

普通高等教育“十二五”规划教材

University Physics

大学物理教程

(下册)

丨 高礼静 刘津升 编著 丨



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理教程

(下册)

高礼静 刘津升 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书根据独立学院近年来大学物理课程的实际教学情况,结合三本和大专院校着重培养应用型人才的特点,在充分借鉴了国内外优秀教材的基础上编著而成。内容上简化了《理工科非物理专业类专业大学物理课程教学基本要求(讨论稿)》的部分B类内容,弱化对公式来源过程的推导,降低数学上的运算,同时加强了对A类内容、公式和概念的理解与实际应用。本书分上、下两册,上册包括力学、振动与波动、气体动理论和热力学基础,下册包括电磁学、光学、相对论和量子物理。

本书可作为高等学校尤其是独立学院或大专院校理工科非物理专业的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程. 下册/高礼静,刘津升编著. —北京:国防工业出版社,2015.3
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-118-09973-7

I. ①大... II. ①高... ②刘... 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044442号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 13¼ 字数 295 千字

2015年3月第1版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 28.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

序 言

物理学是研究物质运动最一般规律和物质基本结构的学科。物理学的发展极大地推动了近代工业和科学技术的创新革命,同时促进了人类社会文明的进步。作为自然科学的带头学科,物理学研究大至宇宙、小至基本粒子等一切物质最基本的运动形式和规律。近些年来,随着教学改革的不深入,“大学物理”课程日渐被看作是一门为学生树立科学世界观、增强学生综合能力的素质教育课程。

独立学院是我国高等教育在办学模式上的一种新的尝试,它是公办高等院校教学资源与社会资金有机结合的产物。目前,大学物理学教材版本较多,但主要针对独立学院学生的教材相对较少,因此很有必要针对该层次的学生编写配套的教材。本着“夯实基础,注重专业衔接”的原则,在借鉴了一些国家级优秀教材的教学内容基础上,我们编写出了符合独立学院教学规律的这套教学用书。

本书的主要特点是:结合三本和大专院校着重培养应用型人才的特点,简化《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》的部分B类内容,弱化了对公式来源过程的推导,降低了数学上的运算,同时加强了对A类内容、公式和概念的理解与实际应用。本书针对独立学院学生基础相对薄弱的特点,挑选出难度适中的例题和习题,让学生在学习和课后自学时更容易理解与掌握。在一些重要的章节中增加了和实际生活紧密相关的物理现象,可以有效激发学生的学习兴趣。全书的教学内容可以根据本校的教学实际进行调整,适用于120课时以下的课程教学。本书适合作为独立学院和专科类院校的物理学课程主讲教材或教学参考书,也可以作为物理爱好者的参考用书。

全书共分为上、下两册。上册主要由唐娜斯、陈悦、张红卫编著;下册主要由高礼静、刘津升编著。

致同学们

当初学者们第一次拿起这本物理学教程,部分同学初看会觉得很有趣,力学、热学、光学和电磁学的部分内容已经在高中接触过,但是仔细一看书上的公式和习题会觉得很有趣,不理解也不会做题。这是因为中学学习的是物理中最基础的内容,用的都是最简单的运算,而在大学物理中将接触其本质和更加普适的形式,使用全新的数学工具——微积分和矢量,内容与中学物理初看雷同,其实有了一个很大的飞跃。

高中物理与大学物理不仅仅在方法和数学工具上有很大的不同,内容上也有很大的区别。例如,中学力学学的是最简单的一维直线运动,大学物理将扩展成为二维、三维曲线运动,无需再像中学那样去背诵那些令人“烦恼”的公式,我们只需要利用最基本的牛顿运动定律动力学矢量式就能推导出直线运动和曲线运动情况下的所有表达式。在电磁

学方面,中学介绍的大多是均匀电场和磁场,而这里我们将详细介绍包含均匀场在内的更一般的电磁现象。在光学中,和中学里利用几何光学研究透镜成像的方法不同,我们将重点介绍波动光学的知识,并用来解释生活中常见的光的波动现象。总之,希望同学们不要在继续使用以前学习物理的方法,以一个初学者的心态去面对,这样你会发现一个全新的、不一样的物理学之美。

“判天地之美,析万物之理”。大学物理是自然科学的基础学科,在理工类专业课的学习前,都会要求学好大学物理。基础课和专业课的关系就如“走”和“跑”的关系,不会走,怎么能跑?除此之外,物理学也是一门普适教育的课程,可以增强大学生的知识面,同时具有科学的价值观和世界观。即使进入到社会,从日常生活到高新技术领域,你们会发现前面学习的这些科学知识原来无所不在。

通过大学物理的学习,我们希望能提高同学们各方面的能力。

(1) 获取知识和应用知识的能力——大学物理比高中物理学习内容多,信息量大,与数学结合紧密,需要学生学会独立阅读书本内容,自学参考书和文献知识,紧密结合高等数学中微积分和矢量代数,提高自学能力和应用能力。

(2) 科学思维的能力——能够运用物理学的理论和观点,通过分析综合、演绎归纳、科学抽象、类比联想等方法正确分析、研究和计算遇到的一些物理问题;能根据单位(量纲)分析、数量级估算、极端情况和特例讨论等,进行定性思考或半定量估算,并判断结果的合理性。

(3) 解决问题的能力——对一些较为简单的实际问题,能够根据问题的性质以及实际需要,抓住主要因素,进行合理的简化,建立相应的物理模型,并用物理语言进行描述,运用所学的物理理论和研究方法,加以解决。

希望同学们在学习过程中注意以下素质的培养。

(1) 科学素质——追求真理的理想和献身科学的精神,树立学生现代科学的自然观、宇宙观和辩证唯物主义世界观,使学生具有科学的成败观和探索科学疑难问题的信心与勇气,培养学生严谨求实的科学态度和坚忍不拔的科学品格。

(2) 创新精神——激发学生求知热情、探索精神和创新欲望,使学生善于思考,勇于实践,敢于向旧观念挑战。

(3) 应用精神——通过理论知识的教学和实验课的学习,能将学到的理论知识应用到实际的生产生活中。

由于作者学术水平有限,书中难免存在不妥之处,希望老师和同学们在使用过程中多提宝贵意见,我们将在以后的再版中不断完善。

编著者

2014年11月

希腊字母表

序 号	大 写	小 写	英文注音	中文读音	物理中的应用
1	A	α	alpha	阿尔法	角度、系数
2	B	β	beta	贝塔	角度、系数
3	Γ	γ	gamma	伽马	电导率
4	Δ	δ	delta	戴尔塔	变化量
5	E	ε	epsilon	艾普西龙	电容率、电势能
6	Z	ζ	zeta	截塔	系数、方位角、阻抗、原子序数
7	H	η	eta	艾塔	磁滞系数、效率
8	Θ	θ	theta	西塔	温度、相位角
9	I	ι	iot	约塔	
10	K	κ	kappa	卡帕	介质常数
11	Λ	λ	lambda	兰姆达	波长、体积
12	M	μ	mu	缪	磁导率、放大率、动摩擦因数
13	N	ν	nu	纽	频率、中微子
14	Ξ	ξ	xi	克西	随机变量
15	O	o	omicron	奥密克戎	
16	Π	π	pi	派	圆周率(值为 3. 141592653589793)
17	P	ρ	rho	柔	密度
18	Σ	σ	sigma	西格马	总和、面密度
19	T	τ	tau	套	时间常数、周期
20	Y	υ	upsilon	宇普西龙	位移
21	Φ	φ	phi	法爱	通量、电势
22	X	χ	chi	奇	电感
23	Ψ	ψ	psi	帕赛	通量、角度
24	Ω	ω	omega	欧米伽	欧姆、角速度、角度

目 录

第9章 真空中的静电场	1
9.1 电荷 库仑定律	1
9.1.1 物质的电结构 电荷守恒定律	1
9.1.2 电荷的量子化	2
9.1.3 库仑定律	2
9.2 电场强度	3
9.2.1 静电场	3
9.2.2 电场强度	3
9.2.3 电场强度的计算	4
9.3 高斯定理及应用	10
9.3.1 电场线	10
9.3.2 电场强度通量	11
9.3.3 高斯定理	13
9.3.4 高斯定理应用举例	15
9.4 静电场的环路定理 电势	18
9.4.1 静电场的环路定理	18
9.4.2 电势能	20
9.4.3 电势	20
9.4.4 电势的计算	21
9.5 等势面 电势梯度	23
9.5.1 等势面	23
9.5.2 电场强度与电势梯度的关系	24
习题	26
第10章 静电场中的导体与电介质	29
10.1 静电场中的导体	29
10.1.1 导体的静电平衡条件	29
10.1.2 静电平衡时导体上的电荷分布	30
10.1.3 静电屏蔽	32
10.2 静电场中的电介质	34
10.2.1 电介质的电结构	34

10.2.2	电介质的极化	35
10.2.3	电极化强度	36
10.2.4	介质中的静电场	37
10.3	有介质的高斯定理	38
10.4	电容 电容器	39
10.4.1	孤立导体的电容	39
10.4.2	电容器	40
10.4.3	电容器的串联和并联	41
10.5	静电场的能量 能量密度	42
10.5.1	电容器的电能	42
10.5.2	静电场的能量 能量密度	43
习题		44
第 11 章	恒定磁场	46
11.1	恒定电流 电动势	46
11.1.1	电流 电流密度	46
11.1.2	电源 电动势	47
11.2	磁场 磁感应强度	49
11.2.1	基本的磁现象	49
11.2.2	磁感应强度	51
11.2.3	磁感应线	52
11.3	毕奥—萨伐尔定律	53
11.3.1	毕奥—萨伐尔定律	53
11.3.2	运动电荷的磁场	54
11.3.3	毕奥—萨伐尔定律的应用	55
11.4	稳恒磁场的高斯定理与安培环路定理	58
11.4.1	磁通量 磁场的高斯定理	58
11.4.2	安培环路定理	59
11.4.3	安培环路定理的应用	61
11.5	带电粒子在电场和磁场中的运动	63
11.6	磁场对载流导线的作用	66
11.6.1	安培定律	66
11.6.2	磁场作用于载流线圈的磁力矩	68
11.7	磁介质	70
11.7.1	磁介质	70
11.7.2	磁化强度	71
11.7.3	磁介质中的安培环路定理	71
习题		73

第 12 章 电磁感应	77
12.1 电磁感应定律	77
12.1.1 电磁感应现象	77
12.1.2 电磁感应定律	79
12.1.3 楞次定律	80
12.2 动生电动势 感生电动势	82
12.2.1 动生电动势	82
12.2.2 感生电动势	84
12.3.3 涡电流	85
12.3 自感和互感	86
12.3.1 自感	86
12.3.2 互感	88
12.4 磁场的能量	89
习题	90
* 第 13 章 几何光学	93
13.1 几何光学的基本实验定律	93
13.1.1 光线在介质分界面处的反射与折射	93
13.1.2 全反射现象	94
13.1.3 费马原理	94
13.2 光在平面上的反射和折射	95
13.2.1 光在平面上的反射	95
13.2.2 光在平面上的折射	95
13.3 光在球面上的反射和折射	96
13.3.1 符号规定	96
13.3.2 光在球面上的反射	96
13.3.3 光在球面镜上的折射	97
13.4 薄透镜	98
13.4.1 薄透镜的成像	98
13.4.2 横向放大率	99
13.5 常见的光学仪器的基本原理	99
13.5.1 眼睛	99
13.5.2 显微镜	100
13.5.3 望远镜	101
习题	102
第 14 章 波动光学	104
14.1 相干光	104

14.1.1	相干光	104
14.1.2	相干光的获取方法	105
14.2	杨氏双缝干涉	106
14.2.1	杨氏双缝干涉	106
14.2.2	光程和光程差	108
14.2.3	透镜的等光程性	109
*14.2.4	菲涅耳双平面镜实验	110
*14.2.5	劳埃德镜实验	110
14.3	薄膜干涉—等倾干涉	112
14.3.1	等倾干涉	112
14.3.2	增透膜和增反膜	114
14.4	薄膜干涉—等厚干涉	115
14.4.1	劈尖干涉	116
14.4.2	牛顿环	118
*14.5	迈克尔逊干涉仪	119
14.6	光的衍射现象 惠更斯—费涅耳原理	121
14.6.1	光的衍射现象	121
14.6.2	惠更斯—菲涅耳原理	122
14.7	夫琅禾费单缝衍射	124
*14.8	圆孔衍射 光学仪器分辨率	128
14.8.1	圆孔衍射	128
14.8.2	光学仪器分辨率	129
14.9	光栅衍射	130
14.9.1	光栅方程	132
14.9.2	缺级现象	132
14.9.3	光栅光谱	133
14.10	X射线的衍射	135
14.11	光的偏振 马吕斯定律	138
14.11.1	自然光与偏振光	138
14.11.2	偏振片的起偏和检偏	139
14.11.3	马吕斯定律	140
14.12	反射光和折射光的偏振 布儒斯特定律	142
*14.13	双折射现象	144
14.13.1	寻常光和非常光	144
14.13.2	尼科耳棱镜	145
习题		145

第15章 狭义相对论基础 150

15.1	经典力学时空观 伽利略变换	150
------	---------------	-----

15.1.1	经典力学时空观	150
15.1.2	伽利略变换 力学的相对性原理	150
15.2	迈克尔逊—莫雷实验 狭义相对论的两个基本假设	152
15.2.1	迈克尔逊—莫雷实验	152
15.2.2	狭义相对论的两个基本假设	152
15.3	洛伦兹变换	153
15.3.1	洛伦兹变换	153
*15.3.2	洛伦兹速度变换式	153
15.4	狭义相对论的时空观	154
15.4.1	同时的相对性	154
15.4.2	时间膨胀	155
15.4.3	长度收缩	156
15.5	狭义相对论动力学基础	157
15.5.1	质量与速度的关系	157
15.5.2	相对论力学的基本方程	158
15.5.3	质量与能量的关系	158
15.5.4	动量与能量之间的关系	159
习题		160
第 16 章	量子物理基础	162
16.1	热辐射 基尔霍夫定律	162
16.1.1	热辐射	162
16.1.2	黑体	163
*16.1.3	基尔霍夫定律	163
16.2	黑体辐射 普朗克能量子假设	164
*16.2.1	斯特藩—玻耳兹曼定律和维恩位移定律	164
16.2.2	普朗克公式	165
16.3	光电效应	166
16.3.1	光电效应实验	166
16.3.2	爱因斯坦光子假设	167
16.3.3	光的波粒二象性	168
16.4	康普顿效应	169
16.5	玻尔的氢原子理论	172
16.5.1	氢原子光谱的实验规律	172
16.5.2	氢原子线光谱系	173
16.5.3	卢瑟福的原子核式结构模型	174
16.5.4	玻尔的氢原子理论	175
16.5.5	玻尔理论的意义与困难	178
16.6	实物粒子的波粒二象性 不确定关系	179

16.6.1	实物粒子的波粒二象性	179
16.6.2	电子衍射实验 物质波的统计解释	180
16.6.3	应用	181
16.6.4	不确定关系	182
16.7	粒子的波函数 薛定谔方程	183
16.7.1	波函数及其统计解释	184
16.7.2	薛定谔方程	184
16.7.3	一维无限深势阱中的粒子	185
习题		187
附录一	国际基本单位制 (SI 单位) 和我国法定计量单位	190
附录二	常用物理基本常数表	193
部分习题参考答案		194
参考答案		199

第9章 真空中的静电场

电磁学主要研究电磁运动的基本规律,是物理学的一个重要分支。电磁运动是物质运动中最基本的一种运动方式,电磁力也是自然界当中四种基本自然力之一。电磁学的发展和建立是物理学发展史上第二次重要的突破。如今,电视、广播以及无线电通信日益普及;电灯照明、家用电器等也早已成为人们生活的必需品;计算机成为科学发展中的重要工具,所有这些,无不以电磁学基本原理为核心。

在相当长的一段时间内,电和磁被看成两种完全不同的现象。因此,人们对它们的理论研究是从两个不同方面进行的,进展十分缓慢。直到1820年,丹麦物理学家奥斯特(H. C. Oersted, 1777—1851)发现了电流的磁效应,人们这才认识到电和磁是相互关联的。紧接着,法拉第(H. Faraday, 1791—1867)于1831年发现了电磁感应现象,进一步揭示了电和磁的内在联系。1865年,麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1879)在前人工作的基础上,提出感应电场和位移电流假说,总结建立了完整的电磁场理论,也成为经典电磁理论。该理论预言了电磁波的存在,并指出光是一种电磁波。

一般来说,运动电荷将同时激发电场和磁场。但是,在某种情况下,如我们所研究的电荷相对某参考系静止时,电荷在这个相对静止参考系中就只激发电场,这个电场就是我们本章要讨论的静电场。本章主要的内容包括静电场的基本定律——库仑定律、静电场的基本定理——高斯定理和环路定理、描述静电场属性的两个基本物理量——电场强度和电势等。

9.1 电荷 库仑定律

9.1.1 物质的电结构 电荷守恒定律

人们对电荷的认识最早是从摩擦起电现象和自然界的雷电现象开始的。实验指出,硬橡胶棒与皮毛摩擦后或玻璃棒与丝绸摩擦后对轻微物体都有吸引作用,这种现象称为带电现象,经过摩擦后的物体带有电荷。自然界只有两种电荷,分别称为正电荷和负电荷。同种电荷互相排斥,异种电荷相互吸引。物体所带电荷的多少称为电荷量(Electric Quantity),用 Q 或 q 表示,单位是库仑,记作C。

摩擦起电的根本原因与物体的电结构有关。按照原子理论,任何物体都是由分子或原子构成,原子又由质子和中子组成的原子核和核外电子构成。中子不带电,质子带正电,电子带负电。通常状态下,质子所带的正电荷和核外电子所带的负电荷在电荷量上相等,因此对外不显示电性。当物体经受摩擦等作用而造成物体中的电子发生转移时,物体

便带了电,失去电子的带正电,得到电子的带负电。

大量实验表明,在一个孤立系统中,无论发生了怎样的物理过程,电荷都不会产生,也不会消失,只能从一个物体转移到另一个物体上,或从物体的一部分转移到另一部分,电荷的代数和是守恒的,这就是电荷守恒定律。

9.1.2 电荷的量子化

1897年,汤姆生(J. J. Thomson, 1856—1940)通过观测阴极射线发现了电子。紧接着,1907—1913年,密立根(R. Milikan, 1868—1953)通过油滴实验发现,带电体的电荷总是以一个基本单元的整数倍出现。这个电荷量的基本单元就是电子所带电荷量的绝对值,用 e 表示, $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$,而一般带电体的电荷量 $q = \pm ne, n = 1, 2, 3, \dots$ 这是自然界存在不连续性(即量子化)的又一个例子。电荷的这种只能取离散、不连续的量值的性质,叫做电荷的量子化。

9.1.3 库仑定律

在发现电子后的2000多年里,人们对电的认识一直停留在定性阶段。从18世纪中叶开始,许多科学家有目的地进行了一些实验性的研究,以便找出静止电荷之间的相互作用力的规律。因为带电体之间的相互作用力不仅与物体所带电荷量有关,还与带电体的形状、大小以及周围介质有关,要用实验直接确立带电体的作用是很困难的。法国物理学家库仑(C. A. Coulomb, 1736—1806)于1785年提出了点电荷(Point Charge)的理想模型,认为带电体的大小和带电体之间的距离相比很小时,可以忽略其形状和大小,把它看作一个带电的几何点。库仑设计了一台精密的扭秤,如图9-1所示,对两个静止点电荷之间的相互作用进行实验,通过定量分析,库仑得到了两个点电荷在真空中的相互作用规律,称为库仑定律,表述如下。

真空中的两个静止点电荷之间的相互作用力 F 的大小与这两个点电荷多带的电荷量 q_1 和 q_2 的乘积成正比,与它们之间的距离 r 的二次方成反比,作用力 F 的方向沿它们的连线方向,同种电荷相互排斥,异种电荷相互吸引,即

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (9-1)$$

式中: $\mathbf{e}_r$ 为从电荷 q_1 指向电荷 q_2 的单位矢量,即 $\mathbf{e}_r = \mathbf{r}/r$; ϵ_0 为真空电容率,又称真空介电常量(Dielectric Constant of Vacuum),其量值为 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$; $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.987 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9.0 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ 。

如图9-2所示,电荷 q_1 和 q_2 的量值可正可负,当 q_1 和 q_2 同号时, q_2 受到斥力作用, F 与 $\mathbf{e}_r$ 同向,当 q_1 和 q_2 异号时, q_2 受到引力作用, F 与 $\mathbf{e}_r$ 反向。库仑定律是一个实验定律,经过精密测定,在一定范围内证明是正确的。

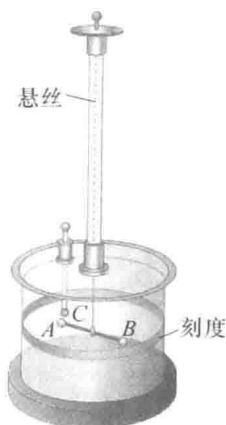


图 9-1 库仑扭秤装置

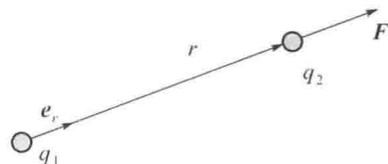
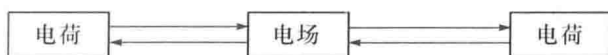


图 9-2 两个点电荷之间的作用力

9.2 电场强度

9.2.1 静电场

库仑定律只给出了两个点电荷之间的相互作用的定量关系,并没指明这种作用是通过怎样的方式进行的。我们平常所见到的物体间的相互作用一般是直接接触作用的。例如,推车时,通过手和车的直接接触把力作用在车子上。但是电力、磁力和重力却可以发生在两个相隔一定距离的物体之间。那么,这些力究竟是如何传递的呢?在很长一段时间内,人们曾认为这些力的作用不需要中间媒介,也不需要时间,就能实现远距离的相互作用,即“超距作用”。到了 19 世纪初,英国物理学家法拉第提出新的观点:认为在电荷的周围存在着一种特殊形态的物质,称为**电场**(Electric Field)。任何电荷在其周围都激发电场,电荷间的相互作用是通过电场对电荷的作用来实现的。其作用可以表示如下:



电场对电荷的作用力称为**电场力**(Force Due to Electric Field)。现代物理学家证明,“超距作用”的观点是错误的,电力和磁力的传递都需要时间,传递速度约为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

法拉第以其惊人的想象力提出的“场”的概念,受到了高度评价。现代物理学已经肯定了场的观点,证明了电磁场的存在。电磁场与实物粒子一样具有质量、能量、动量等物质的基本属性。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),它是电磁场的一种特殊状态,下面就静电场的基本性质加以讨论。

9.2.2 电场强度

为了定量研究电场对电荷的作用,我们把一个实验电荷(Test Charge) q_0 放到电场中,观察电场对实验电荷 q_0 的作用力的情况。实验电荷必须满足如下两个条件:它的线度必须小到可以看作点电荷,以便确定电场中各个点的电场性质;它所带的电荷量必须充分小,以免影响到原有电场的分布。为了讨论方便,我们取实验电荷为正电荷 $+q_0$ 。

如图 9-3 所示,在静止电荷 Q (场源电荷) 周围的电场中,先后将实验电荷 $+q_0$ 放在电场中 A 、 B 和 C 三个不同的场点位置。实验表明,实验电荷在不同位置所受到的电场力 F 大小和方向均不相同;若 在任取的同一场点位置上,改变所放置的实验电荷 $+q_0$ 的 电荷量大小,则 $+q_0$ 所受到的电场力 F 的大小也会随之改 变,然而,两者的比 $F/+q_0$ 却与实验电荷量值 $+q_0$ 无关,而 仅取决于场源电荷 Q 的量值和位置。因此,我们就从电场 对电荷施力的角度,把这个比值作为描述电场的物理量,即

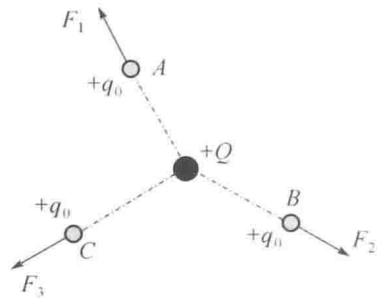


图 9-3 实验电荷在电场中 不同位置受电场力情况

$$\boxed{E = \frac{F}{q_0}} \tag{9-2}$$

在国际单位制中,电场强度 E 的单位是牛顿每库仑 ($N \cdot C^{-1}$),也可以表示为伏特每 米 ($V \cdot m^{-1}$)。式(9-2)为电场强度的定义式。它表明,电场中某点的电场强度 E 等于 位于该点处的单位实验电荷所受到的电场力。显然,电场强度 E 为一个矢量,方向与正 电荷在该点处受到的电场力方向一致。

由以上的讨论不难推断,如果已知空间某点处的电场强度 E ,则电荷 q 在该点处受到 的电场力为

$$F = qE \tag{9-3}$$

9.2.3 电场强度的计算

1. 点电荷电场中的电场强度

由库仑定律及电场强度的定义式,可以求得真空中点电荷周围电场的电场强度。 考虑真空中放置一场源点电荷,电荷量为 q ,设想把一个实验电荷 $+q_0$ 放置在距离 q 为 r 的 P 点处,根据库仑定律, $+q_0$ 受到的电场力为

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

式中: e_r 是从 q 指向 P 点的单位矢量。

由式(9-2)可得到 P 点电场强度为

$$\boxed{E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} e_r} \tag{9-4}$$

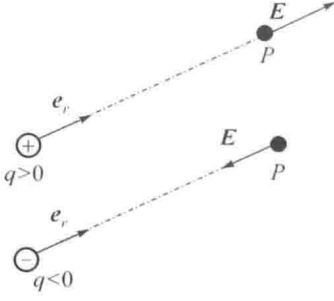


图 9-4 点电荷的电场强度

式(9-4)表明,在点电荷的电场空间,任意一点 P 的电场强度 大小与场源电荷到场点的距离 2 次方成反比,与场源电荷的 电荷量 q 成正比。电场强度的方向取决于场源电荷的符号。 若 $q > 0$,即正电荷的电场强度 E 与 e_r 同向;若 $q < 0$,即负电荷 的电场强度 E 的方向与 e_r 反向,如图 9-4 所示。

从式(9-4)可以看出,点电荷产生的电场具有球对称性,在以场源电荷为球心的球 面上,电场强度的大小处处相等。

2. 点电荷系电场中的电场强度

一般来说,空间可能存在由许多个点电荷组成的点电荷系,那么,点电荷系的电场强度如何计算呢?下面我们具体说明。

设真空中一点电荷系由若干个电荷 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ 组成,每个点电荷周围都有各自激发出的电场。把实验电荷 q_0 放在场点 P 处,根据力的独立作用原理,作用在 q_0 上的电场力的合力 $\mathbf{F}$ 应该等于各个点电荷分别作用于 q_0 上的电场力 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{F}_3, \dots, \mathbf{F}_n$ 的矢量和,即

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3 + \dots + \mathbf{F}_n \quad (9-5)$$

把式(9-5)的两边分别除以 q_0 ,可以得到 P 点的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_3}{q_0} + \dots + \frac{\mathbf{F}_n}{q_0} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 + \dots + \mathbf{E}_n \quad (9-6)$$

即点电荷系在空间某点激发的电场强度,等于各个点电荷单独存在时在该点激发的电场强度的矢量和,这一结论称为电场强度的矢量叠加原理。这是静电场的一个基本原理。将式(9-4)代入式(9-6)可得到 P 点的电场强度为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 + \dots + \mathbf{E}_n = \sum_i \mathbf{E}_i = \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{e}_{r_i} \quad (9-7)$$

式中: $\mathbf{e}_{r_1}, \mathbf{e}_{r_2}, \mathbf{e}_{r_3}, \dots, \mathbf{e}_{r_n}$ 分别是场点 P 相对于各个场源电荷 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ 的位矢 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3, \dots, \mathbf{r}_n$ 方向上的单位矢量。

3. 连续分布电荷电场中的电场强度

对于电荷连续分布的任意带电体,可以将它看成无数个电荷元 dq 的集合。每个电荷元 dq 则看作点电荷,空间任意点的电场强度则是由这无数个点电荷 dq 激发的电场叠加而成。

如图9-5所示,有一体积为 V 、电荷连续分布的带电体,现在来计算点 P 处电场强度。

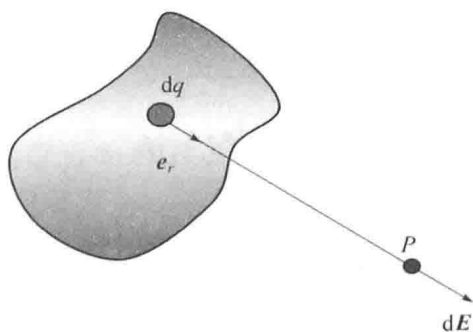


图9-5 连续带电体的电场强度

首先,在带电体上取一个电荷元 dq ,可作为一个点电荷,于是, dq 在 P 的电场强度为 $d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e_r}{r^2} dq$, 式中 $\mathbf{e}_r$ 是由电荷元 dq 指向场点 P 的单位矢量。其次,根据场强的叠加原理,计算出各电荷元在点 P 处的电场强度,求矢量和,因带电体连续分布矢量和可以化成矢量积分。于是,可得到整个连续带电体在 P 点的电场强度为