

下册

# 大学物理学 (第2版)

主编 袁艳红

Physics

清华大学出版社

主编 袁艳红

# 大学物理学

(第2版)

下册

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书参照了教育部物理基础课程教学指导分委员会制订的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》，涵盖了基本要求中的核心内容。在内容选取上采用压缩经典、简化近代；削枝强干，突出重点；简化理论论证，适度增加应用等方法，以适应不同院校和专业对大学物理的要求。同时考虑到技术应用型院校的特点和实际情况，在保证必要的基本训练的基础上，适度降低了例题和习题的难度，而且吸收了国内外优秀教材的精髓，充实了大量物理学史和最新科技进展后编写而成。

本书不仅融入了作者多年教学经历所积累的成功经验，而且考虑到学生和教师教学的新特点，还配备了习题解答、学习指导和电子教案等教学资源。全书分上、下两册，上册内容包括力学、机械振动、机械波、光学和热学，下册内容包括电磁学、狭义相对论和量子物理。

本书可作为技术应用型高等院校工科类各专业大学物理课程的教材，也可作为非物理专业大学物理课程的教材或参考书，还可供文理科相关专业选用和社会读者阅读。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理学. 下册/袁艳红主编.—2版.—北京：清华大学出版社，2017  
ISBN 978-7-302-45662-9

I. ①大… II. ①袁… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 285355 号

责任编辑：佟丽霞

封面设计：常雪影

责任校对：赵丽敏

责任印制：宋 林

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>，<http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编：100084

社 总 机：010-62770175

邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969，[c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈：010-62772015，[zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者：北京天颖印刷有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm

印 张：14

字 数：320 千字

版 次：2010 年 9 月第 1 版

2017 年 3 月第 2 版

印 次：2017 年 3 月第 1 次印刷

印 数：20001~23000

定 价：49.00 元

产品编号：065387-01

# 序

## FOREWORD

物理学是研究物质结构、性质、运动和相互作用基本规律的科学，也是一门与实践紧密结合的科学，是自然科学和技术科学的基础之一。物理学的教学不仅传授本学科的基本知识，更重要的是使学生掌握科学的认识论、方法论，培养学生的思维方法，提高学生的思辨能力。因此，大学物理不仅是一门重要的基础课，也是大学生素质教育的重要内容。这就是目前非物理的理工类专业均开设大学物理课的原因。然而要写好既满足理工科不同专业的要求而又有别于物理专业的教科书，并非易事。

袁艳红教授主编的《大学物理学》是一本适合技术应用型高等院校非物理专业使用的教材。本书不仅渗透了编者的教学经验，而且还体现了她在教学改革方面的一些创新思路。整套教材较全面地介绍了物理学的基本内容，体现了一定的时代性、应用性。本书注重物理概念阐述，避免复杂的数学推导；内容由浅入深、由易到难、由具体到抽象，图文并茂，文字流畅，并重视趣味性和直观性，通俗易懂，便于自学。书中除介绍大学本科学生所必需的物理基本知识外，还适当地向学生介绍一些现代物理前沿知识，有利于学生开阔眼界、启迪思维、丰富想象，培养创新能力。此外，对于物理知识在高新技术中的某些应用，如量子信息技术、纳米技术、激光技术、声悬浮技术、磁悬浮技术、全息技术等，结合教学作了一些介绍并留有感兴趣者进一步学习具体技术的“接口”，这有利于培养学生分析问题、解决问题，理论联系实际的能力。在资源建设上借助了现代信息技术，在书中某些章节增加动画、二维码视频等多媒体教学资源，并配以数字课程教学平台，增加了学生学习物理学的情趣。本教材内容在深度和广度上，符合教育部规定的有关大学物理教学的基本要求，例题和习题选配得当，难易程度适中，适合技术应用型高等院校工科类各专业用作大学物理课程的教材，也可供其他非物理专业用作大学物理课程的教材或参考书，还可供社会读者阅读。

作为高等教育教学改革和教材建设的一项成果，该书具有一定的创新性。编著这套“大学物理”教材对高等教育教材的建设做出了贡献，对技术应用型工科院校大学物理教育大有裨益。

作为一位年轻教授，肯花时间和精力编出这样一本教材实属难能可贵，特为之序。

中国科学院院士 侯洵

2010年6月16日

物理学是研究物质基本结构、基本运动形式及相互作用规律的科学。物理学最初是主要研究力学运动规律，后来又研究热现象、电磁现象、光现象以及辐射的规律。到19世纪末，物理学已经形成了一个完整的体系，称为经典物理学。在20世纪初的30年里，物理学经历了一场伟大的革命，诞生了相对论和量子力学，形成了近代物理学。相对论和量子力学是近代物理学的两大理论支柱，它直接导致了现代科学技术的革命。超大规模的集成电路、人工设计的新型材料、激光技术的应用和发展、低温与超导、新能源的开发和应用等，究其根源，无不以现代物理学基本原理为基础。

以经典物理学、近代物理学和现代科学技术中的物理基础为主要内容的大学物理，是高等院校非物理专业学生一门重要的课程。该课程在培养学生综合素质、丰富科学知识、提高技术能力方面发挥着重要的作用。

针对培养技术应用型人才的高等学校，为了满足大学物理课程改革和实际教学的要求，在多年教学实践的基础上，我们编写了本书。编写的主要思路如下：

(1) 基本内容：为了适应技术应用型人才培养的大学物理教学，本书内容包括基本知识、拓展内容和阅读材料三大板块。基本知识内容以《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》为根据，构成了本书的核心。同时选取少量的拓展内容，作为知识的扩展和延伸，这部分内容以“\*”号标出。教师授课时，删去带“\*”的内容，并不影响全书的系统性和连贯性。书中还安排了一定数量的阅读材料，这些阅读材料与教材内容相匹配，主要是一些基本原理的应用。增加这些内容目的是使学生掌握基础性物理学的知识，了解物理学的前瞻性发展，同时让学生感受到物理学与人们日常生活的密切相关性，增强学习趣味、拓宽学生视野、提高创新意识。

(2) 叙述特点：考虑到技术应用型人才的特点和物理学自身的特点，本书在论述方式上重视物理概念的准确性、物理推论的逻辑性和物理内容的基础性。由浅入深、由易到难、由具体到抽象、由特殊到一般，尽可能避免复杂的数学推证，力求通俗易懂、便于学习。对现代物理学内容的介绍深入浅出，力争不让学生感到过分抽象和复杂。

(3) 内容衔接：为了避免与中学物理内容重复，本书以中学物理为基础，以应用型工科院校为特色编写。在内容衔接点上，综合考虑了不同地区、不同专业大学物理教学的情况，适度地降低了部分内容的衔接点，企盼绝大多数学生都能较好地与中学物理基础相衔接。同时也注意到与大学后续课程的衔接。

(4) 习题安排：为了使学生对所学内容加以巩固，书中安排了一定量的例题和习题。习题和例题涵盖基础、应用两个方面。有些题目与实际联系较密切，且物理原

# 前言

## P R E F A C E

理清楚,有较强的实际应用意义和一定的趣味性。习题内容和数量选择与教材内容相配合,类型有填空题、选择题和计算题。难度由浅到深,有较好的适用性。

(5) 版式格式: 版式采用了与国际接轨的彩色印制; 在编排上注重版面设计、图文并茂; 在内容叙述上保留了原教材的基本特色, 即力求做到生动形象、通俗易懂, 强调了物理图像和物理思想, 使学生在欣赏的过程中体验并学习物理学知识; 在资源建设上借助现代信息技术, 在书中某些章节增加动画、二维码视频等多媒体教学资源, 并配以数字课程教学平台, 期望突破书中知识难点, 增加学生学习物理学的情趣。由纸质教材、纸质辅助教材、电子教案和网络课程等组成了立体化系列教材。

全书采用国际(SI)单位制, 书后有矢量运算、物理量的名称、符号及单位、常用物理常量表、习题参考答案及参考文献。

本书是上海市“十二五”规划教材, 并作为核心成果获得了上海市第十一届教育科学研究优秀成果一等奖, 其分为上、下两册, 分别介绍了力学、机械振动、机械波、光学、热学、电磁学、狭义相对论和量子物理, 由袁艳红教授编写。书中的彩图由陈锐绘画, 演示实验视频由柯磊、赵润宁、杨党强拍摄, 动画资源由贾鑫、杨俊伟设计, 黄才杰校稿。

在本书的编写过程中, 参考了国内外大量的文献资料。此外, 也从网络上搜集了大量的有关资料和图片, 在此向原作者表示感谢。在本书的编写和修改过程中, 得到了苗润才、杨若凡、孙振武和朱泰英等教授的关心和帮助, 在此谨向他们表示诚挚的感谢。

由于编者学识和教学经验有限, 可能对基本要求理解不深, 处理不当, 书中缺点和错误在所难免, 真诚企盼使用本书的读者批评指正。

编者

2016年4月

## 第 9 章 静电场



- 9.1 电荷和库仑定律 / 2
  - 9.1.1 电荷的量子化 / 2
  - 9.1.2 电荷守恒定律 / 3
  - 9.1.3 库仑定律 / 4
  - 9.1.4 静电力叠加原理 / 5
- 9.2 电场和电场强度 / 6
  - 9.2.1 电场 / 6
  - 9.2.2 电场强度 / 6
  - 9.2.3 点电荷的电场强度 / 7
  - 9.2.4 电场强度叠加原理 / 8
  - 9.2.5 电荷连续分布带电体电场中的电场强度 / 9

原理应用 喷墨打印机 / 12

- 9.3 电场强度通量 高斯定理 / 13
  - 9.3.1 电场线 / 13
  - 9.3.2 电场强度通量 / 15
  - 9.3.3 高斯定理 / 17
  - 9.3.4 高斯定理的应用 / 19
- 9.4 静电场的环路定理 电势 / 23
  - 9.4.1 静电场力是保守力 / 23
  - 9.4.2 静电场的环路定理 / 24
  - 9.4.3 电势能 电势和电势差 / 24
  - 9.4.4 电势的计算 / 26
- 9.5 等势面 电场强度与电势 / 29
  - 9.5.1 等势面 / 29
  - 9.5.2 电势与电场强度的关系 / 30

原理应用 离子推进器 / 31

内容提要 / 33

习题 / 34

## 第 10 章 静电场中的导体和电介质

- 10.1 静电场中的导体 / 39
  - 10.1.1 导体的静电平衡条件 / 39
  - 10.1.2 导体表面的电场 / 40



# 目 录

# C O N T E N T S

- 10.1.3 静电平衡时导体上电荷的分布 / 41
- 10.1.4 导体静电平衡的应用 / 42
- 原理应用 静电除尘器 / 45
- 10.2 电容 电容器 / 46
  - 10.2.1 孤立导体的电容 / 46
  - 10.2.2 电容器的电容 / 47
  - 10.2.3 电容器的并联和串联 / 50
- 10.3 静电场中的电介质 / 51
  - 10.3.1 电介质对电场的影响 相对电容率 / 51
  - 10.3.2 电介质的极化 / 52
  - 10.3.3 电极化强度矢量 / 52
- 10.4 电位移 有电介质时的高斯定理 / 53
  - 10.4.1 有电介质时的高斯定理 / 53
  - 10.4.2 电场强度、电极化强度和电位移之间的关系 / 54
- 10.5 静电场的能量 / 57
- 原理应用 心脏除颤器 / 59
- 内容提要 / 60
- 习题 / 61
- 第 11 章 稳恒磁场** .....
- 11.1 恒定电流 / 67
  - 11.1.1 电流 电流密度 / 67
  - 11.1.2 恒定电流的条件 / 69
  - 11.1.3 电动势 / 69
- 11.2 磁场 磁感应强度 / 70
  - 11.2.1 磁的基本现象 / 70
  - 11.2.2 磁感应强度 / 71
- 11.3 磁场叠加原理 毕奥-萨伐尔定律 / 72
  - 11.3.1 磁场叠加原理 / 72
  - 11.3.2 毕奥-萨伐尔定律 / 73
  - 11.3.3 毕奥-萨伐尔定律的应用举例 / 74
  - 11.3.4 磁矩 / 76
- 11.4 磁场的高斯定理 / 77
  - 11.4.1 磁感应线 / 77





- 11.4.2 磁通量 / 77
- 11.4.3 磁场的高斯定理及其应用 / 78
- 11.5 安培环路定理及其应用 / 80
  - 11.5.1 安培环路定理 / 80
  - 11.5.2 安培环路定理的应用 / 81
- 11.6 磁场对运动电荷的作用 / 84
  - 11.6.1 洛伦兹力 带电粒子在均匀磁场中的运动 / 84
  - 11.6.2 带电粒子在现代电磁场技术中的应用举例 / 86
- 11.7 磁场对载流导线的作用 / 88
  - 11.7.1 安培定律 / 88
  - 11.7.2 磁场对平面载流线圈作用的力矩 / 90
- 原理应用 电力系统中母线所受的安培力 / 92
- 11.8 磁场中的磁介质 / 93
  - 11.8.1 磁介质 磁化强度 / 93
  - 11.8.2 磁介质中的安培环路定理 磁场强度 / 95
- 原理应用 超导 / 98
- 内容提要 / 99
- 习题 / 101

## 第 12 章 电磁感应与电磁场

- 12.1 电磁感应现象及其基本规律 / 107
  - 12.1.1 电磁感应现象 / 107
  - 12.1.2 法拉第电磁感应定律 / 108
  - 12.1.3 楞次定律 / 110
- 原理应用 电吉他 / 112
- 12.2 动生电动势和感生电动势 / 113
  - 12.2.1 动生电动势 / 113
  - 12.2.2 感生电动势 / 115
  - 12.2.3 涡电流 / 117
- 原理应用 磁悬浮技术 / 118
- 12.3 互感和自感 / 119
  - 12.3.1 互感 / 119
  - 12.3.2 自感 / 121
- 12.4 磁场的能量 / 122



# 目 录

# C O N T E N T S

- 12.4.1 载流长直螺线管的磁能 / 123
- 12.4.2 磁场的能量 / 123
- \* 12.5 麦克斯韦电磁场理论简介 / 125
  - 12.5.1 位移电流 全电流的安培环路定理 / 125
  - 12.5.2 涡旋电场 / 128
  - 12.5.3 麦克斯韦方程的积分形式 / 128
- \* 12.6 电磁振荡 电磁波 / 129
  - 12.6.1 电磁波的产生与传播 / 129
  - 12.6.2 真空中的平面电磁波及其特性 / 130
  - 12.6.3 电磁波谱 / 132
- 原理应用 核磁共振及其医学成像原理 / 132
- 内容提要 / 134
- 习题 / 136

## 第 13 章 狭义相对论

- 13.1 伽利略变换 牛顿力学相对性原理遇到的困难 / 142
  - 13.1.1 伽利略相对性原理 伽利略变换 / 142
  - 13.1.2 经典力学的绝对时空观 / 143
  - 13.1.3 光速依赖于惯性参考系的选取吗 / 144
- 13.2 狭义相对论的基本原理 洛伦兹变换 / 145
  - 13.2.1 狭义相对论的基本原理 / 145
  - 13.2.2 洛伦兹变换式 / 146
  - \* 13.2.3 洛伦兹速度变换式 / 148
- 13.3 狭义相对论的时空观 / 149
  - 13.3.1 同时性的相对性 / 149
  - 13.3.2 时间的延缓 / 150
  - 13.3.3 长度收缩 / 152
- 13.4 狭义相对论动力学基础 / 153
  - 13.4.1 质量与速度的关系 / 153
  - 13.4.2 相对论的动量 / 154
  - 13.4.3 相对论的动能 / 155
  - 13.4.4 相对论能量 质能关系 / 155
  - 13.4.5 相对论的动量和能量关系 / 156

原理应用 原子核裂变和聚变 / 158

原理应用 光伏发电 / 159



140

内容提要 / 162

习题 / 163

**第 14 章 量子物理** .....

14.1 黑体辐射 普朗克量子假设 / 167

14.1.1 黑体 黑体辐射 / 167

14.1.2 黑体辐射的瑞利-金斯公式 经典物理的困难 / 168

14.1.3 普朗克假设 普朗克黑体辐射公式 / 168

14.2 光电效应 爱因斯坦方程 / 170

14.2.1 光电效应的实验规律 / 170

14.2.2 光的波动说遇到的困难 / 172

14.2.3 爱因斯坦光量子理论 / 172

14.2.4 光的波粒二象性 / 174

14.3 康普顿效应 / 175

14.4 氢原子的玻尔理论 / 178

14.4.1 氢原子光谱 / 178

14.4.2 玻尔理论 / 179

14.5 德布罗意波 实物粒子的二象性 / 183

14.5.1 德布罗意波假设 / 183

14.5.2 德布罗意假设的实验验证 / 184

原理应用 扫描隧穿显微镜 / 185

14.6 不确定关系 / 187

14.7 波函数 薛定谔方程及简单应用 / 190

14.7.1 波函数及其统计解释 / 190

14.7.2 薛定谔方程 / 191

14.7.3 薛定谔方程的应用 / 192

原理应用 碳纳米管及其应用 / 196

内容提要 / 200

习题 / 201



165

静电场

附录..... 204

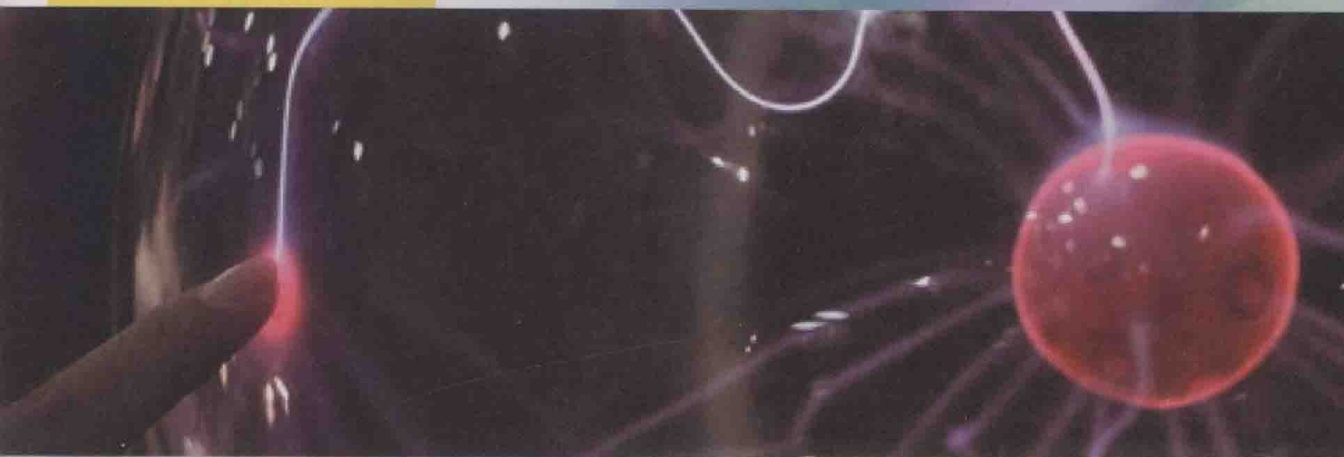
电磁学和近代物理的量 and 单位 ..... 204

习题参考答案..... 206

参考文献..... 210

# Chapter 9

## 第9章



## 静电场

电磁运动是物质运动的又一种基本运动形式。电磁相互作用是自然界已知的四种基本相互作用之一,自然界里的所有变化,几乎都与电和磁相联系。所以,研究电磁运动对于深入认识物质世界是十分重要的。同时,由于电磁学已经渗透到现代科学技术的各个领域,并已成为许多科学和技术的理论基础,因而学习电磁学,掌握电磁运动的基本规律,具有极其重要的意义。

一般来说,运动电荷将同时激发电场和磁场,电场和磁场是相互联系的。但是,在某种情况下,例如当我们所研究的电荷相对于观察者静止时,电荷在这个静止的参考系中就只激发电场,而无磁场。这个电场就是本章所讨论的静电场。场是物质存在的一种特殊形式,是不同于以往的研究对象。

本章的主要内容有:真空中静电场的基本定律——库仑定律,静电场的两条基本定理——高斯定理和环路定理,描述静电场的两个基本物理量——电场强度和电势。



查利·奥古斯丁·库仑(Charlse-Augustin de Coulomb, 1736—1806),法国工程师、物理学家。他用扭秤测量静电力和磁力,导出了著名的库仑定律。库仑定律使电磁学的研究从定性进入定量阶段,是电磁学史上一块重要的里程碑。1781年他发现了摩擦力与压力的关系,得出摩擦定律、滚动定律和滑动定律。

## 9.1 电荷和库仑定律

### 9.1.1 电荷的量子化

人们对电荷的认识最早是从摩擦起电现象和自然界的雷电现象开始的。实验指出,自然界中存在两种**电荷**(electric charge),即正电荷和负电荷。用丝绸摩擦的玻璃棒带正电,用毛皮摩擦的橡胶棒带负电。同种电荷互相排斥,异种电荷互相吸引,这种相互作用力称为**电场力**,如图9-1所示。物体所带电荷的多少叫做电量,常用 $Q$ 或 $q$ 表示,在国际单位制中,电荷量的单位是库仑(C,简称库)。1897年英国物理学家汤姆孙(J. J. Thomson)发现了电子,验证了电子带负电,并直接测出了电子的电量。后来人们又发现了质子和中子。质子带正电荷,中子不带电。一个质子和一个电子所带电量的绝对值相等。原子的电性是由它所包含的质子数和电子数决定的。在正常情况下,原子核所带的质子数与核外的电子数相等,整个原子呈**电中性**(electric neutrality)。如果原子中有一个或多个电子离去,原子就表现为带正电;如果原子获得了一个或多个电子,原子就表现为带负电。原子失去或获得电子的过程,称为**电离**。

1913年,美国物理学家密立根(R. A. Milikan)在他的油滴实验中发现,油滴上的电量总是某一基本电荷的整数倍,证明了微小粒子带电荷的变化是不连续的,它只能是基本电荷 $e$ 的整数倍,即 $q=ne(n=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 。这种电荷量只能一份一份地取分立的、不连续的



图 9-1 头发带静电后互相排斥

数值的性质,叫做**电荷的量子化**(charge quantization)。电荷量子化是个实验规律,现有的实验结果已在相当高的精度下检验了电荷的量子化。不过,常见的宏观带电体所带的电荷量远大于电子的电荷量,在一般灵敏度的电学测试仪器中,电荷的量子性是显示不出来的。因此在分析带电情况时,可以认为电荷是连续变化的。

迄今所知,电子是自然界中存在的最小负电荷,质子是最小的正电荷。它们的带电量都是**基本电荷** $e$ 。

$$e = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{C}$$

1964年,盖耳曼(M. Gell-Mann)等人提出夸克模型,即一些粒子是由被称为夸克和反夸克的更小的粒子组成,每一个夸克带有 $\pm 2e/3$ 或 $\pm e/3$ 电量。在这一模型中,夸克是受到“禁闭”的。迄今为止,尚未在实验中找到自由状态的夸克。现在,分数电荷仍是一个悬而未决的命题。不过好在分数电荷存在,仍然不会改变电荷量子化的结论,只不过新的基本电荷量是原来的 $1/3$ 而已。

### 9.1.2 电荷守恒定律

在正常情况下,物质是由呈电中性的原子组成的,其整体也呈电中性。要使物体带电,可利用摩擦起电、接触起电、静电感应等方法。摩擦起电和其他起电过程的大量实验事实表明,任何使物体起电的过程或带电体被中和的过程,都是电荷从一个物体转移到另一个物体,或从物体的一部分转移到另一部分。在这种过程中,电荷既不能消灭,也不能产生,只能使原有的电荷重新分布。由此就可以总结出**电荷守恒定律**(law of conservation of charge):**一个孤立系统的总电荷(即系统中所有正、负电荷之代数和)在任何物理过程中始终保持不变**。所谓孤立系统,就是指它与外界没有电荷的交换。

在微观过程中,近代科学研究表明电荷守恒定律仍然成立。例如高能光子( $\gamma$ 射线)和一个重原子相碰时,该光子会转化为一对正负电子(电子对产生);反之,当一对正负电子在一定条件下相遇时,又会同时消失而产生两个或三个光子(电子对的湮灭)。光子不带电,正负电子所带的电等量异号,故在此微观过程中尽管粒子产生或湮灭,但过程前后电荷的代数

和仍没有变。

电荷守恒定律就像能量守恒定律、动量守恒定律和角动量守恒定律那样,也是自然界中一条基本的守恒定律,在宏观和微观领域中普遍适用,是物理学中普遍的基本定律之一。

### 9.1.3 库仑定律

1785年,法国物理学家库仑通过扭秤实验,总结出真空中两个静止的点电荷间相互作用的基本规律,称为真空中的库仑定律,简称**库仑定律(Coulomb law)**。**点电荷**是一种理想模型,是指当带电体的形状和大小与它们之间的距离相比能够忽略时,可以将带电体看作是电荷量集中于一个几何点上,因此点电荷是对实际带电体的一种简化和抽象,是一个理想化模型。同力学中的质点模型一样,点电荷可以使电学中问题的研究大为简化。一个带电体能否看成一个点电荷,必须根据具体情况来决定。虽然有时不能把一个带电体看成一个点电荷,但是可以把它看为许多点电荷的集合体,从而能够由点电荷遵从的规律出发,得出我们所寻找的结论。



动画: 库仑定律



库仑定律可表述为: **在真空中,两个静止的点电荷之间的相互作用力的方向沿着它们的连线,同号相斥,异号相吸;作用力的大小与电荷量的乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比。**

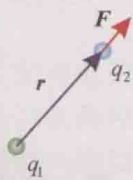


图 9-2 库仑定律

如图 9-2 所示,两个点电荷  $q_1$  和  $q_2$ ,若以  $\mathbf{r}$  表示  $q_2$  的位矢,其大小为  $|\mathbf{r}|=r$ ,方向从  $q_1$  指向  $q_2$ ,则电荷  $q_2$  受到  $q_1$  的作用力  $\mathbf{F}$  为

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \left( \frac{\mathbf{r}}{r} \right) = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (9-1)$$

式中,  $\mathbf{e}_r = \mathbf{r}/r$  是沿  $\mathbf{r}$  方向的单位矢量,它标志着位矢的方向,  $k$  是比例系数,在国际单位制中,  $k = 8.9875 \times 10^9 (\text{N} \cdot \text{m}^2)/\text{C}^2$ ,计算时,我们通常取近似值  $k \approx 9 \times 10^9 (\text{N} \cdot \text{m}^2)/\text{C}^2$ 。

在电磁学中,我们引入一个新的常量  $\epsilon_0$  来取代  $k$ 。

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.8542 \times 10^{-12} \text{C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$$

常量  $\epsilon_0$  称为真空电容率或真空介电常数。这样,真空中库仑定律便可完整地表示成如下的常用形式

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (9-2)$$

当两个点电荷  $q_1, q_2$  是同种电荷时,乘积  $q_1 q_2 > 0$ ,  $\mathbf{F}$  的方向沿  $\mathbf{e}_r$  的方向,表示库仑力为

斥力；当两个点电荷  $q_1, q_2$  是异种电荷时,  $q_1 q_2 < 0$ ,  $\mathbf{F}$  的方向沿  $\mathbf{e}_r$  的反方向, 表示库仑力为引力。

需要说明的是, 虽然引入常量  $\epsilon_0$  后库仑定律的形式变得复杂了, 但是以后我们将会看到, 用此推导出的重要电磁学公式中, 却不会出现  $4\pi$  因子, 从而使公式变得简洁。

两个点电荷  $q_1$  与  $q_2$  之间的库仑力是一对作用力与反作用力, 如果电荷  $q_2$  受到  $q_1$  的作用力是  $\mathbf{F}$ , 则电荷  $q_1$  受到  $q_2$  的作用力是  $-\mathbf{F}$ 。

库仑定律是从实验总结出来的规律, 是静电场理论的基础。

### [例题 9-1]

在氢原子的玻尔模型中, 电子在静电力的作用下以一定的半径绕质子转动。设电子圆周运动轨道半径为  $r = 5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ 。试比较它们之间的静电力和万有引力的大小。

**解** 电子和质子的电荷量和质量分别为  $q_e = -e, m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ;  $q_p = e, m_p = 1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。由库仑定律和万有引力定律可得氢原子中的电子和质子间的静电力和万有引力的大小分别为

$$F_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{9.0 \times 10^9 \times (1.60 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ (N)}$$

$$F_g = \frac{Gm_e m_p}{r^2} = \frac{6.7 \times 10^{-11} \times 9.1 \times 10^{-31} \times 1.7 \times 10^{-27}}{(5.3 \times 10^{-11})^2} = 3.7 \times 10^{-47} \text{ (N)}$$

它们大小的比值为

$$\frac{F_c}{F_g} = 2.2 \times 10^{39}$$

由此可知, 在原子内部静电力比万有引力大得多, 它们相差 39 个数量级! 因此在考虑原子内部的相互作用时, 万有引力完全可以忽略不计。

## 9.1.4 静电力叠加原理

静电力是矢量, 满足矢量运算法则。当真空中有两个以上的点电荷时, 作用在某一点电荷上的总静电力, 等于其他各点电荷单独存在时对该点电荷所施加的静电力的矢量和。这是**静电力叠加原理**。

如图 9-3 所示, 设  $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{F}_3, \dots, \mathbf{F}_n$  分别为点电荷  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$  单独存在时对点电荷  $q$  作用的静电力, 则电荷  $q$  所受静电力的合力  $\mathbf{F}$  (矢量和) 为

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_i}{r_i^2} \mathbf{e}_i$$

式中,  $r_i$  为第  $i$  个点电荷  $q_i$  到受力电荷  $q$  的距离,  $\mathbf{e}_i$  为第  $i$  个点电荷  $q_i$  指向  $q$  的单位矢量。

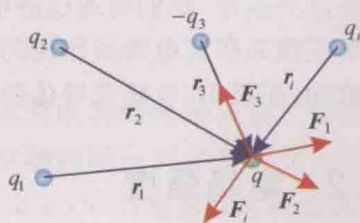


图 9-3 静电力的叠加原理



## 9.2 电场和电场强度

### 9.2.1 电场

库仑定律只给出了两个点电荷之间相互作用的定量关系,并未指明这种作用是通过怎样的方式进行的。日常生活中的许多实际例子告诉我们,相互作用必须借助于物质来传递,并且相互作用的传递需要一定的时间,也就是说作用是以一定的速度传递的。两个带电体在真空中并未直接接触,那么它们之间的相互作用是如何实现的呢?对于这个问题历史上曾有长期的争论。一种观点认为,这类力不需要任何媒介,也不需要时间,就能由一个物体立刻作用到另一个相隔一定距离的物体上去,这种观点叫做“超距作用”。另一种观点认为这类力也是通过它们中间的媒介物质传递过去的,只是这种媒介我们看不见,这种媒介物质是充满空间的一种弹性物质,称为“以太”,这种观点叫做“近距作用”。直到20世纪,人们才从电、磁现象的实践和电磁波的发现中逐渐形成另一种观点:库仑力不是超距作用,电相互作用是通过场以有限速度传播的。充满空间的弹性物质“以太”也不存在。也就是说,任何带电体的周围空间内都存在一种特殊物质,这种特殊物质叫做由该带电体所激发的**电场(electric field)**,当另一个带电体处于该带电体所激发的电场之中时,它就要受到所在处的电场力作用。换句话说,电荷与电荷之间是通过电场这种特殊物质而相互作用的。

例如,两个电荷 $q_1$ 、 $q_2$ 间的相互作用,可以看作是 $q_1$ 作为场源电荷在周围空间激发的电场对电荷 $q_2$ 有力的作用,也可以看作是 $q_2$ 作为场源电荷在周围空间激发的电场对电荷有力的作用。

现代科学和实践证明,场是物质存在的一种形式,它与实物一样也具有能量、动量和质量。但是场是一种特殊的物质,它与我们平常所理解的由分子、原子微粒所构成的物质,在表现的形态上是不相同的。实物和场的不同具体体现在:①实物物质具有大小确定的存在空间,场是弥散在整个空间的;②实物物质具有不可入性,但它的运动形态具有可叠加性;场本身和运动形态都具有可叠加性。

如果带电体相对于观察者所在的惯性参考系(例如地球等)是静止的,那么在这带电体周围存在的电场称为**静电场(electrostatic field)**。

静电场的对外表现:①引入电场中的带电体,都要受到电场所作用的力;②当带电体在电场中移动时,电场所作用的力要对带电体做功。这表明电场具有能量;③电场能对引入电场中的导体产生静电感应,电场也能对引入电场中的电介质产生极化现象。

在这一章中,我们将通过静电场的这些对外表现来研究电场的性质。我们由电场强度和 Gauss 定理来研究电场所作用的力,由电势能和电势的概念来讨论电场所作用的力对带电体做的功,在第10章研究导体的静电感应和电介质的极化现象。

### 9.2.2 电场强度

既然可以把一个电荷引到空间某点,用观察它是否受到电场力的作用来判断该点是否