

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理教程

University Physics

下册

● 陈兰莉 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理教程（下）

主 编 陈兰莉

副主编 于家辉 尹应鹏 肖东岳

李壮辉 宋金璠

（以姓氏笔画为序）



机械工业出版社

本套教材依据教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求》编写而成。本套教材涵盖了《基本要求》的核心内容，并增加了部分拓展内容。本套教材分为上、下两册，共17章，包括力学、热学、电磁学、振动和波、波动光学、狭义相对论和量子力学基础、核物理和粒子物理等内容。除个别章外，每章包含基本内容、本章逻辑主线、扩展思维、习题，并在书后给出答案。此外，为了拓展读者的知识面，本套教材还增加了部分选学内容，这部分内容均标以“*”号。第1章及扩展思维部分，介绍了物理学在前沿科学和技术中的应用，选学内容和扩展思维都自成体系，教师可以选讲或指导学生阅读。

本套教材可作为理工科院校，尤其是应用型本科院校的大学物理教材，对物理专业学生也有一定的参考价值。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理教程. 下/陈兰莉主编. —北京：机械工业出版社，
2015. 1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-48742-5

I. ①大… II. ①陈… III. ①物理学-高等学校-教材
IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 002828 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：张金奎 责任编辑：张金奎 李 乐

版式设计：常天培 责任校对：李锦莉 程俊巧

责任印制：刘 岚

北京京丰印刷厂印刷

2015 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·21 印张·509 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-48742-5

定价：38.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010) 88361066

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010) 68326294

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010) 88379649

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前言

“杠杆轻撬，一个世界从此转动；王冠潜底，一条定理浮出水面。苹果落地，人类飞向太空；蝴蝶振羽，风云为之色变。三棱镜中折射出七色彩虹；大漠荒原上升腾起蘑菇烟尘。”这就是美妙的物理学——对称而又简洁，有趣而又深刻。

1. 物理学的研究对象

物理学是探讨物质结构、运动基本规律和相互作用的科学。

物理学是一门实验科学，物理学实验是物理学理论正确与否的仲裁者。

随着科学的发展，从物理学中不断地分化出诸如粒子物理、原子核物理、原子分子物理、凝聚态物理、激光物理、电子物理、等离子体物理等名目繁多的分支，以及从物理学和其他学科的交叉中生长出来的，诸如天体物理、地球物理、化学物理、生物物理等众多交叉学科。

物理学是一切自然科学的基础，也是当代工程技术的支柱。

2. 物理学对科学技术的推动以及在学生全面素质培养中的作用

现代科学技术正以惊人的速度发展。而物理学中每一项科学的发现都成为新技术发明或生产方法改进的基础。首先，物理学定律是揭示物质运动规律的，使人们在技术上运用这些定律成为可能；第二，物理学中的许多预言和结论，为开发新技术指明了方向；第三，新技术的发明、改进和传统技术的根本改造，无论是原理或工艺，还是试验或应用，都直接与物理学有着密切的关系。可以毫不夸大地说，若没有物理基本定律与原理的指导，就不可能有现代生产技术的大发展。

在18世纪以蒸汽机为动力的生产时代，蒸汽机的不断提高改进，物理学中的热力学与机械力学是起着相当重要的作用的。从19世纪中期开始，电力技术在生产技术中日益发展起来，这是与物理学中电磁学理论的建立与应用分不开的。现代原子能的应用、激光器的制造、人造卫星的发射、电子计算机的发明以及生物工程的兴起等，都与物理学理论有着千丝万缕的密切联系。物理学本身是以实验为基础的科学，物理学实验既为物理学发展创造了条件，同时也为现代工农业生产技术的研究打下了物质基础。从20世纪初开始，超高压装置、超低温设备、油扩散真空泵的先后发明，为现代创造极端物质材料提供了条件。随着电力和电子技术的广泛应用，出现了各种用精确计量的电动装置和电子仪器。自伦琴发现X光、汤姆逊发现电子以后，相继又有阿普顿质谱仪的发明以及同位素测定、红外线光谱、原子光谱等仪器的产生。20世纪30年代发明的电子示波器、电子显微镜、20世纪40年代发明的电子计算机等，不但使物理学家可直接观察到电子运动规律和物质结构等微观现象，而且也为生产技术开拓了一条技术研究及自动化控制的新途径。

20世纪以来，以相对论与量子力学的创立为标志的现代物理学研究工作，从理论和实践两个方面，对人类认识和社会发展起到了难以估量的作用。物理学理论的发展，正在从三个层次上把人类对自然界的认识推进到前所未有的深度和广度。首先，在微观领域内：已经深入到基本粒子的亚核世界（ 10^{-15} cm），并建立起统一描述电磁、弱、强相互作用的标准

模型,还引起了人们测量观、因果观的深刻变革。特别是量子力学的建立,为描述自然现象提供了一个全新的理论框架,并成为现代物理学乃至化学、生物学等学科的基础。其次,在宇观领域内:研究的探针已达到1028cm的空间标度和1017s的宇宙纪元;广义相对论的理论预言,在巨大的时空尺度上得到了证实,引起了人们时空观、宇宙观的深刻变革。再次,在宏观领域内:关于物质存在状态和运动形式的多样性、复杂性的探索,也取得了突破性的进展。

1999年3月,第23届国际纯粹物理与应用物理联合会(IUPAP)在美国亚特兰大举行,与会代表通过了题为“物理学对社会的重要性”的决议,认为:①物理学是一项激动人心的智力探险活动,它鼓舞着年轻人,并扩展着我们关于大自然知识的疆界。②物理学发展着未来技术进步所需的基本知识,而技术进步将持续驱动世界经济发动机的运转。③物理学有助于技术的基本建设,它为科学进步和发明的利用,提供所需训练有素的人才。④物理学在培养化学家、工程师、计算机科学家,以及其他物理科学和生物医学科学工作者的教育中,是一个重要的组成部分。⑤物理学扩展和提高我们对其他学科的理解,诸如地球科学、农业科学、化学、生物学、环境科学,以及天文学和宇宙学——这些学科对世界上所有民族都是至关重要的。⑥物理学提供发展应用于医学的新设备和新技术所需的基本知识,如计算机层析术(CT)、磁共振成像、正电子发射层析术、超声波成像和激光手术等,改善了我们的生活质量。物理学探索视野的广阔性,研究层次的广谱性和理论适用的广泛性,决定了在今后很长时期内,物理学仍将发挥其中心科学和基础科学的作用。

可以说,物理学的基本原理已渗透进物质世界的方方面面,物理学“判天地之美,析万物之理”。物理学习的过程从某种意义上来说也是培养学生实用技能的过程,学好物理就为大学生更好地学好其他科学知识打下坚实的基础,有助于培养大学生严密的逻辑思维能力,并在这一过程中逐渐形成一种科学态度和科学精神。物理思想的强弱、物理基础的厚薄、物理兴趣的浓淡都直接影响着大学生的适应性、创造力和发展潜力。因此,大学物理是大学生应当学好的最重要的基础课之一,也是大学期间一门不可替代的素质教育课。

3. 本书的编写思想

本书是为适应当前形势的发展和大学物理教学改革的要求而编写的。科学技术的飞速发展,使人们对现代人才的素质要求有了新的认识,未来发展的核心是科学技术的竞争,是人才的竞争,高校作为培养未来社会现代化建设需要的高素质人才的重要基地,起着重要的作用。大学生能否适应社会的发展,成为对社会有用的人才,取决于高校的教育教学质量。因此,转变教育思想、更新教育观念、深化教育改革、培养高素质人才是我国高校面临的重要任务。本书的编写,着眼于培养大学生全面的素质与创新能力,具体特点如下:

(1) 注意物理与工程技术的联系。考虑到本书主要面对的是理工类各专业的学生,我们遵从了“从自然到物理、从物理到技术、从技术到生活”的原则,在各部分有意识地突出物理学原理对工程技术的引领作用,并专门设置“物理学的发展及其在高新技术中的应用”一章,用一定篇幅专门介绍物理与工程技术的紧密联系,从而使读者拓宽视野,加深其对物理学基本原理及物理学在工程技术领域重要作用的理解。本书从工程实际出发,避开技术细节,把实际问题抽象成物理模型,并用物理学原理进行分析,提出合理的解决方案,有利于提高读者分析和解决问题的能力,有利于提高各工程专业学生学习物理的兴趣。

(2) 注意科学与哲学的统一。本书的编写,旨在讲科学的同时,让学生从根本上把

握物理学原理的实质,提炼出其中的物理本原,包括其哲学意义。力图避免过去一些传统物理教材从头到尾的公式化,对学生缺乏必要的启发与引导,致使学生最终“不识庐山真面目,只缘身在此山中。”爱因斯坦说:“物理书都充满了复杂的数学公式。可是思想及理念,而非公式,才是每一物理理论的开端。”(爱因斯坦《物理学的进化》)苏东坡有诗云:“横看成岭侧成峰,远近高低各不同。”相对论中关于“相对”二字的理解,解释狭义相对论中的相对性原理,总把相对性说成是两个参考系在描述物理规律时是等价的。这话虽然不错,可既然参考系指的是坐标系加观察者,因此相对论中相对性原理的本质,首先在于作为认识主体的人与客体之间的相对性。一切物理理论,包括相对论和量子力学,既是对自然规律的发现,也是人的发明。爱因斯坦认为:不要去讨论绝对空间、绝对时间和绝对运动,而应该讨论相对空间、相对时间和相对运动。爱因斯坦的相对论是试图寻找这个世界最本源的理论,他把参考系从惯性系推广到非惯性系,把相对性原理从狭义讲到广义,提出了广义相对论。相对论成功的经验实际上告诉我们,空间和时间的概念不是属于客体的,而是主体为了描述客体的运动而引入的。一个粒子的空间和时间坐标是主体赋予它的,因此它们只能是相对的,而且只有当运动有所变化时才能真正(在严格意义下)被认识到。空间、时间坐标尚且如此,更不用说动量和能量了。简言之,没有变化就没有信息。信息并非客观存在,而是主体施变于客体时才共同创造出来的。物理作为“物”之“理”,只能是相对的道理,而不是绝对真理。有时我们觉得,有些物理理论如量子力学的某种解释不很清楚,其实很大程度上是由于我们自己早已进入了“理论”,却还以为我们正在讨论着纯客观世界。本书试图在相关物理学原理的讲述中,做到科学与哲学的统一,让科学印证哲学,让哲学指导科学。

(3) 妥善处理数学与物理的关系。物理与数学,的确有着千丝万缕的联系。但作为适用于工科学生的大学物理,数学公式过多就会难教、难学,甚至淹没了本质上的物理思想及理念。本书中对数学的分量和难度是注意控制的,但不回避。这是因为,重视数字和数学,正是西方哲学之所以能促进科学发展的精髓所在。没有数学就没有物理学。反过来,正因为物理学比其他任何自然科学都更成功地运用数学,学物理便成为学数学的捷径。我们在内容组织编排中注意做到循序渐进,把重点放在启发思考,引起同学兴趣上,对于繁杂的公式推导,不提出过高的要求,从而使部分数学基础稍差的同学能够克服讨厌或害怕数学的心理,转变为愿意学、能学会,进而喜欢学,这对他们将来的职业生涯会有深远的影响。

(4) 融入开放性思想,培养学生大胆质疑、深入思考的创新精神。经过多年的教学与思考,我们体会到:封闭式教学只能培养出书呆子。书当然不可不读,但“尽信书不如无书”。因此,本书在写法上作了一个新的尝试,即以介绍自然现象和实验事实为主,而避免把已有的理论当作是天经地义,必要时介绍理论曲折的发展过程,同时介绍不同的看法,力求反映科学的严谨性和科学发展中固有的大胆怀疑精神,提倡发散式思维。这一尝试集中地表现在第7章(相对论)和第16章(量子物理学基础)中。把现有理论讲得天衣无缝,推导得环环相扣、无懈可击,未必就是教材的最高境界,必要时,我们展现了理论的发展过程,甚至描述了这期间走过的弯路,这样对学生的启迪作用或许会更大。

4. 本书的编写分工

本书由南阳理工学院的教师编写,陈兰莉教授担任主编,编写前言和第17章,并对全书进行设计、统稿和定稿;李壮辉编写第10、11章和第12章的12.1~12.3节;肖东岳编写第12章的12.4及以后内容、第13章、第13章的参考答案;于家辉编写第14章、第15

章的 15.1 ~ 15.8 节; 尹应鹏编写 15.8 节以后内容、第 16 章; 宋金璠编写第 12 及 14 ~ 17 章的参考答案; 黄奇瑞编写第 10、11 章的参考答案。另外, 参加本书编写工作的还有王生钊、石明吉、李梦硕、郭新峰、罗鹏辉等。

编写适合教学改革需要的教材本身就是一种探索, 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

前言

第 10 章 真空中的静电场 1

10.1 电荷 库仑定律 1

10.2 电场 电场强度 4

10.3 电场线 电通量 10

10.4 静电场的高斯定理 12

10.5 静电场力的功 17

本章逻辑主线 25

扩展思维 静电的应用 25

思考题 27

习题 28

第 11 章 静电场中的导体和电

介质 32

11.1 静电场中的导体 32

11.2 电介质的极化 37

11.3 电位移矢量 有电介质时的高斯

定理 40

11.4 电容 电容器 43

11.5 静电场的能量 47

本章逻辑主线 49

扩展思维 电介质的性质及其应用 50

思考题 51

习题 52

第 12 章 运动电荷的磁场 56

12.1 恒定电流 56

12.2 磁通量 磁场中的高斯定理 59

12.3 毕奥-萨伐尔定律 62

12.4 运动电荷的磁场 68

12.5 安培环路定理 70

12.6 磁场对载流导体的作用 74

12.7 磁场对运动电荷的作用 81

12.8 有磁介质时的安培环路定理 85

本章逻辑主线 92

扩展思维 磁在生物学和医学上的应用

核磁共振成像 92

思考题 93

习题 95

第 13 章 电磁场统一理论 101

13.1 法拉第电磁感应定律 101

13.2 动生电动势和感生电动势 103

13.3 电磁感应现象的具体应用 111

13.4 位移电流 麦克斯韦方程组 117

13.5 电磁波 121

本章逻辑主线 124

扩展思维 电磁辐射在遥感技术方面的

应用 124

思考题 126

习题 127

第 14 章 光的干涉 132

14.1 光的相干性 132

14.2 杨氏双缝干涉 137

14.3 光程与光程差 140

14.4 薄膜干涉 142

14.5 迈克耳孙干涉仪 151

本章逻辑主线 153

扩展思维 红外线与紫外线 154

思考题 162

习题 163

第 15 章 光的衍射与偏振 168

15.1 光的衍射 惠更斯-菲涅耳原理 168

15.2 单缝夫琅禾费衍射 169

15.3 光栅衍射 175

15.4 夫琅禾费圆孔衍射 光学仪器的

分辨率 179

15.5 晶体对 X 射线的衍射 181

15.6 自然光与偏振光 马吕斯定律 182

15.7 反射和折射时光的偏振 布儒

斯特定律 186

* 15.8 光的双折射 189

本章逻辑主线 193

扩展思维 液晶 193

思考题 199

习题 200

第 16 章 量子物理学基础 205

16.1 普朗克量子论	206	第 17 章 核物理与粒子物理简介	258
16.2 爱因斯坦的光子学说	212	17.1 原子核的基本性质	258
16.3 康普顿效应	218	17.2 原子核的放射性衰变	266
16.4 玻尔氢原子理论	222	17.3 核反应、核裂变与核聚变	270
16.5 实物粒子的波粒二象性	228	17.4 粒子物理简介	275
16.6 不确定(度)关系	233	17.5 对称性与守恒定律	282
16.7 物质波波函数的统计解释	237	本章逻辑主线	286
16.8 薛定谔方程	239	扩展思维 四种相互作用的统一	287
16.9 薛定谔方程的应用	242	思考题	288
16.10 多电子原子中的电子分布	251	习题	289
本章逻辑主线	254	习题及部分思考题参考答案	290
扩展思维 德布罗意波与玻尔的量子 条件	254	参考文献	326
习题	255		

第10章 真空中的静电场

从本章开始,我们研究物质运动的另一种形态,即电磁运动。自然界的所有变化都几乎与电和磁相联系,电磁场是构成物质世界的重要组成部分,它是研究电磁相互作用及其运动规律的科学。

电磁学是人们在认识到电现象和磁现象深刻的内在联系后开始发展起来的。首先是奥斯特发现了电流的磁效应;接着法拉第发现了电磁感应;麦克斯韦在总结前人研究成果的基础上大胆地提出了感应电场和位移电流假说,建立了完整的电磁场理论——麦克斯韦方程组,并从理论上预言了电磁波的存在。麦克斯韦电磁场理论是从牛顿建立的经典力学理论到爱因斯坦的相对论的这一时期中物理学方面的重要的理论成果。

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,电磁波实现了信息传递,研究新材料的电磁性能促进了新技术的诞生和科学的发展。许多与电磁学看似无关的现象,如物质的弹性、金属的导热性、光学的折射率等都可以从物质的电结构中得到解释,所以电磁学的知识是许多工程技术和科学研究的基础,如电工学、电化学、无线电技术、遥控遥测、自动控制、电视、计算机等都是以电磁学为基础的。因此,电磁学理论在现代物理学中占有重要地位。

电磁学的内容大体可划分为“场”和“路”两部分。大学物理侧重于对“场”的研究,“路”的内容除了中学已经学过的内容外,将主要在后续课程中学习。

本章我们首先研究真空中静电场的基本特性。引入描述电场的两个重要物理量——电场强度和电势,并讨论它们的叠加原理,以及两者之间的积分形式和微分形式的关系;同时介绍反映静电场基本性质的高斯定理和静电场环路定理。

10.1 电荷 库仑定律

10.1.1 电荷守恒定律

1. 电荷

人们对电的认识,最初来自摩擦起电和自然界的电现象。今天我们把物体经过摩擦后能吸引羽毛、纸片等轻微物质的状态叫作带电,也可以说物体带有电荷,把表示物体所带电荷多少的物理量叫作电荷量。

自然界的电荷有两种,分别是正电荷和负电荷。带同种电荷的物体相互排斥,带异种电荷的物体相互吸引,物体间这种相互作用力叫作电性力,还叫作静电力。静电力与万有引力有些相似,但万有引力总是相互吸引的,静电力却随电荷的异号和同号有引力和斥力之分。

2. 电荷守恒定律

摩擦使物体带电的现象可以从物质结构加以说明。宏观物体都由分子和原子组成,而任

何物质的原子都由一个带正电的原子核和一定数目的绕核运动的电子组成，原子核又由带正电的质子和不带电的中子组成。每个质子所带正电荷量和电子所带负电荷量是相等的，通常用 e 表示。在正常情况下，原子内的电子数和原子核内的质子数相等，整个原子呈现电中性。由于构成物质的原子是电中性的，因此，通常宏观物体将处于电中性状态，物体对外不显示电的作用。当两种不同质料的物体紧密接触时，有一些电子会从一个物体迁移到另一个物体上去，结果使两个物体都处于带电状态。所谓的起电，就是通过某种作用，使物体内电子不足或者过多而呈现带电状态。例如，通过摩擦可以使两物体接触面的温度升高，促使一定量的电子获得足够的动能从一个物体迁移到另一个物体，从而使获得更多的电子的物体带负电，失去电子的物体带正电。

实验证明，在一个与外界没有电荷交换的系统内，无论通过怎样的物理过程，系统内正负电荷量的代数和总是保持不变，这就是实验总结出来的电荷守恒定律。

随着近代物理学的不断发展，这个定律也在微观物理过程中得到了精确验证。例如，一个高能光子与一个重原子核作用时，该光子可以转化为正负电子对： $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ 。反之，正负电子相遇则同归于尽（称“湮灭”），转化为两个或三个光子。这种电荷的产生或消失并不改变系统中电荷的代数和，所以电荷守恒定律仍然成立。还要指出的是，电荷量是相对论不变量，即电荷量与运动无关。

3. 电荷量子化

科学发展到今天大量的实验表明，电子和质子所带的电荷量是自然界带有电荷量最小的粒子，任何带电体或其他微观粒子所带的电荷量是电子或质子电荷量的整数倍。这个事实说明了物体带的电荷量不可能连续地取任意量值，只能取某一单元的整数倍值。一个电子或一个质子所带有的电荷量就是这个基本单元，称为元电荷，用 e 表示。在国际单位制中，电荷量的单位是库仑（C），相当于导体中的恒定电流为 1A 时，在 1s 内通过导体横截面的电荷量。一个质子和一个电子所带的电荷量分别是 $1.602177 \times 10^{-19} \text{C}$ 和 $-1.602177 \times 10^{-19} \text{C}$ 。电荷量的这种只能取分立的、不连续量值的性质，称为电荷的量子化。

20 世纪 50 年代以来，包括我国理论物理工作者在内的各国理论物理工作者陆续提出了一些关于物质结构的更深层次的模型。他们认为强子（质子、中子、介子等）都是由更基本的粒子（称为层子或夸克）构成的。夸克理论认为，夸克带有分数电荷，它们所带电荷量是电子电荷量的 $\pm \frac{1}{3}$ ， $\pm \frac{2}{3}$ 。中子是中性的，但并不是说中子内部没有电荷，按夸克理论，中子包含一个带有 $\frac{2}{3}e$ 的电荷量的上夸克和两个均带有 $-\frac{1}{3}e$ 的电荷量的下夸克，总的电荷量为零。强子由夸克组成在理论上已经是无可置疑的，只是迄今为止，尚未发现自由状态的夸克，但无论将来能否发现自由夸克的存在，都不会改变电荷量子化的结论。量子化是微观世界一个基本概念，在微观世界中我们将看到：能量、角动量等也是量子化的。

10.1.2 库仑定律

物体带电后的主要特征是带电体之间存在相互作用的静电力，为了定量地描述这个静电力，我们引入了点电荷的模型，即当带电体的形状和大小与它们之间的距离相比较可以忽略时，这些带电体可以看成是点电荷。这是从实际问题抽象出来的理想模型。具体问题中的点

电荷：带电体本身线度比它到其他带电体间的距离小得多时，带电体的大小和形状可忽略不计，这个带电体称为点电荷（如同质点一样，是假想模型）。点电荷的概念只有相对的意义，它本身不一定很小。

1785年，库仑（C. A. de Coulomb）从扭秤试验结果总结出了点电荷之间相互作用的静电力所服从的基本规律，称为库仑定律。

库仑定律可以表述为：在真空中，两个点电荷之间的相互作用力的方向沿着这两个点电荷的连线，同号电荷相斥，异号电荷相吸；作用力的大小与这两个点电荷电荷量的乘积成正比，而与它们之间的距离的平方成反比。

库仑定律的矢量表达式为

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^3} \mathbf{r} \quad (10-1a)$$

或者

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (10-1b)$$

若采用国际单位制，其中的比例常数 $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ 。

$$\text{令 } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad (\epsilon_0 \text{ 为真空中的介电常数})$$

则库仑定律的矢量表达式为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} \mathbf{r} \quad (10-1c)$$

或者

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (10-1d)$$

写成大小形式

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

式中， q_1 和 q_2 为真空中的两个点电荷； r 为两个点电荷间的距离，还叫作矢径； $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{r}_0$ 都是由施力电荷指向受力电荷， $\mathbf{r}_0$ 是沿矢径方向的单位矢量。近代物理实验表明，当两个电荷之间的距离在 $10^{-17} \sim 10^7 \text{ m}$ 范围内时，库仑定律是极其准确的。

如图 10-1 所示， $\mathbf{F}_{12}$ 和 $\mathbf{F}_{21}$ 分别是 q_1 和 q_2 受的库仑力， $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$

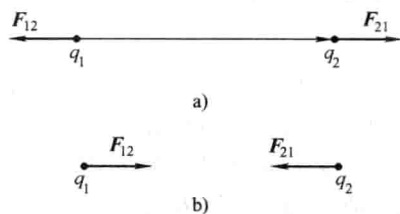


图 10-1 点电荷的作用力

库仑定律适用于真空中两个点电荷之间的作用。当空间同时有几个点电荷时，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。这就是静电力叠加原理。

库仑定律的形式与万有引力定律形式相似，但前者包含引力和斥力，后者只是引力。

10.2 电场 电场强度

10.2.1 电场 电场强度

1. 电场

我们知道力是物体之间的相互作用。两个物体彼此不接触时,其相互作用必须依赖其间的物质作为传递介质。没有物质作传递介质的所谓的“超距作用”是不存在的。真空中两个相互隔开的点电荷也可以发生相互作用。这就说明,电荷周围存在一种特殊的物质,称为**电场**。只要有电荷,就有电场。电场对处于电场中的带电体有力的作用。因此,当带电体在电场中移动时电场力可以做功,说明了电场具有能量。而根据爱因斯坦提出的质能关系式,有能量就有质量,所以电场也有质量和动量。因此,同实物物质一样,电场也是一种物质,这种物质称为电磁场。

本章着重研究的是静电场,即相对于观察者静止的电荷所激发的电场,静电场是电磁场的一种特殊情况。

2. 电场强度

一个被研究对象的物理特性总是通过该对象与其他物体的相互作用显示出来。利用电场对电荷有力的作用,我们引入了电场强度这一物理量;对于电荷在电场中移动时电场力要对电荷做功,我们引入了电势这一概念。电场强度和电势是描述静电场的两个基本物理量。

现将一个试验电荷 q_0 放到电场中各个不同点,观察 q_0 受到的电场力。所谓的试验电荷,首先所带电荷量必须尽可能地小,其次线度必须小到可以看成点电荷。这样把它放入电场中时,不影响原电场的分布,以便能用它来确定电场中每一点的性质;否则只能反映出空间的平均性质。实验指出,把同一试验电荷放进电场不同的点时,电荷所受力的方向和大小逐点不同,但在电场中同一地点,电荷所受力的方向和大小是确定的。

实验表明如果改变试验电荷的量值,它所受力的方向将随着改变,受力的大小和试验电荷带的电荷量成正比。所以我们可以用**试验电荷所受的电场力与试验电荷所带电荷量之比**,作为描述静电场中给定点的客观性质的一个物理量,称为**电场强度**。电场强度是矢量,用符号 $\mathbf{E}$ 表示,即

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} \quad (10-2)$$

由实验验证可知,比值与试验电荷无关,仅仅与试验电荷所在的位置(场点)有关。电场中某点的电场强度的大小等于单位试验电荷在该点所受的力的大小,其方向为正电荷在该点所受力的方向。电场中给定的点 $r(x, y, z)$, 电场强度 $\mathbf{E}$ 是确定的。不同的点电场强度一般不同。所以 $\mathbf{E}$ 是空间坐标 (x, y, z) 的点函数,记作 $\mathbf{E}(x, y, z)$ 。

在国际单位制中,力的单位为 N, 电荷量的单位为 C, 所以电场强度的单位为 $\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$, 电场强度的单位也可以是 $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$, 这两种表示方法是等效的。在电工学中常采取后一单位。

另一方面我们如果知道电场强度的分布 $\mathbf{E}$, 就能方便地求出任意点电荷 q 在电场中所受的电场力,即 $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$ 。

3. 电偶极子 电矩

两个大小相等符号相反的点电荷, $+q$ 和 $-q$, 它们分开距离 l , 这一电荷系统就叫作**电偶**

极子, l 矢量由 $-q \rightarrow +q$, 还叫作电偶极子的轴, 从负电荷指向正电荷的矢量为轴线的正方向。通常这个距离 l 比它们到场点的距离小得多, 电荷量 q 与矢量 l 的乘积定义为电偶极矩, 简称为电矩。电矩也是矢量, 用 p 表示, 可以表示为

$$p = ql \quad (10-3)$$

如图 10-2 所示, 电偶极子在均匀电场 E 中, 两电荷受的电场力大小相等、方向相反, 是一对力偶, 所以产生力偶矩大小为

$$M = Fd = qEl \sin \theta = pE \sin \theta \quad (10-4)$$

电偶极子所受的力矩矢量表达式为

$$M = p \times E \quad (10-5)$$

即电偶极子在均匀电场中受的合力矩。

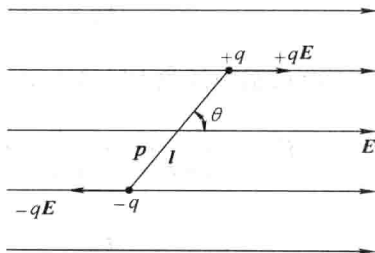


图 10-2 电偶极子电场中受力

10.2.2 电场强度叠加原理

试验电荷 q_0 放在点电荷系 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ 所产生电场中的任意点, 实验表明 q_0 在该点受的电场力 F , 等于点电荷系中每个点电荷单独存在时, 对 q_0 所施加的库仑力 $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ 的矢量和, 即

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n \quad (10-6)$$

由电场强度的定义式, 该点的电场强度为

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{F_1}{q_0} + \frac{F_2}{q_0} + \frac{F_3}{q_0} + \dots + \frac{F_n}{q_0} = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n$$

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \quad (10-7)$$

上式表明, 点电荷系电场中任一点的总电场强度, 等于各个点电荷单独存在时在该点产生的电场强度矢量和, 称为电场强度叠加原理。它是电场的基本性质, 是我们计算合电场强度的依据。但电场强度的叠加是矢量叠加, 一定要注意方向, 各个分电场强度的方向不一致时不能直接相加! 通常用坐标分量法进行计算。

10.2.3 电场强度计算

1. 点电荷电场的电场强度

设在真空中有一个静止的点电荷 q , q 周围任意点 A 处产生的电场强度为 E , 如图 10-3 所示。求电场强度 E 的大小和方向。现在 A 处有一试验电荷 q_0 , q_0 受的电场力为 F , 根据电场强度的定义式得 A 处的电场强度为

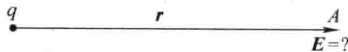


图 10-3 点电荷形成的电场

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{q_0} \cdot \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} r_0$$

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} r_0 \quad (10-8)$$

该表达式为点电荷周围任意点的电场强度。

r_0 由点电荷 q 指向场点 A , q 为正时, E 与 r_0 同向 (由 $q \rightarrow A$); q 为负时, E 与 r_0 反向 (由 $A \rightarrow q$)。

2. 点电荷系电场的电场强度

设真空中有点电荷系 $q_1, q_2, \dots, q_n$, 如图 10-4 所示。 r_{i0} 表示第 i 个点电荷到场点的矢径方向的单位矢量, 则 q_i 单独存在时在 A 点产生的电场强度为

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

因此点电荷系中任意点的合电场强度为

$$\begin{aligned} E &= \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \mathbf{r}_{10} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \mathbf{r}_{20} + \dots + \frac{q_n}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} \mathbf{r}_{n0} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{r}_{i0} \end{aligned}$$

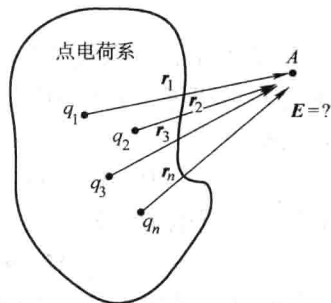
即
$$E = \sum_{i=1}^n E_i$$

在直角坐标系中上式的分量式为

$$E_x = \sum_{i=1}^n E_{ix} \quad (10-9b)$$

$$E_y = \sum_{i=1}^n E_{iy} \quad (10-9c)$$

$$E_z = \sum_{i=1}^n E_{iz} \quad (10-9d)$$



(10-9a) 图 10-4 点电荷系形成的电场

3. 连续带电体电场的电场强度

根据电场强度叠加原理, 我们可以计算电荷连续分布的电荷系的电场强度, 下面是计算电场强度的一种方法, 当然还有其他方法。

如图 10-5 所示, 有一体积为 V , 电荷连续分布的带电体, 在它周围任选一点 A , 现在计算 A 点的电场强度。先在带电体上取一电荷元 dq , 电荷元 dq 可以看成点电荷, 则 dq 在 A 点的电场强度为

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0 \quad (10-10a)$$

带电体在 A 点产生的总电场强度可表示为

$$E = \int dE = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0 \quad (\text{矢量积分}) \quad (10-10b)$$

上式为矢量积分, 求 E 前要分别求出各个分量

$$E_x = \int dE_x, \quad E_y = \int dE_y, \quad E_z = \int dE_z \quad (\text{标量积分})$$

则电场强度为

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j} + E_z \mathbf{k}$$

大小为

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

如果电荷分布在整个体积内, 这种分布叫作体分布。在带电体内任取一点, 做一包含该点的体积元 ΔV , 设该体积中的电荷量为 Δq , 则该点的电荷密度 ρ 定义为 Δq 和 ΔV 比值的极限:

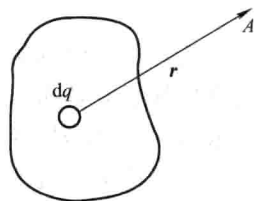


图 10-5 连续带电体形成的电场

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V} = \frac{dq}{dV} \quad (10-11)$$

在处理电荷分布在极薄的表面层问题时,可以把带电薄层抽象为“带电面”电荷的面密度为

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta S} = \frac{dq}{dS} \quad (10-12)$$

若电荷分布在细长的线上,则定义单位长度所带电荷为电荷的线密度,即

$$\lambda = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta l} = \frac{dq}{dl} \quad (10-13)$$

若电荷分布均匀,在确定的体、面、线上的各点 ρ 、 σ 、 λ 是确定的。所以体、面、线上的电荷元分别是 $dq = \rho dV$, $dq = \sigma dS$, $dq = \lambda dl$ 。若电荷密度已知,求出 dq ,再代入 E 的计算公式进而求 E 。

4. 例题分析

【例 10-1】 前面已讲过,两个等量异号点电荷构成的电荷系,它们之间的距离 l 比起所讨论的问题涉及的距离小得多时,如图 10-6 所示,这样一对点电荷系称为电偶极子。由 $-q \rightarrow +q$ 的矢量 l 叫作电偶极子的轴, $p = ql$ 叫作电偶极子的电矩。试计算电偶极子轴线延长线上的一点 A 的电场强度。

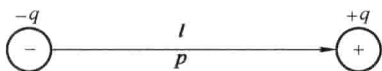


图 10-6 电偶极子

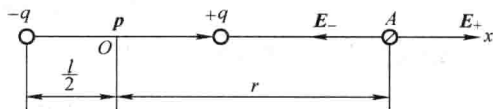


图 10-7 电偶极子形成的电场

【解】 如图 10-7 所示取坐标

$$E_A = E_+ + E_-$$

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

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

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

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

即有

$$E_A = \frac{2p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (E_A \text{ 与 } p \text{ 同向})$$

【例 10-2】 设真空中有一均匀带电直线,长为 L ,总电荷量为 Q ($Q > 0$)。线外有一点 P 离开直线的垂直距离为 a , P 点和直线两端的连线与直线之间的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 ,如图

10-8 所示。求 P 点的电场强度。

【解】 这里，产生电场的电荷是连续分布的，所以，首先要将整个电荷分布划分为许多电荷元，求出任一电荷元 dq 在给定点产生的电场强度 dE ，然后根据电场强度叠加原理求总电场强度。

我们以 P 点到直线的垂足 O 为原点，取坐标轴 Ox 、 Oy ，如图 10-8 所示。在带电直线上离原点为 l 处取线元 dl ， dl 上的电荷量为 dq 。设电荷线密度为 λ （这里 $\lambda = Q/L$ ），则 $dq = \lambda dl$ 。

设 dl 到 P 点的距离为 r ，可知 dq 在 P 点处产生的电场强度 dE 的大小为

$$dE = \frac{\lambda dl}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

方向如图所示， dE 与 x 轴正方向之间的夹角为 θ ， dE 沿 x 轴和 y 轴的两个分量分别为

$$dE_x = dE \cos\theta, \quad dE_y = dE \sin\theta$$

图中 z 轴未画出，显然 $dE_z = 0$ ， $E_z = 0$ 。由图 10-8 可知

$$l = a \cot(\pi - \theta) = -a \cot\theta$$

所以

$$dl = a \csc^2\theta d\theta$$

$$r = a \csc(\pi - \theta) = a \csc\theta$$

所以

$$dE_x = dE \cos\theta = \frac{\lambda a \csc^2\theta}{4\pi\epsilon_0 a^2 \csc^2\theta} \cos\theta d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \cos\theta d\theta$$

$$dE_y = dE \sin\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \sin\theta d\theta$$

将上述两式积分，得

$$E_x = \int dE_x = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \cos\theta d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} (\sin\theta_2 - \sin\theta_1)$$

$$E_y = \int dE_y = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \sin\theta d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$$

由上列两式可知， P 点处的电场强度 E 的大小与该点离带电直线的距离 a 成反比。 E 的大小和方向可由 E_x 、 E_y 确定。

讨论：如果这一均匀带电直线是无限长的（或 P 点在均匀带电直线中部附近），亦即 $L \gg a$ ，这时， $\theta_1 = 0$ ， $\theta_2 = \pi$ ，则

$$E_x = 0$$

$$E = E_y = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 a} \quad (10-14)$$

【例 10-3】 设电荷 q 均匀分布在半径为 R 的圆环上，计算在环的轴线上与环心相距 x

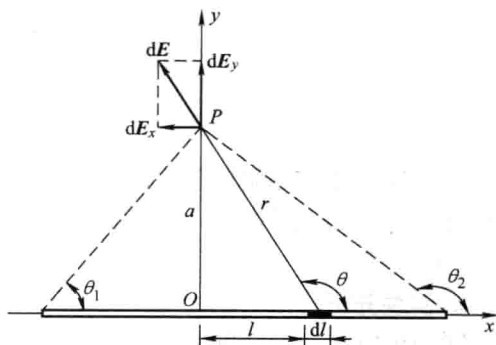


图 10-8 均匀带电直线线
外任一点的电场强度