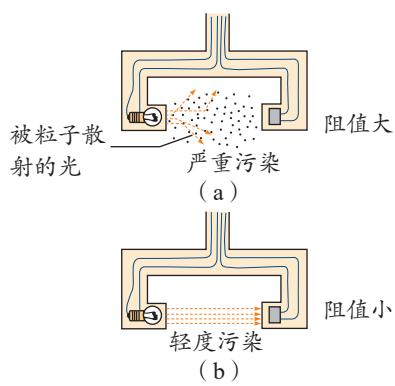
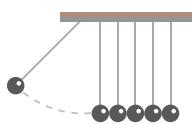


图 5-9 光敏电阻值与水污染程度有关



(2) 热敏元件

热敏电阻是一种常用的热敏元件，广泛应用于温度传感器中。下面我们通过实验探究热敏电阻的热敏特性。



实验与探究

热敏电阻的热敏特性

如图 5-10 所示，将 NTC 热敏电阻及温度计放入盛有热水的烧杯中。用多用电表测量热敏电阻的阻值，同时用温度计测出水温。倒入少许冷水，改变烧杯中水的温度，再次测量电阻值与水温。

热敏电阻的阻值随温度怎样变化？

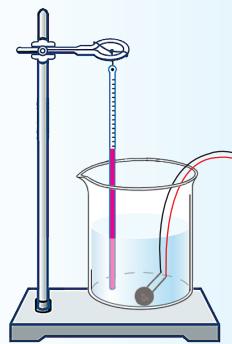


图 5-10 实验装置示意图

上述实验使用的 NTC 热敏电阻的阻值随温度的升高而减小，因此又称为负温度系数热敏电阻。还有一种 PTC 热敏电阻，它的阻值随温度的升高而增大，称为正温度系数热敏电阻。热敏电阻是一种灵敏度极高的温度传感器，在测温过程中响应非常快。利用热敏电阻制成的电子体温计，能很快测出体温；家用电器（如电脑、空调、电冰箱等）的温度传感器使用的主要是热敏电阻。热敏电阻是利用半导体的电阻会随温度的变化而改变的特性制成的。

除了热敏电阻外，还有许多其他类型的热敏元件。它们的工作原理虽然有差别，但都是利用敏感元件的某种电学特性随温度变化而变化的规律制成的。

(3) 磁敏元件

霍尔元件是根据半导体材料的霍尔效应制成的一种磁敏元件，广泛应用于磁传感器中。

一个霍尔元件一般有四个引出端子，其中两个是霍尔元件的电流 I 的输入、输出端，另两个是霍尔电压的输出端。在其垂直方向施加磁感应强度为 B 的匀强磁场，将在垂直于电流和磁场的方向上产生电势差为 U_H 的霍尔电压（图 5-11）。这几个物理量的关系为

$$U_H = k \frac{IB}{d}$$

式中， d 为霍尔元件厚度， k 为与材料有关的霍尔系数。

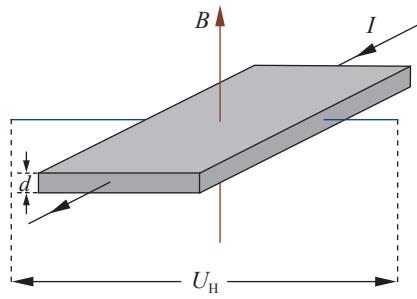


图 5-11 产生霍尔电压的示意图



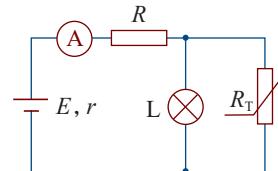
对于一个给定的霍尔元件，当电流 I 固定时， U_H 完全取决于磁感应强度 B 。

因此，霍尔元件可将磁感应强度的测量转化为电压的测量。用霍尔元件制成的磁传感器可直接测量磁场的磁感应强度，还可通过测量电流周围的磁场间接测量电流的大小。

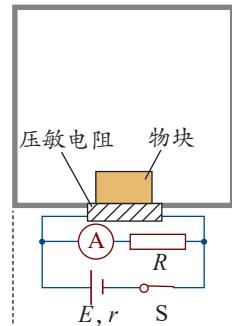


节练习

- 随着科技的进步，手机不再是一种简单的通信工具，而是具有综合功能的便携式电子设备。手机的许多功能是通过传感器来实现的。请查阅资料，选择手机中使用的一种传感器，分析其工作原理及用途。
- 随着生活质量的提高，自动干手机已进入许多家庭。洗手后，将手靠近自动干手机，机内的传感器便使电热器加热，热空气从机内喷出，将手烘干。请查阅资料，选择干手机使用的一种传感器，简要分析其工作原理。
- 如图所示， R 为定值电阻， R_T 为负温度系数热敏电阻， L 为小灯泡。当温度降低时
 - R 两端的电压增大
 - 电流表的示数增大
 - 小灯泡的亮度变强
 - 小灯泡的亮度变弱
- 压敏电阻的阻值随所受压力的增大而减小，有位同学设计了利用压敏电阻判断升降机运动状态的装置，其工作原理如图所示。将压敏电阻固定在升降机底板上，其上放置一个物块，在升降机运动过程的某一段时间内，发现电流表的示数 I 不变，且 I 大于升降机静止时电流表的示数 I_0 ，在这段时间内
 - 升降机可能匀速上升
 - 升降机一定匀减速上升
 - 升降机一定处于失重状态
 - 通过压敏电阻的电流一定比电梯静止时大



第 3 题



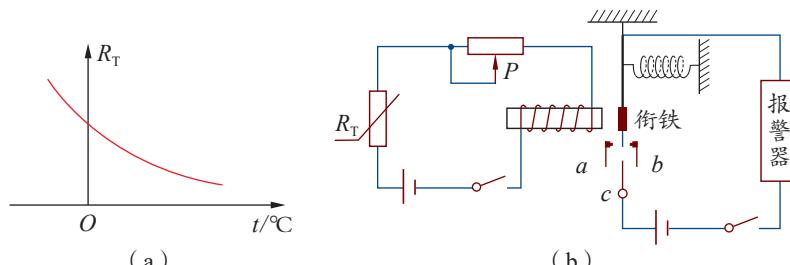
第 4 题



5. 某热敏电阻 R_T 的阻值随温度变化的图像如图 (a) 所示, 图 (b) 是由热敏电阻 R_T 作为传感器制作的简单自动报警器电路图。

(1) 为了使温度过高时报警器铃响, c 应接在 a 端还是 b 端?

(2) 若要使启动报警的温度提高些, 应将滑动变阻器滑片 P 向哪一端移动?



第5题

请提问



第2节

科学制作：简单的自动控制装置

通过动手制作简单的自动控制装置，可更好地理解传感器的工作原理及其应用。

实验目的

- (1) 设计并制作光报警装置。
- (2) 设计并制作温度报警装置。
- (3) 了解制作的报警装置的工作原理。

实验器材

光敏电阻、热敏电阻、温度计、干电池、手电筒、蜂鸣器、开关、导线、变阻器。



安全警示

实验中，手电筒不能对着人的眼睛直射；要避免被热水烫伤。

实验原理与设计

图 5-12 和图 5-13 分别是光报警装置和温度报警装置的电路图，请写出它们的工作原理。

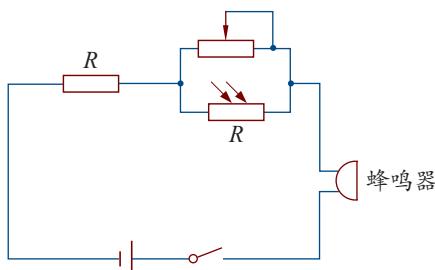


图 5-12 光报警装置电路图

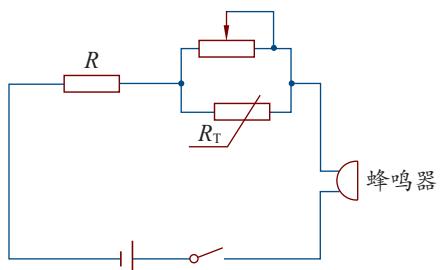


图 5-13 温度报警装置电路图

实验步骤

根据实验原理图组装电路，要求光报警器在一定亮度下报警，温度报警器在一定温度下报警。请写出实验步骤并完成实验。

数据分析

将测量的数据记入你设计的表格中，并分析数据，形成结论。

实验结论

写出随滑动变阻器阻值变化，蜂鸣器报警时光照亮度的变化规律，以及蜂鸣器报警时温度的变化规律。





讨论

(1) 对于图 5-12 所示电路，怎样才能使光敏电阻感测到更强的光才报警？对于图 5-13 所示电路，怎样才能使热敏电阻感测到更高的温度才报警？

(2) 火灾报警器和热水自动加热报警器的原理是什么？请设计一个火灾报警器或热水自动加热报警器。

能针对真实情境提出与实验有关的物理问题，能对一些传感器设计提出质疑；能阐述实验原理、设计实验方案和实验步骤，能动手制作简单的自动控制装置；能用证据说明自制自动控制装置的优势与问题；能撰写研究报告，在报告中能呈现实验原理、实验方案、实验步骤、实验表格、数据分析过程及实验结论，能提出改进措施，能与他人分享制作成果。

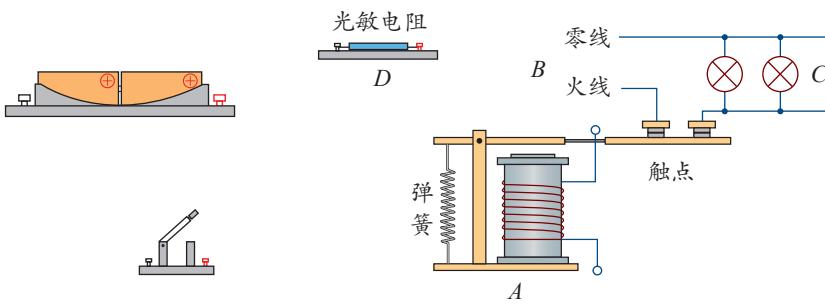
注重提高实验设计能力、动手实践能力及解释能力。

——科学探究



节练习

1. 请撰写“利用传感器制作简单的自动控制装置”的实验报告。注意在报告中呈现实验原理、实验方案、实验步骤、实验表格、数据分析过程及实验结论。请对该实验制作提出问题及改进措施，与同学分享制作成果。
2. 电磁继电器在各种自动化装置中有很多应用，街道路灯自动控制就是其应用之一。模拟电路如图所示，其中 A 为电磁继电器，B 为照明电路，C 为路灯，D 为光敏电阻（白天光照强时，电阻变小；夜晚光照弱时，电阻变得很大）。请你将电路连接完整，达到白天灯熄、夜晚灯亮的效果。（连线时导线不能交叉）



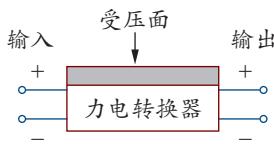
第2题

3. 某同学为了测量一个物体的质量，找到一个力电转换器，该转换器的输出电压与受压面的压力成正比（比例系数为 k ），如图所示。测量时先调节输入端的电压，使转换器空载时的输出电压为零；而后在其受压面上放一物体，即可测得与物体的质量成正比的输出电压 U 。

- (1) 设计一个电路，要求力电转换器的输入电压可调，并且使调节范围尽可能大，在虚线框中画出完整的测量电路图；

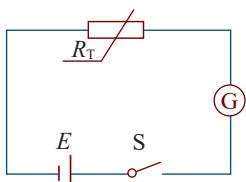


(2) 简要说明测量步骤, 求出比例系数 k , 并测出待测物体的质量 m 。

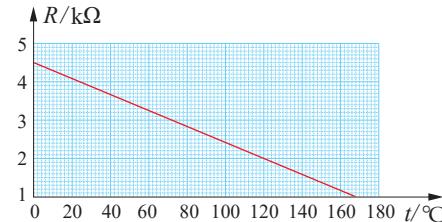


第3题

4. 温度传感器广泛应用于室内空调、电冰箱等家用电器中, 它是利用热敏电阻的阻值随着温度变化的特性来工作的。如图(a)所示, 电源的电动势 $E = 9.0\text{ V}$, 内阻不计; G 为灵敏电流计, 内阻 R_g 保持不变; R_T 为热敏电阻, 其电阻阻值与温度的变化关系如图(b)所示。闭合开关 S , 当 R 的温度等于 20°C 时, 电流表示数 $I_1 = 2\text{ mA}$; 当电流表的示数 $I_2 = 3.6\text{ mA}$ 时, 热敏电阻的温度是多少?



(a)

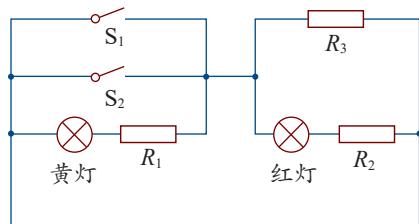


(b)

第4题

5. 电饭锅的电路图如图所示。 S_1 是一个温控开关, 手动闭合后, 当此开关温度达到 103°C 时, 会自动断开。 S_2 是一个自动温控开关, 当温度低于 70°C 时, 会自动闭合; 温度高于 80°C 时, 会自动断开。红灯是加热时的指示灯, 黄灯是保温时的指示灯, 定值电阻 $R_1 = R_2 = 500\Omega$, 加热电阻丝 $R_3 = 50\Omega$, 两灯电阻不计。

- (1) 分析电饭锅的工作原理;
(2) 计算加热和保温两种状态下, 电饭锅消耗的电功率之比。



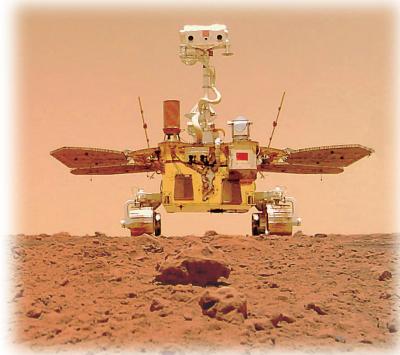
第5题

请提问

第3节

大显身手的传感器

传感器是现代测量和自动控制中使用的重要元件。从宇宙探索、海洋开发、环境保护、灾情预报到日常生活，传感器都发挥着重要的作用（图 5-14）。本节我们将通过几个实例了解传感器的应用。



(a) 装有传感器的火星探测器



(b) 装有传感器的儿童玩具

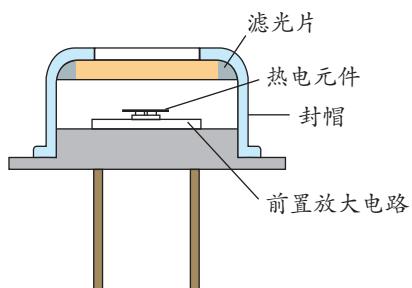
图 5-14 传感器应用广泛

1. 自动感应门

当你走近写字楼、宾馆、机场等大厅的入口时，大门会自动打开；进入大厅之后，门又会自动关闭。你知道吗？控制这种自动门的开关装有一种红外线传感器，它能探测到较远距离的人体发出的微弱红外线（图 5-15）。



(a)



(b)

图 5-15 自动门上的红外线传感器及工作原理示意图

人体会发出特定波长（ $10\text{ }\mu\text{m}$ 左右）的红外线。如图 5-15 所示，人体发出的红外线，经红外感应器入射窗的滤光片后，聚焦到感应器的热电元件上。热电元件感知温度上升后，会因为热电效应释放电荷，使电路中的电阻、电流、电压等电学量发生变化。由此，红外传感器便把门前有无人的非电学信息转换成电路可识别的电学信息了。

在人进入大厅的过程中，自动感应门系统主要经历了三个环节：首先，检测门前是否有人；其次，判断检测结果，发出相关指令；最后，执行指令（开、关门）。

2. 洗衣机水位控制

全自动洗衣机的水位控制装置中使用了压力传感器。图 5-16 (a) 中，1 和 2 分别是洗衣机的外筒和内筒，3 是气室，4 是传感器的膜盒。气室下部与外筒连通，上部与软管、传感器的膜盒连通。向内筒中注水时，水通过内筒壁上的小孔流入外筒，部分水进入气室，气室内被密封的空气压强增大，使传感器的膜片向上凸起 [图 5-16 (b)]。当筒中水位到达设定的高度时，凸起的膜片使动触点 *a* 与静触点 *b* 脱离，并与静触点 *c* 接触，从而接通控制电路，关闭进水电磁阀门，同时接通洗涤电动机电源，开始洗涤衣物。

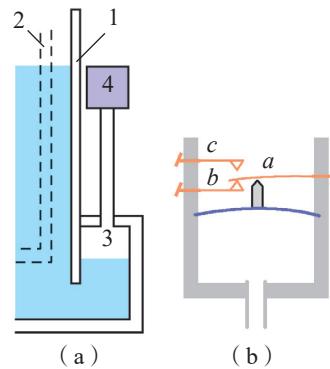


图 5-16 全自动洗衣机水位控制原理示意图

3. 指纹识别器

人的指纹各不相同且终生基本不变。由于具有唯一性和稳定性，指纹成为识别身份的一种有效手段。目前，指纹识别器已应用于密码门、银行储户的身份识别等方面（图 5-17）。

有一种指纹识别器是通过电容传感器来识别指纹的。该传感器表面集合了 300×300 个电容器极板，其外面是绝缘表面。当用户的手指放在绝缘表面时，皮肤便组成了电容阵列极板的另一面，指纹的脊和谷相对于另一极之间的距离不同，使电容阵列中不同位置的电容器的电容值也不相同（图 5-18）。通过读取这些电容的差异，就能获取指纹信息。这样，把指纹的信息转换成了电信号，再经过电路对电信号的比较，便可实现对指纹的识别。



图 5-17 指纹识别器

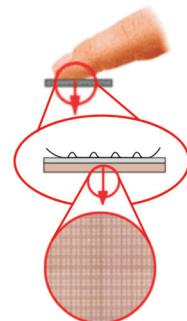


图 5-18 识别指纹的传感器原理示意图



4. 机器人

机器人是一种拟人化的电子机械装置，具有一定的运动、感觉和判断功能。机器人由机械系统、传感器系统、信息处理和控制系统组成。传感器系统是机器人的“感觉器官”，可分为外部传感器和内部传感器。

外部传感器用于感知外部工作环境和外界事物对机器人的刺激。视觉传感器（主要是摄像机）是机器人的“眼睛”，它可测量物体的距离，识别物体的形状、颜色等（图5-19）；超声波传感器、语音识别装置等是机器人的“耳朵”；温度传感器相当于机器人的“皮肤”，机器人通过它感知环境温度的变化；压力传感器、温度传感器、位移传感器等使机器人有了“手感”（图5-20）。除此之外，外部传感器还包括嗅觉、味觉传感器等。

内部传感器（如角度传感器、关节传感器等）用于检测机器人自身的状态。它安装在驱动装置内，用以测量手臂、手爪等的位置和运动速度，以控制机器人精确定位和平稳运动。实现未来机器人的高智能化，依赖于传感器技术的提高。



(a) 汽车生产线上的机器人



(b) 分拣快件的机器人

图5-21 自动化流水线上的机器人

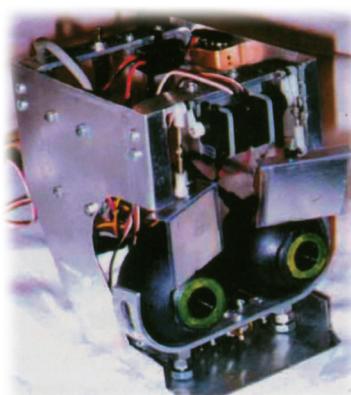


图5-19 机器人的“眼睛”

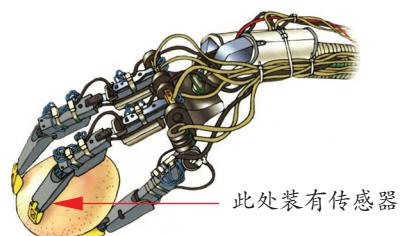


图5-20 传感器使机械手有了“手感”

目前，机器人已经广泛应用于各种自动化流水线（图5-21）。在有害、恶劣的环境中工作时，更能显示出机器人的不可替代性。例如，机器人可靠近起火点控制火情；机器人可上太空，也可下深海，完成高难度作业；机器人还可深入有放射性的场所完成任务等。

能了解常见传感器的工作原理，知道非电学量转换成电学量的技术意义；能解释传感器在生产生活中的应用。具有与传感器相关的运动与相互作用观念。

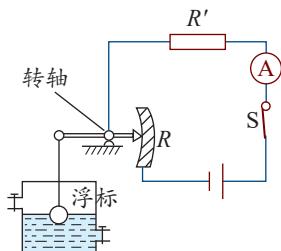
能体会传感技术的应用给人类社会带来的挑战；有较强的将所学内容应用于日常生活实际的热情；认同物理的技术应用应考虑道德与规范的要求，能认识传感技术应用与人类社会发展的关系。

——物理观念，科学态度与责任

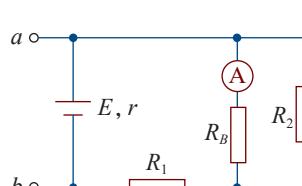


节练习

- 一种测定油箱油量多少的装置如图所示。其中电源电压保持不变， R 相当于滑动变阻器，它的滑片是金属杆的一端。当油箱中油量减少时，电流表的示数将如何变化？
- 为了儿童安全，必须检测布绒玩具有是否存在金属断针。通常先将玩具置于强磁场，磁化断针，再用磁报警装置进行检测。磁报警装置中的一部分电路示意图如图所示，其中 R_B 是磁敏传感器，它的电阻随断针的出现而减小； R_1 、 R_2 是定值电阻； a 、 b 端接报警器。当传感器 R_B 所在处出现断针时，电流表的电流 I 和 a 、 b 两端的电压 U 将怎样变化？为什么？

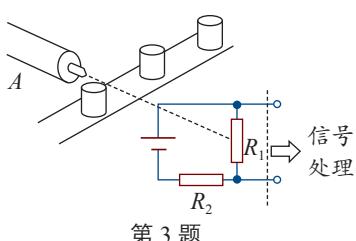


第1题

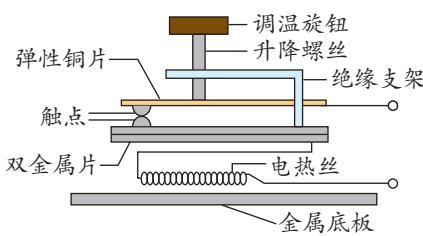


第2题

- 光敏电阻自动计数器原理如图所示，其中 R_1 为光敏电阻， R_2 为定值电阻， A 为发光仪器，小圆柱是传送带上的物品。此光电计数器的基本工作原理是
 - 当有光照射 R_1 时，信号处理系统获得高电压
 - 当有光照射 R_1 时，信号处理系统获得低电压
 - 信号处理系统每获得一次低电压便计数一次
 - 信号处理系统每获得一次高电压便计数一次
- 某电熨斗的结构如图所示。请你上网查询关于电熨斗工作原理的信息，指出下列说法正确的是
 - 常温时上下触点是分离的
 - 双金属片上层的膨胀系数比下层大
 - 若需要设定更高的温度，则应该向上调节升降螺丝
 - 电熨斗中装有双金属片温度传感器，其作用是把电信号转换成热信号



第3题



第4题





5. 传感器在日常生活中有着广泛的应用，它的种类多种多样，其性能也各不相同。以下有关传感器的说法正确的是

- A. 办公大楼的大门能“看到”人的到来或离开而自动开关，这是光传感器的应用
- B. 非触摸式自动水龙头（自动感应水龙头）应用的传感器是压力传感器
- C. 空调机在室内温度达到设定的温度后，会自动停止工作，空调机内实现这一功能的传感器是温度传感器
- D. 调温型电熨斗能自动控制温度的原因是它装有双金属片温度传感器，能控制电路的通断

请提问





章末练习

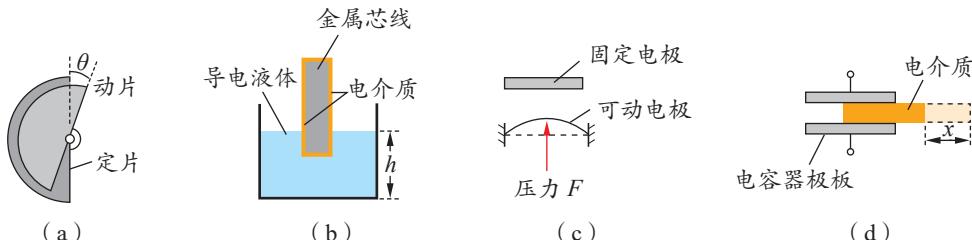
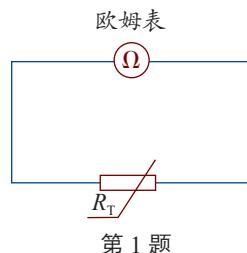
科学认知

1. 如图所示，将多用电表的选择开关置于欧姆挡，再将电表的两支表笔与负温度系数热敏电阻 R_T 的两端相连，这时表针恰好指在刻度盘的正中间。若往 R_T 上擦一些酒精，表针将如何偏转？若用热吹风机对 R_T 加热，表针又将如何偏转？请说明理由。

2. 数码相机的普及使传统胶片相机逐渐被淘汰。数码相机的主要部件是电荷耦合器（CCD），能将光学量转化为电学量。该部件可视为

- A. 力传感器 B. 温度传感器
C. 光传感器 D. 霍尔元件

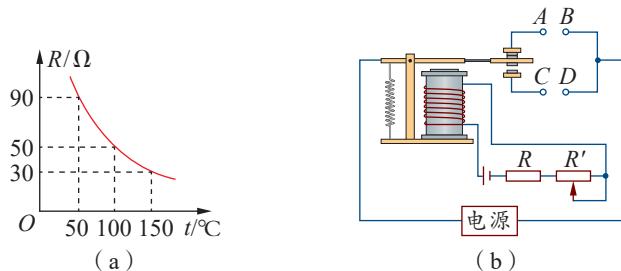
3. 电容式传感器实质上是一个可变电容器，当某待测量发生变化时，能引起电容器的电容变化。如图是四个电容式传感器的示意图。关于这四个传感器的作用，下列说法正确的是



第3题

- A. 图(a)的传感器可测量角度
B. 图(b)的传感器可测量液面的高度
C. 图(c)的传感器可测量压力
D. 图(d)的传感器可测量速度
4. 如图所示，图(a)为热敏电阻的 $R-t$ 图像，图(b)为用此热敏电阻 R 和继电器组成的一个简单恒温箱温控电路，继电器线圈的电阻为 $100\ \Omega$ 。当线圈的电流大于或等于 20 mA 时，继电器的衔铁被吸合。为继电器线圈供电电池的电动势 $E = 9.0\text{ V}$ ，不计内阻。图中的“电源”是恒温箱加热器的电源。
- 恒温箱内的加热器应接在 A 、 B 端还是 C 、 D 端？
 - 如果要使恒温箱内的温度保持在 50°C ，可变电阻 R' 的阻值应调节为多少？

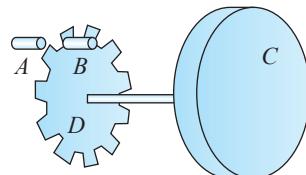




第4题

*5. 一实验小车中利用光电脉冲测量车速和行程的装置如图

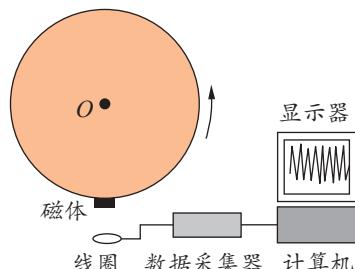
所示，其中 A 为光源， B 为光电接收器， A 、 B 均固定在车身上， C 为小车的车轮， D 为与 C 同轴相连的齿轮。当车轮转动时， A 发出的光束通过旋转齿轮上齿的间隙后成为脉冲光信号，被 B 接收并转换成电信号，由电子电路记录和显示。若实验显示单位时间内的脉冲数为 n ，累计脉冲数为 N ，则要测出小车的速度和行程，还必须测量的物理量或数据是什么？写出小车速度和行程的表达式。



第5题

科技交流

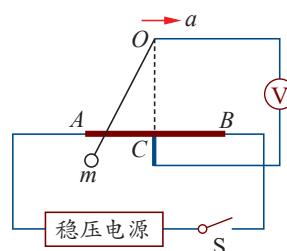
6. 在开展研究性学习的过程中，某同学设计了一个利用线圈测量转轮转速的装置。如图所示，在转轮的边缘贴上小磁体，将小线圈靠近轮边放置，接上数据采集器和计算机（DIS 实验器材）。如果小线圈的面积为 S ，圈数为 N ，小磁体附近的磁感应强度最大值为 B ，回路的总电阻为 R 。实验中发现，轮子转过 θ 角，小线圈的磁感应强度由最大值变为零。因此，该同学说：“只要测得此时感应电流的平均值 I ，就可测出转轮转速的大小。”请你运用所学的知识，通过计算对该同学的结论作出评价。



第6题

温故知新

*7. 一种悬球式加速度仪如图所示，它可用来测定沿水平轨道运动的列车的加速度。 m 是一个金属球，它系在金属丝的下端，金属丝的上端悬挂在 O 点。 AB 是一根长为 l 的电阻丝，其电阻值为 R ，金属丝与电阻丝接触良好，摩擦不计。电阻丝的中点 C 焊接一根导线，从 O 点也引



第7题

出一根导线，两线之间接入一个电压表 V （金属丝和导线电阻不计）。图中虚线 OC 与 AB 垂直，且 $OC = h$ ，电阻丝 AB 接在电压为 U 的直流稳压电源上。整个装置固定在列车中，使 AB 沿着前进的方向。列车静止时金属丝在竖直方向，当列车加速或减速前进时，金属丝将偏离竖直方向，从电压表的示数变化可测出加速度的大小。

- (1) 当列车向右匀加速运动时，试写出加速度 a 与电压表示数 U' 的关系式，以便重新刻制电压表刻线，使其成为可直接读出加速度数值的加速度计。
- (2) 用此装置测得的最大加速度是多少？
- (3) 将 C 点设置在电阻丝 AB 的中点有什么好处？对电压表的选择有什么特殊要求？



我的学习总结

后记

21世纪初我国启动基础教育课程改革，迄今已十余年。我们根据《普通高中物理课程标准（实验）》（2003版）编写的普通高中课程标准实验教科书《物理》在实验区已使用十余年。随着基础教育课程改革的深入，修订后的《普通高中物理课程标准（2017年版）》（以下简称《标准》）已由教育部正式颁布，因此，实验版教科书《物理》也应随之修订。根据国家大政方针和《标准》的要求，在对一线教师大规模问卷调查及深入访谈的基础上，基于多年教科书研究、编写和实践的积淀，教科书编写组对实验版教科书进行了全面修订。

本次修订后的普通高中物理课程标准修订版教科书的整体架构如图所示。

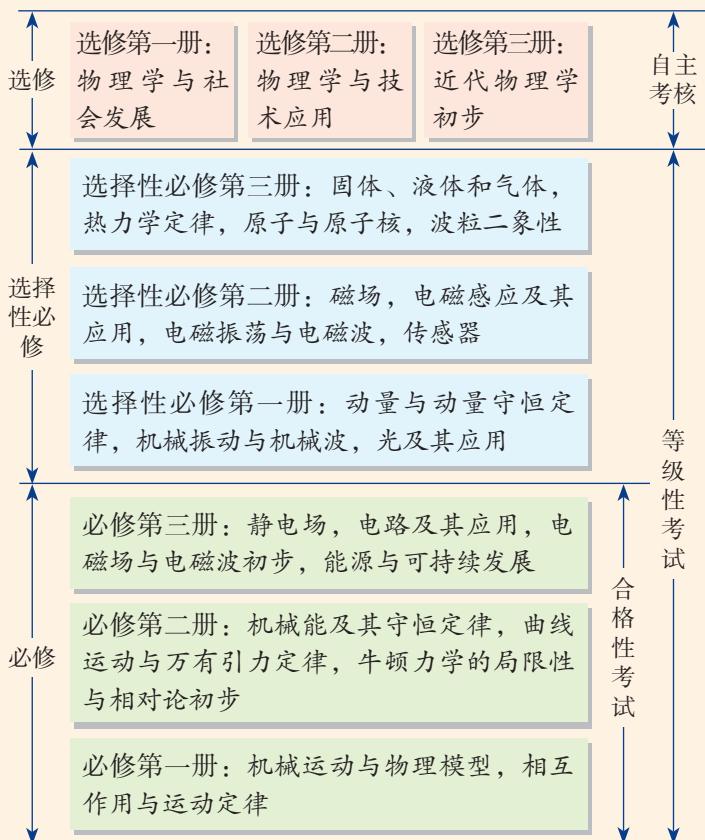
总体来看，修订版教科书具有如下特点：

1. 立意更高，促进学生物理学科核心素养的达成。不仅继承实验版教科书注重落实三维课程目标的特点，而且更加注重体现物理教科书的育人功能，以“素养提升”“本章学业要求”等栏目导向，有效促进教学方式的改进，提升学生物理学科核心素养。

2. 寓意更深，注重从情境走向物理，从物理走向社会的内涵。不仅继承实验版教科书注重联系实际的特点，而且强调问题情境与物理内容的相互呼应。通过“以惑为诱、以问促学”的内容设计，培养学生的物理自然观和建模、推理、论证及质疑能力。

3. 更重实践，强调概念构建过程，注重探究能力的培养。不仅继承实验版教科书的实验栏目，而且注重凸显物理实验的育人功能。通过“学生必做实验”“实验探究”“迷你实验室”“DIS实验室”等实验版块，以“引导、递进、开放”的精巧设计，培养学生在问题、证据、解释及交流方面的探究能力。

4. 更富逻辑，结构更完善，更符合教育教学规律。不仅继承了实验版教科书结构上注重逻辑的特点，而且通过“方法点拨”“策略提炼”“拓展一步”等栏目，进一步升华学



修订后整套教科书的基本架构

习内容，同时注重难点分解、台阶降低、逐步到位，关注了学生的认知特点。

5. 更重评价，发挥习题功能，促进学生全面发展。改进实验版教科书在习题设计方面的不足，基于物理学科核心素养和学业质量要求，分层设计“节练习”“章末练习”“单元自我检测”，更好发挥习题的功能，促进对核心素养测试的探索。

6. 更加拓展，反映物理学对人类生活及社会发展的影响。不仅继承实验版教科书从物理走向社会的特点，而且注重通过“科学书屋”“物理聊吧”等栏目培养学生的学习兴趣、人文情怀，及节约能源、保护环境的科学态度与社会责任感。

7. 臻于精致，体现“以学生发展为本”的理念。不仅继承实验版教科书图文并茂的特点，而且更加美观、适用，从结构确定、内容纳入、栏目设计、图片选用到版式推敲等多方面皆精雕细琢，旨在全力打造高质量的一流物理教科书。

编写组凝聚了高校学科专家、省市物理教研员、中学教学名师、考试评价专家、国际物理教科书研究者等研究力量，具有高校研究平台与中学教学积累的综合优势。各类课题研究、理论探索、国际比较等，使教科书修订具有研究基础、国际视野，能让物理教科书的质量提升到更高的水平。中学各级教学名师丰富的实践经验、珍贵的教学心得，为教科书修订中落实以学生发展为本的教学理念搭建了接地气的脚手架、扎实的一线平台，让修订版教科书更符合教学实际。

本教科书编写组主要成员及分工如下：全套教科书主编为廖伯琴；本册核心编者有宋树杰、刘林、周智良、林明华、张正严、黄晓标、赵保钢、廖伯琴；本册由廖伯琴、林明华、谢德胜统稿，由廖伯琴定稿；全套教科书编务联系工作由李富强、李洪俊负责。

教科书的修订是一系统工程，需各方力量支持。参与本次修订版教科书编写、讨论、审读、组织试教或作出前期贡献的老师还有：李勇、程力、高山、王宪收、陈松、林伟庆、罗基鸣、杨燕鸣、梅家烨、杜明荣、许华忠、田序海、杨学切、青春、黄国雄、冯庆、邓磊、蒋小平、刘健智、廖元锡、冯华、蒋敏、李太华、翟厚岚、洪正平、梁雷、贺晓霞、张修文、梁一平、林钦、李晶晶、王文祥、董茂寅、宋协俊、邹建光、时玉义、马凤喜、吴新田、侯辰虎、郑玉峰、程美贵、冯连奎、曹国莹、岳志国、姜妮、欧剑雄、严士线、彭罡、张庆贵、吴双飞、刘新选、黄巧曦、吴寒平、李勇顺、黄惠菁、刘晓玲、林杰、罗国忠、朱霞、覃朝玲、张滨、黄懋恩、王崇渝等。张书迪女士为本教科书设计图标，并在版式设计方面提出若干建议。

本次修订得到众多专家、学者、教研员、教师、学生以及家长的热诚帮助，得到了山东科学技术出版社的鼎力支持。在此，我们特向提供帮助的各方人士表示由衷感谢！修订后的教科书将很快进入中学课堂，我们恳请各方人士不吝赐教。

挑战与发展共存！我们期待批评，也期待各位的支持。谢谢！

主编 廖伯琴

2019年10月于西南大学荟文楼



物理

WU LI

- 物理 必修 第一册
- 物理 必修 第二册
- 物理 必修 第三册
- 物理 选择性必修 第一册
- 物理 选择性必修 第二册
- 物理 选择性必修 第三册

普通高中教科书

物 理

选择性必修 第二册

PUTONG GAOZHONG JIAOKESHU
WULI XUANZEXING BIXIU DI-ER CE

主 编 廖伯琴

主管单位：山东出版传媒股份有限公司

出 版 者：山东科学技术出版社

地址：济南市市中区舜耕路517号
邮编：250003 电话：(0531)82098088
网址：www.lkj.com.cn
电子邮箱：sdkj@sdcbcm.com

发 行 者：山东新华书店集团有限公司

地址：济南市市中区英雄山路189号
邮编：250002 电话：(0531)82797666

印 刷 者：山东潍坊新华印务有限责任公司

地址：潍坊市潍州路738号
邮编：261031 电话：(0536)2116806

规格：大16开 (210 mm×297 mm) 印张：8.5 字数：173千字
版次：2019年12月第1版 2022年12月第7次印刷

ISBN 978-7-5331-9985-2 定价：9.75元

价格批准编序号：鲁发改价格核(2022)609018 举报电话：12345



绿色印刷产品

