普通高等教育“十一五”规划教材
普通高等院校物理精品教材

大学物理学(下册)

饶瑞昌　主编



华中科技大学出版社
http://www.hustp.com

需要全本请访问 www.ertongbook.com

普通高等教育“十二五”规划教材
普通高等院校物理精品课程教材

大学物理学
下册
（第二版）

饶瑞昌　主编

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 提 要

本书是依据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会最近颁布的《非物理类理工科大学物理课程基本要求(2008)》,在总结编者长期教学实践经验的基础上编写而成的。全书分为上、下两册共16章。上册讲述力学、波动学和热学,内容包括:质点运动的基本规律、守恒定律、刚体的定轴转动、机械振动、机械波、波动光学、气体动理论、热力学基础。下册讲述电磁学和近代物理学,内容包括:真空中的静电场、静电场中的导体和电介质、稳恒磁场、变化的磁场和电场、狭义相对论、早期量子论、量子力学初步、现代科学与高新技术物理基础专题。为配合本书的学习,还专门出版了《大学物理学辅导与题解》。

本书可作为普通高等学校理工科非物理专业的大学物理课程教材,也可作为成人教育大学物理课程的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学·下册(第二版)/饶瑞昌 主编.—武汉:华中科技大学出版社,2011.1
ISBN 978-7-5609-5134-8

Ⅰ.大… Ⅱ.饶… Ⅲ.物理学-高等学校-教材 Ⅳ.O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第015171号

大学物理学·下册(第二版) 饶瑞昌 主编

策划编辑:徐正达
责任编辑:刘 勤
封面设计:潘 群
责任校对:朱 玢
责任监印:熊庆玉
出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)
武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437
录 排:武汉佳年华科技有限公司
印 刷:湖北恒泰印务有限公司
开 本:710mm×1000mm 1/16
印 张:18
字 数:372千字
版 次:2011年1月第2版第3次印刷
定 价:30.00元

华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

第二版前言

大学物理学自2008年出版以来，受到许多教师和学生的关心，他们通过不同的方式提出了不少宝贵意见和有益建议，在华中科技大学出版社的大力支持下，本书第二版得以和读者见面。

本书第二版在保留第一版的特色和风格的基础上进行了如下修改。

(1) 对全书的文字进行了进一步的加工，使本书表述更清晰、更简洁、更有利于教与学。

(2) 对各章的习题重新进行了精选，以进一步保证习题的科学性和实用性。

(3) 为适应不同学时、不同专业对大学物理课程的要求，本书对所包括的力学(第1～3章)，波动学(第4～6章)，热学(第7、8章)，电磁学(第9～12章)，近代物理学(第13～16章)这五篇教学内容在章节的安排上充分考虑了各篇的相对独立性，因此，本书可满足不同学时、不同专业的教学需要。

(4) 为了配合本书的学习，还专门编写了《大学物理学辅导与题解》，以帮助学生更好地掌握所学内容。

参加本书修订工作的有：主编饶瑞昌，副主编吕波，参编潘琳、徐小华、饶黄云、李群、邓玲娜、何娟美、王爱星、周琦、方诚、尧莉、彭凤梅、刘红兵、陈宏伟、李迎等。

由于编者水平有限，第二版中也难免有疏漏和错误，敬请读者不吝赐教。

编　者

2010年12月

第一版前言

科学技术的飞速发展对人才的培养提出了更高、更新的要求。为了满足这一要求，更好地培养跨世纪高等工程技术人才，我们编写了这套适用于理工科非物理专业的大学物理教材。本书的特点如下。

(1) 以教育部颁布的《非物理类理工科大学物理课程基本要求(2008)》A 类核心内容构造本书的体系，以确保 A 类的核心内容，根据需要择要介绍 B 类的扩展内容(其章节用 * 标注)。在保证教材具有科学性、系统性和完整性等鲜明特征的同时，本书着重于基本知识、基本概念、基本原理和基本定律的系统阐述，从而有助于学生对物理世界形成完整的、统一的认识。

(2) 根据当前大学物理教材内容与结构的发展趋势，在内容安排上借鉴了国内外许多教材的长处，在结构体系上有所创新。例如，将机械振动、机械波和波动光学归入一篇，安排在力学之后，以强调波动这一运动形式的普遍性，同时也有利于全部教学内容的调整及教学时数的合理安排；又如，将力学篇和电磁学篇分别安排于上、下册，除了便于分为两个学期施教之外，更重要的是分散了难点，可减少学生在学习时的“负重感”。

(3) 为解决大学物理的初学者普遍感到解题困难的问题，我们对书中的例题、习题进行了精选，尽量选编有代表性、应用性的，难度适中的例题和习题。所用例题均是在进行详细分析的基础上进行求解，部分例题采用多种解法，以培养学生灵活应用知识、解决问题的能力。

(4) 注重教学内容的深入浅出和符合教学规律，做到既尽量避免与中学物理的重复，又不跨入后继课程的范围。在论述上力求简明扼要、通俗易懂，强调物理思想和方法，突出科学素质和能力。

本书由饶瑞昌任主编，吕波、李群、游泳、王爱星任副主编。参加本书编写工作的还有潘琳、徐小华、饶黄云、邓玲娜、何娟美、尧莉、彭凤梅、刘红兵、陈宏伟等。

本书系东华理工大学重点资助教材，在本书的编写过程中得到了东华理工大学教务处及物理系许多同仁的大力支持和帮助，符五久教授仔细审阅了此书并提出了许多宝贵意见，华中科技大学出版社的有关人员在本书的编辑出版过程中付出了大量的辛勤劳动，在此一并致谢。

由于编者水平所限，书中的缺点和错误在所难免，恳切希望读者批评指正，以期进一步改进。

编　者

2008 年 11 月

目　录

第4篇　电　磁　学

第9章　真空中的静电场 …… (2)

9.1　电荷及其相互作用 …… (2)

9.1.1　电荷是量子化的 …… (2)

9.1.2　电荷守恒定律 …… (2)

9.1.3　库仑定律 …… (3)

9.1.4　静电力叠加原理 …… (4)

9.2　电场与电场强度 …… (5)

9.2.1　电场 …… (5)

9.2.2　电场强度 …… (6)

9.2.3　电场叠加原理 …… (6)

9.2.4　电场强度的计算 …… (7)

9.3　电场线与电通量 …… (15)

9.3.1　电场线 …… (15)

9.3.2　电通量 …… (16)

9.4　静电场的高斯定理与安培环路定理 …… (19)

9.4.1　静电场的高斯定理 …… (19)

9.4.2　应用高斯定理求电场强度 …… (21)

9.4.3　静电场的安培环路定理 …… (26)

9.5　电势与电势差 …… (27)

9.5.1　电势能 …… (27)

9.5.2　电势 …… (29)

9.5.3　电势差 …… (29)

9.5.4　电势的计算 …… (30)

9.6　电场强度与电势的关系 …… (33)

9.6.1　等势面 …… (33)

9.6.2　电场强度与电势的微分关系 …… (34)

习题 …… (37)

第10章　静电场中的导体和电介质 …… (42)

10.1　静电场中的导体 …… (42)

10.1.1 导体的静电平衡条件 …… (42)
10.1.2 导体处于静电平衡时的性质 …… (43)
10.1.3 静电屏蔽 …… (45)
10.1.4 有导体存在时静电场的电场强度和电势的计算 …… (45)
10.2 电容与电容器 …… (49)
10.2.1 孤立导体的电容 …… (49)
10.2.2 电容器及其电容 …… (49)
10.2.3 电容器的连接方式 …… (51)
10.3 静电场中的电介质 …… (53)
10.3.1 电介质对电场的影响 …… (53)
10.3.2 电介质的极化 …… (54)
10.3.3 充满均匀电介质的电场 …… (55)
10.4 有电介质时的高斯定理与安培环路定理 …… (56)
10.4.1 有电介质时的高斯定理 …… (56)
10.4.2 有电介质时的安培环路定理 …… (58)
10.5 电场的能量 …… (59)
10.5.1 电容器储存的能量 …… (59)
10.5.2 电场的能量 …… (59)
习题 …… (61)
第 11 章 稳恒磁场 …… (65)
11.1 稳恒电流与稳恒电场 …… (65)
11.1.1 电流和电流密度 …… (65)
11.1.2 电流的连续性方程 …… (66)
11.1.3 稳恒电流和稳恒电场 …… (67)
*11.1.4 欧姆定律的微分形式 …… (68)
11.1.5 电动势 …… (69)
11.2 磁场与磁感应强度 …… (70)
11.2.1 磁场 …… (70)
11.2.2 磁感应强度 …… (70)
11.3 毕奥-萨伐尔定律及应用 …… (71)
11.3.1 毕奥-萨伐尔定律 …… (71)
11.3.2 磁场叠加原理 …… (72)
11.3.3 毕奥-萨伐尔定律的应用 …… (72)
11.3.4 运动电荷的磁场 …… (77)
11.4 磁感应线与磁通量 …… (78)

11.4.1　磁感应线 …… (78)
11.4.2　磁通量 …… (79)
11.5　磁场的高斯定理与安培环路定理 …… (80)
11.5.1　磁场的高斯定理 …… (80)
11.5.2　磁场的安培环路定理 …… (80)
11.5.3　应用安培环路定理求磁感应强度 …… (82)
11.6　磁场对电流的作用 …… (86)
11.6.1　安培定律 …… (86)
11.6.2　两平行无限长载流直导线间的相互作用力 …… (88)
11.6.3　磁场对载流线圈的作用 …… (89)
11.6.4　磁场力的功 …… (91)
11.7　磁场对运动电荷的作用 …… (92)
11.7.1　洛伦兹力 …… (92)
11.7.2　带电粒子在均匀磁场中的运动 …… (93)
11.7.3　霍尔效应 …… (95)
11.8　磁场中的磁介质 …… (96)
11.8.1　磁介质及其磁化 …… (96)
11.8.2　有磁介质时的高斯定理 …… (98)
11.8.3　有磁介质时的安培环路定理 …… (98)
*11.8.4　铁磁质 …… (100)
习题 …… (102)
第 12 章　变化的磁场和电场 …… (110)
12.1　电磁感应的基本定律 …… (110)
12.1.1　法拉第电磁感应定律 …… (110)
12.1.2　楞次定律 …… (113)
12.2　动生电动势 …… (113)
12.2.1　动生电动势的非静电力 …… (113)
12.2.2　动生电动势的计算 …… (114)
12.3　感生电场假设 …… (116)
12.3.1　感生电动势的非静电力 …… (116)
12.3.2　感生电场的高斯定理与安培环路定理 …… (117)
12.3.3　感生电动势的计算 …… (118)
12.3.4　涡电流 …… (121)
12.3.5　导体在变化磁场里运动时的感应电动势 …… (121)
12.4　自感与互感 …… (123)

12.4.1 自感 …… (123)
12.4.2 互感 …… (125)
12.5 磁场的能量 …… (127)
12.5.1 自感储存的能量 …… (127)
12.5.2 磁场的能量 …… (128)
12.6 位移电流假设 …… (129)
12.6.1 位移电流 …… (129)
12.6.2 感生磁场的高斯定理与安培环路定理 …… (131)
12.7 麦克斯韦方程组 …… (133)
12.7.1 电场的性质 …… (133)
12.7.2 磁场的性质 …… (134)
12.7.3 麦克斯韦方程组积分形式 …… (135)
12.8 电磁波 …… (136)
12.8.1 电磁波的产生和传播 …… (136)
12.8.2 电磁波的性质 …… (137)
12.8.3 电磁波的能量 …… (138)
12.8.4 电磁波谱 …… (138)
习题 …… (139)

第 5 篇 近代物理学

第 13 章 狭义相对论 …… (146)
13.1 经典力学的伽利略变换与时空观 …… (146)
13.1.1 经典力学的伽利略变换 …… (146)
13.1.2 经典力学的时空观 …… (147)
13.1.3 经典力学的相对性原理 …… (147)
13.2 狭义相对论的基本原理 …… (149)
13.3 洛伦兹变换 …… (150)
13.3.1 洛伦兹坐标变换 …… (150)
13.3.2 洛伦兹速度变换 …… (152)
13.4 狭义相对论的时空观 …… (154)
13.4.1 长度缩短 …… (154)
13.4.2 时间延缓 …… (155)
13.4.3 同时的相对性 …… (156)
13.4.4 同时性与因果律 …… (157)
13.5 狭义相对论动力学基础 …… (157)

13.5.1　质量和速度的关系 …… (158)
13.5.2　动力学基本方程 …… (159)
13.5.3　质量和能量的关系 …… (159)
13.5.4　能量和动量的关系 …… (161)
习题 …… (161)
第 14 章　早期量子论 …… (164)
14.1　黑体辐射与普朗克量子假设 …… (164)
14.1.1　热辐射及其描述 …… (164)
14.1.2　黑体辐射规律 …… (164)
14.1.3　普朗克量子假设 …… (166)
14.2　光电效应与爱因斯坦光子假设 …… (168)
14.2.1　光电效应的实验规律 …… (168)
14.2.2　爱因斯坦光子假设 …… (170)
14.3　康普顿效应 …… (171)
14.3.1　康普顿效应 …… (171)
14.3.2　光的波粒二象性 …… (175)
14.4　氢原子光谱与玻尔理论 …… (177)
14.4.1　氢原子光谱规律 …… (177)
14.4.2　原子的核型结构 …… (178)
14.4.3　玻尔的氢原子理论 …… (179)
14.4.4　玻尔理论的成就与局限性 …… (182)
习题 …… (182)
第 15 章　量子力学初步 …… (185)
15.1　微观粒子的波粒二象性 …… (185)
15.1.1　德布罗意假设 …… (185)
15.1.2　德布罗意假设的实验验证 …… (186)
15.2　测不准关系 …… (189)
15.3　波函数及其统计解释 …… (191)
15.3.1　波函数 …… (191)
15.3.2　波函数的统计解释 …… (192)
*15.4　态叠加原理 …… (193)
*15.5　算符与平均值 …… (195)
15.5.1　力学量算符 …… (195)
15.5.2　本征值方程 …… (196)
15.5.3　平均值 …… (196)

15.6 薛定谔方程 …… (197)
15.6.1 薛定谔方程 …… (197)
15.6.2 定态薛定谔方程 …… (197)
15.7 薛定谔方程的应用 …… (198)
15.7.1 一维无限深方形势阱 …… (198)
15.7.2 隧道效应 …… (201)
*15.7.3 一维线性简谐振子 …… (203)
15.7.4 氢原子 …… (204)
15.8 电子的自旋 …… (206)
15.8.1 斯特恩-盖拉赫实验 …… (206)
15.8.2 电子自旋假设 …… (207)
15.8.3 四个量子数 …… (208)
*15.9 全同性原理 …… (208)
15.10 原子的壳层结构与元素周期表 …… (210)
15.10.1 泡利不相容原理 …… (210)
15.10.2 能量最小原理 …… (211)
习题 …… (212)
***第 16 章 现代科学与高新技术物理基础专题** …… (216)
16.1 原子核物理 …… (216)
16.1.1 原子核的基本性质 …… (216)
16.1.2 原子核的大小 …… (218)
16.1.3 原子核的自旋 …… (218)
16.1.4 核力 …… (219)
16.1.5 原子核的结合能 …… (219)
16.2 原子核的衰变规律 …… (220)
16.2.1 放射性元素 …… (220)
16.2.2 原子核衰变的规律 …… (221)
16.2.3 核衰变的位移定则 …… (223)
16.2.4 探测放射性现象的方法 …… (223)
16.2.5 放射性同位素的应用 …… (224)
16.2.6 获得高能粒子的方法 …… (225)
16.3 原子核能的应用 …… (226)
16.3.1 裂变反应 …… (226)
16.3.2 聚变反应 …… (227)
16.4 粒子物理 …… (228)

16.4.1　粒子的分类 …… (229)
16.4.2　粒子的相互作用 …… (230)
16.4.3　粒子的一些特性和规律 …… (232)
16.4.4　强子的夸克模型 …… (233)
16.5　激光 …… (234)
16.5.1　自发辐射和受激辐射 …… (234)
16.5.2　激光器 …… (235)
16.5.3　激光产生的原理 …… (236)
16.5.4　氦-氖激光器 …… (239)
16.5.5　激光的特性和应用 …… (240)
16.6　固体的能带结构 …… (240)
16.6.1　电子共有化 …… (241)
16.6.2　能带的形成 …… (241)
16.6.3　导体、半导体和绝缘体 …… (242)
16.6.4　半导体的导电机制 …… (243)
16.6.5　半导体的特性及其应用 …… (244)
16.7　纳米技术 …… (247)
16.7.1　纳米技术的基本概念 …… (247)
16.7.2　扫描隧道电子显微镜与纳米技术 …… (247)
16.7.3　纳米态物质的奇异特性及应用 …… (248)
16.8　超导电性 …… (250)
16.8.1　超导体的发现与发展 …… (250)
16.8.2　超导体的基本性质 …… (251)
16.8.3　超导电性理论简介 …… (252)
16.8.4　超导的应用前景 …… (253)
习题 …… (254)
习题参考答案 …… (256)
参考文献 …… (262)
附录 A　历年诺贝尔物理学奖获得者 …… (263)
附录 B　常用基本物理常量 …… (273)
附录 C　本书中常用物理量的符号和单位 …… (274)

麦克斯韦，英国物理学家、数学家，经典电磁理论的奠基人。他提出了感生电场和位移电流概念，建立了经典电磁理论，并预言了以光速传播的电磁波的存在。他的《电磁学通论》与牛顿的《自然哲学的数学原理》在科学史上并驾齐驱，是人类探索电磁规律的一个里程碑。



（1831—1879）

第4篇　电　磁　学

电磁运动是物质的又一种基本的运动形式，电磁相互作用是自然界已知的四种基本相互作用之一。电磁学研究的是物质电磁运动、电磁相互作用规律及其应用。其理论不仅普遍应用在日常生活、科技和生产的各个方面，而且成为新科学、新技术发展的理论基础。

在相当长的历史时期内，电和磁被看做是两种完全不同的现象加以研究，直到1862年发现电流有磁效应，变化的磁场有电效应，才将人类关于电磁之间联系的认识推广到一个新的阶段。1865年，英国物理学家麦克斯韦在总结了大量实验研究成果的基础上提出感生电场和位移电流假设，建立了完整的电磁场理论基础——麦克斯韦方程组。这个理论的重要意义在于它不仅支配一切宏观电磁现象，促使了工程技术和现代文明的飞速发展，而且在于它将光现象统一在这个理论框架内，深刻地影响着人们认识物质世界的思想。

电磁学内容大体可划分为“场”和“路”，大学物理学侧重于对场的研究，而强电电路、电子线路等有关“路”的部分留待后续课程去研究。需要指出的是，“通量”和“环路”是描述矢量场性质的两个重要特征量，考虑一个矢量场的“通量”和“环路”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，从静电场到稳恒磁场，再到变化的磁场和电场，这一基本方法是一脉相承的。把握了这一点，也就理清了电磁场理论的基本框架，对于电磁场的学习将是十分有益的。

本篇先介绍电现象，然后介绍磁现象，接着介绍电现象和磁现象间的联系，最后介绍统一的电磁场和电磁波。

第 9 章　真空中的静电场

任何电荷周围都存在电场，相对于观察者为静止的电荷在其周围空间所激发的电场称为静电场。静电场规律虽然简单，但却是复杂场的基础。

本章讨论真空中静电场的基本性质与规律。

9.1　电荷及其相互作用

9.1.1　电荷是量子化的

两种不同材料的物体，如丝绸与玻璃棒，相互摩擦后都能吸引小纸片等轻微物体，这时就说丝绸和玻璃棒带了电，或有了电荷。处于带电状态的丝绸和玻璃棒称为带电体。带电体所带电荷的多少称为电荷量，简称电量，电量常用 Q 或 q 表示。在国际单位制中，电量的单位为 C(库仑)。

实验证明，物体所带的电荷只有两种，正电荷和负电荷。电荷之间有相互作用，带同种电荷(或称为同号电荷)的物体相互排斥，带异种电荷(或称为异号电荷)的物体相互吸引。静电荷之间的相互作用力称为静电力(或称为库仑力)。

根据原子结构理论，在每个原子内，电子绕由中子和质子组成的原子核运动。原子中的电子带负电，质子带正电，中子不带电。而且，质子与电子所具有的电量的绝对值是相等的。在正常情况下，每个原子中的电子数与质子数相等，故物体呈电中性，通常就说该物体不带电。如果在一定的外因作用下，物体得到或失去一定量的电子，物体就带电了，失去电子的物体带正电，获得电子的物体带负电。

1913 年，密立根通过著名的油滴实验，测定所有电子都具有相同的电量，以符号 e 表示，其值为

$$e=1.60217733\times10^{-19}\ \mathrm{C}$$

在计算中，可取 $e=1.60\times10^{-19}$ C。

精确的实验表明，自然界中任何带电体所带电量只能是电子电量的整数倍，而不能连续变化，即

$$Q=ne\quad(n=1,2,3,\cdots)\tag{9-1}$$

式中：e 为电荷的量子；n 为量子数。电荷的这一特性称为电荷的量子化。

在近代物理学中，量子化是一个重要的基本概念，在微观领域里将看到能量、角动量等也是量子化的。

9.1.2　电荷守恒定律

大量实验事实表明，**在一个与外界没有电荷交换的孤立系统内，无论进行怎样的**

物理过程，系统的正、负电荷的代数和总保持不变。这一结论称为**电荷守恒定律**，它是自然界的基本守恒定律之一，无论是在宏观过程中，还是在微观领域里，它都是成立的。例如，在宏观物体的带电过程中，随着带电粒子的迁移，物体所带电荷可以从一个物体迁移到另一个物体，但在其所构成的系统中，电荷总量既不会增加，也不会减少；在微观领域里，当高能光子穿过铅板后，可以产生正负电子偶（一个为正电子，另一个为负电子），光子并不带电，而产生的正电子 e^+ 和负电子 e^- 带有等量异号电荷，所以光子穿过铅板前后系统的电量相等且均为零。可见系统的总电量保持不变。

9.1.3　库仑定律

两个静止带电体之间的作用力，除了与带电体所带电量的多少及它们之间的距离有关外，还与带电体的形状、大小及带电体所在的电介质的性质有关。但是，在一些具体问题中，往往可以忽略带电体的大小和形状。例如，在讨论两个大小相同的带电球体 A、B 的相互作用时，如图 9-1 所示，当两带电球本身的直径 d 与它们间的距离 r 相比可以忽略，即当 $r \gg d$ 时，就可忽略它们的形状和大小，把带电体所带的电量看成是集中在一点上，从而把带电体看成一个点电荷。显然，点电荷和质点、刚体一样是一种理想模型。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。

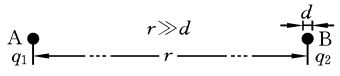


图 9-1

1785 年，库仑通过扭秤实验总结出一条规律：**在真空中两个静止点电荷 q_1 和 q_2 之间的相互作用力的大小与其电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比，与它们之间的距离 r 的二次方成反比；作用力的方向沿着它们的连线，同号电荷相互排斥，异号电荷相互吸引**。这一结论称为**库仑定律**，其数学表达式为

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

式中：k 为比例系数，称为库仑定律常量。在国际单位制中，其值为

$$k = 8.99\times10^9\ \mathrm{N\cdot m^2/C^2} \approx 9.0\times10^9\ \mathrm{N\cdot m^2/C^2}$$

为使以后导出的电学公式简化，在国际单位制中将 k 写成

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

式中：ε_0 称为真空电容率，

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85\times10^{-12}\ \mathrm{C^2/(N\cdot m^2)} = 8.85\times10^{-12}\ \mathrm{F/m}$$

在国际单位制中，电容单位为 F（法拉），1 F = 1 $\mathrm{C^2/(N\cdot m)}$。

于是真空中的库仑定律可以写为

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2} \tag{9-2}$$

库仑定律对两个静止的点电荷间静电力的大小和方向都作了确切的描述，然而

式(9-2)只反映静电力的大小所服从的规律,并未涉及静电力的方向,若要同时反映静电力的大小和方向,可以用矢量式表示为

$$\boldsymbol{F}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r^2}\boldsymbol{r}_0 \tag{9-3}$$

式中:$\boldsymbol{F}$ 为 q_1 作用于 q_2 的力;$\boldsymbol{r}_0$ 为从 q_1 指向 q_2 方向上的单位矢量。当 q_1、q_2 同号时,$q_1q_2>0$,$\boldsymbol{F}$ 与 $\boldsymbol{r}_0$ 同向,如图 9-2(a)所示,这表示 $\boldsymbol{F}$ 是斥力;当 q_1、q_2 异号时,$q_1q_2<0$,$\boldsymbol{F}$ 与 $\boldsymbol{r}_0$ 反向,如图 9-2(b)所示,这表示 $\boldsymbol{F}$ 是引力。

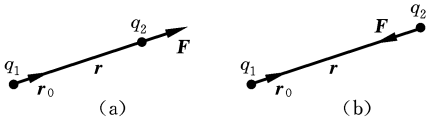


图 9-2

必须指出,库仑定律只适用于真空中两个静止点电荷之间的静电力,在计算一般带电体之间的静电力时不能直接应用。

例 9-1 在氢原子中,电子与质子的距离约为 5.3×10^{-11} m,求此两粒子间的静电力和万有引力。

解 由于电子的电量是 $-e$,质子的电量是 $+e$,而电子的质量 $m_e=9.11\times10^{-31}$ kg,质子的质量 $m_p=1.67\times10^{-27}$ kg,所以由库仑定律求得两粒子间的静电力大小为

$$F_e=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2}=\frac{9.0\times10^9\times(1.6\times10^{-19})^2}{(5.3\times10^{-11})^2}\ \text{N}=8.2\times10^{-8}\ \text{N}$$

由万有引力定律求得两粒子间的万有引力大小为

$$F_g=G_0\frac{m_em_p}{r^2}=\frac{6.67\times10^{-11}\times9.11\times10^{-31}\times1.67\times10^{-27}}{(5.3\times10^{-11})^2}\ \text{N}=3.6\times10^{-47}\ \text{N}$$

由计算结果可以看出,氢原子中电子与质子间的静电力远比万有引力大,前者约为后者的 10^{39} 倍。所以在原子中电子与质子间的万有引力完全可以忽略不计,作用在电子上的力主要为静电力。

9.1.4 静电力叠加原理

实验表明,**若干个点电荷对一个点电荷的作用力等于各个点电荷单独存在时对该点电荷的作用力的矢量和。**这一结论称为**静电力叠加原理。**如果用 $\boldsymbol{F}_1,\boldsymbol{F}_2,\cdots,\boldsymbol{F}_n$ 分别代表 $q_1,q_2,\cdots,q_n$ 单独存在时对 q_0 的作用力,那么,各个点电荷作用在 q_0 上的静电力的合力则为

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{F}_1+\boldsymbol{F}_2+\cdots+\boldsymbol{F}_n=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{F}_i \tag{9-4}$$

库仑定律和静电力叠加原理是关于静电荷之间相互作用的两个基本实验规律,它们一起构成了静电理论的基础。

例 9-2 如图 9-3 所示,q_1、q_2、q_3 为处于真空中的三个点电荷,$q_1=-2.0\times10^{-8}$ C,$q_2=+4.0\times10^{-8}$ C,$q_3=-3.0\times10^{-8}$ C,$r_{12}=0.15$ m,$r_{13}=0.10$ m,$\theta=30°$,求作用于 q_1 上的力 $\boldsymbol{F}_1$。

解 选择坐标系如图 9-3 所示,q_3 对 q_1 的作用力 $\boldsymbol{F}_{13}$ 为斥力,q_2 对 q_1 的作用力

$\boldsymbol{F}_{12}$ 为引力，由库仑定律可得

$$F_{12}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r_{12}^2}=9.0\times10^9\times\frac{2.0\times10^{-8}\times4.0\times10^{-8}}{(0.15)^2}\ \text{N}$$
$$=3.2\times10^{-4}\ \text{N}$$

$$F_{13}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_3}{r_{13}^2}=9.0\times10^9\times\frac{2.0\times10^{-8}\times3.0\times10^{-8}}{(0.10)^2}\ \text{N}$$
$$=5.4\times10^{-4}\ \text{N}$$

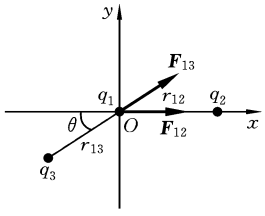


图 9-3

作用在 q_1 上的合力 $\boldsymbol{F}_1$ 在 x 轴、y 轴上的分量分别为

$$F_{1x}=F_{12}+F_{13}\cos\theta=(3.2\times10^{-4}+5.4\times10^{-4}\cos30°)\ \text{N}=7.88\times10^{-4}\ \text{N}$$
$$F_{1y}=F_{13}\sin\theta=(5.4\times10^{-4}\sin30°)\ \text{N}=2.7\times10^{-4}\ \text{N}$$

所以 $\boldsymbol{F}_1$ 的大小为

$$F_1=\sqrt{F_{1x}^2+F_{1y}^2}=8.34\times10^{-4}\ \text{N}$$

$\boldsymbol{F}_1$ 与 x 轴的夹角为

$$\theta=\arctan\frac{F_{1y}}{F_{1x}}=\arctan\frac{2.7\times10^{-4}}{7.88\times10^{-4}}=18.9°$$

9.2　电场与电场强度

9.2.1　电场

库仑定律定量地确定了点电荷之间的相互作用力。但是，电荷之间的相互作用力是通过什么途径得以实现的呢？对这一问题，在物理学历史上，曾有过两种不同的观点。一种观点认为，电荷之间的作用是“超距”作用，即一个电荷所受到的作用力是由另一个电荷直接给予的，既不需要中间介质进行传递，也不需要时间，而是从一个电荷立即到达另一个电荷的。这种作用方式可表示为

$$\text{电荷} \rightleftharpoons \text{电荷}$$

另一种观点认为，任何电荷都会在其周围的空间激发电场，电荷与电荷之间的相互作用是通过电场对电荷的作用来实现的。例如，当电荷 q_1 位于电荷 q_2 附近时，即处于 q_2 的电场中，q_1 所受的作用力就是通过 q_2 的电场施加给它的。同理，q_2 也处于 q_1 的电场中，q_2 受到的作用力是通过 q_1 的电场施加给它的。这也就是说电荷之间的相互作用是经电场传递的。这种作用方式可表示为

$$\text{电荷} \rightleftharpoons \text{电场} \rightleftharpoons \text{电荷}$$

因此，电荷之间的作用力称为电场力。

现代科学实验证明，电场的观点是正确的，电场虽然看不见、摸不着，但它和实物一样，也具有质量、能量、动量等一切物质所具有的重要属性，不过这种物质不同于通常由分子、原子所构成的物质。例如，某一实物所占有的空间不能再被其他实物所占