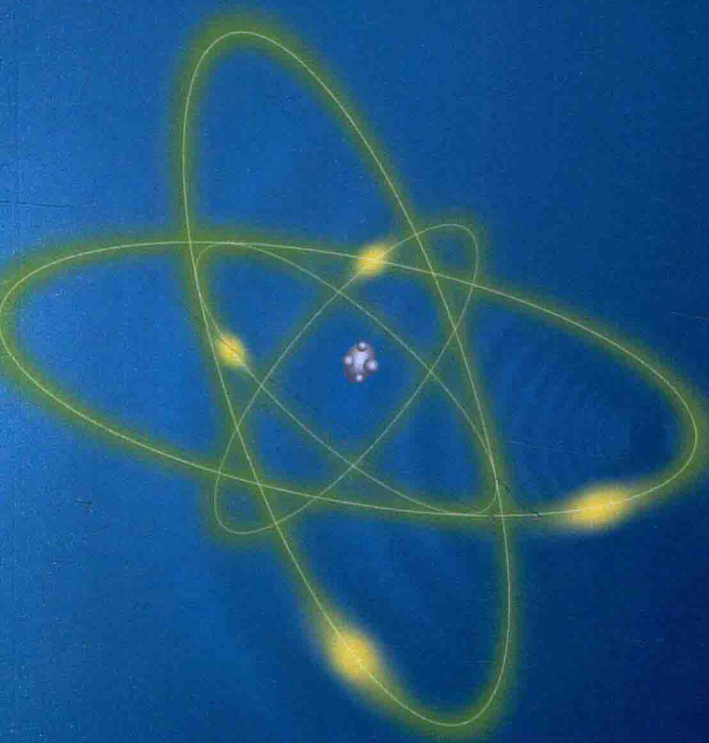


新编大学物理

(第二版) 下册

王济民 罗春荣 陈长乐 编
罗春荣 郑建邦 段利兵 修订



科学出版社

新编大学物理

(第二版)(下册)

王济民 罗春荣 陈长乐 编
罗春荣 郑建邦 段利兵 修订

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在王济民、罗春荣、陈长乐编写的《新编大学物理(上、下册)》的基础上,参照教育部2010年颁布的《理工科类大学物理课程教学基本要求》修订而成的。本书保持了教材内容现代化、体系结构科学化、习题模式多元化的特色。

本书分为上、下两册,上册包括力学、振动与波动、光学、热学,下册包括电磁学、近代物理学。部分章末附有相关内容的专题阅读材料,以介绍物理学学科前沿的最新进展及其物理原理在现代技术中的重要应用等。

与本书配套的有《新编大学物理习题集》、《新编大学物理学习指导》、《新编大学物理电子教案》等辅助用书。

本书可作为高等学校理工科非物理类各专业大学物理课程的教材或参考书使用,也可供其他专业的社会读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

新编大学物理.下册 / 王济民, 罗春荣, 陈长乐编; 罗春荣, 郑建邦, 段利兵修订. —2版. —北京: 科学出版社, 2016.1

ISBN 978-7-03-047249-6

I. ①新… II. ①王… ②罗… ③陈… ④罗… ⑤郑… ⑥段… III. ①物理学—高等学教—教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 016360 号

责任编辑: 窦京涛 陈曰德 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年7月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016年1月第 二 版 印张: 20 3/4

2016年3月第四次印刷 字数: 489 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

本书自 2004 年出版以来,得到了使用本书的教师和学生的肯定和建议.为适应教学层次的多样性以及教学内容实施方案的实际情况,我们对本教材进行了修订,在保证第一版特色的基础上,主要修订内容有:

1. 根据教育部 2010 年颁布的《理工科类大学物理课程教学基本要求》,增加了几何光学内容(第 6 章),建议授课 4 学时.

2. 根据学生高等数学知识的程度,调整教材上下册内容,上册包括力学篇(第 1~3 章)、振动与波动篇(第 4~5 章)、光学篇(第 6~9 章)、热学篇(第 10~11 章),下册包括电磁学篇(第 12~16 章)、近代物理学篇(第 17~19 章).通常在一年级第二学期讲授上册内容,二年级第一学期讲授下册内容.

3. 增加了部分章节的例题,更换了部分图片,修订了印刷错误与个别叙述不妥之处.

4. 根据全国科学技术名词审定委员会(原全国自然科学名词审定委员会)颁布的物理学名词最新版本(2006 年开始修订的 PDF 版本)对全书专用名词作了修订.

5. 本书配套使用的《大学物理习题集》作了较大程度的修订.

本书的修订工作由罗春荣、郑建邦、段利兵、侯建平、白晓军、权王民完成,具体分工为:全书修订方案由罗春荣制订,力学篇由权王民修订,振动与波动篇由侯建平修订,光学篇由侯建平编写与修订,热学篇由白晓军修订,电磁学篇由郑建邦修订,近代物理学篇由段利兵修订,罗春荣、郑建邦、段利兵对全书进行统稿与审定.

本书修订过程中得到了西北工业大学教务处、理学院的大力支持和帮助,在此谨致谢忱.

由于我们水平有限,书中的缺点和错误在所难免,恳请使用本书的师生提出批评和意见,使其质量在今后的修订中得以提高和完善.

编 者

2015 年 11 月

第一版前言

回顾刚刚过去的 20 世纪,物理学研究成果对人类文明进程及生活方式的影响是惊人的. 1905 年爱因斯坦建立了闻名遐迩的质能关系,给了人类打开核能宝库的钥匙,使人类进入了原子能时代. 1917 年爱因斯坦又提出了受激辐射理论,为 20 世纪 60 年代激光器的诞生奠定了理论基础. 1932 年回旋加速器的发明,1934 年电子显微镜的制成,1936 年射电望远镜的诞生,1957 年人造卫星的上天以及随后发展起来的宇航技术,20 世纪 60 年代建造的用作强中子源的实验性反应堆和电子同步加速器等,它们无一不是物理学研究成果. 还有固体及半导体物理的研究成果使得半导体器件及集成电路的问世,促进电子计算机迅速更新换代,使人类迈步跨入了信息时代. 量子物理理论指导了扫描隧道显微镜的诞生(1981 年),在此基础上发展起来的纳米技术在世界范围内引起了巨大反响. 科学家普遍认为,纳米技术将会引发一次新的工业革命,对人类社会产生深远的影响. 很显然,物理学已渗透到人类活动及文明社会的各个层面及领域. 物理学,特别是近代物理学,已成为各类人才所必须具备的基础知识.

但是,近年来国家组织的几次公民科学素质调查结果表明,我国公民对 20 世纪 40 年代以前的学说、理论、发明和创造比较熟悉,但对近 60 年来的许多理论与科技进展却知之不多. 其主要原因是我们的教材更新缓慢,教学内容不能与时俱进所致,加之近年来物理学及其相关学科群也出现了一系列令人鼓舞的新进展. 因此面向 21 世纪的高等教育,大学物理传统教材的改革势在必行.

适应时代需求,革新物理教材,满足 21 世纪高素质人才培养的需要,这正是编写本书的目的. 致力于教材内容的现代化,以更新学生的知识结构;优化教材的体系结构,以突出物理学知识的结构框架;改革传统习题的设置模式,以加强教学实践环节;重视物理原理在现代技术中的应用,以缩小学校教育与社会需求之间的差距;控制教材篇幅及内容深度,以适应高等教育大众化的实际需要. 这些就是本书追求的改革目标.

为了实现上述目标,本书在编写上力求体现以下特点.

1. 用现代观点审视和组织教材内容

在教材内容的组织上,“承袭传统精华,注重革新扩展”是我们的基本思想. 用现代观点审视和组织教材内容,实现了近代物理思想向经典理论的有机渗透. 利用“开窗口、留接口”和设立专题阅读材料等方式介绍学科前沿的最新进展,重视物理原理在现代技术中的应用,达到了“优化经典、加强近代”的改革目标,实现教材内容的现代化.

2. 以结构逻辑和教学逻辑的双重标准优化教材的体系结构

知识体系上的结构逻辑与人们认识事物过程上的渐进性、直观性等教学逻辑并不完全统一. 在教材的体系结构上,我们兼顾体系结构上的科学性和教学上的可接受性. 在章、

节以至段落标题的设置上,力求简洁准确,寓意清晰,对相应节、段的内容能够起到画龙点睛的作用,并优化教材的版式设计及其插图设计,使教材图文并茂,层次分明,结构合理,系统性强,符合教学规律,便于教学操作。

3. 改革传统习题的设置模式,强化学生能力的培养

为了加强实践性教学环节,强化学生能力的培养,本书大幅度地改革传统习题的设置模式,创立了成套结构式习题。其主要特点是:

(1)与教学同步配合,知识点覆盖全面。

(2)题型丰富多样,设问角度多样化。注意对学生综合、类比、联想能力的考察,启发学生多角度开放式思维,注重对学生掌握物理理论、思想及方法的训练。

(3)增设难度系数较大的附加题,题目涉及较多的知识内容,有些是对教材内容的适当延伸。附加题可作为学有余力的同学探讨的较为高级的课题,这样有利于对学生因势利导,使拔尖的优秀人才脱颖而出。附加题可不作为基本要求。

(4)注重物理原理在工程技术中的应用(不少题目来自于工程实际问题),培养学生解决实际问题的能力。

4. 注意教材的普遍适应性

考虑到教学层次的多样性以及高等教育大众化所带来的问题,本书在教材内容深浅的把握上、内容安排的技巧上以及教材篇幅的控制上均给以恰当的处理,以保证教材的普遍适应性。

本书是编者在多年教学实践的基础上,吸收了国内外许多教材之所长编写的,期望能在工科物理教育中发挥更大的作用。全书共计5篇18章,分为上、下两册。上册包括力学(第1~3章)、电磁学(第4~8章),下册包括热学(第9~10章)、振动和波动(第11~15章)、近代物理学(第16~18章)。

参加本书编写工作的有:王济民、罗春荣、陈长乐。具体分工为:王济民编写绪论、第1~3、7、8、12、13~15章以及阅读材料A、C、G;罗春荣编写第4~6、11、16章以及阅读材料B、D、F;陈长乐编写第9、10、17、18章以及阅读材料E、H。全书的统稿工作由王济民完成。文喜星、郭晓枫参加了部分习题的编写工作。全书插图由李普选用计算机绘制。

在本书编写过程中,得到了西北工业大学理学院以及应用物理系领导和许多同仁的大力支持和帮助,在此谨致谢忱。

由于编者水平所限,书中的疏漏和错误之处在所难免,恳请读者不吝指正。

编 者

2003年9月

目 录

前言

第一版前言

第五篇 电 磁 学

第 12 章 真空中的静电场	2
§ 12.1 电荷及其基本属性	3
12.1.1 电荷的种类	3
12.1.2 电荷守恒	3
12.1.3 电荷的量子性	4
12.1.4 电荷之间具有相互作用力	4
§ 12.2 电场 电场强度	7
12.2.1 电场	7
12.2.2 电场强度	7
12.2.3 电场强度的叠加原理	8
12.2.4 电场强度的计算	9
§ 12.3 静电场的高斯定理	16
12.3.1 电场线	16
12.3.2 电通量	17
12.3.3 静电场的高斯定理	19
12.3.4 应用高斯定理求静电场的分布	21
§ 12.4 静电场的环路定理 电势	27
12.4.1 静电力做功的特性	27
12.4.2 静电场的环路定理	28
12.4.3 电势能	29
12.4.4 电势 电势差	29
12.4.5 电势叠加原理	30
12.4.6 电势的计算	30
§ 12.5 等势面 电势与电场强度的微分关系	36
12.5.1 等势面	36
12.5.2 电势与电场强度的微分关系	38
思考题 12	40
习题 12	41

第 13 章 静电场中的导体和电介质	46
§ 13.1 静电场中的导体	47
13.1.1 导体的静电平衡条件	47
13.1.2 静电平衡导体上电荷的分布	48
13.1.3 导体空腔与静电屏蔽	50
13.1.4 有导体时静电场的分析与计算	52
§ 13.2 静电场中的电介质	55
13.2.1 电介质的极化现象及其实验观察	55
13.2.2 电介质极化的理论解释	56
13.2.3 有电介质时的高斯定理	59
§ 13.3 电容	63
13.3.1 孤立导体的电容	63
13.3.2 电容器及其电容	63
§ 13.4 电场能量	70
13.4.1 电容器储能	70
13.4.2 电场的能量	71
思考题 13	73
习题 13	74
物理原理与现代技术(E)	79
第 14 章 恒定磁场	83
§ 14.1 恒定电流	84
14.1.1 电流强度	84
14.1.2 电流密度	84
14.1.3 电流的连续性方程	85
14.1.4 恒定电流与恒定电场	86
§ 14.2 磁场及其描述	88
14.2.1 基本磁现象	88
14.2.2 磁场	88
14.2.3 磁感应强度	89
§ 14.3 场源与磁场	90
14.3.1 毕奥-萨伐尔定律	90
14.3.2 磁场的叠加原理 毕奥-萨伐尔定律的应用	91
14.3.3 运动电荷的磁场	98
§ 14.4 磁场的高斯定理	99
14.4.1 磁感应线	99
14.4.2 磁通量	100
14.4.3 磁场的高斯定理	100
§ 14.5 安培环路定理	101

14.5.1	安培环路定理	101
14.5.2	安培环路定理的应用举例	103
§ 14.6	带电粒子在磁场中的运动	109
14.6.1	洛伦兹力	109
14.6.2	带电粒子在磁场中的运动	109
14.6.3	霍尔效应	111
§ 14.7	磁场对载流导线的作用	113
14.7.1	安培力	113
14.7.2	磁场对载流线圈的作用	116
14.7.3	磁力的功	119
§ 14.8	磁场中的磁介质	120
14.8.1	磁介质及其磁化	120
14.8.2	磁介质磁化的微观机制	121
14.8.3	磁化状态的描述——磁化强度	123
14.8.4	有磁介质时的磁场高斯定理和安培环路定理	124
14.8.5	铁磁质	128
思考题 14		133
习题 14		134
第 15 章	电磁感应	140
§ 15.1	电源及其电动势	141
15.1.1	电源	141
15.1.2	电动势	142
§ 15.2	电磁感应的基本定律	143
15.2.1	法拉第电磁感应定律	143
15.2.2	感应电动势方向的判别	143
§ 15.3	动生电动势	147
15.3.1	动生电动势及其非静电力	147
15.3.2	动生电动势的计算	148
§ 15.4	感生电动势 感生电场	150
15.4.1	感生电动势的非静电力 感生电场	151
15.4.2	感生电场的性质	151
15.4.3	感生电动势的计算	154
15.4.4	导体在时变磁场里运动时的感应电动势	155
§ 15.5	自感和互感	157
15.5.1	自感应	157
15.5.2	互感应	160
§ 15.6	磁场的能量	163
15.6.1	自感储能	163

15.6.2 磁场的能量	165
§ 15.7 非线状导体中的感应电流——涡电流	167
15.7.1 涡电流的产生	167
15.7.2 涡流的热效应	167
15.7.3 涡流的机械效应	169
15.7.4 高频电流的趋肤效应	170
思考题 15	170
物理原理与现代技术(F)	171
第 16 章 麦克斯韦电磁场理论基础	178
§ 16.1 位移电流	179
16.1.1 位移电流	179
16.1.2 位移电流的磁场	181
§ 16.2 麦克斯韦电磁场理论	182
16.2.1 恒定电磁场的基本规律	182
16.2.2 麦克斯韦电磁场理论	183
§ 16.3 电磁波	186
16.3.1 电磁波的产生	187
16.3.2 电磁波的性质	188
16.3.3 电磁波谱	189
*16.3.4 电磁波的多普勒效应	191
思考题 16	194
习题 15、16	194
物理原理与现代技术(G)	199

第六篇 近代物理学

第 17 章 相对论基础	206
§ 17.1 狭义相对论产生的历史背景	207
17.1.1 对伽利略变换与力学相对性原理的回顾	207
17.1.2 经典力学所面临的困难	208
§ 17.2 狭义相对论的基本假设与洛伦兹变换	210
17.2.1 狭义相对论的两个基本假设	210
17.2.2 洛伦兹变换	210
§ 17.3 狭义相对论的时空观	212
17.3.1 同时性的相对性	213
17.3.2 时间的相对性	214
17.3.3 长度的相对性	216

§ 17.4	相对论的速度变换	220
§ 17.5	狭义相对论动力学简介	222
17.5.1	相对论质量	222
17.5.2	相对论动量与相对论动力学的基本方程	225
17.5.3	相对论能量	226
17.5.4	相对论能量和动量的关系	229
* § 17.6	广义相对论简介	230
17.6.1	广义相对论的基本原理	231
17.6.2	引力场的几何描述	231
17.6.3	广义相对论的实验验证	232
思考题 17		233
习题 17		233
第 18 章	量子力学的实验基础	236
§ 18.1	黑体辐射	237
18.1.1	热辐射	237
18.1.2	基尔霍夫辐射定律	237
18.1.3	黑体辐射的实验规律	238
18.1.4	普朗克量子假设	240
§ 18.2	光电效应	241
18.2.1	光电效应的实验规律	241
18.2.2	光电效应的实验规律与经典理论的矛盾	242
18.2.3	爱因斯坦的光子理论	243
§ 18.3	康普顿效应	244
18.3.1	康普顿效应的实验规律	244
18.3.2	康普顿效应与经典理论的矛盾	245
18.3.3	光子理论对康普顿效应的解释	245
§ 18.4	玻尔的氢原子理论	247
18.4.1	氢原子光谱的实验规律	247
18.4.2	原子光谱的实验规律以及原子的核式模型与经典理论的矛盾	248
18.4.3	玻尔的氢原子理论	249
§ 18.5	实物粒子的波粒二象性	252
18.5.1	德布罗意假设	252
18.5.2	德布罗意波的实验验证	254
思考题 18		256
第 19 章	量子力学基础	257
§ 19.1	微观粒子状态的描述 波函数	258
19.1.1	坐标和动量的不确定度关系	258

19.1.2	波函数	261
§ 19.2	薛定谔方程	265
19.2.1	薛定谔方程	265
19.2.2	定态薛定谔方程	267
§ 19.3	一维定态问题	269
19.3.1	一维无限深势阱中粒子的运动	269
19.3.2	一维势垒的穿透 隧道效应	273
§ 19.4	氢原子的量子理论	274
19.4.1	氢原子的定态薛定谔方程及其求解概略	274
19.4.2	氢原子问题的量子力学结论	275
§ 19.5	电子的自旋 四个量子数	280
19.5.1	施特恩-格拉赫实验	280
19.5.2	电子的自旋	281
19.5.3	四个量子数	281
§ 19.6	多电子原子系统的壳层结构	282
19.6.1	泡利不相容原理	282
19.6.2	能量最小原理	283
§ 19.7	固体的能带理论	286
19.7.1	固体能带的形成	286
19.7.2	能带上电子的分布与输运	288
19.7.3	固体的能带结构与导电性	289
19.7.4	杂质半导体的导电机构	290
19.7.5	半导体的特性及应用	292
§ 19.8	激光	294
19.8.1	三种跃迁过程	294
19.8.2	粒子数反转分布与激活介质	297
19.8.3	光学谐振腔	299
19.8.4	激光器的结构及类型	300
19.8.5	激光的特性及其应用	301
思考题 19		302
习题 18、19		302
物理原理与现代技术(H)		305
附录		307
常用物理常数表		307
诺贝尔物理学奖颁发情况一览表		308
参考书目		317

电 磁 学

电磁学 (electromagnetics) 是研究电磁相互作用, 以及电磁场的产生、变化和运动规律及其应用的一门学科, 它是经典物理学的重要组成部分。电磁相互作用是自然界的四种基本相互作用之一, 广泛地存在于整个自然界, 电磁场则是构成物质世界的重要组成部分。电磁学的研究对人类文明历史的进程具有划时代的意义。在电磁学研究基础上发展起来的电能的生产和利用, 导致了一次新的技术革命, 使人类进入了电气化时代。20 世纪中叶, 在电磁学研究基础上发展起来的微电子技术和电子计算机, 渗透于高新技术的各个领域, 使人类逐步跨入了当今的信息时代。不仅如此, 电磁学还是人类深入认识物质世界必不可少的理论基础。人类对原子、原子核的结构以及基本粒子的研究都与电磁理论的研究分不开。从学科体系的外延来看, 电磁学无疑是电工学、无线电电子学、遥控和自动控制学以及通信工程等学科必须具备的基础理论。

电磁学内容大体可以划分为“场”和“路”两部分, 大学物理侧重于对场的研究, 电子线路、强电电路等有关“路”的部分留待后续课程去研究。场不同于实物物质, 似乎有点虚无缥缈。面对这样的研究对象, 从有关概念的建立到其独特的研究方法对低年级大学生来说都是陌生的。应该强调指出, “通量”和“环流”是描述矢量场性质的两个重要特征量, 考察一个矢量场的通量和环流是人们总结出来的研究矢量场的基本方法。这一思想和方法, 将贯穿于电磁学的始末, 从静电场到恒定磁场, 以至于到交变电磁场, 这一基本方法将是一脉相承的。把握了这一点, 也就理清了电磁场理论的基本架构, 对于电磁学的学习将是十分有益的。

本篇电磁学部分包括: 静电场、恒定磁场、变化的电场和变化的磁场等。

第 12 章

真空中的静电场



带电子加速器简称为加速器，它是核研究和核应用领域的一种极为重要的设备，它为揭示核结构、核性质及核规律做出了巨大的贡献。在科学研究、工农业生产、医疗卫生等方面加速器也有其广泛的应用。例如工件的无损探伤、半导体材料的掺杂、中子活化分析、辐射种子改良及辐射治癌等。按照加速离子获得能量的多少可将加速器分为低能、中能和高能加速器；按照加速电场的不同又可将加速器分为静电加速器、电子感应加速器和回旋加速器等。静电加速器是利用静电高压对带电离子的作用来加速的，加速电压越高，离子所获得的能量也就越多。受空气绝缘性能的限制，高压电极上的电压不可能无限提高，故静电加速器属于低能加速器。串联式静电加速器可以使粒子能量成倍的提高。上图为我国建成的 HI-13 串联式加速器，是目前国际上低能物理研究的先进设备。

静电场 (electrostatic field) 是相对于观察者静止的电荷所产生的物理场。静电场的空间分布不随时间变化, 亦即静电场是与时间无关的稳恒场。本章主要讨论真空中静电场的基本性质和规律, 其主要内容的讲授思路是: 从静电现象的基本实验规律——库仑定律出发, 根据电荷在电场中受力的特性, 引入描述静电场性质的基本物理量电场强度。然后介绍描述静电场性质的基本定理之一——静电场的高斯定理。再从电场力做功的特性出发, 介绍静电场的另一个基本定理——环路定理。并根据电场力做功的特点, 引入描述静电场性质的另一个基本物理量电势。电场强度和电势是描述静电场性质的两个基本物理量, 高斯定理和环路定理则是反映静电场性质和规律的两个基本定理。

§ 12.1 电荷及其基本属性

12.1.1 电荷的种类

实验证明, 自然界只存在两类电荷: 正电荷和负电荷。

早在公元前 600 年, 人们就发现用毛皮摩擦过的琥珀能够吸引羽毛、发丝等轻小物体。当物体具有这种吸引轻小物体的特性时, 就说它带了电, 使物体带电叫做起电。人们发现, 无论用何种方式起电, 所得到的电荷要么与用丝绸摩擦过的玻璃棒所带电荷相同, 要么与用毛皮摩擦过的橡胶棒所带电荷相同。这就表明, **自然界只存在两类电荷**, 人们以正、负来区分这两类电荷。电荷的这种命名法是美国物理学家富兰克林首先提出来的, 国际上一直沿用到现在。

电是物质的一种固有属性, 物质的电性起源于物质本身的微观结构。宏观带电体所带电荷种类的不同源于组成它们的微观粒子所带电荷种类的不同。自然界没有独立于物质之外的电荷。

按照物质的电结构理论, 物质由分子组成, 分子由原子组成, 任何元素的原子都有一个原子核和围绕着核的电子云, 在原子核中包含若干带正电的质子和不带电的中子, 电子云则由带负电的电子组成。每一个质子所带正电荷的数量与每个电子所带负电荷的数量相等。不同元素, 原子核中所包含的质子数目不相同, 但不论哪种元素, 在正常情况下, 每一个原子中包含的电子和质子数目相同, 因此原子呈电中性。由大量原子、分子所构成的宏观物体也呈电中性。但当物体经受摩擦等作用时, 一个物体失去若干个电子而带正电, 另一物体得到若干个电子而带负电。

物体所带电荷数量的多少叫做**电量** (electric quantity), 电量常用 Q 或 q 表示。在国际单位制中, 电量的单位是库仑 (C)。

12.1.2 电荷守恒

大量实验事实表明, 无论用什么方式起电, 正负电荷总是成对等量地出现, 当它们相遇时便完全中和了。这表明带电只不过是**通过一定的外界作用, 将物体中固有的正负电荷重新分布**, 并非人为地创造了电荷, 中和只是正负电荷的外在表现彼此抵消, 也并非电荷被消灭。由此人们便得出了如下结论:

在一个与外界没有电荷交换的孤立系统内,不论发生什么过程(物理、化学以及原子核的转变等过程),其正负电荷的代数和保持不变.

这一结论叫做电荷守恒定律(law of conservation of charge).电荷守恒定律是物理学中的基本定律之一,对宏观过程和微观领域均能适用.在分析有基本粒子参与的各种反应过程时,该定律具有重要的指导意义.只有遵从电荷守恒定律的过程才能实现,而违背电荷守恒定律的过程则不可能实现.例如,单独存在的中子是不稳定的,经过平均寿命约 15.3 min 后,就衰变为质子、电子和反中微子,即



$$\text{电荷} \quad 0 \rightarrow e + -e + 0$$

显然,在中子的放射性衰变过程中,反应前后系统的总电量保持不变,服从电荷守恒定律.在电磁学中,处理静电场中的导体问题,电荷守恒定律也将是分析问题的重要理论依据之一.

12.1.3 电荷的量子性

精确的实验结果表明,自然界中任何带电体所带电量只能是某一基本单元(元电荷)的整数倍,且不能连续变化,电荷的这一特性叫做电荷的量子性(quantization of electric charge).

电荷的基本单元就是一个电子(或一个质子)所带电量的绝对值,以 e 表示,其值为

$$e = 1.602176487(40) \times 10^{-19} \text{ C}$$

近代物理从理论上预言基本粒子由若干种夸克(quark)或反夸克(antiquark)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.这一理论预言并不破坏电荷的量子性,然而至今还没有在实验中发现单独存在的夸克.

由于 e 的电量非常小,通常问题中涉及的带电粒子的数目又非常巨大,以致在宏观现象中,电荷的量子化就表现不出来,所以在所讨论的带电体上,可以认为电荷是连续分布的.

12.1.4 电荷之间具有相互作用力

1. 库仑定律

电荷之间具有相互作用是电荷的又一基本属性,即同号电荷相斥,异号电荷相吸,电荷之间相互作用的规律是电现象的基本规律.

法国物理学家库仑通过扭秤实验,总结出点电荷间相互作用的规律,称为库仑定律(Coulomb law).点电荷是指本身的几何线度比起它到其他带电体的距离小得多的带电体.这种带电体的形状与电荷在其中的分布已无关紧要,因此可以把它抽象成一个带电荷的几何点.库仑定律内容如下:

在真空中,两个静止点电荷之间的静电相互作用力的大小,与它们的电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比,与它们之间距离 r 的平方成反比;作用力的方向沿着它们的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸.

如图 12.1 所示,用 F_{12} 表示 q_1 对 q_2 的作用力, F_{21} 表示 q_2 对 q_1 的作用力,则库仑定律

可表示为

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^3} \mathbf{r}_{12}$$

或

$$\mathbf{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{21}^3} \mathbf{r}_{21}$$

其中 $\mathbf{r}_{12}$ 表示 q_2 相对于 q_1 的位置矢量, $\mathbf{r}_{21}$ 表示 q_1 相对于 q_2 的位置矢量. 由于

$$\mathbf{r}_{12} = -\mathbf{r}_{21}$$

则

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$$

即静止电荷之间的库仑力满足牛顿第三定律.

库仑定律中的比例系数 k 由实验测定, 在国际单位制中它的数值和单位为

$$k = 8.9880 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

为了使后面将要导出的更为常用的公式中不含无理数“ 4π ”因子, 令 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, 而得到

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

式中 ϵ_0 称为真空电容率或真空介电常数. 这样的处理方法称为单位制的有理化. 因此在国际单位制中, 库仑定律可以写成

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^3} \mathbf{r}_{12} \quad (12.1)$$

如果用 $\mathbf{r}_0$ 表示受力电荷相对于施力电荷的矢径 $\mathbf{r}$ 的单位矢量, 则可以把库仑定律写成如下的形式:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (12.2)$$

库仑定律是静电学的理论基础, 是电磁学的基本实验定律之一.

2. 静电力叠加原理

库仑定律是关于一种基本力的实验规律, 它直接给出了两个静止点电荷之间的相互作用. 当空间存在两个以上电荷时, 实验事实表明, 两个点电荷之间的作用力并不因第三个点电荷的存在而有所改变, 由此可以推知:

两个以上点电荷对某一点电荷的静电力等于各个点电荷单独存在时对该点电荷的静电力的矢量和. 这一结论叫做静电力叠加原理.

设点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 单独存在时作用于点电荷 q_0 的静电力分别为 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_n$, 则该电荷系同时存在时作用于点电荷 q_0 的静电力为

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n \\ &= \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i = \sum_{i=1}^n \frac{q_0 q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{r}_{i0} \end{aligned} \quad (12.3)$$

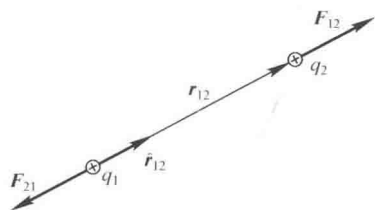


图 12.1 库仑定律