

普通高中课程标准实验教科书

物理

选修 3-1

人民教育出版社 课程教材研究所
物理课程教材研究开发中心 编著



 人民教育出版社

总 主 编：张大昌
副总主编：彭前程
主 编：张维善
执笔人员：黄恕伯 唐果南 张维善
绘 图：王凌波 张傲冰 张 蓓 张 良
责任编辑：谷雅慧 张 颖
版式设计：马迎莺
审 读：王存志

普通高中课程标准实验教科书 物理 选修3-1

人民教育出版社 课程教材研究所
物理课程教材研究开发中心 编著

出版发行 人民教育出版社

(北京市海淀区中关村南大街17号院1号楼 邮编：100081)

网 址 <http://www.pep.com.cn>

经 销 全国新华书店

印 刷 山东德州新华印务有限责任公司

版 次 2010年4月第3版

印 次 2019年7月第51次印刷

开 本 890毫米×1240毫米 1/16

印 张 7.25

字 数 150千字

书 号 ISBN 978-7-107-20253-7

定 价 8.50元

价格依据文件号：京发改规[2016]13号

版权所有·未经许可不得采用任何方式擅自复制或使用了本产品任何部分·违者必究

如发现内容质量问题，请登录中小学教材意见反馈平台：jcyjfk.pep.com.cn

如发现印、装质量问题，影响阅读，请与本社联系。电话：400-810-5788

绿色印刷 保护环境 爱护健康

亲爱的同学们：

你们手中的这本教科书采用绿色印刷标准印制，在它的封底印有“绿色印刷产品”标志。从2013年秋季学期起，北京地区出版并使用的义务教育阶段中小学教科书全部采用绿色印刷。

按照国家环境标准(HJ2503-2011)《环境标志产品技术要求 印刷 第一部分：平版印刷》，绿色印刷选用环保型纸张、油墨、胶水等原辅材料，生产过程注重节能减排，印刷产品符合人体健康要求。

让我们携起手来，支持绿色印刷，选择绿色印刷产品，共同关爱环境，一起健康成长！

北京市绿色印刷工程

目 录

致同学们

第一章 静电场	1
1 电荷及其守恒定律	2
2 库仑定律	5
3 电场强度	10
4 电势能和电势	15
5 电势差	20
6 电势差与电场强度的关系	22
7 静电现象的应用	24
8 电容器的电容	29
9 带电粒子在电场中的运动	33



第二章 恒定电流	40
1 电源和电流	41
2 电动势	43
3 欧姆定律	46
4 串联电路和并联电路	48
5 焦耳定律	53
6 导体的电阻	56
7 闭合电路的欧姆定律	60
8 多用电表的原理	63
9 实验：练习使用多用电表	67
10 实验：测定电池的电动势和内阻	70
11 简单的逻辑电路	72



第三章 磁场	79
1 磁现象和磁场	80
2 磁感应强度	83
3 几种常见的磁场	86
4 通电导线在磁场中受到的力	91
5 运动电荷在磁场中受到的力	95
6 带电粒子在匀强磁场中的运动	99



课题研究	103
附录 游标卡尺和螺旋测微器	104
课外读物	107

致 同 学 们

欢迎大家进入《物理》(选修3系列)的学习。这个系列将为大家呈现比较完整和综合的物理学内容,展示物理学发展中充满睿智和灵气的科学思维,弘扬前辈物理学家探寻真理的坚强意志和科学精神。

在必修物理课中,大家学习了力学的主要内容。诚然,力学是物理学的基础,是在物理学和其他学科中进行科学研究的典范。但是奠定基础是为了实现更高和更强的目标,学习典范是为了追求超越和创新的理想。在这一过程中,一定会有意想不到的坎坷和曲折,但探索未知的诱惑和超越已知的希冀,却总在前面向我们招手……

从这种意义上说,物理课程的学习与物理学自身的发展具有惊人的一致性。

那是1955年4月17日,一个星期日的下午,爱因斯坦从病榻上坐起来,开始了他一生的最后一次计算。他以自己特有的干净利落的笔迹,写下了一行行算式。在整理了一些数字之后,他休息了。几个小时之后,20世纪一位伟大的物理学家去世了。病床旁边放着他最后的,也是失败的一项努力的记录:他要创造一个“统一场理论”,以便对宇宙中已知的几种相互作用做出统一的解释。



爱因斯坦

爱因斯坦的研究溯源于19世纪中前期

法拉第和麦克斯韦的工作。当奥斯特发现电流产生磁场的现象之后,法拉第想知道,

相反的情况是否可能发生——磁能够产生电吗?



法拉第在英国皇家学会演讲

在失败了多次之后,他取得了成功,揭示了自然界一个具有深远意义的奥秘——尽管表面现象不同,但是电和磁仅仅是同一基本现象的不同方面。这向人们暗示:宇宙中的事物具有某种基本的统一性。

虽然法拉第以其高超的实验技能瞥见这种统一性,但他缺乏阐述这一辉煌成果所需的数学工具。麦克斯韦用数学语言成功地把法拉第的发现纳入了一个完美的框架,阐明了电与磁实质上的统一性。

然而,他们没有考虑一个明显的问题:宇宙的这种统一性是否包括人们最熟悉的引力呢?这正是爱因斯坦智慧的触角指向的地方。也许是这个问题太多地超越了科学的年轮,爱因斯坦穷30多年之力,却只能遗憾地把这一科学重任留给后人。



麦克斯韦

在爱因斯坦忙于构建自己的统一场理论的同时,人们发现了另外两种基本的力——凝聚原子核的强相互作用力和造成放射现象的弱相互作用力。从20世纪50年代开始,物理学家的注意力转向了电磁力与弱相互作用力的统一。到60年代末,温伯格、格拉肖和萨拉姆分别在理论上表明,这两种力仅仅是同一种力的不同方面,由此预言的一些现象在70年代被实验证实。这让他们共同获得了1979年诺贝尔物理学奖。

70年代前期,格拉肖还提出了把电磁力、弱作用力和强作用力统一起来的数学公式,并称为“大统一场理论”,但他的预言证实起来却有困难。

1984年,施瓦茨和格林等人终于宣布,能够把最后的局外者——引力和其他的力统一起来。条件是不再把粒子看做点状物,而是看做称为“超弦”的极小物体,它们像一些“琴弦”,存在于10维的时空之中。

尽管这是一项重大进展,但超弦理论似乎仅仅是某种更加根本的东西的一个影子。1995年,威滕把这个“东西”找到了,并称它为“M理论”,或说是“膜理论”。以往的超弦仅仅成为11维的膜的“边缘”而已,这11维时空中除了4维之外全都卷曲起来,以致我们无法“看到”。

这就是爱因斯坦追求的目标吗?它可以通过实验证实吗?除了4维之外的其他维度是如何卷曲的,以致我们看不见?尚存的其他许多维的谜底在哪里?

“M”除代表“Membrane(膜)”之外,可以代表“Mother(母亲)”,也可以代表“Mystery(神秘之物)”,还可以代表“Magic(魔术)”,那么,它到底代表什么呢?答案只能存在于未来的探索之中,也许它正在向你们招手呢!

科学是人类物质文明和精神文明进步的伟大阶梯,它也映射出一个民族和国家



超弦理论认为,各种粒子从一个基本超弦的不同振荡状态产生,就像一根弦振动形成不同的音调。

发展壮大的坚实脚步。中国是个有13亿人口的发展中的大国，无论多么可观的财力、物力，考虑到巨大的人口，就成了很低的水平。但是，事情也有另外一面。如果13亿人都具备了较高的科学素质，以科学的精神和思想方法面对挑战和机遇，中国人难道不可以为自己乃至全人类的发展和进步，承担起无与伦比的重大责任吗？

同学们，学好科学，增长智慧和才干，并把个人价值的实现与祖国的繁荣富强联系起来，那么人生就一定是充实而精彩的！



发射神舟号飞船

曾有一位旅行者在游览杭州西湖后写过一首打油诗：

昔年曾见此湖图，
不信人间有此湖。
今日打从湖上过，
画工还欠费功夫。

如果你在读了前面那些文字之后，对于物理学的博大精深及影响之巨仍然将信将疑，那也没有关系，还是先学下去吧，或许有一天你会拍打着教科书说：“编者还欠费功夫。”

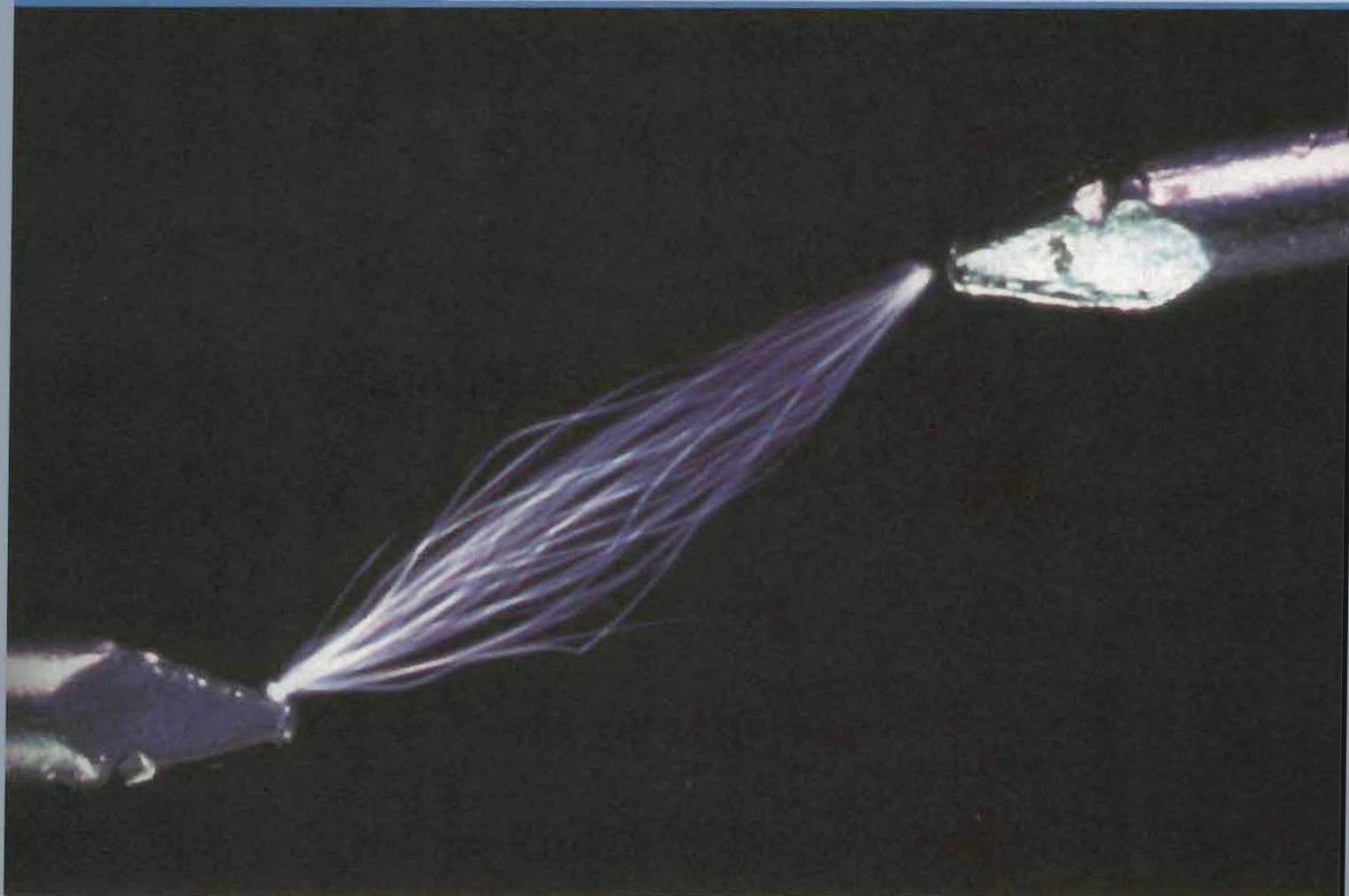


万里长城

科学是可以解答的艺术。科学的前沿是介于可解与难解、已知与未知之间的全新疆域。致力于这个领域的科学家们竭尽全力将可解的边界朝难解方向推进，尽其所能揭示未知领域。

——皮特·梅达瓦^①

第一章 静电场



牛顿曾经说：“我认为自己不过像在海滩上玩耍的男孩，不时地寻找比较光滑的卵石或者比较漂亮的贝壳，以此为乐。而我面前，则是一片尚待发现的真理的大海。”是的，牛顿并没有发现值得我们知道的每一样东西，其中包括电现象、磁现象……

其实，人类研究电现象和磁现象的历史比起研究力学的历史要更加丰富多彩，电和磁的世界也比机械运动的世界更加错综复杂。

从这章开始，我们将进入更有趣的电和磁的世界。

^① 梅达瓦 (Sir Peter B. Medawar, 1915—1987)，阿拉伯裔英国免疫学家，因组织移植方面的研究获 1960 年诺贝尔生理学或医学奖。梅达瓦有许多科学和哲学方面的优秀著作。

公元前600年左右,希腊人泰勒斯(Thales,前624—前546)就发现摩擦过的琥珀吸引轻小物体的现象。公元1世纪,我国学者王充在《论衡》一书中也写下“顿牟掇芥”一语,指的是用玳瑁的壳吸引轻小物体。16世纪,英王御医吉尔伯特(W. Gilbert, 1544—1603)在研究这类现象时首先根据希腊文“ $\eta\lambdaεκτρινο\varsigma$ ”(琥珀)创造了英语中的“electricity”(电)这个词,用来表示琥珀经过摩擦以后具有的性质,并且认为摩擦过的琥珀带有**电荷(electric charge)**。后来,人们发现很多物质都会由于摩擦而带电,并且带电物体之间存在着相互排斥或相互吸引的作用。



古代人发现摩擦过的琥珀能够吸引轻小物体。

摩擦后的物体所带的电荷有两种:用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷是一种,用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷是另一种。同种电荷相斥,异种电荷相吸。人们没有发现对上述两种电荷都排斥或都吸引的电荷。这表明,自然界的电荷只有两种。美国科学家富兰克林(B. Franklin, 1706—1790)把前者命名为**正电荷(positive charge)**,把后者命名为**负电荷(negative charge)**。

到了20世纪,物理学解开了物质分子、原子内部结构之谜,人们对电现象的本质有了更深入的了解。

本章将从物质微观结构的角度认识物体带电的本质、电荷相互作用的基本规律,以及与静止电荷相联系的静电场的基本性质。

1

电荷及其守恒定律

电荷 现在我们已经知道,构成物质的原子本身就包括了带电粒子:带正电的质子和不带电的中子构成原子核,核外有带负电的电子。原子核的正电荷的数量与电子的负电荷的数量一样多,所以整个原子对外界较远位置表现为电中性。

原子核内部的质子和中子被核力紧密地束缚在一起。核力来源于强相互作用,所以原子核的结构一般是很稳定的。核外的电子靠质子的吸引力维系在原子核附近。通常离原子核较远的电子受到的束缚较弱,容易受到外界的作用而脱离原子。当两个物体互相摩擦时,一些束缚得不紧的电子往往从一个物体转移到另一个物体,于是原来电中性的物体由于得到电子而带负电,失去电子的物体则带正电。这就是**摩擦起电(electrification by friction)**的原因。例如,用丝绸摩擦玻璃棒时,玻璃棒上有些电子跑到丝绸上了,玻璃棒因缺少电子而带正电,丝绸因有了多余的电子而带负电。

不同物质的微观结构不同,原子中电子的多少和运动状况也不相同。不仅如此,当大量原子或分子组成大块物质时,由于原子或分子间的相互作用,原子中电子的运动状况也会有

所变化。例如，金属中离原子核最远的电子往往会脱离原子核的束缚而在金属中自由活动，这种电子叫做**自由电子 (free electron)**。失去这种电子的原子便成为带正电的**离子 (ion)**，它们在金属内部排列起来，每个正离子都在自己的平衡位置上振动而不动，只有自由电子穿梭其中，这就使金属成为导体。绝缘体中不存在这种自由电子。

关于金属中原子核、电子所处的状态及其运动，这里描述的情景是简化了的，但它可以有效地解释与金属导电有关的现象，所以也是一个物理模型。

实验

取一对用绝缘柱支持的导体 *A* 和 *B*，使它们彼此接触。起初它们不带电，贴在下部的金属箔是闭合的 (图 1.1-1)。

把带正电荷的物体 *C* 移近导体 *A*，金属箔有什么变化？
这时把 *A* 和 *B* 分开，然后移去 *C*，金属箔又有什么变化？
再让 *A* 和 *B* 接触，又会看到什么现象？
利用上面介绍的金属结构的模型，解释看到的现象。

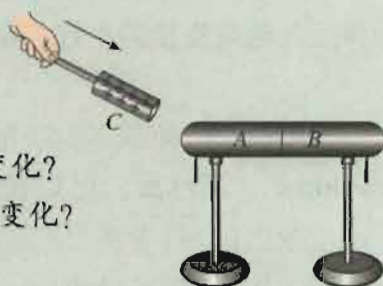


图 1.1-1 静电感应

当一个带电体靠近导体时，由于电荷间相互吸引或排斥，导体中的自由电荷便会趋向或远离带电体，使导体靠近带电体的一端带异号电荷，远离带电体的一端带同号电荷。这种现象叫做**静电感应 (electrostatic induction)**。利用静电感应使金属导体带电的过程叫做**感应起电**。

做一做^①

验电器

为了判断物体是否带电以及所带电荷的种类和多少，从 18 世纪起，人们经常使用一种叫做验电器的简单装置：玻璃瓶内有两片金属箔，用金属丝挂在一根导体棒的下端，棒的上端通过瓶塞从瓶口伸出 (图 1.1-2 甲)。如果把金属箔换成指针，并用金属做外壳，这样的验电器又叫静电计 (图 1.1-2 乙)。

制作一个验电器，并描述如何用验电器检测带电体带电的种类和相对数量。

注意观察：是否只有当带电体与导体棒的上端接触时，金属箔片才会张开？解释看到的现象。



图 1.1-2 验电器和静电计

^① 本书中，“做一做”栏目和“说一说”栏目，其中的内容是扩展性的，不是基本教学内容。同学们可以根据自己的条件在老师的指导下选择学习。

电荷守恒定律 无论是摩擦起电还是感应起电，本质上都是使微观带电粒子（如电子）在物体之间或物体内部转移，而不是创造出了电荷。

大量事实表明，电荷既不会创生，也不会消灭，它只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到另一部分；在转移过程中，电荷的总量保持不变。这个结论叫做**电荷守恒定律**（law of conservation of electric charge）。

近代物理实验发现，在一定条件下，带电粒子可以产生和湮没。例如，一个高能光子在一定条件下可以产生一个正电子^①和一个负电子；一对正、负电子可以同时湮没，转化为光子。不过在这些情况下，带电粒子总是成对产生或湮没，两个粒子带电数量相等但正负相反，而光子又不带电，所以电荷的代数和仍然不变。因此，电荷守恒定律现在的表述是：一个与外界没有电荷交换的系统，电荷的代数和保持不变。它是自然界重要的基本规律之一。

元电荷 电荷的多少叫**电荷量**（electric quantity），在国际单位制中，它的单位是库仑（coulomb），简称库，用C表示。正电荷的电荷量为正值，负电荷的电荷量为负值。

迄今为止，科学实验发现的最小电荷量就是电子所带的电荷量。质子、正电子所带的电荷量与它相同，但符号相反。人们把这个最小的电荷量叫做**元电荷**（elementary charge），用 e 表示。实验还指出，所有带电体的电荷量或者等于 e ，或者是 e 的整数倍。这就是说，电荷量是不能连续变化的物理量。

元电荷 e 的数值最早是由美国物理学家密立根（R. A. Millikan, 1868—1953）测得的。这是他获得诺贝尔物理学奖的重要原因。在密立根实验之后，人们又做了许多测量。现在公认的元电荷的值为

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

在我们的计算中，可取

$$e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

电子的电荷量 e 与电子的质量 m_e 之比，叫做电子的**比荷**（specific charge）。它也是一个重要的物理量。电子的质量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ，所以电子的比荷为

$$\frac{e}{m_e} = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$$

问题与练习

1. 在我国北方天气干燥的季节，脱掉外衣后再去摸金属门把手时，常常会被电击。这是为什么？
2. 在图 1.1-1 所示的实验中，最终 A 带上了 -10^{-8} C 的电荷。实验过程中，是电子由 A 转移到 B 还是由 B 转移到 A？A、B 得到或失去的电子数各是多少？
3. A 为带正电的小球，B 为原来不带电的导体。把 B 放在 A 附近，A、B 之间存在吸

^① 正电子与电子质量相同，与电子的电荷量相等但符号相反，1932 年首次发现。

引力还是排斥力?

4. 如图 1.1-1 那样, 把 A 、 B 在带电体 C 旁边相碰一下后分开, 然后分别接触一个小电动机的两个接线柱, 如果小电动机非常灵敏, 它便会开始转动。当电动机还没有停止时, 又立刻把 A 、 B 在 C 旁边相碰一下分开, 再和小电动机两接线柱接触。如此下去, 小电动机便能不停地转动。这不是成了永动机而违背能量守恒定律吗? 说说你的看法。

2

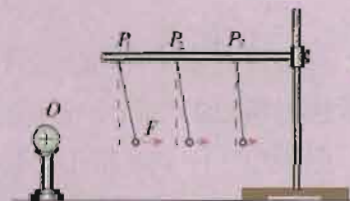
库仑定律

如前所述, 人们最早是通过电荷之间的相互作用来认识电荷的。在牛顿力学成功地研究了物体的机械运动之后, 18 世纪的物理学家们很自然地把带电物体在相互作用中的表现, 与力学中的作用力联系起来了。那么, 电荷之间作用力的大小决定于哪些因素呢?

演示

探究影响电荷间相互作用力的因素

O 是一个带正电的物体。把系在丝线上的带正电的小球先后挂在图 1.2-1 中 P_1 、 P_2 、 P_3 等位置, 比较小球在不同位置所受带电体的作用力的大小。这个力的大小可以通过丝线偏离竖直方向的角度显示出来。



1.2-1 探究影响电荷间相互作用力的因素

使小球处于同一位置, 增大或减少小球所带的电荷量, 比较小球所受作用力的大小。

哪些因素影响电荷间的相互作用力? 这些因素对作用力的大小有什么影响?

实验表明, 电荷之间的作用力随着电荷量的增大而增大, 随着距离的增大而减小。这隐约使我们猜想: 电荷之间的作用力会不会与万有引力具有相似的形式呢? 也就是说, 带电物体之间的相互作用力, 会不会与它们电荷量的乘积成正比, 与它们之间距离的二次方成反比?

事实上, 电荷之间的作用力与引力的相似性早已引起当年一些研究者的注意, 卡文迪许和普里斯特利等人都确信“平方反比”规律适用于电荷间的力。

然而, 他们也发现, 引力与电荷间的力并非完全一样, 而且我们上面的实验也仅仅是定性的, 并不能证实我们的猜想。这一科学问题的解决是由法国学者库仑 (C. A. Coulomb, 1736—1806) 完成的。

库仑定律 库仑在前人工作的基础上通过实验研究确认：真空中两个静止点电荷之间的相互作用力，与它们的电荷量的乘积成正比，与它们的距离的二次方成反比，作用力的方向在它们的连线上。

这个规律叫做库仑定律(Coulomb law)。电荷间这种相互作用力叫做静电力(electrostatic force)或库仑力。

什么是点电荷？任何带电体都有形状和大小，其上的电荷也不会集中在一点上。当带电体间的距离比它们自身的大小大得多，以致带电体的形状、大小及电荷分布状况对它们之间的作用力的影响可以忽略时，这样的带电体就可以看做带电的点，叫做点电荷(point charge)。可见，点电荷类似于力学中的质点，也是一种理想化的物理模型。

库仑的实验 库仑做实验用的装置叫做库仑扭秤。如图1.2-2所示，细银丝的下端悬挂一根绝缘棒，棒的一端是一个带电的小球A，另一端是一个不带电的球B，B与A所受的重力平衡。当把另一个带电的金属球C插入容器并使它靠近A时，A和C之间的作用力使悬丝扭转，通过悬丝扭转的角度可以比较力的大小。改变A和C之间的距离 r ，记录每次悬丝扭转的角度，便可找到力 F 与距离 r 的关系，结果是力 F 与距离 r 的二次方成反比，即

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

在库仑那个年代，还不知道怎样测量物体所带的电荷量，甚至连电荷量的单位都没有。然而事实是，两个相同的金属小球，一个带电、一个不带电，互相接触后，它们对相隔同样距离的第三个带电小球的作用力相等，因此可以断定这两个小球接触后它们所带的电荷量相等。这意味着，如果把一个带电金属小球与另一个不带电的完全相同的金属小球接触，前者的电荷量就会分给后者一半。库仑就用类似的方法，把带电小球的电荷量 q 分为

$$\frac{q}{2}, \frac{q}{4}, \frac{q}{8}, \dots$$

这样库仑又给出了电荷间的作用力与电荷量的关系：力 F 与 q_1 和 q_2 的乘积成正比，即

$$F \propto q_1 q_2 \text{ ①}$$

用一个公式来表示库仑定律，就是

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

式中的 k 是比例系数，叫做静电力常量(electrostatic force constant)。

在国际单位制中，电荷量的单位是库仑(C)、力的单位是牛顿(N)、距离的单位是

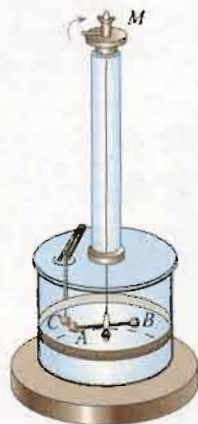


图 1.2-2 库仑扭秤

① 库仑最初的实验是用带电木髓小球进行的，并非金属小球。这个关系式是由库仑作为假设提出的。文中所说的实验可以看做对这个假设的检验。

米 (m)。上述公式中各物理量的单位都已确定, k 的数值就要由实验来测定, 结果是

$$k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

这就是说, 两个电荷量为 1 C 的点电荷在真空中相距 1 m 时, 相互作用力是 $9.0 \times 10^9 \text{ N}$, 差不多相当于一百万吨的物体所受的重力! 由此可见, 库仑是一个非常大的电荷量单位, 我们几乎不可能做到使相距 1 m 的两个物体都带 1 C 的电荷量。通常, 一把梳子和衣袖摩擦后所带的电荷量不到百万分之一库仑, 但天空中发生闪电之前, 巨大的云层中积累的电荷量可达几百库仑。

库仑定律的公式和万有引力的公式在形式上尽管很相似, 但仍是性质不同的两种力。在微观带电粒子的相互作用中, 库仑力比万有引力强得多。

例题 1 已知氢核 (质子) 的质量是 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 电子的质量是 $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 在氢原子内它们之间的最短距离为 $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ 。试比较氢原子中氢核与电子之间的库仑力和万有引力。

解 氢核与电子所带的电荷量都是 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

$$\begin{aligned} F_{\text{库}} &= k \frac{q_1 q_2}{r^2} \\ &= (9.0 \times 10^9) \times \frac{(1.6 \times 10^{-19}) \times (1.6 \times 10^{-19})}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{ N} \\ &= 8.2 \times 10^{-8} \text{ N} \\ F_{\text{引}} &= G \frac{m_1 m_2}{r^2} \\ &= (6.7 \times 10^{-11}) \times \frac{(1.67 \times 10^{-27}) \times (9.1 \times 10^{-31})}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{ N} \\ &= 3.6 \times 10^{-47} \text{ N} \end{aligned}$$

$$\frac{F_{\text{库}}}{F_{\text{引}}} = 2.3 \times 10^{39}$$

可见, 微观粒子间的万有引力远小于库仑力, 因此在研究微观带电粒子的相互作用时, 可以把万有引力忽略。

如果存在两个以上点电荷, 那么每个点电荷都要受到其他所有点电荷对它的作用力。事实表明: 两个点电荷之间的作用力不因第三个点电荷的存在而有所改变。因此, 两个或两个以上点电荷对某一个点电荷的作用力, 等于各点电荷单独对这个电荷的作用力的矢量和。

库仑定律是电磁学的基本定律之一。库仑定律给出的虽然是点电荷间的静电力, 但是任何一个带电体都可以看成是由许多点电荷组成的。所以, 如果知道带电体上的电荷分布, 根据库仑定律和平行四边形定则就可以求出带电体间的静电力的大小和方向。

例題 2 真空中有三个点电荷，它们固定在边长 50 cm 的等边三角形的三个顶点上，每个点电荷都是 $+2 \times 10^{-6} \text{ C}$ ①，求它们各自所受的库仑力。

解 按题意作图(图 1.2-3)。每个点电荷都受到其他两个点电荷的斥力，情况相同，只要求出一个点电荷(例如 q_3)所受的力即可。

q_3 共受 F_1 和 F_2 两个力的作用， $q_1 = q_2 = q_3 = q$ ，相互距离 r 都相同，所以

$$F_1 = F_2 = k \frac{q^2}{r^2} = \frac{9.0 \times 10^9 \times (2 \times 10^{-6})^2}{0.5^2} \text{ N} = 0.144 \text{ N}$$

根据平行四边形定则，合力是

$$F = 2F_1 \cos 30^\circ = 0.25 \text{ N}$$

合力的方向沿 q_1 与 q_2 连线的垂直平分线向外。

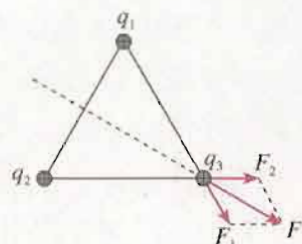


图 1.2-3 求一个点电荷受的库仑力

科学漫步

静电复印

静电现象在技术中有很多应用，其物理原理大多基于静电力的作用。例如，静电喷漆时使被喷的金属件与油漆雾滴带相反的电荷，这样能使漆与金属表面结合得更牢固，而且金属表面凹陷部位也能均匀着漆。又如，静电植绒是使绒丝在静电力的作用下扎入布基的纤维中，使绒丝均匀、牢固地植入。

近年来，随着办公自动化的发展，静电复印机的使用越来越广泛，复印机应用了静电吸附的原理。

复印机的核心部件是有机光导体鼓。它是一个金属圆柱，表面涂覆有机光导体(OPC)②。没有光照时 OPC 是绝缘体，受到光照时变成导体。

1. 复印前先通过机内电路使有机光导体鼓在暗处带电(图 1.2-5 甲)。

2. 复印时强光照到文件上，文件反射的光通过光学系统在鼓上成像，亮处的 OPC 层变成导体，所带的电荷流失，暗处的电荷保留下来。这时在鼓上出现一个电荷组成的“潜像”(图乙)，肉眼不能看见。



图 1.2-4 静电复印机

① 为了表示电荷的正负，有时在电荷量的数值前面加正负号。如果没有正负号，电荷的正负性质应从上下文判断。下一节还有个注解对此做进一步的说明。

② 20 世纪 90 年代以前没有有机光导体，那时金属圆柱表面镀硒，具有同样的功能，圆柱称为硒鼓。现在仍然有人沿用这个名称。

3. 有机光导体鼓在转动, 潜像经过墨粉盒时, 已经带相反电荷的墨粉被吸附在鼓表面带电部位上, 鼓表面的潜像变成了可见的像 (图丙)。

4. 有机光导体鼓继续转动, 经过复印纸时把墨粉印在纸上, 白纸变成了文件的副本 (图丁)。有机光导体鼓不停地转动, 文件就一页一页地复印出来了。

墨粉是掺了树脂胶的, 复印件要加热, 墨粉才能永久地粘在纸上。

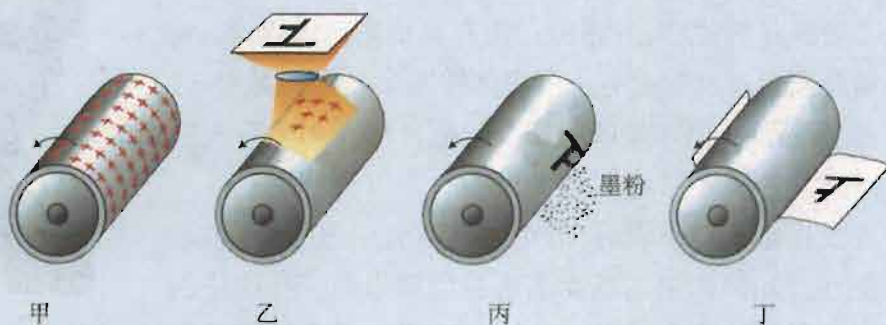


图 1.2-5 静电复印的工作流程

问题与练习

1. 有三个完全一样的金属球, A 球带的电荷量为 q , B 、 C 均不带电。现要使 B 球带的电荷量为 $\frac{3q}{8}$, 应该怎么办?
2. 两个质子在氮原子核中相距约为 10^{-15} m , 它们之间的静电斥力约为多大?
3. 真空中两个相同的带等量异号电荷的金属小球 A 和 B (均可看做点电荷), 分别固定在两处, 两球间静电力为 F 。现用一个不带电的同样的金属小球 C 先与 A 接触, 再与 B 接触, 然后移开 C , 此时 A 、 B 球间的静电力变为多大? 若再使 A 、 B 间距离增大为原来的 2 倍, 则它们间的静电力又为多大?
4. 在边长为 a 的正方形的每个顶点都放置一个电荷量为 q 的点电荷。如果保持它们的位置不变, 每个电荷受到其他三个电荷的静电力的合力是多大?
5. 两个分别用长 13 cm 的绝缘细线悬挂于同一点的相同球形导体, 带有同种等量电荷 (可视为点电荷)。由于静电斥力, 它们之间的距离为 10 cm 。已测得每个球形导体质量是 0.6 g , 求它们所带的电荷量。

3

电场强度

电场 万有引力曾被认为是一种既不需要媒介,也不需经历时间,而是超越空间与时间直接发生的作用力,并被称为超距作用。尽管牛顿本人不赞成这种说法,并指出:“没有其他东西做媒介,一个物体可以超越距离通过真空对另一个物体作用……在我看来,这种思想荒唐之极。”然而,他未能解决这个问题,因而仍然有人把万有引力说成是典型的超距作用。

库仑的平方反比定律似乎表明,静电力像万有引力一样,也是一种超距力。然而,超距作用的观点不可避免地带来一些神秘色彩,与人类的理智和科学追求不符,是18~19世纪的多数科学家难于接受的。使人们摆脱这一困境的是英国人法拉第,一位对事物本性有深刻洞察力的科学家。

19世纪30年代,法拉第提出一种观点,认为在电荷的周围存在着由它产生的**电场 (electric field)**,处在电场中的其他电荷受到的作用力就是这个电场给予的。例如,电荷A对电荷B的作用力,就是电荷A的电场对电荷B的作用;电荷B对电荷A的作用力,就是电荷B的电场对电荷A的作用(图1.3-1)。

近代物理学的理论和实验证实并且发展了法拉第的观点。电场以及磁场已被证明是一种客观存在,并且是互相联系的,统称为**电磁场 (electromagnetic field)**。变化的电磁场以有限的速度——光速,在空间传播。它和分子、原子组成的实物一样具有能量和动量,因而场与实物是物质存在的两种不同形式。

应该指出的是,只有在研究运动的电荷,特别是运动状态迅速变化的电荷时,上述电磁场的实在性才突显出来。在本章中,只讨论静止电荷产生的电场,称为**静电场 (electrostatic field)**。

电场强度 电场明显的特征之一是对场中其他电荷具有作用力,因此在研究电场的性质时,可以从静电力入手。

在上节图1.2-1的实验中,悬挂起来的带电小球受到带电金属球O的静电力,这表明带电金属球周围存在电场。从这个实验还可以看出,小球受到的静电力的大小和方向与小球的位置有关。这表明,电场的强弱是与位置有关的。

图1.2-1实验中的带电小球是用来检验电场是否存在及其强弱分布情况的,称为**试探电荷**,或**检验电荷**;被检验的电场是带电金属球O所激发的,所以金属球O所带的电荷称为**场源电荷**,或**源电荷**。试探电荷的电荷量和尺寸必须充分小,对金属球O上的电荷分布不产生明显



法拉第 (Michael Faraday, 1791—1867), 英国物理学家, 化学家。



图 1.3-1 电荷之间通过电场相互作用

的影响,从而原来的电场不因试探电荷的出现而有明显的变化。

我们不能直接用试探电荷所受的静电力来表示电场的强弱,因为对于电荷量不同的试探电荷,即使在电场的同一点,所受的静电力也不相同。然而,同学们会很自然地想到,如果把一个很小的电荷 q_1 用做试探电荷,它在电场中的某个位置受到的静电力是 F_1 ,另一个同样的电荷在同一位置受到的静电力一定也是 F_1 ;假如两个这样的电荷都在这里,它们总的电荷量是 $2q_1$,它们受到的力很可能就是 $2F_1$ 。依此类推:三个这样的电荷放在这里,电荷量是 $3q_1$,受到的静电力可能是 $3F_1$ ……也就是说,试探电荷在电场中某点受到的力 F 很可能与试探电荷的电荷量 q 成正比

$$F = Eq \quad (1)$$

式中 E 是比例常数,与试探电荷 q 无关。

实验表明,我们的推测是正确的:试探电荷在电场中某个位置所受的力,的确与试探电荷的电荷量成正比。实验还表明,在电场的不同位置,(1)式中的比例常数 E 一般说来是不一样的,它反映了电场在这点的性质,叫做**电场强度(electric field strength)**。根据(1)式我们知道

$$E = \frac{F}{q} \quad (2)$$

按照(2)式,电场强度的单位应是牛[顿]每库[仑],符号为 N/C 。如果 1 C 的电荷在电场中的某点受到的静电力是 1 N ,这点的电场强度就是 1 N/C 。电场强度的另一个单位是伏[特]每米,符号是 V/m ,它与牛每库相等,即 $1\text{ V/m} = 1\text{ N/C}$ ①。

电场强度是矢量。物理学中规定,电场中某点的电场强度的方向与正电荷在该点所受的静电力的方向相同。按照这个规定,负电荷在电场中某点所受的静电力的方向与该点的电场强度的方向相反。

点电荷的电场 电场强度的叠加 电场强度是描述电场性质的物理量,在静电场中,它不随时间改变。图 1.2-1 的实验表明,在某一电荷产生的电场中,不同位置的电场强度一般是不同的。电场强度与产生它的场源电荷有什么关系呢?

点电荷是最简单的场源电荷。设一个点电荷的电荷量为 Q ,与之相距 r 的试探电荷的电荷量为 q ,根据库仑定律,试探电荷所受的力为

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

① 牛每库和伏每米两个单位间的换算关系,将在本章第 6 节谈到。

这里的分析就是一种猜想和假设,它的正确性有待实验的检验。

在物理学中,常常用比值定义物理量,用来表示研究对象的某种性质。例如,用质量 m 与体积 V 的比值定义密度、用位移 l 与时间 t 的比值定义速度 v 、用静电力 F 与电荷量 q 的比值定义电场强度 E ,等等。这样定义一个新的物理量的同时,也就确定了这个新的物理量与原有物理量之间的关系。

在日常生活中也常遇到类似的情况,购买物品时的“单价”就是一例。此外,“人均国民生产总值”等,实际上也是用比值定义的。

依电场强度的定义, $E = \frac{F}{q}$, 所以,
这点电场强度的大小为

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

如果以 Q 为中心作一个球面 (如图 1.3-2), 则球面上各点的电场强度大小相等。当 Q 为正电荷时, E 的方向沿半径向外; 当 Q 为负电荷时, E 的方向沿半径向内。

如果场源是多个点电荷, 事实表明, 电场中某点的电场强度为各个点电荷单独在该点产生的电场强度的矢量和。这说明电场的作用是可以相互叠加的。例如, 图 1.3-3 中 P 点的电场强度, 等于 $+Q_1$ ①在该点产生的电场强度 E_1 与 $-Q_2$ 在该点产生电场强度 E_2 的矢量和。

一个比较大的带电物体不能看做点电荷。在计算它的电场时, 可以把它分做若干小块, 只要每个小块足够小, 就可以把每小块所带的电荷看成点电荷, 然后用点电荷电场强度叠加的方法计算整个带电体的电场。

可以证明, 一个半径为 R 的均匀带电球体 (或球壳) 在球的外部产生的电场, 与一个位于球心的、电荷量相等的点电荷产生的电场相同, 球外各点的电场强度也是

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

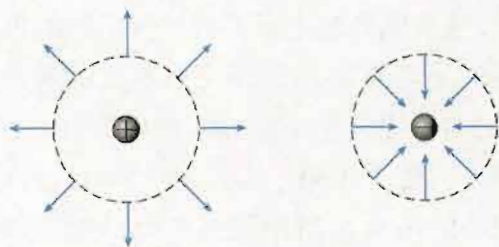
式中的 r 是球心到该点的距离 ($r > R$), Q 为整个球体所带的电荷量。

电场线 形象地了解和描述电场中各点电场强度的大小和方向也很重要。法拉第采用了一个简洁的方法描述电场, 那就是画**电场线** (electric field line)。

电场线是画在电场中的一条条有方向的曲线, 曲线上每点的切线方向表示该点的电场强度方向 (图 1.3-5)。从图 1.3-6 和图 1.3-7 可以看出, 电场线有以下几个特点:

- (1) 电场线从正电荷或无限远出发, 终止于无限远或负电荷;
- (2) 电场线在电场中不相交, 这是因为在电场中任意一点的电场强度不可能有两个方向;

① 一般情况下用 q 或 Q 表示电荷量时, 它们可能代表正电荷, 也可能代表负电荷, 正号或负号写在数值的前面。如 $q_1 = -2 \times 10^{-7} \text{ C}$ 代表一个负电荷, 而 $q_2 = 2 \times 10^{-7} \text{ C}$ 或 $q_2 = +2 \times 10^{-7} \text{ C}$ 代表一个正电荷。字母 q 或 Q 前面不再出现正负号。但有的时候字母前面加写正负号, 目的是强调电荷的正负。



甲 正点电荷的电场 乙 负点电荷的电场

图 1.3-2 点电荷的电场

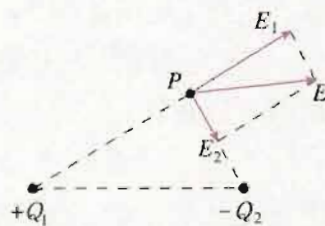


图 1.3-3 电场的叠加

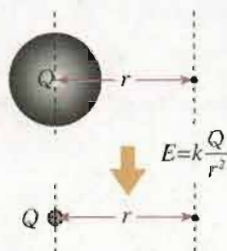


图 1.3-4 研究均匀带电球体 (或球壳) 在球外产生的电场时, 可以认为全部电荷集中在球心。



图 1.3-5 电场线上各点的切线方向与该点的场强方向一致。

(3) 在同一幅图中, 电场强度较大的地方电场线较密, 电场强度较小的地方电场线较疏, 因此在一幅图中可以用电场线的疏密来比较各点电场强度的大小。

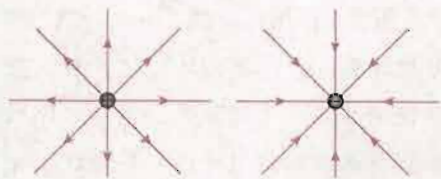


图 1.3-6 点电荷的电场线呈辐射状, 正电荷的电场线向外至无限远, 负电荷则相反。

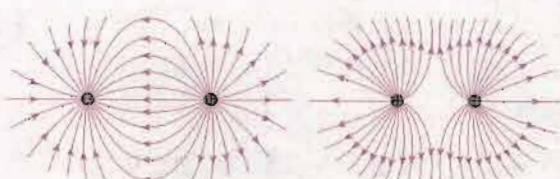


图 1.3-7 等量异号点电荷的电场线和等量同号点电荷的电场线

演示

模拟电场线

电场线的形状可以用实验来模拟。把头发屑悬浮在蓖麻油里, 加上电场, 微屑就按照电场强度的方向排列起来, 显示出电场线的分布情况。图 1.3-8 是两种情况下的照片。



图 1.3-8 模拟电场线

应该指出, 电场线不是实际存在的线, 而是为了形象地描述电场而假想的线。这个实验只是用来模拟电场线的分布。

在图 1.3-9 中, 带电人体的头发由于静电斥力而竖起散开, 其形状也大致显示出电场线的分布。



图 1.3-9 散开的头发大致显示电场线的分布

科学漫步

法拉第和场的概念

相隔一定距离的电荷或磁体间的相互作用是怎样发生的? 这是一个曾经使人感到困惑、引起猜想, 而且有过长期争论的科学问题。19 世纪以前, 不少物理学家持超距作用的观点。

在引力作用是怎样发生的问题上, 牛顿虽不赞成超距作用, 但没有提出自己的观点, 并声称“不做假说”。与牛顿不同, 法拉第在电磁作用问题上明确了自己的见解。他在实验中发现, 电作用和磁作用跟电荷之间或磁体之间的介质有关, 在不同的介质中进行同样的实验, 作用效果不同。这引起法拉第对电磁作用本质的深思。他认为, 电力和磁力不可能是超越空间并与介质无关的超

距作用，并提出：电荷或磁体在空间产生电场或磁场，正是通过场，才把电作用或磁作用传递到别的电荷或磁体。

法拉第不仅提出了场的概念，而且直观地描绘了场的清晰图像。他用电力线（即电场线）和磁力线（即磁感线）形象地描述电场和磁场。力线密的地方场就强，力线疏的地方场就弱，力线上每一点的切线方向表示场强的方向。法拉第用这幅图像说明了诸多电磁现象。例如，1831年他发现电磁感应现象后，借助于磁力线很快地对这一现象做出了清晰的表述：只要通过闭合电路的磁力线数目发生变化，电路里就会产生电流。

对于电磁理论而言，法拉第的场的概念还处于萌芽状态。他不精通数学，他提出的仅是一种不涉及精确的数学工具的描述方法。二三十年之后，麦克斯韦把法拉第关于电磁场的朴素而简单的图像，转换成精致而定量的描述，进而预言了电磁波的存在，并且把光现象与电磁现象统一起来。于是场的概念取得了成功，并日益得到发展。

应该指出的是，法拉第当年确信空间处处存在着有形的力线，如今人们已经不再认同这一看法。既然如此，为什么人们对法拉第的图像还念念不忘呢？

在电磁学发展的初期，法拉第的力线观念给予人们一种物理思想，犹如一座大厦建成以前的“脚手架”，在大厦建成之后，脚手架被拆除了，但这并不意味着脚手架就不重要了。或许今天我们的一些认识正是未来科学大厦的脚手架呢！

匀强电场 如果电场中各点电场强度的大小相等、方向相同，这个电场就叫做匀强电场（uniform electric field）。由于方向相同，匀强电场中的电场线应该是平行的；又由于电场强度大小相等，电场线的密度应该是均匀的。所以匀强电场的电场线是间隔相等的平行线。

带有等量异号电荷的一对平行金属板，如果两板相距很近，它们之间的电场，除边缘部分外，可以看做匀强电场。在两板的外面几乎没有电场。

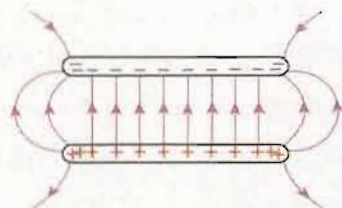


图1.3-10 相距很近的一对带等量异号电荷的平行金属板，它们之间的电场除边缘外，可看做匀强电场。

问题与练习

1. 把试探电荷 q 放到电场中的 A 点，测得它所受的静电力为 F ；再把它放到 B 点，测得它所受的静电力为 nF 。 A 点和 B 点的场强之比 E_A/E_B 是多少？再把另一电荷量为 nq 的试探电荷放到另一点 C ，测得它所受的静电力也是 F 。 A 点和 C 点的场强之比 E_A/E_C 是多少？
2. 氢原子中，电子和质子的平均距离是 $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ 。质子在离它这个距离的位置产生的电场强度是多大？方向如何？电子受到的静电力是多大？方向如何？

3. 场是物理学中的重要概念,除了电场和磁场,还有引力场。物体之间的万有引力就是通过引力场发生作用的,地球附近的引力场叫做重力场。

仿照电场强度的定义,你认为应该怎样定义重力场强度的大小和方向?

4. 有的同学说,电场线一定是带电粒子在电场中运动的轨迹。这种说法对吗?试举例说明。
5. 图 1.3-11 是某区域的电场线分布。A、B、C 是电场中的三个点。

- (1) 哪一点电场最强,哪一点电场最弱?
- (2) 画出各点电场强度的方向。
- (3) 把负的点电荷分别放在这三点,画出所受静电力的方向。

6. 用一条绝缘轻绳悬挂一个带电小球,小球质量为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ kg}$, 所带电荷量为 $+2.0 \times 10^{-8} \text{ C}$ 。现加一水平方向的匀强电场,平衡时绝缘绳与铅垂线成 30° 夹角 (图 1.3-12)。求这个匀强电场的电场强度。

7. 如图 1.3-13, 真空中有两个点电荷 $Q_1 = +4.0 \times 10^{-8} \text{ C}$ 和 $Q_2 = -1.0 \times 10^{-8} \text{ C}$, 分别固定在 x 坐标轴的 $x = 0$ 和 $x = 6 \text{ cm}$ 的位置上。

- (1) x 坐标轴上哪个位置的电场强度为 0?
- (2) x 坐标轴上哪些地方的电场强度方向是沿 x 轴的正方向的?

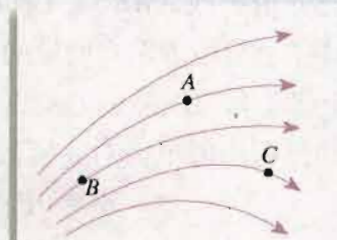


图 1.3-11 研究三个点的电场

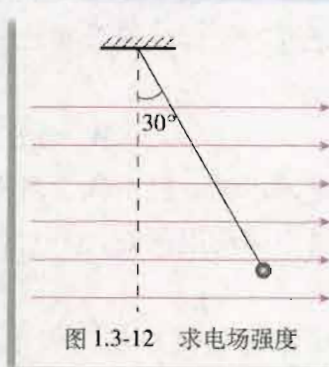


图 1.3-12 求电场强度

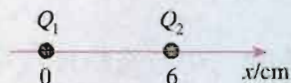


图 1.3-13 研究两个点电荷的电场

4

电势能和电势

我们已经建立了电场强度的概念,知道它是描述电场性质的物理量。倘若把一个静止的试探电荷放入电场中,它将在静电力的作用下做加速运动,经过一段时间以后获得一定的速度,试探电荷的动能增加了。我们知道,这是静电力做功的结果,而功又是能量变化的量度,那么,在这一过程中,是什么能转化成试探电荷的动能呢?为此,我们首先要研究静电力做功的特点。

静电力做功的特点 试探电荷 q 在电场强度为 E 的匀强电场中沿几条不同路径从 A 点移动到 B 点 (图 1.4-1), 我们计算这几种情况下静电力对电荷做的功。

我们把 q 沿直线从 A 移往 B 。在这个过程中 (图 1.4-1 甲), 它受到的静电力 $F = qE$,

静电力与位移 AB 的夹角始终为 θ ，静电力对 q 做的功为

$$W = F \cos \theta \cdot |AB| = qE \cdot |AM|$$

在把 q 沿折线 AMB 从 A 移往 B 的过程中 (图 1.4-1 甲)，在线段 AM 上静电力对 q 所做的功 $W_1 = qE \cdot |AM|$ 。在线段 MB 上，由于移动方向跟静电力垂直，静电力不做功， $W_2 = 0$ 。在整个移动过程中静电力对 q 所做的功 $W = W_1 + W_2$ 。所以

$$W = qE \cdot |AM|$$

再使 q 沿任意曲线 ANB 从 A 移动到 B (图 1.4-1 乙)。我们可以用无数组跟静电力垂直和平行的折线来逼近曲线 ANB 。只要 q 的移动方向与静电力平行，静电力都做功，而这些与静电力平行的短折线的长度之和等于 $|AM|$ 。因此，静电力所做的功还是

$$W = qE \cdot |AM|$$

可见，不论 q 经由什么路径从 A 点移动到 B 点，静电力做的功都是一样的。因此，在匀强电场中移动电荷时，静电力做的功与电荷的起始位置和终止位置有关，但与电荷经过的路径无关。

这个结论虽然是从匀强电场中推导出来的，但是可以证明，对于非匀强电场也是适用的。

电势能 在必修物理课中我们学过，正是由于移动物体时重力做的功与路径无关，同一物体在地面附近的同一位置才具有确定的重力势能^①，从而使重力势能的概念具有实际的意义。同样地，由于移动电荷时静电力做的功与移动的路径无关，电荷在电场中也具有势能，这种势能叫做**电势能** (electric potential energy 或 electrostatic potential energy)，可用 E_p 表示。

思考与讨论

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

物体在地面附近下降时，重力对物体做正功，物体的重力势能减少；物体上升时，重力对物体做负功，物体的重力势能增加。与此相似，当正电荷在电场中从 A 点移动到 B 点时，静电力做正功 (图 1.4-2 甲)，电荷的电势能减少；当电荷从 B 点移动到 A 点时，静电力做负功 (图 1.4-2 乙)，即电荷克服静电力做功，电荷的电势能增加。

^① 在重力势能的零点选定之后。

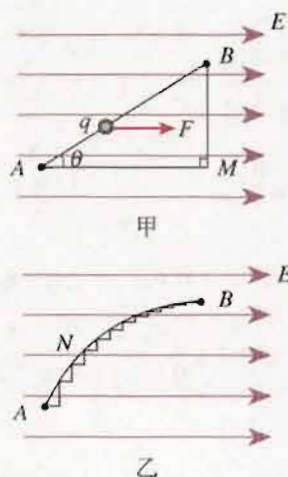


图 1.4-1 计算试探电荷沿不同路径移动时静电力所做的功

这里我们又用到了“通过某种力做的功来研究与它相关的能量”这个科学方法。

功是能量变化的量度。由上面的分析可以得出结论：**静电力做的功等于电势能的减少量**。若用 W_{AB} 表示电荷从 A 点移动到 B 点的过程中静电力做的功， E_{pA} 和 E_{pB} 分别表示电荷在 A 点和 B 点的电势能，则

$$W_{AB} = E_{pA} - E_{pB} \quad (1)$$

通过以上分析可以看到，静电力做的功只能决定电势能的变化量，而不能决定电荷在电场中某点的电势能的数值。只有先把电场中某点的电势能规定为 0，才能确定电荷在电场中其他点的电势能。例如，若规定电荷在 B 点的电势能为 0，则电荷在 A 点的电势能等于 W_{AB} 。也就是说，**电荷在某点的电势能，等于把它从这点移动到零势能位置时静电力做的功**。

通常把电荷在离场源电荷无限远处的电势能规定为 0，或把电荷在大地表面上的电势能规定为 0。

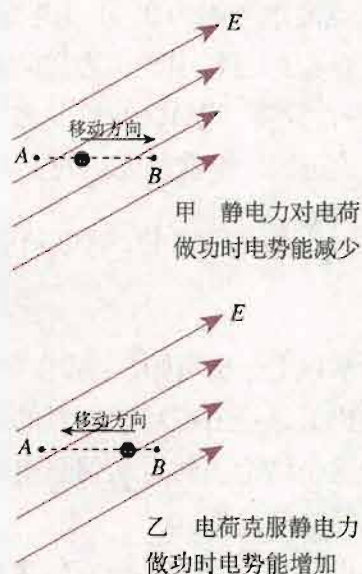


图 1.4-2 电势能的变化与静电力做功的关系

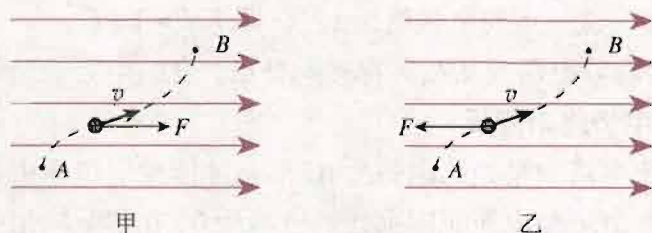


图 1.4-3 同一电场中，在同样的两点间，移动正电荷与移动负电荷，电荷的电势能的增减是相反的。

多么远是“无限远”？在静电问题中，如果离场源电荷已经很远，以至于试探电荷已经不能探测到电场了，这点就可以算是“无限远”。

重力或引力存在的空间称为重力场或引力场。物体在重力场或引力场中移动时，重力或引力做的功，跟电荷在电场中移动时静电力做的功虽然相似，但还是有很大的差异。这是由于存在两种电荷的缘故。在同一电场中，同样从 A 点到 B 点，移动正电荷与移动负电荷，电荷的电势能的变化是相反的（图 1.4-3）。

电势 我们通过静电力的研究认识了电场强度，现在要通过电势能的研究来认识另一个物理量——电势，它同样是表征电场性质的重要物理量。

同学们已经熟悉了用比值定义物理量的方法，现在就来研究电荷在电场中的电势能与它的电荷量的比值，从这里入手研究电势。

有一个电场强度为 $E_{\text{场}}$ 的匀强电场，如图 1.4-4，规定电荷

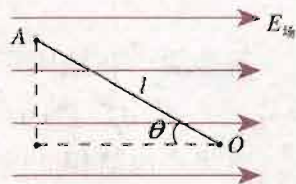


图 1.4-4 电荷在某点的电势能与电荷量的比值、与电荷量的大小无关。

在 O 点的电势能为 0。A 为电场中的任意一点, 电荷 q 在 A 点的电势能 E_{pA} 等于电荷 q 由 A 点移至 O 点的过程中静电力做的功。由于静电力做功与路径无关, 为方便起见, 选择直线路径 AO 进行计算。设 AO 的长度为 l , 则 $E_{pA} = qE_{\text{场}} l \cos \theta$ 。可见, 电荷 q 在任意一点 A 的电势能 E_{pA} 与 q 成正比。也就是说, 处于 A 点的电荷, 无论电荷量大小是多少, 它的电势能跟电荷量的比值 $\frac{E_{pA}}{q}$ 都是相同的。对电场中的不同位置, 由于 l 和 θ 可能不同, 所以这个比值一般是不同的。

从以上分析可知, 电荷在电场中某一点的电势能与它的电荷量的比值, 是由电场中这点的性质决定的, 与试探电荷本身无关。这个结论虽然是从匀强电场得出的, 但可以证明, 对于其他电场同样适用。

电荷在电场中某一点的电势能与它的电荷量的比值, 叫做这一点的电势 (electric potential)。如果用 φ 表示电势, 用 E_p 表示电荷 q 的电势能, 则

$$\varphi = \frac{E_p}{q} \quad (2)$$

在国际单位制中, 电势的单位是伏特 (volt), 符号为 V。在电场中的某一点, 如果电荷量为 1 C 的电荷在这点的电势能是 1 J, 这一点的电势就是 1 V, 即 $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$ 。

在图 1.4-4 中, 假如正的试探电荷沿着电场线从左向右移向 O 点, 它的电势能是逐渐减少的, 因此可以说, 沿着电场线方向电势逐渐降低。

与电势能的情况相似, 应该先规定电场中某处的电势为 0, 然后才能确定电场中其他各点的电势。在物理学的理论研究中常取离场源电荷无限远处的电势为 0, 在实际应用中常取大地的电势为 0。^①

在规定了电势零点之后, 电场中各点的电势可以是正值, 也可以是负值。

电势只有大小, 没有方向, 是个标量。

思考与讨论

在上面关于电势能和电势的讨论及插图中, 我们一直把试探电荷 q 当做正电荷处理。请把 q 当做负电荷, 重复以上讨论。其结果与上面的结果是否一致?

等势面 在地图中常用等高线来表示地势的高低。与此相似, 在电场的图示中常用等势面来表示电势的高低。

电场中电势相同的各点构成的面叫做等势面 (equipotential surface)。与电场线的功能相似, 等势面也是用来形象地描绘电场的。等势面与电场线有什么关系呢?

^① 与实验室相比, 地球的体积巨大。实验器材中的电荷无论流入大地或从大地流出, 对地球的电学状态几乎没有影响, 地球的电势十分稳定, 因此可以把地球的电势定为零电势。

按照国家标准, 电场强度和能量都用字母 E 表示, 而在本节, 电场强度和能量会在同一个关系式中出现。为了区分, 我们用 $E_{\text{场}}$ 表示电场强度, 用 E_p 表示势能, 在某点 A 的势能用 E_{pA} 表示。

在同一个等势面上,任何两点间的电势都相等。所以在同一等势面上移动电荷时静电力不做功。由此可知,等势面一定跟电场线垂直,即跟电场强度的方向垂直。这是因为,假如不垂直,电场强度就有一个沿着等势面的分量,在等势面上移动电荷时静电力就要做功,这个面也就不是等势面了。

这里讨论等势面与电场线的关系时用到了反证法。反证法是科学研究中重要的逻辑方法,在日常生活也常用到。你能举出一些例子吗?

前面说过,沿着电场线的方向,电势越来越低。总起来说,就是:电场线跟等势面垂直,并且由电势高的等势面指向电势低的等势面。

图 1.4-5 是几种电场的等势面和电场线。每幅图中,两个相邻的等势面间的电势之差是相等的。

实际测量电势比测量电场强度容易,所以常用等势面研究电场。先测绘出等势面的形状和分布,再根据电场线与等势面的关系,绘出电场线的分布,于是就知道电场的情况了。设计电子仪器(如示波管、电子显微镜等)中电极的形状、大小和相互位置时,都要利用试验模型测绘等势面的形状和分布,推知电极产生的电场的情况,以便确定符合实际要求的设计方案。

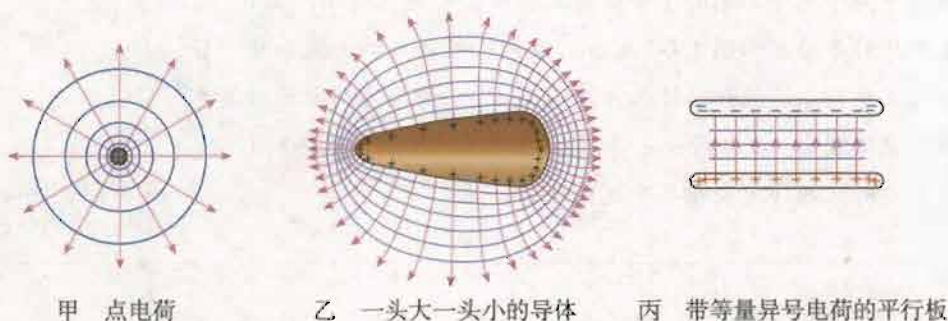


图 1.4-5 几种带电体周围的等势面和电场线

问题与练习

- 把 $q_1 = 4 \times 10^{-9} \text{ C}$ 的试探电荷放在电场中的 A 点, 具有 $6 \times 10^{-8} \text{ J}$ 的电势能, 求 A 点的电势。若把 $q_2 = 2 \times 10^{-10} \text{ C}$ 的试探电荷放在电场中的 A 点, 电荷所具有的电势能是多少?
- 解答以下题目后进行小结: 如何根据试探电荷的电势能来判断电场中两点电势的高低?
 - $+q$ 在 A 点的电势能比在 B 点大, A、B 两点哪点电势高?
 - $-q$ 在 C 点的电势能比在 D 点大, C、D 两点哪点电势高?
 - $+q$ 在 E 点的电势能为负值, $-q$ 在 F 点的电势能是负值, E、F 两点哪点电势高?

3. 根据图1.4-6解答以下题目, 然后进行小结: 如何根据电场线来判断电场中两点电势的高低?

(1) M 、 N 是同一条电场线上的两点, 哪点电势高?

(2) M 、 P 是同一电场中不在同一条电场线上的两点, 哪点电势高?

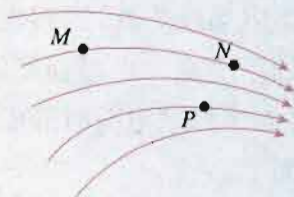


图1.4-6 怎样判断两点电势的高低?

4. 在重力场中可以把物体的重力势能与它的质量的比值定义为重力势。如果物体在地面上的重力势能为0, 试写出重力势的表达式。
5. 以无限远处的电势为0, 请分别把点电荷 $+Q$ 、 $-Q$ 所产生的电场中某一点 P 的电势及试探电荷 $+q$ 、 $-q$ 在 P 点的电势能的特点填在以下表格中。

场源电荷	P 点电势 φ_P 的正负	$+q$ 在 P 点的电势能 E_{+q} 的正负	$-q$ 在 P 点的电势能 E_{-q} 的正负	当 P 点移至离场源电荷较近的位置时		
				φ_P 怎样变化	E_{+q} 怎样变化	E_{-q} 怎样变化
$+Q$						
$-Q$						

6. 电场中两个电势不同的等势面能不能相交? 说明理由。
7. 某电场的等势面如图1.4-7所示, 试画出电场线的大致分布。若单位正电荷 q 沿任一路径从 A 点移到 B 点, 静电力所做的功是多少? 说明理由。正电荷 q 从 A 点移到 C 点, 跟从 B 点移到 C 点, 静电力所做的功是否相等? 说明理由。

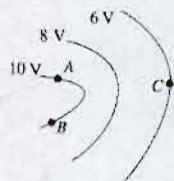


图1.4-7 画出电场线的大致分布

5

电势差

用不同的位置作为测量高度的起点, 同一地方的高度的数值就不相同, 但两个地方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, 电场中某点电势的数值也会改变, 但电场中某两点间的电势的差值却保持不变。正是因为这个缘故, 在物理学中, 电势的差值往往比电势更重要。

电场中两点间电势的差值叫做**电势差 (electric potential difference)**, 也叫**电压 (voltage)**。设电场中 A 点的电势为 φ_A , B 点的电势为 φ_B , 则它们之间的电势差可以表示成

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B \quad (1)$$

也可以表示成

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

显然

$$U_{AB} = -U_{BA} \quad (2)$$

电势差可以是正值,也可以是负值。例如,当A点电势比B点高时, U_{AB} 为正值, U_{BA} 则为负值。

电荷 q 在电场中从A移动到B时,静电力做的功 W_{AB} 等于电荷在A、B两点的电势能之差。由此可以导出静电力做的功与电势差的关系

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

在位移及时间间隔的表达式 $\Delta x = x_2 - x_1$ 和 $\Delta t = t_2 - t_1$ 中, Δx 、 Δt 的正负与下标顺序的关系与这里不一样,应该特别注意。

即

$$W_{AB} = qU_{AB} \quad (3)$$

或

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} \quad (4)$$

因此,知道了电场中两点的电势差,就可以很方便地计算在这两点间移动电荷时静电力做的功,而不必考虑静电力和电荷移动的路径。

例题 在电场中把 $2.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ 的正电荷从A点移到B点,静电力做功 $1.5 \times 10^{-7} \text{ J}$ 。再把这个电荷从B点移到C点,静电力做功 $-4.0 \times 10^{-7} \text{ J}$ 。

- (1) A、B、C三点中哪点电势最高? 哪点电势最低?
- (2) A、B间, B、C间, A、C间的电势差各是多大?
- (3) 把 $-1.5 \times 10^{-9} \text{ C}$ 的电荷从A点移到C点,静电力做多少功?
- (4) 根据以上所得结果,定性地画出电场分布的示意图,标出A、B、C三点可能的位置。

解 (1) 电荷从A移动到B,静电力做正功,所以A点电势比B点高。电荷从B移动到C,静电力做负功,所以C点电势比B点高。但C、B间静电力做功的绝对值比A、B间静电力做功的绝对值大,可以得出C点电势最高,A点次之,B点电势最低。

- (2) 根据(4)式, A、B间的电势差

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{+1.5 \times 10^{-7}}{+2.0 \times 10^{-9}} \text{ V} = 75 \text{ V}$$

A点电势比B点电势高75 V。

同样根据(4)式, B、C间的电势差

$$U_{BC} = \frac{W_{BC}}{q} = \frac{-4.0 \times 10^{-7}}{+2.0 \times 10^{-9}} \text{ V} = -200 \text{ V}$$

C点电势比B点电势高200 V。

A、C间的电势差

$$U_{AC} = U_{AB} + U_{BC} = 75 \text{ V} - 200 \text{ V} = -125 \text{ V}$$

(3) 根据(3)式, 电荷 $q' = -1.5 \times 10^{-9} \text{ C}$ 从 A 移动到 C 时, 静电力做的功为

$$\begin{aligned} W_{AC} &= q' U_{AC} \\ &= (-1.5 \times 10^{-9}) \times (-125) \text{ J} \\ &= 1.875 \times 10^{-7} \text{ J} \end{aligned}$$

即静电力做正功 $1.875 \times 10^{-7} \text{ J}$ 。

在第(1)小题中我们已经知道, A 点电势比 C 点低, 而 q' 是负电荷, 它从电势低的位置向电势高的位置移动时, 静电力应该做正功。所得结果正是这样。

(4) 电场分布示意图和 A 、 B 、 C 三点可能的位置如图 1.5-1。

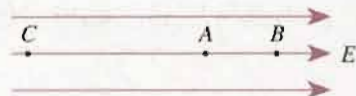


图 1.5-1 例题中电场分布示意图

问题与练习

1. 在某电场中, 已知 A 、 B 两点间的电势差 $U_{AB} = 20 \text{ V}$, $q = -2 \times 10^{-9} \text{ C}$ 的电荷由 A 点移动到 B 点, 静电力做的功是多少? 电势能是增加还是减少, 增加或者减少多少?
2. 在研究微观粒子时常用电子伏特 (eV) 做能量的单位。1 eV 等于一个电子经过 1 V 电压加速后所增加的动能, 那么, 1 eV 等于多少焦耳?
3. 如图 1.5-2, 回答以下问题。

- (1) A 、 B 哪点的电势比较高? 负电荷在哪点的电势能比较大?
- (2) 负电荷由 B 移动到 A 时, 静电力做正功还是负功?
- (3) A 、 B 两点的电势差 U_{AB} 是正的还是负的? U_{BA} 呢?

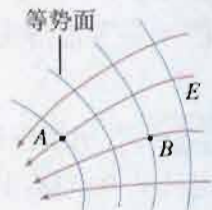


图 1.5-2 讨论 A 、 B 两点的电势差等物理量

6

电势差与电场强度的关系

电场强度和电势都是描述电场的物理量, 它们之间有什么关系? 本节以匀强电场为例进行讨论。如图 1.6-1, 匀强电场的电场强度为 E , 电荷 q 从 A 点移动到 B 点, 静电力做的功 W 与 A 、 B 两点的电势差 U_{AB} 的关系为

$$W = qU_{AB}$$

我们也可以从 q 所受的静电力来计算功。这个力是

$$F = qE$$

因为匀强电场中电场强度 E 处处相等, 所以电荷 q 所受的静电力 F 是一个恒力, 它所做的功为

$$W = Fd = qEd$$

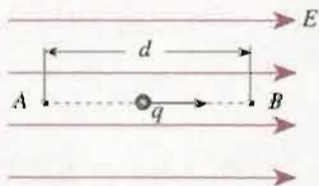


图 1.6-1 讨论匀强电场的电势差与电场强度的关系

比较功的两个计算结果，得到

$$U_{AB} = Ed$$

(1)

即：匀强电场中两点间的电势差等于电场强度与这两点沿电场方向的距离的乘积。

思考与讨论

上面讨论中 A 、 B 两点位于同一条电场线上。如果它们不在同一条电场线上，如图 1.6-2，还能得出以上结论吗？试试看。



图 1.6-2 讨论电势差与电场强度的关系

电场强度与电势差的关系也可以写做

$$E = \frac{U_{AB}}{d}$$

(2)

它的意义是：在匀强电场中，电场强度的大小等于两点间的电势差与两点沿电场强度方向距离的比值。也就是说，电场强度在数值上等于沿电场方向每单位距离上降低的电势。

思考与讨论

由 (2) 式可以得到电场强度的另一个单位：伏[特]每米 (V/m)，这个单位与前面学过的单位牛[顿]每库[仑] (N/C) 相同。请证明这一点。

问题与练习

1. 两块带电的平行金属板相距 10 cm，两板之间的电势差为 9.0×10^3 V。在两板间与两板等距离处有一粒尘埃，带有 -1.6×10^{-7} C 的电荷。这粒尘埃受到的静电力是多大？这粒尘埃在静电力的作用下运动到带正电的金属板，静电力做的功是多少？
2. 带有等量异号电荷、相距 10 cm 的平行板 A 和 B 之间有一个匀强电场 (图 1.6-3)，电场强度 $E = 2 \times 10^4$ V/m，方向向下。电场中 C 点距 B 板 3 cm， D 点距 A 板 2 cm。
 - (1) C 、 D 两点哪点电势高？两点的电势差 U_{CD} 等于多少？
 - (2) 如果令 B 板接地 (即电势 $\varphi_B = 0$)，则 C 和 D 的电势 φ_C 和 φ_D 各是多少？如果令 A 板接地，则 φ_C 和 φ_D 各是多少？在这两种情况中， U_{CD} 相同吗？
 - (3) 一个电子从 C 点移动到 D 点，静电力做多少功？如果使电子先移到 P 点，再移到 D 点，静电力做的功是否会发生变化？

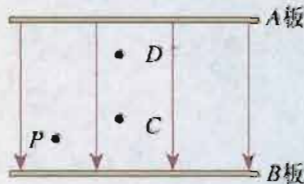


图 1.6-3 讨论 C 、 D 的电势

3. 空气是不导电的。但是如果空气中的电场很强,使得气体分子中带正、负电荷的微粒所受的相反的静电力很大,以至于分子破碎,于是空气中出现了可以自由移动的电荷,空气变成了导体。这个现象叫做空气的“击穿”。

一次实验中,电压为 $4 \times 10^4 \text{ V}$ 的直流电源的两极连在一对平行金属板上,如果把两金属板的距离减小到 1.3 cm ,两板间就会放电。这次实验中空气击穿时的电场强度是多大?

4. 图1.6-4是初中地理某课本中的等高线图(图中数字的单位是米)。小山坡的左边 a 和右边 b 哪一边的地势更陡些? 如果把一个球分别从山坡左右两边滚下(不考虑摩擦等阻碍),哪边的加速度更大? 现在把图1.6-4看成一个描述电势高低的等势线图,图中的单位是伏特, a 和 b 哪一边电势降落得快? 哪一边的电场强度大? 根据两者的对比谈谈你的体会。

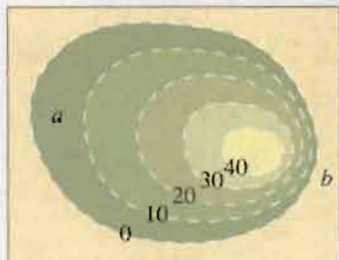


图 1.6-4 小山的等高线图

7

静电现象的应用

静电平衡状态下导体的电场 把一个不带电的金属导体 $ABCD$ 放到电场强度为 E_0 的电场中,导体内的自由电子受到库仑力的作用,将向着与电场相反的方向定向移动(图 1.7-1 甲)。这样,在导体的 AB 面上将出现负电荷,在 CD 面上将出现正电荷。这就是前面研究过的静电感应现象。

导体两面出现的正负电荷在导体内部产生与 E_0 方向相反的电场 E' , 它的电场线用虚线表示(图 1.7-1 乙)。这两个电场叠加,使导体内部的电场减弱。但是,只要导体内部的电场不为 0,自由电子就会继续做定向移动,导体两面的正负电荷就会继续增加,导体内部的电场就会进一步削弱,直到导体内部各点的合电场等于 0 为止。于是,导体内的自由电子不再发生定向移动(图 1.7-1 丙)。这时我们说,导体达到了静电平衡状态(electrostatic equilibrium)。

通过以上分析可以知道,处于静电平衡状态的导体,内部的电场处处为 0。

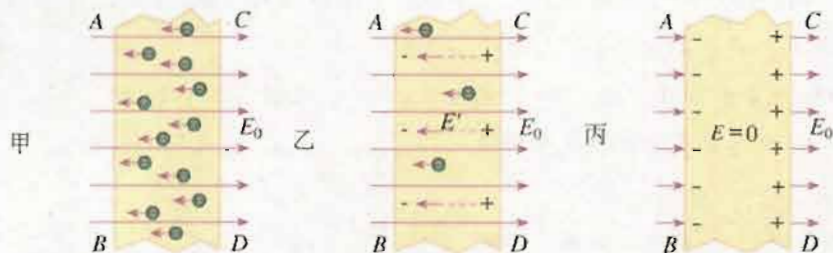


图 1.7-1 静电场中的导体

如果静电平衡时导体内部的电场不为 0,那么自由电子就要在库仑力的作用下做定向移动,那就不是静电平衡状态了。

如果静电平衡时导体不是等势体,那么自由电子就要向电势高的方向做定向移动,那就不是静电平衡状态了。

以上证明又一次用到了反证法。

处于静电平衡状态的导体,其外部表面附近任何一点的场强方向必定与这点的表面垂直。假如不是这样,场强就会有一个沿导体表面的分量,导体上的自由电子就会发生定向移动,这就不是平衡状态了。

根据电势差与电场强度的关系可知,若电场强度处处为0,则任意两点间的电势差为0,也就是导体上各点的电势都相等。所以,处于静电平衡状态的整个导体是个等势体,它的表面是个等势面。

图 1.4-5 乙是一个带电导体外部的电场线和等势面的分布情况。

地球是一个极大的导体,可以认为处于静电平衡状态,所以它是一个等势体。这是我们常常把大地选做零电势体的一个原因。

导体上电荷的分布 一个导体,不论原来是不是带电,放入电场中以后,都会由于静电感应而在导体的不同部位出现电荷。静电平衡时,导体上的电荷分布有以下两个特点。

(1)导体内部没有电荷,电荷只分布在导体的表面。

这是因为,假如导体内部有电荷,导体内部的电场就不可能为0,自由电荷就会发生定向移动,导体也就没有处于静电平衡状态。

(2)在导体外表面,越尖锐的位置电荷的密度(单位面积的电荷量)越大,凹陷的位置几乎没有电荷。

关于这一点,不妨设想一个极端情形的例子:一支缝衣针,带电后由于同种电荷相互排斥,电荷自然要被“挤”到针的两端。

尖端放电 导体尖端的电荷密度很大,附近的电场很强,空气中残留的带电粒子在强电场的作用下发生剧烈的运动,把空气中的气体分子撞“散”,也就是使分子中的正负电荷分离。这个现象叫做空气的**电离(ionization)**。中性的分子电离后变成带负电的自由电子和失去电子而带正电的离子。这些带电粒子在强电场的作用下加速,撞击空气中的分子,使它们进一步电离,产生更多的带电粒子。那些所带电荷与导体尖端的电荷符号相反的粒子,由于被吸引而奔向尖端,与尖端上的电荷中和,这相当于导体从尖端失去电荷。这个现象叫做尖端放电。

避雷针是利用尖端放电避免雷击的一种设施。它是一个或几个尖锐的金属棒,安装在建筑物的顶端,用粗导线与埋在地下的金属板连接,保持与大地的良好接触(图 1.7-2)。当带电的雷雨云接近建筑物时,由于静电感应,金属棒出现与云层相反的电荷。通过尖端放电,这些电荷不断向大气释放,中和空气中的电荷,使建筑物避免雷击。

尖端放电会导致高压设备上电能的损失,所以高压设备中



图 1.7-2 避雷针

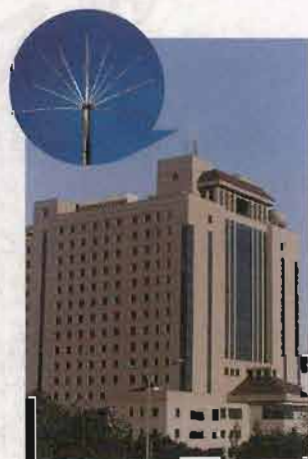


图 1.7-3 现代避雷针往往具有很多组金属尖棒,做成蒲公英花的形状,以增强避雷效果。

导体的表面应该尽量光滑。夜间高压线周围有时会出现一层绿色光晕，俗称电晕，这是一种微弱的尖端放电。

演 示

研究空腔导体内表面的电荷

如图 1.7-4 所示，取两个验电器 A 和 B ，在 B 上装一个几乎封闭的空心金属球 C （仅在上端开有小孔），使 B 和 C 带电， A 不带电。

D 是带有绝缘柄的金属小球。使 D 跟 C 的外部接触，再让 D 跟 A 的金属球接触；这样操作若干次，观察 A 的箔片的变化（图 1.7-4 甲）。

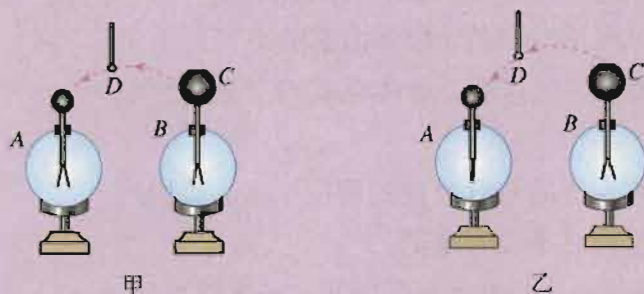


图 1.7-4 研究静电平衡时导体内表面的电荷

重复上述操作，不过这一次让 D 在 C 的内表面与 A 之间反复接触，观察 A 的箔片的变化（图 1.7-4 乙）。

通过这个实验，关于空腔导体内表面与外表面的电荷分布，你能得出什么结论？

静电屏蔽 我们讨论带空腔的导体（图 1.7-5）。静电平衡时，导体壳壁 W 内的电场为 0，内表面又没有电荷，即电场线只能在空腔 C 之外，不会进入空腔之内。所以导体壳内空腔里的电场也处处为 0。也就是说，无论导体外部电场是什么样的，导体内部都不会有电场。

导体壳的这种性质在技术上很有实用价值。把一个电学仪器放在封闭的金属壳里，即使壳外有电场，由于壳内电场强度保持为 0，外电场对壳内的仪器不会产生影响。金属壳的这种作用叫做静电屏蔽。

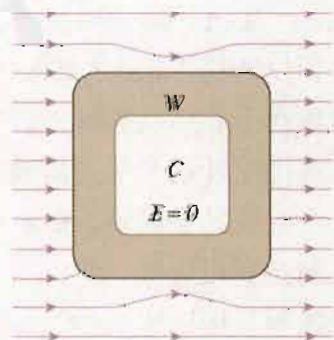


图 1.7-5 导体腔内的电场同样为 0

演示

使带电的金属球靠近验电器，但不接触，箔片是否张开？解释看到的现象。

如图1.7-6，用金属网把验电器罩起来，再使带电金属球靠近验电器，观察箔片是否张开。这个现象说明什么问题？

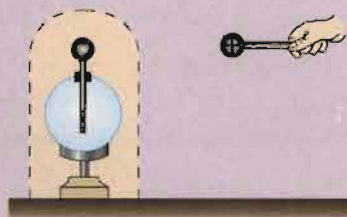


图1.7-6 静电屏蔽

实现静电屏蔽不一定要用密封的金属容器，金属网也能起到屏蔽作用。野外高压输电线受到雷击的可能性很大，所以在三条输电线的上方还有两条导线，它们与大地相连，形成一个稀疏的金属“网”，把高压线屏蔽起来，免遭雷击。



图1.7-7 铁塔上面的两条导线接地，把输电线屏蔽起来。

科学漫步

雷火炼殿

武当山位于湖北省西北部，其主峰天柱峰屹立着一座光耀百里的金殿。殿高5.54米，宽4.4米，进深3.15米，全部为铜铸鎏金。

雷雨交加时，金殿的屋顶常会出现盆大的火球，来回滚动。雨过天晴时，大殿金光灿灿，像被重新炼洗过一般，这就是人们所说的“雷火炼殿”奇观。

武当山重峦叠嶂，气候多变，云层常带大量电荷。金殿屹立峰巅，是一个庞大的优良导体。当带电的积雨云移来时，云层与金殿顶部之间形成巨大电势差，使空气电离，产生电弧，也就是闪电。强大电弧使周围空气剧烈膨胀而爆炸，看似火球，并伴有雷鸣。



图1.7-8 武当山金殿

金殿顶部,除海马等屋脊上的装饰外,很少有带尖的结构,不易放电,所以能使电势差升得比较高,保证“炼殿”之需。如此,金殿五百年灿亮地屹立在天柱峰之巅。

然而,近年来因为金殿周围的一些建筑物常遭雷击,金殿也安装了避雷设施。此后,雷火炼殿的奇观消失了。没有水火的洗炼,金殿的色泽黯淡了许多。

问题与练习

1. 如图 1.7-9, 一个原来不带电的半径为 r 的空心金属球放在绝缘支架上, 右侧放置一个电荷量为 $+Q$ 的点电荷, 点电荷到金属球表面的最近距离为 $2r$ 。



图 1.7-9
研究金属

(1) 标出金属球在静电平衡后左右两侧带电的符号。

(2) 由于静电感应而在金属球上出现了电荷, 它们也在空

间激发电场。这些感应电荷在球心激发的电场强度大小等于多少? 方向如何?

(3) 如果用导线的一端接触球的左侧, 另一端接触球的右侧, 导线是否将球两侧的电荷中和? 为什么?

2. 在实验室中模拟阴雨天的空气, 由此测得当电场强度超过 $3.0 \times 10^6 \text{ V/m}$ 时空气将被击穿而发生放电。现有一片带电的乌云, 距地面 300 m 高, 发生闪电时乌云与地面间的电势差至少有多大?



图 1.7-10 电子点火器的针状电极

3. 在燃气灶和燃气热水器中, 常常安装电子点火器, 接通电子线路时产生高电压, 通过高压放电的电火花来点燃气体。我们看到, 图 1.7-10 中点火器的放电电极做成了钉尖形。这是为什么?

与此相反, 验电器的金属杆上端却固定一个金属球而不做成针尖状, 这又是为什么?

4. 超高压带电作业的工人穿戴的工作服, 为什么要用包含金属丝的织物制成?



图 1.7-11 超高压带电作业的工人所穿衣服的织物中掺入了金属丝

8

电容器的电容

电容器 电容器 (capacitor) 是一种重要的电学元件, 有广泛的应用。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 (空气也是一种电介质), 就组成一个最简单的电容器, 叫做平行板电容器。这两个金属板叫做电容器的极板。实际上, 任何两个彼此绝缘又相距很近的导体, 都可以看成一个电容器。

如图 1.8-1, 把电容器的一个极板与电池组的正极相连, 另一个极板与负极相连, 两个极板将分别带上等量的异号电荷, 这个过程叫做充电。从灵敏电流计可以观察到短暂的充电电流。充电后, 切断与电源的联系, 两个极板上的电荷由于互相吸引而保存下来, 两极板间有电场存在。充电过程中由电源获得的电能储存在电容器中。

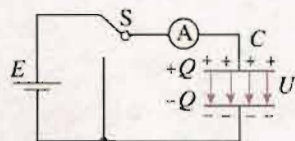


图 1.8-1 电容器充电示意图

如图 1.8-2, 用导线把充电后的电容器的两极板接通, 两极板上的电荷中和, 电容器又不带电了, 这个过程叫做放电。从灵敏电流计可以观察到短暂的放电电流。放电后, 两极板间不再有电场, 电场能转化为其他形式的能量。

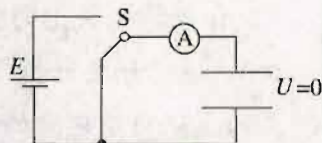


图 1.8-2 电容器放电示意图

电容 充电后电容器的两极板间有电势差, 这个电势差跟电容器所带的电荷量有关。实验表明, 一个电容器所带的电荷量 Q 与电容器两极间的电势差 U 成正比, 比值 $\frac{Q}{U}$ 是一个常量。

这里说的“电容器所带的电荷量”, 是指一个极板所带电荷量的绝对值。

不同的电容器, 这个比值一般是不同的, 可见, 这个比值表征了电容器储存电荷的特性。

电容器所带的电荷量 Q 与电容器两极板间的电势差 U 的比值, 叫做电容器的电容 (capacitance)。用 C 表示电容, 则有

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1)$$

上式表示, 电容器的电容在数值上等于使两极板间的电势差为 1 V 时电容器需要带的电荷量, 需要电荷量多, 表示电容器的电容大。这类似于用不同的容器装水 (图 1.8-3), 要使容器中的水深都为 1 cm, 横截面积大的容器需要的水多。可见, 电容是表示电容器容纳电荷本领的物理量。

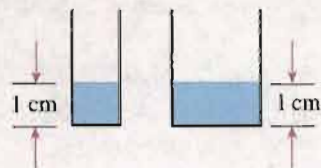


图 1.8-3 不同容器, 使其中的水位升高 1 cm, 所需的水量是不同的。

在国际单位制中, 电容的单位是法拉 (farad), 简称法, 符号是 F。如果一个电容器带 1 C 的电量时, 两极板间的电势差是 1 V, 这个电容器的电容就是 1 F。实际中常用

的单位还有微法(μF)和皮法(pF),它们与法拉的关系是:

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

$$1\ \text{pF} = 10^{-12}\ \text{F}$$

平行板电容器的电容 平行板电容器是最简单的,也是最基本的电容器,几乎所有电容器都是平行板电容器的变形,所以我们先研究影响平行板电容器电容的因素。

现在已经能够制造电容达数千法拉的电容器,主要用在电气设备中,用于储存电能。

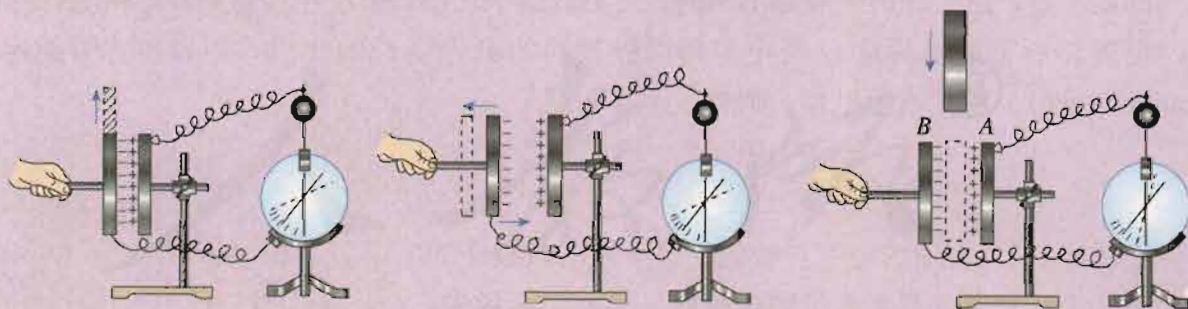
演示

如图 1.8-4,用静电计^①测量已经充电的平行板电容器两极板间的电势差 U 。

1. 保持极板上的电荷量 Q 不变,两极板间的距离 d 也不变,改变两极板的正对面积 S ,通过静电计指针的变化得知两极板间电势差的变化。根据本节(1)式,由电势差的变化判断电容的变化,从而得知电容 C 与正对面积 S 的关系。见图 1.8-4 甲。

2. 保持极板上的电荷量 Q 不变,两极板的正对面积 S 也不变,改变两极板间的距离 d ,通过静电计指针的变化得知两极板间电势差的变化。根据本节(1)式,由电势差的变化判断电容的变化,从而得知电容 C 与两极板间的距离 d 的关系。见图 1.8-4 乙。

3. 保持 Q 、 S 、 d 都不变,在两极板间插入电介质,例如有机玻璃板。通过静电计指针的变化得知两极板间电势差的变化。根据本节(1)式,由电势差的变化判断电容的变化,从而得知两极板间电介质的存在对电容 C 的影响。见图 1.8-4 丙。



甲 保持 Q 和 d 不变,改变两板的正对面积 S ,观察电势差 U 的变化,判断电容 C 的变化。

乙 保持 Q 和 S 不变,改变两板的距离 d ,观察电势差 U 的变化,判断电容 C 的变化。

丙 保持 Q 、 S 、 d 不变,插入电介质,观察电势差 U 的变化,判断电容 C 的变化。

图 1.8-4 研究影响平行板电容器电容大小的因素

^① 静电计实质上也是一种验电器。在图 1.1-2 乙中,把它的金属球与一个导体连接,金属外壳与另一个导体连接(或者金属外壳与另一个导体同时接地),从指针偏转角度的大小可以推知两个导体间电势差的大小。

理论分析表明,当平行板电容器的两极板间是真空时,电容 C 与极板的正对面积 S 、极板距离 d 的关系为

$$C = \frac{S}{4\pi kd} \quad (2)$$

式中 k 为静电力常量。

当两极板间充满同一种介质时,电容变大为真空时的 ϵ_r 倍,即

$$C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi kd} \quad (3)$$

ϵ_r 是一个常数,与电介质的性质有关,称为电介质的相对介电常数(relative dielectric constant)。

表 1.8-1 几种常用电介质的相对介电常数

电介质	空气	煤油	石蜡	陶瓷	玻璃	云母	水
ϵ_r	1.0005	2	2.0~2.1	6	4~11	6~8	81

从上表可以看出,空气的相对介电常数与1十分相近,所以在一般性研究中,空气对电容的影响可以忽略。

常用电容器 常用的电容器,从构造上看,可以分为固定电容器和可变电容器两类。

固定电容器的电容是固定不变的,常用的有聚苯乙烯电容器和电解电容器。

以聚苯乙烯薄膜为电介质,把两层铝箔隔开,卷起来,就制成了聚苯乙烯电容器(图1.8-5甲)。改变铝箔的面积和薄膜的厚度,可以制成不同电容的聚苯乙烯电容器。用陶瓷做电介质的固定电容器也很多。

电解电容器(图1.8-5乙)是用铝箔做一个极板,用铝箔上很薄的一层氧化膜做电介质,用浸过电解液的纸做另一个极板(要靠另一片铝箔与外部引线连接)制成的。由于氧化膜很薄,所以电容较大。

可变电容器由两组铝片组成(图1.8-6),它的电容是可以改变的。固定的一组铝片叫做定片^①,可以转动的一组铝片叫做动片。转动动片,使两组铝片的正对面积发生变化,电容就随着改变。

加在电容器两极板上的电压不能超过某一限度,超过这个限度,电介质将被击穿,电容器损坏,这个极限电压称为击穿电压。电容器外壳上标的是工作电压,或称额定电压,这个数值比击穿电压低。



图1.8-5 固定电容器及其符号



图1.8-6 可变电容器及其符号



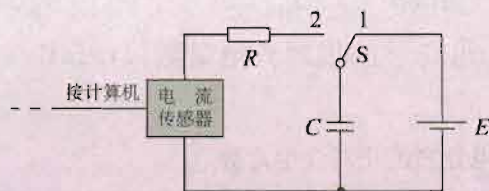
图1.8-7 这个电容器的电容是多少?使用时两极板间的电压不能超过多少伏?

① 图1.8-6中的可变电容器有两组相互独立的定片。

做一做

用传感器观察电容器的放电过程

电流传感器可以像电流表一样测量电流，不同的是，它的反应非常快，可以捕捉到瞬间的电流变化。此外，由于它与计算机相连，能在几秒内画出电流随时间变化的图象。



甲 观察电容器放电的电路图



乙 实验装置

图 1.8-8 用传感器在计算机上观察电容器的放电

照图 1.8-8 甲连接电路。电源用直流 8 V 左右，电容器可选几十微法的电解电容器。先使开关 S 与 1 端相连，电源向电容器充电，这个过程可在瞬间完成。然后把开关 S 掷向 2 端，电容器通过电阻 R 放电，传感器将电流信息传入计算机，屏幕上显示出电流随时间变化的 $I-t$ 曲线。

一位同学测得 $I-t$ 图象如图 1.8-9 所示，他的电源电压是 8 V。

- (1) 在图中画一个竖立的狭长矩形（在图 1.8-9 的最左边），它的面积的物理意义是什么？
- (2) 怎样根据图 1.8-9 估算电容器在全部放电过程中释放的电荷量？试着算一算。
- (3) 根据以上数据估算的电容是多少？

如果要测绘充电时的 $I-t$ 图象，应该怎样连接电路？怎样进行测量操作？得到的曲线可能是什么形状的？

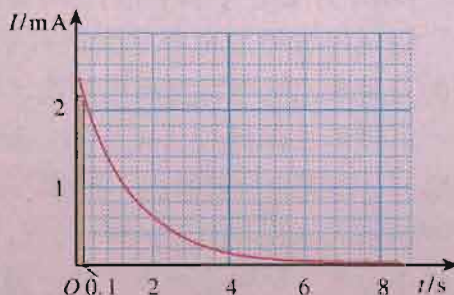


图 1.8-9 一个电容器放电的 $I-t$ 图象

问题与练习

1. 平行板电容器的一个极板与静电计的金属杆相连，另一个极板与静电计金属外壳相连。给电容器充电后，静电计指针偏转一个角度。以下情况中，静电计指针的偏角是增大还是减小？
 - (1) 把两板间的距离减小；
 - (2) 把两板间的相对面积减小；
 - (3) 在两板间插入相对介电常数较大的电介质。

2. 空气中一个平行板电容器的两个极板相距 0.1 mm 。为得到 $2 \mu\text{F}$ 的电容, 每个极板的面积应该多大? 把答案与一扇窗户的面积做比较。
3. 把一个 3 pF 的平行板电容器接在 9 V 的电池上。
 - (1) 保持与电池的连接, 两极板的距离减半, 极板上的电荷增加还是减少? 电荷变化了多少?
 - (2) 移去电池后两极板的距离减半, 极板间的电势差增大还是减小? 电势差变化了多少?
4. 证明: 一个极板间为空气 (真空) 的平行板电容器, 两极板之间的电场强度只与极板所带的电荷量及极板面积有关, 与两极板的距离无关。

9

带电粒子在电场中的运动

带电粒子在电场中受到静电力的作用, 因此要产生加速度, 速度的大小和方向都可能发生变化。对于质量很小的带电粒子, 如电子、质子等, 虽然它们也会受到万有引力 (重力) 的作用, 但万有引力 (重力) 远小于静电力, 可以忽略。

在现代科学实验和技术设备中, 常常利用电场来改变或控制带电粒子的运动。利用电场使带电粒子加速、利用电场使带电粒子偏转, 就是两种最简单的情况。

带电粒子的加速 如图 1.9-1 所示, 在真空中有一对平行金属板, 由于接到电池组上而带电, 两板间的电势差为 U 。若一个质量为 m 、带正电荷 q 的粒子, 在静电力的作用下由静止开始从正极板向负极板运动, 计算它到达负极板时的速度。

在带电粒子的运动过程中, 静电力对它做的功是

$$W = qU$$

设带电粒子到达负极板时的速率为 v , 其动能可以写为

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

由动能定理可知

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

于是求出

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

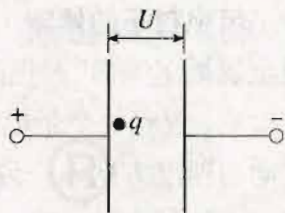


图 1.9-1 计算粒子到达另一个极板时的速度

思考与讨论

上述问题中, 两块金属板是平行的, 两板间的电场是匀强电场。如果两极板是其他形状, 中间的电场不再均匀, 上面的结果是否仍然适用? 为什么?

例题1 炽热的金属丝可以发射电子。在金属丝和金属板之间加以电压 $U = 2\,500\text{ V}$ (图 1.9-2), 发射出的电子在真空中加速后, 从金属板的小孔穿出。电子穿出时的速度有多大? 设电子刚刚离开金属丝时的速度为 0。

解 电荷量为 e 的电子从金属丝移动到金属板, 两处的电势差为 U , 电势能的减少量是 eU 。减少的电势能全部转化为电子的动能, 所以

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

解出速度 v 并把数值代入, 得

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{2eU}{m}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2\,500}{0.9 \times 10^{-30}}} \text{ m/s} \\ &= 3.0 \times 10^7 \text{ m/s} \end{aligned}$$

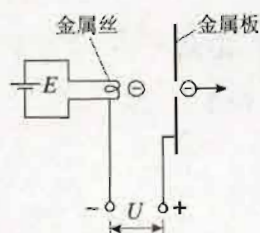


图1.9-2 带电粒子的加速。
电池 E 用来给金属丝加热。

电子的质量 $m = 0.9 \times 10^{-30} \text{ kg}$
和电子的电荷量 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
可以作为已知数据使用。

带电粒子的偏转 如图 1.9-3 所示, 在真空中放置一对金属板 Y 和 Y' , 把两板接到电源上, 于是两板间出现了电场。现有一个带电粒子射入电场, 它受到的静电力的方向与速度方向不一致, 因而发生偏转。下面通过例题做些深入的讨论。

例题2 如图 1.9-3, 两个相同极板 Y 与 Y' 的长度 $l = 6.0 \text{ cm}$, 相距 $d = 2 \text{ cm}$, 极板间的电压 $U = 200 \text{ V}$ 。一个电子沿平行于板面的方向射入电场中, 射入时的速度 $v_0 = 3.0 \times 10^7 \text{ m/s}$ 。把两板间的电场看做匀强电场, 求电子射出电场时沿垂直于板面方向偏移的距离 y 和偏转的角度 θ 。

解 电子在垂直于板面的方向受到静电力。由于电场不随时间改变, 而且是匀强电场, 所以整个运动中在垂直于板面的方向上加速度是不变的。加速度是

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

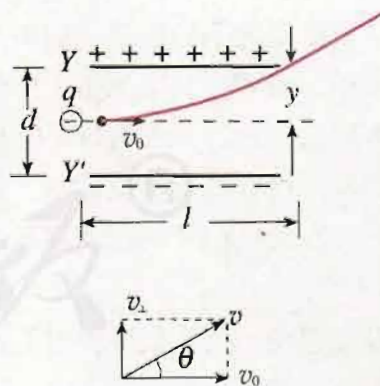


图 1.9-3 带电粒子的偏转

电子射出电场时，在垂直于板面方向偏移的距离为

$$y = \frac{1}{2} at^2$$

其中 t 为飞行时间。由于电子在平行于板面的方向不受力，所以在这个方向做匀速运动，由 $l = v_0 t$ 可求得

$$t = \frac{l}{v_0}$$

将 a 和 t 代入 y 的表达式中，得到

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{eU}{md} \cdot \left(\frac{l}{v_0}\right)^2$$

代入数值后，得

$$y = 0.36 \text{ cm}$$

即电子射出时沿垂直于板面的方向偏离 0.36 cm。

由于电子在平行于板面的方向不受力，它离开电场时，这个方向的分速度仍是 v_0 ，而垂直于板面的分速度是

$$v_{\perp} = at = \frac{eU}{md} \cdot \frac{l}{v_0}$$

离开电场时的偏转角度 θ 可由下式确定

$$\tan \theta = \frac{v_{\perp}}{v_0} = \frac{eUl}{mdv_0^2}$$

代入数值后查表求得

$$\theta = 6.8^\circ$$

带电粒子在匀强电场中的运动，与重物在重力场中的运动相似，有时像自由落体运动，有时像抛体运动，依初速度是否为 0 而定。不过，重物在重力场中受到的力跟质量成正比，因此不同质量的物体具有相同的加速度 g 。但是带电粒子在电场中受到的力跟它的电荷量成正比，而电荷量相同的粒子可能质量不同，因而它们在电场中的加速度可能互不相同，这是静电场与重力场的重要区别。

示波管的原理 有一种电子仪器叫示波器，可以用来观察电信号随时间变化的情况。示波器的核心部件是示波管，图 1.9-4 是它的原理图。它由电子枪、偏转电极和荧光屏组成，管内抽成真空。电子枪的作用是产生高速飞行的一束电子。前面例题 1 实际上讲的就是电子枪的原理。

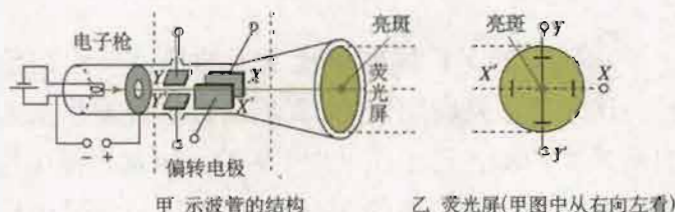


图 1.9-4 示波管原理图

如果在偏转电极 XX' 之间和偏转电极 YY' 之间都没有加电压, 电子束从电子枪射出后沿直线传播, 打在荧光屏中心, 在那里产生一个亮斑。

思考与讨论

1. 如果在电极 XX' 之间不加电压, 但在 YY' 之间加不变的电压, 使 Y 的电势比 Y' 高 (有时说这种情况是“ Y 正、 Y' 负”), 电子束运动过程中受哪个方向的力? 电子将打在荧光屏的什么位置? 试着在图 1.9-4 中标出来。

如果在 YY' 之间不加电压, 而在 XX' 之间加不变的电压 (X 正、 X' 负), 电子将打在荧光屏的什么位置? 试着在图 1.9-4 中标出来。

2. 如果在电极 XX' 之间不加电压, 而在电极 YY' 之间所加的电压按图 1.9-5 所示的规律随时间变化, 在荧光屏上会看到什么图形? 试着画出来。

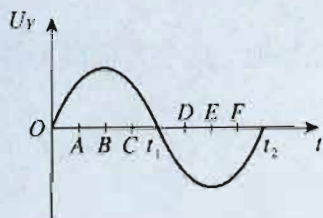


图 1.9-5 YY' 之间的电压

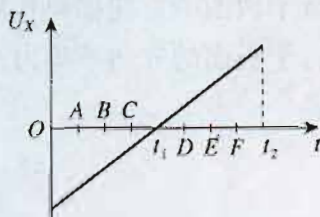


图 1.9-6 XX' 之间的电压

3. 如果 YY' 之间的电压仍然如图 1.9-5 所示, 而在电极 XX' 之间加不变的电压 (X 正、 X' 负), 在荧光屏上会看到什么图形? 若 XX' 之间的电压是“ X 负、 X' 正”呢? 试着画出来。

4. 如果 YY' 之间的电压仍然如图 1.9-5 所示, 而在电极 XX' 之间所加的电压按图 1.9-6 所示的规律变化, 在荧光屏上会看到什么图形? 建议按以下步骤画图。

(1) 在白纸上按图 1.9-4 乙的样子画出荧光屏的放大图;

(2) 在图上分别标出 O 、 A 、 B 、 C 、 t_1 、 D 、 E 、 F 、 t_2 几个时刻光点在荧光屏上的位置;

(3) 根据以上光点的位置, 画出荧光屏上的图形。

示波管的 YY' 偏转电极上加的是待显示的信号电压。这个电压是周期性的, XX' 偏转电极通常接入仪器自身产生的锯齿形电压 (图 1.9-7), 叫做扫描电压。如果信号电压是周期性的, 并且扫描电压与信号电压的周期相同, 就可以在荧光屏上得到待测信号在一个周期内随时间变化的稳定图象了。

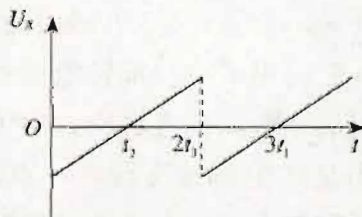


图 1.9-7 扫描电压

科学足迹

密立根实验——电子电荷量的测定

在19世纪末发现电子以后,美国物理学家密立根(R. A. Millikan, 1868—1953)在1907~1913年间进行了多次实验,比较准确地测定了电子的电荷量。

密立根并没有直接测量电子的电荷量,而是测定很小的带电油滴所带的电荷量。一个带电的油滴在匀强电场中所受的静电力是一定的。如图1.9-8,设法使油滴带负电,它所受静电力的方向向上。如果油滴刚好悬浮在空中,那么它受到的静电力的大小正好与油滴所受的重力相等,由此可以测定油滴所带的电荷量。

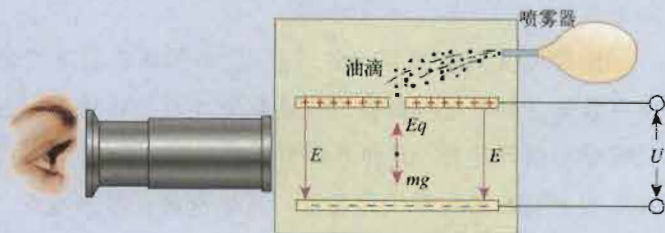


图1.9-8 密立根实验示意图

在图1.9-8中,两块水平放置的金属板分别与电源的正负极相接,板间产生匀强电场,方向竖直向下。用一个喷雾器把许多油滴从上板中间的小孔喷入电场。油滴从喷口出来时由于摩擦而带负电,在电场中受到向上的静电力。油滴的大小、质量、所带电荷量各不相同。在实验中要用显微镜来观察,找到悬浮不动的油滴,根据观测数据算出油滴的质量,再根据已知的电场强度算出油滴的电荷量。这个实验操作难度较大,要求的精密度较高。

在进行了几百次测量以后,密立根发现油滴所带的电荷量虽不相同,但都是某个最小电荷量的整数倍,这个最小电荷量被认为是元电荷 e ,也就是电子的电荷量。

现代实验测出的电子电荷量是

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

到目前为止,科学实验尚未发现比这个电荷量更小的电荷。现代物理学家认为质子、中子等粒子是由更基本的成分——夸克组成的,夸克的电荷量为 $\pm\frac{1}{3}e$ 或 $\pm\frac{2}{3}e$ 。但是目前还没有找到独立存在的夸克,因而有的理论认为夸克是不能单独存在的,只能“集体”存在,其总电荷量为0或 e 。

在密立根的实验,需要测量哪些物理量?请导出用这些物理量计算油滴电荷量的表达式。

科学漫步

范德格拉夫静电加速器

范德格拉夫 (Van de Graaff, 1901—1967) 静电加速器由两部分组成, 一部分是产生高电压的装置, 叫做范德格拉夫起电机; 另一部分是利用高电压加速带电粒子的加速管。

图1.9-9是起电机部分的示意图。金属球壳固定在绝缘支柱顶端, 绝缘材料制成的传送带套在两个转轮上, 由电动机带动循环运转。 E 和 F 是两排金属针 (称做电刷)。

当电刷 E 与几万伏的直流高压电源的正极接通时, E 与大地之间就有几万伏的电势差。由于尖端放电, 正电荷被喷射到传送带上, 并被传送带着向上运动。当正电荷到达电刷 F 附近时, F 上被感应出异号电荷。由于尖端放电, F 上的负电荷与传送带上的正电荷中和, 从而使传送带失去电荷, 而 F 上剩下了正电荷。由于导体带电电荷只能存在于外表面, 所以 F 上的正电荷立即传到金属壳的外表面。这样, 由于传送带的运送, 正电荷不断从直流电源传到球壳的外表面, 从而在金属壳与大地之间形成高电压。

由于电晕放电、局部尖端放电和漏电等现象, 球壳与大地间的电压不能无限制提高。目前可达数百万伏。

带电粒子的加速是在加速管中进行的。加速管安装在起电机的绝缘支柱里面, 管内抽成真空。管顶有离子发生装置, 即粒子源, 底部是靶。粒子源产生的正离子在强电场的作用下, 经过加速可以获得很大的动能。由于粒子加速运动的轨迹是直线, 这类加速器是一种直线加速器。

在医院, 用直线加速器产生的粒子束 (射线) 治疗某些癌症, 称为放射治疗。与使用钴60等放射性物质的放射治疗相比, 使用直线加速器无需放射源, 不开机时完全没有射线, 更加安全, 也便于管理。

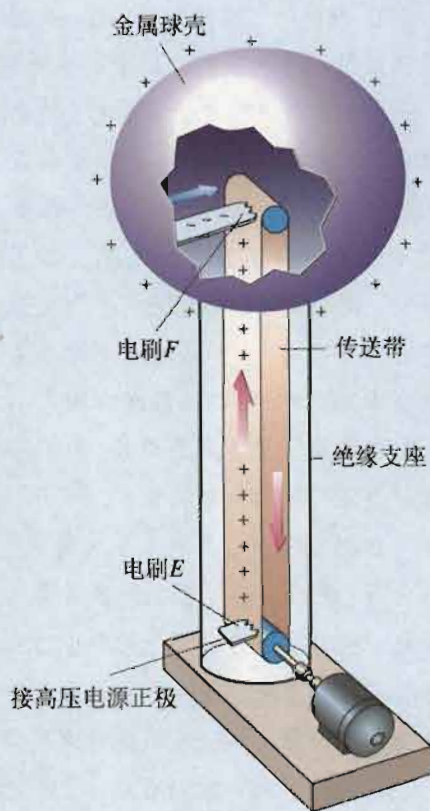


图1.9-9 范德格拉夫起电机示意图



图1.9-10 加速管

问题与练习

- 真空中有一对平行金属板，相距 6.2 cm ，两板电势差为 90 V 。二价的氧离子由静止开始加速，从一个极板到达另一个极板时，动能是多大？
这个问题有几种解法？哪种解法比较简便？
- 某种金属板 M 受到某种紫外线照射时会不停地发射电子，射出的电子具有不同的方向，其速度大小也不相同。在 M 旁放置一个金属网 N 。如果用导线将 MN 连起来， M 射出的电子落到 N 上便会沿导线返回 M ，从而形成电流。现在不把 M 、 N 直接相连，而按图 1.9-11 那样在 M 、 N 之间加一个电压 U ，发现当 $U > 12.5\text{ V}$ 时电流表中就没有电流。
问：被这种紫外线照射出的电子，最大速度是多少？
- 先后让一束电子和一束氢核通过同一对平行板形成的偏转电场，进入时速度方向与板面平行。在下列两种情况下，分别求出离开时电子偏角的正切与氢核偏角的正切之比。
(1) 电子与氢核的初速度相同。
(2) 电子与氢核的初动能相同。
- 让一价氢离子、一价氦离子和二价氦离子的混合物经过同一加速电场由静止开始加速，然后在同一偏转电场里偏转，它们是否会分离为三股粒子束？请通过计算说明。
- 电子从静止出发被 $1\,000\text{ V}$ 的电压加速，然后进入另一个电场强度为 $5\,000\text{ N/C}$ 的匀强偏转电场，进入时的速度方向与偏转电场的方向垂直。已知偏转电极长 6 cm ，求电子离开偏转电场时的速度及其与进入偏转电场时的速度方向之间的夹角。

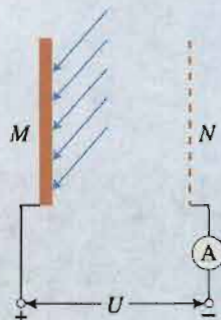
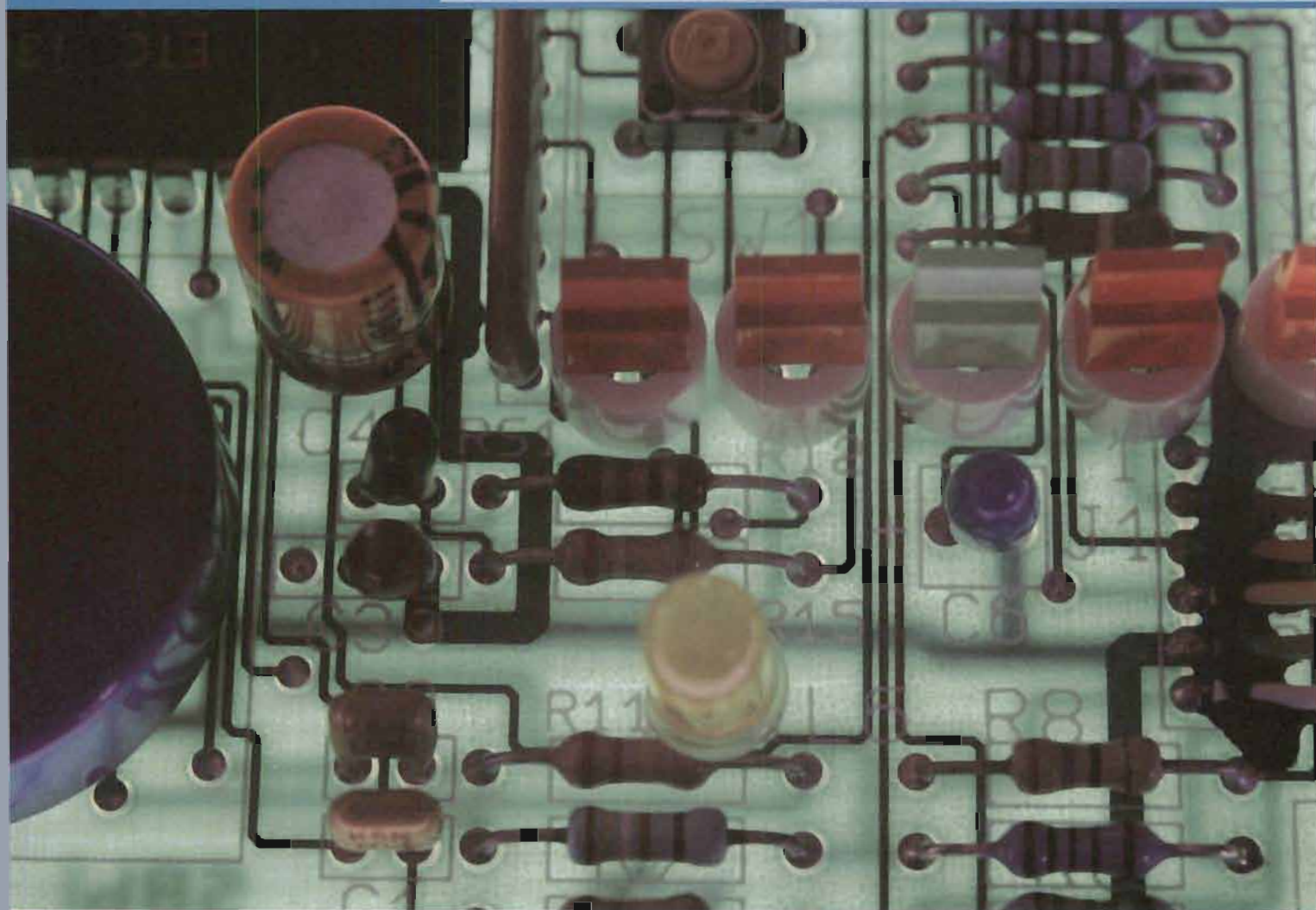


图 1.9-11 求发射电子最大速度

电学已经改变了我们的生活方式,并且产生了一个巨大的工程应用领域。

——埃米里奥·塞格瑞^①

第二章 恒定电流



人类通过对静电场的研究不仅获得了许多关于电现象的知识,而且形成了若干重要的电学概念和研究方法,成为电学理论的重要基础。

但是,无论在自然界还是在生产和生活领域,更广泛存在着的是电荷流动所引起的效应。那么,电荷为什么会流动? 电荷流动服从什么规律,产生哪些效应? 这些效应对人类的生产、生活方式和社会进步又起着怎样的作用呢?

^① 塞格瑞(Emilio G. Segrè, 1905—1989),意大利裔美籍物理学家,因发现反质子与张伯伦(Owen Chamberlain, 1920—2006)共获1959年诺贝尔物理学奖。

1

电源和电流

雷鸣电闪时,强大的电流使天空发出耀眼的闪光,但它只能存在于一瞬间,而手电筒中的小灯泡却能持续发光。这是为什么?

电源 有 A 、 B 两个导体,分别带正、负电荷。从上一章的内容可以知道,它们的周围存在着电场。如果在它们之间连接一条导线 R ,如图 2.1-1,自由电子便会在静电力的作用下沿导线做定向运动, B 失去电子, A 得到电子,周围电场迅速减弱, A 、 B 之间的电势差很快消失,两导体成为一个等势体,达到静电平衡。在这种情况下,导线 R 中的电流只是瞬时的。

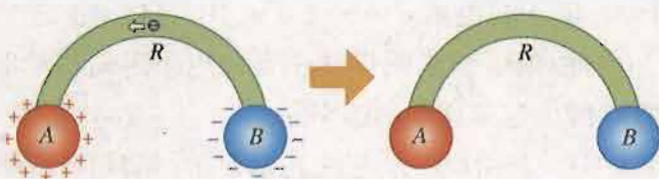


图 2.1-1 自由电子的定向运动使两个带电体成为等势体

倘若在 A 、 B 之间连接一个装置 P (图 2.1-2),它能源源不断地把经过导线 R 流到 A 的电子取走,补充给 B ,使 A 、 B 始终保持一定数量的正、负电荷,这样, A 、 B 周围的空间(包括导线之中)始终存在一定的电场, A 、 B 之间便维持着一定的电势差。由于这个电场,自由电子就能不断地由 B 经过 R 向 A 定向移动,使电路中保持持续的电流。图 2.1-2 中,能把电子从 A 搬运到 B 的装置 P 就是**电源 (power source)**, A 和 B 是电源的两个电极。

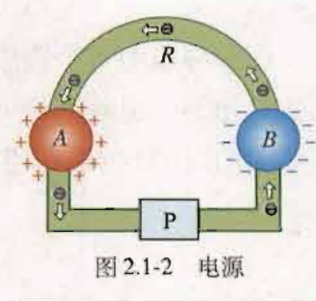


图 2.1-2 电源

恒定电流 详尽的分析表明, A 、 B 周围空间的电场是由电源、导线等电路元件所积累的电荷共同形成的。尽管这些电荷也在运动,但有的流走了,另外的又来补充,所以电荷的分布是稳定的,不随时间变化,电场的分布也不会随时间变化。这种由稳定分布的电荷所产生的稳定的电场,称为**恒定电场 (steady electric field)**。

由于在恒定电场中,任何位置的电荷分布和电场强度都不随时间变化,所以它的基本性质与静电场相同。在静电场中所讲的电势、电势差及其与电场强度的关系等,在恒定电场中同样适用。

由于恒定电场的作用,导体中自由电荷定向运动的速率增加;而运动过程中会与导体内不动的粒子碰撞从而减速,因此自由电荷定向运动的平均速率不随时间变化。如果我们在这个电路中串联一个电流表,电流表的读数将保持恒定。我们把大小、方向都不随时间变化的电流称为**恒定电流 (steady current)**。这一章我们研究恒定电流。

电流的强弱程度用**电流 (electric current)** 这个物理量表示。电流越大, 单位时间内通过导体横截面的电荷量就越多, 如果用 I 表示电流、 q 表示在时间 t 内通过导体横截面的电荷量, 则有

$$q = It \quad (1)$$

国际单位制中, 电流的单位是**安培 (ampere)**, 简称**安**, 符号是 A 。从上述公式可知, $1 C = 1 A \cdot s$ 。常用的电流单位还有**毫安 (mA)** 和**微安 (μA)**:

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} A$$

$$1 \mu A = 10^{-6} A$$

例题 1 有一条横截面积 $S = 1 \text{ mm}^2$ 的铜导线, 通过的电流 $I = 1 A$ 。已知铜的密度 $\rho = 8.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 铜的摩尔质量 $M = 6.4 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$, 阿伏加德罗常数 $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, 电子的电量 $e = -1.6 \times 10^{-19} C$ 。在这个问题中可以认为导线中每个铜原子贡献一个自由电子。求铜导线中自由电子定向移动的速率。

解 设自由电子在导线内定向移动的速率是 v 。

取一段导线 (图 2.1-3), 自由电子从它的左端定向移动到右端所用的时间记为 t , 则这段导线的长度为 vt 、体积为 vtS 、质量为 ρvtS 。这段导线中的原子数为

$$n = \frac{\rho vtS}{M} N_A$$

由于导线中每个铜原子贡献一个自由电子, 所以这段导线中的自由电子数目与铜原子的数目相等, 也等于 n 。

因为时间 t 内这些电子全部通过右端横截面, 因此通过横截面的电荷量是

$$q = ne = \frac{\rho vtS}{M} N_A e$$

把这个式子代入 $I = \frac{q}{t}$, 得

$$I = \frac{\rho v S N_A e}{M}$$

从中解出

$$v = \frac{IM}{\rho S N_A e}$$

代入数值后得

$$v = 7.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

按照这个例题得出的速率, 自由电子通过一条 1 m 长的导线需要 3 个多小时! 这与我们平时开关电灯时的事实似乎不符。实际上, 闭合开关的瞬间, 电路中的各个位置迅速建立了恒定电场, 在恒定电场的作用下, 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。

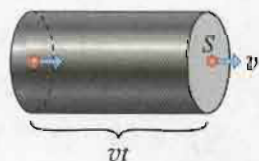


图 2.1-3 导线左端的自由电子经过时间 t 到达右端。

问题与练习

1. 用导线把两个带异号电荷的导体相连,导线中的电流只能存在一瞬间;而用导线把电池的正负极相连,导线中可以产生持续的电流,这是为什么?
2. 一条导线中的电流为 1.6 A , 在 1 s 内通过这条导线某一横截面的电子有多少个?
3. 原子中的电子绕原子核的运动可以等效为环形电流。设氢原子的电子以速率 v 在半径为 r 的圆周轨道上绕核运动, 电子的电荷量为 e , 等效电流有多大?

2

电动势

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,下面我们按正电荷移动的说法进行讨论。

在外电路,正电荷由电源正极流向负极。电源之所以能维持外电路中稳定的电流,是因为它有能力把来到负极的正电荷经过电源内部不断地搬运到正极。

由于正、负极总保持一定数量的正、负电荷,所以电源内部总存在着由正极指向负极的电场。在这个电场中,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。也就是说,电源把正电荷从负极搬运到正极的过程中,这种非静电力在做功,使电荷的电势能增加。

在电池中,非静电力是化学作用,它使化学能转化为电势能;在发电机中,非静电力是电磁作用,它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转化为电势能的装置。

电源移动电荷,增加电荷的电势能,这与抽水机抽水增加水的重力势能相似。不同的抽水机工作时,水能够被举起的高度有所不同,即单位质量的水所增加的重力势能不同。与此类似,在不同的电源中,非静电力做功的本领也不相同:有些电源,它的两极间的电势差比较大^①,那是因为它把一定数量的正电荷在电源内部从负极搬运到正极时,非静电力做较多的功,电荷的电势能增加得比较多;而在另一些电源中,非静电力对同样多的电荷只做较少的功,电势能增加得较少,电源两极间的电势差也就比较小。物理学中用电

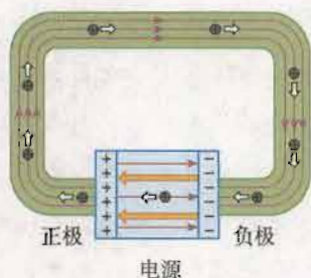


图 2.2-1 非静电力使正电荷在电源内部由负极移至正极。

这里我们又一次看到了做功与能量变化之间的关系。

^① 这里说的两极间电势差的大小均指电源不接用电器的情况。

电动势 (electromotive force, e.m.f) 来表明电源的这种特性。

电动势在数值上等于非静电力把1 C的正电荷在电源内从负极移送到正极所做的功。如果移送电荷 q 时非静电力所做的功为 W ，那么电动势 E ^①表示为

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

式中 W 、 q 的单位分别是焦耳 (J)、库仑 (C)；电动势 E 的单位与电势、电势差的单位相同，是伏特 (V)。电动势由电源中非静电力的特性决定，跟电源的体积无关，也跟外电路无关。

电源内部也是由导体组成的，所以也有电阻，这个电阻叫做电源的**内阻 (internal resistance)**。内阻和电动势同为电源的重要参数。

说—说^②

可以看出，电动势也是用比值定义的物理量。请你把电动势的定义完整地说出来。

科学漫步

生活中的电池

现代生活离不开电池。电子表、照相机、移动电话、计算机、汽车以及许多电子产品，都需要配备各式各样的电池。电动势是电池的重要参数，电动势取决于电池正、负极材料及电解液的化学性质，跟电池体积的大小无关。

电池的另一个重要参数是容量。电池的容量就是电池放电时能输出的总电荷量，通常以安培小时 (A·h) 或毫安小时 (mA·h) 做单位。例如，15 A·h 的蓄电池充电后以 1.5 A 电流为用电器供电，大约可以工作 10 h。电池的容量与放电状态也有关系，同样的电池，小电流、间断性放电就比大电流、连续放电的容量大。

电池还有一个重要参数是电池内的电阻，即内阻，电池的内阻在使用过程中变化较大。对同一种电池来说，体积越大，电池的容量越大，内阻越小。

你认识生活中的这些电池吗？



太阳电池

太阳电池是直接将光能转化为电能的电源，通常都是多单元组合使用。太阳电池是人造卫星、宇宙飞船的主要能源。也用于无人灯塔和山地气象站等。照片为太阳电池供电的试验型汽车。



干电池

电动势约 1.5 V。把多个薄片状的干电池串联做成“积层电池”，具有较高的电动势。目前广泛使用的是碱性干电池，容量比传统的碳锌干电池大很多。

① 按照国家标准，电动势也用字母 E 表示，使用时要注意与电场强度 E 的区别。

② 本书中，“说—说”栏目和“做—做”栏目，其中的内容是扩展性的，不是基本教学内容。同学们可以根据自己的条件在教师的指导下选择学习。



锌汞电池

电动势约1.2 V。锌汞电池体积小,电压稳定。常用在电子手表和小型仪表中。



锂电池

因电极材料不同,电动势为3 V或3.6 V不等。锂电池是目前相同体积中容量最大的电池,广泛用在数码相机、笔记本电脑、移动电话等电子产品中。



铅蓄电池

电动势约2 V。铅蓄电池可以反复充电使用,电解液是硫酸溶液,内阻很小,广泛用于汽车、摩托车中。

做一做

调查常用可充电电池

目前市场上可充电电池的种类很多,有的外形与普通电池相同,可以在多种场合代替普通电池使用;有的则只能配合特定型号的移动电话、数码相机、便携式计算机使用。它们的电动势、容量各不相同,价格相差很大。在调查之后,针对以下问题中的一两个,写出一篇调查报告。

1. 常用可充电电池按电极材料和电解液性质可以划分为多少种类?
2. 各种可充电电池分别适用于什么设备?
3. 可充电电池在充电时要注意什么?
4. 从价格和方便程度等因素综合考虑,你家使用电池的器材各应该选择什么电池?
5. 哪些种类的电池对环境有较大的污染,哪些则相对干净?

调查的途径可以有多种,例如收集说明书、翻阅书籍,还可在因特网上任意选择一个具有查询功能的网站,输入关键词“充电电池”进行查询,也可向有经验的人请教。

问题与练习

1. 某电子点火器用的是1号干电池,某袖珍收音机用的是7号电池。同一品种的新的1号干电池和7号干电池的电动势是否相同?内阻是否相同?
2. 手电筒中的干电池给某小灯泡供电时,电流为0.3 A,在某次接通开关的10 s时间内,一节干电池中有多少化学能转化为电能?
3. 某个电动势为 E 的电源工作时,电流为 I ,乘积 EI 的单位是什么?从电动势的意义来考虑, EI 表示什么?

3

欧姆定律

欧姆定律 电流的大小与什么因素有关？在初中我们曾经探究过导体中的电流跟导体两端电压、导体电阻的关系，现在我们进一步讨论这个关系。

演 示

如图 2.3-1，用电流表测量通过导体 A 的电流，用电压表测量 A 两端的电压。图中虚线框内是一个能提供可变电压的电路（其原理将在以后讨论，在此暂不涉及），调节滑动变阻器的滑片，可以得到关于导体 A 的几组电压、电流数据。随后，换用另一个导体 B 代替 A 进行实验，又可以得到关于导体 B 的多组电压、电流数据。

请你观察和记录实验数据，并在同一坐标系中作出 A 、 B 的 U - I 图象。

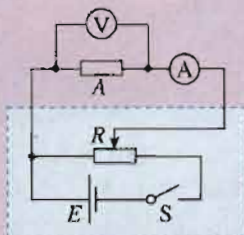


图 2.3-1 测量导体电流和电压

图 2.3-2 是根据某实验作出的关于金属导体 A 和 B 的 U - I 图象。从图中可以看出，同一金属导体的 U - I 图象是一条过原点的直线。这表明，同一导体，不管电流、电压怎样变化，电压跟电流的比值都是一个常数，这个结论可以写成

$$R = \frac{U}{I}$$

R 是一个只跟导体本身性质有关而与通过的电流无关的物理量。图中不同导体 U - I 图象的倾斜程度不同，表明不同导体的 R 值不同。从以上公式可以看到，在电压 U 相同时， R 越大的导体电流 I 越小。看来 R 的值反映了导体对电流的阻碍作用，所以物理学中把它叫做导体的电阻 (resistance)。有了电阻的概念，我们可以把电压、电流、电阻的关系写成

$$I = \frac{U}{R} \quad (1)$$

上式可以表述为：导体中的电流跟导体两端的电压 U 成正比，跟导体的电阻 R 成反比。这就是我们在初中学过的欧姆定律 (Ohm law)。

电阻的单位是欧姆 (ohm)，简称欧，符号是 Ω 。它是根据欧姆定律规定的：如果某段导体两端的电压是 1 V ，通过的电流是 1 A ，这段导体的电阻就是 1Ω ，所以， $1\Omega = 1\text{ V/A}$ 。常用的电阻单位还有千欧 ($\text{k}\Omega$) 和兆欧 ($\text{M}\Omega$)：

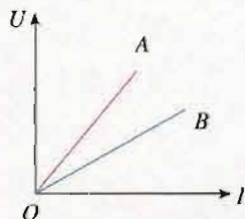


图 2.3-2 导体 A 、 B 的 U - I 图象

$$1 \text{ k}\Omega = 10^3 \Omega$$

$$1 \text{ M}\Omega = 10^6 \Omega$$

图 2.3-3 与图 2.3-2 看起来十分相像，不要混淆。

导体的伏安特性曲线 在实际应用中，常用纵坐标表示电流 I 、横坐标表示电压 U ，这样画出的 I - U 图象叫做导体的**伏安特性曲线**。对于金属导体，在温度没有显著变化时，电阻几乎是不变的（不随电流、电压改变），它的伏安特性曲线是一条直线，具有这种伏安特性的电学元件叫做线性元件。图 2.3-2 中导体 A、B 的伏安特性曲线如图 2.3-3 所示。

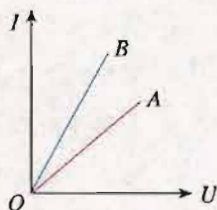


图 2.3-3 导体 A、B 的伏安特性曲线

欧姆定律是个实验定律，实验中用的都是金属导体。这个结论对其他导体是否适用，仍然需要实验的检验。实验表明，除金属外，欧姆定律对电解质溶液也适用，但对气态导体（如日光灯管、霓虹灯管中的气体）和半导体元件并不适用。也就是说，在这些情况下电流与电压不成正比，这类电学元件叫做非线性元件。

实验

测绘小灯泡的伏安特性曲线

实验装置如图 2.3-4，L 为额定电流 0.2 A 左右的小灯泡，虚线框内是能够提供可变电圧的电路。开关闭合前，调节滑动变阻器的滑片，使它靠近电路图中变阻器左端的接线柱，这时小灯泡两端的电压为 0。

闭合开关后逐渐移动变阻器的滑片，增加小灯泡两端的电压，从 0 开始记录电流表和电压表的多组读数，直至电流达到它的额定电流为止。

根据实验数据在方格纸上作出小灯泡灯丝的伏安特性曲线。也可以把测量数据输入计算机中，利用数表软件直接生成伏安特性曲线。

你在自己得到的曲线中有什么新的发现？你怎样解释这个发现？

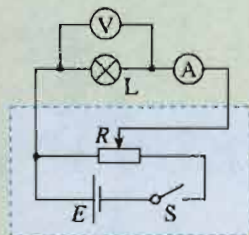


图 2.3-4 测绘小灯泡伏安特性曲线的电路图

说一说

图 2.3-5 是某晶体二极管的伏安特性曲线，请你根据这条曲线描述通过二极管的电流与二极管两端电压的关系。

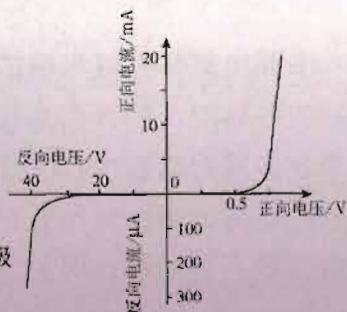


图 2.3-5 某晶体二极管的伏安特性曲线

问题与练习

1. 某电流表可以测量的最大电流是10 mA。已知一个电阻两端的电压是8 V时，通过的电流是2 mA，如果给这个电阻加上50 V的电压，能否用这个电流表测量通过这个电阻的电流？
2. 某同学对四个电阻各进行了一次测量，把每个电阻两端的电压和通过它的电流在 U - I 坐标系中描点，得到了图 2.3-6 中 a 、 b 、 c 、 d 四个点。请比较这四个电阻值的大小。
3. 有三个电阻： $R_A = 5\ \Omega$ 、 $R_B = 10\ \Omega$ 、 $R_C = 2.5\ \Omega$ ，它们的伏安特性曲线都是过原点的直线。请在同一坐标系中作出它们的伏安特性曲线，并在线旁标明 A 、 B 、 C 。
4. 一个小灯泡，当它两端的电压在3 V 以下时，电阻大致等于 $14\ \Omega$ 不变；当它两端的电压增大到4 V 时，钨丝温度明显升高，它的电阻为 $16\ \Omega$ ；当电压增大到5 V 时，它的电阻为 $19\ \Omega$ 。它在0~5 V 范围内的伏安特性曲线大概是怎样的？请画出草图。
5. 初中数学课中已经学过，正比例函数可以表示为 $y = kx$ 的形式，它的图象是一条过原点的直线， k 的大小描述直线的倾斜程度，叫做直线的斜率。请证明：当导体的伏安特性曲线是一条通过原点的直线时，其斜率等于这个导体的电阻的倒数。

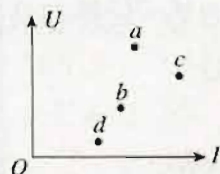


图 2.3-6 哪个电阻大

4

串联电路和并联电路

我们在初中已经知道，把几个导体依次首尾相连，接入电路，这样的连接方式叫做**串联 (series connection)**，如图 2.4-1；把几个导体的一端连在一起，另一端也连在一起，然后把这两端接入电路，这样的连接方式叫做**并联 (parallel connection)**，如图 2.4-2。这一节，我们分别研究串联电路和并联电路中各部分电流的关系、各部分电压的关系，以及各部分电阻的关系。

在初中，我们已经研究过其中的某些问题，现在用高中的物理知识做进一步分析。

串联电路和并联电路的电流 我们已经知道，恒定电流电路内各处电荷的分布是稳定的，任何位置的电荷都不可能越来越多或越来越少。在图 2.4-1 的串联电路中，既然电路中各处的电荷分布保持不变，相同时间内通过 0、1、2、3 各点的电荷量必然相等，因此，**串联电路各处的电流相等**，即

$$I_0 = I_1 = I_2 = I_3$$



图 2.4-1 串联电路

在图 2.4-2 的并联电路中, 只有在相同时间内流过于路 0 点的电荷量等于进入各支路 1、2、3 各点的电荷量之和, 才能保持电路各处的电荷量的分布恒定不变。因此, 并联电路的总电流等于各支路电流之和, 即

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3$$



图 2.4-2 并联电路

串联电路和并联电路的电压 在图 2.4-1 的串联电路中, 如果以 φ_0 、 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 分别表示电路中 0、1、2、3 各点的电势, 以 U_{01} 、 U_{12} 、 U_{23} 、 U_{03} 分别表示 0 与 1、1 与 2、2 与 3、0 与 3 的电势差 (即电压), 那么从电势差跟电势的关系知道

$$U_{01} = \varphi_0 - \varphi_1, U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2, U_{23} = \varphi_2 - \varphi_3$$

因此

$$U_{01} + U_{12} + U_{23} = \varphi_0 - \varphi_3$$

另一方面

$$\varphi_0 - \varphi_3 = U_{03}$$

所以

$$U_{01} + U_{12} + U_{23} = U_{03}$$

即串联电路两端的总电压等于各部分电路电压之和。

在图 2.4-2 的并联电路中, 不考虑导线的电阻, 0、1、2、3 各点之间没有电势差, 它们具有相同的电势。同样, 几个电阻右边的电势也相同, 因此, 并联电路的总电压与各支路电压相等。如果分别以 U_1 、 U_2 、 U_3 代表图 2.4-2 中三个电阻两端的电压, 则

$$U_1 = U_2 = U_3 = U$$

串联电路和并联电路的电阻 两个电阻 R_1 、 R_2 串联起来接到电路里, 作为一个整体, 它相当于一个电阻 (图 2.4-3), 这个电阻的大小与原来两个电阻的大小有什么关系?

由于 R_1 与 R_2 是串联的, 它们两端的总电压 U 等于两个电阻上的电压 U_1 、 U_2 之和, 即

$$U = U_1 + U_2$$

流过这两个电阻的电流 I 是一样的, 上式两旁同除以电流 I , 于是得到

$$\frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I}$$

由欧姆定律, 可得

$$R = R_1 + R_2$$

(1)

不难证明, 如果多个电阻串联, 那么

$$R = R_1 + R_2 + \dots$$

即串联电路的总电阻等于各部分电路电阻之和。

两个电阻 R_1 、 R_2 并联起来接到电路里, 作为一个整体, 它相当于一个电阻 (图 2.4-4),

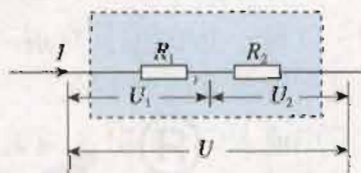


图 2.4-3 电阻串联后作为一个整体, 它相当于一个电阻。

这个电阻的大小与原来两个电阻的大小有什么关系?

由于 R_1 与 R_2 是并联的, 流过它们的总电流 I 等于两个电阻上的电流 I_1 、 I_2 之和, 即

$$I = I_1 + I_2$$

两个电阻上的电压 U 是相同的。把上式两旁同除以 U , 得

$$\frac{I}{U} = \frac{I_1}{U} + \frac{I_2}{U}$$

由欧姆定律, 得

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

(2)

不难证明, 如果多个电阻并联, 那么

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

即并联电路总电阻的倒数等于各支路电阻的倒数之和。

思考与讨论

试证明:

- (1) n 个相同的电阻并联, 总电阻为一个电阻的 n 分之一;
- (2) 若干不同的电阻并联, 总电阻小于其中最小的电阻。

电压表和电流表 常用的电压表和电流表都是由小量程的电流表 G (表头) 改装而成的。表头的工作原理涉及磁场对通电导线的作用, 这是下一章学习的内容。从电路的角度看, 表头就是一个电阻, 同样遵从欧姆定律。表头与其他电阻的不同仅在于通过表头的电流是可以从刻度盘上读出来的。

电流表 G 的电阻 R_g 叫做电流表的内阻。指针偏转到最大刻度时的电流 I_g 叫做满偏电流。电流表 G 通过满偏电流时, 加在它两端的电压 U_g 叫做满偏电压, 由欧姆定律可知, $U_g = I_g R_g$ 。

思考与讨论

图 2.4-5 是某一电流表 G 的刻度盘。使用时指针指着某一电流刻度, 表示通过电流表的电流为某一数值, 而且也意味着表头的两接线柱之间具有一定大小的电压, 因此, 电流表 G 实际上也是一个小量程的电压表。

如果图中电流表的内阻是 $100\ \Omega$, 怎样在这个刻度盘上标出相应的电压数据?

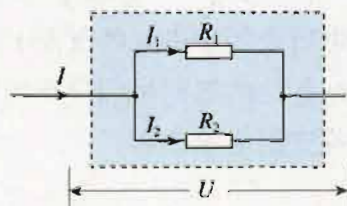


图 2.4-4 电阻并联后作为一个整体, 它相当于一个电阻。

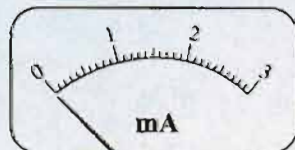


图 2.4-5 电流表刻度盘

表头的满偏电压和满偏电流一般都比较小,测量较大的电压时要串联一个电阻把它改装成电压表;测量较大的电流时则要并联一个电阻,把小量程的电流表改装成大量程的电流表。

学习电表的改装,主要目的是熟悉欧姆定律和串联电路、并联电路的知识。

例题 1 有一个电流表 G, 内阻 $R_g = 30 \Omega$, 满偏电流 $I_g = 1 \text{ mA}$ 。要把它改装为量程 $0 \sim 3 \text{ V}$ 的电压表, 要串联多大的电阻? 改装后电压表的内阻是多大?

解 电压表 V 由表头 G 和电阻 R 串联组成, 如图 2.4-6 的虚线框所示。电压表的量程是 $0 \sim 3 \text{ V}$, 是指电压表 V 两端的电压为 3 V 时, 表头的指针指在最大刻度, 即通过电流表 G 的电流等于 I_g 。

此时表头 G 两端得到的是满偏电压 $U_g = I_g R_g = 0.03 \text{ V}$ 。电阻 R 分担的电压为 $U_R = U - U_g = 2.97 \text{ V}$ 。

由欧姆定律可以求出分压电阻

$$R = \frac{U_R}{I_g} = \frac{2.97}{1 \times 10^{-3}} \Omega = 2.97 \times 10^3 \Omega$$

电压表 V 的内阻等于 R_g 和 R 串联时的总电阻, 即

$$R_V = R_g + R = 3.00 \times 10^3 \Omega = 3.00 \text{ k}\Omega$$

也可以选择整个电压表为研究对象, 根据欧姆定律由

$$R_V = \frac{U}{I_g} \text{ 求得电压表的内阻。}$$

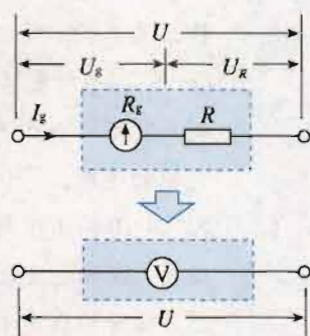


图 2.4-6 把电流表 G 改成电压表

串联电阻 R 的作用是分担一部分电压, 做这种用途的电阻常常称为分压电阻。

例题 2 有一个电流表 G, 内阻 $R_g = 30 \Omega$, 满偏电流 $I_g = 1 \text{ mA}$ 。要把它改装为量程 $0 \sim 0.6 \text{ A}$ 的电流表, 要并联多大的电阻? 改装后电流表的内阻是多大?

解 电流表 A 由表头 G 和电阻 R 并联组成, 如图 2.4-7 的虚线框所示。电流表量程为 $0 \sim 0.6 \text{ A}$, 是指通过电流表 A 的电流为 0.6 A 时, 表头的指针指在最大刻度, 即通过电流表 G 的电流等于 I_g 。

此时通过电阻 R 的电流 $I_R = I - I_g = (0.6 - 0.001) \text{ A} = 0.599 \text{ A}$ 。由欧姆定律可以求出分流电阻

$$R = \frac{U}{I_R} = \frac{I_g R_g}{I_R} = \frac{1 \times 10^{-3} \times 30}{0.599} \Omega = 0.050 \Omega$$

电流表内阻 R_A 等于 R_g 与 R 的并联值。由

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{R_g} + \frac{1}{R}$$

解出 R_A , 然后代入数据, 得

$$R_A = \frac{R_g R}{R_g + R} = \frac{30 \times 0.050}{30 + 0.050} \Omega = 0.050 \Omega$$

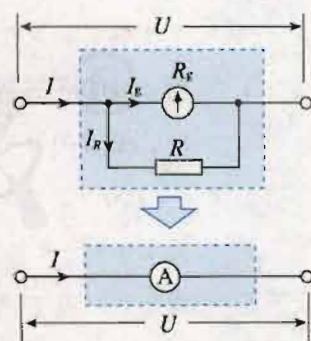


图 2.4-7 把电流表 G 改成大量程电流表

并联电阻 R 的作用是分去一部分电流, 做这种用途的电阻常常称为分流电阻。

也可以选择整个电流表为研究对象, 根据欧姆定律由 $R_A = \frac{U}{I}$ 求得电流表的内阻。

问题与练习

1. (1) 在图 2.4-8 中, 电压之比 $\frac{U_1}{U}$ 与电阻之比 $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$ 有什么关系?

(2) 图 2.4-9 的电路常称分压电路, 当 a, b 间的电压为 U 时, 利用它可以在 c, d 端获得 0 和 U 之间的任意电压。试说明其中的道理。

2. 图 2.4-10 画出了用电压表、电流表测量导体电阻的两种电路图。图中电压表的内阻为 $1 \text{ k}\Omega$, 电流表内阻为 0.1Ω , 被测导体 R 的真实电阻为 87.4Ω 。测量时, 把电压表读数和电流表读数的比值作为电阻的测量值。

如果不考虑实验操作中的偶然误差, 按甲、乙两种电路进行实验, 得到的电阻测量值各是多少? 你能从中得出什么结论?

3. 如图 2.4-11, 两个电阻串联后接在电路中 a, b 两点。已知 a, b 两点的电压能保持 10 V 不变。

某同学把一个电压表并联在 R_1 两端时, 电压表读数为 5 V , 将该电压表并联在 R_2 两端时, 读数为 4 V 。两次电压表读数之和明显不等于串联电路的总电压, 而实验用的电压表是正常的、准确的。这种现象可能发生吗? 如果可能, 分析产生这种现象的原因。

4. 图 2.4-12 是有两个量程的电压表, 当使用 a, b 两个端点时, 量程为 $0 \sim 10 \text{ V}$, 当使用 a, c 两个端点时, 量程为 $0 \sim 100 \text{ V}$ 。已知电流表的内阻 R_g 为 500Ω , 满偏电流 I_g 为 1 mA , 求电阻 R_1, R_2 的值。

5. 图 2.4-13 是有两个量程的电流表, 当使用 a, b 两个端点时, 量程为 1 A , 当使用 a, c 两个端点时, 量程为 0.1 A 。已知表头的内阻 R_g 为 200Ω , 满偏电流 I_g 为 2 mA , 求电阻 R_1, R_2 的值。

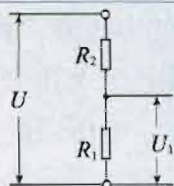


图 2.4-8 求电压之比与电阻之比的关系

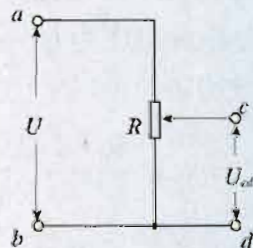


图 2.4-9 分压电路

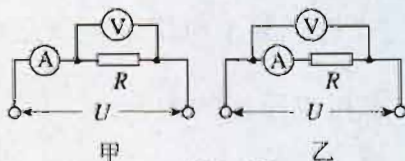


图 2.4-10

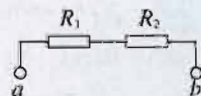


图 2.4-11

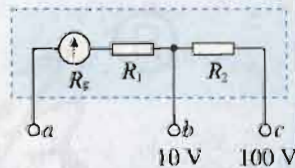


图 2.4-12

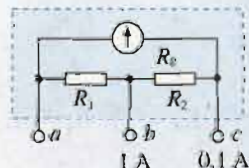


图 2.4-13

电功和电功率 电炉通电时, 电能转化为内能; 电动机通电时, 电能转化为机械能; 蓄电池充电时, 电能转化为化学能。我们已经知道, 功是能量转化的量度, 电能转化为其他形式能的过程就是电流做功的过程, 电流做功的多少等于电能转化为其他形式能的数量。

所谓电流做功, 实质上是导体中的恒定电场对自由电荷的静电力在做功。自由电荷在静电力作用下沿静电力的方向做定向移动, 结果电荷的电势能减小, 其他形式的能增加。

图 2.5-1 表示很小一段电路。电荷在做从左向右的定向移动, 它们从这段电路的左端移到右端所用的时间记为 t 。根据第 1 节的分析, 在这段时间内通过这段电路的电荷总量为

$$q = It$$

如果这段电路左右两端的电势差是 U , 在电荷 q 从左端移到右端的过程中, 静电力做的功是 $W = qU$ 。把 $q = It$ 代入, 得

$$W = IUt \quad (1)$$

这表示, 电流在一段电路中所做的功等于这段电路两端的电压 U 、电路中的电流 I 、通电时间 t 三者的乘积。

单位时间内电流所做的功叫做**电功率 (electric power)**。用 P 表示电功率, 则有 $P = \frac{W}{t}$, 进而得到

$$P = IU \quad (2)$$

这表示**电流在一段电路上做功的功率 P 等于电流 I 与这段电路两端的电压 U 的乘积。**

在以上两个公式中, 电流、电压、时间的单位分别是安培(A)、伏特(V)、秒(s), 电功、电功率的单位分别是焦耳(J)和瓦特(W)。

焦耳定律 电流做功时, 消耗的是电能。究竟电能会转化为哪种形式的能, 要看电路中具有哪种类型的元件。

电流通过白炽灯、电炉等电热元件做功时, 电能全部转化为导体的内能。电流在这段电路中做的功 W 等于这段电路发出的热量 Q , 即

$$Q = W = IUt$$

由欧姆定律得

$$U = IR$$

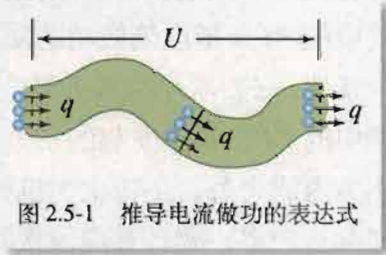


图 2.5-1 推导电流做功的表达式

代入上式后可得热量 Q 的表达式

$$Q = I^2 R t \quad (3)$$

即电流通过导体产生的热量跟电流的二次方成正比,跟导体的电阻及通电时间成正比。这个关系最初是焦耳用实验直接得到的,我们把它叫做焦耳定律 (Joule law)。

单位时间内的发热量通常称为热功率, $P = \frac{Q}{t}$ 。由上式可得热功率 P 的表达式

$$P = I^2 R \quad (4)$$

需要特别说明的是,尽管 (2) 和 (4) 两式都是电流做功的功率表达式,但两式中“ P ”的含义是不同的。(2) 式是在一般情况下推导的,没有对电路的性质做任何限制,所以 (2) 式中的“ P ”指电流做功的功率。但是,在推导 (4) 式的过程中,我们用到了“ $Q = W$ ”这个条件,它要求电流做的功“全部变成了热”,也就是电能全部转化为导体的内能。因此, (4) 式中的“ P ”专指发热的功率。如果电路中有电动机或者正在充电的电池,那么电能除了转化为内能之外,还转化为机械能或化学能。因此 (4) 式计算的结果只是电能转化为内能的那部分功率,要计算电流做功的总功率,只能利用 (2) 式。

(1) (3) 两式的关系与 (2) (4) 两式相似,同学们可以讨论。

例题 1 一个电动机,线圈电阻是 0.4Ω , 当它两端所加的电压为 220 V 时,通过的电流是 5 A 。这台电动机每分钟所做的机械功有多少?

解 本题涉及三个不同的功率:电动机消耗的电功率 $P_{\text{电}}$ 、电动机发热的功率 $P_{\text{热}}$ 、转化为机械能的功率 $P_{\text{机}}$ 。三者之间遵从能量守恒定律,即

$$P_{\text{电}} = P_{\text{热}} + P_{\text{机}}$$

由焦耳定律,电动机发热的功率为

$$P_{\text{热}} = I^2 R$$

电动机消耗的电功率,即电流做功的功率

$$P_{\text{电}} = IU$$

因此可得电能转化为机械能的功率,即电动机所做机械功的功率

$$P_{\text{机}} = P_{\text{电}} - P_{\text{热}} = IU - I^2 R$$

根据功率与做功的关系,电动机每分钟所做的机械功为

$$\begin{aligned} W &= P_{\text{机}} t \\ &= (IU - I^2 R) t \\ &= (5 \times 220 - 5^2 \times 0.4) \times 60 \text{ J} \\ &= 6.54 \times 10^4 \text{ J} \end{aligned}$$

问题与练习

1. 在几个电阻串联或并联组成的电路中, 试根据串、并联电路的电流、电压特点证明以下论断:

- (1) 串联电路各个电阻消耗的电功率与它们的电阻成正比;
- (2) 并联电路各个电阻消耗的电功率与它们的电阻成反比;
- (3) 串联电路上消耗的总功率 $P = IU$ 等于各个电阻上消耗的热功率之和;
- (4) 并联电路上消耗的总功率 $P = IU$ 等于各个电阻上消耗的热功率之和。

2. 电饭锅工作时有两种状态: 一种是锅内的水烧干以前的加热状态, 另一种是水烧干后的保温状态。图 2.5-2 是电饭锅的电路图, R_1 是电阻, R_2 是加热用的电热丝。

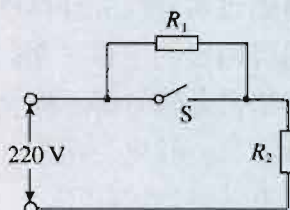


图 2.5-2 电饭锅电路图

- (1) 自动开关 S 接通和断开时, 电饭锅分别处于哪种状态? 说明理由。
- (2) 要使 R_2 在保温状态下的功率是加热状态的一半, $R_1 : R_2$ 应该是多大?

3. 四盏灯泡接成图 2.5-3 的电路。a、c 灯泡的规格为“220 V 40 W”, b、d 灯泡的规格为“220 V 100 W”, 各个灯泡的实际功率都没有超过它的额定功率。请排列这四盏灯泡实际消耗功率大小的顺序, 并说明理由。

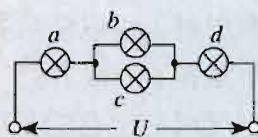


图 2.5-3 为 a、b、c、d 实际消耗的功率排序

4. 如图 2.5-4 所示, 线路的电压 $U = 220 \text{ V}$, 每条输电线的电阻 $r = 5 \Omega$, 电炉 A 的电阻 $R_A = 100 \Omega$ 。求电炉 A 上的电压和它消耗的功率。

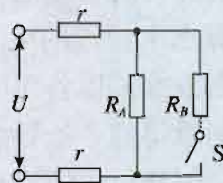


图 2.5-4 计算电功率

如果再并联一个阻值相同的电炉 B, 两个电炉上的电压和每个电炉消耗的功率各是多少?

5. 使用功率为 2 kW 的电加热装置把 2 kg 的水从 20 °C 加热到 100 °C, 用了 10 min。已知水的比热容为 $4.2 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{°C)}$, 这个装置的效率是多少?

6

导体的电阻

影响导体电阻的因素 我们已经知道,导体的电阻是导体本身的一种性质,那么它到底由导体的哪些因素决定呢?移动滑动变阻器的滑片可以改变它的电阻,这说明导体电阻跟它的长度有关;同是220 V的灯泡,灯丝越粗用起来越亮,说明导体电阻跟横截面积有关;电线常用铜丝制造而不用铁丝,说明导体电阻跟它的材料有关。

本节通过实验探究导体的电阻与它的长度、横截面积及它的材料等因素的定量关系。实验时可以在铁丝、康铜丝、电炉丝(镍铬合金丝)等不同金属丝中选择几种,分别测量它们的横截面积、长度、电阻,从中找出关系。关于这些物理量的测量方法,建议如下。

取一段新的紧密绕制的电炉丝,如图2.6-1那样用刻度尺测出它的宽度,除以圈数,便是电炉丝的直径,于是可以算出电炉丝的横截面积 S 。测量铜丝的横截面积时,可以使用类似的方法^①。

把电炉丝拉直,或者用一根已经被拉直的同一规格的电炉丝,用刻度尺量出它的长度 l 。

可以用图2.6-2的电路测量电炉丝的电阻 R :闭合开关后,测出电炉丝两端的电压、通过电炉丝的电流,然后根据欧姆定律算出电炉丝的电阻。改变滑动变阻器滑片的位置,能获得多组数据,以各组电阻数据的平均值为 R 。

通过测量得到各条导线的电阻 R 、长度 l 、横截面积 S 这些数据后,怎样得出结论?以下方案可供参考。

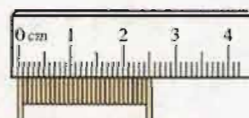


图 2.6-1 测金属丝的直径

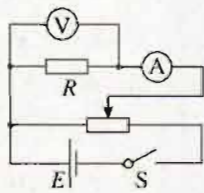


图 2.6-2 测电阻

探究方案一

我们可以通过实验在长度、横截面积、材料三个因素中,保持两个因素不变,比较第三个因素的影响;然后再逐个研究另外两个因素的影响。

实验

探究导体电阻与其影响因素的定量关系

如图2.6-3, a 、 b 、 c 、 d 是四条不同的金属导体。在长度、横截面积、材料三个因素方面, b 、 c 、 d 跟 a 相比,分别只有一个因素不同: b 与 a 长度不同; c 与 a 横截面积不同; d 与 a 材料不同。

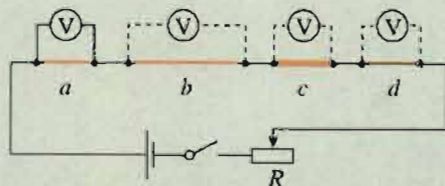


图 2.6-3 定量探究影响导体电阻大小的因素

^① 测量金属丝的直径时也可使用游标卡尺或螺旋测微器,详见本书附录。

图中四段导体是串联的，每段导体两端的电压与它们的电阻成正比，因此，用电压表分别测量 a 、 b 、 c 、 d 两端的电压，就能知道它们的电阻之比。

比较 a 、 b 的电阻之比与它们的长度之比；比较 a 、 c 的电阻之比与它们的横截面积之比；比较 a 、 d 的电阻是否相等。这样就可以得出长度、横截面积、材料这三个因素与电阻的关系。

改变滑动变阻器滑片的位置，可以获得多组实验数据以得到更可靠的结论。

这个实验得到的是电阻与导线长度、横截面积的比例关系，实验中不必测量电阻大小的数值。

探究方案二

除了上述探究思路外，我们还可以用刚刚学过的知识，通过逻辑推理来探究导体的电阻与导体长度、横截面积的关系，然后通过实验来探究导体电阻与材料的关系。

1. 分析导体电阻与它的长度的关系

一条长度为 l 、电阻为 R 的导体，可以看成是由 n 段长度同为 l_1 、电阻同为 R_1 的导体串联而成的，这 n 段导体的材料、横截面积都相同。总长度 l 与每段长度 l_1 的关系为

$$\frac{l}{l_1} = n$$

另一方面，由串联电路的性质可知， $R = nR_1$ ，即

$$\frac{R}{R_1} = n$$

对比两式，可知

$$\frac{R}{R_1} = \frac{l}{l_1}$$

即在横截面积、材料相同的条件下，导体的电阻与长度成正比。

2. 研究导体电阻与它的横截面积的关系

有 n 条导体，它们的长度相同、材料相同、横截面积相同。横截面积同为 S_1 、电阻同为 R_1 。把它们紧紧地束在一起，组成一根横截面积为 S 、电阻为 R 的导体。

由并联电路的性质可知， $R = \frac{R_1}{n}$ ，即

$$\frac{R_1}{R} = n$$

同时

$$\frac{S}{S_1} = n$$

所以

$$\frac{R}{R_1} = \frac{S_1}{S}$$

即在长度、材料相同的条件下，导体的电阻与横截面积成反比。

在以上两个结论的基础上,再通过实验探究导体的电阻是否跟材料有关,这时对它们的几何尺寸就可以不做限制,实验操作的自由度就大多了。

实验

探究导体电阻与材料的关系

1. 根据以上分析,以等式的形式写出用导体长度 l 、导体横截面积 S 表示导体电阻 R 的关系式,用一个与 l 、 S 无关的常量表示比例系数。
2. 选择至少两种不同材料的导体(例如镍铬合金丝和康铜丝),测出它们的长度、横截面积和电阻,分别计算出上述等式中的比例系数。
3. 分析上述比例系数的物理意义。

导体的电阻 同种材料的导体,其电阻 R 与它的长度 l 成正比,与它的横截面积 S 成反比;导体电阻还与构成它的材料有关,写成公式则是

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1)$$

式中 ρ 是比例系数,它与导体的材料有关,是表征材料性质的一个重要的物理量,在长度、横截面积一定的条件下, ρ 越大,导体的电阻越大。 ρ 叫做这种材料的**电阻率(resistivity)**。

思考与讨论

图 2.6-4 中, R_1 和 R_2 是材料相同、厚度相同、表面为正方形的导体,但 R_2 的尺寸比 R_1 小很多。通过两导体的电流方向如图所示。这两个导体的电阻有什么关系?

你认为这种关系对电路元件的微型化有什么意义?

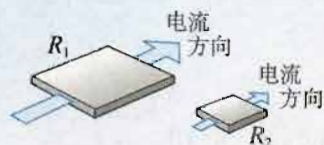


图 2.6-4 两个导体的电阻

表 2.6-1 几种导体材料在 20 ℃ 时的电阻率

材 料	$\rho / (\Omega \cdot \text{m})$	材 料	$\rho / (\Omega \cdot \text{m})$
银	1.6×10^{-8}	铁	1.0×10^{-7}
铜	1.7×10^{-8}	锰铜合金 *	4.4×10^{-7}
铝	2.9×10^{-8}	镍铜合金 **	5.0×10^{-7}
钨	5.3×10^{-8}	镍铬合金 ***	1.0×10^{-6}

* 锰铜合金: 85%铜, 3%镍, 12%锰。

** 镍铜合金: 54%铜, 46%镍。

*** 镍铬合金: 67.5%镍, 15%铬, 16%铁, 1.5%锰。

从上表可以看出,纯净金属的电阻率较小,合金的电阻率较大。连接电路的导线一般用电阻率小的铝或铜来制作,必要时可在导线上镀银。

电阻率往往随温度的变化而变化。金属的电阻率随温度的升高而增大。电阻温度计(图 2.6-5)就是利用金属的电阻随温度变化而制成的,可以用来测量很高的温度。精密的电阻温度计是用铂做的。已知铂丝的电阻随温度的变化情况,测出铂丝的电阻就可以知道温度。有些合金如锰铜合金和镍铜合金,电阻率几乎不受温度变化的影响,常用来制作标准电阻。



图 2.6-5 金属电阻温度计

在本章第3节的实验“测绘小灯泡的伏安特性曲线”中,得到的不是直线。学过本节之后你能不能对此作出解释?

说一说

中央电视台2002年12月播放了北京市技术监督局对市场中电线电缆产品质量抽查的消息。消息引用了检验负责人的话:“十几个不合格产品中,大部分存在导体电阻不合格问题,主要是铜材质量不合格,使用了再生铜或含杂质很多的铜。再一个就是铜材质量可能合格,但把截面积缩小,买2.5平方(毫米)的线,拿到手的线可能是1.5或1.5多一点的,载流量不够。还有一个问题是绝缘层质量不合格,用再生塑料制作电线外皮,电阻率达不到要求……”

谈一谈,这位负责人的讲话体现了哪些物理原理?

问题与练习

1. 在实验室用一段导线连接一个“3 V、0.25 A”的小灯泡做实验时,一般都不会考虑导线的电阻。请你找一段这种导线,目测它的长度和导线中铜丝的横截面积,估算它的电阻,然后说明可以不考虑导线电阻的理由。
2. 小李家的房子装修,买了一卷规格为“100 m、2.5 mm²”的铜导线,用来安装一路专线,对额定功率1.5 kW的空调供电。实际上恰好用去了一半导线。如果空调能够正常工作,制冷时在这段导线上损失的电压约是多少?
3. 某同学想探究导电溶液的电阻随长度、横截面积的变化规律。她拿了一根细橡胶管,里面灌满了盐水,两端用粗铜丝塞住管口,形成一段封闭的盐水柱。她量得盐水柱的长度是30 cm,并测出盐水柱的电阻等于 R 。现握住橡胶管的两端把它拉长,使盐水柱的长度变为40 cm。如果溶液的电阻随长度、横截面积的变化规律与金属导体相同,此时盐水柱的电阻应该等于多少?
4. 有两根不同材料的金属丝,长度相同,甲的横截面的圆半径及电阻率都是乙的2倍。
 - (1) 把它们并联在电路中,甲、乙消耗的电功率之比是多少?
 - (2) 把它们串联在电路中,甲、乙消耗的电功率之比是多少?

7

闭合电路的欧姆定律

闭合电路的欧姆定律 只有用导线把电源、用电器连成一个闭合电路 (closed circuit), 电路中才有电流。如图 2.7-1 所示, 用电器、导线组成外电路 (external circuit), 电源内部是内电路 (internal circuit)。

在外电路中, 正电荷在恒定电场的作用下由正极移向负极; 在电源中, 非静电力把正电荷由负极移到正极。

正电荷在静电力的作用下从电势高的位置向电势低的位置移动, 电路中正电荷的定向移动方向就是电流的方向, 所以在外电路中, 沿电流方向电势降低。

设图 2.7-1 中的电源是一个化学电池, 电池的正极和负极附近分别存在着化学反应层。反应层中非静电力 (化学作用) 把正电荷从电势低处移至电势高处, 在这两个地方, 沿电流方向电势“跃升”。这样, 整个闭合电路的电势高低变化情况就如图 2.7-2 所示。图中各点位置的高低表示电路中相应各点电势的高低。

图 2.7-2 中, A 为电源正极, B 为电源负极。外电路电阻为 R , 闭合电路的电流为 I 。我们分三部分考虑整个电路中的能量转化。

1. 在时间 t 内, 外电路中电流做功产生的热为

$$Q_{\text{外}} = I^2 R t$$

2. 内电路与外电路一样, 也存在着恒定电场, 正电荷也是在静电力的作用下移动的, 这一区域的电阻是内电阻, 记为 r 。在时间 t 内, 内电路中电流做功产生的热为

$$Q_{\text{内}} = I^2 r t$$

3. BC 和 DA 是化学反应层。设两反应层的电动势之和为 E , 则时间 t 内非静电力做的功为

$$W = Eq = EIt$$

根据能量守恒定律, 非静电力做的功应该等于内外电路中电能转化为其他形式的能的总和, 即 $W = Q_{\text{外}} + Q_{\text{内}}$, 所以

$$EIt = I^2 R t + I^2 r t$$

整理后得到

$$E = IR + Ir \quad (1)$$

也就是

由于正电荷沿某方向的移动与负电荷沿相反方向的移动等效, 本节讨论仍认为电路中是正电荷在做定向移动。

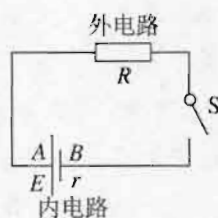


图 2.7-1 闭合电路由内电路和外电路组成

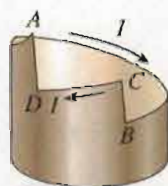


图 2.7-2 闭合电路的电势。 A 、 B 两个位置与上图中的 A 、 B 相对应, D 、 C 则分别代表电池的溶液中与 A 、 B 两电极靠近的位置。

$$I = \frac{E}{R + r} \quad (2)$$

(2)式表示：闭合电路的电流跟电源的电动势成正比，跟内、外电路的电阻之和成反比。这个结论叫做闭合电路的欧姆定律(Ohm law of closed circuit)。

我们用 $U_{\text{外}}$ 表示(1)式中的 IR ，它是外电路上总的电势降落，习惯上叫做路端电压；用 $U_{\text{内}}$ 表示 Ir ，它是内电路的电势降落。所以，(1)式也可以写为

$$E = U_{\text{外}} + U_{\text{内}} \quad (3)$$

这就是说，电源的电动势等于内外电路电势降落之和。这个结论在图 2.7-2 中已经形象地表示出来了：从电源正极 A 沿闭合电路的 B 、 C 、 D 绕一周再回到 A 时，一路上电势降落的总和，必定等于电势升高的总和。 AB 间的电势降落为 $U_{\text{外}}$ ， CD 间的电势降落为 $U_{\text{内}}$ ，而 BC 、 DA 电势跃升的总和就是电动势 E 。

电源的种类很多，形成非静电力的机理也不一样。但是对于所有电源，(2)式所表示的闭合电路的欧姆定律都是成立的。

路端电压与负载的关系 电路中，消耗电能的元件常常称为负载，负载变化时，电路中的电流就会变化，路端电压也随之变化。

演示

按图 2.7-3 连接电路。闭合开关 S_0 以接通电源，再闭合开关 S ，改变外电路的电阻 R ，观察路端电压怎样随着负载的变化而变化。

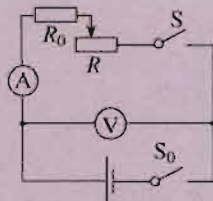


图 2.7-3 研究路端电压

事实是，当电流减小时，路端电压增大；当电流增大时，路端电压减小。我们可以用闭合电路的欧姆定律定量地解释这个现象。

路端电压实际上就是外电压 $U_{\text{外}}$ ，以下为方便，简单地记为 U 。考虑到 $U_{\text{内}} = Ir$ ，由(3)式可以得出路端电压的表达式

$$U = E - Ir \quad (4)$$

就某个电源来说，电动势 E 和内阻 r 是一定的。当外电阻 R 增大时，由(2)可知电流 I 减小，因而内电路的电势降落 $U_{\text{内}} = Ir$ 减小。由(4)式可知，这时路端电压 U 增大。相反，当外电阻 R 减小时，电流 I 增大，路端电压 U 减小。

说一说

一些同学可能有这样的经验：傍晚用电多的时候，灯光发暗，而当夜深入静时，灯光特别明亮。又如，在插上电炉、电暖气等功率大的电器时，灯光会变暗，拔掉后灯光马上又亮起来。在一些供电质量不太好的地区尤其是这样。试着解释这种现象。

现在讨论两种特殊情况。

● 当外电路断开时, I 变为 0, Ir 也变为 0, 由 (4) 式知 $U = E$ 。这就是说, 断路时的路端电压等于电源电动势, 我们常根据这个道理测量电源的电动势。

● 当电源两端短路时, 外电阻 $R = 0$ 。由 (2) 式知此时电流 $I = \frac{E}{r}$ 。电源的内阻 r 一般都很小, 例如铅蓄电池的内阻只有 $0.005 \sim 0.1 \Omega$, 干电池的内阻通常也不到 1Ω , 所以短路时电流很大。电流过大会烧坏电源, 甚至引起火灾。因此, 绝对不允许将电源两端用导线直接连接在一起。

例题 1 在图 2.7-4 中 $R_1 = 14 \Omega$, $R_2 = 9 \Omega$ 。当开关处于位置 1 时, 电流表读数 $I_1 = 0.2 \text{ A}$; 当开关处于位置 2 时, 电流表读数 $I_2 = 0.3 \text{ A}$ 。求电源的电动势 E 和内电阻 r 。

解 根据闭合电路的欧姆定律和题述的两种情况, 可以列出下面两个方程

$$E = I_1 R_1 + I_1 r$$

$$E = I_2 R_2 + I_2 r$$

消去 E , 解出 r , 得

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

代入数值, 得

$$r = 1 \Omega$$

将 r 及 I_1 、 R_1 的值代入 $E = I_1 R_1 + I_1 r$ 中, 得

$$E = 3 \text{ V}$$

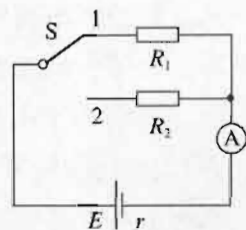


图 2.7-4 求电动势和内阻

思考与讨论

设电源的电动势 $E = 3 \text{ V}$, 内阻 $r = 2 \Omega$ 。请根据路端电压与电流的关系式 $U = E - Ir$, 以 U 为纵坐标, I 为横坐标, 作出 U 与 I 关系的函数图象, 并讨论以下问题。

(1) 外电路断开的状态对应于图中的哪个点? 怎样看出这时路端电压与电动势的关系?

(2) 电动势 E 的大小对图象有什么影响?

(3) 电源短路的状态对应于图中的哪个点? 怎样读出这时电流的大小?

(4) r 的大小对图象有什么影响?

问题与练习

1. 一个电源接 $8\ \Omega$ 电阻时, 通过电源的电流为 0.15 A , 接 $13\ \Omega$ 电阻时, 通过电源的电流为 0.10 A , 求电源的电动势和内阻。
2. 小张买了一只袖珍小电筒, 里面是两节小的干电池。他取出电筒中的小灯泡, 看到上面标有“ $2.2\text{ V } 0.25\text{ A}$ ”字样。小张认为产品设计人员的意图是使小灯泡在这两节干电池的供电下正常发光。由此, 他推算出了产品设计者设定的每节干电池的内阻参数。如果小张的判断是对的, 那么, 所设定的每节干电池的内阻是多少?
3. 许多人造卫星都用太阳电池供电。太阳电池由许多片电池板组成。某电池板不接负载时的电压是 $600\ \mu\text{V}$, 短路电流是 $30\ \mu\text{A}$ 。求这块电池板的内阻。
4. 电源的电动势为 4.5 V 、外电阻为 $4.0\ \Omega$ 时, 路端电压为 4.0 V 。如果在外电路并联一个 $6.0\ \Omega$ 的电阻, 路端电压是多大? 如果 $6.0\ \Omega$ 的电阻串联在外电路中, 路端电压又是多大?
5. 现有电动势 1.5 V 、内阻 $1.0\ \Omega$ 的电池多节, 准备用几节这样的电池串联起来对一个“ $6.0\text{ V } 0.6\text{ W}$ ”的用电器供电, 以保证用电器在额定状态下工作。问: 最少要用几节这种电池? 电路还需要一个定值电阻做分压用, 请计算这个电阻的规格。
提示: 串联电池组的电动势等于各个电池的电动势之和; 串联电池组的内阻等于各个电池内阻之和。

8

多用电表的原理

欧姆表 我们已经学习过把电流表改装成电压表和量程较大的电流表的原理, 是否可把电流表改装成能够测量导体电阻, 并能直接读出电阻数值的欧姆表呢? 下面从一个例题说起。

学习多用电表的原理, 着眼点在于复习欧姆定律和串联电路、并联电路的知识。

例题 在图 2.8-1 的电路中, 电源的电动势 $E = 1.5\text{ V}$, 内阻 $r = 0.5\ \Omega$, 电流表满偏电流 $I_g = 10\text{ mA}$ 、电流表的电阻 $R_g = 7.5\ \Omega$, A 、 B 为接线柱。

(1) 用一条导线把 A 、 B 直接连起来, 此时, 应把可变电阻 R_1 调节为多少才能使电流表恰好达到满偏电流?

(2) 调至满偏后保持 R_1 的值不变, 在 A 、 B 间接入一个 $150\ \Omega$ 的定值电阻 R_2 , 电流表指针指着多少刻度的位置?

(3) 如果把任意电阻 R 接在 A 、 B 之间, 电流表读数 I 与 R 的值有什么关系?

解 (1) 电流表电阻 R_g 的值不能忽略, 此时可以把电流表视为一个电阻。由闭合电路的欧姆定律, 有

$$I_g = \frac{E}{R_g + r + R_1}$$

从中解出可变电阻 R_1 的值

$$R_1 = \frac{E}{I_g} - R_g - r = \left(\frac{1.5}{0.01} - 7.5 - 0.5 \right) \Omega = 142 \Omega$$

这表示, 当两个接线柱直接连到一起, 且表头指针恰好满偏时, 可变电阻 R_1 的值为 142Ω 。

(2) 保持可变电阻 R_1 的值不变, 把 $R_2 = 150 \Omega$ 接在 A 、 B 之间, 设这时电流表读数为 I_2 , 由闭合电路的欧姆定律

$$I_2 = \frac{E}{R_g + r + R_1 + R_2} = \frac{1.5}{7.5 + 0.5 + 142 + 150} \text{ A} = 5 \text{ mA}$$

这表示, 接入 R_2 后, 电表指在 “5 mA” 刻度的位置, 即恰好为电流表满刻度的一半。

(3) 把任意电阻 R 接到 A 、 B 之间, 设电流表读数为 I , 则

$$I = \frac{E}{R_g + r + R_1 + R}$$

代入数值后, 得

$$I = \frac{1.5 \text{ V}}{150 \Omega + R}$$

解出

$$R = \frac{1.5 \text{ V}}{I} - 150 \Omega$$

以上计算使我们不禁想到: 如果把例题中电流表的 “10 mA” 刻度线标为 “0 Ω ”, “5 mA” 刻度线标为 “150 Ω ”, 其他电流刻度则按 $R = \frac{1.5 \text{ V}}{I} - 150 \Omega$ 的规律换成电阻的标度, 它岂不成了可以直接测量电阻的仪表? 从 A 、 B 接线柱引出两支表笔, 把表笔接在被测导体的两端 (图 2.8-2), 从刻度盘上直接读出导体电阻的数值, 这不是很方便吗?

图 2.8-2 虚线框中的电路, 其实就是一个简单的欧姆表电路。实际的欧姆表就是在这个原理的基础上制作的。

多用电表 测量电路某两点的电压用电压表, 测量电路中通过的电流用电流表, 粗测导体的电阻用欧姆表。电压表、电流表、欧姆表都要用到表头, 能不能让它们共用一个表头从而组合在一起呢?

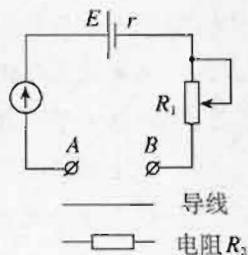


图 2.8-1 欧姆表的原理

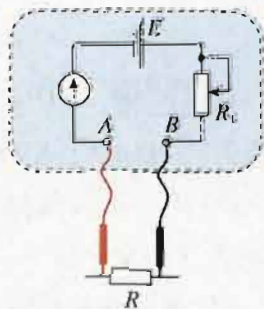


图 2.8-2 欧姆表电路

思考与讨论

图 2.8-3 中, 甲、乙、丙分别是电流表、欧姆表和电压表的示意图。图 2.8-4 的虚线框中是一个单刀多掷开关, 通过操作开关, 接线柱 B 可以接通 1, 也可以接通 2 或 3。现在要使 B 接通 1 时, 能像图 2.8-3 甲那样成为电流表, 接通 2 时像乙那样成为电阻表, 接通 3 时像丙那样成为电压表, 这就成了一个简单的多用电表。请对照两幅图, 讨论一下, 这个多用电表的电路图是怎样的? 把它在图 2.8-4 的基础上画出来。

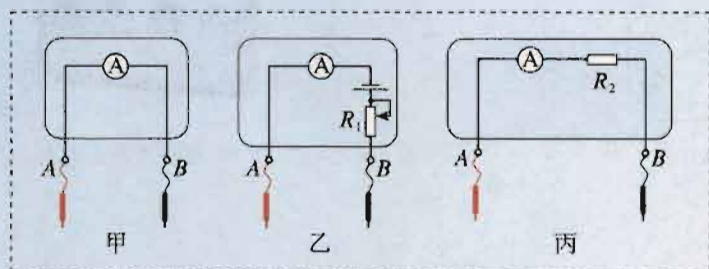


图 2.8-3 电流表、欧姆表和电压表的示意图

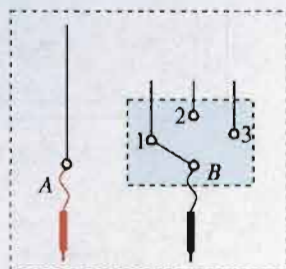


图 2.8-4 请完成最简单的多用电表的电路图

说一说

图 2.8-5 是一个多量程多用电表的简化电路图。测电流和测电压时各有两个量程, 还有两个挡位用来测电阻。请谈一谈: 开关 S 调到哪两个位置上多用电表测量的是电流? 调到哪两个位置上测量的是电压? 调到哪两个位置上测量的是电阻? 在测量电流或电压时, 两个位置中哪一个的量程比较大?

在识别电阻挡和电压挡电路时, 可以把虚线框内的电路当成一个电流表。

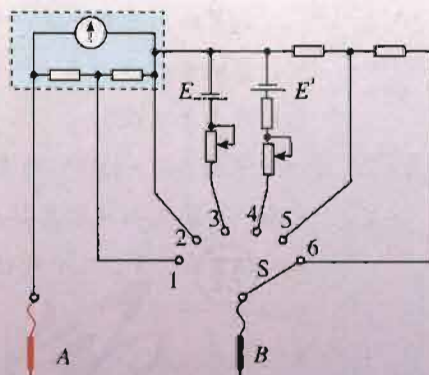


图 2.8-5 多量程多用电表示意图

图 2.8-6 是一种多用电表的外形图。表的上半部分为表盘, 下半部分是选择开关, 开关周围标有测量功能的区域及量程。将选择开关旋转到电流挡, 多用电表内的电流表电路就被接通; 选择开关旋转到电压挡或电阻挡, 表内的电压表电路或欧姆表电路就被接通。使用前应该调整“指针定位螺丝”, 使指针指到零刻度。不使用的时候应该把选择开关旋转到 OFF 位置。

图 2.8-7 是数字式多用电表。数字电表的测量值以数字形式直接显示, 使用方便。数字式多用表内都装有电子电路, 这样可以使电表对被测电路的影响减到最小, 同时还可以具有多种其他功能。

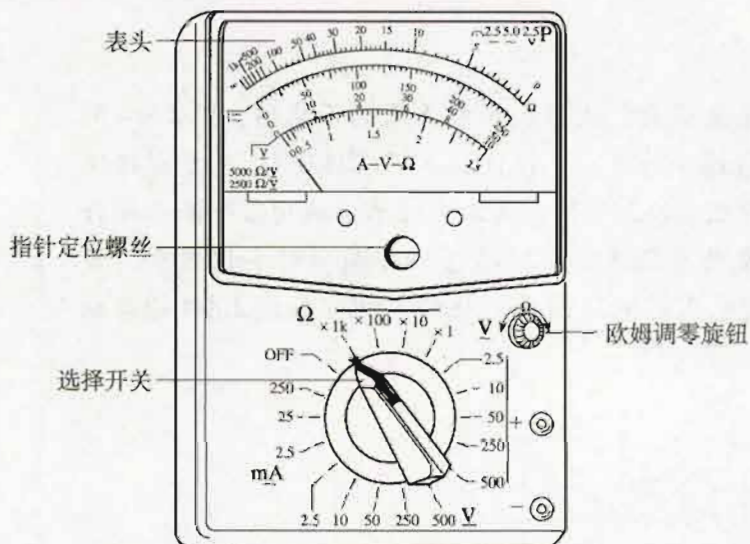


图 2.8-6 指针式多用电表



图 2.8-7 数字式多用电表

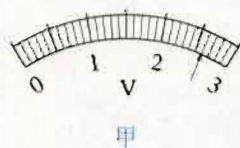
问题与练习

1. 如果给电压表串联一个阻值等于电压表内阻的电阻，它的量程变为多大？刻度盘上的数字（图 2.8-8 甲）应当怎么改？

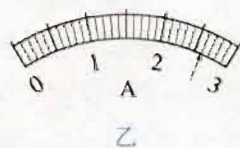
如果给电流表并联一个阻值等于电流表内阻的电阻，它的量程变为多大？刻度盘上的数字（图 2.8-8 乙）应当怎么改？

2. 一个量程为 $0 \sim 150 \text{ V}$ 的电压表，内阻为 $20 \text{ k}\Omega$ ，把它与一个大电阻串联后接在 110 V 电路的两端，电压表的读数是 5 V 。这个外接电阻是多少？这是测量大电阻的一种方法。

3. 某人把电流表、干电池和一个定值电阻串联后，两端连接两支测量表笔，做成了一个测量电阻的装置。两支表笔直接接触时，电流表读数为 5.0 mA ，两支表笔与 200Ω 的电阻连接时，电流表读数为 3.0 mA 。现在把表笔与一个未知电阻连接，电流表读数为 2.5 mA ，这个未知电阻是多大？



甲



乙

图 2.8-8 刻度盘上的数字应当怎么改？

9

实验：练习使用多用电表

测量小灯泡的电压 如图 2.9-1，用直流电源对小灯泡正常供电。将多用电表的选择开关旋至直流电压挡，其量程应该大于小灯泡两端电压的估计值。

用两支表笔分别接触灯泡两端的接线柱，注意红表笔接触点的电势应该比黑表笔高。根据表盘上相关量程的直流电压标度读数，这就是小灯泡两端的电压。

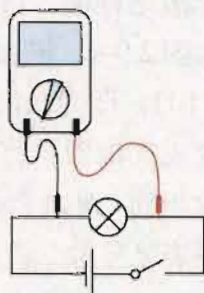


图 2.9-1 测量小灯泡的电压

测量通过小灯泡的电流 如图 2.9-2，在直流电源对小灯泡正常供电的情况下，断开电路开关，把小灯泡的一个接线柱上的导线卸开。将多用电表的选择开关旋至直流电流挡，其量程应该大于通过灯泡电流的估计值。把多用电表串联在卸开的电路中，注意电流应该从红表笔流入电表。

闭合开关，根据表盘上相应量程的直流电流刻度读数，这就是通过小灯泡的电流。

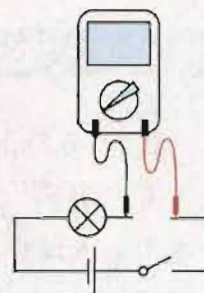


图 2.9-2 测量通过小灯泡的电流

测量定值电阻 使用多用电表的欧姆挡测电阻时，如果指针偏转过大、过小，误差都比较大。所以，假如事先知道电阻的大致数值，应该选择适当倍率的欧姆挡使测量时表针落在刻度盘的中间区域。如果不能估计未知电阻的大小，可以先用中等倍率的某个欧姆挡位试测，然后根据读数的大小选择合适的挡位再测。

测量电阻之前应该先把两支表笔直接接触，调整“欧姆调零旋钮”，使指针指向“0 Ω ”。改变不同倍率的欧姆挡后必须重复这项操作。

测量二极管的正反向电阻 先弄清两个问题，然后再进行操作。

(1) 二极管的单向导电性

二极管是一种半导体元件，如图 2.9-3，它的特点是电流从正极流入时电阻比较小，而从正极流出时电阻比较大。

(2) 欧姆表中电流的方向

分析图 2.8-2 可以知道，多用电表做欧姆表用时，电表内部的电源接通，电流



图 2.9-3 晶体二极管和它的符号

从欧姆表的黑表笔流出,经过被测电阻,从红表笔流入。

测正向电阻:将多用电表的选择开关旋至低倍率的欧姆挡(例如“ $\times 10$ ”挡),调整欧姆零点之后将黑表笔接触二极管正极,红表笔接触二极管负极,如图2.9-4。把读得的欧姆数乘以欧姆挡的倍率(例如10),即为二极管的正向电阻^①。

测反向电阻:将多用电表的选择开关旋至高倍率的欧姆挡(例如“ $\times 100$ ”),再次调整欧姆零点,然后将黑表笔接触二极管的负极,红表笔接触二极管的正极,如图2.9-5。把读得的欧姆数乘以欧姆挡的倍率(例如100),即为二极管反向电阻。

使用二极管时常常需要辨明它的正负极。如果外壳所印的标识模糊,可以用这个办法判断。

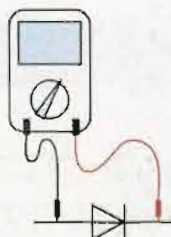


图2.9-4 测二极管正向电阻

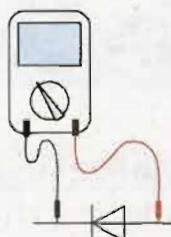


图2.9-5 测二极管反向电阻

思考与讨论

图2.9-6所示多用电表的选择开关没有“OFF”挡。两位同学用过这个多用电表以后,分别把选择开关放在图2.9-6甲、乙所示的位置。你认为谁的习惯比较好?



甲



乙

图2.9-6 谁的习惯比较好?

问题与练习

1. 用多用电表进行了两次测量,指针的位置分别如图2.9-7中*a*和*b*所示。若多用电表的选择开关处在以下表格中所指的挡位,*a*和*b*的相应读数是多少?请填在表中。

所选择的挡位	指针读数	
	<i>a</i>	<i>b</i>
直流电压 2.5 V		
直流电流 50 mA		
电阻 $\times 10$		

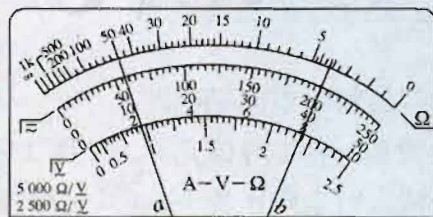


图2.9-7 一种多用电表的表盘

^① 二极管是非线性元件,它的电阻与通过电流的大小有关。使用不同的多用表,或使用不同倍率的欧姆挡时,即使测量的都是正向电阻,数值也会相差很多。因此,这里的方法只能用来判断二极管的好坏或区分它的正负极,读出的电阻数值没有实际意义。

2. 用表盘为图 2.9-7 所示的多用电表正确测量了一个 $13\ \Omega$ 的电阻后, 需要继续测量一个阻值大概是 $2\text{ k}\Omega$ 左右的电阻。在用红、黑表笔接触这个电阻两端之前, 以下哪些操作步骤是必须的? 请选择其中有用的, 按操作顺序写出:_____。

A. 用螺丝刀调节表盘下中间部位的指针定位螺丝, 使表针指 0

B. 将红表笔和黑表笔接触

C. 把选择开关旋转到 “ $\times 1\text{ k}$ ” 位置

D. 把选择开关旋转到 “ $\times 100$ ” 位置

E. 调节欧姆调零旋钮使表针指向欧姆零点

3. 请回答下列问题

(1) 用多用电表测量直流电流时, 红表笔和黑表笔哪个电势较高?

(2) 用多用电表测量直流电压时, 红表笔和黑表笔哪个电势较高?

(3) 用多用电表测量电阻时, 红表笔和黑表笔哪个电势较高?

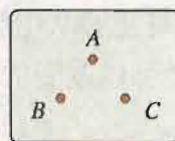


图 2.9-8 判断箱中有什么元件

4. 图 2.9-8 中的 A、B、C 为黑箱 (即看不见内部电路结构的盒子) 上的三个接点, 箱内有两个电学元件与它们相连。为探明内部结构, 某同学用多用电表进行了四步测量:

(1) 用直流电压挡测量: A、B、C 三点间均无电压;

(2) 用欧姆挡测量: A、C 间正反向电阻完全相同;

(3) 用欧姆挡测量: 黑表笔接 A 点、红表笔接 B 点, 有电阻; 反接后阻值很大;

(4) 用欧姆挡测量: 黑表笔接 C 点、红表笔接 B 点, 有电阻, 阻值比第(2)步测得的大; 反接后阻值很大。

请判断, 黑箱内部有什么元件? 它们是怎样连接的?

10

实验：测定电池的电动势和内阻

实验原理 有多种方法测定电池的电动势和内阻, 分别介绍如下, 同学们可以根据自己的实验条件选用。

● 图 2.10-1 中, 电源电动势 E 、内电阻 r , 与路端电压 U 、电流 I 的关系可以写成

$$E = U + Ir \quad (1)$$

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, 于是能够从中解出 E 和 r 。因此, 用电压表、电流表加上一个可以改变的电阻, 就能测定电源的电动势 E 和内阻 r 。

● (1) 式也可以写成

$$E = IR + Ir \quad (2)$$

如果能得到 I 、 R 的两组数据 (图 2.10-2), 也可以得到关于 E 和 r 的两个方程, 于是能够从中解出 E 和 r 。这样, 用电流表、电阻箱也可以测定电源的电动势和内阻。

● (1) 式还可以写成

$$E = U + \frac{U}{R} r \quad (3)$$

如果能得到 U 、 R 的两组数据 (图 2.10-3), 同样能通过解方程组求出 E 和 r 。这样, 除了以上两个方法外, 还可以用电压表、电阻箱来测定电源的电动势和内阻。

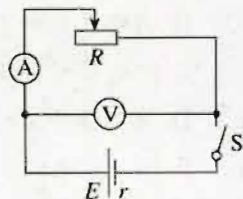


图 2.10-1 测出两组 U 、 I 的值, 就能算出电动势和内阻。

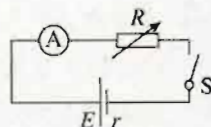


图 2.10-2 测出两组 I 、 R 的值, 就能算出电动势和内阻。

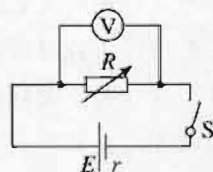


图 2.10-3 测出两组 U 、 R 的值, 就能算出电动势和内阻。

实验方法 把较粗的铜丝和铁丝相隔约几毫米插入马铃薯或苹果中, 就制成了一个水果电池 (铜丝和铁丝相距越近、插入越深, 电池的内阻就越小), 铜丝是电池的正极, 铁丝是负极。我们测量水果电池的电动势和内阻。现在以“实验原理”中的第一个思路为例, 说明实验的方法。这个方法的特点是简单明了, 而且便于通过作图处理数据, 缺点是要同时使用两个电表来测量电流和电压。

如图 2.10-1, 把可变电阻 R 设在某一较大的数值, 闭合开关后用直流电压挡测出电阻两端的电压, 用电流挡测出通过电阻的电流。把电压值和电流值记录在预先绘制的表格中。

减小电阻, 通过它的电流随之增大。这样又获得电压和电流的另一组数据。与此类似, 可以得到多组电压、电流值, 然后用本节稍后的方法处理数据, 求得电源电动势 E 和内阻 r 。

用水果电池做这个实验的优点是它的内阻比较大, 容易测量。但任何电池在使用过程中, 由于化学反应正极附近都会析出气体, 在一定程度上使电极与电解质溶液 (水果电池中

就是果汁)隔离,明显地改变了内阻,水果电池尤其是这样。所以,测量前要做好充分的准备,测量尽量迅速,使得内阻发生较大变化之前结束测量。

数据处理 用两组 I 和 U 的数据,代入 (1) 式,解方程组就可以算出电池的电动势 E 和内阻 r 。这样做虽然简单,误差却可能很大。

为了减小误差,可以多测几组 I 和 U 的数据,分别列出若干组联立方程,求出若干组 E 和 r ,最后以 E 的平均值和 r 的平均值作为实验结果。这个方法的误差比只用两组 I 、 U 的数据求得结果的误差要小。

这里介绍另外一种方法,它也能减小结果的误差,而且更简便、更直观。

(1) 式可以改写成

$$U = -rI + E \quad (4)$$

其中 r 、 E 分别是电池的内阻和电动势,对于一个电池来说是常量;而对不同的几次测量来说, I 、 U 各不相同,是变量。所以 (4) 式可以看做一个一次函数的表达式,它的 U - I 图象是一条直线。

以 I 为横坐标、 U 为纵坐标建立直角坐标系,根据几组 I 、 U 的测量数据在坐标系中描点。此时可以看到这些点大致呈直线分布。如果发现个别明显错误的数据,应该把它剔除。用直尺画一条直线,使尽量多的点落在这条直线上,不在直线上的点能大致均衡地分布在直线两侧,这条直线就能较好地代表 U - I 关系,如图 2.10-4 所示。

这条直线与 U 坐标轴的交点表示 $I = 0$,属于断路的情况,这时的电压 U 等于电源的电动势。这条直线与 I 坐标轴的交点表示 $U = 0$,属于短路的情况,根据短路电流 $I_{\text{短}}$ 与电源内阻 r 、电动势 E 的关系 $r = \frac{E}{I_{\text{短}}}$,可以求出电源的内阻 r 。

如果认为水果电池不太稳定,也可改为测量干电池的电动势和内阻。旧干电池的内阻较大,容易测量。

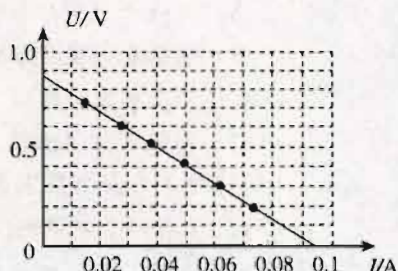


图 2.10-4 图 2.10-1 电路的 U - I 图象

问题与练习

- 某同学做了一个马铃薯电池,准备用滑动变阻器和一个多用电表来测定它的电动势和内阻。实验装置如图 2.10-5。当滑动变阻器为某一值时,用多用电表的直流电压挡测出变阻器两端的电压 U ,再卸去变阻器一个接线柱的导线,把多用电表串联在电路中,用直流电流挡测出通过变阻器的电流 I 。随后改变变阻器的电阻,重复上述操作,获得多组 U 、 I 数据。这个实验方案有什么缺点?

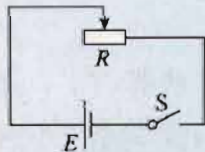


图 2.10-5 某同学的电路

2. 用图 2.10-6 的电路测量一节蓄电池的电动势和内阻。蓄电池的内阻非常小，为防止滑动变阻器电阻过小时由于电流过大而损坏器材，电路中用了一个保护电阻 R_0 。除蓄电池、滑动变阻器、开关、导线外，可供使用的实验器材还有：

- A. 电流表（量程 0.6 A、3 A）
 B. 电压表（量程 3 V、15 V）
 C. 定值电阻（阻值 1 Ω 、额定功率 5 W）
 D. 定值电阻（阻值 10 Ω 、额定功率 10 W）

(1) 电流表和电压表各选哪个量程？为什么？

(2) 选用哪个定值电阻做 R_0 ？为什么？

3. 某同学选用了其他规格的器材，按图 2.10-6 进行实验。他调整滑动变阻器共测得了 5 组电流、电压的数据，如下表。请作出蓄电池路端电压 U 随电流 I 变化的 $U-I$ 图象，根据图象得出蓄电池的电动势和内阻的测量值。

电流表读数 I/A	1.72	1.35	0.98	0.63	0.34
电压表读数 U/V	1.88	1.92	1.93	1.98	1.99

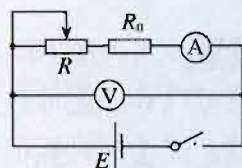


图2.10-6 测量蓄电池的电动势和内阻

11

简单的逻辑电路

以数字信号为特征的现代信息技术在迅猛发展，计算机、数码相机、移动电话、数字电视等与数字信号相关的电子产品，已经深入我们的生活。数字信号在变化中只有两个对立的状态：“有”，或者“没有”（图 2.11-1）。

处理数字信号的电路叫做数字电路，具有逻辑功能的数字电路叫做逻辑电路。本节我们学习最基本的逻辑电路——门电路。

“与”门 所谓“门”，就是一种开关，在一定条件下它允许信号通过；如果条件不满足，信号就被阻挡在“门”外。

如图 2.11-2，两个开关 A、B 串联起来控制同一个灯泡 L，显然，只有 A “与” B 同时闭合时，灯 L 才会亮。在这个事件中，“A 闭合”、“B 闭合”是条件，“灯 L 亮”是结

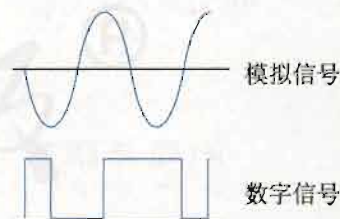


图 2.11-1 模拟信号与数字信号

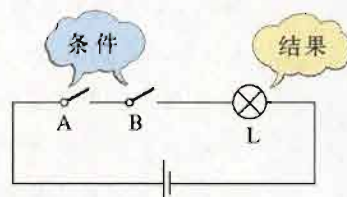


图 2.11-2 “与”逻辑电路

果。如果一个事件的几个条件都满足后,该事件才能发生,我们把这种关系叫做“与”逻辑关系。

思考与讨论

某单位财务室为了安全,规定不准一个人单独进入。为此,在门上以图 2.11-3 的方式安装了两把锁。只有甲与乙两个人同时打开各自的锁时,门才打开。它体现了“与”逻辑关系。

谈谈看,生活中还有哪些事例体现了“与”逻辑关系?



图2.11-3 生活中的“与”逻辑关系

具有“与”逻辑关系的电路称为“与”门电路,简称“与”门。

一个开关有通、断两种情况,图 2.11-2 中两个开关的通、断组合起来就有 4 种情况,我们把这 4 种情况以及每种情况灯泡的亮熄都列在表 1 中。

用数学语言描述表 1 中的关系,就是:把开关接通定义为 1,断开定义为 0,灯泡亮为 1,熄为 0。再把这种描述制成表格,于是就能用数字表示各种控制条件和控制结果,这种表格称为真值表。表 2 就是具有两个输入端的“与”门真值表。

图 2.11-4 是“与”门的电路符号,它有两个输入端 A 和 B, Y 是它的输出端。

在图 2.11-2 中, A、B 是两个机械开关,这是用来说明“与”逻辑关系的。实用的门电路由半导体材料制成,本书不讨论它的内部结构和工作原理。

表 1: 图 2.11-2 的各种情况

条 件		结 果
开关 A	开关 B	灯泡 L
断	断	熄
断	通	熄
通	断	熄
通	通	亮



表 2: “与”门的真值表

输 入		输 出
A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



图2.11-4 “与”门的符号。矩形中的“&”在英语中代表“and”,具有“与”的意思。它象征着:只有 A 与 B 两个输入端都是 1 时,输出端才是 1。

演 示

图 2.11-5 是演示“与”门功能的电路图。图中右侧方框内是一个与门^①, A、B 是它的输入端, Y 是输出端。电压表显示输出电压的值。

左边两个虚线框内是两个信号源,分别从 A、B 接入门电路。当信号源的开

^① 实际的门电路由集成电路或其他电子元件组成,工作时需要电源,因此具有两个输入端、一个输出端的门电路不止三个接线端,但是逻辑电路的电路图只反映逻辑关系,通常不把供电电路画出。

关接1时,信号源将一个电压输入门电路,接0时没有电压输入。可以从电压表上看到,只有当A、B都输入1时,输出端才有输出电压。

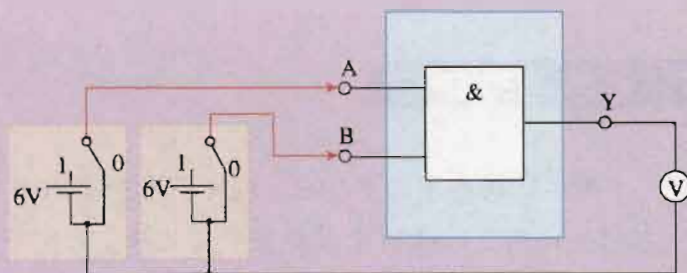


图 2.11-5 “与”门电路的作用

“或”门 图2.11-6中,两个开关A、B并联,控制同一个灯泡Y,在这个电路中,A“或”B闭合时,灯Y就亮。像本例这样:如果几个条件中,只要有一个条件得到满足,某事件就会发生,这种关系叫做“或”逻辑关系。具有“或”逻辑关系的电路叫做“或”门。



图 2.11-6 “或”逻辑电路

思考与讨论

某寝室的4名同学每人都配了一把门钥匙,各人都可以用自己的钥匙单独开门,它体现了“或”逻辑关系。

谈谈看,生活中还有哪些事例体现了“或”逻辑关系?

我们把图2.11-6中开关A、B的四种可能组合以及灯泡亮熄的情况列成表3,表3排列了该电路的控制条件和控制结果的全部关系。

用1表示开关接通、0表示断开,用1表示灯泡亮、0表示灯泡熄,根据表3制成表4。表4就是反映“或”门输入、输出关系的真值表。

图2.11-7是“或”门的电路符号,A和B是它的两个输入端,Y是它的输出端。

表3: 图2.11-6的各种情况

条 件		结 果
开关A	开关B	灯泡L
断	断	熄
断	通	亮
通	断	亮
通	通	亮

表4: “或”门的真值表

输 入		输 出
A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

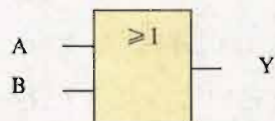


图 2.11-7 “或”门的符号。矩形中的“ ≥ 1 ”象征着:当1个或多个输入端为1时,输出端是1。

演示

图 2.11-8 是演示“或”门功能的电路图。A、B 是输入端，Y 是输出端。电压表显示输出电压的值。

左边两个虚线框内是两个信号源，分别从 A、B 接入门电路。

当信号源的开关接 1 时，信号源

将一个直流电压输入门电路，接 0 时没有电压输入。可以从电压表中看到，只要 A 或 B 输入 1，输出端就有输出电压。

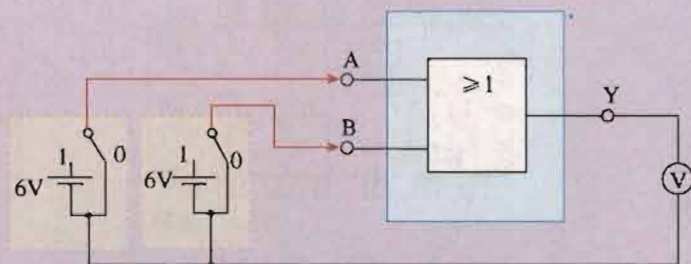


图 2.11-8 “或”门电路的作用

“非”门 在图 2.11-9 的电路中，我们沿用以上讨论“与”门和“或”门时的研究方法：开关闭合为 1、断开为 0，灯泡亮为 1、熄为 0。开关通断是控制的条件，即输入；灯泡亮熄是控制的结果，即输出。

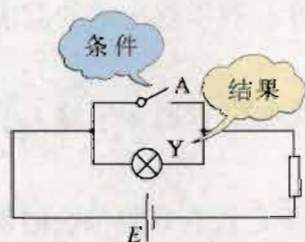


表 5：“非”门的真值表

输入 A	输出 Y
0	1
1	0

图 2.11-9 “非”逻辑电路

在过去的学习中，我们习惯于“开关通、灯泡亮”，“开关断、灯泡熄”。但是对于图 2.11-9 的电路，当开关闭合而输入为 1 时，灯泡反而熄灭，输出为 0；当开关断开而输入为 0 时，灯泡反而点亮，输出为 1。像这样输出状态与输入状态相反的逻辑关系，叫做“非”逻辑关系，具有“非”逻辑关系的电路叫做“非”门。表 5 是“非”门的真值表。图 2.11-10 是“非”门的电路符号。

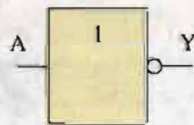


图 2.11-10 “非”门的符号。矩形右侧的小圆可以看做数字“0”，它与矩形中的数字“1”象征着：输入端为 1 时输出端是 0。

目前广泛应用的门电路是将元件集成在一块硅片上的集成电路。图 2.11-11 是一个真实的集成电路块的外引线图：四个 2 输入“与”门集成电路装在一个壳内，共有 14 条引线，其中 12 条引线内部连接着 4 个独立的 2 输入“与”门，第 14 号引线是公共电源线，第 7 号引线是公共地线。图 2.11-12 是由 6 个独立的“非”门组成的集成电路的外引线图。

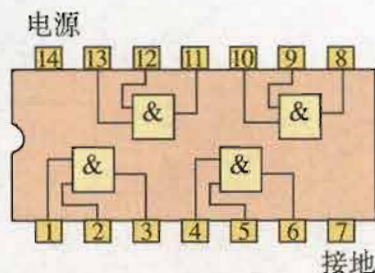


图 2.11-11 四个 2 输入
“与”门集成电路的外引线

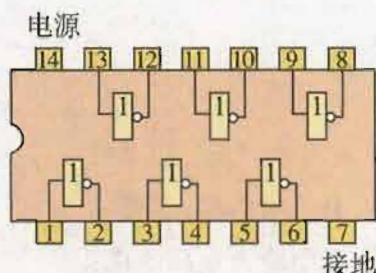


图 2.11-12 六个“非”门
集成电路的外引线

例题 图 2.11-13 是一个火警报警装置的逻辑电路

图。 R_t 是热敏电阻，低温时电阻值很大，高温时电阻值很小， R 是阻值较小的可调电阻。

(1) 要做到平时电铃不响，而火警时电铃由于高温响起。在图中虚线圆内应该接入怎样的元件？

(2) 为什么温度高时电铃会被接通？

(3) 为了提高电路的灵敏度，即要把报警温度调得较低， R 的值应大一些还是小一些？

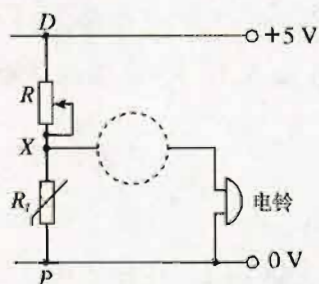


图 2.11-13 火警报警装置

解 (1) 温度较低时 R_t 的阻值很大， R 比 R_t 小得多，因此 X 、 P 之间电压较大。要求此时电铃不发声，也就是要求输出给电铃的电压较小。这里输出端的需求与输入端的状态相反，可见虚线圆内的元件应该是一个非门。

(2) 温度升高时 R_t 阻值减小， X 、 P 之间电压降低。这时由于输入了低电压，所以从非门输出的是高电压，电铃响起。

(3) 为了提高电路的灵敏度，应该使电路在温度还没有升得很高时就能输出高电压，也就是说，应该在温度还没有升得很高时 X 、 P 之间的电压就已经降得足够低。根据分压电路的性质，对于同一个热敏电阻 R_t ，增大可变电阻 R 的电阻值就能达到目的。

科学漫步

集成电路

电阻、电容、晶体管等元件，在使用时总是需要以各种各样的方式组装成一定的电路。对于稍微复杂一些的电路，还要经过一定的调试才能使用，这就降低了工作效率。为了解决这一问题，集成电路 (integrated circuits, IC) 应运而生。它是以半导体材料为基片，将组成电路的各种元件和连线集成在同一基片上，成为具有一定功能的微电路系统。从宏观上看，已经分不清集成电路中哪些部分是元件，哪些部分是连线，它们已经成为一个统一体。

集成电路具有分立元件电路无可比拟的优点。与最紧凑的分立元件电路相比,集成电路的体积小了几个数量级,重量轻了几个数量级。现代微电子技术可以在手指甲大小的半导体硅片上,制造出20亿~30亿个晶体管(图2.11-14)。由超大规模集成电路制成的超轻、超薄笔记本电脑,质量只有1 kg左右,厚度不到2 cm。而世界上第一台电子管式电子计算机,仅用1.8万只电子管,就占地170 m²,质量为30余吨。集成电路还具有可靠性高、运算速度快、成本低廉等许多优点。

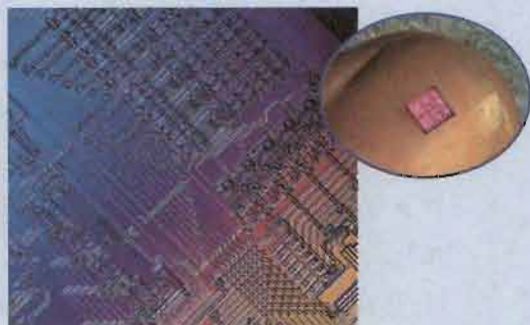


图 2.11-14 集成电路



图 2.11-15 笔记本电脑

目前,集成电路已经广泛应用于国民经济的各个领域以及人们日常的工作和生活中。卫星、导弹的控制系统,汽车、船舶的电子装置,电视、手机等家用电器的核心部件,无一不采用集成电路。

随着微电子技术的发展,微电子产品的功能越来越强大,价格越来越低廉。手机、计算机已经走入千家万户,各种功能广泛、质量可靠、体积小、重量轻的微电子产品,越来越受消费者的青睐。

问题与练习

1. 一个机要仓库有一扇电动门,门上装有三把电动锁,三个机要员各有一把锁的钥匙,只有三人同时转动自己的钥匙(闭合自己的开关),才能通过继电器把门打开。图2.11-16中的 S_1 、 S_2 、 S_3 是三个锁内的开关, J 为继电器(图中未画电动机的电路),请在虚线框内画出符合要求的具有3个输入端的门电路符号。

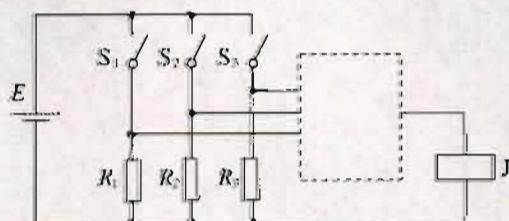


图 2.11-16 画出门电路

2. 某同学设计了一个路灯自动控制门电路(如图2.11-17):天黑了,让路灯自动接通,天亮了,让路灯自动熄灭。图中 R_G 是光敏电阻,有光线照射时,光敏电阻的阻值会显著地减小, R 是可调电阻。 J 为路灯开关控制继电器(图中未画路灯电路)。

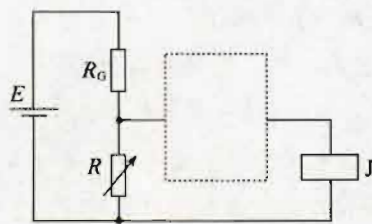


图2.11-17 画出门电路

- (1) 请在虚线框内填入需要的门电路符号。
 (2) 如果路灯开关自动接通时天色还比较亮,需要调节自动控制装置,使得它在天色更暗时才会自动接通开关,应如何调节 R ? 说明道理。

3. 如图2.11-18甲,一个与门的

输出端和一个非门的输入端相连,形成一个组合的门电路。与门的输入端 A_1 、 B_1 就是这个组合电路的总输入端,非门的输出端 Y_2 就是它的总输出端。

为了应用方便,实际中把这两个基本门电路在制作时便复合在一起,做成一个复合门电路,称为“与非”门。图乙就是与非门的符号。

同样的道理,由一个或门和一个非门可以构成一个或非门。图丁是或非门的符号。

请在表中填写与非门和或非门的真值表。

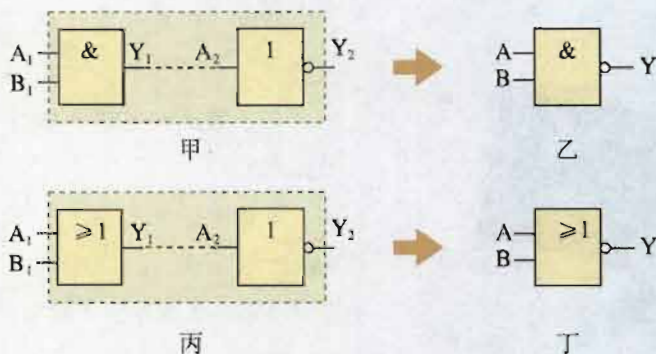


图2.11-18 与非门和或非门

与非门的真值表

输入		输出
A	B	Y

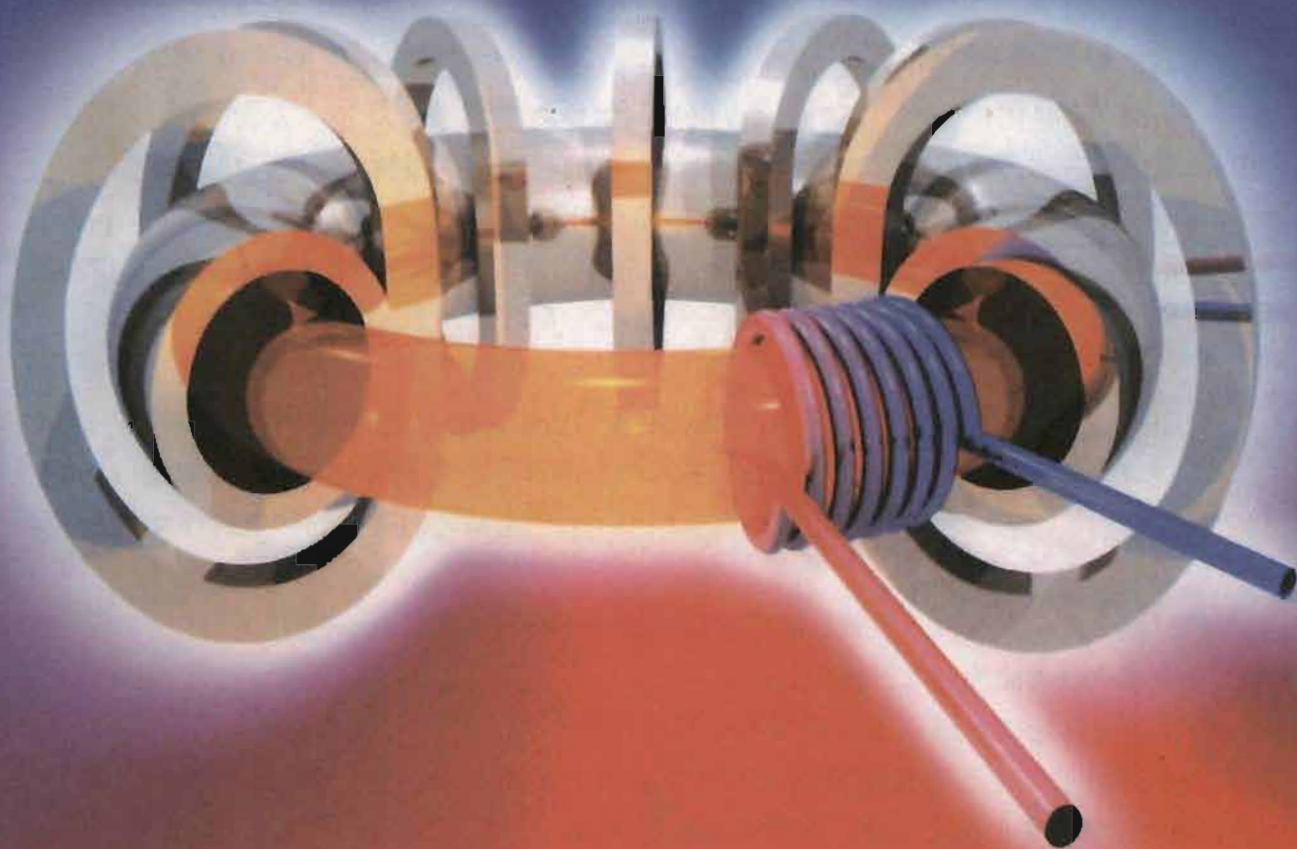
或非门的真值表

输入		输出
A	B	Y

电和磁的实验中最明显的现象是，处于彼此距离相当远的物体之间的相互作用。因此，把这些现象化为科学形式的第一步就是，确定物体之间作用力的大小和方向。

——麦克斯韦^①

第三章 磁场



托卡马克磁约束装置

许多动物除了视觉、听觉、味觉、嗅觉和触觉外，还能感觉到磁场。依靠这种感觉，它们能利用地磁场“导航”。候鸟和海龟长途迁徙不会迷失方向，它们凭借的“秘密武器”之一，可能就是地对磁场的感知能力。

人类对磁场的利用就更多了：利用磁场进行电能和机械能的相互转变，人们制造出发电机、电动机；利用磁性材料的磁化和退磁，人们广泛使用着磁卡、磁盘、磁带；地球的磁场不仅为我们导航、找矿，还能帮助我们测定岩层的年龄，传递大陆漂移的信息。

大到天体，小到粒子，磁现象无处不在。让我们在这一章里，一起探究磁的奥秘吧！

^① 麦克斯韦 (James Clerk Maxwell, 1831 — 1879)，英国物理学家，经典电磁场理论的创始人，统计物理学的奠基人之一。

1

磁现象和磁场

磁现象 古代人们就发现了天然磁石吸引铁器的现象。我国春秋战国时期的一些著作已有关于磁石的记载和描述，而东汉学者王充在《论衡》一书中描述的“司南”，是人们公认的最早的磁性定向工具。指南针是我国古代四大发明之一。12世纪初，我国已将指南针用于航海。

人们最早发现的天然磁石的主要成分是 Fe_3O_4 。现在使用的磁体，多是用铁、钴、镍等金属或用某些氧化物制成的。天然磁石和人造磁体都叫做永磁体^①，它们都能吸引铁质物体，我们把这种性质叫做**磁性(magnetism)**。磁体的各部分磁性强弱不同，磁性最强的区域叫做**磁极(magnetic pole)**。能够自由转动的磁体，例如悬吊着的磁针，静止时指南的磁极叫做南极，又叫S极；指北的磁极叫做北极，又叫N极。



图 3.1-1 司南（根据古代文字记载制作）

电流的磁效应 电现象与磁现象的相似使我们猜想，两者之间可能存在某种联系。

自然界中的磁体总存在着两个磁极，自然界中同样存在着两种电荷。不仅如此，磁极之间的相互作用，与电荷之间的相互作用具有相似的特征：同名磁极或同种电荷相互排斥，异名磁极或异种电荷相互吸引。

1731年，一名英国商人发现，雷电过后，他的一箱刀叉竟然有了磁性。1751年，富兰克林发现莱顿瓶放电能使缝衣针磁化。

但是，也许是由于磁极不可能像电荷那样单独存在，也许是磁体不会对带电体产生直接影响……也许是由于其他原因，直到19世纪初，库仑、托马斯·杨和安培等著名物理学家，都认为电与磁是互不相关的两回事。不过，在18世纪和19世纪之交，随着对摩擦生热及热机做功等现象认识的深化，自然界各种运动形式之间存在着相互联系并相互转化的思想，在哲学界和科学界逐渐形成。深受康德哲学思想影响的丹麦物理学家奥斯特相信，就像电和热、电和光之间存在联系一样，电和磁之间也应该存在着联系。

奥斯的实验研究并非一帆风顺。当时人们见到的力都沿着物体连线的方向，即都是所谓“纵向力”。受这个观念的局限，奥斯特总是把磁针放在导线的延长线上，实验均以失败告终。



奥斯特 (Hans Christian Oersted, 1777—1851)，丹麦物理学家。

^① 现在日常生活中用到的永磁体大多不是铁质的，但为了叙述方便，本书中磁铁和磁体两词通用。

1820年4月,在一次讲课中,他偶然地把导线沿南北方向放置在一个带玻璃罩的指南针的上方,通电时磁针转动了。这个现象可能没有引起听众的注意,但却是奥斯特盼望已久的。他连续进行了大量研究,同年7月发表论文,宣布发现了电流的磁效应,首次揭示了电与磁的联系。

为此,安培写道:“奥斯特先生……已经永远把他的名字和一个新纪元联系在一起了。”法拉第则评论说:“他突然打开了科学中一个黑暗领域的大门,使其充满光明。”

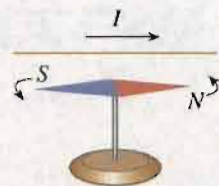


图3.1-2 奥斯特发现,电流能使磁针偏转。

磁场 自奥斯特实验之后,安培等人又做了很多实验研究。他们发现,不仅通电导线对磁体有作用力,磁体对通电导线也有作用力。例如,把一段直导线悬挂在蹄形磁铁的两极间,通以电流,导线就会移动。他们还发现,任意两条通电导线之间也有作用力。

这些相互作用是怎样发生的?

正像电荷之间的相互作用是通过电场发生的,磁体与磁体之间、磁体与通电导体之间,以及通电导体与通电导体之间的相互作用,是通过**磁场 (magnetic field)** 发生的。

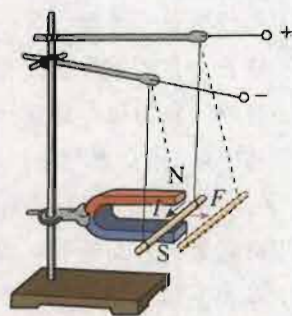


图 3.1-3 通电导线与磁体通过磁场发生相互作用

地球的磁场 发现磁针能够指向南北,这实际上就是发现了地球的磁场。指南针的广泛使用,又促进了人们对地球磁场的认识。

地球的地理两极与地磁两极并不重合,因此,磁针并非准确地指向南北,其间有一个夹角,这就是地磁偏角,简称磁偏角。磁偏角的数值在地球上不同地点是不同的。不仅如此,由于地球磁极的缓慢移动,磁偏角也在缓慢变化。磁偏角的发现对于科学的发展和指南针在航海中的应用都很重要。

不但地球具有磁场,宇宙中的许多天体都有磁场。太阳表面的黑子、耀斑和太阳风等活动都与太阳磁场有关。

阿波罗登月计划的重要科研活动之一,就是观测月岩磁性,并由此推断,月球内部全部为固态物质,这是用其他天文学方法不能做到的。对火星磁场的观察显示,火星不像地球那样有一个全球性的磁场,因此指南针不能在火星上工作。

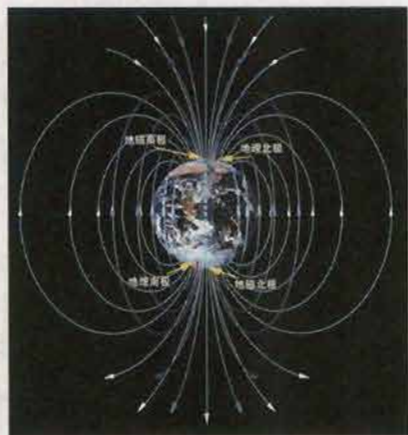


图 3.1-4 地理两极与地磁两极不重合。

STS

指南针与郑和下西洋

明永乐三年(1405)的一天,江苏太仓城外刘家港,一支庞大的船队正准备起锚远航。“宝舟体势巍然,巨无匹敌,棚帆锚舵,非二三百人莫能举动。”整个船队有官兵、水手、工匠、医生、翻译等2万多人。这里描述的是中国古代历史上规模空前的一项系列航海活动。船队的统帅是郑和(1371—1433)。

我国是最早在航海时使用指南针的国家。郑和下西洋的船队已经装备了罗盘,导航时兼用罗盘和观星,二者互相补充、互相修正。他的航海图叫做“针图”,图中的航线叫做“针路”。明清时期,我国海道针经一类书籍相当丰富。15世纪初成书的《顺风相送》《指南正经法》现藏于英国牛津大学图书馆。

从1405年到1433年,郑和先后7次下西洋,向南到达爪哇,向西到达波斯湾和红海的麦加,最远到达赤道以南的非洲东海岸。郑和下西洋是世界航海史上伟大的壮举。

郑和下西洋产生的影响是多方面的。这次航行开拓了我国在南洋群岛、印度洋沿岸国家的海外市场,刺激了我国的商品生产,对当时我国资本主义因素的增长有一定的推动作用。它还开辟了从中国到红海、非洲东海岸的航道,绘制了航海地图,总结了当时的航海技术和航海地理知识,对沟通东西方海路交通做出了重大贡献。郑和的航海图连同船队其他官员的著作,介绍了他们经过的国家的山川地貌和风土人情,大大开阔了中国人的地理视野。郑和的航海活动不但是中国海上探险事业的巨大成就,也是世界地理发展史上的光辉记录。

遗憾的是,由于历史的局限性,这项航海活动没有继续下去。



图 3.1-5 航海用的指南针



图 3.1-6 针路图

问题与练习

1. 音箱中的扬声器、电话、磁盘、磁卡等生活中的许多器具都利用了磁体的磁性。请选择一个你熟悉的器具,简述它是怎样利用磁体的磁性来工作的。
2. 日常生活中,磁的应用给我们带来方便。例如,在柜门上安装“门吸”能方便地把柜门关紧;把螺丝刀做成磁性刀头,可以像手一样抓住需要安装的铁螺钉,还能把掉在狭缝中的铁螺钉取出来。请你关注自己的生活,看看还有哪些地方如果应用磁性可以带来方便。写出你的创意,并画出你设计的示意图。
3. 磁的应用非常广泛,不同的人对磁应用的分类也许有不同方法。请你把磁的应用分类,每类举一个例子。

巨大的电磁铁能吸起成吨的钢铁,实验室中的小磁铁却只能吸起几枚铁钉。磁体磁性的强弱,表现为它所产生的磁场对磁性物质和通电导线的作用力的强弱,也就是说,磁场有强弱之分。怎样认识和描述磁场的强弱呢?

在研究电场的时候,我们研究检验电荷在电场中的受力情况,确定了一个叫做电场强度的物理量,用来描述电场的强弱。与此类似,我们是否可以分析磁体或通电导线在磁场中所受的力,由此入手,找出表示磁场强弱和方向的物理量呢?

磁感应强度的方向 与电场强度相对应,我们本可以把描述磁场强弱的物理量叫做磁场强度。但历史上磁场强度已经用来表示另一个物理量,因此物理学中用**磁感应强度**(**magnetic induction**)来描述磁场的强弱。

人们很容易想到,把一枚可以转动的小磁针作为检验用的磁体放在磁场中的某一点,观察它的受力情况,由此来描述磁场。

小磁针总有两个磁极,它在磁场中受力后,一般情况下将会转动。小磁针静止后,它的指向也就确定了,显示出这一点的磁场对小磁针N极和S极的作用力的方向。物理学中把小磁针静止时N极所指的方向规定为该点的磁感应强度的方向,简称磁场的方向。

但是,N极不能单独存在,因而不可能测量N极受力的大小,也就不可能确定磁感应强度的大小了。怎么办?

磁场除了对磁体有作用力,还对通电导线有作用力。能不能用很小一段通电导线来检验磁场的强弱呢?看来解决问题的办法还是有的!

磁感应强度的大小 在物理学中,把很短一段通电导线中的电流 I 与导线长度 L 的乘积 IL 叫做电流元。但要使导线中有电流,就要把它连到电源上,所以孤立的电流元是不存在的。实际上仍要使用相当长的通电导线。不过如果做实验的那部分磁场的强弱、方向都是一样的,也就是说磁场是匀强磁场,我们也可以用比较长的通电导线进行实验,从结果中推知一小段电流元的受力情况。

演示

探究影响通电导线受力的因素

如图3.2-1,三块相同的蹄形磁铁并列放在桌上,可以认为磁极间的磁场是均匀的。将一根直导线水平悬挂在磁铁的两极间,导线的方向与磁感应强度的方向(由下向上)垂直。

有电流通过时导线将摆动一个角度，通过摆动角度的大小可以比较导线受力的大小。分别接通“2、3”和“1、4”，可以改变导线通电部分的长度。电流由外部电路控制。

先保持导线通电部分的长度不变，改变电流的大小；然后保持电流不变，改变导线通电部分的长度。观察这两个因素对导线受力的影响。

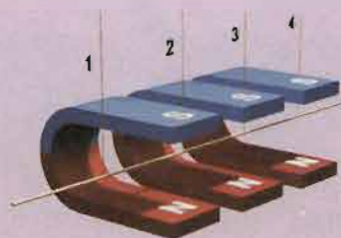


图 3.2-1 在匀强磁场中探究影响通电导线受力的因素

分析了很多实验事实后人们认识到，通电导线与磁场方向垂直时，它受力的大小既与导线的长度 L 成正比，又与导线中的电流 I 成正比，即与 I 和 L 的乘积 IL 成正比，用公式表示就是

$$F = ILB \quad (1)$$

式中 B 是比例系数，它与导线的长度和电流的大小都没有关系。但是，在不同情况下， B 的值是不同的：即使是同样的 I 、 L ，在不同的磁场中，或在非均匀磁场的不同位置，一般说来导线受的力也不一样。看来， B 正是我们寻找的表征磁场强弱的物理量——磁感应强度。由此，在导线与磁场垂直的最简单情况下（例如图 3.2-1）有关系式

$$B = \frac{F}{IL} \quad (2)$$

磁感应强度 B 的单位由 F 、 I 和 L 的单位决定。在国际单位制中，磁感应强度的单位是特斯拉（tesla），简称特，符号是 T，

$$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}。$$

表 3.2-1 一些磁场的磁感应强度 / T

人体器官内的磁场	$10^{-13} \sim 10^{-9}$
地磁场在地面附近的平均值	5×10^{-5}
我国研制的作为 α 磁谱仪核心部件的大型永磁体中心的磁场	0.134 6
电动机或变压器铁芯中的磁场	0.8 ~ 1.7
电视机偏转线圈内的磁场	约 0.1
实验室使用的最强磁场	瞬时 10^3 恒定 37
中子星表面的磁场	$10^8 \sim 10^9$
原子核表面的磁场	约 10^{12}

我们也可以仿照第一章第3节关于第(1)式的讨论，对磁场中 F 、 I 、 L 的关系事先做出推测。

关于(1)式，这里暂做初步了解，在第4节中还要讨论。

可以看出，(2)式与电场强度的定义相似，又是一个用比值定义物理量的例子。



特斯拉 (Nikola Tesla, 1856—1943)，美国电气工程师。他一生致力于交变电流的研究，是交变电流进入实用领域的主要推动者。

科学漫步

地球磁场与古地质学

同学们都知道地球是个大磁体,地磁的S极就在地球的地理北极附近,地磁的N极就在地理南极附近,指南针正是在地磁场的作用下,才忠实地指着南北方向。可是,你们相信吗,70多万年前,地球磁场的方向却与此相反,地磁的N极正在地理北极附近呢!那时候,小磁针的N极不是指北,而是指南!科学家们怎样推断出几十万年前的地磁场方向呢?

同学们还没忘记磁化现象吧?一枚缝衣针在磁铁附近被磁化时,其磁极方向就记录了当时磁场的方向。所以,从缝衣针磁化后的磁场方向,可以推断磁化它的那个磁铁当时的磁场方向或磁极的方位。同样的道理,地壳的岩浆(含有许多铁磁性物质)在冷却形成岩石的过程中也会受到地球磁场的磁化,而且会保持一些磁性(岩石的剩磁)。我们对不同地质时期形成的岩石的磁性进行观测、分析,就可以推断形成岩石那个年代地球磁场的情况。古岩石就像一片记录着地球磁场变化历史的计算机磁盘。

科学家在对同一地方的古岩石的大量分析中发现,有的岩石的剩磁与现在的地磁方向相同,有的剩磁则与现在的地磁方向相反。不仅陆地上的岩层有这种“地磁异常”,各大洋的洋底岩石也存在大量磁异常。

从岩层特别是海底岩层磁性的这些变化,科学家们推断出地球磁场方向曾经与现在相反,而且这种地磁反转在最近500万年里曾经发生过10次之多!

科学家在对古岩层的磁性进行观测时还注意到,不仅不同地质时期岩石的磁化方向不同,分布在不同大陆上的同一地质时期的古岩石的剩磁方向也是不同的。难道同一时期地球有多个南北磁极吗?经过多方面的研究,才认识到这种地磁异常是由于大陆在漫长的地质历史时期中有漂移运动,而且不同大陆的漂移方向不一样。因此,大陆现在的位置和方向已经不是岩石磁化时的位置和方向了。其他许多研究也支持大陆漂移学说。

科学研究还发现,地球磁场正在逐渐减弱。如果这种趋势保持下去,地球磁场也许会消失,而地磁的消失可能会对地球的生物态造成影响。这种减弱过程会不会逆转呢?

问题与练习

1. 有人根据 $B = \frac{F}{IL}$ 提出:一个磁场中某点的磁感应强度 B 跟磁场力 F 成正比,跟电流强度 I 和导线长度 L 的乘积 IL 成反比。这种说法有什么问题?
2. 在匀强磁场中,有一根长0.4 m的通电导线,导线中的电流为20 A,这条导线与磁场方向垂直时,所受的磁场力为0.015 N,求磁感应强度的大小。

3. 在磁场中的同一位置放置一条直导线，导线的方向与磁场方向垂直。先后在导线中通入不同的电流，导线所受的力也不一样。图3.2-2中的几幅图象表现的是导线受力的大小 F 与通过导线的电流 I 的关系。 a 、 b 各代表一组 F 、 I 的数据。在甲、乙、丙、丁四幅图中，正确的是哪一幅或哪几幅？说明道理。

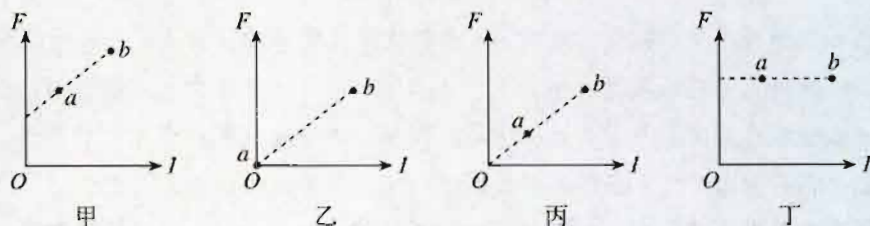


图3.2-2 哪个是正确的？

3

几种常见的磁场

磁感线 我们已经知道，在磁场中的每一点，磁感应强度 B 都有一定的方向。如果在磁场中画出一些曲线，使曲线上每一点的切线方向都跟这点的磁感应强度的方向一致，这样的曲线就叫做**磁感线(magnetic induction line)**。利用磁感线可以形象地描述磁场。

实验中常用铁屑来模拟磁感线的形状。在磁场中放一块玻璃板，玻璃板上均匀地撒一层细铁屑，细铁屑就在磁场里磁化成“小磁针”。轻敲玻璃板，铁屑就会有规则地排列起来，模拟出磁感线的形状，如图3.3-1所示。在两极附近，磁场较强，磁感线较密。

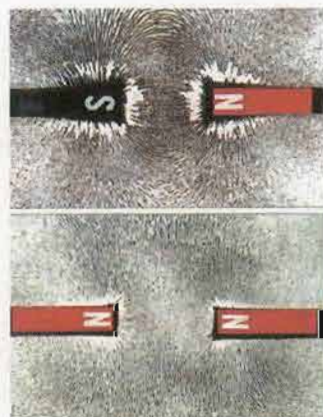


图3.3-1 用铁屑模拟磁感线

几种常见的磁场 把小磁针放到通电直导线附近，根据磁针的指向，可以研究它周围磁场的分布。直线电流的磁场方向可以用**安培定则(Ampère rule)**方便地表示(图3.3-2)：右手握住导线，让伸直的拇指所指的方向与电流方向一致，弯曲的四指所指的方向就是磁感线环绕的方向。这个规律也叫**右手螺旋定则**。

环形电流的磁场也可以用小磁针来

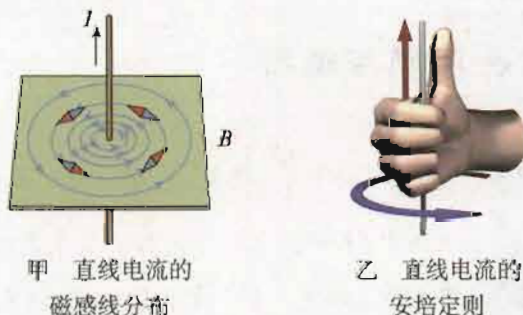
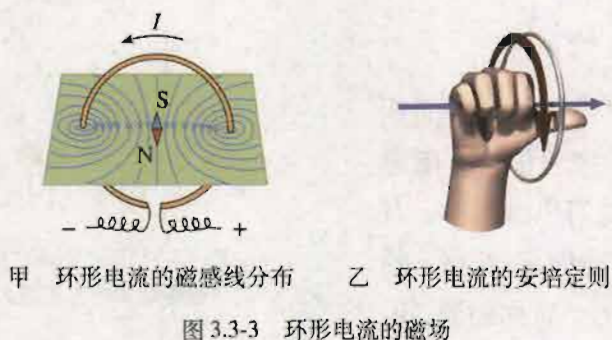


图3.3-2 直线电流的磁场

研究,并且也可以用另一种形式的安培定则表示(图3.3-3):让右手弯曲的四指与环形电流的方向一致,伸直的拇指所指的方向就是环形导线轴线上磁感线的方向。

环形电流其实就是只有一匝的通电螺线管,通电螺线管则是许多匝环形电流串联而成的。因此,通电螺线管的磁场也就是这些环形电流磁场的叠加。所以,环形电流的安培定则也可以用来判定通电螺线管的磁场,这时,拇指所指的方向是螺线管内部的磁场的方向。从外部看,通电螺线管的磁场相当于一个条形磁铁的磁场,所以用安培定则时,拇指所指的是它的北极的方向(图3.3-4)。



与天然磁体的磁场相比,电流磁场的强弱容易控制,因而在实际中有很多重要的应用。电磁起重机、电话、电动机、发电机,以及在自动控制中普遍应用的电磁继电器等,都离不开电流的磁场。

安培分子电流假说 磁铁和电流都能产生磁场。它们的磁场是否有什么联系?我们知道,通电螺线管外部的磁场与条形磁铁的磁场十分相似,法国学者安培(André-Marie Ampère, 1775—1836)由此受到启发,提出了著名的分子电流假说。他认为,在原子、分子等物质微粒的内部,存在着一种环形电流——分子电流。分子电流使每个物质微粒都成为微小的磁体,它的两侧相当于两个磁极(图3.3-5)。

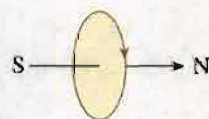


图3.3-5 安培认为,物质微粒内的分子电流使它们相当于一个个的小磁体。

安培的假说能够解释一些磁现象。一条铁棒未被磁化的时候,内部分子电流的取向是杂乱无章的,它们的磁场互相抵消,对外不显磁性(图3.3-6甲)。当铁棒受到外界磁场的作用时,各分子电流的取向变得大致相同,铁棒被磁化,两端对外界显示出较强的磁作用,形成磁极(图3.3-6乙)。磁体受到高温或猛烈撞击时会失去磁性,这是因为激烈的热运动或震动使分子电流的取向又变得杂乱无章了。

在安培的时代,人们不知道物质内部为什么会有分子电流。20世纪后,人们认识到,原子内部带电粒子在不停地运动,这种运动对应于安培所说的分子电流。

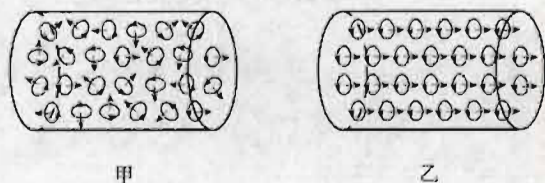


图 3.3-6 分子电流的取向是否有规律,决定了物体对外是否显磁性。

匀强磁场 我们在前面的实验中已经遇到过匀强磁场(uniform magnetic field),它是强弱、方向处处相同的磁场。距离很近的两个平行的异名磁极之间的磁场(图3.3-7),除边缘部分外,可以认为是匀强磁场。

匀强磁场的磁感线是一些间隔相同的平行直线。

相隔适当距离的两个平行放置的线圈通电时,其中间区域的磁场也是匀强磁场(图3.3-8)。这种装置在电子仪器中常常用到。

磁通量 研究电磁现象时,常常要讨论穿过某一面积的磁场及它的变化,为此引入了一个新的物理量——磁通量(magnetic flux)。设在磁感应强度为 B 的匀强磁场中,有一个与磁场方向垂直的平面,面积为 S ,我们把 B 与 S 的乘积叫做穿过这个面积的磁通量(图3.3-9),简称磁通。用字母 Φ 表示磁通量,则 $\Phi = BS$ 。如果磁场 B 不与我们研究的平面垂直,例如图3.3-10中的 S ,那么我们用这个面在垂直于磁场 B 的方向的投影面积 S' 与 B 的乘积表示磁通量。

在国际单位制中,磁通量的单位是韦伯(weber),简称韦,符号是Wb。

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$$

从 $\Phi = BS$ 可以得出 $B = \frac{\Phi}{S}$,这表示磁感应强度等于穿过单位面积的磁通量,因此工程技术人员常把磁感应强度叫做磁通密度,并且用 Wb/m^2 做单位

$$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

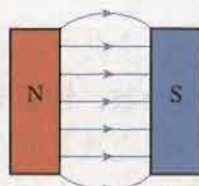


图 3.3-7 永磁铁两个平行的异名磁极间的匀强磁场

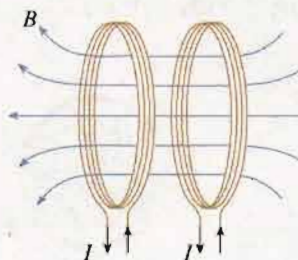


图 3.3-8 两个线圈之间的磁场是匀强磁场。

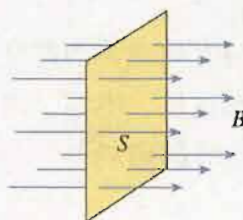


图 3.3-9 磁通量

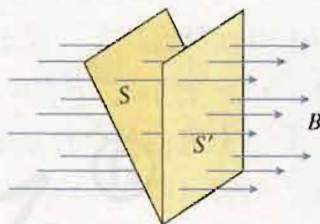


图 3.3-10 平面与 B 不垂直时的磁通量

做一做

(一) 验证环形电流的磁场方向

在瓶子上垫几层纸,然后用漆包线^①绕一个10~15匝的线圈,把绕好的线圈从瓶子上取下来,然后用胶带竖直固定在木板上,把

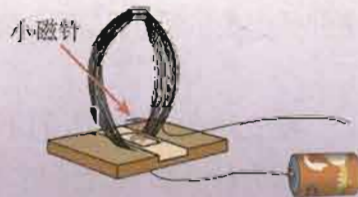


图 3.3-11 验证环形电流的磁场方向

^① 漆包线是涂着绝缘漆的铜线。用漆包线绕制线圈时,尽管导线相互接触,但是电流仍在导线内流动,不会从一圈跳到另一圈。

小磁针放在图 3.3-11 所示的位置。

根据小磁针的指向可以判断磁场的方向。

通电前先根据安培定则做出判断,然后看一看测量结果是否跟你的判断一致。将电池的正负极对调,重做这个实验。

因为十几圈漆包线的电阻很小,电路中的电流会很大,可能损坏电池,所以通电时间不要过长。最好使用旧电池。

(二) 用磁传感器研究磁场

过去,在中学物理实验室没有适当的方法测量磁场。现在,随着信息技术的发展,我们已经可以用磁传感器把磁感应强度变成电信号,通过计算机对磁场进行研究。图 3.3-12 就是一种磁传感器。制作探头的元件对磁场很敏感,输出的电信号从右端经过电缆和接口装置进入计算机。



图 3.3-12 一种磁传感器

由于磁感应强度有方向性,使用磁传感器前要仔细阅读仪器的说明书,弄清它测出的是磁感应强度在哪个方向的分量。图 3.3-12 中的传感器测出的是磁感应强度沿其轴线的分量,向左为正。

在同一位置,改变探头的取向,寻找磁感应强度取最大值的方向,这样还能用传感器大致确定磁场的方向。

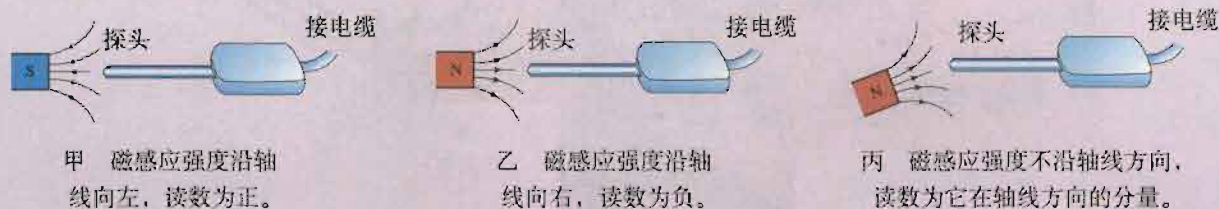


图 3.3-13 使用磁传感器之前要弄清它测出的是磁感应强度在哪个方向的分量

有的磁传感器在使用前要调零,以除去环境磁场(主要是地磁场)的影响。关于这点,不同厂家、不同型号的要求不同,要按说明书的要求操作。

利用磁传感器可以做很多与磁场相关的实验。例如,把探头深入螺线管内部,测量螺线管内不同位置的磁感应强度,计算机可以很快作出磁感应强度 B 与探头位置 x 的关系曲线(图 3.3-14)。如果把磁传感器与电流传感器结合,还能画出磁感应强度与电流关系的曲线。

想一想、试一试,还能做什么实验?

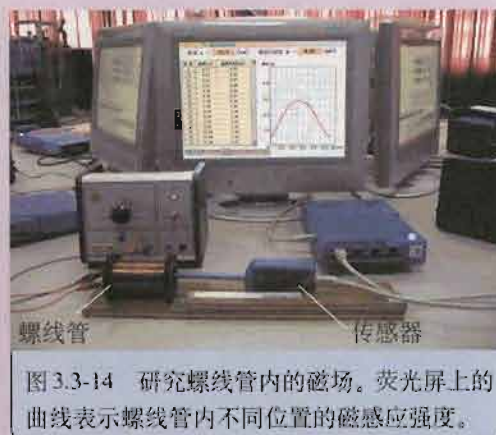


图 3.3-14 研究螺线管内的磁场。荧光屏上的曲线表示螺线管内不同位置的磁感应强度。

科学漫步

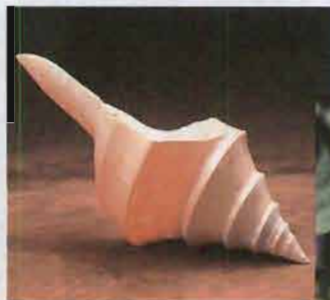
有趣的右螺旋

环形电流的安培定则（右手螺旋定则）反映了一个旋转方向和一个直线方向的关系，这种关系叫做“右旋”关系，在日常生活中随处可见。仔细观察一下，螺栓旋进螺母是不是符合这个“定则”？一个有螺纹的瓶盖，要把它打开，应该朝哪个方向旋转？

自然界里多数海螺、田螺的壳是右旋的，许多缠绕植物的茎也是右旋的，但左旋的也不少。

自行车上有很多螺栓和螺母，大多数是右旋的，但也有左旋的。向有经验的人请教，找出自行车上左旋的螺母。这一两个螺母为什么要与别的不一样？

自然界中看到的右旋与左旋，可能与物质微观结构的右旋与左旋有关，它在深层次反映了自然规律的某些性质。目前人类对它的认识还很肤浅。



甲 右旋的螺壳



乙 右旋的茎（牵牛花）



丙 左旋的茎（啤酒花）



丁 右旋的螺丝钉

图 3.3-15 有趣的右螺旋

问题与练习

1. 通电直导线附近的小磁针如图 3.3-16 所示，标出导线中的电流方向。
2. 如图 3.3-17，当导线环中沿逆时针方向通过电流时，说出小磁针最后静止时 N 极的指向。
3. 通电螺线管内部与管口外相比，哪里的磁感应强度比较大？你是根据什么判断的？
4. 如图 3.3-18，在 x 轴和 y 轴构成的平面直角坐标系中，过原点再做一个 z 轴，就构成了空间直角坐标系。匀强磁场的磁感应强度 $B = 0.2 \text{ T}$ ，方向沿 x 轴的正方向，且 $ab = dc = 0.4 \text{ m}$ ， $bc = ef = ad = 0.3 \text{ m}$ ， $be = cf = 0.3 \text{ m}$ 。通过面积 $S_1(abcd)$ 、

$S_2(befc)$ 、 $S_3(aefd)$ 的磁通量 Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 各是多少?

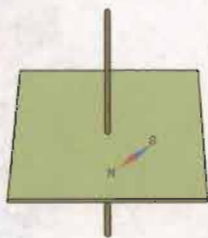


图 3.3-16 标出导线中的电流方向

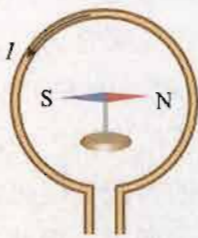


图 3.3-17 判定小磁针的方向

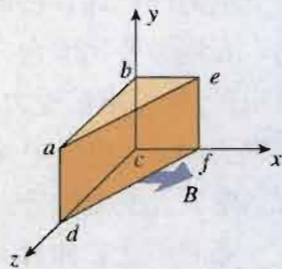


图 3.3-18 求磁通量

4

通电导线在磁场中受到的力

在第二节中我们已经初步了解了磁场对通电导线的作用力。安培在研究磁场与电流的相互作用方面做出了杰出的贡献，为了纪念他，人们把通电导线在磁场中受的力称为安培力 (Ampère force)。本节将对安培力做进一步的讨论。

安培力的方向 我们首先研究安培力的方向与哪些因素有关。

演示

按照图 3.1-3 所示进行实验。

1. 上下交换磁极的位置以改变磁场的方向，观察受力方向是否改变。
2. 改变导线中电流的方向，观察受力方向是否改变。

通过这两种情况的分析，我们实际上已经了解了导线受力的方向与磁场方向、电流方向的关系。你能用简洁的方法表达这个关系吗？

通电导线在磁场中所受安培力的方向，与导线、磁感应强度的方向都垂直，它的指向可用以下方法判定：伸开左手，使拇指与其余四个手指垂直，并且都与手掌在同一个平面内；让磁感线从掌心进入，并使四指指向电流的方向，这时拇指所指的方向就是通电导线在磁场中所受安培力的方向。这就是判定通电导线在磁场中受力方向的左手定则 (left-hand rule)。

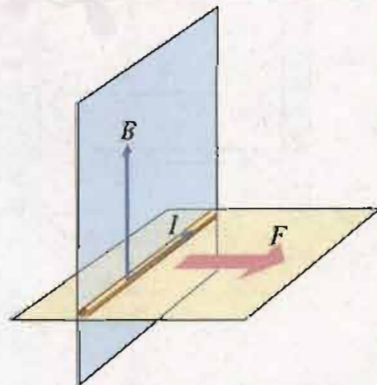


图 3.4-1 安培力的方向与导线方向、磁感应强度的方向都垂直。

磁场、安培力的问题，在很多方面都与电场、库仑力的问题相似。然而，安培力要比库仑力复杂。研究库仑力时，用来检验电场的是点电荷，检验电荷受力的方向与电场的方向相同或相反；但在研究安培力时，与电场中的检验电荷作用相当的是一个有方向的电流元，电流元受力的方向与磁场的方向、电流元的方向三者不但不是一条直线上，而且不在一个平面里。因此，研究安培力的问题要涉及三维空间。

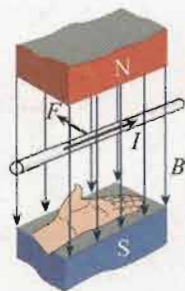


图 3.4-2 安培力的指向用左手定则判定

演示

平行通电直导线之间的相互作用

如图3.4-3所示，两条平行的通电直导线会通过磁场发生相互作用。在什么情况下两条导线相互吸引，什么情况下相互排斥？请你运用学过的知识进行讨论并做出预测，然后用实验检验你的预测。



图3.4-3 研究通电平行导线间的相互作用

安培力的大小 在第2节的学习中我们已经知道：垂直于磁场 B 放置、长为 L 的一段导线（图 3.4-4 甲），当通过的电流为 I 时，它所受的安培力 F 为

$$F = ILB$$

(1)

当磁感应强度 B 的方向与导线的方向平行时，导线受力为 0。

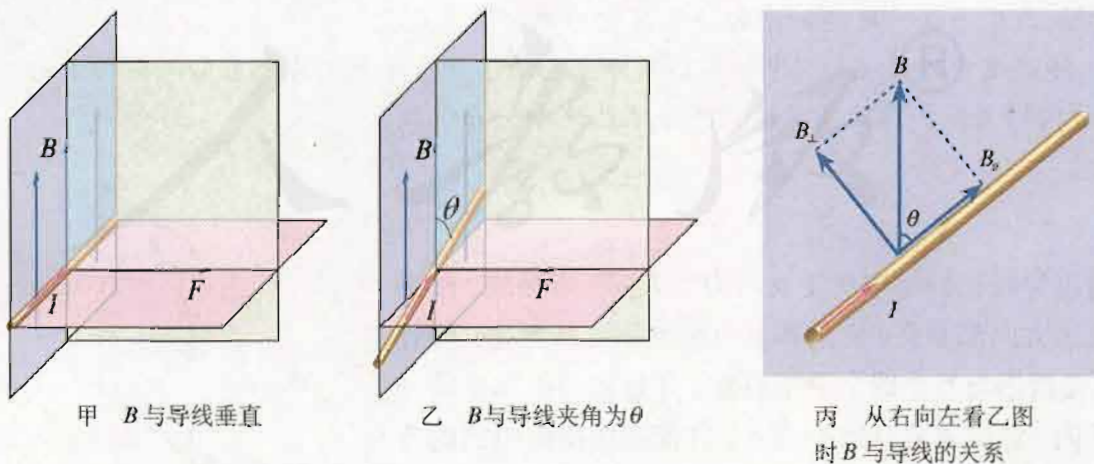


图 3.4-4 导线与磁场的夹角不同时受力的情况有所不同

当磁感应强度 B 的方向与导线方向成 θ 角时（图 3.4-4 乙），它可以分解为与导线垂直的分量 $B_{\perp}$ 和与导线平行的分量 $B_{\parallel}$ （图 3.4-4 丙）。

$$B_{\perp} = B \sin \theta$$

$$B_{\parallel} = B \cos \theta$$

其中 $B_{\parallel}$ 不产生安培力，导线所受的安培力只是 $B_{\perp}$ 产生的，由此又得到

$$F = ILB \sin \theta \quad (2)$$

这是一般情况下安培力的表达式。

磁电式电流表 中学实验室使用的电流表是磁电式电流表(图3.4-5)，它所依据的物理原理是安培力与电流的关系。

磁电式仪表最基本的组成部分是磁铁和放在磁铁两极之间的线圈。图3.4-6是线圈在磁场中受力情况的图示。当电流通过线圈时，导线受到安培力的作用。由左手定则可以判定，线圈左右两边所受的安培力的方向相反，于是安装在轴上的线圈就要转动。

线圈转动时，图3.4-5中的螺旋弹簧变形，反抗线圈的转动。电流越大，安培力就越大，螺旋弹簧的形变也就越大。所以，从线圈偏转的角度就能判断通过电流的大小。

从图3.4-1和图3.4-2可以看出，安培力总与磁感应强度的方向垂直。为了使电流表表盘的刻度均匀，两磁极间装有极靴，极靴中间又有一个铁质圆柱。这样，极靴与圆柱间的磁场都沿半径方向，线圈无论转到什么位置，它的平面都跟磁感线平行(图3.4-7)，表盘的刻度就是均匀的了^①。

线圈中的电流方向改变时，安培力的方向随着改变，指针的偏转方向也随着改变。所以，根据指针的偏转方向，可以知道被测电流的方向。

磁电式仪表的优点是灵敏度高，可以测出很弱的电流；缺点是线圈的导线很细，允许通过的电流很弱(几十微安到几毫安)。如果希望用它测量较大的电流值，就要根据第二章的方法扩大其量程。



图3.4-5 磁电式电表结构的示意图

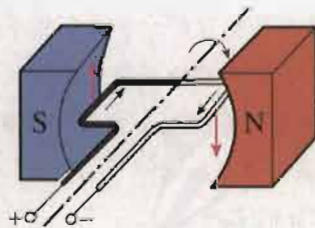


图3.4-6 通电线圈在安培力的作用下发生转动

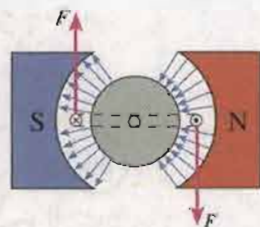


图3.4-7 极靴和铁质圆柱使磁场沿半径方向

做一做

旋转的液体

在玻璃皿的中心放一个圆柱形电极，沿边缘内壁放一个圆环形电极，把它们分别与电池的两极相连，然后在玻璃皿中放入导电液体，例如盐水。如果把玻璃皿放在磁场中(图3.4-8)，液体就会旋转起来。观察发生的现象，用学过的知识解释。液体旋转的方向与你事先的判断是否一致？

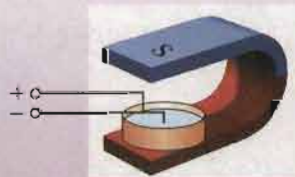


图3.4-8 液体向哪个方向旋转？

^① 完整的解释要用到力矩的知识，这里就不深入讨论了。

问题与练习

1. 图3.4-9的磁场中有一条通电导线,其方向与磁场方向垂直。图甲、乙、丙分别标明了电流、磁感应强度和安培力三个量中两个量的方向,试画出第三个量的方向。(本书用“ $\cdot$ ”表示磁感线垂直于纸面向外,“ $\times$ ”表示磁感线垂直于纸面向里,“ $\odot$ ”表示电流垂直于纸面向外,“ $\otimes$ ”表示电流垂直于纸面向里。)

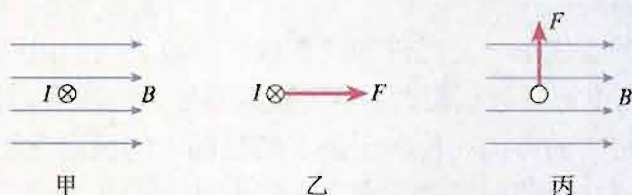


图3.4-9 画出未标出的电流或磁感应强度、安培力的方向

2. 把一根通电的硬直导线 ab 放在磁场中,导线所在区域的磁感线呈弧形,如图3.4-10所示。导线可以在空中自由移动和转动,导线中的电流方向由 a 向 b 。

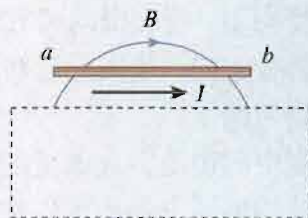


图3.4-10

- (1) 描述导线的运动情况。
(2) 虚线框内有产生以上弧形磁感线的磁场源,它可能是条形磁体、蹄形磁体、通电螺线管、直线电流。请你分别按每种可能考虑,大致画出它们的安放位置。

3. 图3.4-11所示为电流天平,可以用来测量匀强磁场的磁感应强度。它的右臂挂着矩形线圈,匝数为 n ,线圈的水平边长为 l ,处于匀强磁场内,磁感应强度 B 的方向与线圈平面垂直。当线圈中通过电流 I 时,调节砝码使两臂达到平衡。然后使电流反向,大小不变。这时需要在左盘中增加质量为 m 的砝码,才能使两臂再达到新的平衡。

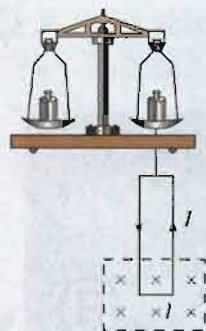


图3.4-11 电流天平

- (1) 导出用 n 、 m 、 l 、 I 计算 B 的表达式。
(2) 当 $n=9$ 、 $l=10.0\text{ cm}$ 、 $I=0.10\text{ A}$ 、 $m=8.78\text{ g}$ 时,磁感应强度是多少?

4. 如图3.4-12所示,把一根柔软的弹簧悬挂起来,使它的下端刚好跟槽中的水银接触。通电后,你预计会发生什么现象?怎样解释这个现象?

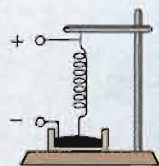


图3.4-12 通电后会出现什么现象?

电视显像管中的电子只是细细的一束,为什么能使整个屏幕发光?从宇宙深处射来的带电粒子为什么只在地球的两极引起极光?……解开这些问题的钥匙,就是磁场对运动电荷作用的规律。

演示

观察阴极射线在磁场中的偏转

图 3.5-1 的玻璃管已经抽成真空。当左右两个电极按图示的极性连接到高压电源时,阴极会发射电子。电子在电场的加速下飞向阳极。挡板上有一个扁平的狭缝,电子飞过挡板后形成一个扁平的电子束。长条形的荧光板在阳极端稍稍倾向轴线,电子束掠射到荧光板上,显示出电子束的径迹。

没有磁场时电子束是一条直线。用一个蹄形磁铁在电子束的路径上加磁场,尝试不同方向的磁场对电子束径迹的不同影响,从而判断运动的电子在各种方向的磁场中的受力方向。

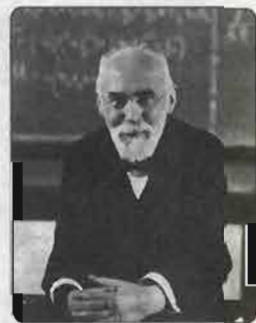
我们曾经用左手定则判定安培力的方向。能不能用类似的方法判定运动电子(电子束)的受力方向?如果运动电荷不是电子,而是带正电的粒子呢?



图3.5-1 用阴极射线管研究磁场对运动电荷的作用

洛伦兹力的方向和大小 运动电荷在磁场中受到的力称为洛伦兹力 (Lorentz force)。通电导线在磁场中受到的安培力,实际是洛伦兹力的宏观表现。由此我们推断,运动的带电粒子在磁场中所受洛伦兹力的方向,与运动方向和磁感应强度的方向都垂直,它的指向可以依照左手定则判定:伸开左手,使拇指与其余四个手指垂直,并且都与手掌在同一个平面内;让磁感线从掌心进入,并使四指指向正电荷运动的方向,这时拇指所指的方向就是运动的正电荷在磁场中所受洛伦兹力的方向。负电荷受力的方向与正电荷受力的方向相反。

实验事实证明以上推断是正确的。



洛伦兹 (Hendrik Antoon Lorentz, 1853—1928), 荷兰物理学家。他在物理学上最重要的贡献是他的电子论。1895年他提出了著名的洛伦兹力公式。

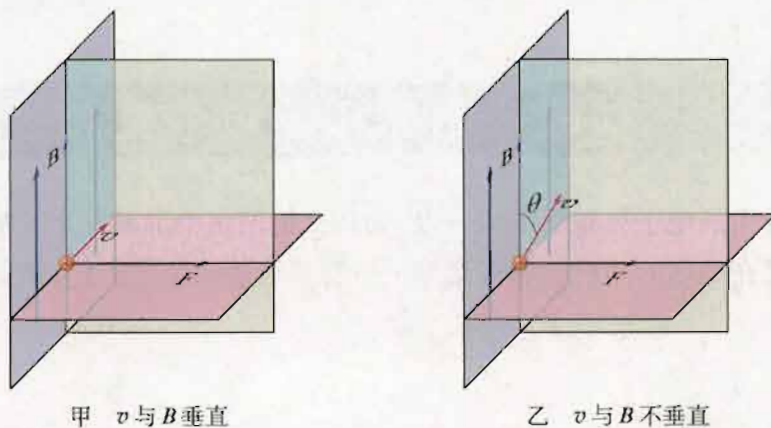


图3.5-2 洛伦兹力与粒子运动方向、磁感应强度方向的关系

思考与讨论

导线中带电粒子的定向运动形成了电流。电荷定向运动时所受洛伦兹力的矢量和，在宏观上表现为导线所受的安培力。按照这个思路，请你尝试由安培力的表达式导出洛伦兹力的表达式。

这里只讨论比较简单情况：导线的方向与磁场的方向垂直，安培力的大小可以表示为 $F = ILB$ 。这种情况下导线中电荷定向运动的方向也与磁场的方向垂直。

建议你沿以下逻辑线索思考。

1. 设导线中每个带电粒子定向运动的速度都是 v ，单位体积的粒子数为 n 。算出图3.5-3的一段导线中的粒子数，这就是在时间 t 内通过横截面 a 的粒子数。如果粒子的电荷量记为 q ，由此可以算出 q 与电流 I 的关系。

2. 写出这段长为 vt 的导线所受的安培力 $F_{\text{安}}$ 。

3. 求出每个粒子所受的力，它等于洛伦兹力 $F_{\text{洛}}$ 。这时，许多中间量，如 n 、 v 、 S 、 t 等都应不再出现。

推导时仍然可以认为做定向运动的电荷是正电荷，所得结果具有普遍性。

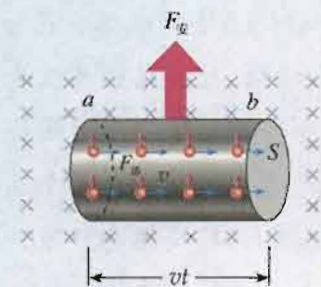


图3.5-3 运动电荷所受洛伦兹力的矢量和在宏观上表现为安培力

电荷量为 q 的粒子以速度 v 运动时，如果速度方向与磁感应强度方向垂直，那么粒子受到的洛伦兹力为

$$F = qvB \quad (1)$$

式中力、磁感应强度、电荷量、速度的单位分别为牛顿 (N)、特斯拉 (T)、库仑 (C)、米每秒 (m/s)。

也可以从运动电荷所受的洛伦兹力出发来定义磁感应强度，即 $B = \frac{F}{qv}$ 。

把 $B = \frac{F}{qv}$ 与 $E = \frac{F}{q}$ 相比较，我们可以更深入地认识磁现象：它只与运动电荷有关，表现为

定义式中反映运动的物理量 v 。

静止电荷产生电场；运动电荷除了仍会产生电场，还会产生磁场。静止电荷受到库仑力的作用，运动电荷不仅受到库仑力的作用，还受到洛伦兹力的作用。

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

$$F = qvB\sin\theta \quad (2)$$

思考与讨论

根据洛伦兹力的方向与带电粒子运动方向的关系,请你推测:洛伦兹力对带电粒子运动的速度有什么影响?洛伦兹力对带电粒子做的功是多少?

电视显像管的工作原理 电视显像管应用了电子束磁偏转的道理。

显像管中有一个阴极,工作时它能发射电子,荧光屏被电子束撞击就能发光。可是,很细的一束电子打在荧光屏上只能使一个点发光,而实际上要使整个荧光屏发光,这就要靠磁场来使电子束偏转了。

思考与讨论

从图3.5-4(俯视图)可以看出,没有磁场时电子束打在荧光屏正中的 O 点。为使电子束偏转,由安装在管颈的偏转线圈产生偏转磁场。

1. 如果要使电子束在水平方向偏离中心,打在荧光屏上的 A 点,偏转磁场应该沿什么方向?
2. 如果要使电子束打在 B 点,磁场应该沿什么方向?
3. 如果要使电子束打在荧光屏上的位置由 B 逐渐向 A 点移动,偏转磁场应该怎样变化?

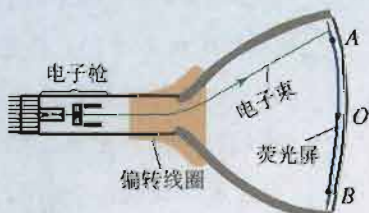


图3.5-4 显像管原理示意图(俯视图)

实际上,在偏转区的水平方向和竖直方向都有偏转磁场,其方向、强弱都在不断变化,因此电子束打在荧光屏上的光点就像图3.5-5那样不断移动,这在电视技术中叫做扫描(scanning)。电子束从最上一行到最下一行扫描一遍叫做一场,电视机中每秒要进行50场扫描,所以我们感到整个荧光屏都在发光。

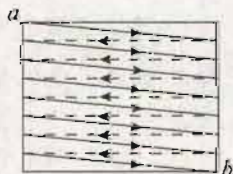


图3.5-5 电子束在荧光屏上扫描一行之后,迅速返回(虚线),再做下一次行扫描,直到荧光屏的下端。

使电子束偏转的磁场是由两对线圈产生的,这样的线圈叫做偏转线圈。为了与显像管的管颈贴在一起,偏转线圈做成马鞍形(图3.5-6)。



图3.5-6 显像管颈部的偏转线圈

问题与练习

1. 试判断图3.5-7所示的带电粒子刚进入磁场时所受的洛伦兹力的方向。

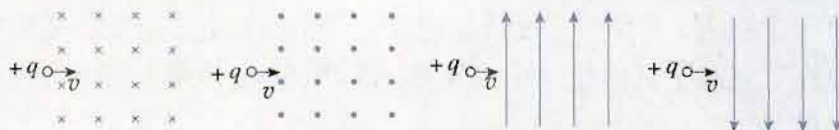


图3.5-7 判断洛伦兹力的方向

2. 电子的速率 $v = 3.0 \times 10^6 \text{ m/s}$, 沿着与磁场垂直的方向射入 $B = 0.10 \text{ T}$ 的匀强磁场中, 它受到的洛伦兹力是多大?
3. 在图3.5-8所示的平行板器件中, 电场强度 E 和磁感应强度 B 相互垂直。具有不同水平速度的带电粒子射入后发生偏转的情况不同。这种装置能把具有某一特定速度的粒子选择出来, 所以叫做速度选择器。试证明带电粒子具有速度 $v = \frac{E}{B}$ 时, 才能沿着图示虚线路径通过这个速度选择器。



图3.5-8 速度选择器

4. 磁流体发电是一项新兴技术, 图3.5-9是它的示意图。平行金属板 A 、 B 之间有一个很强的磁场, 将一束等离子体(即高温下电离的气体, 含有大量正、负带电粒子)喷入磁场, A 、 B 两板间便产生电压。如果把 A 、 B 和用电器连接, A 、 B 就是一个直流电源的两个电极。

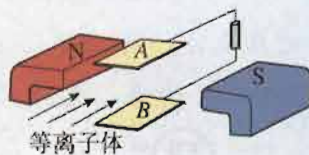


图3.5-9 磁流体发电

- (1) 图中 A 、 B 板哪一个是电源的正极?
- (2) 若 A 、 B 两板相距为 d , 板间的磁场按匀强磁场处理, 磁感应强度为 B , 等离子体以速度 v 沿垂直于 B 的方向射入磁场, 这个发电机的电动势是多大? 提示: 复习第二章第2节电动势的定义。
5. 如果电视机荧光屏上没有图像, 只有一条水平亮线, 故障可能出现在哪里?

图3.6-1是洛伦兹力演示仪。电子束由电子枪产生，玻璃泡内充有稀薄的气体，在电子束通过时能够显示电子的径迹。励磁线圈的原理与图3.3-8相同，它能够在两个线圈之间产生匀强磁场，磁场的方向与两个线圈中心的连线平行。电子速度的大小和磁感应强度可以分别通过电子枪的加速电压和励磁线圈的电流来调节。



图3.6-1 洛伦兹力演示仪

演示

用洛伦兹力演示仪观察运动电子在磁场中的偏转。在做以下每项观察之前，首先进行讨论，根据洛伦兹力的知识预测电子束的径迹，然后观察，检验你的预测。

1. 不加磁场时观察电子束的径迹。
2. 给励磁线圈通电，在玻璃泡中产生沿两线圈中心连线方向、由纸内指向读者的磁场，观察电子束的径迹。
3. 保持出射电子的速度不变，改变磁感应强度，观察电子束径迹的变化。
4. 保持磁感应强度不变，改变出射电子的速度，观察电子束径迹的变化。

带电粒子在匀强磁场中的运动 带电粒子在磁场中运动时，它所受的洛伦兹力总与速度方向垂直，洛伦兹力在速度方向没有分量，所以洛伦兹力不改变带电粒子速度的大小，或者说，洛伦兹力不对带电粒子做功，不改变粒子的能量。

由于粒子速度的大小不变，所以粒子在匀强磁场中所受洛伦兹力的大小也不改变，加之洛伦兹力总与速度方向垂直，正好起到了向心力的作用。所以，沿着与磁场垂直的方向射入磁场的带电粒子，在匀强磁场中做匀速圆周运动。

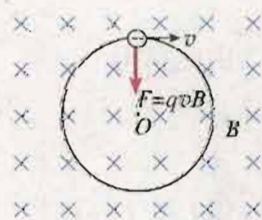


图3.6-2 带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动

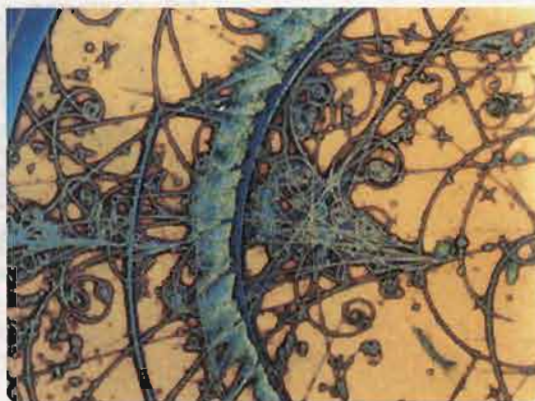
思考与讨论

带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的圆半径，与粒子的速度、磁场的磁感应强度有什么关系？

考虑到粒子所受的洛伦兹力就是它做匀速圆周运动的向心力，列出方程来不难得到几个物理量之间的关系式。然后就可以分别判断粒子的速度、磁场的强弱对圆半径的影响。

在粒子物理学的研究中，可以让粒子通过“云室”“气泡室”等装置，显示它们的径迹。如果在云室、气泡室中施加匀强磁场，可以看到带电粒子运动的圆形径迹。粒子的质量、速度、带电多少不一样，径迹的半径也不一样。

图 3.6-3 带电粒子在气泡室运动径迹的照片。有的粒子运动过程中能量降低，速度减小，径迹就呈螺旋形。



例题 一个质量为 m 、电荷量为 q 的粒子，从容器 A 下方的小孔 S_1 飘入电势差为 U 的加速电场，其初速度几乎为 0，然后经过 S_2 沿着与磁场垂直的方向进入磁感应强度为 B 的匀强磁场中，最后打到照相底片 D 上（图 3.6-4）。

- (1) 求粒子进入磁场时的速率。
- (2) 求粒子在磁场中运动的轨道半径。

解

(1) 粒子进入磁场时的速度 v 等于它在电场中被加速而得到的速度。由动能定理，粒子得到的动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 等于它在 S_1 、 S_2 之间的加速电场中运动时电场对它做的功 qU ，即

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

由此解得

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

(2) 粒子在磁场中只受洛伦兹力的作用，这个力与运动方向垂直，不能改变粒子运动的速率，所以粒子的速率总是 v ，做匀速圆周运动。设圆半径为 r ，粒子做匀速圆周运动的向心力可以写为 $\frac{mv^2}{r}$ ，而洛伦兹力为 qvB ，二者相等，即

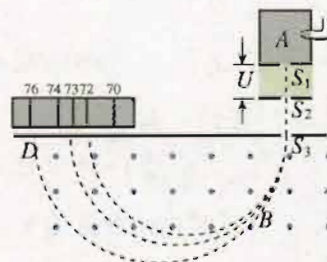


图 3.6-4 质谱仪

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

由此解出

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

把第(1)问中求得的 v 代入, 得出粒子在磁场中做匀速圆周运动的轨道半径

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$$

从这个结果可以看出, 如果容器A中粒子的电荷量相同而质量不同, 它们进入磁场后将沿着不同的半径做圆周运动, 因而打到照相底片的不同地方, 如图3.6-4中的D。这样的仪器叫做质谱仪。从粒子打在底片上的位置可以测出圆周的半径 r , 进而可以算出粒子的比荷 $\frac{q}{m}$ 或算出它的质量。

质谱仪最初是由阿斯顿设计的, 他用质谱仪发现了氦20和氦22, 证实了同位素的存在。质谱仪是一种精密仪器, 是测量带电粒子的质量和分析同位素的重要工具。

回旋加速器 要认识原子核内部的情况, 必须把核“打开”进行“观察”。然而, 原子核被强大的核力约束, 只有用极高能量的粒子作为“炮弹”去轰击, 才能把它“打开”。产生这些高能“炮弹”的“工厂”就是各种各样的粒子加速器。

由于库仑力可以对带电粒子做功, 从而增加粒子的能量, 因此, 人们首先想到加速器中一定要用到电场。加速电压越高, 粒子获得的能量就越高。然而产生过高的电压在技术上是很困难的。于是人们进一步设想, 能不能采用多次(多级)加速的方法呢?

在图3.6-5所示的多级加速器中, 由于粒子在加速过程中的径迹为直线, 其加速装置要很长很长。人们进一步思考, 如果带电粒子在一次加速后又转回来被第二次加速, 如此往复“转圈圈”式地被加速, 加速器装置所占的空间不是会大大缩小吗? 而磁场正好能使带电粒子“转圈圈”! 于是, 人们依据这个思路设计出了用磁场控制轨道、用电场进行加速的回旋加速器(cyclotron)。

回旋加速器的工作原理如图3.6-6所示。 D_1 和 D_2 是两个中空的半圆金属盒, 它们之间有一定的电势差 U 。A处的粒子源产生的带电粒子, 在两盒之间被电场加速。两个半圆盒处于与盒面垂直的匀强磁场 B 中, 所以粒子在磁场中做匀速圆周运动。经过半个圆周之后, 当它再次到达两盒间的缝隙时, 控制两盒间的电势差, 使其恰好改变正负, 于是粒子经过盒缝时



图 3.6-5 多级加速器。各加速区的两板之间用独立电源供电, 所以粒子从 P_2 飞向 P_3 、从 P_4 飞向 P_5 ……时不会减速。

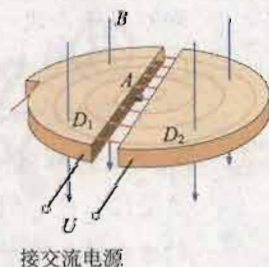


图 3.6-6 回旋加速器的原理

再一次被加速。如此,粒子在做圆周运动的过程中一次一次地经过盒缝,而两盒间的电势差一次一次地反向,粒子的速度就能够增加到很大。

思考与讨论

假如粒子每两次经过盒缝的时间间隔^①相同,控制两盒间电势差的正负变换是容易的。但是粒子的运动越来越快,也许粒子走过半圆的时间间隔越来越短,这样两盒间电势差的正负变换就要越来越快,从而造成技术上的一个难题。实际情况是这样吗?

图 3.6-6 中,粒子每经过一次加速,它的轨道半径就大一些,这样画对吗?

利用带电粒子在匀强磁场中运动的知识,分别计算粒子运动的周期(绕圆运动一周的时间)与速度的关系和半径与速度的关系,就能回答这两个问题。

回旋加速器加速的带电粒子,能量达到 $25 \sim 30 \text{ MeV}$ 后,就很难再加速了。原因是,按照狭义相对论,粒子的质量随着速度的增加而增大,而质量的变化会导致其回转周期的变化,从而破坏了与电场变化周期的同步。关于质量与速度的关系,我们将在选修3-4中学到。

问题与练习

1. 电子以 $1.6 \times 10^6 \text{ m/s}$ 的速度沿着与磁场垂直的方向射入 $B = 2.0 \times 10^{-4} \text{ T}$ 的匀强磁场中。求电子做匀速圆周运动的轨道半径和周期。
2. 已知氦核的质量约为质子的3倍,带正电荷,电荷量为一个元电荷; α 粒子即氦原子核,质量约为质子的4倍,带正电荷,电荷量为元电荷的2倍。现在质子、氦核和 α 粒子在同一匀强磁场中做匀速圆周运动。求以下情况下它们运动半径之比:
(1) 它们的速度大小相等;
(2) 它们由静止经过相同的加速电场加速后进入磁场。
3. A 、 B 是两种同位素的原子核,它们具有相同的电荷、不同的质量。为测定它们的质量比,使它们从质谱仪的同一加速电场由静止开始加速,然后沿着与磁场垂直的方向进入同一匀强磁场,打到照相底片上。如果从底片上获知 A 、 B 在磁场中运动轨迹的直径之比是 $1.08 : 1$,求 A 、 B 的质量之比。
4. 回旋加速器D形盒的半径为 r ,匀强磁场的磁感应强度为 B 。一个质量为 m 、电荷量为 q 的粒子在加速器的中央从速度为0开始加速。根据回旋加速器的这些数据,估算该粒子离开回旋加速器时获得的动能。

^① 指粒子经过半圆轨道所用的时间。盒缝宽度远小于盒半径(图 3.6-6 夸大了缝的宽度),粒子通过盒缝的时间可以忽略。

课题研究

霍尔效应

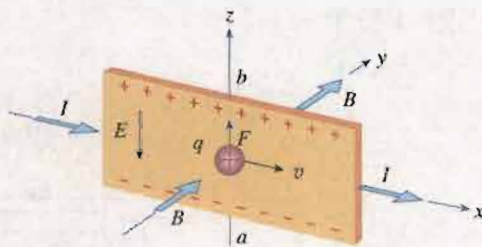
1879年美国物理学家E. H. 霍尔观察到, 在匀强磁场中放置一个矩形截面的载流导体, 当磁场方向与电流方向垂直时, 导体在与磁场、电流方向都垂直的方向上出现了电势差。后来大家把这个现象称为**霍尔效应 (Hall effect)**, 所产生的电势差称为霍尔电势差或霍尔电压。图课-1表示的是正电荷导电的情况, 如果是电子导电, 则霍尔电压方向相反。

霍尔电压与电流、磁感应强度、长方体形导体的厚度都有关系。

利用霍尔效应制成的元件称为霍尔元件。霍尔元件是一种重要的磁传感器。由于霍尔元件体积很小, 它可以用来制作探测磁场的探头, 还可以应用在与磁场有关的多种自动控制系统中。

根据你能看到的参考书、网上资料, 以及所能找到的霍尔元件, 进行以下研究。可以全面完成以下几个课题, 也可以只完成其中的一两个部分, 还可以自己设定其他研究课题。

- 推导霍尔电压与磁感应强度及其他物理量的关系
- 研究描述霍尔元件的主要参数
- 分析一个应用霍尔元件的实例
- 利用霍尔元件制作一个自动控制装置或测量某个物理量



图课-1 霍尔效应的原理

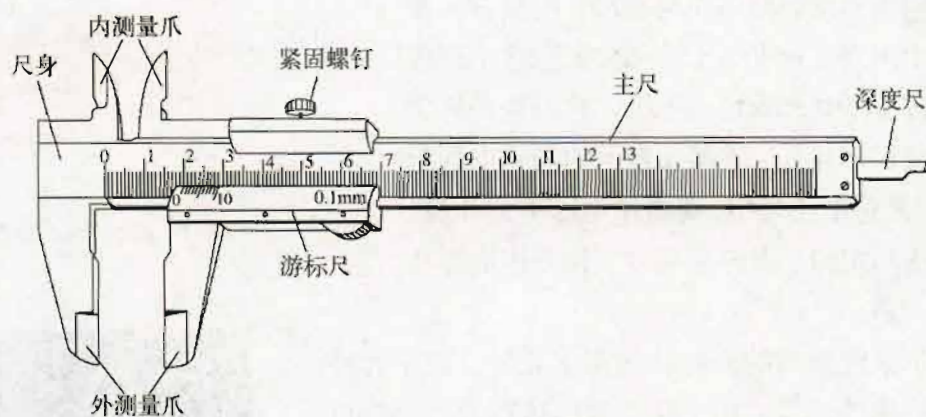


图课-2 霍尔元件

附录 游标卡尺和螺旋测微器

一、游标卡尺

一般刻度尺的最小分度是毫米，要使测量更精确一些，可以使用游标卡尺，它的结构如图附-1所示。



图附-1 游标卡尺

游标卡尺的主要部分是主尺和一条可以沿着主尺滑动的游标尺。当外测量爪内侧的两个刃接触时，游标尺上的0刻线与主尺上的0刻线正好相对；如果把被测物体夹在这两个刃之间，游标尺0刻线在主尺上所指的读数，就是测得的数据。但是，图示这个游标卡尺主尺的最小分度只有1 mm，这样读数的精确度与使用一般的刻度尺没有区别。为了提高读数的精确度，就要用到游标尺了。

图附-1的游标尺上刻着10个小格，粗看起来每个小格好像也是1 mm，但我们把它的0刻线与主尺上的0刻线对正就会看到，这10个小格的总长度只有9 mm，也就是说，游标尺上每个小格只有0.9 mm（图附-2）。



图附-2 游标尺上的小格与主尺上的小格并不等长

假设我们测量某一长度时游标尺与主尺的相对位置如图附-3所示。根据游标尺上0刻线与主尺刻线相对的位置,我们知道,测量值比23 mm大,比24 mm小。我们还看到,游标尺上第7条刻线(不计0刻线)与主尺标有30 mm的刻线对正了。于是可以列出方程

$$\text{被测长度} + 7 \times 0.9 \text{ mm} = 30 \text{ mm}$$

由此得知

$$\text{被测长度} = 30 \text{ mm} - 7 \times 0.9 \text{ mm} = 23.7 \text{ mm}$$

当然,实际测量时不必每次都去列方程和解方程。你可以根据以上分析自己总结使用游标卡尺的操作程序。



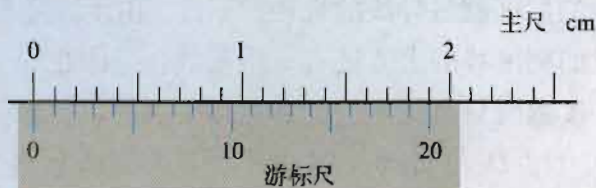
图附-3 这时的测量值是多少?

使用一般的刻度尺也能读到毫米以下的一位,但那是估读。使用这种游标卡尺得到的读数是准确值。

思考与讨论

1. 使用图附-1所示的游标卡尺,以毫米为单位记录数据,最小可以读到哪一位?

2. 现在常用游标卡尺的游标上有20个小格,总长度为19 mm,如图附-4;还有一种游标卡尺,它的游标上有50个小格,总长度为49 mm。用



图附-4 另一种游标卡尺

这两种游标卡尺测量时,怎样读出测量值?它们分别可以准确到多少?

3. 在图附-1的游标卡尺上,“内测量爪”“深度尺”“紧固螺钉”各有什么用处?怎样使用?

实验

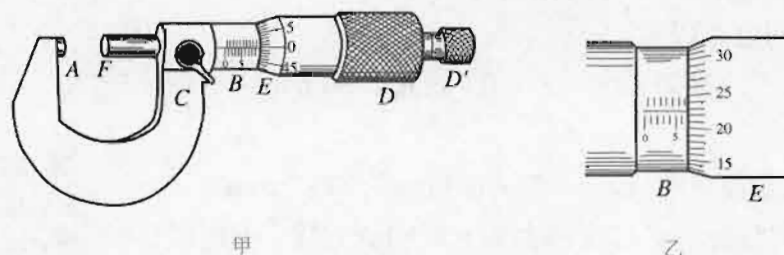
用游标卡尺对金属管的内径、外径及小量筒的深度等量进行测量。对每个量都进行几次测量,然后取平均值。

二、螺旋测微器

在本书图2.6-1中,使用游标卡尺代替刻度尺能够提高测量的精确度。但是如果要直接测量一条导线的直径,即便使用游标卡尺,误差仍然偏大。原因是,实验室中导线的直径一

一般在1 mm左右,图附-1的游标卡尺最小可以分辨0.1 mm的长度,测量的相对误差为 $\frac{0.1 \text{ mm}}{1 \text{ mm}} = 10\%$ 。为了提高测量精度,可以使用螺旋测微器(俗称千分尺)。

如图附-5,螺旋测微器的测砧A和固定刻度B固定在尺架C上;可动刻度E、旋钮D、微调旋钮D'是与测微螺杆F连在一起的,通过精密螺纹套在B上。



图附-5 螺旋测微器

转动旋钮使测微螺杆F与测砧A接触时,可动刻度E的左边缘应该与固定刻度B的0刻线重合。测量时,如果导线刚好夹在A与F之间,那么可动刻度E的左边缘在固定刻度B上指示的数据就是导线的直径。不过,由于固定刻度的最小分度只有1 mm(多数螺旋测微器在B的刻度线的上方还有一组刻线,间距也是1 mm,它们相当于0.5 mm的刻线),在B上直接读数时只有毫米位的读数是准确的,要想得到更精确的读数,就要靠可动刻度E了。

E、D、D'每转动一周就带动F前进或后退0.5 mm,也就是说,精密螺纹的螺距是0.5 mm。因此,通过它们转动的多少就能得知F前进或后退的多少,而这个数值就刻在可动刻度E上。

请你通过试测总结使用螺旋测微器的操作程序。使用时要特别注意以下两点。

- 微调旋钮D'与旋钮D之间是通过“棘轮”连接的。D'转动时D也随之转动,带动F前进,但当A、F与被测物体接触后,即使D'继续转动,D也不动,同时发出“喀喀”的声音。这样就能防止被测物发生明显的形变,也能防止螺旋测微器的损坏。

- 可动刻度E旋转两周时F才前进1 mm。因此,在E上读数前先要判断E的左边缘的位置,看它是在B尺0.5 mm刻线的左侧还是右侧,两种情况下的读数是不同的。

思考与讨论

可动刻度的最小分度是多少? 如果以毫米为单位表示测量结果,估读的那一位在小数点后第几位?

课外读物

下面介绍的图书,有的可以帮助大家更好地理解物理学的内容、方法和意义,有的可以扩展科学视野,有的则介绍了历史上有趣的科学故事。同学们可以根据自己的时间,以及能够见到的图书的多少,选择一两本阅读,也可以阅读其他类似的图书。每一本书都不必全读,也不要求完全读懂,能够有些领悟就很好了。

1. 《阿西莫夫最新科学指南》(上),〔美〕I. 阿西莫夫著,朱岚等译,江苏人民出版社2000年2月第1版

2. 《世界科学演义》,刘以林、丁晓禾编著,吉林文史出版社1997年1月第1版

本书以章回小说的风格生动地展示了数学和自然科学及技术发展的历史画卷,读来别有一番感受与心得。

3. 《普通人的物理世界》,〔美〕R. S. 琼斯著,明然、黄海元译,江苏人民出版社1998年2月第1版

本书为《剑桥文丛》中的一册,通俗生动地介绍了普通人应有的物理知识,特别是科学思考世界的方法和科学精神。

4. 《我们生活在磁的世界里——物质的磁性和应用》,章综主编,李国栋著,清华大学出版社、暨南大学出版社2000年12月第1版

这是《院士科普书系》中的一册,作者为我国著名的晶体学家、磁学家。本书介绍了磁现象的普遍存在和广泛应用。

5. 《外星人学物理③》〔匈〕Holics László 著,李琳培译,人民教育出版社2000年5月第1版

本书是匈牙利高中物理教科书。它把重点放在科学方法上,引导学生通过观察和实验积累经验、在经验事实的基础上建立物理模型,用物理模型解决实际问题、预言未知现象、用新的实验现象检验模型的适用范围、进一步修正模型。在这个框架内介绍物理知识。这套书重视科学素质的培养,无论在选材和写法上都与我国中学物理教材有很大差别。

6. 《万物之理》,阎康年编著,广东人民出版社2000年12月第1版

本书以通俗而准确的语言讲述了从19世纪开始的物理学的发展和成就。作者在前言中引用了卢瑟福的一句名言:“只有当你能把一个理论讲得连女仆都能听懂,你才算真懂了。”应该说,本书作者做到了这一点。

后 记

根据《基础教育课程改革纲要(试行)》的精神,我们按照《普通高中物理课程标准(实验)》的要求编写了共同必修及其他三个系列的全套教科书,本册经全国中小学教材审定委员会2004年初审通过,供普通高中试用。

这套教科书在编写中,得到了诸多教育界前辈和各学科专家学者的热情帮助和大力支持。在本套教科书同课程改革实验区的师生见面时,我们特别感谢担任教科书总顾问的丁石孙、许嘉璐、叶至善、顾明远、吕型伟、王梓坤、梁衡、金冲及、白春礼、陶西平同志,感谢担任教科书编写指导委员会主任委员的柳斌同志和编写指导委员会委员的江蓝生、李吉林、杨焕明、顾泠沅、袁行霈等同志。

这套书的编写者以教育部物理课标组的核心成员为基础,由高校教师、中学教师和出版社的编辑人员三结合组成。共同必修部分和三个选修系列的编写小组分别起草,然后全体编写人员反复讨论、相互修改,因此,本书是编写组集体创作的成果。

在本书的编写过程中,由刘彬生、汪维澄、龙涛组成的实验研究小组做过了全书所有的实验,检验和改进了书稿中的实验部分;由黄恕伯、李友安、叶柯、毛宗致、陈伟平组成的习题研究小组筛选和设计了全书的“问题与练习”。

张同恂、董振邦、窦国兴、扈剑华在编写的不同阶段审阅了书稿,提出了重要修改意见。

我们还要感谢使用本套教材的实验区的师生们。希望你们在使用本套教材的过程中,能够及时把意见和建议反馈给我们,对此,我们深表谢意。让我们携起手来,共同完成教材建设工作。

我们的联系方式如下:

电 话: 010-58758385

E-mail: jcfk@pep.com.cn

人民教育出版社 课程教材研究所
物理课程教材研究开发中心
2004年5月

谨向为本书提供照片的人士和机构致谢

第一章章首图, Physics for Scientist and Engineers, Pearson/琥珀图, collections of the Science Museum, London / 1.1-2, 朱京 / 1.2-4 上图, 谷雅慧 / 下图, 张大昌 / 1.8-5, 朱京 / 1.8-6, 朱京 / 1.8-7, 张大昌 / 第二章章首图, Corel Corporation / 各种电池, 张大昌 / 3.1-5, 《目击者丛书·科学博物馆·能量》, 生活·读书·新知三联书店 1996 年第 1 版 / 3.1-6, 《图书中国古代科技》, 大象出版社 1999 年第 1 版 / 3.3-12, 李晔 / 3.3-14, 李晔 / 3.3-15 乙, 朱京 / 3.3-15 丙, 张大昌 / 3.6-1 甲, 朱京 / 图课-2, 朱京