

普通高中

WULI  
物理

教学参考资料



选择性必修

第二册

上海科学技术出版社

普通高中

物 理  
教学参考资料

选择性必修 第二册

上海科学技术出版社

主 编：蒋最敏 高 景

本册主编：严 明

编写人员：(以姓氏笔画为序)

王肇铭 严 明 李沐东 陈琪琪 赖佳颖

#### 图书在版编目(CIP)数据

普通高中物理教学参考资料：选择性必修. 第二册 /  
上海市中小学(幼儿园)课程改革委员会组织编写；蒋最  
敏，高景主编。-- 上海：上海科学技术出版社，2023.7(2024.7重印)  
ISBN 978-7-5478-6214-8

I. ①普… II. ①上… ②蒋… ③高… III. ①中学物  
理课—高中—教学参考资料 IV. ①G634.73

中国国家版本馆CIP数据核字(2023)第115309号

责任编辑：葛碧临 施 成

封面设计：房惠平

#### 普通高中 物理教学参考资料 选择性必修 第二册

上海市中小学(幼儿园)课程改革委员会组织编写

出 版 上海世纪出版(集团)有限公司 上海科学技术出版社  
(上海市闵行区号景路159弄A座9F~10F 邮政编码 201101)

发 行 上海新华书店

印 刷 上海新华印刷有限公司

版 次 2023年7月第1版

印 次 2024年7月第2次

开 本 890毫米×1240毫米 1/16

印 张 12

字 数 326千字

书 号 ISBN 978-7-5478-6214-8/G·1167

定 价 36.00元

版权所有·未经许可不得采用任何方式擅自复制或使用本产品任何部分·违者必究  
如发现印装质量问题或对内容有意见建议,请与本社联系。电话: 021-64848025

# 编写说明

本书是《普通高中教科书 物理 选择性必修 第二册》的配套教师用书,主要阐释教材编写意图,阐明相关物理概念和知识,并提供相应的资料作为知识背景,旨在帮助教师更深入地理解相关教学内容。

教材的编写坚持以立德树人为目标,注重核心素养与教学内容的内在联系。根据在“情境、探究、应用”框架下强调“从生活走进物理,从物理走向社会”,教材每章节的内容引入均注重以实际生活中的真实问题为情境,然后按“描述现象”“提出问题”“开展探究”“形成结论”“实际应用”的逻辑顺序展开。据此,本书以章为单位进行编写,内容包括整章分析、本章教材解读、本章练习部分解读、本章实验与活动部分解读四部分。

**整章分析** 由“学习目标”和“编写意图”两个栏目组成。“学习目标”部分根据课程标准的要求,明确了在本章的学习过程中涉及的基本方法、技能,以及应体现和逐步形成的学科核心素养;“编写意图”部分包括课程标准的相关要求,本章涉及的重点概念与形成核心素养的关系,本章内容与前、后章内容的关系和在形成核心素养过程中的作用,以及本章内容的学时建议。

**本章教材解读** 先在章首对该章学习内容及展开逻辑进行简单说明,再以节为单位编写,由“本节编写思路”“正文解读”“资料链接”“问题与思考解读”和“复习与巩固解读”等栏目组成。“本节编写思路”主要对该节所要解决的问题及问题解决的逻辑关系、关键支架、所涉及的知识和规律与核心素养的关系等做出分析说明。“正文解读”的内容包括:节首图的情境设置、学习内容与教材正文关系的说明;针对教师教或学生学的过程中可能产生的疑问以及一些重要概念做进一步说明和阐述;介绍相关内容的知识背景、实际应用和物理学史等;教材中栏目的说明及设置栏目的目的和作用;阐述学期活动的性质、方法和要求等。“资料链接”是对“正文解读”部分内容的补充和进一步阐述。“问题与思考解读”和“复习与巩固解读”部分设置“参考解答”“命题意图”和“主要素养与水平”,旨在改变相对固化的习题形式,适当增强习题开放性,减少死记硬背和“机械刷题”现象。其中“命题意图”阐述了编写者的出题意图,包括该题对概念的形成、方法的掌握所起的作用,以及该题应体现或解决的重点知识等。“主要素养与水平”是编写者根据自身对课程标准的理解给出习题所对应或体现的核心素养二级指标以及相应的水平。

**本章练习部分解读** 与《普通高中教科书 物理练习部分 选择性必修 第二册》同步,设置了“参考解答”和“习题主要素养与水平分析”。

**本章实验与活动部分解读** 与《普通高中教科书 物理实验与活动部分 选择性必修》同步,设置了“参考解答”和“命题意图”。

应该指出,给出习题体现的“主要素养与水平”的做法是一种尝试,其目的在于引发广大教师在教学实践中对新课程、新课标和新教材所倡导的学科核心素养及其水平划分、学业质量及其水平划分进行深入的思考。教师对水平划分的描述一定会有“见仁见智”的理解。同时,教学过程如何开展、具体内容的教学怎样进行,需要教师根据学情和自身的教学特点做出考虑和安排,这是教师创造性、个性化的工作,应该予以充分的尊重。相应地,书中并未给出具体的教学指导。

对于书中存在的不足之处,我们欢迎广大教师和物理工作者提出宝贵的意见和建议。

# 目录

<b>第五章 磁场 .....</b>	1
第一部分 整章分析 .....	1
第二部分 本章教材解读 .....	2
第一节 安培力 .....	3
第二节 洛伦兹力 .....	14
第三节 带电粒子在匀强磁场中的圆周运动 .....	21
第三部分 本章练习部分解读 .....	38
第四部分 本章实验与活动部分解读 .....	42
<b>第六章 电磁感应定律 .....</b>	44
第一部分 整章分析 .....	44
第二部分 本章教材解读 .....	45
第一节 楞次定律 .....	46
第二节 法拉第电磁感应定律 .....	55
第三部分 本章练习部分解读 .....	76
第四部分 本章实验与活动部分解读 .....	81
<b>第七章 电磁感应定律的应用 .....</b>	83
第一部分 整章分析 .....	83
第二部分 本章教材解读 .....	84
第一节 自感现象和涡流现象 .....	85
第二节 交变电流 .....	92
第三节 变压器 .....	101

第四节	发电机和电动机	111
第三部分	本章练习部分解读	121
第四部分	本章实验与活动部分解读	125

## 第八章 电磁振荡与电磁波 127

第一部分	整章分析	127
第二部分	本章教材解读	128
第一节	麦克斯韦电磁场理论	129
第二节	电磁波的产生与发射	134
第三节	电磁波的传播和接收	139
第四节	电磁波的应用	147
第三部分	本章练习部分解读	157
第四部分	本章实验与活动部分解读	160

## 第九章 传感器 161

第一部分	整章分析	161
第二部分	本章教材解读	162
第一节	传感器及其敏感元件	163
第二节	常见传感器的工作原理	167
第三节	传感器的应用	174
第三部分	本章练习部分解读	183
第四部分	本章实验与活动部分解读	184

# 第五章 磁场

## 第一部分 整章分析

### 学习目标

1. 知道磁场对通电导体的作用。认识安培力的方向和大小,能用左手定则判断安培力的方向,能计算安培力的大小。了解安培力在生产生活中的应用,体会物理知识和科学技术的关系。
2. 知道磁场对运动电荷的作用。认识洛伦兹力的方向和大小,能用左手定则判断洛伦兹力的方向,能计算洛伦兹力的大小。
3. 理解带电粒子在匀强磁场中做圆周运动的原因。能用洛伦兹力分析带电粒子在匀强磁场中的圆周运动,能计算带电粒子在匀强磁场中做圆周运动的半径和周期。经历实验验证以及进一步感受实验观察和数学推导等研究物理的基本方法,体会物理理论需要接受实验检验的科学规范。
4. 了解质谱仪和回旋加速器的工作原理。了解带电粒子在匀强磁场中的偏转及其应用,感悟科学与技术的密切关系,体会科学知识的巨大力量。

### 编写意图

课程标准中对本章内容的要求为:

- 2.1.1 通过实验,认识安培力。能判断安培力的方向,会计算安培力的大小。了解安培力在生产生活中的应用。
- 2.1.2 通过实验,认识洛伦兹力。能判断洛伦兹力的方向,会计算洛伦兹力的大小。
- 2.1.3 能用洛伦兹力分析带电粒子在匀强磁场中的圆周运动。了解带电粒子在匀强磁场中的偏转及其应用。

在必修第三册中已学习了静电力对电荷的作用和磁场知识,本章是在此基础上进一步介绍磁场对通电导体、磁场对运动电荷的作用,引导学生通过安培力与洛伦兹力的学习进一步认识场的概念。在研究安培力和洛伦兹力时,都是先通过自主活动定性观察力的方向,再定量分析力的大小,以便学生体会解决问题的一般思路。学习本章内容要综合运用学过的力学和电磁学知识,进一步培养学生关于磁场的物质观念、运动与相互作用观念和能量观念。高中物理课程标准要求在课程内容上关注与生产生活、现代社会和科技发展的联系,本章内容紧密联系生产生活实际,帮助学生发展科学思维和科学探究等核心素养。

本章内容是电磁感应定律的基础,为后续电磁学综合问题的学习做了力学知识和电学知识之外的铺垫和实验技能准备,引导学生深入思考以提高解决实际问题的能力。通过本章的学习进一步建立磁场与通电导体、运动电荷间的相互作用观念,引导学生应用学到的知识来解决实际问题,培养运用知识的创新能力。

完成本章内容的学习共需要 7 课时。第一节 2 课时,第二节 2 课时,第三节 3 课时。

## 第二部分 本章教材解读

# 第五章 磁 场

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

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

## 本节编写思路

本节以科技馆“电磁炮”情境引入。通过初中阶段和高中必修三的学习，在已初步了解磁场对电流有力的作用的基础上，首先用实验证实通电导体在磁场中受到力的作用；其次通过“自主活动”使学生经历得出安培力、磁感应强度和电流方向间关系的过程，归纳出左手定则；再通过实验定量探究安培力的大小，创设情境引导学生积极思维，引导学生从探究实验中总结出安培力大小与电流成正比、与通电导线在磁场中的长度成正比。最后通过对电流天平、磁电式电表、动圈式扬声器以及本节开头电磁炮的原理分析，了解安培力在生产、生活中的广泛应用。

本节的学习将帮助学生进一步认识磁场的物质观念、运动与相互作用观念，体会归纳推

### 第一节 安培力

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

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

#### ▶ 磁场对通电导体的作用

##### [1] 自主活动

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



图 5-1 “电磁炮”体验展品

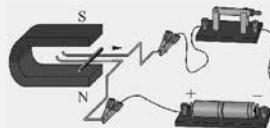


图 5-2 磁场中通电导体棒的运动情况

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

#### ▶ 安培力的方向

安培力的方向、磁场方向和电流方向三者之间有什么样的关系呢？

理的方法，感受数字技术在物理测量中的作用。

### 正文解读

[1] 本“自主活动”安排学生分组实验，探究磁场对通电导体的作用。目的是：

- (1) 通过实验认识安培力。
- (2) 通过磁场对通电导体作用的实验提升磁场的物质观和相互作用观。

[1] 本“自主活动”安排学生分组实验，探究安培力的方向、磁场方向和电流方向三者间的关系。目的是：

(1) 能用三维图正确呈现安培力、磁场和电流三者方向间的关系，通过实验分析得出安培力的方向与磁场和电流所决定的平面垂直的结论。

(2) 经历得出安培力、磁场和电流三者方向关系的过程，体会归纳推理的方法。会判断安培力的方向。

从实验现象的分析可归纳得出：安培力的方向既与磁场方向垂直，又与电流方向垂直，安培力的方向与磁场和电流所决定的平面垂直。

### [1] 自主活动

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

表 5-1 数据记录表

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

从上述实验现象分析归纳出安培力的方向、磁场方向和电流方向三者间的关系是：

\_\_\_\_\_

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

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

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

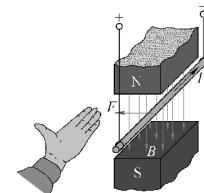


图 5-3 左手定则

### ▶ 安培力的大小

安培力的大小与什么因素有关呢？

### [1] 自主活动

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

把学生电源、滑动变阻器、电流传感器、开关和线圈连接成闭合电路。

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

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



图 5-4 探究安培力的大小

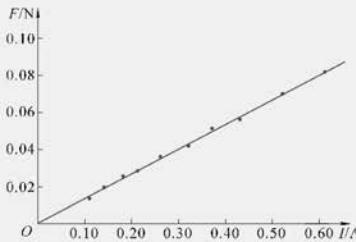


图 5-5 安培力与电流的关系

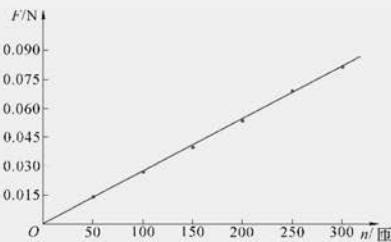


图 5-6 安培力与导线长度(线圈匝数)的关系

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

$$F = BIL$$

当导线的方向与磁感应强度  $B$  的方向平行时, 导线受力为零。

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

解释或解决, 可根据学生的学习能力来确定是否拓展探讨不同的情况。

若磁感应强度  $B$  的方向与电流  $I$  之间的夹角为  $\theta$ , 电流元所受安培力的大小为  $F = BIL \sin \theta$ 。

[1] 本“自主活动”定量演示安培力的大小(有条件的学校尽可能安排为分组学生实验), 目的是:

(1) 经历通电导线与磁场方向垂直时得到安培力大小与电流成正比, 安培力大小与通电导线在磁场中的长度成正比的过程, 认识安培力。

(2) 通过实验定量探究安培力的大小, 感受数字技术在物理测量中的作用。

实验时还可通过调节带刻度的圆盘, 观察安培力大小与磁场和电流方向间夹角的关系。可观察到当电流与磁场方向垂直时安培力  $F$  最大; 电流的方向与磁场的方向平行时安培力为零。

[2] 计算安培力的大小时, 对于电流元与磁场不垂直的情况可以用磁感应强度的等效值或等效电流元的方法来

[1] 通过示例 1, 引导学生利用左手定则判断安培力的方向, 计算安培力的大小。可以让学生了解电流天平的原理, 并与同伴交流自己的观点, 从而加深理解安培力在生产、生活中的应用。

2019 年之前, 千克的定义基于国际千克原器(简称 IPK 或大 K)。但千克原器实物在保存过程中不可避免地会发生物理、化学变化, 从而使其质量发生变化。国际度量衡大会(CGPM)在考虑了多种替代方案之后决定基于基布尔天平的使用, 用普朗克常量  $h$  重新定义质量的基本单位“千克”, 并确定了精度标准。

基布尔天平是定义新的国际标准质量的重要装置, 而该天平的工作原理就是根据安培力的作用而设计的(详见本节资料链接)。

[1] 衡, 需在右端盘内再加入 37.5 g 砝码。求:

- (1) 线圈中电流的方向;
- (2) 匀强磁场的磁感应强度大小。

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

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

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

$$nBIL = \Delta mg$$

由此可得匀强磁场的磁感应强度

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

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

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

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

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

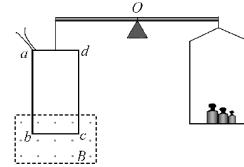


图 5-7 电流天平原理示意图

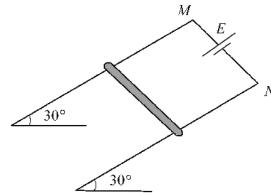


图 5-8 磁场中静置于导轨上的导体棒

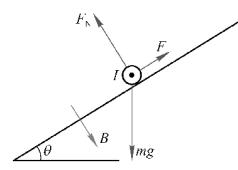


图 5-9 导体棒的受力图

应强度的方向应垂直于导轨平面向下。

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

$$mg \sin \theta = BIL$$

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

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

### ▶ 安培力的应用

安培力在生产、生活等各方面都有广泛应用, 通过如下几个实例可见一斑。

#### 1. 磁电式电表

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

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

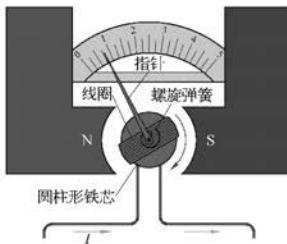


图 5-10 磁电式电表的基本结构图

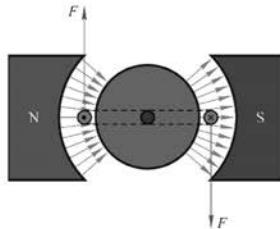


图 5-11 通电线圈在安培力作用下发生转动

[1] 学生在初中已能熟练地使用磁电式电压表和电流表, 但对于其工作原理知之甚少, 故无法解释为何当磁电式仪表的正、负接线柱接反后, 指针会反向偏转。解释磁电式电表的结构及其工作原理, 需要用安培力综合分析。

[1] 电磁炮是一种电磁弹射器。下面介绍一种常见类型——轨道式电磁弹射器的原理。轨道式电磁弹射器主要由两条发射导轨和一个导电的抛射体组成。如图1所示，强大的电流由一条轨道流入，经过抛射体后再由另一条轨道流回。根据右手螺旋定则可判断通电直导线周围磁场分布，图中下方轨道和上方轨道中的电流在抛射体处产生的磁场都是垂直纸面向里，图中用符号“ $\times$ ”表示，可见抛射体所在位置的磁场被大大加强。当电流流经抛射体时，抛射体因载有电流而受到向右的安培力 $F$ ，从而使抛射体沿轨道向右加速射出。显然电流 $I$ 越大，磁感应强度 $B$ 越大，抛射体所受安培力 $F$ 越大，抛射体抛射出去的初速度也就越大。

电磁弹射器的优点是：发射抛射体的初速度大，所以射程远；发射成

本低且易于连续发射；不使用火药，因而没有巨大的声响，而且使用安全；可以发射质量较大的物体。如大大增加电磁弹射器的体积和驱动电流，则可以用抛射体牵引飞机从航空母舰上起飞，这就是航空母舰上帮助舰载机起飞的电磁弹射器，它比上一代的蒸汽弹射器更为优越。我国第三艘航母福建舰就采用了电磁弹射技术。

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

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

## 2. 动圈式扬声器

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

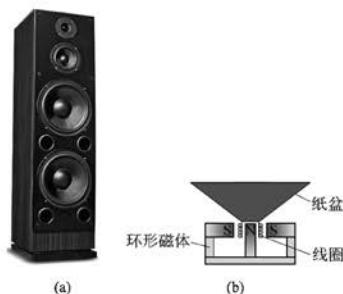


图5-12 动圈式扬声器及原理简图

## 3. 电磁炮

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

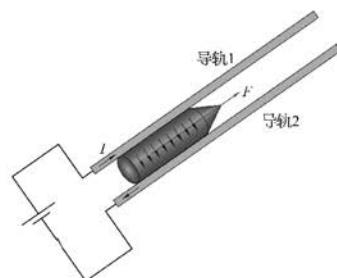


图5-13 电磁炮原理图

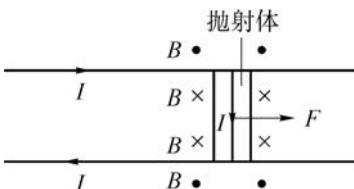


图1

## 问题与思考解读

### 问题与思考

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

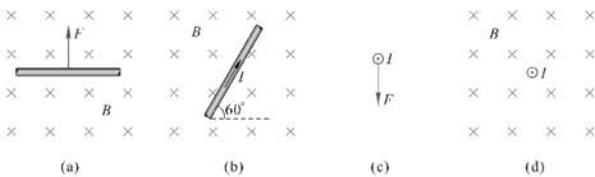


图 5-14

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

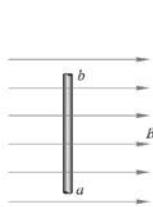


图 5-15

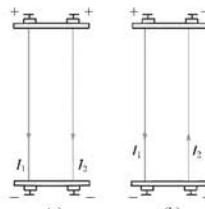


图 5-16

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

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

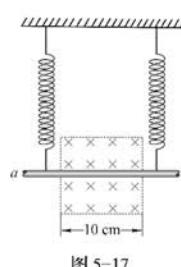


图 5-17

在相互作用力；同方向电流间相互吸引，反方向电流间相互排斥。（虚线：同方向电流向内侧形变，反方向电流向外侧形变，如图 2 所示）

**命题意图：**运用左手定则判断两根通电平行直导线间的相互作用，加深对安培力相关概念的理解。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

4. 参考解答：弹簧不发生形变，两侧的弹簧对导线 ab 没有弹力。根据平衡条件： $F = G$ ；又由  $F = BIL$

可得

$$I = \frac{F}{BL} = \frac{G}{BL} = \frac{0.1}{0.5 \times 0.1} A = 2 A$$

1. 参考解答：(a) 电流  $I$  水平向右 (b) 安培力  $F$  垂直导线向左上方 (c) 磁场  $B$  水平向左 (d) 无安培力  $F$

**命题意图：**运用左手定则判断安培力的方向。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅰ)。

2. 参考解答： $F = BIL$

$$I = \frac{F}{BL} = \frac{1 \times 10^{-2}}{4 \times 10^{-2} \times 8 \times 10^{-2}} A = 3.125 A$$

根据左手定则可判断导线中电流方向为  $b \rightarrow a$

**命题意图：**能判断安培力的方向，会计算安培力的大小。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

3. 参考解答：两根通电平行直导线间存

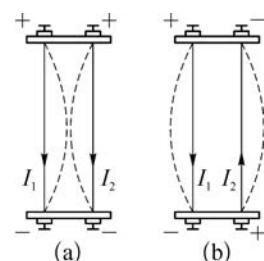


图 2

安培力的方向竖直向上,根据左手定则可判断导线内电流方向为  $a \rightarrow b$

**命题意图:** 运用安培力综合分析解决问题。

**主要素养与水平:** 科学推理(Ⅱ);科学论证(Ⅱ)。

**5. 参考解答:** 若通电后指针  $P$  向右偏转,则说明绕在圆柱形铁芯上的线圈左侧受到的安培力向上,右侧受到的安培力向下。根据左手定则判断线圈内的电流方向,可得电流是由  $A$  接线柱流入电表的

**命题意图:** 了解安培力在生产生活中的应用,应用安培力分析磁电式仪表的工作原理。

**主要素养与水平:** 科学推理(Ⅱ);科学本质(Ⅲ)。

**6. 参考解答:** 可采用分级评分体现科学思维水平,水平越高得分越高。

根据匀变速直线运动规律可得,可增大抛射体的加速度及其作用的时间;从动能定理可得,可增大抛射体的合外力及其作用的位移;从动量定理可得,可增大抛射体的合外力及其作用的时间。

$$BIL - F_{\text{阻}} = ma; a = \frac{BIL}{m} - \frac{F_{\text{阻}}}{m}; v = \sqrt{2as} = \sqrt{2 \left( \frac{BIL}{m} - \frac{F_{\text{阻}}}{m} \right) s} = \sqrt{2 \frac{(kI^2L - F_{\text{阻}})s}{m}}$$

理论上可采用的方法为:增大轨道和抛射体的宽度  $L$ ;增大轨道长度  $s$ ;增大电流  $I$ ;减小抛射体质量  $m$ ;减小抛射体受到的阻力  $F_{\text{阻}}$

(学生其他合理的科学推理论和科学论证均可,如:建模考虑受到变化的阻力,抛射体除了受到轨道的阻力外还受到空气对抛射体的阻力,空气的阻力又与速度或者速度的平方成正比,故抛射体射出前可能已经达到平衡状态,以终极速度射出等)

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

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

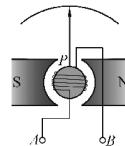


图 5-18

水平 2：通过文字叙述进行合理的分析。

水平 3：进行建模但不考虑阻力的影响。

水平 4：进行建模考虑阻力的影响。

**命题意图：**运用安培力综合分析实际问题，培养模型建构、科学推理和质疑创新的能力。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(IV)；科学推理(IV)；科学论证(III)。

## 资料链接

### 安 培

安德烈·马里·安培 (1775—1836) 是法国物理学家、数学家，经典电磁学的创始人之一。为了纪念安培在电磁学中的贡献，1948 年第九届国际计量大会决定采用安培作为电流的国际单位制单位。安培的名字与另外 71 个法国科学家的名字一起被刻在埃菲尔铁塔上。

安培在电磁学中的贡献：1820 年，丹麦物理学家奥斯特发现电流的磁效应。于是，安培开始着手建立描述电磁关系的物理理论与数学方程。为了进行定量研究，安培设计了一个检流计，可通过指针的偏转检测电流的方向并测量电流的大小。1822 年，安培发表了一篇论文，定量总结实验现象，发现两根平行载流导线以各自产生的磁场对另一根导线产生作用力。安培还在 1820 年到 1825 年间通过一系列构思精巧的实验研究了电流与电流之间的磁力。后来，法拉第和麦克斯韦等人建立了电磁场理论。根据这一理论，电流在其周围空间产生磁场，磁场再作用于其中的电流而产生磁力。如今我们把安培通过实验得到的结论表达为电流元对其附近一点的磁感应强度的贡献。此后，安培的代表作《关于电动力学现象之数学理论的回忆录，独一无二的经历》出版，“电动力学”一词自此产生。1827 年，安培获选为英国皇家学会外籍会员，一年后又当选瑞典皇家科学院外籍会员。

### 两根长直通电导线间的相互作用

根据毕奥-萨伐尔定律，一根长直通电导线附近的某点的磁感应强度  $B$  的大小与电流  $I$  成正比，与该点到导线的距离  $r$  成反比，即  $B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r} = k_m \frac{I}{r}$ ，式中比例系数  $k_m = \frac{\mu_0}{2\pi}$ ， $\mu_0$  为真空磁导率。

两根长度为  $l$  的平行直导线，相距为  $r$  且  $r \ll l$ ，通以相同方向的电流  $I_1$  和  $I_2$ 。通电直导线  $I_1$  在其周围产生磁场，除长直通电导线的两端附近，在距离为  $r$  处的各点，磁感应强度的大小均为  $B_1 = k_m \frac{I_1}{r}$ 。如图 3 所示， $I_1$  右侧的通电直导线  $I_2$  在  $I_1$  的磁场中要受到安培力的作用（忽略两端附近的差别），可以近似地认为通电直导线  $I_2$  全体处于相同大小和方向的磁场中，所受到的安培力大小为

$$F = B_1 I_2 l = k_m \frac{I_1}{r} I_2 l = k_m l \frac{I_1 I_2}{r}$$

方向垂直导线向左。同理可知，通电直导线  $I_2$  在其周围距离为  $r$  处的各点，磁感应强度的大小均为  $B_2 = k_m \frac{I_2}{r}$ ，左边直导线  $I_1$  受到的安培力大小为

$$F' = B_2 I_1 l = k_m \frac{I_2}{r} I_1 l = k_m l \frac{I_1 I_2}{r}$$

方向垂直导线向右。两根长直通电导线间相互吸引。

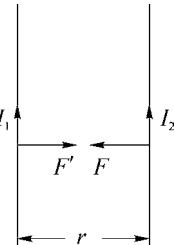


图 3

## 安培力的应用——直流电动机的原理

直流电动机是将直流电能转换为机械能的动力机械。直流电动机最突出的优点是通过改变输入电压很容易调节它的转速。因此，不少需调速的设备都采用直流电动机。如图 4(a)和图 4(c)所示，当直流电源通过电刷向线圈供电时，左侧导体受到向上安培力的作用；右侧导体受到向下安培力的作用。换向器是一对相互绝缘的半圆形接触片且通过电刷与直流电源连接。如图 4(b)和图 4(d)所示，通过换向器，通电线圈便可以连续不断地按顺时针旋转，将输入的直流电能转换成输出的机械能。

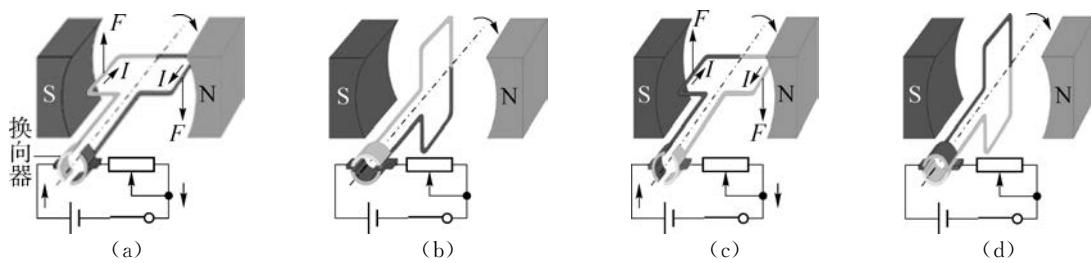


图 4

## 基布尔天平的原理简介

基布尔天平(图 5)的运作分为两种模式。第一种是称重模式，这种模式只需要用到天平的左边。如图 6 所示，在天平左边的托盘上放上质量  $m$  未知的物块，它受到竖直向下的重力  $mg$ 。下方的线圈通入电流，线圈上下各是一块永磁体，产生恒定的磁场。假设产生的磁场为匀强磁场，磁场与电流方向垂直，磁场与导线运动方向垂直。通入电流的线圈会受到向上的安培力作用，大小为  $F = BIL$ ，其中  $I$  是电流大小， $B$  是磁感应强度， $L$  是线圈长度。调整电流大小可以使线圈受到的重力和安培力正好相互平衡，即  $mg = BIL$ 。如果  $B$ 、 $I$ 、 $L$  和  $g$  都能精确测量出来， $m$  就可确定。但问题在于  $B$  和  $L$  很难测到所需的精度，于是就有了巧妙的第二种模式：速度模式。这种模式里要把左边的物块移走，线圈也不通电流，开启右边电机，使得左边的线圈在竖直方向上以匀速  $v$  运动。根据法拉第电磁感应定律，导线在磁场中运动会切割磁感线产生感应电动势  $E = BLv$ ，所以  $BL = \frac{E}{v}$ 。这样无需知道  $B$  和  $L$  具体的值，只需将它们的乘积代入  $mg = BIL$ ，就能消掉  $BL$ ，得  $mgv = EI$ 。这个方程左边是机械功率(单位瓦)，右边是电功率(单位也是瓦)。等式两边功率相等，所以基布尔天平又叫功率天平。于是可得质量  $m = \frac{EI}{gv}$ 。或者利用欧姆定律

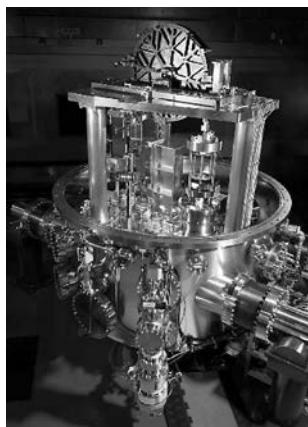


图 5

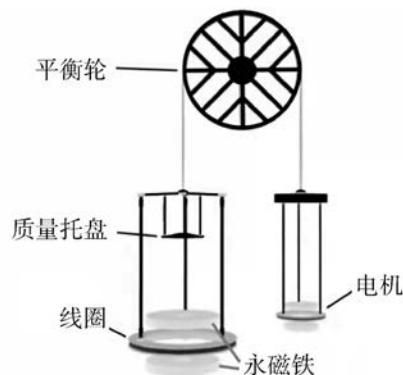


图 6

$I = \frac{E}{R}$ , 改写成这样:  $m = \frac{E^2}{R} \cdot \frac{1}{gv}$ 。当今科技条件下, 等式右边每一项都可以测量到极高的精度, 这样就能以极高精度确定质量, 这就是基布尔天平的基本原理。

那么质量  $m$  又是如何与普朗克常量  $h$  建立联系的呢? 关键在于电动势  $E$  和电阻  $R$ 。为了达到极高的精度, 二者的测量分别借助约瑟夫森效应和量子霍尔效应。将频率为  $\nu$  的电磁波入射约瑟夫森结, 就能测量电势差:  $E = \frac{n\hbar\nu}{2e}$ , 其中  $n$  是反映约瑟夫森结个数的整数,  $h$  是普朗克常量,  $e$  是元电荷的电荷量。

类似地, 电阻  $R$  可以通过量子霍尔效应精准测量:  $R = \frac{h}{pe^2}$ , 其中  $p$  是一个整数,  $e$  是元电荷的电荷量。代入原式就得到了质量的最终表达式:  $m = \frac{pn^2\nu^2}{4gv}h$ 。现在普朗克常量  $h$  已经被固定为常数了, 根据这一质量的最终表达式就能以地球上目前最高的精度来测量质量。

2018 年, 国际度量衡大会决定以普朗克常量重新定义质量。从 2019 年 5 月 20 日起, 国际度量衡局总部地下室罩有三层玻璃钟罩的铂-铱合金圆柱体就正式退出历史舞台了。

### 磁电式电表的刻度为何是均匀的

如教材第 6 页图 5-11 所示, 磁电式电表的线圈处于辐向磁场中, 因此不论转到什么位置, 线圈所受的安培力力矩的大小恒为  $M = NBIS$ , 式中  $N$  为线圈匝数,  $S$  为线圈面积。由于线圈在转动过程中将螺旋弹簧扭紧, 故线圈同时受到螺旋弹簧的阻碍力矩  $M' = k\theta$  的作用, 式中  $k$  为螺旋弹簧的扭转系数。当两力矩平衡时线圈处于平衡位置, 根据力矩平衡条件有:  $NBIS = k\theta$ , 可得  $\theta = \frac{NBS}{k}I$ 。式中  $N$ 、 $B$ 、 $S$ 、 $k$  都是定值, 所以  $\theta \propto I$ , 即线圈的偏转角  $\theta$  与电流  $I$  成正比。电表刻度盘上圆弧的长度也与  $\theta$  成正比, 所以磁电式电表的刻度是均匀的。

## 本节编写思路

本节以美丽的极光现象作为情境，激发学生学习洛伦兹力的兴趣。根据磁场对电流有力的作用，而电流又是由电荷的定向移动形成，引导学生猜想磁场对运动电荷有力的作用；并通过阴极射线在磁场中偏转的演示实验验证。学会计算洛伦兹力的大小。“拓展视野”供学习能力较强的学生认识安培力是作用在导线内所有运动电荷上的洛伦兹力导致的宏观表现。通过实验，能应用左手定则判断洛伦兹力的方向。在高纬度区域，来自太阳风的高能带电粒子有部分沿着地磁场方向运动进入极区附近的大气层后使大气分子受激发而发光，由此解释节首图的极光现象。

本节注重在呈现知识时创设能让学生积极参与、乐于探究、勤于思考的学习情境，体会模型建构和演绎推理的方法，增强科学探究能力。本节注重为学生的自主学习搭建平台，培养和发展自主学习能力。

## 正文解读

[1] 阴极射线管的阴极端连接直流高压电源的负极，阳极端连接电源的正极。电子由阴极端向阳极端运动。这个演示实验可让肉眼看不见的电子显现出径迹，让学生观察磁场可使电子径迹发生偏转的现象，从而激发其好奇心和求知欲。

## 第二节 洛伦兹力

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

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



图 5-19 极光现象

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

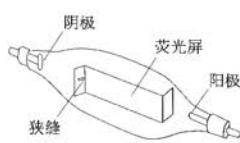


图 5-20 阴极射线管结构

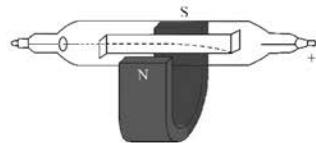


图 5-21 电子束在磁场中偏转

### ▶ 洛伦兹力的大小

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

$$f = qvB$$

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

### [2] 拓展视野

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

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

根据以上条件可得出通过导线截面的电荷量与时间之比, 即电流

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

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

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

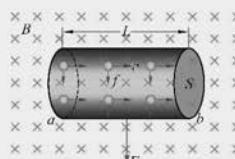


图 5-22 导线内运动电荷的洛伦兹力与宏观安培力

[1] 对于电荷运动

方向与磁场方向不垂直情况下洛伦兹力大小的计算, 可根据学生的学习能力来确定是否拓展。

[2] 此处设置“拓

展视野”, 是为了使学生了解通电导线受到的安培力实际是导线内所有运动电荷所受洛伦兹力的宏观表现。洛伦兹力表达式  $f = evB$  是在导线与磁场垂直的情况下导出的, 这一表达式仅适用于电荷运动方向与磁场垂直的情况。

如果洛伦兹力和安培力的关系作为课堂讲授内容, 应说明洛伦兹力和安培力作用的对象不同: 洛伦兹力作用于带电粒子(如电子), 安培力作用于通电导线。

[1] 教学过程中这个“自主活动”是演示实验(有条件的学校应尽可能安排为分组学生实验),目的是:

(1) 认识洛伦兹力。认识电子束的磁偏转,提升磁场的物质观和相互作用观。

(2) 经历得出洛伦兹力、磁场和电荷的运动三者方向关系的过程,体会科学猜想、逻辑思维、实验验证和归纳讨论。

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

由电子束的偏转情况确定洛伦兹力的方向。填写数据记录表,表中的方向用“向上”“向下”“向左”“向右”“垂直纸面向里”或“垂直纸面向外”填写。

演示实验不仅能够让学生“看到”洛伦兹力的存在,而且可以通过实验发现洛伦兹力的方向与磁场方向和电荷的运动方向都有关系,从而探究得到洛伦兹力、磁场和电荷运动方向三者间的关系。

### ▶ 洛伦兹力的方向

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

### [1] 自主活动

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

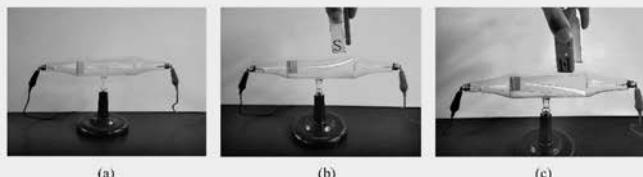


图 5-23 阴极射线在磁场中的偏转

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

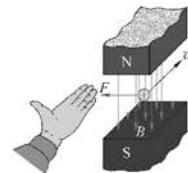


图 5-24 用左手定则判断洛伦兹力的方向

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

分析:根据粒子束中的粒子所带的电荷和左手定则即可

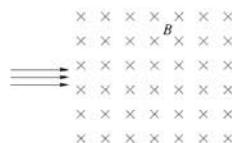


图 5-25 粒子束进入匀强磁场

实验序号	电子运动方向	磁场方向	电子束的偏转方向
1	向右		
2	向右		

判断。

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

[1]

**大家谈**

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

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

[2]

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

[3]

**拓展视野**

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

单位：

$$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}} = 1 \frac{\text{N}}{(\text{C} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{m}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{A} \cdot \text{m}} = 1 \text{ kg} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

[1] 电场和磁场都可以对带电粒子发生作用，此处设置“大家谈”，是为了比较这两种场对带电粒子的作用有何差异。运动电荷在磁场中不一定受到洛伦兹力的作用。如电荷运动方向与磁场方向在同一直线上，则运动电荷不受洛伦兹力的作用。

[2] 极光的颜色由大气的成分以及入射高能带电粒子的能量大小决定。

[3] 此处设置“拓展视野”，是为了通过磁感应强度的不同定义方式，更深刻地认识磁感应强度和比值定义物理量的方法（详见本节资料链接）。必修三教材中用电流元在磁场中受力来定义  $(B = \frac{F}{I \Delta l})$ ，而拓展视野中用洛伦兹力来定义  $(B = \frac{f}{qv})$ 。磁感应强度  $B$  的国际

## 问题与思考解读

14 第五章 磁场

**1. 参考解答：**运动电荷受到的洛伦兹力大小为  $f = qvB = 1.6 \times 10^{-19} \times 6 \times 10^6 \times 0.5 \text{ N} = 4.8 \times 10^{-13} \text{ N}$

如电荷运动方向与磁场方向在同一直线上，运动电荷受到的洛伦兹力大小为零

**命题意图：**会计算洛伦兹力的大小。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

**2. 参考解答：**竖直向上 竖直向上 垂直纸面向外

**命题意图：**运用左手定则判断洛伦兹力的方向。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅰ)。

**3. 参考解答：**阴极射线管的 A 端连接直流高压电源的负极，B 端连接电源的正极 电子的运动方向由  $A \rightarrow B$  电子束运动轨迹向上偏转

**命题意图：**运用左手定则判断洛伦兹力的方向，解释电子束在磁场中偏转的原因。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(Ⅲ)；科学推理(Ⅱ)。

**4. 参考解答：**电子通过空间某区域时不偏转，该区域不一定没有磁场。如磁场方向与电子运动方向在同一条直线上，运动电子不受洛伦兹力作用故不发生偏转。也有可能空间区域内既存在磁场也存在电场，电场力和洛伦兹力平衡，故不发生偏转。

电子在通过空间某区域发生侧向偏转，有可能是电子通过磁场区域受到洛伦兹力的作用，也可能是电子通过电场区域受到电场力的作用，所以该区域中不一定存在磁场

**命题意图：**将静电场知识和磁场知识相关联分析带电粒子偏转的原因，电场力和磁场力都能使带电

### 问题与思考

1. 电子以  $6 \times 10^6 \text{ m/s}$  的速率垂直射入磁感应强度为  $0.5 \text{ T}$  的匀强磁场中，电子受到的洛伦兹力的大小为何？如果电子射入磁场时的速度  $v$  与磁感应强度  $B$  的方向间的夹角是  $180^\circ$ ，则电子所受的洛伦兹力大小为何？

2. 如图 5-26 所示，试判断运动电荷在磁场中所受洛伦兹力的方向。

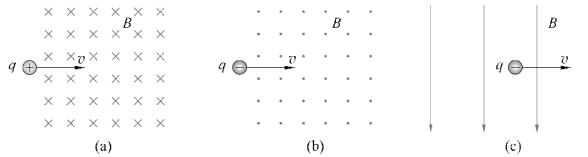


图 5-26

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

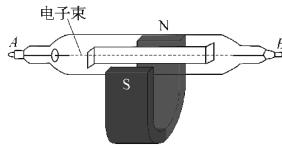


图 5-27

4. 如果一个电子在通过空间某区域时不偏转，是否能肯定该区域中没有磁场？如果一个电子在通过空间某区域时发生侧向偏转，是否能肯定该区域中存在着磁场？试说明理由。

5. 某区域存在一竖直向上的匀强磁场，磁场的磁感应强度大小为  $1.2 \times 10^{-3} \text{ T}$ 。动能为  $5.3 \text{ MeV}$  的质子由南向北水平通过磁场区域，则质子受到的洛伦兹力的大小和方向如何？(质子质量为  $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，忽略地球磁场)

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

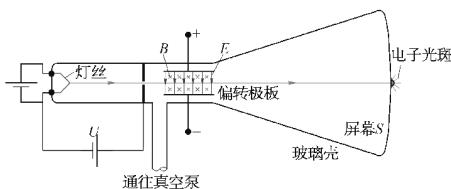


图 5-28

粒子发生偏转。

### 主要素养与水平:

运动与相互作用观念  
(Ⅲ); 科学推理(Ⅱ)。

### 5. 参考解答:

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

$$v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 5.3 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.67 \times 10^{-27}}} \text{ m/s} \\ \approx 3.19 \times 10^7 \text{ m/s}$$

$$f = qvB \\ = 1.6 \times 10^{-19} \times 3.19 \times 10^7 \times 1.2 \times 10^{-3} \text{ N} \\ \approx 6.12 \times 10^{-15} \text{ N}$$

洛伦兹力的方向:

水平向东

**命题意图:** 针对匀强磁场与带电粒子运动方向垂直的情况, 会计算带电粒子所受洛伦兹力的大小, 能判断洛伦兹力的方向。

### 主要素养与水平:

能量观念(Ⅱ); 科学推理(Ⅲ); 科学论证(Ⅱ)。

### 6. 参考解答:

忽略电子所受重力, 运动电荷在电场中受到电场力  $qE$ , 竖直向上。运动电荷在磁场中还受到洛伦兹力  $qvB$ , 竖直向下。电子匀速的通过电场和磁场区域, 合力为零

$$qE = qvB$$

$$v = \frac{E}{B} = \frac{1.5 \times 10^3}{0.4} \text{ m/s} = 3.75 \times 10^3 \text{ m/s}$$

**命题意图:** 将静电场知识、磁场知识与力学知识相关联, 培养学生综合分析问题和解答实际问题的能力。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用观念(Ⅲ); 科学推理(Ⅲ); 科学论证(Ⅱ)。

## 资料链接

### 洛 伦 兹

亨德里克·安东·洛伦兹(1853—1928),荷兰物理学家,于1881年当选荷兰皇家艺术与科学学院院士,并与彼得·塞曼共同获得1902年诺贝尔物理学奖,同时还曾担任多国科学院外籍院士。洛伦兹以其在电磁学与光学领域的研究工作闻名于世。他通过连续电磁场以及物质中离散电子等概念得到了经典电子理论。

洛伦兹在《麦克斯韦电磁理论及其在运动物体中的应用》中首次阐述了电子理论。他在其中还给出了电磁场对运动电荷的作用力,即洛伦兹力表达式。洛伦兹以真空(以太)中宏观的麦克斯韦方程组以及其他唯象方程为出发点,研究了物质电磁作用的微观机制。洛伦兹的电子理论很好地解释了物质中的一系列电磁现象以及物质在电磁场中运动的一些效应,这与现在的电磁场的概念十分接近。洛伦兹对以太与物质加以明确的区分,它们并不能直接产生力学联系,而只能通过电磁力相互作用。在电子理论的基础上,他还发展了运动介质中的电动力学,包括提出物体在其运动方向上会发生长度收缩的假说、引入了“局部时”的概念、获得了质量与速度之间的关系并构造了表述不同惯性系间坐标和时间关系的方程组(洛伦兹变换)。洛伦兹的研究工作后来成为狭义相对论与量子物理的基础。此外,洛伦兹在热力学、分子运动论、广义相对论以及热辐射理论等方面也有建树。

### 用通电试探线圈受到的力矩来定义磁感应强度 $B$

静电场可以用试探电荷在电场中各点受到的作用力来研究,那么研究磁场也需要引进一个可用来试探的物体。用电流元给磁感应强度下定义有缺点,因为不存在电流元。磁场除对电流元和运动电荷有作用力外,对通电线圈有力矩的作用。选用不同的试探磁场的物体,也就有不同比值定义法得到的磁感应强度  $B$ 。

下面我们以匀强磁场对通电试探线圈的作用为例来进行说明。如图 7(a)所示,矩形小线圈的  $ad$  边长为  $l_1$ , $ab$  边长  $l_2$ ,小线圈面积为  $S$ ,匀强磁场的磁感应强度为  $B$ ,线圈中的电流为  $I$ ,磁矩矢量与磁感应强度间的夹角为  $\varphi$ 。

$ad$  边和  $bc$  边所受到的安培力  $F_1 = F'_1 = BI l_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = BI l_1 \sin\theta$ ,  $F_1$  和  $F'_1$  大小相等、方向相反、

在同一直线上,合力为 0。

$ab$  边和  $dc$  边所受到的安培力  $F_2 = F'_2 = BI l_2$ ,  $F_2$  和  $F'_2$  大小相等、方向相反、不在同一直线上,形成力偶。

如图 7(b)所示,通电线圈所受的磁场力的力矩为  $M = F_2 \frac{l_1}{2} \cos\theta + F'_2 \frac{l_1}{2} \cos\theta = BI l_2 l_1 \cos\theta = BIS \cos\theta = BIS \sin\varphi$ , 当线圈平面与磁场平行时,  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , 通电小线圈所受的磁场力的力矩为  $M = BIS$ 。

利用通电试探线圈来检测磁场时,同样可以用比值定义法来定义磁感应强度  $B$  的大小为  $B = \frac{M}{IS}$ 。即

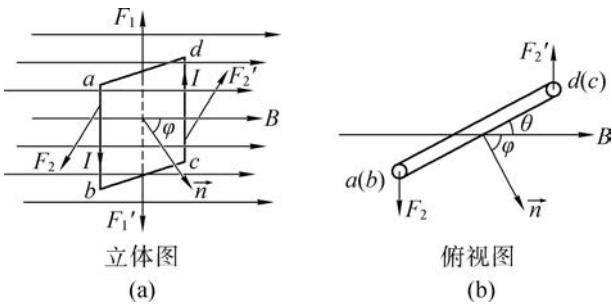


图 7

通电试探线圈所受最大磁力矩  $M$  与电流与线圈面积乘积  $IS$  之比,  $B$  的方向为线圈稳定平衡时磁矩的方向。

用磁力矩定义磁感应强度  $B$  同样适用于非均匀磁场和任意形状的线圈。因为只要试探线圈线度足够小,线圈范围内磁场可视为均匀,试探线圈的通电电流小就不影响磁场原有性质。

## 本节编写思路

本节以洛伦兹力演示实验作为情境。该实验能清晰地演示没有磁场时带电粒子的运动轨迹为直线，加磁场后带电粒子的运动轨迹为一个圆周。首先形象地显示带电粒子在匀强磁场中的圆周运动，然后理论探究带电粒子做圆周运动的原因，自主推导圆周运动的半径和周期，体现从具体到抽象的认识过程。

通过介绍质谱仪和回旋加速器的工作原理，了解直线加速器和回旋加速器面临的技术难题，体会科学与技术之间的密切关系。

通过本节学习，进一步提升学生关于电磁场的物质观念和能量观念。通过学习带电粒子在匀强磁场中的圆周运动，感受实验观察和数学推导等研究物理的基本方法。认识质谱仪利用电场、磁场控制带电粒子的运动，从而能区分同位素的原因，提高模型建构和科学论证的能力。

### 第三节 带电粒子在匀强磁场中的圆周运动

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

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

[1]

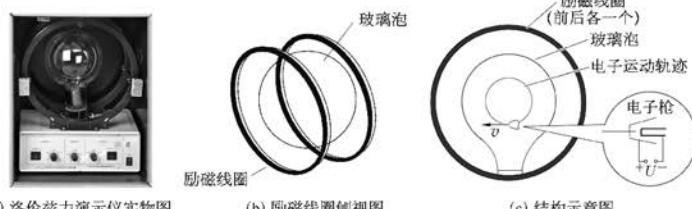


图 5-29 洛伦兹力演示仪

#### [2] 自主活动

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

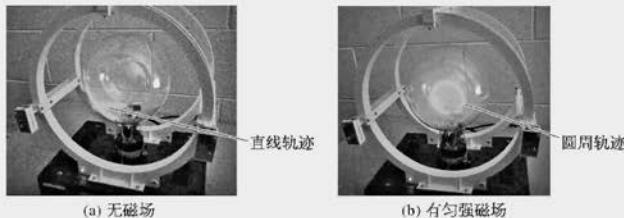


图 5-30 洛伦兹力演示仪

能力。

#### 正文解读

[1] 励磁线圈（此处也叫亥姆霍兹线圈）的“励磁”就是激发产生磁场，此处励磁线圈是一对彼此平行的共轴串联的圆形线圈。圆形线圈产生的磁场的磁感应强度沿中轴线分布较均匀。如图 8 所示，励磁线圈能够在两线圈之间近似产生与两线圈中心的连线平行的匀强磁场。

[2] 本“自主活动”是演示实验，目的是显示如带电粒子垂直入射匀强磁场，会在匀强磁场中做匀速圆周运动。

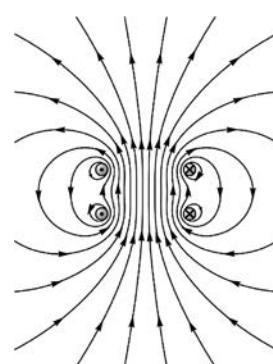


图 8

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

### ▶ 带电粒子在匀强磁场中做圆周运动的原因

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

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

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

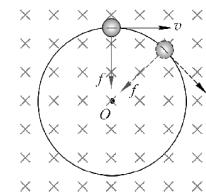


图 5-31 带电粒子在匀强磁场中运动

### ▶ 带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的半径和周期

#### [1] 自主活动

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

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

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

[1] 本“自主活动”是演示实验, 目的是:

(1) 知道在匀强磁场中影响带电粒子圆周运动半径大小的因素。

(2) 验证带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的半径与磁感应强度的大小和电子的速度有关, 体会理论必须经过实验检验的科学研究观念。

为了使学生能计算匀速圆周运动的周期和半径, 先通过自主活动分别改变磁感应强度  $B$  和出射电子的速率  $v$ , 观察电子圆周运动半径  $r$  发生变化; 再进行理论探究, 洛伦兹力提供了带电粒子做匀速圆周运动所需的向心力。

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

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

由此得出

[1]

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

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

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

[2]

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

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

[3]

### 大家谈

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

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

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

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

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

[1] 建议让学生自主推导带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的半径和周期，既巩固前面学习的知识，也能弄清各个物理量之间的关系。

[2] 带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的频率

$$f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}$$

频率  $f$  是带电粒子在磁场中运动的特征频率，也叫做回旋频率。

[3] 此处设置“大家谈”是为了比较电场和磁场对带电粒子的作用的差异。电场力和磁场力都能使带电粒子偏转，但却是两种性质不同的力。电场力和磁场力差异如下表所示。

力的名称	电场力(库仑力)	磁场力(洛伦兹力)
作用对象	静止或运动电荷	运动电荷
力的大小	$f_E = qE$ 与电荷运动速度无关	$f_B = qvB$ 与电荷运动速度有关
力的方向	与电场 $E$ 平行； 正电荷受到的电场力与 $E$ 方向相同， 负电荷受到的电场力与 $E$ 方向相反	与速度 $v$ 和磁场 $B$ 所确定的平面垂直； 先要区别正、负电荷，再用左手定则判断
作用效果	改变电荷的速度大小和方向； 可对运动电荷做功； 可改变电荷动能	只改变电荷的速度方向，不改变速度大小； 不能对运动电荷做功； 电荷动能不变

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv^2 &= qU \\ v &= \sqrt{\frac{2qU}{m}} \\ \text{所以} &= \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.3 \times 10^3}{1.67 \times 10^{-27}}} \text{ m/s} \\ &\approx 5.0 \times 10^5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

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

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

所以，质子在磁场中运动的轨道半径

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

(3) 质子做匀速圆周运动的周期

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

[1] 此处设置“拓展视野”，是为了介绍带电粒子在匀强磁场中运动的一般情况。（详见本节资料链接）

[2] 磁流体发电技术。（详见本节资料链接）

### 拓展视野

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

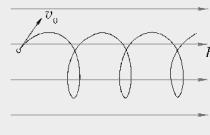


图 5-32 带电粒子做等螺距螺旋运动

### ► 洛伦兹力的应用

洛伦兹力在现代科学技术中有很多的应用，我们通过如下几个实例来说明。

#### [1] 1. 质谱仪

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

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

$$qE = qvB$$

由此得出

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

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

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

$$r = \frac{mE}{qB_0B}$$

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

$$m = \frac{qB_0Br}{E} = \frac{qB_0BX}{2E}$$

式中  $B_0$ 、 $B$ 、 $E$  均为定值。

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

样的独特质谱，质谱仪在工业生产中得到了广泛应用。

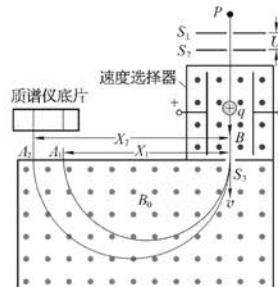


图 5-33 质谱仪工作原理

[1] 质谱仪是分离和检测不同同位素的仪器。仪器将物质在真空环境中气化、电离成带电粒子束，带电粒子通过电场和磁场的加速，选择和偏转后打到质谱仪底片上的不同位置，从而获得不同同位素的质量谱。质谱仪最重要的应用是分离同位素并测定它们的原子质量及相对丰度（同位素丰度比）。测定原子质量的精度超过化学测量方法，三分之二以上的原子的精确质量是用质谱方法测定的。由于质量和能量的当量关系，由此可得到有关核结构与核结合能的信息。用于矿石中提取的放射性衰变产物（元素）的分析测量可确定矿石的地质年代。质谱方法还可用于有机化学分析，特别是微量杂质分析和测量分子的分子量，为确定化合物的分子式和分子结构提供可靠的依据。由于化合物有着像指纹一

[1] 此处设置“大家谈”，是为了引导学生进一步理解质谱仪的原理与作用。同位素的电荷量相同，质量不同，荷质比（带电粒子的电荷量和其质量的比值）就不同。荷质比不同的同位素经同一速度选择器后进入磁场时的速率相同，进入磁场后圆周运动的轨道半径与粒子质量成正比，打到质谱仪底片上的位置因此不同。由质谱仪底片上谱线的位置即可确定粒子的质量。

[2] 要加大直线加速器的加速距离，一个办法就是把加速电场“卷起来”。利用磁场改变带电粒子的运动轨迹，让粒子转圈式地多级加速，这就引入了回旋加速器。回旋加速器是“粒子加速器”的一种。由于粒子每次经过电场时必须被加速，所以粒子每运动半个周期，电场都必须改变方向。随着带电粒子在磁场中被多级加速，带电粒子的速率越来越大。回旋加速器所依据的基本原理就是带电粒子垂直于匀强磁场做匀速圆周运动时周期  $T = \frac{2\pi m}{qB}$

与速率无关。随着带电粒子的速率逐步增大，其轨道半径也越来越大，但绕过半个圆周所用的时间是不变的，都等于回旋周期的一半即  $\frac{T}{2} = \frac{\pi m}{qB}$ ，因此每经过半个圆圈之后使电场方向反向，就能确保粒子经过缝隙时都能得到加速。

[3] 当质子的能量高于 50 MeV 时，常规的回旋加速器开始失效，因为其设计假设之一是在磁场中作圆周运动的带电粒子的周期与速率无关。但由于相对论效应，随着质子的速率增加，质子的回转周期将随速度增加，因而质子圆周运动的周期与回旋加速器交变电场的周期不再同步，从而限制质子能量的增加。另一个困难是传统的回旋加速器的磁场由大型电磁铁提供，要增大 D 形盒半径，电磁铁的面积却不可能无限增大。质子同步回旋加速器的设计与制造就是克服这两个困难的。均匀磁场的磁感应强度  $B$  和加速电场的周期不再像传统的回旋加速器那样是固定的值，而是在加速循环时随时间变化，使之与粒子回旋运动保持同步，质子沿一个圆形而不是螺旋形轨道运动。

[1]

**大家谈**

利用质谱仪为什么可区分同位素？

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

**2. 回旋加速器**

[2]

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

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

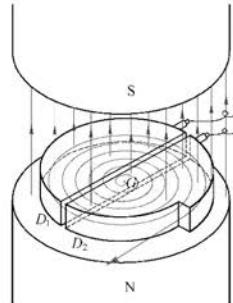


图 5-34 回旋加速器工作原理

[3]



图 5-35 我国 100 MeV 回旋加速器

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

[1]

## STSE

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



图 5-36 阿尔法磁谱仪 2

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

结构使永磁体磁

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

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

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

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

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



图 5-38 “悟空”号暗物质粒子探测卫星模型

[1] 此处设置

“STSE”，不仅仅是介绍磁场在现代科学技术中的应用，更重要的是通过阿尔法磁谱仪2的“中国心”和暗物质粒子探测卫星的成功发射和在轨运行，展现我国在科技方面取得的成就。在暗物质探测领域取得的重大突破，对促进我国空间科学领域的创新发展具有重大意义。本栏目可以激发学生的学习积极性和探究欲望，促进学生物理学科核心素养的全面发展。

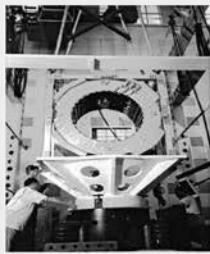


图 5-37 阿尔法磁谱仪 2  
的“中国心”

## 问题与思考解读

1. 参考解答：电子顺时针运动。运动电荷在磁场中受到的洛伦兹力提供电子做匀速圆周运动的向心力，指向圆心。由左手定则可判断正电荷应逆时针转动，从而可得电子顺时针运动，如图9所示

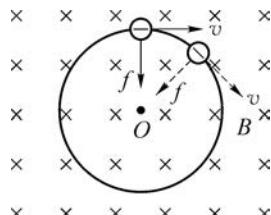


图 9

**命题意图：**引导学生判断洛伦兹力与电荷运动之间的关系。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

2. 参考解答：带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动  $qvB = m \frac{v^2}{r}$ ，可得  $r = \frac{mv}{qB}$ 。

圆周运动的周期  $T = \frac{2\pi r}{v}$ ，得到  $T = \frac{2\pi m}{qB}$ 。

由此可见，电子在磁场中做匀速圆周运动的周期与速率  $v$  无关，因此两个电子同时回到出发点

**命题意图：**了解带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的周期跟轨道半径  $r$  及速率  $v$  无关。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

3. 参考解答：(1) 正确 (2) 正确 (3) 不正确，电子束圆周的半径会增大 (4) 正确

**命题意图：**运用洛伦兹力分析带电粒子在匀强磁场中的圆周运动的半径大小。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

4. 参考解答： $f = qvB$

可得

$$v = \frac{f}{qB} = \frac{3.2 \times 10^{-15}}{1.6 \times 10^{-19} \times 4 \times 10^{-3}} \text{ m/s} = 5 \times 10^6 \text{ m/s}$$

### 问题与思考

1. 如图5-39所示是电子在匀强磁场中做匀速圆周运动的轨迹，匀强磁场的方向垂直纸面向里。电子是顺时针还是逆时针运动？试简述理由。

2. 足够大的匀强磁场中有两个电子从出发点同时射出，分别以速度  $v$  和  $2v$  垂直于磁场方向运动，哪个电子先回到出发点？试简述理由。

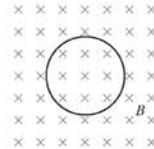


图 5-39

3. 洛伦兹力演示仪用于观察运动电子在磁场中的运动。判断下列说法是否正确，简述理由。

- (1) 不加磁场时电子束的径迹是直线。
- (2) 加磁场并调整磁感应强度可使电子束径迹形成一个圆周。
- (3) 保持磁感应强度不变，增大出射电子的速度，电子束圆周的半径减小。
- (4) 保持出射电子的速度不变，增大磁感应强度，电子束圆周的半径减小。

4. 一个电子在磁感应强度为  $4 \text{ mT}$  的匀强磁场区域中做匀速圆周运动，电子受到的洛伦兹力大小为  $3.2 \times 10^{-15} \text{ N}$ ，电子的质量为  $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 。计算电子做匀速圆周运动的速度大小、轨道半径和周期。

5. 如图5-40所示，质谱仪的离子源  $P$  产生的离子经正下方  $S_1$  和  $S_2$  之间的电场加速后射入速度选择器。速度选择器中的匀强电场  $E$  和匀强磁场  $B$  都垂直于离子速度  $v$ ，且  $E$  和  $B$  相互垂直，狭缝  $S_3$  在离子源  $P$  的正下方。离子源  $P$  射出的离子并非都能通过狭缝  $S_3$  进入磁场  $B_0$ 。试问：通过速度选择器后能射入狭缝  $S_3$  的离子速率  $v$  需满足怎样的条件？

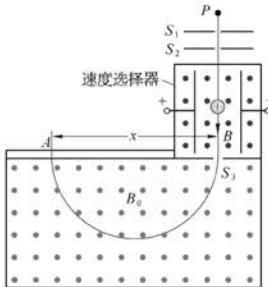


图 5-40

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

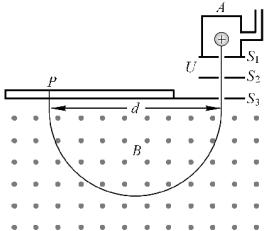


图 5-41

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

可得

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

$$\frac{9.1 \times 10^{-31} \times (5 \times 10^6)^2}{3.2 \times 10^{-15}} \text{ m}$$

$$\approx 7.11 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$T = \frac{2\pi r}{v} \approx$$

$$\frac{2 \times 3.14 \times 7.11 \times 10^{-3}}{5 \times 10^6} \text{ s}$$

$$\approx 8.93 \times 10^{-9} \text{ s}$$

**命题意图:** 运用洛伦兹力公式解答带电粒子在匀强磁场中的圆周运动问题。

**主要素养与水平:** 科学推理(II); 科学论证(II)。

**5. 参考解答:** 离子经加速后射入速度选择器, 以正离子为例, 正离子在磁场中受到向左的洛伦兹力和向右的电场力作用。粒子源  $P$  和狭缝  $S_3$  在一条直线上, 意味着正离子水平方向不发生侧向偏转, 所以能从速度选择器射出的离子应受力平衡,

即满足受到的电场力和洛伦兹力大小相等, 方向相反, 则有

$$qE = qvB$$

可得: 通过速度选择器后射入狭缝  $S_3$  的离子速率需要满足的条件是  $v = \frac{E}{B}$

**命题意图:** 了解电场力和洛伦兹力都能使带电粒子偏转, 理解质谱仪中速度选择器的原理和作用。

**主要素养与水平:** 科学推理(III); 科学本质(III)。

**6. 参考解答:** 离子在  $S_1$  和  $S_2$  之间的电场中被加速, 根据动能定理

$$qU = \frac{1}{2}mv^2 - 0 \quad ①$$

离子在匀强磁场中做匀速圆周运动,根据牛顿第二定律

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

结合几何关系,轨道半径为

$$r = \frac{1}{2}d \quad (3)$$

由①②③式可证明离子的荷质比  $\frac{q}{m} = \frac{8U}{B^2 d^2}$

**命题意图:** 理解质谱仪的基本原理,了解质谱仪如何测定带电粒子的荷质比。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用观念(IV); 能量观念(IV); 科学论证(IV)。

## 资料链接

### 带电粒子在匀强磁场中运动的一般情况

对于带电粒子的初速度  $v$  与匀强磁场的磁感应强度  $B$  成任一角度  $\phi$  的情形,如图 10(a)所示,粒子的速度可分解成平行于  $B$  的分量  $v_{\parallel} = v \cos \phi$  及垂直于  $B$  的分量  $v_{\perp} = v \sin \phi$ 。如果只有垂直分量  $v_{\perp}$ ,粒子将受到洛伦兹力的作用在垂直于磁场的平面内做匀速圆周运动,圆周半径  $r = \frac{mv_{\perp}}{qB}$ ; 如果只有平行分量  $v_{\parallel}$ ,粒子将不受洛伦兹力,因而沿磁场方向做匀速直线运动。这两方面运动合成的结果是粒子做如图 10(b)所示的等螺距螺旋运动,螺旋的螺距(即粒子在绕行一周的时间  $T$  内沿磁场方向运动的路程)  $p = v_{\parallel} T = v \cos \phi \frac{2\pi m}{qB}$ 。

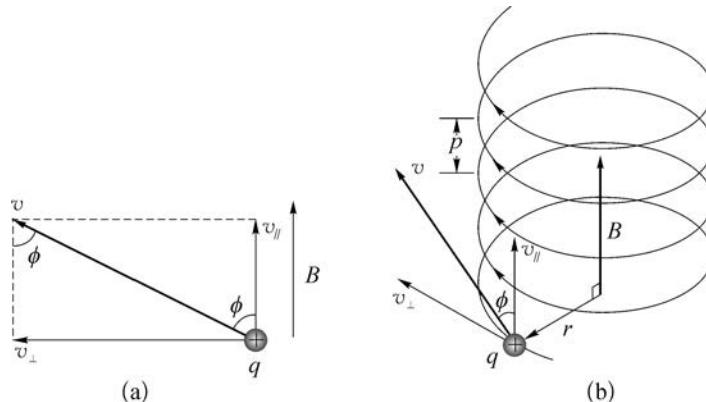


图 10

### 磁流体发电机

磁流体发电技术是一种新型的高效发电方式,由于无需经过机械转换环节,燃料利用效率显著提高。用燃料直接加热气体,使之在高温下电离成导电的离子流,然后让其在磁场中高速流动,在洛伦兹力作用下产生感应电动势,即由热能直接转换成电能。这种技术也称为等离子体发电。在几千摄氏度的高温下,这些物质中的原子和电子的运动都很剧烈,有些外层电子甚至可以脱离原子核的束缚,其结果使这些原子变成自由电子和失去电子的正离子,这就是等离子体。将等离子体以超音速的速度喷射到一个加有

强磁场的管道里面,等离子体中带有正、负电荷的高速粒子在磁场中受到洛伦兹力的作用,分别向两极偏移,如图 11 所示。于是在两极之间产生电压,用导线接入电路中就可对外供电。磁流体发电机本身的效果仅 20% 左右,但由于其排出气体温度很高,从磁流体发电机排出的气体可送往一般锅炉继续加热,蒸汽驱动汽轮机发电,组成高效的联合循环发电,总的热效率可达 50%~60%。

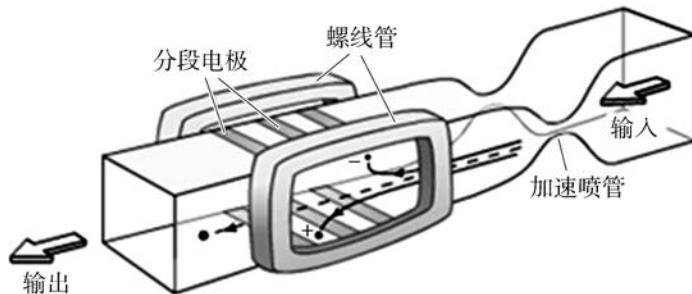


图 11

### 阴极射线荷质比的测定和电子的发现

带电粒子的电荷量与质量之比叫做荷质比。阴极射线是从高电压真空管的阴极发射出来的,是在研究低压气体放电时发现的。1894 年,英国物理学家 J. J. 汤姆孙测出阴极射线的速度比光速小三个数量级,断定阴极射线是带负电的粒子流,否定了此前认为阴极射线是电磁波的看法。

1897 年,汤姆孙做了测量阴极射线粒子荷质比的实验,由此发现了电子。汤姆孙测量阴极射线粒子荷质比的实验装置原理图如图 12 所示。玻璃管内抽成真空,在阳极  $A_1$  和阴极  $K$  之间维持数千伏的高电压,管内残存气体的离子撞击阴极引起的二次发射产生阴极射线。阳极  $A_1$  是紧固在玻璃管中的接地金属环,  $A_2$  是另一接地金属环,  $A_1$  和  $A_2$  中央的小孔使得在  $K$  和  $A_1$  之间加速的粒子通过小孔后形成窄束,打在玻璃管另一端荧光屏  $S$  的中央  $O$  点,形成光斑。玻璃管中央是电容器的两极板,接通电源后在竖直方向产生匀强电场  $E$ ,管外电磁铁在图中虚线区域内产生垂直纸面向里的匀强磁场。适当调节电场  $E$  和磁场  $B$ ,使粒子束在电场和磁场的作用下不发生偏转,以  $e$ 、 $v$  和  $m$  分别表示粒子的电荷量、速率和质量,则应有  $eE = evB$ 。由这时  $E$  和  $B$  的数值可以测出粒子流的速率  $v = \frac{E}{B}$ 。

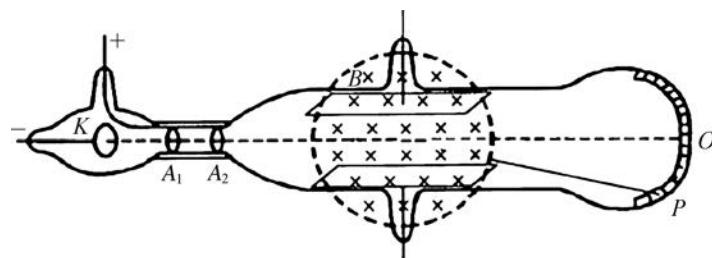


图 12

然后将电场撤去,粒子束在磁场区内将沿圆弧运动,此圆弧半径  $R = \frac{mv}{eB}$ ,因而粒子的荷质比  $\frac{e}{m} = \frac{v}{RB} = \frac{E}{RB^2}$ 。离开磁场区后,粒子束将由于惯性继续运动,射在荧光屏上的  $P$  点。半径  $R$  可以从荧光屏上光点移动的距离  $OP$  和仪器中的一些几何参量确定下来。由此,根据上式可以求出粒子的荷质比  $\frac{e}{m}$ ,其

值比当时已知的氢离子的荷质比大千余倍。汤姆孙采用不同金属材料制成阴极，在射线管中充入不同的稀薄气体，测出的所有阴极射线粒子的荷质比都很接近，进而用“电子”来命名了这种带电粒子。1909年至1913年，密立根的油滴实验排除了阴极射线粒子荷质比比氢离子的荷质比大千余倍来源于带大量电荷的可能性，最后消除了汤姆孙实验关于电子是否真正存在的种种疑虑。

参考资料：赵凯华、张维善，新概念高中物理读本，第二册，人民教育出版社，2018年11月，3.3节。

## 医用回旋加速器的工作原理简介

医用回旋加速器是用来生产医用放射性核素的设备，主要有粒子源、磁场、交变电场、粒子束流引出、轰击靶等系统组成。带电粒子在磁场和交变电场作用下，反复在磁场中做圆周运动并被交变电场反复加速，直至达到所需的粒子能量，通过粒子束流引出系统引出而轰击靶系统中的靶材料，从而获得 PET/CT（正电子发射型计算机断层成像/X 射线 CT 成像仪）成像所必需的正电子放射性核素。

PET/CT 利用图像融合技术，综合了 PET 的功能、分子代谢影像与 X-CT 精细解剖影像的优势，结合正电子放射性核素标记的多种分子“探针”的应用，在以下几方面具有极重要的作用：恶性肿瘤早期诊断与肿瘤分期分级，临床疗效评估与随访监测，良、恶性病变鉴别，协助临床治疗方案决策和放疗生物靶区确定，探索肿瘤生物学特征等；在心脑血管疾病、神经变性疾病、癫痫等疾病的诊断、评估等方面也有独特价值，临床应用不断增加。标记各种分子“探针”所必需的正电子放射性核素如<sup>18</sup>F（氟 18）、<sup>11</sup>C（碳 11）、<sup>13</sup>N（氮 13）等的半衰期一般都很短，因此依赖于医用回旋加速器的即时生产和制备。随着我国 PET/CT 应用的迅速发展，对医用回旋加速器的需求也快速增长。

## 小结

### · 基本概念和基本规律

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

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

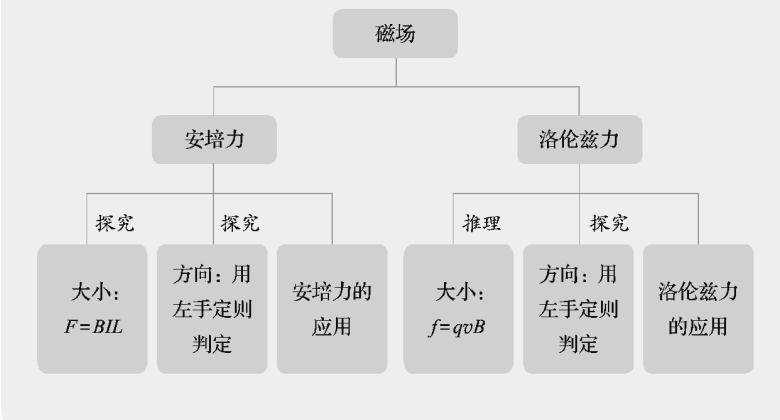
### · 基本方法

通过研究安培力与电流、导线长度、磁感应强度的定量关系, 认识控制变量法。

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

在得出安培力和洛伦兹力的过程中, 认识实验归纳与理论演绎相结合的方法。

### · 知识结构图



## 复习与巩固解读

26 第五章 磁场

**1. 参考解答：**闭合开关，导体棒中的电流由  $B \rightarrow A$ ，根据左手定则可判断安培力方向向右，导体细棒由静止变为向右运动。这一现象中电能通过安培力做功转化为导体细棒的机械能

**命题意图：**通过实验认识安培力，能判断安培力的方向。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(Ⅱ)；能量观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

**2. 参考解答：**磁场的方向与通电导线的电流方向不一定需要垂直。安培力的方向既与磁场的方向垂直又与通电导线的电流方向垂直，安培力的方向垂直于磁场和电流所确定的平面

**命题意图：**知道安培力的方向垂直于电流和磁感应强度确定的平面。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

**3. 参考解答：**电子束的运动轨迹会发生偏转 电子束向下偏转

**命题意图：**知道通电直导线周围存在磁场，了解带电粒子在磁场中的偏转。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

**4. 参考解答：**虚线框1内磁场垂直纸面向里、虚线框2内磁场垂直纸面向外；虚线框2内磁场垂直纸面向里、虚线框3内磁场垂直纸面向外；虚线框内交替改变磁场的方向：使闭合电路的左侧到达的区域磁场总是垂直纸面向里，右侧到达的区域磁场总是垂直纸面向外。实际生活中磁浮列车的驱动原理与此原理相同

**命题意图：**用左手定则判断安培力的方向，了解安培力在生产生活中的应用。

### 复习与巩固

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

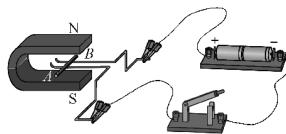


图 5-42

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

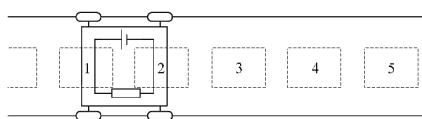


图 5-43

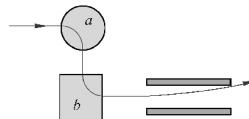


图 5-44

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

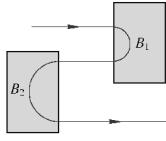


图 5-45

**主要素养与水平：**

运动与相互作用观念(Ⅲ);科学推理(Ⅲ);科学本质(Ⅱ)。

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

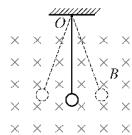


图 5-46

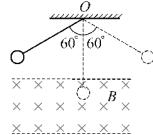


图 5-47

8. 如图 5-47 所示, 带电小球质量为  $m$ , 用细线悬挂于  $O$  点并在竖直平面内摆动, 最大摆角为  $60^\circ$ , 磁场垂直于小球摆动的平面向里。当小球从左边最大摆角处摆到最低点时, 细线上的拉力恰为零。试问小球带正电还是带负电? 小球从右边最大摆角处摆到最低点时, 细线上的拉力是否仍为零? 简述理由。

9. 质量为  $10 \text{ g}$ 、电荷量为  $+80 \mu\text{C}$  的带电小球以  $20 \text{ km/s}$  的速度沿直线匀速通过水平方向的匀强磁场, 带电小球运动的速度方向与磁场方向垂直。求匀强磁场的磁感应强度大小。 $(g$  取  $10 \text{ m/s}^2$ )

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

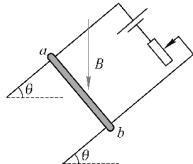


图 5-48

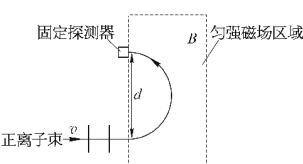


图 5-49

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

- (1) 该匀强磁场的方向如何?

**5. 参考解答:** 带电粒子带负电荷  $a$  区域磁场垂直纸面向里,  $b$  区域磁场垂直纸面向外

**命题意图:** 用左手定则判断洛伦兹力的方向。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用观念(Ⅲ);科学推理(Ⅱ)。

**6. 参考解答:**  $B_1$  区域磁感应强度更大  $B_1$  垂直纸面向里,  $B_2$  垂直纸面向外  $t_1$  小于  $t_2$

$$qvB = m \frac{v^2}{r} \text{ 由此得}$$

出  $B = \frac{mv}{qr}$ 。同一个电子  $m$ 、 $q$  相同, 带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动, 速率  $v$  不变, 则  $B \propto \frac{1}{r}$ 。由图像可看出  $r_1 < r_2$ , 所以  $B_1 > B_2$

由洛伦兹力提供圆周运动所需的向心力, 根据左手定则可得。 $B_1$  垂直纸面向里,  $B_2$  垂直纸面向外

$$r = \frac{mv}{qB} \text{ 代入 } T = \frac{2\pi r}{v}, \text{ 可得 } T = \frac{2\pi m}{qB}, \text{ 在磁场区域所花的时间 } t = \frac{1}{2}T. \text{ 同一个电子 } m, q \text{ 相同, 则}$$

$$T \propto \frac{1}{B}. \text{ 因为 } B_1 > B_2, \text{ 所以 } t_1 < t_2$$

**命题意图:** 运用洛伦兹力公式计算带电粒子在匀强磁场中圆周运动的半径和周期。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用观念(Ⅱ);科学推理(Ⅲ)。

**7. 参考解答:** 速率不变 周期不变

运动的带电塑料小球在匀强磁场中受到的洛伦兹力始终与位移垂直, 故洛伦兹力不做功。只有重力

做功，机械能守恒，所以当小球每次通过平衡位置时，动能相同，速率不变。根据左手定则可判断洛伦兹力始终沿细线方向，简谐运动的回复力不变，故小球摆动的周期不变。

**命题意图：**运用洛伦兹力和力学知识，结合能量观念综合分析带电小球在匀强磁场中的周期运动。

**主要素养与水平：**模型建构(Ⅲ)；科学推理(Ⅳ)。

**8. 参考解答：**小球带正电 细线上的拉力不为零，拉力一定变大

小球从左边最大摆角处摆到最低点时，细线上的张力恰为零，说明最低点受力情况如图 13 所示，洛伦兹力竖直向上，根据左手定则可判断小球带正电。

当小球从右边最大摆角处摆到最低点时，速率仍为  $v$ ，对小球受力分析如图 14 所示，小球所受张力、洛伦兹力和重力的合力提供向心力。因此细线上的拉力一定变大。

**命题意图：**运用洛伦兹力和力学知识，结合能量观念综合分析带电小球经匀强磁场区域的圆周运动。

**主要素养与水平：**科学推理(Ⅲ)。

**9. 参考解答：**由  $mg = qvB$

$$B = \frac{mg}{qv} = \frac{10 \times 10^{-3} \times 10}{80 \times 10^{-6} \times 20 \times 10^3} \text{ T} = 6.25 \times 10^{-2} \text{ T}$$

**命题意图：**运用洛伦兹力和力学知识，分析带电小球做匀速直线运动的原因。

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

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

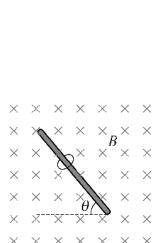


图 5-50

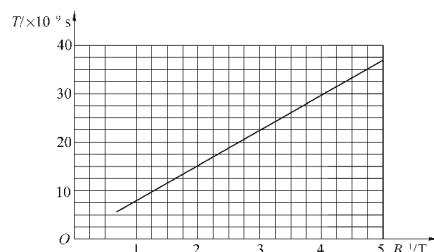


图 5-51

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

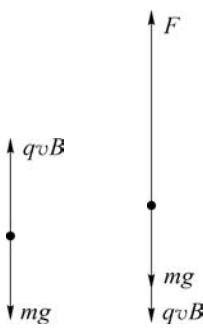


图 13

图 14

**主要素养与水平:** 运动与相互作用观念(Ⅱ); 科学论证(Ⅱ)。

**10. 参考解答:**  $a \rightarrow b$  3.75 A

画出导体棒  $ab$  的侧视图, 根据电源正负极可得导体棒内电流方向  $a \rightarrow b$ , 根据左手定则可判断通电导体棒受到水平向右的安培力  $F$  作用

$$\text{由 } mg \sin \theta = F \cos \theta \text{ 和 } F = BIL \text{ 可得, } I = \frac{mg \tan \theta}{BL} = \frac{10 \times 10^{-3} \times 10 \times \tan 37^\circ}{0.2 \times 0.1} \text{ A} \approx 3.75 \text{ A}$$

**命题意图:** 运用安培力和共点力平衡知识分析解决问题, 加深对安培力的认识。

**主要素养与水平:** 科学推理(Ⅲ); 科学论证(Ⅲ)。

**11. 参考解答:** (1) 匀强磁场的方向垂直纸面向里 (2)  $r = \frac{mv}{qB}$ ,  $d = 2r = \frac{2mv}{qB}$  可知在  $v$ 、 $q$ 、 $B$  一定时, 离子的质量  $m$  越大, 圆周运动的直径越大

定性描绘出这些正离子在磁场中的运动轨迹如图 15 所示

为了在固定探测器上探测到这些离子, 即圆周运动的直径  $d$  保持不变, 随着离子的质量  $m$  的增大, 匀强磁场的磁感应强度  $B$  也需增大

**命题意图:** 了解带电粒子在匀强磁场中的偏转及其应用, 知道质谱仪为何可区分同位素。

**主要素养与水平:** 科学推理(Ⅲ); 科学论证(Ⅲ); 科学本质(Ⅲ)。

**12. 参考解答:** 对小环进行受力分析, 根据平衡条件可得

$$qvB = mg \cos \theta$$

$$v = \frac{mg \cos \theta}{qB}$$

**命题意图:** 运用洛伦兹力和共点力平衡知识分析解决问题, 加深对洛伦兹力的认识。

**主要素养与水平:** 科学推理(Ⅲ); 科学论证(Ⅲ)。

**13. 参考解答:**  $qvB = m \frac{v^2}{r}$ , 由此得出  $B = \frac{mv}{qr}$ 。将  $v = \frac{2\pi r}{T}$  代入, 可得

$$BT = 2\pi \frac{m}{q}$$

可由图像求出斜率  $k = \frac{(22.5 - 8)}{3 - 1} \times 10^{-9} \text{ T} \cdot \text{s} \approx 7 \times 10^{-9} \text{ T} \cdot \text{s}$  (保留一位有效数字)

由  $k = \frac{T}{B^{-1}} = BT = 2\pi \frac{m}{q}$ , 可得带电粒子的电荷量与质量之比

$$\frac{q}{m} = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{7 \times 10^{-9}} \text{ C/kg} \approx 9 \times 10^8 \text{ C/kg}$$

**命题意图:** 结合图像分析提高学生综合运用知识以及分析和解决问题的能力。

**主要素养与水平:** 科学推理(Ⅳ); 科学论证(Ⅲ)。

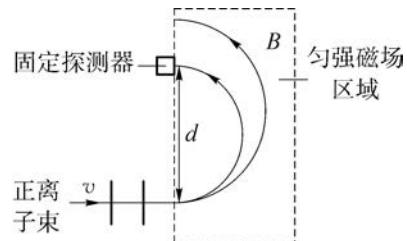


图 15

## 第三部分 本章练习部分解读

### 第一节 安培力

1. (a) 图中安培力  $F$  的方向垂直于纸面向里 (b) 图中通电导线电流  $I$  的方向见图 16(a) (c) 图中通电螺线管所连接电源的正负极见图 16(b)

2.  $0 \text{ N} \leq F \leq 0.15 \text{ N}$

当通电导线与磁感应强度  $B$  的方向垂直时, 安培力  $F$  最大,  $F=BIL$ ; 当导线的方向与磁感应强度  $B$  的方向平行时, 导线受力为零

3. 向左

矩形线框处于长直通电导线形成的非匀强磁场中, 左侧处的磁感应强度大于右侧处的磁感应强度, 因此左侧导线受到向左的安培力大于右侧导线受到向右的安培力, 则矩形线框所受安培力合力的方向向左

4.  $0.16 \text{ N}$ , 方向为  $y$  轴的正方向

每根通电直线段所受安培力

$$F=BIL=40 \times 10^{-3} \times 2 \times 2 \text{ N}=0.16 \text{ N}$$

金属丝所受安培力的合力

$$F_{\text{合}}=2F\cos\theta=2 \times 0.16 \times \cos 60^\circ \text{ N}=0.16 \text{ N}$$

方向为  $y$  轴的正方向, 如图 17 所示

5. 圆盘逆时针方向转动。磁体在图中圆盘处产生大致垂直向里的磁场。接通电源后, 有电流从转轴通过金属圆盘流向汞液槽, 圆盘通过电流的位置始终受到向右的安培力, 使之逆时针不停转动

6. 从上往下看, 线圈逆时针转动, 同时靠近磁铁

7. 导体应东西方向放置; 所需最小电流为  $2.5 \times 10^4 \text{ A}$ , 方向由西向东。这个实验不可能成功, 因为地磁场磁感应强度太小, 故需要很大的直流电流, 但实验中无法提供这样的电流

$$BIL=L\lambda g$$

$$I=\frac{\lambda g}{B}=\frac{45 \times 10^{-3} \times 10}{18 \times 10^{-6}} \text{ A}=2.5 \times 10^4 \text{ A}$$

8. 先减小后增大, 最后大小不变

开始时, 摩擦力沿轨道平面向上, 在磁感应强度  $B$  逐渐增大的初始阶段, 金属杆  $ab$  的受力如图 18 所示。由力的平衡知:

$F_f+BIL=mg \sin \alpha$ , 故  $B$  增大时,  $F_f$  减小

当  $BIL=mg \sin \alpha$  时,  $F_f=0$

当  $B$  继续增大时, 安培力超过重力平行于导轨平面的分力, 即  $BIL > mg \sin \alpha$  时,  $F_f$  方向变为沿轨道平面向下, 故  $BIL=mg \sin \alpha + F_f$ , 故  $B$  增大时,  $F_f$  增大

若  $B$  继续增大, 可使安培力大于  $mg \sin \alpha$  与最大静摩擦力之和, 导体棒将沿轨道平面向上加速运动,

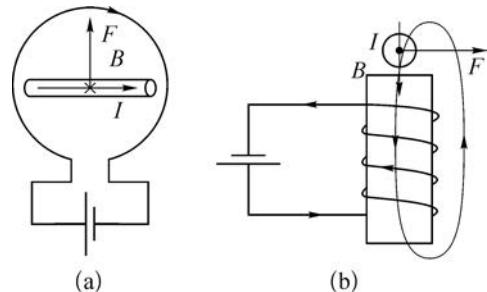


图 16

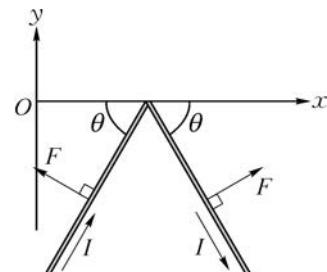


图 17

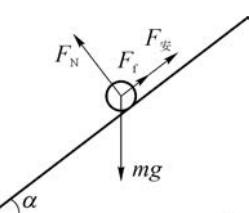


图 18

摩擦力  $F_f$  大小不变

#### 9. 0.392 T

线圈通电流后,  $ab$  边和  $cd$  边在磁场中的部分所受安培力沿水平方向等值反向而彼此平衡; 由于天平两臂等长, 且为使天平重新平衡, 左盘需再加 8 g 砝码, 说明  $bc$  边安培力的方向是由竖直向上变为竖直向下, 所以右盘所受的合力为原  $bc$  边  $n$  匝导线安培力的 2 倍, 应该等于天平左端增加的砝码的重力。设  $bc$  边长为  $L$ , 通过线圈的电流为  $I$ , 匀强磁场的磁感应强度为  $B$ , 天平左端增加的砝码质量为  $\Delta m$ , 则有

$$2nBIL = \Delta mg$$

$$B = \frac{\Delta mg}{2nIL} = \frac{8 \times 10^{-3} \times 9.8}{2 \times 10 \times 0.1 \times 0.1} \text{ T} = 0.392 \text{ T}$$

#### 10. 5 A

如图 19 所示, 金属棒向外偏转的过程中, 受重力  $mg$ 、导线拉力  $F_T$ 、安培力  $F$  共三个力的作用, 其中导线的拉力不做功, 由动能定理得  $W_F + W_G = 0$

其中

$$W_F = Fl \sin \theta = BIl^2 \sin \theta$$

$$W_G = -mg l (1 - \cos \theta)$$

金属棒中的电流

$$I = \frac{mg(1 - \cos 37^\circ)}{Bl \sin 37^\circ} = \frac{50 \times 10^{-3} \times 10 \times (1 - 0.8)}{\frac{1}{3} \times 0.1 \times 0.6} \text{ A} = 5 \text{ A}$$

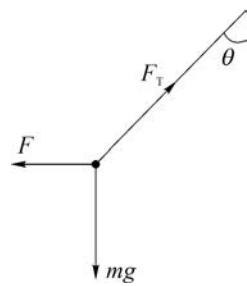


图 19

## 第二节 洛伦兹力

### 1. 安培力 洛伦兹力 宏观表现 左手

#### 2.

说 法	判断	若不正确请说明理由
带电粒子在磁场中运动时, 一定会受到洛伦兹力的作用	错误	如电荷运动方向与磁场方向在同一直线上, 则运动电荷不受洛伦兹力的作用
洛伦兹力的方向垂直于磁感应强度 $B$ 和运动电荷的速度 $v$ 决定的平面, 洛伦兹力对带电粒子不做功	正确	
用左手定则判断洛伦兹力方向时, 四指指向电荷的运动方向	错误	四指指向正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向

#### 3. B

#### 4. 东

由地磁场有指向地理北极的磁场分量和正电荷运动的方向, 根据左手定则可判断洛伦兹力方向向东

#### 5. 1 : 4

$$f = qvB; \text{ 所以, } \frac{f_{\text{甲}}}{f_{\text{乙}}} = \frac{qvB}{2q \cdot 2v \cdot B} = \frac{1}{4}$$

#### 6. $F = qE = 4 \times 10^{-9} \times 2 \times 10^2 \text{ N} = 8 \times 10^{-7} \text{ N}$

$$f = qvB = 4 \times 10^{-9} \times 3 \times 10^5 \times 0.8 \text{ N} = 9.6 \times 10^{-4} \text{ N}$$

7. 电子在匀强磁场中受洛伦兹力作用发生偏转,根据左手定则可判断电子受到的洛伦兹力指向QR边,故电子并不沿着直线通过导电薄片。电子倾向于向QR边运动

8. 如图 20(a)所示

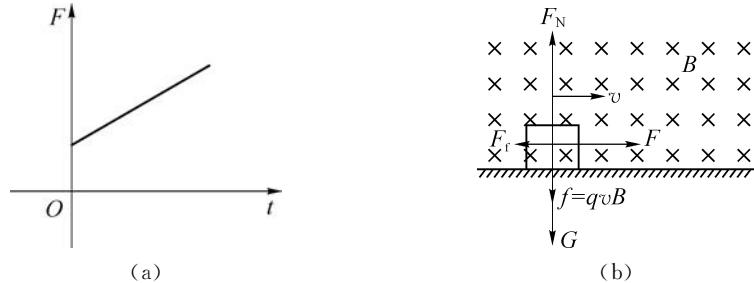


图 20

物块受力如图 20(b)所示

$$F - F_f = ma, F_N = G + f, f = qvB = qBat, F_f = \mu F_N$$

$$F - \mu(mg + qBat) = ma$$

$$F = m(a + \mu g) + \mu qBat$$

因为  $m(a + \mu g)$  和  $\mu qBa$  均为常量,所以  $F$  随时间  $t$  呈线性关系

9. > > =

当桌面右边存在磁场时,由左手定则可知,带正电的小球在飞行过程中受到斜向右上方的洛伦兹力作用,此力在水平方向的分量向右,竖直方向的分量向上,竖直方向上的加速度  $a < g$ ,可得  $t_1 > t_2$ ;由于洛伦兹力在水平方向有向右的分量,小球有水平向右的加速度,可得  $x_1 > x_2$ ;又因为运动过程中洛伦兹力不做功,故根据机械能守恒可得  $v_1 = v_2$

10. 负电荷  $\frac{mg \cos \theta}{qB}$   $\frac{m^2 g \cos^2 \theta}{2q^2 B^2 \sin \theta}$

当物体沿斜面加速下滑时,随着速度的增加,洛伦兹力逐渐增大。为了使物体离开斜面,洛伦兹力的方向必须垂直于斜面向上,由此可判断带电物体带负电

物体沿斜面下滑时,受力如图 21 所示

由牛顿第二定律得:  $mg \sin \theta = ma$ , 可得加速度  $a = g \sin \theta$

洛伦兹力  $f = qvB$ , 当物体离开斜面时  $F_N = 0$ , 即

$$qvB = mg \cos \theta$$

因此可得,物体离开斜面时的速度大小  $v = \frac{mg \cos \theta}{qB}$

由匀变速直线运动的速度位移公式可得

$$v^2 - 0 = 2aL$$

可得物体在斜面上滑行的距离

$$L = \frac{v^2}{2a} = \frac{m^2 g \cos^2 \theta}{2q^2 B^2 \sin \theta}$$



图 21

### 第三节 带电粒子在匀强磁场中的圆周运动

1. D

## 2. 减小 增大

粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动,根据牛顿第二定律,由  $qvB = m \frac{v^2}{r}$  可得  $r = \frac{mv}{qB}$ 。如果保持出射

电子的速度不变,增大磁感应强度,圆周运动半径减小;如果保持磁感应强度不变,增大出射电子的速度,圆周运动半径增大

## 3. 中心 电场

加速器要对离子进行多次加速,当离子达到预期的速率后,用特殊装置把它们引出。由  $qvB = m \frac{v^2}{r}$

可得  $r = \frac{mv}{qB}$ ,则被加速离子的速率越大,圆周运动的半径越大。因此离子只能由加速器的中心附近进入加速器,沿螺线轨迹逐渐趋近于盒的边缘,从边缘离开加速器;在磁场中,由于洛伦兹力并不做功,离子不能从磁场获得能量,而离子通过电场时电场力对离子做正功,故离子是从电场中获得能量

## 4. 负电 =

由图知磁场的方向向里,根据左手定则判断出 M 带负电荷,N 带正电荷。粒子在磁场中运动半周,其运行时间为周期的一半,由  $Bqv = m \frac{v^2}{r}$  及  $T = \frac{2\pi r}{v}$  可得  $T = \frac{2\pi m}{qB}$ ,所以 M 的运行时间等于 N 的运行

时间

$$5. 2 \quad \frac{1}{2}$$

设磁场的边长为  $l$ ,如图 22 所示,粒子从 c 点离开,其半径为  $r_c = l$ ,粒子从 d 点离开,其半径为  $r_d = \frac{1}{2}l$ ,则  $r_c = 2r_d$ ;由  $T = \frac{2\pi m}{qB}$ ,根据圆心角求出运行时间  $t = \frac{\theta}{2\pi}T$ 。运行时间  $t_c = \frac{T}{4}$ ,  $t_d = \frac{T}{2}$ ,则  $t_c = \frac{1}{2}t_d$

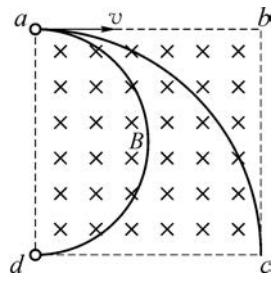


图 22

## 6. 粒子带正电 带电粒子的运动方向:由 A 到 B

带电粒子在磁场中会受洛伦兹力作用,这使粒子运动方向发生偏转。根据洛伦兹力提供曲线运动的向心力指向圆心(曲率中心),即可大致确定洛伦兹力的方向。匀强磁场的方向垂直纸面向里,使用左手定则时,四指指向即为正电荷运动的方向或与负电荷运动方向相反,可得带正电粒子运动方向由 A 到 B 或者带负电粒子运动方向由 B 到 A。因为带电粒子穿过薄金属箔后速度减小(克服阻力做功,能量减小),根据带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的半径  $r = \frac{mv}{qB}$ ,带电粒子速度减小,则圆周运动的半径

随之减小,故可判断粒子运动方向是由 A 到 B,粒子带正电

## 7. 乙 丙

甲下落过程中只有重力做功;乙下落过程中重力和电场力都做正功;丙下落过程中洛伦兹力不做功,只有重力做功。由于从同一高度落到同一水平地面上,所以三个球的重力做功相同,乙有额外的电场力做正功,所以乙球下落速度最大。甲做自由落体运动;乙在竖直方向做自由落体运动、在水平方向做初速度为零的匀加速运动;丙刚进入磁场区域时,受重力和向右的洛伦兹力而做曲线运动,其速度有水平向右的分量,所以丙在竖直方向除受到重力作用外,还有洛伦兹力竖直向上的分力,导致下落的加速度小于重力加速度,下落时间变长。故下落时间最长的为丙

$$8. v = \frac{qBR}{m} \quad E_k = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m}$$

带电粒子达到预期速率时,其做圆周运动的半径也达到最大。带电粒子在磁场中受到的洛伦兹力提供带电粒子做匀速圆周运动所需的向心力。

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

$$v = \frac{qBR}{m}$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2B^2R^2}{2m}$$

**9.**  $2 \times 10^5 \text{ m/s}$     $5.2 \times 10^{-3} \text{ m}$

质子和氘核的电荷量相同,都为  $e$ ,但质量不同,氘核的质量是质子的 2 倍。能通过速度选择器的粒子所受电场力和洛伦兹力大小相等、方向相反,由此得出

$$evB_1 = eE$$

所以  $v = \frac{E}{B_1} = \frac{1.2 \times 10^5}{0.6} \text{ m/s} = 2 \times 10^5 \text{ m/s}$

粒子进入磁场  $B_2$  后做圆周运动,洛伦兹力提供向心力,则有

$$evB_2 = m \frac{v^2}{R}, \text{ 得 } R = \frac{mv}{B_2e}$$

设质子质量为  $m$ ,则氘核质量为  $2m$ ,故

$$d = 2(R_{\text{氘}} - R_{\text{质子}}) = 2\left(\frac{2mv}{B_2e} - \frac{mv}{B_2e}\right) = \frac{2mv}{B_2e} = \frac{2 \times 1.67 \times 10^{-27} \times 2 \times 10^5}{0.8 \times 1.6 \times 10^{-19}} \text{ m} \approx 5.2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

## 第四部分 本章实验与活动部分解读

### 1. 自主活动 磁场对通电导体的作用

**参考解答:** 通电导体棒受到了力的作用改变了导体棒的运动状态。通电导体棒受到重力、支持力、磁场力(安培力)和摩擦力的作用,施力物体分别为地球、导轨、磁场(产生磁场的蹄形磁铁)和导轨

**命题意图:** 通过磁场对通电导体作用的实验,有助于提升学生关于磁场的物质观念、运动与相互作用观念。

### 2. 自主活动 探究安培力的方向、磁场方向和电流方向三者间的关系

**参考解答:**

实验序号	磁场方向	电流方向	安培力方向
1	向上	垂直纸面向里	向右
2	向上	垂直纸面向外	向左
3	向下	垂直纸面向里	向左
4	向下	垂直纸面向外	向右

安培力的大小与磁感应强度大小、电流大小、磁场中通电导线长度、磁场方向与电流方向间夹角有关。

升高电源电压,静止的导体棒通电后运动方向不变,导体棒离开导轨时的速度更快(可通过导体棒平抛运动的水平距离更远来定性判断);降低电源电压,静止的导体棒通电后运动方向不变,导体棒离开导轨时的速度更慢。电源电压过低,通电后导体棒仍静止

**命题意图:**通过探究式学习逐步培养学生收集信息和处理信息的能力,培养运用证据进行描述、解释、猜想和模型建构的能力。

### 3. 自主活动 定量探究安培力的大小

**参考解答:**改变磁场方向与线圈电流方向间的夹角,安培力的大小会发生变化。当电流与磁场方向垂直时,安培力最大;当电流的方向与磁场的方向平行时,安培力为零。若磁感应强度  $B$  的方向与电流方向成  $\theta$  角,根据矢量的运算法则, $B$  可以分解为与电流方向垂直的分量  $B_{\perp}$  和与电流方向平行的分量  $B_{\parallel}$ 。其中  $B_{\parallel}$  对通电导线没有作用力,导线所受的安培力只是由  $B_{\perp}$  产生的,因此安培力的大小会随磁场方向与电流方向间夹角的变化而变化

**命题意图:**体会运用从特殊到一般的思维方法和等效替代的思想方法进行科学推理,研究安培力的大小。

### 4. 自主活动 探究洛伦兹力的方向

**参考解答:**电子束的偏转方向就是电子受力的方向,即运动电子所受的洛伦兹力的方向。洛伦兹力的方向垂直于磁场方向与电荷运动方向所成的平面,三者之间的关系可用“左手定则”来判断

实验序号	电子运动方向	磁场方向	电子束的偏转方向
1	向右( $A \rightarrow B$ )	垂直纸面向里	向下
2	向右( $A \rightarrow B$ )	垂直纸面向外	向上

**命题意图:**通过磁场对运动电荷的作用实验,有助于提升学生关于磁场的物质观念、运动与相互作用观念。

### 5. 自主活动 带电粒子在匀强磁场中做圆周运动

**参考解答:**洛伦兹力提供了电子做匀速圆周运动所需的向心力。由于洛伦兹力始终与电子的速度方向垂直,不改变电子速度的大小,所以电子的动能不会改变(或洛伦兹力对电子不做功,电子的动能不会改变)

**命题意图:**回顾物体做匀速圆周运动的条件,体会洛伦兹力始终与运动方向垂直不做功,不影响带电粒子运动速度的大小,有助于提升学生关于磁场的能量观念。

### 6. 自主活动 带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的半径

**参考解答:**若匀强磁场反向,洛伦兹力的方向也随之反向,向左射出的电子束径迹向左下方偏转,不能在玻璃泡内做圆周运动;若使电子沿着磁场方向入射匀强磁场,电子不受洛伦兹力作用,即使存在磁场电子运动径迹仍是一条直线

**命题意图:**根据洛伦兹力的知识预测电子束的径迹形状并与实验结果进行比较,体会理论必须经过实验检验的科学研究方法。

# 第六章 电磁感应定律

## 第一部分 整 章 分 析

### 学习目标

1. 通过楞次定律和法拉第电磁感应定律的科学探究,进一步掌握分析与归纳实验证据的方法,提升对实验结果定性和定量分析的能力。
2. 理解楞次定律和法拉第电磁感应定律的物理意义。能以能量的观点解释楞次定律,深化能量观,了解楞次定律和电磁感应定律在生产生活中的应用。

### 编写意图

课程标准中对本章的“内容要求”为:

2. 2. 1 探究影响感应电流方向的因素,理解楞次定律。
2. 2. 2 通过实验,理解法拉第电磁感应定律。

关于电磁感应的阐述,遵循由浅入深、从定性到定量的原则。教材必修三第十一章初步介绍了电磁感应现象及感应电流产生的条件,本章在了解电磁感应现象及感应电流产生条件的基础上用实验探究楞次定律,学习判别感应电流方向的方法。本章还将深入讨论电磁感应现象中感应电动势与磁通量变化之间的定量关系,通过对法拉第电磁感应定律的科学探究,深入理解其物理意义。展示结合实验归纳和理论演绎研究问题的物理方法。通过介绍了法拉第电磁感应定律的简单应用体现学习物理学的意义。

本章核心概念是磁通量的变化率及感应电动势,重要实验规律是楞次定律和法拉第电磁感应定律。

本章的学习有助于深化实验探究能力,提升物质观、运动和相互作用观和能量观。

本章学习共需要 8 课时。第一节 2 课时,第二节 6 课时。

## 第六章 电磁感应定律

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

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

## 本节编写思路

本节内容建立在教材必修三第十一章第三节“电磁感应现象”的基础之上。虽然本节教学所用的实验器材与必修三第十一章第三节基本相同，但是为确定“感应电流方向”，仍有必要利用这些实验器材做进一步探究相关实验。

本节重点为运用楞次定律判断感应电流的方向。学习楞次定律要体现探究过程。在分组进行“探究影响感应电流方向的因素”实验的过程中，学生将经历提出问题，根据问题制定科学探究的实验方案，正确操作实验器材，获得可靠的实验数据，通过分析数据发现规律，并能恰当使用证据推出物理结论或质疑已有结论，进而通过归纳形成简洁的、具有普遍意义的结论。

探究楞次定律的过程涉及磁场的方向、磁通量的变化、线圈的绕向、电流的方向等多种因素，相互之间的逻辑关系比较复杂。楞次定律具有较强的抽象性和概括性。理解楞次定律和应用楞次定律判断感应电流的方向有较大的难度；因此，楞次定律成为本节教学的难点。

本节教学应重视理解楞次定律的物理意义。从磁通量变化角度看，感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化；从导体跟磁体的相对运动角度看，感应电流的磁场总是阻碍导体间的相对运动。

## 正文解读

- [1] 为了便于观察铝块或磁铁块在管内下落的情况，长铜管和塑料管的中部沿竖直方向都开了若干个孔。  
[2] 中学实验室常用的J0409型灵敏电流计测量范围为 $\pm 300 \mu\text{A}$ 。1节干电池串联几十千欧的电阻，则通过灵敏电流计的电流处在测量范围内。为了更好地保护灵敏电流计，在实验之前，常采用将干电池的两极通过导线与灵敏电流计两个接线柱瞬间接触的方法判断电流方向与灵敏电流计指针偏转方向之间的关系。

### 第一节 楞次定律

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

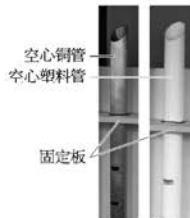


图6-1 竖直放置的空心钢管和塑料管

那么，感应电流的方向是由什么决定的呢？下面我们通过一个实验来探究一下。

#### 学生实验

##### 探究影响感应电流方向的因素

###### 提出问题

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

###### 实验原理与方案

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

###### 实验装置与方法

- [2] 首先要确定灵敏电流计电流流入方向与指针的偏转方向之间的关系，可根据如图6-2所示的电路图观察电路中的电流方向已知时相应的灵敏电流计指针偏转方向。此后就可以从灵敏电流计指针的偏转方向确定电流的流入方向。图6-2中限流电阻取几十千欧。采用瞬间闭合开关的方法，尽可能缩短灵敏电流计的通电时间，以保护灵敏电流计。如图6-3所示，用导线将灵敏电流计和感应线圈相连。

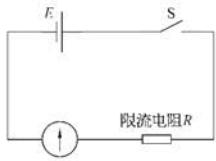


图 6-2 确定电流计偏转方向的电路图

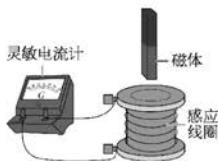


图 6-3 研究感应电流的方向的实验装置

## 实验操作与数据收集

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

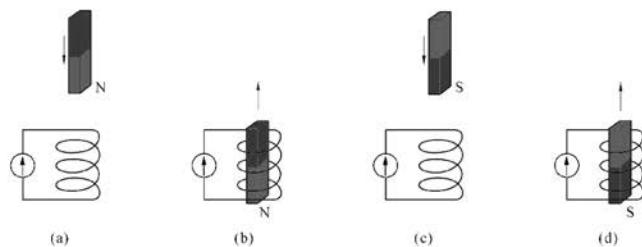


图 6-4 研究感应电流方向的实验过程

表 6-1 实验记录表

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

## 数据分析

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

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

应电流本身也会产生磁场, 根据“右手螺旋定则”可以判断感应电流产生的磁场方向, 在表 6-1 实验记录表编号为④的一行第 1 列中填入“感应电流的磁场方向”, 并相应填写该行其余四列的内容。比较实验记录表编号为②和④的两行各列实验结果分析的内容, 发现“原磁场磁通量的变化”与“感应电流的磁场方向”之间存在一定的逻辑关系, 于是在编号为⑤的那一行第 1 列中填入“感应电流磁场的方向与原磁场磁通量的变化之间的关联”, 并相应填写该行其余四列的内容。通过分析归纳得出“感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化”的结论, 即楞次定律。

[1] 按照教材图 6-4 所示的实验过程, 依次将条形磁体的 N 极和 S 极先后插入和拔出感应线圈, 将观察到的实验现象以及分析、推理和结论记录在表 6-1 中。

根据条形磁体的极性判断感应线圈内原磁场磁感应强度  $B$  的方向, 填入表 6-1 编号为①的一行中。根据灵敏电流计指针的偏转方向确定线圈中感应电流的方向, 填入表 6-1 编号为③的一行中。根据上述实验中观察到的现象, 发现①和③两行中各列实验现象之间并没有直接的逻辑关系。

由必修教材三第一章第三节的学习已知道闭合线圈内磁通量的变化是产生感应电流的必要条件, 由此引导学生在表 6-1 实验记录表编号为②的一行第 1 列中填入“原磁场磁通量的变化”, 相应填写该行其余四列的内容。感

[1] 正确理解楞次定律需要知道闭合电路所处的空间存在两个磁场,即原磁场(导致感应电流的磁场)和感应电流的磁场。能够区分“原磁场的方向”“原磁场磁通量的大小”和“原磁场磁通量的变化”各自不同的物理含义。

正确理解楞次定律中“阻碍”这个关键词。“阻碍”不是“相反”,既不是阻碍原来的磁场,也不是阻碍原来的磁通量,而是指感应电流的磁场阻碍原磁场磁通量的增大或减小。当原磁场的磁通量增大时,感应电流的磁场与原磁场的方向相反,“反抗”磁通量的增大;当原磁场的磁通量减小时,感应电流的磁场与原磁场的方向相同,“补偿”原磁通量的减小。所以,“阻碍”不仅可以是对磁通量增大的“反抗”,也可以是对原磁通量减小的“补偿”。“阻碍”并不“阻止”,感应电流的磁场是阻止不了原磁场磁通量变化的。

[2] 产生感应电流的过程遵守能量守恒定律,阻碍的作用是克服磁场所做功,把其他形式的能量转化为产生感应电流的回路的电能。

### 实验结论

#### 交流与讨论

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

[1] 1834年,物理学家楞次(H. Lenz, 1804—1865)在分析了许多实验事实后,将实验结论用一句话巧妙地表达为:感应电流的磁场总是要阻碍引起感应电流的磁通量的变化,这就是楞次定律(Lenz's law),是电磁学中的一个重要定律。

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

根据楞次定律判断感应电流方向的一般步骤为:

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

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

楞次定律包含着深刻的物理意义,实际上是能量守恒定律在电磁感应现象中的反映。

#### ▶ 楞次定律符合电磁感应现象中的能量守恒定律

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

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

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

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

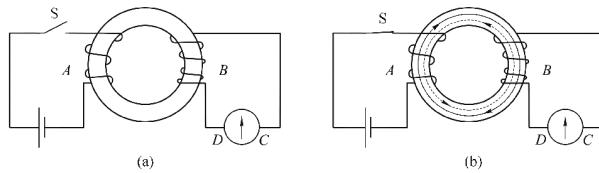


图 6-5 法拉第发现电磁感应现象的实验示意图

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

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

### 拓展视野

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

[1] 此处设置“大家谈”旨在巩固对楞次定律的理解。

如图 6-5(b) 所示,线圈 B 中原来的磁场是顺时针方向。开关断开的瞬间线圈 B 中磁通量突然减小,根据楞次定律线圈 B 中感应电流的磁场方向应与原磁场方向相同,也应为顺时针方向;再用“右手螺旋定则”判断线圈 B 中感应电流的方向便可确定流过灵敏电流计的电流方向是  $C \rightarrow D$ 。

由此可见,线圈 B 中磁通量“增大”和“减小”两个相反的过程中,通过线圈 B 的感应电流方向一定是相反的。

一段时间后,磁通量不再变化,灵敏电流计的指针不再继续偏转。

[2] 比较楞次定律和“右手定则”,了解彼此间联系和区别:

从研究的对象分析:楞次定律研究的是整个闭合导体回路;“右手定则”研究的是闭合导体回路的一部分,即做切割磁感线运动的那一段导线。

从适用的范围分析:楞次定律可应用于由磁通量变化引起感应电流的各种情况(包括一部分导体做切割磁感线运动的情况);“右手定则”只用于一段导线在磁场中做切割磁感线运动的情况。因此,“右手定则”是楞次定律在特殊情景中的一种应用。

[1]

### 大家谈

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

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

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

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

[2]

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

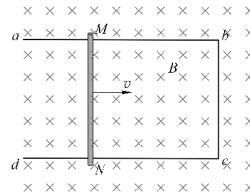


图 6-6 导体棒在磁场中运动

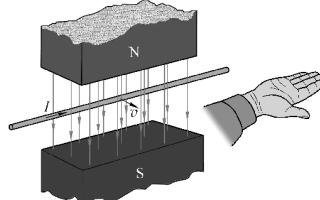


图 6-7 右手定则示意图(说明:图中运动导体是闭合电路的一部分)

尝试用右手定则判断示例 2 导体棒 MN 中感应电流的方向。

[1]

**大家谈**

根据如图 6-6 所示的情景，讨论下列几个问题：

(1) 如果导体棒  $MN$  处于静止状态，导线框在外力作用下向左做匀速运动，此时导体棒  $MN$  中感应电流的方向如何？

(2) 如果导体棒和导线框都处于静止状态，要使导体棒仍然能够产生  $N \rightarrow M$  方向的感应电流，磁感应强度  $B$  的大小应该如何变化？

(3) 如果导体棒和导线框都处于静止状态，磁感应强度  $B$  的大小也不变，如何使导体棒仍然产生  $N \rightarrow M$  方向的感应电流？

从以上讨论中，你发现了什么内在的规律？

**拓展视野**

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

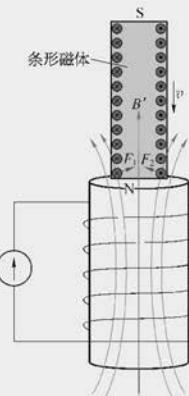


图 6-8 用分子电流假说解释感应电流产生的磁场力

[1] 此处设置“大家谈”旨在进一步深化对产生感应电流的条件和感应电流方向的认识。

(1) 如果导体棒  $MN$  处于静止状态，导线框在外力作用下向左做匀速运动，导线框的  $bc$  边向左切割磁感线，根据“右手定则”可以判断通过导体棒的电流方向仍然为  $N \rightarrow M$ 。也可以认为闭合回路  $NMbc$  中的磁通量减小，根据楞次定律，感应电流的磁场与原磁场方向相同，再根据“右手螺旋定则”，通过导体棒的电流方向仍然为  $N \rightarrow M$ 。

(2) 如果导体棒和导线框都处于静止状态，当磁感应强度  $B$  减小，闭合回路  $NMbc$  中的磁通量减小，根据楞次定律，感应电流的磁场与原磁场方向相同，再根据“右手螺旋定则”，通过导体棒的电流方向仍然为  $N \rightarrow M$ 。

(3) 如果导体棒和导线框都处于静止状态，磁感应强度  $B$  的大小也不变，改变感应强度  $B$  的方向，使通过闭合回路的磁通量减小，根据楞次定律，感应电流的磁场与原磁场方向相同，再根据“右手螺旋定则”，通过导体棒的电流方向仍然为  $N \rightarrow M$ 。

从以上讨论中不难发现闭合回路  $NMbc$  中的磁通量减小是引起感应电流的前提，且通过导体棒的感应电流一定为  $N \rightarrow M$  方向；反之，如果闭合回路  $NMbc$  中的磁通量增大(导体棒向左移动或者导线框向右移动)，通过导体棒的感应电流一定为  $M \rightarrow N$  方向。

## 问题与思考解读

36 第六章 电磁感应定律

**1. 参考解答：**条形磁体的任一极插入  $a$  环时，穿过  $a$  环的磁通量增加，根据楞次定律， $a$  环中感应电流的磁场阻碍原磁通量增大，环中感应电流的磁场和原条形磁体的磁场方向相反，所以条形磁体和存在感应电流的  $a$  环间的相互作用力是斥力，正如同名磁极相互排斥。而  $b$  环有缺口，条形磁体插入时，环中并无感应电流，和条形磁体间没有作用力，所以条形磁体插入  $b$  环时，环不动。

**命题意图：**强化科学思维推理、论证能力和归纳能力。

**主要素养与水平：**  
运动与相互作用(I)；  
模型建构(I)；科学推理(II)。

**2. 参考解答：**已知滑动变阻器的滑片  $P$  向左加速滑动时，滑动变阻器的电阻迅速增大，通过线圈  $A$  的电流迅速减小，通过线圈  $B$  的磁通量迅速减小，灵敏电流计的指针向右偏转。

- (1) 当线圈  $A$  向上拔出，通过线圈  $B$  的磁通量减小，灵敏电流计指针应向右偏转。此判断错  
滑动变阻器滑片  $P$  向右加速滑动，滑动变阻器的电阻减小，通过线圈  $A$  的电流增大，通过线圈  $B$  的磁通量增大，灵敏电流计指针向左偏转。此判断对  
(2) 对。两种操作均使通过线圈  $B$  的磁通量减小，电流计指针应该向右偏转  
(3) 错。滑动变阻器的滑片  $P$  匀速向左(或匀速向右)滑动，滑动变阻器的电阻均匀增大(或均匀减小)，通过线圈  $A$  的电流均匀减小(或均匀增大)，通过线圈  $B$  的磁通量均匀减小(或均匀增大)，线圈  $B$  中产生感应电流，电流计指针不应静止，而应向右(或向左)偏转。

**命题意图：**从不同的实验操作中归纳总结磁通量变化和感应电流方向之间的内在关联。

### 问题与思考

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



图 6-9

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

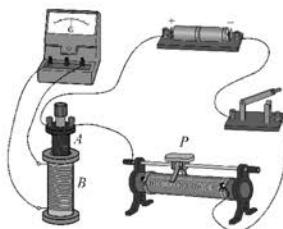


图 6-10

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

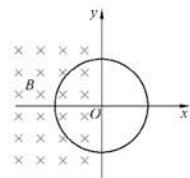


图 6-11

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



图 6-12

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

**主要素养与水平：**

运动与相互作用(Ⅱ)；  
模型建构(Ⅰ)；科学推理(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

### 3. 参考解答：

原磁场的方向垂直于纸面向里，则顺时针方向感应电流产生的磁场方向也为垂直于纸面向里。根据楞次定律可知：线圈内原来的磁通量一定减少

线圈沿  $x$  轴正方向移动，或线圈绕  $x$  轴转动且转角小于  $90^\circ$ ，或线圈绕  $y$  轴转动且转角小于  $90^\circ$ （线圈绕  $Oxy$  平面内任意轴转动且转角小于  $90^\circ$  均可）。上述这些可能的运动方式都能使线圈内原来的磁通量减少，则线圈中一定会产生顺时针方向的感应电流

**命题意图：**此题需要综合应用右手螺旋定则、楞次定律以及匀强磁场中磁通量的知识，要求学生具有一定的空间想象能力。此题也可以根据感应电流的方向

应用“右手定则”判断线圈运动方向，但分析过程比较复杂。

**主要素养与水平：**模型建构(Ⅰ)；科学论证(Ⅱ)。

**4. 参考解答：**从室内学生的角度看，穿过窗户的地磁场方向是指向窗内偏下，推窗过程中穿过窗户的地磁场的磁通量减小。根据楞次定律窗框中感应电流是逆时针方向

**命题意图：**在三维立体空间的具体情境中分析电磁感应现象，需要一定的模型建构能力和科学推理能力。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(Ⅰ)；模型建构(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

**5. 参考解答：**甲同学的观点错误，乙同学的观点正确。如果没有金属框，单独铜环向右移动的过程中，闭合铜环  $egfhe$  的磁通量没有发生变化，所以闭合铜环内没有感应电流。当铜环在闭合金属框上向

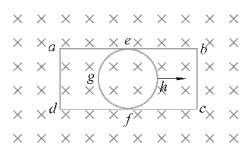


图 6-13

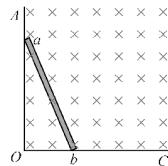


图 6-14

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

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

右移动时,虽然闭合回路  $egfhe$  内的磁通量没有变化,但与之相联系的回路  $eadfge$  和回路  $ebcfhe$  的磁通量却同时发生变化。因此,回路中有感应电流产生。电流方向可以根据楞次定律判断(回路  $eadfge$  的磁通量在逐渐增加,将有逆时针方向的感应电流;回路  $ebcfhe$  磁通量在逐渐减小,将有顺时针方向的感应电流)。因此铜环的左右两侧分别存在  $f \rightarrow g \rightarrow e$  和  $f \rightarrow h \rightarrow e$  方向的感应电流。

应用“右手定则”也可以判断感应电流的方向,注意切割磁感线的等效长度为圆  $egfhe$  的直径

**命题意图:** 灵活确定研究对象的磁通量变化规律,为第三节应用法拉第电磁感应定律解决问题做准备。

**主要素养与水平:** 模型建构(II);科学推理(III)。

**6. 参考解答:** (1) 金属直棒中感应电流方向先是  $b \rightarrow a$ ,后变为  $a \rightarrow b$

当  $ab$  棒在图示位置运动到倾角为  $45^\circ$  的过程中, $ab$  棒与直角金属导轨包围的面积增大,磁通量也增大,根据楞次定律感应电流的磁场要反抗磁通量的增大,在  $ab$  棒与直角金属导轨组成的回路中产生逆时针方向的感应电流,所以通过  $ab$  棒的感应电流方向是  $b \rightarrow a$ ;当  $ab$  棒继续运动的过程中, $ab$  棒与直角金属导轨包围的面积减小,磁通量也减小,根据楞次定律感应电流的磁场要反抗磁通量的减小,在  $ab$  棒与直角金属导轨组成的回路中产生顺时针方向的感应电流,所以通过  $ab$  棒的感应电流是  $a \rightarrow b$

(2) 金属直棒中感应电流方向为  $b \rightarrow a$  时,根据“左手定则”判断磁场力方向与  $ab$  垂直指向左下方;当金属直棒中感应电流方向为  $a \rightarrow b$  时,磁场力方向与  $ab$  垂直指向右上方向

**命题意图:** 运用楞次定律结合“左手定则”判断感应电流的方向和安培力的方向,关注磁通量变化问题中可能出现磁通量的极大值。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用(II);模型建构(III);科学推理(III)。

## 第二节 法拉第电磁感应定律

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

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

### ► 感应电动势

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

在如图 6-16 所示的实验中，每次将条形磁体插入 (或抽出) 感

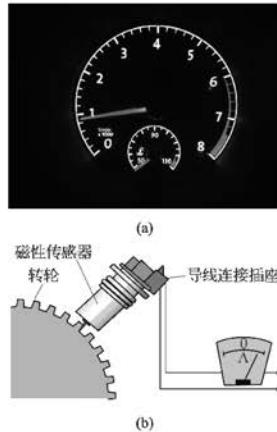


图 6-15 汽车发动机转速表和转速测试装置

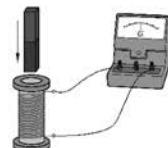


图 6-16 观察磁体快速插入和抽出时感应电流的大小

齿每次经过感应线圈端部时，类似于教材必修三第十一章第三节图 11-25 所示实验中，通电线圈 A 中的软铁棒从线圈中插入和拔出，都会引起感应电流。

[2] 教材图 6-16 所示的实验中当条形磁体插入或拔出感应线圈时在闭合电路中产生感应电流。类比闭合电路中要维持电流，一定存在电源电动势。因此电磁感应现象中一定存在电动势，这种由磁通量变化而引起的电动势称为感应电动势。

用导线将电源、用电器和开关串联组成的闭合回路，虽然断开开关电流为零，但是电源电动势仍然存在。同样，电磁感应现象中即使感应电流为零也仍然存在感应电动势。在图 6-16 所示实验中，如果断开连接灵敏电流计的导线，当条形磁体插入或拔出感应线圈时，感应线圈的两端仍然存在感应电动势。

感应电流的大小与回路的电阻有关，而感应电动势的大小却与回路的电阻无关，所以感应电动势比感应电流更能反映电磁感应现象的本质。

## 本节编写思路

首先，建立感应电动势概念；其次，通过对实验的定性分析，探索感应电动势的大小跟哪些因素有关；然后，在感应线圈截面积不变情况下，依据通过线圈的磁通量与感应电动势之间关系的实验探究和理论分析，引入法拉第电磁感应定律，得出计算感应电动势大小的一般表达式

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

利用法拉第电磁感应定律分析“导线切割磁感线时的感应电动势”的特殊情况，并通过实验验证。

本节教学的重点是法拉第电磁感应定律，难点是对磁通量、磁通量的变化量以及磁通量变化率的理解。学习法拉第电磁感应定律，不仅要求掌握其数学表达式，更重要的是能够应用该定律解决实际问题。

## 正文解读

- [1] 发动机磁电式转速表的转速测试装置中，齿轮凸凹相间的轮

[1] 关于“自主活动”：实验中线圈  $b$  的面积不变，因此实验只能得到感应电动势  $E$  与磁感应强度的变化率  $\frac{\Delta B}{\Delta t}$  成正比的结论。

[2] 此处设置“自主活动”旨在理解磁通量  $\Phi$ 、磁通量的变化量  $\Delta\Phi$  与磁通量的变化率  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  这三个物理量，知道它们之间的联系和区别。

磁通量  $\Phi$  是状态量，反映的是某一时刻穿过回路磁通量的大小； $\Delta\Phi$  是过程量，反映的是某一段时间穿过回路磁通量的变化的大

小； $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  是穿过回路磁通量的变化率，其数值与  $\Delta\Phi$  及所用时间  $\Delta t$  都有关系， $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  也可用  $\Phi - \Phi_t$  图像中某点切线的斜率来表示，因此， $\Phi$  较大， $\Delta\Phi$  不一定大； $\Delta\Phi$

较大， $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  也不一定大，它们是三个不同的物理量。

磁通量  $\Phi$ 、磁通量的变化量  $\Delta\Phi$  和磁通量的变化率  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  三者的关联和区别类似于速度  $v$ 、速度的变化量  $\Delta v$  和速度的变化率  $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ 。

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

若线圈的面积不变，感应电动势大小与线圈内磁感应强度变化有何关系呢？

[1]

### 自主活动

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

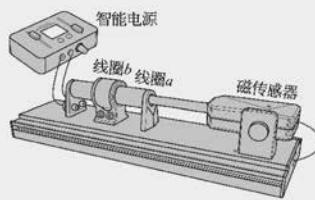


图 6-17 研究感应电动势大小与磁感应强度变化率之间的关系

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

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

[2]

实验又发现：在匀强磁场中，当线圈回路包围的面积发生变化时也会产生感应电动势。可以看出，感应电动势的大小与磁通量变化的快慢有关。磁通量变化的快慢可以用磁通量的变化量与所用时间的比表示，也称为磁通量的变化率；即感应电动势的大小跟磁通量的变化率成正比，这就是法拉第电磁感应定律 (Faraday's law of electromagnetic induction)。

如果  $t_1$  时刻穿过闭合回路的磁通量为  $\Phi_1$ ， $t_2$  时刻穿过闭合回路的磁通量为  $\Phi_2$ ，在较

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

$$[1] \quad E = k \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

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

$$[2] \quad E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

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

$$[3] \quad E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

我们可以用上述公式计算感应电动势的大小，再用楞次定律判断感应电流的方向。

示例 1 一螺线管的匝数  $n=400$ 、截面积  $S=0.20 \text{ m}^2$ ，其内部存在向左的匀强磁场，磁感应强度  $B$  逐渐增加且均匀变化，如图 6-18 所示。设磁感应强度的变化率  $\frac{\Delta B}{\Delta t} =$

$0.10 \text{ T/s}$ ，电阻  $R$  为  $10 \Omega$ ，忽略螺线管导线的电阻，试求：

- (1) 螺线管内感应电动势的大小和通过电阻  $R$  的感应电流方向；
- (2) 在  $\Delta t = 2.0 \text{ s}$  时间内通过电阻  $R$  的感应电荷量。

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

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

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

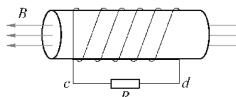


图 6-18 螺线管内产生感应电流

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

于匝与匝之间是相互串联的，整个线圈的总电动势就等于各匝所产生的电动势之和。令  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$  分别为通过各匝线圈的磁通量，则

$$E = \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t} + \frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t} + \dots + \frac{\Delta\Phi_n}{\Delta t} = \frac{\Delta(\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n)}{\Delta t} = \frac{\Delta\Psi}{\Delta t}$$

式中  $\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n$  叫做磁通匝链数。如果穿过每匝线圈的磁通量相同，均为  $\Phi$ ，则  $\Psi = n\Phi$ ，感应电动势

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

[1] 在国际单位制中，磁通量的单位“Wb”是按照法拉第电磁感应

定律  $E = k \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  定义的：

如果在一个闭合线圈中， $1 \text{ s}$  内产生的感应电动势为  $1 \text{ V}$ ，磁通量的变化量即为  $1 \text{ Wb}$ 。可见  $E, \Delta\Phi, \Delta t$  的单位分别是“V”“Wb”“s”时，

式  $E = k \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  中的  $k$  必然是 1。

$$[2] \quad \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$
 实际上表

示  $\Delta t$  这段时间内磁通量的平均变化率，感应电动势  $E$  是  $\Delta t$  这段时间内的平均感应电动势。只有当  $\Delta t$  很小 ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) 时感应电动势  $E$  才是瞬时值，表示在某一时刻感应电动势的大小。

$$[3] \quad$$
 如果闭合回路由多匝线圈组成，磁通量变化时，每匝线圈中都产生感应电动势。由

## (2) 螺线管内感应电流的大小

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

则在 2.0 s 时间内，通过电阻  $R$  的感应电荷量

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

[1]

## 大家谈

计算通过  $n$  匝线圈的电荷量是否还可以这样推理：

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

在上述推理过程中每一个等号成立应该满足什么条件？

## ▶ 导体切割磁感线运动时感应电动势的大小

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

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

在  $\Delta t$  时间内，闭合回路  $abNMa$  的磁通量的变化量

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

根据法拉第电磁感应定律，回路中感应电动势的大小

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

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

$$E = Blv$$

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

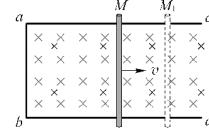


图 6-19 导体棒切割磁感线

[1] 此处设置“大家谈”旨在深化对法拉第电磁感应定律中各个物理量的理解。

由平均电流  $I = \frac{q}{\Delta t}$ ，则  $q = I\Delta t$ ；根据闭合电路欧姆定律  $I = \frac{E}{R + R_{\text{外}}}$ ，此处线圈的电阻为  $R$ ，外电路电阻  $R_{\text{外}} = 0$ ，所以  $I = \frac{E}{R}$ ，即

$$q = I\Delta t = \frac{E}{R}\Delta t。$$

根据  $n$  匝截面积相同的线圈的法拉第电磁感应定律

$$E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{, 则}$$

$$q = I\Delta t = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta t}{R} = n \frac{\Delta\Phi}{R}$$

线圈的截面积  $S$  一定，磁通量  $\Phi = SB$ ，则

$$q = n \frac{\Delta\Phi}{R} = nS \frac{\Delta B}{R}$$

由此可见，感应电动势  $E$  与磁通量变化的快慢有关，通过线圈横截面的电荷量  $q$  只与磁通量变化的多少有关。

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

## [2] 自主活动

利用如图 6-20 所示的实验装置就能研究感应电动势与导线运动速度的关系。

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

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



图 6-20 研究感应电动势与导线运动速度间的关系

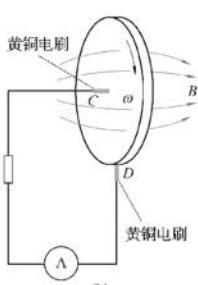


图 6-21 圆盘发电机和原理图

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

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

所证实。理论上，涡旋电场的假说正是麦克斯韦电磁场理论的基本假设之一。

静电场和涡旋电场的比较参见本节资料链接。

[2] 此处设置实验型“自主活动”的目的是验证导线以不同的速度  $v$  垂直切割匀强磁场中磁感线时产生的感应电动势  $E$  与速度  $v$  成正比。改变线圈的匝数等效为改变导线的长度，又能验证感应电动势  $E$  与导线的长度  $l$  成正比，即通过此实验可以验证  $E \propto lv$ ，写成等式为  $E = klv$ 。考虑到导线在大小一定的磁场中垂直切割磁感线，感应电动势还应该与磁感应强度成正比，得到在国际单位制中感应电动势

$$E = Blv$$

[1] 按照磁通量发生变化原因的不同，感应电动势产生的机理可分为两种情况：

(1) 导体在不变的磁场中做切割磁感线运动，产生的感应电动势叫做动生电动势；

(2) 因磁场的变化而引起磁通量发生变化，产生的感应电动势叫做感生电动势。

动生电动势的起因来自洛伦兹力的作用，感生电动势的起因则源于另一种电场。英国物理学家麦克斯韦注意到了这种电磁感应现象的特殊性，他认为感生电动势是由变化着的磁场产生的，导线回路中的感生电动势只是这种电场的一种表现；即使没有任何导体存在，只要磁场随时间变化，这种电场也是存在的。

随时间变化的磁场产生的电场叫做涡旋电场或感生电场。涡旋电场的存在已为包括电磁波在内的许多实验事实

## [1] 能量守恒定律

是自然界的普遍规律，也是物理学的重要规律。电磁感应现象的实质是不同形式能量转化的过程。产生和维持感应电流存在的过程就是其他形式的能量转化为感应电流的电能的过程。

在电磁感应现象中，外力克服安培力做功，在机械能减少的同时产生电能，产生的电能是从机械能转化而来的。当电路闭合时感应电流做功，电能转化为其他形式的能，如在纯电阻电路中电能全部转化为电阻的内能，即放出焦耳热，在整个过程中总能量守恒。

安培力做功的过程是电能转化为其他形式能量的过程，安培力做多少功，就有多少电能转化为其他形式能量。安培力做负功的过程是其他形式能量转化为电能的过程，克服安培力做多少功，就有多少其他形式能量转化为电能。

洛伦兹力对运动电荷不做功，为什么导体棒切割磁感线却可以产生感应电动势？参见本节资料链接。

[2] 此处“拓展视野”将学习内容扩展至导线运动方向和磁感应强度并不垂直的情形。

导体切割磁感线产生感应电动势的计算公式为

$$E = Blv \sin \theta$$

其中  $v$  与  $l$  垂直， $\theta$  为  $B$  和  $v$  之间的夹角。

图 6-22 通过速度分解理解上述公式，如果将磁感应强度  $B$  分解为  $B_{\parallel}$  和  $B_{\perp}$ ，也能得出相同的结果。

上式中如果  $v$  为瞬时速度，则求得的感应电动势  $E$  为瞬时电动势；如果  $v$  为平均速度，则感应电动势  $E$  为平均电动势。

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

[1] 从能量角度看，电磁感应现象的本质是通过外力做功将其他形式的能量转化为电能。

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

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

$$W_{\text{外}} = Fs = Fv \Delta t$$

设感应电动势为  $E$ ，感应电流为  $I$ ，则回路在  $\Delta t$  时间内消耗的电能

$$W_{\text{电}} = IE \Delta t$$

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

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

得

$$E = Blv$$

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

[2]

## 拓展视野

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

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

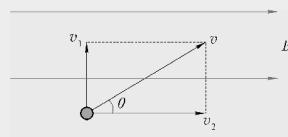


图 6-22 分解导体棒运动速度计算  
感应电动势

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

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

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

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

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

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

电流的方向为从  $Q$  经  $R$  到  $N$ 。

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

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

- (3) 根据焦耳定律, 回路中电流的热功率

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

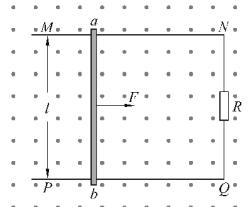


图 6-23 金属棒在外力作用下切割磁感线

### [1] 发生电磁感应

现象时常常伴随着其他现象发生。当闭合回路产生感应电动势时, 电路中就会产生感应电流。感应电流的大小与电路的电阻有关。同时, 感应电流在磁场中受到安培力的作用, 通过感应电流将电磁感应定律与闭合电路欧姆定律、牛顿运动定律和能量守恒定律联系起来。

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

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

[1] 示例 3 中的线框所受的安培力为  $F_A = BIl$ 。线框通过匀强磁场区域时安培力做功

$$\begin{aligned} W &= 2F_A h = 2BILh \\ &= 2B \frac{Blv}{R} lh \\ &= 2 \frac{B^2 l^2 vh}{R} \\ &= 2mgh \end{aligned}$$

线框通过匀强磁场区域过程中安培力做的功等于电流做的总功，也等于线框产生的内能，符合能量守恒定律。

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

分析：线框匀速穿过匀强磁场的过程可分为两段：

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

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

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

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

$$mg = BIl$$

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

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

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

电流做的总功

$$\begin{aligned} W &= 2I^2 Rt \\ &= 2 \frac{B^2 l^2 vh}{R} \end{aligned}$$

可知线框产生的热量

$$Q = W = 2 \frac{B^2 l^2 vh}{R} \quad \textcircled{2}$$

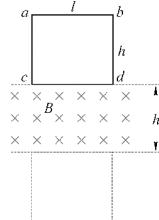


图 6-24 线框穿过匀强磁场

## 问题与思考解读

将①式代入②式得

$$Q = 2mgh$$

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

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

### 问题与思考

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

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

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

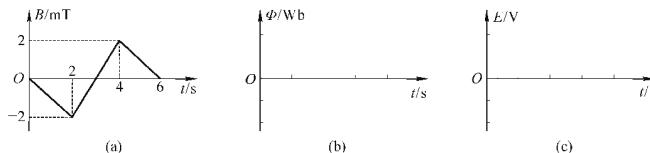


图 6-25

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

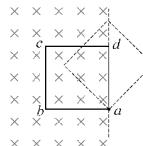


图 6-26

度逐渐减小，通过线圈的磁通量也逐渐减小，但单位时间内磁感应强度的减小量变大，即通过线圈的磁通量的变化率变大，根据法拉第电磁感应定律，感应电动势一定增大，如图 1 中曲线(3)所示

(4) 闭合线圈垂直于磁场方向，磁感应强度逐渐减小，通过线圈的磁通量也逐渐减小，且单位时间内磁感应强度的减小量变小，即通过线圈的磁通量的变化率变小，根据法拉第电磁感应定律，感应电动势一定减小，如图 1 中曲线图(4)所示

**命题意图：**理解磁通量、磁通量的变化量、磁通量的变化率和感应电动势的物理意义。

**主要素养与水平：**模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅲ)。

2. 参考解答：因为  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = S \frac{\Delta B}{\Delta t} = a^2 \frac{\Delta B}{\Delta t} = 0.1^2 \frac{\Delta B}{\Delta t} = 0.01 \frac{\Delta B}{\Delta t}$ ，所以磁通量随时间的变化趋势与磁

1. 参考解答：(1) 闭合线圈垂直于磁场方向，磁感应强度逐渐增大，通过线圈的磁通量也增大，但单位时间内磁感应强度的增加量变小，通过线圈磁通量的增加量也变小，即磁通量的变化率减小，如图 1 中曲线(1)所示

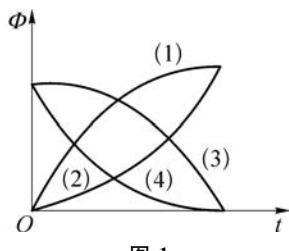


图 1

(2) 闭合线圈垂直于磁场方向，磁感应强度为零，通过线圈磁通量也为零。磁感应强度从零开始增大，单位时间内通过线圈的磁通量也增大，即通过线圈的磁通量的变化率不为零，如图 1 中曲线(2)所示， $t = 0$  时刻，磁通量为零，磁通量的变化率不为零

(3) 闭合线圈垂直于磁场方向，磁感应强

感应强度随时间的变化趋势相同,但两者的单位和大小均不同,  $\Phi - t$  图像如图 2(a)所示

在  $0 \sim 2$  s 内, 感应电动势为负值, 大小为

$$E_1 = n \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t} = nS \frac{\Delta B_1}{\Delta t} =$$

$$na^2 \frac{\Delta B_1}{\Delta t} = 200 \times 0.1^2 \times$$

$$\frac{2}{2} \times 10^{-3} \text{ V} = 2 \times 10^{-3} \text{ V}$$

在  $2 \sim 4$  s 内, 感应电动势为正值, 大小为

$$E_2 = n \frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t} = nS \frac{\Delta B_2}{\Delta t} =$$

$$na^2 \frac{\Delta B_2}{\Delta t} = 200 \times 0.1^2 \times$$

$$\frac{2 - (-2)}{2} \times 10^{-3} \text{ V} =$$

$$4 \times 10^{-3} \text{ V}$$

在  $4 \sim 6$  s 内, 感应电动势为负值, 大小  $E_3 = E_1$ 。 $E - t$  图像如图 2(b)所示

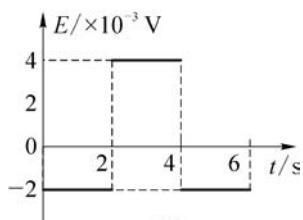
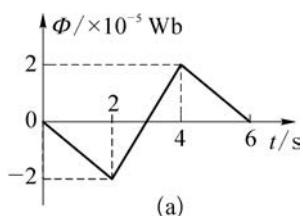


图 2

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

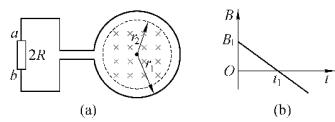


图 6-27

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

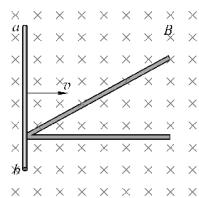


图 6-28

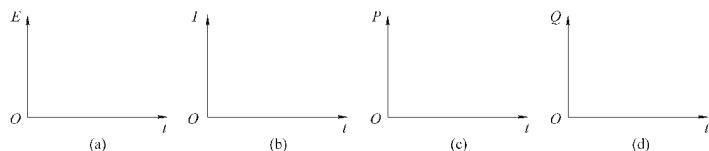


图 6-29

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

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

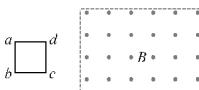


图 6-30

**命题意图:** 理解图像所表示的磁通量的变化量、磁通量的变化率和感应电动势。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用(Ⅱ); 模型建构(Ⅲ); 科学推理(Ⅲ)。

**3. 参考解答:** 导线框内磁通量减小, 根据楞次定律感应电流的方向为顺时针方向;

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{BL^2 - \frac{1}{2}BL^2}{\Delta t} = \frac{BL^2}{2\Delta t}$$

**命题意图:** 理解在匀强磁场中线圈包围磁场有效面积变化计算磁通量的变化率, 进而计算感应电动势。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用(Ⅰ); 模型建构(Ⅱ); 科学推理(Ⅲ)。

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

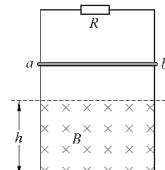


图 6-31

**4. 参考解答:**

圈内磁感应强度减小, 根据楞次定律感应电流的磁场方向与原磁场方向相同, 由右手螺旋定则可知线圈中感应电流的方向为顺时针方向, 所以通过电阻的电流方向为  $b \rightarrow a$

根据法拉第电磁感应定律, 感应电动势

$$\begin{aligned} E &= n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \\ &= n \pi r_2^2 \frac{\Delta B}{\Delta t} \\ &= n \pi r_2^2 \frac{B_1}{t_1} \\ &= \frac{n \pi r_2^2 B_1}{t_1} \end{aligned}$$

根据闭合电路欧姆定律, 感应电流

$$\begin{aligned} I &= \frac{E}{R + 2R} \\ &= \frac{n \pi r_2^2 B_1}{3R} \\ &= \frac{n \pi B_1 r_2^2}{3t_1 R} \end{aligned}$$

**命题意图:** 计算由磁感应强度发生变化引起

起的多匝线圈的感应电动势, 结合闭合电路欧姆定律计算感应电流。理解公式中的“面积”不是线圈的截面积, 而是线圈包围磁场的面积。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用(I); 模型建构(II); 科学推理(III)。

**5. 参考解答:**

如图 3 所示, 导体棒与导轨接触点为  $M$  和  $N$ , “ $\angle$ ”形导轨的夹角为  $\theta$ , 导体棒与导轨单位长度的电阻为  $\lambda$ 。则经过时间  $t$ , 导体棒和导轨之间的距离为  $ON = vt$ , 导体棒切割磁感线的长度为  $MN = vt \tan \theta$ , 倾斜部分导轨的长度为  $OM = \frac{vt}{\cos \theta}$

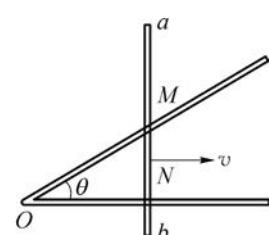


图 3

感应电动势

$$E = B(vt \tan \theta)v = (Bv^2 \tan \theta)t$$

感应电流

$$I = \frac{E}{R} = \frac{(Bv^2 \tan \theta)t}{\lambda \left( vt + vt \tan \theta + \frac{vt}{\cos \theta} \right)} = \frac{Bv \tan \theta}{\lambda \left( 1 + \tan \theta + \frac{1}{\cos \theta} \right)}$$

外力的功率

$$P = P_{\text{电}} = EI = (Bv^2 \tan \theta)t \frac{Bv \tan \theta}{\lambda \left( 1 + \tan \theta + \frac{1}{\cos \theta} \right)} = \frac{B^2 v^3 \tan^2 \theta}{\lambda \left( 1 + \tan \theta + \frac{1}{\cos \theta} \right)} t$$

回路中产生的焦耳热

$$Q = I^2 R t = P_{\text{电}} t = \frac{B^2 v^3 \tan^2 \theta}{\lambda \left( 1 + \tan \theta + \frac{1}{\cos \theta} \right)} t^2$$

图 4 为感应电动势、感应电流、外力的功率和回路中产生的焦耳热随时间变化的关系

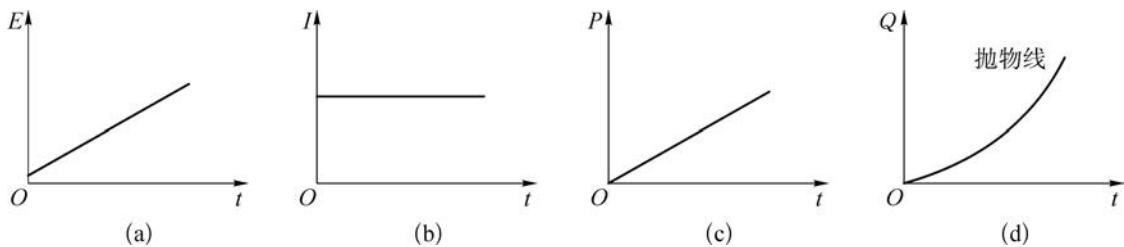


图 4

**命题意图：**理解导体切割磁感线产生感应电动势的相关概念，结合闭合电路欧姆定律分析电流、电功率和焦耳热随时间的变化规律。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(I)；模型建构(II)；科学推理(III)。

**6. 参考解答：**(1) 导线框的边长  $a = 0.20 \text{ m}$ , 其  $dc$  边刚进入磁场时产生感应电动势

$$E = Bav = 1.0 \times 0.20 \times 0.10 \text{ V} = 0.020 \text{ V}$$

等效电路图为图 5

导线框每条边的电阻  $R = r = 1.0 \Omega$ 。 感应电流

$$I = \frac{E}{3R + r} = \frac{0.020}{3 \times 1.0 + 1.0} \text{ A} = 5.0 \times 10^{-3} \text{ A} = 5.0 \text{ mA}$$

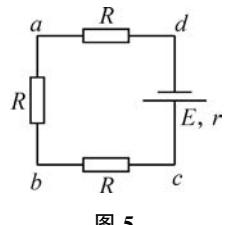


图 5

感应电流的方向为  $adcba$

在导线框进入磁场过程中  $ad$  边受到的安培力

$$F_{\text{安}} = BI(a - vt) = 1.0 \times 5.0 \times 10^{-3} \times (0.20 - 0.10t) \text{ N} = (1.0 \times 10^{-3} - 5.0 \times 10^{-4}t) \text{ N}$$

(2) 导线框进入磁场过程中感应电流产生的焦耳热

$$Q = I^2(3R + r)t = I^2(3R + r) \frac{a}{v} = (5.0 \times 10^{-3})^2 (3 \times 1.0 + 1.0) \times \frac{0.20}{0.10} \text{ J} = 2.0 \times 10^{-4} \text{ J}$$

(3) 导线框进入磁场过程中通过导线的电荷量

$$q = It = I \frac{a}{v} = 5.0 \times 10^{-3} \times \frac{0.20}{0.10} \text{ C} = 1.0 \times 10^{-2} \text{ C}$$

**命题意图：**计算由磁感应强度发生变化引起的感应电动势，综合应用闭合电路欧姆定律计算感应电

流、焦耳热和电量，提高科学思维素养。

**主要素养与水平：**模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅲ)。

**7. 参考解答：**导体棒  $ab$  穿过磁场区域过程中，受到竖直向下的重力和竖直向上的安培力作用，应用动能定理，得

$$mgh - W_{\text{安}} = \frac{1}{2}m\left(\frac{v}{2}\right)^2 - \frac{1}{2}mv^2$$

导体棒穿过磁场区域过程中产生的焦耳热

$$Q_{\text{总}} = W_{\text{安}} = mgh + \frac{3}{8}mv^2$$

已知导体棒的电阻为  $r = \frac{R}{2}$ ，则

$$Q_{\text{总}} = \bar{I}^2(R + r)t$$

$$Q_R = \bar{I}^2 R t$$

电阻  $R$  产生的焦耳热

$$Q_R = \frac{R}{R+r} Q_{\text{总}} = \frac{2}{3} Q_{\text{总}} = \frac{2}{3}mgh + \frac{1}{4}mv^2$$

**命题意图：**根据电磁感应现象中的能量转化和守恒关系分析解决实际问题，应用动能定理和焦耳定律分析和计算，提高能量观念和科学思维素养。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(Ⅱ)；模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅲ)。

## 资料链接

### 静电场和涡旋电场的比较

种类	静电场	涡旋电场
相同	对电场中的电荷有作用力	对电场中的电荷有作用力
不同	由电荷激发	由随时间变化的磁场激发
	电场线不闭合的，它起始于正电荷，终止于负电荷	电场线是闭合的
	是保守力场	不是保守力场

### 洛伦兹力和感应电动势

教材第五章第三节叙述：由于洛伦兹力始终与带电粒子的速度方向垂直，洛伦兹力对运动电荷不做功。而导体棒切割磁感线产生感应电动势是由洛伦兹力提供，两者是否矛盾？

其实，本教材第五章第三节中所说洛伦兹力不做功是指洛伦兹力的合力不做功，这里所说的洛伦兹力做功是指洛伦兹力的一个分力做功，两者并不矛盾。洛伦兹力的作用并不是提供能量，而只是传递能量。

如图 6 所示，一段导体  $MN$  在磁感应强度为  $B$  的匀强磁场中以速度  $v_1$  向右匀速运动，由于该导体在

磁场中做垂直切割磁感线运动，因此该导线中产生感应电动势。由于该段导体与导轨组成闭合回路，因此回路中就有感应电流。导体中自由电子定向运动的方向与电流方向相反，设电子运动速度为  $v_2$ ，正是由于电子具有相对于导体的定向运动才形成了感应电流。同时导体内的电子还有与导体本身相同的运动速度  $v_1$ ，电子受到总的洛伦兹力垂直于合速度  $v$ ，所以总的洛伦兹力  $f$  对电子不做功。

电子在匀强磁场中因具有运动速度  $v_1$  而受到的洛伦兹力（所受合力的分力之一）

$$f_1 = ev_1 B = e(v \cos \theta) B = evB \cos \theta$$

电子在匀强磁场中因具有运动速度  $v_2$  而受到的洛伦兹力（所受合力的另一分力）

$$f_2 = ev_2 B = e(v \sin \theta) B = evB \sin \theta$$

设导体从  $NM$  运动到  $N'M'$  过程中，电子的位移为  $s$ ，则分力  $f_1$  做功

$$W_1 = f_1 s \sin \theta = evBs \sin \theta \cos \theta$$

分力  $f_2$  做功

$$W_2 = -f_2 s \cos \theta = -evBs \sin \theta \cos \theta$$

由此可见洛伦兹力对电子做总功

$$W_1 + W_2 = 0$$

导体受到分力  $f_2$  作用后，速度必然会逐渐降低，若要保持导体匀速运动，必须要有与分力  $f_2$  大小相等方向相反的外力作用于导体，克服  $f_2$  的阻碍作用而做功。外力克服  $f_2$  做正功输入机械能，再通过另一分力  $f_1$  转化为感应电流的能量，即把机械能转化为电能。这也是发电机中能量转换的基本原理。

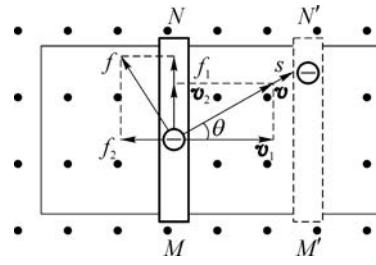


图 6

## 小结

### · 基本概念和基本规律

**楞次定律：**感应电流的磁场总是要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。

**感应电动势：**穿过闭合回路的磁通量变化而引起的电动势。

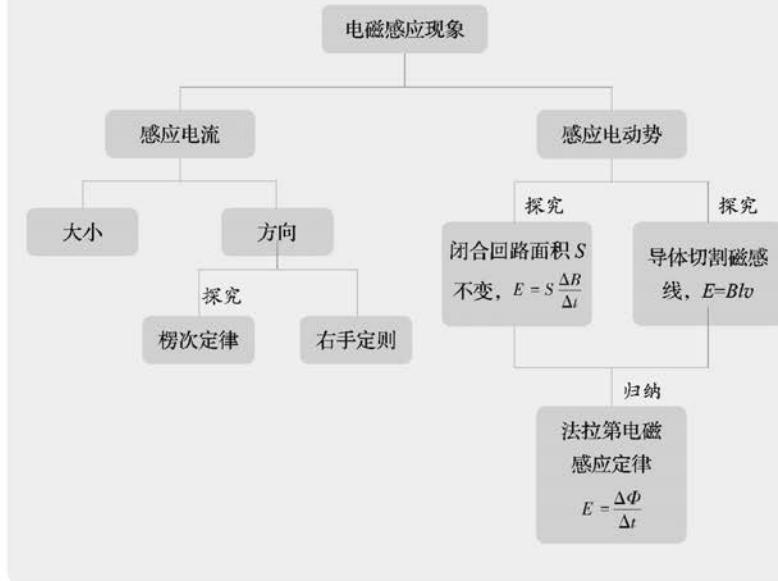
**法拉第电磁感应定律：**回路中感应电动势的大小，跟穿过这一回路的磁通量的变化率成正比， $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 。

### · 基本方法

通过对楞次定律的探究和右手定则的应用，认识控制变量的方法和归纳的方法。

通过得出法拉第电磁感应定律的过程，感受实验归纳和理论演绎相结合的研究方法。

### · 知识结构图



## 复习与巩固解读

50 第六章 电磁感应定律

**1. 参考解答：**由楞次定律金属环  $N$  的运动趋势或运动总是阻碍通过金属环的磁通量的变化，只要金属环  $N$  的磁通量增大就向右运动；金属环  $N$  的磁通量减小就向左移动

(1) 在  $S$  断开的情况下， $S$  向  $a$  闭合的瞬间，通过金属环  $N$  的磁通量增大，金属环向右运动

(2) 在  $S$  断开的情况下， $S$  向  $b$  闭合的瞬间，通过金属环  $N$  的磁通量增大，金属环向右运动

(3) 在  $S$  已向  $a$  闭合的情况下，将  $R$  的滑片向  $c$  端移动时电阻阻值增大，通过线圈的电流减小，通过金属环  $N$  的磁通量减小，金属环向左运动

(4) 在  $S$  已向  $a$  闭合的情况下，将  $R$  的滑片向  $d$  端移动时电阻阻值减小，通过线圈的电流增大，通过金属环  $N$  的磁通量增大，金属环向右运动

**命题意图：**用楞次定律分析产生感应电流的方向，再用“左手定则判断金属环运动的方向”，或者根据楞次定律内在本质，根据磁通量变化趋势直接判断金属环的运动方向。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(I)；模型建构(II)；科学推理(III)。

**2. 参考解答：**(a) 感应电流产生的条件是闭合回路中的磁通量发生变化。系统左右或上下震动时紫铜薄板在磁场中的部分有时多有时少，磁通量发生变化能产生感应电流，感应电流在磁场中受到安培力能够阻碍系统的震动，故图(a)正确；图(d)能阻碍系统左右震动，但不能阻碍系统上下震动，图(b)和(c)均不能阻碍系统左右震动或上下震动，故图(b)、(c)和(d)均错

**命题意图：**将实际问题中的对象转换成物理模型，通过分析获得结论，提高科学思维素养。

### 复习与巩固

1. 如图 6-32 所示，一长直铁芯上绕有一固定线圈  $M$ ，铁芯右端与一木质圆柱连接，木质圆柱上套有一闭合金属环  $N$ ， $N$  可在木质圆柱上无摩擦移动， $R$  为滑动变阻器， $E_1$  和  $E_2$  为直流电源， $S$  为单刀双掷开关。则：

- (1) 在  $S$  断开的情况下， $S$  向  $a$  闭合的瞬间金属环  $N$  向木质圆柱的哪一端运动？
- (2) 在  $S$  断开的情况下， $S$  向  $b$  闭合的瞬间金属环  $N$  向木质圆柱的哪一端运动？
- (3) 在  $S$  已向  $a$  闭合的情况下，将  $R$  的滑片向  $c$  端移动时，金属环  $N$  向木质圆柱的哪一端运动？
- (4) 在  $S$  已向  $a$  闭合的情况下，将  $R$  的滑片向  $d$  端移动时，金属环  $N$  向木质圆柱的哪一端运动？

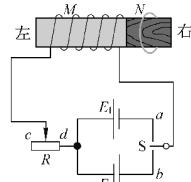


图 6-32

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

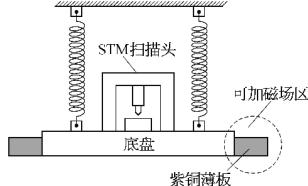


图 6-33



图 6-34

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

## 主要素养与水平：

运动与相互作用(Ⅰ);  
模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅱ);科学论证(Ⅱ);  
科学本质(Ⅰ)。

### 3. 参考解答:

正方形线框四种运动中均有一条边切割磁感线，产生的感应电动势和感应电流均相同。设线框每条边的电阻为  $R$ ，感应电流为  $I$ ，图(a)中  $U_{ab} = IR$ ；图(b)中  $U_{ab} = I(3R) = 3IR$ ；图(c)和图(d)中同为  $U_{ab} = IR$

**命题意图:** 通过分析线框在四种不同运动情况中发生电磁感应现象所涉及的相同物理量和不同物理量，有助于提高科学思维素养。

**主要素养与水平:**  
运动与相互作用(Ⅱ);  
模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

**4. 参考解答:**  $0 \sim 1$  s 内线圈中感应电动势从 0 逐渐增大， $1$  s 末最大， $1 \sim 2$  s 内线圈中感应电动势从最大逐渐减小到 0

$0 \sim 2$  s 内线圈中感应电动势的平均值

$$\bar{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{|\Phi_2 - \Phi_1|}{\Delta t} = \frac{|-2 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-3}|}{2} \text{ V} = 2 \times 10^{-3} \text{ V}$$

**命题意图:** 从磁通量随时间变化的图像中分析感应电动势的大小。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用(Ⅱ);模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅳ)。

**5. 参考解答:** 闭合回路  $QPbc$  内磁通量增大，导体棒将向右运动

条形磁体的转动方向与导体棒的运动方向之间没有关系。无论条形磁体绕轴  $OO'$  向哪个方向转动，在导体棒与金属框组成的闭合回路  $QPbc$  内的磁通量均增大，根据楞次定律知其感应电流的磁场均要反

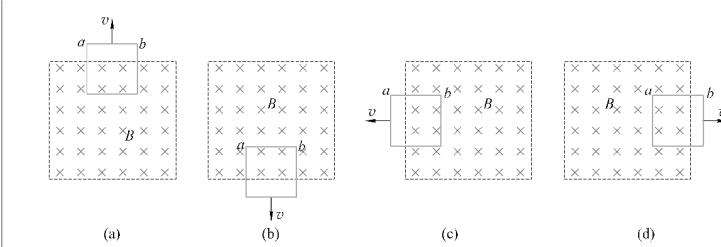


图 6-35

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

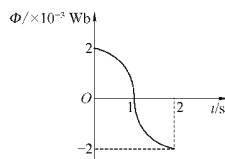


图 6-36

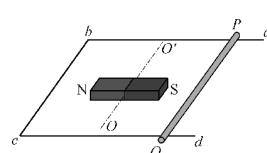


图 6-37

5. 如图 6-37 所示， $abcd$  是光滑水平放置的金属框， $PQ$  为导体棒，静止在框架上；一条形磁体绕金属框平面内的  $OO'$  轴转过  $90^\circ$ 。在此过程中，闭合回路  $QPbc$  内磁通量如何变化？导体棒将如何运动？条形磁体的转动方向与导体棒的运动方向有没有关系？说明判断的理由。

6. 如图 6-38 所示，匀强磁场中有一个用软导线制成的单匝闭合线圈，线圈平面与磁场垂直。已知线圈的面积为  $S$ ，电阻为  $R$ ，磁场的磁感应强度为  $B$ 。现同时向两侧拉动线圈，线圈的两边在  $\Delta t$  时间内合到一起。则线圈在上述过程中感应电动势的平均值多大？感应电流的平均值多大？感应电流的方向如何？通过导线横截面的电荷量多大？

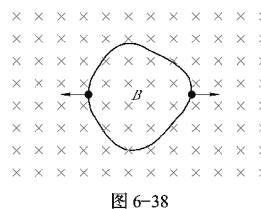


图 6-38

减小到 0

$0 \sim 2$  s 内线圈中感应电动势的平均值

$$\bar{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{|\Phi_2 - \Phi_1|}{\Delta t} = \frac{|-2 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-3}|}{2} \text{ V} = 2 \times 10^{-3} \text{ V}$$

**命题意图:** 从磁通量随时间变化的图像中分析感应电动势的大小。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用(Ⅱ);模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅳ)。

**5. 参考解答:** 闭合回路  $QPbc$  内磁通量增大，导体棒将向右运动

条形磁体的转动方向与导体棒的运动方向之间没有关系。无论条形磁体绕轴  $OO'$  向哪个方向转动，在导体棒与金属框组成的闭合回路  $QPbc$  内的磁通量均增大，根据楞次定律知其感应电流的磁场均要反

抗磁通量的增大。由于在条形磁体中部垂直于磁体轴线的闭合回路面积越小，磁通量越大；闭合回路面积越大，磁通量越小；所以导体棒QP必然向右运动

**命题意图：**深刻理解楞次定律的物理意义，根据条形磁体的磁场分布特点，灵活应用楞次定律解决具体问题。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(Ⅲ)；模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅲ)。

**6. 参考解答：**平均感应电动势  $\bar{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{BS}{\Delta t}$

$$\text{平均电流 } \bar{I} = \frac{\bar{E}}{R} =$$

$\frac{BS}{R\Delta t}$ ，感应电流的方向为顺时针，通过导线横截面的电荷量

$$q = \bar{I}\Delta t = \frac{E}{R}\Delta t$$

$$= \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta t}{R} = \frac{\Delta\Phi}{R} = \frac{BS}{R}$$

**命题意图：**通过计

算由于匀强磁场中导线所围成“面积”的变化而产生的感应电动势，加深对相关概念的理解。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(Ⅰ)；模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅳ)。

**7. 参考解答：**根据法拉第电磁感应定律  $E = Blv$ ，直导线的运动速度

$$v = \frac{E}{Bl} = \frac{1.0}{0.20 \times 0.50} \text{ m/s} = 10 \text{ m/s}$$

$$\text{通过直导线的电流 } I = \frac{E}{R} = \frac{1.0}{2.0} \text{ A} = 0.50 \text{ A}，\text{ 拉力}$$

$$F = F_{\text{安}} = Blv = 0.20 \times 0.50 \times 0.50 \text{ N} = 0.05 \text{ N}$$

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

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

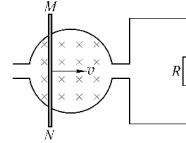


图 6-39

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

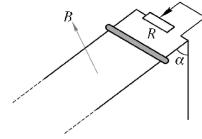


图 6-40

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

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

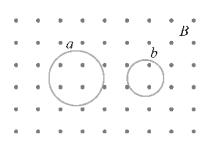


图 6-41

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

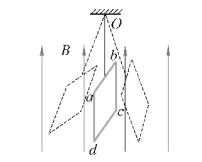


图 6-42

**命题意图：**导线匀速且垂直切割磁感线产生感应电动势，此时外力大小等于安培力。

**主要素养与水平：**

运动与相互作用(I)；模型建构(II)；科学推理(II)。

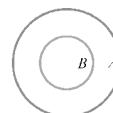


图 6-43

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

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

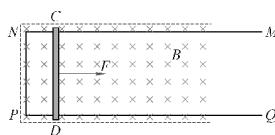


图 6-44

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

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

$$v_{\max} = \frac{(R+r)mg \cos \alpha}{B^2 L^2}$$

**命题意图：**理解在斜面上的金属杆垂直切割磁感线产生感应电动势，结合闭合电路欧姆定律和牛顿运动定律分析问题，理解速度趋近于最大值时金属杆处于平衡状态。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(II)；模型建构(II)；科学推理(IV)。

10. 参考解答：设线圈半径为  $r$ ，匝数为  $n$ ；导线长度均为  $L$ ，截面积均为  $S_0$ ，电阻率均为  $\rho$ ，且  $\frac{\Delta B}{\Delta t} = k$ 。则  $L = n(2\pi r)$ ，线圈中的感应电动势

$$E = nS \frac{\Delta B}{\Delta t} = n(\pi r^2) \frac{\Delta B}{\Delta t} = n\pi \left(\frac{L}{2\pi n}\right)^2 k \propto \frac{1}{n}$$

**命题意图：**理解导体棒垂直切割磁感线产生感应电动势，提高结合闭合电路欧姆定律分析实际问题的能力。

**主要素养与水平：**

运动与相互作用(II)；模型建构(II)；科学推理(III)。

**9. 参考解答：**

- (1)  $E = BLv$ ,  $I =$

$$\frac{E}{R+r} = \frac{BLv}{R+r}, F_A = \frac{vB^2 L^2}{R+r}$$

$$(2) F_{\text{安}} = mg \cos \alpha, \\ \frac{v_{\max} B^2 L^2}{R+r} = mg \cos \alpha,$$

所以  $\frac{E_A}{E_B} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{10}{5} = \frac{2}{1}$ , 即感应电动势之比

$$E_A : E_B = 2 : 1$$

线圈中的感应电流

$$I = \frac{E}{R} = \frac{E}{\rho \frac{L}{S_0}} \propto E$$

则  $\frac{I_A}{I_B} = \frac{E_A}{E_B} = \frac{2}{1}$ , 即感应电流之比  $I_A : I_B = 2 : 1$

**命题意图:** 理解  $n$  匝线圈内的磁感应强度变化产生感应电动势, 结合欧姆定律和电阻定律分析相关物理量。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用(I); 模型建构(II); 科学推理(IV)。

**11. 参考解答:** 线框中感应电流的方向是  $adcba$

当金属线框从右侧某一位置静止释放, 运动到最低点的过程中, 穿过线框的磁通量减小, 根据楞次定律感应电流的磁场方向与原磁

场方向相同, 感应电流的方向为  $adcba$ 。当金属线框从最低点运动到左侧最高点的过程中, 穿过线框的磁通量增大, 根据楞次定律感应电流的磁场方向与原磁场方向相反, 由于穿过线框的磁通量方向相反, 实际感应电流的方向仍为  $adcba$

**命题意图:** 分析线框在三维空间运动过程中磁通量的变化, 应用楞次定律判断感应电流的方向, 说明判断的理由, 这将有利于提高科学思维的素养和文字表述能力。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用(II); 模型建构(II); 科学推理(III)。

**12. 参考解答:** 若环 A 匀速转动, 环 B 内产生稳定的磁场, 环 B 内的磁通量不变, 所以环 B 中没有感应电流

若环 A 带正电荷, 且顺时针加速转动(或逆时针减速转动), 环 B 内产生垂直于纸面向里的磁场增大

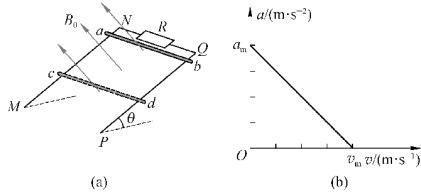


图 6-45

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

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

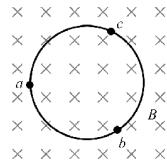


图 6-46

(或垂直于纸面向外的磁场减小),环B向里的磁通量增大(或向外的磁通量减小),根据楞次定律环B中的感应电流为逆时针方向;反之,若环A带负电荷,且环A顺时针加速转动(或逆时针减速转动),环B内产生垂直于纸面向外的磁场增大(或垂直于纸面向里的磁场减小),环B向外的磁通量增大(或向里的磁通量减小),根据楞次定律环B中的感应电流为顺时针方向

环A带正电荷顺时针加速转动等效于带负电荷逆时针加速转动,环A带负电荷顺时针加速转动类似于带正电荷逆时针加速转动

**命题意图:**绝缘环可能带正、负两种的电荷,绝缘环的旋转方向和旋转快慢变化也可能不同,但是产生的感应电流只有顺时针和逆时针两种不同的方向。通过本题要求能够根据楞次定律分析实际现象过程中发现物理本质,归纳内在的物理规律,有助于提高对较复杂实际情景综合分析问题的能力,解决此类问题需要具有较高的科学思维素养。

**主要素养与水平:**运动与相互作用(II);模型建构(II);科学推理(IV)。

**13. 参考解答:** (1) 在匀强磁场中,导体棒CD在恒力F作用下从静止开始运动,随着速度v增大,感应电动势 $E=BLv$ 增大。根据“右手定则”在导体棒内产生由D→C的感应电流,感应电流的大小 $I=\frac{E}{R}$ 也随之增大。当导体棒拉出磁场时感应电动势和感应电流均变为零

(2) 根据“左手定则”,在磁场中的导体棒CD受到向左的安培力作用,由于感应电流随导体棒运动速度的增大而增大,安培力 $F_{\text{安}}=ILB$ 也将逐渐增大。根据牛顿第二定律 $F-F_{\text{安}}=ma$ ,导体棒将做加速度逐渐减小的加速运动,在拉出磁场前可能做匀速直线运动,也可能速度一直增大;当导体棒拉出磁场后只受恒力F作用,将做匀加速直线运动

(3) 外力做功使导体棒CD的动能增大,同时感应电流在导体棒中产生了焦耳热

(4) 如果在导体棒CD还没有拉出磁场时撤去外力,导体棒受到向左的安培力作用,但速度方向仍然向右的导体棒将做加速度逐渐减小的减速运动,感应电动势和感应电流均减小,所以安培力也减小。导体棒可能在出磁场前已经停止运动,也有可能出磁场时仍然有一定的速度,这种情况下导体棒出磁场后将做匀速直线运动

**命题意图:**应用导线切割磁感线产生感应电动势,综合牛顿第二定律、变加速直线运动和焦耳定律定性分析导体棒的运动变化和能量变化。本题要求分类分析不同情况下相关物理量的不同变化趋势,具有较高的科学思维能力要求。

**主要素养与水平:**运动与相互作用(III);模型建构(II);科学推理(IV)。

**14. 参考解答:** (1) 由图(b)可知,当 $v=0$ 时, $a=a_m$ ,此时回路中感应电流为零。根据牛顿第二定律,有

$$mg \sin \theta - \mu mg \cos \theta = ma_m$$

所以

$$\mu = \frac{g \sin \theta - a_m}{g \cos \theta}$$

(2) 由图(b)可知:当金属棒速度为 $v_m$ 时,加速度 $a=0$ 。即当金属棒达到稳定速度 $v_m$ 时,有

$$F_{\text{安}} = B_0 IL, E = B_0 Lv_m, I = \frac{E}{R+r}$$

$$mg \sin \theta = F_{\text{安}} + \mu mg \cos \theta$$

$$r = \frac{v_m B_0^2 L^2}{mg(\sin \theta - \mu \cos \theta)} - R = \frac{v_m B_0^2 L^2}{ma_m} - R$$

$$(3) \quad q = \bar{I} \Delta t = \frac{E}{R+r} \Delta t = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta t}{R+r} = \frac{B_0 L s}{R+r}$$

所以

$$s = \frac{q(R+r)}{B_0 L} = \frac{qv_m B_0 L}{ma_m}$$

$$(4) \text{ 根据动能定理} \quad mgs \sin \theta - \mu mgs \cos \theta - W_F = \frac{1}{2} mv_m^2 - 0$$

$$Q_{\text{总}} = W_F = mgs(\sin \theta - \mu \cos \theta) - \frac{1}{2} mv_m^2 = ma_m s - \frac{1}{2} mv_m^2 = qv_m B_0 L - \frac{1}{2} mv_m^2$$

电阻  $R$  上产生的热量

$$Q_R = \frac{R}{R+r} Q_{\text{总}} = \frac{R}{R+r} \left( qv_m B_0 L - \frac{1}{2} mv_m^2 \right)$$

**命题意图：**理解导线切割磁感线产生感应电动势的相关概念和规律，综合应用牛顿第二定律、变加速直线运动、闭合电路欧姆定律和动能定理分析导体棒的运动及其变化，计算相关物理量，具有较高的科学思维能力要求。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(Ⅲ)；模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅳ)。

**15. 参考解答：**圆环中的感应电动势为  $E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{B \pi r^2}{\Delta t}$ ，感应电流为  $I = \frac{E}{R} = \frac{B \pi r^2}{R \Delta t}$

$$U_{ab} = U_{bc} = - \left( \frac{E}{3} - I \frac{R}{3} \right) = - \frac{E}{3} + \frac{E}{R} \cdot \frac{R}{3} = 0$$

**命题意图：**理解磁感应强度变化产生感应电动势的概念和规律，结合闭合电路欧姆定律分析串联电源两端的电压，通过计算知道在圆环上任意两点之间的电压均为零。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(Ⅱ)；模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅳ)。

## 第三部分 本章练习部分解读

### 第一节 楞次定律

**1.**  $P$  环内磁通量增大，根据楞次定律，感应电流的磁场要反抗磁通量的增大，感应电流产生的磁场方向与原磁场方向相反，由“右手螺旋定则”可知感应电流为逆时针方向

$Q$  环内没有磁场，磁通量为零且不变化，所以感应电流为零

**2.** 套在结构均匀的钢梁或钢轨上的探测器原线圈通电后，其内部产生恒定磁场，灵敏电流计与副线圈组成的闭合回路中没有感应电流。当探测仪经过钢梁或钢轨某些内部结构不均匀的地方时，磁场将发生变化，根据楞次定律，副线圈内将产生感应电流，灵敏电流计的指针就会摆动。因此，可以根据灵敏电流计的指针是否摆动判断钢梁或钢轨内部有没有结构缺陷

**3.**  $BS$  先  $b \rightarrow a$  后  $a \rightarrow b$

$$\Delta \Phi = |\Phi_2 - \Phi_1| = |BS - 0| = BS$$

线框从初始位置转过  $90^\circ$  的过程中，线框内向右的磁通量增大，根据楞次定律，从右向左看感应电流为顺时针方向，通过  $ab$  边的电流方向为  $b \rightarrow a$ ；线框继续转过  $90^\circ$  的过程中，线框内向右的磁通量减小，根

据楞次定律,从右向左看感应电流为逆时针方向,通过  $ab$  边的电流方向为  $a \rightarrow b$ 。所以通过  $ab$  边中的电流方向为先  $b \rightarrow a$  后  $a \rightarrow b$

4. (1) 从图示位置开始转动时,线圈中感应电流的方向为  $abcda$ ,感应电流的方向会改变。当蹄形磁体转动时,矩形线圈会跟着转动,两者转动的方向一致。因蹄形磁体转动时,在矩形线圈中产生了感应电流,根据楞次定律,感应电流要阻碍磁体和线圈之间的相对运动,因此外力使蹄形磁体转动时,矩形线圈会跟着转动,当线圈随着蹄形磁体转动时,两者之间的夹角先是逐渐加大,当夹角超过  $90^\circ$  时,两者之间的夹角又开始逐渐减小,穿过线圈的磁通量开始减小,所以感应电流方向变为  $adcba$ ,矩形线圈仍然会跟着蹄形磁体同方向转动

(2) 不相等。如果线圈的转速和磁体的转速相等的话,它们之间就没有相对运动,通过线圈的磁通量不随时间变化,线圈中就不会产生感应电流,磁场对线圈的  $ab$  边和  $cd$  边就没有力的作用,线圈也就不转动

### 5. (d)

当条形磁体 S 极从图示位置插入线圈的过程中,线圈中向上的磁通量增大,根据楞次定律,线圈中感应电流产生的磁场方向向下,感应电流为顺时针方向 ( $I < 0$ ),且电流的变化率增大。条形磁体的中部插入到线圈平面附近时磁通量最大,但此时刻线圈磁通量的变化率最小,感应电流为零 ( $I = 0$ )。在条形磁体的中部从线圈平面向下运动的过程中,线圈中向上的磁通量减小,根据楞次定律感应电流产生的磁场方向向上,感应电流为逆时针方向 ( $I > 0$ ),且电流的变化率增大

### 6. $abdca$ 导体棒 $ab$ 受力斜向右下方,导体棒 $cd$ 受力斜向左下方

条形磁体的 N 极竖直向下插入两导体棒与导轨组成的闭合回路中,该闭合回路中的磁通量增大,根据楞次定律感应电流产生的磁场方向向上,由右手螺旋定则可知,感应电流为  $abdca$ ,主视图如图 7 所示。 $ab$  棒和  $cd$  棒所在处的磁感应强度分别为  $B_{ab}$  和  $B_{cd}$ ,根据左手定则判断所受安培力分别为  $F_{ab}$  和  $F_{cd}$ ,所以导体棒  $ab$  受力斜向右下方,导体棒  $cd$  受力斜向左下方,使两导体棒相互靠近

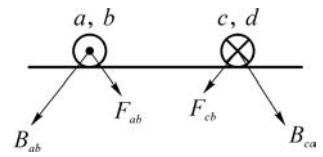


图 7

### 7. 顺时针 紧缩并相互靠近

滑动变阻器的滑片向右滑动,通过螺线管的电流减小,使通过两环向右的磁通量减小。根据楞次定律,感应电流的磁场方向向右,根据“右手螺旋定则”,两导线环内的感应电流方向(从左向右看)均为顺时针方向,所以两环还将紧缩并相互靠近

### 8. $< = <$

铜环下落到 1 位置时,铜环磁通量增大,根据楞次定律,感应电流产生的磁场力方向向上,铜环的加速度  $a_1 < g$

铜环下落到 2 位置时,铜环磁通量最大,但磁感应强度近似不变,磁通量的变化量近似为零,铜环的加速度  $a_2 = g$

铜环下落到 3 位置时,铜环磁通量减小,根据楞次定律,感应电流产生的磁场力方向向上,铜环的加速度  $a_3 < g$

9. 先减小后增大  $adcba$ 。根据长直导线周围磁场分布的“右手螺旋定则”,通过线圈的磁场方向是垂直于纸面向里。当线圈绕  $ab$  边转过  $120^\circ$  时,线圈  $ab$  边和  $cd$  边与直导线的距离相等,通过线圈的磁通量为零,如图 8 所示。线圈绕  $ab$  边转过  $120^\circ$  的过程中,通过线圈的磁通量减小,根据楞次定律,感应电流的方向为  $adcba$ ;线圈绕  $ab$  边再转过  $30^\circ$  的过程中,反向通过线圈的磁通量增大,根据楞次定律,感应电流的方向仍为  $adcba$ 。所以线圈绕  $ab$  边转过  $150^\circ$  的过程

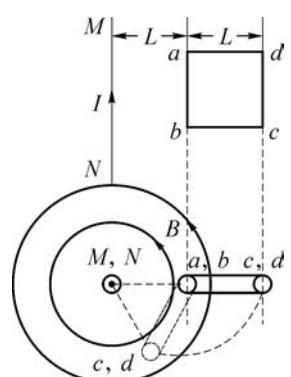


图 8

中,穿过线圈中的磁通量先减小后增大,感应电流的方向始终为 *adcba*

#### 10. 顺时针 逆时针

金属杆 *PQ* 突然向右运动的瞬间,穿过 *PQMNP* 中的磁通量增大,根据楞次定律,感应电流的磁场方向(垂直于纸面向里)与原磁场的方向相反,由“右手螺旋定则”判断 *PQMNP* 中产生顺时针方向的感应电流。金属框 *T* 中感应电流产生磁场的磁通量增大,再根据楞次定律,金属框 *T* 中感应电流为逆时针方向

## 第二节 法拉第电磁感应定律

$$1. (1) \text{ 线圈中产生的感应电动势 } E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 500 \times \frac{0.09 - 0.03}{0.3} \text{ V} = 100 \text{ V}$$

$$(2) \text{ 通过电热器的电流 } I = \frac{E}{r + R} = \frac{100}{5 + 495} \text{ A} = 0.2 \text{ A}$$

#### 2. (1) 感应电动势的平均值

$$\bar{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{L_{ab} \frac{L_{ad}}{2} [B - (-B)]}{\frac{T}{2}} = \frac{BL_{ab}L_{ad}}{\frac{1}{2} \times \frac{2\pi}{\omega}} = \frac{\omega BL_{ab}L_{ad}}{\pi} = \frac{100\pi \times 0.1 \times 0.1 \times 0.2}{\pi} \text{ V} = 0.2 \text{ V}$$

#### (2) 感应电动势的瞬时值

$$E = BL_{dc}v = BL_{dc}L_{ad}\omega = 0.1 \times 0.1 \times 0.2 \times 100\pi \text{ V} = 0.2\pi \text{ V} \approx 0.628 \text{ V}$$

#### 3. (1) 设左、右两正方形导线框的边长分别为 $2a$ 和 $a$ ,则感应电动势

$$E_1 = S \frac{\Delta B}{\Delta t} = (2a)^2 \frac{\Delta B}{\Delta t}, E_2 = S \frac{\Delta B}{\Delta t} = a^2 \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

所以  $E_1 : E_2 = 4 : 1$

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1} = \frac{E_1}{\rho \frac{8a}{S_0}}, I_2 = \frac{E_2}{R_2} = \frac{E_2}{\rho \frac{4a}{S_0}}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{E_1}{E_2} \times \frac{4}{8} = \frac{4}{1} \times \frac{4}{8} = \frac{2}{1}$$

所以  $I_1 : I_2 = 2 : 1$

$$P_1 = E_1 I_1, P_2 = E_2 I_2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{E_1}{E_2} \frac{I_1}{I_2} = \frac{4}{1} \times \frac{2}{1} = \frac{8}{1}$$

所以  $P_1 : P_2 = 8 : 1$

(2)  $Q_1 = I_1 \Delta t, Q_2 = I_2 \Delta t$ , 所以  $Q_1 : Q_2 = I_1 : I_2 = 2 : 1$

4. (1) 当磁感应强度增大时,金属丝中产生逆时针方向的感应电流,对三角形 *ACD* 三条边产生的安培力的合力为零,所以细线上的拉力等于金属丝的重力  $F_T = Mg$

$$(2) \text{ 金属丝中的感应电动势 } E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = S \frac{\Delta B}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left(\frac{L}{3}\right)^2 \sin 60^\circ \times k = \frac{\sqrt{3}}{36} k L^2$$

$$\text{感应电流 } I = \frac{E}{R} = \frac{\sqrt{3}}{36R} k L^2$$

$$AD \text{ 边受到的磁场力 } F = B_0 I \left( \frac{L}{3} \right) = B_0 \frac{\sqrt{3}}{108R} k L^3 = \frac{\sqrt{3} k B_0 L^3}{108R}$$

5. (1) 由图(b)可得

$$\frac{\Delta B}{\Delta t} = \frac{1 + 1.5}{0.3} \text{ T/s} = \frac{25}{3} \text{ T/s}$$

$B$  随时间变化的关系  $B = 1 - \frac{25}{3}t$ , 当  $t = 0.6 \text{ s}$  时,  $B = -4 \text{ T}$

$$\text{感应电动势 } E = S \frac{\Delta B}{\Delta t} = 0.06 \times \frac{25}{3} \text{ V} = 0.5 \text{ V}$$

$$\text{感应电流 } I = \frac{E}{R} = \frac{0.5}{2} \text{ A} = 0.25 \text{ A}$$

金属棒受到的安培力大小为  $F = BIL = 4 \times 0.25 \times 0.3 \text{ N} = 0.3 \text{ N}$

(2) 最初磁场方向竖直向下, 所以当  $t = 0.6 \text{ s}$  时磁场方向竖直向上, 且磁感应强度增大, 根据楞次定律, 从上向下看感应电流的方向为顺时针方向, 再根据“左手定则”可判断金属棒所受安培力的方向向左, 又由牛顿第二定律知道加速度的方向与安培力的方向相同, 所以金属棒的加速度方向为水平向左

6. 当线圈平面平行于地面测量时, 在地面上  $a$ 、 $c$  两处测得试探线圈中的电动势为零, 说明通过线圈的磁通量始终为零, 则直线电缆在  $a$ 、 $c$  连线的正下方

在  $b$ 、 $d$  两处测得线圈中的电动势不为零, 说明穿过线圈的磁通量发生变化, 则试探线圈在通电直导线的两边。当线圈平面与地面成  $45^\circ$  夹角时, 在  $b$ 、 $d$  两处测得试探线圈中的电动势为零, 说明此时直线电缆处在线圈平面的中垂线上, 即在  $b$ 、 $d$  两处的线圈平面中垂线的交点处。又由于  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  恰好位于边长为  $1 \text{ m}$  的正方形的四个顶角上, 所以可确定地下电缆在  $a$ 、 $c$  两点连线的正下方。当线圈平面与地面成  $45^\circ$  夹角时, 直线电缆在线圈平面的正前方下方

如图 9 所示, 设正方形  $abcd$  的边长为  $l$ ,  $\angle O_1 b O_2$  为  $45^\circ$ , 所以电缆离地表面的深度

$$h = O_1 O_2 = O_1 b = \frac{\sqrt{2}}{2} l$$

7. (1) 根据法拉第电磁感应定律

$$E = n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = 200 \times \frac{0.015 - 0.01}{0.1} \text{ V} = 10 \text{ V}$$

(2) 电流的大小

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{10}{48 + 2} \text{ A} = 0.2 \text{ A}$$

根据图像可知, 线圈中垂直于纸面向里的磁场增大, 根据楞次定律, 线圈中感应电流产生的磁场垂直于纸面向外, 再根据右手螺旋定则可知线圈中的感应电流为逆时针方向, 所以通过电阻  $R$  的电流方向为  $a \rightarrow b$

(3) 电阻  $R$  两端的电压是路端电压

$$U = IR = 0.20 \times 48 \text{ V} = 9.6 \text{ V}$$

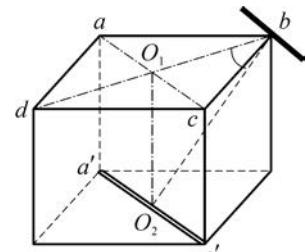


图 9

8. (1) 导体棒运动时受到拉力  $F$  和安培力的作用, 所以有

$$F - BIL = ma$$

即

$$F - \frac{B^2 L^2 at}{R} = ma \text{ 或 } F = \frac{B^2 L^2 a}{R} t + ma$$

可见  $F-t$  图中的截距为  $ma = 0.5$ , 代入数据可解得:  $a = \frac{0.5}{1} \text{ m/s}^2 = 0.5 \text{ m/s}^2$

(2)  $F-t$  图中的斜率  $k = \frac{\Delta F}{\Delta t} = \frac{B^2 L^2 a}{R} = \frac{2 - 0.5}{30} = 0.05$ , 所以

$$B = \frac{1}{L} \sqrt{0.05 \times \frac{R}{a}} = \frac{1}{0.4} \sqrt{0.05 \times \frac{0.4}{0.5}} \text{ T} = 0.5 \text{ T}$$

9. (1) 磁感应强度  $B$  沿  $x$  轴正方向的变化率为  $\frac{\Delta B}{\Delta x} = 0.05 \text{ T/m}$ 。设某时刻导线框左、右两边所处

的磁感应强度分别为  $B_1$ 、 $B_2$ , 则该时刻两边产生的电动势分别为  $E_1$ 、 $E_2$ , 整个导线框的电动势之和

$$E = E_1 - E_2 = (B_1 - B_2)Lv = \Delta B'Lv$$

式中  $\Delta B'$  为沿  $x$  方向上相距  $L$  的两点磁感应强度的变化量, 其大小

$$\Delta B' = \frac{\Delta B}{\Delta x} L = 0.05 \times 0.1 \text{ T} = 5 \times 10^{-3} \text{ T}$$

代入上式, 导线框中感应电动势的大小

$$E = \Delta B'Lv = 5 \times 10^{-3} \times 0.1 \times 20 \text{ V} = 0.01 \text{ V}$$

(2) 感应电流的大小

$$I = \frac{E}{R} = \frac{0.01}{0.25} \text{ A} = 0.04 \text{ A}$$

导线框沿  $x$  正方向做匀速直线运动过程中, 通过导线框的磁通量减小, 根据楞次定律, 感应电流产生的磁场方向垂直于纸面向里, 感应电流为顺时针方向

另外, 第(1)问还可以这样求解:

$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = S \frac{\Delta B}{\Delta t} = L^2 \frac{\Delta B}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} = L^2 v \frac{\Delta B}{\Delta x} = 0.1^2 \times 20 \times 0.05 \text{ V} = 0.01 \text{ V}$$

10. (1) 以  $v_0$  方向为正方向, 设运动过程中某一时刻通过导体棒的电流为  $i$ , 导体棒的速度为  $v$ , 导体棒受到的安培力

$$F_{\text{安}} = -BiL$$

在微小时间  $\Delta t$  内, 应用动量定理, 得

$$-BiL \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v$$

对导体棒运动的全过程, 有

$$\sum (-BiL \cdot \Delta t) = \sum (m \cdot \Delta v)$$

即

$$-BL \sum (i \cdot \Delta t) = m \sum (\Delta v)$$

$$-BL \cdot q = m(0 - v_0)$$

通过闭合回路的电荷量为  $q = \frac{mv_0}{BL}$

(2) 导体棒  $ab$  两端的感应电动势为  $E = BLv$ , 感应电流  $i = \frac{BLv}{R}$

导体棒受到的安培力  $F_{\text{安}} = -BiL = -\frac{B^2 L^2 v}{R}$

在微小时间  $\Delta t$  内, 由动量定理, 得

$$-\frac{B^2 L^2 v}{R} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v$$

对导体棒运动的全过程, 有

$$\begin{aligned} \sum \left( -\frac{B^2 L^2 v}{R} \cdot \Delta t \right) &= \sum (m \cdot \Delta v) \\ -\frac{B^2 L^2}{R} \sum (v \cdot \Delta t) &= m \sum (\Delta v) \\ -\frac{B^2 L^2}{R} \cdot x &= m(0 - v_0) \end{aligned}$$

导体棒在整个运动过程中的位移  $x = \frac{mv_0 R}{B^2 L^2}$

11. (1) 感应电流  $I = \frac{E}{r} = \frac{1}{r} S \frac{\Delta B}{\Delta t} = \frac{kL^2}{r}$ , 由于闭合回路的磁通量增大, 根据楞次定律, 感应电流的方向为逆时针, 金属棒  $ab$  中的感应电流方向为  $b \rightarrow a$

(2)  $t = t_1$  时,  $B = B_0 + kt_1$

棒受到的安培力  $F_{\text{安}} = BIL$

因为棒始终保持静止, 水平拉力为  $F = F_{\text{安}} = BIL$

所以, 水平拉力  $F = (B_0 + kt_1) \frac{kL^3}{r}$

(3) 若不产生感应电流, 则要求闭合回路中的总磁通量不变, 即

$$B_0 L^2 = BL(L + vt)$$

所以, 磁感应强度随时间的变化规律为  $B = \frac{B_0 L}{L + vt}$

## 第四部分 本章实验与活动部分解读

### 1. 学生实验 探究影响感应电流方向的因素

**参考解答:** 当条形磁铁插入或拔出感应线圈(一般用漆包细铜线绕制)时, 感应线圈中每一匝都有相同的磁通量变化, 都会产生相等的感应电动势  $E_i$ , 而整个线圈的感应电动势是各个线圈感应电动势的叠

加,设灵敏电流计的内阻为  $R_g$ ,每匝线圈的电阻为  $r_i$  则感应电流  $I = \frac{nE_i}{R_g + nr_i} = \frac{E_i}{\frac{R_g}{n} + r_i}$ , 所以感应线圈

的匝数  $n$  越多,感应电流也越大,实验效果就越明显。由于通过导线的感应电流(约为几十微安)越小,导线的横截面积也可以越小,所以感应线圈就能用多匝细导线绕制,这样做既节省了导线材料,又能提高实验的效果

**命题意图:** 通过对此实验的分析,知道感应线圈的匝数越多感应电流越大,为以后学习法拉第电磁感应定律打下基础。

## 2. 自主活动 研究感应电动势大小与磁通量变化率之间的关系

**参考解答:** 通电后多层密绕的线圈  $a$  内的磁场类似于螺线管内部的磁场,线圈内部中央附近的磁感线近似均匀分布,且几乎平行于线圈的轴线,将线圈  $b$  套在线圈  $a$  的中部测量磁感应强度变化而产生的感应电动势,可以减小实验误差

**命题意图:** 此实验体现了控制变量的方法。实验中通过线圈  $a$  的电流变化正比于其内部磁感应强度的变化,线圈  $b$  的截面积不变,线圈  $b$  中感应电动势的大小与线圈  $b$  内磁通量的变化率成正比。此实验应用了螺线管内部中央附近的磁场近似为匀强磁场的知识。

## 3. 自主活动 研究感应电动势与导线运动速度的关系

**参考解答:** 实验中线圈的下边在近似的匀强磁场中垂直切割磁感线,改变可移动线圈的匝数等效于改变垂直切割磁感线的导线长度,间接验证了在匀强磁场中导线两端的感应电动势与导线垂直切割磁感线长度成正比的关系

**命题意图:** 此实验体现了控制变量的方法。保持导线在磁场中垂直切割磁感线的位置不变,利用等效的方法改变导线垂直切割磁感线的长度,验证了感应电动势与导线长度成正比;实验中改变线框的高度使导线切割磁感线的速度相应改变,验证了感应电动势与导线的运动速度大小成正比。

# 第七章 电磁感应定律的应用

## 第一部分 整 章 分 析

### 学习目标

1. 了解自感现象和涡流现象的主要原理是基于电磁感应,通过实验过程观察自感现象,并能够用电磁感应规律解释这些现象的原理。知道利用和防止涡流现象。
2. 了解交变电流的基本特征和交变电流的产生原理,知道交变电流的产生原理是基于电磁感应。知道交流电是大小和方向随时间周期性变化的电流。能够根据交流电的特征用函数表达交变电流,知道公式中交流电的最大值、瞬时值、有效值以及它们之间的关系,能够用图像表示交流电的特征物理量,知道交流电的周期和频率及其意义。
3. 用实验探究的方法认识变压器的原理及其原、副线圈的电压和匝数之间的关系,能够根据变压器的结构特点分析变压器能量损耗的主要原因。在初中物理学习的基础上探究高压输电的理论基础,知道降低电能损耗的主要方法。
4. 知道发动机和电动机技术是电磁理论的重要应用,也是第二次工业革命的基础,体会科学发展对技术发展和技术发展对生产力水平及社会发展的作用。

### 编写意图

课程标准中对本章的“内容要求”为:

- 2.2.3 通过实验,了解自感现象和涡流现象。能举例说明自感现象和涡流现象在生产生活中的应用。
- 2.2.4 通过实验,认识交变电流。能用公式和图像描述正弦交变电流。
- 2.2.5 通过实验,探究并了解变压器原、副线圈电压与匝数的关系。知道远距离输电时通常采用高压输电的原因。
- 2.2.6 了解发电机和电动机工作过程中的能量转化。认识电磁学在人类生活和社会发展中的作用。

本章核心概念和规律是:自感和涡流,交流电的有效值和最大值,理想变压器的电压比和匝数比的关系,发电机和电动机的能量转化。

本章的学习有助于了解电磁感应定律的实际应用,体会电磁理论的发展对人类生活和社会发展的影响,感受基础科学的重大发现对工业革命和社会发展的巨大作用。

本章学习共需 7 课时。第一节 1 课时,第二节 2 课时,第三节 3 课时,第四节 1 课时。

## 第二部分 本章教材解读

# 第七章 电磁感应定律的应用

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

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

## 本节编写思路

在掌握电磁感应现象的基础上,通过实验提高学生观察、探究和推理等科学素养。了解自感现象,理解自感电动势在电流变化时所起的作用。

了解涡流产生的原因,知道涡流是一种特殊的电磁感应现象;了解涡流现象的利用和危害。通过对涡流实例的分析,了解涡流现象在生活和生产中的应用。了解电磁阻尼现象,知道涡流的热效应和机械效应,应用电磁感应的知识解释涡流现象和电磁阻尼现象。

本节的重点是理解自感现象的特点,知道涡流的概念及其应用。本节的难点是断电自感现象和电磁阻尼的实例分析。

## 正文解读

[1] 日光灯原理和整流器作用参见本节资料链接。

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

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

### ▶ 自感现象

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



图7-1 高铁上方的受电弓从接触线获取电能

图7-2 碰碰车通过尾部的竖直长导线获取电能

下面我们来观察两个实验。

[2] 电力机车是一种不自带能源,依靠外部电能驱动的机车。变电所将电流输送到接触网,再经过机车顶部的受电弓接受接触网送来的电流作为能源,并由牵引电动机驱动机车的车轮。电力机车具有功率大、热效率(发动机所作机械功与所消耗的热量的比)高、速度大、过载能力强和运行可靠等主要优点,而且不污染环境,特别适用于运输繁忙的干线铁路和隧道多、坡度大的山区铁路。

受电弓通过一个石墨电极接触板与架空接触网的接触线直接接触,受电弓有一定的向上张力,以保证与供电接触线的接触良好。当运动的受电弓通过相对静止的接触线时,如果接触线受到外力干扰,在受电弓和接触线之间就会产生动态的振动。振动剧烈时可能造成受电弓接触板与接触线之间瞬间脱离,从而产生电弧和火花,除了加速相关电器的绝缘损伤以外,甚至会对附近的通信产生电磁干扰。

[1] 此处“自主活动”旨在使学生感性认识自感现象。

要使自感实验的现象更明显，应该增加“时

间常量  $(\tau = \frac{L}{R})$ ”：配置一个电感  $L$  大、电阻  $R$  小的线圈，即在闭合的铁芯上用较粗的导线绕制匝数尽可能多的线圈。

[2] 线圈中变化的电流激发的磁场磁感应强度与电流成正比，因此通过线圈的磁通匝链数  $\Psi$  正比于线圈中的电流，即

$$\Psi = LI$$

式中的比例系数  $L$  称为自感系数，简称自感，单位为亨利，用符号 H 表示。自感系数的数值与线圈的大小、形状和匝数有关。如果线圈中没有铁磁质，自感系数与通过线圈的电流无关。当线圈中的电流改变时， $\Psi$  也随之改变，根据法拉第电磁感应定律，线圈中的自感电动势

### [1] 自主活动

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

重新闭合开关  $S$ ，注意观察开关闭合后两个灯泡的发光情况。

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

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

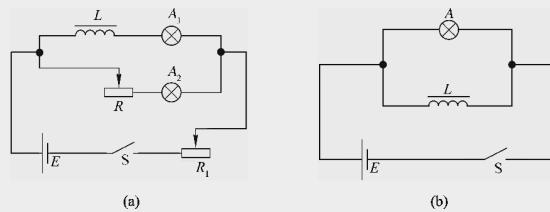


图 7-3 开关闭合或断开时观察灯泡的发光情况

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

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

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

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

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

式中负号表明：当回路中的电流增大时， $E < 0$ ，即  $E$  与  $I$  的方向相反；反之，当回路中的电流减小时， $E > 0$ ，即  $E$  与  $I$  的方向相同。

由此可见， $E$  总是要阻碍回路本身电流的变化，而且回路中的自感系数  $L$  越大，回路中的电流也越不易改变。回路的这一特性与力学中物体的惯性有些相似，所以也可以认为自感系数  $L$  是回路中电磁惯性的量度。

理想螺线管的自感系数  $L = \mu_0 n^2 V$ ，其中真空磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (\text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1})$ ， $n$  为单位长度的匝数， $V$  为螺线管的体积。

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

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

### ▶ 涡流

- [1] 块状金属放在变化的磁场中，或者让它在非均匀的磁场中运动时，根据法拉第电磁感应定律，金属块也将产生感应电动势。该感应电动势在金属块内自成的闭合回路中产生感应电流，这种电流很像水的漩涡，因此叫做涡电流，简称涡流 (eddy current)。因为金属块本身的电阻很小，形成的涡流很大，会在金属块内释放出大量的热量。在生产实际中，有些情况下要利用涡流，有些情况下则要设法避免涡流。
- [2] 图 7-4 (a) 所示的电磁炉就是利用涡流产生大量的热量烹饪食物的。电磁炉的台面是一块平整度高，而且耐油的非金属板，它的内部结构如图 7-4 (b) 所示。在台面下面有励磁线圈、电力转换装置和控制系统等。电磁炉使用交变电流供电，电流的大小和方向时刻变化。交变电流通过电力转换装置产生  $20 \sim 40$  kHz 的高频电压，再通过底盘上铜线绕制的励磁线圈产生迅速变化的磁场。当铁质锅具放在炉面上时，锅底处在迅速变化的磁场中，从而在锅底内会产生无数基本处在垂直锅底平面内的小涡流，致使锅体本身很快发热，从而加热锅内的食物 [图 7-4 (c)]。

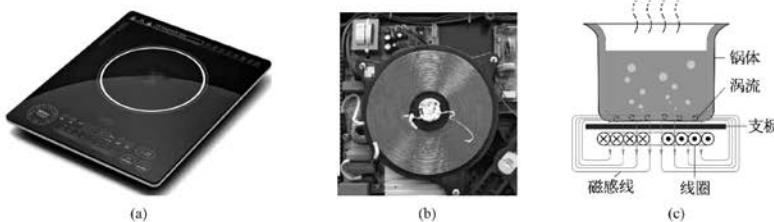


图 7-4 电磁炉利用涡流产生大量的热量

[1] 1851 年，傅科

(J. Foucault, 1819—1868) 发现金属块处在变化的磁场中或相对于磁场运动时，在它的内部会产生感应电流。该电流被称为“傅科电流”，也称为涡流。这是傅科在电磁学方面的重要发现。同年，他被英国皇家学会授予科普利奖章。

[2] 家用电磁炉需

要在  $20 \sim 40$  kHz 的高  
频电压下正常工作。由  
于变压器不能改变交流  
电的频率，电磁炉工作  
时需要由整流电路将  
50 Hz 的家用交流电压  
转化直流电压；然后，由  
开关电源将直流电压转  
化成  $20 \sim 40$  kHz 的高  
频电压；再由控制电路  
和高频变压器输出合  
适的电压；最后输入电  
磁炉底盘上的铜丝绕制  
的线圈中产生高频交变  
磁场。

[1] 感应炉通常分为感应加热炉和熔炼炉。有芯感应炉有铁芯穿过感应器，无芯感应炉无铁芯穿过感应器。无芯感应炉的熔炼室一般做成坩埚形状，用紫铜管绕在坩埚四周作为感应线圈。若需熔炼钢、铸铁或铜、铝、镁、锌等有色金属及其合金，则将其放在耐火材料制作的坩埚中；若需加热非金属材料，则将物料放在石墨坩埚中。增加交流电频率时，感应电流频率相应提高，产生的热量也将增大。无芯感应炉常采用工频（50～60 Hz）、中频（300～10 000 Hz）和高频（50～150 kHz）三种频率。

高频感应炉的突出优点是对样品的适应性强，例如对不锈钢、高铬、高锰钢、电热合金、中间合金、纯金属、硅铁、铬铁、矿石、碳化钨、稀土材料及各种非金属原材料均有较好的加热效果。

但高频感应炉的装料容量只有几十千克，输入功率只有几十千瓦，常用于熔炼少量的特种合金和合金钢。

一般说来，炉子的装料容量越大所用的电源频率就越低。工频感应炉主要用于熔炼铸铁。合金钢保温炉的容量可达一百多吨。中频感应炉容量从几十千克到二十吨左右，输入功率可达几千千瓦，用于熔炼钢及有色金属。中频感应炉以其热效率和电效率都较高、熔炼时间短、耗电省、占地少、投资低和易实施熔炼过程自动化等优点得到迅速发展。

将无芯感应炉的坩埚放在真空室里，就成为真空感应炉。炉料在真空中熔炼，可除去材料中的氢、氮、氧等气体，并减少材料的氧化损失。这种感应炉可用于熔炼耐热合金、磁性材料、电工材料、高强度钢和核燃料。大型的真空感应炉容量可达几十吨。

可以用电磁灶模拟高频感应加热水的实验。

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

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

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

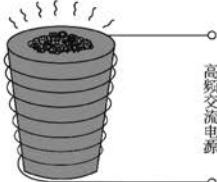


图 7-5 高频感应炉示意图

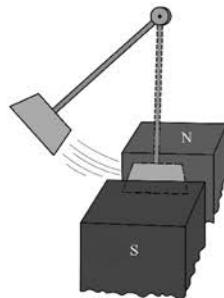


图 7-6 电磁阻尼现象

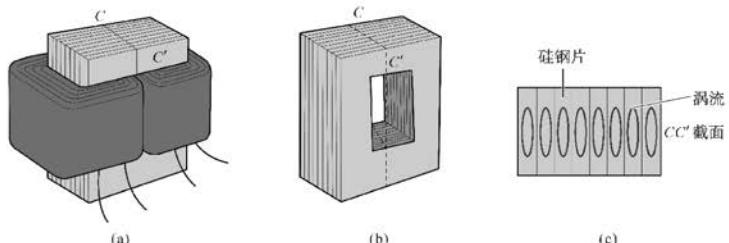


图 7-7 变压器中的硅钢片减小涡流损耗

## 问题与思考解读

### 问题与思考

1. 制造精密电阻时常常采用双线绕法(图7-8),这种方法有什么优点?

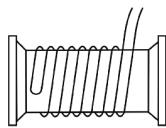


图7-8

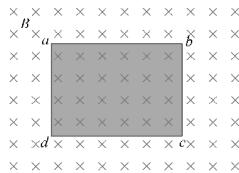


图7-9

2. 如图7-9所示,足够大的匀强磁场垂直于纸面向里,蓝色区域为一处于纸面的金属片。金属片在匀强磁场中垂直于磁感线向右平移,金属片中是否会有涡流?如果将金属片绕ab轴旋转,金属片中是否会有涡流?试说明理由。

3. 在图7-10所示的电路中,开关S先后与位置1和位置2接通,在这个过程中电路中的能量如何变化?

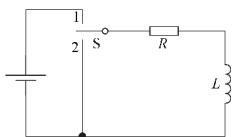


图7-10

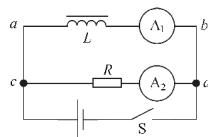


图7-11

4. 如图7-11所示电路中,线圈L的电阻与另一支路中电阻器R的阻值相同。当开关S接通瞬间和断开瞬间,两个电流表的示数是否相同?

5. 工业上制造白炽灯泡时,为了更好地排出灯泡里的空气,必须对灯泡加热,但有时会把灯泡放在频率较高的交变磁场中,此时灯泡玻璃并不发热,为什么这样做能达到加热的目的?

**1. 参考解答:**变化的电流在线圈中引起自感现象,其感应电流与原电流方向相反,使精密电阻的阻值误差增大。采用双线绕法,两条环绕线绕成的两个线圈的匝数相等,但电流方向相反,两条环绕线产生的磁场大小相等,方向相反,磁场相互抵消,也就防止了线圈的自感现象。

**命题意图:**应用自感和“右手螺旋定则”分析实际问题。

**主要素养与水平:**模型建构(I);科学推理(II)。

**2. 参考解答:**金属片在匀强磁场中垂直于磁感线向右平移,金属片内的磁通量没有发生变化,所以金属片中不会产生涡流。如果将金属片绕ab轴旋转,金属片内的磁通量发生变化,所以金属片中就有涡流。

**命题意图:**分析具体实例,知道金属内部磁通量的变化是产生涡流现象的根本原因。

**主要素养与水平:**模型建构(I);科学推理(II)。

**3. 参考解答:**开关S与位置1接通,电源将部分电能转化为电感器L中贮藏的磁场能;然后开关S再与位置2接通,电感器中贮藏的磁场能部分转化为电阻R的焦耳热。

**命题意图:**了解变化的电流通过自感线圈产生自感现象,分析开关闭合和断开两个过程中能量转化的特点。

**主要素养与水平:**运动与相互作用(I);能量观念(I);模型建构(I);科学推理(II)。

**4. 参考解答:**开关S接通瞬间,电源向并联电路供电,线圈分支存在自感,所以两个电流表的示数不同,之后两个电流表的示数逐渐趋同;开关断开时两个电流表的示数相同。

**命题意图：**变化的电流通过自感线圈形成自感现象，从具体电路中分析开关S接通和断开瞬间形成自感现象时的电流变化特点。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(I)；模型建构(II)；科学推理(II)。

**5. 参考解答：**制造灯泡时要抽气封口，但灯泡内金属上吸附的气体，只有在高温下才能迅速释放出来被抽走。所以有时把灯泡放在频率较高的交变磁场中，利用灯泡内金属中产生的涡流来加热金属部分，在加热的同时抽气，然后迅速封口。这种加热方法称为感应加热方法，它们的优点是“热源”不需要和被加热的材料直接接触。灯泡的外层玻璃是绝缘体，当磁场迅速变化时，玻璃中无涡流，故玻璃不发热。

**命题意图：**尝试应用涡流现象解释实际问题。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(I)；模型建构(II)；科学推理(II)。

**6. 参考解答：**金属探测器可以检测工业原料中的金属异物；在建筑施工中，金属探测器可用于探查地下金属管线的走向和分布；在军事上，金属探测器可用来扫雷；在食品加工过程中检测是否有金属残留物等。

**命题意图：**尝试应用涡流现象解释金属探测器的实际问题。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(I)；模型建构(II)；科学推理(II)。



图 7-12

## 资料链接

### 日光灯的工作原理

图1是日光灯的电路图，它由灯管、电感镇流器和启动器组成。灯管内充有稀薄的汞蒸气，当汞蒸气导电时，汞原子受激产生紫外线，涂在管壁的荧光粉吸收紫外线，发出近乎白色的可见光，故俗称为日光灯。

启动器(图2)由封在玻璃泡中的静触片和U形动触片组成，玻璃泡中充有氖气。两个触片间加上一定的电压时，氖气导电以致发光和发热。动触片是用黏合在一起的双层金属片制成的，受热后两层金属的热膨胀不同，动触片稍稍伸开一些，和静触片接触，启动器不再发光，这时双金属片冷却，动触片形状复原，两个触点重新分开。实际使用的启动器中常有一个电容器并联在氖泡的两端，它能使两个触片在分离时不产生电火花，以免烧坏触点，同时还能减轻对附近无线电设备的干扰。没有电容器，启动器也能工作。

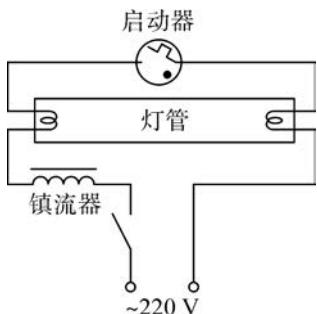


图1

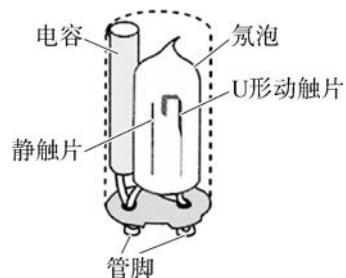


图2

日光灯不是靠它的灯丝发光的，激发汞蒸气导电所需的电压比220V的电源电压高得多，而在汞蒸气一旦被激发发光后，灯管内的电阻立刻变小，此时只需较低的电压(远小于220V)就能维持汞蒸气导电发光的状态。这两方面的要求都是利用电感镇流器来完成的，电感镇流器是一个自感系数很大的绕在铁芯上的线圈。开关闭合后，灯管内的气体电阻极大，相当于断路，所以电流通过串联的电感镇流器、灯丝和启动器形成闭合回路。但启动器很快就突然断电，使电感镇流器产生很大自感电动势，该自感电动势和电源电压一起加在灯管两端的灯丝上，使汞蒸气被激发导电，灯管发光。灯管正常发光后，灯管和电感镇流器成串联状态，电感镇流器对交流电产生很大的阻碍作用，分掉一部分电压，使灯管两端的电压降低到维持正常发光所需的电压，保证了日光灯的正常工作。

与电感镇流器相比，电子镇流器轻便小巧，甚至可以将电子镇流器与灯管等集成在一起。同时，电子镇流器通常可以兼具启动器的功能，故此又可省去单独的启动器。电子镇流器还可以通过提高电流频率和改善电流波形，消除日光灯的闪烁现象。传统电感式镇流器逐渐被发展成熟的电子镇流器所取代。

## 本节编写思路

62 第七章 电磁感应定律的应用

交变电流是生产和生活中最常用到的电流,而正弦交变电流又是最简单和最基本的交变电流。正弦交变电流产生的原理是电磁感应,由于交变电流不同于直流电,它对各种相关元件的作用也不同;因此本节既是前一章电磁感应理论的具体应用,又是教材后一节变压器原理的基础。

由于交变电流的电压、电流等物理量,其大小和方向都随时间做周期性变化,这就需要用一些特殊的物理量描述,借助于图像能对交变电流做全面、细致的形象化描述。如周期和频率表示交变电流周期性变化的快慢;峰值表明交变电流在变化过程中所能达到的最大数值,反映了交变电流的变化范围;有效值反映的是交变电流的热效应在时间上的平均效果。

本节的重点是运用电磁感应的基本知识,配合相应的演示实验,分析交变电流的产生过程,认识交变电流的特点及变化规律。交变电流的有效值是本节教学的重点,也是教学的难点。

## 正文解读

[1] 广义上讲,交变电流(交流电)是方向和大小随时间做周期性变化的电动势、电压和电流的统称。

## 第二节 交变电流

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

### ▶ 交变电流的产生

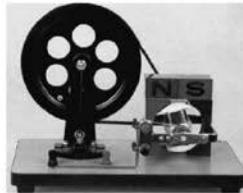
[1] 大小和方向都随时间做周期性变化的电流叫做交变电流(**alternating current**),简称为交流电。交变电流具有许多特点,在工农业生产中有着广泛的应用。例如,交变电流能够通过变压器改变电压,使高效节能的远距离输电成为可能;交变电流能够形成旋转磁场,为交流电动机提供动力;在发电量相同的条件下,交流发电设备比直流发电设备更简单。图7-13为上海外高桥电厂具有国际先进水平的1000MW交流发电机组。

交变电流是如何产生的?

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



图7-13 大型交流发电机组



(a)



(b)

图7-14 交流发电机模型

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

### ► 交流电流的变化规律

我们先用电压传感器来观察几种交流电的电压随时间变化的规律。

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

[1]

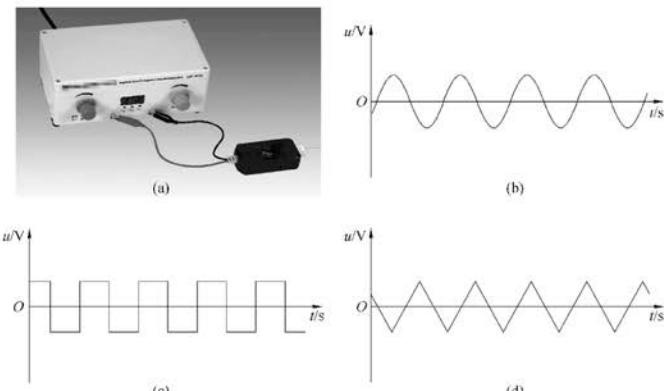


图 7-15 采集几种交流电的电压随时间变化的图像

[2]

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

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

如果我们匀速转动简易交流发电机手柄，也能够得

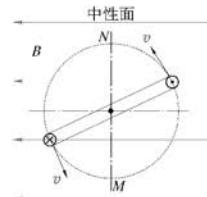


图 7-16 交流发电机模型  
原理示意图

纸面向内。导线 ab 和 cd 旋转过程中分别产生的感应电动势相当于两个“电源”的串联，所以在时刻 t 整个线圈中的感应电动势

$$e(t) = 2e_{ab} = 2nBlv \sin \omega t$$

从上式可以看出，当  $n$ 、 $B$ 、 $l$ 、 $v$  和  $\omega$  一定时，感应电动势随时间按正弦函数做周期性变化。

[1] 如教材图 7-

15 所示，用电压传感器测量低频信号发生器输出的不同交流电压，通过演示实验，知道存在不同类型的交流电。

[2] 如教材图 7-

17 所示，线圈绕  $OO'$  轴逆时针匀速转动。

设在  $t=0$  时刻，线圈处在垂直于磁感线的平面  $MN$  内（称为中性面）。时刻  $t$  转过的角度为  $\omega t$ 。设  $ab=cd=l$ ，此时，导线  $ab$  和  $cd$  的速度大小均为  $v$ ，切割磁感线的分速度为  $v_1=v \sin \omega t$ ，如图 3 所示。根据“右手定则”导线  $ab$  中感应电动势的方向垂直于纸面向外，大小为

$$e_{ab}=Blv_1=Blv \sin \omega t$$

如果线圈匝数为  $n$ ，则有

$$e_{ab}=nBlv \sin \omega t$$

导线  $cd$  中感应电动势的大小  $e_{cd}$  与  $e_{ab}$  大小相等， $e_{cd}$  的方向垂直于

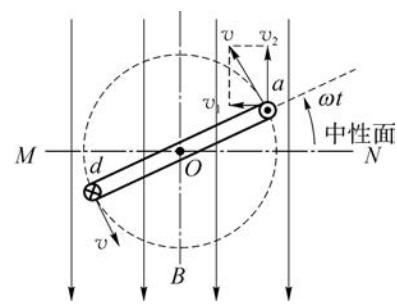


图 3

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

[1] 中性面是指与磁场方向垂直的线圈平面，线圈处于中性面时线圈中的磁通量最大，但线圈中的感应电动势为零；当线圈每次转过中性面时，感应电动势的方向都将改变。

[2] 任意时刻的感应电动势又可以表示为

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

式中  $E_m = 2nBlv$  为感应电动势的最大值。

若外电路为纯电阻，电阻的阻值为  $R$ ，线圈本身的电阻为  $r$ ，根据闭合电路欧姆定律，感应电流随时间的变化

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{E_m}{R+r} \sin \omega t \\ &= I_m \sin \omega t \end{aligned}$$

式中  $I_m = \frac{E_m}{R+r}$  是感应电流的最大值。

外电路两端的电压(路端电压)随时间的变化

$$u(t) = i(t)R = \frac{E_m R}{R+r} \sin \omega t = U_m \sin \omega t$$

式中  $U_m = \frac{E_m R}{R+r}$  是外电路两端电压的最大值。

三相交流电详见本节资料链接。

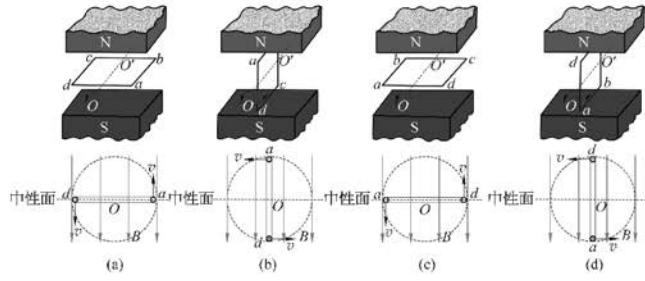


图 7-17 正弦交流发电机的原理示意图

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

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

正弦交流电任意时刻  $t$  的电动势可以表示为

[2]

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

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

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

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

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

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

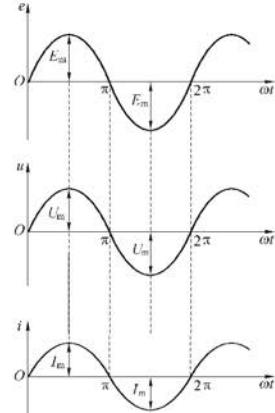


图 7-18 正弦交流电随时间变化的规律

### ► 正弦交变电流的描述

#### 1. 最大值和有效值

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

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

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

[1]

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

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

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

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

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

(a)



(b)

图 7-19 家用交流电器的铭牌

[1] 此处正弦交流电的有效值和峰值的关系，对其他波形的交变电流一般不成立。

有效值和最大值是反映交流电的电流或电压大小的物理量。在计算交变电流平均功率和交变电流通过电阻产生的热功率时，应该用有效值。在选择电容器等元件的工作电压时，必须大于加在这个电容器上电压的峰值。

正弦交流电的有效值与最大值之间关系的推导详见本节资料链接。

## 2. 周期和频率

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

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

**[1] 高中阶段不要求推导正弦交流电的最大值和有效值之间的关系。此处设置“自主活动”，目的是：(1) 通过电压传感器直接测量学生电源的输出电压，获取正弦交流电的电压随时间变化的图像，可由图像拟合的函数表达式中直接读取其最大值和周期。(2) 用数字多用表的交流电压挡直接测量学生电源输出端的电压，其显示的是正弦交流电压的有效值和周期。通过两个实验测量值的相互验证，从而进一步理解正弦交流电的最大值和有效值之间的关系。**

### [1] 自主活动

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

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

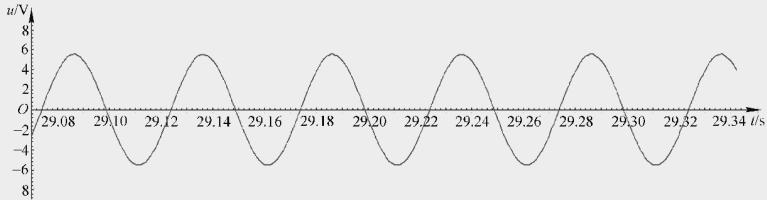


图 7-20 正弦交流电的电压-时间图像

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

所以，这一感应电动势随时间变化的关系式为

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

## [1] STSE

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

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

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

组成。电网质量优劣的主要指标是电压的幅值、频率和波形。

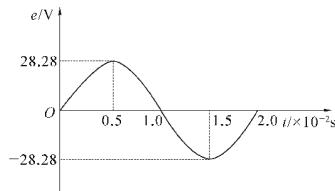


图 7-21 线圈中感应电动势随时间变化的图像

[1] 此处设置“STSE”旨在说明电网的频率是统一规定的，变频空调改变的是输入专用压缩机的频率。

在电力系统中，联系发电和用电设备间的设施及装置统称为电网。电网属于输送和分配电能的中间环节，它主要由联结成网的送电线路、变电站、配电所和配电线

## 问题与思考解读

68 第七章 电磁感应定律的应用

### 1. 参考解答：

$U_m = 220\sqrt{2} \text{ V} \approx 311 \text{ V}$ , 每秒电流方向改变 100 次

**命题意图：**理解交变电流最大值和有效值的关系，知道交变电流的频率。

**主要素养与水平：**模型建构（I）；科学推理（II）。

**2. 参考解答：**不正确。在线圈平面转到中性面的瞬间，如图 7-17(a) 所示，穿过线圈的磁通量最大，但是 ab 和 cd 边均没有切割磁感线，磁通量的变化率为零，因而线圈中感应电动势为零；在线圈平面跟中性面垂直的瞬间，如图 7-17(b) 所示，穿过线圈的磁通量为零，但是 ab 和 cd 均垂直切割磁感线，磁通量的变化率最大，因而线圈中的感应电动势最大。

**命题意图：**理解中性面，以及磁通量、磁通量变化率和感应电动势之间的联系和区别。

**主要素养与水平：**模型建构（I）；科学推理（II）。

**3. 参考解答：**摇动手柄使模型发电机的线圈在磁场中旋转，并切割磁感线，接通电路前输出功率为零，提供的机械功率只需要克服线圈转动产生的摩擦阻力。模型发电机接通电路后，提供的机械功率除了要克服线圈转动产生的摩擦阻力以外，还要提供通电线圈和负载的电功率，所以模型发电机在接通电路并输出电流后比接通电路前需要用更大的力摇动手柄。

**命题意图：**应用能量守恒定律解决实际发电机能量转化问题。

**主要素养与水平：**模型建构（I）；科学推理（II）；科学论证（II）。

### 问题与思考

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



图 7-22

**4. 参考解答：**电解电容器标注的“300 V”是该电容器能够接交流电的电压最大值，其有效值为  $U =$

$$\frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{300}{\sqrt{2}} \text{ V} \approx 212.1 \text{ V}$$

**命题意图：**知道电容器标注的电压值是指能够接在电容器两端电压的最大值。

**主要素养与水平：**模型建构（I）；科学推理（II）。

**5. 参考解答：**（1） $U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{150}{\sqrt{2}} \text{ V} \approx 106.1 \text{ V}$

（2） $I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{30}{\sqrt{2}} \text{ A} \approx 21.2 \text{ A}$

（3） $P = UI = 106.1 \times 21.2 \text{ W} \approx 2249 \text{ W} \approx 2250 \text{ W}$

**命题意图：**理解交变电流最大值、有效值和功率之间的关系。

**主要素养与水平：**模型建构（I）；科学推理（II）。

**6. 参考解答：**（1） $U_{\max} = \sqrt{2}U = \sqrt{2} \times 220 \text{ V} \approx 311 \text{ V}$

（2） $I = \frac{U}{R} = \frac{220}{11} \text{ A} = 20 \text{ A}$

（3） $E = UIt = 220 \times 20 \times 3600 \text{ J} \approx 1.58 \times 10^7 \text{ J} \approx 4.4 \text{ kW} \cdot \text{h}$

**命题意图：**理解交变电流最大值、有效值和消耗的电能之间的关系。

**主要素养与水平：**能量观念（I）；模型建构（I）；科学推理（II）。

**7. 参考解答：**如果灯泡（负载）的两端  $A$  和  $B$  接通交流电源。当电流为正时，如果电流从  $A$  端流入负载，电流对负载做功，能量流入负载；当电流为负时，电流从  $B$  端流入负载，电流仍然对负载做功，能量还是流入负载，因此交流电在整个周期内都有能量提供给负载。

**命题意图：**根据交变电流的特点分析用电器的能量转化。

**主要素养与水平：**能量观念（I）；模型建构（I）；科学推理（II）。

## 资料链接

### 三相交流电

如果在磁场里有三个互成一定角度的线圈同时转动，电路里就产生三个交变电动势，由此产生的交流电叫做三相交流电。

图 4 是三相交流发电机原理的示意图。在铁芯上固定着三个相同的线圈  $U_1U_2$ 、 $V_1V_2$ 、 $W_1W_2$ ，始端是  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$ ，末端是  $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$ ，三个线圈平面互成  $120^\circ$  角。当三个线圈在匀强磁场里做匀速转动时，就会产生三个频率和最大值都相同，但“步调”不同的交流电动势。由于三个线圈的平面依次相差

$120^\circ$  角，则它们感应电动势达到零值（中性面）和最大值（跟磁场方向平行）的时间，依次落后  $\frac{1}{3}$  周期。如果

取如图 4 所示的瞬间作为时间的起点，即  $t=0$  时线圈  $U_1U_2$  位于中性面上，三个线圈里的感应电动势就如图 5 中的三条正弦曲线所示。

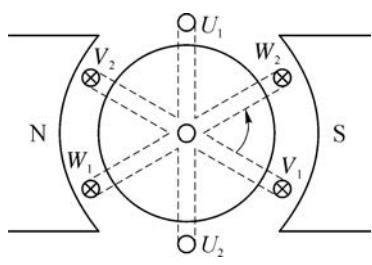


图 4

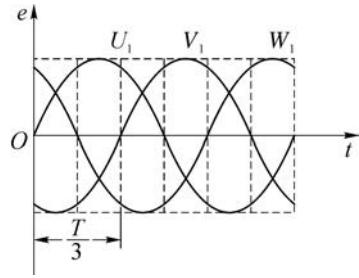


图 5

### 正弦交流电的有效值与最大值之间的关系

正弦交流电的有效值与最大值的关系可以用数学方法推导。设通过电阻的交流电瞬时值为  $i = I_m \sin \omega t$ , 则在  $dt$  时间内产生的热量是  $dQ = i^2 R dt$ , 这是因为在极短时间  $dt$  内, 交流电的变化很小, 可以认为流经阻值为  $R$  的纯电阻的电流值  $i$  是不变的, 所以可用直流电的公式计算。因此, 在一个周期  $T$  内所产生的热量

$$Q = \int_0^T dQ = \int_0^T i^2 R dt = R \int_0^T i^2 dt$$

如果直流电流  $I$  通过同一个电阻, 在相同时间( $T$ )内所产生的热量

$$Q' = I^2 R T$$

根据交流电有效值的定义, 若  $Q' = Q$ , 则

$$I^2 R T = R \int_0^T i^2 dt$$

由此式得, 交流电的有效值可表示为瞬时值的方均根值

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

若该交流电为正弦交流电, 即交变电流为  $i = I_m \sin \omega t$ , 代入上式, 有

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = I_m \sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt} = I_m \sqrt{\frac{1}{2T} \left( t - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega} \right)} \Big|_0^T = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 I_m$$

同理, 正弦交流电的电压有效值

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_m^2 \sin^2 \omega t dt} = U_m \sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt} \\ &= U_m \sqrt{\frac{1}{2T} \left( t - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega} \right)} \Big|_0^T = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 U_m \end{aligned}$$

所以, 正弦交流电的有效值等于其最大值的 0.707 倍。

## 本节编写思路

依据课标,本节教学要求学生能够亲身经历实验探究的过程,通过实验得出“变压器线圈两端的电压与匝数之间关系”的结论。变压器是交变电路中常见的一种电器设备,也是远距离输电不可缺少的装置。

理解变压器的基本原理是电磁感应理论。交变电流与恒定电流不同,虽然连接变压器原、副线圈的铁芯不带电,原、副线圈之间也没有载流导线连接,但是当原线圈接入交变电压时就有交变电流输出。输入原线圈的交变电压在其中产生的交变电流在铁芯中产生交变的磁通量,铁芯使副线圈中产生相同的交变磁通量,从而副线圈中产生感应电动势。对于外界的负载来说副线圈相当于一个交变电源,能够对负载供电。

磁场具有能量。变压器是把电能通过磁场能再转换成电能的装置。经过变压器转换后,交流电压和交流电流的大小一般都将发生变化。

## 第三节 变压器

交变电流技术的发展使远距离输电成为现实,促进了人类社会的发展。发电厂的大型交流发电机发出的电压可达几十千伏,为了减少电能损耗,远距离输电需要利用几百千伏高压(图7-23)。实际应用中,不同的用电设备通常需要的交流电的电压不同:家用照明电路的额定电压是220V;工厂电动机的额定电压大多是380V;电子控制线路中的电压一般不超过10V;机床上使用的安全照明灯要



图7-23 远距离超高压输电

[1] 接在24V的电源上,而广告霓虹灯的灯管则需要10000V以上的电压。为此,人们研制出能改变交流电电压的变压器以适应不同的电压需要。变压器是根据电磁感应原理设计而成的能够升高或降低交流电电压的电气设备。图7-24(a)是油浸式三相电力变压器,图7-24(b)是单相降压变压器,图7-24(c)是手机充电器内部元件,其中也包含小型变压器。变压器种类繁多,应用广泛,但基本结构和原理都是相似的。



图7-24 常见的变压器

### ▶ 变压器的组成

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

变压器的铁芯由导磁能力强的多层硅钢片组成,硅钢片涂覆了绝缘漆膜,以减

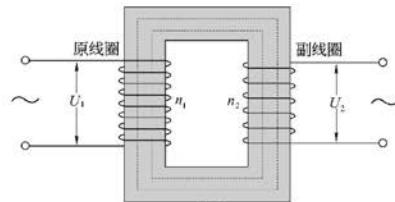


图7-25 变压器原理图

电能的输送是一个理论和技术性都很强的复杂系统工程,属于电力工程学科的一个分支。电能输送不但要求“可靠”“保质”,而且还必须“经济”,在输送电功率一定的条件下,尽可能减少电能损失。

## 正文解读

[1] 电力变压器是用来将某一数值的交流电压(电流)变成频率相同的另一种或几种数值不同的电压(电流)的设备。电力变压器是发电厂和变电所的主要设备之一。

三相电力变压器是3个相同容量的单相电力变压器的组合而成。它有三个铁芯柱,每个铁芯柱都绕着同相位的2个线圈,一个是高压线圈,另一个是低压线圈。能够产生振幅相等、频率相等、相位互差120°的发电机称为三相发电机;以三相发电机作为电源,称为三相电源。以三相电源供电的电路,称为三相电路。三相称为U、V、W,每一相引出的输电线称为相线,相线与相线之间的电压是线电压,我国交流电的线电压为380V;相线与中心线(零线)之间的电压称为相电压,我国交流电的相电压为220V。

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

### [1] 实验说明：

实验前观察可拆式变压器的结构特点，注意原、副线圈的不同接线柱对应的匝数不同。

实验采用控制变量的方法，通过改变原、副线圈的匝数探究原、副线圈的电压比与匝数比的关系。

当变压器原线圈0、400匝两接线柱接入交流12V电压，副线圈0、200匝两接线柱未接小灯泡时，用多用电表交流电压挡测量副线圈两端的电压；然后再将额定电压为6V的小灯泡接在此副线圈的输出端，观察小灯泡的发光情况。

保持变压器原线圈输入的交流电压不变，先后测量副线圈不同匝数对应接线柱的电压。记录各组匝数和对应的电压，比较对应的匝数比和电压比。

本实验采用低压交流电源，保证安全。

### [1] 学生实验

#### 探究变压器原、副线圈电压与匝数的关系

##### 提出问题

变压器输入和输出电压与原、副线圈的匝数有何关系？

##### 实验原理与方案

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

##### 实验装置与方法

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

##### 实验操作与数据收集

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

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



图7-26 探究变压器原、副线圈电压与匝数关系的实验装置

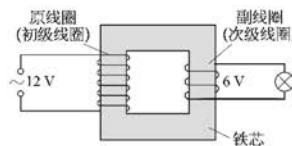


图7-27 探究变压器的匝数比与输入、输出电压之间的关系

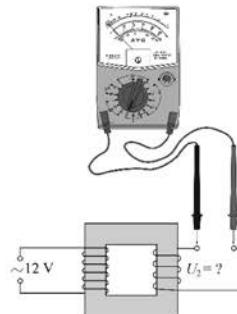


图7-28 用多用电表测量副线圈的输出电压

表 7-1 实验数据记录表

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

## 数据分析

## 实验结论

## 交流与讨论

交流实验中改变副线圈电压的方法，讨论产生实验误差的原因。

## [1] ▶ 理想变压器原、副线圈的电压比与匝数比的关系

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

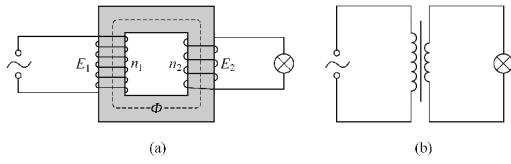


图 7-29 变压器工作原理图

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

得

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

式中  $n_1$  和  $n_2$  分别为原、副线圈的匝数。

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

[2]

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

一定的数值。

原线圈的设计匝数  $n_1$  与铁芯材料、铁芯截面积、电源的频率、导线的材料、铁芯的型式等都有关系。一般小型变压器要求每伏 10 匝左右。上述降压变压器原线圈的匝数

$$n_1 = 10 \times 220 \text{ 匝} = 2200 \text{ 匝}$$

副线圈的匝数

$$n_2 = 10 \times 110 \text{ 匝} = 1100 \text{ 匝}$$

[1] 理想变压器是理想模型之一。理想变压器的原、副线圈都没有电阻，通过原、副线圈每一匝的磁通量都相同，而且铁芯中没有磁滞损耗（磁化过程中磁滞现象引起磁介质发热消耗的能量）和涡流损耗（交变磁通在铁芯中产生的涡流造成的损耗），铁芯不会发热。

[2] 根据公式  $\frac{U_1}{U_2} =$

$\frac{n_1}{n_2}$ ，如果要绕制一个

220 V 降为 110 V 电压的降压变压器，是否可以将原线圈绕 2 匝，副线圈绕 1 匝呢？

这样做肯定是不可以的。如果按照上述方法，把绕有 2 匝的原线圈接到 220 V 电源上，通过原线圈的电流将很大。可见，正常工作的变压器不仅要保证原、副线圈有一定的匝数比，而且原线圈的感抗不能太小，即要求原线圈的匝数  $n_1$  不能小于

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

**示例** 理想变压器的原线圈匝数  $n_1 = 2200$ ，输入电压为 220 V。为了使副线圈得到 36 V 输出电压，副线圈匝数  $n_2$  应为多少？

**分析：**根据理想变压器的电压比和匝数比的关系，可以求出副线圈匝数。

**解：**已知  $n_1 = 2200$ ，输入电压  $U_1 = 220$  V，输出电压  $U_2 = 36$  V，由

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

得

$$n_2 = \frac{U_2}{U_1} n_1 = \frac{36}{220} \times 2200 \text{ 匝} = 360 \text{ 匝}$$

所以，副线圈需要 360 匝。

### [1] 变压器的功率

消耗等于输入功率  $P_1$  和输出功率  $P_2$  之差，即  $\Delta P = P_1 - P_2$ 。变压器功率损耗包括铜损和铁损。铜损是指绕组导线电阻发热的损耗；铁损又分为磁滞损耗和涡流损耗两部分。为减少涡流损耗，铁芯一般由导磁性能较好的硅钢片叠成。

变压器的效率为变压器输出功率与输入功率的百分比，即  $\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$ 。

常见的变压器介绍详见本节资料链接。

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

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

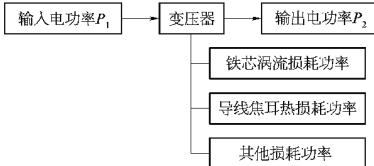


图 7-30 实际变压器的功率转换关系

### 拓展视野

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

$$P_1 = P_2$$

所以

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

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

### ▶ 电能的输送

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

### ▶ 远距离高压输电

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

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

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

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

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

显然，只要 10 倍提升输电电压就能 100 倍降低焦耳热功率。

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

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

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

[1] 远距离高压交流输电都采用三相交流电。三相交流电输电系统是由输送三个频率相同、电压振幅相等、相位差互差  $120^\circ$  角的交流电的设备组成的电力系统。

[2] 输电线路的电压越高，输送单位电能的损耗越低，输送电能的能力越强，输送的距离越远。输电电压也不是越高越好，输电的电压越高，对输电线路和变压器的要求越高，设备绝缘等级就要越高，导致成本越贵，建设费用越高。实际输送电能时，要综合考虑输送功率的大小、距离的远近和建设成本等因素，依照不同情况选择合适的输电电压。

[1] 交流发电厂和用电设备之间都有一个输电网络。通过输电网将电能配送给用户。如果另外一个发电机也想用这个输电网络输电,除了要求交流发电机输出电压、相序(三相交流电的相位顺序)、频率和波形都应相同以外,还必须保证交流发电机输出电压的相位和原有发电机匹配,这些都是交流发电机并网运行的基本条件。同一个电网的电压相位相同称之为电网的同步。多台交流发电机并网运行,可以减小发电机输出电压和频率的波动,提高供电质量。不同电网连接在一起同步运行,并实现功率交换的联网方式称为同步联网。但是同步联网也存在运行管理复杂、交流同步联网可能会出现低频振荡等稳定性问题。此外,当系统发生多重故障或连锁反应时,还可以由于电网间的相互影响而导致事故扩大或大面积停电。

类似于直流电路中电阻对电流的阻碍作用,在交流电路(如串联  $RLC$  电路)中,电容及电感也会对电流起阻碍作用,称作电抗(reactance),其单位是欧姆。在交流电路分析中,电抗用于表示电感及电容对交变电流的阻碍作用。电抗随着交流电频率的变化而变化,并引起电路中的电流与电压的相位变化。

[2] 此处设置“STSE”的目的是说明除了高压交流输电以外,还有高压直流输电,两种输电方式具有不同的特点。直流输电的功率传输稳定性较好,线路故障时的自防护能力较强。交流输电过负荷能力较强,能够用变压器来改变电压等级。直流输电的换流站的造价远高于交流输电设备,而直流输电线路的造价则明显低于交流输电线路,直流输电的电网损耗比交流输电小得多。

高压直流输电通常采用双极供电,比如±800 kV 直流输电,就是+800 kV 直流电和-800 kV 直流电同时供电(电压都是指对地的电压,正常运行时两输电线之间的电压是直流 1 600 kV)。当然,在换流站一般也还有中性金属回线,能够保证在某一极故障或检修时,仅使用+800 kV 或者-800 kV 直流电单极供电。

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

[1]

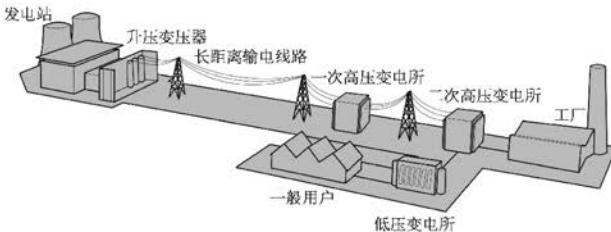


图 7-31 远距离输电

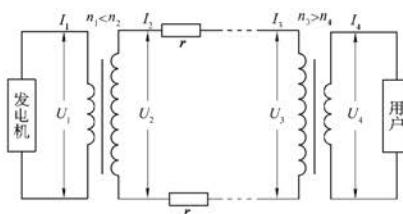


图 7-32 远距离输电原理

[2]

## STSE

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

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

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

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

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



图7-33 特高压直流输电工程上海奉贤换流站设备



图7-34 特高压直流输电线路

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

### 问题与思考

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

**3. 参考解答：**降压变压器的输入电压 $U_1$ 较高，输出电压 $U_2$ 较低，由于 $\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2}$ ，所以降压变压器的

初级线圈匝数比次级线圈多。由于副线圈的电压较低，输送相同的功率，副线圈的电流较大

**命题意图：**理解变压器基本原理及输送功率的概念，分析相关问题推出结论：传输一定的功率，在改变原、副线圈电压的同时也改变通过两线圈的电流。

**主要素养与水平：**模型建构(I)；科学推理(I)；科学论证(II)。

**4. 参考解答：**能够降低电压向电灯供电是图(b)所示的变压器

因为变压器不能改变直流电压，而图(a)和图(c)的输入端接直流电压，输出端电压为零，电灯不亮，因此图(a)和图(c)均错。图(b)初级线圈的匝数多于次级线圈的匝数，是一个降压变压器；图(d)初级线圈

**1. 参考解答：**恒定电流在变压器的原线圈(初级线圈)内产生的磁场是恒定的，这个恒定的磁场在副线圈(次级线圈)内不能产生感应电动势，所以变压器的次级线圈也就没有输出电压了

**命题意图：**理解变压器的原理。

**主要素养与水平：**模型建构(I)；科学推理(II)。

**2. 参考解答：**这个变压器原来是作为降压变压器使用的，将原线圈和副线圈对调以后就成为升压变压器了。原来变压比是 $3:1$ ，现在成为 $1:3$ 了，所以输出的电压为 $18 \text{ V}$

**命题意图：**理解变压器的原线圈和副线圈是根据实际使用情景命名的，并不是绝对的。

**主要素养与水平：**模型建构(I)；科学推理(II)。

的匝数少于次级线圈的匝数，是一个升压变压器。综合以上分析，只有图(b)能够降低电压向电灯正常供电

**命题意图：**应用变压器的基本原理分析实际问题。

**主要素养与水平：**模型建构(I)；科学推理(II)。

**5. 参考解答：**将该变压器视为理想变压器，则次级线圈的匝数为

$$\begin{aligned} n_2 &= \frac{U_2}{U_1} n_1 \\ &= \frac{9.0}{220} \times 660 \text{ 匝} \\ &= 27 \text{ 匝} \end{aligned}$$

**命题意图：**应用变压器的基本原理分析计算相关物理量。

**主要素养与水平：**模型建构(I)；科学推理(II)。

#### 6. 参考解答：

$$\begin{aligned} U_2 &= \frac{n_2}{n_1} U_1 \\ &= \frac{1}{4} \times 12 \text{ V} \\ &= 3 \text{ V} \end{aligned}$$

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

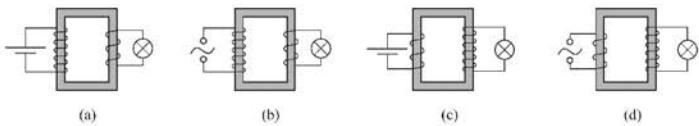


图 7-35

5. 一台笔记本计算机首先从 220 V 的电源通过变压器得到有效值为 9.0 V 的交流电压。如果变压器的初级线圈为 660 匝，次级线圈有几匝？

6. 某理想变压器原、副线圈的匝数之比为 4 : 1。当输入电压为 12 V 时，输出电压为多少？当输入电压减少 2 V 时，输出电压为多少？输入电压的改变量  $\Delta U_1$  与输出电压改变量  $\Delta U_2$  之比为多少？

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



图 7-36

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

**命题意图：**应用变压器的基本原理分析并计算电压变化量之比与匝数比之间的关系。

**主要素养与水平：**模型建构(I)；科学推理(II)。

**7. 参考解答：**(1) 变压器工作过程中电流通过原、副线圈产生焦耳热，外部的散热器做成管道状是为了增大对外散热面积，较快降温

(2) 设计这一装置利用的是连通器原理。玻璃管与油箱组成一个充满同样液体的连通器，静止时液面处于同一高度

(3) 管道沿竖直方向便于变压器中的导热油形成对流增强散热能力

(4) 若变压器油箱中的导热油装得全满，变压器工作过程产生的热量使导热油受热膨胀，容易将变压器胀破造成事故

**命题意图：**熟悉实际输电变压器外部基本结构和作用。

**主要素养与水平：**能量观念(I)；模型建构(I)；科学推理(I)。

## 资料链接

### 常见的变压器

变压器在电力工程和电子技术中有广泛的应用，下面作些简单的介绍。

#### (1) 电力变压器

电力变压器，适用于将某一数值的交流电压(电流)转变成频率相同的另一种或几种数值不同的电压(电流)，以满足不同负载的需要。电力变压器是发电厂和变电所的主要设备之一，也是远距离输电和分配电能的重要电器设备。

#### (2) 电源变压器

在日常生活中，各种家用电器所使用的电压不同。不少家用电器常使用低压直流电源工作，需要用电源变压器把220V交流电转换成不同电压的低压交流电，再通过二极管整流，电容器滤波，形成直流电供用电器工作。在这个转变过程中，电源变压器自身的能量损耗较小，从而达到了方便和经济的目的。

#### (3) 自耦变压器

自耦变压器的铁芯上只绕有一个线圈。如果把整个线圈作为原线圈，副线圈只取线圈的一部分，就可以降压，如图6(a)所示。如果把线圈的一部分作为原线圈，整个线圈作副线圈，就可用来升压，如图6(b)所示。

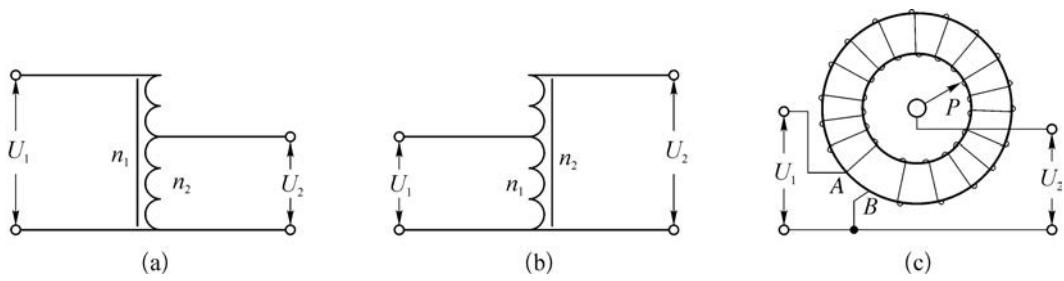


图 6

如果将图6(a)中输出电压的接触点设计成能够移动的滑动触头\$P\$，那么改变\$P\$的位置就可以调节输出电压\$U\_2\$，这样的自耦变压器称为调压变压器，如图6(c)所示。

自耦变压器在不需要初、次级隔离的场合都有应用，具有体积小、耗材少、效率高的优点。常见的交流调压器、家用小型交流稳压器内的变压器、三相电机自耦减压起动箱内的变压器等等，都是自耦变压器的应用范例。由于自耦变压器供电方式非常适用于大容量负荷的供电，对通信线路的干扰又较小，所以被客运专线以及重载货运铁路所广泛采用。

#### (4) 感应圈

感应圈主要部分是两个绕在铁芯上的绝缘导线线圈。初级线圈是几匝粗导线直接绕在铁芯上，次级

线圈则由几千匝细导线组成。感应圈的初级线圈中有节奏地通过断续的直流电，副线圈两端电压可高达数万伏。这样高的电压足以使跟副线圈两端相连接的两根金属棒间隙中的空气电离击穿，产生火花放电。

感应圈设计简单且制造成本较低，是工业生产和实验室中用低压直流电获得交变高压的一种装置。通常应用于汽车发动机点火、煤气灶和卡式炉等含有高压电击器的设备中。

#### (5) 智能变压器

智能变压器是一种新型的变压器。智能变压器除了有变压器基本部件以外，还装置了传感器、智能控制部件、检测装置和传输装置。智能变压器运行过程中利用传感器收集实时信息，实时根据变压器运行工作状况和环境进行自适应调节，除了能够自动有载调压、自动温度控制、自动补偿控制等，还能够在在线监测和故障诊断。智能变压器耗用资源少，加工简单，既减少人力维护成本又提高设备运行的可靠性，是智能电网的核心设备。

## 第四节 发电机和电动机

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

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

### ▶ 发电机的主要性能和能量转化

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

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

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

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

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

本节从能量转化的角度分析发电机和电动机的功能，基于电磁感应和安培力相关概念分别介绍发电机和电动机的基本原理及结构。通过对发电机和电动机的发明及在生产生活实践中的广泛应用的介绍，说明发电机和电动机是实现第二次工业革命的重要基础，以及电磁理论对科技发展和社会进步的巨大作用。

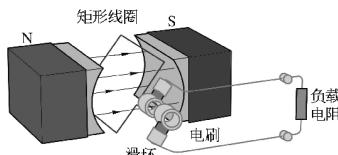


图 7-37 旋转电枢式发电机

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

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

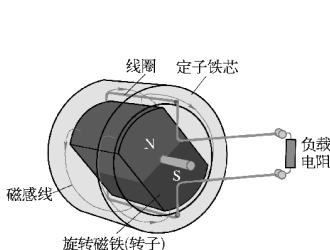


图 7-38 旋转磁极式发电机

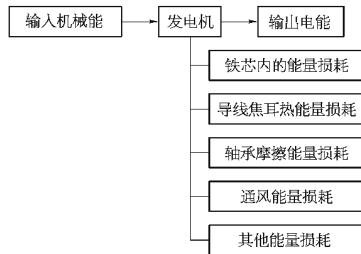


图 7-39 发电机的能量转换关系

### ► 电动机的主要性能和能量转化

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

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

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

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

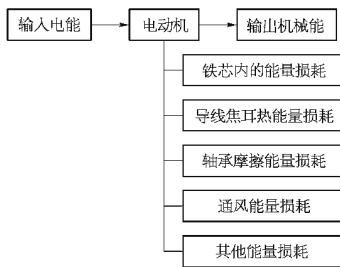


图 7-40 电动机的能量转换关系

## 正文解读

### ► 电磁学促进了社会的发展

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

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

### 问题与思考

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

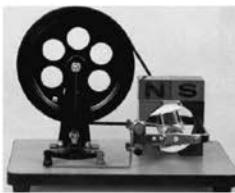


图7-41

导致现代的科学技术，如原子能、电子计算机、微电子技术、航天技术等发展。第四次工业革命是以人工智能、新材料技术、分子工程、机器人技术、量子信息技术、可控核聚变、清洁能源以及生物技术等为突破口的工业革命。

### 问题与思考解读

1. 参考解答：不能实现发电机和电动机的连续运转。电动机和发电机的线圈都存在电阻，在运行过程中，通电线圈产生焦耳热，同时电动机和发电机的轴与轴承之间也存在摩擦阻力，克服摩擦阻力做功也将产生热。根据能量守恒定律，由于存在这些能量损耗，不可能实现发电机和电动机的连续运转。

[1] 工业革命也称为产业革命，是指国民经济各部门广泛采用新技术，以及由此引起的经济发展和产业结构的根本变革。第一次工业革命发生在17—18世纪。牛顿力学的建立和热力学的发展导致了蒸汽机的发明，使人类进入蒸汽动力时代。第二次工业革命发生在19世纪中叶到19世纪末。法拉第发现了电磁感应现象，麦克斯韦创立了电磁理论。电磁理论的创立和发展推动了发电机、电动机、电器、电信设备等的发明和制造，使人类进入了电气时代。电力开始用于带动机器，成为补充和取代蒸汽动力的新能源。第三次工业革命发生在19世纪末到20世纪，相对论、量子论的创立和发展极大地拓宽和加深了人们对物质基本结构和基本性质的认识，

**命题意图：**了解发电机和电动机的基本原理和能量守恒定律。

**主要素养与水平：**能量观念(I); 模型建构(I); 科学推理(I)。

**2. 参考解答：**动车组在减速时不直接采用机械刹车，而是关闭电源。由于动车组具有惯性仍将继续行驶，此时磁场中的线圈随车轮一起转动，使线圈中的部分导线切割磁感线产生感应电动势，这时动车的电动机转变成发电机，把动车组的部分机械能转化为电能。采用此项技术能够节能环保，有利于提高电能利用率，降低动车的运行成本

**命题意图：**进一步理解其能量转化机理及节能设计。有利于形成节能环保观念。

**主要素养与水平：**能量观念(I); 模型建构(I); 科学推理(I)。

**3. 参考解答：**手摇发电机的工作原理是电磁感应，线圈在磁场中切割磁感线产生感应电动势，线圈与小灯泡组成的闭合回路产生感应电流使小灯泡发光；若增加线圈的转动速度，线圈在磁场中切割磁感线的速度增大，感应电动势增大，使发电机的输出功率增加，小灯泡变亮；两个发光二极管极性相反的并联后再与手摇发电机电源输出端串联，两个发光二极管不会同时发光，而是交替发光，说明手摇发电机输出的是交变电流

**命题意图：**有利于理解交流发电机的原理和输出交变电流的特点。

**主要素养与水平：**能量观念(I); 模型建构(I)。

**4. 参考解答：**小型电扇的工作原理是通电线圈在磁体产生的磁场中受安培力作用绕轴转动；用手快速拨动风扇叶片，小型电扇中的线圈在磁场中切割磁感线产生感应电动势，小型电扇的电动机变成了小型发电机

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

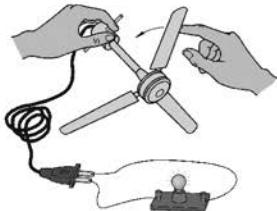


图 7-42

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



图 7-43

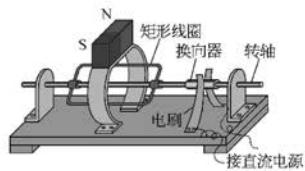


图 7-44

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

**命题意图：**有利于理解发电机和电动机的基本原理和能量守恒定律。

**主要素养与水平：**能量观念(I);模型建构(I)。

**5. 参考解答：**发电旋转门的工作原理是导体切割磁感线在闭合回路中产生感应电流,与发电机工作原理类似;发电旋转门的推门过程中将部分机械能转化为电能

**命题意图：**了解节能发电装置,有利于形成节能环保观念。

**主要素养与水平：**能量观念(I);模型建构(I);社会责任(I)。

**6. 参考解答：**改变电流方向或改变磁场方向都会使电动机转动方向与原来相反

**命题意图：**理解发电机和电动机的基本原理。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(I);模型建构(II)。

## 资料链接

### 电动机

电动机俗称“马达”,是使电能转化为机械能的电机,分直流电动机、交流电动机、同步电动机和异步电动机等。

直流电动机是使直流电能转化为机械能的电机。直流电动机输入电流为直流。一般由具有换向器的旋转电枢和直流励磁的静止的磁场结构(磁极和励磁绕组)组成。原则上同一电机既可用作发电机,也可用作电动机。

交流电动机是使交流电能转化为机械能的电机。交流电动机输入电流为交流。有单相的或多相的,单相的多用于家用电器设备、农业机械和电力机车拖动中。多相的一般是对称的三相或两相。三相交流电机是电力工业的主要动力设备。两相交流电机多用于自动控制中。

同步电动机是交流电动机的一种。转子一般制成凸极的,装有励磁绕组;通常还装有笼型绕组,以便起动。电源频率不变时,转子转速固定不变,同负载无关,常用在转速不变和改善电网功率因数的电气传动中,也常用于拖动大型压缩机和轧钢机等冲击负载。无励磁绕组的凸极同步电动机,容量较小,常用在电子电位差计、电影摄影机和放映机等设备中。

异步电动机是转速异于同步转速的一种交流电动机。常用于定速拖动中。三相定子绕组接上三相电源后,就在其中产生旋转磁场并在转子绕组中感应电流。定子旋转磁场和转子电流相互作用形成转矩,使转子旋转。单相电动机则利用在辅助绕组中接入电阻或电容,形成旋转磁场以实现起动。转子结构分绕线式和笼型两种。绕线式电动机的起动转矩和起动电流,可通过转子电路中接入的电阻进行调节,以适应不同负荷的起动要求,并在适当范围内可以调速。笼型电动机的结构简单,售价低廉,维护方便,应用最广,可以直接起动,但起动电流较大。

交直流两用电动机是励磁绕组和电枢绕组串联的小型的换向器电动机。定子铁芯由凸极的叠片组成,具有集中的励磁绕组。可运行于直流或单相交流系统。常用于家用电器(如吸尘器)或电动工具(如电钻)中。

交流换向器电动机的转子带有换向器,交流换向器电动机的转速可平滑调节,调节范围很广,调节时,功率损失较小。起动和工作特性良好,但成本较高,换向器和电刷的维护和检修都较复杂。

交-直-交流电力传动机车是一种新型铁路机车。通过车内的晶闸管整流器把交流电转变为直流电,再用大功率逆变器把直流电转变为频率可调节的交流电,供给交流牵引电动机驱动机车动轮对。在电力传动内燃机车上,交流电源来自柴油机驱动的牵引发电机;在电力机车上,交流电源直接来自工频电网。这种机车的交流牵引电动机结构简单、运行可靠,价格较低,牵引性能优越,是一种很有发展前途的新型

机车。

交-直流电力传动内燃机车的牵引发电机为交流电机、牵引电动机为直流电机的一种电力传动内燃机车。柴油机带动三相交流同步发电机，发出的三相交流电经过大功率半导体整流装置转变为直流电，供给直流牵引电动机驱动机车动轮对。这种交-直流电力传动内燃机车的功率较大，重量较轻，已得到广泛应用。

以上部分参考《辞海》

## 小结

### · 基本概念和基本规律

**自感现象：**因线圈中电流变化而在线圈自身引起的电磁感应现象。

**涡流：**在金属块体内形成的闭合感应电流。

**交变电流：**大小和方向都随时间做周期性变化的电流，简称交流电。

**交变电流的最大值：**交变电流一个周期中所能达到的最大值。

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

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

**变压器：**根据电磁感应原理设计而成的能够升高或降低交变电压的设备。

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

### · 基本方法

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

通过变压器的组装、获取数据、发现规律、误差分析等过程，认识实验探究的方法。

### · 知识结构图



## 复习与巩固解读

82 第七章 电磁感应定律的应用

**1. 参考解答：**若线圈A和B的绕线方向相同，则线圈B向右摆动；反之，线圈B向左摆动。此时线圈A的运动原理类似于发电机，线圈B的运动原理类似于电动机。

**命题意图：**有利于理解发电机和电动机的基本原理和能量守恒定律。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(I)；模型建构(I)。

**2. 参考解答：**增加线圈的匝数或者增大交流电源的频率都能缩短加热时间，家用电磁炉的工作原理与此类似。

**命题意图：**有利于知道涡流现象的实际应用。

**主要素养与水平：**模型建构(I)；科学推理(II)；科学论证(II)。

**3. 参考解答：**图示装置的磁感线竖直向上， $t=0$ 时线圈四条边均不切割磁感线，感应电流为0；当线圈绕 $OO'$ 轴顺时针转 $90^\circ$ 时 $ad$ 边向右切割磁感线，根据“右手定则”判断感应电流的方向是 $abcda$ ，此时是负向最大电流；当线圈绕 $OO'$ 轴顺时针转 $180^\circ$ 时 $ad$ 边在右边，线圈四条边均不切割磁感线，感应电流为0；当线圈绕 $OO'$ 轴顺时针转 $270^\circ$ 时 $ad$ 边向左切割磁感线，根据“右手定则”判断感应电流的方向是 $adcba$ ，此时是正向最大电流；当线圈绕 $OO'$ 轴顺时针转 $360^\circ$ 时 $ad$ 边在左边回到原来位置，线圈四条边均不切割磁感线，感应电流为0。综合上述分析可知图(c)是正确的。

**命题意图：**通过分析线圈转动过程中切割磁感线的情况，进一步理解交流电的产生原理。

**主要素养与水平：**模型建构(I)；科学推理(II)；科学论证(II)。

**4. 参考解答：**由题意得： $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{0.6\sqrt{2}}{\sqrt{2}} A = 0.6 A$ ,  $U_2 = IR_2 = 0.6 \times 20 V = 12 V$

## 复习与巩固

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

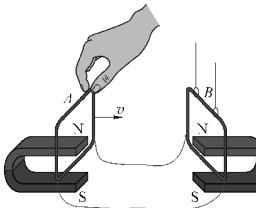


图 7-45

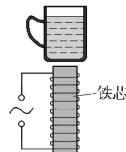


图 7-46

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

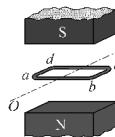


图 7-47

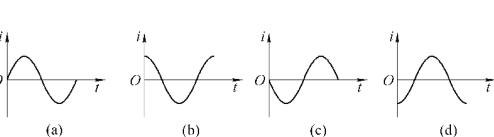


图 7-48

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

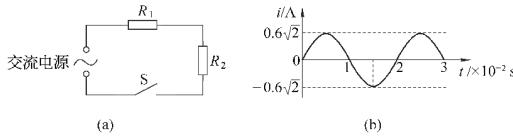


图 7-49

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

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

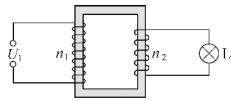


图 7-51

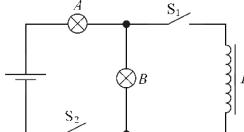


图 7-52

7. 如图 7-52 所示, A、B 是两盏完全相同的白炽灯, L 是电阻不计的电感线圈。如果断开开关 S<sub>1</sub>, 闭合 S<sub>2</sub>, A、B 两灯都能同样发光。如果最初 S<sub>1</sub> 是闭合的, S<sub>2</sub> 是断开的, 那么, 闭合 S<sub>2</sub> 以后, A 灯和 B 灯亮度如何变化? 此时如果断开 S<sub>2</sub>, A 灯和 B 灯亮度又将如何变化?

8. 一个匝数比一定的理想变压器在改变输出交流电的电压大小的同时, 输出交流电电压的频率是否也改变了? 理想变压器输出电压变化的原因是什么? 理想变压器输入电功率变化的原因是什么?

9. 一电热器接在 10 V 的直流电源上, 产生一定大小的热功率。现把它改接到交流电源上, 要使它产生的热功率是原来的 2 倍, 则交流电压的有效值为多少? 交流电压的最大值为多少? (不考虑电阻随温度的变化)

**命题意图:** 有利于

通过  $i-t$  图像理解交流电的有效值和最大值之间的关系, 用一段电路欧姆定律计算纯电阻两端的电压。

**主要素养与水平:**

科学推理(II); 科学论证(II)。

**5. 参考解答:** 开关 S 断开之前通过灯 L 的电流方向由 a 到 b, 断开之后的瞬间通过灯 L 的电流方向由 b 到 a

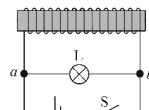


图 7-50

**命题意图:** 理解变化的电流通过自感线圈形成自感现象, 分析前后两个过程的电流变化特点。

**主要素养与水平:**

模型建构(I); 科学推理(II); 科学论证(II)。

**6. 参考解答:** 只增加副线圈匝数, 变压器输入电压不变, 变压器输出电压变大, 电灯变亮, 变压器输入功率变大。理想变压器输入的电能经变压器先转化为磁场能, 再经变压器将磁场能转化为电能输出

**命题意图:** 应用变压器的基本原理分析相关物理量的变化和能量转化过程。

**主要素养与水平:** 能量观念(I); 模型建构(I); 科学推理(II)。

**7. 参考解答:** 闭合开关 S<sub>2</sub> 以后, A 灯变亮, B 灯由亮变暗; 此时如果断开开关 S<sub>2</sub> 时, A 灯立即熄灭, B 灯先亮一下然后熄灭

**命题意图:** 变化的电流通过自感线圈形成自感现象, 分析前后两个过程的电流变化特点。

**主要素养与水平:** 模型建构(I); 科学推理(II); 科学论证(II)。

**8. 参考解答:** 理想变压器输出交流电压的频率始终等于输入交流电压的频率, 所以改变交流电的输出电压不会改变输出的交流电压的频率。匝数比一定的理想变压器所输出电压的变化原因是输入电压的变化。变压器输出端负载变化引起输出电流变化, 从而引起输出功率变化。理想变压器输入功率等于

输出功率，输出功率变化引起输入电功率也发生变化。由于变压器的输入电压是固定不变，所以输入电流将随输出功率的变化而变化

**命题意图：**有利于理解理想变压器原、副线圈之间频率、电压、电流和功率之间的关系。

**主要素养与水平：**模型建构（I）；科学推理（II）；科学论证（II）。

### 9. 参考解答：

$$R = \frac{U_1^2}{P_1} = \frac{U_2^2}{P_2},$$
$$U_2 = U_1 \sqrt{\frac{P_2}{P_1}} = 10 \times \sqrt{\frac{2P_1}{P_1}} = 10\sqrt{2} \text{ V}$$
$$U_m = \sqrt{2}U_2$$
$$= \sqrt{2} \times 10\sqrt{2} \text{ V}$$
$$= 20 \text{ V}$$

**命题意图：**进一步理解交变电流的功率、最大值和有效值的关系。

**主要素养与水平：**模型建构（I）；科学推理（II）；科学论证（II）。

**10. 参考解答：**（1）交流电压的有效值为  $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{311}{\sqrt{2}} \text{ V} \approx 220 \text{ V}$ ，与电饭煲额定电压相等，电饭煲能正常工作

$$(2) I = \frac{P}{U} = \frac{1000}{220} \text{ A} = \frac{50}{11} \text{ A} \approx 4.55 \text{ A}$$

$$(3) i = \frac{50}{11}\sqrt{2} \sin 314t (\text{A}) \approx 6.43 \sin 314t (\text{A})$$

**命题意图：**从交变电流图像分析最大值和有效值的关系，计算其功率、理解交流电压瞬时表达式中各项的物理意义。

10. 如图 7-53 所示，交流电的电压  $u=311\sin 314t (\text{V})$ ，加在一个“220 V 1 000 W”的电饭煲上。

试问：

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

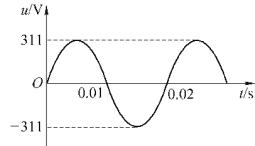


图 7-53

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

**主要素养与水平：**模型建构(Ⅰ);科学推理(Ⅱ);科学论证(Ⅱ)。

**11. 参考解答：**输电线上损失的电功率  $\Delta P = I_2^2 R$

$$\text{则电线上的电流 } I_2 = \sqrt{\frac{\Delta P}{R}} = \sqrt{\frac{1000 \times 10^3 \times 0.04}{16}} \text{ A} = 50 \text{ A}$$

$$\text{则升压变压器输出电压 } U_2 = \frac{P_2}{I_2} = \frac{P_1}{I_2} = \frac{1000 \times 10^3}{50} \text{ V} = 20 \times 10^3 \text{ V}$$

$$\text{输电线量损失的电压 } \Delta U = I_2 R = 50 \times 16 \text{ V} = 800 \text{ V}$$

$$\text{降压变压器输入电压 } U_3 = U_2 - \Delta U = (20 \times 10^3 - 800) \text{ V} = 19200 \text{ V}$$

$$\text{则 } n_1 : n_2 = U_1 : U_2 = 1000 : 20 \times 10^3 = 1 : 20$$

$$n_3 : n_4 = U_3 : U_4 = 19200 : 240 = 80 : 1$$

**命题意图：**理解变压器的原理,应用变压器实现远距离输电,知道采用高压输电的原因。

**主要素养与水平：**能量观念(Ⅱ);模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅲ);科学论证(Ⅳ)。

## 第三部分 本章练习部分解读

### 第一节 自感现象和涡流现象

**1.** 铜片从磁场中拉出或推入时的阻力就是磁场对涡流的安培力。在铜片向右拉出磁场的过程中,铜片中形成涡流,涡流方向如图 7 所示,在磁场中的那部分涡流受到向左的安培力  $F$  作用,阻碍着铜片向右运动。同理,将铜片向左推入磁场时也要受到阻碍着铜片向左运动的安培力

**2.** (1)  $A$ 、 $B$  两极靠得越近,击穿空气产生电火花需要的电压越低,所以副线圈两极距离较近时,在接通开关和断开开关瞬间,即使电压不很高也都有火花产生;(2) 如果副线圈两极距离较远,接通开关时,由于自感作用,原线圈电流是逐渐增大的,在副线圈两端产生的电压不是很高,不能产生火花;断开开关瞬间,原线圈产生很大的自感电动势,通过升压后在副线圈两端产生的电压很高,所以仍然可能有火花出现

**3.** 用多用电表欧姆挡检查匝数较多的带铁芯线圈是否断线时,由于多用电表内有直流干电池作为电源,不要用手捏住线圈的两端再去接触表笔,以免断开时受到电击。应当用手握表笔的绝缘棒,直接让表笔金属部分接触线圈两端。这样,脱离接触时人体与线圈不构成回路,可避免电流通过人体放电产生电击

**4.** (1)  $A$ 、 $B$  两灯的电阻均为  $20\Omega$ 。开关  $S$  闭合的瞬间,电感线圈产生较大的自感电动势,可将电感线圈视为断路, $A$  灯与电阻  $R$  并联后再与  $B$  灯串联,通过  $B$  灯的电流大于通过  $A$  灯的电流。之后,自感线圈的自感电动势减小, $A$ 、 $B$  两灯两端的电压相等,通过两灯的电流也相等

(2)  $S$  断开时, $A$  灯的电流瞬间变为零,由于自感线圈与  $B$  灯形成一个闭合回路,所以  $B$  灯的电流慢慢变为零

**5.** (1) 当开关  $S$  由断开变为闭合的瞬间,电源的电压同时加到两灯上, $A$ 、 $B$  两灯同时亮,随着线圈

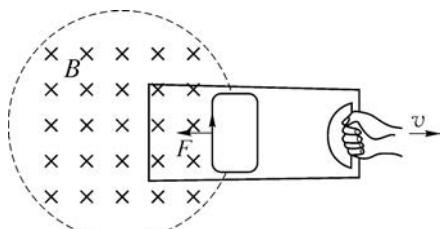


图 7

$L$  中电流增大,由于线圈  $L$  直流电阻可忽略不计,分流作用增大, $B$  灯逐渐被短路直到熄灭。外电路总电阻减小,总电流增大, $A$  灯更亮

(2) 当开关 S 由闭合变为断开的瞬间, $B$  灯与线圈  $L$  构成自感回路,所以  $B$  灯由暗变亮再逐渐熄灭, $A$  灯立即熄灭

6. 自感电动势与电流的变化率成正比,即  $E \propto \frac{\Delta I}{\Delta t}$

所以,  $\frac{E_1}{E_2} = \frac{\frac{\Delta I_1}{\Delta t_1}}{\frac{\Delta I_2}{\Delta t_2}}$ , 即  $\frac{\Delta I_2}{\Delta t_2} = \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{\Delta I_1}{\Delta t_1} = \frac{80}{50} \times \frac{0.04}{0.001} \text{ A/s} = 64 \text{ A/s}$

## 第二节 交 变 电 流

1. (a) (c) (e) (f), (c)

2. 最大 最小 变小 变大

在线圈从中性面转动  $90^\circ$  的过程中,穿过线圈的磁通量逐渐减小,线圈中的感应电动势逐渐增大

3. 电流的有效值为  $I = \frac{P}{U} = \frac{45 \times 10^3}{660} \text{ A} \approx 68.18 \text{ A}$

电流的最大值为  $I_m = \sqrt{2}I = \sqrt{2} \times 68.18 \text{ A} \approx 96.42 \text{ A}$

4. (1)  $E = \frac{e_m}{\sqrt{2}} = \frac{311}{\sqrt{2}} \text{ V} \approx 220 \text{ V}$

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

(3) 闭合线圈处于中性面时感应电动势为零,所以  $0 \text{ s}, 0.01 \text{ s}, 0.02 \text{ s}$  和  $0.03 \text{ s}$  时闭合线圈均处于中性面

5. (1) 由图(b)可知该交流电压的周期为  $0.02 \text{ s}$

(2) 电压随时间的变化规律为  $u = \sqrt{2}U \cos 100\pi t (\text{V}) = 10\sqrt{2} \cos 100\pi t (\text{V})$

根据欧姆定律,电流随时间的变化规律为

$$i_R = \frac{u}{R} = \frac{10\sqrt{2} \cos 100\pi t}{5} (\text{A}) = 2\sqrt{2} \cos 100\pi t (\text{A})$$

6. (1) 当  $t$  为  $0 \text{ s}, 1 \text{ s}$  和  $2 \text{ s}$  时,磁通量为零,线圈平面平行于磁感线,感应电动势最大

$t$  为  $0.5 \text{ s}$  和  $1.5 \text{ s}$  时,电流改变方向

(2) 感应电动势的最大值为

$$E_m = NB \left( 2L_1 \frac{L_2}{2} \omega \right) = NBS\omega = N\Phi_m \frac{2\pi}{T} = 100 \times 0.04 \times \frac{2\pi}{0.02} \text{ V} = 4\pi \text{ V} \approx 12.56 \text{ V}$$

感应电动势的有效值为  $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{4\pi}{\sqrt{2}} \text{ V} = 2\sqrt{2}\pi \text{ V}$

一个周期内线圈产生的热量  $Q = \frac{E^2}{R}T = \frac{(2\sqrt{2}\pi)^2}{4} \times 2 \text{ J} = 4\pi^2 \text{ J} \approx 39 \text{ J}$

7. 因为  $E_m = nBS\omega$ , 交流发电机线圈的转速提高 1 倍,即  $\omega' = 2\omega$ , 则  $E'_m = 2nBS\omega = 2E_m$ , 所以电动

势的瞬时值变为  $e' = 2E_m \sin 2\omega t$

8. 交流电的最大值为  $5\sqrt{2}$  A, 有效值为 5 A, 周期为 0.02 s, 频率为 50 Hz

因为  $i = 5\sqrt{2} \sin\left(100\pi t - \frac{\pi}{2}\right)$  A =  $-5\sqrt{2} \cos(100\pi t)$  A, 所以, 该正弦交流电的电流-时间图像如图 8 所示

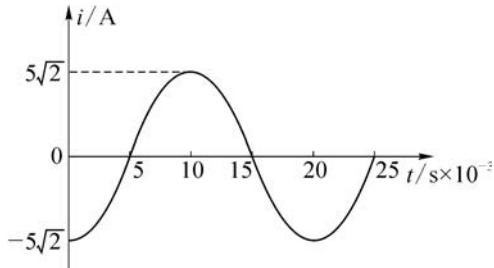


图 8

### 第三节 变压器

1. 2 : 1 1 100

$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{110} = \frac{2}{1}$ , 所需变压器的匝数比为 2 : 1

电吹风正常工作时的功率为  $P_2 = P_1 = U_2 I_2 = 110 \times 10 \text{ W} = 1100 \text{ W}$

2. 不变 减小

理想变压器副线圈两端的输出电压  $U_2$  只与原线圈的输入电压和变压器的匝数比有关, 与负载无关。设电阻  $R$  和灯泡  $L_1$  两端的电压分别为  $U_R$  和  $U_L$ 。因为  $U_2 = U_R + U_L$ , 当开关 S 闭合时, 负载电阻减小, 根据欧姆定律, 通过电阻  $R$  的电流增大, 使电阻两端的电压  $U_R$  增大, 则  $U_L$  减小, 通过灯泡  $L_1$  的电流减小

3. 原线圈 2 000 匝, 副线圈 200 匝

设原线圈的匝数为  $n_1$ , 副线圈的匝数为  $n_2$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{22} = \frac{10}{1} \quad \frac{n_1}{n_2 + 100} = \frac{U_1}{U'_2} = \frac{220}{33} = \frac{20}{3}$$

联立解得  $n_1 = 2000$  匝,  $n_2 = 200$  匝

4. 220 0.02

原线圈交变电压的有效值为  $U_1 = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{311}{\sqrt{2}} \text{ V} \approx 220 \text{ V}$

副线圈上  $e$ 、 $d$  之间的电压为  $U_{ed} = \frac{U_2}{2} = \frac{1}{2} \times \frac{n_2}{n_1} U_1 = \frac{1}{2} \times \frac{1}{10} \times 220 \text{ V} = 11 \text{ V}$

电压的周期为 0.02 s

5. 180 粗

$$n_2 = \frac{U_2}{U_1} n_1 = \frac{36}{220} \times 1100 \text{ 匝} = 180 \text{ 匝}$$

因为理想变压器的输入功率等于输出功率, 输出电压降低, 所以输出电流增大。根据焦耳定律, 电流通过导线产生的热量与电流的二次方成正比。为了减少导线的发热量, 可以减小导线的电阻。根据电阻定律, 导线长度和导线材料相同的情况下, 导线越粗, 横截面积  $S$  越大, 则电阻越小, 所以副线圈的导线比

原线圈粗

6.  $380\sqrt{2} \quad 10 : 1$

$$U_m = \sqrt{2}U = 380\sqrt{2} \text{ V}, \frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{380}{38} = \frac{10}{1}$$

7.  $P_{\text{损}} = I^2 R = \left(\frac{P}{U}\right)^2 R, R = \left(\frac{U}{P}\right)^2 P_{\text{损}} = \left(\frac{U'}{P}\right)^2 P'_{\text{损}}$

$$\left(\frac{U}{P}\right)^2 \times 0.2P = \left(\frac{U'}{P}\right)^2 \times 0.05P$$

所以,  $U' = \sqrt{\frac{0.2}{0.05}} \times 220 \text{ V} = 440 \text{ V}$

8. (1)  $U_2 = \frac{n_2}{n_1} U_1 = \frac{15000}{500} \times 220 \text{ V} = 6600 \text{ V}$

(2)  $P_1 = P_2 = U_1 I_1 = 220 \times 3 \text{ W} = 660 \text{ W}$

(3)  $I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{660}{6600} \text{ A} = 0.1 \text{ A}$

9. (1) 设升压变压器的输入电压为  $U_1$ , 输出电压为  $U_2$ , 输入电流为  $I_1$ , 输出电流为  $I_2$ ; 降压变压器的输入电压为  $U_3$ , 输出电压为  $U_4$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}, U_2 = \frac{n_2}{n_1} U_1 = \frac{5}{1} \times 400 \text{ V} = 2000 \text{ V}$$

$I_2 = \frac{P_2}{U_2}$ , 理想变压器的输入功率等于输出功率, 即  $P_1 = P_2$ , 所以

$$I_2 = \frac{P_1}{U_2} = \frac{40 \times 10^3}{2000} \text{ A} = 20 \text{ A}$$

输电线上损失的电功率为  $\Delta P = I_2^2 R = 20^2 \times 5 \text{ W} = 2000 \text{ W}$

(2) 输电线上损失的电压  $\Delta U = I_2 R = 20 \times 5 \text{ V} = 100 \text{ V}$

降压变压器的输入电压为  $U_3 = U_2 - \Delta U = (2000 - 100) \text{ V} = 1900 \text{ V}$

所以, 降压变压器的变压比为  $\frac{n_3}{n_4} = \frac{U_3}{U_4} = \frac{1900}{220} = \frac{95}{11}$

10. (1) 因为三峡河段每年的平均流量  $Q = 4500 \times 10^8 \text{ m}^3 = 4.5 \times 10^{11} \text{ m}^3$ , 则每年内流过的水的质量为  $M = 4.5 \times 10^{14} \text{ kg}$ , 水的落差为 100 m, 所以, 一年内水的重力势能的减少量为  $Mgh = 4.5 \times 10^{17} \text{ J}$

每年的总发电量为  $W = 1 \times 10^{11} \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^{17} \text{ J}$

所以, 三峡电站的能量转化率约  $\eta = \frac{W}{Mgh} = \frac{3.6 \times 10^{17}}{4.5 \times 10^{17}} \times 100\% \approx 80\%$

(2) 32 台发电机的总功率为  $P = 7 \times 10^8 \times 32 \text{ W} = 2.24 \times 10^{10} \text{ W}$

当输电效率为 99% 时  $P_{\text{损}} = P \times 1\% = 2.24 \times 10^8 \text{ W}$

而  $P_{\text{损}} = I^2 R$ , 所以  $I = \sqrt{\frac{P_{\text{损}}}{R}} = \sqrt{\frac{2.24 \times 10^8}{20}} \text{ A} \approx 3.347 \times 10^3 \text{ A}$

$$\text{因而输电电压 } U_2 = \frac{P}{I} = \frac{2.24 \times 10^{10}}{3.347 \times 10^3} \text{ V} = 6.693 \times 10^6 \text{ V}$$

由于发电机提供的电压约为 1900 V, 所以升压变压器的匝数比

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{1900}{6.693 \times 10^6} \approx \frac{1}{3500}$$

线路损耗的电压  $U_{\text{损}} = IR = 3.347 \times 10^3 \times 20 \text{ V} = 6.694 \times 10^4 \text{ V}$

到达降压变压器输入端的电压

$$U_3 = U_2 - U_{\text{损}} = (6.693 \times 10^6 - 6.694 \times 10^4) \text{ V} = 6.626 \times 10^6 \text{ V}$$

所以, 降压变压器的匝数比

$$\frac{n_3}{n_4} = \frac{U_3}{U_4} = \frac{6.626 \times 10^6}{220} \approx \frac{30000}{1}$$

## 第四节 发电机和电动机

1. 机械 电 电 机械
2. 电枢 磁极 磁极 电枢
3. 法拉第电磁感应定律 磁场对电流
4. 构造简单、控制方便、体积小、效率高、功率可大可小、无污染源
5. 蒸汽机 电磁感应 电磁学 电气

## 第四部分 本章实验与活动部分解读

### 1. 自主活动 研究自感现象

**参考解答:** 采用图 9 所示实验装置的电路图, 不但可以演示通电自感现象, 还能演示断电自感现象。其中  $L$  为可拆式变压器中的 800 匝线圈, 将其套在闭合铁芯上,  $A_1$  和  $A_2$  均为“6.3 V 0.3 A”灯泡, 电源的电动势为 4.5 V,  $R$  的阻值调到和线圈  $L$  的直流电阻相等。实验时先不接通开关  $S_1$ , 当开关  $S$  接通的瞬间, 由于  $L$  的自感作用, 可看到灯泡  $A_1$  比  $A_2$  后亮, 达到稳定后两灯泡亮度相同。保持  $S$  接通, 把  $S_1$  也接通, 再迅速切断开关  $S$ , 可看到灯泡  $A_2$  突然闪亮一下, 然后熄灭。

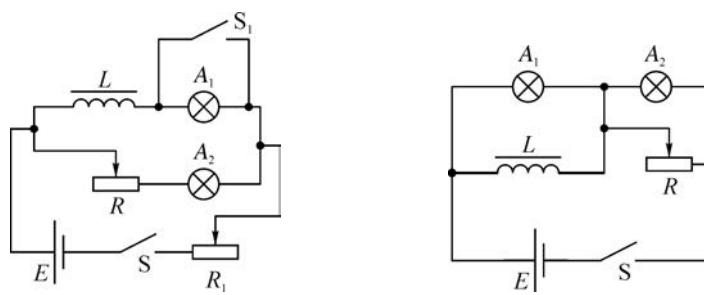


图 9

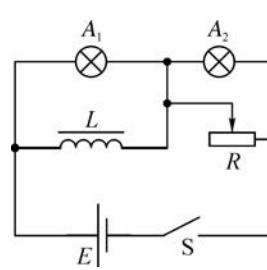


图 10

也可以采用如图 10 所示的实验电路图, 演示通电自感现象和断电自感现象。其中  $L$  为可拆式变压

器的 400 匝或 200 匝线圈,将其套在闭合铁芯上,灯泡  $A_1$  和  $A_2$  均为“6.3 V 0.3 A”,电源的电动势为 4.5 V,  $R$  的阻值调到和  $L$  的直流电阻相等。当开关 S 接通的瞬间,由于  $L$  的自感作用,灯泡  $A_1$  先很亮且亮度逐渐降低,灯泡  $A_2$  后发光且亮度逐渐增强,达到稳定后两灯亮度相同。断开 S 的瞬间, $A_2$  立即熄灭, $A_1$  突然闪亮一下,然后熄灭

**命题意图:** 利用所学知识设计实验,有利于提升科学探究和科学思维素养。

2. 自主活动 观察正弦交变电流的电压随时间变化的规律

**参考解答:** 改变学生电源的交流输出电压,对实验结果而言,其正弦交流电压函数表达式中的最大值  $U_m$  变小,但函数表达式中的最大值  $U_m$  与数字多用表测得的有效值  $U$  之比保持不变,同时周期  $T$  也保持不变。此外,由于实验中所选择的初始条件不同,正弦交流电的函数表达式中的初相位可能不同

**命题意图:** 通过计算机屏幕显示的实验图像,利用专用软件中函数拟合方法获得正弦交流电的函数表达式,进一步理解函数表达式的意义,有利于提高科学思维素养。

3. 学生实验 探究变压器原、副线圈电压与匝数的关系

**参考解答:** 变压器的原、副线圈可以交换使用。变压器的原、副线圈的命名具有相对的意义,当原线圈的匝数大于副线圈的匝数时,变压器实际使用的效果是一个降压变压器;如果将原、副线圈交换使用,该变压器实际使用的效果就成为升压变压器了

**命题意图:** 此问题可以进一步理解变压器的原理是基于电磁感应,变压器交流输入端的线圈能够在铁芯中产生变化磁场,这个线圈称为原线圈;铁芯中变化磁场在交流输出端产生感应电动势的线圈称为副线圈。变压器的原、副线圈交换,就是交换变压器的输入端和输出端。

# 第八章 电磁振荡与电磁波

## 第一部分 整 章 分 析

### 学习目标

1. 通过认识麦克斯韦电磁场理论、电磁波及电磁波谱等内容进一步深化物质观念、能量观念。
2. 通过了解电磁场理论建立过程体会科学推理的思维；通过研究电磁振荡的过程体会模型建构、类比等方法。
3. 通过赫兹实验体会实验证据在物理研究中的重要作用；通过实验了解电磁振荡。
4. 通过电磁场理论的学习，体会理论预言在科学发展中的作用，感受自然界的和谐统一；了解电磁波应用和前沿发展，感受科技对社会发展的推动作用，激发学习兴趣。

### 编写意图

课程标准对本章内容的要求为：

- 2.3.1 初步了解麦克斯韦电磁场理论的基本思想，初步了解场的统一性与多样性，体会物理学对统一性的追求。
- 2.3.2 通过实验，了解电磁振荡。
- 2.3.3 知道电磁波的发射、传播和接收。
- 2.3.4 认识电磁波谱。知道各个波段的电磁波的名称、特征和典型应用。

本章内容是在必修三电磁场与电磁波的内容基础上，结合必修一学习的机械波和光波的相关知识，对电磁场和电磁波的内容进行较为深入的介绍。通过对电磁场和电磁波的学习，深化对“场”的认识。物质的根本属性之一是具有能量，电磁波也具有能量，是其物质性最有力的证据之一。本章的学习始终与能量相结合，由此深化物质观念和能量观念。麦克斯韦电磁场理论的提出与验证体现了科学思维在科学发现中的重要意义，也体现了科学探究的过程。电磁波在现代社会生活中的应用展现了科学对技术发展和社会进步的重要作用。

本章的核心概念为电磁场理论、电磁振荡、电磁波谱等。

本章内容是电场、磁场、电磁感应、电容器充放电、电感器自感等知识的综合应用，是必修部分“电磁场与电磁波初步”的深化，是促进学生形成物理观念和培养科学思维的重要载体。

完成本章内容学习共需要 5 课时。第一节 1 课时，第二节 1 课时，第三节 2 课时，第四节 1 课时。

## 第二部分 本章教材解读

# 第八章 电磁振荡与电磁波

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

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

## 本节编写思路

本节主要内容是电磁场理论的建立与验证,强调了科学推理和实验证据的重要性。电磁场理论建立的过程体现了科学理论发现的艰辛,亦体现物理学对统一性的追求。

### 第一节 麦克斯韦电磁场理论

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

电磁场理论既涉及电场,也涉及磁场,更包括电场和磁场的紧密联系。

[1]

#### 大家谈

请谈谈磁现象与电现象间的区别与联系。

#### ► 电磁场理论建立的基础

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

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

可以说,场的观念是牛顿时代以来,在物理学基础理论方面最重要的变革和发展。

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

#### ► 麦克斯韦电磁场理论的主要观点

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

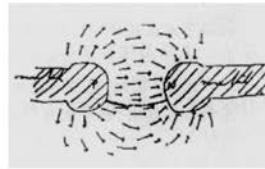


图8-1 法拉第描绘的两个带电导体球间的电场

## 正文解读

[1] 此处“大家谈”旨在引导学生思考和总结电和磁的关系,引出麦克斯韦电磁场理论的学习。

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

### 1. 变化的磁场在周围空间产生电场

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

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

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

### 2. 变化的电场在周围空间产生磁场

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

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

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

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

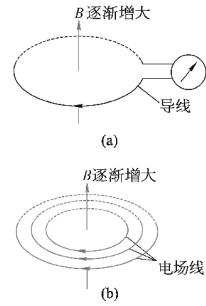


图 8-2 变化的磁场产生电场

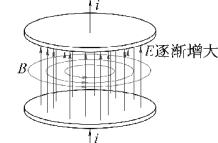


图 8-3 变化的电场产生磁场

[1] 麦克斯韦正是相信电场与磁场有对称之美，才从“变化的磁场周围产生电场”联想到“变化的电场周围产生磁场”。

### ► 电磁场理论的意义

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

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

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

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

麦克斯韦出生在电磁学已经打好基础的年代，他没有辜负时代的要求，总结了已有的成就，甩掉一切陈旧的论点，把电磁场作为客观存在摆在电磁场理论的核心地位，从而开创了物理学一个新的纪元，完成了物理学的第三次大综合。爱因斯坦对他作了很高的评价：“自从牛顿奠定理论物理学的基础以来，物理学的公理基础的最伟大的变革，是由法拉第和麦克斯韦在电磁现象方面的工作所引起的。”麦克斯韦不愧为牛顿之后又一位划时代的杰出物理学家。

#### [1] 拓展视野

物理学理论的发展经历了几次大的综合统一。

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

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

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

[1] 此处的“拓展视野”介绍物理学发展过程中的几次大的综合统一，目的是展现物理学对统一性的追求。

综合。

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

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

### ► 电磁波的验证

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



图8-4 赫兹（H. R. Hertz,  
1857—1894）

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



图8-5 赫兹验证电磁波的实验装置

赫兹不但用实验证实了电磁波的存在，还做了一系列的实验证明电磁波和光波一样，

## 问题与思考解读

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

### 问题与思考

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

量观念(Ⅰ)；模型建构(Ⅰ)；科学推理(Ⅰ)。

**3. 参考解答：**以带指示灯的家用遥控器为例，当按动遥控器按钮时，遥控器前方的指示灯发光，远处的用电器开始工作，这代表电磁波的发射与接收成功，当遮挡遥控器的前方电磁波发射器时，按动遥控器，小灯发光，但用电器工作状态不变，这说明电磁波的传播受到阻碍；当对着墙壁按动遥控器，小灯发光，用电器的工作状态也发生了变化，这表明电磁波发生了反射

**命题意图：**了解生活中电磁波的应用，加强证据意识与交流协作能力。

**主要素养与水平：**问题(Ⅰ)；证据(Ⅰ)；交流(Ⅰ)；社会责任(Ⅰ)。

**1. 参考解答：**(1) 错，随时间均匀变化的电场周围产生的是稳定的磁场  
 (2) 正确，随时间均匀变化的电场周围产生的是稳定的磁场  
 (3) 错，变化的磁场产生的电场可以是稳定的也可以是变化的  
 (4) 错，随时间均匀变化的磁场产生的电场是稳定的

**命题意图：**通过概念辨析，加深对电磁场理论的认识。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(Ⅰ)；科学推理(Ⅰ)。

**2. 参考解答：**麦克斯韦根据法拉第电磁感应现象提出了“变化的磁场能够产生电场”的设想。麦克斯韦确信自然界的规律往往是统一的、对称的

**命题意图：**通过对麦克斯韦电磁理论中对称与统一的认识提升物理观念。

**主要素养与水平：**能

## 本节编写思路

学生已经掌握机械波的产生原理并认识到光是一种电磁波，但仍然不清楚电磁波的产生过程，因此本节内容是本章的重点、难点。教材首先通过自主活动切入，由电磁振荡引入电磁波的产生；在动手和观察中，了解振荡电路的组成及振荡电流的变化规律等，从而积累对电磁振荡的感性认识；接着，教材通过分析电磁振荡的过程，展现电场能与磁场能的相互转化、周期变化等特点，并在“拓展视野”中为同学们提供深入学习电磁振荡的资料；随后，教材通过对电磁波发射的简单原理介绍，联系生活实际，了解电磁波的发射过程。

## 正文解读

[1] 此处“自主活动”旨在通过观察振荡电路中电流变化的规律，增强学生对电磁振荡产生感性的认识；通过对电路元件工作原理的分析，引导学生进一步思考产生这一现象的原因。值得注意的是，此处使用电流传感器代替传统电流表，是因为一方面电感不大时，电流表指针晃动不明显，另一方面电流传感器还可以记录电流大小及时间，这有助于从能量、周期的角度进一步了解电磁振荡。

## 第二节 电磁波的产生与发射

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

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

### ► 电磁振荡

什么是电磁振荡？让我们通过一个实验来认识。

[1]

### 自主活动

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

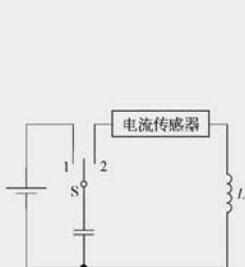


图 8-6 实验电路图

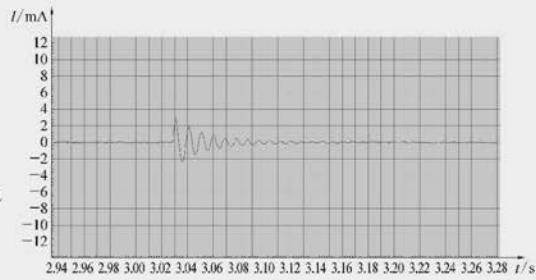


图 8-7 实验记录图

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

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

### ► 电磁振荡的周期性过程

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

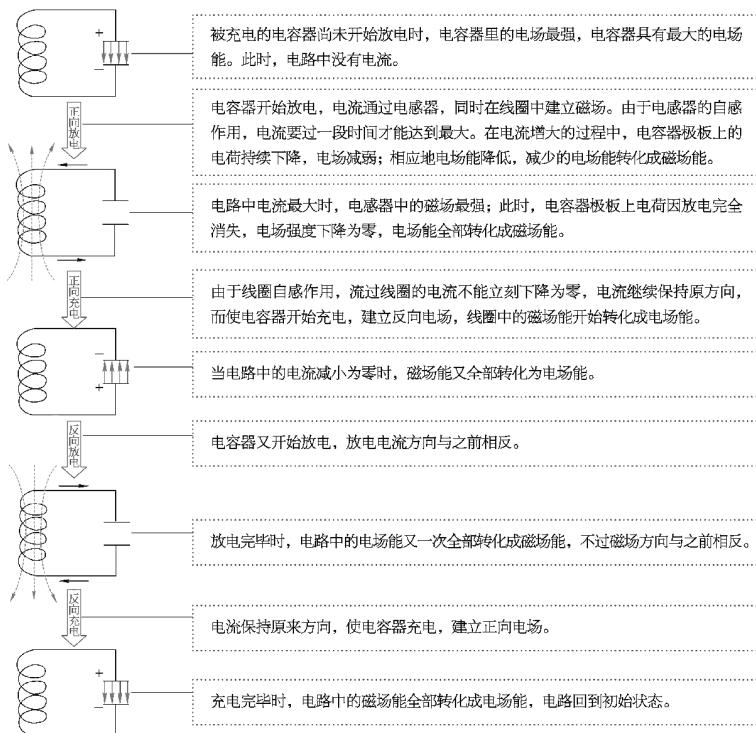


图 8-8 电磁振荡过程

### [1] 在电磁振荡教

学时，首先，应引导学生应用电磁感应的规律分析为什么电容器在放电时电流无法立刻达到最大，为什么电容器放电完毕后电路中还存在电流？随后，分阶段解析电磁振荡过程，包括定性了解何时电容器在充电，何时在放电，电流、磁场能、电场能何时在增大，何时在减小，何时达到最大等；最后，从整体的角度关注电磁振荡的周期性变化特点，同时还可类比机械振动，增强对于能量转化过程的理解。

### [2] 在教学中应建

立起电磁场及电磁能量的关系，通过强调电磁场具有能量的这一特征展现电磁波的物质性。

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

[1] 此处的“拓展视野”介绍了  $LC$  振荡电路的频率表达式。教学中可引导有兴趣的学生关注“自主活动”中振荡电路的振荡频率与电感  $L$ 、电容  $C$  的大小关系；同时还可以介绍了提高电磁波的频率，实际产生电磁波的振荡电路中的电感  $L$ 、电容  $C$  要比实验时小得多。通常情况下，采用晶体振荡器产生电磁波。

[2] 由于实际应用的电磁波发射装置较为复杂，天线的种类也各不相同，此处对电磁波发射条件只需做简单介绍。

### 拓展视野

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

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

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

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

### ▶ 电磁波的发射

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

#### 1. 开放电路

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

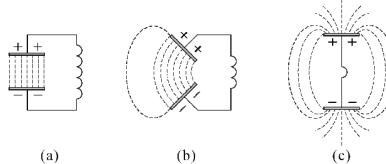


图 8-9  $LC$  电路的演变过程

## 问题与思考解读

94 第八章 电磁振荡与电磁波

### 2. 提高振荡频率

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

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

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

### 问题与思考

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

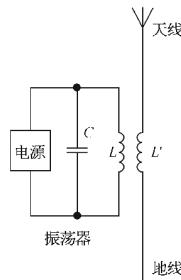


图 8-10 电磁波的发射电路

**1. 参考解答：**参见本节资料链接

**命题意图：**了解电磁振荡的过程，加强物理规律间的联系。

**主要素养与水平：**能量观念(Ⅲ)；模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

**2. 参考解答：**因为线路存在电阻，线路消耗电能；线圈中铁芯内感应电流会产生热量；且交变的电流也能产生电磁波，向空间辐射能量

**命题意图：**了解电磁振荡中的能量损失，增强理论与实际的联系。

**主要素养与水平：**能量观念(Ⅰ)；模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅰ)。

**3. 参考解答：**电磁波是振荡的电场和磁场在空间传播，由场源向周围传播。不过即使场源消失，电磁波也会继续传播，这体现了电磁场具有完全独立存在

的性质，且电磁场具有能量、能与其他物质发生相互作用（事实上电磁场还有质量和动量等一切物质的基本特性），所以电磁场也是一种物质

**命题意图：**通过学习，感受电磁场的物质特性，增强物理观念。

**主要素养与水平：**物质观念(Ⅰ)；运动与相互作用观念(Ⅰ)；能量观念(Ⅰ)；科学推理(Ⅰ)；科学论证(Ⅱ)；科学本质(Ⅱ)。

## 资料链接

### 电磁振荡过程与弹簧振子的振动过程的类比

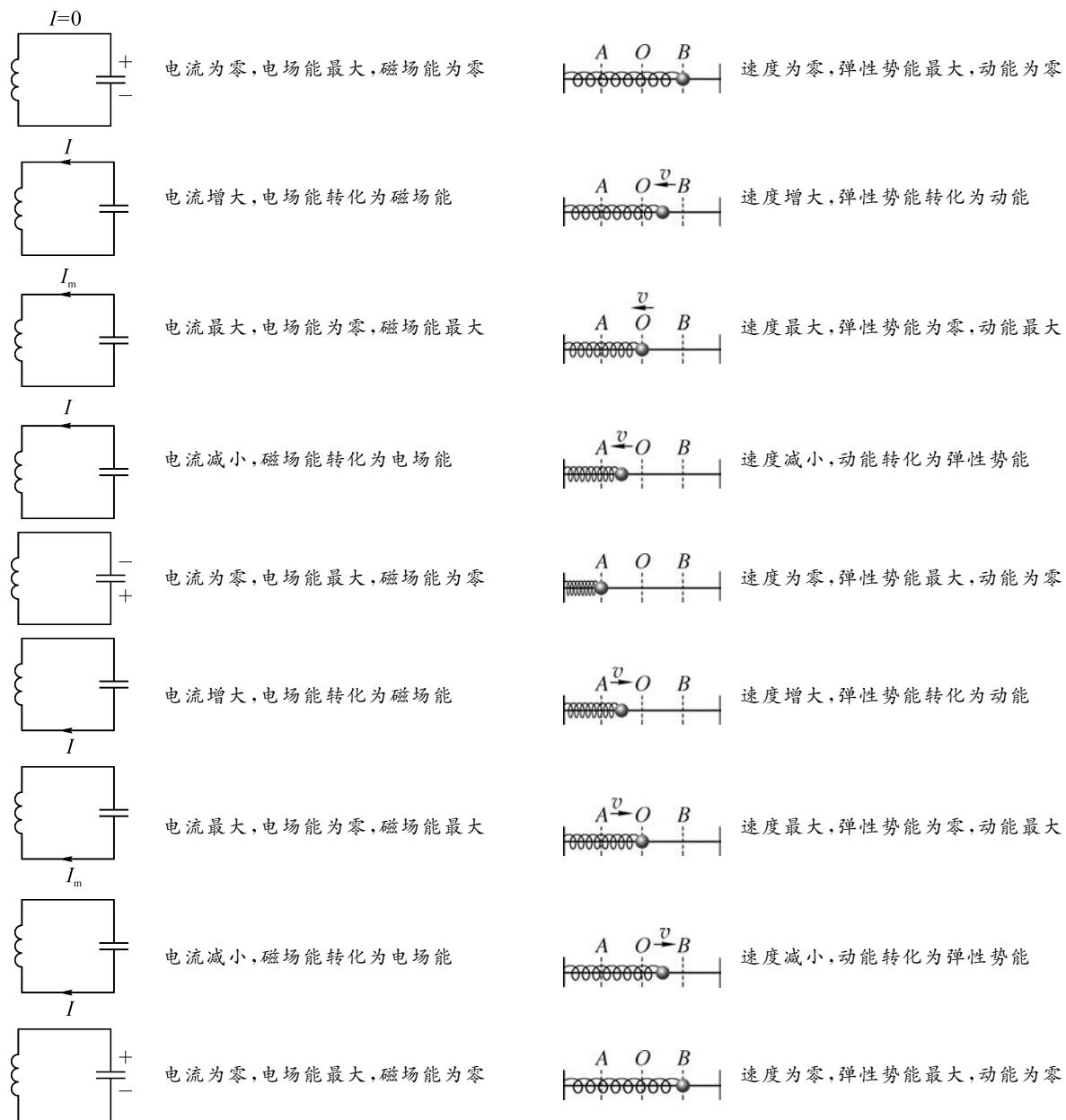


图 1

## 本节编写思路

### 第三节 电磁波的传播和接收

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



图 8-11 移动通信基站

#### ► 电磁波的特性

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

电磁波的波长  $\lambda$ 、频率  $f$ 、波速  $c$  之间的关系和机械波一样

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

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

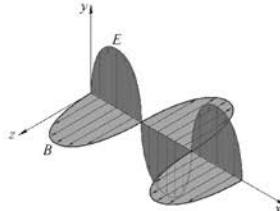


图 8-12 电磁波传播示意图

#### ► 无线电波的传播

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

必修三教材第十一章第四节曾通过实例简单介绍过电磁波的特性。本节需要进一步介绍电磁波传播特性，并比较电磁波与机械波在传播介质、干涉、衍射以及传播速度、频率、波长的计算等方面的不同。同时还可以引导学生讨论电磁波为什么是横波，并借助阅读材料为感兴趣的学生提供深度学习的方向。

## 正文解读

[1] 无线电波的常见传播方式有三种：天波、地波和空间波，这是对电磁波的衍射、反射及沿直线传播等规律的应用。在教学中可以引导学生发现无线电波的波长、频率变化范围非常广，因此在传播方式上存在较大差异；同时利用波长较长较易衍射等规律，介绍三种传播方式与无线电波的波长对应关系。可以通过三种传播方式的特征学习不同无线电波的实际应用，如地波传播更稳定，但在传播时能量会被不断吸收，常被用于超长距离的潜艇、舰艇等通信；天波会受电离层及气候的影响，但是传播距离较远，常被用于无线电广播；空间波的传播效果较好，抗干扰强，但是需要建立很多中间站等。空间波传播比较有代表性的就是微波接力，微波接力需要每

40~60 km 建立一个中继站，提高功率可增加中继站间距。由于微波频率高，带宽较宽，所以能够传播的信息量大，实际生活中应用较广，雷达和通信卫星都是利用微波来进行无线电通信的。

表 8-1 常见无线电波的参数和用途

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

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

### 1. 地波

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

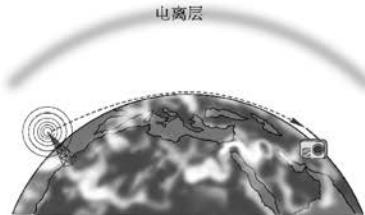


图 8-13 地波示意图

### 2. 天波

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

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

### 3. 空间波

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

### ► 电磁波的接收

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

下面通过实验来观察电磁振荡，探究产生振荡电流的条件。

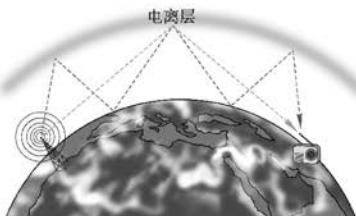


图8-14 天波示意图

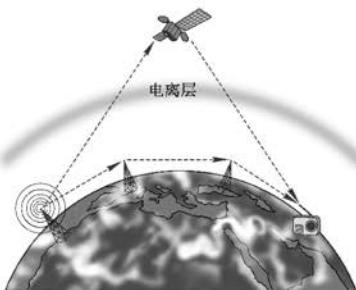


图8-15 空间波示意图

[1] 太阳的活动会影响电磁波通信。例如太阳黑子，指的是太阳表面的一种由炙热气体形成的漩涡，由于其温度(4500℃)低于太阳表面的温度(6000℃)，看起来像太阳的黑斑。当太阳黑子产生时，会对外辐射高能射线，当高能射线进入电离层时会与大气分子发生剧烈碰撞，使电离层局部电子密度迅速增加，这会干扰电磁波利用天波进行传播。

[2] 在教学时应该引导学生发现电磁波无处不在，且电磁波的传递方式也是多种多样的。除了天波、地波及空间波的传播方式外，人们还在两点间建立物理连接，引导电磁波沿着指定路径传输，该方式被称为电磁波导，常见的电磁波导有平行双导线、波导管和光纤等。

### 自主活动

[1] 电谐振是较为抽象的概念。此处设置“自主活动”旨在帮助学生通过实验了解电谐振的条件及相关现象，收集感性和直观的素材，有助于进一步了解电磁波接收的原理。

教学中也可通过与受迫振动、共振的条件及现象的类比来加强对电谐振的理解，建立物理概念和规律间的联系；还可以从能量角度了解电谐振的特点及意义，增强能量观念。

该内容学习时不涉及谐振电路的频率计算等，只需了解电谐振的现象及条件，并懂得电谐振是现代电磁波接收的重要理论基础。

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

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

最后根据氖管发光的亮度，找出振荡电流最大的位置。

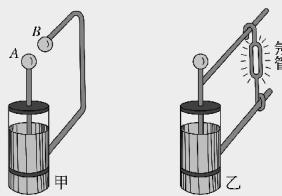


图 8-16 电谐振实验

实验表明，当两个矩形线框面积相等时，振荡电流最大。

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

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

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

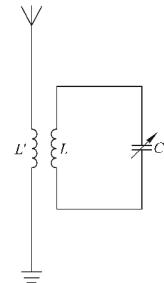


图 8-17 收音机中的接收电路

## [1] STSE

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

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

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

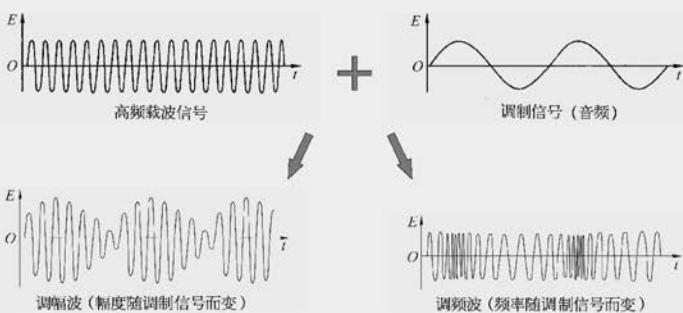


图8-18 模拟调制示意图

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

在接收高频电磁波时，必须把音频信号从已调制的高频电流中分离出来，得到音频

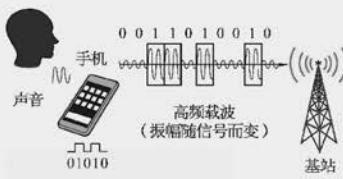


图8-19 数字调制示意图

[1] 电磁波传递信息的过程，除了包含发射和接收电磁波外，还需要将信息有效地“加载”在电磁波上。此处设置“STSE”是为了帮助学生进一步了解信息加载的方式，对如何利用电磁波实现通信有更清晰的认识。教学时可以通过材料阅读让学生辨析“调制”“调幅”“调频”“调谐”“解调”等概念及其相互关系。

图8-18数字调制示意图所展示的电磁波的调制及传播过程可配合教材第97页的手机通信的蜂窝网络与5G技术等内容一同学习，了解手机通信的基本原理，体会科学技术与现代生活的紧密联系。

此外，还可指导学生阅读相关书籍，查阅相关资料等，发展学习的兴趣特长。

[1] 对于图 8-19 的学习,可以组织学生在阅读后进行讨论,解释图中的细节。比如发射过程中,话筒收音后信号是如何加载到电磁波上的?这一过程中载波发生器、调制器和放大器的作用是什么?又比如在信号接收过程中,当收音机的天线接收到电磁波后选台和解调的作用又是什么?对图中各过程的分析及解释有助于应用已学知识,有助于概念和规律的构建和完善,从而提升物理观念,实现理论与实际的紧密联系。

## 问题与思考解读

### 1. 参考解答: 根

据  $t = \frac{s}{c}$ , 可知当  $s = 2 \times (3.84 \times 10^5 \times 10^3) \text{ m}$  时,  $t = 2.56 \text{ s}$

**命题意图:** 了解电磁波传播特性。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用观念(I);模型建构(II);科学推理(II)。

[1] 电流,然后把音频电流送到扬声器里才能听到声音,这个过程叫做解调。

无线电广播的发射和接收过程,如图 8-20 所示。

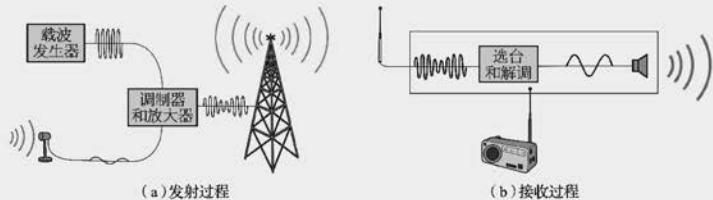


图 8-20 无线电广播的发射和接收过程示意图

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

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

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

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

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

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

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

因此,该广播电视对应的电磁波波长范围为 0.723 ~ 0.737 m。

### 问题与思考

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

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

**2. 参考解答：**

根据  $c = \lambda f$ ，可知当  $c = 3 \times 10^8$  m/s 时， $\lambda = 0.3$  m

**命题意图：**了解电磁波的波长、频率与波速的关系。

**主要素养与水平：**

科学推理(Ⅱ)；科学本质(Ⅰ)。

**3. 参考解答：**电磁波空间中任意一点的电场  $E$  的方向和磁场  $B$  的方向都和电磁波的传播方向垂直

**命题意图：**了解电磁波的传播特性。

**主要素养与水平：**

运动与相互作用观念(Ⅱ)；模型建构(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

**4. 参考解答：**收音机会发出噪声，这代表收音机接收的电台发射的电磁波受到干扰，也说明正在工作的电动剃须刀和手机也能够发射电磁波

**命题意图：**获取电磁波发射与接收的感性素材。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(Ⅰ)；模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅰ)；科学论证(Ⅱ)。

**5. 参考解答：**感应发射器通过与高压电源相连，产生电火花形成电磁波，是将电能转化为电磁场的能量，电磁波在空中传播，也传递了能量，接收器将该电磁波能量转化为电能(电火花)

**命题意图：**通过对物理现象的解释提升物理观念。

**主要素养与水平：**能量观念(Ⅱ)；模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅰ)；科学论证(Ⅱ)；科学本质(Ⅰ)。

## 资料链接

### 平面电磁波的性质

电磁波是横波,其电场强度  $E$  与磁感应强度  $B$  的方向是相互垂直的,与传播方向也相互垂直。在最简单的简谐电磁波(即电场与磁场都做简谐变化的电磁波)中, $E$ 、 $B$  与电磁波的传播方向构成右手螺旋定则,即右手四指并拢从  $E$  转向  $B$ ,大拇指伸直,则大拇指所指的即为电磁波的传播方向。

电磁波是偏振波,沿电磁波的传播方向,电场与磁场都在各自平面内振动,这种性质称为偏振,这也是所有横波所特有的。

$E$  与  $B$  同相位, $E$  与  $B$  都在做周期性的变化,但是  $E$  与  $B$  相位相同,当  $E$  达到最大时, $B$  也达到最大,反之相同。

电磁波传播速度的大小  $v$  决定于介质的电容率  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$ 。电磁波在介质中的传播速度为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}}$$

其中  $\epsilon_0$  为真空中介电常数, $\epsilon_r$  为相对介电常数, $\mu_0$  为真空中磁导率, $\mu_r$  为相对磁导率。

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$ ,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ , 从而可以计算出真空中电磁波的传播速度

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

### 电磁波的有线传输

平行双导线、波导管和光纤等连接方式也能传播电磁波,具体采用哪种方式与传输的电磁波频率、传播效果有直接关系。

平行双导线是指相互平行的两条金属导线,能传播 TEM 波(横电磁波),即在传播方向上没有电场和磁场分量。但当电磁波的频率提高到电磁波波长与双导线间距相近时,辐射损耗显著增加。

波导管主要用于传播微波中的厘米波及毫米波,常见的波导管为矩形、圆形空心金属管。波导管壁常由铜、铝等金属制成,有时内壁镀有银或金,波导管能将传输的电磁波完全限制在金属管内,但由于波导管存在截止频率,其中只能传输比截止频率高的能量(电磁波),而比截止频率低的能量会很快在波导中衰减。波导管在雷达、通信卫星、微波炉中广泛应用。

光纤为光导纤维,利用光的全反射进行信息的传输。虽然光纤的造价很高,但其传播损耗小,可靠性高,所以近年来有着很大的应用前景。为了保证电磁波的有效传播,光纤传输还需要建立中继站,中继器的作用是对信息中继和放大。若传播过程中信息损耗较小,则两中继站间的间距可增大。

## 本节编写思路

本节从电磁波谱出发,通过描述电磁波的发现过程、产生机理,介绍不同频率电磁波的特征及用途,并在此基础上通过更加具体的实例使学生了解电磁波的广泛应用,提升物理概念与科技的联系。

在教学时可通过不同频率电磁波特征的介绍使学生理解其与实际应用间的关联。建议增加阅读、交流的环节或开设有关电磁波应用的课题研究,促使学生关注生活细节,了解与感悟科学发展的过程,认识物理学发展推动科技进步的作用。

### 第四节 电磁波的应用

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

#### ► 电磁波谱

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

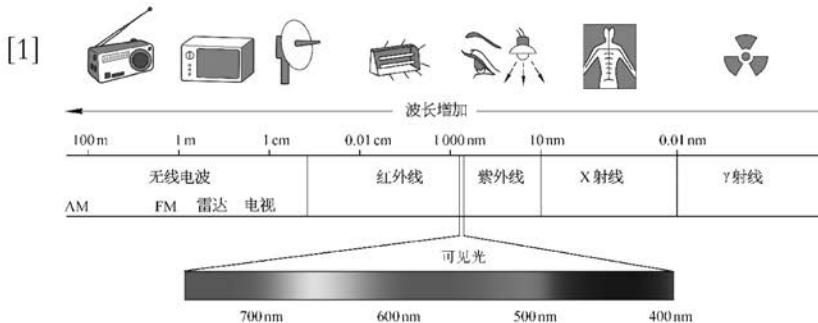


图 8-21 电磁波谱

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

#### 大家谈

谈谈你身边哪些设备正在发射、接收电磁波?

#### ► 电磁波谱主要成员及其应用

##### 1. $\gamma$ 射线 ( $\gamma$ -ray)

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

术都在不断发展,红外线正在朝向波长更长的方向发展,而无线电波则朝着波长更短的方向发展,这导致无线电波中的超短波和远红外线的波长范围存在重叠。对红外线、可见光和紫外线而言,它们都是由于原子较外层电子跃迁而产生的,其中一定频率段的光能够引起人类视觉感知的被称为可见光,而其余的则被称为不可见光。

## 正文解读

[1] 不同电磁波的产生机理不完全相同,不同的电磁波在频率上会有交叠。以红外线和无线电波为例,由于红外线技术和无线电波技

[1] 在太空中，各种天体都在向外辐射电磁波，这些电磁波都蕴藏着大量宇宙演化的宝贵信息。但是并非各类电磁波都能穿过大气层到达地球表面，大部分的可见光、一部分的红外线能够穿透大气层，但是 $\gamma$ 射线却不能穿过。要想探测宇宙中的这一辐射就需要将探测器发送到太空中去。

[2] 除去医疗方面，X射线在科学领域也有着广泛的应用，如用于晶体结构分析的X射线衍射技术，就是利用X射线透过物质的晶体，所形成的衍射图样可进行晶体结构分析或晶体内部原子结构研究。

[3] 在教学中可以增加对比常见的概念如激光与红外线、可见光、紫外线间的异同。常见的红外线、可见光和紫外线都是由物体内部不同的原子自发辐射产生的。自发辐射是个随机过程。自发辐射发出的光传播方向、相位、偏振状态都有一定的任意性，因此是不相干的，这就是相干光源难得的原因之一。激光也属于电磁波，只是激光中，原子是以受激辐射的方式发光，并通过光学谐振腔实现光的放大。激光强度极高、方向性好，相干性好，且具有更为单一的频率。根据频率不同可以分为红外激光、可见光激光和紫外激光等。激光的用途十分广泛，可用于显微手术，扫描数字化光盘用以读取信息，也可以切割钢材，或实现激光通信等等。关于激光可参阅选择性必修一第四章第五节。

[1] 波长约在 $10^{-11}$ m以下，是一种能量很高的光子流。

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



图 8-22 我国的辐照食品标志

### 2. X射线(X-ray)

[2] 1895年，德国物理学家伦琴(图8-23)在研究阴极射线时发现了X射线，他给他妻子的手拍了一张X光照片，如图8-24所示，故X射线又称为伦琴射线。X射线的波长约为 $10^{-11}\sim 10^{-8}$ m，具有很强的穿透能力。

在机场、车站等地方，常用X射线对行李进行透视安全查验，如图8-25所示。



图 8-23 伦琴  
(W. C. Röntgen,  
1845—1923)



图 8-24 伦琴首次拍到的他夫人手的 X 光照片



图 8-25 地铁站的 X 射线安检仪

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

### 3. 紫外线(ultraviolet ray)

[3] 1801年，物理学家在研究可见光的紫光外侧时发现了紫外线，其波长约为 $4\times 10^{-8}\sim 4\times 10^{-7}$ m。太阳光中含有紫外线，能够激起荧光，也能使照相底片感光。

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

射会对人体造成伤害，如晒伤皮肤，或令人眼发生病变等。

#### 4. 可见光 (visible light)

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

#### [1] 5. 红外线 (infrared ray)

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

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

#### 6. 无线电波 (radio wave)

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

### ► 电磁波应用实例

#### [2] 1. 微波炉

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

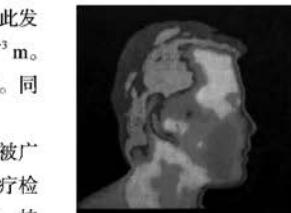


图 8-26 人头部的红外成像

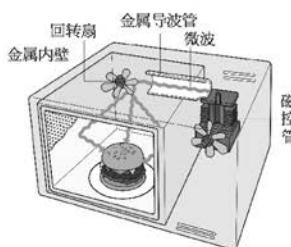


图 8-27 微波炉结构示意图

温装置。其基本原理是被测物体的辐射电磁波通过光学系统被光电探测器测出红外辐射能量，从而计算出被测物体的温度。

[2] 在微波炉教学时可以增加微波炉的基本原理和安全使用提示，增加物理与生活的联系。水分子是由一个氧原子和两个氢原子构成的。水分子中正负电荷中心并不重合，因此水分子是一种看上去像一端带正电一端带负电的极性分子。在微波炉中，由于电磁波中的电场不断地发生变化，极性分子随之取向振荡，从而使含有水分的食物温度升高，微波炉能够加热包括水分子在内的其他极性分子，而对于由非极性分子构成的物质则无法被加热，例如空气和许多容器等。关于微波加热的原理详见资料链接。

[1] 不同温度的物体都在向外辐射红外线，被称为热辐射。热辐射的电磁波谱是连续的。物体温度越高，辐射的强度也越大，但在总能量中各频率电磁波的占比不同，其峰值辐射的电磁波频率与物体的温度有关。温度越低，峰值辐射电磁波的频率越低，反之则越高。低温物体主要对外辐射红外线和远红外线；当温度超过 600 ℃ 时，物体可以呈现暗红色；当温度继续升高时，峰值电磁波可出现在可见光部分，如太阳表面的温度在 6 000 ℃ 左右，到达地球大气层上界的所辐射的电磁波中辐射强度最大的在可见光波段，占 45% 左右，而红外线段的能量占 43% 左右。

红外线温度计是根据物体向外辐射电磁波能量与表面温度有关从而利用光学系统、光电探测器等设备制成的测

[1] 微波炉不能使用金属容器的原因在于微波无法穿透金属，会被反射回来，使容器内的物体不能被加热；同时微波会在金属表面形成电荷积聚，从而在金属器皿和微波炉内胆靠近时引起电弧放电；大量反射回来的微波会使微波元件产生高温，缩短微波炉的使用寿命。

[2] 无线通信指多点间不经过导体或者电缆链接而实现的长距离通信方式。它可以与本章第三节的有线通信方式进行对比。卫星通信，无线广播、手机通信等都属于无线通信范畴，绝大多数的无线通信依靠无线电波实现，而有些则采用其他电磁波传递信号。

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

### 2. 无线通信技术与蓝牙、WiFi

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

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

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

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

### 3. 手机通信的蜂窝网络与 5G 技术

手机，是目前常用的通信工具，也是一个集无线电波发射、接收于一体的设备。

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

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

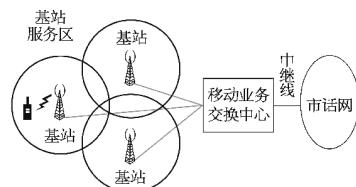


图 8-28 蜂窝移动通信系统

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

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

表8-2 我国4G与5G网络对应的频率范围及频率资源

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

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

### 问题与思考

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

高环保和可持续发展的意识。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(I)；科学论证(II)；科学态度(II)。

**3. 参考解答：**不是巧合，相反的是生物进化的结果。人们的视觉感知已经进化到了对太阳光的最强波段最为敏感。

**命题意图：**利用物理、生物学知识解释物理现象，经历跨学科融合，提升学科交叉意识。

**主要素养与水平：**科学论证(II)；科学本质(II)；科学态度(II)。

[1] 虽然蜂窝服务区能够解决无线通信容量与无线电波有限频率间的矛盾，但是在高速运动的列车上使用手机则需要在多个蜂窝网络服务区内切换，具体可参见本节资料链接，在教学时可供有需要的学生学习。

### 问题与思考解读

**1. 参考解答：**家用电器中，遥控器通常使用红外线来传递数据，浴霸是利用红外线来加热物体；验钞机利用的是紫外线。

**命题意图：**了解红外线、紫外线在生活中的应用。

**主要素养与水平：**模型建构(II)；社会责任(II)。

**2. 参考解答：**臭氧层破坏后，地面将受到过量的紫外线辐射，危害人类健康。

**命题意图：**通过了解臭氧变薄后效应，提

**4. 参考解答：**微波加热的原理是由于食物中含有一定的水分，水分子是极性分子(分子的正负电荷中心不重合)，极性分子在微波电场的作用下会剧烈取向振荡，从而使水温升高。食物中含有水分，食物的温度因而也相应升高。

电磁炉是通过电磁感应来加热食物的。通常要采用铁制锅具，当电磁炉内的磁感线穿过铁锅后在铁锅锅底处产生涡流，电能转化为内能，从而通过热传递快速加热食物。

**命题意图：**利用已学知识，对比、解释微波炉和电磁炉的工作原理，感悟理论与实际的关联。

**主要素养与水平：**模型建构(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)；社会责任(Ⅱ)。

**5. 参考解答：**微波加热的原理是由于食物中含有一定的水分，水分子是极性分子(分子的正负电荷中心不重合)，极性分子在微波电场的作用下会剧烈取向振荡，从而使水温升高。加热器皿中则很少含有水分子，因此不会非常热。若发现器皿比较烫手是因为在加热过程中食物与器皿接触，当食物发热后，由于热传递使器皿烫手。

为了研究器皿的烫手现象是否是因为热传递所引起的，可采用控制变量法，使用对照组，研究微波功率、加热时间、食物含水量、器皿材质(陶瓷、塑料等)等的影响，具体方案略。

**命题意图：**通过利用微波炉加热食品时，容器的热与不热现象的探究，培养科学解释、科学探究的能力。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念(Ⅰ)；能量观念(Ⅰ)；模型建构(Ⅱ)；质疑创新(Ⅰ)；问题(Ⅱ)；证据(Ⅲ)；解释(Ⅱ)；交流(Ⅱ)；科学态度(Ⅱ)；社会责任(Ⅱ)。

3. 太阳辐射的电磁波中，45%左右的能量在可见光波段，而红外波段能量占比次之，紫外波段则最少。在电磁波谱中，可见光波段的波长范围很小，但是我们人眼却对它最敏感，这是一种巧合吗？查找资料，试解释这一现象。

4. 简述微波炉与电磁炉加热食物的区别。

5. 在使用微波炉时，很多情况下食物已经热了，但是器皿却不热，试从微波炉的原理出发解释这一现象。有时会发现器皿也比较烫手，为什么会出现这一现象？试从器皿的材质、食物的含水量、微波功率、加热时间等方面考虑进行实验探究。设计一个采用控制变量法的实验方案，在保证安全的前提下开展实验，分析观察，得出结论，并与同学交流。实验前务必仔细阅读微波炉说明书，特别是其中的安全须知。

## 资料链接

### 为什么在高铁列车上能够接收到手机信号

高铁列车又称为高速列车，一般是指最高运行速度在 200 km/h 以上，且能以高速持续运行的列车。高铁列车具有许多特点，如运行速度大，拥有大量的终端及车身的全封闭结构和使用合金材质等，因此要在高铁列车上实现手机网络的覆盖存在以下几个特殊之处。

- (1) 高铁列车运行速度大，导致大量移动终端需在各个基站服务区中频繁切换。
- (2) 高铁列车运行速度大，导致接收信号的多普勒频偏，从而影响到终端接收信号的强度。
- (3) 高铁列车采用全封闭的车厢结构和合金材质等，导致信号穿透损耗较大。

为了解决以上的问题，我国在高铁的手机网络覆盖上投入了大量的人力和物力。首先，高铁的网络覆盖原则上采用专网的方式，通过精细规划、精确建设保证专网信号在线路区域的主导地位。其次，根据多普勒效应，当高铁列车靠近基站时，接收到的信号频率偏高，反之则偏低，由于在实际环境中，列车接收到的信号可能来自多种途径，通过理论推导可知

$$f_d = \frac{f}{c} \cdot v \cdot \cos \theta = \frac{v}{\lambda} \cdot \cos \theta$$

其中  $f_d$  为多普勒频移， $f$  为基站发出信号的频率， $c$  为电磁波的传播速度， $v$  为列车的前进速度， $\theta$  为列车在前进方向上与接收信号方向的夹角， $\lambda$  为电磁波的波长。由此可知，在列车速度较大时，需要增大  $\theta$ ，也就是基站离高铁越远越好。但是在实际中，这样虽然降低了频移，却使得基站的覆盖范围大大减小，因此通常这个距离控制在 100 m 以内；同时为了减小频移还增加了一定的算法和纠正频偏的设备，通过已知频率和列车行驶速度对数据进行修正；再者，通过窄波瓣高增益天线的使用，重叠服务区的范围，增加手机在服务区内的稳定时间，并将网络服务区根据不同的场景，如农村，山区，市区等设计具体方案，确保通信的稳定。

由于基站在户外，所以维护和建造成本非常高。我国现有高速铁路的总长度超过 3 万 km，位居世界第一，其中一部分还位于人烟稀少地形崎岖的地区，因此保证人们在高铁列车上的基本通信是非常不易的事情。现如今我国已经在部分高铁路段开通了 5G 网络覆盖，这将对 5G 信号的推广普及和通信稳定带来更大帮助。

### 微波加热食物的原理

家用微波炉微波频率为 2 450 MHz，波长为 12.2 cm，属于分米波范畴。这一频率为 1979 年世界无线电行政会议(WARC)经协商而规定的加热专用频率，目的是避免对通信的干扰。

一般的食品通常含有水分。水是极性分子，具有从氧原子指向氢原子连线中点的固有偶极矩  $p$ ，在交变微波电场作用下，偶极矩  $p$  将作取向振荡。可以作为如下模型化理解。

如图 2 所示，取直角坐标系  $Oxyz$ ， $yOz$  平面为纸面， $Oy$  轴向右， $Oz$  轴向上， $Ox$  轴垂直于纸面向外。设某时刻微波电场  $E$  沿  $Oz$  轴正方向，有一水分子，其偶极矩  $p$  处在  $yOz$  平面内，在此电场作用下  $p$  将趋向于电场方向，即将绕通过  $p$  的中心平行于  $Ox$  轴的转轴向右转动(角速度矢量指向  $Ox$  轴的负方向)。如其后电场反向指向  $Oz$  轴负方向， $p$  的这种改向转动也要改向左，即角速度矢量沿  $Ox$  轴正方向。如此，在交变微波电场的作用下，偶极矩  $p$  (从而整个水分子)将交替向左、右转动(左右摇摆)，可称作取向振荡。取向振荡将电磁场的能量转化为分子的转动动能。在取向振荡中水分子会和邻近的分子(包括其他水分子和食物分子)碰撞、摩擦，从而将转动能量转化为内能，而使食品迅速升温。

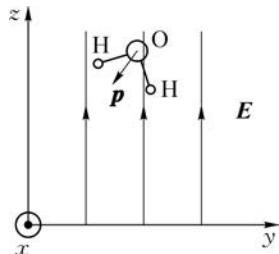


图 2

## 学期 活动

### 电磁辐射的研究与测量

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

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

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

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

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

#### 活动要求：

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

## 小结

### · 基本概念和基本规律

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

**电磁波:** 变化的电磁场在空间的传播。

**LC回路:** 由电容器和电感器组成的电路。

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

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

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

**电磁波谱:** 将电磁波按照波长或频率大小的顺序排列。

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

### · 基本方法

通过对电磁场理论的学习, 感受统一和对称的思想方法。

通过对电磁波的产生及其特性的学习, 认识归纳和类比的思维方法。

### · 知识结构图



## 复习与巩固解读

110 第八章 电磁振荡与电磁波

**1. 参考解答：**根据  $c = \lambda f$  可知，无线广播电视的波长为 500 m，电视信号波长为 0.72 m，根据波的衍射特点，由于电视信号的波长较短，必须采用空间波的传播方式，即点对点的直线传播，因此电视信号要在山上建立基站

**命题意图：**会使用电磁波的频率、波长和波速间关系进行计算，并能利用衍射规律判断电磁波的传播方式。

**主要素养与水平：**模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)；社会责任(Ⅱ)。

**2. 参考解答：**声波是机械波。从产生机理看，机械波的形成需要机械振动，电磁波则可通过电磁振荡产生。从传播特性上看，机械波传播需要介质，而电磁波的传播不需要介质。电磁波和机械波均有波长、频率、波速的概念，并均满足关系  $v = \lambda f$ ，其中电磁波在真空中的传播速度可用  $c$  表示。本题还可从传播能量、信息等方面阐述

**命题意图：**通过比较，了解机械波及电磁波间的异同，建立概念和规律间的内在联系，提升物理观念。  
**主要素养与水平：**物质观念(Ⅰ)；运动与相互作用观念(Ⅰ)；能量观念(Ⅰ)；模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)；科学本质(Ⅰ)。

**3. 参考解答：**根据  $c = \lambda f$  可知，电磁波的波长为 0.64 m；又根据电磁波在空气中的传播速度约  $3 \times 10^8$  m/s 及  $t = \frac{s}{c}$  可知， $t \approx 1.66 \times 10^{-5}$  s

**命题意图：**学会使用电磁波的频率、波长和波速间关系进行计算，并知道对讲机使用的电磁波波长，

### 复习与巩固

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

鼓励学生留意身边的事物,加强理论与实际的关联。

**主要素养与水平:** 模型建构(II);科学推理(II);社会责任(I)。

**4. 参考解答:** 光在真空中传播一年的长度称为光年,用 l.y. 表示,  $1 \text{ l.y.} = 3 \times 10^8 \times 365 \times 86400 \text{ m} \approx 9.46 \times 10^{15} \text{ m}$ , 因此北极星离我们的距离  $l = 1.06 \times 10^{13} \text{ km} \approx 1.12 \text{ l.y.}$ 。根据电磁波在真空中(宇宙)中的传播速度  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$  可知, 北极星的光线照射到地球上需要传播的时间为  $3.5 \times 10^7 \text{ s} \approx 405$  天

**命题意图:** 知道光是一种电磁波,满足电磁波的频率、波长和波速间关系,能将电磁波的基本知识与天体中的概念相关联。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用观念(I);模型建构(II);科学推理(II);科学本质(I)。

**5. 参考解答:** 根据  $c = \lambda f$  可知,氦氖激光器的红光中心频率为  $4.7 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ,根据氦氖激光器的波长范围得到激光器的频率范围为  $4.7 \times 10^{14} \text{ Hz} \pm 3.75 \times 10^9 \text{ Hz}$

**命题意图:** 掌握电磁波的频率、波长和波速间关系,了解激光器的中心频率和特征。

**主要素养与水平:** 模型建构(II);科学推理(II);社会责任(I)。

**6. 参考解答:** 根据  $c = \lambda f$  可知,电磁波的波长为  $0.5 \text{ m}$ ,属于无线电波的分米波波段。电磁波频率  $f$  不变,传播速度变小,波长变短

**命题意图:** 掌握电磁波的频率、波长和波速间关系,会通过波长或频率查找无线电波的波段,了解电磁波的传播特点。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用观念(I);模型建构(II);科学推理(II)。

**7. 参考解答:** 电磁波携带能量,长期大量的电磁波辐射能使人体器官遭受损害;且电磁波间的相互干扰会影响仪器的正常使用,并对人们的生产、生活产生危害,如在飞机起飞、降落过程中使用手机会干扰仪器,严重的会造成失控

**命题意图:** 通过查找资料,了解电磁波的安全使用要求,感悟物理态度与责任。

**主要素养与水平:** 社会责任(II)。

**8. 参考解答:** 由于电磁波能量是以球面波形式由基站向外辐射,半径为  $R$  的球面上每平方米的电磁辐射能量为  $\frac{1}{4\pi R^2}$ ,若按照题目要求不得超过  $0.4 \text{ W/m}^2$ ,则通过计算可知,  $R$  最小约为  $0.45 \text{ m}$

**命题意图:** 能用物理概念及规律解释现象,通过电磁辐射的模型构建和计算解决问题,感悟环境安全、公众健康对可持续发展的意义。

**主要素养与水平:** 能量观念(II);模型建构(II);科学推理(II);社会责任(II)。

## 第三部分 本章练习部分解读

### 第一节 麦克斯韦电磁场理论

**1.** 当空间某处存在随时间不均匀变化的电场时,周围空间会产生随时间不均匀变化的磁场,而这又会在空间产生新的电场……这样,变化的电场和磁场就会由近及远地向周围传播 光速

**2.** 法拉第认为,当闭合回路磁通量发生改变时,就会在回路中产生感应电流,麦克斯韦理论将这一现象解释为变化的磁场在空间产生了电场,无论闭合回路是否存在,这个电场总是存在的。当闭合回路存在时,电场便在回路中产生感应电流

**3.** 图(a),电场是稳定的,不发生变化,因此无法在周围产生磁场,也即无法产生电磁波;图(b)、图

(c), 电场是均匀变化的, 在周围产生稳定的磁场, 因此无法再产生电场, 也即无法产生电磁波; 图(d), 电场是非均匀变化的, 在周围产生非均匀变化的磁场, 磁场又在周围产生变化的电场, 逐次产生, 即产生了电磁波

4. 因为尽管电子流是匀加速运动, 但是以任一个截面为研究对象, 任意相等的时间内通过的电荷量却是一个常量(就好像从水龙头流下的水, 尽管越往下速度越快, 但水流量一直不变), 也就是电流恒定, 所以能产生恒定的磁场(沿电子流方向电子速度变大, 但电子数密度变小, 所以沿电子流方向电流不变, 磁感应强度也不变)。该稳定的磁场不能产生电场

5. 赫兹实验的科学贡献是证实了电磁波的存在, 并测出了电磁波的传播速度正是光速, 证明了电磁波和光波一样, 能发生反射、折射、干涉、衍射等现象。赫兹实验不仅证实了麦克斯韦的电磁场理论, 更为其后的无线电报、无线电广播、电视和雷达等无线电技术的发展奠定了实验基础、开辟了道路

## 第二节 电磁波的产生与发射

1. 在振荡电路中产生振荡电流的同时, 电场能和磁场能发生相应的周期性相互转化, 这种现象叫做电磁振荡。最基础的电路是  $LC$  回路, 由电容与电感组成(图 3)

2.

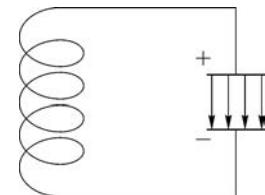


图 3

说 法	判断	若不正确请说明理由
$LC$ 振荡电路中的振荡电流与电场能同时出现最大值	错误	电流最大与磁场能最大是同时出现的, 而非电场能
$LC$ 振荡电路的电容器放电完毕后, 回路中磁场能最小, 电场能最大	错误	电容放电完毕, 此时电场能最小, 磁场能最大
$LC$ 振荡电路中电流增大, 电容器上的电荷一定减小	正确	
$LC$ 振荡电路中, 电容器的某一极板从带最多的正电荷开始到带最多的负电荷为止, 这段时间为一个周期	错误	这段时间为半个周期。电容器的某一极板从带最多的正电荷开始变化, 到再次带最多的正电荷为止, 这段时间为一个周期

3. 若磁场正在减弱, 则电流在减小, 是对电容器充电的过程, 根据右手定则可以确定电流是由 b 向 a

4. 常用的公交一卡通(IC 卡)内部有一个由电感线圈  $L$  和电容  $C$  构成的  $LC$  振荡电路, 此外还有存储器, 读写单元, 以及射频模块。公交车上的读卡机(又称射频读写器, 刷卡时发出“嘀”的一声响)能够向外发射某一特定频率的电磁波。刷卡时, IC 卡内的线圈  $L$  中产生感应电流, 给电容  $C$  充电, 达到一定的电压后, 驱动卡内芯片进行数据处理和传输

5. 开放电路、提高频率 理论上能够产生电磁波, 但是该电磁波的频率极低, 能够向外辐射的能量也很小

6. 拉杆天线做成中空的除了收缩便捷、可以增加天线的长度外, 也是因为“趋肤效应”。天线在接收高频电磁波时, 电流在导体内的分布是不均匀的, 主要集中在导体的外表薄层。因此将天线设计成空心的

## 第三节 电磁波的传播和接收

1. 981 kHz 的波长为 305.8 m, 属于中波

7 620 kHz 的波长为 39.4 m, 属于短波

90.0 MHz 的波长为 3.3 m, 属于微波

2. 电磁波的传播速度  $c = 3 \times 10^8$  m/s, 从电台到收音机的时间  $t = \frac{s}{c} = \frac{30 \times 10^3}{3 \times 10^8}$  s = 0.0001 s。由  $c = \lambda f$  可知, 电磁波的频率为 625 kHz, 根据电谐振, LC 振荡电路需调节到与电磁波频率一致, 即 625 kHz

3.

说 法	判断	理由(可以举例或推理)
电磁波由真空进入玻璃后频率变小	错误	波的频率由波源决定, 因此进入玻璃后频率不变
电磁波中的电场和磁场都与传播方向垂直, 因此电磁波是横波	正确	电磁波空间中任意一点的电场 $E$ 的方向和磁场 $B$ 的方向都和电磁波的传播方向垂直
微波传播可以采用地波的方式, 沿地球表面传播很远的距离	错误	微波波长短, 需沿直线传播

4. (1) FM89.9 的频率为 89.9 MHz, 频道带宽为 75 kHz, 因此频率范围为 89.8625~89.9375 MHz, 根据  $c = \lambda f$ , 可知电磁波的波长范围为 3.3356~3.3384 m

(2) 由于频带很宽, 整个中波频段也容不下几个电台。FM 属于超短波段信号, 该波段电磁波只能以直线方式传播, 因此只能为本地听众服务

5.

种类	传 播 距 离	传播方式	优 缺 点	主 要 用 途
地波	几百千米(与发射塔功率和地表情况有关)	波的衍射	稳定, 但能量损耗大, 需要在高处建立发射塔	导航、船舶通信
天波	几千千米	波的反射	损耗小, 但不稳定, 易受天气影响	无线电广播
空间波	几十千米	波沿直线传播	稳定、信号强, 但需建立中继站	移动通信、卫星通信

#### 第四节 电磁波的应用

1. 4G 与 5G 信号都是电磁波, 因此在空气中的传播速度相同, 但 5G 信号的频率更高, 波长更短, 虽然衍射能力更差, 但是能够有足够的带宽, 满足更多用户的同时使用和大数据的传输

2. 不正确, 一般的收音机 FM 在 87~108 MHz 之间, 中波 AM 在 525~1610 kHz 左右, 短波在 3.2~22 MHz 左右。微波炉的微波频率是 2450 MHz, 与收音机的接收频率相差很大, 微波炉发出的微波会在收音机电谐振时被滤去, 不可能被检测到。而微波炉工作时, 相关的电子设备所产生的电磁波频率可能在收音机的接收频率内, 因此可能被收音机检测到从而产生噪声干扰, 但这不是微波泄漏所导致的

3.

说 法	判断	若不正确请说明理由
无线电波比红外线更容易发生干涉和衍射现象	正确	
“隐形战机”能够躲避雷达的追踪是因为能对电磁波具有较强的反射作用	错误	“隐形战机”可以有效避开雷达的追踪主要是通过吸收雷达发射的电磁波, 电磁波不能反射回雷达, 就不能探测到战机的踪影
电磁波在真空中的传播速度和电磁波的频率、波长和能量大小无关	正确	

**4.** 物质中的原子不停地相对振动、旋转,这些运动有许多不同的特征频率。原子和分子的振动或旋转运动的特征频率分布在红外光谱区,因此当红外线照射物体时,物体更容易吸收其能量而使温度升高

**5.** 便捷:微波炉加热食物,无线电通信,X射线及 $\gamma$ 射线在医学领域的应用等

危害:过量电磁辐射会损害健康,电磁干扰会影响电子设备正常工作

**6.** 生活中许多用电器都在使用和产生电磁波,例如工作状态的手机、收音机都在接收或者发射电磁波。家庭中所有的交流用电器都在产生电磁波,如电视机、电冰箱等。还有些用电器则在产生电磁波维持工作,如遥控器利用电磁波控制家电,微波炉利用电磁波加热,家用路由器利用电磁波构建了家庭无线网络等

## 第四部分 本章实验与活动部分解读

**1. 自主活动 观察电磁振荡现象**

**参考解答:** 电流大小逐渐减小,因为电路中存在能量损耗,电流逐渐减小直至最后停下来。如同机械振动中的阻尼振动

**命题意图:** 了解实际中电磁振荡的情况,与机械振动形成类比。

**2. 自主活动 观察电谐振现象**

**参考解答:** 要想实现接收电路中的振荡电流最大,则接收电路的固有频率要与发射电路的频率相同或接近

**命题意图:** 引发对电磁波接收的思考,为下面的教学内容做铺垫。

# 第九章 传感器

## 第一部分 整 章 分 析

### 学习目标

1. 认识常用传感器的基本原理和简单的控制电路,知道非电学量转换成电学量是实现自动控制、数字化信息传输的基础。进一步培养学生具有与传感器相关的运动与相互作用观念和能量观念。
2. 经历动手设计一个简单传感器电路的实验过程,认识简单的自动控制装置,进一步提高对传感器基本原理及技术的认识。体会传感器技术在实现自动化和智能化方面的社会意义。
3. 了解常用传感器在高铁列车、人工智能与无人驾驶汽车、手机等设备中的应用,感受使用传感器测量物理量更加便捷和准确的实验过程,深入认识物理学对现代化生活和科技发展的积极作用。

### 编写意图

课程标准中对本章的“内容要求”为:

2. 4. 1 知道非电学量转换成电学量的技术意义。
2. 4. 2 通过实验,了解常见传感器的工作原理。会利用传感器制作简单的自动控制装置。
2. 4. 3 列举传感器在生产生活中的应用。

本章是物理知识与技术结合最紧密的内容。传感器所有内容的教学要求都属于了解层次,主要让学生了解非电学量转换成电学量的基本原理以及转换的成因和意义。电学量(电流、电压等信号)便于显示、处理和控制,也便于传输与接收。把非电学量转换成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。通过传感器在高铁列车、无人驾驶汽车和手机中的应用,感受传感器的重要性。通过“自动控制装置的设计与制作”的实验,感受解决技术问题的逻辑思路。

通过本章学习,知道传感器在现代生产生活和科技活动中应用的普遍性;了解现代传感器技术的研发、生产越来越快,运用也越来越普遍;体会科技对人类生活和社会发展的影响,激发学生关注传感器的研究和创新应用。

完成本章内容的学习,共需要 4 课时。其中,第一节 1 课时,第二节 1 课时,第三节 2 课时。

## 第二部分 本章教材解读

在当今社会，信息的利用首先要解决的是如何获取准确可靠的信息，而传感器是获取自然界和生产领域中可靠信息的重要途径与手段。要获取大量人类感官无法直接获取的信息，没有相适应的传感器是不可能的。可以毫不夸张地说，从茫茫的太空到浩瀚的海洋，以至各种复杂的工程系统，几乎每一个现代化项目，都离不开各种各样的传感器。传感器技术在发展经济、推动社会进步方面发挥着重要作用。

传感器的设计与制造是一个国家现代核心技术的重要标志，目前我国的传感器行业与国际先进水平仍然存在一定差距，为此国家专门成立了“国家智能传感器创新中心”，上海市也因此创建了“上海智能传感器产业园”。希望本章的学习能启发和吸引有兴趣的同学将来从事传感器的研究与创新。

# 第九章 传 感 器

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

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

## 本节编写思路

本节通过现代家用电器和中国高铁的介绍,感受传感器在智能化领域的应用;通过介绍传感器的基本组成,将传感器获取信息与人的五官收集各种感官信息相类比,认识传感器的作用;通过“自主活动”对光敏电阻、金属热电阻和热敏电阻的测量及分析,认识敏感元件的特点和应用;知道把非电学量转换成电学量是实现自动控制、数字化信息传输的基础;通过“大家谈”和传感器的分类举例,体会传感器的研发和运用的日新月异。

### 第一节 传感器及其敏感元件

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

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

#### ▶ 传感器

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

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



图9-2 传感器的组成

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

种复杂地质及气候条件下高铁建造成套技术,攻克铁路工程建造领域一系列世界性技术难题。2016年两列自主研制的中国标准动车组在郑徐高铁上以420 km/h速度交会而行,两车相对速度达到840 km/h。这是世界上拟运营高铁动车组列车首次实现的高速交会和重联运行。中国高铁总体技术水平跻身世界先进行列,部分技术达到世界领先水平。

中国高速铁路车站设计师结合当地历史文化、地域特征设计出风格各异、赏心悦目的车站建筑,形成具有特色的交通文化体系。

[2] 一些传感器的功能可与人类5大感觉器官相比拟,如:光敏传感器对应“视觉”,声敏传感器对应“听觉”,气敏传感器对应“嗅觉”,化学传感器对应“味觉”,力传感器、温度传感器对应“触觉”。



图9-1 和谐号列车

## 正文解读

[1] 中国高速铁路简称中国高铁。中国高铁的发展采取引进、消化吸收、再创新的策略,现已成为全球的领跑者。中国已系统掌握各

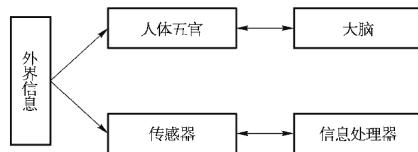


图 9-3 传感器功能和人体五官功能比较

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

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

#### ► 非电学量转化成电学量的意义

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

#### ► 传感器的敏感元件

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

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

[2]

#### 自主活动

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

实验结果：\_\_\_\_\_。

### 1. 光敏电阻

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

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

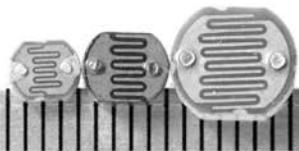


图9-4 三个毫米尺度的光敏电阻

### [1] 2. 金属热电阻

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

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

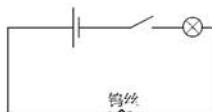


图9-5 使用钨丝控制灯泡亮度的简单电路

### [2] 3. 热敏电阻

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

#### 自主活动

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

实验结果：\_\_\_\_\_。

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

### [3]

#### 大家谈

热敏电阻和光敏电阻在生活中有哪些具体应用？

器精确度与其测量范围相对应，使用前需要观察测量范围。

[3] 此处设置“大家谈”旨在使学生关注身边的生活器具和设施所用到的传感器及其基本控制的逻辑思路。如：温度传感器应用于医用体温计、便携式非接触红外测温仪、智能手机、智慧手环、微波炉、空调、冰箱、热水器、饮水机、洗碗机、消毒柜、洗衣机、烘干机、电磁炉等需要测温、温控的装置。如冰箱中的温度传感器使冰箱内的温度高于设定值时启动制冷系统；而当温度低于设定值时又使制冷系统关停。

光敏传感器应用于照相机、监控器、摄像头、人体感应灯、人体感应开关、光控小夜灯、光控玩具、太阳能草坪灯、光控音乐盒等电子产品及光自动控制领域。如装有光敏传感器的出入感应门，当人体接近门的时候，传感器识别人体的红外辐射并使驱动系统将门开启，在人远离时再将门关闭。

[1] 金属热电阻的材料是金属。温度升高使得金属原子的振动加剧，因而对电子的散射作用增强，从而使金属的电阻率随温度升高而升高。金属的电阻率与温度之间一般具有较好的线性关系。

[2] 热敏电阻的材料一般是半导体，半导体的电阻率随温度的变化而剧烈变化。半导体的电阻率与温度之间的关系一般为非线性，而且引起的电阻变化率大，响应速度高。有的热敏电阻的阻值随温度的升高而增大，有的随温度的升高而减小。还有一种“开关型”热敏电阻：其阻值先随温度的升高而增大，当达到某一温度时，电阻突然减小，当温度继续升高到某一温度时，电阻值又随温度升高而增大。

每种传感器的温度范围也是不同的。用热敏电阻制作的温度传感

## 问题与思考解读

**1. 参考解答：**热敏元件感知温度、光敏元件感知光线、气敏元件感知气体、力敏元件感知作用力、磁敏元件感知磁场、湿敏元件感知湿度、声敏元件感知声音、放射线敏感元件感知放射线等。

**命题意图：**引导学生关注生活中应用的各种敏感元件及其工作原理。

**主要素养与水平：**模型建构（I）。

**2. 参考解答：**金属热电阻的阻值随温度的升高而增大。随温度升高，热敏电阻的阻值的变化情况与材料有关。有的热敏电阻的阻值随温度的升高而增大，有的是随温度的升高而减小。还有一种“开关型”的热敏电阻，其阻值先是随温度升高而增大；当达到某一温度时，电阻突然减小；当温度继续升高到某一温度时，电阻值又随温度升高而增大。

**命题意图：**厘清金属热电阻与热敏电阻的材料差异及其导电特性的差异，关注半导体材料的研究。也是引导学生关注“大家谈”对学习的帮助。

**主要素养与水平：**模型建构（II）；科学推理（II）。

**3. 参考解答：**①可能是红外线传感器。任何物体只要温度在绝对零度以上都会产生红外辐射。人体也是天然的红外辐射源。红外生命探测仪探测出被埋人员身体的热量，帮助救援人员确定被埋人员的位置。②也可能是声音传感器。如果幸存者已经不能说话，只要用手指轻轻敲击发出微小的声响，就能被声音传感器感知。此外，声音传感器还能检测出心脏的跳动，从而找到伤员。③也可能同时装有以上两种传感器。

**命题意图：**引导学生认识技术不仅为人类服务，让社会进步，还能在关键的时候拯救生命，潜移默化地进行生命教育，领会学习的责任。

**主要素养与水平：**科学推理（II）；社会责任（II）。

### ► 传感器的分类

如图9-6所示为各种传感器。对于传感器的分类，通常有如下几种方式：

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

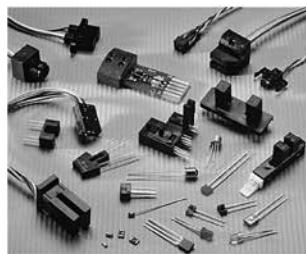


图9-6 各种传感器

### 问题与思考

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

## 本节编写思路

传感器在现代化的进程中的作用越来越重要。通过介绍磁传感器、温度传感器、力传感器、用压电陶瓷片制作的传感器等工作原理，让学生了解这些元件如何将非电学量转化成电学量。让学生了解这些常用传感器的工作原理就是已经学习过的物理规律，感受物理知识与技术结合的意义及社会效益。通过“自主活动”让学生亲身体验压电陶瓷片的压电敏感性，激发有兴趣的同学对材料特性和传感器研发的关注。

## 第二节 常见传感器的工作原理

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

### ▶ 磁传感器测磁感应强度的原理

用来测定磁感应强度  $B$  的磁传感器的主要部分由半导体材料构成。常用的半导体材料分为两类，一类材料中的自由电荷是正电荷，另一类材料中的自由电荷是负电荷。把这两种半导体薄片放在匀强磁场中，其平面与匀强磁场方向垂直，分别如图 9-7（a）、（b）所示。当电流从下往上通过元件时，由于受洛伦兹力的作用，自由电荷在磁场中发生侧向偏转，图（a）中正电荷向薄片右边逐渐积累，图（b）中负电荷也向薄片右

- [1] 边逐渐积累，使得每块薄片的两侧都产生电势差，这个现象叫做霍尔效应；这两种半导体薄片便叫做霍尔元件。在霍尔效应中，磁感应强度越大，霍尔元件两侧面的电势差越大；于是可以通过测定霍尔元件两侧面的电势差来确定磁感应强度的大小。磁传感器就是运用这个原理制成的。

### ▶ 温度传感器的测温原理

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

热敏电阻灵敏度高、反应快、使用方便，但通电后自身发热影响阻值，因此测量操作

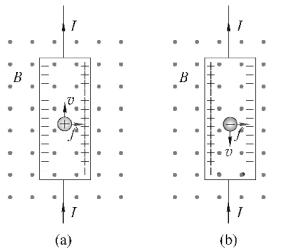


图 9-7 匀强磁场中半导体薄片内自由电荷的受力方向

## 正文解读

[1] 霍尔传感器是根据霍尔效应制作的一种磁场传感器。导体、半导体、导电流体等都有这种效应，而半导体的霍尔效应比金属强得多，从而使霍尔效应成

为研究半导体材料性能的基本方法之一。霍尔效应从本质上讲是运动的带电粒子（电子或空穴）在磁场中受洛伦兹力作用而偏转形成霍尔电压的现象。

根据霍尔效应用半导体材料制成的元件叫霍尔元件，它可将许多非电、非磁的物理量例如力、力矩、压力、应力、位置、位移、速度、加速度、角度、角速度、转速以及工作状态发生变化的时间等，转变成电学量来进行检测和控制，在自动化生产与技术领域具有广泛应用。

[1] 正温度系数 PTC (positive temperature coefficient) 热敏电阻是电阻值随温度升高而增大的电子元件。负温度系数 NTC (negative temperature coefficient) 热敏电阻是电阻值是随温度升高而减小的电子元件。临界温度热敏电阻 CTR (critical temperature resistor) 具有负电阻突变特性，在某一温度范围内，电阻值随温度的升高急剧减小，具有很大的负温度系数。

[1]



图 9-8 常见热敏电阻



图 9-9 温度传感器

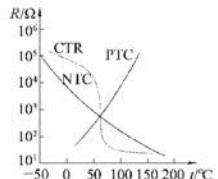


图 9-10 各类热敏电阻的阻值随温度变化的特性曲线

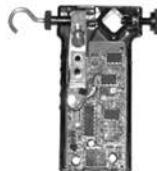
必须迅速，并且通常用于测量精度要求不高的场合。

#### ► 力传感器的测力原理

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



(a)



(b)

图 9-11 电子台秤和实验用的力传感器

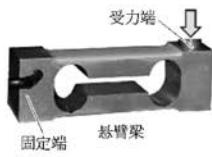


图 9-12 弹性元件——悬臂梁

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

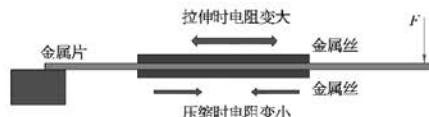


图 9-13 应变片

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

**拓展视野**

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

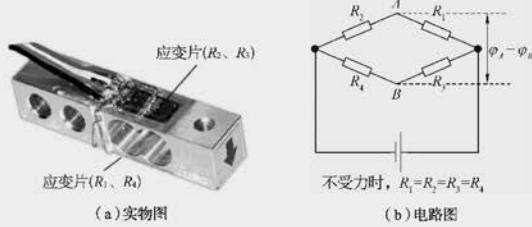


图 9-14 悬臂梁与桥式电路图

**[1] STSE**

力在生活与技术中有着广泛的应用，测量力大小的力传感器的种类很多。

## 1. 应变管式力传感器 [图 9-15 (a)]

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

## 2. 膜片式力传感器 [图 9-15 (b)]

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

## 3. 组合式应变压力传感器 [图 9-15 (c)]

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

**[1] 此处的“STSE”**

主要介绍几种压力传感器。压力传感器广泛应用于航空航天、军工、石化、电力、船舶、机床、管道、水利水电、铁路交通、智能建筑等众多行业的生产自控环境，其制作工艺要求很高，引起学生关注很有必要。



图 9-15 三种力传感器

[1] 介绍几种常用传感器的基本原理，旨在引导学生理解设计传感器的基本逻辑：需要知道的外界变化（信号）→ 找到可感知和接收的载体→ 转换为电信号→ 测出变化，为控制或调节提供信息。

### [1] ▶ 气敏传感器测气体浓度的原理

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

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



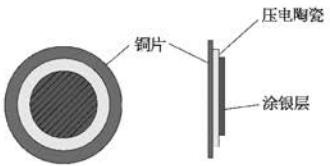
图 9-16 气敏传感器

### ▶ 用压电陶瓷片制作传感器的原理

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



(a) 实物图



(b) 结构示意图

图 9-17 压电陶瓷片

### [1] 自主活动

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



图 9-18 压电陶瓷片连接电压传感器



图 9-19 电压-时间图像

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

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

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

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

[1] 此处的“自主活动”旨在使学生直接体验压电陶瓷片的性能，感受技术的重要性及其在生活中的应用，如电子秤、压电式打火机、燃气灶点火、压电式雨滴传感器、压电式声控传感器等。

## 问题与思考解读

第二节 常见传感器的工作原理 121

**1. 参考解答：**如电吹风、电扇、电烙铁等无传感器。如电视机遥控器有的是用红外传感器，也有的是用声控传感器。电冰箱、电饭煲的温控采用温度传感器。家用饮水器里有温度传感器、压力传感器等。

**命题意图：**让学生感受到现在已很少没有传感器的家用电器了，说明传感器在现代家用电器中已广泛应用。

**主要素养与水平：**模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅰ)。

**2. 参考解答：**行人发出的声响，作为声音信号，被声控传感器接收而转为电信号。

**命题意图：**明确传感器的基本功能是通过将非电学量转换成电学量实现自动控制的。进一步领会非电学量转换为电学量的意义。

**主要素养与水平：**模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

**3. 参考解答：**应测量  $t_2 \sim t_3$  范围内的温度。因为此范围对应的图像的斜率较大，即相同的温度改变导致电阻改变得更大，使电流的改变也更大，温度计表现得更灵敏。

**命题意图：**从图像中获取信息，理解灵敏度的意义。

**主要素养与水平：**模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

**4. 参考解答：**(1) 根据左手定则，只要电流方向不变，无论移动的电荷是正电荷还是负电荷，安培力的方向都是指向  $N$  侧的，即负电荷偏向  $N$  侧面， $N$  面上聚集的是负电荷，因此  $M$  的电势比  $N$  要高。

(2) 若将电极  $N$  沿  $ab$  方向平移至  $N'$ ，由于材料是有电阻的，沿电流方向电势会降低，即电势  $U_{N'} < U_N$ 。当移动的是负电荷，因此  $M$ 、 $N$  之间的电势差将会变大。当移动的是正电荷， $N$  的电势比  $M$  要高。

### 问题与思考

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

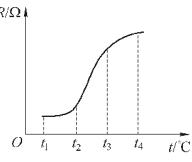


图 9-20

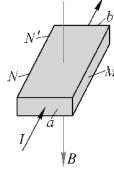


图 9-21

则  $M$ 、 $N$  之间的电势差将会变小。若  $NN'$  之间的距离足够大，则  $M$ 、 $N$  之间的电势差先变小、直到减为零后再反向变大。

**命题意图：**了解磁传感器中的核心元件(霍尔元件)的基本原理是基于洛伦兹力的作用，进一步巩固带电粒子与电场、磁场的相互作用。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

## 本节编写思路

本节通过传感器技术在轨道交通、无人驾驶汽车领域的应用，使学生感受传感器技术对自动化与智能化的巨大价值。可以让学生查阅资料后相互交流和演示手机中不同传感器的功能，使他们了解身边的技术应用及原理，感受传感器应用给人们带来的便利以及经济效益与社会效益。

通过动手设计一个利用传感器制作走道路灯的自动控制装置的学生实验，让学生体验将非电学量转换成电学量、电学量的处理、电学量对路灯的控制等过程，进一步认识传感器的工作原理；鼓励他们关注传感技术的研发和创新应用。

### 第三节 传感器的应用

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

#### [1] ▶ 传感技术在轨道交通领域的应用

如图 9-22 所示为轨道交通专用传感器。在新一代列车中，传感器在列车运行状态信息收集、钢轨探伤、轨道状态远程监测及列车内外环境综合检测等方面有着广泛的应用。以我国自主研发的和谐号高铁列车为例，一列列车里的传感器数量达 1000 多个，平均每 40 个零部件里就有一个传感器，它们承担着状态监视、故障报警、车载设备控制等功能。

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



图 9-22 轨道交通专用传感器

#### ▶ 传感技术在汽车上的应用

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

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

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

## 正文解读

[1] 传感器的应用非常广泛，这里之所以选择轨道交通、汽车和手机，是由于我国的轨道交通发达、汽车用户和手机用户数量全球第一，可以使学生感受各种传感器的研发及应用不可估量的社会经济价值，也有利于激发学生敢想、会想，鼓励有兴趣的同学更加关注传感器的研发与应用。



图 9-23 汽车传感器

动通过红绿灯、自动避开路边障碍等。

#### ► 传感技术在手机里的应用

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

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

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

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

如果你在一个没有无线网络的地方，手机里的惯性传感器仍然可以追踪你的位置。大多数智能手机配有一个惯性传感器：罗盘（或者磁力仪）确定方向；加速度传感器报告前进的速度和方向；陀螺仪既可确定转向动作，还可以感知“摇一摇”（晃动手机实现一些

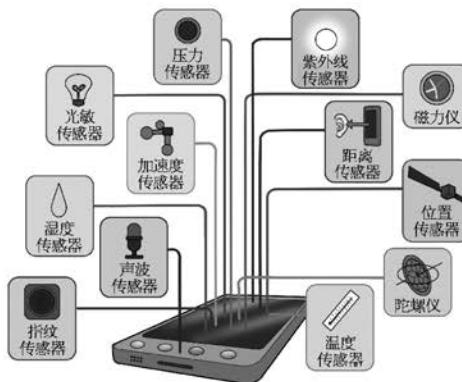


图 9-24 智能手机里的各类传感器

[1] 此处的“大家谈”不是引导学生了解智能手机的功能，而是要让学生发现这些功能是通过哪些传感器实现的，了解手机日新月异的性能是思维创意与科技发展的产物。

[2] 实验的主要目的：说明路灯自动控制的智能化——既要满足安全美好的需要，又要充分考虑节能的要求；提醒学生认识应用科学与技术让生活更美好的同时应注意节能减排。

鼓励学生在实验设计与制作中，全面思考人们对路灯的多种需求，例如改变以往光线太暗或是无论有无行人通过路灯都一直开启造成浪费等情况；让学生思考可能会出现的多种情况，探究解决问题的逻辑思路，从而提升他们分析、解决实际问题的思维能力。

实验要求了解数字化模块的性能，会组装实验装置；在操作中的试错与调整的过程中，能使小灯的开启与熄灭达到设计效果，能用证据说明自制自动控制装置的优缺点。

本实验目的是培养学生基于集成电路模块的应用解决实际问题的信息化素养和能力。

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

[1]

**大家谈**

智能手机里还有哪些传感器？你用过手机里的哪些传感器？

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

利用传感器的不同组合可以实现各种自动化的功能。

[2]

**学生实验****利用传感器制作走道路灯的自动控制装置****提出问题**

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

**制作方案**

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

**制作材料**

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

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

下载模块：将计算机编译后的程序上传至控制模块。

电源模块：为装置提供电源。

问题与思考解读

彩灯模块：设置有多个LED灯，可以分别发出不同颜色、不同亮度的灯光。

光敏传感器模块：可以检测光照强度。

人体红外感应模块：当检测到有人靠近时，输出高电势信号。

制作方法与测试

1. 将控制模块与下载模块拼接在一起，下载模块使用 USB 线连接至计算机 USB 口。
  2. 通过拼接程序块进行编程。读取光敏传感器模块和人体红外感应模块的数据，判断是否亮度过低并且有人经过，控制灯的亮灭。
  3. 将编好的程序进行编译，如果软件提示编译错误，对错误进行修改。
  4. 程序编译成功后，将程序上传至控制模块。
  5. 程序上传成功后，断开 USB 连接，将各个模块按照自己的设计组合在一起。如图 9-25 所示为程序运行逻辑图。
  6. 注意查看电源模块的电量是否充足，然后打开电源模块的电源开关，测试装置是否能够正常运行。

展示与交流

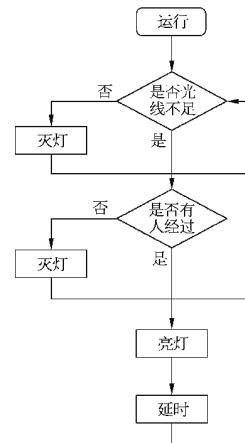
各组展示完成的作品，交流在制作过程中出现故障的原因，以及排除故障的方法。

## 问题与思考

1. 火灾探测器是火灾自动报警系统的触发装置，在发生火情初期通常会出现哪些可被感知的物理量？通过哪些传感器能变成电信号，传输到火灾报警系统，从而起到对火灾预警与监控作用？

2. 为了省电，常见的楼道灯都由两个开关一起控制。一个是利用光敏电阻制成的“光控开关”，它在光线暗时自动闭合、光线亮时自动断开；一个是利用声敏元件制成的“声控开关”，它在有声音时自动闭合，一段时间无声音则自动断开。试将如图 9-26 所示的器材连接成符合省电要求的电路。

图 9-25 自动控制路灯装置程序逻辑图



### 逻辑图

产生烟雾的密度、  
(升高)和光辐射等  
被感知到的物理  
通过温度传感器、  
传感器和光传感器  
在火灾初期的火灾  
转变成电信号

**命题意图：**引导学生寻找生活中的物理量与所学传感器知识的联系，重视火灾的防范。

主要素养与水平：  
模型建构（I）；社会责任（I）。

## 2. 参考解答：如

图 1 所示电路

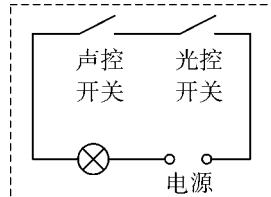


图 1

要求光控开关和声控开关同时控制一盏灯，当自然光暗到一定程度，且环境有一定程度的声音时电灯才点亮，两个开关和灯泡应该是串

**命题意图：**引导学生思考生活场景的应用与节约用电的问题。电路中的开关控制用电器时，通常是指一个开关和用电器串联，当光暗到一定程度或有声音时都能使电灯点亮，但这样做不满足节约用电的要求。若是光线暗而无行人通过，或者是有行人通过而光线充足，就都不需要开启路灯。本题是打破常规，利用一个简单的问题，启发学生敢想敢做的创新意识。

**主要素养与水平:** 科学推理(Ⅱ);社会责任(Ⅱ)。

### 3. 参考解答：

(1) 无光照时, 光敏电阻的阻值大、分压大, 由图(b)可知无光照时示波器所示的  $R_1$  上所分得的电压为 4 V,

$$\text{由 } \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} \text{ 得 } R_1 =$$

$$\frac{R_2 \times 4 \text{ V}}{6 \text{ V} - 4 \text{ V}} = 2000 \Omega$$

(2) 有光照时, 光敏电阻阻值小、分压小, 由图(b)可知有光照时  $R_1$  上所分得的电压为 2 V, 此时  $R'_1 =$

$$\frac{R_2 \times 2 \text{ V}}{6 \text{ V} - 2 \text{ V}} = 500 \Omega$$

(3) 由图(b)可知一个周期  $T = 0.6 \text{ s}$ , 所以每小时通过的产品个数为  $n = \frac{3600}{0.6} = 6000$  个

**命题意图:** 通过电路计算复习串联电路知识, 但重点是要学生读懂传感器与电路连接的关系, 能从图像中获取传输周期与每一件产品通过时间的关系。体会科学、技术与社会的关系。

**主要素养与水平:** 模型建构(Ⅱ); 科学推理(Ⅱ)。

**4. 参考解答:** 图中的(a)电路。(b)(c)(d)三种电路中, 温度传感器与烘箱并联, 当一条支路中的传感器断开时, 另一条支路中的烘箱仍在工作, 这样就不能达到自动控制电路的作用

**命题意图:** 让学生思考和分析家用电器中的自动化实现的一些思路方法, 感受学以致用。

**主要素养与水平:** 模型建构(Ⅰ); 科学推理(Ⅱ)。

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

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

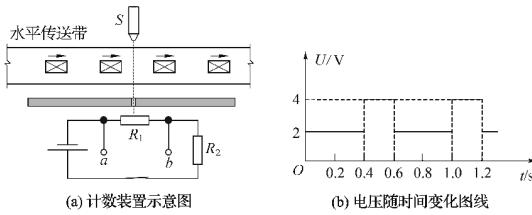


图 9-27

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

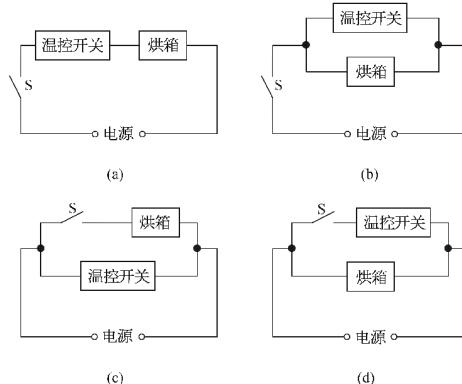


图 9-28

## 小结

### · 基本概念和基本规律

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

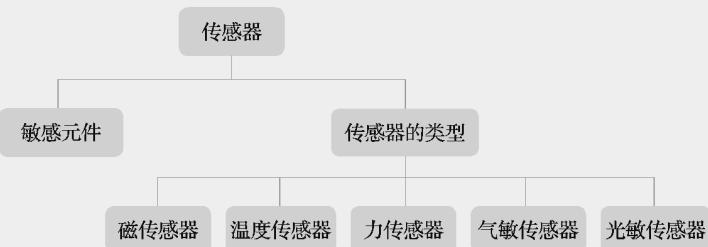
**敏感元件：**直接感受被测量，并输出与被测量有确定关系的物理量信号的元件。

### · 基本方法

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

在简单控制电路的制作过程中，认识逻辑推理的方法。

### · 知识结构图



## 复习与巩固解读

128 第九章 传感器

### 1. 参考解答：声音传感器，光传感器

夜晚时人发出声响，灯就会发光，说明有声音传感器。白天楼道光照充足，即使有人路过发出声响，楼道照明灯也不应点亮，只有夜晚光线不足时，才可能点亮，说明要有光传感器。

**命题意图：**启发学生创设情景，通过科学推理得出结论。

**主要素养与水平：**模型建构（I）；科学推理（I）。

### 2. 参考解答：(1) 力传感器 (2) 光传感器 (3) 红外传感器

电梯超载是指超过电梯设计的安全载重量，所以超载报警用的是力传感器。烟雾的产生使仪器周围的光强发生改变，所以是光传感器。人手具有一定的温度，发出的红外线可被红外传感器接收而工作，所以是红外传感器。

**命题意图：**旨在引导学生关注日常生活环境中所用的各种电气或设备中传感器的基本物理原理，体会物理就在我们身边。

**主要素养与水平：**科学推理（I）。

### 3. 参考解答：

- (1) 表述错误。热敏电阻是把温度这个热学量的变化转换为电阻这个电学量的变化
- (2) 表述错误。金属热电阻的阻值随温度的升高而增大
- (3) 表述错误。电熨斗中的双金属片是温度传感器
- (4) 表述正确。霍尔元件中的电荷受磁场力的作用在薄片两侧积累，产生电压，通过这个电压来确定磁感应强度的大小

### 复习与巩固

1. 有些楼道的照明灯是声音控制的，当人过来发出声响就会发光，人离开后就会熄灭。这种照明灯内部至少包含了哪两种传感器？

2. 在生活中使用传感器已很普遍，试问：

- (1) 电梯超载时会自动报警。这种报警系统通常采用的是什么传感器？
- (2) 光电式感烟探测器〔简称烟感器，图 9-29 (a)〕由光源、光电元件和电子开关组成。利用光散射原理探测火灾初期产生的烟雾，并及时发出报警信号。烟感器利用的是什么传感器？

(3) 在很多洗手间中都装有自动干手机〔图 9-29 (b)〕，洗手后将手靠近，自动干手机内的传感器就开通电热器加热，有热空气从内部吹出，将湿的手烘干。自动干手机通常采用的是什么传感器？

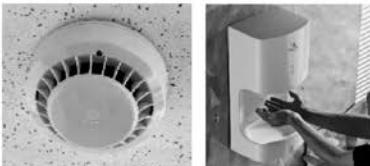


图 9-29

3. 关于敏感元件的特性，判断下列说法是否正确，并说明理由。

- (1) 热敏电阻是把温度转化为电阻的敏感元件。
- (2) 金属热电阻是阻值随温度升高而减小的敏感元件。
- (3) 电熨斗中的双金属片是力敏感元件。
- (4) 霍尔元件是能够把磁感应强度转换为电压的敏感元件。

4. 将热敏电阻  $R_T$ 、定值电阻  $R$ 、电流表、电源按图 9-30

连接成电路。将烧杯装入  $\frac{2}{3}$  的水，并用铁架台固定在加热器上。闭合开关 S，当热敏电阻未放入热水中时，电流表的示数为  $I_1$ ；将热敏电阻放入温水中，电流表的示数为  $I_2$ ；将热敏电阻放入热水中，电流表的示数为  $I_3$ 。试判断  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  的大小关系。

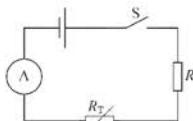


图 9-30

5. 自 2019 年起，上海新投运的公交车全部采用新能源，近千辆新能源公交车的充电管理都通过云平台自动监控。原先充电主要靠手动和目测，若插歪充电桩，很容易导致枪头温度过高而损害设备甚至引发火灾。为保证安全，试设计一个自动监控新能源公交车充电过程的简要方案。

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

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

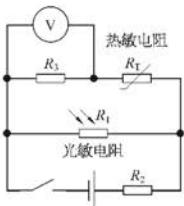


图 9-31

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



(a)

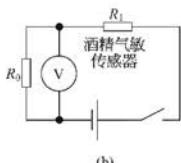


图 9-32

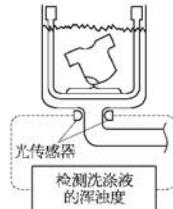


图 9-33

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

**命题意图:** 旨在引导学生进一步熟悉和巩固几种常见传感器工作时是将哪些非电学量转换为电学量。

**主要素养与水平:** 科学推理(I)。

**4. 参考解答:** 若是正温度系数热敏电阻, 则其电阻值随温度的升高而增大, 故  $I_1 > I_2 > I_3$ 。若是负温度系数热敏电阻, 则其电阻值随温度的升高而减小, 故  $I_1 < I_2 < I_3$

**命题意图:** 旨在使学生明确认识到, 不同材料的热敏电阻, 其阻值变化的特点也不同。

**主要素养与水平:** 科学推理(I)。

**5. 参考解答:** 可以在充电枪头上安装一个温度传感器, 实时监控温度的变化, 超过规定的温度就向管理人员发出信息或警告

**命题意图:** 通过具体实例的分析和设计, 增强学生利用所学知识解决实际问题的能力。

**主要素养与水平:** 科学推理(I); 社会责任(I)。

**6. 参考解答:** 将光控开关和压力开关串联。当有车辆通过时, 光控开关会自动闭合; 若车辆超重, 压力开关会闭合; 当两者都闭合时, 摄像机才会被激活进行自动拍摄

**命题意图:** 通过具体实例问题的分析和设计, 增强学生利用所学知识解决实际问题的能力。

**主要素养与水平:** 科学推理(II); 科学态度(I)。

**7. 参考解答:** 热敏电阻的温度升高, 或者是光照减弱

**命题意图:** 运用闭合电路中电压表的变化判断相关电阻的变化, 本题用热敏电阻或光敏电阻替代以往的滑动变阻器, 实现自动化调节。

**主要素养与水平:** 模型建构(I); 科学推理(II)。

**8. 参考解答：**在对酗酒者进行测试时，酒精气体使  $R_1$  的阻值减小，导致电路中的电流变大，由欧姆定律可知电压表的示数变大，因此我们就可以通过电压表的示数大小判断此人是否喝了酒。

**命题意图：**用电压表的示数变化测试呼出气体中的酒精浓度，既感受将知识转化为技术的价值和意义，也进行潜在的安全教育与生命教育。

**主要素养与水平：**  
科学推理(Ⅱ)；社会责任(Ⅰ)。

**9. 参考解答：**洗涤过程中水逐渐变浑浊，致使透光率降低，光敏电阻的阻值变大，继续保持洗涤。一段时间后，当洗涤水变清，光敏电阻的阻值减小到一定数值时，给出电信号结束洗涤。

**命题意图：**运用所学传感器知识分析日常生活中自动控制设备的工作原理，感受将知识转化为技术的价值和意义。

**主要素养与水平：**模型建构(Ⅰ)；科学推理(Ⅱ)。

**10. 参考解答：**陀螺仪——飞行姿态感知，气压传感器——悬停高度粗略控制，超声波传感器——低空高度精确控制或避障，光流传感器——悬停水平位置精确确定，GPS 模块——水平位置高度粗略定位。

**命题意图：**现代无人机应用很广泛，引导学生关注生活中的新景象与所学知识的联系。传感器技术是自动化技术的重要标志，旨在吸引对传感器有兴趣的同学敢于联想和尝试，培养创新意识。(光流传感器利用的是图像的变化处理，用于检测地面的状态，从而监测飞机的移动；主要用于保持飞机的水平位置，以及在室内实现定高和定点飞行)

**主要素养与水平：**模型建构(Ⅰ)；科学推理(Ⅱ)。

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



图 9-34

## 第三部分 本章练习部分解读

### 第一节 传感器及其敏感元件

1. 变小 温度
  2. C
  3. B
  4. A
  5. 增强 敏感
6. 常见的有：光线传感器、距离传感器、重力传感器、加速度传感器、磁(磁阻)传感器、陀螺仪、GPS；可能还有：指纹(光学或半导体)传感器、霍尔传感器、气压传感器、心率(反射式红外)传感器、紫外线传感器等

### 第二节 常见传感器的工作原理

1. 大 力
2. 玻璃碎裂时常伴随振动，压电传感器受到机械振动时会产生电压输出，输出电压经放大等处理后提供给报警系统，从而实现玻璃破碎的报警功能
3. c、d 减小
4. B

5. (1) 由图像可知，在  $0 \sim T_1$  区间内元件的电阻随温度升高而减小，电源电压  $U$  不变，由  $P = \frac{U^2}{R}$  可知，此元件的电功率变大

(2) 在  $T_1 \sim T_2$  区间里电阻随温度的升高而增大，电功率随之减小，当产生的热量与散发的热量相等时，温度保持在  $T_1 \sim T_2$  的某一值不变

6. (1) a (2) 右  
这是两个独立的闭合电路，当左侧电路的电流较小时，与弹簧相连的导体受到电磁铁的吸引力小于弹簧对它的拉力，此导体将接触 b 电极；当左侧电路的电流较大时，与弹簧相连的导体受到电磁铁的吸引力大于弹簧对它的拉力，此导体将接触 a 电极

(1) 温度升高，热敏电阻的阻值变小，左侧的闭合电路中电流变大，电磁铁的磁性变强，与弹簧相连的导体与 a 接触使右侧电路导通，报警器铃响，所以 c 应接在 a 处

(2) 若将滑片 P 向左移，则变阻器在回路中的电阻值变大，只有在温度更高、 $R_f$  更小时才能有足够的电流，使电磁铁有足够的引力将与弹簧相连的导体吸引到 a 处

所以，要降低报警的最低温度，滑片 P 应向右移使变阻器在回路中的电阻值变小。温度只要稍微升高，热敏电阻的阻值下降一点就使回路中的电流增大到足以报警

### 第三节 传感器的应用

1. B
  2. D
- 无烟雾时，发光二极管 LED 的光线被不透明的挡板遮挡；有烟雾时，烟雾将发光二极管 LED 的光线散射到光电三极管上使其电阻变小，发出警报

3. 变小 变大

4. 高 低

信号处理系统获得的电压就是定值电阻  $R_2$  两端的电压,光敏电阻  $R_1$  和定值电阻  $R_2$  为串联关系。当没有物品遮挡时,光敏电阻  $R_1$  的阻值很小,定值电阻  $R_2$  分得的电压就较大;当光线被物品遮挡,光敏电阻  $R_1$  的阻值很大,定值电阻  $R_2$  分得的电压就很小

$$5. \frac{1}{2}v(t_0 - t) = \frac{U - U_0}{U_0}m_0$$

当测重台不站人时,测量仪顶部到底部的距离  $s_0 = \frac{1}{2}vt_0$

当某人站上测重台后,测量仪顶部到人头顶的距离  $s = \frac{1}{2}vt$

则此人的身高  $h = s_0 - s = \frac{1}{2}v(t_0 - t)$

由于传感器输出电压与其所受的压力成正比,即  $\frac{m_0 g}{U_0} = \frac{(m_0 + m)g}{U}$

所以,人的质量  $m = \frac{U - U_0}{U_0}m_0$

## 第四部分 本章实验与活动部分解读

1. 自主活动 光敏电阻

**参考解答:** 光敏电阻的阻值变化与光强有关,也与入射光的频率有关。不同材料制成的光敏电阻,被不同频率的光照射时其电阻的变化情况是不同的。如硫化铅制成的光敏电阻器用红外光照射时的电阻值与不用红外光照射时的电阻值变化较大,即硫化铅对红外光敏感;硫化镉对可见光敏感,硒化镉对紫外光较敏感。所以,根据材料的特性可制成红外光敏电阻器、可见光光敏电阻器、紫外光敏电阻器等。

**命题意图:** 旨在引导学生养成遇到问题,通过自主查阅资料可以获得答案。了解光敏电阻不仅仅是敏感可见光,也有敏感其他频率的光。也可以直接阅读下面的“阅读材料”获得答案。

2. 自主活动 热敏电阻

**参考解答:** 从热敏电阻的阻值随温度变化的特性曲线可知:热敏电阻的导电性在不同温度下的变化图像,只有其中的某一段区间内的温度与阻值的变化关系是线性关系的。若使用者的温度不是在线性变化的区间内,则此时的使用者就会感觉精确度存在较大偏差。

**命题意图:** 旨在引导学生能从教材中的“各类热敏电阻的阻值随温度变化的特性曲线”,认识用热敏电阻制作的温度传感器,其测量范围与其特性曲线的某区间相对应。

3. 自主活动 压电陶瓷片

**参考解答:** 用压电陶瓷制作的加速度传感器,在航空和宇航领域、在汽车、船舶、桥梁和建筑的振动和冲击测量中普遍使用。压电式压力传感器可以用来测量发动机内部燃烧压力的测量与真空度以及点火角不匹配引起的爆震测量。

**命题意图:** 旨在引导学生关注各种传感器及其特殊用途,激发学生的好奇心和创造欲,也让学生养成自主查阅文献的习惯。

## 说 明

本书根据教育部颁布的《普通高中物理课程标准(2017年版 2020年修订)》和高中物理教科书编写,经上海市中小学教材审查委员会审查准予使用。

编写过程中,上海市中小学(幼儿园)课程改革委员会专家工作委员会、上海市教育委员会教学研究室、上海市课程方案教育教学研究基地、上海市心理教育教学研究基地、上海市基础教育教材建设研究基地、上海市物理教育教学研究基地(上海高校“立德树人”人文社会科学重点研究基地)及基地所在单位复旦大学给予了大力支持。马世红、王祖源、陆昉、陈树德、蒋平、冀敏在本书编写的各个阶段审阅了书稿。在此一并表示感谢!

欢迎广大师生来电来函指出书中的差错和不足,提出宝贵意见。出版社电话:021-64848025。

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



经上海市中小学教材审查委员会审查  
准予使用 准用号 II - GJ - 2023006



绿色印刷产品

ISBN 978-7-5478-6214-8

A standard EAN-13 barcode representing the ISBN number 978-7-5478-6214-8.

9 787547 862148 >

定价：36.00 元