

普通高中课程标准实验教科书

物 理

选 修 3-1

教师教学用书

人民教育出版社 课程教材研究所
物理课程教材研究开发中心 编著

人教版®

人民教育出版社

主 编：彭前程
副 主 编：马宇澄 孙 新
编写人员：陈 行 杜 敏 黄恕伯 李 明
马宇澄 苗元秀 孙 新 唐果南
责任编辑：苗元秀 孙 新

图书在版编目(CIP)数据

普通高中课程标准实验教科书教师教学用书. 物理. 3—1: 选修/人民教育出版社课程教材研究所物理课程教材研究开发中心编著. —3版. —北京: 人民教育出版社, 2010.5 (2019.7重印)
ISBN 978-7-107-18271-6

I. ①普… II. ①人… III. ①中学物理课—高中—教学参考资料 IV. ①G633

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第019424号

普通高中课程标准实验教科书 物理 选修 3—1 教师教学用书

出版发行 人民教育出版社

(北京市海淀区中关村南大街17号院1号楼 邮编: 100081)

网 址 <http://www.pep.com.cn>

经 销 全国新华书店

印 刷 北京天宇星印刷厂

版 次 2010年5月第3版

印 次 2019年7月第27次印刷

开 本 890毫米×1240毫米 1/16

印 张 11.25

字 数 286千字

定 价 22.20元

版权所有·未经许可不得采用任何方式擅自复制或盗用本产品任何部分·违者必究
如发现内容质量问题、印装质量问题, 请与本社联系。电话: 400-810-5788

说 明

本书是在《普通高中课程标准实验教科书物理选修 3-1 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 3-1》,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《普通高中物理课程标准(实验)》(以下简称《课程标准》)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“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。

补充习题 教科书由于篇幅所限,不可能编写太多的习题。我们在这里补充了一些习题,供老师们在教学中选用。

本书原编写者还有:王雄、吴高文、周智良。

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

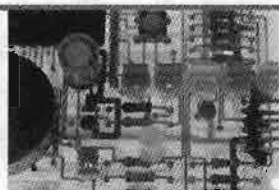
2010 年 4 月

目 录

第一章 静电场	1
一、本章教材概述	1
二、教材分析与教学建议	4
第1节 电荷及其守恒定律	4
第2节 库仑定律	8
第3节 电场强度	12
第4节 电势能和电势	18
第5节 电势差	23
第6节 电势差与电场强度的关系	25
第7节 静电现象的应用	28
第8节 电容器的电容	31
第9节 带电粒子在电场中的运动	36
三、教学设计案例	39
电势能	39
四、教学资源库	43
(一) 概念、规律和背景资料	43
(二) 联系生活、科技和社会资料	54
(三) 实验参考资料	55
五、补充习题	65

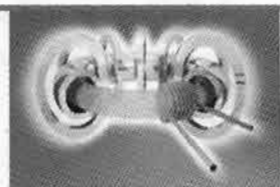


第二章 恒定电流	73
一、本章教材概述	73
二、教材分析与教学建议	77
第1节 电源和电流	77
第2节 电动势	80
第3节 欧姆定律	82
第4节 串联电路和并联电路	86
第5节 焦耳定律	89
第6节 导体的电阻	92
第7节 闭合电路的欧姆定律	95
第8节 多用电表的原理	99
第9节 实验：练习使用多用电表	101



第 10 节 实验:测定电池的电动势和内阻	103
第 11 节 简单的逻辑电路	106
三、教学资源库	104
(一) 概念、规律和背景资料	110
(二) 联系生活、科技和社会资料	116
(三) 实验参考资料	117
四、补充习题	122

第三章 磁场	129
一、本章教材概述	129
二、教材分析与教学建议	132
第 1 节 磁现象和磁场	132
第 2 节 磁感应强度	134
第 3 节 几种常见的磁场	137
第 4 节 通电导线在磁场中受到的力	140
第 5 节 运动电荷在磁场中受到的力	144
第 6 节 带电粒子在匀强磁场中的运动	147
三、教学设计案例	149
带电粒子在匀强磁场中的运动	149
四、教学资源库	153
(一) 概念、规律和背景资料	153
(二) 联系生活、科技和社会资料	159
(三) 实验参考资料	165
五、补充习题	169



人教版®

课程标准的要求

1. 了解静电现象及其在生活和生产中的应用。用原子结构和电荷守恒的知识分析静电现象。
2. 知道点电荷，体会科学研究中的理想模型方法。知道两个点电荷间相互作用的规律。通过静电力与万有引力的对比，体会自然规律的多样性与统一性。
3. 了解静电场，初步了解场是物质存在的形式之一。理解电场强度，会用电场线描述电场。
4. 知道电势能、电势，理解电势差。了解电势差与电场强度的关系。
5. 观察常见电容器的构造，了解电容器的电容。举例说明电容器在技术中的应用。

一、本章教材概述

本章是选修3系列的第一章，是高中阶段电学内容的开始。这一章的内容是高中阶段基础的内容之一。它既是电磁学知识的基础，又是光学等其他物理学知识的重要基础。

本章的核心内容是电场的概念及描述电场特性的物理量。教科书从电荷在电场中受力入手，引入电场强度的概念，明确它是表示电场强弱的物理量。然后，通过将静电力做功与路径无关和重力做功与路径无关类比，得出电荷在电场中具有由位置决定的能量——电势能。在此基础上，同引入电场强度的方法相同（比值定义法），引入电场的另一种描述，即电势的概念。这样，通过几个相关物理概念的讨论，完成对静电场性质的初步认识。

本章知识内容共有9节，大致可以分为三个单元。

第一单元包括第1、2节，即“电荷及其守恒定律”和“库仑定律”，为本章的后续学习打下基础；

第二单元包括第3、4、5、6节，分别是“电场强度”“电势能和电势”“电势差”“电势差与电场强度的关系”，是关于电场强度和电势概念的具体讨论，是本章的核心内容；

第三单元包括第7、8、9节，即“静电现象的应用”“电容器的电容”“带电粒子在电场中的运动”，是前面各节内容之间以及与力学知识的综合。

这三个单元是按照物理学自身发展的过程以及教学中循序渐进的原则来安排的。先认识电荷、电荷之间相互作用的规律，再认识描述场的性质的相关物理量。在此基础上，通过核心内容的拓展和应用，如静电现象的应用、电容器的电容、带电粒子在电场中的运动等，提高学生综合运用物理知识的能力。

在编写本章内容时有以下一些思考：

1. 注意渗透电磁学与力学的紧密联系

本章处于承上（力学）启下（电磁学）的重要位置。我们知道，人类对静电现象的认识和研究是物理学产生和发展的源头之一。尽管电磁学已经发展成为一门独立而完整的学科，但它仍然保持着与力学的紧密联系。力、功和能量等仍然是电磁学的主要概念。本章研究静电荷产生的静电场的性质，就是从电荷在电场中受力和电荷在电场中具有能量两个角度出发，有效地描述电场的基本特性。力学中的一些基本概念（如力、能量）和规律，对人们认识电现象起到了非常重要的作用。

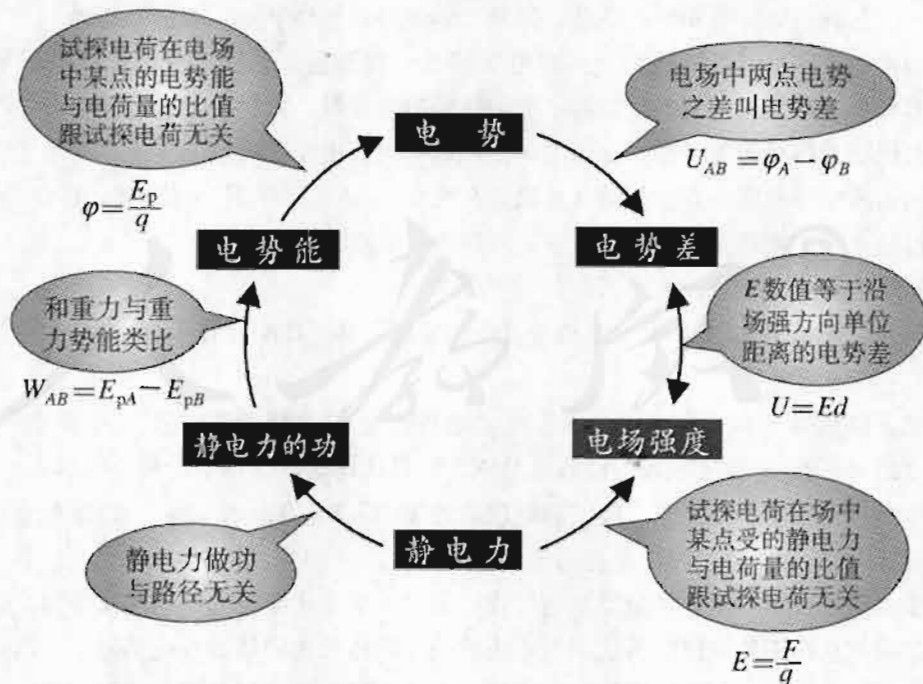
在此之前，学生学习的都是力学的有关内容，从这章开始，学生就要学习电学的有关知识。由于电学中的有关内容较力学更为抽象，而通过已有的知识可以帮助学生发现新的现象，认识和理解新的规律，所以教科书采用类比的方法将有关的电学知识与力学知识有机联系。例如，在介绍库仑定律时，将它与万有引力定律类比，分析二者的相同与不同；在介绍电势及电势能的有关内容时，同样借助介绍重力势能的一些思路，等等。这种紧密联系的方法既对学生学习、理解新的知识有帮助，也有利于学生用相互联系、相互影响的观点去看待事物。这样的处理对学生进入电学的学习是十分有益的。

2. 内容结构的设计形成了较紧密的“知识链”

有人说，从本章内容的选取和结构设计来看，好像有些过分强调知识的系统性，目的是要追求物理学科知识体系的严谨性吗？

应该指出的是，电势能、电势、电势差的概念得出的先后顺序新旧教科书有所不同。过去的教科书从学生实际接触比较多的电压，即电势差的概念入手，从而进一步学习电势、电势能的内容，而新教科书则正相反。这样变化的主要思考是新教科书自始至终贯穿了“通过做功研究能量变化”的思想。

由下面的图示可以看出，这样的处理，使整章内容形成了较稳固的“知识链”结构。



从教科书内容结构的设计来看，形成稳固的“知识链”设计，有利于突出知识间的递进关系。学生学习新知识，需要原有的知识为基础。知识间的联系越紧密，就越容易为教学提供一



个比较清晰的知识线索，确保学生的学习循序渐进。

正如前面所说，教科书在整体设计上始终抓住“功和能的关系”这条主线来展开问题的讨论。例如，在《物理必修2》第七章“机械能守恒定律”中就曾有过充分的讨论。新教科书之所以按电势能—电势—电势差的逻辑关系设计知识结构，目的就是要渗透“通过做功研究能量变化”的科学思想。教科书在分析了静电力做的功与路径无关之后，很自然地就会得到电势能的概念，随后，由于电势能的大小与检验电荷的电荷量成正比，于是又得到了电势……

另外，在教学中还需要进一步明确的是，具有清晰的知识线索的教学，可以避免知识的简单堆砌。它是学生获得新知识的一条有效途径，是提出、整理、检验关于自然的种种解释的一个过程，是经验与理性思维的碰撞。也许，这正是教学的基本价值所在。所以，教科书中这样的设计绝不是单纯追求物理学科知识体系的严谨性，目的仍然是要全面落实课程的“三维”目标。

3. 有效地把握知识要求的层次

静电场是继引力场之后，教学中又一次面临的有关“场”的问题。电场的概念及其特性的描述一直是教学的难点。由于概念比较抽象，不能用感官直接感受，加上电场是分布在空间中的，所以需要有较强的抽象思维能力和空间想像能力，才能形成正确的物理图景。因此，在教学中要充分运用各种形象化的教学手段，帮助学生形成正确的认识。

对于《课程标准》中“了解静电场，初步了解场是物质存在的形式之一”的教学要求，我们应该如何理解呢？

可以说，相当多的学生对场是除实物以外物质存在的另一种形式的理解是有困难的。教科书对这一问题的处理，只要求学生通过电场对电荷的作用来检验其存在，对其他内容不要求拓展。

另外，需要进一步说明的是，对于初步了解场是物质存在的形式之一的教学要求，仅靠本章内容的学习是无法达到的。在学生对电场强度和电势的概念及其相互联系有所认识的基础上，还需要学习磁场及电磁波等知识，在此之后才可能对场的物质性有进一步的认识。换句话说，相关的知识在高中电磁学内容的相关部分都有阐述和渗透。因此，学生只有通过学习电场和磁场的知识，知道电场和磁场的基本性质，了解电场和磁场规律在科学技术、生产和生活中的应用，才能加深对于世界的物质性和物质运动的多样性的认识。所以，在教学中，应该通过整个电磁学的教学，逐步引导学生加深对场的物质性的认识。

课时安排建议

教科书中的每节课，是根据《课程标准》的要求和知识内容的相对完整性来划分的。对课堂教学设计来说，有的内容可能多一些，有的内容可能少一些。这就要求教师根据具体情况，在对整章内容进行分析的基础上，划分好单元，确定实际课堂教学的课时分配。下面的课时安排建议仅供参考。

第1节 电荷及其守恒定律	1课时
第2节 库仑定律	1课时
第3节 电场强度	2课时
第4节 电势能和电势	2课时
第5节 电势差	1课时
第6节 电势差与电场强度的关系	1课时
第7节 静电现象的应用	1课时
第8节 电容器的电容	1课时
第9节 带电粒子在电场中的运动	2课时

二、教材分析与教学建议

第1节 电荷及其守恒定律

1. 教学目标

(1) 知道自然界存在两种电荷，并且只存在两种电荷。知道同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引。

(2) 经历摩擦起电和感应起电的实验过程，了解使物体带电的方法，能从物质微观结构的角度认识物体带电的本质。

(3) 理解电荷守恒定律。

(4) 知道电荷量的概念及其国际单位。

(5) 关注存在元电荷的事实，知道元电荷的概念，知道电荷量不能连续变化。

2. 教材分析与教学建议

本节由电荷、电荷守恒定律、元电荷三部分内容组成。它们是本章的预备性知识。关于静电现象方面的知识，初中已有介绍，而高中更侧重从物质微观结构的角度认识物体带电的本质。结合摩擦起电和感应起电的具体情景，理解电荷守恒定律是本节的重点。

新教科书之所以把“电荷守恒定律”单列一节来处理，目的是要进一步突出守恒的思想。我们知道，各种守恒定律都是物理学的基本定律，它们不是科学家在盲目摸索中得来的。“守恒”始终是物理学家追求的目标。为了突出守恒的思想，在力学中学习功和能的关系时就是从“追寻守恒量”开始的。

过去的教科书常常习惯把“摩擦起电”和“感应起电”作为单独的两个知识点来处理，而新教科书是将它们放在从属于“电荷守恒定律”的地位。教学中要通过对这两个现象的分析，使学生的思考达到电荷可能守恒的合理推测，从而进一步深化对电荷的认识。

(1) 电荷

针对学生常常会出现的“凭什么说自然界只有两种电荷”的思考，或者说，“怎见得没有第三种电荷”的疑问，教科书中以“人们没有发现对上述两种电荷都排斥或都吸引的电荷。这表明，自然界的电荷只有两种”的表述，呈现出一种严谨的逻辑关系。应该说，这是一种理性思维，或者说是一种批判性思维，同时也在进行科学态度的教育。

如果有学生问道，教科书中为什么说“整个原子对外界较远位置表现为电中性”？应该告诉学生这是一种比较严密的说法。因为从原子结构的知识可知，原子内部正、负电荷并不重叠在一起，所以在离原子较近的位置观察原子的带电状况时，说原子表现为电中性就不恰当了。

摩擦起电和感应起电两个内容不仅为“两种电荷”以及电荷间的相互作用提供了感性材料，而且为理解电荷守恒定律铺设了台阶。所以做好摩擦起电和感应起电两个实验，尤其是感应起电的实验是本节教学的关键。教学中应该重视这两个实验的教学设计。

(2) 电荷守恒定律

摩擦起电 学生以前学习物理、化学知识时，对原子结构已经有所接触，所以教科书直接

从物质微观结构的角度阐述物体带电以及物体电中性的本质。学生也已经知道：通过摩擦可以使原来不带电的物体带电；带电体与不带电的导体接触，可以使不带电的导体带电（注意：学生虽然知道这个现象，但认识并不深入，下节“库仑的实验”中有所涉及）。本节教学是从物质微观结构的角度认识摩擦起电的本质。

对于摩擦起电的本质，教科书中的表述是：“……摩擦时，一些束缚得不紧的电子往往从一个物体转移到另一个物体，于是原来电中性的物体由于得到电子而带负电，失去电子的物体则带正电。”这里需要明确：

① 两个互相摩擦的物体一定是同时带上种类不同的电荷，且电荷量相等。

② 同一物体分别与不同种类的物体摩擦，该物体所带电荷的种类可能不同。所以，不要以为摩擦过的玻璃棒总是带正电。

对程度较好的学生可以进一步介绍图 1-1 所示的实验结果：棉布分别与丙烯塑料板（图甲）和乙烯塑料板（图乙）摩擦，所带电荷的种类是不同的。补充这样的内容，一方面有利于学生理解教科书中“……摩擦时，一些束缚得不紧的电子往往从一个物体转移到另一个物体”的内容；另一方面，有利于消除学生一提玻璃棒就认为一定带正电的思维定势。

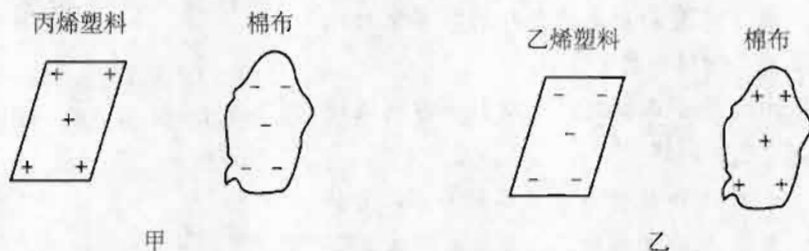


图 1-1

感应起电 感应起电实验是学习电荷守恒定律的又一准备。通过教科书中“实验”栏目的感应起电实验可将金属导体的带电过程展示在学生面前，丰富学生的感性认识。要让学生理解感应起电的微观过程，关键是要了解金属内部自由电子的运动状况。教学中可以给出简化的金属结构的物理模型（图 1-2）。

教科书中，“实验”栏目的呈现形式有了很大的改进。栏目中的实验表述没有说明可以观察到的具体现象，也就是说，没有给出结论性的内容。这主要是考虑到实验现象应该由学生自己去观察，而不应事先写出。教科书这样的呈现方式，体现了将科学探究思想渗透于各教学活动之中的设计宗旨。应该说，实验教学如果只要求学生停留在找出正确答案的层面是不够的。原因是学生在说出正确答案时，其思维程度可能还仅仅停留在对问题的一种推测、猜想，培养学生思维能力的目标还没有达成。所以，在进行这部分教学时，既要重视知识和实验技能的训练，还要重视逻辑关系及理性思维的训练。应该设计一些有梯度、能提升思维强度的问题，使学生切实做到独立思考、师生互动、同伴交流。

从教科书中这个实验的结果可以看出，带电是电子（离子）移动引起的电中性被破坏的现象。另外，实验中需注意：做好这个实验的关键是保证两部分导体对地的绝缘性能良好（课本图 1.1-1），A、B 的底座可以选用聚四氟乙烯（塑料王）；让物体 C 带尽可能多的电荷；为避免导体 A、B 与周围空间产生放电，导体表面需打磨光滑。

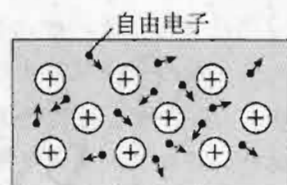


图 1-2 金属结构



对感应起电现象的分析

提出问题：把带正电荷的物体C移近导体A、B，金属箔有什么变化？再将物体C移开，使它远离导体A、B，金属箔又有什么变化？

实验观察：金属箔由闭合变为张开，表明导体A、B两端都带了电；再将物体C移开，金属箔又由张开变为闭合，表明导体A、B又恢复到原来的电中性状态。要求学生根据教科书关于金属的微观结构的论述分析产生这一实验现象的原因。

分析推测：这既不是接触带电，也不是摩擦起电，这是一种新的带电方式，表明带电体对导体内部的电荷分布带来了影响。它影响的是金属导体中自由电子的移动吗？是否由于同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引的原因，使靠近带电体的导体内部的电荷重新分布？这个影响的可能图景会是什么样的？学生对此会提出自己的推测、猜想（图1-3）。

怎样证实推测的是否正确呢？可以引导学生设计新的实验来验证自己的推测。

问题导引：先把A和B分开，然后移去C，金属箔是否有变化？再让A和B接触，又会看到什么现象？

实验观察：先把A和B分开，然后移去C时，A和B两端的金属箔仍然张开，但张角却有些变小了。再让A和B接触，可以看到A、B两端的金属箔都闭合了。

分析论证：因为C棒的正电荷吸引金属导体中的自由电子，在A端有多余电子积累而带负电，B端因失去电子带正电，A、B分离时A带负电，B带正电，并且A、B两导体所带电荷等量异号。移去C棒后，积累在A端和B端的电荷会在两部分导体中重新分布，原来积累在A、B两端的电荷有一部分会分散掉，所以金属箔张角变小。再让A、B接触，由于它们所带电荷等量异号，所以电荷中和，金属箔闭合。

实验结果表明，由于导体中正、负电荷的分离，使原来电中性的导体分别带了电。带电体A、B再次恢复到电中性的状态，说明导体内部电荷的种类和数量达到等量、异号。如果不是这样，导体内一定有一种电荷多于另一种电荷，A、B也就不可能成为电中性体。

小结：实验过程中导体没有与其他物体接触，并且导体与周围绝缘，所以总电荷不可能增减。也就是说，感应起电的实验过程中导体A、B没有与其他物体接触，A、B都带电时总电荷没有增加，A、B接触时总电荷也没有减少。

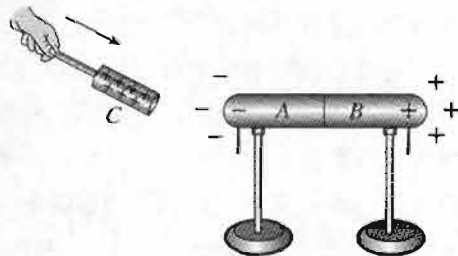


图1-3 靠近带电体的一端因电子过多而带负电，远离的一端因电子缺少而带正电。

从教科书的整体设计来说，这套教科书更加强调“守恒”思想的渗透，这在《物理必修2》“追寻守恒量”“能量守恒定律”的引入，以及《物理选修3-5》“研究物体碰撞的不变量”中都有体现。而电荷守恒定律是自然界主要的守恒定律之一，所以教科书也有介绍。

在有效完成“电荷”教学的基础上，学生能够认识到，无论是摩擦起电还是感应起电，其本质都是微观带电粒子（如电子）在物体之间或物体内部的转移，而不是创造出了电荷。有了这样的认识，就可以顺利引出教科书中关于电荷守恒定律的第一种表述。针对这一表述，在教

学中可以提出以下三个问题：

- ① 电中性物体中是否有电荷存在？
- ② 所谓“电荷的中和”是不是正、负电荷一起消失了？
- ③ 对于“电荷的总量保持不变”中的“电荷的总量”你是怎么理解的？

引导学生认识到：电中性物体中是有电荷存在的，只是电荷的代数和为0；“电荷的中和”是指电荷的种类和数量达到等量、异号，这时正、负电荷的代数和为0；“电荷的总量”是指电荷的代数和。

如果学生能够正确理解上述三个问题，就容易理解教科书中关于电荷守恒定律的第二种表述了。

注意：关于正、负电子湮没转化为光子等现象，在教学中不宜要求过高。可以告诉学生，这部分内容以后还会学习，现在只要知道随着人类研究领域的扩大和深入，电荷守恒定律有了新的表述即可。

对于“做一做”栏目的教学，可以从两方面考虑。一是动手制作验电器，这样有助于学生了解验电器的功能及使用方法；二是让学生通过观察和实验进一步理解接触带电、静电感应等方面的知识。

关于此栏目的教学提供以下参考：

- ① 制作验电器：所需材料为导体棒、玻璃瓶、两片金属箔、金属丝和绝缘塞。

制作过程中有两个关键点：一是绝缘塞的绝缘性能要好。课外活动时比较容易找到的材料是石蜡，绝缘性能就不错。二是两片金属箔要既轻又硬，张开合拢灵活。

② 检验是否带电：当带电体直接接触导体棒时，导体棒和两片金属箔带了与带电体同种的电荷。当带电体靠近导体棒并不与其接触时，因静电感应，导体棒带了与带电体不同种的电荷，两片金属箔带了与带电体同种的电荷。两种方式下，两片金属箔都会相互排斥而张开，都可以判断物体是否带电。

③ 检验电荷的种类：先使金属箔带上某种已知电荷，再将待测带电体靠近验电器的导体棒，根据金属箔张角的增减判断带电体电荷的种类。

关于静电计，在学完本章“电容器的电容”内容后就会清楚它的原理，此处只是让学生学习它的使用方法。我们知道，静电计是通过静电感应检测带电体带电的相对数量的静电仪器。它是通过测量导体棒与金属外壳间的电势差来定标的，指针偏转越大，电势差也越大。由于静电计这个“电容器”的两个极板太简陋，受外界影响太大，极板间的电势差并不正比于板上的电荷量，所以只能用它定性地估计电势差。

(3) 元电荷

对于元电荷的概念，最重要的是把握电荷量子化的思想，这是学生第一次接触“量子化”，要为以后的学习打个伏笔。由于电荷的多少是可以量度的，所以也就有了“电荷量”这一物理量。教科书首先阐明了存在元电荷的事实：电子带有最小的负电荷，质子带有最小的正电荷。在此基础上，通过“实验还指出，所有带电体的电荷量或者等于 e ，或者是 e 的整数倍。这就是说，电荷量是不能连续变化的物理量”的表述，渗透出电荷是量子化的观点。教师授课时不必过早提出“量子化”的名词，可先以人群的最小量是一个人为例，让学生知道不连续变化的含义，然后引出电荷量是不能连续变化的物理量的事实，并介绍电荷量的定义、单位。最小的电荷量最早是由美国物理学家密立根通过实验测出来的。一般情况其值可以取 $e=1.60\times 10^{-19}\text{ C}$ 。

需要说明的是，教科书在给出元电荷概念的基础上，还要给出比荷（荷质比）的概念。比



荷是带电微观粒子的基本参量之一，曾为人类认识微观世界作出了重大贡献，比如汤姆孙发现电子的存在就与比荷的测量有关。

3. 问题与练习

内容分析

本节问题与练习围绕电荷守恒定律这一中心展开，习题联系生活实际，关注学生对物质的微观结构的认识，重视培养学生对静电感应知识的应用能力。

第1题联系生活实际，考查应用物理知识解释身边现象的能力。题目以说理题的形式出现。

第2题要求学生运用静电感应知识解决实际问题。即，要求学生根据金属导体内部的微观结构，说明自由电子受到C棒所带正电荷的吸引向左端移动。然后根据元电荷的概念计算B失去电子的数目。

第3题同样要求学生运用静电感应知识解决实际问题。

第4题要求从能量转化的角度解释静电现象。学生都知道永动机是不可能制成的，本题的关键是找到使电动机转动的能量来源，对培养科学世界观有积极意义。题目侧重基本概念和说理分析，对运算的要求不高。

解答与说明

1. 在天气干燥的季节，脱掉外衣时，由于摩擦，外衣和身体各自带了等量、异号的电荷。接着用手去摸金属门把手时，身体放电，于是产生电击的感觉。

2. 由于A、B都是金属导体，可移动的电荷是自由电子，所以，A带上的是负电荷，这是电子由B移动到A的结果。其中，A得到的电子数为 $n = \frac{10^{-8}}{1.6 \times 10^{-19}} = 6.25 \times 10^{10}$ ，与B失去的电子数相等。

3. 图1-4是此问题的示意图。导体B中的一部分自由电子受A的正电荷吸引会积聚在B的左端，右端会因失去电子而带正电。A对B左端的吸引力大于对右端的排斥力，A、B之间产生吸引力。

4. 此现象并不是说明制造出了永动机，也没有违背能量守恒定律。因为，在把A、B分开的过程中要克服A、B之间的静电力做功。这是把机械能转化为电能的过程。

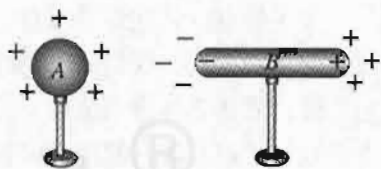


图1-4

第2节 库仑定律

1. 教学目标

(1) 通过演示实验，定性了解电荷之间的作用力大小与电荷量的多少以及电荷之间距离大小的关系。

(2) 明确点电荷是个理想模型。知道带电体简化为点电荷的条件，感悟科学研究中建立理想模型的重要意义。

(3) 知道库仑定律的文字表述及其公式表达。通过静电力与万有引力的对比，体会自然规

律的多样性和统一性。

(4) 了解库仑扭秤实验。

2. 教材分析与教学建议

本节内容的核心是库仑定律，它不仅是电磁学的基本定律，也是物理学的基本定律之一。库仑定律阐明了带电体相互作用的规律，为整个电磁学奠定了基础。

教科书在库仑定律教学的处理上，首先通过“演示”栏目中“探究影响电荷间相互作用力的因素”的定性实验导入。在此基础上，展示库仑定律建立的历史背景。一方面突现类比的方法在该定律建立过程中所起的重要作用；另一方面，库仑的实验是建立该定律的重要基础，该实验结果有力地证实了多位科学家的猜想。所以，本节的教学要特别注意实验教学。

(1) 影响电荷间相互作用力的因素

教科书中的“演示”栏目，虽然介绍的是一个定性的实验，但这个实验在本节课的地位却十分重要。因为它不仅丰富了学生的感性认识，而且体现了探究电荷间相互作用力与哪些因素有关的过程与方法。

教学片段

影响电荷间相互作用力的因素

实验中需思考及注意的问题：

①用感应起电盘反复多次使球形导体 O 带上足够多的电荷。

注意：带电体的底座要有良好的绝缘性。 O 的表面一定要光滑，否则容易漏电。带电体 O 也宜选择略大一些的，这样可以使其带有较充足的电荷。

②把静电摆与带电体 O 接触，静电摆就因带上了同种电荷而受到排斥。移动静电摆到适当的位置，观察静电摆与铅垂线的偏角大小。

③增大带电体 O 与静电摆间的距离，观察静电摆与铅垂线的偏角大小如何变化。

④使带电体 O 与静电摆恢复到原来的距离，用不带电的静电摆与原来的静电摆接触，原静电摆所带的电荷量减少。再观察静电摆与铅垂线的偏角大小如何变化。

静电摆的制作：材料应该用导体，如果用泡沫塑料，外面应该包一层铝箔纸。也可以用很薄的金属箔，以圆柱形笔筒为芯把箔纸卷成筒状，再剪一枚直径与箔纸筒相同的圆箔纸片封住箔纸筒的底。把细丝线一端打个结穿过圆形箔纸片的圆心，线长约 80 cm 左右，线的另一端悬挂在绝缘支架上。

实验的难点是如何保证两个静电摆材质、形状、大小基本相同。只有这样，两个静电摆接触时才会达到电荷量均分的目的。

下面采用的方法可以帮助我们突破这个难点。即，用金属箔片制作两个大小相同的圆片，再穿两根绝缘细线组成双线摆，如图 1-5 甲（正面图示）。实验时把两个圆片悬挂在水平绝缘杆上，如图 1-5 乙（侧面图示）。

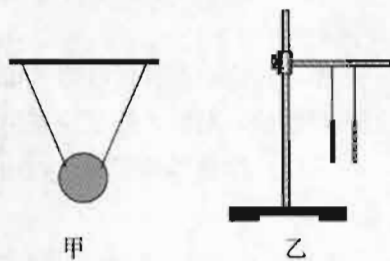


图 1-5

实验之前先让两金属圆片带等量电荷，其余步骤同上。

(2) 库仑定律

在完成上述实验的基础上，需要向学生明确的是，该实验属于定性研究，据此还不能得出库仑定律。教学中有必要将库仑定律建立的历史背景加以介绍，目的是向学生传达一个信息，即，科学定律的建立仅凭实验事实还不够，还需要推理、需要创新。科学家以广博的知识和深刻的洞察力为基础进行的猜想，才是最有创造力的思维活动。

在18世纪中叶，库仑定律发现的前夕，对万有引力的研究已经相当深入，人们已经知道了“平方反比”规律的各种表现。例如，把质点放到均匀物质球壳中的任何一点，球壳对它的引力都是0。18世纪60年代，富兰克林做了一个实验：把一个带电的软木球吊在带电的罐头盒正中，结果发现软木球受带电罐头盒的力为0。另一位物理学家爱普里斯特利据此猜测静电力也与万有引力一样具有“平方反比”的规律……所有这一切还只能说是一种猜测，因为实验条件并不一样：罐头盒并不是均匀带电的球壳。同时，还有其他人由于受不同事实的启发，也推测静电力存在“平方反比”的规律。库仑就是在这样的背景下进行他的扭秤实验的。

对库仑定律的教学应明确以下几个问题：

①知道点电荷的物理意义，以及在具体的物理情境中建立点电荷模型的条件，体验物理理想模型的研究方法，感悟科学研究中建立理想模型的重要意义，并能在其他场合中尝试运用这种方法研究物理问题。“点电荷”是学生在电磁学中接触的的第一个理想模型，可以把它与学过的“质点”理想模型联系起来，以加深学生对这种方法的体验。如，在两带电体之间距离接近0时，由于已经失去了简化为点电荷的前提条件，因此不能根据库仑定律得到静电力无穷大的结论；而在两带电体间的距离非常大时，不管形状如何，总是可以把它们看做点电荷，它们之间的作用力等于0。

②叙述库仑定律的内容不仅要说明静电力的大小，而且要说明静电力的方向。可以告诉学生，严格地说，这个定律只适用于真空中的两个静止的点电荷，但实际上对空气中两个静止点电荷，或者运动速度不大的两个点电荷，也可以用库仑定律计算它们的静电力。学生如果问：为什么强调“静止的”点电荷？可以告诉他们这个问题在以后学习电磁场与电磁波时就会明白。

③万有引力与物体的质量有关，静电力与电荷的电荷量有关；万有引力只存在引力，而静电力有引力和斥力，这说明了自然规律的多样性。另一方面，万有引力定律与库仑定律都遵循距离的“平方反比”规律，表达形式也十分相似，相互作用都是相关“场”的作用。可见，自然界的事物尽管是多种多样的，但却具有统一的一面。通过对上述问题的分析、类比，可以使使学生进一步体会到自然界的和谐与多样的美。

(3) 库仑的实验

由于库仑扭秤实验在中学很难做成，可介绍库仑扭秤实验的设计思路与实验方法，其中需要突出两点：

第一，库仑扭秤的特点是可以定量测量微小的力，由于《物理必修2》没有介绍卡文迪许的扭秤实验，所以，这里应该引导学生仔细观察课本图1.2-2，了解扭秤的工作原理①。

第二，库仑当年实验时，还不知道怎样测量物体所带的电荷量，甚至连电荷量的单位都没

① 当年库仑用扭秤实验测量的是同种电荷的排斥力，而异种电荷的吸引力的关系，库仑是用静电摆进行测量的，这与卡文迪许扭秤测万有引力常量是有所不同的。

有。库仑根据实验现象判断：两个相同的带电金属小球互相接触后所带的电荷量相等。应该要求学生理解库仑作出这一判断的实验依据，这不仅能够培养学生严谨的科学态度，而且能够培养学生的理性思维能力。

静电力常量是个重要的常量，教学中要求学生根据库仑定律的公式推导出它的单位。

另外，教科书中选取的两道例题具有很强的针对性，教学中要认真加以分析。

例题1是通过定量计算，使学生进一步明确在微观带电粒子（电子、质子、原子核和失去外层电子的离子等）的相互作用中静电力远远大于万有引力。了解这样的差别，有助于学生理解科学家在研究微观带电粒子时的合理简化，也会使学生对《物理必修1》第三章第一节中的“四种基本相互作用”有进一步的认识。

例题2是多个点电荷对同一点电荷作用力的叠加问题。此题一方面巩固对电荷在电场中受力的分析，另一方面，也为下一节电场强度的叠加作了铺垫。

对于学习能力较强的学生，可以结合教科书图1.2-3提出更高的要求。即例题2可以改为：“如果从 q_1 到 q_2 是一根均匀带电的直棒，所带的电荷量为 (q_1+q_2) ，那么，此棒对 q_3 的作用力方向如何？”启发学生把直棒分割成很多小段，每一小段都可以看做一个点电荷，利用点电荷位置的对称性分析合力的方向。这样做有利于学生理解教科书中关于“任何一个带电体都可以看成是由许多点电荷组成的”表述。

教科书中的“科学漫步”栏目，介绍了静电喷漆、静电植绒和静电复印。可以指导学生自学这篇文章，了解上述静电技术的原理都是基于静电力的作用。对于复印机的技术细节只要一般了解即可。可以介绍学生读些课外科技读物，以求拓宽知识面。

3. 问题与练习

内容分析

问题的重点是训练运用库仑定律解决问题的能力。其要求是逐步提高的，梯度比较合理。

第1题帮助学生了解库仑的实验，巩固库仑的实验中巧取不同电荷的方法，对学生理性思维的训练是有益的。

第2题让学生通过计算，明确原子核内两质子间的作用力很大，为今后讲解核力打下伏笔。

第3题中电荷量分配是对第1题所述能力的再次训练。同时，训练库仑定律的应用。

第4题训练静电力的叠加和力的平行四边形定则，要求比较高。

第5题是电学与力学的综合题，不仅提供了一种测量电荷量的方法，而且可以起到复习力的分解知识的作用，要求也是比较高的。

解答与说明

1. 根据库仑的发现，两个相同的带电金属球接触后所带的电荷量相等。所以，先把A球与B球接触，此时，B球带电 $\frac{q}{2}$ ；再把B球与C球接触，则B、C球分别带电 $\frac{q}{4}$ ；最后，B

球再次与A球接触，B球带电 $q_B = \frac{\left(\frac{q}{2} + \frac{q}{4}\right)}{2} = \frac{3q}{8}$ 。

$$2. F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = k \frac{e^2}{r^2} = 9.0 \times 10^9 \times \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(10^{-15})^2} \text{ N} = 230.4 \text{ N}.$$

提醒学生，原子核中的质子间的静电力可以使质子产生 $1.4 \times 10^{29} \text{ m/s}^2$ 的加速度！



3. 设 A、B 两球的电荷量分别为 q 、 $-q$ ，距离为 r ，则 $F = -k \frac{q^2}{r^2}$ 。

当用 C 接触 A 时，A 的电荷量变为 $q_A = \frac{q}{2}$ ，C 的电荷量也是 $q_C = \frac{q}{2}$ ；C 再与 B 接触后，B 的电荷量变为 $q_B = \frac{-q + \frac{q}{2}}{2} = -\frac{q}{4}$ ；此时，A、B 间的静电力变为

$$F' = k \frac{q_A q_B}{r^2} = -k \frac{\frac{q}{2} \times \frac{q}{4}}{r^2} = -\frac{1}{8} k \frac{q^2}{r^2} = \frac{1}{8} F$$

在此情况下，若再使 A、B 间距离增大为原来的 2 倍，则它们之间的静电力变为

$$F'' = \frac{1}{2^2} F' = \frac{1}{32} F$$

4. 第四个点电荷受到其余三个点电荷的排斥力如图 1-6 所示。 q_4 共受三个力的作用，由于 $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q$ ，相互间的距离分别为 a 、 $\sqrt{2}a$ 、 a ，所以 $F_1 = F_3 = k \frac{q^2}{a^2}$ ， $F_2 = k \frac{q^2}{2a^2}$ 。根据平行四边形定则，合力沿对角线的连线向外，且大小是 $F = 2F_1 \cos 45^\circ + F_2 = \frac{2\sqrt{2}+1}{2} k \frac{q^2}{a^2}$ 。由于对称性，每个电荷受到其他三个电荷的静电力的合力的大小都相等，且都沿对角线的连线向外。

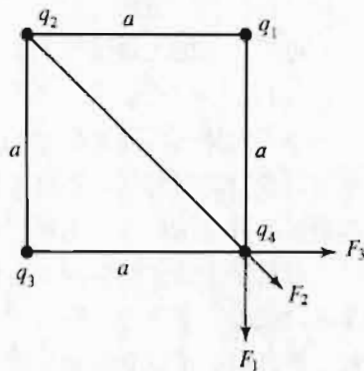


图 1-6

5. 带电小球受重力、静电斥力和线的拉力作用而平衡，它的受力示意图见图 1-7。静电斥力

$$F = mg \tan \theta$$

$$\tan \theta = \frac{5}{\sqrt{13^2 - 5^2}} = \frac{5}{12}$$

$$F = k \frac{q^2}{r^2} = mg \tan \theta$$

$$q = r \sqrt{\frac{mg \tan \theta}{k}} = 0.1 \times \sqrt{\frac{0.6 \times 10^{-3} \times 10 \times \frac{5}{12}}{9.0 \times 10^9}} \text{ C} = 5.3 \times 10^{-8} \text{ C}$$

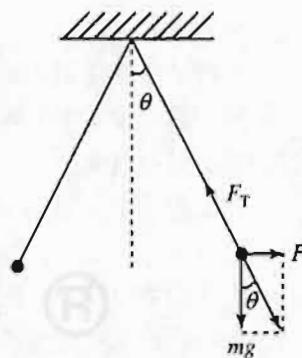


图 1-7

第 3 节 电场强度

1. 教学目标

- (1) 知道电荷间的相互作用是通过电场实现的。知道场与实物是物质存在的两种不同形式。
- (2) 体会用比值定义物理量的方法，理解电场强度的定义公式、单位、方向。
- (3) 能推导点电荷的电场强度公式，并能进行有关的计算。知道电场强度的叠加原理，并能应用这一原理进行简单的计算。
- (4) 知道电场线的定义和特点，会用电场线描述电场强度的大小和方向。

2. 教材分析与教学建议

教科书从电荷在电场中受力入手,引入了电场强度的概念,明确它是表示电场强弱的物理量。本节主要由“电场”“电场强度”“点电荷的电场 电场强度的叠加”“电场线”“匀强电场”几部分内容组成。

教科书定义电场强度的设计思路是:在一个电荷附近的任何一点,检验电荷会受到静电力的作用,静电力与检验电荷的电荷量的比值与该检验电荷的电荷量无关,说明比值反映了空间的某种性质,于是就定义了电场强度。

从某种意义上说,电场强度概念引入的同时也定义了电场。教学中可以提出电场的物质性,但不必过分强调,原因是学生对电场的存在还缺乏感性认识,他们必须通过一段时间的学习后,才能逐步认识。这里只要求学生通过电场对电荷的作用来检验其存在,了解电场是物质存在的形式之一,知道电场具有确定的性质,它对位于电场中的电荷施加作用力。其他方面不要求做进一步的拓展。

另外,对电场强度的理解需要明确的还有:它不依赖于电场中是否有检验电荷,也不依赖于检验电荷的性质。学生应该知道电场强度的定义式,理解其矢量性和叠加性,并会用电场线描述电场。

(1) 电场

教科书从历史上关于是否存在“超距作用”的讨论切入,把静电力与万有引力进行类比,直接提出了法拉第的观点“电荷的周围存在着由它产生的电场”。

“场”是物理学中一个重要概念,“电场”看不见、摸不到,十分抽象,难于理解。教师在课堂上可以把静电力与磁极间的磁力进行类比,因为学生在初中学习过磁场的概念,这样处理比较充分地利用了学生已经学过的知识,建立电场的概念会更加自然一些。

需要让学生明白,本章只研究由静止电荷产生的电场,称为静电场。静止电荷之间的相互作用是通过静电场相互作用完成的。

“科学漫步”栏目可组织学生自学。重点体会法拉第为什么会提出“场”的概念;法拉第又是怎样形象描述电场的。感悟法拉第对电磁学作出的重大贡献。

(2) 电场强度

这部分内容的教学设计可分三步完成:

①对电场强弱和方向的认识

研究电场的性质从静电力入手。原因是,电场最明显的特征是它对电场中的电荷有静电力的作用。应该指导学生再次研究课本图 1.2-1 所示的实验,通过这一实验至少可以认识到以下几个问题:

- 带电小球处于带电体 O 产生的电场中。
- 同一带电小球受到的静电力大小和方向与小球所在的位置及场源电荷的正负有关。
- 电荷量不同的小球在同一位置受到的静电力大小不同。

综合以上三点,可以知道,电场的强弱和方向是与位置及场源电荷的正负有关的。

②寻找描述电场性质的物理量

首先,必须明确试探电荷所受的静电力不能描述电场的强弱,或者说不能描述电场的性质。原因是,根据库仑定律,不同的试探电荷在电场中同一点所受的静电力不同。换句话说,静电力的大小不仅与电场有关,还与试探电荷的电荷量有关。

其次,我们要寻找的描述电场性质的物理量必须与试探电荷无关,在上述实验背景下,这

一物理量应该仅与带电体 O 的距离有关。

教科书提出了一个这样的假设：如果试探电荷 q_1 在电场中某点受到的静电力为 F_1 ，另一个同样的电荷在这一点受到的静电力一定也是 F_1 ；两个这样的电荷在这一点受到的静电力可能是 $2F_1$ ，这里的分析虽然是一种猜想和假设，它的正确性有待实验检验，但是这样的分析有助于培养学生逻辑思维的能力，课堂教学应该重视这一分析过程。千万不要一带而过，急于得出静电力与试探电荷的电荷量成正比的结论。

在推测到关系式 $F = Eq$ 后，可以在带电体 O 产生的电场中考察，电荷量为 Q 。设想在电场中离带电体 O 的距离为 r 处放置试探电荷 q_1 ，它受到的静电力为 $F = k \frac{Qq_1}{r^2}$ （把带电金属球 O 看做点电荷的理由在下一节再加以说明），在该处放置试探电荷 $2q_1$ ，则受到的静电力为 $F = k \frac{2Qq_1}{r^2}$ ，…这时候再说“实验表明我们的推测是正确的”效果会更好。

把关系式 $F = Eq$ 变形为 $E = \frac{F}{q}$ ，比值 $\frac{F}{q}$ 是一个与试探电荷无关的量，它的大小完全由电场确定。再回到带电金属球产生的电场中去看看这一比值，则 $\frac{F}{q} = k \frac{Q}{r^2}$ ，它确实是与试探电荷无关，仅与该点到带电金属球的距离有关。至此，描述电场性质的物理量就找到了。也就是说，引入电场强度概念的时机已经成熟：试探电荷在电场中某点所受静电力与它的电荷量的比值叫做该点的电场强度，定义式是 $E = \frac{F}{q}$ 。

用比值定义物理量是一种非常重要的科学方法，教学过程应该展示比值的物理意义，引导学生体会这种方法的精辟和严谨。学生尽管已经接触过密度、速度等用比值定义的物理量，但是对用比值定义物理量的认识仍然比较肤浅，他们常常从数学的角度去认识这个比例式，容易出现像“速度越大则加速度越大”之类的错误。教师的任务就是要引导学生认识这个比例式的物理意义，让学生在多次接触中逐步体验用比值定义物理量的方法。

③ 电场强度方向的规定

再利用课本图 1.2-1 所示的实验，引导学生讨论：把同一试探电荷放在电场中不同位置，试探电荷受到的静电力方向是否相同？经过讨论，学生会明白电场强度应该既能描述电场的强弱又能描述电场的方向，所以电场强度必须是矢量。

通过纠正如“试探电荷在电场中某点受到的静电力的方向就是该点的电场强度方向”的错误认识，帮助学生理解电场强度方向的规定。

(3) 点电荷的电场 电场强度的叠加

回顾课本图 1.2-1 所示实验，其中试探电荷受到的静电力与其电荷量的比值 $E = \frac{F}{q} = k \frac{Q}{r^2}$ ，就可以得到点电荷的电场强度公式。值得讨论的是：在以点电荷为球心、以 r 为半径的球面上，各点的电场强度的大小和方向有怎样的关系？建议画出场源电荷，分正、负两种场源电荷分别图示电场强度的方向，为后面电场线的学习打下基础。

关于电场强度的叠加问题，可以先要求学生讨论下列问题：

① 两等量同号场源电荷 Q ，相距为 r （给出示意图），试求以它们的连线为边长的等边三角形的顶点处的电场强度的大小和方向。（求出电场强度的大小并不难，但是容易遗漏另一个等边三角形的顶点处的一组解。此问题培养学生思维的全面性。）

②改变其中一个场源电荷的电性，画出两等量异号点电荷产生的电场强度的矢量和。明确电场强度的叠加实质上是求各个电场强度单独存在时的矢量和。

一个半径为 R 的均匀带电球体（或球壳）在外部产生的电场，与一个位于球心的、电荷量相等的点电荷产生的电场相同，球外各点的电场强度也是 $E=k\frac{Q}{r^2}$ 。上述结论的证明要用到高斯定律，因此教学中要求不要偏高，点到为止。同时说明在研究课本图 1.2-1 所示的实验时可以把带电金属球 O 看做点电荷的原因即可。

（4）电场线

法拉第不仅提出了“场”的概念，而且用电场线直观地描绘了“场”的清晰图景。通过电场线的学习，应使学生感悟到科学家是如何用虚拟的图线来描述抽象的物理概念的。它能使物理概念具体化、形象化，这充分体现了科学研究中一种十分重要的思想方法。

学习电场线需要明确以下几个问题：

①用电场线可以表示电场的方向与强弱（强调：电场线上每一点的切线方向表示该点的电场强度方向，并且这些电场线都是空间分布的）；

②电场线是从正电荷或无限远出发，终止于无限远或负电荷；

③在同一电场中电场线不可相交表示了电场中电场强度的惟一性；

④在同一幅图中，可以用电场线的疏密来表示电场强度的相对大小；

⑤电场中实际上并不存在电场线，但电场线是形象描述电场的有效工具。

通过电场线的学习，能读懂一些典型电场的电场线分布图；会用电场线来描述有关的电场，即会用电场线描述电场强度的大小和方向；使学生感悟到用虚拟的图线描述抽象的物理概念的做法是科学研究中一种重要的思想方法。用“线”描述“场”是法拉第为物理学作出的重大贡献之一。

教学片段

电 场 线

提出问题：如何形象地描述电场中各点电场强度的大小和方向？

设计方案：可以从点电荷的电场开始。分别以正、负点电荷为圆心画几个同心圆，如图 1-8 所示。点电荷的电场是分布在空间的，这里给出的只是平面的情况。

首先，在不同圆周上指定几个点，要求学生在图上画出这些点的电场强度的大小和方向。然后，再指定几个不在圆周上的点，要求学生画出这些点的电场强度的大小和方向。

讨论：同一圆周上所有点的电场强度的大小有什么关系？能否用语言描述其方向的图景？

同一圆周上所有点的电场强度的大小是相等的。正点电荷的电场线好像是光芒四射的太阳；负点电荷的电场线好像是众矢之的。

问题导引：如果把两个等量同号的点电荷逐渐靠近，它们周围的电场线形状是否会改变？说说你的理由。

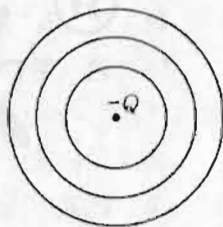


图 1-8

实验演示：用悬浮在蓖麻油里的头发屑模拟电场中的电场线。分别模拟两个等量同号、两个等量异号点电荷产生的电场。实验中还要强调电场线是分布在空间的。

两个等量同号、等量异号点电荷产生的电场的模拟电场线分布图如课本图 1.3-8 所示。结合前面已讨论的等量同号点电荷在以连线为边长的等边三角形顶点的电场强度方向问题，画出两等量同号点电荷产生的电场的电场线分布图。用同样的方法画出等量异号点电荷产生的电场的电场线分布图。

分析：在完成以上两种电场的电场线分布图后，应该重点分析两个点电荷连线的垂直平分线上各点电场强度的大小、方向有何特点。

- 等量同号两个点电荷连线垂直平分线上各点电场强度的大小、方向（沿两个点电荷连线垂直平分线向外）。

- 等量异号两个点电荷连线垂直平分线上各点电场强度的大小、方向（与两个点电荷连线平行且沿从正电荷指向负电荷的方向）。

另外，在电场线分布图中找一个不在电场线上的点，要求学生说明这个点的电场强度的方向，由此引出电场线是研究电场时人为设想的，画多少条电场线描述电场可根据分析问题的需要而定。

(5) 匀强电场

匀强电场的教学主要有以下三点：

① 匀强电场的定义。

② 匀强电场的电场线的特点。

③ 实际生活中有哪些地方的电场可以看做匀强电场。（带有等量异号电荷的一对平行金属板靠近时，两板间的电场可以看做匀强电场。）

3. 问题与练习

内容分析

本节练习题侧重于计算的习题只有 3 道，其余 4 道则侧重于概念的理解和知识的迁移。习题的针对性很强，难度有梯度。第 1 至第 4 题在第 1 课时后使用。

第 1 题以复习、巩固电场强度的定义式为目的。

第 2 题以氢原子为背景，计算质子产生的电场强度，目的是让学生了解质子在电子所处的位置产生的电场的电场强度很大。可以让学生计算电子在该处的加速度的数量级。

第 3 题和第 4 题是说理题，目的是培养学生的知识迁移能力和综合分析能力。

第 5 题巩固用电场线描述电场的知识。

第 6 题是与力学知识综合处理电荷的平衡问题。

第 7 题训练同一直线上电场强度矢量的叠加，这种训练为在今后与力学知识综合运用时夯实基础。

解答与说明

$$1. A、B \text{ 两处电场强度之比为 } \frac{E_A}{E_B} = \frac{\frac{F}{q}}{\frac{nF}{q}} = \frac{1}{n}。A、C \text{ 两处电场强度之比为 } \frac{E_A}{E_C} = \frac{\frac{F}{q}}{\frac{F}{nq}} = n。$$

2. 电子所在处的电场强度为 $E = k \frac{e}{r^2} = 9.0 \times 10^9 \times \frac{1.6 \times 10^{-19}}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{ N/C} = 5.1 \times 10^{11} \text{ N/C}$, 方向沿着半径指向外。电子受到的静电力为 $F = Ee = 5.1 \times 10^{11} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ N} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$, 方向沿着半径指向质子。

3. 重力场强度等于重力与质量的比值, 即 $\frac{mg}{m} = g$, 单位是牛顿每千克, 方向竖直向下。

4. 这种说法是错误的。例如, 如图 1-9 所示, 有一带电粒子以平行于金属板的初速度射入电场, 它沿电场线的方向做匀加速运动, 而沿初速度方向做匀速运动, 它的运动轨迹是曲线。也就是说, 它的运动轨迹与电场线不重合。

5. 根据电场线描述电场分布的状态回答下列问题。

(1) 因为电场线的疏密程度反映电场强度的强弱, 所以, B 点的电场最强, C 点的电场最弱。

(2) A、B、C 三点的电场强度的方向如图 1-10 所示。

(3) 负电荷在 A、B、C 三点时的受力方向如图 1-10 所示。

6. 小球受到重力 mg 、静电力 F 、轻绳拉力 F_T 的作用而处于平衡状态, 它的受力情况如图 1-11 所示, 则

$$\frac{F}{mg} = \frac{Eq}{mg} = \tan 30^\circ$$

$$E = \frac{mg}{q} \tan 30^\circ = \frac{1.0 \times 10^{-2} \times 10}{2.0 \times 10^{-8}} \times \frac{\sqrt{3}}{3} \text{ N/C} = 2.9 \times 10^6 \text{ N/C}$$

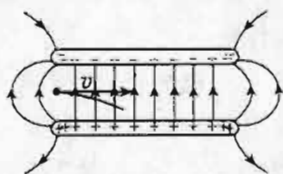


图 1-9

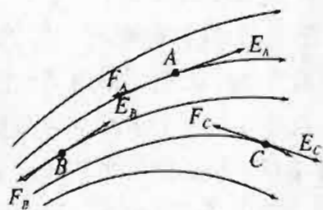


图 1-10

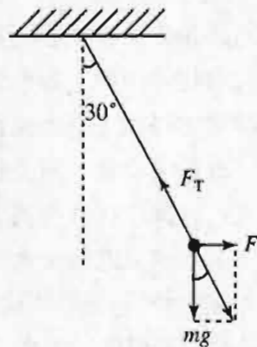


图 1-11

7. 因为 $|Q_1| > |Q_2|$, 所以, 在 Q_1 左侧的 x 轴上, Q_1 产生的电场的电场强度总是大于 Q_2 产生的电场的电场强度, 且方向总是指向 x 轴负半轴, 在 $x=0$ 和 $x=6 \text{ cm}$ 之间, 电场强度总是指向 x 轴的正方向。所以, 只有在 Q_2 右侧的 x 轴上, 才有可能出现电场强度为 0 的点。

(1) 设该点距离原点的距离为 x , 则 $k \frac{Q_1}{x^2} - k \frac{Q_2}{(x-6)^2} = 0$, 即 $4(x-6)^2 - x^2 = 0$, 解得 $x_1 = 4 \text{ cm}$ (不合题意, 舍去) 和 $x_2 = 12 \text{ cm}$ 。所以, 在 $x_2 = 12 \text{ cm}$ 处电场强度等于 0。

(2) 在 x 坐标轴上 $0 < x < 6 \text{ cm}$ 和 $x > 12 \text{ cm}$ 的地方, 电场强度的方向总是沿 x 轴的正方向的。

第4节 电势能和电势

1. 教学目标

- (1) 通过讨论静电力对试探电荷做功, 知道静电力做功与路径无关的特点。
- (2) 将静电力做功与重力做功进行类比, 理解静电力做功与电势能变化的关系。认识电势能的相对性。
- (3) 知道电势的定义方法及其定义公式、单位。
- (4) 知道等势面的定义, 知道电场线一定垂直于等势面。

2. 教材分析与教学建议

上节是从力的角度出发研究描述电场性质的物理量——电场强度。本节是从能量的角度研究电场。新教科书之所以按电势能—电势—电势差的逻辑关系设计知识结构, 目的就是要突出通过做功研究能量变化的科学思想。从教科书整体设计角度分析, 功和能的关系问题在《物理必修2》中有过充分的讨论。在此, 教科书分析了静电力做的功之后很自然地就会得到电势能的概念, 随后, 由于电势能的大小与检验电荷的电荷量成正比, 又得到了电势的概念。

应该看到, 对中学生来说, 建立电势能和电势的概念是一个比较困难的过程。对此, 教师应有充分的思想准备。教科书以静电力对试探电荷做功为切入点, 首先引导学生认识静电力做功与路径无关; 接着将其同重力对物体做功与路径无关进行类比建立了电势能的概念, 并且与重力对物体做功引起重力势能的变化再次类比, 得出静电力做的功等于电势能的减少量, 又一次与重力势能进行类比得知电势能具有相对性。

教科书反复应用类比的方法是“过程与方法”“情感、态度与价值观”等教育目标的具体体现, 教师应该从提高学生的思维品质的角度渗透类比法, 运用类比法。

电势的概念既是重点, 也是难点。由于学习重力势能时没有学习与电势相对应的物理量, 如“重力势”, 教科书通过类比电场强度的定义方法来定义电势。在引入电势概念之前要先让学生体会到电势能的大小与试探电荷的电荷量有关, 不能用来描述电场的性质。要让学生带着寻找一个与试探电荷无关的、完全由电场的性质决定的、可以描述电场能的性质的物理量去学习。

等势面可以与地理中的等高线类比, 学生接受等势面的概念难度不大。但学生对“等势面一定与电场线垂直”这一结论的理解会有困难, 教科书阐述这一问题时又一次运用了反证法。

本节教学内容建议用两课时。第1课时讨论静电力做功和电势能, 第2课时讨论电势和等势面。

(1) 静电力做功的特点

教科书先以一个静止的试探电荷在电场中为背景。学生已经知道试探电荷在电场中必定受到静电力作用。那么, 静止的试探电荷在电场中, 必然会在静电力的作用下加速运动, 试探电荷的动能就要增大。这里可以导引两个思考性问题: 一是, 什么力做功使试探电荷的动能增大? 二是, 什么形式的能转化为试探电荷的动能?

学生应该能够回答第一个问题, 是静电力做功使试探电荷的动能增大。于是就可以利用图 1-12 研究静电力做功的问题:

① 试探电荷在匀强电场中沿直线由 A 运动到 B, 静电力做多

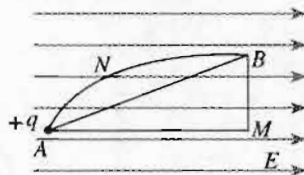


图 1-12

少功。

②试探电荷在匀强电场中沿折线由 A 经过 M 再运动到 B，静电力做多少功。

③试探电荷在匀强电场中沿曲线 ANB 运动到 B，静电力做多少功。

①和②的问题可以由学生自己解决。而③的问题比较复杂，需要引导学生把曲线分成很多小段，小到分割后的每一段曲线都可以看做直线。这样，电荷沿每一小段直线移动静电力做功都可以求出，每小段做功的代数和就是整个过程中静电力做的功。

结论：在匀强电场中移动电荷时静电力做功与电荷经过的路径无关，即 $W = qE|AM|$ 。把这一结论推广到一般电场中去的证明超出了中学物理的要求，所以不必深究。

(2) 电势能

静电力做功与重力做功有共同的特点——所做的功与路径无关。这种相似性启发我们把静电力与重力进行类比。学生已经知道，重力做功必然引起重力势能的变化，所以容易想到静电力做功必然引起相应的能量变化。物体在地球周围时处于地球产生的重力场中，重力场中的物体具有重力势能，与此类似，电场中的电荷应该具有电势能。

建立电势能的概念为什么要讨论静电力做功的问题。这是因为，各种势能都是空间点的函数，即一个点对应一个确定的值，如果做不到，就不可能定义某种势能。分析某种力做功的特点，就能知道是否“一个点对应一个确定的值”。我们不妨假设电荷从电势能为 0 处沿不同路径移动到电场中另一点 P，如果移动电荷时静电力做的功不同，那么，同一电荷在同一点 P 的“势能”就不同，这样，P 点的“势能”就没有了确定的意义，所以，也就不能建立电势能的概念。

强调这些，目的是使学生对势能有清晰的认识。《物理必修 2》中的重力势能就是这样处理的，学习电势能时还是采用同样的做法。教科书这样设计，目的不仅仅是传授知识本身，还要渗透科学价值观的教育，即说话、做事要讲道理，要合乎逻辑。

那么，电势能的大小由什么决定呢？电势能的大小应该是由电荷与电场的相对位置决定的。同一电荷在电场中同一点的电势能应该具有确定的值。电荷在静电力作用下加速运动时，增加的动能就是由电势能转化来的。前述的第二个问题也就有了答案。

这里需及时将电势能与重力势能进行比较，以加深对电势能的理解。

①重力势能属于地球和物体组成的系统；电势能属于电荷和电场组成的系统。

②重力势能的大小具有相对性，物体在某点的重力势能等于把物体从该点移动到零势能位置时重力做的功；电势能的大小也具有相对性，电荷在某点的电势能等于把电荷从该点移动到零势能位置时静电力做的功。

③重力做的功等于重力势能的减少量；静电力做的功等于电势能的减少量。

应该指出：静电力做功比重力做功的情况复杂。因为地球产生的重力场对物体只能产生引力，但场源电荷产生的电场对电荷既可以产生引力，也可以产生斥力，导致静电力做功的情况较为复杂。教学的重点要突出重力做的功等于重力势能的减少量，即 $W_{GAB} = E_{GPA} - E_{GPB}$ ；静电力做的功等于电势能的减少量，即 $W_{AB} = E_{PA} - E_{PB}$ 。

另外，如果第 1 课时只讲授静电力做功的特点和电势能，补充以下三道习题加以巩固。

习题 1 有一电荷量 $q = -3 \times 10^{-6} \text{ C}$ 的点电荷，从电场中的 A 点移到 B 点时，克服静电力做功 $6 \times 10^{-4} \text{ J}$ ，从 B 点移到 C 点时静电力做功 $9 \times 10^{-4} \text{ J}$ 。问：

①以 B 为零势能点，电荷在 A 点时的电势能 E_{PA1} 是多少？

②如选取 C 点的电势能为 0，则电荷在 A 点时的电势能 E_{PA2} 又是多少？

分析：



①以 B 为零势能点, 电荷由 A 移向 B 的过程中, 静电力做功 $-6 \times 10^{-4} \text{ J}$, 即 $W_{AB} = -6 \times 10^{-4} \text{ J}$ 。根据 $W_{AB} = E_{pA1} - E_{pB}$, 得 $E_{pA1} = -6 \times 10^{-4} \text{ J}$ 。

②以 C 为零势能点, 根据 $W_{AC} = E_{pA2} - E_{pC}$, 因为电荷从 A 移动到 C , 静电力做功 $W_{AC} = W_{AB} + W_{BC} = [(-6) + 9] \times 10^{-4} \text{ J} = 3 \times 10^{-4} \text{ J}$, 所以 $E_{pA2} = 3 \times 10^{-4} \text{ J}$ 。

习题 2 将一个 $-7.0 \mu\text{C}$ 的电荷从无限远处移动到图 1-13 所示的电场中的 A 点时, 电荷的电势能为 $-140 \mu\text{J}$, 问此过程中静电力做功多少?

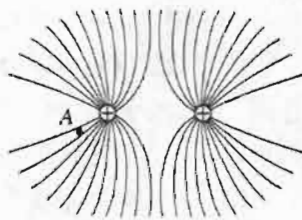


图 1-13

分析: 设无穷远处为 N 点, 尽管我们不知道电荷是怎样移动到 A 点的, 但根据静电力做功与路径无关, 有 $W_{NA} = E_{pN} - E_{pA}$, 而无穷远处 N 的电势能等于 0, 故: $W_{NA} = -E_{pA} = 140 \mu\text{J}$ 。

习题 3 图 1-14 甲是等量异号点电荷的电场线分布图, 乙是等量同号点电荷的电场线分布图。AOB 是两点电荷的连线的垂直平分线, O 是连线的中点。

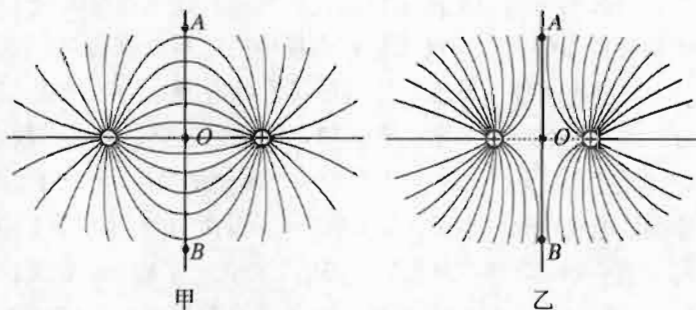


图 1-14

①在甲图中, 把单位正试探电荷从 O 点沿 OA 移动到无限远处, 静电力是否做功? 电势能是否变化? 怎样变化?

②在乙图中, 把单位正试探电荷从 O 点沿 OA 移动到无限远处, 静电力是否做功? 电势能是否变化? 怎样变化?

分析:

①在甲图中, 因为静电力与位移方向始终垂直, 静电力不做功, 所以电荷的电势能不变;

②在乙图中, 静电力做正功, 因为静电力方向沿 OA 方向, 与位移方向一致, 所以电势能变小。

(3) 电势

教科书在定义电势之前直接与定义电场强度进行类比, 开门见山地提出要找电势能与电荷量的比值。再通过计算电荷在电场两点间移动时静电力做的功, 证实试探电荷在电场中同一点的电势能与它的电荷量成正比, 所以把电荷在电场中某点的电势能与它的电荷量的比值定义为这一点的电势, 即 $\varphi = \frac{E_p}{q}$ (应用这一定义式时正负号也带入一起运算)。

也可以像定义电场强度之前那样, 设试探电荷 q 在电场中某点 A 的电势能是 E_{pA} , 那么电荷量为 $2q$ 的试探电荷在 A 点的电势能是多少? (可以想像为两个电荷量均为 q 的试探电荷都放在 A 点时共有多少电势能) 从中发现电势能这个物理量不仅与电场性质有关, 还与试探电荷的电荷量有关。所以, 电势能不能用来描述电场的性质。我们应该寻找一个物理量, 这个物理量应与试探电荷无关, 仅仅由电场的性质决定。

以前我们遇到这种情况是怎么处理的? 在讨论这些问题的过程中, 通过师生互动、同伴交流加深对比值定义物理量的体验, 由此得出电势的定义式。

电势概念的形成需要明确以下几个问题:

①它是描述电场性质的又一重要物理量。

②明确电势与电场强度的区别与联系。电场强度是矢量；电势是标量。电场强度可以与空间的一点相联系，不管在这点上是否真有试探电荷存在与否。

③确定电势零点。应用中常常选取大地为电势零点，理论研究中选取无限远为电势零点，然后确定电场中其他各点的电势。由此明确电势取正值和取负值的意义。

④电场线指向电势降低的方向。

教科书“思考与讨论”栏目中的问题起到了巩固提高的作用。结合课本图 1.4-4，把试探电荷换成负电荷，组织学生讨论：静电力做的功是多少？负电荷在 A 点的电势能是多少？电势能与电荷量的比值又是多少？

讨论中可以发现，负电荷从 A 移动到 O 静电力做功 $W = -|q|E_{\text{场}}l\cos\theta$ ；负电荷在 A 点的电势能是 $E_{\text{pA}} = -|q|E_{\text{场}}l\cos\theta$ ；电势能与电荷量的比值是 $\frac{-|q|E_{\text{场}}l\cos\theta}{-|q|} = E_{\text{场}}l\cos\theta$ 。可见，在此过程中，电势没有改变。

这样的讨论可以加深理解“电势与试探电荷无关，而电势能与试探电荷有关”的结论。

另外，沿着电场线方向移动负电荷，静电力做负功，电势能增加，电势逐渐降低；沿着电场线方向移动正电荷，静电力做正功，电势能减少，电势逐渐降低。于是得到“电场线指向电势降低的方向”的结论。

这样的讨论能够增强学生思维的严密性和全面性。

(4) 等势面

教科书运用与地理课中学过的等高线进行类比的方法引出了等势面的概念。为了提高学生的空间想像能力，可以组织学生讨论点电荷产生的电场的等势面是什么形状，匀强电场的等势面是什么形状，等等。建议向学生介绍几种典型的电场的等势面分布图。如，两等量同号点电荷电场以及两等量异号点电荷的电场中的等势面形状。这对理解等势面与电场强度的关系是十分有益的。

电场线与等势面一定垂直。教科书运用反证法对这个问题进行了论证。反证法是科学研究中重要的逻辑方法，应该由学生举些他们熟悉的应用反证法的例子，加深学生对这种方法的理

解。要组织学生研究课本图 1.4-5。我们知道，同一图中电场线的疏密程度可以反映电场强度的强弱；反过来，等势面的疏密是否也可以描述电场的强弱呢？对于物理学习水平较高的学生，可以适当介绍一些电场线和等势面的知识，帮助学生加深对电场性质的认识，同时渗透物理学研究方法。

3. 问题与练习

内容分析

本节练习共 7 道题，都是围绕电势能的计算、电势高低的判断和电场线、等势面的应用展开，大部分问题很新颖，对巩固基本概念十分有益。特别是关于重力势表达式的推导，不失时机地使学生感悟科学研究中的比值定义方法，体现了新课程注重培养学生科学素养的导向。

第 1 题巩固电势和电势能的计算。

第 2 题根据试探电荷的电性和电势能的大小判断电势的高低。

第 3 题应用电场线判断电势的高低。

第 4 题推导重力势的表达式，培养学生的知识迁移能力。

第5题以表格的形式研究正、负场源电荷产生的电场中电势的分布和正、负试探电荷在上述电场中的电势能正、负号,以及电势和电势能的变化情况,这个问题要求较高。

第6巩固反证法的应用。

第7题培养学生根据等势面判断静电力做功和描绘电场线的能力。

解答与说明

$$1. \varphi_A = \frac{E_{PA}}{q} = \frac{6 \times 10^{-8}}{4 \times 10^{-9}} \text{ V} = 15 \text{ V}; E_{PA} = q_2 \varphi_A = 2 \times 10^{-10} \times 15 \text{ J} = 3 \times 10^{-9} \text{ J}.$$

2. 根据试探电荷的电势能来判断电场中两点电势的高低。

$$(1) \varphi_A = \frac{E_{PA}}{q}, \varphi_B = \frac{E_{PB}}{q}. \text{ 因为 } E_{PA} > E_{PB}, \text{ 所以 } \varphi_A > \varphi_B, \text{ 可见 } A \text{ 点电势比 } B \text{ 点高.}$$

$$(2) \varphi_C = \frac{E_{PC}}{-q} = -\frac{E_{PC}}{q}, \varphi_D = \frac{E_{PD}}{-q} = -\frac{E_{PD}}{q}, \text{ 因为 } E_{PC} > E_{PD}, \text{ 所以 } \varphi_C < \varphi_D, \text{ 故 } D \text{ 点电势比 } C \text{ 点高.}$$

$$(3) \varphi_E = \frac{E_{PE}}{q} < 0, \varphi_F = \frac{E_{PF}}{-q} = -\frac{E_{PF}}{q} > 0, \text{ 可见 } \varphi_F > \varphi_E, \text{ 故 } F \text{ 点的电势比 } E \text{ 点高.}$$

小结:

第(1)问表明在电场中,同一正试探电荷的电势能越大的点,电势越高;同一正试探电荷在电势越高的点,电势能越大。

第(2)问表明在电场中,同一负试探电荷的电势能越大的点,电势越低;同一负试探电荷在电势越高的点,电势能越小。

第(3)问表明正的试探电荷电势能为负值的点的电势小于负的试探电荷电势能为负值的点的电势。

3. 根据电场线判断电场中两点电势的高低。

(1) 沿着电场线的方向,电势是逐渐降低的,所以M点的电势比N点高。

(2) 先假设正试探电荷从M点沿着与电场线始终垂直的路径移动到与P点在同一条电场线上的M'点,这一过程静电力不做功。再把这一电荷从M'移动到P点,全过程静电力做正功。所以,从M点移动到P点静电力做正功,电势能减少, $\frac{E_{PM}}{q} > \frac{E_{PP}}{q}$, M点电势比P点电势高。

$$4. \text{ 因 } E_p = mgh, \text{ 故 } \varphi = \frac{E_p}{m} = gh, \text{ 可见重力势为 } gh.$$

5.

场源电荷	P点电势 φ_P 的正负	+q在P点的电势能 E_{+q} 的正负	-q在P点的电势能 E_{-q} 的正负	当P点移至离场源电荷较近时		
				φ_P 怎样变化	E_{+q} 怎样变化	E_{-q} 怎样变化
+Q	正	正	负	升高	变大	变小
-Q	负	负	正	降低	变小	变大

6. 假设两个电势不同的等势面相交。因为空间任一点的电势只能有一个唯一的值,所以相交处的电势就一定相等,这两个等势面的值就不能不同,这与题设条件矛盾。所以,电场中两个电势不同的等势面不能相交。

7. 根据电场线与等势面一定垂直的结论,画出的电场线的大致分布如图1-15所示。

因为 $\varphi_A = \varphi_B = 10 \text{ V}$, $\varphi_C = 6 \text{ V}$, 取 $q = 1 \text{ C}$, 可得静电力所做的功为

$$W_{AB} = q\varphi_A - q\varphi_B = q(\varphi_A - \varphi_B) = 0$$

$$W_{AC} = q\varphi_A - q\varphi_C = q(\varphi_A - \varphi_C) = 1 \times (10 - 6) \text{ J} = 4 \text{ J}$$

$$W_{BC} = q\varphi_B - q\varphi_C = q(\varphi_B - \varphi_C) = 1 \times (10 - 6) \text{ J} = 4 \text{ J}$$

可见, 静电力所做的功 $W_{AC} = W_{BC}$ 。

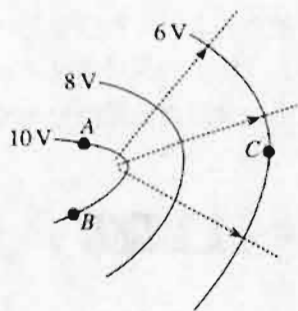


图 1-15

第 5 节 电势差

1. 教学目标

- (1) 理解电势差的概念, 知道电势差与电势零点的选择无关。
- (2) 掌握两点间电势差的表达式, 知道两点之间电势差的正负号与这两点的电势高低之间的对应关系。
- (3) 知道在电场中移动电荷时静电力做功与两点间电势差之间的关系, 会应用静电力做功的公式进行相关的计算。

2. 教材分析与教学建议

本节内容以电势的概念为起点, 再次运用类比的方法, 把电势差与高度差进行类比引入电势差的概念。同时, 得出电势差与电势零点的选择无关。在物理学中, 特别是在技术应用方面常用到的是电势差的概念, 电势差往往比电势更有意义。

本节内容的重点是静电力做功公式 $W_{AB} = qU_{AB}$ 的推导和该公式的具体应用。本节内容的难点是静电力做功公式中正负号的应用与正负号的物理意义。

教学中把地理位置中两点间的高度差与电场中两点间的电势差进行比较, 得到高度和电势都具有相对性, 与参考点的选取有关, 但高度差和电势差却保持不变 (与参考点的选取无关)。因此, 在解决实际问题时, 电势差比电势更方便。

学习电势差概念时需注意的几个问题:

①在学习电势差的表达式 $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$ 和 $U_{BA} = \varphi_B - \varphi_A$ 时, 应该注意下标的使用规则和正负号表示的物理意义。电势差也叫做电压, 在很多场合电压不带正负号。

②静电力做功公式的推导依据是“静电力做功等于电势能的减少量。”推导的过程: $W_{AB} = E_{pA} - E_{pB} = q\varphi_A - q\varphi_B = q(\varphi_A - \varphi_B)$, 所以有 $W_{AB} = qU_{AB}$ 。应用这一公式时, W_{AB} 可正可负, U_{AB} 可正可负, q 也是可正可负的。所以, 必须和学生一起讨论这三个物理量取正号与取负号的物理意义。

W_{AB} 取正号表示静电力做正功; U_{AB} 取正号表示 A 点电势高于 B 点电势; q 取正号表示试探电荷是正电荷。

反过来, W_{AB} 取负号表示静电力做负功; U_{AB} 取负号表示 A 点电势低于 B 点电势; q 取负号表示试探电荷是负电荷。

③引入电势差的概念, 使得静电力做功的计算十分方便, 不必考虑静电力的大小和电荷移动的路径。特别是当静电力是变力时, 静电力做功不能用 $W = Eq l \cos \alpha$ 来计算, 只能用 $W_{AB} = qU_{AB}$ 来计算。同时, 用电势差来计算静电力做功时, 公式中各物理量可以取绝对值, 静电力

做功的正负要根据电荷移动的方向与所受静电力方向的具体情况来判定。

为了加深理解电势具有相对性，电势差与零电势点的选取无关的性质，建议在讲授教科书中的例题之前先讨论如图 1-16 所示的问题。



教学片段

电势差问题讨论

问题导引：在图 1-16 中，如果 B 板接地（取大地的电势为 0，则与大地相连的导体的电势也为 0），则 A 点电势为 8 V，M 点的电势为 6 V，N 点电势为 2 V，M、N 两点间的电势差是多少伏？如果改为 A 板接地，问：B 板的电势是多大？M、N 两点的电势各为多大？M、N 两点的电势差是多少伏？

分析：B 板接地时，M、N 两点间的电势差

$$U_{MN} = \varphi_M - \varphi_N = (6 - 2) \text{ V} = 4 \text{ V}$$

如果改为 A 板接地，则 A 板的电势等于 0，已知 A 板的电势比 B 板高 8 V，所以 B 板的电势等于 -8 V；M 点的电势比 A 板低 2 V，所以 M 点的电势为 -2 V；N 点的电势比 A 板低 6 V，所以 N 点的电势为 -6 V；M、N 两点之间的电势差

$$U_{MN} = \varphi_M - \varphi_N = [-2 - (-6)] \text{ V} = 4 \text{ V}$$

可见，由于选择了不同的零电势点，A、B、M、N 各点的电势值都不同，但 M、N 两点间的电势差是不变的。

可以让学生自己验证任意两点间的电势差都是不变的。

教科书中设置的例题，其目的在于训练学生在认识静电力做功与电势差的关系时，进一步理解 W_{AB} 、 U_{AB} 、 q 三个物理量正负号的运用，提高其判断能力。

3. 问题与练习

内容分析

本节练习题围绕静电力做功和电势高低两个基本问题设置。这对巩固基本概念十分有利。

第 1 题通过计算巩固静电力做功公式的应用和正负号意义的理解，同时复习了电势能的变化。

第 2 题关键是理解“一个电子经过 1 V 电压加速后所增加的动能”这句话。要求学生既要知道元电荷概念，又要知道静电力做功公式，还要知道动能定理（不要求出动能）。这是一道好题目，不能只是布置学生记住换算的数值。

第 3 题定性回答问题，对巩固概念十分有益。

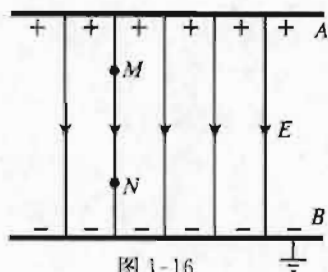
解答与说明

1. $W_{AB} = qU_{AB} = -2 \times 10^{-2} \times 20 \text{ J} = -4 \times 10^{-8} \text{ J}$ 。静电力做负功，电势能增加 $4 \times 10^{-8} \text{ J}$ 。

2. 一个电子的电荷量 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，电子增加的动能等于静电力做的功，则

$$W = qU = 1e \times 1 \text{ V} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

所以 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。



3. 因为电场线总是由电势高的等势面指向电势低的等势面, 所以, 由课本图 1.5-2 可知:
 (1) B 点的电势高于 A 点的电势, 把负电荷从 A 移到 B 静电力做正功, 电势能减少, 负电荷在 A 点的电势能较大。

(2) 负电荷从 B 移动到 A 时, 静电力做负功。

(3) $U_{AB} < 0$, $U_{BA} > 0$ 。

第 6 节 电势差与电场强度的关系

1. 教学目标

(1) 知道在匀强电场中电势差与电场强度的定量关系, 掌握表达两者关系的公式。

(2) 知道电场强度另一个单位“伏特每米”的物理意义。

2. 教材分析与教学建议

电场强度和电势都是描述电场性质的物理量, 两者从不同角度对电场性质进行描述。虽然前者是矢量, 后者是标量, 但通过静电力做功在两者之间建立了联系。对于一般的电场, 学生只要定性了解电势差与电场强度的关系就可以了。对于匀强电场, 可以要求了解它们的定量关系式, 即在匀强电场中推导出电场强度与电势差之间的关系公式, 并通过公式变形, 用比值的方法指出电场强度在数值上等于沿电场方向每单位距离上降低的电势。这在分析问题时是很有用的。

本节内容的重点是匀强电场中两点间的电势差等于电场强度与这两点沿电场方向的距离的乘积。同样, 本节内容的难点是电场强度的大小为什么等于两点间电势差与这两点沿电场方向的距离的比值问题。

(1) 电势差与电场强度的关系

既然电场强度和电势都是描述电场性质的物理量, 那么, 两者之间肯定有联系, 两者间的关系建议按以下顺序展开。



教学片段

电势差与电场强度的关系

①复习电场强度和电势的概念(电场强度是试探电荷受到的静电力与它的电荷量的比值; 电势是电势能与试探电荷电荷量的比值)。比较可以发现, 两者的共同媒介是试探电荷, 可否通过研究试探电荷将电场强度与电势联系起来?

②研究试探电荷在电场中移动的问题。从最简单的情况入手, 即用正试探电荷在匀强电场中沿电场线方向从 A 移动到 B , 见课本图 1.6-1。从恒力做功的角度计算静电力在此过程中做的功, $W_1 = Fl \cos \alpha = qEd$; 从静电力做功公式计算此过程做功, $W_2 = W_{AB} = qU_{AB}$ 。在同一电场的两点间移动同一电荷, 静电力做功应该相等。由 $W_1 = W_2$, 得 $qEd = qU_{AB}$, $U_{AB} = Ed$ 。这里 E 和 d 分别表示电场强度的大小和两点间距离的大小, E 和 d 都是正值, 但 U_{AB} 却可正可负, 如果不考虑 U_{AB} 的正负, 把 U_{AB} 的下标去掉(理解为两点间电压, 用 U 表示), 故有 $U = Ed$ 。

③公式 $U=Ed$ 的物理意义是：匀强电场中两点间的电势差等于电场强度与这两点间沿电场方向的距离的乘积。这是本节内容的重点。

④注意： $E=\frac{U}{d}$ 不是 $U=Ed$ 简单的变形，这一变形有丰富的物理内涵。 $E=\frac{U}{d}$ 的物理意义是：电场强度的大小等于两点间的电势差与这两点间沿电场方向的距离的比值。这一比值在非匀强电场中也有意义，它表示两点间的平均电场强度。这是本节内容的难点。

对于学有余力的学生，可以引导他们把 $E=\frac{U}{d}$ 与速度定义式 $v=\frac{\Delta x}{\Delta t}$ 进行比较，指出速度是位置对时间的变化率，而电场强度是电势对空间位置的变化率。位置随时间变化得越快，则速度越大；电势随空间位置变化得越快，则电场强度越强。这样的比较对于理解比值定义物理量的实质是有帮助的。

(2) “思考与讨论”栏目的教学

教科书“思考与讨论”栏目的设计，不是为了学习新知识，而是要求对刚刚讨论的电势差与电场强度的关系问题进行更加深入的研讨。即，将前述特殊条件下得来的结论，推广到更一般的情况。这对于学生理性思维的训练以及科学研究方法的渗透都是十分有益的。

建议利用课本图 1.6-2 引导学生开展讨论。

电荷 q 从 A 点移动到 B 点（课本图 1.6-2），电荷所受的静电力做的功为 $W=qEl\cos\theta=qEd$ 。另外，静电力所做的功与 A、B 两点间的电势差的关系为 $W=qU_{AB}=qEd$ 。可见， $U=Ed$ 和 $E=\frac{U}{d}$ 都可以适用（只要 d 仍然表示 A、B 两点沿电场方向的距离）。

同时，还可以证明电场强度的单位牛顿每库仑与伏特每米是相同的。

利用图形研究电势差与电场强度的关系有形象直观、印象深刻、不易遗忘的优点，并且，在研究图形的过程中可以加深对公式的理解。教科书中没有这方面的内容，这里我们以一个例题的形式进行图形研究。（仅供参考，请教师根据学生情况决定是否使用这个例题）



教学片段

利用图形研究电势差与电场强度的关系

如图 1-17，以点电荷 $+Q$ 为圆心（球心）画同心圆（同心球面），半径之比为 1:2:3，试回答下列问题：

问题导引 1：A、B 两点间的电势差与 B、C 两点间的电势差是否相等？说明理由。

分析：A、B 两点间的电势差与 B、C 两点间的电势差不相等。原因是，由正点电荷的电场线分布可知，沿着 QABC 的方向，电场强度越来越弱。现在假设有正试探电荷 q 先从 A 移动到 B，再由 B 移动到 C。在此过程中，只能用 $W_1 = Fl\cos\alpha = qEd$ 计算静电力做的功。但是，这里的静电力是个变力，我们只好把 AB 和 BC 分割成许多小段，这样，每一小段上的静电力都可以看做是恒力，再把各小段上静电力做的功相加得到由 A 移动到 B 和由 B 移动到 C 静电力做的功了。因为由 B 移动到 C 的静电力总是小于由 A 移动到 B 的静电力，所以 $W_{AB} > W_{BC}$ 。从另一角度看， $W_{AB} =$

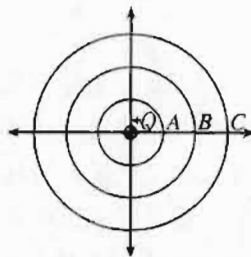


图 1-17

qU_{AB} 适用于任何电场, 所以 $qU_{AB} > qU_{BC}$, 故 $U_{AB} > U_{BC}$ 。

问题导引 2: 在图 1-17 中允许 A、B、C 三点在电场线上移动, 并且要求 $U_{AB} = U_{BC}$, 你能判断线段 AB 与线段 BC 的大小关系吗?

分析: 如果要求 $U_{AB} = U_{BC}$, 则应该 $AB < BC$ 。

理由是: 如果把正试探电荷 q 从 A 移动到 B, 再由 B 移动到 C, 因 $U_{AB} = U_{BC}$, 故 $W_{AB} = W_{BC}$ 。但 AB 段的静电力大于 BC 段的静电力, 所以 A、B 间的距离应该小于 B、C 间的距离。

问题导引 3: 图 1-18 甲中两相邻的同心圆之间的电势差相等, 乙图表示电势降落的情况。看图说一说电势在哪些地方降落得快, 哪些地方降落得慢。

分析: 在离场源电荷较近的地方 (也就是电场强度强的地方) 电势降落得快, 在离场源电荷较远的地方 (也就是电场强度弱的地方) 电势降落得慢。该图形象地说明电场强度的大小反映电势随空间位置变化的快慢。

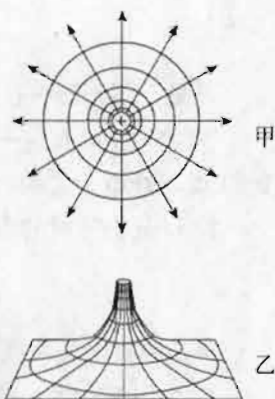


图 1-18

3. 问题与练习

内容分析

习题设置重点围绕电场强度与电势差的关系问题。有平行板电容器内部电场强度的计算、静电力大小的计算、静电力做功的计算和电势大小的计算, 还有应用类比法判断电势降落快慢的练习。其中注意兼顾知识与技能训练和科学方法的练习。

第 1 题练习静电力的大小和静电力做功的计算。

第 2 题巩固公式 $U = Ed$ 的应用, 同时体会电势的相对性和电势差的不变性, 并且, 重温静电力做功与路径无关。

第 3 题结合生活实际讲了空气击穿现象。做过这样的练习题后, 应该告诉学生, 雷击就是空气被击穿的现象, 并且要知道击穿电压的数量级高达 10^6 V 的常识。

第 4 题要求通过与地理课中学过的等高线类比, 体会电场强度强的地方是电势降落得快的地方。这类习题对拓宽知识面, 培养知识迁移能力有较强的效能, 教师应该高度重视。

解答与说明

$$1. \text{ 两板间的电场强度 } E = \frac{U}{d} = \frac{9.0 \times 10^3}{10 \times 10^{-2}} \text{ V/m} = 9.0 \times 10^4 \text{ V/m}.$$

$$\text{尘埃受到的静电力 } F = qE = 1.6 \times 10^{-17} \times 9.0 \times 10^4 \text{ N} = 1.4 \times 10^{-12} \text{ N}.$$

$$\text{静电力对尘埃做功 } W = Fd' = 1.4 \times 10^{-12} \times 0.5 \times 10 \times 10^{-2} \text{ J} = 7.0 \times 10^{-14} \text{ J}.$$

2. 根据 $U = Ed$ 公式解答下列问题。

(1) 看电场线方向知, D 点电势比 C 点电势高, 有

$$U_{CD} = Ed_{CD} = 2 \times 10^4 \times (-5) \times 10^{-2} \text{ V} = -1\,000 \text{ V}$$

(2) B 板接地时

$$\varphi_C = Ed_{CB} = 2 \times 10^4 \times 3 \times 10^{-2} \text{ V} = 600 \text{ V}$$

$$\varphi_D = Ed_{DB} = 2 \times 10^4 \times 8 \times 10^{-2} \text{ V} = 1\,600 \text{ V}$$

$$U_{CD} = \varphi_C - \varphi_D = -1\,000 \text{ V}$$

A 板接地时

$$\varphi_C = Ed_{CA} = 2 \times 10^4 \times (-7) \times 10^{-2} \text{ V} = -1\,400 \text{ V}$$

$$\varphi_D = Ed_{DA} = 2 \times 10^4 \times (-2) \times 10^{-2} \text{ V} = -400 \text{ V}$$

$$U_{CD} = \varphi_C - \varphi_D = [-1\,400 - (-400)] \text{ V} = -1\,000 \text{ V}$$

可见, 不管哪一板接地, U_{CD} 都是 $-1\,000 \text{ V}$ 。

(3) $W_{CD} = eU_{CD} = -1.6 \times 10^{-19} \times (-1\,000) \text{ J} = 1.6 \times 10^{-16} \text{ J}$, 如果电子先移到 P 点再移到 D 点, 静电力做的功不会改变。这是因为静电力做功与路径无关, 只与初末位置有关。

3. 空气击穿时的电势差 $U = Ed = 4 \times 10^4 \text{ V}$, $d = 1.3 \times 10^{-2} \text{ m}$, 所以

$$E = \frac{U}{d} = \frac{4 \times 10^4}{1.3 \times 10^{-2}} \text{ V/m} = 3.1 \times 10^6 \text{ V/m}$$

雷击就是一种空气被击穿的现象。

4. 小山坡 b 比 a 地势更陡些, 小石头沿 b 边滚下加速度更大些。 b 边电势降落比 a 边降落得快, b 边的电场强度比 a 边强。可见, 电势降落得快的地方是电场强度强的地方。

第7节 静电现象的应用

1. 教学目标

- (1) 通过对静电场中导体的自由电荷运动情况的讨论, 了解静电平衡的概念, 知道处于静电平衡的导体的特征。
- (2) 通过实验了解静电平衡时带电导体上电荷的分布特点。
- (3) 了解尖端放电和静电屏蔽现象, 关注生活、生产中的静电现象。

2. 教材分析与教学建议

本节的主要概念是静电平衡, 掌握静电平衡的概念, 理解静电平衡的特征是本节的重点。应用静电平衡知识, 认识导体的电荷分布特点、尖端放电现象、静电屏蔽现象是本节的难点。做好演示实验是这节课的关键。

金属导体放在电场中, 达到静电平衡状态是一个非常快的过程, 但是对这一过程的分析却十分重要。一定要带领学生共同讨论这一过程, 使他们明白自由电荷不再定向移动的条件。这样做不仅突出了重点, 也为突破难点打下基础。

带电导体的电荷分布的两个特点对于学生来说是十分深奥的问题, 必须通过实验才能加深认识。

静电屏蔽现象以及静电屏蔽的应用都必须做好演示实验。

(1) 静电平衡状态下导体的电场

教科书一开始就给出一个情景——把不带电的金属导体 $ABCD$ 放到电场强度为 E_0 的电场中, 教师根据这一情景引导学生展开讨论。



教学片段

静电平衡状态下导体的电场的讨论

- ① 金属导体的微观结构如何?
- ② 自由电子怎样移动?

- ③ 自由电子会在什么地方积聚?
- ④ 电子的积聚会出现怎样的结果?
- ⑤ 最终会出现怎样的现象?

最终出现的现象是:导体内的自由电子不再定向移动。由此得出,导体内自由电子不再定向移动的状态叫做静电平衡状态。

这样的讨论可以起到温故知新的作用,学生的认识也比较深刻。

有了静电平衡的概念,静电平衡的两个特征也容易推出。

第一,处于静电平衡的导体内部的电场强度处处为0。

第二,处于静电平衡的整个导体是个等势体,它的表面是个等势面。

第一个特征是由静电平衡的定义决定的。教科书再次运用反证法,证明了这一问题。第二个特征应用了上节课关于电场强度与电势差的关系。因为 $U=Ed$,所以,在电场强度处处为0的空间里任意两点间的电势差为0。(电场强度处处为0则电势对空间位置的变化率处处为0,空间各点的电势都相等)

地球可以视为一个大导体,因为地球的电容很大,它的电荷量的有限变化不会引起它的电势明显变化,所以我们可以把大地选做零电势点。

(2) 导体上电荷的分布与尖端放电

假如导体内部有电荷,导体内部的电场强度就不可能为0。理解这句话要根据电场线是“从正电荷出发终止于负电荷”的特征,有电荷的地方必定有电场,有电场的地方电场强度必定不为0。

导体的表面越尖锐的位置电荷的密度越大。关于这一点,除教科书举的缝衣针例子外,还可以请学生看课本图1.4-5乙。从这幅图中可以看到尖端位置的电荷密度比较大。

知道了导体尖锐的位置电荷密度大,就应该知道尖端附近的电场线密集(因为电场线是从正电荷出发终止于负电荷的,所以,电荷密度大的地方电场线必定密集),尖端附近的电场强度很强就容易理解了。

可以对尖端放电的过程作出形象的比喻:由于尖端的电荷密度大,电荷在尖端十分拥挤,不断地有些电荷被排挤出去。这样,缓慢地、不间断地放电就可以避免火花放电。尖端放电与火花放电可以用感应圈进行实验对比。感应圈两边全用金属球,电压加到一定数值就会出现火花放电;两边加同样的电压、调到同样的距离,但一边换成尖针,就不会出现火花放电现象。

避雷针是尖端放电的应用。避雷的关键是良好接地。做静电实验时,带电导体与大地之间的电压也会很高,如果导体表面有毛刺,也会发生尖端放电(就是我们所说的漏电),所以,实验中带电金属球表面都要十分光滑。高压设备中导体表面要尽量光滑也是这个道理。

电荷的分布不能直接观察,只能通过实验间接推知。所以,做好法拉第圆筒实验是研究导体上电荷分布的关键。同时也为接下来的静电屏蔽作了铺垫。

做好法拉第圆筒实验的注意事项有:

①验电器A和B都要有良好的绝缘,灵敏度都要高。

②验电器B上方的圆筒宜大一点,这样带的电荷量可以多一点。如果没有现成的仪器,可以用易拉罐代替,用起电器使圆筒带电,电荷量尽量多一点。

③搬运电荷的金属小球 D 不要太小, 否则每次搬运的电荷量少 (圆筒的开口稍大一点也无妨)。 D 的表面要光滑, 防止漏电。

由法拉第圆筒实验的现象可以得出什么结论? 结论只能是外表面肯定有电荷, 内部几乎没有电荷。但是, 不要因一个实验就得出内部无电荷的结论, 因为这样会让学生觉得作出一个判断性结论很容易。应该再次用反证法证明导体内部不可能有电荷, 使学生认识到实验探究与理论推导密切结合后得到的结论才比较可靠。

(3) 静电屏蔽

教科书在“演示: 研究空腔导体内表面的电荷”基础上, 对静电屏蔽采用了先理论分析后实验验证的方案。

学生已经有了静电感应、静电平衡的知识, 理解静电屏蔽的原因并不难。课本图 1.7-6 的实验已经说明, 金属网罩可以起到静电屏蔽的作用, 之后, 教科书又介绍了高压线屏蔽的方法。这一例子贴近生活, 能够拓宽学生的知识面。如果教师有静电屏蔽的其他例子, 可以再举几个。

值得指出的是, 课本图 1.7-5 和图 1.7-6 两种情景, 都是把外部的电场屏蔽起来不让它影响内部。事实上, 静电屏蔽还有另一种情景, 就是把带电体的电场屏蔽起来不让它影响外部, 图 1-19 就是这种情景的示意图。使用这种方法, 外壳必须接地。图 1-20 与课本图 1.7-6 的实验方法类似。实验时, 只要把接地的金属网罩罩住带电球体, 验电器的指针就会合拢, 就可以演示图 1-19 的情景了。如果把金属网罩的接地线去掉, 验电器的金属箔就会张开。

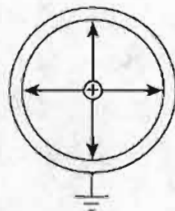


图 1-19

“科学漫步”栏目中的“雷火炼殿”说明, 球形物体可以积累电荷, 产生火花放电。为什么电荷的积累会形成巨大的电势差呢? 因为导体上电荷增加, 导体之间的电场线密度就会增大, 所以, 导体间的电势差就增大。还可以告诉学生, 学完本章第 8 节电容的知识后, 对于这一问题的认识会更加清楚。

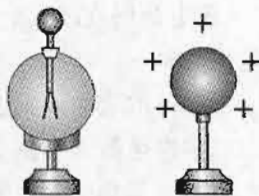


图 1-20

3. 问题与练习

内容分析

本节练习主要围绕静电感应、静电平衡、静电屏蔽和尖端放电等概念设置。习题在知识层面上的分量比较小, 侧重于对静电现象的解释, 体现了教材对生活、生产中的静电现象的关注。

第 1 题主要涉及静电感应规律和静电平衡的特点。其中, 第 (2) 问要求较高, 第 (3) 问考查学生对等势体概念的理解, 但由于变换了设问的角度, 对学生是个很好的考验。

第 2 题与第 6 节的练习题 3 类似。

第 3 题贴近生活, 是尖端放电的一个应用。

第 4 题要求应用静电屏蔽的知识解释超高压带电操作的原理。

解答与说明

1. 根据静电感应规律和静电平衡的特点解答下列问题。

(1) 金属球内的自由电子受到点电荷 $+Q$ 的吸引, 所以在靠近 $+Q$ 的一侧带负电, 在离 $+Q$ 远的一侧带正电。

(2) 在静电平衡状态下, 金属球的内部电场强度处处为 0, 就是说感应电荷产生的电场强

度与 $+Q$ 产生的电场强度等大、反向。在球心处 $+Q$ 产生的电场强度为 $E_+ = k \frac{Q}{9r^2}$ ，所以金属球上感应电荷产生的电场强度大小为 $E_- = k \frac{Q}{9r^2}$ ，方向指向 $+Q$ 。

(3) 如果用导线的一端接触球的左侧，另一端接触球的右侧，导线不可能把球两侧的电荷中和，因为金属球是个等势体，导线连接的是电势相等的两个点，电荷在这两点间不会移动，就像用水管连接高度相等的两个装水容器，水不会在水管内流动一样。

$$2. U = Ed = 3.0 \times 10^6 \times 300 \text{ V} = 9.0 \times 10^8 \text{ V}.$$

3. 点火器的放电电极做成针状是利用尖端放电现象，使在电压不高的情况下也容易点火。验电器的金属杆上固定一个金属球是防止出现尖端放电现象，使验电器在电压较高时也不会放电（漏电）。

4. 因为超高压输电线周围存在很强的电场，带电作业的工人直接进入这样的强电场就会有生命危险。如果工人穿上包含金属丝的织物制成的工作服，这身工作服就像一个金属网罩，可以起到静电屏蔽的作用，使高压电线周围的电场被工作服屏蔽起来，工人就可以安全作业了。

第8节 电容器的电容

1. 教学目标

- (1) 知道电容器的概念，认识常见的电容器，通过实验感知电容器的充、放电现象。
- (2) 理解电容的概念及定义方法，掌握电容的定义公式、单位，并会应用定义式进行简单的计算。
- (3) 通过实验了解影响平行板电容器电容大小的因素，了解平行板电容器的电容公式，知道改变平行板电容器的电容大小的方法。

2. 教材分析与教学建议

电容器是一种重要的电学元件，有着广泛的应用。学生已经学习了研究电容器需要涉及的电势差、电场强度、电荷量等物理量，所以，本节教学的核心是应用静电场的有关知识研究电容器。如何培养学生应用所学知识解决新问题的能力，在这里应该有所体现。

电容的概念是本节的重点，也是难点。电容又是一个用比值定义的物理量，引出这一比值的关键，是要让学生知道电容器所带的电荷量与两极板间的电势差成正比，其比值反映电容器本身的性质。

影响平行板电容器电容大小的因素是本节教学内容的又一难点，做好教科书中的演示实验是突破该难点的好办法。

(1) 电容器

电容器在各种电子仪器中都有广泛的应用，但是学生对电容器并不熟悉，因为他们很少打开用电器观察其中的元件。教学中可以先进行实物展示，让学生认识电容器的外形和两个电极，接着拆开电容器，让学生了解电容器的两块极板和极板之间的介质，介绍时要突出主要构件——极板和介质。这些感性材料对学生了解电容器是十分有益和必要的。

教科书没有对电容器下定义,教师也不必要对电容器下定义,学生能通过实物认识电容器即可。

电容器的充、放电过程是电容器工作的主要形式,也是学生了解电容器的一个载体。如果能创造条件把教科书中电容器充电、放电的示意图(课本图1.8-1和课本图1.8-2)变成演示实验,会使学生对电容器的认识更加具体、更加丰富。例如,可以用一个 $100\ \mu\text{F}$ 以上的电容器、一个灵敏电流表和几节干电池演示电容器的充电和放电过程。实验中需明确的是:

- ①观察充电电流方向与放电电流方向是相反的;
- ②电容器所带电荷量是指一块极板所带电荷量的绝对值;
- ③要分析充电与放电过程的能量转化。

在条件允许的学校,可组织学生用传感器在计算机上观察电容器放电或充电电流的波形。

(2) 电容

教科书指出,充电后的电容器的极板间有电势差,这个电势差跟电容器所带的电荷量有关。实验表明,一个电容器所带的电荷量 Q 与电容器两极板间的电势差 U 成正比,比值 $\frac{Q}{U}$ 是一个常量。但不同的电容器,这个比值一般是不同的。

可见,这个比值表征了电容器储存电荷的特征,反映的是电容器本身的性质。比值越大,表明电容器储存电荷的本领越强。应该说,这是定义电容的出发点,也是学生学习的难点。如何突破这一难点呢?



教学片段1

用定性实验研究电容器所带电荷量与其两极板间电势差的关系

实验设计:分别用 $8\ \text{V}$ 、 $16\ \text{V}$ 电压给一个确定的电容器($25\ \text{V}\ 4\ 700\ \mu\text{F}$)充电,然后再放电。

实验现象:用 $8\ \text{V}$ 电压充电后,让电容器放电,会看到极板间产生橘红色的火星,伴随着放电的声音;而用 $16\ \text{V}$ 电压充电后,让电容器放电,会看到极板间产生白炽的火花,放电的声音更大。

分析:这表明电容器充电电压越大,充得的电荷量越多。对此我们会得到有益的启示:电容器所带电荷量与其两极板间电势差很有可能是成正比关系的。



教学片段2

用类比法帮助学生形成电容的概念

类比:将电容器与柱形水容器进行类比。电荷量 Q 类比于水的体积 V ,电势差 U 类比于水的深度 h 。对于同一电容器, U 越大, Q 越大;对于同一柱形水容器, h 越大, V 越大。

猜测:对于一个给定的柱形水容器而言, V 与 h 的比值为常量,对于一个给定的电容器而言, Q 与 U 的比值也应该为一个常量。

电容器极板上电荷量增加,两极板间的电场强度也会增强,根据电势差与电场强度的关

系, 两极板间的电势差也会增大。猜想毕竟只是猜想, 最后必须通过实验加以证实才行。

教科书直接给出: 实验表明, 一个电容器所带的电荷量 Q 与电容器两极板间的电势差 U 成正比, 比值 $\frac{Q}{U}$ 是一个常量。从而引出电容的概念。

教科书中“做一做”栏目的“用传感器观察电容器的放电过程”的内容采用何种方式进行教学, 教师可自行决定。因为如果跳过去不学, 对后续学习没有直接的影响。但是, 用传感器做实验, 这是一个方向, 教科书写入这些内容, 表示编者的导向。由于各学校的条件和教师的情况不同, 从教学要求来说, 没有把它们当做必学内容。不过, 最好尽量创造条件做一两个这样的实验, 至少可以在学生的兴趣小组中试做, 讨论一下电流随时间变化的 $I-t$ 图象下的“面积”。这样的讨论有利于增强学生利用图象处理问题的能力。如能与电容概念的教学相结合, 则能更好地发挥该实验的作用。

教学片段3

用传感器做定量实验学习电容的概念

运用 DIS 实验进行定量测量, 目的是要证实学生的猜想, 而形成对电容概念的认识。

(具体实验案例见本章教学资源库中相应部分)

设计思路: 电容器是一个形象化的实物, 而其电容是一个十分抽象的概念。教学中先让学生观察金属膜电容器的实物结构, 使学生获取有关电容器的感性认识, 在此基础上, 让学生通过小实验, 了解电容器的工作过程, 即充电和放电过程。再进一步通过 DIS 实验测绘出电容器的放电曲线, 计算图象下围出的“面积”即电荷量, 再比较不同电势差下的电荷量, 从而得出电容的概念。

图 1-21 为实验采用的电路示意图。

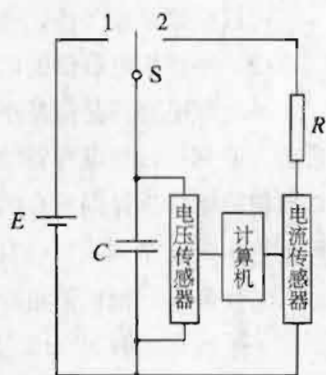


图 1-21

进行实验: 通过 DIS 实验测绘出电容器的放电曲线。即, 用电流传感器将捕捉到的瞬间电流 I 的变化通过数据采集器与计算机连接, 直接在屏幕上显示出电流 I 随时间 t 的变化图象。实验电路如图 1-22 所示。

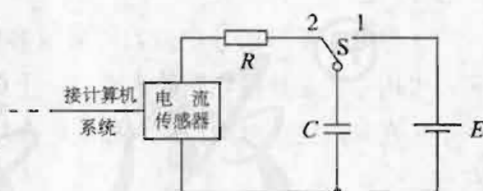


图 1-22

收集数据: 通过计算, 分别求出 4 次以上实验中电容器充电后所带的电荷量, 填写在下列表格中。

	1	2	3	4	...
电荷量 Q					
电压 U					

分析论证:

①结合获得的 $I-t$ 图象, 引导学生从理论上分析图象下面所围出的“面积”的物理意义。

在此过程中,可借鉴 $v-t$ 图象中获得的经验,“面积”的计算可借鉴测定分子直径的实验中获得的经验。

②通过对上述问题的分析和计算我们不难得到,对同一电容器而言,在实验误差范围内, $\frac{Q}{U}$ 是一个常量。

小结:这个比值反映的是电容器本身的性质,即电容器储存电荷的能力。在此基础上给出电容的定义式 $C = \frac{Q}{U}$ 。

有时间的话还可以换一个其他容量的电容器进行实验,得到不同的电容器 $\frac{Q}{U}$ 的比值不同。

下面谈一谈设计以上三个教学片段的基本思路。

教学片段1关注学生知识的生成过程,但由于所做的实验是定性实验,无法得出定量结论。不过,它的功能是为认识、理解电容的概念提供重要的铺垫和启示。

教学片段2用类比法一定程度上降低了学生理解电容概念的难度,但缺乏充分的证据。

教学片段3的效果良好,但需要一定的教学设备和时间。

可以根据学校条件,选择适当的方法,帮助学生理解电容的概念。

(3) 平行板电容器的电容

平行板电容器是最基本的电容器,研究平行板电容器的电容对理解电容的定义也有很大的帮助。研究平行板电容器的关键是演示实验。实验采用的控制变量法学生不难理解,困难在于如何使静电计指针偏角有明显的变化(可以参见本章教学资源库中的资料部分:影响静电计指针偏角 $\Delta\theta$ 的三个因素),以提高演示实验效果。

①使静电计指针偏角有明显变化需做到:

- 平板直径取 20 cm 左右。
- 两极板初始间距 d_0 取 0.5~1.0 cm。
- 在只改变 d 值时, d 值由 d_0 增大到 10 cm 左右。实验开始时,应使验电器的指针张角 θ_0 在 15° 左右。
- 给电容器极板带电时,可采用多次接触带电法,直到指针偏转 15° 左右。一旦带电过多,可用手快速触摸导线的绝缘层,让 $C_{\text{表}}$ 放电,以减少极板的电荷量。
- 在只改变正对面积或只插入电介质时,极板间距离也应在 0.5~1.0 cm 之间, θ_0 在 15° 左右。

如果做到上述几个方面,实验中静电计指针张角的变化量 $\Delta\theta$ 可接近 30° ,效果十分明显。

②分析实验现象时必须明确两点:

- 实验中电容器所带的电荷量不变;
- 静电计的指针张角大小反映了电容器两极板间电势差的大小。

抓住电容的定义式 $C = \frac{Q}{U}$,结合实验现象就可以明确电容器的电容与哪些因素有关。

虽然上述实验只是个定性的实验,但是它可以丰富学生的感性认识。平行板电容器电容计算公式的得出不是中学物理教学的任务,把公式介绍给学生即可。

那么,在教学中,由极板面积 S 和极板间的距离 d 计算平行板电容器电容的两个公式

$C = \frac{S}{4\pi kd}$ 和 $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi kd}$ 应该要求到什么程度呢？我们知道，在科学技术工作中，公式的作用不只是用来计算，它也反映物理量之间的关系，包括定性的关系。这两个公式在教科书中正是起后一个作用。影响电容的几个因素的不同作用，通过公式看，一目了然。《课程标准》没有硬性要求这两个公式，所以，不必让学生记忆，也不必利用它们进行运算。对于教科书中的练习题，让学生看书完成即可。

另外，在介绍几种材料的相对介电常数时，可以让学生想一想，用哪些材料做电容器的介质比较好。

(4) 常用电容器

要组织学生识别固定电容器和可变电容器，了解可变电容器改变电容的原理；提供给学生观看的电容器的花色品种要尽量多，使他们以后见到电容器时不会感到陌生；要引导学生识别各种电容器的电路符号；还要讲解电容器额定电压和击穿电压的概念，使学生具有安全使用电容器的意识。

3. 问题与练习

内容分析

本节练习重点突出，主要巩固对电容的定义式的理解，对平行板电容器电容的计算公式的应用和对演示实验的理解。

第1题以静电计指针偏角变化为设问点，意在检查学生对“研究平行板电容器的电容”实验的理解程度。

第2题计算一个 $2\ \mu\text{F}$ 的平行板电容器的极板面积，并与一扇窗户的面积进行比较，目的是加深学生对电容单位大小的感知。还可以补充一问，即如果是一个 $2\ \text{F}$ 的电容器，它的面积又该多大？

第3题涉及的两种情景十分典型，与电源连接时电容器两端的电压不变，充电后与电源分离，电容器两极板的电荷量不变。要指导学生善于在动态变化中寻找不变的量。

第4题证明平行板电容器两极板间的电场强度只与极板的电荷量和极板的面积有关。证明过程不但要用到电容的定义式，还要用到平行板电容器的计算公式。本题要求较高。

解答与说明

1. 根据平行板电容器的电容 $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi kd}$ ，分析并回答下列问题。

(1) 把两极板间距离减小，电容增大，电荷量不变，电压变小，静电计指针偏角变小。

(2) 把两极板间相对面积减小，电容减小，电荷量不变，电压变大，静电计指针偏角变大。

(3) 在两极板间插入相对介电常数较大的电介质，电容增大，电荷量不变，电压变小，静电计指针偏角变小。

2. 由 $C = \frac{S}{4\pi kd}$ ，得 $S = 4\pi kdC = 4 \times 3.14 \times 9.0 \times 10^9 \times 0.1 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^{-6}\ \text{m}^2 = 22.6\ \text{m}^2$ 。

此面积约为窗户面积的10倍。

3. 根据不同外界条件以及平行板电容器的电容与极板间距的关系回答下列问题。

(1) 保持与电池连接，则两极间电压不变， $Q = UC = 9 \times 3 \times 10^{-12}\ \text{C} = 2.7 \times 10^{-11}\ \text{C}$ ，两极板间距离减半，则电容加倍， $Q' = UC' = 9 \times 2 \times 3 \times 10^{-12}\ \text{C} = 5.4 \times 10^{-11}\ \text{C}$ 。极板上电荷量增加了 $Q' - Q = 2.7 \times 10^{-11}\ \text{C}$ 。

(2) 移去电池后电容器所带电荷量不变, $U = \frac{Q}{C} = 9 \text{ V}$, 两极板距离减半后, $U' = \frac{Q}{2C} = 4.5 \text{ V}$, 即两极板间电势差减小了 4.5 V 。

4. 设电容器所带电荷量为 Q , 因 $C = \frac{Q}{U}$, 并且 $C = \frac{S}{4\pi kd}$, 所以, $\frac{Q}{U} = \frac{S}{4\pi kd}$, $\frac{Q}{S} = \frac{U}{4\pi kd}$ 。又因为 $E = \frac{U}{d}$, 所以, $E = \frac{U}{d} = 4\pi k \frac{Q}{S}$ 。可见, 电场强度与两极板间距离无关, 只与电容器所带电荷量和极板面积有关。

第9节 带电粒子在电场中的运动

1. 教学目标

(1) 学习运用静电力、电场强度等概念研究带电粒子在电场中运动时的加速度、速度和位移等物理量的变化。

(2) 学习运用静电力做功、电势、电势差、等势面等概念研究带电粒子在电场中运动时的能量转化。

(3) 了解示波管的工作原理, 体会静电场知识对科学技术的影响。

2. 教材分析与教学建议

在前面学习静电场性质的基础上, 本节学习处理带电粒子在电场中运动的问题。本节内容主要培养学生综合应用力学知识和电学知识的能力。

本节内容由“带电粒子的加速”“带电粒子的偏转”“示波管的原理”三部分组成。教学内容的梯度十分明显, 这样的安排也符合学生的认知规律。由于力学与电学的综合程度逐渐提高, 学生学习出现一些困难也是正常现象。教师应该帮助学生铺设合理的台阶, 逐步提高他们的综合分析能力。

教科书是通过例题的形式来研究带电粒子的加速和偏转问题的。这样的处理可以防止出现“加速度公式、位移公式、速度公式、偏转角公式”等, 因为记忆这些公式不仅加重学生负担, 更严重的是会淡化学生研究问题时的物理意识。

示波管原理部分不仅对力学、电学知识的综合能力有较高的要求, 而且要求有一定的空间想像能力。为此, 教科书在“思考与讨论”栏目中设置了四个问题, 实际上是设置了四个台阶。教学中要循序渐进, 给学生足够的时间来思考。

(1) 带电粒子的加速

学生处理带电粒子在电场中运动的问题时, 常常因“重力是否可以忽略”这一问题感到迷茫。教师处理这个问题的方法可归纳为两种:

① 只有在带电粒子的重力远远小于静电力时, 粒子的重力才可以忽略。

② 一般地说, 微观带电粒子如电子、质子、离子、 α 粒子等除有说明或有明确暗示外, 处理问题时均不计重力。而带电的液滴、小球等除有说明或有明确暗示外, 处理问题时均应考虑重力。

课本图 1.9-1 中带电粒子做匀加速运动, 但没有用匀加速运动的公式来处理, 而是用动能定理来处理。这是因为在电场中应用动能定理有特别的优越性(静电力做功与路径无关)。

“思考与讨论”栏目中提出的问题又告诉我们, 即使在非匀强电场中, 动能定理仍然适用。

教师在分析例题 1 时应该指出,这里的电场已经不是匀强电场,静电力做功 $W=Uq$ 适用于任何电场。

“科学足迹”栏目中介绍了“密立根实验——电子电荷量的测定”的历史背景资料。可以通过阅读使学生了解其实验设计思想,即油滴在电场中受力平衡,根据静电力与重力相等可以测定电子的电荷量。

“科学漫步”栏目中介绍了“范德格拉夫静电加速器”的工作原理,即利用尖端放电的原理起电。起电的目的是产生高电压,再用高电压对带电粒子加速。通过阅读可以使学生感悟到,使用这种加速器比使用放射性物质更加安全、更加环保。

(2) 带电粒子的偏转

课本图 1.9-3 给出了电子垂直电场线方向射入匀强电场的情景。由于静电力方向与电子的初速度方向垂直,且静电力是恒力,所以,电子只能做匀变速曲线运动。这时应该让学生思考,用什么样的方法分析处理此类曲线运动的问题。

如果学生能够联想到处理平抛运动的方法,提出把曲线运动分解为两个直线运动来处理,那么解决例题 2 就水到渠成了。在例题 1 中强调了动能定理的优越性,在例题 2 中还应该说明,动能定理只能求速度的大小,不能求速度的方向,而曲线运动中涉及运动的方向问题,一般采用把运动分解的方法。

(3) 示波管的原理

首先要认识示波管的结构,应该组织学生认真观察课本图 1.9-4。示波管主要由电子枪、偏转电极和荧光屏三部分组成。电子枪通电后产生热电子,电子在加速电场作用下被加速的过程就是例题 1 讨论的情景。电子经过偏转电场的过程就是例题 2 讨论的情景,只是这里有两组偏转电极,使电子运动的轨迹变得比较复杂。教学过程中应该顺着“思考与讨论”中设置的台阶,先判断清楚只有一组电极间有电压时亮斑的位置。

如果仅在 YY' 之间加不变的电压,使 Y 的电势比 Y' 高,在荧光屏的正 Y 轴上将出现一个亮斑;如果仅在 XX' 之间加不变的电压,使 X 的电势比 X' 高,在荧光屏的正 X 轴上将出现一个亮斑。那么如果在 YY' 和 XX' 之间都加不变的电压,使 Y 的电势比 Y' 高, X 的电势比 X' 高,那么亮斑出现在荧光屏的什么位置?(在第 I 象限)

如果仅在 YY' 之间加课本图 1.9-5 所示的电压,在荧光屏上会看到 Y 轴上一条竖直的亮线;如果仅在 XX' 之间加课本图 1.9-6 所示的电压,在荧光屏上会看到 X 轴上一条水平的亮线。如果在 YY' 之间加课本图 1.9-5 所示的电压,而在 XX' 之间加不变的电压(X 正、 X' 负),在荧光屏上会看到一条与 Y 轴平行的竖直的亮线(在第 I、IV 象限);如果在 YY' 之间加课本图 1.9-5 所示的电压,而在 XX' 之间加不变的电压(X 负、 X' 正),在荧光屏上会看到一条与 Y 轴平行的竖直的亮线(在第 II、III 象限)。

如果在 YY' 之间加课本图 1.9-5 所示的电压,同时在 XX' 之间加课本图 1.9-6 所示的电压,要想知道荧光屏上会看到怎样的图形,只要按照教科书的提示描出 O 、 A 、 B 、 C 、 t_1 、 D 、 E 、 F 、 t_2 九个时刻对应的亮斑(在 t_1 时刻亮斑位于坐标原点),再过这些点描出光滑的曲线即可。

3. 问题与练习

内容分析

本节练习共 5 道题,题目设置既有知识训练,又有过程、方法训练,侧重点在于过程、方法训练。

第1题要求归纳该题的几种解法,比较这些解法哪种更简便。归纳和比较非常有意义,它既可以开阔学生的思路,又可以使学生发现动能定理的优越性。

第2题,以光电效应实验作为背景,求电子的最大初速度。此题对运算的要求并不高,关键是要理解在什么条件下电流表会没有电流。本题侧重于训练学生的分析能力,通过分析电子的受力情况和运动情况,强化学生应用功能关系的意识,提高综合分析能力。

第3、第4、第5题都是带电粒子在匀强电场中的偏转问题,其中第4题实质上是证明题。证明题使用的语言应该简洁、严密、逻辑性强,要对学生加强这方面的训练。

解答与说明

1. 综合运用电学、动力学、运动学的知识用多种方法解答问题。

解法一: $\Delta E_k = E_k = qU = 2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 90 \text{ J} = 2.9 \times 10^{-17} \text{ J}$ 。

解法二: $E = \frac{U}{d}$, $W = Eqd = \frac{U}{d}qd = qU = 2.9 \times 10^{-17} \text{ J}$ 。

解法三: $E = \frac{U}{d}$, $a = \frac{qE}{m}$, $v = \sqrt{2ad}$, $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = qU = 2.9 \times 10^{-17} \text{ J}$ 。

可见,第一种方法最简单。

2. 如果电子的动能减少到等于0的时候,电子恰好没有到达N板,则电流表中就没有电流。由动能定理 $W = 0 - E_{k0}$, $W = -eU$, 得

$$-eU = 0 - E_{k0} = -\frac{1}{2}m_e v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2Ue}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 12.5 \times 1.6 \times 10^{-19}}{0.91 \times 10^{-30}}} \text{ m/s} = 2.10 \times 10^6 \text{ m/s}$$

3. 设加速电压为 U_0 , 偏转电压为 U , 带电粒子的电荷量为 q , 质量为 m , 垂直进入偏转电场的速度为 v_0 , 偏转电场两极间距离为 d , 极板长为 l , 则: 带电粒子在加速电场中获得初动能 $\frac{1}{2}mv_0^2 = qU_0$, 粒子在偏转电场中的加速度 $a = \frac{qU}{dm}$, 在偏转电场中运动的时间为 $t = \frac{l}{v_0}$, 粒子离开偏转电场时沿静电力方向的速度 $v_y = at = \frac{qUl}{dmv_0}$, 粒子离开偏转电场时速度方向的偏转角 θ 的正切 $\tan \theta = \frac{v_y}{v_0} = \frac{qUl}{dmv_0^2}$ 。

(1) 若电子与氢核的初速度相同, 则 $\frac{\tan \theta_e}{\tan \theta_H} = \frac{m_H}{m_e}$ 。

(2) 若电子与氢核的初动能相同, 则 $\frac{\tan \theta_e}{\tan \theta_H} = 1$ 。

4. 设加速电压为 U_0 , 偏转电压为 U , 带电粒子的电荷量为 q , 质量为 m , 垂直进入偏转电场的速度为 v_0 , 偏转电场两极间距离为 d , 极板长为 l , 则: 粒子的初动能 $\frac{1}{2}mv_0^2 = qU_0$, 粒子在偏转电场中的加速度 $a = \frac{qU}{dm}$, 在偏转电场中运动的时间为 $t = \frac{l}{v_0}$, 粒子离开偏转电场时沿静电力方向的速度 $v_y = at = \frac{qUl}{dmv_0}$, 粒子离开偏转电场时速度方向的偏转角 θ 的正切 $\tan \theta = \frac{v_y}{v_0} = \frac{qUl}{dmv_0^2}$, 由于各种粒子的带电量不同, 其初动能就不同。但是把 $mv_0^2 = 2qU_0$ 代入偏转角 θ 的正切 $\tan \theta = \frac{qUl}{dmv_0^2}$ 中, 得 $\tan \theta = \frac{Ul}{2U_0d}$, 所以各种粒子的偏转角度相同; 粒子在静电力方向的偏转距离为 $y = \frac{1}{2}at^2 =$

$\frac{qUl^2}{2mdv_0^2} = \frac{Ul^2}{4dU_0}$, 可见各种粒子的偏转距离也相同, 所以这些粒子不会分成三束。

5. 电子的初动能 $\frac{1}{2}mv_0^2 = eU_0$, $v_0 = \sqrt{\frac{2eU_0}{m}}$ 。垂直进入匀强电场后加速度 $a = \frac{eU}{dm}$, 在偏转电场中运动的时间为 $t = \frac{l}{v_0}$, 电子离开偏转电场时沿静电力方向的速度 $v_y = at = \frac{eUl}{dmv_0}$, 电子离开偏转电场时速度方向的偏转角的正切

$$\tan\theta = \frac{v_y}{v_0} = \frac{eUl}{dmv_0^2} = \frac{eUl}{2dU_0e} = \frac{El}{2U_0} = \frac{5\,000 \times 0.06}{2 \times 1\,000} = 0.15$$

$$v_y = v_0 \tan\theta, v = \sqrt{v_y^2 + v_0^2} = v_0 \sqrt{\tan^2\theta + 1} = \sqrt{\frac{2eU_0}{m} (\tan^2\theta + 1)}.$$

代入数值得

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1000}{9.1 \times 10^{-31}} \times (0.15^2 + 1)} \text{ m/s} = 1.9 \times 10^7 \text{ m/s}$$

$$\theta = \arctan 0.15 = 8.53^\circ$$

三、教学设计案例

电 势 能

1. 教学目标

- (1) 通过讨论静电力对试探电荷做的功, 知道静电力做功与路径无关的特点。
- (2) 把静电力做功与重力做功进行类比, 理解静电力做功与电势能变化的关系。认识电势能的相对性。
- (3) 通过类比方法思维特征的分析 and 体验, 进一步感悟电势能概念的物理意义。

2. 教学过程

(1) 导入新课

类比法是根据两个(两类)对象之间在某些方面的相同或相似, 而推出它们在其他方面也可能相同或相似的逻辑推理方法。具体说来, A 事物具有属性 a、b、c, 又具有属性 d。如果 B 事物具有属性 a、b、c, 那么, B 事物也可能具有属性 d。是否真是这样, 需要得到实验的验证。如下表中实验室起电机放电与天空雷电的对照:

特征或现象	实验室起电机放电	天空雷电
a	有不规则形状的火花放射	有不规则形状的强烈火花放射
b	有噼啪声	有轰鸣声
c	能点燃易燃物	会引发森林火灾
d	可用导线传导到另外的地方	是否也可用导线传导到另外的地方?

众所周知，富兰克林就曾用风筝做实验证实了这个问题。我们在以后的学习中还会有机会学习并应用这种方法。请思考下面的问题：

问题1 从受力角度考虑，电荷放在电场中会受到静电力的作用；物体放在重力场中会受到重力的作用。是否可以认为，就这个特征来说两者是相似的？

问题2 从描述场的强弱角度考虑，静电场是用试探电荷在某点所受静电力与它的电荷量的比值表示该点电场的强弱。重力场的强弱是怎样描述的？是否也可以认为，就这个特征来说两者是相似的？

特征或性质	静电场	重力场
a	对场中的电荷有力的作用	对场中的物体有力的作用
b	用比值“ $\frac{F}{q}$ ”表示场的强弱	用比值“ $\frac{F}{m}$ ”表示场的强弱

可见，静电场与重力场有某些特征是相似的。根据两者的相似性，我们是否可以大胆地推测静电场的其他性质？下面我们进一步讨论这一问题。

(2) 进行新课

c. 物体在重力场中具有重力势能，电荷在静电场中也会有势能吗？

求证：在重力场中由静止释放质点，质点一定加速运动，动能增加，重力势能减少；在静电场中由静止释放电荷，电荷一定会加速运动，动能增加，是什么能量转化为电荷的动能呢？在我们讨论了性质d以后就会明白，是电势能转化为电荷的动能。

d. 重力做功与路径无关，静电力做功也与路径无关吗？

求证：我们利用图1-23求证静电力做功与路径无关。若试探电荷沿直线从A移动到B，静电力做功 $W_{AB} = Eq \cos \theta = qE|AM|$ 。若试探电荷沿折线AMB从A移动到B（图1-23甲），则从A移动到M，静电力做功 $W_{AM} = qE|AM|$ ，从M移动到B，因为静电力与位移垂直， $W_{MB} = 0$ 。所以从A移动到B静电力做功 $W_{AB} = W_{AM} + W_{MB} = qE|AM|$ 。若试探电荷沿任意曲线ANB从A移动到B，可以用无数组跟静电力垂直和平行的折线来逼近曲线ANB（图1-23乙），此时每一小段曲线都可以看做直线。沿此直线移动电荷，静电力做的功等于沿与之对应的折线移动电荷做的功，而与静电力平行的短折线长度之和等于|AM|，所以静电力做的功仍然等于 $qE|AM|$ 。

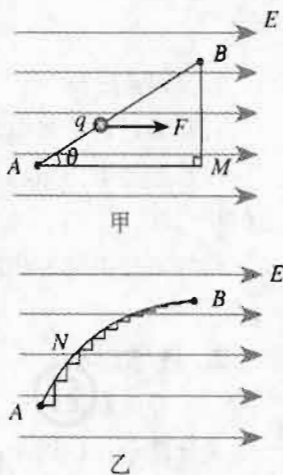


图1-23

如果在非匀强电场中，我们可以把移动的路径分割成无数段，使每一小段路径上的电场可以认为是匀强电场，通过同样的分析与推导，上述的结论仍然成立。

可见和重力做功一样，静电力做功也与路径无关！所以，我们也可以引入与静电力相对应的势能——电势能。

e. 重力做的正功等于减少的重力势能，克服重力做的功等于增加的重力势能，用公式表示为 $W_{AB} = E_{pA} - E_{pB} = -\Delta E_p$ 。那么静电力做的正功也等于减少的电势能吗？克服静电力做的功也等于增加的电势能吗？用公式表示也是 $W_{AB} = E_{pA} - E_{pB} = -\Delta E_p$ 吗？

求证：在电场中由静止释放电荷，电荷加速运动，动能增加。根据能量守恒定律，电势能必然减少。根据动能定理， $W_{AB} = E_{kB} - E_{kA} = \Delta E_k$ 。因为增加的动能等于减少的电势能，

$E_{kB} - E_{kA} = E_{pA} - E_{pB}$, 所以 $W_{AB} = E_{pA} - E_{pB} = -\Delta E_p$ 。

f. 重力势能具有相对性, 电势能也具有相对性吗?

求证: 通过计算静电力做的功只能确定电势能的变化量, 只有把电场中某点的电势能规定为 0, 才能确定电荷在电场中其他点的电势能的数值。可见电势能的确具有相对性。

g. 质点在某点的重力势能等于把它从该点移动到零势能处的过程中重力做的功, 电荷在某点的电势能也等于把它从该点移动到零势能处的过程中静电力做的功吗?

求证: 如果规定 B 点的电势能为 0, 根据 $W_{AB} = E_{pA} - E_{pB}$, 可知 $W_{AB} = E_{pA}$, 所以电荷在某点的电势能等于静电力把它从该点移动到零势能处时所做的功。

h. 重力势能属于物体与重力场组成的系统, 电势能也属于电荷与静电场组成的系统吗?

求证: 如果只有试探电荷而不存在电场, 就不存在静电力的作用, 试探电荷也不可能具有电势能; 如果只有电场而没有试探电荷, 也不存在静电力的作用, 也就不存在电势能。只有在试探电荷处于电场中时, 讨论与静电力做功紧密联系的电势能才有意义。所以, 电势能属于电荷与电场组成的系统。

注意: 以上性质 e、f、g、h 都是依赖于性质 d 而存在的。这些性质是一切势能的共同性质。

我们可以将类比法得到的结果列表呈现如下:

特征或性质	重力场	静电场
a	对场中的物体有力的作用	对场中的电荷有力的作用
b	用比值 “ $\frac{F}{m}$ ” 表示场的强弱	用比值 “ $\frac{F}{q}$ ” 表示场的强弱
c	物体在重力场内有重力势能	电荷在静电场内也有势能
d	重力做功与路径无关	静电力做功也与路径无关
e	重力做的正功等于减少的重力势能, 克服重力做的功等于增加的重力势能。用公式表示为 $W_{AB} = E_{pA} - E_{pB} = -\Delta E_p$	静电力做的正功也等于减少的电势能, 克服静电力做的功也等于增加的电势能。用公式表示也是 $W_{AB} = E_{pA} - E_{pB} = -\Delta E_p$
f	重力势能具有相对性	电势能也具有相对性
g	质点在某点的重力势能等于把它从该点移动到零势能处的过程中重力做的功。	电荷在某点的电势能也等于把它从该点移动到零势能处的过程中静电力做的功。
h	重力势能属于物体与重力场组成的系统。	电势能属于电荷与静电场组成的系统。

(3) 分析讨论

• 如果电荷沿不同路径移动时静电力做功不一样, 还能建立电势能的概念吗? 为什么?

电势能的大小是由电荷与电场的相对位置决定的, 同一电荷在电场中同一点的电势能应该有确定的值。我们不妨假设, 电荷从电势能为 0 处沿不同路径移动到电场中另一点 P。如果静

电力移动电荷时做的功不同,那么同一电荷在同一点 P 的“电势能”就不同,这样 P 点的“电势能”就没有确定值,就不能建立电势能的概念。

·物体在重力场中移动时重力做功,与电荷在电场中移动时静电力做功虽然相似,但还存在差异。你能具体说一说这种差异吗?

在重力场中移动的质点的质量都是正值,在重力场中确定的两点间移动等质量的质点,重力做功一定相同,重力势能的变化量一定相等;在电场中移动的电荷可正、可负,在电场中确定的两点间移动电荷量大小相等的电荷,静电力做的功的绝对值相等(有正、负两个可能的值),电势能的变化量也有正、负两个可能的值。例如,把正电荷从 A 移动到 B (图 1-24 甲),静电力做正功,电势能减少;把等量的负电荷从 A 移动到 B (图 1-24 乙),静电力做负功,电势能增加。

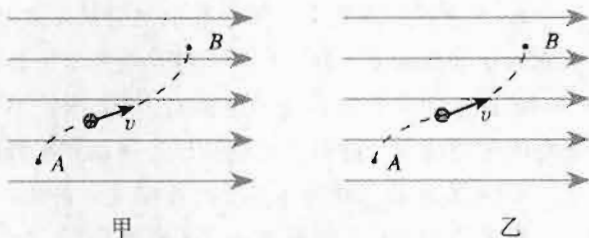


图 1-24

·你是否认为凡是“场”都可以引入“势能”的概念?

是否可以引入“势能”的概念,关键是看“场”的力做的功是否与路径无关。所以,不能认为凡是“场”都可以引入“势能”的概念。

·类比法在生产、生活中的应用十分广泛,你能举几个例子说一说吗?

(4) 巩固提高

例题:有一电荷量 $q = -3 \times 10^{-6} \text{ C}$ 的点电荷,从电场中的 A 点移到 B 点时,克服静电力做功 $6 \times 10^{-4} \text{ J}$ 。求:

- ①电荷的电势能怎样变化?变化了多少?
- ②以 B 为零势能点,电荷在 A 点的电势能 E_{pA} 是多少?
- ③如果把这一电荷从 B 点移到 C 点时静电力做功 $9 \times 10^{-4} \text{ J}$,电荷的电势能怎样变化?变化了多少?
- ④如果选取 C 点为零势能点,则电荷在 A 点的电势能 E'_{pA} 又是多少?
- ⑤通过这一例题你有什么收获吗?

解:

- ①静电力做功 $W_{AB} = -6 \times 10^{-4} \text{ J}$,电势能增加了 $6 \times 10^{-4} \text{ J}$ 。
- ②以 B 为零势能点,电荷在 A 点的电势能是 $-6 \times 10^{-4} \text{ J}$ 。
- ③ $W_{BC} = 9 \times 10^{-4} \text{ J}$,电荷的电势能减少了 $9 \times 10^{-4} \text{ J}$ 。
- ④以 C 为零势能点,则电荷在 A 点的电势能 $E'_{pA} = W_{AC} = W_{AB} + W_{BC} = 3 \times 10^{-4} \text{ J}$ 。
- ⑤取不同的零势能点,同一电荷在电场中同一点的电势能数值是不同的。

3. 教学设计说明

本章第 4 节电势能部分的教学案例,试图在课堂教学过程中突出类比法的思维特征和思维过程,适当强调类比过程中的求证环节。希望学生能在体验类比法的优越性的同时,掌握电势能的有关知识,力争把“三维”目标放在合适的位置。

四、教学资源库

(一) 概念、规律和背景资料

1. 静电学发展简史

我国古代和古希腊对静电现象的研究

我国是世界文明古国之一，在古代书籍中有许多关于电磁现象的记载。例如西汉末期的《春秋纬·考异邮》（公元前20年左右）中就有“璊（玳）瑁吸裙”（引自《太平御览》卷807）的话，意思是说经过摩擦的玳瑁（一种跟龟相似的海生爬行动物的甲壳）能够吸引微小的物体（裙，音若）。东汉时期王充在《论衡》中进一步记述了这种现象：“顿牟（即玳瑁）掇芥，磁石引针”。西晋张华在他写的《博物志》中写有“今人梳头、脱着衣时，有随梳、解结有光者，也有咤声”，记载了梳子与头发摩擦而起电，外衣与不同质料的内衣摩擦起电的现象。

古希腊是西方电磁学的发源地。在古希腊的文献中记载了一些电磁现象，柏拉图（前427—前347）曾提到“关于琥珀和磁石的吸引是观察到的奇事”。表明公元前三百多年古希腊人就发现了琥珀吸引小物体的现象。（琥珀是松柏类植物的树脂流入地下后而成的化石，多为具有黄色光泽的透明固体，古希腊人习惯把琥珀当做高贵的装饰品，经常带在身上，这样就容易发现它有吸引轻小物体的现象。）

我国古代和古希腊关于电的知识，都是由经验得出的，比较零散，而且在一千多年的时间里进展很少。

吉尔伯特最先系统研究电磁现象

吉尔伯特（1544—1603）是一位医生，曾任英国女王伊丽莎白一世的御医。他在从事医学工作之余，潜心研究磁现象和摩擦起电现象。他是第一位通过实验对电现象和磁现象进行系统研究的人，有许多重要发现。他首先确定琥珀的吸引和磁石的吸引是两种不同的现象。磁石本身就具有吸引力，而琥珀则要经过摩擦；磁石只能吸引有磁性的物体，而摩擦过的琥珀则能吸引任何小物体。吉尔伯特利用各种物质做了许多摩擦起电的实验，他发现除琥珀外，金刚石、蓝宝石、水晶、玻璃、硫磺、硬树脂、云母、岩盐等，摩擦后也能吸引小物体。吉尔伯特把经过摩擦后能吸引小物体的物体叫做 electric，意思是“琥珀体”，这就是西文中“电”的词根的来源。为了确定一种物质是不是带电体，他发明了第一个可供实验用的验电器——用一根极细的金属棒，中心平衡在一个尖端上，可以自由转动，由于棒很轻，当摩擦后带电的物体靠近棒时，棒被吸引而转动。

莱顿瓶的出现及其影响

荷兰莱顿大学的物理学家穆欣布罗克（1692—1761）在从事电学实验时，看到好不容易使带电体所带的电很快在空气中消失，便想找出一种保存电的方法。有一次，他用丝线吊起一支枪管来接收从摩擦起电机玻璃球传来的电。在枪管的一端吊一根黄铜线，铜线的下端放入一只盛有水的玻璃瓶中。穆欣布罗克让助手一只手拿着玻璃瓶，同时自己使劲转动起电机，助手不慎将另一只手碰到枪管上，感到一次强烈的电击，大喊起来。穆欣布罗克与助手互换位置，让助手摇动起电机，自己一手拿瓶，另一手去碰枪管，也遭到电击。这个实验表明，把带电体放在玻璃瓶中可以把电保存起来。后来人们把这个蓄电的瓶子叫做“莱顿瓶”。莱顿瓶几经改进

后,瓶内外表面都贴上金属箔,瓶盖上插一金属杆,杆上端装一金属小球,下端用金属链子与瓶内表面接触,瓶内盛水,增大了瓶的蓄电能力,可以产生更强的电击。放电时产生的电火花可以点燃火药、氢气等。莱顿瓶的出现为进一步研究电现象提供了有力的手段。

莱顿瓶能使人受到电击的现象,引起人们的好奇,当时人们用莱顿瓶做电击示范表演成了一种娱乐游戏。最出色的一次表演是法国电学家诺莱特在巴黎圣母院前进行的。他请700个修道士手拉手排列起来,让排头者手拿莱顿瓶,排尾者手握莱顿瓶的引线,当他让莱顿瓶通过他们放电时,整个队伍突然同时跳了起来,在场观众被惊得目瞪口呆。这一表演显示了电的巨大威力。

富兰克林的风筝实验

莱顿瓶出现后,有人使用它到处表演电学实验,并越过大洋传到了美国。富兰克林(1706—1790)就是在1746年看了从苏格兰到英国的史宾斯博士表演的莱顿瓶实验后,开始研究电学的。当时富兰克林已经40岁,在事业上有所成就,成为社会名流。他看了史宾斯表演的电学实验后,感到极新鲜,又惊又喜。当时伦敦皇家学会会员柯林孙赠给富兰克林的图书馆一根玻璃管和用以做实验的说明书,富兰克林就用它进行实验。后来又在自己的玻璃厂中制作实验工具。他开始做电学实验后,根据自己所观察到的现象,想到闪电和电火花是同一种东西,猜想闪电是带电的云大量放电产生的。他想到用风筝把雷雨云中的电直接引下来做实验。他用丝手帕糊了个风筝,风筝上安装一根尖铁丝用来引云中的电,铁丝与放风筝的麻线连接在一起,麻线的下端系一段丝带和一把金属钥匙。钥匙作为导体,以备引出电来。放风筝时手握丝带,以防电通过身体受伤害。1752年7月,在大雷雨的一天,46岁的富兰克林带着21岁的儿子来到牧场,把风筝放到天上有闪电的云层中。他们观察到麻线上的小纤维都竖立起来,跟摩擦产生电的效果一样;他用手指靠近钥匙,立即有电火花从手指上闪现;他使莱顿瓶充电,再放电,产生的效果都跟摩擦产生的电完全相同。这就是著名的富兰克林费城风筝实验,它清楚地证明了雷电就是一种放电现象,使人类对电的认识前进了一大步。富兰克林的实验是很危险的。后来富兰克林在此基础上发明了避雷针。

2. 对摩擦起电的解释

摩擦起电是一种比较复杂的现象,摩擦过程中伴随着物质间的接触和分离、温度升高、分子的破裂、热分解、压电和热电效应等,它们都对起电产生影响。即使同种物质,以不同的方向摩擦时,也会出现带电现象。现在对摩擦起电还存在着一些认识不清楚的问题。

固体的带电机理可用双电层和接触电势差来说明。两种物质接触时,由于不同原子得失电子的能力不同,外层电子的能级不同,会发生电子转移。当两种物质紧密接触(其间距离小于 $0.25 \times 10^{-10} \text{ m}$)时,界面两侧会出现大小相等、符号相反的两层电荷,称做双电层。双电层间的电势差叫做接触电势差。当双电层间的接触电势差达到一定值后,电子的转移达到平衡。接触电势差跟物质性质和表面状况有很大关系,固体的接触电势差为 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ V}$,最大为1V左右。金属与金属、金属与绝缘物(电介质)、绝缘物与绝缘物的界面上都会出现双电层。由于存在双电层,两个紧密接触的物体分开时,就可能带电。

摩擦可使物体间紧密接触,增大接触面积,从而增加电荷量;摩擦还使温度升高,促进电子的转移。

影响固体带电的因素很多。两种物质摩擦时,哪个带正电,哪个带负电,首先决定于物质的性质。没有一定带正电或一定带负电的物体。当物体相互接触时,两物体之间对峙着不同的原子,其中哪种原子容易放出电子,哪种原子容易接受电子,这取决于原子之间的相对性质。

因此,构成物体的原子的相对性质,决定物体与物体摩擦时带电的正负。玻璃棒与丝绸摩擦,玻璃棒的电子移到丝绸上,而使玻璃棒带正电,丝绸带负电。但不能由此就说玻璃棒不能带负电,丝绸不能带正电。如橡胶棒与丝绸摩擦,这时丝绸带正电,橡胶棒带负电。摩擦起电过程中物体带电的正负性取决于图 1-25 所示的物体之间的相对关系,并把它叫做摩擦起电序列。两种物质摩擦时,左面的物质带正电,右面的物质带负电。左右两种物质相隔越远,越容易起电。摩擦起电还受周围环境条件的影响,周围温度、湿度、气压都影响电荷量,有时还影响带电的符号。物体间的力学因素,例如摩擦的速度、摩擦的长度、压力的大小也对所带电荷量有影响。

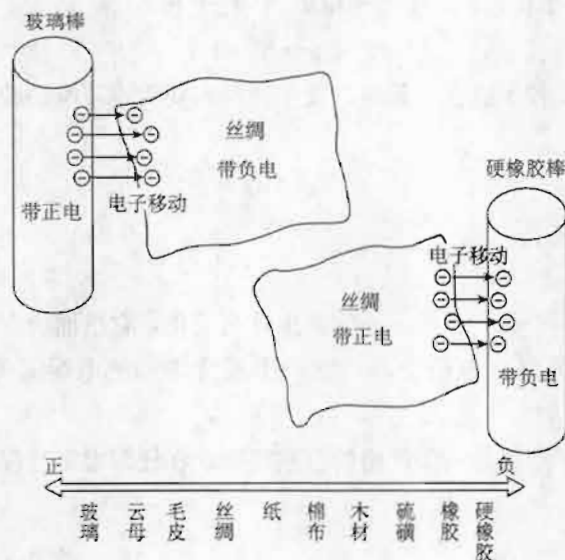


图 1-25

3. 关于电荷

电荷不能脱离其电场而单独存在。电荷周围的空間里必定有电场,没有电场的电荷是不存在的。另外,电荷不能脱离质量而单独存在。实验表明,凡是带电的粒子,其静质量都不为 0。曾有人提出,电子的质量来源于它的电场的能量,后来还出现过各种各样的有关理论,但都因遇到无法克服的困难而没有成功。

电荷是洛伦兹不变量。实验表明:在有相对运动的两个惯性系里测量同一个电荷的电荷量,其值相等。

(1) 电荷有两种

1733 年,法国科学家迪费 (Du Fay) 发现,电荷有两种,同种电荷互相排斥,而异种电荷则互相吸引。

从形式上看,电荷在库仑定律中的地位与质量在牛顿万有引力定律中的地位相当;这种相当性使得库仑 (C. A. Coulomb) 认为,两个点电荷之间的相互作用力必然与它们的电荷量之积成正比,这一点是无须用实验加以证明的,所以他就没有做这方面的实验。然而,电荷与质量不同,质量只有一种,彼此都互相吸引,而电荷则有两种,并且同种电荷是互相排斥的。

(2) 电荷可以产生和消失

电荷的产生,从宏观上说,是指物体不带电时,就不存在电荷,但不带电的物体经过摩擦、感应、加热、照射等方法处理后,便产生出电荷来。电荷的消失从宏观上说,是指两个带异种电荷的物体接触时,电荷会发生中和,物体就不呈现带电现象。

从微观上说,中性的粒子(如中子)不带电,但它们经过衰变,产生出带电粒子,即产生了电荷。例如

中子的衰变 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

π^0 介子的衰变 $\pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + \gamma$

又如高能光子也可以转化为电子偶,也产生了电荷

$$\gamma \xrightarrow{\text{(核旁)}} e^+ + e^-$$

反过来,两个带有异种电荷的粒子碰到一起时,也可以转变为不带电的中性粒子,电荷也就消失了。例如 π^- 介子和质子相碰,产生不带电的 Λ^0 粒子和 K^0 粒子

$$\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$$

特别是带电粒子与它的反粒子碰在一起时,发生湮没,变为不带电的粒子,例如电子和正电子的湮没

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

产生两个光子,电荷消失了。

(3) 电荷守恒

电荷守恒定律说,一个孤立系统,不管发生什么变化,它里面所有电荷的代数和永远保持不变;如果两个系统之间发生电荷交换,则一个系统增加的电荷必等于另一个系统减少的电荷。

实验表明,电荷守恒定律是一条严格的自然规律,在任何宏观过程和任何微观过程中,都是被严格地遵守的。

(4) 电荷是量子化的

迄今为止的实验都表明,任何电荷都是电子电荷的整数倍。

电子电荷的值按现代最精确的测量结果为

$$e = 1.602\,177\,33(49) \times 10^{-19} \text{ C}$$

比 e 小的电荷是否存在,目前尚无定论。即使存在比 e 小的电荷,电荷也仍然是量子化的,只不过电荷的最小单位比 e 小而已。

(5) 电荷是物质的一种属性

有人说,电荷是带电体的一种属性。这种提法是不太恰当的。因为这种提法是以宏观物体带电现象为实验依据的,而在宏观上,非带电体只不过是其中正负电荷的电荷量之和为 0 而不显电性罢了,其实电中性也是电荷概念的一个反映。从物质的微观结构来看,物质是由分子、原子组成,而原子又由带正电的原子核和带负电的核外电子所组成。从这个层次上认识实物的结构,可以说电荷是物质的一种属性。若进一步考虑原子核内的电荷,比如在非氢原子、包括氢的同位素原子的原子核里,存在着不带电的中子,或者说中子在核内不显正电荷性质也不显负电荷性质。但中子经过衰变可放出一个电子而变成一个质子,即中子衰变

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \text{ (反中微子)}$$

这就说明中子具有以电荷概念描述的性质,只不过它的电荷量为 0 而已。所以我们认为,电荷是一切实物的一种属性,不能说成只是带电体的基本属性。

物理学中“场”的观点,把电荷和它所激发的场联系起来,电荷间的相互作用通过场来实现,就是说,作为特殊物质的电磁场,终归由电荷所激发,也只有电荷才能检验电磁场的存在,所以,电荷是属于物质的,是物质的一种属性。19 世纪末, J. J. 汤姆孙 (J. J. Thomson)

和 20 世纪初密立根 (R. A. Millikan) 先后由阴极射线和油滴实验证明: 任一带电粒子的质量和电荷量的比值是一个常数, 它与实验的条件无关, 这又一次反映了电荷和质量同是物质的两个固有属性。

(6) 点电荷的概念

首先必须明确, 点电荷是个理想模型。当带电体之间的距离比起它们本身的线度大得多, 带电体的形状、大小及它上面电荷的分布情况对相互作用力的影响能够忽略时, 可以把它抽象成一个带电的几何点, 称为点电荷或点带电体。实验表明, 带电体之间相互作用力不仅与带电体之间的距离及所带电荷量有关, 还与带电体的大小、形状、电荷在带电体上的分布情况以及周围介质的情况有关; 随着带电体之间距离的增大, 带电体本身的几何形状、大小及带电体上电荷分布等诸因素对其间相互作用力的影响将逐渐减小。因此, 引进点电荷概念是必要的也是可能的, 它是从实际带电体中抽象出来的理想模型。

必须注意的是, 实际问题中的点电荷并不是一个带电的几何点, 它具有相对意义。在两带电体的线度 l 远小于两带电体间的距离 r 的情况下, 当研究两带电体间的静电力时, 就可把带电体当做点电荷来处理, 带电体的几何中心为带电体的几何点的位置, 两点电荷间的距离就是标志它们各自位置的两个几何点之间的距离。比如, 两个线度为 1 cm 的带电体, 相距 10 m 时, 可把它们当做点电荷来处理, 若相距也是 1 cm 时就不能把它看做点电荷了。至于带电体间的距离 r 比带电体的线度 l 大多少才可将带电体看成点电荷, 没有绝对的标准, 主要视讨论问题时所要求的精确程度而定。

(7) 检验电荷与一般的点电荷

检验电荷也是一个点电荷, 与一般的点电荷不同之处是: 检验电荷的线度必须非常小, 而一般点电荷只要求“线度远小于研究范围的空间尺度”; 检验电荷的电荷量必须足够小, 而一般点电荷的电荷量是任意的。

检验电荷的线度必须很小的原因, 是要求在检验电荷占据的空间内, 电场强度是“相同的”。实际静电场都是不均匀电场, 各点的电场场强大小、方向是不同的, 如果检验电荷的线度比较大, 将无法区分场中相邻各点的场强。

检验电荷的电荷量必须很小的原因, 是要求放入检验电荷后, 对原有静电场不产生影响。如果检验电荷的电荷量较大, 对静电场的场源电荷分布产生影响, 测出的电场与原电场不一样。如图 1-26, 一个电荷量为 Q 的金属球, 在未放入点电荷 q 时, 电场是球对称分布的, 放入电荷 q 后, 因为静电感应, 球上的电荷将重新分布, 电场分布也发生变化。只有电荷量 q 非常小时, 才可以忽略放入电荷所引起的场的变化, 从而测定出静电场的分布情况。

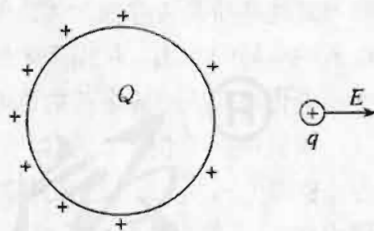


图 1-26

(《电磁学教学札记》, 张之翔编著, 高等教育出版社)

(《高中物理专题分析》下册, 杨兴国、叶禹卿主编, 高等教育出版社)

(《电磁学》, [日] 正田英介主编、高木正藏编, 科学出版社 OHM 社)

4. 静电力的平方反比律是自然界中极其精确的定律之一

法国科学家库仑 (C. A. Coulomb) 1785 年通过他自己设计的扭秤测量出带电球体间很弱的作用力遵循平方反比律。静电力的平方反比律自确立以来, 得到了不少物理学家的实验验证, 至今这方面的工作仍在继续进行, 因为静电力的平方反比律若有偏差, 理论上就会导致光

子的静止质量不等于0,从而出现真空色散、光速可变、电荷不守恒等问题,这就会动摇电磁学乃至物理学大厦的基础。同时,由于库仑的实验是直接测量力和距离,不可能有很高的精度,库仑当年的实验对平方反比律的偏差就为 $\delta=4\times 10^{-2}$ 。因此,后来的精确实验都是以高斯定理($\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{Q}{\epsilon_0}$)的推论为出发点的。高斯定理是静电力严格地与电荷间距离的平方成反比的结果,而由高斯定理出发可推论出:电荷只能分布在导体的外表面上,导体内部的净电荷为0。通过检验导体内部是否有电荷,可在极高的精度上验证平方反比定律。有意思的是:卡文迪许(Cavendish)在早于库仑十几年,就用这一思想从实验上检验了电荷间力的平方反比定律,只是由于他埋头研究而未能将这一成果公布于世罢了。

卡文迪许的实验方法是这样的:用两个半球壳将一个铜球完全包住,铜球的半径小于半球壳的内半径。铜球与半球壳用导线相连,待闭合的两个半球壳充电后,将导线撤去,再把两个半球壳分开,然后细心地检验铜球上的电荷量。如果球上电荷量为0,说明静电力平方反比定律没有偏差,若铜球上的电荷不为0,则说明静电力平方反比定律有偏差。由于实验技术及测量的精度有限,卡文迪许只能断言偏差 $\delta \leq 10^{-2}$,与库仑的实验偏差基本相同。1873年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)同样用检验空心导体内表面带电程度的方法证明静电力平方反比定律的偏差 $\delta < 10^{-4}$ 。1936年普林顿(Plimpton)和劳顿(Lawton)两人,用灵敏电流计和电子学放大仪器代替麦克斯韦实验中的静电计重复实验,证实 $\delta \leq 10^{-9}$ 。1968年G. D. 科朗和P. A. 弗朗肯及1971年E. R. 威廉斯, J. E. 法勒和H. A. 希尔使用灵敏度更高的放大器,把检验器及记录仪器一并放在内导体壳内,分别得到 $\delta = 1.3 \times 10^{-13}$ 和 $\delta = 3 \times 10^{-16}$,从而使库仑定律的验证实验达到极高的准确程度,有力地证明了静电力的平方反比定律是自然界中极精确的定律之一。

卡文迪许的实验方法是这样的:用两个半球壳将一个铜球完全包住,铜球的半径小于半球壳的内半径。铜球与半球壳用导线相连,待闭合的两个半球壳充电后,将导线撤去,再把两个半球壳分开,然后细心地检验铜球上的电荷量。如果球上电荷量为0,说明静电力平方反比定律没有偏差,若铜球上的电荷不为0,则说明静电力平方反比定律有偏差。由于实验技术及测量的精度有限,卡文迪许只能断言偏差 $\delta \leq 10^{-2}$,与库仑的实验偏差基本相同。1873年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)同样用检验空心导体内表面带电程度的方法证明静电力平方反比定律的偏差 $\delta < 10^{-4}$ 。1936年普林顿(Plimpton)和劳顿(Lawton)两人,用灵敏电流计和电子学放大仪器代替麦克斯韦实验中的静电计重复实验,证实 $\delta \leq 10^{-9}$ 。1968年G. D. 科朗和P. A. 弗朗肯及1971年E. R. 威廉斯, J. E. 法勒和H. A. 希尔使用灵敏度更高的放大器,把检验器及记录仪器一并放在内导体壳内,分别得到 $\delta = 1.3 \times 10^{-13}$ 和 $\delta = 3 \times 10^{-16}$,从而使库仑定律的验证实验达到极高的准确程度,有力地证明了静电力的平方反比定律是自然界中极精确的定律之一。

5. 库仑定律与其他物质无关

一些教科书在叙述库仑定律时,常常说是真空中两个点电荷之间的相互作用力,这样说是为了去掉其他电荷的影响,并没有错。但是,加了“真空中”这一条件,会引起这样的问题:有其他物质存在时库仑定律是否成立?回答是:有其他物质存在时库仑定律仍然成立,库仑定律与其他物质是否存在无关。但要注意的是,在有其他物质存在时,这些物质会受到原来两个电荷的电场的作用,从而产生极化电荷或感应电荷,因此,原来两个电荷中的每一个,都要受这些极化电荷或感应电荷的影响,这时它们所受的作用力就比较复杂了。

我们举一个例子说明如下。有两个点电荷 q_1 和 q_2 ,相距为 r , q_1 处在导体的空腔内(图1-27)。问 q_2 作用在 q_1 上的力是多少?对于这个问题,常见的回答是:由于导体的屏蔽作用, q_2 作用在 q_1 上的力为0。这个回答是错误的。之所以错误,就是因为不知道两个点电荷之间的相互作用力与其他物质是否存在无关。正确的回答是: q_2 作用在 q_1 上的力为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r} \quad (1)$$

与导体不存在时完全相同。有人也许会感到,照你这样说,那导体就不能起屏蔽作用了。不是这样的。静电场中导体的特点是:导体总是使它的外表面产生这样的电荷分布,这个分布在导体内每一点产生的电场强度,正好与导体外所有电荷在同一点产生的电场强度互相抵消,使得

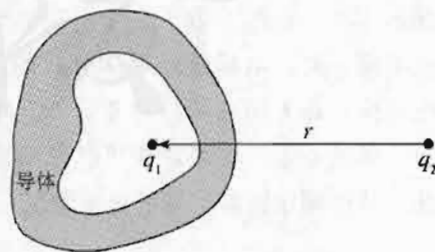


图1-27 点电荷 q_2 作用在导体空腔内点电荷 q_1 上的力是多少?

导体内每一点的电场强度都为 0。说导体空腔内的电场强度因为有导体屏蔽而不受导体外面电荷的影响,是指导体外表面上所有电荷与导体外所有电荷在腔内产生的电场强度之和为 0,而不是指外面各电荷都不在腔内产生电场强度。外面每个电荷在腔内产生的电场强度与导体不存在时完全相同。所以,图 1-27 中 q_1 受导体外表面上电荷和 q_2 的作用力之和为 0,而不是不受 q_2 的作用, q_2 作用在 q_1 上的力仍然遵守库仑定律,即①式。

6. 库仑定律的适用范围

库仑定律适用于两个点电荷静止的情况。因为只有对“点电荷”,两带电体间的距离才有确切的意义,才能消除带电体本身的几何形状、大小及带电体上电荷分布诸因素对其间相互作用力的影响。只有“静止”电荷,在空间才激发静电场,相互作用力才可能相等。

r 在 10^{-15} m 至 10^7 m 范围内,库仑定律是可靠的。卢瑟福 (E. Rutherford) 于 1912~1913 年,用 α 粒子散射实验检验原子核的模型时,证实两电荷间的距离在 10^{-15} m 以上库仑定律能严格成立。1980 年 7 月 11 日,丁肇中在北京报告了他的实验结果,即轻子(电子、 μ 子和 τ 子)的半径小于 1×10^{-18} m,这表明,在 r 小到 1×10^{-18} m 时,库仑定律仍成立。地球物理探测的大量实验表明,在大到地球的线度 (10^7 m) 内,库仑定律是可靠的,至于在更大的距离范围(比如天文距离范围)内库仑定律是否适用,目前尚无定论。不过,现有的理论和实验事实告诉我们,库仑定律在由 10^{-15} m 到 10^7 m 的范围内都是可靠的。

7. 能根据公式 $E=k\frac{Q}{r^2}$ 判定,当 $r \rightarrow 0$ 时, $E \rightarrow \infty$ 吗?

在研究电磁现象时,为了便于讨论问题,经常需要对现实存在的物体进行简化,抽象成为理想模型。理想模型的建立需要有一定的条件。

如果我们研究一个均匀带电的球体,其半径为 R ,电荷量为 Q ,球体外部空间的电场场强为

$$E_1 = k \frac{Q}{r^2}$$

球体内部的电场,场强随半径 r 的增加而加大,场强

$$E_2 = k \frac{Q}{R^3} r$$

场强数值随 r 的变化曲线如图 1-28 中的实线。

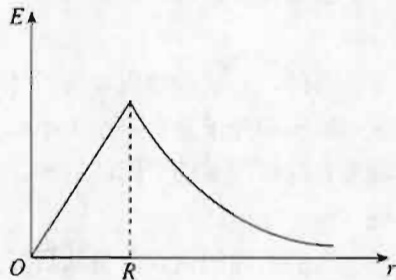


图 1-28

虽然只有当 $r \gg R$ 时,才能将带电球视为点电荷;当 $r > R$ 时,不能将带电球视为点电荷,但由于带电体内的电荷分布是球对称的。球外电场分布与点电荷电场相同,可以将之视为电荷量集中于球心的点电荷处理。当 $r < R$ 时,不能将球视为点电荷,也不能作为点电荷处理,不能用点电荷的场强公式求解。 $r < R$ 时,公式 $E=k\frac{Q}{r^2}$ 已经失效,不能误认为 $r \rightarrow 0$, $E \rightarrow \infty$ 。

(《高中物理专题分析》下册,杨兴国、叶禹卿主编,高等教育出版社,有改动)

8. 运动电荷之间的相互作用力

运动电荷之间的相互作用力比较复杂,现举一简单例子说明如下。如图 1-29,设点电荷 q_1 以匀速 v 运动,点电荷 q_2 静止不动,则 q_2 作用在 q_1 上的力为

$$F_{12} = -\frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^3} \mathbf{r} \quad \text{①}$$

即遵守库仑定律。但反过来, q_1 作用在 q_2 上的力却不遵守库仑定律。根据电动力学, q_1 在 q_2

处产生的电场强度为

$$E = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r^3} \left[\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) r + \left(\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}}{cr}\right)^2 \right]^{3/2} \quad (2)$$

式中 c 是真空中光速。因此, 按 $f = qE$ 计算, q_1 作用在 q_2 上的力便为

$$F_{21} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^3} \left[\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) r + \left(\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}}{cr}\right)^2 \right]^{3/2} \quad (3)$$

由此式可见, q_1 作用在 q_2 上的力不遵守库仑定律; 只有在 $v=0$ 时, ③式才化为与库仑定律一样的形式。这表明, 静止电荷之间的相互作用力遵守库仑定律。比较①式和③式还可以看出, 当两个电荷有相对运动时, 它们之间的相互作用力不遵守牛顿第三定律。关于运动电荷产生的场和它们之间的相互作用力, 是电动力学里研究的问题, 这里就不多讲了。

(《电磁学教学札记》, 张之翔编著, 高等教育出版社)

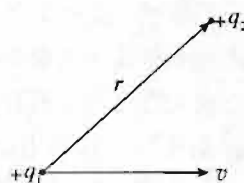


图 1-29 点电荷 q_1 以匀速运动, q_2 不动。

9. 关于场也是物质

光能不能算物质呢? 答案当然是肯定的。从科学的观点看, 光确实是一种物质。

大家知道, 太阳光照在人们身上, 就把温暖给了人们, 这说明光具有能量。烛光虽然没有太阳光强, 但是, 科学实验已经证明了, 凡是光都具有能量。另外, 光还有动量, 当光照到镜面上被反射时, 会给镜面一个压力, 就像皮球被墙面反弹时给墙面以压力那样。

因为光在传输时, 像一切运动的物质一样, 不仅具有能量, 还有动量, 所以说光是物质的一种。

当然, 光这种物质, 与固体、液体和气体等都不同。固体、液体和气体由原子或分子构成, 原子和分子是有一定大小和质量的。但是光并不是由原子或分子构成的, 它连绵不断地布满所有能够占据的空间。另外, 光的质量等于 0。所以光属于特殊的一类物质, 这类物质叫做场 (field)。

人们对场的认识, 是从研究自然界存在着的作用力开始的。很久以前, 人类就发现了一定质量物体之间的万有引力、带电体之间的库仑力以及磁石吸铁的磁力, 因为它们能够作用于受力物体而改变其运动状态。

万有引力是牛顿 (Isaac Newton, 1642—1727) 发现的。他的基本思想是, 所有具有质量的物体之间都存在着吸引力, 这种作用是超距的, 不需要物与物的接触。比如地球对于月球的吸引力, 它们相隔约 3.8×10^5 km, 万有引力的作用似乎是不经任何媒介即时传递的。基于这种思想, 牛顿导出了万有引力定律, 还建立了在力作用下物体运动规律的理论。这个理论在大量天体现象的解释中得到了检验。当然也有个别例外, 比如水星近日点的进动, 也就是在地球上观察到的水星绕日的椭圆形轨道随时间而逐渐推进, 用牛顿理论计算的结果与天文观测总有一个微小的差别。虽然这个误差很小, 但是与牛顿力学对其他现象十分精确的预言比起来, 这个偏差是不可忽视的, 它意味着牛顿理论需要改进。事实上, 这个问题直到爱因斯坦创立了引力的相对论理论之后才得以解决, 是广义相对论最得意的成果之一。

至于电力和磁力, 起初人们也认为是一种超距作用。因为从表面上看来, 当一个物体带上正电荷以后, 在离开它很远地方的另一个带负电的物体就立即能够受到它的吸引力, 这个力好像是越过两者的空间在瞬间直接传过去的。又如, 磁铁可以把附近的铁钉吸引过来, 两者原

来也没有接触。

然而，超距作用的观念与我们从日常生活中见到的大量其他现象中得到的认识并不相符。我们在推拉一个物体时，总是要接触这个物体，才能给它施力。投掷运动员把铅球抛出去是由于他的推力通过手作用于铅球。我们说话能被周围人听到，是由于声带振动压迫空气使之密度改变，从而通过在空气中产生的声波把声音传播开去。假如没有空气，即使我们使尽气力说话，周围的人也是不可能听到的。你往水中投下的石头，打到水面时会迫使那里的水面向下沉，然后水面又反弹起来，产生了振动。这种石头与水的作用通过水的传播而形成波浪，可以影响到很远的水面。在这些现象中，任何一种作用都是通过物体与物体直接接触而依次传递的。那么，难道电磁力和引力就能够不需通过任何媒介，即从一个物体作用到相距很远的另一物体吗？

直到19世纪30年代，英国物理学家法拉第（Michael Faraday，1791—1867）才对超距作用提出了不同的看法，并首先对于电磁相互作用引入了场的概念。他通过大量实验发现，带电体、磁体或电流之间的电作用或磁作用与它们之间的介质有关。介质不同，显示出的作用力就不同。因而，法拉第设想带电体、磁体或电流周围空间存在一种由电或磁产生的物质，它无所不在，起到传递电、磁力的媒介作用，法拉第把它称之为场。1832年在他写给英国皇家学会的一封信中指出：

“……磁作用需要时间，即当一个磁体作用于另一个远处的磁铁或一块铁时，产生作用的原因（我以为可以称之为磁）是逐渐地从磁体传播开的；这种传播需要一定的时间，而这个时间显然是非常之短的。我还认为，电磁感应也是这样传播的。我认为，磁力从磁极出发，类似于波纹的水振动或空气粒子的声振动，也就是说，我打算把振动理论应用于磁现象，就像对声所做的那样，而且这也是光现象最可能的解释。相比之下，我认为也可以把振动理论运用于电磁感应……”

法拉第在一张纸上撒些铁屑，在纸下面用磁棒轻轻颤动，结果这些铁屑在纸面上清楚地排列成一条一条的线形轨迹，形象地显示了无形的磁场中磁力线（现在更规范的名称是磁感线）的走向（图1-30）。事实上，不管磁体周围是否有铁屑存在，磁体周围总存在作用于铁屑的场。一块磁铁可以把铁钉吸引过来，这是磁场把磁力的作用传递过去的结果。



图 1-30 磁铁周围的铁屑分布显示了磁场中的磁力线走向

与磁力产生的原因相似，两个带电体之间的静电力是通过电场来传递的。当一个物体带上了电以后，在它周围也就产生了一个电场。另一个带电物体好像是浸在这个电场中，受到了该电场的作用力。反过来，第二个带电物体也在它周围产生了一个自己的电场，对于第一个带电物体来说，又好像浸在另一个电场中，因此也受到另一个带电物体的作用力。

物体间的电力和磁力就是这样通过电场和磁场相互传递的。后来人们又发现，电场和磁场常常互相依赖而同时存在，所以又将它们统称为电磁场。电磁场是一种真实存在的物质，但是与人们直观能体察到的、占据有限空间的物体不同，它是通过被作用物体运动之变化来表现自

身的性质的。电磁场不能被“看见”，但是它的强度可以被测量到，所以电磁场是可观测的。过去因为它的本质还没被认识，所以人们长期接受超距作用的观念。

从人类发现电磁场到完全认识这种特殊的物质，经过了漫长的道路。实验上经历了从静电、静磁、电磁感应到电磁振荡现象的发现；理论上经历了从库仑定律、高斯定律、安培定律到法拉第定律的建立，中间还加入了许多数学家的贡献。1865年，麦克斯韦（James C. Maxwell, 1831—1879）在提出了变化的磁场激发电场的概念之后，把在特殊条件下总结出来的电磁现象的实验规律归纳成了完整的普遍的电磁场理论，即得到了可以完全描述电磁现象的著名的麦克斯韦方程组。麦克斯韦理论统一描述了电现象和磁现象。按照这个理论，他预言变化的电场和变化的磁场相互激发，会形成变化的电磁场在空间传播（即电磁波），并算出了电磁波的传播速度。在1886到1888年间，赫兹（Heinrich R. Hertz, 1857—1894）专门设计了圆弧形导线的放电感应实验，证明了电磁波的存在。

（《探索物质最深处：场论与粒子物理》，谢治成、勾亮著，世潮出版有限公司，有改动）

10. 为什么引入电场强度描述静电场后，还要引入电势的概念？

电场强度 E 和电势 φ 从不同的角度描述静电场。当然，各点电场强度确定后，电场分布便已确定，用电场强度完全可以细致准确地描述静电场。但是，有时需要从能量的角度分析某些问题，使用电势概念更为方便。另外，电势 φ 是标量而电场强度是矢量，标量运算比矢量运算简单，若先求出电场中各点的电势，再通过 φ 与 E 的关系求 E ，也可使问题变得较为简单。基于上述两点原因，同时用 E 、 φ 描述电场。

电场强度 E 与电势 φ 之间存在一定的关系。中学物理中讲述了在匀强电场中 E 与电势差 U 的关系，沿电场方向

$$U = Ed \quad ①$$

在一般的情况下， E 与 U 的关系为

$$U_a = \int_a^P E \cdot dl \quad ②$$

$$E = -\text{grad}U \quad ③$$

②式说明，电势是场强的线积分，式中 a 、 P 称为积分的下、上限， P 点为电势零点。②式是电势定义的一般表示。③式中的符号“grad”称为“梯度”，其大小等于沿等势面法线方向的变化率。若改用极限表示，可将③式改写为

$$E = -\lim_{\Delta h \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta h} \cdot n \quad ④$$

④式中的 Δh 是沿垂直于等势面方向上的位移， ΔU 为经过 Δh 后，电势的变化量， n 为等势面法向单位矢量。③④式中的负号表示电场强度的方向沿电势减小的方向。

11. 关于零电势的选取

(1) 零电势选取的任意性及其限制

根据电势的定义，电场中任意两点的电势差 $\varphi_M - \varphi_P$ 等于从 M 点到 P 点移动单位正电荷静电力所做的功，即

$$\begin{aligned} \varphi_M - \varphi_P &= \int_M^P E \cdot dl = \int E \cdot dl \Big|_P - \int E \cdot dl \Big|_M \\ &= \left(-\int E \cdot dl \right) \Big|_M - \left(-\int E \cdot dl \right) \Big|_P \end{aligned} \quad ①$$

任一位置的电势，可表示为位置函数 $\left(-\int E \cdot dl \right)$ 与任一常数 C 之和：

$$\varphi = - \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} + C \quad (2)$$

函数 $(-\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l})$ 是确定的, 常数 C 取任一实数都不会改变给定的两点间的电势差, 只有预先规定电势等于0的位置以后, 才能根据②式确定常数 C 的值, 从而确定空间任一点的电势值, 空间任一点 M 的电势, 等于从该点移动单位正电荷到零电势点静电力所做的功, 即

$$\varphi = \int_M^{\text{零电势点}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (3)$$

由上所述可见, 零电势点的选取是重要的, 又是随意的。

但是, 在一些特殊情况下, 对零电势点的选取却有限制。例如, 在真空中, 点电荷的电势为

$$\begin{aligned} \varphi &= - \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} + C \\ &= - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{q}{r^2} dr + C \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} + C \end{aligned} \quad (4)$$

如果取 $r=r_0$ 处为零电势点, 将 $r=r_0$, $\varphi=0$ 代入上式, 可得

$$C = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_0}$$

于是得出点电荷的电势分布为

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right) \quad (5)$$

r_0 取非零的任意实数值, 都可以得到确定的电势分布。但是, 如果取 $r_0=0$ 处(即点电荷所在处)为零电势点, 就不可能确定常数 C , 也就得不到确定的电势分布。所以点电荷所在的点不能取为零电势点。这种不能取为零电势的点叫做零电势的“奇点”。

(2) 对分布在有限区域内的点电荷系或连续带电体, 选取无限远点为零电势点比较方便。

在单个点电荷的情况下, 如果取无限远处为零电势点, 即 $r_0=\infty$ 处 $\varphi=0$, 则常数 $C=0$, 电势

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (6)$$

表达式最为简单。

对于点电荷系, 如果取空间一点 P 为零电势点(这一点当然不能有任何电荷), 点电荷系电场中任一点的电势为

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i}{r_i} + \frac{q_i}{r_P} \right) \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i} + C \end{aligned} \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_P} \quad (8)$$

C 是几项之和, 比较麻烦, 但是, 如果取无限远处为零电势点, 则 r_P 为无限大, $C=0$, 电势表达式也最为简单。

如果场源是有限区域内的连续带电体, 其电势分布为

$$\begin{aligned}\varphi &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\int_Q \frac{1}{r} dq + \int_Q \frac{1}{r_p} dq \right) \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_Q \frac{1}{r} dq + C\end{aligned}\quad (9)$$

$$C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_Q \frac{1}{r_p} dq \quad (10)$$

C的计算也比较麻烦。如果取无限远处为零电势点, r_p 为无限大, $C=0$, 电势表达式也变得最为简单。

可见, 当选取无限远处为零电势点时, 能使电势的计算变得简单, 因此, 大家都愿意取 $\varphi_\infty=0$ 。

实际上, 点电荷是一个物理模型, 所谓无限远处, 并不是数学意义上的无限远。在距带电体相当远处, 就可把带电体看做点电荷。带电体的电场分布, 随着距离的增大而趋于点电荷的球对称场。等势面随距离的增大而趋于球面。场强随 r 增大而趋于按 $\frac{1}{r^2}$ 的规律减小。所谓物理上的无限远, 就是指场强已减得很弱而可以忽略不计的地方。这些地方对带电体来说是无限大的球形等势面。规定 $\varphi_\infty=0$, 就是规定这个无限大的球形等势面的电势为 0。

(3) $\varphi_{\text{地}}=0$, $\varphi_{\text{地}}=0$ 与 $\varphi_\infty=0$ 的等效性

在实际问题中, 常取大地的电势为 0, 即 $\varphi_{\text{地}}=0$, 凡接地的导体电势皆为 0, 这样做的原因是地球可以看做一个极大的 (对通常的带电体来说是无限大的) 导体球。一般带电体与地球接通, 可能流入 (或流出) 地面的电荷量 Δq 引起地球电势的变化 $\Delta\varphi_{\text{地}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_{\text{地}}} \Delta q$ 极小, 而可以忽略不计 (因为 Δq 很小, 而 $r_{\text{地}}$ 极大)。地面附近的带电体由于静电感应引起的地球电荷分布的变化也是极小, 因而可以忽略不计的。所以地球是一个电势稳定的大导体, 以大地作为电势的参考, 并规定地球的电势为 0 是很方便的。

实验证明, 取 $\varphi_{\text{地}}=0$ 与取 $\varphi_\infty=0$ 是等效的。这是因为, 地球上的一切实验都是在实验室或厂房里进行的, 其尺度远小于地球, 实验中的带电体激发的电场所充满的空间, 只是地面上的一个局部小区域。这区域的边缘, 对实验室中的带电体来说, 就是物理上的无限远。就是说, 对实际的带电体来说, 无限远只是地面上的部分地区, 这地区由地面上的各种建筑物构成, 它们与地是等电势的。因此, 对通常的实验, 取无限远处电势为 0, 与取大地的电势为 0 是等效的。

(二) 联系生活、科技和社会资料

静电喷涂

静电喷涂是用某种方法使涂料粒子带上静电荷, 并在被涂工件上加上相反的电压, 涂料粒子由于库仑力的作用就被吸到被涂工件上。根据产生静电荷方法的不同, 可分为以下两种:

(1) 间接带电法 也叫栅网式静电喷涂法, 其原理如图 1-31 所示, 栅网式平板放电电极带负高电压, 被涂工件在放电电极之间, 并通过输送机接地, 涂料喷出时被空气泵喷出的气流变成微粒, 放电电极之间因空气电离产生的离子附着的涂料微粒上, 带电的涂料微粒受库仑力作用被吸到被涂工件上。

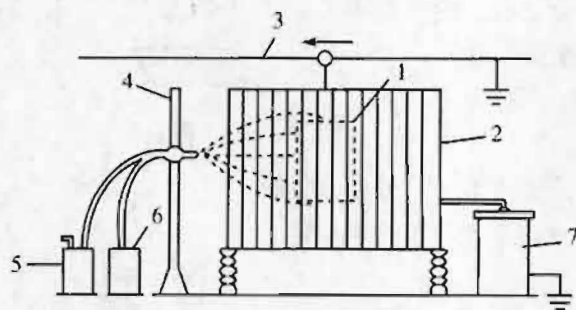


图 1-31 栅网式静电喷涂法

1. 涂件；2. 栅网式放电极；3. 输送器；4. 喷射器支架；
5. 空气泵；6. 涂料泵；7. 直流高压电源。

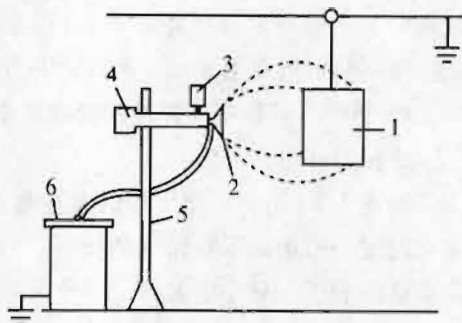


图 1-32 喷杯式静电喷涂法

1. 涂件；2. 回转杯；3. 涂料容器；
4. 驱动电机；5. 支架；6. 直流高压电源。

(2) 直接带电法 也叫喷杯式静电喷涂法，其原理如图 1-32 所示，碗形喷杯高速旋转并带负高电压，涂料从喷杯中心流出，由于离心作用在杯面上扩展开来，从喷杯的前端以雾状喷出，喷出的涂料微粒是带电的，被涂工件接地，涂料微粒就被吸引到工件上。这种方法涂料微粒带的电荷量较大，所以微粒在工件上的吸着率较高。

(三) 实验参考资料

1. 静电除尘

这里介绍一种很简单的演示装置。如图 1-33，将圆柱形铁罐的底部去掉，变为两端开口的圆筒，再通过一根绝缘柄把铁罐装在铁架台上，铁圆筒的中轴线处吊一根下系一个重物的金属线。演示时将静电起电机的两个电极分别接于圆筒和金属线上端，在圆筒下方点燃蚊香，烟雾从圆筒上冒出。起电时，烟雾即刻消失。

2. 带电体的相互作用

把一只白炽灯泡放在玻璃杯口上，如图 1-34 所示，用干净的手帕摩擦有机玻璃（或塑料）直尺 A 使其带电，将直尺 A 平稳地放在玻璃灯泡上，用同样的方法使直尺 B 带电，并接近直尺 A。如果两根直尺的材料相同，可以看到直尺 A 被排斥而旋转起来；如果它们的材料不同，则它们互相吸引，如果增大两直尺间的距离，可以看到它们的相互作用减弱；如使其中一根直尺上所带的电荷量增大，可以看到它们的相互作用增强。

3. 静电散花小实验

将很薄的纸剪成纸屑，放在带绝缘柄的金属板上，用干净的丝绸或手帕摩擦塑料膜垫使膜上带负电，再用手接触着金属板将其放在塑料膜上，由于静电感应，金属板的下表面带正电，上表面的负电荷从手流入大地，将手从金属板上移开，再手持

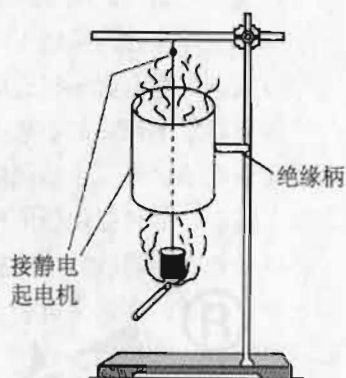


图 1-33

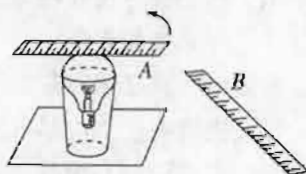


图 1-34

绝缘柄末端,将金属板与塑料膜垫分开,可以看到金属板上的纸屑向上飞散开来(如图1-35)。这是由于金属板下的电荷重新分布,使纸屑带上了同种电荷,并且产生相互作用。

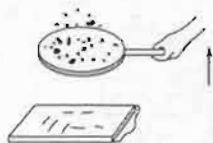


图 1-35

4. 制作小莱顿瓶,并用氖管做放电实验

莱顿瓶的制作方法:

如图1-36所示,给干净的胶卷盒外壁贴一层铝箔,在胶卷盒盖的中心固定一根用回形针做成的导杆,往胶卷盒内倒入适量的水,盖上盒盖就做成了一只小电容器——小莱顿瓶。



图 1-36

实验方法:

用感应起电盘使带绝缘柄的金属板带正电。

手持氖管的一端,其另一端与带正电的导电圆盘接触,可见与手持端相连的氖管电极闪光(氖管是相对低电势的一端闪光)。

用感应起电的方法使导电圆盘带上电,再将它与莱顿瓶的导杆接触。经多次充电后,手持氖管一端,将其另一端与莱顿瓶的导杆接触,可以看到氖管产生闪光现象。

5. 做好静电实验的关键

(1) 选择和检验绝缘材料

通常情况下,有机玻璃、泡沫塑料、保鲜薄膜、石蜡块、尼龙丝等都是适宜做静电实验的绝缘材料。材料表面清洁和干燥的状况对绝缘性能有很大的影响。实验前应当对绝缘材料的性能进行检验。比较简单的检验方法是:取一只验电器(或验电羽),使其带电。手持待测绝缘体的一端,让另一端接触验电器(验电羽)的导杆,如果验电器的指针(或张开的验电羽)不闭合,说明待测物的绝缘性能良好,否则,在实验前应对绝缘物表面进行清洁和除湿处理。

(2) 选择有效的起电工具和起电方法

可用高压静电起电机起电,还可用简易的起电方法——摩擦起电和感应起电。

如果对带电荷量的要求不高,可以摩擦绝缘棒(如有机玻璃棒)使其带电,再将电荷传递给需要带电的物体。在传递电荷时,考虑到绝缘棒的电荷不是自由电荷,应当使带电棒在物体表面上移动,尽可能使带电棒的各部分表面与需要带电的物体接触,以传递较多的电荷。

如果实验中需要较多的电荷量,用感应起电盘起电效果较好。感应起电盘的制作及起电方法如下:

取一只新的塑料保鲜袋,套在干净的硬泡沫塑料板上。再备一块带绝缘柄的金属板(可用演示电容器的极板),一块干净的布(或丝绸)。实验时,用布摩擦塑料袋表面使其带电(通常带负电),把金属板放在塑料膜上方,此时金属板在静电场的感应下,下表面带正电,上表面带负电。再用手接触金属板,板上的负电荷流向大地,手持绝缘柄将金属板移开,金属板上就带上了正电荷。用此种方法可以反复多次使导体带电,而塑料膜上的电荷几乎不减少。

(3) 注意操作要领

做静电实验必须时刻保持绝缘意识。例如,用导线把验电器与一带绝缘座的导体连接起来时,导线夹所夹位置应尽可能远离验电器的外壳,导线(即使是有绝缘外层)一定要架空,并尽可能远离桌面和其他与“地”相通的物体。又如,手持起电盘的绝缘柄时,应避免用手掌握棒(因为手心的汗水较多),并且应远离金属板。

6. 验证库仑定律

(1) 仪器和器材

专用支架,轻导体小球A和B,绝缘的导体球C(球A、B和C的大小和形状都相同),

镜尺（或透明标尺），丝线（1 m左右），米尺，起电盘，废唱片或塑料板，学生天平。

(2) 实验原理

带电体之间的作用力决定于它们之间的距离和它们所带的电荷量。本实验是通过共点力平衡的方法来测量带电体之间的作用力的。

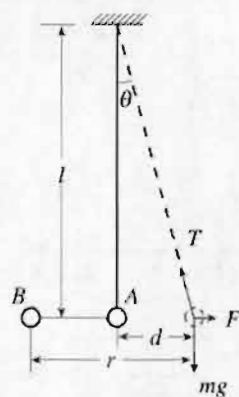


图 1-37

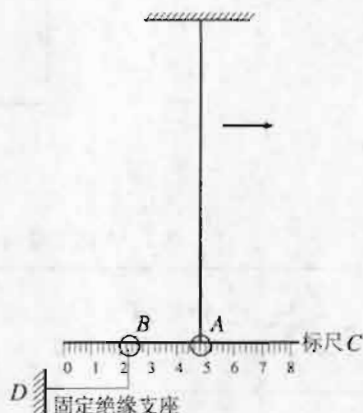


图 1-38

将一个带电小球 A 用细丝线悬挂，并将另一与小球 A 带同种电荷的带电球 B 与它靠近，A 受 B 的静电斥力作用而发生偏移，如图 1-37 所示；测量 A 球的质量 m ，测量悬点到 A 球球心的长度 l 和 A 球偏移的距离 d ，当 $l \gg d$ 时，有 $F = mg \tan \theta \approx mg \frac{d}{l}$ ，由此即可以得出小球 A 所受到的静电力。

(3) 实验方法

装置如图 1-38 所示。

①称量小球的质量 m 值。

②测量悬点到小球球心的距离 l 值。

③将 B 球固定在绝缘支座 D 上，A 球用丝线悬挂在支架上，并调好竖直与水平位置。

④使 A 球与 B 球带上同种等量的电荷（方法见“注意事项”④），移动 B 球支座 3~5 次，改变两球之间距离，用镜尺测量两球的距离 r 和 A 球偏移的距离 d ，将实验数据记录在表 1 中。

表 1 A 球质量 $m = \underline{\hspace{2cm}}$ g $l = \underline{\hspace{2cm}}$ cm

项目 次数	A 球偏移 d/cm	两球距离 r/cm	$\frac{1}{r^2}/\text{m}^{-2}$	静电斥力 F/N

⑤根据实验数据作出 $F - \frac{1}{r^2}$ 图象（图 1-39）。让学生分析并得出结论。

⑥用绝缘导体球先后分别与 A、B 两球接触，使其电荷量减半。随着 A 球位置的不同，适当调整 B 球支座位置，以保持两球距离不变，并记录数据，填入表 2 中，然后分析并得出结论。

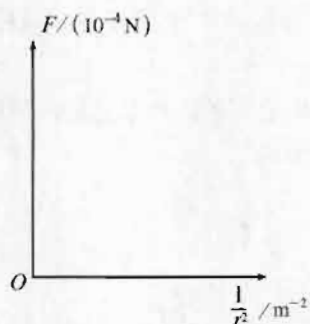


图 1-39

表 2 A 球质量 $m = \underline{\hspace{1cm}}$ g $l = \underline{\hspace{1cm}}$ cm

项目 次数	A 球电荷量	B 球电荷量	A 球偏移 d/cm	静电斥力 F/N

⑦分析误差原因。

(4) 注意事项

①在完成图 1-39 的 $F - \frac{1}{r^2}$ 图象时，可以发现第一次测量所得数据偏离直线较多，其原因是由于开始时带电小球所带电荷量较多，其电势高，容易漏电所致，所以误差较大。

②分析表 2 的数据时应注意，由公式 $F = mg \frac{d}{l}$ 计算出的静电力越来越小于理论值（与两电荷电荷量的乘积比较），这是由于带电小球不断漏电的原因。

③从实验结果可以发现，两带电小球相距越远，所带电荷量越小，测量结果越符合库仑定律，这是由于带电小球相距越远，所带电荷量越少，小球上的电荷量分布相对来说就越均匀，更接近于点电荷。对于这一现象的分析可以使进一步明确库仑定律的适用条件。

④使两个绝缘导体小球带同种等量电荷的方法：将两小球接触，用带电起电盘接触其中任一小球，拿走起电盘，使两小球分开，这两个小球便带上了同种等量电荷。

⑤使绝缘导体小球所带电荷量减半的方法：用另一完全相同的不带电绝缘导体小球与带电球接触，即可使带电球的电荷量减半。

⑥保持器材的清洁和干燥是完成实验，减少误差的重要保证。实验过程中动作要迅速，以免漏电过多。

⑦轻导体小球的制作方法：将乒乓球用细砂纸磨薄，其上涂一层碳素墨水，即成一个轻的导体小球。也可将磨薄的乒乓球涂上乳胶再粘细铜粉，待胶干后细心地将球面抛光，可以得到貌似铜质的导体小球，其质量仅 1 g 左右（可以由物理天平称量）。

⑧实验过程中测量 r 和 d 比较困难，尤其是在其值变化不大时，在镜尺上的读数误差可能较大。采用图 1-40 所示方法可以减少测量误差。B 为固定的带电小球；A 为用丝线悬挂的带电小球（A' 是初始位置，A 是在静电力

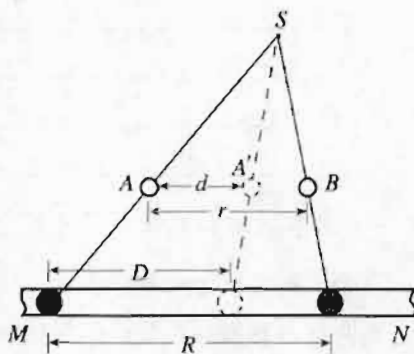


图 1-40

作用下的平衡位置)。 d 为 A 球偏离的位移, r 为两球之间的距离。 S 为点光源, 可用线状灯泡, 灯丝方向与标尺 NM 垂直, 而标尺 MN 应与 $AA'B$ 连线在同一水平面上。 利用 A 、 B 球在透明标尺 MN 上的投影, 即可比较精确地得到 D 与 R , 而 D 与 d 成比例, R 与 r 成比例, 用 R 和 D 代替 r 和 d 进行数据分析, 可提高实验精度。

7. 电场中等势面(线)的描绘

学习用恒定电流的电场模拟静电场描绘等势面(线)的方法, 熟悉等量异种电荷电场中等势线的分布情况。

(1) 仪器和器材

学生电源或干电池 4 节, 检流计, 等势线描绘实验器。没有等势线描绘实验器, 也可用圆柱形电极 2 个, 导电纸、复写纸、白纸各一张, 一对探针以及一块木板来代替。

(2) 实验原理

静电场的场强分布可以用电场线进行描述, 而等势面(线)与电场线相垂直, 通过实验测绘出电场的等势面(线), 就可以描绘出电场线。由于静电场中不存在电流, 一般磁电式测量仪表, 在有电流时才会有反应, 因此难以确定静电场的等势面(线)。

恒定电流的电荷分布和电磁场均不随时间变化, 所以在均匀电介质中恒定电流的电场和静电场相似, 利用其相似性, 可以用恒定电流的电场模拟静电场, 进行静电场的实验研究。而接到直流电源两端的小圆柱形电极之间形成的恒定电场, 可以用来模拟等量异种电荷之间的静电场。

实验中确定等势点的根据是: 当两点电势相等时, 连接该两点间的导线上无电流通过, 否则将有电流从高电势点流向低电势点。

(3) 实验方法

① 实验电路的连接

将导电纸有导电物质的一面向上, 下面依次垫复写纸和白纸(或坐标纸), 并用图钉固定在光滑木板上, 注意使导电纸在整个实验过程中不要移动。将圆柱形电极放在导电纸上, 并使两个电极相距 10 cm。将电极与电源的 6 V 稳压输出相连。如图 1-41 所示。

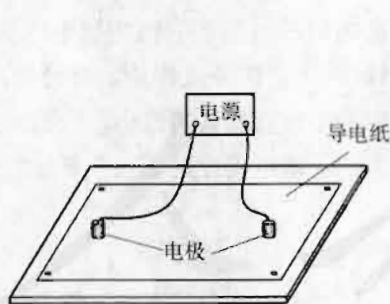


图 1-41

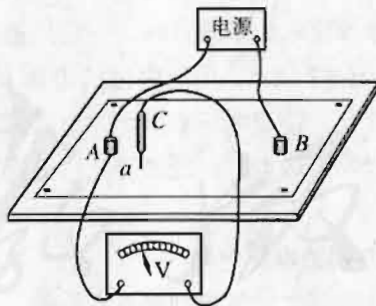


图 1-42

② 电势基准点的确定

电势的基准点可以用两种方法确定: 其一, 将两电极连线进行六等分, 除电极以外的五个等分点即作为电势的基准点(现在中学中一般都采用这种方法)。其二, 用内阻在 $200\text{ k}\Omega$ 以上的电压表, 将其一端接于电极 A 上, 另一端通过探针 C 探测场中的电位值, 如图 1-42 示。在 AB 连线上移动探针的位置, 在电压表读数为 1 V 时, 用力下压, 留下压痕, 作为 a 点, 依次类推可得电势差均为 1 V 的点 b 、 c 、 d 、 e 。适合于第二种方法的电压表有电子管毫伏表和晶体管毫伏表, 或数字式万用表。

③等势面(线)线的描绘

将探针接在灵敏电流计上,使一个探针固定在 a 点,另一探针在导电纸上轻轻移动,当找到电流为0的点,即灵敏电流计指针不发生偏转的点,作出标记 a_1 (用探针在导电纸上用力压一下,通过复写纸在白纸上留下痕迹)如图1-43所示。继续寻找这样电流为0的点 a_2 、 a_3 、 a_4 、…。这些点均和 a 点有相同的电势。

用以上方法,将一个探针依次固定于 b 、 c 、 d 、 e 点,分别找到与它们电势相等的点。

取去导电纸,将白纸上有相同电势的点用光滑曲线连接起来,即可得到五条等势面(线),如图1-44。

④电场线的描绘

利用电场线与等势面(线)垂直的性质,绘出等量异种电荷的电场中的电场线。

(4) 注意事项

①电极要与导电纸充分接触好,实验过程中电极位置不能变动,否则导电纸上的电场分布会发生变化,造成较大的误差。为此,可以增大电极对导电纸的压力,或在导电纸下多垫几张白纸。

②导电纸不能折叠,注意保持它的清洁,否则导电纸上的导电物质的分布将不均匀,影响等电势点的分布,严重时会出现断路。

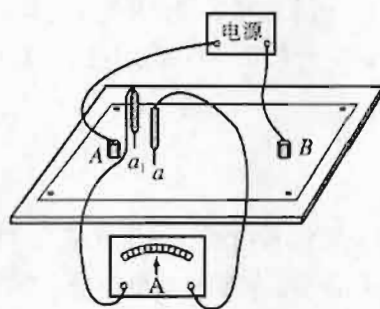


图 1-43

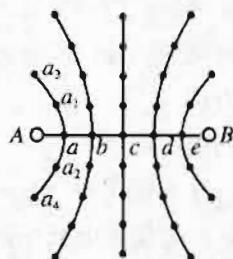


图 1-44

③用电压表确定电势基准点时,一定要选用高内阻的电压表。因为导电纸的电阻率较大, (每厘米间的电阻约 $2\text{ k}\Omega$),用低内阻的电压表测量时,它的分流作用,将使导电纸上的电场发生较大的变化,造成电压表显示的电势值比电场中该点的真实值小,引起误差。

④用探针找等电势点时,既要防止因电流太大把灵敏电流计烧坏,又要仔细观察,把等电势点找准。

8. 利用电容器放电测电容

深入理解电容概念,掌握利用电容器通过高电阻放电测电容的方法,学会计算曲线下面积的方法。

(1) 仪器和器材

学生电源,直流电压表,电流表,滑动变阻器,简式电阻箱,电解电容器(25 V $470\sim 1\,000\text{ }\mu\text{F}$),单刀开关2个,停表,导线若干。

(2) 实验原理

电容器充电后,所带电荷量 Q 与两极板间电势差 U 和电容 C 之间满足 $Q=CU$ 的关系。 U 可由直流电压表测出, Q 可由电容器放电测量。使电容器通过高电阻放电,放电电流随电容器两极板间的电压下降而减少,通过测出不同时刻的放电电流值,直至 $I=0$,作出放电电流 I

随时间变化的 $I-t$ 图象, 其图线下的面积即等于电容器所带电荷量 Q 。由 $C = \frac{Q}{U}$ 可求出电容器的电容值。

(3) 实验方法

①按图 1-45 连接好电路, 滑动变阻器 R' 先调在输出电压最小的位置, 电阻箱 R 调至最大阻值, 并串接一个定值电阻, 使放电电阻的总阻值大约在 $10 \sim 12 \text{ k}\Omega$ 左右。电源电压选择 6 V 稳压输出。接通电源后, 调节滑动变阻器 R' , 使电压表示数为某一确定值 (如 2.5 V), 然后闭合开关 S , 给电容器充电。当电容器两端电压 U_c 到达某一稳定电压 U 时, 充电完毕。记下此时的电压表和电流表的示数。

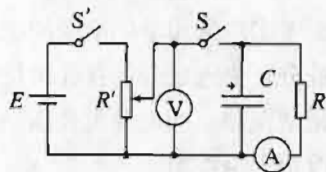


图 1-45

②断开开关 S' 和 S , 同时开始计时, 这时电容器通过电阻 R 放电, 放电电流 I_c 随时间 t 的增加而减小, 每间隔 5 s 读取并记录一次电流表的电流值, 直到电流消失为止。将测量结果记入下表。

充电电压 $U_1 =$ V	时间 t/s	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
	放电电流 I_c / μA										
充电电压 $U_2 =$ V	时间 t/s	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
	放电电流 I_c / μA										
充电电压 $U_3 =$ V	时间 t/s	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
	放电电流 I_c / μA										

③以放电电流为纵坐标, 放电时间为横坐标, 在坐标纸上作充电电压为 $U_1 = 2.5 \text{ V}$ 时的 $I-t$ 图象。图 1-46 所示为一次实验所得 $I-t$ 图象。

④计算实验所得图线下所围图形的面积, 即可求出电容器在充电结束时所带的电荷量。具体计算方法是: 首先, 以坐标纸上 $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ 的一个小方格作为面积计量单位, 数出实验图线下有多少完整的小方格。对于曲线通过其中的小方格, 凡曲线下的部分超过该格一半面积的记为一个小方格, 不足一半的则舍去不计, 这样可得到曲线下包含的小方格数。其次确定每个小方格所对应的电荷量值, 如纵轴的每一小格为 $10 \mu\text{A}$, 横轴的每一小格为 5 s , 则每个小方格所表示的电荷量值为 $q = 10 \mu\text{A} \times 5 \text{ s} = 50 \times 10^{-6} \text{ C}$ 。最后由曲线下的方格数与 q 的乘积即可得到电容器所带电荷量 Q 。

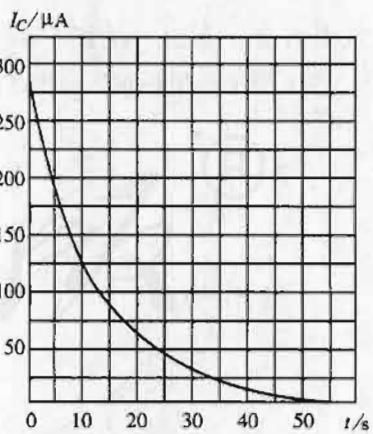


图 1-46

⑤由电容器的电容计算公式, 可计算出电容值

$$C = \frac{Q}{U}$$

⑥改变电容器的充电电压(如 $U=3\text{ V}$, 3.5 V)重复上述实验步骤, 求出电容器的电容值(这些值应大体相近, 请思考这是为什么), 再取平均值, 即能准确测出电容。

(4) 注意事项

①应采用学生电源的稳压输出供电, 不能用“直流输出”供电, 因为后者存在较大的交流成分, 交流成分的存在将使开关断开的瞬间, 电流表指针向右方偏转一下后再向左偏转, 造成记录误差。如电源无稳压输出挡, 则可在电源输出接线柱上并一个大电容滤去交流成分。或者改用干电池组。

②放电电阻过小, 放电时间短, 放电电流变化快, 会给记录数据带来困难; 放电电阻过大, 放电时间长, 放电电流变化慢, 很难达到 $I=0$ 。一般取放电电阻为 $10\sim 15\text{ k}\Omega$ 为宜。由于简式电阻箱最大阻值为 $9\,999\,\Omega$, 故应串接一个定值电阻。

③同时记录放电时间和放电电流, 是本实验操作上的一个难点, 一般是一个同学掌握停表, 每隔 5 s 读一次时间, 另一同学记录相应的放电电流值。下面介绍两种简便易行的方法:

· 节拍器计时法: 将节拍器的响铃周期调至 2 s (或 3 s), 使它每 2 s (或 3 s)铃响一次, 这样可根据铃响来记录放电电流的大小。用此法一个同学即能完成实验。

· 不论用停表还是节拍器计时, 在电流表指针偏转过程中读取放电电流值都比较困难。为解决这一问题, 可在电流表表盘上贴一张透明胶纸, 实验时, 手持泡沫笔并使笔尖随表针移动, 在相应的时刻于表针位置上划一墨点(墨点在胶纸上)。待放电完毕, 再由墨点位置记下相应的电流值。重新实验时可将墨点擦去, 重新划点。这种方法记录的数据较为准确。

④实验中, 由于电容器两端电压逐渐降低, 放电电流不断减少, 即放电电流 I 是随时间 t 变化的。因此电容器所带的电荷量 Q 不能直接用公式 $Q=It$ 来计算。若以放电电流 I 为纵坐标, 放电时间 t 为横坐标, 作出 $I-t$ 图象(如图1-47所示)。把横坐标 t 分成许多很小的时间间隔 Δt_1 、 Δt_2 、 $\dots$ 、 Δt_n , 在这些小区间里放电电流可视为不变, 相对应的数值 I_1 、 I_2 、 $\dots$ 、 I_n , 电容器 C 所带的电荷量为:

$$Q = I_1 \Delta t_1 + I_2 \Delta t_2 + \dots + I_n \Delta t_n$$

式中 $I_1 \Delta t_1$ 、 $I_2 \Delta t_2$...为图1-47中的狭条形面积。由此可知电容器 C 所带电荷量 Q 在数值上等于 $I-t$ 图象与坐标轴所包围的面积。

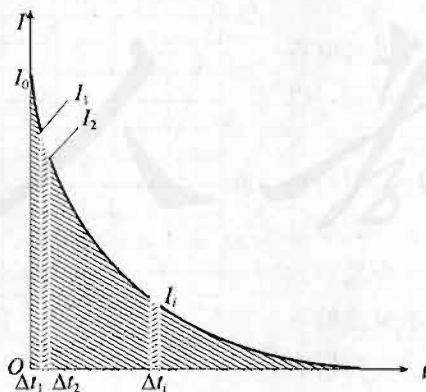


图 1-47

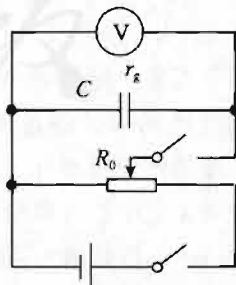


图 1-48

9. 用传感器做定量实验学习电容的概念

(1) 实验设计

①电流传感器

电流传感器是测定电流强度的仪器,与传统的指针式电流表相比,具有两个优点:一是测定电流时反应更迅速,因此可以捕捉到瞬间电流 I 的变化;二是它可以通过数据采集器与计算机连接,直接在屏幕上显示出电流 I 随时间 t 的变化图象。

②实验电路如图 1-49 所示。

(2) 实验器材

电流传感器 ($-1\text{ A} \sim +1\text{ A}$) 和数据采集器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共同研制的朗威数字化实验室 (Llongwill DISLab) 中的器材,此外还需要电阻箱 (取 $R=100\ \Omega$)、电解电容 ($50\text{ V } 1\ 000\ \mu\text{F}$)、高中学生电源 (取 $0 \sim 16\text{ V}$ 直流电压)、单刀双掷开关 S 。

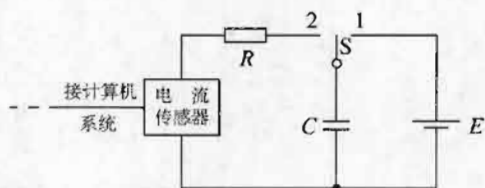


图 1-49

DISLab 网络实验室环境: WINDOS98 以上操作系统, 安装朗威数字化实验软件 (DISLab)。

(3) 实验过程

- ①按图 1-49 所示的电路进行实物连线, 注意电流传感器的正负极性不要接反。
- ②开启 DISLab 实验数据采集盒电源, 打开电脑及 DISLab 通用软件。
- ③按下 **示波** 钮, 软件能在窗口自动显示 $I-t$ 图象 (电流的单位为安培, 时间的单位为秒)。
- ④将电流传感器正负接线夹短接, 按下 **开始** 钮、按 **调零** 钮使其调零。
- ⑤按下 **停止** 钮、选择 **采样频率** 为 500 Hz 。
- ⑥选择电源电压 $U_1=4\text{ V}$, 将开关 S 先放到 1 位置, 给电容器充电。
- ⑦将开关 S 放到 2 位置, 让电容器通过电阻 $R=100\ \Omega$ 及电流传感器放电, 此时计算机将自动记录一幅 $I-t$ 图象。
- ⑧按 **保存图片** 钮保存图片。
- ⑨选择不同的充电电压 $U_2=8\text{ V}$ 、 $U_3=12\text{ V}$ 、 $U_4=16\text{ V}$, 重复实验步骤 7 和 8。
- ⑩拆卸电路, 整理仪器。

说明: 按下 **停止** 钮, 按下 **x 平移** 钮寻找图象, 按 **x 缩放** 钮使图象在窗口内的水平长度大小合适, 如果某个电流 I 的幅度太小, 可以利用 **y 缩放** 钮调整。

(4) 实验分析

①将学生经探究获得的 $I-t$ 图象传输到教师计算机上, 让学生进行网络交流, 总结共性认识, 教师点评结果。

②结合 $I-t$ 图象, 引导学生思考: 从理论上分析, 图象下面所围出的“面积”有什么物理意义? (可对比速度图象中获得的经验) 如何计算出这一“面积”? (可对比测定分子直径的实验中获得的经验)

③如图 1-50、1-51、1-52、1-53 是充电电压分别为 4 V 、 8 V 、 12 V 、 16 V 时的电容器放电图象, 放电用电阻为 $R=100\ \Omega$, 横轴为时间轴, 单位为秒, 纵轴为电流轴, 单位为安培, 供参考。

④通过计算, 分别求出四次实验中电容器充电后所带的电荷量, 并填写在下列表格中。

物理量	第一次实验	第二次实验	第三次实验	第四次实验
U/V	4	8	12	16
Q/C	3.84×10^{-3}	8.08×10^{-3}	13.44×10^{-3}	17.6×10^{-3}
$\frac{Q}{U} / (C \cdot V^{-1})$	960×10^{-6}	$1\ 010 \times 10^{-6}$	$1\ 120 \times 10^{-6}$	$1\ 100 \times 10^{-6}$

⑤通过对上述问题的思考和计算分析,学生不难得到,对同一电容器而言,在实验误差范围内, $\frac{Q}{U}$ 是一个常量,在此基础上给出电容的定义式 $C=\frac{Q}{U}$ 。如果有时间的话,还可以换一个其他容量的电容器进行实验,以得到不同的电容器 $\frac{Q}{U}$ 的比值不同的结论。

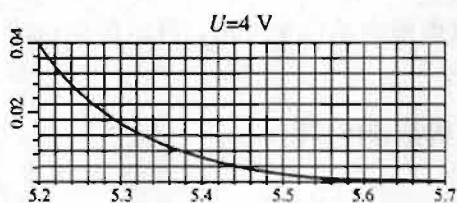


图 1-50

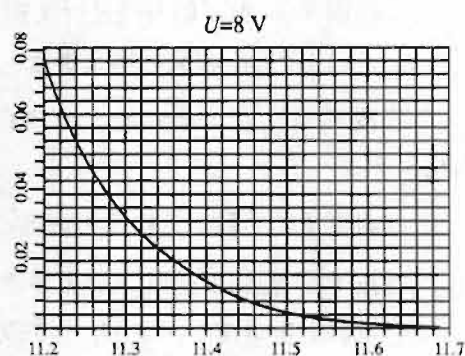


图 1-51

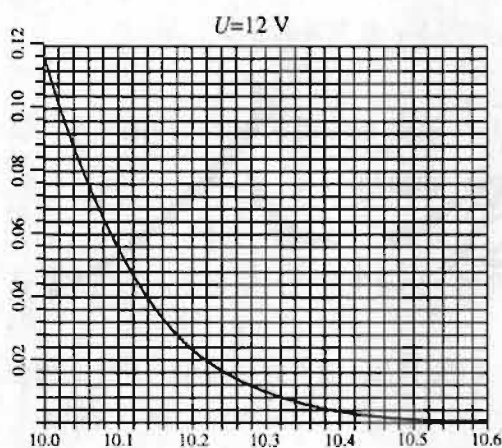


图 1-52

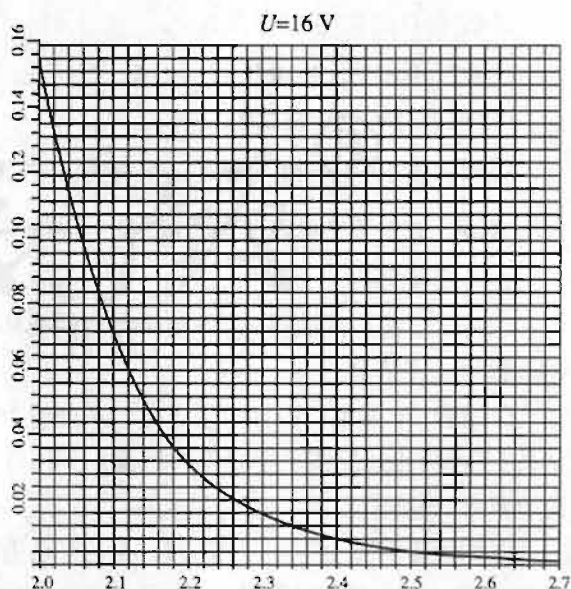


图 1-53

10. 影响静电计指针偏角 $\Delta\theta$ 的三个因素(1) $\Delta\theta$ 与平行板电容器的电容的变化量 ΔC 有关

由于电容器的两极板分别与静电计的外壳和金属棒连接（实际上是并联），所以电容器两极板间的电势差等于静电计的外壳与它的金属球之间的电势差。在 Q 不变的条件下，电容 C 减小得越多，电势差 U 增大得越多，静电计的张角变化 $\Delta\theta$ 也越大。由于 $C = \frac{\epsilon S}{4\pi k d}$ ，在只改变 d 的情况下，根据微分原理， $\Delta C = -\frac{\epsilon S}{4\pi k d^2} \Delta d$ ，这

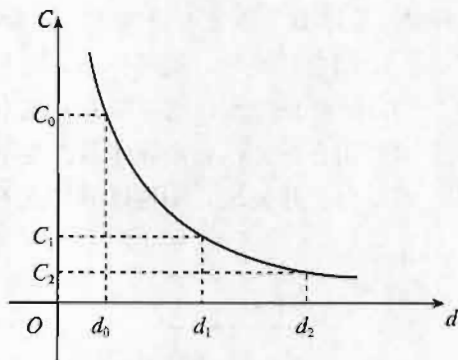


图 1-54

说明在 d 的变化量相同时， d 的值较小时电容的变化量 ΔC 较大。在图 1-54 中可以看到，当 $d_1 - d_0 = d_2 - d_1$ ，即 $\Delta d_1 = \Delta d_2$ 时，由图可知 $C_0 - C_1 > C_1 - C_2$ ，即 $|\Delta C_1| > |\Delta C_2|$ ，可见在电容器两极间距离较小时改变两极间距离静电计指针偏角变化较明显。

(2) $\Delta\theta$ 与电路中的分布电容有关

应该指出，在我们的实验中除了平行板电容器（记为 $C_{\text{板}}$ ）外，还有静电计也是一个电容器（记为 $C_{\text{计}}$ ），两根导线也是一个电容器（记为 $C_{\text{线}}$ ），这三个电容器是并联的。只有当 $C_{\text{板}} \gg (C_{\text{计}} + C_{\text{线}})$ 时，才可以忽略 $C_{\text{计}}$ 与 $C_{\text{线}}$ ，所以我们应该在 $C_{\text{板}}$ 较大的情况下进行实验静电计指针偏角变化才会较明显。

(3) $\Delta\theta$ 与静电计的 $U-\theta$ 显示特性曲线有关

实验表明，静电计的指针偏转角与金属棒和外壳间的电势差并不成线性关系。因此即使加在静电计上的电势差发生大小相同的变化，其指针偏转角的变化 $\Delta\theta$ 也是不同的。就是说 $\Delta\theta$ 不仅与 ΔU 有关，还与初始张角 θ_0 有关，实验时取 θ_0 在 15° 左右效果较好。

综上所述，为了实验取得较好的效果，建议平板直径取 20 cm 左右，两板间初始距离 d_0 取 0.5~1.0 cm（这样初始电容较大）。在只改变 d 值时， d 值由 d_0 增大到 10 cm 左右（超过 10 cm 时分布电容不能忽略）。实验开始时，应使验电器的指针张角 θ_0 在 15° 左右。为此，给电容器极板带电时，可采用多次接触带电法，直到指针偏转 15° 左右。一旦带电过多，可用手快速触摸导线的绝缘层，让 $C_{\text{线}}$ 放电，以减少极板的带电量。如果做到上述几个方面，实验时， $\Delta\theta$ 可接近 30° ，效果十分明显，在只改变正对面积或只插入电介质时，极板间距离也应在 0.5~1.0 cm 之间， θ_0 在 15° 左右。

五、补充习题

A 组

- 下列关于电场线的说法中，不正确的是（ ）
 - 电场线是电场中实际存在的线
 - 在复杂电场中的电场线是可以相交的
 - 沿电场线方向，场强必定越来越小
 - 电场线越密的地方，同一试探电荷所受的静电力越大
- 如图 1-55 所示，带电小球 A 附近有用绝缘支架支撑着的金属导体 B，当开关 S_1 、 S_2 断

开时, 导体 B 左端带有负电荷, 右端带有正电荷。下列说法中正确的是 ()

- A. 闭合开关 S_1 , 则导体 B 左端不再带有电荷
- B. 闭合开关 S_1 , 则导体 B 右端不再带有电荷
- C. 闭合开关 S_2 , 则导体 B 左端不再带有电荷
- D. 闭合开关 S_2 , 则导体 B 右端不再带有电荷

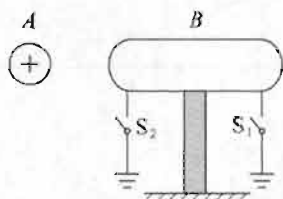


图 1-55



图 1-56

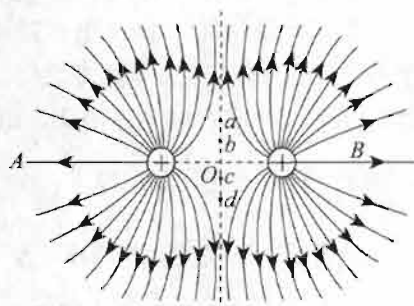


图 1-57

3. 如图 1-56 所示, A 、 B 两点在点电荷产生的电场的一条电场线上, 若一带负电的粒子从 B 点运动到 A 点时, 加速度增大而速度减小, 则可判定 ()

- A. 点电荷一定带正电
- B. 点电荷一定带负电
- C. 点电荷一定在 A 点的左侧
- D. 点电荷一定在 B 点的右侧

4. 如图 1-57 所示, 经过 AOB 三点的直线上有两个等量的正电荷, 经过 aOd 三点的直线是两点电荷连线的垂直平分线, 已知 $ab=bo=Oc=cd$ 。下列说法中正确的是 ()

- A. 把单位正电荷沿直线从 a 移到 b , 再把它从 b 移到 O , 两过程中静电力做的功相等
- B. 把单位正电荷沿直线从 a 移到 O , 再把它从 O 移到 d , 静电力做的总功等于 0
- C. 把单位正电荷从 O 点开始沿直线 Oba 匀速移动到无限远处的过程中, 静电力做功的功率先增大后减小
- D. 把单位正电荷从 O 点开始沿直线 Oba 匀速移动到无限远处的过程中, 静电力做的总功等于 0。

5. 如图 1-58 所示, 是一个电场中的等势面分布情况。试根据此图分析: (1) 如果把电子从 b 等势面移动到 e 等势面, 静电力做功是多少电子伏特? (2) 在电场中的 A 、 B 两点中, 哪一点的电场强度较大? 简述你的理由。

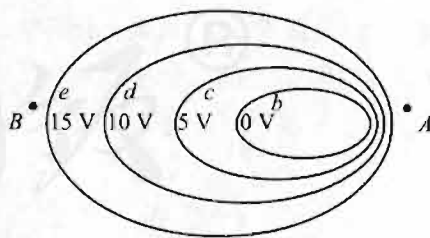


图 1-58

6. 匀强电场中的 A 、 B 、 C 三点构成一边长为 a 的等边三角形, 如图 1-59 所示。电场强度的方向平行于纸面。具有初速度的电子在静电力作用下从 B 移到 A 动能减少 E_0 , 质子在静电力作用下从 C 移到 A 动能增加 E_0 , 求匀强电场的电场强度。

7. 如图 1-60 所示, 电荷量 q 、质量为 m 的滑块, 沿固定绝缘斜面匀速下滑, 现加一竖直向上的匀强电场, 电场强度为 E , 且 $qE \leq mg$, 以下判断中正确的是 ()

- A. 物体将沿斜面减速下滑
- B. 物体将沿斜面加速下滑

- C. 物体仍保持匀速下滑
D. 仅当 $qE=mg$ 时, 物体继续保持匀速下滑

8. 如图 1-61 所示, 在水平放置的光滑金属板正上方有一带正电的点电荷 Q , 另一表面绝缘, 带正电的金属小球 (可视为质点, 且不影响原电场), 自左以初速度 v_0 在金属板上向右运动, 在运动的过程中 ()

- A. 小球先减速运动, 后加速运动
B. 小球一直做匀速直线运动
C. 合电场对小球的作用力为 0
D. 合电场对小球做的功为 0

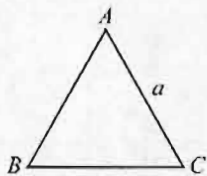


图 1-59

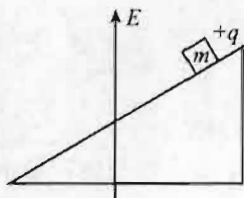


图 1-60

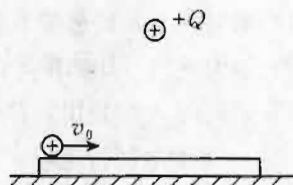


图 1-61

9. 如图 1-62 所示, Oxy 坐标系中, 将一负检验电荷 Q 由 y 轴上 a 点移至 x 轴上 b 点时, 需克服静电力做功 W ; 若从 a 点移至 x 轴上 c 点时, 也需克服静电力做功 W , 那么关于此空间存在的静电场可能是 ()

- A. 存在电场强度方向沿 y 轴负方向的匀强电场
B. 存在电场强度方向沿 y 轴正方向的匀强电场
C. 处于第 I 象限某一位置的正点电荷形成的电场
D. 处于第 IV 象限某一位置的负点电荷形成的电场

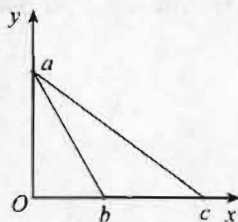


图 1-62

10. 一个带电质点, 电荷量为 $3 \times 10^{-9} \text{ C}$, 逆着电场方向水平地从 A 点移动到 B 点的过程中外力做功为 $6 \times 10^{-5} \text{ J}$, 带电质点的动能增加了 $4.5 \times 10^{-5} \text{ J}$, 求 A 、 B 两点间的电势差 U_{AB} 。

11. 在真空中的 O 点放一点电荷 $Q=1.0 \times 10^{-9} \text{ C}$, 直线 MN 过 O 点, $OM=30 \text{ cm}$, M 点放有一点电荷 $q=-2 \times 10^{-10} \text{ C}$, 如图 1-63 所示。求: (1) M 点的电场强度大小; (2) 若 M 点的电势比 N 点的电势高 15 V , 则电荷 q 从 M 点移到 N 点, 电势能变化了多少?

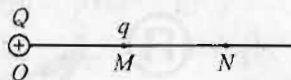


图 1-63

12. 如图 1-64 所示, 水平方向的匀强电场中, 有一质量为 m 的带电小球, 用长为 l 的细线悬于点 O , 当小球平衡时, 细线和竖直方向的夹角为 θ , 现给小球一个初速度, 速度方向和细线垂直, 使小球恰能在竖直平面内做圆周运动, 则圆周运动过程中速度的最小值为 ()

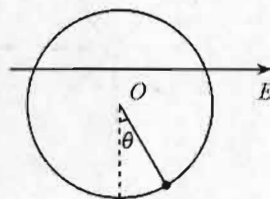


图 1-64

- A. $\sqrt{gl}$
B. $\sqrt{gl \cos \theta}$
C. $\sqrt{\frac{gl}{\cos \theta}}$
D. 0

B 组

1. 如图 1-65 所示, A、B、C 是三个安装在绝缘支架上的金属体, 其中 C 球带正电, A、B 两个完全相同的枕形导体不带电。试问:

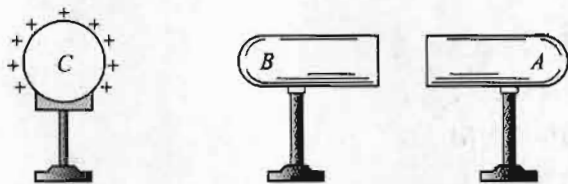


图 1-65

- (1) 如何使 A、B 都带等量正电?
- (2) 如何使 A、B 都带等量负电?
- (3) 如何使 A 带负电, B 带等量的正电?

2. 当一个验电器带电时, 为什么两片金属箔会张开一个角度? 为什么两个金属箔张开一定的角度就不变了?

3. 实验显示, 一电子 (质量为 m 电荷量为 e) 可以以半径为 r 的圆轨道绕均匀带电的直导线做匀速圆周运动, 轨道平面与直导线垂直, 如图 1-66 所示。

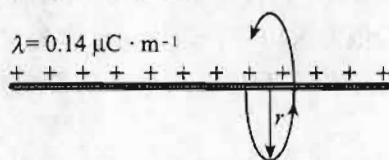


图 1-66

- (1) 根据这一实验事实, 说明均匀带电直导线周围的电场是怎样分布的?
- (2) 如果已知电子运动的速率为 v , 求电子所在轨道处的电场强度的大小。
- (3) 如果把长直导线无限分割成无数个小段, 那么每小段都可以看做一个点电荷, 你能根据点电荷的电场线分布特点说明由这些点电荷排成的直线的电场线一定与该直线处处垂直吗?

4. 孤立的点电荷的电场线如图 1-67 甲所示, 如果在它的附近放一个导体, 由于静电感应导体两端会出现感应电荷, 很快达到静电平衡状态。感应电荷的出现会改变点电荷周围的电场线分布, 某同学画了静电平衡情况下的电场线如图 1-67 乙, 这位同学画的电场线是否有错误?

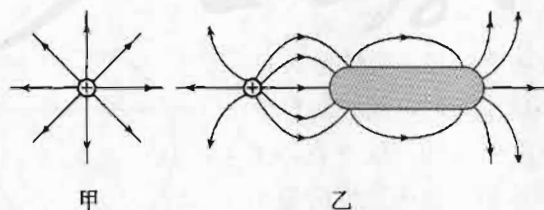


图 1-67

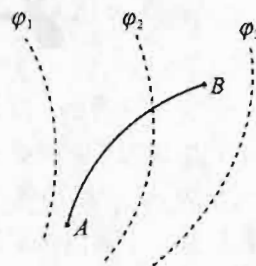


图 1-68

5. 如图 1-68 所示, 三条虚线表示某电场的三个等势面, 其中 $\varphi_1 = 10 \text{ V}$, $\varphi_2 = 20 \text{ V}$, $\varphi_3 = 30 \text{ V}$ 。一个带电粒子只受静电力作用, 按图中实线轨迹从 A 点运动到 B 点, 由此可知()

- A. 粒子带负电
B. 粒子的速度变大
C. 粒子的加速度变大
D. 粒子的电势能变大

6. 在真空中 A、B 两点分别放置等量异种电荷，在电场中通过 A、B 两点的连线中点对称地选取一个矩形闭合路径 $abcd$ ，如图 1-69 所示。现将一电子沿 $abcd$ 移动一周，试判断下列说法是否正确（在后面的括号中填写正确或错误）。

- ①由 $a \rightarrow b$ 静电力做正功，电子的电势能减少（ ）
②由 $b \rightarrow c$ 电场对电子先做负功，后做正功，总功为 0（ ）
③由 $c \rightarrow d$ 电子电势能增加（ ）
④由 $d \rightarrow a$ 电子电势能先减少，后增加，电势能总增量为 0（ ）

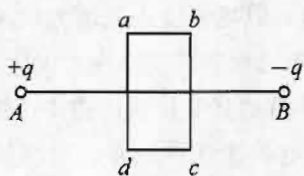


图 1-69

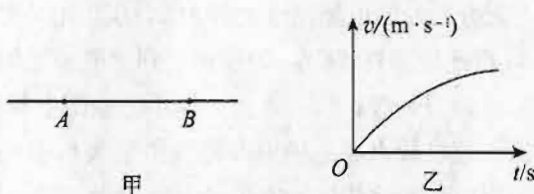


图 1-70

7. 如图 1-70 甲是某电场中的一条电场线，A、B 是这条电场线上的两点，若将一负电荷从 A 点自由释放，负电荷沿电场线从 A 到 B 运动过程中的 $v-t$ 图象如图 1-70 乙所示，比较 A、B 两点电势的高低和电场场强的大小可知（ ）

- A. $\varphi_A > \varphi_B$ B. $\varphi_A < \varphi_B$
C. $E_A > E_B$ D. $E_A < E_B$

8. 如图 1-71 所示，有三块大小相同平行导体板 A、B、C，其中 A 与 B 间距是 B 与 C 间距的一半，且 A、B 两板所构成的电容器的电容为 $10^{-2} \mu\text{F}$ ，电池电压为 2 V，求 A、B 两板上的电荷量分别为多少。

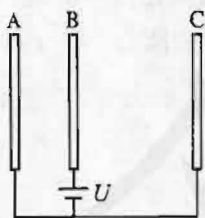


图 1-71

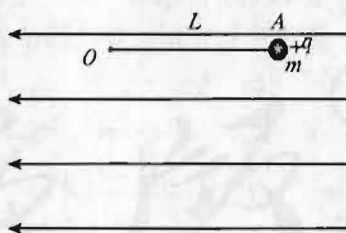


图 1-72

9. 如图 1-72 所示，空间存在水平方向的匀强电场 $E = 2.0 \times 10^4 \text{ N/C}$ ，在 A 处有一个质量为 0.3 kg 的质点，所带电荷量为 $q = +2.0 \times 10^{-4} \text{ C}$ ，用一长为 $L = 600 \text{ cm}$ 的不可伸长的绝缘细线与固定点 O 连接。AO 与电场线平行处于水平状态，取 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。现让该质点在 A 处静止释放，求：

- (1) 质点第一次到达 O 点正下方时增加的机械能 ΔE ；
(2) 质点第一次到达 O 点正下方时的速度大小 v_1 。

参考答案

A组

1. A、B、C

2. B、D 提示：开关断开时，导体B的左端带负电，右端带正电，这是静电感应现象。由于导体B右端的正电荷受到导体A的正电的排斥，所以不管哪个开关闭合，导体B都会接地，导体B右端的电荷都会消失。

3. B、C 提示：加速度增大，说明带负电的粒子在向产生电场的点电荷靠近。速度减小，说明该粒子受到排斥力的作用。所以点电荷一定带负电，并且一定在A点的左侧。

4. B、C 提示：从O到b再到a电场强度是不相等的，所以单位正电荷沿直线从a移到b，再把它从b移到O，两过程中静电力做的功不相等。因为a与d在同一等势面上，所以单位正电荷沿直线从a移到O，再把它从O移到d，静电力做的总功等于0。O点的电场强度等于0，无穷远处的电场强度也等于0，所以沿直线Oba的方向，电场强度是先增大后减小，因此从O点开始沿直线Oba匀速移动到无限远处的过程中，静电力做功的功率先增大后减小。

5. (1) 15 eV; (2) A点 提示：地图上等高线密集的地方地势变化快，物体在这种地方下滑的加速度较大。电场中等势线密集表示电势变化较快，电荷在这种地方运动的加速度较大，所以电势变化快的地方电场强度较大，因此A点的电场强度较大。

6. $\frac{E_0 a}{e}$ 提示：电子从B到A的过程中 $-eU_{BA} = -E_0$ ；质子从C到A过程中 $eU_{CA} = E_0$ ，

所以 $\varphi_B = \varphi_C > \varphi_A$ ，根据 $E = \frac{U}{d}$ ，得 $E = \frac{U_{BA}}{a \cos 30^\circ} = \frac{2\sqrt{3}E_0}{3ae}$ ，方向平行于BC，并指向C。

7. C 提示：因为静电力在竖直方向，正压力减小的同时摩擦力也成比例减小，所以仍能匀速下滑。

8. B、D 提示：静电平衡时，金属板的表面是个等势面，电场线与其表面垂直，所以小球做匀速运动，静电力对小球不做功。

9. A、C、D 提示：根据题意，b、c两点的电势相等且a点电势高于b、c两点的电势，选项A正确。若以第I象限某一位置的正点电荷为圆心，b、c两点在同一圆周上且比a离圆心的距离大，则选项C正确。若以第IV象限某一位置的负点电荷为圆心，b、c两点在同一圆周上，则选项D正确。

10. 5 000 V 提示： $W_{\text{外}} + qU_{AB} = \Delta E_k$ ，则

$$U_{AB} = \frac{\Delta E_k - W_{\text{外}}}{q} = \frac{4.5 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-5}}{3 \times 10^{-9}} \text{ V} = -5 000 \text{ V}$$

负号表明A点的电势比B点低。

11. (1) $E = 100 \text{ N/C}$; (2) $3 \times 10^{-9} \text{ J}$ 提示： $W_{MN} = qU_{MN} = -3 \times 10^{-9} \text{ J}$ ，这一过程中静电力做负功则电势能增加 $3 \times 10^{-9} \text{ J}$ 。

12. C

B组

1. 根据静电感应的原理可以解决本题。

(1) 把A、B紧密靠拢，让C靠近B，则在B端感应出负电荷，A端感应出等量正电荷，把A与B分开后再用手摸一下B，则B所带的负电荷就被中和，再把A与B接触一下，A和

B 就带等量正电荷。

(2) 把 A、B 紧密靠拢, 让 C 靠近 B, 则在 B 端感应出负电荷, A 端感应出等量正电荷, 再用手摸一下 A 或 B, 则 A 所带的正电荷就被中和, 而 B 端的负电荷不变, 移去 C 以后再把 A 与 B 分开, 则 A 和 B 就带等量负电荷。

(3) 把 A、B 紧密靠拢, 让 C 靠近 A, 则在 A 端感应出负电荷, B 端感应出等量正电荷, 马上把 A 与 B 分开后, 则 A 带负电 B 带等量的正电。

2. 提示: 当验电器带电时, 两片金属箔上带同种电荷, 同种电荷相排斥, 所以两金属箔会张开一定的角度。金属箔的张角越大, 则金属箔的重力与排斥力的合力越大。当这两个力的合力与悬挂处的拉力相平衡时, 金属箔就能够保持静止状态, 其张角就不会再增大。

3. 提示: 根据静电场、匀速度圆周运动等知识分析并回答问题。

(1) 因为电子绕直导线做匀速圆周运动, 所以电子所受的静电力提供了电子所需的向心力, 因此电子所受静电力的方向都是在垂直于直导线的平面内并指向直导线。由此可见, 直导线周围的电场线都是与直导线垂直, 并且呈辐射状指向远离直导线的方向。

$$(2) Ee = m \frac{v^2}{r}, E = \frac{mv^2}{er}.$$

(3) 把每一小段看做一个点电荷, 每个点电荷的电场线都像“光芒四射的太阳”的光线, 我们设导线的中点为 P, 在 P 的左右两个与 P 等距离的点电荷产生的电场强度在平行于导线方向的分量互相抵消, 在垂直于导线方向上的电场互相叠加, P 点就是两等量同号点电荷连线的中点, 所以这两个点电荷在经过 P 的垂直于导线的平面内的电场是与导线垂直的, 如果导线充分长, 那么把任何一点作为中点都是可以的, 所有点电荷产生的电场叠加的结果——所有电场线都是垂直于带电直导线。

4. 有错误。提示: 电场线起始于正电荷终止于负电荷, 导体的左端带负的感应电荷, 右端带正的感应电荷, 这位同学画的电场线大部分是正确的, 但是有两条电场线是明显错误的。这两条电场线从导体的左端出发终止于导体的右端, 如果真有这样的电场线, 那么就说明导体的左端电势高于右端的电势, 导体的内部就会产生从左向右的电流, 而静电平衡状态下, 导体中的电荷是不会定向移动的。可见这两条电场线是不存在的。

5. A、B 提示: 电场线与等势面处处垂直, 电场力指向曲线的凹侧, 所以粒子带负电, 选项 A 正确; 负电荷向电势高的地方移动, 电势能减小, 动能增加, 选项 B 正确, D 错误; A 处的等势线密集, A 处的电场强度大, A 处的加速度大, 选项 C 错误。

6. ①③正确, ②④错误。提示: 根据等量异种点电荷电场线分布情况和等势面分布的情况, 掌握静电力做功与电势能变化的关系来分析推理, 这个问题就容易解决。

$a \rightarrow b$, 静电力做负功, 电子的电势能增加, ①错误;

$b \rightarrow c$, 电场对电子先做负功, 后做正功, 因为 b、c 对称地分布的同一等势面上, 所以静电力做总功为 0, ②正确;

$c \rightarrow d$, 静电力做正功, 电子的电势能减少, ③错误;

$d \rightarrow a$, 电场对电子先做正功, 后做负功, 因为 d、a 两点分布在同一等势面上, 所以静电力做的总功为 0, 所以电子电势能先减少, 后增加, 电势能总增量为 0, ④正确。

7. B、C

$$8. \text{根据 } C = \frac{\epsilon S}{4\pi k d} \text{ 可知, } C_{BC} = \frac{1}{2} C_{AB} = \frac{1}{2} \times 10^{-2} \mu\text{F} = 5 \times 10^{-3} \mu\text{F}.$$

电容器 AB 的带电量 $Q_1 = C_{AB}U = 10^{-2} \times 10^{-6} \times 2 \text{ C} = 2 \times 10^{-8} \text{ C}$, 其中 A 板带负电, B 板带正电。电容器 BC 的带电量 $Q_2 = C_{BC}U = 1 \times 10^{-8} \text{ C}$, 其中 B 板带正电, C 板带负电。

$$Q_A = -Q_1 = -2 \times 10^{-8} \text{ C}, Q_B = Q_1 + Q_2 = 3 \times 10^{-8} \text{ C}.$$

9. (1) 24 J 提示: 静电力做功等于增加的机械能, $\Delta E = EqL = 24 \text{ J}$ 。

(2) $5\sqrt{10} \text{ m/s}$ 提示: $EqL + mgh = \frac{1}{2}mv_1^2$, $v_1 = 5\sqrt{10} \text{ m/s}$ 。

人教版®

第二章 恒定电流

课程标准的要求

1. 观察并尝试识别常见的电路元器件，初步了解它们在电路中的作用。
2. 初步了解多用电表的原理。通过实际操作学会使用多用电表。
3. 通过实验，探究决定导线电阻的因素，知道电阻定律。
4. 知道电源的电动势和内阻，理解闭合电路的欧姆定律。
5. 测量电源的电动势和内阻。
6. 知道焦耳定律，了解焦耳定律在生活、生产中的应用。
7. 通过实验，观察门电路的基本作用。初步了解逻辑电路的基本原理以及在自动控制中的应用。
8. 初步了解集成电路的作用。关注我国集成电路以及元器件研究的发展情况。

一、本章教材概述

本章是3-1模块的第二章，它的前一章是静电场。表面上看，第一章研究电场的知识，本章研究电路的知识，前者是“场”，后者是“路”，两者似乎没有什么关联。而且从具体内容来看，本章主要是运用欧姆定律等物理规律，围绕着串、并联电路，对电流、电压、电动势等物理量进行分析讨论，这些内容组成了一个相对封闭的知识结构，好像跟上一章不容易挂上钩。而实际上，本章的很多概念和规律都是在静电场知识的基础上建立的，和前一章有密切联系。

本章经常涉及的电压，来源于上一章建立的电势差概念。本章在对串联电路总电压跟各部分电压关系进行分析时，就是根据上一章电势差跟电势的关系从理论上推出的。在推导闭合电路欧姆定律的公式时，需要了解闭合电路中静电力和非静电力做功的情况，这就必须对闭合电路各处电势的高低进行分析。上一章所学习的电势概念，在这里成为推导闭合电路欧姆定律的基础。

本章电路问题中常说的电能，其本质是上一章所学习的电势能。本章许多知识的学习都是在电势能概念基础上进行的。例如，“电动势”一节，教科书强调，电源是通过非静电力做功把其他形式的能转化为电势能的装置，并在此基础上定义电动势的概念。又如，在“焦耳定律”一节，教科书指出：所谓电流做功，实质上是导体中的恒定电场对自由电荷的静电力做功，结果电荷的电势能减少，其他形式的能增加。教科书通过对电势能变化的分析，揭示了电流热效应的实质。

学生在初中也学过直流电路知识，与初中教科书不同的地方，最突出的就是它可以将所学过的静电场知识作为学习的基础，从而大大丰富了本章教材内容的理论性，同时也为学生有意



识将电路与静电场建立联系提供空间,本章第1节对恒定电场的知识做了简要介绍,使学生了解到,静电场中的许多规律,在恒定电场中也是适用的,为学生应用静电场知识分析电路问题清除了认识上的障碍。

电流和电动势是本章的重要知识。第三章“磁场”中的一个基础概念——磁感应强度,其定义式就涉及电流;《物理选修3-2》中的第四章“电磁感应”所学习的感应电流和感应电动势,都建立在本章电流和电动势概念的基础上;第五章“交变电流”中的电流瞬时值和峰值,是本章电流概念的拓展和具体应用;第六章“传感器”中所讲的传感器,就是把非电学量转换为电学量的元件,其中所转换的电学量就是本章所学的电流或电压。本章所学习的电流、电动势等物理概念以及欧姆定律、焦耳定律等物理规律贯穿在整个电学各章之中。

本章共有11节,大致可以分为四个单元。第一单元包括第1、2节,介绍电源、电动势的有关知识,这是本章的概念基础;第二单元包括第3、4、5、6共四节,这四节所讨论的是不含电源的部分电路问题,包括部分电路欧姆定律、串联电路和并联电路、焦耳定律和导体的电阻;第三单元包括第7、8、9、10节,这四节以闭合电路欧姆定律为中心内容,第7节推导、理解闭合电路欧姆定律,第8、9节是闭合电路欧姆定律的具体应用——“多用电表的原理”和“实验:练习使用多用电表”,第10节是根据闭合电路欧姆定律测量电源电动势和内阻的学生实验;第四单元是第11节,介绍简单逻辑电路的知识。这几个单元的安排,按照循序渐进的原则,先认识电源、电动势等基础概念,再逐步学习相关物理规律。先学习部分电路,再学习闭合电路。在学习闭合电路欧姆定律时,先妥善解决对知识正确理解的问题,随之引导学生对知识进行应用(设计简单多用表),再让学生获得操作体验(实验)。也就是说,在编写时,既重视《课程标准》中结果性目标的达成,同时关注体验性目标的实现。

在编写本章时还有对以下一些问题的思考:

1. 重视对知识线索进行规划

本章注重知识之间的内在联系,在设计全章各节的内容结构时,对其知识线索的展开进行了细致的规划,列举两个实例如下:

(1) 本章的主要内容是讨论电路,其外电路主要是串、并联电路。为此,教科书专门设立了“串联电路和并联电路”一节。串、并联电路的知识在初中已经有所涉及,高中应该在此基础上有更理性和定量的认识。为此,在讨论串、并联电路的电流、电压规律时,教科书没有采用实验探究的方式,而是以本章第1节“电源和电流”为基础,用“恒定电流电路内各处电荷的分布是稳定的”和有关“电势、电势差”的知识进行理论分析,得出结论。不仅避免了跟初中内容的重复,重要的是体现了高中不同于初中的要求,同时,使相关的知识线索能及时、流畅地展开,有利于学生的知识建构。另外,教科书还把“电压表和电流表”内容也放在这一节,阐述电表改装的方法和原理。这样处理,不仅有利于学生用串、并联电路的规律认识电表改装的基本思路,更重要的是渗透了电压表、电流表在直流电路中的本质实际上就是一个“电阻”。认识电表的这一电阻模型,将为灵活解决电路问题奠定很好的基础。

(2) 《课程标准》要求“理解闭合电路的欧姆定律”。教科书用理论分析的方法推导出闭合电路的欧姆定律,以利于对该定律的理解。其推导的核心过程是分析闭合电路以下三个地方的能量转化。

外电路	$Q_{\text{外}} = I^2 R t$	①
内电路	$Q_{\text{内}} = I^2 r t$	②
化学反应层	$W = E I t$	③



要理解①②两式，除了需要知道前面已经学过的焦耳定律之外，必须对内电路和外电路有清晰的认识。因此，教科书在用图 2.7-1 呈现一个闭合电路的同时，还用图 2.7-2 形象画出了闭合电路各处的电势高低情况，阐述了闭合电路中沿电流方向的电势变化。在这个基础上，指出哪个地方是电源的正极，哪个地方是负极，哪里是外电路，哪里是内电路。

要理解③式，必须从能量转化的角度认识电动势。为此，教科书在第 2 节“电动势”中用非静电力做功引起的能量转化以及用非静电力做功来定义电动势，在“电动势”这一节中都得到了解决。这样，在讨论以上三个计算式时，事先铺垫的线索都在起作用，此时则是“水到渠成”。

在这之后，通过“路端电压与负载的关系”的分析，理解闭合电路欧姆定律的线索不断延伸下去。“断路”和“短路”的讨论，把闭合电路欧姆定律的应用推向两种特殊的情况。如果把课本图 2.7-2 “闭合电路的电势”绘制成断路和短路的情况，相信对闭合电路欧姆定律会有更形象的认识。

2. 把理论探讨和实验探究结合起来

在探究决定导线电阻的因素时，教科书安排了两个探究方案。方案一从控制变量的角度，实验探究导线电阻跟长度、横截面积、材料三个因素的关系。实施方案一时，可能有的学校在因地制宜选择实验器材方面会有一些困难，因为要寻找材料不同、横截面积相同、而且还适合实验室电压表进行测量的金属导线并不容易，因此教科书还安排了探究方案二。探究方案二对实验器材的要求比较宽松，两种不同材料的导线不要求横截面积相同，只要能分别测出它们的长度、横截面积和电阻就可以了。教科书安排探究方案二还有另一个重要目的，这就是把理论探讨和实验探究结合起来。对高中生来说，应该具备一定的理论探讨的能力。在前面“串联电路和并联电路”中，学生已经经历了一次从理论上探讨串、并联电路的电流、电压关系的过程。本节的探究方案二，把导线电阻与长度、横截面积的关系演变为串、并联电路的模型，通过理论分析的方法得出导线的电阻与长度成正比、与横截面积成反比的结论，这不仅使得电阻与材料关系的实验探究器材易于获得，而且让学生再经历了一次把理论与实验相结合的探究过程，有利于提高学生全面的探究能力。

3. 让学生在体验中获取新知识

多用电表是本章学生需要学习的新知识。要了解多用电表的原理，核心的问题是多用表在欧姆挡时测量电阻的原理，即欧姆表的原理。教科书没有采用直接阐述欧姆表原理的方法，而是先让学生做一个闭合电路欧姆定律的例题。在这个例题的分析和解答中，通过具体的数据，使学生体会到闭合电路中某一电阻的变化，会引起串联在电路中电流表读数的变化，不同的电阻值和不同的电流表读数具有一一对应的关系，引导学生联想电流表的读数可以用来表示该电阻的值，进而构建出一个欧姆表的电路模型。这段教学设计，把欧姆表这一新知识，建立在对原有学习过程的体验上，通过对该体验的创造性联想来形成新知识。

4. 让学生经历解决问题的过程

教科书只有单向传递信息的功能，它只能通过文字和图形把信息提供给读者，教科书无法收集读者的信息，更不可能对读者的信息在教学现场中进行反馈。因此，有呼有应的教学设计需要教师在教科书的基础上进一步创造。本章“多用电表的原理”一节，教科书为教师设计双边活动的教学过程提供了一个初步的框架。课本图 2.8-3 把电流表、欧姆表、电压表的示意图并列在一排，有意让学生观察这三个图相同和不同的地方：相同的地方是都有一个电流表的符号；不同的地方是欧姆表在电流表的基础上串联了一个电源和可变电阻，电压表在电流表的基

础上串联了一个定值电阻。课本图 2.8-4 提供了一个单刀三掷开关,要求学生用这个单刀三掷开关设计一个最简单的多用表。也就是说,把课本图 2.8-3 中三个图相同的地方作为三掷开关连线的共同部分,然后电路分叉为三路,分别体现三个图不同的地方。学生经历该解决问题的活动,其收获不仅是知道了多用表原理这一知识结果,更重要的是经历了一次观察、比较、设计、创造的过程,是“过程与方法”目标在教学中的具体体现。

在这之后,教科书还安排了一个“说一说”活动,让学生认识一个双量程多用表的电路图(课本图 2.8-5),这个“说一说”活动的主要目的是识图。通过识图,让学生领悟真正多用表的工作原理。同时,课本图 2.8-5 的排列、结构和课本图 2.8-4 相似,如果学生对课本图 2.8-4 的设计有困难,“说一说”之后,有利于他们重新来完成“思考与讨论”中的设计任务。

5. 重视教学内容与科学·技术·社会的联系

教科书重视教学内容与科学·技术·社会的联系,该指导思想不仅体现在课文的正文中,而且贯穿于各个栏目,目的是使学生在“思考与讨论”“说一说”等栏目学习中,实践意识得到不断强化。例如:

思考与讨论 在“电阻定律”这一节中,讨论材料相同、厚度相同的正方形导体,其电阻是否跟尺寸有关,领悟该现象在集成电路中的意义;在学习“简单的逻辑电路”时,结合栏目中的实例,让学生讨论生活中还有哪些事例体现了“与”逻辑和“或”逻辑关系。

说一说 在“电阻定律”中,教科书引用了中央电视台播放的北京技术监督局有关人员对电线电缆产品质量抽查结果的一段讲话,让学生说一说讲话中体现了哪些物理原理;在“闭合电路的欧姆定律”中,让学生说一说夜深人静时灯光为什么特别明亮、接上电炉等电器时灯光为什么会变暗等生活现象。

做一做 在“电动势”一节中,让学生调查市场上常用的可充电电池,了解它们的分类、适用的设备和充电时的注意事项等。

科学漫步 在学习电源的知识后,教科书以“生活中的电池”为题,介绍干电池、锂电池、铅蓄电池、锌汞电池、太阳电池的有关知识;在“简单的逻辑电路”中,教科书利用“科学漫步”,介绍集成电路的有关知识。

问题与练习 以现实生活中的事实作为练习题的背景,例如,买某一规格铜导线作为空调专用线路时的实际电压损失问题;电饭锅的加热和保温电路问题;根据袖珍小电筒的灯泡规格推算所用电池的设计参数问题;路灯自动控制的门电路问题等等。

6. 学生实验——统一、基本的要求和灵活、多样的方法相结合

本章的一个重要实验是“测定电池的电动势和内阻”。教科书对这个实验的编写,体现了统一、基本的实验要求和灵活、多样的实验方法相结合的指导思想。

实验原理是基本要求,该实验,不管用哪种实验方法和器材,都是根据闭合电路欧姆定律,测出除电动势、内阻以外的物理量,利用图象或计算,求出电动势和内阻。

数据处理的方法也是基本要求。进行图象分析时,图象中的什么量表示电动势?什么量表示电阻?数据处理时怎样减小偶然误差?这些问题都是基本的问题,因为它们不仅与本实验有关,其他的实验也同样存在类似的问题。因此,这是一个统一的实验要求,是学生解决实验问题的基本素质。

究竟用哪一种具体的实验方法和器材来测量电源的电动势和内阻,教科书没有提出单一的实验方案。闭合电路欧姆定律的表达式,通过外电路 U 、 I 、 R 关系的变换,可以写成多种方式(教科书已有表述)。因此,通过测量 U 和 I 、或者 U 和 R 、或者 I 和 R 都可以求得电动势

和内阻。实验方法的多样性可以拓展学生的思路,可以避免死记实验步骤,有利于灵活把握实验原理,也有利于因地制宜地选择实验器材。

统一的基本要求和多样的实验方法相结合,将有利于学生在提高实验基本素质的情况下灵活解决各类实验问题。

课时安排建议

第1节 电源和电流	1 课时
第2节 电动势	1 课时
第3节 欧姆定律	1 课时
第4节 串联电路和并联电路	2 课时
第5节 焦耳定律	2 课时
第6节 导体的电阻	1 课时
第7节 闭合电路的欧姆定律	2 课时
第8节 多用电表的原理	1 课时
第9节 实验:练习使用多用电表	1 课时
第10节 实验:测量电池的电动势和内阻	1 课时
第11节 简单的逻辑电路	3 课时

二、教材分析与教学建议

第1节 电源和电流

1. 教学目标

- (1) 了解形成电流的条件,知道电源的作用和导体中的恒定电场。初步体会动态平衡的思想。
- (2) 理解电流的定义,知道电流的单位、方向的规定;理解恒定电流。
- (3) 经历金属导体内自由电子定向移动速率的推导过程,从微观的角度理解导体中电荷的定向移动与电流之间的关系。

2. 教材分析与教学建议

把电路知识与电场知识紧密联系起来是这套教科书在电路知识呈现方面的一大特色。本节教材内容正是电场与电路两部分知识的衔接,起承上启下的作用。例如,用电场的知识分析了两个分别带正、负电荷的导体之间的电势差,同时分析了连接在它们之间的导线中自由电子的定向移动情况,从而描述了电源在电路中的作用。

这种编排方式以学生刚刚学过的电场知识入手,分析、讨论问题,有效地将“场”和“路”的知识相联系,有利于培养学生不断运用学到的知识分析、解决实际问题的意识和能力。学习本节知识有利于学生电磁学知识体系的构建,避免知识的割裂。

(1) 电源

教科书从电流的形成入手,结合课本图 2.1-1 来说明电源在电路中的作用。不过,电源的



作用对学生来说有一定的难度。下面的例子可以较形象地帮助学生理解这个问题。



教学片段

用类比法理解电源的作用

如图 2-1, 水池 A、B 的水面有一定的高度差, 若在 A、B 之间用一细管连起来, 则水在重力的作用下定向运动, 从水池 A 流动到水池 B。A、B 之间的高度差很快消失, 在这种情况下, 水管中只可能有一个瞬间水流。

问题导引: 怎样才能使水管中有源源不断的水流呢?

分析: 水池 A 中的水量需要及时补充才行。可将水池 B 中的水及时抽到水池 A 中, 保持它们之间的高度差, 从而使水管中有源源不断的水流流过。

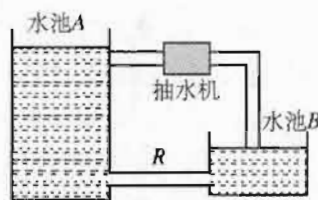


图 2-1

注意: 把电源的作用与抽水机类比, 学生比较容易理解, 尽管两者在工作机理上的差异很大, 但在教学的初期这样的类比是有益的。同时, 这部分教学也为后面电动势概念的建立打下一定的基础。

在此基础上, 教学中可以根据课本图 2.1-1, 设置恰当的问题引导学生进一步思考。

①用导线连接两个分别带正、负电荷的导体, 导线中有没有电流通过? 为什么? 如果有, 这个电流能持续下去吗?

②如何能让导线中保持持续的电流? 电源起到了什么作用?

通过以上问题的讨论, 使学生理解导体中产生电流的条件是导体两端有电势差, 即能产生驱使电荷做定向移动的作用力——静电力。电源的作用就是移送电荷, 保持导线两端的电势差, 从而保持电路中有持续的电流。

(2) 恒定电流

为什么要引入“恒定电场”的概念? 我们知道, 关于自由电荷在导体中做定向移动的原因, 过去教学时总是说, 导体中有了电场……于是自由电荷发生定向运动等, 没有更多的解释。这样的解释虽然正确, 但是, 实际教学中学生常常会问: 导体中的电场强度不是为 0 吗, 怎么又有了电场? 当然, 导体中电场强度为 0 是有条件的, 即静电平衡。不过, 学生对此印象并不深刻, 因为我们从来没有处理过静电不平衡的情况。如果稀里糊涂地过去, 对于学习恒定电流这个知识点来说, 好像没有多大妨碍, 但却有悖于“物理要说理”这个价值观教育的原则。

实际上, 有恒定电流存在时, 导体内的不同位置有电荷的堆积, 导体内的电场强度不是 0。导体内电荷的分布是不随时间变化的, 电场强度也不随时间变化。

可见, 恒定电场中“恒定”的意义是相对于静电场而言的, 其本质为动态平衡。教科书在这里渗透这种思想, 一方面要使学生了解到, 静电场中的许多规律, 在恒定电场中也是适用的, 为学生应用静电场知识分析电路问题清除了认识上的障碍; 另一方面, 也为后面的电动势、闭合电路欧姆定律的学习打下基础。

关于恒定电场, 不必要求学生分析导体内电荷分布的具体情况, 也不必分析电荷分布达到平衡的过程。



关于恒定电流,教科书仅从“电荷的定向移动形成电流”出发,揭示出电流越大,单位时间内通过的电荷量就越多,并直接给出了公式 $q=It$ 。同时,教科书以例题的形式,推导了铜导线中自由电子定向移动的速率,目的是帮助学生从微观角度进一步理解电流的形成,并将宏观量 I 与微观量 v 联系起来,而不把电流的微观表达式作为一个知识点去要求学生。

教学中可以抓住“电流的大小与电荷定向移动速率有关”这样一条思维主线,引导学生努力去探寻其中的关系。

需要向学生说明的是,电荷定向移动的速率和在导线中建立电场的速率是两个不同的概念。金属导体中,自由电子的定向移动不是简单的匀速运动,自由电子在无规则热运动基础上,受到静电力的作用做加速运动。同时,又不断地跟正离子碰撞而使定向运动遭到破坏,然后在静电力作用下再加速,再碰撞。从大量自由电子运动的宏观效果来看,可以认为它们以平均速率 v 做定向运动。

实际上,电流传导速率就是导体两端加上电压后,在导体中建立电场的速率(即电场传播速率),它等于光速。一旦接通电路,导体中以光速建立电场,整个电路里各处的自由电荷几乎同时都受到静电力作用而做定向移动,电路中各处立即就有了电流。

3. 问题与练习

内容分析

第1题通过用静电场的知识分析导线中电流是瞬时的和能持续的原因,使学生理解电源在电路中的作用。

第2题涉及电流的概念及定义式。

第3题在第2题的基础上计算电流,让学生体会宏观量电流与微观量电荷定向移动速率之间的联系,也是教科书中例题1的变式练习,锻炼学生具体问题具体分析的能力。

解答与说明

1. 如果用导线把两个带异号电荷的导体相连,导线中的自由电子会在静电力的作用下定向移动,使带负电荷的导体失去电子,带正电荷的导体得到电子。这样会使得两导体周围的电场迅速减弱,它们之间的电势差很快消失,两导体成为一个等势体,达到静电平衡。因此,导线中的电流是瞬时的。

如果用导线把电池的正负极相连,由于电池能源源不断地把经过导线流到正极的电子取走,补充给负极,使电池两极之间始终保持一定数量的正、负电荷,两极周围的空间(包括导线之中)始终存在一定的电场。导线中的自由电子就能不断地在静电力的作用下定向移动,形成持续的电流。

由于电池的内阻很小,如果直接用导线把电池的正负极相连,会烧坏电池,所以实际操作中决不允许这么做。这里只是为让学生明白电池的作用而出此题。

$$2. n = \frac{q}{e} = \frac{It}{e} = \frac{1.6 \times 1}{1.6 \times 10^{-19}} = 1.0 \times 10^{19}.$$

3. 在电子轨道的某位置上考察,电子绕原子核运动的一个周期内有一个电子通过。电子运动周期 $T = \frac{2\pi r}{v}$,等效电流 $I = \frac{e}{T} = \frac{e}{\frac{2\pi r}{v}} = \frac{ev}{2\pi r}$ 。

学生的困难在于不能理解电子绕原子核的运动就是电荷的定向移动。可以引导学生假想在电子轨道上某处进行考察,在这位置不断有电子从同一方向通过。本题还可以结合圆周运动和

静电力的知识,根据电子与原子核之间的静电力提供向心力,进一步求得电子绕核运动的速度、周期。

第2节 电动势

1. 教学目标

- (1) 知道电源是将其他形式的能转化为电能的装置。
- (2) 了解电路中(电源外部和内部)自由电荷定向移动过程中,静电力和非静电力做功与能量转化的关系。
- (3) 了解电源电动势的基本含义,知道它的定义式。
- (4) 理解电源内电阻。

2. 教材分析与教学建议

电动势是本章重点概念,也是本章的难点。教科书明确提出了“非静电力”的概念,让学生从功和能的角度理解非静电力,知道非静电力在电路中所起的作用,并能从非静电力做功的角度去理解电动势的概念。

同时,为了降低难度,教科书直接给出了电动势的定义式,但只是说“电动势在数值上等于非静电力把1 C的正电荷在电源内从负极移送到正极所做的功”,没有用比值方法严格定义。电源的内阻在后面的闭合电路欧姆定律学习中很重要,本节仅作一些铺垫。

(1) 非静电力

引导学生用功和能的观点来分析电路。

①在电源外部的电路里,自由电荷在静电力作用下移动,静电力做正功,电势能转化为其他形式的能。

②在电源内部的电路里,自由电荷移动的方向与受到的静电力方向相反,移送电荷的不再是静电力,叫做“非静电力”。非静电力做功将电荷“移送”到电势能高的电极,增加电势能(消耗其他形式的能)。

所以说,电源是通过非静电力做功,将其他形式的能转化为电能的装置。至于电源内的非静电力是怎样产生的,不要求理解。

(2) 电动势

我们知道,在过去的教学中,一般是用“电源两极间电压的大小是由电源本身的性质决定的,为了表征电源的这种特性,物理学中引入了电动势的概念”的表述把电动势的概念直接呈现给学生。

如果仅从学习知识的角度看,直接将电源电动势这一名词告诉学生,会节省很多教学时间,但是学生始终不会对这一概念有较深的理解。由于此套教科书多处对“通过做功研究能量”的思想都有阐述和铺垫,故此处再次运用这种功能关系的观点来学习电动势。这样既可以使学生对电源电动势的理解深刻,同时也会很好地培养学生理性思维的习惯。

我们常说要让学生经历科学过程,其形式是多种多样的。学生可以通过讨论或实验认识新的规律,通过阅读来了解前人的工作过程,跟着教师的思路一环套一环地接受新的概念等,这都是经历科学过程的不同形式。

电 动 势

设计思路：从非静电力做功的角度引入电动势的概念，教学上的设计要有层次，努力使学生经历一个理性的、逻辑的科学思维过程，并将其思维上的台阶搭建合理。

台阶一，电源能维持电荷的流动是因为它具有把自由电荷从负极经电源内部搬运到正极的能力（图 2-2）；正、负极堆积着正、负电荷，所以电源内部存在着由正极指向负极的静电场；要把电荷从负极搬运到正极就要克服静电场对电荷的作用力。

分析 1：正电荷在电源内部受到的这个静电力的方向与正电荷的运动方向相反。静电力充当的是阻力。

台阶二，一定存在着“非静电力”，它像个“搬运工”。

分析 2：电源内部，正电荷受到的这个静电力要阻碍它的运动，为此，必须要有另外一个力充当动力，克服静电力做功把正电荷从电源负极搬运到正极，满足形成持续电流的需要。这个力由电源提供，叫做非静电力，方向与静电力相反。

从能量转化的角度看，电源是把其他形式的能转化为电能的装置。通过非静电力做功，让电势能增加。

台阶三，即使是把相同的电荷量从负极移到正极，非静电力在不同的电源中做的功也不一样，就像把相同的重物从一楼搬上二楼，如果楼层的层高不同，人力做的功就不一样。

分析 3：不同的电源非静电力做功的本领是不同的，我们用电动势来表达电源这种特性。

台阶四，非静电力对电荷做的功与电荷的比值有特殊意义（相当于楼层的层高），定义为电动势。

小结：电动势在数值上等于非静电力把 1 C 的正电荷从电源负极移送到正极所做的功。若电源移送电荷 q ，非静电力做功 W ，则电源电动势 $E = \frac{W}{q}$ ，介绍各量的含义及单位。对于同一个电源来说，非静电力做的功 W 与移送的电荷量 q 成正比，比值保持不变，表达电源的转化能量的本领。电动势是电源的一种特性，其大小与非静电力的性质有关，与 W 和 q 是无关的。

可以看出，以这样的方法引入电动势，的确要比直接给出一个名词费些时间，但这是值得的，因为这里体现的是物理学的基本思想——通过做功研究能量变化的思想、用比值定义物理量的思想。不仅如此，这样的学习还有助于建立闭合电路中电荷运动的图景。从机械的练习中分出少量时间来经历这个过程，对于学好物理，提高解题能力，有根本性的帮助。

教学中还需要让学生知道：

- ①如果是静电力做功，电势能减少，移送单位正电荷减少的电势能就是电压；
- ②如果是非静电力做功，电势能增加，将单位正电荷从电源的负极移动到正极所增加的电势能就是电动势。

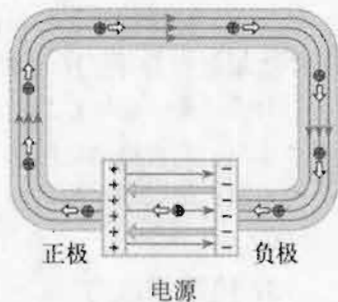


图 2-2 非静电力使正电荷在电源内部由负极移至正极。



电动势和电压的单位是一样的。

另外，教科书中的“说一说”栏目，是对电动势教学的拓展性内容，由于学生已经多次接触到用比值的方法定义物理量，可以引导学生对电动势的定义进行一些讨论。

(3) 电源内阻

教学中要让学生理解，不管是电源外部还是内部，不管是静电力做功还是非静电力做功，只要电荷在导体中移动都会受到阻碍，即导体都存在电阻。电源内部导体的电阻叫做电源内阻。

关于“科学漫步”栏目的教学，可以让学生来说一说各种电池上所标参数的物理意义，引导学生根据容量算一算电池储存的能量。教师也可以收集一些新型电池给学生做一些介绍。

对于“做一做”栏目的教学，建议该部分教学采用研究性学习的模式开展，将全班分成若干个小组，对可充电电池进行调查，写出调查报告，然后在全班交流和评比，增强学生关注社会的意识，增强学生的能源、环保意识。

3. 问题与练习

内容分析

第1题涉及决定电源电动势和内阻大小的因素。

第2题要求根据电动势的定义进行定量计算，考查学生对电源中非静电力做功及能量转化的理解程度。

第3题涉及非静电力做功快慢，即功率的问题。

解答与说明

1. 电源电动势相同，内阻不同。原因是解决本题需要理解电池电动势大小与电池正负极的材料和电解液的化学性质，也就是说，它与非静电力的性质有关。两种电池尽管体积大小不同，但电池内的材料相同，非静电力的性质相同，所以，电动势相同。而内阻就是电源内部物质对电流的阻碍，和其他导体的电阻一样与导体的形状、体积都有关系。

2. 10 s内通过电源的电荷量 $q = It = 0.3 \times 10 \text{ C} = 3.0 \text{ C}$ 。

化学能转化为电能的数值就是把这些电荷从低电势的极板移送到高电势极板的过程中，非静电力做的功 $W = Eq = 1.5 \times 3.0 \text{ J} = 4.5 \text{ J}$ 。

3. 乘积 EI 的单位是瓦特。

因为 $EI = \frac{Eq}{t} = \frac{W}{t} = P$ ，所以 EI 表示非静电力做功的功率，也就是电源将其他形式的能转化为电能电功率。

本题也可以从量纲的角度来考虑，要求学生从物理量的复合单位的物理意义入手进行思考。

第3节 欧姆定律

1. 教学目标

(1) 经历探究导体电压和电流关系的过程，体会利用 $U-I$ 图象来处理、分析实验数据、总结实验规律的方法。

(2) 进一步体会用比值定义物理量的方法，理解电阻的定义，理解欧姆定律。

(3) 通过测绘小灯泡伏安特性曲线的实验, 掌握利用分压电路改变电压的基本技能; 知道伏安特性曲线, 知道线性元件和非线性元件。学会一般元件伏安特性曲线的测绘方法。

2. 教材分析与教学建议

本节教材内容涉及两个问题。一是欧姆定律, 二是导体的伏安特性曲线。关于欧姆定律, 教科书先用演示实验探究导体中电流与电压的关系, 通过 $U-I$ 图象处理的方法得到电流与电压的正比关系, 由斜率反映了导体对电流的阻碍作用, 然后定义电阻。在此基础上, 通过对因果关系、适用条件的分析等, 得到欧姆定律的公式及表述。这样安排, 在实验电路、数据处理、研究思路等方面都较初中有很大提高, 也更加科学。对导体的伏安特性曲线的研究, 尤其是测绘小灯泡伏安特性曲线的实验, 使学生对欧姆定律的认识更加深化。

(1) 欧姆定律

通过实验研究导体两端的电压和电流之间的关系。实验中采用分压电路, 获得从 0 开始变化的电压, 经历对同一导体的电流和电压关系, 以及不同导体的电压和电流关系的研究, 使学生体会研究问题的思想方法, 并由电压和电流的关系定义电阻。同时, 利用图表和 $U-I$ 图象的方法处理数据, 总结规律。教学中要注意这些较初中有提高的地方, 达到应有的教学效果。



欧姆定律

问题导引: 研究导体两端电压和电流关系。

实验设计: 画出实验电路图。对程度比较好的学生可提出较高要求。即可以引导学生思考, 如何改变导体两端的电压。对分压连接和限流连接两种方法进行分析、比较, 提高学生电路分析和设计的能力。也可以讨论分压接法对采集数据的好处等。

进行实验: 由教师操作实验, 并用列表的方法记录数据。

数据处理: 实验得到导体中的电流与导体两端电压的多组数据后, 引导学生用 $U-I$ 图象的方法进行分析。对同一个导体而言, $U-I$ 图象是一条过原点的直线。

分析论证: 不管电压 U 和电流 I 的大小如何变化, 它们的比值 $\frac{U}{I}$ 是恒定的, 由此说明, 比值 $\frac{U}{I}$ 是一个与导体本身有关的量, 与导体两端的电压和通过导体的电流无关。对不同的导体, 比值 $\frac{U}{I}$ 的数值一般是不同的。当给各导体加上相同的电压时, 比值 $\frac{U}{I}$ 越大的导体中电流越小。这个比值反映了导体对电流的阻碍作用, 它就是导体的电阻 R 。

同伴交流: 用比值定义物理量的方法学生已经遇到多次, 在这里可引导学生进行交流, 做一些类比, 进一步领会这种科学研究方法。

小结: 欧姆定律的公式可以从电阻的定义式变形得出, 即 $I = \frac{U}{R}$, 但必须讨论其因果关系、适用条件等。为了更好地理解欧姆定律, 需讨论下面两个问题:

- ① 对同一电阻来说, 其中电流的大小与什么有关?
- ② 对同一电压来说, 导体中电流的大小与什么有关?



④问题讨论

要引导学生自己发现问题，并自己解决问题。问题讨论要体现两个层次。

首先，看到伏安特性曲线不是直线，引导学生分析哪部分曲线斜率大，曲线的斜率又表示什么物理意义。让学生明确由于电压、电流的不同，灯泡灯丝的温度不同，电阻不同，造成 $I-U$ 图象的斜率不同。

其次，要看到，灯两端电压在额定电压附近变化（小灯泡接近正常发光）时，曲线的斜率几乎不变，也就是说，灯丝的电阻变化很小，我们在一般计算时可以忽略这个变化。

3. 问题与练习

内容分析

第1题是导体中电流与两端电压成正比关系，即欧姆定律的简单运用。

第2、第3题要求对通过导体的电流与两端电压成正比有较深刻的认识，并能理解伏安特性曲线的物理意义。要求学生能画出伏安特性曲线并利用图线进行分析，可以说这是从 $I-U$ 图象获得有效信息的一种训练。

第4、第5题则对伏安特性曲线的理解要求更高，其中包括从 $I-U$ 图象获取信息的能力训练。

解答与说明

1. 因为 $\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_1}{U_2}$ ，所以 $I_1 = \frac{U_1}{U_2} I_2 = \frac{50 \times 2}{8} \text{ mA} = 12.5 \text{ mA} > 10 \text{ mA}$ ，因此不能用这个电流表来测量通过这个电阻的电流。另外，也可以先求通过的电流为 10 mA 时，电阻两端的电压值（ 40 V ），再将所得的电压值与 50 V 比较，从而作出判断。

2. $R_a > R_b = R_c > R_d$ 。用直线将图中的4个点与坐标原点连接起来，得到4个电阻的伏安特性曲线。在同一条直线上的不同点，代表的电压、电流不同，但它们的比值相同，这个比值就是对应电阻的阻值。 b 、 c 在同一条直线上，因此电阻相同。在其中三条直线上取一个相同的电压值，可以发现 a 的电流最小，因此电阻最大， d 的电流最大，因此电阻最小。也可以根据直线的斜率判断电阻的大小。

3. 如图 2-4 所示。

4. 如图 2-5 所示。可以根据电阻求出 3 V 、 4 V 和 5 V 时的电流，在坐标系中描点，画出 $I-U$ 图象。由于点太少， $I-U$ 图象所给出的只是一个粗略估测的结果。

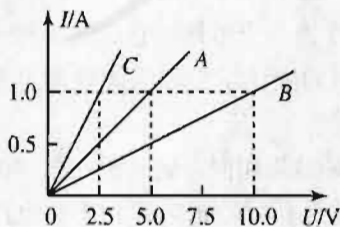


图 2-4

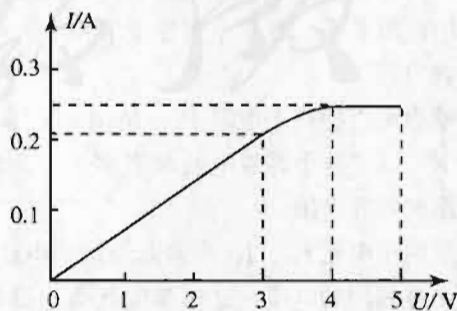


图 2-5

5. 证明： $k = \frac{I}{U} = \frac{1}{R}$ 。

第4节 串联电路和并联电路

1. 教学目标

- (1) 经历串、并联电路的电流关系和电压关系的理论分析过程。
- (2) 经历根据电流、电压关系和欧姆定律，推导串、并联电路的电阻关系的过程。理解串、并联电路的电阻关系。提高逻辑思维能力。
- (3) 通过对电表改装的分析讨论，提高综合运用欧姆定律、电路串并联规律以及分析解决问题的能力。

2. 教材分析与教学建议

本节教材内容主要的知识线索：根据“恒定电流电路内电荷的稳定分布”分析得出串、并联电路的电流关系；根据电势和电势差的概念，通过理论分析得到串、并联电路的电压关系；在此基础上，得到串、并联电路的电阻关系。然后，从应用角度出发，通过对电表量程的改装、电流表和电压表电路模型的建立等内容使知识得以拓展。

教学中要通过分析，让学生体会到高中与初中的区别，提高理论分析能力。与初中相比，本节教材内容注重串、并联电路有关规律的理论推导和实际应用。注重学生逻辑思维能力的提高。教科书将电表的改装问题通过习题的方式呈现，目的并不是新知识点的传授，而是欧姆定律的应用，着眼点在基本物理规律上。

(1) 串联电路和并联电路的电流和电压

我们知道，初中物理教科书也涉及串联电路和并联电路的电流、电压的关系，那是通过实验总结出来的。这套高中物理教科书以此为基础上了一个台阶：根据电荷守恒的思想，分别得出串联电路和并联电路中各点的电流的关系；又根据各点电势的关系，分别得出两种电路中的电压关系。

教科书这样处理的目的是，一方面是从理论分析的角度使学生对串、并联电路中的电流、电压间的关系有更深刻地理解；另一方面是使学生体会到，许多概念、规律都靠逻辑关系联系着，物理学是一个自洽的体系。

(2) 串联电路和并联电路的电阻

教科书根据串、并联电路的电压和电流关系以及欧姆定律进行了理论推导，得到了串、并联电路的电阻关系。教学中要逐步培养学生对实际问题进行理论分析的习惯，让学生体会理论探究的魅力。

教学中可以把两个电阻 R_1 、 R_2 串联起来接到电路中，作为一个整体，它的效果相当于一个电阻 R ，以“这个等效电阻 R 有多大”为题提出问题。目的要让学生领会串联的总电阻是串联电路的等效电阻。

如果两个电阻 R_1 、 R_2 串联起来接到电路中与一个电阻 R 效果相同，就是说在相同的电压下，应该有相同的电流。这样学生就会想到解决问题的关键是利用欧姆定律和串联电路的电压、电流关系。

得到串联电路的电阻关系后，可以让学生自己推导并联电路的电阻关系。让学生体会推导过程中的思想方法。

这里的“思考与讨论”栏目是为了帮助学生进一步理解并联电路的电阻关系，可以引导学

生做以下的讨论：

- ①几个相同的电阻并联，总电阻为一个电阻的几分之一；
- ②若不同的电阻并联，总电阻小于其中最小的电阻；
- ③若某一支路的电阻增大，则总电阻也随之增大；
- ④若并联的支路增多时，总电阻将减小；
- ⑤当一个大电阻与一个小电阻并联时，总电阻接近小电阻。

(3) 电压表和电流表

电压表、电流表在直流电路中可以看做是一个“电阻”。不过与通常电阻不同的是，电压表这个“电阻”两端的电压是可读的；电流表这个“电阻”中的电流也是可读的。它们完全遵从电阻的串、并联规律。认识电表的这一电阻模型（图 2-6），可为灵活解决电路问题奠定很好的基础。

教学中要注意让学生理解表头就是一个电阻的事实，了解表头的构造，知道表头中有电流通过，指针会发生偏转。电流越大，指针偏角越大。对表头的内阻 R_g 、满偏电流 I_g 、满偏电压 U_g 的大小有一个基本的认识， $I_g = \frac{U_g}{R_g}$ 。

教科书的“思考与讨论”栏目，目的同样是为了让学生更好地理解电流表实际上也是一个小量程的电压表的问题。可以引导学生运用欧姆定律进行分析，如果知道表头的电阻和流过的电流，根据欧姆定律就可以计算表头两端的电压，即 $U_g = I_g R_g$ 。还可以根据欧姆定律把电流表相应各点的电流值改写成电压值。这样，电流表就成为可以直接测量电压的电压表了。它们本质上并无差别，只是刻度盘的刻度不同而已。

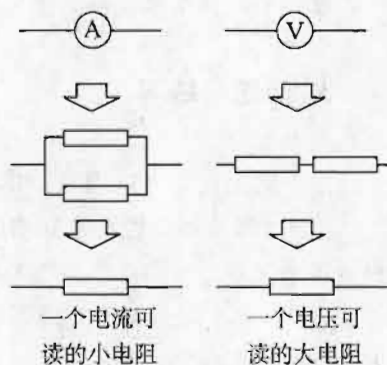


图 2-6



教学片段

电表的改装

提出问题：由于表头的满偏电流 I_g 、满偏电压 U_g 很小，不能满足于实际测量。怎样利用表头来测量大电压和大电流呢？

讨论：对同一表头的内阻 R_g 、满偏电流 I_g 、满偏电压 U_g 三个特征量来说，其大小是一定的。与表头串联一个电阻， $U = U_g + I_g R$ ，电压表的量程被扩大了 $I_g R$ ， R 越大，量程会越大。电阻 R 起到了分压的作用。

反过来，与表头并联一个电阻， $I = I_g + I_R$ ，电流表的量程被扩大了 I_R ，其中， $I_R = \frac{I_g R_g}{R}$ 。可见， R 越小，量程会越大。电阻 R 起到了分流的作用。

所以，利用表头来测量大电压时，需要串联一个较大的电阻，这个电阻叫做分压电阻；测量大电流时需要并联一个较小的电阻，这个电阻叫做分流电阻。

问题导引：如何计算分压电阻？改装后的表盘刻度还是均匀的吗？内阻的增大对测量有什么好处？

分析论证：根据 $U=U_g+I_g R$ ，分压电阻 $R=\frac{U-U_g}{I_g}$ 。

在 $U=U_g+I_g R$ 式中， U_g 、 I_g 为常量， U 与 R 成线性关系，所以改装后的表盘刻度仍然是均匀的。

改装后电压表的总内阻 $R_V=R_g+R$ ，或 $R_V=\frac{U}{I_g}$ 。内阻增大， U 增大，这样便于测量，可以减少误差。

分流电阻的情况可以引导学生自主完成。

3. 问题与练习

内容分析

第1题是让学生运用串、并联电路的知识分析分压电路，体会分压电路的分压作用。

第2、第3题是说明实际测量中，电压表、电流表（非理想电表）的内阻将影响电路，给测量带来误差，并要求学生能利用串、并联电路的知识分析产生误差的原因。

第4、第5题是关于有两个量程的电表的问题，要求学生利用串、并联电路的知识解决更为复杂的电表改装问题。

解答与说明

1. 分析分压电路解决下列问题。

(1) 因为 R_1 与 R_2 串联，设通过它们的电流为 I ，可知 $U_1=IR_1$ ， $U=I(R_1+R_2)$ ，所以电压之比 $\frac{U_1}{U}$ 与电阻之比 $\frac{R_1}{R_1+R_2}$ 相等。

(2) 设负载电阻为 R_0 ，变阻器下部分电阻为 R_x ，电路结构为 R_0 与 R_x 并联后，再与 $(R-R_x)$ 串联，由串、并联电路的特点可得

$$U_{cd} = \frac{R_{\#}}{R_{\#} + (R - R_x)} U = \frac{\frac{R_0 R_x}{R_0 + R_x}}{\frac{R_0 R_x}{R_0 + R_x} + (R - R_x)} U = \frac{R_0 R_x}{R R_0 + R R_x - R_x^2} U$$

当 $R_x=0$ 时， $U_{cd}=0$ ；当 $R_x=R$ 时， $U_{cd}=U$ ，所以 U_{cd} 可以取 0 至 U 的任意值。

可以引导学生对变阻器滑动触头分别滑到变阻器两端，进行定性分析。还可以将变阻器的这种分压连接与限流连接进行比较，分析它们改变电压的作用和通过它们的电流情况，进一步提高学生的分析能力。

2. 课本图 2.4-10 甲中，电流表测到的电流实际上是电压表和电阻并联部分的总电流，所以电阻的测量值为电压表和电阻并联部分的总电阻，即

$$R_{\text{测甲}} = \frac{R R_V}{R + R_V} = \frac{87.4 \times 10^3}{87.4 + 10^3} \Omega = 80.4 \Omega$$

课本图乙中，电压表测到的电压实际上是电流表和电阻串联部分的总电压，所以电阻的测量值为电流表和电阻串联部分的总电阻，即

$$R_{\text{测乙}} = R + R_A = (87.4 + 0.1) \Omega = 87.5 \Omega$$

由于电压表和电流表的内阻的影响，两种测量电路都存在系统误差，图甲中测量值小于真实值，图乙中测量值大于真实值，但两种电路误差的大小是不一样的。

可以引导学生进一步讨论两种电路的误差大小与待测电阻阻值之间的关系，知道在实际测量中如何选择电路以减小测量误差。

在这里,教科书把电压表的内接和外接问题作为欧姆定律在新情境下的一个应用,没有作为一个知识点,因此教学的着眼点应该放在基本规律的练习。

3. 可能发生。产生这种现象的原因是电压表内阻的影响。当电压表并联在 R_1 两端时,电压表和 R_1 的并联电阻小于 R_1 , 测得的电压小于 R_1 、 R_2 直接串联时 R_1 分得的电压。同样,当电压表和 R_2 并联时,测得的电压也小于 R_1 、 R_2 直接串联时 R_2 分得的电压。所以两次读数之和小于总电压。

4. 当使用 a 、 b 两个端点时,接 10 V 电压,电流表满偏,即电流为满偏电流。 $I_g(R_g + R_1) = 10$ V, 解得 $R_1 = 9.5 \times 10^3 \Omega$ 。

当使用 a 、 c 两端点时, $I_g(R_g + R_1 + R_2) = 100$ V, 解得 $R_2 = 9 \times 10^4 \Omega$ 。

5. 当使用 a 、 b 两个端点时, R_2 与电流表串联后再与 R_1 并联, 可得

$$I_g(R_g + R_2) = (I_1 - I_g)R_1$$

当使用 a 、 c 两个端点时, R_1 与 R_2 串联后再与电流表并联, 可得

$$I_g R_g = (I_2 - I_g)(R_1 + R_2)$$

联立解得 $R_1 = 0.41 \Omega$, $R_2 = 3.67 \Omega$ 。

本题的困难在于, 学生不容易理解使用 a 、 b 两个端点时, R_2 与电流表串联再与 R_1 并联后也是电流表, 能够测量电流。

第5节 焦耳定律

1. 教学目标

- (1) 从电能向其他形式能的转化理解电功以及电功率, 理解电功和能量转化的关系。
- (2) 知道焦耳定律的物理意义, 关注焦耳定律在生活、生产中的应用。
- (3) 从能量的转化和守恒理解电功和电热的区别, 知道纯电阻电路和非纯电阻电路。

2. 教材分析与教学建议

本节从能量转化的角度理解电功和电热, 区分纯电阻电路与非纯电阻电路。教科书没有通过实验归纳引入焦耳定律, 而是从能量守恒定律分析得出的。这里又一次应用了功能关系的思想。

(1) 电功和电功率

教科书根据功和能的关系, 从电能的转化引入电功概念, 然后根据静电力做功的知识和电流与电荷量的关系得到了电功的计算公式。教学中可以引导学生对用电器中的能量转化进行讨论, 这样有利于学生理解电功的物理意义。

①从静电力做功的角度去考虑问题。电流通过用电器的过程中, 消耗了电能, 同时产生了其他形式的能, 这个能量转化的过程就是电流做功的过程。实质上, 就是静电力做功, 电势能减小, 增加了其他形式的能的过程。在转化的过程中, 能量是守恒的。

②功是能量转化的量度, 电流做了多少功, 就有多少电能转化为其他形式的能, 即电功等于电路中电能的减少, 这是电路中能量转化与守恒的关键。

③推导电功的公式时, 在时间 t 内, 相当于把电荷 q 由电路的一端移到另一端, 移动电荷所做的功是 $W = qU = IUt$ 。



④不同的用电器电流做功(消耗电能转化为其他能)的快慢不同,引入电功率概念 $P=\frac{W}{t}$, 还可以跟速度等概念进行类比,帮助学生理解。要让学生知道用电器额定功率的含义,并让学生对常见用电器的额定功率有一个大致的了解。

(2) 焦耳定律

电路中电流做功,将电能转化为其他形式的能,其中很常见的就是内能,但是很多情况下,电路消耗的电能不全部转化为内能。教师可以用电动机作为例子,引导学生进行讨论。电动机消耗的电能(电功)转化为机械能和内能两部分。

让学生清楚,对于非纯电阻电路,电功和电热不相等。这时可以从能量守恒角度来考虑问题。



教学片段

区分纯电阻与非纯电阻电路

提出问题:电流通过用电器的过程中,消耗电能,同时产生其他形式的能,这个能量转化的过程就是电流做功的过程,即电功 $W=IUt$ 。而电流流导体产生焦耳热 $Q=I^2Rt$,那么, Q 和 W 相等吗?

假设: $Q=W$, 将推导出 $I=\frac{U}{R}$, 即欧姆定律。我们知道,欧姆定律是有它的适用条件的。

分析:在欧姆定律适用的情况下,电功等于电热,也就是说电流消耗的电能全部转化为内能。所以,欧姆定律适用的电路叫做纯电阻电路;不适用的电路就可以叫做非纯电阻电路。

设计实验:为了帮助学生理解此问题,可以让学生利用下面电路进行实验探究(图2-7)。比较电动机M在转动与不转动两种不同状态下,电压、电流、电阻的关系有什么特点。

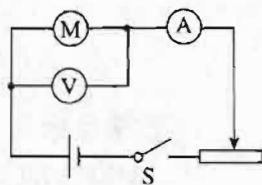


图2-7

进行实验:实验时可先固定电动机M不让它转动,此时消耗的电能全部产生焦耳热,可以用电动机两端的电压和通过电动机的电流来计算电动机的电阻。

然后放开手让电动机转动,进行实验,可以看到此时电动机的电压、电流、电阻不再满足 $I=\frac{U}{R}$ 的关系。

分析论证:由此可见,电功 $W=UIt$, 内能 $Q=I^2Rt$, 两者并不相等。进一步引导学生从能量守恒的角度去考虑,即 $W=Q+E$ 。让学生计算电动机消耗的电能、产生的热量以及产生的机械能,以加深学生的理解。

例题反思:从例题中给出的 U 、 I 、 R 三个物理量的数值并不满足公式 $I=\frac{U}{R}$ 的特点出发,再根据对电路能量转化的分析,有关纯电阻电路和非纯电阻电路的区别问题就比较清楚了。

教师要引导学生对上述讨论进行归纳、总结。一方面,总结电功和电热的关系;另一方面,要让学生体会用能量转化和守恒的观点来分析问题的思想方法。

3. 问题与练习

内容分析

第1题要求结合串、并联电路的特点证明,串、并联电路中,各电阻上消耗的电功率与其电阻的关系,各电阻消耗的热功率与总功率的关系。这是学习教科书中推导串、并联电路的电阻关系后的一次独立的尝试,对提高学生的逻辑分析能力有较大的帮助。

第2、第3、第4题,具体应用电功、电功率的知识,结合欧姆定律和串、并联电路的特点进行定量计算。可以提高学生对电路进行分析和计算的能力。

第5题是一个电学和热学综合应用的问题,与生活实际联系紧密。

解答与说明

1. 设电阻 R_1 消耗的电功率为 P_1 , 电阻 R_2 消耗的电功率为 P_2 , ...

(1) 串联电路中各处电流相等, 设电流为 I , 则电功率 $P_1 = I^2 R_1$, $P_2 = I^2 R_2$, ...

$$P_1 : P_2 : \dots = I^2 R_1 : I^2 R_2 : \dots$$

$$P_1 : P_2 : \dots = R_1 : R_2 : \dots$$

此式说明串联电路中各电阻消耗的电功率与其电阻成正比。

(2) 并联电路中各电阻两端的电压相等, 设电压为 U , 则有 $P_1 = \frac{U^2}{R_1}$, $P_2 = \frac{U^2}{R_2}$, ...

$$P_1 : P_2 : \dots = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \dots$$

得证。

(3) 因为串联电路总电压等于各部分电压之和, 即 $U = U_1 + U_2 + \dots$, 所以串联电路消耗的总功率 $P = UI = I(U_1 + U_2 + \dots) = P_1 + P_2 + \dots$, 得证。

(4) 因为并联电路总电流等于各支路电流之和, 即 $I = I_1 + I_2 + \dots$, 所以并联电路消耗的总功率 $P = UI = U(I_1 + I_2 + \dots) = P_1 + P_2 + \dots$, 得证。

本题不仅可以使学生知道串、并联电路中功率分配与电阻的关系, 而且因为证明过程是知识整合、综合运用过程, 还可以培养学生思维的严密性。要注意对学生解题规范的要求。这里限于篇幅, 没有给出(3)和(4)的规范解题格式。

2. 根据电功、电功率有关知识解决下列问题。

(1) 接通开关 S 时, R_1 被短路, R_2 直接接在电源两端, 电路消耗的电功率为 $P_1 = \frac{U^2}{R_2}$ 。

当开关 S 断开时, R_1 、 R_2 串联后接到电源上, 电路消耗的电功率为 $P_2 = \frac{U^2}{R_1 + R_2}$ 。

因为 $P_1 > P_2$, 所以开关 S 接通时, 电饭锅处于加热状态; 开关 S 断开时, 电饭锅处于保温状态。

(2) 加热时, $P_{R_2} = \frac{U^2}{R_2}$; 保温时, $P'_{R_2} = \left(\frac{U}{R_1 + R_2}\right)^2 R_2$ 。要使 $P'_{R_2} = \frac{1}{2} P_{R_2}$, 必有 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{\sqrt{2}-1}{1}$ 。

3. 根据灯泡的规格可以知道 $R_a = R_c > R_b = R_d$ 。电路可以看成是由 b 、 c 并联, 然后与 a 、 d 串联而成。由于电流相同, 且并联部分的总电阻小于其中最小的电阻, 所以 $P_a > P_d > P_b + P_c$ 。对于 b 、 c 并联部分, 由于电压相等, b 的电阻小, 因此 $P_b > P_c$ 。所以 $P_a > P_d > P_b > P_c$ 。

4. 根据欧姆定律、电功、电功率有关知识解决下列问题。

(1) 当只有电炉 A 时, $I = \frac{U}{R_A + 2r} = \frac{220}{100 + 5 \times 2} \text{ A} = 2 \text{ A}$ 。



所以, $U_A = IR_A = 200 \text{ V}$, $P_A = I^2 R_A = 400 \text{ W}$ 。

(2) 当再并联电炉 B 时, 总电流 $I' = \frac{U}{\frac{R_A}{2} + 2r} = \frac{220}{\frac{100}{2} + 5 \times 2} \text{ A} = \frac{11}{3} \text{ A}$ 。

电炉上的电压为 $U'_A = U_B = I' \frac{R_A}{2} = \frac{11}{3} \times 50 \text{ V} = 183 \text{ V}$ 。

每个电炉上消耗的电功率为 $P'_A = \frac{U'^2_A}{R_A} = \frac{\left(\frac{550}{3}\right)^2}{100} \text{ W} = 336 \text{ W}$ 。

可以引导学生讨论为什么在傍晚用电高峰时, 电灯比较昏暗, 而夜深人静用电量较小时, 电灯很亮。这样可以使学生关注生活和社会, 理论联系实际, 增强对实际问题进行理论分析的意识。

5. 电热 (消耗的电能) 为 $Q = Pt = 2 \times 10^3 \times 10 \times 60 \text{ J} = 1.2 \times 10^6 \text{ J}$ 。

水升温吸收的热量为 $Q' = cm\Delta T = 4.2 \times 10^3 \times 2 \times 80 \text{ J} = 6.72 \times 10^5 \text{ J}$ 。

效率为 $\eta = \frac{Q'}{Q} \times 100\% = 56\%$ 。

第6节 导体的电阻

1. 教学目标

(1) 经历决定导体电阻的因素的探究过程, 体验运用控制变量研究物理问题的思维方法。体会实验探究和逻辑推理都是重要的科学研究方法。

(2) 深化对电阻的认识, 了解导体的电阻规律, 能用电阻的计算公式进行有关计算。

(3) 理解电阻率的物理意义, 并了解电阻率与温度的关系。通过对不同材料电阻率的介绍, 加强学生理论联系实际的意识和安全用电的意识。

2. 教材分析与教学建议

本节教材内容以探究决定电阻的因素为载体, 提供了实验探究和理论探究两种方案, 体现了实验探究和理论探究都是重要的科学研究方法, 两者结合, 可以让学生体验实验的魅力和逻辑的力量。教科书中的探究方案二中, 通过理论探究得到导体电阻与长度、横截面积的关系后, 再用实验研究导体电阻与材料的关系, 解决了实际教学中找不到“材料不同, 粗细相同的导线”的困难。提供不同的实验方案, 这是新教科书从必修开始就做的努力, 第二个方案中的逻辑分析则表明科学探究并不仅局限于做实验。

(1) 影响导体电阻的因素

本节教材内容既要研究电阻与其影响因素的定量关系, 更重要的是突出探究过程。因此, 要求教师既要让学生有充分体验探究过程的时间, 又要考虑让学生掌握必要的知识与方法。教学中可以采取实验探究重方法, 理论探究重思维的策略, 对两套方案加以选择和整合。

比如, 可以通过实验研究导体电阻与长度的关系, 感受实验的魅力, 然后引导学生联系串联电路电阻的关系, 从理论上加以论证, 进而引导学生用并联电路电阻的关系, 推导体电阻与导体横截面积的关系, 体验逻辑思维的力量。

探究方案一：可以从生活生产实例入手，找出影响电阻大小的可能因素。然后引导学生用控制变量的思想去设计实验研究方案。在设计研究电阻与长度关系的方案时，学生根据已有的知识和经验，往往会选取材料、横截面积一定，长度不同的导线，分别测出它们的长度和电流，以此得到导体电阻与电流的关系。可以在此基础上引导学生优化实验。将这些导线串联起来（电流相同），只要比较它们两端的电压，知道电压与长度的关系，也就知道了电阻与长度的关系。要注意这里不仅仅是方法优化的问题，物理学研究中往往没有办法测量出一些物理量的确切数值，但可以研究得到它们的定量关系。比如库仑定律的研究，当时不可能测量电荷量，也无法测量力的具体大小，但可以得到它们之间的定量关系。

探究方案二：教科书采用通过串、并联电路的知识，利用逻辑推理来探究电阻与长度和横截面积的关系，并用实验来探究导体电阻与材料的关系。教学中要有效地启发学生进行逻辑思维，并让学生明确，逻辑推理和实验探究一样，也是科学研究的方法之一，两者是相辅相成的。

(2) 导体的电阻

教科书两种探究方案中，关于电阻与材料的关系的研究都采用了实验的方法。教学中可以利用前面探究得到的电阻与长度、横截面积的关系：

①写出电阻的表达式： $R = \rho \frac{l}{S}$ ；

②引导学生对比例系数 ρ 进行研究（典型的物理学方法）。要让学生明确：对于同一种导体材料而言，不管导体的长度、横截面积和电阻多大， ρ 是一个不变的量；对于不同的导体材料则 ρ 是不同的。长度、横截面积相同、材料不同的导体， ρ 越大，电阻越大。认识 ρ 是表征材料性质的一个重要物理量，称为电阻率。

“思考与讨论”栏目的设计，目的在于运用导体电阻的计算公式，分析得到两个电阻阻值相同后，进一步引导学生思考这种关系对电路元件的微型化的意义。同时，还可以指出微型化后带来的散热问题，培养学生关注现代技术的意识和辩证看问题的意识。

“说一说”栏目，通过选取生活中的素材，强化学生的实践意识。引导学生从影响电阻的因素出发，去思考“消息”中包含的物理原理。这表明，教科书重视 STS 思想的渗透，该指导思想不仅体现在教科书的正文中，而且贯穿于各个栏目的学习中。应该看到，这同样是一个引导学生关注社会的好机会。

另外，教科书对不同导体电阻率受温度影响，表述得很清楚。要让学生利用好教科书中提供的材料，通过阅读电阻率表格，既发现电阻率反映的是导体导电性能的好坏，又看出其与温度的关系，同时也培养了阅读和观察的能力。这样的处理可以体现学生的主体地位，调动他们的积极性。



教学片段

电阻率与温度关系的演示

关于电阻率与温度的关系，可用演示实验加以说明。图 2-8 中 L 为日光灯的灯丝（可用 8 W 日光灯丝），D 为小灯泡。演示时，闭合开关 S，调节电源输出电压，使小灯泡灯丝微红。向日光灯灯丝吹气（加快散热而降温），可以看到小灯泡灯丝变得很亮。如果用 40 W 的日光灯丝，则可以调

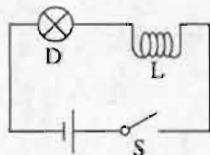


图 2-8

节电源输出电压，使小灯泡正常发光，然后，用酒精灯对日光灯灯丝加热，可以看到小灯泡变暗。实验说明温度与电阻率的关系。

还可以结合前面学过的小灯泡的伏安特性曲线进行讨论。

最后可以介绍不同材料电阻率大小不同，与温度的关系也不同，因而有不同的用途。有些金属材料（如纯金属）电阻率较小，可以用来制作连接电路用的导线；有些金属材料（如合金材料）电阻率较大，可以用来制作电阻丝等；还有一些合金材料电阻率随温度变化很小，可用于制作标准电阻；而那些电阻率随温度变化较大的材料，可以用来制作电阻温度计，电阻温度计连接在电路里，温度越高，导体电阻越大，电路里的电流就越小，用电流表的示数来表示相应的温度。有条件的也可以演示电阻温度计，让学生了解科学与技术的联系。

3. 问题与练习

内容分析

本节的问题与练习虽然都以导体电阻的规律的理解和应用为主，但每个习题的意义不同。

第1题直接运用电阻的公式计算导线电阻，同时使学生明白为什么通常情况下（包括电学实验中）可以忽略连接用电器的导线的电阻。本题通过选取生活中的素材，强化学生的实践意识，培养他们质疑的习惯。

第2题讨论了导线上损失的电压，这为介绍远距离输电做了知识准备。因为远距离输电时，导线较长，电阻无法忽略。

第3题将导体的电阻应用于导电溶液，进一步巩固这方面的知识。

第4题将导体的电阻和串、并联电路的功率相结合，在知识的综合运用方面要求较高。

解答与说明

1. 小灯泡的电阻为 $R = \frac{U}{I} = \frac{3}{0.25} \Omega = 12 \Omega$ 。

若铜丝长为 10 cm，横截面直径为 1 mm，则铜丝的电阻为

$$R' = \rho \frac{l}{S} = 1.7 \times 10^{-8} \times \frac{0.1}{3.14 \times \frac{(1 \times 10^{-3})^2}{4}} \Omega = 2.17 \times 10^{-3} \Omega$$

可见， R' 比 R 小得多，故可以不计导线电阻。

2. 导线的电阻为

$$R = \rho \frac{l}{S} = 1.7 \times 10^{-8} \times \frac{50}{2.5 \times 10^{-6}} \Omega = 0.34 \Omega$$

空调正常工作时，电流 $I = \frac{P}{U} = \frac{1.5 \times 10^3}{220} \text{ A}$ 。

导线上损失的电压为 $U' = IR = \frac{1.5 \times 10^3}{220} \times 0.34 \text{ V} = 2.32 \text{ V}$ 。

可以引导学生讨论，为什么远距离输电时，电阻不能忽略。在计算完导线上损失的电压后，还可以拓展：计算导线损失的电功率；讨论导线中损失的电功率与哪些因素有关。

3. 盐水柱的体积不变，所以， $l_1 S_1 = l_2 S_2$ 。如果溶液的电阻也遵从电阻定律，得 $R_1 = \rho \frac{l_1}{S_1}$ ， $R_2 = \rho \frac{l_2}{S_2}$ 。因此， $\frac{R_2}{R_1} = \frac{l_2 S_1}{l_1 S_2} = \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2 = \left(\frac{4}{3}\right)^2 = \frac{16}{9}$ ， $R_2 = \frac{16}{9} R_1$ 。

$$4. \frac{R_{\text{甲}}}{R_{\text{乙}}} = \frac{\rho_{\text{甲}} \frac{L_{\text{甲}}}{S_{\text{甲}}}}{\rho_{\text{乙}} \frac{L_{\text{乙}}}{S_{\text{乙}}}} = \frac{2}{1} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{2}。$$

(1) 并联时, $P_{\text{甲}} : P_{\text{乙}} = R_{\text{乙}} : R_{\text{甲}} = 2 : 1。$

(2) 串联时, $P_{\text{甲}} : P_{\text{乙}} = R_{\text{甲}} : R_{\text{乙}} = 1 : 2。$

第7节 闭合电路的欧姆定律

1. 教学目标

(1) 经历闭合电路欧姆定律的理论推导过程。体验能量转化和守恒定律在电路中的具体应用, 理解内、外电路的能量转化。

(2) 理解内、外电路的电势降落, 理解闭合电路欧姆定律。

(3) 会用闭合电路欧姆定律分析路端电压与负载的关系, 并能进行相关的电路分析和计算。

2. 教材分析与教学建议

闭合电路欧姆定律是本章的重点知识。

在过去的教学中, 闭合电路的欧姆定律是通过儿童滑梯的比喻引入的。仅从学习这个知识点来说, 这样引入比较简单, 学生容易接受。但是, 闭合电路欧姆定律在体现功能关系问题上是一个很好的素材, 它能够充分体现功和能的概念在物理学中的重要性。既然学生已经从做功的角度认识了电动势的概念, 这里仍旧通过功能关系的分析来建立闭合电路的欧姆定律是可行的。如果学生能够娴熟地从功和能的角度分析物理过程, 对于解决物理问题是很有好处的。

因此, 帮助学生理解电路中的能量转化关系是基础和关键。应用闭合电路欧姆定律讨论路端电压与负载关系则是本节的难点, 要注意提高学生运用闭合电路欧姆定律分析问题的能力。

(1) 闭合电路的欧姆定律

本书的基本思路: 相同时间内非静电力做的功等于内、外电路中能量的消耗。即, $EIt = I^2 Rt + I^2 rt。$

现行教科书的思路: 电路中各点的电势应该有确定的值。

两个思路在逻辑上都没有问题, 但本书强调做功与能量的关系问题。

可以先复习本章第2节的内容, 回忆电源在电路中的作用, 理解电动势的意义, 理解电源的内阻。然后, 帮助学生理解闭合电路中各部分做功和能量转化的情况。

①假设闭合电路中的电流为 I , 时间 t 内, 外电路中正电荷在恒定电场的作用下, 从电势高处向电势低处移动, 此过程中静电力做正功, 电势能转化为其他形式的能, 减少的电势能 $E_{\text{外}} = UI t$ 。 U 为外电路两端电压, 若外电路为纯电阻电路, 电阻为 R , 则电流做功产生的热为 $Q_{\text{外}} = I^2 Rt。$

②电流在内电路中流过时, 由于电源内部也有电阻, 所以也将产生焦耳热, 若电源内阻为 r , 则电源内部电流做功产生的热为 $Q_{\text{内}} = I^2 rt。$ 对于外电路电阻、外电压学生比较容易理解。对于内电路电阻、电势降落学生不容易理解。

为此, 可以先进行演示实验, 分别测量电源不接通外电路和接通外电路两种情况下电源两

端的电压。学生会发现，电源接通电路后，电源两端的电压变小了，产生了问题和探究的兴趣。然后，引导学生从微观角度思考，电荷通过内电路时，也要和离子发生碰撞，受到阻碍作用，同时，使离子热运动加剧（即增加内能），这样，学生比较容易理解内电阻、内电压等概念。

③在电源两极间，非静电力做功，将正电荷从负极移送到正极，将其他形式的能转化为电能。若电源电动势为 E ，则非静电力所做的功（转化得到的电能） $W = EIt$ 。

根据能量守恒定律，非静电力做的功，等于内、外电路中电能转化为其他形式的能的总和，即 $W = Q_{\text{外}} + Q_{\text{内}}$ 。所以， $EIt = I^2 R t + I^2 r t$ ，整理后得到 $E = IR + Ir$ 。也就是 $I = \frac{E}{R + r}$ ，这就是闭合电路欧姆定律。

教学中还要让学生知道闭合电路欧姆定律的三个表达形式的物理意义是有区别的。 $E = IR + Ir$ 和 $E = U_{\text{内}} + U_{\text{外}}$ 主要表达的是因消耗其他形式的能而产生的电势升高 E ，通过外电路 R 和内电路 r 而降落，体现了能量转化与守恒的物理意义。 $I = \frac{E}{R + r}$ 主要回答了电路中电流与哪些因素有关的问题。另外， $E = IR + Ir$ 和 $I = \frac{E}{R + r}$ 只适用于外电路是纯电阻的情况，而 $E = U_{\text{内}} + U_{\text{外}}$ 却不需要这样的条件。

教学片段

闭合电路的欧姆定律

①明确研究对象

如图 2-9 所示，某闭合电路，外电路有一电阻 R ，电源是一节电池，内阻为 r 。

②思考与讨论

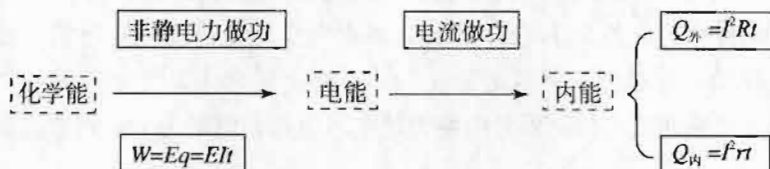
· 合上开关 S ，在时间 t 内，电路中有电流的同时伴随能量的转化，整个电路中电能转化为什么能？各是多少？

· 电路中的电能又是什么能转化来的？在电源内部是如何实现的？

· 在时间 t 内，有多少化学能转化为电能，如何计算？

提示：功是能量转化的量度，电源内部非静电力做了多少功，就有多少化学能转化为电能！

· 完成下面的框图：（虚线框是已知条件，实线框是要填的）



③得出结论，拓展加深

· 根据能量守恒定律，结合上面的框图，可以得到怎样的一个等式？对这个等式加以推导还可以得到哪些推论？完成下面的框图：

· 上框图中 1、2 两式反映了闭合电路中的什么规律？（能量守恒）

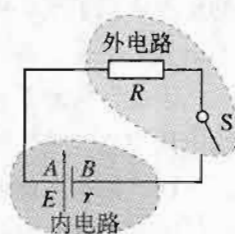
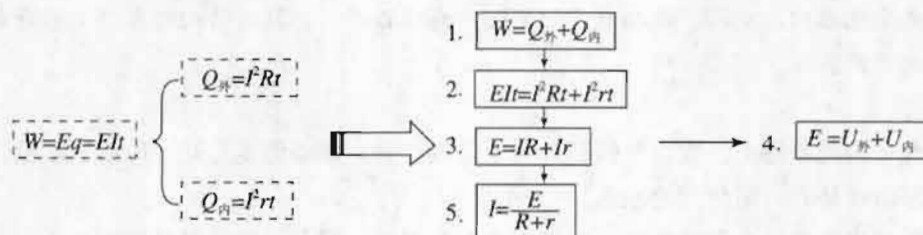


图 2-9



• 上框图中 3、4 两式反映了闭合电路中的什么规律？（因消耗其他形式的能量而产生的电势升高 E ，通过外电路 R 和内电路 r 而降落。结合课本图 2.7-2，概括为：外电路电势降低，内电路电势“升中有降”）

• 上框图中 5 式反映了闭合电路中的什么规律？（电流与那些因素有关，闭合电路欧姆定律）

(2) 路端电压与负载的关系

教科书在演示路端电压随负载变化的实验基础上，应用闭合电路欧姆定律对实验现象进行分析和解释。教学中首先要做好演示实验，使学生形成感性认识。学生通过观察负载变化，看路端电压变化的情况。可以引导学生观察：

① 当外电路电阻增大（或减小）时，电流怎样变化？路端电压怎样变化？

② 引导学生利用闭合电路欧姆定律分析、讨论上述实验现象。要明确哪些量是不变的，哪些量是变化的。

③ 讨论短路和断路两种情况。

“说一说”栏目的内容，取材于生活实际，对于锻炼学生分析实际问题的能力，强化学生的实践意识等方面是十分有益的。就其中的实际问题而言，用电器多的时候，外电阻 R 减小，整个电路中的电流增大，导致路端（即用电器两端）电压减小，所以灯光变暗。

为了提高学生运用闭合电路欧姆定律分析电路的能力，可以在这里增加一道例题。

教学片段

运用闭合电路欧姆定律分析电路

提出问题：如图 2-10 所示电路中，当滑动变阻器的滑动触点向上移动时，电流表、电压表的示数怎样变化？

分析：

① 当滑动变阻器滑动触点向上移动时，电阻 R_3 变大，外电路总电阻变大。

根据闭合电路欧姆定律，电路总电流 I 减小，所以，路端电压 U 增大，即电压表示数增大。

② 电流表的示数是滑动变阻器中的电流，由于其电压、电阻都变化，难以判断其电流变化。

根据串、并联电路的特点： $U = U_1 + U_2$ ， $I = I_1 = I_2 + I_3$ 作判断。

由于总电流 I 减小，电阻 R_1 上的电压 U_1 减小，而总电压是增大的，这样电阻 R_2 两端的电压 U_2 增大， R_2 中的电流 I_2 增大，所以， R_3 中的电流 I_3 减小，即电流表示数减小。

小结：电路中任一局部发生变化，将引起各处的电流和电压的变化。判断这类问题，可以

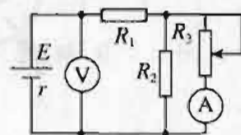


图 2-10

先从局部的变化推出总电流、路端电压的变化,再根据串、并联电路的特点以及部分电路欧姆定律作出相应的判断。

在定性分析的基础上,教科书例题进行了定量计算,该例题既是知识应用的示范,又为实验测量电源电动势和内阻作理论准备。

要引导学生思考:电源电动势、内阻不能直接测量,但与可以测量的路端电压、电流之间可以通过闭合电路欧姆定律来建立联系。由于电源电动势、内阻两个未知,至少要建立两个联立方程。进而引导学生讨论有没有其他方法来测量电源电动势和内阻。

关于“思考与讨论”栏目,可以让学生根据路端电压与电流的数学表达式来画 $U-I$ 图象,然后引导学生根据图象并结合演示实验现象来讨论,结合短路、断路来讨论 $U-I$ 图线截距、斜率等的物理意义。

3. 问题与练习

内容分析

本节的问题与练习主要是应用闭合电路的欧姆定律分析和解决问题。

第1题隐含了测量电源电动势和内阻的基本思路。

第2、第3题联系生活和科技,通过对袖珍小电筒所用干电池和太阳能电池板内阻的推算,进一步巩固对闭合电路欧姆定律的应用和理解。

第4题通过定量计算让学生进一步体会路端电压随负载的变化而变化。

第5题涉及电路设计,是一个综合性题目,对学生灵活处理问题的能力要求较高。

解答与说明

1. 根据闭合电路的欧姆定律,可得

$$E = I_1(R_1 + r)$$

$$E = I_2(R_2 + r)$$

$$\text{联立解得: } E = \frac{I_1 I_2 (R_2 - R_1)}{I_1 - I_2} = 1.5 \text{ V}, r = \frac{I_2 R_2 - I_1 R_1}{I_1 - I_2} = 2 \Omega.$$

可以看到,虽然电动势和内阻不能直接测量,但可以应用闭合电路的欧姆定律将可以测量的路端电压、电流等与电动势、内阻建立联系,从而计算得到电动势和内阻。由于要求电动势和内阻两个未知量,所以需要两次测量,建立方程组。

2. 每节干电池的电动势为 1.5 V,两节干电池的电动势为 3.0 V。设每节干电池的内阻为 r ,两节干电池的总内阻为 $2r$ 。由题意得

$$U_{\text{内}} = E - U_{\text{外}} = (3.0 - 2.2) \text{ V} = 0.8 \text{ V}$$

又因为 $U_{\text{内}} = 2rI$, 所以

$$r = \frac{U_{\text{内}}}{2I} = \frac{0.8}{2 \times 0.25} \Omega = 1.6 \Omega$$

3. 不接负载时的电压即为电动势,因此 $E = 600 \mu\text{V}$, 短路时外电阻 $R = 0$ 。根据闭合电路的欧姆定律得 $r = \frac{E}{I} = \frac{600}{30} \Omega = 20 \Omega$ 。

4. 当外电阻为 4.0Ω 时, 电流 $I = \frac{U_{\text{外}}}{R} = 1.0 \text{ A}$ 。再由闭合电路的欧姆定律 $E = I(R + r)$, 可得 $r = 0.5 \Omega$ 。

当在外电路并联一个 $6.0\ \Omega$ 的电阻时, $R_{\text{并}} = \frac{4 \times 6}{4+6}\ \Omega = 2.4\ \Omega$ 。

电路总电流为 $I' = \frac{E}{R_{\text{并}} + r} = \frac{4.5}{2.4+0.5}\ \text{A} = 1.55\ \text{A}$ 。

路端电压为 $U'_{\text{并}} = I'R_{\text{并}} = 3.72\ \text{V}$ 。

当外电路串联一个 $6.0\ \Omega$ 的电阻时, $R_{\text{串}} = 10\ \Omega$ 。

电路电流为 $I'' = \frac{E}{R_{\text{串}} + r} = \frac{4.5}{10+0.5}\ \text{A} = 0.43\ \text{A}$ 。

路端电压为 $U''_{\text{串}} = I''R_{\text{串}} = 4.3\ \text{V}$ 。

5. 通过用电器的电流 $I = \frac{P}{U} = \frac{0.6}{6}\ \text{A} = 0.1\ \text{A}$ 。设至少需要 n 节电池, 串联的分压电阻为 R_0 , 因为路端电压必须大于 (或等于) 灯的额定电压, 即 $nE - Inr \geq U$, 得到 $n \geq \frac{U}{E - Ir} = \frac{6}{1.4}$, 可见 n 取整数的最小值为 5。这时路端电压 $U' = 5E - I \times 5r = 7\ \text{V}$, 需要串联的分压电阻为

$$R_0 = \frac{U' - U}{I} = \frac{7 - 6}{0.1}\ \Omega = 10\ \Omega$$

第 8 节 多用电表的原理

1. 教学目标

- (1) 通过对欧姆表的讨论, 进一步提高应用闭合电路欧姆定律分析问题的能力, 知道欧姆表测量电阻的原理。
- (2) 了解欧姆表的内部结构和刻度特点。
- (3) 了解多用电表的基本结构, 知道多用电表的测量功能。

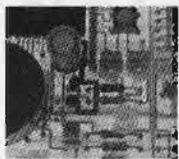
2. 教材分析与教学建议

本节是闭合电路欧姆定律的具体应用。教科书通过例题的方式来讲解欧姆表的原理, 并没有把欧姆表作为知识点来处理, 而是从闭合电路欧姆定律的应用入手, 旨在提高学生灵活运用知识解决实际问题的能力。欧姆表的原理是根据闭合电路欧姆定律, 通过测量容易测得的电流, 来实现测量较难测量的电阻, 教学中要注意渗透这种转换测量的思想。在学习欧姆表的基础上, 教科书通过“思考与讨论”“说一说”栏目让学生了解多用表的基本结构, 并通过实验, 让学生学会使用多用电表。

(1) 欧姆表

对于欧姆表的原理, 教科书没有采用阐述欧姆表原理的传统方法, 而是先让学生做一个闭合电路欧姆定律的例题, 也就是说, 在教学上的要求是让学生练习欧姆定律的应用, 其目的是要把欧姆表这一新知识, 建立在对原有学习过程的体验上, 通过对该体验的创造性联想来形成新知识。

在这个例题的分析和解答过程中, 通过具体的数据, 使学生体会到闭合电路中某一电阻的变化, 会引起串联在电路中电流表读数的变化, 不同的电阻值和不同的电流表读数具有一一对



应的关系,引导学生联想电流表的读数可以用来表示该电阻的值,这正是欧姆表的原理。这部分的教学可从如下三方面展开:

第一,使欧姆表调零,调零后将电流表、电源和变阻器 R_1 视为一个整体,电流表的内阻、电源内阻、变阻器 R_1 看成一个电阻。

第二,欧姆表的中值电阻问题。解决特殊点的电流与电阻的关系。

第三,由特殊到一般,要根据闭合电路的欧姆定律得到电流表中电流与外接电阻的关系。

结合课本图 2.8-2,分析通过电流表的电流与电阻 R 之间有什么关系。

当表笔短接 ($R=0$) 时,表头中电流为 I_g ,回路总电阻为多少? 电流 I_g 处对应的电阻刻度是多少?

当红黑表笔断开,表头中电流为 0,电流零刻度处对应的电阻刻度为多少? 若表笔间接上某电阻后,表头指针指在中间刻度,该电阻多大?

中间刻度对应的电阻刻度为多少?

你能把其他电流刻度改标成电阻刻度吗? 为什么电阻刻度是不均匀的?

通过以上问题的思考,可以基本理解欧姆表的原理。



教学片段

欧姆表的原理

为了弄清欧姆表的原理,先让学生阅读和思考教科书例题,依次思考下列问题:

①用一根导线把 A、B 直接连接起来,此时,应把可变电阻 R_1 调节为多少才能使电流表恰好达到满偏电流 I_g ? 在欧姆表的原理图 2-11 中,电源 E 、可调电阻 R_1 、电流表各起什么作用?

②调至满偏后保持 R_1 的值不变,在 A、B 间接入一个 $150\ \Omega$ 的电阻 R_x ,电流表的指针指着多少刻度的位置?

③表头显示的一直是电路中的电流的大小,但改装后我们要从表头上读出的却是 A、B 间接电阻的大小,若 A、B 间接一根电阻可以忽略的导线时,表头的指针指向哪里? 此处所标电阻刻度值为多大?

若 A、B 直接断开,表头的指针指向哪里? 此处所标电阻刻度值为多大?

④若 A、B 之间接入某一电阻 R_x 时,欧姆表表头的指针恰好指向满偏刻度的 $\frac{1}{4}$ 处, R_x 多大? 若指针恰好指向满偏刻度的 $\frac{1}{8}$ 处, R_x 又为多大?

⑤欧姆表的刻度盘上所标示的电阻刻度均匀吗? 能否简要证明你的推测?

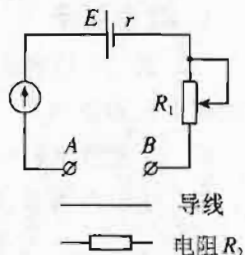


图 2-11 欧姆表的原理

(2) 多用电表

电流表、电压表以及欧姆表都是由表头改装而成,能不能让它们共用一个表头而组合在一起呢? 教科书从这一问题出发,引出对多用电表进一步的思考和分析。

教科书以“思考与讨论”栏目的形式要求学生将课本图 2.8-3 三个表的示意图组合完成课本图 2.8-4。这个要求比较高,一般学生困难较大,教学中可以将有能力完成的学生画出的示意图展示出来(如果没有学生完成,可以由教师直接给出),让学生说出选择开关分别接 1、

2、3 时,电表的功能分别是什么。让学生了解多用电表的基本构造。

“说一说”栏目的教学,可以引导学生把一个较复杂的电路分解成几个基本部分来认识。多用电表的结构由三种电表到合用一个表头的问题是比较复杂的,对学生来说是一个台阶,从单量程到双量程又是一个台阶。因此,教学上要做好铺垫,不易要求过高。

对于实际多用电表的认识,教学中可以利用看实物来帮助学生认识多用电表,电表分两大部分,上部是表头加刻度盘,下部为选择开关和接线柱。可以让学生试着选择不同的挡位,找出对应的刻度,进一步熟悉多用电表,也为接下来的实验操作做准备。

3. 问题与练习

内容分析

本节问题与练习的设置,围绕电表改装问题,进一步要求学生用学过的串、并联电路以及闭合电路欧姆定律的知识解决问题。

第 1 题主要是电压表、电流表量程的改变问题。一方面复习前面学过的知识;另一方面,让学生进一步了解刻度盘上刻度是如何标注的,理解量程与刻度的关系,为正确使用多用电表打下基础。

第 2 题用串联电路的知识可以解答。它提示了一种测量电阻的方法,让学生体会到测量电阻的方法有多种。

第 3 题要用闭合电路欧姆定律来解决,不仅可以巩固闭合电路欧姆定律的知识,更重要的是体会欧姆表测量电阻的原理。第 2、3 题尽管不同,但原理相通,放在一起进行对比更有利于学生理解欧姆表原理。

解答与说明

1. 电压表量程变为原来的 2 倍,原来的 0、1、2、3 分别改为 0、2、4、6。

电流表量程变为原来的 2 倍,原来的 0、1、2、3 分别改为 0、2、4、6。

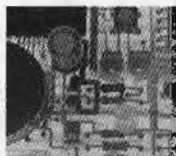
2. $420\text{ k}\Omega$

3. 设干电池的电动势为 E ,表笔短接时,回路总电阻为 R_0 , $I_0 = 5.0 \times 10^{-3}\text{ A}$, $R_1 = 200\ \Omega$ 的电阻时, $I_1 = 3.0 \times 10^{-3}\text{ A}$, 测量未知电阻 R_x 时, $I_x = 2.5 \times 10^{-3}\text{ A}$ 。则有 $\frac{E}{R_0} = I_0$, $\frac{E}{R_0 + R_1} = I_1$, $\frac{E}{R_0 + R_x} = I_x$ 。代入数值解得: $E = 1.5\text{ V}$, $R_0 = 300\ \Omega$, $R_x = 300\ \Omega$ 。

第 9 节 实验: 练习使用多用电表

1. 教学目标

- (1) 通过观察了解多用电表的结构和测量功能,会根据测量需要正确选择挡位。
- (2) 通过实验操作学会使用多用电表测量电压、电流和电阻。养成良好的多用电表使用习惯
- (3) 会用多用电表测量二极管的正、反向电阻,并据此判断二极管的正、负极,会用多用电表探索简单黑箱中的电学元件。



2. 教材分析和教学建议

本节课为学生分组实验课。教科书安排了4个实验，目的是为了让学生学会使用多用电表。

在学生动手实验之前，可以让学生观察多用电表，说一说多用电表有哪些测量功能。要实现其测量功能，挡位选择开关应如何选择？在刻度盘上相应的刻度位置在哪里？等等。

实验1和实验2，用多用电表测量小灯泡两端的电压和通过小灯泡的电流，要求学生会选择合适的量程，会在刻度盘上找到对应的刻度，会准确读数。

这里可以提示学生，根据多用电表的原理图，思考表头中的电流方向，知道红表笔是电压表、电流表的正接线柱；黑表笔是负接线柱。如果实验室多用电表的量程太小，可以用阻值较大的定值电阻代替小灯泡，减小电路中的电流。

实验3，用多用电表测量定值电阻过程中要让学生知道：

①尽管欧姆表的刻度是从“0”到“无穷大”，但如果指针偏转过大或过小，误差都比较大，应选择适当倍率的欧姆挡使测量时表针指示在刻度盘的中间区域。若不知道待测电阻的大致阻值，可以先用中等倍率的挡位试测，然后根据情况再选择合适挡位进行测量。

②每一次测量电阻，或换用不同倍率的欧姆挡，都要进行电阻调零。

实验4，用多用电表测量二极管的正反向电阻过程中要让学生知道：

二极管有单向导电性，电流从正极流入时电阻较小，电流从负极流入时，电阻较大。

教学中可以引导学生根据欧姆表的原理图分析，用欧姆挡测电阻时，在电表内部电流方向是从红表笔流到黑表笔，在电表外部电流从黑表笔流到红表笔。这样二极管接入欧姆表的红黑表笔间时，如果测量的电阻较小，反接后则所测电阻较大。电阻较小时与黑表笔连接的那个极就是二极管的正极，电阻较大时与黑表笔连接的那个极是二极管的负极。

对“思考与讨论”栏目的教学，不要简单处理，要从认知和习惯两个方面去引导学生分析讨论，这是一个实现情感目标的机会。

3. 问题与练习

内容分析

本节问题与练习的设置，是围绕多用电表的使用展开的。

第1题主要练习读表，需要在刻度盘上寻找对应挡位的刻度，并能正确、熟练地读数。

第2题主要巩固使用欧姆表测量电阻的基本方法，包括选择挡位、调零等。

第3题需要弄清欧姆表的内部结构，知道测量电流、电压和电阻时，表中的电流方向。

第4题是黑箱探测的问题，需要结合电路的知识进行逻辑推理，有利于学生综合分析能力的提高。

解答与说明

1.

所选择的挡位	<i>a</i>	<i>b</i>
直流电压 2.5 V	0.57 V	2.00 V
直流电流 50 mA	11.4 mA	40.0 mA
电阻 $\times 10$	500 Ω	32 Ω

2. D、B、E。

3. (1) 红表笔; (2) 红表笔; (3) 黑表笔。
4. 黑箱内部有电阻和二极管, 它们的连接情况如图 2-12 所示。

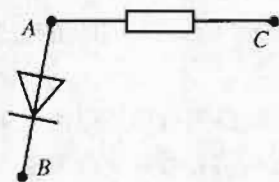


图 2-12

第 10 节 实验: 测定电池的电动势和内阻

1. 教学目标

- (1) 知道测量电源电动势和内阻的实验原理, 进一步感受电源路端电压随电流变化的关系。
- (2) 学会根据图象合理外推进行数据处理的方法。
- (3) 尝试分析电源电动势和内阻的测量误差, 了解测量中减小误差的方法。
- (4) 培养仔细观察, 真实记录实验数据等良好的实验习惯和实事求是的品质。

2. 教材分析与教学建议

教科书提供了三种实验方法供教学中选择, 但实验原理大致相同, 教学中可以就第一种方法进行详细分析, 其余的可以让学生课后进行思考。要让学生理清电动势和内阻测量的思维线索。

通过“实验: 测定电池的电动势和内阻”这节课的学习, 学生可以更灵活地运用闭合电路欧姆定律, 再一次熟悉用图象处理数据的方法, 还可以得到电学实验中许多操作技能的训练。因此, 本节教学的目的不只是教给学生一种测量电动势的方法, 重要的是通过实验更好地理解电动势这一概念。

至于用测量路端电压的方法测量电动势, 在前面已有涉及, 如第 7 节中“断路时的路端电压等于电源电动势, 我们常根据这个道理测量电源的电动势”的表述。实际测量时可以根据需要和器材的具体情况选择合适的方法。

(1) 实验原理

电源电动势和内阻不能直接进行测量, 但电源接在电路中, 路端电压和电流与电动势和内阻可以通过闭合电路欧姆定律建立联系, 因此, 通过测量路端电压和电流, 可以计算电动势和内阻。由于有电动势和内阻两个未知量, 所以要改变路端电压和电流至少需要两组数据, 才能利用闭合电路欧姆定律建立两个方程, 解得电动势 $E_{\text{测}}$ 和内阻 $r_{\text{测}}$ 。

$$E_{\text{测}} = U_1 + I_1 r_{\text{测}}$$

$$E_{\text{测}} = U_2 + I_2 r_{\text{测}}$$

实际操作中为了减小偶然误差, 需要测量多次。

(2) 实验方法

① 针对电池特点进行有效测量

电池内阻的大小会直接影响到测量结果。内阻太小, 电池的路端电压变化就不明显。这是

因为路端电压 $U = \frac{E}{1 + \frac{r}{R}}$, 当 $r \ll R$ 时, $U \approx E$, 从而造成 U 没有变化, 不方便读数, 也不方便作图。为了解决这个问题, 常常选择内阻大一些的电池进行测量 (或与电池串联一个几欧姆的电阻充当内阻)。

水果电池的优点是内阻较大, 电池路端电压随电流变化明显, 易于进行测量。但其内阻在实验过程中会有明显改变, 所以, 测量前要做好充分准备, 测量尽量迅速, 在内阻发生较大变化前结束测量。

为了避免电池电动势和内阻发生较大变化, 实验中不要将电流调得过大, 每次读完数立即切断电源, 且最好使电流值由大到小顺序变化, 使实验过程中 E 和 r 的值较稳定。实验中要测出不少于 6 组 I 、 U 数据, 且变化范围要大一些。

② 针对测量电路进行误差分析

用电流表和电压表测电源的电动势和内电阻时, 在电流表外接和内接两种情况下, 电动势的测量值与真实值、电源内阻的测量值与真实值间的关系如何?

采用图 2-13 电路。

分析: 根据闭合电路欧姆定律 $E = U + Ir$, 两次测量的方程为

$$E_{\text{测}} = U_1 + I_1 r_{\text{测}}$$

$$E_{\text{测}} = U_2 + I_2 r_{\text{测}}$$

$$\text{解得: } E_{\text{测}} = \frac{I_2 U_1 - I_1 U_2}{I_2 - I_1}, \quad r_{\text{测}} = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1}.$$

若考虑电流表和电压表的内阻, 对图 2-13 所示电路应用闭合电路欧姆定律有

$$E = U_1 + I_1 r + I_1 R_A$$

$$E = U_2 + I_2 r + I_2 R_A$$

式中, E 和 r 为电动势和内阻的真实值。

$$\text{解得: } E = \frac{I_2 U_1 - I_1 U_2}{I_2 - I_1}, \quad r = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} - R_A$$

比较得: $E_{\text{测}} = E$, $r_{\text{测}} > r$ 。

采用图 2-14 所示的电路。

分析: 同样考虑电流表和电压表的内阻, 应用闭合电路欧姆定律有

$$E = U_1 + \left(I_1 + \frac{U_1}{R_V} \right) r$$

$$E = U_2 + \left(I_2 + \frac{U_2}{R_V} \right) r$$

$$\text{解得: } E = \frac{I_2 U_1 - I_1 U_2}{(I_2 - I_1) - \frac{U_1 - U_2}{R_V}}, \quad r = \frac{U_1 - U_2}{(I_2 - I_1) - \frac{U_1 - U_2}{R_V}}.$$

比较得: $E > E_{\text{测}}$, $r > r_{\text{测}}$ 。

(3) 数据处理

教科书先站在一般同学的认识水平上, 用求多次测量, 多次计算得到的电动势、内阻的平均值的方法来减小测量误差。然后详细介绍了图象的方法。教学中要让学生理解图象方法的优

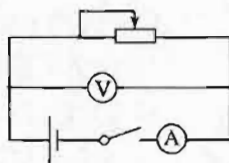


图 2-13

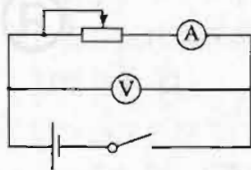


图 2-14

点。要结合前面学习中学生已经知道的电源 $U-I$ 图象的物理意义。从图象得到电池电动势和内阻的值。



教学片段

利用 $U-I$ 图象测定电池电动势和内阻

依据：由闭合电路欧姆定律有 $U = -rI + E$ ，对于一个电池来说，电动势和内阻是一定的，所以，路端电压 U 是电流 I 的一次函数。其 $U-I$ 图象一定是一条不过原点的倾斜直线（图 2-15）。

作 $U-I$ 图象：可以在 $U-I$ 坐标系中描出各组 U 、 I 值对应的点，然后画出 $U-I$ 图象。在画图象时，要指导学生尽量使多数点落在直线上，不能在直线上的点大致均匀分布在直线两侧，个别偏离直线太远的点可以舍去不考虑。并让学生理解这样做可以减小偶然误差，提高测量精度。

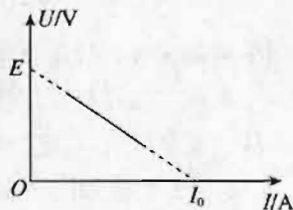


图 2-15

分析 1：图线在 U 轴上的截距是电流为 0 时（断路）电池路端电压的值，等于电池电动势 E ；图线在 I 轴上的截距是路端电压为 0 时（短路）的电流（即短路电流） I_0 ，得到电池内阻 $r = \frac{E}{I_0}$ 。

问题导引：既然断路时的路端电压就等于电池电动势，短路时的电流测量后就可以得到电池的内阻，为什么不直接进行测量呢？

分析 2：原因是，在实际测量中，即使是用电压表直接测电池电压，此时电路中也有微小电流，结果只能是近似值；而直接将电流表连在电池两端，则电流会过大，是不允许的。而作出 $U-I$ 图象从理论上进行合理的外推，得到电池电动势和内阻的数值，则是科学研究中很重要的一种处理数据的方法。

另外，对学有余力的学生的要求：当电池内阻较小时，路端电压变化较小，画出的 $U-I$ 图象会比较“平坦”，很难确定短路电流。对此，我们可以指导学生将 I 轴向 U 轴正方向平移，放大 U 轴的标度，使 $U-I$ 图象更完整。如图 2-16 所示，路端电压 U 轴的起点是 U_0 ，这时 I 轴上的截距 I_0 不再是短路电流，电池内阻 $r = \frac{E - U_0}{I_0}$ ，

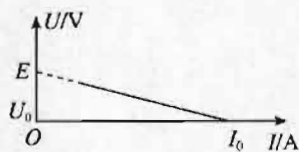


图 2-16

可见，电池的内阻仍等于倾斜直线斜率的绝对值。

要让学生在实操中积极思考，学会坐标变换的方法，体会这种坐标变换是实际数据处理的需要。

3. 问题与练习

内容分析

第 1 题要求对实验方案进行评估。

第 2 题涉及实验器材的选取，需要对实验原理、实验方法和产生误差的原因进行综合考虑。

第 3 题要求应用图象来处理实验数据，涉及对 $U-I$ 图线的物理意义的认识，以及描绘 $U-I$ 图线的基本技能。

解答与说明

1. 该实验方案的主要缺点是, 将路端电压和电流分两次测量。由于电表内阻的影响, 两次测量时电路并不处于同一状态, 也就是说, 测得的电流值, 已不是测电压时电路中的电流值了。另外, 在测量中需要不断改变电路, 操作也不方便。

2. 根据电流表、电压表的使用方法等, 综合分析下列问题。

因蓄电池的电动势为 2 V, 故电压表量程应选 3 V 挡。

若定值电阻取 $10\ \Omega$, 则电路中电流最大不超过 0.2 A, 电流值不到电流表小量程的 $\frac{1}{3}$, 不利于精确读数, 故定值电阻只能取 $1\ \Omega$ 。电路中电流最大接近 2 A, 电流表量程应选 3 A。

选取实验器材, 需要综合考虑, 学生的困难往往在于顾此失彼。要让学生知道, 选择器材要从“安全可行、测量精确、便于操作”三方面考虑。

3. $U-I$ 图象如图 2-17 所示。

由图象可知: $E=2.03\ \text{V}$, $r=0.08\ \Omega$ 。

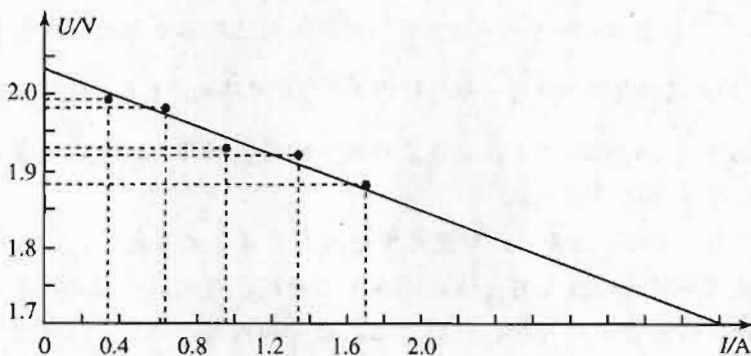


图 2-17

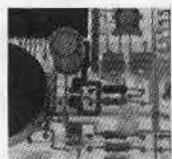
第 11 节 简单的逻辑电路

1. 教学目标

- (1) 初步了解简单的逻辑电路及表示符号。
- (2) 通过实验, 理解“与”“或”和“非”逻辑电路中结果与条件的逻辑关系。
- (3) 知道真值表, 会用真值表来表示一些简单的逻辑关系。
- (4) 通过简单的逻辑电路的设计, 体会逻辑电路在现实生活中的意义。
- (5) 初步了解集成电路。关注我国集成电路以及元器件研究的发展情况。

2. 教材分析与教学建议

教科书分别从生活事例出发介绍了“与”“或”和“非”三种逻辑电路的逻辑关系, 并在此基础上介绍了表示这三种逻辑关系的真值表。教科书通过演示实验让学生知道这些逻辑关系可以通过电路来实现, 从而引入了门电路。又从门电路的组合到“科学漫步”, 让学生了解集成电路及应用领域。同时, 这里的内容也是为《物理选修 3-2》中传感器的教学打下基础。



(1) 逻辑电路和逻辑关系

教学中可以从生活实例或演示实验现象入手,帮助学生理解三种逻辑关系。鼓励学生从生活中寻找“与”“或”和“非”逻辑关系,以加深对逻辑关系的理解。让学生了解,门电路是一种“条件开关”。只有当输入信号满足一定的条件时,“门”才能打开,才能有输出信号。

常见的门电路有“与”门、“或”门、“非”门等。

①通过实验,引入“与”逻辑关系

教学中通过实验让学生理解:如果一个事件的几个条件都满足后,该事件才能发生,这种关系叫做“与”关系。还可以用“思考与讨论”栏目中的例子来进行讨论,帮助学生理解这种逻辑关系。接着可以通过演示实验来说明:具有“与”逻辑关系的电路称为“与”门电路,“与”门电路就是每个输入端都有信号输入时,输出端才有信号输出。只要求学生认识输入信号与输出信号的逻辑关系,不要求掌握具体电路结构。

②通过实验,引入“或”逻辑关系

教学中通过实验让学生理解:如果几个条件中,只要有一个条件得到满足,某事件就会发生,这种关系叫做“或”逻辑关系。这里的“思考与讨论”栏目同样起到帮助学生理解的作用。接着用演示实验说明:具有“或”逻辑关系的电路叫做“或”门。“或”门电路就是各输入端只要任意一个有信号输入,输出端就有信号输出。同样,只要求学生认识输入信号与输出信号的逻辑关系,不要求掌握具体电路结构。

③通过实验,引入“非”逻辑关系

用集成电路中的“非”门来进行演示,让学生了解输出状态和输入状态呈相反的逻辑关系,叫做“非”逻辑。具有“非”逻辑关系的电路叫做“非”门。“非”门电路就是输入端有信号输入时,输出端就没有信号输出,输入端没有信号输入时,输出端就有信号输出。

为了帮助学生理解真值表,可以让学生知道对于输入:用逻辑值“1”表示满足条件(或有信号输入),用逻辑值“0”表示条件不满足(或没有信号输入),对于输出:用“1”表示产生结果(或有信号输出),用“0”表示没有产生结果(或没有信号输出),在此基础上,让学生尝试用真值表表示以上三种逻辑关系。还可以给出一些真值表,让学生来说一说这些真值表所反映的逻辑关系。



教学片段

真 值 表

问题导引:如图 2-18 甲所示,两个与门的输出端与一个或门的输入端相连,再与一个非门串联,形成一个组合的门电路,与门的输入端 A、B、C、D 就是这个组合电路的总输入端,非门的输出端 Y 就是它的总输出端。为了应用方便,实际中把这四个门电路在制作时便复合在一起,做成一个复合门电路,称为“与或非”门,它的符号如图 2-18 乙所示,请在表中填写与或非门的真值表。

分析: A、B 和 C、D 是两个与门的输入端,若均无输入(赋值为“0”),则输出均为“0”。对于后面的“或”门来说,两个输入均为“0”,所以输出为“0”。最后是“非”门,输入为“0”,输出即为“1”。最后的输出端 Y 的真值为“1”。如此将输入端的不同赋值组合填写入表格中,再根据电路的逻辑关系确定输出值。最后完成真值表如下:

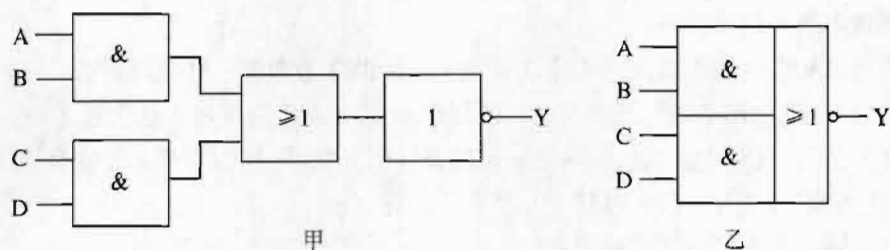


图 2-18

输入端				输出端
A	B	C	D	Y
0	0	0	0	1
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	0
0	1	0	0	1
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	0

(2) 逻辑电路的设计

本节教科书中的例题，实际上就是根据所提出的实际要求，去选择满足相应逻辑关系的逻辑电路。教学中可以在例题教学的基础上做一点拓展，帮助学生提高根据给定的实际逻辑命题，设计出实现其逻辑功能的电路的能力。让学生了解一般的设计过程：

①进行逻辑抽象。要完成这一工作，首先应仔细分析所给定逻辑命题的因果关系，将引起事件发生的原因，确定为输入量，将事件所产生的结果，作为输出量。

②给输入量和输出量分别以逻辑 0 和逻辑 1 给以赋值，然后将输入量各种取值组合对应的输出量之间的关系，用真值表表示，这就完成了组合逻辑设计的最基本的工作，也是最重要的工作。真值表列得是否正确，直接影响到电路的设计是否正确。

③根据真值表中输入量与输出量的关系，选择合适的逻辑电路（或将简单的逻辑电路组合）。最后对设计的逻辑电路检验，符合逻辑命题即为可行的逻辑设计。教学中对逻辑电路怎样实现逻辑关系，不宜过多过细，要把主要精力放在对电路逻辑关系的理解上。

逻辑电路的设计

任务：某商场为了统计每天进入商场的人数，在商场的两个入口的脚踏板下装了感应开关。当任一门口有顾客进入，感应开关接通，信号输入同一个计数器并计数1次。（假设两个感应开关同时接通的可能很小，可以忽略。）

①这两个感应开关与计数器构成什么逻辑关系？

②画出真值表和逻辑电路图。

分析：两个门口任意一个感应开关接通，有信号输入，都有信号输出给计数器，它们是“或”逻辑关系。接通一个开关有信号输入时逻辑值为“1”，不接通没有信号输入时逻辑值为“0”，有信号输给计数器时逻辑值为“1”（真值表），逻辑电路如图2-19所示。

一号门 开关1	二号门 开关2	计数器
A	B	Y
0	0	0
1	0	1
0	1	1

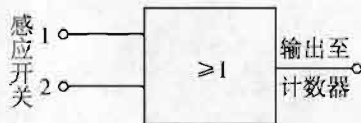


图 2-19

3. 问题与练习

内容分析

本节的问题与练习层层递进，由简单到复杂。

第1题需要根据实际问题抽象出逻辑关系，然后再选择相应的逻辑电路。

第2题需要结合电路，先判断输入信号，确定逻辑关系，然后根据逻辑关系选择逻辑电路，还要对输入信号进行调节。

第3题是复合门问题，先要对输入进行排列组合，然后根据电路的逻辑关系确定输出，从而完成真值表。

解答与说明

1. 如图2-20所示。解决这类实际问题，需要根据实际问题中的信息，抽象出逻辑关系后，选择能实现该逻辑关系的电路。必要时还应考虑简单逻辑电路的组合。



图 2-20

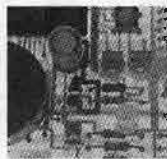


图 2-21

2. 分析并判断输入信号，确定逻辑关系，画出相应的逻辑电路。

(1) 如图2-21所示。

(2) 应使R增大。当天色还比较亮时，因光线照射，光敏电阻的阻值较小，但不是很小，此时R的分压较低，从而会使非门输出一高电压而激发继电器工作。所以应增大R，使非门输入端电压升高，而输出一低电压，使继电器处于断开状态。



3.

与非门的真值表

输入		输出
A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

或非门的真值表

输入		输出
A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

三、教学资源库

(一) 概念、规律和背景资料

1. 电流发现的历史过程

(1) 动物电

远在公元 50 年，罗马医生拉古斯曾叙述过一位叫安塞罗的自由人懂得用电鳗放电治疗痛风。后来，法伊也做过类似描述，说非洲老卡拉巴尔河沿岸的黑人用电鳗放电给孩子治疗疾病。

1752 年，瑞士学者苏尔泽 (J. G. Sulzer, 1720—1779) 发现，若将一根铅线和一根银线的一端相连，把它们的自由端放在舌头上，就会感到有点麻木和酸味，与铅和银的味道都不同。

1772 年，英国皇家学会会员华尔士 (J. Walsh) 发现电鳗放电限制在两点之间，一是在背脊，一是在胸腹。他还发现电鳗身上也有类似构造。

1773 年，苏格兰科学家亨特发现电鳗的发电机构位于头壳和腮部之间的空腔内，是由许多小圆柱体堆叠而成的。

1781 年，普鲁士科学家阿查尔 (F. C. Achard) 发现电击可以使刚死的动物复活。他做过一次实验，让一只快断气的红雀通过适当的电接触，红雀苏醒了过来，眼睛睁开，还能站起叫唤，甚至振击翅膀。经过 8 min 后，它才真正死去。

遗憾的是，以上这些发现，未能引起人们的重视。

(2) 伽伐尼电

1780 年 9 月 20 日，意大利解剖学家伽伐尼 (L. Galvani, 1737—1798) 在一次解剖青蛙中偶然发现，当一只剥了皮的青蛙放在起电机旁实验桌上的金属板上，解剖刀触及青蛙腿神经，若这时起电机发出电火花，青蛙腿会猛然地抽搐一下。经过反复实验，他发现用金属接触神经和发出电火花都是必要条件。伽伐尼是电的同一性的信奉者，于是想用雷电做实验。他把蛙腿用铜钩子挂到室外铁杆上，结果观察到了雷雨天蛙腿的收缩。后来，他把蛙腿提进屋内，



放在一张铁桌上，当铜钩子碰上铁桌子时，蛙腿又痉挛起来，这时既无电火花又无雷电。以后他又用各种不同的金属多次重复实验，总是得到相同的结果，只是在使用某些金属时，收缩得更强烈而已。但用诸如玻璃、橡胶、松香、干木头等来代替金属时，则不会发生这样的现象。

伽伐尼实际上已经接近了现象的要害，即电流是由两种不同金属夹以某种湿组织产生的。然而，他未能形成这样的认识，却认为是动物体内存在着“动物电”，只要用两种金属与之接触，这种电就能激发出来，就如莱顿瓶放电一样。他提出“神经电流体”假说来说明动物电的产生。认为青蛙体内存在一种“神经电流体”，它是由大脑中血液产生，经过神经传至肌肉内部使之带正电，而肌肉外层感应出负电。青蛙就像一只充了电的莱顿瓶，若有一种导体从外部接通神经和肌肉，“神经电流体”就会经导线弧放电，导致肌肉抽搐。

伽伐尼的发现，立即引起了人们的广泛重视，在意大利掀起了一股伽伐尼电的热潮。当时有三种观点：第一种观点认为它与莱顿瓶放电相类似；第二种观点认为伽伐尼电与普通电不同，是动物电；第三种观点根本不同意把这一现象归之于动物神经电流体，但人们仍称这种电流为“伽伐尼电”。

1792年，意大利解剖学家柏林吉里(F. V. L. Berlingiere)做了一个实验：把青蛙腿神经截成两段，使神经末梢与上部神经分离，再用锡箔包住神经末梢，若用导线一端与锡箔接触，另一端与肌肉接触，结果发现青蛙腿部仍然抽搐。这一事实说明伽伐尼的“神经电流体”假说是错误的。

(3) 伏打电堆

伏打(A. Volta, 1745—1827)是意大利巴维亚大学的自然哲学教授，开始时完全赞同伽伐尼的观点。后来，他改变方式重做实验。用两种不同金属构成的弧来刺激一只活青蛙，一端接触腿，一端接触背，结果青蛙也发生抽搐。这个实验事实是神经电流体假说所不能解释的。因为导线弧未进入肌肉，未与神经直接接触。此外，他又用莱顿瓶对一只活青蛙放电，结果也观察到青蛙的抽搐现象。表明这是外部电流刺激的结果。这样，伏打开始认为肌肉不是电的源泉，只不过可起到了显示电存在的作用。

1792年9月13日，伏打在给卡伐洛的一封信中最早提出了“接触电”思想。他写到：用一种无可置疑的方法，即用两种不同金属相互接触的方法产生非常微弱的人工电的作用是伽伐尼电的根本原因。

1793年，伏打对各种金属相互间的接触电动势进行了全面研究，根据测量结果，按接触电势高低顺序，他把金属和石墨排成如下顺序：锌、锡、铅、铁、黄铜、青铜、铂、银、金、水银、石墨，被称为伏打序列。

伏打还提出了中间金属定理：不论多少种不同金属串联在一起，它们的总接触电动势与中间金属无关，仅取决于两端金属的性质。

1793年12月，伏打在给一家物理杂志编辑格伦的信中指出：用不同导体，特别是金属导体接触在一起，包括黄铜矿其他矿石以及炭等，我们称之为干导体或第一类导体，再与第二类导体或湿导体接触，就会引起电激励。

1800年春，伏打制成了有名的伏打电堆，它是用一些不同的导体按一定方式叠置起来的装置。他在给英国皇家学会的一个报告中谈到：用30片、40片、60片，甚至更多的铜片（当然最好是银片），将它们中的每一片与一片锡（最好是锌）接触，然后充一层水或导电性比水更好的食盐水、碱水等液层，或填上一层用这些液体浸透的纸皮或皮革等……就能产生相当多的电荷。

伏打电堆比莱顿瓶优越之处是能获得持续的电流。伏打的这一成就深受人们赞赏，轰动了科学界。1801年，罗马姆用伏打电堆给莱顿瓶充电成功，证明了伽伐尼电与摩擦电是相同的。伏打电堆的发明，第一次提供了产生稳恒电流的电源，使电学研究从静电走向动电，从而开辟了一个新的研究领域。伏打电堆促进了电化学、化学电源的研究，也促进了人们研究电流的各种效应。

电流的发现工作始于伽伐尼，但发现电流的却是伏打。伏打虽然发明了电堆，但并不了解其机理，他把电堆动力的来源归结为不同金属的接触。真正阐明伏打电堆的电流来自化学作用的是英国著名化学家戴维（H. Davy, 1778—1829）。

2. 欧姆和欧姆定律的建立

乔治·西蒙·欧姆（Georg Simon Ohm, 1787—1854）1787年3月16日生于德国埃尔兰根城，父亲是锁匠。父亲自学了数学和物理方面的知识，并教给少年时期的欧姆，唤起了欧姆对科学的兴趣。16岁时他进入埃尔兰根大学研究数学、物理与哲学，由于经济困难，中途辍学，到1813年才完成博士学业。欧姆是一个很有天才和科学抱负的人，他长期担任中学教师，由于缺少资料和仪器，给他的研究工作带来不少困难，但他在孤独与困难的环境中始终坚持不懈地进行科学研究，自己动手制作仪器。

欧姆对导线中的电流进行了研究。他从傅里叶发现的热传导规律受到启发，导热杆中两点间的热流正比于这两点间的温度差。因而欧姆认为，电流现象与此相仿。他猜想导线中两点之间的电流也许正比于它们之间的某种驱动力，即现在所称的电动势。欧姆花了很大的精力在这方面进行研究。开始他用伏打电堆作电源，但是因为电流不稳定，效果不好。后来他接受别人的建议改用温差电池作电源，从而保证了电流的稳定性。但是如何测量电流的大小，这在当时还是一个没有解决的难题。开始，欧姆利用电流的热效应，用热胀冷缩的方法来测量电流，但这种方法难以得到精确的结果。后来他把奥斯特关于电流磁效应的发现和库仑扭秤结合起来，巧妙地设计了一个电流扭秤，用一根扭丝悬挂一磁针，让通电导线和磁针都沿子午线方向平行放置，再用铋和铜温差电池，一端浸在沸水中，另一端浸在碎冰中，并用两个水银槽作电极，与铜线相连。当导线中通过电流时，磁针的偏转角与导线中的电流成正比。实验中他用粗细相同、长度不同的八根铜导线进行了测量，得出了如下的等式：

$$X = \frac{a}{b+x}$$

式中 X 为磁效应强度，即电流的大小； a 是激发力（温度差）有关的常数，即电动势； x 表示导线的长度， b 是与电路其余部分的电阻有关的常数， $b+x$ 实际上表示电路的总电阻。这个结果于1826年发表。1827年欧姆又在《动电路的数学研究》一书中，把他的实验规律总结成如下公式：

$$S = \gamma E$$

式中 S 表示电流； E 表示电动力，即导线两端的电势差， γ 为导线对电流的传导率，其倒数即为电阻。

欧姆定律发现初期，许多物理学家不能正确理解和评价这一发现，并提出怀疑和尖锐的批评。研究成果被忽视，加上经济极其困难，使欧姆精神抑郁。直到1841年英国皇家学会授予他最高荣誉的科普利金牌，才引起德国科学界的重视。

欧姆在自己的许多著作里还证明了：电阻与导体的长度成正比，与导体的横截面积和传导性成反比；在稳定电流的情况下，电荷不仅在导体的表面上，而且在导体的整个截面上运动。

3. 金属中电子的热运动速度和定向移动速度

金属导体中的导电机理是自由电子的定向移动。金属中的正离子构成金属的晶体点阵，自由电子在晶格间做无规则的热运动。在导体两端加上电压后，自由电子受到电场的作用，在无规则的热运动上又加上一个定向运动，因而产生电流。自由电子的定向运动不是简单的匀速直线运动，而是在静电力作用下的加速运动，同时又不断地跟正离子碰撞，使定向运动遭到破坏，然后在静电力作用下再加速，再碰撞。从大量自由电子运动的宏观效果来看，可以认为它们是以平均速率 $\bar{v}$ 做定向运动。

自由电子热运动的平均速率是很大的。根据金属经典电子理论，电子的热运动和气体分子运动一样，电子热运动的平均速率 $\bar{u} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$ ，式中 k 是玻尔兹曼常量， $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ； m 是电子的质量， $m = 0.91 \times 10^{-30} \text{ kg}$ ， T 是热力学温度。由公式可算出，当 $t = 27^\circ\text{C}$ ，即 $T = 300 \text{ K}$ 时，

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{8 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300}{3.14 \times 0.91 \times 10^{-30}}} \text{ m/s} = 1.08 \times 10^5 \text{ m/s}$$

自由电子定向运动的平均速率是很小的。假定金属导体单位体积内的电子数为 n ，电子电荷量为 e ，电子定向运动的速率为 $\bar{v}$ ，在 Δt 时间内通过导体横截面 S 的电子数就是 $nS\bar{v}\Delta t$ ，通过此横截面 S 的电荷量 $\Delta q = enS\bar{v}\Delta t$ ，导体中的电流 $I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = enS\bar{v}$ ，由此可推出电子定向运动的平均速率 $\bar{v} = \frac{I}{enS}$ 。

以铜为例，铜单位体积内的电子数 $n = 8.4 \times 10^{22} / \text{cm}^3$ ， $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。直径 1 mm 的铜导线，通过的电流是 1 A 时，由上面的公式可算出这时自由电子定向运动的平均速率 $\bar{v} = 7.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。可见自由电子定向运动的平均速率是很小的。

4. 热电子发射和金属导热性的微观解释

金属炽热时，从它的表面可放出电子到周围空间中，这种现象叫热电子发射（或热离子现象）。如果在两个金属电极间加上一定的电压，并使电势低的一极（阴极）炽热，于是在两极之间就产生电流，称为热电子流。现代热电子发射广泛用于电子管和电子枪中。热电子流不服从欧姆定律。在阴极温度一定时，热电子流随阳极电势升高而增大，但当阳极电势升高到一定程度后，热电子流将呈现饱和，不再随两极电势差的增大而增大。

从金属电子论观点看，在通常温度下，金属中的自由电子还是受到导体表面的非静电起源的力的约束，不能飞离金属表面。但金属受热时，金属中自由电子的热运动加剧，就有一部分自由电子能获得足够的动能，克服这种约束力做功而越出金属表面。在一定温度下，单位时间内能越出金属表面的电子数是一定的。定量计算证明，热电子流强度（饱和电流）和金属的温度关系，与经典电子论符合得很好。

一切金属都是热的良导体，这不难用金属电子论来解释。由于金属传热不仅靠原子（金属正离子）的“碰撞”，而且靠自由电子之间和自由电子与金属正离子之间的碰撞。由于自由电子在导体中易于改变运动状态，因此电子能把在导体的高温区获得的附加的热运动能量比较迅速地传递到相邻区域去，从而大大地加速了热传导的过程。

5. 金属电阻率跟温度的关系

金属的电阻率随温度的升高而增大，当温度变化范围不大时，电阻率与温度之间近似地存在着如下的线性关系



$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

式中 ρ 是温度 T 时的电阻率； ρ_0 是某参考温度 T_0 时的电阻率，一般常取 0°C 或 20°C 作为参考温度； $\Delta T = T - T_0$ ； α 是一个实验常数，叫做电阻率的温度系数，不同材料的电阻温度系数不同。

根据经典电子理论推得金属的电阻率公式为： $\rho = \frac{2m\bar{u}}{e^2 n \bar{\lambda}}$ ，式中 m 、 e 为电子的质量和电荷量， n 为单位体积的电子数， $\bar{u}$ 为电子热运动的平均速率， $\bar{\lambda}$ 为电子的平均自由程。由于 $\bar{u} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$ ，所以导体的电阻率 ρ 应该跟热力学温度的平方根成正比，而不是跟热力学温度成正比，这与前面所讲的电阻率随温度变化的实验规律是不相符合的。造成这一矛盾的原因，是经典金属电子论的缺陷。经典电子论认为电子的热运动服从玻尔兹曼分布规律，而自由电子的量子理论表明，电子是自旋为半整数的费米子不服从玻尔兹曼分布，而服从费米-狄拉克统计规律，因而电阻率公式中的电子热运动平均速率 $\bar{u}$ 应该用费米速度 v_F 来代替，电子的平均自由程则与金属中电子的散射过程有关系。应用量子理论，可以得到电阻率 ρ 正比于 T 的结论。

6. 欧姆定律的微观解释

由于自由电子与晶格结点频繁碰撞时，向各方向散射的机会均等，平均定向运动速度为 0，所以自由电子的热运动并不能产生电荷的集体定向运动，因而不可能形成电流。但是，如果有某种外源存在，使金属中存在一定方向的电场，则在电场作用下，自由电子将在热运动的基础上得到一个与电场方向相反的附加定向运动速度。图 2-22 表示一个电子在某一段时间内的运动，图中实线表示在无电场时自由电子的热运动情形，虚线表示有电场时自由电子的热运动情形。自由电子集体逆电场方向定向运动的现象称为“漂移”，这种漂移运动的平均速度称为“漂移速度”。用 u 表示。

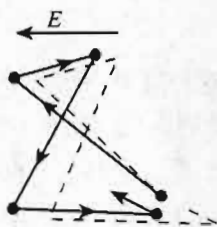


图 2-22

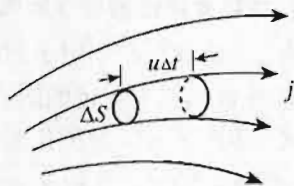


图 2-23

我们来看 u 与 j 的关系。在导体中取一小导体元（如图 2-23），并设导体内单位体积内自由电子数为 n ，则在 Δt 时间内流过导体元的电荷量为 $\Delta q = neu \Delta t \Delta S$ ，则

$$j = \frac{\Delta I}{\Delta S} = \frac{\Delta q}{\Delta S \Delta t} = neu$$

由于自由电子的漂移速度与电场反向，因而与 j 反向，故有

$$j = -ne u \quad (1)$$

下面我们研究 u 与导体中的场强 E 的关系。类似气体分子动理论，自由电子连续两次与晶格骨架的碰撞之间通过的路程和经历的时间，分别用电子的平均自由程 $\bar{\lambda}$ 和平均自由飞行时间 $\bar{\tau}$ 来描写，故自由电子热运动的平均速率为

$$\bar{v} = \frac{\bar{\lambda}}{\bar{\tau}}$$

由于热运动不引起自由电子的定向运动，可以把两次碰撞之间，自由电子在恒定电场 E

作用下的运动看做初速为 0 的匀加速运动, $a = \frac{eE}{m}$ 。设自由电子与正离子碰前的定向速率为 u_i , 平均定向漂移速度为 u , 则有

$$u_i = a \bar{\tau} = \frac{eE\bar{\lambda}}{m\bar{v}}$$

$$u = \frac{u_i}{2} = \frac{eE\bar{\lambda}}{2m\bar{v}}$$

由于漂移速度与场强方向相反, 故得

$$u = -\frac{eE\bar{\lambda}}{2m\bar{v}} \quad (2)$$

由①和②两式得

$$j = \frac{ne^2\bar{\lambda}}{2m\bar{v}}E \quad (3)$$

一定的金属在确定温度下, n 、 $\bar{\lambda}$ 、 $\bar{v}$ 为恒量, 故③式表明, 电流密度 j 与导体中的场强成正比 (微分形式的欧姆定律), 可见欧姆定律是自由电子在外电场作用下运动的必然结果。

7. 焦耳定律的微观解释

电子在电场作用下得到的与漂移速度有关的动能为

$$E_k = \frac{1}{2}m\bar{u}_i^2 = \frac{1}{2}\frac{e^2E^2\bar{\lambda}^2}{m\bar{v}^2}$$

由于电子在碰撞后平均定向运动速度为 0, 所以上式所决定的动能就是碰撞时传递给金属的动能。

设在单位时间内, 每一电子平均碰撞 $\bar{Z}$ 次, 由气体分子动理论可知,

$$\bar{Z} = \frac{\bar{v}}{\bar{\lambda}}$$

在单位时间内, 金属单位体积内的自由电子由碰撞而传给金属的总能量为

$$p = E_k \cdot \bar{Z} \cdot n = \frac{ne^2\bar{\lambda}}{2m\bar{v}}E^2 = \sigma E^2$$

8. 经典金属电子论的困难

虽然经典的电子论能比较简明地解释金属的导电规律, 但只能做到定性的程度。一当涉及定量时, 理论结果与实际差别很大。例如, 近似地用 $\sqrt{\bar{v}^2}$ 代替 $\bar{v}$ (它们之间只相差一个常系数), 可得金属的电阻率

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{2\sqrt{3kmT}}{e^2n\bar{\lambda}}$$

因为在常温下 n 、 $\bar{\lambda}$ 与金属的温度无关, 上式表明, 金属的电阻率与绝对温度的平方根成正比。但实验证明, 电阻率与绝对温度成正比, $\rho \propto T$ 。

在金属的导热性方面, 经典电子论与实验也很不符合。经典电子论假定金属中大量自由电子在做热运动, 且具有相应的能量, 这就会得出导体的热容量应该比不导电的固体大。在断定自由电子数与原子数同数量级时, 每摩尔质量的物质由于自由电子的热运动而附加的内能应为 $\frac{3}{2}kNT = \frac{3}{2}RT$, R 为普适气体恒量, 因而摩尔热容量应增加 $\frac{3}{2}R$ 倍。而实验证明, 导体与不导电的固体的热容量是一样的。

造成上述困难的基本原因是把适用于气体运动的经典统计理论搬到自由电子的运动中去。实际上, “电子气” 不遵循经典统计, 而是遵循量子力学的费米—狄拉克统计。借助于量



子理论,上述困难以及其他一些困难都能克服。

(二) 联系生活、科技和社会资料

1. 电阻温度计

电阻温度计是利用金属电阻随温度变化的原理制作的。它利用各种金属电阻作感温元件,通过测量金属的电阻来确定温度,电阻的测量通常用惠斯通电桥。电阻温度计使用的金属有铜、镍、铂、铂铑合金等,其中以铂的测温性能最好,所以铂电阻温度计较多。

铂电阻的测温范围广,常用于 $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$,也可延伸至 $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 630\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,铂电阻与温度的关系为:

$$R_t = R_0(1 + AT + BT^2)$$

式中 R_0 、 A 、 B 为常量。

纯金属铂电阻温度计是一种非常准确可靠的仪器,常作为实用的标准温度计。

铜电阻温度计价格便宜,常用于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,在这个范围内电阻与温度呈现线性关系:

$$R_t = R_0(1 + \alpha T)$$

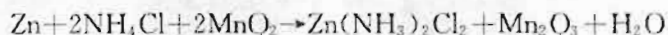
2. 常用的电池及其电动势

常用的电池有干电池、蓄电池、氧化银电池、锂电池等,这几种电池都是化学电池。

(1) 干电池

干电池有许多种,例如锌—锰、碱性锌—锰、锌—空气等类型。其中应用最广泛的是锌—锰干电池。锌—锰干电池的负极是用锌做成的圆筒,正极是碳棒,用 NH_4Cl 作电解液, MnO_2 作去极剂。

锌—锰干电池中的基本化学反应是:



这种干电池,不论体积多大,电动势都是 1.5 V ,内阻约 $0.1\ \Omega$,干电池在使用过程中,由于不断在锌极表面产生 $\text{Zn}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_2$,电池内阻不断增大。当内阻增大到不能供给电流时,电池就报废了。一般锌—锰干电池只适用于间歇放电,而且放电电流应在 1 A 以下。

干电池有圆筒形的和叠层的。圆筒形的用“R”表示,通常按其体积的大小又分为1号、2号、3号、4号、5号等几种。叠层电池用符号“F”表示,例如“4F22”表示由4个扁平形F22叠层电池组合成的电池。叠层电池是将糊状电解层涂敷在优质纸上做成的。市场上所售的高能电池多为此种电池。

下表是几种常用的锌—锰干电池的性能。

电池种类及型号	开路电压/V	正常使用时的放电电流/A	容量/(A·h)	主要用途
干电池				
R20 (1号)	1.5	0.3	4.25	收音机
R14 (2号)	1.5	0.3	1.5	照明
R6 (5号)	1.5	0.3	0.425	一般实验
叠层电池				
4F22	6	0.01	0.35	收音机
6F22	9	0.01	0.31	仪表

(2) 蓄电池

蓄电池是能反复充电、放电的电池。最常用的是铅蓄电池，它广泛用于汽车或拖拉机的启动、通信电源、电力系统、蓄电池车及仪器设备等。

铅蓄电池的正负极板一般是用铅或铅合金制成的板栅，在板栅上填充作为活性物质的膏状物。正极板上的活性物质是 PbO_2 ，负极板上的活性物质是海绵状铅。用硫酸溶液作电解液。

新的铅蓄电池一般在使用前需要进行初充电。首先按照制造厂规定的密度灌注硫酸溶液。注液后的反应热会引起温升，需放置 1~6 h 进行降温。反应后液面下降时，要进行补液。待温度降至 35 °C 以下时，便可开始初充电。初充电的电流要小，可用 20 小时率的电流（即充电电流 = 电池容量 / 20 h），充电 70~80 h。当电解液温度升至 45 °C 时，要减小充电电流，或暂时停止充电。在气体开始激烈产生之后，每隔 1 h 测量一次电池的电压和溶液浓度，连续三次不变时，初充电即可结束。

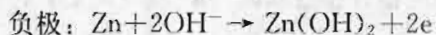
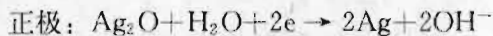
蓄电池在使用过程中，由于电池放电，硫酸溶液密度逐渐降低。在密度降至 1.16 g/cm^3 、电动势降至 1.85 V 时，必须重新充电。充电至大量产生气体后，每隔 10~15 min 测量一次电池的电压和硫酸溶液的密度。当连续测量三次不变时，充电即可结束。

铅蓄电池的内阻很小，当外电路电阻很小或电路短路时，将有很大的电流通过电池，这会损坏极板，所以一定要注意防止这种情况发生。蓄电池闲置不用时，每月也要充电一次，每次充电时间 1~2 h。

(3) 微型电池

微型电池是体积很小的电池，它们的形状有纽扣形、圆柱形、硬币形等。微型电池的种类有 20 多种，例如常用的氧化银电池、汞电池、锂电池等。

氧化银电池是微型电池中用得最多的一种，广泛用于助听器、电子手表、微型计算器中。氧化银电池的正极是氧化银，负极是锌，电解液是氢氧化钾，电池放电时的反应是：



氧化银电池的电动势为 1.55~1.6 V，工作电压一般稳定在 1.5 V。它的突出优点是容量大（为铅蓄电池的 3~4 倍），能保持稳定的工作电压。

(三) 实验参考资料

1. 欧姆表表盘的刻度

由课本图 2.8-1 可知，当红、黑表笔间接入某一电阻 R_x 时，通过电流表的电流为

$$I = \frac{E}{R_g + R + r + R_x}$$

由于干电池的内阻 r 跟 R_g 、 R 相比很小，可以忽略不计，所以上式可简化为

$$I = \frac{E}{R_g + R + R_x} \quad \text{①}$$

在电源电动势 E 、电流表内阻 R_g 、限流电阻 R 确定的情况下， I 随 R_x 而变，电流表指针偏转的角度与 R_x 的值相对应，此即为欧姆表的原理。

如果把红、黑表笔短接（ $R_x = 0$ ），调节 R 的值使电路中的电流等于电流表的满偏电流



I_g , 则

$$I_g = \frac{E}{R_g + R} \quad (2)$$

即欧姆表的零阻值刻度应标在电流表满刻度处。

如果把红黑表笔断开($R_x = \infty$), 电路中电流 $I = 0$, 电流表指针不发生偏转, 因此, 欧姆表的无限大电阻刻度应在电流表的电流为 0 处。

表盘上的 $0 < R_x < \infty$ 之间的刻度又怎样确定呢?

首先确定中值电阻。由①和②式可知, 当 $R_x = R_g + R$ 时, $I_x = \frac{1}{2} I_g$, 即电流表指针只偏转满刻度的一半, 也就是在欧姆表表盘的中央刻度处。此刻度值叫中值电阻 $R_{中}$, $R_{中} = R_g + R$ 。

再根据 $I = \frac{E}{R_{中} + R_x} = \frac{R_{中}}{R_{中} + R_x} I_g$ 确定其他刻度。当 R_x 分别为 $R_{中}$ 的 2 倍、3 倍、4 倍... 时, 电路中的电流 I 分别为满偏电流 I_g 的 $\frac{1}{3}$ 、 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{5}$ 、... 即电流表指针偏转的角度分别为满偏电流时偏转角度的 $\frac{1}{3}$ 、 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{5}$ 、... 当 R_x 的值为 $R_{中}$ 的 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{3}$ 、 $\frac{1}{4}$ 、... 时, 指针偏转的角度分别为满偏的 $\frac{2}{3}$ 、 $\frac{3}{4}$ 、 $\frac{4}{5}$ 、... 所以欧姆表表盘的刻度是不均匀的。

为了使欧姆表各挡共用一个刻度标尺, 一般都以 $R \times 1$ 挡的中值电阻为标准, 成 10 倍地扩大。如果 $R \times 1$ 挡的中值电阻 $R_{中} = 10 \Omega$, 此时表的总内阻 $r_{总} = R_g + R = R_{中} = 10 \Omega$, $R_x = 10 \Omega$ 的刻度应在刻度盘的中央。当电表的 $r_{总} = 100 \Omega$ 时, $R_{中} = 100 \Omega$, 此时 $R_x = 100 \Omega$ 的刻度也应在刻度盘的中央, 即指针指在原来“10”的位置, 读数乘以 10 就是 100Ω , 这就是 $R \times 10$ 挡。依此类推。可见, 扩大欧姆表的量程就是扩大表的总内阻 $r_{总}$ 的值。这实际上是通过欧姆表内的另一附加电路来实现的。

由 $I_g = \frac{E}{R_{中} + R_x}$ 还可看出, 当 $R_x \ll R_{中}$, $I \approx I_g$, 此时指针接近满偏, R_x 变化时, I 的变化很小, 表头受本身灵敏度限制, 指针变化不易分辨, 因而测量误差很大。当 $R_x \gg R_{中}$ 时, $I \approx 0$, 同理测量误差也很大。所以实际上通常只用表盘中间的一段来测量, 一般取 $0.1 R_{中} \sim 10 R_{中}$ 这段范围。欧姆表都有几个量程, 每个量程的 $R_{中}$ 不同, 但每个量程的可用范围都是 $0.1 R_{中} \sim 10 R_{中}$ 。如果 $R_{中} = 10 \Omega$, 测量范围就是 $1 \sim 100 \Omega$; 如果 $R_{中} = 100 \Omega$, 测量范围就是 $10 \sim 1\,000 \Omega$ 。

2. 测未知量程的电流表的内阻和量程

(1) 实验仪器的选取

有一只灵敏电流计 G, 刻度盘上共有 N 格刻度而无具体示数, 已知该电流表的满偏电流 I_g 约为几百微安, 内阻 R_g 约为几百欧。现在要求尽可能精确而简捷地测出此表的 I_g 、 R_g 。除 G 表外可能提供的器材有:

- ① 电流表 A (量程 30 mA, 内阻约为几十欧);
- ② 电压表 V (量程 3 V, 内阻 15 k Ω);
- ③ 滑动变阻器 R_1 (0~200 Ω , 0.5 A);
- ④ 滑动变阻器 R_2 (0~20 Ω , 2 A);
- ⑤ 电阻箱 R_3 (0~9 999.9 Ω);
- ⑥ 定值电阻 R_0 (50 Ω , 0.1 A);
- ⑦ 电池组 ($E = 12$ V, $r \approx 0.5 \Omega$);

⑧ 开关、导线。

(2) 实验要求

① 设计出测量方案，画出电路图。

② 除灵敏电流表 G 外所需器材是：_____。(填数字代号)

③ 说明需要测定的物理量，列出计算方程并导出计算 I_g 、 R_g 的数学表达式。

方案一：

为了确保灵敏电流表 G 的安全，采用如图 2-24 所示的分压式电路来测定灵敏电流表 G 的每格刻度值 I_0 和内阻 R_g 。

实验应选择的器材是：②④⑤⑦⑧

调节滑动变阻器 R' 和电阻箱 R ，读出电压表的示数 U_1 、电阻箱 R 的阻值 R_1 、灵敏电流表 G 指针偏转刻度数 n_1 ，然后再次调节 R' 和 R ，读出相应的 U_2 、 R_2 和 n_2 。

由欧姆定律有

$$n_1 I_0 (R_g + R_1) = U_1$$

$$n_2 I_0 (R_g + R_2) = U_2$$

联立求得

$$I_0 = \frac{n_1 U_2 - n_2 U_1}{n_1 n_2 (R_2 - R_1)}$$

此电流表的内阻是

$$R_g = \frac{n_2 R_2 U_1 - n_1 R_1 U_2}{n_1 U_2 - n_2 U_1}$$

此电流表的量程是

$$I_g = N I_0 = \frac{N(n_1 U_2 - n_2 U_1)}{n_1 n_2 (R_2 - R_1)}$$

方案二：

为了确保灵敏电流表 G 的安全，采用如图 2-25 所示的分压式电路来测定 G 表的每格刻度值 I_0 。再采用方案一中的实验电路来测灵敏电流表 G 的内阻 R_g 。

应选择的器材同方案一。

调节滑动变阻器 R' ，读出电压表的示数 U 和灵敏电流表 G 指针偏转的刻度数 n ，由欧姆定律有灵敏电流表 G 的读数 $I_2 = n I_0 = \frac{U}{R_V}$ 。

解得 $I_0 = \frac{U}{n R_V}$ 。

采用方案一中的实验电路来测灵敏电流表 G 的内阻 R_g 。

调节电阻箱 R 和滑动变阻器 R' ，读出电压表的示数 U' 、电阻箱的阻值 R 和灵敏电流表 G 指针偏转的刻度数为 n' ，则

$$I = n' I_0$$

由欧姆定律 $U' = I(R_g + R)$ ，有

$$R_g = \frac{U'}{I} - R = \frac{n U'}{n' U} R_V - R$$

联立求得结果。

3. 电路的控制——测定运动物体加速度的仪器

(1) 实验器材

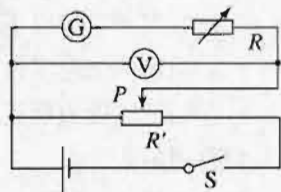


图 2-24

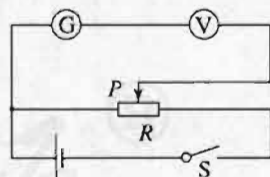


图 2-25



光滑直杆一根，质量为 $m=0.1\text{ kg}$ 的滑块一个，劲度系数为 $k=20\text{ N/m}$ 轻弹簧一根，量程为 8 V 的电压表一个，电源电动势 $E=10\text{ V}$ 、内阻不计的电源一个，有效总长度为 $L=8\text{ cm}$ 、总阻值 $R=40\text{ }\Omega$ 的滑动变阻器一个。

(2) 实验原理

测定运动物体加速度的仪器已经广泛应用。我们采用将力学信号转换为电信号的方法来进行研究。

如图 2-26 所示为应变式加速度计的原理图：支架 AB 固定在待测系统上，滑块穿在 AB 之间的水平光滑杆上，并用轻弹簧连接在 A 端，其下端有一活动臂可通过电路将滑动头的移动转换成电信号从电压表输出。当待测系统静止时，滑动触头 P 在变阻器的中点，此时弹簧处于原长状态，取由 A 至 B 为速度正方向。

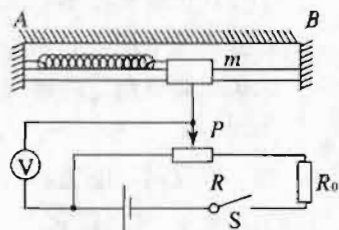


图 2-26

该方案要完成以下几个指标：

- ① 确定该加速度计测量加速的范围。
- ② 保证电压表能正常使用，确定如图电路中电阻 R_0 至少应为多大？

③ 根据 R_0 的最小值，写出待测系统沿 AB 做变速运动时，电压表输出电压 U 与加速度 a 的关系。

④ 根据 R_0 的最小值，将电压表盘上的电压刻度改成适当的加速度刻度，将对应的加速度值填入图中电压表盘的小圆内，如图 2-27 所示。

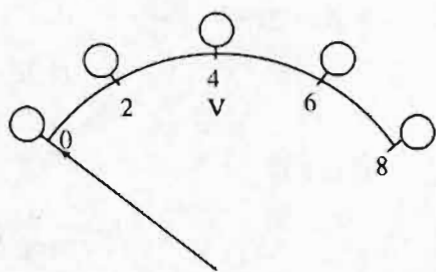


图 2-27

(3) 实验举例

滑块由弹力产生加速度，弹簧最大形变为 $x=4\text{ cm}$ 。

由牛顿第二定律得

$$kx=ma \quad ①$$

由①式并代入数据得

$$a=\frac{kx}{m}=\frac{20\times 4\times 10^{-2}}{0.1}\text{ m/s}^2=8\text{ m/s}^2$$

变阻器最大电压为 $U=8\text{ V}$ ，分压电阻 R_0 的电压则为 $U_0=2\text{ V}$ ，由电路特点得

$$\frac{U_0}{U}=\frac{R_0}{R}$$

由上式代入数据可得

$$R_0=\frac{U_0}{U}R=\frac{2\times 40}{8}\text{ }\Omega=10\text{ }\Omega$$

弹簧长度 x 的变化范围在变阻器中点两侧 4 cm 以内，电压表读数变化量 ΔU ，有

$$\Delta U=\frac{REx}{(R+R_0)L}=\frac{40\times 10x}{(40+10)\times 0.08}=100x \quad ②$$

由①式得

$$x=\frac{ma}{k} \quad ③$$

由②和③式得

$$\Delta U = 100 \frac{m}{k} a$$

电压表读数 U_V 与加速度 a 的关系

$$U_V = \frac{U}{2} - \Delta U \quad (4)$$

将数值代入④式得

$$U_V = 4 - \frac{a}{2}$$

$$a = 8 - 2U_V \quad (5)$$

④由⑤式可得

当电压表读数 $U_V = 0$ 时, $a = 8 \text{ m/s}^2$ 。

$U_V = 2 \text{ V}$ 时, $a = 4 \text{ m/s}^2$ 。

$U_V = 4 \text{ V}$ 时, $a = 0$ 。

$U_V = 6 \text{ V}$ 时, $a = -4 \text{ m/s}^2$ 。

$U_V = 8 \text{ V}$ 时, $a = -8 \text{ m/s}^2$ 。

由上面数值可以得出, 加速度的示数在电压表盘上的刻度如图 2-28 所示。

将力学量转化为电学量来进行测量是一种基本的方法。事实上, 传真机就是将文字信号、表格信号、图像信号等转化为电信号来进行传输的; 电视机等就是将声音信号、图像信号转化为电信号来进行测量和传输的。

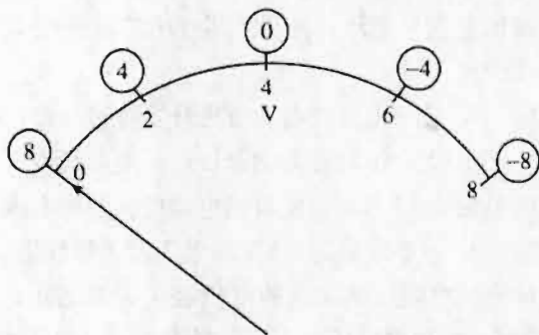


图 2-28

4. 磁电式电表的一些知识

(1) 误差来源: 动圈所处的辐射状磁场不均匀, 动圈指针系统的重心偏离转动轴, 游丝的扭转力矩不严格与扭转角度成正比, 表盘分度不均匀, 刻度弧线的圆心和指针的转动轴不重合, 以上综合表现为线性不良。轴与轴承的摩擦造成示值变动性误差, 如每次断电后不能都回零, 当电流缓慢增加或减少到同一值时, 指针的示值却有些不同。磁钢退磁, 温度升高时铜丝绕成的动圈电阻增加大于锰铜丝制成的分流电阻的增加, 改变了分流比, 这些都将使示值偏小, 是系统误差。游丝弹性疲劳, 外界磁场干扰也造成误差, 如学生电表未加磁屏蔽, 互相靠近时示值都将变化。

(2) 准确度等级: 表示正常条件下电表的基本误差。如 J0407 型电流表和 J0408 型电压表都是 2.5 级, 表示在任何示值时示值与标准值之差与电表满度值的百分比都不超过 $\pm 2.5\%$ 。对于 $0 \sim 3 \text{ A}$ 挡, 示值的最大可能绝对误差 $\Delta I = \pm 2.5\% \times 3 \text{ A} = \pm 0.075 \text{ A}$ 。欧姆表的准确度定义则不同, 如 J0411 型万用电表电阻挡标以数字 “2.5”, 表示在任何一处的示值误差不超过标尺弧线全长的 $\pm 2.5\%$ 。

(3) 示值误差: 对于分度均匀的电流表和电压表, 不同示值的绝对误差相同, 示值越大则相对误差越小。如前例中电流表示值 2.64 A 时, 相对误差 $\frac{\Delta I}{I} = \frac{0.075}{2.64} = 2.8\%$, 对于欧姆表, 它的总内阻等于标尺的中值电阻 R_Φ , 用微分方法导出公式 $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta R_\Phi}{R_\Phi} \left[\frac{(R_\Phi - R)^2}{R_\Phi R} + 4 \right]$ 。由此式可知: 当 $R = R_\Phi$ 时, 相对误差最小, 对前例中多用表, $\frac{\Delta R}{R} = 10\%$; 当 $R = 2R_\Phi$ 或 $R = \frac{1}{2} R_\Phi$



时, $\frac{\Delta R}{R} = 11.3\%$; 当 $R = 4R_{\text{中}}$ 或 $R = \frac{1}{4}R_{\text{中}}$ 时, $\frac{\Delta R}{R} = 15.6\%$ 。所以为了得到较准确的结果, 应尽可能利用标尺的中部。

上述示值误差不包括人读数时产生的误差。

四、补充习题

A 组

1. 电视机显像管中的电子枪射出的高速电子流也是电荷的定向移动, 可以看做电流, 若该电流的大小为 $9.6 \times 10^{-3} \text{ A}$, 则每秒钟打到荧光屏上多少个电子?

2. 电阻温度计是根据金属导体电阻随温度变化而变化的原理制成的, 已知在某金属丝两端加上 3 V 电压, 测得金属丝中的电流在 $10 \sim 20 \text{ mA}$ 之间变化, 则金属丝的电阻变化范围是多少?

3. 某一用直流电动机提升重物的装置, 如图 2-29 所示, 重物的质量 $m = 50 \text{ kg}$, 电源电压 $U = 110 \text{ V}$ 。不计各处的摩擦, 当电动机以 $v = 0.90 \text{ m/s}$ 的恒定速度向上提升重物时, 电路中的电流 $I = 5 \text{ A}$, 由此可知电动机线圈的电阻 $R = \underline{\hspace{1cm}} \Omega$ 。 ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

4. 一个内阻是 $1 \text{ k}\Omega$ 的电压表, 量程是 3 V , 当它串联一个 $5 \text{ k}\Omega$ 的分压电阻后组成新的电压表再去测电压, 读得原表盘上的示数是 2 V , 则被测电压的实际值是多少? 该电压表的量程是多少?

5. 家庭电路中的电能表是用来测量家庭中使用电能的数值的。它使用的单位叫 $\text{kW} \cdot \text{h}$ (俗称“度”)。

(1) $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 等于多少焦耳?

(2) 你能用电能表来估测家庭电路里的电流吗?

6. 某同学想用实验测定某铝箔的厚度, 可以利用的器材有: 米尺、电压表、电流表、电源、滑动变阻器、电键和若干导线。请设计一个测定铝箔膜层厚度的实验方案。

(1) 实验中应测定的物理量有哪些?

(2) 用符号画出测量电路图。

(3) 写出计算膜层厚度的公式。

7. 用多用电表测电阻。

(a) 如果表的指针偏转过大, 为使测量比较精确, 应将选择开关拨至倍率较 (填“大”或“小”) 的挡位上。

(b) 每次换挡后, 需重新 , 再进行测量。

8. 在图 2-30 所示的电路中, 当滑动变阻器的滑动触点向上移动时, 电流表、电压表的示数怎样变化?

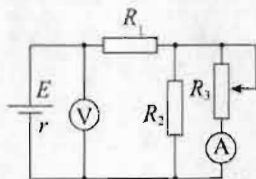


图 2-30

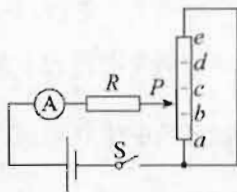


图 2-31

9. 手电筒里的两节干电池, 用了很久后, 小灯泡只能发出微弱的光了。把这两节干电池取出来, 用电压表测量, 每一节两端的电压都很接近 1.5 V , 把它们装入电子钟里, 电子钟能正常工作。试用闭合电路的欧姆定律来解释这个现象。

10. 两实验小组使用相同规格的元件, 按图 2-31 所示的电路进行测量。他们将滑动变阻器的滑片 P 分别置于 a 、 b 、 c 、 d 、 e 间距相同的位置 (a 、 e 为滑动变阻器的两个端点), 把相应的电流表示数记录在表 1、表 2 中, 对比两组数据, 发现电流表示数的变化趋势不同, 经检查, 发现其中一个实验组使用的滑动变阻器发生了断路。

表 1 (第一实验组)

P 的位置	a	b	c	d	e
电流表示数 (A)	0.84	0.48	0.42	0.48	0.84

表 2 (第二实验组)

P 的位置	a	b	c	d	x	e
电流表示数 (A)	0.84	0.42	0.28	0.21		0.84

- (1) 滑动变阻器发生断路的是第____实验组, 断路发生在滑动变阻器的____段。
 (2) 表 2 中对应滑片 P 在 x (d 、 e 之间某一点) 处的电流表示数的可能值为 ()
 A. 0.16 A B. 0.26 A C. 0.36 A D. 0.46 A

B 组

1. 如图 2-32 所示, 电源电动势 $E=12\text{ V}$, 内阻 $r=3\ \Omega$, $R_0=1\ \Omega$, 直流电动机内阻 $R_0'=1\ \Omega$ 。当调节滑动变阻器 $R_1=2\ \Omega$ 时, 图甲电路输出功率最大。调节 R_2 使图乙电路输出功率最大, 且此时电动机刚好正常工作 (额定功率为 6 W), 则此时 R_2 的阻值和电动机的焦耳热功率 P 为 ()

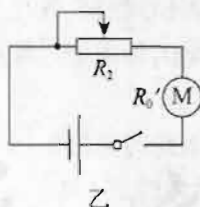
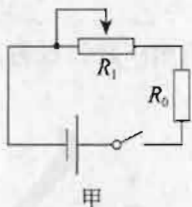


图 2-32

- A. $R_2=2\ \Omega$ B. $R_2=1.5\ \Omega$ C. $P=6\text{ W}$ D. $P=4\text{ W}$

2. 如图 2-33 所示, 当滑动变阻器的活动触点 P 向上滑动时, 则 ()

- A. A 灯和 B 灯均变亮
 B. A 灯和 B 灯均变暗
 C. A 灯变亮, B 灯变暗
 D. A 灯变暗, B 灯变亮

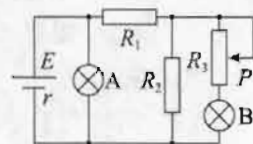


图 2-33

3. 如图 2-34 所示电路, 当变阻器的滑动片从一端滑到另一端的过程中两电压表的读数随电流表读数的变化情况如图 2-35 中的 AC、BC 两直线所示, 不考虑电表对电路的影响。求:

- (1) 定值电阻 R_0 和变阻器的总电阻;

(2) 电源的电动势和内阻。

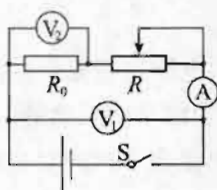


图 2-34

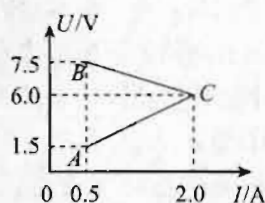


图 2-35

4. 为了测定某选层电池的电动势 (约 20~22 V) 和内电阻 (小于 2 Ω), 需要把一个量程为 10 V 的直流电压表接一个固定电阻 (用电阻箱代替), 改装量程为 30 V 的电压表, 然后用伏安法测电源的电动势和内电阻, 以下是该实验的操作过程:

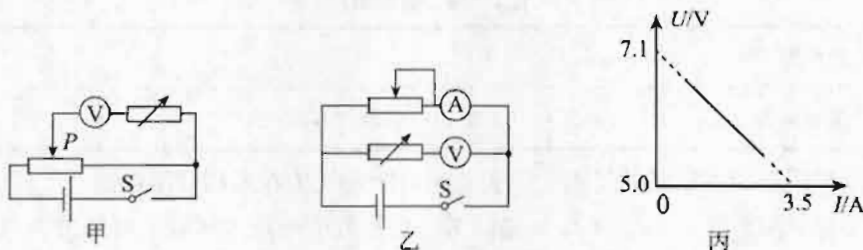


图 2-36

(1) 把电压表量程扩大, 实验电路如图 2-36 甲所示, 请完成第五步的填空。

第一步: 把滑动变阻器滑动片移至最右端

第二步: 把电阻箱阻值调到 0

第三步: 闭合开关

第四步: 把滑动变阻器滑动片调到适当位置, 使电压表读数为 9 V

第五步: 把电阻箱阻值调到适当值, 使电压表读数为 _____ V

第六步: 不再改变电阻箱阻值, 保持电压表和电阻箱串联, 撤去其他线路, 即得量程为 30 V 的电压表

(2) 上述实验可供选择的器材有:

- A. 选层电池 (电动势约 20~22 V, 内电阻小于 2 Ω)
- B. 电压表 (量程为 10 V, 内阻约 10 k Ω)
- C. 电阻箱 (阻值范围 0~999.9 Ω , 额定功率小于 10 W)
- D. 电阻箱 (阻值范围 0~999.99 Ω , 额定功率小于 10 W)
- E. 滑动变阻器 (阻值为 0~20 Ω , 额定电流 2 A)
- F. 滑动变阻器 (阻值为 0~2 k Ω , 额定电流 0.2 A)

电阻箱应选 _____, 滑动变阻器应选 _____ (用大写字母表示)。

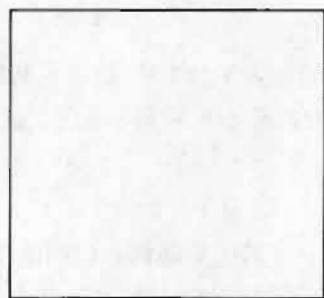
(3) 用扩大了量程的电压表 (电压表的表盘没变), 方法采用伏安法, 测量电源电动势 E 和内电阻 r , 实验电路如图 2-36 乙所示, 得到多组电压 U 和电流 I 的值, 并作出 $U-I$ 图象如图 2-36 丙所示。可知电池的电动势为 _____ V, 内电阻为 _____ Ω 。

5. 小灯泡灯丝的电阻会随温度的升高而增大, 某同学为研究这一现象, 用实验得到如下数据 (I 和 U 分别表示小灯泡上的电流和电压)。

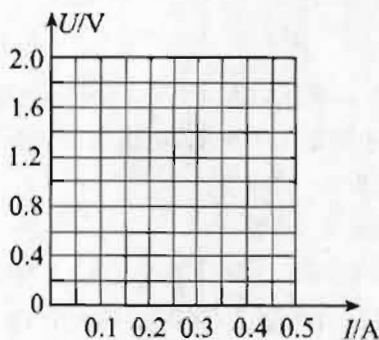
I/A	0.12	0.21	0.29	0.34	0.38	0.42	0.45	0.47	0.49	0.50
U/V	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00

(1) 在图 2-37 甲框中画出实验电路图。可用的器材有：电压表、电流表、滑动变阻器(变化范围 $0 \sim 10 \Omega$)、电源、小灯泡、开关、导线若干。

(2) 在图 2-37 乙中画出小灯泡的 $U-I$ 曲线。



甲



乙

图 2-37

(3) 如果有一电池的电动势为 1.5 V ，内阻为 2.0Ω ，将本题中的小灯泡接在该电池的两端，则小灯泡的实际功率是多少？(若需作图可直接画在第(2)小题的方格图中)

6. 小彭同学根据电容的定义式 $C = \frac{q}{U}$ 测量某一电容器的电容。他利用电流传感器测量电容器上充电的电荷量，实验原理如图 2-38 甲所示，其中电源电动势 $E = 15 \text{ V}$ ，内阻 $r = 2.0 \Omega$ ， $R = 200 \Omega$ ，开始时电容器 C 不带电。电流传感器与计算机相连，其作用可以观察和描绘电容器充电时电流随时间的变化关系图线。接通开关 S ，电源对电容器充电电流随时间的变化关系如图 2-38 乙所示，则该电容器充电完成时两端的电压为 $\underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$ ，用 $\underline{\hspace{2cm}}$ 的方法可以知道电容器充电完成时所带的电荷量。该电容器的电容 $C = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

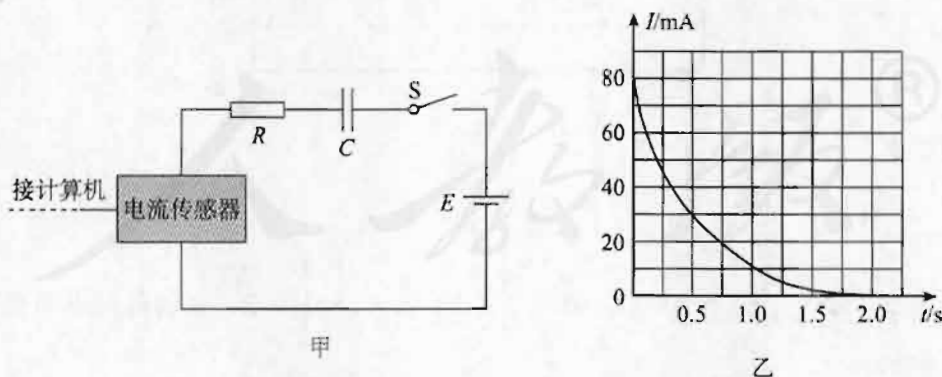


图 2-38

7. 在图 2-39 的电路中，各元件值为 $R_1 = R_2 = 10 \Omega$ ， $R_3 = R_4 = 20 \Omega$ ， $C = 300 \mu\text{F}$ ，电源电动势 $E = 6 \text{ V}$ ，内阻不计。单刀双掷开关 S 开始时接触点 2，求：

- (1) 当开关 S 从触点 2 改接触点 1，且电路稳定后，电容 C 的所带的电荷量；
- (2) 若再将开关 S 从触点 1 改接触点 2 后，直至电流为 0 止，通过电阻 R_1 的电荷量。

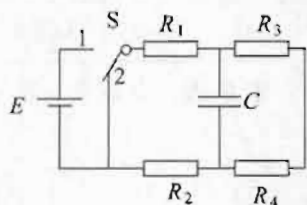


图 2-39

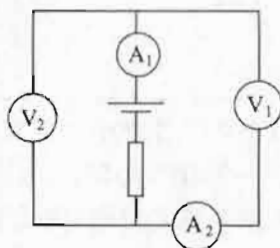


图 2-40

8. 如图 2-40 所示, A_1 和 A_2 是两只电阻不同的电流表, V_1 和 V_2 是两只相同的电压表。电流表 A_1 的示数是 1.4 mA , 电压表 V_1 和 V_2 的示数分别是 0.6 V 和 0.8 V , 试求:

(1) 电流表 A_2 的内阻;

(2) 电流表 A_2 示数。

9. 如图 2-41 所示, 用开关 S_1 、 S_2 来改变输入端 A、B 的电势高低, 控制电动机 M 工作。实验发现, 只有当 S_1 、 S_2 同时接通时, 电动机才能工作。则输入端 A、B 与输出之间是 _____ 门逻辑电路。完成真值表。

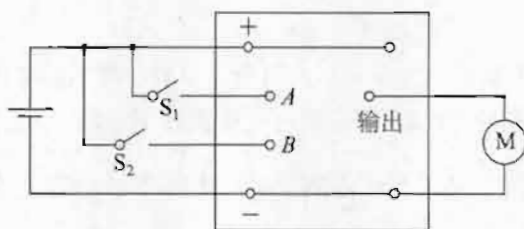


图 2-41

输入 A	输入 B	输出

参考答案

A 组

1. 6×10^{16}

2. $R_1 = \frac{U}{I_1} = \frac{3}{10 \times 10^{-3}} = 300 \, \Omega$, $R_2 = \frac{U}{I_2} = \frac{3}{20 \times 10^{-3}} = 150 \, \Omega$, 金属丝的电阻变化范围是 $300 \sim 150 \, \Omega$ 。

3. 4 提示: 根据电动机线圈的发热功率 $P_{\text{热}} = I^2 R$ 来求线圈电阻 R 。线圈的发热功率是电动机消耗的电功率与对重物做功功率的差 $P_{\text{热}} = P - P_{\text{机}}$ 。对重物做功功率 $P_{\text{机}} = Fv$, 由于物体以恒定速度被提升, $F = mg$ 。本题的答案是 $4 \, \Omega$ 。

4. 12 V 提示: 该电表加 3 V 电压时指针满偏, 满偏电流 $I_g = \frac{U}{R_g} = \frac{3}{1 \times 10^3} = 3 \times 10^{-3} \text{ A}$, 串联 $5 \text{ k}\Omega$ 的分压电阻后的量程为

$$U_1 = I_g(R_g + R) = 3 \times 10^{-3} \times (1 \times 10^3 + 5 \times 10^3) = 18 \text{ V}$$

当电表指针指在 2 V 处时, 被测电压是 12 V。

5. (1) $3.6 \times 10^6 \text{ J}$ 提示: $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的含义是功率为 1 kW 的用电器在 1 h 内所消耗的电功, 也就是 1 h 中所做的电功 $W_1 = Pt = 1 \times 10^3 \times 3.6 \times 10^3 \text{ J} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$ 。(2) $\frac{NW_1}{nU_1}$ 提示: 家庭电路电压为 220 V , 电能表可以测量电功 W , 所以电路里的电流 $I = \frac{W}{U_1 t}$, 但是电能表的单位是 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 做 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的电功一般需要很长时间。我们可以利用电能表铭牌上的技术数据 $n r / (\text{kW} \cdot \text{h})$, 即电路中消耗 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的电功, 电能表铝盘转过 n 圈。

这样我们可以用秒表或手表测量时间 t 秒内电能表铝盘转过的圈数 N , 则时间 t 秒内电路中的电功 $W = \frac{N}{n} W_1$ 。

所以, 电路中的电流 $I = \frac{W}{U_1 t} = \frac{NW_1}{nU_1 t}$ 。

6. (1) 提示: 铝箔的电阻由它的长度、横截面积和电阻率决定。铝箔的横截面积为铝箔的宽度和厚度的乘积。所以实验中应测量: 铝箔两端的电压 U 和电流 I (计算电阻 R)、铝箔的宽度 r 和长度 L 。

(2) 测量电阻的电路图如图 2-42 所示。

(3) 计算铝箔厚度的公式为: $d = \frac{\rho L}{rR} = \frac{\rho L I}{r U}$ 。

7. 小, 调零

8. 电压表示数增大, 电流表示数减小。提示: 当滑动变阻器滑动触点向上移动时, 电阻 R_3 变大, 外电路总电阻变大, 根据闭合电路欧姆定律, 电路总电流 I 减小, 所以路端电压 U 增大, 即电压表示数增大。

电流表的示数是滑动变阻器中的电流, 由于其电压、电阻都变化, 难以判断其电流变化, 可根据串、并联电路的特点加以判断

$$U = U_1 + U_2$$

$$I = I_1 = I_2 + I_3$$

由于总电流 I 减小, 电阻 R_1 上的电压 U_1 减小, 而总电压是增大的, 所以电阻 R_2 两端的电压 U_2 增大, R_2 中的电流 I_2 增大, R_3 中的电流 I_3 减小, 即电流表示数减小。

9. 提示: 电池用久了, 内阻变大, 内电压升高, 路端电压减小, 小灯泡不能正常发光。由于电子钟工作电流较小, 内电压小, 有足够的路端电压使电子钟正常工作。

10. (1) 第二组, de 之间 提示: 该电路中滑动变阻器 aP 段和 Pe 段并联后与电阻 R 串联接到电源上, aP 段和 Pe 段并联后的电阻随 P 的滑动而变化, P 在中点时, 电阻最大, P 在两端点时, 电阻最小为 0。第一组实验数据反映了这一点。发生断路的是第二实验组, 且第二组的实验数据反映 P 越向上, 电流越小, 说明电阻越大 ad 之间是导通的, 断路应该发生在 de 之间。(2) D 提示: 若 x 在断点之下, 则电流应比在 d 点时还小 ($0.168 \text{ A} < I < 0.21 \text{ A}$), 若 x 在断点之上, 则电流比在 b 点时还大 ($I > 0.42 \text{ A}$)。所以 (2) 中答案应选 D。

B 组

1. B、D; 2. C; 3. (1) $R_0 = 3 \Omega$, $R = 12 \Omega$; (2) $E = 8 \text{ V}$, $r = 1 \Omega$ 。

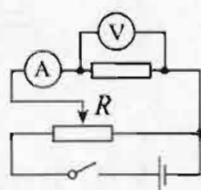


图 2-42

4. (1) 3 提示: 要使电压表量程扩大 3 倍, 则电阻箱的阻值应为电压表内阻的 2 倍, 电压表读数应为电阻箱两端电压的一半, 认为总电压保持 9 V 不变, 所以电压表读数为 3 V;
(2) D, E; (3) 21.3, 1.8

5. (1) 实验电路如图 2-43 所示。(2) 小灯泡的 $U-I$ 曲线如图 2-44 所示。(3) 0.28 W
提示: 在方格图中作出电源的伏安特性曲线, 为一条倾斜的直线, 纵轴的截距为电源的电动势, 斜率为电源的内阻, 两曲线的交点就代表此电源给该灯泡供电的工作状态。读出小灯泡实际工作电压为 0.80 V, 实际电流为 0.35 A, 则小灯泡的实际功率为 $P=UI=0.28$ W。

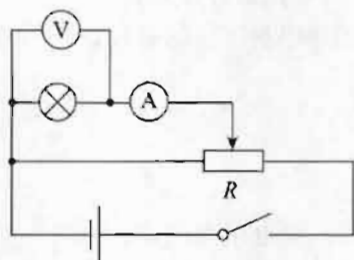


图 2-43

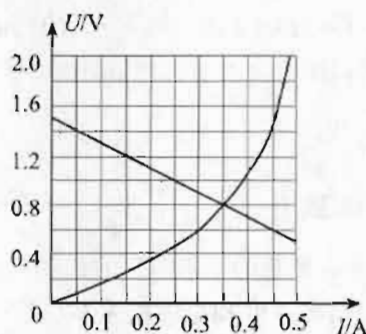


图 2-44

6. 15, 数格子计算图线与 I 轴、 t 轴包围的面积, 2.5×10^{-3} F。

7. (1) 1.2×10^{-3} C, 0.8×10^{-3} C 提示: $U_C = \frac{(R_3 + R_4)E}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)} = 4$ V, $Q = CU_C = 1.2 \times 10^{-3}$ C; (2) 0.8×10^{-3} C 提示: 改接后, 电容器通过两条支路放电, 由于两支路并联, 电压始终相同, 故放电电流与支路电阻成反比。故通过电阻 R_1 的电荷量为

$$Q_1 = \frac{(R_3 + R_4)Q}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)} = 0.8 \times 10^{-3} \text{ C}$$

8. $\frac{1000}{3} \Omega$, 0.6 mA 提示: 设电流表 A_1 的电阻为 R_1 , A_2 的电阻为 R_2 , 电压表的电阻为 R 。 $I_1 = 1.4$ mA 时, $U_1 = 0.6$ V, $U_2 = 0.8$ V, 则有

$$\frac{U_2}{R} + \frac{U_1}{R} = I_1$$

$$\frac{U_1}{R} R_2 + U_1 = U_2$$

解得: $R = 1000 \Omega$, $R_2 = \frac{1000}{3} \Omega$ 。

电流表 A_2 的读数 $I_2 = \frac{U_1}{R} = \frac{0.6}{1000} \text{ A} = 6 \times 10^{-4} \text{ A}$ 。

9. 与

输入 A	输入 B	输出
1	0	0
0	1	0
1	1	1
0	0	0

课程标准的要求

1. 列举磁现象在生活、生产中的应用。了解我国古代在磁现象方面的研究成果及其对人类文明的影响。关注与磁相关的现代技术发展。
2. 了解磁场，知道磁感应强度和磁通量。会用磁感线描述磁场。
3. 会判断通电直导线和通电线圈周围磁场的方向。
4. 通过实验，认识安培力。会判断安培力的方向。会计算匀强磁场中安培力的大小。
5. 通过实验，认识洛伦兹力。会判断洛伦兹力的方向，会计算洛伦兹力的大小。了解电子束的磁偏转原理以及在科学技术中的应用。
6. 认识电磁现象的研究在社会发展中的作用。

一、本章教材概述

磁场和电场都是电磁学的核心内容。对于磁场，可以通过与电场类比进行教学。如，磁场与电场类比；磁感应强度与电场强度类比；磁感线与电场线类比；安培力与静电力类比等。有意识地、恰当地运用类比方法，不但有利于学生接受知识，而且有利于发展学生思维能力，把学习磁场和电场结合起来，学生在接受“电磁场”这一概念时也比较自然。

本章的教材内容，特别是对磁场性质的定量描述，是以后学习电磁学知识，比如《物理选修3-2》中“电磁感应”“交变电流”以及《物理选修3-4》中“电磁波”的基础。磁感应强度 B 、磁感线及磁通量、安培力和洛伦兹力是本章的核心内容。这些知识不仅在学习《物理选修3-2》各章时要用到，在工农业生产和高新科技发展中都有着广泛的应用。

本章的教材内容按照以下线索展开：

磁现象（磁效应）—磁场性质的定量和定性描述—磁场对电流和运动电荷的作用—安培力和洛伦兹力的应用。这种安排，知识的逻辑结构比较清晰，也符合学生的认知规律。

本章共有6节，可分为四个单元。第1节为第一单元，是在初中有关知识的基础上，介绍基本磁现象、磁效应和地磁场，特别是着重介绍了在科学史上有里程碑意义的奥斯特实验和STS的重要素材“指南针与郑和下西洋”。第二单元包括2、3两节，介绍磁场的性质及其描述。磁场具有强弱和方向，磁场的这种性质可以用磁感应强度进行定量描述，也可以用磁感线定性描述，在第3节里，还根据《课程标准》的要求介绍了磁通量。第三单元包括4、5两节，讲述安培力、洛伦兹力，是本章的核心知识也是教学的重点。第四单元包括第6节，介绍带电粒子在匀强磁场中的运动，其实质是介绍洛伦兹力的应用，特别是在现代高新科技中的应用。这几个单元的安排，注意了循序渐进并且先讲宏观、后讲微观，注意了前后呼应。



在编写本章时还有以下思考：

1. 注意继承和改革相结合的原则

新教科书在具体呈现磁场一章的内容时，根据新课程的理念和《课程标准》的要求以及选修模块的定位，做了一些创新和改进的尝试。所做的一些变化主要有以下三个方面：

(1) 关注学生获取知识的过程，为学生自主学习搭建平台

根据《课程标准》提出的“三维”目标，教科书在呈现知识时更加关注学生获取知识的过程，注意为学生自主学习搭建平台。例如，在介绍洛伦兹力时，就不是简单地陈述其推导过程，而是采取思考与讨论的方式，让学生自主地去得出结论：教科书首先给学生建立一个物理模型（电荷定向运动时所受洛伦兹力的合力，表现为通电导体所受的安培力），然后给学生提出其思考的方向和自主学习的任务（请你尝试由安培力的表达式 $F = ILB \sin \theta$ 导出洛伦兹力的表达式），并进一步建议学生沿以下逻辑线索进行思考。这样，教科书就把向学生呈现知识变成引导学生自主地获取知识，以提高学生的学习能力，而这正是新课程着力追求的价值目标。与此类似的处理在教科书上还很多，比如，洛伦兹力的方向、电视显像管的工作原理、带电粒子在匀强磁场中做圆周运动的半径等，都是通过提出问题、指出思路的方式，引导学生自主完成的。

(2) 在知识呈现中注意渗透“三维”目标的要求

教科书注意将“三维”目标中的“过程与方法”“情感态度与价值观”和“STS”思想有机地渗透在知识教学中。例如，关于电流的磁效应，不仅一开始就指出“电现象与磁现象的相似使我们猜想，两者之间可能存在某种联系”，而且在展现科学家对电磁学方向的探索过程时，既有物理思想的导引，又指出过程的曲折（直到19世纪初，库仑、托马斯·杨和安培等著名物理学家，都认为电与磁是互不相关的两回事。……奥斯特的实验研究并非一帆风顺……）。由于“猜想与假设”是科学探究的重要要素之一，而在传统的物理教学（包括一些探究性实验的教学）都有所忽视，所以在新教科书中有所加强。例如，演示栏目“带电粒子在匀强磁场中的运动”中，要求学生在做每项观察之前，首先进行讨论，根据洛伦兹力的知识预测电子束的径迹，然后观察、检验自己预测。在这里，教科书很强调在观察实验之前要先进行猜想、预测。这一方面是为了克服观察、实验的盲目性，让学生更清楚这个实验（观察）究竟要做什么、看什么、思考什么；另一方面也对“猜想与假设”这个科学探究中的要素进行了强化。

教科书注意将情感态度与价值观自然地融进知识介绍中，例如在第3节“科学漫步”栏目中“有趣的右螺旋”内容，向学生展示了动物、植物、机械等各种左（右）螺旋现象。这些现象与反映电磁现象的左、右手定则虽完全属于不同的范畴，但它们都有一个共同点：旋转方向与轴线运动方向有着确定的关系。这样就在学生面前展现了一个丰富多彩而又统一和谐的自然图景。同时，还可启发学生思考，这种惊人的相似性的后面是否还隐藏着更深层次的秘密？再如，第2节的“科学漫步”栏目中“地球磁场与古地质学”向学生展现了一项地球物理的重要成果：地磁极曾多次发生反转而且现在仍在不间断地移动，其强度也在不断减弱。我们期望将这些内容以及其他许多类似素材编入教科书，使学生能领略自然界的奇妙与和谐，发展对科学的好奇心与求知欲，乐于探究自然界的奥秘，能体验探索自然规律的艰辛与喜悦。

(3) 反映与磁场相关的新科技及科学思想

根据课程基本理念，“在课程内容上体现时代性”“反映当代科学技术发展的重要成果和新的科学思想”的要求，编者力图在教科书中反映与磁场相关的一些科技进步和在磁场研究中蕴涵的科学思想。



例如,在第3节的“做一做”中,安排有“用磁传感器研究磁场”,既能供有条件和有兴趣的同学用比较现代的科技手段研究磁场,又能开放性地完成更多的实验。这样安排是因为传感器已经在科学技术甚至在日常生活中得到了广泛应用,而且在物理选修2系列中还特地要求“通过实验或实例了解常见传感器的工作原理,了解传感器在生产、生活中的应用”。所以,编者虽然了解不少学校实验室还没有磁传感器,但还是将其安排进教科书的“做一做”栏目中。即使没有条件做,也可以开开眼界,知道磁感应强度这个物理量的确是个客观存在,是有许多方法可以测量出来的,是我们自己都可以测量出来的。

在介绍“带电粒子在匀强磁场中的运动”时,除用传统的“洛伦兹力演示仪”外,还安排了一小段课文和一幅插图(课本图3.6-3)介绍粒子物理的一些常用设备,如云室、气泡室。这些内容既是“带电粒子在匀强磁场中的运动”的实际应用,又与粒子物理这种前沿学科相联系,可以增加教科书的时代感。

此外,除介绍质谱仪、回旋加速器等磁场的传统内容外,教科书还特地介绍了“电视显像管的工作原理”。这不仅是洛伦兹力的一个技术应用,而且“磁偏转”本身也是电子束做大角度(大屏幕)偏转的必然选择。

有兴趣的教师可以组织学生讨论:为什么电视显像管、计算机显示器等都采用磁偏转?为什么显像管的管颈又细又短,而采用电(场)偏转的示波管的管颈又粗又长?这些,都是在中学物理范畴内可以解决的很有趣的实际问题。

2. 注意各节教材内容信息量的均衡和全章教学节奏的均衡

以往教科书多把磁现象和几种典型电流磁场的磁感线分布设为一节。在本书第三章“磁场”里把这些内容分为两节(第1节、第3节),而且还在这两节之间安排一节“磁感应强度”。这是出于什么考虑呢?因为这部分内容不仅信息量较多,而且蕴涵有丰富的“三维”目标,特别是“情感态度与价值观”方面的教育素材,课文用较大的篇幅介绍了电流磁效应的发现历史。电流磁效应的发现是一个划时代的发现。奥斯特的发现使人们进一步深入了解自然界的相互联系。同时,这段科学史也是科学思维中传统与创新交锋和突破的生动事例,它同时还展示了创新思维的重要性和时代局限性对创新的羁绊。因此,它是科学史上不可多得的优秀素材,在课文中应有恰当的表述。

另外,这样安排也是为了让教科书编排上有一些张弛相间的节奏感。第1节、第3节的内容都比较容易,定性的阐释比较多,也不涉及复杂的定量计算。将其连贯安排也不是不可以,但显得太松,而后面几节都是传统上的核心内容、难度较大,连续安排又会显得太急促。现在这样安排,似乎更合理一些,而且从系统性上也说得通:先介绍了磁场的一般现象,然后分别介绍描述磁场的两种方式(磁感应强度和磁感线),再继续研究磁场对电流、对运动电荷的作用力及其广泛的应用。应该说,逻辑线索还是比较清晰的。

3. 首次引入“电流元”这个物理量

新中国成立以来的各个版本高中物理教科书中都未出现过“电流元”这个物理量,现在这样做有什么道理呢?我们认为,这样处理至少有两个理由。

第一,《课程标准》指出,作为选修3系列,需要进一步了解物理学的思想与方法。模型的方法是物理学的基本方法之一。本套教科书从一开始的质点起,就很重视理想模型的建立。本模块第一章提及的“试探电荷”“点电荷”是理想模型,电流元也是理想模型。电流元的电流和尺寸必须充分小,被检验的磁场不会因电流元的出现而有明显的变化。当然,教科书也指出了“孤立的电流元是不存在的”。用电流元检测磁场的性质只是用理想模型进

行的理想实验。实际的实验还是用较长的通电导线在匀强磁场中进行，再从结果中推知电流元的受力情况。

第二，引入电流元有利于将磁场与电场进行类比研究。在磁场研究中引入的电流元 IL ，就相当于电场中的点电荷 q 。因此，电场强度与磁感应强度的定义式、静电力与磁场力的公式就都有了形式上的一致性，有利于学生形成一定的知识结构。（本章第5节以旁批的形式特别强调了这种类比，并指出了磁与电的本质区别：磁只与运动的电荷有关。）当然，对电流元也只是—般性的提及，不必过分地“深挖洞”，增加教学的难度。

4. 对于安培力和洛伦兹力的要求

对于安培力和洛伦兹力，是否要求掌握 $F = ILB \sin \theta$ 和 $F = qvB \sin \theta$ 这两个公式？教科书中的习题只要求计算导线方向（或粒子运动方向）与磁场方向垂直情况下导线（或运动粒子）所受的力，不要求计算一般情况下的安培力或洛伦兹力。教科书中引入了 $F = ILB \sin \theta$ 这个公式，目的在于介绍一种方法：把 B 沿导线方向和垂直于导线的方向分解，分别研究这两个分量的作用。这里实际上承袭了力学中已经应用多次的方法（有人把它叫做正交分解法）。这也是教科书重视科学方法教育的一个体现。对于洛伦兹力也是按照同样方法处理的。这在该节的“思考与讨论”中已经体现。

课时安排建议

第1节 磁现象和磁场	1学时
第2节 磁感应强度	1学时
第3节 几种常见的磁场	2学时
第4节 通电导线在磁场中受到的力	2学时
第5节 运动电荷在磁场中受到的力	1学时
第6节 带电粒子在匀强磁场中的运动	3学时

二、教材分析与教学建议

第1节 磁现象和磁场

1. 教学目标

- (1) 了解电流的磁效应。了解电流磁效应的发现过程，体会奥斯特发现的重要意义。
- (2) 知道磁场的基本特性。了解地球的磁场。
- (3) 了解我国古代在磁现象方面的研究成果及其对人类文明的影响。关注磁现象在生活和生产中的应用。

2. 教材分析与教学建议

本节的内容多为初中学过的知识，重点是电流的磁效应和磁场概念的形成。可以结合演示实验，对初中知识复习概括并从科学与人文两个角度提升认识，为后续学习打下基础。应该指出的是，本节内容蕴藏了丰富的人文内涵。当然对于初中基础好的学生，也不必拘泥于用完整的1课时来完成本节教学任务，可以根据实际情况与本章第3节部分知识的教学有机结合。

(1) 磁现象

可以结合生活生产中涉及的磁体实物（磁铁、磁针、喇叭、磁盘、磁带、磁卡、电动机、电流表等）和磁体间相互作用的小实验来形象生动地认识磁现象。教师应该设置一些具体的问题情境引导学生关注生活实际，培养学以致用意识。例如，可以引导学生对生活中的磁现象或磁现象的应用进行归类整理，对物质的磁性也可开展一些小发明小制作的课题研究。

可以通过指导学生阅读有关材料，回忆初中所学的人们对磁现象的认识过程和我国古代对磁现象的研究、指南针的发明和作用。这部分知识教学的目标偏重于学生的人文素养，因此提供给学生的阅读材料除教科书的正文和STS栏目的内容外，还可以包括人教版《物理选修1-1》第二章“磁场”的第1节“指南针与远洋航海”等。

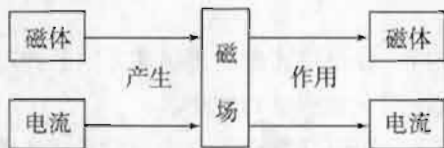
(2) 电流的磁效应

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。教学中要让学生体会到奥斯特发现电流磁效应的历史背景。一方面，随着对摩擦生热及热机做功等现象认识的深化，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，寻找电和磁的联系，正是在这种哲学信念的支配下的有意识的探索活动；另一方面，在奥斯特实验前人们见到的力都是“纵向力”，这种思维定势给实验研究带来了很大的障碍，奥斯特的发现是人类遇到的第一个“横向作用”，在当时的历史条件下，确实给人一种豁然开朗的感觉。了解这段背景，对于理解奥斯特实验的物理思想和重要意义，体现物理教育的文化功能是很有帮助的。

有必要做好电流磁效应的演示实验为磁场概念的形成做准备，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。

(3) 磁场

演示磁体对电流的作用，电流与电流的作用，结合前面演示的磁体与磁体间的作用和电流对小磁针的作用，类比库仑力和电场，形成磁场的概念。下面的框图可以帮助学生归纳本节课演示的几组实验，理解磁场的概念。



应该说明磁场虽然看不见、摸不着，但是和电场一样都是客观存在的一种物质，我们可以通过磁场对磁体或电流的作用来认识磁场。

对于学生来说，“场”毕竟是一个抽象的概念，可以引导学生研究两个具体的磁场——地磁场和电流的磁场，来深化学生对磁场的认识。有条件的话，可以让学生进行分组实验，研究通电直导线的磁场，做实验时可以分为四种情形观察、记录并分析现象：水平电流在小磁针的正上方时，让电流分别由南向北流和由北向南流；水平电流在小磁针的正下方时，让电流分别由南向北和由北向南流。

(4) 地球的磁场

教科书在初中“明白地理的南北极和地磁的南北极的区别，知道存在磁偏角，了解沈括对磁偏角的研究。用一个条形磁铁来模拟地球，说明小磁针静止时为什么会指向地球的南北极”的基础上，对磁偏角、“宇宙中的许多天体有磁场”做了更细致的描述。教学中除指导学生阅读教科书了解这些知识外，还应让学生认识并能够清楚地表述地磁场的空间立体分布情况，锻



炼学生的空间想像和空间表述能力，这对后续学习是有很大帮助的。

让学生课后阅读教科书第2节后的“科学漫步”中“地球磁场与古地质学”，在拓展视野的同时培养学习的兴趣，受到科学的熏陶。

3. 问题与练习

内容分析

本节的3道习题从“原理—应用—归类”三个层面层层递进，引导学生关注磁现象在生产、生活中的应用，意在落实《课程标准》中的情感目标。习题的答案是开放性的，应鼓励学生的“异想天开”。下面的解答只是示例，作为参考。

解答与说明

1. 喇叭发声的机理：磁体产生的磁场对附近的通电线圈产生力的作用，从而使线圈振动，带动喇叭的纸盆振动，发出声音。耳机和电话的听筒能够发声也是这个道理。

2. 如果有铁质的物体（如小刀等）落入深水中无法取回时，可以用一根足够长的细绳拴一磁体，放入水中将物体吸住，然后拉上来；如果有许多大头针（或小铁屑等）撒落在地上，可以用一块磁铁迅速地将它们拾起来。

3. 磁的应用的分类：

(1) 利用磁体对铁、钴、镍的吸引力，如门吸、带磁性的螺丝刀、皮带扣、女式的手提包扣、手机皮套扣等。

(2) 利用磁体对通电导线的作用力，如喇叭、耳机、电话、电动机等。

(3) 利用磁化现象记录信息，如磁卡、磁带、磁盘等。

第2节 磁感应强度

1. 教学目标

(1) 通过实验、类比和分析，寻找描述磁场强弱和方向的物理量——磁感应强度。

(2) 进一步体会通过比值法定义物理量的方法。

(3) 知道磁感应强度的定义，知道其方向、大小、定义式和单位。

2. 教材分析与教学建议

磁感应强度是电磁学的基本概念之一，是本章的重点。同时，磁场对磁极和电流的作用力（本质上是磁场对运动电荷的作用力）远比电场对电荷的作用力复杂，如何寻找描述磁场强弱和方向的物理量也是本章教学的一个难点。教科书用小磁针N极受力方向定义磁感应强度的方向，用电流元受磁场力与电流元之比定义磁感应强度，是符合中学生认知水平的。可以通过演示实验和与电场强度的定义类比来突破难点，形成磁感应强度的概念。

(1) 磁感应强度的方向

通过上一节课的实验，学生容易认识到，在磁场中不同位置，磁场往往具有不同的方向和强弱。教科书提出与研究电场中检验电荷受力定义电场强度的方法相类比，自然地引出“我们是否可以分析磁体或通电导线在磁场中所受的力，由此入手，找出表示磁场强弱和方向的物理量”的设问。这在给出磁感应强度的物理意义的同时，指明本节的学习任务和整体思路以引发

学生的思考,体现磁感应强度定义的过程和方法目标。

学生容易接受对磁感应强度的方向的规定,但在判断磁场中的小磁针两极受力的方向时,仍习惯于用“同名磁极相互排斥,异名磁极相互吸引”来判断。在此宜加以引导,强化训练“小磁针 N 极受力与磁感应强度方向相同”这种方法是更基本有效的判断方法。

喜欢思考质疑的学生也许会提出这样的疑问:“为什么不通过磁极受力的大小来定义磁感应强度大小呢?”“为什么不通过电流受力的方向来定义磁感应强度的方向呢?”对于前一个问题,教科书上已经有简要的说明(实际上教科书的这种说明本身就是对学生提出质疑的启示和鼓励,不能仅仅理解为一种过渡性说明)。对于后一个问题,应该肯定学生的想法。在很多大学的电磁学教材中(如赵凯华先生所著的《电磁学》)就是通过电流元间作用力来定义磁感应强度的大小和方向的,只是在中学阶段受数学手段局限才采用教科书的定义。

(2) 磁感应强度的大小

电流元是学生遇到的又一个理想物理模型,可以与试探电荷类比,不必过于深究。

教科书通过“演示”栏目让学生研究通电导线在磁场中受到的作用力与电流的大小、导线长度间的关系。这样的处理与电场强度引入过程中的“演示”栏目相呼应。类比电场强度的定义方法得到磁感应强度的定义式也是研究“场”的性质的一个基本方法,应予以充分重视。下面的教学片段 1 和教学片段 2 都是在教科书实验的基础上,力图粗略反映通电导线与磁场方向垂直时受力大小与电流大小的定量关系。

教学片段 1

通电导线在磁场中受力大小与电流定量关系的研究

用传统的实验手段粗略地演示通电导线与磁场方向垂直时受力大小与电流大小的定量关系。

实验设计:实验装置如图 3-1 所示,用铜皮卷成轻质铜棒(因安培力太小,铜棒也应较轻),两个固定的铁架台架一支横梁(塑料管),用夹子夹长丝线悬挂铜棒,在靠近磁铁的边缘处水平固定一个毫米刻度标尺,铜棒上用纸片做指针。

实验操作:用一个变阻器、一个电流表、一个蓄电池、若干导线,连接电路给铜棒通电。没通电时指针指示标尺的零刻度,然后逐渐加大电流,慢慢移动磁铁使铜棒相对于磁铁的位置不变,逐个记录指针所指示铜棒的偏移量。

数据处理:

I/A	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
d/mm	0	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5

这是一组很好的正比例数据,可以粗略反映所研究问题的定量关系。

注意事项:

①悬挂铜棒时要用丝线,导线仅起通电的作用,不能着力;

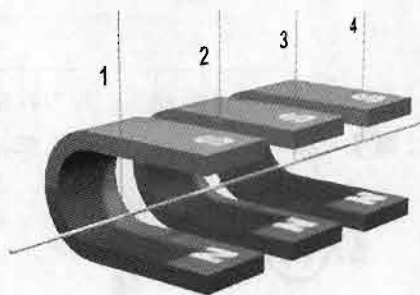


图 3-1



- ②悬线长度在 60 cm 左右为宜，不能太短；
- ③从侧面观测铜棒的偏移量 d 。



教学片段2

通电导线在磁场中受力大小与电流定量关系的研究

用 DIS 演示实验研究通电导线与磁场方向垂直时受力大小与电流大小的定量关系。如图 3-2 的装置中保持通电线框位置不变，用力传感器测量所需拉力 F 的大小（等于安培力的大小）即两者为平衡力。用电流传感器测量线框中的电流。

①保持受力部分导线的长度不变，改变电流 I ，测定相应的拉力 F ，利用图象得到 $F \propto I$ 。

同一块磁铁

F/N	0.04	0.08	0.12	0.16
I/A	0.21	0.41	0.64	0.81

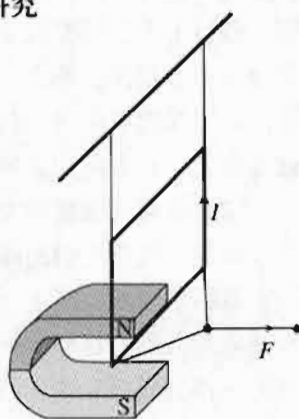


图 3-2

②保持电流 I 不变，用 3 个相同的蹄形磁铁逐次并放，以改变受力部分导线的长度，测定相应的拉力 F ，得到 $F \propto L$ 。

保持电流 I 不变

	L	$2L$	$3L$
F/N	0.08	0.16	0.24
I/A	0.36		

实验过程中需要注意：矩形线圈保持竖直；两个相同的蹄形磁铁并放时要有一定间隔；每次测量时矩形线圈相对磁铁位置保持不变。

通过对实验结论的引申和推广，要使学生了解比值 $\frac{F}{IL}$ 是磁场中各点的位置函数。也就是说，在磁场中某一确定位置处，无论怎样改变 I 和 L ， F 都与 IL 的乘积大小成比例地变化，比值 $\frac{F}{IL}$ 与 IL 的大小无关。在非匀强磁场中的不同位置，比值 $\frac{F}{IL}$ 不同。比值 $\frac{F}{IL}$ 的大小反映了各不同位置处磁场的强弱程度，所以人们用它来定义磁场的磁感应强度。还应说明 F 是指通电导线方向跟所在处磁场方向垂直时的磁场力，此时通电导线受到的磁场力最大。

作为本节的复习巩固，可对比磁场与静电场，比较磁感应强度的引入和电场强度引入的异同。两者都是用比值法定义物理量，其基础是力与电荷量、电流元成正比，比值是对应场中各点的位置函数，反映场的强弱。但两者也有明显的不同之处：

从方向上看，静电力方向与电场强度方向总是相同或相反，而磁场力方向与磁感应强度方向总是垂直。

从大小上看，某试探电荷在电场中某位置受静电力的大小是一定的，但某电流元在磁场中某位置受的磁场力大小还与电流方向有关，定义式中的 F 是指电流元受力的最大值。

3. 问题与练习

内容分析

本节的3道习题都围绕磁感应强度大小的定义式展开。

第1题是为了纠正学生中常见的一种错误理解，强化对定义式和决定式的理解。

第2题利用磁感应强度的定义式进行简单计算。

第3题通过图象反映物理量之间的关系，强调安培力与电流的正比关系是比值法定义磁感应强度大小的基础。

解答与说明

1. 这种说法不对。磁场中某点的磁感应强度由磁场本身决定，与检验电流的大小、方向、通电导线的长度、受到的安培力的大小均无关。

单纯从数学出发而不考虑公式的物理意义是学生的一种常见错误。定义式 $B = \frac{F}{IL}$ 是一个比值定义式，磁场中特定位置的比值 $\frac{F}{IL}$ 不变才反映了磁场本身的属性。

2. 由 $B = \frac{F}{IL}$ ，可知 $B = 0.0019 \text{ T}$ 。

3. 正确的是乙图和丙图。由定义式 $B = \frac{F}{IL}$ 可知，当 L 一定时， $\frac{F}{I}$ 是定值，所以两点的连线应通过 $F-I$ 图的坐标原点。

第3节 几种常见的磁场

1. 教学目标

- (1) 知道磁感线。知道几种常见磁场磁感线的空间分布情况。
- (2) 会用安培定则判断通电直导线和通电线圈周围磁场的方向。
- (3) 了解安培分子电流假说。
- (4) 知道磁通量。

2. 教材分析与教学建议

本节教材内容在初中基础上有很大的提高和拓展。“磁感线”“几种常见的磁场”“匀强磁场”是最基本的，也是最重要的知识，在今后的学习中会广泛应用。磁通量的概念是学习电磁感应的基础，但在这里学习学生难以理解其物理意义，是教学的难点。由于磁感线的分布不是平面的，而是空间的，应该通过演示实验来加深认识，教学中应注意培养学生的空间想像力。

(1) 磁感线

关于磁感线，初中只介绍了磁感线可以方便、形象地描述磁场，磁场中小磁针的方向表示磁场的方向，高中明确了曲线上每一点的切线方向跟这点的磁感应强度方向一致，比初中讲得更加准确。

可以先提出问题，如，除了用磁感应强度定量描述磁场的强度和方向，能否像电场线形象地描述电场一样，也假想一系列曲线来形象地描述磁场的强弱和方向？引入磁感线定义后，做



好模拟磁感线形状的实验很重要,其中需要明确磁感线只是为研究问题方便而假想的一系列曲线,本实验只是模拟了一个平面上的磁感线分布,应该进一步结合立体模型加深对磁场立体空间的認識。

可以要求学生在课后列表对比磁感线和电场线,并明确:

- ①两者都是为研究问题的方便而假想的一系列曲线;
- ②两者都用切线方向描述场的方向,用疏密描述场的强弱;
- ③电场线是不闭合的,而磁感线则是闭合曲线。

(2) 几种常见的磁场

逐个做好模拟条形磁铁、蹄形磁铁、通电直导线、通电环形电流、通电螺线管等磁感线的演示实验,使学生熟悉这些以后常会用到的磁感线的空间走向及疏密分布情况。熟悉安培定则,进一步要求学生通过动手比划说出具体问题中的通电直导线、环形电流、通电螺线管等磁场磁感线的空间分布并画出它们的磁感线的俯视图和不同角度的剖面图,调动学生充分发挥空间想像力,使他们对空间分布的磁感线有一个完整的认识。

教科书十分注重不同磁场之间的联系。如,从通电直导线磁场过渡到环形电流磁场再过渡到通电螺线管磁场,是由直到曲的转化、由少到多的叠加过程,形象思维中隐含了逻辑思维。注意到这种联系而不是孤立地罗列这些磁场各自的规律,有利于培养学生科学的思想方法。再如,从通电螺线管外部磁场与条形磁铁外部磁场的一致,能联想到条形磁铁的内部磁场情况。这里可以让学生认识到磁感线都是封闭曲线。一方面能让学生更加全面联系地看待问题,另一方面认识磁铁内部磁场对学生后续学习解决电磁感应中的相应问题有很大帮助。

(3) 安培分子电流假说

有必要让学生知道:“假说”是用来说明某种现象但未经实践证实的命题。在物理定律和理论的建立过程中,“假说”常常起着很重要的作用,它是在一定的观察、实验的基础上概括和抽象出来的。安培分子电流假说就是在“通电螺线管磁场与条形磁铁磁场极为相似”这一事实的启发下,结合环形电流磁场的特点,经过思维发展而产生出来的,而这种从表面现象的简单相似到本质的内在联系(也是隐藏在复杂事物背后的简单的逻辑关系)的发展,正是物理大师的直觉灵感和深入思考结合的产物,体现了物理学深刻而又简洁之美。

安培分子电流假说能够解释磁化和退磁等现象,揭示了磁现象的电本质。可以让学生观察一些磁化和退磁的演示并说明其中的道理。

(4) 匀强磁场

要明确两种情形的匀强磁场,即距离很近的两个异名磁极之间除边缘部分以外的磁场;相隔一定距离的两个平行线圈(亥姆霍兹线圈)通电时,其中间区域的磁场,可以展示一下后者的外形,为后面的洛伦兹力演示埋下伏笔。

要明确匀强磁场的磁感线的空间分布。

(5) 磁通量

磁通量是中学生遇到的惟一“通量”,对中学生而言,理解其物理意义是非常困难的,但是磁通量又是一个非常重要的基本概念,是学习电磁感应的基础。

教学中应该指出,磁感应强度描述了磁场中某一点的强弱和方向,磁场越强,磁感线越密,磁感应强度越大。但很多时候我们需要了解磁场中某个面上的总体情况,即如果说磁感应强度可以用磁感线的疏密来反映,那么磁通量则表示穿过某一个面的磁感线的多少。必要时,我们可以用“光通过墙洞”的类比加以说明,“光通量”由光的强弱及洞的有效面



积决定。

对磁通量表达式的教学,可以根据对磁通量的物理意义的理解由特殊到一般逐步提高:先研究匀强磁场中与 B 垂直的平面,得到表达式 $\Phi=BS$;再研究匀强磁场中平面与 B 不垂直的情况,明确这种情况下式中 S 为垂直磁场方向上的投影面积;对于基础比较好的学生,最后还可以提一下对于非匀强磁场,理论上可以先把它分成许多可以看成匀强磁场的小区域再求每一个小区域磁通量的代数和,这可以帮助学生进一步理解磁通量的物理意义和表达式 $\Phi=BS$ 的适用条件。

可明确磁通量是标量,有正、负之分,可举例说明其正负号的含义。知道磁感应强度的另一种定义。

“做一做”栏目的教学完全以拓展学生知识视野为目的。



教学片段1

验证环形电流的磁场方向

这个实验一般学校的实验条件都可以做到。时间允许的话,也可以作为随堂实验由学生完成,能使学生对环形电流形成的磁场有一个更具体的认识。

教师指导以下注意事项:

- ①本实验线圈中的电流比较大,所以通电时间不能太长。电池应该采用干电池,不要用蓄电池,因为蓄电池的内电阻很小,电路中电流更大,容易损坏蓄电池。
- ②小磁针与支架之间的摩擦越小越好,实验前应该打磨支架的针尖。
- ③在接通电源前先根据安培定则判断线圈的磁场方向。考虑地磁场的影响,线圈平面应放在南北方向。



教学片段2

用磁传感器研究磁场

有条件的话,可以鼓励学生在课内外用磁传感器测量、研究磁场,加深对磁场的认识。

师生共同研究磁传感的功能并设计实验:

- ①磁传感器能测量沿其轴线方向的磁感应强度的分量,因此可以改变探头的取向寻找磁感应强度取最大值的方向,能大致确定磁场的方向;
- ②可以测量通电螺线管内部不同位置处磁感应强度的大小,并由计算机描绘磁感应强度 B 与探头位置 x 的关系曲线;
- ③可以与电流传感器配合研究并描绘通电螺线管内部磁感应强度大小与电流的关系曲线;
- ④可以分别研究通电直导线周围磁感应强度与电流和与直导线距离间关系等。

3. 问题与练习

内容分析

几种常见的磁场是本节的重点,磁通量的概念是本节的难点。第1、2、3题分别是通电直导线、环形电流、通电螺线管磁场的磁感线分布(第3题还涉及磁感线的性质和应用),第4

题则通过计算巩固磁通量的概念。另外，第1题和第4题都给出了立体图。第4题需要学生能看懂三维坐标图，有一定的空间思维能力。

解答与说明

1. 电流方向由上向下。

2. 小磁针N极的指向是垂直纸面向外，指向读者。

3. 通电螺线管内部的磁感应强度比管口外的大，可根据磁感线越密处，磁感应强度越大来判断。

$$4. \Phi_1 = BS_1 = BS_{abcd} = 0.024 \text{ Wb}$$

$$\Phi_2 = BS_2 \cos 90^\circ = 0$$

$$\Phi_3 = BS_3 \cos \angle bae = BS_{abcd} = 0.024 \text{ Wb}$$

第4节 通电导线在磁场中受到的力

1. 教学目标

(1) 观察安培力方向与哪些因素有关的实验，记录实验现象并得出相关结论。知道安培力的方向与电流、磁感应强度的方向都垂直，会用左手定则判断安培力的方向。

(2) 推导匀强磁场中安培力的表达式，计算匀强磁场中安培力的大小。

(3) 知道磁电式电流表的基本构造以及运用它测量电流大小和方向的基本原理。

2. 教材分析与教学建议

安培力的方向和大小是本节重点，弄清安培力、电流、磁感应强度三者方向的空间关系是本节难点。安培力的方向一定与电流、磁感应强度的方向都垂直，但电流方向与磁感应强度方向可以成任意角度；当电流方向与磁感应强度方向垂直时，安培力最大。对此，学生常常混淆，例如，在解决实际问题时误以为安培力、电流、磁感应强度一定是两两垂直的等。另外，空间想像能力对本节的学习至关重要。要使学生能够看懂立体图，熟悉各种角度的侧视图、俯视图和剖面图，需要一定量的训练巩固。

(1) 安培力的方向

做好演示实验，引导学生认真观察、记录、分析现象。实验记录和分析的过程本身就是培养学生空间思维能力的过程，要很好地把握。



教学片段1

安培力的方向

提出问题：观察演示实验发现，电流元受力的方向与磁场的方向、电流的方向三者不但不是一条直线上，而且不在一个平面内，怎样确定它的方向呢？是否需要建立三维坐标来呈现？

进行实验：分别改变磁场方向和电流方向，在课本图3.4-1所示的立体图上记录各次安培力的方向。

分析论证：分析实验记录的几幅立体图，概括得到“安培力的方向既与磁场方向垂直、又

与电流方向垂直，即垂直于磁场方向与电流方向所在的平面”这一结论。它是判断安培力方向的基础。

小结：尝试归纳判断安培力方向的方法，学习教科书介绍的左手定则印证实验现象。

有些学生对磁场与电流不垂直时判断安培力方向会有些困难（此时用左手定则磁感线不是垂直穿过掌心的），因此可以改变磁场方向使之与电流方向的夹角不等于 0° 或 90° ，观察并记录此时的安培力方向，验证左手定则。这对于避免学生认为安培力、电流、磁感应强度一定两两垂直是有益的。

左手定则涉及三个物理量的方向，三维图形立体感强，具有直观、形象、逼真等特点，而学生的空间想像力还不强，教学中要重视对三维图形的识读训练。但三维图形在表达方向、夹角、力的图示等方面不如二维图形表达得清楚、准确，因此，有效地训练如何恰当地用侧视图、俯视图和剖面图等表达，显得很有必要。为了掌握左手定则，可以适当补充课内、外练习。



教学片段2

练习确定安培力的方向

图 3-3 为一段通电导体棒在匀强磁场中受力的示意图，试确定图 A、图 B、图 C、图 D 中导体棒所受安培力的方向，图 E 中电流的方向和图 F 中匀强磁场的方向。

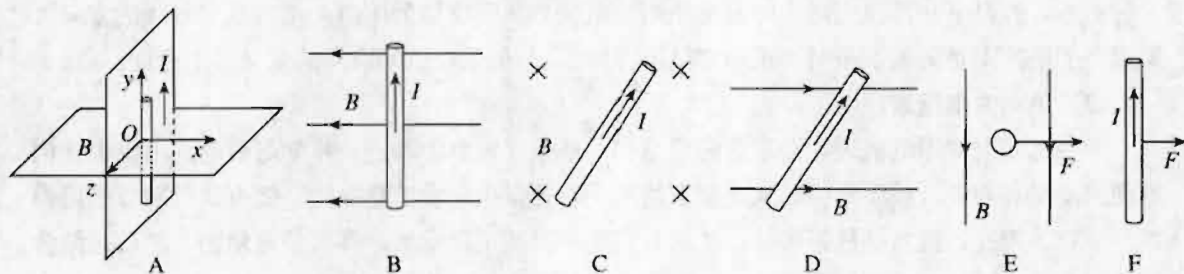


图 3-3

图 A 是立体图，图 B 是它的侧视图，看懂图并运用左手定则求安培力的方向是最基本的要求；图 C 中的导体棒看起来是斜的，但它与磁场方向还是垂直的，安培力在纸面内垂直导体棒斜向上；图 D 中导体棒和磁场方向都在纸面内但不垂直，安培力方向垂直纸面，再运用左手定则求安培力方向；图 E 是图 A 的俯视图，已知安培力方向和磁场方向确定电流方向（由于导体棒的方位是已知的，只有一个明确的解）；图 F 看起来似乎是图 A 的正视图，但要注意磁场的方向一定垂直安培力的方向但不一定与导体棒垂直，因而并不惟一，正确解是磁场方向在 Oyz 平面内且与 z 的正方向夹角不超过 $\pm 90^\circ$ 的范围内。

通过这一系列的训练，提高学生的空间想像能力，使学生全面而准确地掌握安培力、电流、磁场三者方向的空间关系，熟练运用左手定则。

要引导学生区别安培定则和左手定则，并且用这两个定则去解释“平行通电直导线之间的相互作用”这一演示实验。解释时应明白左边的通电导线受到的安培力是右边的通电导线所产生的磁场施加的，反之亦然。

(2) 安培力的大小

按照从特殊到一般的思路研究安培力的大小：从第2节的实验（或 B 的定义式），很容易得到电流与磁场方向垂直时 $F=ILB$ ，电流与磁场方向平行时 $F=0$ ，再根据矢量分解的等效替代关系推导公式 $F=ILB\sin\theta$ （推导时可以借鉴电场的叠加和静电力的合成）。推导的过程要注意两点：

一是要结合课本图3.4-4的立体图，在具体的空间情境下讨论安培力的大小和方向，不要离开具体问题作抽象的数学推理；

二是要让学生对推导过程中涉及的科学思想方法（等效替代和从特殊到一般的思维方法）有所体会。

可以对教学片段2中各图进行定量计算来巩固安培力的计算公式，避免将安培力的大小和方向割裂开来研究。显然图A、图B、图C的情况电流与磁场垂直（要注意图C的情况）， $F=ILB$ ；图D中 $F=ILB\sin\theta$ ；图E中 $I=\frac{F}{BL}$ ；图F中 B 的大小不能确定，但能够确定 B 沿 z 轴方向的分量 $B_z=\frac{F}{IL}$ 。

可以让学生对比安培力和静电力。电荷在电场中某一点受到的静电力是一定的，方向与该点的电场方向要么相同，要么相反。而电流在磁场中某处受到的磁场力，大小与电流在磁场中放置的方向有关（电流方向与磁场方向平行时，安培力等于0；电流方向与磁场方向垂直时，安培力最大，等于 ILB ），方向与磁场方向垂直。

另外，教科书在涉及安培力时避免使用“电流方向”这样的用语，用的是“导线的方向”。原因在于电流不是矢量，平时所说的“电流方向”，与矢量在空间取向的意义并不相同。

(3) 磁电式电流表

学生已多次使用电流表，知道它的用途和一些主要参数，有进一步学习磁电式电流表结构原理的动机和兴趣。教学中应该从观察实物入手，让学生先看清楚磁铁、铝框、线圈、螺旋弹簧、极靴、指针、铁质圆柱等构件，了解它们之中哪些是固定的，哪些是可动的。然后再结合课本图3.4-6进行定性地简要讲述。这里只要引导学生弄清楚以下几点。

- 线圈的转动是怎样产生的？
- 线圈为什么不能一直转动下去？
- 为什么指针偏转角度的大小可以说明被测电流的强弱？
- 如何根据指针偏转的方向来确定电路上电流的方向？
- 使用时要特别注意什么？

对有能力的学生，可以提出“磁电式电流表怎样保证电流刻度是均匀的”，让他们去进一步思考、研究。

“做一做”栏目的内容是个非常有趣的小实验，能拓宽学生的视野，引起学生浓厚的学习兴趣。建议有条件的学校可以让学生自己亲身猜一猜、做一做，再讲一讲，条件不够的话，可以教师做演示让学生解释看到的现象，解释的关键是要弄清液体中的电流方向。

3. 问题与练习

内容分析

本节习题中的第1、第2、第4题都涉及判断安培力的方向，但要求逐步提高：

第1题要求在看懂剖面图的情况下直接应用左手定则；

第2题要求有更强的空间想像力和空间思维能力，并能不局限于静态地看问题，分析问题更加全面周到；

第3题在巩固安培力大小的计算公式的同时，给出了一种测量磁感应强度大小的有效方法。

第4题需要在判断电流之间磁场力方向的基础上，通过一定的动态分析才能得出结论。

解答与说明

1. 如图3-4所示。

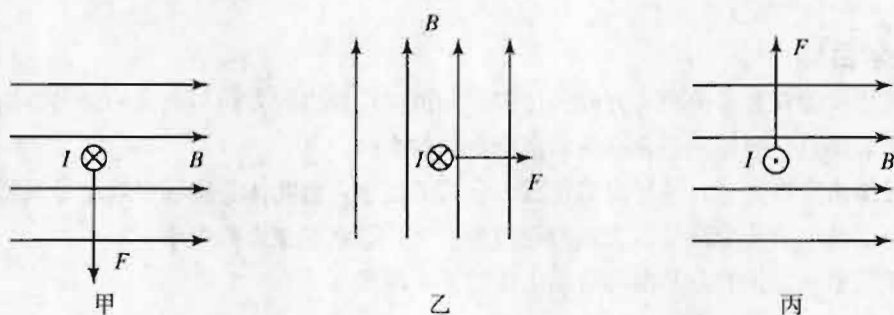


图3-4

2. 根据安培力、磁感应强度、电流三者方向的关系进行判断。

(1) 通电导线的a端和b端受到的安培力分别垂直纸面向外和垂直纸面向内，所以导线会按俯视逆时针方向转动。当转过一个很小的角度后，在向右的磁场分量的作用下，通电导线还会受到向下的安培力。所以导线先转动，后边转动边下移。

(2) 图3-5所示的甲、乙、丙、丁四个图分别表示虚线框内的磁场源是条形磁体、蹄形磁体、通电螺线管和直流电流及其大致位置。

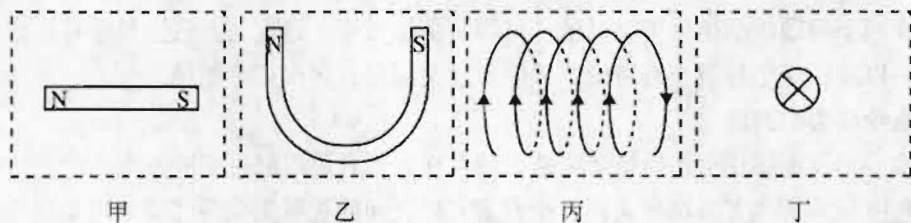


图3-5

虚线框内的磁场源还可以是通电的环形电流。

3. 根据安培力大小的计算以及平衡条件解决问题。

(1) 设电流方向未改变时，等臂天平的左盘内砝码质量为 m_1 ，右盘内的质量为 m_2 ，则由等臂天平的平衡条件，有

$$m_1 g = m_2 g - n B I l$$

电流方向改变后，同理可得

$$(m + m_1) g = m_2 g + n B I l$$

两式相减，得 $B = \frac{m g}{2 n I l}$ 。

(2) 将 $n=9$ ， $l=10.0 \text{ cm}$ ， $I=0.10 \text{ A}$ ， $m=8.78 \text{ g}$ 代入 $B = \frac{m g}{2 n I l}$ ，得 $B=0.48 \text{ T}$ 。

把安培力的知识与天平结合，可以“称出”磁感应强度，这是一个很有用的方法。

4. 弹簧上下振动, 电流交替通断。产生这种现象的原因是: 通入电流时, 弹簧各相邻线圈中电流方向相同, 线圈之间相互吸引, 使得弹簧收缩, 电路断开; 电路断开后, 因电流消失, 线圈之间的相互作用消失, 因而弹簧恢复原来的状态, 电路又被接通。这个过程反复出现, 使得弹簧上下振动, 电路交替通断。

第5节 运动电荷在磁场中受到的力

1. 教学目标

(1) 经历实验探究洛伦兹力方向的过程, 知道洛伦兹力的方向与电荷的运动方向和磁感应强度的方向都垂直, 会用左手定则判断洛伦兹力的方向。

(2) 经历由安培力公式推导出洛伦兹力公式的过程, 由此体会磁场中通电导线所受的安培力实际上是运动电荷所受洛伦兹力的宏观表现。会计算洛伦兹力的大小。

(3) 知道电视显像管的基本构造及工作的基本原理。

2. 教材分析与教学建议

洛伦兹力的方向和大小是本节教材内容的重点, 实验结合理论探究洛伦兹力方向, 再由安培力的表达式推导出洛伦兹力的表达式的过程是培养学生逻辑思维能力的好机会, 一定要让全体学生都参与这一过程。教科书在“思考与讨论”栏目中提出的逻辑线索, 实质上是推导过程铺设的台阶, 教师也可以根据学生的实际情况灵活铺设台阶, 要让不同层次的学生在讨论中都有比较深刻的感受。

“洛伦兹力对带电粒子运动的速度有什么影响? 洛伦兹力对带电粒子做的功是多少?” 教科书提出这样两个问题供学生思考与讨论, 目的是更加重视“过程与方法”教学目标的实现。课堂教学中可以组织学生开展小组讨论, 然后通过交流发言得出正确结论。

(1) 洛伦兹力的方向

演示实验不仅能够让学生确信洛伦兹力的存在, 而且可以通过实验发现洛伦兹力的方向与磁场方向和电荷的运动方向都有关系, 探究出它们之间的关系能成为“安培力是洛伦兹力的宏观表现”的一个佐证。同时, 这个演示实验让肉眼看不到的电子显现出径迹, 让学生可以亲眼观察磁场使电子径迹发生弯曲的现象, 可以大大激发起学生的好奇心和求知欲, 甚至有的学生由此能树立从事科学研究的人生志向。因此做好这个演示实验十分重要。应充分发挥演示实验的作用, 结合对安培力方向的复习, 使研究洛伦兹力方向的过程成为一个科学猜想、逻辑思维、实验证实、归纳讨论的过程。



教学片段

洛伦兹力的方向

提出问题: 观察演示实验发现, 没有磁场时, 电子束是一条直线。有磁场时, 电子束发生偏转。改变磁场的方向, 电子束的径迹就会受到影响。怎样确定电子束的受力方向呢? 磁场方向、电子的运动方向及其受力方向有什么关系呢?

猜想和假设：磁场对电流有作用力，电流是由电荷的定向移动形成的，磁场对电流作用力的实质可能是磁场对运动电荷的作用力。

进行实验：介绍阴极射线管，演示阴极射线在磁场中的偏转。改变磁场方向，结合课本图 3.5-1 所示的图片，记录电子束偏转的情况，并分析其受力的方向。要使阴极射线向上（或下）偏转，让学生思考磁场应该怎样放置，分析电子束打不到荧光板上的原因等等。

分析论证：在上述具体实验中，要看到上下方向偏转的电子束，磁场应前后方向放置……根据前面对安培力实质的猜想和安培力方向的判定法则，结合实验记录，概括得到，洛伦兹力方向应垂直于电荷运动方向和磁场方向，并用左手定则判断（注意：用左手定则判断洛伦兹力方向，电子束的运动方向与电流方向是相反的）。

小结：归纳洛伦兹力的方向。说明“安培力实际是洛伦兹力的宏观表现”。

与安培力的方向一样，培养学生的空间想像能力仍然是学好本节的关键。应帮助学生建立三维空间模型（必要时可借助一些实物工具如墙角、笔、尺等），充分发挥立体图和各种剖面图的作用。同时由于我们的习题和例题大多数是洛伦兹力方向、电荷的运动方向、磁感应强度方向是两两垂直的，应该防止学生在解决实际问题时以为洛伦兹力方向、电荷的运动方向、磁感应强度方向一定是两两垂直的。可结合课本图 3.5-2 强调洛伦兹力的方向一定与电荷的运动方向和磁感应强度的方向都垂直，但电荷的运动方向与磁感应强度方向可以成任意角度。当电荷的运动方向与磁感应强度方向垂直时，洛伦兹力最大，当电荷的运动方向与磁感应强度方向平行时，洛伦兹力最小，等于 0。

(2) 洛伦兹力的大小

教科书“思考与讨论”栏目，揭示了推导洛伦兹力大小的计算公式的思路。先明确推导的出发点：安培力实际是洛伦兹力的宏观表现，即一段导线所受安培力等于该段导线内所有电荷定向移动所受洛伦兹力的合力；其次建立推导的物理模型：长为 L 的静止的通电导线，它受到的安培力除以导线内定向移动的带电粒子数目 $N(N=nLS)$ ；再考虑推导的目标：洛伦兹力大小可能与哪些因素有关，表达式中哪些物理量不应该出现，从而找到电流 I 与带电粒子运动速度 v 的数量关系($I=nqvS$)。抓住了上述线索，思考与讨论就有了方向。教师应该根据学生的讨论进度适时进行点拨，让学生体会推导的思维线索和逻辑过程，不仅知道“要这样做”，更知道“为什么这样做”，避免教师或优秀学生的“推导表演”。

洛伦兹力的计算公式 $F=qvB$ 是在导线与磁场垂直的情况下导出的，这一公式仅适用于导线与磁场垂直的情况。如果电荷的运动方向与磁场方向不垂直，应该怎么处理？这个问题应该由学生自己解决，也不必再增加一个公式 $F=qvB\sin\theta$ 。

教科书旁批由运动电荷所受的洛伦兹力出发来定义磁感应强度，不仅拓展了学生的视野，更重要的是揭示了磁现象的电本质：把 $B=\frac{F}{qv}$ 与 $E=\frac{F}{q}$ 相比较，它们都是用比值的方法定义的物理量，但磁场只与运动的电荷有关；静止的电荷只能产生电场，而运动的电荷不仅产生电场而且产生磁场。可结合旁批让学生对电场和磁场、静电力和洛伦兹力进行对比。

洛伦兹力对运动电荷不做功是一个非常重要的结论，这一结论也应该由学生通过讨论自己得出。

(3) 电视显像管的工作原理

这部分内容体现了物理知识与科学技术的联系，教学中不必深究技术细节，重点是了解应



用了哪些物理原理。

电视显像管中,电子枪应用了热电子发射和加速电子的原理,偏转线圈应用了磁场对运动电荷的洛伦兹力作用。判断电子束的偏转方向实际上是左手定则的具体应用,判断时应该要求学生把左手放到课本图 3.5-4 上。由于运动的是电子,学生判断失误的概率不小。正好利用这一情景强调左手的四指方向应该与正电荷的运动方向一致,四指方向应与负电荷的运动方向相反。

电子技术中的扫描应用的物理原理是速度的合成,只要说明电子的水平分速度是竖直方向的磁场控制的,电子的竖直分速度是水平方向的磁场控制的,其余细节不必深究。

3. 问题与练习

内容分析

本节的 5 道习题都围绕洛伦兹力的大小和方向展开。

第 1 题是应用左手定则的基本练习。

第 2 题是计算洛伦兹力大小的基本练习。

第 3、第 4 题是重点习题,分别以速度选择器和磁流体发电为背景,检测学生应用左手定则和洛伦兹力计算公式的能力。

第 5 题讨论简单的扫描问题。

解答与说明

1. 在图 3-6 中, A 图中运动电荷所受洛伦兹力的方向在纸面内向上; B 图中运动电荷所受洛伦兹力的方向在纸面内向下; C 图中运动电荷所受洛伦兹力的方向垂直纸面指向读者; D 图中运动电荷所受洛伦兹力的方向垂直纸面背离读者。

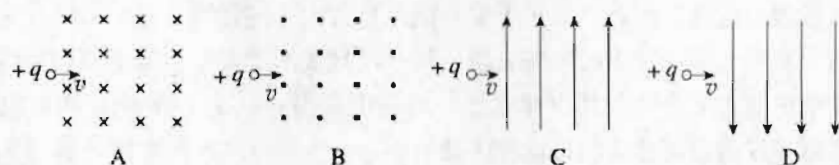


图 3-6

2. 由 $F=qvB$ 可知, $F=1.6 \times 10^{-19} \times 3.0 \times 10^6 \times 0.10 \text{ N} = 4.8 \times 10^{-14} \text{ N}$ 。

3. 能够通过速度选择器的带电粒子必须做直线运动,而做直线运动的带电粒子是沿电场中的等势面运动的,静电力对带电粒子不做功。同时,洛伦兹力对带电粒子也不做功,所以,粒子一定做匀速运动,它所受到的洛伦兹力与静电力等大反向,即 $qE=qvB$, 所以 $v=\frac{E}{B}$ 。

还可以引导学生讨论以下问题:

- (1) 如果粒子所带电荷变为负电荷,仍从左向右入射,此装置是否还能作为速度选择器用?
- (2) 如果带电粒子从右向左入射,此装置是否能作为速度选择器用?
- (3) 如果把此装置中的电场和磁场方向同时反向,此装置是否可以作为速度选择器用?如果可以,那么粒子应该从哪个方向入射?

4. 应用左手定则和洛伦兹力计算公式解决问题。

(1) 等离子体进入磁场,正离子受到的洛伦兹力的方向向下,所以正离子向 B 板运动,负离子向 A 板运动。因此, B 板是发电机的正极。

(2) 在洛伦兹力的作用下,正负电荷会分别在 B、A 两板上积聚。与此同时, A、B 两板间会因电荷的积聚而产生由 B 指向 A 的电场。这一电场对带电粒子的静电力与带电粒子所受



的洛伦兹力的方向相反。如果外电路断开,当 $qE=qvB$ 成立时,A、B两板间的电压最大值就等于此发电机的电动势,即 $U=Ed=dvB$ 。所以,此发电机的电动势为 dvB 。

5. 荧光屏上只有一条水平的亮线,说明电子束在竖直方向的运动停止了。故障可能是,在显像管的偏转区产生水平方向的磁场的线圈上没有电流通过。

应该注意的是,水平方向的磁场使电子束产生竖直方向的分速度,而竖直方向的磁场使电子束产生水平方向的分速度。

第6节 带电粒子在匀强磁场中的运动

1. 教学目标

(1) 通过实验知道带电粒子沿着与磁场垂直的方向射入匀强磁场会做圆周运动,圆周运动的半径与磁感应强度的大小和入射的速度大小有关。

(2) 通过理论分析知道带电粒子沿着与磁场垂直的方向射入匀强磁场会在磁场中做匀速圆周运动,并能用学过的知识推导出匀速圆周运动的半径公式和周期公式。

(3) 能够用学过的知识分析、计算有关带电粒子在匀强磁场中受力、运动的问题,了解质谱仪和回旋加速器的工作原理。

2. 教材分析与教学建议

本节教材的内容属于洛伦兹力知识的应用,教科书采用了先实验探究,再理论分析与推导的顺序。带着实验得到的感性材料,再用学过的知识进行理论分析,从理论的高度推导出实验现象的必然性,这样先实验观察再理论论证比较符合一般的认知过程,也降低了学习的难度。当然,如果学生的整体水平比较高,学生需要高强度的思维训练,也可以采用先理论分析,再实验验证的顺序。不管采用怎样的顺序,都应该使学生既有丰富的感性材料,又有清晰的理论依据,让学生在—学习过程中对理论与实践相结合的研究方法有所体会,并且在学习过程中尝到成功的喜悦。

作为带电粒子在匀强磁场中运动的知识在现代科学技术中广泛应用的实例,质谱仪和回旋加速器也是本节的重要内容,可以培养学生的综合运用力学知识和电学知识的能力。

(1) 带电粒子在匀强磁场中的运动

对一般学生而言,从理论上直接由洛伦兹力的知识推出带电粒子在匀强磁场中的运动情况难度过大。可以先用洛伦兹力演示仪让学生观察带电粒子直线运动,并讲解演示装置,让学生弄清其中电场、励磁线圈、匀强磁场方向等情况,再观察电子沿着与磁场垂直的方向射入匀强磁场,在磁场中运动的圆形轨迹,然后用洛伦兹力的知识对观察到的现象加以说明并进一步推断其半径与速度的关系,用实验观察带电粒子速度改变时运动情况的变化,验证所推出的结果。在学生观察之前,教师应该说明匀强磁场的产生、方向和电子束运动的方向。如果学生的基础比较好,也可以要求学生在观察实验前先根据洛伦兹力的有关知识判断电子束偏转的方向,并进行讨论,预测电子束的轨迹形状,然后与实验观察结果进行比较。

理解电子垂直进入匀强磁场会做匀速圆周运动是学习的难点。教学时可以让学生分组讨论,通过合作学习、教师梳理,可以明确以下几点:

①洛伦兹力总是垂直于带电粒子的速度方向,洛伦兹力对带电粒子不做功,带电粒子的动

能不变。

②洛伦兹力大小不变且方向始终与带电粒子运动方向垂直，刚好提供了带电粒子做圆周运动所需的向心力，即 $qvB = \frac{mv^2}{r}$ 。

③根据洛伦兹力作为向心力推导出带电粒子的半径和周期表达式，讨论 r 、 T 与哪些因素有关，并与实验现象相比较，让学生注意到粒子的运动周期与它的速度无关。

(2) 质谱仪

教科书通过一个例题的形式介绍了质谱仪，应用静电力做功、动能定理和洛伦兹力等知识，学生不难得到带电粒子在匀强磁场中运动的半径表达式，值得重点介绍的是质谱仪的用途。它可以精确测定粒子的比荷，分析同位素，测定带电粒子的质量，也可以介绍测定粒子的比荷在物理学发展史中的重要作用①（汤姆孙发现电子）。

(3) 回旋加速器

教科书首先提出“打开”原子核需要高能“炮弹”，并指出加速器就是制造高能“炮弹”的“工厂”。

引入回旋加速器的思路应该十分清晰：

①可以利用静电力对带电粒子做功增加粒子的能量， $\Delta E_k = qU$ ，电压越高粒子增加的能量越大。遇到的困难是技术上不能产生过高的电压。

②解决上述困难的一个途径是进行多级（次）加速，这就是直线加速器，遇到的困难是加速设备很长。

③解决上述困难的一个途径是把加速电场“卷起来”，利用磁场改变带电粒子的运动轨迹，让粒子“转圈圈”式地多级（次）加速，这就引入了回旋加速器。

④介绍回旋加速器的主要装置和原理：

粒子每次经过磁场时必须被加速，所以粒子运动半个周期电源必须改变方向。“思考与讨论”栏目中问到，电源的变化周期是否越来越短，这个问题应该让学生讨论后得出结论。

D形盒和盒间电场都应该在真空中。

回旋加速器加速带电粒子有没有局限性？也可以让学生讨论。学生能够想到，D形盒半径不能无限制增大；另一个是受相对论效应的制约，这一点应该由老师介绍。值得指出，任何先进的仪器都有某些局限性，不可能发明十全十美、毫无局限性的先进仪器。

3. 问题与练习

内容分析

本节的4道习题都围绕带电粒子在磁场中运动受到洛伦兹力展开。

第1、第2题直接将洛伦兹力作为向心力进行计算，是基础练习。

第3题是关于质谱仪原理的计算，与教科书中例题的设问角度不同。

第4题是有关回旋加速器的计算，可以对粒子离开回旋加速器时的动能表达式进一步讨论。

解答与说明

$$1. \text{ 由 } qvB = m \frac{v^2}{r}, \text{ 得 } r = \frac{mv}{qB} = 4.6 \times 10^{-2} \text{ m}, T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB} = 1.8 \times 10^{-7} \text{ s}.$$

①《新概念高中物理读本》第二册第111页的“小史料”介绍了证明金属导电是靠电子的实验，也是测定导电粒子的比荷而取得了成功。

2. 洛伦兹力作为向心力。

(1) 由 $r = \frac{mv}{qB} \propto \frac{m}{q}$ 可知, $r_{\text{质子}} : r_{\text{氦核}} : r_{\alpha\text{粒子}} = \frac{1}{1} : \frac{3}{1} : \frac{4}{2} = 1 : 3 : 2$ 。

(2) 由 $qU = \frac{1}{2}mv^2$ 和 $r = \frac{mv}{qB}$, 得 $r = \frac{\sqrt{2mqU}}{qB} \propto \sqrt{\frac{m}{q}}$, 所以

$$r_{\text{质子}} : r_{\text{氦核}} : r_{\alpha\text{粒子}} = \sqrt{\frac{1}{1}} : \sqrt{\frac{3}{1}} : \sqrt{\frac{4}{2}} = 1 : \sqrt{3} : \sqrt{2}$$

3. 由 $qU = \frac{1}{2}mv^2$ 和 $r = \frac{mv}{qB}$, 得 $r = \frac{\sqrt{2mqU}}{qB} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}} \propto \sqrt{m}$, 所以

$$m_A : m_B = d_A^2 : d_B^2 = 1.08^2 : 1^2 \approx 1.17$$

4. 带电粒子离开回旋加速器时, 做匀速圆周运动的半径等于 D 形盒的半径, 由 $qvB = m \frac{v^2}{r}$ 得 $v = \frac{qBr}{m}$ 。所以, 粒子离开 D 形盒时的动能为 $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2 B^2 r^2}{2m}$ 。

上述结果告诉我们, 对于电荷量和质量一定的粒子, D 形盒的半径越大、盒内磁感应强度越大, 粒子离开加速器时的动能越大。但是, 增大盒半径和增大磁感应强度都受到技术水平的限制。

三、教学设计案例

带电粒子在匀强磁场中的运动

1. 教学目标

(1) 通过实验, 知道带电粒子沿着与磁场垂直的方向射入匀强磁场会在磁场中做圆周运动, 圆周运动的半径与磁感应强度的大小和入射的速度大小有关。

(2) 通过理论分析, 知道带电粒子沿着与磁场垂直的方向射入匀强磁场会在磁场中做匀速圆周运动, 并能用学过的知识推导出匀速圆周运动的半径公式和周期公式。

(3) 能够用学过的知识分析、计算有关带电粒子在匀强磁场中受力、运动的问题, 了解质谱仪和回旋加速器的工作原理。

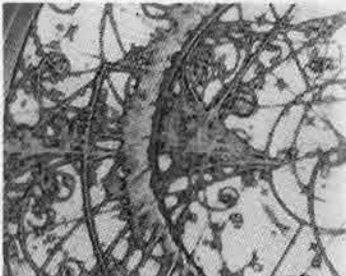
2. 教学资源

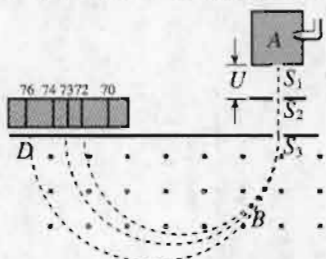
洛伦兹力演示仪、多媒体教学设备 (实物投影、计算机)

3. 教学过程

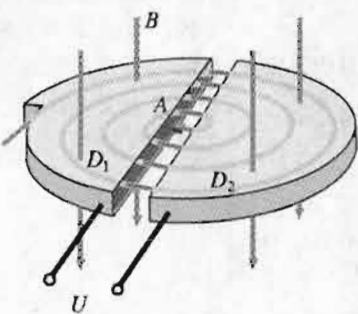
教师活动	学生活动	点评
(1) 导入新课 上节课我们讨论了磁场对运动电荷的作用力——洛伦兹力。那么在洛伦兹力的作用下带电粒子会做什么样的运动呢? 我们今天就来研究带电粒子在匀强磁场中的运动规律。	搜索已学知识 (洛伦兹力), 但不能很快找出规律, 陷入思考中。	问题的提出激发学生的好奇心和求知欲, 使学生的注意力很快集中到本节课要探究的问题中来。

续表

教师活动	学生活动	点评
(2) 进行新课 ①洛伦兹力演示仪 电子束由电子枪产生, 玻璃泡内充有稀薄气体, 当电子束通过玻璃泡时, 可以显示电子的径迹。 • 励磁线圈在两线圈间产生匀强磁场, 其方向与两线圈中心连线的方向平行。 • 调节电子枪的加速电压, 可以改变电子的速度大小。 • 调节励磁线圈的励磁电流, 可以改变磁感应强度。 演示与提问 1: 不加磁场时, 电子束的径迹如何? 演示与提问 2: 给励磁线圈通电, 在玻璃泡中产生沿两线圈中心方向、由纸内指向纸外的磁场, 电子束的径迹又会怎么样呢? 演示与提问 3: 保持电子枪的加速电压不变, 改变励磁线圈的电流, 电子束的径迹会如何变化? 演示与提问 4: 保持励磁线圈的电流不变, 改变电子枪的加速电压, 电子束的径迹会如何变化?	观察实验。 观察与思考 1: 不加磁场时, 电子枪射出的电子不受外力作用, 保持匀速直线运动状态, 故径迹为一条直线。 观察与思考 2: 电子在磁场中运动时受到洛伦兹力的作用。根据左手定则可以判断, 洛伦兹力的方向始终和速度方向垂直, 且在同一平面内。洛伦兹力在速度方向没有分量, 所以洛伦兹力不改变电子的速度大小。由洛伦兹力的表达式知道电子在匀强磁场中受到的洛伦兹力的大小也不改变, 所以洛伦兹力正好起到向心力的作用。因此电子的径迹是一个圆。 观察与思考 3: 洛伦兹力提供电子做匀速圆周运动所需的向心力。可列出方程 $qvB = \frac{mv^2}{r}$, 由此解得 $r = \frac{mv}{qB}$。保持电子枪的加速电压不变, 则电子进入磁场的初速度不变。改变励磁线圈的电流, 就改变了磁场的强弱, 电子束的径迹半径就发生变化。电流变强, 半径变小; 电流变弱, 半径变大。 观察与思考 4: 保持励磁线圈的电流不变, 则磁感应强度 B 不变。改变电子枪的加速电压, 就改变了电子进入磁场时的初速度, 由 $r = \frac{mv}{qB}$ 可知, 电子束的径迹半径会发生变化。加速电压越高, 半径越大; 加速电压越低, 半径越小。	一系列问题的提出由浅入深, 学生运用已学的知识对实验现象做出预测, 然后通过观察实验验证自己的预测。 在这个过程中, 学生可以体会到成功的喜悦, 有利于达成课堂教学中的情感目标。同时, 还有利于培养学生理论联系实际、科学思维方法。
②“气泡室”照片 	观察图片并思考问题。	运用刚刚从演示实验中得到的有关知识解决实际问题, 培养学生运用所学知识解决实际问题的能力。

教师活动	学生活动	点评
运用实物投影展示气泡室、云室中带电粒子在匀强磁场中运动的径迹照片。 问题 1: 不同带电粒子的径迹半径为什么不一样? 问题 2: 同一条径迹上为什么曲率半径会越来越小呢?	分析 1: 造成径迹半径不一样的原因是粒子的质量、速度、所带电荷量的多少不一样。 分析 2: 带电粒子在运动过程中能量降低, 速度减小, 所以曲率半径就减小, 径迹就呈螺旋形。	
③质谱仪 提出问题: 能否从刚刚分析过的气泡室中带电粒子的径迹得到启发设计一个仪器, 将所带电荷量和质量比值 (比荷) 不同、初速度几乎为 0 的带电粒子分开? (在学生设计过程中, 教师可以根据实际情况适当提示, 以降低难度。) 设计方案: 设一个质量为 m、电荷量为 q 的粒子, 从容器 A 下方的小孔 S_1 飘入电势差为 U 的加速电场, 然后经过 S_2 沿着与磁场垂直的方向进入磁感应强度为 B 的匀强磁场中, 最后打到照相底片 D 上, 求: a. 粒子进入磁场时的速率。 b. 粒子在磁场中运动的轨道半径。  这样的仪器叫做质谱仪。从粒子打在底片上的位置可以测出圆周的半径, 进而可以算出粒子的比荷或算出其质量。质谱仪最初是由阿斯顿设计的, 他用质谱仪发现了氖 20 和氖 22, 证实了同位素的存在。现在质谱仪已经是一种十分精密的仪器, 是测量带电粒子的质量和分析同位素的重要工具。	思考与讨论: 可以将这些带电粒子经过电场加速后射入磁场, 根据带电粒子在匀强磁场中运动的半径不一样, 从而可以将带电粒子分开。 分析与论证: a. 粒子进入加速电场时的速度可以认为是 0。由动能定理得 $\frac{1}{2}mv^2 = qU$, 由此解得 $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$。 b. 由洛伦兹力提供向心力 $qvB = \frac{mv^2}{r}$, 由此解得 $r = \frac{mv}{qB}$。 把 a 问题中求得的 v 代入, 得出粒子在磁场中做匀速圆周运动的轨道半径 $r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$。从中可以看出, 比荷不同的带电粒子进入磁场后将沿着不同的半径做圆周运动, 因而, 打到照相底片不同的地方。这样带电粒子就被分开了。	对教科书中的例题是这样处理的: 先提出问题, 然后由学生进行设计、引出教科书中的例题, 由学生自己处理, 从而得出质谱仪的工作原理, 并论证了实验设计的可行性。在这个过程中学生又一次体会到了科学探究的快乐。
④回旋加速器 问题 1: 要认识原子核内部的情况, 必须把核“打开”进行“观察”。然而, 原子核被强大的核力约束, 只有用极高能量的粒子作为“炮弹”去轰击, 才能把它“打开”。那么怎样才能产生这些高能炮弹呢?	分析 1: 利用电场对带电粒子进行加速, 加速电压越高, 粒子获得的能量就越大。	依据学生现有的知识和能力一般能联想到用电场对带电粒子进行加速, 所以该问题由学生自行解决。



教师活动	学生活动	点评
 产生过高的电压在技术上是很难的。于是人们采用了多次（多级）加速的方法。 加速器中的径迹为直线，其加速装置要很长很长。 问题2：有没有什么办法可以让带电粒子在加速后又转回来被第二次加速，如此反复“转圈圈”式地被加速，加速器装置所占的空间不是会大大缩小吗？  接交流电源 人们依据这个思路设计出了用磁场控制轨道、用电场进行加速的回旋加速器。其原理如课本图 3.6-6 所示，D_1、D_2 是两个中空的半圆金属盒，它们之间有一定的电势差 U。A 处的粒子源产生带电粒子，在两盒之间移动时被电场加速，获得速度。两个半盒处于与盒面垂直的匀强磁场中，所以，粒子在磁场中做匀速圆周运动。经过半个圆周后，当它再次到达两盒间的缝隙时，控制两盒间的电势差，使其刚好改变正负。于是，粒子经过盒缝时再一次被加速。如此，粒子在做圆周运动的过程中一次次地经过盒缝，而两盒间的电势差一次次地反向，粒子的速度就能够增加到很大。 问题3：由于粒子运动得越来越快，如果粒子走过半圆的时间越来越短，这样两盒间电势差的正负变换就要越来越快，从而造成技术上的一个难题。实际情况是这样的吗？	分析2：可以让带电粒子通过磁场做圆周运动，从而可以被第二次加速。 分析3：带电粒子在磁场中运动的周期 $T = \frac{2\pi r}{v}$，将 $r = \frac{mv}{qB}$ 代入，得到 $T = \frac{2\pi m}{qB}$。由此式发现，粒子在磁场中运动的周期与速度无关，由带电粒子自身的性质和磁场的强弱决定。所以，当带电粒子的速度越来越大时，其走	多级加速和回旋加速器对学生来讲比较困难。所以，由教师先引导，再让学生进行联想、设计。在这里通过对加速器发展过程的了解，使学生认识到科学发现的艰辛与快乐，同时又体会到科学技术就是生产力的道理。

教师活动	学生活动	点评
问题 4: 粒子每经过一次加速, 它的轨道半径就会大一些, 为什么? 回旋加速器加速带电粒子, 能量达到 25~30 MeV 后, 就很难再加速了。原因是, 按照狭义相对论, 粒子的质量随着速度的增加而增大, 而质量的变化会导致其回转周期的变化, 从而破坏了与电场变化周期的同步。	过半圆的时间并不改变, 因此, 两盒间电势差的正负变换的时间间隔不变。 分析 4: 设粒子被 n 次加速后速度达到 v_n, 在磁场中运动的半径为 r_n, 由 $\frac{1}{2}mv_n^2 = nqU$ 和 $r_n = \frac{mv_n}{qB}$, 得 $r_n = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mnU}{q}}$ 由此式可知, 轨道半径和加速的次数 n 的平方根成正比, 即随着加速次数的增多, 轨道半径也会变大一些。	

4. 教学设计说明

这节课的设计是为了让学生运用已有的知识来获取新知识, 即运用洛伦兹力和向心力的有关知识去认识带电粒子在匀强磁场中的运动规律, 从而体会到科学探究的乐趣。在让学生认识带电粒子在匀强磁场中的运动规律时, 采用理论探究和实验相结合的方法。先让学生通过向心力和洛伦兹力的有关知识进行理论探究, 再通过实验进行验证。这样处理, 可以使学生获得体验, 加深对知识的理解。

对课文中的例题采用先由学生进行设计, 再引入例题并放手由学生自行解决, 使学生体会到科学探究的乐趣。为了使学生体会到科学发展道路的曲折和不平凡, 这里没有直接给学生讲述多级加速器和回旋加速器的原理, 而是先由老师加以引导, 然后在学生充分思考的基础上引入这两种加速器。

(江苏省南菁高级中学 戴加成)

四、教学资源库

(一) 概念、规律和背景资料

1. 磁感应强度的几种定义

磁感应强度是描述磁场的基本物理量, 已知一个磁场的磁感应强度的分布, 就可以确定运动电荷、电流在磁场中受到的作用力。磁感应强度 B 是和静电场的电场强度 E 相对应的物理量。静电场对静止电荷有作用力, 静电场可以用检验电荷在电场中各点受到的力来研究, 电场强度 E 定义为 $E = \frac{F}{q}$ 。研究磁场也要引进一个检测的物体, 由于磁场对运动电荷、电流有作用力, 对通电线圈有力矩的作用, 所以可以采用这三种物体作为检测磁场的物体, 采用不同的检测物体, 也就相应地给出了磁感应强度 B 的不同定义。

下面介绍常见的磁感应强度的三种定义方法。



(1) 用一段通电直导线受到的磁场力来定义

通电直导线在磁场中受到力的作用,这种力叫做安培力。实验表明,如果直导线的长度为 L ,电流为 I ,垂直放在匀强磁场中,作用在导线上的安培力大小为 $F=ILB$ 。由此可以定义磁感应强度 B ,即 $B=\frac{F}{IL}$ 。

这种定义方法是用一小段通电导线作为检测物体,安培力能够演示,形象直观,便于学生接受。中学教科书多采用这种定义方法,但是这种方法确定的是一小段通电导线所在范围内磁感应强度 B 的平均值,只有对匀强磁场,给出的才是各点的 B ;对于非匀强磁场,不能给出各点的 B ,因此,对学生建立磁感应强度的概念有不利之处。

(2) 用通电矩形线圈受到的力矩来定义

面积为 S 的小矩形线圈,通以电流 I ,当线圈平面跟磁场平行时,线圈所受磁场力的力矩为 $M=BIS$,由此可给出 B 的定义式,即 $B=\frac{M}{IS}$ 。

由于线圈等效于一个小磁针,线圈在磁场中受到的作用力相当于小磁针受到的作用力。所以用线圈作为检测物体来研究磁场,与历史上对磁场的认识过程比较一致,某些普通物理教科书中采用这种定义方法的,但是由于线圈总有一定的大小,所确定的也是线圈范围内的磁感应强度 B 的平均值,不能严格地确定磁场中各个点的 B 。

(3) 用运动电荷受到的磁场力来定义

实验表明,运动电荷在磁场中要受到力的作用,这个力叫做洛伦兹力。运动电荷在磁场中某点所受磁场力的大小跟电荷量 q 、运动速度 v 以及该点的磁感应强度 B 有关系,还跟运动方向与磁场方向间的夹角有关系,当电荷运动的方向垂直于磁场时所受的磁场力最大,且 $F_{\text{洛}}=qvB$,由此可给出磁感应强度 B 的定义式,即 $B=\frac{F_{\text{洛}}}{qv}$ 。

电磁学是研究电磁场与电荷间相互作用及运动规律的,电磁场对电荷有作用力,通过电场对电荷的作用力引入了电场强度 E ,所以通过磁场对运动电荷的作用力来引入磁感应强度 B 是合适的。从理论上讲,这种定义 B 的方法也比较本质、严谨,所以许多教科书中采用这种定义方法,但这种定义方法比较抽象,要求学习者有较高的抽象思维能力和推理能力。

2. 奥斯特

丹麦物理学家奥斯特(Hans Christian Oersted, 1777—1851) 1777年8月14日生于丹麦朗格兰德岛一个药剂师家庭,12岁开始帮助父亲在药房里干活,同时坚持学习化学。由于刻苦攻读,17岁以优异的成绩考取了哥本哈根大学的免费生,他一边当家庭教师,一边在学校学习药理学、天文、数学、物理、化学等。1806年任哥本哈根大学物理学教授,1821年被选为英国皇家学会会员,1823年被选为法国科学院院士,后来任丹麦皇家科学协会会长。

奥斯特早读大学时就深受康德哲学思想的影响,认为各种自然力都来自同一根源,可以相互转化。富兰克林发现的莱顿瓶放电使钢针磁化的现象,对奥斯特启发很大,他认识到电向磁的转化不是不可能的,关键是要找出转化的具体条件。他在1812年出版的《关于化学力和电力的统一性的研究》中,根据电流流经直径较小的导线会发热,推测如果通电导线的直径进一步缩小,那么导线就会发光;使通电导线的直径变得更小,小到一定程度时,电流就会产生磁效应。他指出:“我们应该检验电是否以其最隐蔽的方式对磁体有所影响。”寻找这两大自然力之间联系的思想,经常盘绕在他的头脑中。

1819年冬，奥斯特在哥本哈根开设了一个讲座，讲授电磁学方面的课题。在备课中，奥斯特分析了前人在电流方向上寻找磁效应都未成功的事实，想到磁效应可能像电流通过导线产生热和光那样是向四周散射的。1820年春，奥斯特安排了一个这方面的实验。他采用讲演时常用的电池槽，让电流通过一根很细的铂丝，把一个带玻璃罩的指南针放在铂丝下面，实验没有取得明显的效果。1820年4月的一天晚上，奥斯特在讲课中突然出现了一个想法，讲课快结束时，他说：“让我把导线与磁针平行放置来试试看。”当他接通电源时，发现小磁针微微动了一下。这一现象使奥斯特又惊又喜。他紧紧抓住这一现象，连续进行了3个月的实验研究，终于在1820年7月21日发表了题为《关于磁针上的电流碰撞的实验》的论文。这篇仅用了4页纸的论文，是一篇极其简洁的实验报告。奥斯特在报告中讲述了他的实验装置和60个实验的结果，从实验总结出：电流的作用仅存在于载流导线的周围，沿着螺旋方向垂直于导线；电流对磁针的作用可以穿过各种不同的介质；作用的强弱决定于介质，决定于导线到磁针的距离和电流的强弱；铜和其他一些材料做的针不受电流作用；通电的环形导体相当于一个磁针，具有两个磁极，等等。

奥斯特发现电流的磁效应，是科学史上的重大发现，它立即引起了那些懂得它的重要性和价值的人们的注意。在这一重大发现之后，一系列的新发现接连出现。两个月后安培发现了电流间的相互作用，阿拉果制成了第一个电磁铁，施魏格发明电流计等。安培曾写道：“奥斯特先生……已经永远把他的名字和一个新纪元联系在一起了。”奥司特的发现揭开了物理学史上的一个新纪元。

奥斯特不只是一位著名的物理学家，还是一位优秀的教师。他的讲课有表演，有分析。他非常重视实验，他说过：“我不喜欢那种没有实验的枯燥的讲课，因为归根到底，所有的科学进展都是从实验开始的。”

3. 安培

安培（Ampère, André-Marie, 1775—1836）是法国物理学家、数学家，1775年1月22日生于里昂一个商人家庭。父亲为他安排了按照自己的意愿来学习的环境。他自幼聪明好学，具有惊人的记忆力，尤其是在数学方面有非凡的天赋。12岁学习了微积分，13岁发表关于螺旋线的论文。18岁时，除了拉丁语，还通晓意大利语和希腊语。他不仅钻研数学，还研究物理学和化学。在化学方面，他最先预见了氯、氟、碘三种物质是元素，还独立地发现了“阿伏加德罗定律”。

安培最重要的贡献是在电磁学方面。1820年7月奥斯特发现了电流的磁效应。法国科学家阿拉果8月在瑞士听到这一消息后，9月初回到法国立即向法国科学院报告了这一最新发现。善于接受新的研究成果的安培，怀着极大的兴趣，第二天就重做了奥司特的实验，并于9月18日向法国科学院提交了第一篇论文，报告他的实验成果，接着又在9月25日、10月9日提出了第二篇和第三篇实验报告论文。在这三篇论文中，包括了电流方向和磁针偏转方向关系的右手定则；同向直线电流间互相吸引，异向直线电流间互相排斥；通电螺线管的磁性跟磁针等效，等等。安培又用了两三个月的时间进一步研究电流之间的相互作用，把精巧的实验和他高超的数学技巧结合起来，通过四个巧妙设计的实验，得出了重要的结论，这就是：导线中的电流反向时，它们产生的作用也反向；电流元具有矢量性，作用在电流元上的力跟电流元垂直；电流元的长度和相互间的距离增加相同的倍数时，作用力不改变。安培根据这四个实验，导出了两个电流元之间相互作用的公式，即两个电流元之间的作用力跟它们之间距离的二次方成反比，这就是著名的安培定律。

安培还进一步探索了磁的本质,提出了分子电流假说,为正确认识物质磁性指出了方向。安培把磁和电流联系起来,从本质上认识了磁和电的统一。

安培精湛的实验技巧和探索根源的精神受到后人的称颂,因在电磁学方面的重要贡献他被麦克斯韦誉为“电学中的牛顿”。

4. 洛伦兹

洛伦兹(Hendrik Antoon Lorentz, 1853—1928)是荷兰物理学家、数学家,1853年7月18日生于阿纳姆,1870年在莱顿大学学习数学、物理学,1875年获博士学位,25岁起任莱顿大学理论物理学教授达35年。

洛伦兹是经典电子论的创立者。他认为电具有“原子性”,电的本身是由微小的实体组成的。后来这些微小实体被称为电子。洛伦兹以电子概念为基础来解释物质的电性质,从电子推导出运动电荷在磁场中要受到力的作用,即洛伦兹力。他把物体的发光解释为原子内部电子振动产生的。这样当光源放在磁场中时,光源的原子内电子的振动将发生改变,使电子的振动频率增大或减小,导致光谱线的增宽或分裂。1896年10月,洛伦兹的学生塞曼发现,在强磁场中钠光谱的D线有明显的增宽,即产生塞曼效应,证实了洛伦兹的预言,塞曼和洛伦兹共同获得1902年诺贝尔物理学奖。

1904年,洛伦兹证明,当把麦克斯韦的电磁场方程组用伽利略变换从一个参考系变换到另一个参考系时,真空中的光速将不是一个不变的量,从而导致对不同惯性系的观察者来说,麦克斯韦方程及各种电磁效应可能是不同的。为了解决这个问题,洛伦兹提出了另一种变换公式,即洛伦兹变换。用洛伦兹变换,将使麦克斯韦方程从一个惯性系变换到另一个惯性系时保持不变。后来,爱因斯坦把洛伦兹变换用于力学关系式,创立了狭义相对论。

爱因斯坦称洛伦兹为“我们时代最伟大、最高尚的人”。为了纪念洛伦兹的卓著功勋,荷兰政府决定从1945年起,把他的生日定为“洛伦兹节”。

5. 劳伦斯

劳伦斯(Ernest Orlando Lawrence, 1901—1958)因发明和制造回旋加速器并用其产生人工放射性元素,获得了1939年度诺贝尔物理学奖。

在回旋加速器发明以前,人们只局限于使用天然放射性物质发射的 α 粒子进行核反应,能够进行核反应的物质和反应产物的数量都受到很大的限制。1929年,劳伦斯首先提出了获得高速带电粒子的磁共振加速法,也就是回旋加速器的原理:把不变的均匀磁场和频率固定的振荡电场恰当地结合起来,使带电粒子逐步加速,并沿着半径不断增大的圆形轨道运动。1931年,他在自己学生的协助下,制成了第一台加速器。几年之后,他们通过加速质子、氘核和 α 粒子去轰击靶核,得到了高强度的中子束,还首次制成了 ^{24}Na 、 ^{32}P 和 ^{131}I 等医用同位素。随着回旋加速器的进一步发展,在加速器中被加速的粒子的能量大大超过了天然放射性物质发射的 α 粒子的能量。后者的能量约为7~8 MeV,而在1939年,用加速器提供的 α 粒子的能量已经达到了百万兆电子伏特。用这些高能量的“炮弹”轰击其他原子核,引起了许多新的核衰变,使普通的物质转变为放射性比天然镭还要强的人工放射性物质,并放出巨大的能量。

回旋加速器带来的最重要的成果,是产生人工放射性物质。虽然放射性同位素是约里奥·居里夫妇于1934年用天然放射性物质发射的 α 粒子发现的,但是只有回旋加速器,才可能大量地产生放射性同位素,这也是放射性元素能够应用于生物学和医学的一个重要条件。历史上,回旋加速器还对核力和核裂变问题的研究起过极其重要的作用。现在,它仍然是核物理实验中的一种重要设备,在工业、医疗等方面也有其广泛的用途。

6. 磁场与静电场是两类不同性质的场

静电力是一种保守力,静电场是一种保守力场,即势场。在静电场中移动电荷时,静电力所做的功与路径无关。而磁场是涡旋场,不是势场,不能引入相应的“势能”的概念来研究磁场的性质。同时磁感线都是围绕着电流的闭合曲线,或者从无限远处来,又到无限远处去,没有起点,也没有终点;而静电场中的电场线则总是起始于正电荷,终止于负电荷。

7. 中国古代在磁学方面的成就

(1) 磁石吸铁性的发现及其早期应用

远在春秋时期,人们就已经认识磁石了。《管子·地数篇》就有“上有慈石者,其下有铜金……”的记载。明确提出磁石具有吸铁性的是《吕氏春秋·精通》,其中记有“慈石召铁,或引之也”。这表明,早在春秋战国时期,关于磁石吸铁性的知识已经相当普遍,并已开始用于找矿了。

西汉《淮南子·览冥训》记载道:“若以慈石之能连铁也,而求其引瓦则难矣,物固不可以轻重论也。”《淮南子·说山训》中有“慈石能吸铁,及其于铜则不通也”的记载。都是用磁性来对物质进行分类的一种尝试。

在磁力的利用方面,中国古代也有不少生动的实例。《史记·封禅书》中记载有方士栾大以磁石作棋子,使其“自相触击”。表明当时人们实际上已经运用了磁石同极相斥、异极相吸的原理。此外,人们已将磁石的吸铁性初步应用于防盗、防刺客、作战上。

(2) 司南、指南鱼的发明与地磁倾角的发现

关于磁石的指极性的发现及其应用,在中国古代也是很早的。公元前4世纪的《鬼谷子·谋篇》中就记有:“郑子取玉,必载司南,为其不惑也。”公元前3世纪的《韩非子·有度篇》也记有:“……故先王立司南,以端朝夕。”“以端朝夕”即正四方的意思。这些记述表明当时人们已发现了磁石指极的特性,并且发明了指示方向的司南。到了东汉,王充对司南作了比较具体的记述。《论衡·是应篇》中写道:“司南之杓,投之于地,其柢指南。”“杓”即勺子,是利用天然磁石琢磨成的勺形指南器;“地”是中央光滑的地盘;“柢”是勺的长柄。将磁勺放置在中央极光滑的方位盘中央,它就会自由转动起来,直至与地磁场的南北极相一致为止,勺的长柄则指南方。

宋代曾公亮(998—1078)编著的《武经总要》中记述了一种利用人工磁化方法制造的指南鱼:“鱼法,以薄铁叶剪裁,长二寸阔五分,首尾锐如鱼形,置炭火中烧之,候通赤,以铁钤钤鱼首出火,以尾正对子位,蘸水盆中,没尾数分则止,以密器收之。用时置水碗于无风处,平放鱼在水面令浮,其首常南向午也。”曾公亮所记述的虽纯系实践经验的总结,但今天看起来,是很符合科学原理的。使铁片加热到“通赤”(高于 700°C ,相当于居里点的温度),铁片的磁畴即行瓦解,变成顺磁体;然后再把铁鱼尾正对子位(即正北方)蘸水,使铁鱼冷却,磁畴又重新恢复了。但因铁鱼沿地磁场方向放置,受地磁场的作用而使其磁畴按地磁方向排列,鱼尾被磁化成北极,鱼首自然指南极。淬火时“没尾数分”,即使鱼尾稍向下倾斜,接近地磁倾角方位,黄河一带的地磁倾角为 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$,鱼体则更接近于地磁场的方向,使铁鱼磁化的有效磁场强度增大,磁化效果就会更好。把铁片剪成长条而首尾尖锐的鱼形,不但指向性好,而且还减小了磁体的退磁因数,有利于使用和保留磁性。从曾公亮这项记述可以看出,远在公元11世纪前,中国就已发明了利用地磁场进行人工磁化的方法制造简易的指南器,并在实践中发现了地磁倾角的存在,实在是一项了不起的科学贡献。西方到16世纪才发现地磁倾角;1600年,英国吉尔伯特(W. Gilbert)在其著的《论磁》一书中,才讲到红热铁片

在地磁场方向冷却磁化的方法。

(3) 指南针的制造与地磁偏角的发现

沈括在《梦溪笔谈》第437条记载道：“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也。水浮多荡摇，指爪及唇上皆可为之，运转尤速，但坚滑易坠，不若缕悬为最善。其法取新纆（kuàng，絮）中独茧缕，以芥子许蜡，缀于针腰，无风处悬之，则针常指南。其中亦有磨而指北者。余家指南、指北皆有之。”同书第588条又指出：“以磁石磨针锋，则锐处常指南，亦有指北者，恐石性亦不同……南北相反，理应有异，未深考耳。”这是关于指南针最早的明确记载。

上述记载说明，到了宋代，指南器的磁性已经跨过了司南和指南鱼两个阶段，发展为针形，成为一种更简便、更具有实用价值的指南仪器，它和现代磁针的形式已极为接近。这种使用天然磁石摩擦铁（钢）针使其磁化的人工磁化方法，直到19世纪现代电磁铁出现以前，几乎所有磁针都是这样制成的。

此外，值得指出的是：第一，沈括提出了磁针所指的方向“常微偏东，不全南”的现象。这说明沈括在实践中已经发现了地磁偏角，即磁子午线与地理子午线之间的角度。据考证，11世纪，沈括经常居住的长江下区的地磁偏角一般不超过 $3^{\circ}\sim 4^{\circ}$ ，这样小的数值，在800多年前的古代，如不经过长期的实验观察，是很难发现的，这是沈括在物理学上的一项重大贡献。至于西方，直到1492年意大利哥伦布在横渡大西洋的航行中才多次观测到地磁偏角的现象。其次，沈括通过实验总结出了四种放置指南针的方法，即水浮法、指甲旋定法、碗唇旋定法和缕悬法。沈括的这些实验给现代指南针装置以很大的启示。在近代制作罗盘和地磁测量仪器中，磁变仪、磁力仪的基本结构和原理采用的就是缕悬法；在航海和航空中使用的罗盘里也有以水浮磁针为基本装置的。最后，沈括在记述中还提到，经过磁石磨过的针尖“常指南，亦有指北者，恐磁性亦有不同”。这可以说是对磁石的两极性最早的认识。从当时的科学水平来说，把地球作为一个磁体来解释磁针的指极性的原因还没有可能，所以沈括只是笼统地说大概是由于磁石的性质有所不同的缘故。但又承认自己还搞不清楚其中的道理，这表现了他的严谨的、实事求是的治学态度。

指南针是我国著称于世的四大发明之一。指南针一经发明，很快就被应用于航海。成书稍晚于《梦溪笔谈》的朱彧所著的《萍洲可谈》（1119年）卷2中记载道：“舟师识地理，夜则观星，昼则观日，阴晦则观指南针。”徐兢（1093—1155）在《宣和奉使高丽图经》（1123年）中，也有“若晦冥则用指南浮针，以揆南北”的记载。到了元代，不论昼夜阴晴都用指南针导航了。罗盘放在专门的“针房”内，由最有航海经验的人来掌管。正是由于指南针在航海中的应用，才大大促进了中国古代航海事业的发展。明代伟大的航海家郑和（1371—1435）曾率领庞大的船队七次大规模远航，访问了亚非三十多个国家，最远到达红海和非洲东岸，有力地促进了中国和亚非各国的经济、文化交流。

中国的指南针大约是在公元12世纪末到13世纪初，由海路传入阿拉伯，然后再传到欧洲，有力地促进了西欧各国从封建社会到资本主义社会的过渡。

(4) 中国古代关于磁的本性的认识

磁石为什么能吸铁，而不能吸引其他金属（铜、金等）和非金属？东汉王充曾认为是“气性”相同，互相感应的结果。到了宋代陈显微和俞琰对这个问题做过研究。陈显微指出：“磁石吸铁，皆阴阳相感，阻碍相通之理，岂能测其端倪哉！”（《古文参同契笺注集解》卷上引陈显微语）。俞琰指出：“神与气和，隔阂相通，犹如磁石之吸铁也。”（同上，引俞琰语）。他们

都是试图用中国古代的“元气说”去解释,认为磁石吸铁是因为铁和磁石之间存在着内在的“气”的联系,是“阴阳相感”“神与气和”。这种解释虽然模糊,但能够从铁和磁之间内在的“气”的联系去寻找原因,却是可贵的。

明末清初的刘献廷在《广阳杂记》中还讲到磁的屏蔽现象。他指出:“磁石吸铁,隔碍潜通。或问余曰:‘磁石吸铁,何物可以隔之?’犹子阿孺曰:‘惟铁可以隔之耳’,其人去而复来,曰:‘试之果然’。”铁是强磁性物质,导磁系数远大于1,故可以产生屏蔽效应。

(二) 联系生活、科技和社会资料

1. 磁电式电流表的刻度为什么是均匀的?

圆柱形软铁芯的作用是加强它与极靴间空隙处的磁感应强度,并使此处磁感应强度均匀地沿径向分布。这样一来,无论线圈转到什么位置,磁力矩的大小都相等,并可表示为 $M_1 = NBIS$ (N 为线圈匝数, S 为线圈面积, I 为通入的待测电流, B 为磁感应强度)。

当线圈转动时,螺旋弹簧(游丝)发生形变,因而产生反抗力矩 M_2 ,阻止线圈继续转动。线圈转角 θ 越大,游丝形变越大,反抗力矩 M_2 也越大。实验证明, M_2 与 θ 成正比,即 $M_2 = \alpha\theta$, 式中 α 叫做游丝的扭转常数。可见,对于一定的待测电流 I 来说,线圈所受的磁力矩 M_1 也是一定的,而游丝的反抗力矩 M_2 却随着线圈转角的增大而增大。所以,线圈必定在某一转角 θ 处稳定下来。这时两个力矩达到平衡,故有 $NBIS = \alpha\theta$, 或者改写为 $I = \frac{\alpha}{NSB}\theta = K\theta$ 。式中 $K = \frac{\alpha}{NSB}$, 为一常量,在数值上等于线圈转过单位转角时所必须通入的电流,它可由实验测出。这样,就可以由转角 θ (指针所指示的位置)得到通入线圈的电流 I 。由于 K 是常量,也说明了刻度盘上刻度均匀的事实。

2. 磁共振成像的基本原理

磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI; 也称核磁共振 NMRI)利用了人体内水分子中的氢核在外磁场中产生核磁共振的原理。含氢液体样品放入外磁场时,宏观上反映氢核磁矩的磁化强度矢量 M 沿磁场方向取向,这时在垂直主磁场方向加一射频脉冲磁场,使 M 偏离主磁场方向(夹角为 θ)。由于 θ 角大小与激发脉冲宽度成正比, MRI 中经常使用的 90° 、 180° 脉冲就是分别使 M 偏离主磁场 90° 及 180° 。射频脉冲结束后氢核通过自旋—晶格弛豫(纵向弛豫,时间常数为 T_1)及自旋—自旋弛豫(横向弛豫,时间常数为 T_2)恢复到原来的平衡状态。由于人体不同的正常组织、器官以及同一组织、器官的不同病理阶段氢核的弛豫时间有显著不同,利用梯度磁场进行层面选择和空间编码就可以获得体内各体素中氢核的密度、纵向弛豫时间 T_1 、横向弛豫时间 T_2 等信息,将体内任意断层上各体素的这些信息用对应像素的灰度值表现,就可以获得反映体内解剖结构及病理改变的二维断层图像。医学上使用的其他成像方式是由单一参数成像,而 MRI 是多参数成像。MRI 可以通过改变成像条件使图像突出 T_1 或 T_2 的差别,这样得到的图像称为 T_1 加权图像或 T_2 加权图像。为得到体内更多有用的信息,近年来引进了很多新的 MRI 图像对比度机制,如扩散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI)是通过测量人脑中水分子扩散的特性来反映组织的生化特性及组织结构的变化,在临床上可用于急性脑梗死的早期诊断。以血氧水平依赖(blood oxygenation-level depend-



ent, BOLD) 程度为依据的功能磁共振成像 (functional MRI, fMRI) 以及根据磁共振信号的化学位移测量脑内有关区域内各种化合物分子的磁共振波谱 (magnetic resonance spectroscopy, MRS) 也已经用于脑功能研究及疾病的诊断治疗。BOLD 成像的原理是: 伴随着大脑的神经活动, 在大脑皮层相应区域内就会出现局部毛细血管中的血流增加; 由于氧的摄取量没有明显增加, 局部血氧量增加, 脱氧血红蛋白减少。脱氧血红蛋白具有顺磁性, 它的减少将改变 T_2 加权的磁共振信号, 因此脱氧血红蛋白就可作为内源性对比度增强剂发射 fMRI 信号, 比较刺激前后磁共振信号的差异就可以确定该刺激激活脑区的范围, 从而进行脑功能的研究。在临床上, 当脑部肿瘤在某功能区附近时, 可通过 fMRI 确定该功能区的范围, 手术时给予保护。

(《物理学照亮世界》, 赵凯华主编, 北京大学出版社, 有改动)

3. 磁记录材料

利用强磁性原理输入 (写入)、记录、存储和输出 (读出) 声音、图像、数字等信息的一类磁性材料。分为磁记录介质和磁头材料两类。前者主要完成信息的记录和存储功能, 即从磁头接收磁信息并记录和存储在磁性材料中, 需要时又将这些记录和存储的磁信息通过磁头转变为电信号; 后者主要功能是将输入的信息转变为写入磁场、使信息记录和写入磁记录介质中, 或者将存储在磁记录介质中的磁信息转变为读出电信号。

19 世纪末, V. 浦耳生 (Poulsen) 发明了利用永磁钢丝记录声音的最早磁录音装置。20 世纪 30 年代, 开始采用磁性氧化物和电镀磁介质作磁记录介质。1935 年 E. 舒勒 (Schüller) 研究出环形磁头, 连同 20~30 年代高频偏场法和电子放大器的采用, 进一步提高了磁录音的质量。50 年代, 又将磁记录应用于电子计算机的录数 (二进制制) 和视像设备中的录像, 从而扩大了磁记录材料的应用领域。60~70 年代, 先后研制出高矫顽力的氧化铬 (CrO_2)、包钴 (Co) 或掺钴的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 磁记录介质, 以及金属粉和金属薄膜磁记录介质。1977 年岩崎俊一提出并研究高密度的垂直记录方法后, 促进了钴铬系、钕铁氧体系垂直磁记录介质的研究。在磁头材料方面, 相继研究和应用了铁氧体系的多晶和单晶磁头材料、硬镍铁系磁头材料、非晶多层膜磁头材料以及磁电阻磁头材料等。

在记录信息 (声音、图像、数码) 过程中, 输入信息先转变为相应的电信号, 再传送到记录磁头的线圈中, 使记录磁头气隙中产生与输入电信号相应的变化磁场; 紧靠近气隙并以恒定速度移动的磁带上的磁记录介质受到这变化磁场的作用, 从原来未存储信息的退磁状态转变到磁化状态, 即将随时间变化的磁场转变为按空间变化的磁化强度分布, 磁带通过磁头以后转变到相应的剩磁状态; 剩磁状态便记录下与气隙磁场、磁头电流和输入电信号相应的信息。在磁带重放过程中, 正好与上述的磁记录过程相反, 即经过下列转变过程: 磁带剩磁 $\rightarrow$ 磁头气隙磁场 $\rightarrow$ 磁头线圈中的电流 (在磁电阻磁头中为随电阻变化的电流) $\rightarrow$ 与原来记录相应的 (声、像、数) 信息。

影响磁记录和重放质量的因素很多, 涉及磁记录材料性能的磁性参量。

对于磁记录介质主要是:

①适当高的矫顽力 H_c , 以有效存储信息, 抵抗环境干扰, 减小自退磁效应, 提高信息密度;

②高的饱和磁化强度 M_s , 以获得高的输出信息, 提高由形状磁各向异性导致的矫顽力;

③高的矩形比 $\frac{M_r}{M_s}$ (M_r 为剩余磁化强度), 以减小自退磁效应, 提高信息记录效率;

④高的 $\frac{H_c}{M_r}$ 比值,以提高记存信息的密度和分辨率,减小自退磁效应;

⑤陡直的磁滞回线,以使录数的开关磁场区域变窄,减小输出脉冲宽度,提高记存信息分辨率;

⑥低的磁性温度系数和老化效应,以提高磁记录的稳定性。

对于感应式磁头材料主要是:

①高的最大磁导率 μ_m ,以减小记录磁头的输入功率,增加磁头气隙磁场;

②高的饱和磁化强度 M_s ,以提高磁头的气隙磁场,增强磁记录介质的磁化程度;

③低的矫顽力 H_c ,以减小磁头磁滞损耗;

④低的剩余磁化强度 M_r ,以降低剩磁噪声;

⑤高的起始磁导率 μ_i ,以提高重放磁头的灵敏度;

⑥高的电阻率 ρ ,以降低涡流损耗,改善高频响应特性;

⑦高的磁导率截止频率 f_c ,以提高频率使用上限,有利于高频高速磁记录;

⑧高的力学强度,以提高耐磨性能,延长使用寿命,降低脱粒引起的噪声。

对于磁电阻磁头材料,除频率响应和力学强度要求外,主要是要求高的磁致电阻系数,以提高磁头灵敏度。

磁记录材料按形态可分为颗粒状材料和连续薄膜材料两大类;按其导电性可分为非金属材料 and 金属材料两大类。目前已经获得应用或尚在研究开发的磁记录介质主要有 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 系。除纯 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 外,还有表面包钴和掺钴的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 高矫顽力材料,等等。

磁记录材料的应用领域十分广泛,主要用于磁录音、磁录像、磁录数(码)、磁复制、磁印刷和磁照相等方面。

(《材料科学技术百科全书》,材料科学技术百科全书编委会,中国大百科全书出版社,有改动)

4. 磁性材料

具有铁磁性能的材料统称。包括铁磁性、亚铁磁性材料,螺旋型和成角型的铁磁性、亚铁磁性材料,以及非晶型的散铁磁性、散亚铁磁性材料等。广义的磁性材料还包括应用其磁性和磁效应的弱磁性(抗磁性和顺磁性)、反铁磁性材料等,如微波激射器应用的顺磁性晶体和毫米波旋磁器件应用的高内场反铁磁性材料等。

2 000 多年前人类就已发现磁现象。公元1世纪已有利用材料磁性制成的指南器。近代多种磁性材料的研究和应用,是从19世纪末到20世纪初由于电工、电子学和无线电技术的需要而发展起来的。在软磁材料方面,1900年W. F. 巴雷特(Barrett)等最早研究了铁硅(Fe-Si)合金的磁性,并于1903年开始工厂生产;1934年N. P. 戈斯(Goss)研制成功晶粒取向硅钢片;20世纪50年代又研制成功立方织构硅钢片,使软磁合金获得实际应用。1889年J. 霍普金森(Hopkinson)最早研究了铁镍(Fe-Ni)合金的磁性;1913年G. W. 埃尔门(Elmen)开始研究Fe-Ni合金的弱场磁性;发现了提高其磁导率的特殊热处理工艺(称为坡莫合金处理);而后他又研制成功加钴的坡莫瓦合金(1928年)和钼坡莫合金(1930年)。在永磁材料方面,19世纪中后期研制成功钨磁钢(1855年)和铬磁钢(1870年);20世纪初又研制成功钴钨磁钢(1917年)和钴铬磁钢(1921年),但其最大磁能积均在 10 kJ/m^3 以下。20世纪30年代研制成铝镍钴(Al-Ni-Co)系永磁合金(1931~1940年),铂钴(Pt-Co)永磁合金(1936年);20世纪50年代初研制成功钕铁氧体系永磁材料;20世纪60~80年代又先后研制成功钐钴(Sm-Co_5)系、 $\text{Sm}_2\text{-Co}_{17}$ 系和钕铁硼(Nd-Fe-B)系三代稀土永磁材料,使磁性材料

的最大磁能积提高到 200 kJ/m^3 以上。在铁氧体方面,随着非金属磁性的研究和高频电子技术的发展,20 世纪 30 年代起即开始了非金属各种铁氧体磁性材料的系统研究和应用。例如,高频技术用的软磁铁氧体(20 世纪 40 年代),微波技术用的旋磁铁氧体(20 世纪 50 年代初期),电子计算机用的矩磁铁氧体(20 世纪 50 年代中期),都是适应高新技术的需要和基于铁氧体物理的基础研究而发展起来的。与此同时,特种磁性材料的研究和应用也广泛开展起来。20 世纪 50 年代开始的各种磁记录材料的研究和应用,20 世纪 60 年代开始的非晶磁性材料的研究和应用,20 世纪 80 年代开始的纳米磁性材料的研究和应用,都显示出新型磁性材料的研究和应用是与磁学基础研究和高新技术的发展密切相关的。

磁性材料可按应用、磁性、化学组成多种方法分类,以便于突出特征和选择应用。在此只介绍按应用、磁性分类的情况。

磁性材料按应用可分为 3 大类。

①普通磁性材料:包括应用最早最广和品种最多的永磁材料和软磁材料。

②特种磁性材料:应用其某一特殊磁性或磁效应,或具有特殊形态和组织结构的磁性材料。例如,利用其微波磁性和旋磁效应的旋磁材料,利用其磁光效应的磁光材料等。

③弱磁性材料:主要应用其磁特性或磁效应产生非磁特性的材料。例如,利用特殊磁能级间跃迁产生相干微波辐射的顺磁微波激射材料,利用自发(交换)磁致伸缩抵消热膨胀的因瓦(invar)型材料等。有时也将弱磁性材料归入特种磁性材料。

按磁性分类可分为以下 12 种。

①永磁(性)材料:矫顽力高,可以长期保持其剩磁的材料。

②软磁(性)材料:矫顽力低,容易磁化、退磁的材料。其磁导率高,损耗小。

③矩磁材料:磁滞回线近似矩形(矩形比高)、矫顽力低的材料。主要应用于磁存储器和磁开关器等。

④旋磁材料:旋磁效应高、微波损耗低的材料。主要用于微波旋磁器件(如隔离器和环行器)和静磁波器件等。

⑤磁光材料:光(含红外)频段磁光效应和旋电效应高、光损耗低的材料。主要用于各种磁光器件,如光隔离器和磁光记录(存储)介质等。

⑥压磁材料:又称磁致伸缩材料。其特点是磁致伸缩系数高,磁-弹换能效率高,损耗低。主要用于磁声换能器和微位移器件等。

⑦磁记录材料:包括类似永磁性能的磁记录介质和类似软磁性能且力学性能好的磁头材料。主要应用于磁录音、磁录像和磁录数码的磁记录技术等。

⑧磁泡材料:利用磁膜材料中的磁泡(畴)或磁畴壁中布洛赫(Bloch)线做数字存储单元的材料。主要要求磁膜具有一定的垂直磁各向异性和饱和磁化强度。多用于磁泡存储器等。

⑨磁电阻材料:主要特点是外磁场引起的电阻变化效应高。主要用于磁传感器和记录磁头等。

⑩磁传感材料:主要特点是各种环境因素(如温度、湿度、压力等)引起某一磁性变化大,或磁场和磁性改变引起某一物性变化大。用于各种磁传感器。

⑪磁致冷材料:利用物质中的电子系统或原子核系统的绝热退磁效应以产生温度差而获得在不同温区降低温度的材料。

⑫磁性液体:利用强磁性材料的单磁畴微粉与液体形成的胶状材料。其特点是兼有受磁场控制的若干物性(如比重、黏度等)和液体流动性。主要用于磁密封、磁阻尼和特种磁流体发

电机等。

如果按磁性强弱还可分为强磁性材料，即一般所称的磁性材料，其基本特征是磁导率远大于1；弱磁性材料，其磁导率略微大于1（如顺磁性和反铁磁性材料），或略微小于1（如抗磁性材料，超导材料例外）。

（《材料科学技术百科全书》，材料科学技术百科全书编委会，中国大百科全书出版社，有改动）

5. 磁粉无损探伤

利用缺陷处漏磁场与磁粉相互作用的原理，检测铁磁性材料表面及近表面缺陷的一种无损检测方法。又称磁力探伤。是磁性探伤方法之一。磁粉是磁粉探伤的显示介质。JB3965-85 磁粉探伤标准规定，磁粉粒度应不小于200目。在磁粉探伤中，通常用四氧化三铁（ Fe_3O_4 ）或 γ 氧化铁（ Fe_2O_3 ）作为磁粉，平均粒度 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 。JB3965-85 标准还规定，磁粉应具有高磁导率和低剩磁性质，且磁粉之间不应相互吸引，用磁性称量法检验时，其磁性称量值应大于7g，荧光磁粉的称量值可另行选择。由于铁磁性物质内的缺陷磁导率的变化，“切割”铁磁性物质表面或近表面内的磁感应线，导致磁感应线在缺陷附近离开或进入试件表面所形成的磁场称之为漏磁场。磁粉探伤是检验工件或焊缝表面和近表面缺陷的有效方法。其最终结果是通过磁痕分析评价缺陷的性质和真伪。已被广泛应用于机械、造船、航空、航天、铁路、兵器等工业部门，用于现场快速对工件进行无损探伤。

当工件被磁化时，若在工件表面或近表面存在裂纹、冷隔等缺陷，便会在该处形成一漏磁场。此漏磁场将吸引、聚集探伤过程中施加的磁粉而形成磁痕，以放大的形式显示缺陷的部位、大小和形态。

在进行磁粉探伤时，首先对被检工件施加外磁场进行磁化。外加磁化场的获得一般有两种方法：

①由可以产生大电流（几百安培至上万安培）的磁力探伤机直接给被检工件通大电流而产生磁场，作为被检工件的磁化场；

②把被检工件放在螺旋管线圈产生的磁场中或电磁铁产生的磁场中，使工件磁化。然后在工件表面均匀喷洒细微颗粒的磁粉。具有较高的导磁性细小磁粉，可以被弱小的磁场吸引。如果被检工件不存在缺陷，磁化后可视为磁导率无变化的均匀体，则磁粉在工件表面也均匀分布。当被检工件有缺陷时，缺陷内含有空气或非金属，其磁导率接近1，远远小于工件（铁磁性材料）的磁导率。由于磁阻的变化，位于工件表面或近表面的缺陷处产生漏磁场，形成一个小NS磁极（图3-7），磁粉就会被小磁极吸引。缺陷处由于堆积较多磁粉而被显示出来，形成肉眼可见的缺陷图像。根据磁粉堆积部位、形状和大小等，可以判断缺陷的性质和大小。由于磁化场的方向与缺陷垂直时漏磁场最大，灵敏度最高，因此在检查工件纵向裂纹时，应采用同向磁场进行磁化；在检查工件横向裂纹时，应采用纵向磁场进行磁化（图3-8）。在实际探伤中，为了验证被测工件是否达到探伤灵敏度，可采用灵敏度

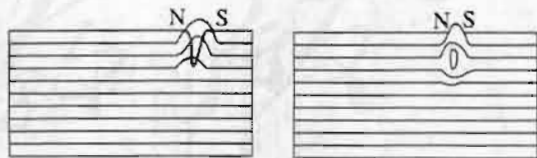


图 3-7 裂纹的存在引起漏磁场

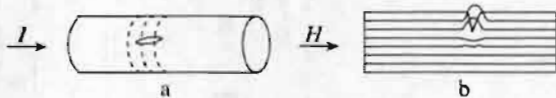


图 3-8 磁粉探伤时施加的磁化场

试片。磁粉探伤灵敏度标准试片刻有一定深度的人工缺陷，能用磁粉显示，显示影像直观，使用简便，可以方便地反映探测灵敏度，能迅速地选定合理的检查规范。

磁粉探伤方法可分为两种。

①外加磁场法：又称连续法。在外加磁化场的同时，把磁粉浇在试件上，然后停电再进行检查。施加磁粉分两种情况：用湿磁粉悬浮液浇在试件上，简称湿法；用干磁粉撒在试件上，简称干法。外加磁场法是最常用的磁粉探伤方法，一般焊缝或大中型零件探伤都用这种方法。

②剩余磁场法：简称剩磁法。是在去掉外加磁场后，将磁粉施加到试件上进行探伤的方法。从铁磁性材料的磁滞回线（图 3-9）可以看出，当去掉外加磁场时，工件磁感应强度并不为 0，而保留一定的剩磁。由于剩磁的存在，当向工件施加磁粉时，缺陷处仍然会吸引磁粉而显示出来。剩磁法主要用于大批量小型零件的磁粉探伤。

磁粉探伤的发展趋势是实现检测的标准化、自动化，保证检测结果的准确可靠，提高工作效率。常用的自动探伤方法有磁带录磁法、漏磁法和光电转换法。采用磁带录磁法和漏磁法时，已无需磁粉，所以不能称为磁粉探伤，而是磁性探伤。实际上，磁粉探伤是磁性探伤的一种。

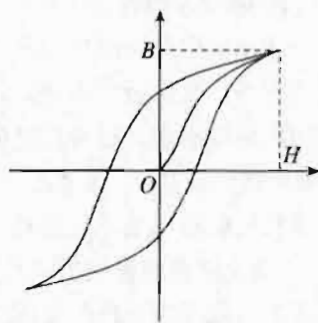


图 3-9 铁磁性材料磁滞回线

（《材料科学技术百科全书》，材料科学技术百科全书编委会，中国大百科全书出版社）

6. 磁浮列车

高速磁浮列车是 20 世纪的一项技术发明。自 20 世纪 60 年代以来，以德国、日本为代表，对常导和超导两种磁浮技术模式，进行了深入研究和反复试验。上海磁浮采用的是德国的常导模式，引进的是德国技术。德国的常导系统，先后经过 8 代改进。1987 年建成了埃姆斯兰试验线 31.5 km，最高运行速度达 450 km/h，运行里程累计已超过 6×10^5 km。1991 年，德国联邦铁路组织专家评估，认为“技术已经成熟，可以规划商业运行线路”。在日本，早在 1962 年就开始研究常导磁浮技术。随着超导技术的迅速发展，从 70 年代初，日本开始转而研究超导磁浮技术。1972 年首次成功地进行了 2.2 t 的超导磁浮列车试验，该车在 480 m 长的试验线路上达到了 60 km/h。1977 年 12 月在宫崎磁浮试验线上，最高速度达到了 204 km/h。1979 年 12 月又将不载人运行的速度提高到了 517 km/h。1982 年 11 月，磁浮列车的载人试验获得成功。1989 年，不载人试验速度达到了 494 km/h。1994 年，不载人运行最高速度达到 431 km/h；载人磁浮列车试验时的最高速度达到 411 km/h。

日本目前还在进行运行试验，进行改造空气动力学特性、减少噪声、降低造价的研究。拟于 2004 年进行商业应用。

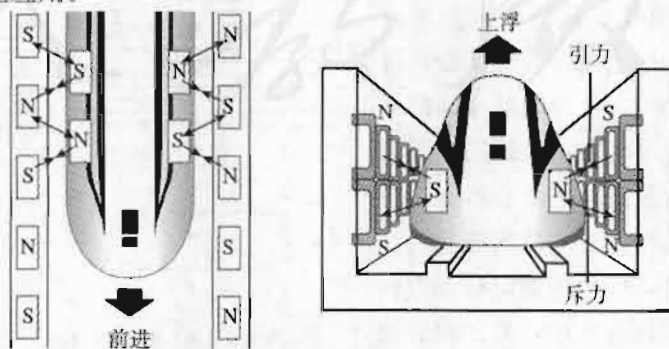


图 3-10 一种磁浮列车受力的示意图。车体两侧与轨道侧壁的电磁铁系统相互作用，产生向前的牵引力和使列车悬浮的力。



高速磁浮列车运行时,与轨道完全不接触。它没有轮子和传动机构,列车的悬浮、导向、驱动和制动都是利用电磁力来实现的。悬浮电磁铁以电磁力使车辆往上浮起,电磁控制系统保证磁浮列车与轨道保持约 10 mm 间距。导向电磁铁保证列车沿线路两侧的定位。列车通过长定子同步直线电机来驱动和制动。直线电机定子线圈中的电流产生一个运动磁场,在这个运动磁场的作用下,推动磁浮列车前进。

高速磁浮铁路系统由线路、车辆、供电、运行控制系统等四个主要部分构成。

线路:线路引导列车前进方向,同时承受列车荷载并将之传至地基。线路上部结构为用于联结长定子的精密焊接的钢结构或钢筋混凝土结构的支撑梁,下部结构为钢筋混凝土支墩和基础。

车辆:车辆是高速磁浮客运系统中最重要的部分,包括悬浮架和其上安装的电磁铁、二次悬挂系统和车厢。此外还有车载蓄电池、应急制动系统和悬浮控制系统等电气设备。

供电:供电系统包括变电站、沿路供电电缆、开关站和其他供电设备。磁浮列车供电系统通过给地面长定子线圈供电提供列车运行所需的电能。首先,从 110 kV 的公用电网引入交流高压电,通过降压变压器降至 20 kV 和 1.5 kV,然后整流成为直流电,再由逆变器变成 0~300 Hz 交流电,升压后通过线路电缆和开关站供给线路上的长定子线圈,在定子和车载电磁铁之间形成牵引力。磁浮列车系统的整流、变流及电机定子等设备均在地面,对设备的体积和重量以及抗震性能没有严格要求。

运行控制系统:运行控制系统是整个磁浮交通系统正常运转的根本保障。它包括所有用于安全保护、控制、执行和计划的设备,还包括用于设备之间相互通信的设备。运行控制系统由运行控制中心、通信系统、分散控制系统和车载控制系统组成。

高速磁浮列车与传统的高速轮轨列车相比,除了运营速度可达 450 km/h 至 500 km/h 的优势之外,还有四个优点:磁浮列车能耗低,是汽车的一半、飞机的四分之一;启动快、爬坡能力强,选线比较灵活;安全、舒适、维护少;采用电子驱动,没有废气排放,运行时没有车轮和轨道间的摩擦,环境影响小。

(选自新华网及上海磁浮官方网站,有改动)

(三) 实验参考资料

1. 研究直线电流的磁场

研究载流直导线的磁场的磁感应强度 B 的大小与导线中的电流 I 及测定点距导线的距离 r 的关系,得出直线电流磁场的分布规律。

(1) 仪器和器材

铜线(直径 0.2~0.3 mm,长约 3 m),长木条(1×2×100 cm³,两端固定有两个等高的铜质接线柱)、磁针(针尖要细、盘面刻有 360°刻度),直流电流表,滑动变阻器,学生电源,单刀开关,刻度尺(不能用钢皮尺),胶纸(或医用胶布),木支架 2 个(带座),白纸,导线若干。

(2) 实验原理

可绕竖直轴转动的磁针静止时北极的指向是沿北极所在点的地磁场的水平分量 B_e 的方向。若有沿由南至北的水平直线电流在磁针轴的正上(或下)方,或者有竖直方向的直线电流流经磁针侧,则磁针北极将偏转一个角度 θ ,指向直线电流在磁针所在处的磁感应强度矢量 B 与地

磁场在该处的水平分矢量 B_h 的合矢量 $B_{\text{合}}$ 的方向, 如图 3-11。由于 $\tan\theta = \frac{B}{B_h}$, $B = B_h \tan\theta$, 因此通过测定偏角 θ 的变化可以确定 B 的变化情况, 从而能够研究 B 随 I 和 r 变化的规律。

(3) 实验方法

①把长约 50 cm、宽约 10 cm 的白纸大致沿南北方向铺在实验桌靠边沿的正中部分, 用胶纸粘牢。把磁针放在纸的正中部位, 沿盘边缘用铅笔勾画出磁针底盘的位置。待磁针静止时, 转动磁针底盘, 使磁针两极指在南北方位线上。沿磁针 N、S 极指向在纸上画一直线, 如图 3-12。

②把长直导线固定在长木条的接线柱上, 固定时一定要绷紧。把长木条水平地固定在木架台上。按图 3-12 所示接好电路。调整木架台位置, 使得导线与白纸上的虚线在同一竖直平面内。调整长木条的高度, 使长直导线与磁针的距离在 3~10 cm 范围内。

③测出水平导线与磁针的竖直距离 r 。闭合开关, 调节滑动变阻器 R , 先后取 $I=0.5\text{ A}$ 、 1 A 、 1.5 A 、 2 A , 每次都待磁针稳定后读出磁针产生的偏角 (记为 θ)。改变导线中的电流方向, 再读 $I=0.5\text{ A}$ 、 1 A 、 1.5 A 、 2 A 时的偏角记为 θ' 。取两次读数的平均值 (记为 $\bar{\theta} = \frac{|\theta| + |\theta'|}{2}$) 为该电流值时磁针的偏角, 将测得的数据记入下表。

次数	r/m	$\frac{1}{r}/\text{m}^{-1}$	I/A	θ	θ'	$\bar{\theta}$	$\tan \bar{\theta}$	次数	r/m	$\frac{1}{r}/\text{m}^{-1}$	I/A	θ	θ'	$\bar{\theta}$	$\tan \bar{\theta}$
1								6							
2								7							
3								8							
4								9							
5								10							

④保持电流为 2 A 不变, 改变水平导线与磁针的距离 r , 读出相应的偏角, 在不同距离上测几组数据。

⑤整理分析实验数据, 看 $\tan \bar{\theta}$ 是否与电流 I 成正比、与 $\frac{1}{r}$ 成正比。同时作出 $\tan \bar{\theta} - I$ 图线和 $\tan \bar{\theta} - \frac{1}{r}$ 图线, 看图线是否是过坐标原点的直线。

(4) 注意事项

①本实验采用单根导线研究, 而没有用矩形线圈。在电流为 2 A 、 $r=10\text{ cm}$ 时, 磁针偏角

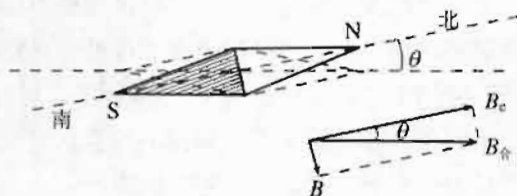


图 3-11

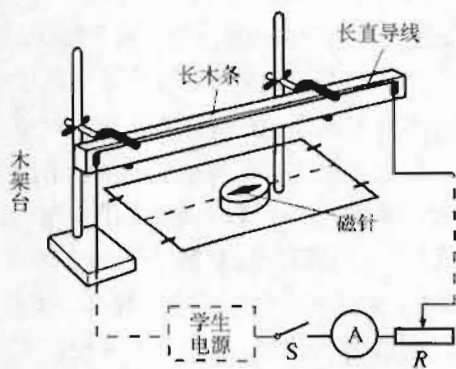


图 3-12

约 14° ，已有足够的精度。实验时，在磁针和水平直导线附近不应有铁磁性物质和其他电流，学生电源要尽量远离水平导线。连接电路的两竖直部分导线到磁针的距离尽可能相等。

②本实验把有限长直导线当做无限长直导线来研究，这只有导线长 $l \gg r$ 时才近似成立。因此 r 取值不可过大，最好不大于 10 cm ，导线长 l 不应小于 1 m 。

③通常所用磁针较短，磁针盘面小，最小刻度值为 3° 或 5° ，偏角读数误差大。可用铝质细丝附于磁针上，增大磁针盘面以增大分度的精度。磁针支轴应尖细，否则轴处摩擦力矩有可能引起较大误差。

④水平导线如果不严格沿南北方向，会带来磁针偏角读数误差。本实验方法中采用改变电流方向，取两次磁针偏角的平均值来减小这种误差。

2. 用探测线圈研究螺线管的磁场

研究螺线管的磁场分布；研究螺线管的磁场与电流及螺线管自身结构的关系。

(1) 仪器和器材

螺线管（见图 3-13 及“参考资料”中的有关说明），交流电流表（ $0 \sim 3\text{ A}$ ），学生电源，滑动变阻器（ $50\ \Omega$ 、 1.5 A ），探测线圈（截面积为螺线管截面积的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{5}$ ，匝数在 100 匝左右），学生示波器，连接导线。

(2) 实验原理

在简谐交变磁场 $B = B_m \sin 2\pi f t$ 中，若感应线圈平面面积为 S ，且线圈平面与磁感应强度方向垂直，则穿过线圈平面的磁通量为 $\Phi = B_m S \sin 2\pi f t$ 。若线圈匝数为 n ，则感应电动势 $e = n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = B_m S n 2\pi f \cos 2\pi f t$ 。令 $E_m = 2\pi f B_m S n$ ，在交流磁场的频率 f 、感应线圈的匝数 n 和截面积 S 恒定时，感应电动势的最大值 E_m 与磁感应强度的最大值 B_m 成正比。因此我们可以通过测定感应电动势的最大值及其变化来探测磁感应强度的最大值及其变化情况，从而能用示波器直观地分析螺线管的磁场与线圈中的电流及线圈结构的关系和螺线管的磁场的空间分布。

在中学物理范围内，介绍此实验原理时，可直接应用线圈在匀强磁场中以频率 f 转动时，感应电动势 $e = B_{\text{磁}} S 2\pi f \sin 2\pi f t$ 来说明。由于线圈转动、磁场不变和线圈不动磁场旋转的电磁感应效果相同，我们可以把上述感应电动势理解为是线圈不动、匀强磁场转动产生的。匀强磁场旋转在线圈平面内引起的磁通量变化，相当于一个正弦交变磁场在线圈平面内引起的磁通量变化。这交变磁场的磁感应强度的最大值 $B_m = B_{\text{磁}}$ ，从而推出感应电动势与磁感应强度的最大值成正比的结论。

(3) 实验方法

①研究螺线管内的磁场与螺线管中的电流的关系。

· 把器材按图 3-13 所示的电路装配好。其中各绕组线圈的头和尾依次串接。电源接交流 6 V 输出。把示波器调好至扫描。把探测线圈放入螺线管中心附近，使其线圈平面垂直于螺线管的轴线，将它固定。

· 闭合电源开关，调节变阻器 R ，使螺线管中的电流为 0.5 A 。调节示波器的“衰减”旋钮和“Y 增

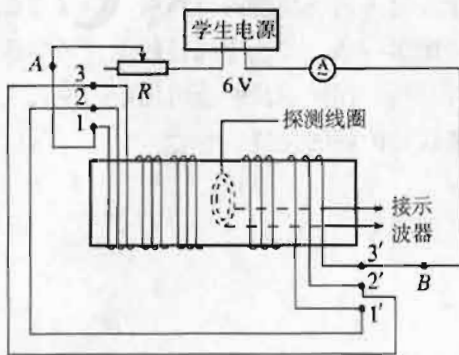


图 3-13

益”旋钮，使荧光屏上的波形幅度为10 mm。记下此时波形幅度 a_1 。

·示波器的“衰减”和“Y增益”保持不变，调节变阻器 R ，使电路中的电流分别为1 A、1.5 A、2 A；分别记下相应的波形幅度 a_2 、 a_3 、 a_4 。把电流值和波形幅度值记入自己设计的记录表格中。

·比较各次的电流和波形幅度（或作出 $I-a$ 图象），关于螺线管内的磁感应强度与螺线管中的电流的关系，你可以得出什么结论？

②研究螺线管内的磁场与螺线管单位长度上的线圈匝数的关系。

·只把线圈1-1'接入电路（即图3-13中导线A端不动，导线B端接在1'处）。调节变阻器 R ，使导线中的电流保持为2 A，观察并记下波形幅度 a' 。

·将串接的线圈绕组1-1'和2-2'接入电路（即不动A端导线，把导线B端接在2'上），调节变阻器 R ，使电流仍保持为2 A，观察并记下此时的波形幅度 a'' 。

·将波形幅度 a' 、 a'' 与前面所得的 a_4 比较，你可以得出螺线管内部磁场的磁感应强度与单位长度上的线圈匝数之间存在着什么关系？

③研究螺线管磁场的空间分布。

·仍将三个串接的绕组接入电路（如图3-13），调节变阻器 R ，使电流保持为1 A（或1.5 A）。

·把探测线圈沿螺线管的轴线方向从左端外边10 cm处向右端外边10 cm处移动。移动中应始终使线圈平面垂直于螺线管的轴线。每移动5 cm，记录一次波形幅度值。以螺线管轴线 x 为横轴，波形幅度 a 为纵轴，作出 $a-x$ 图象。由此图象，你可以得出关于螺线管磁场的磁感应强度的轴向分布情况的结论。

（4）注意事项

①由于所通电流较大，每次观察结束要及时断开电源。

②滑动变阻器应尽量远离螺线管，以免它的磁场干扰螺线管的磁场，在测螺线管外部的磁场时，特别要注意这一点。

③示波器的“衰减”旋钮拨在“1”，主要由调节“Y增益”来设定波形幅度 a_1 。设定 a_1 后不能再动“衰减”和“Y增益”。

（5）参考资料

①关于螺线管的制作。螺线管骨架可采用直径为10 cm左右的塑料圆筒，筒长约32 cm。线圈可采取三线并绕的方式。如果绕两层，筒长可取17 cm。所用漆包线直径以1 mm为宜。

②探测线圈可以用直径0.1~0.2 mm的漆包线绕制。线圈骨架宜为圆形，以便于在探测螺线管内磁场的横向分布时，能紧靠螺线管内壁。线圈平面直径不大于5 cm，线圈匝数应尽可能多一些。若选用线径较细，可多达上千匝。这样在探测螺线管外部磁场分布时，效果会更好一些。在探测线圈上可固定一根长度为螺线管长度两倍的硬质细杆，以便于调节探测线圈在螺线管内部的位置。

五、补充习题

A 组

1. 如图 3-14 所示, 有一束电子正在 y 轴上向 y 轴正方向移动, 则它在 z 轴上某点 A 处产生的磁场方向为 ()

- A. 沿 x 轴的正方向
- B. 沿 x 轴的负方向
- C. 沿 z 轴的正方向
- D. 沿 z 轴的负方向

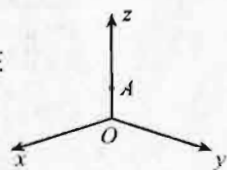


图 3-14

2. 如图 3-15 所示, 通有恒定电流的导线 MN 与闭合金属框共面, 第一次将金属框由 I 平移到 II, 第二次将金属框由 I 绕 cd 边翻转到 II, 设先后两次通过金属框的磁通量的变化分别为 $\Delta\Phi_1$ 和 $\Delta\Phi_2$, 则 ()

- A. $\Delta\Phi_1 > \Delta\Phi_2$
- B. $\Delta\Phi_1 = \Delta\Phi_2$
- C. $\Delta\Phi_1 < \Delta\Phi_2$
- D. $\Delta\Phi_1 = -\Delta\Phi_2$

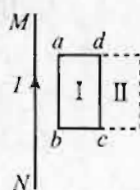


图 3-15

3. 如图 3-16 所示的通电螺旋管的正上方有一金属圆环, 讨论以下两种情况金属环中磁通量怎样变化? (1) 仅电流 I 增大; (2) 仅金属环的半径 R 增大。

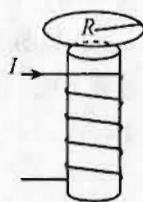


图 3-16

4. 放在通电螺线管里面的小磁针保持静止时, 位置是怎样的? 两位同学的回答相反。甲说: “小磁针的位置如图 3-17 甲, 因为管内的磁感线向右, 所以小磁针的 N 极指向右方。” 乙说: “小磁针的位置如图 3-17 乙, 因为通电螺线管的 N 极在右侧, 根据异名磁极相吸的原理可知, 小磁针的 S 极指向右方。” 你的看法是怎样的? 他们谁的答案错了? 错在哪里?



图 3-17

5. 有两条垂直交叉、但不接触的导线通过大小相等的电流 I , 如图 3-18 所示, 则磁感应强度 $B=0$ 的区域必定在第几象限?

6. 如图 3-19, 金属杆 ab 的质量为 m , 长为 L , 通过的电流为 I , 处在磁感应强度为 B 的匀强磁场中, 结果 ab 静止且紧压于水平导轨上。若磁场方向与导轨平面成 θ 角, 求:

- (1) 棒 ab 受到的摩擦力;
- (2) 棒对导轨的压力。

7. 如图 3-20 所示, 以 MN 为界的两匀强磁场, 磁感应强度 $B_1=2B_2$, 方向均为垂直纸面向里, 现有一质量为 m 、电荷量为 q 的正粒子, 从 O 点沿图示方向进入 B_1 中。

- (1) 试画出此粒子的运动轨迹;
- (2) 求经过多长时间粒子重新回到 O 点?

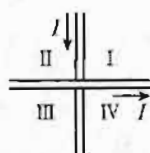


图 3-18

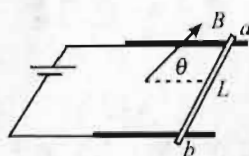


图 3-19

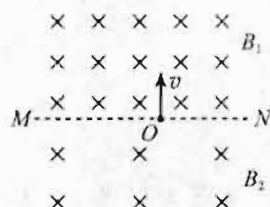


图 3-20

8. 如图 3-21 所示, 铝圆环和磁铁在同一平面内, 当圆环通入电流瞬间, 方向如图所示, 圆环将 ()

- A. 左边向里, 右边向外, 转动同时向磁铁靠近
- B. 左边向外, 右边向里, 转动同时向磁铁靠近
- C. 左边向里, 右边向外, 转动同时与磁铁远离
- D. 圆环不会转动, 但向磁铁靠近

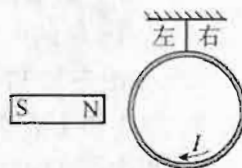


图 3-21

9. 如图 3-22 所示, 在第一象限内有垂直于纸面向里的匀强磁场, 一对正、负电子分别以完全相同的速度从原点射入磁场, 速度方向与 x 轴成 $\theta=30^\circ$ 角, 求正、负电子在磁场中运动时间之比。

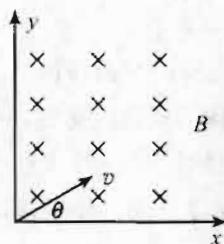


图 3-22

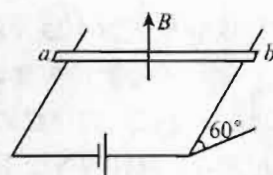


图 3-23

10. 如图 3-23 所示, 在与水平方向成 60° 角的光滑金属导轨间连一电源, 在相距 1 m 的平行导轨上放一重为 3 N 的金属棒 ab , 棒上通以 3 A 的电流, 磁场方向竖直向上, 这时棒恰好静止, 求:

- (1) 匀强磁场的磁感应强度;
- (2) ab 棒对导轨的压力。

11. 汤姆孙提出的测定带电粒子的比荷 ($\frac{q}{m}$) 的实验原理如图 3-24 所示。带电粒子经过电压为 U 的加速电场加速后, 垂直于磁场方向进入宽为 L 的有界匀强磁场, 带电粒子穿过磁场时发生的偏转位移是 d , 若磁场的磁感应强度为 B 。求带电粒子的比荷。

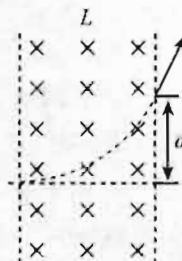


图 3-24

12. 在同一水平面内相距 2 m 的两导轨互相平行, 置于磁感应强度大小为 1.2 T, 方向竖直向上的匀强磁场中, 一质量为 3.6 kg 的铜棒垂直放在导轨上, 当棒中的电流为 5 A 时, 棒沿导轨做匀速直线运动。那么当棒中的电流为 8 A 时, 棒的加速度大小为多大?

B 组

- 1. 有一段通电直导线, 长为 0.01 m, 电流为 5 A, 把它放入磁场中某一位置, 受到的磁

场力为 0.1 N , 则该处的磁感应强度 B 的大小为 ()

- A. $B=1 \text{ T}$ B. $B=2 \text{ T}$
C. $B \geq 2 \text{ T}$ D. $B \leq 2 \text{ T}$

2. 如图 3-25 所示, 一个带负电的橡胶圆盘处在竖直面内, 可以绕过其圆心的水平轴高速旋转, 当它不动时, 放在它左侧轴线上的小磁针处于静止状态, 当橡胶圆盘从左向右看逆时针高速旋转时, 小磁针的 N 极 ()

- A. 不偏转
B. 向左偏转
C. 向右偏转
D. 向纸内偏转

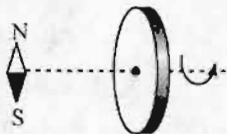


图 3-25

3. 如图 3-26 所示, 两个相同的轻质铝环能在一个光滑的绝缘圆柱体上自由移动, 设大小不同的电流按如图所示的方向通入两个铝环中, 则两个铝环的运动情况是 ()

- A. 都绕圆柱体转动
B. 彼此相向运动, 且具有大小相等的加速度
C. 彼此相向运动, 电流大的加速度大
D. 彼此背向运动, 电流大的加速度大



图 3-26

4. 如图 3-27 所示, 条形磁铁放在光滑斜面上, 用平行于斜面的轻弹簧拉住处于静止状态。a 为垂直纸面放置的直导线的横截面, 导线中无电流时, 磁铁对斜面的压力为 F_{N1} ; 当导线中有电流通过时, 弹簧的伸长量增大了, 此时磁铁对斜面的压力为 F_{N2} , 则 ()

- A. $F_{N1} < F_{N2}$, a 中电流方向向外
B. $F_{N1} = F_{N2}$, a 中电流方向向里
C. $F_{N1} > F_{N2}$, a 中电流方向向外
D. $F_{N1} < F_{N2}$, a 中电流方向向里

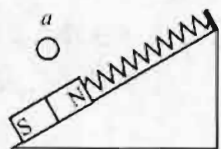


图 3-27

5. 如图 3-28 所示是磁流体泵的示意图。已知磁流体泵是高为 h 的矩形槽, 槽左右相对两侧壁是导电板, 它们之间的距离为 l 。两导电板加上电势差为 U 的电场, 垂直于纸面的前后两非导电板间加上磁感应强度为 B 的匀强磁场, 方向垂直纸面向里, 槽的下部与水银面接触, 上部与竖直的非导电管相连。已知水银的密度为 ρ , 电阻率为 r , 重力加速度为 g 。试问:

- (1) 水银能上升的条件;
(2) 在满足 (1) 问的条件下, 水银能上升的高度。

6. 如图 3-29 一劲度系数为 k 的轻质弹簧, 下端挂有一匝数为 n 的矩形线框 $abcd$, bc 边长为 l , 线框下边部分处于匀强磁场中, 磁感应强度大小为 B , 方向与线框平面垂直向里, 线框中通以如图方向的电流, 开始时线框处于平衡状态, 现令磁场反向, 磁感应强度大小仍为 B , 线框达到新的平衡。求此过程中线框位移的大小 Δx 和位移方向。

7. 如图 3-30 所示, 质量 $m=0.1 \text{ g}$ 的小球, 带有 $q=5 \times 10^{-4} \text{ C}$ 的正电荷, 套在一根与水平方向成 $\theta=37^\circ$ 角的绝缘杆上。小球可以沿杆滑动, 与杆间的动摩擦因数 $\mu=0.4$, 这个装置放在磁感应强度 $B=0.5 \text{ T}$ 的匀强磁场中, 求小球无初速释放后沿杆下滑的最大加速度和最大速度。

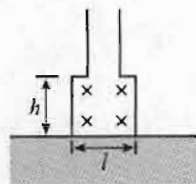


图 3-28

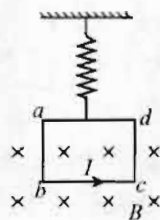


图 3-29

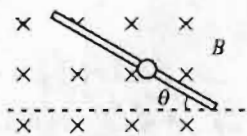


图 3-30

8. 如图 3-31 所示, 在 $B=0.1\text{ T}$ 的匀强磁场中画出边长为 $L=8\text{ cm}$ 的正方形 $EFGH$, 内有一点 P , 它与 EH 和 HG 的距离均为 1 cm 。在 P 点有一个发射正离子的装置, 能够连续不断地向纸面内的各个方向发射出速率不同的正离子, 离子的质量为 $1.0\times 10^{-14}\text{ kg}$, 电荷量为 $1.0\times 10^{-3}\text{ C}$, 离子的重力不计, 不考虑离子之间的相互作用。(计算结果保留根号)

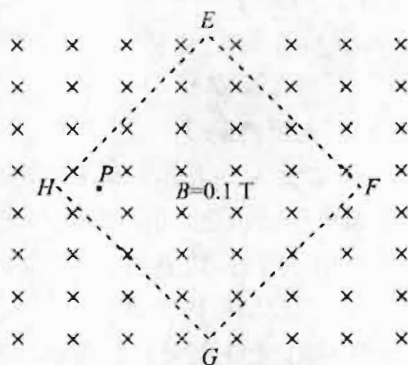


图 3-31

(1) 速率为 $5\times 10^5\text{ m/s}$ 的离子在磁场中运动的半径是多少厘米?

(2) 速率在什么范围内的离子不可能射出正方形区域?

(3) 速率为 $5\times 10^5\text{ m/s}$ 的离子在 GF 边上离 G 的距离多少厘米的范围内可以射出。

(4) 离子要从 GF 边上射出正方形区域, 速度至少应有多大?

参考答案

A 组

1. B 提示: 电荷定向移动形成电流, 当电子沿 y 轴正方向移动时, 相当于导线中通以沿 y 轴负方向的电流, 根据安培定则可知, 在 Oxy 平面内的 y 轴上方, 磁场方向是垂直于 Oxy 平面指向 x 轴的负方向, 故本题正确选项为 B。

2. C 提示: 设位置 I 的磁通量为 Φ_I , 位置 II 的磁通量为 Φ_{II} , 则 $\Delta\Phi_I = \Phi_{II} - \Phi_I$, $\Delta\Phi_2 = \Phi_{II} - (-\Phi_I) = \Phi_{II} + \Phi_I$ 。

3. 提示: (1) 环中磁通量增大, 因为环内磁感应强度增大; (2) 环内磁通量减小。因为磁感线是封闭的, 向上穿出螺旋管的磁感应线都要向下回到螺旋管内, 当环的半径增大时会把环外部分由上向下的感应线划进环中, 这样就部分抵消了环中原有的由下向上的磁通量, 所以磁通量减小。

4. 甲的说法正确。提示: 在磁场中保持静止的小磁针, 它的 N 极一定指向磁感线的方向, 这是普遍适用的。而“同名磁极相互排斥, 异名磁极相互吸引”只适用于两个磁体互为外部时磁极间的相互作用。

5. 提示: $B=0$ 的区域是 II、IV 象限。因为这两个象限内两个导线电流的磁场方向相反。

6. 提示: 棒 ab 受重力、安培力和摩擦力的作用而处于静止状态, 由平衡条件得到:

$$(1) F_t = F \sin \theta = BIL \sin \theta;$$

$$(2) F_N = mg - F \cos \theta = mg - BIL \cos \theta.$$

7. (1) 粒子运动轨迹如图 3-32 所示。(2) $\frac{4\pi m}{qB_1}$ 或 $\frac{2\pi m}{qB_2}$ 提示: 由图示轨迹可知, 粒子重新

回到O点前, 共在磁场 B_1 中转过两个半圈, 在磁场 B_2 中转过一个半圈, 所以一共经过的时间 $t = T_1 + \frac{T_2}{2} = \frac{2\pi m}{qB_1} + \frac{\pi m}{qB_2} = \frac{4\pi m}{qB_1}$, 或 $t = \frac{2\pi m}{qB_2}$ 。

8. A 提示: 铝圆环及其电流可以等效于一个小磁针, 该磁针的N极指向纸面内, S极指向纸面外, 所以环转动, 同时向磁铁靠近。

9. 2:1 提示: 正负电子在磁场中运动的半径相等, 但受到的洛伦兹力方向相反, 正电子在磁场中的轨迹所对圆心角为 120° , 负电子的轨迹所对圆心角为 60° , 所以运动时间之比为 2:1。

10. (1) $\sqrt{3}$ T; (2) 6 N 提示: 导体 ab 处于静止状态, 则其处于受力平衡状态, 所以沿斜面方向有: $mg\sin 60^\circ = F_A \cos 60^\circ$, 垂直于斜面方向有: $F_N = mg\cos 60^\circ + F_A \sin 60^\circ$, 式中 $F_A = BIL$, 由以上三式可得 $B = \sqrt{3}$ T, $F_N = 6$ N。

11. $\frac{8Ud^2}{B^2(d^2+L^2)^2}$ 提示: 根据粒子运动轨迹确定其圆心, 根据几何关系得到粒子做圆周运动的半径 $R = \frac{d^2+L^2}{2d}$, 由粒子做圆周运动规律可知: $R = \frac{mv}{qB}$, 又有 $qU = \frac{1}{2}mv^2$, 由以上各式可得 $\frac{q}{m} = \frac{8Ud^2}{B^2(d^2+L^2)^2}$ 。

12. 2 m/s^2 提示: 当棒中电流为 5 A 时, 棒处于平衡状态, $F_1 = F = BIL = 1.2 \times 5 \times 2 \text{ N} = 12 \text{ N}$ 。当棒中电流为 8 A 时, 根据牛顿第二定律: $BI'L - F_1 = ma$, 即 $a = 2 \text{ m/s}^2$ 。

B 组

1. C 提示: 由安培力 $F = BIL\sin\theta$, 由于 $\sin\theta = \frac{F}{BIL} \leq 1$, $B \geq \frac{F}{IL} = 2 \text{ T}$, 所以该处的磁感应强度 $B \geq 2 \text{ T}$, 正确选项为 C。

2. 当橡胶圆盘转动起来后, 形成了环形电流 (由于圆盘带负电, 电流方向与转动方向相反), 在其周围产生磁场, 由安培定则可判定小磁针所在位置处的磁场方向为沿轴线向右, 故小磁针的N极将向右偏转。

3. B 提示: 两个通有电流的铝环可等效看做两个磁体, a 环的右侧为磁体的N极, b 环的左侧为磁体的S极, 所以两环互相吸引, 相向运动; 由牛顿第三定律可知, a 对 b 环的作用力与 b 对 a 环的作用力必是等大反向, 故两环具有大小相等的加速度。所以本题正确选项为 B。

4. D 提示: 导线中有电流通过时弹簧的伸长量增大, 这说明通电导线对磁铁的作用力有沿斜面向下的分力, 由于导线离N极较近, 所以可以肯定电流对N极的作用力有沿着斜面向下的分力 (电流对S极的作用力有沿着斜面向上的分力), 所以电流周围的磁感线是顺时针方向 (可以判定导线中的电流方向向里), 所以通电导线对磁铁N极的作用力方向为斜向左下方, 故磁体对斜面的压力将增大。本题正确选项为 D。

5. (1) $BU > \rho rgl$; $\frac{BUh}{\rho rgl}$ 提示: 设矩形槽前后两壁之间的距离为 d , 在水银面上取一高为 x (x 很小) 的水银柱作为研究对象, 则水银柱所受重力 $G = mg = \rho lxdg$ 。

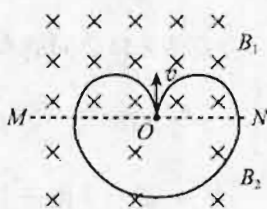


图 3-32



左右两侧壁之间的水银柱电阻 $R=r\frac{l}{xd}$, 故电流 $I=\frac{U}{R}=\frac{Uxd}{rl}$, 所以水银柱受到的安培力大小为 $F=BIl=B\frac{Uxd}{rl}l=\frac{BUxd}{r}$ 。当 $F>G$, 即 $\frac{BUxd}{r}>\rho lxdg$, $BU>\rho rgl$ 时, 水银能上升。

(2) $\frac{BUh}{\rho rgl}$ 提示: 由于水银柱上升的条件与 x 无关, 所以水银柱最终稳定时必定充满整个矩形槽且有一部分进入非导电管。设水银上升的高度为 H , 则整个水银柱在底部产生的压强为 $p=\rho gH$, 水银柱所受安培力 $F=BIl=B\frac{Uhd}{rl}l=\frac{BUhd}{r}$, 它产生的压强为 $p'=\frac{F}{S}=\frac{F}{ld}=\frac{BUh}{rl}$, 当 $p=p'$ 时, 水银柱稳定, 所以有 $H=\frac{BUh}{\rho rgl}$ 。

6. $\frac{2nBIl}{k}$ 提示: 设第一次弹簧伸长量为 x_1 , 第二次为 x_2 , 则 $kx_1+nBIl=mg$; $kx_2-nBIl=mg$ 。

由此可得 $\Delta x=x_2-x_1=\frac{2nBIl}{k}$, 方向向下。

7. 6 m/s^2 , 9.2 m/s 提示: 小球可以从静止开始沿杆下滑, 由左手定则判断得小球所受的洛伦兹力方向垂直于杆向上, 随着下滑速度的增大, 洛伦兹力也增大, 杆给球的弹力先由垂直于杆向上逐渐减小为 0, 再由垂直杆向下逐渐增大, 小球开始阶段的受力情况如图 3-33 所示, 由牛顿第二定律得:

$$mg\sin\theta-F_t=ma, F_t=\mu F_N$$

$$\text{而 } qvB+F_N-mg\cos\theta=0$$

当 $F_t=0$ 时, 即 $v=\frac{mg}{qB}\cos\theta$ 时, 小球的加速度最大, 此时

$$a_m=g\sin\theta=10\times\frac{3}{5}\text{ m/s}^2=6\text{ m/s}^2$$

而当 $a=0$, 即 $mg\sin\theta=\mu F_N=\mu(qvB-mg\cos\theta)$ 时, 小球的速度最大, 此时

$$v_m=\frac{mg\sin\theta+\mu mg\cos\theta}{\mu qB}=9.2\text{ m/s}$$

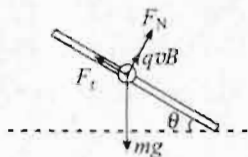


图 3-33

8. (1) $r_1=\frac{mv_1}{qB}$, $r_1=5\text{ cm}$; (2) 不能。提示: 运动直径小于 1 cm 的粒子不能射出正方形, 即速率小于 $5\times 10^5\text{ m/s}$ 的离子不能射出正方形区域; (3) 提示: 这种粒子的半径是 5 cm , 它首先要不射出 HG 边才有可能射出 GF 边, 所以运动轨迹恰与 HG 相切是一个临界条件; 另一个临界条件是恰与 GF 边相切, 所以离 G 的距离 x 范围为 $2\leq x\leq (1+\sqrt{21})\text{ cm}$ 的范围内这种离子可以射出 GF 边; (4) 至少 $(8-\sqrt{14})\times 10^6\text{ m/s}$ 提示: 运动轨迹既与 HG 相切又与 GF 相切是所有射出 GF 的轨迹中半径最小的, 该轨迹对应的速率为 $(8-\sqrt{14})\times 10^6\text{ m/s}$, 所以速率至少为 $(8-\sqrt{14})\times 10^6\text{ m/s}$ 的离子才能够射出 GF 边。