

大学基础物理自学丛书

# 电学

上册

凌德洪 王海兴 凤孟琨



大学基础物理自学丛书

# 电 学

上 册

凌德洪 王海兴 凤孟琨 编

上海科学技术出版社

大学基础物理自学丛书

电 学

上 册

凌德洪 王海兴 凤孟琨 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 泰州人民印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 11.375 字数 250,000

1981年9月第1版 1981年9月第1次印刷

印数 1—51,000

书号: 13119·933 定价: (科四) 1.05元

## 序 言

为了适应千百万未能进入高等院校的青年自学的需要,上海科学技术出版社在出版中学《数理化自学丛书》的基础上,又组织部分高等院校教师编写《大学基础数学自学丛书》、《大学基础物理自学丛书》和《大学基础化学自学丛书》。这是一件很有意义的工作。支持和鼓励广大在职青年坚持业余学习,让他们能够自学成才,是全社会的责任,也是我们高等学校教育工作者的义务,而为在职青年提供合适的自学读物,则是办好业余高等教育事业的一个组成部分。

《大学基础物理自学丛书》是由南京师范学院、安徽师范大学、扬州师范学院和江苏师范学院物理系的有关教师执笔编写的,其中力学(上、下册)由南师负责编写,热学由扬师负责编写,光学由皖师负责编写,电学(上、下册)和原子物理学由江师负责编写。全书共七册,可供具有高中文化程度、立志于自学大学物理的广大读者使用。本书亦可作为全日制高等院校、各类职工大学以及电视大学学生学习普通物理学的参考读物。

“自学丛书”与普通的教材相比,应该具有便于自学,无师自通的特点。本书在编写过程中,尽可能注意到这一特点。在内容的安排上抓住物理学中主要的必不可少的部分讲细讲透,不追求形式上的深而全;文字的叙述力求做到口语化、通俗化;新概念的引入尽量让读者在已有中学物理知识的基础上,通过具体的物理现象和有关实验逐步深化;对于物理公式的推导,在数学的严密性上不作过高的要求。只要读者

在自学本书的同时能自学《大学基础数学自学丛书》，在数学工具上不会发生大的困难。本书每章之首有提要，每章之末有小结，例题和习题按章节编排，每章末附复习题。本书例题较多，这是考虑到读者在自学本书的同时，不必再去翻阅其他参考书的例题。习题多是为了能让读者有选择的余地，并不要求读者对每道题都详细解答。本书附有习题和复习题答案，供读者解题时参考。

本书学习顺序原则上按照力、热、电、光、原子物理的顺序进行，但每种书又各自成系统，读者可按需要独立地选读其中任何一种，也不会有大的困难。

业精于勤，只要读者下定决心，持之以恒地刻苦攻读，相信大家是一定可以自学好大学物理的。

本书编审过程中得到南京师范学院、安徽师范大学、扬州师范学院和江苏师范学院物理系领导的支持以及这些学校许多教师的协助，在此一并致谢。

由于本书编写者水平所限以及出版时间的仓促，书中缺点和错误在所难免，希望读者多加指正。

朱正元

1981年4月于江苏师范学院

# 目 录

## 序言

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 绪论 .....                   | 1   |
| 第一章 电荷与电场 .....            | 4   |
| § 1.1 电荷与物质 .....          | 4   |
| § 1.2 导体和绝缘体 .....         | 8   |
| § 1.3 库仑定律 .....           | 12  |
| § 1.4 电场 电场强度 .....        | 18  |
| § 1.5 电场强度的计算 .....        | 23  |
| § 1.6 电力线 电通量 .....        | 34  |
| § 1.7 高斯定理 .....           | 40  |
| § 1.8 静电位能 .....           | 50  |
| § 1.9 电位差 电位 .....         | 56  |
| § 1.10 电位的计算 .....         | 61  |
| § 1.11 等位面 .....           | 67  |
| § 1.12 场强与电位的关系 电位梯度 ..... | 70  |
| § 1.13 密立根油滴实验 .....       | 75  |
| § 1.14 电场对电荷的作用 .....      | 78  |
| 第一章小结 .....                | 83  |
| 复习题一 .....                 | 85  |
| 第二章 电场中的导体和电介质 .....       | 89  |
| § 2.1 电场中导体的性质 .....       | 89  |
| § 2.2 尖端电现象 静电屏蔽 .....     | 97  |
| § 2.3 静电计 静电起电机 .....      | 107 |
| § 2.4 电容和电容器 .....         | 113 |

|            |                   |            |
|------------|-------------------|------------|
| § 2.5      | 电容器电容的计算          | 119        |
| § 2.6      | 电容器的联接            | 125        |
| § 2.7      | 电容器中的能量贮存         | 132        |
| § 2.8      | 电介质对电容的影响 电介质的极化  | 134        |
| § 2.9      | 电介质的极化强度矢量        | 143        |
| § 2.10     | 电介质中的场强 介质的极化率    | 148        |
| § 2.11     | 有介质存在时的高斯定理 电位移矢量 | 153        |
| § 2.12     | 电场的能量 能量密度        | 160        |
| § 2.13     | 几种特殊介质的电性质        | 164        |
|            | 第二章小结             | 167        |
|            | 复习题二              | 169        |
| <b>第三章</b> | <b>电流和电路</b>      | <b>177</b> |
| § 3.1      | 电流 电流密度矢量         | 177        |
| § 3.2      | 连续性方程 稳恒电流的条件     | 183        |
| § 3.3      | 欧姆定律 电阻 电阻率       | 188        |
| § 3.4      | 电阻的联接 分压与分流       | 197        |
| § 3.5      | 电功和电功率 焦耳定律       | 207        |
| § 3.6      | 电动势 电路中的能量转换      | 212        |
| § 3.7      | 一段有源电路的欧姆定律       | 221        |
| § 3.8      | 基尔霍夫方程组           | 227        |
| § 3.9      | 复杂电路的计算           | 234        |
| § 3.10     | 直流电路中电容器的作用       | 241        |
| § 3.11     | 电阻和电位差的测量         | 247        |
|            | 第三章小结             | 255        |
|            | 复习题三              | 258        |
| <b>第四章</b> | <b>固体的导电</b>      | <b>261</b> |
| § 4.1      | 金属的经典电子论          | 261        |
| § 4.2      | 欧姆定律和焦耳定律的经典解释    | 268        |
| § 4.3      | 电子的逸出功和热电子发射      | 272        |
| § 4.4      | 接触电现象             | 277        |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| § 4.5 温差电现象 .....        | 285        |
| § 4.6 经典电子理论的局限性 .....   | 293        |
| § 4.7 固体导电的能带理论 .....    | 294        |
| § 4.8 半导体 .....          | 298        |
| 第四章小结 .....              | 303        |
| 复习题四 .....               | 304        |
| <b>第五章 流体的导电 .....</b>   | <b>305</b> |
| § 5.1 电解质的离子导电性 .....    | 305        |
| § 5.2 电解质的电导率 .....      | 308        |
| § 5.3 法拉第电解定律 .....      | 311        |
| § 5.4 化学能和电能的转换 .....    | 317        |
| § 5.5 气体的被激导电和自激导电 ..... | 328        |
| § 5.6 辉光放电 .....         | 335        |
| § 5.7 弧光放电 .....         | 339        |
| § 5.8 等离子体 .....         | 343        |
| 第五章小结 .....              | 345        |
| 复习题五 .....               | 347        |
| <b>附录 习题和复习题答案 .....</b> | <b>348</b> |

## 绪 论

电磁学是研究电磁现象基本规律的学科，是物理学的一个重要分支，并渗透到天文、化学、生物、地质等其他学科。电磁学又是一门应用十分广泛的学科，是许多应用科学的必不可少的基础。随着对物质运动认识的深入，人们惊奇地注意到，整个物质世界，大到天体，小到基本粒子，无一不与电磁现象有着紧密的联系。

电磁现象是比机械运动更高级、更复杂的运动形式。研究电磁学要以力学为基础，但研究的方法又与力学有区别。力学研究的对象是质点、质点系和刚体，着重讨论机械运动的变化与物体间相互作用的联系以及在这过程中的能量关系。电磁学研究的对象是带电粒子及其激发的电场和磁场，着重讨论场与场源之间的联系以及在这过程中的能量关系。传统的电磁学内容有电磁场理论和电路原理两大部分。基于电路原理目前已发展成一门独立的学科，本书将着重介绍电磁场的基本理论，作为场的基本理论的应用，我们也涉及一些有关电路的内容。

在学习电磁学时，希望读者能了解与掌握研究场的基本方法，注意培养从具体到抽象的思维能力，进一步学会用数学工具解物理问题，并能运用电磁学的基本原理解决一些实际问题。

在我们开始进入电磁学这个领域时，给读者简要地介绍一些电磁学的发展历史和最新的动态是有必要的。在这里，

我们着重介绍经典电磁理论部分的发展历史。

从历史上看,电磁学是发展比较晚的一门学科。虽然在纪元前和中世纪,人们已经积累了一些关于电现象和磁现象的观察资料,如“琥珀拾芥”和“慈石召铁”等一类的记载,但这些都只是停留在对自然现象的观察上。直到十七世纪以后,社会生产力有了较大的发展,同时数学、力学等其他自然科学的水平也有了很大的提高,这时,由于实际的需要人们才开始用实验的方法来研究电磁现象。这样,在摩擦电、大气电、地磁、电流等方面获得了某些有价值的成果。尽管如此,在这个阶段,电学与磁学这两门学科,彼此是完全独立、平行地发展的。

1820年,丹麦物理学家奥斯特(H. C. Oersted)发现了电流的磁效应,首次找到了电与磁之间的内在联系,从这时起,电磁学就作为一门统一的分支学科出现于物理学中。法国物理学家安培(A. M. Ampère)在一系列实验的基础上,证明了闭合电流与磁铁等效,建立了磁的分子电流理论,同时还得到了磁场对电流作用力的公式。对于经典电磁理论作出了重大贡献的是两名卓越的英国物理学家法拉第(M. Faraday)和麦克斯韦(J. C. Maxwell)。1831年,法拉第发现了电磁感应现象,从而确定了磁电转换的基本规律。法拉第的工作有着重大的科学和技术的意义。法拉第的理论奠定了电工学的基础,从此,电磁理论开始进入生产技术的领域。1873年,麦克斯韦在法拉第等人工作的基础上,发表了巨著《电学和磁学论》,他系统总结和发展了十九世纪中叶以前对电磁理论的研究成果,以完美的数学形式建立了电磁场的基本方程,即著名的麦克斯韦方程组,从而完善了经典电磁场理论的体系。

然而,经典电磁理论并不是发展到麦克斯韦时代就终止

了。1895年,荷兰物理学家洛伦兹(H. A. Lorentz)提出了经典的电子论,把电磁波经过物质时所呈现的各种宏观现象,归结为物质中电子受到准弹性力作用所引起,这个理论能够解释电磁场与物质的相互作用引起的一些效应。与洛伦兹进行经典电子论工作的同时,德国物理学家赫兹(H. Hertz)终于在实验室中获得了电磁波,从此开创了无线电电子学的新纪元。

电磁学发展的第三个阶段是探索微观与高速领域里的电磁理论。在微观领域,考虑到场的量子效应,经典电磁理论被量子电动力学所替代。而在研究高速运动物体的电磁现象时,爱因斯坦(A. Einstein)发现,经典电磁理论经过适当的调整,仍然可以适用,这就是相对论电动力学的内容。这两部分内容已经越出本书的范围。

近一、二十年以来,许多理论物理学家致力于电磁相互作用与弱相互作用统一理论的研究工作,并获得了成功,这是电磁理论发展的新动态。另一方面,电磁理论在实际应用中也获得了新的发展。特别值得指出的是,过去长期不被人们重视的生物电、生物磁的研究,在人类探索生命奥秘的征途中,正在发挥着愈来愈大的作用。

# 第一章

## 电 荷 与 电 场

本章介绍电学的几个基本物理量——电量、电场强度、电位以及它们间的相互关系。电荷是一切电磁现象的源，电荷的多少称为电量。电荷激发电场，电荷的运动离不开电场的作用。描述电场的物理量叫电场强度。电场强度和电量之间有着严密的定量关系。电位是研究能量转换关系的一个常用物理量。

### § 1.1 电 荷 与 物 质

1. 电荷 在历史上，人们把摩擦过的物体有了吸引轻小物体的性质，称为物体带了电，或者说有了电荷。带了电的物体叫带电体。有时候，也有把微小的带电体笼统地称作电荷的。使物体带电叫做起电。用摩擦的方法使物体带电叫做摩擦起电。

从摩擦起电的实验中我们知道，用丝绸摩擦过的玻璃棒和用毛皮摩擦过的硬橡胶棒都带有电荷。但是，由于两根摩擦过的玻璃棒或硬橡胶棒之间存在着斥力，而玻璃棒和硬橡胶棒之间存在着引力，这说明玻璃棒和硬橡胶棒之间所带电荷性质是不同的。1747年，美国物理学家富兰克林(B. Franklin)第一次提出正电和负电的名称。他把用丝绸摩擦过的玻璃棒上带的电荷叫做正电荷；用毛皮摩擦过的硬橡胶

棒上带的电荷叫做负电荷。这两个名称一直用到今天。

许多实验事实表明，电荷之间的相互作用服从这样一个规律：同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引。

使物体带电的方法很多。在一定条件下，两种不同物质之间摩擦后都能带电。除了机械摩擦以外，用其他方法也能使物体带电。例如，利用静电感应作用能使导体带电；用加热的方法能使气体带电；借助化学作用或电磁感应作用可以使正负电荷分离；加热电子管的阴极或者以光照射铯和铷等材料可以获得带负电荷的电子等等。但是，不论用什么方法使物体带电，所带电荷不是正的便是负的，第三种电荷是不存在的。所以我们说：自然界存在正、负两种电荷，而且只有两种电荷。

2. 电荷的量子化 在十八世纪，电荷曾经被设想成如空气和水一样的连续的流体，而“电流”就是这种连续的电流体的流动。近代物质结构理论证明，空气和水等流体本身并不是连续的，而是由分子和原子组成的。实验事实表明，“电流体”同样是不连续的，而是由一定的基本电荷的整数倍组成的。这种基本电荷以符号  $e$  (即电子电荷)表示，一切物体带的电荷，不管是用什么方法产生的，都是  $e$  的(正的或负的)整数倍。电荷的这种以“颗粒”形式存在的不连续性质，称为电荷的量子化。

量子化是近代物理学中的一个重要概念。例如，一切物质是由分子、原子以及基本粒子组成，因此质量不是连续的，而是量子化的。再如，物体受热辐射的能量(电磁波)也不是连续的，而是量子化的，称为光量子。即使近代物理假设构成基本粒子的层子(或夸克)带的是分数电荷，电荷仍然是量子化的。以后在原子物理中将学到，电子运动的能量和角动量(即动量

矩)也是量子化的。量子化是物质存在和运动的基本形态。

我们在研究宏观电磁现象时,一般不考虑电荷的量子化,而认为电荷是连续地分布在整個带电体上,就象我们在研究牛顿力学时,把质量也看作是连续分布的而不考虑质量的量子化那样。其原因就在于,电荷的量子  $e$  太小,而我们研究的对象往往涉及若干亿亿个电荷量子。在经典电磁理论中,我们讨论的是大量电荷量子的平均电磁效应,这是一种简便而又有效的方法。另一方面,这种方法也有不足之处。正因为忽略了电荷的量子效应,经典电磁理论在解释物质的微观电磁现象时,遇到了许多困难,这时,我们不得不重新考虑电荷的量子化性质。

3. 电荷与物质 构成所有实物的原子中,质子和中子结合成原子核,各种原子核的半径约从  $1 \times 10^{-15}$  米(氢核的半径)到  $7 \times 10^{-15}$  米(最重的原子核半径)。原子核为若干个电子所包围,它们各沿着不同的圆轨道(或椭圆轨道)运转,电子轨道的外直径,大约为  $1 \sim 3 \times 10^{-10}$  米,即比原子核的半径大  $10^4 \sim 10^5$  倍。通常原子的大小即取决于这些电子轨道的半径。

根据实验测定,一个电子的静止质量是  $9.11 \times 10^{-31}$  千克。氢原子核只含有一个质子,核外电子也只有一个,氢原子的全部质量几乎都集中在核上,核外电子质量仅占全部质量的  $1/1840$ 。

实验测定电子所带电量是  $1.6 \times 10^{-19}$  库仑,这就是基本电荷  $e$  的大小。质子所带电量与电子相同。电子带负电,一般用  $-e$  表示电子的电荷。而质子带的是正电,一般用  $+e$  表示质子所带的电荷。中子是一种电中性的粒子,它的质量几乎和质子质量相等。

电子和质子都带有电荷,因此它们之间,除万有引力作用

外,还存在着电力的作用。电力不同于万有引力。万有引力总是吸引力,而电力有斥力和引力两种形式。质子与质子之间或电子与电子之间是斥力,质子与电子之间是引力。电力和万有引力,是自然界中存在的两种长程力(从原则上讲,它们的作用半径是无限的)。万有引力因素主要考虑于质量巨大的宇宙天体之间。而一般的宏观物体以及分子、原子这些微观粒子之间的作用,实质上主要是电力\*。电力是产生固体的弹性力、摩擦力,液体的浮力、粘滞力,气体的压力以及千千万万分子之间的结合力的根本原因。

4. 电荷守恒 实验表明,原来不带电的丝绸和玻璃棒摩擦时,玻璃棒上带多少正电荷,丝绸上带同等数量的负电荷。我们通常所说“摩擦起电”,意思是指用摩擦的方法把等量的正负电荷分离开来。摩擦的作用是这样,其他起电方法的作用也是这样。

在一般情况下,物体是不带电的,这是指物体内部正负电荷的总数(代数和)等于零。当由于某种作用破坏了物体的电中性状态,例如由于摩擦的作用把一些电子从一个物体转移到另一个物体,则失去电子者带正电,得到电子者带负电,不过,这两个物体正负电荷的代数和仍然等于零。反之,如果让两个带等量异号电荷的物体互相接触,正负电荷中和,从而两个物体都不带电,在这个过程中,正负电荷的代数和仍然不变,即总等于零。大量实验表明:如果某个系统与外界没有电荷交换,那么无论系统内发生什么物理、化学变化,这个系统的电荷的代数和始终保持不变。这个结论叫做电荷守恒定律。

电荷守恒定律是自然界基本守恒定律之一。当电子(电量 $= -e$ )和正电子(电量 $= +e$ )彼此相遇时,这两个粒子就会

\* 如氢原子中质子和电子间的电力比万有引力大  $10^{39}$  倍,参见例 1-1。

湮没成两个光子。在湮没前后，电子和正电子以及两个光子的净电荷都等于零，所以电荷是守恒的。在天然放射性现象中，镭( ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ )抛出一个 $\alpha$ 粒子( ${}_2\text{He}^4$ )后转变为氡( ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ )，蜕变前的电荷总数( $88e$ )与蜕变后的电荷总数相同。在核反应实验中，当卢瑟福(E. Rutherford)在1919年用 $\alpha$ 粒子轰击氮( ${}_7\text{N}^{14}$ )时，他得到了氧( ${}_8\text{O}^{17}$ )和质子( ${}_1\text{H}^1$ )，反应前的电荷数 $[(2+7)e]$ 恰好等于反应后的电荷数 $[(8+1)e]$ ，电荷也是守恒的。

## 习 题 1.1

1. 通常所说“发电机发电”是什么意思？发电机的电是从哪里来的？为什么发电机可以成年累月地发电而不会用完？

2. 举出几个与电荷守恒和量子化相对应的质量、能量守恒和量子化的例子。

3. 在原子核裂变反应中， ${}_{92}\text{U}^{235}$ 俘获一个中子以后，分裂成两个原子量中等、质量相近的原子核，指出在这种原子核裂变反应中服从电荷守恒定律。

4. 铜的摩尔质量为64克，已知每个铜原子带有 $4.6 \times 10^{-18}$ 库仑的正电荷和等量的负电荷，问一根质量为3.1克的铜线中含有多少正电荷和负电荷？

5. 带电棒吸引干燥木屑，木屑接触到棒以后，又剧烈地跳离此棒，怎样解释此现象？

## § 1.2 导体和绝缘体

我们从日常经验中知道，金属具有良好的导电性能，而塑

料、橡胶等物质是不导电的。所以，电线、电缆等常用金属(铜、铝)做成线芯，外面包以塑料或橡皮。在做摩擦起电的实验中，丝绸、玻璃、毛皮、硬橡胶棒都是不导电的物体，因此，摩擦出来的电荷能保留相当长的时间。如果我们用铁棒和丝绸进行摩擦，铁棒就显示不出带电的性质，原因在于铁棒上的电荷经过人体传到大地上去了，因为人体和大地也是能导电的。

一切物质按它们的导电本领可分为导体和绝缘体(或电介质)两大类。然而，导体和绝缘体的区分并不是绝对的，在一定条件下它们可以相互转化。在导体和绝缘体之间，还有一种导电性能介乎两者之间的半导体。

1. 导体 按照导电特征的不同，导体可分为第一类导体和第二类导体两类。

第一类导体的导电特征是：当电荷在导体中迁移时，并不引起任何化学性质的变化；迁移电荷的携带者(又称为载流子)是自由电子。此外，由于电子的质量很小，即使是大量电子的迁移也不会使导体发生显著的质量迁移。一切金属如银、铜、铝、铁等都属第一类导体。在金属中，原子的外层价电子与原子核的联系很弱，这些价电子已不再属于个别原子，而为原子实所共有。原子实是原子中丢掉价电子后所剩下的部份。金属中的原子实排列成一个有规则的晶体点阵，形成金属物质的骨架。而价电子可以在原子实构成的晶体点阵中自由运动，这些电子通常就称为自由电子如图 1-1 所示。自由电子在晶体点阵中的分布就象气体分子一样，因此又称为电子气或电子云。



图 1-1 金属中的原子实和自由电子

第二类导体的导电特征是：电荷的迁移总伴随着化学变