

University Physics

大学物理 (下册)

主编 邓文基 郑立贤

高等教育出版社

Daxue Wuli

大学物理

主编 邓文基 郑立贤

(下册)

参编 王琴惠 李仁英 文德华 汪红翎

内容提要

本书根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版)并结合作者多年的教学经验编写而成。书中涵盖了《基本要求》中的核心内容,并精选了相当数量的拓展内容。全书行文流畅,深入浅出,物理图像清晰,难易程度适中,强调理论与实验的紧密联系,关注物理概念的演变过程,注重对学生科学素质的培养。

本书分上、下两册。上册包括力学、振动与波动、波动光学以及热学,下册包括电磁学、相对论以及量子物理等。各章均配有习题,供学生练习以加深对知识的理解。学生可通过扫描书中二维码等方式获取相关电子资源。

本书可作为高等学校理工科非物理类专业的大学物理课程教材,也可供社会读者阅读及自学。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理.下册/邓文基,郑立贤主编.--北京:
高等教育出版社,2016.9

ISBN 978-7-04-046130-5

I. ①大… II. ①邓… ②郑… 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 192007 号

策划编辑	李颖	责任编辑	程福平	封面设计	张志奇	版式设计	杜微言
插图绘制	杜晓丹	责任校对	刘娟娟	责任印制	赵义民		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京市白帆印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 20.25
字 数 430 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>

版 次 2016 年 9 月第 1 版
印 次 2016 年 9 月第 1 次印刷
定 价 36.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 46130-00

序

“大学物理”是高等学校理工科类专业开设的公共基础课,旨在指导学生学习和掌握必要的物理学基础知识,帮助学生成长为训练有素的科学工作者和工程技术人员。

大学物理教学内容涉及力学、机械振动和机械波、热力学和统计物理、光学、电磁学和近代物理等六大部分,包含物理学的一些基本概念、重要原理和典型方法,为继续学习和研究物理学或其他相关学科打下必要的基础。与物理类专业的“普通物理”系列课程不同,非物理类专业的大学物理理论课通常只有大约 120 学时,在这十分有限的教学时间里如何为学生打开通向广阔物理世界的门窗始终是大学物理教学面临的主要挑战。

物理学是研究物质的基本结构、相互作用和普遍运动形式及其相互转化规律的科学,并已渗透到人类知识的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是自然科学和工程技术的共同基础,甚至对人文和社会科学也产生了重要影响。

物理学并非一个已经完成的封闭系统。新的实验结果、新的创造发明甚至新的社会思潮都会改变和丰富我们对物质世界的认识,更新物理学的知识体系。大学物理课程不仅要循序渐进地传授和掌握物理学的基本知识,而且还要适当地关心和了解物理学的研究前沿与最新进展。

物理学是实验和理论相互依存的开放体系。对任何物理概念和原理的正确理解最终都依赖于物理实验,而缺乏理论诠释的观察结果和实验数据只是凌乱的感觉和印象。研究和创新总是意味着对现有理论更全面与深刻的理解和阐述。

编写教材是教学活动的重要环节,也是我们的悠久传统。早在 1988 年,周勇志教授(已故)就主持编写了《大学物理》教材,由华南理工大学出版社出版并多次再版,于 1992 年获得“国家教委优秀教材二等奖”。邓法金教授(已故)全面总结了多年从事大学物理教学的丰富经验,独自编著了《大学物理学》教材,并于 2001 年在科学出版社出版。2009 年,我们组织编写的《大学物理》教材由华南理工大学出版社出版,至今已使用近八年。这些教材各有特色,编排合理,受众面广,口碑良好。此次新编《大学物理》,我们在保留原教材精华的基础上,广泛吸收教师和学生的使用反馈意见,查缺补漏,充实完善,特别是对机械振动与机械波、波动光学以及近代物理等章节做了大幅度的修订和改写,力争为广大师生提供一部精品教材。全书共分上、下两册,参加编写工作的教师有李绍新(第 1—5 章),邓柏昌(第 6,7 章),郑立贤、罗仁俊(第 8—10 章),韩光泽(第 11—13 章),王琴惠(第 14,15 章),李仁英(第 16—20 章),文德华(第 21,26 章),邓文基、汪红翎(第 22,23 章),汪红翎(第 24,25 章)。邓文基和郑立贤主持编写。

新编《大学物理》教材获得高等教育出版社与华南理工大学的青睐与支持。高等教育出版社出版过众多优秀的大学物理教材,拥有丰富的大学物理电子资源,编辑力量雄厚,为教材质量提供了重要保证。

虽然如此,我们也清楚地意识到书中的缺点和错漏仍然在所难免,真诚地希望能够得到读者的批评与指正。若能将您的意见和建议发到电子邮箱 phwjdeng@scut.edu.cn,我们不胜感激。

编者

2016年6月16日

目 录

第五篇 电 磁 学

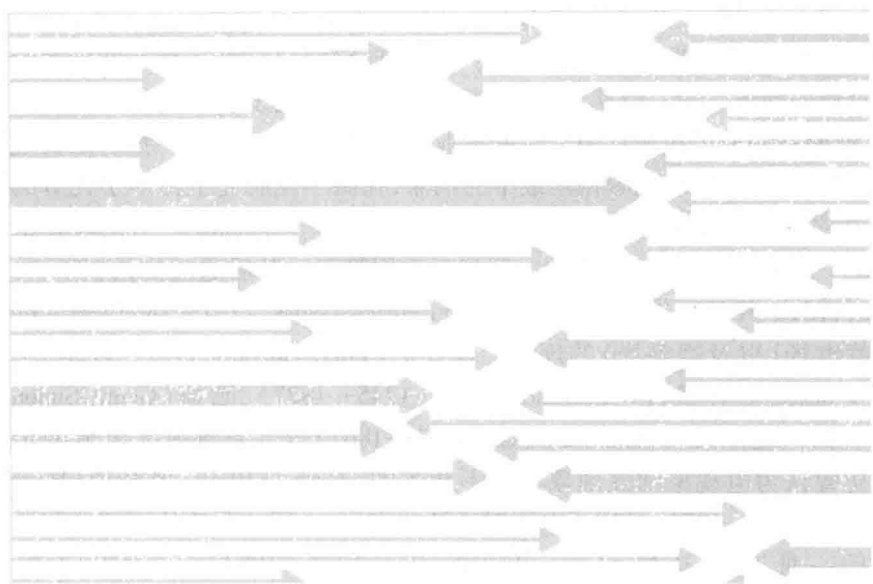
第 14 章 真空中的静电场	003
14.1 库仑定律	004
14.2 电场 电场强度	008
14.3 电场强度通量与高斯定理	017
14.4 静电场的环路定理与电势	025
14.5 等势面 场强与电势的微分关系	033
阅读材料 卡文迪许关于点电荷相互作用力的研究	037
习题	038
第 15 章 静电场中的导体和电介质	043
15.1 静电场中的导体	044
15.2 静电场中的介质 介质中高斯定理	053
15.3 电容和电容器	063
15.4 电场的能量	069
阅读材料 静电现象和应用	073
电介质击穿的危害及应用	077
电流变液的研究及应用	080
铁电体 压电效应	081
习题	083
第 16 章 恒定磁场	089
16.1 恒定电流	090
16.2 磁场与磁感应强度	103
16.3 毕奥-萨伐尔定律	106
16.4 匀速运动点电荷的磁场	111
16.5 磁场的高斯定理和安培环路定理	112
习题	117
第 17 章 磁场对电流的作用	121
17.1 磁场对运动电荷的作用	122
17.2 磁场对载流导线的作用	127
17.3 均匀磁场对载流线圈的作用	131
17.4 磁力的功	132

习题	135
第 18 章 磁介质	139
18.1 磁介质及其磁化	140
18.2 磁介质中的高斯定理与安培环路定理	145
18.3 铁磁质	149
习题	152
第 19 章 电磁感应	155
19.1 法拉第电磁感应定律	156
19.2 动生电动势与感生电动势	158
19.3 自感、互感	169
19.4 磁场的能量	173
习题	176
第 20 章 麦克斯韦方程组与电磁波	179
20.1 位移电流与全电流定理	180
20.2 麦克斯韦方程组	183
20.3 电磁波	185
习题	188

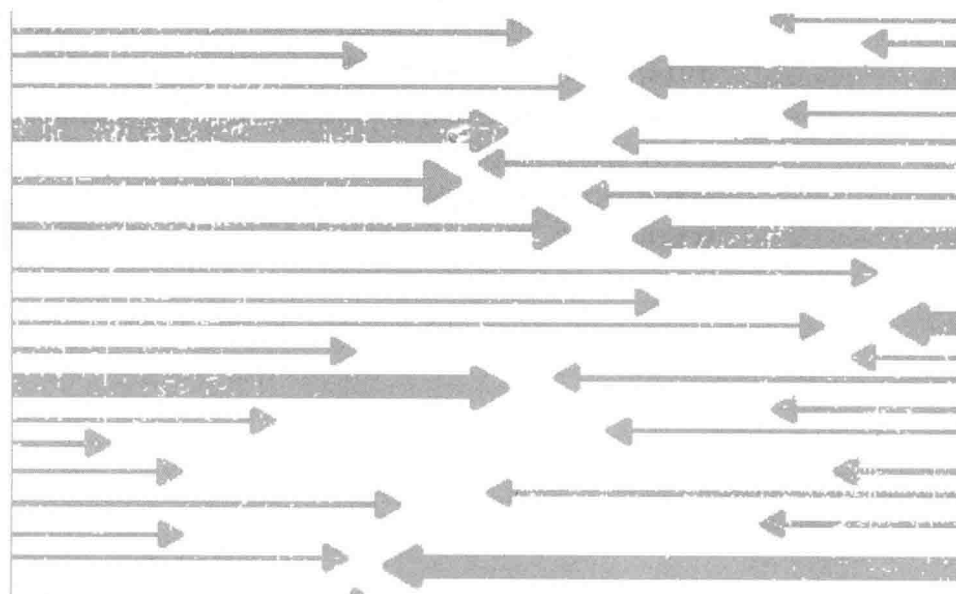
第六篇 近代物理

第 21 章 狭义相对论	193
21.1 牛顿的绝对时空观	194
21.2 爱因斯坦的相对论时空观	198
21.3 几个典型的相对论效应	205
21.4 相对论动力学	208
阅读材料 双生子效应	216
狭义相对论与广义相对论在全球定位系统(GPS)中的应用	216
高速运动物体的视觉形象	217
习题	218
第 22 章 早期量子论	221
22.1 黑体辐射与能量量子化	222
22.2 光电效应	228
22.3 康普顿效应	232
22.4 氢光谱与玻尔氢原子模型	236
习题	240
第 23 章 量子力学初步	243
23.1 德布罗意波	244
23.2 波函数与薛定谔方程	248
23.3 薛定谔方程应用举例	253

23.4	氢原子的量子态	261
	习题	268
第 24 章	激光	271
24.1	原子的自发辐射、受激辐射和受激吸收	272
24.2	激光产生的条件	273
24.3	常见激光器及其主要性能	276
24.4	激光的特性及其应用	277
	习题	280
第 25 章	固体的能带理论基础	281
25.1	固体的能带结构	282
25.2	导体 半导体 绝缘体	283
25.3	半导体的导电机制	285
	习题	288
* 第 26 章	广义相对论 天体物理与宇宙学简介	289
26.1	广义相对论基础	290
26.2	致密天体	293
26.3	宇宙学基础	296
	阅读材料 固有时、固有长度和时空的间隔距离	300
	广义相对论对双生子佯谬的解释	301
	部分习题参考答案	303



第五篇 电 磁 学



电磁运动是物质运动的一种最基本的运动形式,电磁学是研究电磁场的基本性质和基本规律及电磁场与物质的相互作用的科学。电磁学在现代物理学中占有重要地位。

电磁学起源于人类的生产活动,并随着生产的发展而逐步完善。远在公元前6世纪左右,希腊哲学家泰勒斯(Thales,公元前624—前546)已记载了用布摩擦过的琥珀能吸引草屑的现象。同一时期即春秋战国末年我国人民发现了磁铁矿吸铁的现象,并用天然磁石制成了指南针用于航海事业,还发现了地磁偏角。我国是发现天然磁石、发明指南针和发现地磁偏角最早的国家,在磁学发展史上留下了光辉的一页。关于电磁现象的定量的理论研究,最早可以从库仑(Charles-Augustin de Coulomb,1736—1806)1785年研究电荷之间相互作用算起。其后通过泊松(Simeon Denis Poisson,1781—1840)、高斯(Johann Carl Friedrich Gauss,1777—1855)等人的研究形成了静电场(以及静磁场)的理论。伽伐尼(Luigi Galvani,1737—1798)于1786年发现了电流,后经伏打(Alessandro Volta,1745—1827)、欧姆(Georg Simon Ohm,1789—1854)、法拉第(Michael Faraday,1791—1867)等人发现关于电流的定律。人们最初曾认为电现象和磁现象是互不相关的,直到1819年,奥斯特(Hans Christian Oersted,1777—1851)发现了电流对磁针的作用,人们才开始认识到电和磁的关系。此后一两年内,毕奥(Jean-Baptiste Biot,1774—1862)、萨伐尔(Felix Savart,1791—1841)、安培(Andre-Marie Ampere,1775—1836)、拉普拉斯(Pierre Simon Laplace,1749—1827)等作了进一步定量的研究。1831年法拉第发现了电磁感应现象及其规律,并提出了场和场线的概念,使人们对电现象和磁现象的内在关系有了更为深刻的认识。1865年,麦克斯韦(James Clerk Maxwell,1831—1879)在前人工作的基础上,提出了涡旋电场和位移电流两个假说,以其深刻的物理思想、高超的数学技巧建立了系统的电磁场理论,并由此预言了电磁波的存在,且指出光是一种电磁波,使光学成为电磁场理论的组成部分,完成了电、磁、光现象的理论大综合。

现在,电磁学理论已在工农业生产、科学研究及日常生活等方面有着极其广泛的应用,也已成为人类深入认识物质世界必不可少的基本理论。一切电磁器件和光电器件,例如电动机、发电机、电视机、微波、雷达、高能加速器、电子显微镜和电子计算机等,莫不依赖于电磁学的基本原理,而电工学、无线电电子学、无线电技术和集成电路等,都是在电磁学的基础上建立和发展起来的。

本篇将介绍电磁现象与电磁规律及其在生产 and 科研中的一些应用。由于电和磁有着密切的联系,电场和磁场是统一电磁场的两个侧面,因此本篇先分别讨论电现象和磁现象,再讨论电和磁的联系,介绍统一的电磁运动规律。

>>> 第14章

… 真空中的静电场

相对于观察者静止的电荷所激发的场称为静电场。本章主要研究真空中静电场的基本性质和规律。

本章以库仑定律和场强叠加原理为基础推出静电场的两个基本定理——高斯定理和静电场环路定理,引入两个描述电场性质的物理量——场强和电势,并讨论由已知场源电荷的分布计算空间场强和电势分布的方法。在本章中首次引入场的观念并介绍场的研究方法,对后续内容中的磁场研究部分也有借鉴意义。本章所涉及的内容,就思维方法来讲,对整个电磁学甚至整个物理学都具有典型的意义。

14.1 库仑定律

14.1.1 电荷及其性质

具有吸引羽毛、纸屑等轻小物体的性质的物体称为带电体,使物体带电的过程称为起电(electrification)。人们可以用摩擦或其他方法使物体带电,并把带电体所带的电称为电荷(electric charge)。实验指出,电荷有两种,而且只有两种:一种是丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷——称为正电荷,另一种是毛皮摩擦过的橡胶棒所带的电荷——称为负电荷。近代理论使我们对物质带电的本质有了进一步认识,物质电结构理论使我们认识到各种物质都由分子、原子组成,原子由原子核及核外电子组成,原子核又由中子和质子组成。中子不带电,质子带正电,电子带负电。通常状态下原子呈电中性(electric neutrality)状态,即原子中核内质子数与核外电子数相等。当两不同物体相互摩擦时,可使一物体失去一些电子而带正电,另一物体得到电子而带负电。物质电结构理论进一步表明:电荷是实物粒子的一种属性,它描述了实物粒子的电性质,正如质量反映实物粒子惯性或引力属性一样。一切实物粒子(无论宏观粒子或微观粒子)都有一定质量,但带电性质则可以不同。电荷只能随带电的基本粒子(电子、质子)的迁移而迁移,一切物体的原子核一般是不容易迁移的,所以物体带电的本质是两种物体间发生了电子的转移。

物体所带电荷数量的多少称为电荷量(electric quantity),常用 Q 或 q 表示。在国际单位制中,它的单位为库仑,符号为C。实验证明,在自然界中带电体所带电荷量总是一个基本单元的整数倍。这一基本单元的电荷量是电子所具有的电荷量的绝对值,以 e 表示,称为元电荷(elementary charge)。任意带电体所带电荷量则可表示为

$$q = ne \quad (n \text{ 为整数})$$

电荷的这一特性称为电荷量子化(charge quantization)。经近代测定,元电荷 e 的量值为

$$e = 1.602\ 176\ 620\ 8(98) \times 10^{-19} \text{ C}$$

现在已经知道基本粒子所具有的电荷量都是基本单元的整数倍。尽管近代物

理从理论上指出,基本粒子(如质子、中子等强子)都是由分别具有 $\pm\frac{1}{3}e$ 和 $\pm\frac{2}{3}e$ 电荷的夸克或反夸克组成,但这并不破坏电荷量子化的规律。因为,由于夸克禁闭,至今尚未在实验上发现单独存在的夸克,仅在一些间接的实验中验证了夸克的存在。

在物体的带电过程中,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上。但其所构成的系统的电荷总量既不会增加,也不会减少。实验证明,在一个孤立带电系统中(即没有净电荷通过系统界面),无论发生怎样的物理过程与化学过程,系统所具有的正负电荷的代数和总是保持不变,这就是电荷守恒定律(law of conservation of charge, 1748)。电荷守恒定律在微观领域内也被证明是正确的。

此外,实验证明,物体所带电荷与它的运动状态无关。当质子和电子处在加速器中时,随着它们速度的变化,其质量变化是显著的,但电荷却没有任何变化。电荷的这一性质表明系统所带电荷与参考系的选取无关,即电荷具有运动不变性或相对论不变性。

14.1.2 库仑定律

1. 点电荷

从18世纪开始,不少人着手研究电荷之间的相互作用力的定量规律。最先研究的是静止电荷之间的相互作用力(即库仑力)。研究静止电荷之间的相互作用力的理论称为静电学(electrostatics)。

实验发现,真空中两个静止带电体之间的电性相互作用力,不仅和两个带电体的电荷量、距离有关,而且与它们的大小、形状以及电荷在带电体上的分布有关。当带电体的几何线度远小于带电体之间的距离时,带电体的大小、形状以及电荷在带电体上的分布对它们之间的相互作用力的影响非常小,可以忽略不计,即可以把带电体所带的电荷看成集中在一个“点”上而视为点电荷。带电体被简化为点电荷后,可以用一个几何点标志它的位置,两个带电体之间的距离就是标志它们位置的两个几何点之间的距离。点电荷是理想模型。至于带电体的几何线度比带电体之间的距离小多少才能把带电体当作点电荷,要根据具体问题要求的精确度来确定。

2. 库仑定律

法国物理学家库仑发明了扭秤,并用扭秤研究两个点电荷之间的相互作用力的规律。1785年库仑发表了实验结果,这就是库仑定律(Coulomb's law, 1785)。

扭秤装置如图14-1所示。如果小球A和B都带电,则作用在小球A上的静电力将使悬丝扭转。为了使两个带电小球保持在实验时所需要的特定距离,可将悬头扭转一角度

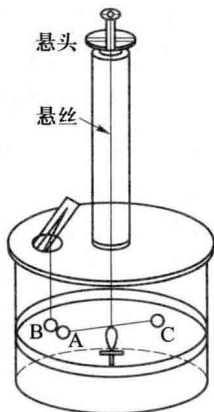


图14-1 库仑扭秤



θ ,以抵消悬丝的扭转效应。测量出角度 θ 的大小就可以确定作用在带电小球 A 上的力。

实验结果指出

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

式中, F 是作用于 A 和 B 这两个带电小球上的相互作用力的量值, r 是 A 和 B 间的距离。这两个力沿着两电荷的连线而指向相反的方向。应该注意,即使这两个电荷的大小不同,作用于每个电荷的力的大小也是相等的。

库仑还利用扭秤研究电荷间的相互作用力如何随着电荷的相对量值的改变而改变。当时,人们还没有其他方法可以用于检验或测量电荷,只能利用电荷间的静电力进行检验,而静电力与电荷量间的关系正是库仑所要解决的问题。库仑用巧妙的方法解决了这个问题。设两个完全相同的金属球,一个带电,一个不带电。如果这两个球接触,则原来的电荷必然均等地分配于这两个球上,这一点可以用扭秤来验证。使图 14-1 中 B 球的电荷量保持不变,令 A 球与另一完全相同的金属球 C 相碰,然后测量 A 与 B、C 与 B 间的相互作用力。可以测得,当距离 r 相同时力也相同。这就证明了 A 球与 C 球带有相同的电荷量。库仑利用这一方法,通过改变图 14-1 中 A、B 两球上电荷的相对量值,从而得到

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

式中 q_1 和 q_2 是球 A 和球 B 上电荷的相对量值。这一结论只对点电荷成立。即:真空中两个静止点电荷之间的相互作用力与这两个点电荷的电荷量的乘积成正比,与它们之间的距离的平方成反比,作用力的方向沿两点电荷的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸。这个结论称为库仑定律。库仑定律可用矢量公式表示为

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \mathbf{e}_{r12} \quad (14-1)$$

式中, q_1, q_2 分别表示两个点电荷的电荷量(带有正、负号); r_{12} 表示两点电荷之间的距离; \mathbf{F}_{12} 表示 q_2 对 q_1 的作用力; \mathbf{e}_{r12} 表示由 q_2 指向 q_1 方向的单位矢量; k 为比例系数, k 的数值和单位根据其他各量的单位由实验测定。当 q_1 和 q_2 同号时, \mathbf{F}_{12} 与 \mathbf{e}_{r12} 同方向,表明 q_1 受 q_2 的斥力,如图 14-2(a) 所示;当 q_2 与 q_1 异号时, \mathbf{F}_{12} 与 \mathbf{e}_{r12} 反方向,表明 q_1 受 q_2 的吸引力,如图 14-2(b) 所示。若将式(14-1)下标 1,2 对调,则此式将表示 q_1 对 q_2 的作用力 \mathbf{F}_{21} , 因 $\mathbf{e}_{r21} = -\mathbf{e}_{r12}$, 则 $\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12}$, 即真空中两个静止点电荷之间的相互作用力符合牛顿第三定律。

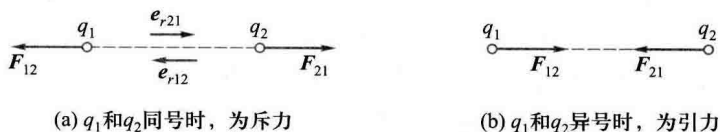


图 14-2 两个点电荷间的相互作用力

如果用 e_r 表示由施力点电荷指向受力点电荷的单位矢量, 则式(14-1)中的下标可去掉, 即库仑定律的矢量公式又可表示为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} e_r \quad (14-2)$$

在国际单位制(SI)中, 电荷量的单位是 C(库仑), 长度单位是 m(米), 力的单位是 N(牛顿), 实验测定的比例系数 k 为

$$k = 8.988\,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

通常引入另外一个常量 ε_0 来代替 k , 即

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

于是, 库仑定律的表达式可以写成

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} e_r \quad (14-3)$$

这里引入的常量 ε_0 叫作真空电容率(也称为真空介电常量), 其 2010 年推荐值为

$$\varepsilon_0 = 8.854\,187\,817 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

在库仑定律表达式中引入 4π 因子的做法, 称为单位制的有理化。单位制有理化的结果虽然使库仑定律的数学表达式变得复杂了些, 却使常用的电磁学规律的数学表达式中不出现 4π 因子, 从而变得简单简洁。在今后学习中读者会逐步体会到电磁学单位制有理化的优越性。

实验证明, 点电荷在空气中的作用力和在真空中的作用力相差极小, 也就是空气的电容率与真空电容率相差极小, 故对于空气中的静止点电荷, 式(14-2)仍可应用。

库仑力是自然界中的一种基本相互作用力。库仑定律是关于一种基本相互作用力的定律。库仑力与距离 r 的平方成反比常简称为平方反比律。电磁学的某些基本规律与平方反比律有关。平方反比律的精确性不断经历着实验的考验, 至今仍是某些物理学家关注的问题之一。

【例 14-1】 氢原子中电子和质子间的距离 $r = 5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$, 质子质量 $m_p = 1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 电子质量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 试比较此两粒子间万有引力和静电力的大小。

解 万有引力:

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

静电力:

$$F_e = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = 9.0 \times 10^9 \times \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{ N} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

两力之比为

$$\frac{F_e}{F_m} = 2.2 \times 10^{39}$$

显然,在微观粒子的相互作用中,万有引力与静电力相比远小得多,完全可以略去。在原子结合成分子、原子或分子组合成液体或固体时,它们的结合力在本质上也都属于电力,万有引力则可忽略不计。应该指出的是,当质子和中子结合成原子核时,原子核内质子间的库仑斥力是非常大的,但由于原子核内除了这种斥力外还存在着远比斥力强的引力——核力,原子核才得以稳定。

14.2 电场 电场强度

14.2.1 电场

库仑定律指出了两个静止的点电荷在真空中的相互作用力,然而并没有告诉我们电荷间的相互作用是怎样进行的。

早期的电磁理论是超距作用理论,它认为相隔一定距离的两个物体之间所存在的相互作用,既不需要介质传递,也不需要时间。19世纪,法拉第在大量实验事实基础上,提出了以近距作用观点为基础的场和场线的概念,从此场的概念成为近代物理学中最主要的基本概念之一。

按照场的观点,电荷间的相互作用是通过一种特殊的介质——电场(electric field)来传递作用的。即任何电荷都在周围空间激发起电场;电场是物质的一种特殊形态,与有形的、占据一定空间的带电体不同,它不仅存在于带电体内,也存在于带电体外,以至弥漫于整个空间。

相对于观察者静止的电荷在周围空间激发的电场称为静电场(electrostatic field),该电荷称为场源电荷。静电场仅是电磁场的一种特殊形态。电磁场与实物物质一样具有质量、能量和动量等,电磁场一经产生就能单独存在,即使产生它的电荷已经消失,而电磁场所具有的空间叠加性却是实物物质所不具有的。因此,场和实物虽然都是物质,但又有区别,是物质存在的两种不同形式。从近代的观点看,两个点电荷是通过交换场量子而相互作用的,电磁场的场量子就是光子。

电场的重要外在表现是:对引入电场的任何其他电荷都有作用力,称为电场力;当电荷在电场中移动时,电场力将对其做功;使引入电场的导体或电介质分别产生静电感应现象或极化现象。我们将根据上述电场的外在表现来研究电场的性质。

14.2.2 电场强度

为了描述电场的性质,首先引进物理量——电场强度(electric field strength)。

设想一静止不变的场源电荷(可以是点电荷、点电荷系或带电体)在空间激发一静电场,现分析如何定量表示空间某点处电场的强弱。为此,在场中某点引入试验电荷 q_0 以测量它所受到的电场力 \mathbf{F} ,并要求试验电荷 q_0 的电荷量足够小,几何线度足够小(可视为点电荷),从而不影响原有电场的分布。

实验发现,同一试验电荷在场中不同点,其受力的大小和方向一般均不相同。对于场中任一固定点来说,比值 \mathbf{F}/q_0 是一个无论大小和方向都与试验电荷无关的矢量(利用库仑定律也可以证明),显然它反映了电场本身的性质,我们把它定义为电场强度,简称为场强,用 \mathbf{E} 表示,即

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} \quad (14-4)$$

由式(14-4)可知,电场中某点的电场强度,在量值上等于放在该点的单位正电荷所受电场力的大小,其方向与单位正电荷在该点的受力方向一致。在国际单位制中,电场强度的单位是 $\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$ 或 $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

电场存在于电荷周围的整个空间。为了描述电场的空间分布,设想在空间的每一点上都相应有一个矢量 \mathbf{E} ,这些矢量 \mathbf{E} 的总体称为矢量场(vector field)。矢量场实际就是空间坐标的一个矢量函数 $\mathbf{E}(x, y, z)$ 。在讨论场的性质时,我们关心的是场强与空间坐标之间的函数关系。

14.2.3 场强叠加原理

若场源电荷是由空间中 n 个点电荷 q_1, q_2, \dots, q_n 所组成的点电荷系,试验表明,作用于场中某点 P 处试验电荷 q_0 的电场力 \mathbf{F} ,等于各个点电荷作用于 q_0 的力的矢量和,这称为力的独立作用原理,即

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

根据场强定义式(14-4)可求得合场强 \mathbf{E} 为

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \dots + \frac{\mathbf{F}_n}{q_0} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{F}_i}{q_0} = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i \end{aligned} \quad (14-5)$$

由此可见,点电荷系在空间某点产生的场强,等于每一个点电荷单独存在时在该点分别产生的场强的矢量和。这一结果称为场强叠加原理(superposition principle of electric field intensity),这是场的基本性质之一。

14.2.4 场强的计算

设真空中有一个场源点电荷 q ,在距点电荷 q 为 r 的 P 点放置一试验电荷 q_0 ,根据库仑定律表达式(14-3),作用于 q_0 上的电场力为