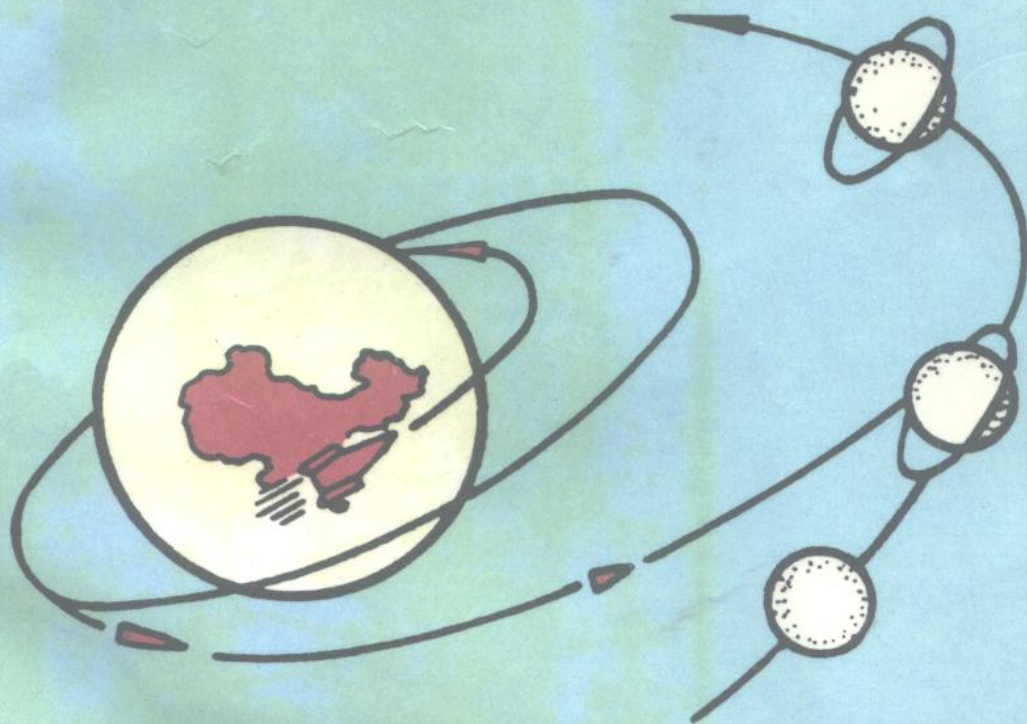


高等学校教材

工科大学物理学

下册

洪佩智 韩树东 主编



北京理工大学出版社

工科大学物理学

(下 册)

洪佩智 韩树东
楼惠珍 赵学荣 王群善 编

北京理工大学出版社

(京)新登字 149 号

内容简介

本书是作者根据多年积累的教学经验与研究成果并借鉴国内外部分教材编写成的。全书共六篇二十三章,分上、下两册。上册包括力学、狭义相对论、振动和波、气体动理论与热力学基础;下册包括电磁学、波动光学、量子物理基础和现代工程技术物理基础专题。总学时为 130~150 学时,带 * 内容未记入学时。

本书在提高大学物理教材的科学性、教学性和内容的现代化方面作了有益探索。除基本内容外,还专题介绍了物理学在工程技术中的应用和 12 位著名科学家的传略,以开阔学生的思路、激发探索和创新精神。

本书内容的选取和讲述的深度是以国家教委制订的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》为依据的,可作为工科大学本、专科的物理课程教材或参考书,也可供各类成人高等院校的相近专业选用。

工科大学物理学

下册

洪佩智 韩树东 主编

北京理工大学出版社出版发行

(北京海淀区白石桥路 7 号 邮政编码:100081)

各地新华书店经售

沈阳工业学院印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:21.75 字数:528.84 千字

1995 年 5 月第一版 1995 年 5 月第一次印刷

印数:1—3200 册 定价:16.90 元

ISBN 7-81013-974-6/O · 106

出版说明

遵照国务院国发〔1978〕23号文件精神,中国兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵总教材编审室成立以来,在广大教师的积极支持和努力下,在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下,已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务,共出版教材211种。这批教材出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革及提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要,特别是国防现代化培养人才的需要,反映国防科技的先进水平,达到打好基础、精选内容、逐步更新及利于提高教学质量的要求,我们以提高教材质量为主线,完善编审制度、建立质量标准及明确岗位职责,制订了由主审人审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件。并根据兵工类专业的特点,成立了十个专业教学指导委员会,以更好地编制兵工类专业教材建设规划,加强对教材的评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材,全面提高质量,适当发展品种,力争系统配套,完善管理制度,加强组织领导”的“八五”教材建设方针,兵总教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上,于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划,共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的,专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查,认为符合兵工专业培养人才要求,符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套,为教学质量的提高和培养国防现代化人才,为促进兵工类专业科学技术的发展,都将起到积极的作用。

本教材由东北大学王燕生教授主审,经中国兵器工业总公司教材编审室审定。

限于水平和经验,这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处,希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1994年3月

序

由韩树东、洪佩智主编的这套教材是从立项研究开始的。1990年秋,编写小组以“工科大学物理合理结构研究”为题,立项研究,经过2年时间,写出了十几万字的“工科大学物理教材纲要”,1992年秋,通过了专家组的科研成果鉴定。我阅读过这本“纲要”,如今这套教材的编写工作又完成,即将出版,令人十分高兴。对编者的辛勤劳动和严肃认真的态度感到由衷的钦佩。一套基础课教材,经历了这样的立项、研究、鉴定、编写、修改不断优化的过程,历时4年,最后由兵器部教材编审室组织完成编写出版,这种作法还不多见,很值得提倡。而且,教材的主编和编者都是长期从事第一线教学有较深造诣的教授和副教授,因此,这套教材无疑是教学经验与科学研究结合的硕果,也是集体智慧和辛勤汗水的结晶。

该教材符合国家教委制定的“工科大学物理教学基本要求”,物理量名称、单位和符号都与国家最新标准一致。最值得提及的是这套教材具有下列鲜明的特色:

(1) 教材按物理规律自身的相互联系自然形成体系,按教学逻辑编排内容,结构合理,便于高效率教学。

(2) 根据各章内容的不同特点,确定与之相适应的写法,选取恰当的起点,以便实现既能与中学物理顺利的衔接,又能突出大学物理的本色。使学生能在较短时间内完成从中学到大学思维方式的转变,学好最需要掌握的中心内容、重点内容。

(3) 特别注重物理本质的论述,分析问题深入浅出,思路清晰,语言简练,能使学生思维迅速到位,深入透彻的理解物理含义。

(4) 例题、习题、思考题紧密配合理解教学基本内容,掌握基本方法;而且,新编题较多,内容新颖、难易适度、复盖面宽、针对性强,有效地帮助学生消化理解物理内容,提高分析问题解决问题的能力。

(5) 用比较浅显的语言论述了一些现代工程技术中的物理专题,这不仅开扩了学生的知识视野,而且还能激发学生学习物理学的热情。

我希望这套教材早日与广大读者见面,相信它将会为教学改革、提高教学效率作出贡献,显示出它应有的价值。

余瑞藻

1995年3月于吉林大学

前 言

大学物理是工科大学生必修的一门基础理论课。本书是根据本课程的基本任务和现代科技发展的需要,以国家教委制订的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》为依据,结合编者多年积累的教学经验和研究成果,并借鉴国内外部分教材编写而成。

本书编写的宗旨是:突出基本内容与重点内容,改善结构和叙述,使教材利于提高教学效率,在规定的时间内学好更多的物理知识,培养更强的分析问题和解决问题的能力。

本书力求体现如下特点:

(1) 内容安排不受历史发展过程的限制,从有利于教学出发,按物理规律自身的相互联系所确定的关系——教学逻辑形成体系。

(2) 叙述内容中心明确,思路清晰,语言简练,概念、规律准确,论证注重理解物理内容,不过分追求系统与严密的数学推导。

(3) 提高起点。凡中学大纲列入的内容,本书不作简单的重复;中学能解的习题,除了少数因讲述基本原理、基本方法需要外,一般也不再选用。

(4) 加强例题、思考题、习题的针对性。通过例题讲清基本规律应用的方法和步骤;尽可能地选取最能体现物理内容,运用高等数学计算的典型例题。习题是例题的补充,供学生练习,思考题供学生思考,都以消理解物理内容、训练物理方法为主要目的。

(5) 在教材内容现代化方面作了有益探索。本书尝试用大学物理课程语言讲述现代工程技术中的物理基础专题,内容涉及超导、激光、全息与非线性光学等;还介绍了物理学在现代工程技术中的应用,如卫星的发射、超声波的应用、温度的测量、压电体与铁电体以及磁在信息技术中的应用等;此外还介绍了12位著名科学家的生平,以激发学生的探索、创新和敬业精神。

本书一律采用国际单位制,各物理量的名称、符号也均与国际标准化组织(ISO)规定的国际标准一致。

本书参考总学时为130~150学时,带*内容未计入学时,可根据需要选用。

本书上册由韩树东教授、洪佩智副教授主编。第1~6章由陈爱民副教授执笔,第7~10章由韩树东执笔,科学家介绍、物理学与技术由孙汉宝副教授执笔;本书下册由洪佩智副教授、韩树东教授主编,第11~12章由楼惠珍副教授执笔,第13~15章由洪佩智执笔,第16~19章由赵学荣副教授执笔,第20~23章由王群善教授执笔。

全书由韩树东、洪佩智统稿,由东北大学物理系王燕生教授主审。王先生对全书原稿进行了仔细的审阅,提出了许多宝贵的指导性意见和建议,对保证本书质量起到重要作用,在此表示衷心感谢。

由于编者的能力、水平有限。编写时间仓促,本书不妥之处在所难免,衷心希望使用者多提出宝贵意见。

编者

1993.6

目 录

第三篇 电 磁 学

第十一章 真空中的静电场	2
§ 11.1 电荷 库仑定律.....	2
§ 11.2 电场 电场强度.....	4
§ 11.3 电通量 静电场的高斯定理	11
§ 11.4 静电场的环路定理 电势	19
§ 11.5 场强和电势的微分关系	25
§ 11.6 带电粒子在电场中的运动	28
思考题	31
习 题	33
第十二章 静电场中的导体和电介质	37
§ 12.1 静电场中的导体	37
§ 12.2 静电场中的电介质	45
§ 12.3 电位移 有电介质时的高斯定理	48
§ 12.4 电容 电容器	53
§ 12.5 电场的能量	60
思考题	64
习 题	65
第十三章 稳恒电流的磁场	69
§ 13.1 磁现象 磁与电的联系	69
§ 13.2 磁场 磁感应强度	71
§ 13.3 毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律	73
§ 13.4 磁通量 磁场的高斯定理	82
§ 13.5 安培环路定理	85
§ 13.6 磁场对电流的作用	91
§ 13.7 磁场对运动电荷的作用.....	102
思考题.....	110
习 题.....	112
第十四章 磁介质	118
§ 14.1 磁介质的磁化 磁化强度.....	118
§ 14.2 磁场强度 有磁介质时的安培环路定理.....	123
§ 14.3 铁磁质.....	127

思考题.....	131
习 题.....	132
第十五章 电磁感应	134
§ 15.1 电磁感应基本定律.....	134
§ 15.2 动生电动势.....	139
§ 15.3 感生电动势 涡旋电场	144
§ 15.4 互感与自感.....	149
§ 15.5 磁场能量.....	155
思考题.....	157
习 题.....	158
第十六章 电磁场理论的基本概念	163
§ 16.1 电流密度 位移电流.....	163
§ 16.2 麦克斯韦方程组的积分形式.....	165
§ 16.3 电磁场的传播——电磁波.....	167
思考题.....	171
习 题.....	171

第四篇 波动光学

第十七章 光的干涉	174
§ 17.1 光的相干性 光程 光程差.....	174
§ 17.2 杨氏双缝 洛埃镜.....	177
§ 17.3 薄膜干涉(一)——等倾条纹.....	182
§ 17.4 薄膜干涉(二)——等厚条纹.....	185
§ 17.5 干涉现象的应用 干涉仪.....	189
思考题.....	193
习 题.....	193
第十八章 光的衍射	196
§ 18.1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	196
§ 18.2 单缝的夫琅和费衍射.....	198
§ 18.3 光栅衍射.....	203
§ 18.4 圆孔衍射 光学仪器的分辨率.....	209
§ 18.5 伦琴射线的衍射.....	211
思考题.....	213
习 题.....	213
第十九章 光的偏振	215
§ 19.1 自然光与偏振光.....	215
§ 19.2 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律.....	217
§ 19.3 反射光和折射光的偏振 布儒斯特定律.....	219

§ 19.4 光的双折射现象	221
*§ 19.5 偏振光的干涉	226
*§ 19.6 人为双折射	228
*§ 19.7 旋光现象	230
思考题	232
习 题	232

第五篇 量子物理基础

第二十章 光的量子性	235
§ 20.1 热辐射 普朗克量子假说	236
§ 20.2 光电效应 爱因斯坦光子假说	239
§ 20.3 康普顿效应	244
思考题	247
习 题	248
第二十一章 原子的量子理论	250
§ 21.1 原子光谱的实验规律	250
§ 21.2 玻尔的氢原子理论	252
§ 21.3 实物粒子的波粒二象性	257
§ 21.4 不确定关系	261
§ 21.5 波函数 薛定谔方程	263
§ 21.6 定态薛定谔方程应用举例	266
§ 21.7 氢原子的量子力学处理	270
§ 21.8 电子自旋 四个量子数	275
§ 21.9 多电子原子中的电子分布	277
思考题	281
习 题	282

第六篇 现代工程技术物理基础

第二十二章 固体的量子理论	284
§ 22.1 固体的能带结构	284
§ 22.2 电子在能带中的填充和运动	288
§ 22.3 半导体的导电机理	290
§ 22.4 p-n 结与半导体器件	292
*§ 22.5 超导体	295
思考题	298
第二十三章 激光	300
§ 23.1 激光产生的基本原理	300

§ 23.2 激光器	303
§ 23.3 激光特性及应用	305
§ 23.4 激光全息照相	307
§ 23.5 非线性光学	312
思考题	314
科学家介绍	315
库仑	315
法拉第	315
麦克斯韦	316
菲涅耳	317
普朗克	317
玻尔	318
德布罗意	319
物理学与技术	320
铁电体 压电效应及其应用	320
磁性材料在信息技术中的应用	322
习题答案	326
附录	337
〔1〕 国际单位制(SI)中常用电磁学量的名称、符号和量纲式	337
〔2〕 常用物理常量表	338
参考文献	339

第三篇 电 磁 学

电磁学是经典物理学的一个重要部分,电磁场是物质世界的重要组成部分,电过程是自然界的基本过程,电磁作用是物质的基本相互作用之一。电磁学就是研究电磁运动及其规律的一门学科。

人类对电磁现象的接触和认识是非常早的。早在我国汉朝就有“琥珀拾芥”的记载,罗盘的发明在中国至少也可上溯到公元前 2 世纪。但是在 18 世纪以前的漫长岁月里,电磁学的发展并没有取得实质性的进展。18 世纪中期以后,人们对电现象进行了一系列重要的观察,其中最主要的发现也许是 1752 年富兰克林用实验证明了雷雨云的电性质。直到 1785 年库仑定律的发表,电磁学的研究才成为定量的科学。1800 年,伏打在伽伐尼研究的基础上制成了伏打电池,从此,人们才获得了较强的稳定电流。1820 年,奥斯特发现了电流的磁效应,首先揭示了电和磁之间的联系。1821—1822 年,安培提出了分子电流假设,使永磁现象和电流的磁效应联系了起来。1822 年,安培建立了磁场对电流作用的规律。在安培实验的基础上,毕奥和萨伐尔同时表述了电流元产生磁场的规律。1826 年,欧姆阐明了电动势和端电压的差别,建立了欧姆定律,定义了电阻,并建立了电阻定律。1831 年,法拉第发现了电磁感应定律,揭示了电和磁的又一重要联系,他最先提出电场和磁场的观点,认为电力和磁力两者都是通过场起作用的。在他们成就的基础上,麦克斯韦终于在 1865 年建立了系统的电磁场理论,并指出光是一种电磁波——在空间传播的交变电磁场,使光学成为电磁场理论的组成部分。20 多年后,即 1888 年,赫兹从实验中发现了电磁波的存在,为麦克斯韦理论提供了最有力的支持。到 20 世纪初,人们进一步发现,在解释微观世界的一些现象中,需要把相对论与量子规律结合起来,从而导致了新的学科——量子电动力学的诞生。现在这一学科已成为人类探索微观世界的有力武器。总之,随着生产的不断发展,实验技术的不断完善,使人们对电磁现象的认识不断深入,电磁学的理论也就一步一步地深化。由于人们对客观世界的认识是无止境的,可以预料,电磁学必将得到进一步发展和完善。

电磁学在生产技术和科学实验中有着广泛的应用。无论是动力、通信、精密测量及自动控制等都离不开电和磁。此外,电磁学还是其它一些学科的基础,如电工学、电化学、无线电电子学、遥控和自动控制学、电视学、固态电子学等。电磁学在物理学中也具有重要地位。物质的某些性质,如金属的导热性、固体和液体的弹性、光学中的折射率等都可以由物质的电结构和电磁学理论得到满意的解释。因此,学习和掌握电磁学的基本知识是十分重要的。

本篇主要讲述电磁学的基础知识,主要内容有:静电场的基本性质及其规律;静电场和物质的相互作用;磁场的基本性质及其规律,磁场和物质的相互作用;电磁感应现象及其规律;简要介绍电磁场理论的基本概念和电磁波。

第十一章 真空中的静电场

相对于观察者静止的电荷称为静电荷,静电荷所激发的电场称为静电场。本章主要介绍真空中静电场的基本性质和规律,带电粒子在静电场中的受力及其运动。

我们将分别从电场对电荷作用力和电荷在电场中移动时电场力对电荷作功这两方面进行讨论,分别引入电场强度和电势这两个重要物理量来描述电场的特性;介绍反映静电场基本性质的场强叠加原理、高斯定理和场强环流定理;讨论电场强度和电势两者之间的关系。

§ 11.1 电荷 库仑定律

很早以前,人们就认识到有些物体,如琥珀和丝绒相互摩擦后,可以具有吸引轻小物体的能力,后来把这种能力归因于经过摩擦的物体上带上了电荷。本节通过对电荷各种相互作用和效应的研究来认识电荷的基本特性有:电荷有正、负电荷两种,同种电荷相斥,异种电荷相吸;电荷的量子性;电荷守恒。并通过库仑定律的介绍,定量地研究电荷之间相互作用力的规律,这是静电学的基础。

一、电荷

人类认识电现象,开始于对摩擦起电现象的观察。我国古代学者王充在他的著作《论衡》中就有:“顿牟掇芥”的记载。人们把物体经过摩擦具有吸引轻小物体的能力称为带电,或者称为有了电荷。处于带电状态的物体称为带电体。实验证明,物体所带的电有两种,而且只有两种,一种和丝绸摩擦过的玻璃棒上的电性相同,称为正电荷;另一种和毛皮摩擦过的橡胶棒上的电性相同,称为负电荷。电荷之间有相互作用力,同号电荷相互排斥,异号电荷相互吸引。这种相互作用力称为电力。根据带电体之间的相互作用力的大小,能够确定物体所带电荷的多寡。表示物体所带电荷多寡程度的物理量称为电量,常用 Q 和 q 表示,在国际单位制中,电量的单位为库仑,简记作 C。

摩擦起电的原因,可以由物质的电结构得到解释,我们知道,任何实物都是由分子、原子组成的,而原子是由带正电的原子核和带负电的电子构成,原子核中又有带正电的质子和不带电的中子。每个质子和电子所带的电量等值异号。在正常情况下,每个原子中的质子数和电子数相同,对外呈电中性。由大量分子、原子组成的物体,一般情况下也是呈电中性的。当两个物体相互摩擦时,情况将会变化。一些原子中的外层电子在摩擦作用下获得能量,从而脱离原子核的束缚而转移到另一个物体上。这样,获得电子的物体带负电,失去电子的物体带正电,这正是摩擦起电的微观机理。

到目前为止的大量实验表明,电子是自然界具有最小电量的粒子,所有带电体或其它微观粒子的电量都是电子电量的整数倍。这个事实说明,物体所带的电荷不是以连续方式出现的,而只能是一系列分立的、不连续的量值。这称为电荷的量子化。据测定,电子电量的绝对值为

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$$

电荷的最小单元(即电子电量 e)是如此之小,以致使电的量子性在研究宏观现象的绝大多数实验中不表现出来。近代物理从理论上预言基本粒子由若干种更小的粒子叫做“夸克”或“反夸克”所组成,每一个夸克或反夸克可能带有 $\pm e/3$ 或 $\pm 2e/3$ 的电量。然而至今单独存在的夸克尚未在实验中发现。

二、电荷守恒定律

实验表明,无论是摩擦起电过程,还是其他方法使物体带电的过程,正负电荷总是同时出现的,而且这两种电荷的量值一定相等。当两种异号电荷相遇时,则互相中和;如果原来两种异号电荷的量值相等,经中和后物体就不带电了,但两物体电荷总量不变。由此可见,当一种电荷出现时,必然有相等量值的异号电荷同时出现;一种电荷消失时,也必然有相等量值的异号电荷同时消失。在一隔离的系统内,无论进行怎样的物理过程,系统内电量的代数和保持不变。这个由实验总结出来的定律称为电荷守恒定律。这个定律也可这样叙述:电荷只能从一个物体转移到另一个物体,或者从物体的一部分转移到另一部分。但电荷既不能被创造,也不能被消灭。电荷守恒定律是物理学中的基本定律之一。

近代物理实验已表明,在某些核反应和微观粒子的相互作用过程中,电荷是可以产生和消失的。然而电荷守恒并未因此而遭到破坏。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的电量的代数和,因而电荷守恒定律仍然保持正确。

三、库仑定律

一般地说,两个带电物体间的相互作用力与它们的大小、形状及周围介质等有关,情况较复杂。本节所研究的是一种最简单最基本的情况,即两个相对静止的真空中的点电荷之间的相互作用力。

点电荷是一种理想模型。如果一个带电体的几何线度比起它到其他带电体的距离小得多时,这带电体的大小、形状和其上的电荷分布已显得无关紧要,因而可以将它抽象为一个只具有电荷的几何点——点电荷。注意,点电荷的概念具有相对意义,点电荷的带电量不一定很小。

1785年库仑利用扭秤实验定量地研究了真空中两个点电荷之间的相互作用力,确立了著名的库仑定律。库仑定律可陈述如下:

在真空中, q_1 和 q_2 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;作用力的大小与电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比,而与这两个点电荷之间的距离 r_{12} 的平方成反比。

库仑定律的数学表达式为

$$\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{r}}_{12}$$

式中 k 为比例系数; $\mathbf{F}_{12}$ 表示 q_1 受到 q_2 的作用力, $\mathbf{F}_{21}$ 表示 q_2 受到 q_1 的作用力; $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ 表示由 q_1 指向 q_2 的单位矢量(即沿这个方向且长度为 1 单位的矢量)。当 q_1 和 q_2 同号时,如图 11-1(a)所

示, F_{21} 和 $\hat{r}_{12}$ 方向相同, 表示 q_1 和 q_2 之间的作用力是斥力; 当 q_1 和 q_2 异号时, 如图 11-1(b) 所示, F_{21} 和 $\hat{r}_{12}$ 方向相反, 表示 q_1 和 q_2 之间的作用力是吸引力。因此上述矢量式同时给出了两个点电荷间作用力的大小和方向。

比例系数 k 的值取决于式中各量的单位。在国际单位制中, F 的单位是 N, r_{12} 的单位是 m, q_1 、 q_2 的单位是 C。在选定了这些单位后, k 的实验值为

$$k = 8.98755 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

为使由库仑定律导出的公式形式简化, 通常引入新恒量 ϵ_0 代替 k 。令

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

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

ϵ_0 称为真空的介电常数, 也叫真空的电容率。这样, 真空中的库仑定律可写作

$$\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{r}}_{12} \quad (11-1)$$

运用库仑定律时, 计算相互作用力大小用标量式

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

方向按同号相斥、异号相吸予以判定。

例 11.1-1 在氢原子内电子和原子核之间的距离 $r = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。试计算氢原子内电子和原子核之间的静电作用力和万有引力, 并比较两者的大小。已知电子的质量 $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 氢原子核的质量 $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 电子和原子核所带的电量相等, 即 $q_1 = q_2 = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, 万有引力恒量 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ 。

〔解〕 根据库仑定律, 计算电子和原子核间的静电力为

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = 9.00 \times 10^9 \times \frac{(1.60 \times 10^{-19})^2}{(0.529 \times 10^{-10})^2} = 8.23 \times 10^{-8} \text{ N}$$

根据万有引力定律, 计算电子和原子核间的引力为

$$F_g = G \frac{m_p m_e}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times (1.67 \times 10^{-27}) \times \frac{(9.11 \times 10^{-31})}{(0.529 \times 10^{-10})^2} = 3.64 \times 10^{-47} \text{ N}$$

静电力与万有引力比值为

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{8.23 \times 10^{-8}}{3.64 \times 10^{-47}} = 2.27 \times 10^{39}$$

可见, 在原子内部电子和原子核间静电力远比其间的万有引力大。故在处理电子和原子核之间相互作用时往往只考虑静电力而将万有引力忽略不计。

§ 11.2 电场 电场强度

电场以及磁场已被证明是一种客观实在, 它们运动的速度是有限的, 电磁场和实物一样具

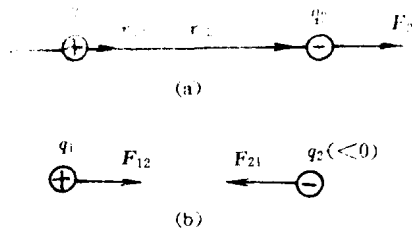


图 11-1 两个点电荷之间的相互作用力

有能量、质量和动量,场和实物是物质存在的两种不同形式。本节从电场对电荷作用的电场力出发研究电场的力的性质,并引入电场强度的概念来描述电场的力学性质。

一、电场

在真空中,两个静止电荷之间存在的相互作用力是怎样传递的呢?围绕这一问题,历史上曾有两种观点。一种是所谓超距作用的观点,这种观点认为,真空中相隔一定距离的两个点电荷之间的相互作用力,既不需要时间,也不需要任何介质,而是直接越过空间作用的。另一种观点则认为,这种力是通过一种叫做以太的介质来传递的。直到近代,这一问题才有了定论。科学家通过大量实验,证实了任何一个带电体都要在其周围空间由近及远地激发电场,库仑力是通过电场以有限速度传递的。电荷与电荷间的相互作用是通过场来实现的,即

$$\boxed{\text{电荷 } q_1} \rightleftarrows \boxed{\text{电场}} \rightleftarrows \boxed{\text{电荷 } q_2}$$

进一步的研究表明,电场是一种特殊物质。它具有实物物质的一些基本属性,如场有能量、动量和质量等,但又有其特殊性。对实物粒子来说,一个粒子占据的空间,就不被其它粒子占据。电场则不一样,一个电荷在某一空间激发电场,另一个电荷也可以在同一空间激发另一个电场,即几个场可以在同一空间共存。

相对于观察者静止的电荷所激发的电场称为静电场。静电场的对外表现主要有:

- (1) 位于电场中的任何带电体都将受到电场对它的作用力;
- (2) 带电体在电场中移动时,电场力将对带电体做功,表明电场具有能量;
- (3) 电场能使位于电场中的导体和电介质分别产生静电感应现象和极化现象。

正是根据静电场的以上表现来研究静电场的性质。

二、电场强度

下面先从静电场对处于电场中的电荷有力的作用来研究电场的性质。

用试验电荷可以确定电场中某点场的性质。试验电荷 q_0 必须同时具备两个条件:

- (1) q_0 的几何线度必须很小,可视为点电荷,便于用来确定空间各点场的性质;
- (2) q_0 的电量必须很小,以至于在实验精确度范围内 q_0 对原电场无明显影响。

把试验电荷 q_0 引入电场中各点做实验时发现:把试验电荷 q_0 放在电场中不同点时,在一般情况下, q_0 所受力的方向和大小是逐点不同的。但在电场中给定点处, q_0 所受力的方向和大小是完全一定的; q_0 取不同值时, q_0 受力的大小 F 不同, q_0 越大, F 也越大,但 F/q_0 具有确定的量值,也就是说,对电场中任一给定点, F/q_0 是个确定的常矢量。对电场中不同的给定点,比值 F/q_0 的大小和方向一般不同。因此,比值 F/q_0 只与试验电荷所在点的电场性质有关,而与试验电荷 q_0 的电量无关。由于 F/q_0 反映了电场的性质,所以用它来描述电场,并定义它为电场强度,简称场强。场强是矢量,用 E 表示

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (11-2)$$

上式中, $q_0=+1$ 单位时, E 与 F 量值相等,方向也相同。可见电场中任一场点的电场强度在量值和方向上等于单位正电荷在该点所受的力。

电场强度的单位是牛顿每库仑($\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$),或伏特每米($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)。场强的量纲是 $\text{I}^{-1} \text{LMT}^{-3}$ 。

对于电场强度这一概念,需要强调以下两点:

(1) 电场强度 E 是描述电场自身性质的物理量,与是否引入试验电荷无关。当场源电荷(相对试验电荷而言)确定后,它在空间中激发的电场也就确定了。引入试验电荷仅为测量电场中各点的场强 E ,试验电荷不存在时, E 仍客观存在。

(2) 在一个确定的电场中,不同的空间点, E 一般有不同的方向和大小。所以场强 E 是空间点函数, E 的空间分布构成一个矢量场。

三、场强叠加原理

若场源电荷是由几个点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 组成的点电荷系时,各个点电荷均在空间激发自己的电场,这时空间各点的场强该如何计算呢? 我们可根据场强的定义式(11-2),用实验方法测出试验电荷 q_0 在空间某点所受的电场力 F ,便可确定这组点电荷在该点激发的总场强 E 。设 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 分别表示 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 单独存在时所激发的电场施于 q_0 上的力。根据力的叠加原理, q_0 在点电荷系激发的总电场中所受的电场力 F 为

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum_{i=1}^n F_i$$

上式两边同除以 q_0 ,得

$$\frac{F}{q_0} = \frac{F_1}{q_0} + \frac{F_2}{q_0} + \dots + \frac{F_n}{q_0} = \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{q_0}$$

按场强定义,右边各项分别是各个点电荷单独存在时所产生的场强,左边为总场强,即

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{i=1}^n E_i \quad (11-3)$$

上式说明,点电荷系所激发的电场在任一点处的总场强等于各个点电荷单独存在时在该点各自激发的场强的矢量和。这叫场强叠加原理,是电场的基本性质之一。它是计算点电荷系或任意形状的带电体的场强的依据。

四、场强的计算

当电荷的分布已知时,根据场强叠加原理,从点电荷的场强公式出发,便可求出电场中各点的场强。下面说明计算场强的方法。

1. 点电荷电场中的场强

设在真空中有一个点电荷 q ,则其周围电场中,在距离 q 为 r 的 P 点处的场强可计算如下:设想在 P 点处放一试验电荷 q_0 ,按库仑定律, q_0 所受的电场力为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \hat{r}$$

式中 $\hat{r}$ 是从点荷 q 指向 P 点的单位矢量。根据场强定义(11-2)式得 P 点的场强为

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (11-4)$$

如果 q 为正电荷, E 的方向与 $\hat{r}$ 方向一致,是背离 q 的;如果 q 是负电荷, E 的方向与 $\hat{r}$ 方向相反,而指向 q 。如图 11-2 所示。

由式(11-4)可知,点电荷场强的大小为

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

方向沿径向,这种电场的特征是 E 与 r^2 成反比, r 值越大, E 值越小;当 r 相同时, E 值也相同。在以场源电荷 q 为球心、 r 为半径的球面上,场强的大小相等,方向沿径向。通常称这样的电场为具有球对称性的电场。

2. 点电荷系电场中的场强

设真空中的电场是由若干点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 所共同激发的,各点电荷到电场中任一给定点 P 的矢径分别为 $r_1, r_2, \dots, r_n$,按式(11-4),各点电荷在 P 点的场强分别为

$$E_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \hat{r}_1, \quad E_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \hat{r}_2, \quad \dots, \quad E_n = \frac{q_n}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} \hat{r}_n$$

根据场强叠加原理,这些点电荷各自在 P 点所产生的场强的矢量和就是 P 点的总场强,用 E 表示,则

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \hat{r}_i \quad (11-5)$$

3. 任意带电体电场中的场强

对电荷连续分布的任意形状的带电体,可以将它视为由无限多极小的电荷元 dq 组成,每个电荷元 dq 可视为一个点电荷,它在空间一点产生的场强 dE ,按点电荷的场强公式可写为

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \hat{r}$$

将所有电荷元在该点产生的场强 dE 求矢量和(即矢量积分),可得出带电体在空间中任一点的场强,即

$$E = \int dE = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r} \quad (11-6)$$

式中 r 为 dq 到所求场点的矢径 r 的大小; $\hat{r}$ 为矢径 r 方向上的单位矢量。

上式是矢量的积分形式,在具体运算时,通常把 dE 在事先选定的坐标轴方向上投影,写出其分量式,然后对分量进行积分,得出沿各个坐标轴的分量值,最后由各分量值求出总的场强。

式(11-6)中电荷元 dq 的具体表达式视带电体的情况而定。如果电荷是线分布的,则线元 dl 上的电量为 $dq = \lambda dl$, λ 称为线电荷密度,即表示单位长度上的电量;如果电荷是面分布的,则面元 dS 上的电量为 $dq = \sigma dS$, σ 称为面电荷密度,即单位面积上的电量;如果电荷是体分布的,则体元 dV 内的电量为 $dq = \rho dV$, ρ 称为体电荷密度,即单位体积内的电量。

例 11.2-1 求电偶极子轴线延长线上和中垂线上任一点的场强。

〔解〕 一对等量异号的点电荷 $+q$ 和 $-q$,当两者之间的距离 l 比所讨论问题中涉及的距离小得很多时,这一对点电荷称为电偶极子。描述电偶极子用电偶极矩(简称电矩)这一物理量,电偶极矩定义为

$$p = ql \quad (11-7)$$

式中 l 表示从负电荷到正电荷的矢径,其大小为 l ,方向由 $-q$ 指向 $+q$ 。正负电荷的连线称为电

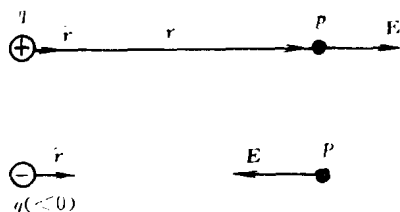


图 11-2 点电荷电场中的场强方向