

普通高中

WULI

物理

教学参考资料

必修

第三册

上海科学技术出版社

普通高中

物 理
教学参考资料

必修 第三册

上海科学技术出版社

主 编：蒋最敏 高 景

本册主编：严 明

编写人员：（以姓氏笔画为序）

王肇铭 严 明 李沐东 陈琪琪 赖佳颖

图书在版编目（C I P）数据

普通高中物理教学参考资料：必修. 第三册 / 上海市中小学（幼儿园）课程改革委员会组织编写；蒋最敏，高景主编。-- 上海：上海科学技术出版社，2022.8（2025.8重印）

ISBN 978-7-5478-5685-7

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第093654号

责任编辑：葛碧临 施 成

封面设计：房惠平

普通高中 物理教学参考资料 必修 第三册

上海市中小学(幼儿园)课程改革委员会组织编写

出 版 上海世纪出版(集团)有限公司 上海科学技术出版社

（上海市闵行区号景路 159 弄 A 座 9F~10F 邮政编码 201101）

发 行 上海新华书店

印 刷 上海新华印刷有限公司

版 次 2022 年 8 月第 1 版

印 次 2025 年 8 月第 4 次

开 本 890 毫米×1240 毫米 1/16

印 张 14

字 数 380 千字

书 号 ISBN 978-7-5478-5685-7/G·1110

定 价 42.00 元

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

编写说明

本书是《普通高中教科书 物理 必修 第三册》的配套教师用书,主要阐释教材编写意图,阐明相关物理概念和知识,并提供相应的资料作为知识背景,旨在帮助教师更深入地理解相关教学内容。

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

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

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

本章练习部分解读 与《普通高中教科书 物理练习部分 必修 第三册》同步,设置了“参考解答”和“习题主要素养与水平分析”。

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

应该指出,给出习题体现的“主要素养与水平”的做法是一种尝试,其目的在于引发广大教师在教学

实践中对新课标、新教材和新课程所倡导的学科核心素养及其水平划分、学业质量及其水平划分进行深入的思考。教师对水平划分的描述一定会有“见仁见智”的理解。同时，教学过程如何开展、具体内容的教学怎样进行，需要教师根据学情和自身的教学特点做出考虑和安排，这是教师创造性、个性化的工作，应该予以充分的尊重。相应地，书中并未给出具体的教学指导。

对于书中存在的不足之处，我们欢迎广大教师和物理工作者提出宝贵的意见和建议。

目录

第九章 静电场	1
第一部分 整章分析	1
第二部分 本章教材解读	3
第一节 静电现象 电荷	4
第二节 电荷的相互作用 库仑定律	12
第三节 电场力 电场强度	19
第四节 电势能 电势	27
第五节 带电粒子在电场中的运动	35
第六节 电容 电容器	43
第七节 静电的利用与防范	53
第三部分 本章练习部分解读	63
第四部分 本章实验与活动部分解读	72
第十章 电路及其应用	74
第一部分 整章分析	74
第二部分 本章教材解读	76
第一节 简单串联、并联组合电路	77
第二节 电阻定律	84
第三节 测量金属丝的电阻率	91
第四节 多用电表	101
第五节 闭合电路欧姆定律、电源电动势及内阻	108
第六节 电源电动势和内阻的测量	115
第七节 电功、电功率及焦耳定律	120

第八节	家庭电路	127
第三部分	本章练习部分解读	138
第四部分	本章实验与活动部分解读	145

第十一章 电磁场与电磁波初步 147

第一部分	整章分析	147
第二部分	本章教材解读	149
第一节	磁现象 磁感线	150
第二节	电流的磁场 磁感应强度	156
第三节	磁通量 电磁感应现象	165
第四节	电磁场与电磁波	172
第三部分	本章练习部分解读	183
第四部分	本章实验与活动部分解读	187

第十二章 能源与可持续发展 188

第一部分	整章分析	188
第二部分	本章教材解读	189
第一节	能源及其应用	190
第二节	能量的转化	198
第三节	能源与环境	203
第三部分	本章练习部分解读	213

第九章 静电场

第一部分 整 章 分 析

学习目标

1. 了解静电现象,会用原子结构模型解释摩擦起电和静电感应现象。知道不同起电方式和电荷守恒定律,体会守恒观念对认识物理规律的重要性。
2. 知道点电荷模型。知道电荷间相互作用的规律,体会发现库仑定律过程中的科学思想和方法。
3. 知道电场是电荷周围空间存在的一种物质。能利用电场线描述电场。
4. 了解电场强度、电势能、电势、电势差、电容等物理量的概念和定义的建立,进一步感受运用类比、比值定义新物理量的方法。
5. 知道匀强电场中电势差与电场强度的关系。能分析带电粒子在电场中的运动情况,解释相关现象。
6. 了解电容器的充、放电现象,能够举例说明电容器的应用。
7. 了解生产生活中关于静电的利用与防范。

编写意图

课程标准中对本章的“内容要求”为:

- 3.1.1 通过实验,了解静电现象。能用原子结构模型和电荷守恒的知识分析静电现象。
- 3.1.2 知道点电荷模型。知道两个点电荷间相互作用的规律。体会探究库仑定律过程中的科学思想和方法。
- 3.1.3 知道电场是一种物质。了解电场强度,体会用物理量之比定义新物理量的方法。会用电场线描述电场。
- 3.1.4 了解生产生活中关于静电的利用与防护。
- 3.1.5 知道静电场中的电荷具有电势能。了解电势能、电势和电势差的含义。知道匀强电场中电势差与电场强度的关系。能分析带电粒子在电场中的运动情况,能解释相关的物理现象。
- 3.1.6 观察常见电容器,了解电容器的电容,观察电容器的充、放电现象。能举例说明电容器的应用。

本章的内容是学习电磁学其他知识的重要基础。静电场知识在生产生活中有广泛的应用。教材中提及的基于生活和已有知识形成的大量经验情景,可强化物理学与生活、社会的联系。重视情境的创设以及概念和规律的形成过程有助于提升科学态度和责任素养。本章涉及模型建构、类比的科学方法,微小量放大、用比值定义物理量的物理方法,能够培养学生的科学思维和综合分析问题的能力。

本章静电场是后续电路及其应用、电磁场与电磁波初步两章的基础。在本章的学习过程中，有助于学生进一步提升物质观念、运动与相互作用观念和能量观念。培养学生进一步利用构建物理模型的科学思维来解释生产、生活中的现象，养成基于事实证据进行科学推理的良好习惯。

完成本章内容的学习共需要 12 课时。其中，第一节 1 课时，第二节 2 课时，第三节 2 课时，第四节 2 课时，第五节 2 课时，第六节 2 课时，第七节 1 课时。

第二部分 本章教材解读



图示为经头发反复摩擦后的塑料梳子靠近细水流，使竖直下落的细水流发生偏转。我国东汉王充《论衡》书中就有“顿牟掇芥”的记载，就是玳瑁摩擦后能吸引轻小物体的静电现象。摩擦后的梳子为何能使细水流偏转？

第九章 静 电 场

- 在本章中我们将：
 1. 了解静电现象，知道两个电荷间相互作用的规律。知道电场是一种物质。
 2. 体会探究库仑定律过程中的科学思想。体会运用类比、比值等方法定义物理量。
 3. 了解生产生活中关于静电的利用与防护，了解电容器的作用。
- 本章的学习涉及电场强度、电场力等概念，会从多视角描述电场的特性，解释相关的静电现象。
- 本章的学习有助于提升物质、相互作用和能量的观念。

人类很早就观察到自然界中存在着雷电等静电现象，并进行了记载。人类不但观察了雷电等自然现象，还发现被摩擦之后的琥珀可以吸引轻小物体。我们在日常生活中也能观察到塑料袋与手之间的吸引、摩擦后的梳子能使细水流偏转等静电现象。静电现象是由电荷间彼此相互作用的静电力产生的。对于静电场的研究需要了解电荷间相互作用的性质以及遵循的规律，并用合适的数学手段做出定量的描述。

本节编写思路

本节通过一系列自然界中的现象和日常生活中的示例讨论、分析和了解静电现象，具体为：

1. 通过对摩擦起电、接触起电和感应起电等实验的观察，了解静电现象的本质。基于上述实验事实，用原子结构模型和电荷守恒定律的知识构建物理模型解释静电现象。

2. 通过摩擦起电与起电机起电的实验演示，引导学生思考带电体所带电荷量有大小。通过电荷量的国际单位和元电荷知识的学习，了解任何带电体所带电荷都是不连续的，是量子化的。

经历检验物体是否带电的自主活动，有助于学生明确如何描述物体所带电荷量的多少，培养学生基于事实证据进行科学推理的核心素养。

[1]



图 9-1 摩擦后的气球可使猫毛竖起

第一节 静电现象 电荷

在生活中静电现象是十分常见的。比如章导图所示的摩擦过的梳子可以吸引细小水流；摩擦后的气球可使猫毛竖起（图 9-1）；冬天脱毛衣的时候常会听到“噼噼啪啪”的声音，黑暗中还能看见毛衣“冒火星”；有时候用钥匙去开门或触摸金属门把手的时候会突然感觉被刺了一下；自然界中的闪电等都是静电现象。

[2]

大家谈

日常生活中你还经历过哪些静电现象？

我们已经知道，电荷分为两种：正电荷和负电荷。电荷间存在相互作用：同号电荷间相互排斥，异号电荷间相互吸引。

静电是如何产生的？

静电可通过物体间的摩擦、接触、感应等方法来产生。

1. 摩擦起电

物体是由分子、原子组合而成，而原子的基本结构为原子核和核外的电子，原子核由

正文解读

[1] 静电现象在日常活动中十分普遍，也是学生所熟悉的生活场景，但我们较难直接用眼睛观察静电。节首图显示经头发摩擦后的气球可使猫毛竖起，说明气球带有电荷，对轻小物体有吸引力。

本节“问题与思考”第 1 题中轻质材料木髓球与此呼应。

[2] 此处设置“大家谈”，是为了让学生在初中电学知识的基础上回顾和复习与静电相关的概念。要注意静电现象与恒定电流的区别。生活中常见的静电现象还有：打开保鲜袋或垃圾袋时，轻质塑料袋吸附在手上；给手机贴膜时，屏幕上容易吸附灰尘粒；触摸宠物的皮毛有时会受到微量的“电击”；轻薄的衣物被吸附到身体上等。

[1] 质子和中子组成。科学家们发现质子带的电荷为正电荷, 中子不带电, 而电子带负电荷。在正常状况下, 一个原子的核内质子与核外电子正、负电荷彼此平衡, 物体对外表现不出带电性。但是, 如果物体受到摩擦的作用, 就会使原子中的电子发生转移而使自身的正负电荷不平衡, 从而使物体呈现带电性。两个物体发生摩擦时, 得到电子的物体带负电, 失去电子的物体带正电。在日常生活中所说的摩擦起电实质上就是两种物体间相互摩擦而使电子转移的过程。如图9-2所示, 当橡胶棒和毛皮在一起互相摩擦时, 毛皮上的电子转移到橡胶棒上, 橡胶棒得到电子导致带负电荷, 毛皮失去电子导致带正电荷。

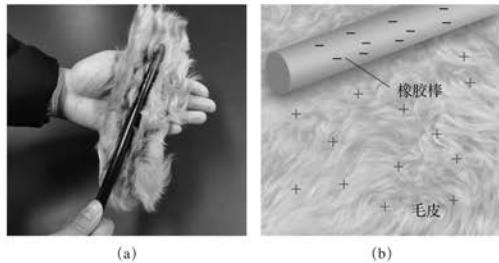


图9-2 摩擦起电

2. 接触起电

接触起电是指带电体和不带电的物体相接触而使后者带电的现象。例如, 用毛皮摩擦过的橡胶棒与验电器接触, 使验电器带电, 这就是接触起电的例子。

3. 感应起电

[2] 如图9-3所示, 一对用绝缘柱支撑的不带电的导体A和B彼此接触, A、B下方均连有两片闭合的金属箔。观察下列几种情况下金属箔的变化情况。①把带正电荷的物体C移近导体A; ②把A和B分开, 然后移去C; ③再让A和B接触。

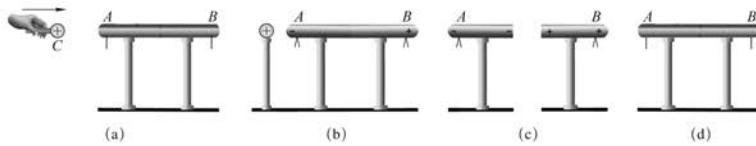


图9-3 静电感应现象

我们可观察到带电体C移近导体A时, A、B下方的金属箔张开; 把A和B分开, 然后移去C时, 可观察到A、B下方的金属箔仍然继续张开; 再让A和B接触时, 可观察到A、B下方的金属箔立即闭合。这说明带电体C移近导体A时, 导体A和B带上了异号电荷。

正、负离子, 不过气体中的负电荷还可以是电子。

[2] 与导体不同, 一些物体中的电荷不能自由移动, 在电场力作用下仅能稍微改变其位置, 这些物体叫做绝缘体。由于绝缘体中自由电子很少, 它们的导电性能很差, 也就不会发生感应起电。

此外, 还有一些物体叫半导体, 导电本领介于导体和绝缘体之间。在半导体中导电的粒子(叫做载流子)除带负电的电子外, 还有带正电的“空穴”。当其中多数载流子是电子时, 称为N型半导体; 当其中多数载流子是“空穴”时, 称为P型半导体。将N型和P型半导体结合起来, 可以制成晶体二极管、三极管等各种半导体元器件。这些半导体元器件在电路中有着广泛的应用。

[1] 对组成金属材料的原子而言, 其外层价电子可以摆脱原子核的束缚而在金属导体中运动, 这类电子叫做自由电子。除价电子(自由电子)以外原子的内层电子和原子核组成原子实。在固态金属中原子实排列成整齐的点阵, 称为晶格或晶体点阵。自由电子在晶体点阵间像气体的分子那样做无规则运动, 并不时地彼此碰撞或与点阵上的原子实碰撞。内部存在可以自由移动的电荷的物体叫做导体, 其中可以自由移动的电荷叫做自由电荷。金属导体中的自由电荷就是自由电子。

并非只有金属才是导体。在不同类型的导体中, 自由电荷的微观载体是不一样的。例如, 在导电的电解液中, 自由电荷不是电子而是溶液中溶质分子离解成的正、负离子; 在电离的气体中, 自由电荷也是

[1] “守恒”思想是物理学研究中非常重要的思想。电荷守恒定律不仅在一切宏观过程中成立，它也是一切微观过程所普遍遵守的。例如，高能光子（能量大于 1.022 MeV 的 γ 射线）和原子核相碰时，会产生一对正、负电子；反之，一对正、负电子相遇转化为一对 γ 光子。光子不带电，正、负电子所带的电荷等量异号，故此过程中尽管发生带电粒子的产生或湮灭，但电荷的代数和不变。

[2] 知道元电荷的概念，体会电荷量是不连续的，从而认识电荷的量子化。

[3] 电流的单位安培(A)，其原本的定义为真空中相距 1 m 的两根无限长且横截面积可忽略的平行直导线内通过一恒定电流，两导线每米长度之间的相互作用力等于 $2 \times 10^{-7}\text{ N}$

时，导线中通过的电流为 1 A 。这个单位是在1946年国际计量委员会上得到批准，1960年第十一届国际计量大会上被正式采用为国际单位制的基本单位之一。

这样的定义给实验室中的精确测量造成了困难。2018年11月16日国际计量大会通过决议，使用元电荷 e 对 1 A 进行了重新定义。元电荷 e 是物理学的基本常量之一， 1 A 定义为“ 1 s 内通过导体某一横截

面 $\frac{1}{1.602\,176\,634 \times 10^{-19}}$ 个元电荷所产生的电流”。

大量实验发现，若将一个带电体靠近一个不带电的导体，该导体在靠近带电体的一端聚集了与带电体相反的电荷，而远离带电体的一端聚集了与带电体相同的电荷。这种现象叫做静电感应（electrostatic induction）。通过静电感应使金属导体带电的过程叫做感应起电。

摩擦起电、接触起电、感应起电从本质上都源于物质的原子中的电子在不同物体间或者同一物体的不同部分间发生了转移，它们之间电荷的总量并没有发生变化。

[1] 物理学中往往把研究的物体或物体的集合作为一个系统。对于一个孤立系统，不论发生什么样的物理过程，系统内电荷总量保持不变。电荷可以从一个物体转移到其他物体，或者从物体的一部分转移到其他部分，但在转移过程中电荷的总量保持不变。这就是电荷守恒定律（law of conservation of charge），它是物理学的一条基本定律。现代物理研究表明，在粒子的相互作用过程中，电荷是可以产生和消失的，然而电荷守恒定律依然成立。例如，在正、负电子对的产生与湮灭过程中，正、负电荷总量始终为零。

为了观察静电现象，人们设计了许多专门产生静电的设备，如图9-4所示就是两种常用的起电机。

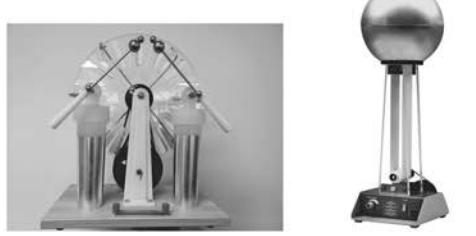


图9-4 两种常用的起电机

如何描述物体所带电荷的多少？

不同带电体带电的多少往往是不同的。物体所带电荷的多少叫做电荷量（amount of electric charge），用符号 Q 或 q 表示。电荷量是标量，我们通常取正电荷的电荷量为正值，取负电荷的电荷量为负值。电荷量的国际单位是库仑，简称库；符号为C。库仑是一个相当大的电荷量单位，因此通常还用微库作为电荷量单位，符号为 μC 。库仑和微库的换算关系是

$$1\,\mu\text{C} = 10^{-6}\text{ C}$$

- [2] 物体所带电荷的电荷量不是任意的，而是某个最小电荷量的整数倍。人们把最小电荷量叫做元电荷（elementary charge），用符号 e 来表示，通常 e 取 $1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$ 。任何带电体所带电荷都是 e 的整数倍。实验表明，单个质子携带的电荷量为 e ，单个电子携带的电荷量则为 $-e$ 。

[1]

拓展视野

美国科学家密立根 (R. A. Millikan, 1868—1953) 在 1907—1913 年间首次测定了元电荷的电荷量，为此获得了 1923 年的诺贝尔物理学奖。他设计的实验装置如图 9-5 所示，实验中用一个喷雾器向一个透明的圆柱形容器里喷入带电油滴；容器中的 A、B 板分别连接电源的两极，使 A 板为正极板、B 板为负极板；带负电的油滴在 A、B 之间受重力、电场力和空气阻力的作用而运动，可以通过改变极板间的电压来控制油滴的运动。当油滴所受的重力与极板间电场的作用力平衡时，油滴可静止悬浮于电场中。为测得电荷量，还需测得油滴质量。两极板间不加电压，油滴受重力作用而加速下降。由于空气阻力的作用，下降一段距离达到某一速度后，油滴所受的重力与阻力平衡，油滴将匀速下降，通过计算得到油滴的质量。经过反复实验，得出结论：油滴的电荷量是某个最小固定值的整数倍，这个最小固定值就是单个电子的电荷量的绝对值。

现在得到的元电荷的精确值在 2019 年更正为： $e = 1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，一般情况下可取值 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

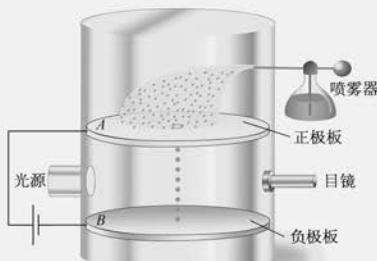


图 9-5 密立根油滴实验

[1] 此处设置“拓展视野”，不仅仅是介绍物理学史，更重要的是通过这个实验使学生形成科学思维的能力，体会科学推理和科学论证的魅力，同时掌握一种发现物理规律的方法。

密立根油滴实验在近代物理学发展中具有重要的地位。该实验直接证明了电荷是不连续的，是量子化的，并确定了元电荷的电荷量的量值，可帮助学生理解元电荷的含义。

密立根油滴实验不在正文中介绍是因为课程标准对此没有要求。本节的“问题与思考”第 5 题与此呼应。

[2] 这是一个实验型自主活动，活动可采用小组协作的方式进行。根据学校实际实验器材的配备情况，可提供不同器材供学生选择使用。也可分组实验，一部分学生使用验电器，另一部分学生使用

[2]

自主活动

实验器材包括验电器（图 9-6）、数字式静电计（图 9-7）、玻璃棒、橡胶棒、丝绸、毛皮。

使用验电器或数字式静电计观察、测量摩擦后物体的带电情况。

使用验电器时，将带电体接触验电器的金属球，根据下方金属箔张角的变化可定性显示金属球所带的电荷量的多少。

使用数字式静电计时，按下数字式静电计的调零按钮将电荷量的显示归零。将物体接触数字式静电计的金属球，数字式静电计的屏幕定量显示金属球所带的电荷量。

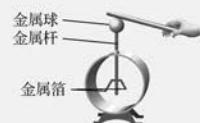


图 9-6 用验电器检测物体是否带电



图 9-7 用数字式静电计检测物体所带的电荷量

数字式静电计进行实验。实验中，教师应注意引导学生思考和讨论实验中的问题，如验电器与数字式静电计的区别等。

通过数字式静电计液晶显示屏即可以观察到物体所带电性的正、负以及电荷量的多少。使用数字式静电计时要注意以下两点：一是测量前先按下调零按钮，将电荷量的显示归零；二是不超过所用数字式静电计的量程（ -100 nC 到 $+100 \text{ nC}$ ）。

在实验过程中，数字式静电计屏幕显示的示数可能较小。可将摩擦后的带电体前后移动，增加静电计顶端的金属球所带的电荷量，使得实验现象更明显。

介绍数字式静电计的目的是使学生体验看不见的电荷量不但能被检测到，而且可被定量测量。

问题与思考解读

1. 参考解答：可

将带正电的带电体(如用丝绸摩擦过的玻璃棒)靠近木髓球,如相互排斥则木髓球带正电荷,如相互吸引则木髓球可能带负电荷或不带电;再将带负电的带电体(如用毛皮摩擦过的橡胶棒)靠近木髓球,如相互排斥说明木髓球带负电荷,如相互吸引说明木髓球不带电。

命题意图：基于电荷之间相互作用的实验事实,了解静电现象。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ);解释(Ⅰ)。

2. 参考解答: $Q =$

$$Ne; N = \frac{Q}{e} = \frac{32 \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 2 \times 10^{20} \text{ 个}$$

命题意图：构建模型,解释现象。

主要素养与水平：物质观念(Ⅱ);模型建构(Ⅱ)。

3. 参考解答: 飞机

高速飞行使机身带静电的主要原因是摩擦起电;飞机靠近带电云的一侧由于感应起电而带上和云层相反的电荷。

命题意图：根据静电产生的方法,判断生活实例中的静电起因。

主要素养与水平：物质观念(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

4. 参考解答：球体 D 接触球体 A 分离后所带的电荷量: $Q_D = \frac{0 + Q_A}{2} = \frac{0 + (+16Q)}{2} = +8Q$

球体 D 接触球体 B 分离后所带的电荷量: $Q_{D1} = \frac{Q_D + Q_B}{2} = \frac{(+8Q) + (-32Q)}{2} = -12Q$

球体 D 接触球体 C 分离后所带的电荷量: $Q_{D2} = \frac{Q_{D1} + Q_C}{2} = \frac{(-12Q) + (+48Q)}{2} = +18Q$

问题与思考

- 木髓球是一种由轻质材料制成、外部涂一层石墨或铝的轻质小球。现有一个悬挂在绝缘线上的木髓球,如何判断木髓球是带正电荷、带负电荷还是不带电?
- 某次雷雨时一次闪电从云层向地面输送了 32 C 的负电荷,在这个过程中有多少个电子到达地面?
- 高速飞行的飞机机身会带上静电;当飞机靠近带电的云层时,飞机靠近云的一侧会带上与之相反的电荷。试分析上述两种情况下机身带电的主要原因。
- 四个完全相同、相互间隔较远的导体球, A 球所带电荷量为 $+16Q$, B 球所带电荷量为 $-32Q$, C 球所带电荷量为 $+48Q$, D 球不带电荷。首先,将 D 球接触 A 球后分开;然后,将 D 球接触 B 球后分开;最后,将 D 球接触 C 球后分开。问: D 球上最终的电荷量是多少?
- 密立根通过实验测得了元电荷的电荷量为 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。实际测量时测得的部分油滴电荷量的数据如表 9-1 所示,通过对这些实验数据作分析,给出结论。

表 9-1

序号	电荷量	序号	电荷量	序号	电荷量
1	$6.563 \times 10^{-19} \text{ C}$	4	$13.13 \times 10^{-19} \text{ C}$	7	$19.71 \times 10^{-19} \text{ C}$
2	$8.204 \times 10^{-19} \text{ C}$	5	$16.48 \times 10^{-19} \text{ C}$	8	$22.89 \times 10^{-19} \text{ C}$
3	$11.50 \times 10^{-19} \text{ C}$	6	$18.08 \times 10^{-19} \text{ C}$	9	$26.13 \times 10^{-19} \text{ C}$

可得球体 D 上最终的电荷量是 $+18Q$

命题意图：运用电荷守恒原理进行科学推理。

主要素养与水平：科学论证(Ⅱ)。

5. 参考解答：由 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 左右均可认为正确。可分级评分以体现科学思维水平越高其得分越高。水平1：带电油滴的电荷量不连续，都是元电荷的整数倍，是量子化的；水平2：油滴的电荷量是某个最小固定值的整数倍，通过对实验数据的初步分析得到此固定值，即为元电荷的大致数值，如 $(8.204 - 6.563) \times 10^{-19} \text{ C} = 1.641 \times 10^{-19} \text{ C}$ 或 $(13.13 - 11.50) \times 10^{-19} \text{ C} = 1.63 \times 10^{-19} \text{ C}$ 等结果；水平3：用实验测得的电荷量 q 除以公认的元电荷值 e ，得到一个接近于某一个整数的数值，即为油滴所带的元电荷的数目 n 。再绘制电荷量 q 与元电荷数目 n 的关系图如图1所示，由图像斜率可得： $e = 1.6326 \times 10^{-19} \text{ C}$

命题意图：加强电荷量量子化的概念，运用数学方法解决物理问题。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)；解释(Ⅲ)。

资料链接

密立根油滴实验

用喷雾器从间距为 d 的两平行极板的正极板上方喷入油滴。油液被喷射撕裂成油滴时一般都是带电的。设油滴的质量为 m ，所带电荷量为 q ，两极板间的电压为 U ，如图2所示。设极板间为匀强电场，则油滴静止在电场中时，由平衡条件可得

$$mg = qE = q \frac{U}{d} \quad ①$$

为测得电荷量 q ，需要测出油滴质量 m 。因 m 很小，需用如下方法测定：平行极板不加电压时，油滴受重力作用而加速下降；由于空气阻力的作用，下降一段距离达到某一速度后阻力与重力 mg 平衡，如图3所示（空气浮力忽略不计），油滴将匀速下降。

由平衡条件

$$mg = f_r \quad ②$$

其中 f_r 为空气阻力。

根据斯托克斯定律有

$$f_r = 6\pi a \eta v_g \quad ③$$

其中 η 是空气的黏滞系数， a 是油滴的半径（油滴近似为球形）， v_g 为油滴下降的速率。

由于油滴非常小，空气已不能看成连续媒质，应修正空气的黏滞系数，修正公式为

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pa}} \quad ④$$

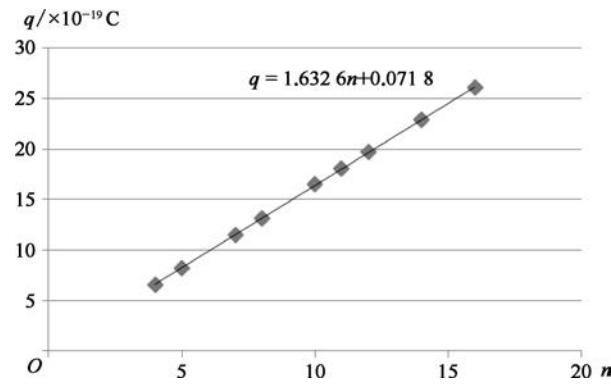


图 1

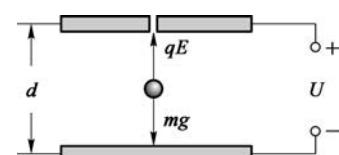


图 2

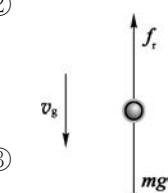


图 3

其中 b 为修正常数, p 为空气压强, a 为油滴半径。

根据④式, 斯托克斯定律公式修正为

$$f_r = \frac{6\pi a \eta v_g}{1 + \frac{b}{pa}} \quad (5)$$

油滴近似为球形, 则体积

$$V = \frac{4}{3}\pi a^3 \quad (6)$$

$$m = \rho V = \frac{4}{3}\pi \rho a^3 \quad (7)$$

根据②、③、④、⑦式, 可得

$$a = \left(\frac{9\eta' v_g}{2\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中, v_g 可以通过

$$v_g = \frac{l}{t} \quad (9)$$

测得, 其中 l 为油滴匀速运动的路程, t 为匀速运动的时间。

$$\text{由此得 } m = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g^3}} \left(\eta' \frac{l}{t} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

由①、④和⑩式得

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left(\frac{\eta l}{\left(1 + \frac{b}{pa} \right) t} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{d}{U} \quad (11)$$

重复对许多油滴进行实验之后, 发现油滴电荷量的值皆为某个最小固定值的整倍数, 因此认定此最小电荷量的数值为元电荷 e 。也可以测得同一油滴所带电荷的改变量 Δq (可以用紫外线或放射源照射油滴, 使它所带电荷量改变), 这时 Δq 应近似为某一最小单位的整数倍, 此最小单位即为元电荷 e 。

感应起电机原理

利用静电感应原理制成的感应起电机是静电实验中连续产生静电荷及高电压的常用仪器。图 4 是起电机的外形, A_1 、 A_2 是两个绝缘盘, 盘边缘均匀地粘有径向锡箔条。

B_1 、 B_2 是两个两端带有金属刷子(电刷)的金属杆, 互相垂直并分别居于绝缘盘的两侧。摇动摇柄可使两盘反向转动。

图 5 是起电机原理示意图。大小两圆代表圆盘 A_1 和 A_2 (两圆盘实际是一样大的, 这里为了便于区别而画成半径不同的圆), 1、2、3、4 代表四个电刷, 由于大气中存在各种射线以及其他引起空气电离的因素, 空气中经常存在微量电荷。假设 A_2 盘的锡箔偶然获得正电荷, 则如图 5(a)所示: 把 A_1 盘上与箔 a 相对的箔 b 、金属杆 B_1 及箔 b' 看成一个导体, 由于静电感应, b 带负电而 b' 带正电。若接着将 A_1 盘顺时针转动而 A_2 盘保持不

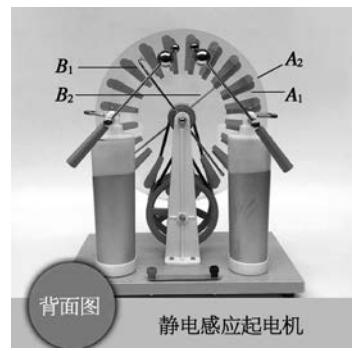


图 4

动，则 A_1 盘上每对锡箔在与电刷 1、2 接触时都带上等量异号电荷，转动半周后情况如图 5(b)所示〔值得注意的是 A_2 盘与电刷 3、4 接触的一对锡箔 c 和 c' 也因感应而带异号电荷，且因 A_1 盘上正对 3、4 的一对锡箔 d 和 d' 都有施感电荷，故 c 和 c' 的感应电荷量比在图 5(a)中的 b, b' 的感应电荷量要大〕。再保持 A_1 盘不动而 A_2 盘逆时针转半周，情况应如图 5(c)所示。由图 5(c)可见，两盘电荷在一、三象限异号而二、四象限同号。若在二、四象限放置集电极(一排针尖) D_1 及 D_2 ，如图 5(d)所示，利用尖端放电原理(与静电加速器相同)，就可以把正、负电荷不断收集至小球 S_1 和 S_2 上，使两球间可有高达几万伏的电位差。

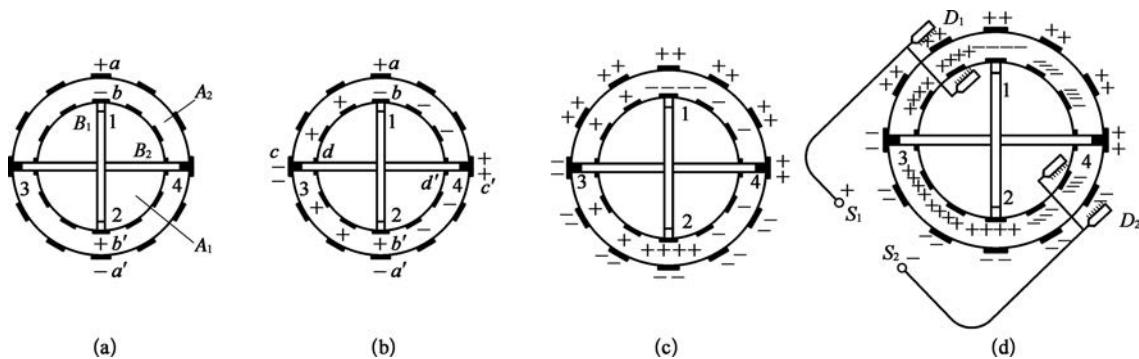


图 5

事实上，两个圆盘是同时反向旋转的，但上述讨论仍然适用，只是过程加速而已。重要的是转向不得与图 5 所示相反，否则两盘在二、四象限将带异号电荷。

当两球间电压足以使空气击穿时，球间出现强烈的火花放电。如图 6 所示，有时为了储存更多电荷而不放电，可在两球间连接两个莱顿瓶(此处用电容器的符号表示)，两个莱顿瓶可有四种不同的接法〔图 6 中虚线表示在图(d)基础上所增加的用以连接电路的导线〕。采用图 6(a)中的接法时，球间电容量大，两球达到放电电压所用时间最长，但每次放电时间也最长(说明储存的电荷量大)。其他接法所储电荷量依次减小，四种接法的效果均可由放电情况看出。

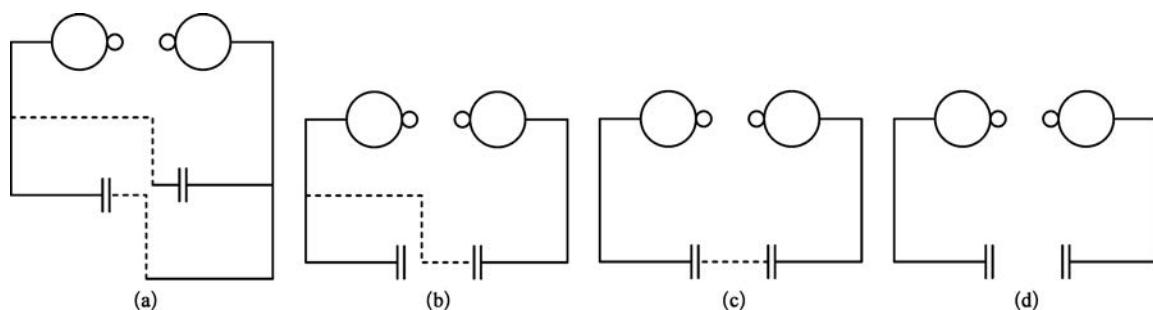


图 6

本节编写思路

本节通过带同号电荷塑料丝的相互排斥现象，引出静止电荷之间存在着静电力的概念。先定性探究静电力的大小由哪些因素决定，知道电荷间相互作用力与带电体间的距离和两电荷的电荷量大小有关。然后体验在研究带电体之间相互作用力的定量关系时，如何解决遇到的三大困难：一是相互作用的电荷间距离的确定；二是微小库仑力测量问题；三是电荷量测量问题。通过静电力和万有引力的对比，体会自然规律的多样性和统一性。最后通过具体实例知道利用电荷之间的相互作用规律处理复杂带电体之间的静电力作用的思想和方法。

通过学习静电力与电荷之间距离的二次方成反比的过程中所涉及的类比、模型建构、守恒和对称、微小量放大等方法，体验科学思维方法在科学中的重要作用。通过实验探究引导学生学习物理学的研究方法，渗透科学本质观的教育。了解科学家如何巧妙解决实验过程中的诸多问题，培养学生的科学态度和责任素养。

正文解读

[1] 通过节首图库仑定律实验装置手稿照片，启发学生体会库仑扭秤实验装置（图9-8中Fig 1）设计中的一些细节（图9-8中Fig 2~5），了解科学家在探究库仑定律过程中是如何巧妙解决电荷量测量、微小库仑力测量等实验过程中的许多问题的。

本节第8页的图9-11和“拓展视野”的内容与节首图相呼应。

[2] 用演示实验定性探究影响静电力大小的因素，知道电荷间相互作用力与带电体间的距离和两电荷的电荷量大小有关。实验时应注意尽可能使带电体与系在丝线上的带电小球静止后处于同一高度。

[1]

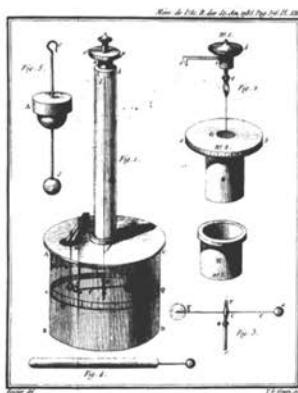


图9-8 库仑扭秤实验装置图手稿

第二节 电荷的相互作用 库仑定律

在如图9-9所示的场景中，将塑料丝的一半撕成细丝，用干燥的手掌握住塑料丝捋几下，塑料丝就会散开。我们在初中已经知道，电荷之间有相互作用，同号电荷间相互排斥、异号电荷间相互吸引。塑料丝散开正是因为手掌的摩擦在其上产生同号电荷相互排斥的结果。这种静止电荷之间的相互作用又叫做静电力。

② 静电力的大小由哪些因素决定？

如图9-10所示，把一个带正电的物体放在M处，然后把系在丝线上带正电的小球悬挂在P位置，小球带动丝线发生偏转；改变M处带电体与小球之间的距离，观察偏角θ的变化；固定带电体的位置，改变其所带电荷量的大小，观察偏角θ的变化。带正电物体和小球间有静电排斥力作用，我们可以通过偏角θ的大小来定性判断小球受到的静电力的大小；偏角θ越大表示小球受到的静电力越大。

[2] 通过这样的实验，我们可初步知道电荷间相互作用力的大小与带电体间的距离有关，距离越小，作用力越大；静电力的大小还与两电荷的电荷量的大小有关，电荷量越大，作用力越大。



图9-9 相互排斥的塑料绳细丝

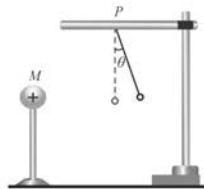


图9-10 同号电荷间的相互排斥

如何定量探究电荷间相互作用力的规律?

18世纪中叶以前,研究带电体之间的静电力遇到三大困难:一是任意带电体上的电荷分布难以确定,无法确定相互作用的电荷间的距离;二是这种静电力非常小,没有测量如此小力的工具;三是当时还没有度量电荷量的单位,也就无法确定电荷量的大小。

法国物理学家库仑(C. A. de Coulomb, 1736—1806)巧妙地解决了这些困难。他根据电荷在金属球表面上均匀分布的特点,把金属球上的电荷想象成集中在球心的“点电荷”。这一模型就解决了测量带电体之间距离的问题。

[2]

大家谈

与质点模型类比,带电体抽象为点电荷的条件是什么?

库仑设计制作了一台能够测出微弱作用力的扭秤,用以测量两个同种点电荷之间的作用力,如图9-8所示就是他当时的手稿,装置主要结构如图9-11所示。库仑从牛顿的万有引力规律得到启发,用类比的方法来研究电荷间的相互作用。

[3]

如图9-11所示,库仑扭秤固定装置中有一根弹性扭丝(细金属丝、石英玻璃丝等),它的一端固定在一个旋转螺丝上,另一端连接绝缘棒的中点,使绝缘棒水平悬挂在扭丝上;绝缘棒的一端有一个金属小球A,另一端是一个质量大小相同的金属小球B;在离A不远处放一个跟A相同的金属球C。当弹性扭丝处于自然状态时,调节螺丝使A与C接触;接着使C带电,则A、C带同号电荷,它们之间的斥力使绝缘棒发生转动,扭丝扭转,使得绝缘棒重新平衡。根据扭丝的扭转角 θ 与使扭丝扭转的力F成正比的规律就可以找出电荷间的相互作用力跟距离的关系。

拓展视野

根据库仑对电荷间的相互作用力的研究历史,当年库仑得到表9-2所示的三组实验数据。他分析在电荷量一定的条件下弹性扭丝的扭转角 θ 与两带电体A、C之间距

助一臂

[1]

当带电体的形状、大小、电荷分布对电荷间相互作用力的影响可以忽略时,带电体可以看成带有电荷的点,这样的带电体叫做点电荷。

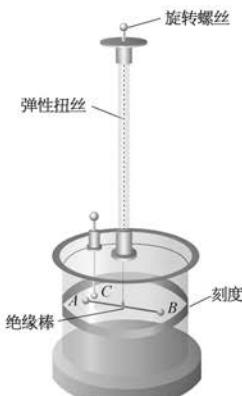


图9-11 库仑扭秤实验装置

[1] 点电荷和质点都属于理想模型,是对研究对象科学抽象的结果。

[2] 此处设置“大家谈”的目的是让学生体验类比法在科学中的作用,以便以后在其他场合也能尝试运用建立理想化模型的方法研究物理问题。

在研究物体的运动时,如仅研究物体整体的平动,或者所涉及的空间尺度比物体自身的尺度大得多时,可以不考虑物体的大小和形状,把它简化为质点。在研究电荷间相互作用力的规律时,如所涉及的带电体的尺度比它们之间的距离小得多时,我们也可以把带电体抽象成只有电荷量而没有大小的点,即点电荷。实际上任何带电体都有其大小和形状,真正的点电荷是不存在的。

[3] 法国物理学家库仑于1785年发表了一篇有关电荷间作用力的论文,其中提出如图9-8手稿所示的

扭秤实验装置,在管顶有螺旋测角器,下面用弹性扭丝悬挂一横杆,玻璃缸壁上刻有360个刻度,可以读数。弹性扭丝处于自由状态时,横杆上的小球A指在零刻度。固定在绝缘竖杆末端的小球C,带电以后通过玻璃盖板上的洞放入缸内,与大小相同的小球A接触后分开,这样A、C两球带上等量同号电荷而相互排斥。然后旋转管顶的旋转螺丝使两球恢复到初始位置,可从管顶的螺旋测角器读出弹性扭丝的扭转角 θ 。根据扭丝的扭转角 θ 和两带电体之间距离r的关系,得出“带同号电荷的两球之间的排斥力与两球中心之间的距离的二次方成反比”的结论。后来库仑又通过电引力扭摆实验(详见本节资料链接)进一步证明了异号电荷间存在的吸引力也满足二次方反比的关系,总结出了库仑定律,并测出了静电力常量。

库仑定律是电学发展史上的第一个定量规律,是电磁学和电磁场理论的基本定律之一。电荷量的单位就是为了纪念库仑而以他的名字命名的。

[1] 此处设置“拓展视野”，旨在为课程标准3.1.2中明确提出的“体会探究库仑定律过程中的科学思想和方法”提供史料。

介绍库仑扭秤实验用弹性扭丝的扭转角间接测量静电力变化的比值关系的巧妙测量方法，目的是希望学生可试着根据弹性扭丝的扭转角 θ 与带电体之间距离 r 的实验数据，探究得到扭转角 θ 与距离 r 的二次方成反

比 $(\theta \propto \frac{1}{r^2})$ 的结论。

此实验中用到扭力和力矩平衡的知识，学生此前并没有学过，课程标准中也没有相应的要求，可对学有余力的同学课后补充讲解。由于库仑扭秤实验结构上的复杂性和操作上的精确性，这里并不要求学生熟悉实验器材、掌握实验操作步骤，而是侧重介绍库仑扭秤实验的设计思路与其中包含的科学思想和方法。

得出扭转角 θ 与距离 r 的二次方成反比 $(\theta \propto \frac{1}{r^2})$ 后，再根据 $F \propto \theta$ ，即得 $F \propto \frac{1}{r^2}$ ，可和联想到的

同样与距离二次方成反比的万有引力类比。

[2] 此处设置“助一臂”，是为了展现库仑定律发现的历史背景，突显类比的方法在库仑定律发现过程中所起的作用，体会物理学的和谐统一之美，提高学生学习物理的兴趣。

离 r 的关系，得到弹性扭丝的扭转角 θ 与 r 的二次方成反比 $(\theta \propto \frac{1}{r^2})$ 。再根据电荷间的相互作用力 F 与扭丝的扭转角 θ 成正比 $(F \propto \theta)$ ，并以9个刻度对应1单位的距离，由表9-2的数据可得两带电球间的距离与静电力之间的关系，如表9-3所示。

[1]

表9-2 弹性扭丝的扭转角 θ 与两带电体之间距离 r 的关系

实验序号	两带电体之间距离 r	扭丝的扭转角 θ
1	36个刻度	36°
2	18个刻度	144°
3*	8.5个刻度	575.5°

表9-3 库仑扭秤实验的数据处理

实验序号	两带电体之间距离 r	距离之比	扭丝的扭转角 θ	静电力之比
1	36个刻度	4	36°	1
2	18个刻度	2	144°	4
3	8.5个刻度	0.94	575.5°	15.99

库仑用扭秤进行实验，通过和万有引力的类比较快得出了电荷间作用力 F 跟距离 r 的二次方成反比 $(F \propto \frac{1}{r^2})$ 的规律。如仅靠实验数据的积累，也许这个规律的发现可能会被推迟。电荷间的相互作用力一定和电荷量有关。库仑细心地发现两个相同的带电金属球相互接触后，它们对相同距离外的第三个带电小球的作用力相等，所以他断定这两个小球所带的电荷量相等。利用了电荷在两个相同金属球之间等量分配的原理，可把带电小球的电荷量 q 分为 $\frac{q}{2}, \frac{q}{4}, \frac{q}{8}, \dots$ ，这样就保证了实验中金属球的电荷量成倍变化。

从而，库仑发现了电荷间的相互作用力 F 与电荷量 q 的关系，即 F 与电荷量 q_1, q_2 的乘积成正比 $(F \propto q_1 q_2)$ 。

综上可得， $F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$ 。

* 第三组数据略有偏差，库仑分析是因为漏电所致。

助一臂

[2]

类比是根据两个不同对象的部分特性相似而推出它们其他性质也可能相似的一种推理方法。类比是一种重要的科学方法，在科学发展史中发挥了巨大的作用。

在库仑之前，就有很多科学家将静电力与万有引力进行类比，猜想静电力也与距离的二次方成反比。

真空中两个静止的点电荷之间相互作用力的大小跟它们的电荷量的乘积成正比，跟它们之间的距离的二次方成反比，作用力的方向在它们的连线上。这叫做库仑定律（Coulomb's law），可用下面的公式表示

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

[1] 电荷间的这种相互作用的静电力又称为库仑力。式中 k 叫做静电力常量，在国际单位制中， $k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ 。就是说，两个均带 1 C 电荷量的点电荷即使在相距 1 m 的情况下，它们相互间的库仑力依然高达 $9 \times 10^9 \text{ N}$ ，可见库仑（C）是个很大的电荷量单位。

示例 1 如图 9-12 所示，真空中有两个点电荷 q_1 和 q_2 ，它们的电荷量分别是 $+4.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ 和 $-2.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ ，两点电荷间相距 10 cm，求这两个点电荷间的相互作用力。（已知静电力常量 $k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ ）

分析：在运用库仑定律时，物理量都要采用国际单位制；点电荷的电荷量可用绝对值代入，这样可以避免因对正、负号意义混淆不清而造成错误；库仑力的方向可以通过同号电荷相互排斥、异号电荷相互吸引来直接判断。

解：以电荷 q_2 为研究对象， q_2 受到 q_1 对其的静电力作用，根据库仑定律， q_1 对 q_2 的静电力的大小

$$\begin{aligned} F_{12} &= k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \\ &= 9 \times 10^9 \times \frac{4.0 \times 10^{-9} \times 2.0 \times 10^{-9}}{(0.10)^2} \text{ N} \\ &= 7.2 \times 10^{-6} \text{ N} \end{aligned}$$

方向为沿 q_1 、 q_2 连线指向 q_1 。

同理，以电荷 q_1 为研究对象，根据库仑定律，可得 q_2 对 q_1 的静电力 F_{21} 与 q_1 对 q_2 的静电力 F_{12} 大小相等、方向相反、作用在同一直线上。因此 F_{21} 大小也为 $7.2 \times 10^{-6} \text{ N}$ ，方向为沿 q_1 、 q_2 连线指向 q_2 。

示例 2 已知氢原子中质子的质量为 $m_1 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，电子的质量为 $m_2 = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ，在氢原子内质子和电子间的距离为 $r = 5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ ，求氢原子中质子与电子之间的库仑力和万有引力大小的比值。（已知引力常量 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ ，静电力常量 $k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ ，元电荷 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ）

分析：氢原子内质子和电子间距离为 $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ 。当代物理学认为氢核即质子，其直径在 10^{-15} m 量级，而电子直径则在 10^{-18} m 量级，两带电体间距离远大于带电体的直径，故质子和电子均可看成质点和点电荷。它们间的相互作用符合万有引力和库仑定律的适用范围。

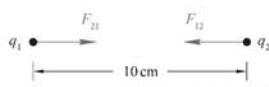


图 9-12 两个点电荷间的相互作用

[1] 教学中，建议此处可让学生根据库仑定律表达式导出静电力常量的单位，从而理解静电力常量 k 的单位是由公式中 F 、 q 、 r 的单位确定的，而它们在国际单位制中的单位是牛（N）、库（C）、米（m）。进而理解使用此常量 $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ 根据库仑定律计算时，只在国际单位制下才成立。

在真空中静电力常量 k 也常常写成 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ 的形式， ϵ_0 是物理学中的一个基本物理常量，叫做真空介电常数或真空电容率。 $\epsilon_0 = 8.9 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ 。引入 ϵ_0 后，库仑定律可改写为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

[1] 此处设置“大家谈”的目的是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(与距离的二次方成反比)。通过示例2体会微观带电粒子间的相互作用中,静电力的大小远大于万有引力的大小,为后续章节研究带电粒子在电场中的运动时忽略重力对带电粒子的影响做铺垫。静电力可以是相互吸引或相互排斥的,而万有引力一定是彼此相互吸引的。

带电粒子间的静电力和万有引力在大小、方向、表达式上的异同:

① 大小: 通过示例2可见微观粒子间的万有引力远小于静电力。因此在研究微观带电粒子的相互作用时,往往可以忽略万有引力。

② 方向: 万有引力都是吸引力,而静电力可以是吸引力,也可以是排斥力。

③ 表达式: 库仑定律和万有引力定律的数学表达式很类似,都遵从二次方反比规律;都是跟相互作用的两个物体有关,前者跟它们的电荷量有关,后者跟它们的质量有关,并且都成正比。

④ 作用力的方向均沿着两物体(质点、点电荷)间的连线。

解: 设质子和电子间的库仑力为 F_1 , 万有引力为 F_2 , 质子所带电荷量为 q_1 , 电子所带电荷量为 q_2 , 则由库仑定律和万有引力定律

$$F_1 = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad F_2 = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

可得彼此间的库仑力和万有引力大小之比为

$$\begin{aligned} \frac{F_1}{F_2} &= \frac{k |q_1| \cdot |q_2|}{G m_1 m_2} \\ &= \frac{9 \times 10^9 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.67 \times 10^{-11} \times 1.67 \times 10^{-27} \times 9.1 \times 10^{-31}} \\ &\approx 2.3 \times 10^{39} \end{aligned}$$

[1]

大家谈

试比较带电粒子间的静电力和万有引力在力的大小、方向和表达式上有何异同。

问题与思考

- 在研究带电体间相互作用力的过程中,库仑利用扭秤实验巧妙解决了电荷量测量问题和微小库仑力测量问题。库仑扭秤实验采用了哪些科学思想方法?在实验中如何体现?
- 真空中甲、乙两个点电荷的相互距离为 r , 它们间的库仑力为 F 。若两个点电荷的电荷量均减半,它们间的距离变为 $2r$, 则它们间的库仑力变为多大?
- 如图 9-13 所示,把一电荷量为 $q_1 = -2.0 \times 10^{-6}$ C 的带电小球用绝缘细绳悬挂在 P 位置,将电荷量为 $q_2 = -4.0 \times 10^{-5}$ C 的带电体 M 靠近带电小球。当带电体和带电小球均静止时,两个带电体在同一高度,相距 0.2 m,求:
 - 这两个带电体间的相互作用力。
 - 如需计算带电小球的质量,还需测量哪些物理量?简述理由。

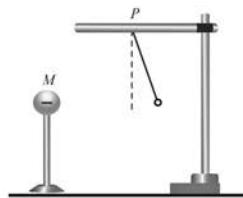


图 9-13

问题与思考解读

- 参考解答: ① 类比(库仑力与万有引力类比) ② 模型建构(把金属带电球体建构为点电荷)
- ③ 守恒和对称思想(两相同金属球接触后电荷量均分) ④ 微小量放大(库仑扭秤实验)

命题意图: 总结本节内容中的科学研究方法,体会科学思想。

主要素养与水平: 科学态度(I)。

4. 如图9-14所示为氯化钠晶体的一个原子面的排列示意图, 可以看出每个一价钠离子(Na^+)的周围有距离相等的一价氯离子(Cl^-)。同样, 每个一价氯离子的周围也有距离相等的一价钠离子。相邻的一价钠离子与一价氯离子之间的距离 $d=2.82 \times 10^{-10}$ m, 则相邻两个钠离子间的静电力大小是多少?

5. 设想为了抵消地球和月球间的万有引力, 可在地球和月球上各放置电荷量相等的正电荷 Q , 试求 Q 的电荷量。另外, 需要多少千克氢离子才能提供所需的电荷量? [地球质量 $m_{\text{地}}=6.0 \times 10^{24}$ kg, 月球质量 $m_{\text{月}}=7.3 \times 10^{22}$ kg, 氢离子摩尔质量 $M(\text{H}^+)=1$ g/mol, 阿伏加德罗常数 $N_A=6.02 \times 10^{23}$ mol⁻¹]

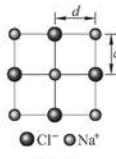


图9-14

2. 参考解答:

空中的两个点电荷, 相距为 r 时相互作用的静电力大小为 F , 根据库

仑定律 $F=k \frac{q_1 q_2}{r^2}$; 若

将这两个点电荷的电荷量减半的同时距离变为 $2r$, 则它们之间的静电力大小变为

$$\begin{aligned} F' &= k \frac{\frac{1}{2}q_1 \cdot \frac{1}{2}q_2}{(2r)^2} \\ &= \frac{1}{16}F \end{aligned}$$

命题意图: 运用库仑定律解决问题, 加深对库仑定律相关概念的理解。

主要素养与水平: 运动与相互作用观念(I)。

3. 参考解答:

(1) $F = k \times$

$$\frac{|q_1||q_2|}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{2.0 \times 10^{-6} \times 4.0 \times 10^{-5}}{0.2^2} \text{ N}$$

= 18 N (2) 如需计算带电小球的质量 m , 我们还需测量细绳与竖直

方向的夹角 θ , 根据共点力平衡可得: $F = mg \tan \theta$, θ 为带电小球悬绳的偏角, 从而计算得到带电小球的质量

命题意图: 将静电知识与力学知识相关联, 培养学生综合分析问题和解决问题的能力。

主要素养与水平: 运动与相互作用观念(II); 证据(II); 解释(I)。

4. 参考解答: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = k \frac{e^2}{(\sqrt{2}d)^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{2 \times (2.82 \times 10^{-10})^2} \text{ N} = 1.45 \times 10^{-9} \text{ N}$

命题意图: 运用概念和规律解答实际问题。

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

5. 参考解答: 以地球为研究对象, 仅受到万有引力和静电力的作用。万有引力 $F_{\text{引}}$ 和静电力 $F_{\text{静}}$ 二力平

衡： $F_{\text{引}} = F_{\text{静}}$ ，可得 $G \frac{m_1 m_2}{r^2} = k \frac{Q^2}{r^2}$ ，即 $Q = \sqrt{\frac{G m_1 m_2}{k}} = \sqrt{\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 6.0 \times 10^{24} \times 7.3 \times 10^{22}}{9 \times 10^9}} \text{ C} \approx 5.7 \times 10^{13} \text{ C}$ 。又因为 $Q = Ne$ ，所以所需氢离子总数 $N = \frac{2Q}{e} = \frac{2 \times 5.7 \times 10^{13}}{1.6 \times 10^{-19}} = 7.125 \times 10^{32}$ 个。氢离子物质的量 $n = \frac{N}{N_A} = \frac{7.125 \times 10^{32}}{6.02 \times 10^{23}} \text{ mol} \approx 1.18 \times 10^9 \text{ mol}$ ，氢离子质量 $m = nM = 1.18 \times 10^9 \times 1 \text{ g} = 1.18 \times 10^6 \text{ kg}$

命题意图：通过一个假设的情境，模型建构后进行科学推理，体会相互作用观念。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅲ)；科学论证(Ⅲ)。

资料链接

电引力扭摆实验

库仑利用扭秤研究了同号电荷间的斥力。但在异号电荷间扭秤的引力研究中，由于金属扭丝扭转的恢复力矩仅与角度的一次方成比例，不能保证扭秤的稳定，两带电球如果相距较远，则其误差很大；如果相距较近，由于扭秤十分灵活，两球会出现左右摇摆相碰的现象。两球相互吸引的结果常常是相互接触而发生电荷中和现象，使实验无法进行下去。库仑把电荷间的吸引力和地球对物体的万有引力加以类比，从单摆受地球万有引力而摆动的事实受到启发。在地球对物体作用力遵从二次方反比规律的前提下，必然存在地面上的单摆摆动周期正比于摆锤离地心的距离。库仑认为电荷间的吸引力也应与此相近。

《物理学原著选读》一书记载的库仑电摆实验如图 7 所示， G 是一个直径为 1 英尺(0.3048 m)的铜球或锡包的纸板球，由四根涂有西班牙蜡的玻璃直柱撑起，直柱下端与四根三英寸或四英寸长的西班牙蜡棍相接，使该玻璃直柱更为绝缘。各玻璃柱的下端有个基底，放在可以活动的小桌上，在其旁边用一根从茧中抽出的长 7~8 英寸(17.78~20.32 cm)的单根蚕丝 SC ，将虫漆制成的针 lg 吊起，在 l 端装一个用金箔剪成的、直径 0.8 英寸(2.032 cm)的圆形小金箔，与针垂直，丝线悬于经火炉烧干的、涂有虫漆或西班牙蜡的小铁杆 St 下端的 S 处，该铁杆在 t 处被一个可以沿刻度尺 OE 滑动的钳夹住，滑尺 OE 可由螺旋 E 来调整其高度，并可由螺旋 V 使其位于任何所需的位置。实验时，使 G 和 l 带异号电荷，则小针受引力摆动，测量出 G 、 l 在不同距离时，针 lg 摆动同样次数的时间，从而计算出每次的振动周期。

库仑记录了三次实验数据，如下表所示：

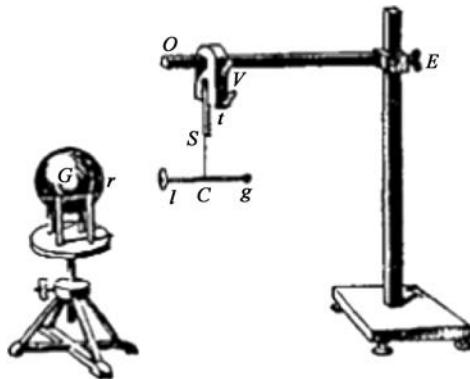


图 7

实验序号	金箔与球心距离(英寸)	15 次振动所需时间(s)
1	9	20
2	18	41
3	24	60

三次实验中，金箔与球心的距离之比为 3 : 6 : 8，假如电摆的周期与金箔到金属球球心的距离成正比，则根据理论它们的周期之比应为 20 : 40 : 53.33，但是实验测得值为 20 : 41 : 60。库仑认为实际测得的时间与理论时间不同的原因是漏电。

本节编写思路

正确描绘客观世界是物理学的基本任务之一。学生在初中阶段已学过诸多描述不同物理现象的相关知识,比如用磁感线描述磁场等。

类似于用磁感线形象描述磁场,法拉第在研究电场时也采用了电场线来形象描述电场。从自主活动的实验事实出发,经过理想化抽象提炼得到形象化描绘电场的电场线。为定量描述电场中某点力的性质,运用比值定义的方法定义了电场强度。通过具体实例知道电场强度的客观性和矢量性以及通过对等量异号电荷周围某处电场强度的计算,了解电场强度的叠加原理。最后介绍带等量异号电荷的平行金属板间(除边缘附近外)的电场,了解匀强电场的特点。

通过比值法定义电场强度,体会用物理量之比定义新物理量的方法。通过电场线描述电场强弱分布体会概念具体化、形象化是科学的研究的一种重要方法。

[1]



图 9-15 科技馆的“怒发冲冠”项目

第三节 电场力 电场强度

上海科技馆智慧之光展区内有一“怒发冲冠”(图 9-15)的项目,通过 2×10^5 V 的高压演示了静电现象。站在绝缘地板上的长发女士,手摸着范德格拉夫起电机的金属球罩,范德格拉夫起电机产生大量电荷,这位女士的长发就会立刻张开,呈现了怒发冲冠的情景。

② 电荷间的相互作用如何传递?

带电体周围空间存在一种物质,这种物质称为电场 (electric field)。电荷间的相互作用就是靠电场来传递的。场的概念对早先的传统观念是一个重大的突破。现在,场的概念已经成为现代物理学中最重要的基本概念之一。

场是物质存在的一种形态。电场是一种看不见也摸不到的物质。然而,电场却无处不在,几乎弥漫于整个宇宙。人类的生活也时刻离不开各种场:重力场、磁场、电场等。在信息化时代,信息的形成、传递、储存都离不开场。我们把相对观察者静止的电荷产生的电场叫做静电场 (electrostatic field)。

只要有电荷存在,电荷的周围就存在着电场。电场的基本性质是能够对放入其中的电荷有力的作用,这种力就叫做电场力 (electric field force)。

通过本节学习,体会电场是物质存在的形式之一,知道电场对位于其中的电荷有作用力,有助于提升物质观念。

正文解读

[1] 上海科技馆的很多展示项目都是引人入胜的互动游戏。其中智慧之光的常设展区内以大量的互动展品为主要展示手段,演示数学、物理、化学、生物等学科的典型现象,揭示其基本规律和基本原理,培养参观者的动手能力,在体验中探索科学的奥秘。“怒发冲冠”的体验项目展示 20 万伏的高压静电使长发张开的现象,视觉冲击力强,受到广大游客的欢迎。在教学过程中,可通过人体带电时头发沿电场线排列的实验现象引入电场的概念,使学生经历“比较—概括—抽象”的思维过程。

本节第 14 页的“自主活动”与节首图相呼应。“怒发冲冠”的原理详见本节资料链接。

[1] 在 19 世纪之前,不少物理学家认为电荷之间的相互作用不需要任何媒介,也不需要经历时间就能由一个电荷传到另一个电荷。这种认识称为超距作用观点。19 世纪 30 年代,法拉第提出电力(还有磁力)是近距作用,是通过带电体(或磁体)周围的电场(或磁场)来传递的。这种电场(或磁场)是一种充满在空间的弹性媒质,并称之为“电磁以太”。法拉第也是最早用电场线和磁场线描绘电场和磁场的。近代物理学的发展证明,超距作用的观点是错误的,电力和磁力传递很快但并非不需要时间;取而代之的是近距作用即“场”的观点。迈克耳孙-莫雷实验证明“电磁以太”并不存在。电场和磁场本身就是物质的一种形态。

[2] 这是一个实验型活动,其目的是:(1)观察孤立电荷周围的电场线分布;(2)观察等量同号电荷周围的电场线分布;(3)观察等量异号电荷周围的电场线分布。

针状晶体或头发屑在电场中由于极化而在电场中有规律地排列,它们的排列走向顺着电场力的方向。我们可以观察到针状晶体或头发屑就按电场强度方向排列起来,从而可以形象地模拟静电场电场线的大致分布,实现模拟各类典型电场线的实验目的。节首图 9-15“怒发冲冠”的原理(详见本节资料链接)与此相同。此实验也可借助高压电极与水平玻璃板上细小的石膏晶粒或食用油上漂浮的草籽等来进行。

学生经历电场线模拟实验,感悟如何用虚拟的图线来描述抽象的物理概念;能够看懂一些典型电荷系统周围电场的电场线分布图,从而体会电荷周围电场的分布,并学会用电场线简洁地表示电场。

通过自主活动的实验,学生可感悟到电场对电荷的作用是确实存在的。分子偶极子(详见本节资料链接)在电场力的作用下沿着电场线排列,使得头发也沿着电场线排列。实验可增强学生对场的客观存在的感性认识。

如何形象描述电场?

[1] 电场虽看不见、摸不着,但我们仍然可以利用电场对放入其中的电荷有力的作用来探究电场的分布特征。

在初中物理学习中,我们已经使用磁感线来形象地描述磁场。法拉第在研究电场时,采用了电场线(**electric field lines**)来描述电场。电场线是为了直观形象地描述电场分布而在电场中引入的一些假想的曲线。如图 9-16 所示,电场线是有方向的曲线;电场线起始于正电荷(或无穷远),终止于负电荷(或无穷远);曲线上每一点的切线方向与正电荷在该点所受的电场力的方向相同,与负电荷在该点所受的电场力的方向相反;电场线的疏密可以大致反映电场的强弱,电场线密集的地方电场强,稀疏的地方电场弱。

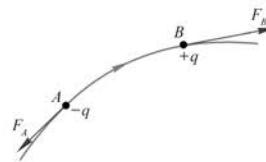


图 9-16 电场线

[2]

自主活动

如图 9-17 所示,把奎宁(一类植物树皮中的生物碱)的针状晶体或头发屑悬浮在蓖麻油或洗洁精中,并把高电压加到两个电极上。电极是电荷集中的地方,其周围存在电场。针状晶体或头发屑因受到电场力的作用而有规律地排列。它们的排列走向顺着电场力的方向,从而可以形象地模拟静电场电场力的大致分布,好像一条条的曲线。

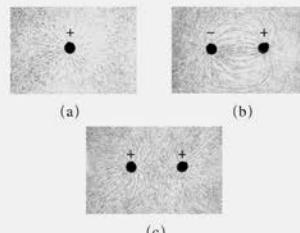


图 9-17 模拟电场线

把上述自主活动观察到的模拟电场线分布作理想化的描绘,得到如图 9-18 所示的电场线。

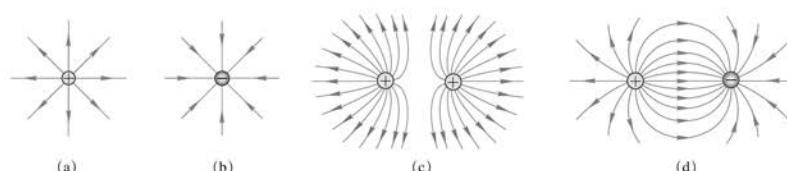


图 9-18 典型电场线

[1]

大家谈

如图 9-18 所示的典型电场线分布有何特点？如何与如图 9-17 所示的模拟电场线相对应？

② 如何定量描述电场力的性质？

如图 9-19 所示，为了研究点电荷 A 周围电场力的性质，我们需要在电场中引入另一个点电荷 B。点电荷 B 的电荷量必须足够小，以致可忽略其对电场的影响，我们把点电荷 A 称为场源电荷，点电荷 B 称为试探电荷。

保持场源电荷 A 不动，移动试探电荷 B，观察其在不同位置的受力情况。可以看出试探电荷 B 在电场不同位置所受电场力的大小、方向一般是不同的，这反映了电场中各点的电场强弱和方向是不同的。

当试探电荷 B 的位置不变而电荷量 q 发生变化时，其受到的电场力 F 也随之变化，但电场力 F 与试探电荷的电荷量 q 之比 $\frac{F}{q}$ 不变。如果再将试探电荷 B 放在电场中的其他位置，

F 与 q 之比与放在前一位置时 F 与 q 之比则一般是不同的。

[2] 这个比的大小可以反映电场中不同点的电场的强弱程度。因此，我们将放入电场中某点的电荷所受的电场力 F 和其电荷量 q 之比叫做该点的电场强度，用符号 E 表示。即

$$E = \frac{F}{q}$$

[3] 电场强度 E 是矢量。物理学中规定，电场中某点电场强度的方向跟正电荷在该点所受电场力的方向相同。上式是电场强度的定义式，表明了电场强度的物理意义，其数值上等于单位正电荷所受的电场力。但电场强度是由电场本身决定的物理量，它与试探电荷置入电场与否无关。电场强度的国际单位是 N/C，读作牛每库。

如果已知电场中某一点的电场强度 E，那么，放在该点的点电荷 q 所受到的电场力 F 的大小就是 qE，F 的方向则取决于电场的方向和点电荷 q 的正负。

示例 1 如图 9-20 所示，有一固定的点电荷 q_1 ， q_1 左方的 A 点处有一个负电荷 q_2 ，其电荷量为 -1×10^{-9} C。测出 q_2 受到的电场力 F 为 2×10^{-5} N，方向水平向右。



图 9-19 试探电荷在电场中受力

[1] 此处设置“大家谈”，是为了引导学生提出电场线疏密程度不同、不相交、有起始和终止点等特点。

图 9-17(a) 对应图 9-18(a)；图 9-17(b) 对应图 9-18(d)；图 9-17(c) 对应图 9-18(c)。

通过电场线的分布了解各类典型电荷系统周围的电场线，体会概念具体化、形象化是科学研究中心的一种重要方法。

[2] 电场强度概念的引入有利于更好地揭示电场的物理性质和电场的物质特性。电场与由分子、原子组成的物质不同，虽看不见、摸不着，但可以通过它表现出的性质来认识它。

利用电场线可以形象地描述电场分布。电场线分布有以下特点：

- (1) 电场线上每一点的切线方向表示该点电场强度的方向；
- (2) 电场线起源于

正电荷（或无穷远），终止于负电荷（或无穷远）；

(3) 电场线不闭合，不相交；

(4) 电场线的疏密代表了电场强度的相对大小，越密集的地方电场强度越大。

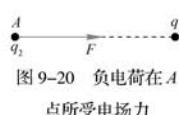


图 9-20 负电荷在 A 点所受电场力

[3] 电场强度是描述电场的物理量，即使没有试探电荷，它也是客观存在的。在静电场中，电场强度不随时间而改变。

在国际单位制中，电场强度的单位是牛/库（N/C），在第五节中还会看到，这一单位又可写作伏/米（V/m）。

[1] 定义电场强度

涉及的物理量是试探电荷所受的电场力和其电荷量。其研究对象是试探电荷，但定义后的物理量却跟试探电荷无关；它描述的是试探电荷所在处场源电荷产生的电场的性质，而不是试探电荷自身的性质。

从库仑定律出发进行数学推导，得到静电力与电荷量之比的表达

$$式 E = k \frac{q}{r^2}，式中 q 为$$

场源电荷的电荷量。从中可以看出只要有电荷存在，电荷的周围就存在着电场，静电力与试探电荷的电荷量之比确实与试探电荷无关，还能看到在电场中的不同位置这个“比”是不同的，从而说明这个“比”确能描述电场的强弱。

[2] 点电荷 q 的电场强度大小为 $E =$

$$k \frac{q}{r^2}。q$$
 确定后， E 的

大小只与距离 r 有关，

所以在每个以 q 为中心的球面上电场强度大小相等。因此，这样的电场是球对称的。此外上式还表明， E 与 r^2 成反比，当 $r \rightarrow \infty$ 时， $E \rightarrow 0$ 。

若 $q > 0$ ， E 的方向沿矢径向外；若 $q < 0$ ， E 沿矢径的反方向指向电荷 q 本身。电场中任意一点 E 的方向均沿以 q 为中心的矢径方向或其反方向。

(1) 求点电荷 q_1 产生的电场在 A 点的电场强度。

(2) 如把 A 点电荷的电荷量 q_1 变为 $5q_2$ ，其他条件不变，求 q_1 产生的电场在 A 点的电场强度和该 $5q_2$ 电荷受到的电场力。

[1] 分析：可利用电场强度的定义式计算空间某点处的电场强度，但这只是对电场强度的一种间接反映，实际上电荷在空间某处电场的强弱仅由场源电荷本身决定，与试探电荷的有无或电荷量的大小无关。试探电荷受到的电场力大小由所在处的电场强度和自身所带电荷量所决定。在计算中电荷量取绝对值，电场强度的方向由电荷所受电场力的方向来判断。

解：(1) 已知放入 q_1 的电场中 A 点的电荷所受的电场力 F 和该电荷所带电荷量 q_2 ，由电场强度的定义式，可得 A 点的电场强度的大小

$$E = \frac{F}{|q_2|} = \frac{2 \times 10^{-5}}{1 \times 10^{-9}} \text{ N/C} = 2 \times 10^4 \text{ N/C}$$

由于负电荷所受电场力的方向跟该点的电场强度方向相反，可知 A 点的电场强度方向水平向左。

(2) 电场强度的大小只与电场本身性质有关，也就是只与产生该电场的场源电荷有关，而与放入电场的试探电荷无关。即使放在 A 点的电荷的电荷量变化了， q_1 产生的电场在 A 点的电场强度也不会发生变化，仍为 $2 \times 10^4 \text{ N/C}$ ，方向为水平向左。

放入 A 点的电荷变为 $5q_2$ ，则该电荷受到的电场力大小为

$$F' = 5|q_2| \cdot E = 5 \times 10^{-9} \times 2 \times 10^4 \text{ N} = 1 \times 10^{-4} \text{ N}$$

方向为水平向右。

真空中点电荷 q 产生电场，由库仑定律可得在距其 r 处的电场强度

[2]

$$E = k \frac{q}{r^2}$$

若 q 为正电荷，电场强度的方向远离 q ；若 q 为负电荷，电场强度的方向指向 q 。

研究表明，如果在空间中有几个点电荷同时存在，这时在空间的某一点的电场强度等于各个点电荷单独存在时在该点产生的电场的电场强度的矢量和，这叫做电场的叠加原理。

[3]

示例 2 如图 9-21 (a) 所示，真空中相距 $2r$ 的点电荷 A 、 B 带电荷量分别为 $+q$ 和 $-q$ 。求：

(1) 两点电荷连线中点 O 的电场强度。

(2) 在 A 、 B 连线上，点电荷 B 的外侧且与点电荷 B 之间的距离为 r 的 P 点处的电场强度。

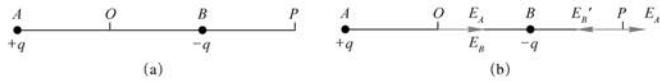


图 9-21 电场的叠加

[3] 通过示例 2 对等量异号电荷(电偶极子)周围某处电场强度的计算，了解电场强度的叠加原理。

分析：由于有两个点电荷产生的电场同时存在，因此要利用电场的叠加原理来计算 O 点与 P 点的电场强度。

如图 9-21 (b) 所示， O 点电场强度由电荷 A 产生的电场在该点的电场强度 E_A 和电荷 B 产生的电场在该点的电场强度 E_B 叠加而成；同样， P 点电场强度是由电荷 A 产生的电场在该点的电场强度 E'_A 和电荷 B 产生的电场在该点的电场强度 E'_B 叠加而成。

解：(1) 由于点电荷 $+q$ 与 $-q$ 的电场同时存在，由图 9-21 (b) 所示。两个电荷分别产生的电场在 O 点的电场强度 E_A 、 E_B 方向相同，根据电场的叠加原理可知， O 点的电场强度大小

$$\begin{aligned} E_O &= E_A + E_B \\ &= k \frac{q}{r^2} + k \frac{q}{r^2} \\ &= 2k \frac{q}{r^2} \end{aligned}$$

O 点的电场强度方向为由 O 指向 B 。

(2) 由图 9-21 (b) 可知，两个点电荷产生的电场同时存在，但因为 E'_B 方向向左， E'_A 方向向右， $E'_B > E'_A$ ，所以根据电场的叠加原理可得， P 点的电场强度大小

$$\begin{aligned} E_P &= E'_B - E'_A \\ &= k \frac{q}{r^2} - k \frac{q}{(3r)^2} \\ &= k \frac{8q}{9r^2} \end{aligned}$$

P 点的电场强度方向为由 P 指向 B 。

② 是否能产生电场强度处处相同的电场？

两块正对放置的相同的平行金属板，若板间距离远小于极板的线度，在两板之间能构建出一个电场强度处处相同的电场。当两板分别带有等量的正电荷和负电荷时，极板间（除边缘附近外）的电场强度在不同位置大小和方向都不变，如图 9-22 所示。我们把在某个区域内各处电场强度大小相等、方向相同的电场称为匀强电场。匀强电场的电场线是相互平行疏密相同的直线。

[1]

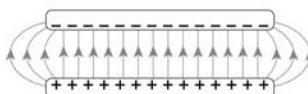


图 9-22 带等量异号电荷的平行金属板间的电场

[1] 两块正对放置

的相同的平行金属板，若两板间距离很小（远小于板的线度），当它们分别带有等量的异号电荷时，板间的电场（除边缘附近）就是匀强电场。

产生匀强电场的平行板电容器的极板理论上应无限大，因为电荷在靠近极板的边缘处密度改变，这种电荷密度的不均匀造成了电场的畸变，使极板边缘附近的电场不再是匀强电场。故教材中特别指出“除边缘附近外”极板间的电场强度在不同位置大小和方向都不变。

匀强电场是带有等量异号电荷的一对平行金属板上所有电荷激发的电场叠加的结果。

问题与思考解读

1. 参考解答: (1) 错误; 电场是电荷及变化磁场周围空间里实际存在的一种特殊物质
(2) 错误; 电场线是为形象地描述电场的分布而在电场中人为画出的一些有方向的曲线, 曲线上每一点的切线方向都表示该点电场强度的方向, 电场线的疏密程度与该处电场强度大小成正比 (3) 正确; 电场的基本性质就是对处于其中的电荷有力的作用

命题意图: 体会通过电场对电荷的作用来检验电场的存在, 认识电场是物质存在的形式之一。了解电场线是为了形象描述电场而人为引入的。

主要素养与水平:
物质观念(I)。

2. 参考解答: 用图线 c 表示

命题意图: 应用库仑定律分析其物理量间的关系。

主要素养与水平: 科学推理(II)。

3. 参考解答: 电场力大小 $F_A = F_C > F_B$; 方向相同, 在两个等量异号电荷连线上指向负点电荷(水平向右)

命题意图: 了解两个等量异号点电荷周围的电场分布。

主要素养与水平: 物质观念(I); 科学推理(II)。

4. 参考解答: 图(a): 带等量异号电荷的平行金属板间
带等量异号的两个点电荷周围 图(b): 带等量正电的两个点电荷周围
带正电的点电荷周围 图(c): 带等量负电的两个点电荷周围

命题意图: 从形象化的电场线图像到具体的典型电荷系统周围的电场分布, 会使概念具体化、形象

问题与思考

1. 判断以下关于电场的说法是否正确, 简述理由。

- (1) 电场只是一个理想模型, 实际上并不存在。
- (2) 电场中的电场线不是人为画出的, 而是实际存在的。
- (3) 电场的基本性质就是对放入其中的电荷有力的作用。

2. 我们已经知道, 电荷量分别为 q_1 、 q_2 的两个点电荷距离为 r 时, 它们之间的静电作用力 $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$, 其中 k 为静电力常量。当 q_1 和 r 一定时, F 与 q_2 之间的关系可用图 9-23 中的哪条图线表示?

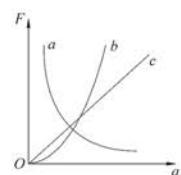


图 9-23

3. 如图 9-24 所示, 在两个等量异号点电荷产生的电场中有 A、B、C 三点, 都在两个电荷的连线上, B 处于两点电荷连线的中点, $AB = BC$, 均等于两点电荷距离的 $\frac{1}{4}$ 。若某正电荷先后放在 A、B、C 三点, 该电荷在 A、B、C 三点所受的电场力大小、方向关系如何?

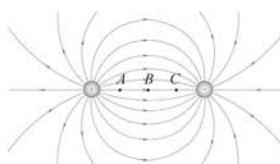


图 9-24

4. 图 9-25 中各方框内给出的均是电场的部分电场线, 它们分别对应哪种电荷系统周围的电场线?

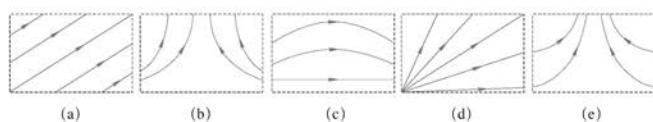


图 9-25

5. 固定在A、B两点的带电粒子，分别如图9-26(a)、(b)、(c)、(d)所示。在两带电粒子连线上的A点的左侧附近有一个负电荷。在图9-26中哪些情况下，负电荷可能处于平衡状态？简述理由。

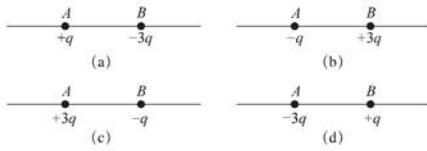


图9-26

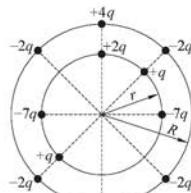


图9-27

6. 点电荷分布在两个半径不同的同心圆周上，所带电荷量如图9-27所示。写出圆心处电场强度的表达式；若在圆心放一个电荷量大小为q的负电荷，它所受电场力为多大，方向如何？

化是科学研究的一种方法。

主要素养与水平：

物质观念(I)；模型建构(II)；科学推理(II)。

5. 参考解答：

在图(a)、(b)所示的两种情况下，负电荷可能处于平衡状态

只要在两带电粒子的左侧负电荷所在处的电场强度为零，那么负电荷就会处于平衡状态。根据点电荷电场强

度的大小 $E = k \frac{Q}{r^2}$ 以

及电场强度的方向可以判定，图(c)电场强度水平向左、图(d)电场强度水平向右，均不可能。而图(a)、(b)两种情况下，两带电粒子的左侧负电荷所在处电场强度可能为零，因此负电荷可能处于平衡状态

命题意图：了解电场强度的叠加原理，能进行科学论证并用语言表达。

主要素养与水平：

科学推理(II)；科学论

证(III)。

6. 参考解答：根据点电荷的电场强度公式 $E = \frac{F}{q} = \frac{kQq}{r^2}$ ，大圆上6个点电荷中任意关于圆心对称的两个等量点电荷在圆心处共同产生的电场强度为零。小同心圆上每个电荷在圆心处产生的

电场强度 $E = k \frac{Q}{r^2}$ ，同理，小同心圆上一对 $+q$ 和一对 $-7q$ 在圆心处共同产生的电场强度也为零，故只需

考虑 $+2q$ 在圆心处产生的电场强度即可。圆心处电场强度： $E = 2k \frac{q}{r^2}$ 。圆心处负电荷 q 所受电场力的

大小： $2k \frac{q^2}{r^2}$ ；方向：沿 $+2q$ 与圆心连线向上

命题意图：体会用对称的思想方法解决问题。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

资料链接

电偶极子

电偶极子(electric dipole)是两个靠得很近的等量异号点电荷组成的电荷系统。在外电场作用下，电介质(绝缘体)的原子或分子里正、负电荷会产生微小的相对位移，无极分子的正、负电荷中心不再重合，这就形成了电偶极子。电偶极子的电学性质用电偶极矩矢量描述，矢量的方向由负电荷指向正电荷，大小为电荷量 q 和正、负电荷间距离 l 的乘积。如果是极性分子则不受外场作用也有固定电偶极矩。在外场中电偶极矩矢量的方向都倾向于沿着外电场的方向。电子在无线电发射金属天线里做周期性运动时，金属天线的两端会交替带上正、负电荷，这就形成了振荡偶极子。它们都是具有实际意义的带电系统。

“怒发冲冠”的原理

教材图 9-15 中女士的头发是电介质，在强电场中会明显极化。电介质的极化是指当电介质靠近带电体时，在电场的作用下，电介质靠近带电体的一端产生和带电体异号的电荷，远离带电体的一端产生和带电体同号的电荷的现象。人体带电时头皮处积累同号电荷，产生的电场垂直于头皮。在这样的电场中头发就会垂直于头皮沿电场线“张开”，宛如“怒发冲冠”。

女士的每一根头发都可看成无数极短的头发首尾相连串接而成。每一小段短发都是电介质，在电场中都因极化而可看成偶极子。由于电场力的作用，电偶极矩在电场中要顺着电场线排列，即偶极子中正、负电荷的连线应与电场强度方向一致。如此，在电场中一根头发上不同小段形成的偶极子便首尾相接沿电场线排成一串，看上去一根头发便宛如一根电场线。

科技馆“怒发冲冠”体验项目中观众的处境是否危险呢？静电起电机可以产生很高的电压，但它的功率很小，即使发生放电，其放电电流也很小。人体是否“触电”取决于通过人体电流的大小，体验这一项目的观众站在一个绝缘平台上，几乎没有电流通过观众的身体，所以这一体验项目是安全的，遵守实验规则就能毫无异样感觉地完成实验。

本节编写思路

20 第九章 静电场

[1]



图 9-28 城市上空的闪电

第四节 电势能 电势

闪电(图9-28)是一种常见的自然现象,是带电的云层与云层之间、带电的云层与地面之间强烈的放电现象。据估计,每秒约有几十到上百次的闪电击中地球表面。一次闪电在短时间内释放出很多能量,这一能量来自放电电荷的电势能。

② 什么是电势能?

我们已经知道,地球上的物体因为受到地球引力作用具有重力势能而能做功,重力做功与重物的移动路径无关,如图9-29(a)所示。

如图9-29(b)所示,在一个电场强度为E的匀强电场中,沿着不同的路径把试探电荷+q从A点移动到B点。由于匀强电场的电场力为恒力,不论+q经由什么路径从A点移动到B点,电场力所做的功都是一样的。

不仅匀强电场的电场力做功与电荷移动的路径无关,一般静电场的电场力做功也同样

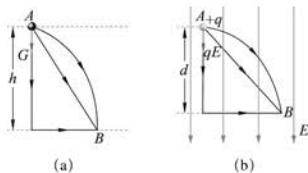


图 9-29 重力与电场力做功特点类比

研究中的作用。通过几种常见电场的等势面和电场线,感受形象描述电场的方法。

本节学习将加深电场力做功与电势能变化关系的理解,形成关于电势的较为完整的能量观念。要求学生会用等势面描绘静电场,了解电场线和等势面的关系。这将有助于模型建构、科学推理能力的提高。

正文解读

[1] 学生在生活中已体验了大量的经验情境,这是构建新的物理概念的基础。本节节首图引用闪电现象是为了让学生形象地认识电场中的放电电荷蕴藏着巨大的能量。通过真实的生活情境激发学生的求知欲。

第五节“问题与思考”第1题和第七节图9-69避雷针的原理内容与此呼应。

本节通过电场力对电场中移动的电荷做功和重力做功一样与路径无关,只决定于始、末位置的性质,类比重力势能建立电势能的概念。

电场力做了多少功,就有多少电势能和其他形式的能量相互转化,由此建立电场力做功与电势能变化之间的关系。

通过示例1感受电场中电势能的变化与其中的电荷有关。类比电场强度是由比值法定义的一个仅由电场本身决定而与试探电荷无关的物理量,也可定义一个从能量角度客观反映电场性质的新物理量:电势。

通过与重力势能对比,了解电荷在电场中的电势能;通过与电场强度的类比,知道用比值法定义表示电场能量性质的物理量——电势,体验类比法在科学

与路径无关。因此，我们可以得到这样的结论：在电场中移动电荷时，静电力做的功只与电荷的起始位置和终止位置有关。由于重力做功与路径无关，物体具有重力势能。与此类似，在静电场中电场力对其中移动的电荷做功也与路径无关，只决定于始末位置，因此，电荷在电场中也具有势能。这种势能就叫做电势能（electric potential energy）。

电势能是标量，通常用符号 E_p 表示；电势能的单位是焦耳，符号 J。

[1] 此处设置“拓展视野”，是为了让学生正确理解保守力的定义，原理详见本节资料链接。

[1]

拓展视野

引力做功与路径无关源自万有引力定律，两质点间的万有引力沿质点间的连线方向，与彼此间距离的二次方成反比，即万有引力是各向同性的有心力。同引力一样，以库仑定律描述的电荷间的静电力同样具有各向同性的有心力的特点，也具有做功和电荷移动路径无关的特点。万有引力是保守力，静电力也是保守力。

电场力做功与电势能变化之间有何关系？

功是能量变化的量度，当地球上的物体从一个位置移动到另一个位置时，若重力做正功，则物体的重力势能减少；若重力做负功，则物体的重力势能增加。同样，当电场中的电荷从一个位置移动到另一个位置时，若电场力做正功，则电荷的电势能减少；若电场力做负功，则电荷的电势能增加。

将点电荷在电场中由 A 点移到 B 点，电场力做功

$$W_{AB} = E_{pA} - E_{pB}$$

E_{pA} 为 A 点电势能， E_{pB} 为 B 点电势能。

点电荷在电场中从 A 点移到 B 点，这个点电荷的电势能的变化量

$$\Delta E_p = E_{pB} - E_{pA}$$

因此，电场力对电荷做功与电荷的电势能变化量的关系为

$$W_{AB} = -\Delta E_p$$

重力势能的大小等于物体从现有位置移动到重力势能为零处的过程中重力所做的功。与此类似，电荷 q 在电场中某点的电势能在数值上等于把此电荷从该点移动到电势能为零处电场力所做的功。

通常我们把电荷在离场源电荷无穷远处的电势能规定为零，或把电荷在大地表面上的电势能规定为零。而且电势能也和重力势能一样只有相对意义，电势能的变化量才有绝对物理意义。

必须强调，就像重力势能属于重物和地球构成的体系一样，电荷的电势能并非只属于该电荷，而是该电荷和场源电荷相互作用的能量，同属于该电荷和场源电荷。通常为了方便而简称为某电荷的电势能。

- [1] 示例 1 如图 9-30 所示, 在某正点电荷的电场中, 沿电场线有 A、B 两点。若将一个正电荷 q_1 从 A 点移至无穷远处, 电场力做了 3.0×10^{-6} J 的功; 若将正电荷 q_1 从 B 点移至无穷远处, 电场力做了 1.5×10^{-6} J 的功。则:

- (1) 该电荷在 A、B 两点的电势能为多大?
- (2) 如果将一个电荷量为 q_2 的负电荷从 A 移至 B, 则该负电荷在 A、B 两点中哪一点电势能大?

分析: 电荷 q 在电场中某点的电势能在数值上等于把电荷从这点移动到无穷远处电场力所做的功。

解: (1) 正电荷 q_1 在 A 点受到的电场力方向向右, 电荷从 A 点至无穷远处的过程中, 电场力做正功、电势能减小至零, 所以 A 点的电势能 E_{pA} 大于零。则

$$E_{pA} = 3.0 \times 10^{-6} \text{ J}$$

同理, B 点电势能

$$E_{pB} = 1.5 \times 10^{-6} \text{ J}$$

(2) 负电荷 q_2 放在 A 点, 受到的电场力方向向左, 从 A 点移至 B 点的过程中, 电场力做负功, 电势能增加, 所以 $E_{pA} < E_{pB}$, 即负电荷 q_2 在 B 点电势能大。

- [2] 由示例 1 可知, 在同一电场中, 同样从 A 点到 B 点分别移动正电荷与负电荷时, 相应的电势能的变化是相反的。

如何从能量的角度描述电场的性质?

同一物体在地球上不同位置的重力势能不尽相同, 不同物体在地球上同一位置的重力势能也不尽相同。类似地, 根据电场力做功与电势能变化的关系可知, 同一电荷在电场中的不同位置上的电势能不尽相同, 不同电荷在电场中的同一位置上的电势能也不尽相同。

进一步的研究表明, 在一个确定的电场中, 不同电荷在场中同一位置的电势能与其电荷量之比是一定的, 即 $\frac{E_{p1}}{q_1} = \frac{E_{p2}}{q_2} = \frac{E_{p3}}{q_3} = \dots = \frac{E_{pn}}{q_n}$ 。这个比仅由电场决定, 和电场强度一样, 它与试探电荷置入与否无关。可见, 这个比像电场强度从电场力的角度描述电场一样, 从能量的角度客观地反映了电场的性质。

- [3] 在电场中, 任意一点电荷的电势能 E_p 和它所带的电荷量 q 之比叫做这一点的电势 (electric potential)。电势通常用符号 φ 来表示, 则

$$\varphi = \frac{E_p}{q}$$

电势的国际单位是伏特, 简称伏, 用符号 V 表示, $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$ 。

由上式可看出电势的物理意义。电场中任意一点的电势数值上等于单位正电荷在该点

比为重力场强度。

重力势能也可与静电势能类比, 从而找出和静电势类比的重力势。如果一个质量为 m 的物体位于离地面高度 h 处(取地面为零势面), 该处的重力加速度为 g , 则类比静电势 $\varphi = \frac{E_p}{q}$, 该处的重力势可以表示为 $\frac{E_p}{m} = \frac{mgh}{m} = gh$, 即把重力加速度 g 与高度 h 的乘积称为重力势。

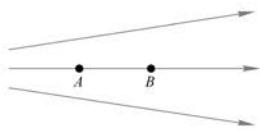


图 9-30 分析电荷在电场中的电势能

[1] 示例 1 通过具体分析电荷在电场中的电势能, 强调电势能是电荷和场源电荷共有的能量。

[2] 通过用电场力做功与电势能变化的关系来计算电荷在电场中的电势能, 了解电势能的系统性和相对性。

[3] 重力场与静电场的类比。重力场和电场有许多相似的性质, 所以它们之间可以进行类比。电场中反映各点电场强弱的是电场强度

$$E = \frac{F}{q}, \text{ 重力场中反映}$$

各点重力场强弱的则是

$$g = \frac{F}{m} = \frac{G}{m}。 \text{ 即重力加速度可与电场强度类}$$

[1] 通过示例 2 对电场中电势的具体分析了解电势的客观性、标量性和相对性。阐明零电势的规定以及电势正、负的意义，知道电势的大小与零电势的选择有关，具有相对性。

[2] 此处设置“大家谈”是为了说明如示例 2 中的试探电荷为负电荷，则 A、B 两点的电势能均为负值，电场力做功分别为 -3.0×10^{-6} J 和 -1.5×10^{-6} J，而 A、B 两点的电势不变，由此深入感受电势能的正、负与电场中电荷的正负和其所处位置电势的正、负都有关，为下一节电势差的绝对性、电场力做功与电势差的关系做铺垫。

[3] 可以从电场线能够形象地描述电场引导学生思考是否可以同样用等势面描述电场。等势面的教学可联系其他学科的知识，如地理学科中用等高线描绘地形、用等压线描绘气候等。认识一些常见电场的等势面和电场线。通过用等势面描绘电场的一般方法认识等势面在电学研究中的价值，体会到相邻等势面电势之差相等时，等势面的疏密程度反映了该区域电场的强弱。

所具有的电势能。

电势跟电势能一样，其数值不具有绝对意义，只具有相对意义。只有规定了某处的电势为零后，才能确定电场中其他各点的电势的值。

电势 φ 是标量，只有大小，没有方向，但有正、负之分，正、负只表示比零电势高还是低。若将正试探电荷沿电场线方向移至无穷远处，电场力做正功，电势能逐渐减小，电势逐渐降低。因此，沿着电场线方向，电势越来越低。

示例 2 在点电荷 $+Q$ 的电场中，沿电场线方向有 A、B 两点。若将一个电荷量为 1×10^{-8} C 的正电荷 q 从 A 点缓慢移至无穷远处，电场力做了 3.0×10^{-6} J 的功；若将该正电荷从 B 点缓慢移至无穷远处，电场力做了 1.5×10^{-6} J 的功。则 A、B 两点的电势各为多少？

[1] 分析：电场中任意一点的电势数值上等于单位正电荷在该点所具有的电势能。

解：设正电荷 q 在 A 点的电势能为 E_{pA} 、在 B 点的电势能为 E_{pB} 。由于点电荷 q 与产生电场的点电荷均为正电荷，因此在 q 从 A 点移至无穷远的过程中，电场力做正功、电势能减小至零，A 点的电势能 E_{pA} 大于零，可得

$$E_{pA} = 3.0 \times 10^{-6} \text{ J}$$

同理，B 点的电势能

$$E_{pB} = 1.5 \times 10^{-6} \text{ J}$$

则 A 点的电势

$$\varphi_A = \frac{E_{pA}}{q} = \frac{3.0 \times 10^{-6}}{1.0 \times 10^{-8}} \text{ V} = 3.0 \times 10^2 \text{ V}$$

B 点的电势

$$\varphi_B = \frac{E_{pB}}{q} = \frac{1.5 \times 10^{-6}}{1.0 \times 10^{-8}} \text{ V} = 1.5 \times 10^2 \text{ V}$$

[2]

如试探电荷为负电荷是否还能得到关于电势能和电势的讨论中得到的结论？

已知电场中某一点的电势为 φ ，则处于该点的点电荷 q 所具有的电势能

$$E_p = q\varphi$$

[3] 电荷在电场中沿垂直于电场方向移动时电场力不做功，电荷的电势能不发生变化，说明电场中的这些点的电势相等。电场中电势相同的各点构成的面叫做等势面 (equipotential surface)。可见，等势面一定跟电场强度的方向垂直。等势面和电场线相似，也是用来形象地描述电场的。

问题与思考解读

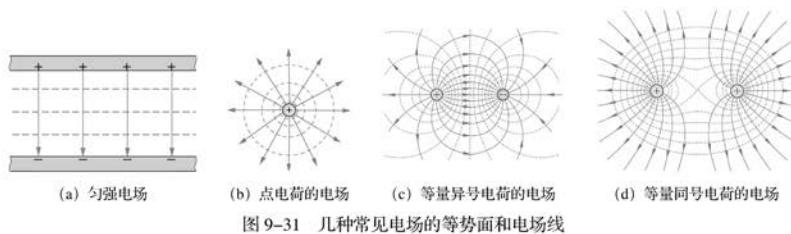


图 9-31 几种常见电场的等势面和电场线

问题与思考

- 有两个带正电的点电荷 Q_1 、 Q_2 分别位于 A 、 B 两点，若保持电荷 Q_2 静止，并使 Q_1 分别沿着图 9-32 中 a 、 b 、 c 三条不同的路径移动到位置 C 。在此过程中，电场力是否对 Q_1 做功？如做功，做的是正功还是负功？ Q_1 沿三条不同路径移动到 C 点的过程中，电场力对 Q_1 所做功的大小关系如何？ A 、 C 两点哪点电势高？
- 电场中 A 点放有电荷量为 $+1 \times 10^{-8}$ C 的点电荷 q_1 。若 q_1 的电势能为 2×10^{-6} J， A 点的电势为多大？若移走该点电荷， A 点的电势为多大？若在 A 点放另一电荷量为 -3×10^{-8} C 的点电荷 q_2 ，则 q_2 的电势能为多大？
- 有两个等量异号电荷，如图 9-31 (c) 所示。在图中找出电势为正、电势为负和电势为零的区域。如将一个负电荷置于此电场中，在哪个区域电势能为正值？(取无穷远处的电势为零)
- 如图 9-33 所示，在真空中有两个等量同号的正点电荷 q_1 、 q_2 ，分别置于 A 、 B 两点， DC 为 AB 连线的中垂线。将一负电荷 q_3 由 C 点沿中垂线移动到无穷远的过程中， q_3 的电势能如何变化？电势如何变化？简述理由。

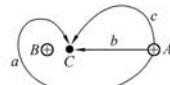


图 9-32

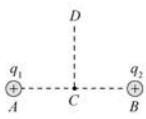


图 9-33

主要素养与水平：能量观念(Ⅱ)。

- 3. 参考解答：**两个等量异号电荷连线的中垂面为零势面。中垂面将整个电场分为正、负两个对称的区域，正电荷所在一侧为正电势区域，负电荷所在一侧为负电势区域。如将一个负电荷置于负电荷所在一侧的负电势区域，负电荷的电势能为正值。

命题意图：通过电场线和等势面的分布了解两个等量异号电荷周围电势分布的特点。

主要素养与水平：能量观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

- 4. 参考解答：** q_3 的电势能增加；电势降低。在移动负电荷 q_3 的过程中，电场力始终做负功，电势能增加。负电荷的电势能增加所以电势降低(也可根据等势面判断电势的变化)

命题意图：对检验电荷在具体电场中运动进行科学推理，从不同的角度思考问题，培养科学态度。

1. 参考解答：电场力对 Q_1 做功，电场力方向与位移方向相反，电场力做负功。电场力做功与路径无关，所以电荷 Q_1 沿三条不同路径移动时电场力做的功相等， $W_1 = W_2 = W_3$ 。正电荷 Q_1 从 A 移动到 C ，电场力做负功，正电荷的电势能增加，说明电势增加，所以 C 点电势高

命题意图：知道电场力做功的特点、电势和电势能的关系。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)。

2. 参考解答： $\varphi = \frac{E_p}{q_1} = \frac{2 \times 10^{-6}}{1 \times 10^{-8}} V = 200 V$ ；移走 q_1 后 A 点的电势仍为 $200 V$ ； A 点放入的点电荷 q_2 电势能为 $E_p = q_2 \varphi = -3 \times 10^{-8} \times 200 J = -6 \times 10^{-6} J$

命题意图：知道电势与电势能的关系。

主要素养与水平：

能量观念(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

5. 参考解答：

- (a) $\varphi_a > \varphi_b$, $E_a = E_b$
且电场强度方向相同
- (b) $\varphi_a = \varphi_b$, $E_a = E_b$
但电场强度方向相反
- (c) $\varphi_a = \varphi_b$, $E_a = E_b$ 但
电场强度方向不同
- (d) $\varphi_a = \varphi_b = 0$, $E_a = E_b$ 且电场强度方向
相同

命题意图：通过对不同类型电场中电势和电场强度的具体分析，了解电势的标量性和相对性。

主要素养与水平：
物质观念(Ⅱ);能量观念(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

5. 在如图 9-34 所示的 4 种情况下，图 (b) 和图 (d) 中 a 、 b 为两点电荷连线中垂线上关于 O 点对称的两点。分别描述 4 种情况中 a 、 b 两点的电势和电场强度的关系。



(a) 带等量异号电荷平行金属板

(b) 两等量同号电荷

(c) 正点电荷

(d) 两等量异号电荷

图 9-34

资料链接

各向同性有心力是保守力的原因

质点 m 受到的各向同性有心力 f 可表示为 $f(\mathbf{r}) = f(r)\mathbf{r}_0$, \mathbf{r}_0 为由力心指向受力点的单位矢量。

当质点在 $f(\mathbf{r})$ 作用下从 \mathbf{r}_A 经任意路径运动到 \mathbf{r}_B 时, $f(\mathbf{r})$ 所做功可表示为

$$W = \int_{\mathbf{r}_A}^{\mathbf{r}_B} \mathbf{f}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = \int_{\mathbf{r}_A}^{\mathbf{r}_B} f(r) \mathbf{r}_0 \cdot d\mathbf{r} = \int_{r_A}^{r_B} f(r) dr = \int_{r_A}^{r_B} f(r) dr$$

即各向同性有心力所做的功 W 只与始、末位置有关,而与具体路径无关。

静电势能

静电场中的电荷具有静电势能,源于静电场的电场力是保守力。匀强电场中的电场力是恒力,恒力做功与路径无关,必为保守力。现在来考察点电荷的电场力是否为保守力。设空间有点电荷 Q 与 q , Q 对 q 的电场力

$$\mathbf{F} = k \frac{Qq}{r^2} \mathbf{r}_0$$

其中 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, ϵ_0 为真空介电系数, r 为两点电荷之间的距离,而 \mathbf{r}_0 为由 Q 指向 q 的单位矢量。上

式具有和质点间万有引力相同的形式,说明点电荷间的库仑力同样是各向同性(由 $1/r^2$ 表示)的径向有心力(由 \mathbf{r}_0 表示),因此也必为保守力(参见必修二教师用书)。任意分布电荷的电场力总可视为各个点电荷电场力的叠加,可见任意分布电荷的电场力,即任意静电场的电场力必为保守力。对受保守力作用的物体体系可引进势能,这就是静电势能的由来。

我们先以最简单的上述两个点电荷组成的体系讨论静电势能。将两点电荷相距无穷远作为静电势能的零点,并设 Q 静止的参照系,可得将 q 从和 Q 相距 r 处移动到无穷远处的过程中 Q 的电场力所做的功。结果是

$$W = k \frac{Qq}{r}$$

保守力的功等于势能的负增量,因此 W 就等于 q 和 Q 相距 r 时的电势能 E_p

$$E_p = k \frac{Qq}{r}$$

如果 Q 和 q 同号, $E_p > 0$; 如果 Q 和 q 异号, $E_p < 0$ 。

取距 Q 无穷远处为电场中电势的零点,则距 Q 为 r 处的电势为 $\varphi = k \frac{Q}{r}$, q 的电势能 $E_p = q\varphi$ 。

和重力势能一样,静电势能 E_p 并不单属于点电荷 q ,而是属于 q 及其所处的电场。该电场由场源电荷 Q 产生,因此 E_p 也即属于这一彼此间存在库仑相互作用的 Q 及 q 组成的体系。 E_p 也可表示成 $E_p = Q\varphi'$,这里 φ' 为 q 的电场在 Q 所在处的电势。实际上 E_p 是 Q 和 q 静电相互作用的能量,是 Q 和 q 共同产生的电场之电场能的一部分。

如果 q 所处的电场是由若干个点电荷或连续分布的电荷所产生的,在这样的电场里 q 的电势能也属于包括 q 在内的所有电荷组成的体系,属于 q 和其他电荷产生的电场,也是包括 q 在内所有电荷产生电

场的电场能的一部分。

虽然不少教材提到电势(能)零点的选择原则上具有任意性,但电势零点作为稳定的电势参考点,在实际选择时还会受到一些限制。在每个场源电荷均固定不变且为有限大小,并且分布在有限空间(即既不是点电荷,又不延伸至无穷远)的情形,电势零点可任意选择。理论上如电荷分布在有限区域,常取无穷远处为电势或电势能的零点;在实用上,也可取地球作为电势(能)零点,二者兼容。二者兼容的依据是地球可看作一硕大的导体。众所周知,地球带有负电荷。如果不考虑这一负电荷,便可将地球视为一很大的中性导体。如果空间不存在电荷,即空间无电场,直至无穷远处全部空间均为等势空间。于是地球电势和无穷远处相等,也为零。如果空间存在电荷,或是有带电体接近地球使地球感应带电,或是有带电体和地球接触使地球带电,原则上地球电势会发生变化。但是地球是一庞大的导体,电容极大,区区有限电荷的变化导致地球电势的变化极微。地球电势仍和零相差无几,仍可视为零电势。或者说,地球实际上可取为电荷电势能的零点。将无穷远和地球取为有限分布电荷电势和电势能的零点是等价的。两平行金属板间的匀强电场可取负极板为电势零点。

关于电势和电势能还有一点需要注意:即使对单个带电体我们也可谈论电势,例如均匀带电导体球的电势,但单个导体的电势能是没有意义的。重力势能也一样,即使没有重物,我们也可谈论孤立地球的重力势,在地球表面就是 gh 。重力加速度 g 其实和重物无关,只决定于地球本身。重力势能则不同,孤零零一个地球是无所谓重力势能的,重力势能必是地球和重物组成的体系的性质,和地球与重物均有关,后者即表现为重物质量 m 。重力势能用 mgh 表示,正体现了这是由地球和重物组成的体系的性质。

[1]

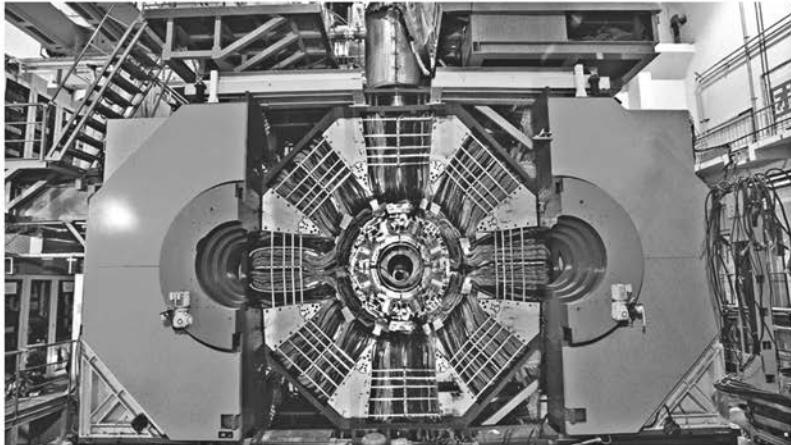


图 9-35 北京正负电子对撞机的双储存环

第五节 带电粒子在电场中的运动

带电粒子由于携带电荷，在电场中会受到电场力的作用产生加速度，使其速度发生变化。在现代科学实验和技术设备中，常常根据这个原理利用电场来改变或控制带电粒子的运动。北京正负电子对撞机是我国第一台高能加速器，也是世界八大高能加速器之一，如图 9-35 所示是该装置中的双储存环。该对撞机是高能物理研究的重大科技基础设施，它为中国粒子物理和同步辐射应用提供了基本研究实验手段和条件，使中国高能物理研究进入了世界前沿。而且，正负电子对撞机产生的同步辐射作为特殊光源，可在生物、医学、化学、材料等领域开展广泛的应用研究工作。

② 电场中两点的电势之差与电场力做功有何关系？

测量高度的起点不同，同一点的高度的数值就不相同，但两点间的高度差却保持不变。同样的道理，选择不同的位置作为电势零点，电场中任意点的电势的大小会随之改变，但电场中任意两点间的电势之差却保持不变。

电场中两点间电势之差称为 **电势差**（electric potential difference），也叫电压。设电场中 A 点的电势为 φ_A ，B 点的电势为 φ_B ，A、B 两点间的电势差用符号 U_{AB} 表示，则

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$$

本节编写思路

本节通过类比高度及高度差，得出电场中任意两点间电势之差保持不变的结论，引出电势差的概念。

通过分析电场力做功与电势差的定量关系，可得电场中任意两点之间的电势差在数值上等于移动单位正电荷电场力所做的功。

通过分析、演绎得到匀强电场中电场强度和电势差的定量关系。

通过科学推理和科学论证，学会计算带电粒子在电场中沿直线运动的问题。通过自主活动实验研究带电粒子在电场中的偏转问题。

通过分析电场线和等势面之间的关系、电势差与电场强度的关系，体会科学研究应从不同角度展开。

体验分析和演绎的重要作用，感悟科学推理在科学中的重要性，构建运动与相互作用观念，培养科学推理和论证的能力。

正文解读

[1] 北京正负电子对撞机(BEPC)于 1988 年 10 月在中国科学院高能物理研究所建成。它由注入器、输运线、储存环、北京谱仪和同步辐射装置等几部分组成。对撞机的注入器是一台 200 m 长的直线加速器，用于为节首图所示的储存环提供能量为 1.1~1.55 GeV 的正负电子束。输运线连接注入器和储存环，将注入器输出的正负电子分别传送到储存环里。节首图所示的储存环是一台周长为 240.4 m 的环形加速器，它将正负电子加速到需要的能量，并加以储存。

本节可通过情境提出如何使带电粒子加速和偏转两大任务，然后逐项解决。帮助学生认识电场对带电粒子的作用，会计算带电粒子在电场中沿直线加速运动的问题，并通过实验了解带电粒子在电场中的偏转。

本节对带电粒子在电场中沿直线加速进行分析。“问题与思考”第 5 题的内容与此呼应。

[1] 理解电势差的概念，知道电势差与零电势的选择无关，具有绝对性。

引入电势差的概念亦可为下一章学习串联电路总电压等于各部分电压之和等电路知识做好铺垫，以便学生用电势差的概念分析电路。

[2] 通过示例 1 有关电场力做功的练习，可使学生体会电场力做的功既可由第四节电场力做功与电势能的变化之间的关系来计算，也可由本节电场力做功和电势差的定量关系来计算。

运用公式 $W_{AB} = qU_{AB}$ 时，可将电荷量 q 和电势差 U_{AB} 的正、负都代入计算，直接得到电场力做功的大小和正、负；也可将电荷量 q 和电势差 U_{AB} 分别用绝对值代入计算，得出做功的大小后，再利用电荷所受电场力方向和移动方向判断电场力做功的正、负。体会从不同角度开展科学推理的过程。

电势差是标量，只有大小，没有方向。当 A 点电势比 B 点电势高时， U_{AB} 为正值； U_{BA} 则为负值。在国际单位制中电势差的单位也是伏特，简称伏，用符号 V 表示。

[1] 把正电荷 q 沿电场线的方向从 A 点移到 B 点，若 A 点的电势为 φ_A ， B 点的电势为 φ_B ，电场力做正功 W_{AB} ，则有

$$\begin{aligned} W_{AB} &= E_{pA} - E_{pB} \\ &= q\varphi_A - q\varphi_B \\ &= q(\varphi_A - \varphi_B) \\ &= qU_{AB} \end{aligned}$$

即 $U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}$

这就是电势差与电场力做功的关系，说明电场中任意两点之间的电势差数值上等于移动单位正电荷电场所做的功。因此，知道了电场中两点的电势差就可以方便地计算在这两点间移动电荷时电场力所做的功，而不必考虑电荷移动的路径。

[2] 示例 1 电场中有 A 、 B 两点，已知电势 $\varphi_A = 650$ V， $\varphi_B = 800$ V。把电荷量 $q = -2 \times 10^{-9}$ C 的带电粒子从 A 点移动到 B 点，则：

- (1) A 、 B 两点间的电势差是多少？
- (2) 电场力做了多少功？做的是正功还是负功？

分析：根据 A 、 B 两点的电势可求出两点间电势之差。利用电场中某一点的电势与电荷量的乘积可求得带电粒子在该点所具有的电势能，根据电场力做功与电势能变化量的关系便可求解。

解：(1) A 、 B 两点间的电势差

$$\begin{aligned} U_{AB} &= \varphi_A - \varphi_B \\ &= 650 \text{ V} - 800 \text{ V} \\ &= -150 \text{ V} \end{aligned}$$

(2) 带负电粒子在 A 点的电势能

$$\begin{aligned} E_{pA} &= q\varphi_A \\ &= -2 \times 10^{-9} \times 650 \text{ J} \\ &= -1.3 \times 10^{-6} \text{ J} \end{aligned}$$

带负电粒子在 B 点的电势能

$$\begin{aligned} E_{pB} &= q\varphi_B \\ &= -2 \times 10^{-9} \times 800 \text{ J} \\ &= -1.6 \times 10^{-6} \text{ J} \end{aligned}$$

带电粒子从 A 点移动到 B 点电场力所做的功

$$\begin{aligned}W_{AB} &= E_{pA} - E_{pB} \\&= -1.3 \times 10^{-6} \text{ J} - (-1.6 \times 10^{-6}) \text{ J} \\&= 3 \times 10^{-7} \text{ J}\end{aligned}$$

当然，也可以用公式 $W_{AB} = qU_{AB}$ 进行计算，即

$$\begin{aligned}W_{AB} &= qU_{AB} \\&= (-2 \times 10^{-9}) \times (-150) \text{ J} \\&= 3 \times 10^{-7} \text{ J}\end{aligned}$$

因此电场力做功 $3 \times 10^{-7} \text{ J}$ ，做的是正功。

② 匀强电场中电场强度和电势差有何关系？

如图 9-36 所示，匀强电场的电场强度为 E ， AB 间距离为 d ，电势差为 U_{AB} 。把正电荷 q 沿电场方向从 A 点移动到 B 点，在此过程中，它受到的电场力为 qE ，电场力对其做功 $W_{AB} = qEd$ 。由电场力做功与电势差的关系，也可得 $W_{AB} = qU_{AB}$ 。

由此可得电场强度与电势差的关系为

$$[1] \quad E = \frac{U_{AB}}{d}$$

上式说明匀强电场中电场强度数值上等于沿电场线方向单位距离上降低的电势，而且，沿电场线的方向电势降低得最快。

[2]

大家谈

请证明 $1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$ 。

示例 2 如图 9-37 (a) 所示，在电场强度大小为 60 V/m 的匀强电场中有 a 、 b 、 c 三点， $ab = 5 \text{ cm}$ ， $bc = 8 \text{ cm}$ ，其中 ab 沿电场方向， bc 与电场方向的夹角为 60° 。求： a 、 c 两点间的电势差 U_{ac} 。

分析：根据匀强电场中电场强度与电势差的关系 $E = \frac{U_{ac}}{d}$ ，可得 $U_{ac} = Ed$ ，其中 d 为 a 、 c 两点间沿电场线方向的距离或 a 、 c 两点所在等势面间的间距，如图 9-37 (b) 所示。

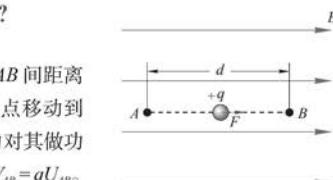


图 9-36 匀强电场中移动电荷

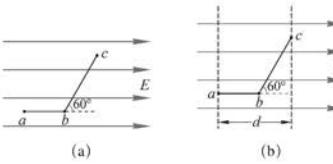


图 9-37 a 、 b 、 c 三点在匀强电场中的关系

[2] 此处设置“大家谈”，是为了比较电场强度两种单位间的联系。电场强度的单位应是牛(顿)每库(仑)。在国际单位制中，符号为 N/C ，数值上等于单位正电荷所受的电场力。电场强度的另一单位是伏(特)每米，符号是 V/m ，它与 N/C 相等。常用的单位还有伏特每厘米，符号为 V/cm 。

证明： $1 \frac{\text{N}}{\text{C}} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{C} \cdot \text{m}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}} \cdot \frac{1}{\text{m}}$ 。根据 $U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}$ 可知，电场中任意两点之间的电势差数值上等于移动单位电荷时电场力所做的功， $1 \text{ V} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}}$ 。综上所述 $1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$ 。

[1] 对于电场中任意两点 A 、 B 间的电势差，表达式 $U_{AB} = Ed$ 仍然适用，但式中的 d 应理解为单位正电荷的位移矢量在电场方向上的投影。由功能关系可导出该式。若点电荷 q 在匀强电场中沿任意直线路径从 A 点移动到 B 点，设位移为 s ，则从电场的能量属性可得电势能增量 $\Delta E_{AB} = qU_{AB}$ ，从电场力做功的角度考虑有 $W_{AB} = Fs \cos \theta = qEscos \theta$ ，由功能关系可得： $U_{AB} = Escos \theta$ ($s \cos \theta = d$ ， θ 为电场强度 E 与位移 s 方向的夹角)，即匀强电场中两点间的电势差等于电场强度 E 的大小、位移 s 的大小、电场强度与位移夹角 θ 的余弦三者的乘积，这样就能得到电势差 U_{AB} 的正、负，判断 A 、 B 两点电势的高低。

解: a 、 c 两点间沿电场线方向的距离

$$d = ab + bc \cdot \cos 60^\circ = (5 + 8 \times 0.5) \text{ cm} = 9 \text{ cm} = 0.09 \text{ m}$$

根据匀强电场中电场强度与电势差的关系, a 、 c 两点电势差的大小

$$|U_{ac}| = Ed = 60 \times 0.09 \text{ V} = 5.4 \text{ V}$$

因为沿电场线方向电势逐渐降低, $\varphi_a > \varphi_b > \varphi_c$, 所以电势差 U_{ac} 为正值。 $U_{ac} = 5.4 \text{ V}$ 。

② 如何分析带电粒子在电场中的运动?

带电粒子在电场中受到电场力的作用, 通常电场力远大于带电粒子的重力, 从而可以忽略重力对带电粒子的影响。如图 9-38 所示, 真空中有一对平行金属板, 两板间电势差为 U , 板间距为 d , 将一质量为 m 、带电荷量为 $+q$ 的粒子在正极板附近由静止释放, 分析带电粒子在电场中的运动情况。

带电粒子在匀强电场中做初速度为零的匀加速直线运动。为了求带电粒子到达负极板时速度 v 的大小, 我们用两种方法来研究。

方法一: 由于带电粒子在匀强电场中受到电场力 F 作用, 从正极板出发做初速度为零的匀加速直线运动, 则由牛顿第二定律可得, 带电粒子做匀加速直线运动的加速度

$$a = \frac{F}{m}$$

又 $F = qE$, 由匀强电场的电场强度与电势差的关系 $E = \frac{U}{d}$

得到

$$a = \frac{qU}{md}$$

[1] 根据初速度为零的匀加速直线运动的运动学规律, 则有

$$v^2 = 2ad$$

可得

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$$

方法二: 带电粒子从正极板出发到达负极板, 仅有电场力做功 $W = qU$, 改变了带电粒子的动能, 则根据动能定理, 有

$$qU = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$$

由于 $v_0 = 0$, 也可得

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$$

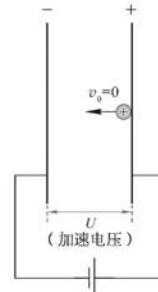


图 9-38 带电粒子
在电场中的加速

[1] 通过初速度为零的带正电粒子在匀强电场中沿直线加速这种情况, 解决节课首图所提出如何使带电粒子加速的任务。进一步通过“大家谈”引导解决非匀强电场的问题, 学会计算带电粒子在电场中沿直线加速运动的不同情况。

[1]

大家谈

如果不是匀强电场，方法一和方法二中是否有些等式不适用了？请说明理由。

[2]

电荷在电场中运动会受到电场力的影响，必然获得加速度。因此，可以利用电场来控制带电粒子的运动。

[3]

自主活动

阴极射线是从低压气体放电管的阴极射出的带负电的电子流。如图 9-39 所示即为用阴极射线管演示带电粒子在电场中的偏转的实验装置。

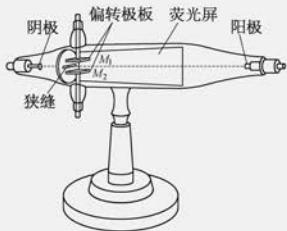


图 9-39 阴极射线在电场中偏转实验装置

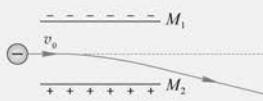


图 9-40 电子束在电场中的偏转

给阴极射线管左右两端加上高电压，电子束从阴极射向阳极。利用荧光屏可清晰地显示出电子束运动的径迹。在荧光屏前有一狭缝，射线只能从狭缝中通过沿直线前进。在射线经过路径的上下方有一对平行金属板 M_1M_2 ，称为偏转极板。通过控制偏转极板施加的电压观察带电粒子在电场中的偏转情况。

当平行金属板 M_1M_2 之间未加电压时，电子束不发生偏转，沿直线运动；当平行金属板 M_1M_2 之间施加上负下正的电压时，电子束在电场力的作用下如图 9-40 所示向下偏转；当平行金属板 M_1M_2 之间施加上正下负的电压，电子束将在电场力的作用下向上偏转。

带电粒子在电场中由于受到电场力的作用产生加速度，其速度大小和方向都可能发生变化。带电粒子在电场中沿直线加速和偏转是两种最基本的运动情况。

较多。本自主活动可采用电子束演示器(执行标准 JY0017)的成套仪器供教师演示或学生自主活动。

这是一个观察型活动，其目的是：(1) 观察电子束在电场中的偏转情况；(2) 改变偏转极板电压的极性，观察电子束在电场中偏转情况的变化。

阴极射线是从低压气体放电管的阴极射出的带负电的电子流。在阴极射线管左、右两端连接直流高电压，阳极端接高电位，就会有电子束从阴极射向阳极。利用荧光屏可清晰地显示出电子束运动的径迹(电子束肉眼并不可见，但高速电子束打到荧光屏表面时可使荧光粉发光)。在荧光屏前有一狭缝，射线(电子束)只能从狭缝中通过并沿直线前进。在电子束经过路径的上、下方有一对平行金属板，称为偏转极板。通过控制偏转极板施加电压的正、负，观察电子束的偏转情况。通过改变偏转极板之间电压的大小，还可以人为控制电子束的偏转程度。

[1] 此处设置“大家谈”，是为了讨论带电粒子在电场中沿直线加速运动的问题时，运用动力学方法和动能定理求速度的区别与联系。

带电粒子在两平行金属板间匀强电场中加速的情境中，两种方法都适用。

如果不是匀强电场，方法二中的所有等式均适用，但方法一中的等式 $E = \frac{U}{d}$ 不适用(详见本节资料链接)。因为这一等式仅适用于匀强电场，对于非匀强电场并不适用，也就不能得到 $a = \frac{qU}{md}$ 。

[2] 在电场中受电场力作用获得加速度，从而改变带电粒子的运动状态。不仅可以改变速度的大小，还能改变速度的方向。

[3] 本节中理论分析、演绎和计算的内容

[1] 课程标准要求

通过实验了解带电粒子在电场中的偏转。此处设置“拓展视野”，是为了探究“自主活动”中显示的偏转现象，应用运动的合成和分解的思想进行分析。学生通过必修二的学习已有平抛运动的基础，类比平抛运动的规律学习带电粒子在电场中偏转的规律，理解人为控制电子束偏转程度的理论根据。

问题与思考解读

1. 参考解答：

$$\Delta E_p = |W_{AB}| = qU_{AB} = 1 \times 1.2 \times 10^9 \text{ eV} = 1.2 \times 10^9 \text{ eV}, \text{ 电势能减少 } 1.2 \times 10^9 \text{ eV}$$

命题意图：带电云层下部大部分带负电荷，所以大多数的雷击是负极性的，雷云中的负电荷会在地面感应出大量正电荷。这样地面与带电云层之间，会形成强大的电场，雷击就是由电场对电子做功形成电流所致。

主要素养与水平：能量观念(Ⅱ)；科学本质(Ⅰ)。

2. 参考解答： A 、 B 两点间的电势差 $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = 300 \text{ V} - (-200) \text{ V} = 500 \text{ V}$ 。由于 $q = +4 \times 10^{-6} \text{ C}$, $W_{AB} = qU_{AB} = 4 \times 10^{-6} \times 500 \text{ J} = 2 \times 10^{-3} \text{ J}$ 电场力做正功, $\Delta E_p = -W_{AB} = -2 \times 10^{-3} \text{ J}$, 电势能减少了 $2 \times 10^{-3} \text{ J}$

命题意图：运用电场力做功与电势能变化的关系。

主要素养与水平：能量观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

[1]

拓展视野

如图 9-41 所示，一电子（电荷量大小为 e 、质量为 m ）以初速度 v_0 沿水平方向射入水平放置、相距 d 、长为 L 、电势差为 U （能使电子飞出极板）的一对平行金属板间。

设两极板间为向上的匀强电场。电子进入匀强电场后，由于重力通常远小于电场力，重力可忽略不计。忽略极板的边缘效应，电子受到竖直向下的电场力作用而发生偏转。电子的运动类似于重力场中的平抛运动。

电子在水平方向的分运动是速度为 v_0 的匀速直线运动，即 $v_x = v_0$ ，因此电子在电场内运动的时间 $t = \frac{L}{v_0}$ 。

电子在竖直方向受电场力 eE 的作用，做初速为零、加速度为 a 的匀加速直线运动，产生垂直于板面方向偏移的距离 $y = \frac{1}{2}at^2$ 。其中

$$a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m} = \frac{eU}{md}$$

$$\text{所以 } y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{eUL^2}{2mdv_0^2}$$

电子离开电场时，速度 v 的竖直方向分量

$$v_y = at = \frac{eU}{md} \cdot \frac{L}{v_0}$$

偏转角度 θ 可由 $\tan \theta$ 来确定，即

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{eU}{md} \cdot \frac{L}{v_0^2}$$

问题与思考

- 在某次雷暴中，地面和云层之间的电势差是 $1.2 \times 10^9 \text{ V}$ 。假设一个电子从云层运动到地面，其电势能改变了多少？
- 电场中有 A 、 B 两点，已知两点的电势为 $\varphi_A = 300 \text{ V}$, $\varphi_B = -200 \text{ V}$ 。将一电荷量为 $+4 \times 10^{-6} \text{ C}$ 的粒子从 A 点移到 B 点，电场力对带电粒子做了多少功？做的是正功还是负功？带电粒子的电势能是增加还是减少？改变了多少？

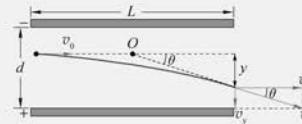


图 9-41 带电粒子在电场中偏转

3. 如图 9-42 所示是一匀强电场的等势面，相邻等势面相距 2 cm，则该匀强电场的电场强度为多大，方向如何？

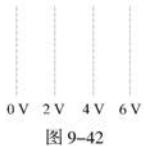


图 9-42

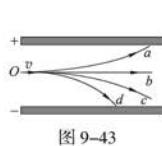


图 9-43

4. 如图 9-43 所示，一束粒子从 O 点沿水平方向射入平行板之间的电场后分成了 a、b、c、d 四束，各粒子束中粒子的带电情况如何？(不计粒子重力)

5. 如图 9-44 所示的装置处在真空中，电场加速电压为 $U=10\text{ V}$ ，两极板间距离 $d=2\text{ cm}$ 。若电子在负极板处由静止释放，求其在装置中被加速后离开电场时的速度 v 。(电子的质量为 $9.1 \times 10^{-31}\text{ kg}$)

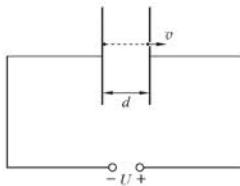


图 9-44

3. 参考解答：电场强度大小： $E = \frac{U_{AB}}{d} = \frac{2}{0.02}\text{ V/m} = 100\text{ V/m}$ 。电场强度的方向：垂直于等势面由电势高的等势面指向电势低的等势面(水平向左)

命题意图：分析匀强电场中电场线和等势面之间的关系、电势差与电场强度的关系，知道电势差与电场强度的定量关系。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

4. 参考解答：两平行金属板间匀强电场方向竖直向下，带电粒子所受电场力方向与速度方向不在一直线上，故带电粒子在电场中做曲线运动。粒子束 a 向正极板偏转说明粒子束 a 带负电；粒子束 b 不发生偏转说明粒子束 b 不带电；粒子束 c、d 向负极板偏转说明粒子束 c 和 d 带正电

命题意图：认识电场对带电粒子的作用，能分析带电粒子在电场中的运动情况。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅱ)。

5. 参考解答：电子在匀强电场中做初速度为零的匀加速直线运动，根据动能定理： $qU = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$ 以及 $v_0 = 0$ ，可得 $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10}{9.1 \times 10^{-31}}} \text{ m/s} \approx 1.88 \times 10^6 \text{ m/s}$

命题意图：会计算带电粒子在电场中沿直线运动的问题，亦可用本节正文介绍的动力学方法求速度。

主要素养与水平：能量观念(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

资料链接

电场强度与电势差的定量关系

$E = \frac{U_{AB}}{d}$ 仅适用于匀强电场,对于非匀强电场并不适用,但在极小空间范围内由于电场强度变化很小,可以近似看成匀强电场,此时上式可写成 $E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta l}$ ($\Delta\varphi$ 表示沿电场方向 Δl 距离上电势的变化量)。电场强度在任一方向的分量表示沿该方向电势变化率的负值。电场强度数值上等于沿电场线方向单位距离上降低的电势。负号的物理意义表示电场强度的方向与电势升高的方向相反。对三维情形,电场强度 \mathbf{E} 与电势 φ 之间的关系为 $\mathbf{E} = -\nabla\varphi$ (∇ 为梯度的符号),即电场强度大小与电势的梯度相等,方向相反。

本节编写思路

[1]



图 9-45 上海公交 11 路超级电容车

第六节 电容 电容器

如今在城市街头我们时常看到新能源汽车——电动汽车在路上行驶，其中超级电容车是典型的代表，作为城市公交的一员为市民提供公共服务。上海公交 11 路（图 9-45）是世界上首条使用超级电容车实现快速充电技术商业化的公交线路。

超级电容车借助车上安装的“超级电容器”，可以通过车顶的充电设备从充电站的电缆上实现几十秒的快速充电，然后继续行驶。超级电容车行驶所需的能量贮存在“超级电容器”里。

② 什么是电容器？

[2] 如图 9-46 所示的莱顿瓶可看作电容器的原型。莱顿瓶是一个玻璃容器，内外包覆着导电金属箔作为极板。瓶口插一根与外侧金属箔绝缘的金属棒，棒的上端接一个金属球，下端利用金属链与内侧金属箔连接。莱顿瓶具有贮存电荷的功能。

随着科技的发展，不断有新的用来储存电荷的装置被

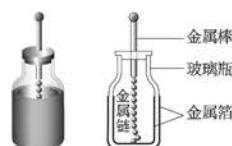


图 9-46 莱顿瓶

超级电容车仅需充电数分钟，就可以完成 20~30 km 的线路运行，无需中途充电。快充高能量电容公交车由于不需要在停车场内长时间集中充电，能有效缓解中心城区停放场地紧张、供电容量不足的问题，其采用的快充技术还可有效弥补采用慢充技术的锂电池纯电公交车充电时间较久的不足。

本节中“超级电容器”的内容与此呼应。

[2] 莱顿瓶是一种用以储存静电的装置，早期在荷兰的莱顿试用。作为原始形式的电容器，莱顿瓶曾被用来作为电学实验的供电来源，也是电学研究的重要基础器件。典型的莱顿瓶是一个玻璃容器，内外包覆着导电金属箔作为极板。瓶口上端接一个球形电极，下端利用导体（通常是金属锁链）与内侧金属箔或是水连接。莱顿瓶的充电方式是将电极接上静电产生器或起电盘等电荷源，外部金属箔接地，内部与外部的金属将会携带电荷量相等但极性相反的电荷。

本节通过 11 路电容车引出超级电容车的快充技术能够在很短时间内储存能量，在行驶过程中慢慢释放出来，体会电容器的储能作用。

通过观察和拆解常见的电容器了解电容器的构造。通过观察电容器充、放电现象的学生实验了解电容器的作用。

利用观察不同电容器电荷量与两极板间电势差之比的实验知道用比值法来定义电容器的电容，再次体会比值定义法在定义物理量中的重要作用。

通过学生实验培养学生的实验观察能力和科学探究能力。以电容触摸屏为例来说明电容器在生活中的广泛应用，体会科学、技术、社会、环境之间存在的相互联系，认识科学本质，培养科学态度。

正文解读

[1] 节首图所示的

[1] 建议在了解电容器的基本结构和常见的电容器时,通过观察和拆解常见的圆柱形(纸质)电容器认识电容器的外形和两个电极,拆解后观察和归纳出电容器的主要构件——两块极板和极板之间的介质,了解电容器的基本构造,突出模型建构。

电容器的分类方式可按结构分为固定电容器、可变电容器和微调电容器;也可按电介质分为有机介质电容器、无机介质电容器、电解电容器(符号如图8所示)、空气介质电容器、瓷介电容、涤纶电容、钽电容、聚丙烯电容等。

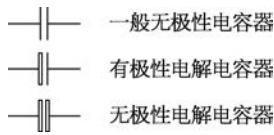


图 8

创造出来,我们把能存储电荷和电能的装置叫做电容器(**capacitor**)。各种电容器在电子或电力设备里有广泛的应用。

电容器(图9-47)可分为容量固定的与容量可变的两种。电容器的符号如图9-48所示。常见的是固定容量的电容器,包括电解电容器和瓷片电容器等。

[1]



固定电容器
可变电容器

平行板电容器(图9-49)是最简单的电容器。它是在两个相距很近的平行金属板中间夹上一层绝缘物质——电介质(如空气、聚丙烯、云母等)组成的。

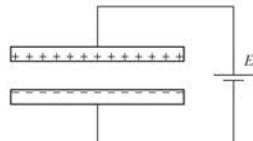


图 9-49 电路中的平行板电容器

② 电容器如何存储和释放电荷?

图9-50中如将单刀双掷开关S置于接线柱1,电源的两极就分别与电容器两极板相连接,两极板就分别带上了等量异号电荷。这个过程称为对电容器充电。每个极板所带的电荷量的绝对值叫做电容器所带的电荷量。

随着极板上积累的电荷量不断增大,电容器两极板间的电势差U逐渐增大。当两板间电势差增大至与电源两端电压相等时,电路中不再有电流流动,电容器的充电过程完成。

此时,将单刀双掷开关S置于接线柱2,电容器上的电荷中和放电,极板上电荷量下降,两极板之间的电势差U也随之下降。当极板上的电荷量减小为零时,两极板之间电势差也下降为零,电容器最终不再带电,电容器的放电过程完成。

[2] 充、放电是电容器的重要特性之一。它可以将电能储存起来而在需要时释放。

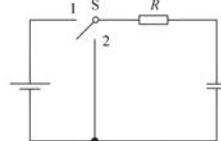


图 9-50 电容器的充、放电原理图

[2] 通常电容器的充、放电过程比较短暂,难以用视觉直接感受。学生在日常生活中对电容器的充、放电现象和电容器能储存和释放电荷的作用没有直观的体验,必须通过演示实验以及学生实验来观察和领会。

通过观察电容器的充、放电现象的实验,了解电容器的作用,知道电容器是一种储存电荷、储存能量的装置。

学生实验**观察电容器的充、放电现象****实验原理与方案**

如图 9-50 所示, 将单刀双掷开关 S 置于接线柱 1 时就构成了电容器的充电电路。当电容器充电结束后, 将开关 S 置于接线柱 2 时就构成了电容器的放电电路。

[1] 实验装置与方法

方法一: 如图 9-51 所示, 通过灯泡的亮度变化观察电容器的充电和放电过程。

方法二: 如图 9-52 所示, 利用电压传感器和电流传感器, 分别代替电压表与电流表, 采集所测电路的电压、电流信号, 得到电容器充、放电时电压 U 和电流 I 随时间 t 变化的图像, 分别如图 9-53 和图 9-54 所示; 从而可了解电容器的充电和放电过程。

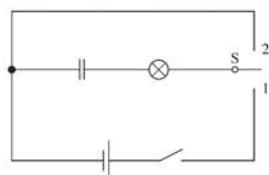


图 9-51 用灯泡观察电容器的充、放电电路

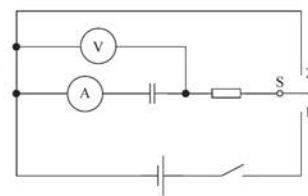
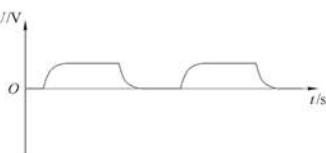
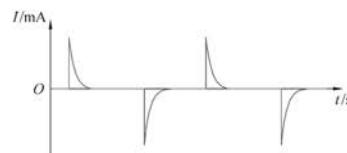


图 9-52 用传感器观察电容器的充、放电电路

[2]图 9-53 $U-t$ 图像图 9-54 $I-t$ 图像**实验操作和数据收集**

根据方法一或方法二的实验原理图组装电路, 进行实验, 观察电容器的充、放电现象。

数据分析

实验观察到的现象: _____。

实验结论: _____。

交流与讨论**[3]**

电容器在充电过程中获得的能量来自哪里?

电容器在充、放电过程后, 电源提供的电能又去了哪里? (电源视为其内阻为零)

大, 随后逐渐减小到零; 在充电过程中, 开始时电压较小, 随后逐渐增大达到稳定值。在放电过程中, 开始时电流较大, 随后逐渐减小到零; 在放电过程中, 开始时电压较大, 随后逐渐减小为零。

[3] 电容器中储存的能量来自电源提供的电能。

电源供给的电能最终转化为电路消耗的内能(忽略充、放电过程中的电磁辐射)。

[1] 本实验应注意

器材选择, 宜选择电容值较大的电容器和电阻值较大的电阻(例: 可选用 $1\ 000\ \mu\text{F}$ 的电容器和 $200\ \Omega$ 的电阻), 使充、放电过程缓慢, 容易观察(原理详见本节资料链接)。具体的实验指导可参见《普通高中教科书 物理实验与活动部分 必修》。

大容量电容器大多是电解电容, 电解电容器是常用的有极性电容器。在有极性电解电容器中, 两根引脚一长一短, 长的为正极性, 短的为负极性。无极性电解电容器的两根引脚没有正、负极之分。

[2] 实验观察到的

现象: 电容器的充、放电过程需要时间, 电流和电压随时间变化。根据 $I-t$ 图像可判断电容器在充、放电过程中的电流方向相反。

实验结论: 在充电过程中, 开始时电流较

[1] 用电动势为 E 的电源给一电容为 C 的电容器充电完毕后，电容器两端的电压为 E ，极板上储存的电荷量为 Q 。

如图 9 所示， $Q-U$ 图像的斜率为电容器电容 C ，图像与横坐标轴围成的面积为电容器储存的电场能： $W = \frac{1}{2}UQ = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}CE^2$ 。这一

结果可证明如下：在电容器充电的过程中，电源将总量为 Q 的正电荷由负极板输送至正极板，电源做功为 EQ 。在这一过程中，电路中的电阻要消耗焦耳热，设为 A ， $A = \int dA =$

$\int_0^Q U dq$ ， U 为电阻两端电压， q 为电容器极板上的电荷。由于 $U =$

$E - \frac{q}{C}$ ，得 $A =$

$\int_0^Q \left(E - \frac{q}{C} \right) dq = EQ -$

$\frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}EQ = \frac{1}{2}CE^2$ ，即电源提供能量的一半为电阻上消耗的能量，另一半转化为电场能

储存在电容器中。可见储存的能量与转化为焦耳热的能量相等。放电时，电容器储存的电场能转化为电阻上消耗的焦耳热。

如何描述电容器存储电荷本领的强弱？

将电容器 A 、电压传感器、电流传感器、电压可变的直流电源等按如图 9-52 所示组成电路。调节直流电源的电压，闭合开关，分别记录电容器两极板间的电势差 U 和在不同电压下充电完毕时电容器所带的电荷量 Q （将电流传感器采集的数据处理后得到）。以电容器所带的电荷量 Q 为纵轴，以两极板间的电势差 U 为横轴，绘制电容器 A 的 $Q-U$ 图像（图 9-55），发现电容器 A 每个极板所带的电荷量 Q 和电容器两极板间的电势差 U 成正比。

[1]

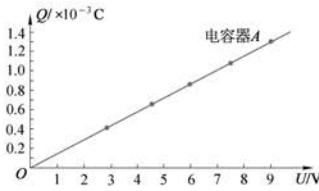


图 9-55 电容器 A 的 $Q-U$ 图像

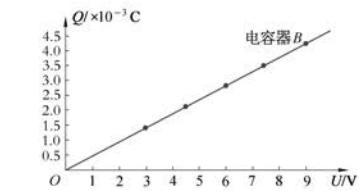


图 9-56 电容器 B 的 $Q-U$ 图像

选择另一个不同的电容器 B ，重复上述实验步骤，绘制电容器 B 的 $Q-U$ 图像（图 9-56），同样发现电容器 B 每个极板所带的电荷量 Q 和电容器两极板间的电势差 U 成正比，但电容器 B 的比例系数与电容器 A 的比例系数不同。

大量研究表明，对于同一个电容器，每个极板所带的电荷量 Q 和电容器两极板间的电势差 U 成正比，也就是说 $\frac{Q}{U}$ 是确定的；对于不同电容器 $\frac{Q}{U}$ 一般是不同的。可见，电荷量 Q 和电势差 U 之比描述了电容器存储电荷的本领。

物理学中把电容器所带的电荷量 Q 与电容器两极板间的电势差 U 之比称为电容器的电容（capacitance），用符号 C 来表示。

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

由上式可见，电容器的电容在数值上等于两极板间的电势差为 1 V 时电容器极板上所带的电荷量。电容的国际单位是法拉，简称法，用符号 F 表示。一般电容器的电容往往比 1 F 小得多，常用微法 (μF)、纳法 (nF)、皮法 (pF) 等单位，它们的关系是：

$$1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}, 1 \text{nF} = 10^{-9} \text{ F}, 1 \text{pF} = 10^{-12} \text{ F}$$

如加在电容器两极板上的电压超过某个极限数值，电介质将变成导体，这种现象称为电介质的击穿。电介质击穿会导致电容器损坏。这个极限电压称为击穿电压。

电容器通常都标明电容器的电容和额定电压。额定电压是电容器长期工作时所能承受的电压，这个数值比击穿电压低。

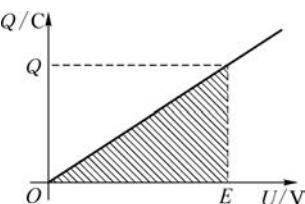


图 9

超级电容车的“超级电容器”一般使用活性炭电极材料，具有储存电荷量大的特点，其电容可达几百至上千法。超级电容作为绿色节能的新型器件，以其容量高、寿命长、充电时间短、高效率、低污染等优异特性在交通运输、电力、机械工业等方面得到广泛的使用。

[1]

大家谈

规定电容器的电容这个物理量时采用了什么方法？在本章的学习过程中哪些物理量的定义也采用了这一方法？

示例 一个平行板电容器的电容是 $0.05 \mu\text{F}$ ，两极板间的电势差为 3 V ，求电容器所带的电荷量。

分析：可由电容的定义公式求得电荷量。

解：已知平行板电容器的电容 $C = 0.05 \mu\text{F} = 5 \times 10^{-8} \text{ F}$ ，电容器两极板的电势差 $U = 3 \text{ V}$ 。

则由电容的定义式 $C = \frac{Q}{U}$ ，得电容器的电荷量

$$\begin{aligned} Q &= CU \\ &= 5 \times 10^{-8} \times 3 \text{ C} \\ &= 1.5 \times 10^{-7} \text{ C} \end{aligned}$$

[2]

拓展视野

如图 9-57 (a) 所示，使一个极板与静电计相连的电容器充电后断开电源。在保持极板上的电荷量 Q 不变的条件下分别改变两极板的正对面积 S 、两极板间的距离 d 、两极板间的电介质。静电计指针的偏转角可定性地反映两极板间电势差 U 的大小。指针偏转角大反映了两极板间电势差大，由于极板上电荷量不变，说明电容器电容值小；指针偏转角小反映了两极板间电势差小，说明电容器电容值大。因此就可用不同情况下电势差 U 的大小反映电容器电容值 C 的大小从而研究影响电容器电容的因素。

1. 如图 9-57 (b) 所示，保持 Q 、 d 不变，改变 S ，研究 C 与 S 的关系；
2. 如图 9-57 (c) 所示，保持 Q 、 S 不变，改变 d ，研究 C 与 d 的关系；
3. 如图 9-57 (d) 所示，保持 Q 、 S 、 d 不变，在两极板间插入电介质，研究 C 与电介质的关系。

[1] 此处设置“大家谈”是因为电容的定义采用了比值定义法。由此可进一步体会比值定义法在定义物理量中的重要作用。

本章学习过程中，类似的已使用比值定义法定义的物理量还有电

$$\begin{aligned} \text{场强度 } \mathbf{E} &= \frac{\mathbf{F}}{q} \text{ 和电势} \\ \varphi &= \frac{E_p}{q}。 \end{aligned}$$

[2] “探究影响平行板电容器电容的因素”的实验原理详见本节资料链接。

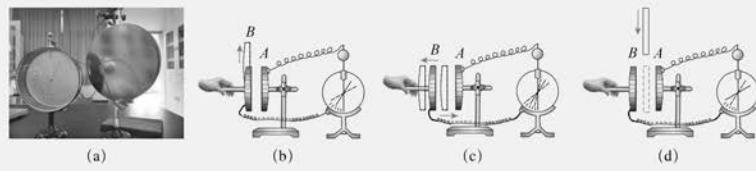


图 9-57 探究影响平行板电容器电容的因素

实验表明： S 越小， U 越大，说明 C 越小； d 越大， U 越大，说明 C 越小；插入介质板后， U 减小，说明 C 变大。

由实验可得平行板电容器的电容大小与两极板的正对面积、极板间的距离和极板间电介质有关。

[1] 此处设置

“STSE”是为了说明电容器的应用。以电容触摸屏的原理为例说明电容器在生活中的广泛应用。教学中还可以介绍电容器在照相机闪光灯电路等电子技术中的应用，体会科学、技术、社会、环境之间存在的相互联系，认识科学本质，培养科学态度。

[1]

STSE

目前智能手机普遍采用了电容触摸屏，电容触摸屏可分为自电容屏和互电容屏两种类型。这里以支持多点触控的互电容屏为例进行说明。

如图 9-58 所示为互电容屏结构。互电容屏内部由驱动线路与玻璃基板上的传感线路等部分组成，驱动线路发出低电压高频信号投射到传感线路形成稳定的电流。

如图 9-59 所示，当手指接触到电容屏时，人体与电容屏就形成一个等效电容，而高频信号可以通过这一等效电容流入地线，这样传感线路所接收的电荷量减小，手指越靠近发射端，电荷量减小越明显，由此可根据传感线路所接收的电流确定触碰点的位置。

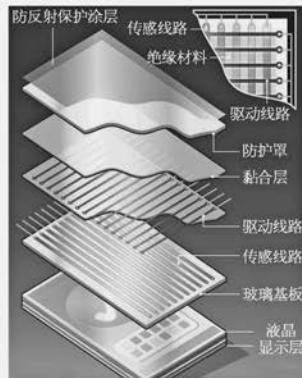


图 9-58 互电容屏结构

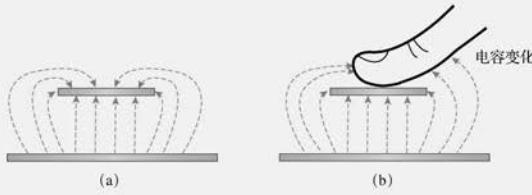


图 9-59 触屏原理示意图

问题与思考解读

问题与思考

1. 如图 9-60 所示为五种不同型号的电容器，试按储存电荷本领由强到弱排序。

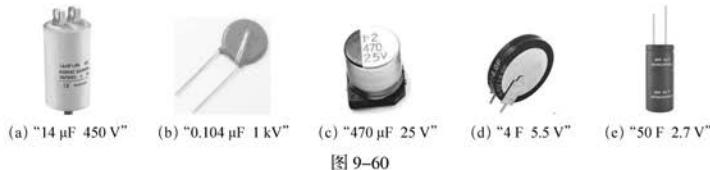


图 9-60

2. 有一个电容器的电容为 C ，当电容器所存储的电荷量 q 加倍时，其电容如何变化？如果电容器两端的电势差 U 增至三倍，其电容又如何变化？简述理由。

3. 给一个额定电压为 25 V 的固定电容器充电。试在如图 9-61 所示的坐标系中画出这个电容器在充电过程中电荷量 Q 、电压 U 和电容 C 这三个物理量中任意两个物理量之间的关系。

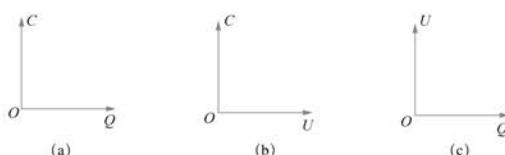


图 9-61

4. 如图 9-62 所示，有一固定电容器的电容为 $4.7 \mu\text{F}$ ，额定电压为 50 V，求该电容器在额定电压下充电完成后所带的电荷量。若实际电压降到 40 V 时，电容器的电容和所带电荷量将如何变化？

5. 手能够使手机触摸屏工作是因为手指接触到电容屏时，人体与电容屏间形成一个等效电容。普通手套一般由绝缘材料制成，戴着普通手套无法使触屏手机屏幕工作。佩戴触屏手套则可以使得触屏手机屏幕正常工作，观察如图 9-63 所示的触屏手套，触屏手套拇指和食指部位的材料有何特点，才能使手机屏幕工作？



图 9-62



图 9-63

不成反比。这和电阻 R 、电压 U 、电流 I 的关系类似， $R = U/I$ ，但 R 不和 U 成正比，也不和 I 成反比。

主要素养与水平：能量观念(Ⅰ)；科学推理(Ⅱ)。

3. 参考解答：如图 10 所示

命题意图：应用电容器的电荷量 Q 、电压 U 、电容 C 三者之间的关系解答简单的问题。

主要素养与水平：能量观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

4. 参考解答： $Q = CU = 4.7 \times 10^{-6} \times 50 \text{ C} =$

$2.35 \times 10^{-4} \text{ C}$ 。若实际电压降到 40 V 时，电容器的电容仍为 $4.7 \mu\text{F}$ ，电荷量变为 $Q' = CU' = 4.7 \times 10^{-6} \times 40 \text{ C} = 1.88 \times 10^{-5} \text{ C}$ 。电容器所带电荷量减少了 $\Delta Q = 4.7 \times 10^{-5} \text{ C}$

1. 参考解答：根据电容器上标明的电容值，即可判断其储存电荷本领的强弱。因此顺序应为 e、d、c、a、b

命题意图：认识常见的电容器，了解用电容来描述电容器储存电荷本领的强弱。

主要素养与水平：能量观念(Ⅰ)；科学推理(Ⅰ)。

2. 参考解答：当电容器上所存储的电荷量 q 加倍时，电容器的电容 C 不变；电容器上的电势差 U 增至三倍时，电容器的电容 C 不变。这是因为电容 C 反映的是电容器储存电荷本领的强弱，不会随外加电压的改变而改变，电容 C 与电荷量 Q 不成正比，与电压 U 不成反比

命题意图：理解比值法定义电容的含义。电容 C 与电荷量 Q 不成正比，与电势差 U 也

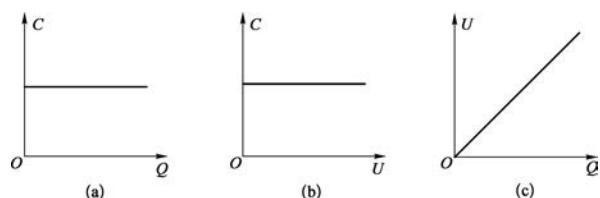


图 10

命题意图：通过计算认识电容器的电容以及电容器的充电过程。

主要素养与水平：科学推理(I); 科学论证(II)。

5. 参考解答：触屏手套在手指的部位采用了导电材料(例如含有金属的织物纤维)。因此,手指指尖与手机电容屏仍能形成等效电容,屏幕自然也就可以正常工作了

命题意图：通过日常生活中电容触摸屏的原理,说明电容器的应用。

主要素养与水平：科学本质(I); 科学态度(II)。

资料链接

电容器充、放电过程快慢的决定因素

对图 9-52 所示的电容器通过电阻的充放电过程,以 u_C 及 u_R 分别表示电容和电阻上的电压,当充电时开关 S 置于 1,有 $u_R + u_C = E$, $u_R = iR$
故

$$iR + u_C = E \quad ①$$

为使上式成为只含 u_C 的方程,应设法找到 i 与 u_C 的关系。 i 是单位时间内流进电容器极板的电荷量,即 $i = \frac{dq}{dt}$, 它与 u_C 又有如下关系: $q = Cu_C$
故

$$i = C \frac{du_C}{dt} \quad ②$$

将②式代入①式得

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E \quad ③$$

这便是 $u_C(t)$ 所满足的微分方程,其通解为

$$u_C(t) = E + A e^{-\frac{t}{RC}} \quad ④$$

令开关闭合时刻为 $t=0$, 则初始条件为 $u_C(0)=0$, 代入通解④式可得: $A=-E$, 故得特解 $u_C(t)=E(1-e^{-\frac{t}{RC}})$, $t \geqslant 0$ 。 u_C 的曲线如图 11(a)所示,可知 u_C 以指数方式随 t 增大,最后达到稳定值 E 。电源通过电阻对电容的充电过程的快慢取决于 RC 乘积,我们称它为 RC 电路的时间常数。

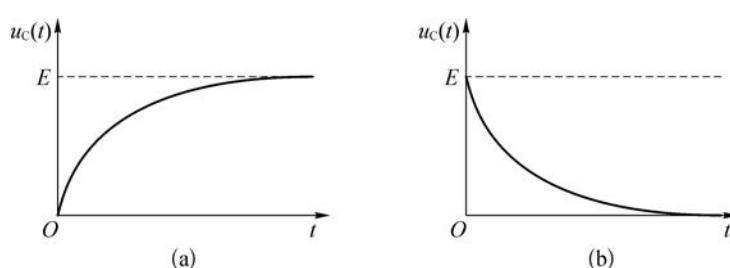


图 11

对电容器充电完成后通过电阻的放电过程,开关 S 置于 2。电容器通过电阻放电,则有 $u_R + u_C = 0$,
即

$$iR + u_C = 0 \quad ⑤$$

将②式代入⑤式得

$$RC \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (6)$$

其通解为

$$u_c(t) = A e^{-\frac{t}{RC}} \quad (7)$$

因开关改置 2 前 $u_c = E$, 根据 u_c 不能突变的原则, 可得初始条件为 $u_c(0) = E$, 代入通解⑦式可得: $A = E$, 故得特解 $u_c(t) = E e^{-\frac{t}{RC}}$ 。由此, 放电时 u_c 随时间变化如图 11(b) 所示, 可知 u_c 以指数方式随时间下降为零, 下降的快慢同样取决于时间常数 RC 。

电容器“隔直流、通交流”的含义

电容对直流电有“隔直流”作用, 是指在直流电流对电容器充电完成后, 电路中就没有电流了。在直流电源刚加到电容器上时, 电路中是有电流流动的, 这一电流是对电容器的充电电流。这一电流流动的过程很快就会结束, 具体时间长短与电路中电阻和电容的大小有关, 两者的乘积越大, 充电时间就越长, 反之越短, 而且电流并不通过电容器。充电完成后, 电容器两端的电压等于直流电源电压的大小。在交流电的一个周期内, 由于对电容器的正反向充电, 流过电路中的电流方向是改变的, 但对电容器反复充、放电, 就会使电路中始终有电流通过, 此时虽然电流仍不通过电容器, 但可以等效地视为电容器并未阻隔电流, 即电容器能够让交流电“通过”电路, 这就是电容器的“通交流”特性。通常电容器的两个极板之间都填充以绝缘介质, 所以不会通过自由电荷, 即电流不能“穿”过电容器。我们所说的“通交流”, 其实是靠电容器两端不断充电和放电的过程形成的。此时, 电容器的外部线路中有电流通过, 内部仍然无电流通过。

纯电容电路的电流和电压的相位关系

电容器的充、放电电流 i 等于电容器极板电荷量 q 的变化率, 即 $i = \frac{dq}{dt}$ 。极板电荷量 q 与 u 的关系为

$q = Cu$, 可得

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1)$$

如果对电容器施加简谐函数式的交变电压 u , 可写成

$$u = U_m \cos(\omega t + \varphi_u) = \sqrt{2} U \cos(\omega t + \varphi_u) \quad (2)$$

将②式代入①式得

$$i = \sqrt{2} \omega C U \cos\left(\omega t + \varphi_u + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

纯电容电路电流的初相等于 $\varphi_i = \varphi_u + \frac{\pi}{2}$ 或 $\varphi_i - \varphi_u = \frac{\pi}{2}$ 。电容器在交流电路中的这种特性可表述为: 纯电容电路的电流相位比电压相位超前 $\frac{\pi}{2}$,

如图 12 所示。

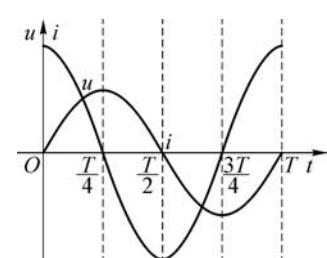


图 12

平行板电容器的电容表达式

当平行板电容器的两极板间是真空时,电容 C 与极板面积 S 、极板间的距离 d 的关系为: $C = \frac{S}{4\pi k d}$,

式中 k 为静电力常量。

当两极板之间充满同一种介质时,电容 $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi k d}$, 式中 ϵ_r 是一个常数,与电介质有关,称为电介质的相对介电常数。

“拓展视野”中“探究影响平行板电容器电容的因素”的实验原理

验电器在此实验中也构成一个电容器。已充电的平行板电容器与验电器相连就构成两个电容器并联,设平行板电容器的电容为 C_1 ,验电器的电容为 C_2 。因为平行板电容器的两个极板上分别带有等量的异号电荷,这样它必然对验电器充电。充电的结果使平行板电容器的电荷量为 Q_1 ,验电器的电荷量为 Q_2 ,两并联电容处于充电平衡状态,即两个电容器两极的电势差相等,均为 U 。则它们的总电荷量为 $Q = Q_1 + Q_2 = C_1 U + C_2 U$ 。由于验电器的结构设计,它的电容 C_2 非常小,只能容纳很少的电荷,验电器上电荷量的变化对平行板电容器而言总是可以忽略不计的,因此,平行板电容器的电荷量可以认为就是总的电荷量即 $Q = C_1 U$ 。验电器的偏转角和其上的电荷量正相关,验电器的电容不变,则验电器的电荷量与验电器自身电容上的电势差成比例,此电势差即所研究的平行板电容器的电势差,即教材中所述“验电器指针的偏转可反映两极板间电势差 U 的大小”的原因。

保持极板上电荷量 Q 不变的情况下,如验电器的指针偏转角大,说明平行板电容器的电势差 U 大,由 $C_1 = \frac{Q}{U}$ 可知,平行板电容器的电容值 C_1 小。反之,如验电器的指针偏转角小,说明平行板电容器的电势差 U 小,由此可知平行板电容器的电容值 C_1 大。

[1]



图 9-64 静电复印

第七节 静电的利用与防范

随着科学技术的发展和各种用电器的普及，静电与人们的关系越来越密切。在生产和社会生活中，静电既有有利的一面，如静电除尘、静电喷雾、静电复印（图 9-64）等，也有需要防范的一面。

② 如何利用静电？

1. 静电除尘

[2] 在工业生产中常利用静电以净化气体或回收有用尘粒。如图 9-65 所示为静电除尘装置及其示意图。在强电场 B 附近空气分子被电离为正离子和电子，电子在奔向正极 A 的运动过程中遇到尘粒，使尘粒带负电被吸附到正极处。这一装置常用于火力发电站收集烟气中的煤灰和粉尘，以及用于冶金业收集锡、锌、铅、铝等的氧化物。静电除尘也可以用于家庭除尘灭菌。

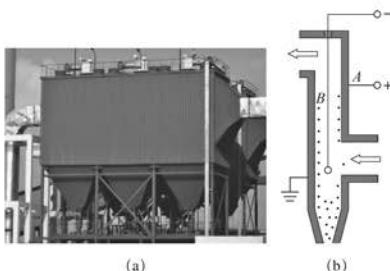


图 9-65 静电除尘

的现代办公设备。

本节中激光打印和复印等利用静电现象的内容与此呼应。

[2] 静电除尘的主要机理是静电吸附，而口罩的过滤主要基于两种机理：机械过滤和静电吸附。机械过滤就是采用机械的方式将病毒等杂质微粒拦截下来。如果滤网上的孔做得足够小，例如小到 $0.1 \mu\text{m}$ 就可以过滤掉空气中的绝大多数颗粒，可是这样过滤对气流阻力太大，会严重影响呼吸。一个解决办法就是把过滤层做得很薄来减小气阻，现在的很多纳米过滤膜都很薄，譬如口罩用的聚四氟乙烯纳米膜，薄到 $10 \mu\text{m}$ 以下；静电纺丝制备的纳米膜，一般也薄到 $10 \mu\text{m}$ 以下。但是这样的薄膜强度很低，必须用强度更高的大孔无纺布等进行复合支撑。第二个办法就是使过滤材料具有静电吸附能力。带静电的物体可吸附轻小物体，在聚丙烯熔喷布中通过各种方法注入电荷，使熔喷布带上静电并长时间保持这一状态。当

本节编写思路

本节通过介绍静电除尘、静电喷雾和静电复印等的基本原理了解生产生活中静电的利用。

通过介绍良好接地、工艺控制和使用避雷针（接闪杆）等的基本原理，了解生产、生活中静电的防范。

通过静电知识在生产、生活中的广泛应用，感受理论联系实际、科学转化为技术的过程与方法，体验客观事物的两面性，树立趋利避害的观点，培养将物理知识转化为解决实际问题的能力。

认识物理学是对自然现象的描述与解释，激发学生学习物理的兴趣以及对自然界的好奇心。这将有助于培养学生的科学态度与责任。

正文解读

[1] 节首图所示的静电复印机是一种常见

空气中的颗粒通过口罩时就会被增加的静电作用吸附上去,如图 13 所示,从而在不增大呼吸阻力的情况下,大大提高整体过滤效率。静电吸附对于机械过滤很难拦截的 $0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 之间的颗粒过滤起到了至关重要的作用。今天的高质量医用外科口罩和医用防护口罩等正是基于以上这两种过滤机理,兼顾了低过滤阻力和高过滤效率。

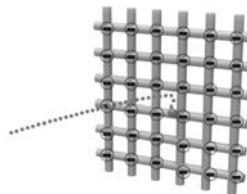


图 13

[1] 这是一个实验型自主活动,其目的是体验静电复印的原理。

[2] 静电的其他应用可根据学生的基础与实际情况适当补充,以扩大学生的知识面,提高利用静电现象解决实际问题的能力。静电在生活中的应用,如压电打火机、电蚊拍、空气净化等;静电在生产中的应用,如高压静电对白酒、醋酸和酱油的陈化有促进作用,使品味更纯正等;静电在生物医学技术中的应用,如口罩熔喷布的制备、静电纺丝等。

2. 静电喷雾

静电喷雾的特点是形成带有电荷的雾滴。在工业生产中,静电喷雾技术可用于汽车、家电、仪表等外壳的喷涂。

如图 9-66 所示,静电喷雾的喷枪口上有金属导流管接高压负极,被涂工件接地作为正极,在喷口和工件之间形成较强的静电场。当高压空气将涂料从输料管送到喷口的导流管时,由于导流管连接高压负极使涂料微粒带上负电荷,在静电力和压缩空气的作用下飞向工件,并均匀地吸附在工件表面。经过干燥或加热,固化成厚度均匀、质地坚固的涂层,完成喷涂工作。

3. 静电复印

现代电子技术的广泛应用给人们带来了许多方便,大大提高了工作效率。静电复印机具有简便、迅速、清晰、可扩印和缩印并可复印彩色原件等优点而被广泛应用。

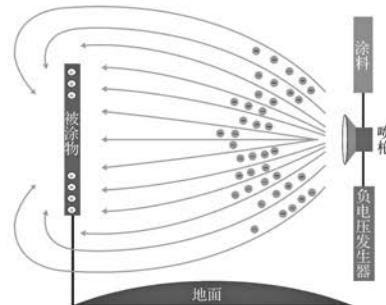


图 9-66 静电喷雾

自主活动

[1]

准备塑料板一块,丝绸一块,一些细木屑(或粉笔屑)。用丝绸在塑料板上用力摩擦后,再用手指在塑料板上缓慢移动写字,比如写一个“大”字,然后把干燥的细木屑(或粉笔屑)均匀地撒在塑料板上,竖起塑料板在桌面上轻轻敲击后,塑料板上就会留下一个空心的“大”字。

[2]

如图 9-67 所示,当一张要复印的图像放在静电复印机的稿台上时,在机内灯光照射下,反射光通过光学系统在光导硒鼓上成像。光导硒鼓表面覆有光敏导体薄膜。光敏导体对光很敏感,没有光线时电阻大,能保持电荷;遇到光照电阻就急剧下降,将所带的电荷传走。光敏导体表面在充电极的作用下带有均匀的正电荷。图像的反射光形成的像就落在光导硒鼓的光敏导体表面上。由于反射光有强有弱(与原稿图像的深浅对应),光敏导体的电阻相应发生变化。光敏导体表面的静电电荷也随光线强弱程度而不同程度地消失,在光敏导体膜层上便形成一个相应的静电图像。但人们看不到它,好像潜藏在膜层内,故称“静电潜像”。

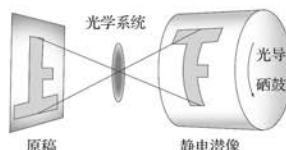


图 9-67 静电复印

这时带负电的显影墨粉在电场力的作用下被吸附到光敏导体表面。潜像上吸附的墨粉量与潜像上电荷的多少相对应。于是，在光导硒鼓的表面显现出有深浅层次的墨粉图像。复印机将送来的复印纸充上比光导硒鼓表面更强的正电。当复印纸与墨粉图像接触时便将带负电的墨粉转移到复印纸上。再经定影器加热，墨粉便被熔化并牢固地黏附在纸上，图像和文字就复印在纸上了。

[1]

大家谈

在生活中，静电是否给你带来过麻烦？你又是如何应对的？

虽然静电有许多用处，但静电的麻烦也不少。静电危害来源于带电体静电场的作用。例如飞机飞行时机体与空气、水汽、灰尘等微粒摩擦会使飞机带电，如果不采取措施，将会严重干扰飞机电子设备的正常工作；在印刷厂里，纸页之间的静电会使纸页黏合在一起，难以分开，给印刷带来麻烦；在制药厂里，由于静电吸引尘埃，会使药品达不到标准的纯度。另外，还可能因静电火花点燃某些易燃物体而引发爆炸等事故。

② 如何防范静电对人类的危害？**1. 良好接地**

如图 9-68 所示，常见的油罐车尾的拖地链和加油机上的金属键盘等都是通过有效接地的方法把静电传入地下，以防止静电的积聚，避免静电放电的火花引发爆炸。飞机使用导电橡胶制作的轮胎，在着陆时静电通过导电轮胎及时传入大地，保证乘客和飞机的安全。



(a) 油罐车尾的拖地链



(b) 加油机上的金属键盘

图 9-68 良好接地

[2]

静电的产生与环境湿度和空气中的离子浓度存在密切的关系。因此，保持一定湿度，让静电通过潮湿空气转移出去是一种有效的防范措施。同时，与普通场合相比，在空气纯净的场所（如无尘车间）内，静电更易产生。同样的操作在不同的湿度下产生的静电电压可以相差许多。值得注意的是，并不是湿度越高越好，湿度过高会导致设备易结露水；因此湿度应控制在一个合理范围内。另外，在橡胶、纤维、纸张、涂料中，常采用不同工艺掺加抗静电剂，从而使材料具有持久的抗静电效果。

其仍然有可能带有大量的静电，有可能会造成严重的事故。由于绝缘体上静电泄漏很慢，同一绝缘体的不同部位电势可能有所不同。绝缘体受潮后，其表面电阻减小，静电将变得容易泄漏。

[1] 此处设置“大

家谈”是因为可利用生活中常见的现象说明静电既有可以利用的一面，又有需要防范的一面。通过结合生活中的案例展开讨论，增加学生对静电的感性认识。

[2] 易于产生和积

累静电的材料大多是高分子材料，这些材料的电阻率都很高，它们的静电泄漏往往很慢，在产生静电的工艺过程停止相当长一段时间后，

问题与思考解读

第七节 静电的利用与防范 43

1. 参考解答:

(1) 防范静电 (2) 防范静电 (3) 利用静电 (4) 防范静电 油罐车有一条铁链拖地、飞机轮胎用导电橡胶制作、汽车加油站的工作人员不能穿腈纶衣服都是防范静电,使积累的电荷迅速导离;而喷漆时让喷嘴喷出的油漆带上与工件异号的电荷是利用静电

命题意图:了解生产、生活中关于静电的利用与防护。

主要素养与水平:科学本质(Ⅱ);科学态度(Ⅰ)。

2. 参考解答:燃气灶的电子点火器的放电电极做成针尖形是因为电荷易集中于形状比较尖端的地方,在其周围形成强电场而使尖端放电,在点火器电源(电池)电压不高的情况下也容易点火;静电计需要大量电荷均匀分布在表面以检测物体是否带电,所以做成球形以容纳更多电荷,防止出现尖端放电现象,使静电计在电压较高时也不会放电(漏电)

命题意图:通过避雷针利用尖端放电防范静电的方法,能解释电子点火器和验电器涉及的物理现象。

主要素养与水平:科学推理(Ⅱ);科学本质(Ⅱ)。

3. 参考解答:电蚊拍是利用高压放电现象杀死蚊子的,电蚊拍中的电子线路使中间层金属网处于高电势,外层金属网处于低电势。当蚊子碰到内外层金属网时形成短路,虽然通过蚊子的电荷量不多,但足以将蚊子烧焦灭除

命题意图:通过电蚊拍灭蚊原理的分析,了解静电在生产、生活中的应用,培育科学态度。

主要素养与水平:科学推理(Ⅱ);科学本质(Ⅱ)。

3. 使用避雷针(接闪杆)

现代建筑物都装有避雷针。避雷针(接闪杆)的原理是尖端放电。如图9-69所示,在雷雨天气高楼上空出现带电云层时,高楼顶部会被感应上大量电荷。由于避雷针是尖的,在其周围形成强电场而导致尖端放电。这就是把空气击穿(电离)形成导电通路,使云层中积累的电荷通过避雷针导入大地,减少地面物受雷击的可能性。所以避雷针其实不“避雷”,反而是“接雷”,只不过是化强为弱,避免强雷电的破坏。

总之,静电利用是借助电荷间的相互作用,而静电防范是让产生的电荷及时转移出去,不产生累积。

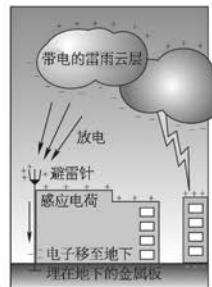


图9-69 避雷针的原理

问题与思考

1. 下列关于生活中常见静电现象的实例是利用静电还是防范静电?为什么?

- (1) 油罐车有一条铁链拖地。
- (2) 飞机轮胎用导电橡胶制作。
- (3) 喷漆时让喷嘴喷出的油漆带电。
- (4) 汽车加油站的工作人员不能穿腈纶衣服。

2. 如图9-70(a)所示是家用燃气灶的电子点火器,电子点火器的放电电极为何要做成针尖形?如图9-70(b)所示是实验室中的静电计,它的金属杆上端固定一个金属球而不做成针尖状,这又是为什么?



(a)



(b)

图9-70



(a)



(b)

图9-71

3. 观察电蚊拍的结构,如图9-71所示。仔细观察会发现电蚊拍的金属网有三层。外面两层金属网连通处于低电势,中间层金属网高电势,外层与中间层电势差可达上千伏。试分析电蚊拍的灭蚊原理。

资料链接

静电屏蔽

静电平衡状态的导体内部没有电荷,电荷只分布在导体的外表面。空腔的导体静电平衡时,内表面没有电荷,导体壳壁内的电场强度为零,即电场线只能在空腔之外,不会进入空腔,所以导体壳内空腔里的电场强度也处处为零,即导体壳可对它的内部起“保护”作用,使内部不受外部电场的影响,此方法称为静电屏蔽。

生产、生活中静电的电压和能量

生产、生活中某些情况下,静电会产生较高电压,如人在干燥的地毯上行走、冬季脱毛衣,消耗的能量却极为有限。微小的能量为何能产生这么高的电压呢?原来两导体之间电压与其上电荷量和电容间存在关系 $U = \frac{Q}{C}$ 。以平行板电容器为例,电容的大小为 $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi k d}$,如果介电常数 ϵ_r 、极板面积 S 保持不变,则电容 C 与极板间距离 d 成反比。

两物体紧密接触时,因摩擦起电形成的电压很小;当两物体迅速离开时,例如距离增大为原来的 40 万倍,则电容减小为原来的 40 万分之一;如果分离前后物体上的电荷量保持不变,电压将升高为原来的 40 万倍。因此,数万伏的静电电压并不足为奇。正因为静电电压在很大程度上取决于电容,以致同一带电体的电势随位置的变化而变化。

静电的高压特征主要来自电容,而不是来自电荷量。测量表明,在局部范围内,生产工艺过程中产生的静电电荷量一般都是微库级的。工艺过程中所产生的静电能量一般在毫焦级,但微小的静电放电能量也可能引燃很多易爆性混合物,因此,加油站、面粉厂等场所都需要防范静电可能带来的危害。

导体表面电场与表面曲率的关系

电荷在导体表面的分布不但与自身形状有关,而且与外界条件有关。只有孤立导体的电荷分布才能由自身的形状及电荷量决定。对孤立的带电导体来说,电荷分布有以下规律,导体表面电荷面密度的大小与该处表面的曲率有关,在孤立导体表面,向外凸出尖端的地方(曲率为正且较大),电荷面密度较大;表面较平缓的地方(曲率较小)电荷面密度较小;表面向里凹进的地方(曲率为负)电荷面密度最小。根据高斯定律可知,导体表面电场强度与电荷面密度成正比。例如,一孤立的一头大一头小的卵形带电导体表面附近的等势面和电场线分布图如图 14 所示。

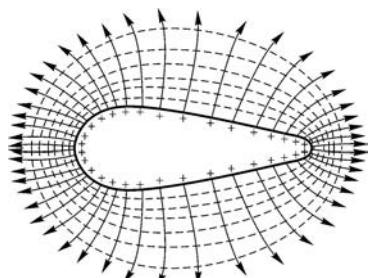


图 14

[1] 正常的心率称为窦性心律，心脏纤颤是指心肌纤维的高频颤动；心房纤颤造成心律不齐，可能引起心脑血管阻塞，偶发且无不适者无需治疗；心室纤颤则非常严重，使心脏不能工作，几分钟即可致人死亡，而且极少能自行中止。如何治疗心室纤颤呢？这里做一个简单的类比：把一块木板的四角用四根弹簧支撑，如果四根弹簧同步振动，木板就能平稳地振动；但如四根弹簧不能同步振动，木板的振动就乱了。怎么办呢？简单的办法就是先用手把木板按住，让所有的弹簧静止下来，然后再让整个装置重新开始振动。按照这个想法，现在心室纤颤的治疗方法是一个纯粹、“物理”的办法——用自动体外除颤器（AED）进行治疗。除颤器的作用是，在很短的时间内让可控的电流通过心脏，使心脏完全停止跳动，再让心脏重新起搏，这样纤颤就消失了。除颤器的核心元件就是一个耐压较高、电容较大的电容器。

学期 活动

我国每年因心脏骤停死亡的人数超过 50 万，大约每 60 s 就会有一条生命因此离去。4 min 是心脏骤停发生后的黄金救助时间。在生死一线的黄金时刻，自动体外除颤器（Automated external defibrillator，缩写 AED，图 9-72）可以担负起挽救生命的职责。自动体外除颤器智能易操作，能完成心脏电击除颤，为患者争取更大的生存机会。自动体外除颤器以 100 kW 的电功率用 20 A 的电流通过胸腔，在约 2 ms 的时间内最多可传输 200 J 的电能。在人流密集的公共场所，如何才能找到自动体外除颤器？

以小组为单位，查阅资料了解自动体外除颤器具体的工作原理和使用方法，并寻找我们身边设置有自动体外除颤器的地点，完成一篇调查报告，同时绘制宣传海报。介绍自动体外除颤器的工作原理、使用方法和学校周边 AED 设备的分布。

[1]



图 9-72 地铁站中的自动体外除颤器

小结

· 基本概念和基本规律

元电荷：最小的电荷量，用符号 e 表示。通常 e 取 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

库仑定律：真空中两个静止点电荷之间的相互作用力的大小跟它们的电荷量的乘积成正比，跟它们之间的距离的二次方成反比；作用力的方向沿两点电荷的连线，

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (k \text{ 为静电力常量, } k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)$$

电场强度：放入电场中任意点的电荷所受的电场力 F 跟其电荷量 q 之比，用符号 E 表示， $E = \frac{F}{q}$ 。

电势能：在电场中的电荷受电场力作用而具有的能做功的能量，用符号 E_p 表示。

电势：电场中某一点电荷的电势能 E_p 跟它所带的电荷量 q 的比，用符号 φ 表示，

$$\varphi = \frac{E_p}{q}$$

电势差：电场中两点间电势之差，也叫电压， $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$ 。

电容：电容器所带的电荷量 Q 与电容器两极板间的电势差 U 之比，用符号 C 表示， $C = \frac{Q}{U}$ 。

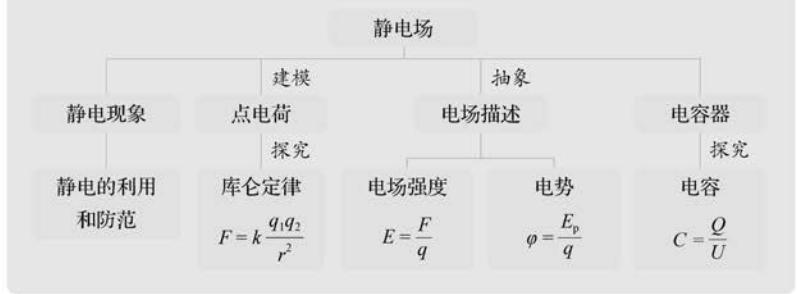
· 基本方法

通过研究带电体之间相互作用所建立的点电荷模型，认识模型建构的思想方法。

通过科学家发现库仑定律的过程，认识库仑扭秤实验巧妙解决电荷量和微小库仑力的测量问题，感受类比、微小力放大、守恒和对称等思想方法。

通过电场强度、电势、电容等物理量的概念和定义的建立，认识比值定义法。

· 知识结构图



复习与巩固解读

46 第九章 静电场

1. 参考解答: (1) 矢量 (2) 矢量 (3) 标量 (4) 标量 (5) 标量

命题意图: 能区分本章中所学的一些重要物理量有无方向性。

主要素养与水平: 科学推理(I)。

2. 参考解答: A 点电场强度较大, 因为该处的电场线较密。作图略。

命题意图: 能用电场线描述电场, 体会使概念形象化是科学研究的重要方法。

主要素养与水平: 运动与相互作用观念(II); 科学推理(II)。

3. 参考解答: $E = \frac{F}{q} = \frac{k \frac{Qq}{r^2}}{q} = k \frac{Q}{r^2}$,

$$Q = \frac{Er^2}{k} = \frac{2 \times (0.5)^2}{9 \times 10^9} C = 5.56 \times 10^{-11} C$$

命题意图: 知道用物理量比值定义新物理量, 应用库仑定律。

主要素养与水平: 科学论证(II)。

4. 参考解答: 垂直于 AB 向上。可把电荷均匀分布的 AB 棒视为无数个正点电荷所组成, P 点电场强度是所有点电荷电场强度的叠加。对称处于中垂线两侧的任意两个点电荷的合电场强度均垂直于 AB 向上, 所以 P 点的电场强度方向必然也垂直于 AB 向上。

命题意图: 了解电场强度的叠加原理, 体会利用对称性的方法。

主要素养与水平: 物质观念(I); 科学推理(II)。

5. 参考解答: $q = CU = 0.25 \times 10^{-6} \times 12 C = 3 \times 10^{-6} C$, $N = \frac{q}{e} = \frac{3 \times 10^{-6}}{1.6 \times 10^{-19}} = 1.87 \times 10^{13}$ 个

命题意图: 通过电容器的充电过程, 了解电容器的作用。

复习与巩固

1. 下列物理量是矢量还是标量?

(1) 电场强度 (2) 电场力 (3) 电势 (4) 电势能 (5) 电容

2. 如图 9-73 所示为某电场的电场线分布, A、B 是电场中的两点。A、B 两点中哪一点的电场强度大? 画出正点电荷在 A 点和负点电荷在 B 点所受电场力的方向。

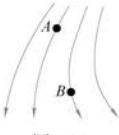


图 9-73

3. 某点电荷在距离其 50 cm 处产生的电场的电场强度大小为 2 N/C。该点电荷所带电荷量的大小是多少?

4. 如图 9-74 所示, 棒 AB 上均匀分布着正电荷, 它的中点正上方有一 P 点。P 点的电场强度的方向如何? 简述理由。

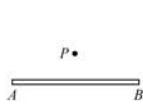


图 9-74

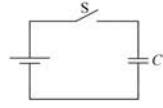


图 9-75

5. 如图 9-75 所示, 将一电容 $C = 0.25 \mu F$ 的不带电电容器和电势差 $U = 12 V$ 的电源连接。闭合开关 S, 对电容器充电。充电完成后, 电容器的负极板上带的电荷的电荷量相当于多少个电子所带的电荷量?

6. 两个完全相同的金属小球 A 和 B 所带的电荷量大小相等, 相隔一定距离, 两球之间的相互吸引力的大小为 F 。现让第三个完全相同的不带电的金属小球 C 先后与 A、B 接触后移开, 则此时 A、B 两金属小球之间的静电相互作用是吸引还是排斥? 相互作用力的大小为多少?

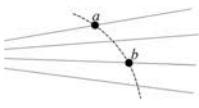


图 9-76

7. 如图 9-76 所示, 实线是一组未标明方向的由点电荷产生的电场线, 虚线是某一带电粒子通过该电场区域的运动轨迹, a、b 是其轨迹上的两点。若带电粒子在运动中只受电场力作用, 比较带电粒子在 a、b 两点的电势能大小和速度大小的关系。

8. 把电荷量 $q = -3 \times 10^{-6} C$ 的点电荷从 A 点移到 B 点, 电场力做功为 $6 \times 10^{-4} J$ 。把同样的点电荷从 B 点移到 C 点, 克服电场力做功 $3 \times 10^{-4} J$ 。比较电场中 A、B、C 三点的电势大小。

主要素养与水平：

科学推理(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

6. 参考解答：

$$\text{互吸引 } \frac{F}{8} \quad \text{两球之}$$

间是吸引力，所以金属小球A和B带等量异号电荷，电荷量分别为 $+q$ 与 $-q$ 。库仑力

$$\text{为 } F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2} =$$

$$k \frac{q \cdot q}{r^2} = k \frac{q^2}{r^2}, A, B$$

两金属小球带异号电荷相互吸引。

$$F' = k \frac{|q'_1| |q'_2|}{r^2}$$

$$= k \frac{\frac{q}{2} \cdot \frac{q}{4}}{r^2}$$

$$= \frac{1}{8} k \frac{q^2}{r^2} = \frac{1}{8} F$$

命题意图：知道两个电荷间相互作用的规律，库仑定律的简单应用。

主要素养与水平：

科学推理(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

7. 参考解答：

场线方向和带电粒子所带电荷的正负题中未明确给出，但根据电场力提供了带电粒子做曲线运动所需的向心力，可确定电场力的方向。假设带电粒子从a运动到b，由于带电粒子受到的电场力的方向沿电场线，则由图可知带电粒子在电场中所受电场力的方向和位移方向的夹角大于 90° ，可推得电场力做负功，电势能增加，所以 $E_{pa} < E_{pb}$ ；又因为带电粒子只受电场力作用，动能和电势能之和守恒。带电粒子从a到b，带电粒子的电势能增加，动能减少，所以 $v_a > v_b$ 。如带电粒子从b运动到a，电场力做正功，结论相同。

命题意图：电场力做功和电势能变化关系的应用，理解只有电场力做功情况下的能量守恒观念。

主要素养与水平：能量观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

$$8. \text{ 参考解答: } U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{6 \times 10^{-4}}{-3 \times 10^{-6}} \text{ V} = -200 \text{ V, 即 } B \text{ 点的电势比 } A \text{ 点的电势高 } 200 \text{ V. } U_{BC} =$$

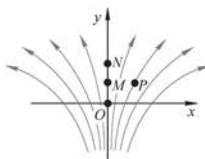


图 9-77

9. 细胞膜的厚度约等于 8 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)。若将细胞膜内的电场视为匀强电场，试求当细胞膜的内外层之间的电压达 40 mV 时，细胞膜内电场强度的大小。此时一价钠离子(Na^+)可发生渗透通过细胞膜，则一个钠离子发生渗透时电势能改变多少？

10. 一电场的电场线分布关于y轴对称，O、M、N是y轴上的三个点，且 $OM=MN$ 。P点在y轴右侧， $MP \perp ON$ ，如图9-77所示。M点与P点的电势哪点更高？电势差 U_{OM} 与 U_{MN} 的大小关系如何？

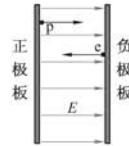


图 9-78

- *11. 在与x轴平行的匀强电场中，一带电荷量为 $1.0 \times 10^{-8} \text{ C}$ 、质量为 $2.5 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 的物体在光滑水平面上沿x轴做直线运动，其位移与时间的关系是 $x = 0.16t - 0.02t^2$ ，式中x以m为单位，t以s为单位。从开始运动到第5 s末，物体所经过的路程为多少？克服电场力所做的功为多少？

- *12. 如图9-78所示，两块分别带等量异号电荷的大平行金属板相距 5.0 cm ，它们之间的电场可视为匀强电场。电子(e)从负极板表面静止释放的同时，质子(p)也从正极板表面静止释放。忽略电子和质子间的相互作用力，当它们到达同一等势面时，该等势面与正极板之间的距离是多少？(质子的质量为 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，电子的质量为 $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$)

$\frac{W_{BC}}{q} = \frac{-3 \times 10^{-4}}{-3 \times 10^{-6}}$ V = 100 V, 即 B 点的电势比 C 点的电势高 100 V。所以在 A、B、C 三点中, B 点的电势最高, A 点的电势最低。即 $\varphi_B > \varphi_C > \varphi_A$

命题意图: 知道电场力做功和电势差的定量关系,理解电势差的概念。

主要素养与水平: 科学推理(II)。

$$9. \text{ 参考解答: } E = \frac{U}{d} = \frac{40 \times 10^{-3}}{8 \times 10^{-9}} \text{ V/m} = 5 \times 10^6 \text{ V/m}$$

$$W = qU = 1.6 \times 10^{-19} \times 40 \times 10^{-3} \text{ J} = 6.4 \times 10^{-21} \text{ J}$$

命题意图: 将真实情境模型化。

主要素养与水平: 科学论证(II);科学本质(II)。

10. **参考解答:** M 点的电势更高; $U_{OM} > U_{MN}$ 。可画出经过 M 点与 P 点的两个等势面,根据沿着电场线的方向电势降低,可判断 M 点的电势比 P 点的电势高。由于该电场不是匀强电场,OM 间的电场强度比 MN 间的电场强度大,当 OM = MN 时,O、M 两点间的电势差要大于 M、N 两点间的电势差

命题意图: 会用等势面和电场线描绘静电场,了解非匀强电场中电势差与电场强度的定性关系。

主要素养与水平: 能量观念(II);科学推理(II)。

* 11. **参考解答:** 位移与时间的关系式是 $x = 0.16t - 0.02t^2$

当 $t = 4 \text{ s}$ 时, x 正向最大: $x_m = 0.32 \text{ m}$

当 $t = 5 \text{ s}$ 时, $x = 0.3 \text{ m}$

所以路程 $s = 0.32 \text{ m} + (0.32 - 0.3) \text{ m} = 0.34 \text{ m}$

由 $x = 0.16t - 0.02t^2$ 可得,该物体做匀变速直线运动的初速度和加速度为: $v_0 = 0.16 \text{ m/s}$, $a = -0.04 \text{ m/s}^2$

所以 $t = 5 \text{ s}$ 时, $v_t = v_0 + at = (0.16 - 0.04 \times 5) \text{ m/s} = -0.04 \text{ m/s}$

只有电场力对物体做功。则由动能定理,电场力做的功

$$W = \frac{1}{2}mv_t^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2} \times 2.5 \times 10^{-3} \times [(-0.04)^2 - (0.16)^2] \text{ J} = -3 \times 10^{-5} \text{ J}$$

所以,克服电场力做功 $3 \times 10^{-5} \text{ J}$

命题意图: 将静电场与匀变速直线运动、动能定理等知识综合运用,提高学生综合运用知识以及分析和解决问题的能力。

主要素养与水平: 科学推理(II);科学论证(III)。

* 12. **参考解答:** 质子与电子都在电场力的作用下做初速度为零的匀变速直线运动。设质子的质量为 m_1 ,加速度大小为 a_1 ,到达同一等势面时距正极板的距离为 x_1 ;电子的质量为 m_2 ,加速度大小为 a_2 ,到达同一等势面时距负极板的距离为 x_2 。

$$a_1 = \frac{Eq_{\text{质}}}{m_1}$$

$$a_2 = \frac{Eq_{\text{电}}}{m_2}$$

由于电子与质子电荷量的大小相等,质子与电子加速度大小之比为

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1} = \frac{9.11 \times 10^{-31}}{1.67 \times 10^{-27}} = 5.46 \times 10^{-4}$$

由于 $x = \frac{1}{2}at^2$ 可得

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{a_1}{a_2} = 5.46 \times 10^{-4} \quad ①$$

且

$$x_1 + x_2 = 0.05 \text{ m} \quad ②$$

可见,由于质子和电子质量悬殊,实际上质子刚启动,电子已抵达。由①、②式可得:质子移动的距离 $x_1 = 2.73 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。所以,当它们到达同一等势面时,该等势面与正极板之间的距离为 $2.73 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。

命题意图:能结合具体匀强电场中带电粒子的运动问题,认识电场对带电粒子的作用。

主要素养与水平:科学推理(Ⅲ);科学论证(Ⅲ)。

第三部分 本章练习部分解读

第一节 静电现象 电荷

(一) 参考解答

1. 摩擦 接触 感应 电子

2. 增加 不变

物体接触带电时电子发生转移,导体 B 的多余电子转移到了不带电的导体 A,从而使导体 A 带负电,而并非质子数目的变化,质子数目在接触过程中是不变的。

3. -3.2×10^{-19} 失去 5×10^{11}

4. 正 负 尼龙(腈纶) 腈纶(尼龙)

两个物体相互摩擦,哪个物体带正电,哪个物体带负电,主要决定于物质失去电子的难易程度。因为在序列中,尼龙在前,丝绸居中,腈纶最后,所以尼龙与丝绸摩擦,尼龙带正电;丝绸与腈纶摩擦,腈纶带负电。尼龙与腈纶摩擦,起电现象最显著。

5. (1) 导体 AB 带电,带负电荷 (2) 导体 AB 带电,带负电荷 导体 AB 在带正电的小球 Q 附近时,导体棒上的自由电子会向导体棒的左边运动,导体棒的左端因有了多余的电子而带负电,右端因失去电子而带正电。而当手碰在导体棒上,不论是 A 端还是 B 端时,导体棒通过人体与大地相连而成为一大导体;导体棒成为距 Q 较近的近端,带负电。移去手指再移去 Q 后,导体棒仍带负电

6. 2.25×10^{20} 个电子

$$q = It = 0.3 \times 2 \times 60 \text{ C} = 36 \text{ C}$$

$$n = \frac{q}{e} = \frac{36}{1.6 \times 10^{-19}} = 2.25 \times 10^{20} \text{ 个}$$

7. 所需器材:由细线悬挂的泡沫塑料球、塑料直尺、尼龙布、玻璃棒和丝绸(或橡胶棒和毛皮)。

主要实验步骤:先用丝绸摩擦玻璃棒(毛皮摩擦橡胶棒),使玻璃棒带正电(负电),再让玻璃棒(橡胶棒)接触由细线悬挂的泡沫塑料球,使小球也带正电(负电),再把用尼龙布摩擦过的塑料直尺靠近小球。如果是排斥的,塑料直尺就带正电(负电);如果是吸引的,塑料直尺带的就是负电(正电)

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	物质观念	模型建构	科学推理	科学论证	证据	解释	交流	科学本质
1	I		I					
2	I		II					
3	I	II	II	II				
4	I		II					II
5	II		II			II		
6	II	II		II				I
7	II				III	II	II	

第二节 电荷的相互作用 库仑定律

(一) 参考解答

1. 带电体的大小、形状、电荷分布对它们之间的相互作用的影响可忽略 理想化模型(物理模型、模型建构)

2. $N \cdot m^2/C^2 \quad 1 \quad 1 \quad 9 \times 10^9$

3.

说 法	判断	理由(可以举例或推理)
只有体积很小的带电体才能看成点电荷	错	当带电体的形状、大小及电荷的分布状况对它们之间的作用力影响可以忽略时,可以看成点电荷
元电荷的数值最早是由美国物理学家密立根测得的,元电荷是物理学的基本常数之一	对	该说法符合科学史实
由公式 $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ 知,当真空中的两个电荷间的距离 $r \rightarrow 0$ 时,它们之间的静电力 $F \rightarrow \infty$	错	当两个电荷距离趋于 0 时,两电荷不能看成点电荷,此时库仑定律的公式不再适用
一带正电的金属小球放在潮湿的空气中,一段时间后发现该小球几乎不带电了。这是因为小球上原有的正电荷会自动逐渐消失	错	小球几乎不带电了,是因为小球上原有多余的正电荷与周围空气中的负离子中和,而不是小球上原有过多的正电荷消失了

4. 静止的点电荷 7.2×10^{-6} 吸引

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{4.0 \times 10^{-9} \times 2.0 \times 10^{-9}}{0.1^2} N = 7.2 \times 10^{-6} N$$

5. $21 : 4$

设两个相同小金属球所带电荷量分别为 $7Q$ 和 $3Q$, 它们在相距一定距离时相互作用力为 $F_1 = k \frac{21Q^2}{r^2}$; 由于相互吸引,故两金属球带异号电荷。接触后再分开,两球电荷量的绝对值均为 $2Q$, 此时两

球的库仑力 $F_2 = k \frac{4Q^2}{r^2} = \frac{4}{21} F_1$, 则 $F_1 : F_2$ 大小之比为 $21 : 4$

6. 9×10^{-3} N

设两部分电荷量分别为 q_1 和 q_2 , 由于 $q_1 + q_2 = \text{恒量}$, 根据基本不等式 $ab \leq \left(\frac{a+b}{2}\right)^2$, 当且仅当 $a = b$ 时等号成立, 所以当 $q_1 = q_2 = +4 \times 10^{-8}$ C 时静电力最大。

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{(4 \times 10^{-8})^2}{0.04^2} \text{ N} = 9 \times 10^{-3} \text{ N}$$

7. 4.9×10^{-7} kg 7.08×10^{-11} C

两带电体间静电力大小相等、方向相反、作用在同一直线上。

$$F_1 = F_2$$

$$m_1 a_1 = m_2 a_2$$

$$m_2 = \frac{a_1}{a_2} m_1 = \frac{7}{9} \times 6.3 \times 10^{-7} \text{ kg} = 4.9 \times 10^{-7} \text{ kg}$$

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

$$q = \sqrt{\frac{Fr^2}{k}} = \sqrt{\frac{m_1 a_1 r^2}{k}} = \sqrt{\frac{6.3 \times 10^{-7} \times 7 \times (3.2 \times 10^{-3})^2}{9 \times 10^9}} \text{ C} \approx 7.08 \times 10^{-11} \text{ C}$$

8. (1) 水平向左 (2) 水平向左 (3) 水平向左

* 9. 各图中 y 轴上电荷所受到的静电力合力的方向依次为:

y 轴负方向(竖直向下) y 轴负方向(竖直向下) x 轴正方向(水平向右) x 轴负方向(水平向左)

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用观念	模型建构	科学推理	科学论证
1		I		
2	I			
3	II	II	I	
4	II		I	II
5	II		II	
6			II	II
7	II		II	II
8	II		II	
9	III		III	

第三节 电场力 电场强度

(一) 参考解答

1. 电场 力 电场力 电荷量 正

2. A、B 两点处的正、负电荷所受电场力 F 的方向和 C 点处的电场强度 E 的方向如图 15 所示

3. F/q , 方向水平向右

4. 2.0×10^4 向右 向左 2.0×10^4

A 点电场强度的大小为: $E = \frac{F}{q} = \frac{2.0 \times 10^{-4}}{1.0 \times 10^{-8}} \text{ N/C} = 2.0 \times 10^4 \text{ N/C}$, 方向

向右。根据负试探电荷受力方向和电场方向相反可得: 试探电荷在 A 点所受电场力的方向向左, 若取走试探电荷, 则 A 处的电场强度仍为 $2.0 \times 10^4 \text{ N/C}$

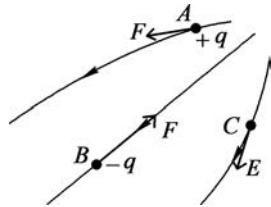


图 15

5. 加速度大小都相等

$a = \frac{F}{m} = \frac{qE}{m} = \frac{q}{m} E$, 匀强电场中各处的电场强度 E 相同, 质子的荷质比 $\frac{q}{m}$ 又是一定的, 与质子的速度无关, 所以加速度的大小都相等

6. $8.33 \times 10^{-12} \text{ C}$

$$E = k \frac{q}{r^2}$$

$$q = \frac{Er^2}{k} = \frac{0.3 \times (0.5)^2}{9 \times 10^9} \text{ C} \approx 8.33 \times 10^{-12} \text{ C}$$

$$7. \frac{GM}{r^2}$$

8. 如图 16 所示, 以两个小球整体为研究对象, 可判断 a 球上方绝缘线处于竖直绷紧状态。再以 b 球为研究对象, 根据平衡条件可判断 a 与 b 之间绝缘线向右偏转

9. (1)

$$qE = mg \tan 30^\circ$$

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

(2)

$$qE_{\min} = mg \sin 30^\circ$$

$$E_{\min} = \frac{mg \sin 30^\circ}{q} = \frac{1.0 \times 10^{-2} \times 10 \times 0.5}{2.0 \times 10^{-8}} \text{ N/C} = 2.5 \times 10^6 \text{ N/C}$$

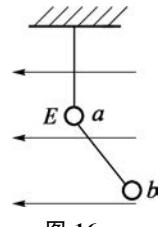


图 16

由于点到直线的距离以垂线(到垂足)最短, 电场强度 E 沿此方向数值最小, 故最小电场强度的方向为垂直细线上

* 10. 根据对称性可知, 关于中心点对称的两点电荷合电场强度为零, 所以 $E_1=0$ 。根据点电荷电场强度 $E = k \frac{q}{r^2}$ 和电场强度的叠加原理可得到:

$$E_2 = k \frac{e}{(2d)^2} + k \frac{e}{(2d)^2} + k \frac{e}{d^2} + k \frac{e}{d^2} = \frac{5}{2} k \frac{e}{d^2}, \text{ 方向向右}$$

$$E_3 = k \frac{e}{(2d)^2} + k \frac{e}{(2d)^2} = \frac{1}{2} k \frac{e}{d^2}, \text{ 方向向左}$$

$$E_4 = k \frac{e}{d^2} + k \frac{e}{d^2} = 2k \frac{e}{d^2}, \text{ 方向向左}$$

所以, 中心点处电场强度的大小按由大到小排序: $E_2 > E_4 > E_3 > E_1$

(二) 习题主要素养水平分析

习题的主要素养与水平

题号	物质观念	运动与相互作用观念	模型建构	科学推理	科学论证	科学本质
1	I	I				
2			I	I		
3	I	II				
4				II		
5		II		II		
6				I	II	
7	II	II				II
8		II		II		
9				II	II	
10		III		III		

第四节 电势能 电势

(一) 参考解答

1. 静止电荷 电场强度 电势 降低 减小
2. 路径 始、末位置 减小 增加 $W = -\Delta E_p$
- 3.

说 法	判断	理由(可以举例或推理)
电荷在电场中电势高的地方,具有较大的电势能	错	负电荷在电势高的地方,具有的电势能较小
具有较大的电荷量的电荷,有较大的电势能	错	$E_p = q\varphi$ 电势能除了与电荷量有关还与所处位置的电势有关(如零电势)
负电荷具有的电势能可以比正电荷具有的电势能大	对	电势能除与电荷的正、负有关外,还同电势有关。例如负电荷在负电势处的电势能(大于0)就比正电荷在负电势处的电势能(小于0)大
只有当电荷有较大的电荷量,又在电势较高的地方,它才具有较大的电势能	错	例如负电荷有较大的电荷量,又在电势为正且较高的地方,电势能反而较小

4. 设无穷远处电势为零。从无穷远处到A,电场力做正功 $W = 4.0 \times 10^{-5}$ J, 等效于从A到无穷远处,电场力做负功 $W = -4.0 \times 10^{-5}$ J, 即正电荷在A点的电势能为 $E_p = -4.0 \times 10^{-5}$ J

$$\varphi_A = \frac{E_p}{q} = \frac{-4.0 \times 10^{-5}}{2.0 \times 10^{-6}} \text{ V} = -20 \text{ V}$$

5. 若点电荷q为正电荷,则由于A点的电势比B点的高,说明电荷q在A点的电势能大于在B点的电势能;从A点移到B点,电势能减少,电场力做正功

若点电荷q为负电荷,则由于A点的电势比B点的高,说明负电荷在A点的电势能小于在B点的电势能;从A点移到B点,电势能增加,电荷克服电场力做功

6. 他们三位同学的说法都不正确,电场强度的大小与电势的高低没有关系
7. 正电荷仅在电场力的作用下由A点向B点运动,速度增加,动能增大,电势能减小。正电荷的电

势能 $E_{pA} > E_{pB}$, 所以 $\varphi_A > \varphi_B$ 。 $v-t$ 图斜率表示加速度, 由图可得斜率变大, 所以 $a_A < a_B$, 因为 $a = \frac{q}{m}E$, 所以 $E_A < E_B$

* 8. D

根据点电荷的电场强度公式 $E = k \frac{q}{r^2}$, 可求得各个点电荷分别在 a 、 b 两点产生的电场强度, 再根据

矢量的合成, 可得 a 、 b 两点的电场强度大小和方向。再根据几种常见电场的等势面分布情况可判断 a 、 b 两点的电势关系, 故 D 正确

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	物质观念	运动与相互作用观念	能量观念	科学推理	科学论证	交流
1	I			I		
2			I	I		
3			I	II		
4			II	II	II	
5			II	II		
6				II		I
7			II	III		
8		III	II	III		

第五节 带电粒子在电场中的运动

(一) 参考解答

1. D

$$2. 1.6 \times 10^{-19}$$

$$3. -2.0 \times 10^{-9} \text{ C}$$

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = (2000 - 3600) \text{ V} = -1.6 \times 10^3 \text{ V}$$

$$q = \frac{W_{AB}}{U_{AB}} = \frac{3.2 \times 10^{-6}}{-1.6 \times 10^3} \text{ C} = -2.0 \times 10^{-9} \text{ C}$$

$$4. E_a < E_b \quad \varphi_a > \varphi_b$$

可根据电场线的疏密判断电场强度的大小; 绘制 a 、 b 两点所处的等势面和电场线的方向判断 a 、 b 两点的电势高低

$$5. \text{水平向右} >$$

$$6. 425 \quad 2.125 \times 10^4 \quad \text{水平向右}$$

$$\varphi_A = \frac{E_{pA}}{q} = \frac{4.0 \times 10^{-4}}{1.0 \times 10^{-6}} \text{ J} = 400 \text{ V}$$

$$\varphi_B = \frac{E_{pB}}{q} = \frac{5.0 \times 10^{-6}}{-2.0 \times 10^{-7}} \text{ J} = -25 \text{ V}$$

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = 400 - (-25) \text{ V} = 425 \text{ V}$$

$$E = \frac{U_{AB}}{d} = \frac{U_{AB}}{AB \cdot \cos 60^\circ} = \frac{425}{0.04 \times 0.5} \text{ V/m} = 2.125 \times 10^4 \text{ N/C}$$

因为沿电场线电势降低且 $\varphi_A > \varphi_B$, 所以电场强度方向水平向右

7. (1) 因为 $E = \frac{U}{d}$, 且三组等势面上、下间距离 d 均相同, 所以比较电势差的大小即可得到电场强

度的大小。由图像可得相同间距的上、下两等势面间电势差的大小: $U_a = 80 \text{ V}$; $U_b = 40 \text{ V}$; $U_c = -40 \text{ V}$ 。可得 $E_a > E_b = E_c$

(2) 电势沿电场线逐渐降低。若电场强度的方向竖直向下, 则由上而下电势下降, 因此图(c)所示的电场强度的方向竖直向下

8. 水平向右(与等势面垂直)

五条路径的电势差分别为 $U_1 = U_2 = 80 \text{ V} - 70 \text{ V} = 10 \text{ V}$, $U_3 = 80 \text{ V} - 60 \text{ V} = 20 \text{ V}$, $U_4 = 60 \text{ V} - 70 \text{ V} = -10 \text{ V}$, $U_5 = 70 \text{ V} - 60 \text{ V} = 10 \text{ V}$

根据 $W_{AB} = eU_{AB}$

$$W_1 = W_2 = W_5 = eU_1 = (-1.6 \times 10^{-19}) \times 10 \text{ J} = -1.6 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$W_3 = eU_3 = (-1.6 \times 10^{-19}) \times 20 \text{ J} = -3.2 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$W_4 = eU_4 = (-1.6 \times 10^{-19}) \times (-10) \text{ J} = 1.6 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$9. U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{6.4 \times 10^{-18}}{-1.6 \times 10^{-19}} \text{ V} = -40 \text{ V}$$

$$U_{BA} = -U_{AB} = 40 \text{ V}$$

$$U_{AC} = U_{AB} = -40 \text{ V}$$

因为 B 与 C 在同一等势面上, 所以 $U_{CB} = 0$

10. (1) 电子静止释放仅在电场力的作用下加速运动, 说明电场力做正功 W_{AB}

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{W_{AB}}{e}, \text{ 因为 } W_{AB} > 0, e < 0, \text{ 所以 } U_{AB} < 0 \text{ 即 } \varphi_A < \varphi_B$$

故 B 点电势高

$$(2) U_{AB} = -100 \text{ V}$$

电子在仅有电场力做功 $W_{AB} = eU_{AB}$ 的情况下加速运动, 则根据动能定理有:

$$eU_{AB} = E_{kB} - 0$$

$$E_{kB} = (-1.6 \times 10^{-19}) \times (-100) \text{ J} = 1.6 \times 10^{-17} \text{ J} = 100 \text{ eV}$$

$$11. (1) W = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2W}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 7 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.67 \times 10^{-27}}} \text{ m/s} \approx 3.66 \times 10^7 \text{ m/s}$$

$$(2) qEd = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E = \frac{W}{qd} = \frac{7 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19} \times 3} \text{ N/C} \approx 2.33 \times 10^6 \text{ N/C}$$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	能量观念	科学推理	科学论证	科学本质	社会责任
1		I			
2	I		I		
3	II		II		
4		II			
5	II	II			
6	II	II	II		
7	II	II			
8	II	II	II		
9	II	II	II		
10	II	II	II		
11	III		III	II	I

第六节 电容 电容器

(一) 参考解答

1. D

2. 470 470

平行板电容器的电容 $C = \frac{Q}{U} = \frac{7.52 \times 10^{-3}}{16} \text{ F} = 4.7 \times 10^{-4} \text{ F} = 470 \mu\text{F}$; 电容反映电容器本身的特性,

电容器不带电时电容不变,仍为 $470 \mu\text{F}$

3. 实际电压 1.5 V 低于电容器的额定电压 2.7 V , 所以充电完成时电容器两极板间电势差为 1.5 V 。

根据 $C = \frac{Q}{U}$ 可得, 电容器所带的电荷量为 $Q = CU = 100 \times 1.5 \text{ C} = 150 \text{ C}$

4. (1) $C = \frac{Q}{U} = \frac{4 \times 10^{-8}}{10} \text{ F} = 4 \times 10^{-9} \text{ F}$

(2) 电荷量减小后, 电荷量为 $3 \times 10^{-8} \text{ C}$, 电容不变, 故电压 $U' = \frac{Q'}{C} = \frac{4 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-8}}{4 \times 10^{-9}} \text{ V} = 7.5 \text{ V}$

5. (1) 电容器间的匀强电场的电场强度大小: $E = \frac{U}{d} = \frac{60}{1 \times 10^{-2}} \text{ V/m} = 6 \times 10^3 \text{ N/C}$

A 板带正电,B 板带负电, 所以场强方向由 A 板指向 B 板

(2) 电容器所带的电荷量 $Q = CU = 100 \times 10^{-12} \times 60 \text{ C} = 6 \times 10^{-9} \text{ C}$

6. 减小 1 增大 充电 减小 2 减小 放电

7. 在电容器充电过程中, 电源的电能转化为电容器储存的电场能和整个电路的内能(电热); 在电容

器放电过程中,电容器储存的电场能转化为整个电路的内能(电热)

* 8. (1) 带正电的极板接地作为零势能面,若带电粒子从正极板到 x_0 处电场力做功为

$$W = qEx_0 \quad ①$$

$$W = -\Delta E_p = -(E_p - 0) \quad ②$$

由①、②式可得:

$$E_p = -qEx_0$$

(2) 在带电粒子的运动方向上任取一点,设坐标为 x ,由牛顿第二定律可得:

$$qE = ma \quad ③$$

由运动学公式可得:

$$v^2 = 2a(x - x_0) \quad ④$$

由③、④式可得坐标为 x 处:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{qE}{a} \cdot 2a(x - x_0) = qE(x - x_0)$$

$$E_p = -qEx$$

$$E = E_k + E_p = qE(x - x_0) + (-qEx) = -qEx_0 \text{ (恒量)}$$

即动能与电势能之和保持不变

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	能量观念	科学推理	科学论证	解释
1	I	I		
2	II	I	I	
3	II	II	I	
4	II	II	II	
5	II	II	II	
6	II	II		II
7	II			
8	III	II	III	

第七节 静电的利用与防范

(一) 参考解答

1. D

2. 正 负 正

3. 可采用良好接地、工艺控制、维持适当的空气湿度、使用避雷针(接闪杆)等途径来防范静电的危害

害。静电防范是让产生的电荷及时传导离开,不产生积累

4. 相互作用 静电除尘 静电喷雾 静电复印

5. 由于金属管 A 接高压电源的正极,B 接高压电源的负极,在它们之间形成很强的电场;B 附近的空气分子被强电场电离,成为正离子和电子。正离子被吸引到负极 B 上,获得电子后又成为分子;而电子在向正极 A 运动的过程中遇到烟气中的煤粉,使其带负电,在电场力作用下煤粉被吸附到正极 A 上;煤粉堆积到一定程度,受重力作用落在下面的集尘装置中

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用观念	科学推理	交 流	科学本质	社会责任
1		I		I	
2	I	II		II	
3			I	II	II
4	I			I	
5		II	I	II	II

第四部分 本章实验与活动部分解读

1. 自主活动 检测物体是否带电

用验电器下方金属箔张角变化来显示物体所带电荷量的大小与用数字式静电计屏幕上显示物体所带电荷量的区别在哪里?

参考解答: 验电器只能检测物体是否带电,无法判断电性。数字式静电计可判断电性,同时还能定量显示物体所带的电荷量

命题意图: 通过实验,了解静电现象。了解验电器和数字式静电计的异同。

2. 自主活动 模拟静电场的电场线

教材第 13 页节导图所展示的“科技馆的怒发冲冠项目”的原理是什么?能否给出你的解释?

参考解答: 怒发冲冠的原理与此自主活动原理相同,是头发在电场中受到电场力的作用有规律地排列,它们的排列走向顺着电场力的方向

命题意图: 通过实验观察到针状晶体或头发屑按电场强度方向排列起来,从而可以形象地模拟静电场电场线的大致分布,解释节首图的原理。

3. 自主活动 带电粒子在电场中的偏转

如仅增大加速极板之间的电压,电子束的偏转方向以及偏转程度是否发生变化?

参考解答: 如仅增大加速极板之间的电压,电子束在电场中的偏转方向不变,但偏转的弯曲程度会减小

命题意图: 认识电场对带电粒子的作用,能分析带电粒子在电场中的运动情况。

4. 学生实验 观察电容器的充、放电现象

更换另一电容值不同的电容器,重复上述实验步骤。观察“电压 U -时间 t ”图像与“电流 I -时间 t ”图像的变化,比较异同。

参考解答: 电容器的电容对充、放电时间有影响。如更换电容更大的电容器,发现电容器充、放电所需时间变长;更换电容更小的电容器,发现电容器充、放电所需时间变短

命题意图：能使用实验图像进行分析，用实验中获得的证据表达自己的观点。

5. 自主活动 体验静电复印

如想在塑料板上留下一个实心的“大”字，能否给出你的具体做法？

参考解答：用丝绸在塑料板上用力摩擦，使绝缘塑料板带电。在塑料板除“大”字以外的部分均用手指缓慢划过。然后再把干燥的细木屑（或粉笔屑）均匀地撒在塑料板上，竖起塑料板并轻轻敲击，可留下一个实心的“大”字

命题意图：提出猜想，设计实验步骤并通过实验检验猜想。

第十章 电路及其应用

第一部分 整 章 分 析

学习目标

1. 通过电流、电阻的微观解释、电池作用的分析和电路中的能量转化等内容,进一步深化运动与相互作用观念、能量观念。
2. 通过电流、电阻的微观解释和螺旋测微器原理等内容体会模型建构的方法。通过复杂串联、并联组合电路的简化,体会等效替代的方法。通过电路元件的作用和闭合电路中电势升降的分析,运用类比的方法。
3. 在研究金属导体的电阻影响因素的实验中,运用控制变量法设计实验方案,学会选择规格合适的器材测量金属导体长度、电阻。学会使用多用电表测量电学量。在教师的指导下学会制定测量电动势及内阻的方案,并能分析实验中存在的误差,提出减小误差的方法。进一步学会使用图像描述实验数据,理解图像在研究物理中的作用。
4. 在实验过程中,培养严谨的科学态度。了解电学发展取得的成就和科学前沿,激发学习兴趣,培养科学研究志向。通过对家庭电路用电情况的调查,提升节约用电的意识,养成环保节能的习惯。

编写意图

课程标准中对本章内容的要求为:

- 3.2.1 观察并能识别常见的电路元器件,了解它们在电路中的作用。会使用多用电表。
- 3.2.2 通过实验,探究并了解金属导体的电阻与材料、长度和横截面积的定量关系。会测量金属丝的电阻率。
- 3.2.3 了解串、并联电路电阻的特点。
- 3.2.4 理解闭合电路欧姆定律。会测量电源的电动势和内阻。
- 3.2.5 理解电功、电功率及焦耳定律,能用焦耳定律解释生产生活中的电热现象。
- 3.2.6 能分析和解决家庭电路中的简单问题,能将安全用电和节约用电的知识应用于生活实际。

本章内容为初中电路的延续,除了概念和规律上有所增加外,在知识的应用方面要求也更高。在本章的编写中特地增加了电流的微观解释及闭合电路中非静电力做功等内容,加深学生对物质及相互作用观念和能量观念的认识。本章在概念的建立和规律的探索中,通过动手实验、演绎推理等逐步深化学生对控制变量、等效替代和类比等方法的理解。本章中的学生实验较多,教材在编写时按照课程标准的要求,呈现了科学探究能力的递升。在测量性的实验中,强调器材操作能力的训练,在探究性实验中,则通过理论分析帮助学生形成实验方案,从而凸显了不同类型实验教学的育人功能。本章中的多用电表及家

庭电路均考虑了实际的生产、生活情况,将符合现代技术发展的产品融入教材,不仅能激发学生的学习热情,也更好地体现了科学·技术·社会·环境的关系。

本章的核心概念为简单的串联、并联组合电路、电动势以及电功和电功率等,重点规律则为闭合电路欧姆定律。

本章的内容既与上一章电场与电荷的运动及其能量转化有着密切的关系,又是后续电磁感应、电磁振荡等电路部分的基础;是促进学生形成能量观念和培养科学探究能力的重要内容。

完成本章内容学习,共需要 10 课时。其中,第一节 2 课时,第二节 1 课时,第三节 1 课时,第四节 1 课时,第五节 2 课时,第六节 1 课时,第七节 1 课时,第八节 1 课时。

第二部分 本章教材解读

芯片中包含了极为复杂的电子线路。芯片生产技术是我国当下需重点攻克的技术，芯片的生产也是我国的重要战略。

本章首图一方面让学生感受前沿科技的日新月异，一方面以芯片技术发展为题进行爱国主义教育，激发学生从事基础科学的研究的热情。



图为从硅晶圆上取下已制好的集成电路所需的芯片。如今， 1 cm^2 的集成电路就可以拥有几十亿甚至上百亿个电子元器件。稳定、高效、轻便的集成电路为人们的生活、科技带来了无限的可能。集成电路极为复杂，要研究集成电路，我们需先从认识简单电路开始。那么，电路元器件如何构成简单电路，电路工作中遵循哪些规律呢？

第十章 电路及其应用

· 在本章中你将：

1. 认识常见的电路元器件，了解串并联组合电路特点，理解闭合电路欧姆定律、电功、电功率及焦耳定律等有关电路的概念和规律。
2. 探究影响导体电阻的因素；练习使用多用电表；测量电阻率、电源电动势和内阻。
3. 运用电路知识解释生活中的有关现象，分析和解决家庭电路的简单问题。

· 本章的学习将从微观机制深入理解电学量；在初中学习的基础上学习简单的串联、并联组合电路及闭合电路。

· 本章的学习将进一步认识等效替代、控制变量等思想方法。

本节编写思路

[1]



图 10-1 上海浦东陆家嘴的璀璨夜景

本节内容的编排除了体现课标 3.2.1、3.2.3 的要求外,同时复习初中所学电路知识,在此基础上拓展到串联、并联组合电路的学习。在初中的基础上,进一步加深对电学基本量的认识,并增加对电流、电阻的微观解释。这也与上一章的学习相呼应,进一步加强运动和相互作用的物理观念,实现学以致用。

第一节 简单串联、并联组合电路

夜晚的上海浦东陆家嘴(图 10-1)灯光璀璨,美丽壮观。实现这些照明效果,需要使用各种各样的电路元器件搭建电路。

常见的电路元器件有哪些?

如图 10-2 所示是一些常见的电路元器件,自左至右依次为小型电动机、电感器、电容器、电阻器、三极管和二极管。如表 10-1 所示为电路中常见元器件的名称及符号。

[2]



图 10-2 常见的电路元器件

正文解读

[1] 该图体现了现代化大都市与电的关系,电使我们生活的城市——上海的夜晚更漂亮。本节以该生活情景引入电路的学习。授课时也可以使用其他适宜的素材引入教学。

[2] 电路是由各种元件和器件组成的。虽然元件和器件的含义不同,但在这里不作严格

区分,统一用元器件称谓。

教学时可向学生展示实物。

[1] 表 10-1 给出了常见电路元器件的名称及符号。教师引导学生认识元器件的同时，应强调符号的规范性，也可以进行适当的解释帮助学生理解性记忆，还可适当补充表中未列入的元器件符号。

[2] 图 10-3 所示的简单电路具有多重教学功能。既体现元器件的作用，又复习初中所学知识，更为后续深入学习做铺垫。

[3] 关于自由电荷定向移动形成电流的微观解释可详见本节资料链接。

表 10-1 常见电路元器件的名称及符号

[1]	名称	图形符号	名称	图形符号	名称	图形符号
	电源	+	电阻器	□	电容器	
	开关	—	可调电阻器	—	可变电容器	—
	电灯	—⊗—	滑动变阻器	—	空心线圈	—
	电动机	—○—	晶体二极管	—	铁芯线圈	—

各种元器件连接在一起形成电路 (electric circuit)。初中我们已学过一个简单的电路由电源、用电器、开关、导线组成，如图 10-3 所示。其中电源提供电能；用电器消耗电能；导线提供电流通道，起到输送电能的作用；开关控制电路的通、断，若开关闭合，电路中即有电流通过。



图 10-3 简单电路

② 电流是如何形成的？

为了简单起见，我们以金属导体为例讨论。如图 10-4 所示，在金属导体中，有“固定”在晶体结构点阵上失去电子的原子，我们把它称为原子实。还有大量的自由电子，这些电子是金属导体内的自由电荷。一般情况下，金属导体中的自由电子大约以 10^5 m/s 的速率做永不停息的无规则热运动，做热运动的自由电子向各个方向运动的机会均等，从宏观上看，不会形成电流。



图 10-4 导体中自由电子的热运动

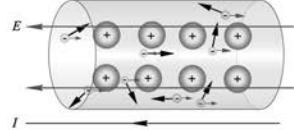


图 10-5 存在电场时导体中电子的运动
(说明：漂移速度远小于热运动速度，图中代表漂移速度的红色箭头仅为示意，不代表实际大小)

若导体中存在电场，在电场力的作用下，导体中的自由电子获得与电场方向相反的加速度。自由电子在加速运动过程中和原子实频繁碰撞，持续加速受到阻碍，最终获得沿加

速度方向一定的速度，这一速度称为漂移速度，如图 10-5 所示。电子的漂移速度很小，比热运动的速度小许多个量级。但由于漂移速度的存在，使导体内的自由电子从整体上发生了逆电场方向的定向移动，便形成了和电场方向相同的电流。

物理学中规定，通过导体某一横截面的电荷量 Q 与所用时间 t 之比称为电流（electric current），用符号 I 表示，即

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

在国际单位制中，电流的单位是安培，简称安，符号为 A。

[1]

大家谈

导体中的自由电子在电场力的作用下获得漂移速度。由于电场力持续存在，该速度是否会持续增大，从而使导体中的电流持续增大呢？

② 电路中的电压如何理解？

我们知道导体中的自由电荷是在电场力的作用下才发生定向移动的。正电荷在电场力的作用下从电势高处向电势低处运动，我们规定正电荷定向移动的方向为电流的方向，因此，沿着电流的方向电势逐渐降低。电流方向上的两点间存在电势差，这个电势差就是电路中这两点间的电压（voltage）。

[2]

拓展视野

当对金属导体两端施加电压时，金属内部就建立起电场并形成和电场方向相同的电流。虽然导体内一直存在电场对电子加速，但是电子的漂移速度却不会无限增加。这是因为电子会和原子实发生碰撞，这种碰撞对电子的定向运动形成“阻碍”。加速与碰撞两种作用同时存在，结果便是一定的电场下，电子获得一定的漂移速度。所以电流不会无限增大，即一定的外加电压形成一定的电流。

另一方面，电场对电子加速必对电子做功，使所有电子的总动能增加。在电子与原子实碰撞过程中，电子的一部分动能传递给原子实，使原子实在点阵位置上的热振动加剧，表现为导体获得热量，温度升高。由此可见，自由电子与晶体点阵上的原子实碰撞，形成对电子定向运动的阻碍作用，这就是“电阻”产生的原因，也是电阻元件在通电时发热的原因。

[1] 此处“大家谈”

的目的是引出电阻的存在。这个问题可以通过“拓展视野”的内容来回答和加深理解。

[2] 初中已经学过

电流、电压和电阻这三个基本电学物理量，但这三者是学习电路的基础，因此高中教材又花了一定的篇幅对其进行深入介绍，特别是对电流和电阻的微观解释。这是上一章学习的应用，也体现高中阶段的学习特点。

[1] 开始串联、并联组合电路的学习之前，应回顾串联、并联电路的特点，做好铺垫。

[2] 在处理较复杂的电路时，可将某两个或某几个电阻用一个电阻等效替代，以使电路简化，然后运用初中所学的串联、并联的电路特点予以解决。本示例可使学生进一步掌握“等效替代”的物理思想。

② 什么是串联、并联组合电路？

[1] 初中时我们已经学过了两个用电器的串联或并联，当用电器的数目超过两个，用电器间的连接方式会比较复杂，可能既有串联又有并联。将用电器同时采用串联和并联的方式组合起来形成的电路叫做串联、并联组合电路。实际生活中大部分电路都是采用串联、并联组合电路的方式连接的。

[2] 示例 把阻值分别为 $R_1 = 20 \Omega$ 、 $R_2 = 30 \Omega$ 、 $R_3 = 8 \Omega$ 的三个电阻连接成如图 10-6 所示的组合电路，电路的总阻值为多少？若电源电压 $U = 20 \text{ V}$ ，则闭合开关后，流过每个电阻的电流大小分别为多少？

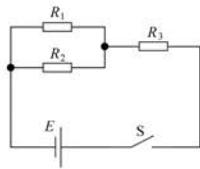


图 10-6 组合电路图

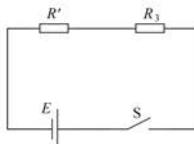


图 10-7 等效电路图

分析：这个组合电路为 R_1 与 R_2 并联后再与 R_3 串联。将 R_1 、 R_2 按照并联关系等效为电阻 R' ，则原电路可等效为如图 10-7 所示的 R' 与 R_3 的串联电路，这样就可以求解电路的总阻值了。可先将原电路等效为如图 10-7 所示的串联电路，然后再根据串并联电路特点逐步还原求解。

解： R_1 与 R_2 并联，则 R_1 、 R_2 与等效电阻 R' 之间的关系为

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

因此

$$R' = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

又 R' 与 R_3 串联，因此电路中总电阻

$$\begin{aligned} R_{\text{总}} &= R' + R_3 \\ &= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 \\ &= \left(\frac{20 \times 30}{20 + 30} + 8 \right) \Omega \\ &= 20 \Omega \end{aligned}$$

助一臂

等效电路是将一个复杂的组合电路通过电阻等效等方法，化简成具有与原电路功能相同的简单电路。这个简单的电路，称作原复杂电路的等效电路。

“等效”的目的是为了在电路分析时，通过等效替代，简化分析过程。之前学习的平均速度、力的合成等都是等效替代思想的应用。

闭合开关后,由欧姆定律得,电路中的总电流,即流过 R_3 的电流

$$I_3 = I = \frac{U}{R_{\text{总}}} = \frac{20}{20} \text{ A} = 1 \text{ A}$$

设流过电阻 R_1 的电流为 I_1 ,流过电阻 R_2 的电流为 I_2 ,由于 R_1 与 R_2 并联,有

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

又

$$I_1 + I_2 = I = 1 \text{ A}$$

则

$$I_1 = 0.6 \text{ A}, I_2 = 0.4 \text{ A}$$

[1]

STSE

集成电路是一种微型电子器件或部件。采用一定的工艺,把一个电路中所需的晶体管、电阻、电容等元件及布线互连在一起,制作在一小块或几小块半导体晶片或介质基片上,然后封装在一个管壳内,成为具有所需电路功能的微型结构。如图 10-8 所示为一款封装后的集成电路。集成电路的诞生,使电子技术发生了划时代的革命。集成电路与由分立元件组装的普通电路相比,具有重量轻、体积小、性能好和能耗小等多项明显优势。

在集成电路的制造过程中,光刻技术是一个非常重要的环节,它决定了集成电路的集成度,即单位面积上的元器件数目。随着集成度需求的不断提升,光刻技术正在逼近物理极限。在集成电路未来的发展中,人类想要突破极限,就需要新的技术和解决方案。



图 10-8 集成电路

问题与思考

1. 如图 10-9 所示是一块电路板,指出至少 2 种电路元件,并说出其名称。

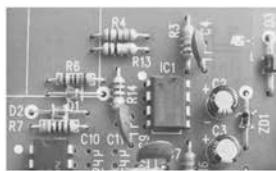


图 10-9

[1] 可以让学生查阅集成电路相关资料,进行课堂交流。

问题与思考解读

1. 参考解答: 电阻、电容、二极管

命题意图: 从图片中提取信息,在具体情景中识别电路元器件。

主要素养与水平: 物质观念(I)。

2. 参考解答：

- (1) 石墨能导电，形成定向移动的微粒是电子
(2) 金刚石是正四面体的结构，每个碳原子的周边连着四个碳原子，形成4个共价键，不存在能自由移动的电子，不能导电

命题意图：拓展对电流形成原因的认识，体现学科的综合。

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

3. 参考解答：

6.0×10^4 A

命题意图：采用具体情景计算电流，增加对身边现象的科学认知。

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

4. 参考解答： S_1 、
 S_2 均断开，24 V； S_1 闭合、 S_2 断开，12 V； S_1 断开、 S_2 闭合，8 V； S_1 、 S_2 均闭合，6 V

命题意图：提升利用串并联电路的特点分析解决电路问题的能力。

主要素养与水平：模型建构(I)；科学推理(I)。

5. 参考解答：7种，分别为 6Ω , 12Ω , 3Ω , 18Ω , 2Ω , 9Ω , 4Ω

命题意图：了解串并联电路电阻的特点，学会计算等效电阻。

主要素养与水平：模型建构(II)；科学推理(II)。

2. 石墨是元素碳的一种同素异形体，每个碳原子的周边连结着另外3个碳原子，单层石墨碳原子的排列方式呈蜂巢式的六边形平面结构，如图10-10所示。每个碳原子最外层有4个价电子，其中3个电子与周围的碳原子形成3个共价键，剩余的1个电子能够自由移动。



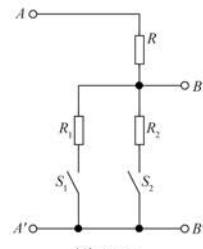
图10-10

- (1) 由上述材料判断石墨能否导电，若能导电，则形成定向移动的带电微粒是什么？

(2) 查阅金刚石的结构，判断其能否导电？

3. 当雷雨云聚集的电荷达到一定的数量时，在带电的云层与云层之间或者带电的云层与地面之间能形成很强的电场，足以把空气击穿，同时激发出耀眼的闪光，这就是人们常说的闪电。若一次闪电放电的电荷量大小是300 C，放电的时间是0.005 s，则这次闪电放电时的平均电流为多大？

4. 如图10-11所示为某控制电路的一部分。已知AA'间的输入电压为24 V，如果电阻 $R=6\text{k}\Omega$, $R_1=6\text{k}\Omega$, $R_2=3\text{k}\Omega$ ，则BB'输出的电压可能为多少？



5. 有三只阻值均为 6Ω 的电阻，取其中的一只、两只或三只使用，通过不同的连接方式，共可获得多少种不同的阻值，分别为多少？

资料链接

电场作用下自由电子的定向移动

在均匀直导线中取一横截面,设其面积为 S 。当电场方向自左向右时,电子漂移运动的方向自右向左。如图 1 所示,设电子漂移速度为 v ,则在时间 t 内通过截面 S 的电子就是原来在 S 右方,以 S 为底, vt 为高的圆柱体内的自由电子。设导体每单位体积内的自由电子数为 n (也叫电子数密度),则此圆柱体内的自由电子的总电荷量就是 $q = neSvt$ 。

这些自由电子通过 S 时形成的电流就是 $I = q/t = neSv$ 。

根据相关计算,电子漂移速度在 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ m/s 的数量级!既然电子的漂移速度这么小,为什么当我们把电灯开关闭合时,电灯立刻就亮了呢?实际上,闭合开关的瞬间,电路中立刻建立了恒定电场,电场的传播速度极高,为光速,约为 3×10^8 m/s。在电场的作用下,电路中各处的自由电子几乎同时开始定向移动,整个电路也就几乎同时形成了电流。所以开关一接通,电灯立刻就亮了。

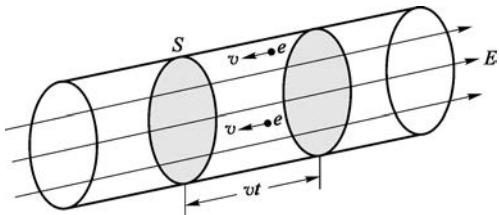


图 1

本节编写思路

本节从各种各样的电阻器引入，过渡到影响金属导体电阻因素的研究，落实课标“3.2.2 通过实验，探究并了解金属导体的电阻与材料、长度和横截面积的定量关系”的要求。

随着电阻定律的得出，学生经历了完整的科学探究过程。要重视“假设”环节的落实，然后通过实验进行验证，实验时体现控制变量的思想方法。

通过“自主活动”，了解温度对导体电阻的影响；通过“STSE”，了解超导的相关知识，拓展学习视野。

正文解读

[1] 节首图展示了若干种类的电阻器，拓展学生视野。电阻器往往被简称为电阻，而电阻又被用作一个物理量。注意二者的区别。与此类似的还有电容、电感。

[1]

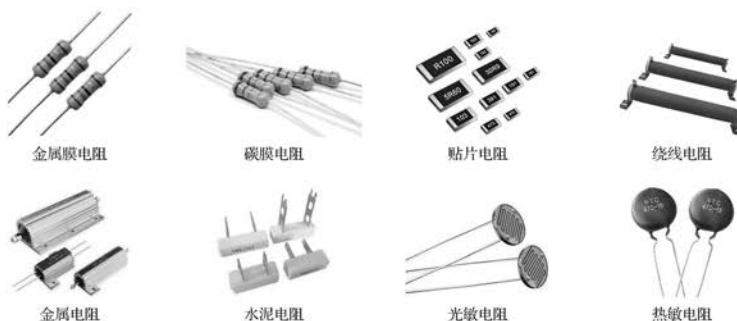


图 10-12 形形色色的电阻器

第二节 电阻定律

如图 10-13 所示，在用伏安法测一根细铁丝的电阻时，我们发现，将其两端直接接入电路和将铁丝对折头尾相连再接入电路，两次测得的电阻值不同。若将细铁丝换成形状相同的细铜丝，测得铜丝的电阻值与铁丝的也不同。我们知道，**电阻 (resistance)** 是一个物理量，表示导体对电流阻碍作用的大小，通常用 R 表示；电阻是导体本身的一种特性，不同的导体，电阻大小一般不同；电阻越大，表示导体对电流的阻碍作用越大。同样的铁丝为什么两次测量的电阻值不同呢？相同形状的铁丝与铜丝的电阻值为什么又不同呢？

[2]

大家谈

一段金属导体的电阻由哪些因素决定？有怎样的定量关系？请猜测、提出假设并说明假设的依据。

② 一段金属导体电阻与长度、横截面积等因素有怎样的定量关系？

1. 研究金属导体电阻与长度的关系

采用粗细均匀的长金属电阻丝，按如图 10-14 所示的电路连接。不断改变导线与电阻丝

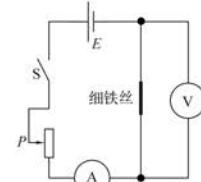


图 10-13 伏安法测细
铁丝的电阻

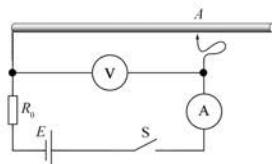


图 10-14 研究金属导体电阻与长度的关系

[2] 此处“大家谈”是为后面的教学内容做铺垫。教学时，注意引导学生提出“假设”。从某种意义上来说，所有的实验都是验证性实验，除了验证已知规律外，还可以验证头脑中的假设。假设的提出必须基于一定的依据。此处可引导学生根据以往学习的知识提出导体电阻大小可能与长度和面积有关，详见下页。

的接触点 A 的位置，依次记录电压表、电流表的示数及连入电路的电阻丝的长度 L ，随后根据电压表、电流表的示数计算连入电路部分的电阻丝的电阻值 R ，最终绘制 $R-L$ 图像，判断导体电阻与长度的关系。

2. 研究金属导体电阻与横截面积大小的关系

采用材料及长度相同、横截面积不同的电阻丝，分别接入如图 10-15 所示的电路 a 、 b 两端。记录电压表及电流表的示数，计算出电阻丝阻值 R ，绘制电阻丝阻值 R 与横截面积 S 的 $R-S$ 图像，从而判断导体电阻与横截面积间的关系。

3. 研究金属导体的电阻与材料的关系

采用横截面积、长度相同但材料不同的金属电阻丝，分别连入如图 10-15 所示的电路 a 、 b 两端。通过记录电压表、电流表的示数，计算电阻丝阻值 R ，判断材质是否影响电阻阻值。

实验表明：在温度不变时，导体的电阻 R 与导体的长度 L 成正比，与导体的横截面积 S 成反比，与构成它的材料有关，即

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

这就是**电阻定律 (law of resistance)**。式中 ρ 叫做材料的**电阻率 (resistivity)**，电阻率的单位是欧姆·米，符号为 $\Omega\cdot m$ 。不同材料的电阻率 ρ 是不同的，它的数值是由导体的材料性质所决定的，反映了材料的导电性能。在一定的温度下，对同一种材料而言， ρ 不变。如表 10-2 所示为一些常见导体材料在温度为 20 ℃ 时的电阻率。

表 10-2 一些常见导体材料在温度为 20 ℃ 时的电阻率

导体	电阻率 ρ ($\Omega\cdot m$)	导体	电阻率 ρ ($\Omega\cdot m$)
银	1.6×10^{-8}	铁	1.0×10^{-7}
铜	1.7×10^{-8}	汞	9.6×10^{-7}
铝	2.9×10^{-8}	锰铜合金 *	4.4×10^{-7}
钨	5.3×10^{-8}	镍铜合金 **	5.0×10^{-7}
铂	1.0×10^{-7}	镍铬合金 ***	1.0×10^{-6}

* 锰铜合金：85% 铜，3% 锰，12% 锌。

** 镍铜合金：54% 铜，46% 镍。

*** 镍铬合金：67.5% 镍，15% 铬，16% 铁，1.5% 锰。

以下有关假设的依据可以作为教学参考：

移动滑动变阻器的滑片可以改变它的电阻，这说明导体的电阻跟它的长度有关（长度越长，电阻越大）；传统熔丝的粗细不同，规格不同，这说明导体的电阻跟它的横截面积有关（横截面积越大，电阻越小）；电线常用铜丝制造，而不用铁丝，说明导体的电阻跟它的材料有关。

对于假设的实验验证，采用教师演示实验的方式。如果学校条件允许，也可以在教学时让学生进行实验。该实验过程为后续的“测量金属丝的电阻率”学生实验打下了基础。

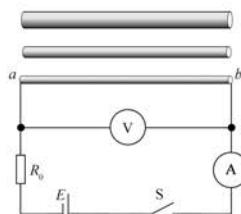


图 10-15 研究金属导体电阻与横截面积大小的关系

[1] 此处“大家谈”

旨在引导学生辨析电阻和电阻率两个概念。

1. 定义不同。电阻用电压和电流的比值 U/I 来定义, 即 $R = \frac{U}{I}$ 。电阻率是描述材料导电性能的物理量。某种材料的电阻率数值上等于单位长度、单位横截面积该材料圆柱体的纵向电阻。

2. 物理意义不同。电阻值的大小表示的是导体对电流阻碍作用的大小, 是导体本身的一种性质。导体的电阻越大, 对电流的阻碍作用就越大。电阻率的大小表示的是材料的导电性能的好坏, 是材料本身的一种性质。材料的电阻率越大, 其导电性能就越差。

3. 二者关系。依据公式 $R = \frac{\rho L}{S}$ 可知: 长度 L 相同、横截面积 S 相同时, 电阻率 ρ 大的材料制成的导体, 其电阻 R 越大。所以, 在制作定值电阻时, 应该用电阻率大的材料(灯丝、电炉丝也是如此); 在制造导线时, 应选用电阻率小的材料。

[2] 此处的“自主活动”目的是通过实验展示出电阻随温度改变而改变的现象, 可以采用教材给出的方案, 也可以采用加热电阻观察电路电流变化等其他方案。

在教材图 10-17 中, 随着电压的不断增加, 图线出现了弯曲, 根据电阻 $R = \frac{U}{I}$, 可知图像中任何一点与原点的连线斜率表示电阻阻值 R 倒数的大小, 即 $\frac{1}{R}$ 。由图可知, 随着电压的不断增加, 小灯的电阻阻值也不断增加。在教学中可以指导学生讨论电阻阻值随电压的增加的变化情况。

示例 一根长 $L = 10\text{ m}$ 的铁丝, 质量 $m = 0.156\text{ kg}$ 。试求其在温度为 20°C 时的电阻。(铁的密度 $D = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)

分析: 由电阻定律公式 $R = \rho \frac{L}{S}$ 可知, 若求铁丝的电阻 R , 必须知道铁丝的电阻率 ρ 、长度 L 和横截面积 S 。其中 ρ 可以由表 10-2 查得, L 已知, S 则要通过铁丝的质量 m 、密度 D 和长度 L 来求得。

解: 设铁丝的体积为 V , 横截面积为 S , 由 $m = DV = DSL$ 得

$$S = \frac{m}{DL}$$

将上式代入电阻定律公式, 则铁丝的电阻

$$R = \rho \frac{DL^2}{m} = \frac{1.0 \times 10^{-7} \times 7.8 \times 10^3 \times 10^2}{0.156} \Omega = 0.5 \Omega$$

[1]

大家谈

导体的电阻和电阻率有何区别?

② 温度对导体的电阻有何影响?

前面讨论电阻和电阻率时我们都假定“温度不变”, 那么温度对导体的电阻有何影响呢? 下面我们就先来做一个实验。

[2]

自主活动

利用电压表、电流表、温度传感器, 按如图 10-16 所示的电路研究小灯泡的 $I-U$ 特性曲线。

实验时, 闭合开关, 缓慢调节滑动变阻器阻值, 记录电压 U 、电流 I 的数据, 并相应记录此时小灯泡周围的温度值。得到的实验 $I-U$ 图线如图 10-17 所示。

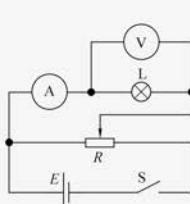


图 10-16 研究小灯泡的电压、电流关系

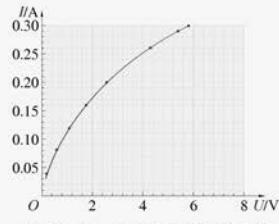


图 10-17 小灯泡 $I-U$ 特性曲线

从 $I-U$ 图线不是一条直线可知，电阻不是一个常数。由实验可知，随着流过小灯泡的电流的增加，小灯泡灯丝的温度逐渐升高。温度对灯丝的电阻存在影响，灯丝温度变化时，它的电阻发生了变化。从实验获得的图线可知，灯丝电阻随温度升高而增大。小灯泡的灯丝在正常发光时的电阻值比不发光时大很多。电阻随温度的变化主要是由于导体材料的电阻率随温度发生了变化。尽管如此，在中学物理中，除非特别指出，一般不考虑温度对电阻变化的影响。

利用金属的电阻跟温度的关系，可以制成电阻温度计。通常用铂电阻丝做成的温度计叫做铂温度计，它比汞温度计更精确，且测量范围更广。

电阻器 (resistor) 是用导体材料制成的、在电路中对电流起一定阻碍作用的电子元件，在日常生活中也常常被直接称为电阻。人们根据电阻定律，设计生产出各种各样的电阻器（图 10-12）来满足社会生产生活实际需要。作为重要基础电子元件，电阻器在工业生产中有着重要而且广泛的应用。

STSE

1911 年，荷兰物理学家昂内斯 (H. K. Onnes, 1853—1926) 发现，当汞温度降到 4.15 K (-269°C) 附近时，电阻会突然降到零。之后，又有科学家发现，某些金属、合金和化合物在温度降到绝对零度附近某一特定温度时，电阻会突然减小到无法测量，这种现象叫做超导现象。由正常状态转变为超导状态的温度称为这种物质的临界温度。现在已发现，大多数金属元素以及数以千计的合金、化合物都在不同条件下显示出超导性。

超导体可以通过大电流，并产生强磁场，因此在电磁设备中有着广泛的应用，如核磁共振成像仪、加速器等。不过超导现象大规模应用遇到的主要障碍是超导所要求的低温。如果能得到在室温下呈现超导现象的材料，就会使世界发生巨大的变化。

我国著名物理学家赵忠贤 (1941—) 从 1976 年开始从事探索高温超导体的研究，1983 年开始研究氧化物超导体 BPB 系统及重费米子超导性，1986 年底在 Ba-La-Cu-O 系统研究中，注意到杂质的影响，并于 1987 年参与发现了液氮温区超导体。1987 年 2 月，他所在的小组独立地发现了液氮温区超导体，并首先向世界上公布了其化学成分 Ba-Y-Cu-O。这个研究成果推动了超导研究。现在，许多科学家正在研究超导。

问题与思考

- 导致电路烧毁的故障，经常发生在插座处。试说明可能的原因。
- 某实验室需要绕制一个总阻值是 $50\ \Omega$ 的滑动变阻器。根据表 10-2 的数据，计算需要用多长的横截面积是 $0.02\ \text{mm}^2$ 的镍铬线？

证 (I)。

2. 参考解答：1 m

命题意图：学会查表获取电阻率的数据，会使用电阻定律进行相关物理量的求解计算。

主要素养与水平：科学推理 (I)；科学论证 (I)。

电路元器件中有一类被称为线性元件，其伏安特性曲线是一条过坐标原点的斜线，即满足两端电压与电流成正比关系。电路元器件中电压与电流为非线性关系的则称为非线性元件，常见的非线性元件有二极管、三极管、热敏电阻和光敏电阻等，了解它们的伏安特性有助于电路设计时的选择。

问题与思考解读

1. 参考解答：如果插头和插座的接触不良，接触面很小，根据电阻定律，截面积小处导体的电阻较大，则会在该处产生较大的热量；也可能是接触面金属氧化，导致电阻率升高，电阻增大，在该处产生较大的热量。

命题意图：引导学生观察生活现象，并运用所学知识解释现象。

主要素养与水平：科学推理 (I)；科学论

3. 参考解答：

ABCD -接线柱; E -金属杆; F -瓷筒; G -金属丝; H -支架; P -滑片
滑片触头滑动的时候，接入电路中的导体长度近似连续变化，从而实现电阻连续变化

命题意图：让学生更加了解滑动变阻器的结构，破解滑动变阻器接入电路的难点。

主要素养与水平：

模型建构(Ⅱ); 科学推理(Ⅰ); 科学论证(Ⅰ)。

4. 参考解答：过原点分别连接 a 、 b 、 c 、 d 四个点的直线，根据直线的斜率表示电阻的大小可知， a 、 b 两电阻的大小最为接近

命题意图：了解伏安特性曲线的物理意义。

主要素养与水平：

模型建构(Ⅰ); 科学推理(Ⅰ)。

5. 参考解答：镍铜合金

命题意图：巩固串并联电路特点、电阻定律等内容。

主要素养与水平：

模型建构(Ⅰ); 科学推理(Ⅰ); 科学论证(Ⅱ)。

6. 参考解答：由于体内脂肪几乎不导电，而肌肉和水分等身体成分则容易导电，所以脂肪秤可以通过测量人体生物电阻来计算体内脂肪、水分以及其他组织成分的比率

命题意图：利用所学知识了解生活中科技产品的原理，进一步激发学习兴趣。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ); 科学推理(Ⅱ); 科学论证(Ⅱ)。

3. 观察滑动变阻器的外观，说出图 10-18 中各字母标识的部件的名称，并解释滑动变阻器能改变电阻的原因。

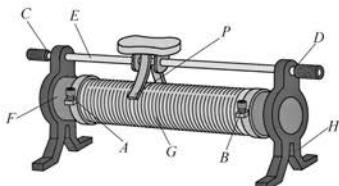


图 10-18

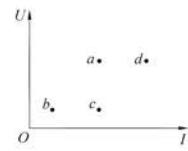


图 10-19

4. 将四个定值电阻 a 、 b 、 c 、 d 分别接入电路，测得电流、电压值如图 10-19 中相应的点所示。试指出其中阻值最接近的两个电阻，并简述理由。
5. 两根长短、粗细都相同的导体，一根是铜丝，另一根材料未知。若将这两根导体串联接在电路中，发现另一根导线两端的电压约为铜丝两端电压的 30 倍，试问另一根导线是用何种材料制成的？
6. 研究表明，人体中的水分绝大部分存在于血液、肌肉及内脏中，而脂肪中含水量极低，因此脂肪部分比肌肉和人体其他组织电阻率更高。电子脂肪秤是一种测量人体脂肪百分率、水分百分率、骨骼质量等数据的产品。脂肪秤的表面隐藏有两个电极片，使用时人需要赤脚站立在脂肪秤上。根据上述资料，建立简单物理模型，猜测脂肪秤的工作原理，并查找资料对脂肪秤测量的准确性进行评价。

资料链接

金属电阻率与温度的关系

实验表明,纯金属的电阻率会随温度变化而变化。在0℃附近,当温度的变化范围不大时,电阻率与温度之间近似地存在着如下的线性关系:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

式中 ρ 表示金属在 t ℃时的电阻率, ρ_0 表示金属在0℃时的电阻率。不同材料的温度系数 α 不同,大多数常见金属的 α 值在0.003/℃到0.007/℃之间。

在室温下,金属导体的电阻率约为 $10^{-8} \sim 10^{-5}$ Ω·m;绝缘体材料的电阻率大于 10^8 Ω·m;半导体材料的电阻率介于两者之间,为 $10^{-5} \sim 10^8$ Ω·m。半导体的电阻率随温度变化的规律与金属导体大不相同。在常温附近,半导体的电阻率一般随温度的升高而急剧减小,而且变化也不是线性的。

量子理论对电阻的解释概要

20世纪物理学飞速发展的一个重要方面便是将量子力学应用于固体的研究,关于电导的量子理论是典型的成果之一。

量子理论应用于固体,发展出能带理论,解决了固体中电子能量状态的问题,从而奠定了用量子理论研究固体物理性质的基础。我们知道对孤立原子而言,核外电子分布在一系列分立的能级上;由低到高,电子按量子力学的泡利不相容原理占据各能级。在固体中,由于原子间存在较强的相互作用,原子能级“分裂”成一定宽度的能带。为了便于理解,我们来考察最简单的氢分子。氢分子由两个氢原子组成。氢原子的核外只有一个电子,处在1s能级上。当两个氢原子组成氢分子时,由于原子间距离较近,两个原子的1s波函数会彼此交叠,原子间存在相互作用,从而使1s能级分裂成两个能级(通常称为分子轨道):一个能量较低的成键轨道,一个是能量较高的反键轨道。两个电子都占据成键轨道,一个自旋向上,一个自旋向下。对于由数密度约 $10^{29}/\text{m}^3$ 的原子组成的固体,原子能级也要分裂成密密麻麻距离极小的能级,形成所谓的能带。每个原子能级对应一个能带,能带宽度随原子能级高低而不同。对内层原子能级展宽而成的能带而言,由于相邻原子间内层电子波函数交叠较少,能带较窄,甚至类似原子能级;而外层电子能级展宽而成的能带较宽,可达电子伏特的量级。每个能带里的能级数都和固体中的原子数相等,可见能级分布之密;也是所以称为能带的原因。固体中的电子由低到高占据能带中的能级,因此这些能带又称许可带。相邻许可带之间存在电子不能占据的能量范围,称为禁带。实际情形能量较高的许可带的能量也可能彼此交叠,呈现比这里介绍的简单图画更为复杂的情形。

量子理论认为占据许可带能级的电子可以一定的速度在整个固体里运动而不束缚于一个特定的原子核附近。但是,在一个被电子占满的许可带(满带)里,如有一个向某方向运动的电子,必相应地有一个以大小相同的速度向相反方向运动的电子,从而对电流的贡献彼此抵消。于是,我们将这种情形简称为满带电子不导电。对固体而言,在温度不太高时能量较低的许可带都是满带;只有价电子占据的能带(称为价带)可能不满。如果电子填充的最高的能带价带也是满带,这样的固体便不能导电,这就是绝缘体。如果价带虽是满带,但和上面最靠近的一个许可带之间隔开的禁带不太宽,价带上部能量较高的电子有可能通过热激发等过程跃迁到上面的许可带,使这两个许可带都成为部分被占据的能带而能导电,这就是半导体的情形。对于金属,价带是被部分占据的,从而使金属成为能导电的导体。这就是能带论对固体具有不同电导率的解释。

在有限温度下,金属表现出现一定的电阻,经典理论认为这是由于自由电子和晶体原子的碰撞。但

量子理论认为如果晶体中的原子实严格按周期性规律排列，电子在其中运动状态不会改变，即是不受散射的。用经典理论看就是电子不遭遇碰撞，犹如水下虽然礁石密布，但游鱼依然随心所欲畅游其中不会撞得头破血流。经典的电子论认为即使原子实严格按周期性排列，只要挡在电子前面照撞不误。而且，带负电的电子如真的和带正电的原子实相撞会中和成中性原子而使导电的自由电子减少。这也是经典的电导理论的困难。量子理论认为，实际的晶体都存在散射因素，使电子运动的漂移速度不会持续增加而在恒定电场作用下达到稳定的数值，从而表现一定的电阻率；严格周期性的原子排列产生对电子的严格周期性势场，在周期场中运动的电子不受散射，因此这里的散射因素就是指对严格周期性势场的偏离。这种偏离主要来自两种物理因素。一是存在杂质，杂质原子和母体金属原子不同，引进的势场也不同，从而造成对严格周期场的偏离；另一是我们熟知的金属原子的热运动，就是原子在其平衡位置附近的振动，称为晶格振动。晶格振动使原子偏离平衡位置，电子经受的势场偏离严格周期场。而且，温度愈高振动愈烈，对周期场的偏离愈大，对电子散射愈甚，电阻愈高。这就是熟知的金属电阻率要随温度上升而增高。

以上我们的讨论实际上认为金属中的每个价电子都对电导有贡献。但量子理论认为，其实只有少量能量处于费米能级（如有一电子能级的能量和费米能级相等，该能级为电子占据的概率就是 $1/2$ 。对金属而言，在绝对零度，低于费米能级的电子能级全被电子占满，而费米能级以上能级全空）附近的电子对电导有贡献，因为只有费米能级附近能量较高的电子有可能改变其能量状态，才有可能从外场吸收能量并对电导作出贡献。计算表明这部分电子只占电子总数约亿分之一，但每个电子的贡献都很大，其余百分之 99.999 999 的价电子对电导几无影响。

[1]



图 10-20 汽车后挡风玻璃上的电阻丝

第三节 测量金属丝的电阻率

细心观察，你会发现汽车的后挡风玻璃上有一条条的细线，如图 10-20 所示，其实这些细线是金属电阻丝。当挡风玻璃起雾、起霜时，汽车对挡风玻璃上的电阻丝通电加热可以起到除雾化霜的作用。我们已经知道金属丝的长度和横截面积一定时，其阻值取决于金属材料的电阻率。本节我们将通过实验测量金属丝的电阻率。

金属丝的电阻率如何测量？

若有一根长为 L 、直径为 d 的金属丝，则可以根据电阻定律 $R = \rho \frac{L}{S}$ ，得其电阻率 $\rho = \frac{SR}{L}$ ，又 $S = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$ ，所以可得

$$\rho = \frac{\pi d^2 R}{4L}$$

因此，要测得金属丝的电阻率 ρ ，需要先测得金属丝的长度 L 、直径 d 和电阻 R 。

段视频更好地体现电阻丝的除雾、除霜的功能。

本节编写思路

本节学习落实课标

“3.2.2 会测量金属丝的电阻率”的要求。上节电阻定律的学习是本节测量金属丝电阻率的理论基础。要注意区分两节课实验的区别：上节课是探究影响金属导体电阻的因素，得出电阻定律；本节是利用电阻定律测量某种材料金属丝的电阻率。

通过理论分析得知，要测量金属丝的电阻率先应测量金属丝的长度、直径和电阻，然后相应地进行学生实验一、二。

通过动手实验，学习工具的使用，进行实验误差的分析，减小实验误差的讨论，培养严谨求实的科学态度。

正文解读

[1] 现在家用汽车已经相当普及，节首图所描述的与电阻率有关的现象，教师可以拍一段视频更好地体现电阻丝的除雾、除霜的功能。

学生实验

学生实验一：长度测量及其测量工具的选用

长度是物理学中的基本物理量之一。长度的测量是最基本的测量，测量工具众多，最常用的工具是刻度尺。另外，也可以使用游标卡尺（图 10-21）和螺旋测微器（图 10-22）等。测量工具的分度值（测量工具所能测量的最小值）决定了测量工具所能达到的精度。通常情况下，刻度尺的分度值为 1 mm，游标卡尺的分度值有 0.1 mm、0.05 mm 和 0.02 mm 三种，螺旋测微器的分度值一般为 0.01 mm。

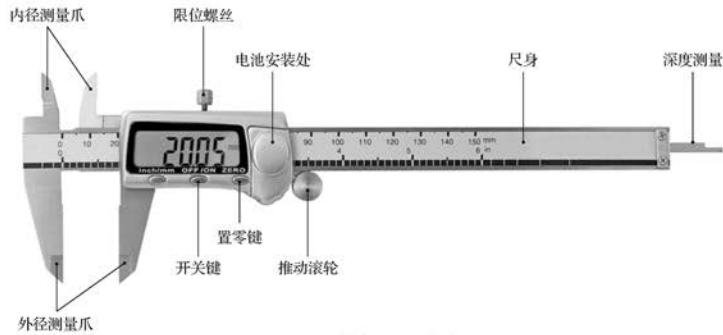


图 10-21 数字显示游标卡尺

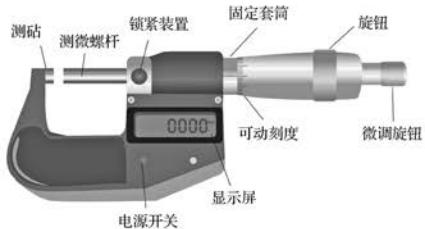


图 10-22 数字显示螺旋测微器

测量长度时要根据不同的场景和要求选择不同的工具。应尽量选择测量工具的量程大于被测物体长度，避免多次测量的累加造成的测量精确度下降；测量工具的分度值要小于测量精度的要求。如金属丝的长度可用刻度尺测量，但金属丝的直径用刻度尺测量则满足不了精度的要求，会造成较大的误差，因此需要选用精度更高的游标卡尺或螺旋测微器对金属丝直径进行测量。

实验原理与方案

用刻度尺测量金属丝的长度，用数字显示螺旋测微器测量金属丝的直径。多次测量取平均值以减少误差。

实验操作和数据收集

1. 用刻度尺测量金属丝的长度，将数据记录在表 10-3 中；
2. 用数字显示螺旋测微器测量金属丝横截面的直径。打开电源开关，在测砧与测微螺杆接触时进行调零；将金属丝置于测砧与测微螺杆之间；旋转旋钮，当测砧即将夹紧金属丝时，改旋微调旋钮使测砧夹紧金属丝，将显示屏上显示的金属丝直径数值记录在表 10-3 中。

表 10-3 实验数据记录表

实验序号	1	2	3	4	5	平均值
金属丝长度 l/mm						
金属丝直径 d/mm						

实验结论

金属丝的长度 l 为 _____；金属丝的直径 d 为 _____。

交流与讨论

也可用游标卡尺测金属丝的直径。各组交流使用不同测量仪器的体会，讨论提高测量准确度的方法。

[1]

拓展视野

1. 游标卡尺的测量原理

游标卡尺作为一种被广泛使用的高精度测量工具，可以测量物体的长度、内径、外径及深度等。它是由主尺和附在主尺上能滑动的游标尺两部分构成，如图 10-23 所示。游标尺上的刻度线越多，测量的精确程度就越高。如分度值为 0.1 mm、0.05 mm、0.02 mm 的游标卡尺

尺的游标尺上分别有 10 条、20 条、50 条刻度线。那么，游标卡尺是如何实现测量精度的提高的呢？

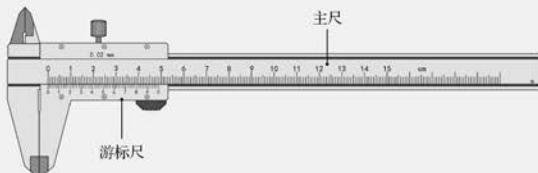


图 10-23 游标卡尺

[1] 关于“拓展视

野”给出的游标卡尺和螺旋测微器的原理，学生从中可以学习和借鉴解决问题的思维方法。

游标尺上的刻度间距 x 比主尺上的刻度间距 y 略小一点。一般游标尺上的 n 个刻度间距等于主尺上 $(n-1)$ 个刻度间距，即

$$nx = (n-1)y$$

由此可知，游标上的刻度间距与主尺的刻度间距相差 $\frac{1}{n}$ mm，这就是游标尺的精度。以分度值 0.1 mm 的游标卡尺为例，如图 10-24 所示，游标尺上有 10 个等分刻度，总长 9 mm，因此游标尺的每一分度为 0.9 mm，比主尺上的最小分度小 0.1 mm。当测量爪并拢时，主尺和游标尺的零刻度线对齐，两者的第一条刻度线相差 0.1 mm，第二条刻度线相差 0.2 mm，……，第 10 条刻度线相差 1 mm，即游标的第 10 条刻度线恰好与主尺的 9 mm 刻度线对齐。若测量时测量爪的卡口间距为 0.3 mm，游标尺就要向右移动 0.3 mm，使得它第 3 条刻度线恰好与尺身的 3 mm 刻度线对齐。这样就将主尺上读数时所涉及的估读问题转化为确定主尺上的刻度线与游标尺上的哪条刻度线对齐的问题。所以，游标卡尺是利用主尺的单位刻度（1 mm）与游标尺的单位刻度之间固定的微量差值来提高测量精度的，即采取了错位放大法提高了测量的精度。

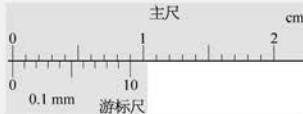


图 10-24 分度值为 0.1 mm 的游标卡尺的刻度线

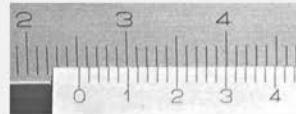


图 10-25 分度值为 0.02 mm 的游标卡尺的读数

如图 10-25 所示的游标卡尺的精度为 $\frac{1}{50}$ mm，即 0.02 mm。在读数时，先从主尺上读得游标尺的零刻度线所在的整数分度值（25 mm）；再到游标尺上找与主尺刻度线准确对齐的游标刻度线（第 11 根刻度线）；求得游标尺的分度值 $11 \times \frac{1}{50} = 0.22$ mm；最后得到测量值 $25 + 0.22 = 25.22$ mm。由于使用游标卡尺测量长度时没有进行估读，只是判断刻度线的对齐与否，因此其测量误差即为游标尺的精度值，本例中为 0.02 mm。

2. 螺旋测微器的测量原理

螺旋测微器 [图 10-26 (a)] 是依据螺旋放大的原理制成的。该原理类似于在盘旋式楼梯上行走时，走过的距离与上升高度间存在放大关系，即螺杆在螺母中旋转一周的同时即沿着旋转轴线方向前进（后退）一个螺距的距离。在螺旋测微器中，可动

刻度的一圈为 50 格，而旋转一圈，螺杆前进（后退） 0.5 mm ，即为固定刻度中的一个小格，所以，螺旋测微器可精确测量的最小刻度为 $\frac{0.5}{50}\text{ mm} = 0.01\text{ mm}$ 。



图 10-26 螺旋测微器

如图 10-26 (b) 所示的螺旋测微器（局部）螺距为 0.5 mm ，活动套筒（可动刻度）的周界被等分为 50 格，故活动套筒转动 1 格，螺杆相应地移动 0.01 mm ，再加上估读，其测量精度值可达到 0.001 mm 。读数时，先读固定套筒（刻度）上标尺的数值，再加上活动套筒上标尺的数值。应特别注意活动套筒上的示数是否过 0，过 0 则加 0.5，不过 0 则不能加 0.5。如图 10-26 (b) 所示，虽然固定套筒上的 5.5 mm 刻度线已经可以看到，但活动套筒上的示数尚未过 0，因此读数应为 $5.0 + 0.474 = 5.474\text{ mm}$ ，而非 $5.5 + 0.474 = 5.974\text{ mm}$ 。

学生实验

[1]

学生实验二：测量金属丝的电阻率

实验原理与方案

要测得金属丝的电阻率，在金属丝的长度和直径的测量基础上，还需要进一步测出金属丝的电阻 R 。本实验采用伏安法测量金属丝阻值 R ，电路图如图 10-27 所示。

实验装置与方法

本实验要用到学生稳压电源、电压表、电流表、滑动变阻器、待测金属丝等实验器材。

实验操作和数据收集

根据图 10-27 连接电路，闭合开关，调节滑动变阻器，设计表格，记录多组电压、电流值。

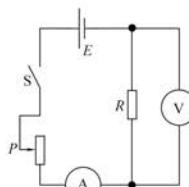


图 10-27 实验电路图

[1] 学生实验一和学生实验二其实是电阻率测量实验的两个部分，教材为了呼应课程标准的要求，拆分为两个独立的实验。

数据分析

根据实验数据，绘制 $U-I$ 图像，由图线的斜率得出金属丝的阻值 R 。

根据测得的金属丝长度、直径和阻值计算金属丝的电阻率。

实验结论

金属丝的电阻率 $\rho = \text{_____}$ 。

交流与讨论

与其他实验小组分享、比较同一金属丝电阻率的测量结果，并通过查表对比标准值与所测金属丝电阻率的差异。

分析实验误差产生的原因，提出减少实验误差的方法。

STSE

把各种材料的电阻率由小到大排列起来，如图 10-28 所示。

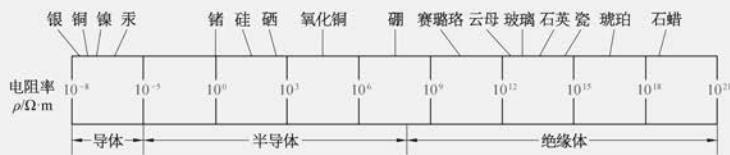


图 10-28 各种材料的电阻率

可见，锗、硅、硒、氧化铜、硼等的电阻率比绝缘体小而比金属大，这类材料称为半导体。

半导体的电阻率常随周围各种环境条件的改变而变化。利用半导体的电阻率随温度升高而减小的特性，可以制成热敏电阻。如图 10-29 所示是一个用热敏电阻制成的半导体体温计，灵敏度、精确度都比较高。

热敏电阻还广泛应用于电子器件的自动调节和控制，是自动化设备的一种重要元件。

有的半导体材料在光照下，电阻率也会改变，这类半导体材料可制成光敏电阻。它也是自动控制、遥测技术中的重要元件。例如，若机器上装有光敏电阻控制的制动装置，使一束光照射在光敏电阻上，操作时，若手伸入了危险区，光路就被截断，光敏电阻阻值迅速增大。通过控制电路，机器立刻自动停止运转，从而保证操作工人的安全。在货物传送带旁安装光敏电阻控制的计数器，就可对货物自动计数。



图 10-29 电子体温计

问题与思考解读

问题与思考

- 根据“测量金属丝的电阻率”的实验，判断下列操作是否正确，并对错误的操作做出修改。
 - 用刻度尺多次测量金属丝的全长，算出其平均值。
 - 用螺旋测微器在金属丝上一个部位测量直径。
 - 实验中尽可能保持金属丝的温度不变。
- 某段导线的电阻是 2Ω ，如果把它均匀拉长到原来的 1.2 倍，这段导线的电阻将变为多少？
- 某同学为了测定自动铅笔笔芯的电阻率做了以下实验：他取出一根直径为 0.7 mm 的自动铅笔笔芯，用刻度尺测出笔芯的长度为 11.0 cm ，又用“伏安法”测得其电阻阻值为 25.1Ω 。计算铅笔芯的电阻率并提出 1~2 个在实验中可能产生误差的原因。
- 将若干张相同的纸叠放在一起，用刻度尺测量出其总厚度，然后除以张数，可以得到一张纸的厚度。受此方法启发，如何用刻度尺测出一根细电阻丝的直径？写出测量方法，并用字母表示出测量值。若该电阻丝的总电阻为 R ，总长度为 l ，试写出该电阻丝的电阻率的表达式。
- 长江口涨潮时海水倒灌，出现所谓“咸潮”现象，使得崇明岛的水质受到影响。如果海水的电阻随长度、横截面积的变化规律与金属导体相同。设计一个测量海水电阻率的实验方案以研究“咸潮”出现的规律。

度、用伏安法测量笔芯电阻等会产生误差

命题意图：电阻率的测量及误差分析。会用电阻定律进行计算。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)；证据(Ⅰ)。

4. 参考解答：找一支圆铅笔(或粗细适当的圆柱体)，将金属丝在铅笔上依次密绕适当的圈数，用刻度尺量出这个线圈的长度，再将线圈长除以圈数，所得的商就是金属丝的直径 d

$$\rho = \frac{R \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}{l}$$

命题意图：了解测量长度的特殊法，熟悉电阻定律的计算。

1. 参考解答：

- 正确
- 错误，应该在多个部位进行测量并取平均值
- 正确

命题意图：知道测量时的注意事项，减少误差

主要素养与水平：证据(Ⅱ)；科学态度(Ⅰ)。

2. 参考解答：

2.88Ω (长度拉长到 1.2 倍，由于导线的体积不会改变，所以横截面积缩小到 $\frac{1}{1.2}$ ，根据电阻定律导电的电阻将变为原来的 1.44 倍)

命题意图：熟悉电阻定律的应用。

主要素养与水平：物质观念(Ⅰ)；模型建构(Ⅰ)；科学推理(Ⅰ)。

3. 参考解答： $\rho = RS/l = 25.1 \times 3.14 \times (0.35 \times 10^{-3})^2 \div 0.11\Omega \cdot \text{m} = 8.78 \times 10^{-5}\Omega \cdot \text{m}$

实验中测量笔芯长

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

5. 参考解答：用玻璃管装满海水，两端密封接上电极进行测量(具体步骤略)

命题意图：与实际问题相结合，培养用所学知识解决实际问题的能力。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)；证据(Ⅱ)；解释(Ⅱ)；社会责任(Ⅰ)。

资料链接

间接测量长度的多种方法

长度测量是最基本的测量。一般情况下，可以用测量工具刻度尺直接测量。如果受到某些条件的限制，不能或不易用测量工具直接测量，则可用间接测量方法。间接测量长度的方法通常有以下几种：

一、累积法

通过积少成多的办法进行测量，再通过求平均来求得相应的长度。这种方法还可以减小误差。可用于测纸的厚度和细金属线的直径。如要测某一本书每张纸的厚度，可取若干张纸(纸的张数要适量)，压紧后，用最小刻度为毫米的刻度尺量出其总厚度，然后将总厚度除以纸的张数，所得的商即是每张纸的厚度。

又如，要测细金属丝的直径，我们只要找一支圆柱形铅笔(或粗细适当的圆柱体)，将金属丝在铅笔上依次密绕适当的圈数，用有毫米刻度的刻度尺量出这个线圈的长度，再将线圈长除以圈数，所得的商就是金属丝的直径。

二、化曲为直法

曲线的长度是不易直接测出的，但可以将曲线化为直线，再用工具测出直线长。例如，测地图上某两城市铁路线的长度，可使棉线与地图上的铁路线重合，再把棉线拉直，用刻度尺测出其长度，即是地图上铁路线的长度。

三、滚轮法

比较长的曲线，可用一轮子沿曲线滚动，记下滚动的圈数，再测出其直径，然后求出其周长，最后将轮的周长与轮滚动的圈数相乘，所得的积就是曲线的长度。例如，要测运动场上跑道的长度，可用已知周长的滚轮在长跑道上滚动，用滚动的圈数×滚轮的周长，就可算出跑道的长度。

四、平移法

这种测量方法也叫“卡测法”。卡测法适用于部分形状规则的物体，某些长度端点位置模糊，或不易确定，如圆柱体、乒乓球的直径和圆锥体的高等，需要借助于三角板或桌面将待测物体卡住，把不可直接测量的长度转移到刻度尺上，从而直接测出该长度。例如，用直角三角板和刻度尺测球体的直径、圆锥体的高和圆柱体的直径等。

五、比例法

根据相似三角形的对应线段成比例，利用已知的长度求出未知的长度。例如，用竹子在晴天测量一幢楼房的高度，就是利用竹子的长与楼房的高的比等于它们的影子长度之比；飞机、轮船利用俯角和仰角以及一些已知的距离可求出未知距离的长度。

六、取样法

这种测量方法被称为“量小求大法”。由于被测量物体的长度远远超过了刻度尺的最大测量值，不便于用刻度尺测量，可先选取一个小物体或一小部分，用刻度尺测取其长度，然后设法测出大物体与小物体(或小部分)的倍数关系，最后根据这一倍数关系求得大物体的长度。

例如：测一大卷粗细均匀的细铜线的长度。由于细铜线长度数值非常大，远远超出了普通刻度尺的

最大测量值，不便于直接测量。我们可以先截取一小段细铜线，用刻度尺测出其长度为 L ，然后用天平分别测出所有细铜线的质量和截取的小段细铜线质量，两者相除求得其倍数关系为 n ，则这一大卷细铜线的总长度为 nL 。

伏安法测电阻及误差分析

【原理】

伏安法测电阻是电学的基础实验之一。它的原理是欧姆定律。根据欧姆定律的变形公式 $R = \frac{U}{I}$ 可知，要测某一电阻 R_x 的阻值，只要用电压表测出 R_x 两端的电压，用电流表测出通过 R_x 的电流，代入公式即可计算出电阻 R_x 的阻值。

【内接法与外接法】

由于所用电压表和电流表都不是理想电表，即电压表的内阻并非趋近无穷大，电流表也存在内阻，因此实验测量出的电阻值与真实值不同，存在误差。为了减少测量过程中的系统误差，通常伏安法测电阻的电路有两个基本连接方法：电流表内接法和电流表外接法（图 2），简称内接法和外接法。

【误差分析】

外接法：

误差分析方法一：

在如图 3 所示的外接法中，考虑电表内阻的存在，则电压表的测量值 U 为 R 两端的电压，电流表的测量值为干路电流 I ，即流过待测电阻的电流与流过电压表的电流之和，此时测得的电阻 $R_{\text{测}}$ 为 R 与 R_V 的并联总电阻，即 $R_{\text{测}} = \frac{U}{I} = \frac{R_V \times R}{R_V + R} < R$ （电阻的真实值）

此时给测量带来的系统误差来源于 R_V 的分流作用，系统的相对误差为：

$$\delta = \frac{|R_{\text{测}} - R|}{R} \times 100\% = \frac{1}{1 + \frac{R_V}{R}} \times 100\% \quad ①$$

误差分析方法二：

当用外接法时， $U_{\text{测}} = U_{\text{真}}$, $I_{\text{测}} = I_V + I_{\text{真}} > I_{\text{真}}$

所以，测出电阻值 $R_{\text{测}} = \frac{U_{\text{测}}}{I_{\text{测}}} = \frac{U_{\text{真}}}{I_V + I_{\text{真}}} < R_{\text{真}}$ ，即电压表起到分流作用，当 R 越小时，引起误差越小，

说明该接法适应于测小电阻。

内接法：

误差分析方法一：

在如图 4 所示的内接法中，电流表的测量值为流过待测电阻和电流表的电流，电压表的测量值为待测电阻两端的电压与电流表两端的电压之和，即

$$R_{\text{测}} = \frac{U}{I} = R_A + R > R$$

此时给测量带来的系统误差主要来源于 R_A 的分压作用，其相对误差为：

$$\delta = \frac{|R_{\text{测}} - R|}{R} = \frac{R_A}{R} \times 100\% \quad ②$$

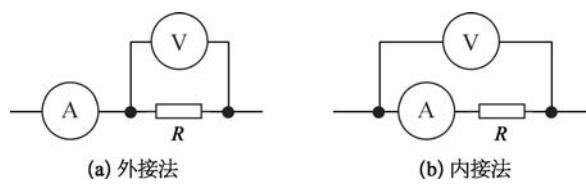


图 2

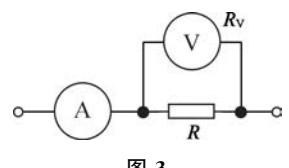


图 3

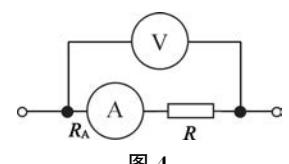


图 4

误差分析方法二：

当用内接法时， $I_{\text{测}} = I_{\text{真}}$, $U_{\text{测}} = U_A + U_{\text{真}} > U_{\text{真}}$

所以, 测出电阻值 $R_{\text{测}} = \frac{U_{\text{测}}}{I_{\text{测}}} = \frac{U_A + U_{\text{真}}}{I_{\text{真}}} > R_{\text{真}}$, 即电流表起了分压作用。当 R_A 越小时引起误差越

小, 说明该接法适应于测大电阻。

【如何选择内接法与外接法】

一、根据待测电阻大小选择

从前面的分析可以知道, 当 $R_V \gg R$ 时, 选择电流表外接法误差更小; 当 $R_A \ll R$ 时, 选择电流表内接法误差更小。但这只给定了待测电阻 R 的一个大概的取值范围, 在具体的测量中究竟如何根据给定的待测电阻 R 的值来确定测量电路的选择呢?

由①、②式可知, 伏安法测电阻时的相对误差不仅与电流表和电压表的内阻有关, 而且与待测电阻的大小也有关。这里我们可以使内接法和外接法分别测电阻时两相对误差相等, 即 $\frac{1}{1 + \frac{R_V}{R}} = \frac{R_A}{R}$

$$\text{计算处理可得: } R = \frac{R_A + \sqrt{R_A^2 + 4R_A R_V}}{2}$$

考虑到 $R_A \ll R_V$, 则有 $R = \sqrt{R_A \cdot R_V}$

由此可对内、外接法的选择作如下判断:

当 $R = \sqrt{R_A \cdot R_V}$ 时, 内接法和外接法测电阻的相对误差相等; 当 $R > \sqrt{R_A \cdot R_V}$ 时, 采用内接法测电阻产生的误差较小; 当 $R < \sqrt{R_A \cdot R_V}$ 时, 采用外接法测电阻产生的误差较小。

小结: 用伏安法测电阻时, 对于连接方法的选择遵循“大内大、小外小”的准则, 即若待测电阻为大电阻, 则选用内接法, 测量值与真实值相比偏大; 若待测电阻为小电阻, 则选用外接法, 测量值与真实值相比偏小。

二、试触法

试触法电路图如图 5 所示, 先把电压表一端固定在 a 端, 另一端先后与 b 、 c 点试触, 当电流表的示数变化明显时, 说明电压表内阻分流明显, 对电路影响大, 即 R_x 与 R_V 可比拟, R_x 属于大电阻, 电路应当采用内接法; 当电压表的示数变化明显时, 说明电流表内阻分压明显, 对电路影响大, 即 R_x 与 R_A 可比拟, R_x 属于小电阻, 电路应当采用外接法。

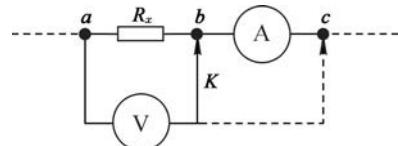


图 5

本节编写思路

第四节 多用电表 67

[1]



图 10-30 飞机仪表盘

第四节 多用电表

在现代的工厂、交通运输工具以及航空航天器上都能看到各类仪表。它们中绝大多数是由电表和传感器构成的，通过数字或者指针显示的方式非常直观地体现着各种量的变化，在帮助我们操作设备、减少事故、节约能源、防止污染等方面发挥着重要的作用。例如，如图 10-30 所示的飞机仪表盘就可以帮助飞行员及时掌握有关飞机自身或飞行状态的各项数据。

[2]

大家谈

谈一谈生活中的各类仪表，以及这些仪表的功能。

什么是多用电表？

多用电表是一种集测量电压、电流、电阻于一体的多用途电表。多用电表也是装配、修理电子仪器的必备检测工具，常见的有指针式和数字式两种。

指针式多用电表可以用来测量电压、电流、电阻等电学量。它的外部有刻度盘、旋转式选择开关、调零旋钮和红黑表笔插孔等，如图 10-31 (a) 所示。

数字式多用电表的外部主要有液晶显示屏、电源开关、功能旋钮（其中量程选择有手

本节通过使用数字式多用电表测量各种电学量使学生逐步学会电学量的测量方法及工具使用：

- 通过对多用电表的外观及可测量量的观察，了解多用电表的简单结构和基本用途；
- 通过一系列测量过程及“大家谈”，了解使用多用电表测量电压、电流和电阻等简单电学量的步骤及显示极性、判断好坏等功能；
- 通过学生实验，学会使用多用电表测量电压、电流和电阻等电学量。

使用数字式多用电表时，学生需要了解量程和表笔插孔等多个多用电表特征以及多用电表测量电阻、电压、电流的操作步骤。有兴趣的学生可以了解多用电表的原理，但不要求掌握。

正文解读

[1] 飞机作为一种交通工具，拥有高精度的操作系统，各类仪表通过指针或者数显的方式，反映了飞机各部分器械的运作情况及外界的环境等的监测数据。飞机的仪表盘不仅能让学生联想到生活中各类仪表，还能让他们认识到学会使用各类仪表的重要性，从而引入多用电表的教学。

[2] 此处学生可以通过“大家谈”了解仪表的功能、显示方式、被测量等内容，从而认识到仪表种类的多样性及学会使用仪表的重要性。

[1] 在使用数字式

多用电表测量电学量时,务必注意不同型号的数字式多用电表笔插孔、屏幕显示、功能旋钮等特征,这会直接影响到测量的过程及结果。有些数字式多用电表可以自动选择量程,只需要将旋钮调节至待测物理量,测量后可直接显示结果。不同的多用电表在表示数值溢出时也有不同,应注意对学生的引导。

[2] 显示位数是数

字式多用电表的重要指标之一,有两种表现方式:位数及记数。以位数表现为例,常用的手持式数字多用电表大多数为“3 1/2”表,所谓“3”是指有三位数字可以显示“0~9”,“2”表示最高位仅能显示2个数字,“1”表示最高位最大显示“1”,因此,“3 1/2”表的最大显示位数为“1999”。测量一节干

电池外电路断路时两端的电压,选用“2 V”挡位,最大可显示“1.999 V”,则此时示数为“1.459 V”;选用“20 V”挡位时,由于最大示数为“19.99 V”,则此时电压示数为“1.46 V”。一般来说,显示位数越多,其准确度越高,价格也越高。因此在测量电学量时,应根据需求进行合理选择量程挡位,而不是越大越好。

动和自动两种),以及若干表笔插孔。表笔插孔中标有“COM”的为公共插孔,测量时需插入黑表笔。其他插口处标有“V”“A”“Ω”,分别代表测量电压、电流、电阻时红表笔对应的插孔,如图 10-31 (b) 所示。此外,数字式多用电表还可以测量交流信号频率、电容值等。由于数字式多用电表更为精确和便捷,现在已逐步代替指针式多用电表成为主流。

[1]

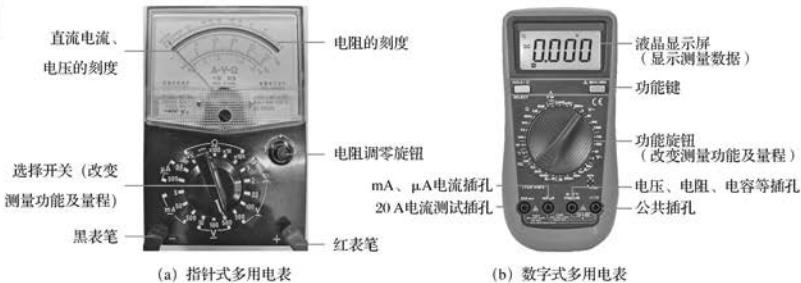


图 10-31 多用电表

② 如何使用数字式多用电表测量各种电学量?

在使用数字式多用电表之前,需检查表笔以及表壳是否有损坏;接通电源,判断电池是否能正常供电。若遇到问题应及时检查更换。

[2]

测量时,应按需求调节功能旋钮到相应的挡位,待示数稳定后才能开始测量。使用完毕后,功能旋钮应旋至 OFF 挡,或者旋至交流高压挡,并关闭电源。长期不使用还应取出电池。

1. 使用数字式多用电表测量电压

如图 10-32 所示为利用滑动变阻器调节小灯泡亮度的电路。电路中电源电压为 3 V, 小灯泡的规格为“2.5 V, 0.3 A”。连接电路,闭合开关。为了使小灯泡正常发光,应调节滑动变阻器滑片的位置,利用数字式多用电表测量小灯泡两端的电压,直至额定电压为止,具体步骤如下:

- ① 将红表笔插入电压插孔, 黑表笔插入公共插孔;
- ② 将功能旋钮旋转至(直流)电压挡, 根据待测值选择合适的量程;
- ③ 在电路接通的情况下, 将红、黑表笔的金属笔尖分别与小灯泡两端的 a、b 两点接触(红表笔接高电势), 如图 10-32 所示;
- ④ 缓慢调节滑动变阻器滑片的位置, 直到数字式多用

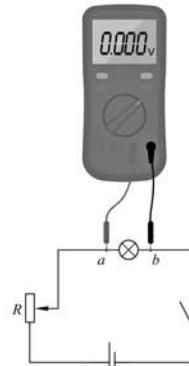


图 10-32 用数字式多用电表
测电压

电表的示数为 2.5 V 为止。此时小灯泡在额定电压下工作。

测量时要选择合适的量程，若液晶屏显示“OL”或最高位显示“1”等字样，则代表量程选择过小，待测量超过量程。此时应断开多用电表连接，重新换挡后继续测量。若无法预估待测值，应选择最大量程测量一次，再逐渐减小至最合适的量程。

[1]

大家谈

在测量电压时，有同学将两支表笔均插入了正确的位置，但是数字式多用电表的电压示数为负，这表示什么含义？

2. 使用数字式多用电表测量电流

在先前的图 10-32 电路中，为了检验小灯泡在额定电压下的工作电流，可以使用数字式多用电表继续实验，具体步骤如下：

- ① 将红表笔插入电流插孔，黑表笔插入公共插孔；
- ② 将功能旋钮旋转至（直流）电流挡，根据待测值选择合适的量程；
- ③ 断开电路，将红、黑表笔的金属笔尖分别与电路中的 c、d 两点接触（接通电路后，电流由红表笔流入多用电表），如图 10-33 所示；
- ④ 闭合开关，保持小灯泡正常发光时滑动变阻器滑片的位置不变，记录数字式多用电表的电流示数。

值得注意的是，由于数字式电表的内部结构不同，测量较小电流 (μA 或 mA) 和较大电流 (A) 时，红表笔应插入不同的插孔，在实际使用时，应根据待测值选择合适的插孔。

3. 使用数字式多用电表测量电阻

使用数字式多用电表测量电阻的基本步骤如下：

- ① 将红表笔插入电阻插孔，黑表笔插入公共插孔；
- ② 将功能旋钮旋转至电阻挡位，根据待测电阻的估计值选择合适的量程；
- ③ 将红、黑表笔与待测电阻相连，如图 10-34 所示，从数字式多用电表中直接读出阻值。

使用数字式多用电表测量电阻时，必须先把电阻从电路中断开。测量时既要保持表笔与电阻良好接触，又不能使待测电阻与其他导电物体（包括手）接触。

[1] 此处设置“大家谈”是为了让学生通过实验，了解多用电表在测量电压、电流极性时的特点，同时强调红、黑表笔在测量时的区别。

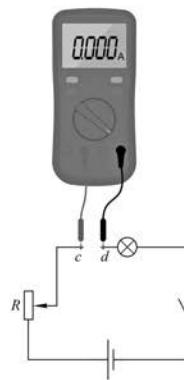


图 10-33 用数字式多用电表测电流



图 10-34 用数字式多用电表测电阻

[1] 本节中主要介绍数字式多用电表的外部结构和使用方法,但是考虑到指针式仪表在生活中仍然多见,为了提高学生的综合能力,“拓展视野”中特地介绍了指针式多用电表的使用方法,该部分内容可为感兴趣的学生提供操作指针式多用电表的自学材料。

[1]

拓展视野

指针式多用电表 [图 10-31 (a)] 测电压、电流、电阻的原理主要是利用通过内部灵敏电流计的电流大小,来反映待测物理量的大小,其中刻度盘如图 10-35 所示。在测量电阻时根据第一排刻度读数,在测量直流电流及直流电压时,则根据第二排刻度读数。

在测量电压与电流时,指针式多用电表的使用方法与指针式电压表和电流表的使用方法相类似。首先,将红、黑表笔分别插入“+”“-”插孔,随后选择合适的测量量程。测量电压时,将指针式多用电表的红、黑表笔并联在待测元器件两端;测量电流时,通过红、黑表笔把多用电表串联接入电路。最后记录指针所在位置的示数,并结合刻度的最大值与所选量程的大小,等比例缩放所读数值,便能得到待测物理量的大小。例如,当选择量程为 5 V 直流挡位时,若指针根据 0~500 的刻度线获得的示数为 200,则最终测得电压的示数为 2 V。值得注意的是,通常指针式多用电表不能测量负值,因此红表笔需与高电势点连接或者作为电流流入端。

指针式多用电表测量电阻的原理图如图 10-36 所示,其中 G 为灵敏电流计, E 为干电池,其利用到的原理是之后将学习的闭合电路欧姆定律,即利用电路中电流与电阻大小有一一对应关系,通过测量电流来间接获得电阻的阻值。

与电压及电流刻度不同,指针式多用表的电阻刻度不均匀,且零刻度位于最右侧,而无穷大则位于最左侧。用指针式多用电表测电阻时,应先根据电阻估测值,选择倍率挡;再将红、黑表笔短接观察指针偏转,调节调零旋钮,使指针指向电阻零刻度处;最后将红、黑表笔与电阻接触,根据刻度盘示数乘以倍率挡中的倍率后即为测量电阻值。由于指针式多用电表内部结构的特殊性,当指针在刻度盘中央位置附近时电阻测量值比较准确,如果偏离中央位置较远,应改变倍率,并重新调零后测量。



图 10-35 指针式多用电表的刻度盘

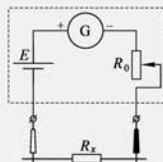


图 10-36 指针式多用表测量电阻的原理图

学生实验**用多用电表测量电学中的物理量****实验装置与方法**

将电阻、电源以及开关按如图 10-37 所示的方式连接,依次测量电阻 R 两端电压 U、流过电阻 R 的电流 I 及电阻 R 的阻值。

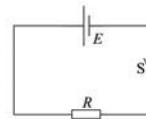


图 10-37 实验电路图

问题与思考解读

实验操作与数据收集

- ①接通电路，选择多用电表直流电压挡，其量程应大于电阻两端的电压的估计值，测量电阻 R 两端的电压 U ；
- ②选择多用电表直流电流挡，其量程应大于通过电阻电流的估计值，将多用电表串联接入电路中，测量通过电阻 R 的电流 I ；
- ③断开电路，选择合适的电阻量程挡位，用多用电表测量电阻 R 的阻值。
电阻 R 两端电压 $U = \underline{\hspace{2cm}}$ ，流过电阻 R 的电流 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ ，电阻 $R = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

问题与思考

1. 某同学在使用多用电表测电阻时，双手不小心碰到两支表笔的金属部分，判断电阻的测量值与真实值的大小之间的关系，简述判断理由。
2. 二极管是重要的电路元件，它有两根引线，分别为正极、负极。在电路中，二极管具有单向导通性。当二极管加上正向电压时，它的电阻阻值很小；当二极管加上反向电压时，它的电阻就会变得很大。根据上述特征，简述用多用电表检测二极管的极性及好坏的方法。
3. 如图 10-38 所示为一个暗盒，盒内有两个电阻、一个恒压电源，它们分别连接在暗盒的三个接线柱 A 、 B 、 C 的任意两个之间，构成回路。某同学使用多用电表电压挡位进行测量，测得 $U_{AB} = -2V$ ， $U_{BC} = 0.4V$ ， $U_{CA} = 1.6V$ 。试画出三个元件构成的电路图，并求出电源电压及两电阻阻值之比。 $(U_{AB}$ 为当红色接线柱接在 A 处而黑色接线柱接在 B 处时测得的电压，以此类推)
4. 某同学发现在如图 10-39 所示的电路中，开关闭合后小灯不亮。若本电路仅在开关或小灯的位置存在一处故障。列举可能引发故障的原因，并简述使用多用电表检测故障的过程。
5. 如图 10-40 所示为某指针式多用电表测电阻的原理图，电源电压为 $1.5V$ 。电流计可以测量的最大电流为 $300\mu A$ ，将红、黑表笔直接接触，调节 R 使电流计的示数达到最大，则此时虚线框内的总电阻值是多大？若在红、黑表笔间接入一个待测电阻 R_x ，电流计的示数变为原来的一半，则 R_x 的阻值是多大？

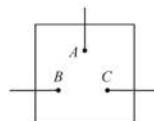


图 10-38

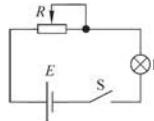


图 10-39

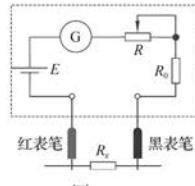


图 10-40

出电压较小，无法正向导通部分二极管，因此有专门的二极管挡用来判断二极管的极性及好坏。也可以用指针式多用电表的电阻挡($10 k\Omega$)来检测二极管的好坏，操作方法与数字式多用电表类似，当测得的电阻值较小时，红色表笔连接的是二极管的负极。

命题意图：使用多用电表解决实际问题，了解二极管特点。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

3. 参考解答：AB 间接的是电源，其他接的是电阻，如图 6 所示；两个电阻阻值之比为 $R_{BC} : R_{AC} = 1 : 4$

命题意图：通过构建模型，分析暗盒问题，提高论证分析能力。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)；质疑创新(Ⅰ)。

1. 参考解答：测量值小于真实值。因为人体是导电的，相当于一个电阻，上述操作会将人体与待测电阻形成并联关系，电表测的是人体与电阻并联的总电阻，所以导致测量值比真实值偏小

命题意图：使用多用电表测量电阻的注意事项及并联电阻规律。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅰ)；科学论证(Ⅰ)。

2. 参考解答：用数字式多用电表的电阻挡分别正向、反向测量二极管的电阻，如果其中一次测量测得的电阻值接近无穷大，另一次测量测得的电阻值较小，说明二极管是好的，否则，就说明二极管可能存在质量问题。测得的电阻值较小时，红色表笔连接的是二极管的正极。一般情况下，数字式多用电表电阻挡输

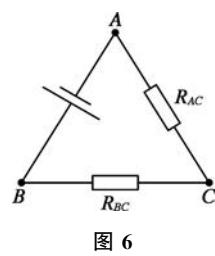


图 6

4. 参考解答：由于小灯不亮可以断定故障可能是开关断路、小灯短路或者断路中的一种。将多用电表选择电流挡位，串入电路，电流示数不为零，则可断定小灯短路。若电流示数为零，则是小灯或开关断路；再将多用电表选择直流电压挡，并联在小灯两端，如果示数为零，则开关断路，若示数不为零，则小灯断路。

命题意图：分析电路故障，提高证据意识。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)；质疑创新(Ⅱ)。

5. 参考解答：当红、黑表笔直接接触后，设虚线框中的电阻为 $R_{\text{总}}$ ， $R_{\text{总}} = \frac{E}{I} = \frac{1.5}{300 \times 10^{-6}} \Omega = 5000 \Omega$ ；当接入 R_x 后， $I' = \left(\frac{E}{R_{\text{总}} + R_x} \right) = \frac{I}{2}$ ，可得 $R_x = 5000 \Omega$ 。

命题意图：通过简单电路，了解指针式多用表测电阻原理。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

资料链接

数字式多用电表的简单原理

数字式多用电表实质上是在直流数字式电压表的基础上加一些转换器来实现测量多种电学量的功能，其简单原理框图如图 7 所示。数字式电压表由模拟/数字转换(A/D 转换器)、计数器、译码器等组成，将输入的模拟微小直流电压转化为显示器中相应的数值，常见量程为 200 mV。 I/U 转换器能实现电流转换电压的功能， R/U 转换器能实现电阻转换电压的功能，AC/DC 转换器能实现交流转换直流的功能。在测量时，实际是先把不同的电学量通过转换器转换成直流电压，再通过转换显示在液晶屏上。

数字式多用电表和指针式多用电表的基本原理一样，都建立在电阻串并联和欧姆定律的基础之上；在测量较大的电压时，可以通过分压电阻扩大量程。

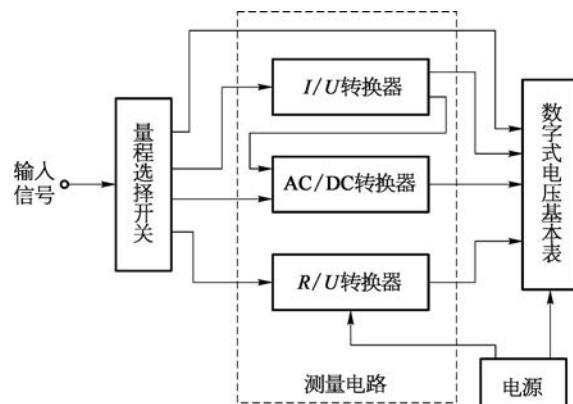


图 7

指针式多用电表简介

指针式多用电表主要由磁电式灵敏电流计作为表头，并配合电阻、二极管、干电池等来实现电压、电流以及电阻的测量。若某多用电表的表头内阻为 R_g ，满偏电流为 I_g ，则表明表头能测量的最大电流为 I_g 、最大电压为 $I_g R_g$ 。

当测量直流电压时，其内部简化结构如图 8 所示。通过改变与表头串联的倍增电阻，可实现测电压量程的转换。例如，当倍增电阻的阻值为 R ，多用电表可以测量的最大电压值为 $I_g (R + R_g)$ 。由此可知倍增电阻的阻值越大，电压量程越大。在读数时，可根据电流计示数等比例地获得待测电压值[电流计的示数为 I 时，待测电压为 $I(R_g + R)$]。

当测量直流电流时，其内部简化结构如图 9 所示。通过改变与表头并联的分流电阻，可以实现测电流量程的转换。例如，当分流电阻的阻值为 R ，多用电表可以测量的最大电流为 $I_g \frac{(R_g + R)}{R}$ 。由此可

知分流电阻的阻值越小,电流量程越大。在读数时,可以根据电流计示数等比例的获得待测电流
 [电流计示数为 I 时,待测电流值为 $I \frac{(R_g + R)}{R}$]。



图 8



图 9

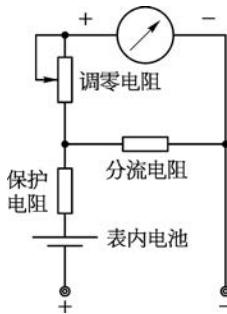


图 10

当测量电阻时,其内部简化结构如图 10 所示。表内电池可为整个电路供电,根据闭合电路欧姆定律可知,待测电阻与表头电流间存在一一对应关系。由于这一对应关系是非线性的,因此,多用电表测量电阻的刻度不均匀。当多用电表断路时(待测电阻为无穷大),表头电流为零,指针在最左端,记做阻值为无穷大;当多用电表短路时(待测电阻为零),此时可调节调零电阻使表头满偏,指针指在刻度最右端,记做阻值为零。根据电流与电阻间的关系,可通过表头指针偏转获得待测电阻阻值。在使用多用电表测电阻时,每次更换倍率挡都需要调零,即使多用电表短接时指针指向表盘刻度的最右端。

在测量交流电压和交流电流时,多用电表内部则需要连接一个由二极管构成的半波整流电路,将交流电转化为直流电后输入测量。为了扩大量程,仍然应连入倍增电阻和分流电阻。

本节编写思路

本节通过一系列活动及案例，引导学生发现电源的内部特征及闭合电路欧姆定律，本节课共分为三个层次：

1. 通过自主活动，打破原来学生认为电池两端电压不变的错误认识，结合可调高内阻电池的实验演示“不论闭合电路的外电阻和内阻如何变化，电源内外电压之和不变”，从实验角度为学习闭合电路欧姆定律打下基础。

2. 推导得出闭合电路欧姆定律，并结合实例分析，形成对闭合电路中外电压随外电阻的变化规律的认识，最后为自主活动答疑释惑。

3. 通过对电源能够持续产生电流原因的介绍，了解闭合电路中尤其是电源内部能量转化关系，从能量转化的角度进一步理解闭合电路欧姆定律，加强能量观念的教学。

正文解读

[1] 1800年，伏打用很多对圆形铜片锌片相间叠放在一起，中间放上盐水浸湿的麻片布，便在金属两端产生较稳定的电压，后人称之为伏打电堆。

本节内容从历史出发，其目的是让学生了解伏打电堆使人们第一次获得了比较强且稳定持续的电流、为科学家们从对静电的研究转入对“动”电的研究创造了条件。同时也开启学生对电源特征及闭合电路欧姆定律的学习。

[2] “自主活动”中使用的水果电池是常见的原电池，通过实验会发现它具有电动势却无法点亮小灯。通过对本节闭合电路欧姆定律的学习，可最终解释这一现象。这一前后呼应的过程不仅可以使所学内容联系实际，体现物理源于生活，更能逐渐形成学生探索自然的内在动力。

[1]



图 10-41 由银片、锌片和浸湿的布叠合而成的伏打电堆

第五节 闭合电路欧姆定律、电源电动势及内阻

为了能在导体两端间维持一个稳定的电势差以产生稳定的电流，科学家探寻了很长长时间。直到1800年，意大利物理学家伏打（A. Volta, 1745—1827）发明了伏打电池才出现突破。如图10-41所示，许多伏打电池依次叠放起来成为很高的一摞，被称为伏打电堆。为了纪念伏打在电学中的贡献，把电压的单位命名为伏特。其实，我们用一个水果、一片锌片和一片铜片即可以制作一个电池。

[2]

自主活动

制作一个水果电池，试着能否点亮小灯泡。首先，将一片锌片和一片铜片插入柠檬中，柠檬与锌片、铜片构成了一节化学电池。随后用多用电表测量这节电池两端的电压，如图10-42(a)所示。再将一个标有“1.5V, 0.3A”的小灯与它连接构成回路，小灯是否会被点亮呢？

如图10-42(b)所示，出乎意料的是小灯不仅没有发光，而且此时再测量电池两端的电压，电压几乎全部“消失”了！若再取走小灯，水果电池的两端电压又会恢复。

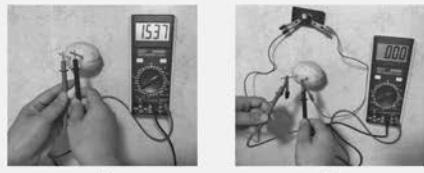


图 10-42 用多用电表测量水果电池两端的电压

要弄清水果电池两端电压“消失”的原因，我们需要对电路的知识有更多的了解。

我们把由电源、用电器和导线等组成的完整回路叫做闭合电路或者全电路。闭合电路可以分成两部分，其中电源外部的电路叫做外电路，电源内部的电路叫做内电路。电流在内、外电路中流动均会受到阻碍作用。外电路对电流的阻碍作用叫做外电阻，用 R 表示；内电路对电流的阻碍作用叫做**内电阻**（internal resistance），简称内阻，用 r 表示。

外电路两端的电压，称为外电压（ $U_{\text{外}}$ ），也叫做端电压，它是电源正负极两端的电压；内电路两端的电压，称为内电压（ $U_{\text{内}}$ ）。

② 闭合电路中内、外电压之间存在什么关系？

如图 10-43 所示为探究外电压、内电压间关系的仪器——可调高内阻电池。这种电池的正、负极板（A、B）为二氧化铅及铅，电解液为稀硫酸。与一般的铅蓄电池相比，它的内阻是可以调节的。只要降低或者提升电池两极之间的液面高度，电源的内阻便会增大或减小。外电路接有滑动变阻器，可以方便地改变外电阻的大小。位于两个电极内侧的探针 a、b 与电压表 V_1 相连，测量内电压；电源的两极 A、B 与电压表 V_2 相连，测量外电压。实验时改变正、负极板间液面高低、调节滑动变阻器，从而改变内、外电阻阻值，记录相应的内、外电压 $U_{\text{内}}$ 、 $U_{\text{外}}$ 。

- [1] 由实验数据可以证明，当内电阻不变，外电阻阻值增大时，外电压增大，内电压减小；当外电阻不变，内电阻阻值增大时，内电压增大，外电压减小。内、外电压之和为恒量，这一恒量称为**电源电动势**（electromotive force），通常用符号 E 表示，单位为伏特（V）。

$$E = U_{\text{内}} + U_{\text{外}}$$

③ 闭合电路中电流与电源电动势之间存在什么关系？

在闭合电路中，若外电路用电器为纯电阻，阻值为 R ，回路中电流为 I ，电源内阻为 r ，则根据 $E = U_{\text{外}} + U_{\text{内}}$ ，又 $U_{\text{外}} = IR$ ， $U_{\text{内}} = Ir$ ，因此

$$I = \frac{E}{R + r}$$

即在闭合电路中电流与电源电动势成正比，与内、外电阻的阻值之和成反比，这个结论叫做**闭合电路欧姆定律**（Ohm law of closed circuit）。相应地，初中学习的欧姆定律称为部分电路欧姆定律。

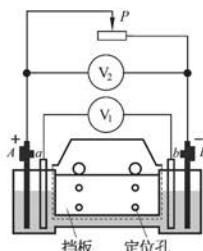


图 10-43 可调高内阻电池

[1] 本节以实验结论为基础，推导出闭合电路欧姆定律。

在进行实验时，应引导学生观察内、外电阻变化时内、外电压的变化情况。在了解内、外电阻改变时，内、外电压一增一减的结果后，可进一步使用可调高内阻电池定量研究内、外电压变化情况。这一实验过程有助于培养分析数据、发现特点、形成结论的能力。

在使用可调高内阻电池时，因为其不完全封闭，且内部使用稀硫酸，因此需注意安全，并按照说明书要求充电及保存，确保实验效果。

示例 在如图 10-44 所示的电路中, 电源电动势 $E = 9 \text{ V}$, 内阻 $r = 2 \Omega$, 外电阻 R 为可变电阻箱。闭合开关, 若电阻 R 分别调节到 $R_1 = 2 \Omega$ 、 $R_2 = 10 \Omega$ 、 $R_3 = 400 \Omega$, 求回路中的电流及外电压。

分析: 根据闭合电路欧姆定律可以求出电路中的电流, 再对外电路根据部分电路欧姆定律求出外电压。

解: 根据闭合电路欧姆定律 $I = \frac{E}{R+r}$ 及 $U_{\text{外}} = IR$ 分别得到三种情况下回路中的电流及外电压。

当电阻 R 调节到 R_1 时, 回路中电流 I_1 及外电压 $U_{\text{外}1}$ 有

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + r} = \frac{9}{2 + 2} \text{ A} = 2.25 \text{ A}, \quad U_{\text{外}1} = I_1 R_1 = 2.25 \times 2 \text{ V} = 4.5 \text{ V}$$

当电阻 R 调节到 R_2 时, 回路中电流 I_2 及外电压 $U_{\text{外}2}$ 有

$$I_2 = \frac{E}{R_2 + r} = \frac{9}{10 + 2} \text{ A} = 0.75 \text{ A}, \quad U_{\text{外}2} = I_2 R_2 = 0.75 \times 10 \text{ V} = 7.5 \text{ V}$$

当电阻 R 调节到 R_3 时, 回路中电流 I_3 及外电压 $U_{\text{外}3}$ 有

$$I_3 = \frac{E}{R_3 + r} = \frac{9}{400 + 2} \text{ A} = 0.022 \text{ A}, \quad U_{\text{外}3} = I_3 R_3 = 0.022 \times 400 \text{ V} = 8.8 \text{ V}$$

一个固定的闭合电路, 由于电源电动势 E 和内阻 r 均不变, 根据闭合电路欧姆定律 $I = \frac{E}{R+r}$, 可以看出: 当外电阻 R 增大后, 电流 I 会减小, 内电压 $U_{\text{内}} = Ir$ 也会减小, 外电压 $U_{\text{外}}$ 增大了; 反之, 当外电阻 R 减小时, 外电压 $U_{\text{外}}$ 也会减小。

对于外电路断开和短路两种特殊的情况, 同样可以根据闭合电路欧姆定律进行分析。

1. 当外电路断开时, 外电阻阻值可视为无穷大, 此时电流 I 变为零, 内电压 $U_{\text{内}} = Ir$ 也为零, 此时外电压在数值上等于电源电动势。因此, 用电压表直接测量电源两端电压, 就可得出电源电动势的近似值。

2. 当外电路短路时, 外电阻阻值 R 接近零, 此时外电压 $U_{\text{外}} = IR$ 也接近于零, 回路中电流称为短路电流 $I_{\text{短}} = \frac{E}{r}$ 。通常电池内阻较小, 一旦发生短路, 电路中电流很大, 极易损坏电源, 甚至发生火灾。因此要防止发生短路。

[1]

大家谈

根据以上学习的内容, 请讨论并回答在之前的自主活动中水果电池两端电压“消失”的原因。

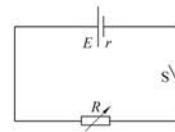


图 10-44 外电阻可调的闭合电路

[1] 此处设置“大家谈”的目的是希望学生能够利用外电阻变化时外电压和内电压的变化规律, 举一反三, 了解内电阻不同时, 内、外电压的情况, 从而解释水果电池不能点亮小灯的原因。

在教学时, 还可以引入“为什么水果电池不能点亮小灯, 但却可以使电子时钟长时间工作”“为什么干电池用久后, 其电动势没有明显变化但无法使电器正常工作”“为什么新旧电池不能混合使用”等实际问题, 使学生加深对闭合电路欧姆定律的理解, 也能将所学知识结合生活实际, 学以致用。

电源为什么能在闭合回路中产生持续电流？

[1] 电流是由于大量的自由电荷定向移动而产生的。在金属导体中，能够自由移动的电荷是自由电子。由于它们带负电荷，电子向某一方向的定向移动相当于正电荷向相反方向的定向移动。为了方便，下面我们仍以正电荷为例讨论。

如图 10-45 所示，由于电源正、负极总保持一定数量的正、负电荷，所以，电源正极的电势高于电源负极。在外电路，正电荷在静电力的作用下由电源正极流向负极；在电源内部，正电荷所受的静电力阻碍它继续向正极移动。因此，在电源内部要使正电荷向正极移动，就一定要有“非静电力”作用于电荷才行。在干电池中，非静电力是化学作用；在发电机中，非静电力是电磁作用。电源把正电荷从负极搬运到正极的过程中，非静电力在做功，使电荷的电势能增加。干电池使化学能转化为电势能；发电机使机械能转化为电势能。所以，从能量转化的角度看，电源是通过非静电力做功把其他形式的能量转化为电势能的装置。

综上所述，电源之所以能维持电路中稳定的电流，是因为它有能力不断地把来到负极的正电荷经过电源内部搬运到正极去。在不同的电源中，把单位正电荷在电源内部从负极搬运到正极的过程中，非静电力做功的本领不同。电动势就是描述电源这种特性的物理量，数值上等于非静电力把 1 C 的正电荷在电源内从负极搬运到正极所做的功。电动势由电源内部非静电力的特性决定，跟外电路无关。

[2]

STSE

电池从发明至今已经有 200 余年的历史。这一期间，一代代电池的更替和发展都在很大程度上改变着人类的生活。

1800 年，伏打正式宣布“伏打电堆”的诞生，这令持续产生电流成为可能，为科学家们从对静电的研究转入对电流的研究创造了条件。1836 年，英国人丹尼尔对“伏打电堆”作了改良，用稀硫酸作为电解液制造了一种能保持稳定电流的“锌铜电池”。1860 年，法国的普朗泰发明了一种在电压下降后能再次充电的铅蓄电池。1887 年，英国的赫勒森发明了干电池。1909 年，爱迪生成功研制出了性能良好、可反复充放电的镍铁电池。直至今日，干电池的种类已经有 100 多种，包含常见的锌锰电池和碳锌电池等。

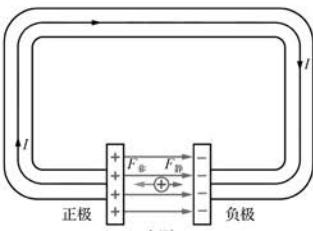


图 10-45 电源内存在非静电力

[1] 教学这部分内容时，可根据学生的学习程度，从能量转化与守恒角度推导闭合电路欧姆定律。电流流过外电路以及内电阻时，电流做功，电能转化为其他形式的能量，电源内部非静电力做功使其他形式的能量转化为电能，两者相等，即 $W_{\text{电}} = (U_{\text{外}} + U_{\text{内}}) \cdot It = W_{\text{非}} = EIt$ 。由此可提升学生的能量观念。

[2] 通过对电池发展历史的阅读，学生可以了解到科学家对供电装置性能提升的不断追求，知道科学·技术·社会·环境存在相互联系。

该部分内容可以让学生阅读后在课堂交流感想，相互启发，引导学生了解尽管科学与技术存在很大差别，但是两者却在不断发生相互作用，使学生认识到人类在保护环境和促进可持续发展方面的责任。

问题与思考解读

76 第十章 电路及其应用

1. 参考解答：

(1) 根据闭合电路欧姆

定律, 可知 $I = \frac{E}{R+r} =$

$$\frac{1.5}{1.2+0.3} \text{ A} = 1 \text{ A},$$

$$U_L = IR_L = (1 \times 1.2) \text{ V} \\ = 1.2 \text{ V}$$

(2) 在小灯上电流做功, 电能转化为光能和内能; 在电池内部非静电力做功, 化学能转化为电能, 同时电流也做功, 电能转化为内能

命题意图: 通过应用闭合电路欧姆定律解决简单问题, 培养学生的物理观念。

主要素养与水平:
能量观念(Ⅱ); 模型建构(Ⅱ); 科学推理(Ⅱ)。

2. 参考解答: 根据闭合电路欧姆定律 $U_{\text{外}} = E - Ir = 11.2 \text{ V}$, 则内阻为

$$r = \frac{E - U_{\text{外}}}{I} \\ = \frac{12.78 - 11.2}{200} \Omega \\ = 7.9 \times 10^{-3} \Omega$$

命题意图: 通过解决实际问题, 培养学生的建模能力。

主要素养与水平: 模型建构(Ⅱ); 科学推理(Ⅱ)。

3. 参考解答: $E = \frac{W_{\text{非}}}{q} = \frac{2}{1} \text{ V} = 2 \text{ V}$ $W = EI t = 2 \times 0.2 \times 10 \times 60 \text{ J} = 240 \text{ J}$

命题意图: 了解电源电动势的定义及闭合电路中能量转化的过程。

主要素养与水平: 能量观念(Ⅱ); 模型建构(Ⅰ); 科学推理(Ⅱ)。

4. 参考解答: 电源供给电路的电压会随着电路中电阻阻值的变化而变化。当外电路电阻较大, 内电路电阻较小的时候可以近似正确

常见的干电池大多数为锌锰电池和碱锰电池, 其中含有汞等有毒重金属。废电池无论在大气中还是深埋在地下, 其重金属成分都会随渗液溢出, 造成地下水和土壤的污染, 日积月累会严重危害人类健康。因此, 我们使用过的干电池不能随手丢弃, 应进行分类回收。

近年来, 我国在开发新能源方面发展迅速。锂电池由于具有较高的能量及更具环保性, 已经开始全面取代传统的铅酸、镍氢和镍镉电池, 成为目前重要的储能元件。

我国具有丰富的锂资源和完善的锂电池产业链, 已成为全球最大的锂电池制造国, 年产量超过全球年总产量的一半。随着新能源汽车对动力锂电池的需求不断提升, 我国的锂电池产业将不断发展壮大。

问题与思考

1. 如图 10-46 所示, 电源电动势为 1.5 V, 内阻为 0.3Ω , 小灯泡电阻为 1.2Ω 。则:

(1) 当开关闭合后, 电路中电流和小灯泡两端的电压各为多少?

(2) 简述闭合电路中电流做功与能量转化的情况。

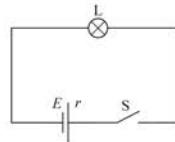


图 10-46

2. 汽车电瓶是一种蓄电池, 电源电动势为 13 V 左右。启动时外电压不低于 11 V 即算正常, 低于此电压就可能造成汽车启动困难。如图 10-47 所示, 测量得到一汽车蓄电池的电源电动势为 12.78 V。某同学通过查阅资料得知该汽车启动时, 电瓶正、负极间的电压为 11.2 V, 电流为 200 A, 则该汽车电瓶的内阻为多大?



图 10-47

3. 有一蓄电池, 当从负极向正极移动 1 C 电荷时, 非静电力做功 2 J, 该蓄电池的电动势是多少? 用此蓄电池给一个小灯泡供电, 供电电流是 0.2 A, 若供电 10 min, 非静电力做多少功?

4. 在初中阶段, 往往认为电源供给电路的电压是不变的。试对此作出评论, 并指出在什么情况下这种看法近似正确。

5. 在如图 10-48 所示的电路中, 闭合开关, 将滑动变阻器触头 P 向左移动, 判断电流表、电压表的示数分别如何变化? 简述判断过程。

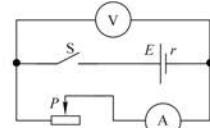


图 10-48

命题意图：辨析外电压及电源电动势的不同。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅱ);科学论证(Ⅱ)。

5. 参考解答：触头P向左滑动，阻值变小，根据闭合电路欧姆定律，电路中电流变大，即电流表的示数变大；电流变大，则内电压变大，由于内外电压之和等于电动势，所以外电压变小，即电压表的示数变小

命题意图：了解电路动态变化的分析方式，提升通过现象分析原因的能力。

主要素养与水平：模型建构(Ⅰ);科学推理(Ⅱ)。

资料链接

电池电动势及内阻的分析

我们以一种比较简单的电池——丹尼尔电池为例，了解一下化学电池内部的实际情况。丹尼尔电池的结构如图11(a)所示，其两个电极是铜板和锌板，分别放置在硫酸铜和硫酸锌的电解质溶液中，并用盐桥等方式连接，其中盐桥的作用是将两种电解质溶液分开且通过离子的移动保持溶液的电中性。当电极与电解液接触后，会因为极板和电解液的物理化学反应，使电极及周围的电解液间的薄层中发生电势跃迁，简化示意图如图11(b)所示，即正极板a的电势高于周围电解液b，负极板d的电势则低于周围电解液c。

负极板处，一开始，锌板上的Zn溶解到溶液里成为正离子 Zn^{2+} ，把电子留在锌板上，使锌板带负电，成为电源负极，而周围的溶液带正电。正负电荷之间的一薄层叫作电偶极层，电偶极层中的电场方向是阻止进入 Zn^{2+} 溶液的，当这种阻碍作用与使Zn溶解的化学作用相平衡时，锌板上的负电荷和周围溶液中的正电荷便不再增加，两者之间保持一定的电势差，锌板电势低，溶液电势高。这个电势差是在很短的距离内产生的，叫作电势跃变，记作 U' 。

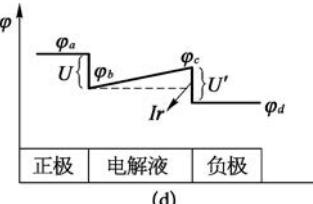
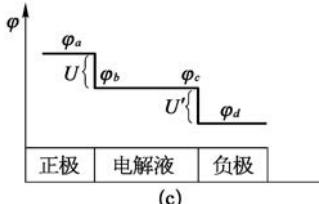
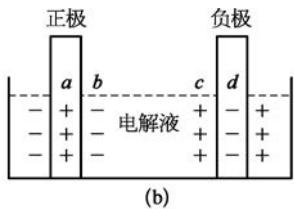
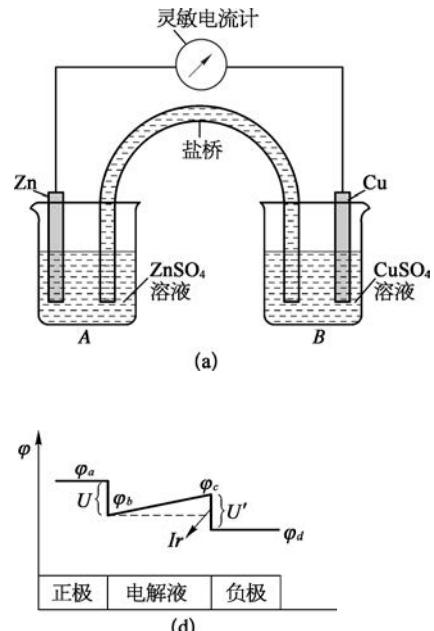


图 11

正极的Cu在溶液中产生的化学变化与Zn相反，是溶液中的 Cu^{2+} 沉积到铜极上，使铜极带正电，周围溶液带负电。形成电偶极层，其电场方向是阻止 Cu^{2+} 的沉积的。当电场作用和化学作用相平衡时，铜极和溶液之间也形成一定的电势差，铜板电势高，溶液电势低，这也是一个电势跃变，记作U。使Zn溶解和 Cu^{2+} 沉积的化学作用就是非静电力的来源。

当外电路没有接通时，在两个电偶极层中都是非静电力和电场力平衡，电池内部无电流流过，除了薄层处存在电势跃变之外，电解液内其他各处电势均相等，如图11(c)所示。

当外电路接通后，负极板上的电子在电场力的作用下通过导体流到正极板（形成由正极流向负极的电流），与正极板上的离子相结合。这使负极板上的电子减少，静电场减弱，打破了原来的平衡， Zn^{2+} 将继续溶解，直到静电力与非静电力再次达到平衡，从而保持极板与电解液间的薄层处电势跃变 U' 不变。同样，正极板附近的 Cu^{2+} 将继续沉积，直到极板与电解液间的薄层处电势跃变U不变。在电源内部，电流

由负极流向正极(*c*向*b*),电解液对电流也有阻碍作用,因此顺着电流的方向,外电路及电解液中均存在电势的降落,其中内电路上电势降落为 Ir (r 为电解液中的电阻),如图 11(d)所示。

在电池内部把单位正电荷从锌板(负极)移到铜板(正极)时,要经过两个电偶极层。非静电力所做的功数值上与两个电势差之和相等,所以丹尼尔电池的电动势等于两个电势跃变之和,即 $E = U' + U$ 。

根据化学中测得的数据知道: $U' = 0.76$ V, $U = 0.34$ V, 所以丹尼尔电池的电动势为 1.1 V。

由于极板及电解液的物理化学性质不变,因此无论外电路如何变化,两薄层和极板间的电势跃变值不变,即电源电动势 E 不变。不同的电池中采用的电极不同,溶液不同,内部的化学反应也不同,因此,它们的电动势便不同,常用的干电池的电动势为 1.5 V,铅蓄电池的电动势为 2 V。

值得注意的是,极板周围电解液薄层的范围非常小,因此实验无法准确测量,这也是使用可调内阻电池进行测量内电压时的误差所在。

欧姆发现闭合电路欧姆定律的过程

乔治·西蒙·欧姆(Georg Simon Ohm, 1789—1854),德国物理学家。他出生于德国一个经济困难的家庭。他的父亲是一名锁匠,自学了数学和物理的知识并教授给年少时的欧姆及其兄弟姐妹。欧姆自此开始对科学产生了浓厚的兴趣。1805 年,16 岁的欧姆进入埃尔朗根大学学习数学、物理和哲学,但是由于经济困难,曾中途辍学。他完成博士学业后,长期担任中学教师。从 1820 年起,欧姆开始研究电磁学。由于经济问题,欧姆的研究工作是在十分困难的条件下进行的,需要自己动手制造仪器来进行有关实验。

欧姆类比对傅立叶发现的“热传导现象中两点之间的温度差起着驱动热流的作用”,猜想导线中两点之间的电流大小也可能正比于这两点之间的某种驱动力,也就是今天所说的“电势差”(电压)。自此欧姆选择了能够提供稳定电流的电源(一开始选择伏打电堆作为电源,后改用温差电池作为电源),自制了可以反映电流大小的仪表,即电流扭秤。电流扭秤把电流的磁效应和库伦扭秤结合在一起。欧姆用了八根粗细相同长度不同的板状铜条与温差电池构成回路,并利用悬挂在玻璃罩中悬丝下的磁针偏转角度来测定电流大小。随后通过控制变量等方法,经过一系列的实验,终于得到了 $X = \frac{a}{b+x}$, 其中 X 相当于电流大小, a 相当于电源电动势, b 相当于电源的内阻, x 相当于外电路的电阻。

1827 年,欧姆发表《用数学推导的伽伐尼电路》一书,严格推导了欧姆定律。由于这一推演过程十分复杂,没能得到德国科学界的重视。直到 1841 年,英国皇家学会才肯定了欧姆的工作,并授予欧姆英国皇家学会科普利奖。

本节编写思路

[1]

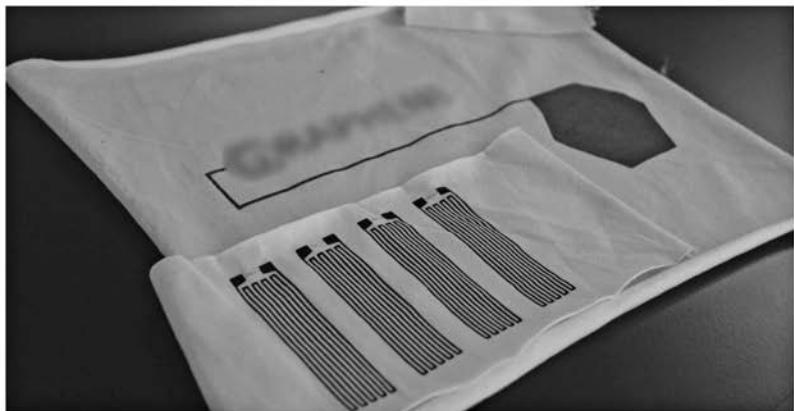


图 10-49 柔性纺织电池

第六节 电源电动势和内阻的测量

21世纪以来，电池工艺日新月异，一些实验室在研制柔性纺织电池（图10-49），它不仅可以提供电能，同时还可以像普通的棉布一样柔韧。未来有望突破可穿戴产品的技术障碍，打开可穿戴智能电器和智能布料的大门。我们日常使用的干电池、蓄电池等电源，有两个标志其特性的重要参数——电动势和内阻。

电源电动势和内阻如何测量？

在一个闭合电路中，电源电动势、外电阻和内电阻等物理量取决于电源和用电器的性质，与电路是否工作无关；而电流、外电压和内电压等物理量则反映了电路的工作状态。这六个物理量通过部分电路欧姆定律和闭合电路欧姆定律相互联结，从而使我们可以有很多种测量电源电动势和内阻的方法。

电源电动势 E 、内电阻 r 与外电压 U 、电流 I 的关系可以写成

$$E = U + Ir$$

如果能测出 U 、 I 的两组数据，就可以列出两个关于 E 、 r 的方程，联立求解可得 E 和 r 。因此，用一个滑动变阻器，加上测量电压、电流的仪器，就能测定电源的电动势 E 和内阻 r ，如图 10-50 所示。

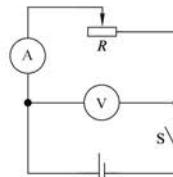


图 10-50 伏安法测电源的电动势和内阻

分析能力，也巩固对闭合电路欧姆定律的掌握，培养严谨的科学态度和实事求是的科学精神。

正文解读

[1] 柔性纺织电池由石墨烯材料制成，拥有很好的安全性和较长的使用寿命，能够用于穿戴式的电子产品。柔性纺织电池只是诸多新型电源种类中的一种，它的发明反映了人类对舒适便捷生活的向往和不懈的努力。在面对未知的新型电池时，测量电源电动势及内阻是了解未知设备性质的重要手段，对学生来说，测量电动势及内阻的过程中将经历模型建构，实验方案的设计、数据处理等过程，能提升科学探究能力。

本节从了解未知电池重要参数的问题引入，通过理论分析和“大家谈”活动，初步形成测量电源电动势及内阻的方案，具体分为三个层次：

1. 通过对柔性纺织电池的介绍，使学生了解电动势及内阻是电源特征的两个重要参数，从而提出测量电动势及内阻的问题。

2. 通过对闭合电路中各个物理量关系的分析，了解伏安法测电动势及内阻的方案，并利用“大家谈”等活动，类比得到各种常见的实验方案。

3. 通过学生实验，提高实验方案的设计能力和使用图像处理数据获得结论的能力。

本节通过对电源电动势及内阻测量方法的讨论和实施，进一步提升学生的实验方案设计能力、数据处理及图像

[1] 测量电源电动势及内阻的方法较多，此处可通过“大家谈”活动充分讨论可行的方案；也可根据学生情况，比较各类方法的异同，或讨论如何减小测量误差等。讨论方案应包括数据的记录方式及处理方法等。在选择图像法处理数据时应讨论图线的意义、其代数表达式以及截距和斜率的含义等，为后续完成测量电动势及内阻实验奠定基础。

使用电压表及电阻箱测量电源电动势及内阻：可按照如图 12 所示的方法连接电路，闭合开关后，调节电阻箱，记录电压表的示数 U 及电阻箱的示数 R ，得

$$E = U + \frac{U}{R}r, \quad \frac{1}{U} =$$

$$\frac{r}{E} \cdot \frac{1}{R} + \frac{1}{E}, \text{ 根据数}$$

据绘制 $\frac{1}{U} - \frac{1}{R}$ 图像。

该图像是一条不过原点的倾斜直线，其斜率为

$$\frac{r}{E}$$
, 纵坐标截距为 $\frac{1}{E}$ 。

使用电流表及电阻箱测量电源电动势及内阻：按照如图 13 所示的方式连接电路，闭合开关后，调节电阻箱，记录电流表的示数 I 及电阻箱的示数 R ，得 $E = IR + Ir$ ，
 $\frac{1}{I} = \frac{R}{E} + \frac{r}{E}$ ，根据数据绘制 $\frac{1}{I} - R$ 图像。该图像为一条

不过原点的倾斜直线，其斜率为 $\frac{1}{E}$ ，纵坐标截距为 $\frac{r}{E}$ 。

[2] 此处实验方案的设计应由学生自主完成，并在教师指导下逐步完善。实验方案可采用不同的测量

[1]

大家谈

如果有一个电阻箱，同时只有一个电流表或电压表，如何测量电源的电动势与内阻呢？

学生实验

测量电源的电动势和内阻

实验原理与方案

[2] 本实验采用伏安法测电源的电动势 E 及内阻 r ，根据闭合电路欧姆定律， $U = E - Ir$ 。将待测电池接入电路，改变外电阻，用电压表和电流表测量不同工作状态下的外电压 U 和电流 I ，并作出 $U-I$ 图线，由图线分析即得出电动势 E 和内阻 r 。

实验装置与方法

如图 10-51 所示为测量电源电动势和内阻的实验电路图，其中电压表测量电源的外电压 U ，电流表则测量流过电源的电流 I 。电路中的固定电阻 R 起到保护电路的作用，它可防止滑动变阻器不慎短路时回路中电流过大而损坏电源及其他设备。

实验操作和数据收集

根据图 10-51 连接电路。改变滑动变阻器 R' 的阻值，从而改变外电阻。设计表格，记录每组电压和电流值。

数据分析

建立直角坐标系，以外电压 U 为纵轴，以电流 I 为横轴。根据实验数据作出 $U-I$ 图像（选择合适的坐标范围），并由图线的截距得出被测电源的电动势，由图线的斜率得出被测电源的内阻值。

实验结论

$$E = \text{_____}, \quad r = \text{_____}.$$

交流与讨论

1. 在本实验中为什么要采用 $U-I$ 图像来处理数据？
2. $U-I$ 图像中斜线上的点代表怎样的含义？
3. 当外电路断开时，外电压为多少？
4. 当电源被短路时，电流是否为无穷大呢？
5. 若一节干电池的电动势为 1.5 V 左右，允许通过的最大电流为 0.6 A 左右，请确定保护电阻 R 的阻值范围。

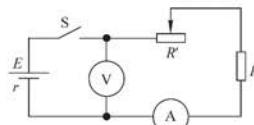


图 10-51 测量电源电动势和内阻的实验电路图

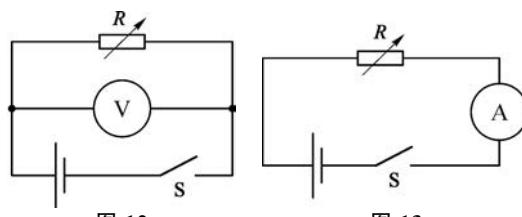


图 12

图 13

如果用电器需要比较高的电压和比较大的电流，一个电池不能符合要求时，往往需要把几个相同的电池连接起来组成电池组。例如，家电遥控器内通常用两节干电池作为电源。如图 10-52 所示的上海浦东机场屋顶太阳能电池板，由很多“晶片”连接在一起。许多“太阳能电池板”连接在一起组成“太阳能电池阵”，也是一种电池组。



图 10-52 浦东机场的屋顶太阳能电池板

② 电池如何连接成电池组？

[1] 串联电池组

如图 10-53 所示，依次将电池的正极和其他电池的负极相连，就组成了串联电池组。如果串联电池组是由 n 个相同的电池串联而成的，且每个电池的电动势都为 E ，内阻都为 r ，则串联电池组的电动势和内阻为

$$E_{\text{串}} = nE$$

$$r_{\text{串}} = nr$$

当用电器的额定电压高于单个电池时，可以采用串联电池组供电，但是用电器的最大工作电流必须小于每个电池允许通过的最大电流。

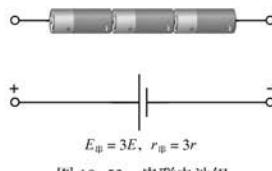


图 10-53 串联电池组

拓展视野

如图 10-54 所示，把所有电池的正极连接在一起，成为电池组的正极；把所有电池的负极连接在一起，成为电池组的负极，就组成了并联电池组。如果并联电池组由 n 个相同的电池并联而成，且每个电池的电动势都为 E ，内阻都为 r ，则并联电池组的电动势和内阻

$$E_{\text{并}} = E$$

$$r_{\text{并}} = \frac{r}{n}$$

并联电池组能提供较大的电流，因为每个电池中通过的电流只是总电流的一部分，所以当用电器的工作电流大于单个电池允许通过的最大电流时，就可以用并联电池组作为电源。

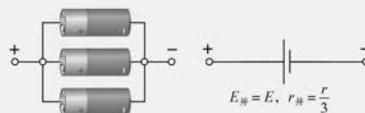


图 10-54 并联电池组

P 表示并联。例如，新能源汽车上动力锂电池标注 3P100S，则代表该电池组由三个锂电池并联构成一个模组，然后由 100 个这样的模组串联构成电池组。

电池组相关内容应强调等效替代的思想。在介绍太阳能电池和新能源汽车电池组时还可以进行环境教育，提高环境保护的意识。

方法，配合《普通高中教科书 物理 实验与活动部分 必修》，将实验器材、步骤，数据处理等内容填入，并最终得出实验结论。在测量数据时应尽可能使数据点分布更广，减小实验误差。

[1] 生活中有很多串联电池的应用。

太阳能电池板是一种利用太阳光直接发电的半导体薄片，由太阳能电池板单体串、并联构成。太阳能单体一般的供电电压为 0.5 V 左右，能提供的电流也很小，很难满足实际需求，因此通过串联来提升电动势，并通过并联来提升供电电流。

新能源汽车的电池也是使用锂电池串、并联组成。单个锂电池的电动势约为 3.7 ~ 4.2 V，一般汽车动力电池的电压会在 450 V 以内，因此需要数百节电池串、并联而成。锂电池组上 S 表示串联，

问题与思考解读

1. 参考解答：

- (1) 电流，电压， b
(2) 根据纵坐标的示数为 1.5 V 可知，电动势为 1.5 V ，根据 $U-I$ 图像的斜率可知， $r = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{0.9}{0.75}\Omega = 1.2\Omega$

命题意图：加深对测量电源电动势及内阻实验的认识。

主要素养与水平：模型建构(I); 科学推理(II); 证据(II); 解释(II); 科学态度(I)。

- 2. 参考解答：**图中斜率的绝对值代表 r ，纵坐标的截距代表电动势，横坐标的截距代表短路电流，因此根据图像可知， $E_1 > E_2$ ， $r_1 > r_2$ ， $I_{\text{短}1} < I_{\text{短}2}$

命题意图：认识 $U-I$ 图像的物理意义。

主要素养与水平：模型建构(I); 科学推理(I); 解释(II); 交流(I)。

3. 参考解答：

- (1) 两节电池串联后电动势 $E_{\text{总}} = 3\text{ V}$ ，设内电阻为 $r_{\text{总}} = 2r$ ，根据闭合电路欧姆定律可知， $U_{\text{外}} = E_{\text{总}} - Ir_{\text{总}}$

$$r_{\text{总}} = \frac{E_{\text{总}} - U_{\text{外}}}{I} = \frac{3 - 2.5}{0.3}\Omega = \frac{5}{3}\Omega \quad \text{所以 } r = \frac{5}{6}\Omega$$

- (2) 断开后电池组两端电压为电源电动势 $E_{\text{总}} = 3\text{ V}$

命题意图：在熟悉的问题情境中，运用闭合电路欧姆定律解决简单问题。

主要素养与水平：模型建构(I); 科学推理(II)。

- 4. 参考解答：**根据闭合电路欧姆定律可知两次连接后 $E = U_1 + \frac{U_1}{R_1}r$ ， $E = U_2 + \frac{U_2}{R_2}r$

问题与思考

1. 在“测量电源的电动势和内阻”的实验中，连接成如图 10-55 所示的电路。

- (1) 图中方框 A、B 中的仪表分别测量什么物理量？闭合开关前，滑动变阻器的滑动头 P 应位于 a 端还是 b 端？
(2) 在用伏安法测电池电动势和内阻的实验中，共记录五组数据，作图得到 $U-I$ 图线，如图 10-56 所示。则该电池的电动势和内阻分别为多大？

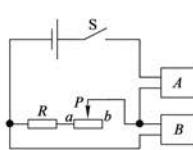


图 10-55

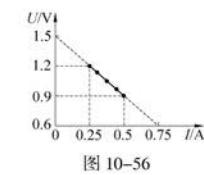


图 10-56

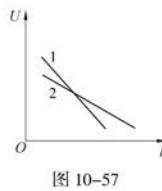


图 10-57

2. 实验室内有两个不同的电源，用伏安法测量这两个电源的电动势和内阻，根据实验数据得到端电压和电流的关系如图 10-57 中直线 1、2 所示。试比较这两个电源电动势 E 和内阻 r 的大小。

3. 手电筒由两节电源电动势大小均为 1.5 V 的相同电池串联成电池组供电，如图 10-58 所示。当开关接通后，测得小灯泡两端电压为 2.5 V ，流过的电流为 0.3 A ，则：

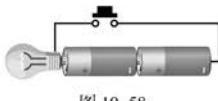


图 10-58

- (1) 每节电池的内阻是多少？
(2) 开关断开后，电池组两端的电压为多少？
4. 如图 10-59 所示，已知定值电阻 $R_1 = 9\Omega$ ， $R_2 = 5\Omega$ 。当单刀双掷开关 S 置于位置 1 时，电压表的示数为 5.4 V ；当 S 置于位置 2 时，电压表的示数为 5 V 。求电源电动势及内阻。

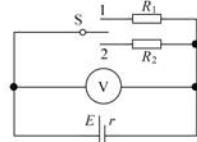


图 10-59

5. 某锂电池的电动势是 3.2 V ，内阻是 $16\text{ m}\Omega$ 。将该锂电池串联使用，给一个“ $24\text{ V} 12.5\text{ A}$ ”的直流电机供电。问：
(1) 需要几个电池串联才可以保证该直流电机正常使用？
(2) 如果不小心将该电池正、负极短路，电路中的电流多大？说明为何要尽量避免电池正、负极短路。

$$r = \frac{(U_1 - U_2)R_1R_2}{U_2R_1 - U_1R_2} = \frac{(5.4 - 5) \times 9 \times 5}{5 \times 9 - 5.4 \times 5} \Omega = 1 \Omega \quad E = U_1 + \frac{U_1}{R_1}r = \left(5.4 + \frac{5.4}{9} \times 1\right) V = 6 V \quad \text{代入数据可以得到电动势 } E = 6 V, \text{ 内阻 } r = 1 \Omega$$

命题意图：了解测量电动势及内阻的其他方法。

主要素养与水平：模型建构(I); 科学推理(II)。

5. 参考解答：

(1) 电池串联, 总电动势 $E_{\text{串}} = nE$, 给电机正常供电则需要 $E_{\text{串}}$ 不小于 24 V, 则 $n = \frac{E_{\text{串}}}{E} = \frac{24 \text{ V}}{3.2 \text{ V}} = 7.5$, 所以至少需要 8 个电池

(2) $I = \frac{E}{r} = \frac{3.2 \text{ V}}{0.016 \Omega} = 200 \text{ A}$, 电流过大, 很容易将电池烧毁, 所以要尽量避免电池正、负极短路

命题意图：了解电池串联, 并能通过证据表达自己的观点。

主要素养与水平：模型建构(I); 科学推理(II); 科学论证(II)。

本节编写思路

本节在电学量、电路连接方式、电路相关规律的基础上，进一步学习电路中能量的转化问题，进一步建立完善能量的观念。

电功和电功率的概念建立时多与机械功和功率相类比，凸显类比的方法。

通过电功与电热的比较，明确纯电阻电路与非纯电阻电路的区别，理解各公式的意义与适用条件。将额定功率与实际功率相比较，理解两者的区别与联系。

正文解读

[1] 电熨斗是一个常见的家用电器，也是一个电热设备。

[1]



图 10-60 电熨斗

第七节 电功、电功率及焦耳定律

用电器可以把电能转化成各种其他形式的能。电熨斗（图 10-60）、电热毯、电饭煲和工业上用来冶炼钢铁的电弧炉，主要把电能转化成内能；洗衣机、电车主要把电能转化成机械能；电解池、电镀装置主要把电能转化成化学能。我们知道，从一种形式的能转化成另一种形式的能的过程需要做功。电能转化成其他形式的能的过程实际上就是电流做功的过程。

② 什么是电功？

我们把电流所做的功叫做电功（electric work）。电流做了多少功就表示有多少电能转化成其他形式的能。

电功实质上是导体中的电场对自由电荷的作用力做的功。设通过导体的恒定电流为 I ，导体两端的电压为 U ，则在时间 t 内电流通过这段导体的电荷量为 $q = It$ ，电场力对电荷所做的功为

$$W = qU = UIt$$

电功的单位是焦耳，简称焦，符号是 J。

② 什么是电功率?

以前已经学过用功率表示机械做功的快慢,类似的,我们用电功率来表示电流做功的快慢。电流所做的功与完成这些功用的时间之比叫做电功率(electric power),用 P 表示。

根据功率的定义式 $P = \frac{W}{t}$, 将 $W = UIt$ 代入得

$$P = UI$$

电功率的单位是瓦特,简称瓦,符号是 W。

[1]

大家谈

日常生活使用的电器上都贴有一个铭牌,标识该用电器的额定电压、额定功率或额定电流等。如图 10-61 所示是一台电风扇的铭牌,说说铭牌上标识的电学量及其含义。

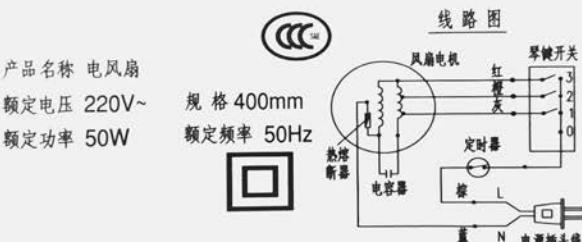


图 10-61 某电风扇的铭牌

[2] 示例 1 一浴霸的额定功率 $P = 1.1 \text{ kW}$ 、额定电压 $U = 220 \text{ V}$ 。试问:该浴霸在正常工作时,通过的电流有多大?如果连续正常工作 30 min,消耗多少电能?

分析: 电流可由 $I = \frac{P}{U}$ 求解,消耗的电能即为这段时间电流做的功。

解: 设浴霸正常工作时电流为 I , 则根据电功率的公式 $P = UI$, 可得

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1100}{220} \text{ A} = 5 \text{ A}$$

浴霸连续正常工作时间 $t = 30 \text{ min} = 1800 \text{ s}$, 消耗电能

$$W = Pt = 1100 \times 1800 \text{ J} = 1.98 \times 10^6 \text{ J}$$

[1] 此处的“大家谈”活动,也可以让学生收集家中的电器铭牌上的标识信息在课堂上交流。

[2] 示例 1 可让学生熟悉电功率公式的使用,了解生活中常用的电能单位。

需要说明的是，由于焦耳这个单位较小，在日常生活中经常使用的电功单位是千瓦·时 (kW·h)。1 kW·h 等于电功率为 1 kW 的用电器连续工作 1 h 所消耗的电能。因此，如需知道示例 1 中的浴霸消耗了多少千瓦·时电能，可由运行时间 $t = 30 \text{ min} = 0.5 \text{ h}$ 及额定功率 $P = 1.1 \text{ kW}$ ，得浴霸消耗电能

$$W = Pt = 1.1 \times 0.5 \text{ kW}\cdot\text{h} = 0.55 \text{ kW}\cdot\text{h}$$

② 什么是电热？

英国物理学家焦耳 (J. P. Joule, 1818—1889) 经过多次实验指出：电流通过导体产生的热量 Q ，与电流 I 的二次方、导体的电阻 R 和通电的时间 t 成正比。这就是焦耳定律 (Joule's law)，即

$$Q = I^2 R t$$

通常把电流流过导体时产生的热量称为电热，也叫做焦耳热。电流通过导体产生的热量与所用时间之比叫做热功率，其表达式为

$$P = \frac{Q}{t} = I^2 R$$

电路将消耗的电能全部用于发热，这样的电路称为纯电阻电路，典型的应用有电熨斗、电饭煲等。

[1] 示例 2 让学生通过具体的运算了解额定功率与实际功率的区别。

[1] [示例 2] 一台标有“220 V 1 000 W”字样的电热水器在额定电压下使用，1 min 产生多少热量？如果电路电压略有下降，降为 210 V，电热水器 1 min 放出的热量又是多少？

分析：电热水器的电路可视为纯电阻电路，电功率等于热功率。当电压不是额定电压时，电热水器的实际功率就不是额定功率 1 000 W。

解：设该电热水器额定电压为 U 、额定功率为 P 、电阻为 R ，则其 1 min 产生的热量

$$Q = Pt = 1 000 \times 60 \text{ J} = 6.0 \times 10^4 \text{ J}$$

根据 $P = UI = \frac{U^2}{R}$ ，可得电热水器的电阻

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{1 000} \Omega = 48.4 \Omega$$

当电路电压 U_1 为 210 V 时，电热水器 1 min 产生的热量

$$Q_1 = \frac{U_1^2}{R} t = \frac{210^2}{48.4} \times 60 \text{ J} \approx 5.5 \times 10^4 \text{ J}$$

由本示例可知，用电器只有在额定电压下，其电功率才是额定功率，如果电压发生变化，实际功率就会发生变化。

电功和电热有什么区别?

如果电路是纯电阻电路,电能都转化为内能,这时电功 W 与电流所产生的热量 Q 相等,即 $W=Q$ 。

如果电路中有电动机或电解槽等用电器,则在这类非纯电阻电路中,电能并不全都转化为内能,有部分电能转化为机械能或化学能。这时,电功 $W >$ 电热 Q ,它们的差就是电能转化成机械能或化学能的部分。

[1] 示例 3 一台电动机的额定电压 $U=220\text{ V}$,线圈的电阻 $R=0.8\Omega$ 。正常工作时,它每秒产生的热量为 1280 J ,则正常工作时的电流为多大?电动机的输出功率为多大?

分析:含有电动机的电路是非纯电阻电路,电能会转化为内能和机械能。应先根据电动机产生的热量算出通过线圈的电流 I ;再根据电功率的公式 $P=UI$ 算出电动机的输入功率 P ,将输入功率减去转化为内能的功率 $P_{\text{热}}$,就是电能转化为机械能的功率,也即输出功率 $P_{\text{输出}}$ 。

解:设电动机正常工作时通过的电流为 I , 1 s 产生的热量为 Q ,则由 $Q=I^2Rt$ 得

$$I=\sqrt{\frac{Q}{Rt}}=\sqrt{\frac{1280}{0.8 \times 1}}\text{ A}=40\text{ A}$$

电动机正常工作时输入功率

$$P=UI=220 \times 40\text{ W}=8800\text{ W}$$

电动机正常工作时的热功率

$$P_{\text{热}}=\frac{Q}{t}=\frac{1280}{1}\text{ W}=1280\text{ W}$$

因此,电动机的输出功率

$$P_{\text{输出}}=P-P_{\text{热}}=(8800-1280)\text{ W}=7520\text{ W}$$

问题与思考

1. 在力学和电学的学习中,已经知道功率的多种表达式,简要说明下述表达式的含义及其适用范围:

$$\text{① } P=\frac{W}{t} \quad \text{② } P=Fv \quad \text{③ } P=UI \quad \text{④ } P=I^2R \quad \text{⑤ } P=\frac{U^2}{R}$$

2. 一台电热水器接入电压为 220 V 的电路中, 0.5 h 内产生的热量为 $1.452 \times 10^6\text{ J}$,求这台热水器加热时的电阻。

[1] 示例 3 让学生了解非纯电阻电路的电功率的运算,从而更好地理解输入功率、热功率、输出功率的含义。

问题与思考解读

1. 参考答案:

- ① 功率的定义式,适用于任何功率的计算
- ② 功率的计算式,适用于力做功的功率计算
- ③ 电功率的定义式,电功率的计算均适用
- ④ ⑤ 热功率的计算式,仅适用于纯电阻电路发热功率的计算

命题意图: 加深对各公式的理解。

主要素养与水平:

能量观念(I);科学论证(II);科学本质(I)。

2. 参考答案:

$$R=\frac{U^2 t}{W}=\frac{220^2 \times 1800}{1.452 \times 10^6}\Omega=60\Omega$$

命题意图: 熟悉电功公式的使用。

主要素养与水平:

能量观念(I);模型建构(I);科学推理(II)。

3. 参考答案：

$$W_{\text{输入}} = UIt$$

$$= 220 \times 32 \times 20 \times 60 \text{ J}$$

$$= 8.448 \times 10^6 \text{ J}$$

$$W_{\text{热}} = I^2 R t$$

$$= 32^2 \times 0.5 \times 20 \times 60 \text{ J}$$

$$= 6.144 \times 10^5 \text{ J}$$

$$W_{\text{机}} = W_{\text{输入}} - W_{\text{热}} =$$

$$7.8336 \times 10^6 \text{ J}$$

命题意图：非纯电
阻电路的计算。

主要素养与水平：

能量观念(Ⅱ);模型建
构(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

4. 参考答案：约

为2次 $N = W/P \cdot$

$$t = 3.6 \times 10^6 \div 180 \div$$

$$420 = 47.9 \quad n =$$

$$N/24 \approx 2$$

命题意图：将学到
的知识应用于实际
生活。

主要素养与水平：

能量观念(Ⅰ);模型建
构(Ⅰ);科学推理(Ⅰ);
社会责任(Ⅰ)。

5. 参考答案：

(1) 该移动电源的能量
为 $50 \text{ W} \cdot \text{h}$, 所以可以
携带 (2) 14.2 h

命题意图：根据所
学知识读懂身边常用电器技术参数的含义,养成安全意识。

主要素养与水平：模型建构(Ⅰ);科学推理(Ⅱ);科学论证(Ⅱ);社会责任(Ⅱ)。

3. 一台电动机额定电压是 220 V , 线圈电阻为 0.5Ω , 电动机在正常工作时通过的电
流为 32 A , 则电动机在运转 20 min 的过程中, 消耗了多少电能? 线圈电阻产生了
多少热量? 最多有多少电能转化为机械能?

4. 一台冰箱的输入功率是 180 W , 一天耗电 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。若冰箱每次制冷时间为 7 min ,
且间隔均匀相等, 估算该冰箱 1 h 制冷的次数。

5. 移动电源, 也叫“充电宝”, 常采用锂电池, 能为手机、平板计算机等设备供
电, 但使用不当可能会造成过充、短路等安全隐患。出于安全原因, 中国民航
总局规定当移动电源的额定容量不超过
 $100 \text{ W} \cdot \text{h}$ 才可在乘机时随身携带。某移
动电源的铭牌如表 10-4 所示。

(1) 通过计算, 判断乘客在乘机时是否
能随身携带该移动电源。

(2) 该移动电源在充满电的情况下, 能
为一个“ $3 \text{ W } 1.5 \text{ A}$ ”的 USB 风扇供电
多长时间?

表 10-4

输入	DC 5 V 2.0 A
输出	DC 5 V 2.1 A
容量	10 000 mA·h
转换率	>85%

资料链接

直流电动机的基本结构、功率和效率

直流电动机是将电能转化为机械能的旋转机械装置。在生产、工业领域主要运用的是交流电动机，但由于直流电动机有较好的启动和调速性能，常被用在对启动和调速有较高要求的场合，如矿井卷扬机、高速电梯、电动汽车等。

直流电动机由定子和转子两部分组成，结构如图 14 所示。定子是指直流电动机工作时静止不动的部分，主要包括主磁极、换向极、电刷、机座、端盖和轴承等。转子则是指直流电动机的运动部分，它是产生感应电动势及电磁转矩，从而实现能量转化的重要部分，因此又被称为电枢，由转轴、电枢铁芯、电枢绕组、换向器等组成。

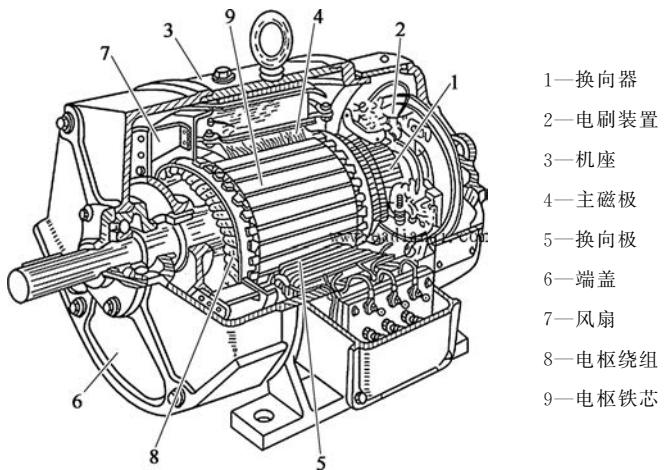


图 14

主磁极是用来在电动机中产生磁场的，结构如图 15 所示，包括极心和极掌两部分，极心上有励磁绕组，极掌为其下方扩大部分，用来使电机空气隙中磁感应强度分布最为合适。

电枢铁芯为圆柱形，表面有槽，电枢绕组一般由铜线绕成，包上绝缘后嵌入电枢铁芯的槽中。

为了明确电动机中换向器与电刷的作用，我们将直流电动机的主磁极和电枢绕组等部分进行简化，结构如图 16 所示，电刷 A、B 与换向器相连接，电流在电枢绕组中的电流流向为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ ，因此产生顺时针的电磁转矩，当 ab 边和 cd 边旋转超过与中轴在同一个水平面后，电刷 A 将与换向器 2 连接，电枢绕组中的电流转变方向，但是产生的电磁转矩不变，使其继续转动。所以，换向器的作用就是改变电枢绕组中的电流，使电磁力维持电枢的转动。



图 15

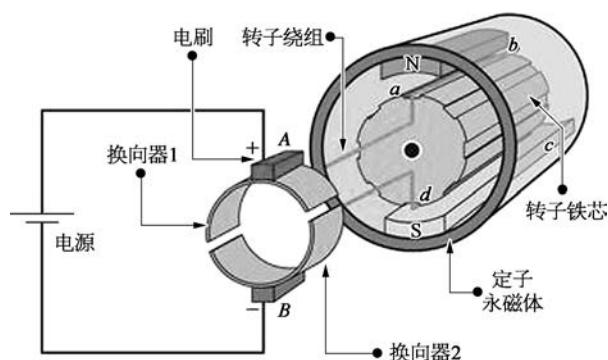


图 16

另外,当电枢在磁场中转动时,根据电磁感应,电枢绕组也会产生感应电动势。这一电动势的方向与外加电压的方向相反,被称为反电动势。当电动机工作时,电动机的电磁转矩 T 应该与机械负载转矩 T_1 与空载损耗转矩 T_0 相平衡;当负载增加时,即 T_1 增加,此时机械负载转矩 T_1 与空载损耗转矩 T_0 大于电磁转矩 T ,电动机转速将下降,此时电枢中的反电动势也将下降,从而使得电枢电流增加 ($I_a = \frac{U - E}{R_a}$, 式中 E 为反电动势, U 为电动机两端电压, I_a 、 R_a 分别为电枢的电流及电阻),若电动机的两端电压不变,则其输入功率将增大。这就表明直流电动机的功率会随转速的变化而变化。

在选择电动机时,应该考虑其效率、转速和功率等因素。电动机的效率可用字母“ η ”表示,等于电动机输出功率 P_2 与电动机输入功率 P_1 之比的百分数,即 $\eta = (P_2/P_1) \times 100\%$ 。

电动机的效率与拖动的负载、电动机的转速和电源的电压都有关系。一般直流电动机效率在 80%~85% 左右,负载小时效率低,负载大时效率高。

[1]



图 10-62 家庭配电箱

第八节 家庭电路

各式各样的家用电器为人类的生活提供便利。家中几乎所有的用电器都需要接入家庭供电线路，而家庭配电箱（图 10-62）则控制着其中的各条线路。你是否关注过为家用电器供电的线路呢？了解家庭电路的主要组成，掌握故障分析的基本技术，具有节能环保的意识，安全、合理地用电，才能使我们拥有更美好的生活。

家庭电路包含哪些部分？

家庭电路主要由供电线路、电能表、总开关、低压断路器、插座、开关、用电器等组成。其中供电线路包含相线（又称火线）及零线，相线与零线间的电压为 220 V，除了相线、零线外，入户线中还应铺设一条地线，地线的对地电压为 0。家庭用电器的种类繁多，厨房、浴室中的用电器和空调的用电量较大，因此往往将家庭电路分为若干支路，分别对应照明、浴室、空调等。如图 10-63 所示为常见家庭配电系统。

家庭电路中，为了避免用电器通断时的相互影响，所有用电器都是并联连接在相线、零线间，且有的用电器还需与地线连接。在实际生活中，接入电路的用电器数目及总功率

本节编写思路

本节从学生熟悉的家庭电路组成入手，通过分析学会解决家庭电路中的简单问题，具体分为三个层次：

- 通过对家庭电路各部分的介绍，了解家庭电路的基本组成。
- 通过对低压断路器功能以及导线安全电流的了解，掌握分析简单电路故障的方法。
- 结合“大家谈”，知道家庭电路的用电安全注意事项；通过对“STSE”的学习，知道节能环保对可持续发展的重要意义。

本节内容旨在通过电路简单故障的分析提升物理观念，培养科学思维；通过节能环保，安全用电的学习，关注生命教育，提升社会责任意识。

正文解读

[1] 家庭配电箱由多组断路器构成，是家庭安全用电的保障。家庭配电箱贴近生活实际，通过对其中断路器的分析，帮助学生认识和排除家庭用电中的简单故障。本节中的“问题与思考”第 4 题与此呼应。

本节可结合前面学习的电路内容，引导学生认识到节首图中配电箱内的断路器是判断电路故障和保护电路安全的重要器件。本节内容涉及面较广，主要由家庭电路的组成、简单故障分析以及用电安全、节能等内容组成。在教学时可结合生活中的实例，通过实物、图片和视频等方式进行讲解，也可以采用学生阅读，教师点拨的方式进行。

往往不时发生改变，因此为了保障家庭用电的安全，我们应该根据实际需求来选择合适的电路元器件。

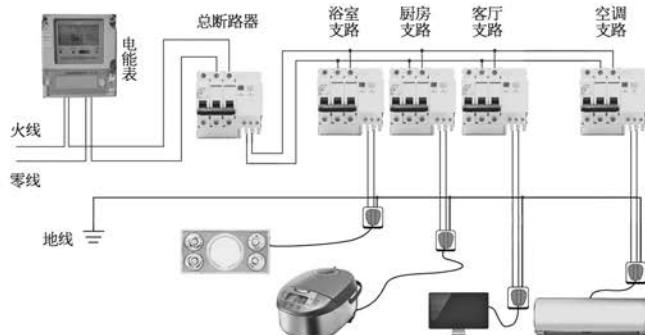


图 10-63 家庭配电系统

低压断路器

低压断路器是家庭用电安全的重要保障之一，如图 10-64 所示。断路器与火线、零线连接，具有过载、短路保护功能，即当火线、零线中的电流超过额定电流时，断路器会自动切断供电线路，避免损害用电器和发生其他危害。有些断路器还带有漏电保护功能，当断路器检测到相线与零线中流过的电流不一致，且差值超过一定小时便会在短时间内断开电路。



图 10-64 低压断路器

[1] 导线

家庭电路中用导线与用电器、低压断路器、开关等连接。我们知道，导线具有一定的电阻，通过电流时，会发热。若导线持续处于过热状态会加快绝缘层老化，甚至损坏，引发事故。因此，导线长时间通电时能承载的最大安全电流是选择导线时重点考虑的要素之一。表 10-5 是常见的铜导线横截面积与安全电流对照表。

表 10-5 铜导线横截面积与安全电流对照表

序号	横截面积 S/mm ²	安全电流 I/A	序号	横截面积 S/mm ²	安全电流 I/A
1	2.5	28	4	10	65
2	4	35	5	16	91
3	6	48	6	25	120

[1] 选择导线面积
时是否只需要考虑最大电流？在近距离输电时，首要根据导线允许的安全电流选择合格的导线；远距离输电时，除了要根据导线允许的安全电流选择合格的导线外，还要考虑导线的电压损失，保证用电器两端的电压在正常工作范围内。

选择家用导线时，可以通过用电器铭牌、说明书等，查找或计算用电器的工作电流，如图 10-65 所示；随后根据连接在导线上的用电器使用需求，对照表 10-5，选择有合适横截面积的导线。

如何分析家用电路的简单故障及排除安全隐患？

家用电路的故障主要有短路、断路、过载、漏电及连接错误等。

断路器不仅能保障用电安全，也有助于排查故障所在。断路器自动断开表示其所在回路发生过载或短路、漏电等故障；因此不可以强行接通，应立即排查故障所在。如总断路器因故障断开，应先断开所有断路器，随后接通总断路器，再逐一接通支路断路器。如总断路器再次自动断开，便可判断刚刚接通的支路发生了故障。在生活中，应重视断路器的自动断开现象，及时排除故障，否则可能会加快线路老化，或引发火灾、触电等事故。

多用电表及验电笔是对简单电路故障检测的常用工具。当验电笔接触相线时，其中有电流通过，氖泡会发光。当验电笔正常工作时，通过的微弱电流不会对身体造成伤害，但 220 V 家庭用电电压远高于人体安全电压，因此在对家庭用电故障进行检测时，应熟知操作注意事项，做好安全防护措施，否则会危及生命安全！

[1]

大家谈

谈谈家庭安全用电的注意事项，并进行交流。

[2]

STSE

我国的发电厂主要依靠燃烧煤炭发电。煤炭发电不仅难以可持续发展，而且会带来严重的环境问题。我们应节约用电、保护环境，并从以下身边的事情做起。

1. 及时更换“超龄”电器。家用电器都有安全使用期限，超过期限之后不仅会线路老化、元器件性能下降导致耗电量大幅增大，还可能会引发漏电、起火、有害物质泄漏等事故。按照国家规定，冰箱的使用年限为 12~16 年，电饭煲、微波炉的使用年限为 10 年，一些小家电的使用期限则更短。

2. 选择高效、节能电器。2004 年起，我国对主要的家用电器采用能效标识分类，如图 10-66 所示为某电冰箱的能效标识。能效标识将用电器的能效划分为 5 个等级，



图 10-65 电器铭牌

[1] 此处设置“大家谈”及“STSE”的目的是使节约用电和安全用电成为开放性的学习内容。教材中仅展现一部分可用于参考的资料。在使用时，可组织学生自由交流观点，根据生活经验，提出建议和举措，实现相互学习，促进课堂生成。同时，应注意引导学生运用已学知识论证观点，提高证据意识，培养科学思维。

[2] 通过对“STSE”中“超龄”电器、节能电器和节能习惯等内容的学习，可以培养学生节能环保的意识；通过对分时电费的了解，并配合调查家庭的用电习惯等活动，可以倡导学生体验绿色环保的生活方式，增强学生的社会责任感。

问题与思考解读

1. 参考解答:

(1) “10 A”表示允许通过的最大电流 (2) 上端的“E”字的插脚和家用电器金属外壳相连,是接地线的插脚。插入插座时,金属外壳接地,它比其他两脚稍长一些,插插头时能使家用电器的金属外壳先接地,拔插头时能使金属外壳后离开地线,即使家用电器因绝缘不好“漏电”,人也不会触电

命题意图:了解插头的实际构造,知道家庭电路的安全知识。

主要素养与水平:
模型建构(I);科学推理(I);科学论证(II);社会责任(I)。

2. 参考解答:根据LED灯及白炽灯的功率,可以得到替换灯泡后每天节省的电能,由此便可计算出一年节省的电费。根据 $W = Pt$ 可得,每盏白炽灯及LED灯每天消耗的电能为

$$W_{\text{白炽灯}} = P_{\text{白炽灯}} t = 40 \times 5 \times 3600 \text{ J} = 7.2 \times 10^5 \text{ J}$$

$$W_{\text{LED}} = P_{\text{LED}} t = 5 \times 5 \times 3600 \text{ J} = 9 \times 10^4 \text{ J}$$

则每年可以节省的电能为

$$W_{\text{总}} = n(W_{\text{白炽灯}} - W_{\text{LED}}) \times 365 = 5 \times (7.2 \times 10^5 - 9 \times 10^4) \times 365 \text{ J} = 1.15 \times 10^9 \text{ J} = 319.4 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

因此一年可以节省电费194.8元

命题意图:复习功率计算,了解更换节能灯的必要性,提升环保意识。

主要素养与水平:能量观念(I);模型建构(I);科学推理(II);社会责任(II)。

数字越小表示用电器能效越高,节能效果越好。

3. 合理利用分时电费。白天与夜晚人们用电的需求差别很大,所以在夜晚发电厂产能过剩,若又无法储存大量电能,很容易造成浪费。因此不少国家推出了峰谷电费的方式,鼓励一些工厂在夜间生产。对于家庭用电,也可以做好用电计划,这样既可以节约电费,又可以减少用电高峰时的用电量,对减小碳排放,提高资源利用效率有很大帮助。

4. 养成良好的用电习惯。对于使用完毕或暂时不使用的电器,如机顶盒、计算机、电灯等,应及时关闭,以减少能源浪费。在使用空调时,应在保证交换一定量的新鲜空气的基础上减少自然风对流;夏天温度宜在27℃左右,而冬天温度宜在20℃左右。冰箱要定期清理过期食物,及时化霜,避免不必要的开门和存取。



图 10-66 中国能效标识

问题与思考

- 某同学学习了家庭电路的知识后,在家中观察家用电器和电路。他发现洗衣机用的是三脚插头,其上标有“10 A 250 V”字样,如图10-67(a)所示,其中的“10 A”表示什么含义?他还发现标有“E”字的插脚比其他两脚稍长一些,如图10-67(b)所示。他又查看了其他家用电器的三脚插头,都是如此。查找资料解释标有“E”字的插脚为何要比其他两脚稍长?

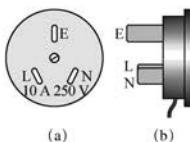


图 10-67

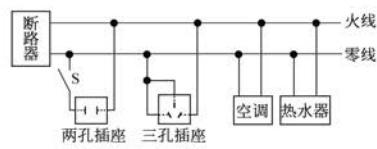


图 10-68

- 在一个三口之家,共有5盏40 W白炽灯,倘若使用照明显度相近的5 W LED灯代替,每年可因此节约多少电费?(假设每盏灯的日照明时间为5 h,家庭电费为0.61元/kW·h)
- 请根据所学的知识,分析如图10-68所示的家庭电路中存在哪些安全隐患,并提出改进措施。

4. 某同学家中一盏照明灯突然熄灭，电路示意图如图 10-69 所示。检查发现，断路器并未断开。试分析照明灯不亮的原因可能有哪些？如何进一步检测、排除电路故障？

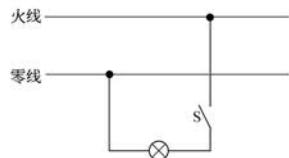


图 10-69

3. 参考解答：两孔插座的开关应该接在火线上；三孔插座应将上方插孔接在接地线上；空调和热水器应该分别连接在不同的断路器上

命题意图：简单了解家庭电路的线路安全设计原则。

主要素养与水平：

能量观念(I)；模型建构(I)；科学推理(I)；社会责任(I)。

4. 参考解答：由于灯熄灭后，断路器未自动断开，可以判断灯泡熄灭的原因并非灯泡以及线路短路，可判断故障应为灯泡所在线路发生断路所致。可使用验电笔或多用电表进行检测，只需写出一种情况即可。若使用多用电表检测，可先将灯泡拆下，用多用电表的电阻挡测量阻值，若显示溢出则代表灯泡断路，否则代表灯泡正常；若灯泡正常，可使用电压表测量开关两端，若电压

显示为 0 则代表开关正常，若显示为 220 V 则代表开关断路。

命题意图：能利用所学工具，排除家庭电路故障。

主要素养与水平：模型建构(I)；科学推理(I)；科学论证(II)；质疑创新(I)。

资料链接

低压断路器的工作原理

断路器的电路切断功能是通过“脱扣”来实现的。如图 17 所示，常见的断路器在过载和短路时会自动实现“脱扣”来保护电路，有些也具有欠压保护功能。其内部原理图如图 18 所示，当家用电路发生非严重的过载时，较大的电流使发热元件产生一定热量，促使双金属片受热向上弯曲，推动杠杆使搭钩与锁扣脱开，将主触头分离，切断电源。当家用电路发生短路或严重电流过载时，短路电流能使得电磁脱扣器产生足够大的吸力，在短时间内(一般小于 0.1 s)将衔铁吸合并撞击杠杆，切断电源。当电路出现欠压时，欠压脱扣器无法吸住衔铁，使衔铁被弹簧拉起，撞击杠杆，切断电源。在实际的断路器中，还存在灭弧室，因为自动断开开关的时候，会有一个电弧的产生，电弧因磁、热等作用引入灭弧室后被分割为多段，很快冷却、熄灭，电流彻底中断。常见的家用断路器，因为以空气作为灭弧介质，故又称“空气开关”。其他类型的断路器还有真空断路器、油断路器等。

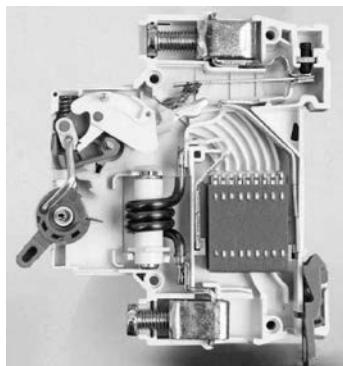


图 17

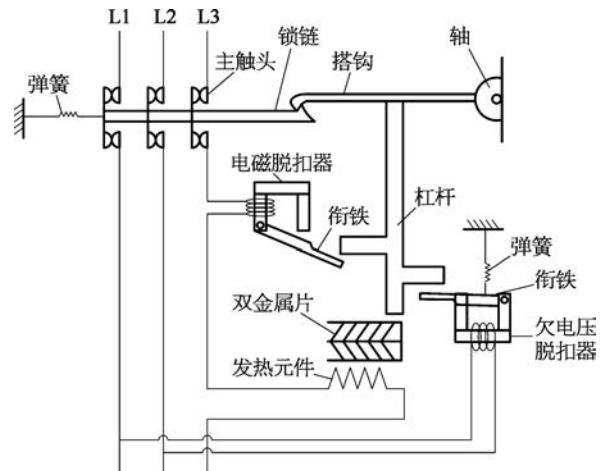


图 18

小结

· 基本概念和基本规律

电流：通过导体某一横截面的电荷量 Q 与所用时间 t 之比，用 I 表示， $I = \frac{Q}{t}$ 。

电阻定律：在温度不变时，导体的电阻 R 与导体的长度 L 成正比，与导体的横截面积 S 成反比， $R = \rho \frac{L}{S}$ ， ρ 为导体材料的电阻率。

闭合电路欧姆定律：闭合电路中电流 I 等于电源的电动势 E 与内、外电阻的阻值和 $R+r$ 之比，即 $I = \frac{E}{R+r}$ 。

电功：电流所做的功，用 W 表示， $W = UIt$ 。

电功率：电流所做的功与其完成时间之比，用 P 表示， $P = \frac{W}{t} = UI$ 。

焦耳定律：电流通过导体产生的热量 Q 等于电流 I 的二次方、导体的电阻 R 和通电的时间 t 的乘积，即 $Q = I^2Rt$ 。

· 基本方法

通过电路中的等效电阻，认识等效替代法。

通过探究金属导体的电阻与材料、长度和横截面积的定量关系，认识控制变量法。

通过了解游标卡尺、螺旋测微器的原理，感受错位放大和螺旋放大的方法。

通过测量电源电动势和内阻的实验，认识数据处理的图像分析法。

· 知识结构图



复习与巩固解读

92 第十章 电路及其应用

1. 参考解答: 4Ω

1.5 A

命题意图: 掌握欧姆定律及电流强度的计算方法。

主要素养与水平: 模型建构(I); 科学推理(II)。

2. 参考解答: 不正确。电动势等于外电路断路时,电源正、负极两端的电压

命题意图: 了解电动势与外电压的区别和联系。

主要素养与水平: 模型建构(I); 科学论证(II)。

3. 参考解答: (1) 错误,用手拉离会导致触电 (2) 水导电,所以用水灭火会有触电危险 (3) 错误,断路器跳闸可能是短路、超载所致,也可能是触电、漏电导致的 (4) 正确

命题意图: 了解用电安全知识。

主要素养与水平: 模型建构(II); 科学论证(II); 社会责任(II)。

4. 参考解答: $R_{\text{甲}} < R_{\text{乙}}$, 略(绘制图像时,取某一电流值为纵坐标,此电流值下甲、乙电压之和为横坐标,从坐标原点连接该坐标点即得)

命题意图: 了解欧姆定律及伏安特性曲线。

主要素养与水平: 模型建构(II); 科学推理(II); 科学论证(II)。

5. 参考解答: 1 A、12 V 3 A、9 V

命题意图: 分析简单串并联问题。

主要素养与水平: 模型建构(II); 科学推理(II)。

6. 参考解答: (1) 空调。因为电视机、电冰箱和电风扇的额定功率分别为 75 W、70 W 和 65 W, 而空

复习与巩固

1. 在某导体的两端加上 16 V 电压, 若 120 s 内通过导体横截面的电荷量大小为 480 C, 该导体电阻值为多大? 若两端电压降为 6 V, 则流过该导体的电流为多少?

2. 甲同学认为电动势的大小等于电源接入电路正常供电时电源正、负两极间的电压。判断甲同学关于电动势的说法是否正确, 简述理由。

3. “珍爱生命、注意安全”, 请判断下列有关安全用电的说法是否正确, 简述理由。

- (1) 发现有人触电时, 应立即用手把触电人拉离电线。
- (2) 家用电器或电线着火时, 应该迅速浇水灭火。
- (3) 断路器“跳闸”一定是出现了短路。
- (4) 有金属外壳的用电器, 金属外壳一定要接地。

4. 甲、乙两电阻的电流–电压关系图线如图 10–70 所示。

- (1) 试判断甲、乙两电阻的大小关系。
- (2) 在图中大致绘制出将甲、乙串联后得到的新电阻的电流–电压关系图线, 并说明理由。

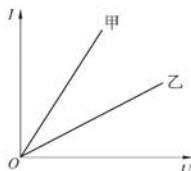


图 10-70

5. 在如图 10–71 所示的电路中, 三个电阻的阻值均为 $R = 6 \Omega$, 电压 U 恒为 18 V, 则电流表和电压表的示数分别为多少? 若将电压表与电流表的位置互换, 则电流表和电压表的示数又分别为多少?

6. 表 10–6 中列出了不同品牌的电视机、电冰箱、电风扇、空调器铭牌上的主要技术指标。

- (1) 各用电器正常工作时, 功率最大的是哪一个?
- (2) 根据铭牌所提供的信息, 比较 8 h 内连续正常使用的电冰箱与电风扇消耗的电能的大小。

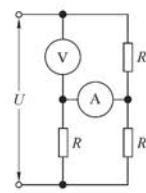


图 10-71

表 10-6

电视机	电冰箱	电风扇	空调器
工作电压 220 V	额定电压 220 V	规格 400 mm	额定电压 220 V
整机功率 75 W	电源频率 50 Hz	额定电压 220 V	电源频率 50 Hz
待机功率 $\leq 0.05 \text{ W}$	额定功率 70 W	电源频率 50 Hz	制冷 / 制热电流
	耗电量 0.50 kW·h/24 h	额定功率 65 W	6.5 A/8.0 A

7. 一台小型电动机在 12 V 的电压下工作，通过的电流是 0.5 A。该电动机能在 1 min 内把 9.6 kg 的物体匀速提升 3 m。不计各处摩擦， g 取 10 m/s^2 ，求电动机输入电功率、输出机械功率、电动机的效率及电动机线圈的电阻。

8. 一只电能表标有“220 V 5 (60) A 1 600 imp/kW·h”字样。

- 请查找资料，了解“220 V 5 (60) A”以及“1 600 imp/kW·h”的物理意义。
- 当某一用电器工作 3 min 后，电能表的脉冲指示灯闪烁了 60 下，则这个用电器消耗的电能为多少焦，该用电器的功率多大？

9. 在进行家庭装修时，需根据需求选择合适截面积的铜导线。现有一捆长度为 100 m、横截面积为 2.5 mm^2 的铜电线，请估算它的阻值约为多大？(铜在 20 ℃ 时的电阻率为 $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)

10. 如图 10-72 所示， $R_1 = 8 \Omega$ ， $R_2 = 20 \Omega$ ， $R_3 = 30 \Omega$ ，接到电压 $U = 20 \text{ V}$ 的电源两端，求每个电阻两端的电压和通过电流的大小。

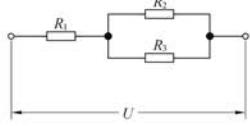


图 10-72

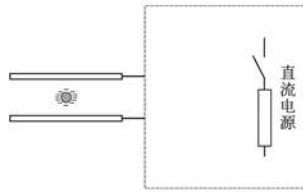


图 10-73

11. 如图 10-73 所示，质量为 m 、带负电的小油滴位于两平行放置、间距为 d 的水平金属板之间，调节两金属板间的电压，使小油滴保持静止。在虚框内画出控制电路图，并标出直流电源的正负极。可用的器材有：滑动变阻器和电压表。

12. 在如图 10-74 所示的电路中，电源电动势为 E ，内阻为 r ， R_1 和 R_2 是两个阻值固定的电阻。闭合开关 S 后，若滑动变阻器 R 的滑片向 a 移动，则通过 R_1 的电流 I_1 和通过 R_2 的电流 I_2 如何变化？

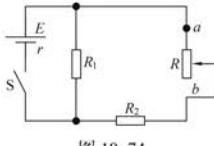


图 10-74

内阻。

主要素养与水平：能量观念(I)；模型建构(II)；科学推理(II)；社会责任(I)。

8. 参考解答：(1) 220 V 表示电能表的工作电压，5 A 为基本电流，是负载工作时电能表通过的电流；60 A 为额定最大电流，是仪表能满足其制造标准规定的准确度的最大电流值。1 600 imp/kW·h 表示消耗 1 kW·h 的电能，电能表的 LED 灯将闪烁 1 600 下。(2) 根据消耗 1 kW·h 的电能，电能表的 LED 灯

将闪烁 1 600 下，所以 3 min 内闪烁 60 下，消耗的电能为 $W = \frac{60}{1600} \times 3.6 \times 10^6 \text{ J} = 1.35 \times 10^5 \text{ J}$ ，功率为

$$P = \frac{1.35 \times 10^5}{3 \times 60} \text{ W} = 750 \text{ W}$$

调工作时的电压为 220 V，工作电流为 6.5 A 或者 8 A，根据 $P = UI$ ， $P_{\text{冷}} = 220 \times 6.5 \text{ W} = 1430 \text{ W}$ ， $P_{\text{热}} = 220 \times 8.0 \text{ W} = 1760 \text{ W}$ ，所以其工作功率更大。

(2) 根据冰箱每 24 小时消耗 $0.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的电能，可知冰箱 8 小时内消耗电能为 $W_{\text{电}} =$

$$\frac{0.5}{3} \text{ kW} \cdot \text{h} = \frac{0.5}{3} \times 3.6 \times 10^6 \text{ J} = 6 \times 10^5 \text{ J}$$

电风扇的额定功率为 65 W，所以电风扇在 8 小时内消耗电能 $W_{\text{风}} = 65 \times 8 \times 3600 \text{ J} = 1.872 \times 10^6 \text{ J}$ ，因此电风扇消耗的电能更多。

命题意图：分析家用电器功率，培养节能环保意识。

主要素养与水平：

能量观念(I)；模型建构(I)；科学推理(II)；社会责任(II)。

7. 参考解答：6 W

$$4.8 \text{ W} \quad 80\% \quad 4.8 \Omega$$

命题意图：分析非纯电阻用电器的功率及

命题意图：了解家庭电能表，会计算功率。

主要素养与水平：

能量观念(I)；模型建构(I)；科学推理(II)。

9. 参考解答：根据电阻定律可知，铜导

$$\text{线的电阻 } R = \rho \frac{L}{S} =$$

$$1.7 \times 10^{-8} \times \frac{100}{2.5 \times 10^{-6}} \Omega = 0.68 \Omega$$

命题意图：会利用电阻定律计算电阻阻值。

主要素养与水平：模型建构(I)；科学推理(II)。

10. 参考解答：电路的总电阻为： $R =$

$$R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 8 \Omega +$$

$$\frac{20 \times 30}{20 + 30} \Omega = 20 \Omega$$

由欧姆定律得总电

$$\text{流为： } I = \frac{U}{R} = \frac{20}{20} \text{ A} =$$

1 A

即通过 R_1 的电流为 1 A。 R_1 的电压为：

$$U_1 = IR_1 = 1 \times 8 \text{ V} = 8 \text{ V}$$

R_2 与 R_3 的电压相等，有： $U_2 = U_3 = U - U_1 = (20 - 8) \text{ V} = 12 \text{ V}$

$$\text{通过 } R_2 \text{ 的电流为： } I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{12}{20} \text{ A} = 0.6 \text{ A}$$

通过 R_3 的电流为： $I_3 = I - I_2 = 1 \text{ A} - 0.6 \text{ A} = 0.4 \text{ A}$

所以，通过 R_1 的电流为 1 A， R_1 两端的电压为 8 V。 R_2 与 R_3 两端的电压都是 12 V，通过 R_2 的电流为 0.6 A，通过 R_3 的电流为 0.4 A

命题意图：分析简单串联、并联问题。

主要素养与水平：模型建构(II)；科学推理(II)。

13. 在如图 10-75 所示的电路中，电阻 R 两端的电压是 U ；当将 R 换成 $3R$ 之后，其两端的电压为 $2U$ 。问：

- (1) 换成 $3R$ 时的电流是电路接入 R 时的多少倍？
(2) 该电源是否存在内电阻 r ，简述理由。

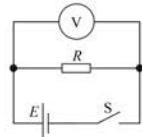


图 10-75

14. 某智能扫地机器人利用自身携带的小型吸尘部件吸尘清扫，其前端装有感应器，通过发射、接收超声波或者红外线来侦测障碍物。已知机器人电池容量为 3 000 mA·h，电机两端电压为 15 V，吸尘时的额定功率为 30 W，输出功率为 22 W，问：

- (1) “mA·h”是哪个物理量的单位？
(2) 扫地机器人电机的电阻大小是多少？

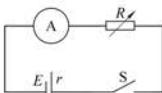


图 10-76

- *15. 取一片铜片和一片锌片，相隔一定距离插入水果（如苹果等）内，就构成了简易水果电池。用电阻箱、内阻为 300Ω 的微安表（量程 0~500 μA ）、水果电池、开关等构成如图 10-76 所示的电路。闭合开关后，某同学调节电阻箱，相应记录电阻箱阻值及微安表示数，如表 10-7 所示。则：

表 10-7

$R/k\Omega$	1	2	3	4	5
$I/\mu\text{A}$	150	127	110	97	88

- (1) 该电池的电动势、内阻分别为多少？
(2) 试设计实验方案进一步研究水果电池的电动势大小与金属片（铜片、锌片）插入水果深度间的关系。

11. 参考解答：如图 19 所示，为了使金属板两端的电压可以发生变化，滑动变阻器必须采用分压的连接方式

命题意图：根据要求，设计简单电路，了解滑动变阻器的连接方式。

主要素养与水平：运动与相互作用(I)；模型建构(II)；科学推理(II)。

12. 参考解答：当可变电阻的滑片向 a 点移动，变阻器有效电阻减小，该支路的电阻减小，从而引起整个电路的外电阻 $R_{\text{外}}$ 减小，据闭合电路欧姆定律可知，电路的总电流 I 总增大，电路的外电压

$U_{\text{外}} = E - I_{\text{总}} r$ 减小，即 R_1 两端的电压 $U_1 = U_{\text{外}}$ 减小，则通过 R_1 的电流 I_1 减小。又因 $I_{\text{总}}$ 增大， I_1 减小，通过 R_2 的电流 $I_2 = I_{\text{总}} - I_1$ 增大。故 I_1 变小， I_2 变大

命题意图：利用闭合电路欧姆定律分析电路的动态变化。

主要素养与水平：模型建构(II)；科学推理(II)；科学论证(II)。

13. 参考解答：(1) $2/3$ 倍 (2) 存在内电阻，因为当内电阻不存在时外电压将不随外电阻变化而变化(本题也可通过计算出内电阻阻值证明内电阻的存在)

命题意图：利用闭合电路欧姆定律进行电路分析、计算。

主要素养与水平：模型建构(II)；科学推理(II)；科学论证(II)。

14. 参考解答：(1) “mAh”是电荷量的单位 (2) 电机额定工作电压 15 V，额定功率 30 W，输出功率为 22 W，由于电机为非纯电阻用电器，根据 $P = UI$ ，得 $I = P/U = 2 \text{ A}$ ，又因为 $P_{\text{出}} = UI - I^2 R$ ，可得 $R = \frac{UI - P_{\text{出}}}{I^2} = \frac{15 \times 2 - 22}{2^2} \Omega = 2 \Omega$

命题意图：了解电器中电荷量的表述，分析非纯电阻用电器的功率及内阻。

主要素养与水平：能量观念(I)；模型建构(II)；科学推理(II)；社会责任(I)。

15. 参考解答：(1) 使用电流表及电阻箱测量电源电动势及内阻：按照如教材图 10-76 所示的方式

连接电路，可以得到 $E = IR + I(r + R_g)$ ， $\frac{1}{I} = \frac{R}{E} + \frac{(r + R_g)}{E}$ ，其中 R_g 为微安表电阻，随后绘制 $\frac{1}{I}$ - R 图像。该图像为一条不过原点的倾斜直线，其函数方程为 $\frac{1}{I} = 1.1829R + 5512.1$ ，根据斜率为 $\frac{1}{E}$ ，纵坐标截距为 r/E ，可得电动势约 0.84 V，内阻约 4 360 Ω

(2) 方案：根据 $E = U_{\text{外}} + U_{\text{内}}$ ，可知 $E = I(r + R_g) + IR$ ，只需测得 I 及 R 便可求得 E 。为了减小误差，也可绘制 $\frac{1}{I}$ - R 图线，由直线斜率得出 E 。由于水果电池的电动势较小、内阻较大，需采用 0~99 999.9 Ω 的电阻箱，以及微安表。微安表内阻不可忽略，因此 $\frac{1}{I} = \frac{1}{E}(R + r + R_g)$

器材：水果电池(铜片、锌片)、微安表、电阻箱、开关、导线若干。

步骤：(1) 在两块金属片上标记刻度 (2) 断开开关，连接实验电路 (3) 控制金属板插入深度不变，调整电阻箱改变阻值，记录多组微安表示数和电阻箱阻值 (4) 绘制 $\frac{1}{I}$ - R 图线，得出电动势 E (5) 改变插入深度，重复上述步骤 (6) 根据插入深度及电动势数据，判断插入深度是否对电动势存在影响

命题意图：电源电动势及内阻的测量，练习实验数据的处理；练习实验方案的设计。

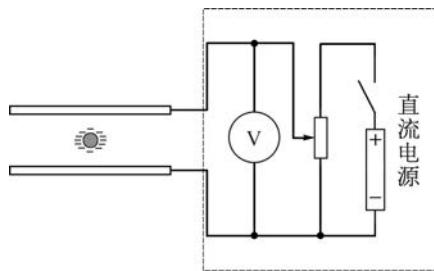


图 19

主要素养与水平: 模型建构(Ⅱ); 科学推理(Ⅱ); 科学论证(Ⅱ); 质疑创新(Ⅰ); 问题(Ⅰ); 证据(Ⅲ); 解释(Ⅱ)。

第三部分 本章练习部分解读

第一节 简单串联、并联组合电路

(一) 参考解答

1. 见下表

名称	图形符号	名称	图形符号	名称	图形符号
开关	— / —	可调电阻	— / □	电容器	— —
滑动变阻器	— / □	空心线圈	— ~ ~ ~	电动机	— M —

2. (1) 错误, 通过导体横截面的电荷量与电流大小和时间有关, 时间越长电荷量越多 (2) 错误, 电流是一个标量 (3) 错误, 电流的大小取决于电子的漂移速度和自由电子的数密度, 与电子速率无关
(4) 正确, 这是欧姆定律的内容

3. 导体两端始终存在电势差

4. 小鸟两脚之间的电势差非常小

5. 以接近光速运动的电子绕行一圈所用的时间 $t = \frac{432}{3 \times 10^8} \text{ s} = 1.44 \times 10^{-6} \text{ s}$, 因此在所有电子均绕

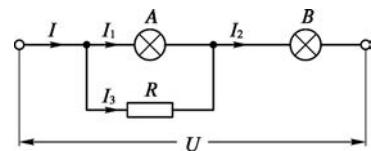
行一圈时通过导体截面的电荷量 $q = It = 4.32 \times 10^{-7} \text{ C}$, 即为环内电子的总电荷量大小, 所以电子数目为 2.7×10^{12} 个

6. 因为两小灯泡的额定电压之和恰好等于电源的输出电压, 但两小灯泡的额定电流不相等, 只要灯泡 A 与一电阻 R 并联后再与灯泡 B 串联, 使灯泡 A 分去 0.2 A 的电流即可, 如图 20 所示。

$$U_3 = U_1 = U - U_2 = (8 - 5) \text{ V} = 3 \text{ V}$$

$$I_3 = I_2 - I_1 = (0.5 - 0.3) \text{ A} = 0.2 \text{ A}$$

$$R = \frac{U_3}{I_3} = \frac{3}{0.2} \Omega = 15 \Omega$$



所以, 可用一个阻值是 15Ω 的电阻与 A 并联后再与 B 串联(其他的解法亦可)

7. 2 V 1 A

当 c、d 端接电压表, 由于电压表电阻很大视作断路, 与之串联的两个电阻上分得的电压可以忽略不计, 所以电路为三个电阻串联, 电压表测其中一个电阻的电压, 即为 2 V

当 c、d 端接电流表, 由于电流表电阻很小视作导线, 与之串联的两个电阻 R 再与一个电阻 R 并联, 根据并联电路分流原理, 电流表所在支路的电流为 1 A

8. 电压表示数变小, 电流表示数变大

开关闭合前, 电路断开, 电压表测量电源电压, 电流表示数为零; 开关闭合后, 电路接通, 电流表示数

增大,电压表测量电阻 R 两端电压,所以示数变小

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	物质观念	运动与相互作用观念	模型建构	科学推理	科学论证
1	I				
2	I	I	II		
3			I	I	
4	I				
5		I	II	II	
6			II	II	II
7			II	II	
8			I	II	

第二节 电 阻 定 律

(一) 参考解答

1. (1) 正确,此表述即为电阻定律的内容 (2) 错误,电阻率与温度有关 (3) 错误,电阻定律只适合金属电阻与浓度均匀的电解液

2. 越小 1 A/V

3. (1) 需要串联一个 1.67Ω 电阻。 $I_L = 0.3\text{ A}$, $U_L = 2.5\text{ V}$, $U = 3\text{ V}$, 得 $U_R = U - U_L = 0.5\text{ V}$, $I_L = I_R = 0.3\text{ A}$, 故 $R = \frac{U_R}{I_R} \approx 1.67\Omega$

(2) 未考虑。已知铜导线的电阻率和横截面积,估算导线的长度为 30 cm,则可以根据电阻定律,得到单根导线的电阻为 $5.1 \times 10^{-3}\Omega$,由于导线的阻值远小于其他用电器,因此可以忽略不计

4. 根据小灯的标称值可知 $R_L = 6\Omega$ 。图(a)中滑动变阻器与小灯串联;当滑动变阻器的阻值最大时小灯两端电压最小,为 $U_L = \frac{U}{R_{\max} + R_L} R_L \approx 0.69\text{ V}$;当滑动变阻器的阻值最小时小灯两端电压最大,为 $U_L = 3\text{ V}$,所以图(a)中小灯两端电压的变化范围为 $0.69\text{ V} \leq U_L \leq 3\text{ V}$ 。在图(b)中小灯与滑动变阻器的右侧部分并联,再与左侧部分串联;当滑片滑至最左端时,小灯与滑动变阻器最大阻值并联在电源两端,此时小灯两端电压最大,所以 $U_L = 3\text{ V}$;当滑动变阻器滑片移至最右端时,小灯与导线并联被短路,两端电压最小,为 $U_L = 0$,所以在图(b)中 $0 \leq U_L \leq 3\text{ V}$

5. 当 R_3 的滑片向左移动时, R_3 接入电路的阻值减小;由于 R_2 与 R_3 是并联的,则 R_2 、 R_3 并联的总电阻 R_{23} 亦将减小,所以 R_{23} 的阻值变化范围为 $0 \sim 2\Omega$;而 R_1 与 R_{23} 是串联的,所以电路的总电阻也将减小,变化范围为 $8 \sim 10\Omega$

根据欧姆定律可知,当电路的电压 U 一定时,总电流 I_1 将从 0.8 A 增大到 1 A ;又因为 R_1 是连接在干路中的,所以 R_1 两端的电压 $U_1 = I_1 R_1$ 将由 6.4 V 增大到 8 V ;再根据串联电路的特点, $U = U_1 + U_2$ 。显然,当 U 一定时, U_2 将减小,也就是说并联在 R_2 与 R_3 两端的电压表的示数将由 1.6 V 减小到 0

由于 U_2 减小, R_2 保持不变,根据欧姆定律通过 R_2 的电流 I_2 将减小,而干路中的电流 I_1 却是增大

的,根据并联电路的总电流与分路电流的关系 $I_1 = I_2 + I_3$ 可知,通过 R_3 的电流将增大

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	物质观念	能量观念	模型建构	科学推理	科学论证	质疑创新
1	I		I	I		
2	I		I	I		
3		II		II	II	II
4			II	II	II	
5			II	II	II	

第三节 测量金属丝的电阻率

(一) 参考解答

1. (1) 刻度尺 (2) 螺旋测微器 (3) 游标卡尺 (4) 卷尺 (5) 游标卡尺或螺旋测微器

2. (1) 需要分别记录电压传感器接在电阻丝 a 、 b 、 c 两端时的电压示数。根据串联电路电流相同可知,电压与电阻阻值成正比,因此可根据电压之比,求得电阻阻值之比。为了减小误差,本实验还可调节滑动变阻器,多次测量取平均值 (2) 不能,至少应更换 b 处、 c 处的电阻丝,并多次测量其阻值与长度、横截面间的关系才能得到电阻定律

3. 通过绕在圆柱形铅笔上的圈数及宽度可知电阻丝的直径为 $D = \frac{d}{N}$, 随后

根据电阻定律 $R = \rho \frac{L}{S}$ 可以得到, 电阻率 $\rho = \frac{d^2 \pi R}{4 N^2 L}$

4. A、B 间的电路连接如图 21 所示。调节滑动变阻器阻值,记录样本两端的电压及流过的电流,计算出电阻阻值。处理数据时可以采用多次测量取平均值的方法,或者绘制 $U-I$ 图像

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

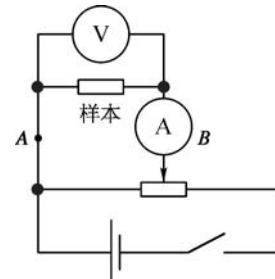


图 21

题号	模型建构	科学推理	证据	解释	交流
1	I		I		
2	II	II	II	II	II
3	II	II			
4	II	II	II	II	

第四节 多用 电 表

(一) 参考解答

1. 直流电流(A—)、交流电流(A~)、直流电压(V—)、交流电压(V~)、电阻(Ω)、电容(F)等

2. 瞬时速度、平均速度、密度等

3. 如图 22 所示

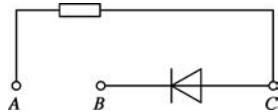


图 22

4. 图略 根据已有的温度、光照强度与电阻间的关系，在实验时可以通过测量电阻阻值得到待测温度和光照强度

5. 略

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用观念	模型建构	科学推理	证据	解释
1				II	
2			II		
3		II		II	II
4	II	III		III	III

第五节 闭合电路欧姆定律、电源电动势及内阻

(一) 参考解答

1. 电动势及电压的单位都为 V，但是能量转换的方向不同。电动势代表非静电力做功，即其他形式的能量转化为电能；电压代表静电力做功，即电能转化为其他形式的能量

2. (1) 错误，电源接入电路正常供电时电源正、负两极间的电压为外电压的大小，电动势的数值等于外电路断开时，电源两端的电压 (2) 错误，电动势单位为 V，也等于 J/C (3) 正确，电池用旧以后电动势会略微降低，但是内阻会变大很多 (4) 错误，电动势与外电路结构无关，但是外电压与外电阻的阻值有关，外电路改变，外电阻变化的话，外电压要相应地发生变化

3. (1) 正确 (2) 错误，内电压是电源内电阻两端的电压 (3) 错误，内、外电压之比与内、外电阻阻值之比相等，故外电阻不一定大于内电阻，所以外电压不一定大于内电压 (4) 正确

4. 闭合开关 S，根据闭合电路欧姆定律得： $I = \frac{E}{R + r}$

$$\text{故 } R = \frac{E}{I} - r = \left(\frac{3.0}{0.30} - 1.0 \right) \Omega = 9.0 \Omega, \text{ 即滑动变阻器接入电路的阻值为 } 9.0 \Omega$$

5. 当 S 接 1 时， $U = 3.0 \text{ V}$ ，则流过电阻的电流 $I = \frac{U}{R} = \frac{3}{30} \text{ A} = 0.1 \text{ A}$

$$\text{根据闭合电路的欧姆定律，可以求得电源内阻 } r = \frac{E - U}{I} = \frac{3.2 - 3.0}{0.1} \Omega = 2 \Omega$$

$$\text{当 S 接 2 时，因小灯泡的电阻 } R_L = \frac{U_L^2}{P} = \frac{3^2}{4.5} \Omega = 2 \Omega$$

$$\text{此时闭合电路中的电流 } I' = \frac{E}{R_L + r} = \frac{3.2}{2 + 2} \text{ A} = 0.8 \text{ A}$$

$$\text{小灯泡两端实际电压 } U'_L = I' R_L = 0.8 \times 2 \text{ V} = 1.6 \text{ V} < U_L \text{ (额定电压)}$$

因此,灯泡很暗或不亮

6. 光照强度逐渐增大, R 阻值逐渐变小, 则其与 L_1 并联的总阻值变小, 根据闭合电路欧姆定律, 干路电流变大, 内电压变大, L_2 两端电压变大, L_2 逐渐变亮, L_1 与电阻 R 的并联电压减小, L_1 逐渐变暗

7. 旧电池内电阻比较大, 但电压传感器的阻值极大, 好比电源与一个阻值极大的负载串联, 因此测量值约等于电源电动势。在连接负载后, 电压传感器示数可取接近于零到电源电动势标称值之间的任何数值, 取决于外电路中负载的阻值与内电阻大小间的关系

我们可将一空载电池等效视为图 23(a)所示的线路, 其中 E 表示电池的电动势, r 为内阻, A 和 B 分别为电池的正、负两极。图 23(b)为用电压传感器测空载电池两端(两极间)电压的等效线路。 R_s 代表电压传感器的等效电阻, 通常很大, 远大于旧电池的内阻 r 。图中 A 、 B 两点之间的电压即为电压传感器测得的电压 V_s 。由于 $R_s \gg r$, V_s 近似等于 E , 所必, 电池空载时电压传感器测得的电池两端电压接近电池电动势的标称值。

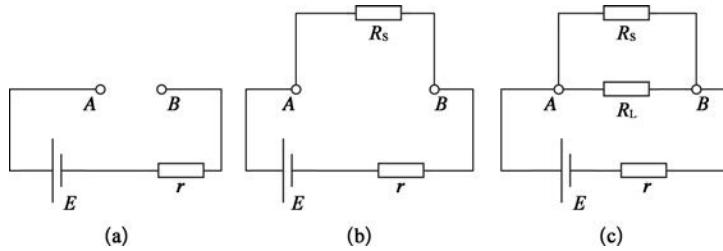


图 23

当旧电池接入负载电阻 R_L 时, 等效线路如图 23(c)所示。设 R_L 远小于电池内阻 r , A 、 B 间电压很小, 在 R_L 极小时接近零。因此, 在 R_L 极小时电压传感器示数接近零。如负载阻值 R_L 介于以上两种情形(空载也可视为负载阻值 R_L 为 ∞)之间, 电压传感器示数便介于零和电动势 E 之间。可见, 电池空载时电压传感器示数接近电池电动势 E 的标称值; 接入负载电阻时, 电压传感器测得电池两极间的电压介于零和电池电动势的标称值之间, 视负载电阻 R_L 的阻值而定。

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用观念	能量观念	模型建构	科学推理	科学论证
1		I			II
2		I	II	I	II
3	I		II	I	II
4			I	II	
5			II	II	II
6			II	II	II
7			I	II	

第六节 电源电动势和内阻的测量

(一) 参考解答

1. (1) 保护电路不会短路 (2) 由图(b)可知, 电动势大小为 20 V; 图线的斜率为 7.5, 所以内阻的大

小为 7.5Ω (3) 电流为 $1A$, 电路总电阻为 20Ω , 所以滑动变阻器的阻值为 9.5Ω

2. $U_{外}-I$ 图中斜率的绝对值代表 r , 纵坐标截距代表电动势, 横坐标截距代表短路电流, 因此根据图像可知, $E_1 > E_2$; $r_1 > r_2$; $I_{短1} < I_{短2}$

3. (1) 如图 24 所示 (2) $1.5 \quad 0.75$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	模型建构	科学推理	科学论证
1	II	II	II
2	II	II	
3	II	II	

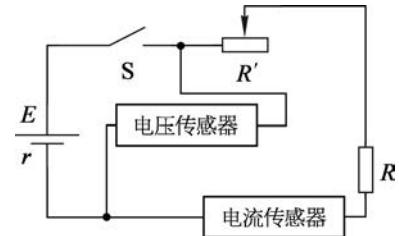


图 24

第七节 电功、电功率及焦耳定律

(一) 参考解答

1. ① 为功率的定义式, 用于计算各种类型的功率, 以表示做功快慢 ② 电功率计算公式, 用于计算电流做功快慢 ③ 热功率计算公式, 用于计算用电器单位时间内产生热量的大小 ④ 电功率计算公式, 仅当用电器为纯电阻时, 才可以用于计算电功率

2. (1) 错误, 电功率不随时间变化而变化 (2) 错误, 额定功率不随用电器两端的电压变化而变化 (3) 正确, 实际功率随电流增大而增大 (4) 正确, 消耗的电能与实际功率有关

3. 5.9 234 000 微波炉的输入功率为 1300W , 输出功率为 850W , 根据计算可知效率 $\eta = \frac{P_{出}}{P_{入}} \times 100\% \approx 65.4\%$, 大于 58% , 因此该微波炉为合格产品

4. 滑动变阻器 P_a 部分的电阻应为 10Ω , 此时, 滑动变阻器消耗的电功率为 5.4W

设滑动变阻器的阻值为 $R_0 = 30\Omega$, P_a 段电阻为 R

由于小灯正常发光, 所以小灯两端电压 $U_L = 6\text{V}$, 通过小灯的电流 $I_L = \frac{1.8}{6}\text{A} = 0.3\text{A}$

通过 P_b 段的电流 $I_{Pb} = \frac{U_L}{R_0 - R}$, 通过 P_a 段的电流 $I_{Pa} = \frac{U - U_L}{R}$

又因为 $I_{Pa} = I_L + I_{Pb}$, 解得 $R = 10\Omega$

P_a 段电阻消耗的功率为 $P_1 = \frac{(U - U_L)^2}{R} = 3.6\text{W}$

P_b 段电阻消耗的功率为 $P_2 = \frac{U_L^2}{R_0 - R} = 1.8\text{W}$

所以, 整个滑动变阻器消耗的电功率 $P = P_1 + P_2 = 5.4\text{W}$

5. (1) $P_{总} = UI = 48 \times 12\text{W} = 576\text{W}$, 又 $P_{总} = P_{出} + I^2R$, 因此 $R \approx 2.26\Omega$

(2) $\eta = \frac{P_{出}}{P_{总}} \times 100\% = \frac{250}{576} \times 100\% \approx 43.4\%$

(3) $v_{\max} = \frac{P}{F_f}$, 所以, $F_f = 36 \text{ N}$, 在实际行驶时虽然电动机以额定功率工作, 仍然会因机械摩擦等损失能量

6. $I = \frac{E_{\text{总}}}{R + r_{\text{总}}} \approx 1.62 \text{ A}$, 因此电阻丝上的热功率为 $P = I^2 R \approx 6.56 \text{ W}$ 。根据计算可知, 电路中的电流较大, 容易导致电源损坏; 或者电热丝的防护不是很好, 会导致烫伤或引起火灾

7. 不正确。当两者并联使用时, 两者功率不变, 相当于共同加热, 所以将等量的水煮沸所用时间将小于 2 min。当两者串联使用时, 设煮水需要的热量为 Q , $Q = \frac{U^2 t}{R}$, 则 $t = \frac{U^2 R}{Q}$, U 、 Q 不变, t 与 R 成正比, 所以将等量的水煮沸所用的时间等于 7 min

8. 当 LED 灯发红光时, 两端的电压 $U = 1.4 \text{ V}$, 通过的电流 $I = 20 \text{ mA} = 0.02 \text{ A}$, 此时的 LED 屏功率最小, 每个 LED 灯的电功率 $P = UI = 1.4 \times 0.02 \text{ W} = 0.028 \text{ W}$; 显示屏为 3 m^2 , 因此灯的数量为 3.0×10^4 个, 则总功率: $P_{\text{总}} = nP = 840 \text{ W}$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	能量观念	模型建构	科学推理	科学论证	解释	科学态度	社会责任
1	I	I		II			
2	I	I	I	II			
3	I				I	I	
4	I	II	II				
5	II	II	II	II			
6	I	I					I
7	I	I	II	II			
8	I	I	II	I			

第八节 家庭电路

(一) 参考解答

- 交变电流 220 V
- 常见的家用电器故障检测仪有验电笔和多用电表。验电笔是一种常用的电工工具。它可以用来判断家庭电路中的零线和火线, 也可以用来判断家用电器是否存在漏电现象。多用电表交流电压挡可以检测家庭电路中的零线和火线, 电阻挡则可测导线等的阻值
- 大功率的家用电器会导致火线及零线上产生较大电流, 因为导线有电阻且和用电器串联, 所以此时导线两端的电压增大, 从而使得照明灯两端的实际电压变小, 灯变暗
- ① 横截面积小, 则可以通过的安全电流较小, 因此容易使导线过载。② 导线绝缘层容易开裂老化, 会导致漏电, 存在安全隐患。③ 导线阻值过大, 导线上的电功率会增大, 导线两端电压也会增加, 因此会增加能耗, 也降低用电器分得的电压, 导致用电器无法正常工作
- 略

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	能量观念	模型建构	科学推理	科学论证	质疑创新	问题	社会责任
1							I
2							I
3		II		II			I
4		I	I				I
5	I				I	II	I

第四部分 本章实验与活动部分解读

1. 学生实验 长度测量及其测量工具的选择

(1) 说明本实验误差的主要来源。

参考解答：本实验的误差主要来自测量工具选择的精度、金属丝的粗细不均匀和读数时的估读

命题意图：了解实验误差的主要来源，能理解操作中减少误差的方式。

(2) 如果要测量乒乓球的直径，选用哪个长度测量工具更为合适呢？为什么？

参考解答：选用游标卡尺更为合适，因为游标卡尺的外径测量爪可以夹住乒乓球，使测量值最接近乒乓球直径；若选用刻度尺则需要使用三角尺夹住乒乓球，操作困难且难以准确判断直径；常见的螺旋测微器量程为 25 mm，小于乒乓球直径，无法使用。

命题意图：了解不同的长度测量工具各自的特点与适用场景。

2. 学生实验 测量金属丝的电阻率

与其他实验小组分享、比较同一材料电阻率的测量结果，并通过查表对比标准值与所测值之间的差异。分析实验误差产生的原因，提出减少误差的方法。

参考解答：产生误差的原因可能有：测金属丝长度和直径时，由于金属丝的粗细不均匀、测量工具的精度以及估读问题等导致误差；在测量金属丝的电阻时，可能是电表测量精度、电表估读以及绘制 $U-I$ 图像时产生误差。为了减小误差，可以多次测量不同位置处的金属丝直径并取平均值，或者提高测量工具的精度，采用伏安法测电阻时可增加测量次数，减小使用图像法求得电阻的误差。

命题意图：了解实验误差的主要来源，能理解操作中减少误差的方式。

3. 学生实验 用多用电表测量电学中的物理量

在测量电阻的实验中，若数字式多用电表上出现数值溢出，这可能是什么原因所导致的？应如何纠正？

参考解答：可能是由于量程选择过小。若更换更大量程后，始终出现这一现象，则可能是电阻损坏（断开）所导致的。

命题意图：学会分析多用电表测电阻时示数溢出的原因。

4. 自主活动 研究水果电池的外电压变化

有同学认为，水果电池连接小灯后两端电压降为 0 是因为水果电池连接小灯后就立即没电了，能否

设计一个实验来证实或者推翻这一看法？

参考解答：可以将水果电池两端的小灯断开，观察此时两端的电压变化，若电压仍然恢复原来的大
小，此时再连接小灯，电压再次降为0，则说明水果电池并不是立即没电（也可使用其他实验证明，例如更
换小灯为电子时钟等）

命题意图：提升实验时分析论证的意识。

5. 学生实验 测量电源的电动势和内阻

采用伏安法测量电源电动势和内电阻时，有同学在处理数据、绘制 $U-I$ 图线时发现，外电压 U 的示数虽然各不相同，但是都非常接近。这是由什么原因导致的？为了减小实验误差可采用什么方法？

参考解答：这是因为外电阻虽然在变化，但其阻值大于内电阻阻值，且始终较大，所以根据闭合电路
欧姆定律，外电压始终较大，接近电源电动势。因此 $U-I$ 图像中，外电压的数据大多集中在纵坐标横截
距处。为了减小误差，可以在确保电路安全的情况下更换总阻值更小的滑动变阻器，或者在电源一侧增
加一个定值电阻（阻值已知）

命题意图：了解实验设计及操作的基本要求，能理解操作中减小误差的方式。

第十一章 电磁场与电磁波初步

第一部分 整 章 分 析

学习目标

1. 了解磁场的基本概念,通过建立磁感线物理模型,体会物理模型在研究具体问题中的重要作用。能用磁感线模型分析磁场中比较简单的问题,并得出结论。在分析和论证过程中,能使用证据说明自己的观点。
2. 利用与静电场对比的方法了解磁感应强度,理解用比值定义磁感应强度的方法,进一步了解用物理量之比定义新物理量的方法。
3. 知道磁通量是一个重要的物理量。通过实验了解产生感应电流的条件,体会科学实验在物理学发展中的重要作用,了解电磁感应现象在生产生活中的应用。知道电磁场的物质性,能说出电磁感应现象在生产生活中应用的实例,能利用场的性质解释有关电磁波的现象,丰富物质观、运动与相互作用观和能量观的内容,并能以此观察和解释简单的自然现象,解决简单实际问题。
4. 知道光是一种电磁波、光的能量是不连续的,初步了解微观世界的量子化特征,培养学生的物质观念、运动与相互作用观念和能量观念。

编写意图

课程标准中对本章的“内容要求”为:

3.3.1 能列举磁现象在生产生活中的应用。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。

3.3.2 通过实验,认识磁场。了解磁感应强度,会用磁感线描述磁场。体会物理模型在探索自然规律中的作用。

3.3.3 知道磁通量。通过实验,了解电磁感应现象,了解产生感应电流的条件。知道电磁感应现象的应用及其对现代社会的影响。

3.3.4 通过实验,了解电磁波,知道电磁场的物质性。

3.3.5 通过实例,了解电磁波的应用及其带来的影响。

3.3.6 知道光是一种电磁波。知道光的能量是不连续的。初步了解微观世界的量子化特征。

本章内容是在小学科学、初中物理学习内容的基础上,除了对抽象的“场”这种物质的认识及对磁感线有更深入的理解外,还增加了对磁场的强弱和方向的定量描述方法,引入了磁感应强度(B)和磁通量(Φ)的概念。

历史上人类对磁场的研究是从磁铁的磁性及其相互作用开始的,本章首先从磁相互作用的观点学习

磁场的性质,揭示了磁体与磁体之间的相关作用、磁体与电流之间的相关作用以及电流与电流之间的相关作用都是通过磁场实现的。用类比的方法,通过“电流元”引入磁感应强度描述磁场中某一点的磁场强弱和方向,引入磁通量描述磁场中某个面上的磁场强弱。基于奥斯特发现电流的磁效应和法拉第发现变化的磁场可以产生感应电流的实验事实,揭示了电现象和磁现象之间的相互联系和转化。交替变化的电场和交替变化的磁场相互联系形成一个统一的电磁场,麦克斯韦预言了电磁波的存在,并进而将光学纳入了电磁学范畴。

本章核心概念是磁感应强度及磁通量,重要实验现象是电流的磁效应和电磁感应。

通过本章的学习有助于深化实验探究的意识,丰富物质观、运动和相互作用观和能量观的内涵。

完成本章内容的学习,共需要 6 课时。其中,第一节 1 课时,第二节 2 课时,第三节 2 课时,第四节 1 课时。

第二部分 本章教材解读



图示为位于贵州省平塘县喀斯特洼坑中的 500 m 口径球面射电望远镜（简称 FAST），被誉为“中国天眼”，是我国自主设计建设的世界最大单口径、最灵敏的射电望远镜。射电望远镜如何发现遥远天体发出的信息？

射电望远镜是观测和研究来自天体的射电波（波长大于 1 mm 的电磁波）的基本设备，是揭示宇宙奥秘的重要工具。本章将要学习电磁波的初步知识，提升电磁波的物质观念，以及电磁波与物体之间相互作用的观念。第四节中将简单介绍我国的射电望远镜。

第十一章 电磁场与电磁波初步

- 在本章中我们将：
 1. 了解磁场的基本概念，知道磁通量是一个重要的物理量，知道电磁场的物质性。
 2. 通过类比的方法，知道磁感应强度是描述磁场强弱的物理量。通过实验了解产生感应电流的条件，体会科学实验在物理学发展中的重要作用。
 3. 知道电磁感应现象在生产生活中的应用，能利用场的性质解释有关电磁波的现象。
- 本章的学习将进一步认识磁场的物质性，理解电和磁的内在联系。磁场和电磁感应现象是学习法拉第电磁感应定律的基础，也是学习、了解电磁波的基础。
- 本章的学习有助于深化科学探究的意识，提升物质观念和相互作用的观念。

本节编写思路

初中教材介绍了磁感线可以方便、形象地描述磁场，磁场中小磁针静止时N极所指的方向表示该点的磁场方向。本节内容明确了磁感线曲线上每一点的切线方向跟这点的磁场方向一致，磁感线的疏密程度表示磁场的强弱，两条磁感线之间仍然有磁场，比初中讲得更全面更准确。本节的要求是在初中物理磁感线概念的基础上作适当提高，并进一步介绍了与磁相关的现代技术发展。

磁现象是最早被人类认识的物理现象之一。通过学习能列举磁现象在生产和生活中的应用，了解我国古代在指南针、磁偏角等磁现象方面的研究成果及其对人类文明的影响。

[1]



图 11-1 上海磁浮列车是世界上首条投入商业运营的高速磁浮列车

第一节 磁现象 磁感线

在人类生活中处处可遇到磁场。随着科学技术的发展，磁技术已经渗透到了我们的日常生活和工农业生产技术的各个方面。磁浮列车（图 11-1）就是一种现代高科技轨道交通工具。世界上第一条商业运营的磁浮列车线路在上海浦东新区运行，其列车的最高速度达 430 km/h。磁场是物质的一种形态，但这类物质形态并不能像实物一样为人类的感官直接觉察。历史上人类对磁场的研究是从磁铁的磁性及其相互作用开始的，我国古代对磁现象的研究成果丰硕，对人类文明影响深远。

为什么说我国是对磁现象认识最早的国家之一？

公元前 4 世纪左右成书的《管子·地数篇》中就有“上有慈石者，其下有铜金”的记载，这是关于磁的最早记载。古代的人们就发现了磁石只能吸铁，而不能吸金、银、铜等其他金属的现象，并将能吸铁的磁石形象地比喻为慈母对子女的关爱呵护。利用磁石制成的“司南”是世界上最早使用的指南针。东汉王充在《论衡·是应篇》中记有“司南之杓，投之于地，其柢指南”*。南宋后，以磁针为主要结构的罗盘在航海中被普遍使用。到了

* “杓”即勺子，是一种舀东西的器具，略作半圆形，有柄。“柢”原指树根，此借为杓柄。此句意为：司南是用天然磁铁矿石琢成一个杓形的东西，放在一个光滑的刻着方位的盘上，杓柄指向南方。

正文解读

[1] 上海磁浮专线全长 29.8 km，2003 年 1 月 4 日正式开始商业运营，全程只需 8 min，是世界第一条商业运营的高架磁浮专线。

上海磁浮列车的底部装进了强大的电磁铁，利用电磁作用使得列车悬浮于铁轨之上。

2019 年 5 月我国时速 600 km 高速磁浮试验样车在青岛下线，标志着我国在高速磁浮技术领域实现重大突破。节首通过本图表示磁现象与我们的生活紧密相关，磁现象的研究促进了人们对磁相互作用本质的探索。

明代，遂有郑和下西洋远航到非洲东海岸之壮举。中国指南针约于 12 世纪末 13 世纪初由海路传入阿拉伯，又由阿拉伯传到欧洲。指南针的传播，正如英国哲学家培根所说的那样，在促进人类航海事业发展和改变世界面貌上产生了巨大的影响。

天然磁石主要成分是四氧化三铁。现代工业上可以制造出各种各样的人造磁体，20 世纪 70 年代制造出稀土强磁材料使得磁性元件更加小型化，到目前为止具有最强磁力的永久磁体是钕磁体，也称为钕铁硼磁体（图 11-2）。

在生命体中也存在磁现象，有人认为信鸽识途归巢、候鸟千里迁徙等就是利用地磁场辨别方向。人体及器官也有磁性，利用电子技术及超导量子干涉技术可得到心磁图、脑磁图、肺磁图及人体磁场分布。基于磁场的核磁共振技术成像（图 11-3）及磁疗技术也广泛用于医学临床。

如何形象地描述磁场？

在磁体周围存在磁场。在条形磁体周围撒上的铁屑会呈现有规则的排列（图 11-4）。磁场的强弱和方向可以形象地用磁感线来描述：磁感线的疏密程度表示磁场的强弱，磁感线越密集的地方磁场就越强；磁感线的切线方向表示该点的磁场方向，即放在该处小磁针静止时的 N 极所指的方向。

[1]

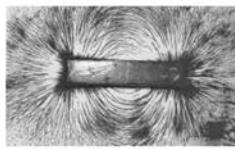


图 11-4 条形磁体周围铁屑分布情况

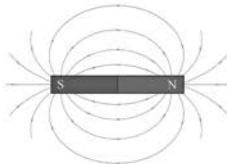


图 11-5 条形磁体外部的磁感线

磁感线是闭合曲线，磁体外部的磁感线是从 N 极出来，回到磁体的 S 极，内部是从 S 极到 N 极。任意两条磁感线不相交，两条磁感线之间的区域仍然有磁场。如图 11-5 所示为条形磁体外部的磁感线。

指南针指向地球南极吗？

如图 11-6 所示，地球周围存在一个大范围的磁场，宛如一个大的条形磁体。在地磁

[1] 教材图 11-4

为条形磁体周围铁屑分布情况的照片，图 11-5 为条形磁体外部的磁感线。在条形磁体的内部也有磁感线，建议根据图 11-5 再补充画出条形磁体内部的磁感线。

根据磁场性质可知，每一根磁感线都是封闭的曲线。应该注意教材中画出的磁感线只表示条形磁体附近一个平面上的磁感线，实际磁感线在三维空间是立体分布的。

[1] 学生在初中就

知道地理南、北极和地磁南、北极的区别，知道存在磁偏角。在沈括对磁偏角研究的基础上，本章进一步指出地球表面不同地区磁偏角一般是不同的，而且地球磁极缓慢移动，磁偏角也在缓慢变化。本节要求学生认识并清楚地表述地磁场的空间立体分布情况，锻炼空间想象和空间表述能力，从物理视角解释自然现象，形成正确的物理观念。

地磁场在地球周围的有限区域之内形成的磁层使由宇宙空间射来的、足以使生物致命的高能粒子流偏转，从而保护所有生物得以安全地栖息在地球上。包括人类在内的所有生物都已完全适应和习惯于在地磁环境下生活和繁衍。

静电场是相对观察者静止的电荷周围存在的场，磁场是运动的电荷周围存在的场；电场基本性质就是会对放入其中的电荷有力的作用，而磁场也会对放入其中的磁体或电流有力的作用；电场和磁场都可以从力的角度和能量的角度描述其性质。这是形成物质、运动和相互作用、能量等物理观念的载体，也是模型构建、科学论证等科学思维的载体。

心、脑、肺磁图涉及的基本物理原理见资料链接。

地磁场倒转原因的“发电机学说”见资料链接。

场的作用下，指南针会调整方向，使其指向顺着地磁场的磁感线，N极指向地磁南极；S极指向地磁北极。地磁南极在地理北极附近；地磁北极在地理南极附近。地磁两极与地理两极不完全重合，地磁轴和地球自转轴之间的夹角约为 11° 。我们将地球表面水平放置的指南针静止时N极所指的方向与地球北极方向之间的夹角称为磁偏角，地球表面不同地区磁偏角是不相同的。不仅如此，由于地球磁极的缓慢移动，磁偏角也在缓慢变化。

[1]

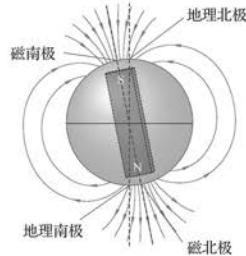


图 11-6 地理两极与地磁两极不重合

我国宋代科学家沈括是历史上第一个提出磁偏角现象的人，他在《梦溪笔谈》中记载了地磁偏角现象：“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也。”*较系统地研究磁偏现象原始理论的是英国人吉尔伯特。磁偏角的发现对指南针在航海方面的应用十分重要。

拓展视野

科学家发现地球磁场的方向并不是恒定不变的，它的南北磁极曾经对换过位置，这就是“磁极倒转”现象。

在地球的几十亿年历史中，磁极倒转事件发生多次。仅在最近的450万年里，就出现了4个磁场极性不同的时期。有两次和现在基本一样，是“正向期”，即地磁北极在地理南极附近，地磁南极在地理北极附近。还有两次则是和现在正好相反的“反向期”。在每一个磁性时期里，有时还会发生短暂的磁极倒转现象。

为什么会出现地磁极变化呢？地球磁场反复变化有什么规律吗？迄今科学家们仍然没有得出统一的结论。大部分科学家认为，当地球内部液态铁质流围绕着地核中心旋转时，如果突然发生变化，其流动方向倒转，就会引发磁极倒转现象。

地球磁场的倒转是否有一定的规律可循，是否可以预报？由于地心变化太过复杂，更难于直接观测，迄今人们仍未得出结论。

* “方家”原指深于道术的人，后指精通某种学问或技艺的专家。此句意为：用磁石磨针的针尖，针尖就能指向南方，但是常常稍微向东偏，不完全指南。

问题与思考

1. 在条形磁体外部靠近中央位置处有没有磁场？如何判断？
2. 假设将指南针移到地球地心处，则指南针 N 极将指向什么方向？
3. 通过学习磁场和磁感线，某同学总结了如下几个结论。试判断这些说法是否正确，并简述理由。
 - (1) 磁感线是铁屑组成的。
 - (2) 磁感线是磁体周围空间实际存在的曲线。
 - (3) 磁场是看不见摸不着的，但是可以借助小磁针感知它的存在。
 - (4) 地磁场的磁感线是从地球南极附近发出回到地球北极附近。
4. 判断下列关于磁场的说法是否正确，并简述理由。
 - (1) 两个磁极之间总是直接发生相互作用的。
 - (2) 磁场是为了解释磁极间相互作用而人为规定的。
 - (3) 磁场是特殊物质，它对放入其中的磁性物体有力的作用。
 - (4) 由于磁场弱处磁感线疏，所以两条磁感线之间没有磁场。
5. 日常生活中磁的应用给我们带来了方便，想想还有哪些地方可以应用磁性？

1. 参考解答：条形磁体外部中央附近位置的磁场虽然没有两极那么强，但还是存在磁场的。可以将大头针（或其他铁质物体）放在条形磁体外部的中央位置，从所观察到的大头针被吸引的情况证实磁场的存在

命题意图：仔细观察教材图 11-4 实验所显示的条形磁体周围的铁屑分布图，设计简单的实验以验证自己的猜想。

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

2. 参考解答：在地球外部的磁感线由地理南极指向地理北极（即指南针 N 极指向地理北极），由于磁感线是闭合曲线，所以在地球内部球心处的磁感线由地理北极指向地理南极，根据自由小磁针 N

极静止时的受力方向沿该处磁感线的切线方向，可判定地球球心处指南针 N 极指向地理南极附近

命题意图：根据磁感线是封闭曲线的概念，分析在地球内部仍然存在磁场，推断磁场的方向。

主要素养与水平：模型建构（I）；科学推理（I）。

3. 参考解答：（1）错。磁感线是假想的曲线，用来描述磁场的分布。铁屑在磁场中被磁化后类似于一个个小磁针，几乎都沿着磁场方向，即磁感线的方向排列。（2）错。磁感线实际是不存在的，磁感线是为了形象的研究磁场空间分布情况而假想的一些有方向的曲线。（3）对。磁场看不见摸不着，但磁场对自由的小磁针有磁力的作用，所以可以借助小磁针感知其存在。（4）对。地球是一个巨大的磁体，地磁场的南极在地理北极附近，地磁场的北极在地理南极附近。

命题意图：辨析磁场和磁感线的关系，明确磁场是客观存在，可以通过特定的仪器感知，磁感线是为

了直观形象地描述磁场分布而在磁场中引入的一些假想的曲线。

主要素养与水平：模型建构(I);科学推理(I)。

4. 参考解答：

- (1) 错。磁极附近存在磁场,磁极与磁极之间的相互作用通过磁场发生
(2) 错。磁场是一种存在于磁极或电流附近的特殊的客观物质,并不是为解释磁极间的相互作用而假想出来的
(3) 对。磁场对其中的磁性物体存在相互作用力
(4) 错。磁感线的疏密程度反映磁场的强弱,两根磁感线之间仍然存在磁场

命题意图：加深磁场是客观存在的特殊物质的认识,强调磁极与磁极、磁极与电流发生作用只是检测磁场的一种方法,磁感线是描述磁场的一种形象化的假想的虚拟工具。

主要素养与水平：运动与相互作用(I);模型建构(I);科学推理(I)。

- 5. 参考解答：**把螺丝刀做成磁性刀头,可以吸起需要安装的铁螺丝,还能把掉在狭缝中的铁螺丝取出来。门吸利用磁性可以保持开门状态,磁性黑板可以将磁性演示教具吸在黑板上,冰箱门四周的磁性密封条使冰箱的门关紧等

命题意图：此题关注磁场与生活实际紧密联系,引导学生从物理学视角解释实际问题。

主要素养与水平：运动与相互作用(I);证据(I);解释(I)。

资料链接

心、脑、肺磁图的基本物理原理

人体磁场属于生物磁场的范畴。由于人体的磁场信号非常微弱,又常常处于周围环境的磁场噪声中,给测定工作带来了极大的困难。近三十年以来,尤其是超导量子干涉仪的发明,人体磁场产生与测定的研究取得较大的发展。超导量子干涉仪可以将微弱的人体磁场信号从环境磁场中提取出来,所获取的人体磁场信息对临床多种疾病的诊断及推进一些疑难病症的治疗具有重要的意义。

形成人体生物磁场的主要原因:

- (1) 生物电流。人体生命活动的氧化还原反应是不断进行的。在这些生化反应过程中,体内带电离子发生流动可形成的电流称为生物电流。人体细胞接受有效刺激后,在静态电势的基础上能够迅速产生一个可向远处传播的电势波动,有研究表明,这种电势波动发生时伴生的磁场的磁感应强度约为 1.2×10^{-10} T。人体脏器如心、脑、肌肉等都有规律性的生物电流流动。运动着的电荷会产生磁场,人体凡能产生生物电信号的部位,必定会同时产生生物磁信号,心磁场、脑磁场、神经磁场、肌磁场等都属于这一类磁场。

脑电图是通过电极探测大脑神经细胞群活动所产生的自发性、节律性的电流。脑磁图探测的信号是脑组织内神经细胞电流产生的极微弱磁场变化(图1)。测量脑磁图比脑电图有不少优越性。脑电图探测的是细胞内及细胞外电流,反映脑的电场变化,容易受传导介质的影响。脑磁图不需要接触皮肤,不受传导介质的影响。可以直接反应脑内磁场源的活动状态,并能确定磁场源的强度与部位。视觉诱发脑磁场,听觉诱发脑磁场与躯体诱发脑磁场具有特异性,能够分辨出组织上与机能上不同的细胞群体。因此脑磁图比脑电图具有较高的时间和空间分辨率,脑磁图对脑部损伤的定位诊断比脑电图更为准确。



图1 脑磁场测定病灶

心磁场随时间变化的曲线称为心磁图。心脏不停地进行舒张收缩活动，供给全身血液，因而起到了类似“泵”的作用。心脏的收缩活动是由于心肌受到动作电势的刺激而发生的，脉冲式的动作电势沿心肌的神经纤维扩布，引起心肌细胞除极化和复极化过程，从而产生与心脏电活动相关且变化的电场（心电场）以及心电流，进而产生与此相应的变化磁场（心磁场）。利用磁屏蔽室和超导量子干涉仪，可测出其心磁图（某些固定点）。

(2) 外磁性使人体内强磁物质产生的剩余磁场。由于职业或环境原因，某些具有强磁性的物质如含铁尘埃、磁铁矿粉末可通过呼吸道、食道进入体内，这些物质在地磁场或外界磁场作用下被磁化，产生剩余磁场。例如，含铁粉尘物质侵入肺后，出现的肺磁场就属于此种情况。肺磁场的强度约为 $10^{-11} \sim 10^{-8}$ T，虽然肺磁场在人体磁场中表现较强，但和地磁场、交流电引起的磁噪声相比，仍然是比较弱的。

(3) 由生物磁性材料产生的感应磁场。人体活组织内某些物质具有一定的磁性，称为“生物磁性材料”。这种材料在地磁场及其他外界磁场的作用下便产生感应磁场，如肝、脾等脏器组织所呈现的磁场即属此类。

地磁场倒转原因的“发电机学说”

目前研究和应用较多的地球磁场学说是 20 世纪 40 年代发展起来的“发电机学说”，发电机学说认为，地球内部的导电液体在流动时产生稳定的电流，这种电流的作用形成了地球磁场。

如图 2 所示，地球的内部结构为一同心状圈层构造，由地心至地表依次分为地核、地幔和地壳。地球的地核、地幔和地壳的分界面上，通常物质所带的正电和负电是相等数量的，但由于地球核心物质受到的压力较大，温度高达约 6 000℃，内部有大量的铁磁质元素，物质变成带电荷量不等的离子体，即原子中的电子克服原子核的引力，变成自由电子，加上由于地核中物质受着巨大的压力作用，自由电子向压力较低的地幔移动，使地核处于带正电状态，地幔附近处于带负电状态，地核和地幔整体就像是一个巨大的“原子”。地球自转必然会引起地幔负电层的旋转，地幔负电层的旋转形成的电流就如同存在于没有电阻的，且垂直于地球自转轴的圆形线圈中，可以永不消失地在其中流动，这使地球形成了一个磁场强度较稳定的磁场以及南北磁极。

但是，由于电子的分布位置并不是固定不变的，会因多种因素的影响而变化。地核的自转与地壳和地幔并不同步，这会产生强大的变化的电磁场，使地球磁场南北磁极缓慢移动，可能使地球的南北磁极翻转。

20 世纪 90 年代以来，地球物理学家用计算和模拟的方法证明，当地球内核转得比液态外核快，经过几千年就可形成相对稳定的磁场，而在一定时期之后，其极性又可以反转。然而，地球内部结构复杂，这个假说仍然需要进一步的观测和实验研究。

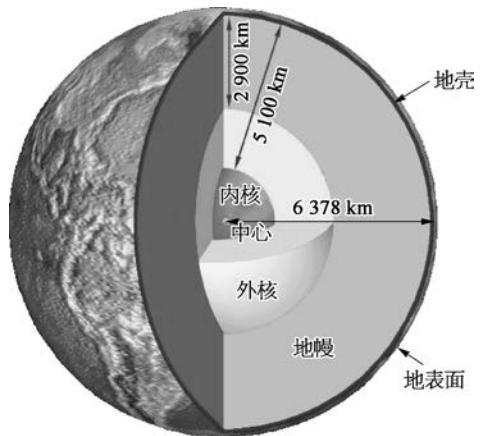


图 2 地球的内部结构

本节编写思路

通过实验认识磁场。明确磁感应强度是电磁学的重要物理量，也是本章的重点。

通过演示实验感知通电电流附近存在磁场。自由状态小磁针N极的受力方向可以确定磁感应强度的方向，用电流元所受最大磁场力与电流元之比的方法定义磁感应强度。通过类比于电场强度的方法定义磁感应强度可以理解磁感应强度是不依赖于磁场力和电流元的客观存在。

正文解读

[1] 科学研究表明物质处于磁场中时，其性能可能发生改变，呈现出多样的物理、化学现象和效应。因而施加磁场一直是研究物理等诸多学科的一种重要的手段。

节首图所示的稳态强磁场实验装置(SHMFF)的基本原理是利用强电流产生强磁场，教材第104页的内容与之相呼应。如何描述电流周围的磁场有助于形成物质观念和能量观念。建立稳态强磁场实验装置的意义见资料链接。

[1]



图11-7 中国科学院强磁场科学中心的“稳态强磁场实验装置(SHMFF)”

第二节 电流的磁场 磁感应强度

早期人们对磁现象没有进行系统的科学探究和测量，仅仅停留在对磁极间相互作用和地球磁性等表面现象的观察上。直到19世纪20年代，丹麦著名物理学家奥斯特发现了电流的磁效应后才开启了电磁学研究的新纪元。

与天然磁体的磁场相比，电流产生的磁场的强弱和方向容易控制和调节，在科学的研究和实际中有更多的应用；电磁起重机、电话、电动机、发电机、电磁继电器、磁浮列车、电子门锁、智能通道闸和电磁流量计等都离不开电流产生的磁场。中国科学院强磁场科学中心建成的强磁场实验装置（图11-7）为我国电子材料、铁基超导体、新型拓扑超导体、非常规超导体、低维体系量子效应及输运研究、生物大分子在疾病中的分子机制、肿瘤发病机理和小分子药物作用机制等研究提供了有力的支持。

② 通电直导线周围的磁场方向如何判断？

让一根粗直导线竖直穿过一块均匀撒有铁屑的水平纸板中央。接上直流电源后，轻轻敲击纸板就可以清楚显示出通电导线周围铁屑的分布情况。我们可以发现，当导线中通过

电流时,纸板上的铁屑将环绕着这根导线形成一个个同心圆,如图 11-8 (a) 所示。清除铁屑后在纸板上画一个以中央为圆心的圆,再将一小磁针放在水平纸板上,导线接通直流电源,沿圆周移动小磁针的位置,观察小磁针 N 极的指向,并把小磁针的指向画在纸板的相应位置上。

实验表明通电直导线周围磁场的磁感线是一些和导线垂直的平面上以导线为圆心的同心圆;靠近导线处的磁感线较密,磁场较强,离开导线越远磁感线越疏,磁场越弱。

大量的实验都表明,通电直导线中电流方向与其周围磁场的方向满足右手螺旋定则:用右手握住通电直导线,让大拇指指向电流的方向,四指的指向就是磁感线的环绕方向,如图 11-8 (b) 所示。

通常,我们用“ \otimes ”和“ \odot ”分别表示通电导线中垂直于纸面向内和垂直于纸面向外的电流方向。用“ \times ”和“ \bullet ”分别表示垂直于纸面向内和垂直于纸面向外的磁场方向。

如图 11-9 (a) 所示为通电直导线附近磁场的俯视图,中间导线中的电流方向垂直于纸面向外;载流直导线垂直平面上磁场呈同心圆状的分布。如图 11-9 (b) 所示为通电直导线所在平面上的磁场分布,越靠近导线磁场越强,越远离导线磁场越弱。

通电螺线管周围也有磁场,类似于条形磁体周围的磁场。可以用右手螺旋定则来判断通电螺线管环绕的电流方向与螺线管内部磁场方向之间的关系,如图 11-10 (a) 所示。如果螺线管很长,而且绕得很密,其内部的磁感线就近似为平行于螺线管轴线的、同方向、间隔均匀的直线,如图 11-10 (b) 所示。通电螺线管的磁场可以看成是由许多环形电流的磁场叠加而成的,环形电流内部磁场方向也可以用右手螺旋定则来判断。

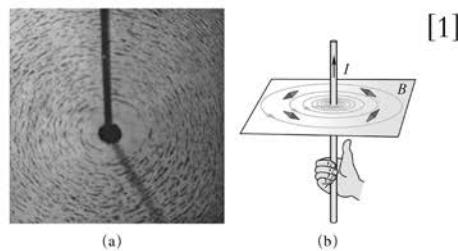


图 11-8 载流直导线周围的铁屑分布和磁场

[3]

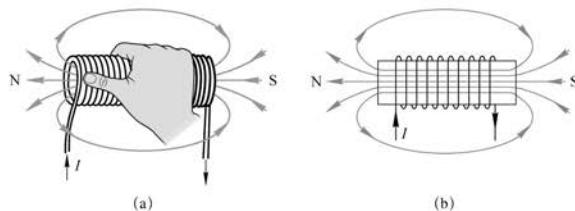


图 11-10 通电螺线管的磁感线

1.2~1.5 V 的直流电压,再用手轻敲穴板,可观察到透明穴板内的小铁棒有规律地排列成同心圆形状。将小磁针放置在透明穴板不同位置,可观察到小磁针指向为透明穴板内小铁棒构成曲线的切线方向,记录此时小磁针 N 极指向与通电直导线的电流方向,可以验证“右手螺旋定则”。

[3] 初中已经知道通电螺线管内部和外部的磁感线方向。根据叠加原理可将通电螺线管的磁场看成是由许多环形电流的磁场叠加而成,环形电流内部磁场方向可以用“右手螺旋定则”来判断。知道通电螺线管的磁场分布与条形磁体的磁场分布相似,其磁性来源于螺线管的电流,是电流磁效应的表现。

由此理解磁场的叠加性和等效思想。

[1] 经历通电长直导线周围磁场分布的演示实验,应用右手螺旋定则判断电流方向和磁感线方向之间的关系,知道通电长直导线周围非均匀磁场的磁感线方向和磁感线空间疏密分布情况。能够根据通电直导线产生磁场的空间分布,画出相应磁感线的俯视图和剖面图。在演示实验中重视观察现象和归纳处理获得的信息,基于证据得出实验结论并作出科学解释。

[2] 如图 3 所示,观察通电直导线周围磁场分布的演示实验时,可以取两块钻有许多空穴的矩形透明板拼接成一平面。拼接前将矩形线圈的一边紧挨拼接处的孔穴放置,且使线圈边与板面垂直。孔中置小铁棒的两块透明穴板均放在支架上。轻轻敲击透明穴板,使穴内的小铁棒处于无序状态。矩形线圈两端接

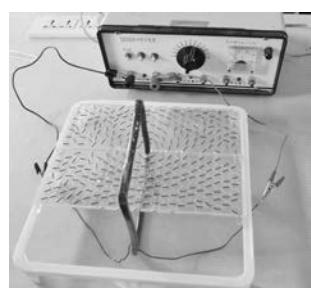


图 3

[1] 安培分子电流假说揭示了磁现象的本质。材料内每一个分子都存在一个圆形的分子电流，形如一个“小磁针”。分子电流由核外电子运动形成。当磁性材料被磁化时，这些小磁针的取向趋于一致，相邻分子电流的方向相反，相互抵消，因而在材料的边界上将形成一个大的磁化电流（图4）。磁化电流和传导电流均能产生磁场，都受外磁场作用，但磁化电流是约束电流，仅存在于介质界面上，不产生焦耳热。

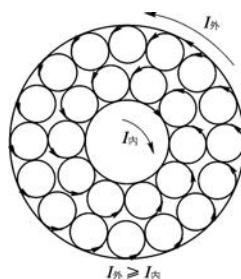


图 4

“假说”是根据已知的科学原理和科学事实，对未知现象的本质和规律所作的理论解释。“假说”是理论思维的一种形式，是科学研究的一种基本方法，也是建立和发展科学理论的一种途径。“假说”以一定的事实和科学理论为根据，因而具有科学性。但这些根据又不足以说明问题，须运用类比、演绎、想象等方法作出假定性解释，因而具有推测性。有的假说经过实践检验被完全证实后转化为科学理论；有的假说被部分证实，经修改、补充、发展后转化为科学理论，而错误的假说则经实践证伪而被否定。

[2] 通电导线在磁场中也会受到磁场力的作用。类比电场强度 $(E = \frac{F}{q})$ 的定义方法，类比试探电荷 (q) 引入另一个理想物理模型——电流元 $(I\Delta l)$ 。电流元的电流和尺寸必须充分小，使被检验的磁场不会因电流元的出现而有明显的变化。磁场中某处磁感应强度的大小和方向是磁场本身的性质，与其中是否

[1] 拓展视野

安培观察到通电螺线管的磁场和条形磁体的磁场很相似，提出了分子电流假说。

安培认为在分子等物质微粒的内部，存在着一种环形电流——分子电流，使每个分子成为微小的磁体，分子的两侧相当于两个磁极。通常情况下磁体分子的分子电流取向是杂乱无章的，如图 11-11 (a) 所示。它们产生的磁场互相抵消，对外不显磁性。当外界磁场作用后，分子电流的取向大致相同，如图 11-11 (b) 所示。在垂直于导体的平面上，相邻分子间的电流作用抵消，所有分子电流的总效果显示出宏观的磁性。

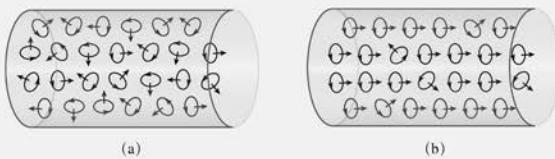


图 11-11 分子电流假说示意图

安培的分子电流假说与现代原子分子结构的概念相符合，分子电流对应核外电子绕核旋转形成的电流；除了能够解释软铁棒被磁化的现象以外，还能够解释磁体受到高温或猛烈敲击会失去磁性的现象，这是由于分子电流的取向由大致相同变成杂乱无章所致。

如何定量地描述磁场的强弱？

磁体在周围空间产生磁场，另一块磁体在此磁场中会受到磁场力的作用。通电导线在周围空间产生的磁场也会对其中的磁体产生磁场力的作用；反之，通电导线在磁场中也会受到磁场力的作用。

与定义电场强度类似，假定我们将长度 Δl 足够短的电流元 $I\Delta l$ 放在磁场中的任意点 P ，如果电流元受到的最大磁场力为 F ，则我们可以用 F 与 $I\Delta l$ 之比来定义 P 点描述磁场大小和方向的物理量——磁感应强度（magnetic induction）

[2]

$$B = \frac{F}{I\Delta l}$$

磁感应强度的单位是特斯拉，简称特，符号为 T。磁感应强度是矢量，在某一点磁感应强度的方向就是放在该点可以在任意方向自由转动的小磁针 N 极的指向，也是磁感线在该点的切线方向。磁场中某处磁感应强度的大小和方向是磁场本身的性质，与其中是否存在电流元及电流的大小无关。

实际情形中，磁场的强弱可以有很大的区别。表 11-1 列出了一些磁场的磁感应强度大小的近似值。

表 11-1 一些磁场的磁感应强度大小的近似值

地点	磁感应强度
中子星表面	10^8 T
钕磁体附近	10^6 T
小条形磁体附近	10^{-2} T
地球表面	10^{-5} T
星际空间	10^{-10} T
磁屏蔽室内	10^{-14} T

[1]

自主活动

将螺线管串接 10Ω 电阻和开关后接入 3 节 1.5 V 干电池组成的电源，如图 11-12 (a) 所示。

将磁传感器（收集所在位置磁场的磁感应强度数据）与计算机相连接。

螺线管放置在水平桌面上，调节磁传感器的高度，使探测管正好处在螺线管的轴线上，如图 11-12 (b) 所示。



图 11-12 用磁传感器研究通电螺线管内部的磁感应强度

合上开关，记录磁传感器探测管的前端插入螺线管内部的距离 d 与相应磁感应强度 B 的测量值，绘制 $B-d$ 曲线。

从实验结果不难发现，在通电螺线管中心轴线上靠近中央处的磁感应强度几乎不随位置变化。

磁场强弱和方向处处相同的磁场称为匀强磁场。匀强磁场的磁感线是一系列疏密间隔相同的、同方向的平行直线。通电密绕直螺线管内部的磁场，靠得很近的两个平行异名磁

存在电流元及其电流的大小无关。这种利用物理量之比定义磁感应强度 $(\mathbf{B} = \frac{\mathbf{F}}{I \Delta l})$ 的方法是研究“场”的性质的一个基本方法。课程标准的必修部分不要求定量讨论磁场力的大小，因此必修教材不使用“安培力”名称。教材还特别指出定义式中磁场力 (\mathbf{F}) 为电流元受到的最大磁场力，既避免了“安培力”这个名称，又隐含磁感应强度 (\mathbf{B}) 、电流元 $(I \Delta l)$ 和磁场力相互垂直的要求。

[1] 此处设置“自主活动”是为了经历从实验中获取数据，通过计算机进行数据处理，基于实验证据得出结论并提出匀强磁场的概念，体现了科学探究过程。

具体实验步骤和注意事项见资料链接。

极之间中央部分的磁场，或者较大的蹄形磁体两磁极间的磁场，都可以近似看作匀强磁场，如图 11-13 和图 11-14 所示分别为铁屑显示的部分区域近似存在匀强磁场的磁场分布和磁感线。

[1] 匀强磁场是一个理想化的模型，实际并不存在完全均匀的磁场。

[2] 电磁铁是利用电磁吸力来操纵机械的装置，主要由铁芯、衔铁、线圈和工作部件等组成。电磁铁磁性的有无可以用通、断电流控制，磁性的大小可以通过改变电阻控制电流大小或改变线圈的匝数控制，电磁铁的磁极可以通过改变电流的方向控制。

[1]

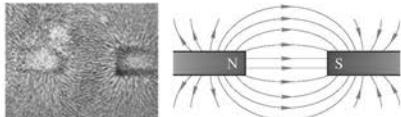


图 11-13 两个平行异名磁极间的磁场

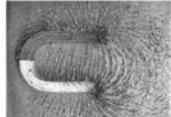


图 11-14 蹄形磁体两磁极间的磁场

磁体是科学的研究工具。借助强磁场有助于我们“看到”物质本性和科学规律。强磁场是半导体、超导、特殊功能材料和器件研究不可缺少的条件，同时强磁场下的核磁共振，又是生命科学、医学研究的必要工具。2017 年 9 月，中国科学院强磁场科学中心成功建成“稳态强磁场实验装置”。在此建设过程中，取得了一系列成就，成功研制了由内部水冷磁体和外部超导磁体组合而成的混合磁体，最大磁感应强度达 43 T。另外，该中心建成了国际首创水冷磁体扫描隧道显微镜系统、扫描隧道—磁力—原子力组合显微镜系统，以及强磁场下低温、超高压实验系统，使得我国稳态强磁场相关实验条件达到国际领先水平。

[2]

STSE

电磁铁是通电产生磁性的一种装置，其结构为在铁芯的外部缠绕通电线圈。工业上使用起重电磁铁吊运钢材、铁砂等导磁材料，或者用电磁铁作电磁机械手夹持钢铁等导磁材料。在实际生活中电磁铁是电磁继电器、电磁阀门、电子门锁、智能通道闸和电磁流量计等的核心部件之一。如图 11-15 所示的半自动式智能通道闸就是通过电磁铁来控制机芯的运转和停止的。

一般而言，电磁铁所产生的磁场与电流大小、线圈匝数及铁芯都有关。另外，为了使电磁铁断电后立即消磁，往往采用消磁较快的软铁或硅钢材料来制作电磁铁。这样的电磁铁在通电时有磁性，断电后立即失去磁性；磁性的强弱能用电流的大小来控制；磁极可以由电流的方向来控制。



图 11-15 电磁铁控

制的智能通道闸

问题与思考解读

问题与思考

- 在奥斯特电流磁效应的实验中，水平放置的通电直导线如果不恰好沿南北方向平行地放在小磁针的上方，能否发现小磁针的偏转？
- 指出图 11-16 中导线接通电流后小磁针的偏转情况。

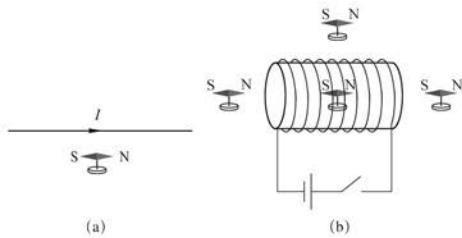


图 11-16

- 若电流元 $I\Delta l$ 在某空间 P 点受到的最大磁感应强度为 F ，该处的磁感应强度多大？如果电流元的电流增大， P 点处的磁感应强度是否相应增大？如果撤去电流元，该处的磁感应强度是否变化？
- 如图 11-17 所示， ab 、 cd 是两根在同一竖直平面内的长直导线，在两导线中央悬挂一个小磁针，小磁针与两根直导线静止在同一竖直平面内。当两导线中通以大小相等的电流时，小磁针 N 极垂直于纸面向外转动，则导线 ab 中电流方向如何？导线 cd 中电流方向如何？若导线 ab 中电流方向是 $b \rightarrow a$ ，如何才能使小磁针 N 极仍然垂直于纸面向外转动？
- 如图 11-18 所示， AB 是一根通电导线且绕了一个圈，处于纸面所在的平面上，导线下有一个小磁针，通电时 N 极指向纸外。试在纸面上画出导线附近 M 、 P 、 Q 处磁感应强度的方向（用“•”或“×”表示），简述判断的理由。

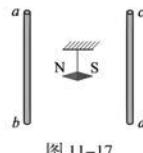


图 11-17

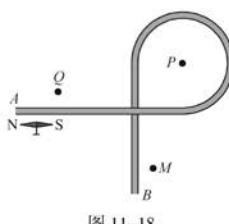


图 11-18

间分布特点，应用“右手螺旋定则”判断磁场的方向。

主要素养与水平：运动与相互作用(I); 模型建构(I); 科学推理(I)。

2. 参考解答：(a) 根据“右手螺旋定则”判断小磁针 N 极垂直于纸面向里偏转 (b) 根据“右手螺旋定则”可判断通电螺线管内部磁场方向由右指向左，外部磁场方向由左指向右。通电后沿螺线管轴线上的三个小磁针均会改变原来的指向，其 N 极均指向左侧；螺线管上部的小磁针 N 极指向不变

命题意图：根据通电直导线和通电螺线管周围磁场的空间分布特点，应用“右手螺旋定则”判断磁场的方向。

主要素养与水平：运动与相互作用(I); 模型建构(I); 科学推理(I)。

1. 参考解答：如果小磁针在磁场中不沿磁场方向，磁场力会使小磁针偏转，使其 S、N 极的连线沿磁感线方向。地球表面地磁场的方向是沿南北方向，小磁针在地磁场中平衡后的指向也是南北方向。通电直导线的电流方向与其产生的磁场方向满足右手螺旋定则，产生的磁场分布在一族以导线为轴的同心圆柱面上。如果通电导线沿东西方向放置在小磁针的上方时，通电导线产生的磁场对小磁针的作用力可能不会使小磁针偏转；当通电导线沿南北方向放置在小磁针的上方时，通电导线产生的磁场对小磁针的作用力才能使小磁针发生明显的偏转，就能直接观察到通电直导线周围产生了磁场

命题意图：根据通电直导线周围磁场的空间分布特点，应用“右手螺旋定则”判断磁场的方向。

3. 参考解答：根据磁感应强度的比值定义式 $B = \frac{F}{I\Delta l}$, 电流元的电流增大使电流元受到的最大磁场力也同比例增大, 它们的比反映该处的磁感应强度。因此电流元的电流变化不影响该处磁感应强度大小和方向, 即使撤去电流元, 该处的磁感应强度仍然不变

命题意图：理解比值定义物理量的意义。电流元受到的最大磁场所力意味着电流元、磁感应强度和磁场所力彼此相互垂直。

主要素养与水平：运动与相互作用(Ⅰ); 模型建构(Ⅱ); 科学推理(Ⅰ)。

4. 参考解答：(1) 导线 ab 中的电流方向为 $a \rightarrow b$, 导线 cd 中的电流方向为 $d \rightarrow c$ (2) 导线 cd 中的电流方向为 $d \rightarrow c$, 且导线 cd 中的电流大于导线 ab 中电流, 小磁针所在处的合磁场方向是垂直于纸面向外, 小磁针 N 极仍然垂直于纸面向外转动

命题意图：考查通电直导线周围磁场的分布特点和磁场的叠加性, 提升多角度分析问题的能力。

主要素养与水平：运动与相互作用(Ⅱ); 模型建构(Ⅰ); 科学推理(Ⅱ)。

5. 参考解答： M 点“ \times ”, P 点“ \times ”, Q 点“ \times ”。根据“右手螺旋定则”先由小磁针指向确定电流方向是 $B \rightarrow A$, 再由电流方向确定其他各点的磁场方向

命题意图：本题考查“右手螺旋定则”和理解磁场叠加性, 灵活应用物理规律解决具体问题, 提升科学思维水平。

主要素养与水平：运动与相互作用(Ⅰ); 模型建构(Ⅰ); 科学推理(Ⅱ)。

资料链接

建立稳态强磁场实验装置的意义

科学研究表明物质处在磁场中内部可能发生改变, 呈现出多样的物理、化学现象和效应。因而, 磁场一直是研究物理等诸多学科的一种重要的手段。在稳态强磁场的实验装置的内部, 产生强磁场的线圈内通过的电流达几十千安, 同时会产生大量的热, 所以还必须采用高纯水冷却系统, 以确保强磁场装置不会因高热受损。

SHMFF 是以极低温和超高压等极端实验条件为基础的大型科学实验设施, 为探索物质科学和生命科学的未知世界、发现自然规律、实现功能材料和医疗等技术变革提供极限稳态磁场, 被物理、材料、化学和生命科学等一系列研究及多学科交叉研究所需要。

中国科学院合肥物质科学研究院的稳态强磁场实验装置(SHMFF)于 2008 年 5 月 19 日获批开工, 2010 年 10 月 28 日转入“边建设, 边运行”模式, 2017 年 9 月 27 日通过国家验收。我国在稳态强磁场实验装置建设过程取得了一系列成就, 磁体技术和综合性能处于国际领先地位: 成功研制了创造世界纪录的系列水冷磁体、国际一流水平的混合磁体及其磁体支撑装备系统; 成功研制了国际唯一的高场扫描隧道显微系统, 国际独创的组合成像显微系统; 国际领先的强磁场、超高压、低温综合极端实验条件。在国际上实现了强磁场实验条件从跟跑到领跑的跨越, 使我国稳态强磁场科学实验条件跃升至世界一流水平, 中国科学院合肥物质科学研究院的稳态强磁场实验装置已成为国际五大稳态强磁场实验装置之一。

用磁传感器研究通电螺线管内部的磁感应强度

实验“用磁传感器研究通电螺线管内部的磁感应强度”是一个“自主活动”。按照教材要求应使螺线

管接通直流电,将磁传感器接入数据采集器,并与计算机相连接。之后的实验操作如下:

(1) 点击“专用软件”菜单上的“用磁传感器研究通电螺线管内部的磁感应强度”,显示屏将出现 B - d 坐标及数据表格等,如图 5 所示。其中 B 为通电螺线管内磁场的磁感应强度,单位为 mT; d 为磁传感器探测管插入线圈的长度,单位为 cm。

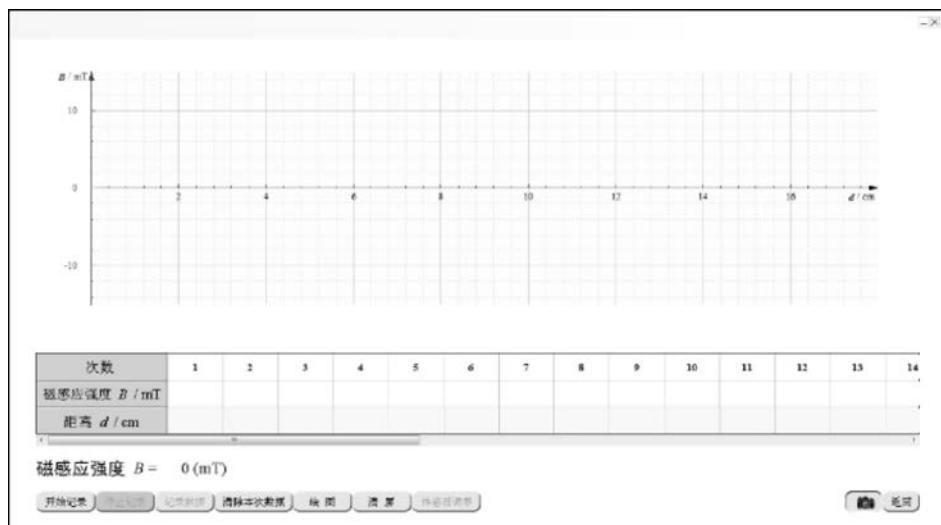


图 5

(2) 将磁传感器探测管的 0 刻度线与螺线管右端对齐,闭合开关,观察磁传感器的示数。若该示数为负值,就应该调换电源的正、负极,使磁传感器的示数为正值。

(3) 以每次 0.5 cm 的距离将磁传感器探测管沿螺线管中心轴线插入螺线管内,分别输入测量距离 d 的值,并点击“记录数据”按钮,记录对应的磁感应强度值,得到多组数据。

(4) 点击“绘图”按钮,绘出基于实验数据的螺线管中心轴线上的磁感应强度分布图(图 6)。

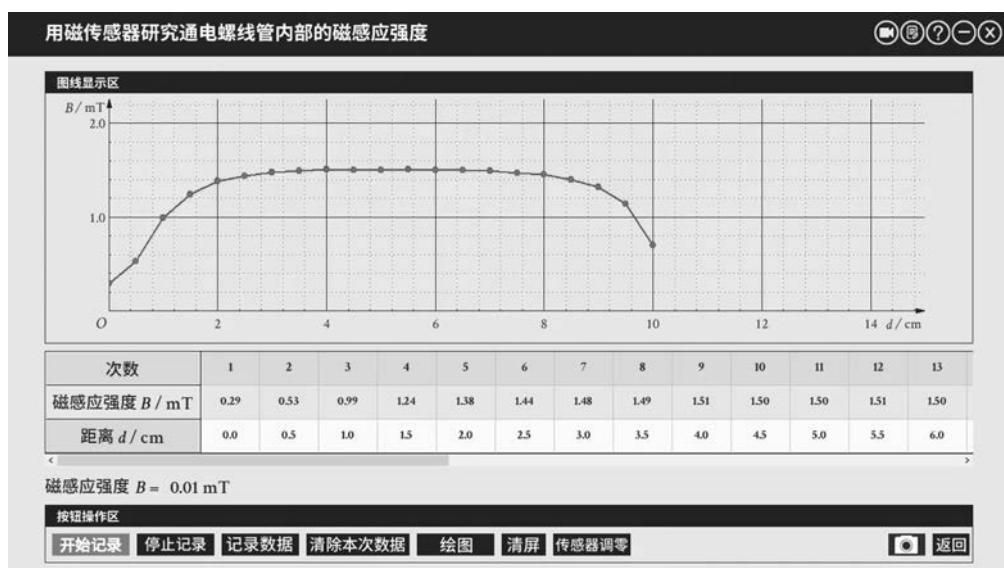


图 6

实验结果表明:在通电螺线管中心轴线上靠近中央位置处的磁感应强度的大小和方向几乎不变,由此可以引出匀强磁场的概念。

亥姆霍兹线圈

如图 7 所示,两个半径和匝数完全相同的线圈串接,并将两个线圈同轴排列,且两个线圈的间距等于线圈的半径,满足此条件的这对线圈称为亥姆霍兹线圈(Helmholtz coil)。通电后两个载流线圈中心连线的中点附近一定范围内存在近似的匀强磁场(图 8)。

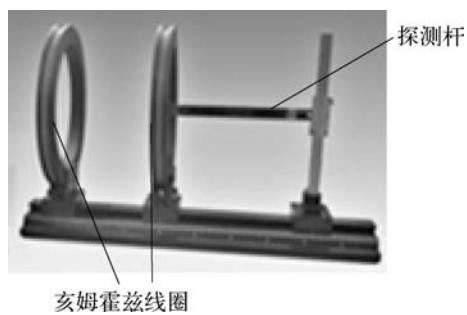


图 7

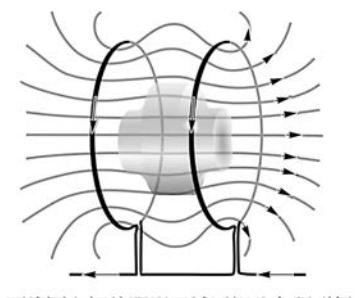


图 8

[1]

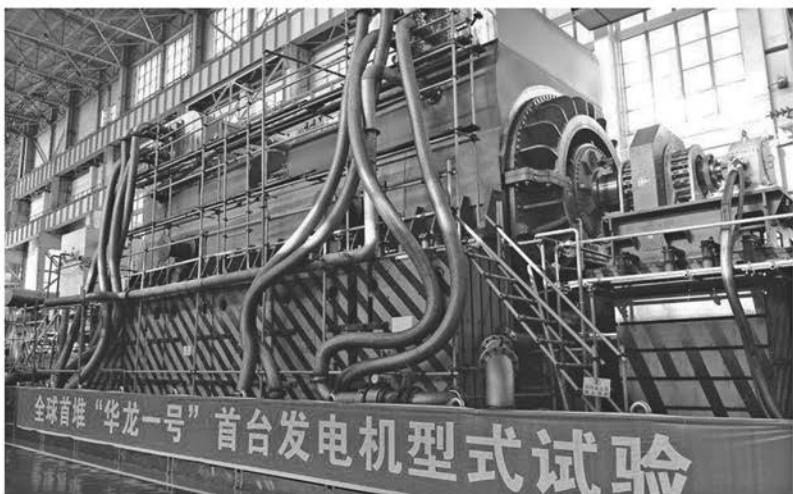


图 11-19 “华龙一号”核能发电机

第三节 磁通量 电磁感应现象

电力工业是一个国家经济发展的命脉，2019年，我国发电装机容量已达19亿千瓦。电力的获得依赖于煤炭、水力、风力、核燃料等能源的转换。正是由于物理学家发现了磁场与电场之间的联系，才使得其他形式的能转变成电能成为现实。磁场有何性质？它与电场有何联系呢？

为了进一步研究磁场的性质，以及磁场与电场之间存在的关系，物理学家引入了磁通量的概念。

② 什么是磁通量？

如图11-20所示，设在磁感应强度为B的匀强磁场中，有一个面积为S且与磁场方向垂直的平面，磁感应强度B与面积S的乘积叫做穿过这个平面的磁通量(magnetic flux)，简称磁通，用 Φ 表示，即

$$\Phi = BS$$

磁通量是标量，如果设定磁感应强度指向右方时穿过这一面积的磁通量为正，那么，磁感应强度指向左方时穿过这一面积的磁通量就为负。

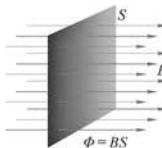


图 11-20 磁通量

量化、规模化发展。“型式试验”是为了验证产品能否满足技术规范的全部要求所进行的试验，“华龙一号”核电项目首台发电机2017年11月6日通过了“型式试验”，全部指标达到和优于设计要求，发电机组采用自主开发的电磁计算程序、新型通风冷却技术、绝缘系统以及静态励磁系统、整体式定子结构等。“华龙一号”的研发和建设使我国成为又一个具有独立自主研制三代核电技术的国家，跻身世界先进核电技术行列。

教材图11-19为福建省福清核电站“华龙一号”发电机，该发电机单机容量为1200MW，发电机效率达到99%。电磁感应是发电机的基本原理，也是本节的教学内容，此节首图与教材第110页首段相呼应。

本节编写思路

知道磁通量是一个重要的物理量。知道磁通量是标量，能举例说明磁通量正、负号的含义。知道磁感应强度的另一种定义。

理解磁通量、磁通量的变化量和磁通量的变化率是三个重要的物理概念，为以后学习楞次定律和法拉第电磁感应定律作铺垫。

引导学生通过实验了解电磁感应现象，了解产生感应电流的条件，体会科学实验在物理学发展中的重要作用。知道电磁感应现象的应用及其对现代社会的影响。

正文解读

[1] 1991年12月，我国自行设计建造的秦山300MW核电站并网成功。经过30多年的发展，我国核电事业实现了核电型谱化、批

[1] 磁通量是表征某一区域磁场情况的物理量,教材从特殊到一般,逐步提高对磁通量物理意义的理解。明确 $\Phi = BS$ 只适用于计算平面法线与磁感应强度平行的匀强磁场的磁通量,对学有余力的学生可以经推导给出“通过任意闭合曲面的磁通量等于零”的一般结论。

在非匀强磁场中,计算通过某一曲面的磁通量,可将该曲面分割成无限多个面积元,通过每个面积元的磁场近似视为匀强磁场。如图9所示,在曲面S上任取一面积元 $d\mathbf{S}$, $d\mathbf{S}$ 的法线方向 n 即为面积元矢量 $d\mathbf{S}$ 的方向, $d\mathbf{S}$ 与该处磁感应强度 B 之间的夹角设为 θ ,则通过面积元 $d\mathbf{S}$ 的磁通量为

$$d\Phi = \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = BdS \cos \theta$$

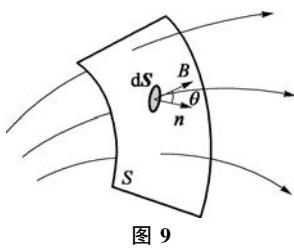


图 9

[2] 除了通过逻辑思维寻找事物的内在联系之外,直觉思维也是一种重要的创造性思维方式。法拉第在发现电磁感应定律之前,就从当时发现的“电流的磁效应”想到:“既然电流可以产生磁场,那么反过来,磁场能否产生电流呢?”正是他出自对称性思考的直觉思维,抓住了电与磁内在的本质联系,为发现电磁感应定律奠定了基础。

1824年阿拉果做了一个实验:将一个圆铜盘装在一根垂直轴上,使其可以自由转动,再在铜盘正上方悬吊一根磁针,所用的悬线质地柔软,使磁针能够自由转动。通过实验,阿拉果发现:当铜盘旋转时,磁针即跟着一起旋转,但是时间上稍有滞后,这个发现就是物理学史上著名的“阿拉果铜盘实验现象”。

在国际单位制中,磁通量的单位是韦伯,简称韦,符号是Wb;面积的单位是m²,则

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$$

[1] 由 $\Phi = BS$ 可得 $B = \frac{\Phi}{S}$ 。由此可知磁感应强度数值上等于穿过垂直于磁场方向单位面积的磁通量,因此也常把磁感应强度叫做磁通密度。上式虽然得自匀强磁场,同样适用于非匀强磁场的一般情况。由于我们约定磁场较强处磁感线较密集,磁场较弱处磁感线较稀疏,可以看出在给定的磁场中穿过某一面积的磁感线的条数与穿过该面积的磁通量成正比,即磁通量越大,穿过相同面积的磁感线越多。

拓展视野

如图11-21所示,面积为 S 的平面与匀强磁场方向不垂直。若平面的法线方向与磁场方向的夹角为 θ ,则该平面在垂直于磁场方向上的投影面积

$$S' = Scos\theta$$

由图可知,通过平面 S 的磁通量等于通过平面 S 在垂直于磁场方向上的投影区域 S' 的磁通量,即

$$\Phi = BS' = BScos\theta$$



图 11-21 平面与磁场方向不垂直

[2] 奥斯特发现电流磁效应的实验揭示了电现象与磁现象之间的联系。自然界的许多规律都具有对称性,对称性是人类认识自然界的一个重要法则。那么电和磁是否也具有对称性?英国物理学家法拉第(图11-22)就认为电与磁应该是一对和谐的对称现象。



图 11-22 法拉第(M. Faraday, 1791—1867)

既然电流可以产生磁场,反过来磁场能否产生电流呢?

经过近十年的艰苦探索,1831年,法拉第对此终于有所发现。如图11-23所示,在软铁环的A侧接好导线,把B侧的线圈接到灵敏电流计上,再把A侧的线圈接到电池组上;当A侧电路接通的瞬间,法拉第看到B侧灵敏电流计的指针立即明显偏转,这就表明B侧的线圈中出现了电流;当A侧电路断开时,他又看到指针向相反方向偏转。由于通电线圈产生磁场,法拉第把他发现的这种由磁产生电流的现象正式命名为电磁感应(electromagnetic induction)现象,产生的电流就叫做感应电流(induction current)。

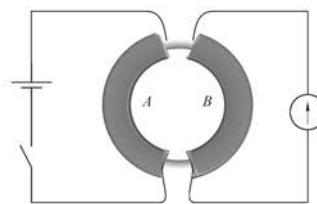


图 11-23 法拉第实验示意图

通过有限曲面的磁通量为

$$\Phi = \int d\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \int B \cos \theta dS$$

产生感应电流的条件是什么？

除了上述法拉第的实验外，还有什么办法可以产生感应电流？

[1]

自主活动

准备一根条形磁体，按照如图 11-24 所示先将灵敏电流计和线圈 B 连接组成闭合回路，观察灵敏电流计的指针是否偏转。灵敏电流计的指针发生偏转说明在线圈 B 内产生了感应电流。

按照表 11-2 中的实验操作，将观察到的结果填入表中。

在这一实验中，发现什么情况下能够产生感应电流？线圈 B 内什么物理量发生了变化？

按照图 11-25 将灵敏电流计和线圈 B 连接成闭合回路。线圈 A 通过滑动变阻器和开关连接到电源上，组成另一个闭合回路。将线圈 A 插在线圈 B 里面，再将软铁棒插在线圈 A 中。

按照表 11-3 中的实验操作，将观察的实验结果填入表格中。

在这一实验中，发现什么情况下能够产生感应电流？线圈 B 内什么物理量发生了变化？

表 11-2 实验现象记录表

磁体的动作	灵敏电流计指针是否偏转
插入线圈	
停在线圈中	
从线圈中抽出	

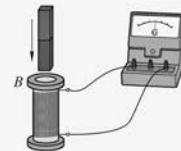


图 11-24 研究电磁感应现象实验

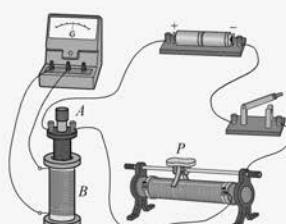


图 11-25 研究电磁感应现象实验

表 11-3 实验现象记录表

开关、滑动变阻器的状态	灵敏电流计指针是否偏转
开关闭合瞬间	
开关闭合时，滑动变阻器的滑片静止	
开关闭合时，滑动变阻器的滑片快速滑动	
开关断开瞬间	

发现的这种现象正式定名为“电磁感应”。

[1] 由于原线圈 A 的电阻较小，所以不宜将其直接接在直流电源的两端，应该在回路中接入滑动变阻器（其阻值只能由大调小），以免回路电流太大；通过调节滑动变阻器的滑动头可以改变回路中电流的大小，从而改变线圈 B 中磁场的强弱。

实验中建议用干电池组作为直流电源。

此处设置“自主活动”是为了通过图 11-24 到图 11-28 的一系列实验，使学生经历科学探究过程，理解产生感应电流的条件。在实验中经历对实验现象和实验结论不断提出质疑和批判，不断通过实验检验并修正实验结论，有利于提升科学思维和科学探究能力。

图 11-24 和图 11-25 的实验中线圈 B 内部的面积不变，实验只能得到“无论磁体还是通电线圈，只要能使线圈内的磁场强弱发生变化，就会在线圈 B 中产生感应电流”的结论。

法拉第开始关注阿拉果铜盘实验现象。通过对电磁感应现象的相关研究，法拉第发现了阿拉果实验现象的本质，认为磁体和导体之间的相对运动在导体内产生出了感应电流，而感应电流产生的磁力又与磁体的磁力互相作用，从而使得磁体转动。1831 年 10 月，法拉第利用圆铜盘和强磁体设计了一套新的能够产生稳定的感应电流的实验装置，这个装置就是最原始的发电机。在此基础上，法拉第认识到导体只要切割磁感线就会产生感应电流，从而促进了法拉第电磁感应定律的建立。

1831 年 11 月 24 日，法拉第在英国皇家学会宣读了他的论文《电学实验研究》第一辑中的四篇论文：《论电流的感应》《论从磁产生电》《论物质的一种新的电状态》和《论阿拉果的磁现象》。法拉第把产生感应电流的情况概括为五类：变化的电流、变化的磁场、运动的恒定电流、运动的磁铁和在磁场中运动的导体。法拉第把他发

[1] 提出“线圈内的磁场强弱发生变化时，是否一定产生感应电流”的质疑。通过图 11-28 的实验，用“大家谈”栏目进一步提出疑问。

图 11-28 中“特殊圆锥曲面”是恰好沿圆柱形磁体磁感线形状制作的。环绕在该圆锥曲面下端的导线两端与灵敏电流计（或微电流传感器）组成闭合回路。同时向左和向右两边拉导线，使导线组成的闭合回路沿圆锥曲面向上滑动。在此过程中闭合回路内磁场增强的同时穿过回路磁感线的“面积”却在相应减小。从而可以得出“只要通过闭合导体回路的磁通量不发生变化，闭合导体回路中就不会产生感应电流”的结论。

实验中特殊圆锥曲面的制作方法：将圆柱形磁体放在桌面上，在磁体任何一极的上面平行于桌面放一块约 A4 纸大小的薄玻璃板，将铁屑均匀撒在玻璃板上，轻轻敲击玻璃板，铁屑呈现有规律的排列；在玻璃板上用笔描绘磁体磁极附近细铁粉形成的曲线的形状（图 10），这就是特殊圆锥曲面的纵截面形状。根据该圆锥曲面的纵截面形状就能够制作该特殊的圆锥曲面体。

此处设置“大家谈”的目的是要求根据实验现象，明确线圈内磁场变强并不一定能够产生感应电流。在闭合线圈平面垂直于磁感线的情况下，当线圈内磁场变强的同时减小线圈的面积，或者线圈内磁场变弱的同时增大线圈的面积都可能不产生感应电流。只有当闭合线圈内的磁通量发生变化时才能产生感应电流。

穿过闭合导体回路的磁通量发生变化的情形：闭合导体回路所处磁场的磁感应强度 B 发生了变化；闭合导体回路所围磁场的面积 S 发生了变化；闭合导体回路所围磁场的面积与磁场方向的夹角 θ 发生了变化。但是当上述三种因素中的两个或三个因素同时发生了变化时，磁通量不一定会发生变化。

在如图 11-24 所示的实验中，条形磁体插入线圈，线圈中的磁场均由弱变强；条形磁体从线圈中抽出，线圈中的磁场均由强变弱，如图 11-26 所示。这两种情况下，线圈中都产生了感应电流。

在如图 11-25 所示的实验中，开关闭合或断开的瞬间，或者在开关闭合、滑动变阻器的滑动头快速滑动时，线圈 A 中电流都会迅速变化，产生的磁场也迅速变化。由于线圈 A 与线圈 B 套在一起，使线圈 B 中磁场的强弱也迅速变化，如图 11-27 所示，这时，线圈 B 中产生了感应电流。

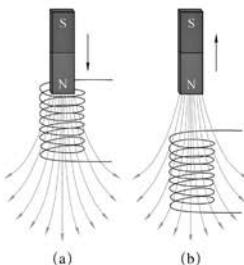


图 11-26 条形磁体插入或者抽出线圈，使线圈内的磁场强弱发生变化

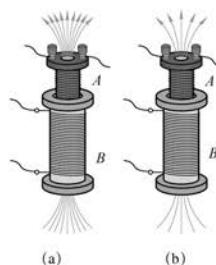


图 11-27 线圈 A 中电流的变化使线圈 B 中的磁场变化

从上述两个实验还可以发现：无论磁体还是通电线圈，只要能使线圈 B 内的磁场强弱变化，就会在线圈 B 中产生感应电流。

线圈内的磁场强弱发生变化时，是否一定产生感应电流？将一块条形磁体固定在一个特殊圆锥曲面的上端，该圆锥外曲面的形状恰好沿着条形磁体的磁感线（图 11-28）。将一根导线两端连接微电流传感器的输入端（或者灵敏电流计）；再将导线环绕在圆锥外曲面的下端。沿曲面拉动导线，使导线沿着圆锥外曲面向上滑动。该导线组成的闭合回路内的磁场变强，但是微电流传感器（或者灵敏电流计）却没有检测到感应电流。



图 11-28 沿着特殊圆锥外曲面向上滑动的闭合回路

大家谈

为什么线圈内的磁场变强时，却没有产生感应电流呢？

以上实验和其他事实都表明：只要通过闭合导体回路的磁通量发生变化，闭合导体回路中就会产生感应电流。

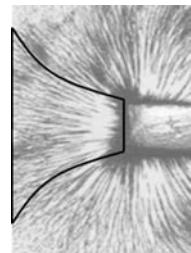


图 10

问题与思考解读

110 第十一章 电磁场与电磁波初步

新中国成立以来，我国电力工业在火力发电、水力发电、风力发电和核能发电等领域都取得了举世瞩目的成就。尤其在核能发电领域，我国自主研发的第三代核电“华龙一号”发电机（图 11-19）具有多项设计创新，其安全指标和技术性能都达到了国际三代核电技术的先进水平。但归根结底，无论是火力发电、水力发电、风力发电，还是核电站的发电，都是利用了电磁感应的基本原理。

问题与思考

1. 如图 11-29 所示，在匀强磁场中有一个矩形闭合线框，判断在下列情况下线框中是否产生感应电流，并说明理由。

- (1) 如图 (a) 所示，保持线框平面始终与磁感线垂直，线框在磁场中由上向下运动。
- (2) 如图 (b) 所示，保持线框平面始终与磁感线垂直，线框在磁场中由左向右运动。
- (3) 如图 (c) 所示，保持线框平面始终与磁感线平行，线框在磁场中由左向右运动。
- (4) 如图 (d) 所示，线框绕轴线 OO' 转动。

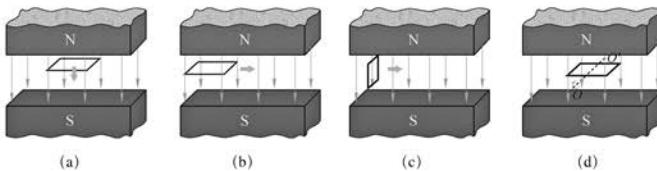


图 11-29

2. 如图 11-30 所示，围绕条形磁体中央有两个面积大小不同且处于同一平面内的线圈 a 和 b 。试比较通过的线圈 a 与线圈 b 的磁通量大小，并简述理由。

3. 甲、乙两同学关于磁通量有不同的看法。甲同学认为：根据磁通量的计算公式 $\Phi = BS$ ，在匀强磁场中，线圈的面积越大磁通量一定越大；乙同学认为：在非匀强磁场中，线圈的面积越大磁通量越小。试对甲、乙两位同学的看法作出评价。

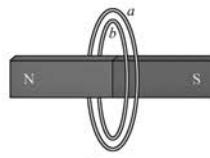


图 11-30

由 N 极指向 S 极（向右）。如果向左通过线圈的磁通量为正，则向右通过线圈的磁通量为负，线圈的合磁通量等于两者的代数和。如图 11-30 所示，虽然通过两线圈正向磁通量均相等，但在同一平面内面积越大的线圈通过线圈负向的磁通量越大，合磁通量就越小。线圈 a 比线圈 b 面积大，所以通过线圈 a 的磁通量小于通过线圈 b 的磁通量。

命题意图：理解正、负磁通量的意义。

主要素养与水平：模型建构（Ⅱ）；科学推理（Ⅱ）。

3. 参考解答：两位同学的看法都是错误的。磁通量的计算公式 $\Phi = BS$ 只适用于匀强磁场，而且线圈平面一定要垂直于磁场方向。甲同学没有考虑线圈平面与磁场方向之间的夹角，当线圈的平面与磁场方向平行时，无论线圈面积如何变化，磁通量始终为零，所以甲同学的看法是错的。乙同学将套在条形磁

1. 参考解答：（1）和（2）线框按照图(a)和图(b)所示方向运动，通过线框的磁通量始终不变，线框中没有感应电流；（3）线框的磁通量始终为零，线框中也没有感应电流；（4）线框的磁通量变化，线框中有感应电流。

命题意图：能够正确判断匀强磁场中通过线圈的磁通量是否变化，知道磁通量的变化是闭合线圈产生感应电流的条件。

主要素养与水平：运动与相互作用（Ⅰ）；模型建构（Ⅰ）；科学推理（Ⅰ）。

2. 参考解答：磁感线是闭合曲线，磁体内部通过线圈的磁感线条数等于外部所有磁感线条数的总和。在线圈所在平面上条形磁体内部的磁感线方向由 S 极指向 N 极（向左），条形磁体外部的磁感线方向

体中部线圈的面积大小与磁通量关系的结论，不恰当地扩大到全部非均匀磁场的情景。例如，若平面线圈与通电长直导线共面，且在导线一侧，当线圈面积向外扩展时，磁通量增大。所以，乙同学的看法也是错的

命题意图：理解磁通量正、负的意义，知道典型的非均匀磁场中磁场分布特点。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

4. 参考解答：(1) 条形磁体两极附近磁场最强。当圆环 a 由无穷远右移到靠近条形磁体的 N 极，通过圆环 a 的磁通量变大 (2) 条形磁体内部中央位置向左的磁场最强。当圆环 a 由条形磁体的 N 极通过磁体移到 S 极的过程中，通过圆环 a 的磁通量先变大后变小 (3) 条形磁体外部中央位置与磁体中轴线的距离越远，磁场越弱。当圆环 b 从条形磁体的中央位置垂直下落，距离磁体越远，磁场越弱，穿过圆环 b 的磁通量越小

(4) 条形磁体 S 极右侧附近越靠近磁极的磁场越强，在条形磁体 S 极右侧中轴线上的磁场水平向左，中轴线上方的磁场方向斜向左下方，在条形磁体中轴线下方的磁场方向斜向左上方。当环面水平的圆环 c 从位置 1 移到位置 2 过程中，向下穿过圆环面的磁通量减小；当圆环 c 从位置 2 移到位置 3 过程中，向上穿过圆环面磁通量增大 (5) 条形磁体中央位置处的磁场方向水平向右。圆环 c 从条形磁体右上方沿着水平方向移到磁体中央位置过程中，穿过圆环环面向下的磁通量逐渐减小；圆环 c 从磁体中央位置移到磁体左边过程中，穿过圆环环面向上的磁通量逐渐增大。因此圆环 c 从条形磁体右上方沿水平方向移到磁体左边过程中通过圆环 c 向下的磁通量先变小，通过圆环 c 向上的磁通量后变大

命题意图：本题考查条形磁体的空间磁场分布、磁通量以及磁通量变化。从第 1 题判断匀强磁场中

4. 如图 11-31 所示，空间固定一条形磁体，有三个金属环 a 、 b 、 c ，则：

(1) 若圆环 a 由无穷远向右移到靠近条形磁体的 N 极，通过圆环 a 的磁通量如何变化？

(2) 若圆环 a 由条形磁体的 N 极通过条形磁体移到 S 极，通过圆环 a 的磁通量如何变化？

(3) 若垂直于地面的圆环 b 从条形磁体的中央位置竖直下落，通过圆环 b 的磁通量如何变化？

(4) 若在条形磁体附近，环面平行于地面的圆环 c 从条形磁体右边的位置 1 下降到位置 3，通过圆环 c 的磁通量如何变化？

(5) 若在条形磁体附近，圆环 c 从条形磁体右边的位置 1，沿着水平方向移到磁体左边，通过圆环 c 的磁通量如何变化？

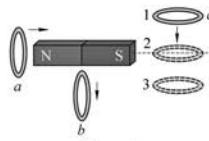


图 11-31

5. 如图 11-32 所示，在无限长的通电直导线附近放置一矩形线圈，与导线处在同一平面内，且线圈中的上下两条边与导线平行。则当线圈做下列三种不同方向的平行移动时，线圈内能否产生感应电流？

(1) 线圈平行移动的方向与导线中电流的方向一致。

(2) 线圈平行移动的方向与导线中电流的方向垂直，并保持线圈与导线在同一平面内。

(3) 线圈平行移动的方向垂直于纸面向上。

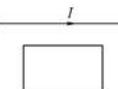


图 11-32

6. 如图 11-33 所示是研究电磁感应现象实验所需的器材。试用笔画线代替导线，将带有铁芯的线圈 A 、电源、滑动变阻器和开关连接成回路，将灵敏电流计和线圈 B 连接成另一个回路。简述在实验中采用不同的元器件改变线圈 B 回路的磁通量，使回路产生感应电流的四种不同方式。

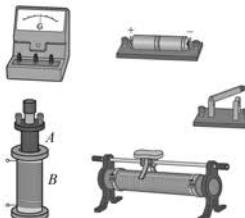


图 11-33

穿过线圈磁通量的变化,过渡到本题判断非匀强磁场中穿过线圈磁通量的变化,逐渐提升科学思维水平。

主要素养与水平: 模型建构(II); 科学推理(II); 科学论证(II)。

5. 参考解答: 无限长通电直导线周围的磁场是环绕直导线轴线对称分布的非匀强磁场,距离导线越近磁场越强。(1) 线圈沿导线方向平行移动过程中,通过线圈的磁通量不发生变化,线圈中不产生感应电流;(2) 在同一平面内,线圈平行移动的方向与电流方向垂直,离直导线越远,磁场越弱,穿过线圈的磁通量减小,线圈中产生感应电流;(3) 线圈平行移动的方向无论垂直于纸面向里移动,还是垂直于纸面向外移动,通过线圈的磁通量均减少,线圈中均产生感应电流

命题意图: 第4题中判断线圈在条形磁体附近的非匀强磁场中运动磁通量的变化,本题是线圈在通电直导线附近的非匀强磁场中运动,而且还考查磁通量变化是引起电磁感应现象的条件,体现科学思维水平的逐渐提高。

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

6. 参考解答: 如图11所示

- (1) 线圈A插入线圈B后闭合开关(或通电后断开开关)
- (2) 线圈A插入线圈B且闭合开关,滑动变阻器快速向左(或向右)滑动
- (3) 线圈A插入线圈B且闭合开关,铁芯插入线圈A(或铁芯从线圈A中拔出)
- (4) 闭合开关,线圈A插入线圈B(或线圈A从线圈B中拔出)

命题意图: 本题考查探究电磁感应现象的实验原理和实验操作步骤的合理设计,并能够依据证据解释实验现象,理解只有在线圈A通电的情况下,才有可能使穿过线圈B内磁通量发生变化,只有线圈B内磁通量发生变化才能使灵敏电流计的指针发生偏转,灵敏电流计的指针发生偏转说明线圈B中产生了感应电流。

主要素养与水平: 模型建构(II); 科学推理(II); 证据(I); 解释(I)。

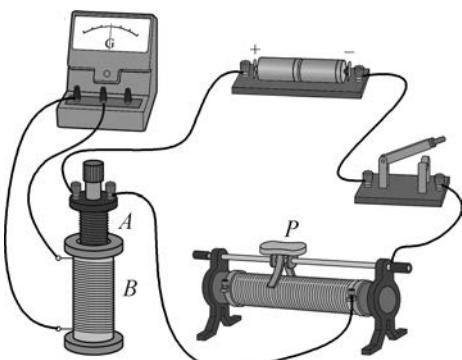


图 11

本节编写思路

麦克斯韦电磁场理论的建立开辟了许多新的研究方向。电磁波的研究带来了通信、广播和电视事业的发展，物质电磁性质的研究推动了材料科学的发展；带电粒子和电磁场相互作用的研究导致等离子体物理、磁流体力学等分支学科的形成与发展。所有这些对现代科学的发展、技术的进步以及物质文化的繁荣昌盛都起了重要的作用。

正文解读

[1] 北斗卫星导航系统是我国着眼于国家安全和经济社会发展需要、自主建设运行的全球卫星导航系统。北斗卫星导航系统已在交通运输、农林渔业、水文监测、气象测报、通信授时、电力调度、救灾减灾、公共安全等领域得到广泛应用。基于北斗系统的导航服务已被电子商务、移动智能终端制造、辅助定位服务等厂商采用，广泛进入中国大众消费、共享经济和民生领域，深刻改变着人们的生产生活方式。

北斗卫星导航系统采用三种不同轨道卫星组成混合“星座”，可提供定位导航授时、全球短报文通信、区域短报文通信、国际搜救、星基增强（电磁波信号）、地基增强（电磁波信号）、精密单点定位共7类服务。全球范围定位精度优于10 m、测速精度优于0.2 m/s、授时精度优于20 ns。

[2] 麦克斯韦电磁场理论使人们认识到除了实物粒子外，还有电磁场这种完全不同于实物粒子的另一类物质。电磁场具有能量、动量等基本的物理性质。电磁场可以脱离物质单独存在，并且能够与物质交换能量和动量。麦克斯韦电磁场理论揭示了电磁场运动变化的规律。从麦克斯韦方程组可以推导出电磁波在真空中以光速传播，并以此提出光是一种电磁波的假说，随着物理学的发展，光的电磁假说获得了科学证明。

[1]

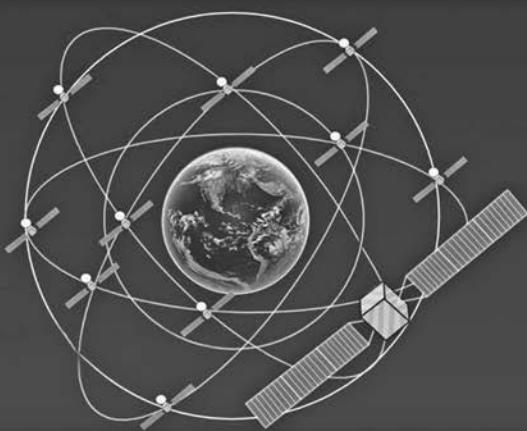


图 11-34 中国北斗卫星导航系统示意图

第四节 电磁场与电磁波

现代社会离不开电子通信技术，它的稳定持续发展离不开电磁场与电磁波的应用。北斗卫星导航系统（图 11-34）是我国自行研制的全球卫星导航系统，可在全球范围内全天候、全天时提供导航、定位和授时服务，并具有短报文（传送 120 个汉字的短信息）通信能力。北斗卫星导航系统是利用电磁波传递信息的。

② 什么是电磁场？什么是电磁波？

19世纪60年代，英国物理学家麦克斯韦（图 11-35）在总结前人对电和磁研究的基础上，将电磁场理论用简洁、对称、完美的数学形式表示出来。经后人整理和改写，确立了经典电磁学主要基础的麦克斯韦方程组，建立了完整的电磁场理论。这个理论不仅说明了当时已知的电磁现象，而且预言了电磁波的存在。

[2] 麦克斯韦指出：如果在空间某处有交替变化的电场，就会在空间引起交替变化的磁场；这个交替变化的电场和磁场又会在较远的空间引起新的交替变化的电场和磁场……交替变



图 11-35 麦克斯韦

化的电场和磁场相互联系，形成一个不可分离的统一的场，这就是**电磁场 (electromagnetic field)**。电磁场能独立于场源存在，反映了电磁场作为物质存在的一种形式。电磁场并不局限于空间某个区域，而要由近及远向周围空间传播开去。电磁场这样由近及远地传播，就形成**电磁波 (electromagnetic wave)**。

电磁波与我们的生活联系紧密，用仪器可以检测到电磁波信号。如图 11-36 所示，高灵敏度环形线圈两端与微电流传感器相连，再接入计算机，可以检测多种电磁波信号源（如电动机、电动剃须刀等）。如果采集到电磁波，则在显示器上显示出得到的电磁波信号。



图 11-36 用微电流传感器检测电磁波

电磁波主要有哪些应用？

电磁波的频率范围极为宽广，各个频段都有专门的名称，如无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线等。电磁波在日常生活中有广泛的应用，我们的生活离不开电磁波。

1. 卫星通信

利用人造地球卫星在地面站之间进行通信的系统，称为**卫星通信系统**，人造卫星相当于离地面很高的中继站。卫星通信（图 11-37）可以在两个或多个地面站之间进行。卫星通信的特点是：通信范围大，只要在卫星发射的电磁波所覆盖的范围内，任何两点之间都可进行通信。

如果一位在中国的用户要与南极洲的科考人员打电话，这个过程就是先通过手机把声音转换为数字信号发射到基站，通过基站把用户电话线路与地面站连通，地面站把电话信号发射到卫星，卫星接到这个信号后经过信号放大再转发到南极洲的地面站，地面站把电话信号取出来，送到科考人员的手机上，手机把数字信号转换成声音。无线电广播、电视节目转播的原理与电话传输相似。



图 11-37 卫星通信

[2] 2. 微波加热

微波炉是利用电磁波中的微波加热食物的，使用微波炉加热食物快速高效，且能保证食物的营养，尤其是蛋白质和维生素不被破坏。

3. 遥控和自动控制

电磁波中特定波段的红外线常用于遥控和自动控制。例如，家用电器的遥控器大多是

子一头带正电，氧原子一头带负电，这样的分子叫作“极性分子”。在通常的水里，水分子是杂乱无章地排列的。

微波是波长在 1 mm 到 1 m 之间的电磁波，其相应频率在 300 GHz 至 300 MHz 之间。放在微波炉中的食物含有水分，极性水分子在微波高频交变电场作用下剧烈振动，彼此摩擦从而可以将食物迅速加热。

[1] 电吹风机中的电动机工作时会发出微弱的电磁辐射。线圈与微电流传感器组成闭合回路，通过计算机显示感应电流的大小。手握冷风挡的电吹风机，将其置于环形线圈中间，开启电源，调整电吹风机的位置使计算机屏幕上出现的波形最大。

保持电吹风机的位置不变，增大电吹风机与环形线圈的距离，计算机屏幕上出现的波形幅度减小了，说明距离波源越远处接收到的电磁波越弱。

用铝箔包住电吹风机或将电吹风机放入铁盒中，闭合开关后微电流传感器几乎检测不到电磁波信号，说明铝箔或铁盒能够屏蔽电磁波。

[2] 2. 微波炉原理

水分子是由一个氧原子和两个氢原子构成的，氢原子中的电子倾向于靠近氧原子。从整体来看，水分子的氢原

[1] 无线射频识别

(Radio Frequency Identification, RFID) 是一种非接触式的自动识别技术。

RFID 系统主要由读写器、应答器(也称为标签)和后台计算机组成,其中,读写器实现对标签的数据读写和存储。标签进入读写器发射的射频场后,将天线获得的感应电流经升压电路后作为工作电源,同时将带信息的感应电流通过输入电路转变为数字信号,数字信号送入逻辑控制电路处理,需要回复的信息则从标签内部的存储器发出,经逻辑控制电路处理,最后通过天线发回读写器。

RFID 公交刷卡系统由读写器、非接触式公交卡(标签)和信息管理中心计算机组成。读写器通过发射线圈,发射交变磁场给予公交卡能量,通过磁场的断、续编码写入数据,并通过线圈感应公交卡发出的磁场,阅读公交卡发来的数据;公交卡通过交变磁场获得能量,通过检验磁场的断、续获得读写器发来的数据,并按设定的模式编码调制,向读写器发出数据。读写器把这些信息传输给信息管理中心处理后,信息管理中心给出交易成功与否的信息。

标签的特殊之处在于免接触,故不怕脏污,其晶片编码唯一,很难复制,安全性高且寿命长。RFID 的应用非常广泛,目前典型的应用有动物晶片、汽车晶片防盗器、门禁管制、停车场管制、生产线自动化和物料管理等。RFID 技术可识别高速运动物体并可同时识别多个标签,有外接电源的长距射频产品识别距离可达几十米,多用于交通领域,如自动收费或识别车辆身份等。

[2] X-CT 基于人体不同组织对 X 射线的吸收以及吸收规律不同,利用 X 射线束对人体某部位一定厚度的层面进行扫描。由灵敏度极高的探测器接收透过该层面的 X 射线,经光电转换及模数转换后的信

利用发射红外线进行遥控的。公共场所的感应式水龙头则是靠人手遮挡反射红外线实现自动控制。

[1] 4. 无线射频识别技术

射频识别是一种非接触式的自动识别技术,可以通过无线电信号自动识别特定目标,并读写相关数据,而无需识别系统与特定目标之间建立机械或光学的接触。图 11-38 所示是公交卡的内部结构,当公交卡接近刷卡机时,卡内的线圈就会产生感应电流,实现卡内芯片与外部数据库的数据传输。

[2] 5. 医疗设备

电磁波中的紫外线可以用于医用消毒,形成无菌空间;X 射线透射照相和 X-CT 扫描用于疾病检查。X 射线和 γ 射线常用于治疗疾病。许多种理疗设备也是靠电磁波对人体的作用治疗疾病。如图 11-39 所示是由我国原陆军总医院研制成功的“稀土材料小型 16 层移动 X-CT”,各项质量指标显著优于国际同类 CT 扫描仪。

6. 雷达

雷达是利用电磁波测定物体位置的设备。电磁波如果遇到尺寸明显大于波长的障碍物就要发生反射,雷达向一定的方向发射周期性的不连续的电磁波(叫做电磁脉冲)。发射出去的电磁波遇到障碍物反射,反射波可以在脉冲周期时间间隔内被天线接收。测出从发射到接收电磁脉冲之间的时间,就可以得到障碍物的距离,再根据发射电磁波的方向,便能确定障碍物的位置。

我国自主设计建设的 500 m 口径球面射电望远镜(FAST)与雷达接收天线类似,遥远天体投射来的微弱电磁波信号被精确镜面反射后会聚到公共焦点,接收机将这些信号加工、转化成可供记录、显示的形式。FAST 主导国际甚长基线干涉测量网,能获得天体超精细结构。FAST 具有空间飞行器的测控与通信能力,将深空通信能力延伸至太阳系外缘行星,将卫星数据接收能力提高 100 倍。FAST 建成启用以来,已经在脉冲星探测方面取得众多成果,未来在暗物质和暗能量的探测及地外文明搜寻等方面将会起到重要作用。

一方面人们利用电磁波为人类服务,借助电磁波工作、生活,另一方面还有更多的电磁波是在无意中产生的。例如:家用电器中的电风扇、吹风机、榨汁机等,这些电器工作时都会产生电磁波。在利用电磁波提高人们的生活质量的同时,电磁波也可能对人们产生一定的危害,我们需要加以防范,趋利避害。

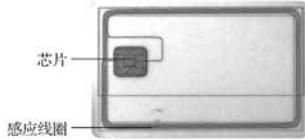


图 11-38 公交卡的内部结构



图 11-39 稀土材料小型 16 层移动 X-CT

电磁波和光有何关系?

麦克斯韦从理论上得出电磁波在真空中的传播速度等于光在真空中的传播速度，认为光是一种电磁波，并在此基础上提出了光的电磁说。

光的本性是复杂的。19世纪末，科学家发现了光电效应现象，但无法用当时流行的光的波动理论解释。爱因斯坦提出了光子说，成功地解释了光电效应现象。爱因斯坦指出空间传播的光能量是不连续的，而是一份一份的，每一份叫做一个光子，这是人们对微观粒子本质认识的一个飞跃。

科学家发现光既具有波动特性，又具有粒子特性。光既能像波一样传播，有时又表现出粒子的特征，因此我们称光具有“波粒二象性”。

麦克斯韦的电磁场理论在物理学上具有重要意义；这一理论推进了第二次工业革命，为人类利用电能提供了科学依据，使人类进入了电气化时代。现在，在电磁场理论和近代物理发展的基础上，人类又迈向信息化时代。

问题④思考

- 2018年，中国成功发射了嫦娥四号月球探测器的中继卫星“鹊桥”。随后的几天里，“鹊桥”号中继星飞行到月球背面上空的地月引力平衡点L2点（图11-40）附近运行，为嫦娥四号月球探测器的发射以及在月球背面着陆提供了通畅的地月中继通信支持。L2点位于月球的背后，到地球的距离超过 4×10^5 km，比月球到地球的距离还要远 6.5×10^4 km。如果从月球背面发射的无线电信号通过“鹊桥”号中继星转发，试问信号到地球所需的时间约为多少？（不计“鹊桥”号中继星转发信号的时间）

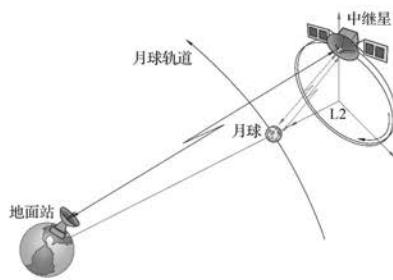


图11-40

号输入计算机，计算机对数据进行处理后，就可重建出人体被检查部位的断面或立体图像，从而发现体内检查部位的细小病变。

问题与思考解读

1. 参考解答：

$$\begin{aligned} t &= \frac{s_{\text{月星}} + s_{\text{星地}}}{c} \\ &= \frac{6.5 \times 10^7 + 4 \times 10^8}{3 \times 10^8} \text{ s} \\ &= 1.55 \text{ s} \end{aligned}$$

命题意图：考查真空中电磁波的传播速度大小。

主要素养与水平：

模型建构（I）；科学推理（I）；科学本质（I）。

2. 参考解答：收

音机能接收电磁波，经放大处理后从扬声器输出声音信号。将收音机调节到 MW 波段无电台播音信号的频段，即接收频率与任一电台的频率错开；再将音量调到最大。用导线的一端连接电池的一极，并用导线的另一端在电池的另一极不停地快速摩擦，就能产生不断变化的瞬间短路电流，不但可以观察到接触点微小的电火花，还能从收音机的扬声器中听到杂音，说明收音机接收到不规则的电磁波信号，也就证明了电磁波的存在。

命题意图：尝试用身边简单的器件设计实验，证明电磁波能够在不相互接触的物体之间传播。

主要素养与水平：

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

3. 参考解答：(1) 太阳与地球之间的距离约为

$$s = ct = 3.00 \times 10^8 \times 500 \text{ m} = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$$

(2) 电磁波是一种能够在真空中传播的特殊物质，太阳光能够传到地球，说明光是一种电磁波。

命题意图：通过实际现象引导学生运用物理观念、逻辑推理解决问题和归纳得出结论。

主要素养与水平：运动与相互作用（I）；科学推理（I）。

4. 参考解答：实验证明：金属材质对电磁波有一定的屏蔽作用。材质不同屏蔽作用的效果也不同，铁质材料优于铝质材料，较厚的材料优于较薄的材料。实验证的方法为：将手机 A 放入薄壁铁盒中，用另一只手机 B 拨打手机 A，观察手机 A 能否接通；换一个厚壁铁盒重复上述实验，观察金属盒的壁厚。

2. 为了证实磁场的存在，常将小磁针放到磁体附近，可以观察到小磁针受到磁场力的作用其 N 极所指的方向发生了偏转。试设计一种简单可行的办法，以证实电磁波的存在。
3. 太阳光传到地球约需要 500 s，太阳与地球之间的距离约为多少？在地球和太阳之间的大部分区域都处于真空状态，太阳光能够传到地球说明了什么？
4. 手机和收音机都依靠电磁波传递信号。尝试将手机或收音机放入不同材质的容器中，例如：铝膜袋、塑料袋或者金属饭盒中，观察手机或收音机是否还能正常工作。观察的结果与容器的材质和器壁厚度有没有关系？如何用实验证？
5. 举例简述电磁波载有能量，也能载有信息。

对电磁波的屏蔽效果。然后再换用相同壁厚的铝盒和铁盒重复上述实验,观察不同金属材质对电磁波的屏蔽效果。将手机换成正常放音的收音机,也可以观察电磁波的屏蔽效果

命题意图: 实际体验金属容器屏蔽电磁波的效果,实验中还可以检验哪些材料不能够屏蔽电磁波。

主要素养与水平: 运动与相互作用(I);问题(I);证据(I);解释(I)。

5. 参考解答: 微波炉利用电磁波中的微波加热食物,红外线有着明显的热辐射作用;电磁波中可见光的能量可引起照相底片上感光物质的化学反应;太阳能电池能够将光能转化成电能,广泛运用在人造地球卫星、灯塔、无人气象站等;手机通信和卫星电视广播都说明电磁波能够传播能量和信息

命题意图: 知道生活和生产实际中广泛使用的电磁波能够传递能量和信息。

主要素养与水平: 运动与相互作用(I);科学论证(I)。

小结

· 基本概念和基本规律

磁场：磁体内外和电流周围存在的物质。

磁感应强度：描述磁场大小和方向的物理量。磁感应强度的方向是放在该点可以在任意方向自由转动的小磁针N极的指向。磁感应强度的单位是特斯拉，简称特，符号为T。

磁通量：在给定的磁场中，磁通量为磁感应强度与垂直于磁场面积的乘积。磁通量的单位是韦伯，简称韦，符号是Wb。

电磁感应现象：通过闭合导体回路的磁通量发生变化从而产生感应电流的现象。

电磁场：交替变化的电场和磁场相互联系，形成一个不可分离的统一的电磁场。电磁场是物质存在的一种形式。

电磁波：在空间传播的交替变化的电磁场。光是一种电磁波，同时具有波动性和粒子性。

· 基本方法

通过建立磁感线、电流元等物理模型，感受抽象、简化和建模的方法。

通过产生感应电流的探究实验，认识实验数据获取、分析和处理的基本方法。

· 知识结构图



复习与巩固解读

118 第十一章 电磁场与电磁波初步

复习与巩固

1. 导线中分别通以如图 11-41 所示方向的电流，当小磁针静止时，N 极分别指向什么方向？

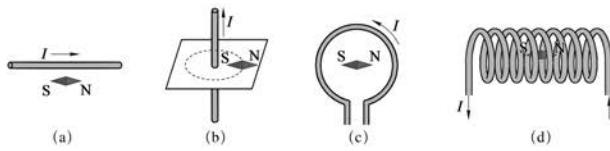


图 11-41

2. 闭合导线环处在匀强磁场中，导线环的环面与磁场垂直，导线环面积为 0.5 m^2 ，通过环的磁通量为 0.2 Wb ，则该磁场的磁感应强度为多少？当环面转至与磁场方向平行时，通过环的磁通量为多少？在闭合导线环旋转的过程中该处匀强磁场的磁感应强度是否改变？

3. 如图 11-42 所示为“研究电磁感应现象”的实验装置。

(1) 在图示状态下，线圈 A 插入线圈 B 后，将滑动变阻器滑动头向左快速滑动，线圈 B 的磁通量如何变化？这时灵敏电流计的指针会不会偏转？

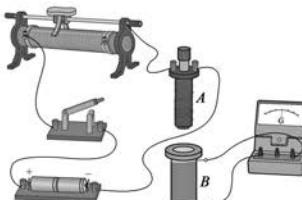


图 11-42

(2) 线圈 A 插入线圈 B 后，闭合开关的瞬间和断开开关瞬间线圈 B 的磁通量如何变化？这时灵敏电流计的指针是否偏转？

(3) 根据上述实验过程，说明线圈 B 中产生感应电流的条件。

4. 如图 11-43 所示是三根平行通电直导线的截面图，它们的电流 I 大小相同，方向垂直纸面向外。如果 $AB = BC = CA$ ， D 点、 E 点和 F 点分别是 AB 、 BC 和 CA 的中点，则 D 点、 E 点和 F 点的磁感应强度的方向如何？磁感应强度的大小是否相等？

5. 如图 11-44 所示，在同一平面内有四条彼此绝缘的通电直导线围成一个正方形， O 点为正方形的中心，四根导线中的电流方向如图所示，电流 $I_1 < I_2 < I_3 < I_4$ 。试

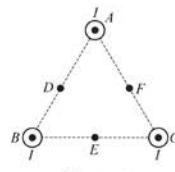


图 11-43

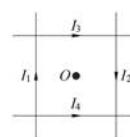


图 11-44

关未闭合，通过线圈 B 的磁通量始终为零，灵敏电流计的指针没有偏转。开关断开瞬间通过线圈 B 的磁通量增大，开关断开瞬间通过线圈 B 的磁通量减小，灵敏电流计的指针都会偏转。这个实验说明：线圈 B 与灵敏电流计组成闭合回路，当线圈 B 中的磁场强弱发生变化，引起该回路的磁通量发生变化，该回路中产生感应电流，灵敏电流计的指针发生偏转。

命题意图：考查“研究电磁感应现象”的实验中可以用多种方法产生感应电流，其本质是改变通过线圈的磁通量。

主要素养与水平：运动与相互作用(Ⅰ)；模型建构(Ⅰ)；科学推理(Ⅱ)。

4. 参考解答：根据右手螺旋定则可以判断长直导线的磁感应强度方向，与长直导线距离相同点的磁感应强度大小相等。 D 点与 A 、 B 两通电直导线距离相等，产生的磁感应强度大小相等，方向相反，合磁

1. 参考解答：根据“右手螺旋定则”可以判断：图(a)中小磁针静止时 N 极垂直于纸面向里；图(b)中俯视看小磁针 N 极逆时针转动 90° ；图(c)中小磁针静止时 N 极垂直于纸面向外；图(d)小磁针 N 极指向向左。

命题意图：考查通电直导线、圆环和螺线管周围的磁场分布。

主要素养与水平：运动与相互作用(Ⅰ)；模型建构(Ⅰ)；科学推理(Ⅰ)。

2. 参考解答：设 $B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0.2}{0.5} \text{ T} = 0.4 \text{ T}$

0 该处的磁感应强度没有改变。

命题意图：考查匀强磁场中磁通量的计算和磁感应强度的概念。

主要素养与水平：模型建构(Ⅰ)；科学推理(Ⅱ)。

3. 参考解答：(1) 开

(2) 开关闭合瞬间通过线圈 B 的磁通量增大，开关断开瞬间通过线圈 B 的磁通量减小，灵敏电流计的指针都会偏转。(3) 这个实验说明：

线圈 B 与灵敏电流计组成闭合回路，当线圈 B 中的磁场强弱发生变化，引起该回路的磁通量发生变化，该回路中产生感应电流，灵敏电流计的指针发生偏转。

感应强度为零,所以D点磁感应强度等效于由通电导线C产生,其方向沿DB指向B;E点与B、C两通电直导线距离相等,产生的磁感应强度大小相等,方向相反,合磁感应强度为零,所以E点磁感应强度等效于由通电导线A产生,E点磁感应强度的方向沿EC指向C;F点与A、C两通电直导线距离相等,产生的磁感应强度大小相等,方向相反,合磁感应强度为零,所以F点磁感应强度等效于由通电导线B产生,F点磁感应强度的方向沿FA指向A。D点、E点和F点的磁感应强度的大小相等。

命题意图:考查通电长直导线产生磁场的特点,理解磁感应强度的方向性和叠加性。

主要素养与水平:
模型建构(I);科学推理(II);科学论证(II)。

5. 参考解答:

根据“右手螺旋定则”, I_1 、 I_2 和 I_3 在O点产生的磁感应强度均垂直于纸面向里, I_4 在O点产生的磁感应强度垂直于纸面向外,且距离相同的位置导线中电流越大,产生的磁感应强度也越大。 I_1 和 I_2 在O点的磁感应强度是垂直于纸面向里。由于 $I_3 < I_4$, I_3 和 I_4 在O点的磁感应强度是垂直于纸面向外。切断电流 I_4 ,其余三根导线在O点的磁感应强度的方向都是垂直于纸面向里,所以O点磁感应强度垂直纸面向里。切断电流 I_1 ,其余三根导线在O点的磁感应强度方向不能确定:如果 $I_4 > I_2 + I_3$,则在O点的磁感应强度垂直于纸面向外;如果 $I_4 < I_2 + I_3$,则在O点的磁感应强度垂直于纸面向里。

命题意图:考查通电长直导线产生磁场的特点,理解磁感应强度的方向性和叠加性。

主要素养与水平:模型建构(I);科学推理(II);科学论证(II)。

6. 参考解答:设通电导线产生的磁感应强度为 B_0 ,匀强磁场的磁感应强度为 B ,则a、b、c、d四点

判断 I_1 和 I_2 在O点产生的磁感应强度沿什么方向? I_3 和 I_4 在O点的磁感应强度沿什么方向?如果切断电流 I_4 ,O点的磁感应强度沿什么方向?如果切断电流 I_1 ,O点的磁感应强度沿什么方向?简述判断的理由。

6. 如图11-45所示,在一方向竖直向上的匀强磁场中,沿水平方向放置一长直通电导线,导线中的电流方向垂直纸面向里。 a 、 b 、 c 、 d 是以通电导线为圆心的竖直平面内同一圆周上的四个点,则在这四个点中,哪两点的磁感应强度大小相同?哪个点的磁感应强度最大?哪个点的磁感应强度最小?

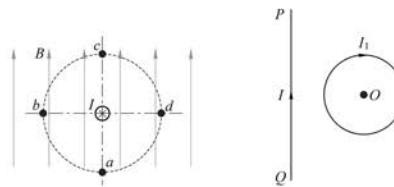


图 11-45

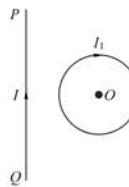


图 11-46

7. 如图11-46所示,圆环与通电长直导线PQ导线位于同一平面内。已知圆环中心O点的磁感应强度为 B ,通电圆环在O点产生的磁感应强度为 B_1 ,则:

- (1) 通电直导线在O点产生的磁感应强度 B_2 为多大?
- (2) 改变长直导线的电流,使通电直导线在O点产生的磁感应强度增为 $2B_2$;改变通电圆环的电流使通电圆环在O点产生的磁感应强度相应减小为 $\frac{B_1}{2}$,则O点的磁感应强度变为多大?

8. 如图11-47所示,小线圈放在通有恒定电流的大线圈上,小线圈恰好一半面积在大线圈内,小线圈和大线圈互相对绝缘。规定垂直纸面向外的磁通量为正,判断通过小线圈的磁通量正负,简述判断的理由。

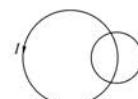


图 11-47

9. 如图11-48所示,直三棱柱放在空间直角坐标系内, $ab=50\text{ cm}$, $ad=20\text{ cm}$, $abcd$ 平面垂直 Oxy 平面,与 Ox 、 Oy 的夹角分别为 $\alpha=37^\circ$, $\beta=53^\circ$ ($\sin 37^\circ \approx 0.6$, $\cos 37^\circ \approx 0.8$),匀强磁场沿 Ox 方向,磁感应强度为 0.20 T 。通过 $Ocbe$ 面的磁通量为多大?通过 $adOe$ 面的磁通量为多大?

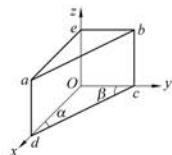


图 11-48

10. 在磁感应强度为 B 的匀强磁场中, 用一根长为 l 的导线绕制一个线圈。若使通过该线圈的磁通量最大, 线圈应为什么形状且如何放置? 求出磁通量的这个最大值。

11. 如图 11-49 所示, 四根完全相同的长直导线互相平行, 它们的截面处于一个正方形 $abcd$ 的四个顶点 a 、 b 、 c 、 d 处, 导线 a 、 b 、 c 、 d 的电流方向垂直于纸面向里, 导线 c 的电流方向垂直于纸面向外, a 、 c 连线和 b 、 d 连线的交点为 O 。测得通电导线 a 在 O 处产生磁场的磁感应强度大小为 B , 则通电导线 a 和 c 在 O 处产生磁场的磁感应强度大小如何? 通电导线 b 和 d 在 O 处产生磁场的磁感应强度大小如何?

*12. 自行车发电机的结构如图 11-50 所示, 一块永久磁体置于绕有线圈的 U 形导磁硅钢片的内部。当自行车骑行时车轮的边缘通过摩擦轮带动磁体转动。解释该装置为何能对车灯供电。

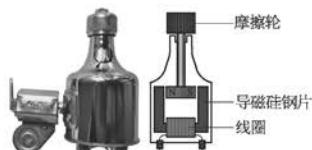


图 11-50

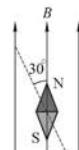


图 11-51

*13. 某科考队进入矿区后发现水平放置的指南针原来指向正北的 N 极逆时针转过 30° , 如图 11-51 中的虚线所示。设该处地磁场的磁感应强度水平分量为 B , 则该矿区产生的磁感应强度在水平面内的最小值为多少?

*14. 如图 11-52 所示, 在磁感应强度为 B 且范围足够大的匀强磁场中有一个面积为 S 的线框。线框平面与匀强磁场方向成 θ 角, 则:

- (1) 通过该平面的磁通量为多少?
- (2) 若将线框从水平位置 I 顺时针转到竖直位置 II, 则磁通量变化量为多少?
- (3) 若将线框从水平位置 I 转到水平位置 III, 顺时针旋转和逆时针旋转的磁通量变化量各为多少?

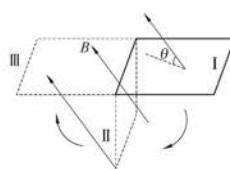


图 11-52

$$B_2 = B - B_1 \quad (2) \text{ 当 } B'_2 = 2B_2, B'_1 = \frac{B_1}{2} \text{ 时, } B' = B'_1 + B'_2 = \frac{B_1}{2} + 2B_2 = \frac{B_1}{2} + 2(B - B_1) = 2B - 1.5B_1$$

命题意图: 考查通电长直导线产生的磁场和匀强磁场的叠加。

主要素养与水平: 模型建构(I); 科学推理(III)。

8. 参考解答: 通电大线圈内部的磁场方向垂直于纸面向外, 外部的磁场方向垂直于纸面向里, 且大线圈内部的磁场比外部的磁场强。如果将垂直于纸面向外的磁通量设为正值, 则垂直于纸面向里的磁通量为负值。小线圈在大线圈内部和外部的面积相同, 所以通过小线圈的磁通量为正值。

命题意图: 考查通电圆环产生的磁场特点以及磁通量的概念。

主要素养与水平: 模型建构(II); 科学推理(II)。

的磁感应强度为 \mathbf{B}_0 和 \mathbf{B} 的矢量和。由图 12 可知, b 点的磁感应强度最大为 $B_0 + B$, a 、 c 两点的磁感应强度大小相等均为 $\sqrt{B_0^2 + B^2}$, d 点的磁感应强度最小为 $B_0 - B$

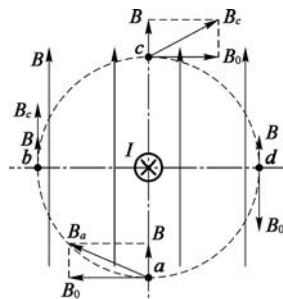


图 12

命题意图: 考查通电长直导线产生的磁场和匀强磁场的叠加。

主要素养与水平:

模型建构(II); 科学推理(II); 科学论证(II)。

7. 参考解答: (1) 圆环中心 O 点的磁感应强度为通电圆环和通电直导线两者在 O 点产生磁感应强度的矢量和, 即 $\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2$, 所以通电直导线在 O 点产生的磁感应强度为

9. 参考解答: $l_{oe} = l_{oc} = l_{ab} \cos \beta = 0.50 \times 0.6 \text{ m} = 0.30 \text{ m}$

通过 $Ocbe$ 面的磁通量为 $\Phi_1 = BS_1 = Bl_{eb}l_{bc} = 0.20 \times 0.30 \times 0.20 \text{ Wb} = 1.2 \times 10^{-2} \text{ Wb}$, 由于 $adOe$ 面与磁感应强度 B 平行, 所以通过 $adOe$ 面的磁通量为 $\Phi_2 = 0$

命题意图: 考查匀强磁场中计算磁通量的方法。

主要素养与水平: 模型建构(II); 科学推理(II)。

10. 参考解答: 长为 l 的导线组成一个圆线圈的面积最大, $l = 2\pi R$, 圆线圈的面积

$$S = \pi R^2 = \pi \left(\frac{l}{2\pi}\right)^2 = \frac{l^2}{4\pi}$$

线圈平面垂直于磁场方向放置, 最大磁通量为 $\Phi_{\max} = BS = \frac{Bl^2}{4\pi}$

命题意图: 考查匀强磁场中周长恒定的导线的最大磁通量。

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

11. 参考解答: 根据右手螺旋定则通电导线 a 在 O 处产生磁场的磁感应强度大小为 B , 方向由 O 指向 b , 通电导线 c 在 O 处产生磁场的磁感应强度大小也为 B , 方向也由 O 指向 b 。通电导线 a 和 c 在 O 处磁感应强度是两者产生磁感应强度的矢量和, 所以 O 处磁感应强度的大小为 $2B$

通电导线 b 在 O 处产生磁场的磁感应强度大小为 B , 方向由 O 指向 c , 通电导线 d 在 O 处产生磁场的磁感应强度大小也为 B , 但方向由 O 指向 a , 两者方向相反。 O 处磁感应强度是两者产生磁感应强度的矢量和, 所以通电导线 b 和 d 在 O 处产生的磁感应强度为 0

命题意图: 考查通电长直导线周围磁场的大小和方向分布特点以及磁场的叠加性。

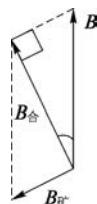
主要素养与水平: 模型建构(II); 科学推理(II)。

12. 参考解答: 永久磁体随着驱动轮转动, 变化的磁场通过导磁矽钢片, 使通过线圈的磁通量发生变化, 因而在闭合线圈内产生感应电流对车灯供电

命题意图: 考查用电磁感应的原理简单解释实际的应用情景。

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

13. 参考解答: 在矿区水平放置的指南针的指向为该处合磁场 $B_{\text{合}}$ 的方向, 该处地磁场的磁感应强度水平分量为定值 B , 如图 13 所示。当 $B_{\text{矿}} = B \sin 30^\circ = \frac{B}{2}$, 方向西偏南 30° 为矿区产生的磁感应强度在水平面内的最小值



命题意图: 考查磁感应强度的叠加性和最小值计算方法。

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

14. 参考解答: (1) 将磁感应强度 B 沿线框平面和垂直于线框平面两个方向分解, 分别为 $B_{\parallel} = B \cos \theta$ 和 $B_{\perp} = B \sin \theta$, 根据磁通量的定义 $\Phi = BS \sin \theta$

$$(2) \Delta\Phi = |\Phi_2 - \Phi_1| = |-BS \cos \theta - BS \sin \theta| = BS(\sin \theta + \cos \theta)$$

(3) $\Delta\Phi = |\Phi_2 - \Phi_1| = |-BS \sin \theta - BS \cos \theta| = 2BS \sin \theta$, 顺时针旋转和逆时针旋转磁通量变化量的大小均为 $2BS \sin \theta$

命题意图: 考查磁感应强度的矢量分解、磁通量的概念以及磁通量变化量的计算。

主要素养与水平: 模型建构(II); 科学推理(III)。

第三部分 本章练习部分解读

第一节 磁现象 磁感线

(一) 参考解答

1. 磁场 疏密程度 切线方向 N

2. 见下表

说 法	判断	理由(可以举例或推理)
存在铁屑的地方才有磁场	错	铁屑在磁场中被磁化,两粒铁屑之间以及磁铁周围空间仍然存在磁场
蹄形磁体内部不存在磁场	错	蹄形磁体内部存在磁场,磁感线形成封闭曲线
铁屑显示的磁感线是真实存在的	错	铁屑在磁场中被磁化后类似于一个个小磁针沿着磁场方向排列,小磁针的N极指向磁场方向,铁屑能模拟磁感线的分布,但磁感线并非真实存在的实体线
用铁屑的分布模拟了磁感线的分布	对	铁屑沿着磁场方向排列模拟了磁感线的分布形状

3. 见下表

说 法	判断	理由(可以举例或推理)
地理南极与地磁场南极重合	错	地理南极在地磁场的北极附近但不重合,地理南极方向与地磁场北极方向之间存在磁偏角
地磁场的磁感线不是闭合的曲线	错	磁感线一定是闭合的曲线
在赤道上小磁针的S极在静止时指向地理的南方	对	静止时赤道上小磁针的N极指向地理的北方,则S极指向地理的南方
地球表面任意位置的地磁场方向都与地面平行	错	例如极地附近磁场近似垂直于地面

4. 不相同 弱

两条磁感线之间的区域仍然有磁场,磁感线的切线方向表示该点的磁场方向,M点和P点的切线方向不同,所以M点的磁场方向与P点的磁场方向不相同。磁感线的疏密程度表示磁场的强弱,M点附近磁感线较稀疏,所以M点的磁场比P点的磁场弱

5. S 航海

6. 如图14所示

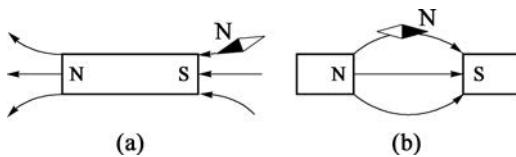


图 14

7. S N

8. 如图 15 所示

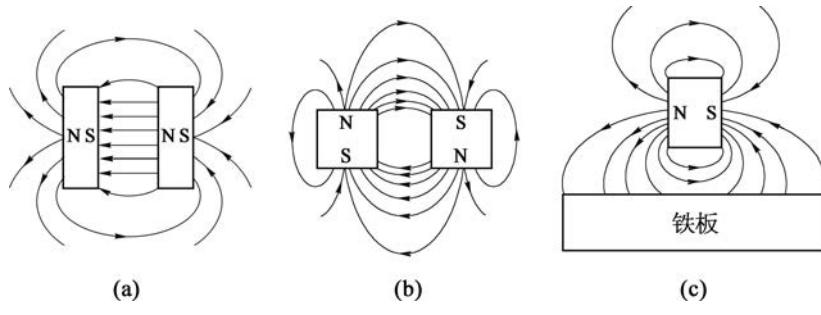


图 15

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	模型建构	科学推理	科学态度
1	I	I		
2	I	I		
3	I	I		
4	I		II	
5	I	I		I
6	I	I	I	
7	I	I	I	
8	I	I	II	

第二节 电流的磁场 磁感应强度

(一) 参考解答

1. 大拇指指向 四指环绕方向 弯曲四指指向 中心轴线上磁场
2. z 负 z 正
3. 从东向西
4. 相反 正
5. a 为正极, b 为负极。通电线圈内、外的磁场方向相反, 线圈外小磁针 N 极指向下方, 说明线圈内的磁场方向指向上方, 根据“右手螺旋定则”判断电流的方向从 a 端流进线圈, 所以 a 端为电源的正极
6. 右 左
7. 磁场强弱和方向 磁场力 电流 磁场中导线的长度 特(T)

$$8. I = \frac{F}{Bl} = \frac{1.0 \times 10^{-3}}{0.40 \times 0.10} A = 2.5 \times 10^{-2} A, B = \frac{F}{Il} = \frac{F'}{I'l}, \text{ 所以}$$

$$F' = \frac{I'}{I} F = \frac{0.010}{2.5 \times 10^{-2}} \times 1.0 \times 10^{-3} N = 4 \times 10^{-4} N$$

或

$$F' = BlI = 0.40 \times 0.010 \times 0.10 N = 4.0 \times 10^{-4} N$$

$$9. B = \frac{F}{Il} = \frac{2 \times 10^{-3}}{0.05 \times 0.20} T = 0.2 T$$

$$F' = BI'l = 0.2 \times 0.1 \times 0.20 N = 4 \times 10^{-3} N = 2F, \text{ 所以, } \frac{F'}{F} = 2$$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	模型建构	科学推理	科学论证
1		I	I	
2		I	II	
3	I	I	II	
4	I	I	I	I
5	I	I	I	I
6	I	I	II	
7		I	I	
8		I	II	
9		I	II	

第三节 磁通量 电磁感应现象

(一) 参考解答

1. 根据磁感应强度的定义式、磁通量定义式和基本单位可导出答案: $\text{kg}/(\text{A} \cdot \text{s}^2)$ $\text{kg} \cdot \text{m}^2/(\text{A} \cdot \text{s}^2)$

$$2. B = \frac{\Phi}{a^2} = \frac{3 \times 10^{-5}}{(2 \times 10^{-2})^2} T = 7.5 \times 10^{-2} T$$

$$\Phi' = Ba'^2 = 7.5 \times 10^{-2} \times (1 \times 10^{-2})^2 \text{ Wb} = 7.5 \times 10^{-6} \text{ Wb}$$

3. 减小 不变 减小 减小

$$4. \pi r^2 B \quad \pi B(R^2 - r^2) \quad \pi B |R^2 - 2r^2|$$

5. c a

6. 先变小后变大 $-2BS$

7. 从位置 1 下落到位置 3 的过程中能产生感应电流。螺线管位置 1 和位置 3 的磁感应强度比位置 2 的磁感应强度小, 闭合铜环保持水平下落过程中通过铜环的磁通量先增大后减小, 磁通量的变化将产生感应电流

8. 无 有 线圈 A 当线圈平面水平放置, 地磁场通过线圈的磁通量几乎为零。绕南北方向的轴线转动时地磁场通过线圈的磁通量不变, 线圈中无感应电流。线圈平面水平放置, 绕东西方向的轴线转动过程中, 当线圈平面垂直于地面时通过线圈的磁通量最大, 当线圈平面平行于地面时通过线圈的磁通量最小, 转动过程中通过线圈的磁通量变化, 线圈中有感应电流。如图 16 所示, 地球的南北方向与地球附近地磁场的方向几乎相

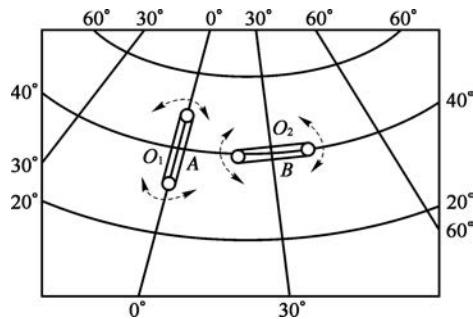


图 16

同,当线圈平面竖直放置且平行于南北方向绕竖直轴 O_1 转动线圈,虽然在图示位置通过线圈的磁通量为零,但是地磁场通过线圈的磁通量变化较明显;当线圈平面竖直放置且平行于东西方向绕竖直轴 O_2 转动线圈,虽然在图示位置通过线圈的磁通量最大,但是地磁场通过线圈的磁通量变化却并不明显,所以显示感应电流比较明显的是线圈 A

9. 穿过闭合回路的磁通量发生变化,一定产生感应电流。将圆环捏成“8”字形,导线围成的面积的變化量

$$\Delta S = S_0 - S_8 = \pi R^2 - 2\pi \left(\frac{R}{2}\right)^2 > 0$$

即线圈面积 S 减小。因为磁通量 $\Phi = BS$, Φ 减小,所以闭合回路一定产生感应电流

10. $\Phi_1 = BS_1 = B \times \left(l \times \frac{l}{2}\right) = \frac{1}{2} Bl^2$

俯视图如图 17 所示

线框绕 ab 边为轴转动 $\theta < \frac{\pi}{3}$ 过程中通过线框的磁通量不变,转动 $\frac{\pi}{2} >$

$\theta > \frac{\pi}{3}$ 期间通过线框的磁通量逐渐变小,所以线框绕 ab 边为轴在转过 90° 的过

程中,线框中有感应电流的时间为

$$\Delta t = \frac{\Delta\theta}{\omega} = \frac{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3}}{2\pi} s = \frac{1}{12} s$$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	模型建构	科学推理
1		I	I
2		I	II
3		II	II
4		II	II
5		II	II
6		II	II
7	I	I	II
8		II	II
9		I	II
10		II	III

第四节 电磁场与电磁波

(一) 参考解答

1. 3×10^8 属于

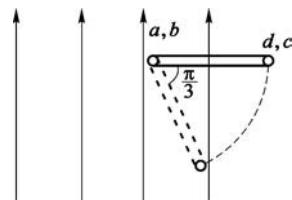


图 17

2. 光信号 电磁波
3. 光子 不连续 光子 光电效应
4. 交替变化的电场产生交替变化的磁场,交替变化的磁场产生交替变化的电场,这种交替变化的电场和磁场由近及远地传播 光速
5. 红外线 120

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	模型建构	科学推理	科学态度	社会责任
1	I	I	I		
2	I	I		I	I
3	I	I			
4	I	I			
5	I	I	II		I

第四部分 本章实验与活动部分解读

1. 自主活动 研究通电螺线管内部的磁感应强度

为什么螺线管要串联一个阻值为 10Ω 左右的电阻后再接通电源?

参考解答: 实验所用螺线管的额定电流一般为 0.6 A ,过高的电流将使螺线管发热损坏。3节干电池的电动势为 4.5 V ,串联一个阻值为 10Ω 左右的电阻再与螺线管连接,就能保证通过螺线管的电流小于额定电流。

命题意图: 电学实验中的仪器需要在一定的条件下才能正常使用。除了关注铭牌标注的信息以外,还要仔细阅读使用说明书,提高科学探究的能力。

2. 自主活动 产生感应电流的条件

将通电线圈A替代条形磁体做实验有何优点?

参考解答: 干电池组与带有铁芯的线圈A、滑动变阻器和开关串联。当通电线圈A处在线圈B中时,除了可以将通电线圈A插入或拔出线圈B以外,还可以有更多种方法改变线圈B中的磁通量产生电磁感应现象,使灵敏电流计的指针发生偏转,这样做实验能够从多角度探究产生电磁感应现象的原因。

命题意图: 关注实验探究的过程,基于实验过程提出问题,并能够及时评估和反思。

第十二章 能源与可持续发展

第一部分 整 章 分 析

学习目标

1. 了解利用水能、风能、太阳能和核能的方式；初步认识核裂变和核聚变；知道能量在转化过程中总量保持不变，能量转化具有方向性；了解能源及其分类；逐步增强能量观念。
2. 通过关注生产生活中的能源利用及其对环境的影响，增强环境保护的意识和自觉行为。
3. 认识能源开发与利用对人类生活和社会发展的影响，关注科学·技术·社会·环境的关系，培养分析和解决实际问题的能力与社会责任感。

编写意图

课程标准中对本章的“内容要求”为：

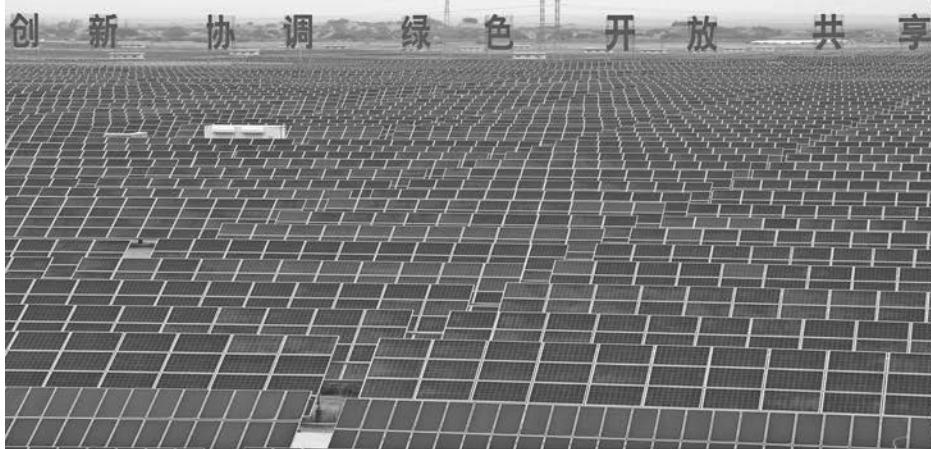
- 3.4.1 了解利用水能、风能、太阳能和核能的方式。初步了解核裂变与核聚变。
- 3.4.2 知道不同形式的能量可互相转化，在转化过程中能量总量保持不变，能量转化是有方向性的。
- 3.4.3 了解可再生能源和不可再生能源的分类，认识能源的过度开发和利用对环境的影响。
- 3.4.4 认识环境污染的危害，了解科学·技术·社会·环境协调发展的重要性，具有环境保护的意识和行为。

本章是从不同的视角对能源分类，进一步了解关于分类的知识和新能源的开发与利用。通过对如何预防污染、可采取哪些方式节能减排及对清洁能源和太阳能的利用等课题的研究，认识科学对技术的推动作用，体会科技进步对人类生活和社会发展的影响。

能源与可持续发展等内容的学习有助于领会能量转化与守恒的能量观念，认识能源的过度开发和利用对环境的影响，明确保护环境、节约能源、促进可持续发展的重要意义。

完成本章内容的学习，共需要 5 课时。其中，第一节 1 课时，第二节 1 课时，第三节 1 课时，学期活动 2 课时。

第二部分 本章教材解读



图示为格尔木光伏电站，位于青海省西部的柴达木盆地，于2011年建成并网发电。电站总规划装机容量达7210 MW。太阳能光伏发电是利用太阳能电池吸收太阳光，将光能直接转变成电能输出的一种发电方式。世界各国对环境的保护和对再生清洁能源有着巨大需求，还有哪些可开发利用的新能源呢？

第十二章 能源与可持续发展

· 在本章中你将：

1. 了解利用水能、风能、太阳能和核能的方式，初步了解核裂变和核聚变。知道能量在转化过程中总量保持不变，能量转化具有方向性。认识能源及其分类。
 2. 经历对社会生活中的能源利用及其对环境影响的关注过程，增强环境保护意识。
- 本章的学习将了解能源分类的知识，进一步了解新能源的开发与利用。了解科学、技术、社会、环境协调发展的重要性。
- 本章的学习有助于领会能量转化与守恒的能量观念，认识能源的过度开发和利用对环境的影响。知道保护环境、节约能源、促进可持续发展的重要意义。

有兴趣的同学将来投身于太阳能开发利用领域，为人类的可持续发展做贡献。

格尔木光伏电站是我国已建成的大型光伏发电站。光伏发电是一种新兴的可再生能源，是太阳能利用的重要方面。太阳辐射能是一种自然能源，每年照射到地球表面的太阳能相当于130万亿吨煤，其总量属当今世界最大能源。现在公认太阳寿命仍有50亿年，太阳能可谓取之不尽、用之不竭。太阳能无需开采运输，可直接利用，清洁无污染，既量大又长久；是国际公认为未来最具竞争性的能源之一。

我国太阳能光伏发电潜力巨大，尽管我国太阳能发电技术已经走在世界前列，已成为世界最大太阳能发电国，但太阳能的利用率仍有很大的研究空间。借此巨大壮观的场景，号召

本节编写思路

通过“大家谈”进一步熟悉能量在日常生活中的表现的多样性及其来源,进而引出能源分类方式。再次通过“大家谈”引导关注可再生能源与不可再生能源的特点。

通过三峡水电站、东海大桥风力发电场、太阳能路灯等实例介绍水能、风能、太阳能在生产生活中应用。通过秦山核电站的介绍了解核能的可控与和平利用。

让学生了解核裂变和核聚变。通过“多米诺骨牌”的自主活动了解链式反应;通过中科院研制“东方超环”的介绍,了解可控核聚变的研究前沿。

在学习过程中,了解科学知识在新能源的开发和利用中的应用,体会科学·技术·社会·环境关系。

[1]



图 12-1 采用电池供电的新能源公交车

第一节 能源及其应用

自然界中处处充满能量,能量无所不在,而它的表现形式是多种多样的。以汽车为例:汽车行驶,具有动能;鸣响喇叭,声波在空气中传播,是声能的表现;打开车灯照亮道路,这是光能的作用。如图 12-1 所示的新能源公交车内部电池中贮存着电能,电能转化为声能、光能、机械能等能量形式。此外,自然界还有原子核能、引力势能、生物质能等。正是由于在这个世界上到处有能量存在,而且这些能量还可以相互转化,才使得我们这个世界绚丽多彩,充满了生机和活力。

能量在日常生活中的表现更是多种多样:按下开关,台灯亮起;点燃煤气,煮饭烧菜;人吃饱饭,充满力量……这些都反复证明,能量不仅普遍存在,而且无时无刻不在发挥作用。

[2]

大家谈

我们每天都要吃饭、喝水,要使用手机、冰箱、热水器,还要乘坐交通工具。我们人类的活动,用电器、交通工具的运转,都需要能量。日常生活中所用的能量都从何而来呢?

正文解读

[1] 上海已将公交车全部更换为新能源汽车,这是上海市清洁空气行动计划中的一项重要举措。发展新能源车是汽车行业的发展趋势,减少用油就是减少碳排放。通过节首图引导学生关注公共交通,关注新能源汽车电池的研究。

[2] 此处设置“大家谈”是要学生意识到,我们的生存和所有的日常活动都是在消耗能源。提问我们的能源哪里来,深层次的意义是要学生体会能源的有限与宝贵,人人都要珍惜,不要浪费。

② 什么是能源?

能量来自能源。能源是能提供多种形式、可以相互转换的能量的源泉。简单确切地说，能源是自然界中能为人类提供某种形式能量的物质资源。人类利用的能源有太阳、草木、风、水、煤、石油、天然气等。

③ 能源如何分类?

- [1] 能源有若干种，人类为了更好地认识能源，按照不同的分类准则对其进行分类。能源按来源可分为三大类：来自太阳的能源、地球本身蕴藏的能源及太阳、月球等天体与地球的相互作用产生的能源。来自太阳的能源有太阳光的热辐射能和间接来自太阳的煤、石油、天然气以及生物质能、水能、风能等；地球本身蕴藏的能源有地热能和核燃料（如铀矿等）所蕴藏的原子核能；太阳、月球等天体与地球的相互作用产生的能源有潮汐能等。

能源按生产的方式分类可分为一次能源和二次能源。一次能源是指在自然界现成存在的能源，如太阳能、水能、煤、石油、天然气等；二次能源是指由一次能源加工转换而成的能源产品，如电力、焦炭、煤气、蒸汽等。一次能源又可分为可再生能源和不可再生能源两大类。可以不断得到补充，或能在较短周期内再产生的能源称之为可再生能源，如太阳能、生物质能、风能、水能、潮汐能等；经过亿万年形成而短期内无法恢复的能源称之为不可再生能源，如煤、石油、天然气等。

还有其他不同的能源分类方式。如按能源的性质可分为燃料能源、非燃料能源；按能源的利用技术可分为常规能源、新能源等。

[2]

大家谈

家庭生活中一天所用的能量哪些来自可再生能源，哪些来自不可再生能源？

④ 如何开发和利用新能源?

- [3] 从保护环境和可持续发展的角度来看，煤、石油和天然气等燃料，不仅存量有限，而且有的燃料在使用时会排放大量有害气体，引起温室效应和大气污染。而太阳能、水能、风能具有可再生、无污染等特点。人们一直在研究和开发这些“清洁能源”，同时也在发展和利用核能。

[1] 对能源分类学习的目的之一是让学生认识对事物进行分类要依据一定的标准，这也有助于学生厘清生活中关于能源名称的多种表述的含义。

[2] 此处的“大家谈”是要让学生意识到我们每天用掉多少不可再生能源。进一步可启发学生思考“不可再生”的社会意义，从而引导学生关注社会，激发学生社会责任感。

[3] 关于新能源的开发和“清洁能源”的使用所举的实例都是我国为改善民生、增强国家综合实力所采取的重大举措或成就，有利于激发和提升民族自豪感。

1. 水能

水力发电是利用水能的主要方面。一般需筑坝拦截江河水流或蓄水成水库，水流自上而下冲击安装在坝底的发电机组发电。可见水力发电的能源乃是上游水的势能。归根结底，能量来自太阳，因为上游水主要来自雨水，而雨水是靠太阳蒸发地表水系成为水汽，凝结成云而化雨下落。

我国三峡水电站（图 12-2）位于湖北省宜昌市三斗坪镇境内，总装机容量达到 2 240 万千瓦，是我国最大的水力发电站和清洁能源生产基地。三峡水电站通过华东电网保障了上海市巨大的用电量。三峡工程是一项极具综合效益的水利工程，集发电、防洪、航运、供水灌溉等多种效益于一体。

水能不仅可再生，而且成本低、效率高。许多国家在规划电力工业时也往往优先发展水电。

2. 风能

风力发电是利用风能的最重要的方面。风力发电就是把风的动能转化为电能。如图 12-3 所示的上海市东海大桥 10 万千瓦风电场是中国第一个国家海上风电示范项目。该项目位于上海市浦东新区临港新城至洋山深水港的东海大桥两侧，海上风电机组全部是我国自主研发。每年为国家节约燃煤几十万吨，减排大量二氧化碳。



图 12-2 三峡水电站



图 12-3 上海市东海大桥 10 万千瓦风电场

[1]

STSE

上海中心大厦（图 12-4）高达 632 m，大厦屋顶上全年平均风速可达到 8~10 m/s，非常适合利用风力来发电。上海中心的外幕墙上了开了三个很大的开孔，安装高空风力发电系统，包含 270 台“垂直轴涡轮”风力发电机，总装机容量为 135 kW，每年可以为大厦提供 100 多万千瓦·时的绿色电力，供屋顶、观光层中的设备使用。

大厦顶部设计成现在的造型也是为了收集屋面雨水，将收集的雨水和生活废水作为中水（又叫再生水，是指废水或雨水经过适当处理后，达到一定水质指标的水）水源，两类不同水质的原水经各自的设施处理后，用于除酒店客房外的其他所有中水用

[1] 此处的“STSE”不仅仅是表现上海中心这座现代化建筑是多么壮观，更是引导学生去了解和探寻它的“现代”体现在哪些地方，真实感受现代建筑涉及的科学与技术，开阔学生视野，激发学生的学习兴趣。

水场所，包括冲厕、绿化浇灌、水景补水、道路冲洗等，还有部分中水供陆家嘴地区市政绿化浇灌之用。

上海中心大厦内有多个高度设有“空中大堂”，方便租户就近享受休闲娱乐生活，从而减少能源消耗。如某人在 78 楼工作，从这一层出发，如果他能在上下不超过 14 层的范围内到达一处康乐区吃午餐，而不必一直下到楼底，就是节约了能源。

上海中心大厦又称“绿色大厦”。大厦采用双层幕墙结构，外层幕墙保证主体结构的规则性，内部再加一层幕墙构成了世界上最大的“保温瓶”。双幕墙系统用以调整室内外温差，起到绿色节能的功效。

风能也是太阳能的一种转化形式。太阳辐射造成地球表面各部分受热不均匀，引起大气层中气压分布不均匀，从而形成风。风力发电不需要使用燃料，也不会产生辐射或空气污染，但存在风能转换效率偏低的发展瓶颈。风能作为一种清洁的可再生能源，越来越受到世界各国的重视。

[1] 3. 太阳能

太阳能的利用有光热转换和光电转换，光伏发电是一种新兴的可再生能源，是太阳能利用的重要方面。光伏的含义是利用半导体技术直接将太阳的光能转换成电能（称为光伏效应）输出，相应的发电元件称为太阳能电池或光伏电池。简单的光伏电池可为手表、计算器、路灯（图 12-5）提供能源，较复杂的光伏发电系统把光能转换成电能并实时输送上电网。我国太阳能光伏发电潜力巨大，到 2030 年光伏装机容量将达 1 亿千瓦，年发电量可达 1 300 亿千瓦·时。

太阳能既便捷又环保。阳光普照大地、无需开采运输，可直接利用，且清洁无污染。同时，太阳能既量大又长久。每年照射到地球表面的太阳能相当于 130 万亿吨煤，其总量属当今世界最大能源。科学家认为太阳寿命仍有约 50 亿年，因此，太阳能可谓取之不尽、用之不竭。

我国太阳能发电技术走在世界前列，已成为世界最大的太阳能发电国。

[2]

大家谈

常见的计算器上都有一个小太阳能电池板，可以很多年不充电、不换电池。曾经有手机厂商推出太阳能电池手机，但这一技术措施未获推广，谈谈原因何在。

附近的空气分子不同，太阳风暴的冲击会干扰人类正常的无线电短波通信。可指导学生查阅研究太阳能热发电的技术及其发展历程，引导学生关注太阳能的利用与研究。

[2] 通过此处的“大家谈”引导学生了解技术与社会的关系，也为学生后续关于“清洁能源与太阳能利用”的课题研究启发思路。



图 12-4 上海中心大厦



图 12-5 太阳能路灯

[1] 尽管太阳能是人类最早利用、也是最直接利用的原始能源，直到今天关于太阳能的利用仍在不断研究与创新之中。太阳能发电就是把太阳辐射能直接或间接转化为电能。一类是利用阳光的热效应加热水，再利用蒸汽驱动涡轮带动发电机发电；另一类是利用太阳能电池直接把光能转为电能。太阳能电池与光伏发电，是我国重要的能源产业。无论哪一类，将太阳能转化为电能的效率都还有很大的提升空间。

太阳给人类带来温暖的同时，太阳也不断向外喷射出高速带电粒子流。这些高速带电粒子流流动时所产生的效应与空气流动十分相似，所以称它为太阳风。在地球上，12 级台风的风速是 32.5 m/s 以上；而太阳风的风速可达 200~800 km/s。这些高速带电粒子流与地球

[1] 核电池不同于

日常使用的电池，它的全称是放射性同位素热电发生器，简称 RTG。核电池的原理与核发电站相类似，它利用了放射性元素衰变过程中产生的热能，热能推动发电设备工作，产生电能。航天器上采用的核电池一般是放射性元素钚-238。钚-238不像其他的天然的放射性同位素，它需要由人工制造，通过在特定的核反应堆中由中子轰击镎-237才能获得。钚-238的生产成本昂贵、产量也非常低，目前只有极少数国家有能力批量生产。核电池与太阳能电池相比，核电池不受天气与灰尘的影响，其稳定性更好。核能是人类未来能源的重要来源。了解核裂变和核聚变的最新研究成果，不仅有助于培育学生的科学素养，也希望能促进有兴趣的同学进一步去学习和研究核物理。

4. 核能

核能是一种重要的新能源。我国核电工业历经艰辛，已具一定规模。其中秦山核电站（图 12-6）是中国自行设计、建造和运营管理的第一座 30 万千瓦压水堆核电站，地处浙江省嘉兴市海盐县。秦山核电站采用目前世界上技术成熟的压水堆，核岛内采用燃料包壳、压力壳和安全壳 3 道屏障，能承受极限事故引起的高压、高温和各种自然灾害等异常情况。秦山核电基地经过多次扩建，9 台机组的总装机容量达到 650 多万千瓦，年发电量约 500 亿千瓦·时，成为国内核电机组数量最多、堆型最丰富、装机容量最大的核电基地。

[1] 核能的能量释放速度极快；并且核燃料的能量密度比传统化石燃料高几百万倍，因此核电厂所需的燃料体积小，运输储存都很方便。如果对核能有正确的认识，安全生产，核能也会和其他新能源一样为人类发展提供强有力的能量保障。

核裂变

1939 年，物理学家发现用中子轰击铀核时铀核分裂成几个其他原子核，同时释放出能量。较重的原子核分裂成几个较轻的原子核的过程叫做核裂变（图 12-7）。一个铀 235 核裂变可释放约 200 MeV 能量（eV 是能量单位，称为“电子伏特”， $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$, $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ）。若有足够数量的铀核裂变且能持续进行，那么，所释放的能量就能为人类所用。



图 12-6 秦山核电站

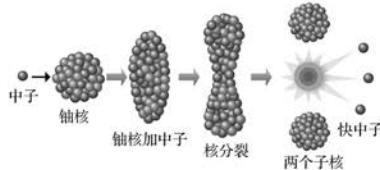


图 12-7 核裂变

[2]

自主活动

如图 12-8 所示，将若干枚骨牌排列起来，然后用手指轻轻向左推一下最右边第一枚骨牌，你会看到什么现象？

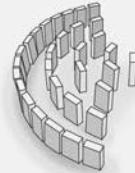


图 12-8 多米诺骨牌

[2] 此处的“自主活动”模拟链式反应，目的是让学生体会利用类比的方法解释科学问题。既调节学生的学习方式，也能丰富教师的教学方法。起到活跃课堂气氛，激发学习兴趣的作用。

多米诺骨牌排列的式样可以多种多样，排列骨牌的关键要素是骨牌之间的间距要均匀、适中，在倒下的过程中只碰倒邻近的骨牌，碰撞点应在骨牌重心上方，尽量不要碰撞在骨牌的顶端。

问题与思考解读

如图 12-9 所示，铀核受中子轰击而发生裂变时能放出 2~3 个中子和一定的能量。这 2~3 个中子又迅速引起周围其他铀核的裂变，这就使裂变迅速扩大，释放出越来越多的能量。这种反应过程的产物可以引起随后的反应，因而使这种反应一经开始就能自动持续进行的反应过程叫做链式反应。链式反应能够迅速释放巨大的核能。

铀材料的体积大小是产生链式反应的一个重要条件。由于原子核非常小，如果铀块的体积不够大，中子射入铀块时可能一个铀核都没碰到就穿了出去。能够发生链式反应的铀块的最小体积叫做临界体积。如果一块铀 235 的体积超过了临界体积，只要有中子进入就会立即引起铀核的链式反应，在极短时间内释放出大量核能，会发生猛烈的爆炸。原子弹就是根据这个原理制成的。

为了控制核裂变的链式反应速度从而安全稳定地利用核能，必须建立一种装置，使铀核不但能发生链式反应，而且中子的再生率是可以控制的。这种装置叫做反应堆。

目前，利用核能发电的技术已经成熟。作为核燃料的铀、钍等元素在地球上的可采储量的核能是煤、石油等所能提供的能量的 15 倍左右。因此，发展核电的前景广阔。

核聚变

若干个较轻的原子核也可以结合成一个较重的原子核，同时释放出巨大能量，这样的过程称为核聚变。太阳能就来源于太阳内部氢的核聚变。氢弹也是依靠核聚变释放出巨大的能量，是不可控核聚变。在我国的氢弹研究事业中，“两弹一星”元勋、核物理学家于敏（1926—2019）突破了氢弹原理研究的一系列问题，填补了我国原子核理论的空白，对我国的氢弹研制起到了关键作用，被誉为“中国‘氢弹之父’”。他隐姓埋名 28 载，不求名利，无私奉献，为我国的国防科技事业做出了重要贡献。

可控核聚变是未来人类能源的理想来源，相比核裂变，核聚变的放射性污染等环境问题少很多。如氘和氚的核聚变反应，其原料可直接取自地球上储量巨大的海水。目前科学家们正在攻克可控核聚变问题。中国科学院合肥物质科学研究院研制的世界上第一个非圆截面全超导托卡马克装置，即可控核聚变反应装置，被叫做“东方超环”，也被称为“人造小太阳”，2019 年已实现在 1×10^8 ℃ 条件下运行 10 s。

问题与思考

- 自然界物质的运动有许多不同的形式，每种运动形式都有对应的能量。说明机械运动、热运动、电荷的定向移动分别对应何种形式的能量？
- 链式反应中，重核裂变时放出的可以使裂变不断进行下去的粒子是质子、中子还是电子？要使链式反应发生，裂变物质的体积应满足何种条件？

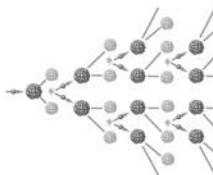


图 12-9 链式反应

1. 参考解答：机械运动对应机械能，热运动现象对应内能，电荷的定向移动对应电能

命题意图：回顾每种运动形式都有对应的能量，强调运动与相互作用以及能量观念。

主要素养与水平：能量观念（I）。

2. 参考解答：重核裂变时放出的可以使裂变不断进行下去的粒子是中子。要使链式反应发生，裂变物质的体积要大于其临界体积

命题意图：初步了解链式反应的基本条件，认识物质的运动与变化是需要满足一定条件的。

主要素养与水平：模型建构（I）。

3. 参考解答：声波的能量来自喇叭振膜振动的机械能；振膜的机械能来自喇叭电源的电能；声波的能量最终转化为空气的内能

命题意图：巩固能量转化与守恒的认知。

主要素养与水平：能量观念（I）；科学推理（I）。

4. 参考解答：垂直于地球表面的有效辐射面积可以等效视为地球大圆面积，即 πR^2 。因此，每秒辐射到地球的总能量 $Q = 1361 \times \pi \times (6.371 \times 10^6)^2 \text{ J} = 1.735 \times 10^{17} \text{ J}$

命题意图：通过模型构建与等效替代的思想方法，了解地球与太阳之间的能量传递与利用，知道有“太阳常数”这个名词，再次认识太阳能。

主要素养与水平：能量观念（I）；模型建构（I）。

5. 参考解答：风

力发电机每分钟产生的电能 $W = Pt = 160 \times 60 \text{ J} = 9600 \text{ J}$, 每分钟风所做的功为

$$W_0 = \Delta E_k = (30000 - 18000) \text{ J} = 12000 \text{ J}, \text{ 因此发电机}$$

效率为 $\eta = \frac{W}{W_0} = \frac{9600}{12000} \times 100\% = 80\%$

3. 电动喇叭发出的声波是空气振动的传播，声波具有能量。追根溯源，声波的能量是从哪里来的？又到哪里去了？
4. 人们常用“太阳常数”来描述地球大气层上方的太阳辐射强度，这是指在平均日地距离时地球大气层外界垂直于太阳辐射的 1 m^2 、 1 s 接收的太阳辐射能量值。近年来，通过各种手段测得太阳常数标准值为 1366 W/m^2 。地球半径约为 $6.371 \times 10^6 \text{ m}$ 。试根据上述数据估算太阳每秒辐射到地球的总能量。
5. 风力发电机的原理是风吹在叶片上推动叶片转动发电，将风的动能转化为电能。一台风力发电机 1 min 作用在叶片上风的动能从 30000 J 减小为 18000 J ，发电功率为 160 W ，求该风力发电机的效率。

命题意图：初步了解能量转化的技术途径与转化效率。

主要素养与水平：
能量观念(I); 科学推理(II)。

资料链接

太空探测器中的太阳能利用

太空探测器是人类研究宇宙的重要工具，太空探测器中各种仪器设备都需要电能来维持运作。在太空中能够利用的能源有限，早期探测器采用太阳能提供能量，现在也有用核电池供电的探测器。如我国首辆祝融号火星车采用的是太阳能动力。“祝融号”火星车利用太阳能的方式有三种：一种方式是通过太阳能电池板的转换直接为车上的科学仪器提供充足的电力。在火星的中午前后阳光充足，火星车会把一部分电能储存在蓄电池中，以备夜间使用，这是“祝融号”火星车利用太阳能的第二种方式。科学家还设计了一种利用物质相变吸收太阳能的方法：在火星车顶部的集热窗里装有正十一烷，正十一烷白天吸收太阳能温度升高而熔化，存储能量；到晚上无太阳光照射时温度下降，正十一烷由液体凝固为固体，同时释放热量给机器设备保温，以保障火星车安全度过漫漫寒夜。

热中子反应堆与快中子反应堆

核反应堆指的是一种可控制的核裂变或者核聚变链式反应的装置。我国目前商用核电站的主要堆型是热中子堆（或称慢中子堆）。热中子反应堆是用含轻元素而又吸收中子少的物质，如重水、铍、石墨、水等，把核裂变反应中产生的自由中子速度降低，使之成为热中子，再利用热中子来进行链式反应的一种装置。热中子又称“慢中子”，通常指动能小于1 eV的中子，其速度大小约几千米/秒。

快中子反应堆（简称快堆）是以快中子引起裂变链式反应的核反应堆，快堆是没有中子慢化剂的核裂变反应堆，核裂变反应十分剧烈，必须使用导热能力很强的物质把堆芯产生的大量内能转移并用于发电。快堆是国际公认的第四代先进核能系统中的优选堆型。快中子是指在核裂变反应中产生的自由中子，其动能大于0.1 MeV，速度大小约为光速的5%。

铅铋冷却快堆可以发展为移动式小型核反应堆，使之成为真正的移动电源，便于为偏远地区、深海空间站及其他水下核动力设备供电，也有研究用于核动力飞机、核动力导弹（理论表明发射之后拥有无限飞行的能力）等。核反应堆小型化的应用前景广阔，但也存在核泄漏风险。

本节编写思路

各种形式的能量可以互相转化。通过“大家谈”，知道能量在转化或转移过程中，能量的总量保持不变。

通过“摔碎的杯子”和“气体自由膨胀”等实例，知道能量转化具有方向性。

让学生了解能量在利用的过程中，能量的总值虽然保持不变，可被利用的价值在退化，理解为什么能量守恒还会有能源危机的问题，引导学生关注可再生能源和核能的研究与开发。

正文解读

[1] 历史上蒸汽机车在交通运输业中的应用使人类迈入了“火车时代”，迅速扩大了人类的活动范围。然而，蒸汽机车受能量转化效率与污染空气等因素的影响，现已被电气化的动车所替代。这张节首图既显示能量的转化，更启发学生了解技术与社会的进步。

[2] 此处设置的“大家谈”旨在启发学生通过科学思维，认识各种不同形式能量之间的转化，也体会电能的来之不易。从而增强节约意识，同时加深学生对能量转化概念的理解。

[1]



图 12-10 蒸汽机车将内能转化为机械能

第二节 能量的转化

各种形式的能量可以相互转化。如图 12-10 所示是一辆行驶中的蒸汽机车，燃料燃烧将化学能转化为内能，蒸汽机再将内能转化为机械能。在吸热化学反应中，内能转化为化学能；在发电机和电动机中，电能和机械能相互转化；照明灯发光时，电能转化为光能；电池充放电时，化学能和电能相互转化。利用能源本质上就是利用能量的转化过程。

[2]

大家谈

电能的产生及其使用包含了哪些能量转化过程？

能量转化过程是否会产生或损失能量？

在学习机械能守恒定律时我们知道，在只有重力和弹力做功的情况下物体的动能和势能可以相互转化，而两者之和即总机械能保持不变。人们根据积累的经验和大量的生产实践、科学实验发现，不只是机械能守恒，在任何能量转化过程中能量的总量都不变。这就

是能量守恒定律 (law of conservation of energy): 能量既不会凭空产生, 也不会凭空消失; 只能从一种形式转化为其他形式, 或者从一个物体转移到其他物体, 或者从物体的一部分转移到其他部分; 在转化或转移的过程中, 能量的总量保持不变。

能量守恒定律的发现是科学史上的重大事件。人们曾经认为互不相关的各种现象, 如力学的、热学的、电磁学的、光学的、化学的、生物学的……都能通过能量守恒定律联系起来, 把表面上不同的各类运动统一在同一个自然规律之中。恩格斯把能量守恒定律与细胞学说、生物进化论一起列为 19 世纪的三大发现。能量守恒定律是自然界中最普遍的规律之一, 一切现象都遵循这一定律。直到现在, 能量守恒定律仍然是我们研究自然科学强有力得工具。

[1]

拓展视野

在 17—18 世纪, 为了满足生产力日益增加的需求, 许多人致力于制造一种机器, 可以不消耗任何能量, 却能源源不断地对外做功; 这样的机器称为“第一类永动机”。

如图 12-11 所示为意大利人泰斯尼尔斯设计的磁力“永动机”。左侧高台上有一个强力磁体, 能将右侧的小铁球吸上斜面; 小铁球从斜面顶端的小孔落下, 回到斜面底部, 再穿过底部的小孔回到斜面上; 如此往复实现小铁球的永动。实践后却发现, 如果磁体磁性够强, 则小铁球无法从左侧斜面顶端的小孔落下; 如果磁体磁性不够强, 则小球无法被吸上斜面。

迄今为止, 历史上所有对第一类永动机的尝试都以失败告终。事实证明, 任何制造“永动机”的设想无论看上去多么巧妙, 都无法实现, 因为这类永动机违背了能量守恒定律。



图 12-11 泰斯尼尔斯设计的磁力“永动机”

凡是能量守恒的过程就一定能发生吗?

人死不能复生、破镜不能重圆、覆水难收、落叶归根……这些事实和成语都反映了一个道理——实际过程具有“单向性”或“不可逆性”(图 12-12)。而且, 这是另外一条重要的物理规律的表现。

下面我们通过简单的例子来考察“单向性”的含义。

[2]

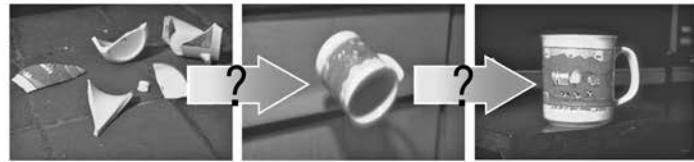
烧开的水放在空气中会逐渐冷却, 最终温度与室温相同。谁也没有见过这样的现象: 热量自发地从低温物体传给高温物体, 使低温物体的温度越来越低, 高温物体的温度越来越高。这里所说的“自发地”, 指的是没有任何外界的帮助, 也没有对外界产生任何影响。这说明热传递过程具有单向性, 只能自发地从高温物体传向低温物体。

循环机系统中, 利用机械能形成温度差所消耗的能量大于利用此温度差形成的能量转化所产生的能量。如空气压缩机利用机械能压缩气体所消耗的能量大于做功形成的能量。由于机械能和内能的转化过程具有方向性, 热量不能自发地从低温物体转移到高温物体, “第二类永动机”终告失败。

[1] 此处设置“拓展视野”的目的在于通过简介人类科学史上对能量转化研究中一些不成功的案例知道永动机是不可能实现的, 强化能量守恒定律的普适性。

[2] 此处是通过多个生活中的事例, 说明能量转化的方向性和自然过程的不可逆性。

由能量守恒定律可知, 不可能有任何机器不消耗任何能量源源不断地对外做功, 宣告“第一类永动机”不可能实现。进而有人专门研究是否存在从单一热源吸热使之完全变为有用功而不产生其他影响的“第二类永动机”。如热



(a) 从桌上落下摔碎的杯子 (b) 碎片自发地重新集合 (c) 完整的水杯自动返回桌面

图 12-12 如图所示的过程不会发生

自由膨胀和扩散现象也具有单向不可逆性。如图 12-13 所示，隔板将气室隔成两部分；左边有气体，右边为真空。抽去隔板，气体会自发地向真空区域膨胀，最终均匀地分布于整个容器。但我们从未观察到相应的逆过程：气体自发地缩回容器的一边。又如图 12-14 所示，两种不同的气体可以自发地混入对方，最后形成均匀混合气体，但是绝不会发生相反的现象：两种气体均匀混合后又自发地各自分开回到原处。

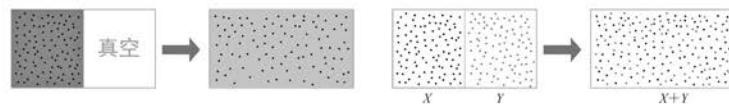


图 12-13 自由膨胀过程

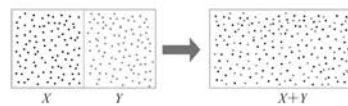


图 12-14 扩散过程

能量转化的方向性是指内能和其他形式的能量（如电能、机械能等）的相互转化具有方向性。机械能可以无条件地全部转化为内能，而内能不可以无条件地全部转化为机械能。

秋千在来回摆动许多次后总会停下来，它通过克服阻力做功而使其机械能转化为内能。同样，我们也从未观察到相应的逆过程：传到空气中的这部分内能重新自发地转变为机械能而使秋千恢复摆动。

热传递、气体自由膨胀、分子扩散、摩擦生热……这些现象的逆过程并不违反能量守恒定律，却从未能自发地发生。大量事实表明，自然界中的一切实际变化都具有方向性。朝某个方向的变化是可以自发发生的，相反方向的变化却是受到限制的。如果要使变化了的事物重新恢复到原来的状态，一定要外界施加影响，或者对外界产生影响，这就是自然过程的不可逆性。

既然能量守恒，为什么还会有能源危机？

- [1] 在自然界发生的种种变化中，能量的总值虽然保持不变（守恒），但是能量可被利用的价值却越来越小，也就是说能量是在退降。

[1] 利用“既然能量守恒，为什么还会有能源危机”这个问题，启发学生思考能源的合理使用与能量转化的问题。

问题与思考解读

132 第十二章 能源与可持续发展

对于人类来说，既需要内能，更需要机械能和电能。内能在转化为机械能的过程中，总有一部分要散发到温度较低的环境里，只有部分内能可成为有用的机械能，另一部分成了“废品”。从这个意义上说，内能是一种可被利用价值低的能量。如果其他形式的能量通过摩擦、碰撞、燃烧等过程转化成内能，其能量的可被利用的价值就降低了。

由于自然过程的不可逆性，如果一个系统的内能增加，这个系统就永远无法依靠自身的作用（自发地）回到原先的状态，除非系统依靠外界的帮助。而“外界的帮助”往往回更多地消耗其他形式的能量，又将产生出更多的内能来。

当我们使用地球上的能源时，并不会减少地球上能量的总量，但是能量的可利用价值在降低。例如，汽车行驶时要消耗汽油，汽油在发动机中燃烧，将一部分内能转化为驱动汽车行驶的机械能、一部分内能使发动机整体升温而传到空气中，还有一部分内能被汽车排气管排出的废气带走，后两部分内能就很难再利用了。

目前，人类消耗的能量主要来自煤炭、石油、天然气等物质。这些能源在地球上的总储量是有限的，燃烧使用后在几百年，乃至几千年内是无法再生的。如果人类不研究和开发新能源，能源危机就会迫在眉睫。所以，为了解决能源危机，很多国家都在积极研究和开发可再生能源和核能等。

问题与思考

1. 在日常生活中以下哪些现象能够发生，哪些不能发生？
(A) 一杯热水在打开杯盖后逐渐变得更热
(B) 蒸汽机把蒸汽的内能全部转化成机械能
(C) 桶中混浊的泥水在静置一段时间后，泥沙下沉，上面的水变清；泥、水分离
(D) 电冰箱通电后把电冰箱内低温物体的热量传到电冰箱外高温物体
2. 古代没有玻璃透镜，但古人用冰制成透镜，称为“阳燧”，用它能将阳光聚到木材上取火。这是热量从低温物体传到高温物体的例子吗？
3. 如图 12-15 所示是一种风、光兼备型节能路灯。它“头”顶风扇，“肩”扛太阳能电池板。简述此节能灯装置一昼夜的能量转化情况。
4. 在某城市，居民使用 1 kW·h 的家庭用电需要支付 0.61 元。那么，购买能提供相同能量的 5 号干电池需要花多少钱？对此你有何想法？(取每节 5 号干电池容量 1 500 mA·h，零售价格 2.30 元)



图 12-15

“阳燧”聚焦于一点，而阳燧本身并不向木材提供能量

命题意图：分析现象的本质，利用科学推理与论证说明自然现象，提升科学素养。

主要素养与水平：能量观念(I)；科学推理(I)。

3. 参考解答：在白天，太阳能电池板把太阳能转化为电能，电能储存在蓄电池里，将电能转化为蓄电池内部的化学能。晚上路灯照明时，蓄电池将其内部的化学能转化为电能。无论白天黑夜，只要有风吹动叶片转动，风能就转化为风扇叶片的动能，小风扇中的发电机再将叶片动能转化为电能

命题意图：引导观察现代路灯，利用物理知识解释身边的物理问题。

主要素养与水平：能量观念(I)；科学推理(I)。

4. 参考解答：1 节 5 号干电池的能量 $E_0 = qU = 1500 \text{ mA} \cdot \text{h} \times 1.5 \text{ V} = 1.5 \times 3.6 \times 10^3 \times 1.5 \text{ J} =$

1. 参考解答：A、B 不能发生。因为能量转化具有方向性，热传递过程只能自发地将内能从高温物体传向低温物体。环境温度低于杯内热水温度，杯内热水将会降温；蒸汽温度高于周围材料和环境的温度，蒸汽的内能将有一部分传递到周围材料和环境中，蒸汽机不能把蒸汽的内能全部转化成机械能。C、D 能发生，泥沙的密度通常大于水的密度，泥沙由于重力做功而下沉；电冰箱通过电流做功而实现能量由低温向高温转移

命题意图：认识能量转化的方向性与自然过程的不可逆性，强化能量观念。

主要素养与水平：能量观念(I)；科学推理(I)。

2. 参考解答：不是。这是利用透镜聚焦的原理，将太阳光通过

$$8.1 \times 10^3 \text{ J}$$

$$\text{提供 } 1 \text{ kW} \cdot \text{h} \text{ 的电能需要干电池的节数 } n = \frac{E}{E_0} = 1 \times 10^3 \times \frac{3.6 \times 10^3}{8.1 \times 10^3} = 445$$

需要花费为 $445 \times 2.3 \text{ 元} = 1023.5 \text{ 元}$

干电池的花费虽远远高于市电的费用,但由于干电池是独立电源,携带与使用方便、灵活,依然具有广阔的市场。干电池的回收与处理对环境的影响需要重视和改善。可充电干电池值得改进和推广。

命题意图:生活中能源的使用方式多种多样,不同形式能源的成本不同,有不同的用途。

主要素养与水平:能量观念(I);科学推理(I);科学态度(I);社会责任(I)。

资料链接

不同能源的成本比较

能源的种类不同,即使产生相同的能量,所需要的能源成本差异也很大。例如,同样产生 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的能量,煤炭比石油要便宜很多倍。各种不同能源提供每千瓦·时的电能成本比较如下表所示(以人民币计价,不包括工厂运营和电能传输成本)。

能 源	成本(每千瓦·时)	市场参考价
煤 炭	0.05—0.07 元	500—700 元/吨
天 然 气	0.24 元	2.6 元/米 ³
石 油	2.3 元	3 元/升
汽 车 电 池	1.68 元	400 元/组
电 脑 电 池	6.8 元	170 元/粒
AAA 电 池	1 000 元	2.3 元/节
市 电	0.61 元	

从使用成本来看,一些发展中国家可能会更多地依赖煤炭而不是石油或者天然气来满足能源的需求。然而,过多地依赖煤炭会造成严重的环境污染。干电池的成本虽高,但其便捷性仍然使其成为人们生活不可或缺的日常用品。

本节编写思路

[1]



图 12-16 全面综合治理后的上海苏州河

第三节 能源与环境

在现代社会中，能源关系着一个国家的经济发展和国家安全。在 100 多年的历史中，煤、石油、天然气等传统能源占据着主要地位。能源的使用大大提高了人们的生活质量，但也对环境造成了巨大的影响。环境保护和治理已成为现代社会普遍关注的问题。

如图 12-16 所示是上海苏州河综合治理后的景色，苏州河两岸现已成为上海市的文化、艺术、休闲的场所。

② 人类使用能源对环境造成哪些影响？

20 世纪中叶以前，能源的使用对环境的破坏没有引起人类足够的重视，导致温室气体急剧增加、极端气候增加、酸雨区增多等诸多环境问题，严重影响人类的生存环境和生活质量。

历史上，工业的发展带来了严重的环境污染问题（图 12-17）。在一些工业发达的国家，污染曾经一度达到“土不能植、水不能饮、空气也不能



图 12-17 钢铁厂黑烟滚滚的烟囱

企业将工业废水直接排入苏州河，加上附近居民的生活污水，在综合治理工程实施以前流入苏州河的废污水量约占全市废污水总量的 47%。由于污染源逐年增加，水质污染日趋严重，污染范围也逐渐上溯扩大。苏州河见证了上海工业发展的进程，也让人们付出了沉痛的代价，成为系在繁华都市腰上的“脏布”。

1998 年，按照“以治水为中心，全面规划、远近结合、突出重点、循序渐进、标本兼治”的原则，苏州河环境综合整治工程总投资 140 亿元，耗时 20 年，被誉为上海生态环境“第一工程”。2008 年主体工程完成后的苏州河水生态系统在很大程度上得到恢复。苏州河环境的改善对两岸居民生活和健康有着重要意义。如今的苏州河两岸已成为市民休闲娱乐的景观地带。这一节首图既显示党和国家关心国计民生的根本方针，也显示我国对解决环境污染这一世界性难题作出的积极贡献。这一节首图也与后面的“STSE”相呼应。

利用能量是人类生存和发展的必要条件。通过钢铁厂燃煤的浓烟、沙尘暴、酸雨让草木枯萎等图片，感受人类在能源过度开发和利用过程中对环境的严重影响。

通过两个“大家谈”，让学生相互交流生活中节能减排的多种方式和方法，理解垃圾分类的意义。认识环境污染的危害，明确能源是环境的一个组成部分，节约能源本身就是保护环境。具有环境保护的意识和行动，形成一定的科学态度和社会责任感。

正文解读

[1] 这是全面综合治理后上海苏州河的一张照片。20 世纪 80 年代，苏州河流域集中了上海近千家企业。密集的化工、印染、棉纺、造纸、制革、食品和制药等

“呼吸”的严重程度。《美国经济史》对1884年的匹兹堡这样描述：“从住家、商店、工厂、汽船等处冒出来的一股股烟柱汇成一大片乌云，笼罩在城市所在的狭窄山谷之中，直到太阳冲破重重乌云黑雾，显露出它黄铜色的圆脸来……城市住户和工厂燃烧的煤炭有很大一部分化为浓烟直冲云霄。”可见当年使用化石燃料对环境的严重影响。

人类过度放牧、滥伐森林植被，尤其是人为过度垦荒破坏地面植被、扰动地面结构，造成大面积土地荒漠化，直接加速了沙尘暴（图12-18）的形成和扩散。强烈的沙尘暴可造成交通供电受阻或中断、火灾、人畜伤亡等；而且污染自然环境，破坏作物生长，给人类的生产和生活造成严重危害。沙尘暴是过度开发自然资源所引起的极端天气现象之一。

近几十年来，由于人类生产、生活大量排放二氧化硫、氮氧化物等酸性气体，造成酸雨日渐频繁，严重危害生态环境。酸雨危害的主要方面包括：损坏植被，导致森林死亡（图12-19）；湖泊中的鱼虾死亡；破坏土壤成分，使农作物减产甚至死亡；酸化饮用水源，危害人体健康；腐蚀建筑物和工业设备；破坏露天的文物古迹。煤和石油的燃烧是造成酸雨的主要原因，酸雨已成为全世界面临的最严重的环境问题之一。

20世纪全球严重的环境污染事件基本都发生在工业化起步较早的国家，但是后来这些国家采取保护环境、防治污染的措施，环境污染事件明显减少。不过，这些污染事件仍然不应该被遗忘，值得发展中国家在经济发展过程中引以为鉴。

煤、石油等传统能源除了会造成环境污染以外，由于其不可再生，随着大规模的开采利用，储量越来越少，总有枯竭之时。人们已经意识到这样的能源危机，开始思考如何可持续发展。发展新能源是一种解决能源危机和环境污染的有效途径。

[1] 此处设置“大家谈”旨在引导学生积极面对人类既要使用能源又会造成环境污染的矛盾问题，为今后如何寻找和开发“清洁能源”埋下探索的“种子”。

[1]

大家谈

哪些能源不会对环境造成污染？

② 如何预防污染？

地球是人类赖以生存的家园。随着经济的发展，人们的生活水准日益提高，但环境也因此遭受很多破坏。如温室气体排放所引起的全球气候变暖；工业和生活污水排放导致江



图12-18 铺天盖地的沙尘暴



图12-19 酸雨让草木尽枯

河湖泊受到严重污染；生产废料与生活垃圾乱排乱放等。保护环境已成为世界各国共同努力的主题。

节约能源与开发新能源、严控排放、垃圾分类与处理是预防污染的重要措施。节能减排是应对全球气候变化的迫切需要，如新能源汽车的研发和推广，节约用纸、节约用水、节约用电。纸张的大量消费不仅造成森林毁坏，而且因生产纸浆排放污水使江河湖泊严重污染。在生活中，为珍惜水资源，不要让水龙头空流；应缩短淋浴时间；安装节水龙头；用节水型抽水马桶等。应节约用电，如使用节能灯具，随手关灯；随时关紧电冰箱门；使用高效低能耗电器等应成为大家的习惯。

能源是环境的一种组成部分，节约能源本身就是保护环境。《中华人民共和国节约能源法》指出“节约资源是我国的基本国策。国家实施节约与开发并举、把节约放在首位的能源发展战略”。为节约资源、保护环境，国家调整经济结构、转变经济增长方式，倡导节约发展、清洁发展、安全发展，以实现经济的可持续发展。

[1]

大家谈

生活中可采取哪些方式节能减排？

人们大量地消耗资源的同时，每个人每天又都会扔出许多垃圾。若垃圾被简易堆放或填埋，必然是臭气蔓延，还会污染土壤和地下水体。生活垃圾的分类，大致都是根据垃圾的成分构成、产生量，结合本地垃圾的资源利用和处理方式进行的。垃圾利用既可节省自然资源，又能减轻环境污染。处理利用100万吨废纸用于再生造纸，可避免砍伐600 km²的森林；处理利用120~130 t罐头盒可回收1 t锡，相当于开采冶炼400 t矿石；处理利用废弃的黑色金属（铁、铬、锰及其合金），可节省铁矿石炼钢所需电能的75%和所需水的40%，显著减少对大气的污染并降低矿山和冶炼厂周围堆积废石的数量；处理利用废弃的食物可补充饲料来源，明显提高农业效益，用100万吨废弃食物加工饲料，可节省36万吨饲料用谷物。

垃圾是被浪费的资源。合理进行垃圾分类，充分利用这一资源是节能减排的重要手段之一。2017年，我国对“普遍推行生活垃圾分类制度”作出了部署，将基本建立生活垃圾分类标准，逐步形成可复制、可推广的生活垃圾分类模式。

STSE

苏州河是上海重要的河流之一，也曾经是污染最严重的河流。苏州河发源于太湖瓜泾口，于外白渡桥汇入黄浦江。苏州河的污染可追溯到20世纪20年代。由于上海

[1] 此处设置的

“大家谈”旨在启发学生开动脑筋，思考日常生活如何节能减排，潜移默化地把个人与国家环境治理目标联系起来，提高学生的社会责任感和国家意识。

问题与思考解读

1. 参考解答：学校教室所有电风扇的总功率为 $P = 30 \times 4 \times 0.1 \text{ kW} = 12 \text{ kW}$, 一个月节约的电能为 $E = 20 \times 0.5 \text{ h} \times 12 \text{ kW} = 120 \text{ kW} \cdot \text{h}$

命题意图：通过身边物理问题的计算，让学生体会到节约能源并非都很难，有时随手就能做到，关键是要有自觉节能的意识。

主要素养与水平：能量观念(I); 科学推理(II)。

2. 参考解答：发电 $130 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 需要完全燃烧煤的质量为：
 $m = 130 \times 0.4 \text{ kg} = 52 \text{ kg}$, 这些煤的含碳量为 $m_c = 90\% \times 52 \text{ kg} = 46.8 \text{ kg}$; 由 $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ 可知：1 mol 碳完全燃烧，产生 1 mol 二氧化碳。即 12 kg 碳完全燃烧产生 44 kg 二氧化碳。因此，太阳能发电 $130 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 减少排

放的二氧化碳为 $m_{\text{CO}_2} = 46.8 \div 12 \times 44 \text{ kg} = 171.6 \text{ kg}$

命题意图：体会用煤与用太阳能造成的碳排放的差异，启发对“清洁能源”研究的关注。

主要素养与水平：能量观念(I); 科学推理(II)。

3. 参考解答：从个人的角度讲，可以少用一次性用品、节约纸张、节约水资源，多用公共交通和共享单车、尽量使用低能耗高能效电器等。从社会的角度讲，可以建议决策者加强节能减排方面的立法以及奖惩机制等

命题意图：提醒学生对节约能源的全方位的关注。

主要素养与水平：能量观念(I); 社会责任(I)。

4. 参考解答：通常，对于二氧化硫等污染气体的减排是要付出相当能耗的。外高桥第三发电厂研究

工业的迅速发展和人口激增，污染状况日益严重。到 1978 年，苏州河在上海境内全部遭受污染，市区河段终年黑臭、鱼虾绝迹。苏州河的污染源主要是未经处理的工业废水和生活污水的大量排放，还有船舶航运、码头装卸、上游来水的影响。同时，苏州河不利的水动力条件也加剧了污染。

上海市政府于 1995 年 12 月正式提出要把苏州河作为“上海环保重中之重”开展全面综合治理。数以百亿元计的财力及大量的人力物力投向苏州河。经过多年的治理，苏州河早已消除黑臭、重现鱼虾，成为上海一道亮丽的风景。

虽然苏州河的治理获得了成功，但耗费了太多的资源和人力、财力，付出了太大的代价。我们不禁想象要是苏州河不曾被污染该有多好。相对于污染后的治理，如何预防污染是我们更值得思考的问题。

问题与思考

- 某学校有 30 个班级，每个教室有 4 个“220 V, 100 W”的电风扇。有同学发现在到操场做课间操的 30 min 内部分教室里的电风扇仍在工作。试想：如果在课间操时间内每个教室的电风扇都关闭，那么一个月（按 20 天计算）学校能节约电能多少千瓦·时？
- 传统的火力发电技术发电 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 需要完全燃烧 400 g 煤。我国国家体育场“鸟巢”用太阳能发电系统替代了部分火力供电。该系统正常工作 1 h 可发电 $130 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，大约可以减少排放多少千克二氧化碳？（设煤的含碳量为 90%，煤燃烧的化学方程式为 $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ ）
- 从个人的角度而言，为了节约能源每个人能做点什么？从社会的角度而言，你能为管理部门提出哪些节约能源的建议？
- 上海外高桥第三发电厂（图 12-20）承担着上海 10% 的供电量，投产以来一直是全球最干净、最节能的火电厂。每发 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电的煤耗比国际最高技术水平的电厂低 10 g，达到了 $276 \text{ g/kW} \cdot \text{h}$ 。收集相关资料，说说电厂采取了哪些技术措施来减少能量消耗。



图 12-20

出“零能耗”脱硫的系列技术,是在烟气脱硫之前将其中的热能通过一种特殊装置加以回收,并送回热力系统再发电,以弥补脱硫系统的电耗,再辅以相应的节电技术,最终使脱硫系统的节能量与耗能量达到平衡甚至结余,实现“零能耗”脱硫的目标。

命题意图: 旨在关注企业对“节能减排”所做的努力与取得的成果。

主要素养与水平: 能量观念(I);科学态度(I);社会责任(I)。

资料链接

国五、国六排放标准

“国六排放标准”即为“国家第六阶段机动车污染物排放标准”,是指为贯彻《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国大气污染防治法》,防治压燃式及气体燃料点燃式发动机汽车排气对环境的污染,保护生态环境,保障人体健康而制定的标准。“国六排放标准”包括《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》和《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》两部分。“国五排放标准”即为“国家第五阶段机动车污染物排放标准”。

国五、国六排放标准的主要差异

污染物	THC (mg/km)		CO (mg/km)		NO _x (mg/km)		NMHC (mg/km)		N ₂ O (mg/km)		PM (mg/km)		PN (个/km)	
	汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油
国五	100	—	1 000	500	60	180	68	—	—	—	4.5	4.5	—	6.0×10^{11}
国六 a	100	—	700	—	60	—	68	—	20	—	4.5	—	6.0×10^{11}	—
国六 b	50	—	500	—	35	—	35	—	20	—	3	—	6.0×10^{11}	—

注: THC: 总碳氢化合物; CO: 一氧化碳; NO_x: 氮氧化物; NMHC: 非甲烷碳氢化合物; N₂O: 氧化亚氮; PM: 细颗粒物; PN: 粒子数量

国六标准较国五标准排放标准限值变化 单位: mg/km(PN 的单位: 个/km)

标 准	CO	THC	NMHC	NO _x	N ₂ O	PM	PN
国五标准	1 000	100	68	60	无此项	4.5	6.0×10^{11}
国六标准(6a)	700	100	68	60	20	4.5	6.0×10^{11}
国六标准(6b)	500	50	35	35	20	3.0	6.0×10^{11}
6a VS 国五	↓ 30.00%	无变化	无变化	无变化	新增	无变化	无变化
6b VS 国五	↓ 50.00%	↓ 50.00%	↓ 48.53%	↓ 41.67%	新增	↓ 33.33%	无变化

注: CO: 一氧化碳; THC: 总碳氢化合物; NMHC: 非甲烷碳氢化合物; NO_x: 氮氧化物; N₂O: 氧化亚氮; PM: 细颗粒物; PN: 粒子数量

学期 活动

[1] 这是一个围绕“清洁能源和太阳能的利用”的探究性活动，探究的主题可以自拟、自定。

在选题时教师可做适当引导，使得在理论研究和实践制作等方面基本都由学生自行实施。在学期结束前完成一篇研究报告，并在班级中交流。

[1] 围绕主题“清洁能源和太阳能的利用”开展分组探究活动。

- 以下提供一些相关探究的问题，供大家选取。
1. 调查我国能源结构的现状和未来转型趋势，对我国能源结构转型提出合理建议。
 2. 了解地球能源危机的起因和现状，提出一些行之有效的解决措施。
 3. 了解科学技术为我们的生产生活带来的利弊。研究如何趋利避害，让科学技术更好地服务于社会发展。
 4. 调查人们对太阳能的利用情况，了解太阳能利用的常见方式及应用前景，研究太阳能利用的新方法。
 5. 设计利用太阳能取暖或发电的方案，讨论环境对太阳能利用的影响，研究提高太阳能利用效率的方法，研究太阳能的优缺点和制约太阳能利用的因素。
 6. 查阅资料，了解太阳能电池的结构和原理，研究太阳能电池的优缺点和改良方法。
 7. 调查太阳能电池产业发展现状、趋势和瓶颈，提出突破瓶颈、促进产业发展的方案。
 8. 查阅资料，了解太阳能电池常见的应用方式，研究太阳能电池产业发展带来的社会效应。

活动要求

1. 自主选择探究的问题，每个问题2~3组，每组2~3人。
2. 如涉及实验，需将实验过程和结果详细记录，并进行展示交流。
3. 如涉及问卷调查，需设计问卷，详细记录并分析调查数据。
4. 完成一份书面结题报告和汇报演示文档（PPT），期末展示交流。
5. 留意并交流研究过程中本组和其他组遇到的困难和提出的解决方案，对课题研究进行自评和互评。

小结

· 基本概念和基本规律

能源：自然界中能为人类提供能量的物质资源。

新能源：水能、风能、太阳能、核能等。

核裂变：较重的原子核分裂成几个较轻的原子核的过程。

核聚变：若干个较轻原子核结合成一个较重的原子核的过程。

能量守恒定律：能量既不会凭空产生，也不会凭空消失。能量只能从一种形式转化为其他形式，或者从一个物体转移到其他物体，或者从物体的一部分转移到其他部分。在转化或转移的过程中，能量的总量保持不变。

能量转化的方向性：内能和其他形式的能量（如电能、机械能等）的相互转化具有方向性。机械能可以无条件地全部转化为内能，而内能不可以无条件地全部转化为机械能。

· 基本方法

通过可再生能源和不可再生能源的比较，感受比较与分类的思维方法。

了解能源开发与利用方式，体会科技进步对人类生活和社会发展的影响，认识归纳与提炼的思维方法。

· 知识结构图



1. 参考解答：因为能量转化具有方向性。如煤用于火力发电，煤的化学能通过燃烧转变成内能，内能再通过热机转化为电能，每一种能量转化的效率都是低于 100%，都有一定数量的热能耗散到空气中，造成全球变暖。地球上储存的煤、石油和天然气等燃料在燃烧之后就再也无法自发变回原先可燃烧的燃料了。

命题意图：巩固能量转化具有方向性的概念，强化能量观念。

主要素养与水平：能量观念（I）。

2. 参考解答：常见的发电方式有：火力发电、水力发电、核发电、光伏发电、风力发电等。火力发电是将煤和天然气等化学能转化为电能，水力发电是将水的机械能转化为电能，核发电将核燃料的核能转化为电能，光伏发电

将光能转化为电能，风力发电是风的机械能转化为电能

命题意图：引导学生关注电能的产生与能量的转化，感受人类长期对电能研究的成果。

主要素养与水平：能量观念（I）。

3. 参考解答：核电站利用的核燃料主要是铀和钚，此类核反应属于核裂变

命题意图：引导学生关注核能的来源与产生方式，提升科学素养。

主要素养与水平：能量观念（I）。

4. 参考解答：用力压的过程是压力做功，将机械能转化为电能；出现电火花是电能转化为光能和内能；可燃气体被点燃是化学能转化为内能和光能

命题意图：通过观察现象获取信息，利用物理知识解释现象，培养科学推理能力。

复习与巩固

- 举例说明在自然界发生的种种变化中，能量的总值虽然保持不变（守恒），但是能量可被利用的价值却越来越小。
- 人类社会自从进入电气化时代以来，就一直在不断地探寻电能的来源。如今有哪些常见的发电方式？说明相应的能量转化形式。
- 目前核电站主要采用哪一种核燃料？这种核燃料发生的核反应是核裂变还是核聚变？
- 打火机中使用了一种叫做“压电陶瓷”的电子元件，当对它挤压或拉伸时，它的两端就会形成一定的电压，这种现象称为压电效应。用大拇指压一下打火机上的按钮，压电陶瓷片就会产生 10~20 kV 的高压，形成火花放电，从而点燃可燃气体。简述在上述过程中所发生的能量转化形式。
- 太阳光照射到地球上，地球表面的水吸收太阳的能量蒸发成水蒸气，上升后形成云，再以雨、雪等形式落下，流入江河；地球表面被晒热，而地面各个部位受热不均，使空气流动形成了风。简述上述自然现象中能量的转化。
- 有人认为太阳能来源于化学能。这种说法是否正确？简述理由。
- 如图 12-21 所示是我国古代的一种农业机械，它叫做水碾，是利用水的动能来做功的装置。当水冲击下部水轮时，转动的轮子会带动上部的碾来碾米。假若每秒冲击叶片的水量为 10 kg，水速从 5 m/s 减小为 1 m/s，则水碾每秒从水流中获得能量为多少？这些能量是否都被用来碾米？
- 以自行车代替汽车出行可以减少现代生活中留下的“碳足迹”，积极应对全球气候变暖的严峻挑战。人们的各种行为留下的“碳足迹”可以用直观的“碳足迹计算器”估算。设开车的二氧化碳排放量 (kg) = 汽油消耗量 (L) × 2.2 (kg/L)。现用骑自行车代替开车出行 100 km，可以节约 9 L 汽油，则相应减少排放了多少二氧化碳？
- 科学家们通过大量的实践研究，估算出了整个地球表面接受的太阳辐射能主要去向的数据，如表 12-1 所示。

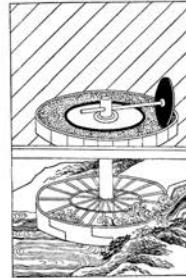


图 12-21

主要素养与水平：

能量观念(Ⅰ);科学推理(Ⅰ)。

5. 参考解答：

地球表面的水吸收太阳的能量经过蒸发形成水蒸气,上升形成云,是将太阳能转化为云、雨、雪等的机械能和空气的内能;雨、雪落下,流入江河,机械能转化为水的机械能和内能。太阳把地球表面晒热,是将太阳能转化为内能;使空气流动形成了风,是将太阳能转化为风能

命题意图：认识大自然,用物理知识解释自然现象中的能量转化,增强能量观念。

主要素养与水平：能量观念(Ⅰ)。

6. 参考解答：太阳能是由于太阳内部的氕和氚在太阳内部的高温高压条件下的核聚变反应产生的,太阳内部的反应不是化学反应

命题意图：通过辨析,能区分核聚变反应和化学反应,提升物理

观念。

主要素养与水平：能量观念(Ⅰ)。

7. 参考解答：水的动能减少量 $\Delta E = \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2 = \frac{1}{2} \times 10 \times 5^2 J - \frac{1}{2} \times 10 \times 1^2 J = 120 J$, 水碾

每秒获得的能量约为 120 J。这些水能与水碾之间的碰撞会损失一部分,转化的效率低于 100%。转动过程中机械之间的摩擦也要消耗一部分能量

命题意图：认识水能的利用,感受不同时代的人们都曾探索利用大自然的力量来提高生产力。

主要素养与水平：能量观念(Ⅰ);科学推理(Ⅰ)。

8. 参考解答：开车 100 km 消耗 9 L 汽油,排放的二氧化碳 $m = 9 \times 2.2 \text{ kg} = 19.8 \text{ kg}$ 。若不计人增加

去向	直接反射	向太空热辐射	水循环	大气流动	光合作用
辐射功率	$5.0 \times 10^{13} \text{ kJ/s}$	$8.0 \times 10^{13} \text{ kJ/s}$	$4.0 \times 10^{13} \text{ kJ/s}$	$4.0 \times 10^{11} \text{ kJ/s}$	$5.0 \times 10^{10} \text{ kJ/s}$

根据以上数据试估算地球对太阳能的利用率有多大?每年植物通过光合作用利用的太阳能为多少?

10. 人们工作、学习和劳动都需要能量,能量来自食物。食物在人体内经消化过程转化为葡萄糖,葡萄糖在体内又转化为 CO_2 和 H_2O ,同时释放能量,每克葡萄糖释放的能量 $E = 1.56 \times 10^4 \text{ J}$ 。一个质量为 60 kg 的人登高 100 m,至少需要消耗多少克葡萄糖?

*11. 我国自古有“昼涨称潮,夜涨称汐”的说法。潮汐主要是由太阳和月球对海水的引力造成的,以月球对海水的引力为主。

(1) 如图 12-22 所示是一种潮汐发电示意图。涨潮时开闸,水由通道进入海湾水库蓄水,待水面升至最高点时关闭闸门。当落潮时,开闸放水发电。设海湾水库面积为 $5.0 \times 10^8 \text{ m}^2$,平均潮差为 3.0 m,一天涨落潮两次,发电的平均能量转化率为 10%,发电的平均功率约为多少? ($\rho_{\text{海水}} = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, g 取 10 m/s^2)

(2) 如图 12-23 所示为双水库潮汐电站原理示意图。两个水库之间始终保持着水位差,以保障能够全天发电。试问涨潮时和落潮时应如何开关闸门?

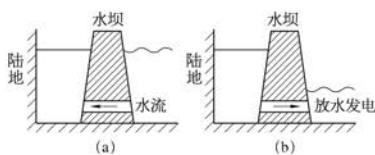


图 12-22

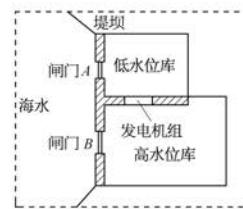


图 12-23

的排放量，则减少排放 19.8 kg 二氧化碳。实际上人骑自行车也是要增加排放二氧化碳的，但相应排放小于 19.8 kg

命题意图：通过信息获取，知道研究环保的新名词“碳足迹”；通过运算，知道每一次的“绿色出行”都是在为应对全球变暖问题作出个人的贡献。

主要素养与水平：能量观念（I）；科学推理（II）；科学态度（I）；社会责任（I）。

9. 参考解答：地球表面每秒接收的太阳辐射能

$$E = (5.0 \times 10^{13} + 8.0 \times 10^{13} + 4.0 \times 10^{13} + 4.0 \times 10^{11} + 5.0 \times 10^{10}) \text{ kJ} = 1.7 \times 10^{14} \text{ kJ}$$

每秒到达地球且被地球利用的太阳能中水循环、大气流动、光合作用这三部分能量为

$$E_1 = (4.0 \times 10^{13} + 4.0 \times 10^{11} + 5.0 \times 10^{10}) \text{ kJ} = 4.04 \times 10^{13} \text{ kJ}$$

地球对太阳能的利用率

$$\eta = \frac{E_1}{E} \times 100\% = \frac{4.04 \times 10^{13}}{1.7 \times 10^{14}} \times 100\% = 23.8\%$$

每年通过植物的光合作用转化的化学能为

$$E_2 = 5.0 \times 10^{10} \times 365 \times 24 \times 3600 \text{ kJ} = 1.58 \times 10^{18} \text{ kJ}$$

命题意图：通过信息获取，利用模型建构，得出到达地球和被地球接收的太阳能，认识核聚变的太阳蕴藏巨大的能量和万物生长靠太阳的含义。

主要素养与水平：能量观念（II）；模型建构（II）；科学推理（II）。

10. 参考解答：人在运动过程中，通过消耗体内的葡萄糖获取所需要的能量。人在登高的过程中不仅克服重力做功把葡萄糖的化学能转化为人的重力势能，同时，人本身新陈代谢等生命过程所需的能量也来自葡萄糖的化学能。所以，人登高 100 m 所需能量远大于重力势能的增加。设人登高 100 m 至少消耗 m 克葡萄糖，则 $m = \frac{m_{\text{人}} gh}{E} = \frac{60 \times 9.8 \times 100}{1.56 \times 10^4} \text{ g} = 3.77 \text{ g}$

命题意图：增强学生利用物理学、生命科学和化学的知识综合分析问题的意识，通过学科知识的综合与迁移，培育学生的创造力，因为有“远距离的迁移就等于是创造”之说。

主要素养与水平：能量观念（III）；科学推理（III）。

11. 参考解答：（1）在一天中，水力发电是将水的机械能转化为电能， $E_{\text{电}} = E_{\text{水}} \times 10\%$

$$\begin{aligned} E_{\text{电}} &= 2 \times (mgH) \times 10\% = 2 \times \left(\rho Sh \times \frac{gh}{2} \right) \times 10\% = \rho Sgh^2 \times 10\% \\ &= 1.0 \times 10^3 \times 5.0 \times 10^8 \times 10 \times (3.0)^2 \times 10\% \text{ J} \\ &= 4.5 \times 10^{12} \text{ J} \end{aligned}$$

$$\text{发电的平均功率：} P = \frac{W}{t} = \frac{E_{\text{电}}}{t} = \frac{4.5 \times 10^{12}}{24 \times 3600} \text{ W} = 5.2 \times 10^4 \text{ kW}$$

（2）涨潮时，闸门的开关情况是 A 关 B 开；落潮时，闸门的开关情况是 B 关 A 开

命题意图：知道潮汐现象自古就被发现和利用。通过模型建构，会分析、推理、估算出在这种设计方案里可利用的能量，培养学生的科学推理能力。

主要素养与水平：能量观念（II）；模型建构（III）；科学推理（III）。

第三部分 本章练习部分解读

第一节 能源及其应用

(一) 参考解答

1. B

核能来自地球所蕴藏的放射性物质。生物质能是自然界中有生命的植物提供的能量,这些植物作为媒介,通过光合作用间接储存了太阳能。潮汐能主要来自月球对海水的引力作用。地热能来自地球内部的熔岩

2. A

目前世界各国运营的核电站,还都是利用核裂变反应,主要燃料是铀

3. C

能源按生产的方式分类可分为一次能源和二次能源。一次能源是指在自然界现成存在的能源,如太阳能、水能、煤、石油、天然气等。二次能源是指由一次能源加工转换而成的能源产品,如电力、焦炭、煤气、蒸汽等

4. ③⑥ ①②④⑤

常规能源主要是指石油、煤炭和天然气;新能源主要有风能、地热能、潮汐能和核能等

5. 1.9×10^4

由题意可知:地球表面每平方米接收到的太阳能的平均辐射功率的 18% 转化为电功率,所以有:

$$\text{总面积 } S = \frac{P}{\eta P_0} = \frac{4.6 \times 10^3}{0.18 \times 1.353} \text{ m}^2 \approx 1.9 \times 10^4 \text{ m}^2$$

6. 2.6×10^{24} 个

一个铀 235 核裂变时释放的核能 $E_0 = 200 \text{ MeV} = 200 \times 10^6 \text{ eV} = 200 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

$$n = \frac{E}{E_0} = \frac{8.36 \times 10^{13}}{200 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}} \text{ 个} \approx 2.6 \times 10^{24} \text{ 个}$$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	能量观念	模型建构	社会责任
1	I		
2	I		
3	I		
4	I		
5	II	II	I
6	II	II	I

第二节 能量的转化

(一) 参考解答

1. 可被利用

2. (1) 机械 内 (2) 内 机械 (3) 电 内 (4) 化学 内

“两小球相互碰撞”说明两球具有机械能(动能),碰后黏合在一起不动,说明机械能转化为内能

“热机气缸内的气体推动活塞运动”说明气体因燃烧而温度升高了,“活塞运动”说明具有机械能,所以是内能转化为机械能

“给盛水的容器内的电阻丝通电”说明电流做功,“水温升高”说明水的内能增加,所以是电能转化为内能

“用酒精灯加热水”,说明酒精燃烧将酒精的化学能转化为水的内能,所以是化学能转化为内能

3. D

能量耗散是指能量可被利用的价值在降低,但仍然遵守能量守恒定律,选项 A 错误。能量既不会凭空消失,也不会凭空产生,它只会从一种形式转化为其他形式,或者从一个物体转移到另一个物体,而在转化和转移的过程中,能量的总量保持不变,选项 B 错误。永动机违背了能量守恒定律,是不可能制成的,选项 C 错误。根据能量守恒定律可知,某种形式的能量减少,一定有其他形式的能量增加,能量总量保持不变,选项 D 正确

4. C

太阳的辐射能是地球万物生长的源泉,树林的生长离不开光合作用,燃煤电厂的煤是远古的林木演化而来的,空调的工作需要电力

5. (1) 热机 (2) 电动机 (3) 发电机 (4) 电热器 (5) 火电厂

热机可将内能转化为机械能,发电机可将机械能转化为电能,电动机可将电能转化为机械能,电热器可将电能转化为内能,火力发电厂可将内能转化为电能

6. (1) 说法是错误的。能量的总量都是保持不变的,即能量是守恒的,能量并不会凭空消失,而是转化为其他形式的能量。此处摆球的机械能转化成空气和摆球的内能 (2) 说法是错误的。虽然可以使摆球恢复摆动,但这需要提供额外的能量,并不会自发产生,因此不是一个可逆过程

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	能量观念	科学推理
1	I	
2	I	I
3	I	
4	I	I
5	I	
6	I	II

第三节 能源与环境

(一) 参考解答

1. B

以煤作为主要生活燃料、使用汽油或柴油都会产生大量污染物，导致大气污染，引发温室效应、酸雨等环境问题，而利用太阳能、风能等替代化石能源可以减少有害气体的排放。解决能源问题的最佳方法是开发新能源

2. C

根据能量守恒，自然界的总能量是守恒的，并不会凭空消失，选项 A 错误。石油、煤炭这些不可再生能源在地球储量有限，会有用尽的一天，选项 B 错误。新能源通常都是可再生能源，可供人类持续的使用，而且新能源造成的环境破坏也小得多，选项 C 正确。根据能量守恒，自然界的总能量是守恒的，既不会凭空消失，也不会凭空产生，选项 D 错误

3. D

人类过多地使用氯氟烃类化学物质是破坏臭氧层的主要原因，这种物质并不是由火力发电厂产生的

4. 不可再生 164

5. 干垃圾经过处理后可用于焚烧发电，目前，上海干垃圾焚烧能力每天达 1.93×10^4 t，约占干垃圾产生量的 90%。在湿垃圾处理厂，运到厂里的湿垃圾经分拣去除塑料袋等杂质后，经过粉碎、提油等步骤，将通过厌氧发酵产生沼气，并用于发电，残余的沼渣将被送入焚烧炉焚烧处理。上海每天产生湿垃圾约 9 600 t，资源利用能力约占湿垃圾总量的 81%

6. 排放标准对汽车尾气中排放的一氧化碳、碳氧化合物、微尘、碳烟等有害物质的排放量有明确的限制，旨在控制汽车污染排放，提高环境质量。国六标准的实施，对排放物一氧化碳、氮氧化物、碳氢化物要求将更加严格

国一排放标准：20世纪80年代初，我国颁布了一系列机动车尾气污染控制排放标准

国二排放标准：在这一阶段我国已经形成了比较完整的汽车尾气排放标准以及检测体系

国三排放标准：2005年12月30日，北京开始实施国三排放标准

国四排放标准：2008年元旦国四燃油在北京上市，随后北上广等多地开始实行国四标准

国五排放标准：2017年7月1日开始全国范围全面实施国五排放标准，其中氮氧化物排放量比国四标准降低了 25%，并且新增了 PM 的排放限制，更加严格

国六排放标准：2016年12月23日，环境保护部、国家质检总局发布《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》，自2020年7月1日起实施，本次轻型车国六标准采用分步实施的方式，设置国六a和国六b两个排放限值方案，分别于2020年和2023年实施。2018年6月22日，发布《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》，自2019年7月1日起实施

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	能量观念	科学推理	科学态度	社会责任
1			I	I
2			I	I
3			I	I
4	I	I	I	I
5			I	I
6			I	I

说 明

本书根据教育部颁布的《普通高中物理课程标准(2017年版2020年修订)》和高中物理教科书编写,经上海市中小学教材审查委员会审查准予使用。

编写过程中,上海市中小学(幼儿园)课程改革委员会专家工作委员会、上海市教育委员会教学研究室、上海市课程方案教育教学研究基地、上海市心理教育教学研究基地、上海市基础教育教材建设研究基地、上海市物理教育教学研究基地(上海高校“立德树人”人文社会科学重点研究基地)及基地所在单位复旦大学给予了大力支持。马世红、王祖源、陆昉、陈树德、蒋平、冀敏在本书编写的各个阶段审阅了书稿。在此一并表示感谢!

欢迎广大师生来电来函指出书中的差错和不足,提出宝贵意见。出版社电话:021-64848025。

声明 按照《中华人民共和国著作权法》第二十五条有关规定,我们已尽量寻找著作权人支付报酬。著作权人如有关于支付报酬事宜可及时与出版社联系。

经上海市中小学教材审查委员会审查
准予使用 准用号 II - GJ - 2021041



绿色印刷产品

ISBN 978-7-5478-5685-7

9 787547 856857 >

定价：42.00 元