



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

大学物理学 下

(第4版)

主编 赵近芳 王登龙
主审 颜晓红

Physics



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

大学物理学

(第4版)

(下)

主 编 赵近芳 王登龙
编 者 杨友田 王凤姣 谢月娥
主 审 颜晓红

北京邮电大学出版社

· 北京 ·

内容简介

本书是在“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材《大学物理学》”的基础上进行改编而成。全书仍分为上、下两册,上册包括力学基础、相对论、振动与波和热学;下册包括电磁学、波动光学和量子论。本书作为工科物理及理科非物理专业大学物理教材的改革尝试,采用了“高、宽、新、活、宜”的原则,即高视点选择经典内容,努力拓宽知识面,尽量反映新科技发展,注意各部分知识之间的活化联系,并保持教材内容难度适宜。同时,本书还配备了学习指导书、多媒体课件、电子教案、网络课件、网络学习平台等立体化教学资源。

本书可作为高等工科院校各专业的物理教材,也可作为综合大学和师范院校非物理专业的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学. 下/赵近芳,王登龙主编. —4版. —北京:北京邮电大学出版社,2014.11(2016.6重印)
ISBN 978-7-5635-4163-8

I. ①大… II. ①赵… ②王… 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(2014)第 240956 号

书 名 大学物理学(第4版)(下)
主 编 赵近芳 王登龙
责任编辑 韩 霞
出版发行 北京邮电大学出版社
社 址 北京市海淀区西土城路10号(100876)
电话传真 010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
网 址 www3.buptpress.com
电子信箱 ctrd@buptpress.com
经 销 各地新华书店
印 刷 北京泽宇印刷有限公司
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 20.5
字 数 497千字
版 次 2014年11月第4版 2016年6月第7次印刷

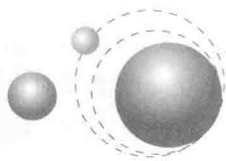


ISBN 978-7-5635-4163-8

定价: 39.00元

如有质量问题请与发行部联系
版权所有 侵权必究

第4版前言



承蒙兄弟院校的厚爱,普通高等教育“十一五”国家级规划教材《大学物理学》(第3版)得到了全国数十所高等院校的使用,使我们倍感欣慰.更令我们振奋的是,该书被评为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材.现根据使用教材院校的反馈信息,为了使教材更能满足教学改革的需求,更好地为广大师生提供优质的教材,我们在第3版的基础上对内容进行了精细化修改,使全书内容更丰富,更符合大学物理课程教学的需要.

全书仍分为《大学物理学》上、下两册和《大学物理学学习指导》.上册包括力学、相对论、振动与波、热学;下册包括电磁学、波动光学、量子物理学、新技术物理基础(专题);指导书包括学习指导和系列化习题.全书改编过程遵循“高、宽、新、活、宜”的原则,即高视点选择经典内容,努力拓宽知识面,尽量反映新科技发展概况,注意各部分知识之间的活化联系,同时保持教材内容难度适宜.

近年来高中物理知识和数学知识有所变动,例如,高等数学中的导数和积分已挪到高中学习,物理知识则在难度上有所降低.我们参考了近年来部分省(市)的高中物理教材,仔细研究了大学物理跟高中物理最佳的结合体系和内容.与第3版相比,本版的特色主要表现在以下四个方面.

1. 适当减少综合性、运算繁复的例题,选用了一些切合实际的应用题.

2. 增加思考题、选择题、填空题三类题型.习题的选择注重基本问题的理解和基本解题方法的训练,尽量避免难题和偏题,并以紧扣每部分教学内容的典型题为主,适当控制题目数量,不贪多求大.减少了计算题,适当降低了计算题难度.

3. 对教材内容难度大的部分进行了删改,重要的但有一定难度的内容作适当深入阐述.如高中物理对复杂物体的受力分析弱化,原教材刚体部分讲得不够详细,因此在本版教材中我们把刚体内容单独作为一章列出.此外,部分难度较大的物理内容已用星号“*”标记,作为选修参考.

4. 教材与课程建设紧密结合,形成了一套独具特色的立体化教学资源,主要包括学习指导书、多媒体课件、电子教案、网络课件、网络学习平台等.教材与学习指导两者既可彼此独立,又可相互配套使用.教材始终保持普通物理基础知识层次,每章均有本章提要,而且重要概念和主要公式用醒目的粗黑字体体现.一些知识点标有星号或用小字体体现,去掉后仍呈体系,可供不同非物理类的各理工科专业选用.

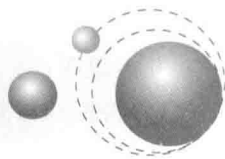
不同院校不同专业的物理教学计划时数可能存在差异,在使用本教材时可根据其具体情况对内容进行重组或取舍,教学时数可掌握在 96~128 学时范围内。

本书由王凤姣负责改编力学、振动与波及其相应章节的阅读材料和习题;杨友田改编热学、量子物理篇、新技术物理基础(专题)的所有内容;谢月娥负责电磁学篇的所有内容;王登龙改编相对论、波动光学篇的全部内容,学习指导的相关章节仍由以上老师改编,最后由赵近芳教授和王登龙教授负责全书的修改和定稿工作。在修订过程中,广西师范大学郭平生、湖南工业大学柳闻鹃、湖南科技大学周并举、南华大学彭志华、中南大学罗益民、邵阳学院曾爱华等老师参加了讨论和编写,提出了许多宝贵意见。参加讨论和编写的老师还有焦志伟、白心爱、刘道军、曲蛟、汤永新、张博洋、范军怀、马双武、苏文刚、唐咸荣、杜立、韩霞等。教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会委员、南京邮电大学颜晓红教授仔细审查了此书。北京邮电大学出版社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,在此一并表示感谢。

编写适合市场需求的教材是一种探索,由于编者水平有限,书中的疏漏和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

第3版前言



本书是为适应当前教学改革的要求,根据教育部《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的精神,在总结我们多年教材改革实践的基础上,汲取了当前国内外优秀教学改革成果而编写,是普通高等教育“十一五”国家级规划教材.教材既包括了工科大学物理课程指导委员会制定的教学基本要求的全部内容,又特别加强了近代物理知识和新科技物理基础的介绍,使全书内容更丰富、更符合工科物理教学的需要,这套教材的主要特点是:

1. 高视点选择经典内容,更新教学体系 如力学中删去了直线运动、抛体运动、碰撞等内容,加强了矢量性、能量及守恒定律等重要概念的阐述,使学生对大学物理有新鲜感.教材把相对论纳入力学篇,使牛顿力学与相对论时空观紧密相联,开拓了学生的视野.

2. 着重内容现代化 教材介绍了当前高新技术领域中的基础性物理原理,如熵与信息、全息、光纤通信、能带理论、激光、超导、纳米科学技术等,还引入了非线性物理的一些基本概念,如混沌、孤波、耗散结构、非线性光学等内容;同时大力加强了现代物理学的重要观念,如相对论时空观、微观粒子的波粒二象性、量子论以及时空对称性与守恒定律的关系等,使读者尽早接触现代高科技的发展脉搏和现代物理的前沿课题,具有鲜明的时代特色.

3. 加强培养全局掌握、运用知识的综合能力 教材力求突出主干,删除枝节,精选了例题和习题,尽量避免烦琐的叙述和冗长的数学推导,力求对物理概念、原理阐述准确、简洁、透彻,重点突出,便于学生阅读和理解.加强重要概念在各部分内容中的联系,如势能概念在力学、热学和电学中一直互相呼应,一脉相承,使学生整体把握知识的能力受到必要的训练,有利于从全局观点掌握、运用知识和综合思考.

4. 开“窗口”、重视科学素质训练 在现代物理部分大胆地“渗透”一些科技前沿信息及开一定的非线性物理“窗口”.尽管有些内容学生不一定能完全清楚,但这将有益于培养学生的求知欲望和独立思考能力,而求知欲和独立思考是科学素质和创造能力的基本要素.

说明:

(1)教材中打 * 号的章节多为开“窗口”的内容,教师可自行取舍;

(2)书中小字部分是相关章节的延伸内容,不作要求;

(3)若将打 * 号的章节和小字部分除去,仍不影响教材的整体性.

本书第 1 版于 2002 年 8 月由北京邮电大学出版社出版,为新一代物理教材.该书出版后,曾在国内 10 多所高校中使用,反映较好.

本书第 2 版于 2005 年由北京邮电大学出版社出版,教材体系与第 1 版大体相同,保持了原教材基础知识系统、扎实,内容精干,重实际训练等特色,又进一步加强了现代物理的新

观念、新思想及新技术的介绍,使全书内容更丰富、更符合工科物理教学的需要.

现根据使用学校师生的反馈意见和要求,对教材进行了再次修改.全书分《大学物理学》上、下册和《大学物理学学习指导》.上册:力学、相对论、振动与波、热物理学;下册:电磁学、波动光学、量子物理学、新技术的物理基础(专题);指导书:学习指导和系列化习题.

几点说明:

(1)将振动与波归入力学篇,同时在电磁学篇最后讲述电磁波,接着再讲述波动光学,前后连贯,更方便教学.

(2)教材中删去了部分起点较高的内容和习题,并对书中一些不规范的地方进行了修正.

(3)教材增加了阅读材料和本章小结,供学生自学时参考.

(4)修改了书中的插图,使之更准确、更形象、更美观.

本书由黎培德编写力学、振动与波、超导电性及阅读材料一、二、三、五、六;杨友田编写热学及阅读材料七、八、九;黄克立编写电磁学、激光原理及阅读材料十、十一、十二;赵近芳编写波动光学、固体的能带结构、纳米科学技术及阅读材料十三、十四、十五、十六、十七;崔洪农编写相对论、量子物理基础、原子核物理和粒子物理及阅读材料四、十八;王登龙编写玻色-爱因斯坦凝聚及阅读材料十九.学习指导的相关章节仍由以上编者分工编写,最后由赵近芳教授负责全书的修改和定稿工作.在改编过程中,参加讨论和编写的老师还有黄小益、蔡新华、曹东坡、贺江达、滕道祥、陈飞明、卢德华、唐世洪、苏卡林、周宙安、张登玉、方家元、黄祖洪、吴松安、龚志强、刘朝辉、彭解华、陈昌永、王振华、施毅敏等,他们提出了许多很中肯的建议,尤其是得到了北京航空航天大学、北京邮电大学、厦门大学、中北大学、武汉理工大学、江汉大学、湘潭大学、中南大学、长沙理工大学、南华大学、湖南大学、华南理工大学、中南林学院等学校老师的帮助和指导,教育部物理教学指导委员会委员颜晓红教授仔细审查了此书,匡乐满教授和罗维治教授对此书提出了许多宝贵意见,北京邮电大学出版社有关人员在本书的编辑出版过程中付出了大量的劳动,在此一并致谢.

编写适合教学改革需要的教材是一种探索,加之编者水平所限,难免有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正.

编者

目 录

电磁学篇

第 9 章 静电场 /2



- 9.1 电场 电场强度 /3
- 9.2 电通量 高斯定理 /10
- 9.3 电场力的功 电势 /15
- 9.4 电场强度与电势的关系 /19
- 9.5 静电场中的导体 /22
- 9.6 静电场中的电介质 /27
- 9.7 电容 电容器 /30
- 9.8 电场的能量 /34
- 阅读材料十 压电体 /36
- 本章提要 /37
- 习题 /39

第 10 章 稳恒磁场 /43



- 10.1 磁场 磁感应强度 /44
- 10.2 安培环路定理 /54
- 10.3 磁场对载流导线的作用 /58
- 10.4 磁场对运动电荷的作用 /64
- 10.5 回旋加速器 磁聚焦 /69
- 10.6 磁介质 /71
- 阅读材料十一 等离子体及其磁约束 /80
- 本章提要 /82
- 习题 /83

第 11 章 电磁感应 /89



- 11.1 电磁感应定律 /90
- 11.2 动生电动势与感生电动势 /93
- 11.3 电子感应加速器 涡电流 /98
- 11.4 自感应与互感应 /99
- 11.5 磁场能量 /102
- 阅读材料十二 磁单极 /104

本章提要 /104

习题 /105

第 12 章 电磁场和电磁波 /109



12.1 位移电流 麦克斯韦方程组 /110

12.2 电磁波 /114

12.3 电磁场的能量与动量 /118

阅读材料十三 遥感技术 /120

本章提要 /122

习题 /123

波动光学篇

第 13 章 光的干涉 /127



13.1 光源 光的相干性 /128

13.2 杨氏双缝干涉实验 /131

13.3 光程与光程差 /134

13.4 薄膜干涉 /136

13.5 劈尖干涉 牛顿环 /138

13.6 迈克耳孙干涉仪 /143

阅读材料十四 全息照相 /146

本章提要 /149

习题 /150

第 14 章 光的衍射 /153



14.1 光的衍射 惠更斯-菲涅耳原理 /154

14.2 单缝夫琅禾费衍射 /156

14.3 衍射光栅 /160

14.4 圆孔衍射 光学仪器的分辨率 /166

14.5 X射线的衍射 /168

阅读材料十五 光纤通信 /170

本章提要 /176

习题 /177

第 15 章 光的偏振 /179



15.1 自然光和偏振光 /180

15.2 起偏和检偏 马吕斯定律 /182

15.3 反射与折射时光的偏振 /184

15.4 散射光的偏振 /186

15.5 光的双折射 /187

15.6 偏振光的干涉 人为双折射现象 /190

- *15.7 旋光现象 /192
 阅读材料十六 液晶 /193
 阅读材料十七 非线性光学简介 /198
 本章提要 /201
 习题 /202

量子论篇

第 16 章 量子物理基础 /205



- 16.1 黑体辐射 普朗克量子假设 /206
 16.2 光的量子性 /209
 16.3 玻尔的氢原子理论 /216
 16.4 粒子的波动性 /221
 16.5 测不准关系 /223
 16.6 波函数 薛定谔方程 /226
 16.7 薛定谔方程在几个一维问题中的应用 /229
 16.8 量子力学对氢原子的应用 /235
 16.9 斯特恩-盖拉赫实验 /240
 16.10 电子自旋 /242
 16.11 原子的壳层结构 /243
 阅读材料十八 量子力学的争论和非线性量子力学 /248
 本章提要 /250
 习题 /252

第 17 章 原子核物理和粒子物理简介 /255



- 17.1 原子核的基本性质 /256
 17.2 原子核的放射性衰变 /260
 17.3 粒子物理简介 /263
 阅读材料十九 黑物质与黑能量 /269
 本章提要 /270
 习题 /270

第 18 章 新技术的物理基础 /272



- 18.1 固体的能带结构 /273
 18.2 激光原理 /283
 *18.3 超导电性 /289
 *18.4 纳米科学技术简介 /298
 *18.5 玻色-爱因斯坦凝聚态 /303
 习题 /310

习题答案 /312



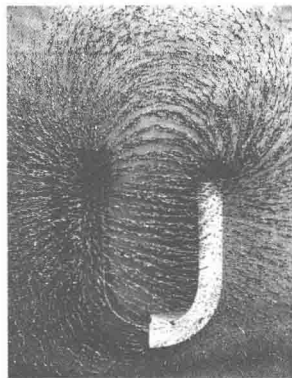
电磁场是物质世界的重要组成部分,电磁学就是研究电磁场运动规律的学科。

电磁现象形成理论,可以认为是从1785年库仑研究电荷之间的相互作用开始的,人们研究了静电、静磁和电流等现象,总结出一些实验定律。但是,电磁学的重大进展是在人们认识到电现象和磁现象之间的深刻内在联系以后才开始的。1820年,奥斯特发现了电流的磁效应;1831年法拉第发现电磁感应现象,并提出场和力线的概念。至此,电现象和磁现象作为矛盾统一的整体开始被人们认识。1864年,麦克斯韦总结前人的成果,再加上他关于涡旋电场和位移电流两个大胆的假说,建立了描述宏观电磁场的完美理论——麦克斯韦方程组,并从理论上预言了电磁波的存在。1888年,赫兹利用振荡器在实验上证实了麦克斯韦关于电磁波的预言。麦克斯韦的电磁场理论是从牛顿建立经典力学理论到爱因斯坦提出相对论的这段时期中物理学的最重要的理论成果。

1905年,爱因斯坦创立了相对论,解决了经典力学时空观与电磁现象的新的实验事实的矛盾。根据电磁现象的规律必须满足相对论时空洛伦兹变换的要求,人们发现:从不同参考系观测,同一电磁场可表现为或只是电场、或只是磁场、或电场和磁场并存。这说明电磁场是一个统一的整体,而描述电磁场的物理量——电场强度和磁感应强度——是随参考系改变的。

电磁学的知识是许多工程技术和科学研究的基础。电能是应用最广泛的能源之一,电磁波的传播实现了信息传递,研究新材料的电磁性质促进了新技术的诞生。显然,电磁学和工程技术各个领域有十分密切的联系。电磁学的研究在理论方面也很重要。物质的各种性能是由物质的电结构决定的,在分子和原子等微观领域中,电磁力起主要作用。许多物理现象,如物质的弹性、金属的导热性、光学的折射率等都可从物质的电结构中得到解释。所以,电磁学理论在现代物理学中也占有重要地位。

本篇主要研究电磁场的规律以及物质的电磁性质。先介绍电场的描述及其规律,接着介绍静电场中的导体和电介质;然后介绍磁场的描述及其规律,接着介绍磁场中的磁介质;最后介绍电场和磁场的相互联系——电磁感应和宏观电磁场的理论——麦克斯韦方程组以及电磁波。





第 9 章

静 电 场

本章主要研究静电场的基本性质及电场与导体、电介质的相互作用。

电场强度和电势是描述电场特性的两个重要物理量。电场强度的高斯定理和环流定理是反映静电场性质的基本规律。

已知场源电荷分布求解电场强度分布和电势分布是本章要解决的主要问题之一。

对于某些对称分布静电场中的电场强度除了用库仑定律求解以外,还可通过高斯定理求解,这种对称分析是现代物理学的一种基本分析方法。

在电场的作用下,导体和电介质中的电荷分布会发生变化。这种变化的电荷分布又会反过来影响电场分布,最后达到静电平衡。我们还将讨论电场与物质的相互作用规律,以及电容器和电场的能量。

本章介绍的一些概念、规律、研究和处理问题的方法贯穿在整个电磁学中,是学习电磁学的入门知识,在学习过程中应注意提高这方面的能力。

9.1 电场 电场强度

9.1.1 电荷

电荷的概念是从物体带电的现象中产生的. 两种不同材料的物体, 如丝绸与玻璃棒相互摩擦后, 它们都能吸引小纸片等轻微物体. 这时, 我们说丝绸和玻璃棒处于带电状态, 它们分别带有电荷. 可见, 电荷是物体状态的一种属性. 宏观物体或微观粒子处于带电状态就说它们带有电荷.

物体或微观粒子所带的电荷有两种, 称为正电荷和负电荷. 带同种电荷的物体(简称同号电荷)互相排斥, 带异种电荷的物体(简称异号电荷)互相吸引. 静止电荷之间的相互作用力称为静电力. 根据带电体之间相互作用力的大小能够确定物体所带电荷的多少. 表示电荷多少的量叫作电量. 在国际单位(SI)制中, 电量的单位是库仑, 符号为 C.

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, 常把电子看成一个无内部结构而具有有限质量和电量的“点”. 质子只有正电荷, 都集中在半径约为 10^{-15} m 的体积内. 中子内部也有电荷, 靠近中心是正电荷, 靠外为负电荷; 正负电荷电量相等, 所以对外不显带电.

由物质的分子结构知识可知, 在正常状态下, 物体内部的正电荷和负电荷量值相等, 物体处于中性状态. 使物体带电的过程就是使它获得或失去电子的过程. 在一孤立系统内, 无论发生怎样的物理过程, 该系统电荷的代数和保持不变, 这就是**电荷守恒定律**. 在粒子的相互作用过程中, 电荷是可以产生和消失的. 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、负电子又各带着等量异号电荷, 所以这种电荷的产生和消失并不改变系统中电荷的代数和, 电荷守恒定律仍然保持有效.

迄今为止, 所有实验表明, 任何带电体所带电量都是基本电量 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C 的整数倍. 这种电量只能取分立的、不连续的量值的性质称为**电荷的量子化**. 因为 e 如此之小, 以致使电荷的量子性在研究宏观现象的绝大多数实验中未能表现出来. 因此常把带电体当作电荷连续分布的带电体来处理, 并认为电荷的变化是连续的. 近代物理从理论上预言, 基本粒子由若干种电量为 $\pm \frac{1}{3}e$, $\pm \frac{2}{3}e$ 的夸克或反夸克组成. 然而尚未在实验中发现单独存在的夸克.

实验还证明, 一个电荷的电量与它的运动状态无关. 例如, 加速器将电子或质子加速时, 随着粒子速度的变化, 电量没有任何变化. 再如, 氢分子和氦原子都有两个电子, 它们在核外的运动状态差别不大, 电子电量应该相同. 但是, 氢分子的两个质子是作为两个原子核在保持相对距离约为 0.07 nm 的情况下转动的; 氦原子中的两个质子却紧密地束缚在一起运动. 氦原子中的两个质子的能量比氢分子的两个质子的能量大到一百万倍的数量级, 因而两者的运动状态有显著差别. 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.这就说明,质子的电量也是与其运动状态无关的.大量事实证明,电荷的电量是与其运动状态无关的.在不同的参考系观察,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**.

9.1.2 库仑定律

两个静止带电体之间的作用力(通常简称为两个静止电荷之间的作用力)即静电力,不仅与它们所带电量及它们之间的距离有关,而且还与它们的大小、形状及电荷分布情况有关.当带电体本身的线度与它们之间的距离相比足够小时,带电体可以看成**点电荷**.即带电体的形状、大小可以忽略,而把带电体所带电量集中到一个“点”上.

真空中两个静止点电荷之间相互作用力的大小与这两个点电荷所带电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比,与它们之间的距离 r 的平方成反比.作用力的方向沿着两个点电荷的连线,同号电荷相互排斥、异号电荷相互吸引.这就是**库仑定律**.它是1785年由法国物理学家库仑首先指出的.相互作用力 F 的大小可表示为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (9.1)$$

式中 k 为比例系数,其数值和单位取决于各量所采用的单位.在国际单位制中, $k = 8.988 0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2 \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$.

为了使由库仑定律推导出的一些常用公式简化,我们引入新的常数 ϵ_0 来代替 k ,两者的关系为

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2) \quad (9.2)$$

ϵ_0 称为真空中的介电常数.以 ϵ_0 代入式(9.1)得

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (9.3)$$

为了表示力的方向,可采用矢量式表示库仑定律:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (9.4)$$

式中 \mathbf{r}_0 是由施力电荷指向受力电荷的矢径方向的单位矢量.近代物理实验表明,当两个点电荷之间的距离在 $10^{-17} \sim 10^7 \text{ m}$ 范围内,库仑定律是极其准确的.

库仑定律只适用于两个点电荷之间的作用.当空间同时存在几个点电荷时,它们共同作用于某一点电荷的静电力等于其他各点电荷单独存在时作用在该点电荷上的静电力的矢量和.这就是**静电力的叠加原理**.

9.1.3 电场强度

静电力同样是物质之间的相互作用.这种特殊的物质,叫作**电场**.电荷和电荷之间是通过电场这种物质传递相互作用的,这种作用可以表示为

$$\text{电荷} \longleftrightarrow \text{电场} \longleftrightarrow \text{电荷}$$

近代物理证实这种看法是正确的.同时还证实电场和一切实物一样,也具有能量、动量和质量等重要性质,因此,电场也是一种物质.但场与其他实物不同,几个电场可以同时占有

同一空间,所以电场是一种特殊形式的物质.

相对于观察者为静止的带电体周围存在的电场称为**静电场**.静电场对外表现主要有:

(1) 处于电场中的任何带电体都受到电场所作用的力.

(2) 当带电体在电场中移动时,电场所作用的力将对带电体做功.

电场中任一点处电场的性质,可从电荷在电场中受力的特点来定量描述.用电量很小的点电荷 q_0 作为试验电荷,当试验电荷 q_0 放在电场中一给定点处时,它所受到的电场力的大小和方向是一定的;放在电场中的不同点处,其受到的电场力的大小和方向一般是不相同的.实验电荷 q_0 放在电场中一固定点处,当 q_0 的电量改变时它所受的力方向不变,但力的大小将随电量的改变而改变.然而始终保持力 \mathbf{F} 和 q_0 的比值 $\frac{\mathbf{F}}{q_0}$ 为一恒矢量.因此, $\frac{\mathbf{F}}{q_0}$ 反映了 q_0 所在点处电场的性质,称为**电场强度**,用 \mathbf{E} 表示,即

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} \quad (9.5)$$

当 q_0 为一个单位正电荷时, $\mathbf{E} = \mathbf{F}$,即电场中任一点的电场强度等于单位正电荷在该点所受的电场力.在SI制中,电场强度 \mathbf{E} 的单位是牛顿每库仑(N/C),也可以写成伏特每米(V/m).

一般情况下,电场中的不同点,其电场强度的大小和方向是各不相同的.要完整地描述整个电场,必须知道空间各点的电场强度分布,即求出矢量场函数 $\mathbf{E} = \mathbf{E}(\mathbf{r})$.

9.1.4 电场强度叠加原理

将试验电荷 q_0 放在点电荷系 q_1, q_2, \dots, q_n 所产生的电场中时, q_0 将受到各点电荷静电力的作用.由静电力的叠加原理知, q_0 受到的总静电力

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n$$

两边除以 q_0 ,得

$$\frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \dots + \frac{\mathbf{F}_n}{q_0}$$

按电场强度定义 $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0}$,有

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i \quad (9.6)$$

上式表明,电场中任一场点处的总电场强度等于各个点电荷单独存在时在该点各自产生的电场强度的矢量和.这就是**电场强度叠加原理**.任何带电体都可以看作许多点电荷的集合,由该原理可计算任意带电体产生的电场强度.

9.1.5 电场强度的计算

如果场源电荷分布状况已知,那么根据电场强度叠加原理,原则上可以求得电场分布.

1. 点电荷的电场

设真空中有一点电荷 q , P 为空间一点(称为场点), \mathbf{r} 为从 q 到 P 点的矢径.当试验电荷 q_0 放在 P 点时, q_0 所受电场力为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r^2} \mathbf{r}_0$$

式中 r_0 为矢径 r 方向的单位矢量, 则 P 点电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (9.7)$$

q 为正电荷时, \mathbf{E} 与 \mathbf{r} 同方向; q 为负电荷时, \mathbf{E} 与 \mathbf{r} 反方向. 式(9.7)表明, 点电荷的电场具有球对称性: 在以 q 为中心的每一个球面上, 各点电场强度的大小相等; 正点电荷的电场强度方向垂直球面向外, 负点电荷的电场强度方向垂直球面向里.

2. 点电荷系的电场

设真空中有点电荷系 q_1, q_2, \dots, q_n , 用 \mathbf{r}_{i0} 表示第 i 个点电荷 q_i 到任意场点 P 的矢径 \mathbf{r}_i 方向的单位矢量, \mathbf{E}_i 为 q_i 单独存在时在 P 点产生的电场强度. 则

$$\mathbf{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_{i0}$$

根据电场强度叠加原理, 可得 P 点总电场强度

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_{i0} \quad (9.8)$$

在直角坐标系中式(9.8)的分量式分别为

$$\begin{cases} E_x = \sum_{i=1}^n E_{ix} \\ E_y = \sum_{i=1}^n E_{iy} \\ E_z = \sum_{i=1}^n E_{iz} \end{cases}$$

例 9.1 两个等值异号的点电荷 $+q$ 和 $-q$ 组成的点电荷系, 当它们之间的距离 l 比起

所讨论问题中涉及的距离 r 小得多时, 这一对点电荷系称为**电偶极子**. 由负电荷 $-q$ 指向正电荷 $+q$ 的矢径 l 称为电偶极子的轴. ql 为**电偶极矩**, 简称**电矩**, 用 \mathbf{p} 表示, 即 $\mathbf{p} = ql$. 试计算电偶极子轴线延长线上的一点 A 和轴的中垂面上的一点 B 的电场强度.

解 选取如图 9.1 所示的坐标, O 为电偶极子轴的中点. 点电荷 $+q$ 和 $-q$ 在 A 点产生的电场强度大小为

$$E_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2}$$

$$E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2}$$

\mathbf{E}_+ 沿 x 轴正方向, \mathbf{E}_- 沿 x 轴负方向, 所以 A 点总电场强度大小为

$$E_A = E_+ - E_-$$

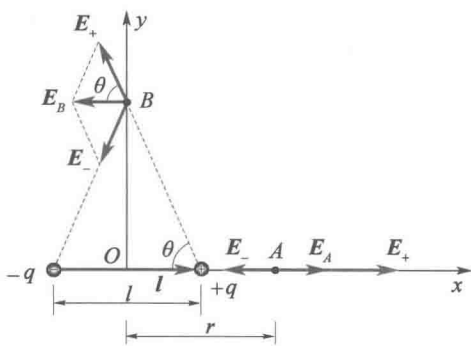


图 9.1

$$\begin{aligned}
 &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - \frac{1}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} \right] \\
 &= \frac{q \cdot 2lr}{4\pi\epsilon_0 \left[\left(r - \frac{l}{2}\right) \left(r + \frac{l}{2}\right) \right]^2}
 \end{aligned}$$

因为 $r \gg l$, 故

$$E_A \approx \frac{2ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{2p}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

E_A 沿 x 轴正方向, 与电矩 p 同方向, 所以

$$E_A \approx \frac{2p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (1)$$

类似计算可得

$$E_B = E_x = -2E_+ \cos \theta = -2 \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)} \frac{\frac{l}{2}}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}}} \approx -\frac{ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} = -\frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

E_B 沿 x 轴负方向, 与电矩 p 方向相反. 所以

$$E_B \approx -\frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (2)$$

对于 $r \gg l$ 的其他场点的电场强度, 可以把电偶极矩 p 分解为沿 r 方向和垂直于 r 方向的分量, 利用式 (1) 和式 (2) 来叠加.

电偶极子的物理模型在研究电介质的极化以及电磁波的辐射时都要用到.

3. 电荷连续分布的带电体的电场

可以把带电体分割成无限多个电荷元 dq . dq 在场点 P 产生的电场强度 dE 与点电荷电场强度相同, 由式(9.7)知

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0$$

\mathbf{r}_0 为电荷元 dq 到 P 点的矢径 r 方向的单位矢量. 根据电场强度叠加原理, 带电体在 P 点的总电场强度为

$$\mathbf{E} = \int_V dE = \int_V \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (9.9)$$

若电荷连续分布在一体积内, 用 ρ 表示电荷体密度, 则式(9.9)中 $dq = \rho dV$; 若电荷连续分布在一曲面或平面上, 用 σ 表示电荷面密度, 则 $dq = \sigma dS$; 若电荷连续分布在一曲线或直线上, 用 λ 表示电荷线密度, 则 $dq = \lambda dl$. 相应地计算 E 的积分分别为体积分、面积分和线积分. 具体计算时, 更多的是进行分量的积分而求出 E 的各个分量.

例 9.2 真空中有一均匀带电直线, 长为 L , 总电量 q , 试求距直线上距离为 a 的 P 点的电场强度.

解 如图 9.2 所示, 取 P 点到 L 的垂足 O 点为坐标原点, x 轴与 y 轴正向如图所示. P 点到 l 两端的连线与 x 轴正方向的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 . 线元 dx 位于 x 处, 则 $dq = \lambda dx =$