



普通高中教科书

W U L I

物理

选择性必修

第二册



 广东教育出版社

普通 高 中 教 科 书

物 理

选择性必修

第二册

主编 熊建文



 广东教育出版社

· 广州 ·

图书在版编目(CIP)数据

物理：选择性必修 第二册 / 熊建文主编. —广州：
广东教育出版社，2020.2（2022.1重印）
普通高中教科书
ISBN 978-7-5548-2982-0

I. ①物… II. ①熊… III. ①中学物理课—高中—教材
IV. ①G634.71

中国版本图书馆CIP数据核字（2019）第187550号

编写单位 广东教育出版社

主 编 熊建文

副 主 编 王笑君 姚跃涌

本 册 主 编 熊建文

本 册 副 主 编 许桂清

核心编写人员（以姓氏笔画为序）

艾 静 刘同胜 李朝明

何琴玉 张军朋 张晓红

周少娜 谢 春

出 版 人 朱文清

责任编辑 蔡潮生 李敏怡

责任技编 杨启承 陈 瑾

装帧设计 何 维 梁 杰

物理 选择性必修 第二册

WULI XUANZEXING BIXIU DI-ERCE

广东教育出版社出版

（广州市环市东路472号12-15楼）

邮政编码：510075

网址：<http://www.gjs.cn>

广东新华发行集团股份有限公司发行

广州市新思程印刷有限公司印刷

（广州市番禺区沙头街大富村白仙岗4号）

890毫米×1240毫米 16开本 9.25印张 232 000字

2020年2月第1版 2022年1月第5次印刷

ISBN 978-7-5548-2982-0

定价：10.86元

批准文号：粤发改价格〔2017〕434号 举报电话：12315

著作权所有·请勿擅用本书制作各类出版物·违者必究

如有印装质量或内容质量问题，请与我社联系。

质量监督电话：020-87613102 邮箱：gjs-quality@nfc.com.cn

购书咨询电话：020-87772438

前言

欢迎进入《物理》选择性必修第二册的学习。

在必修第三册中，我们初步认识了磁场，知道了磁场对通电导线具有力的作用，那么，如何计算这种作用力的大小，如何判断它的方向？电流是由电荷的定向移动形成的，那么，磁场对电荷是否也具有力的作用？在本册第一章，通过探究上述问题，我们将进一步体会磁场中运动与相互作用观念以及能量观念。

在必修第三册中，我们也初步认识了电磁感应现象，知道了产生感应电流的条件，那么，如何判断感应电流的方向？如何定量描述电磁感应的规律？这些规律与交变电流的产生和远距离输电有什么关系？在本册第二章和第三章，通过对上述问题的探究，我们将进一步体会实验归纳和理论演绎等研究物理问题的方式。

在必修第三册中，我们还初步认识了电磁波，知道了电磁场的物质性，那么，电磁场是如何产生的？电磁波又是如何产生、传播和接收的？不同类别的电磁波在生产、生活中各有什么应用？在本册第四章探讨上述问题的过程中，我们将体会理论预言和实验证据对科学发展的作用，体会物理学发展过程中对统一性的追求。

电磁学的相关研究成果为测量和控制各类电学量如电压、电流提供了便利，因此，科技人员将其他较难测量的非电学量如压力、光照强度等，设法转化为电学量，从而实现自动化控制。在本册第五章将要学习的传感器，就是二者转化的桥梁。通过对传感器工作原理及其应用的学习，体会科学、技术、社会三者之间的紧密联系。

学习物理是一个动手动脑、体验物理学魅力的过程，为此，本书设计了一系列引人入胜的栏目。“观察与思考”栏目，锻炼我们观察、描述、分析物理现象的能力。“实验与探究”栏目，使我们体会问题、证据、解释、交流等要素在开展科学探究中的重要性。“讨论与交流”栏目，让我们展示对物理问题的见解，感受思维碰撞的乐趣。“实践与拓展”栏目，使我们发散思维，在实践性的课题探索中提升创新能力，认识科学、技术、社会与环境发展的关系。“资料活页”栏目，让我们感悟物理学史上科学家们的智慧，感受前沿科技的成就。“练习”和“习题”栏目，巩固我们对物理概念与规律的理解以及解决实际问题的方法。“本章小结”栏目，通过知识结构图梳理全章的知识主线，让

我们回顾和整理学习成果，反思自己的学习情况。

学习物理，不仅是为了记住物理概念和认识物理规律，而且是为了帮助我们形成正确的物理观念，指导我们认识自然万物；培养科学思维，辩证地分析实际生产和生活中遇到的问题；学会科学探究的方法，培养基于观察和实验探究自然规律的能力；形成正确的科学态度与社会责任意识。这才是物理学习的要义，让我们共同努力！

“电磁”世界充满了无穷的奥秘，让我们一起开启新的探寻之旅！

目 录



第一章 磁场 1

第一节	安培力	2
第二节	安培力的应用	8
第三节	洛伦兹力	13
第四节	洛伦兹力与现代技术	18



第二章 电磁感应 30

第一节	感应电流的方向	31
第二节	法拉第电磁感应定律	38
第三节	电磁感应规律的应用	43
第四节	互感和自感	48
第五节	涡流现象及其应用	54



第三章 交变电流 63

第一节	认识交变电流	64
第二节	描述交变电流的物理量	69
第三节	变压器	75
第四节	远距离输电	80



第四章 电磁振荡与电磁波 90

第一节	电磁振荡	91
第二节	麦克斯韦电磁场理论	97
第三节	电磁波的发射、传播和接收	103
第四节	电磁波谱	108



第五章 传感器 118

第一节	传感器及其工作原理	119
第二节	传感器的应用	126
第三节	用传感器制作自动控制装置	132
* 第四节	利用智能手机中的磁传感器 研究磁现象	135

第一章

磁场

磁场是一种看不见摸不着的物质，可以借助物理实验中常用的转化法，通过研究磁场对通电导线产生的作用力，间接地了解磁场的特性。而导线中的电流是由电荷的定向移动形成的，从运动和相互作用的观念出发，猜想磁场对运动电荷也存在力的作用。针对这一猜想，经历实验探究与物理建模的过程，并以此为例体会和领悟物理学研究的思想与方法。

从自然界奇妙的极光现象，到生活中各种电动玩具的直流电动机，再到科学研究中的电流天平、回旋加速器和质谱仪，处处都离不开磁场的作用，这些现象和技术的背后，又蕴含着怎样的物理学原理？

本章我们将通过实验认识安培力和洛伦兹力，了解它们在生产生活中的应用，以进一步认识场的概念，认识科学与技术的紧密联系。



第一节

安培力



在必修第三册中我们知道，磁场能够对通电导线产生作用力。为了纪念安培在该方面作出的杰出贡献，人们把磁场对通电导线的作用力称为**安培力**（Ampère force）。下面我们将进一步探究安培力方向和大小所遵循的规律。

认识安培力

磁场看不见、摸不着，但可以利用铁屑以转化的方式直观地呈现出磁场的特征。那么，我们能否设计实验直观地感受安培力的作用效果呢？



观察与思考

如图 1-1-1 所示是一种直观感受安培力作用效果的实验装置示意图，在蹄形磁铁两极间放置一个与外电路相连接的水平固定金属导轨，上面静置一根与轨道垂直的金属棒。

(1) 闭合开关，观察实验现象，分析在该实验中安培力的作用效果。

(2) 请结合必修第三册所学知识，设计新的可以直观感受安培力作用效果的实验方案，并将新方案的实验装置示意图绘制在方框内。

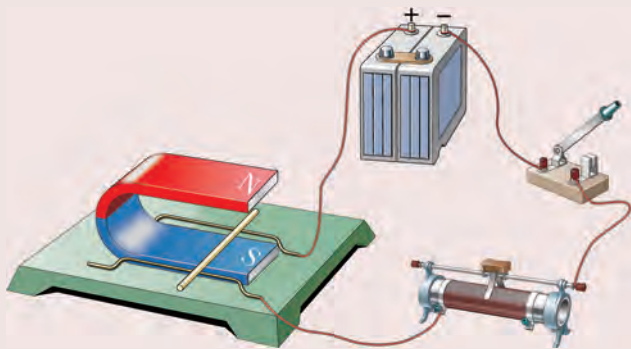


图 1-1-1 探究安培力实验装置示意图

新方案的实验装置示意图：

在上述实验中，当开关闭合时，平行导轨上的金属棒相当于一根通电导线，此时金属棒在轨道上由静止开始滚动，表明它受到了安培力. 该实验方法便于改变电流大小、磁场方向、电流方向等因素，为探究安培力的规律提供了便利.

安培力的方向

安培力是一个矢量，既有大小又有方向. 那么，安培力的方向与哪些因素有关呢？

实验与探究

根据磁感应强度的表达式 $B = \frac{F}{IL}$ ，猜想安培力 F 的方向可能与磁感应强度 B 的方向和电流 I 的方向有关. 利用如图 1-1-1 所示的实验装置，探究影响安培力方向的因素，设计实验现象记录表如表 1-1-1 所示. 其中“ $\otimes$ ”表示电流方向垂直纸面向里，“ $\odot$ ”表示电流方向垂直纸面向外. 进行实验，并将金属棒运动方向相应的实验结果用带箭头线段绘制在表格中.

表 1-1-1 安培力方向探究实验记录表

磁场方向	磁场方向竖直向下		磁场方向竖直向上	
电流方向	垂直纸面向里	垂直纸面向外	垂直纸面向里	垂直纸面向外
金属棒 运动方向				

分析实验结果，可以发现什么规律？

上述实验表明，通电导线在磁场中所受安培力的方向与磁场方向、导线中电流方向有关. 更精确的实验研究表明，它们之间的关系可以用左手定则（left-hand rule）判定. 如图 1-1-2 所示，伸开左手，使大拇指与四指垂直，且都与手掌在同一个平面内. 让磁感线垂直穿入手心，并使四指指向电流的方向，这时大拇指所指方向就是通电导线在磁场中所受安培力的方向.

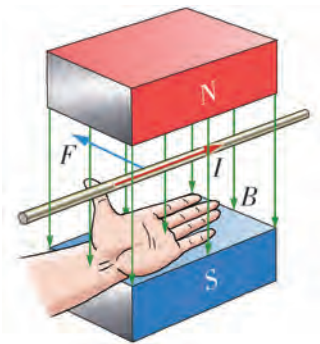


图 1-1-2 左手定则



讨论与交流

在必修第三册中我们知道，两根通电直导线之间（如图 1-1-3 所示）存在相互作用力。

(1) 请根据安培定则和左手定则，分析在什么情况下这两根平行直导线会相互吸引，什么情况下这两根平行直导线会相互排斥。

(2) 利用如图 1-1-3 所示的实验装置还可以探究什么物理问题？

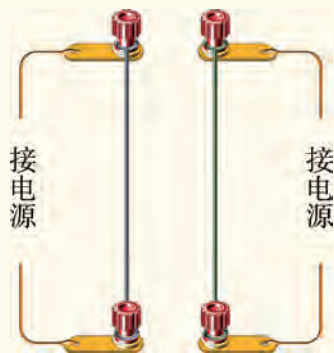


图 1-1-3 探究平行通电直导线间的相互作用

安培力的大小

实验和理论表明，当通电直导线与磁场方向平行时，如图 1-1-4 (a) 所示，通电直导线所受安培力的大小 $F=0$ 。

当通电直导线与磁场方向垂直时，如图 1-1-4 (b) 所示，通电直导线所受安培力的大小 $F=BIL$ 。

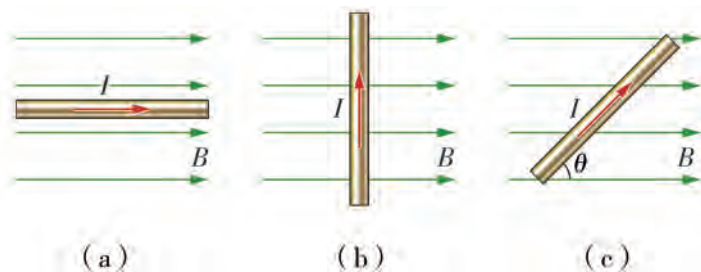


图 1-1-4 通电直导线与磁场方向成不同角度情况图

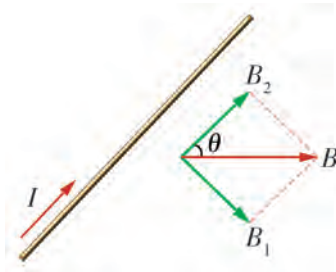


图 1-1-5 磁感应强度的分解

当通电直导线与磁场方向成 θ 角时，如图 1-1-4 (c) 所示，可以将原磁场的磁感应强度 B 分解为与直导线垂直的分量 B_1 和与直导线平行的分量 B_2 ，如图 1-1-5 所示，则

$$B_1 = B\sin\theta$$

$$B_2 = B\cos\theta$$

其中平行于直导线的分量 B_2 不对通电直导线产生作用力，只有垂直于直导线的分量 B_1 才会对通电直导线产生作用力。因此，长度为 L 、电流为 I 的通电直导线与磁场方向成 θ 角时，所受安培力的大小为

$$F = BIL\sin\theta$$

(1.1.1)

这是一般情况下安培力的表达式。

例题：在如图 1-1-1 所示的实验中，两根固定的金属导轨间距离为 L ，处于蹄形磁铁两极中间的磁场可近似看成是匀强磁场，磁感应强度为 B 且垂直导轨平面，金属棒长度为 l ($L < l$)，测得电路中电流大小为 I 。金属棒由于受到安培力作用而沿轨道向前滚动，忽略金属棒与导轨之间的摩擦。

(1) 求此时金属棒受到的安培力。

(2) 为了使金属棒在离开导轨时具有更大的速度，同学们提出了以下不同的建议：

同学甲：适当增加两导轨间的距离。

同学乙：换一根横截面积相同但更长的金属棒。

同学丙：适当增大金属棒中的电流。

谁的建议可行？为什么？

分析：对于第 (1) 个问题，可应用安培力表达式，但要注意公式中的长度是指金属棒在磁场中通有电流的有效长度，即导轨间的距离 L 而不是导体棒自身的长度 l 。安培力的方向则可根据左手定则判断。对于第 (2) 个问题，可以根据动能定理列出运动速度的表达式，并结合安培力表达式作出选择。

解：(1) 由于金属棒与磁场方向垂直，

故此时金属棒受到安培力的大小为 $F = BIL$ 。

根据左手定则，如图 1-1-6 所示，可以判断出此时金属棒受到的安培力方向为水平向右。

(2) 由于金属棒受到的摩擦力忽略不计，设从开始滚动到离开导轨水平运动的距离为 s ，根据动能定理，有

$$Fs = \frac{1}{2}mv^2.$$

根据同学甲的建议，适当增加两导轨间的距离（即增大 L ），则安培力 F 增大。因此最终离开导轨的速度 v 增大，该建议可行。

根据同学乙的建议，换一根横截面积相同但更长的金属棒，虽然金属棒长度 l 增长，但金属棒在磁场中通有电流的有效长度即导轨间的距离 L 不变，安培力 F 不变。而金属棒质量 m 增大，速度 v 将变小，因此该建议不可行。

根据同学丙的建议，适当增大金属棒中的电流 I ，则安培力 F 增大，速度 v 增大，该建议可行。

如果实验中将导轨一端垫高，使导轨与磁场间成一个夹角 θ ，其他条件不变，请思考本题又该如何解决。

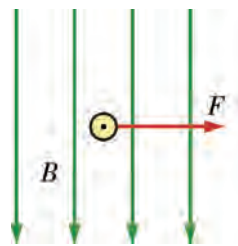


图 1-1-6



实践与拓展

利用数据采集器验证安培力大小与电流大小以及通电导线长度的关系，实验装置图如图 1-1-7 所示。用分压法将滑动变阻器、学生电源、线圈、电流传感器组成闭合电路，利用电流传感器测量电流大小，利用固定在铁架台上的力传感器测量安培力的大小。

将边长之比为 2:1 的矩形线圈的某一边置于匀强磁场中，更换置于磁场中长度不同的边，可视为更换磁场中导线的长度。

改变滑动变阻器的阻值，使电流逐渐增大，可得线圈长边和短边所对应的安培力—电流关系图线。

结合所学知识，猜想绘制出的安培力—电流关系图线的形状，并通过以上实验步骤检验猜想是否成立。

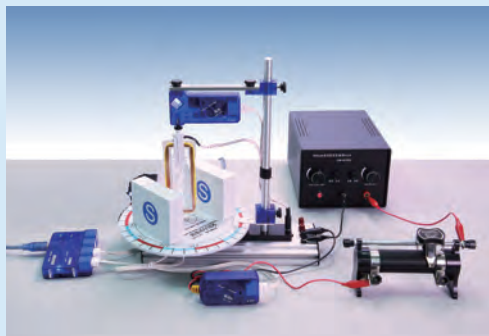


图 1-1-7 验证安培力大小与电流大小以及通电导线长度关系的实验装置图

安培关于电流间相互作用的科学探究

1820 年，安培第一次听到丹麦物理学家奥斯特发现电流的磁效应消息后，就一直在思考它。他提出把一切磁现象都归结为电流作用的观点，由此认为永久磁铁的磁作用完全和通电螺线管等效。他还提出了“分子电流”的假说。与此同时，安培还设计了一系列精巧的实验进行探究。

为了定量研究电流之间的相互作用，安培设计了四个“示零实验”，通过力的平衡效果判断通电导线间作用力的性质。其中第四个实验示意图如图 1-1-8 所示。安培使用了三个相似的共面圆形线圈，这三个线圈的中心都在同一直线上，其半径之比分别等于其距离之比，其中线圈 1 和 3 固定并串联在一起，线圈 2 可以移动。当三个线圈通以相同方向的电流，或者线圈 2 通以与线圈 1 和 3 相反电流时，线圈 2 纹丝不动。这表明线圈 2 受线圈 1 和 3 对其作用力的合力为零。在此实验基础上，安培总结得出了通电导体间作用力大小与导线长度、作用距离之间的关系，建立了通电导体间相互作用力的公式，这就是著名的安培定律。

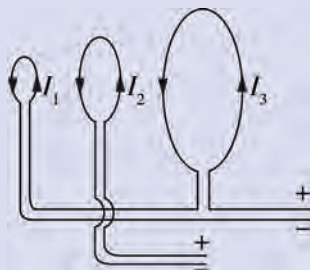


图 1-1-8 三个通电线圈相互作用

安培定律的建立为电动力学提供了基础。值得注意的是，安培定律从形式上看，与牛顿的万有引力定律非常相似。安培正是遵循牛顿的路线，仿照力学的理论体系，创建了电动力学。麦克斯韦称赞安培的这一工作是“科学史上最光辉的成就之一”，并把安培誉为“电学中的牛顿”。

练习

1. 如图 1-1-9 所示，通电直导线与匀强磁场互相垂直。图中已分别标明电流、磁感应强度和安培力这三个量中两个量的方向，试标出第三个量的方向。

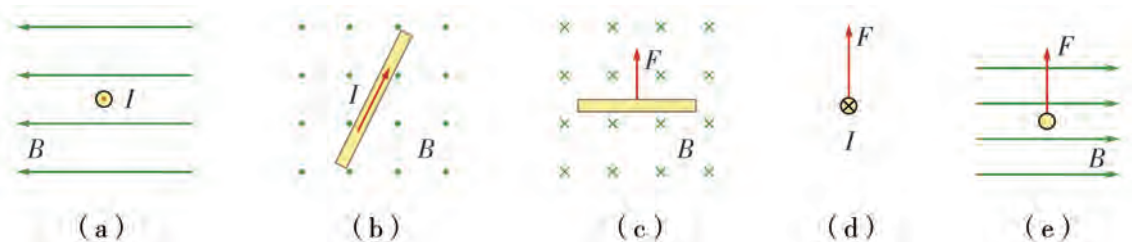


图 1-1-9

2. 在某次讨论活动中，几名同学针对下面的物理情境提出了不同观点。他们的观点正确吗？请说明原因。

物理情境：一段通电直导线被放置于磁感应强度为 B 的匀强磁场中，导线长度 $L = 0.2 \text{ m}$ ，导线中通过 $I = 2.5 \text{ A}$ 的电流。

(1) 同学甲：如果磁场磁感应强度 $B = 2 \text{ T}$ ，则导线所受安培力 F 的大小一定等于 1 N 。

(2) 同学乙：这段导线所受安培力有可能为零，而导线所在的磁场磁感应强度并不为零。

(3) 同学丙：因为是匀强磁场，所以在磁场中旋转这段导线时，导线所受安培力 F 只是方向改变，但大小不变。

3. 在地球赤道附近，地磁场可视为沿南北方向的匀强磁场，磁感应强度 $B = 5.0 \times 10^{-5} \text{ T}$ 。假设在赤道上沿东西方向水平放置一根长 $L = 10 \text{ m}$ 的直导线，并通有从西向东的电流 $I = 2.0 \text{ A}$ 。求地磁场对这根直导线的安培力 F 的大小和方向。

4. 一个物理研究性学习小组希望利用如图 1-1-10 所示的实验装置，探究影响安培力大小与方向的因素。请设计实验方案并写出实验步骤。



图 1-1-10

第二节

安培力的应用

安培力在生活、生产和科研中有着广泛的应用，例如电流天平、磁电式电表、直流电动机等器件的工作原理均与安培力有关。本节我们通过探讨这些器件的设计思想与工作原理，体会物理原理与技术的紧密结合。

电流天平

普通天平是应用杠杆原理把被测物与已知质量的砝码进行力学平衡，利用等效替代法测量出被测物体的质量。对于较难直接测量的安培力和磁感应强度，人们同样运用等效替代法，结合安培力的相关知识和现代电子技术，设计出了如图 1-2-1 所示的电流天平。

如图 1-2-2 所示是等臂电流天平的原理图。在天平的右端挂一矩形线圈，设线圈匝数为 n ，底边 cd 长 L ，放在待测匀强磁场中，使线圈平面与磁场垂直，磁场方向垂直于纸面向里。

当线圈中通入图示方向的电流 I 时，在天平左、右两边加上质量分别为 m_1 、 m_2 的砝码使天平平衡。设磁场磁感应强度为 B ，根据左手定则、安培力表达式和平衡条件，有

$$m_1 g = m_2 g - nBIL$$

保持线圈中电流的大小不变，使电流方向反向。通过在天平左盘加上质量为 m 的砝码使天平再次平衡，则有

$$(m_1 + m)g = m_2 g + nBIL$$

综合以上两式，可得该匀强磁场的磁感应强度测量值

$$B = \frac{mg}{2nIL}$$

电流天平常用于实验室中测量两平行通电导体之间的相互作用力和磁感应强度。



图 1-2-1 电流天平

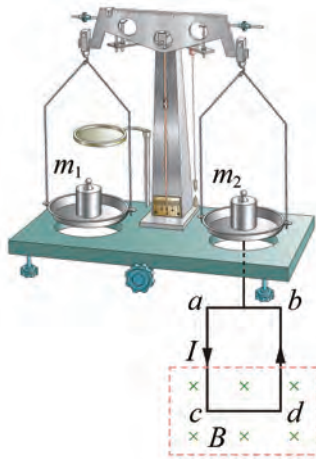


图 1-2-2 等臂电流天平原理图

磁电式电表

学校实验室经常使用的电流表是磁电式电表，下面我们通过观察它的内部结构示意图来了解其工作原理。



观察与思考

如图 1-2-3 所示是磁电式电表内部结构示意图，蹄形磁铁的两极间有一个固定的圆柱形铁芯，铁芯外面套有一个可以绕轴转动的铝框，在铝框上绕有铜线圈。电表指针固定在线圈上，可与线圈一起转动。线圈的两端分别接在两个螺旋弹簧上，被测电流经过这两个弹簧流入线圈。

蹄形磁铁与铁芯间的磁场可看作是均匀辐射分布的，如图 1-2-4 所示。无论通电线圈转到什么位置，线圈的平面总与磁场方向平行。

结合相关物理学原理，思考下列问题。

(1) 为什么电表指针偏转角度的大小可以反映通过电表电流的大小？

(2) 能否通过指针的偏转方向判断通过电表的电流方向？

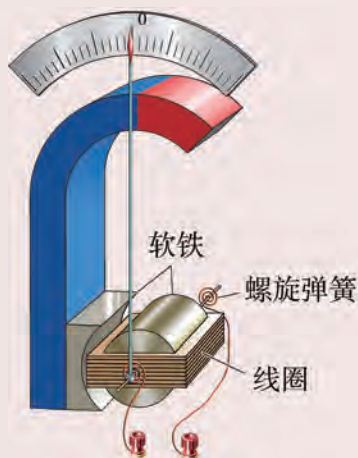


图 1-2-3 磁电式电表内部结构示意图

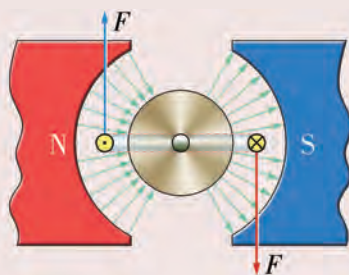


图 1-2-4 均匀辐射分布的磁场

当磁电式电表的线圈没有电流通过时，螺旋弹簧处于自然状态，线圈处于水平位置，指针指向零刻度。当线圈通入电流时，根据左手定则，可知线圈的两对边受到大小相等、方向相反的一对安培力作用。在安培力作用下，线圈绕中心轴转动。线圈的转动导致螺旋弹簧被扭转，产生一个阻碍线圈转动的阻力。当安培力与螺旋弹簧阻力作用效果相当时，线圈停在某一位置，电表指针指示表盘相应刻线，进而得到相应电流的大小。

改变通入线圈的电流方向，安培力的方向随之改变，指针的偏转方向也随之改变。所以，根据指针的偏转方向，可以知道通过电表的电流方向。

磁电式电表灵敏度高，能够测出很弱的电流，但缺点是线圈的导线很细，只允许通过很弱的电流。因此，若要利用磁电式电表测量较大的电流值，需要根据电表改装方法扩大其量程。

直流电动机

生活中不少设备装配了直流电动机，例如，部分类型的电动汽车和电动自行车、多数电动玩具和电动剃须刀（如图 1-2-5 所示）等设备中的电动机都是直流电动机。直流电动机是利用安培力使通电线圈转动的典型应用。从能量的角度看，它是将电能转换成机械能的旋转电机。



(a) 电动自行车



(b) 电动玩具车



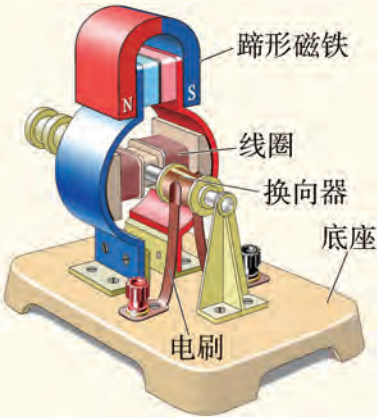
(c) 电动剃须刀

图 1-2-5 生活中各种使用直流电动机的设备



讨论与交流

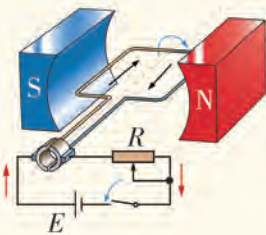
如图 1-2-6 所示是直流电动机的内部结构示意图。它主要由蹄形磁铁、线圈、电刷和换向器等部件组成，其中两磁极间的磁场可近似看作匀强磁场。换向器是一对相互绝缘的半圆形铜环，它们通过固定的电刷与直流电源相接。



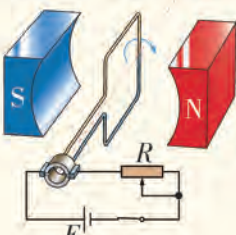
(1) 当线圈位于如图 1-2-7 所示的四种状态时，所受安培力的情况如何？

(2) 直流电动机的线圈是如何实现连续不停地朝一个方向转动的？

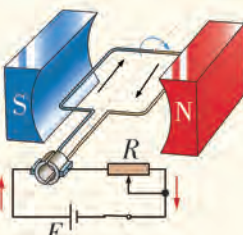
图 1-2-6 直流电动机内部结构示意图



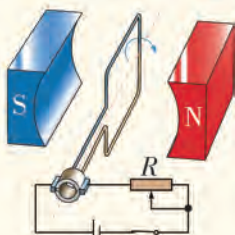
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1-2-7 直流电动机工作原理

在图 1-2-7 中, 当图 (a) 直流电动机中的线圈通入电流后, 线圈在安培力的作用下转到图 (b) 位置时, 尽管受力平衡, 但由于惯性作用, 线圈仍能够按原方向继续转过该平衡位置. 为了让线圈能够持续转动下去, 技术人员巧妙地使线圈两端与两个半圆形铜环相连并一起转动, 同时在电路中安装了与半圆形铜环接触的电刷. 由此通过电流的周期性换向, 确保线圈受到的安培力始终起到推动线圈往同一个方向持续转动的效果. 物理原理与技术在此处得到了完美结合.

直流电动机的优点是只需改变输入电流的大小, 就能够直接调节电动机的转速, 而输入电流的大小是较容易改变的, 因此, 直流电动机常被应用于需要调速的设备.

无刷直流电动机

无刷直流电动机又称无换向器电动机, 是指采用位置传感器实现电子换向而代替有刷电动机中电刷和换向器的直流电动机. 它在结构上相当于一台反装式直流电动机, 电枢绕组被放置在定子上, 转子为永磁体.

与有刷直流电动机相比, 无刷直流电动机具有体积小、重量轻、性能可靠、效率高、节能、抗电磁干扰、噪声小、维修简单、使用寿命长等优点. 因此, 目前在工业先进的国家, 工业现代化领域中有刷直流电动机已经逐步被无刷直流电动机所替代. 随着电子技术和微处理技术的发展、新材料的应用等, 无刷直流电动机作为中小功率的高性能调速电机和伺服电机, 在纺织机械、印刷机械、数控机床、医疗器械、家用电器等方面的应用越来越广泛.

为了满足各种需求, 人们不断研发各种类型的无刷直流电动机, 如无刷直流力矩电动机、无刷直流直线电动机、无刷直流有限转角电动机……无刷直流电动机正在大踏步地走进我们的生产生活中.



练习

1. 电磁炮是一种新式兵器, 其主要原理如图 1-2-8 所示. 某电磁炮能够把 $m = 2.2 \text{ g}$ 的弹体 (包括金属杆 CD 的质量) 加速到 $v = 10 \text{ km/s}$. 若轨道宽 $L = 2 \text{ m}$, 长 $s = 100 \text{ m}$, 通过的电流为 $I = 10 \text{ A}$, 忽略轨道摩擦.

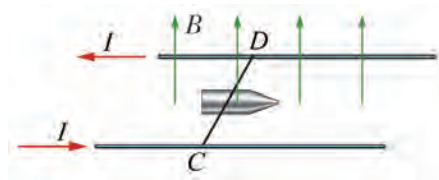


图 1-2-8

(1) 轨道间所加的匀强磁场的磁感应强度为多少?

(2) 电磁炮的最大功率为多少?

2. 磁电式电表的灵敏度较高. 如果仅通过较小电流就能使磁电式电表指针有显著的偏转, 我们就认为该电表有较高的灵敏度. 试根据磁电式电表的设计原理, 简要列举提高磁

电式电表灵敏度的办法，并说明相应的理由.

- 方法 1: 增加线圈匝数; 理由: _____.
- 方法 2: _____; 理由: _____.
- 方法 3: _____; 理由: _____.
- 方法 4: _____; 理由: _____.

3. 如图 1-2-9 所示是一种测量磁感应强度的实验方案. 虚线框内存在一个与纸面垂直的匀强磁场. D 为位于纸面内的金属框, E 为直流电源, R 为电阻箱, A 为电流表, S 为开关, 此外还有细沙、天平、刻度尺和若干轻质导线.

(1) 用笔画线代替导线, 在图 1-2-9 中画线完成实验电路图.

(2) 补充完成下列实验步骤.

①按照实验电路图连接电路.

②保持开关 S 断开, 在托盘内加入适量细沙, 使 D 处于平衡状态. 然后用天平称出细沙质量 m_1 .

③闭合开关 S , 调节电阻 R 的值使电流大小适当, 在托盘内重新加入适量细沙, 使 D 重新处于平衡状态. 然后读出电流表的示数 I , 并用天平测量此时细沙的质量 m_2 .

④用刻度尺测量_____.

(3) 用测量的物理量和重力加速度 g 表示磁感应强度 B 的大小, 则 $B =$ _____.

(4) 判定磁感应强度方向的方法: 若_____ (填两次实验细沙质量的关系), 磁感应强度方向垂直纸面向外. 反之, 磁感应强度方向垂直纸面向里.

4. 某电子天平原理如图 1-2-10 所示, E 形磁铁的两侧为 N 极, 中心为 S 极, 两极间磁感应强度的大小均为 B , 磁极宽度均为 L . 忽略边缘效应, 一正方形线圈套于中心磁极, 其骨架与秤盘连为一体, 线圈两端 C 、 D 与外电路连接. 当质量为 m 的重物放在秤盘上时, 弹簧被压缩, 秤盘和线圈一起向下运动 (骨架与磁极不接触), 随后外电路对线圈供电, 秤盘和线圈恢复到未放重物时的位置并静止. 此时根据对应的供电电流 I , 可确定重物的质量. 已知线圈匝数为 n , 线圈电阻为 R , 重力加速度为 g .

(1) 供电电流 I 是从 C 端, 还是从 D 端流入?

(2) 求重物质量与电流的关系.

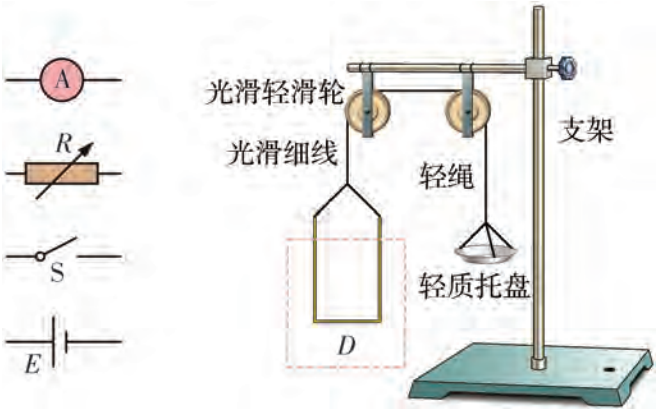


图 1-2-9

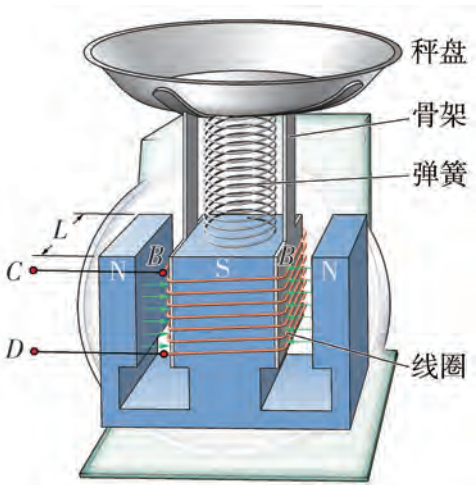


图 1-2-10

第三节

洛伦兹力



磁场对通电导体有安培力的作用，而导线中的电流是由电荷定向移动形成的，由此我们猜想，磁场对运动电荷会产生力的作用。

认识洛伦兹力

下面通过实验探究磁场对运动电荷是否能够产生作用力。



观察与思考

在如图 1-3-1 所示的实验装置图中，阴极射线管两端被加上高电压。此时，阴极射线管内形成了一束电子束。

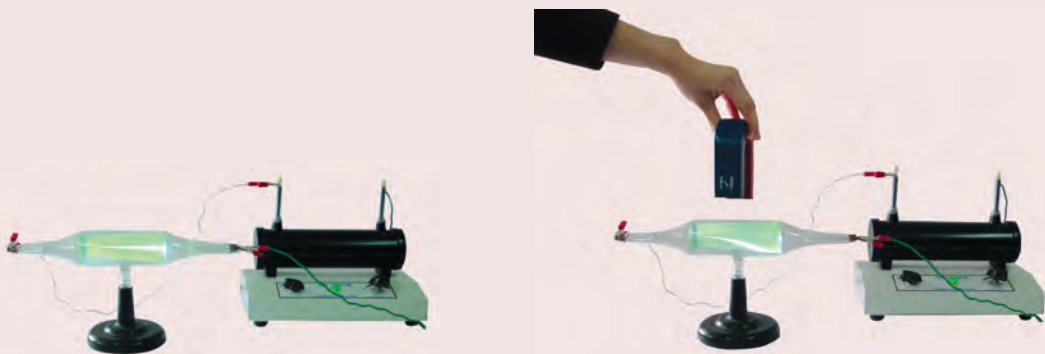


图 1-3-1 阴极射线管中电子束的运动径迹

(1) 当用无磁性的玻璃棒、橡胶棒靠近阴极射线管时，观察电子束的运动方向是否发生改变。

(2) 当蹄形磁铁（或条形磁铁）靠近阴极射线管，使磁场方向与电子束前进方向垂直时，观察电子束运动方向是否发生改变。

思考并讨论上述实验现象说明了什么。

上述实验表明，当没有外磁场时，阴极射线管中的电子束沿直线前进。当磁场方向与电子束前进方向垂直时，电子束运动径迹发生了弯曲，表明磁场对电子束产生了作用力。

1895 年，荷兰物理学家洛伦兹（H. A. Lorentz，1853—1928）公布了磁场对运动电荷的作用力公式。为了纪念他，人们将磁场对运动电荷产生的作用力称为洛伦兹力（Lorentz force）。



图 1-3-2 洛伦兹

洛伦兹力的方向

我们知道，通电导线在磁场中所受安培力的方向，与磁场方向、电流方向等因素有关。电流是由电荷的定向移动形成的，那么磁场对运动电荷产生的作用力方向，即洛伦兹力的方向，是否也与磁场方向和电荷运动方向有关呢？

实验与探究

如图 1-3-1 所示，当阴极射线管两端被加上高电压后，阴极射线管中的电子沿直线前进。改变磁铁方向即改变磁场方向，观察不同情况下电子偏转方向，并将实验结果记入表 1-3-1 中。

表 1-3-1 不同情况下电子偏转方向

磁场方向	电子运动方向	电子偏转方向

分析表 1-3-1，可以得到什么结论？

上述实验现象表明，电子偏转方向与磁场方向、电子运动方向有关。更多实验研究表明，当运动电荷的速度方向与磁场方向平行时，运动电荷不受洛伦兹力；当运动电荷的速度方向与磁场方向垂直时，运动电荷受到的洛伦兹力，其方向既与磁场方向垂直，又与速度方向垂直。

类比安培力方向的判断方法，洛伦兹力方向也可以运用左手定则进行判断。如图 1-3-3 所示，伸开左手，使大拇指与其余四指垂直，并且都与手掌在同一平面内，让磁感线垂直穿入手心，并使四指指向正电荷的运动方向，这时拇指所指的方向就是正电荷在该磁场中所受洛伦兹力的方向。运动的负电荷在磁场中所受洛伦兹力的方向，与沿相同方向运动的正电荷所受力的方向相反。

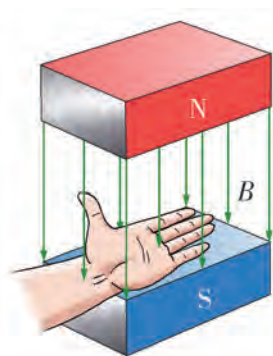


图 1-3-3 洛伦兹力方向判定方法示意图

洛伦兹力的大小

洛伦兹力的大小又遵循怎样的定量规律？我们知道，通电导线在磁场中受到安培力的作用，而电流是由大量定向移动的电荷形成的，因此，我们可以将安培力看作是大量定向移动电荷所受洛伦兹力的宏观表现，下面利用安培力表达式推导洛伦兹力大小的表达式。

如图 1-3-4 所示，通电直导线处于磁感应强度大小为 B 的匀强磁场中，导线中电流方向与磁场方向垂直。若只考虑其中一段长度为 L 的导线，设该段导线内定向移动的电荷数为 N ，导线所受安培力为 F ，每个电荷所受洛伦兹力为 f ，则

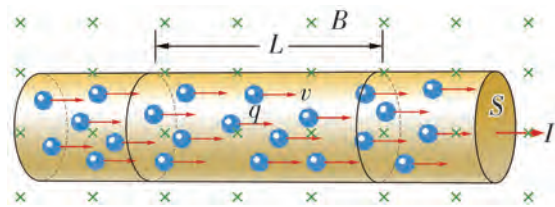


图 1-3-4 推导洛伦兹力大小的物理模型

$$F = Nf$$

根据安培力表达式，有

$$F = BIL$$

根据电流公式，有

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

其中 Q 为时间 t 内经过导线横截面积 S 的电量。

设自由电荷定向移动的速度为 v ，每个电荷所带电量为 q ，则

$$Q = Nq$$

$$L = vt$$

综上所述，导线中每个定向移动的电荷所受洛伦兹力的大小为

$$f = qvB$$

大量实验证实，这一结果同样适用于带电粒子在磁场中运动的情况。当电荷在垂直磁场的方向上运动时，磁场对运动电荷的洛伦兹力大小 f 等于电量 q 、电荷运动速率 v 、磁场磁感应强度 B 三者的乘积，即

$$f = qvB \quad (1.3.1)$$

仿照前面对于安培力大小的讨论可知，在一般情况下，当电荷运动的方向与磁场的方向夹角为 θ 时，电荷所受的洛伦兹力为

$$f = qvB\sin\theta$$

由于洛伦兹力的方向总是与电荷运动方向垂直，因此洛伦兹力不做功。

例题：如图 1-3-5 所示，来自太阳和其他星体的宇宙射线含有大量高能带电粒子，幸好由于地磁场的存在而改变了这些带电粒子的运动方向，使很多带电粒子不能到达地面，避免了其对地面上生命的危害。已知北京上空某处由南指向北的磁感应强度为 $1.2 \times 10^{-4} \text{ T}$ ，如果有一速率 $v = 5.0 \times 10^5 \text{ m/s}$ 、电量 $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 的质子竖直向下运动穿过此处的地磁场。

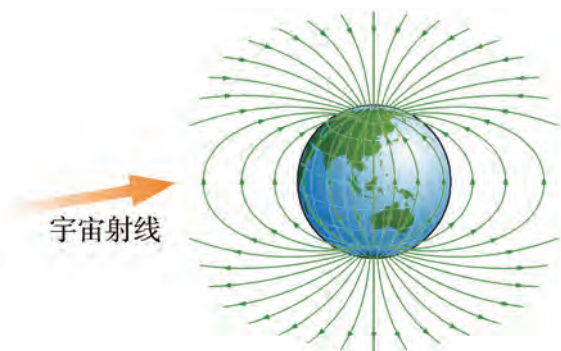


图 1-3-5 宇宙射线与地磁场

(1) 此时该质子受到的洛伦兹力是多大？向哪个方向偏转？

(2) 在地球两极处地磁场方向可近似认为垂直于地面，在赤道处地磁场方向可近似认为由地理南极指向地理北极。那么，地球两极处和赤道处相比，哪个区域地磁场对高能带电粒子的阻挡效果更好？为什么？

分析：对于第 (1) 个问题，当带电粒子速度与磁场方向垂直时，可以利用洛伦兹力公式计算大小，根据左手定则判断方向；对于第 (2) 个问题，需要考虑地磁场在地球两极和赤道处磁场方向上的不同，进而判断阻挡效果。

解：(1) 已知质子运动方向与地磁场方向垂直，根据洛伦兹力计算公式，得

$$f = qvB = 1.6 \times 10^{-19} \times 5.0 \times 10^5 \times 1.2 \times 10^{-4} \text{ N} = 9.6 \times 10^{-18} \text{ N}.$$

根据左手定则可知，质子受到的洛伦兹力由西向东，因此质子向东偏转。

(2) 由于地球两极处地磁场可近似认为垂直于地面，因此竖直向下的带电粒子运动方向与两极处的磁场方向平行，在南北两极不受洛伦兹力，地磁场对宇宙射线的阻挡效果较弱。

而在赤道附近，地磁场的方向由地理南极指向地理北极，带电粒子运动方向与磁场的方向垂直，带电粒子受到了洛伦兹力的作用，所以对宇宙射线的阻挡效果强。



实践与拓展

结合本节所学知识，尝试解释为什么在地球两极会出现极光现象。



图 1-3-6 极光现象

练习

1. 试判定图 1-3-7 中各带电粒子所受洛伦兹力的方向或带电粒子的运动方向.

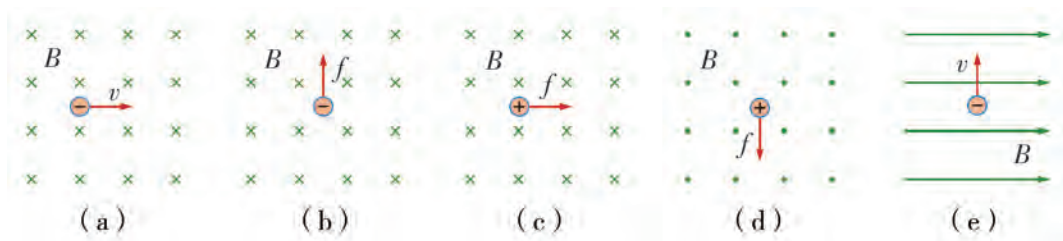


图 1-3-7

2. 关于洛伦兹力, 下面三名同学有着不同的看法.

同学甲: 运动电荷在磁感应强度不为零的地方, 一定受到洛伦兹力的作用; 而运动电荷在某处不受洛伦兹力作用, 则该处的磁感应强度一定为零.

同学乙: 洛伦兹力对带电粒子不做功, 因此既不能改变带电粒子的动能, 也不能改变带电粒子的速度.

同学丙: 一个电子穿过某一空间未发生偏转, 此空间可能有相互正交的匀强磁场和匀强电场.

他们的看法是否正确? 为什么?

3. 科研人员在检测某种物质时, 发现该物质发出的射线在磁场中分裂为多束, 如图 1-3-8 所示, 该现象说明了什么?

4. 为了诊断病人的心脏功能和动脉中血液黏滞情况, 可使用电磁流量计测量血管中血液的流速和流量. 如图 1-3-9 所示是电磁流量计测量血管中血液流速的示意图, 使血管处于磁感应强度为 B 的匀强磁场中, 测得血管两侧电压为 U . 已知血管的直径为 d , 假定血管中各处液体的流速 v 相同, 忽略重力影响.

(1) 管壁上点 a 和点 b , 哪一点的电势高?

(2) 试求血管中血液的流速 v .

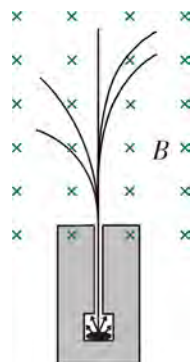


图 1-3-8

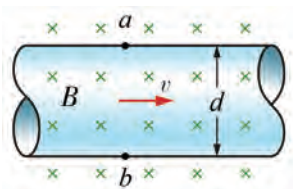


图 1-3-9

第四节

洛伦兹力与现代技术

洛伦兹力在现代科学技术中有着广泛的应用，如回旋加速器、质谱仪等，都利用了洛伦兹力对带电粒子的作用。

回旋加速器

科研人员利用高速粒子对原子核进行“轰击”，以观测其可能产生的新粒子。加速器就是这样一种使带电粒子获得高能量的装置。在必修第三册中我们已经学过，利用电场可以使带电粒子加速。早期的加速器就是用不断提高电源的电压来使带电粒子加速。然而实际所能达到的电压是有限制的。为了进一步提高粒子的能量，科学家制成了直线加速器，让带电粒子在多级电场的作用下进行多次加速，这就导致整个加速器延伸得相当长。

于是人们设想使加速过的粒子绕回来再加速，如此往复多次加速，就能大大缩小装置所占据的空间。而洛伦兹力恰好能够让带电粒子在磁场中做圆周运动，从而达到“绕回来”的目的。根据这一思路设计出的粒子加速装置，称为回旋加速器。

那么，磁场是如何使带电粒子做圆周运动的呢？下面我们先通过洛伦兹力演示仪，了解运动电子在磁场中做圆周运动的情况。



观察与思考

如图 1-4-1 所示是洛伦兹力演示仪的实物图和原理图。洛伦兹力演示仪中电子枪射出的电子束，能使玻璃泡中稀薄的气体发出辉光，显示出电子的径迹。

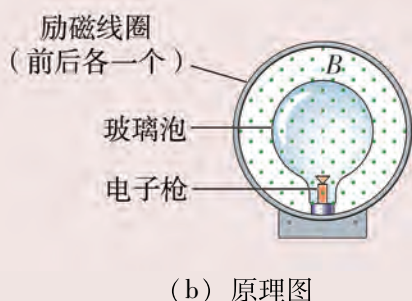


图 1-4-1 洛伦兹力演示仪

调节电子枪的加速电压，可改变电子速度的大小。匀强磁场由两个平行的励磁线圈产生，磁场的磁感应强度可通过改变线圈中电流的大小进行调节。

(1) 未加磁场时，观察洛伦兹力演示仪中电子束的径迹形状。

(2) 给励磁线圈通电，在玻璃泡内会产生沿两线圈轴线中心连线、方向由纸内指向纸外的磁场，观察此时垂直磁场射入的电子束径迹形状。

上述实验表明，当未加磁场时，洛伦兹力演示仪中电子束的径迹显示为一条直线，如图 1-4-2 (a) 所示。当洛伦兹力演示仪的励磁线圈通电后，在玻璃泡内会产生沿两线圈轴线中心连线、方向由纸内指向纸外的磁场，可以看到垂直磁场射入的电子束径迹不再是一条直线，而是形成了圆弧形的径迹，如图 1-4-2 (b) 所示。



(a)



(b)

图 1-4-2 洛伦兹力演示仪中电子束的径迹



讨论与交流

定量分析如图 1-4-2 (b) 所示的圆弧形径迹的规律。设匀强磁场磁感应强度为 B ，质量为 m 、电量为 q 的带负电粒子垂直射入磁场，如图 1-4-3 所示。不计带电粒子所受的重力。

(1) 试推导出带电粒子做圆周运动时的半径 $R = \frac{mv}{qB}$ 。

(2) 试推导出带电粒子做圆周运动时的周期 $T = \frac{2\pi m}{qB}$ 。

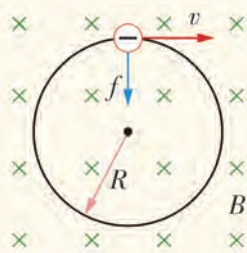


图 1-4-3

基于上述带电粒子在匀强磁场中做圆周运动物理模型，1930 年，美国物理学家劳伦斯 (E. O. Lawrence, 1901—1958) 制成了世界上第一台回旋加速器，后来又经过进一步改进。凭借此项成果，他于 1939 年获得诺贝尔物理学奖。

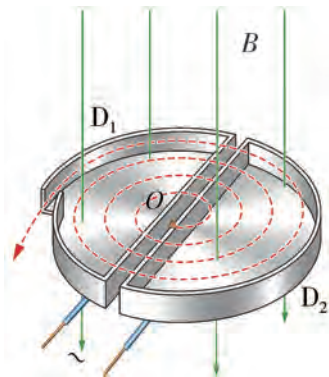
劳伦斯回旋加速器（如图 1-4-5 所示）的真空室内主要有两个区域。其中 D 形盒区域施加垂直盒底面的匀强磁场，另外一个区域是两个 D 形盒之间的窄缝区，施加方向可调的电场。处于中心 O 附近的粒子源产生的带电粒子在两盒之间被电场加速，进入 D 形盒的磁场区域。由于 D 形盒内无电场，粒子在盒内空间做匀速圆周运动。经过半个圆周后粒子再次到达两盒间的缝隙时，两盒间的电压恰好改变正负，于是粒子在两盒缝隙间再一次被加速。由 $T = \frac{2\pi m}{qB}$ 可知，回旋周期 T 与粒子速度 v 无关，只要我们选择合适的交变电压周期，就能确保粒子在每次穿过电场时被加速。随着粒子速度的增加，由 $R = \frac{mv}{qB}$ 可知，粒子做圆周运动的半径也将逐步增大。当粒子达到预期的速率时，用静电偏转板将高能粒子引出 D 形盒，即可用于科学研究。



图 1-4-4 劳伦斯



(a) 世界上第一台回旋加速器



(b) 原理图

图 1-4-5 回旋加速器

2014 年，我国成功研发出世界上第一台 100 MeV（兆电子伏）质子回旋加速器，它在国防核科学研究、放射性核素物理研究、肿瘤治疗等领域具有广阔的应用前景。

质谱仪

洛伦兹力在化学研究领域中有广泛的应用，例如同位素是质子数相同、中子数不同、属于同一元素的原子，由于同位素的化学性质相同，不能利用化学方法加以区别，但是，由于它们的质量数不同，因而在磁场中做圆周运动的半径不同，根据这一特性可以对同位素加以区别。基于上述思路，英国实验物理学家阿斯頓（F. W. Aston, 1877—1945）发明了质谱仪，并利用质谱仪最先得到了氦 20 和氦 22 的质谱线，证实了同位素的存在，他也因此获得了 1922 年的诺贝尔化学奖。



图 1-4-6 阿斯頓

例题：英国实验物理学家阿斯頓当年为了证明同位素的假说，设计了多种质谱仪测量同位素的比荷（粒子电量 q 与质量 m 之比）. 请结合物理学相关原理，尝试从理论上提出一种质谱仪的设计方案以实现下列功能.

功能一：使带电粒子获得一定的速度.

功能二：让粒子通过一个速度选择器，只留下特定速度的粒子，排除其他速度粒子的干扰.

功能三：让带电粒子进入磁场发生偏转.

记录粒子的运动轨迹，进而求得粒子的比荷.

分析：根据前面所学的知识，方案之一是借助电场使带电粒子获得一定的速度；通过使带电粒子受到的电场力和洛伦兹力平衡，即 $qvB = qE$ ，可以选择出特定速度的粒子；通过使粒子进入匀强磁场做匀速圆周运动，可以测出圆周运动的半径，进而求出粒子的比荷.

解：下面是质谱仪的理论设计方案之一.

(1) 要满足功能一，可以设置一个加速电场，如图 1-4-7 所示.

设一个质量为 m 、电量为 $+q$ 的粒子，从小孔 S_1 进入电势差为 U 的加速电场，粒子初速度为零. 根据动能定理，有

$$\frac{1}{2}mv^2 - 0 = qU,$$

所以 $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$ ，即带电粒子获得了一定的速度.

(2) 要满足功能二，可以设置一个既有电场又有磁场的速度选择器，如图 1-4-8 所示.

设 P_1 、 P_2 之间的匀强磁场 B_1 和匀强电场 E 相互垂直，只有始终沿直线运行的粒子才能顺利通过 S_0 上的狭缝，进入下一区域. 对于满足沿直线运行条件的粒子，根据平衡条件，有

$$qvB_1 = qE,$$

$$\text{所以 } v = \frac{E}{B_1}.$$

由此留下特定速度的粒子，排除了其他速度粒子的干扰.

(3) 要满足功能三，可以让粒子进入匀强磁场中做匀速圆周运动，经过半个圆周后打在照相底片上留下印迹. 通过测量印迹半径求得粒子的比荷.

设从速度选择器中出来的粒子马上进入磁感应强度为 B_2 的匀强磁场区域，在该区域内做匀速圆周运动，打在照相底片 A_1A_2 上，并留下印迹，如图 1-4-9 所示. 根据牛顿第二定律，有

$$qvB_2 = m \frac{v^2}{r},$$

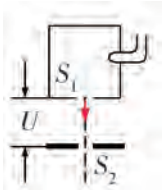


图 1-4-7 加速电场

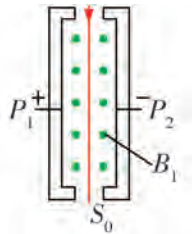


图 1-4-8 速度选择器

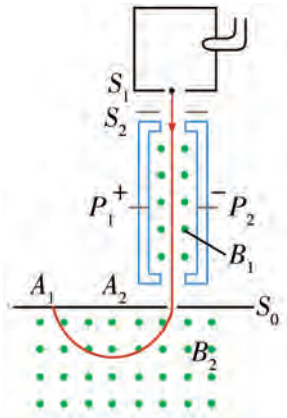


图 1-4-9 一种质谱仪的理论设计方案

可得带电粒子的比荷 $\frac{q}{m} = \frac{E}{B_1 B_2 r}$.

如果有电量相同而质量有微小差别的粒子通过 S_0 上的狭缝, 根据例题中的讨论可知, 它们进入磁场后将沿不同的半径做圆周运动, 其轨迹在照相底片的不同位置形成若干谱线状的细条 (质谱线). 由于每一条质谱线都对应一定的质量值, 人们利用质谱仪便可以测量带电粒子的质量和分析同位素.



实践与拓展

一台大型回旋加速器的设计、制作、安装、调试, 需要许多科技工作者相互配合、通力合作. 劳伦斯在诺贝尔奖领奖演说中谈道: “从工作一开始就要靠多个实验室中众多能干而积极的合作者的集体努力, 各方面的人才都参加到这项工作中来. 不论从哪个方面来衡量, 取得的成功都依赖于密切和有效的合作.” 查阅相关资料, 并结合自身的体验, 谈谈对这段话的理解.

阿尔法磁谱仪

2016 年 12 月, 著名美籍华人物理学家、诺贝尔物理学奖获得者丁肇中在瑞士欧洲核子研究中心发布了阿尔法磁谱仪在国际空间站运行五年的成果, 引起了世界的广泛关注.

阿尔法磁谱仪 (Alpha Magnetic Spectrometer, 简称 AMS), 又译作反物质太空磁谱仪, 是由丁肇中教授构思主导的、迄今为止在太空运行的最强大、最灵敏的粒子物理探测器. 该探测器主要用于探测宇宙中的奇异物质, 包括暗物质及反物质等. 它于 2011 年 5 月被安装在国际空间站上, 并将一直持续运行到 2024 年国际空间站使命结束.



图 1-4-10 安装在国际空间站上的阿尔法磁谱仪

阿尔法磁谱仪实际上就是一个带电粒子探测器，其核心部件是一个能够产生很强磁场的永磁体。当宇宙中的带电粒子穿过这个磁场时，磁场就会对带电粒子施加洛伦兹力使之发生偏转。此时记录下相关数据，再利用计算机进行数据处理，由此分析宇宙中的各种带电粒子。

阿尔法磁谱仪的研制是一项国际合作项目，聚集了来自 15 个国家 31 所科研机构的上百名科研人员。其中最关键的永磁体系统（如图 1-4-11 所示）正是由中国科学院电工研究所、高能物理研究所和中国运载火箭技术研究院联合研制成功的，他们解决了几十年来不能将较强磁场磁体送入外层空间运行的世界技术难题，得到了各国科学家的广泛赞誉。丁肇中教授曾对记者表示：“中国科学家为磁谱仪实验作出了决定性贡献。”



图 1-4-11 中国研制的阿尔法磁谱仪永磁体系统

目前，阿尔法磁谱仪已收集超过 900 亿个宇宙射线事件的数据。这些探测结果大大扩展了人们对宇宙射线产生、加速以及传播的认识。它的许多探测结果仅由现有物理学、天文学和宇宙论的知识理论还无法得以解释，这亟待物理学家及天文学家们提出新的理论模型来揭开宇宙神秘的面纱。

练习

1. 有 a 、 b 两个电子分别以速率 v 和 $2v$ 同时沿垂直磁场方向射入同一匀强磁场中，试通过计算比较它们回到出发点的先后顺序。
2. 参考如图 1-4-5 (b) 所示的回旋加速器原理图，回答下列问题。
 - (1) 在回旋加速器中，带电粒子是从 D 形盒磁场中获得能量，还是从两个 D 形盒空隙

间的电场中获得能量？

(2) 带电粒子再次进入 D 形盒的匀强磁场中做匀速圆周运动时，其速率变大，它的运动周期将随之变化吗？即带电粒子前后两次进入电场区的时间间隔会随之变化吗？

(3) 为了使带电粒子每次经过两个 D 形盒的间隙时，恰能受到电场力作用而被加速，高频电源的频率应符合什么要求？

3. 磁流体发电是一项新兴技术，它可以把物体的内能直接转化为电能，如图 1-4-12 所示是其原理示意图. 平行金属板 A、B 之间有一个很强的磁场，将一束等离子体（即高温下电离的气体，含有大量正、负带电粒子）射入磁场，A、B 两板间便产生电压. 如果把 A、B 板和用电器连接，A、B 板相当于一个直流电源的两个电极.

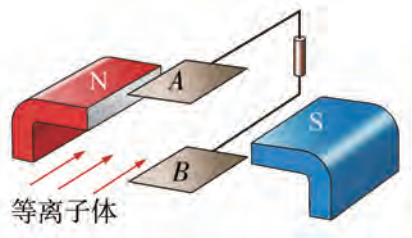


图 1-4-12

(1) 图中 A、B 板哪一个是发电机的正极？

(2) 若 A、B 两板间距为 d ，板间的磁场可视为匀强磁场，磁感应强度为 B ，等离子体以速率 v 沿垂直于磁场的方向射入磁场，则该发电机的电动势是多少？

4. 利用质谱仪测量氢元素的同位素，如图 1-4-13 所示，让氢元素的三种同位素氕、氘、氚的离子流从容器 A 下方的小孔无初速度飘入电势差为 U 的加速电场，加速后垂直进入磁感应强度为 B 的匀强磁场，最后打在照相底片 D 上，形成 a、b、c 三条质谱线.

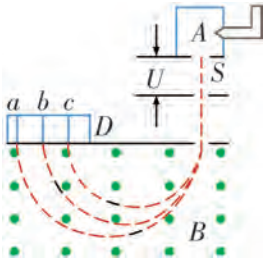


图 1-4-13

(1) 在进入磁场时，氢元素的哪种同位素的动能比较大？为什么？

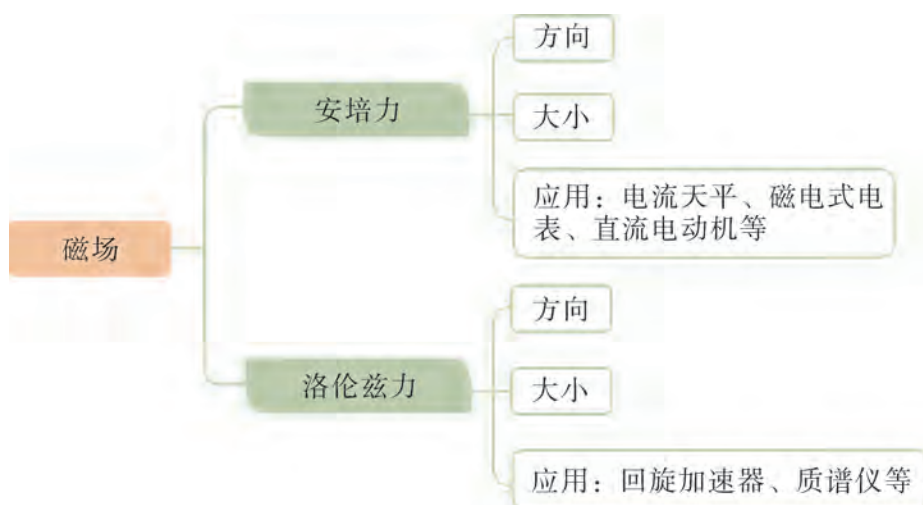
(2) 氢元素的哪种同位素在磁场中运动的时间比较长？为什么？

(3) a、b、c 三条质谱线分别对应氢元素的哪一种同位素？

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



回顾与评价

1. 本章中哪些内容体现了运动与相互作用观念、能量观念？
2. 本章中学到了哪些与磁场相关的物理模型？
3. 生活生产中应用安培力、洛伦兹力相关知识的例子有哪些？分析这些例子一般采用的思路是什么。
4. 结合本章的相关内容，谈谈如何看待物理、技术和社会三者的关系。

习题一

1. 如图 1-1 所示, 金属杆 ab 的质量为 m 、通过的电流为 I , 处在磁感应强度为 B 的匀强磁场中, 平行导轨间的距离为 L , 金属杆 ab 静止且紧压在水平导轨上. 若磁场方向与导轨平面成 α 角, 金属杆 ab 与水平导轨间动摩擦因数为 μ , 下列关于金属杆 ab 受力的说法正确的是 ().

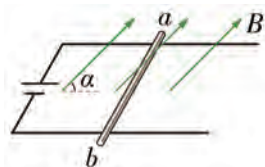


图 1-1

- A. 所受安培力的大小为 $BIL\sin\alpha$
- B. 所受安培力的大小为 BIL
- C. 所受摩擦力的大小为 $BIL\tan\alpha$
- D. 所受摩擦力的大小为 μmg

2. 超导电磁船是一种不需要螺旋桨推进的低噪声新型船, 如图 1-2 所示是电磁船的简化原理图, AB 和 CD 是与电源相连的导体板, AB 与 CD 之间部分区域浸没在海水中并有垂直纸面向里的匀强磁场 (磁场由固定在船上的超导线圈产生, 其独立电路部分未画出), 下列说法正确的是 ().

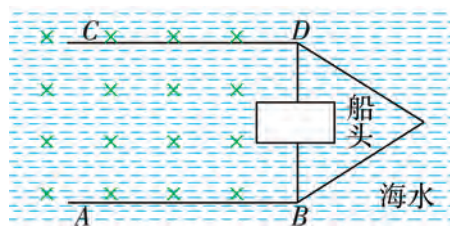


图 1-2

- A. 使船前进的力, 是磁场对海水的安培力
- B. 要使船前进, 海水中的电流方向从 CD 板流向 AB 板
- C. 同时改变磁场的方向和电源正负极, 推进力方向将与原方向相反
- D. 船所获得的推力, 与通过海水的电流大小和超导线圈产生的磁感应强度有关

3. 如图 1-3 所示是一“滤速器”装置示意图. a 、 b 为水平放置的平行金属板, 一束具有不同速率的电子沿水平方向经小孔 O 进入 a 、 b 两板之间. 为了选取具有某种特定速率的电子, 可在 a 、 b 间加上电压, 并沿垂直于纸面的方向加一匀强磁场, 使所选电子仍能够沿水平直线 OO' 运动, 由 O' 射出. 忽略粒子重力作用, 可能达到上述目的的办法是 ().

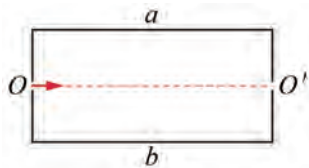


图 1-3

- A. 使 a 板电势高于 b 板, 磁场方向垂直纸面向里
- B. 使 a 板电势低于 b 板, 磁场方向垂直纸面向里
- C. 使 a 板电势高于 b 板, 磁场方向垂直纸面向外
- D. 使 a 板电势低于 b 板, 磁场方向垂直纸面向外

4. 回旋加速器是加速带电粒子的装置,其核心部分是分别与高频交流电极相连接的两个 D 形金属盒,两盒间的狭缝中有周期性变化的电场,使粒子在通过狭缝时都能得到加速,两个 D 形金属盒处于垂直于盒底的匀强磁场中,如图 1-4 所示,要增大带电粒子射出时的动能,下列说法正确的是 ().

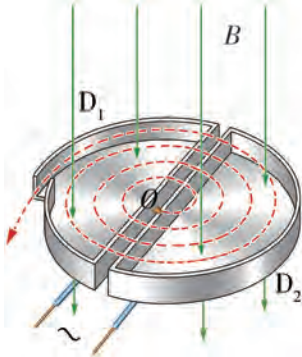


图 1-4

- A. 增大狭缝间加速电压
- B. 增大磁场的磁感应强度
- C. 增大狭缝间的距离
- D. 增大 D 形金属盒的半径

5. 电磁泵在生产、科技中得到了广泛应用. 如图 1-5 所示,泵体是一个长方体, ab 边长为 L_1 , 两侧端面是边长为 L_2 的正方形;流经泵体内的液体密度为 ρ , 在泵头通入导电剂后液体的电导率为 σ (电阻率的倒数), 泵体所在处有方向垂直向外的匀强磁场, 磁感应强度为 B , 把泵体的上下两表面接在电压为 U 的电源 (内阻不计) 上, 则 ().

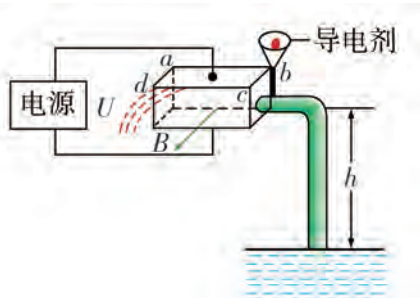


图 1-5

- A. 泵体上表面应接电源正极
- B. 通过泵体的电流 $I = \frac{UL_1}{\sigma}$
- C. 增大磁感应强度可获得更大的抽液高度
- D. 增大液体的电导率可获得更大的抽液高度

6. 某研究性小组为了测定磁极间的磁感应强度, 设计了如图 1-6 所示的实验装置. 在该实验中, 磁铁固定在水平放置的电子测力计上, 磁铁两极之间的磁场可视为水平匀强磁场, 其余区域磁场不计. 水平直铜条 AB 的两端通过导线与一电源连接成闭合回路, 直铜条 AB 在磁场中的长度为 L , AB 的电阻为 R , 电源电动势为 E , 内阻为 r . 在开关闭合前, 电子测力计的计数为 F_1 ; 开关闭合后, 电子测力计的计数为 F_2 .

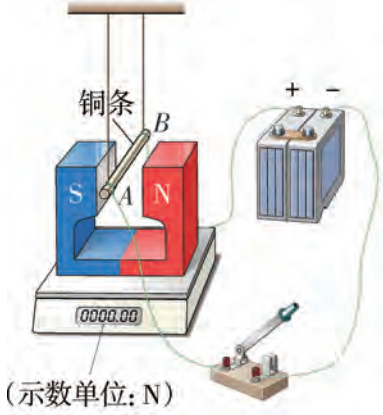


图 1-6

(1) 开关闭合后, 铜条所受安培力的大小为 _____, 方向为 _____.

(2) 磁极间的磁感应强度大小 $B =$ _____.

7. 物体的带电量是一个不易测得的物理量, 某同学设计了一个实验来测量带电物体所带电量. 如图 1-7 (a) 所示, 他将一由绝缘材料制成的小物块 A 放在足够长的木板上, 打点计时器固定在长木板末端, 物块 A 靠近打点计时器, 一纸带穿过打点计时器与物块 A 相连, 请结合下列操作步骤回答问题.

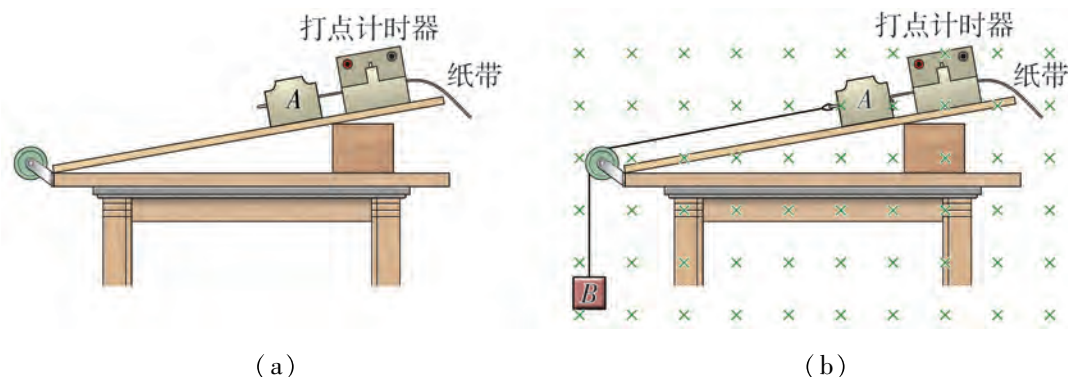


图 1-7

(1) 为消除摩擦力的影响，他将长木板一端垫起一定倾角，接通打点计时器，轻轻推一下小物块 A ，使其沿着长木板向下运动。多次调整倾角 θ ，直至打出的纸带上点迹均匀，测出此时木板与水平面间的倾角，记为 θ_0 。

(2) 如图 1-7 (b) 所示，在该装置处加上一范围足够大的垂直纸面向里的匀强磁场，用细绳通过一轻小定滑轮将物块 A 与物块 B 相连，绳与滑轮的摩擦不计。给物块 A 带上一一定量的正电荷，保持倾角 θ_0 不变，接通打点计时器，由静止释放小物块 A ，该过程可近似认为物块 A 的带电量不变。下列关于纸带上点迹的分析正确的是 ()。

- A. 纸带上的点迹间距先增加后减小至零
- B. 纸带上的点迹间距先增加后减小至一不为零的定值
- C. 纸带上的点迹间距逐渐增加，且相邻两点间的距离之差不变
- D. 纸带上的点迹间距逐渐增加，且相邻两点间的距离之差逐渐减少，直至间距不变

(3) 为了测定物块 A 所带电量 q ，除倾角 θ_0 、磁感应强度 B 外，本实验还必须测量的物理量有_____。

(4) 用重力加速度 g 、磁感应强度 B 、倾角 θ_0 和所测得的物理量，可得出 q 的表达式为_____。

8. 某同学对下面这道习题的解法如下所示，这种解法是否正确？若不正确，请指出错误之处，并给出正确的解答。

如图 1-8 所示，宽为 L 的光滑导轨与水平面成 α 角，处于磁感应强度大小为 B 、方向垂直于导轨面的匀强磁场中。在导轨上水平放置一根质量为 m 的金属棒，且金属棒通有电流的有效长度也为 L ，此时金属棒恰好能静止，回路中通有电流。

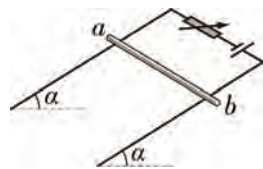


图 1-8

- (1) 求磁感应强度的方向。
- (2) 求回路中电流的大小。

某同学的解法如下：

解：(1) 要使金属棒能够静止，受力分析如图 1-9 所示，即安培力方向需沿斜面向上。根据左手定则，可知磁场方向垂直导轨斜面向上。

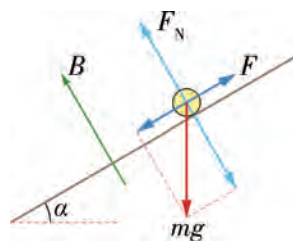


图 1-9

- (2) 根据力的平衡条件，有 $F = mg \sin \alpha$ 。

而 $F = BIl$, 可得 $I = \frac{mgs\sin\alpha}{BL}$.

9. 如图 1-10 所示是洛伦兹力演示仪. 设电子的电量为 e , 质量为 m , 电子枪的加速电压为 U , 两线圈之间的磁感应强度为 B . 忽略电子所受重力及电子间的相互作用.

- (1) 求电子从电子枪射出时速度 v 的大小.
- (2) 求电子在磁场中运动轨道半径 r .
- (3) 如果想要改变电子在磁场中运动轨道半径 r , 可以采取哪些措施?

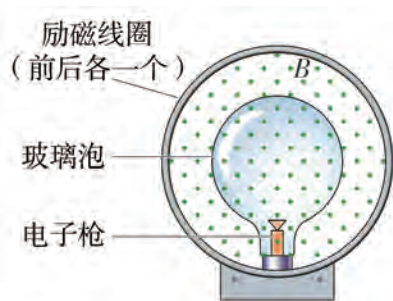


图 1-10

10. 如图 1-11 所示是一个测量磁场磁感应强度大小的实验方案. 整个装置悬挂在弹簧测力计下, 装置下端有单匝线圈, 线圈宽度 $L = 0.1 \text{ m}$, 线框下边处于一个待测匀强磁场中, 磁场方向与线圈平面垂直. 当线框接通直流电源, 电流为 2 A 时, 发现弹簧测力计的示数为 0.6 N . 保持电流大小不变, 改变电流方向, 弹簧测力计的示数变为 0.8 N .

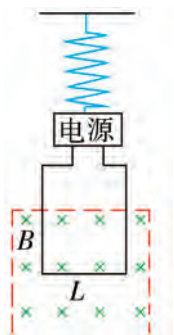


图 1-11

11. 地磁场可以有效抵御宇宙射线的侵入. 赤道剖面外地磁场可简化为包围地球厚度为 d 的匀强磁场, 方向垂直该剖面, 如图 1-12 所示. 宇宙射线中对地球危害最大的带电粒子主要是 β 粒子. 设 β 粒子的质量为 m , 电量为 e , 最大速率为 v , 地球半径为 R , 匀强磁场的磁感应强度为 B , 不计大气对 β 粒子运动的影响. 要使在赤道平面内从任意方向射来的 β 粒子均不能到达地面, 则磁场厚度 d 应满足什么条件?



图 1-12

12. 电磁弹射器是航空母舰上的一种舰载机起飞装置, 如图 1-13 所示. 飞机前轮下连有一牵引杆, 起飞前牵引杆伸出至上下导轨之间, 储能装置提供瞬发能量, 强大的电流从导轨流经牵引杆, 牵引杆在安培力作用下带动飞机运行至高速.

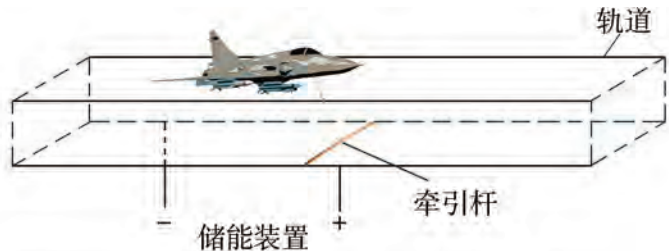


图 1-13

- (1) 请判断图中电磁弹射器工作时磁场的方向.
 - (2) 请根据上述信息, 自设物理量, 推导出飞机从静止、加速到起飞, 起飞轨道至少需要多长.
13. 如何利用小指南针来估测条形磁铁磁场某处的磁感应强度? (提示: 可以利用地磁场与条形磁铁的相互关系, 并查阅地磁场的相关数值.)

第二章

电磁感应

从电生磁到磁生电，体现了物理学对称之美，而要进一步探究磁生电的规律，需要从电磁感应的实验现象中发现并提出新的问题，设计实验探究方案，针对实验结果进行科学解释，并结合科学解释严谨表述结论。科学探究没有一成不变的步骤，唯有实事求是的科学态度与质疑创新的科学精神。

19世纪初电磁学的研究成果，尤其是电磁感应定律的发现，不仅奠定了电磁学理论的基石，而且使一种新的、效率更高的、更方便的能源利用和转化成为可能，人类社会的电气时代由此拉开帷幕——发电机将燃料、水流等能源转化为电能，实现了电能高效率、大规模的生产和传输；电动机将电能转化成机械能，为机器生产和新的动力能源架起了桥梁……从此，人类文明被深深地烙上了电磁的印记。

本章我们将通过实验探究影响感应电流方向的因素，理解法拉第电磁感应定律，了解自感现象和涡流现象及其在生产生活中的应用，并进一步树立能量转化与守恒的观念。



第一节

感应电流的方向



在必修第三册中，我们通过在螺线管中插、拔磁铁的实验，探究了感应电流的产生条件，并发现不同的实验操作会使电流计指针的偏转方向即感应电流的方向发生变化，这其中究竟存在怎样的规律呢？

影响感应电流方向的因素

感应电流的方向与什么因素有关？我们通过实验来探究这一问题。



实验与探究

1. 如图 2-1-1 所示是根据问题设计的实验探究方案。

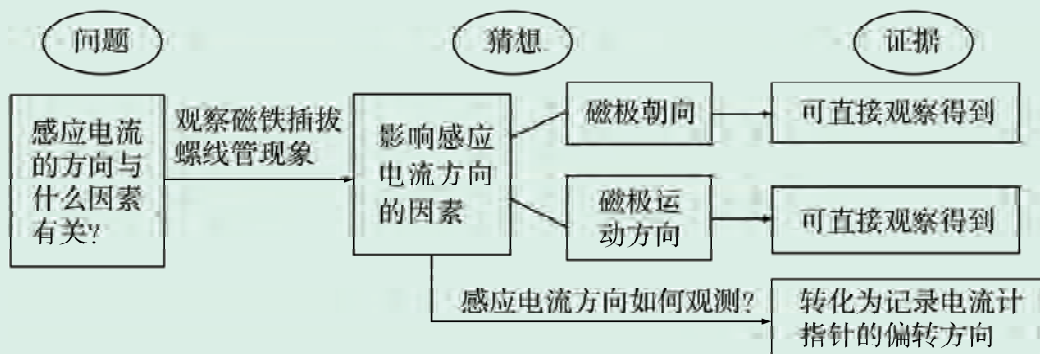


图 2-1-1 实验探究方案

从上图可以看到，感应电流的方向看不见、摸不着，于是将其转化为电流计指针的偏转方向进行记录。我们设计了如图 2-1-2 所示的实验电路，探究电流计指针的偏转方向与通入电流方向的关系，把观察到的现象及结果填入表 2-1-1 中。

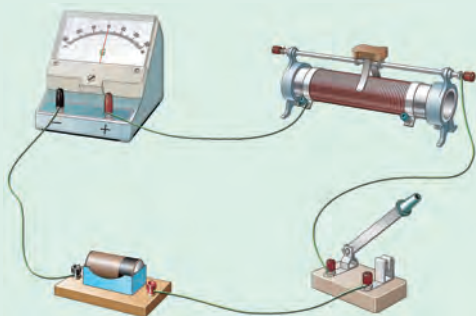


图 2-1-2 实验电路图

表 2-1-1 实验现象记录表

电流流入电流计的情况	电流计指针偏转方向
电流从“+”接线柱流入	
电流从“-”接线柱流入	

由磁极朝向和磁极运动方向两个变量的搭配组合，可以组成四种不同的实验操作方案，由此设计实验现象记录表格如表 2-1-2 所示。

表 2-1-2 实验现象记录表

条形磁铁的运动情况	N 极朝下 插入线圈	N 极朝下 从线圈中拔出	S 极朝下 插入线圈	S 极朝下 从线圈中拔出
实验操作图示				
电流表指针的偏转方向	右偏			
线圈中感应电流的方向	$b \rightarrow a$			

从表 2-1-2 中的实验现象，可见感应电流的方向与磁极朝向、磁极运动方向之间并不存在较明显的关系。

当从实验结果中无法直接得出结论时，我们尝试借助已有的理论，将记录的物理量转化为其他间接的物理量，以进一步探索可能存在的关联。

2. 用“原磁场的方向”表示“磁极的朝向”，用“原磁通量 Φ 的变化”表示“磁极运动的方向”，将感应电流的方向也转化为与磁场相关的描述——感应电流磁场的方向。安培定则可以作为转化的工具。

依据上述思路进行实验操作，并将观察到的实验现象记录在表 2-1-3 内。

表 2-1-3 实验现象记录表

条形磁铁的运动情况	N 极朝下 插入线圈	N 极朝下 从线圈中拔出	S 极朝下 插入线圈	S 极朝下 从线圈中拔出
实验操作图示				

(续表)

条形磁铁的运动情况	N 极朝下 插入线圈	N 极朝下 从线圈中拔出	S 极朝下 插入线圈	S 极朝下 从线圈中拔出
原磁场的方向	向下			
原磁通量 Φ 的变化	增大			
电流表指针的偏转方向	右偏			
线圈中感应电流的方向	$b \rightarrow a$			
感应电流磁场的方向	向上			

分析表 2-1-3 中的实验结果, 可以发现什么规律?

在上述实验探究中, 我们发现感应电流产生的磁场的方向与原磁场穿过线圈的磁通量 Φ 的变化有关. 当原磁通量 Φ 增加时, 感应电流产生的磁场的方向与原磁场方向相反, 如图 2-1-3 所示. 当原磁通量 Φ 减小时, 感应电流产生的磁场的方向与原磁场的方向相同, 如图 2-1-4 所示. 由此可以判定感应电流磁场的方向, 再由安培定则最终判定感应电流的方向.

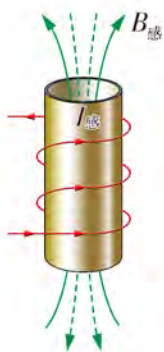


图 2-1-3 原磁通量 Φ 增加的情况

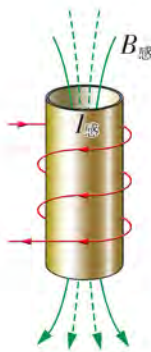


图 2-1-4 原磁通量 Φ 减小的情况

楞次定律

当法拉第关于电磁感应现象的发现传到俄国时, 俄国物理学家楞次 (H. F. E. Lenz, 1804—1865) 很快在此基础上做了各类相关的实验, 进一步探究电磁感应现象的全过程, 并于 1833 年 11 月总结得出: 闭合回路中感应电流具有这样的方向, 即感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化. 这就是著名的楞次定律 (Lenz Law).



图 2-1-5 楞次

根据楞次定律，电磁感应现象中各物理量之间的逻辑关系如图 2-1-6 所示.



图 2-1-6 电磁感应现象中各物理量之间的逻辑关系

这里的“阻碍”并不是“阻断”. 例如，当引起感应电流的磁通量增加时，感应电流产生的磁场的方向与原磁场方向相反，它的作用只是阻碍了磁通量的增加，并没有把磁通量增加这种行为阻断. 当回路中的磁通量不变时，回路中没有“变化”需要阻碍，此时无须新的感应磁场，即不会产生感应电流.

从能量的角度分析，感应电流的方向符合楞次定律是能量守恒定律的必然结果. 由于回路中存在电阻，感应电流会产生内能. 根据能量守恒定律，这部分内能只可能从其他形式的能量转化而来.

在上述探究实验中，当条形磁铁插入线圈时，根据楞次定律，条形磁铁会受到斥力，如图 2-1-7 所示. 为使磁铁能继续插入线圈中，必须借助外力克服这个斥力对外做功. 正是通过这部分功将其他形式的能量（如磁铁的机械能）转化为线圈中的电能，电能再转化为线圈和电流计中的内能. 可见，楞次定律是能量守恒定律在电磁现象中的体现.

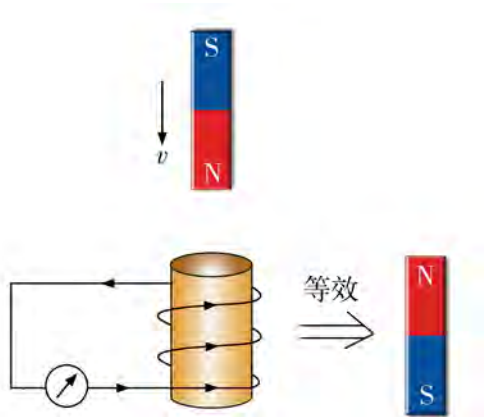


图 2-1-7 实验中磁铁受力分析

例题：如图 2-1-8 所示是必修第三册中探究电磁感应电流产生条件的一种实验方案. 请利用该实验方案中的器材，设计一个验证楞次定律的实验，写出实验步骤与论证过程.

分析：要验证楞次定律，需要改变原磁通量的大小，并记录感应电流的方向，从而检验实验结果是否符合楞次定律.

解：实验步骤与论证过程如下：

第一步：按如图 2-1-8 所示连接电路，将金属棒与灵敏电流计串联，并置于蹄形磁铁的磁场中.

第二步：将金属棒向右移动做切割磁感线运动，如图 2-1-9 所示. 此时导线与金属棒围成的闭合回路中磁通量减小.

根据楞次定律，此时感应电流产生的感应磁场方向应与原磁场方向相同. 根据安培定则，可知金属棒

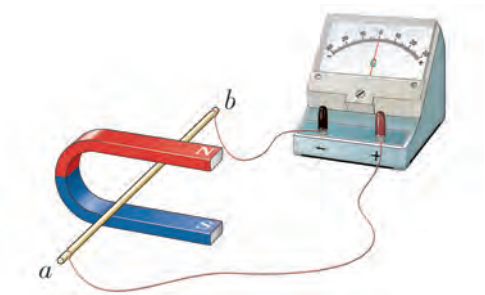


图 2-1-8 探究电磁感应电流产生条件

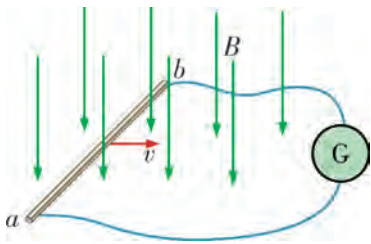


图 2-1-9 金属棒向右切割磁感线

中的电流应当是从 a 端流向 b 端, 即从电流计的 “-” 接线柱流入, 指针应当左偏. 实际操作并观测电流计指针偏转方向, 即可检验是否符合楞次定律.

第三步: 将金属棒向左移动做切割磁感线运动, 根据楞次定律, 此时感应电流产生的感应磁场方向与原磁场方向相反. 根据安培定则, 可知电流计指针应当右偏. 实际操作并观测实验结果是否符合楞次定律.

讨论与交流

如图 2-1-8 所示, 金属棒中的自由电荷是负电荷, 在金属棒向右移动做切割磁感线运动过程中, 这些负电荷是否会受到洛伦兹力? 若有, 方向如何?

右手定则

闭合回路的部分导体在切割磁感线时会产生感应电流, 除了可以用楞次定律和安培定则判定感应电流的方向, 还有其他特殊的判定方法吗?

英国电机工程师、物理学家弗莱明 (J. A. Fleming, 1864—1945) 发现, 感应电流的方向与磁感线方向、导体运动方向三者之间存在一定的规律, 这就是右手定则 (right-hand rule): 伸开右手, 使拇指与其余四个手指垂直, 并且都与手掌在同一个平面内. 让磁感线垂直穿入手心, 拇指指向导体运动的方向, 这时其余四指所指的方向就是感应电流的方向, 如图 2-1-10 所示.

右手定则可以看作是楞次定律在导体运动情况下的特殊运用.

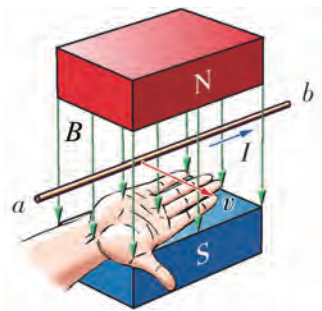


图 2-1-10 右手定则

实践与拓展

将线圈与微电流传感器连接, 如图 2-1-11 所示, 利用条形磁铁改变线圈中的磁场, 验证楞次定律是否成立.

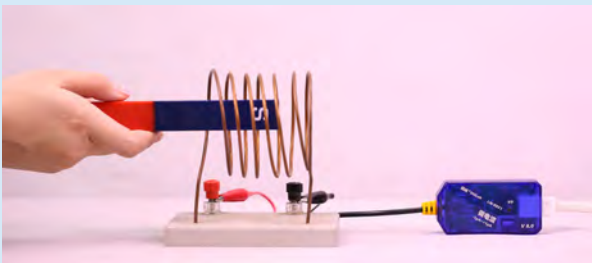


图 2-1-11 实验装置图

从磁生电研究简史品味对称性思想

1820年，奥斯特关于电流磁效应的发现，引发了科学界研究电磁现象的热潮。当时不少人根据对称性思想都想到一个问题：既然电能生磁，那么磁能生电吗？而且当时人们普遍认为：既然恒定电流产生了稳恒磁场，那么稳恒磁场应该可以产生恒定电流。

法拉第等科学家早期在上述指导思想下做了大量实验，一类是将两根导线并列摆放，希望利用一根导线产生的磁场，在另一根导线中感应出电流；另一类是将导线放在磁场旁边希望感应出电流。然而，上述两类实验中并未发现磁生电现象，恒定电流和稳恒磁场之间出现了不对称性。

法拉第的前期探索并非完全没有价值，根据前期研究，他发现实验所需磁体最好的形状，很可能是“很厚的环”。于是他在粗软铁环上绕上两个彼此绝缘的线圈A和B，组成实验方案电路图如图2-1-12所示，并于1831年8月29日抓住一个偶然现象继续深究，终于发现了磁生电现象，并提出“只有变化的磁场才能产生电流”，打破了早期的对称性猜想。

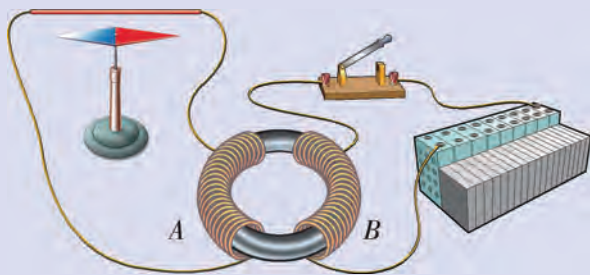


图2-1-12 法拉第电磁感应实验

之后麦克斯韦建立了完整的电磁场理论，指出恒定电流本质上是电荷的恒定流动。电荷运动所产生的电场是运动的，所以恒定电流产生的是变化的电场。因此恒定电流产生稳恒磁场的本质是变化的电场周围产生了磁场。根据对称性思想，变化的磁场周围会产生电场，在闭合电路中表现为产生了电流，这正符合法拉第的发现。至此，在更高的理论层面上，在对称性思想的指引下，又再次获得了成功，而物理学在“对称—打破对称—建立更高层次对称”的过程中不断向前发展。电磁现象的研究如此，当代前沿研究也类似。

 练习

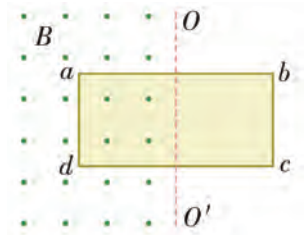


图 2-1-13

表 2-1-4

序号	线圈的运动	线圈中是否有感应电流产生	感应电流的方向
1	将线框 $abcd$ 向右匀减速平移		
2	将线框 $abcd$ 向纸面外平移		
3	将线框 $abcd$ 以 ad 为轴向外转动 60°		

2. 假设感应电流的方向与楞次定律规定的方向相反，请用反证法分析该假设是否符合能量守恒定律，进而论证楞次定律的正确性.

3. 如图 2-1-14 所示，一铝制导体圆环竖直套在一根固定的水平光滑绝缘杆 ab 上.

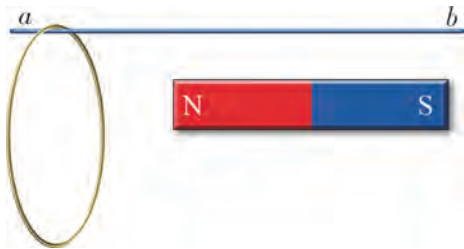


图 2-1-14

(1) 当进行以下操作时，圆环中能否产生感应电流？若有感应电流产生，其方向如何？

操作 1：圆环固定不动，条形磁铁从圆环中心位置沿竖直方向向下平移.

操作 2：圆环不固定，条形磁铁 N 极向左插入圆环.

操作 3：去除横杆 ab ，让圆环和条形磁铁同时从当前位置自由下落.

(2) 除了上述操作，还有其他可能让圆环产生感应电流的操作方案吗？如果有，请指出各种方案中感应电流的方向.

4. 为了探究楞次定律，某同学设计了如图 2-1-15 所示的实验方案. 他设想在一根较长的铁钉上，用漆包线绕了两个线圈 A 和 B ，希望利用其中一段漆包线中的电流变化使小磁针发生偏转，再利用安培定则判定感应电流的方向.

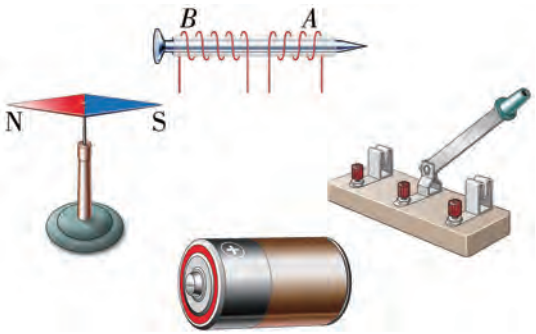


图 2-1-15

(1) 请根据该同学的设想连接好电路.

(2) 分析闭合开关瞬间，线圈 A 和 B 漆包线中电流的方向，以及小磁针 N 极的偏转情况.

(3) 闭合开关，该同学发现小磁针偏转角度很小，现象并不明显. 如何改进实验才能让现象更明显呢？

第二节

法拉第电磁感应定律



将产生感应电流的电路与常见的闭合电路进行类比，可知产生感应电流的电路中存在电动势；当电路断开时，虽然没有感应电流，但是电动势依然存在。在电磁感应现象中产生的电动势称为**感应电动势**（induced electromotive force）。

影响感应电动势大小的因素

我们知道，闭合回路中磁通量发生变化会产生感应电流，说明回路中有感应电动势产生，那么感应电动势的大小是否与磁通量的变化有关呢？我们将磁通量的变化类比速度的变化，考虑从磁通量变化的大小和磁通量变化的快慢两个角度进行研究。



实验与探究

如图 2-2-1 所示，将螺线管用导线与电表连接，依次用 1 根条形磁铁快速插入或拔出螺线管、用 2 根条形磁铁分别快速和慢速插入或拔出螺线管，并以定性描述的方式（如很大、较大、较小等），将实验结果填入表 2-2-1 中。



图 2-2-1 探究影响感应电动势大小的因素

表 2-2-1 实验结果记录表

所用条形磁铁的数目	条形磁铁插入或拔出的方式	螺线管中磁通量变化的大小 $\Delta\Phi$	电流表指针的偏转角度	感应电动势 E 的大小
1 根	快速			
2 根	快速			
2 根	慢速			

分析表 2-2-1 中的实验结果，可以得到什么实验结论？

实验表明,在控制条形磁铁插入或拔出螺线管的速度相同,以保证磁通量变化所用时间近似相等的情况下,磁通量的变化量 $\Delta\Phi$ 越大,感应电动势 E 越大;在保持磁铁的数量相同,以保证磁通量变化量相等的情况下,磁通量变化的时间 Δt 越小,感应电动势 E 越大.

从上面的实验结果可以初步看出,感应电动势的大小与磁通量变化快慢 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 有关.

法拉第电磁感应定律

物理学是一门定量的科学,物理学中的基本规律一般都需通过公式来表达.德国物理学家纽曼(F. E. Neumann, 1798—1895)在对理论和实验资料进行严格分析后,于1845年指出了感应电动势的定量规律:电路中感应电动势的大小,与穿过这一电路的磁通量变化率成正比.由于之前法拉第做了大量开创性的研究工作,人们将这一规律称为法拉第电磁感应定律(Faraday law of electromagnetic induction).

设感应电动势的大小为 E , 则有

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

式中 k 为比例系数,它的值取决于各个量所用的单位.在国际单位制中, E 的单位是伏特(V), Φ 的单位是韦伯(Wb), t 的单位是秒(s), 则 $k = 1$. 于是上式可写成

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.2.1)$$

如果线圈有 n 匝,可以看作是由 n 个单匝线圈串联而成的.由于横截面积不大,穿过每匝线圈的磁通量变化率可以看作是相同的,所以,整个线圈中的感应电动势是单匝线圈的 n 倍,即

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

导线切割磁感线时的感应电动势

导线做切割磁感线运动是产生感应电动势的一种常见方式.如图2-2-2所示,在磁感应强度为 B 的匀强磁场中,有相距为 L 的两平行金属导轨 ae 和 df . ad 间串联一电流计,两导轨所在平面与磁感线垂直.导线 bc 放在导轨上,与两导轨垂直,此时电流计、金属导轨与导线构成一个闭合回路.设导线 bc 以速度 v 向右运动,在 Δt 时间内,由原来的位置 bc 移到 $b'c'$. 这个过程中,闭合回路的面积变化量

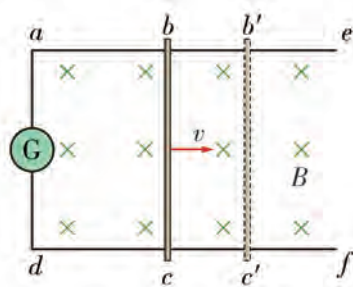


图2-2-2 导线做切割磁感线运动

$$\Delta S = Lv\Delta t$$

穿过闭合电路磁通量的变化量

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

根据法拉第电磁感应定律，可求得导线做切割磁感线产生的感应电动势

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

如果导线的运动方向与磁感线方向不垂直，那么怎样计算感应电动势的大小呢？如图 2-2-3 所示，圆点表示导线的截面，棒的运动方向与其自身方向垂直，与磁感线方向的夹角为 θ ，此时，速度 v 可以分解为两个分量：垂直于磁感线的分量 $v_1 = v\sin\theta$ 和平行于磁感线的分量 $v_2 = v\cos\theta$ 。平行于磁感线的分量不切割磁感线，因此不产生感应电动势。垂直于磁感线的分量切割磁感线，产生的感应电动势为

$$E = BLv_1$$

即可得到导线做切割磁感线运动产生的感应电动势的另一种表述方式为

$$E = BLv\sin\theta \quad (2.2.2)$$

式中 θ 为导线运动方向与磁感线方向的夹角。在国际单位制中， E 、 B 、 L 、 v 的单位分别是伏特 (V)、特斯拉 (T)、米 (m)、米/秒 (m/s)。

上述属于较为特殊的情形，因为导线是细直形状，并且做的是匀速直线运动。若将其换成形状不规则的导体，相应的表达式需要采用微元的思想进行推演，大学阶段的学习将有进一步的阐述。

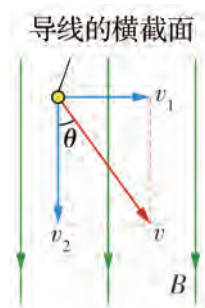


图 2-2-3 速度分解



讨论与交流

1. 公式 $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 和公式 $E = BLv\sin\theta$ 有何区别？
2. 在如图 2-2-2 所示的图中，导线做切割磁感线运动，能量是如何转化的？所产生的电能与克服安培力所做的功之间有什么关系？

切割磁感线的导线等效为一个电源。在电源内部，电流是由负极流向正极，因此，可以通过右手定则判断导线的电流方向，进而可知导线两端感应电动势的高低。

在导线做切割磁感线的运动中，产生的电能是通过其他外力克服安培力做功转化而来的，克服安培力做了多少功，就有多少电能产生。这些电能又通过电流做功，转化为其他形式的能，整个过程遵守能量守恒定律。



实践与拓展

如图 2-2-4 所示, 将漆包线绕在透明的管上, 制作成一个大的螺线管 (每一捆线圈 50 匝, 共 8 捆). 通电后通电螺线管两端产生了非匀强磁场, 在螺线管中部产生了近似的匀强磁场.

请利用上述自制螺线管、线圈、灵敏电流计、学生电源、开关和滑动变阻器, 设计一个实验方案, 探究影响感应电动势大小的因素.

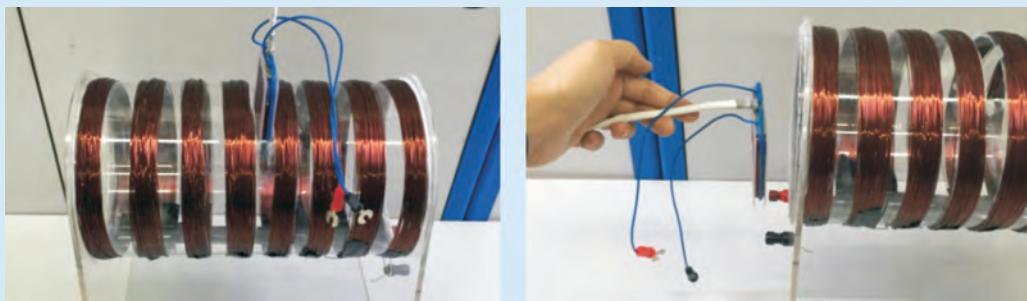


图 2-2-4 自制螺线管及线圈摆放位置示意图

电子感应加速器的设计

现代科学研究中常常用到高速电子, 我们在第一章学过的回旋加速器的加速区域只是在两个 D 形盒间的狭缝区, 电子在磁场中做圆周运动时速度大小并没有发生变化. 能否设计一种电子加速装置, 让电子一边做圆周运动一边加速呢? 为了实现这个功能, 人们给运动的电子提供一个与电子圆周运动轨迹时时相切的同心圆电场. 那么, 如何提供这样的同心圆电场? 研究表明, 磁场变化时会在空间激发出一种电场, 称为感生电场, 利用电磁感应现象中产生的感生电场是一种很好的思路.

如图 2-2-5 所示, 上、下电磁铁的线圈中通入方向呈周期性变化的交变电流, 在电磁铁两极间产生交变磁场, 这个交变磁场又激发出一个感生电场, 如图 2-2-6 所示. 电子枪射入的电子同时受到两个力的作用, 一个是洛伦兹力, 使电子做圆周运动; 另一个

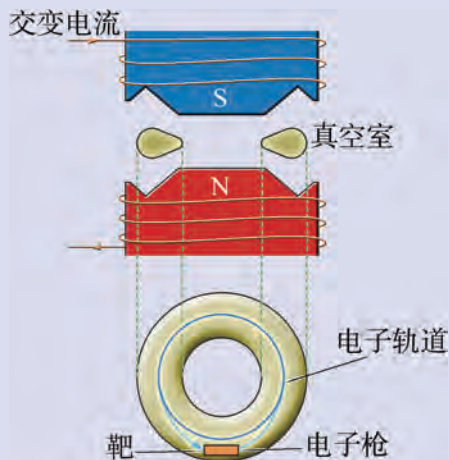


图 2-2-5 电子感应加速器原理图

是切线方向的电场力，使电子沿圆周不断加速。

除了同心圆电场，还需解决另外两个问题。

一是如何减小空气阻力对加速电子的影响。为此，我们可以将两极之间抽成真空。二是如何让

电子一边加速一边维持半径不变的圆周运动。根据洛伦兹力公式 $f = qvB = m \frac{v^2}{r}$ ，当 v 不断增加

时，只要磁感应强度 B 对应地不断增加并满足上述等式，则可以让电子运动半径保持不变。而

实际中磁场的磁感应强度 B 总是有上限的，所以，在磁场增至最大值之前，需要将电子引离轨道进入实验用的靶室。

至此，应用学过的知识，就可以设计出现代科学研究中常用的电子感应加速器的初步方案。科学与技术的紧密联系，由此可见一斑。

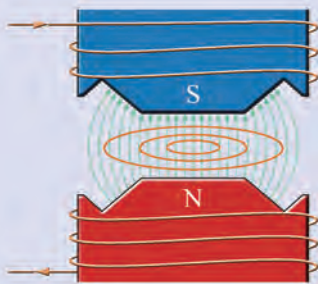


图 2-2-6 电子感应加速器中的磁感线和电场线

练习

1. 下面是几名同学对于感应电动势的认识，他们的观点正确吗？为什么？

同学甲：穿过线圈的磁通量越大，感应电动势越大；穿过线圈的磁通量为零，感应电动势一定为零。

同学乙：穿过线圈的磁通量的变化量越大，感应电动势越大。

同学丙：感应电动势与穿过闭合电路的磁通量的变化量成正比。

2. 如图 2-2-7 所示， A 、 B 两个闭合线圈是用同样的导线制成的，其匝数均为 10 匝，半径 $R_A = 2R_B$ ，图示区域内有磁感应强度均匀减小的匀强磁场。

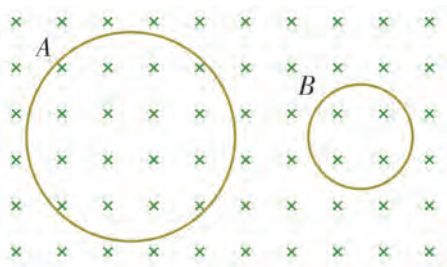


图 2-2-7

(1) 线圈 A 、 B 中产生的感应电动势之比是多少？

(2) 线圈 A 、 B 中产生的感应电流之比是多少？

3. 正在转动的电风扇叶片由于某种原因被卡停时，往往过一段时间就会发出焦糊味，出现电动机被烧坏的现象。请结合如图 2-2-8 所示的风扇中使用的直流电动机模型，分析出现这种现象的原因。

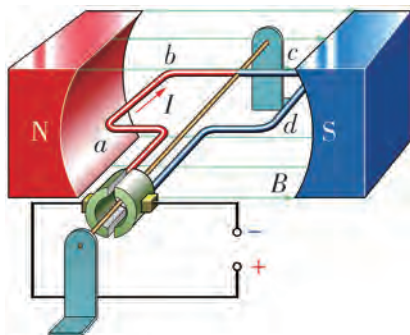


图 2-2-8

第三节

电磁感应规律的应用



电磁感应规律有着非常广泛的应用，例如生活中的超速“电子眼”，实验室里的法拉第发电机，军事上的航母阻拦技术，都与电磁感应现象有着密切的联系。下面我们结合这些实例应用物理原理建构物理模型，解释生活生产中的各种现象，体验学以致用思路。

超速“电子眼”

为了保障道路交通安全，很多地方都在马路上安装“电子眼”，对违章超速车辆进行抓拍。目前普遍使用的一款“电子眼”即是一套利用电磁感应规律制成的交通监测设备。如图 2-3-1 所示，在路面下方间隔一段距离埋设两个通电线圈。当车辆通过通电线圈上方的道路时，由于车身是由金属材料制成的，做切割磁感线运动会产生感应电流，引起电路中电流的变化。根据 $v = \frac{s}{t}$ ，只有汽车先后通过两个线圈上方的时间间隔小于某个值，拍摄装置才会被触发拍下超速车辆的照片。

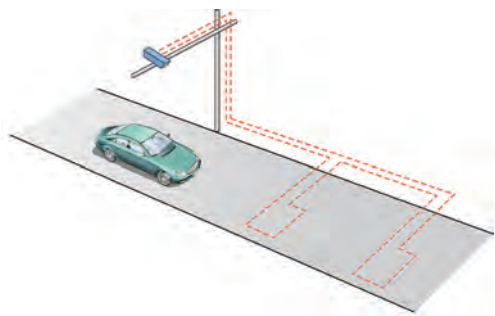


图 2-3-1 超速“电子眼”设备物理模型图

从具体实物到物理模型，物理建模的思想在上例中得到了体现。这是学以致用的一种思路。

法拉第发电机

将物理模型结合技术设计成为生活、生产、科研中可以应用的产品，是学以致用的第二种思路。

铜棒在匀强磁场中旋转做切割磁感线运动产生感应电动势，这是一个典型的物理模型。下面通过例题来思考如何将这一典型物理模型设计成可以应用的产品。

例题 1：如图 2-3-2 所示，长为 L 的铜棒 OA 在垂直于匀强磁场的平面上绕点 O 以角速度 ω 匀速转动，磁场的磁感应强度为 B 。求铜棒中感应电动势的大小，并分析 O 、 A 两点电势的高低。

分析：在磁场中，设想铜棒与以 O 为圆心、 L 为半径的一个圆环构成闭合回路。随着铜棒转动回路面积减小，磁通量发生变化。

利用 $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 可求得感应电动势。根据右手定则可判断电势高低。

解：设在 Δt 时间内，铜棒转过的角度为 α ，则

$$\alpha = \omega \Delta t.$$

此过程铜棒扫过的面积

$$\Delta S = \frac{1}{2} L \alpha \cdot L = \frac{1}{2} L^2 \alpha.$$

此过程磁通量的变化量

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

$$\text{所以 } E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} B L^2 \omega \Delta t}{\Delta t} = \frac{1}{2} B L^2 \omega.$$

根据右手定则，若连接铜棒两端形成回路，铜棒中电流方向将由 A 指向 O 。铜棒相当于电源，在电源内部电流方向从电源的负极指向正极，故点 O 的电势高，点 A 的电势低。

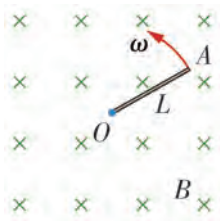


图 2-3-2 铜棒在磁场中匀速转动



讨论与交流

1. 在例题 1 中，能否根据 $E = BLv$ 计算感应电动势的大小？能否根据楞次定律判断电势高低？
2. 参考例题 1 中的物理模型，发挥想象力，设计一款运用于生活、生产或科研的产品，并与同学们进行交流分享。

在例题 1 中，铜棒旋转做切割磁感线运动产生了感应电动势，如果通过导线与铜棒组成闭合回路，则回路中将产生感应电流。如果将很多根铜棒连成一体组成一个导体圆盘，在磁场中持续转动，则产生的感应电流将更大，这就是发电机的雏形。

基于上述思路，1831 年 10 月，法拉第将一个由紫铜制成的圆盘置于蹄形磁极之间，发明了世界上第一台发电机——法拉第圆盘发电机，如图 2-3-3 所示。圆盘的圆心处固定一个摇柄，圆盘的边缘和圆心处各与一个黄铜电刷紧贴。当转动摇柄使铜盘旋转起来时，与电刷连接的电流

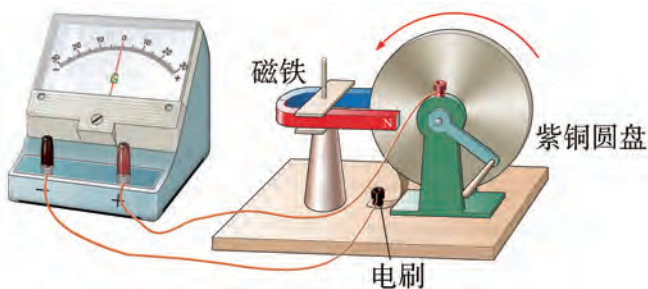


图 2-3-3 法拉第圆盘发电机示意图

计显示电路中产生了持续的电流.

法拉第圆盘发电机虽然结构简单,其产生的电流甚至不足以让一个小灯泡发光,然而作为世界上第一台发电机,法拉第圆盘发电机揭开了机械能转化为电能的序幕,为后续大型发电机的研制提供了宝贵的参考.法拉第应用物理模型开发新设备的思路,也为我们学以致用提供了良好的实例.

航母阻拦技术

面对同一问题,我们可以建构不同的物理模型,从而提出不同的解决方案,这体现出学以致用灵活性.下面通过有关航母阻拦技术的例题加以体会.

例题 2: 2012 年 11 月,我国歼-15 舰载机(如图 2-3-4 所示)在“辽宁号”航空母舰上着舰成功,它的阻拦系统原理如图 2-3-5 所示,飞机着舰时,通过阻拦索对飞机施加作用力,使飞机在甲板上短距离滑行后停止.新一代航母阻拦系统的研制,则从阻拦索阻拦转向了引入电磁学模型的电磁阻拦技术,其基本原理如图 2-3-6 所示,飞机着舰时钩住轨道上的一根金属棒并关闭动力系统,在磁场中共同滑行减速.阻拦索与金属棒绝缘.

- (1) 试分析电磁阻拦相对于阻拦索阻拦的优点.
- (2) 试分析电磁阻拦中,飞机从钩住金属棒到停下来的整个过程做怎样的运动.



图 2-3-4 舰载机着舰

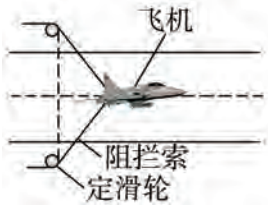


图 2-3-5 阻拦索阻拦模型

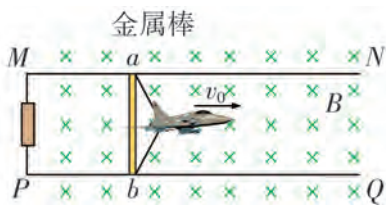


图 2-3-6 电磁阻拦模型

分析: 对于第(1)个问题,可以通过受力分析比较两种阻拦模型中阻力的来源,进而比较其优缺点.对于第(2)个问题,可以将飞机和金属棒看成一个整体,综合应用动量守恒、运动学、安培力等知识,分析整个过程中的运动状态.

解: (1) 根据阻拦索阻拦模型的受力分析,可知飞机受到两根阻拦索的作用力.对于阻拦索而言,一方面在硬度和韧性方面的工艺要求非常苛刻,制造难度大;另一方面,阻拦索持续工作一段时间后,容易出现疲劳和老化等问题.

对于电磁阻拦模型,可把飞机与金属棒看成一个整体,其在磁场中做切割磁感线运动时会受到安培力的阻碍作用,相对于利用阻拦索阻拦而言,电磁阻拦减少了对阻拦索的依赖,提高了飞机着舰的安全性和可靠性.

- (2) 以飞机和金属棒组成的整体为研究对象,设飞机质量为 M ,金属棒质量为 m ,飞

机刚钩住金属棒的前后时刻系统动量守恒，根据动量守恒定律，有

$$Mv_0 = (M + m) v,$$

$$\text{解得 } v = v_0 \frac{M}{M + m},$$

即飞机以 v_0 的速度着舰，钩住金属棒后与金属棒以共同速度 v 进入磁场。

在随后任一时刻，设金属棒做切割磁感线运动产生的感应电流大小为 i ，忽略摩擦阻力，根据牛顿第二定律，可知此时加速度 a 的大小为

$$a = \frac{BiL}{M + m}.$$

设金属棒电阻为 r ，飞机和金属棒的共同速度为 v' ，轨道端点 MP 间的电阻阻值为 R ，根据闭合电路欧姆定律，可知此时感应电流 i 的大小为

$$i = \frac{E}{R + r} = \frac{BLv'}{R + r}.$$

综合上述两式，可得任一时刻加速度 a 的大小为

$$a = \frac{B^2 L^2 v'}{(M + m)(R + r)}.$$

从上面加速度的表达式可知，当飞机和金属棒以共同速度 v 进入磁场后，做速度不断减小、加速度也不断减小的减速运动，直至最终停止。

同样，我们还可以计算飞机从钩住金属棒到它们停下来整个过程中运动的距离。感兴趣的同学可在课外另行计算。



实践与拓展

查阅资料，撰写报告分析奥斯特电流磁效应和法拉第电磁感应定律对第二次工业革命的贡献，了解科学技术对社会发展的意义。



练习

1. 法拉第于 1831 年发明了世界上第一台发电机，可是真正将发电机用于大规模发电，却是近 50 年后才得以实现。如何看待两者间隔了如此长的时间？

2. 在某一生产铜线框的工厂流水线上，人们为了检测出个别未闭合的不合格线圈，通常将完全相同的铜线圈等距离排列在匀速运动的水平绝缘传送带上，然后让传送带通过一固定的、磁场方向垂直于传送带的匀强磁场区域，根据穿过磁场后线圈间的距离，就能够检测出不合格线圈。请根据上述原理，观察图 2-3-7 中的第 1~6 个铜线圈，分析哪个或哪些线圈不合格，并说明判断理由。

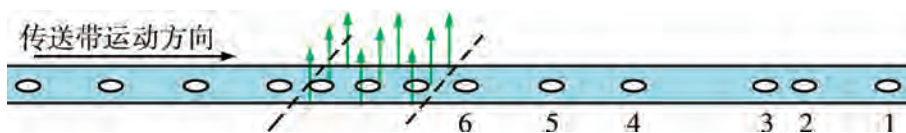
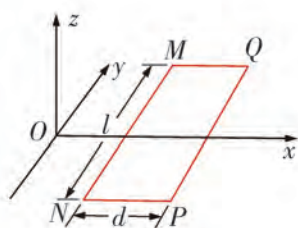


图 2-3-7

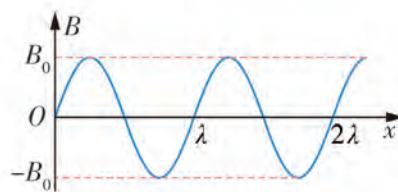
3. 磁悬浮列车是一种高速低耗的新型交通工具, 如图 2-3-8 (a) 所示. 它的驱动系统可简化为如下模型, 固定在列车下端的动力绕组可视为一个矩形金属框, 电阻为 R 的金属框置于 xOy 平面内, MN 长为 l 平行于 y 轴, NP 宽为 d 平行于 x 轴, 如图 2-3-8 (b) 所示. 轨道区域内存在垂直于金属框平面的磁场, 磁感应强度 B 沿 Ox 方向按波长为 λ 的正弦规律分布, 如图 2-3-8 (c) 所示. 整个磁场以一定的速率沿 Ox 方向匀速平移, 忽略一切阻力, 列车在驱动系统作用下沿 Ox 方向加速行驶.



(a)



(b)



(c)

图 2-3-8

(1) 简要叙述列车运行中获得驱动力的原理.

(2) 为使列车获得最大驱动力, MN 、 PQ 边应处于磁场中的什么位置?

4. 法拉第曾提出一种利用河流发电的设想, 并进行了实验研究. 实验装置示意图如图 2-3-9 所示, 两块面积均为 S 的矩形平行金属板正对地浸在河水中, 金属板间距为 d . 水流速度处处相同, 大小为 v , 方向水平向左. 金属板与水流方向平行. 地磁场磁感应强度的竖直分量为 B , 水的电阻率为 ρ , 水面上方有一阻值为 R 的电阻通过绝缘导线和开关 S 连接到两金属板上. 忽略边缘效应, 求:

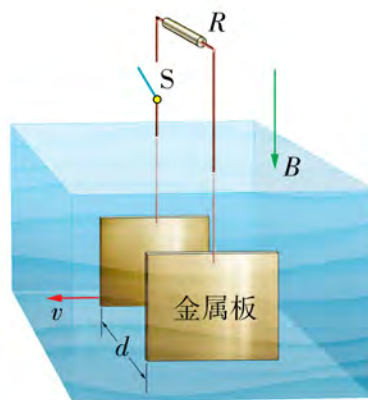


图 2-3-9

(1) 该发电装置的电动势大小.

(2) 通过电阻 R 的电流大小.

(3) 电阻 R 消耗的电功率大小.

第四节

互感和自感



从实际应用的角度，可以根据感应电动势的产生是来自导体线圈外部还是自身，将感应电动势分为互感电动势和自感电动势。

互感现象

如图 2-4-1 所示是法拉第发现电磁感应现象的实验原理图之一。当线圈 A 中电流发生变化时，它产生的变化的磁场在线圈 B 中激发出了感应电动势。根据对称性思想，线圈 B 中感应电流的变化，同时也会在线圈 A 中产生相应的感应电动势。这种现象称为**互感** (mutual-induction)，所产生的感应电动势称为**互感电动势**。互感现象也可以发生在两个相互靠近的电路之间。

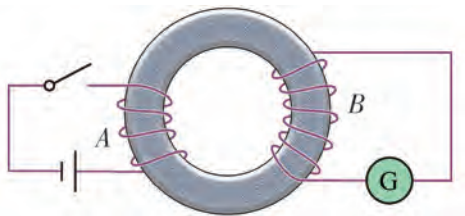


图 2-4-1 互感现象实验原理图

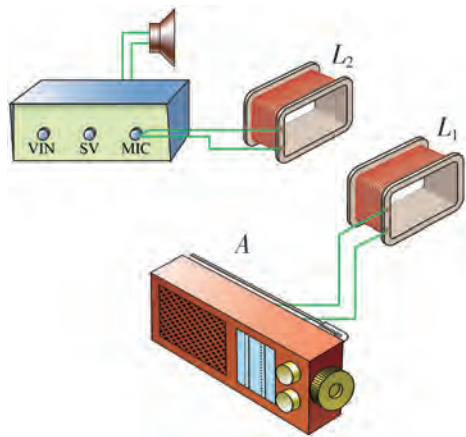


图 2-4-2 无线通信演示实验示意图

利用互感现象，我们可以将一个线圈中变化的信号传递到另外一个线圈。在如图 2-4-2 所示的无线通信演示实验中，打开收音机开关时，线圈 L_1 和线圈 L_2 之间有一定的距离，喇叭却能发出音乐声响。关闭收音机，喇叭则不发声。可见喇叭发出的声音是通过线圈 L_1 和 L_2 的互感作用，将收音机的音乐电信号传递给喇叭。

互感现象在电工技术和电子技术中有着广泛的应用，但并非所有的互感现象都是有利的，如有时互感现象会影响电路的正常工作，因此要尽力减小其消极影响。

自感现象

由于线圈本身的电流发生变化而产生的电磁感应现象称为**自感** (self-induction). 在自感现象中产生的感应电动势, 称为**自感电动势**.



观察与思考

通电和断电时都能够让线圈中的磁通量发生变化. 分别设计实验, 探究自感现象的规律.

实验 1: 探究通电时的自感现象.

如图 2-4-3 所示, 两个完全相同的灯泡, 一个与线圈串联, 另一个与电阻箱串联, 实验前调节电阻箱 R_1 , 使它的电阻等于线圈的内阻. 闭合开关 S , 观察实验现象并解释其产生的原因.

实验 2: 探究断电时的自感现象.

断电时, 线圈中是否会产生感应电动势? 一个实验小组受通电自感实验的启发, 设计了如图 2-4-4 所示的两个实验电路图.

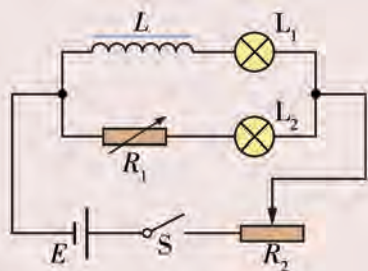
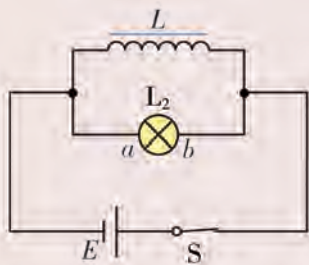
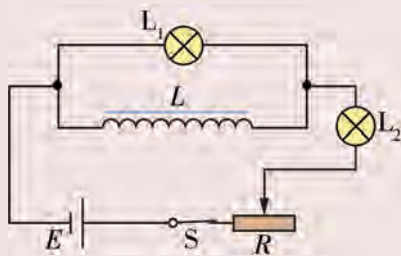


图 2-4-3 通电自感实验电路图



(a)



(b)

图 2-4-4 断电自感实验电路图

根据上述实验方案, 思考并讨论下列问题.

- (1) 从理论上分析, 实验电路 (a) 和实验电路 (b) 中的开关断开时, 各会发生什么现象?
- (2) 根据理论分析的结果, 哪个实验方案相对更好?
- (3) 连接电路并进行实验, 观察实验现象是否与理论预测相符. 如果发现与预测不相符的现象, 试分析其原因.

在实验 1 中, 开关 S 闭合瞬间, 灯泡 L_2 立刻正常发光, 而与线圈 L 串联的灯泡 L_1 却逐渐亮起来, 过一段时间后两个灯泡才达到同样的亮度. 在实验 2 的电路 (a) 中, 当开

关S断开时,灯泡L并没有立即熄灭,而是逐渐熄灭.在电路(b)中,断开开关S的瞬间,灯泡L₂立即熄灭,灯泡L₁却闪亮一下再逐渐熄灭.

上述自感现象都有一个共同特点,即在闭合或断开开关时,通过线圈的电流发生了变化,导致通过线圈自身的磁通量发生了变化.根据法拉第电磁感应定律,可知此时线圈中产生了阻碍自身磁通量变化的感应电动势.

自感系数

从定量的角度分析自感现象,自感电动势是感应电动势的一种,同样遵循法拉第电磁感应定律,其大小与穿过线圈的磁通量的变化率成正比,即 $E \propto \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$.实验和理论研究表明,线圈中变化的电流所激发的磁感应强度B与电流的变化率成正比,即 $B \propto \frac{\Delta I}{\Delta t}$;结合磁通量公式 $\Phi = BS$,可推得自感电动势与电流的变化率成正比,即

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

式中L是比例系数,称为**自感系数**,简称自感或电感,它与线圈的形状、长短、匝数以及是否有铁芯等因素有关,电感的单位是亨利,简称亨,符号是H.实际使用中,电感都很小,所以常用毫亨(mH)和微亨(μH)为单位,其换算关系为

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

以亨利为自感系数的单位,是为了纪念美国物理学家亨利(J. Henry, 1797—1878).1831年,亨利在电磁铁实验中意外发现,通有电流的线圈在断路时有电火花产生.他抓住这个发现进行系统研究,并发表论文宣布发现了自感现象.而后他又继续实验,于1835年发表第二篇论文解释自感现象.可惜当时欧洲的科学家没有阅读到他在美国发表的论文,以致1837年亨利到欧洲拜访法拉第时,还不得不向法拉第演示自感现象并作解释.可见科学传播与交流的重要性.



图 2-4-5 亨利

生活、生产中的自感现象

自感现象广泛地存在于生活、生产之中.人们常常利用自感现象比如断电自感来产生高压.日光灯、汽车发动机点火器(如图2-4-6所示)、煤气灶电子点火器等都利用了这一原理.

自感现象也会产生危害,生产中的大型电动机一般都有自感系数很大的线圈.当电路中开关断开时,线圈会产生很大的自感电动势,使开关的闸刀



图 2-4-6 汽车发动机点火器

和固定夹片之间的空气电离而变成导体，形成电弧。这不仅是会烧坏开关，甚至还会危害到操作人员的安全。因此，切断这种电路时必须采用特制的安全开关。

又如，无轨电车（如图 2-4-7 所示）在行驶的过程中，由于车身颠簸，有可能导致车顶上的车弓在某个瞬间会脱离电网线出现瞬间断电，此时电车内部的线圈会产生一个较大的自感电动势，使电弓与电网线之间的空气电离，从而闪现电火花。



图 2-4-7 无轨电车

讨论与交流

- 1. 拔下正在工作的家用电器的电源插头，或者将家用电器电源插头插入插座时，有时会看到电火花，这些电火花是怎样产生的？日常生活中我们应当怎样注意用电安全？
- 2. 电子设备中常要用一种没有电感的精密电阻，采用的是双线并绕的方式，即把一根电阻线对折后绕制成线圈，如图 2-4-8 所示。为什么这种结构的电阻会没有电感？

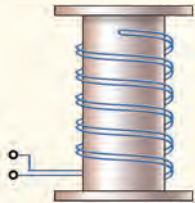


图 2-4-8 双线绕法

实践与拓展

将实验 1 中的两个灯泡换成两个电流传感器，可以得到两条对应的 $i-t$ 图线，如图 2-4-9 所示。它们的主要区别在于图线拐角处形状不同。请实际操作实验并判断：这两条曲线分别对应了哪条支路？为什么？

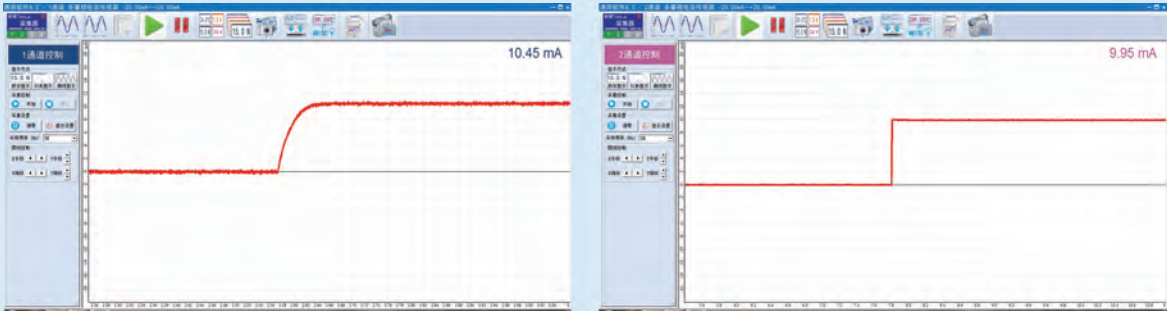


图 2-4-9 电流传感器测得的实验图线

日 光 灯

日光灯是自感现象的典型应用之一。

日光灯主要由灯管、镇流器和启辉器组成，如图 2-4-10 所示。灯管的两端各有一条灯丝，管中充有稀薄的氩和微量水银蒸气，管壁上涂有荧光粉。两条灯丝之间的气体在导电时会发出紫外线，荧光粉受到紫外线的照射就会发出可见光。

启辉器的内部结构如图 2-4-11 所示。当闭合开关时，电源把电压加到启辉器两极，启辉器内的氖气放电发出闪亮的辉光。辉光产生热量使启辉器的 U 形动触片受热膨胀而接触静触片，两极接触后电路接通，此时两极间的电势差很小，氖气不再产生辉光，管内温度降低，U 形动触片冷却收缩，两极断开，启辉器熄灭。

镇流器的内部结构如图 2-4-12 所示，其关键部分是一个绕在闭合铁芯上的线圈。当启辉器通电后很快又断电，根据断电自感的原理，此时镇流器中的线圈产生很大的自感电动势，与电源电压合在一起，形成瞬间高压加在灯管两端，使灯管内的气体电离发出紫外线，激发管壁上的荧光粉发出可见光。日光灯发光后，由于交变电流不断通过镇流器的线圈，线圈中持续产生自感电动势阻碍线圈中电流的变化。灯管发光后的镇流器，此时又起到降压限流的作用，满足了灯管正常发光所需的低电压。



图 2-4-10 日光灯的电路图

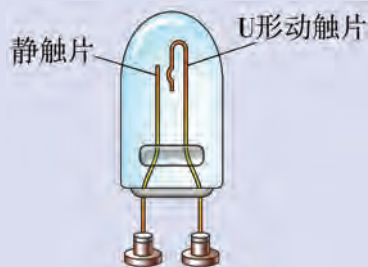


图 2-4-11 启辉器内部结构

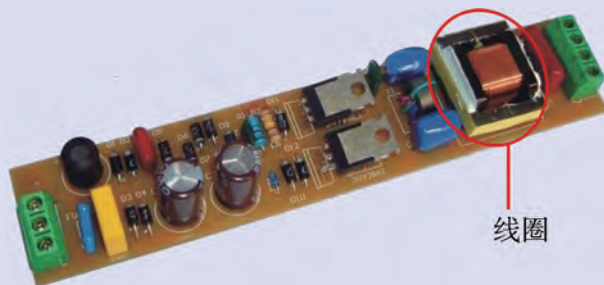


图 2-4-12 镇流器内部结构

随着技术的进步，传统的日光灯逐渐被新型的节能灯代替。虽然它们的发光原理相近，但节能灯多采用新型的电子镇流器，不再需要启辉器，并且具有耗材少、照明能效高、保护视力等明显优势，符合低碳生活的发展趋势。



练习

1. 在如图 2-4-13 所示的电路中, L 是自感系数足够大的线圈, 它的电阻可忽略不计, L_1 和 L_2 是两个完全相同的小灯泡.

(1) 当闭合开关 S 时, L_1 和 L_2 两个灯泡的亮度将如何变化?

(2) 当断开开关 S 时, L_1 和 L_2 两个灯泡的亮度又将如何变化?

2. 某同学设计了如图 2-4-14 所示的实验电路来测定自感系数很大的线圈 L 的电阻.

(1) 请根据实验电路, 说明该实验测定线圈 L 电阻的原理.

(2) 测量完毕后, 该同学想先断开开关 S_2 , 此时, 他的同学赶紧制止, 并告诉他, 若其断开开关 S_2 将会烧坏电压表. 这种说法正确吗? 如何正确拆解这个电路?

3. 在实际生产中, 有些高压直流电路中含有自感系数很大的线圈. 当电路中的开关 S 由闭合到断开时, 线圈会产生很高的自感电动势, 使开关 S 处产生电弧, 危及操作人员的人身安全. 为了避免电弧的产生, 几名同学分别提出了以下四种方案, 如图 2-4-15 所示. 哪种(些)方案可行? 还有其他设计方案吗?

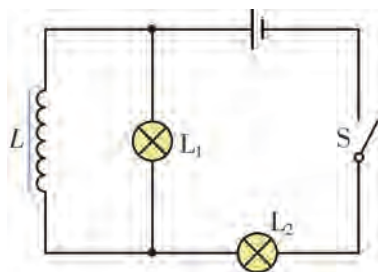


图 2-4-13

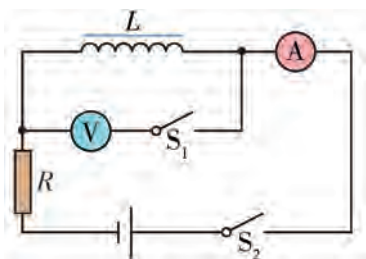


图 2-4-14

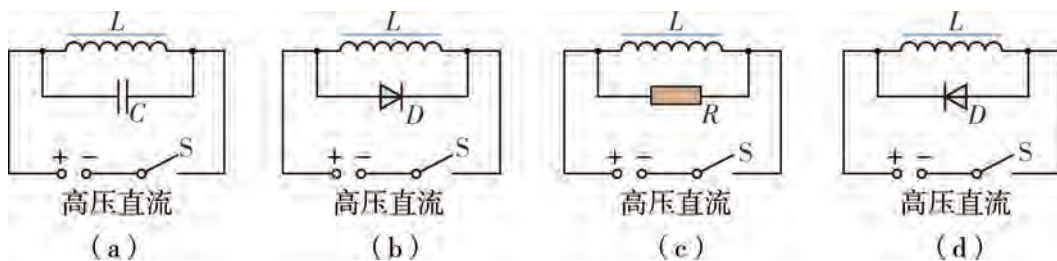


图 2-4-15

第五节 涡流现象及其应用

许多电磁设备中常配有大块的金属，例如电动机、变压器的线圈都绕在铁芯上。当这些金属块处于变化的磁场中或者相对磁场运动时，其内部是否会产生感应电流？

涡流现象

如图 2-5-1 所示，一块导体外面绕上线圈，给线圈通入变化的电流，线圈中就会产生变化的磁场。线圈中的导体可看成是由许多闭合回路组成的，回路中的磁通量不断变化，每个回路中都会产生感应电流。在整个导体中，一圈圈的感应电流环绕导体轴线流动，如果用图表示这样的感应电流，看起来就像水中的旋涡，所以我们称之为**涡电流**（eddy current），简称**涡流**。这种在整块导体内部发生电磁感应而产生感应电流的现象，称为**涡流现象**。

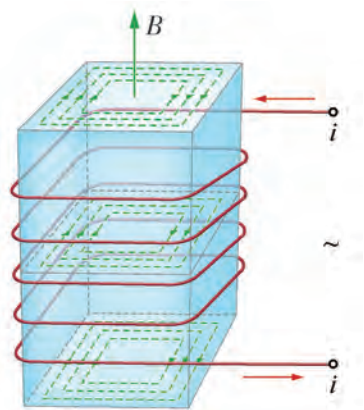


图 2-5-1 涡流现象的产生

涡流的热效应

像其他电流一样，金属块中的涡流也会产生热量。如果金属的电阻率小，则会产生很强的涡流，产生大量的焦耳热。利用涡流这种热效应，可以在生产、生活中加热各种物体。

高频感应炉就是利用涡流的热效应进行金属冶炼的例子。如图 2-5-2 所示，在耐火材料制成的冶炼锅中放入待熔化的金属，冶炼锅外缠绕线圈，让高频交变电流通过线圈，被冶炼的金属内部产生很强的涡流，从而产生大量的热量使金属熔化。这种冶炼方法加热效率高、速度快，可以减小表面氧化程度，并且容易控制温度，适合冶炼特种钢等各种特种合金。

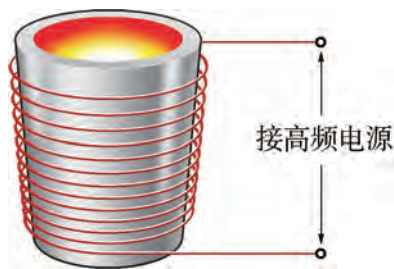
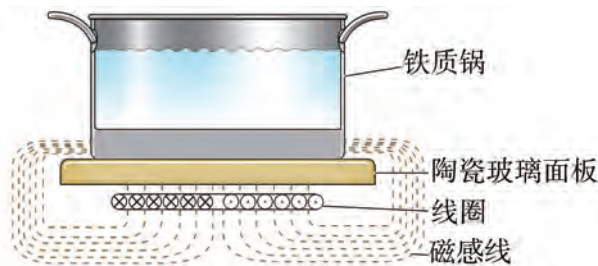


图 2-5-2 高频感应炉示意图

我们生活中常见的电磁炉也是涡流热效应的典型应用。如图 2-5-3 所示，利用陶瓷玻璃面板下方的线圈产生变化的磁场，当铁磁材料制成的烹饪锅放置在面板上时，锅底处在变化的磁场中产生涡流，使锅本身自行高速发热，达到加热锅内食物的目的。通过控制交变电流的大小，我们可以控制电磁炉的功率，从而满足炒、蒸、炖等多种烹饪方式的火力需要。



(a) 电磁炉实物图



(b) 电磁炉的基本结构图

图 2-5-3 电磁炉

利用锅底涡流发热的电磁炉，热量在传递过程中损耗较少，因此其热效率高达 80% 以上。此外，电磁炉不产生明火和燃烧废气，是一种清洁、高效的炊具。

涡流的机械效应

涡流除了热效应外，磁场中的涡流会受到安培力的作用，表现出相应的机械效应。



实验与探究

在设计实验探究磁场中涡流的机械效应时，需要满足下列实验条件。

- (1) 提供一个磁场，既可以采用普通磁铁，也可以采用电磁铁。
- (2) 提供一个能够在磁场中做切割磁感线运动而产生涡流的导体，例如悬挂在磁场中摆动的金属片、在磁场中旋转的铝笼等。

(3) 考虑导体做切割磁感线运动的方式，可以是磁场静止、导体运动，也可以是导体静止、磁场变化。

综合上述三个条件，组合成不同的实验方案。

如图 2-5-4 所示是其中一种方案。一个铝笼置于蹄形磁铁的两个磁极间，铝笼可以绕支点自由转动。转动磁铁，观察铝笼的运动，思考并讨论下列问题。



图 2-5-4 探究磁场中涡流的机械效应实验装置

- (1) 该实验方案采用了什么方式探究磁场中涡流的机械效应？
- (2) 实验前结合相关知识猜想：该方案的实验现象将是怎样的？开展探究实验，验证猜想是否正确。
- (3) 参考上述实验设计思路，设计出其他实验探究方案。

当磁场相对于导体运动时，导体中产生的涡流使导体受到安培力，安培力使导体运动起来的现象叫作**电磁驱动**。

磁性式转速表就是利用电磁驱动作用制成的。如图 2-5-5 所示，转速表的磁铁转轴与其他机器设备（如车轮）相连。磁铁随着转轴转动时，在金属感应片中产生涡流，由于电磁驱动的作用带动指针发生偏转，直到与弹簧游丝扭转产生的反向作用效果平衡，由此显示出转速的大小。将转速表盘改为车速刻度，就成了汽车上的车速表。

当导体在磁场中运动时，导体中产生的涡流使导体受到安培力，并且安培力总是阻碍导体的运动，这种现象叫作**电磁阻尼**。

例如，磁电式电表中将线圈绕在一个轻铝框上，如图 2-5-6 所示，当有电流输入线圈时，通电线圈在磁场中受力转动，带动指针和铝框一起转动。此时铝框中产生涡流，由于电磁阻尼的作用，铝框很快就会停止摆动，使指针能够迅速稳定在示数位置上。

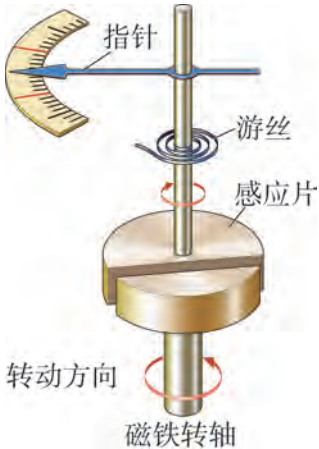


图 2-5-5 磁性式转速表

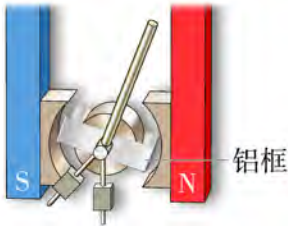


图 2-5-6 磁电式电表中的铝框

涡流的磁效应

涡流也是电流，而电流能够产生磁场。因此，涡流也具有磁效应。

如何利用涡流的这种磁效应？我们可以通过检测这个磁场，间接地推断物质的属性。根据这一思路，人们制成了探测金属的金属探测器，如图 2-5-7 所示。通有变化电流的长柄线圈在扫过地面时，地下金属物体在交变磁场中被激发出涡流，涡流产生磁场影响线圈的磁场，从而触发报警。安检人员使用的手持式金属探测器（如图 2-5-8 所示），也是应用类似的原理。当金属探测器扫过乘客身上所携带的金属物品时，就会触发金属探测器报警。



图 2-5-7 金属探测器



图 2-5-8 手持式金属探测器

涡流现象是一种电磁感应现象，能够将变化磁场的磁场能转化为感应电流的电能。而涡流对外产生热效应、机械效应或者磁效应，实质上是将金属块自身的电能转化为其他形

式的能的过程. 例如, 热效应是将电能转化为内能的过程, 机械效应是将电能转化为机械能的过程, 磁效应是将电能转化为磁场能的过程.

 练习

1. 如图 2-5-9 所示是高频焊接原理示意图, 线圈中通以高频变化的电流时, 待焊接的金属工件中会产生感应电流, 感应电流通过焊缝处时产生大量热量, 从而将金属熔化, 把工件焊接在一起, 而工件其他部分发热却很少. 据此判断以下三名同学的说法是否正确. 为什么?

- 同学甲: 电流变化的频率越高, 焊缝处的温度升得越快.
- 同学乙: 要使焊缝处产生的热量较大, 可增大交变电流的电压.
- 同学丙: 工件上只有焊缝处温度升得很高, 是因为焊缝处的电阻小.

2. 某同学在学习了涡流现象的知识后, 制作了如图 2-5-10 所示的实验装置. 将一个玩具小人连接弹簧悬挂起来, 玩具的底部粘上一块强磁铁, 并分别制作了铝环、塑料环和带缺口的铝环.

请利用上述实验器材, 通过比较的方式, 分别设计一个能够演示电磁驱动和演示电磁阻尼的实验.

3. 涡流探伤是工业上常用的技术之一, 该技术通过励磁线圈靠近导体, 使导电构件中产生涡电流, 再借助探测线圈测定涡电流的变化量, 从而获得构件缺陷的有关信息. 参考如图 2-5-11 所示的示意图, 解释涡流探伤技术是如何发现导体中的缺陷的.

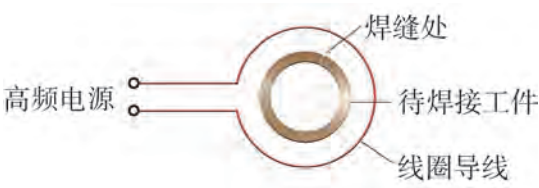


图 2-5-9

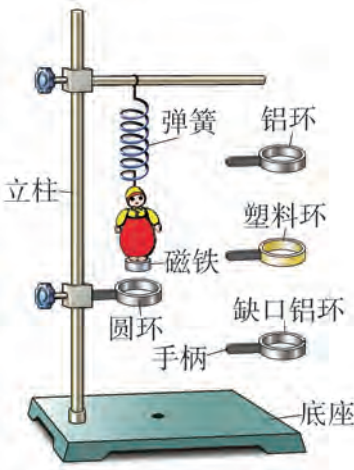


图 2-5-10

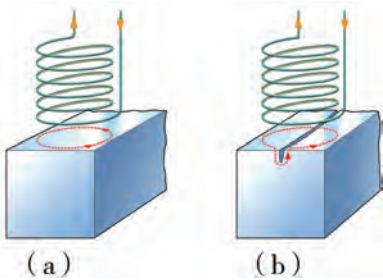


图 2-5-11

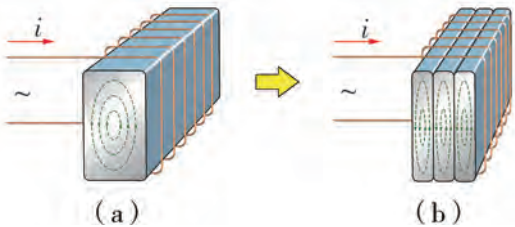


图 2-5-12

4. 涡流产生的热会使变压器的铁芯温度升高, 降低工作效率. 为此, 变压器中常用电阻率较大的硅钢作为铁芯材料, 如图 2-5-12 所示, 并把整块金属的铁芯替换成由许多互相绝缘的薄硅钢片叠成的铁芯. 请结合相关知识说明上述改进措施的原理.

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



回顾与评价

1. 本章中学到哪些与电磁感应相关的物理模型？
2. 生活、生产中有哪些体现了电磁感应知识应用的例子？分析这些例子一般采用的思路是什么。
3. 在探究影响感应电流方向因素的实验过程中，印象最深的是什么？
4. 你对本章哪些内容提出了质疑？又产生了哪些新的想法？

习题二

- 关于电磁感应，下列说法正确的是（ ）。
 - 只要导体切割磁感线就会产生感应电流
 - 只要磁通量发生了变化就会产生感应电动势
 - 感应电流的磁场总是与原来磁场的方向相反
 - 线圈中的电流变化越快，其自感系数就越大
- 从能量的角度研究电磁感应现象，下列说法不正确的是（ ）。
 - 楞次定律中的阻碍过程实质上是能量转化的过程
 - 产生感应电流的过程中，机械能和其他形式的能通过电磁感应转化成电能
 - 电磁感应现象中，克服安培力做了多少功，就有多少电能产生
 - 自感现象和涡流现象都符合能量守恒定律
- 如图 2-1 所示是生产中常用的一种延时继电器的示意图，铁芯上有两个线圈 A 和 B，线圈 A 跟电源连接，线圈 B 的两端接在一起，构成一个闭合回路。下列说法错误的是（ ）。
 - 闭合开关 S 时，线圈 B 中产生图示方向的感应电流
 - 断开开关 S 的瞬间，线圈 B 中产生图示方向的感应电流
 - 断开开关 S 时，主要是线圈 A 具有延时作用
 - 断开开关 S 的瞬间，弹簧 K 立即将衔铁 D 拉起
- 电吉他中电拾音器的基本结构如图 2-2 所示，磁体附近的金属弦被磁化，因此弦振动时，在线圈中产生感应电流，电流经电路放大后传送到音箱发出声音，下列说法正确的有（ ）。
 - 选用铜质弦，电吉他仍能正常工作
 - 取走磁体，电吉他将不能正常工作
 - 增加线圈匝数可以增大线圈中的感应电动势
 - 弦振动过程中，线圈中的电流方向不断变化

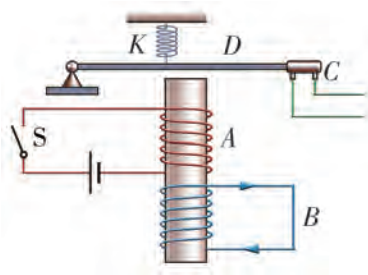


图 2-1

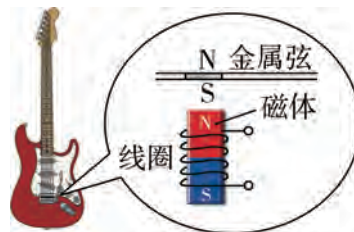


图 2-2

5. 如图 2-3 所示是手机无线充电板的充电原理示意图. 充电板接交流电源, 对充电板供电, 充电板内的送电线圈可产生交变磁场, 从而使手机内的受电线圈产生交变电流, 再经整流电路转变成直流电流后对手机电池充电.

为方便研究, 现将问题做如下简化: 设受电线圈的匝数为 n , 面积为 S , 若在 $t_1 \sim t_2$ 时间内, 磁场垂直于受电线圈平面向上穿过线圈, 其磁感应强度由 B_1 均匀增加到 B_2 . 下列说法正确的是 ().

- A. 点 c 的电势高于点 d 的电势
- B. 受电线圈中感应电流方向由 d 到 c
- C. c 、 d 之间的电势差为 $\frac{n(B_2 - B_1)S}{t_2 - t_1}$
- D. c 、 d 之间的电势差为 $-\frac{n(B_2 - B_1)S}{t_2 - t_1}$

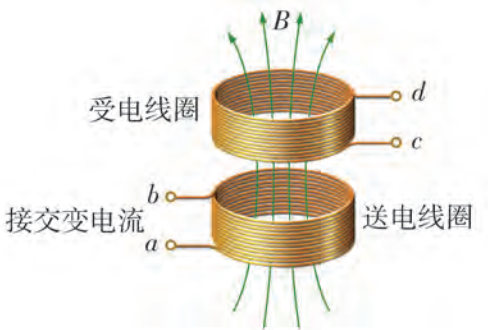


图 2-3

6. 在如图 2-4 所示的电路中, 电感 L 的自感系数很大, 电阻可忽略不计, D 为理想二极管, 则下列说法正确的有 ().

- A. 闭合开关 S , L_1 立即变亮, L_2 逐渐变亮
- B. 闭合开关 S , L_1 一直不亮, L_2 逐渐变亮
- C. 断开开关 S , L_2 立即熄灭
- D. 断开开关 S , L_1 突然变亮, 然后逐渐变暗至熄灭

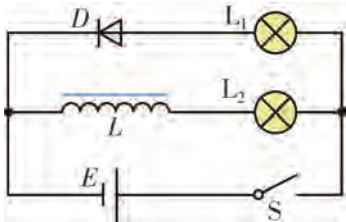


图 2-4

7. 科技节上, 老师做了一个奇妙的“跳环实验”. 如图 2-5 所示, 她把一个带铁芯的线圈、开关和电源用导线连接起来后, 将一个金属套环置于线圈上, 且使铁芯穿过套环. 闭合开关的瞬间, 套环跳起. 某同学另外找了器材来重复演示此实验. 他连接好电路, 经重复试验, 线圈上的套环均未动. 对比老师演示的实验, 分析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. 所用套环的材料与老师的不同

8. 如图 2-6 所示是探究电磁感应产生条件的实验器材.

(1) 在图中用实线代替导线将实验器材连成实验电路.

(2) 可以使电流表的指针发生偏转的操作有:

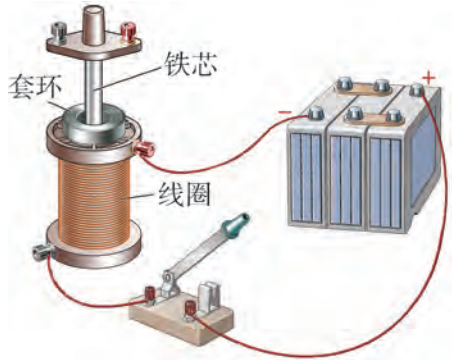


图 2-5

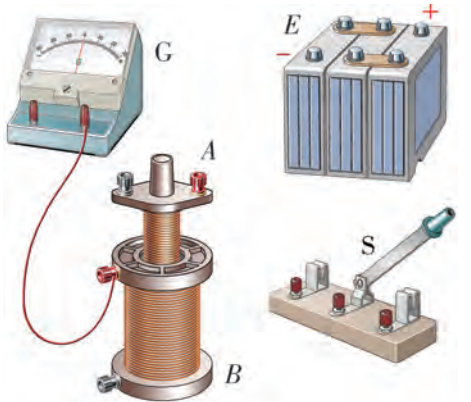


图 2-6

- ① _____.
- ② _____.

(3) 假设在开关闭合的瞬间,灵敏电流计的指针向左偏转,则螺线管 A 向上拔出的过程中,灵敏电流计的指针向_____ (选填“左”或“右”)偏转.

(4) 某同学在连接好的电路中做实验.第一次将螺线管 A 从螺线管 B 中快速抽出,第二次将螺线管 A 从螺线管 B 中慢慢抽出,发现电流计指针摆动的幅度大小不同,第一次比第二次的幅度_____ (选填“大”或“小”),原因是_____.

9. 某研究性学习小组利用风速仪测风速,风速仪的简易装置如图 2-7 (a) 所示.

(1) 请根据装置图说明风速仪测风速的原理.

(2) 研究小组发现,某一段时间内线圈输出的感应电流波形如图 2-7 (b) 所示,从电流的波形图中,我们可以得到什么有价值的信息?

(3) 若电流波形的峰值突然增大了,则说明风速如何变化?

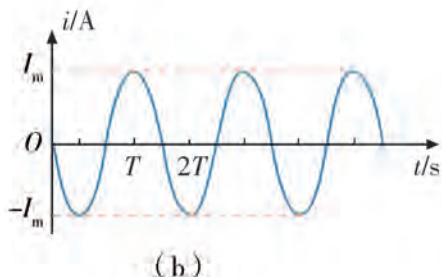
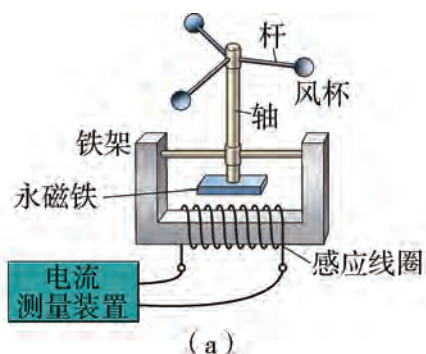


图 2-7

10. 如图 2-8 所示,单匝矩形线圈处于磁感应强度为 B 的匀强磁场中绕轴 OO' 转动,若线圈的两个边长分别是 L_1 和 L_2 ,线圈匀速转动的角速度为 ω . 试证明:在图示位置时,线圈中产生的感应电动势 $E = BS\omega$, 式中 $S = L_1 L_2$ 为线圈面积.

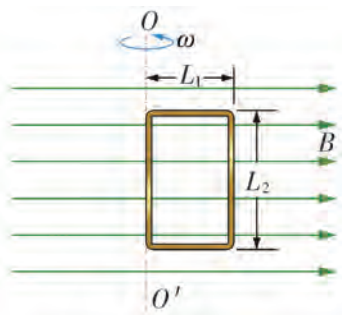


图 2-8

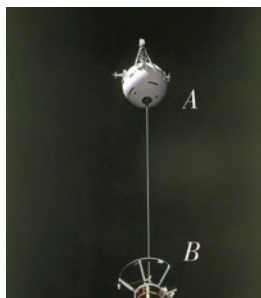


图 2-9

11. 航天科学家设计了一个关于“绳系卫星”的实验,如图 2-9 所示.从航天飞机上释放一颗小卫星,小卫星与航天飞机之间用导电缆绳相连,“绳系卫星”位于航天飞机的正下方,且与航天飞机一起在地球赤道上空,以 7.5 km/s 的线速度自东向西绕地球做匀速圆周运动,导电缆绳 AB 的长度 $L = 20 \text{ km}$, 所处地磁场的磁感应强度大小均为 $5.0 \times 10^{-5} \text{ T}$.

- (1) 判断缆绳 AB 哪一端电势高，并说明理由.
- (2) 求缆绳 A 、 B 间感应电动势的大小.
- (3) 结合相关知识，大胆想象一下“绳系卫星”可以有哪些用途.

12. 月球探测器在月面实现软着陆是非常困难的，为此科学家们在实验探索过程中设计了一种电磁阻尼缓冲装置，其原理如图 2-10 所示. 该装置的主要部件有两部分：①缓冲滑块，它由高强绝缘材料制成，其内部边缘绕有闭合单匝矩形线圈 $abcd$ ，指示灯连接在 cd 两处；②探测器主体，包括绝缘光滑缓冲轨道 MN 、 PQ 和超导线圈（图中未画出），超导线圈能产生方向垂直于整个缓冲轨道平面的匀强磁场. 当缓冲滑块接触仿真水平月面时，滑块立即停止运动.

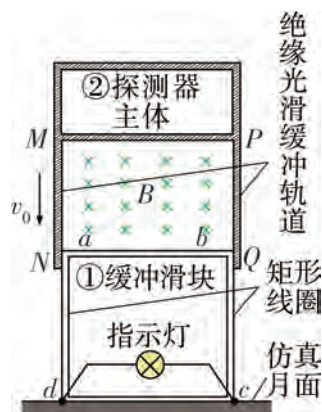


图 2-10

- (1) 请运用已学知识分析该装置是如何实现缓冲的.
- (2) 简要阐述该装置在缓冲过程中能量是如何转化的.

13. 某部侦探小说中描述了这样一种窃听电话的方法：窃听者将并排在一起的两根电话线分开，在其中一根电话线旁边铺设一条两端分别与耳机连接的导线，这条导线与电话线是绝缘的，如图 2-11 所示. 请运用所学知识分析该方法是否可行. 为什么？



图 2-11

第三章

交变电流

交变电流是电磁感应的典型应用之一，应用图像和公式等数学工具来描述交变电流的特征，体现了数学与物理的融合；交流发电机和变压器的设计及其在远距离输电中的应用，则体现了科学、技术、社会三者的融合。

从科学史上著名的直流和交流之争，到如今交变电流远距离输送到城市乡村、工厂学校和千家万户，再到未来更为安全高效的远距离输电方式的研制，这背后是广大科技工作者的执着专注与责任担当。

本章我们将通过实验认识交变电流，了解变压器的工作原理，了解远距离输电时通常采用高压输电的原因，并进一步认识电磁学在人类社会和社会发展中的作用。



第一节

认识交变电流



在必修第三册中，我们将方向不随时间改变的电流称为直流。其中强弱和方向都不随时间变化的电流称为恒定电流。在生产和生活中，我们还经常会遇到强弱和方向随时间做周期性变化的电流，称为**交变电流**（alternating current），简称**交流**（AC）。

交变电流被广泛应用于电力工程、无线电电子技术和电磁测量中。在电力系统中，从发电到输配电，用的都是交变电流；在无线电电子设备中的各种电信号，大多数也是交变电流信号；在许多电子测量仪器中，交变电流来自各种信号发生器。

观察交变电流的图像

我们较难直接观察日常生活中的交变电流，不过我们可以应用转化法，通过示波器将电信号转化为看得见的图像。电流或电压随时间变化的图像称为交变电流的**波形图**。



观察与思考

如图 3-1-1 所示，用学生电源把照明电路中 220 V 的交变电压变成 6 V 或 3 V 的低压交变电压，给小灯泡供电。把小灯泡的两端接入示波器的输入端，观察示波器显示的波形图，如图 3-1-2 所示。思考并讨论：示波器显示出来的波形图是什么形状？需要引进哪些物理量进行描述？



图 3-1-1 用示波器观察交变电流的图像

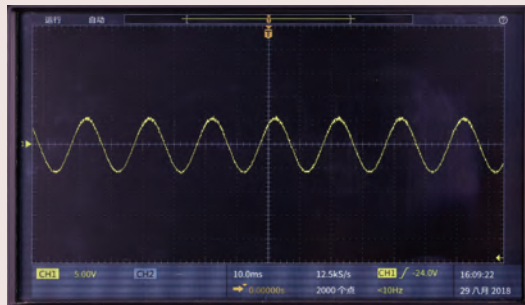


图 3-1-2 交变电流的波形图

如图 3-1-2 所示,示波器显示的图像是正弦(余弦)曲线.它反映了灯泡两端的电压(或通过灯泡的电流)随时间的变化规律.我们日常生活和生产中所使用的交变电流就是按正弦规律变化的.

交变电流的产生

交变电流是由交流发电机产生的.如图 3-1-3 所示,交流发电机最基本的结构是线圈和磁极,线圈可绕中心轴转动.线圈的 ab 边连在金属滑环 L 上, cd 边连在滑环 K 上,固定的电刷 A 、 B 压在滑环 K 、 L 上,由电刷将电流引出.

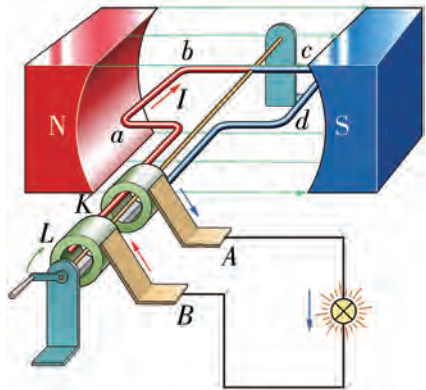


图 3-1-3 交流发电机原理图

观察与思考

如图 3-1-4 所示,把电流计接入发电机模型的输出端,摇动发电机的手柄,使线圈在磁极之间转动,观察电流计指针的摆动情况.改变摇动发电机手柄的速度,电流计指针的摆动情况有什么变化?这些变化说明了什么?

匀速转动发电机手柄一周,观察电流计的示数变化有何规律.

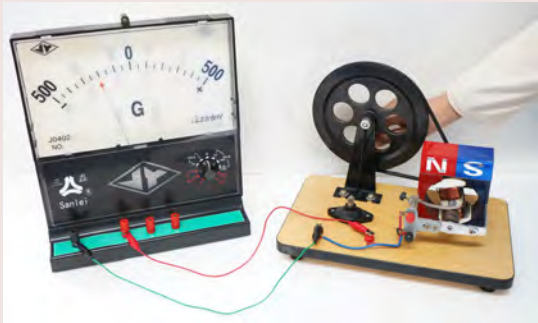


图 3-1-4 模拟交流发电的实验装置

实验中电流计指针由中间向两边不断摆动,这表明发电机产生的电流大小和方向在不断变化,即产生了交变电流.另外,当发电机手柄摇得越快时,电流计指针摆动幅度越大、摆动越快,这表明所产生的交变电流越大,方向变化越快.

取线圈在匀强磁场里匀速转动一周过程中几个特殊的位置如图 3-1-5 所示,探究交变电流产生的原理.

设线圈沿逆时针方向转动, OO' 是转动轴.当线圈转到如图 3-1-5 (a) 所示的位置时,线圈平面与磁感线垂直.这时 ab 边和 cd 边的速度方向与磁感线平行,不做切割磁感线运动,线圈中没有感应电动势产生,也没有感应电流.线圈此时所处的位置叫作**中性面**.

当线圈从中性面转过 90° ,处于如图 3-1-5 (b) 所示的位置时, ab 边和 cd 边做垂直切割磁感线运动,根据右手定则,可知感应电流沿 $abcd$ 方向流动.

当线圈再转过 90° ,处于如图 3-1-5 (c) 所示的位置时,该位置也是中性面,线圈中没有感应电流产生.

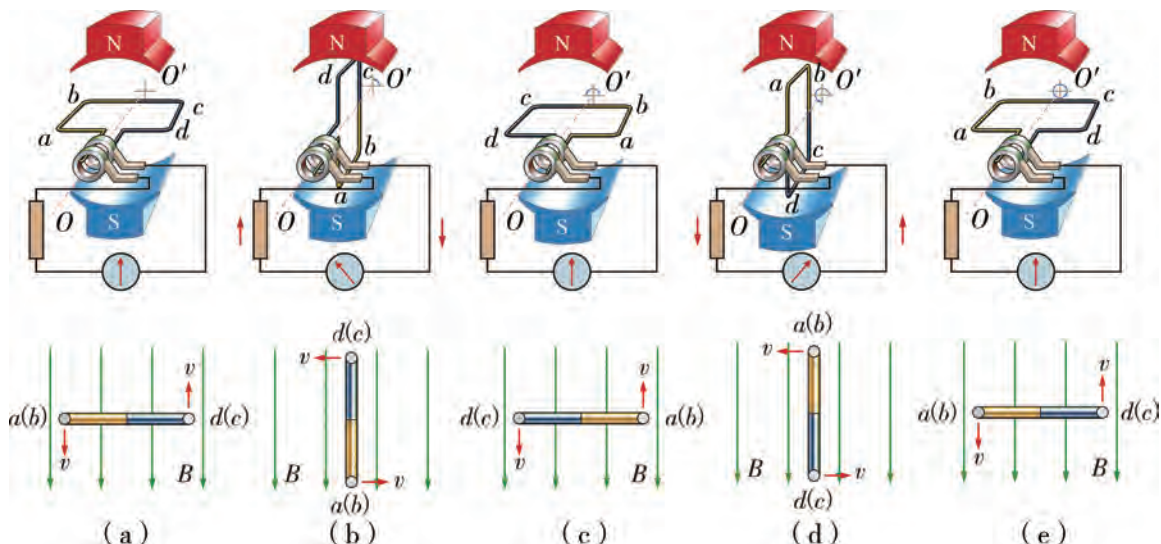


图 3-1-5 交变电流产生过程分析

当线圈再转过 90° ，处于如图 3-1-5 (d) 所示的位置时， ab 边和 cd 边再次做垂直切割磁感线运动，产生感应电流。 ab 、 cd 两边的速度方向与图 3-1-5 (b) 所示方向相反，线圈中感应电流方向也相反，沿 $dcba$ 方向流动。

当线圈再转过 90° 处于中性面时，同样没有感应电流，如图 3-1-5 (e) 所示。在之后的转动过程中，将重复上述过程。

线圈在磁场中不同位置做垂直切割磁感线运动的分速度大小和方向不同，因而产生了大小和方向随时间变化的交变电流。通过上述分析可知，线圈每经过中性面一次，感应电流的方向就改变一次，而线圈每转动一周要经过两次中性面，感应电流的方向改变两次。

从能量的角度思考，交流发电机的工作过程是将机械能转化为电能和回路中内能的过程，符合能量守恒定律。

用公式描述交变电流

上面定性探究了交变电流产生的原理，下面我们对交变电流的变化规律进行定量研究。



讨论与交流

如图 3-1-6 所示是交流发电机线圈截面示意图。标有 a 的小圆圈表示线圈 ab 边的横截面，标有 d 的小圆圈表示线圈 cd 边的横截面。设 ab 边的长度为 l ， ad 边的长度为 l' ，匀强磁场的磁感应强度为 B 。线圈平面从中性面开始以角速度 ω 转动，经过时间 t 后转到图示位置。

根据上述信息，推导此时感应电动势的表达式。

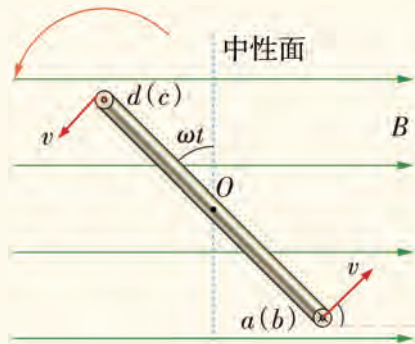


图 3-1-6 交流发电机线圈截面示意图

通过推导可以得出, 如果从中性面开始计时, 交流发电机产生的感应电动势 e 随时间 t 变化的规律为

$$e = E_m \sin \omega t \quad (3.1.1)$$

式中的 e 随时间变化, 不同时刻有不同的数值, 称为感应电动势的**瞬时值** (instantaneous value). E_m 表示感应电动势达到的最大值, 称为感应电动势的**峰值** (peak value), ω 是发电机线圈转动的角速度.

如果外电路为纯电阻 R , 线圈本身的电阻为 r , 根据闭合电路欧姆定律, 可得电流随时间的变化规律为

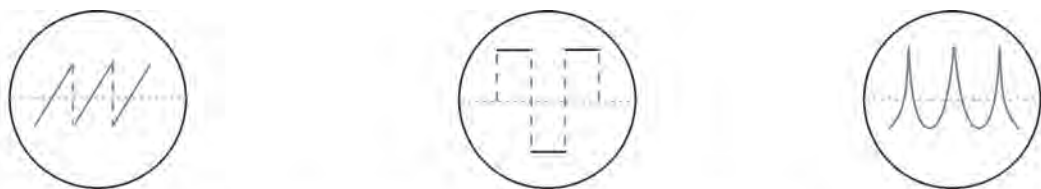
$$i = \frac{E_m}{R + r} \sin \omega t = I_m \sin \omega t$$

外电路两端的电压随时间的变化规律为

$$u = iR = \frac{E_m R}{R + r} \sin \omega t = U_m \sin \omega t$$

式中 I_m 和 U_m 分别表示感应电流和路端电压的峰值. 这种按正弦规律变化的交变电流称为**正弦式交变电流**, 简称**正弦式电流**.

正弦式电流是最基本的交变电流, 电力系统中应用的大多是正弦式电流. 在电子技术中应用的交变电流, 则不只限于正弦式电流, 它们随时间变化的规律是各式各样的, 如图 3-1-7 所示.



(a) 示波器中的锯齿波扫描电压 (b) 电子电路中的矩形脉冲 (c) 激光通信中的尖脉冲

图 3-1-7 几种交变电流的波形

交流发电机

发电厂里的交流发电机构造较为复杂, 但其基本组成部分还是产生感应电动势的线圈 (通常称为电枢) 和产生磁场的磁极. 我们把电枢转动、磁极不动的发电机称为**旋转电枢式发电机**.

旋转电枢式发电机产生的电流必须经过裸露的滑环和电刷引到外电路. 如果电压很高, 容易产生火花放电烧毁发电机. 另外, 电枢的大小也受到限制, 线圈匝数不能过多. 由于上述限制, 旋转电枢式发电机



图 3-1-8 三峡电站安装的旋转磁极式发电机

提供的电压一般不超 500 V.

应当如何稳定地产生更高的电压? 依据对称性思想, 可以让磁极转动而电枢不动. 线圈切割磁感线时, 电枢同样会产生感应电动势, 这种发电机称为旋转磁极式发电机, 如图 3-1-8 所示. 由于旋转磁极式发电机的电枢 (即线圈) 嵌在外壳内, 占用的空间可以很大, 因此可以提供几千到几万伏的电压, 输出功率可达几十万千瓦. 所以, 目前大多数大型发电机都是旋转磁极式发电机.



练习

1. 如图 3-1-9 所示, 线圈静止, 磁体按图示方向旋转, 请用箭头标出图中 4 个线圈中产生的感应电流方向. 如果没有感应电流则不用标箭头.

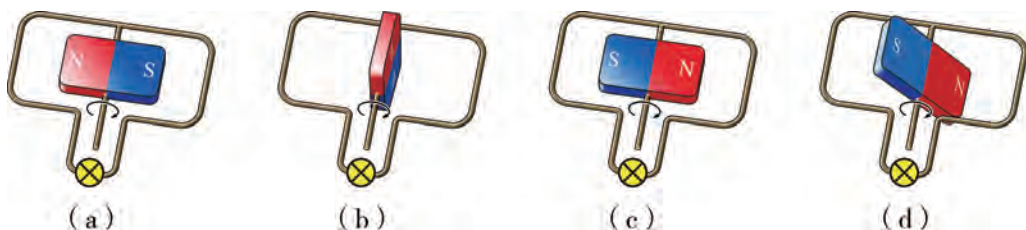


图 3-1-9

2. 如图 3-1-10 所示是电动势随时间变化的图像, 图中 Oa 、 ab 、 bc 、 cd 分别对应图 3-1-5 中的哪一个过程?

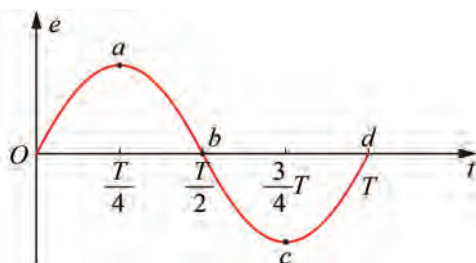


图 3-1-10

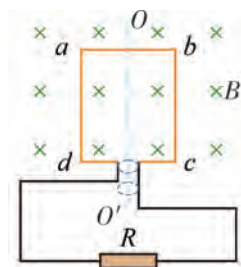


图 3-1-11

3. 如图 3-1-11 所示, 面积为 0.05 m^2 、总电阻为 1Ω 、共 100 匝的矩形线圈 $abcd$ 处于磁感应强度 $B = \frac{1}{\pi} \text{ T}$ 的匀强磁场中, 其外接阻值 $R = 9 \Omega$ 的电阻, 线圈以 300 r/min 的转速绕 OO' 匀速旋转.

- (1) 若从线圈处于中性面开始计时, 写出线圈中感应电动势的瞬时值表达式.
- (2) 画出线圈中感应电动势随时间变化的图像.
- (3) 求出线圈转过 $\frac{1}{30} \text{ s}$ 时, 线圈中感应电动势的瞬时值.

4. 在一次物理探究活动中, 某同学将一个蹄形磁铁靠近正在发光的白炽灯, 如图 3-1-12 所示, 他惊讶地发现灯丝在晃动.

- (1) 请解释一下灯丝会晃动的原因.
- (2) 请说明该现象中能量的转化过程.



图 3-1-12

第二节 描述交变电流的物理量



恒定电流的大小和方向都不随时间改变，因此我们可以通过电压 U 或电流 I 等物理量对恒定电流进行定量描述。而交变电流除了方向随时间作周期性变化外，大小一般也随时间发生变化。因此，除了电流或电压的峰值和瞬时值外，我们还需要引入一些新的物理量对交变电流进行更全面的描述。

周期和频率

我们知道，示波器显示正弦式交变电流的图像是正弦（余弦）曲线，符合路端电压的表达式 $u = U_m \sin \omega t$ 。图像显示交变电流呈现周期性变化，因此需要引入周期和频率两个物理量进行描述。线圈转动一周，电动势、路端电压和电流均按正弦规律完成一个周期的变化。我们将交变电流完成一次周期性变化的时间称为交变电流的**周期**（period），用符号 T 表示，单位是秒。

交变电流的**频率**（frequency）是反映交变电流做周期性变化快慢的物理量，用交变电流在一段时间内做周期性变化的次数与所用时间之比来表示。它的符号是 f ，单位是赫兹，简称赫，符号是 Hz。频率是供电质量的重要指标，直接关系到电能驱动设备的运行质量，也是电网调度中监控电力系统运行的核心参数。

周期和频率都是描述交变电流变化快慢的物理量，根据定义可得它们之间的关系：

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



讨论与交流

1. 我们日常生活中使用的交变电流频率是多少？该频率的物理意义是什么？为什么我们感受不到灯泡在闪烁？

2. 正弦式交变电流的周期 T 和频率 f ，与交流发电机转子转动的角速度 ω 有什么关系？

峰值和有效值

交变电流的峰值是指在一个周期内所能达到的最大数值. 交变电流的电动势、电流和电压的峰值分别用 E_m 、 I_m 和 U_m 表示. 峰值在实际应用中有着重要的意义, 例如在交流电路中使用电容器、二极管等元器件时, 需要注意交变电压的峰值不能超过它们所能承受的最大电压, 否则这些元件就有被击穿的危险.

为了便于对交变电流进行测量和分析, 生产、生活中还采用有效值来描述交变电流. 交变电流的有效值是根据电流的热效应来规定的. 让交变电流和恒定电流分别通过相同阻值的电阻, 如果在交变电流的一个周期内它们产生的热量相等, 那么这一恒定电流的数值称为交变电流的**有效值** (effective value). 交变电流的电动势、电流和电压的有效值分别用 E 、 I 和 U 表示.

平时我们所说的 220 V 交变电流、各种使用交变电流的电气设备所标注的额定电压和额定电流的数值, 以及交流电流表、交流电压表等电气仪表测出的数值, 指的都是有效值.

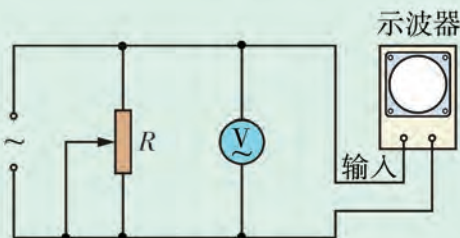
交变电流的有效值与峰值间具体有什么关系呢? 下面我们通过实验进行探究.

实验与探究

如图 3-2-1 所示, 将滑动变阻器接到交流电源上, 用交流电压表测量变阻器两端的交变电压有效值, 用示波器显示交变电压的波形图, 测量其峰值.



(a) 实验装置



(b) 实验原理图

图 3-2-1 探究交变电流有效值与峰值之间的关系

改变滑动变阻器的阻值, 重复上述实验, 并把实验数据填入表 3-2-1 中.

表 3-2-1 实验数据记录表

物理量	实验次数					
	1	2	3	4	5	...
有效值 U/V						
峰值 U_m/V						
有效值与峰值之比 $\frac{U}{U_m}$						

根据实验结果, 可以得到什么实验结论?

分析上述实验数据可知, 正弦式电流的电压有效值 U 与峰值 U_m 之比均在 0.7 左右.

精确的实验和理论推导表明, 正弦式电流的电动势、电流和电压的有效值与峰值之间的关系如下:

$$\begin{aligned} E &= \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707 E_m \\ I &= \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m \\ U &= \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707 U_m \end{aligned} \quad (3.2.1)$$

用图像描述交变电流

我们通过示波器可以观察正弦式交变电流的图像, 用公式可以对正弦式交变电流进行定量描述. 此外, 我们还可以借助图像来定量描述交变电流.

根据正弦式交变电流的公式, 我们可以绘制出正弦式电流的电动势 e 、电流 i 和电压 u 随时间变化的图像. 图中标出了周期、峰值等物理量, 如图 3-2-2 所示.

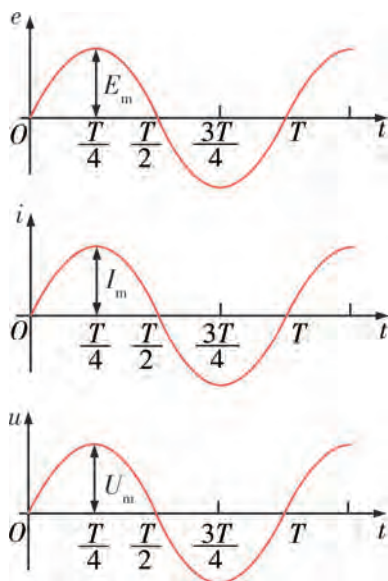


图 3-2-2 用图像描述正弦式交变电流



讨论与交流

1. 如图 3-2-3 所示是一个正弦式电流的图像. 根据图像求出它的周期、频率、电流的峰值、电流的有效值, 并写出正弦式电流的表达式.

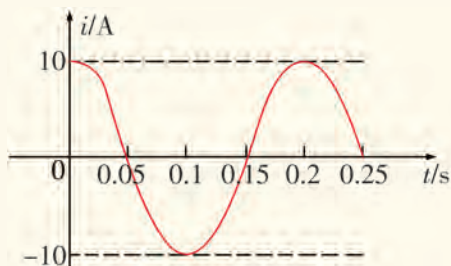


图 3-2-3 正弦式电流图像

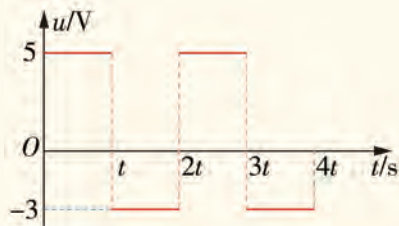


图 3-2-4 矩形交变电流图像

2. 将阻值为 2Ω 的电阻接到电压按如图 3-2-4 所示规律随时间变化的交变电路中. 该交变电流的周期是多少? 一个周期内电阻两端电压的有效值是多少?



实践与拓展

利用数据采集器探究交流发电机输出的波形. 如图 3-2-5 所示, 将电压传感器与交流发电机模型的输出端并联, 缓慢摇动发电机模型的手柄, 观察并解释: 电压窗口内的波形图 (如图 3-2-6 所示) 为什么不是正弦波?



图 3-2-5 实验装置

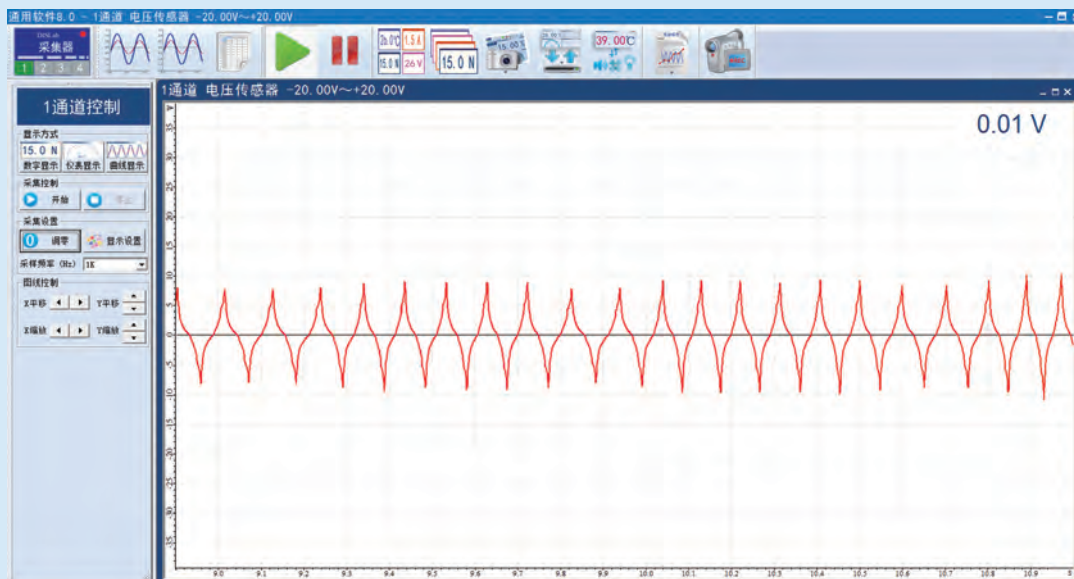


图 3-2-6 电压波形图

理论推导交变电流有效值与峰值的关系

如图 3-2-7 和图 3-2-8 所示分别为峰值和周期相同的正、余弦式交变电流, 则它们的瞬时电流表达式分别为

$$i_1 = I_m \sin \omega t$$

$$i_2 = I_m \cos \omega t$$

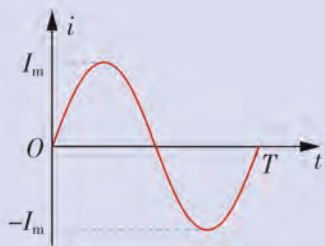


图 3-2-7 正弦式交变电流

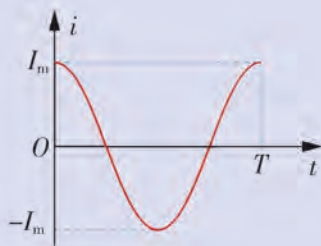


图 3-2-8 余弦式交变电流

让它们分别通过阻值均为 R 的纯电阻, 则它们的瞬时功率表达式分别为

$$P_1 = i_1^2 R$$

$$P_2 = i_2^2 R$$

它们的瞬时功率之和为

$$P = i_1^2 R + i_2^2 R = I_m^2 R$$

因此, 在一个周期内, 交变电流 i_1 和 i_2 分别通过电阻 R 产生的总热量为

$$Q_{\text{总}} = I_m^2 RT$$

又由于交变电流 i_1 和 i_2 的有效值 I 相等, 则

$$Q_{\text{总}} = 2I^2 RT$$

联立上述两式, 可得

$$I_m^2 RT = 2I^2 RT$$

所以

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

练习

1. 某课外实验小组将一个交变电流信号输入示波器，示波器屏幕上出现如图 3-2-9 所示的波形图。从该波形图可以得到哪些信息？

2. 某一正弦式电流通过一个阻值为 $100\ \Omega$ 的电阻，其热效应与 $1\ \text{A}$ 的恒定电流在相同时间内通过该电阻所产生的热效应相同。

(1) 这个正弦式电流的电压、电流的有效值分别是多少？

(2) 这个正弦式电流的电压、电流的峰值分别是多少？

3. 一台发电机的结构如图 3-2-10 所示，N、S 是永久磁铁的磁极。M 是圆柱形铁芯，铁芯外套有一矩形线圈，线圈绕铁芯 M 中心的固定转轴匀速转动。磁极与铁芯之间的缝隙形成沿半径方向的磁场。若从图示位置开始计时，取此时的电动势为正值，请画出线圈中感应电动势 e 随时间 t 变化的图像。

4. 矩形线圈在匀强磁场中绕垂直于磁场方向的中心轴匀速转动，产生的交变电动势表达式为 $e = 311\sin 314t\ (\text{V})$ 。

(1) 求电动势的峰值、有效值和频率。

(2) 当线圈平面从中性面开始转过 $\frac{3}{4}$ 周期时，电动势的瞬时值为多大？

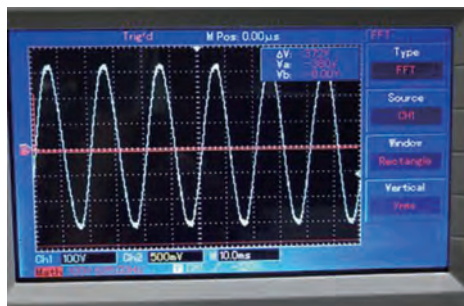


图 3-2-9

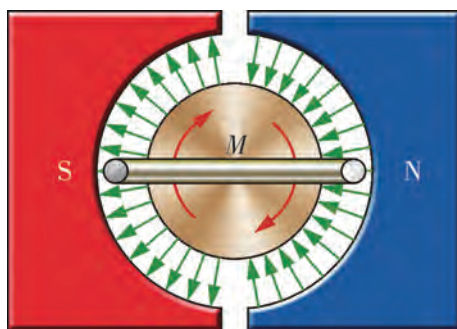


图 3-2-10

第三节

变压器



发电站的大型发电机输出电压一般在10 kV 左右, 工厂里电动机的工作电压为380 V, 家庭电路电压为 220 V, 家用电器里各部分器件的工作电压一般也不相同. 在实际应用中, 人们经常需要改变交变电流的电压以适应不同需求.

变压器 (transformer) 就是一种用于改变交流电压的设备.



图 3-3-1 变电站大型变压器



图 3-3-2 城乡街头的变压器



图 3-3-3 实验室用的可拆变压器

认识变压器

变压器是由闭合铁芯和绕在铁芯上的线圈组成的, 其中闭合铁芯由表面涂有绝缘漆的硅钢片叠合而成, 线圈用绝缘导线绕成. 如图 3-3-4 所示是变压器原理图, 与电源连接的线圈称为**原线圈**, 也称为初级线圈; 与负载连接的线圈称为**副线圈**, 也称为次级线圈. 在电路中, 变压器的符号如图 3-3-5 所示.

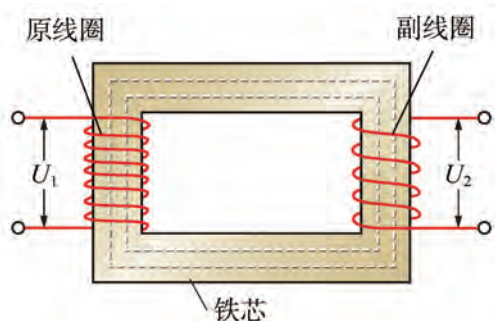


图 3-3-4 变压器原理图

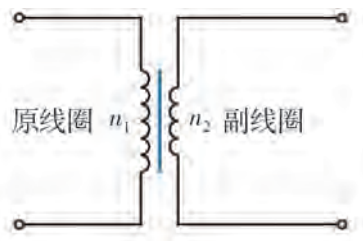


图 3-3-5 变压器的符号

变压器工作的基本原理是利用互感现象. 当原线圈上加交变电压时, 原线圈中便有交变电流, 并在铁芯中激发交变的磁通量, 这个交变的磁通量又在副线圈内产生感应电动势和感应电流, 它反过来通过互感磁通又影响到原线圈. 如果在副线圈两端接入负载构成闭合回路, 则回路中就会形成交变电流.



讨论与交流

在如图 3-3-6 所示的电路中, 闭合开关 S 后, 灯泡中是否有电流通过? 为什么?

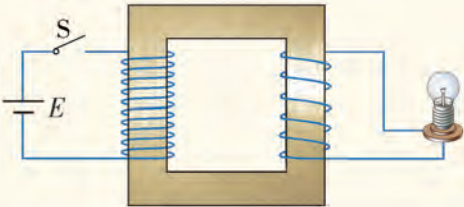


图 3-3-6 变压电路图

变压器原、副线圈电压与匝数的关系

变压器作为能够改变交变电压的设备, 其原、副线圈的匝数和电压一般不相等. 那么, 变压器原、副线圈的电压与匝数有什么关系呢?



实验与探究

根据图 3-3-7 所示的实验电路原理图连接电路, 其中变压器是可拆变压器, 其原、副线圈匝数 n_1 、 n_2 可改变. 实验时, 变压器原线圈接在学生电源上, 原线圈电压 U_1 为学生电源输出电压, 副线圈电压 U_2 通过交流电压表测得.

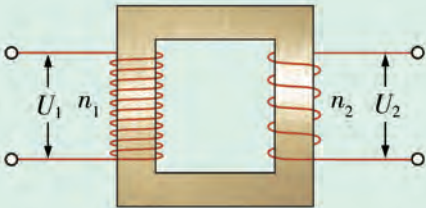


图 3-3-7 实验电路原理图

分步进行实验, 并将实验数据记录到表 3-3-1 中.

表 3-3-1 实验数据记录表

次数	$n_1/\text{匝}$	$n_2/\text{匝}$	$\frac{n_1}{n_2}$	U_1/V	U_2/V	$\frac{U_1}{U_2}$
1						
2						
3						

根据实验结果, 可以得到什么实验结论?

从上面实验结果初步发现, 变压器原、副线圈上的电压之比近似等于它们的匝数之比.

接下来我们利用法拉第电磁感应定律进一步探究变压器原、副线圈的电压与线圈匝数之间的关系.

在没有漏磁的情况下, 穿过变压器原线圈每匝的磁通量, 也同样穿过副线圈. 二者的磁通量 Φ 及其变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 相同.

根据法拉第电磁感应定律, 可得在原、副线圈中产生的感应电动势分别为

$$e_1 = n_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad e_2 = n_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

所以有

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}{n_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}} = \frac{n_1}{n_2}$$

当变压器中原、副线圈的电阻都可以忽略时, 则它们两端电压的数值等于对应的感应电动势, 即有

$$U_1 = e_1, \quad U_2 = e_2$$

由此可得

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

上式表明, 变压器的输入电压与输出电压之比等于它们的原、副线圈匝数之比.

在上面的探究中, 我们忽略了变压器的漏磁、原(副)线圈电阻和其他电磁能量损耗, 这是对实际变压器的理想化, 我们把满足这些条件的变压器称为理想变压器.

对于理想变压器, 原、副线圈两端的电压之比等于这两个线圈的匝数之比, 用公式表示为

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (3.3.1)$$

从式(3.3.1)可以看到, 当 $n_2 > n_1$ 时, $U_2 > U_1$, 变压器使电压升高, 这种变压器称为升压变压器; 当 $n_2 < n_1$ 时, $U_2 < U_1$, 变压器使电压降低, 这种变压器称为降压变压器.



讨论与交流

1. 实验探究得到的数据为何不严格服从式(3.3.1)中原、副线圈电压与匝数的关系? 造成误差的原因可能是什么?
2. 如果变压器副线圈产生的感应电动势为 E_2 , 那么 E_2 就是副线圈两端的电压 U_2 吗? 为什么?

实际变压器的线圈有电阻，电流通过它们时会发热而损耗能量。铁芯在交变磁场中反复被磁化，也会因铁芯发热而损耗能量。一般情况下，变压器的这两类能量损耗都很小，特别是大型变压器，实际转换效率可达95%以上。所以在实际计算中常常忽略损耗的能量，可将其视为理想变压器，这时副线圈的输出功率 P_2 和原线圈的输入功率 P_1 相等。根据电功率公式 $P = UI$ ，有

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

又因为 $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$ ，所以理想变压器原、副线圈中的电流与它们的匝数成反比，即

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

例题：无线充电技术已经逐渐应用于智能手机上。手机无线充电器的基本原理类似于变压器，由发射器和接收器组成，分别有一发射线圈和接收线圈，其简化模型如图 3-3-8 所示。已知发射、接收线圈匝数比 $n_1 : n_2 = 5 : 1$ ，AB 端输入电流为 $i = 0.28\sin 200\pi t$ (A)。

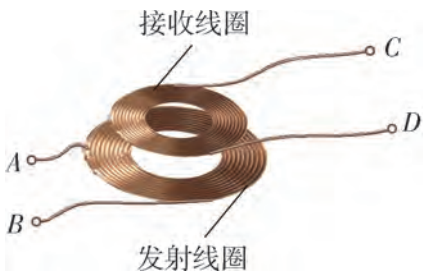


图 3-3-8 手机无线充电器简化模型

(1) 请结合模型解释手机无线充电的基本原理。

(2) 求接收线圈输出电流的有效值。

分析：对于第 (1) 个问题，可以参考变压器的原理，对手机无线充电的基本原理进行解释。对于第 (2) 个问题，需要先求出输入电流的有效值，然后根据理想变压器原、副线圈的电流关系进行计算。

解：(1) 手机无线充电器的原理类似于变压器，主要是利用了互感现象。交变电流流过发射线圈产生变化的磁通量，这个变化的磁通量同时也穿过接收线圈，在接收线圈中产生感应电流，该感应电流经过一定的处理后转为直流电流再给手机充电。

(2) 因为 AB 端输入电流为 $i = 0.28\sin 200\pi t$ (A)，根据 $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ ，可得 AB 端输入电流的有效值为

$$I_1 = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{0.28}{\sqrt{2}} \text{ A} = 0.2 \text{ A}.$$

将其看成是理想变压器。根据理想变压器原、副线圈电流的关系 $\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$ ，可得接收线圈输出电流的有效值为

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{n_1}{n_2} = 0.2 \times 5 \text{ A} = 1 \text{ A}.$$

练习

1. 变压器线圈中的电流越大，所用的导线就越粗。通常给用户送电的变压器是降压变压器，那么它的原线圈和副线圈，哪个应该用较粗的导线？请说明理由。

2. 汽油机做功冲程开始时，汽缸中的汽油、空气混合气要靠火花塞点燃。但是汽车蓄电池的电压只有 12 V，远远达不到火花塞产生火花所需要的 10 000 V 电压。为此，有人设计了如图 3-3-9 所示的点火装置。这个装置的核心是一个变压器，它的初级线圈通过开关连到蓄电池上，次级线圈接到火花塞的两端，开关由机械进行自动控制。试分析该设计是否可行。若要实现点火，变压器需满足什么条件？

3. 如图 3-3-10 所示是一理想变压器示意图。原线圈 $n_1 = 1100$ 匝，其中一副线圈 $n_2 = 500$ 匝，两端接阻值 $R = 250 \Omega$ 的电阻；另一副线圈 $n_3 = 150$ 匝，两端接有额定值为“30 V 15 W”的灯泡 L。原线圈接入交变电压后，灯泡 L 恰能正常发光。求电阻 R 的电功率和原线圈中的电流。

4. 在某些需要带电工作的情况下测量交变电流时，电工需要使用钳形电流表，其结构如图 3-3-11 所示。试说明钳形电流表测量交变电流大小的原理。（提示：被测导线相当于变压器的初级线圈，二次绕组相当于变压器的次级线圈。）

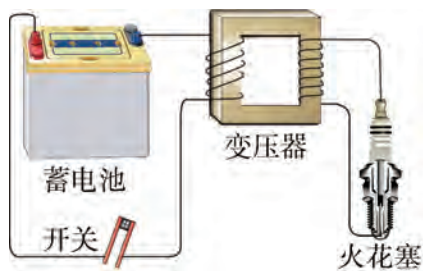


图 3-3-9

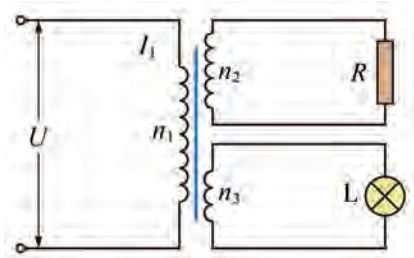


图 3-3-10

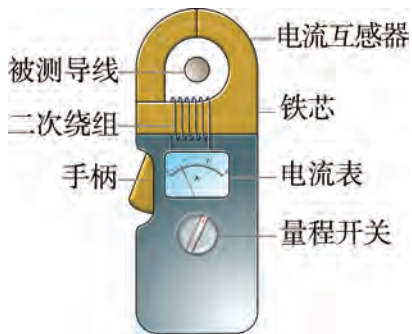


图 3-3-11

第四节

远距离输电



为了合理高效地利用自然资源，通常火力发电厂建在煤炭产地，水力发电站建在水力资源丰富的地方。它们发出的电能一般都要经过远距离输送，才能供几百千米甚至几千千米之外的用户使用。在电能输送的过程中，由于输电导线内电流的热效应，必然有一部分电能转化为内能，从而导致电能的损耗。因此，为了能安全、保质地输送电能，同时减少电能损耗，需要综合多方面的因素进行考虑。

远距离输电中的电功率和电压损耗

1882 年，美国发明家爱迪生（T. A. Edison，1847—1931）在纽约修建了珍珠街电站，为附近用户提供 110 V 的直流电流，这是世界上第一个电能传输系统。然而，随着时间的推移，人们发现，爱迪生的低压直流输电系统受到传输距离的极大限制，一旦输电距离偏大，将带来很大的电功率损耗和电压损耗。下面通过例题来体会当时低压直流输电中电能的损耗情况。



图 3-4-1 爱迪生与他的直流发电机

例题：查史料可知，1882 年珍珠街电站采用 6 台直流发电机，输出总功率为 661.5 kW，电能输送的最远距离为 1.6 km，给用户 110 V 的直流电压，最多可满足 6000 盏 16 W 的爱迪生灯泡使用。

- (1) 电流在输电线路上的损耗功率占发电机输出功率的百分比是多少？
- (2) 估算直流发电机的输出电压。
- (3) 若将输电距离增加一倍，还能否为 6000 盏 16 W 的爱迪生灯泡正常使用？

分析：绘制直流输电电路，如图 3-4-2 所示，再根据欧姆定律和功率计算公式进行分析计算。

解：(1) 根据题意，用户能够使用的最大功率为 $P_{\text{用}} = 6000 \times 16 \text{ W} = 96\,000 \text{ W} = 96 \text{ kW}$ 。

电流在输电线路上的损耗功率占发电机输出功率的

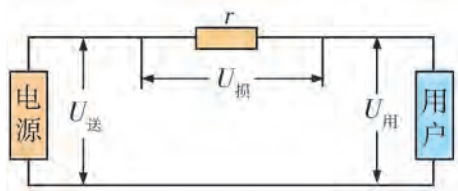


图 3-4-2 直流输电电路图

百分比为

$$\frac{P_{\text{损}}}{P_{\text{总}}} = \frac{P_{\text{总}} - P_{\text{用}}}{P_{\text{总}}} = \frac{661.5 - 96}{661.5} \times 100\% = 85.5\%.$$

(2) 由功率公式 $P = UI$ 计算线路中直流电流大小为

$$I = \frac{P_{\text{用}}}{U_{\text{用}}} = \frac{96\,000}{110} \text{ A} = 872.7 \text{ A}.$$

所以直流发电机输出电压即电路中的输送电压为

$$U_{\text{送}} = \frac{P_{\text{总}}}{I} = \frac{661.5 \times 10^3}{872.7} \text{ V} = 758 \text{ V}.$$

(3) 由功率计算公式 $P = I^2 r$, 可求得线路中的电阻大小为

$$r = \frac{P_{\text{损}}}{I^2} = \frac{(661.5 - 96) \times 10^3}{872.7^2} \Omega = 0.74 \Omega.$$

输送距离增加一倍, 则线路中电阻变为 $2r$, 此时线路上损耗的电压为

$$U'_{\text{损}} = Ir' = 2Ir = 2 \times 872.7 \times 0.74 \text{ V} = 1292 \text{ V}.$$

由于 $U'_{\text{损}} > U_{\text{送}} = 758 \text{ V}$, 这意味着输送电压小于线路上的损耗电压, 因此不可能将输送距离增加一倍到 3.2 km.

从例题中可以看到, 爱迪生的低压直流输电系统在输电线路存在很高的功率损耗和电压损耗, 因此无法满足当时逐渐高涨的电力需求.

高压交流输电

用什么方法可以减少远距离输电中电能的损耗呢? 根据导线的发热功率计算公式 $P = I^2 r$, 可知输电过程中, 减少电能损耗的方法有两种.

第一种方法是减小输电线的电阻. 由电阻定律 $r = \rho \frac{l}{S}$, 可知在输电导线长度 l 一定的情况下, 为了减小电阻, 应当选用电阻率小、横截面积大的导线. 目前一般采用电阻率较小的铜或铝作为导线材料. 但是, 要增大导线的横截面积, 需要多耗费金属材料, 并且会使输电线过重, 给架线带来较大困难.

第二种方法是减小输电导线中的电流. 在输电导线电阻不变的条件下, 输电电流如果减小到原来的百分之一, 根据公式 $P = I^2 r$, 输电的功率损耗将减小到原来的万分之一. 由公式 $P = UI$, 可知在保证输送功率不变的前提下, 可通过提高输电电压以减小输电电流. 这就是我们通常采用高压远距离输送交变电流的原因.

现代发电站的大型发电机输出的电压一般在 10 kV 左右, 不符合远距离输电的要求. 因此, 要在发电站区域内用升压变压器将电压升高到几百千伏再进行远距离输电. 目前我国远距离输电常采用的电压有 110 kV、220 kV、330 kV 等, 输电干线已经采用 500 kV 的超高压, 西北电网的电压甚至达到 750 kV. 实际上, 输电电压也不能无限制提高, 因为输

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，增加能量损耗。

电能输送是一项系统工程。为了确保电能输送的经济、可靠，人们设计建造了电能输电网。如图 3-4-3 所示是远距离输电的基本过程示意图。当电能从发电站升压经过远距离输送到用电区域后，先在“一次高压变电站”通过降压变压器，电压降到 100 kV 左右，再输送到“二次高压变电站”，电压降到 10 kV 左右。然后，一部分电能送往大量用电的工业用户；另一部分经过“低压变电站”降到 220 V，用于一般用户的生活用电。现代电网把许多发电站连成一体，根据火电、水电、核电、风电、光伏发电的特点，调剂不同地区的电力供需，提高电力使用的经济效益。

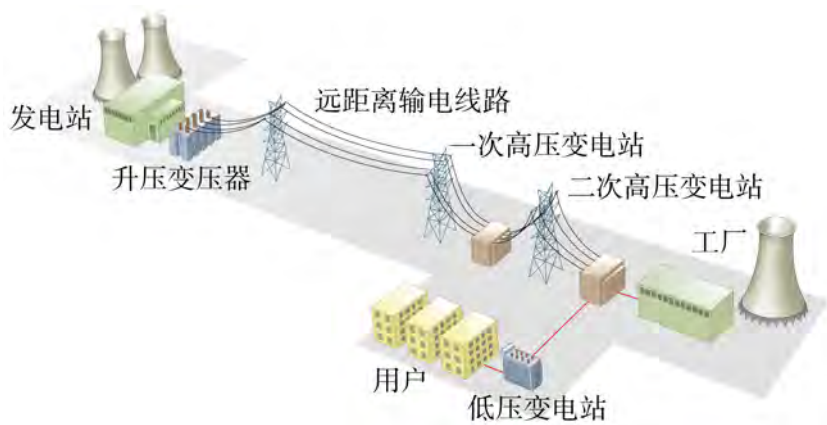


图 3-4-3 远距离输电的基本过程示意图

电网的结构以及运行状况，直接影响着人们生活、生产和科研等方方面面。2017 年 4 月 21 日，美国旧金山一个变电所发生了故障，导致大规模停电，很多工厂和公司工作停滞，交通大面积延误，受影响人数达到 9 万人。2008 年 2 月我国南方地区的雪灾对电网设备造成了巨大破坏，导致约 1.1 亿人口的用电受到影响。因此，我们需要深入总结大面积停电的经验教训，提高电网建设和管理水平。

 观察与思考

为了检验输送电压高低对电能输送的影响，采用实验比较法，在低压交流电源上并联两个回路。一个回路只含电阻、灯泡和电流表，电阻模拟远距离输电线路导线的电阻，灯泡模拟用户使用的效果；另一个回路先通过一个升压变压器提高电压，再通过一个降压变压器降低电压，其余线路与第一个回路相同。实验电路如图 3-4-4 所示。

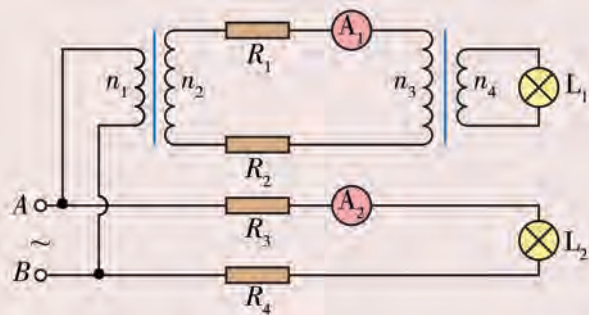


图 3-4-4 实验电路

进行实验，并观察实验现象，可以得到什么结论？

在上述实验中, 灯泡 L_1 的亮度明显比灯泡 L_2 的大, 而电流表 A_1 的示数却明显比电流表 A_2 的示数小. 这说明在输电导线电阻不变的前提下, 提高输电的电压可以减小输电电流, 达到减少输电过程中电能损耗的目的.

直流输电

随着电力工业的不断发展, 高压交流输电出现了一定的局限性. 输电导线中的交变电流会因电磁感应产生自感, 同时与附近的导线产生互感. 在输送大功率的电能时, 这些电感导致的电能损耗会超过导线电阻造成的损耗. 此外, 要使输电线路正常工作, 为同一电网供电的所有发电机都必须同步运行, 这在技术层次上是很难实现的.

采用直流输电是克服上述局限的较好途径之一. 因为导线对于稳定的直流电流只有电阻作用而没有电感作用, 并且直流输电也不存在需要发电机同步运行的问题.

现代的直流输电, 只有输电这个环节使用高压直流, 发电、用电及升、降电压仍然使用交变电流. 发电机产生的交变电流经变压器升压后, 由换流设备将交变电流变为直流电流, 高压直流经远距离传输后, 再由换流设备将直流电流转换为交变电流. 然后, 配电所的变压器再将高压交变电流降压成适合用户使用的交变电流, 整个过程如图 3-4-5 所示.

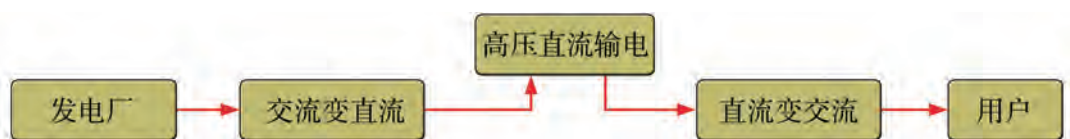


图 3-4-5 现代直流输电示意图

自 1984 年我国首个高压直流输电工程开工至今, 我国电网发展不断突破, 技术水平不断提升, 实现了从初期核心设备全部依靠进口, 到现在直流输电设备绝大多数国产化、运行指标达到国际领先水平的重大转变. 近些年来, 随着高压直流输电核心技术难题成功被攻克, 我国已成为国际上为数不多、拥有自主知识产权的掌握特高压输电技术的国家. 我国直流输电技术正以全新的姿态走出国门, 走向世界.

直流与交流之争

科学史上有一段著名的直流与交流之争. 它不仅是科技的竞争, 也是商业的竞争, 更是科学家间的竞争.

1878 年, 美国发明家爱迪生成功研制出白炽灯, 吸引了金融家的投资, 成立了爱迪生电灯公司. 为加快商业开发, 爱迪生发明了一套直流电力系统, 兴建起全美第一座发电厂, 由此迎来了电力时代的黎明.

由于当时大量直流技术专利被爱迪生电灯公司所垄断, 于是, 1885 年美国发

明家威斯汀豪斯 (G. Westinghouse, 1846—1914) 组建了西屋电气公司, 转向了当时并不被看好的交流配电系统研发。然而, 交流的发展尚缺乏感应电动机的关键技术, 此时特斯拉 (N. Tesla, 1856—1943) 出现了。他早期投奔了爱迪生电灯公司, 向爱迪生提出的建议屡次不被接纳, 便很快辞职。威斯汀豪斯听闻特斯拉的研究后前往拜访, 双方很快达成了合作协议, 启动全新的交流系统的研发和推广工作。当爱迪生电灯公司得知此事后, 试图利用媒体大肆宣传交流系统的危险性, 但这并没能阻止交流系统的推广。

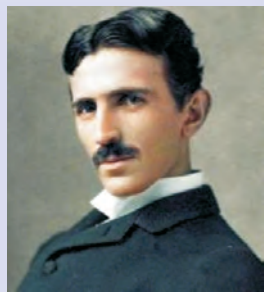


图 3-4-6 特斯拉

在芝加哥世界博览会的竞标上, 威斯汀豪斯以低于爱迪生电灯公司一半的报价竞标成功, 利用交流发电机为博览会提供电力。1893 年举办的世界博览会, 大大转变了社会大众对交流的认识。之后的一年里, 美国新订购的电器、电动机超过半数转向使用交流, 随后交流逐渐成为主流, 并沿用至今。

进入 21 世纪, 直流与交流的竞争还在继续。随着科技的不断发展, 近年来的研究发现, 当距离超过 800 km 时, 高压直流输电比高压交流输电的电能损耗更小, 而一百多年前的“直流转化交流”和“直流升压”等难题如今都已经解决。因此, 世界各国在远距离输电时, 又开始考虑采用更为经济实用的高压直流输电方式。

练习

1. 如图 3-4-7 所示是远距离交流输电的简化示意图。其中发电厂的输出电压是 U , 两条输电线的等效总电阻为 r , 输电线路中的电流是 I_1 , 其末端间的电压为 U_1 。在输电线与用户间连有一理想变压器, 流入用户端的电流是 I_2 。

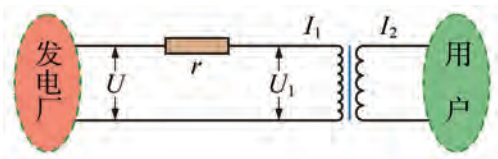


图 3-4-7

- (1) 用户两端的电压是多少?
- (2) 理想变压器的输入功率是多少?
- (3) 输电线上损耗的电功率和电压分别是多少?

2. 在日常生活中, 为什么在用电高峰时段, 家里的电灯会比较暗?

3. 某实验兴趣小组设计并制作了一个远距离输电演示器, 如图 3-4-8 所示。

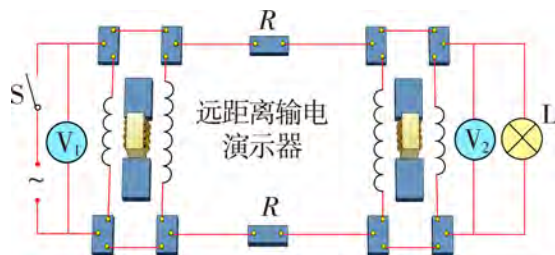


图 3-4-8

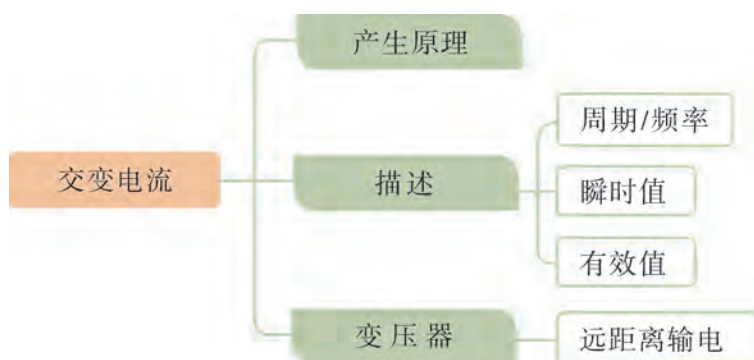
(1) 观察装置并尝试描述演示步骤及实验现象。

(2) 若想测出升压变压器原、副线圈的匝数, 应当如何进行实验操作?

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



回顾与评价

1. 结合本章利用波形图和公式描述交变电流特征的相关知识，谈谈你如何看待数学与物理两门学科间的关系。
2. 本章中学到了哪些与交变电流相关的物理模型？能量的观念在这些物理模型中是如何体现的？
3. 在探究变压器电压与匝数关系的实验中，有哪些新的发现或新的设想？
4. 根据本章所学的交变电流知识，提出两三个有效节约电能方案。

习题三

1. 下列关于交变电流的说法中，正确的是（ ）。

- A. 所有交流电压的有效值都满足 $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ 的关系
- B. 照明电压 220 V、动力电压 380 V 指的都是有效值
- C. 交流电压表和电流表测量的是交变电流的最大值
- D. 在一个周期内交变电流的方向只改变一次

2. 如图 3-1 所示是一种变压器的铭牌。根据上面标示的信息，以下判断正确的是（ ）。

型号: PKT-12-3000 输入参数: 220 V 50 Hz 输出参数: 12 V 3.0 A
--

图 3-1

- A. 这是一个升压变压器
- B. 原线圈的匝数比副线圈的匝数多
- C. 当原线圈输入交流电压 220 V 时，副线圈输出直流电压 12 V
- D. 当原线圈输入交流电压 220 V、副线圈接负载时，副线圈中电流比原线圈中电流小

3. 普通的交流电表不能直接接入高压输电线来测量交变电流，通常要与电流互感器配合使用。在如图 3-2 所示的电路中电流互感器 ab 间线圈匝数较多， cd 间线圈匝数较少。下列说法正确的是（ ）。

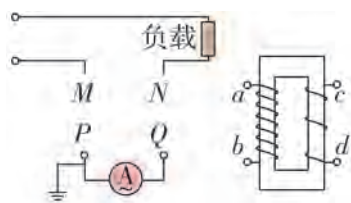


图 3-2

- A. ab 接 MN ， cd 接 PQ
- B. ab 接 PQ ， cd 接 MN
- C. 在使用电流互感器时，副线圈可以不用接地
- D. 在使用电流互感器时，副线圈可以处于开路状态

4. 远距离输电线路的示意图如图 3-3 所示。若发电机的输出电压不变，升压变压器和降压变压器都是理想的，输电导线有一定的电阻，则下列判断错误的是（ ）。

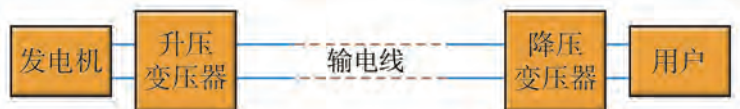


图 3-3

- A. 升压变压器的输出电压总是大于降压变压器的输入电压
- B. 升压变压器的输出功率总是大于降压变压器的输入功率

- C. 随着用户用电功率增加, 升压变压器原线圈中的电流变小
D. 随着用户用电功率增加, 降压变压器原线圈两端的电压变小

5. 调光台灯是利用闸流晶体管来实现无级调节灯的亮度的. 现将某无级调光台灯接在 220 V 的正弦式交变电流上, 如图 3-4 (a) 所示. 经过闸流晶体管调节后, 加在灯管两端的电压如图 3-4 (b) 所示. 图中每一小段都是正弦函数, 则此时电压表的示数是 ().

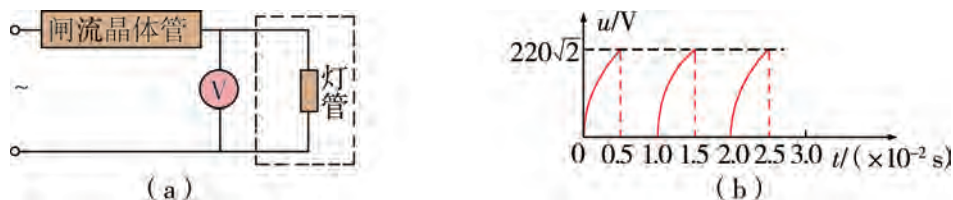


图 3-4

- A. 220 V B. 156 V C. 110 V D. 78 V

6. 高频焊接技术的原理如图 3-5 (a) 所示. 线圈接入如图 3-5 (b) 所示的正弦式交变电流 (以电流顺时针方向为正), 与圈内待焊接工件形成闭合回路, 则 ().

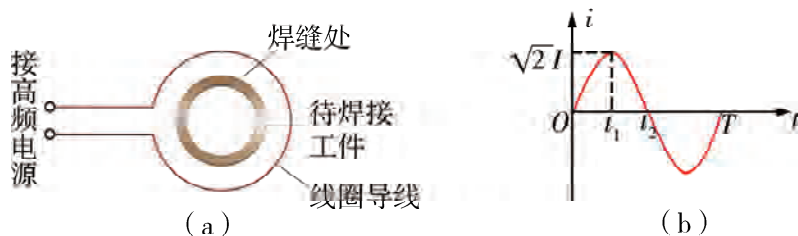


图 3-5

- A. 图 (b) 中电流的有效值为 I
B. 图 (b) 中 T 越大, 工件温度上升越快
C. $0 \sim t_1$ 内工件中的感应电流变大
D. $0 \sim t_1$ 内工件中的感应电流方向为逆时针

7. 如图 3-6 (a) 所示, 在匀强磁场中, 一矩形金属线圈两次分别以不同的转速, 绕与磁感线垂直的轴匀速转动, 产生的交变电动势图像如图 3-6 (b) 中曲线 a 、 b 所示, 则 ().

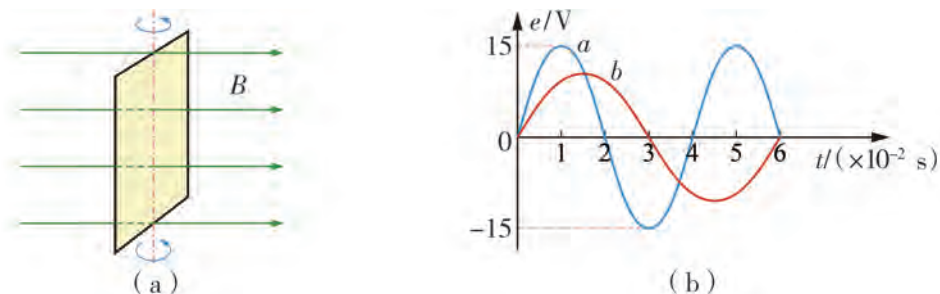


图 3-6

- A. 两次 $t=0$ 时刻, 线圈平面均与中性面重合
- B. 曲线 a 、 b 对应的线圈转速之比为 $2:3$
- C. 曲线 a 表示的交变电动势频率为 25 Hz
- D. 曲线 b 表示的交变电动势有效值为 10 V

8. 有一种家用电器, 其电路工作原理图如图 3-7 (a) 所示. 当电阻丝接在交流电源上后, 电阻丝开始加热. 当其温度达到某一数值时, 自动控温装置 P 启动, 使电阻丝所接电压变为如图 3-7 (b) 所示波形 (部分仍为正弦波), 从而进入保温状态. 不计电阻丝阻值的变化, 则下列说法正确的是 ().

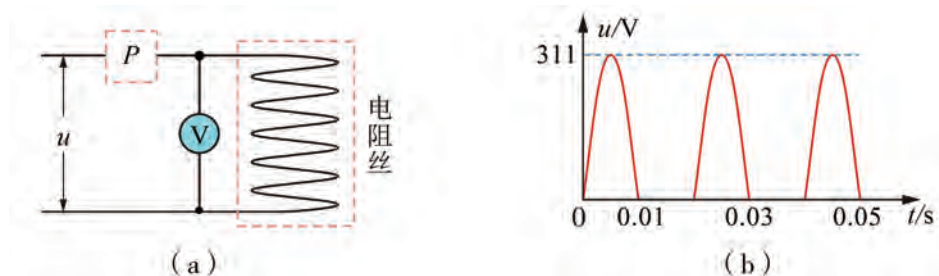


图 3-7

- A. 自动控温装置 P 启动后, 电阻丝的功率变为原来的一半
- B. 自动控温装置 P 启动后, 电阻丝所接交变电压的频率变为原来的一半
- C. 自动控温装置 P 启动后, 电压表的示数大约是原来的 0.5 倍
- D. 自动控温装置 P 启动后, 电压表的示数大约是原来的 0.7 倍

9. 在课堂演示“探究变压器线圈两端的电压与匝数的关系”实验时, 老师利用小灯泡定性判断变压器线圈两端的电压与匝数的关系. 如图 3-8 所示, 将长导线按顺时针方向一匝一匝地绕在铁芯的左边, 边绕边观察小灯泡的发光情况. 等小灯泡发出耀眼的强光后, 再将导线一匝一匝地退出铁芯, 边退边观察小灯泡的发光情况, 观察到的现象是 _____, 由此能得出的结论是 _____.

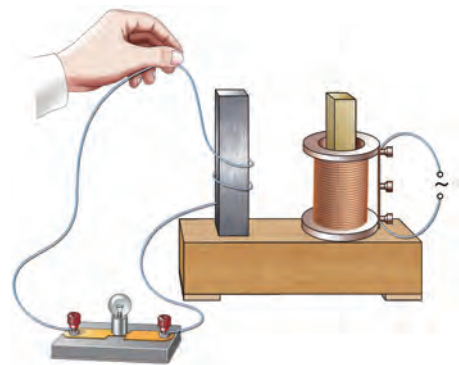


图 3-8

10. 某同学想用 220 V 交变电流作为小型收录机的电源. 他先制作了一个交变电流变直流的整流器. 但是这个整流器需要用 6 V 的交变电流电源. 于是他又添置了一个 $220\text{ V}/6\text{ V}$ 的变压器, 如图 3-9 所示. 他看到这个变压器上有 a 、 b 、 c 、 d 四个引出线头, 且 a 、 d 引线比 b 、 c 引线粗. 他不知道如何接法, 也没有相应的说明书.

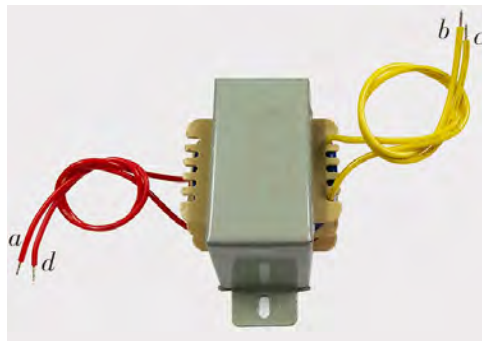


图 3-9

(1) 请帮助该同学判断 ad 端是接 220 V 还是 6 V . 为什么?

(2) 为了进一步探究变压器线圈两端的电压与匝数的关系，他又取匝数 $N_a = 80$ 匝和 $N_b = 160$ 匝的一个变压器重新接入电源。测量结果记录如表 3 - 1 所示，则接电源的是 N_a 端还是 N_b 端？为什么？

表 3 - 1

U_a/V	1. 80	2. 80	3. 80
U_b/V	4. 00	6. 01	8. 02

11. 水力发电具有防洪、防旱、减少污染等多个优点，现已成为我国的重要能源之一。某条河的流量为 $4\text{ m}^3/\text{s}$ ，水流下落高度为 5 m 。现在利用该河流兴建水电站来发电。设所用发电机的总效率为 50% 。

- (1) 求发电机的输出功率。
- (2) 设发电机输出电压为 350 V ，输电线的电阻为 $4\text{ }\Omega$ ，允许损耗的功率为 5% ，则当用户所需电压为 220 V 时，所用升压变压器和降压变压器匝数之比是多少？（ $g = 9.8\text{ m/s}^2$ ）

12. 黑光灯是一种利用物理方法来灭蛾杀虫的环保型设备。它通过利用发出的紫色光引诱害虫飞近高压电网来“击毙”害虫。如图 3 - 10 所示是黑光灯高压电网的工作电路。高压电网是利用变压器将有效值为 220 V 的交流电压变成高压。高压电网相邻两极间距离为 0.5 cm 。已知空气在常温常压下的击穿电场为 6220 V/cm ，为防止空气被击穿而造成短路，变压器的次、初级线圈匝数比不得超过多少？

13. 在家庭电路中，为了安全，一般都会在电能表后面的电路中安装一个漏电保护器。如图 3 - 11 所示，其原线圈是由进户线的火线和零线并在一起双线绕成。当漏电保护器的 ab 端没有电压时，脱扣开关 S 能始终保持接通；当 ab 端一旦有电压时，脱扣开关立即断开，切断电路以起保护作用。

- (1) 用户正常用电时， a 、 b 之间有没有电压？为什么？
- (2) 如果某人站在地面上，手误触火线而触电，脱扣开关是否会断开？为什么？

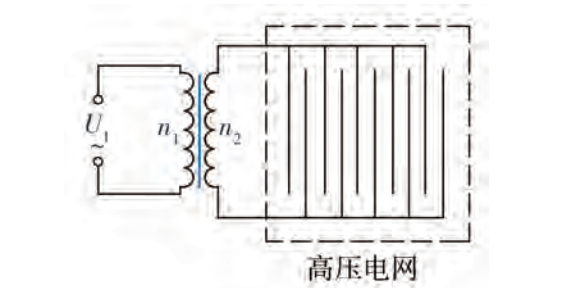


图 3 - 10

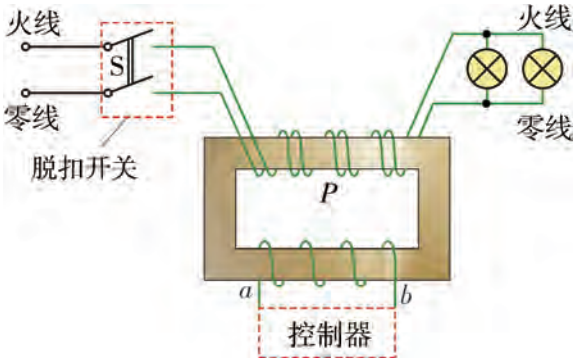


图 3 - 11



第四章 电磁振荡与电磁波

牛顿的万有引力定律把天体的运动和地面物体的运动纳入统一的力学理论体系之中，而建立在前人研究基础与创新预言上的麦克斯韦电磁场理论，则实现了电、磁、光本质上的统一，成为物理学又一座伟大的丰碑。赫兹的一系列实验，则为该理论奠定了坚实的实验基础，展示了理论与实验同等重要。

麦克斯韦预言的电磁波，已经广泛应用于生产和生活中的各个领域，大到雷达、射电望远镜，小到生活中的微波炉、电视遥控器，处处都有电磁波的功劳。

本章我们将通过实验了解电磁振荡，了解电磁波的发射、传播和接收，认识电磁波谱，并进一步体会物理学对统一性的追求。

第一节

电磁振荡



正弦式交变电流的大小和方向都随时间做周期性的变化,如图4-1-1所示.它的波形图与单摆振动的位移—时间图像(如图4-1-2所示)很相似.那么,电磁学中是否也有类似于单摆振动的规律呢?

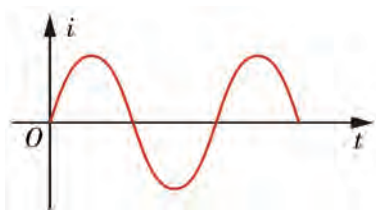


图4-1-1 正弦式交变电流图像

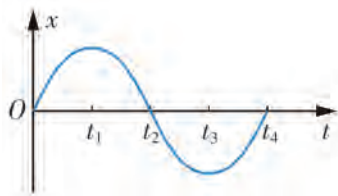


图4-1-2 单摆振动的位移—时间图像

振荡电流的产生

如图4-1-3(a)所示,一个电流计与一个闭合线圈连接.当一条形磁铁不断地插入和拔出线圈时,电流计的指针会不断地摆动.这说明电路中产生了大小和方向都不断变化的电流.如果将电流计拿走,如图4-1-3(b)所示,当条形磁铁不断地插入和拔出线圈时,电路断开处的 A 、 B 两点间仍存在感应电动势,即 A 、 B 两点间仍存在变化的电势差.这都是我们熟悉的电磁感应现象.

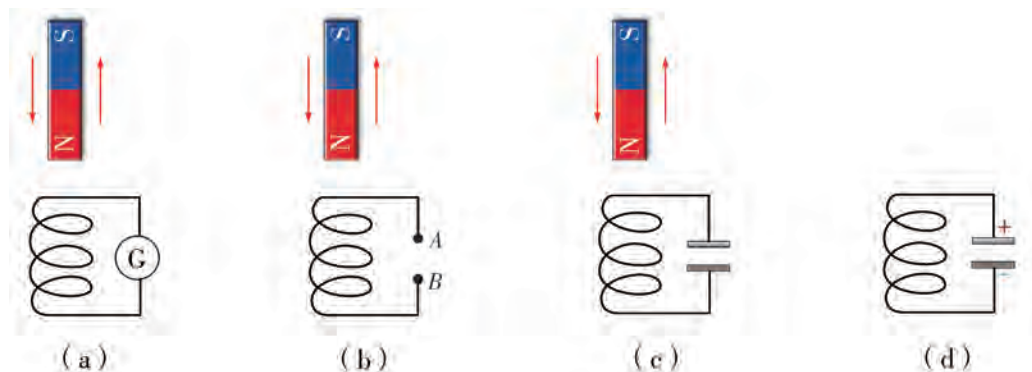


图4-1-3 振荡电路

在 A 、 B 两点间接入一个平行板电容器，如图 4-1-3 (c) 所示。当条形磁铁不断地插入和拔出线圈时，在两板之间的空间内就会产生大小和方向不断变化的电场，即电容器在不断地进行充、放电。

那么，如果一个充满了电的电容器与线圈连接，如图 4-1-3 (d) 所示，会发生什么现象呢？

观察与思考

在如图 4-1-4 所示的电路中，先将开关 S 扳到 a 处，此时电容器开始充电，观察电流计指针是否会摆动。再将开关 S 扳到 b 处，观察电流计指针是否会摆动以及如何摆动。将电流计换成示波器，观察示波器中显示的图像（如图 4-1-5 所示）。图像呈现怎样的规律？

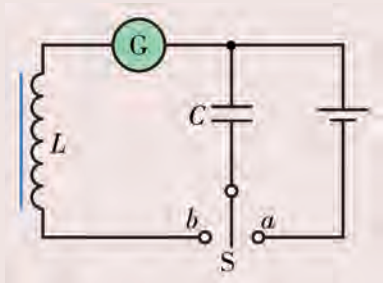


图 4-1-4 用 LC 振荡电路观察电流的实验



图 4-1-5 示波器显示的图像

在线圈和电容器组成的实验电路中，示波器显示的波形具有周期性。这表明电路中产生了大小和方向都做周期性变化的电流。这种电流称为**振荡电流**。能产生振荡电流的电路称为**振荡电路**（oscillating circuit）。由线圈和电容器组成的电路是最简单的振荡电路，称为 **LC 振荡电路**。从示波器中显示的图像可以看出， LC 振荡电路产生的振荡电流是按正弦或余弦规律变化的。振荡电流是一种频率很高的交变电流。这种电流用线圈在磁场中转动很难产生，主要通过振荡电路产生。

电磁振荡中能量的转化

在如图 4-1-4 所示的电路中，当开关 S 从 a 处扳到 b 处后，电流计指针的摆动幅度逐渐减小，最终停在零点位置。这是由于线圈和电路中的电阻消耗了部分电能，还有一部分能量以电磁波的形式损耗。为了能够抓住本质规律，我们忽略 LC 振荡电路中所有的电阻。那么，在 LC 振荡电路理想化模型中，能量是如何转化的呢？

如图 4-1-6 (a) 所示, 当开关由 a 处扳向 b 处的瞬间, 即电容器刚要放电的瞬间, 电路中没有电流, 线圈中没有磁场, 电容器里的电场最强, 电路里的能量全部储存在电容器的电场中.

电容器开始放电后, 由于线圈的自感作用, 放电电流不能立刻达到最大值而是由零逐渐增大, 如图 4-1-6 (b) 所示. 放电完毕时, 电容器极板上没有电荷, 放电电流达到最大值. 在这个过程中, 电容器里的电场逐渐减弱, 线圈的磁场逐渐增强, 能量由电场能逐渐转化为磁场能. 在放电完毕瞬间, 电场能全部转化为磁场能.

电容器放电结束时, 由于线圈的自感作用, 电流不会立刻减小为零, 而是保持原来的方向继续流动并逐渐减小. 由于电流继续流动, 电容器在与原来相反的方向上重新充电. 到反方向充电结束的瞬间, 电流减小为零, 电容器极板上的电量达到最大值, 如图 4-1-6 (c) 所示, 能量由磁场能逐渐转化为电场能. 在反方向充电完毕瞬间, 磁场能全部转化为电场能.

此后电容器又开始反向放电, 电路中的电场能量又逐渐转变为磁场能量, 如图 4-1-6 (d) 所示. 电容器反向放电完毕, 电场能量为零, 磁场能量达到最大值.

接着电流给电容器再度充电, 恢复到图 4-1-6 (a) 的状态, 如图 4-1-6 (e) 所示. 电场能量达到最大值, 磁场能量为零.

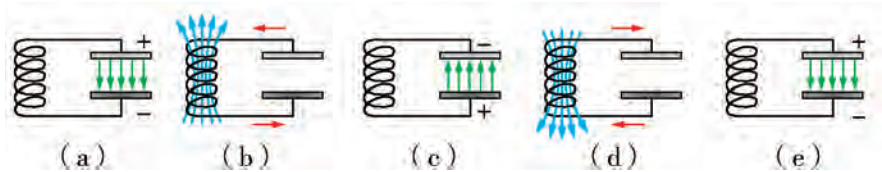


图 4-1-6 电磁振荡过程

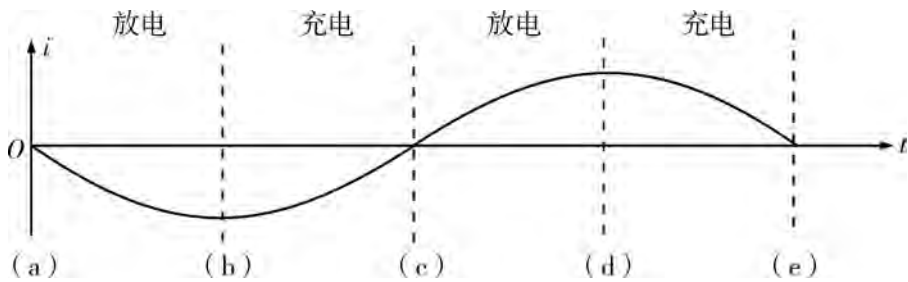


图 4-1-7 电流的周期性变化 (如图 4-1-6 中顺时针方向电流为正)

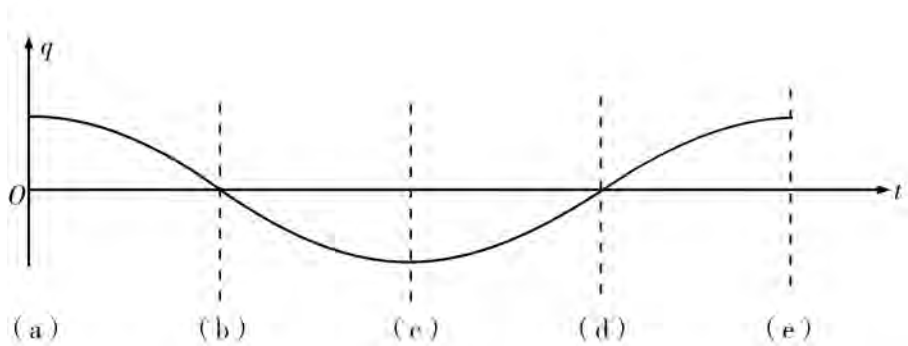


图 4-1-8 电容器极板上带电量的周期性变化 (q 为图 4-1-6 中电容器上极板的带电量)

上述过程周而复始地进行，由此产生大小和方向呈周期性变化的振荡电流，线圈中对应的磁场和电容器里的电场也呈周期性变化，电场能和磁场能相互转化。这种现象称为**电磁振荡** (electromagnetic oscillation)。在电磁振荡的过程中，回路中的电流*i*和电容器极板上的带电量*q* 随时间做周期性变化的情况，如图 4-1-7 和图 4-1-8 所示。

讨论与交流

- 1. 参考图 4-1-6，分析电磁振荡过程与单摆振动过程中能量转化的相似之处。
- 2. 参考图 4-1-6，分析电磁振荡过程中电容器极板上带电量*q* 的变化情况。
- 3. 尝试画出电磁振荡过程中电场能 $E_{\text{电}}$ 和磁场能 $E_{\text{磁}}$ 的变化图像。

电磁振荡的周期和频率

振荡电流属于交变电流的一种，可以用周期和频率来描述。电磁振荡完成一次周期性变化所用的时间称为电磁振荡的周期，电磁振荡在一段时间内做周期性变化的次数与所用时间之比称为电磁振荡的频率。

单摆的振动周期由系统自身的摆长和当地的重力加速度决定。那么 LC 振荡电路的周期、频率与哪些因素有关呢？

理论与实验表明，LC 振荡电路的振荡周期*T*和频率*f*只与自感系数*L*和电容*C*有关，与其他因素无关。它们的关系式为

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

式中*T*、*L*、*C*和*f*的单位分别是秒(s)、亨利(H)、法拉(F)和赫兹(Hz)。

根据上述公式可知，可以通过改变回路中电容器的电容和线圈的自感系数，以获得所需的振荡频率。例如，收音机、电视机中用于调台的调谐电路，就是通过调节可变电容器的电容来改变回路的振荡周期和频率的。

实践与拓展

利用数据采集器观察电磁振荡现象，其电路图如图 4-1-9 所示，电压传感器被连接到电路中，先将开关*S*扳到*a*处，对电容器进行充电。然后将开关*S*扳至*b*处，此时电压传感器

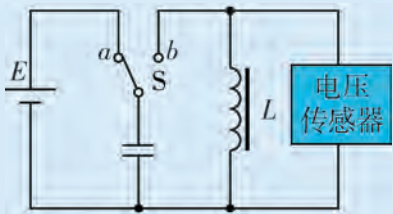


图 4-1-9 电磁振荡实验电路图

开始采集电路信号，经系统处理后，绘制出如图 4-1-10 所示的曲线。观察该曲线，尝试解释实验图像的特点。

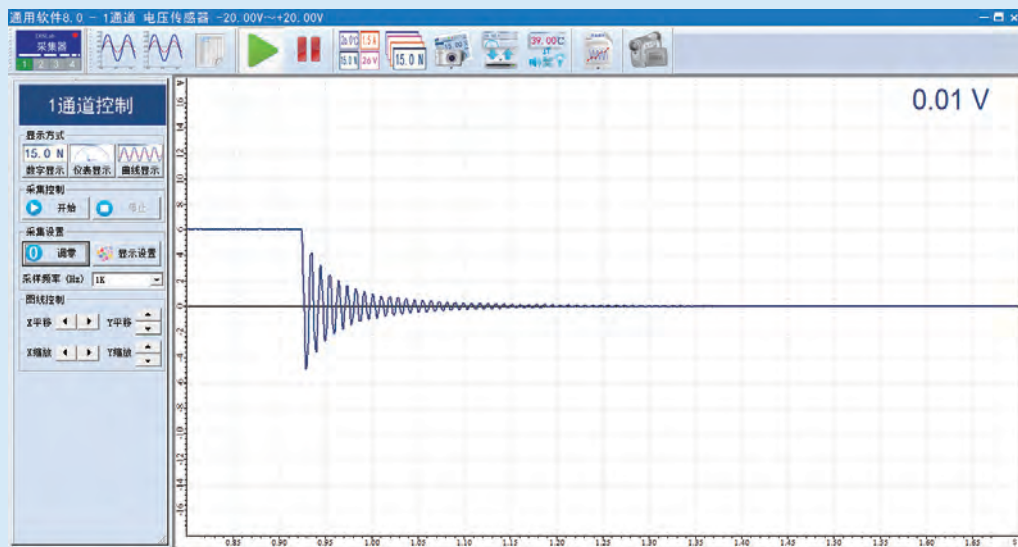


图 4-1-10 系统采集绘制的实验曲线

阻尼振荡和无阻尼振荡

在电磁振荡中，假如没有能量损耗，振荡将永远持续下去，振荡电流的振幅将永远保持不变，如图 4-1-11 所示。这种振荡称为无阻尼振荡。

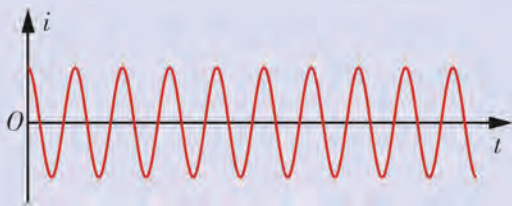


图 4-1-11 无阻尼振荡

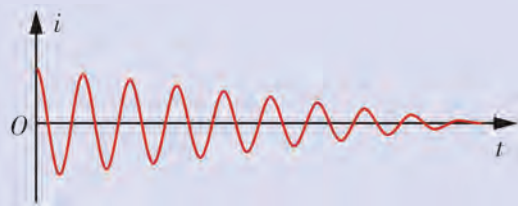


图 4-1-12 阻尼振荡

但是，实际电路中都有电阻，电流流过时都会因电阻发热而损耗电能， LC 回路中还有一部分能量以电磁波的形式损耗掉，振荡电流的振幅会逐渐减小，直到最终停止振荡，如图 4-1-12 所示。这种振荡称为阻尼振荡。

实际的电磁振荡大都是阻尼振荡，而我们实际需要的多数是等幅振荡。等幅振荡是用振荡器产生的。振荡器适时、恰当地将电源的能量补充到振荡电路中，使之产生持续的等幅振荡。例如，电子表上的石英晶体振荡器（如图 4-1-13 所示）就是专门用来产生等幅振荡的器件。

当前在智能手机、平板电脑、计算机、可穿戴设备、打印机、摄像机以及众多其他应用中，都大量使用了石英晶体振荡器。随着电子信息技术产业的发展，石英晶体振荡器也在往多功能、小型化和智能化的方向发展，为人类带来更多便利的服务。

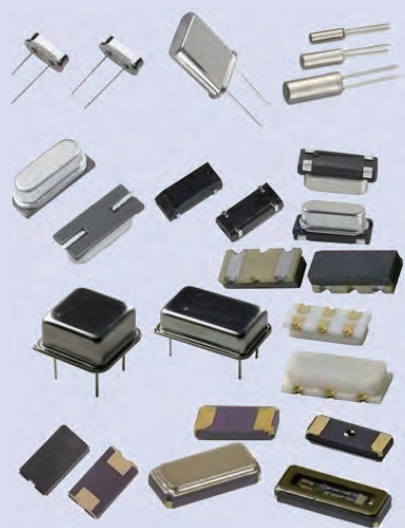


图 4-1-13 各类石英晶体振荡器

练习

1. 运用能量守恒定律说明为什么只含有电阻器和电容器的电路或者只含有电阻器和自感线圈的电路都不可能产生电磁振荡。

2. 我们平时可能会有这样的经历：雷雨天在家收听广播节目时，我们会先听到收音机里发出“咔嚓、咔嚓……”的声音，然后才听到雷声。

(1) 打雷时收音机为什么会发出“咔嚓”的声音？

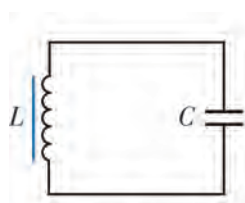
(2) 为什么会先听到收音机里的“咔嚓”声，然后才听到雷声？

3. 某收音机的 LC 振荡电路由自感系数为 L 的线圈和可变电容器构成。若 L 保持不变，要求 LC 振荡电路的频率范围是 $535 \sim 1605 \text{ kHz}$ ，则可变电容的最大值与最小值之比是多少？

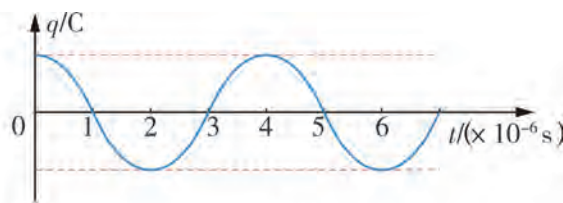
4. 在如图 4-1-14 (a) 所示的 LC 振荡电路中，电容器 C 极板上的带电量随时间变化的图线如图 4-1-14 (b) 所示。

(1) 在 $1 \times 10^{-6} \text{ s}$ 至 $2 \times 10^{-6} \text{ s}$ 内，电容器处于充电过程还是放电过程？

(2) 该振荡电路激发的电磁波的波长是多少？



(a)



(b)

图 4-1-14

第二节 麦克斯韦电磁场理论

机械振动会产生机械波，那么电磁振荡是否也能产生相应的电磁波？

19 世纪 60 年代，英国物理学家麦克斯韦在总结了前人研究成果的基础上，展开了大胆的猜想与假设，建立了具有划时代意义的电磁场理论，预言了电磁波的存在。

两个基本假设

麦克斯韦电磁场理论有两个基本假设：

假设一：变化的磁场周围会产生电场

如图 4-2-1 所示，在变化的磁场中放置一个闭合电路，电路中将会产生感应电流，这是我们熟悉的电磁感应现象。

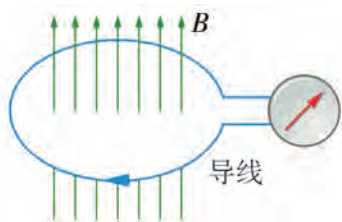


图 4-2-1 电磁感应现象

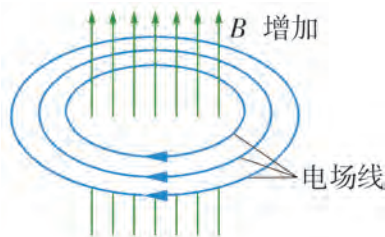


图 4-2-2 变化的磁场产生电场

麦克斯韦认为，电路中产生感应电流，是由于导体中的自由电荷受到电场力的驱使而做定向移动，说明电路所在的空间存在电场。而这个电场是由变化的磁场引起的，如图 4-2-2 所示。此处闭合电路只起到了检验空间所在处是否有产生电场的作用，即使没有闭合电路，空间仍然存在电场。也就是说，变化的磁场周围产生电场是一种普遍存在的现象，与闭合电路是否存在无关。



讨论与交流

变化的磁场产生的电场与静电场有何不同？

假设二：变化的电场周围会产生磁场

既然变化的磁场能产生电场，坚信电场与磁场对称之美的麦克斯韦大胆假设：变化的电场周围也会产生磁场。

后来大量的实验证实了麦克斯韦的上述假设。如图 4-2-3 所示，用手摇动感应起电机给电容器充电时，或者电容器放电时，电容器两极板间都会产生变化的电场，变化的电场在周围产生磁场，使附近的小磁针发生摆动。

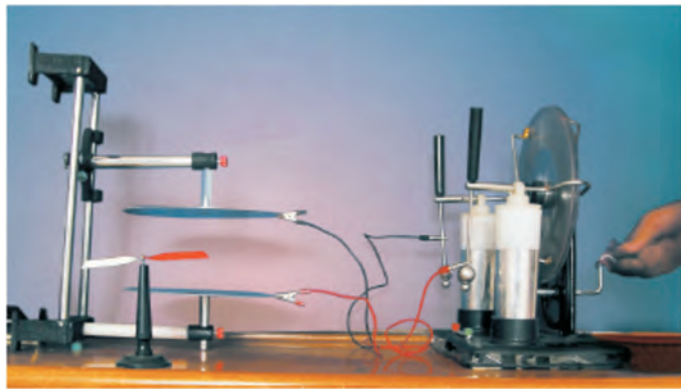


图 4-2-3 电容器充电时，其附近的小磁针发生摆动

变化的磁场产生电场，变化的电场产生磁场。变化的电场和磁场总是相互联系，形成一个不可分离的统一体，这就是**电磁场** (electromagnetic field)。电场和磁场只是这个统一的电磁场的两种具体表现，体现了场的统一性与多样性。

伟大的预言

根据上述两个电磁理论的基本假设，麦克斯韦推断：如果在空间某区域有周期性变化的电场，这个变化的电场就会在周围空间产生周期性变化的磁场；这个变化的磁场又会在较远的空间引起周期性变化的电场。这样，变化的电场和磁场并不会局限于空间某个区域，而是由近及远地向周围空间传播出去。由此，一个伟大的预言诞生了：空间可能存在着**电磁波** (electromagnetic wave)。

麦克斯韦进一步预言的电磁波具有以下特点，如图 4-2-4 所示。

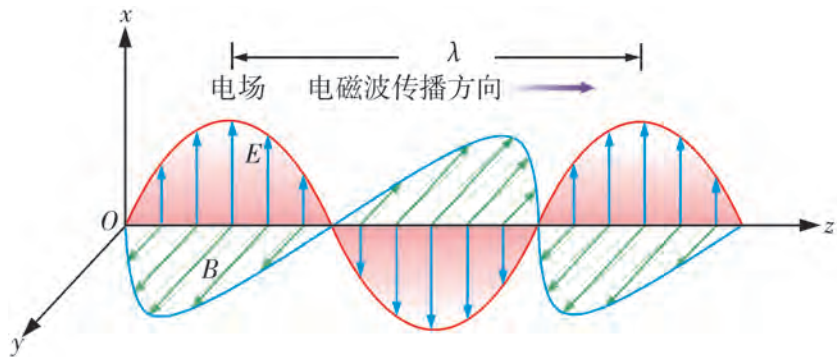


图 4-2-4 沿 z 轴传播做正弦变化的电磁波在某一时刻的图像

(1) 在电磁波传播过程中，空间中任意一点的电场强度 E 和磁感应强度 B 相互垂直，并且都和电磁波的传播方向垂直，因此电磁波是横波。

(2) 在电磁波传播过程中，空间中任意一点的电场强度 E 和磁感应强度 B 都随时间作周期性变化，电磁波的频率即为电磁振荡的频率，它由波源决定，与介质无关。

(3) 电磁波在真空中的传播速度等于光在真空中的传播速度，光波的本质是电磁波。

麦克斯韦集电磁学研究成果之大成，不仅预言了电磁波的存在，而且揭示了电、磁、光现象在本质上的统一性，把电磁学发展成为一个完整的、优美的理论体系。这被认为是19世纪科学史上最伟大的理论统一，其意义足以与牛顿力学体系相媲美，二者都展示了物理学发展过程中对统一性的追求。正是这个理论为现代电力工业、电子工业、无线电技术、通信等领域的应用奠定了基础，成为物理学中又一座伟大的丰碑。

赫兹实验

1864年，麦克斯韦关于电磁波的预言震动了整个物理学界，并为电磁学的研究发展指明了新的探索方向，体现了科学预言不可忽视的价值。但由于在此之前从来没有人能够证实电磁波的存在，所以当时很多物理学家，甚至连物理学界的权威学者都不敢相信这个新理论是完全正确的。

1879年，德国柏林科学院悬奖征求对麦克斯韦电磁场理论实验验证，这促使年轻的德国物理学家赫兹（H. R. Hertz, 1857—1894）萌发了进行电磁波实验的雄心壮志。



图 4-2-5 赫兹

1888年，赫兹用如图4-2-6所示的实验方案证实了电磁波的存在。他把两根共轴的黄铜杆 A 、 B 接在感应圈的两极上。黄铜杆 A 、 B 间留有一个间隙，间隙两边杆的端上焊有一对磨光的黄铜球。感应圈是一个与变压器相似的装置，由两个不同匝数的线圈绕在同一铁芯上组成。当通入匝数少的线圈的电流突然断开时，在匝数多的线圈两端（即与黄铜杆连接的两极）之间会产生很高的电压。这个高电压使铜球之间的空气被击穿，产生火花放电。每跳一次火花，两球之间就形成一次高频振荡电流，并向外发射同频的电磁波。

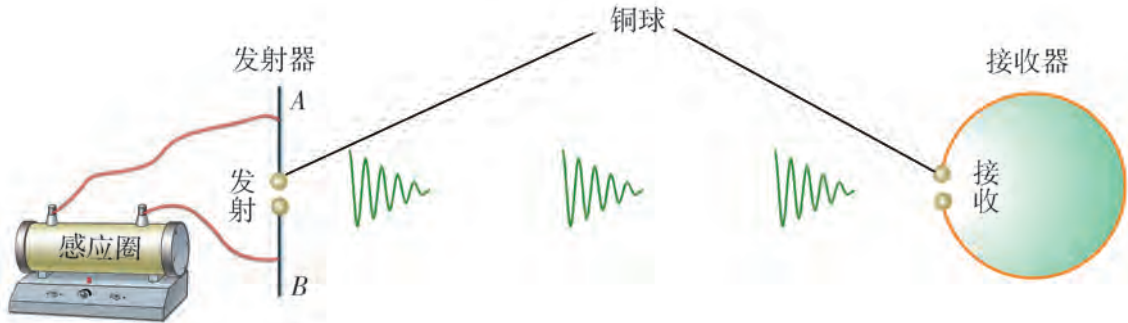


图 4-2-6 赫兹证实电磁波存在的实验方案示意图

与这个回路相距一定距离有一个电磁波接收器，它由一根粗铜导线弯成一个带开口的圆环，开口端各焊一个铜球，铜球之间有可作微调的空隙，这个接收器实际上可以看作是一个 LC 振荡电路。通过调节小铜球间隙改变接收电路的固有频率，使其与发射过来的电磁波产生共振，从而在导线环中产生足够高的感应电动势，使接收器上两个铜球的空隙间产生火花。赫兹发现，当发射器两球间有火花产生时，接收器两球间也有火花产生。这表明有电磁波从发射器到达了接收器。

下面我们观察一个模拟赫兹实验的现象。

观察与思考

如图 4-2-7 所示，有 4 根完全相同的铜管（长约 1 m），将其中两根接在高压感应圈的两极，组成发射器。感应圈的高压能使两管间不断产生电火花。在另外两根铜管之间接一个发光二极管，组成接收器。

观察实验现象并思考下列问题。

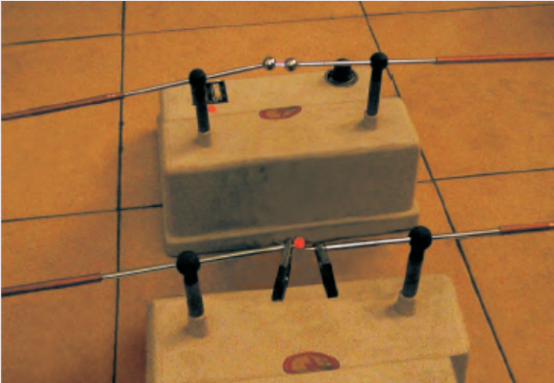


图 4-2-7 模拟赫兹实验的装置

- (1) 接收器上的发光二极管在什么情况下会亮？
- (2) 接收器处于不同位置时，发光二极管的亮度如何变化？

从上述模拟赫兹实验可以看到，只有当发射器两小球间产生电火花时，接收器上的发光二极管才会亮。这表明接收到了发射器发出的电磁波。当接收器慢慢远离发射器，在超过一定距离后，发光二极管明显变暗甚至熄灭。这表明电磁波在传播过程中有能量损耗，接收电磁波需要满足一定的条件。

赫兹运用自己精湛的实验技术，还观察到电磁波的反射、折射、干涉、衍射和偏振等现象，证明了电磁波在真空中的传播速度就是光速，从而证实了麦克斯韦的伟大预言，为麦克斯韦的电磁场理论奠定了坚实的实验基础。赫兹的实验也为无线电技术的发展开辟了道路。为了纪念赫兹作出的贡献，人们把频率的单位定为赫兹。



实践与拓展

用磁传感器取代如图4-2-3所示实验中的小磁针。摇动感应起电机，观察并解释传感器输出的实验图像（如图4-2-8所示）。

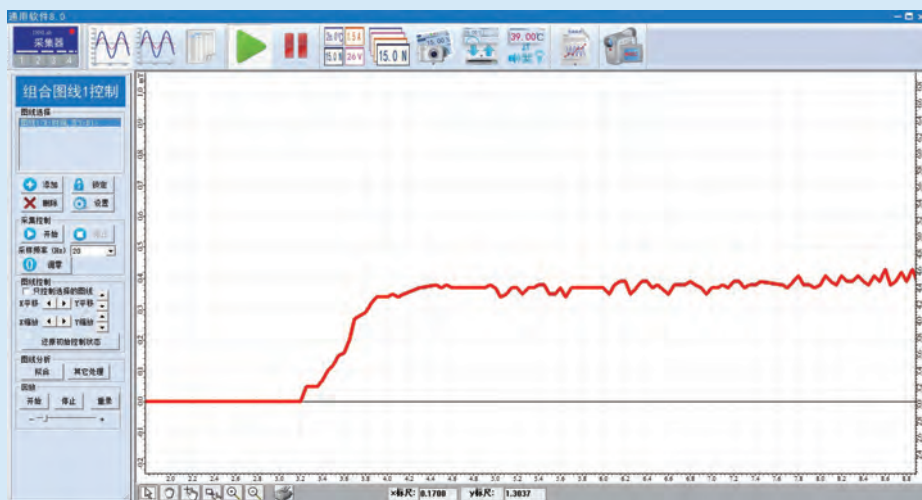


图 4-2-8 磁传感器输出的实验图像

麦克斯韦的研究方法

19 世纪中叶，人类已经发现电磁现象的各个局部规律，如库仑定律等。在物理学统一性思想指引下，建立普遍的电磁理论对各种电磁现象作出统一描述的时机已经到来。

麦克斯韦早期被法拉第定性表述的“力线”思想所吸引。他能否用数学方法再塑法拉第的电磁理论？1855 年，麦克斯韦发表了论文《论法拉第力线》，把流体力学中的数学工具迁移过来，通过类比法定量描述了电场、磁场在空间的变化情况。

随后，麦克斯韦意识到，利用类比法只能对各类物理现象的共性进行描述，有可能掩盖了电磁场特殊的性质。1862 年，麦克斯韦发表了第二篇论文，采用建模的方法提出了一个场的力学模型——“以太涡旋模型”。利用该模型，不仅可以说明法拉第磁力线的特性，还建立了电磁现象之间的联系。

麦克斯韦清醒地认识到所提出的理论还只是一个“力学上可以想象和便于研究”的模型，而模型本身“可能并不是自然界中真实存在的”。能否建立一个更坚实的并能用实验来证实的理论体系呢？1865 年，麦克斯韦发表了第三篇论文，放弃



图 4-2-9 麦克斯韦

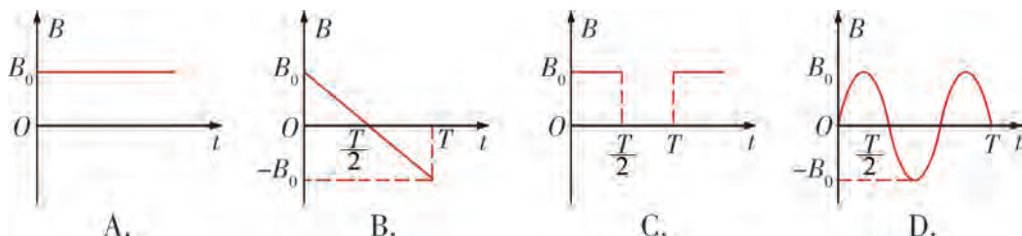
了“以太涡旋模型”，以几个基本的实验事实为基础，用“场”的概念取代“力线”的概念，运用数学方法提出了著名的麦克斯韦方程组，构建了电磁学的完整理论。

在创建电磁理论的过程中，一方面，数学方法是麦克斯韦的工具，用数学去解释物理现象，表述物理思想；另一方面，他并不是完全依靠数学演绎方法推导得出的麦克斯韦方程组，而是用思想实验的方法，在已有电磁实验的基础上展开思想上的实验，从而使以前几个相互独立、没有统一性的电磁公式，成为具有本质性意义的电磁场理论体系。



练习

1. 下列是一些磁场的磁感应强度 B 随时间 t 变化的图像。哪个（些）能在磁场周围产生稳定的电场？并说明理由。



2. 声波和电磁波在产生、传播以及特性等方面存在着哪些异同点？

3. 分析下列生活中的各种现象是否会产生电磁波，并说明原因。

- (1) 开灯的一瞬间。
- (2) 灯泡正常发光时。
- (3) 关灯的一瞬间。
- (4) 使用电吹风时。
- (5) 电饭煲从加热状态自动跳转到保温状态时。

4. 在经典物理学发展史上，出现过四个里程碑式的人物。他们分别是伽利略、牛顿、法拉第和麦克斯韦。爱因斯坦认为他们同样伟大。说说你的观点。

第三节

电磁波的发射、传播和接收



LC 振荡电路能够产生振荡电场和磁场。但在常规的 LC 振荡电路中，电场能主要集中在电容器内，磁场能主要集中在线圈内，两种能量大都是在电路内相互转化，发射出去的能量很少。怎样才能有效地发射电磁波呢？

电磁波的发射

研究表明，要有效地发射电磁波， LC 振荡电路必须具备以下两个条件：

第一，要有足够高的振荡频率。频率越高，发射电磁波的本领越大。理论研究表明，单位时间内发射出去的电磁波的能量与振荡频率的四次方成正比。根据振荡频率公式 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，可知要使振荡频率高，电路中 LC 的乘积应比较小；结合平行板电容器的电容

公式 $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi k d}$ ，可以通过减小电容器两极板的正对面积、增大极板间距来满足要求。

第二，要使 LC 振荡电路的电场和磁场分散到尽可能大的空间。

为了满足以上两个条件，应将如图 4-3-1 (a) 所示的 LC 振荡电路进行改造。如图 4-3-1 (b) 和图 4-3-1 (c) 所示，可以增大电容器极板间的距离，减小电容器两极板的正对面积，减少自感线圈的匝数，甚至演化成为一条导线，如图 4-3-1 (d) 所示，使电场和磁场扩展到电容器的外部，这样的振荡电路称为**开放电路**。

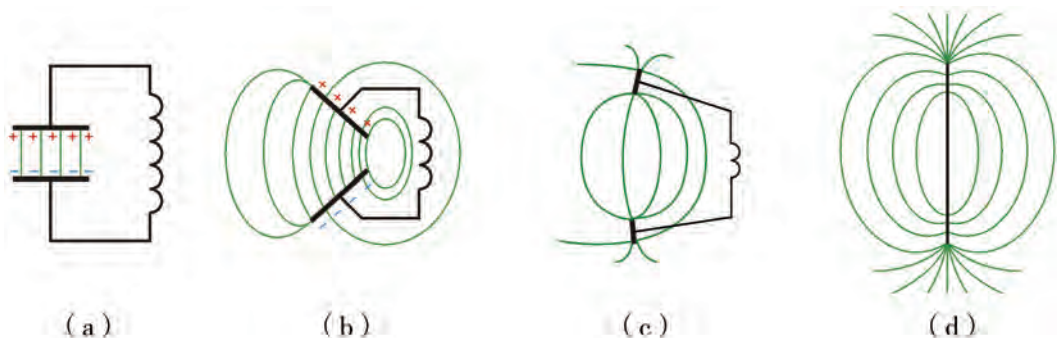


图 4-3-1 由闭合电路变成开放电路

实际应用中，广播电台或电视台的天线都可以看成是开放电路，它的一端伸向高空，另一端接入地下。电磁波就由这样一个开放电路发射出去。在无线电技术中使用的电磁波称为**无线电波**（radio wave）。

发射无线电波可以采用感应耦合开放电路，如图 4-3-2 所示。天线被安装在高大的发射塔上。发射塔越高，发射电磁波的本领越强。

在无线电通信中，电磁波是用来传输信号的。例如，无线电广播传递的是声音，无线电传真传递的是图片或文字，电视传递的不仅有声音还有图像。信号传输前，首先要将声音、图像等信息转变为电信号。但这种电信号频率很低，不能直接送到天线上向空间发射。发射电磁波必须采用高频电流。因此必须把低频的电信号“加载”在高频振荡电流上。这个过程称为调制。

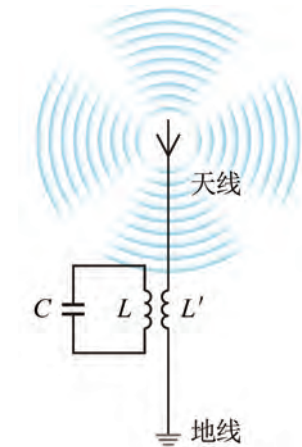


图 4-3-2 无线电波的发射

调制的方式主要有两种：调幅（AM）和调频（FM），如图 4-3-3 所示。调幅是使高频电磁波的振幅随信号的强弱而变，如图 4-3-3（c）所示。调频是使高频电磁波的频率随信号的强弱而变，如图 4-3-3（d）所示。

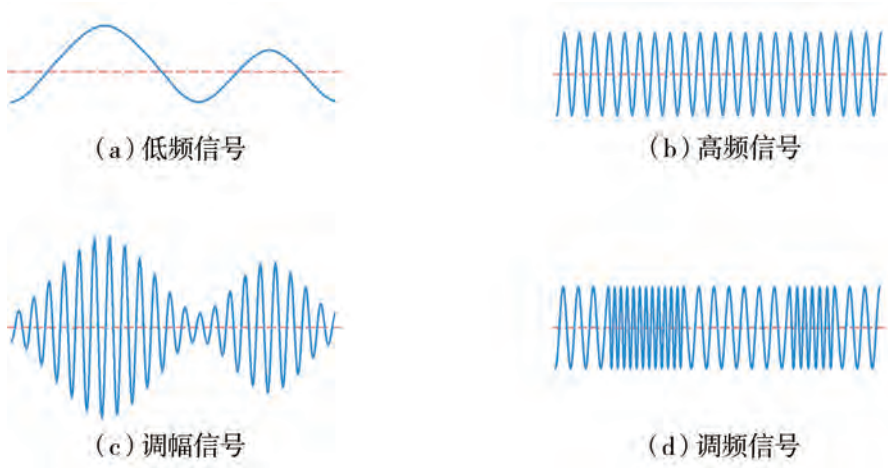


图 4-3-3 调制方式

与调幅广播相比，调频广播抵抗干扰的能力比较强，在传递过程中不容易失真。因此，音频广播多采用调频方式。电视信号因包含图像和声音两种信号，这两种信号如果采用相同方式调制会相互干扰，给图像与声音带来不良影响。因此，一般情况下图像采用调幅方式进行调制，声音采用调频方式进行调制。

电磁波的传播

波长不同的电磁波有着不同的传播特性，这里我们主要学习无线电波的传播。无线电

波的波长范围是 1 mm ~ 30 km. 根据波长或频率, 可以把无线电波分为几个波段, 不同波段的传播方式和主要用途如表 4-3-1 所示.

表 4-3-1 不同波段无线电波传播方式及其应用

波段		波长 λ/m	频率 f/kHz	传播方式	主要用途
长波		3000 ~ 30 000	10 ~ 100	地波	超远程无线电通信和导航
中波		200 ~ 3000	100 ~ 1500	地波和天波	调幅无线电广播、电报、通信
中短波		50 ~ 200	1500 ~ 6000		
短波		10 ~ 50	6000 ~ 30 000	天波	
微波	米波	1 ~ 10	30 000 ~ 300 000	近似于直线传播	调频无线电广播、电视、导航
	分米波	0.1 ~ 1	300 000 ~ 3 000 000	直线传播	电视、雷达、导航
	厘米波	0.01 ~ 0.1	3 000 000 ~ 30 000 000		
	毫米波	0.001 ~ 0.01	30 000 000 ~ 300 000 000		

无线电波的传播方式主要有三种: 地波、天波和直线传播, 如图 4-3-4 所示.

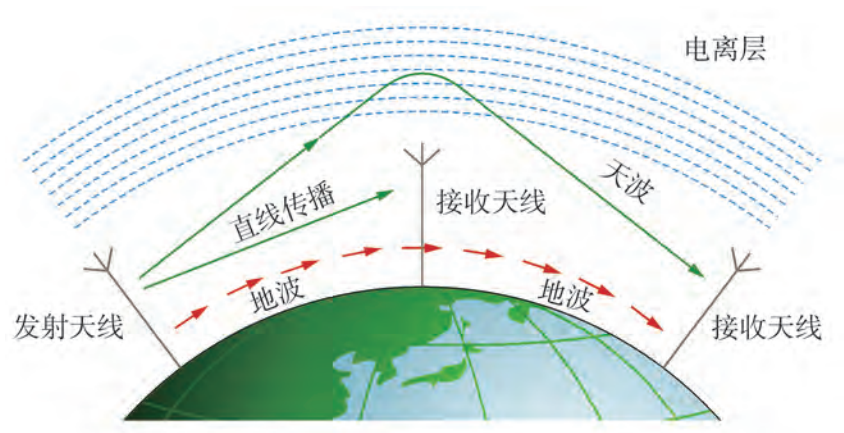


图 4-3-4 无线电波的传播方式

沿地球表面传播无线电波的方式称为地波传播. 无线电波的波长越长, 越容易绕过地面的障碍物. 中、长波能绕过地球表面上多数障碍物, 因此可采用地波传播方式. 但中波和中短波虽然能绕过障碍物, 能量损耗却较多. 因此中波段的收音机一般只能收听到本地或附近省市的电台.

利用大气中电离层的反射来传播无线电波的方式称为天波传播. 短波和部分中波的波长较短, 但能够在地面与电离层之间来回反射进行传播, 可采用天波传播方式. 由于电离层容易受到太阳辐射的影响, 造成反射的天波时强时弱, 所以收音机收到的短波信号会出现忽大忽小、不够稳定的现象.

沿直线传播无线电波的方式称为直线传播，又叫作空间波。微波的波长较短，能够穿透电离层，因此只能采用直线传播方式，从发射天线直接传播到接收天线。由于地球是一个近似的球体，无线电波沿直线传播的距离一般只有几十千米，所以需要设立许多中继站，不断地把信号接收、放大，再传到下一站，就像接力赛跑一样，一站一站地把信号传送到远方。

同步通信卫星（如图 4-3-5 所示）是一个很好的中继站。把无线电信号先传给通信卫星，然后由通信卫星把信号转发回地面，这样能大大地增加信号的覆盖面积。

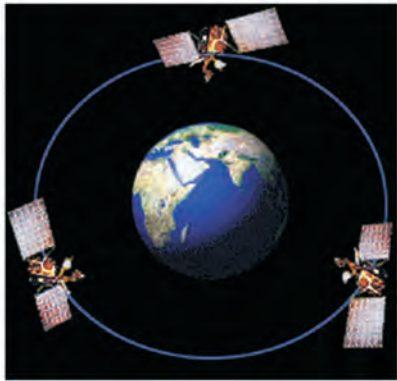


图 4-3-5 同步通信卫星示意图

电磁波的接收

在空间传播的电磁波如果遇到导体，会在导体中产生微弱的感应电流，感应电流的频率与激起它的电磁波的频率相同。因此，可以用导体制成的天线和地线组成接收电路来接收电磁波。

在我们周围空间弥漫着许多不同频率的无线电波，从中把需要的选出来，这一过程称为选台。类比机械振动中的共振现象，当接收电路的固有频率被调到与需要接收的无线电波的频率相同时，这个频率的无线电波在接收电路里将激起最强的振荡电流，这个过程称为调谐。能够调谐的接收电路称为调谐电路。如图 4-3-6 所示是一个简单的调谐电路。

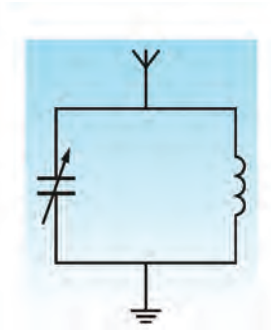


图 4-3-6 简单调谐电路

经过调制的高频振荡电流，还必须设法从中筛选出需要的低频信号电流。从高频振荡电流中“检”出它所携带的低频信号电流的过程称为检波。检波是调制的逆过程，所以又叫解调。检波之后的信号再经过放大、重现，还原成声音、文字、图片或图像。



实践与拓展

1. 设计一个实验方案，探究收音机对不同波段无线电广播的收听效果，并尝试分析其原因。
2. 如果条件允许，可以组织参观当地的广播电视发射台。



图 4-3-7 收音机

伪基站的危害与整治

近年来,伪基站短信已成为通信信息诈骗的主要手法之一。不法分子利用伪基站向广大手机用户群发短信,散播诈骗、黄赌毒等违法信息,甚至通过短信传播恶意软件和病毒链接。我们一旦点击了伪基站发来的短信中的链接,个人信息和财产安全将要受到侵害。

伪基站实际上是一套非法无线电发射装置,一般由笔记本电脑、发射器、天线、手机和电瓶组成。到了某个区域后,手机可以测定出这个区域手机通信基站的信道,然后伪基站开始发射无线电控制该信道,以信号的强度优势,诱使周围的手机连接伪基站。最后通过伪基站向连接上来的手机发送垃圾短信。

然而,“狐狸再狡猾也骗不过好猎手”。被伪基站信号挟持过的手机,重新接上正常基站网络时,会把伪基站的相关信号数据带过来。在大数据技术支持下,正常基站将不正常的伪基站信令上传至网络与大量正常信令对比,经确认后可以迅速发送预警短信提醒用户。

在侦测伪基站短信的基础上,技术人员迅速锁定大量用户手机受到伪基站攻击的同一个区域,计算出伪基站的准确位置,配合警方定位并捣毁伪基站,有效震慑违法犯罪行为。



图 4-3-8 公安机关缴获的伪基站设备



练习

1. 某无线电广播的中波波段波长限定在 $300 \sim 3000 \text{ m}$ 的范围内。为了避免邻近电台的干扰,两个电台的频率范围至少应相差 10^4 Hz 。此波段中最多能容纳的电台数约为多少个?
2. 某同学自己绕制天线线圈,制作了一个最简单的收音机,用来收听中波的无线电广播。他发现有一个频率最高的中波电台收不到,但可以接收其他中波电台。为了收到这个电台,他应该增加还是减少线圈的匝数?为什么?
3. 如图 4-3-9 所示是一台收音机的波段调谐窗。调节收音机侧面的调谐旋钮,移动窗口中的波段指针,即可以收听自己想听的电台。请在图中找出有关这台收音机至少两条以上的信息。

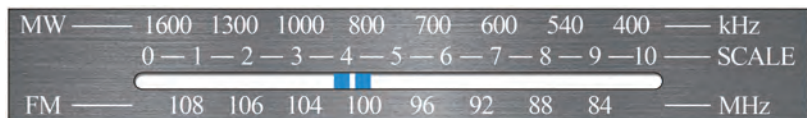


图 4-3-9

第四节

电磁波谱

电磁波是一个大家族。为了更全面地认识电磁波的家族成员，我们将各类电磁波按波长进行排列，逐类了解其特性及其应用。

认识电磁波谱

电磁波的频率范围很广。无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线都是电磁波，将它们按波长或频率大小的顺序排列成谱，如图 4 - 4 - 1 所示，称为电磁波谱 (electromagnetic wave spectrum)。

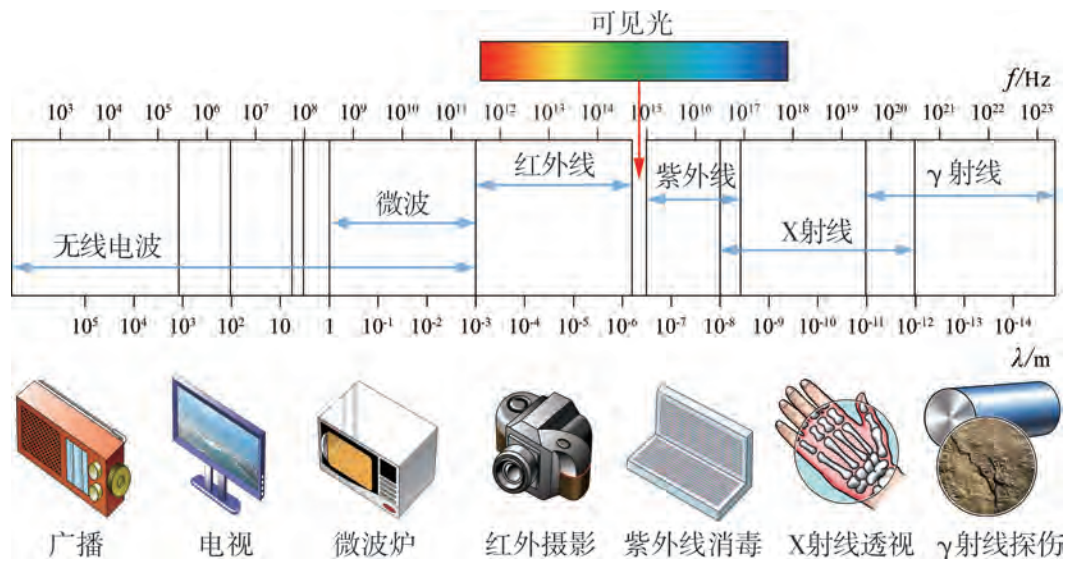


图 4 - 4 - 1 电磁波谱及应用

电磁波家族中各个成员之间既有统一性，又表现出多样性。它们都是本质相同的电磁波，都具有电磁波的性质。它们的频率和波长各异。频率低的无线电波由于波长较长，较容易发生干涉和衍射现象，而频率高的 X 射线、 γ 射线由于波长较短，因此较难观察到干涉、衍射现象。

不同的电磁波，产生机理表现出多样性。无线电波是自由电子振荡产生的，红外线、可见光、紫外线是原子的外层电子受到激发后产生的，X 射线是原子的内层电子受到激发后产生的， γ 射线是原子核受激发后产生的。

电磁波家族成员的特性及其应用

无线电波 (radio wave)

波长大于 1 mm (频率小于 300 GHz) 的电磁波是无线电波。它主要用于通信、广播及其他信号传输。20 世纪以来,无线电通信迅猛发展,相继出现了无线电广播、雷达、无线电传真机、电视、无线电寻呼机、移动电话等。

微波是无线电波中一个有限频带的简称,即波长在 1 mm ~ 1 m 之间的电磁波。微波的波长比地球上很多宏观物体如飞机、舰船、导弹、卫星、建筑物等的尺寸小得多。因此微波照射到这些物体上将产生强烈的反射,利用它与几何光学相似的这一特点,可以制成方向性很强的微波天线,用来发射或接收微弱的微波信号,从而为雷达、卫星通信、导弹等提供必要条件。



图 4-4-2 舰艇上的军事雷达

此外,微波相对一般的无线电波频率高很多,可用频带很宽。微波携带的信息容量大,因此可作为多路通信的载频。移动通信通常用的是 800 ~ 1800 MHz 这一频段。现已逐渐普及的 Wi-Fi 也是一种通过微波将个人电脑、手机等电子设备连接到一个无线局域网的技术,其工作频率范围是 2400 ~ 2500 MHz。这个范围被分为 14 个频段,前 13 个频段每个频段带宽 20 MHz,最后一个大一些,相邻的频段间有叠加区域,可能会产生干扰。这也是有时通过 Wi-Fi 连接的网速慢的主要原因之一。

蓝牙是另一种在生活中常见的无线技术,可实现固定设备、移动设备和个人域网之间的短距离数据交换,工作频率范围是 2400 ~ 2483.5 MHz,与 Wi-Fi 同频段,会与其产生相互干扰的现象,但一般不会导致不可用的情况。蓝牙技术的电磁波覆盖范围非常小,半径约为 15 m,而 Wi-Fi 的电磁波覆盖范围大,例如家庭使用的 Wi-Fi 半径可达 100 m。

不同物体对微波的吸收程度不同,如对于玻璃、塑料和瓷器,微波几乎是穿越而不被吸收。水和食物等则会吸收微波而使自身发热,所以微波还可用于食品加工(微波炉)、工业和医疗上的加热与解冻等。

红外线 (infrared ray)

1800 年,英国天文学家赫歇尔 (F. W. Herschel, 1738—1822) 利用温度计在日光光谱红端外观察到增温现象,由此发现了红外线。它的波长范围为 $0.77\mu\text{m}$ ~ 1 mm,介于无线电波与可见光之间。红外线的频率比可见光更接近固体物质分子振动的固有频率,更容易引起分子的共振,有明显的热效应,可以用来加热物体、烘干油漆和谷物。烤制食品的红外线烤箱利用的就是红外



图 4-4-3 红外线高空拍摄地球图

线的热效应.

一切物体都在不断地向外辐射红外线,不同的物体或物体的温度不同时,向外辐射的红外线强度和频率都不同.利用灵敏的红外线探测器接收物体发出的红外线,然后用电子仪器对接收到的信号进行处理以探明被探物体的特征,这种技术称为红外线遥感.红外线的波长比可见光更长,其衍射现象更明显,更容易透过云雾、烟尘,可实现全天候红外线遥感和红外线高空摄影.军事上用的红外线夜视装置可实现全天候作战.

红外线还用于遥控技术.各种家用电器的遥控器大多数是利用红外线脉冲信号来实现各种操作的.

可见光 (visible light)

能够引起人的视觉的光只在一个很窄的波段内,通常称为可见光,它的波长范围为 440 ~ 770 nm.不同频率(或波长)的可见光颜色不同,频率最高(波长最短)的可见光是紫光,频率最低(波长最长)的可见光是红光.

在月球上的宇航员看到的天空是黑的(如图 4-4-5 所示),这是因为月球上没有能散射太阳光的大气.而在地球上,波长较短的蓝光更容易与空气分子发生散射.这种光偏离原来的传播方向射入我们的眼睛,于是我们看到了蓝天.阴天或者大气污染较严重时,空气中的冰晶或尘粒的数量较多,各种波长的可见光都会被散射,因而天空呈现出灰白色.

紫外线 (ultraviolet ray)

1801 年,德国物理学家里特(J. M. Ritter, 1776—1810)发现太阳光光谱紫端外面的一段,能够使含有氯化银的照相底片感光,由此发现了紫外线.它的波长范围为 5 ~ 400 nm.紫外线具有较大的能量,照射到荧光物质上时能够使分子受激而发出可见光,因此具有较强的荧光效应.生活中常用的日光灯和灭蚊灯都是通过紫外线激发荧光物质发光的.

紫外线还具有明显的化学作用,能够穿透生物的细胞膜和细胞核,破坏 DNA 的分子键,使其失去复制能力或失去活性,因此被普遍用于杀菌或消毒(如图 4-4-6 所示).另外,紫外线还能促使人体合成维生素 D,而维生素 D 有助于人体对钙的吸收而预防佝偻病.但过强的紫外线也会使人的眼睛和皮肤受到伤害.



图 4-4-4 我国第一台红外相机——“资源一号”红外扫描仪



图 4-4-5 我国宇航员从太空传回的照片



图 4-4-6 紫外线杀菌灯

X 射线 (X-ray)

1895 年, 德国物理学家伦琴 (W. K. Röntgen, 1845—1923) 在研究阴极射线时, 意外发现了伦琴射线, 即 X 射线。伦琴因此于 1905 年获得第一届诺贝尔物理学奖。

X 射线是一种波长比紫外线还短的电磁波, 波长范围为 $10^{-3} \sim 10$ nm。它的穿透能力很强, 能使包在黑纸里的照相底片感光。X 射线穿透物质的程度跟被穿透物质的密度有关。这种特性在工业上可以用来检测部件内部有没有砂眼、裂纹或气孔; 在医学上可以用来透视人体, 检查体内的病灶及骨骼情况; 在火车站、机场等场所进行行李安全检查时, 也是利用 X 射线检查行李箱中的物品。

γ 射线 (γ -ray)

1900 年, 法国科学家维拉德 (P. U. Villard, 1860—1934) 从实验照片记录上细心地发现了有某种辐射穿过了 0.2 mm 的铝箔, 由此发现了 γ 射线。 γ 射线是波长最短的电磁波, 波长范围为 $10^{-7} \sim 10^{-2}$ nm。 γ 射线穿透能力比 X 射线更强, 能穿过几厘米厚的铅板。因此, 工业上常用它来进行探伤。

γ 射线具有很高的能量, 能破坏生命物质的结构。利用这个特点, 在医学上可以摧毁病变的细胞如癌细胞, 因而有“ γ 刀”之称。 γ 刀手术无创伤、不出血、不需麻醉, 无手术禁忌证, 是一种较好的肿瘤局部治疗手段, 适应证较广。

利用 γ 射线照射农作物的种子、植株或某些器官和组织, 可以促使它们产生各种变异, 再从中选出所需要的可遗传的优良变异, 经过培育成为优良的新品种。



图 4-4-7 伦琴为夫人拍下的第一张 X 射线照片



图 4-4-8 γ 刀手术



实践与拓展

通过网络或借阅书籍, 查找有关微波炉的工作原理与技术的资料, 并根据资料撰写一份关于微波炉使用规范的说明文。



图 4-4-9 微波炉

练习

1. 波长为 $0.6\ \mu\text{m}$ 的红光，从 $30\ \text{m}$ 外的交通信号灯传到你的眼睛，大约需要多长时间？

2. 据研究发现，响尾蛇能感知红外线。那么它能在夜里“看见”东西吗？为什么？“响尾蛇”导弹是一种被动制导的空对空导弹。导弹本身不发射电磁波，而是靠探测敌方飞机发动机辐射的红外线来确定攻击目标的。“隐形”飞机能躲过一般的雷达，它能躲过“响尾蛇”导弹吗？为什么？

3. 回答以下关于微波炉的问题。

(1) 微波是频率为 $300 \sim 30\ 000\ \text{MHz}$ 的无线电波，微波炉的工作频率多选用 $915\ \text{MHz}$ 或 $2450\ \text{MHz}$ ，从同样使用微波的其他设备角度考虑，为什么微波炉要选用这样的频率？

(2) 微波炉门上一般都安装有安全联锁开关，它能确保炉门打开时，微波炉不能工作，炉门关上时，微波炉才能工作，并且微波炉的玻璃门也要安装网状金属片。请分析这样设计的原因。

(3) 为什么不能将金属器皿或镶有金银花边的碗碟放进微波炉中使用？

(4) 为什么不能将盒装的牛奶放进微波炉加热？

4. “没它，手机没信号；有它，辐射会不会比较大？”某高层住宅的用户们对新安装在楼道里的“蘑菇头”产生了困惑，如图 4-4-10 所示。他们所说的“蘑菇头”，实际上是一种手机室内分布系统，主要用于改善室内信号，使基站的信号均匀分布在室内每个角落。有人称室内分布系统的信号辐射是手机的数十倍，其他居民也有议论：“楼里有孕妇，要是被辐射了可咋办呀？”“要是辐射大，我宁愿不用手机！”



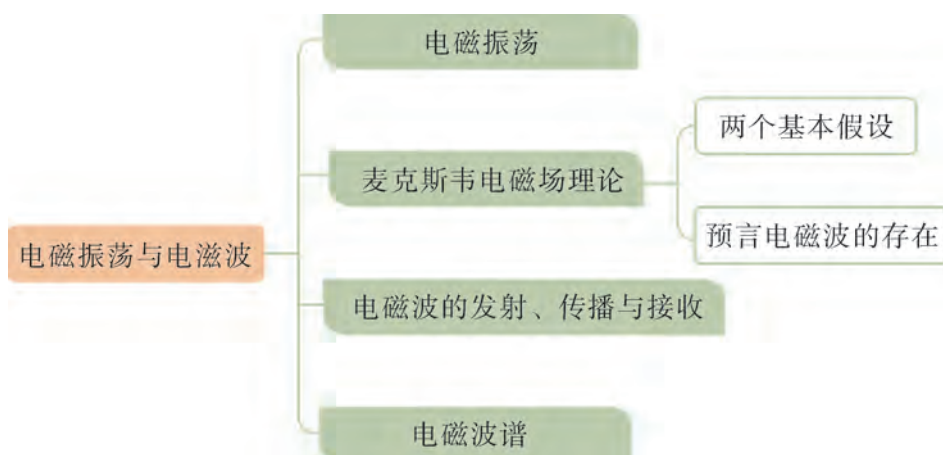
图 4-4-10

你认为应当如何看待和解除大家的这种担忧？

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识.



回顾与评价

1. 请从能量的观念，比较电磁振荡与单摆振动有哪些异同点.
2. 结合麦克斯韦电磁场理论和赫兹实验，谈谈如何看待物理理论与实验之间的关系.
3. 电磁波谱中不同波段的电磁波，在生活、生产中各有哪些应用？能否设计出更具创意的应用电磁波的方式？

习题四

- 电磁波与机械波具有的共同性质是 ().
 - 都是横波
 - 都能传输能量
 - 都能在真空中传播
 - 都具有恒定的波速
- 关于电磁波, 下列说法正确的是 ().
 - 电磁波在真空中的传播速度与电磁波的频率无关
 - 周期性变化的电场和磁场可以相互激发, 形成电磁波
 - 电磁波在真空中自由传播时, 其传播方向与电场强度、磁感应强度方向垂直
 - 电磁波可以由电磁振荡产生, 若波源的电磁振荡停止, 空间的电磁波随即消失
- 下列关于紫外线的说法正确的是 ().
 - 紫外线可以用来进行遥控
 - 适当的紫外线照射有助于人体合成维生素 D
 - 紫外线能杀死微生物
 - 紫外线可以用在步枪的瞄准器上
- 使用蓝牙耳机接听手机来电, 信号传输示意图如图 4-1 所示. 蓝牙通信的电磁波 ().

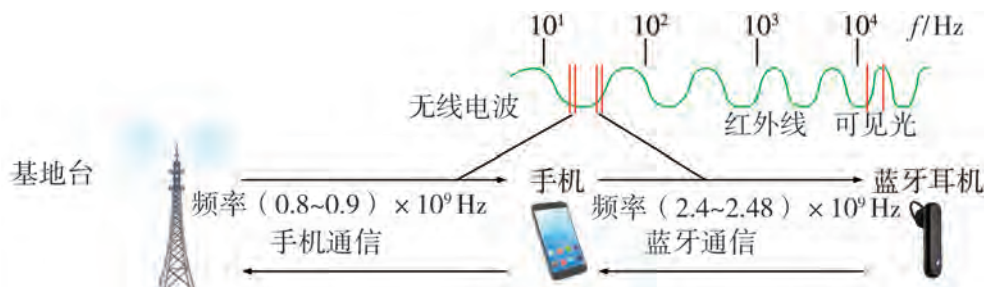


图 4-1

- 是蓝光
- 波长比手机通信的电磁波短
- 在真空中的传播速度大小为 340 m/s
- 在真空中的传播速度比手机通信的电磁波速度小

5. 如图 4-2 所示是 LC 振荡电路和通过点 P 的电流随时间变化的规律. 若把流过点 P 向右的电流规定为正方向, 则 ().

- A. 在 $t_1 \sim t_2$ 内, 电容器 C 在充电
- B. 在 $t_1 \sim t_2$ 内, 电容器 C 的上极板带正电
- C. 在 $t_2 \sim t_3$ 内, 磁场能正在转化为电场能
- D. 在 $t_2 \sim t_3$ 内, 点 Q 的电势比点 P 的电势高

6. 某长直导线中分别通以如图 4-3 所示的电流, 则下列说法正确的是 ().

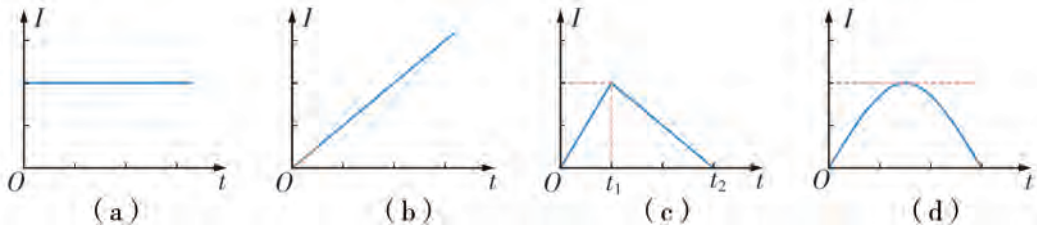


图 4-3

- A. 如图 4-3 (a) 所示电流周围产生匀强磁场
- B. 如图 4-3 (b) 所示电流周围的磁场是稳定的
- C. 如图 4-3 (c) 所示电流周围各点的磁场方向在 $0 \sim t_1$ 内与 $t_1 \sim t_2$ 内的方向是相反的
- D. 如图 4-3 (d) 所示电流周围的磁场先变强再变弱, 磁场中各点的磁感应强度方向不变

7. 红外遥感卫星通过接收地面物体发出的红外辐射来探测地面物体的状况. 地球大气中的水汽 (H_2O)、二氧化碳 (CO_2) 能强烈吸收某些波长范围的红外辐射. 也就是说地面物体发出某些波长的电磁波, 只有一部分能够通过大气层被遥感卫星接收. 如图 4-4 所示为 H_2O 和 CO_2 对某一波段不同波长电磁波的吸收情况. 由图 4-4 可知, 在该波段红外遥感卫星大致能够接收到的波长范围为 ().

- A. $2.5 \sim 3.5 \mu m$
- B. $4 \sim 4.5 \mu m$
- C. $5 \sim 7 \mu m$
- D. $8 \sim 13 \mu m$

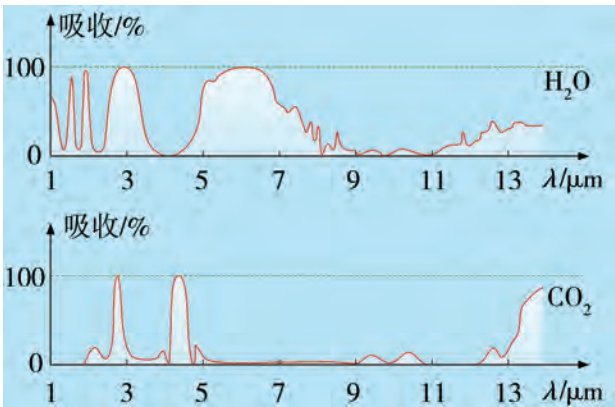


图 4-4

8. 某居住地 A 位于某山脉的一侧, 山脉的另一侧 P 处建有一无线电波发射站, 如图 4-5 所示. 该发射站可发送频率为 400 kHz 的中波和频率为 400 MHz 的微波, 已知无线电波在空气中的传播速度都为 $3 \times 10^8\text{ m/s}$.

- (1) 求该中波和微波的波长.
- (2) 发射站发出的电磁波是经过干涉还是衍射后到达居住地 A 处的? 请说明理由.
- (3) 若两种波的接收效果不同, 请说明哪一种波的接收效果更好. 为什么?

9. 雷达是用脉冲电磁波来测定目标的位置和速度的设备. 某机场引导雷达发现一架飞机正向雷达正上方匀速飞来, 已知该雷达显示屏上相邻刻度线之间的时间间隔为 $1.0 \times 10^{-4}\text{ s}$, 某时刻雷达显示屏上显示的波形如图 4-6 (a) 所示, A 脉冲为发射波, B 脉冲为目标反射波, 经 $t = 170\text{ s}$ 后雷达向正上方发射和被反射的波形如图 4-6 (b) 所示, 则该飞机的飞行速度约为多少?

10. 某电台在某地区的发射频率为 95.8 MHz . 某车载调频收音机的 LC 振荡电路由自感系数为 $L = 2\text{ }\mu\text{H}$ 的线圈和可变电容器构成, 可变电容器的最大电容是 2 pF , 电容器动片完全旋出时, 电容变为 1.125 pF , 则这一 LC 振荡电路能否接收到该电台的节目?

11. 如图 4-7 所示, 感应圈 G 上装两根带有球形电极的铜管 a 、 b 构成发射天线, 两球的间隙约 0.5 cm . 将一根导线弯成环状, 导线两端安装两个小金属球. 其间留有空隙, 将导线固定到绝缘支架 B 上靠近感应线圈放置. 让感应线圈工作, 当电火花在铜管 a 、 b 上两个金属球间跳动时, 支架 B 上导线环两端的两个小球间也有电火花跳动. 据此回答下列问题.

- (1) 人类历史上, 首先捕捉到电磁波的科学家是_____.
- (2) 对于这一实验现象的解释如下, 请完成其中的填空.
 - ①感应线圈本质上是一个变压器, 它利用_____将低压交流电变成数千伏的高电压. 由于铜管 a 、 b 上两球间的电压很高, 间隙中电场_____, 空气分子被电离, 从而形成一个导电通路.
 - ②当电火花在铜管 a 、 b 上的两个金属球间跳动时, 必定建立了一个迅速变化的电磁场. 这种变化的电磁场以_____的形式在空间快速传播. 当其经过导线环时, 迅速变化的电磁场在导线环中激发出_____, 击穿导线环中的空气, 使得导线环的空隙中也产生了电火花.
 - ③在此实验中, 感应圈及金属棒构成了电磁波的_____. 导线环成了电磁波的_____.

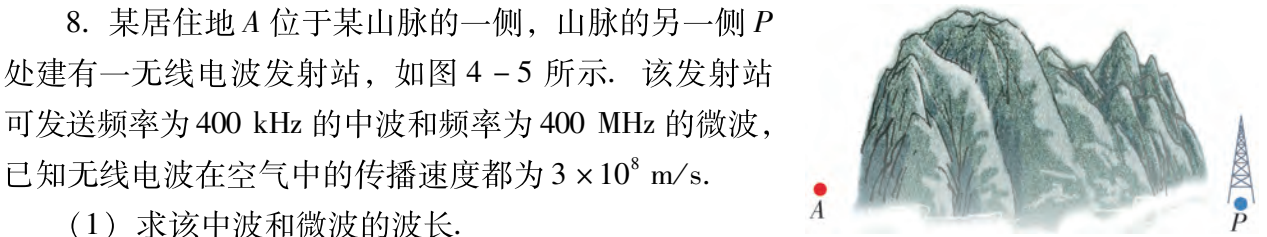


图 4-5

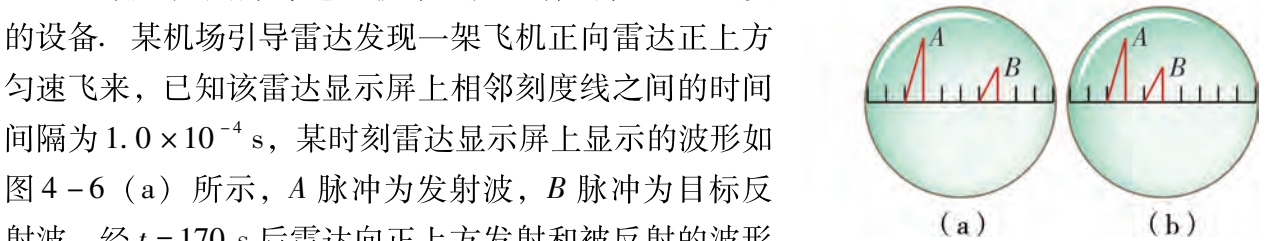


图 4-6

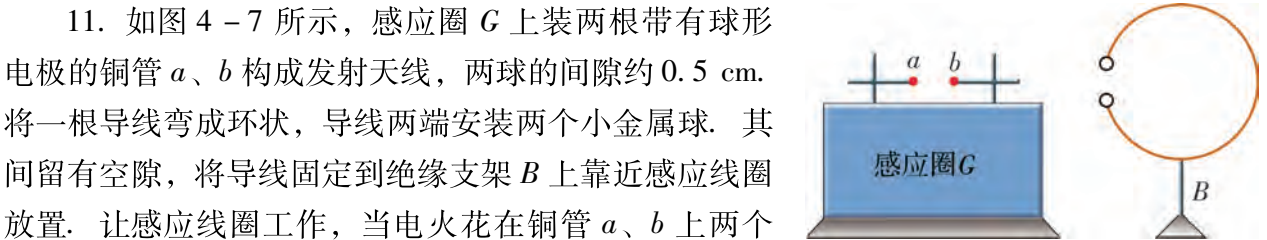


图 4-7

12. 人们通过研究仿生学，并且应用最新的技术和材料，终于使庞大的飞机（如图 4-8 所示）也实现了“隐形”，也就是让雷达无法侦察到飞机的存在。充分发挥想象力，并结合本章所学的电磁波的知识，设计出可能让飞机“隐形”的方案。



图 4-8

13. 某同学转载了一则“手机电磁波煮鸡蛋”的消息：两名实验人员将一个生鸡蛋放置在陶瓷杯子里，在鸡蛋两侧各放置一部手机，让听筒与鸡蛋的水平距离保持 2 cm 左右。用其中一部手机拨通另一部手机，并保持通话状态。在实验进行到 65 min 时，实验人员取出鸡蛋，发现鸡蛋已经完全熟了。请设计一个方案，判别这则消息的真伪。

第五章

传感器

在数字化信息传输和自动控制过程中，常常需要将非电学量转化为电学量，而传感器则架起了这两种量之间转化的桥梁，连接了物理、化学、生物等多学科不同领域的应用，使自动化成为现实。

传感器广泛应用于日常生活和生产之中。水果店里的电子秤、工厂流水线上的机械手，舞台上表演的机器人，都需要借助传感器实现各自的功能。

本章我们将通过实验了解常见传感器的工作原理，了解传感器在生产生活中的应用，并尝试利用传感器制作简单的自动控制装置，体会实践创新的过程。



第一节

传感器及其工作原理



日常生活中，为什么电饭煲能自动加热和保温，而不会把饭烧焦？其实这要归功于现代传感器技术的发展和应用。

什么是传感器

农贸市场上，用于称重的杆秤已被更为灵敏的电子秤（如图 5-1-1 所示）替代。电子秤受到重物的压力，内部的称重传感器就会把受到的压力大小这一信息转化为电信号，并对电信号进行处理后，显示出对应重物质量的相应数字。

像称重传感器这种能够感受到被测量的信息，并将其按照一定的规律转化为可用信号的器件或装置，称为**传感器**（sensor）。



图 5-1-1 电子秤

实际上，能够完成两种量之间变换或转换关系的器件，都符合传感器的定义范畴。与压力、速度、温度、亮度等非电学量相比，电压、电阻、电容和电感等电学量更便于电学仪表显示和用于自动控制，所以传感器通常是将非电学量转化为电学量，这是物理学中转化法的典型体现。把非电学量转化为电学量，才可能实现信息采集、处理、储存和传输的自动化与智能化，这是实现自动控制、数字化信息传输的基础。

传感器一般由敏感元件、转换元件和转换电路三部分组成，如图 5-1-2 所示。



图 5-1-2 传感器组成框图

敏感元件：相当于人的感觉器官，直接感受被测量，并将其变换成与被测量成一定关系的易于测量的物理量，如温度、位移等。

转换元件：也称为传感元件，通常不直接感受被测量，而是将敏感元件输出的物理量转换成电学量输出。

转换电路：将转换元件输出的电学量转换成易于测量的电学量，如电压、电流等。

 观察与思考

如图 5-1-3 所示，将电容式话筒与电阻串联，用电压表测量电阻两端的电压。闭合开关后，对着话筒说话。

(1) 当说话的音量变化时，观察电压表的示数如何变化。

(2) 分析电容式话筒是怎样把声音信号转换成电信号的。



图 5-1-3 实验电路

实验中，电容式话筒的关键部件是由振动膜片和固定电极组成的，相当于一个电容器。当声波信号使振动膜片振动时，振动膜片和固定电极的距离发生变化，使电容的大小也发生相应的变化，电阻两端的电压也随之发生变化。由此，话筒就把声音信号转换成了电信号。

实验中，声波是被测量，声波传到振动膜片上，振动膜片是敏感元件，振动膜片和固定电极组成的话筒是转换元件，电源、电阻组成的是转换电路，电压表测得的电压是电学量，三个部分组成了一个传感器，如图 5-1-4 所示。

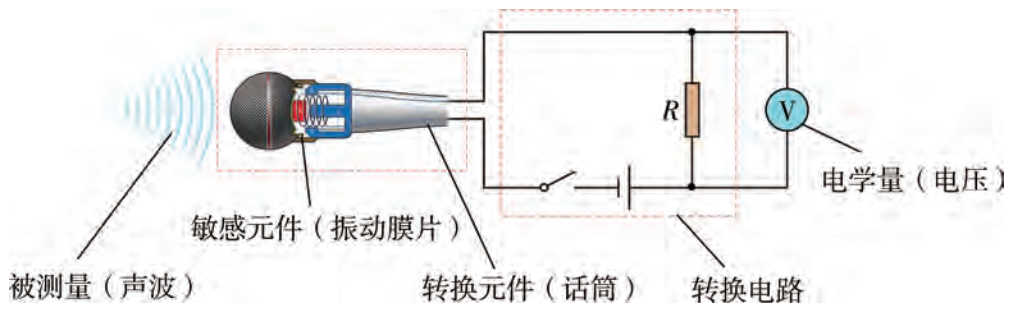


图 5-1-4 话筒和转换电路等组成的传感器示意图

传感器的分类

传感器的种类繁多，涉及多个学科领域，如一辆小汽车就用上多种传感器，如图 5-1-5 所示。

根据检测量的不同，传感器可以分为物理传感器、化学传感器和生物传感器等。

物理传感器主要利用被测物理量（如压力、温度、位移、亮度等）变化时，敏感元件的电学量（如电阻、电压、电容等）发生明显变化的特性制成，如压电传感器、光电传感器、加速度传感器、温度传感器等，如图 5-1-6 所示。物理传感器开发早、发展快、品

种多、应用广，目前正向集成化、系列化和智能化方向发展.

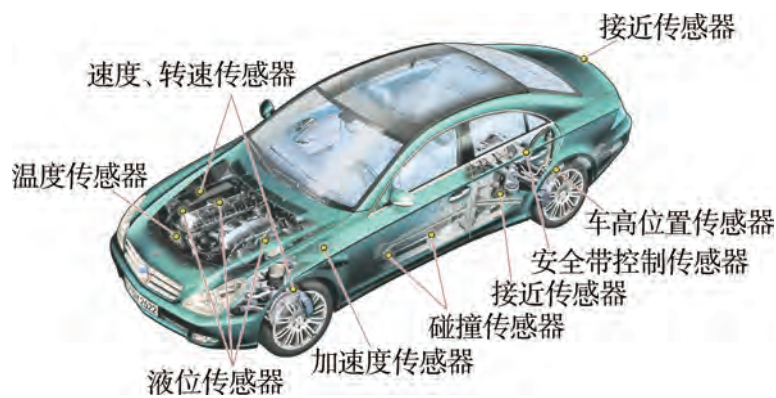


图 5 - 1 - 5 汽车上的传感器

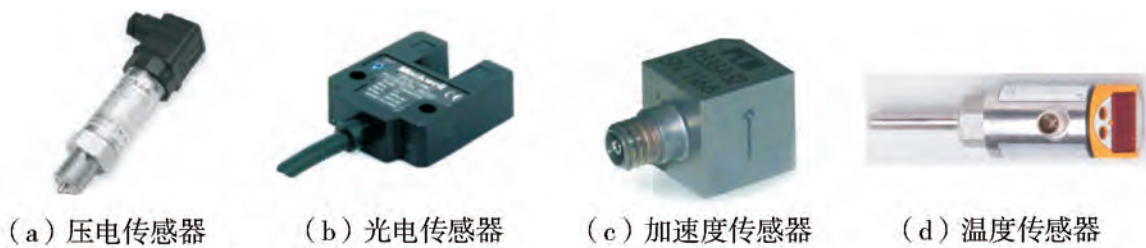


图 5 - 1 - 6 各类物理传感器

化学传感器主要是基于化学反应的原理，将化学物质的成分、浓度等化学信息转化为电学量的传感器，如半导体气体传感器（如图 5 - 1 - 7 所示）、湿敏传感器、离子传感器等. 化学传感器广泛应用于环境监测、火灾报警、气体检测、医疗护理等领域.



图 5 - 1 - 7 半导体气体传感器



图 5 - 1 - 8 谷氨酸—葡萄糖双功能分析仪

生物传感器是一种基于酶、抗体和激素等分子识别功能，并将其转换为电信号进行检测的传感器，如酶传感器、细胞传感器、免疫传感器等. 生物传感器与物理传感器和化学传感器的最大区别在于感受器中含有生命物质. 这类传感器在医疗血液分析、农药残留物检测、发酵工业等领域有广泛的应用，如图 5 - 1 - 8 所示.

温度传感器的原理

温度是最重要的环境参数之一. 在生活、生产和科研领域中，温度测量占有重要的地位. **温度传感器**（temperature sensor）是一种将温度变化转换为电学量变化的装置. 它通

过测量传感器元件的电学量随温度的变化来实现温度的测量。

常见温度传感器的敏感元件有热敏电阻（如图 5-1-9 所示）、热电偶、热双金属片等。热敏电阻是利用半导体材料的阻值随温度的变化而变化的特性来实现温度测量的，下面以热敏电阻为例研究温度传感器的原理。

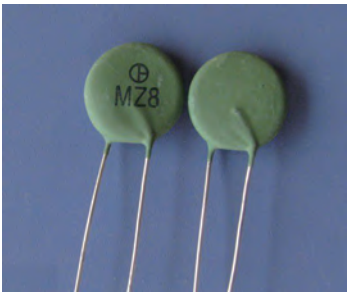


图 5-1-9 热敏电阻

观察与思考

如图 5-1-10 所示，将一温度计和一连接有欧姆表的热敏电阻器放入装有水的烧杯中。烧杯被固定在铁架台上。用酒精灯给水加热。测出水中各个温度下电阻表的读数，并将实验数据填入表 5-1-1 中。

表 5-1-1 实验数据记录表

物理量	实验次数				
	1	2	3	4	5
温度 $t/^{\circ}\text{C}$					
电阻 R/Ω					

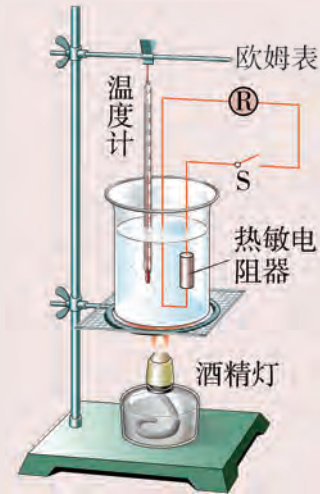


图 5-1-10 探究热敏电阻特性实验装置

采用作图法分析数据，根据表 5-1-1 中的实验数据，在图 5-1-11 中作出 $R-t$ 图线。分析热敏电阻的阻值随温度变化的规律，可以得到什么实验结论？

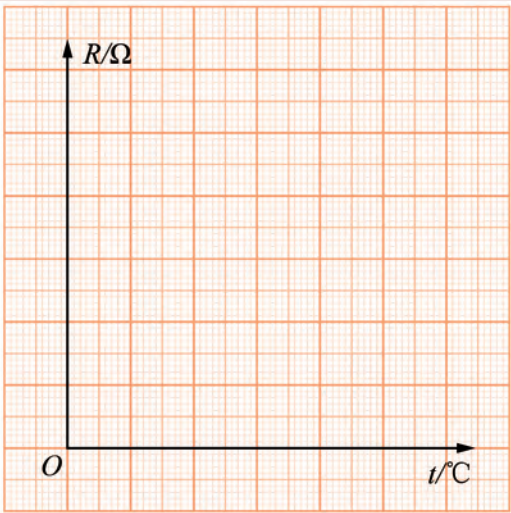


图 5-1-11 热敏电阻 $R-t$ 图线

实验中选用不同的热敏电阻，可能呈现出不同的温度特性。根据温度特性的不同，热敏电阻可分为三类：第一类，正温度系数热敏电阻，它的阻值随温度的上升而增加；第二类，负温度系数热敏电阻，它的阻值随温度的上升而下降；第三类，临界温度系数热敏电阻，它的阻值在很小的温度范围内急剧下降。只要知道了热敏电阻的温度特性，即可依据电阻与温度的关系，将温度这一热学量转化为电阻阻值这一电学量。其他温度传感器也是类似的原理。

与其他温度传感器的敏感元件相比，热敏电阻灵敏度高、测量线路简单，并且体积小、稳定性好、价格便宜，主要用于小温差温度的测量、温度补偿和电路的自动调整等。电脑、空调、冰箱等电器使用的温度传感器大多是热敏电阻。

光电传感器的原理

光电传感器（light sensor）是一种能够感受光信号，并按照一定规律把光信号转化成电信号的传感器。**光敏电阻**（light resistor）是光电传感器的敏感元件，如图 5-1-12 所示。大多数的光敏电阻由半导体材料制成。

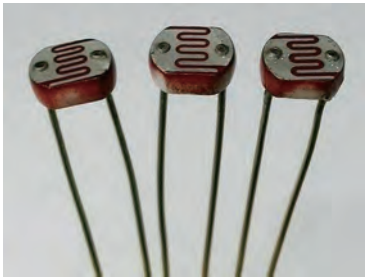


图 5-1-12 光敏电阻

观察与思考

如图 5-1-13 所示，用多用电表电阻挡来研究光敏电阻的阻值变化。观察实验现象，并思考下列问题。

- (1) 有光照射和无光照射时，光敏电阻的阻值有何不同？
- (2) 改变光的照射强度，光敏电阻的阻值有何变化？



图 5-1-13 用多用电表测光敏电阻阻值的变化

实验表明，无光照射时，光敏电阻的阻值较大；有光照射时，光敏电阻的阻值较小，并且随光照的增强而减小。光敏电阻广泛应用于照相机自动测光、室内光线控制、报警器、电子玩具、光控音乐、电子验钞机等各个领域。

常见光电传感器的敏感元件除了光敏电阻外，还有光电池、光敏晶体管等。根据它们的电阻特性即电阻与光照强度的关系，可以将光照强度这一光学量转化为电阻这一电学量，这就是光电传感器的原理。



实践与拓展

结合本节课所学知识，并查阅相关资料，尝试解释电饭煲是如何利用传感器技术进行自动加热和保温而不会把饭烧焦的。

资料活页

气体报警器

燃气的使用在现代生活中已经非常普及。燃气在给我们带来便利的同时，屡屡发生的安全事故也向我们敲响了警钟：燃气安全非小事。我们可以根据气体的种类，选择相应的气体报警器安放在易检测气体泄漏的地方。一旦气体泄漏达到危险浓度，报警器便会自动发出报警信号。

如图 5-1-15 所示是一种家用可燃气体报警器的电路图。气体传感器采用直热式气敏器件 TGS109。当室内可燃性气体增加时，由于气敏器件接触到可燃气体而使其阻值降低，流经测试电路的电流增加，直接驱动蜂鸣器 (HA) 报警。

设计报警器时，重点是如何确定开始报警的气体浓度。一般情况下，对于丙烷、丁烷或甲烷等气体，都选定在爆炸下限的 $\frac{1}{10}$ 。



(a) 吸顶式家用可燃气体报警器



(b) 壁挂式家用可燃气体报警器

图 5-1-14 常见家用可燃气体报警器

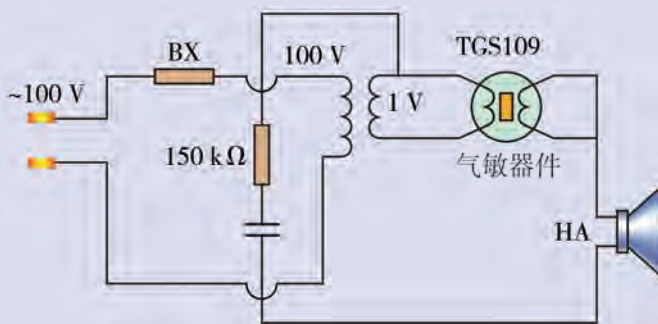


图 5-1-15 家用可燃气体报警器的电路图



练习

- 如图 5-1-16 所示， R_1 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_1 两端的电压_____，电流表的示数_____，小灯泡的亮度变_____。

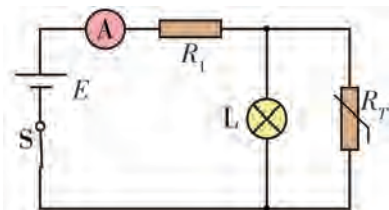


图 5-1-16

2. 如图 5-1-17 所示是电熨斗的原理图, 它装有双金属片温度传感器, 其作用是控制电路的通断. 常温时图中上下触点是_____ (选填“接触”或“分离”) 的. 当温度升高时, 双金属片_____ (选填“上层”或“下层”) 膨胀比另一层大. 若需要设定更高的温度, 则应该调节升降螺丝向_____ (选填“上”或“下”).

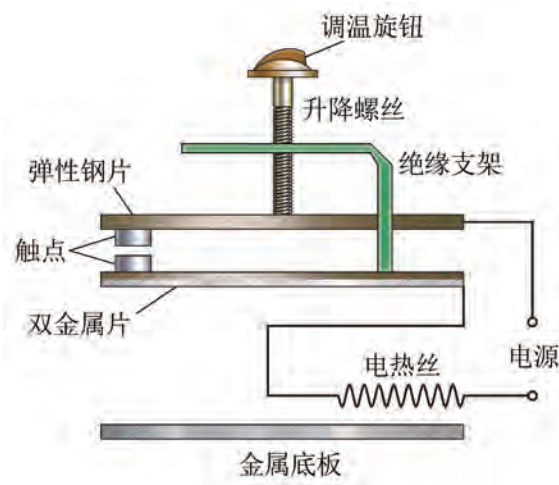


图 5-1-17

3. 霍尔元件是一种能将磁感应强度这一磁学量转换成电压这一电学量的传感器. 其基本结构如图 5-1-18 所示, M 为半导体薄片 (砷化镓), B 为外加与薄片垂直的磁场, a 、 b 、 c 、 d 为霍尔电极. 若在 ab 方向通以恒定电流 I , 请简要分析霍尔电势的形成过程及方向.

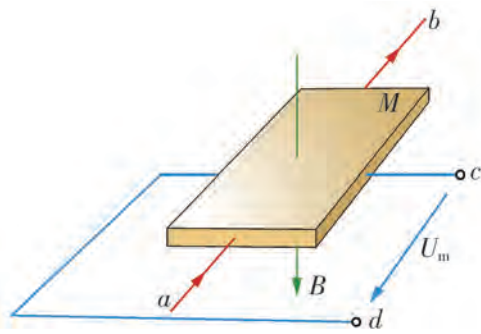


图 5-1-18



图 5-1-19

4. 有三个失去标记的元件, 分别是定值电阻、热敏电阻和光敏电阻. 为识别它们, 可将这三个元件分别接入如图 5-1-19 所示电路中的 A 、 B 两点间. 用黑纸包住元件或者把元件置入热水中, 观察欧姆表的示数变化, 这样就可将它们区分开来. 请简述其中的原理.

第二节 传感器的应用

传感器的应用领域极其广泛. 大到宇宙飞船、人造地球卫星、工业自动控制等, 小到家用电器、电动玩具等, 都有它的身影.

生活中的传感器

随着家用电器的普及, 传感器进入了千家万户. 电饭煲、电冰箱、微波炉、空调机、消毒碗柜等与温度控制相关的家用电器, 几乎都要用到温度传感器; 自动门、家电遥控器、非接触红外测温仪以及防盗、防火报警器等, 均使用了红外线传感器; 此外还有照相机中的光敏传感器、家用便携式电子秤的压力传感器等. 传感器的应用改变了我们的生活, 使生活逐步走向自动化.



图 5-2-1 装有酒精气体传感器的酒驾检测仪



图 5-2-2 生活中各式各样的传感器

讨论与交流

在酒店、银行、商场等公众场所常常能见到自动门. 当人走近时大门会自动打开. 远离大门后不久, 门又会自动关闭. 自动门的工作原理是什么?

仔细观察自动门我们会发现，自动门上有一个凸起的装置，里面实际上是一个红外线传感器，其内部结构如图 5-2-3 所示。人体都有恒定的体温，会发出特定波长的红外线。当人接近自动门时，门上的红外线传感器就能够接收到人体发出的红外线。

结合上述信息和生活经验，请绘制出自动门的工作流程图。



图 5-2-3 自动门上的红外线传感器

农业生产中的传感器

在农业生产中，传感器广泛应用于耕种、栽培、收割、运输、排灌等过程的自动控制。这样既解放了人力，又实现了最优化管理。无人管理的自动喷灌系统（如图 5-2-4 所示），利用湿度传感器判断农田的水分蒸发情况，自动执行供水或停水。自动化温室种植是现代化农业生产方式之一，在温度传感器的帮助下实现自动控温，使我们在寒冷的冬天仍然能够享用新鲜的蔬菜。



图 5-2-4 农田中的自动喷灌系统

现代粮库采用温度传感器和湿度传感器，可对上百个储粮点进行温度和湿度监测。微机测试系统根据检测到的温度和湿度数据，对通风装置进行自动控制，有效地减少粮库里的霉变。



讨论与交流

试分析具有自动控制功能的蔬菜大棚（如图 5-2-5 所示）是怎样控制光照强度、温度、空气湿度、空气中 CO_2 浓度、土壤湿度等影响蔬菜生长的因素的。



图 5-2-5 具有自动控制功能的蔬菜大棚

工业生产中的传感器

在工业生产中，由于传感器的大量使用，实现了生产的自动化或半自动化，大大减轻了人们的劳动强度，同时提高了产品质量，降低了产品成本。

在现代化工厂里，自动化的生产流程随处可见。机器人、自动化小车、自动机床、各种自动生产线或者系统，代替人们完成加工、装配、包装、运输、存储等工作。例如，汽车生产线上的焊接机器人（如图 5-2-6 所示），通过视觉传感器测量与焊缝的距离，识别焊件的形状、颜色，通过力学传感器完成零件的抓取，通过温度传感器检测焊道附近母材的温度，通过电弧传感器检测焊接电压和电流，监测和控制焊接过程的质量等。各种传感器使生产的自动运行保持在最佳状态，以确保产品质量，提高效率。



图 5-2-6 汽车生产线上的焊接机器人



图 5-2-7 工厂自动化生产线安全监控系统

工业传感器是判断一个国家工业体系是否完善的关键性因素之一。相对民用来说，用于智能制造的工业传感器在精度、稳定性、抗震动和抗冲击性等方面的要求更为苛刻。在高端制造领域，我国传感器的国产化率还较低。智能制造所需的某些特殊部件，如耐高温、高压的传感器，国内产品的可靠性、稳定性与国外相比还有些差距。但这也从另一个角度说明，用于智能制造的工业传感器领域具有十分广阔的发展前景。

航天航空中的传感器

在航天航空技术领域，大量的传感器被应用于运载火箭、载人飞船、卫星的遥测和遥控中，对控制航天器的姿态、接收和发送信息、收集太空数据等起着关键性作用。

例如，我国于 2011 年成功发射了“天宫一号”目标飞行器。发射“天宫一号”的“长征二号”F 运载火箭的捆绑式助推器和整流罩上，一共配置了 8 个压力传感器。从火箭发射到进入轨道的 500 多秒内，



图 5-2-8 发射“天宫一号”的“长征二号”F 运载火箭

随着整流罩的脱落，这些压力传感器的工作时间只有 400 秒左右，但发挥的作用却非常关键。它们将火箭在飞行过程中受到的各种压力实时记录下来，并通过控制系统将数据传送到地面指挥遥控中心，与理论压力值进行实时比较，以及时判断和修正火箭的运行状况。

2016 年，科学家们利用哈勃空间望远镜发现一个距离地球 134 亿光年的星系。这是当时人类在宇宙中发现的最遥远、最古老的天体。该发现正是得益于装载在哈勃空间望远镜上的 3 号广角相机通过高精度光学传感器获取的光谱数据。而哈勃空间望远镜指向的准确性，则有赖于三个精细导星传感器的精确定位。

此外，在载人飞船中还会使用一类测量航天员各种生理指标的生理传感器，用于测量航天员的血压、心电图、体温等。例如，我国在 2008 年发射的首次有宇航员出舱作业的“神舟七号”载人飞船上，就安装了 20 多种传感器以监测航天员的生理指标，其中监测航天员体温的装置就是一个装在宇航员耳包里的温度传感器。



图 5-2-9 哈勃空间望远镜



图 5-2-10 “神舟七号”上的三名航天员



讨论与交流

根据所学的传感器知识，充分发挥想象力，大胆设计一段能够体现传感器在航天航空中作用的故事情节，并与其他小组的同学进行交流和分享。

手机中的传感器

随着科学技术的进步，手机已不仅是一个简单的通信工具，而且是具有综合功能的便携式电子设备。下面简单介绍手机中常见传感器的原理及其用途。

1. 光线传感器

原理：光线传感器中的光敏三极管在接收到外界光线时，会产生强弱不等的电流，从而感知环境光亮度。

用途：通常用于调节屏幕自动背光的亮度，白天提高屏幕亮度，夜晚降低屏幕亮度，使屏幕更清楚。此外还可用于拍照时自动白平衡。

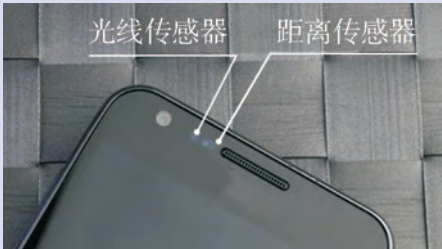


图 5-2-11 手机上的光线传感器和距离传感器

2. 距离传感器

原理：当红外 LED 灯发射的红外线被近距离物体反射后，红外探测器通过接收到红外线的强度，测定距离。

用途：检测手机是否贴在耳朵上正在打电话，以便自动熄灭屏幕达到省电的目的。此外还可用于皮套、口袋模式下自动实现解锁与锁屏动作。

3. 重力传感器

原理：传感器内部一块重物和压电片整合在一起，利用压电效应，通过正交两个方向产生的电压大小计算出水平方向。

用途：手机横竖屏智能切换、拍照照片朝向、重力感应类游戏等。

4. 磁场传感器

原理：各向异性磁致电阻材料在感受到微弱的磁场变化时，会导致自身电阻发生变化。因此手机要旋转或晃动几下才能准确指示方向。

用途：指南针、地图导航方向、金属探测器等。

以上传感器几乎是目前智能手机的标配。此外部分手机里还装有加速度传感器、指纹传感器、霍尔感应器、气压传感器、心率传感器、紫外线传感器等。可以想象，未来的手机会集成越来越多的传感器。



图 5-2-12 手机中的指南针



练习

1. 如图 5-2-13 (a) 和图 5-2-13 (b) 所示是一种测量血压的压力传感器工作时的示意图。薄金属片 P 有 4 个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 。如图 5-2-13 (c) 所示是它的侧面图。这四个电阻连接成如图 5-2-13 (d) 所示的电路，试回答下列问题。

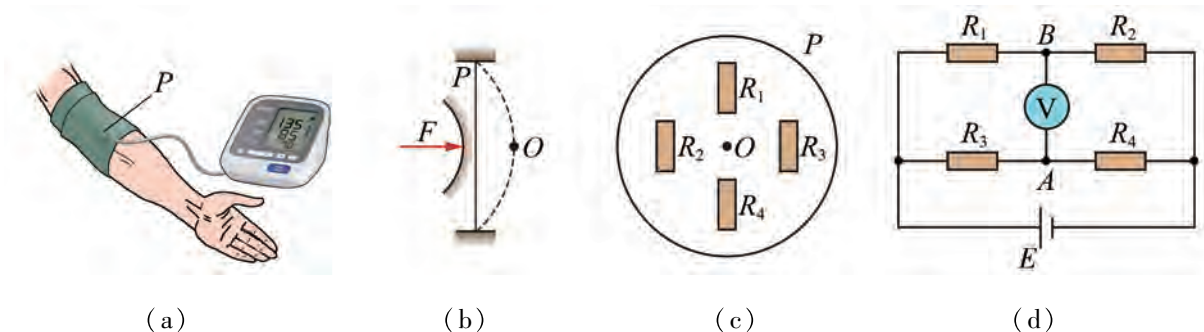


图 5-2-13

(1) 开始时，金属片中心点 O 未加任何压力，欲使电压表无示数，这 4 个电阻应满足

怎样的关系？

(2) 在点 O 加一个压力 F 后金属片会发生形变，此时 4 个电阻也随之发生形变。形变后各电阻大小如何变化？

(3) 电阻变化后，金属片上的 A 、 B 两点哪点电势高？

2. 气体传感器可以利用物质的化学反应将某种气体的浓度转换成电信号输出，如图 5-2-14 所示， B 为将可燃气体或有毒气体 (CO 、 CH_4 等) 浓度转换为电信号的传感器，俗称“电子鼻”。请根据如下材料：电源 $U=220\text{ V}$ 、小灯泡 L 、继电器 G 、控制电源 A 、控制开关 S ，设计一个家用自动排烟电路，并用笔画线代替导线，在图中完成连线。

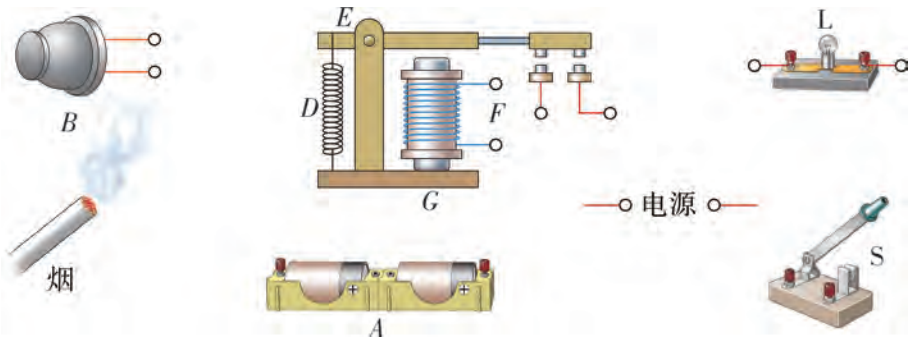


图 5-2-14

3. 如图 5-2-15 (a) 所示是电饭煲的结构示意图。其温度传感器的主要元件是感温铁氧体。感温铁氧体的特点是常温下具有铁磁性，能够被磁铁吸引，但温度上升到约 $103\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，就失去了铁磁性，不再被磁铁吸引。

(1) 饭熟后，水分被大米吸收，煲底的温度会有什么变化？试根据电饭煲的结构说明这时电饭煲会自动发生哪些动作。

(2) 如果用电饭煲烧水，能否在水沸腾后自动断电？为什么？

(3) 已知某型号的保温式自动电饭煲在 220 V 电压下正常工作时，加热状态与保温状态交替运行。从通电开始，其工作电流随时间变化的关系如图 5-2-15 (b) 所示。求 1 h 内该电饭煲消耗的电能。

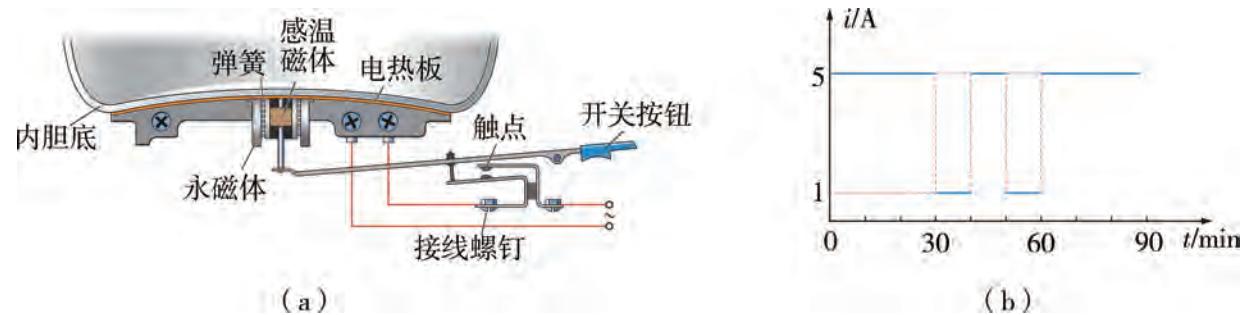


图 5-2-15

4. 随着科技的发展，传感器技术的滥用问题逐渐显现。如果过度依赖传感器的敏锐性，过分信任其精确度，一旦传感器失效就容易引发事故。例如，通过声音传感器来验证主人的身份进而启动某一系统，但如果遇上因感冒引起声音发生变化导致传感器失效，则可能会出现无法启动系统的情况。如何看待传感器的这一类弊端？

第三节

用传感器制作自动控制装置



每当夜幕降临，光线逐渐变暗时，我们会感觉看不清东西（人的感知），于是想到可以借助灯光照明（人的思维），便打开电灯（人的行动）。这个过程就是人类智能活动的一个例子。

智能感应灯在天黑的时候，通过传感器检测到光线变弱（机器的感知），将这一信号传送给控制系统，控制系统经过分析判断（机器的思维），指挥LED灯开启（机器的行动）。机器智能活动这一过程与人类智能活动过程有一定的相似之处，所以我们说机器人是一种模仿人或生物智能制造出来的自动化装置。



图 5-3-1 自动照明路灯

今天，我国已经有很多城市都实现了路灯的自动化管理。作为自动化管理的一部分，光控设备可以根据天黑程度自动调节灯的亮度。那么，我们能否根据所学知识，设计并制作一个光控自动照明灯电路呢？



观察与思考

对于光控电路，我们设想利用光敏电阻来设计。最初的想法是将灯泡 L 与光敏电阻 R_G 并联组成闭合回路，如图 5-3-2 所示。

请结合光敏电阻和闭合电路欧姆定律的相关知识，从理论上分析上述实验方案是否满足要求。

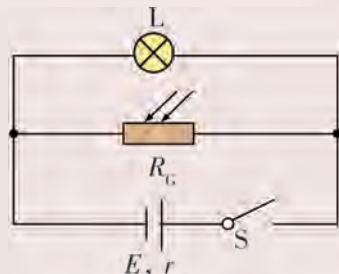


图 5-3-2 实验探究方案

从图 5-3-2 的实验方案分析可知，当白天光线变强时，光敏电阻 R_G 阻值减小，根据闭合电路欧姆定律，可知此时路端电压变小，因此灯泡 L 亮度较暗；当夜晚光线变弱时，

光敏电阻 R_G 阻值反而增大,此时路端电压变大,灯泡L亮度增加.

尽管上述实验探究方案利用光敏电阻控制了灯泡亮度的变化,但并没有满足实际生活中天亮时灯泡自动熄灭的要求.那么,怎样才能实现光控灯泡的通断呢?

实验与探究

光线的强弱会影响光敏电阻阻值大小的变化,那么,如何将光敏电阻的信号转化为灯泡亮与灭的信号呢?

在我们学过的常规元件的串、并联电路中,电阻大小的变化只能改变灯泡两端电压的大小,无法实现电路的通断控制.有什么元件可以将两端电压大小的改变转化为电路的导通和关断呢?

查阅资料可知,电子电路中常见的元件——单向晶闸管 V_S 可以实现上述功能.它很像二极管,但比二极管多了一个控制极G,通过控制极G可以控制 V_S 的通断.如图5-3-3所示是一个阴极受控 V_S 的工作原理图,其中A、K、G分别为 V_S 的阳极、阴极、门极(控制极).

当单向晶闸管 V_S 受到正向阳极电压并且门极有触发电流 I_G 时才会导通.这正符合设计的需要.

那么,如何将光敏电阻阻值大小的改变转化为单向晶闸管 V_S 门极G上的电流的变化呢?我们可以采用分压电路作为控制回路,由光敏电阻 R_G 与电阻 R 组成分压器.为了确保单向晶闸管 V_S 能得到正向阳极电压,在分电路上加上一个只能单向导通的二极管 V_D ,由此得到新的实验方案,如图5-3-4所示.

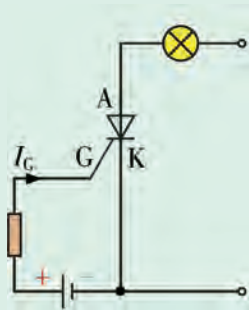


图 5-3-3 单向晶闸管
工作原理图

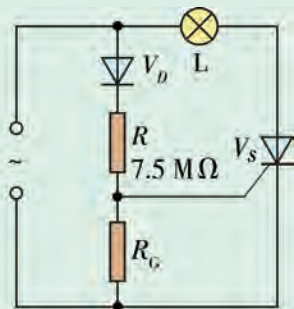


图 5-3-4 实验探究方案

分析图5-3-4的实验探究方案可知,当白天光线较强时,光敏电阻 R_G 呈低电阻,此时,通过 V_D 和 R 后的电流主要分流到 R_G 支路,而流向门极G的电流变小,不足以触发导通 V_S , V_S 处于关断状态,灯泡不亮.当夜幕降临时,光线减弱, R_G 呈高电阻,流向门极G的电流增大,从而触发导通 V_S ,灯泡L发亮.

根据图5-3-4的实验探究方案制作光控自动照明控制装置.

制作完成后,参考表5-3-1撰写实验报告,并向同学、老师展示制作成果.

表 5-3-1 应用光敏电阻制作光控自动照明灯电路实验报告

课题名称	
实验原理	
实验器材	
作品展示	请用相机记录下作品展示出的不同效果，并打印出来粘贴在实验报告上
思考拓展	参考本实验方案设计的思路，除了设计光控自动照明灯电路之外，还能设计出哪些自控装置
自我评价	请对自己在本次实验探究过程中的表现以及成果作品进行评价

* 第四节

利用智能手机中的磁传感器研究磁现象

智能手机已经成为人们生活中重要的通信工具。因它配备了多种传感器，我们可以把它作为物理探究实验的实用工具之一。

例如，多数智能手机中都配有磁传感器，其测量范围一般为 $-810 \sim 810 \mu\text{T}$ ，并能够测量磁场 x 、 y 、 z 三个坐标轴分量的磁感应强度，满足对常见磁场的测量。通过安装相关应用软件，可以对各类磁现象进行探索与研究。



图 5-4-1 手机中的磁传感器



实验与探究

1. 探究磁体的磁场分布是否随时间发生变化。

磁体的磁场分布与空间有关。磁体的磁场分布是否还与时间有关，即磁体的磁场大小是否会随着时间的变化而发生相应的变化呢？

针对上述问题，选取条形磁铁作为研究对象。将手机放置在条形磁铁一端的前方，如图 5-4-2 所示。借助物理磁力工具箱（Physics Toolbox Magnetometer）应用软件，观察磁场随时间变化的图像。

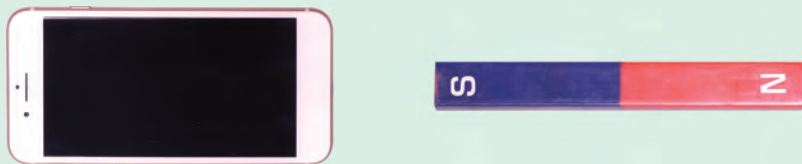


图 5-4-2 探究条形磁铁磁场随时间变化的实验方案

* 本节供有条件的学校选用。

运行软件，点击 Record 键开始采集数据，按下 Pause 键暂停。这样可以得到条形磁铁在磁场空间中三个不同方向的分量随时间变化的图像，如图 5-4-3 所示。由此可以得出什么探究结论？

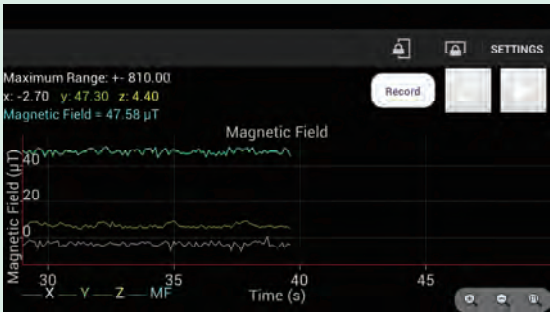


图 5-4-3 条形磁铁的磁场随时间的变化图像

2. 探究条形磁铁垂直和水平方向磁场强弱的分布规律。

设计实验方案并实际操作，将实验探究结论填写在表 5-4-1 中。

表 5-4-1 实验探究结论记录表

情形	手机沿垂直于磁铁方向做直线运动	手机沿平行于磁铁方向做直线运动
实验方案		
实验图像		
图像描述	磁场的总磁感应强度（蓝色线）先增加后减小	磁场的总磁感应强度（蓝色线）先增加后减小再又增加
探究结论		

3. 探究两平行排列的异名条形磁铁中间磁场强弱的分布规律。

设计实验方案如图 5-4-4 所示。实验图像如图 5-4-5 所示展现了什么新的规律？

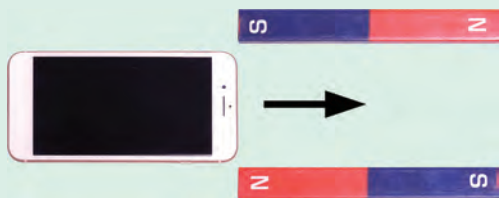


图 5-4-4 探究两平行排列的异名条形磁铁中间磁场强弱分布的实验方案

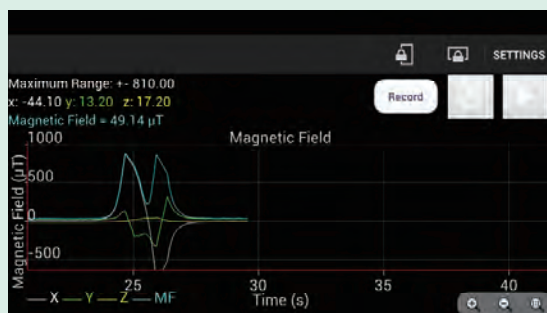


图 5-4-5 两平行排列的异名条形磁铁中间磁场强弱分布

除了上述探究方案，还可以利用手机中的磁传感器和相应的手机软件进行哪些新的实验探究？请把新的探究问题、实验探究方案、实验数据和实验结论填写在下面空白处。

新的探究问题：_____。

实验探究方案草图：

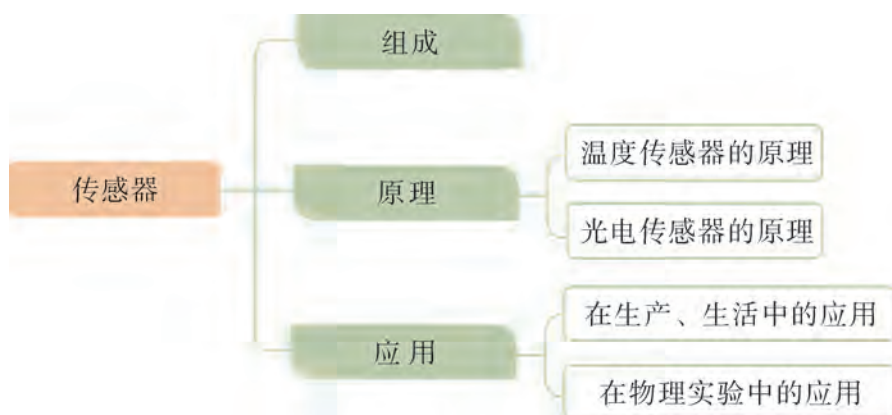
实验数据：

根据实验，可以得到什么实验结论？

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



回顾与评价

1. 结合能量的观念，分析温度传感器和光电传感器的原理.
2. 举出传感器在生活生产中应用的例子，并谈谈你对物理、技术与社会三者之间的关系又有什么新的认识.
3. 在利用传感器制作自动控制装置的过程中，你遇到了哪些困难？是如何克服的？
4. 我们看过的虚假广告有哪些？对其出现的各类所谓科学解释是否有过质疑？通过本章的学习，可以学到哪些识别虚假广告的知识和技能？

习题五

1. 下列关于传感器的说法中，正确的是（ ）。

- A. 一般的传感器可以直接用来进行自动控制
- B. 传感器可以用来采集信息
- C. 金属材料不可以制成传感器
- D. 传感器可以将所有感受到的信号都转换为电学量

2. 如图 5-1 所示，在电路中接入一段钨丝，闭合开关，灯泡正常发光。当用打火机给钨丝加热时，灯泡亮度明显变暗。根据钨丝的上述特性，可用钨丝来制作一个温度传感器。下列说法不正确的是（ ）。

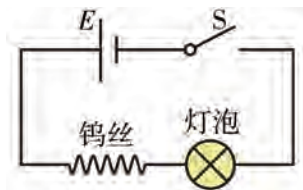


图 5-1

- A. 该传感器利用了钨丝的物理性质
- B. 该传感器利用了钨丝电阻随温度变化而变化的特性
- C. 该传感器能够把热学量（温度）转换为电学量（电阻）
- D. 该传感器能够把电学量（电阻）转换为热学量（温度）

3. 在电梯门开合处放置一障碍物，会发现电梯门不停地开开合合。这说明电梯门上安装了（ ）。

- A. 光传感器
- B. 温度传感器
- C. 声传感器
- D. 压力传感器

4. 压敏电阻的阻值随所受压力的增大而减小。某同学利用压敏电阻设计了判断小车运动状态的装置，如图 5-2 (a) 所示。现将压敏电阻和一块挡板固定在绝缘小车上，中间放置一个绝缘重球。小车向右做直线运动过程中，电流表的示数如图 5-2 (b) 所示。下列判断正确的是（ ）。

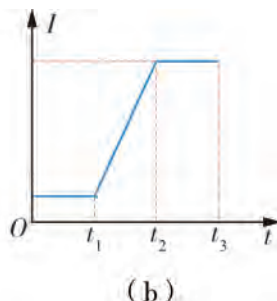
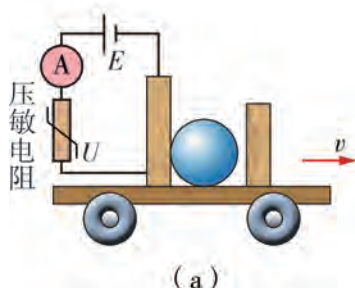


图 5-2

- A. 在时间 t_1 至 t_2 内, 小车做匀速直线运动
- B. 在时间 t_1 至 t_2 内, 小车做匀加速直线运动
- C. 在时间 t_2 至 t_3 内, 小车做匀速直线运动
- D. 在时间 t_2 至 t_3 内, 小车做匀加速直线运动

5. 如图 5-3 所示是光电计数器的工作示意图.

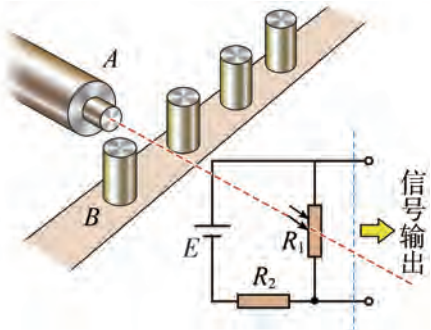


图 5-3

其中 A 是发光仪器, B 是传送带上的物品, R_1 为光敏电阻, R_2 为定值电阻. 此光电计数器的基本工作原理是 ().

- A. 当有光照射 R_1 时, 信号处理系统获得高电压
- B. 当有光照射 R_1 时, 信号处理系统获得低电压
- C. 信号处理系统每获得一次低电压就计数一次
- D. 信号处理系统每获得一次高电压就计数一次

6. 某实验小组探究一种热敏电阻的温度特性. 现有器材包括直流恒流电源 (在正常工作状态下输出的电流恒定)、电压表、待测热敏电阻、保温容器、温度计、开关和导线等.

(1) 用上述器材测量热敏电阻的阻值随温度变化的特性. 请用笔画线代替导线在如图 5-4 (a) 所示的实物图上连线.

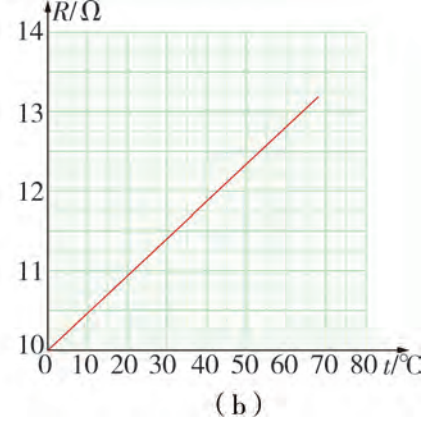
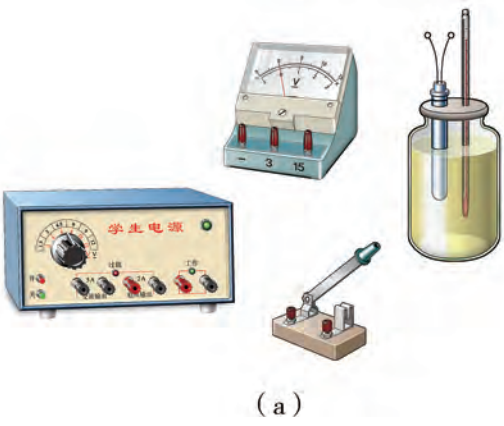


图 5-4

(2) 实验的主要步骤.

- ①正确连接电路, 在保温容器中注入适量冷水. 接通电源, 调节并记录电源输出的电流值.
- ②在保温容器中添加少量热水, 待温度稳定后, 闭合开关, _____, _____, 断开开关.
- ③重复步骤②若干次, 测得多组数据.

(3) 实验小组算得该热敏电阻在不同温度下的阻值, 并据此绘得如图 5-4 (b) 所示的 $R-t$ 关系图线. 请根据图线写出该热敏电阻的 $R-t$ 关系式 $R = \underline{\hspace{2cm}}$. (结果保留三位有效数字)

7. 如图 5-5 (a) 所示是某种型号电子秤的结构示意图.

(1) 这台电子秤的传感器是由哪些器件组成的? 属于哪类传感器?

(2) 在图 5-5 (b) 中画出这台电子秤的电路图.

(3) 简述这台电子秤的工作原理.

8. 化学实验常用到恒温箱. 如图 5-6 (a) 所示为简单恒温箱温控电路图. 它由热敏电阻 R_T 和继电器组成.

如图 5-6 (b) 所示为热敏电阻的 $R-t$ 图像. 设继电器线圈中电流大于或等于 20 mA 时, 继电器衔铁吸合. 若继电器线圈电阻为 $150\ \Omega$, 为继电器线圈供电的电源 $E=6\text{ V}$ (内阻可以不计) 时, 要使恒温箱内温度保持 $120\text{ }^\circ\text{C}$, 可变电阻 R_1 的值应调节为多少?

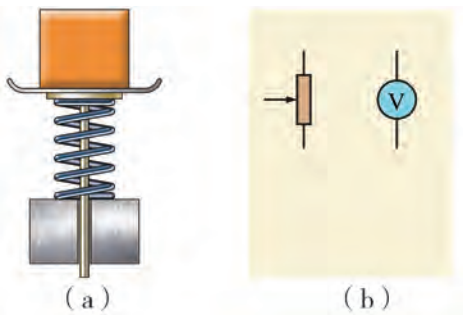


图 5-5

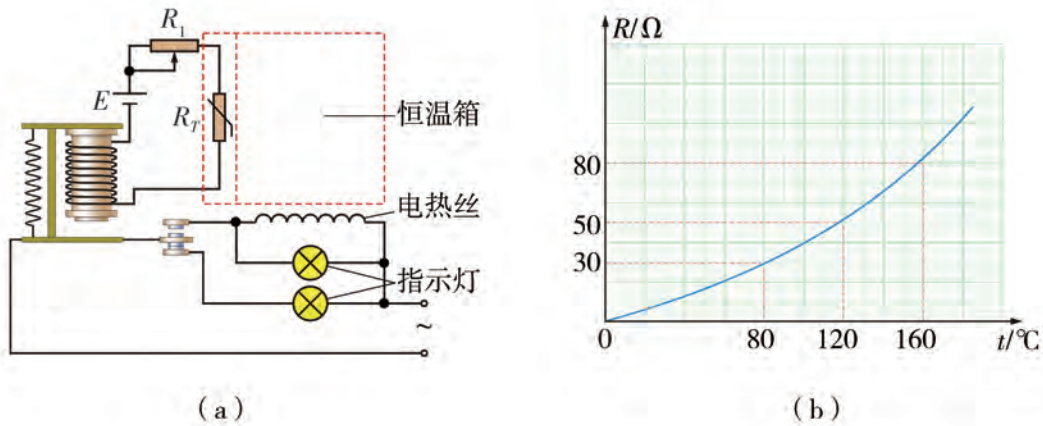


图 5-6

9. 把蜂鸣器、光敏电阻、干簧管继电器开关、电源按如图 5-7 (a) 所示的电路连接, 制成光电报警器装置. 当报警器有光照射时, 蜂鸣器发声; 当没有光照或者光照很弱时, 蜂鸣器不发声. 光敏电阻受到光照后, 阻值会变小. 干簧管继电器开关由干簧管和绕在干簧管外的线圈组成, 如图 5-7 (b) 所示. 当线圈中有一定的电流时, 线圈产生的磁场使密封在干簧管内的两个铁质簧片磁化, 两个簧片在磁力作用下, 由原来的分离状态变成闭合状态; 当线圈中没有电流或者电流很微弱时, 磁场消失, 簧片在弹力的作用下恢复到分离状态. 试说明光电报警器的工作原理.

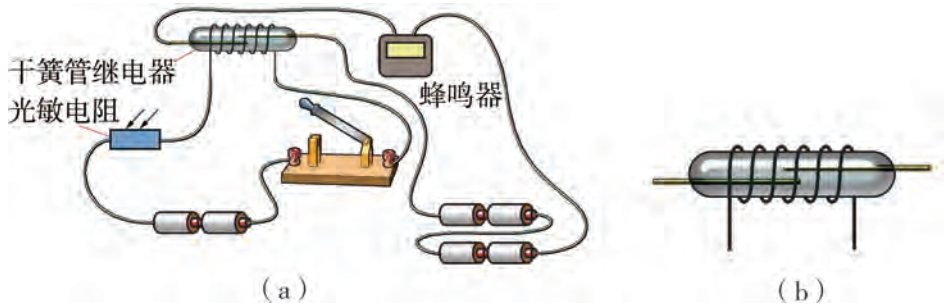


图 5-7

10. 用塑料薄膜做成的育秧棚，往往会因棚内湿度过高而影响秧苗的正常生长，因此需要一个能指示棚内湿度的简单仪器，以便及时排湿，保证育好秧苗. 如图 5 - 8 所示是育秧棚湿度传感器的原理图，其中由湿敏电阻 R_H 、滑动变阻器 R_P 和定值电阻 R_1 、 R_2 组成测湿电桥. 当相对湿度正常时， R_H 阻值很大；当育秧棚内的相对湿度增大到较高时， R_H 的阻值减小.

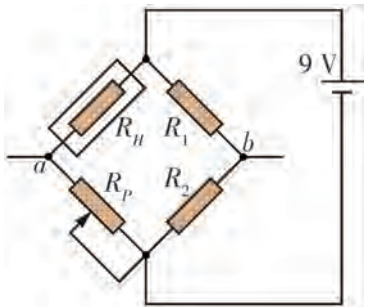


图 5 - 8

- (1) 当育秧棚的湿度正常时， a 、 b 两点哪一点的电势高？
- (2) 如何调高棚内的湿度？

11. 如图 5 - 9 (a) 所示是反射式光纤位移传感器的工作原理图. 由恒定光强的光源发出的光进入入射光纤，并从入射光纤的出射端射向被测物体，使被测物体反射的光部分被接收光纤接收. 由图 5 - 9 (b) 可知，光纤探头的光照与发射光和接收光的重合面积 B' 有关. 试讨论光纤探头的光照随物体距离的变化情况.

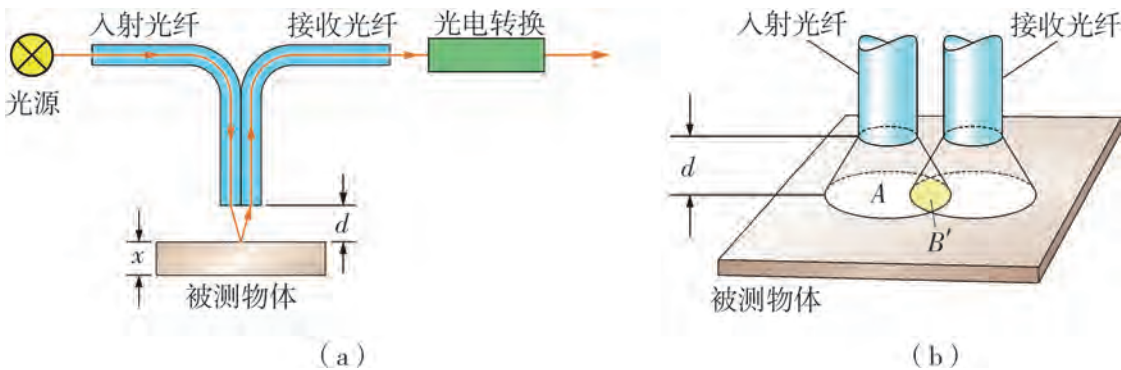


图 5 - 9

12. 某研究性学习小组为了测量物体的质量，找到一个力电传感器. 该传感器的输出电压与受压面的压力成正比（比例系数为 k ），如图 5 - 10 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 0，然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 . 现有力电传感器、质量为 m_0 的砝码、电压表、滑动变阻器和电池各一个，开关及导线若干，待测物体（可置于力电转换器的受压面上），请完成对该物体质量的测量.

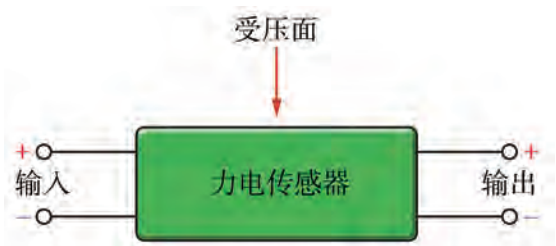
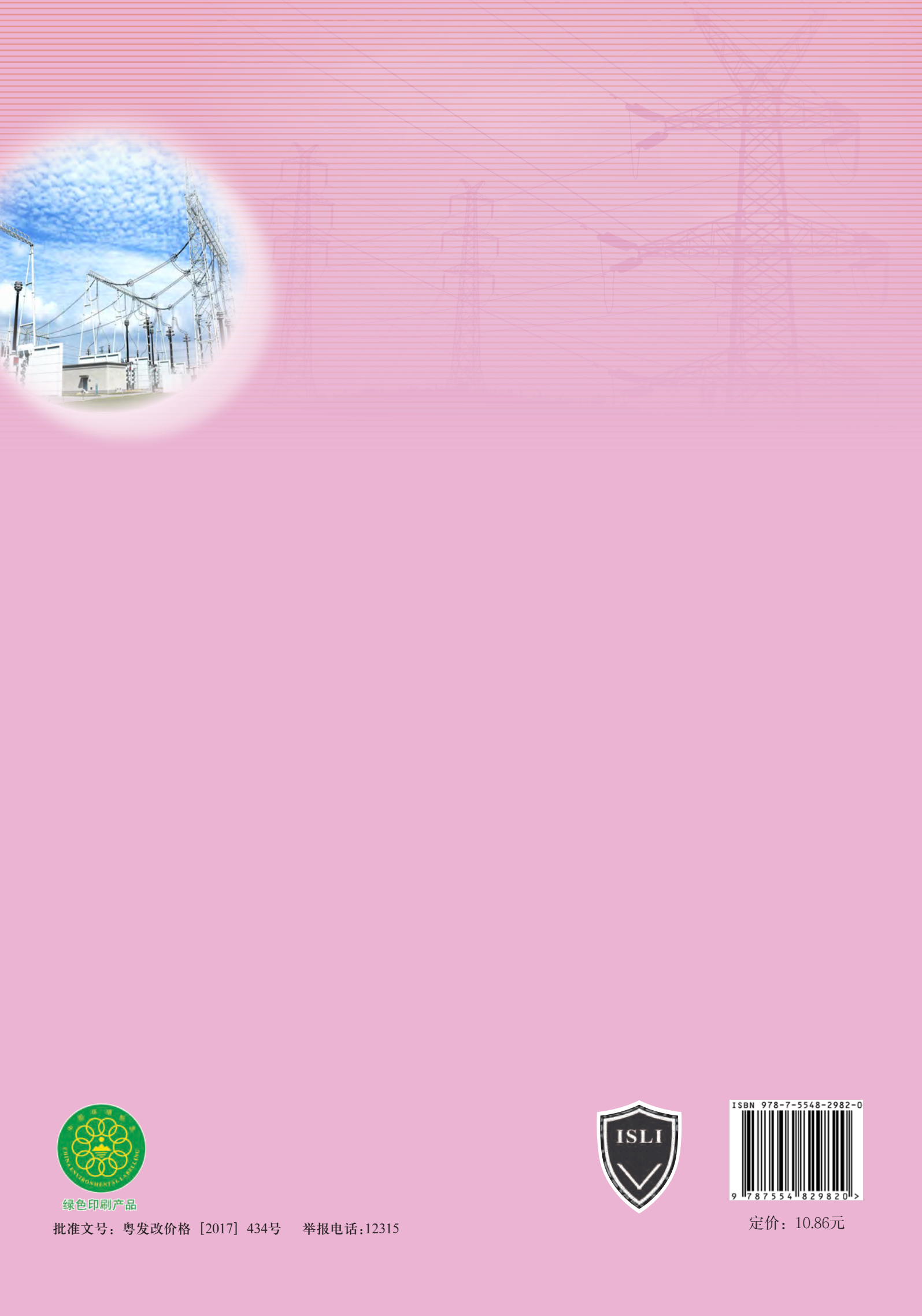


图 5 - 10

- (1) 设计一个电路，要求力电转换器的输出电压可调，并且使电压的调节范围尽可能大，请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 .
- (3) 请写出实验中可能影响实验结果的因素.



绿色印刷产品

批准文号：粤发改价格〔2017〕434号 举报电话：12315



定价：10.86元



致力于用榜样的力量提升学生成绩的共享家教平台

中国家庭教育学会荣誉会员单位

985/211 大学生 1对1 上门辅导

找家教就像叫“代驾”一样简单
家长们都在偷偷用的家教预约神器

记得拍照留存哦



扫码关注 预约上门

关注送200元优惠券

小初高全科辅导

学霸云集任您挑

学历真实可担保



与优秀大学生同行，激发孩子无限潜能



微信搜索公众号：365优教网

咨询热线：4000-711-365

YOUJ 优教

既是找老师，更是找榜样

家教老师全国招募中