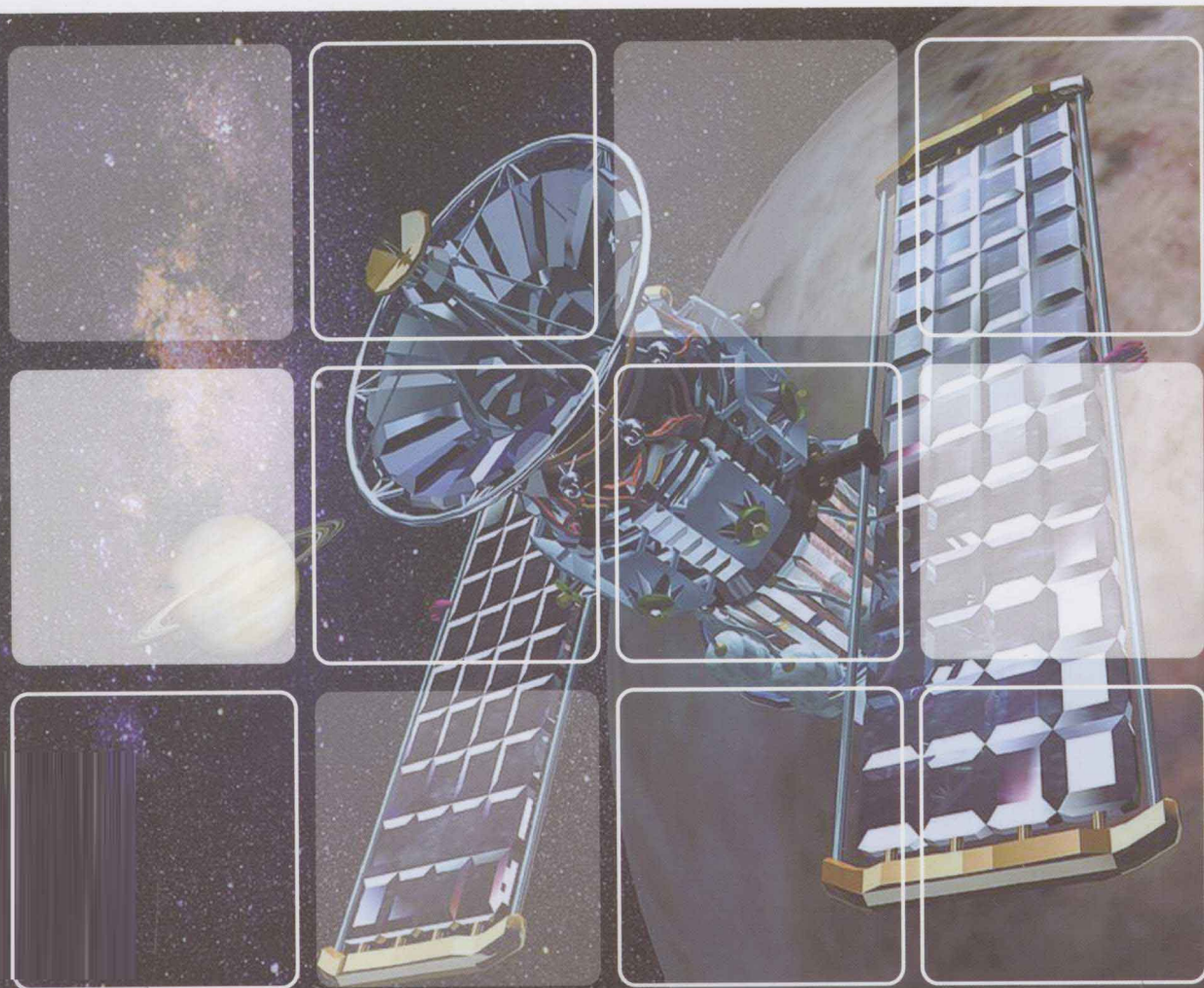


二十一世纪高校应用型本科规划教材

大学物理学

吕海江 焦铮
何聚 许媛 谢国秋 编著

下册



二十一世纪高校应用型本科规划教材

大学物理学

(下册)

吕海江 焦 铮
何 聚 许 媛 谢国秋 编著

吉林大学出版社

内容简介

本书是在结合应用型本科院校理工科专业(非物理类)大学物理教学内容和课程体系改革的实践基础上,总结了教学实践中的改革成果和经验,为适应 21 世纪高等教育大众化的新形势下对大学物理课程改革的需要而编写的。

全书分为上、下两册。上册着重叙述力学的基础地位和衔接作用,介绍比较易于接受的机械振动和机械波,以及热力学的物理基础,这样有利于低年级大学生尽快地进入学习上的良性循环和自主学习状态,激发学习兴趣。下册主要介绍了电磁学理论,以及波动光学和近代物理等内容;在此基础上阐述了现代物理和工程技术原理。

本书的编写指导思想:以基本概念、基本定律和科学方法为核心,在保持经典物理知识体系完整的同时,加强了近代物理和物理原理在科学研究、工程技术中的应用,增加了物理学与现代高新技术密切联系的知识。在编排上循序渐进、由浅入深,兼容性较好,可以满足各类院校尤其是一般应用型本科院校的教学要求,而对于学时较少的部分院校相关专业,带“*”内容可选择使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学. 下 / 吕海江, 焦铮编著. —长春:

吉林大学出版社, 2010. 12

ISBN 978-7-5601-6678-0

I. ①大… II. ①吕… ②焦… 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(2010)第 229858 号

书 名: 大学物理学(下)

作 者: 吕海江 焦铮 编著

责任编辑、责任校对: 陈颂琴

吉林大学出版社出版、发行

开本: 710×1000 毫米 1/16

印张: 15.5 字数: 321 千字

ISBN 978-7-5601-6678-0

封面设计: 读秀文化

浙江省良渚印刷厂 印刷

2010 年 12 月 第 1 版

2010 年 12 月 第 1 次印刷

定价: 33.00 元

版权所有 翻印必究

社址: 长春市明德路 421 号 邮编: 130021

发行部电话: 0431—88499826

网址: <http://www.jlup.com.cn>

E-mail: jlup@mail.jlu.edu.cn

前 言

物理学是一门实验科学,是理论和实验高度结合的精确科学。作为自然科学和工程技术的基础,物理学的基本理论已渗透到自然科学的众多领域,广泛应用于科学研究和生产技术以及日常生活中。物理学所体现的科学思维方式以及认识论和方法论,对人才的文化修养、综合素质和创新能力的培养举足轻重。正因为如此,大学物理学在各高等院校成为理工农医等专业大学生必须学好的最重要的基础课程之一。编写一本既符合教学改革的精神,又适合目前我国高等教育实际的大学物理课程的教材,一直被高校的广大物理教师所关注,这是一项具有非常重要意义的工作。近一个世纪以来,由于物理学的发展及其与物理学紧密联系的新技术的出现和广泛应用,使得这项工作变得不容易,甚至比较复杂。许多从事物理教学工作的教师在这方面做了许多有益的尝试和探索,取得了一些成果和经验。我们编写的这套《大学物理学》教材,就是从物理课程教学改革的需要和教学实际情况出发所做的一种尝试和探索。希望通过该课程的学习,不仅让学生了解和掌握众多重要的自然现象和规律,更重要的是要使入门者看到和学习到严格而严密的科学方法,使他们终生受益。

本教材根据“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,借鉴国内外关于教材建设与改革的经验,结合多年来我们的教学实践编写成的。在保证物理学理论体系的科学性、完整性、系统性的前提下,以“加强基础,提高能力,削枝强干,突出主线”为原则。教材注重陈述物理学的基本知识、基本概念、基本原理和定律,突出物理学知识的主要结构、框架,在保证经典物理和近代物理基础知识的同时,加强物理学原理与现代科学技术相联系的知识;同时适度控制篇幅及内容的深度,以适应不同地区学校和专业在高等教育大众化的新形势下对大学物理课程改革的需要,为普通高等院校理工院系提供一套符合当前教育需求和便于实际教学操作的教材。本教材特点主要有以下几点:

1. 精选经典内容,构建教材新体系。

2. 力求教材内容的现代化。教材中除讲述相对论和量子物理等近代物理内容外,还以阅读材料的形式介绍了许多当前新技术中的基础物理原理,包括熵、全息照相、激光和能带理论。在通篇教材中,加大了现代化内容的比重,使学生能接触到更多新的物理知识和概念,对提高学生学习物理的兴趣、培养学生的探索精神有益处。

3. 力求内容精炼和言简意赅。抓住主要内容,去粗取精,突出物理学中的重要定律与定理,从物理学发展的过程和教学实际情况的两个方面组织教学内容,精选例题、习题,用基本的、通俗的方法讲述物理内容。力求既满足广大教师的教学需要,又能激发学生的学习兴趣,培养学生的创新能力。

4. 适度开“窗口”,重视科学素质培养。在近现代物理部分大胆地“渗透”一些科技前沿信息。有些内容对学生学习可能有一定困难,但让学生尽早了解这些内容,有益于激发、培养学生的求知欲望和独立思考能力,提高学生的科学素质。

全书分为上下两册,共计 5 篇 14 章。上册包括力学(第 1~3 章),振动和波(第 4 章),热学(第 5~6 章);下册包括电磁学(第 7~10 章),波动光学(第 11 章),近代物理(第 12~14 章)。

本书各章节分别由以下同志执笔;谢国秋:绪论、第六章。程和平:第一章、第二章。郑立:第三章。刘仁臣:第四章、第五章。焦铮:第七章、第八章。许媛:第九章、第十章。吕海江:第十二章、第十三章。何聚:第十一章、第十四章。马堃:全书习题、附录 1、附录 2。全书由谢国秋统稿完成。

由于编者水平有限,错误及不妥之处在所难免,请广大师生批评指正,以便今后逐步完善和提高。

目 录

第三篇 电磁学	(143)
第 7 章 静电场	(144)
7.1 电荷与库仑定律	(144)
7.1.1 电 荷	(144)
7.1.2 点电荷	(144)
7.1.3 库仑定律	(145)
7.1.4 叠加原理	(146)
7.2 电场与电场强度	(146)
7.2.1 电 场	(146)
7.2.2 电场强度 E	(147)
7.2.3 电场强度的计算	(147)
7.3 静电场的高斯定理	(152)
7.3.1 电场线	(152)
7.3.2 “静电场”电场线的性质	(153)
7.3.3 电通量	(154)
7.3.4 静电场的高斯定理	(155)
7.3.5 高斯定理的应用举例	(157)
7.4 静电力的功 电势	(161)
7.4.1 静电力的功	(162)
7.4.2 静电场的环路定理	(162)
7.4.3 电势差和电势	(163)
7.4.4 电势的计算	(164)
7.4.5 等势面	(166)
7.4.6 电场强度与电势梯度的关系	(167)
7.5 静电场中的导体	(169)
7.5.1 导体的静电平衡条件	(169)
7.5.2 静电平衡时导体上的电荷分布	(170)
7.5.3 导体表面附近的电场强度 E 与面上对应点的电荷面密度 σ 的关系	(171)
7.5.4 孤立导体的形状对电荷分布的影响	(172)
7.5.5 导体静电平衡时的讨论方法	(172)
7.5.6 静电屏蔽	(173)
7.6 电容器 电场的能量	(174)

7.6.1	孤立导体的电容	(174)
7.6.2	电容器及其电容	(175)
7.6.3	电容器的串联和并联	(177)
7.6.4	电场的能量	(178)
7.7	介质中的静电场	(179)
7.7.1	电介质的电结构	(179)
7.7.2	电介质的极化	(179)
7.7.3	电极化强度 极化电荷与极化强度的关系	(180)
7.7.4	电极化强度 P 与场强 E 的关系	(181)
7.7.5	有介质时的高斯定理	(181)
习 题		(183)

第8章 恒定电流和稳恒磁场

8.1	恒定电流	(187)
8.1.1	电流强度和电流密度	(187)
8.1.2	电流的连续性方程和恒定电流条件	(188)
8.1.3	欧姆定律	(189)
8.1.4	焦耳定律	(190)
8.1.5	电源和电动势	(190)
8.1.6	闭合电路的欧姆定律	(190)
8.1.7	含源电路的欧姆定律	(191)
8.1.8	基尔霍夫方程组	(192)
8.2	磁场 磁感应强度	(193)
8.2.1	磁现象	(193)
8.2.2	磁感应强度	(193)
8.3	毕奥—萨伐尔定律	(194)
8.3.1	毕奥—萨伐尔定律	(194)
8.3.2	运动点电荷的磁场	(195)
8.3.3	毕奥—萨伐尔定律的应用	(196)
8.4	磁场的高斯定理	(198)
8.5	磁场的安培环路定理	(200)
8.5.1	安培环路定理	(200)
8.5.2	安培环路定理的应用	(202)
8.6	磁场对运动电荷的作用	(203)
8.6.1	洛伦兹力	(203)
8.6.2	带电粒子在均匀磁场中的运动	(204)
8.6.3	霍耳效应	(205)
8.7	磁场对载流导线的作用	(206)
8.7.1	安培定律	(206)

8.7.2	两平行长直电流之间的相互作用	(206)
8.7.3	电流强度的单位——“安培”的定义	(207)
8.7.4	磁力对载流导线做的功	(207)
8.8	磁场对载流线圈的磁力矩	(209)
8.9	磁场中的磁介质 磁场强度	(210)
8.9.1	磁介质的磁化 磁化强度	(210)
8.9.2	磁化电流	(212)
8.9.3	磁场强度 有磁介质时的安培环路定理	(213)
习 题		(216)
第9章	电磁感应	(220)
9.1	电源 电动势	(220)
9.1.1	非静电力	(220)
9.1.2	电动势	(221)
9.2	电磁感应定律	(222)
9.2.1	电磁感应现象	(222)
9.2.2	楞次定律	(223)
9.2.3	法拉第电磁感应定律	(224)
9.3	动生电动势	(225)
9.3.1	动生电动势	(226)
9.3.2	交流发电机的基本原理	(227)
9.4	感生电动势和感生电场	(228)
9.4.1	感生电场	(228)
9.4.2	感生电场和感应电动势的计算	(231)
9.4.3	感生电场的应用	(232)
9.5	自感和互感	(233)
9.5.1	自感现象	(233)
9.5.2	自感系数和自感电动势的计算	(234)
9.5.3	互感现象	(234)
9.5.4	互感系数和互感电动势的计算	(235)
9.6	磁场的能量	(236)
9.6.1	$R-L$ 串联电路	(236)
9.6.2	自感线圈的磁能	(237)
9.6.3	互感线圈的磁能	(238)
9.6.4	磁场的能量	(238)
9.7	位移电流 麦克斯韦方程组	(239)
9.7.1	位移电流	(239)
9.7.2	麦克斯韦方程组	(240)
习 题		(241)

第 10 章 电磁波理论	(246)
10.1 电磁振荡	(246)
10.2 电磁波的产生	(247)
10.2.1 从电磁振荡到电磁波	(247)
10.2.2 偶极振子发射的电磁波	(248)
10.3 电磁波的性质	(249)
10.3.1 电磁波的基本性质	(249)
10.3.2 电磁波的能量	(250)
10.4 电磁波的应用	(250)
习 题	(252)
第四篇 光学	(253)
第 11 章 波动光学	(256)
11.1 光波 相干光 光程差	(256)
11.1.1 光 波	(256)
11.1.2 相干光	(257)
11.1.3 光程和光程差	(260)
11.2 光波的干涉 双缝干涉	(262)
11.2.1 杨氏双缝干涉实验	(262)
11.2.2 干涉明暗条纹的位置	(263)
11.2.3 杨氏双缝干涉的光强分布	(264)
11.2.4 缝宽对干涉条纹的影响 空间相干性	(265)
11.2.5 菲涅耳双镜实验	(266)
11.2.6 洛埃德镜实验	(267)
11.3 薄膜干涉	(267)
11.3.1 等倾干涉	(268)
11.3.2 等厚干涉	(272)
11.3.3 迈克耳逊干涉仪	(277)
11.3.4 时间相干性	(280)
11.4 光波的衍射 惠更斯—菲涅耳原理	(280)
11.4.1 光波的衍射现象	(280)
11.4.2 惠更斯—菲涅耳原理	(280)
11.4.3 菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射	(281)
11.5 单缝衍射 光栅衍射	(282)
11.5.1 单缝的夫琅禾费衍射	(282)
11.5.2 圆孔的夫琅禾费衍射光学仪器的分辨率	(284)
11.5.3 光栅衍射	(288)
11.5.4 X 射线的衍射	(293)
11.6 光波的偏振 自然光和偏振光	(294)

11.6.1	光的偏振性 马吕斯定律	(294)
11.6.2	反射光和折射光的偏振	(298)
11.6.3	双折射 偏振棱镜	(300)
11.6.4	旋光现象	(305)
11.6.5	偏振光的干涉	(306)
习 题		(315)
第五篇 近代物理		(319)
第 12 章 相对论		(321)
12.1	绝对时空观 伽利略变换	(321)
12.1.1	绝对时空观	(321)
12.1.2	伽利略坐标变换	(321)
12.2	狭义相对论的基本原理	(322)
12.3	洛仑兹变换	(323)
12.4	狭义相对论的时空观	(324)
12.4.1	同时性的相对性	(324)
12.4.2	时间膨胀	(325)
12.4.3	空间塌缩	(325)
12.4.4	狭义相对论的速度变换公式	(325)
12.5	相对论的质量和能量	(326)
12.5.1	相对论质量	(326)
12.5.2	相对论动能和能量	(327)
12.6	广义相对论的建立	(327)
12.6.1	引力质量与惯性质量的等同性	(328)
12.6.2	等效原理	(328)
习 题		(330)
第 13 章 量子力学基础		(332)
13.1	黑体辐射 普朗克量子假说	(332)
13.1.1	黑体辐射	(332)
13.1.2	黑体辐射的实验规律	(334)
13.1.3	普朗克能量子假说	(335)
13.2	光电效应	(336)
13.2.1	光电效应的实验规律	(336)
13.2.2	光电效应的理论解释,光量子假设	(338)
13.2.3	光的波粒二象性	(339)
13.3	德布罗意物质波	(340)
13.3.1	德布罗意假设	(340)
13.3.2	德布罗意物质波的实验证明	(341)

13.3.3 德布罗意物质波的应用	(343)
13.4 不确定关系	(343)
13.4.1 位置和动量的不确定关系	(343)
13.4.2 能量和时间的不确定关系	(344)
13.5 波函数	(345)
13.5.1 波函数的概念	(345)
13.5.2 波函数的统计性解释	(346)
13.5.3 波函数的性质	(348)
13.6 薛定谔方程	(349)
13.6.1 薛定谔方程	(349)
13.6.2 定态薛定谔方程	(349)
13.6.3 态叠加原理	(350)
13.7 一维无限深势阱	(350)
习 题	(352)
第 14 章 凝聚态物理基础	(355)
14.1 金属的自由电子气模型	(356)
14.1.1 金属自由电子气模型	(356)
14.1.2 电子能级和波函数	(357)
14.1.3 自由电子气模型中电子状态数密度	(358)
14.1.4 费米能级和能量	(358)
14.1.5 金属导电的量子理论	(359)
14.2 固体的能带理论	(360)
14.2.1 电子共有化	(360)
14.2.2 能带的形成	(361)
14.2.3 满带、导带和禁带	(362)
14.2.4 导体、绝缘体和半导体	(362)
14.3 半导体	(363)
14.3.1 半导体的导电机理	(363)
14.3.2 本征半导体和杂质半导体	(364)
14.3.3 电阻和温度的关系	(365)
14.3.4 半导体的光电导现象	(365)
14.3.5 PN 结的形成与特性	(365)
14.3.6 半导体器件	(368)
习 题	(372)
附录 1 习题参考答案	(373)
附录 2 主要参考文献	(377)

第三篇

■ 电磁学 ■

电磁学是研究电磁运动规律及其应用的一门学科。

人们对于电磁现象的接触和认识是非常早的。但是人们一直认为电现象和磁现象是两种截然不同的概念,互不相关。随着 1819 年奥斯特发现了电流对磁针的作用,1820 年安培发现的磁场对电流的作用,人们认识到电和磁之间有着一定的联系。1831 年法拉第发现电磁感应定律,并最先提出了场的观点。1865 年,麦克斯韦在前人的基础上建立了以“麦克斯韦方程组”为核心的完整的电磁场理论,明确指出光是一种电磁波,使光学成为电磁场理论的重要组成部分。

电磁现象是自然界中普遍存在的一种自然现象,其涉及的方面很广泛,从人们的日常生活到生产部门,从新技术的开发应用到尖端科学研究,都与电磁学有关,这表明电磁学是大学物理中很重要的一个组成部分,电磁学的研究对于人类文明的进程有着非常重要的意义。

电磁学的内容按照性质来分,主要包括“场”和“路”两部分,本书侧重于从场的观点来进行阐述。“场”具有物质属性,却又不同于实物物质,从概念到描述方法来说都具有全新的内容。在本篇中,对通量和环流这两个描述矢量场的重要的特征量的掌握,有助于帮助读者理清电磁场理论的框架,对于电磁学的学习有着非常大的帮助。

本篇介绍电磁学的基本理论,主要介绍宏观电磁场的基本规律。首先介绍静电场的描述及其基本规律,接着介绍恒定电流及其激发的磁场——稳恒磁场的描述及其基本规律,再介绍电场和磁场相互联系的规律——电磁感应定律,最后讨论电磁振荡和电磁波的基本性质。

第7章 静电场

相对于观察者静止电荷激发的电场称为静电场。本章首先讨论真空情况下静电场的基本性质,得到静电场所满足的库仑定律和叠加原理这两个基本规律;再介绍描述电场性质的物理量——电场强度和电势;掌握高斯定理和静电场的环路定理;最后分析具有导体和电介质情况下的静电场。

7.1 电荷与库仑定律

7.1.1 电 荷

早在公元前 600 年,人们就发现用毛皮摩擦过的琥珀能够吸引羽毛、小纸片等轻小物体。这表明,两个物体在摩擦后处于一种特殊的状态,我们把处于这种状态的物体称为带电体,并说物体带有电荷。

实验证明,物体所带的电荷只有两种:正电荷和负电荷。用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷为正电荷,用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷为负电荷。通过研究,我们发现电荷具有量子性、守恒性、相对论不变性等特征。

电荷的量子性:到目前为止,科学界普遍认为构成物质的原子中包含三种微观粒子:质子、中子和电子。质子带一个单位的正电荷,中子不带电荷,电子带一个单位的负电荷。物质的电性就由质子和电子的数目决定,因而任何物体所带电荷量不可能连续变化,只能一份一份地增加或减少,这种性质为电荷的量子化。

电荷的最小份额称为基本电荷或元电荷,常用 e 表示,物体所带电量为 $q = \pm ne$, 其中 $e = 1.60217733(49) \times 10^{-19}$ 被称为“基本电荷”,它是一个电子或一个质子所带电量的绝对值,单位为库仑 C。整数 n 称为“电荷数”或“量子数”, n 可以取 0、1、2 等整数。

电荷守恒定律:在没有净电荷出入边界的系统中,电荷的代数和保持不变。这一结论称为电荷守恒定律。电荷守恒定律适用于一切宏观和微观过程,它是物理学中的基本定律之一。

电荷的相对论不变性:处在不同运动状态下的同一带电粒子,电量保持不变。电荷的这一特性称为电荷量的相对论不变性。

7.1.2 点电荷

当一个带电体的线度比问题研究中所涉及到的距离小得多时,该带电体就可

被视为一个带电的点,称为点电荷。

点电荷是电学中的一个重要概念,它在电学中的地位与质点在力学中的地位类似,应用时应注意:在讨论带电体之间的相互作用时,各带电体自身的线度比起它们之间的距离小得多,那么这些带电体可看作点电荷;在讨论电场中一场点的性质时,产生此电场的带电体(场源带电体)自身的线度比场点到此带电体的距离小得多,那么此场源带电体可以看作为点电荷。同时,点电荷是一个宏观范围的理想模型,面电荷、线电荷和电偶极子等都属于这类模型,每一个可视为点电荷的带电体总包含了大量微观带电粒子,但任何微观带电粒子却不一定能满足点电荷的条件而被视为点电荷。如果脱离以上两点来使用点电荷的概念,则会误认为点电荷是带有一定电量的几何点,实际上,带一定电量的几何点是不存在的。

7.1.3 库仑定律

1785年,库仑从扭秤实验得出点电荷之间存在着相互作用力,称为库仑力,同时库仑得到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,其实质为表示两个电荷之间静电相互作用力的基本定律。表述为:在真空中两个相对于观察者静止的点电荷之间的相互作用的大小与它们所带电量的乘积成正比,与它们之间的距离平方成反比;作用力的方向沿着两点电荷的连线,同号电荷相斥(为正),异号电荷相吸(为负)。如图7-1所示。

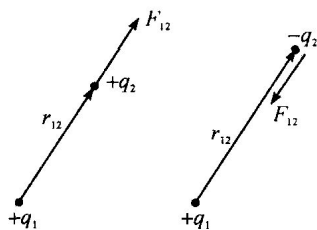


图 7-1

数学表达式为:

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \left(\frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}} \right) = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{r}}_{12} \quad (7-1)$$

式中 k 是比例系数, k 的取值及单位与式中各量的单位有关。在国际单位制中,由实验测定的 k 值为: $k = 8.9875518 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ 。

通常令 $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ M}^2$, ϵ_0 称为真空中的介电常数。于是真空中的库仑定律又可以表示为:

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \left(\frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{r}}_{12} \quad (7-2)$$

应该指出:库仑定律是表示真空中两个静止的点电荷之间相互作用的规律;两个电荷之间的相互作用是通过电场传递的。点电荷 q_1 对点电荷 q_2 的作用力是通过 q_1 在自己周围空间激发的电场来传递的;而点电荷 q_2 对点电荷 q_1 的作用力则是通过 q_2 在自己周围空间激发电场来传递;库仑定律揭示了静电力遵从平方反比律,预示着静电场具有与万有引力场相似的性质;关于库仑定律有效作用范围的问题,结论是在 $10^{-15} \text{ m} \sim 10^7 \text{ m}$ 尺度上,库仑定律是准确、可靠的。

7.1.4 叠加原理

库仑定律讨论的是两个点电荷之间的静电力。当空间有两个以上的点电荷时,补充一实验事实:作用于每一个点电荷上的总静电力等于其它点电荷单独存在时作用于该点电荷的静电力的矢量和——叠加原理。

库仑定律和叠加原理相配合,原则上可以解决静电学中的全部问题。

例1 三个点电荷的位置如图 7-2 所示,其中 $q_1 = q_2 > 0$, 相距为 $2a$, $q_0 < 0$, 位于 x 轴上, 求 q_0 所受的库仑力。

解: q_0 所受的库仑力 $f = f_x i + f_y j$, 式中

$$f_y = 0, f_x = -2f_1 \cos\theta = -\frac{2|q_0|q_1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{x}{(a^2 + x^2)^{3/2}}$$

例2 在长为 ℓ 带电为 q 的均匀细杆的一端离端点为 d 处置一电荷 q_0 , 如图 7-3, 求 q_0 所受的库仑力。

解: 如图 7-3 所示, 细杆单位长度上的电量为 $\lambda = \frac{q}{\ell}$, 细杆上任一电荷元 dq 对 q_0 的作用力的大小 $df_x = \frac{dq q_0}{4\pi\epsilon_0 r^2}$, 方向与 x 轴平行。

利用 $r = \ell + d - x$, $dq = \lambda dx$, 得

$$df_x = \frac{q_0 \lambda dx}{4\pi\epsilon_0 (\ell + a - x)^2}$$

所以 q_0 所受的合力 $f = f_x i$, 式中

$$f_x = \int df_x = \int_0^\ell \frac{-q_0 \lambda d(d + \ell - x)}{4\pi\epsilon_0 (d + \ell - x)^2} = \left[\frac{q_0 \lambda}{4\pi\epsilon_0 (d + \ell - x)} \right]_0^\ell = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0 d(d + \ell)}$$

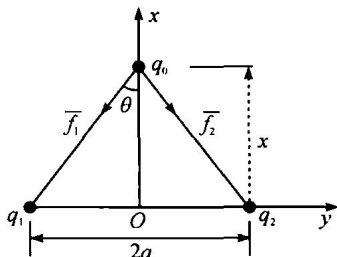


图 7-2

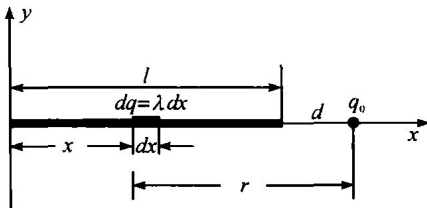


图 7-3

7.2 电场与电场强度

7.2.1 电 场

库仑定律给出了两个静止点电荷之间的相互作用力,但并没有说明这种作用是如何实现的。关于这个问题,历史上有过两种观点:早期的一种观点称为超距离作用观点,认为库仑力不需任何媒介,也不需任何时间就能由一个带电体作用到一定距离的另一个带电体上。近代物理学则给出另一种观点称为近距离作用观点,认为电荷之间的作用力必须通过中间媒质来相互作用,凡是有电荷的地方,四周就存在某种特殊形式的物质,这种特殊形式的物质被称为电场,或者说任何带电体均在自己周围空间中产生电场。电荷间的相互作用是通过电场传递的。

具体来说,电荷 q_1 处于 q_2 的周围任一点都要受力,说明 q_2 周围整个空间存在一种特殊的物质,这种特殊的物质就是由电荷 q_2 激发的电场。同样电荷 q_1 也在周围的空间激发电场(与 q_2 的电场重叠于同一空间)。这样,“两个电荷之间的静电力”实际上是每个电荷的电场作用在另一电荷上的电场力。

电场是看不见、摸不着的,但可用仪器测定它。近代物理学已证明:电场具有能量、动量等属性,即电场具有物质的某些属性,通常认为电场是物质的一种特殊形式。

相对于观察者静止的电荷所产生的电场称为静电场,本章只讨论静电场。

7.2.2 电场强度 E

一个被研究对象的物理特性,总是能通过对象与其他物体的相互作用显示出来,静电场的一个基本特性是它对引入电场的任何电荷有力的作用,因此我们可以利用电场的这一特性,从中找出能反映电场性质的物理量。电场强度就是描述电场状况的最基本物理量之一,它反映了电场的力的性质。

为了讨论电场中各点的性质,用一个电荷 q_0 作实验,称为试探电荷,所谓的试探电荷是指当被看作点电荷的带电体所带电量的绝对值非常小、且其自身的线度也非常小时,该带电体就被称为试验电荷或试探电荷。其电量必须足够小,使得它的置入不引起原有电荷的重新分布;同时线度必须小到可以被看作点电荷,以便确定场中每点的性质。

讨论点电荷 q 在周围空间激发的静电场。将在电场中所需研究的点叫做场点,在场点上放置一静止的试探电荷 q_0 ,则 q_0 所受电场力为 F 。定义矢量 $E = \frac{F}{q_0}$ 为电场强度或简称场强,用以描述电场的状况。

电场中某点的电场强度的大小,等于单位电荷在该点所受电场力的大小,方向与正电荷在该点所受电场力的方向一致。

在国际单位制中,力的单位是 N,电荷量的单位是 C,因此电场强度的单位为牛顿/库仑,符号表示为 N/C。

对于场中任一点,就有一个确定的场强 E ,对于同一场中的不同点, E 一般可以不同,这表明:电场强度是电场空间坐标的矢量函数,即 $E = E(x, y, z)$,“计算某一带电体激发的电场”就是指求出场强与坐标的函数关系: $E(x, y, z)$ 。

各点场强有相同的大小和方向的电场叫做均匀电场(匀强电场)。

7.2.3 电场强度的计算

如果电荷分布已知,那么从点电荷的场强公式出发,根据场强的叠加原理,就可以求出任意电荷分布所激发的场强。

(1) 单个点电荷产生的电场

引入试探电荷 q_0 来讨论单个点电荷产生的电场, 见

图 7-4。

$$\text{由库仑定律: } \mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \hat{\mathbf{r}},$$

则

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (7-3)$$

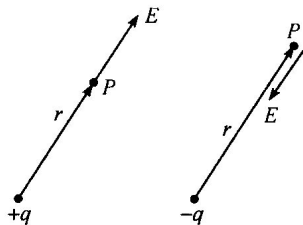


图 7-4

若 $q > 0$, $\mathbf{E}$ 与 $\hat{\mathbf{r}}$ 同向; 若 $q < 0$, $\mathbf{E}$ 与 $\hat{\mathbf{r}}$ 反向。

注: 由此可以看出, 电场强度只是与产生电场的电荷有关, 与引入的试探电荷没有关系, 因而可以用电场强度来表征场点的性质。

(2) 多个点电荷产生的电场

当电场由 n 个点电荷激发时, 以 $\mathbf{F}_i$ 表示第 i 个点电荷对试探电荷 q_0 作用的静电力, $\mathbf{E}_i$ 表示第 i 个点电荷在 q_0 所在场点激发的场强, 则

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\sum \mathbf{F}_i}{q_0} = \sum \frac{\mathbf{F}_i}{q_0} = \sum \mathbf{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i \quad (7-4)$$

由此可知, 点 P 的电场强度等于各个点电荷单独在 P 点产生的电场强度的矢量和, 这就是场强叠加原理, 我们可以利用这一原理, 计算任意带电体激发的场强。

(3) 任意带电体的场强

虽然由于电荷的量子性, 从微观来看它总是一粒粒分布, 但是为了宏观上的研究方便, 可忽略微观起伏而认为电荷连续分布于某一体积、曲面或曲线上, 要计算场强, 首先要了解电荷的具体分布情况。

<1> 电荷连续分布于某一体积中

① 定义电荷体密度 ρ

在体积中某点周围取一小体元 $\Delta\tau$, 设 $\Delta\tau$ 内电量为 Δq , 则 $\rho = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta\tau} = \frac{dq}{d\tau}$ 称为电荷体密度。

注意 $\Delta\tau$ 的选取: 为了精确反映电荷分布的宏观不均匀性, $\Delta\tau$ 越小越好, 并且 $\Delta\tau$ 又必须包含有足够多的带电粒子, 以免电荷分布的微观起伏暴露出来。 $\Delta\tau$ 是宏观看来很小而微观看来很大的体元——物理无限小体元。

② 计算场强

把带电区域分成许多小体元 $d\tau$, 每个 $d\tau$ 带电量 $\rho d\tau$ (即电荷元 $\rho d\tau$), 看作点电荷, 则其在 P 点产生的电场的场强为 $d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\rho d\tau}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$, 故整个带电体在 P 点激发的场强为:

$$\mathbf{E} = \int_{\tau} d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\tau} \frac{\rho d\tau}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (7-5)$$