

普通高中课程标准实验教科书

# 物 理

选修 3—2

---

## 教师教学用书

---

人民教育出版社 课程教材研究所  
物理课程教材研究中心 编著

人民教育出版社

主 编：彭前程  
副 主 编：王永元 付荣兴 贾克均  
编写人员：付荣兴 彭 征 孙 新 吴 健 王永元  
              吴兆雄 俞菊明 徐正黄 张惠钰  
责任编辑：孙 新  
绘 图：郭 巍  
版式设计：张万红

普通高中课程标准实验教科书

物理 选修3-2

教师教学用书

人民教育出版社 课程教材研究所 编著  
物理课程教材研究开发中心

人民教育出版社 出版发行

网址：<http://www.pep.com.cn>

北京天宇星印刷厂印装 全国新华书店经销

开本：890毫米×1240毫米 1/16 印张：10 字数：250 000

2008年4月第3版 2009年6月第9次印刷

ISBN 978-7-107-18711-7 定价：10.40元

G·11801 (课)

如发现印、装质量问题，影响阅读，请与本社出版科联系调换。

(联系地址：北京市海淀区中关村南大街17号院1号楼 邮编：100081)

## 说 明

本书是在《普通高中课程标准实验教科书物理选修3-2教师教学用书》的基础上，根据几年来实验地区的一些反映，修订而成的。旨在帮助教师更好地使用《普通高中课程标准实验教科书物理选修3-2》，为教学提供一些参考。

本书介绍了教科书的特色，新的教学理念和一些新的教学方式、方法，与教科书采取“紧密配合”的方式，逐章逐节进行分析说明。本书的主要结构如下：

**课程标准的要求** 摘录了《普通高中课程标准物理（实验）》的相关内容，作为教学的依据。

**本章教材概述** 主要介绍本章教科书的编写意图，主要内容和教材结构的特点，以及在选择内容和讲述方法上的考虑。

**教材分析与教学建议** 根据课程标准及教科书，对每一节教学内容提出了具体的教学目标，并且对教材内容提出了比较详细的建议，包括教学过程中可能遇到的问题，供选择的教学方法，怎样发展学生的非智力因素，怎样使用教科书中的栏目、插图，怎样以课程理念处理教学问题，如何发展教师自身的教学能力，如何处理数字化教学，如何帮助学生进行探究等。

**问题与练习** 从练习题“内容分析”和“解答与说明”两部分对教科书“问题与练习”中的问题给出了较为详细的解答。

**教学设计案例** 主要目的是给实验地区的教师提供一些教学设计方面的参考，包括一些重点难点的分析、把握、处理，整堂课的设计思想、具体安排等。

**教学资源库** 是与教学内容相关的教学资源，包括“概念、规律和背景资料”“联系生活、科技和社会资料”“实验参考资料”三个部分。课程新理念需要教师进一步提高职业素质，需要教师尽早进入终身学习的轨道，我们在这里围绕教学的需要选择了一些拓展性的内容，为教师的素质发展提供一些线索。

本书原编写者还有唐掣、汪维澄、王琦、刘彬生。

本书在编写过程中得到北京市、浙江省、江苏省、山东省、重庆市、天津市、安徽省、江西省、辽宁省等全国各地教研室的热情支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

对于书中存在的缺点和错误，欢迎教师和物理教育工作者们及时批评、指正。来函请寄：100081 北京市海淀区中关村南大街17号院1号楼 人民教育出版社物理室 收。

人民教育出版社物理室

2008年3月

# 目 录

<b>第四章 电磁感应</b>	
一、本章教材概述	1
二、教材分析与教学建议	4
第1节 划时代的发现	4
第2节 探究感应电流的产生条件	9
第3节 楞次定律	14
第4节 法拉第电磁感应定律	21
第5节 电磁感应规律的应用	27
第6节 互感和自感	31
第7节 涡流、电磁阻尼和电磁驱动	37
三、教学设计案例	41
自感	41
四、教学资源库	44
(一) 概念、规律和背景资料	44
(二) 联系生活、科技和社会资料	56
(三) 实验参考资料	63



<b>第五章 交变电流</b>	70
一、本章教材概述	70
二、教材分析与教学建议	71
第1节 交变电流	71
第2节 描述交变电流的物理量	75
第3节 电感和电容对交变电流的影响	78
第4节 变压器	83
第5节 电能的输送	87
三、教学设计案例	91
变压器	91
四、教学资源库	94
(一) 概念、规律和背景资料	94
(二) 联系生活、科技和社会资料	108
(三) 实验参考资料	111





<b>第六章 传感器</b>	114
一、本章教材概述	114
二、教材分析与教学建议	116
第1节 传感器及其工作原理	116
第2节 传感器的应用（一）	122
第3节 传感器的应用（二）	126
第4节 传感器的应用实验	131
三、教学设计案例	137
传感器及其工作原理	137
四、教学资源库	141
（一）概念、规律和背景资料	141
（二）联系生活、科技和社会资料	148
（三）实验参考资料	150



# 第四章 电磁感应

## 课程标准的要求

1. 收集资料，了解电磁感应现象的发现过程，体会人类探索自然规律的科学态度和科学精神。
2. 通过实验，理解感应电流的产生条件。举例说明电磁感应在生活和生产中的应用。
3. 通过探究，理解楞次定律。理解法拉第电磁感应定律。
4. 通过实验，了解自感现象和涡流现象。举例说明自感现象和涡流现象在生活和生产中的应用。

## 一、本章教材概述

电磁感应现象的发现是电磁学中最重大的发现之一。电磁感应现象的研究使人们从有特殊性的静电场和静磁场的静场课题，进入到变化场的动力学课题。电磁感应包括大量奇异现象，十分激动人心。利用电磁感应原理制造的发电机使人类获取了巨大而廉价的电能，为电气化奠定了基础。工业上广泛应用的感应电动机和变压器就是应用电磁感应原理制造的。电磁感应原理在电工技术、电子技术中的应用实例不胜枚举，在电磁测量、自动化技术中也有广泛、重要的应用。

电磁感应现象揭示了电与磁相互联系和转化的重要方面，推动了电磁学理论的发展，通过对变化磁场、变化电场的研究，麦克斯韦建立了完整的电磁场理论。可以说，电磁感应现象的发现在科学上和技术上都具有划时代的意义。

电磁感应现象及其规律是本章的重点，教科书对电磁感应现象及其本质、规律的阐述分三个阶段逐步深入。教科书第1节“划时代的发现”，阐述法拉第发现电磁感应现象的过程。第2节“探究感应电流的产生条件”，通过几个典型实验的探究得出结论。第3节“楞次定律”，通过实验阐述楞次定律的内容，说明楞次定律与右手定则的关系。前3节是从感应电流角度来认识电磁感应现象，这是认识电磁感应现象的第一个阶段。第4节“法拉第电磁感应定律”，从感应电流深入到感应电动势来理解电磁感应现象，这是第二个阶段。它的核心内容是法拉第电磁感应定律  $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ ，由此导出应用很多的公式  $E = Blv$ ，讨论了反电动势的意义。第5节“电磁感应规律的应用”，介绍了产生感应电动势的两种非静电力，即感生电场力和洛伦兹力。它揭示了电磁感应现象的本质，这是认识电磁感应现象的第三个阶段。对此，只要求学生一般了解。第6节“互感和自感”，阐述了两种具体的电磁感应现象，特别是自感现象的特点及应用。第7节介绍涡流及其广泛应用，前6节研究的是电路中的电磁感应现象，涡流是导体块中的感



应电流。

在编写本章时还有对以下一些问题的思考：

### 1. 重视电磁感应现象发现的历史

人类在探索丰富多彩的自然现象的奥秘过程中建立了许多学科，物理学是研究自然界各种最基本的运动形态的学科。从某种意义上说，物理学的历史就是寻找不同自然现象之间的联系，追求统一解释的历史。牛顿创建经典力学理论（牛顿运动定律、万有引力定律）统一解释了天体的运动和地面上物体的运动。长期以来，电和磁一直被人们认为是没有联系的两个自然现象。奥斯特、法拉第等科学家在“自然力统一”思想的影响下，发现了“电生磁”和“磁生电”，打开了电与磁联系的大门。经过麦克斯韦的进一步研究，建立了电磁理论，统一解释了各种电磁现象。

牛顿的力学理论构建了一幅自然界的机械运动图景，这是人类对自然现象的第一次大综合。从奥斯特、法拉第到麦克斯韦的电磁理论构建了自然界另一幅图景，即电磁运动的图景，这是人类对自然现象的第二次大综合。从这个角度考虑，编者由奥斯特的“电生磁”说起，阐述了法拉第发现电磁感应现象这一划时代的成果。

法拉第的思想非常深刻，具有高度的创造性和想象力。他在“自然力统一”思想的影响下，提出具有近距作用“场”的观点，并经过艰苦努力，终于发现了电磁感应定律。编者通过课文和“科学足迹”栏目，介绍了法拉第的科学思想方法和他淡泊名利、献身科学事业的一生。我们希望学生能从法拉第的信念、科学思想和方法、艰苦奋斗、不慕荣华富贵的高尚品质中受到教益。

在“科学足迹”栏目中还介绍了法拉第关心他的发现对社会进步的影响。法拉第在奥斯特发现的基础上，巧妙利用电流与磁极间作用力的特征做了“电磁旋转实验”，使通电导线能绕磁棒连续转动和磁棒绕通电导线连续转动，实现了电能向机械能的转化，这就是人类历史上第一台电动机的雏形。

法拉第发现电磁感应现象的第一个实验是关于互感现象的实验，他所用的铁环上绕两组线圈就是变压器的雏形。法拉第利用电磁感应现象，发明了人类历史上第一台发电机——圆盘发电机，实现了机械能向电能的转化。近100多年来人类社会的发展，充分说明电磁感应现象的发现对社会进步的积极推动作用。

### 2. 注意揭示电磁感应现象的物理本质

物理学追求认识自然界最普遍、最基本的规律。学生学习物理，就要注意养成追根问底、悟物穷理的思维习惯，这有利于提高学生的理性思维能力。教科书注意逐步展开电磁感应现象的发现过程，要使学生对电磁感应现象的认识由现象逐步深入到物理本质。

首先，归纳实验现象，说明电磁感应现象的特征是闭合电路中出现了感应电流，条件是穿过闭合电路的磁通量发生变化。学习这一过程需要注意，电磁感应现象是在变化、运动过程中出现的效应，虽然引起感应电流的各种变化、运动的形式多种多样，但都可归结为“穿过闭合电路的磁通量的变化”。与静电感应不同，电磁感应现象不是一种静态效应。

其次，根据闭合电路欧姆定律，闭合电路中的电流是由电动势产生的。因此，感应电流是由闭合电路中的感应电动势产生的。感应电流的大小除了与感应电动势大小有关外，还与闭合电路的电阻有关。穿过闭合电路磁通量的变化要产生感应电动势，由此在闭合电路中就会有感应电流产生。我们对电磁感应现象的表述可从“只要穿过闭合电路的磁通量发生变化，闭合电路中就有感应电流产生”，进一步表述为“只要穿过闭合电路的磁通量发生变化，闭合电路中



就产生感应电动势”。

完整的法拉第电磁感应定律应该包括感应电动势的大小和方向的内容。为便于学生接受和理解，教科书先在第3节介绍了如何判别感应电流的方向，即楞次定律，然后在第4节“法拉第电磁感应定律”中主要介绍了感应电动势的大小与磁通量变化率之间的关系。楞次定律是电磁感应定律的一部分，用它可以判断感应电动势的方向，感应电流的方向与感应电动势的方向一致。

教科书在第5节“电磁感应规律的应用”中分析了产生感应电动势的非静电力的本质，使学生对电磁感应现象的认识又上升到一个新的高度。在《物理选修3-1》中，学生学习了电动势的本质是非静电力移动电荷做功，自然会追问感应电动势的本质是什么呢？考虑到随时间变化的磁场产生涡旋电场是电磁感应规律的核心内容，也是麦克斯韦电磁场理论基本方程的内容，它鲜明地显示了磁场与电场的联系，教科书介绍了感生电动势的本质是涡旋电场力。不过应该注意到，这部分对感生电动势的介绍是粗浅的、形象的，它只要求学生对此有初步的认识即可。教科书对动生电动势的本质用洛伦兹力做了具体的分析、说明，在学生学习了洛伦兹力之后，由导线运动切割磁感线产生动生电动势的机理就不难理解了。

### 3. 重视理论联系实际

电磁感应现象的应用非常广泛，教科书注意让学生了解其多方面的应用。

在“做一做”栏目中介绍了“摇绳发电”，使学生对电磁感应现象感到亲近、可操作，并能引起学习兴趣。介绍有关反电动势的内容时，分析直流电动机中反电动势的作用。另外，通过“问题与练习”，让学生了解有关动圈式扬声器也可当话筒用；绳系卫星的缆绳中能产生感应电动势；电磁流量计的测量原理；法拉第圆盘发电机的原理等。在学生了解感生电场的基础上，教科书介绍了电子感应加速器的基本构造和原理。

互感现象和自感现象是常见的电磁感应现象，教科书注意联系多种自感现象的实例。涡流是在金属块中产生的感应电流，这是与电路中产生感应电流不同的另一类电磁感应现象。涡流的重要性表现在：它能造成危害，但又有很多有益的应用。教科书在理论联系实际方面做了比较系统的介绍，如教科书先介绍涡流的热效应和磁效应的各种应用，接着又介绍涡流的机械效应，即电磁阻尼和电磁驱动的各种应用。

### 4. 提供学生自主学习、教学方式多样化的条件

“划时代的发现”一节提供了丰富、生动的历史资料，目的是要激发学生的兴趣，引起学生的思考，并获得更大的拓展空间。

“探究电磁感应的产生条件”一节设置了一个探究活动。学生在自主探究过程中会出现各种想法，提出各种问题，甚至会提出教科书没有涉及的许多实验方案，教学中应该多鼓励，不要对此加以限制。教学中要让学生广开思路、大胆实践、独立思考、互相切磋，最后归纳出产生感应电流的条件。

“楞次定律”一节，教科书注意通过实验引导学生归纳出楞次定律，力图使学生自己动手做实验，归纳出判断感应电流方向的规律，体验科学探究的过程。

为了给学生独立思考创造条件，教科书从第3节到第7节为引入课题、点拨课题和总结课题等目的设置了多项“思考与讨论”栏目，引导学生独立思考，逐步达到对重要的问题更透彻的理解。“思考与讨论”栏目是教科书内容的重要组成部分，教学中要留给学生足够的思考空间。

### 5. 落实“三维”目标的有机融合

应该看到，初、高中阶段，学生对电磁感应现象的理解经历了四个阶段。



初中关于电磁感应现象的描述是：闭合电路的一部分导体在磁场中做切割磁感线运动时，导体中就产生电流，这种现象叫做电磁感应现象，产生的电流叫做感应电流。另一种更简单的表述是：由于导体在磁场中运动而产生电流的现象，是一种电磁感应现象，产生的电流叫做感应电流。这是认识电磁感应现象的第一个阶段。

在高中阶段，让学生通过实验发现，尽管导体与磁场之间没有位置的相对变化，只要穿过闭合电路的磁通量发生变化，闭合电路中就有感应电流产生。法拉第电磁感应定律概括了初中所学的内容，揭示了产生感应电流的条件是穿过闭合电路中的磁通量发生了变化。明确了电路中感应电动势的大小跟穿过这一闭合电路的磁通量的变化率成正比，以及感应电流的方向与磁通量变化的关系，这是认识电磁感应现象的第二个阶段。

在学习《物理选修3-4》的电磁振荡和电磁波的知识时，教科书将提出电磁场的概念。这样，就对电磁感应现象做了本质的解释。至此，高中阶段对电磁感应现象的认识相对初中来说提高了一大步。

从能的转化与守恒的观点看，电磁感应现象是把其他形式的能转化为电能的过程。

本章的内容主要是讲述电磁感应现象的产生，确定感应电动势的大小和方向的一般规律，以及电磁感应现象在现实生活中的应用。电磁感应定律的发现，不仅在科学和实践上具有重要意义，而且发现定律的思想以及发现过程中法拉第所表现的科学态度、意志力，对后人也有重要的启迪和教育意义。人类对“电与磁”关系的认识过程，反映了科学发展过程的继承性，以及科学家群体的巨大作用。这些也都应在教学中有意识地、自然地渗透和体现，是有利于提高学生的科学素质的。

#### 课时分配建议

1 划时代的发现	1 课时
2 探究感应电流的产生条件	2 课时
3 楞次定律	3 课时
4 法拉第电磁感应定律	3 课时
5 电磁感应规律的应用	1 课时
6 互感与自感	1 课时
7 涡流	1 课时

## 二、教材分析与教学建议

### 第1节 划时代的发现

#### 1. 教学目标

- (1) 关注电磁感应现象的发现过程，了解相关的物理学史。
- (2) 知道电磁感应、感应电流的定义。
- (3) 学习法拉第的科学探索精神，感悟科学、技术、社会的相互关系。
- (4) 了解信念和机遇在科学发现中的作用，辩证认识传统观念对科学发展的利与弊。



## 2. 教材分析与教学建议

从物理学角度看，电磁感应电磁学中的地位举足轻重。如果说静电场和磁场的知识是电磁学的基础，那么，电磁感应就是电磁学的核心。正是由于电磁感应现象的发现，才使得电与磁的关系全面地被揭示出来，从而导致人类社会的技术应用水平发生了划时代的变化。在电磁感应的发现过程中，科学家的思考、探索中的迷失以及最后的成功，都会给予我们多方面的教育和启迪。这些都是落实“过程与方法”“情感、态度与价值观”目标的好素材。

奥斯特的实验之所以重要，是他将外观上看似不同的现象，建立起了相互的联系。教学中，要注意渗透当时的重要思想方法对科学家的影响，即自然现象间的相互联系。正是在这种思想的启示下，奥斯特经过不懈的努力，发现了“电流产生磁场”的现象。也正是这种思想的启示和奥斯特的成功，鼓舞了人们探索这种“对称性”的另一面——“磁是否可以产生电”的现象。

教科书把“划时代的发现”单独作为1节课来处理，主要是想通过对法拉第电磁感应现象研究史实的学习，培养学生的科学方法和科学精神。奥斯特的发现改变了人们的自然观、世界观和思维方式，法拉第的发现揭开了人类社会迈进电气化时代的序幕。应该说，这段科学史是科学思维中传统与创新的交锋和突破，同时，它也展示了创新思维的重要性和时代局限性对创新的羁绊。

教科书从奥斯特的发现讲起，以颇富哲理的语言，扼要地回溯了人类探索“电生磁”“磁生电”的社会背景和探索过程（思路、方法、挫折、机遇等），并以“科学足迹”栏目的形式简述了“科学发现的启迪”和“伟大的科学家法拉第”。

教师应提高职业素养，了解科学史实，如法拉第发现电磁感应现象的具体过程（背景和思路、迷失与机遇、经验与启迪），法拉第同时代的物理学家关于电磁感应的研究情况，读一些科学哲学方面的著作等。

### （1）利用科学史情景进行探究教学

在利用科学史情景进行探究教学方面，本套教科书选择了多个典型案例。如，伽利略对自由落体运动的研究（见《物理必修1》第二章第6节“伽利略对自由落体运动的研究”）；牛顿关于万有引力定律的发现（见《物理必修2》第六章第2节“太阳与行星间的引力”和第3节“万有引力定律”）；法拉第的划时代的发现——电磁感应现象等。这三个案例分别介绍了三个具有代表性的重大发现及其特有的科学研究方法，以及从这三位伟大的科学家身上映射出的科学精神和个人魅力。

利用科学史情景进行探究教学，可以把教科书中的物理知识及其历史进程中所蕴涵的科学思维方法作为基础，有机地渗透科学史等方面的知识，依据学习目标和学生发展水平，把讲授知识变为学生自主探究性学习的一种方式。它的特点是学生不仅可以学到物理课程中的概念、规律、公式、定理等知识，还可以从中学习和领悟科学思维的方法，认识科学、技术、社会的相互影响、相互促进、相互制约的关系。

我们要求学生科学探究的认识应该是多层面、多角度的。不仅要对所学的知识进行探究性学习，而且更应该把人类对自然界的认识过程和研究方法进行探究性学习。只有这样，才能使全面、深入地学习和继承前人积累下来的科学知识。

值得说明的是，利用科学史情景进行探究教学的教学设计是物理课堂教学改革过程中出现的一个新课题，也是值得我们深入探索的研究课题。它除了要考虑学生对已有知识的认知水平外，还需要考虑科学史的发展进程。物理学家虽然不是教学活动的参与者，但由于物理知识是

物理学家思维活动的成果，从这些成果中可以窥视出他们的思维过程，而这种成熟的思维过程——科学思维方法，正是学生思维活动的楷模，因此，教师需要根据有关物理学家的思维活动和探究历程，并在综合分析教学资源的基础上，拟定具体的教学过程。

教学过程的设计，应注意把科学史与学生现实相结合，尝试把学生带到科学史的具体事件中去，感悟科学发现的过程，但又不是历史的简单重复。具体样例可参见后面的教学片段。

### (2) 奥斯特梦圆“电生磁”

学生在初中学习奥斯特实验时，可能觉得实验现象很简单，奥斯特也只是“碰巧”获得了这个意义重大的发现。教学中，要让学生了解奥斯特发现的历史背景，例如，随着对摩擦生热以及热机做功等现象认识的深入，自然界各种运动形式之间存在着必然的相互联系的思想在哲学界和科学界逐步形成。寻找电与磁的联系，正是在这种哲学信念的支配下完成的。另外，在奥斯特实验之前，人们见到的力都是“纵向力”，这种思维给实验研究造成很大的误导。奥斯特的发现是人类遇到的第一个“横向作用”，这在当时的历史条件下，确实给人一种豁然开朗的感觉。了解这段历史背景，对于理解奥斯特实验的物理思想具有极其重要的意义。同时，在体现物理教育的文化功能等方面也是很有帮助的。

为重现历史，营造课堂教学气氛，可以考虑重做“电流磁效应”的演示实验，不仅演示通电直导线对小磁针的作用，还可以演示环形电流和通电螺线管对小磁针的作用。这些演示实验可以增强学生的感性认识，并引导学生进一步认识到，电流磁效应的发现，揭示了电与磁之间存在的某种联系。也可以说，奥斯特的思维和实验突破了以往人们对电与磁认识上的局限，引发了科学认识领域的思考，推动了电磁学的发展。

教学设计的思路可分以下几步进行：

电与磁间似无关→转化思想生猜想→几经研究仍未果→机遇青睐局限破

可采用分小组讨论，或边讲边议的教学方式。引导学生阅读教科书有关奥斯特发现电流磁效应的内容，并提出以下问题：

①是什么信念激励奥斯特寻找电与磁的联系？在此之前，有关这方面科学研究领域的历史背景是怎样的？

②奥斯特发现电流磁效应的过程是怎样的？是一帆风顺的吗？奥斯特面对失败是怎样做的？

③电流磁效应的发现有何意义？谈谈自己的感受。

### (3) 法拉第心系“磁生电”

教学中，可考虑重做法拉第1831年8月29日发现电磁感应现象的实验。即，他把两个线圈绕到同一个铁环上（图4-1），一个线圈接电源，另一个线圈接电流表，在给线圈通电和断电的瞬间，另一个线圈中就会出现电流。

有关“电磁感应现象的产生条件”将在第2节课深入学习。本节课引导学生对法拉第实验有一个初步的认识即可，如“磁生电”是一种在变化、运动过程中才能出现的效应等。

教学设计的思路可分以下几步进行：

电可生磁震欧陆→对称思考创新路→静态实验千百度→磁生电在暂态处

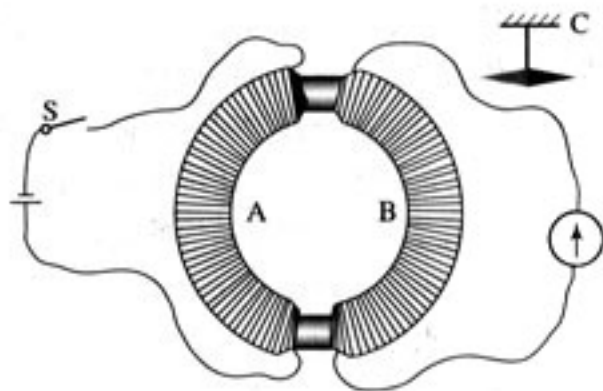


图4-1



可采用分小组讨论，或边讲边议的教学方式。引导学生阅读教科书中有关法拉第发现电磁感应的内容，并提出以下问题：

- ① 奥斯特发现电流磁效应引发了怎样的思考？法拉第对此所持有的观点是什么？
- ② 法拉第面对失败是怎样做的？失败的原因是什么？
- ③ 法拉第认为发现电磁感应现象成功的“秘诀”是什么？从法拉第探索电磁感应现象的历程中，你学到了什么？谈谈自己的体会。

下面以“法拉第心系磁生电”的教学设计为例，对利用科学史情景开展探究式教学的流程进行诠释。

## 教学片段

### 法拉第心系“磁生电”



背景介绍、设置问题：奥斯特发现的启示→法拉第的科学信念→“磁生电”的猜想。

如果你是法拉第，你能尝试设计一个用以探索“磁生电”的实验方案吗？

设计实验、交流评价：旨在把学生带到科学史的具体事件中去，使其转换角色，并限定在法拉第时代所具有的知识和经验基础上设计实验方案。随后，交流学生设计的实验方案，并进行简要评价。其目的，一是要让学生进一步了解相关的知识及历史背景；二是为学生初步认识法拉第探索“磁生电”所做的初始假设及未果实验的合理性和局限性做好铺垫。

初始假设、未果实验：主要介绍法拉第探索“磁生电”的初始设想及其形成过程。学生已认识静电感应、磁体的磁场、电流的磁效应等都是一种静态和稳态关系。教学中，介绍并演示法拉第做过的未果实验（详见教学资源库），可以采取让学生先预测结果，教师再通过实验进行检验的教学方式。

突破：介绍并演示法拉第电磁感应现象的第一个成功实验（图4-1）。

领悟：介绍并演示法拉第所做的另一个成功实验（图4-2）。正是通过这个实验，使法拉第领悟到“电生磁”的过程是一个暂态过程。



图4-2

教学中，选择法拉第成功实验的原则：一是要模拟历史上的真实事件；二是要顾及本章教学的整体安排及设计。在本节教学中所选的有关实验，旨在通过这些个例，说明“磁生电”的基本特点，即一种在变化、运动过程中才出现的效应。这里还不要得出“产生电磁感应的一般条件”，尽可能不要涉及下节课“探究电磁感应的产生条件”中的学生实验，以免影响后续教学的探究性。同时，以上流程应根据实际情况适当增减、调整。

另外，根据学校的具体条件，本节课的教学也可以采用另一种设计思路。即，教学流程大致为：



背景介绍、提出问题 → 收集资料、历史研究 → 交流讨论、评价归纳 → 新的问题、学生再思考。

#### (4) 法拉第发现电磁感应的过程回顾与启迪

法拉第发现电磁感应现象的过程是本节课教学的重点，从教学角度考虑，通过回顾法拉第发现电磁感应的历程，展示其科学探究思想的精髓，使学生认识法拉第的科学思想、科学信念和科学态度，从而启迪学生形成正确的科学观。

教学设计思路可分以下几步进行：

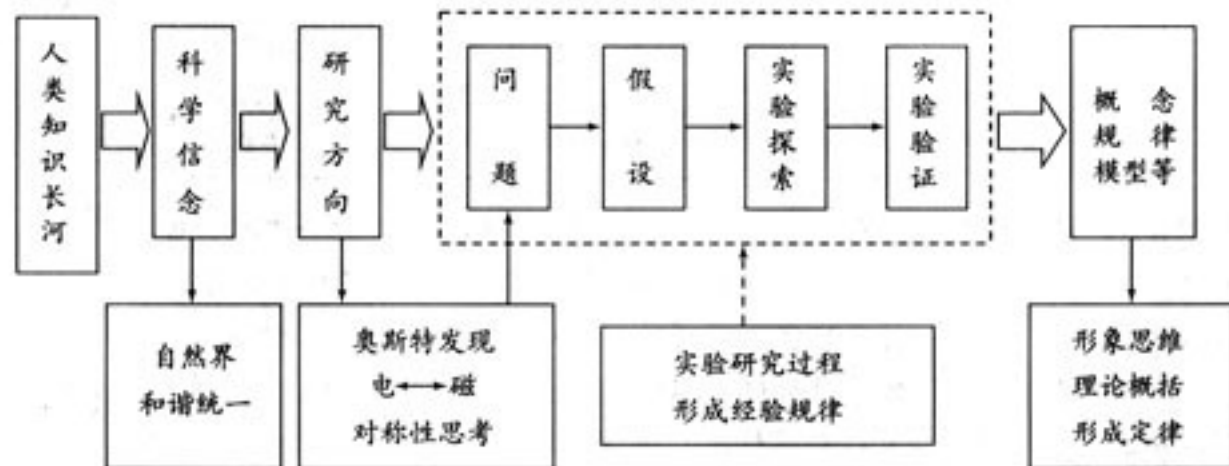
课题的提出 → 失败的启迪 → 成功的诀窍 → 伟大的法拉第



### 教学片段

#### 法拉第发现电磁感应的过程回顾与启迪

下面框图可以简要展示法拉第发现电磁感应规律的科学探究过程。



##### ①课题的提出：统一的信念，对称的思想

提出问题：奥斯特发现电流磁效应引发了怎样的思考？法拉第对此持有怎样的观点？

背景介绍：法拉第受奥斯特发现的启发，相信自然力是统一的。任何一种物理关系，即因果关系都应存在它的反作用，即对称性。

初期观点：既然电流可产生磁；反过来，磁也可能产生电流；电流也应该能产生电流。在自然界和谐统一的科学信念下，用类比推理的思维方法可以得出合理的推测。

##### ②失败的启迪：突破传统，才能创新

提出问题：法拉第做了大量实验都是以失败告终，失败的原因是什么？

原因分析：回顾法拉第做过的失败实验可以看出，这些实验，都是在以往经验的启发下，通过类比方法设计的。主要原因在于受传统观念的影响，只注意寻找静态和稳定的感应电流，而忽略了对动态过程的观察。或许，即使看到了，也不认为是“有用的结果”，视而不见。另外，为了避免电流磁效应的影响，检测感应电流的电流计（当时用的是类似于小磁针那样的电流计）一般都用较长的导线连接，离实验装置较远，不利于观察动态过程。

启迪：研究往往是从已有的经验、知识和方法入手，即以经验和理论为指导去进行研究。这种指导的作用是必要的、有益的，但同时也会带来局限，特别是对那些新领域的开创性研究工作影响是很大的。

### ③成功的诀窍：不懈的努力，敏锐的洞察力

**提出问题：**法拉第是怎样突破静态的观念，认识到电磁感应现象的动态特征的呢？你认为法拉第成功的“秘诀”是什么？

**科学态度：**经过多次失败之后，法拉第仍然坚持研究“磁生电”的课题。由于偶然的发现，看到新现象的端倪，及时抓住进行研究，从而获得科学上的重要突破和创新。正是由于他不懈的努力，正是他以“有准备的头脑”及“敏锐的洞察力”捕捉到了稍纵即逝的偶然现象。

**成功实验：**法拉第经过长达 11 年的艰苦探索，终于在 1831 年发现作为电流磁效应的逆效应的电磁感应现象，并且认识到电磁感应是一种在变化和运动过程中才能出现的非恒定的暂态效应。

**启迪：**科学发现的魅力在于前所未有的。奥斯特的发现使人类首次揭示“纵向力”的作用；法拉第的发现使人类首次触及电磁领域的暂态过程。

## 3. 问题与练习

内容分析

编写这两个题目的目的是帮助学生做好进入本章学习的知识基础和心理准备。

解答与说明

1. 奥斯特实验，电磁感应等。
2. 电路是闭合的，导体切割磁感线运动。

## 第 2 节 探究感应电流的产生条件

### 1. 教学目标

- (1) 观察电磁感应现象，理解产生感应电流的条件。
- (2) 经历感应电流产生条件的探究活动，提高学生的分析、论证能力。
- (3) 进一步认识磁通量的概念，能结合实例对磁通量的变化进行定性和定量的判断。
- (4) 经历各种实验现象，学会通过现象，分析、归纳事物本质特征的科学思想方法。认识实验观察能力与逻辑思维能力在科学探究过程中的重要作用。

### 2. 教材分析与教学建议

本教科书力图通过学生自己的探究活动，总结、归纳出感应电流的产生条件。但值得注意的是，电磁感应的产生条件是以法拉第为代表的一群科学家通过许多年的探索才发现的，学生不可能在 1 节课的时间内完成前人所做的这么多工作。如果教师这样要求学生，反而会给学生错误的信号：科学探究是轻而易举的事。本节课的目的是，引导学生通过活动和思考来主动地获得知识。

教学设计的思路可分以下几步进行：





教科书所呈现的3个实验(1个演示实验和2个学生实验),既为本节课研究感应电流的产生条件提供了感性材料,同时,又成为本章后续教学的基点之一。也就是说,后续的教学将多次以这3个实验为出发点,变换视角,提出问题,引入新的课题。例如,从确定感应电流方向的角度,重新审视教科书图4.2-2所示的磁铁插入线圈实验,展开楞次定律的教学;从研究感应电动势大小的角度,重新审视这3个实验,引入法拉第电磁感应定律的教学;从电路结构的角度,重新审视教科书图4.2-3所示的模仿法拉第的实验,引入互感或变压器的基本原理。因此,认真引导学生做好这3个实验,是本节教学的重点之一。

探究感应电流的产生条件,从实验本身来看并不难,难的是在实验观察的基础上,如何理出头绪、分析论证和归纳结论,即如何从观察到的有关电磁感应的现象,推出电磁感应产生的一般条件。这既是本节课的重点、难点,也是能力培养和方法论教育的着力点。

### (1) 观察3个实验

本节课设置的3个实验,其观察重点是不同的。

**演示**(教科书图4.2-1所示实验)观察闭合电路的一部分导体在磁场中运动时产生感应电流的条件。这是初中学习过的内容,演示时要引导学生观察导线上、下运动,以及左、右运动时的不同结果,从而了解“导线切割磁感线运动”的具体含义。

可以明确告诉学生,所谓切割磁感线的运动,就是导体的运动方向和磁感应强度 $B$ 的方向不平行。这也为后续的 $E=Blv\sin\theta$ 的推导做好铺垫。

**实验1**(教科书图4.2-2所示实验)观察线圈不动,磁场运动时是否产生感应电流。当磁铁与线圈之间发生相对运动时,闭合电路中也会产生感应电流。

**实验2**(教科书图4.2-3所示实验)研究线圈静止在磁场中时,能否获得感应电流的问题。在这个实验中,学生能观察到,当线圈A的电路接通或断开瞬间,以及滑动变阻器滑片移动时,线圈B中都会产生感应电流。通过对本实验观察结果的进一步分析,明确在闭合电路所处磁场中,磁感应强度发生变化时,电路中就能产生感应电流。

### (2) 感应电流的产生条件

首先,可以引导学生观察实验,并根据背景知识提出解决问题的设想。然后,针对各自提出的设想展开讨论。在评价、改进和修正的基础上,得到一个更合理的解决问题的设想,通过逐次深入的试错与批判,不断逼近目标。

感应电流产生条件的教学,不应该要求一步到位。教学中,应该关注学生在归纳过程中出现的一些不成熟,以及有待改进的结论,借助认知冲突的形成与解决,逐渐逼近结论——感应电流产生的一般条件。

另外,从知识准备的角度看,怎样引导学生从直接的观察结果,转而从磁通量(磁通量的变化)的角度陈述并概括有关实验结果,这是一个值得注意的教学环节。

## 探究闭合电路中感应电流产生的条件

演示：教科书图 4.2-1 所示实验。重温感应电流产生的条件，即切割磁感线。

实验 1：学生分组实验（教科书图 4.2-2 所示实验——磁铁插入线圈）

观察现象，收集证据，归纳感应电流产生的条件，即当闭合电路与磁铁间相对运动时（如磁铁插入线圈，就相当于线圈“切割”磁铁的磁感线）〔设想 1〕。

实验 2：学生分组实验（教科书图 4.2-3 所示实验——模仿法拉第的实验）

观察现象，收集证据，归纳感应电流产生的条件，即无“切割”，无“相对运动”……认知冲突！重新审视有关实验。

分析实验 1：再次归纳感应电流产生的条件。即闭合电路与磁铁间相对运动时→磁场强弱的变化，可以产生感应电流。

分析实验 2：再次归纳感应电流产生的条件。即当开关通、断→电流变化→电流的磁场变化→磁场强弱变化，可以产生感应电流。

师生归纳：当闭合电路所处磁场的强弱发生变化时，闭合电路中就会产生感应电流。〔设想 2〕

审视演示：新的认知冲突！即闭合电路所处磁场的强弱并未发生变化，也能产生感应电流。为什么？

进一步的分析：磁感应强度  $B$  未变，闭合电路所包围的面积  $S$  发生改变→也能产生电磁感应现象。〔设想 3〕

新的问题：对〔设想 2〕〔设想 3〕，能否做进一步概括？怎样概括？

设想 2：闭合电路所包围的面积  $S$ ——不变 磁感应强度  $B$ ——变化

设想 3：闭合电路所包围的面积  $S$ ——变化 磁感应强度  $B$ ——不变

两个因素：面积  $S$  和磁感应强度  $B$ ；是否有一个物理量也包含这两个要素（如果没有，根据研究方便的需要，当然也可以“创造”）

引入磁通量概念：〔设想 2〕〔设想 3〕可概括为磁通量“变化”。

进一步的结论：只要穿过闭合电路的磁通量发生变化，闭合电路中就有感应电流产生。

对教师而言，需要明确，电磁感应现象较严格的说法应该是：穿过闭合回路的磁通量发生变化时，在闭合回路中产生感应电动势的现象。教学中，为了便于学生接受，也为便于分散难点，这里把回路改成电路，把感应电动势改成感应电流（感应电流比感应电动势更直观）。在学生清楚了电磁感应现象和它的产生条件后，再使学生认识到，只要有磁通量发生变化，即使电路断开时，电路中也有感应电动势存在，而无感应电流。电磁感应现象的本质要看是否存在感应电动势。

另外，值得注意的是，不要用教学课件替代真实的实验活动。类似的教学课件可用于复习、巩固相关知识，但不宜替代探究活动中的学生实验。







## 验证产生感应电流的条件

实验装置：如图 4-3 所示连接电路。

实验操作：注意观察电流表指针的位置变化情况。

操作① 让插有软铁芯的螺线管 A 的轴线与线圈 C 的平面平行，闭合开关 S；

操作② 让螺线管 A 的轴线与线圈 C 的平面垂直，闭合开关 S。

实验现象：

在操作①时，螺线管 A 中磁场发生变化，而电流表指针不偏转，说明线圈 C 中没有感应电流；

在操作②时，螺线管 A 中磁场发生变化，电流表指针偏转，说明线圈 C 中有感应电流。

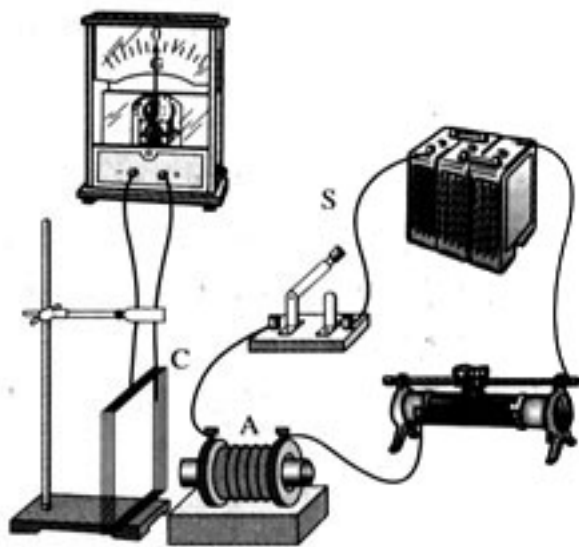


图 4-3

分析：能否产生感应电流，关键是螺线管 A 通电前后，穿过闭合线圈 C 的磁感线条数是否发生变化。引导学生能否从教科书中的 3 个实验归纳出这样的结论，即穿过闭合电路的磁感线条数发生变化，闭合电路中就有感应电流产生。最后，使学生认识到，“闭合电路中的磁场发生变化”是指穿过闭合电路的磁通量发生变化。

### (3) 认识磁通量的变化

磁通量是一个比较抽象的概念。教科书已在《物理选修 3-1》第三章第 3 节中，结合几种常见磁场的教学，介绍了磁通量的概念，并给出了它的定义式  $\Phi = BS$ 。

应该注意的是，磁通量的概念实际上是贯穿本章各节教学内容的一根主线。对学生而言，无论是判断有无感应电流，还是判断感应电动势的方向（楞次定律的应用），以及有关感应电动势大小的计算（法拉第电磁感应定律的应用），其难点并不在于这些定律本身，而在于对实际情境中的磁通量和磁通量的变化的判断。因此，关于磁通量和磁通量的变化的教学，需要在教学中统筹安排，逐步深化。

①要提醒学生注意，此定义的适用条件，即磁感应强度  $B$  与闭合电路的面积  $S$  平面垂直。由于磁感线的疏密程度可以形象地描述磁感应强度的大小，因此，通过某一平面的磁通量的大小，可以用穿过这一平面的磁感线条数的多少形象地表示。讲清楚这一点，可以帮助学生理解磁通量的概念。

②要求学生了解引起磁通量发生变化的原因。

- 闭合电路的面积  $S$  一定，磁感应强度  $B$  发生变化，磁通量  $\Phi$  发生变化；
- 磁感应强度  $B$  一定，闭合电路的面积  $S$  发生变化，磁通量  $\Phi$  发生变化；
- 磁感应强度  $B$  与闭合电路的面积  $S$  之间的夹角  $\theta$  发生变化，磁通量  $\Phi$  发生变化。

这一切都有可能引起磁通量发生变化。最好通过实验来演示这三种情况，也可以让学生自行找出相应的实例。

另外，本节“做一做”栏目内容的设置目的，是让学生对地磁场有所了解，同时，加强物



理和生活的联系，提高学生学习物理的兴趣。本实验可在课外活动时进行，也可在课堂分小组进行。两位学生东、西方向站位，摇绳时，可看到灵敏电流表指针的摆动状况。同时，也可将该实验做适当“改良”，冠名以“开门发电”之类，用以设置问题情景，也可在引入新课时使用。

通过实验，还可以要求学生研究以下几个问题：

①摇绳为什么能发电？

②比较南、北方向站位与东、西方向站位，摇绳时所产生的电流大小的差异，了解北半球地磁场的分布情况，解释产生差异的原因。

③在摇动导线时观察电流表，它的指针为什么会左右摆动，而不是指向一个方向？

④评价：利用地磁场发电有无实际意义。

这几个问题可作为学生探究问题的参考，以拓展学生的思路。

有关“摇绳能发电吗？”的实验器材的选择、注意事项等，请参阅本章实验参考资料中的相关内容。

### 3. 问题与练习

内容分析

本节习题安排由简单到复杂，由定性到定量。

第1、第2、第3题都是判断处于匀强磁场中的闭合电路，在不同的物理情景下，能否产生感应电流。

第4、5题通过判断处在非匀强磁场中的线圈，能否产生感应电流，进一步让学生理解产生感应电流的条件。

第6题是一个比较复杂的问题。让学生通过分析数学图象，明确电流随时间的变化规律，从而明确磁感应强度的变化规律，以此强化学生对产生感应电流条件的理解。

第7题通过计算，让学生加深认识磁通量的概念，以及对感应电流的产生条件的深入理解。

解答与说明

1. 答：

(1) 不产生感应电流；

(2) 不产生感应电流；

(3) 产生感应电流。

2. 答：由于弹簧线圈收缩时，面积减小，磁通量减小，所以产生感应电流。

3. 答：在线圈进入磁场的过程中，由于穿过线圈的磁通量增大，所以线圈中产生感应电流；在线圈离开磁场的过程中，由于穿过线圈的磁通量减小，所以线圈中产生感应电流；当整个线圈都在磁场中时，由于穿过线圈的磁通量不变，所以线圈中不产生感应电流。

4. 答：当线圈远离导线移动时，由于线圈所在位置的磁感应强度不断减弱，所以穿过线圈的磁通量不断减小，线圈中产生感应电流。当导线中的电流逐渐增大或减小时，线圈所在位置的磁感应强度也逐渐增大或减小，穿过线圈的磁通量也随之逐渐增大或减小，所以线圈中产生感应电流。

5. 答：如果使铜环沿匀强磁场的方向移动，由于穿过铜环的磁通量不发生变化，所以，铜环中没有感应电流产生；如果使铜环在不均匀磁场中移动，由于穿过铜环的磁通量发生变化，所以，铜环中有感应电流产生。

6. 答：乙、丙、丁三种情况下，可以在线圈 B 中观察到感应电流。因为甲所表示的电流是稳恒电流，那么，由这个电流产生的磁场就是不变的。穿过线圈 B 的磁通量不变，不产生感应电流。乙、丙、丁三种情况所表示的电流是随时间变化的电流，那么，由这样的电流产生的磁场也是变化的，穿过线圈 B 的磁通量变化，产生感应电流。

$$7. B = \frac{B_0 l^2}{l^2 + vtl} = \frac{B_0 l}{l + vt}$$

为了使 MN 中不产生感应电流，必须要求 DENM 构成的闭合电路的磁通量不变，即  $BS = B_0 l^2$ ，而  $S = l^2 + vtl$ ，所以，从  $t = 0$  开始，磁感应强度 B 随时间 t 的变化规律是

$$B = \frac{B_0 l}{l + vt}$$

### 第 3 节 楞次定律

#### 1. 教学目标

- (1) 理解楞次定律的内容，能运用楞次定律判断感应电流方向，解答有关问题。
- (2) 理解楞次定律是能量守恒定律在电磁感应现象中的反映。
- (3) 掌握右手定则，认识右手定则是楞次定律的一种具体表现形式。
- (4) 体验楞次定律实验探究过程，提高分析、归纳、概括及表述的能力。
- (5) 感受科学家对规律的研究过程，学习他们对工作严肃认真不怕困难的科学态度。

#### 2. 教材分析与教学建议

楞次定律是本章教学的重点和难点。一是其涉及的因素多（磁场方向、磁通量的变化、线圈绕向、电流方向等），关系复杂；二是规律比较隐蔽，其抽象性和概括性很强。因此，学生理解楞次定律有较大的难度，成为本章教学的难点。本节课的主要任务是引导学生通过实验探究过程，总结出感应电流的方向所遵循的一般规律——楞次定律，并对定律内容有初步的认识。在探究楞次定律后，通过应用楞次定律进行有关判断，可以帮助学生深刻理解楞次定律，顺利突破这一难点。

本节教学内容的处理是建立在第 2 节“探究电磁感应的产生条件”基础上，虽说教科书中的实验都是前面教学中做过的，但是，从确定“感应电流方向”的角度考虑问题，就需要重新研究第 2 节中的两个学生实验。

##### (1) 楞次定律的得出

本节教科书的编写是以问题与问题解决为纽带，引导学生通过发现问题→分析问题（提出假设）→解决问题等步骤去掌握知识。意在突出科学探究要素，着眼于学生探究能力的提高。具体说来，教科书关于“楞次定律的得出”教学设计的流程如下。



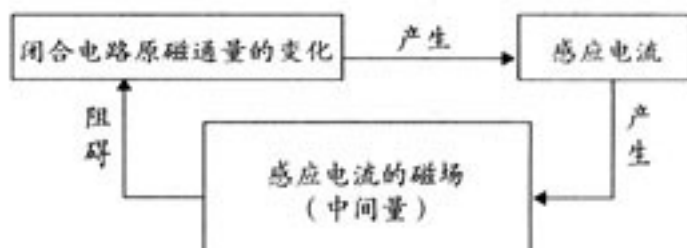
教师可利用教科书提供的素材，设置问题情境，引导学生观察、分析实验现象，寻找共性，归纳和总结规律。



在分析实验现象时，突出研究的对象是线圈（闭合电路），要抓住穿过线圈的磁场方向和磁通量的变化，注意让学生分清“原磁场方向”和“原磁场磁通量的变化”，以及“感应电流的磁场方向”。其中，如何引导学生分析实验数据，发现以感应电流的磁场作为“中介”来确定感应电流的方向是本节教学的重点和难点。

教学中，可以从分析感应电流产生的条件入手，构建各相关量关系的流程图，引出“中介”——感应电流的磁场，从而引导学生归纳出楞次定律的简洁表述。

这种利用“中介”研究或表述问题的方法值得关注。



### 教学片段

#### 归纳楞次定律

教学中，可根据教科书实验设计如下表格，引导学生进行分析归纳，最后得出楞次定律。

方案	甲				乙			
相对运动情况								
原磁场方向								
$\Phi$ 的变化情况								
感应电流方向								
感应电流磁场方向								
感应电流磁场方向与 $\Phi$ 变化间的关系								
结论								

除根据教科书所设置的实验进行分析、归纳、得出楞次定律外，还可以利用下面的实验进行实验探究。该实验的设计，突出了两磁场（原磁场和感应电流的磁场）方向相同与相反对应情景的认识过程，对帮助学生得出并理解楞次定律有较好的作用。



### 楞次定律的实验探究

器材准备：①支架一副；②一根条形磁铁；③用直径为1 mm左右的铝线或铜线绕制一个10~20匝左右的线圈，线圈的直径在10 cm左右，要求能够很清楚地看到线圈的绕向，线圈先是不闭合的；④演示灵敏电流计一个；⑤80 cm长的细导线两根；⑥细棉线若干。

实验装置：如图4-4所示。用细线将线圈吊起，再用两根细线将条形磁铁吊在木架的中间，要求使条形磁铁保持水平，并且处在线圈的轴心线上。

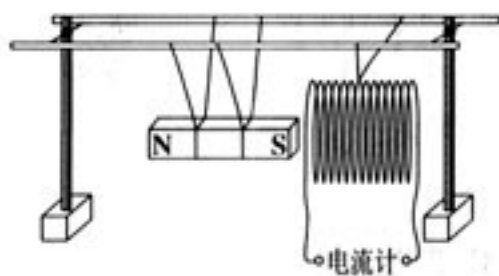


图4-4

演示1：让磁铁摆动，线圈不闭合，随着磁铁的摆动，线圈不动。

演示2：让磁铁摆动，线圈闭合，随着磁铁的摆动，线圈也跟着摆动起来。

提出问题：

- ①线圈不摆动和摆动的原因是什么？（从受力的角度思考）
- ②闭合线圈受力摆动，这个力是哪里来的？（感应电流受到的磁场力）
- ③由感应电流的磁场力能否确定感应电流的磁场方向？（磁铁靠近线圈，两者排斥；磁铁远离线圈，两者吸引。也就是说“来斥去吸”）
- ④由感应电流的磁场方向怎样确定感应电流的方向？（安培定则）

设计实验：通过实验确定感应电流的方向。

首先，引导学生用旧电池判断出灵敏电流计中电流的流向与指针偏转方向的关系。然后，将灵敏电流计用两根细导线与没有闭合的线圈组成闭合电路，弄清楚线圈的绕向。

进行实验、分析归纳：

将条形磁铁的S极向线圈内插入，观察灵敏电流计的指针是否发生偏转？向哪一边偏转？电流是什么流向？线圈中的电流是什么流向？线圈中感应电流的磁场是什么方向？并与前面的分析结果进行比较。

把这些问题搞清楚后，再把磁铁的N极从线圈中拔出来，看上面的那些问题又是如何的，经过几次实验后，总结出规律——楞次定律。

#### (2) 对楞次定律的理解

楞次定律的表述简明扼要，高度概括。学生初学时，常不能正确理解它的含义。

##### ①明确各物理量之间的关系。

当穿过闭合电路的磁通量发生变化时，闭合电路中会产生感应电流。感应电流与其他电流一样，也会产生磁场，即感应电流的磁场。这样，电路中存在两个磁场——原磁场（产生感应电流的磁场）和感应电流的磁场。

##### ②正确理解“磁通量的变化”。

要提醒学生注意区分“磁通量的变化”“磁通量的多少”“原磁场的方向”“原磁场磁通量的变化”等各自不同的含义。

##### ③正确理解楞次定律中“阻碍”的含义。



楞次定律的关键词是“阻碍”，只有深刻理解“阻碍”的含义，才能准确地把握楞次定律的实质。教学中，要注意结合实例进行分析，并从以下三点纠正学生可能存在的误解。

• “阻碍”不是“相反”

有些学生误认为“阻碍”就是方向相反，以为感应电流的磁场总与原磁场的方向相反。应使学生明确，“阻碍”既不是阻碍原磁场，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加或减少。

• “阻碍”不是“阻止”

感应电流的磁场对原磁场磁通量的变化有“阻碍”作用，但不是“阻止”原来磁通量的变化。因为原磁通量的变化是引起感应电流的必要条件，若这种变化被阻止了，就不可能产生感应电流。因此，感应电流的磁场是阻止不了原磁通量的变化的。

• “阻碍”不仅是“反抗”

感应电流的磁场对原磁场的磁通量变化的“阻碍”作用不仅是“反抗”。当原磁场的磁通量增加时，感应电流的磁场与原磁场的方向相反，“反抗”磁通量的增加；当原磁场的磁通量减少时，感应电流的磁场与原磁场的方向相同，以“补偿”原磁通量的减少。所以“阻碍”不仅“反抗”原磁通量的增加，同时又有“补偿”原磁通量的减少。

## 教学片段

### 楞次定律中“阻碍”的含义

设计问题链：



分析：

①谁在阻碍？

起阻碍作用的是“感应电流的磁场”。

②阻碍什么？

感应电流的磁场阻碍的是“引起感应电流的磁通量的变化”，而不是阻碍原磁场，也不是阻碍原磁通量。

③如何阻碍？

当引起感应电流的磁通量（原磁通量）增加时，感应电流的磁场就与原磁场的方向相反，感应电流的磁场“反抗”原磁通量的增加。当原磁通量减少时，感应电流的磁场就与原磁场的方向相同，感应电流的磁场“补偿”原磁通量的减少。

④能否阻止？

当原磁通量的增加引起感应电流时，感应电流的磁场方向与原磁场方向相反，其作用仅仅使原磁通量的增加变慢了，但磁通量仍在增加。当原磁通量的减少而引起感应电流时，感应电流的磁场方向与原磁场方向相同，其作用仅仅使原磁通量的减少变慢了，但磁通量仍在减少。原磁通量是在阻碍变化中“变化”的，没有“变化”也就没有阻碍。

#### ⑤为何阻碍？

产生感应电流的过程也必须遵守能量守恒定律，这是能量转化的必然结果。阻碍的作用是克服磁场力做功，把其他形式的能量（或其他电路的电能）转化（或转移）为感应电流所在回路的电能，没有这种阻碍就不能实现能量的转化（或转移）。

### (3) 从能量守恒角度看楞次定律

由于引起磁通量变化的原因各不相同，如，磁场变化、相对运动、线圈变化等，总的来看，阻碍的作用是把其他形式的能量（或其他电路的电能）转化（或转移）为感应电流所在回路的电能，在这个过程中，能量总是守恒的。楞次定律的深刻意义，正是在于它是能量的转化与守恒定律在电磁感应现象中的体现，而这种能的转化与守恒关系是通过“阻碍”作用具体体现出来的。

楞次定律的另一种表述：“电磁感应所产生的效果总是要阻碍引起感应电流的导体（或磁体）间的相对运动。”即引起感应电流的导体（或磁体）靠近或远离的过程中都要克服电磁力做功，外力克服电磁力做功的过程就是把其他形式的能量转变为电能的过程（由此可判断电磁感应现象中导体间相对运动的方向）。

本节的“思考与讨论”栏目的内容，旨在通过所设置的一个有关电磁感应实验，体会能量转化的问题情境，引导学生从能量的转化与守恒的角度审视楞次定律。同时，还要注意：在电磁感应现象中，电路中产生的感应电流又受到安培力的作用，从而引起种种机械效果，这是能量转化和守恒在电磁现象中的一种具体表现。

在楞次定律的另一种表述中，感应电流的原因可以是磁通量的变化，也可以是引起磁通量变化的机械效应（如相对运动或使回路发生形变）；感应电流的效果，既可以是感应电流所产生的磁场，也可以是因为感应电流而导致的机械作用（如磁场力等）。总之，从磁通量变化的角度来看，感应电流的磁场总要阻碍原磁通量的变化；从导体和磁体的相对运动的角度来看，感应电流总要阻碍相对运动。

教学中，用一个趣味“跳环”实验，作为新课（楞次定律）的导入。用一个趣味“落磁”实验，作为楞次定律课的结尾。

## 教学片段

### 用“跳环”实验引入新课

演示：如图4-5所示。将J2425型教学用可拆变压器的条形铁芯竖直放置，把一轻质铝环套在其上，接通交流220V电源的瞬间，铝环上跳。（注意：由于实验时通过线圈的电流较大，通电时间一次不要超过30s）

提出问题：是什么力让铝环上跳呢？请同学们思考！

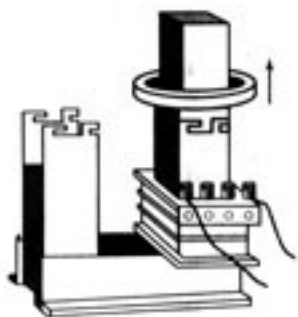


图4-5

## 用“落磁”实验设计课堂结尾

演示：如图 4-6 所示。用一根长 1 m 左右的空心铝管竖直放置，把一枚没有磁性的圆柱形小铁块（直径略小于管道内径）从管上端放入管口，很快就从管道下端出来，类似自由落体。同样把一枚磁性很强的圆柱形小磁铁（直径略小于管道内径）从管上端放入管口，过了许久才从管道下端出来。

提出问题：是什么阻碍了小磁铁（铝不能被磁化，小磁铁不吸引铝）的下落呢？请同学们思考！

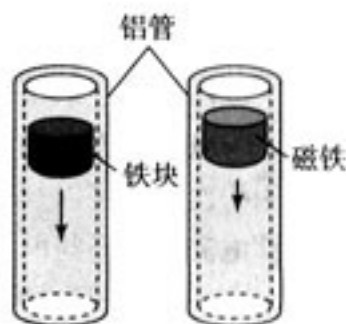


图 4-6

总之，理解楞次定律需要明确它所包含的两层意义：一是注意因果关系，即磁通量的变化为“因”，而感应电流的磁场的产生是“果”；二是符合能量守恒定律。

## (4) 楞次定律的应用

教科书结合实例，说明应用楞次定律判定感应电流方向的方法与思路。其中，例题 1 选取的是由于电流变化引起磁通量的变化，从而产生电磁感应现象的实例。教科书借助例题 1 的分析与解答，说明应用楞次定律判定感应电流方向的具体方法，并将其基本思路概括为一个方框图。

教学中，建议在解析例题 1 的过程中，可仿照楞次定律得出的方式，设计如下表格。

研究对象	穿过线圈原磁场的方向	磁通量变化	感应电流的磁场方向	感应电流的方向

分析解题过程，归纳应用楞次定律判定感应电流方向的步骤：

- ①明确研究的对象是哪一个闭合电路；
- ②确定原磁场的方向，原磁场可以是磁铁形成的，也可以是电流形成的；
- ③判断穿过闭合电路的磁通量如何变化，这是产生感应电流的必要条件；
- ④根据楞次定律确定感应电流所产生的磁场方向；

⑤运用安培定则根据感应电流的磁场方向确定感应电流的方向，然后，将其转化为教科书中所示的方框图。

例题 2 选取的是由于相对运动引起磁通量的变化，从而产生电磁感应现象的实例。该例题试图引导学生尝试利用方框图所提供的思路解答稍有变化的电磁感应问题。应用楞次定律时，按照教科书中所讲的基本步骤进行分析，思路比较清晰。但是，不要让学生记住这些步骤，而要按照楞次定律本身的要求进行具体分析。

应当指出，当对楞次定律的应用熟练到一定程度，对楞次定律理解到一定深度时，还会有灵活应用楞次定律的各种其他方法，特别是应用能量观点分析问题的方法，十分简捷。但在初始阶段，还应该严格按照基本步骤去做。

## (5) 右手定则

在右手定则的教学中，教科书在“思考与讨论”栏目中设置了一个“问题链”，帮助学生理解所学内容。有意识地让学生经历这样的学习过程，将会逐渐形成提出问题的习惯，这样，学生不仅学到了科学方法，也养成了质疑的习惯。应该说，这是情感、态度与价值观的教育。





那种简单地把结论告诉学生的做法是不可取的，探究的过程就是发现问题和解决问题的过程。教学中要发挥“思考与讨论”栏目的作用，层层递进，利用“磁通量的变化”与“感应电流方向”的关系，判断出感应电流的方向。

教学中还可以在电路的右端（教科书图 4.3-6）也接一个电流表，让学生从右侧回路判断导体 AB 中的感应电流的方向，并在此基础上引出“右手定则”。需要说明的是，应用楞次定律或右手定则判断，其结果应该是一致的。如何判断，要根据具体问题的方便与否来确定。

#### ① 感应电动势方向的判断

利用楞次定律可以判断感应电流的方向。由于在电源内部电流的方向是从负极到正极，即电源内部电流的方向与电动势的方向相同，所以判断出了感应电流的方向也就知道了感应电动势的方向。

#### ② 楞次定律与右手定则比较

从研究对象上说，楞次定律研究的是整个闭合电路，右手定则研究的是闭合电路的一部分，即一段导线做切割磁感线运动。

从适用范围上说，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（当然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，导线不动时不能应用。因此，右手定则又是楞次定律的特殊应用。

### 3. 问题与练习

#### 内容分析

第 1、第 2、第 3、第 4 题的目的是让学生理解楞次定律并初步掌握使用楞次定律的步骤。

第 5、6 题进一步强化了产生感应电流的条件，加深了对楞次定律的理解和应用。

第 7 题通过对法拉第发电机原理的分析，让学生进一步理解法拉第电磁感应定律的原理，并加强右手定则的应用。

#### 解答与说明

1. 答：在条形磁铁移入线圈的过程中，有向左的磁感线穿过线圈，而且线圈的磁通量增大。根据楞次定律可知，线圈中感应电流磁场方向应该向右，再根据右手螺旋定则，判断出感应电流的方向，即从左侧看，感应电流沿顺时针方向（图 4-7）。

2. 答：当闭合开关时，导线 AB 中电流由左自右，它在上面的闭合线框中引起垂直于纸面向外的磁通量增加。根据楞次定律，闭合线框中产生感应电流的磁场，要阻碍它的增加，所以感应电流的磁场在闭合线框内的方向是垂直纸面向里，再根据右手螺旋定则可知感应电流的方向是由 D 向 C。

当断开开关时，垂直于纸面向外的磁通量减少。根据楞次定律，闭合线框中产生感应电流的磁场，要阻碍原磁场磁通量的减少，所以感应电流的磁场在闭合线框内的方向是垂直纸面向外，再根据右手螺旋定则可知感应电流的方向是由 C 向 D。

3. 答：当导体 AB 向右移动时，线框 ABCD 中垂直于纸面向内的磁通量减少。根据楞次定律，它产生的感应电流的磁场要阻碍磁通量的减少，即感应电流的磁场与原磁场方向相同，垂直于纸面向内，所以感应电流的方向是 A→B→C→D。

此时，线框 ABFE 中垂直纸面向内的磁通量增加，根据楞次定律，它产生的磁场要阻碍磁通量的增加，即感应电流的磁场与原磁场方向相反，垂直于纸面向外。所以，感应电流的方

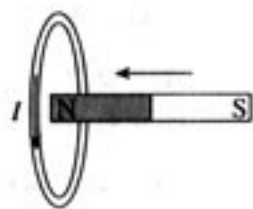


图 4-7



向是  $A \rightarrow B \rightarrow F \rightarrow E$ 。

所以，我们用这两个线框中的任意一个都可以判定导体  $AB$  中感应电流的方向。

说明：此题对导体  $AB$  中的电流方向的判定也可用右手定则来确定。

4. 答：由于线圈在条形磁铁的  $N$  极附近，所以可以认为从  $A$  到  $B$  的过程中，线圈中向上的磁通量减小，根据楞次定律，线圈中产生的感应电流的磁场要阻碍磁通量的减少，即感应电流的磁场与原磁场方向相同，再根据右手螺旋定则可知感应电流的方向，从上向下看为逆时针方向。

从  $B$  到  $C$  的过程中，线圈中向下的磁通量增加，根据楞次定律，线圈中产生的感应电流的磁场要阻碍磁通量的增加，即感应电流的磁场与原磁场方向相反，再根据右手螺旋定则可知感应电流的方向，从上向下看也为逆时针方向。

5. 答：

- (1) 有感应电流；
- (2) 没有感应电流；
- (3) 有感应电流；

(4) 当合上开关  $S$  的一瞬间，线圈  $P$  的左端为  $N$  极；当打开开关  $S$  的一瞬间，线圈  $P$  的右端为  $N$  极。

6. 答：用磁铁的任一极（如  $N$  极）接近  $A$  环时，穿过  $A$  环中的磁通量增加，根据楞次定律， $A$  环中将产生感应电流，阻碍磁铁与  $A$  环接近， $A$  环将远离磁铁；同理，当磁铁远离  $A$  环时， $A$  环中产生感应电流的方向将阻碍  $A$  环与磁铁远离， $A$  环将靠近磁铁。

由于  $B$  环是断开的，无论磁极移近或远离  $B$  环，都不会在  $B$  环中形成感应电流，所以  $B$  环将不移动。

7. 答：

(1) 如图 4-8 所示。圆盘中任意一根半径  $CD$  都在切割磁感线，这半径可以看成是一个电源，根据右手定则可以判断， $D$  点的电势比  $C$  点高，也就是说，圆盘边缘上的电势比圆心电势高，在  $CD$  之间接上用电器，转动的圆盘就可以为用电器供电。

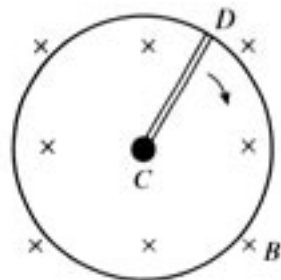


图 4-8

(2) 根据右手定则判断， $D$  点电势比  $C$  点高，所以流过电阻  $R$  的电流方向自下向上。

说明：本题可拓展为求  $CD$  间的感应电动势。设半径为  $r$ ，转盘匀速转动的角速度  $\omega$ ，匀强磁场的磁感应强度为  $B$ ，求圆盘转动时的感应电动势的大小。具体答案是  $E = \frac{1}{2} Br^2 \omega$ 。

## 第 4 节 法拉第电磁感应定律

### 1. 教学目标

(1) 知道什么叫感应电动势。

(2) 知道磁通量的变化率是表示磁通量变化快慢的物理量，并能区别  $\Phi$ 、 $\Delta\Phi$  和  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 。

(3) 理解法拉第电磁感应定律的内容及数学表达式。

(4) 知道公式  $E = Blv \sin \theta$  的推导过程。

(5) 会用  $E = n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$  和  $E = Blv \sin \theta$  解决问题。

(6) 感悟从不同物理现象中抽象出个性与共性问题的方法，培养学生对不同事物进行分析，找出共性与个性的辩证唯物主义思想。

## 2. 教材分析与教学建议

前面几节的内容是从感应电流的角度来认识电磁感应现象的。本节是从感应电动势进一步深入到感应电动势来理解的，即研究“决定感应电动势大小的因素”。教科书在这个问题的处理上并没有通过实验探究，而是以陈述事实的方式，引入法拉第电磁感应定律，即教科书用“在法拉第、纽曼、韦伯等人工作的基础上，人们认识到：……感应电动势……成正比”的表述给出了电磁感应定律。教科书之所以这样处理，是力图通过这一物理规律的教学，充分体现人类认识事物的一种真实图景。也就是说，物理学中多数定律的得出，并不一定是直接归纳的结果，而是在分析了很多间接的实验事实后被“悟”出来的，并且定律的正确往往也是由它的推论的正确性来证实的。因此，本节教学不要求通过实验探究来建立规律。

本节教学设计的总体思路：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；随后，得出感应电动势大小的一般表达式  $E = n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ ；最后，再利用法拉第电磁感应定律对“导线切割磁感线时的感应电动势”和“反电动势”这两种特殊情况进行分析。

本节教学的重点是法拉第电磁感应定律，难点是对磁通量的变化及磁通量的变化率的理解。

### (1) 感应电动势

引入感应电动势的概念，要注意温故知新。闭合电路中要维持持续电流，其中必有电动势的存在。在电磁感应现象中，闭合电路中有感应电流，必然存在对应的电动势，即感应电动势。

比较概念之间的内在联系，使学生深刻理解概念的本质。由感应电流过渡到感应电动势，对学生来说，是从现象到本质的认识深化过程。为了让学生认识到感应电流与感应电动势的区别和联系，教师可以通过演示实验，让学生观察接通与断开闭合电路时的电路电流与路端电压。即当电路断开时，回路中没有感应电流，但路端电压（即感应电动势）仍然存在，而电路中出现感应电流，是要以电路闭合与电动势的同时存在为前提条件。所以，感应电动势的有无，完全决定于穿过闭合电路的磁通量是否发生变化，与电路的通断，电路的组成情况等无关。在电磁感应现象中，“感应电动势”比“感应电流”更具有本质意义。

结合实例进行对比分析，对巩固和深化概念很有效。如图 4-9 甲所示，电路中的线圈相当于电源，其电动势为感应电动势，线圈导线的电阻相对于电源内阻，进而可画出如图 4-9 乙所

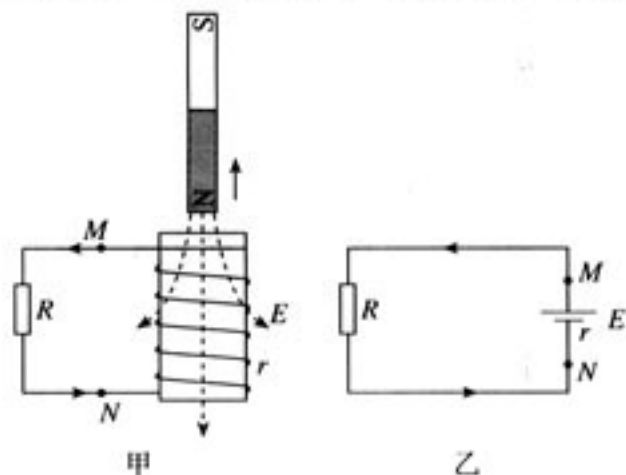


图 4-9



示的电路图，以便学生类比学习。

建立感应电动势概念的教学思路可以归纳为：

电磁感应现象→电流→感应电流→电源→感应电动势。

## (2) 法拉第电磁感应定律

教学设计的思路如下：



按上述线索分析教材时，一是要使学生对演示实验的现象观察清楚；二是要结合实验、实例，运用类比等方法，加深学生对磁通量变化率概念的理解。教学中，可以列举速度是由位置的变化率决定，加速度是由速度的变化率决定等，以此来加深对变化率概念的理解。

### 教学片段

#### 影响感应电动势大小的因素

观察实验，分析、思考并回答下面的问题。

问题导引 1：将条形磁铁如教科书图 4.2-2 所示插入线圈中，电流表指针发生偏转。其原因是什么？电流表指针偏转程度跟感应电动势的大小有什么关系？

分析： $\Phi$  变化 $\Rightarrow$ 产生  $E \Rightarrow$  产生  $I$ ；另外，由  $I = \frac{E}{R+r}$  可知，总电阻一定时， $E$  越大， $I$  越大，指针偏转越大。

问题导引 2：将条形磁铁从同一高度，插入如教科书图 4.2-2 所示的线圈中，快插入和慢插入有什么相同和不同？

分析归纳：

	从条件上看	从结果上看
相同	磁通量的变化 $\Delta\Phi$ 相同	都产生了感应电流 $I$
不同	磁通量变化的快慢不同	所产生的感应电流 $I$ 的大小不同

猜想：以上两个实验结果表明，感应电动势的大小与感应电流的大小成正比，与磁通量的变化成正比。感应电动势的大小可能与磁通量变化的快慢有关，磁通量变化得快，感应电动势就大。磁通量变化的快慢是否可用磁通量的变化率来描述，即可表示为  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 。

实验检验：

①在教科书图 4.2-1 所示导体切割磁感线的实验中，导体棒运动越快，即  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  越大，感应电流  $I$  越大，感应电动势  $E$  越大。

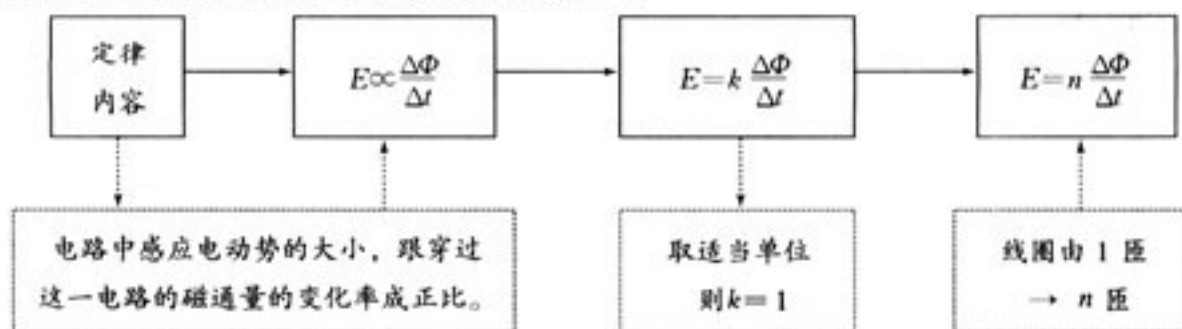
②在教科书图 4.2-3 所示实验中，开关断开或闭合的瞬间，比移动滑动变阻器的滑片时的  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  大，感应电流  $I$  大，感应电动势  $E$  大。



进一步的猜想：感应电动势的大小很可能与磁通量的变化率有关，且与它成正比。

### (3) 法拉第电磁感应定律的表达式

法拉第电磁感应定律表达式的推演思路如下：



教学中还应注意以下几点：

①讲清比例常数  $k$ ，可引导学生推导  $1 \text{ Wb/s}$ ，从而得出  $k=1$  的结论，因此法拉第电磁感应定律的表达式为  $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 。

②要使学生了解如果闭合电路由  $n$  匝线圈串联组成，整个线圈总的感应电动势是单个线圈的  $n$  倍，即  $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 。这里要说明，穿过每匝线圈的磁通量的变化率是相同的。

### (4) 理解法拉第电磁感应定律

为加深学生对法拉第电磁感应定律的理解，建议适当增加例题。例题的选择与分析，要注意纠正学生可能存在的误解。

#### ①区别 $\Phi$ 、 $\Delta\Phi$ 与 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

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；

$\Delta\Phi$  是穿过回路磁通量的变化，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， $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  是  $\Phi-t$  图象上某点切线的斜率。

因此， $\Phi$  大， $\Delta\Phi$  不一定大； $\Delta\Phi$  大， $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  也不一定大，三者没有直接的数量关系。它们是三个不同的物理量，不可混淆。

$\Phi$ 、 $\Delta\Phi$  与  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  三者的关系，可以用  $v$ 、 $\Delta v$  与  $\frac{\Delta v}{\Delta t}$  三者的关系来类比。

教科书在这里特地介绍了磁通量的变化率，目的是为学生准确理解法拉第电磁感应定律扫清障碍。另外，需要注意，教科书中给出的法拉第电磁感应定律公式中的  $\Delta\Phi$  取绝对值， $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  也取绝对值，它表示的是感应电动势的大小，而不涉及方向。

#### ②理解 $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 中的 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

$\Delta\Phi$  等于  $\Delta t$  这段时间内，末时刻的磁通量  $\Phi_2$  与初时刻磁通量  $\Phi_1$  的差值，而与这段时间内磁通量是否均匀变化无关。所以， $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  实际上表示  $\Delta t$  这段时间内磁通量的平均变化率， $E$  是  $\Delta t$  这段时间内的平均感应电动势，只有  $\Delta t$  特别小 ( $\Delta t$  趋于 0) 时，才是瞬时值。

### (5) 导线切割磁感线时的感应电动势

引起闭合电路磁通量变化的原因有多种,例如,闭合电路的一部分导体在磁场中切割磁感线运动时,会引起磁通量的变化。利用  $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  来研究导体切割磁感线运动,可推导出感应电动势的公式为  $E = Blv\sin\theta$ ,注意条件是  $v$  与  $l$  垂直,其中  $\theta$  是  $B$  和  $v$  的夹角。

不论从分解速度的角度还是从分解磁感应强度的角度来理解这个公式,其意义是等价的。因为不论把  $B$  分解为  $B_{\parallel}$  和  $B_{\perp}$ ,还是把  $v$  分解为  $v_{\parallel}$  和  $v_{\perp}$ ,都会得出相同的结果。上式中如果  $v$  为瞬时速度,则求得的  $E$  为瞬时电动势,如果  $v$  为平均速度,则  $E$  为平均电动势。

$E = Blv\sin\theta$  是一个重要的公式。要使学生了解它是法拉第电磁感应定律的一个特例,当研究导体做切割磁感线运动的有关问题时,使用它比较方便。

教学中,要让学生注意公式  $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  与  $E = Blv\sin\theta$  在以下几个方面的区别及联系。

①研究对象不同。 $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  的研究对象是一个回路,而  $E = Blv\sin\theta$  的研究对象是磁场中运动的一段导体。

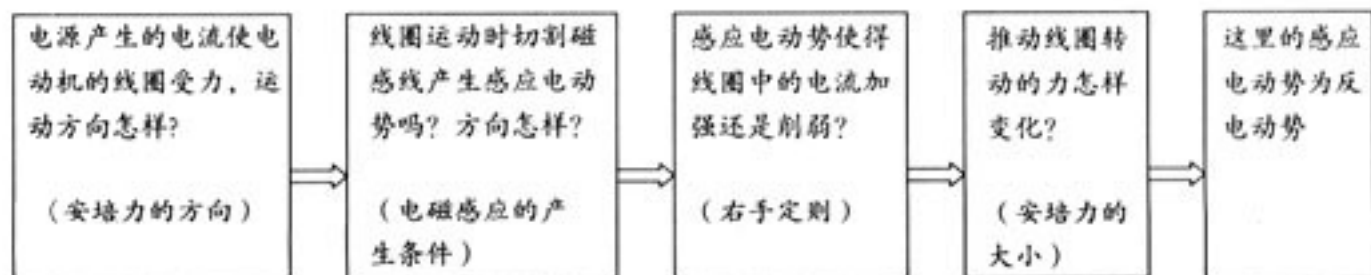
②物理意义不同。 $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  表示的是  $\Delta t$  时间内的平均感应电动势,当  $\Delta t \rightarrow 0$  时,则  $E$  为瞬时感应电动势;而  $E = Blv\sin\theta$ ,如果  $v$  是某时刻的瞬时速度,则  $E$  也是该时刻的瞬时感应电动势;若  $v$  为平均速度,则  $E$  为平均感应电动势。

③  $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  表示的电动势是整个回路的感应电动势,而不是回路中某部分导体的电动势。整个回路的电动势为 0,其回路中某段导体的感应电动势不一定为 0。

④  $E = Blv\sin\theta$  和  $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  本质上是统一的。前者是后者的一种特殊情况。但是,当导体做切割磁感线运动时,用  $E = Blv\sin\theta$  求  $E$  比较方便;当穿过电路的磁通量发生变化时,用  $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  求  $E$  比较方便。

### (6) 反电动势

“反电动势”概念的引入,是通过“思考与讨论”栏目的设计来完成的。即,



可见,其中用到的知识都是本章最基本的知识,谁都不会否认熟练掌握这些知识的必要性。因此,完全可以把反电动势概念的教学作为复习、应用这些知识的一个习题来处理。

①让学生观察演示实验和直流电动机模型,了解其结构后,分析其转动原理。使学生了解通电线圈在磁场中受到的安培力是使线圈产生转动的动力,由负载和摩擦引起的力为阻力。

②重点是引导学生讨论直流电动机的线圈转动时所产生的感应电动势及其特点,使学生从导线做切割磁感线运动的角度,了解转动的线圈切割磁感线时会产生感应电动势。这个电动势的大小与线圈转动的快慢有关(不需做出定量的分析)。感应电动势的方向可根据楞次定律来



判断。感应电动势的方向与线圈中的电流方向相反，而电流方向和外加电压方向相同。故感应电动势方向与外加电压方向相反。

有条件的学校，还可以利用能量转化的观点分析直流电动机的工作原理。详见教学资源库。

### 3. 问题与练习

内容分析

第1题是一个选择题，目的是让学生理解法拉第电磁感应定律，体会感应电动势的大小跟磁通量变化的快慢有关。

第2、3题分别强化了本节的重点知识，即法拉第电磁感应定律  $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  和导体切割磁感线的感应电动势  $E = Blv$ 。让学生理解法拉第电磁感应定律和初步掌握使用  $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 、 $E = Blv$  的方法。

第4题通过对实际问题的分析，让学生进一步理解产生感应电流的条件。

第5题的目的是使学生掌握线圈在匀强磁场中匀速转动时的感应电动势的最大值  $E = BS\omega$ 。该题同时与第1题可相互呼应，磁通量为0时，感应电动势为最大值。该题也为了了解交变电流的产生打下了基础。

第6题进一步让学生加深对法拉第电磁感应定律的理解。

第7题通过对电磁流量计的分析，提高了学生应用电磁感应现象解决实际问题的能力。

解答与说明

1. 正确的是D。

2. 解：根据法拉第电磁感应定律，线圈中感应电动势为

$$\begin{aligned} E &= n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \\ &= 1\,000 \times \frac{0.09 - 0.02}{0.4} \text{ V} = 175 \text{ V} \end{aligned}$$

根据闭合电路欧姆定律可得，通过电热器的电流为

$$\begin{aligned} I &= \frac{E}{R+r} \\ &= \frac{175}{990+10} \text{ A} = 0.175 \text{ A} \end{aligned}$$

3. 解：根据导线切割磁感线产生感应电动势的公式  $E = Blv$ ，可知缆绳中的感应电动势为

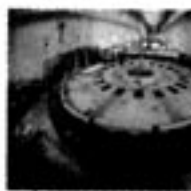
$$\begin{aligned} E &= 4.6 \times 10^{-5} \times 2.05 \times 10^4 \times 7.6 \times 10^3 \text{ V} \\ &= 7.2 \times 10^3 \text{ V} \end{aligned}$$

4. 答：可以。声音使纸盒振动，线圈将随纸盒振动，线圈切割磁感线，产生感应电流。

5. 答：因为线圈绕  $OO'$  轴转动时，线圈长为  $L_2$  的边切割磁感线的速度变化，感应电动势因而变化。

根据公式  $E = Blv\sin\theta$  和  $v = \omega r$  有  $E = BL_1L_2\omega\sin\theta$ 。因为  $S = L_1L_2$ ， $\theta = 90^\circ$ ，所以， $E = BS\omega$ 。

6. 答：



(1) 根据法拉第电磁感应定律, 线圈中感应电动势  $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = n \frac{\Delta B}{\Delta t} \pi R^2$ , 所以,  $\frac{E_A}{E_B} = \frac{R_A^2}{R_B^2} = \frac{4}{1} = 4$ .

(2) 根据闭合电路欧姆定律, 可得通过线圈的电流  $I = \frac{E}{r} = n \frac{\Delta B}{\Delta t} \pi R^2 \frac{1}{\rho \frac{2\pi R}{S}} = n \frac{\Delta B S}{\Delta t} \frac{R}{2\rho}$ .

所以,  $\frac{I_A}{I_B} = \frac{R_A}{R_B} = \frac{2}{1} = 2$ .

7. 答: 管中有导电液体流过时, 相当于一长为  $d$  的导体在切割磁感线, 产生的感应电动势  $E = Bdv$ . 液体的流量  $Q = v\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2$ , 即液体的流量与电动势  $E$  的关系为  $Q = \frac{\pi d}{4B} E$ .

## 第5节 电磁感应规律的应用

### 1. 教学目标

(1) 了解感生电场, 知道感生电动势产生的原因。会判断感生电动势的方向, 并会计算它的大小。

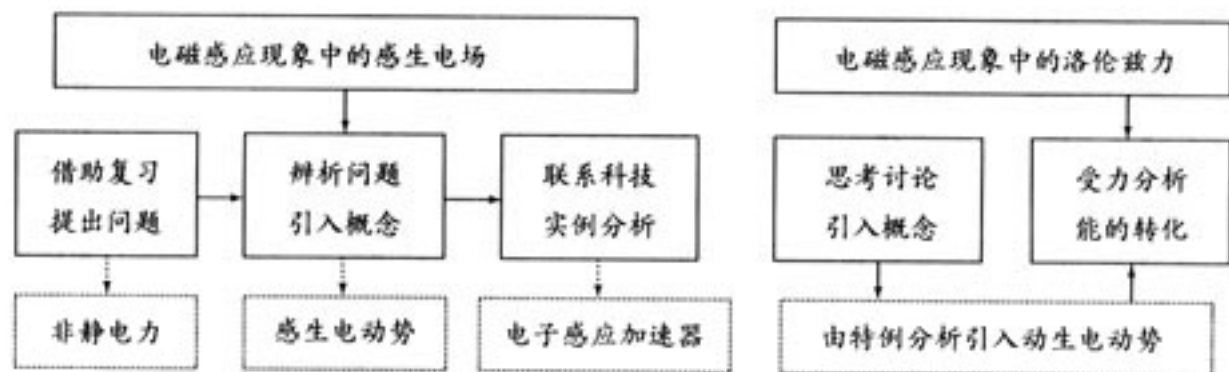
(2) 了解动生电动势的产生以及与洛伦兹力的关系。会判断动生电动势的方向, 并会计算它的大小。

(3) 了解电磁感应规律的一般应用, 会联系科技实例进行分析。

### 2. 教材分析与教学建议

从电磁感应规律应用的角度看, 本节对感生电动势和动生电动势, 及其形成原因进行了初步的探讨。应该说, 两者是按照引起磁通量变化的不同原因来区分的。虽然感生电动势与动生电动势的提出, 涉及电磁感应的本质问题, 但是教科书对此要求并不高。那么, 教科书为什么要引入感生电动势和动生电动势两个不同的概念呢? 原因是教科书对电动势的概念做了较为深入的分析, 该问题的讨论正是为了进一步沿续整套教科书关于“通过做功研究能量”的思想。所以, 教学的着眼点应该放在感生电场和洛伦兹力的问题上, 前者是为学习电磁波做准备, 后者是对前面知识的复习。

本节教学内容展开的流程如下。





### (1) 电磁感应现象中的感生电场

教科书运用从“一般”到“特殊”的思想方法，引入感生电场的概念，即先从复习《物理选修3-1》第二章“恒定电流”关于“电动势”的内容入手，使学生认识到电路中电动势的作用实际上是某种非静电力对自由电荷的作用。

#### 教学片段

#### 研究感生电动势的产生

提出问题：磁场变化使闭合电路中的导体产生感应电流，那么，使导体中自由电荷做定向移动的作用力是什么力呢？

猜想：引导学生根据自己对已有知识的认识，排除洛伦兹力、静电力。原因是，磁场对静止电荷不会有洛伦兹力；静电力是电荷间相互作用力，与磁场无关。难道是变化的磁场对电荷产生作用力？

问题导引：变化的磁场是怎样对电荷产生作用力的？怎样得到变化的磁场？怎样得到电荷？

设计实验：变化的磁场获得的方法很多，如通电直导线，通电螺线管等。

演示：实验装置如图4-10所示。当穿过螺线管的磁场随时间变化时，在空间激发的涡旋电场使线圈A中产生感应电动势，感应电流使灯泡发光。

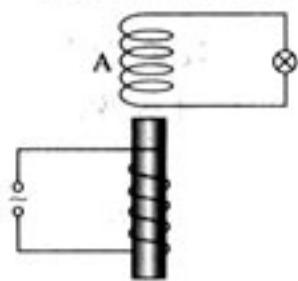


图4-10

分析、总结：

- 变化的磁场使电荷受到作用力做定向运动。
- 变化的磁场在空间产生一个电场——感生电场。
- 感生电动势的非静电力就是感生电场对电荷的作用力。

关于感生电动势产生的机理详见教学资源库。

另外，从感生电场的实际应用角度考虑，教科书以例题形式介绍了电子感应加速器工作原理。该问题的处理体现了整套教科书关于“让学生通过有实际意义的物理情境来学习基础知识”的编写思想，也体现了改变学生学习方式的努力。该例题的教学可通过“问题链”的形式展开：

#### 教学片段

#### 电子感应加速器的工作原理

①电磁铁中通有教科书图4.5-2所示方向的恒定电流时，真空室中的电子受力怎样？

引导学生讨论  $v_0=0$  和  $v_0 \neq 0$  情况下电子的运动。

②电磁铁中通有图示方向均匀减小的电流时，所激发的磁场和感应电场怎样？真空室中的电子受力怎样？能使电子加速吗？

引导学生讨论  $v_0=0$  和  $v_0 \neq 0$  情况下电子的运动。

③电磁铁中通有图示方向均匀增加的电流时，所激发的磁场和感应电场怎样？真空室中的

电子受力怎样？能使电子加速吗？

④电磁铁中通有图示方向相反均匀减小的电流时，所激发的磁场和感应电场怎样？真空室中的电子受力怎样？能使电子加速吗？

⑤电磁铁中通有怎样变化的电流时，真空室中的电子才能保持在一定的轨道运动？

⑥若电磁铁中通有正弦交变电流时，在1周期内的哪一段，电子才能在真空室中被加速？

## (2) 电磁感应现象中的洛伦兹力

教科书运用从特殊到一般的思想方法引入动生电动势的概念，即通过教科书图 4.5-3 的特例，设置了一个问题链，引导学生层层深入，最终得出导体  $CD$  两端存在电势差，即导体  $CD$  相当于一个电源，在说明该电源的非静电力与洛伦兹力有关后，引出“动生电动势”的有关概念。

值得注意的是，教科书对于洛伦兹力与动生电动势的具体关系并未深究，只是较笼统地用一句话“这时的非静电力与洛伦兹力有关”一带而过，这主要是为了降低教学难度。至于“这时的非静电力与洛伦兹力有怎样的关系？”“洛伦兹力作用的结果产生动生电动势的具体物理过程怎样？”等问题，有条件的学校可在“思考与讨论”栏目中的问题链后再增加一个问题：导体切割磁感线时所产生的电动势，哪些作用充当了非静电力？通过对该问题的具体分析，引导学生从洛伦兹力的角度推导动生电动势大小的表达式。

关于动生电动势产生的机理详见教学资源库。

## (3) 从能量转化的角度看动生电动势产生的过程

教学中，可利用图 4-11 的问题来定量研究电磁感应现象中的能量转化与守恒，并通过教学片段中设计的问题链，引导学生从能量转化与守恒的角度推导动生电动势大小的表达式。

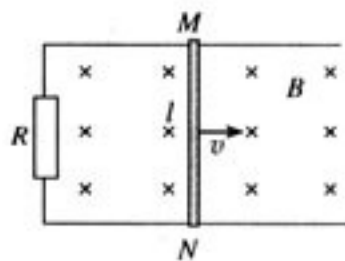


图 4-11

### 教学片段

#### 推导动生电动势大小的表达式

设匀强磁场的磁感应强度为  $B$ ，导体  $MN$  的长度为  $l$ ，以速度  $v$  水平向右匀速运动，不计其他电阻。可按照物理过程提出下列问题：

①导体  $MN$  做匀速运动时所受到的安培力  $F'$  的大小是多少？方向如何？

(导体  $MN$  在磁场中做匀速运动时，导体中的电子由于受到洛伦兹力的作用在竖直方向定向移动，假设形成的电流大小为  $I$ ，则  $F = F' = BIl$ ，水平向左。)

②作用在导体  $MN$  上的外力  $F$  的大小是多少？(为了使导体保持匀速运动，使  $F = F'$ ，有  $F = F' = BIl$ )

③外力做功的功率  $P$  的大小？( $P = Fv = BIlv$ )

④设感应电动势为  $E$ ，闭合电路中的电功率  $P'$  的大小是多少？( $P' = EI$ )

⑤“外力  $F$  做功的功率  $P$ ”与“闭合电路中的电功率  $P'$ ”之间有什么关系？为什么？

(拉力的功并没有增加导体的动能，而是使电路中产生了感应电流  $I$ ，根据能的转化和守恒定律知  $P' = P$ ，即  $Fv = EI$ ，或  $BIlv = EI$ )

⑥动生电动势  $E$  的大小与速度  $v$  有什么关系？(由此可得动生电动势大小的计算式  $E = Blv$ )



从上述物理过程可知，发生电磁感应现象时，常伴随着其他现象发生。当闭合电路产生感应电动势时，电路中就会产生感应电流。感应电流的强弱又由欧姆定律决定。电流在磁场中必将受到磁场力的作用，通过感应电流可将电磁感应与电路、力学知识联系起来。

实际上，在中学物理教学中可按三种不同的思路推导动生电动势的表达式  $E=Blv$ 。一是用法拉第电磁感应定律推导；二是从动生电动势产生与洛伦兹力关系的角度推导；三是从能量转化与守恒的角度推导。

教科书只研究了动生电动势产生过程中的能量转化情况，有条件的学校也可引导学生对感生电动势产生过程中的能量转化情况进行分析。

### 3. 问题与练习

内容分析

本节习题的安排，由实际到抽象，由简单到复杂。

第1题仅有一段导线在磁场中运动，而没有闭合电路，在导线中虽无电流，但仍存在动生电动势。强化第3节和第4节中切割磁感线产生感应电动势正负的判断及电动势的计算，并与实际紧密相联。

第2题突出了感生电场产生的实质，即只需空间磁场随时间变化，空间就产生感生电场。即使在此空间放置一段导体，导体不闭合，导体两端也会有感生电动势产生，并强化了第4节法拉第电磁感应定律的内容。

第3题与第4题同样是闭合电路中部分导体切割磁感线产生动生电动势，形成等效电路中的等效电源，使闭合电路中产生感应电流。第3题仅简单计算其电流并判断其方向。

第4题强调了在产生动生电动势过程中，切割速度的大小对动生电动势的影响，更进一步分析与计算产生电能的变化情况，体现了外力克服安培力做功与感应电流做功的关系。

解答与说明

1. 解：根据导线切割磁感线产生感应电动势的公式  $E=Blv$ ，  
该机两翼尖间的电势差为  $E=4.7 \times 10^{-5} \times 12.7 \times 0.7 \times 340 \text{ V}$   
 $=0.142 \text{ V}$

根据右手定则可知，从驾驶员角度来说，左侧机翼电势高。

说明：该题的难点之一在于学生的空间想象力往往比较弱，对此，可用简单图形（图4-12）帮助理解；另外，该题可补充一问，即当飞机从西向东飞行时，哪侧机翼电势高？分析可得仍为左侧机翼电势高。

2. 答：

(1) 根据法拉第电磁感应定律，线圈中感应电动势为  $E=n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 。

根据  $\Phi-t$  图象可知， $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=0.5 \text{ Wb/s}$ 。

电压表的读数为  $E=n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=100 \times 0.5 \text{ V}=50 \text{ V}$ 。

(2) 感应电场的方向为逆时针方向，如图4-13所示。

(3) A端的电势比B端高，所以A端应该与电压表标“+”的接线柱连接。

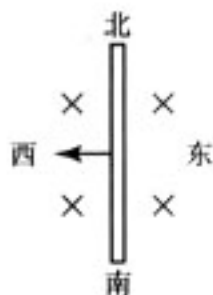


图4-12

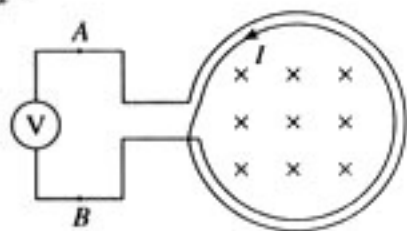
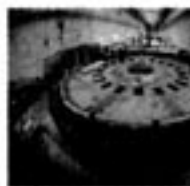


图4-13



3. 答:

(1) 等效电路如图 4-14 所示。

(2) 通过  $R$  的电流方向从上到下。

根据导线切割磁感线产生感应电动势的公式  $E=Blv$ ,  $MN$ 、 $PQ$  的电动势都为  $E=1 \times 1 \times 1 \text{ V}=1 \text{ V}$ 。根据电池的并联和闭合

电路欧姆定律, 通过  $R$  的电流  $I=\frac{E}{r}=\frac{1}{1} \text{ A}=1 \text{ A}$ 。

(3) 通过  $MN$  的电流方向为自  $N$  到  $M$ ; 过  $PQ$  的电流方向为自  $Q$  到  $P$ 。

4. 答:

(1) 线圈以速度  $v$  匀速进入磁场, 当  $CD$  边在磁场中时, 线圈中感应电动势  $E_1=Bl_1v$ , 其中  $l_1$  为  $CD$  边的长度。此时线圈中的感应电流为  $I_1=\frac{E_1}{R}=\frac{Bl_1v}{R}$ , 其中  $R$  为线圈的总电阻。

同理, 线圈以速度  $2v$  匀速进入磁场时, 线圈中的感应电流最大值为  $I_2=\frac{E_2}{R}=\frac{2Bl_1v}{R}$ 。

第二次与第一次线圈中最大电流之比为  $2:1$ 。

(2) 线圈以速度  $v$  匀速进入磁场, 当  $CD$  边在磁场中时,  $CD$  边受安培力最大, 最大值为  $F_1=BI_1l_1=\frac{B^2l_1^2v}{R}$ 。由于线圈做匀速运动, 所以此时外力也最大, 且外力大小等于安培力大

小, 此时外力的功率为  $P_1=F_1v=\frac{B^2l_1^2v^2}{R}$ 。

同理, 线圈以速度  $2v$  进入磁场时, 外力的最大功率为  $P_2=\frac{4B^2l_1^2v^2}{R}$ 。

第二次与第一次外力做功的最大功率之比为  $4:1$ 。

(3) 线圈以速度  $v$  匀速进入磁场, 线圈中的感应电流为  $I_1=\frac{E_1}{R}=\frac{Bl_1v}{R}$ 。

设  $AD$  边长为  $l_2$ , 则线圈经过时间  $t=\frac{l_2}{v}$  完全进入磁场, 此后线圈中不再有感应电流。所

以第一次线圈中产生的热量为  $Q_1=I_1^2Rt=\frac{B^2l_1^2v^2}{R^2}R\frac{l_2}{v}=\frac{B^2l_1^2l_2v}{R}$ 。

同理, 线圈以速度  $2v$  匀速进入磁场时, 线圈中产生的热量为  $Q_2=\frac{2B^2l_1^2l_2v}{R}$ 。

第二次与第一次线圈中产生的热量之比为  $2:1$ 。

说明: 可进一步分析并说明, 在这一过程中, 外力克服安培力所做的功与感应电流所做的功是相等的。

## 第 6 节 互感和自感

### 1. 教学目标

(1) 通过实验, 了解互感现象和自感现象, 以及对它们的利用和防止。

(2) 能够通过电磁感应的有关规律分析通电、断电时自感现象的成因, 以及磁场的能量转化问题。



图 4-14



(3) 了解自感电动势的计算式  $E=L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ ，知道自感系数是表示线圈本身特征的物理量，知道它的单位。

(4) 认识互感和自感是电磁感应现象的特例，感悟特殊现象中有它的普遍规律，而普遍规律中包含了特殊现象的辩证唯物主义观点。

## 2. 教材分析与教学建议

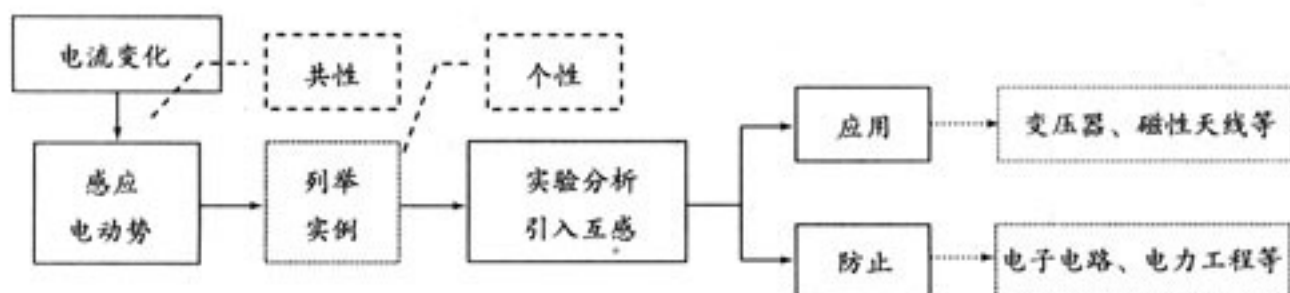
互感和自感现象都是电磁感应现象的特例。学习“互感电动势”和“自感电动势”的重要性在于它们具有实际的应用价值。

本节教学内容主要包括互感现象、自感现象和磁场的能量三个部分。教学的重点是自感现象和自感系数，难点是对自感有关规律的认识。

### (1) 互感现象

互感现象是一种常见的电磁感应现象。法拉第发现电磁感应现象的第一个成功实验就是互感现象。教科书对互感的教学要求不高，只要求知道互感现象产生的原因，以及互感现象在电工技术和电子技术中有广泛的应用。互感现象是变压器工作的基础，有些问题可在下一章的变压器部分解决。

教科书关于“互感现象”教学内容展开的流程如下。



教学中，一是要注意从“共性”与“个性”关系的角度，说明互感现象是电磁感应现象的特例之一。二是要注意做好教科书图 4.1-2 所示的实验（法拉第发现电磁感应现象的第一个实验），使学生对互感现象有一个感性认识。

另外，还可利用可拆变压器，自己绕制原、副线圈进行实验，并使副线圈电路中的灯泡发光；或者利用收音机中的“磁性天线”演示，加深学生对互感现象的了解，进一步明确尽管两个线圈之间并没有导线连接，互感现象却可以使能量由一个线圈传递到另一个线圈。

### (2) 自感现象

自感现象是一种特殊的电磁感应现象，即由导体本身电流的变化而产生的电磁感应现象。所谓“自感”，就是当通过线圈的电流发生变化时，在线圈本身激发出的感应电动势（若电路闭合，就会产生感应电流）。这个自感电动势总是阻碍原电流的变化。在教学中，要使学生明白自感现象的规律都符合电磁感应现象的一般规律。下面推荐一个“有惊无险”的自感实验，可用作新课（或断电自感现象）的导入。

### 用断电自感引入课题

实验装置：如图 4-15 所示。让几位同学“串联”在电路中，电源只需 1 节干电池即可。

操作方法：

- 闭合开关 S 前，学生谈体验——“无感觉”；
- 闭合开关 S 后，学生再谈体验——“无感觉”；
- 断开开关 S 瞬间，同学突然受到电击——“迅速收回双手”。

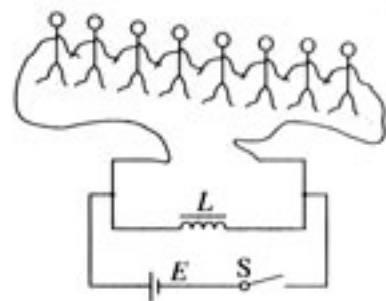


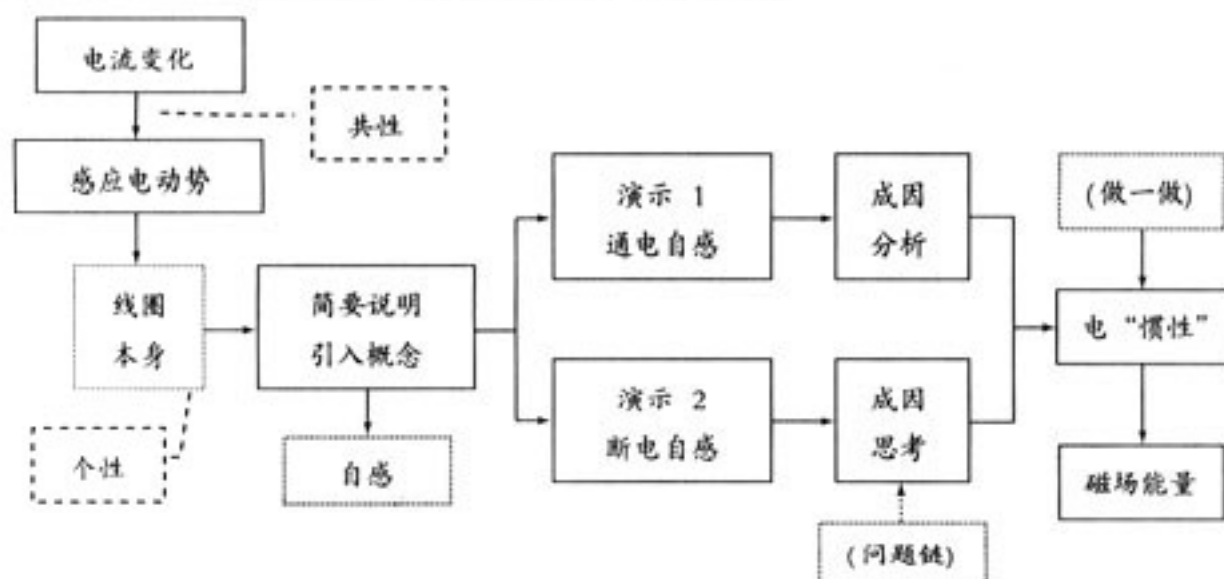
图 4-15

1 节干电池何以能使这么多同学同时受到电击？学生对此引发的思维疑问和惊奇而提出问题，从而引入本节课研究的课题——自感现象。

以这种方式引入课题的优点在于，学生体验深刻，能很好激起学生的探究欲望，学生参与面较广，师生互动，且器材简单易得，改装方便（图 4-15 中的自感线圈可用常见日光灯的镇流器替代）。

自感电动势是一个抽象的概念，它产生的原因学生较容易接受，但它对电流变化所起的“阻碍”作用，以及自感电动势方向的确定却是教学的一个难点。本节教学的关键是做好通电自感和断电自感两个实验。

教科书中关于“自感现象”教学内容展开的流程如下。



上述教学设计的基本思路：先做演示实验，观察实验现象，然后，运用电磁感应的有关规律（主要是楞次定律）对实验现象进行分析，使学生了解自感现象产生的原因和理解自感电动势的作用。这样展开教学，思路清晰，易于被学生接受。

为便于学生理解与思考，教科书对通电自感现象成因的分析（教科书图 4.6-2），采用了正面表述的方式，而对断电自感现象成因的分析（教科书图 4.6-4），改用问题链的方式。前者是示范提示，后者为设问引导。该问题链看似一连串的问题，但所设置的问题瞄准对自感现象成因分析的要点和易错点，环环相扣，逐渐深入，实际是借助问题链的方式为学生的理解与



思考提供“支架”，借以化解难点。

分析通电自感和断电自感这两个实验时要注意把握以下两点：

①导体本身电流变化，引起磁通量的变化，这是产生自感现象的原因。

②自感电动势的作用是阻碍电流变化，即电流增大时，自感电动势阻碍电流增大；当电流减小时，阻碍电流减小，总是起着推迟电流变化的作用。

在教学中，建议教师向学生强调：分析自感现象，关键是分清电流的变化，并抓住“阻碍电流变化”这一特点，确定自感电动势（或自感电流）的方向。正是因为自感线圈具有“阻碍电流变化”这一特性，才使得通过它的电流不能发生“突变”，因而显示出电的“惯性”。

值得说明的是，自感现象的教学可先从分析通电自感和断电自感的实验电路图入手，提出问题，再引导学生运用已学过的电磁感应的有关规律进行理论探究，对可能产生的实验现象做出预测，然后，再用实验加以验证。这种教学设计适用于基础好的学生，既有利于提高他们分析问题的能力，又有助于对产生自感原因的理解。

**教学片段**

**通电自感**

设计实验：选出学生设计的通电自感实验电路图（图4-16），请大家分析是否合理？如果不合理，请你提出改进方案。

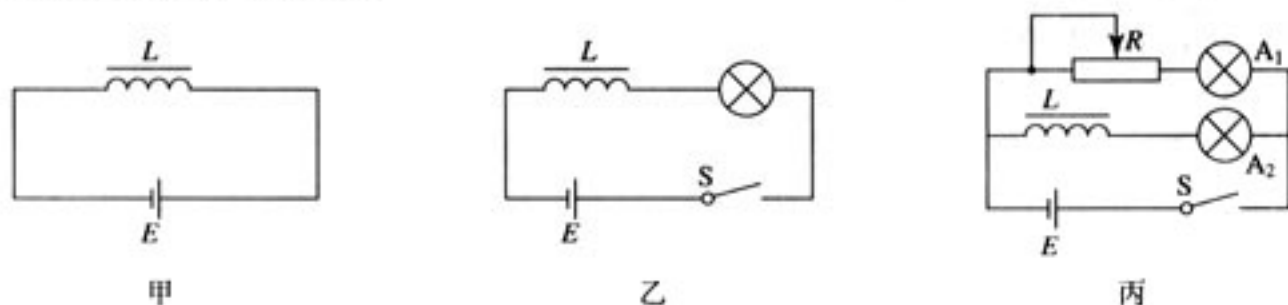


图 4-16

分析讨论：

方案1 如图4-16甲所示。

（无法判断。不合理。）

方案2 如图4-16乙所示。

（开关S接通瞬时，灯泡能发光。由于灯泡的明暗程度及明暗快慢变化显示了线圈中电流的变化情况，但是1个灯泡没有对比，无法说明问题，不合理。）

方案3 如图4-16丙所示。

（两个灯泡能发光，也能对比的原因是R为限流电阻，且已调节好，使通电后， $A_1$ 、 $A_2$ 正常发光且亮度相同。合理。）

预测：开关S闭合瞬时，会出现 $A_1$ 立即变亮， $A_2$ 逐渐变亮的现象……

分析其原因可知，由楞次定律，在通电瞬间，线圈中电流增大时，穿过线圈的磁通量增加，线圈中产生感应电动势（自感电动势），它阻碍了线圈中电流的增大，推迟了电流达到正常值的时间，因此，出现 $A_2$ 逐渐变亮。这种阻碍有别于阻止， $A_2$ 的电流最终达到正常值。

进行实验：动手实验操作，证实自己的猜测。

## 断电自感

演示：实验电路图如图 4-17 所示。

当开关 S 合上后，B 灯亮（二极管  $D_2$  导通），A 灯不亮（二极管  $D_1$  截止）；

当开关 S 断开后，B 灯不亮（二极管  $D_2$  截止），A 灯亮（二极管  $D_1$  导通）。

实验结果表明，开关 S 断开前，A 灯不亮（二极管  $D_1$  截止）；断开后的瞬间，有电流通过 A 灯，但电流方向相反。所以，通过

A 灯的电流源自电感线圈。即线圈中有电流时，电流产生感应磁场，磁场也具有能量。当开关断开后的瞬间，磁场能通过电磁感应转化为电能，由线圈提供给灯 A。这说明电磁感应遵循能量守恒。

结论：不管是通过导体本身的电流增大也好，或者是减小也好，产生自感现象的关键在于自感线圈中的磁通量发生变化。当自感线圈中的电流减小时，自感电动势对其也有阻碍作用。由此可知，自感电动势的作用便是阻碍线圈中电流的变化，即电感线圈中的电流不能发生突变，只能渐变。

通过进一步的分析可知，为使断电自感实验的效果更明显，对线圈的要求主要有两方面：一是线圈自身的电阻要明显小于灯泡的电阻；二是线圈的自感系数  $L$  要大。鉴于此，教学中可将“思考与讨论”栏目中的第 4 问分解为 3 个不同层次的小问题，安排在不同的教学环节分别设问。

①开关断开后，通过灯泡的感应电流是否可能比原来的电流大？（可能性判断）

②为了使实验效果更明显，对线圈的电阻有什么要求？（半定量判断）

③为了使实验效果更明显，要求线圈的自感系数  $L$  是大些好？还是小些好？

有关断电自感实验的进一步分析详见教学资源库。

本节“做一做”栏目中的内容，旨在提供一种方案，以便更形象地说明含有线圈电路的电流不能“突变”。

### （3）自感系数

自感电动势也是感应电动势，同样遵循法拉第电磁感应定律，在推导自感电动势计算式时要注意：

①自感系数的引入是以实验为基础的。教学中可用不同的线圈来做演示实验，以便学生从感性上加深对自感系数的认识。

②教学中应引导学生弄清自感系数的物理意义、决定因素及其单位。自感系数越大的线圈，对于相同的变化率，自感电动势越大，自感作用越强。自感系数的大小与线圈的大小、形状、圈数、以及有无铁芯等因素有关。

③  $E = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$  公式的引入，目的是使学生进一步认识数学公式在物理学中的作用，即从公式中能看到物理量之间的关系。一般来说，“系数”一定是在两个物理量发生相关变化时的某个

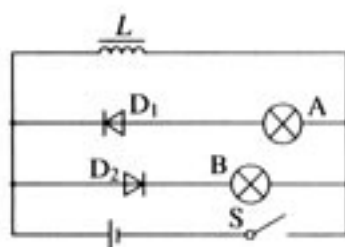


图 4-17





不变的量，它在确定这两个物理量的关系时是非常重要的。所以，教科书没有用这个公式进行计算的例题，节后也没有这方面的习题。

#### (4) 磁场的能量

为加强学生对磁场的认识，教科书通过对自感实验现象的分析，说明磁场具有能量。这主要是为今后电磁场与电磁波的教学做好铺垫。

按照“场”的观点，充电电容器的电能是以电场能量的形式储存在电容器两极板间的电场中的。与此类似，通电自感线圈中的能量是以磁场能量的形式储存在线圈的磁场中的。也就是说，磁场是能量的载体。教科书借助对断电自感实验现象的观察，从能量转化的角度提出问题，并加以定性分析，进而引入磁场具有能量这一概念。

磁场具有能量也可从互感现象的分析入手，因为互感现象的基本原理就是通过磁场将能量从一个线圈传递到另一个线圈，因此，可以从能量传递和转化的角度重新审视互感教学中有关的演示实验等。教学中可以结合实例进行分析，如电视信号的传递，无线电通信，电磁波对人体的影响等加深学生对“磁场的能量”的感性认识。

### 3. 问题与练习

#### 内容分析

本节习题与实际紧密相联，重视学生分析能力的培养。

第1题是通过一个互感现象应用的例子，强调互感产生的过程，其实质是感生电场使闭合电路产生感应电流的过程。目的就是让学生了解互感在生活中的应用，并让学生分析互感中的电流、磁性的变化等，培养学生逻辑思维能力。

第2题是断电自感过程中产生较大自感电动势的一个典型实例。在做教科书图4.6-4的演示实验过程中，电源电压控制在1.5V左右时，让学生体会一下“触电”的感觉。其目的是使学生了解在电源电压较大的情况下，断开电路可能出现的危险。

第3题分析电路断开、闭合时，电路中各电流的变化。一方面强调了导体内电流的变化引起磁通量变化；另一方面，强调自感电动势有阻碍电流变化的作用。

#### 解答与说明

##### 1. 答：

(1) 当开关S断开后，使线圈A中的电流减小并消失时，穿过线圈B的磁通量减小，从而在线圈B中将产生感应电流。根据楞次定律，感应电流的磁场要阻碍原磁场的减小，这样就使铁芯中磁场减弱得慢些，即在开关S断开后一段时间内，铁芯中还有逐渐减弱的磁场，这个磁场对衔铁D依然有力作用，因此，弹簧K不能立即将衔铁拉起。

(2) 如果线圈B不闭合，不会对延时效果产生影响。在开关S断开时，线圈A中电流减小并很快消失，线圈B中只有感应电动势而无感应电流，铁芯中的磁场很快消失，磁场对衔铁D的作用力也很快消失，弹簧K将很快将衔铁拉起。

2. 答：当李辉把多用表的表笔与被测线圈断开时，线圈中的电流将减小，发生自感现象，会产生较大的自感电动势，两只表笔间有较高电压，“电”了刘伟一下，所以刘伟惊叫起来。当李辉再摸多用表的表笔时，由于时间经历的较长，自感现象基本“消失”。

##### 3. 答：

(1) 当开关S由断开变为闭合，A灯由亮变得更为明亮，B灯由亮变暗，直到不亮。

(2) 当开关S由闭合变为断开，A灯不亮，B灯由亮变暗，直到不亮。

## 第7节 涡流、电磁阻尼和电磁驱动

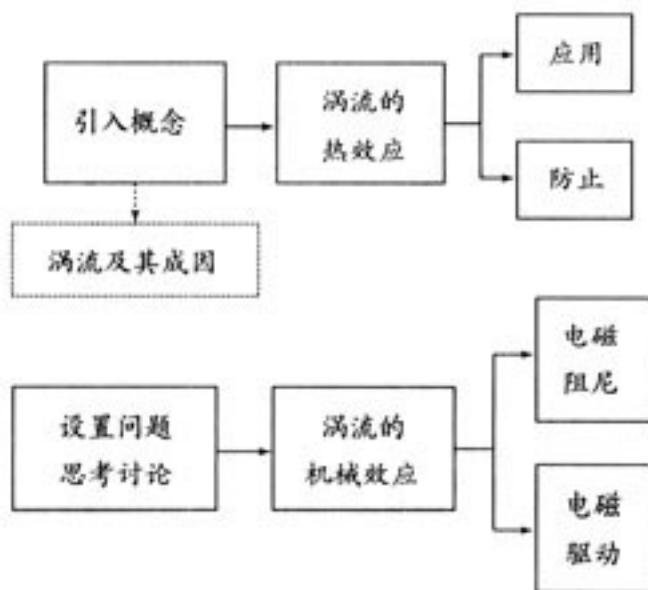
### 1. 教学目标

- (1) 了解涡流是怎样产生的。
- (2) 了解涡流现象的利用和危害。
- (3) 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。
- (4) 了解电磁阻尼和电磁驱动。

### 2. 教材分析与教学建议

前面学生学习的都是闭合导线中的电磁感应现象，本节将学习金属块状导体中的电磁感应现象——涡流。涡流是一种特殊的电磁感应现象，在生产、生活以及实验教学等方面有许多应用。教学内容主要学习涡流及其成因，涡流的热效应、机械效应等。教学的重点是涡流的概念及其应用。难点是电磁阻尼和电磁驱动的实例分析。

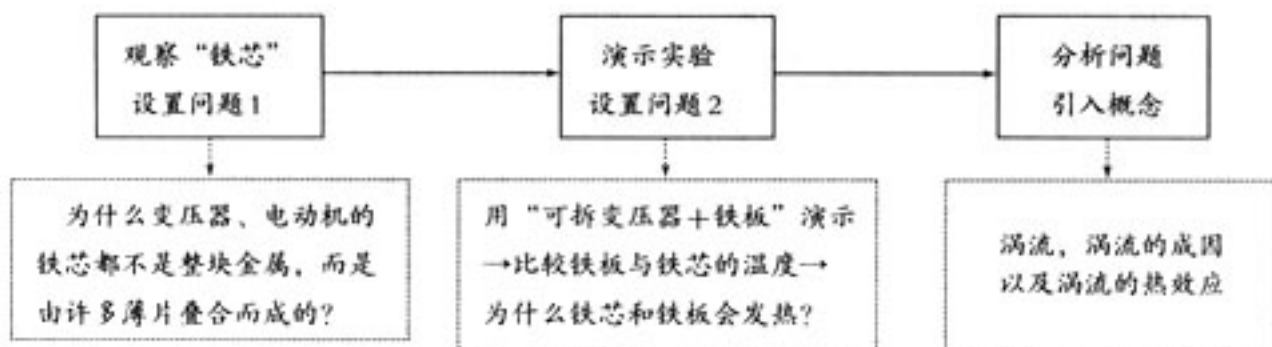
教科书关于本节教学内容展开的流程如下。



#### (1) 涡流

教学中，注意把这部分内容与“感生电动势”的概念相结合，让学生体会到，正是由于线圈中交变电流产生的变化磁场，在空间激发感生电场，这个感生电场为涡旋电场。一旦在此空间存在闭合导体，该电场对导体内的自由电荷就有力的作用，从而形成涡流。

关于涡流概念的引入，除教科书中所呈现的方式外，也可采用观察实验、设置问题的方式。





### 演示涡流的热效应

**实验装置：**如图 4-18 所示。在可拆变压器的条形铁芯下插入一块厚约 2 mm 的铁板，铁板垂直于铁芯里磁感线的方向。

**演示：**原线圈接交变电流，几分钟后，触摸铁芯和铁板，比较它们的温度。发现铁芯和铁板的温度都升高了，且铁板的温度比铁芯高。

**问题导引：**尽管交变电流没有直接接在铁芯上，铁板和铁芯的温度却升高了，而且铁板的温度比铁芯高。原因何在？

**分析：**铁板和铁芯的温度升高，表明两金属导体内有涡流的存在，正是由于涡流的热效应，使两金属导体温度升高。另外，铁板的温度比铁芯高，表明铁芯材料（硅钢片）比铁板的电阻率要高。

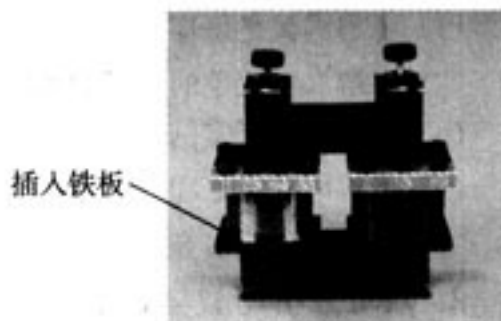


图 4-18

另外，上述演示实验也可用下面的简易实验替代。即用较粗的导线在一块铁芯上绕几十到几百匝的线圈，给线圈通入 1~3 A 的低压交变电流，观察铁芯的温度是否发生明显的变化。有条件的学校也可用示波器观察铁芯中的涡流情况，具体做法参考本书实验参考资料部分的相关内容。

#### (2) 涡流的应用

##### ① 利用涡流熔炼金属

交变电流的磁场在金属内感应的涡流能产生热效应。这种加热方法与用燃料加热相比有很多优点。如，加热速度快；加热效率高达 50%~90%；用不同频率的交变电流可得到不同的加热深度等。其原因是涡流在金属内不是均匀分布的，越靠近金属表面层电流越强，频率越高，涡流现象越显著。这就是“趋肤效应”。

教科书图 4.7-2 画的是无心式感应熔炉，主要用途是熔炼铸铁、钢、合金钢、铜和铝等有色金属的。其所用交变电流的频率要随冶炼炉所能容纳的金属质量的多少来选择，以取得最好的效果。例如，5 kg 的用 20 kHz，100 kg 的用 2.5 kHz，5 t 的用 1 kHz 乃至 50 Hz。

另外，感应加热法也广泛用于钢件的热处理，如淬火、回火、表面渗碳等。例如，齿轮、轴等只需要将表面淬火提高硬度，增加耐磨性，可以把它放入通有高频交流的空心线圈中，表面层在几秒内就可上升到淬火需要的高温，颜色通红，而其内部温度升高很少。然后用水或其他淬火剂迅速冷却就可以了。其他的热处理工艺可根据加热深度的需要，选取与之相适应的频段。

涡流也可以应用于生活，有关电磁灶的工作原理的内容见教学资源库。

##### ② 涡流防止

在各种电机、变压器中，涡流是有害的。由于金属块的电阻比较小，所以若有涡流产生，其涡流是很强的。当交变电流通过导线时，铁芯中就会产生很强的涡流使铁芯发热，浪费了电

能,还可能损坏电器。为了减少损失,电机、变压器等通常用具有绝缘层的薄硅钢片叠压制成铁芯,使回路电阻增大,减少涡流。

### (3) 电磁阻尼与电磁驱动

通过对本节“思考与讨论”栏目中电表线圈骨架的作用的实例分析,使学生认识涡流的机械效应。教学中要引导学生自主进行分析,明确其工作原理,即当被测电流通过线圈时,由于磁场对通电线圈有安培力作用,所以线圈带动指针和铝框一起转动。铝框在磁场中转动时产生感应电流,磁场对感应电流的作用力阻碍铝框的转动,于是指针随着铝框很快就稳定地指在读数位置上,达到能够迅速读出数据的功能。

## 教学片段

### 演示电磁阻尼现象

实验装置:如图 4-19 甲所示。阻尼摆是可以在两磁极间摆动的铝片(或铜片)。

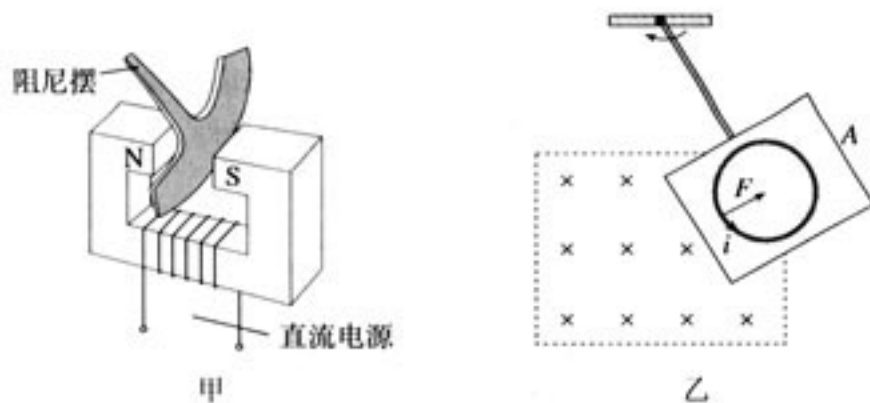


图 4-19

演示:电磁铁线圈中没有通电时,铝片可以摆动较长时间才停下来。而电磁铁线圈中通电时,铝片很快就会停下来。

分析:按铝片的运动分两个过程分析感应电流的产生。一个过程是铝片进入磁场;另一个过程是铝片离开磁场。

这部分教学一定要结合楞次定律,不仅要能从感应电流(涡流)产生的原因上分析,还应该从能量转化的角度来分析每个过程。在图 4-19 乙的截面示意图中,铝片上取一个闭合回路,在铝片进入磁场的过程中,闭合回路的磁通量增加,根据楞次定律,感应电流的磁场与原磁场的方向相反,感应电流的方向如图 4-19 乙箭头所示。感应电流使导体受到安培力的作用,方向与铝片的运动方向相反,它将阻碍铝片的运动。铝片要克服安培力做功,铝片的机械能转化为铝片内的电能。反过来,在铝片离开磁场的过程中,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,感应电流的方向与铝片进入磁场的方向不同,感应电流使导体受到的安培力的方向也随之改变,它也将阻碍铝片运动。铝片要克服安培力做功,铝片的机械能也会转化为铝片内的电能。因此铝片在进、出磁场的过程中机械能很快减少,因此铝片很快也就停下来了。

注意:电磁铁线圈中通电时,不是通交变电流,而是直流,这与涡旋电场产生涡流不同。电学测量仪表中的磁场也是恒定磁场,铝框在磁场中转动时产生感应电流。





教学中还可以将铝片换成玻璃片或其他非金属片，重做上述实验，让学生比较实验的不同点和相同点，说明为什么会出现不同的实验现象。

进行“电磁驱动”的教学时，首先要做好演示实验，在此基础上，分析线框中产生的感应电流使线框受到安培力的作用，安培力使导体运动起来。同样可以从能量的角度来分析电磁驱动现象。教学中还可以将铝框换成其他非金属框，重做上述实验，让学生比较实验的不同点和相同点，说明为什么会出现不同的实验现象。

另外，“做一做”栏目中的内容，实际上是提供了一种不用专门仪器，就可检测微安表的内部是否断路的简易实验方法。通过比较微安表接线柱连线与不连线时指针相对表盘的摆动情况，即能判断微安表的内部是否存在断路故障。我们不妨从此入手，设置问题，引入电磁阻尼的概念。

### 3. 问题与练习

#### 内容分析

本节习题的安排注重科学知识与实际的联系，突出电磁阻尼，加强学生分析能力的训练与提高。

第1、2、3和4题均是产生涡流的例子，都涉及将机械能转化为其他形式能的问题。其中，第2题可细致分析其受力以及运动情况，是电磁感应的条件、楞次定律、安培力、作用力与反作用力的一个综合性问题。

第5题是电磁驱动的一个实例分析，同时也复习了以往学过的电磁感应规律的知识。

#### 解答与说明

1. 答：当铜盘在磁极间运动时，由于发生电磁感应现象，在铜盘中产生感应电流，使铜盘受到安培力作用，而安培力的方向阻碍导体的运动，所以铜盘很快就停了下来。

2. 答：当条形磁铁的N极靠近线圈时，线圈中向下的磁通量增加，根据楞次定律可得，线圈中感应电流的磁场应该向上，再根据右手螺旋定则，判断出线圈中的感应电流方向为逆时针方向（自上而下看）。感应电流的磁场对条形磁铁N极的作用力向上，阻碍条形磁铁向下运动。

当条形磁铁的N极远离线圈时，线圈中向下的磁通量减小，根据楞次定律可得，线圈中感应电流的磁场应该向下，再根据右手螺旋定则，判断出线圈中的感应电流方向为顺时针方向（自上而下看）。感应电流的磁场对条形磁铁N极的作用力向下，阻碍条形磁铁向上运动。因此，无论条形磁铁怎样运动，都将受到线圈中感应电流磁场的阻碍作用，所以条形磁铁较快地停了下来。在此过程中，弹簧和磁铁的机械能均将转化为线圈中的电能。

说明：做这个实验时，为了现象明显，闭合线圈应当使用较宽、较厚，且内径较小的铜环或铝环，这样可以产生较强的感应电流，并且对磁铁产生较大的作用力。

3. 答：在磁性很强的小圆片下落的过程中，没有缺口的铝管中的磁通量发生变化（小圆片上方铝管中的磁通量减小，下方的铝管中的磁通量增大），所以铝管中将产生感应电流，感应电流的磁场将对下落的小圆片产生阻力作用，小圆片在铝管中缓慢下落；如果小圆片在有缺口的铝管中下落，尽管铝管中也会产生感应电流，感应电流的磁场将对下落的小圆片也产生阻力作用，但这时的阻力非常小，所以小圆片在铝管中下落得比较快。

4. 答：这些微弱的感应电流，将使卫星受到地磁场的安培力作用。因为克服安培力作用，卫星的一部分动能转化为电能，这样卫星机械能减小，运动轨道距离地面高度会逐渐降低。

5. 答：当条形磁铁向右移动时，金属圆环中的磁通量减小，圆环中将产生感应电流，金



属圆环将受到条形磁铁向右的作用力。这个力实际上就是条形磁铁的磁场对感应电流的安培力。这个安培力将驱使金属圆环向右运动。

### 三、教学设计案例

#### 自 感

##### 1. 教学目标

(1) 在掌握电磁感应现象的基础上,通过实验,进一步了解自感现象。

(2) 了解自感电动势的计算式  $E_{\text{自}} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ 。知道自感系数及影响自感系数大小的因素。

(3) 通过演示实验及对实验的分析,培养学生观察和推理能力,从而理解自感电动势在电流变化时所起的作用。

(4) 认识自感是电磁感应现象的特例,感悟特殊现象中有它的普遍规律,而普遍规律中包含了特殊现象的辩证唯物主义观点。

重点、难点分析:重点是使学生在了解自感现象与电磁感应现象统一性的基础上,把握自感现象的特点。断电自感现象中,灯泡突然闪亮一下学生很难理解,这是教学中的难点。

教具:通电自感现象的演示装置,断电自感现象的演示装置,电源,开关及导线若干。自制多媒体课件,关于日光灯工作原理的示教板。

##### 2. 教学过程

###### (1) 复习提问、引入新课

提问:产生感应电流的条件是什么?

如图 4-20 所示,有两个线圈  $L_1$ 、 $L_2$  共轴放置,当滑动变阻器的滑片向左滑动时,试推理判定通过电阻  $R_1$  感应电流的方向。

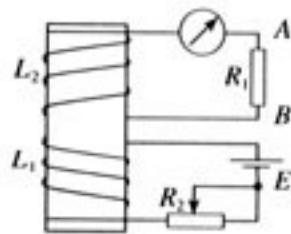


图 4-20

###### (2) 教学过程设计

提出问题:因为穿过线圈  $L_2$  向上的磁通量增加了,所以通过电阻  $R_1$  闭合线圈中产生了  $B \rightarrow R_1 \rightarrow A$  方向的感应电流。那么,对于线圈  $L_1$  来说,它通过电池、滑动变阻器也组成了闭合电路,而且穿过这个闭合电路的磁通量也发生了变化,会不会在这个闭合电路中也发生电磁感应现象呢?是否有感应电动势呢?

演示:演示两个有关自感现象的演示实验。要求学生注意演示过程和瞬间发生的现象。

###### ① 通电时的自感现象

操作过程:

- 展示电路结构(图 4-21)。
- 接通电路,缓慢调整滑动变阻器的阻值,使两个灯泡  $A_1$ 、 $A_2$  发光亮度相同。
- 断开电路后,再接通电路。这里应重复几次。

叙述现象:让学生能看到每次接通时,灯  $A_1$  总比灯  $A_2$  滞后一

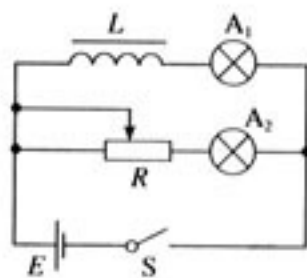


图 4-21

段时间才亮。

提出问题：两个灯泡稳定发光时亮度是一样的。为什么电路接通时， $A_2$  立即点亮而  $A_1$  要滞后一段时间？

在学生回答的基础上分析得出：接通电路时，通过线圈  $L$  的电流增大，该电流产生的磁场增强，穿过线圈的磁通量要增加，根据法拉第电磁感应定律可知这个线圈中要产生感应电动势。用楞次定律还可以判定出感应电动势的方向与磁通量增加的方向相反。故通过灯  $A_1$  的电流不是立即变强而是逐渐增强，使  $A_1$  滞后一段时间点亮。

### ② 断电时的自感现象

操作过程：

- 连接好电路，展示电器结构（图 4-22）。
- 接通电路调整滑动变阻器的滑动头，使灯 A 发出微弱的光。
- 断开开关，应看到灯 A 闪亮一下。这里应重复几次。

叙述现象并简单推理：学生应看到电路断开时灯 A 闪亮一下，说明通过灯泡有一个强电流。

提出问题：为什么在断开电路时，通过灯泡 A 的电流突然增大？

教师讲解分析：通过投影机用投影片讲述断电自感过程。

如图 4-23a 电路接通时因为线圈  $L$  的电阻很小，所以两支路的电流强弱是不同的。

当电路断开时，通过线圈的电流要减小，由法拉第电磁感应定律和楞次定律可知，线圈中要产生一个感应电动势，且感应电动势的方向与减小的电流方向相同。由于电源支路已处于断路状态，所以这个逐渐减小的强电流要反向通过灯 A（此时展示投影片图 4-23b），故灯泡要闪亮一下。

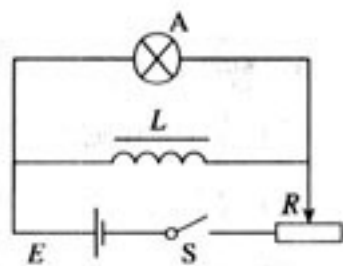


图 4-22

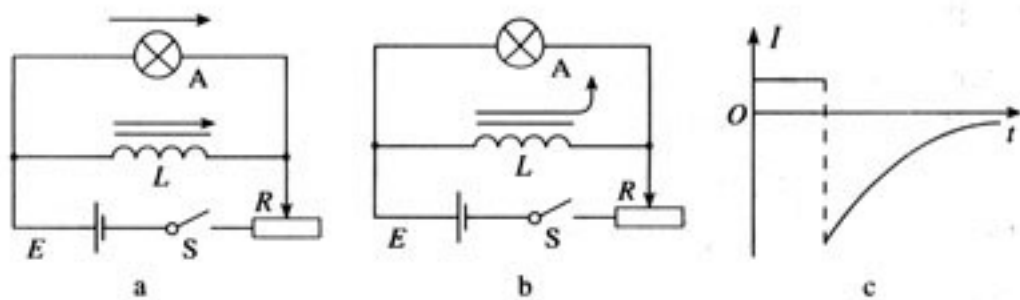


图 4-23

启发学生画出断电时通过灯 A 电流随时间变化的函数图线（展示投影片图 4-23c）。

### ③ 通过总结实验得出结论

当导体中的电流变化时，导体本身就产生感应电动势。这个电动势阻碍导体中原来电流的变化，这种由于导体本身的电流发生变化而产生的电磁感应现象叫自感现象，自感现象中产生的感应电动势叫自感电动势。

### ④ 推理得到影响自感电动势的因素

提出问题：自感电动势是感应电动势，它是由自身电流变化产生的，它和电流变化有什么关系呢？

师生共同分析研究：

- 由法拉第电磁感应定律可知感应电动势  $E = n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ 。因为在线圈中的磁通量  $\Phi$  与线圈中

的磁感应强度  $B$  成正比。又因为在电流磁场中任意一点的磁感应强度都与电流成正比。所以穿过线圈的磁通量  $\Phi$  与通电线圈中的电流  $I$  成正比，磁通量的变化  $\Delta\Phi$  与电流的变化  $\Delta I$  成正比，即： $\Delta\Phi \propto \Delta I$ 。

- 引入比例系数  $L$  得出结果： $E_n = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ 。即自感电动势跟电流的变化率成正比。
- 根据楞次定律和两个演示实验，可以总结出：自感电动势的方向总是阻碍电流的变化。
- 讲解说明：自感电动势  $E_n$  跟电流变化率  $\frac{\Delta I}{\Delta t}$  的比值  $L$  叫“自感系数”，简称“自感”或称“电感”。

自感系数的大小由线圈本身特点（如：匝数、长度、截面积、是否有铁心等）决定。自感系数在国际单位制中的单位是亨利，简称亨，符号是 H。 $1 \text{ H} = 1 \frac{\text{V}\cdot\text{s}}{\text{A}}$ ， $1 \text{ H} = 1 \times 10^3 \text{ mH} = 1 \times 10^6 \mu\text{H}$ 。

### ⑤ 自感现象的实际意义

• 说明自感现象广泛存在。凡是有导线、线圈的设备中，只要有电流变化都有自感现象存在，因此要充分考虑自感和利用自感。

- 自感现象应用一例——日光灯。

结合日光灯工作原理的示教板（图 4-24），说明日光灯电路结构。接通电路让学生观察日光灯的启辉过程。

提出下列问题，安排学生阅读课本并整理笔记。

- 灯管、启动器、镇流器的构造及它们的连接特点。
- 启动器中双金属片工作原理。
- 激发灯管中的水银蒸气导电的高电压是怎么获得的？
- 日光灯的“白光”是哪里发出的？
- 日光灯正常发光时，镇流器起什么作用。

### (3) 课堂小结

① 自感现象是电磁感应现象。自感电动势的大小和方向仍可以用法拉第电磁感应定律和楞次定律确定。

② 自感电动势的大小，不是跟电流  $I$  成正比，也不是跟电流的变化  $\Delta I$  成正比，而是跟电流的变化率成正比。

### 3. 教学设计说明

(1) 充分利用已知的知识来研究新问题，是科学研究问题的重要方法。这节课恰是研究电磁感应现象的特例。课堂设计中要突出从已学过的知识发现、总结新知识的研究过程。

(2) 对中学生观察能力的培养，是物理教学的重要任务之一。中学生在观察能力方面普遍显得薄弱。这节课的两个演示实验恰恰是培养学生观察能力的好素材，因此演示时教师不要加任何的实验导语，创造条件给学生以锻炼的机会。

(3) 本课时内容较多，若课时紧张可安排成两课时，并加一些例题。

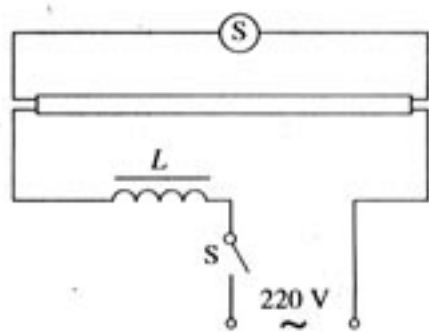


图 4-24





## 四、教学资源库

### (一) 概念、规律和背景资料

#### 1. 奥斯特

##### (1) 生平简介

奥斯特(Hans Christian Oersted, 1777—1851), 丹麦物理学家、化学家。1777年8月14日生于丹麦的路克宾。1794年他进入哥本哈根大学学习医学和自然科学, 1799年获得博士学位。1801~1803年他旅游德国、法国等地, 于1804年回国。1806年被聘为哥本哈根大学物理、化学教授, 研究电流和声等课题。1824年倡议成立丹麦自然科学促进会, 1829年出任哥本哈根理工学院院长, 直到1851年3月9日在哥本哈根逝世。终年74岁。

##### (2) 科学成就

###### ①1820年发现电流的磁效应

自从库仑提出电和磁有本质上的区别以来, 很少有人再去考虑它们之间的联系。如安培和毕奥等物理学家就认为电和磁不会有任何联系。可是, 奥斯特一直相信电、磁、光、热等现象相互存在内在的联系, 尤其是富兰克林曾经发现莱顿瓶放电, 能使钢针磁化, 更坚定了他的信念。当时, 有些人做过实验, 寻求电和磁的联系, 结果都失败了。奥斯特分析这些实验后认为, 在电流方向上去找磁效应, 看来是不可能的, 那么磁效应的作用会不会是横向的呢?

在1820年4月, 有一次晚上讲座, 奥斯特演示了电流磁效应的实验。当伽伐尼电池与铂丝相连时, 靠近铂丝的小磁针摆动了。这一不显眼的现象没有引起听众的注意, 而奥斯特非常兴奋, 他接连三个月深入地研究, 在1820年7月21日, 他宣布了实验情况。

奥斯特将导线的一端和伽伐尼电池正极连接, 导线沿南北方向平行地放在小磁针的上方, 当导线另一端连到负极时, 磁针立即指向东西方向。把玻璃板、木片、石块等非磁性物体插在导线和磁针之间, 甚至把小磁针浸在盛水的铜盒子里, 磁针照样偏转。

奥斯特认为, 在通电导线的周围, 发生一种“电流冲击”。这种冲击只能作用在磁性粒子上, 对非磁性物体是可以穿过的。磁性物质或磁性粒子受到这些冲击时, 阻碍它穿过, 于是就被带动, 发生了偏转。导线放在磁针的下面, 小磁针就向相反方向偏转; 如果导线水平地沿东西方向放置, 这时不论将导线放在磁针的上面还是下面, 磁针始终保持静止。

他认为电流冲击是沿着以导线为轴线的螺旋线方向传播, 螺旋方向与轴线保持垂直。这就是形象的横向效应的描述。

奥斯特对磁效应的解释, 虽然不完全正确, 但并不影响这一实验的重大意义, 它证明了电和磁能相互转化, 这为电磁学的发展打下基础。

###### ②其他方面的成就

奥斯特曾经对化学亲和力等问题做过研究。1822年他精密地测定了水的压缩系数值, 论证了水的可压缩性。1823年他还对温差电偶做过成功的研究, 对库仑扭秤也做过一些重要的改进。

奥斯特在1825年最早提炼出铝, 但纯度不高, 以致这项成就在冶金史上归属于德国化学



家 F. 维勒 (1827)。他最后一项研究是 19 世纪 40 年代末期对抗磁体的研究, 试图用反极性的反感应效应来解释物质的抗磁性。同一时期, 法拉第在这方面的成就超过了奥斯特及其法国的同辈。法拉第证明不存在所谓的反磁极, 并用磁导率和磁力线的概念统一解释了磁性和抗磁性。不过, 奥斯特研究抗磁体的方法仍具有很深的影响。

### ③ 出版了《奥斯特科学论文》集

他的重要论文在 1920 年整理出版, 书名是《奥斯特科学论文》。

### (3) 趣闻轶事

#### ① 磁针的跳动, 使他激动得摔了一跤

奥斯特深受康德哲学思想的影响, 一直坚信电和磁之间一定有某种关系, 电一定可以转化为磁。当务之急是怎样找到实现这种转化的条件。奥斯特仔细地审查了库仑的论断, 发现库仑研究的对象全是静电和静磁, 确实不可能转化。他猜测, 非静电、非静磁可能是转化的条件, 应该把注意力集中到电流和磁体有没有相互作用的课题上去。他决心用实验来进行探索。

1819 年上半年到 1820 年下半年, 奥斯特一面担任电、磁学讲座的主讲, 一面继续研究电和磁的关系。1820 年 4 月, 在一次讲演快结束的时候, 奥斯特抱着试试看的心情又做了一次实验。他把一条非常细的铂导线放在一根用玻璃罩罩着的小磁针上方, 接通电源的瞬间, 发现磁针跳动了一下。这一跳, 使有心的奥斯特喜出望外, 竟激动得在讲台上摔了一跤。但是因为偏转角度很小, 而且不很规则, 这一跳并没有引起听众注意。以后, 奥斯特花了三个月, 做了许多次实验, 发现磁针在电流周围都会偏转。在导线的上方和导线的下方, 磁针偏转方向相反。在导体和磁针之间放置非磁性物质, 比如木头、玻璃、水、松香等, 不会影响磁针的偏转。1820 年 7 月 21 日, 奥斯特写成《论磁针的电流撞击实验》的论文, 正式向学术界宣告发现了电流磁效应。

#### ② 设立奥斯特奖章

奥斯特的功绩受到了学术界的公认, 为了纪念他, 国际上从 1934 年起命名磁场强度的单位为奥斯特, 简称“奥”。1937 年美国物理教师协会还专门设立了奥斯特奖章, 来奖励教学有成绩的优秀物理教师。

## 2. 法拉第

法拉第是杰出的物理学家和化学家。他不仅发现了电磁感应现象、电磁感应定律、电解定律、磁致旋光效应, 还提出了场、力线和电介质的概念, 并首次用“冰桶实验法”证明了电荷守恒定律。通过实验, 他发现了氯气液化的方法, 发现了苯, 发现了同分异构体的事实。他不仅发表了很多有价值的论文, 而且还出版了三卷《电学的实验研究》、八卷《法拉第日记》和《化学操作》等畅销书。法拉第是科学史上罕见的高产科学家, 仅受过两年正规学校教育的法拉第, 为什么会取得如此辉煌的成就呢?

### (1) 感兴趣的目标

1791 年 9 月, 法拉第出生在英国伦敦市郊, 全家 6 口人就靠父亲打铁为生。由于家境贫寒, 他 7 岁上学, 9 岁退学, 13 岁到里波书店当送报童, 1 年后因勤快、爱动脑筋而被老板里波先生收为书籍装订学徒工, 此后他便住在书店上面的一间小阁楼里。对法拉第来说, 与家里仅有一本《圣经》相比, 这里简直就是书的世界。看到不会念的字就虚心请教, 读到理解不了的内容就反复琢磨——他利用工余时间阅读了《大英百科全书》《化学漫谈》等大量科学文化书籍, 对自然科学产生了浓厚兴趣。在听过大化学家戴维教授的 4 次学术演讲后, 他就把从事

自然科学研究作为自己的理想。通过不懈的争取，他终于和赫赫有名的戴维教授有了一次见面的机会。他告诉戴维先生：“我对装订书籍不感兴趣，我希望到皇家学院工作，做什么都可以，我不在乎钱多少，我对买卖不感兴趣，那只是为了赚钱，自私自利。可是科学工作是为了追求真理，哲学家都具有高尚的道德感情。”在戴维的帮助下，1813年3月，法拉第终于如愿以偿地走进皇家学院实验室，成为戴维的助手，周薪25先令，外加实验室楼上的两间住房。经过近10年的奋斗，他正式进入英国皇家学院。

在随戴维夫妇到欧洲大陆作为期两年的科学研究旅行时，他既当实验助手，又兼文书和仆人。1815年回到英国皇家学院实验室后，他既是实验助手、助教，又是技工、勤杂工。凭借出色的实验技能，他多次为戴维和皇家学院其他科学家做化学分析。通过做化学实验，他在1816~1821年间共发表论文30余篇。

1820年，丹麦物理学家奥斯特在一次演示实验中，偶然发现了电流的磁效应，彻底否定了长期在物理学领域占统治地位的电与磁彼此无关的观点，在科学界引起强烈反响。经过许多物理学家、化学家的不懈努力，又相继得出毕—萨定律、安培定律等一批成果。1821年，英国著名杂志《哲学年鉴》的主编邀请戴维写一篇文章，综合评述自奥斯特发现电流的磁效应以来电磁学的发展概况，戴维把这个任务交给了法拉第。他用几个月时间认真研读搜集到的电、磁文献资料，并重复有关的一系列实验，终于写出了综合评述文章《电磁研究的历史概况》。一直从事化学研究的法拉第，就这样找到了自己最感兴趣的领域——电磁学。

## (2) 积极的心态

法拉第不仅利用工余时间刻苦学习，还从自己微薄的收入中拿出钱来购买化学药品，把他居住的小阁楼建成一个化学实验室，边看书，边做实验。这种学习方式，不仅加深了他对理论的理解，而且还提高了实验技能。

对于一个连小学都没毕业的穷孩子来说，从事自然科学研究工作简直就是异想天开，但法拉第始终没有放弃。他首先鼓足勇气给皇家学会会长班克斯先生写了一封信，表达了从事科学工作的强烈愿望，恳求让他到英国皇家学院工作。在苦等1周不见回音的情况下，他跑到会长家门口询问，得到的回答却是，“会长说，你的信不必回”。虽然备受打击，但他并不灰心。不久，他又给大化学家戴维教授写了一封更恳切的信，随信还寄去了他整理、装订的戴维4次演讲记录，共386页。不仅补上了许多未讲到的内容，还配上漂亮的插图——认真、细致、踏实的作风，使戴维深受感动。当晚他就给法拉第写了回信：“承蒙寄来大作，读后不胜愉快。它展示了你的热情、记忆力和专心致志的精神。最近我不得不离开伦敦，到一月底才能回来。到那时我将在你方便的时候见你。我很乐意为你效劳。希望这是我力所能及的事。先生，我是你顺从、谦恭的仆人。”自助者，天助也。就这样，法拉第不仅得以与戴维见面，而且不久就在他的举荐下，进入皇家学院实验室，成为其实验助手。

1821年4月，因发现钡和铯元素而闻名的英国物理学家沃拉斯顿，在皇家学院实验室当着戴维的面，把磁棒靠近载流导线，期望能观察到导线自转现象，结果失败了。两位大师经过认真讨论，还是无法确定失败原因。

积极的心态再次成就了法拉第，经过反复实验和思考，他认为，既然磁针试图绕着导线转，那么，根据作用与反作用原理，导线也必然试图绕着磁针转，即通电导线应绕着磁铁的磁极公转，而不是像沃拉斯顿所设想的那样自转。经过不断改进，他设计了如下实验：

在玻璃杯底部装一电极，通过导线与电源一极相连。直立的磁铁棒下端固定在玻璃杯底部的中心，往杯内加入水银。在玻璃杯的正上方吊一可动导线，导线的上端与电源的另一极相



接，下端浸入玻璃杯中的水银。由于水银密度大，导线会倾斜地与水银相连。这样，可动导线、玻璃杯中的水银、玻璃杯底部的电极和电源就构成了一个回路（图 4-25）。

当回路中有电流通过时，可动导线就绕着固定在玻璃杯底部的磁铁棒的上端不停地转动。这就是著名的“电磁转动实验”，他据此写出论文《论某些新的电磁运动兼论磁的理论》，向世界报告了他的重大发现，引起科学界的轰动。

### （3）独立的思考

法拉第从小就有极强的好奇心，对书本里的结论和权威的话，一直不轻信，不盲从，在自学《化学漫谈》时，他经常用实验验证其结论。通过分析和思考电流的磁效应实验，他成功进行了电磁转动实验，而且还利用逆向思维法提出如下疑问：既然电能转成磁，那么磁能否转成电？法拉第提出这样的问题是源于：“我因为对当时产生电的方法感到不满意，因此急于想发现电磁及感应电流的关系，觉得电学在这条路上一定可以有充分的发展。”从此，转磁为电成了他新的奋斗目标。

虽然电磁转动实验得到了各国科学家的高度评价，但这并没有给法拉第带来好运。当得知小实验员法拉第在自己失败的领域取得成功时，因虚荣心严重受挫而心生嫉妒的戴维，指责法拉第剽窃了沃拉斯顿的研究成果，虽然他知道法拉第的实验在方法、仪器、理论解释等方面都与沃拉斯顿的完全不同。从此，法拉第不得不把主要精力放到自己既无兴趣又无特长的合金钢、光学玻璃制造等技术问题上，但他一直没有放弃转磁为电的实验研究。随着沃拉斯顿和戴维的相继去世，1829年，法拉第终于重新回到他感兴趣的电磁学研究领域。当然，研究转磁为电的并不只是法拉第一个人。早在1821年，著名物理学家安培就开始探索转磁为电的途径，由于实验在稳恒电流下进行，安培并没有观察到感应电流。1823年，瑞士物理学家科拉顿试图通过移动螺线管内的磁铁而在导线中得到电流。为避免移动磁铁对电流表指针的影响，科拉顿把电流表放在一个房间里，通过长导线与放在另一房间的螺线管相连，构成一个闭合回路。科拉顿反复从螺线管中插入和拔出磁铁棒，然后马上跑到另一房间去观察电流表。毫无疑问，科拉顿每次都看到了零结果，因为产生的感应电流是暂时的。在探索转磁为电的途径上，法拉第最初也没有发现感应电流。1831年，毫不气馁的法拉第开始反思实验的各个环节，并逐个检查实验仪器。当检查到电流表时，他突然想到，每次做实验都是先合开关、后看电流表，问题会不会就出在这里？在合上开关的瞬间，他果然看到电流表指针摆动了一下。电磁感应现象就这样被发现了，而法拉第已为此奋斗了10年。

由于电磁学中的库仑定律、毕—萨定律与牛顿的万有引力定律表达式相似，受牛顿“引力作用是即时作用，不需媒介传递”的超距说影响，富兰克林、库仑、安培等物理学家都用超距作用观点来研究和解释电磁现象。法拉第一开始也是超距说的支持者，但当他在电磁转动实验中发现电磁力不是中心力后，就对超距说产生了怀疑，认为电磁力是不能凭空传递的，而是需要媒介传递的近距离作用力。凭着对电磁实验的深入分析和惊人的形象思维能力，他提出了场和力线的概念以解释近距离作用。他的近距离作用观点刚一提出，就遭到科学界的反对。英国皇家天文官乔治·埃里爵士曾说：“以超距作用为基础所做的计算与观察相互吻合，凡是了解这种情况的人很难想象，他会在这种简单而又精确的超距作用和如此模糊而又捉摸不定的力线之间有片刻的迟疑。”然而，真理不会因遭到反对而变成谬误。场和力线的思想通过麦克斯韦的发展，到19世纪末已为物理学界普遍接受。场和力线的概念是继牛顿之后物理基本概念最重要的发



图 4-25





展，它既是电磁理论的基础，又描绘了一幅与牛顿机械自然观截然不同的自然图景。

在向目标前进的过程中，我们会遇到各种困难。有时还会走入死胡同，要战胜困难取得成功，就必须独立思考。关于独立思考，法拉第曾在一次演讲中精辟地指出：“自然哲学家应当是这样一种人，他愿意倾听每一种意见，却下定决心要自己做出判断。他应当不被表面现象所迷惑，不对某一种假设有偏爱，不属于任何学派。在学术上不盲从大师，他应该重事不重人，真理应当是他的首要目标。如果有了这些品质，再加上勤勉，那么他确实可以有希望走进自然科学的圣殿。”

#### (4) 专注的奋斗

法拉第去世于1867年，在76年的人生岁月里，他做了50多年实验。1829年，当他又回到心爱的电磁学研究领域时，因高超的化学实验技能而成为实业界争夺的对象，很多企业以10倍于英国皇家学院的重金聘请他做技术顾问。法拉第在金钱和电磁学研究两者不可兼得的情况下，毫不犹豫地选择了后者。为集中精力，他于1831年给皇家学会秘书写信，希望摆脱商业性技术工作。1834年，他谢绝所有的宴会邀请，1835年拒绝次要的分析工作，1837年取消早上的演讲，1838年决定每周内3天不接待任何客人，1857年谢绝出任皇家学会会长。他利用一切可以利用的时间进行实验研究，每一天都是在皇家学院一栋楼内的顶层住宅和底层实验室内度过的。

专注的奋斗，换来了丰硕的成果。他于1832年提出光的电磁说，指出可能存在电磁波；1833年证明不同形式的电在本质上是相同的；1834年在《关于电的实验研究》一文中，不仅使用了阳极、电解质等一系列新术语，还提出了两条电解定律；1835年独立发现自感现象；1836年发现静电屏蔽现象；1837、1844年分别出版了《电学的实验研究》第一、第二卷；1843年首创“冰桶实验法”证明电荷守恒定律；1845年发现磁致旋光效应；1846年论述了能的统一性和多样性。指出光电磁理论的发展方向；1851年在《论磁力线》一文中，给出了电磁感应定律的完整表述；1855年出版了三卷《电学的实验研究》和八卷《法拉第日记》。其中，3000多节内容的《电学的实验研究》，他竟持续写了24年。

#### (5) 一流的氛围

皇家学院人才荟萃、大师云集。在这样的科研氛围里，法拉第能够及时了解科学发展的最新动态，使自己始终奋战在科学的最前沿。

而熟悉德国哲学家康德关于力的统一和转化学说的戴维，对法拉第的思想也有着深刻影响。法拉第坚信大自然是和谐统一的，他曾明确指出：“我早已持有一种见解，它几乎达到深信不疑的程度，而且我想这也是其他许多自然科学的追求者所持有的见解，即物质之力所表现出来的各种形式具有共同的起源；换言之，它们彼此是如此之互相依赖，以至于它们能够相互转化并具有力的当量。”正是在这种思想的指导下，他提出了转磁为电的设想，用实验证实各种电在本质上是相同的，发现磁场对偏振光产生影响的磁致旋光效应。论述了能的多样性和统一性。他提出的强磁场可能改变光源波长的设想，虽没有在验证实验中取得成功，但却被30多年后的塞曼效应实验完全证实。他在1849年的实验日记中写道：“重力，这种力与电力、磁力和其他力的实验关系一定能够找出来，从而用通过相互作用和等价效应来确定它。”虽然他的种种努力并未取得成功，但其光辉思想却在一个世纪后被爱因斯坦提出的统一场论所继承。如今，建立统一场理论仍是许多物理学家的奋斗目标。

#### (6) 高尚的品格

关于品格与成功的关系，法拉第精辟地分析道：“许多人之失败，是因为他们只求获得名



誉，而不重视探求真实之知识。我可断言，我知道有许多人可以成为优良而成功之科学研究者，可以获得甚高之名望，但他们一心重视名望和报酬——世界赞美之报酬。在这种情况下，他们之心灵即有一嫉妒与悔恨之阴影，我不能想象在如此情绪下，有人尚可在科学上有所发现。”法拉第的成功正是源于这样的品格——为进皇家学院，无论干什么工作，无论给多少报酬，他都毫无怨言；为集中精力搞电磁学实验研究，他辞去了回报丰厚的商业性技术兼职，拒绝接受官方授予的贵族头衔，拒绝出任皇家学会会长。

（摘自科学出版社，王廷志编《现代物理知识》18卷5期（总107期），有改动）

### 3. 法拉第的未果实验

(1) 1824年12月28日的实验：试图通过磁体对电流的作用来发现磁生电。

实验1：期望一个强磁极接近导线时通过导线的电流会受到影响，以便显示在导线其他部分中的某些反作用效应。（实验结果：未觉察到任何这类效应）

实验2：把长短不同、粗细不同的铜线（或银线）制作成螺线管，并与电流计和电池相联接构成一个回路，把磁极放入螺线管。（实验结果：未发现电流表指针的偏转）

(2) 1825年1月28日的实验：试图用载流导线进行感应的实验。

实验1：他用两根长约4m的导线平行放置，相隔约两张纸厚的距离，先把其中的一根导线接到电池的两端通电，再把另一根与电流计相连。（实验结果：结果没有发现任何效应）

实验2：把一根螺旋线与电池两极连接，直导线穿过它，后者两端连接电流计。（实验结果：未发现电流计指针的偏转）

(3) 1828年4月22日的实验：为提高测试的灵敏度，法拉第所做的巧妙设计。

实验：如图4-26所示，法拉第用一根线把一个铜线环固定在导线上并把它悬挂起来，像一个扭秤一样，把强磁棒一端磁极置入环内。（实验结果：没有发现任何效应）

说明：在法拉第进行“磁生电”的初始阶段，在很长的一段时间内所做的实验基本可以分为两类：一是将强磁体放置在导线或线圈附近，希望在导线或线圈中出现稳定的电流；二是将两根导线并列放置，将其中一根导线通以电流，希望在另一根中感应出电流。为提高测试的灵敏度，法拉第做了许多巧妙设计，但这些实验都没有取得期望的结果。

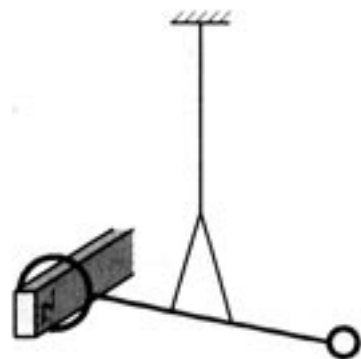


图 4-26

### 4. 法拉第同时代科学家的研究

1822年，安培（A. M. Ampere, 1775—1836）和德莱里弗（A. delaRive, 1801—1873）做了一个电流的感应效应的实验。他们将强磁体移向铜环，当线圈与电池接通时，发现铜环发生了偏转。这本来是由于铜环中产生了感应电流的缘故。而当时他们两人却局限在安培的分子电流框架内，认为当线圈与电池接通时，铜环暂时被磁化，在铜环中有分子电流产生，铜环的转动是由于强磁极对分子电流作用的结果。

1829年，美国物理学家亨利（Josoph Honry, 1799—1878）在用实验考查绕有不同长度导线的电磁铁所产生的磁力大小时，意外地发现，当断开与通电线圈相连的开关时，会产生强烈的电火花。当时亨利对此无法解释，也未做进一步的研究，从而与真理擦肩而过，以至于当亨利知道法拉第的发现后懊悔不已。

1832年，俄国物理学家楞次（H. F. E. Lenz, 1804—1865）获悉法拉第发现电磁感应现象后做了许多电磁实验。在他发表的题为《论电磁感应引起的电流方向的决定》一文中，提出了

确定感应电流方向的一般原则。他提出，如果一个金属导体在一电流或一磁体附近运动，其所产生的感应电流的方向是这样决定的：感应电流在磁场中受到的作用力与导线的运动方向相反。

1845年，德国物理学家纽曼（F. E. Neumann, 1798—1895）将安培分子电流假说推广到宏观电流的情况，试图将超距理论电动力学与法拉第的电磁学统一起来，并首先从理论上导出了电磁感应定律的定量表达式，这是从一个错误的出发点导出的一个正确的结论。

### 5. 动生电动势和感生电动势

在电磁感应现象中，由于引起磁通量变化的原因不同，感应电动势产生的机理也不同，一般分为两种：一种是磁场不变，导体运动引起磁通量变化而产生感应电动势，这种电动势叫动生电动势。另一种是导体不动，由于磁场变化引起磁通量变化而产生感应电动势，这种电动势叫感生电动势。

#### (1) 动生电动势

导体在磁场中做切割磁感线运动时，产生动生电动势，它是由于导体中自由电子受洛伦兹力作用而引起的。

如图4-27所示，一条直导线CD在匀强磁场B中以速度v向右运动，并且导线CD与B、v的方向互相垂直。由于导体中的自由电子随导体一起以速度v运动，因此每个电子受到的洛伦兹力为

$$F = evB$$

F的方向竖直向下。在力F的作用下，自由电子沿导体向下运动，使导体下端出现过剩的负电荷，导体上端出现过剩的正电荷。结果使导体上端D的电势高于下端C的电势，出现由D指向C的静电场。此电场对电子的作用力F'是向上的，与洛伦兹力的方向相反。随着导体两端正、负电荷的积累，场强不断增强，当作用在自由电子上的静电力F'与洛伦兹力F互相平衡时，DC两端便产生了一个稳定的电势差。如果用另外的导线把CD两端连接起来，由于D端电势比C端高，自由电子在静电力的作用下将在导线框中沿顺时针方向流动，形成逆时针方向的感应电流。电荷的流动使CD两端积累的电荷减少，洛伦兹力又不断地使电子从D端运动到C端，从而在CD两端维持一个稳定的电动势。

可见，运动的导体CD就是一个电源，D端为正极，C端为负极，自由电子受洛伦兹力的作用，从D端被搬运到C端；也可以看做是正电荷受洛伦兹力的作用从C端搬运到D端。这里，洛伦兹力就相当于电源中的非静电力。根据电动势的定义，电动势等于单位正电荷从负极通过电源内部移动到正极非静电力所做的功。作用在单位正电荷上的洛伦兹力

$$F = \frac{F_{\text{非}}}{e} = vB$$

于是，动生电动势就是

$$E = Fl = Blv$$

上式与法拉第电磁感应定律得到的结果一致。

洛伦兹力总与电荷的运动方向垂直。因此，洛伦兹力对电荷不做功。但是动生电动势又等于洛伦兹力搬运单位正电荷所做的功，两者是否矛盾？其实并不矛盾。运动导体中的自由电子，不仅随导体以速度v运动，而且还沿导体以速度u做定向运动，正是这个定向运动才产生

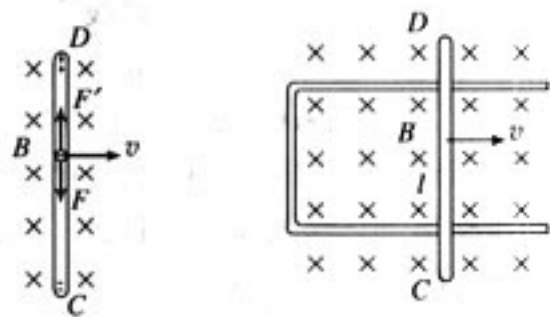


图4-27



感应电流(图 4-28)。因此,导体中电子的合速度是  $\vec{\omega} = \vec{u} + \vec{v}$ , 电子所受的总的洛伦兹力为

$$F_{\omega} = e\omega B$$

$F_{\omega}$  与合速度  $\omega$  垂直, 它对电子不做功。 $F_{\omega}$  的一个分量是

$$F_1 = evB$$

这个分力对电子做功, 产生动生电动势。 $F_{\omega}$  的另一个分量是

$$F_2 = euB$$

$F_2$  的方向与  $v$  的方向相反, 是阻碍导体运动的, 做负功。可以证明两个分力  $F_1$  和  $F_2$  所做功的代数和为 0。结果仍然是洛伦兹力并不提供能量, 而只是起传递能量的作用, 即外力克服洛伦兹力的一个分量  $F_2$  所做的功, 通过另一个分量  $F_1$  转化为感应电流的能量。

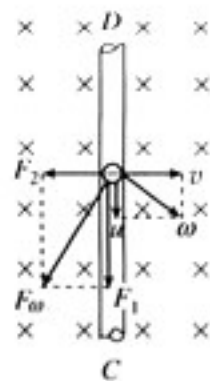


图 4-28

### (2) 感生电动势

当导体回路不动, 而磁场变化时, 导体中将产生感生电动势。由于导体不动, 所以作用在导体内自由电子上的力不可能是洛伦兹力。麦克斯韦指出, 变化的磁场在周围空间要激发涡旋电场。涡旋电场对电荷也产生力的作用, 正是这种涡旋电场使导体中产生感生电动势。即涡旋电场的电场力作为一种非静电力在导体内产生感生电动势。如果以  $E_{\text{感}}$  表示涡旋电场强度, 那么, 沿任一闭合回路  $L$  的感生电动势

$$E = \oint_L E_{\text{感}} \cdot dl$$

根据法拉第电磁感应定律, 有

$$\oint_L E_{\text{感}} \cdot dl = -\frac{d\Phi}{dt}$$

式中  $\Phi$  是通过以闭合电路  $L$  为边界的任意曲面  $S$  的磁通量, 因而

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

代入上式可得

$$\oint_L E_{\text{感}} \cdot dl = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

当闭合回路  $L$  不变时, 磁通量的变化完全是由磁场的变化而引起的, 上式中对时间的微商和对曲面积分的次序可以交换, 故得

$$\oint_L E_{\text{感}} \cdot dl = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$$

这就是麦克斯韦关于涡旋电场与变化磁场之间关系的表示式。

### (3) 动生电动势和感生电动势的划分

在某些情况下只有相对的意义。例如在教科书图 4.2-2 所示的实验中, 如果在相对于磁棒静止的参考系内观察, 磁棒不动, 空间各点的磁场也没有发生变化, 而线圈在运动, 线圈内的电动势是动生的。但是, 如果在相对于线圈静止的参考系内观察, 则看到由于磁棒运动, 引起空间磁场变化, 因而线圈中的电动势是感生的。在这种情况下, 究竟把电动势看做动生的还是感生的, 决定于观察者所在的参考系。然而, 并不是在任何情况下都能通过参考系的变换把一种电动势归结为另一种电动势的, 教科书图 4.2-5 所示的实验就是一例。





## 6. 楞次定律的表述及其实质

掌握楞次定律，准确判断感应电流的方向，是理解电磁感应定律的重要环节。

### (1) 楞次定律的表述及其特点

楞次定律的表述可归结为：“感应电流的效果总是反抗引起它的原因。”

如果电路中的感应电流是由穿过该回路的磁通量的变化引起的，那么楞次定律可具体表述为：“感应电流在回路中产生的磁通量总是反抗（或阻碍）原磁通量的变化”。我们称这个表述为“通量表述”。这里感应电流的“效果”是在回路中产生了磁通量；而产生感应电流的原因则是“原磁通量的变化”。

如果感应电流是由组成回路的导体做切割磁感应线运动而产生的，那么楞次定律可具体表述为：“运动导体上的感应电流受的磁场力（安培力）总是反抗（或阻碍）导体的运动。”我们不妨称这个表述为“力表述”。这里感应电流的“效果”是受到磁场力；而产生感应电流的“原因”是导体做切割磁感应线的运动。

从楞次定律的上述表述可见，楞次定律并没有直接指出感应电流的方向，它只是概括了确定感应电流方向的原则，给出了确定感应电流的程序。要真正掌握它，必须要求对表述的涵义有正确的理解，并熟练掌握电流的磁场及电流在磁场中受力的规律。

“通量表述”的要点是，感应电流的磁通量反抗引起感应电流的原磁通量的变化，而不是反抗原磁通量。如果原磁通量是增加的，那么感应电流的磁通量要反抗原磁通量的增加，就一定与原磁通量的方向相反；如果原磁通量减少，那么感应电流的磁通量要反抗原磁通量的减少，就一定与原磁通量的方向相同。在正确领会定律的上述涵义以后，就可按以下程序应用楞次定律判断感应电流的方向：

- ① 明确穿过回路的原磁通量的方向，以及它是增加还是减少；
- ② 根据楞次定律表述的上述涵义确定回路中感应电流在该回路中产生的磁通量的方向；
- ③ 根据回路电流在回路内部产生磁场的方向的规律（右手螺旋法则），由感应电流的磁通量的方向确定感应电流的方向。

“力表述”的要点是，感应电流在磁场中受的安培力的方向，总是与导体运动的方向成钝角，从而阻碍导体的运动。因此应用它来确定感应电流的程序是：

- ① 明确磁场  $B$  的方向和导体运动的方向；
- ② 根据楞次定律的上述涵义明确感应电流受安培力的方向；
- ③ 根据安培力的规律确定感应电流的方向。

可见正确掌握楞次定律并能应用，不仅要求准确理解其涵义，还必须掌握好电流的磁场和电流在磁场中受力（安培力）的规律。

### (2) 楞次定律的实质

楞次定律可以有不同的表述方式，但各种表述的实质相同。楞次定律的实质是：产生感应电流的过程必须遵守能量守恒定律。如果感应电流的方向违背楞次定律规定的原则，那么永动机就是可以制成的。下面分别就两种情况进行说明：

① 如果感应电流在回路中产生的磁通量加强引起感应电流的原磁通量的变化，那么，一经出现感应电流，引起感应电流的磁通量的变化将得到加强，于是感应电流进一步增加，磁通量的变化也进一步加强……感应电流在如此循环过程中不断增加直至无限。这样，便可从最初磁通量微小的变化中（并在这种变化停止以后）得到无限大的感应电流。这显然是违反能量守恒定律的。楞次定律指出这是不可能的，感应电流的磁通量必须反抗引起它的磁通量的变化。感



应电流具有的以及消耗的能量，必须从引起磁通量的变化的外界获取。要在回路中维持一定的感应电流，外界必须消耗一定的能量。如果磁通量的变化是由外磁场的变化引起的，那么，要抵消从无到有建立感应电流的过程以保持回路中有一定的磁通量的变化率，产生外磁场的励磁电流就必须不断增加与之相应的能量，这只能从外界不断地补充。

② 如果由组成回路的导体做切割磁感应线运动而产生的感应电流在磁场中受的力（安培力）的方向与运动方向相同，那么，感应电流受的磁力就会加快导体切割磁感应线的运动，从而又增大感应电流。如此循环，导体的运动将不断加速，动能不断增大，电流的能量和在电路中损散的焦耳热都不断增大，却不需外界做功，这显然是违背能量守恒定律的。楞次定律指出这是不可能的，感应电流受的安培力必须阻碍导体的运动，因此要维持导体以一定速度做切割磁感线运动，在回路中产生一定的感应电流，外界必须反抗作用于感应电流的安培力做功。

综上所述，楞次定律的任何表述，都是与能量守恒定律相一致的。概括各种表述“感应电流的效果总是反抗产生感应电流的原因”，其实质就是产生感应电流的过程必须遵守能量守恒定律。

### 7. 利用能量转化的观点分析直流电动机的工作原理

利用能量转化的观点分析直流电动机的工作原理，具体应注意以下两点：

#### (1) 理解电功和电热不一定相等

只有在纯电阻电路中电功才等于电热，而像直流电动机这种存在反电动势的电路中电功是大于电热的。

设闭合电路中的电流为  $I$ ，电动机两端电压为  $U$ ，电路中的反电动势为  $E_{\text{反}}$ ，电路的总电阻为  $R$ ，则  $I = \frac{U - E_{\text{反}}}{R}$ ，从能量守恒的角度看，就是  $UI = I^2 R + E_{\text{反}} I$ ，其中  $UI$  就是电动机的输入电功率， $I^2 R$  只是电路中产生的电热功率， $E_{\text{反}} I$  是电动机输出的机械功率。

#### (2) 分析直流电动机的输入功率 $UI$ 随负载的增大而增大

当电动机两端电压  $U$  一定，电动机匀速转动时，安培力矩等于阻力矩。当负载加大时，阻力矩增大，引起转速减小，则反电动势  $E_{\text{反}}$  减小。根据  $I = \frac{U - E_{\text{反}}}{R}$  可知，电路电流增大，安培力矩增大，电动机的输入功率  $UI$  增加。

### 8. 电子感应加速器原理

电子感应加速器是利用由变化磁场激发的涡旋电场（感生电场）来加速电子的设备。我们先从一个题目开始，介绍电子感应加速器的原理。

#### (1) 从一个例题谈起

**例题** 有两个同心圆柱区，内圆柱面的半径为  $r$ ，其内有均匀磁场  $B_1$ ，方向平行于圆柱母线，指向纸内。在两柱面之间有均匀磁场  $B_2$ （图 4-29）， $B_2$  之值恰可使质量为  $m$ 、电荷量为  $+q$  的粒子在两柱面之间贴近内圆柱面处做逆时针的圆周运动（圆心为  $O$  点，半径为  $r$ ）。现在令  $B_1$  随时间均匀的变化， $\frac{\Delta B_1}{\Delta t} = k$ （常数）。为了使

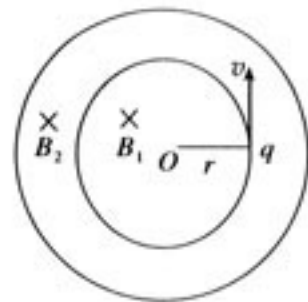


图 4-29

该带电粒子保持在同一圆周上运动， $B_2$  应以多大的变化率  $\frac{\Delta B_2}{\Delta t}$  变化？

**解：**由于带电粒子的圆轨道在磁场  $B_2$  的区域内，故带电粒子圆运动所需的向心力是磁场  $B_2$  作用于运动电荷上的洛伦兹力  $F_c = qvB_2$ ，有

$$qvB_2 = \frac{mv^2}{r} \quad (1)$$

解出

$$B_2 = \frac{mv}{rq} \quad (2)$$

可见，只要磁场  $B_2$  与带电粒子的动量 ( $mv$ ) 成比例的增加，带电粒子即可保持在相同的圆轨道上运动。下面讨论  $B_1$  的变化对带电粒子运动的影响。

以带电粒子运动的圆轨道 (半径为  $r$ ) 为回路，已知此回路包围的范围内，磁场  $B_1$  随时间增强，其变化率为  $\frac{\Delta B_1}{\Delta t} = k$ 。因此穿过回路所围面积的磁通量的变化率为

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \pi r^2 \frac{\Delta B_1}{\Delta t} = \pi r^2 k \quad (3)$$

根据电磁感应定律，在回路上产生与带电粒子运动的方向相同 (逆时针方向) 的感应电动势，其大小为

$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \pi r^2 \frac{\Delta B_1}{\Delta t} = \pi r^2 k \quad (4)$$

根据电动势的定义：回路上的电动势等于沿回路移动单位正电荷 1 周的过程中，非静电力所做的功。由磁场变化而产生感应电动势的非静电力是感应电场  $E_i$ 。考虑到柱对称性，圆周回路上各点的这种非静电力的大小相等，故有

$$E = \oint_{(\text{圆周})} E_i \cdot dl = 2\pi r E_i \quad (5)$$

由(4)、(5)式可见半径为  $r$  的圆轨道上， $E_i$  的方向为逆时针方向 (与粒子运动方向相同)。大小为

$$E_i = \frac{r}{2} \frac{\Delta B_1}{\Delta t} = \frac{r}{2} k \quad (6)$$

带电粒子受到由变化磁场  $B_1$  激发的感应电场力的作用，此力沿运动轨道的切向，大小为

$$F_i = qE_i = \frac{1}{2} r q k \quad (7)$$

根据牛顿运动定律，带电粒子的动量的变化率为

$$\frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = F_i = \frac{1}{2} r q k \quad (8)$$

可见，由于  $B_1$  的均匀变化而使粒子的动量均匀增大。为了保证动量不断增大的粒子在半径  $r$  不变的圆周上运动，提供向心力的洛伦兹力也要相应地增大，轨道所在区域中的磁感应强度也应按一定规律变化。由 (2) 式知，在  $r$  不变的条件下有：

$$\frac{\Delta B_2}{\Delta t} = \frac{1}{rq} \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} \quad (9)$$

将(8)式代入，即求得  $B_2$  的变化率。

$$\frac{\Delta B_2}{\Delta t} = \frac{1}{2} k = \frac{1}{2} \frac{\Delta B_1}{\Delta t} \quad (10)$$

即：环形轨道区域内的磁感应强度的变化率应等于内柱面区域内的磁感应强度的变化率的一半。这是带电粒子沿半径  $r$  不变的圆轨道运动，并被不断加速的必备条件。

### (2) 电子感应加速器原理

从上面这个例题中可以看出，由磁场变化激发的感应电场可以用来加速带电粒子，只要恰





当地安排磁感应强度的分布[由(10)式表示],可使被加速的带电粒子保持在不变的圆轨道上运动。但另一方面,要保证沿一定转向的带电粒子始终被感应电场加速,圆轨道范围内的磁场变化的方向也必须是确定不变的。如图4-29的情形下,必须保证垂直向下的磁感应强度随时间不断增加,才能使带电粒子沿逆时针转向不断加速。这一点限制了用感应电场加速带电粒子的实际应用范围,因为人们不可能做到沿一确定方向并保持一定变化率始终不断增强的磁场。激励变化磁场的电流总是周期性变化的。交变电流激励的变化磁场只能在1周期的 $\frac{1}{4}$ 时间里,才能保证 $B$ 和 $\frac{\Delta B}{\Delta t}$ 的方向既能提供沿一定方向做圆周运动的带电粒子的向心力,又能使之被加速。而在其余 $\frac{3}{4}$ 期间达不到上述要求,这就注定进入圆轨道的被加速的带电粒子只能是一束一束地被加速,而且每一束带电粒子只能在交变励磁电流的 $\frac{1}{4}$ 周期内被加速。对于重粒子(如质子、 $\alpha$ 粒子等),在这样短的时间内,加速的效果不明显。唯独电子,因其质量极小,由感应电场产生的加速度很大,即使在交变电流的 $\frac{1}{4}$ 周期的时间内,也可能被加速到很高的速度,获得很大的能量。所以,电子感应加速器成为应用感应电场加速电子的现代设备。

电子感应加速器中激励变化磁场的圆柱形电磁铁的两极形状如图4-30甲所示。磁极的形状是为了使中心区域的磁感应强度 $B_1$ 和周围环状区域的磁感应强度的平均值 $\overline{B_2}$ 之间始终满足

$$\overline{B_2} = \frac{1}{2} B_1 \quad (11)$$

因而当励磁电流变化时,两区域的磁感应强度的变化始终满足(10)式,即

$$\frac{\Delta \overline{B_2}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{\Delta B_1}{\Delta t}$$

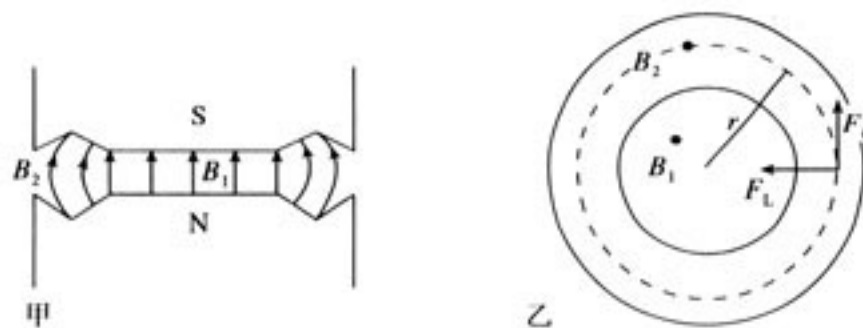


图4-30

如上面的例题讨论,这是带电粒子(这里是电子)沿不变的圆轨道运动并被加速的必备条件。

在两极之间,磁场为 $B_2$ 的环形区域中,放入环形真空室(图4-30乙),其中包括电子枪和引出高能电子的装置。被加速的电子从电子枪射出后,将在真空室内沿着半径为 $r$ 的圆形轨道运动并被感应电场加速。

在图4-30乙的情况下,磁感应强度 $B_1$ 和 $B_2$ 的方向垂直纸面向外,并随时间增大,轨道处产生顺时针方向的感应电场。带负电( $q=-e$ )的电子受感应电场的作用力 $F_E$ 沿逆时针方向,故电子沿逆时针方向被加速。同时, $B_2$ 作用于电子的洛伦兹力 $F_L$ 恰好指向中心,作为电子圆轨道运动的向心力。

激励磁场的电流通常是正弦交变电流,在磁极间产生正弦变化磁场。图4-31上半部表示磁场变化图线,与4-30乙配合, $B$ 的正方向为垂直于纸面向外。图4-31的下部分分别表示磁



场变化的1周期内电子轨道上感应电场  $E_i$  的方向；沿逆时针方向运动的电子被加速或减速的情况；以及电子受磁场  $B_2$  作用的洛伦兹力  $F_L$  的指向。从图4-31可见，只有在磁场变化的第一个  $\frac{1}{4}$  周期内，沿逆时针方向运动的电子受到加速且洛伦兹力能提供向心力这两个要求才能同时得到满足。在其余的  $\frac{3}{4}$  周期中，上述二条件不能同时满足，因而不能用来加速电子。（第二个  $\frac{1}{4}$  周期可用来加速绕圆周顺时针方向运动的电子）。

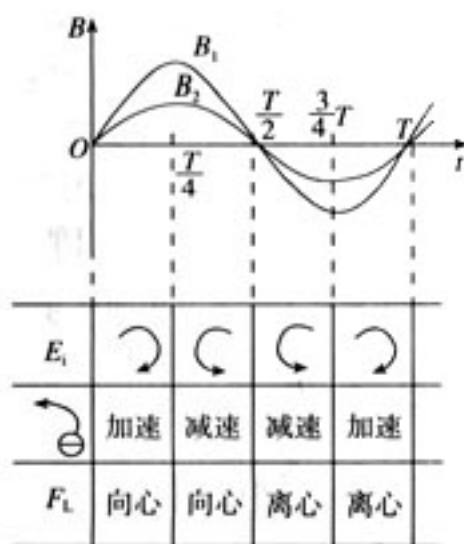


图4-31

虽然只是励磁电流变化周期的  $\frac{1}{4}$  时间内，从电子枪射入轨道的电子才被沿一定的方向加速，但由于电子的静止质量很小，即使在这样短的时间内，电子的速度仍可加速到接近光速。如100 MeV的电子感应加速器中被加速后的电子速度与光速之差不到万分之一。被加速过程中电子经过的路程的量级为  $10^3$  km，可绕直径约1.5 m的轨道转几十万圈。

由于在上面的讨论中[(2)、(8)、(9)式]，一直以动量( $mv$ )来描述带电粒子（这里是电子）的动力学状态，而且电磁作用的规律（涡旋电场、洛伦兹力）在相对论情况下也是适用的。因此电子感应加速器的上述原理不受相对论效应的限制。在高速圆运动的电子将不断辐射能量，转速愈快，辐射损耗的能量越大，这是对电子感应加速器进一步提高能量的限制。

电子感应加速器主要用于核物理研究，被加速的高能电子即为人工的高能  $\beta$  射线。用它来轰击靶时，可产生穿透力很强的  $\gamma$  射线。从能量不大的电子感应加速器中引出的电子束，可用来产生硬 X 射线，在工业和医学上都有相应的应用，如工业探伤和治疗癌症等。

电子感应加速器原理也被用来解释宇宙射线的起源，由于星际云的碰撞或超新星的爆发会引起宇宙云的强烈压缩，从而使空间的磁场迅速增强，形成强大的感应电场。感应电场加速带电粒子，产生辐射，形成低能的宇宙射线。

## (二) 联系生活、科技和社会资料

### 1. 电磁灶

电磁灶是近年发展起来的一种利用电磁感应加热、烹饪食物的一种家用电热炊具。20世纪70年代初期，由于高效能、高频率、大功率电源的出现，加上人们迫切需要安全、卫生、高效、节能的烹饪器具，因此实用电磁灶应运而生，成为目前国际市场上一种最新型家用电热炊具。

电磁灶主要由励磁装置、铁磁材料做锅底的炊具及控制部分组成。电磁灶加热的工作原理如下：当励磁线圈通过交变电流时，线圈周围产生交变磁场，即电能变成了磁能，这一交变磁场的磁力线经过锅底形成回路，就在锅底产生感应电动势，因锅底是良导电材料，从而在锅底产生涡旋状感应电流——涡流，这样将磁能又转化为电能。然后，这一涡流在锅底内通过锅

底本身材料的电阻产生焦耳热，把电能又转化为热能。

电磁灶的特点：

① 热效率高。一般电阻式电灶的热效率只有 50%~55%，由于电磁灶是锅底的涡流产生的热效应直接给锅底加热，所以热效率高，可达 70%~80%，因此它能节约能量，经济性好。

② 温控准确。它的热惯性小，断电后立即断磁，不再发热，热响应速度非常快，因此能方便、准确地控制发热量及烹饪的温度。同时锅温比较均匀，烹饪效果好。

③ 安全性好。使用时不必点火，因此不必担心像煤气灶那样因燃烧不充分或微火熄灭易引起空气污染、中毒。电磁灶在使用时没有明火，灶台本身不发热，因此不必像电灶那样担心烫伤，更无火灾的危险。

④ 清洁卫生。灶台表面平滑，清洁十分方便，如果食品溢到灶上也绝不会烧糊，很容易擦净。

⑤ 因为在电磁灶上用的锅担负着将磁能转化为感应电流后再转化为热能的双重任务，故对锅的材料和形状应有一定的要求。

电磁灶按感应线圈中电流频率分为低频和高频两类。低频电磁灶因为直接用工频电流 (50 Hz 或 60 Hz)，所以又称工频电磁灶；而高频电磁灶是利用工频变成高频后的电流 (15 kHz 以上)，因此两种电磁灶的结构、电路和性能各不相同。

#### (1) 工频电磁灶

##### ① 基本结构

工频电磁灶的基本结构如图 4-32 所示。它由励磁线圈、励磁铁芯、灶面、烹调锅体控制元件等几部分所组成。工作原理如前述，不再重复。

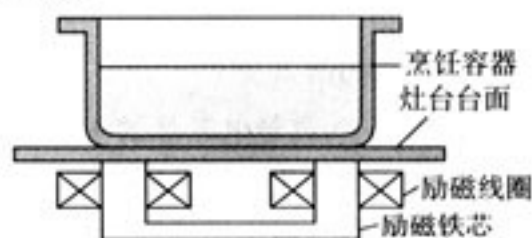


图 4-32

##### ② 励磁线圈和励磁铁芯

为解决工频电磁灶的震动和噪声问题，常采用如图 4-33 所示的四个等距磁极和一个共同的轭铁相联。每个磁极上都有自己的励磁线圈，相对的两个磁极线圈串联成一组，其中一个线圈串联一个电容器，使两组电流有 90° 的相位差，并使  $I_A = I_B$ ，此时，两个磁路  $\Phi_A$  与  $\Phi_B$  的相位差也是 90°。由于磁通产生的交变电磁力的频率为电源频率的两倍，因此这两个励磁电路产生的电磁力  $F_A$  和  $F_B$  的相位差约 180°，而它们的大小是相等的， $F_A$  与  $F_B$  的两个分量互相抵消，仅有直流分量  $F_0$ 。（见图 4-34），即专用锅只受直流吸引力的作用，使锅体上下震动的交变电磁力抵消，从而避免了锅体产生的振动和噪声。

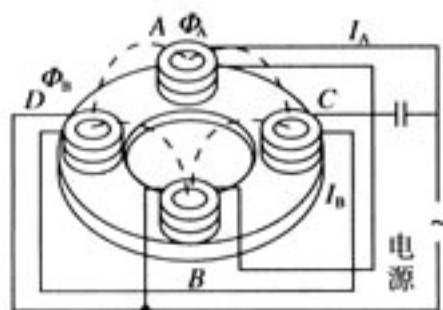


图 4-33 四磁极励磁器结构图

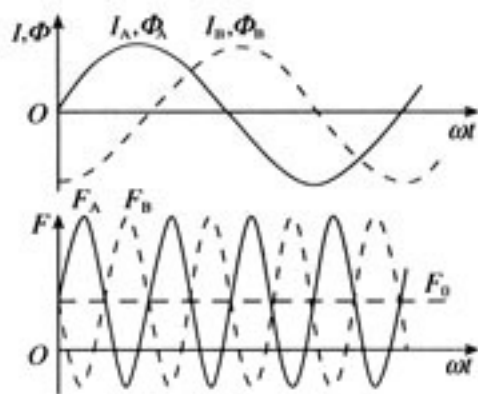


图 4-34 励磁电流与电磁力波形图



锅体产生的涡流除产生有用的热量外，还产生洛伦兹力，使锅底向上悬浮或转动。为了克服这一现象，采用了一个有中心磁极的和外围多对磁极组成的励磁系统，如图4-35所示，中心磁极对锅体产生的磁力抵消涡流产生的洛伦兹力，从而有效地防止了锅体的悬浮和转动。

工频电磁灶对烹饪容器的结构和材料有一定的要求。一般烹饪容器采用单一材料。如铝、陶瓷、不锈钢、铁、铜等，但铝、铜本身的电阻低，涡流效应差，不锈钢导磁性差，热效应也受影响；铁的导磁性好，电阻也大，但容易锈蚀，不合卫生要求，因此应该使用复合结构的烹饪容器。从热效率、发热量等方面考虑，采用铝铁复合板做基材；再从耐腐蚀、卫生、美观等方面考虑，采用不锈钢包装，形成了不锈钢—铁—不锈钢—铝四层复合结构锅体，如图4-36所示。

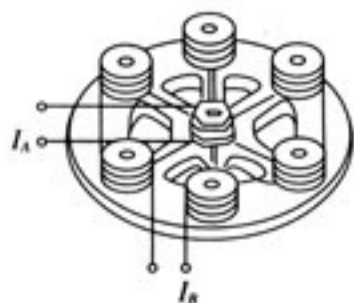
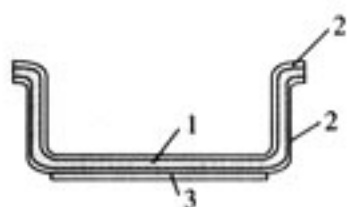


图 4-35 多磁极励磁器铁芯与绕组结构

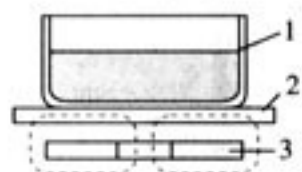


1—铁；2—不锈钢；3—铝

图 4-36 复合锅体

## (2) 高频电磁灶

图4-37为高频电磁灶的工作示意图。灶台台面是一块高强度、耐冲压的钢化陶瓷平板或石英结晶玻璃，它的下面装有高频感应加热线圈（即励磁线圈）。高频感应电力转换装置及控制系统，灶面上配有平底烹调锅。工作时，整流器首先将工频电流转换为直流电。高频电流流过扁平空心螺旋状的感应加热器，产生高频交变磁场，其磁感线穿过灶面作用于金属烹调锅产生涡流而发热。



1—烹调锅；2—灶台台板；3—感应加热线圈

图 4-37 高频电磁灶结构简图

高频电磁灶对锅体材料没有像工频电磁灶那样严格，但也有一定要求。由于铜、铝的电阻较小，不能满足需要的发热功率，因此不宜作锅底材料。普通铁锅的磁导率大，且有很大的表面电阻，约为铜、铝的20~50倍，特别是使用铁磁性不锈钢锅体，可以使锅体具有良好的加热特性，与采用复合锅相比，它小巧省料，且有较高的机械强度、较大的发热功率和美观的外表。

### 2. 感应加热

感应加热是利用感应电流使工件加热。在工业应用中，采用的感应加热方式有两种，一种是有铁芯的感应加热方式（图4-38甲），这时被加热的材料相当于次级线圈。另一种是无铁芯的感应加热方式（图4-38乙），这时被加热材料相当于芯棒。

由于感应电流有趋肤效应，交变电流的频率越高，趋肤效应越显著，材料的受热层越薄。因而采用感应加热时，要根据加热的目的、要求、被加热物体的材料和尺寸，选择适当的频率。感应加热的电源按频率可分为工频、中频和低频三种。



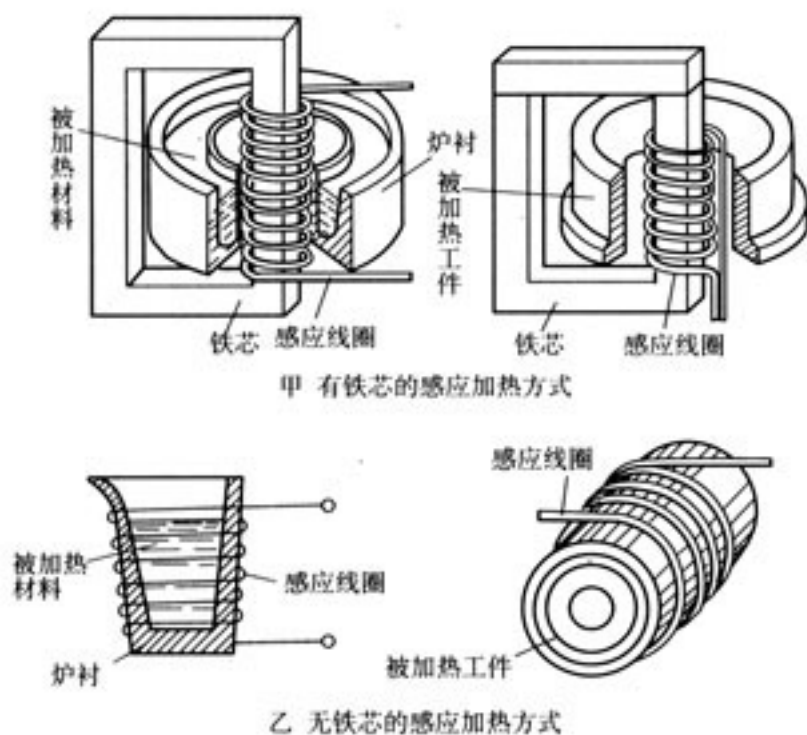


图 4-38 感应加热方式

工频即 50 Hz 的电源，可直接从供电网中取得，不需要特殊的频率变换装置。中频是 50~10 000 Hz 的频率。常用的中频频率为 500 Hz、1 000 Hz、2 500 Hz、4 000 Hz、8 000 Hz、10 000 Hz。获得中频电流有两种方法，一种是利用旋转变频机，它是用感应电动机来驱动中频发电机。另一种方法是利用可控硅变频器，它是利用硅整流元件将工频交流变为直流，再利用可控硅元件将直流变为所要求的中频交流。高频电源一般指 20 000 Hz 以上的电源，它是通过电子管振荡器获得的。

感应加热的应用范围很广，主要用于合金钢、铸铁、有色金属的熔炼、钢制零件的表面热处理和焊接等。

#### (1) 金属熔炼设备

①有芯感应熔炼炉有一个用硅钢片叠成的闭合铁芯，采用 50 Hz 工频电源。主要用于铜、锌、铝、黄铜、青铜等低熔点金属和合金的熔炼、保温。在铸铁生产过程中，可用于铁水的加热、保温和调整化学成分。有芯感应炉的容量为几百千克到几百吨。

②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。主要用于熔炼钢、铸铁和铜、铝、镁、锌等有色金属及其合金。有工频、中频和高频三种。一般说来，炉子的装料容量越大，所用的电源频率就越低。高频炉的装料容量只有几十千克，输入功率只有几十千瓦，用于熔炼少量的特种合金和合金钢。中频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。工频炉主要用于熔炼铸铁。合金钢保温炉的容量可达一百多吨。

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。

#### (2) 感应加热设备

采用感应加热的设备有透热、淬火、焊接等。金属材料的锻造、冲压、挤压、轧制等热加工之前需要加热，使材料整体被热透，称之为透热。图 4-39 是感应透热设备的示意图。这种





设备还可以用于金属部件的退火等加工工艺。

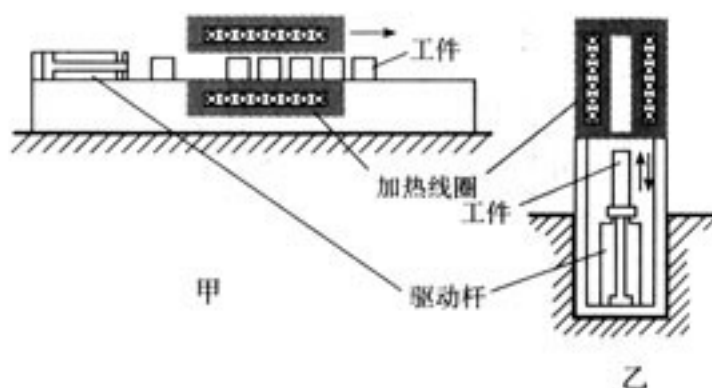


图 4-39 感应透热

### (3) 感应淬火

利用交变电流的趋肤效应，采用感应加热的方法使金属零件表面加热，随即进行淬火，能使零件表面达到高的硬度、耐磨度和抗疲劳强度，而内部仍保持原有的韧性。利用感应淬火比用一般的火焰淬火加热速度快，零件表面氧化损失少，加工成本低，劳动条件好，已成为机械加工行业主要的表面淬火方法。图 4-40 是感应淬火的装置示意图。

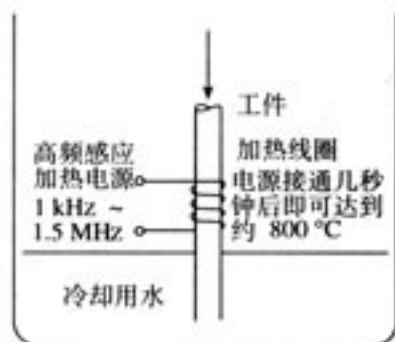


图 4-40 感应淬火

### 3. 灵敏电流计中线圈的电磁阻尼

灵敏电流计是高灵敏度的磁电式电流计，可用来测量 $10^{-11} \text{ A} \sim 10^{-7} \text{ A}$ 的微小电流。

如图 4-41 甲所示，灵敏电流计中的矩形线圈(1)绕在圆柱形软铁芯(2)上，置于永久磁体的两板间。磁极的形状可使在磁极与圆柱形软铁芯之间形成径向的磁场(图 4-41 乙)，并保证线圈不论转到什么方位，与圆柱轴平行的部分都处于相同大小的磁场中，而且保证在转动时总是垂直切割磁感线。为了提高灵敏度，线圈绕线较细，圈数较多，而且线圈不是靠轴承支承，

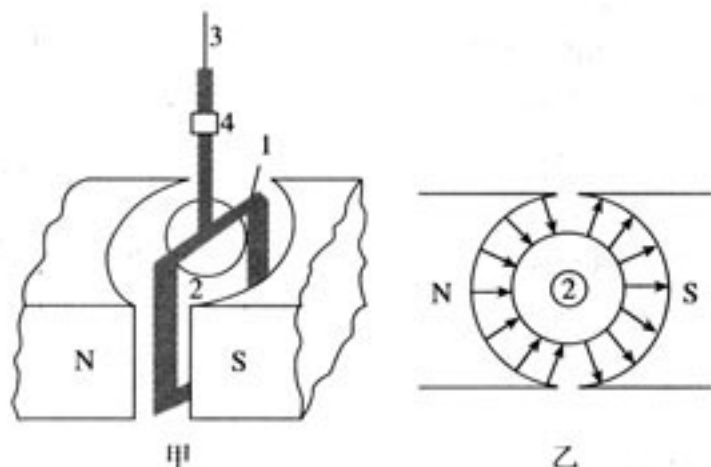


图 4-41



而是用一根细金属丝(3)悬挂,线圈能以金属丝为轴转动。悬丝下端装上一个镜(4),将一束光束投射到镜上,当小镜随线圈转动时,从小镜反射光的偏向即可反映线圈的转角。这里通过小镜反射的光束相当于一个无惯性的指针。

当线圈通过待测电流  $I$  时,线圈受到的安培力对轴线的力矩的大小为

$$M_{\text{安}} = 2nILBr = nISB \quad (1)$$

其中  $n$  为线圈匝数,  $B$  为磁感应强度,  $L$  为矩形线圈竖直边长,  $r$  为其半径,  $S=2Lr$  为线圈的面积。  $M_{\text{安}}$  使线圈转动,悬丝发生扭转。当偏转角为  $\varphi$  时,悬丝的弹性恢复力矩为

$$M_{\text{弹}} = -D\varphi \quad (2)$$

$D$  为回复系数(由悬丝材料的切变模量、悬丝的长度和直径等因素决定)。

当安培力矩与弹性回复力矩大小相等时,二力矩平衡,这时线圈的偏转角为

$$\varphi_0 = \frac{nISB}{D} \quad (3)$$

但由于线圈从开始转动起到平衡位置的过程中,在安培力矩大于回复力矩时,转动动能增大,在平衡位置处已有一定的转速,因此不可能在平衡位置  $\varphi = \varphi_0$  处静止,而是以平衡位置为中心摆动。

为了阻止摆动,按一般的磁电式仪表加阻尼器的方法,有碍于提高灵敏度,为灵敏电流计所不取。在这里采取利用转动线圈上出现的感应电流受到的电磁阻尼来阻止摆动。当线圈在磁场中以角速  $\omega$  转动时,线圈两边竖直的导线切割磁感线,产生感应电动势,其大小为

$$E = 2nBLv = 2nBLr\omega = nBS\omega \quad (4)$$

设线圈的电阻为  $R_1$ , 与之串联形成闭合电路的外电路电阻为  $R_2$ , 总电阻  $R = R_1 + R_2$ , 则线圈通过的感应电流为

$$i = \frac{E}{R} = \frac{nBS}{R}\omega \quad (5)$$

此感应电流在磁场中同样受到安培力矩,只是这个力矩与线圈转动方向相反,为阻力矩,其大小为

$$|M_{\text{阻}}| = niSB = \frac{(nSB)^2}{R}\omega \quad (6)$$

由于它总是阻碍线圈的转动(楞次定律),方向与角速度  $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$  的方向相反,故表为

$$M_{\text{阻}} = -P \frac{d\varphi}{dt} \quad (7)$$

其中

$$P = \frac{(nSB)^2}{R} \quad (8)$$

称为阻力矩系数。

由上可见,线圈是在  $M_{\text{安}}$ 、 $M_{\text{弹}}$  和  $M_{\text{阻}}$  三个力矩作用下转动。由于待测电流  $I$  是很小的电流,比较(1)式和(6)式,  $M_{\text{阻}}$  和  $M_{\text{安}}$  相比,已不是可忽略的因素。实际上适当调整  $R_2$ (即调整  $R$ ) 而调整阻力矩系数  $P$ , 可使  $M_{\text{阻}}$  在线圈的转动中起到明显的阻尼作用。

根据转动定律,电流计线圈的运动方程为

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} = M_{\text{安}} + M_{\text{弹}} + M_{\text{阻}}$$

$J$  为线圈对轴的转动惯量。将(1)、(2)、(8)式代入整理后得

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\beta \frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2 \varphi = \frac{n}{J} BIS \quad (9)$$

式中

$$\beta = \frac{P}{2J} = \frac{(nSB)^2}{2JR} \quad (10)$$

称为阻尼因数。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{J}} \quad (11)$$

称为线圈绕悬丝的固有振动角频率。

根据微分方程理论，(9)式的解分为三种情况，分别对应于线圈的三种可能的运动规律。

①当  $\beta < \omega_0$ ，即电磁阻尼与悬丝的弹性相比为次要因素时，线圈将在平衡位置  $\varphi_0$  附近做衰减振动，其规律为

$$\varphi = \varphi_0 - \varphi' e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha) \quad (12)$$

其中  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ ， $\varphi'$  和  $\alpha$  是由线圈运动的初始状态决定的常数。设初始时  $t=0$ ， $\varphi=0$ ， $\frac{d\varphi}{dt} = \omega_0 = 0$ ，则有

$$\varphi' = \sqrt{1 + \left(\frac{\beta}{\omega}\right)^2} \varphi_0$$

$$\alpha = \text{tg}^{-1}\left(-\frac{\beta}{\omega}\right)$$

偏转角  $\varphi$  在平衡位置  $\varphi_0$  附近振动的情况如图 4-42 中图线 1 所示。可见线圈将经过一个衰减振动的过程，慢慢地稳定在平衡位置  $\varphi_0$ 。

②当  $\beta > \omega_0$ ，即对线圈中感应电流的电磁阻尼与悬丝的弹性相比，成为突出的重要因素时，线圈将十分缓慢地转向平衡位置，不会发生在平衡位置附近的摆动，偏转角随时间趋近于  $\varphi_0$  的规律为

$$\varphi = \varphi_0 - e^{-\beta t} (Ae^{\sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} t} + Be^{-\sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} t}) \quad (13)$$

在前述的初始条件下，二积分常数  $A$ 、 $B$  分别为

$$A = \frac{1}{2} \varphi_0 \left(1 + \frac{\beta}{\omega}\right), \quad B = \frac{1}{2} \varphi_0 \left(1 - \frac{\beta}{\omega}\right)$$

偏转角  $\varphi$  趋近平衡位置  $\varphi_0$  的情况如图 4-42 中图线 2 所示。 $\varphi$  十分缓慢地趋于  $\varphi_0$ 。这是电磁阻尼过大的表现，故称此种情况为过阻尼。

③当  $\beta = \omega_0$  时，为上面两种情况之间的临界情形，线圈既不在  $\varphi_0$  附近做衰减振动，又能较快地达到平衡位置  $\varphi_0$ ，并稳定下来。这种情况称为临界阻尼。在前述初始条件下， $\varphi$  的变化规律，即(9)式的解为：

$$\varphi = \varphi_0 - (1 + \beta t) \varphi_0 e^{-\beta t} \quad (14)$$

图 4-42 中图线 3 表示临界阻尼下， $\varphi$  趋向平衡值  $\varphi_0$  的过程。

根据对灵敏电流计的线圈在通以待测电流  $I$  后的运动情况的上述分析可见，为了测量的方便，应避免衰减振动和过阻尼，而利用临界阻尼。为此就需调整电流计线圈的有关参数，以满

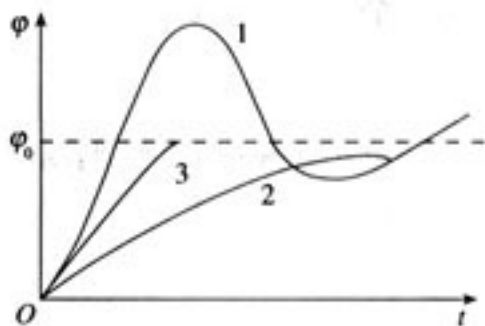


图 4-42



足  $\beta = \omega_0$ ，即满足

$$\frac{(nSB)^2}{2JR} = \sqrt{\frac{D}{J}} \quad \text{或} \quad \frac{(nSB)^2}{2R\sqrt{JD}} = 1 \quad (15)$$

其中  $R = R_i + R_e$  为线圈内阻与外电路的电阻之和。在线圈的内参数已确定的情形下，可以调节外电路的电阻  $R_e$ ，使条件 (15) 满足。

在使用灵敏电流计时，还会发生这种情形，即当电流计已显示待测电流引起的线圈偏转，然后将电路断开时，线圈不构成回路。已经偏转的线圈受弹性回复力作用而在零点附近来回摆动。这是实验中不希望发生的事。为解决这个问题，在电流计的两端并联一个阻尼开关，它在测量时是断开的。为了在测量终止时使线圈的摆动停下来，当线圈在摆动到零点位置时，迅速将阻尼开关合上，这相当于接上一个  $R_e = 0$  的外电阻，转动的线圈产生较大的感应电流，从而受到较大的阻力，使线圈迅速停止下来。

### (三) 实验参考资料

#### 1. 摇绳能发电吗？

实验器材：10~20 m 的双股软导线（将两股导线的端部绝缘层剥去连接在一起成为并联）、灵敏电流表（或数字多用表、100  $\mu\text{A}$  演示电流表）、指南针。

在室外实验时，大体上用指南针确定东西方向与南北方向。可以使实验时东西方向的现象与南北方向的现象的差异尽可能的大一些。

教科书“做一做”栏目中要求用 10 m 长导线的两端与灵敏电流表连接，可以摇动的长度约为 4~5 m，如果要求摇动部分长度为 10 m，则导线的总长度可以取 20~25 m。

以下是在北京地区室外实测参考数据：

① 导线长 25 m，摇动时两个人的距离为 10 m，导线长约 15 m，学生用 300  $\mu\text{A}$  灵敏电流表。导线长度沿东西方向，电流表指针左右摆动最大 2~2.5 格，与摇动绳子的速度有关。在南北方向摇动，摆动最大幅度略小于 2 格。速度基本相同的情况下，电流表指针摆动的情况与东西方向没有明显的差别。

② 数字表实测：导线长仍为 25 m，摇动距离仍为 10 m，绳长约 15 m。用直流 200 mV 挡测量：东西方向最大值 2.4 mV；南北方向最大值 1.9 mV。直流 200  $\mu\text{A}$  挡东西方向与南北方向区别不大。

③ 减小导线的长度，最短至 1 m 时仍可看到指针的摆动。

④ 根据上述数据可以估测地磁场的强度：摇动绳子的速度约为每秒 2 圈，绳子转动时的幅度约 1~1.5 m，数字表电压挡的输入阻抗很大，电压读数可认为是电动势。估算的地磁场磁感应强度数值很接近其平均值  $5 \times 10^{-5} \text{ T}$ ，略小于北京地区的地磁场总磁感应强度。

地磁场的的数据资料：

(1) 北京地区(1964年北京地磁台测量)：

磁场总的磁感应强度 =  $5.515\ 09 \times 10^{-5} \text{ T}$

磁倾角 =  $57^\circ 10' 34''$

磁偏角 =  $5^\circ 51.93'$

垂直强度 =  $4.634\ 36 \times 10^{-5} \text{ T}$



- |                      |                                      |
|----------------------|--------------------------------------|
| (2) 地磁场的水平分量 (在磁赤道处) | $(3\sim 4) \times 10^{-5} \text{ T}$ |
| 地磁场的垂直分量 (在南、北磁极处)   | $(6\sim 7) \times 10^{-5} \text{ T}$ |
| 地磁场在地面附近的平均值         | $5 \times 10^{-5} \text{ T}$         |

## 2. “法拉第电磁感应定律”量化研究的教学设计

实验装置：如图 4-43 所示，实验电路组成正向串联电路。用很薄的布将蹄型磁铁包裹起来，直到恰能插入两个线圈中为止 (图 4-44)，两台 J2459 型学生示波器。

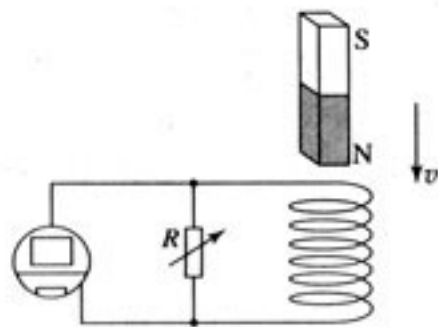


图 4-43 电路图

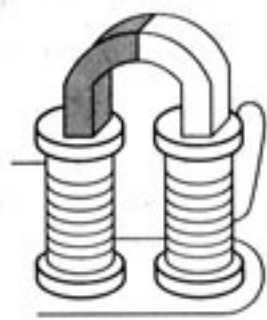


图 4-44 器材组装图

实验调节：将两台示波器调节为相同的标度  $75 \text{ mV/格}$ 。具体操作方法是，将衰减旋钮置于 10 倍处， $1.5 \text{ V}$  干电池的正极接“Y”输入，负极接“地”。调节 Y 增益旋钮，使水平线偏转 2 格。然后，将衰减置于 1 倍处，扫描范围置于 1 k 位置。

实验过程中要注意，定标后，不能再调节 Y 增益旋钮。

### (1) 定性研究感应电动势与磁通量变化率的关系

观察 1 将两个相同的线圈紧紧靠放在水平桌面上，按图 4-45 所示绕向连接电路，使示波器 1 可观察线圈 A 上的感应电动势大小，示波器 2 可观察 B 线圈上产生的感应电动势大小。实验时，将一蹄形磁铁的 N、S 两极分别插入线圈 A、B 中，请学生观察两个示波器上扫描线的偏转幅度的关系。实验可多做几次以使学生观察到结果。

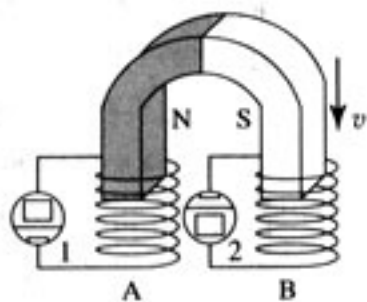


图 4-45

(结果是偏转幅度基本相等，且都向一个方向偏转)

观察 2 将蹄形磁铁在单个线圈中插入或拔出得快一些，请学生观察示波器 1 的水平扫描线的偏转幅度与插入速度间的关系。

问题导引：观察到了什么现象？这两个实验现象说明了什么？

讨论并归纳：观察 1 中，由于用的是同一个磁铁，因此，在任意时刻两个线圈中的磁通量的变化率一定是相等的。这一实验说明，当穿过线圈的磁通量的变化率相等时，两个匝数相同线圈上的感应电动势相等。观察 2 说明线圈插得越快，感应电动势越大。此现象说明感应电动势的大小由穿过电路的磁通量变化率决定。

### (2) 定量研究感应电动势与线圈匝数的关系并估测感应电动势的大小

观察 3 按图 4-46 所示绕向及电路连接两个线圈。示波器 1 可以观察线圈 A 上的感应电动势大小；示波器 2 可以观察匝数加倍后线圈 B 上产生的感应电动势也加倍。实验时，将一蹄形磁铁的 N、S 两极插入线圈 A、B 中，改变插入速度使示波器 1 的水

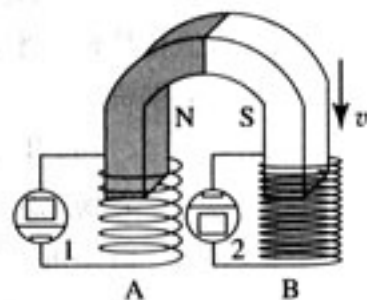


图 4-46

平线偏移为 2 格左右, 就可从示波器 2 上清楚地观察到它们的偏移方向相同, 偏转格数为 4 格左右, 即 A 线圈上的感应电动势约为 150 mV。B 线圈上的感应电动势约为 300 mV。

归纳 感应电动势的大小与匝数成正比。

在两个实验的基础上归纳出法拉第电磁感应定律: 电路中感应电动势的大小跟穿过这一电路的磁通量的变化率成正比, 与线圈的匝数成正比。

(3) 测量磁通量的变化率  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

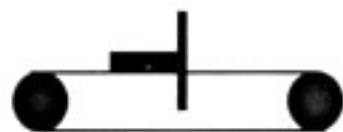


图 4-47

设计思想: 借助“转化思想”, 可比较  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  的大小。

方案 1 在时间相同的情况下, 改变穿过某一面积的条形磁铁数量。

方案 2 在磁铁条数线圈面积、匝数不变的情况下, 改变磁铁穿过线圈的时间。

考虑到条形磁铁的磁性不可能完全一样, 所以选择方案 2。在传送带上固定一条形磁铁, 让传送带以  $v$ 、 $2v$ 、 $4v$  速度运动, 控制  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  成倍数变化, 实验装置如图 4-47 所示。

实验器材: 可成倍数控制速度的同步电动机; 同步带 (上端固定一强磁铁); 线圈 (连接到微电压传感器上), 处理数据的计算机 (已连接传感器) 等。

收集数据: 用同一个线圈进行实验 (即匝数  $n$  一定), 改变使同步电动机的速度成倍数变化; 记录下每次磁铁穿过线圈时, 传感器将采集的数据传送至计算机进行图象处理, 如图 4-48 所示。



图 4-48

实验数据分析:

① 为便于比较感应电动势的大小是否成倍数的变化, 实验时可比较其最大值。

② 从实验中可见: 速度为  $v$ 、 $2v$ 、 $4v$  对应的电压最大值分别为 0.5 V、1.0 V、2.0 V (注意看标尺)。

结论：电路中感应电动势的大小跟穿过这一电路的磁通量的变化率成正比，即法拉第电磁感应定律。

——根据姚武斌（上海市金山中学）和张杰（深圳罗湖区罗湖外语学校）的教学设计改编

### 3. 自感现象

#### (1) 通电自感

实验中注意以下问题：

①如果使用成品实验仪器，一般不需要调整就可以清楚地看到现象。电路如图 4-49 所示。与灯泡  $A_2$  串联的电阻  $R$  的大小与电感  $L$  的纯电阻相等。灯泡  $A_1$  与  $A_2$  规格相同，但是也需要挑选，可以用欧姆表测灯泡的冷态电阻，选择相同的使用。

电源要用稳压电源或电池，不能用整流后的脉动直流做电源。

②没有成品仪器，可以用 J2425 型变压器原理说明器的红色原线圈 1 600 匝套在闭合铁芯上替代图 4-49 中的电感线圈  $L$ ，用欧姆表实测电感线圈的电阻，将电阻  $R$  的大小调至与电感线圈电阻相同。实验装置的电路图如图 4-50 所示。电源电压使用直流 12 V 稳压电源或电池（不能用整流后的脉动直流电源）。图中灯泡为“6.3 V 0.15 A”，选择方法与前述相同。

③需要向学生说明实验中用灯泡延迟发光表现通电线圈的自感现象比较形象、直观。将灯泡换成电流表或发光二极管同样可以观察电感线圈的自感现象。如果灯泡选配不合适，观察不到灯泡延迟发光现象，但是自感现象依然存在。

#### (2) 断电自感

电路如图 4-50 所示。成品仪器实验现象明显，如果灯泡损坏要选择同规格的灯泡。在通电状态下，灯泡发出微弱的光，这样在断电时的闪亮会更加明显。

没有成品仪器，则用可拆变压器绿色线圈的 400 匝套在闭合铁芯上作为电感线圈  $L$ ，仍用前述灯泡，电源用直流 4 V，断开开关的速度要快，才能产生较大的自感电动势。

说明：通电自感实验所用的电源不能用整流后的脉动电流，因为脉动电流含有交流成分，电感  $L$  对其有较大的阻抗，不仅在通电的瞬间产生自感电动势，而且在通电后仍然有阻碍作用，稳压电源或电池其电流恒定，电感  $L$  只在通电的瞬间有阻碍作用，电流达到稳定状态时只有纯电阻的作用而无自感电动势。

资料：分别演示通、断电自感，学生可能误认为每种线圈只能在一种条件下产生自感电动势，改用图 4-51 实验装置的电路图演示可消除此误解。 $L$  为变压器原理说明器的 800 匝线圈套在闭合铁芯上， $L_1$ 、 $L_2$  为“6.3 V 0.15 A”小灯泡， $R$  的阻值要调到和线圈  $L$  的直流电阻相等。实验时先不接通  $S_1$ ，当  $S$  接通的瞬间，可看到  $L_1$  比  $L_2$  后亮，达到稳定后亮度相同。保持  $S$  接通，把  $S_1$  也接通，再迅速切断  $S$ ，可看到  $L_2$  猛亮一下再熄灭。也可用图 4-52 演示， $L$  为变压器原理说明器的 400 匝或 200 匝线圈套在闭合铁芯上，两灯泡规格同上， $R$  的阻值也调到和  $L$  的直流电阻相等。接通  $S$  的瞬间，由于  $L$  的自感， $L_1$  先亮且发光逐渐变弱些， $L_2$  后亮且发光逐渐增强，达到稳定后两灯亮度相同。断开  $S$  的瞬间， $L_2$  立即熄灭， $L_1$  先猛亮一下再熄灭。

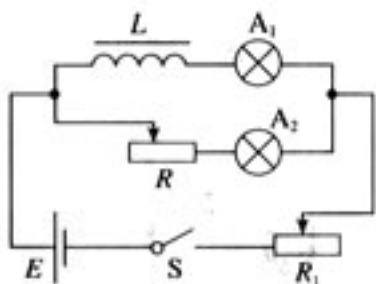


图 4-49

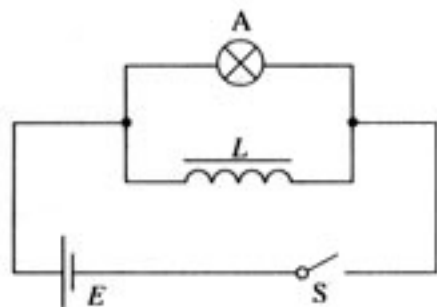


图 4-50

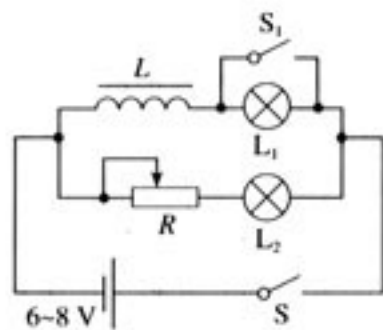


图 4-51

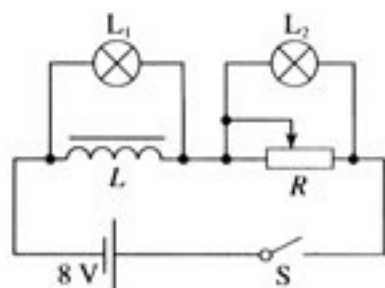


图 4-52

在 J2423 型可拆变压器或老产品“万用变压器”上，参照上文选用匝数近似的线圈也能完成以上实验。也可用 40 W 日光灯镇流器代替图 4-49 中的铁芯线圈演示通电自感，只需电源电压改为 8 V。用任何规格的日光灯镇流器都可以按图 4-53 电路演示断电自感。N 为日光灯启辉器中的氖泡（启辉电压一般在 140 V 以上），当  $L$  为 40 W 镇流器时取  $U=3$  V，当  $L$  为 8 W 镇流器时取  $U=4$  V。S 接通时氖泡不亮，S 迅速切断的瞬间氖泡闪光，表明产生了很大的自感电动势。如果 N 改用试电笔中的氖管（启辉电压约 70 V），电源电压再低些也能成功。

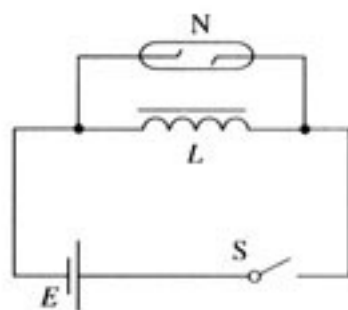


图 4-53

空心线圈同样能产生自感电动势。可仍按图 4-53 电路演示， $L$  用变压器原理说明器的 400 匝空心线圈，N 为试电笔中氖管， $E$  取 4 V。切断 S 的瞬间 N 也会闪光。

#### 4. 用示波器观察通电自感与断电自感

(1) 用计算机教学辅助系统做断电自感实验，如图 4-54 所示，将电流传感器与电阻串联，开关断开前后可以看到电阻  $R$  的电流方向相反，与后文中图 4-58 乙相仿。

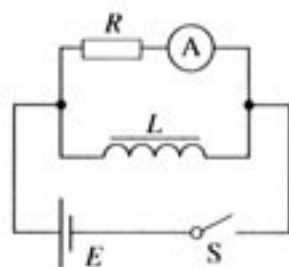


图 4-54

(2) 可以用示波器观察通电自感与断电自感，其曲线和用传感器、计算机看到的曲线相同。所不同的是用电流传感器实验，在计算机屏幕上看到的是电流变化曲线，而用示波器实验输入到示波器的是电压信号，观察的是电压变化曲线。在示波器上同样可以测量电压的大小。

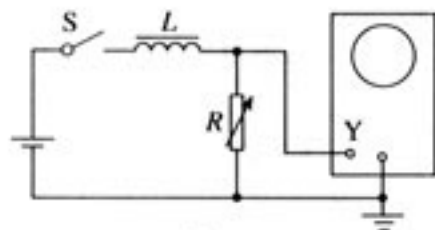


图 4-55

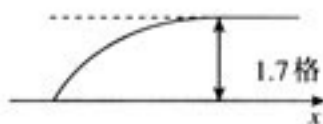


图 4-56

① 通电自感的实验电路如图 4-55 所示，电感  $L$  仍选择可拆变压器红色初级线圈（1 600 匝，直流电阻约为  $26 \Omega$ ，套在闭合铁芯上）或日光灯镇流器（40 W、30 W 均可，直流电阻约为  $50 \Omega$ ），电阻  $R$  用电阻箱调至  $60 \Omega$ ，电源用 6 V 稳压电源或干电池（不能用整流后的脉动直流电源），示波器为 J2458-1 型或其他型号。实验时首先调整示波器方波电压，使正负半周相距半格，从示波器说明书可知此时每格为 200 mV。然后将 Y 轴调至衰减  $\times 10$  挡，则每格电压为 2 000 mV，即 2.0 V。将 X 轴微调旋钮逆时针旋到频率最低位置，调整扫描线至屏幕中央与横坐标轴吻合。示波器 Y 输入的耦合方式取 DC（直流）。当闭合开关 S 的瞬间，



可以看到电阻  $R$  两端的电压变化曲线如图 4-56 所示, 电压的最大值为  $1.7 \times 2.0 \text{ V} = 3.4 \text{ V}$ , 通过电感  $L$  和电阻  $R$  的最大电流为  $5.7 \times 10^{-2} \text{ A}$ , 通过电阻  $R$  的电流变化曲线形状与电压变化曲线一致。由于示波器显示的图线时间较短 (一般示波器为中余辉), 不能将电压变化曲线驻留在屏幕上, 可重复做几次, 画出大致的曲线形状进行分析。

② 断电自感的实验电路图如图 4-57 所示, 电感  $L$ 、电阻  $R$ 、电源电压以及示波器的调整都和通电自感实验相同。当闭合开关  $S$  扫描线上升至  $X$  轴的上方约 2.2 格, 即电压为 4.4 V (图 4-58 甲)。当断开  $S$  的瞬间, 自感电动势通过电阻  $R$  放电, 其电压曲线如图 4-58 乙所示, 放电曲线在  $X$  轴的下方并逐渐衰减到 0, 最大值为 2.8 格即电压最大值为 5.6 V, 在电阻两端断电自感电压变化总值达 10 V 左右。电阻  $R$  上的放电电流方向与通电电流方向相反。

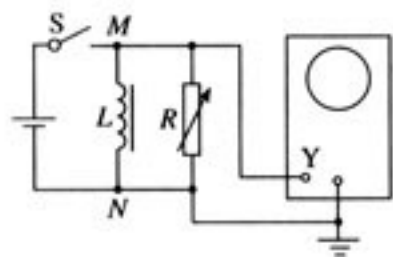


图 4-57

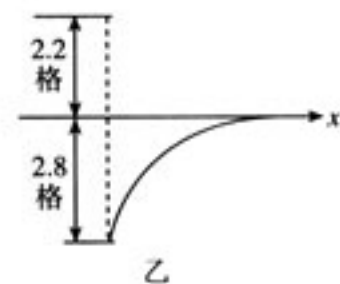
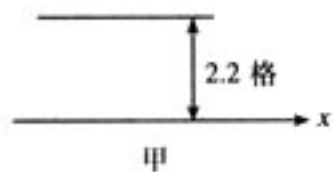


图 4-58

③ 一般的学校都有足够数量的学生用示波器, 可以按图 4-55 和图 4-57 所示的实验器材和电路开展实验活动。

教科书第 6 节中的“做一做”栏目是用传感器观察通电和放电时电流变化情况的实验, 可以使用上海市中小学数字化实验系统研发中心和山东远大公司研制的数字化实验系统 (DIS-Lab) 中的电流传感器。观察效果与用示波器时相似。

### 5. 用示波器观察铁芯中涡流形成的电压波形和涡流电压的大小

实验器材: 变压器原理说明器 (J2425 型) 用红色线圈 (1 600 匝)、极掌、条形磁铁、示波器、家庭电灯用的拉线开关  $S$  (不要用低电压用的单刀单掷开关)、多用电表。

实验方法:

① 如图 4-59 所示, 将 1 600 匝红色线圈套在 U 型铁芯上, 条形磁铁、极掌分别安放在 U 型铁芯上, 条形磁铁与极掌之间留下  $0.5 \sim 1 \text{ cm}$  的距离后固定在铁芯上。用多用电表电阻挡测试一下线圈接线柱与极掌是否连接, 指针不偏转, 说明线圈与极掌之间是断路。

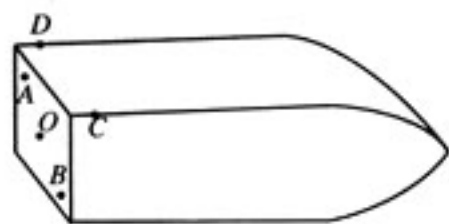
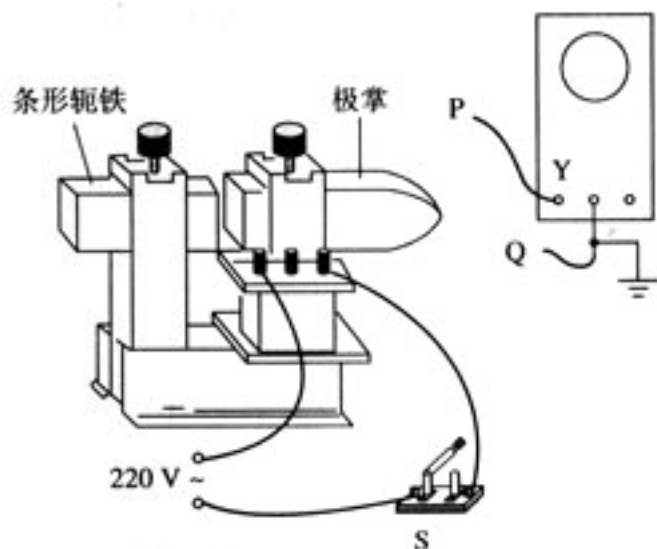


图 4-59



② 示波器 Y 轴调整在衰减  $\times 1$  挡或  $\times 10$  挡，X 轴扫描频率调整在  $10 \sim 100$  Hz 范围。Y 轴和地之间的输入导线可用多用表的表笔，作为探针。

③ 红色线圈经过开关 S 接在 220 V 交流电源上。闭合开关 S。因为极掌是一整块软铁做成，所以在极掌铁芯内部产生涡流，并形成涡流电压。将示波器 Y 轴和地的探针 P、Q 与极掌上不同的两个点接触，如 AO、AB、AC 或 CD。在示波器屏幕上都可以看到涡流交流电压的正弦波波形。如果示波器事先调整好每小格所测量的电压大小，根据涡流电压的幅度，还可以测出不同的两点之间涡流电压的大小。条形磁铁是用硅钢片制成，每一片硅钢片之间是绝缘的，其涡流电流控制在每一片硅钢片的最小范围内，在条形磁铁的端面检测不到明显的涡流电压波形。

④ 断开开关 S，探针 P、Q 仍与上述各点接触则在示波器上看不到涡流电压波形。可知实验步骤③中所看到的正弦电压波形是极掌中由于电磁感应形成的涡流电压波形，而不是线圈中 220 V 交流电压波形。

⑤ 注意安全。线圈的输入接线柱接在 220 V 交流电源上，最好用绝缘胶布裹上防止误碰而触电。通电时间要短些，避免线圈过热。

另外，用计算机教学辅助系统也可以完成涡流电压波形的观测。用电压传感器检测极掌上任意两点涡流电压，计算机屏幕同样可以显示涡流电压波形，并能够测量其大小。

## 第五章 交变电流

### 课程标准的要求

1. 知道交变电流，能用函数表达式和图象描述交变电流。
2. 通过实验，了解电容、电感对交变电流的导通和阻碍作用。
3. 通过实验，探究变压器电压与匝数的关系。
4. 了解从变电站到用户的输电过程，知道远距离输电时应用高电压的道理。

### 一、本章教材概述

这一章讲述的交变电流知识，是第四章“电磁感应”知识的具体应用。在电磁感应现象发现之初，英国财政大臣问道：“它到底有什么用呢？”法拉第回答说：“也许要不了多久你就可以对它收税了。”生活在现代化的我们，生活中主要使用的交变电流就是应用电磁感应现象产生的。本章也是《物理选修3-1》第二章“恒定电流”内容的进一步扩展。通过本章的学习可以使学生了解到，不仅有大小和方向不变的恒定电流，还有大小和方向都发生变化的交变电流。交变电流与恒定电流有相似的地方，也有自己特殊的规律。

本章共有5节，大致可以分为三个单元。第一单元包括第1、2两节，介绍正弦交变电流的产生和描述，这是本章的概念基础；第二单元为第3节，讨论的是在简单的交流电路中，电感、电容元件对交流电路的影响；第三单元包括第4、5节，了解在生产 and 生活中广泛应用的变压器的原理，及其在电能输送中所起的作用。

在编写本章时还有以下思考：

#### 1. 注重学生的自主学习和探究性学习

关于交变电流的产生，教科书并没有直接给出线圈在各个位置时电流的方向，而是以问题的方式引导学生自己分析，从而对交变电流的方向变化有所了解。

又如，在“变压器”一节设置了“探究变压器线圈两端的电压与匝数的关系”的实验。在这个活动中，初级、次级电压关系的引入与传统教材不同：“根据前面‘思考与讨论’中看到的现象及你对变压器原理的理解，你认为线圈两端的电压与线圈的匝数可能有什么关系？能不能简单地说，线圈的匝数越多它两端的电压就越高？也许两个线圈的匝数都对副线圈两端的电压有影响？也许……”在这里，“也许……也许……”体现了科学探究中“猜想与假设”这一要素。另外，考虑到学生已经多次经历过探究过程，此处的设计具有较大的开放性，其操作步骤和电路图都需要学生自己设计，教科书只是在个别关键点上进行了说明。

#### 2. 注意将直流与交变电流的特点进行比较

教科书除了在有关各节分别介绍直流电与交变电流的特点之外，还通过复习使学生对交变

电流的优点有全面的认识。与此同时，也讲明直流电在生产和科研中仍是不可缺少的，避免对事物绝对化的片面理解。

### 3. 重视交变电流与实际生活的联系

在课文、习题和阅读材料中注意联系实际，希望对提高学生的综合分析能力和联系实际解决问题的能力起到积极作用。本教科书重视反映现代科技成果，例如直流输电、超导电缆输电等；也重视反映现代社会对电的过分依赖所带来的一些潜在的危害，STS栏目“大面积停电的思考”就反映了人们对这些问题的思考。

#### 课时分配建议

第1节	交变电流	1课时
第2节	描述交变电流的物理量	1课时
第3节	电感和电容对交变电流的影响	1课时
第4节	变压器	1课时
第5节	电能的输送	1课时

## 二、教材分析与教学建议

### 第1节 交变电流

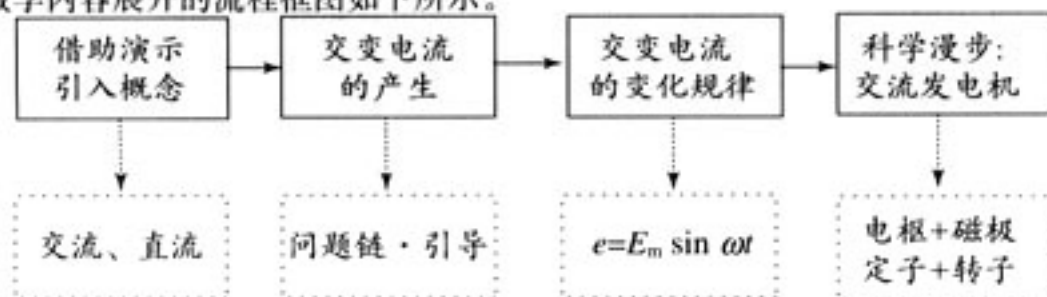
#### 1. 教学目标

- (1) 会观察电流（或电压）的波形图，理解交变电流、直流的概念。
- (2) 分析线圈转动1周中电动势和电流方向的变化，能对交变电流的产生有比较清楚的了解，具有运用基本原理解决新情境下问题的能力。
- (3) 知道交变电流的变化规律及表示方法，知道交变电流的峰值、瞬时值的物理含义。

#### 2. 教材分析与教学建议

交变电流是生产和生活中最常用到的电流，而正弦式电流又是最简单和最基本的。正弦式电流产生的原理是基于电磁感应的基本规律，所以本章是前一章的延续和发展，是电磁感应理论的具体应用。另一方面，本节知识是全章的理论基础，由于交变电流与直流不同，因此，它对各种元件的作用也不同。正因为交变电流的特殊性，才有了变压器及其广泛的应用。所以，本节内容有承上启下的作用，教学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规律。

具体教学内容展开的流程框图如下所示。





### (1) 交变电流

过去，我们常先分析矩形线圈在匀强磁场中转动时产生的感应电流，得知这个电流的大小、方向在不断变化，由此引入交变电流的概念。这样的理论分析还是比较抽象的，对于现在的高中学生来说，从墙面插座孔中获得电流早就习以为常，那么，这样的电流与手电筒中的电流有什么不同吗？这是一个很自然的问题。教科书通过传感器和计算机（或示波器）展现两种电流变化的不同情况，通过图象的对比，先了解什么是交变电流，而后再学习交变电流是怎样产生的。有利于学生在感性认识的基础上再做理性分析，达到降低教学难度的效用。

对于直流电和交变电流的波形图问题，如果不具备用电流传感器观察直流和交变电流波形的条件，可以用示波器进行观察。由于示波器上显示的图形比较小，很多学生看不清楚，所以，最好做到两位学生使用一台示波器进行分组实验。如果条件不允许，至少用一台进行演示也好。



### 观察直流和交变电流的波形图

实验电路如图 5-1 所示。

实验器材：示波器、滑动变阻器、电池（3V）、开关及导线。

实验操作：

① X 轴扫描置于“10~100 Hz”挡，调节扫描线成一直线并与横坐标轴重合。

② Y 轴衰减置于×10 挡，把“DC、AC”开关置于“DC”位置。

③ 闭合开关 S，滑片 P 自 N 向 M 移动，要以看到扫描线为一直线且向上（如电池极性与图中相反则向下）移动。

④ 将图 5-1 中的电池改为学生电源的交流输出，电压选择 2 V 或 3 V，把“DC、AC”开关置于“AC”位置。调节滑片 P 自 N 向 M 至适当位置，调节 Y 轴增益旋钮及 X 轴扫描频率微调旋钮，使屏幕出现 1~2 个周期的正弦波形。另外，也可以直接观察示波器内提供的 50 Hz 正弦交流波形。

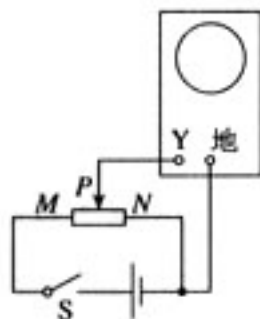


图 5-1

### (2) 交变电流的产生

对于交变电流的产生，教科书采取由感性到理性，由定性到定量，逐步深入的讲述方法。为了有利于学生理解和掌握，教学中要尽可能用模型或多媒体动画配合讲解。如果用问题链的方式引导学生分析线圈转动 1 周中电动势和电流的变化，问题的安排要讲究一定的梯度，逐步深入，以降低学习难度，具体可设置如下问题：

① 教科书图 5.1-3 中，矩形线圈转动过程中，哪些边会产生电动势？

② 只有 AB、CD 边产生电动势，怎样由立体图画出平面图？注意在平面图基础上分析后续问题。

③ 在线圈由甲转到乙的过程中，AB 边中电流向哪个方向流动？在线圈由丙转到丁的过程中，AB 边中电流向哪个方向流动？

④ 当线圈转到什么位置时线圈中没有电流，转到什么位置时线圈中的电流最大？这些位置

磁通量及磁通量的变化率等还有什么特点？

⑤大致画出通过电流表的电流随时间变化的曲线，从  $E$  流向  $F$  的电流记为正，反之为负。在横坐标上标出线圈到达甲、乙、丙、丁几个位置时对应的时刻。

在分析中注意运用楞次定律、法拉第电磁感应定律这些基本原理解决新情境下的问题，以及运用数学图象对物理量随时间的变化情况进行描述。其中，用图象表示交变电流的变化规律是一种重要的方法。它形象、直观，易于被学生接受。教学中，可引导学生先采用描点法作图，然后在平面图中用法拉第电磁感应定律推导交变电流的变化规律，以加深理解。需要指出的是，教科书图 5.1-3 给出的是原理图，而实际的交流发电机比这个要复杂得多。教学中就应该设法突出问题的本质特征。

### 教学片段

#### 观察教学发电机发出的交变电流

实验装置：如图 5-2 所示。用两个不同颜色的发光二极管连接在教学用发电机的两端，观察两个发光二极管的发光情况。

实验操作：实验时开始摇动发电机的速度要慢，可以观察到两个发光二极管轮流发光的情况；转速微微加快，两个发光二极管几乎同时闪闪发光，就分不出先后了。

注意事项：转速加快后电压增高，可能烧坏发光二极管，所以，有必要在电路中串联一个保护电阻（约  $330\ \Omega$ ，电阻的大小只影响发光二极管的亮度），防止发光二极管被烧坏。

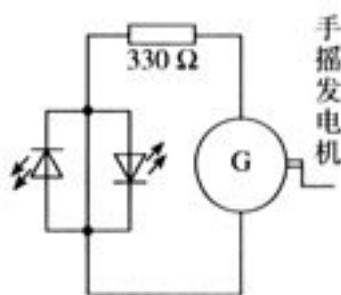


图 5-2

### 教学片段

#### 用示波器观察教学发电机发出的交流电压波形

实验装置：实验电路如图 5-3 甲所示。

实验操作：教学发电机接在  $M$ 、 $N$  两端（图 5-3 甲中的交流电压表可以不接）。示波器输入耦合开关置于“DC”，Y 轴衰减置于“ $\times 100$ ”，X 轴扫描置于“ $10\sim 100\ \text{Hz}$ ”，均匀转动发电机，同时适当调节 X 轴频率微调旋钮，就可以看到发电机发出如图 5-3 乙所示的电压波形。

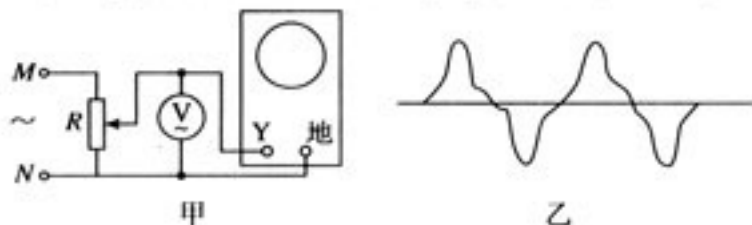


图 5-3

分析：示波器显示的电压波形呈现周期性变化的规律，表明交变电流与直流的区别。另外，电压波形不是严格的正弦波形，其主要原因是教学发电机的磁场不是匀强磁场。

### (3) 交变电流的变化规律

对中学生来说,本节要接受许多新名词。如交变电流、正弦式电流、中性面、瞬时值、峰值(以及下一节的有效值)等。要让学生明白这些名词的准确含义是有一定难度的。例如,交变电流从广义上讲,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。而对中性面的理解,要让学生明确:

①中性面是指与磁场方向垂直的平面,此时线圈中的磁通量最大。

②当线圈位于中性面时,线圈中感应电动势为0。

③当线圈再次转过中性面时,感应电动势的方向改变。

要让学生知道,交变电流有许多种,正弦式电流只是其中比较基本、比较简单的一种。为什么在生产和生活中使用的大多是交变电流?交变电流和直流电各有什么优缺点?这些问题的提出,目的是引发学生的思考,使学生在本章的学习中始终关注着交变电流的特点和有意识地在各节的具体问题中与直流电的对比,这不仅有助于知识的纵向联系和整体把握,还可以开阔学生思路,给学生的思维留下更大的空间。



#### 教学片段

#### 推导公式 $e = E_m \sin \omega t$

提出问题:如图5-4所示。在磁感应强度  $B$  的匀强磁场中,矩形线圈逆时针绕中轴匀速转动,角速度为  $\omega$ 。图中标  $a$  的小圆圈表示线圈  $ab$  边的横截面,标  $d$  的小圆圈表示线圈  $cd$  边的横截面, $ab$ 、 $cd$  长度为  $L_1$ ,  $ad$ 、 $bc$  长度为  $L_2$ ,设线圈平面从中性面开始转动。则经时间  $t$

- ①线圈与中性面的夹角是多少?
- ② $ab$  边的速度多大?
- ③ $ab$  边速度方向与磁场方向夹角多大?
- ④ $ab$  边产生的感应电动势多大?
- ⑤线圈中感应电动势多大?

引导学生分析:

- ①线圈的角速度是  $\omega$ ,经过时间  $t$ ,它与中性面的夹角是  $\omega t$ 。
- ② $ab$  边绕中心轴做匀速圆周运动,角速度是  $\omega$ ,转动半径为  $\frac{L_2}{2}$ ,所以  $ab$  边的速度是  $\frac{\omega L_2}{2}$ 。
- ③ $ab$  边速度方向与磁场方向夹角与线圈从中性面转过的角度相同,也是  $\omega t$ 。
- ④ $ab$  边产生的感应电动势  $e_1 = BL_1 \omega \frac{L_2}{2} \sin \omega t$ 。
- ⑤线圈中感应电动势  $e = 2BL_1 \omega \frac{L_2}{2} \sin \omega t = B\omega S \sin \omega t = E_m \sin \omega t$

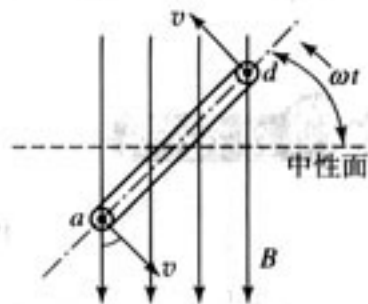


图 5-4

教师通过问题链的方式,引导学生进行理论探究,逐步得出公式  $e = E_m \sin \omega t$ 。这样处理,有利于培养学生对复杂问题的研究,也有利于学生对知识的掌握和能力的提高。



### 3. 问题与练习

内容分析

本节习题安排是由简单到复杂，由定性到定量。

第1题通过对灯丝颤动的分析，让学生体会到日常生活中常用到的电流是交变电流。

第2题的目的是让学生能确切理解磁通量、磁通量变化率的含义。进一步理解法拉第电磁感应定律，以及感应电动势的大小与磁通量的变化率成正比，而与磁通量 $\Phi$ 没有必然的联系。

第3题通过定量计算进一步理解感应电动势的最大值。

第4、第5题通过定量计算，使学生理解和掌握交变电流的产生及变化规律。

解答与说明

1. 答：磁铁靠近白炽灯，发现灯丝颤动。因为通有交变电流的灯丝处在磁场中要受到力的作用，灯丝受到的磁场力的大小、方向都随时间做周期性变化，因而灯丝颤动。

2. 答：这种说法不对。根据法拉第电磁感应定律，

感应电动势的大小与磁通量的变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 成正比，而与

磁通量 $\Phi$ 没有必然的联系。假定线圈的面积为 $S$ ，所在磁场的磁感应强度为 $B$ ，线圈以角速度 $\omega$ 绕垂直于磁感线的轴匀速转动，线圈在中性面时开始计时，则磁通量 $\Phi$ 随时间变化的关系为： $\Phi = BS\cos\omega t$ ，其图象如图5-5所示。线圈平面转到中性面瞬间（ $t=0$ ， $t=T$ ），

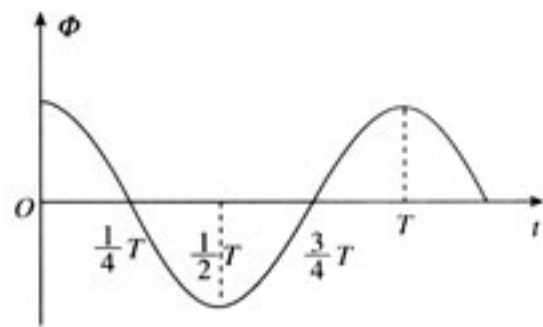


图 5-5

穿过线圈的磁通量 $\Phi$ 虽然最大，但是，曲线的斜率为0，即，磁通量的变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=0$ ，感应电

动势为0；而线圈平面转到跟中性面垂直时（ $t=\frac{1}{4}T$ ， $t=\frac{3}{4}T$ ），穿过线圈的磁通量 $\Phi$ 为0，

但是曲线的斜率最大，即磁通量的变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 最大，感应电动势最大。

3. 解：单匝线圈转到线圈平面与磁场平行位置时，即教科书图5.1-3中乙和丁图时，感应电动势最大。即 $E_m = 2BL_{AB}v = 2BL_{AB}\omega \frac{L_{AD}}{2} = BL_{AD}L_{AB}\omega = 0.01 \times 0.20 \times 0.10 \times 2\pi \times 50 \text{ V} = 6.3 \times 10^{-2} \text{ V}$

4. 解：假定发电机线圈平面位于中性面开始计时，感应电动势瞬时值表达式 $e = E_m \sin\omega t = 400\sin(314t)$ 。

不计发电机线圈的内阻，电路中电流的峰值 $I_m = \frac{E_m}{R} = \frac{400}{2000} \text{ A} = 0.2 \text{ A}$ 。

电流的瞬时值表达式 $i = I_m \sin\omega t = 0.2\sin(314t)$ 。

5. 解： $KL$ 边与磁场方向呈 $30^\circ$ 时，线圈平面与中性面夹角为 $60^\circ$ ，此时感应电动势为：

$e = E_m \sin\omega t = BS\omega \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}BS\omega$ ，电流方向为 $KNMLK$ 。

## 第2节 描述交变电流的物理量

### 1. 教学目标

(1) 知道交变电流的周期、频率的含义，以及它们相互间的关系。知道我国生产和生活用



电的周期（频率）的大小。

(2) 知道交变电流的峰值和有效值的意义。能利用有效值定义计算某些交变电流的有效值。

(3) 会应用正弦式交变电流有效值公式进行有关计算。

(4) 具有运用类比、迁移的科学方法分析新问题的意识和能力。

## 2. 教材分析与教学建议

教学中要让学生知道，用图象对交变电流的描述是全面的、细致的。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的变化，这就需要用一些特殊的物理量来描述它。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；而有效值反映的是交变电流的热效应在时间上的平均效果。交变电流的有效值是本节教学的重点，也是教学的难点。

### (1) 周期和频率

教科书中提到“频率是供电质量的重要标志”。供电质量由两大部分组成，即电能质量和供电可靠性。电能质量是表征电能品质的优劣程度，包括电压质量与频率质量两部分。电压质量又分为幅值与波形质量两方面，频率质量则以频率偏差来衡量。我国的电能质量国家标准中规定电力系统频率允许偏差为：一是正常允许为 $\pm 0.2$  Hz，根据系统容量可以放宽到 $\pm 0.5$  Hz；二是用户冲击引起的频率变动一般不得超过0.2 Hz。频率偏差越小，供电越稳定，供电质量就越好。

### (2) 有效值

新教科书引入有效值概念的思路与过去教科书基本相同，而引入的方式略有不同。新教科书通过“思考与讨论”的栏目，设计一个让学生自主研究交变电流通过电阻时产生热量的问题情境，为新概念的引入做了很好的铺垫。

由于交变电流的大小和方向随时间变化，它产生的效果也随时间变化，但在处理实际问题中，常常只要知道它的平均效果即可。例如，流过电灯的交变电流不断变化，为什么看不出灯光会一亮一暗？这是由于电流变化太快，而人眼有视觉暂留的缘故。当电流变小时，灯丝还来不及变冷，电流又大了，所以灯丝总是热的。也就是说，灯光的亮度是电功率随时间变化的平均效果。为此，我们可以从交变电流的热效应考虑，某个交变电流与多大的恒定电流相当，由此引入有效值的概念。

怎样衡量交变电流的平均效果呢？我们可以让交变电流与恒定电流分别通过大小相同的电阻，如果在1周期内交变电流产生的热效应与等时间内恒定电流产生的热效应相同，就可以用恒定电流的电压和电流来表示交变电流的电压和电流的平均效果。换句话说，在交变电流中有实际意义的往往不是瞬时功率，而是它在1周期内的平均值，这个平均值如果不为0（对于纯电阻电路就是这样），则在形式上写成与直流电路功率相同的公式： $P=IU$ ， $I$ 和 $U$ 就是交变电流的有效值，有效值的实际意义也正是基于有效值与平均功率的如此密切的关系。特别值得注意的是，教科书第一次明确地用1周期 $T$ 来定义有效值，这使得有效值的概念更加准确。



## 交变电流的有效值

提出问题：交变电流在不同时刻，瞬时值不同，那么，我们用什么来表示交变电流的平均效果呢？即如果有一个最大值为  $I_m$  的交变电流，如何计算它在时间  $t$  内作用在电阻  $R$  上产生的热量呢？能否用恒定电流的公式来计算，如果可以，那么公式中的电流应该用什么值来代入呢？

实验设计和进行实验：选用两个完全相同的水壶，装入温度、质量相同的水，分别用恒定电流和交变电流给电阻丝加热（图 5-6）。① 如果两壶水在相同的时间内被烧开，那么这两个电流有何关系？

分析：实验说明两电流产生的热效应相同，它们在相同的时间内产生热量相同，有相同的热功率。把

恒定电流的数值代入公式  $Q=I^2Rt$ ，就能计算交变电流在一定时间内产生的热量。此时，恒定电流的电流值称为交变电流的有效值。有效值代表着交变电流的平均作用效果（从热效应来看）。

小结：让交变电流和恒定电流通过同样阻值的电阻，如果它们在同一时间内产生的热量相等，则这一交变电流的电流（电压）有效值就跟这个恒定电流的电流（电压）相等。

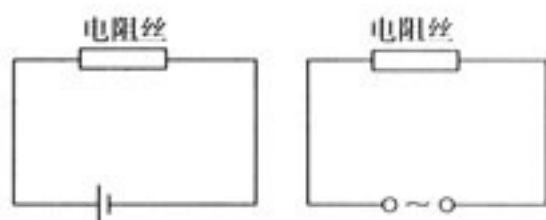


图 5-6

### (3) 有效值与峰值

① 要让学生知道，提到交变电流的电压、电流、电动势时，如果不加特别说明，通常指的都是交变电流的有效值。交流用电器的额定电压和额定电流指的是有效值。交流电流表和交流电压表的读数是有效值。保险丝的熔断值为有效值。电容器的击穿电压为峰值（最大值）。

② 正弦电流的有效值和峰值的关系，教科书中是直接给出的，不要求加以证明，但它十分有用，应要求学生记住。另外，要让学生明确，这一关系只对正弦式交变电流成立，对其他波形的交变电流一般不成立。

③ 教学中需明确，有效值和最大值都是反映电流强弱或电压高低的物理量。在实际应用中，要视具体需要选择一个来解决问题。在计算平均功率时，应该用有效值。在选择电容器的工作电压时，却必须考虑加在这个电容器上的实际电压的峰值。

怎样帮助学生区别交变电流的峰值、平均值及有效值呢？教学中可以通过解决一些实际问题的方式来完成。例如，在计算交变电流通过电阻产生的热功率时，只能用有效值，而不能用平均值。在计算通过导体横截面的电荷量时，只能用平均值，而不能用有效值。

峰值是交变电流能达到的最大数值，是电流变化中的某一瞬时值。对纯电阻电路来说，没有什么应用意义。但是，对含电容电路，在判断电容器是否会被击穿时，则需考虑交流的峰值是否超过电容器的耐压值。

### 3. 问题与练习

#### 内容分析

第 1 题通过对我国电网中交变电流的分析，让学生明确，交变电流在 1 周期内，电流方向

① 实验时可用滑动变阻器调节，使图 5-6 中的两个电阻丝两端的直流电压和交流电压相等。



改变两次。

第2、3题的目的是使学生对交变电流中的有效值和峰值有确切的理解。让学生知道，提到交变电流的电压、电流、电动势时，如果不加说明，通常是指有效值。但电容器的耐压值指的是峰值。并且，让学生明确，正弦交变电流最大值和有效值之间存在  $I_m = \sqrt{2}I$  的关系。

第4题是一个用图象表示交变电流变化规律的问题。要求学生会根据交变电流的图象，求出周期、频率、电流的峰值等。培养学生通过图象解决物理问题的能力。该题还有一个目的，是让学生通过计算，对正弦交变电流的最大值和有效值有进一步的认识。

第5题是一个求功率的问题，使学生明确求功率应该用有效值。

解答与说明

1. 解：交变电流1周期内，电流方向变化两次，所以1s内电流方向变化的次数为  $\frac{1}{0.02} \times 2$  次=100次。

2. 解：不能把这个电容器接在交流电压是10V的电路两端。因为，这里的10V电压是指交流电压的有效值，在电压变化过程中的最大值大于10V，超过了电容器的耐压，电容器会被击穿。

3. 解：灯泡正常工作时，通过灯丝电流的有效值  $I = \frac{P}{U} = \frac{40}{220} \text{ A} = \frac{2}{11} \text{ A}$ ，电流的峰值  $I_m = \sqrt{2}I = \frac{2\sqrt{2}}{11} \text{ A} = 0.26 \text{ A}$ 。

4. 解：根据图象，读出交变电流的周期  $T = 0.2 \text{ s}$ ，电流的峰值  $I_m = 10 \text{ A}$ 。

频率  $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.2} \text{ Hz} = 5 \text{ Hz}$ 。

电流的有效值  $I = \frac{\sqrt{2}}{2}I_m = 5\sqrt{2} \text{ A} = 7.1 \text{ A}$ 。

5. 解：该电热器消耗的功率  $P = \frac{U^2}{R}$ ，其中  $U$  为电压的有效值  $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ ，所以， $P = \frac{(\frac{U_m}{\sqrt{2}})^2}{R} = \frac{U_m^2}{2R} = \frac{311^2}{2 \times 50} \text{ W} = 967 \text{ W}$ 。

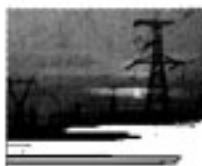
### 第3节 电感和电容对交变电流的影响

#### 1. 教学目标

- (1) 通过实验，了解电感器和电容器对交变电流的阻碍和导通作用。
- (2) 知道感抗和容抗的物理意义及影响因素。
- (3) 通过猜想、假设、实验、交流合作与分析论证，体验科学探究过程。

#### 2. 教材分析与教学建议

本节教学突出交变电流与恒定电流的区别，这有利于加深学生对交变电流特点的认识，而关于感抗和容抗的问题，这里不要求进行深入的讨论。教学中可结合学校的实际情况，尽可能多用实验说明问题，不必在理论上进行过细的讨论。



### (1) 电感对交变电流的阻碍作用

根据电磁感应的知识,学生不难理解感抗的概念和影响感抗大小的因素。教学中,要注意适当复习或回忆已学过的有关知识,尽可能让学生通过独立思考、同伴交流、师生互动的学习方式进行学习。线圈的自感系数 $L$ 越大,交变电流的频率越高,则线圈中的自感电动势越大。自感电动势对交变电流的阻碍作用就是通过感抗反映出来的。这样既有利于理解新知识,又有利于培养学生的能力,使学生学会如何把知识联系起来,形成知识结构,进而独立地获取新知识。

①由于一般的直流电源的电压和交流电源的电压的有效值正好相等的情况很少,要分析教科书图 5.3-1 中电感对交直流的影响,可以按图 5-7 所示电路进行实验。在 MN 两点间分别用直流电压表和交流电压表监测电压,用滑动变阻器 $R$ 调节,使图 5-7 中 MN 两端的直流电压和 MN 两端的交流电压相等,观察灯泡的亮度。

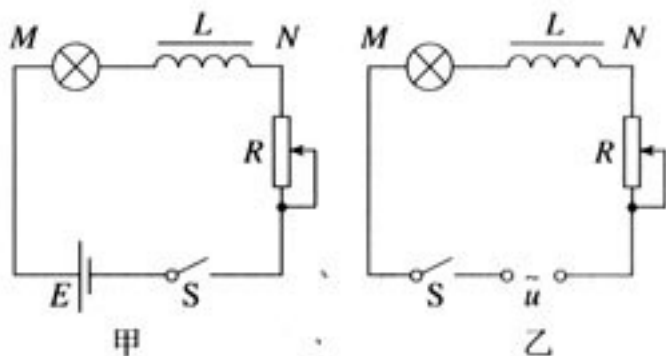


图 5-7

②灯泡的额定电压根据所用的电感 $L$ 的大小以及电感线圈的电阻而定。电感 $L$ 的选用,可以用学生实验的变压器线圈或可拆变压器的副级线圈,线圈直流电阻约为 $5\sim 10\ \Omega$ ,灯泡选择 $3.8\sim 12\ \text{V}$ 。灯泡发光时的电阻与电感线圈的直流电阻大致相同。先调节直流电压,使灯泡正常发光。再调节交流电压的有效值与直流电压相同,观察灯泡的发光。如果电感 $L$ 较大,灯泡可能不发光,可以减小电感 $L$ (减少线圈匝数,如果是可拆变压器,可将铁芯拆开减小电感量)。另外,也可以提高交变电流的电压值,直至灯泡发光,用交流电压表测 MN 两端的电压可以看到比直流电压高得多。

③直流电源可以用电池或稳压电源。

④实验中所用的电压是低电压,仪器条件许可的学校可以让学生自己进行实验。



### 教学片段

#### 研究电感线圈对交变电流的阻碍作用

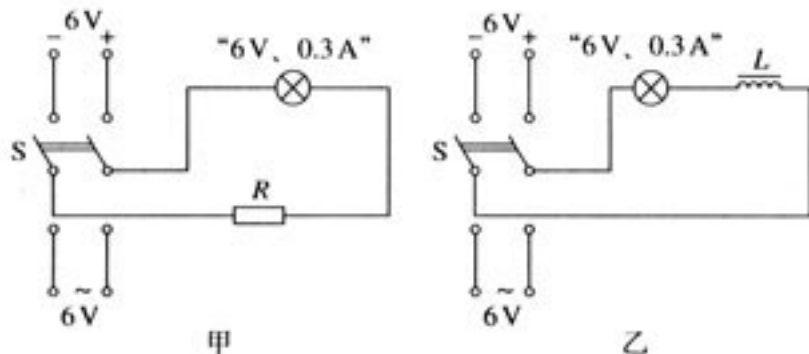


图 5-8

演示 1: 如图 5-8 甲所示。电路分别接到交、直流电源上,观察两次灯的亮度。

(灯的亮度相同,说明电阻对交流和直流的阻碍作用相同。)

演示 2: 如图 5-8 乙所示。电路分别接到交、直流电源上,观察两次灯的亮度。

(电键接到直流上,亮度不变;接到交流上,灯泡亮度变暗。说明线圈对直流和交变电流



的阻碍作用不同。)

分析：线圈对直流的阻碍作用只是电阻，而对交变电流的阻碍作用除了电阻之外，还有电感。由电磁感应的知识可知，当线圈中通过交变电流时，产生自感电动势，阻碍电流的变化。电感对交变电流阻碍作用的大小，用感抗来表示。感抗决定于线圈的自感系数和交变电流的频率，线圈的自感系数越大，自感作用就越大，感抗就越大；交变电流的频率越高，电流变化越快，自感作用越大，感抗就越大。

教师也可以演示不同自感系数的线圈对交变电流的影响和同一线圈对不同的频率的交变电流的不同阻碍作用。

### (2) 交变电流能够通过电容器

对于交变电流能“通过”电容器的道理，可以利用教科书图 5.3-5，结合电容器充、放电的过程加以说明，这一点使学生有所了解即可。



#### 教学片段

### 交变电流能够通过电容器

演示：实验电路如图 5-9 所示。开关 S 分别接到直流电源和交流电源上，观察现象，说明道理。

接通直流电源，灯泡不亮；接通交流电源，灯泡亮。说明直流不能通过电容器；交变电流能够“通过”电容器。

分析：电容器的两极板间是绝缘介质，在电容器的充、放电的动态过程中，自由电荷并没有通过电容器两极板间的绝缘介质。当电源电压升高时，电容器充电，电荷向电容器的极板上集聚，形成充电电流；当电源电压降低时，电容器放电，电荷从电容器的极板上放出，形成放电电流。电容器交替进行充电和放电，电路中就有了电流，表现为交变电流通过了电容器。

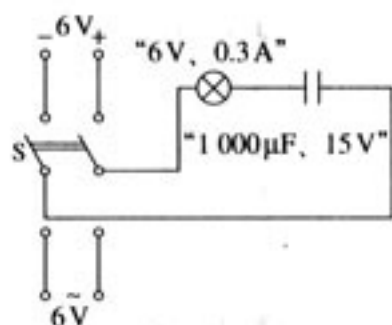


图 5-9

### (3) 电容器对交变电流的阻碍作用

①对于容抗的概念和影响容抗大小的因素，教科书直接给出。对此，我们可以做如下定性的解释：频率一定，则电容器充（放）电的时间一定，又因电压一定，根据  $Q=CU$  可知，电容  $C$  大的电容器充入（或放出）的电荷量多，因此，充电（或放电）的速率就大，所以，电流也就越大，容抗越小；而电容  $C$  一定时，电容器充入（或放出）的电荷量一定，频率越高，电容器充（放）电的时间越短，充电（或放电）的速率越大，容抗也越小。

②教科书图 5.3-4 的演示实验，灯泡选用 3~12 V 均可，电容器电容的大小视灯泡工作电压高低而定，交流电压的高低根据电容器大小而定。电容器应该选用无极性电解电容器。使用有极性电容器时，灯泡点燃的时间要短，否则电解电容器可能被击穿。可以用两个电解电容器串联将电解电容器的两个负极接在一起，将两个正极端分别接在交流电源上，组成无极性电容器，电容器串联后，电容  $C$  减半。其他各种介质电容器的电容大小一般较小，不能满足实验要求。具体参考数据如下。

对 3.8 V 灯泡而言，

20  $\mu\text{F}$ ，交流电压 12~16 V 可以发光；

47  $\mu\text{F}$ ，交流 8~14 V；

220  $\mu\text{F}$ ，交流 6~8 V。

对 6 V 灯泡而言，

220  $\mu\text{F}$ ，交流 8~14 V；

470  $\mu\text{F}$ ，交流 4~10 V；

2 200  $\mu\text{F}$ ，交流 2~6 V。

## 教学片段

### 研究电感线圈、电容器对交、直流的影响

实验准备：如图 5-10 所示。低压交、直流电源，小灯泡，3 个经过包装的电学元件（根据外表不能判断是何元件）。

演示 1：

① 将小灯泡接入电路，调节电源电压使灯泡正常发光；

② 将 1 号电学元件串联接入电路中，观察现象（灯泡变暗）；

③ 将 2 号电学元件串联接入电路中，观察现象（灯泡变得更暗）；

④ 将 3 号电学元件串联接入电路中，观察现象（灯泡仍较暗）。

演示 2：

① 将 1 号元件接入相同电压的直流，观察现象（与接到交流电源上亮度情况相同）；

② 将 2 号元件接入相同电压的直流，观察现象（比原来变亮）；

③ 将 3 号元件接入相同电压的直流，观察现象（亮了一下，然后熄灭）。

分析：1 号元件对交、直流的影响几乎相同；2 号元件对交变电流的影响较大；3 号元件对直流电影响很大，且直流电不能通过 3 号元件。

将这三个元件从暗盒中拿出，分别得出 1 号元件为电阻，2 号元件为电感线圈，3 号元件为电容器。从观察到的实验现象说明，除电阻外，电感线圈、电容器对直流和交变电流的影响程度是不同的，值得研究。

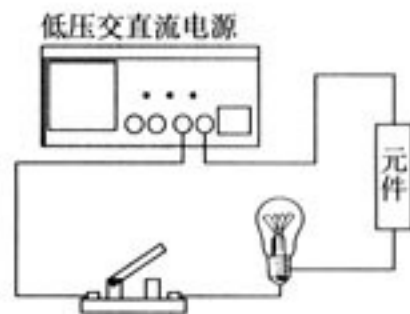


图 5-10

## 教学片段

### 电容器对交变电流的阻碍作用

演示 1：将图 5-9 实验电路中“1 000  $\mu\text{F}$ 、15 V”的电容器两端用导线短路，观察灯泡的亮度。

现象：灯泡的亮度变亮了，说明电容器对交变电流也有阻碍作用，物理上用容抗来表示电容器对交变电流阻碍作用的大小。

演示2：将实验中的电容器换用电容量较小的电容再次进行实验，观察灯泡的亮度。

现象：灯泡的亮度变暗了。实验说明，电容器的电容越小，容抗越大，电容越大，容抗越小。

分析：电容越大，在同样电压下电容器容纳电荷越多，因此充放电的电流越大，容抗就越小。容抗除了决定于电容器电容的大小外，还决定于交变电流的频率，交变电流的频率越高，充放电进行得越快，充放电电流越大，容抗越小，即电容器的电容越大，交变电流频率越高，容抗越小。电容器具有“通交流、隔直流”“通高频、阻低频”的特点。

小结：通过更换电容器，使学生能明白电容虽然能通过交变电流，但是并不是畅通无阻的，而是对交变电流也产生一定的阻碍作用。通过改变电容器的电容大小来说明容抗与电容的关系，说明阻碍作用的大小与电容大小的关系，在实验的基础上引导学生分析容抗与交变电流频率大小的关系。

#### (4) 电感和电容在技术上的应用

①扼流圈是利用电感对交变电流的阻碍作用制成的，有低频扼流圈和高频扼流圈两种（示意实物）。低频扼流圈匝数为几千到超过一万，对低频交变电流有较大的阻碍作用，线圈本身电阻较小，对直流阻碍作用较小；高频扼流圈匝数为几百匝，对低频交变电流的阻碍作用较小，对高频交变电流的阻碍作用很大。

②在电子技术中，从某一装置输出的电流常常既有交流成分，又有直流成分。如果只需要把交流成分输送到下一级装置，只要在两级电路之间接入一个电容器（称为隔直电容器）就可以了。电流通过电容器后，只能是交流部分通过电容器到达后一级装置。反过来，如果只需要把直流成分输送到下一级装置（本节“说一说”栏目），只要采用如图5-11所示电路即可。由于电容器具有“隔直流、通交流”的作用，将电容器 $C$ 与电阻 $R_2$ 并联，交流成分经过电阻 $R_2$ “旁边”的电容 $C$ ，直流成分不能通过电容器而通过电阻 $R_2$ ，这样负载电阻 $R_2$ 上的交流成分就更少了。为尽量减少 $R_2$ 上的交流成分，应该选用自感 $L$ 较大的线圈和电容 $C$ 较大的电容器。

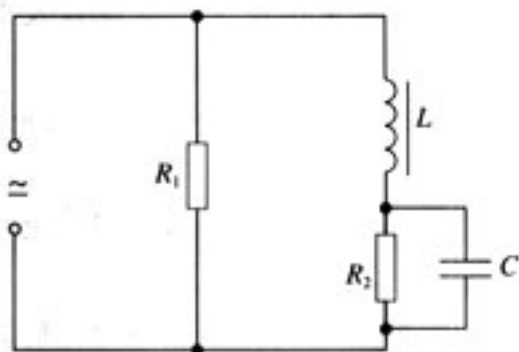


图5-11

③在电子技术中，从某一装置输出的交变电流常常既有高频成分，又有低频成分。如果只需要把低频成分送到下一级装置，只要在下一级电路的输入端并联一个电容器就可以达到目的。具有这种用途的电容器叫做高频旁路电容器。频率越高的交流部分容抗越小，易通过电容器。高频部分电流通过电容器被分流；低频部分电流，由于容抗大不易通过电容器而输入到下一级。

④电容、电感不仅在电容器和电感线圈中存在，而且导线之间、电子元件以及机壳之间也存在。有时会造成较大的影响，这是我们应该注意的。

### 3. 问题与练习

内容分析

第1题使学生对纯电阻、纯电容电路、纯电感电路在交变电流中的电路的影响有清晰的认识。增大频率，电阻的值不变，容抗减小，感抗增大。

第2、3题分别是低频耦合电容和高频旁路电容。通过这两题使学生对电容器具有“隔直

流、通交流”“通高频、阻低频”的作用有明确的认识。

解答与说明

1. 答：三个电流表  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  所在支路分别为：纯电容电路、纯电感电路、纯电阻电路。改换电源后，交流电压的峰值没有变化，而频率增加了。

对于纯电容电路，交流电压峰值不变，则电路两端电压的有效值不变。电容大小  $C$  未变，交变电流频率增大，则容抗变小，电流有效值增大，即  $A_1$  读数增大。

对于纯电感电路，交流电压峰值不变，则电路两端电压的有效值不变。电感大小  $L$  未变，交变电流频率增大，则感抗变大，电流有效值减小，即  $A_2$  读数减小。

对于纯电阻电路，交流电压峰值不变，则电路两端电压的有效值不变。虽然交变电流频率增大，但是对电阻大小没有影响，电阻大小未变，则电流有效值不变，即  $A_3$  读数不变。

说明：拓宽内容可给出容抗、感抗的公式： $x_c = \frac{1}{2\pi fC}$  和  $X_L = 2\pi fL$ 。

2. 答：由于电容器串联在前级和后级之间，前级输出的直流成分不能通过电容器，而交流成分可以通过电容器被输送到后级装置中，输入后级的成分中不含有前级的直流成分，所以两级的直流工作状态相互不影响。

3. 答：电容器对高频成分的容抗小，对低频成分的容抗大，按照教科书图 5.3-8 的连接，高频成分就通过“旁边”的电容器，而使低频成分输送到下一级装置。

## 第 4 节 变压器

### 1. 教学目标

- (1) 知道变压器的构造及几种常见的变压器，理解变压器的工作原理。
- (2) 通过实验，探究理想变压器的原、副线圈中电压与匝数的关系，电流与匝数的关系。了解理想化模型在物理学研究中的重要性。
- (3) 了解变压器在生活中的应用。

### 2. 教材分析与教学建议

《课程标准》对于变压器的教学要求是“通过实验，探究变压器线圈两端的电压与匝数的关系”。新教科书与以往教科书的不同之处是增加了这一探究实验。教学中要突出通过探究得出结论。变压器是交变电路中常见的一种电器设备，也是远距离输送交变电流不可缺少的装置。对于变压器工作原理，要让学生在电磁感应理论的基础上理解什么是互感现象？为什么原、副线圈之间没有载流导线的连接，副线圈中还可以输出电流？使学生再次体会交变电流与恒定电流的区别，以及交变电流的优点。

变压器在生产 and 生活中有十分广泛的应用，教学中可根据实际情况向学生进行介绍。如挂图、照片、实物或参观等，还可以利用多媒体设备展示相关的视频资料，以开阔学生眼界。

#### (1) 变压器的原理

在讲解变压器的原理时，要积极引导学生从电磁感应的角度去理解问题。如，原线圈上加交变电压，就会有交变电流，铁芯中产生交变的磁通量，副线圈中就会产生感应电动势，副线圈相当于交变电源对外界负载供电。

应该向学生强调，从能量转换的角度看，变压器是把电能通过磁场能再转换成电能的装



置。经过转换后，电压、电流都发生了变化。

注意：针对有的学生认为变压器铁芯也是带电的错误认识，可以让学生根据电磁感应规律，独立思考，分析变压器铁芯的功能。变压器在工作状态下，其铁芯内部有磁场（铁芯外部磁场很弱），并且磁场是具有能量的。



### 变压器的铁芯带电吗？

实验装置：如图 5-12 所示。实验室可拆变压器一台；铁芯的横截面积为  $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ ，边长  $10\text{ cm}$ 。

演示：在原线圈未通电源的情况下，让一位女同学把变压器上面的横条提起来，简直就轻松得很。但当原线圈接通电源，变压器正常工作时，让一位强壮的男同学尝试提起连接铁芯的横条，用很大的力气也很难取下它。

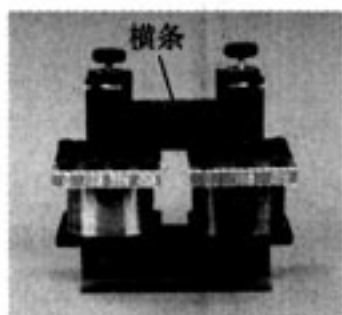


图 5-12

分析：上述现象表明，变压器原、副线圈中的“电”是通过铁芯中的“磁”来“相互联系”的。接通电源，铁芯被磁化，并不带电，横条被吸在铁芯上构成闭合磁路，铁芯内部有磁场，磁场是具有能量的。变压器就是把电能通过磁场能再转换成电能的装置。

互感现象是变压器工作的基础。只有在学习电磁感应的基础上，才能更好地理解互感现象。问题的关键是原线圈和副线圈有共同的铁芯，穿过它们的磁通量和磁通量的变化时刻都相同。因此，其中的感应电动势之比只与匝数有关。这样，原、副线圈的匝数不同，就可以改变电压了。

#### (2) 电压与匝数的关系

“探究变压器线圈两端的电压与匝数的关系”的教学，目的是使学生在探究过程中，获得探究的成功体验，激发学习兴趣，感悟科学的探究方法。

##### ① 引导学生讨论探究的方案

猜测原、副线圈的电压与什么因素有关？由法拉第电磁感应定律可知，感应电动势与线圈匝数有关……充分发挥学生学习的积极性、主动性，让学生自己从实验中得出结论，体验探索的快乐、成功的喜悦，增强学习的乐趣。

实验仪器为学生电源（低压交流  $12\text{ V}$ ）、可拆变压器、多用电表（交流电压挡）；设计并画出实验电路图；设计实验操作步骤；记录实验数据，可以设计一个表格。

##### ② 学生分组实验

保持原线圈电压和匝数不变，改变副线圈匝数，研究副线圈匝数对副线圈电压的影响；  
保持原线圈电压和副线圈匝数不变，改变原线圈匝数，研究原线圈匝数对副线圈电压的影响。

##### ③ 引导学生分析数据、归纳结论

原线圈电压和匝数不变时，副线圈匝数越多，其电压越大。原线圈电压和副线圈匝数不变时，原线圈匝数越少，副线圈电压越高。在实验误差范围内，原、副线圈电压比跟原、副线圈匝数

比成正比。

### (3) 对理想变压器的理解

①要使学生明白，理想变压器忽略了变压器中的能量损耗，它的输出功率与输入功率相等，这样才得出原、副线圈的电压、电流与匝数的关系式。在解决有两个副线圈的变压器的问题时，这一点尤其重要。当然，在初学时，有两个副线圈的变压器的问题，不做统一要求，不必急于去分析这类问题。对于学有余力的学生，可引导他们进行分析、讨论。

②学生对变压器原理和变压器中原、副线圈的电压、电流的关系常有一些似是而非的模糊认识，如：

其一，原、副线圈之间并未直接用导线连接，而是靠线圈中的磁通量的变化传输能量，因此，认为能量在传输过程中不会有损失。

其二，原线圈中交变电流引起铁芯中磁通量的变化，铁芯中磁通量的变化又使得穿过副线圈的磁通量也变化，因而，在副线圈中产生感应电动势。根据法拉第电磁感应定律，副线圈中的感应电动势与磁通量的变化率成正比。那么，原线圈交变电流的频率越高，磁通量的变化率就越大。所以，对于相同的原电压  $U_1$ ，交变电流的频率越高，副线圈的感应电动势和端电压  $U_2$  就越高。所以，变压比不仅与匝数比有关，还与交变电流的频率有关。

对于类似的模糊认识，应该引导学生分析、讨论。对于前者明确指出，磁通量的变化会在铁芯中产生涡流损失，在导线上也会有热损失，所以，能量在传输过程中仍会有损失。对于后者，指出原、副线圈有共同的铁芯，原、副线圈中磁通量的变化是相同的。

## 教学片段

### 理想变压器

演示：如图 5-13 所示。使可拆变压器的铁芯由不闭合到闭合，接在副线圈两端的小灯泡亮度从较小到正常发光。

提出问题：小灯泡的亮度为什么会逐渐变亮？

猜想：若无铁芯或铁芯不闭合，原线圈产生的磁场的磁通量只有一小部分穿过副线圈，大部分漏失在外。有了闭合铁芯，由于铁芯被磁化，绝大部分磁感线集中在铁芯内部，穿过副线圈，大大增强了变压器传输电能的作用。可见，漏失的磁通量不能起到传输电能的作用。

有了闭合铁芯后，漏失的磁通量大大减少，但能完全避免磁通量的漏失吗？仍会有一小部分磁通量漏失在周围空间。变压器副线圈输出的电能要小于原线圈输入的电能。

实际变压器工作时，除了因漏磁而损耗电能外，还有哪些方面的原因也会引起电能损耗呢？

感悟：让一位同学用手触摸工作后的变压器线圈和铁芯，并说出感觉。感觉到发热。为什么会发热？

分析：原、副线圈有电阻，通电时要发热；铁芯在反复磁化时也要发热，都要损耗电能。现在，由于在材料和技术上采取了许多有效措施，实际大型变压器的效率（输出与输入的电功率之比）可高达 97%~99.5%，电能损耗可以很少。如果我们设想有一种完全没有能量损耗的变压器，称它为理想变压器，这种变压器应具备的条件：

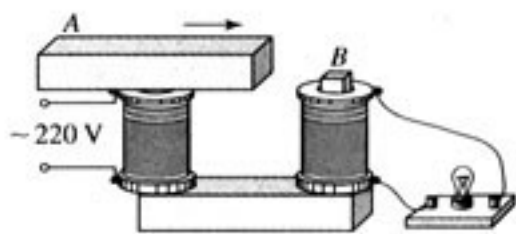


图 5-13

- ①原、副线圈没有电阻；
- ②无磁通量漏失；
- ③铁芯不发热。

教学中，努力使学生明确，理想化是科学研究中一种常用的重要方法，在前面学习中，我们通过这一方法得到了许多重要的物理模型（如质点、匀变速直线运动等）。现在，我们弄清了变压器工作时起作用的各种因素，通过分清主次，并突出主导因素，建立了理想变压器的模型。但是，对初学者来说，原线圈中的电流产生的磁通量，绝大部分通过铁芯，只有一小部分漏到铁芯之外，在通常的计算中可以忽略漏掉的磁通量，认为穿过这两个线圈的交变磁通量相同是有难度的。因此，可通过下述的教学片段突破这个教学难点。

### 教学片段

#### 体会闭合铁芯的功能

演示：将无铁芯的线圈1、2并排放着，线圈1接交流电源，线圈2接交流电压表，接通电源（图5-14），让学生观测到电压表的读数很小，几乎发现不了变化。这说明了什么？

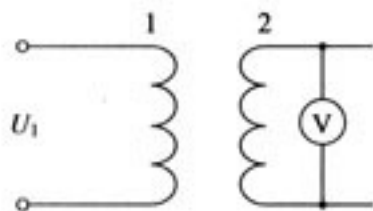


图 5-14

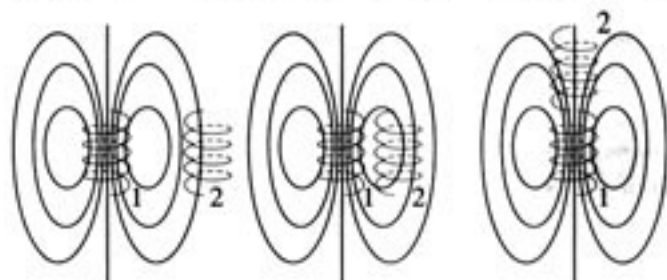


图 5-15

分析：说明线圈2中产生的感应电动势很小，根据法拉第电磁感应定律可知，线圈2中的磁通量变化率很小。那么，在不改变电源电压、频率、线圈匝数的情况下，采用哪些方法可以使线圈2中产生的感应电动势增大？

方法1：将线圈2向线圈1靠拢；将线圈2叠在线圈1的正上方（图5-15）。接通电源时，电压表的读数增加。

感悟：上述做法可以使穿过线圈2的磁通量增加，从而也就增加了线圈2中磁通量的变化率，线圈2产生的感应电动势也就增大。

方法2：两线圈间距不动，把线圈1、2套在铁芯上，不闭合铁芯，接通电源时，电压表的读数增加十分显著。把铁芯闭合，电压表的读数就增加得更大。

感悟：线圈中加入铁芯，线圈产生磁场的磁感应强度被加强，穿过线圈的磁通量也被加强。当铁芯闭合，磁感线绝大部分沿铁芯闭合，线圈2中磁通量的变化率增加，产生的感应电动势也就显著增大。

### 3. 问题与练习

内容分析

第1题的目的是让学生理解变压器的工作原理是互感现象。要想在副线圈中引起感应电动

势，必须使穿过原、副线圈中的磁通量发生变化。让学生体会交变电流与直流的区别，以及交变电流的优点。

第2、第3题让学生明确变压器线圈两端电压与匝数关系。

第4、5题的目的是进一步加深对变压器工作原理的理解。同时让学生体会到变压器在实际和生活中有着广泛的应用。

解答与说明

1. 答：恒定电流的电压加在变压器的原线圈上时，通过原线圈的电流是恒定电流，即电流的大小和方向不变，它产生的磁场通过副线圈的磁通量不变。因此，在副线圈中不会产生感应电动势，副线圈两端也没有电压，所以变压器不能改变恒定电流的电压。

2. 解：根据题目条件可知， $U_1=380\text{ V}$ ， $U_2=36\text{ V}$ ， $n_1=1\ 140$ ，求： $n_2=?$

$$\therefore \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}, \therefore n_2 = \frac{U_2}{U_1} \times n_1 = \frac{36 \times 1140}{380} = 108$$

3. 解：根据题目条件可知， $n_2=400$ ， $U_1=220\text{ V}$ ， $U_2=55\text{ V}$ ，求： $n_1=?$

$$\therefore \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}, \therefore n_1 = \frac{U_1}{U_2} \times n_2 = \frac{220 \times 400}{55} = 1\ 600$$

4. 答：降压变压器的副线圈应当用较粗的导线。根据理想变压器的输出功率等于输入功率即  $I_1 U_1 = I_2 U_2$ ，降压变压器的  $U_2 < U_1$ ，因而，它的  $I_2 > I_1$ ，即副线圈的电流大于原线圈的电流，所以，相比之下，副线圈应用较粗的导线。

5. 答：假定理想变压器的原线圈输入的电压  $U_1$  一定， $V_1$  示数不变；当用户的用电器增加时，相当于  $R$  减小，副线圈电压  $U_2 = \frac{n_2}{n_1} U_1$  不变， $V_2$  示数不变；因为  $R$  减小，所以， $A_2$  示数增大；因为理想变压器输入功率等于输出功率，有： $P_1 = I_1 U_1 = P_2 = I_2 U_2$ ， $U_1$ 、 $U_2$  的值不变， $I_2$  增大，则  $I_1$  增大， $A_1$  示数增大。

## 第5节 电能的输送

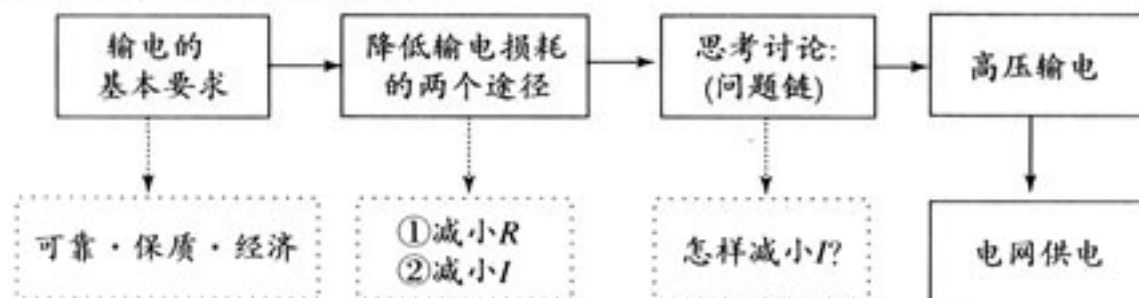
### 1. 教学目标

- (1) 了解从变电站到用户的输电过程。知道远距离输电时应用高电压的道理。
- (2) 引导学生积极主动探究，发现问题，解决问题，在学习知识的同时获得一定的成就感。

### 2. 教材分析与教学建议

本节要求学生运用所学过的电磁学方面的知识解决一个实际问题——电能的输送。

教科书教学内容展开的流程如下：





应使学生明确，电能的输送是一个理论性和技术性都很强的复杂的系统工程，属于电力工程学科的一个分支。我们在高中阶段对它仅仅是一个初步的了解。教学要围绕输送电能的“可靠”“保质”“经济”等基本要求展开。

第一，怎样减少电能的损失？这是理解如何确保“经济”这一基本要求的关键问题。教科书是通过“思考与讨论”栏目，将输电过程简化，根据学生的实际情况，引导学生自己从已有的直流电路知识出发，进行分析，得出结论。

第二，怎样既“经济”又“保质”地将电能送到用户？也就是既没有太大的电能损失，又保证各种用电设备正常工作的问题。一方面要使学生知道交变电流远距离输送的基本方式。即低压发电→高压输电→低压用户。另一方面，要使学生了解变压器在输电过程中的重要作用，再次体会交变电流的优点所在。

第三，还应该指出输电电压也不是越高越好，要综合考虑各种因素，防止看问题片面化和绝对化。

本节教学应该注意应用已有直流电路方面的知识，同时也要避免将某些直流电路的结论不加分析地随意扩展。

### (1) 降低输电损耗的两个途径

建议结合教科书图 5.5-2 的简化输电电路，利用“思考与讨论”栏目中列出的 5 个问题加以引导，具体说明如下：

对于电路上的功率损失，可引导学生自己从已有的直流电路知识出发，进行分析，得出结论。例如，通过讨论，有哪些办法可以减少输电线上能量的损失？其中哪种方法是最有效的？归纳减少输电线上能量损失的思路，体会哪种方法最好。

减小输电损耗的途径有两个。一是减小输电线的电阻；二是减小输电线中的电流。

真正的实际问题比较复杂，教学中并不要求深入讨论这些实际问题，也不要求对输电过程中感抗和容抗的影响进行深入分析，教学中要注意掌握好分寸。另外，减小输电线的电流，要通过提高输电电压来实现，但输电电压并不是越高越好。这就要希望帮助学生科学地、全面地、辩证地认识问题，逐步树立正确地分析问题、认识问题的观点和方法。



### 教学片段

#### 降低输电损耗的途径

问题导引：怎样减小远距离输电过程中的电能损失？

案例体验 1：把功率为 200 kW 的电能输送到 40 km 以外的地方，输电线上的总电阻为 0.1 Ω，用 200 V 的电压输电，损失的功率占总功率的百分之几？(50%)

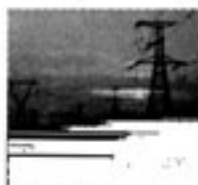
案例体验 2：把功率为 200 kW 的电能用铝线输送到 40 km 以外的地方，用 200 V 的电压输电，要使功率损耗降为输电功率的 25%，导线的截面积需提高为 0.1 Ω 时的几倍？(2 倍)

案例体验 3：把功率为 200 kW 的电能输送到 40 km 以外的地方，输电线上的总电阻为 0.1 Ω，用 2 kV 的电压输电，损失的功率占总功率的百分之几？(0.5%)

分析论证：根据  $E_{损} = Q = I^2 R t$

① 输电时间要保证，缩短时间  $t$  不可行。

② 减小电阻  $R$ 。



$$R = \rho \frac{L}{S} \begin{cases} \text{减小 } \rho: \text{ 铜、铝。} \\ \text{减小 } L: \text{ 输电距离要保证, 不可行。} \\ \text{增大 } S: \text{ 可适当增大, 介绍现实中用的材料, 如教科书图 5.5-1 所示。} \end{cases}$$

③减小  $I$ : 保证一定传输功率的前提下, 可通过提高输电电压来实现。

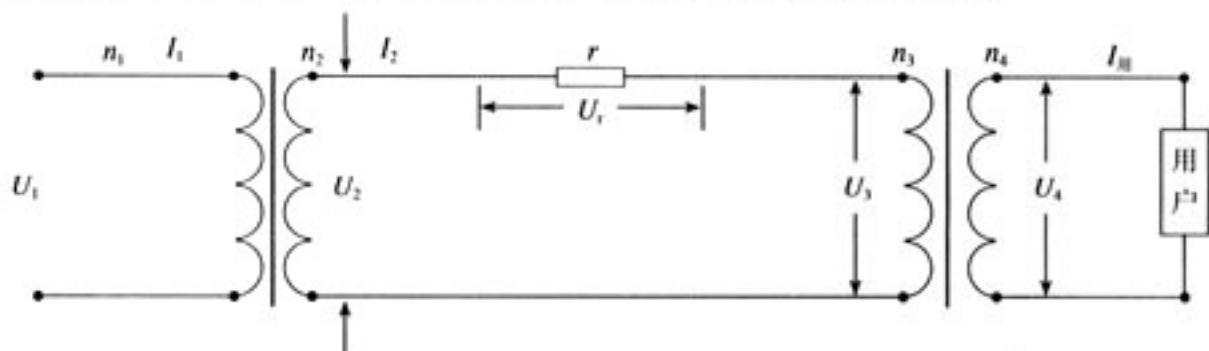


图 5-16

小结: 在确保输送功率不变的情况下, 减小电能输送中电能损失最有效的方法是提高输电电压, 最后给出实际输电线路示意图 (图 5-16) 并作总结。

## (2) 区分电压损失与输电电压

学生常常容易将导线上的电压损失, 与输电电压混淆起来, 甚至进而得出错误结论。“问题与解答”中的第 2 题就是针对这种错误而设计的, 可引导学生进行讨论, 澄清认识。这里要注意, 切不可单纯由教师讲解, 而代替了学生的思考, 要学生通过自己的具体分析和运算, 自然而然地得出哪个途径对于降低输电线路的损耗更为有效, 以及怎样才能减小输电电流的结论, 否则会事倍功半。

## (3) 求解输电问题的思路

之所以采用电网供电, 一个重要原因就是由于发电机本身的输出电压不可能有大的提高, 所以要采用高压输电, 就需要在发电站内先用升压变压器升压后再由输电线输出, 到用电处再用降压变压器降到所需的电压。

在解答有关远距离输电问题时, 首先要将整个电路分成几段进行研究, 找出跟各段电路相应的物理量; 然后, 利用变压器工作原理和电路的基本定律分段列式, 最后联立求解, 进行计算。另外, 还需注意以下几点:

- ①发电机的输出功率通常认为是恒定的;
- ②输电导线上的电能损失往往要求不能超过某一规定值;
- ③如图 5-16 所示输电电路中以下两个关系特别要注意。

电压关系:  $U_2 = U_1 + U_3$

功率关系:  $P_1 = P_2 + P_r$

其中, 升压变压器功率  $P_1$ 、降压变压器功率  $P_2$  与输电线损失功率  $P_r$ 。

教科书在“科学漫步”栏目中介绍了“直流输电”和“超导电缆输电”方面的内容。交流输电的确给我们带来了诸多便利, 它的优点是不容置疑的。然而, 任何事物都是一分为二的, 长距离交流输电中线路的电感和电容影响了稳定性, 限制了输电功率, 甚至带来许多其他问题。应该看到, 在输电环节上, 高压直流输电比交流输电优点要多。通过这部分内容的介绍, 不仅对于现代输电新技术有一个了解, 也是从理论联系实际, 帮助学生科学地、全面地认识问题等方面的好素材。有条件的学校, 可以组织学生参观当地的小型电厂, 了解发电情况, 调查

发电机的容量、居民用电和工业用电等情况，撰写调查报告。

### 3. 问题与练习

内容分析

第1题和第3题通过计算，比较采用高压、低压输电时导线中的电流、电压的情况，使学生对高压和低压输电的不同有直观的认识。

第2题通过对输电导线损失功率的错误推导，以加深学生对输电导线损失功率的理解。

第4题通过对高压输电和低压输电损失功率相同情况下，横截面积之比，使学生对采用远距离输电的好处有些感性的认识。

第5题通过计算进一步让学生体会高压输电的优点。

第6题是一个典型的远距离输电的计算题，该题的目的，一方面使学生知道交流远距离输电的基本方式，即低压发电→高压电→低电用电。另一方面，使学生了解变压器在输电过程中的重要作用。

解答与说明

1. 在不考虑电抗的影响时，电功率  $P=IU$ ，所以  $I=\frac{P}{U}$ 。

当  $U=110\text{ kV}$  时，导线中的电流  $I=\frac{4\,800\times 10^3}{110\times 10^3}\text{ A}=43.6\text{ A}$ 。

当  $U=110\text{ V}$  时，导线中的电流  $I=\frac{4\,800\times 10^3}{110}\text{ A}=43.6\times 10^3\text{ A}$ 。

公式  $U=IR$  中的  $U$ 、 $I$ 、 $R$  对应于同一段电路，同理，公式  $P=UI$  中的  $P$ 、 $U$ 、 $I$  也是对应于同一段电路的物理量。在此题中的功率  $P$  并不是输电线上消耗的功率，而是发电机（电源）、输电线以及用户构成的闭合电路的总功率， $U$  是此电路的总电压，而  $I$  是回路的总电流（也是流经输电线的电流），如果输电线的电阻为  $R$ ，则  $U\neq IR$ ，原因是  $U$  并非输电线上的电压降，而  $P=IU$ ，原因是这三个量是对应于同一段电路，即电路总电压  $U$ 、总电流  $I$ 、总功率  $P$ 。

2. 公式  $P_{\text{损}}=UI$  和  $U=Ir$  都是错误的， $U$  是输电电压，而非输电线上的电压降。

正确的推导应该是：设输电电压为  $U$ ，输送的电功率为  $P$ 。

$$P_{\text{损}}=I^2r \quad (1)$$

$$I=\frac{P}{U} \quad (2)$$

$$\text{将公式(2)代入(1)式，得到：} P_{\text{损}}=\frac{P^2}{U^2}r \quad (3)$$

由(3)式可知，要减小功率损失  $P_{\text{损}}$ ，就应当用高压送电和减小输电线的电阻  $r$ 。

3. 解：

(1) 用  $110\text{ V}$  电压输电，输电线上电流  $I_1=\frac{P}{U_1}=\frac{200\times 10^3}{110}\text{ A}\approx 1.8\times 10^3\text{ A}$ ，输电线上由电阻造成的电压损失  $U_1=I_1R=1.8\times 10^3\times 0.05\text{ V}=90\text{ V}$ 。

(2) 用  $11\text{ kV}$  电压输电，输电线电流  $I_2=\frac{P}{U_2}=\frac{200\times 10^3}{11\times 10^3}\text{ A}\approx 18\text{ A}$ ，输电线上由电阻造成的电压损失  $U_2=I_2R=18\times 0.05\text{ V}=0.9\text{ V}$ 。

两者比较，可以看出，用高压输电可使输电线上的电压损失减少许多。

4. 解：输送的电功率为  $P$ ，输电电压为  $U$ ，输电线上的功率损失为  $\Delta P$ ，导线长度为  $L$ ，导线的电阻率为  $\rho$ ，导线的横截面积为  $S$ ，则  $\Delta P = I^2 R = \left(\frac{P}{U}\right)^2 \rho \frac{L}{S}$ ，因为  $P$ 、 $U$ 、 $\Delta P$ 、 $L$ 、 $\rho$  各量都是相同的，所以横截面积为  $S$  与输电电压  $U$  的二次方成反比，所以有  $\frac{S_1}{S_2} = \frac{U_2^2}{U_1^2} = \frac{(11 \times 10^3)^2}{220^2} = 2.5 \times 10^3$ 。

5. 解：

(1) 假如用 250 V 的电压输电，输电导线上的功率损失  $\Delta P = \left(\frac{P}{U}\right)^2 R = \left(\frac{20 \times 10^3}{250}\right)^2 \times 0.5 \text{ kW} = 3.2 \text{ kW}$ 。

用户得到的功率  $P_{\text{用}} = P - \Delta P = 20 \text{ kW} - 3.2 \text{ kW} = 16.8 \text{ kW}$ 。

(2) 假如改用 500 V 的电压输电，输电导线上的功率损失  $\Delta P = \left(\frac{P}{U}\right)^2 R = \left(\frac{20 \times 10^3}{500}\right)^2 \times 0.5 \text{ kW} = 0.8 \text{ kW}$ 。

用户得到的功率  $P_{\text{用}} = P - \Delta P = 20 \text{ kW} - 0.8 \text{ kW} = 19.2 \text{ kW}$ 。可见，提高输电电压，可以大大减小输电线上的功率损失。

6. 解：输电原理如图 5-16 所示。

(1) 降压变压器输出电流，也就是用户得到的电流  $I_{\text{用}} = \frac{P_{\text{用}}}{U_{\text{用}}} = \frac{95 \times 10^3}{220} \text{ A} \approx 4.32 \times 10^2 \text{ A}$ 。

因为， $\Delta P = I_2^2 r$ ，输电线上通过的电流  $I_2 = \sqrt{\frac{\Delta P}{r}} = \sqrt{\frac{5 \times 10^3}{8}} \text{ A} = 25 \text{ A}$ 。

(2) 输电线上损失的电压  $U_r$ ， $U_r = I_2 r = 25 \times 8 \text{ V} = 200 \text{ V}$ ，因为升压变压器为理想变压器，输入功率 = 输出功率，所以升压变压器输出的电压  $U_2$  计算如下：

因为， $P_2 = I_2 U_2 = P_1$ ，所以， $U_2 = \frac{P_1}{I_2} = \frac{100 \times 10^3}{25} \text{ V} = 4 \times 10^3 \text{ V}$ 。

(3) 升压变压器的匝数之比  $\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{250}{4000} = \frac{1}{16}$ 。

降压变压器的匝数之比  $\frac{n_3}{n_4} = \frac{U_3}{U_{\text{用}}} = \frac{U_2 - U_r}{U_{\text{用}}} = \frac{4000 - 200}{220} = \frac{190}{11}$ 。

### 三、教学设计案例

#### 变压器

##### 1. 教学目标

- (1) 知道几种常见变压器的构造，理解变压器的工作原理。
- (2) 探究理想变压器的原、副线圈中电压与匝数关系，电流与匝数关系。
- (3) 了解变压器在生活中的应用。
- (4) 体会理想化模型在物理学研究中的重要性。



重点、难点：通过实验探究得到变压器原、副线圈电压和匝数的关系是本节课的重点；理想变压器电压与匝数关系的分析推导成为本节的教学难点。

教具准备：学生电源、可拆变压器、交流电压表、小灯泡、多用电表（交流电压挡）。

## 2. 教学过程

### (1) 创设情境，激趣导入

①在我们使用的各种用电器中，所需的电源电压可能各不相同（如下表所示），而日常照明电路的电压是 220 V，怎么解决这样的问题呢？

为解决这样的问题，我们需要引入变压器。（让学生体会到变压器作用的实际意义）

用电器	额定工作电压	用电器	额定工作电压
随身听	3 V	机床上的照明灯	36 V
扫描仪	12 V	防身器	3 000 V
手机充电器	4.2 V、4.4 V、5.3 V	黑白电视机显像管	几万伏
录音机	6 V、9 V、12 V	彩色电视机显像管	十几万伏

②多媒体展示变压器的种类和式样（让学生对实际变压器有感性认识）；

③引导学生观察可拆变压器的构造，并通过示意图明确下列概念。

- 原线圈——与电源相连，输入电压  $U_1$ ，线圈匝数为  $n_1$
- 副线圈——与用电器相连，输出电压  $U_2$ ，线圈匝数为  $n_2$
- 铁芯——有何特点？

变压器是如何变压的呢？有什么规律？这就是我们今天探究的课题。

### (2) 探究变压器的变压规律

猜测：原、副线圈的电压与什么因素有关？由法拉第电磁感应定律公式可能想到与线圈匝数有关。

实验仪器：学生电源（低压交流 12 V）、可拆变压器、多用电表（交流电压挡）。

实验设计：画出实验电路图；设计实验操作步骤；实验数据记录表格。（引导学生讨论探究的方案）

①保持原线圈电压  $U_1$  和匝数  $n_1$  不变，改变副线圈匝数  $n_2$ ，研究副线圈匝数  $n_2$  对副线圈电压  $U_2$  的影响。

$$U_1 = \quad \text{V}, n_1 = \quad$$

	1	2	3	4	5
$n_2$					
$U_2$					

②保持原线圈电压  $U_1$  和副线圈匝数  $n_2$  不变，改变原线圈匝数  $n_1$ ，研究原线圈匝数  $n_1$  对副线圈电压  $U_2$  的影响。

$$U_1 = \quad \text{V}, n_2 = \quad$$

	1	2	3	4	5
$n_1$					
$U_2$					

分析归纳：原线圈电压和匝数不变时，副线圈匝数越多， $U_2$  越大。原线圈电压和副线圈匝数不变时，原线圈匝数越少，副线圈电压越高。由此可以推测，原、副线圈电压之比跟原、副线圈的匝数之比成正比。

### (3) 根据互感原理推导变压器原、副线圈的电压和匝数的关系

#### ① 能量损耗分析

实际的变压器在运行时，哪些地方有能量损耗呢？主要表现在如磁通量漏磁、线圈电阻发热、铁芯涡流等。在解决漏磁方面，铁芯起到了重要的作用。

演示：使可拆变压器的铁芯由不闭合到闭合，接在副线圈两端的小灯泡亮度从较小到正常发光。

分析：若无铁芯或铁芯不闭合时，原线圈中的磁通量只有一小部分贯穿副线圈，大部分漏失在外。有了闭合铁芯，由于铁芯被磁化，绝大部分磁通量集中在铁芯内部，贯穿副线圈，大大增强了变压器传输电能的作用。变压器中能量转换的过程是：电能→磁能→电能。铁芯起到了能量转换的作用。

#### ② 理论推导

在忽略能量损失的情况下，如无漏磁，通过原、副线圈的磁通量及其变化量都相等，即

$$\Phi_1 = \Phi_2, \Delta\Phi_1 = \Delta\Phi_2$$

原、副线圈产生的感应电动势分别为

$$E_1 = n_1 \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t}, E_2 = n_2 \frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t}$$

因原、副线圈没有电阻，原、副线圈两端电压与电动势的关系分别为

$$U_1 = E_1, U_2 = E_2$$

由此可得，原、副线圈的电压与匝数的关系为

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

#### ③ 理想变压器模型的建立

变压器工作过程中，电能和磁能的相互转化是最主要的因素，而伴随而来的损耗是一些次要因素。为了研究问题的方便，我们突出主要因素，忽略次要因素。这是科学研究的一种常用方法。那么，我们可以把实际的变压器抽象成理想变压器——一个没有能量损耗的理想模型。

引导学生自主推导理想变压器原、副线圈电流与匝数的关系。

理想变压器输入的电功率等于输出的电功率  $P_1 = P_2$ ，即

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

由此可得

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

所以，理想变压器的原、副线圈的电流跟它们的匝数成反比。

可见，若是高压线圈匝数多，但电流小，可用较细的导线，能节省材料；若是低压线圈匝数少，但是电流大，就要用较粗的导线。所以，我们可以从导线的粗细来判断其匝数的多少，进而判断使用升压变压器还是降压变压器。

#### (4) 系统归纳，总结全课

在本节课学习中，我们学到了哪些知识？使用了哪些思想方法？请同学们总结归纳。

#### (5) 学以致用，知识延伸

如何测量高压线上的交流电压？

分析电压互感器并延伸介绍电流互感器以及其他常见变压器。

### 3. 教学设计说明

(1) “变压器”课题的教学应围绕“什么是变压器？”“变压器副线圈为什么有电压？”“变压器为什么能改变电压？”“变压器是怎样改变电压、电流的？”等问题为线索展开教学。针对学生现有的知识水平和认知特点，在不增加教学难度的前提下，可采用定性分析和定量推导相结合、实验探究和理论推导相结合的方法，使学生先在实验探究中发现电压与线圈匝数之间存在的关系，然后从电磁感应原理出发解释和推导这一关系。这样处理，学生对变压器的变压原理的理解将更加深刻，学生的实验能力和理论分析能力将同时得以训练和培养。

(2) 以能量转化和传输为核心，突出变压器的理想化模型，这应是处理本节课教学内容所遵循的基本原则。教学中，通过引导学生分析变压器传输电能时因各种原因而产生的电能损耗，提出变压器的理想化条件，建立理想模型。在此基础上，进一步分析导出理想变压器原、副线圈的功率关系、电压关系和电流关系。这样处理，教学思路严谨、清晰，教学过程自然、流畅，不仅能使学生准确理解理想变压器的工作原理和工作特性，而且，能使学生在再次学习建立物理模型的方法，有利于提高他们的分析概括能力。

江苏省太仓高级中学 吴健

## 四、教学资源库

### (一) 概念、规律和背景资料

#### 1. 正弦式电流的有效值

交变电流的瞬时值  $i$  随时间变化  $i = i(t)$ 。工程上所用的交变电流值都是通过该交变电流经过电阻时所消耗的功率去衡量的。如果交变电流流经一个阻值不变的电阻  $R$ ，在 1 周期内消耗的能量跟某一恒定电流经过同一电阻在同一时间内消耗的能量相等，则此恒定电流  $I$  的大小就是交变电流  $i$  的有效值。它们之间的关系是

$$I^2 RT = \int_0^T Ri^2(t) dt$$

即交变电流有效值

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

也就是说，交变电流的有效值等于该电流在 1 周期内的方均根值。这个关系式适合于 1 周期内平均值不为 0 的周期电流。

交变电压  $u = u(t)$ ，其有效值

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

交变电流在电阻  $R$  上瞬间消耗的功率为瞬时功率,  $p(t) = u(t)i(t)$ 。通常有实际意义的不是瞬时功率, 而是平均功率。平均功率是瞬时功率在 1 周期  $T$  内对时间的平均值。

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt$$

对于正弦交变电流

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

在纯电阻电路中,  $u(t)$  与  $i(t)$  同相, 无相位差,

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

在 1 周期  $T$  内的平均功率为

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T i(t)u(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T I_m U_m \sin^2 \omega t dt \\ &= \frac{1}{2} I_m U_m \\ &= \frac{1}{2} I_m^2 R \end{aligned} \quad (1)$$

在纯电阻电路中,  $u(t)$ 、 $i(t)$ 、 $p(t)$  随时间的变化曲线如图 5-17 所示, 由于  $u(t)$ 、 $i(t)$  相位一致, 因而任何时刻输入到元件中的瞬时功率  $p(t)$  都是正的, 这能量全部转化为焦耳热, 这跟恒定电流是一样的。

对于恒定电流  $I$  来说,

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

比较 (1) 式和 (2) 式可知

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

同理可得

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

以上便是正弦式交变电流的电流有效值、电压有效值跟峰值间的关系。

## 2. 正弦交变电流整流后的有效值和平均值

一些中学物理习题涉及交变电流整流后的功率或发热的问题。这类问题往往因没有正确理解有效值和平均值而出错。

正弦交流经全波整流后, 其波形图如图 5-18 甲所示; 即时电流的平方  $i^2(t)$  的图象如图 5-18 乙所示。全波整流后, 电流的方均根值应与整流前相同, 故  $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$  仍然适用。

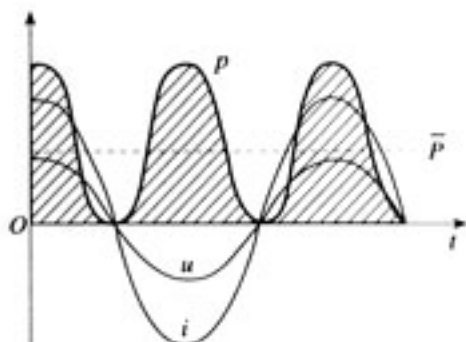


图 5-17





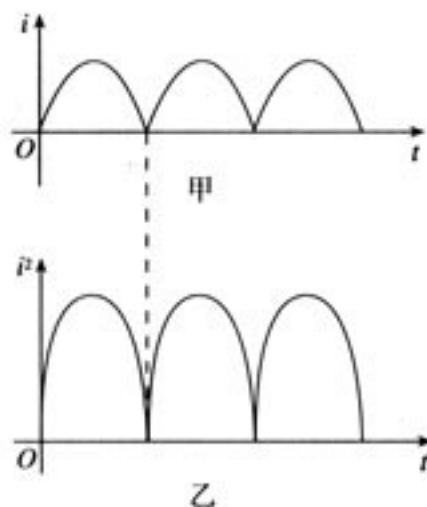


图 5-18

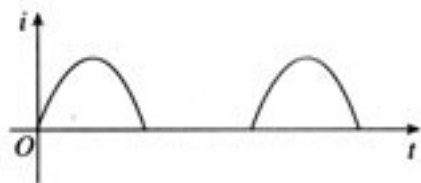


图 5-19

但经半波整流后，波形图如图 5-19 所示。由于每 1 周期内，都有半个周期电流为 0。故 1 周期内电流的有效值

$$\begin{aligned}
 I &= \sqrt{\frac{1}{T} \left[ \int_0^{\frac{T}{2}} I_m^2 \sin^2 \left( \frac{2\pi}{T} t \right) dt + \int_{\frac{T}{2}}^T 0 dt \right]} \\
 &= I_m \sqrt{\frac{1}{2T} \left[ t - \frac{\sin \left( 2 \times \frac{2\pi}{T} t \right)}{2 \times \frac{2\pi}{T}} \right]_0^{\frac{T}{2}}} \\
 &= \frac{I_m}{2} \tag{1}
 \end{aligned}$$

而 1 周期内电流的平均值应为

$$I = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{\frac{T}{2}} \sin \left( \frac{2\pi}{T} t \right) dt + \int_{\frac{T}{2}}^T 0 dt \right] = \frac{I_m}{\pi} \tag{2}$$

可见，半波整流后的有效值为整流前的  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  倍，而平均值为整流前（半周的平均值）的一半。

例 如图 5-20 甲图中交流电压表和乙图中的直流电压表示数相同。在相同时间  $t$  ( $t \geq T$ ,  $T$  为周期)，两图中相同电阻  $R$  上的发热量  $Q_{\text{甲}}$  和  $Q_{\text{乙}}$  哪个大些？

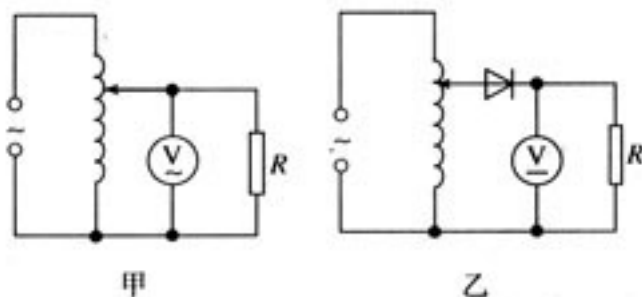


图 5-20

解：此题容易误认为甲图中未经整流，1 周期内都有电流通过  $R$ ，而两表示数又相同，故  $Q_{\text{甲}} > Q_{\text{乙}}$ 。

实际上，由于直流电压表是磁电式仪表，所测量的是交变电流的平均值。由 (2) 式，乙图中直流表示数  $U_{\text{乙}} = I_{\text{乙}} R = \frac{I_m R}{\pi} = \frac{U_m R}{\pi}$ ；而由 (1) 式，乙图中  $R$  上的有效值为  $U_{\text{乙}} = I_{\text{乙}} R = \frac{I_m R}{2} = \frac{U_m R}{2}$ ，故  $U_{\text{乙}} = \frac{\pi U_{\text{乙}}}{2}$ 。所以

$$Q_L = \frac{U_L^2}{R}t = \left(\frac{\pi U_L}{2}\right)^2 \frac{t}{R} = \frac{\pi^2 U_L^2 t}{4R}$$

而  $Q_{\text{甲}} = \frac{U_{\text{甲}}^2}{R}t$ , 由条件  $U_{\text{甲}} = U_L$ , 可知  $Q_{\text{甲}} > Q_L$ 。

### 3. 正弦式交变电流的有效值与峰值关系的初等推导

由于正弦交变电流波形的对称性质, 在每一个  $t_2 - t_1 = \frac{T}{4}$  内, 当  $t_1 = k \frac{T}{4}$  ( $k=0, 1, 2, \dots$ ) 时, 电流的有效值与 1 周期内的有效值是相同的; 其定性分析, 中学生是不难理解的。因此, 我们可以通过求这样的“ $\frac{T}{4}$ ”时间的电流的有效值来确定 1 周期内交变电流的有效值。

如图 5-21。把  $\frac{T}{4}$  时间分为  $n$  等分, 每等分时间间隔为  $\Delta t$ , 则

$$\frac{T}{4} = n\Delta t \quad (1)$$

设  $n$  很大, 则在每个  $\Delta t$  时间内电流可以近似认为不变。则

$$Q_{\frac{T}{4}} = i_1^2 R \Delta t + i_2^2 R \Delta t + \dots + i_n^2 R \Delta t \quad (2)$$

在时间轴上, 下述时刻组成的点组对于  $\frac{T}{8}$  时刻的点对称:  $t_1$  和  $(\frac{T}{4} - t_1)$ 、 $t_2$  和  $(\frac{T}{4} - t_2) \dots t_k$  和  $(\frac{T}{4} - t_k)$ ,  $k=1, 2, \dots, \frac{n}{2}$ 。

由于

$$\begin{aligned} i_k &= I_m \sin \omega t_k \\ i_{(\frac{T}{4} - t_k)} &= I_m \sin[\omega(\frac{T}{4} - t_k)] = I_m \sin[\omega(\frac{\pi}{2\omega} - t_k)] \\ &= I_m \cos \omega t_k \end{aligned}$$

故

$$i_k^2 + i_{(\frac{T}{4} - t_k)}^2 = I_m^2 (\sin^2 \omega t_k + \cos^2 \omega t_k) = I_m^2 \quad (3)$$

由 (1)、(2)、(3) 式可得

$$Q_{\frac{T}{4}} = I_m^2 k R \Delta t = I_m^2 R \Delta t \cdot \frac{n}{2} = \frac{I_m^2 R (\frac{T}{4})}{2} \quad (4)$$

按交变电流有效值的定义

$$Q_{\frac{T}{4}} = I^2 R (\frac{T}{4}) \quad (5)$$

比较 (4) 和 (5) 式, 可得  $I = I_m \sqrt{2}$ , 这正是期望的结果。

### 4. 正弦式交变电流感性电路和电容性电路的相位差

电流与电压存在相差是交流电路与直流电路的重要区别。这里将就这个问题作出中学生可以理解的讨论。此外还将就“纯”电路中的实际相位差作简要的分析。

#### (1) 纯电路中电流与电压的相位差的初等推导

在中学物理教学中, 通常是用演示实验介绍电流与电压的相位差。但实际上不可能有完全

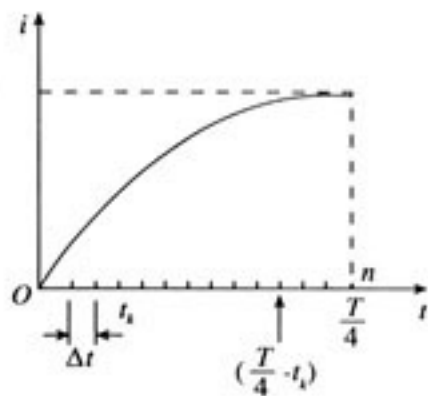
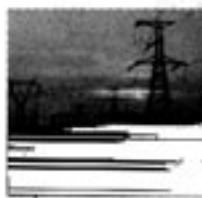


图 5-21



纯的电路，因而，演示的结果一般不能做到相位差为 $\frac{\pi}{2}$ 。所以，对纯电路的相位差给出初等推导是有意义的。

①纯电感电路中电流与电压的相差的初等推导

在纯电感电路中，自感电动势为

$$e_L(t) = -L \frac{\Delta i(t)}{\Delta t} \quad (1)$$

设电路电流为

$$i(t) = I_m \sin \omega t \quad (\varphi_i = 0) \quad (2)$$

从 $t$ 时刻起，经时间 $\Delta t$ 后，电流为

$$i'(t) = I_m \sin \omega(t + \Delta t)$$

则

$$\begin{aligned} \Delta i(t) &= i'(t) - i(t) = I_m \sin \omega(t + \Delta t) - I_m \sin \omega t \\ &= (I_m \sin \omega t \cos \omega \Delta t + I_m \cos \omega t \sin \omega \Delta t) - I_m \sin \omega t \end{aligned}$$

当 $\Delta t$ 很小时， $\sin \omega \Delta t \approx \omega \Delta t$ ， $\cos \omega \Delta t \approx 1$ ，上式简化为：

$$\Delta i(t) = I_m \omega \Delta t \cos \omega t \quad (3)$$

将(3)式代入(1)式，得

$$e_L(t) = -I_m L \omega \cos \omega t = I_m L \omega \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

加在纯电感上的电压与自感电动势等值反向，所以

$$u(t) = -e_L(t) = I_m L \omega \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (4)$$

令 $U_m = I_m L \omega$ ，而 $U_m = I_m X_L$ ，即感抗 $X_L = L \omega$ ，且(4)式可写为

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (5)$$

比较(2)、(5)两式可知，在纯电感电路中，电压的相位比电流的相位超前 $\frac{\pi}{2}$ 。

②纯电容电路中电流与电压的相差的初等推导

设加在纯电容电路上的电压为

$$u(t) = U_m \sin \omega t \quad (6)$$

电容上的充、放电电流(即纯电容电路中的电流)

$$i(t) = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{C \Delta u(t)}{\Delta t} \quad (7)$$

从 $t$ 时刻起，再经微小时间 $\Delta t$ ，电容上的电压为

$$u'(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta t)$$

则

$$\Delta u(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta t) - U_m \sin \omega t$$

同①中的推导类似，可得， $\Delta u(t) = U_m \omega \Delta t \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ ，代入(7)式，

$$i(t) = U_m C \omega \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (8)$$

令 $I_m = U_m C \omega$ ，而 $I_m = \frac{U_m}{X_C}$ ，故容抗 $X_C = \frac{1}{C \omega}$ 。(8)式写为

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (9)$$

比较 (7)、(9) 两式可知, 在纯电容电路中, 电流的相位比电压的相位超前  $\frac{\pi}{2}$ 。

### (2) 纯电路中电流与电压出现相位差的物理分析

对于中学生, 即使作了上面的推导, 他们虽承认了这种“数学上的结果”, 但对于“为什么  $i(t)$  与  $u(t)$  会产生  $\frac{\pi}{2}$  的相差”, 并不能真正解决。根据学生已有的物理和数学知识, 可以对电流、电压变化的特征作出具体分析, 以加深学生的理解。

#### ① 纯电感电路中 $i$ 、 $u$ 的相位差的意义及原因分析

纯电感电路中, 电压  $u$  的相位比电流的相位超前  $\frac{\pi}{2}$ , 表示电压变化的步调超前于电流变化的步调。如就  $i$ 、 $u$  各自达到正向峰值 (或即时值与峰值的比值相同的状态) 的时间而言, 电压比电流超前  $\frac{T}{4}$ 。这不能被理解为“有了电压  $\frac{T}{4}$  时间后, 才有电流”, 具体分析如下:

如图 5-22, 当电流的即时值为 0, 并向正向增加时 ( $t=0$  时刻), 电压即取正向峰值; 以后电流向正向增大, 而正向电压则减小; 经过  $\frac{T}{4}$  ( $t=\frac{T}{4}$  时), 电压即时值变为 0, 并具有反向变化的趋势, 而电流的即时值刚好变为正向峰值; 再经  $\frac{T}{4}$  ( $t=\frac{T}{2}$  时), 电压即时值为负向峰值, 而电流才刚变到即时值为 0 并具有反向变化趋势; ……可见, 就各自达到“正向峰值”“即时值为 0 并具有反向变化趋势”“负向峰值”……等给定的状态, 电压都比电流超前  $\frac{1}{4}$  周期。这就是电压的相位 (变化步调) 比电流的相位 (变化步调) 超前  $\frac{\pi}{2}$  的意义。从图 5-22 中可以看出: 一旦有了电压, 就有了电流的变化, 因而就有了自感电动势,  $i$ 、 $u$ 、 $e$  同时存在于电路之中, 无先后之分;  $t=0$  时, 仅仅是电流的即时值为 0, 不是在这之前的  $\frac{T}{4}$  时间内, 电流均是 0; 同样, 图中  $t=\frac{T}{4}$  时刻  $u$ 、 $e$  即时值为 0, 不能认为它们在此后的  $\frac{T}{4}$  时间内的值也是 0。

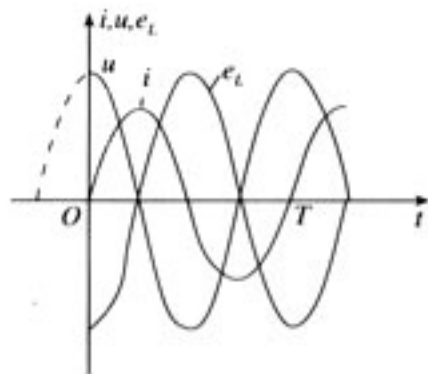


图 5-22

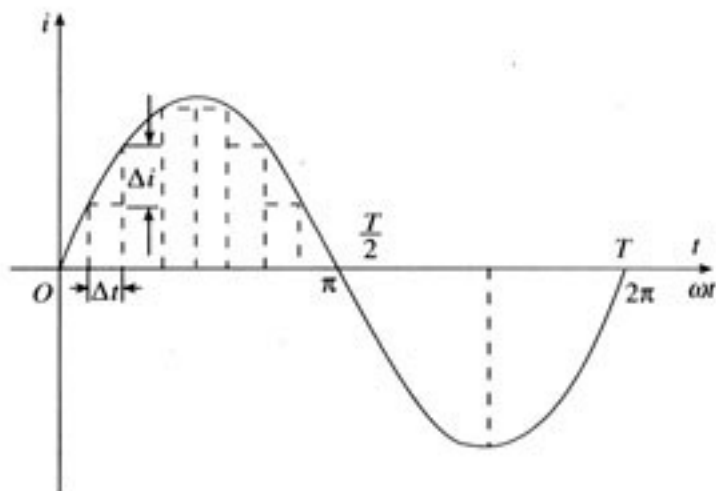


图 5-23

为什么在纯电感电路中, 电压的相位会比电流的相位超前  $\frac{\pi}{2}$  呢? 由于纯电感电路中, 电压



$u$  与自感电动势  $e_L$  总是等值反向，所以关键在于分析清楚电流的相位与自感电动势的相位的关系。在中学物理教学中，可以定性分析如下：如图 5-23，把 1 周  $T$  时间分成若干相等的微小时间间隔  $\Delta t$ 。以  $0 \rightarrow \frac{T}{4}$  时间为例，在各个相同时间  $\Delta t$  内电流的变化  $\Delta i$  是不同的，且随时间的增加而减小。在  $t=0$  时刻附近， $\frac{\Delta i}{\Delta t}$  最大，在  $t=\frac{T}{4}$  附近， $\frac{\Delta i}{\Delta t}$  最小（取极限  $\Delta t \rightarrow 0$ ， $\frac{\Delta i}{\Delta t} \rightarrow 0$ ）。由电磁感应定律  $e_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$  可知，自感电动势  $e_L$  的大小与电流变化率  $\frac{\Delta i}{\Delta t}$  成正比，方向与电流变化的方向相反（即电流增大时， $e_L$  与  $i$  反向；电流减小时， $e_L$  与  $i$  同向）。所以在  $t=0$  时，自感电动势负向最大（此时  $i=0$ ）；而  $t=\frac{T}{4}$  时，自感电动势为零（此时  $i$  最大）；在  $t=0 \rightarrow \frac{T}{4}$  时间内，自感电动势减小，其方向总与电流反向。同理可以得出，在  $\frac{T}{4} \rightarrow \frac{T}{2}$  时间内，自感电动势增大而方向与电流方向相同，等等。 $e_L$  与  $i$  的关系如图 5-24 所示。因为电压  $u$  与  $e_L$  时刻等值、反向，所以电压  $u$  随时间变化的规律也应如图 5-24 所示。由图可见，在纯电感电路中，电压的相位总是超前于电流  $\frac{\pi}{2}$ 。这是电磁感应定律的必然结果。

### ② 纯电容电路中 $i$ 、 $u$ 产生相位差的原因分析

纯电容电路中，电流的相位为什么超前于电压  $\frac{\pi}{2}$  呢？可以定性分析如下。由于电容器上的电荷量  $q(t)$  与外压电压  $u(t)$  成正比，所以，当纯电容电路上加有正弦电压  $u(t) = U_m \sin \omega t$  时，电容器上的电荷量  $q(t) = q_m \sin \omega t$ 。其中， $q_m = CU_m$ 。 $u$ 、 $q$  随时间变化的图象如图 5-24 所示。又因为  $i(t) = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ ，即电流的大小与电容器上的电荷量的变化率成正比，所以，电流的大小与电压的变化率  $\frac{\Delta u}{\Delta t}$  成正比。把 1 周期的时间分成若干微小的相等时间间隔  $\Delta t$ ，类似上段的推理分析（这里从略），可得到  $i(t)$  图线如图 5-24 中虚线所示。由图可知， $i(t)$  的相位超前于电压  $\frac{\pi}{2}$ 。

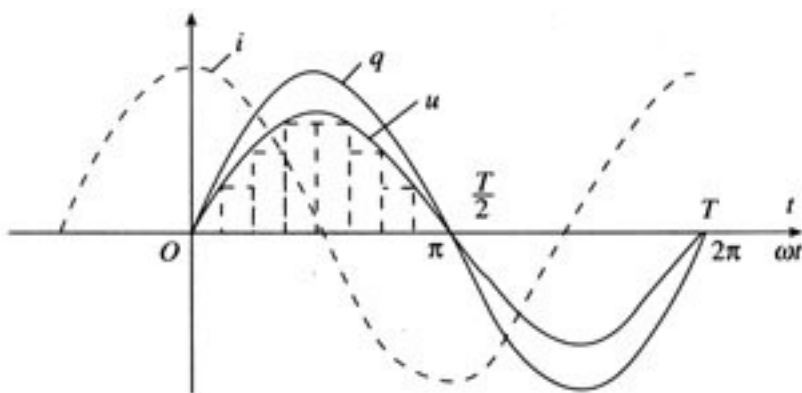


图 5-24

### (3) “纯”电感电路中电流、电压的实际相位差

在教学中有的学生常要提出：“既然在纯电感电路中，自感电动势与外加电压时刻大小相等、方向相反，那么电路中怎么会有电流流过？”“如果电路中没有电流流过，又怎么会有电流的变化，从而有自感电动势？”怎样理解这种似是而非的“矛盾”呢？

实际上，所谓“纯”电感电路，是为了突出电感电路的基本特征而作的理想化。实际的电感电路总是不可避免地存在欧姆电阻（确切说，是有功电阻，可以等效为图 5-25 所示的  $r-L$

串联电路, 其中  $r$  为电路中的电阻。对此电路, 应有

$$u(t) + e_L(t) = i(t)r$$

或

$$u(t) = -e_L(t) + ri(t) \quad (10)$$

为使讨论更为明晰, 下面我们先分析研究  $u(t)$ 、 $e_L(t)$  和  $i(t)$  的相位关系。对于正弦交变电压

$$\begin{aligned} i(t) &= I_m \sin \omega t \\ e_L(t) &= -L \frac{di}{dt} \\ &= -L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} \end{aligned}$$

即

$$e_L(t) = -\omega L I_m \cos \omega t = \omega L I_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (11)$$

可见,  $e_L(t)$  的相位比电流  $i(t)$  的相位落后  $\frac{\pi}{2}$ 。

将 (11) 式代入 (10) 式, 得

$$u(t) = \omega L I_m \cos \omega t + r I_m \sin \omega t = \omega L I_m \left( \cos \omega t + \frac{r}{\omega L} \sin \omega t \right)$$

令

$$\cot \varphi = \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} = \frac{r}{\omega L} \quad (12)$$

则

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{\omega L I_m}{\sin \varphi} (\sin \varphi \cos \omega t + \cos \varphi \sin \omega t) \\ &= \frac{\omega L I_m}{\sin \varphi} \sin (\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

由 (12) 式可得,

$$\sin \varphi = \frac{\omega L}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}}$$

故

$$u(t) = I_m \sqrt{r^2 + (\omega L)^2} \sin (\omega t + \varphi) \quad (13)$$

这就是说, 电路的电压  $u(t)$  的相位比电流的相位超前  $\varphi$ , 比  $e_L(t)$  的相位超前  $(\varphi + \frac{\pi}{2})$ 。

由 (12) 式, 当  $r \rightarrow 0$  时,  $\cot \varphi \rightarrow 0$ ,  $\varphi \rightarrow \frac{\pi}{2}$ ; 当  $r \neq 0$  时,  $\varphi < \frac{\pi}{2}$ 。即在  $r$  很小时, 电压的相位比电流的相位超前约为  $\frac{\pi}{2}$ , 但小于  $\frac{\pi}{2}$ ; 电压的相位比自感电动势的相位超前约为  $\pi$ , 但小于  $\pi$ 。由 (11) 和 (13) 式可知,

$$E_{Lm} = \omega L I_m < U_m = I_m \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}$$

所以, 在  $r$  极小的“纯”电感电路中, 在 1 周期的绝大多数时间内  $u(t)$  和  $e_L(t)$  的即时值方向相反, 且  $|e_L(t)| < |u(t)|$ 。只有认为  $r=0$ ,  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , 电压的相位才超前电流  $\frac{\pi}{2}$ , 电压与自感电动势才是等值、反相的。这就回答了前面提出的似是而非的问题。

顺便指出, 上面的讨论从一个特例说明了用旋转矢量法讨论交流电路的理论根据。如图 5-26, 当  $U_r \neq 0$ ,  $U_L > E_L$  时, 电路

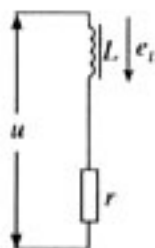


图 5-25

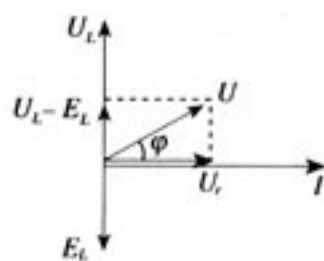


图 5-26



电压超前电流的相位  $\varphi$ ；当  $U_r = 0$  时， $\varphi = \frac{\pi}{2}$ 。

### 5. 关于理想变压器的几个问题

在中学物理教学中，必然会涉及关于互感变压器的下列问题：

- (1) 变比公式成立条件；
- (2) 原、副线圈电压为什么反相？
- (3) 怎样理解功率关系式  $I_1 U_1 = I_2 U_2$ ？
- (4) 什么是理想变压器？
- (5) 自耦变压器线圈上的电流分配。这些问题都与对理想变压器的理解有关。

对于理想变压器，有两种主要观点。一种观点认为，理想变压器是没有能量损耗（铜损和铁损）的变压器，并认为在这种条件下，变压比公式  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$  和变流比公式  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$  严格成立；另一种观点认为，除没有铜损和铁损外，还应加上没有漏磁的条件，才是理想变压器，并认为，即使在这样的条件下，变流比公式也不严格成立。怎样评价这些观点，关键在于弄清变比公式的成立条件和怎样定义理想变压器。下面我们比较明晰的方式讨论上述问题。

#### (1) 变压比公式成立的条件

设变压器空载时，原线圈加有电压  $U_1$ ，通过原线圈的空载电流（励磁电流）为  $I_0$ ，并假定（理想化条件）：

① 变压器没有铜损（即不计电阻引起的热损耗）和铁损（即铁芯中无磁滞和涡流损耗），变压器作为纯电感接入电路；

② 电流  $I_0$  只在铁芯中建立磁通量，即变压器铁芯没有漏磁通量，原、副线圈内磁通量完全相同，如图 5-27 所示。

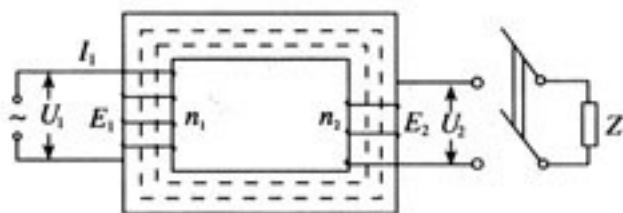


图 5-27

对于简谐交变电压

$$u_1 = U_{1m} \cos \omega t = U_{1m} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (1)$$

在原线圈内产生的电流为（ $L_1$  为原线圈的自感系数）

$$i_0 = \frac{U_{1m}}{\omega L_1} \sin \omega t = I_{0m} \sin \omega t \quad (2)$$

它所产生的磁通量为  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，这磁通在原、副线圈内产生的感生电动势分别为

$$e_1 = -\frac{n_1 d\Phi}{dt} = -n_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = n_1 \omega \Phi_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$e_2 = -\frac{n_2 d\Phi}{dt} = n_2 \omega \Phi_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

令  $E_{1m} = n_1 \omega \Phi_m$ ， $E_{2m} = n_2 \omega \Phi_m$  (3)

则  $e_1 = E_{1m} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$  (4)

$$e_2 = E_{2m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (5)$$

令  $e_1$ 、 $e_2$  的有效值分别为  $E_1$ 、 $E_2$ ，由 (3) 式

$$\frac{E_{1m}}{E_{2m}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (6)$$

因为原、副线圈是纯电感性的，所以有效值  $E_1 = U_1$ ， $E_2 = U_2$ ，则

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (7)$$

这就是说，在没有漏磁和铜、铁损的条件下，变压比公式准确成立。这个结论显然与负载是否接入无关。

如果铁芯有漏磁通量  $\Phi_p$ （为简化讨论，设漏磁通量仅存在于原线圈一侧），如图 5-28。则穿过副线圈的磁通量  $\Phi_2$  仅是电流  $I_1$  激起的磁通量的一部分，记为  $\Phi_1$ （一般情况是很大一部分）。通常把  $\Phi_2 = \Phi_1 = \Phi$  称主磁通量或工作磁通量，它在原、副线圈内产生的感生电动势仍由 (3)、(4)、(5)、(6) 式表示。漏磁通量不穿过副线圈，但在原线圈中产生与  $e_1$  同相的感生电动势

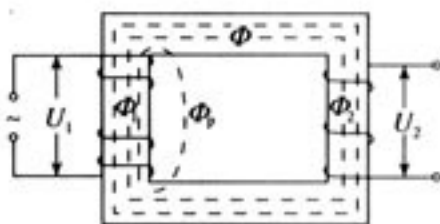


图 5-28

$$e_p = n_1 \omega \Phi_{pm} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = E_{pm} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (8)$$

因此，原线圈两端电压的幅值和有效值分别为：

$$U_{1m} = E_{1m} + E_{pm}, \quad U_1 = E_1 + E_p$$

原、副线圈的电压比：

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1 + E_p}{E_2} = \frac{n_1 \omega (\Phi_m + \Phi_{pm})}{n_2 \omega \Phi_m} \neq \frac{n_1}{n_2}$$

这就是说，在有漏磁通量的情况下，即使没有铜损和铁损，变压比公式也不再严格成立。

### (2) 原、副线圈的端电压相位相反的条件

在空载情况下，只要变压器是纯电感性的，则电压  $u_1$  的相位超前于电流  $I_0$  的相位  $\frac{\pi}{2}$ ，由 (2)、(5) 两式知，电动势  $e_2$  的相位落后于  $i_0$  的相位  $\frac{\pi}{2}$ ，故  $u_1$  与  $e_2$  的相位差为  $\pi$ 。而电压  $u_2$  的相位与  $e_2$  的相位相同，所以  $u_1$  与  $u_2$  的相位差为  $\pi$ ，即反相。由于漏磁通量的存在并不影响电流、电压的相位关系（参看 (8) 式），所以这个结论与变压器磁芯是否存在漏磁通量无关。

在变压器任载时，若负载是纯电阻性的， $u_1$  与  $u_2$  的相差为  $\pi$  的结论仍然成立。若电路是电感性（或电容性的），则副线圈上的电流  $i_2$  和端电压  $u_2$  不再是同相位的。电流  $i_2$  的磁通量反馈到变压器中去，将改变  $e_1$ （或  $u_1$ ）与  $i_0$  的相位关系，则  $u_1$  和  $u_2$  相差为  $\pi$  的关系一般不再成立。

### (3) 变流比公式成立的条件

#### ① 自感系数、互感系数、线圈匝数间的关系

为了讨论变流比公式，我们先介绍在无漏磁通量情况下，两个线圈 1 和 2 的自感系数  $L_1$ 、 $L_2$ 、互感系数  $M$  与线圈  $n_1$ 、 $n_2$  间的关系。

如图 5-29，设两线圈通过的电流  $i_1$  和  $i_2$ ，两电流产生的磁通量

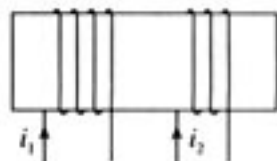
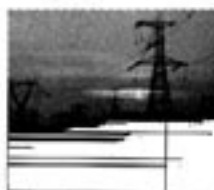


图 5-29





分别为  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$ ，由电磁感应定律，线圈 1 上的自感电动势

$$e_1 = -n_1 \frac{d\Phi_1}{dt} = -L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (9)$$

由于无漏磁通量，磁通  $\Phi_1$  全部穿过线圈 2，在线圈 2 中所产生的互感电动势为

$$e_{12} = -n_2 \frac{d\Phi_1}{dt} = -M \frac{di_1}{dt} \quad (10)$$

由 (9)、(10) 两式得

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{L_1}{M}, \quad M = \frac{n_2 L_1}{n_1} \quad (11)$$

同理，线圈 2 上的自感电动势为

$$e_2 = -\frac{n_2 d\Phi_2}{dt} = -\frac{L_2 di_2}{dt} \quad (12)$$

$\Phi_2$  在线圈 1 中产生的互感电动势为

$$e_{21} = -n_1 \frac{d\Phi_2}{dt} = -M \frac{di_2}{dt} \quad (13)$$

由 (12)、(13) 式得

$$M = n_1 \frac{L_2}{n_2} \quad (14)$$

由 (11) 和 (14) 可得

$$M = \sqrt{L_1 L_2} \quad (15)$$

若有漏磁通量存在， $M$  值将比  $\sqrt{L_1 L_2}$  小。

### ②变流比公式及其成立条件

当变压器负载时，原、副线圈内的电流均在磁芯中激起磁通量，产生互感现象。设无铜损、铁损和漏磁通量，且线圈的绕向如图 5-27 所示（这时，原、副线圈在铁芯中激起的磁通量方向相同）；原、副线圈的电流、线圈匝数、自感系数分别为  $i_1$ 、 $n_1$ 、 $L_1$  和  $i_2$ 、 $n_2$ 、 $L_2$ ，互感系数为  $M$ ；并设负载是纯电阻性的。这时  $i_2$  的相位与  $u_2$  的相位相同，而  $u_2$  的相位与  $e_2$  相同，对照 (5) 式，可得

$$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (16)$$

令

$$i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \varphi), \quad u_1 = U_{1m} \cos(\omega t + \varphi) \quad (17)$$

这时，原线圈中的磁通量为电流  $i_1$  的磁通量  $\Phi_1$ （自感磁通量）和电流  $i_2$  的磁通量  $\Phi_2$  的总和。由电磁感应定律，这时原线圈上的感生电动势为

$$\begin{aligned} e'_1 &= -n_1 \frac{d(\Phi_1 + \Phi_2)}{dt} = -n_1 \frac{d\Phi_1}{dt} - n_1 \frac{d\Phi_2}{dt} \\ &= -L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \end{aligned}$$

$$\therefore e'_1 = -L_1 \omega I_{1m} \cos(\omega t + \varphi) - M \omega I_{2m} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (18)$$

根据 (18) 式，当  $i_2 = 0$  ( $I_{2m} = 0$ ) 时，原线圈为空载电流，

$$e'_1 = -u_1 = -L_1 \omega I_{1m} \cos(\omega t + \varphi)$$

代入(18)式得，

$$-L_1\omega I_{0m}\cos(\omega t + \varphi) = -L_1\omega I_{1m}\cos(\omega t + \varphi) - M\omega I_{2m}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

即

$$L_1\omega(I_{1m} - I_{0m})\cos(\omega t + \varphi) = -M\omega I_{2m}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

令

$$i'_1 = (I_{1m} - I_{0m})\cos(\omega t + \varphi) = I'_{1m}\cos(\omega t + \varphi)$$

则

$$L_1\omega I'_{1m}\cos(\omega t + \varphi) = -M\omega I_{2m}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (19)$$

由(19)式可知,必有 $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ,即 $i'_1$ 、 $i_1$ 均与 $i_2$ 反相。

$i'_1 = i_1 - i_0$  (或 $i_1 = i'_1 + i_0$ ),  $i'_1$ 常称为反射电流,它是由于负载电流 $i_2$ 的存在而在原线圈内增加的电流,其作用是抵消电流 $i_2$ 在原线圈中增加的磁通量。

由(11)、(12)、(19)式可知, $i'_1$ 、 $i_2$ 的有效值满足

$$\frac{I'_1}{I_2} = -\frac{M}{L_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (20)$$

通常情况下,虽然原线圈电感 $L_1$ 很大, $I_0$ 很小,但 $I_0$ 总是存在的(约为满载电流的3%~8%)。所以 $I'_1 \approx I_1$ ,  $I_1$ 为原线圈中实际电流的有效值。只有当 $L_1 \rightarrow \infty$ 时,由(2)式, $I_0 \rightarrow 0$ ,才有 $I'_1 = I_1$ ,即原线圈电流全系反射电流,因而

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (21)$$

(21)式就是中学物理教材中的变流比公式。由上面的推导可见,它成立的条件是很严格的,要求变压器无铜损、铁损、无漏磁,且原线圈电感 $L_1 \rightarrow \infty$ 。

#### (4) 理想变压器的定义

建立理想变压器模型的目的是为了突出变压器的基本原理,对通常的实际问题作简化的近似处理。因此,(7)式和(21)式对于理想变压器应该是严格成立的。从上述推导过程可以看出,同时满足下列四个条件的变压器,可定义为理想变压器:

- ①没有漏磁,即通过原、副线圈的每一匝的磁通量都一样;
- ②原、副线圈没有电阻,即忽略线圈导线中的焦耳损耗(铜损);
- ③铁芯中没有铁损,即忽略铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗;

④原、副线圈的感抗均趋于无穷大,从而空载电流趋于0(在上面的讨论中,只直接涉及原线圈的电感趋于无穷大。但在许多情况下,两个线圈中任一个作原线圈都是可以的,所以要求两线圈电感均趋于无穷大)。

在这样的意义上定义理想变压器,变比公式(7)和(21)严格成立。因此,本问题开头提到的,认为满足上面三个条件的变压器就是理想变压器,从而认为(21)式对理想变压器不严格成立的观点是不妥当的。另一种观点认为只要没有能量损耗的变压器,(7)式和(21)式就严格成立,显然是一种误解。从上面推导的过程中可看到:没有条件①,就不可能导出(7)式;没有条件①和④,不可能导出(21)式。而在可忽略电磁辐射的情况下(变压器工作时就是这种情况),不满足条件①和④,变压器系统的能量同样是守恒的。

## 6. 交流输电与直流输电

“输电”是“发电”和“用电”的中间环节。现代输电工程中并存着两种输电方式：高压交流输电和高压直流输电。两种方式各有自己的长处和不足，同时使用它们，可以取得更大的经济效益。这里作一简略介绍。

### (1) 输电方式的变化

人类输送电力，已有一百多年的历史。输电方式是从直流输电开始的。1874年，在俄罗斯圣彼得堡第一次实现了直流输电，当时输电电压仅100V。随着直流发电机制造技术的提高，到1885年，直流输电电压已提高到6000V。但要进一步提高大功率直流发电机的额定电压，存在着绝缘等一系列技术困难。由于不能直接给直流电升压，使得输电距离受到极大的限制，不能满足输送容量增长和输电距离增加的要求。

19世纪80年代末发明了三相交流发电机和变压器。1891年，世界上第一个三相交流发电站在德国劳风竣工，以 $3 \times 10^4$  V高压向法兰克福输电。此后，交流输电就普遍地代替了直流输电。但是随着电力系统的迅速扩大，输电功率和输电距离的进一步增加，交流输电的缺点越来越突现。而大功率换流器（整流和逆变）的研究成功，为高压直流输电突破了技术上的障碍。因此直流输电重新受到人们的重视。1933年，美国通用电器公司为布尔德坝枢纽工程设计出高压直流输电装置；1954年在瑞典，从本土到果特兰岛，建起了世界上第一条远距离高压直流输电工程。

### (2) 直流输电系统简介

在直流输电系统中，只有输电环节是直流电，发电系统和用电系统仍然是交变电流。

图5-30为高压直流输电的典型线路示意图。在输电线路的始端，发电系统的交流电经换流变压器 $T_1$ 、 $T_2$ 升压后，送到整流器 $H_1$ 和 $H_2$ 中去。整流器的主要部件是可控硅变流器和进行交直流变换的整流阀，它的功能是将高压交变电流变为高压恒定电流后，送入输电线路。直流通过输电线路 $L_1$ 和 $L_2$ 被送到逆变器 $H_3$ 和 $H_4$ 中。逆变器的结构与整流器相同而作用刚好相反，它把高压直流电变为高压交变电流。再

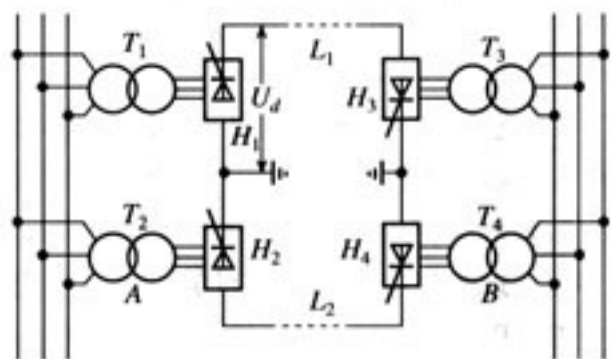


图 5-30

经过换流变压器 $T_3$ 和 $T_4$ 降压，交流系统A的电就能输送到了交流系统B中。在直流输电系统中，通过改变换流器的控制状态，也可以把交流系统B中的电能送到系统A中去，即整流器和逆变器是可以互相转换的。

### (3) 交变电流和直流电的优缺点比较

高压直流输电方式与高压交流输电方式相比，有明显的优越性。历史上仅仅由于技术的原因，才使得交流输电代替了直流输电。下面先就交变电流和直流电的主要优缺点作出比较，从而说明它们各自在应用中的价值。

交变电流的优点主要表现在发电和配电方面：利用建立在电磁感应原理基础上的交流发电机可以很方便地把机械能（水流能、风能……）、化学能（石油、天然气……）等其他形式的能转化为电能；交变电流源和交流变电站与同功率的直流电源和直流换流站相比，造价大为低廉；交变电流可以方便地通过变压器升压和降压，给配送电能带来极大的方便。

直流的优点主要在输电方面：



①输送相同功率时，直流输电所用线材仅为交流输电的  $\frac{2}{3} \sim \frac{1}{2}$ 。

直流输电采用两线制，与采用三线制三相交流输电相比，在输电线载面积相同和电流密度相同的条件下，即使不考虑趋肤效应，在输送相同的电功率情况下，输电线和绝缘材料可节约  $\frac{1}{3}$ 。设两线制直流输电线路输送功率为  $P_d$ ，则  $P_d = 2U_d I_d$ ；设三线制三相交流输电线路所输送的功率为  $P_s$ ， $P_s = \sqrt{3}U_s I_s \cos \varphi$ 。对于超高压线路，功率因数一般较高，可取为 0.945。设直流输电电压等于交流输电电压的最大值，即  $U_d = \sqrt{2}U_s$ ，且  $I_d = I_s$ ，则  $\frac{P_d}{P_s} = \frac{2\sqrt{2}U_s I_s}{3U_s I_s \times 0.945} \approx 1$ 。如果考虑到趋肤效应和各种损耗（绝缘材料的介质损耗、磁感应的涡流损耗、架空线的电晕损耗等），输送同样功率交变电流所用导线截面积大于或等于直流输电所用导线的截面积的 1.33 倍。因此，直流输电所用的线材几乎只有交流输电的一半。同时，直流输电杆塔结构也比同容量的三相交流输电简单，线路走廊占地面积也少。

②在电缆输电线路中，直流输电没有电容电流产生，而交流输电线路存在电容电流，引起损耗。

在一些特殊场合，必须用电缆输电。例如高压输电线经过大城市时，采用地下电缆；输电线经过海峡时，要用海底电缆。由于电缆芯线与大地之间构成同轴电容器，在交流高压输电线路中，空载电容电流极为可观。一条 200 kV 的电缆，每千米的电容约为  $0.2 \mu\text{F}$ ，每千米需供给充电功率约  $3 \times 10^3 \text{ kW}$ ，在每千米输电线路中，每年就要耗电  $2.6 \times 10^7 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。而在直流输电中，由于电压波动很小，基本上没有电容电流加在电缆上。

③直流输电时，其两侧交流系统不需同步运行，而交流输电必须同步运行。

交流远距离输电时，电流的相位在交流输电系统的两端会产生显著的相位差；并网的各系统交变电流的频率虽然规定统一为 50 Hz，但实际上常产生波动。这两种因素引起交流系统不能同步运行，需要用复杂庞大的补偿系统和综合性很强的技术加以调整，否则就可能在设备中形成强大的循环电流损坏设备，或造成不同步运行的停电事故。在技术不发达的国家里，交流输电距离一般不超过 300 km。而直流输电线路互连时，它两端的交流电网可以用各自的频率和相位运行，不需进行同步调整。

④直流输电发生故障的损失比交流输电小。

两个交流系统若用交流线路互连，则当一侧系统发生短路时，另一侧要向故障一侧输送短路电流。因此使两侧系统原有开关切断短路电流的能力受到威胁，需要更换开关。而直流输电中，由于采用可控硅装置，电路功率能迅速、方便地进行调节，直流输电线路基本上不向发生短路的交流系统输送短路电流，故障侧交流系统的短路电流与没有互连时一样。因此不必更换两侧原有开关及载流设备。

在直流输电线路中，各极是独立调节和工作的，彼此没有影响。所以，当一极发生故障时，只需停运故障极，另一极仍可输送不少于一半功率的电。但在交流输电线路中，任一相发生永久性故障，必须全线停电。

(4) 我国直流输电现状及发展前景

我国在 1977 年就建成了第一条 31 kV 直流输电工业性实验电路。我国超高压直流输电工程，有从葛洲坝—上海的 500 kV 线路和青海龙羊峡—北京的输电工程。

直流输电在我国有广阔的发展前景，主要体现在如下方面：



①我国能源与负荷分布不均，需要大容量远距离输电。目前，我国的主要能源（水力资源和煤炭资源）主要集中在西南、中南、西北及华北地区，而负荷则主要集中在京津地区、东北及华东、华南地区。所以不可避免要进行大容量远距离输电。青海龙羊峡—北京输电线路就属于这一类。

②用直流线路联络两个交流系统，以取得较大的经济效益。葛洲坝—上海直流输电工程属于这一类。

③用海底电缆跨海送电。我国沿海岛屿众多，许多岛屿（如舟山群岛、海南岛、崇明岛、台湾岛等）需要由大陆送电或互联并网。舟山直流输电工程就属于这一类。

④用直流通电缆向大城市中心供电，以解决大城市电能日益增长的迫切需要。在英国，已由金斯诺思用直流输电向伦敦供电。我国上海、北京等大城市不久也将会实现。

## （二）联系生活、科技和社会资料

### 1. 涡流式电感测压传感器原理

利用涡流效应可改变电感线圈电感的原理，可以测定动态压强。

如图 5-31 所示，一个空心线圈  $L$  由高频电源供电，在线圈的一端有一块用非铁磁性材料制成的导电金属膜片，膜面与线圈的轴线垂直。

当高频电流输入电感线圈  $L$  时，线圈便产生变化的磁场。在变化磁场的作用下，靠近线圈的金属膜片感应出与线圈轴线同心的涡流，而涡流又产生一个磁场，使通过线圈的磁通量发生变化，这也是一种互感作用。由图 5-31 可知，在被测压强  $p$  作用下，金属膜片将沿着线圈的轴线移动，膜片靠近线圈越近，互感越大；反之，则越小。因此，金属膜片在被测压强作用下发生位移时，电感线圈的等效电感与被测压强之间存在确定的函数关系。

可以证明，当金属膜片受被测压强的作用移近线圈  $L$  时，互感增强将导致线圈的等效电感减小。若用电学方法测出等效电感的变化，即可得知被测压强  $p$ 。

（摘自《物理学原理在工程技术中的应用》，高等教育出版社 1995 年第 1 版，有改动。）

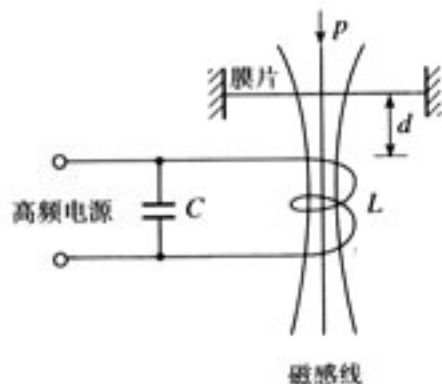


图 5-31

### 2. 变压器的功率损耗

根据能量守恒定律，运行中的变压器从原绕组输入的电功率  $P_1$  应该等于变压器的损耗功率（包括铁损  $P_{Fe}$  和铜损  $P_{Cu}$ ）与副绕组的输出功率  $P_2$  之和，用公式表示即

$$P_1 = P_{Fe} + P_{Cu} + P_2 \quad (1)$$

铁损  $P_{Fe}$  包括磁滞损耗  $P_{CZ}$  和涡流损耗  $P_{wl}$  两部分，即

$$P_{Fe} = P_{CZ} + P_{wl} \quad (2)$$

实验表明，变压器的铁损约与铁芯中磁感应强度的二次方以及电源频率成正比，而电源频率和变压器主磁通基本不变，因此可以认为  $P_{Fe}$  与负载大小无关，基本不变，所以铁损又称为变压器的不变损耗。

铜损是电流通过原、副绕组时，在原、副绕组的电阻上所消耗的功率，即

$$P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (3)$$

将  $I_2 = kI_1$  代入上式得

$$P_{Cu} = I_1^2 (R_1 + k^2 R_2) = I_1^2 R_{dL} \quad (4)$$

式中  $R_{dL} = R_1 + k^2 R_2$  为短路电阻。把上式中的  $I_1$  改用  $I_2$  表示, 则有

$$P_{Cu} = I_2^2 \frac{R_{dL}}{k^2} \quad (5)$$

上式表明,  $P_{Cu}$  与负载电流  $I_2$  的二次方成正比, 因此铜损又称为可变损耗。

变压器的铁损可用空载试验来测定, 如图 5-32 所示。使变压器副绕组开路, 在原绕组加上额定电压  $U_{1e}$ , 空载时变压器副边输出功率为 0, 空载电流又很小, 铜损可以忽略不计 (空载时的铜损仅为额定负载时铜损的 0.25%~2%), 所以, 从功率表读出的功率 (即空载损耗  $P_0$ ) 就是铁损  $P_{Fe}$ 。

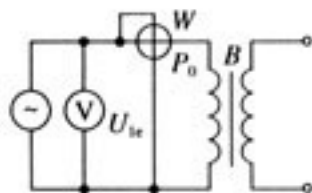


图 5-32

变压器在额定负载时的铜损称为满载铜损, 用  $P_{Cu}$  表示 ( $P_{Cu} = I_{1e}^2 R_{dL}$ ), 可用短路试验测定。如图 5-33 所示, 将变压器副绕组短路, 把原绕组接至调压变压器, 逐渐升高电源电压, 使通过原绕组的电流达到额定值  $I_{1e}$ , 此时电压表的读数, 称为短路电压, 以  $U_{dL}$  表示。当副边短路 ( $Z=0$ ) 而原边通入额定电流时, 原边电压只是短路阻抗电压降, 因此短路电压又叫阻抗电压。短路电压通常以  $U_{dL}$  与该绕组的额定电压  $U_N$  之比值的百分数来表示, 即

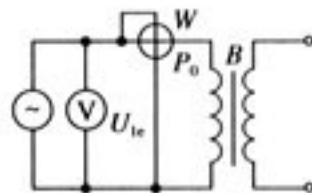


图 5-33

$$U_{dL}(\%) = \frac{U_{dL}}{U_N} \times 100\% \quad (6)$$

此值一般很小 (通常只有百分之几), 所以此时的铁损耗很小, 可以忽略不计, 故功率表的读数 (即短路损耗  $P_{dL}$ ) 就是满载铜损耗  $P_{Cu}$ 。

#### 变压器的效率

变压器的输出功率与输入功率之比的百分数称为变压器的效率, 用  $\eta$  表示, 即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} \times 100\% \quad (7)$$

将式(5)代入上式得

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + I_2^2 \frac{R_{dL}}{k^2} + P_{Fe}} \times 100\% \quad (8)$$

当  $U_2$ 、 $\cos \varphi_2$ 、 $k$ 、 $R_{dL}$ 、 $P_{Fe}$  都不变时,  $\eta$  为  $I_2$  的函数。空载时  $I_2 = 0$ ,  $\eta = 0$ , 负载时随着  $I_2$  的增加,  $\eta$  逐渐增大。现在求  $I_2$  满足什么条件时效率最大, 为

此, 求  $\eta$  对  $I_2$  的导数并令其为 0, 即

$$\frac{d\eta}{dI_2} = \frac{U_2 \cos \varphi_2 (P_{Fe} - I_2^2 \frac{R_{dL}}{k^2})}{(U_2 I_2 \cos \varphi_2 + I_2^2 \frac{R_{dL}}{k^2} + P_{Fe})^2} = 0$$

则有

$$P_{Fe} - I_2^2 \frac{R_{dL}}{k^2} = 0$$

$$P_{Fe} = I_2^2 \frac{R_{dL}}{k^2} = P_{Cu} \quad (9)$$

由此得出结论, 当变压器的铜损与铁损相等时效率最高。图 5-34 为变压器的效率曲线, 当效率增加到最大值  $\eta_{max}$  以后, 又略为下降。

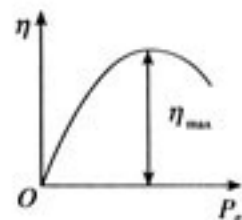


图 5-34

变压器的损耗一般很小, 所以效率很高。大型电力变压器在额定负载时的效率可达 96%~

99%，但轻载时的效率很低，因此应合理选用电力变压器的容量，避免长期轻载运行或空载运行。

(摘自电子工业出版社2001年5月第1版，幼强、行小帅主编/黄庆元主审《电工学》，有改动)

### 3. 汽油机点火装置的工作原理

汽车中汽油发动机的点火装置是利用感应圈的原理制成的。感应圈是互感现象的重要应用之一，它实际上就是一个小功率的升压变压器，它能将十几伏的直流低电压变成数万伏的高电压，是科学实验中经常用来取得高压的一种电源设备。

感应圈的结构示意图如图5-35。主体部分是在一个用许多薄硅钢片叠合而成的直条形铁芯上套有两个线圈的变压器，初级线圈绕在里层，次级线圈绕在外层，层间有良好绝缘，整个变压器经过绝缘处理后放进胶木外套筒中，空隙处灌满了很厚的一层石蜡。

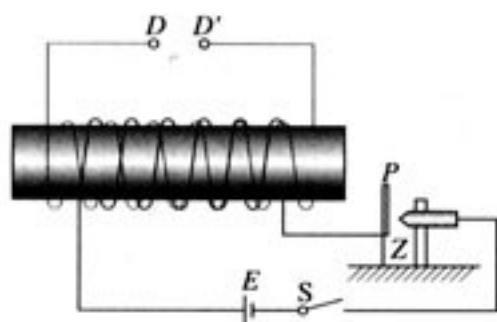


图 5-35

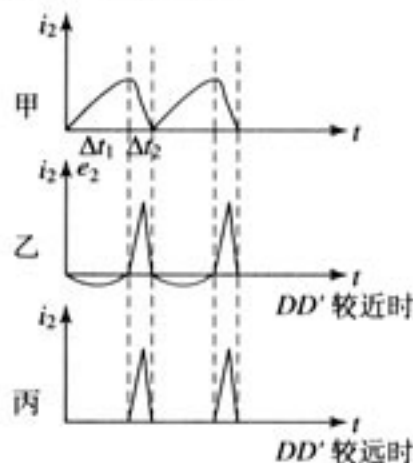


图 5-36

恒定直流是不能变压的，但不断地接通与切断直流电路却可以产生互感电动势，这表明断续的脉动直流也可以进行电压变换，这里通断电流的机构是采用一个最简单的电磁式断续器，当螺旋调节器触点  $Z$  与带有铁头的弹簧片  $P$  接触时，合上电源开关  $S$ ，初级线圈中有恒定直流通过，于是铁芯被磁化吸引弹簧片，但此时却切断了电路；铁芯失去磁性便放开弹簧片，弹簧片又与触点  $Z$  接触，电路再度被接通。如此不断地重复下去，低压恒定直流就变成了脉动直流。由于初级线圈自感作用的结果，电流不能突然增大，也不能突然减小，因而变成上升被阻拦，下降被拖延的脉动直流，其波形如图5-36甲所示。图中  $\Delta t_1$  时间内的曲线表示电路接通时，电流上升的情形，而  $\Delta t_2$  时间内的曲线则表示电路断开时，电流下降的情形。我们知道，由于初级线圈电流的变化，在初级和次级线圈中都会感应出电动势，电流的变化率越大，感应电动势也就越高。由图5-36甲可见，由于电路断开时电流的变化率比电路接通时电流的变化率要大得多，所以电路断开时感应电动势也比接通时高得多。图5-36乙中画出了次级的电动势  $e_2$  的变化波形。在电路接通时 ( $\Delta t_1$  时间内)，感应电动势较小，而电路断开时 ( $\Delta t_2$  时间内)，感应电动势上升至较大的数值。如果两次级端点  $D$ 、 $D'$  相距较近，则感应电动势的正向与负向的值都可使  $DD'$  间的空气击穿而发生强烈的火花放电。这时，次级线圈中就有交变电流通过，其电流变化的规律与电动势变化的规律相同，仍如图5-36乙所示。但是如果  $D$ 、 $D'$  相距较远，则当电路接通时，次级的感应电动势不足以使空气击穿放电，此时次级线圈没有电流通过；只有当电路断开时，由于次级感应电动势很大， $DD'$  间的空气被击穿放电，次级线圈中才有电流通过，所以这时次级的电流是脉冲的直流，如图5-36丙所示。

由于初级线圈的自感系数较大，当电路断开时，电流的变化率又很大，所以此时可产生约几百伏的自感电动势，比直流电源的电压要高得多。而且，因为次级线圈的匝数  $n_2$  约为初级线圈匝数  $n_1$  的300倍左右，次级线圈的电压将比初级线圈的电动势高约300倍，所以，次级线圈的电动势可以达到一万伏乃至几万伏的高压。因为学生已经知道自感电动势的大小与电流



的变化率有关，所以上述内容可适当的进行补充，以利于学生理解自感及变压器。

#### 4. 我国特高压输电技术取得突破

我国特高压输电技术的研究已取得突破性进展，目前在绝缘配合、高海拔研究、防雷研究等领域已达到国际先进水平。所谓特高压，是指由 1 000 kV 级交流和正负 800 kV 级直流系统构成的高压电网。特高压电网的最大特点是长距离、大容量送电。

我国能源资源大部分在西部，而电力需求则集中在东部。现有电网主要以 500 kV 交流电和正负 500 kV 直流系统为主，最远电力输送距离为 500 km，使电力输送能力和规模受到严重制约。而特高压电网输电距离可达 1 000 km 至 1 500 km，可更好地满足经济发展对电力的需求。特高压电网建成后，可以减少发电装机  $2 \times 10^7$  kW，每年减少发电煤耗  $2 \times 10^7$  t，年综合节电效益可达  $1 \times 10^{11}$  kW·h 以上。

国家电网公司对交流输电方案从自然功率、造价、输电走廊等经济指标进行了综合比较，结论是：1 000 kV 交流输电方案的单位输送容量投资约为 500 kV 交流输电方案的 73%。对直流特高压比较的结论是：正负 800 kV 直流输电方案的单位输送容量投资约为正负 500 kV 直流输电方案的 72%。研究结果表明，输电线路越长，输送容量越大，使用特高压输电就越经济。我国设备制造水平不断提升，已基本具备了研制特高压设备的能力，500 kV 输变电设备已实现国产化，西北 750 kV 输变电示范工程其变压器、电抗器等设备均由国产厂家自主开发，一次试验成功。到 2020 年，我国特高压电网将基本建成，输送电量将达到  $2 \times 10^8$  kW 以上，占全国装机总容量的 25%。与此同时，特高压直流输电工程建设也正在按计划稳步推进，第一条特高压直流输电线路工程将在 2008 年开工建设，2011 年建成投产。

### (三) 实验参考资料

#### 1. 课本图 5.3-3 低频扼流圈用来“通直流，阻交流”的演示方法

##### (1) 实验方法一

电路如图 5-37 所示。电源使用 6 V 干电池和 2 V、50 Hz 交流电源（学生实验电源）串联，组成直流与交流成分均有的电源。电感  $L$  可以用可拆变压器的次级线圈或其他电感线圈， $L$  的直流电阻为  $R_L$ ，可用欧姆表测出。 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  为电阻箱。 $R_L$  与电阻  $R_3$  之和等于电阻  $R_1$  与  $R_2$  之和，且  $R_1 = R_L$ ， $R_2 = R_3$ 。

示波器 Y 轴输入耦合开关置于“DC”，在没有输入的情况下，X 扫描频率置于 10~100 Hz，并且将扫描线置于示波器方格坐标的中央，作为 0 参考点。首先将 A 点接 Y 轴，学生电源交流电压置于 2 V，电源开关置于关的位置，这时 6 V 直流电源已经通过学生电源的 2 V 线圈将 6 V 直流电压加到示波器的 Y 轴，在示波器上扫描线高于（或低于）坐标轴 0 参考点，记下该位置的格数。然后仍在交流电源开关断开的情况下，分别将 B、C 两点接入示波器 Y 轴，观察扫描线偏离 X 轴 0 参考点的位置，这两个位置分别是  $R_2$  与  $R_1$  的分压值的位置和  $R_3$  与  $R_L$  的分压值的位置，并记下这两个位置的格数，可以发现它们是相同的。

将学生电源开关接通电源，用示波器观察三个位置的电压波形：

①电源电压波形，即  $R_1 + R_2$  两端的电压波形。这时可以看到交流电压波形是以 6 V 直流

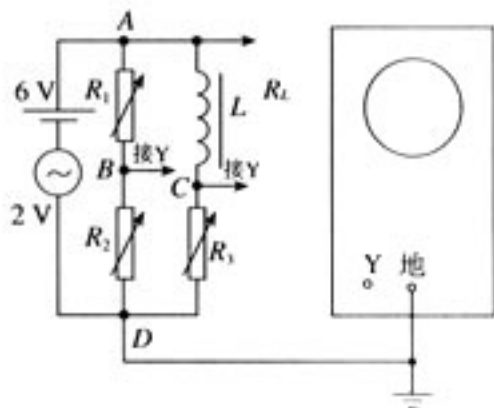


图 5-37



电压所在位置为横轴的正弦波形；

②观察  $R_2$  部分的电压波形，可以看到交流电压是以  $B$  点直流电压为横轴的正弦交流电压波形；

③观察  $R_3$  上的电压波形，该处是以  $C$  点直流电压位置为横轴的交流电压波形。

但是其交流电压幅度小于  $B$  点位置的交流电压幅度。首先调好电源电压波形，保持  $Y$  轴与  $X$  轴的各个旋钮的位置不变，然后进行后面的②、③两步。

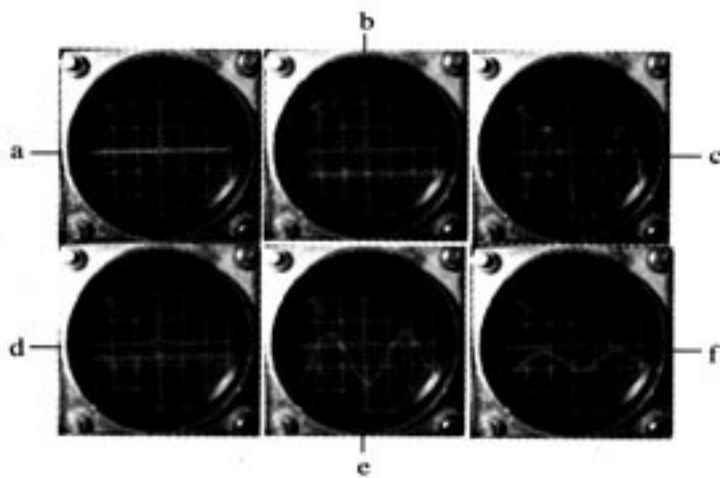


图 5-38

实际观察情况举例。电感用小型变压器的次级线圈，其直流电阻  $R_L = 10 \Omega$ ； $R_3$  为  $10 \Omega$ ；电阻箱  $R_1$  调整为  $10 \Omega$ ，电阻箱  $R_2$  调整为  $10 \Omega$ ；直流电压  $6 \text{ V}$ 、交流电压  $2 \text{ V}$ ；学生示波器  $Y$  轴衰减  $100$ ， $X$  轴扫描频率  $10 \sim 100 \text{ Hz}$ ，微调扫描频率，出现 2、3 个波形。波形如图 5-38 照片所示，图中的尺寸相同。a 图为 0 参考点；b 图为  $6 \text{ V}$  直流电压的位置，约大于 0 参考点 1 大格；c 图为  $A$  点电压波形即电源电压波形；d 图为电阻  $R_2$ 、 $R_3$  上的直流电压分压的位置，其大小约为 b 图的一半；e 图为电阻  $R_2$  上的电压波形，是以 d 图为横轴的正弦交流电压波形；f 图为电阻  $R_3$  上的电压波形，是以 d 图为横轴的正弦交流电压波形，其幅度小于 e 图的幅度，因为通过  $R_3$  上的交流受到电感  $R_L$  的阻碍作用。

### (2) 实验方法二

只用图 5-37 中电感  $L$  与电阻  $R_3$  的串连电路（不用  $R_1$  和  $R_2$ ），分为两次实验。第一次使用直流电源，观察示波器显示的电源电压大小（变化格数）和电阻  $R_3$  两端的电压大小（变化格数）。第二次将电源改为交变电流，电压大小与直流电源相同，先观察交流电压大小（可以数峰值的格数），再观察电阻  $R_3$  两端的交流电压大小。比较两次  $R_3$  上的电压与电源电压之比，可知电感  $L$  对直流和交变电流有不同的作用。

### 2. 电磁式（动铁式）仪表

磁电式（动圈式）仪表不能直接测量交变电流。常用的交流电表有两类：一类是整流式仪表，是用二极管将交流整流成为直流后接入磁电式仪表进行显示，多用电表中的交流电压挡、交流电流挡都是这样的。另一类是电磁式仪表。

电磁式仪表的结构如图 5-39 所示。被测交变电流通入固定的线圈 3，当电流  $I$  的方向如图所示时，定、动两软铁片都被磁化，且磁极方向相同，因而互相排斥使动铁片转动，直到游丝产生的反力矩和排斥力矩平衡为止。电流越强，排斥力矩越大，指针偏转角度越大。当电流方向改变时，两铁片磁化后的极性都和图中相反，仍然互相推

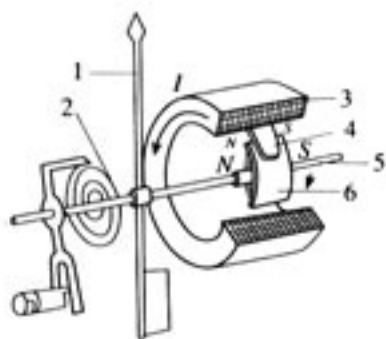


图 5-39

1. 指针；2. 游丝；3. 线圈；
4. 定铁片；5. 转轴；6. 动铁片。

斥，所以指针仍保持在原来偏转的角度处。这种仪表按有效值刻度，由于刻度是不均匀的，精度较低，适合测量工频交变电流，多用于工业上的测量，如配电盘（柜）上的电压表、电流表就是电磁式仪表。

电磁式仪表也可以测量直流。

图 5-40 所示的是在电表的度盘上标明它们类型的图形符号，甲表示磁电式，乙表示整流式，丙表示电磁式。



图 5-40

### 3. J2423 可拆变压器的简易实验

目的和要求：

了解变压器的基本构造；懂得变压器的基本工作原理。

仪器和器材：

可拆变压器（J2423 型），学生电源（J1202 型或 J1202-1 型）。白炽灯泡（220 V，40 W），大灯座，指示灯泡，小灯座（J2351 型）。氖泡（废日光灯启辉器，取掉外壳，剪断与氖泡并联的小电容器），导线若干。

J2423 型可拆变压器主要由以下几部分组成：

铁芯：由硅钢片迭压铆合的 U 形铁芯及条形铁轭组成闭合磁路。

线圈骨架：方形胶木制成，上沿有铝制线圈的匝数标牌和接线柱。

线圈： $L_1$  总匝数 1 400 匝，在 200 匝和 800 匝处抽头，抽头引线接于接线柱上，标号分别为 0、2、8、14； $L_2$  共 400 匝，在 100 匝处抽头，接线柱上标号分别为 0、1、4。

实验方法：

①观察可拆变压器的构造，了解各部分名称及接线柱上的标号意义。

②在“0-1”两接线柱间串联一个指示灯泡和 12 V 直流电源，在“0-14”两接线柱间接上白炽灯泡。指示灯泡发光，表明在初级线圈中有电流通过。注意观察次级线圈上白炽灯是否发光。

思考直流电能不能通过变压器由初级传送到次级？

③初级电路不变，把次级电路灯泡换成氖泡。电路接通后，指示灯发光，注意氖泡是否发光。把初级电路断开，注意初级电路断开的瞬间，氖泡是否发光。

思考初级电路断开，即初级线圈的电流发生变化时，次级电路有没有电压产生？

④在“0-1”接线柱间接上 12 V 交流电源，在“0-14”接上额定电压是 220 V 的白炽灯泡。注意观察白炽灯是否发光。

思考交变电流能不能通过变压器由初级传送到次级？能不能改变交变电流的电压？在这一实验中电压是升高了还是降低了？

⑤把“0-14”接线柱串联白炽灯泡后接在 220 V 交流电源上，在“0-1”接线柱间接上指示灯泡，将条形铁芯取下，接通电源后初级灯泡发光，次级灯泡不发光。然后将条形铁芯从 U 形铁芯的一端向另一端推移，同时注意指示灯是否发光或发光的情况。

思考变压器铁芯的情况对电能从初级电路传送到次级电路有无影响？在这一实验中，传到次级的交变电流电压是升高了还是降低了？

注意事项：

①接线时应断开电源，谨防触电。

②变压器线圈严禁不插铁芯接在电源上。因为不插入铁芯，线圈本身的电感量很小，感抗小而电流很大，极易烧坏线圈。

## 课程标准的要求

1. 知道非电学量转换成电学量的技术意义。
2. 通过实验，知道常见传感器的工作原理。
3. 列举传感器在生活和生产中的应用。

## 一、本章教材概述

这一章讲述传感器的相关知识。随着科学技术的发展，传感器的应用已越来越普及。事实上，在我们的身边就大量地使用着各种各样的传感器。例如，电视机、空调的遥控装置中使用着光学传感器；唱卡拉“OK”时使用的话筒是一种将声音信号转换为电信号的传感器；电饭锅、电熨斗、电冰箱中使用着温度传感器，等等。传感器技术是一项当今世界令人瞩目的迅猛发展起来的高新技术之一，这部分内容也是《课程标准》中“在课程内容上体现时代性”的一个标志。

传感器的种类很多，有简单的，也有很复杂的。现在大量使用的物理型传感器是利用某些变换元件的物理性质以及某些功能材料的特殊物理性能制成的。教科书中介绍的传感器是一些工作原理和使用方法比较简单的常见的传感器，主要目的是使学生对传感器知识有一个初步的了解，体会物理知识在技术中的应用。

本章共有4节，大致可以分为三个单元。第一单元为第1节，介绍常见传感器及其基本工作原理；第二单元包括第2、3节，介绍常见传感器的应用；第三单元为第4节，是常见传感器的应用实验研究。

在编写本章时还有以下思考：

### 1. 突出体现科学、技术与社会的密切关系

《课程课标》将“传感器”列为选修3-2模块的二级主题，集中体现《课程标准》对科学、技术与社会相互关系的关注。选取这样一个具有时代气息的内容主要有三方面的考虑：一是传感器已经广泛地应用到现代的生产和生活的诸多方面，成为进行测量和控制不可缺少的元器件；二是这种现代技术产品是基于许多物理原理设计的，可以很好地将它们联系起来，使学生对于科学与技术的关系有更全面和深入的体会；三是传感器的应用在促进现代社会的发展中起了重要的作用。

是否关注人类在应用技术方面的发展，以及科学在技术中的应用，是一个人的价值观的问题。长期以来，物理教学中非常重视基础的理论知识，研究许多理想的物理模型，这是完全必要的。但是，学生的技术知识甚至于技术常识却十分贫乏。即使安排了数量有限的物理实验和





有关高新技术发展的阅读材料，在实际教学中往往也难以落实。

本章有关技术的内容十分丰富，但是在教学要求上不同于技术课程。它侧重于物理原理在传感技术中的应用，让学生通过观察，了解运用传感器解决生活和生产中的某些需求的过程，体会到应用技术的重要性，了解和学习一些比较简单的技术知识。

教学中，在让学生列举传感器的各种应用事例的同时，认识传感器的应用对社会发展所起到的重要作用。这方面的内容所涉及的范围是相当广泛的，如经济、文化、人际关系、社会结构等，注意展现科学的人文价值。讨论中，要鼓励他们发表不同的意见和设想，既要肯定正面的作用，又要关注如何防止负面的影响。例如手机上增加了摄像功能，既能将美好的影像迅速传向远方，又可能侵犯个人隐私。

### 2. 突出理论联系实际的思想，培养分析具体事物的能力

本章以传感器这种产品为主线，让学生综合动用已经学过的或将要学到的物理知识来认识传感器的工作原理，经历这种学习过程，进行理论联系实际的思想教育。

学生一般会做大量的习题，有较强的解题能力。但是，当遇到具体的实际问题和一些简单的有技术含量的产品时，却常常不会分析和处理。也就是说，学生在如何把实际问题抽象为物理问题方面的能力较弱。虽然可以通过产品说明书了解产品的性能，但是其中多是技术参数的罗列，缺少对原理解释，难以适合本章教学的需要。因此，教科书中设置了大量的原理图、产品照片和简化结构图、电路图，配以简明的文字来阐述其物理原理和技术性能，具有较好的可读性。教师可以运用演示、讲解、学生阅读、讨论和动手实验等多种教学方式，培养学生认识和分析实际问题的能力。

### 3. 学习制作电子电路的技能

学生对于组装和调试普通的实验电路比较熟悉。在此基础上，可以进一步接触电子电路，因为电子电路的内容在生活中也是经常会遇到的。

教科书中安排的教材内容是：了解常用电子元器件的功能，认识最基本的电子电路图，使用一些基本工具和测量仪器，组装最简单的电子电路来实现最简单的测量和控制功能。

考虑到数字电路的应用越来越广泛，集成电路块的价格已经非常低廉，并且与模拟电路相比，数字电路需要的元件少，又可以避免调节器件的工作点，所以设计的制作实验都使用数字电路。

本章对理论知识要求不高。教学中应注意创造条件和教学环境，让学生主动参与，多观察、多动手、多思考。学生在开始时可能不适应这部分学习内容，教师要先引导他们突破一两个事例，领会研究方法，形成自信心，然后就可以放手学习其余的内容，把这一章的学习变成兴趣盎然、没有负担的物理课。

应该看到，教师对本章的教材内容一般不是很熟悉，感到它的技术性太强，往往有一种神秘和畏惧心理。其实，这部分内容并不难，要求也是很基本的。只要下功夫学习，认真备课，亲自动手去做每一个实验，完全可以理解相关的技术知识，掌握基本的操作技能，把握住教学的要求。这也体现了知识更新和教学能力的与时俱进。

#### 课时分配建议

第1单元	1 传感器及其工作原理	(2课时)
第2单元	2 传感器的应用(一)	(2课时)
	3 传感器的应用(二)	(1课时)
第3单元	4 传感器的应用实验	(4课时)



## 二、教材分析与教学建议

### 第1节 传感器及其工作原理

#### 1. 教学目标

(1) 通过观察一些现象和常见的事例，初步形成传感器的概念，感受传感技术在信息时代的作用与意义。

(2) 介绍光敏电阻、热敏电阻和霍尔元件三种敏感元件，通过实验知道它们的性能，了解其工作原理，感悟基础知识学习和应用的重要性。

(3) 知道非电学量转换成电学量的技术意义，进一步拓展学生的思维，进一步探讨科技发展给人类带来的利与弊。

#### 2. 教材分析与教学建议

本章的教学特点是定性研究一些原理性基础知识，但不做定量的计算。做好本节教学的关键是多举些例子和多做些实验，不要求展开。很多初看起来不易弄清的原理，动手一做就明白了。教师教好这章、学生学好这章，都要解决一个“怕”字。之所以会“怕”，就是因为不熟悉，接触多了，问题就很容易解决了。首先，通过观察一些现象和常见的事例，初步形成传感器的概念。然后，介绍三种制作传感器所使用的敏感元件，运用以前学习的物理知识了解它们的工作原理，为传感器的应用打下基础。

##### (1) 什么是传感器

在生活中，人类通过各种感觉器官（眼、耳、鼻、舌、皮肤等）来感知周围的世界，做出各种判断和反应。在自动化系统中，如果把计算机看成“大脑”的话，各种传感器就是“电五官”。因此，作为信息获取的关键环节，传感器在现代信息技术中占有十分重要的地位。所有的自动化测控系统，都需要传感器为其提供决策依据。

传感器主要包括两个部分：敏感元件和转换电路。敏感元件是传感器实现把各种非电信号转换为电信号的核心，是传感器的输入端；传感器输出的信号是可以直接利用的电信号，输出信号时需要解决电学量的可测量、可传输、可处理和可控制等技术问题，这些是通过其转换电路进行的。因此，要让学生认识传感器，就必须从其功能和作用方面入手。

①分析传感器是用来测量什么“量”的？

②这个“量”基于什么敏感机理被测量？

③通过什么样的转换电路才能够给出可用的电信号输出？

在引入传感器概念的教学过程中，教科书是从简单的传感器“永磁体控制小灯泡开关”的实验，引入传感器教学，让学生从了解干簧管构造及其工作原理中获得传感器的感性认识。



### 感知敏感元件

演示1：如教科书图6.1-1所示。小盒子的侧面露出一个小灯泡，盒外没有开关，当把磁铁放到盒子上面，灯泡就会发光，把磁铁移开，灯泡熄灭。

提问并猜测：盒子里有怎样的装置能实现这样的控制？盒子里一定有铁质材料制作的开关。

实验并分析：打开盒子，了解“干簧管”元件的结构。实验时条形永磁体必须按照教科书图6.1-2所示的方位靠近干簧管，才能使簧片得到最好的磁化，导致两个簧片相对的部分形成相反的磁极而吸合。干簧管是一个能感受磁场的敏感元件。

拓展：这个装置反过来还可以让我们通过灯泡的发光情况，感知干簧管周围是否存在磁场。

演示2：教师出示一只音乐茶杯，茶杯平放桌上时，无声无息，提起茶杯，茶杯开始播放悦耳的音乐，并发出五彩的光芒。

提问并猜测：音乐茶杯的工作开关在哪里？开启的条件是什么？在茶杯底部，所受压力发生改变，或者是由于光照强度的改变。

实验并分析：提起茶杯，用手压杯的底部，音乐并没有停止。用书挡住底部（不与底部接触），音乐停止。可见，音乐茶杯受光照强度的控制。音乐茶杯中所用的元件是能感受光照强度的敏感元件。

让学生感知敏感元件的教学，目的是使学生对传感器的概念有一定的感性认识，现代技术中，我们可以利用一些元件设计电路，它能够感受诸如力、温度、光、声、化学成分等非电学量，并能把这些量按照一定的规律转换为电压、电流等电学量，或转换为电路的通断。我们把这种设备元件叫做传感器。它的优点是，把非电学量转换为电学量以后，就可以很方便地进行测量、传输、处理和控制了。

教学中，可进一步引导学生列举生活中一些常见的传感器。例如，计算机上的摄像头、扩音话筒、光声控延时路灯、各种电器的遥控器、电冰箱、空调机、电熨斗和电饭锅上的温控器等。这些传感器的结构虽然复杂，但是，若仅从其功能角度考虑，学生是能够理解的。目的是使学生能从这些简单的例子中，概括出传感器的一般概念。

有关本节的几种敏感元件的教学，可以从随堂小实验来认识敏感元件材料的特性，不必追求掌握材料的结构和原理。（敏感元件将非电学量转换成的电学量的类型及传感器的分类等可参见本章的教学资源库。）

#### （2）光敏电阻

当有光照射到某些半导体时，这些半导体就像导体一样，导电能力很强；当没有光照射时，这些半导体就像绝缘体一样，导电性能很弱。人们根据光照会使半导体的导电性能发生显著变化这一特性，用这种半导体材料制成了各种电子元件。把跟光照射有关的半导体材料制成的电子元件（电阻）称为光敏电阻。

光敏电阻器是一种电阻值随入射光的强弱而改变的电阻器。一般它所用的材料主要有硒、硫化镉、硫化铝、硫化铋、硒化镉、硒化锌、砷化镓、硅等。它的敏感波长在可见光附近，包括红外线和紫外线。

光敏电阻价格低，不易损坏，适合学生实验。用教科书图 6.1-5 所示的方法做随堂实验，可以采用手遮挡的方法，直接观察到电阻随光照的变化而变化，并且能够让学生再次练习使用多用电表。

教学中，让学生以实验操作的方式将光敏电阻与普通电阻器进行对比研究，显示光敏电阻对光照的高度敏感性。普通电阻器的导电物质是附着在细瓷棒（或细瓷管）上的金属膜或碳（石墨）膜，不具有光敏性。

### 教学片段

#### 感知光敏元件的感光特性

演示：将两节 5 号干电池与音乐集成块、发光二极管串联，并把它们固定在小塑料盒内，由盒内引出两根导线，连接到光敏电阻上（光敏电阻装在一个黑色小圆柱管中）。

①打开电源开关，再将装光敏电阻的黑色圆柱管一端打开，可以听到音乐集成块发出音乐声，但因光敏电阻藏在管的内部，只感受到微弱的光照，故音乐声较小，并且有些“走调”，同时发光二极管发出的也是淡淡的色光。

②把光敏电阻从黑管中拿出来，音乐声变大，发光二极管发出了较亮的色光。

③用手电筒光照射光敏电阻，音乐声更大，发光二极管发出的色光更亮。

### 教学片段

#### 观察光敏电阻导电特性的实验

①实验方案设计：

方案 A 如教科书图 6.1-5 所示。用欧姆表测定不同光照情况下（迎光、背光、放抽屉里……）光敏电阻的电阻值，在相同条件下，用普通电阻进行对比实验。

方案 B 用直流电路，在不同光照情况下（迎光、背光、放抽屉里……），通过小灯泡的明暗程度变化，比较光敏电阻阻值的变化情况。在相同条件下，用普通电阻进行对比实验。

②实验：光敏电阻无极性之分，暗电阻 $\geq 1\text{ M}\Omega$ ，亮电阻 $\leq 1\text{ k}\Omega$ ，所以多用表应选用“ $\times 100$ ”或“ $\times 1\text{ k}$ ”挡。

将光敏电阻感光面，迎光、背光、放抽屉里……读取欧姆表示数或观察小灯泡亮度。

③交流评价：学生交流实验结果，分享实验中对光敏电阻特性认识的体验。

介绍光敏电阻的工作原理能够扩展学生关于物质导电性的知识。除了已学到的金属的自由电子导电和溶液的离子导电外，又认识了半导体依靠载流子导电的机理。教科书在“科学漫步”栏目中，对这种导电机理作了浅显的解释，学生有所领会即可，不要求掌握。

(3) 热敏电阻和金属热电阻

热敏电阻是人们利用温度变化使半导体的导电性能发生显著变化的特性制成的电子元件。热敏电阻是开发早、种类多、发展较成熟的敏感元器件之一，其电阻值会随着热敏电阻本体温度的变化呈现阶跃性的变化。



教学中，要让学生做好随堂实验。可使用低价位（几角钱）的负温度系数热敏电阻，如产品型号为 MF-11，其外形为直径 5~10 mm 的小圆片状，表面涂绿色漆层，有两根铜丝引脚，选购标称阻值（即常温 20℃ 时阻值）为几百欧的较为适用。特别提示，片状热敏电阻是不防水的，如果要利用水来研究它的温度特性时，需要对它进行防水处理。

### 教学片段

#### 探究热敏电阻、金属电阻随温度变化的关系

实验装置：如图 6-1 所示。

操作要求：注意欧姆表倍率的选择，建议热敏电阻选“×1k”，金属热电阻选“×10”。

学生观察并记录不同温度下的两个欧姆表的读数，并记录在表格中。实验时，将两个多用电表放在实物投影仪上，学生看屏幕上多用电表指针所指的刻度，同时请三位同学到讲台前，让一个同学观察温度计的示数，让另外两个同学各读一个表的读数。

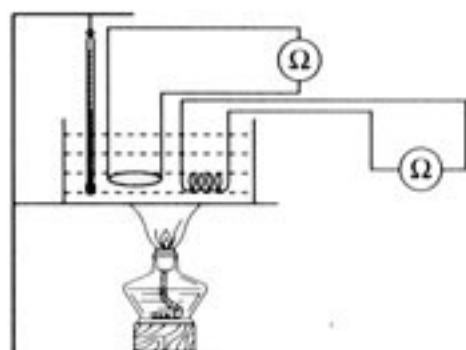


图 6-1

数据记录：

温度 $t_{\text{水}}/^{\circ}\text{C}$						
热敏电阻 $R_1/\Omega$						
金属热电阻 $R_2/\Omega$						

数据处理：用 Excel 处理表格中的数据，绘出电阻—温度特性图线。

（请一位同学将实验数据输入到 Excel 的表格中，并插入图表，显示出  $R-t_{\text{水}}$  图象。）

图象分析：讨论图象给我们带来的有用信息，并用简洁的语言表达出来。

如，当温度升高时，这两种电阻将发生怎样的变化？如果变化相同的温度，你会发现这两种电阻哪个将明显地变化……

### 教学片段

#### 探究钨丝的电阻、热敏电阻随温度的变化

实验 1：如图 6-2 所示。AB 间接有一段钨丝（可从旧灯管中取出），闭合开关 S，灯泡正常发光，当用打火机给钨丝加热时，灯泡亮度明显变暗。

问题：钨丝的电阻在常温下和高温下的电阻哪个大？金属导体的导电性能与温度有何关系？

分析：钨丝的电阻随温度的升高而增大。表明金属导体的电阻随温度的升高是增大的。

实验 2：学生两人一组，用多用电表的欧姆挡测一只热敏电阻的阻值。第一次直接测量，第二次用手心捂住热敏电阻再测量，记录两次测得的电阻值。

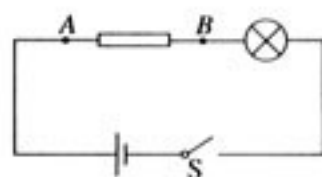


图 6-2



问题：热敏电阻的阻值与温度有何关系？

分析：热敏电阻的阻值随温度的升高而减小，且阻值随温度变化非常明显。

归纳总结：金属热电阻和半导体热敏电阻都可以用作温度传感器。它们都能够把温度这个热学量转换为电阻这个电学量，金属热电阻的化学稳定性好，测温范围大，但灵敏度较差。

教学中，有意识介绍同功能的多种传感器，目的是让学生体会解决问题可以有多种途径。就温度传感器而言，如热敏电阻温度传感器、金属热电阻温度传感器、热电偶温度传感器、硅 P-N 结集成温度传感器、红外温度传感器等就是用不同材料和不同方法制成的各种传感器。

#### (4) 电容式位移传感器

教科书中的“说一说”栏目是从学生拓展知识的角度考虑的，学生有所领会即可，不要求掌握。教科书图 6.1-8 是原理图。它要用到已学过的有关介质影响电容器电容的知识，这里也可以这样理解：该栏目的设计，目的是贯彻整套教科书“通过真实的图景学习基本的知识”的思想，学生在不同的情境中应用同样的基本知识，这样才能把知识学活。至于检测电容的变化，可以有不同的方法。例如，使用数字式电容表（许多型号的数字式多用电表附有此功能），或者将图中的电容器与某个电感线圈组成电磁振荡回路，从振荡频率的变化反映出电容的变化等。

#### (5) 霍尔元件

霍尔元件是利用霍尔效应制成的新型磁敏元件。霍尔传感器是由霍尔元件、放大器、温度补偿电路及稳压电路构成的。它能感应磁感应强度等物理量，并能输出控制信号，具有体积小、灵敏度高、无磨损、功耗低等优点，被广泛应用于录、放像机等电路中。

霍尔传感器的种类很多。例如，数字和模拟霍尔效应位置传感器、霍尔效应叶片传感器、齿轮传感器、霍尔效应微动开关和磁体等。实际应用例子在互联网上多有介绍，可以请学生自己查阅。

学生在《物理选修 3-1》的“课题研究”中对霍尔效应略有了解。本节在此基础上介绍具有磁敏效应的半导体元件——霍尔元件。其工作原理的理论推导可不做过高的要求。

另外，如果能够得到教科书图 6.1-10 所示的霍尔元件，最好把“做一做”栏目所述的演示实验做一下。



### 教学片段

#### 霍尔效应的演示

演示：实验电路如图 6-3 所示。限流电阻  $R$  可以用电阻箱或电位器，调节它的阻值使通过霍尔元件的工作电流  $I$  约为 10 mA 的恒定值。当永磁体的任意一个磁极靠近时，都会产生霍尔电压，由数字电压表显示出来，并且当某个磁极对着元件的工作面时电压为正（ $M$  端的电势高于  $N$  端），而另一个磁极对着元件的工作面时电压为负（ $M$  端的电势低于  $N$  端）。还会看到，磁极越靠近，即磁感应强度  $B$  越大时，霍尔电压也越大；其他条件不变时，霍尔电压跟磁感线与元件工作面的夹角有关，垂直时达到最大。

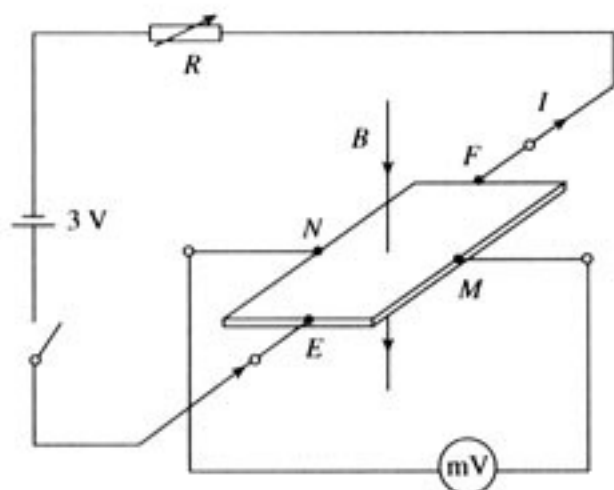


图 6-3

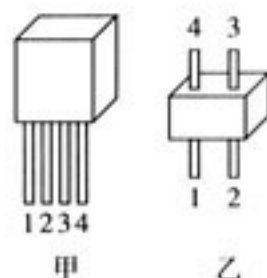


图 6-4

教科书图 6.1-10 所示的是常见的霍尔元件，标有文字或颜色点的表面是工作面。其引脚如图 6-4 所示，1、3 两脚相当于图 6-3 中 E、F 端，是通入电流的，2、4 两脚相当于图 6-3 中 M、N 端，是输出霍尔电压的。

### 3. 问题与练习

#### 内容分析

第 1 题的两种装置都是把位移这个力学量转换成了自感系数这个电学量。通过学生尝试分析工作原理、设计简单的电路图，让学生初步了解传感器及其工作原理。

第 2 题是一个开放性的问题。同一种名称的传感器可能有不同的结构和工作原理，通过该题让学生熟悉各种不同的传感器，并知道其工作原理。

#### 解答与说明

##### 1. 答:

甲图中，当待测物体位移变化时，软铁芯 2、3 间的空气间隙变化，线圈 4 的电感值发生变化。这一变化通过转换电路转换为电路中输出电流的变化，这样电流的变化就与位移的变化建立起对应关系，电流的变化量就反映出被测物体位移的变化量。

乙图中被测物体位移变化，带动软铁芯 2 在线圈中移动，线圈的电感值将变化，这一变化通过转换电路和检测电路输出电流，就得到了被测物体位移的变化。

甲图中在线圈 4 上串联电源和电流表。乙图中在线圈 3 上串联电源和电流表。相连接的测量显示电路可设计成如图 6-5 所示，G 为频率一定的正弦交流信号源，将上述传感器的线圈 L 与交变电流表 A 串联后与信号源连接。线圈自感系数的变化将使它对交变电流的感抗发生变化，从而引起电路中电流的变化，由电流表显示出来。

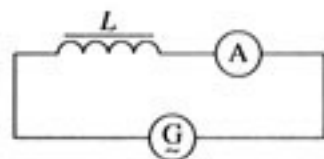


图 6-5

2. 答：同一种名称的传感器可能有不同的结构和工作原理，下面仅列出一种答案仅供参考。

传感器名称	输入（感受）的物理量或化学量	输出的物理量	可能的工作原理
气体压强传感器	气体压强	电压（电流）	元件受压电阻变化
硅光电池	光照强度	电压	受光照产生电动势

续表

传感器名称	输入(感受)的物理量或化学量	输出的物理量	可能的工作原理
光电二极管	光照强度	电流	受光照产生光电流
湿敏电阻	空气湿度	电压(电阻)	感湿材料的导电能力变化
话筒	声波的压强	电流	电磁感应或压电效应
加速度传感器	加速度	电压	牛顿第二定律及压电效应
测速发电机	物体的转速	电流(电压)	电磁感应
热电偶	温度	电压	温差电效应
酒精气体传感器	酒精蒸气浓度	电压	化学反应后引起电压变化

## 第2节 传感器的应用(一)

### 1. 教学目标

- (1) 了解传感器应用的一般模式。
- (2) 了解力传感器在电子秤上的应用。
- (3) 了解声传感器在话筒上的应用。
- (4) 了解温度传感器在电熨斗上的应用。
- (5) 感受传感技术给人类生活带来的便利, 拓展学生的设计思路。

### 2. 教材分析与教学建议

本节是在前一节的基础上, 通过一些具体的装置或设备, 了解它们是怎样应用传感器来解决实际问题的。由于例子较多, 故分为两节叙述。

分析这些实例, 目的在于认识传感器在工作过程中起了怎样的作用, 并不要求学生记住。教科书使用了許多图片, 有实物图、原理图、结构图、电路图等, 并且把它们与文字结合起来进行说明。许多学生对这部分内容不熟悉, 需要教师加以引导。教学中, 努力让学生体验传感器与现代生活和科技的密切关系。课前, 可布置学生收集家庭中所能找到的传感器, 初步了解它们的特点。例如, 可以收集电饭煲、电熨斗、电冰箱、各种遥控器、手机等的说明书, 通过阅读说明书, 对它们的使用及原理有一个初步的认识。

#### (1) 传感器应用的一般模式

认识各种敏感元件的作用是本章贯穿的一根主线。第1节研究了几种敏感元件, 为了使学生理解敏感元件在传感器中的地位和作用, 我们努力把已学过的知识及时纳入相关的知识体系。传感器的信号输入是依赖敏感元件来实现的, 但是敏感元件输出的电信号一般很弱, 不能直接使用, 所以需要经过转换或放大电路, 才能实际使用。传感器从整体功能来说, 输入的是非电信号, 输出的是可以直接使用的电信号。所以, 传感器应用的一般模式应该包括敏感元件和转换放大电路两大部分。关于这点, 我们可以从本节介绍的几种传感器中体会和认识到。

教科书给出的传感器应用的一般模式(教科书图6.2-1)强化了传感器的转换功能及实际

应用中的呈现方式。

## (2) 力传感器的应用——电子秤

可以由学生熟悉的弹簧测力计的原理引入，教科书图 6.2-2 所示的传感器就是依据物体弹性形变的大小来测量力的大小的，只不过把弹簧的拉伸换成了双臂金属梁的弯曲形变。虽然双臂金属梁的形变量很小，但也能将力转换为形变的量。

应变片的作用则是将“形变”这个非电学量转换成电学量。应变片内部的核心是半导体材料制成的长条形电阻元件，在其发生微小的伸长时，电阻就会变大；缩短时，电阻变小。然后，再通过直流电桥电路将电阻的变化转换为适宜传输和测量的电压加给显示系统，在数字屏上显示出对应的力的数值。

这里需要给学生补充一些“形变”的知识。一根直梁弯曲时，其凸出的表面将发生伸长形变，而凹下的表面则发生压缩形变。可以在一块长条形橡皮的侧面或上下两个表面上各画出一一些小方格（图 6-6），然后用手弯曲这块橡皮，就能够从方格的形状变化证明上述规律。

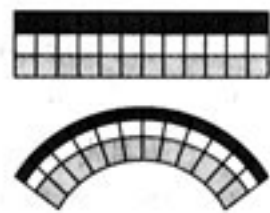


图 6-6

## 教学片段

### 设计电子地磅秤

提出设想：当加在弹簧上的力发生变化时，弹簧的形变量也要发生变化。如果把这个形变量的变化与一个变阻器的滑动触点同步连动，就能改变电路中的接入电阻值，从而也就会影响到电路中的电流和电压的变化。据此，我们可以尝试设计一个电子地磅秤的电路，请画出它的电路图。

学生活动：进行设计，并交流设计方案。

方案 1 如图 6-7 甲所示。它是采用电流表指示重力值的设计。

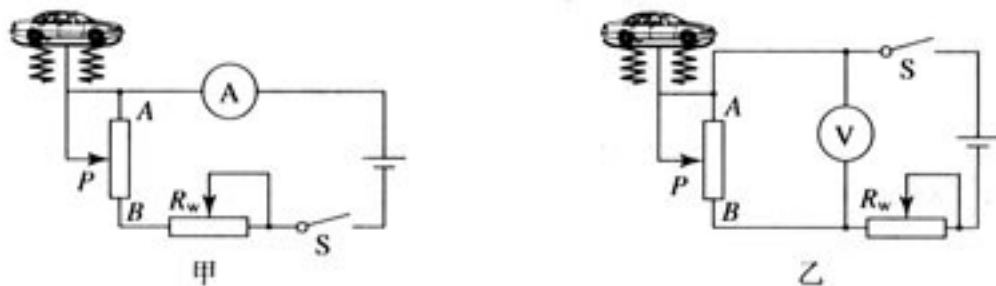


图 6-7

不称物体时，弹簧弹力作用使滑片  $P$  在  $A$  端，有效电阻较大，电流较小；称重物时，重力作用使滑片  $P$  在  $B$  端，有效电阻较小，电流较大。把电流对应的重力刻在表盘上，就可直接读出重力的值。

方案 2 如图 6-7 乙所示。它是采用电压表指示重力值的设计。

不称物体时，弹簧弹力作用使滑片  $P$  在  $A$  端，有效电阻较大，电压较大；称重物时，重力作用使滑片  $P$  在  $B$  端，有效电阻较小，电压较小。把电压对应的重力刻在表盘上，就可直接读出重力的值。

对电子秤的学习需向学生做进一步的介绍，让学生知道，电子秤是一种装备了电子元件的



称重计量设备。具有称量快、读数方便，能在恶劣环境条件下工作，便于与计算机技术相结合而实现称重技术和过程控制的自动化等特点，因而，被广泛应用于医院、学校、企业、能源交通、商业贸易和科学技术等部门。

### (3) 声传感器的应用——话筒

话筒的正规名称叫做传声器。教科书上“将声信号转换为电信号”是一种笼统的说法。具体情况分析如下。

①动圈式话筒的原理最简单，可以让学生对照教科书图 6.2-5 依据电磁感应的知识解释其工作原理。动圈式话筒的主要结构是由轻薄的弹性膜片后面粘接一个由很细的漆包铜线绕制的小线圈（教科书图 6.2-5），并将其置于磁场中。当声波使弹性金属膜片振动时，连接在膜片上的线圈随着一起振动，线圈在永久磁铁的磁场里振动，其中就产生感应电流（电信号），感应电流的大小和方向都变化，变化的振幅和频率由声波决定，这个信号电流经扩音器放大后传给扬声器，从扬声器中就发出放大的声音。

②电容式话筒的原理联系到电容的知识。教学中，可以引导学生思考相关的问题，如，接收声波时，电路中为什么会产生变化的电流？分析教科书图 6.2-6 可知，Q 是绝缘支架，薄金属膜 M 和固定电极 N 形成一个电容器。当声波使膜片振动时，电容发生变化，电路中形成变化的电流，于是电阻 R 两端就输出了与声音变化规律相同的电压，其原因是由于构成话筒的电容器交替充、放电的结果。

③驻极体话筒的振动膜和金属极板构成了一个容量约为几十皮法的电容器。在外界声波的作用下，电容随之改变。由于驻极体振动膜上的电荷量不变，所以电容器两端电压随声波的变化而变化。这样，驻极体话筒就把声音信号转变为电信号。



### 用示波器观察话筒的工作

实验装置：如教科书图 6.2-7 所示。其中，C 为隔直电容器，驻极体话筒内部装有一个场效应三极管作为阻抗变换，所以必须外接 6 V 直流电源，供场效应管工作用。

演示：示波器的 Y 输入端要选用电压灵敏度最高的挡位，话筒采用驻极体话筒（灵敏度较高，且价格仅 1~2 元），将话筒接在示波器的输入端。

轻敲音叉，使其靠近话筒，观察荧光屏上的波形，再对着话筒说话或播放各种乐器的声音，比较其与音叉波形的区别（音叉的波形为正弦函数；其他声音的波形各异）。

通过以上实验，体会话筒把声信号转变为电信号的过程。

本演示实验也可以改用动圈式话筒（例如演唱卡拉 OK 用的），或者一只口径 10 cm 左右的动圈式喇叭当作话筒，它们都不需要电源，直接接到示波器的“Y 输入”和“地”两端即可。

### (4) 温度传感器的应用——电熨斗

双金属片温度传感器是发明和应用最早的传感器之一。它构造简单、动作可靠，能够直接控制强电电路（如 220 V、2 A）的通断。它输出的是电信号的开关量，就是接通或断开这种跃变。而前两种传感器输出的则是连续变化的模拟量。

教科书图 6.2-8 所示的日光灯启辉器中的双金属片小实验，其目的是看到双金属片温控开

关的动作。

电熨斗的教学设计的方案可以分下面三步进行：

- ①双金属片的工作原理；
- ②电熨斗的控温原理；
- ③电熨斗的调温原理。

## 教学片段

### 探究电熨斗控温和调温原理

双金属片的工作原理：双金属片巧妙地利用了不同金属热膨胀（线膨胀）的差异，在温度发生变化时，双金属片发生弯曲。

实验：可以用图 6-8 所示的装置进行实验。黄铜片和铁片铆在一起，常温下是直的，用酒精灯加热后，由于黄铜的线胀系数大于铁，就会向铁片一侧弯曲。

演示：将电熨斗通电加热，过一段时间后达到比较高的温度后自动断电；用电熨斗熨烫衣物，温度降低后，电熨斗自动通电继续加热。

问题导引：

①常温下，电熨斗的上下触电应该是接触的还是分离的？

②敏感元件双金属片上下层金属的膨胀系数应该哪个比较大？

通过以上问题的解决帮助学生理解电熨斗的控温工作原理。

提出问题：

①熨烫棉、麻衣物时，通常需要设定较高温度，熨烫丝绸衣物时，通常需要设定较低温度。有什么方法实现上述要求？

②当温度达设定值时，双金属片将怎样起作用？

③如何利用调温控制旋钮来提高和降低设置温度？

通过以上问题的分析和解答，帮助学生理解调温的工作原理。

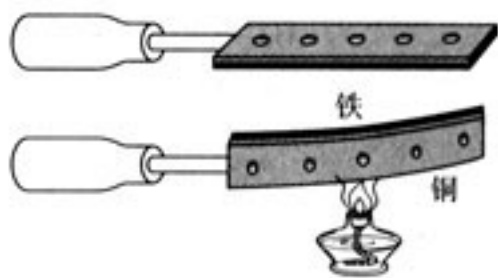


图 6-8

在学完这三个传感器后，要再让学生分析、比较这三个传感器在敏感元件、输出信号的形式、测量装置的结构等方面的异同。这样，有利于学生通过实例提升对传感器概念和传感器工作过程的理解。

### 3. 问题与练习

内容分析

第 1 题通过对电冰箱内温度控制器工作原理的分析，定性了解应用传感器来解决实际问题。

第 2 题通过对加速度计工作原理的分析，进一步增强对传感器工作原理的理解，该题是一个力学与电学综合题，可以做定量或半定量处理，有利于提高学生综合分析的能力。

第3题是一个由热敏电阻和继电器组成的温控电路，强化了学生对传感器工作原理的理解，该题通过图象、定量计算等进一步提高学生的认知和分析的能力。

解答与说明

1. 答：

(1) 电冰箱内温度较高时，密封系统中的压强增大，箱体膨胀，膜盒3通过小柱体推动弹簧片4，使动触点5与静触点6接触，控制压缩机自动开始工作，而在达到设定的低温时拉簧7带动弹簧片4将触点5、6断开，使压缩机停止工作。

(2) 凸轮8转动会改变连杆9对弹簧7的拉力，该拉力与弹性膜盒3产生的推力共同控制弹簧片4的运动。具体说，当逆时针转动凸轮8时，连杆9对弹簧7的拉力增大，要使触点5、6接触，需要膜盒3产生的推力增大，膜盒3体积膨胀增加变大，那么冰箱内的设定温度增高。故旋转凸轮可以改变设定的温度。

2. 答：该同学是依据牛顿第二定律和胡克定律设计的，电路在原理上可行，当滑动片P在滑动变阻器中央时，P、Q等势，电压表指针指中央零点。

这个装置可以同时测出加速度大小和方向，大小可通过电压表示数大小表示，方向可通过偏转方向判定。

当物体具有图示方向的加速度 $a$ 时，滑块2将向左移，带动变阻器的滑片4移向中点左方；变阻器右端电阻大，故电流流过滑动变阻器时电势降落大；Q点电势高于P点，则指针应向零点左侧偏转。

半定量：

$$\text{设滑块向左偏离 } x, \text{ 由牛顿第二定律, } 2kx=ma \quad (1)$$

$$\text{在电流大小不变时, } U_{QP} \propto x \quad (2)$$

则,  $U_{QP} \propto a$

加速度越大, 指针偏转越大。

3. 解：

(1) 应将加热器接在A、B端

(2) 由甲图查出热敏电阻在 $t_{\text{M}}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,  $R=50\ \Omega$ , 设 $R_j$ 为继电器线圈的电阻。

$$\text{则继电器电路中电流在 } t_{\text{M}}=100\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ 时, } I=\frac{E}{R+R'+R_j}$$

代入数据解得： $R'=100\ \Omega$

### 第3节 传感器应用(二)

#### 1. 教学目标

(1) 通过阅读说明书和示意图, 了解电饭锅、测温仪、鼠标器、火灾报警器的自动控制工作原理。

(2) 观察演示实验, 了解热敏元件、光敏元件的工作特性。

(3) 利用光敏电阻或硅光电池, 制作摄影用的曝光表。

#### 2. 教材分析与教学建议

本节继第2节之后再介绍四种传感器的应用实例, 进一步拓展学生的视野, 提高学生的认



识和分析能力。要让学生认识到，传感器应用在学习生活中的各个方面，人类已进入电气化和计算机时代，许多信息都需要转化为电学量来处理，日常生活中的应用可以参见下表。

本节教学目标之一是进一步拓展学生对各类传感器应用的认识。目标之二是让学生通过认识，操作教科书中介绍的几个传感器实例，了解它们的工作原理，了解敏感元件的特性，学会分析控制电路，并能够迁移到其他控制电路的分析和简单设计中去。

本节课建议有条件的学校开设分组实验，分四大组同时将电饭锅、测温仪、鼠标器和火灾报警器展放在同一教室内，每一大组配备三套装置（包括说明书），4人1小组开展边教边实验的探究教学。

每一组围绕表格内项目进行自学讨论。

项目	敏感元器件	控制电路	工作原理	敏感元器件的其他应用举例
电饭锅				
测温仪				
鼠标器				
火灾报警器				

### (1) 温度传感器的应用——电饭锅

电饭锅与上节课的电熨斗一样都是利用热敏元件实现电路的开关功能。电熨斗的热敏元件是双金属片，其转换机理是由温度变化→金属片弯曲变形→电路通断。电饭锅的热敏元件是感温铁氧体，其转换机理是由温度达到居里点→材料的铁磁性变化→电路通断。

电饭锅的温控方式与电熨斗不同，它不用敏感元件直接控制电路的通断，而是间接推动杠杆来实现（教科书图 6.3-1）。开始煮饭时，向下压按钮，杠杆使永磁体接触而相互吸住，同时弹簧被压缩，压杆抬起，下面的簧片向上弹起，两个触点接通，使电饭锅内电热丝通电。水沸腾后，大致保持  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。饭煮熟后，锅底温度上升到  $103\text{ }^{\circ}\text{C}$  时，感温铁氧体失去铁磁性不能与永磁体相吸，永磁体就在重力和弹簧弹力的共同作用下落下，杠杆左端下降，将簧片压下使触点分离，电热丝断电停止加热。

教学中要注意引导学生的发散思维，使他们认识到其他具有热敏性质的元件都可以利用作为控制部件。

## 教学片段

### 感受居里温度

材料准备：收音机的天线磁棒，酒精灯，铁架台等。

知识准备：在此可适当补充有关磁性材料的一些知识，并通过演示实验让学生认识居里点，如高温或者撞击可能会扰乱磁体中分子电流的取向，磁体因而失去磁性，这就是去磁现象等。

演示：酒精灯加热磁棒到一定的温度，磁棒上吸附的铁环掉落……

提出问题：你能否利用这一磁现象设计一个温控开关呢？

教学中，要注意引导学生观察、分析电饭锅的结构示意图，理解其结构设计的巧妙，通过分析欣赏，激发学生的创造欲望。



## (2) 温度传感器的应用——测温仪

要让学生知道，测温元件有多种多样，可以满足不同的需要。例如，铂热电阻的电阻值与温度有很好的线性关系，稳定性又好，教科书图 6.3-2 左方的测温仪探头内使用的就是铂热电阻。热电偶工作时不需要电源，且价格较低，教科书图 6.3-2 下方数字多用表上配用的就是热电偶。

常见的热敏元件有：

- ①热电阻（铂丝）、热敏电阻（温度变化→材料的电阻率变化）；
- ②热电偶（两种不同的金属构成回路→温度变化→热电动势变化）；
- ③硅 P-N 结（在恒定电流条件下，温度升高→硅 P-N 结正向电压减小）；
- ④红外敏感元件（红外线能量→温度变化→非电学量变化→电学量变化）等。

### 教学片段

#### 观察热电偶的温差电现象

让学生观察和认识热电偶的温差电现象。

提出问题：热电偶是怎样把温度信号转变为电信号的呢？

观察：按照图 6-9 将铜丝和铁丝的一端相互压合（或绞合），两根线的另一端分别接在灵敏电流计的两个接线柱上。用燃烧的火柴加热压合端，可以看到灵敏电流计的指针偏转。热电偶将温度信号转变为电信号。

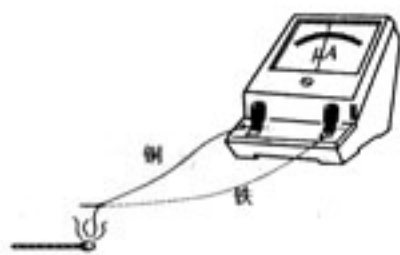


图 6-9

### 教学片段

#### 温度自动控制

实验器材：热敏电阻、学生用电源、小灯泡、继电器、电吹风、冷水、导线。

实验操作：如图 6-10 所示，连好电路。

①合上开关 S，由于热敏电阻阻值较大，左侧电路电流较小，电磁铁磁性较弱，吸不住衔铁，小灯泡不亮。

②用电吹风对热敏电阻加热使其阻值变小，电路中电流增大，电磁铁吸住衔铁，小灯泡变亮。

③停止加热，由于热敏电阻温度仍然较高，小灯泡不会立刻熄灭；把热敏电阻放入冷水中使其加速降温，小灯泡熄灭。

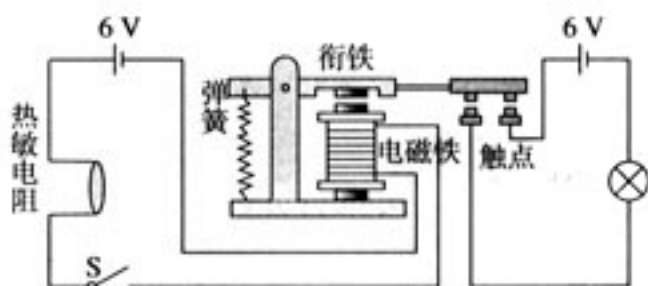


图 6-10

如果有数字化系统，可以将利用热敏电阻制作的温度传感器与数据采集器、计算机连接，测量和记录某个物体（如 1 杯水）的温度变化，描绘出温度变化曲线。与第 1 节利用实验得到的热敏元件的  $R-t_{\text{温}}$  图象进行对比，让学生感受现代化实验手段的应用和优点。

## (3) 光传感器的应用——鼠标器

鼠标器是利用光传感器的一个实例。教学中每组需要配备 1 只打开外壳的机械式鼠标器。

先看清滚球是如何带动两个互相垂直的滚轴转动的，再找到红外线发射管和接收管，了解转动的码盘所起的作用。要明确红外接收管光传感器是将断续的光脉冲转换为电压脉冲，输出的是一种数字量，而这正是计算机适于接受和处理的。教学资源库中介绍了另一种鼠标器的原理图，供有兴趣的学生参考。

## 教学片段

### 机械式鼠标器的结构、工作原理

课前准备：发动学生收集废旧鼠标器，或者老师收集学校使用过的废旧机械式鼠标器，学生4人1组，备齐机械式鼠标器1个。

设置问题：

设问1 机械式鼠标有哪些主要部件？

设问2 两组滚轴和码盘的相互之间放置的位置关系是怎样的？

设问3 红外发射管和红外接收管在哪里？它们怎样记录滚轮移动信号？

设问4 机械式鼠标怎样控制光标在计算机光屏上向x、y方向运动？

设问5 机械式鼠标怎样控制光标在计算机光屏上向各个任意方向运动？

学生活动：带着设问自己动手打开机械式鼠标底盖进行观察和研究，通过思考与讨论，尝试回答上述问题。

小结：交流、汇报研究成果。

#### (4) 光传感器的应用——火灾报警器

火灾报警器是一个十分简单、实用的控制电路，利用烟尘的散射来控制光电三极管对光的接收，构思巧妙、实用，是创造性思维的一个典范。

另外，本节还安排了一个很简单的学生实验《测量光照的强度》，用多用电表、干电池和廉价的光敏电阻就能够完成，目的是让学生亲自体验应用传感器做测量的过程和原理，并且用它来解决某些实际问题，例如夜间灯光对书桌的照明是否合适等。

## 教学片段

### 制作传感器的简单分组实验箱

材料准备：如图6-11所示。其中有光敏电阻、二极管、定值电阻、热敏电阻。

制作方法：

①在33 cm×21 cm×5 cm木盒的面板上，标识A、B、C、D、E处各钻一个洞（间距5 cm），分别装上接线柱。再在DE间钻一个洞，面积刚好与光敏电阻光照面相等。

②分别在木箱内DE、AC、BC相应位置装上光敏电阻（亮阻5 kΩ，光照面刚好与板面平齐）、定值电阻（3 kΩ）和二极管。在AD处接热敏电阻，同时热敏电阻（标300 Ω）的两引脚各焊出一根长约30 cm的软线（两引脚

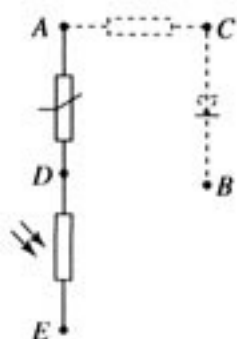


图6-11

分别套上绝缘胶管), 在线端各焊上一个接线夹备用。

实验操作:

①把多用电表的选择开关置于欧姆挡, 两表针分别插入 A、D 接线柱上, 测量 AD 间的热敏电阻在常温下的电阻值, 再把热敏电阻放在不同温度的热水中, 测量不同温度情况下的电阻值。

②把多用电表两表针分别插在 D、E 接线柱上, 测量光敏电阻不同光照时的阻值。

.....

该实验箱可以开展传感器的简单应用的实验教学。

在“科学漫步”中介绍了现代的机器人。机器人技术综合应用了多种传感器, 功能越来越强, 对社会发展的影响越来越大, 是各国科技水平竞争的热点。要求学生对机器人技术作更多的了解, 给予更多的关注。

建议学生在本节学完后完成一份作业, 通过网络查询和市场调查的方式收集整理一份传感器的分类表, 并分别简单介绍其原理, 配备必要的实物照片。

### 3. 问题与练习

内容分析

第 1 题是有关声传感器、光传感器和门电路应用的实例。

第 2 题是一个霍尔元件与集成电路组合在一起的磁传感器问题。

这两道题的目的是扩展学生的视野, 进一步提高学生的认识和分析能力。

解答与说明

1. 答:

(1) 接入了两种传感器: 声传感器 (通常用的是微型驻极体话筒) 和光传感器 (通常用的是光敏电阻)。

(2) 应该使用“与门”电路。因为点亮楼道灯需要具备两个条件, 足够暗的光照和足够大的声音。所以要用“与门”电路。

2. 答:

(1) 设计方案如图 6-12 所示。在 C 形软铁芯 1 上绕制线圈 2, 霍尔传感器 3 置入铁芯的间隙中, 并与数字毫伏表 4 相连。线圈 2 中通入的待测电流  $I$  越强, 铁芯间隙中的磁感应强度就越大, 则传感器输出的电压也越大。

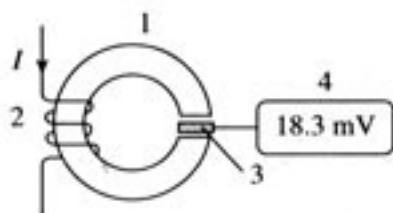


图 6-12

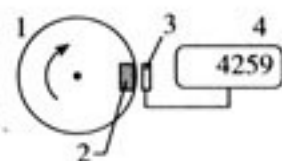


图 6-13

(2) 设计方案如图 6-13 所示。转动物体 1 的边缘上嵌入一个永磁体 2, 霍尔传感器 3 固定在其近旁, 并与计数电路和显示屏 4 相连。物体每转动 1 周, 传感器就输出 1 个电压脉冲, 计数器显示的数字就增加 1。配合秒表测出物体在时间  $t$  内转动的周数  $n$ , 就可以计算出转速。



## 第4节 传感器的应用实验

### 1. 教学目标

- (1) 让学生练习电子电路的组装，获得对自动控制电路设计的感性认识。
- (2) 识别各种晶体管、逻辑集成电路块、集成电路实验板，知道各种元器件的性能和引脚关系。
- (3) 了解光控开关电路及控制原理，会组装光控开关。
- (4) 了解温度报警器及控制原理，会组装温度报警器。

### 2. 教材分析与教学建议

传感器在实际应用中，很多情况下是用来完成一定的控制任务的，本节就安排了两个这种类型的学生实验，即使用常见的少量电子元器件，组装实用的光控开关和温度报警电路。其目的是使学生动手体会传感器的应用，培养组装和调试电子电路的能力。对于信息时代的高中学生，动手接触电子元件和电路是有好处的。

教科书选择了在通用的集成电路实验板上插接元件来组装电路的方法。这样，既可以避免用电烙铁进行锡焊的麻烦，又能够使器材重复使用。同时，实验中学学生可以再次练习使用多用电表检测元器件和电路的工作状态。

本实验可行性强，电路简单，容易操作，成本低廉，元件可以反复使用。实验使用的元器件符合现在市场发展水平，教学理念先进，与工厂或者科研水平对接，用集成数字电路实现控制功能。能够帮助学生了解现在电子行业的发展层次，加强理论联系实际，树立学以致用的教育理念。

本节教学设计的流程建议如下：

- ①介绍发光二极管、74LS14 集成电路块（斯密特触发器）、集成电路实验板（面包板）等元件的功能和作用，以及如何识别这些元件的外部引脚。
  - ②分析光控开关和温度报警器的电路图及工作原理。
  - ③学生实验进行实物连线操作。
  - ④学生根据实物连接装置进行控制实验并分析实验现象。
- 有条件的学校可以组装两套“问题与练习”1、2中的实验电路，供学生讨论研究。

#### (1) 实验准备

相关元件的原理和使用要点的内容，教科书设置在本节的附录中，但是在安排教学时，作为学生实验的准备性知识，需要把它放在学生动手实验之前。

##### ①发光二极管

主要是认识和学会使用发光二极管。它有两根引脚，较长的是正极。通过教科书图 6.5-3 “用欧姆表检测发光二极管”实验，使学生明确，只有加上一定的正向电压，发光二极管才能导通发光，普通的发光二极管工作电流只需要几毫安，最大不得超过 10 mA。过大的电流会损坏发光二极管，因此，在使用时必须串联合适的限流电阻。

##### ②逻辑集成电路

学生从《物理选修 3-1》第二章第 10 节“简单的逻辑电路”中初步获得集成门电路的知



识。这里要认识真正的集成电路的外形、引脚和把它插接到集成电路实验板上的方法，并且观测“与非门”的逻辑功能。以往，学生看到的只是用二极管等分立元件组成的最简单的门电路和原理性的实验。现在要用实际使用的集成门电路做演示。如通过教科书图 6.5-5 所示的实验，亲身认识一种具有新的逻辑功能的“与非门”。要注意，这类门电路输出的高电平电压值要比电源的电压低一些，输出的低电平电压值并不为 0，而是很接近于 0。

### ③ 集成电路实验板

介绍集成电路实验板，它使用插接的方式组装电路，可以灵活地组装成不同的电路。去掉实验板背面的塑料膜，看清那些条形铜片的分布，以及它们是如何把正面对应的插孔连接起来的。可以仿照教科书图 6.5-7 组装好一个电路做示范。

实验板的主体由乳白色的塑料制成，正面有很多小孔，排成整齐的行列。每个小孔中都有一对弹性的小铜片，元件的引脚插入时就与小铜片紧密接触；每一对小铜片都与背面的窄铜条成为一体，将这组小孔连接起来，如图 6-14 所示。

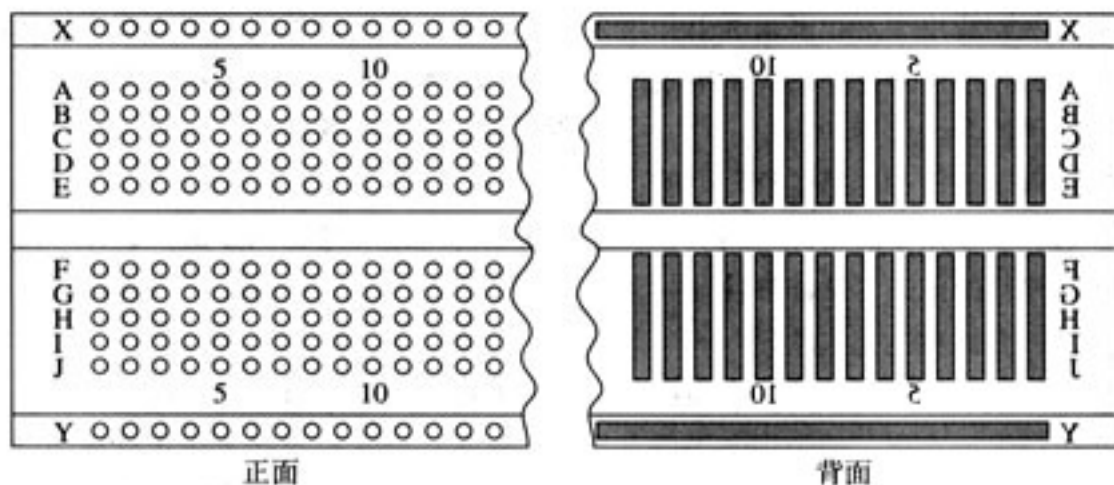


图 6-14

每一个小孔都用它的坐标命名，如 X1、A3、H9 等。标有 X 的这一行孔连成一体，常用来连接电源的正极。标有 Y 的这一行孔也连成一体，常作为电路中的公共端，用来连接电源的负极。纵向成列的小孔多用来插接元件，每 5 个小孔为一列。

### (2) 实验 1 光控开关

能够看懂光控开关的实验电路图（教科书图 6.4-2）中的电流流向的学生可能较少，对此，教师要了解、分析学生存在困惑的原因，帮助他们学会认识这样的电路图。这个问题的主要原因是电路缺少完整的电流回路，与学生原有的认知相冲突。因此，要向学生介绍逻辑电路与普通电路图的关系。这是一种门电路的表示形式，门电路表示的是逻辑关系，通常不把电流的通路完整画出来。下面我们就来认识斯密特触发器的工作原理图。

斯密特触发器具有回差电压特性，能将边沿变化缓慢的电压波形（模拟信号）整形为边沿陡峭的矩形脉冲（数字信号）。也就是将连续变化的输入电压  $U_A$  转化为跳变的输出电压  $U_V$ ，以实现开关功能。

“触发”似枪的扳机，达到一定数值一触即发，产生突变。所以，斯密特触发器可以把模拟信号转换为数字信号。教科书中对于斯密特触发器的性能描述，可以用图 6-15 所示的图象来描述。

组装前必须分析电路图（教科书图 6.4-2），并注意以下几点：

- ①图中的接地符号表示电路的公共端，并非与大地连接。5 V 电源的负极是与接地端连

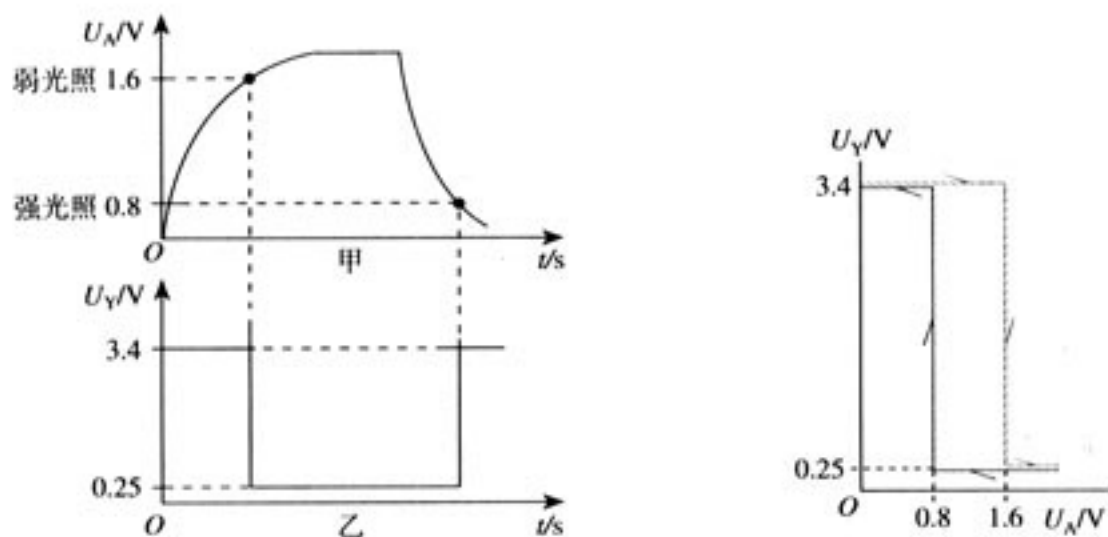


图 6-15

接的。

②在电子技术中，习惯上常用“电平”来描述逻辑电路的输入端和输出端的状态。其实，电平指的就是某个端点与“地”（接地端）之间的电压。或者说，如果以接地端的电势为零，那么电平表示的就是某个端点的电势。

③因为控制门电路的逻辑状态的物理量是输入端的电平，而不是电流或电阻，所以要将电阻  $R_1$  与光敏电阻  $R_G$  组成串联分压电路，把光敏电阻因光照而发生的电阻的变化，转换为电压的变化，加到非门的输入端 A。

④控制灯光亮与熄灭需要的是一种跳变的开关量，而光敏电阻输出的是连续变化的模拟量，所以要使用触发器（这里用的是斯密特触发器）把模拟信号转换为数字信号。

⑤ $R_2$  是发光二极管的限流电阻，使通过它的电流不超过 10 mA。

⑥电磁继电器线圈 J 中的电流突然减小时，会产生相当大的自感电动势，并且线圈下端为高电势端（对图而言）。这个自感电动势与 5 V 电源的电压是同方向迭加的，超过了门电路集成块的承受能力。所以，要按照图示方向给线圈并联二极管，自感电动势使二极管导通，则线圈两端的电压就只有约 0.7 V（即二极管的导通电压）了。

⑦教科书图 6.4-2 是对电路的简化画法。例如，甲图实际上各个支路的电流都构成了回路，本小节末虚线框内的文字对此做了解释。这个解释可用图 6-16 表示，在集成块中，既流过了它本身的工作电流，又流过了通过发光二极管的电流，都从标有“GND”的引脚汇集流出，回到电源。

⑧把  $R_1$  阻值调大些，就会在天更暗时才能点亮路灯。因为，这时只有光敏电阻的阻值更大一些，才能使它分得的电压达到触发器翻转所需要的阈值 1.6 V。

⑨如果在教室内通常的光照下，将电位器  $R_1$  调到最大值（51 k $\Omega$ ）仍不能使灯熄灭，可换用阻值更大的（如 220 k $\Omega$ 、470 k $\Omega$ ）电位器。

对于电路的分析，用到了学过的串联电路分压、自感电动势、二极管的单向导电性、电磁继电器等知识，让学生有了丰富的研讨内容，但是要求较高，同时，涉及一些技术知识，教学

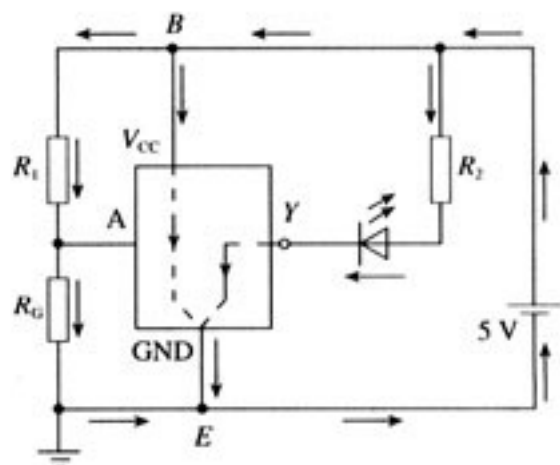


图 6-16

时不要要求都做讲解，可根据学生的条件酌情处理。



### 斯密特触发器的利用 (一)

实验装置：如图 6-17 所示。

组装电路：明确连接电路的顺序。

集成块的  $V_{cc}$  接 X 行，GND 接 Y 行 → 接信号输入端的各个元件 → 接信号输出端的各个元件 → 接电源。

图 6-17 显示出在集成电路实验板上按照教科书图 6.4-2 甲组装成的实物电路。

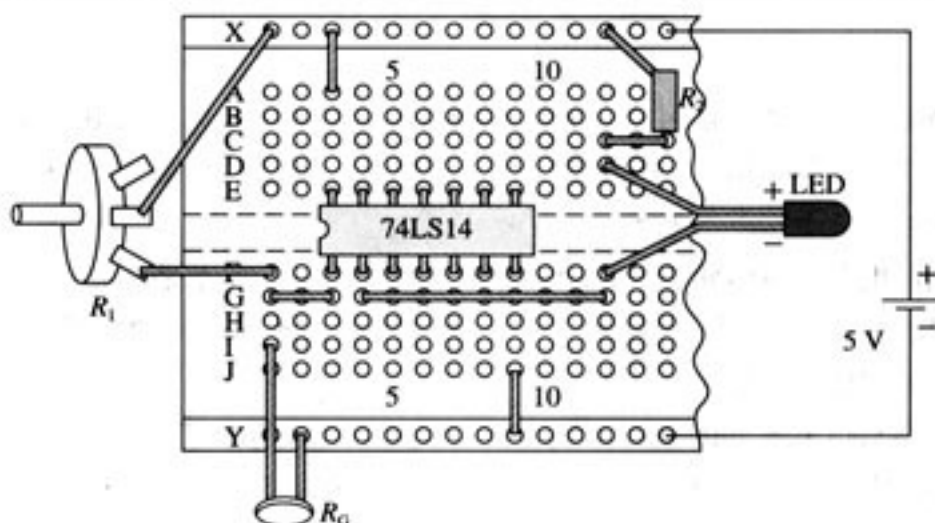


图 6-17

图中的实验板上，X、Y 两行孔分别连接电源的正、负极。集成块 74LS14 的两排引脚分别插入 E3-E9 和 F3-F9 这 14 个孔中。A3 和 X3 两孔间插入的导线将集成块的  $V_{cc}$  引脚连接到电源的正极，J9 和 Y9 两孔间插入的导线将此集成块的 GND 引脚连接到电源的负极，提供集成块工作所需的电源。这里只使用了集成块中的一个非门，这个非门的输入端由 G3 和 G1 两孔间的导线连接到 F1-J1 这列孔，再分别由 I1 孔连接到光敏电阻  $R_0$  的一根引脚，由 F1 孔中插入的导线连接到小型电位器  $R_1$  上左侧的引脚（此引脚接到电位器中电阻体的一端）。光敏电阻的另一根引脚插入 Y2 孔中与电源的负极连接。X1 孔中插入的导线连接电位器  $R_1$  上中央的引脚（此引脚接到电位器中的滑动片上）。限流电阻  $R_2$  的一根引脚插入 X12 孔与电源的正极连接，另一根引脚插入 C12 孔。发光管 LED 的正极引脚插入 D12 孔，与电阻  $R_2$  连接，负极引脚插入 F12 孔，经过 G12 孔与 G4 孔之间的导线与非门的输出端连接。

提出问题：斯密特触发器的电路连接和电流流向如图 6-16 所示。 $R_0$  的变化是如何引起 A 端电压变化的呢？

假设：如教科书图 6.4-2 乙所示。去掉二极管 D，继电器线圈电压  $U_J \geq 4\text{ V}$  时，衔铁吸合； $U_J \leq 2\text{ V}$  时，衔铁释放。取  $R_1 = 20\text{ k}\Omega$  进行估算。

分析：

黄昏，当  $R_0$  增大到  $9.4\text{ k}\Omega$  时， $R_1$  与  $R_0$  的分压就会使  $U_A$  上升到  $1.6\text{ V}$ ，则  $U_Y$  就突然下降到  $0.2\text{ V}$ 。于是， $U_J$  变为  $4.8\text{ V}$  ( $>4\text{ V}$ )，使衔铁吸合，则触点 a 接通，灯 L 发光。

清晨，当  $R_0$  减小到  $3.8\text{ k}\Omega$  时， $R_1$  与  $R_0$  的分压就会使  $U_A$  下降到  $0.8\text{ V}$ ，则  $U_Y$  就突然

上升到 3.4 V。于是,  $U_1$  变为 1.6 V ( $< 2$  V), 使衔铁释放, 则触点  $a$  断开, 灯 L 熄灭。

### (3) 实验 2 温度报警器

可以参照前一个实验的教学建议。

## 教学片段

### 斯密特触发器的利用 (二)

实验装置: 如图 6-18 所示。

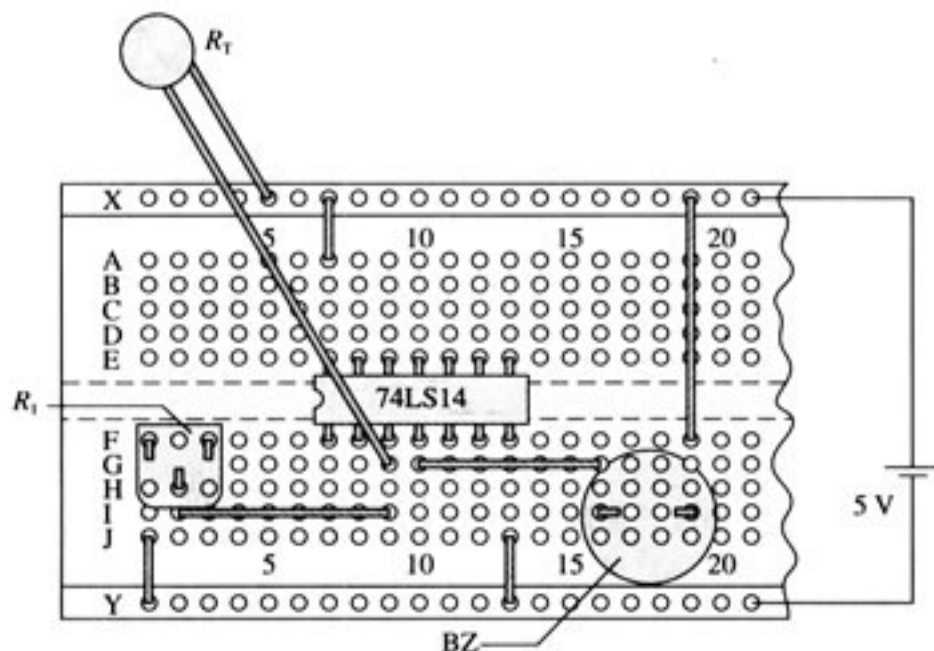


图 6-18

组装电路: 图 6-18 显示出在集成电路实验板上按照教科书图 6.4-3 组装成的实物电路。集成块 74LS14 的两排引脚分别插入 E7-E13 和 F7-F13 这 14 个孔中。A7 和 X7 两孔间插入的导线将此集成块的  $V_{cc}$  引脚连接到电源的正极, J13 和 Y13 两孔间插入的导线将此集成块的 GND 引脚连接到电源的负极, 提供集成块工作所需的电源。这里只使用了集成块中的一个非门, 热敏电阻  $R_T$  的两根引脚焊出软导线, 一根插入实验板的 G9 孔中与此非门的输入端连接, 另一根插入 X5 孔中与电源的正极连接。微型电位器  $R_1$  的三根引脚分别插入 F1、F3、H2 三个孔中, 左侧的引脚接到电位器中电阻体的一端, 由 J1 和 Y1 两孔间插入的导线将它连接到电源的负极。中央的引脚是接到电位器的滑动片上的, 由 I2 和 I9 两孔间插入的导线将它与非门的输入端连接。蜂鸣器 BZ 的正极引脚插入 I19 孔中, 负极引脚插入 I16 孔中。F19 和 X19 两孔间插入的导线将蜂鸣器的正极连接到电源的正极, G16 和 G10 两孔间插入的导线将蜂鸣器的负极连接到非门的输出端。

提出问题: 斯密特触发器的电路连接如教科书图 6.4-3 所示。  $R_T$  的变化是如何引起 A 端电压变化的呢?

分析: 因为这个电路需要当温度高于某个数值, 即热敏电阻的阻值小于某个数值时, 触发器输入端的电平达到翻转所需的阈值, 使蜂鸣器发声。

在传感器教学的最后阶段, 让学生设计并制作一些传感器, 熟悉电子元件, 提高动手



能力。

教学片段

### 设计水壶温度报警器

用热敏电阻设计并制作一个小仪器。当水壶中水烧开时，传感器发出声响报警。

- ①学生分组先讨论并画出电路示意图。
- ②把各组的电路示意图用投影仪显示出来，并让学生分析其原理。
- ③在各组的电路示意图中选出一种最简单可行的方案。

设计方案之一如图 6-19 所示。

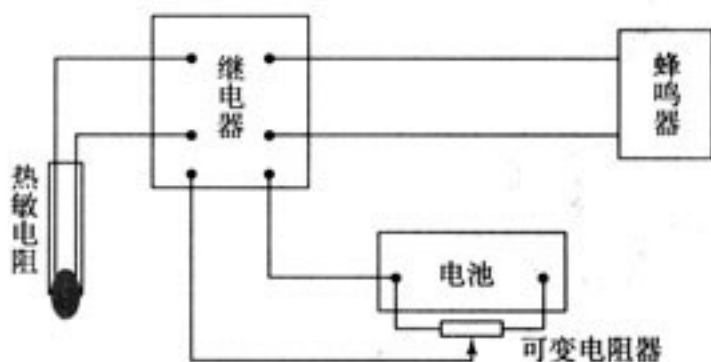


图 6-19

实验器材：热敏电阻一个、可变电阻器、电池、继电器、蜂鸣器及导线等器材。让学生课后完成操作过程，下节课进行成果展示。

### 3. 问题与练习

内容分析

第 1 题是一个简单磁控防盗报警器电路的实际应用问题。

第 2 题是一个与逻辑电路相结合的综合题。进一步培养学生的综合分析能力。

第 3 题是一个电热水器温控电路的设计，有一定的难度。其目的是让学生直接体会传感器的应用，培养学生组装和调试电子电路的能力。

第 4 题是一个开放性的题目，也是本章的总结。

解答与说明

1. 答：门关闭时，干簧管内两个簧片被磁化而吸合，使触发器（非门）的输入端为低电平，则其输出端为高电平，与电源的电压很接近。于是蜂鸣器两端的电压很小，不会发声。若盗贼将门打开，永磁体就远离干簧管，因而两个簧片分离，使触发器（非门）的输入端跳变为高电平，则其输出端变为低电平。于是蜂鸣器两端达到了工作电压，就发出叫声报警。

使用本节课内实验 2 的器材，将热敏电阻改为干簧管，再找一块小的永磁体，就可以做这个实验了。

2. 答：当非门的输入端 A 为高电平时，其输出端 Y 则为低电平，于是发光二极管得到足够的电压而导通、发光。而当非门的输入端 A 为低电平时，其输出端 Y 则为高电平，发光二极管两端的电压小于其导通电压，就不发光了。

3. 答：如图 6-20 所示。A 为双金属片，一端固定在金属杆上，另一端固定与金属杆 b 构

成一对触点。将它密封在玻璃罩 B 内，成为温度传感器，浸入热水器 C 的水中，J 为电磁继电器的线圈，a 为该继电器的常开触点，R 为大功率电热元件，常温下，双金属片 A 与触点 b 接触，继电器触点 a 吸合，电热元件通电发热。当水烧开时，双金属片 A 因温度升高，弯曲程度加大而与触点 b 分离，则继电器触点 a 断开，就停止对水的加热了。水温下降到某一值（例如水温低于约  $10^{\circ}\text{C}$ ）时，A 与 b 又接通，再度给水加热，在任何温度（例如水温只比沸点低  $2^{\circ}\text{C}$ ）时，只要接通开关 S，就能使继电器触点 a 吸合，立即对水加热。

利用日光灯启辉器中的双金属片，可以做模拟实验。但它是温度升高时触点接通，因此需将图改为用继电器的常闭触点控制电热元件，并且将手动开关 S 改为与传感器串联。还需要用小钳子调整双金属片的形状，使它在水烧开时恰好与触点 b 接触。

说明：本题可以有不同的设计方案。

4. 答：调查研究是一个开放性的活动，也是本章的总结，具体对学生的要求是：

- (1) 自愿结合，3~4 人为一个小组。
- (2) 要认真设计调查计划（时间、地点、对象、组内分工、事先准备等）。
- (3) 要有效开展调查，学会与人沟通，寻求他人帮助，做好本组内人员的协调。

(4) 要认真分析调查结果，学会分类和归纳，认真撰写调查报告，学会在互联网上交流。要注重突出科学技术与社会的联系。

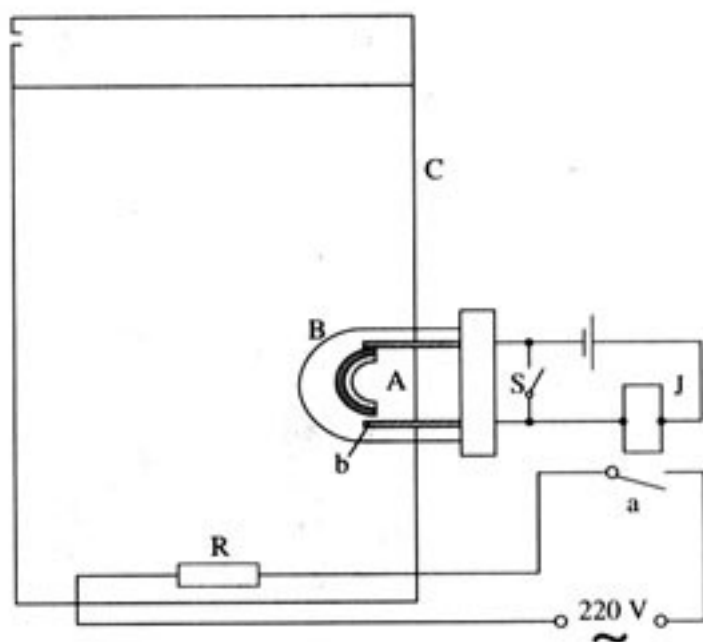


图 6-20

### 三、教学设计案例

#### 传感器及其工作原理

##### 1. 教学目标

(1) 通过观察一些现象和常见的事例，初步形成传感器的概念，感受传感技术在信息时代的作用与意义。

(2) 介绍光敏电阻、热敏电阻和霍尔元件三种敏感元件，通过实验知道它们的性能，了解它们的工作原理，感悟基础知识学习和应用的重要性。

(3) 知道非电学量转换成电学量的技术意义，拓展学生的思维，进一步探讨科技发展给人类带来的利和弊。

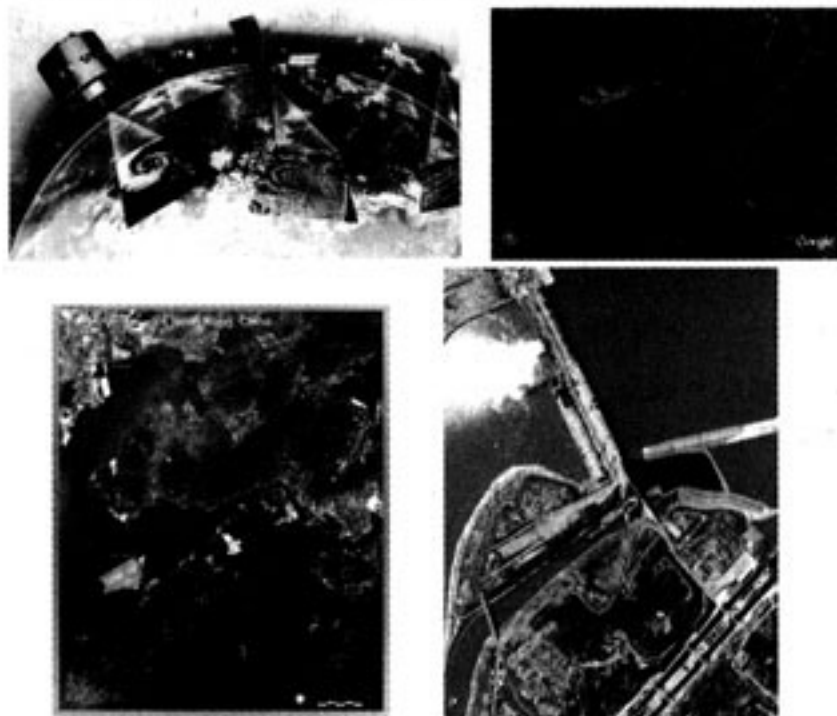
实验器材：自制“光声控延时电灯演示板”1 块；光声控延时路灯灯座 1 个、小螺丝刀 1 把、铁架台 1 架、烧杯 1 个、酒精灯 1 个、温度计 1 根、NTC 型热敏电阻制作的温度探头 1 根、光敏电阻 1 个、多用电表 1 个，热水若干。

## 2. 教学过程

### (1) 引入新课

当今世界已经进入信息化自动控制的年代。人类已经实现了利用卫星对地球资源的监测。

[多媒体展示：香港、三峡库区……卫星图片]



提出问题：为什么遥感卫星能在高空一览无遗地观测到地貌和矿藏？

各种信息的获取是依赖传感器来实现的。它们构成了现代信息技术系统的“感官”。

[多媒体展示：温度探针、高压气体压强探头、摄像探头、色标传感器、力传感器等图片或实物资料]

这些传感器酷似人的“五官”（视觉、嗅觉、味觉、听觉和触觉），不过，人们对它的要求比对人的五官高得多，即要求它把人体无法感知的量测量出来。如，紫外光、红外光、电磁场、无味无嗅的气体、特高/低温、特高/低气压、剧毒物、各种微弱信号等。

### (2) 新课教学

#### ① 感知光敏元件

演示：光声控延时开关电路的功能。

传感器离我们并不遥远，随着自动控制系统的普及，传感器已经走进了我们的生活。以家用光声控延时开关为例（图 6-21），楼道里的自控照明路灯有哪些自动控制功能。



图 6-21

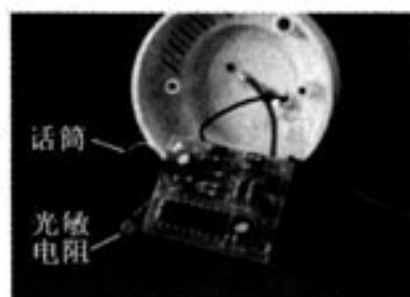


图 6-22

[出示光声控延时电灯演示板，让学生观察现象并思考以下问题。]

- 在正常光照情况下，声音能不能控制电灯点亮？
- 关闭教室内的光源和窗帘，试试声音能否“打开”电灯？

• 用物体遮挡光线处，在正常光照情况下声音能否控制电灯？

猜想：光声控延时开关里可能有与光控相关的敏感元件。

活动设计 1：观察光声控延时开关的内部结构，对比电路图，简介主要元件。如图 6-22 所示。

感知：光敏电阻能够感受光照强度的变化，并把光照强度转变为电信号。

传感器的结构 = 敏感元件 + 电子转换电路

[让学生阅读教科书，观察光敏电阻导电特性的实验，并思考以下问题。]

- 光敏电阻的电阻率与什么有关？
- 光敏电阻受到光照时会发生什么变化？为什么会发生这种变化？
- 光敏电阻能够将什么量转化为什么量？

引导学生设计实验方案：

方案 A 如教科书图 6.1-5 所示。用欧姆表测定不同光照情况下（迎光、背光、放抽屉里……）光敏电阻的电阻值，在相同条件下，做普通电阻的对比实验进行比较。

方案 B 用直流电路。在不同光照情况下（迎光、背光、放抽屉里……），通过小灯泡的明暗程度变化，比较光敏电阻阻值的变化情况。在相同条件下，做普通电阻的对比实验进行比较。

进行实验：光敏电阻无极性之分，暗电阻  $\geq 1 \text{ M}\Omega$ ，亮电阻  $\leq 1 \text{ k}\Omega$ ，所以多用表应选用“ $\times 100$ ”或“ $\times 1 \text{ k}$ ”档。

将光敏电阻感光面迎光、背光、放抽屉里……读取欧姆表示数或观察小灯泡亮度。

归纳总结：光敏电阻的电阻率与光照强度有关。光敏电阻受到光照时电阻会变小。硫化镉是一种半导体材料，无光照时，载流子极少，导电性能不好；随着光照增强，载流子增多，导电性能变好。光敏电阻能够将光学量转化为电阻这个电学量。

## ② 认识热敏电阻

[让学生阅读教科书有关内容，定量研究热敏电阻的温度特性，并思考以下问题。]

- 金属与半导体材料的导电性能跟温度的变化关系是否相同？
- 热敏电阻和金属热电阻各有哪些优缺点？
- 热敏电阻和金属热电阻能够将什么量转化为什么量？

引导学生设计实验方案：

实验装置如图 6-23 所示。将一只热敏电阻连接到多用电表的两端。测量热敏电阻的阻值随温度的变化情况。列表记录数据，作出  $R-t_{\text{测}}$  图象（图 6-24）。

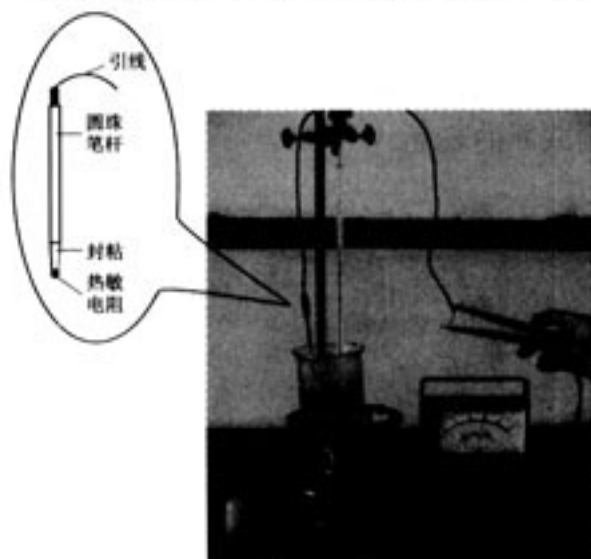


图 6-23

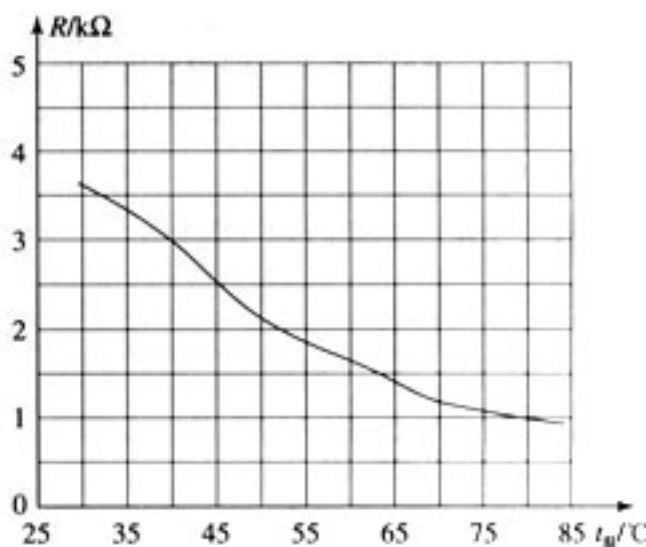


图 6-24





热敏电阻的阻值随温度的变化实验数据如下：

实验次数	温度 $t_{\text{温}}/^{\circ}\text{C}$	阻值 $R/\text{k}\Omega$
1	30	3.6
2	40	3.0
3	50	2.2
4	60	1.6
5	70	1.2
6	80	1.0

- 阻值随温度的升高而降低——NTC型热敏阻值。
- 阻值随温度的升高而增加——PTC型热敏电阻。

认识：研究教科书图 6.1-7 可知，金属导体与半导体材料的导电性能与温度的变化关系不相同。金属导体的导电性能随温度升高而降低；半导体材料的导电性能随温度升高而变高。

热敏电阻灵敏度高，但化学稳定性较差，测量范围较小；金属热电阻的化学稳定性较好，测量范围较大，但灵敏度较差。

结论：热敏电阻或金属热电阻能够将热学量（温度）转化为电阻这个电学量。

### ③了解霍尔元件的工作原理

理论推导：霍尔元件是在一个很小的矩形半导体（例如砷化镓）薄片上，制作 4 个电极  $E$ 、 $F$ 、 $M$ 、 $N$  而成（教科书图 6.1-9）。若在  $E$ 、 $F$  间通入恒定电流  $I$ ，同时外加与薄片垂直的匀强磁场  $B$ ，薄片中的载流子就在洛伦兹力的作用下发生偏转，使  $M$ 、 $N$  间出现电压  $U$ 。

设霍尔元件长为  $a$ ，宽为  $b$ ，厚为  $d$ ，则当薄片中的载流子达到稳定状态时， $F_{\text{洛}} = F_{\text{电}} = Eq$ ，即  $qBv = \frac{U}{b}q$ 。

又因  $I = nqSv = nqbdv$

所以  $U = \frac{IB}{nqd} = k \frac{IB}{d}$  ( $k$  为霍尔系数)

因此，在  $EF$  方向电流一定的条件下， $MN$  间的电压跟磁感应强度  $B$  成正比。我们就可以根据电压  $U$  的变化得知磁感应强度  $B$  的变化。

结论：霍尔元件能够把磁感应强度这个磁学量转换为电压这个电学量。

引入传感器的概念：能够感受诸如力、温度、光、声、化学成分等非电学量，并能把非电学量转化为电流、电压等电学量，或者转换为电路的通或断的装置。

### ④课外作业

教科书第 54 页“问题与练习”。

苏州市一中 汪慧琴



## 四、教学资源库

### (一) 概念、规律和背景资料

#### 1. 传感器基础知识

##### (1) 传感器的作用

现代信息技术的三大基础是信息的拾取、传输和处理，也就是传感技术、通信技术和计算机技术。现代电子技术和计算机技术为信息转换与处理提供了十分完善的手段，对传感器技术的需求更为迫切，并且存在着“头脑（计算机）发达、感觉（传感器）迟钝”的严重现象，所以传感器技术的研究和生产受到了全世界的普遍重视。

人类为了从外界获取信息，必须借助于感觉器官。人类依靠这些器官接受来自外界的刺激，再通过大脑分析判断，发出命令而动作。随着科学技术的发展和人类社会的进步，人类为了进一步认识自然和改造自然，只靠这些感觉器官就显得很不够了。于是，一系列代替、补充、延伸人的感觉器官功能的各种手段就应运而生，从而出现了各种用途的传感器。如果把计算机比作大脑，那么传感器则相当于五官，传感器能正确感受被测量并转换成相应输出量，对系统的质量起决定性作用。可以说没有传感器技术就不可能有自动测量与控制，也就不可能有现代工业、现代农业等诸方面的发展。

##### (2) 传感器的组成

顾名思义，传感器的功能是一感二传，即感受被测信息，并传送出去。传感器是一种检测装置，能感受到被测量的信息，并能将检测感受到的信息，按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出，以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。它是实现自动检测和自动控制的首要环节。

以电学量为输出的传感器虽然历史不长，但其发展迅速，目前只要谈到传感器，几乎都是指有电输出的传感器。

国家标准 GB7665-87 对传感器下的定义是：“能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置”。简单说传感器是将外界信号转换为电信号的装置。

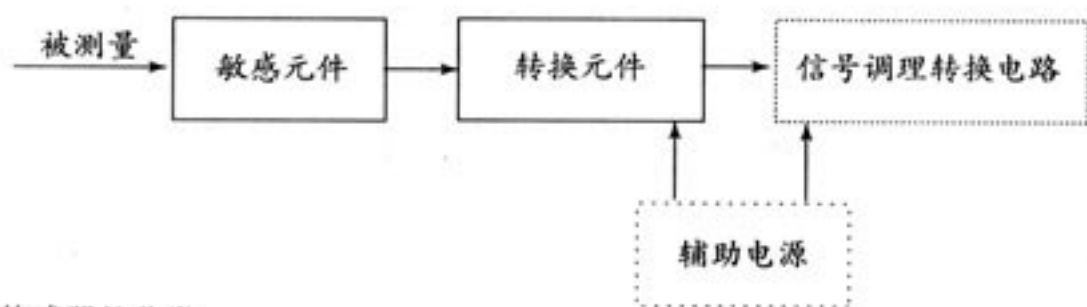
根据传感器的功能要求，它一般应由三部分组成，即：敏感元件、转换元件、转换电路。

**敏感元件** 是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分。例如金属或半导体应变片（教科书图 6.2-3），能感受压力的大小而引起形变，形变程度就是对压力大小的响应。铂电阻能感受温度的升降而改变其阻值，阻值的变化就是对温度升降的响应，所以铂电阻就是一种温度敏感元件，而金属或半导体应变片，就是一种压力敏感元件。

**转换元件** 是指传感器中将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号部分。其中有许多敏感元件可兼做转换元件。如果敏感元件本身就能直接将被测量变成电路参数，那么，该敏感元件就是具有了敏感和转换两个功能。如热敏电阻，它不仅能直接感受温度的变化，而且能将温度变化转换成电阻的变化，也就是将非电路参数（温度）直接变成了电路参数（电阻）。

由于传感器的输出信号一般都很微弱，因此需要有转换电路对其进行放大、运算、调制等。此外，转换电路以及传感器工作必须有辅助的电源，因此，转换电路以及所需的电源都应

作为传感器组成的一部分。传感器组成如下框图所示。



### (3) 传感器的分类

根据传感器应用的对象、测量的范围、周围的环境等不同，需要使用的传感器各不相同，因而有各式各样的传感器。目前对传感器尚无一个统一的分类方法，用得较多的分类法有以下两种：

①根据传感器感知外界信息所依据的工作原理，大体上可以分成三大类。基于物理效应如光、电、声、磁、热等效应进行工作的物理传感器，如电阻传感器、霍尔传感器等；基于化学反应如化学吸附、选择性化学反应等进行工作的化学传感器，如气敏传感器、湿度传感器等；基于酶、抗体、激素等分子识别功能的生物传感器，如酶传感器、免疫传感器等。

②根据被测量分类，这种分类方法直接说明了传感器的用途，如位移传感器、压力传感器、温度传感器等。

在以上两种分类方法中，以被测量分类时，对使用的对象比较明确；以工作原理分类时，则对传感器采用的原理比较清楚。还可以把两者结合起来称呼，如电容式压力传感器、电导式湿度传感器等。

### (4) 传感器技术的发展

传感器的发展日新月异，特别是人类由高度工业化进入信息时代以来，传感器技术向更新、更高的技术发展。传感器技术的发展，一是传感器本身的基础研究，重点是研究新的传感器材料和工艺；二是与微处理器结合在一起的传感器系统的研究，将检测功能与信号处理技术相结合，向智能化方向发展。

#### ①发现并利用新现象

利用物理现象、化学反应、生物效应作为传感器原理，所以研究发现新现象与新效应是传感器技术发展的重要工作，是研究开发新型传感器的基础。例如，利用超导技术研制成功高温超导磁性传感器，可用于磁成像技术，有广泛推广价值；抗体和抗原在电极表面上相遇复合时，会引起电极电位的变化，利用这一现象可制出免疫传感器，可对某生物体内是否有这种抗原作检查，起到快速、准确的作用。

#### ②利用新材料

传感器材料是传感器技术的重要基础，随着材料科学的进一步发展，已有可能自由地控制制造出来的材料成分，可设计制造出满足不同用途的各种新型传感器。

例如，高分子聚合物能随周围环境的相对湿度大小成比例地吸附和释放水分子。高分子电介常数小，水分子能提高聚合物的介电常数。将高分子电介质做成电容器，测定电容容量的变化，即可得出相对湿度。利用这个原理制成等离子聚合法聚苯乙烯薄膜湿度传感器。

光导纤维的应用是传感材料的重大突破，其最早用于光通信技术。在光通信利用中发现当温度、压力、电场、磁场等环境条件变化时，引起光纤传输的光波的强度、相位、频率、偏振态等变化，测量描述光波的物理量的变化，就可知道导致这些光波量变化的温度、压力、电





场、磁场等物理量的大小，利用这些原理可研制出光导纤维传感器。光纤传感器与传统传感器相比有许多特点：灵敏度高、结构简单、体积小、耐腐蚀、电绝缘性好、光路可弯曲、便于实现遥测等。

### ③微机械加工技术

半导体技术中的加工方法有氧化、光刻、扩散、沉积、平面电子工艺，各向异性腐蚀及蒸镀，溅射薄膜等，这些都已引进到传感器制造。因而产生了各种新型传感器，如利用半导体技术制造出硅微传感器，利用薄膜工艺制造出快速响应的气敏、湿敏传感器，利用溅射薄膜工艺制压力传感器等。

### ④集成传感器

集成传感器的优势是传统传感器无法达到的，它不仅仅是一个简单的传感器，其将辅助电路中的元件与传感元件同时集成在一块芯片上，使之具有校准、补偿、自诊断和网络通信的功能，它可降低成本、增加产量。

### ⑤智能化传感器

智能化传感器是一种带微处理器的传感器，是微型计算机和传感器相结合的成果，它兼有检测、判断和信息处理功能。

## 2. 传感器的静态特性

在生产过程和科学实验中，要对各种各样的参数进行检测和控制，就要求传感器能感受被测非电学量的变化并将其不失真地变换成相应的电学量，这取决于传感器的基本特性，即输入—输出特性。传感器的基本特性可用静态特性和动态特性来描述。这里简单介绍一下传感器的静态特性。

传感器的静态特性是指对静态的输入信号，传感器的输出量与输入量之间所具有的相互关系。因为这时输入量和输出量都和时间无关，所以它们之间的关系，即传感器的静态特性可用一个不含时间变量的代数方程，或以输入量作横坐标，把与其对应的输出量作纵坐标而画出的特性曲线来描述。表征传感器静态特性的主要参数有：线性度、灵敏度、分辨力和迟滞等。

### ①线性度

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间数量关系的线性程度。通常情况下，传感器的实际静态特性输出是条曲线而非直线。在实际工作中，为使仪表具有均匀刻度的读数，常用一条拟合直线近似地代表实际的特性曲线，线性度（非线性误差）就是这个近似程度的一个性能指标。拟合直线的选取有多种方法，如将零输入和满量程输出点相连的理论直线作为拟合直线，或将与特性曲线上各点偏差的平方和为最小的理论直线作为拟合直线，此拟合直线称为最小二乘法拟合直线。

### ②灵敏度

传感器的灵敏度是指传感器在稳态工作情况下输出量变化  $\Delta y$  对输入量变化  $\Delta x$  的比值，即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

对于线性传感器，它是输出—输入特性曲线的斜率，灵敏度  $S$  是一个常数。而非线性传感器的灵敏度为一变量，它将随输入量的变化而变化。

灵敏度的量纲是输出、输入量的量纲之比。例如，某位移传感器，在位移变化 1 mm 时，输出电压变化为 200 mV，则其灵敏度应表示为 200 mV/mm。当传感器的输出、输入量的量



纲相同时，灵敏度可理解为放大倍数。提高灵敏度，可得到较高的测量精度。但灵敏度愈高，测量范围愈窄，稳定性也愈差。

### ③分辨力

分辨力是指传感器可能感受到的被测量的最小变化的能力。也就是说，如果输入量从某一非零值缓慢地变化。当输入变化值未超过某一数值时，传感器的输出不会发生变化，即传感器对此输入量的变化是分辨不出来的。只有当输入量的变化超过分辨力时，其输出才会发生变化。

通常传感器在满量程范围内各点的分辨力并不相同，因此常用满量程中能使输出量产生阶跃变化的输入量中的最大变化值作为衡量分辨力的指标。上述指标若用满量程的百分比表示，则称为分辨率。

### ④迟滞特性

迟滞特性表征传感器在正向（输入量增大）和反向（输入量减小）行程间输出—输入特性曲线不一致的程度，如图 6-25 所示。也就是说，对于同一大小的输入信号，传感器的正反行程输出信号大小不相等。产生这种现象的主要原因是由于传感器敏感元件材料的物理性质和机械零部件的缺陷所造成的，例如弹性敏感元件的弹性滞后、运动部件摩擦、传动机构的间隙、紧固件松动等。

迟滞大小通常用这两条曲线之间的最大差值  $\Delta H_{\max}$  与满量程输出  $Y_{FS}$  的百分比表示，即

$$\delta_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%。$$

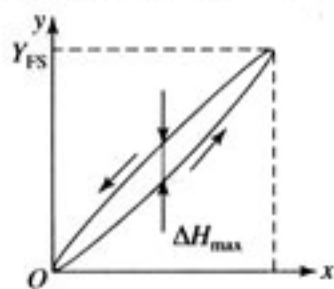


图 6-25

## 3. 热敏电阻传感器

温度是表征物体冷热程度的物理量，是工业生产过程中一个重要而又普遍的参数。在许多生产过程中，常常需要使物料和设备的运转状态处于某一定的温度范围，因此，温度的测量和控制，对保证产品质量、提高生产效率、节约能源起着非常重要的作用。自然界的许多物质，其物理特性如长度、电阻、容积、辐射功率等都与温度有关。温度传感器就是通过测量物质的某些物理参数随温度的变化而间接地测量温度的。

温度传感器主要由热敏元件组成。热敏元件品种很多，市场上销售的有双金属片、铜热电阻、铂热电阻、热电偶及半导体热敏电阻等。以半导体热敏电阻为探测元件的温度传感器应用广泛，这是因为在元件允许工作条件范围内，半导体热敏电阻器具有体积小、灵敏度高、精度高的特点，而且制造工艺简单、价格低廉。

按温度特性热敏电阻可分为两类，随温度上升电阻增加的为正温度系数热敏电阻，反之为负温度系数热敏电阻。

### ①正温度系数热敏电阻的工作原理

这种热敏电阻以钛酸钡 ( $BaTiO_3$ ) 为基本材料，再掺入适量的稀土元素，利用陶瓷工艺高温烧结而成。纯钛酸钡是一种绝缘材料，但掺入适量的稀土元素，如镧 (La) 和铈 ( $Nb$ ) 之后，变成了半导体材料，被称半导体化钛酸钡。它是一种多晶体材料，晶粒之间存在着晶粒界面，对于导电电子而言，晶粒间界面相当于一个势垒。当温度低时，由于半导体化钛酸钡内电场的作用，导电电子可以很容易越过位垒，所以电阻值较小；当温度升高到居里点温度（即临界温度，此元件的“温度控制点”，一般钛酸钡的居里点为  $120\text{ }^\circ\text{C}$ ）时，内电场受到破坏，

不能帮助导电电子越过势垒，所以表现为电阻值的急剧增加。因为这种元件在未到达居里点前电阻随温度变化非常缓慢，具有恒温、调温和自动控温的功能，以及只发热、不发红、无明火、不易燃烧、使用寿命长等特点，非常适用于电动机等电器装置的过热探测。

#### ②负温度系数热敏电阻的工作原理

负温度系数热敏电阻是以氧化锰、氧化钴、氧化镍、氧化铜和氧化铝等金属氧化物为主要原料，采用陶瓷工艺制造而成。这些金属氧化物材料都具有半导体性质，完全类似于锗、硅晶体材料，体内的载流子（电子和空穴）数目少，电阻较高；温度升高，体内载流子数目增加，电阻值降低。负温度系数热敏电阻类型很多，使用区分低温（ $-60\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）、中温（ $300\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）、高温（ $>600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）三种，有灵敏度高、稳定性好、响应快、寿命长、价格低等优点，广泛应用于需要定点测温的温度自动控制电路，如电冰箱、空调、温室等的温控系统。

热敏电阻与简单的放大电路结合，就可检测千分之一摄氏度的温度变化，所以和电子仪表组成测温计，能完成高精度的温度测量。普通用途热敏电阻工作温度为 $-55\sim 315\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，特殊低温热敏电阻的工作温度低于 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，可达 $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

#### ③热敏电阻器的主要参数

各种热敏电阻器的工作条件一定要在其出厂参数允许范围之内。热敏电阻的主要参数有十余项：标称电阻值、使用环境温度（最高工作温度）、测量功率、额定功率、标称电压（最大工作电压）、工作电流、温度系数、材料常数、时间常数等。其中标称电阻值是在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 零功率时的电阻值，实际上总有一定误差，应在 $\pm 10\%$ 之内。普通热敏电阻的工作温度范围较大，可根据需要从 $-55\sim 315\text{ }^{\circ}\text{C}$ 选择，值得注意的是，不同型号热敏电阻的最高工作温度差异很大，如MF11片状负温度系数热敏电阻器为 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而MF53-1仅为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，学生实验时应注意（一般不要超过 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）。

#### ④实验用热敏电阻选择

首选普通用途负温度系数热敏电阻器，因它随温度变化一般比正温度系数热敏电阻器易观察，电阻值连续下降明显。若选正温度系数热敏电阻器，实验温度应在该元件居里点温度附近。

### 4. 光传感器及光敏元件

光传感器主要由光敏元件组成。目前光敏元件发展迅速、品种繁多、应用广泛。市场出售的有光敏电阻器、光电二极管、光电三极管、光电耦合器和光电池等。

#### ①光敏电阻器

光敏电阻又称光导管，它几乎都是用半导体材料制成的光电器件。当敏感波长的光照射半导体光电晶体表面时，晶体内载流子增加，使其电导率增加（即电阻减小）。光敏电阻没有极性，纯粹是一个电阻器件，使用时既可加直流电压，也可以加交流电压。当光敏电阻受到一定波长范围的光照时，它的阻值（亮电阻）急剧减小，电路中电流迅速增大。一般希望暗电阻越大越好，亮电阻越小越好，此时光敏电阻的灵敏度高。实际光敏电阻的暗电阻值一般在兆欧级，亮电阻在几千欧以下。

光敏电阻的主要参数有：

- 光电流、亮电阻：在一定外加电压下，当有光（ $100\text{ lx}$ 照度）照射时，流过光敏电阻的电流称光电流；外加电压与该电流之比称为亮电阻，一般几千欧到几十兆欧级。

- 暗电流、暗电阻：在一定外加电压下，当无光照射时，流过光敏电阻的电流称暗电流；外加电压与该电流之比称为暗电阻，一般几百千欧到几千千欧以上。



- 最大工作电压：一般几十伏至上百伏。
- 额定功率（功耗）：光敏电阻的亮电流与外电压乘积；可有 5 mW 至 300 mW 多种规格选择。

光敏电阻的主要参数还有响应时间、灵敏度、光谱响应、光照特性、温度系数、伏安特性等。值得注意的是，光敏电阻的光照特性（随光照强度变化的特性）、温度系数（随温度变化的特性）、伏安特性不是线性的，如 CdS（硫化镉）光敏电阻的光阻有时随温度的增加而增大，有时随温度的增加又变小。

### ②光敏二极管和光敏晶体管

光敏二极管的结构与一般二极管相似。它装在透明玻璃外壳中，其 PN 结装在管的顶部，可以直接受到光照射。光敏二极管在电路中一般是处于反向工作状态（图 6-26），在没有光照射时，反向电阻很大，反向电流很小，这反向电流称为暗电流。当光照射在 PN 结上时，光子打在 PN 结附近，使 PN 结附近产生光生电子和光生空穴对。它们在 PN 结处的内电场作用下作定向运动，形成光电流。光的照度越大，光电流越大。因此光敏二极管在不受光照射时，处于截止状态，受光照射时，处于导通状态。

光敏二极管的主要参数有：最高工作电压（10~50 V）、暗电流（ $\leq 0.05 \sim 1 \mu\text{A}$ ）、光电流（ $> 6 \sim 80 \mu\text{A}$ ）、光电灵敏度、响应时间、结电容和正向压降等。

光敏二极管的优点是线性好，响应速度快，对宽范围波长的光具有较高的灵敏度，噪声低；缺点是单独使用输出电流（或电压）很小，需要加放大电路。适用于通讯及光电控制等电路。

光敏二极管的检测可用多用表  $\times 1\text{k}$  电阻挡，避光测正向电阻应为  $10 \text{ k}\Omega \sim 200 \text{ k}\Omega$ ，反向应为无穷大，去掉遮光物后向右偏转角越大，灵敏度越高。

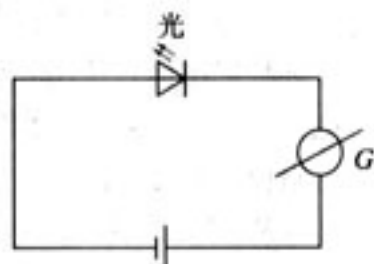


图 6-26

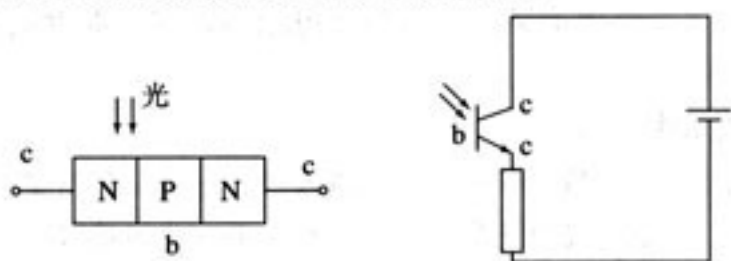


图 6-27

光敏晶体管与一般晶体管很相似，具有两个 PN 结，只是它的发射极一边做得很大，以扩大光的照射面积。图 6-27 为 NPN 型光敏晶体管的结构简图和基本电路。大多数光敏晶体管的基极无引出线，当集电极加上相对于发射极为正的电压而不接基极时，集电结就是反向偏压；当光照射在集电结上时，就会在结附近产生电子—空穴对，从而形成光电流，相当于三极管的基极电流。由于基极电流的增加，因此集电极电流是光生电流的  $\beta$  倍，所以光敏晶体管有放大作用，其暗电流、光电流和光电灵敏度比光电二极管要高得多，但结构原因使结电容加大，响应特性变坏。广泛应用于低频的光电控制电路。

### 5. EVOC 型鼠标的工作原理

EVOC 型鼠标的电路原理如图 6-28 所示。它由 U1（K037017）核心芯片组成编码芯片，外围电路有电源电路、光电传感电路和晶振电路。光电传感电路由两组构成：LD1、LQ1 控制光标的左右移动，LD2、LQ2 控制光标的上下移动。LD1、LD2 为发光二极管，LQ1、LQ2



为光敏三极管，各由两只相同的光敏三极管组成，以便检测相应光栅盘的转动方向。当移动鼠标时，包裹着一层橡胶材料的小球在弹簧和重力作用下，依靠摩擦力的作用，使与之接触的左右、上下塑料转轴转动，带动与转轴相连的光栅盘以相同的角速度转动，发光二极管发出的红外光被均匀开槽的光栅盘分成不连续的光束，扫射在光敏三极管的表面，光敏三极管将间断的光照转化为脉冲式光电流，编码芯片 U1 对此进行处理，以串行数据的形式从③脚输出。通过鼠标电缆线和 PS/2 鼠标插头、接口送入主机。PS/2 鼠标插头、接口的①为数据针，③为接地针，④为鼠标 +5 V 电源针，⑤为鼠标工作时钟针，②、⑥未用。

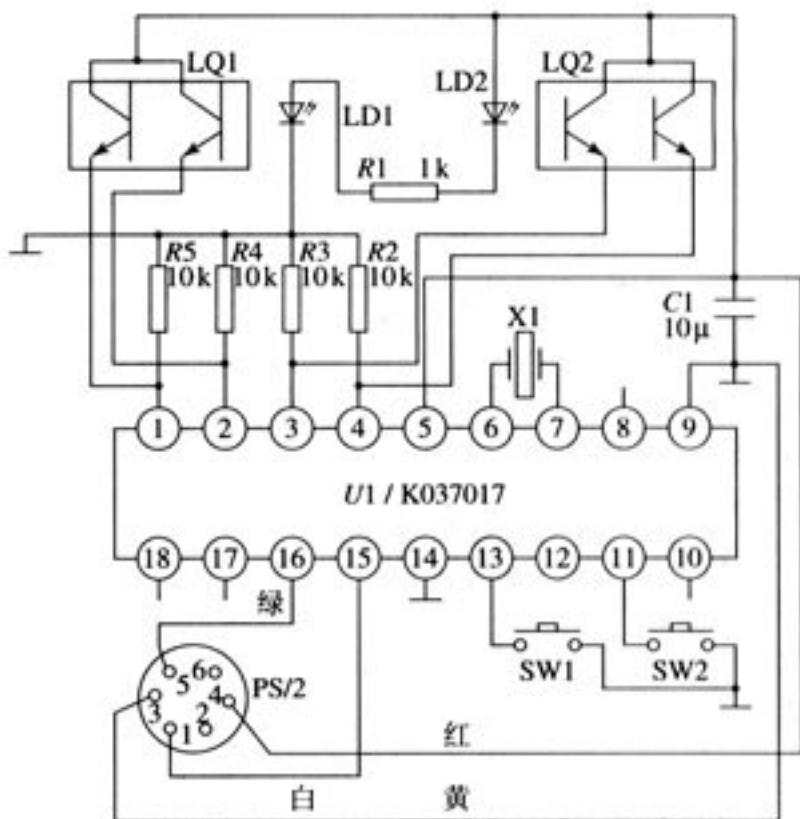


图 6-28 EVOc 型鼠标电路原理图

## 6. 霍尔元件

霍尔元件是基于霍尔效应的一种传感器，具有结构牢固、体积小、重量轻、寿命长、精度高、线性度好、安装方便等许多优点，广泛用于压力、加速度、振动等方面的测量。

### ① 霍尔效应

把一个导体（半导体薄片）两端通以电流  $I$ ，在垂直方向施加磁感强度  $B$  的磁场，在薄片的另外两侧会产生一个与控制电流  $I$  和磁场强度  $B$  的乘积成比例的电动势，这就是霍尔效应，是由美国物理学家霍尔首先在金属材料中发现的。相应的电动势就称为霍尔电动势（或霍尔电压），其大小为

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} = K_H IB$$

式中  $R_H$  称为霍尔系数，由半导体材料的性质决定， $K_H = \frac{R_H}{d}$  称为霍尔片的灵敏度，与霍尔系数  $R_H$  成正比，而与霍尔片厚度  $d$  成反比。为了提高灵敏度，霍尔元件常制成薄片形状。

任何材料在一定条件下都能产生霍尔电压，但不是都可以用来制造霍尔元件。一般金属材料载流子迁移率很高，但电阻率很小霍尔效应太弱；而绝缘材料电阻率极高，但载流子迁移率极低，都不适合用来制造霍尔元件。随着半导体技术的发展，开始用半导体材料制成霍尔元件，由于其霍尔效应显著而得到应用和发展。目前常用的霍尔元件材料有：锗、硅、砷化钢、铋化钢等半导体材料。

### ② 霍尔元件的基本结构

霍尔元件的结构很简单，它由霍尔片、引线 and 壳体组成，如教科书图 6.1-9 所示。霍尔片是一块矩形半导体单晶薄片，引出四个引线。E、F 两根引线加激励电压或电流，称为激励电极；M、N 引线为霍尔输出引线，称为霍尔电极。霍尔元件壳体由非导磁金属、陶瓷或环氧树





脂封装而成。

霍尔元件的主要参数有：输入电阻和输出电阻、额定控制电流、不等位电势（也称为非平衡电压或残留电压）和不等位电阻、灵敏度、寄生直流电势、霍尔电势温度系数等。

### ③霍尔元件的应用

根据霍尔输出与控制电流和磁感应强度的乘积成正比的关系可知，霍尔元件的用途大致分为三类：保持元件的控制电流恒定，则元件的输出与磁感应强度成正比，根据这种关系可用于测定磁感应强度，如高斯计等。当元件感受的磁感应强度不变时，则元件的输出与控制电流成正比，这方面的应用有测量交、直流的电流表、电压表等；当元件的控制电流和磁感应强度均变化时，元件输出与两者乘积成正比，这方面的应用有乘法器、功率计等。

此外，在非电学量测量技术领域，利用霍尔元件可以制成位移、压力、流量等传感器。

图 6-29 给出了最简单的霍尔式位移传感器的工作原理图。磁场强度相同的两块永久磁铁，同极性相对地放置，霍尔元件处在两块磁铁的中间。由于磁铁中间的磁感应强度  $B=0$ ，因此霍尔元件输出的霍尔电压  $U_H$  也等于 0，此时位移  $\Delta x=0$ 。若霍尔元件在两磁铁中产生相对位移，霍尔元件感受到的磁感应强度也随之改变，这时  $U_H$  不为 0，其量值大小反映出霍尔元件与磁铁之间相对位置的变化量，这种结构的传感器，其动态范围可达 5 mm，分辨率为 0.001 mm。

任何非电学量只要能转换成位移量的变化，均可利用霍尔式位移传感器的原理变换成霍尔电压。霍尔式压力传感器就是其中的一种，由弹性元件（可以是波登管或膜盒）将被测压力变换成位移，将霍尔元件固定在弹性元件的自由端上，弹性元件产生形变时将带动霍尔元件，使它在线性变化的磁场中移动，从霍尔电压的大小就可以知道压力的大小。

如果将硅霍尔元件与放大电路、温度补偿电路等集成在一起制成集成霍尔传感器，则具有性能优良、使用方便、体积小、成本低、输出功率大和输出电压高等优点，是应用最为广泛的集成传感器之一。

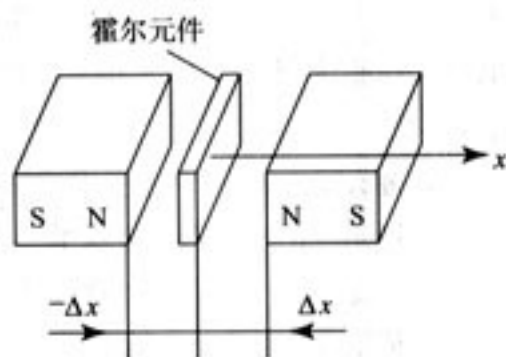


图 6-29

## (二) 联系生活、科技和社会资料

### 1. 有关传感器的新闻报道

#### ①我国无线传感技术完整价值链初步形成

##### 小小传感器会“撒豆成兵”

一群特殊的“哨兵”正悄悄在浦东机场周围驻扎。比起“神经过敏”的红外监测系统，它们能更准确地分辨出是落叶还是人触动了报警装置，大大降低了误警、漏警率。这队“哨兵”就是我国自主研发的无线传感网络，它们正在浦东机场进行一次重要的实际应用测试，为今后的推广积累经验。记者从中科院无线传感技术学术研讨会上获悉，目前我国已初步形成无线传感技术完整的价值链，无线传感网络将在 2008 年奥运会、2010 年世博会中发挥重要作用。中科院副院长、中科院上海分院院长江绵恒出席会议并讲话。

传说中的“撒豆成兵”恰好可以用来描述无线传感网络。目前，国内最小的无线传感器仅如火柴盒般大小，可以“撒”在火灾现场、道路、机场等任何需要监测的场所。这些传感器会相互呼应，自动组成网络，将收集到的信息通过无线网络传回控制中心。万一有“队友”“牺



性”，其他传感器又会自动“重组”，弥合缺位。该技术在公共安全、智能家居、环保监控、智能交通及应急指挥等领域有着广泛的应用。

我国自1999年进入传感网络领域以来，已自主开发了以MEMS传感器为主、复合多信息探测的小型化传感器系列；研制出了5个系列9种传感网端机、4个系列基站等原型样机，成功实现了各种无线传感网络与公共网络、卫星网络的加密互联；完成了我国第一个无线传感网核心协议芯片的研制，为我国具有自主知识产权的无线传感网的广泛应用打下了基础。

同时，相继建立的传感网上海联盟、无线传感网（浙江）工程中心、无线传感网（宁波）工程中心等机构，已逐步构建起产学研三级价值链。

据悉，无线传感网络已在今年召开的上海合作组织峰会的交通指挥中发挥了重要作用。上海市公安局、上海市城市公共安全中心等单位正着手建立城市公共安全 Mesh 传感网的示范系统，为2010年的“安全世博”打下技术基础。

（摘自2006年11月7日《文汇报》）

## ②英国也有个“CCTV”——250万部摄像机监视英国人

说来也巧，中国有个CCTV，英国也有个CCTV。但中国的CCTV是大家看它，而英国的CCTV却是它看大家。

1993年和1994年，爱尔兰共和军在人口密集的伦敦金融区引爆两枚炸弹。那两次恐怖事件促使英国政府在该城的8个入口处安装了闭路电视摄像机。

但这8个闭路摄像机还不能平息民众对恐怖行动的焦虑，于是英国政府在更多的场所安装了摄像机。1994年，2岁的男孩吉米被两个10岁的男学生绑架并杀害。闭路电视的摄像机捕捉到这两个男孩把吉米领出商场的模糊镜头。警方将这一镜头通过电视反复向公众播放，呼吁公众提供线索。

监控摄像机捕捉到的那一组镜头震撼了全国，公众强烈要求在公共场所安装更多闭路电视摄像机，英文简称为CCTV。当时以梅杰为首相的英国保守党政府顺应民意，拨出预防刑事犯罪预算的四分之三用于鼓励地方政府安装闭路监控摄像机。1994年，英国还只有79个城市的市中心安装了摄像监视系统；到了1998年，市中心装上这种系统的城市已达440个。现在，英国各部门都根据各自的需要设立了摄像监控网，公共场所安装的这些闭路摄像机已为民众所接受，称之为“空中友好之眼”，连偏僻乡下的小村庄都计划安装自己的闭路监控系统。有人估计，英国目前约有250万部监控摄像机在监视着英国人的生活。也有人说，实际数量还要大得多。

尽管当初英国安装这数百万台闭路电视摄像机的本意是对付恐怖分子，但它们很快就被各部门用于不同目的。在伦敦城警察局的闭路电视监控室里，警官们分坐在两排电视荧光屏前。尽管他们的主要任务是监控恐怖分子，但实际上大部分时间是跟踪盗车贼和交通违规者。当一排排缓缓行进的车辆驶入伦敦城时，摄像机清楚地摄下每辆车的牌照号码及驾驶员的面孔。任何有反常行为的人都会成为闭路电视的聚焦点。

有趣的是，无论英国的犯罪率上升还是下降，支持安装闭路监视系统的人总认为它们有功劳：犯罪率上升时，是闭路电视监视系统发现了这些犯罪行为；犯罪率下降时，是闭路电视监视系统防止了犯罪行为。毫无疑问，闭路电视摄像机在英国的普及正在改变英国社会。尽管有人置疑英国的公民失去了很多隐私，但许多英国人认为，他们以失去隐私的代价换来了安全感，还是值得的。

（摘自2001年11月2日《光明日报》，有改动）

## 2. 传感器在家用电器上的应用

	彩电	电冰箱	吹风机	食品加热器	录像机	电烤炉	电饭锅	煤气用具	电子灭蚊器	面包烘箱	热水器	电锅	室内空调	洗衣机	衣服干燥机	电褥子	电脚炉	报警器	烫发器	喷雾器
温度传感器	压力式		●			●		●					●							
	双金属											●	●							
	热电偶							●			●									
	热敏电阻		●		●	●							●					●		
	PTC	●		●		●			●				●		●		●	●	●	
	CTR							●								●				
	有机感温体															●				
	感温铁涂氧							●				●								
	热膨胀元件			●							●									
	温度保险丝	●			●	●	●					●	●							
光传感器	●				●													●		
压力传感器														●						
湿度传感器		●			●															●
气体传感器				●				●										●		
烟雾传感器				●														●		
接触传感器	●				●									●				●		

### (三) 实验参考资料

#### 1. 一些元器件的介绍

##### (1) 微型电位器 (可调电阻器)

教科书图 6.5-9 照片中的电阻器,就是一种微型电位器,可以插在面包板上使用。它有三个引脚,两侧的引脚接到电阻体(附着在绝缘物上的圆弧形碳膜)的两端,中央的引脚接到滑动片上,用小螺丝刀旋动圆形金属片中间的一字形窄孔,就可以改变滑动片在电阻体上接触的位置,从而改变中央与任意一侧这两个引脚之间的电阻值。

##### (2) 蜂鸣器 (微型直流音响器)

教科书的实验 2 中使用的蜂鸣器其实是一种微型直流音响器。它的外形如图 6-30 所示,黑色的塑料外壳很小巧,直径只有十几毫米,高度在十毫米左右。顶部开圆孔使声音传出,底



部有两根引脚连接电源，其中长脚要接电源的正极。我们使用的是 YMD-12095-1 型，价格在 1 元以下。它自带音源，接通电源时，就会发出连续的声音，频率约 2 000 Hz。它的发声器相当于一个动圈式耳机，由装在音响器内部的集成音频振荡和放大电路来驱动。它的工作电压分为 1.5、3、6、9、12 V 五种，本实验可以选用 3 V 或 6 V 的。

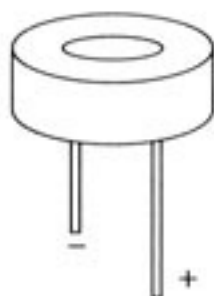


图 6-30

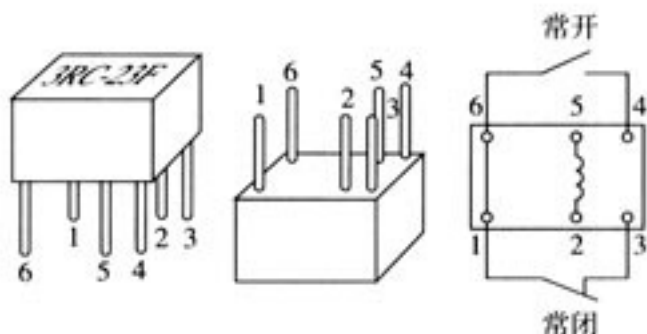


图 6-31

### (3) 微型电磁继电器

教科书的实验 1 的图 6.4-2 中，使用了微型电磁继电器。我们选用的是型号为 JRC-21F（或 HRS1H-S）的，它的引脚的直径和间距适合插在面包板上。它的工作电压分为几种，本实验选用 5 V 的。这种继电器是密封的，内部电磁铁的线圈电阻约为  $120\ \Omega$ ，工作电流约为 40 mA，并且具有一组转换型触点，触点允许通过的最大直流电流为 1 A。外形和引脚的功能如图 6-31 所示，引脚 2、5 间为线圈，1 与 6 在内部接通，4、6 间为常开型触点，1、3 间为常闭型触点，实验时要照此连接。

### (4) 干簧管和干簧继电器

普通干簧管内有两个簧片，是用有弹性的软磁合金材料制成的，它们密封在玻璃管中，成为一组常开型触点。管中充入惰性气体（如氮气）来防止触点被氧化。小型干簧管价格约为 1 元。

条形永磁体必须按照图 6-32 甲所示的方位靠近干簧管，才能使簧片得到最好的磁化，导致两个簧片相对的部分形成相反的磁极而吸合。图中虚线为磁感线。

如果如图 6-32 乙所示，将干簧管 H 放入一个螺线管 L 中，两者就组合成为干簧继电器。当螺线管中通入电流时，电流产生的磁场就使干簧管中簧片被磁化而吸合。干簧继电器的优点是：体积小、重量轻、灵敏（螺线管匝数很多时，通入几毫安的电流就能使簧片吸合）、簧片能够快速动作、触点的寿命长。

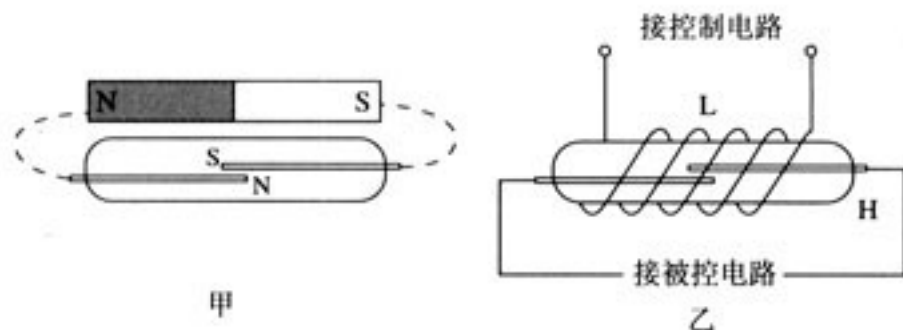


图 6-32



## 2. 实验中的一些问题

### (1) 声传感器的演示

教科书 62 页的演示使用的是驻极体话筒，因为它内部装有一个场效应三极管做阻抗变换，所以必须外接 6 V 直流电源供场效应管工作用。

也可以改用动圈式话筒（例如演唱卡拉 OK 用的），或者一只口径 10 cm 左右的动圈式喇叭当做话筒，它们都不需要电源，直接接到示波器的“Y 输入”和“地”两端即可。

### (2) 怎样提供 5 V 直流稳压电源

TTL 型逻辑集成电路块要求的电源电压范围为 4.75~5.25 V，所以正规的供电方法是使用标称值为 5 V 的稳压电源。但是学校配备的学生电源大多没有这种输出。解决的方法有三种：

①自行组装图 6-33 甲所示的稳压电路，其中使用了型号为 7805 的三端稳压集成块，它的外形如图乙所示。将此电路装入一个小盒子中，其输入端 A、B 由学生电源提供 8~10 V 的脉冲直流电压，则 C、D 端就有  $5.0 \pm 0.1$  V 的直流稳压输出。

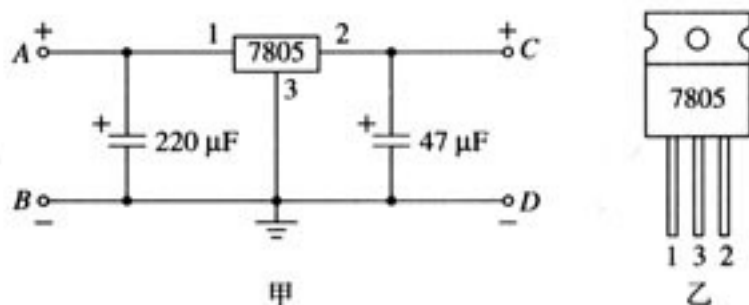


图 6-33

②将 4 节用过一段时间的干电池串联，其端电压大约在 5 V 左右。

③将现有的学生电源 6 V 的稳压输出，经过  $50 \Omega$  的滑动变阻器分压，得到 5.0 V 供给实验电路用。

### (3) TTL 型门电路的带负载能力

TTL 型门电路的输出端为高电平时，将有电流从输出端流出到它所带的负载；而在输出端为低电平时，则有电流从它所带的负载流入输出端。从器件手册上可以查到，无论流出还是流入，其电流的大小一般都不宜超过 10 mA。所以它只能带动一些需要小电流的负载，如发光二极管、微型直流音响器、或者另外的几个 TTL 型门电路的输入端等。

常用的小灯泡、低压电铃、功率大一些的电磁继电器等的工作电流约为几百毫安，显然不能用门电路直接带动。解决的办法是，用晶体三极管将门电路输出的电流放大，然后再去驱动负载。

## 3. 不平衡电桥在测量中的应用

有一些敏感元件是将被测的非电学量转换为不同的电阻，但是不同的电阻值不便于传送和显示，需要把电阻变化转换为电压的变化。通常采用不平衡直流电桥来解决这个问题。应变式力传感器就是这样的。由于学生没有学过电桥，所以教科书中只能做些笼统的叙述。

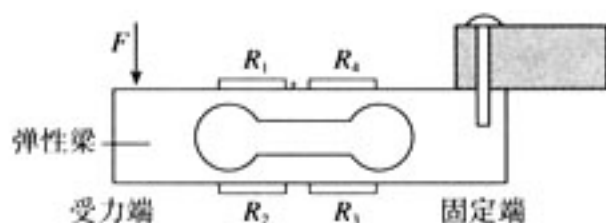


图 6-34

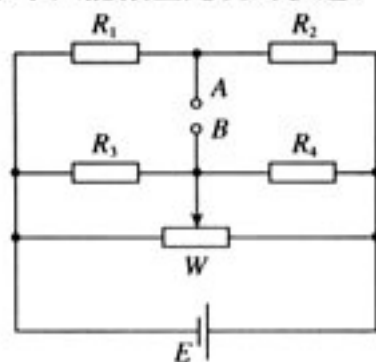


图 6-35



实际上是在梁形的弹性构件上下两个表面上各粘贴两个应变片，要将其中  $R_1$ 、 $R_4$  两个应变片粘贴在梁的上表面， $R_2$ 、 $R_3$  两个应变片粘贴在梁的下表面，如图 6-34 所示。

测量电路如图 6-35 所示，由这四个应变片组成电桥的四个桥臂，A、B 端接入数字式电压表。理论上要求四个应变片的电阻值相等，实际上必然存在制造误差，因此还要接入电位器  $W$ ，在梁不受力时，调节  $W$  使电桥的输出电压  $U_{AB} = 0$ 。当梁受力  $F$  向下弯曲时， $R_1$ 、 $R_4$  的阻值变大， $R_2$ 、 $R_3$  的阻值变小，于是电桥失去平衡，A、B 端之间就输出与所测的力成正比的电压。

后文推荐的课外活动“组装热敏温度计”，也使用了不平衡电桥。

#### 4. 组装热敏温度计

电路如图 6-36 所示。这是一个典型的不平衡电桥。按图连接电路，微安表的量程为  $0 \sim 200 \mu\text{A}$ ，内阻约  $500 \Omega$ 。 $R_T$  为热敏电阻，常温下 ( $20^\circ\text{C}$ ) 阻值约  $330 \Omega$ ， $R_1$ 、 $R_2$  各为  $270 \Omega$  的电阻， $R_3$  为电阻箱， $R_4$  为  $50 \Omega$  的变阻器。 $E$  为一节干电池。

假设要组装的热敏温度计的量程为  $20 \sim 60^\circ\text{C}$ 。先将热敏电阻和水银温度计共同浸入  $20^\circ\text{C}$  的冷水中，接通电源，调节  $R_4$  使加在 A、C 两点的电压  $U_{AC}$  约为电源电压的一半，然后仔细调节  $R_3$  使微安表的读数为零，这就标定好了下限温度，即用  $0 \mu\text{A}$  的刻度表示  $20^\circ\text{C}$ 。接下来，保持  $R_3$  不变，将热敏电阻和水银温度计共同浸入  $60^\circ\text{C}$  的热水中，可看到微安表有了读数，调节  $R_4$  使微安表恰好满偏，这样标定好了上限温度，即用  $200 \mu\text{A}$  的刻度表示  $60^\circ\text{C}$ 。

保持已经调好的  $R_3$ 、 $R_4$  值不变，依次将热敏电阻和水银温度计共同浸入  $50^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$ 、 $30^\circ\text{C}$  的热水中，记下微安表的读数就标定了这三个温度值  $t_{\text{温}}$  在微安表刻度盘上的位置。

依据全部测量数据画出  $I-t_{\text{温}}$  曲线。用这个热敏电阻去测量任意一个物体，读出微安表的示数  $I$ ，就可以在  $I-t_{\text{温}}$  曲线上查出对应的温度值  $t_{\text{温}}$ 。

#### 5. 用三极管制作温度控制器和光控开关

①温度自动控制器：实验电路如图 6-37 所示。甲图中 T 为 3AX31 型三极管；J 为型号 2414 的直流继电器线圈（原初三学生分组实验用过），它的额定电压为  $6 \text{ V}$ ； $R_1$  为  $1 \text{ k}\Omega$  的定值电阻， $R_2$  为  $10 \text{ k}\Omega$  的电位器（因实验室有现成的，实际使用小于  $10 \text{ k}\Omega$ ）； $R$  为热敏电阻，标值  $100 \Omega$ （如果气温超  $30^\circ\text{C}$ ，实测电阻小于  $100 \Omega$ ），从它的两个引脚各焊出一根细长的软导线； $D$  为 1N4001 型二极管，用它保护三极管，防止当线圈中电流急剧减少时产生的自感电动势把三极管的集电结击穿；乙图为被继电器触点控制的电路，A、B、C 分别为继电器的常闭触点、动触点、常开触点，LED 为发光二极管，一只红色、另一只绿色；电阻  $R_3$  为  $470 \Omega$ ，作为发光二极管的限流保护（与甲图共用一个电源）现用它模拟一个电热箱的控制电路。

接好电路后，先使热敏电阻处于常温下，调节  $R_2$ ，使三极管  $b$ 、 $e$  两极间的电压  $U_b$  增大，直到三极管导通，则继电器线圈 J 中有足够大的电流通过，使衔铁吸合，于是触点 B 与 C 接通。红色 LED 发光，表示箱内的电热器通电发热，然后将热敏电阻放入  $50^\circ\text{C}$  以上的水中，则

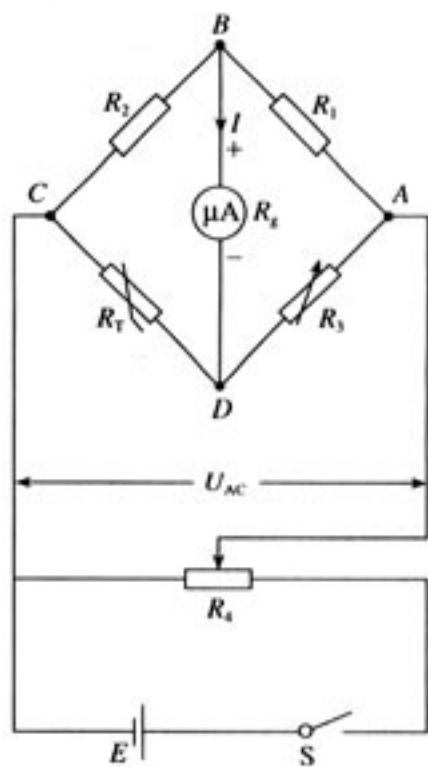


图 6-36

$R$  的阻值明显减小，导致三极管由导通变为截止，则继电器线圈中没有电流通过，使衔铁释放，于是触点  $B$  变为与  $A$  接通，绿色 LED 发光，表示箱内已经达到设定的温度（多次实验数据显示，本实验控制温度平均为  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）同时红色 LED 熄灭，表示停止加热。

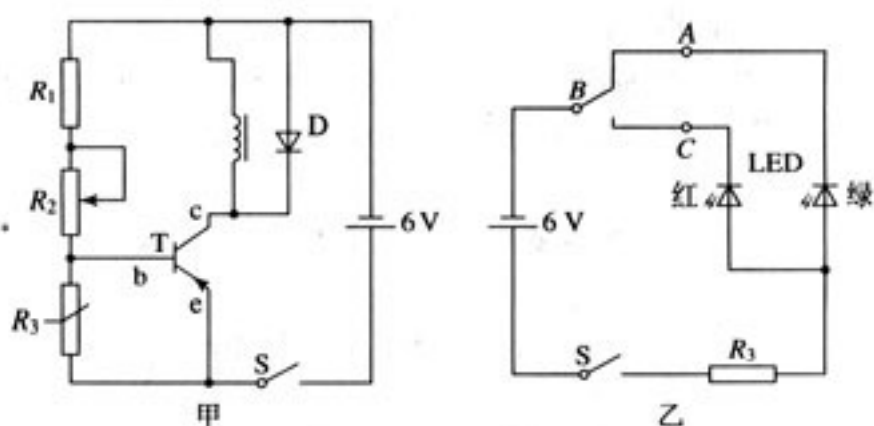


图 6-37

②光控开关：用光敏电阻可以组成图 6-38 所示的电路， $T$  为 3AX31 型三极管， $D$  为 1N4001 型二极管，它与线圈并联，使线圈中电流急剧减少时产生的自感电动势形成一个放电回路，保护了三极管； $R$  为光敏电阻，装在一个遮光筒内； $J$  为干簧继电器线圈（我们用已报废的打点计时器线圈代替）；LED 为高亮度发光二极管，用作电源指示兼作光敏电阻光源； $M$  为玩具电机或发光二极管，本电路当光敏电阻不受光照时，其阻值很大，三极管截止，线圈  $J$  中无电流，干簧管内两个簧片处于分离状态， $M$  不转动，当用高亮度发光管照射光敏电阻时，阻值变得相当小（约  $1\text{ k}\Omega$ ），使三极管由截止变为导通，于是线圈  $J$  中有电流通过，线圈产生的磁场使密封在干簧管内的两个铁质簧片磁化，两个簧片在磁力作用下由原来的分离状态变成闭合状态，接通电机电路， $M$  转动，可用它模拟车辆厂的光控大门电路。

以上两实验，可以分别把它们安装在两个长  $\times$  宽  $\times$  高为  $33\text{ cm} \times 21\text{ cm} \times 5\text{ cm}$  的木盒内（木盒原是实验材料的包装盒），在面板上作图，在热敏电阻、发光管、光敏电阻、开关、电位器等相应位置钻洞，让它们露出外面（其中接有细长线的热敏电阻与温度计扎在一起，平时放在盒内，实验时才拿出）。在盒内焊线，用 5 号干电池作电源（甲、乙图共用一个电源），全部制作很容易。

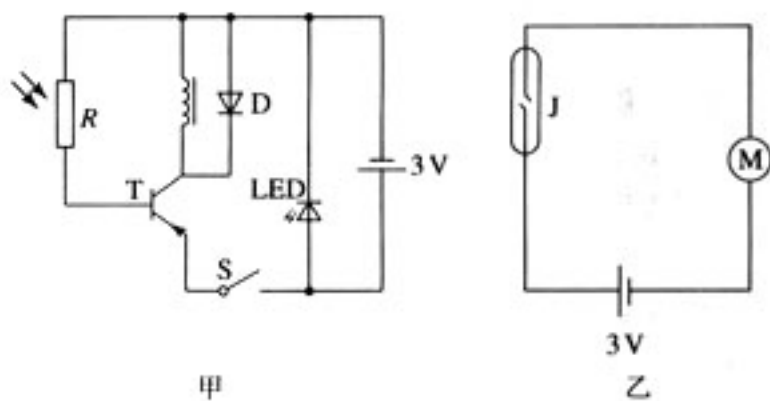


图 6-38

000 [http://www.pep.com.cn/gzwl/jszx/tbjx/kb/jsys/xx32/201008/../../201008/t20100827\\_804428.htm](http://www.pep.com.cn/gzwl/jszx/tbjx/kb/jsys/xx32/201008/../../201008/t20100827_804428.htm)