



普通高等教育“九五”国家级重点教材



清华大学教材

大学物理学

第三册

电磁学

第二版

张三慧 主编



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

清华大学教材

张三慧 主编

大学物理学(第三册)

电 磁 学

(第二版)

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书是清华大学教材《大学物理学》的第三册,讲述电磁学的基本理论,包括静止和运动电荷的电场,运动电荷和电流的磁场,电场和磁场的相对论性联系,介质中的电场和磁场,电磁感应,电磁波等。除了基本内容外,还专题介绍了大气电学、超导、等离子体等今日物理趣闻,若干现代技术和著名科学家介绍,作为选讲或选读内容,以扩大学生的现代知识领域。基本内容简明扼要,选读部分通俗易懂。

本书可作为高等院校的大学物理教材,也可以作为中学物理教师教学或其他读者自学的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学 第3册,电磁学/张三慧 主编. —2版. —北京:清华大学出版社,1999.12

ISBN 7-302-03819-8

I. 大… II. 张… III. ①物理学-高等学校-教材 ②电磁学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 50785 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学学研楼,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者:昌平环球印刷厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:850×1168 1/32 印张:13 $\frac{3}{8}$ 字数:348 千字

版 次:1999 年 12 月第 2 版 1999 年 12 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-03819-8/O·223

印 数:00001~15000

定 价:16.00 元

目 录

电磁学概述	1
第 1 章 静止电荷的电场	3
1.1 电荷	3
1.2 库仑定律与叠加原理	7
1.3 电场和电场强度	12
1.4 静止的点电荷的电场及其叠加	15
1.5 电场线和电通量	23
1.6 高斯定律	27
1.7 利用高斯定律求静电场的分布	30
提要	37
思考题	38
习题	39
* 第 2 章 运动电荷的电场	45
2.1 高斯定律与运动电荷	45
2.2 电场的变换	47
2.3 做匀速直线运动的点电荷的电场	52
2.4 静电场对运动电荷的作用	56
提要	59
思考题	60
习题	60
第 3 章 电势	61
3.1 静电场的保守性	61

3.2	电势差和电势	64
3.3	电势叠加原理	68
3.4	电势梯度	73
3.5	电荷在外电场中的静电势能	76
*3.6	电荷系的静电能	78
3.7	静电场的能量	82
	提要	85
	思考题	86
	习题	87

第4章 静电场中的导体 93

4.1	导体的静电平衡条件	93
4.2	静电平衡的导体上的电荷分布	95
4.3	有导体存在时静电场的分析与计算	98
4.4	静电屏蔽	101
*4.5	唯一性定理	102
	提要	107
	思考题	107
	习题	109
	物理学与现代技术 I 范德格拉夫静电加速器	112



今日物理趣闻 A 大气电学

A.1	晴天大气电场	115
A.2	雷暴的电荷和电场	118
A.3	闪电	122



第5章 静电场中的电介质 126

5.1	电介质对电场的影响	126
-----	-----------	-----

5.2	电介质的极化	128
5.3	D 的高斯定律	133
5.4	电容器和它的电容	140
5.5	电容器的能量	144
	提要	147
	思考题	148
	习题	150
	物理学与现代技术 II 压电效应	156
第 6 章	恒定电流	159
6.1	电流和电流密度	159
6.2	恒定电流与恒定电场	162
6.3	欧姆定律和电阻	165
6.4	电动势	168
6.5	有电动势的电路	171
* 6.6	电容器的充电与放电	175
6.7	电流的一种经典微观图象	178
	提要	182
	思考题	183
	习题	183
	物理学与现代技术 III 常用电源	187
第 7 章	磁力	193
7.1	磁力与电荷的运动	194
7.2	磁场与磁感应强度	196
7.3	带电粒子在磁场中的运动	200
7.4	霍尔效应	203
7.5	载流导线在磁场中受的力	206
* 7.6	磁场是哪里来的?	212
	提要	220
	思考题	220

9.6 简单磁路	306
提要	308
思考题	309
习题	311
物理学与现代技术 V 磁记录	316

第 10 章 电磁感应 319

10.1 法拉第电磁感应定律	319
10.2 动生电动势	322
10.3 感生电动势和感生电场	327
10.4 互感	331
10.5 自感	334
10.6 磁场的能量	337
提要	340
思考题	341
习题	343
科学家介绍 法拉第	350



今日物理趣闻 C 超导电性

C.1 超导现象	354
C.2 临界磁场	356
C.3 超导体中的电场和磁场	357
C.4 第二类超导体	359
C.5 BCS 理论	361
C.6 约瑟夫森效应	362
C.7 超导在技术中的应用	365
C.8 高温超导	367



第 11 章 麦克斯韦方程组和电磁辐射 369

11.1 麦克斯韦方程组	369
--------------------	-----

* 11.2	加速电荷的电场	373
* 11.3	加速电荷的磁场	377
* 11.4	电磁波的能量	380
* 11.5	同步辐射	385
* 11.6	电磁波的动量	387
* 11.7	A-B 效应	390
	提要	393
	思考题	394
	习题	394
	数值表	398
	习题答案	400
	索引	412

电磁学概述

电磁学是研究电磁现象的规律的学科。关于电磁现象的观察记录,可以追溯到公元前 6 世纪希腊学者泰勒斯(Thales),他观察到用布摩擦过的琥珀能吸引轻微物体。在我国,最早是在公元前 4 到 3 世纪战国时期《韩非子》中有关“司南”(一种用天然磁石做成的指向工具)和《吕氏春秋》中有关“慈石召铁”的记载。公元 1 世纪王充所著《论衡》一书中记有“顿牟缀芥,磁石引针”字句(顿牟即琥珀,缀芥即吸拾轻小物体)。西方在 16 世纪末年,吉尔伯特(William Gilbert, 1540—1603 年)对“顿牟缀芥”现象以及磁石的相互作用做了较仔细的观察和记录。electricity(电)这个字就是他根据希腊字 $\eta\lambdaεκτρου$ (原意琥珀)创造的。在我国,“电”字最早见于周朝(公元前 8 世纪)遗物青铜器“番生簋”上的铭文中,是雷电这种自然现象的观察记录。对“电”字赋以科学的含义当在近代西学东渐之后。

关于电磁现象的定量的理论研究,最早可以从库仑 1785 年研究电荷之间的相互作用算起。其后通过泊松、高斯等人的研究形成了静电场(以及静磁场)的(超距作用)理论。伽伐尼于 1786 年发现了电流,后经伏特、欧姆、法拉第等人发现了关于电流的定律。1820 年奥斯特发现了电流的磁效应,很快(一两年内),毕奥、萨伐尔、安培、拉普拉斯等作了进一步定量的研究。1831 年法拉第发现了有名的电磁感应现象,并提出了场和力线的概念,进一步揭示了电与磁的联系。在这样的基础上,麦克斯韦集前人之大成,再加上他极富创见的关于感应电场和位移电流的假说,建立了以一套方程组为基础的完整的宏观的电磁场理论。在这一历史过程中,有偶然的

机遇,也有有目的的探索;有精巧的实验技术,也有大胆的理论独创;有天才的物理模型设想,也有严密的数学方法应用。最后形成的麦克斯韦电磁场方程组是“完整的”,它使人类对宏观电磁现象的认识达到了一个新的高度。麦克斯韦的这一成就可以认为是从牛顿建立力学理论到爱因斯坦提出相对论的这段时期中物理学史上最重要的理论成果。

1905年爱因斯坦创立了相对论。它不但使人们对牛顿力学有了更全面的认识,也使人们对已知的电磁现象和理论有了更深刻的理解。根据电磁现象的规律必须满足相对论时空洛伦兹变换(这本质上是自然界的一种重要的对称性——匀速直线运动的对称性或洛伦兹对称性的表现)的要求,可以证明,从不同的参考系观测,同一电磁场可表现为只是电场,或只是磁场,或电场和磁场并存。更确切地说,表征电磁场的物理量——电场强度和磁感应强度——是随参考系改变的。这说明电磁场是一个统一的实体,而且麦克斯韦方程组可以在此基础上加以统一的论证。

本书《电磁学》介绍宏观电磁场的基本规律。先讲电场的描述及其规律,再讲磁场的描述及其规律,最后讲电场和磁场相互联系的规律——电磁感应和电磁波。这些规律都是相对于同一惯性参考系加以说明的。为了说明电场和磁场的相对论性的统一,本书还在适当地方,插入了运动电荷的电场,磁场是电场的相对论表现以及电磁感应规律的相对论论证等内容。这些内容当然用到了洛伦兹变换,公式推导显得稍微复杂一些,读者可以略去这些内容(这些内容都附记了*号)而仍按传统方式学习电磁学的基本规律。但是也应指出,对于学过狭义相对论的读者,只要细心研读,认真思考,是完全可以学懂这些内容的。这样不仅可以更深刻更系统地理解电磁场的规律,而且还可以更一般地体会到自然规律的奥妙。

第1章 静止电荷的电场

作为电磁学的开始,本章讲解静止电荷相互作用的规律。在简要地说明了电荷的性质之后,就介绍了库仑定律。由于静止电荷是通过它的电场对其它电荷产生作用的,所以关于电场的概念及其规律就具有基础性的意义。本章除介绍用库仑定律求静电场的方法之外,特别介绍了更具普遍意义的高斯定律及应用它求静电场的方法。对称性分析已成为现代物理学的一种基本的分析方法,本章在适当地地方多次说明了对称性的意义及利用对称性分析问题的方法。无论是概念的引入,或是定律的表述,或是分析方法的介绍,本章所涉及的内容,就思维方法来讲,对整个电磁学(甚至整个物理学)都具有典型的意义,希望读者细心地、认真地学习体会。

1.1 电 荷

物体能产生电磁现象,现在都归因于物体带上了电荷以及这些电荷的运动。通过对电荷(包括静止的和运动的电荷)的各种相互作用和效应的研究,人们现在认识到电荷的基本性质有以下几方面。

1. 电荷的种类

电荷有两种,同种电荷相斥,异种电荷相吸。美国物理学家富兰克林(Benjamin Franklin, 1706—1790年)首先以正电荷、负电荷的名称来区分两种电荷,这种命名法一直延续到现在。宏观带电体所带电荷种类的不同根源于组成它们的微观粒子所带电荷种类的不同:电子带负电荷,质子带正电荷,中子不带电荷。现代物理

实验证实,电子的电荷集中在半径小于 10^{-18}m 的小体积内。因此,电子被当成是一个无内部结构而有有限质量和电荷的“点”。通过高能电子束散射实验测出的质子和中子内部的电荷分布分别如图 1.1(a),(b)所示。质子中只有正电荷,都集中在半径约为 10^{-15}m 的体积内。中子内部也有电荷,靠近中心为正电荷,靠外为负电荷;正负电荷电量相等,所以对外不显带电。

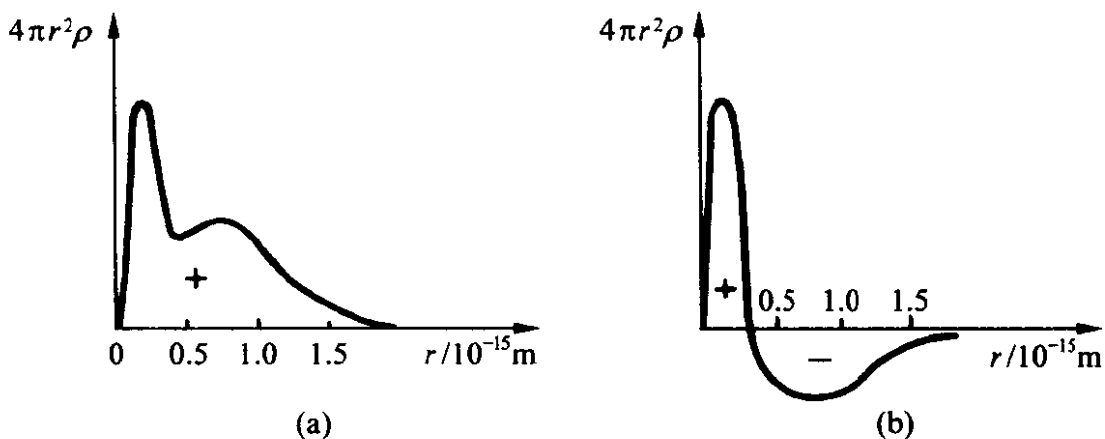


图 1.1 质子内 (a)与中子内(b)电荷分布图

带电体所带电荷的多少叫电量。谈到电量,就涉及如何测量它的问题。一个电荷的量值大小只能通过该电荷所产生的效应来测量(这一点在 8.6 节中会讲到),现在我们先假定电量的计量方法已有了。电量常用 Q 或 q 表示,在国际单位制中,它的单位名称为库[仑],符号为 C 。正电荷电量取正值,负电荷电量取负值。一个带电体所带总电量为其所带正负电量的代数和。

2. 电荷的量子性

实验证明,在自然界中,电荷总是以一个基本单元的整数倍出现,电荷的这个特性叫做电荷的量子性。电荷的基本单元就是一个电子所带电量的绝对值,常以 e 表示。经测定,

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

电荷具有基本单元的概念最初是根据电解现象中通过溶液的电量 and 析出物质的质量之间的关系提出的。法拉第 (Michael

Faraday, 1791—1867 年)、阿累尼乌斯 (Arrhenius, 1859—1927 年) 等都为此做过重要贡献。他们的结论是：一个离子的电量只能是一个基本电荷的电量的整数倍。直到 1890 年斯通尼 (John Stone Stoney, 1826—1911 年) 才引入“电子”(electron) 这一名称来表示带有负的基元电荷的粒子。其后, 1913 年密立根 (Robert Anolvews Millikan, 1868—1953 年) 设计了有名的油滴试验, 直接测定了此基元电荷的量值。现在已经知道许多基本粒子都带有正的或负的基元电荷。例如, 一个正电子, 一个质子都各带有一个正的基元电荷。一个反质子, 一个负介子则带有一个负的基元电荷。微观粒子所带的基元电荷数常叫做它们各自的**电荷数**, 都是正整数或负整数。近代物理从理论上预言基本粒子由若干种**夸克**或**反夸克**组成, 每一个夸克或反夸克可能带有 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 的电量。然而至今单独存在的夸克尚未在实验中发现。(即使发现了, 也不过把基元电荷的大小缩小到目前的 $1/3$, 电荷的量子性依然不变。)

本章大部分章节讨论电磁现象的宏观规律, 所涉及的电荷常常是基元电荷的许许多多倍。在这种情况下, 我们将只从平均效果上考虑, 认为电荷**连续地**分布在带电体上, 而忽略电荷的量子性所引起的微观起伏。尽管如此, 在阐明某些宏观现象的微观本质时, 还是要从电荷的量子性出发。

在以后的讨论中经常用到点电荷这一概念。当一个带电体本身的线度比所研究的问题中所涉及的距离小很多时, 该带电体的形状与电荷在其上的分布状况均无关紧要, 该带电体就可看作一个带电的点, 叫**点电荷**。由此可见, 点电荷是个相对的概念。至于带电体的线度比问题所涉及的距离小多少时, 它才能被当作点电荷, 这要依问题所要求的精度而定。当在宏观意义上谈论电子、质子等带电粒子时, 完全可以把它们视为点电荷。

3. 电荷守恒

实验指出,对于一个系统,如果没有净电荷出入其边界,则该系统的正、负电荷的电量的代数和将保持不变,这就是**电荷守恒定律**。宏观物体的带电、电中和以及物体内的电流等现象实质上是由于微观带电粒子在物体内部运动的结果。因此,电荷守恒实际上也就是在各种变化中,系统内粒子的总电荷数守恒。

现代物理研究已表明,在粒子的相互作用过程中,电荷是可以产生和消失的。然而电荷守恒并未因此而遭到破坏。例如,一个高能光子与一个重原子核作用时,该光子可以转化为一个正电子和一个负电子(这叫**电子对的“产生”**);而一个正电子和一个负电子在一定条件下相遇,又会同时消失而产生两个或三个光子(这叫**电子对的“湮灭”**)。在已观察到的各种过程中,正、负电荷总是成对出现或成对消失。由于光子不带电,正、负电子又各带有等量异号电荷,所以这种电荷的产生和消失并不改变系统中的电荷数的代数和,因而电荷守恒定律仍然保持有效^①。

4. 电荷的相对论不变性

实验证明,一个电荷的电量与它的运动状态无关。较为直接的实验例子是比较氢分子和氮原子的电中性。氢分子和氮原子都有两个电子作为核外电子,这些电子的运动状态相差不大。氢分子还有两个质子,它们是作为两个原子核在保持相对距离约为0.07nm的情况下转动的(图1.2(a))。氮原子中也有两个质子,但

^① 近年来不断有电荷不守恒的实验报道。电子衰变时只能产生中微子,所以电子的衰变就意味着电荷不守恒。有人做实验测知电子的平均寿命要大于 10^{23} 年,这已大大超过宇宙年龄(10^{10} 年),所以实际上电子还是不衰变。在 $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr} + \text{中性粒子}$ 的过程中有中子衰变的过程。有人分析此实验结果时得出中子的电荷不守恒,但这种电荷不守恒的衰变概率与电荷守恒的衰变概率之比为 7.9×10^{-21} 。这说明在这一过程中即使电荷守恒破坏了,也只是很微小的破坏。

它们组成一个原子核,两个质子紧密地束缚在一起运动(图 1.2 (b))。氦原子中两个质子的能量比氢分子中两个质子的能量大得多(一百万倍的数量级),因而两者的运动状态有显著的差别。如果电荷的电量与运动状态有关,氢分子中质子的电量就应该和氦原子中质子的电量不同,但两者的电子的电量是相同的,因此,两者就不可能都是电中性的。但是实验证实,氢分子和氦原子都精确地是电中性的,它们内部正、负电荷在数量上的相对差异都小于 $1/10^{20}$ 。这就说明,质子的电量是与其运动状态无关的。

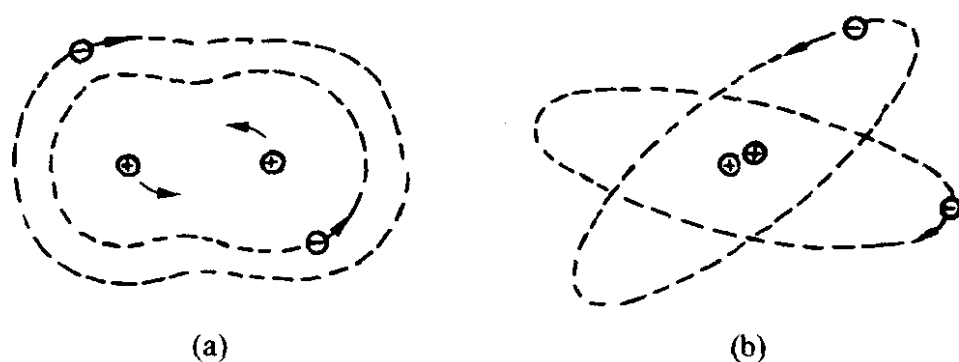


图 1.2 氢分子(a)与氦原子(b)结构示意图

还有其它实验,也证明电荷的电量与其运动状态无关。另外,根据这一结论导出的大量结果都与实验结果相符合,这也反过来证明了这一结论的正确性。

由于在不同的参考系中观察,同一个电荷的运动状态不同,所以电荷的电量与其运动状态无关,也可以说成是,在不同的参考系内观察,同一带电粒子的电量不变。电荷的这一性质叫**电荷的相对论不变性**。

1.2 库仑定律与叠加原理

在发现电现象后的两千多年的长时期内,人们对电的认识一直停留在定性阶段。从 18 世纪中叶开始,不少人着手研究电荷之

间作用力的定量规律,最先是研究静止电荷之间的作用力。研究静止电荷之间的相互作用的理论叫**静电学**。它是以1785年法国科学家库仑(Charles Augustin de Coulomb, 1736—1806年)通过实验总结出的规律——**库仑定律**——为基础的。这一定律的表述如下:相对于惯性系观察,自由空间(或真空)中两个静止的点电荷之间的作用力(斥力或吸力,统称库仑力)与这两个电荷所带电量的乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比,作用力的方向沿着这两个点电荷的连线。这一规律用矢量公式表示为

$$\mathbf{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \mathbf{e}_{r_{21}} \quad (1.1)$$

式中 q_1 和 q_2 分别表示两个点电荷的电量(带有正、负号), r_{21} 表示两个点电荷之间的距离, $\mathbf{e}_{r_{21}}$ 表示从电荷 q_1 指向电荷 q_2 的单位矢量(图 1.3); k 为比例常量,依公式中各量所选取的单位而定。 \mathbf{F}_{21} 表示电荷 q_2 受电荷 q_1 的作用力。当两个点电荷 q_1 与 q_2 同号时, \mathbf{F}_{21} 与 $\mathbf{e}_{r_{21}}$ 同方向,表明电荷 q_2 受 q_1 的斥力;当 q_1 与 q_2 反号时, \mathbf{F}_{21} 与 $\mathbf{e}_{r_{21}}$ 的方向相反,表示 q_2 受 q_1 的引力。由此式还可以看出,两个

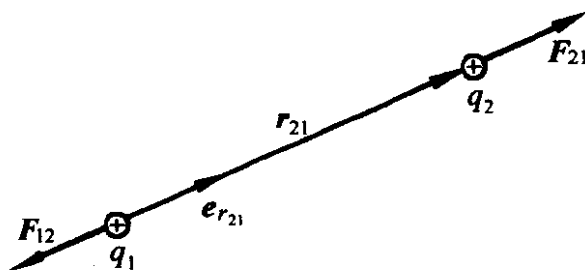


图 1.3 库仑定律

静止的点电荷之间的作用力符合牛顿第三定律,即

$$\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12} \quad (1.2)$$

(1.1)式中的单位矢量 $\mathbf{e}_{r_{21}}$ 表示两个静止的点电荷之间的作用力沿着它们的连线的方向。对于本身没有任何方向特征的静止的点电荷来说,也只可能是这样。因为自由空间是各向同性的(我们也只能这样认为或假定),对于两个静止的点电荷来说,只有它们