

普通高等院校基础课规划教材

大学物理

(下册)

苟秉聪 胡海云 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等院校基础课规划教材

大学物理

(下册)

苟秉聪 胡海云 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书分上下两册,上册共6章,包括质点力学、刚体、气体动理论、热力学基础、振动与波动、波动光学;下册共7章,包括静电场、静电场中的导体和电介质、稳恒磁场、电磁感应和电磁场、狭义相对论力学基础、量子物理基础、固体中的电子。各章后均有思考题和习题,书末备有习题参考答案。

本书依据大学物理课程的基本要求,是在编者长期教学改革经验基础上编写完成的。书中力求物理概念明确、物理图像清晰、论述深入浅出并有适量的技术应用和理论扩展。本书可作为大学工科各专业的大学物理课程的教材,也可作为综合性大学和高等师范学院相关专业的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 下册/苟秉聪,胡海云主编. —北京:国防工业出版社,2008.2

普通高等院校基础课规划教材

ISBN 978-7-118-05429-3

I. 大... II. ①苟...②胡... III. 物理课—高等学校—教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 167983 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 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15 字数 344 千字

2008 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 65.00 元(上、下册)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

大学物理是高等学校非物理类专业学生一门重要的必修基础课。它所涉及的物理基础知识、科学思维方式和研究方法,是每位理工科大学生必须掌握的。该课程不仅是理工科各专专业学生学习其他后续课程的重要铺垫,而且在培养学生科学的世界观,增强学生的创新意识和解决问题的能力等方面具有重要作用。

本书根据“非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求”,结合编者在北京理工大学多年教学研究和实践经验,并借鉴国内外同类教材改革成果编写而成。本书的编写,以现代的观点来处理经典物理的体系结构及其内容,加强近代物理部分。注意从物理学史发展的角度引入物理定律和概念,并适当介绍当代物理学的成就以及在工程技术上的应用,突出物理学知识与实际相结合的特色。在写作风格上力求物理图像清晰,尽量避免繁琐的数学推导,突出物理思想;深入浅出,通俗易懂,注重激发学生的兴趣,增加教材的可读性和趣味性;在例题和习题中配备了具有启发性的能力题,以培养学生的创新思维能力。

本书分上、下两册,共12章。上册包括质点力学、刚体、气体动力学、热力学基础、振动和波动、波动光学;下册包括静电场、静电场中的导体和电介质、稳恒磁场、电磁感应和电磁场、狭义相对论力学基础、量子物理基础、固体中的电子。在各章中,带*号的部分是相关知识的扩展内容,可有选择地讲授,也可让学生自学。为了便于教师和学生使用这套教材,编者将出版配套的学习指导书,给出教材中每一章的知识要点和习题分析与详细解答。

本书由苟秉聪教授和胡海云教授主编,参加编写工作的有:刘兆龙(第1、2章),缪劲松(第3、4章),胡海云(第5章),郑少波(第6章),吴晓丽(第7、8章),王菲(第9、10章),冯艳全(第11、13章),苟秉聪(第12章)。全书由苟秉聪教授和胡海云教授负责统稿和定稿,苟秉聪教授组织了编写讨论会并负责组织出版等工作。感谢清华大学陈信义教授在百忙中审阅了全书,并提出了宝贵的修改意见和建议。编者还要感谢国防工业出版社对本书的积极支持。书中难免出现不妥之处,真诚地希望读者提出批评和建议。

编 者

2007年9月

目 录

第 7 章 静电场	1
7.1 库仑定律	1
7.1.1 电荷	1
7.1.2 库仑定律	2
7.1.3 电力的叠加原理	4
7.2 电场、电场强度	4
7.2.1 电场	4
7.2.2 电场强度	5
7.2.3 场强叠加原理	6
7.3 静电场的高斯定理	12
7.3.1 电场线和电通量	12
7.3.2 高斯定理	14
7.3.3 利用高斯定理求静电场的分布	15
7.4 静电场的环路定理、电势	19
7.4.1 静电场的环路定理	19
7.4.2 静电势能	21
7.4.3 电势和电势差	22
7.4.4 电势叠加原理	23
7.4.5 等势面	26
7.4.6 电势梯度	27
本章提要	29
思考题	31
习题	31
第 8 章 静电场中的导体和电介质	36
8.1 静电场中的导体	36
8.1.1 导体的静电平衡条件	36
8.1.2 静电平衡时导体上电荷的分布	37
8.1.3 静电屏蔽	39
8.2 静电场中的电介质	41
8.2.1 电介质对电场的影响	41

8.2.2	电介质的极化	42
8.2.3	电极化强度	44
8.3	有介质时的高斯定理	46
8.3.1	电位移和有电介质时的高斯定理	46
8.3.2	有电介质时高斯定理的应用	47
8.4	电容、电容器	48
8.4.1	孤立导体的电容	48
8.4.2	电容器的电容	49
8.5	静电场的能量	52
8.5.1	电容器的能量	53
8.5.2	静电场的能量、能量密度	53
	本章提要	56
	思考题	56
	习题	57
第9章	稳恒磁场	62
9.1	稳恒电流	62
9.1.1	电流密度	62
9.1.2	欧姆定律的微分形式	63
9.2	磁场、毕奥—萨伐尔定律	64
9.2.1	磁的基本现象	64
9.2.2	磁场与磁感应强度	65
9.2.3	毕奥—萨伐尔定律	66
9.2.4	毕奥—萨伐尔定律的应用	67
9.2.5	运动电荷产生的磁场	71
9.3	磁场的高斯定理、安培环路定理	72
9.3.1	磁场的高斯定理	72
9.3.2	安培环路定理	73
9.3.3	安培环路定理的应用	74
9.4	洛伦兹力和安培力	77
9.4.1	带电粒子在磁场中的运动	77
9.4.2	霍耳效应	79
9.4.3	作用在载流导线上的安培力	80
9.4.4	作用在载流线圈上的磁力矩	83
9.5	有磁介质存在时的磁场	84
9.5.1	磁介质的磁化	84
9.5.2	磁介质中的安培环路定理, 磁场强度	87
9.5.3	铁磁质	88
	本章提要	91

思考题	92
习题	92
第 10 章 电磁感应和电磁场	97
10.1 法拉第电磁感应定律	97
10.1.1 电磁感应现象	97
10.1.2 电动势	98
10.1.3 法拉第电磁感应定律	99
10.1.4 楞次定律	100
10.2 动生电动势	101
10.3 感生电动势	104
10.3.1 感生电场与感生电动势	104
10.3.2 涡电流	107
10.4 自感与互感	108
10.4.1 自感	108
10.4.2 互感	110
10.5 磁场的能量	111
10.6 麦克斯韦方程组和电磁场	113
10.6.1 位移电流	113
10.6.2 麦克斯韦方程组	116
10.6.3 电磁波	118
10.7 同步辐射	119
本章提要	121
思考题	123
习题	123
第 11 章 狭义相对论力学基础	127
11.1 狭义相对论的基本原理	127
11.1.1 绝对时空观和伽利略变换	128
11.1.2 爱因斯坦相对性原理和光速不变原理	129
11.2 洛伦兹变换	131
11.3 时间延缓和长度收缩	135
11.3.1 同时的相对性	135
11.3.2 时间延缓	136
11.3.3 长度收缩	139
11.3.4 因果律	140
11.4 相对论速度变换	141
11.5 相对论动力学基础	143
11.5.1 相对论动量和质量	144

11.5.2	质能关系	144
11.5.3	相对论能量和动量的关系	147
11.6	广义相对论简介	148
	本章提要	150
	思考题	150
	习题	151
第 12 章	量子物理基础	153
12.1	普朗克能量量子假设	153
12.1.1	黑体辐射	153
12.1.2	普朗克能量量子假设	154
12.2	光的粒子性	156
12.2.1	光电效应	156
12.2.2	爱因斯坦光子假设和光电效应方程	157
12.2.3	康普顿效应	159
12.2.4	光的波粒二象性	160
12.3	氢原子光谱	162
12.3.1	氢原子光谱的规律性	162
12.3.2	玻尔的氢原子理论	163
12.4	粒子的波动性与波函数	165
12.4.1	德布罗意波	165
12.4.2	德布罗意波的实验验证	166
12.4.3	波函数的统计解释	167
12.4.4	自由粒子波函数	168
12.5	不确定关系	169
12.6	薛定谔方程	171
12.6.1	自由粒子薛定谔方程	171
12.6.2	薛定谔方程和哈密顿量	172
12.7	一维势场中的粒子	174
12.7.1	一维无限深方势阱中的粒子	174
12.7.2	势垒贯穿	177
12.7.3	简谐振子	179
12.8	原子中的电子	180
12.8.1	轨道角动量	180
12.8.2	氢原子	182
12.8.3	电子自旋和泡利不相容原理	185
12.8.4	四个量子数和原子的壳层结构	187
* 12.9	激光	188
12.9.1	激光的产生	188

12.9.2	激光的特性	190
12.9.3	激光的应用:激光冷却	190
	本章提要	191
	思考题	192
	习题	193
第13章	固体中的电子	195
13.1	金属中的自由电子	195
13.1.1	自由电子气模型	195
13.1.2	自由电子气的费米能量公式	197
13.1.3	态密度、费米—狄拉克分布	199
13.2	固体能带理论	202
13.2.1	固体的能带	202
13.2.2	价带、导带和禁带	204
13.2.3	导体、绝缘体和半导体	205
13.3	半导体导电	207
13.3.1	半导体分类	207
13.3.2	PN结	210
*13.3.3	半导体器件	210
	本章提要	213
	思考题	214
	习题	214
	物理常数表	216
	常用数值表	217
	习题答案	218
	索引	226
	参考文献	232

第7章 静电场

电磁运动是物质的一种基本运动形式,电磁相互作用是自然界已知的四种基本相互作用之一。电磁学是物理学的一个重要分支,它是研究电磁运动基本规律的学科。电磁学理论的发展大大推动了人类社会的进步,它不仅与人们的日常生活和生产技术有着十分密切的关系,而且也是电工学、无线电电子学、电子计算机技术以及其它新科学、新技术发展的理论基础。

人类对电和磁现象的认识可追溯到远古时期。公元前6世纪人类就观察到摩擦起电、磁石吸铁以及磁石指南等现象。公元16世纪,英国医生吉尔伯特(W. Gilbert)对电和磁现象进行了系统的研究,并且采用了电力、电吸引以及磁极等名词。1785年,库仑(C. A. de Coulomb)用自己设计的扭秤实验得出了电力的平方反比定律,使电学和磁学的研究进入了定量阶段。然而,在相当长的历史时期内,电和磁被看作是两种完全不同的现象分别加以研究。直到1820年奥斯特(H. C. Oersted)发现了电流的磁效应,才使电学与磁学彼此隔绝的情况有了突破,开始了电磁学的新阶段。1831年,法拉第(M. Faraday)发现了电磁感应现象,并提出了场的概念,进一步揭示了电磁现象的内在联系。1865年,麦克斯韦(J. C. Maxwell)总结了前人的工作,极富创见地提出了感应电场和位移电流的假说,建立起了一套完整的电磁场理论。

真空中相对于观察者静止的电荷产生的电场称为静电场。本章从静电场的基本实验规律——库仑定律出发,引入描述静电场的两个基本物理量——电场强度和电势,并导出静电场的两条基本定理——高斯定理和环路定理,最后讨论电场强度和电势两者之间的关系。

7.1 库仑定律

7.1.1 电荷

早在公元前6世纪,希腊人就发现用毛皮摩擦过的琥珀能够吸引轻小物体。到16世纪末、17世纪初,人们进一步发现,其它的物体如玻璃棒、硬橡胶棒或水晶块等,用毛皮或丝绸摩擦后都能吸引轻小物体。这种现象称为摩擦起电,也就是通过摩擦方法使物体带上了电荷。

实验表明,自然界中只有两种电荷,同种电荷相斥,异种电荷相吸。这两种电荷一种称为正电荷,一种称为负电荷,这种命名法是美国物理学家富兰克林(B. Franklin)提出来的,并且一直沿用至今。

物体所带电荷数量的多少叫做电量,常用 Q 或 q 表示。在国际单位制中,电量的单位是库[仑],用C表示。正电荷电量取正值,负电荷电量取负值。一个带电体所带的总电量

是其所带正负电量的代数和。

宏观带电体所带电荷种类的不同,是由于组成它们的微观粒子所带电荷种类不同。根据物质的原子结构理论,物质是由分子、原子组成的,而原子又由带正电的原子核和带负电的电子组成。原子核内带电的粒子是质子,中子不带电。一个电子所带的电量和一个质子所带的电量数值相同,但符号相反。在通常情况下,物体中任何一部分都包含相同数目的质子和电子,所以对外界不表现出电性。当两个电中性的宏观物体相互摩擦时,可使一个物体从另一个物体得到电子,或者失去一些电子给另一个物体,结果得到电子的物体就带负电,失去电子的物体就带正电。因此,摩擦起电实际上就是通过摩擦作用使电子从一个物体转移到另一个物体的过程。

1. 电荷的量子性

实验证明,电子是自然界中具有最小电量的粒子,所有宏观带电体或其它微观粒子的电量都是电子电量的整数倍。这个事实表明,物体所带的电荷不是以连续方式出现,总是以一个基本单元的整数倍出现。电荷的这个特性就叫做电荷的量子性,而这个基本单元就是一个电子所带电量的绝对值,常以 e 表示,称为基元电荷。其测量值(2002 年推荐值)为 $e = 1.60217653 \times 10^{-19} \text{C}$;在计算中通常取 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 。

20 世纪初,美国物理学家密立根(R. Millikan)花了数年时间,通过著名的油滴实验验证了油滴上的电量总是 e 的整数倍。自然界中任何一个电荷都可以写成 $q = Ne$,其中 N 是一个整数。例如,电子带电量 $-e$,质子带电量 $+e$, α 粒子,即氦原子核,是由紧密结合在一起的两个质子和两个中子所组成的,具有 $+2e$ 的电量;一个原子序数为 Z 的原子,带有 Ze 的正电荷,而核外有 Z 个电子,因而是电中性的。

近代物理从理论上预言一些粒子是由被称为夸克和反夸克的更小的粒子组成,每一个夸克或反夸克的电量为 $\pm e/3$ 或 $\pm 2e/3$ 。但在实验中至今还没有检测到单独存在的夸克。因此,人们仍然把电子电量看作是基本电量。即使存在自由夸克,电荷的量子性依然不会改变,而只是改变了电荷的基本单元。

2. 电荷守恒

大量实验表明,一个系统,如果没有净电荷出入其边界,则该系统的正、负电荷的电量的代数和将保持不变。这就是电荷守恒定律。

电荷守恒定律是物理学最基本的定律之一。近代科学实践证明,它不仅是一切宏观过程(如摩擦起电)中成立,一切微观过程也普遍遵守电荷守恒定律。如在原子核衰变过程 ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$ 中,衰变前后,电荷量的代数和保持不变。在粒子的相互作用过程中,尽管电荷是可以产生和消灭的,电荷守恒并未因此而遭到破坏。如在正负电子对的湮灭过程中,一对正负电子转化为两个不带电的光子,即 $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$,而一个高能光子与一个重原子核作用时,该光子又可以转化为一个正电子和一个负电子。这种电荷的产生和消灭并不改变系统中电荷的代数和。

7.1.2 库仑定律

在发现电现象以后的两千多年的时间里,人们对电的认识一直处于定性阶段。最早的定量研究是在 1785 年,法国科学家库仑用自己发明的扭秤测定了两个带电球体之间的相互作用力,并在此基础上,提出了两个静止点电荷之间相互作用的规律,即库仑定律。所谓

点电荷,是电学中的一个理想模型。当带电体自身的几何线度远小于它与其它带电体之间的距离时,该带电体的形状和电荷在其上的分布均可以忽略,我们可以把它看作是一个带电的几何点,即点电荷。

库仑定律表述为:真空中,两个静止点电荷之间的相互作用力(称为库仑力)的大小与这两个电荷所带电量的乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比;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。

如图 7-1 所示,两个点电荷的电量分别为 q_1 和 q_2 ,其值可正可负, $e_{r_{21}}$ 表示从 q_1 指向 q_2 的单位矢量,则 q_2 受到 q_1 的作用力为

$$\mathbf{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \mathbf{e}_{r_{21}} \quad (7-1)$$

式中, r_{21} 表示两个点电荷之间的距离; k 为比例常数。当 q_1 和 q_2 同号时, $\mathbf{F}_{21}$ 和 $\mathbf{e}_{r_{21}}$ 同方向,表明 q_1 和 q_2 之间的作用力是斥力;当 q_1 和 q_2 异号时, $\mathbf{F}_{21}$ 和 $\mathbf{e}_{r_{21}}$ 反方向,表明 q_1 和 q_2 之间的作用力是引力。

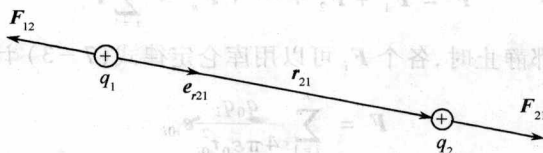


图 7-1 库仑定律

由式(7-1)可以看出,两个静止点电荷之间的相互作用力遵守牛顿第三定律,即

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21} \quad (7-2)$$

在国际单位制中,由实验测得库仑定律中的比例系数为

$$k = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

为了使以后经常使用的电磁学规律的表达式得到简化,通常引入另一常量 ϵ_0 ,使 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$,这样就得到库仑定律的常用表达式

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \mathbf{e}_{r_{21}} \quad (7-3)$$

这里引入的 ϵ_0 称为真空介电常数,又称为真空电容率,其值为

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

库仑定律是一个实验定律,经过大量精密实验测定。从高能电子的散射实验到人造地球卫星的地球磁场研究中已经证实,两个静止点电荷之间距离的数量级在 $10^{-17} \text{ m} \sim 10^7 \text{ m}$ 的范围内,库仑定律是极其精确地与实验相符合的。

例 7-1 设两个 α 粒子相距 10^{-13} m ,比较它们之间的库仑力和万有引力的大小。已知 α 粒子带电量为 $2e$,质量为 $6.68 \times 10^{-27} \text{ kg}$,万有引力常数为 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

解 由库仑定律,两个 α 粒子间的库仑力为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{(2 \times 1.6 \times 10^{-19})^2}{4 \times 3.14 \times 8.85 \times 10^{-12} \times (10^{-13})^2} \text{ N} = 9.22 \times 10^{-2} \text{ N}$$

由万有引力定律,两粒子间的万有引力为

$$f = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{(6.68 \times 10^{-27})^2}{(10^{-13})^2} \text{N} = 2.98 \times 10^{-37} \text{N}$$

可见,在两个 α 粒子之间,万有引力远远小于库仑力。所以在研究带电粒子的相互作用时,它们之间的万有引力通常都可以忽略不计。

7.1.3 电力的叠加原理

实验表明:两个点电荷之间的作用力并不因第三个点电荷的存在而有所改变。如果空间中存在两个以上的点电荷,则作用在每一个点电荷上的合力,等于其它点电荷单独存在时对该点电荷的作用力的矢量和。这一结论称为电力的叠加原理。

例如,如果以 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 分别表示点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 单独存在时对点电荷 q_0 的作用力,则它们同时存在时,作用在 q_0 上的合力为

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum_{i=1}^n F_i \quad (7-4)$$

当 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 和 q_0 都静止时,各个 F_i 可以用库仑定律式(7-3)计算,可得


$$F = \sum_{i=1}^n \frac{q_0 q_i}{4\pi\epsilon_0 r_{0i}^2} e_{r_{0i}} \quad (7-5)$$

式中, r_{0i} 表示 q_0 与 q_i 之间的距离, $e_{r_{0i}}$ 是由 q_i 指向 q_0 的单位矢量。

7.2 电场、电场强度

7.2.1 电场

库仑定律描述了真空中两个相隔一定距离的点电荷之间的相互作用力与哪些因素有关,但它并没有解释这种作用力是怎样来传递的。为了解释这一问题,历史上曾经有过两种对立的观点。一种观点认为两个电荷之间的相互作用力是超距作用,即这种作用力既不需要中间媒质,也不需要传递时间,而是直接和即时地发生作用。这种作用方式可表示为

电荷 $\longleftrightarrow$ 电荷

另一种观点是法拉第在19世纪30年代提出来的,并且被近代物理学的理论和实验证实是正确的。这种观点认为,任何电荷都在其周围的空间激发电场,电荷与电荷之间的相互作用是通过电场对电荷的作用来实现的。例如,当电荷 q_1 位于电荷 q_2 的附近时,即处于 q_2 的电场中, q_1 所受到的作用力就是通过 q_2 的电场施加给它的。同理, q_2 也处于 q_1 的电场中, q_2 受到的作用力是通过 q_1 的电场施加给它的。这种作用方式可表示为

电荷 $\longleftrightarrow$ 电场 $\longleftrightarrow$ 电荷

因此,电荷之间的作用力也称为电场力。

电场以及我们后面将会讲到的磁场是一种特殊形态的物质,电磁场和物质的另一种通常形态——由原子、分子组成的实物一样,具有能量、动量和质量等物质的属性。电场对外的表现主要有:(1)处于电场中的电荷要受到电场力的作用;(2)当电荷在电场中运动时,电场力要对电荷做功,这表示电场具有能量。因此我们将从力和能量这两方面来研

究电场的性质,并相应地引入描述电场性质的两个物理量——电场强度和电势。

7.2.2 电场强度

相对于观察者静止的电荷在其周围产生的电场称为静电场,静电场对电荷的作用力称为静电力。为了研究静止电荷 Q 产生的电场(Q 称为场源电荷),我们在电场中引入一个试验电荷 q_0 。这一试验电荷需要满足如下要求:电荷 q_0 的几何线度要充分小,即可以把它看成点电荷,从而可以研究电场中各点的性质;电荷 q_0 的电量要充分小,当把它引入电场中时不会显著改变原来电场的分布,从而可以测定原来电场的性质。

实验表明,在电场中不同的位置 a 、 b 和 c 处,试验电荷 q_0 所受到的电场力 F 的大小和方向一般来说是不同的,如图 7-2 所示。

但对于电场中任一固定点(称为场点)而言, q_0 所受到的电场力是确定的,而且这一电场力和试验电荷的电量 q_0 成正比。如果把试验电荷的电量增大到 n 倍,则电场力 F 也增大到 n 倍,而力的方向不变。如果把试验电荷换成等量异号的电荷,则力的大小不变,而方向相反。因此,对电场中的固定点来说,试验电荷所受到的电场力 F 与试验电荷电量 q_0 的比值 F/q_0 是一个与试验电荷的大小、正负无关的矢量。这个矢量只与给定电场中各固定点的位置有关,反映了电场本身的性质。我们把这个矢量定义为电场中各点的电场强度,简称场强,用 E 表示,即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (7-6)$$

式(7-6)表明,电场中任意点的电场强度等于静止于该点的单位正电荷所受的电场力。在静电场中,各点的 E 可以各不相同, E 是空间坐标的矢量函数。

在国际单位制中,电场强度的单位为 N/C ,亦为 V/m ,且

$$1V/m = 1N/C$$

需要指出,在已知静电场中各点电场强度 E 的情况下,可由式(7-6)求得任一点电荷 q 在场中所受到的电场力为

$$F = qE \quad (7-7)$$

下表给出了一些典型的电场强度的数值。

一些典型电场强度的数值 单位: N/C

室内天线附近	约 3×10^{-2}	电视机的电子枪内	约 10^5
无线电波内	约 10^{-1}	空气的电击穿强度	约 3×10^6
日光灯内	约 10^2	X 射线管内	5×10^6
地球表面附近	约 10^2	氢原子内电子轨道处	6×10^{11}
太阳光内(平均)	约 10^3	中子星表面	约 10^{14}
雷雨云附近	约 10^4	铀核表面	2×10^{21}

例 7-2 求一个静止的点电荷 q 的电场强度分布。

解 将一试验电荷 q_0 放在距 q 为 r 处的 P 点,如图 7-3 所示。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 表示从场源电荷 q 指向场点 P 的单位矢量。由电场强度的定义, P 点的电场强度为

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r \quad (7-8)$$

这就是点电荷的电场强度分布公式。式中,当 $q > 0$ 时, E 与 e_r 同向(图 7-3(a)),当 $q < 0$ 时, E 与 e_r 反向(图 7-3(b))。上式表明,静止的点电荷的电场具有球对称性,即在以点电荷为中心的每个球面上各点的电场强度大小相等,电场强度的方向处处沿着半径向外($q > 0$)或向内($q < 0$)。

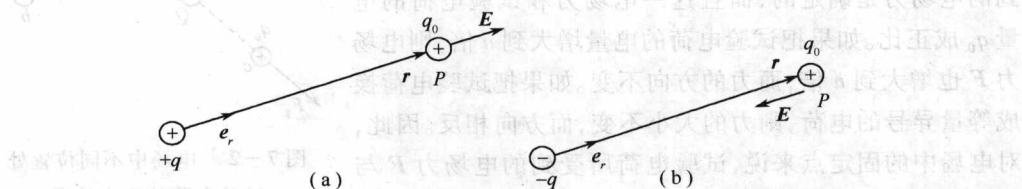


图 7-3 静止的点电荷的电场

7.2.3 场强叠加原理

一般来说,空间可能存在由多个点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 组成的点电荷系,那么点电荷系的电场强度如何计算呢?根据电力的叠加原理,可得

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{q_0} = \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{q_0}$$

式中, F_i/q_0 是电荷 q_i 单独存在时在 q_0 所在位置产生的电场强度,所以

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \quad (7-9)$$

式(7-9)表明,在点电荷系产生的电场中,任一点处的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的矢量和。这就是场强叠加原理。

将点电荷电场强度公式(7-8)代入式(7-9)可得点电荷系所产生的电场的电场强度为

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} e_{ri} \quad (7-10)$$

式中, r_i 表示 q_i 与场点之间的距离, e_{ri} 是由 q_i 指向场点的单位矢量。

对于电荷连续分布的带电体,需要用微积分的方法来求解其电场强度的分布。通常认为,该带电体的电荷是由许多无限小的电荷元 dq 组成,而每个电荷元都可视为点电荷,如

图 7-4 所示。任一电荷元 dq 在 P 点产生的电场强度为 dE ，根据点电荷电场强度公式 (7-8) 有

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

式中， r 是电荷元 dq 到场点 P 的距离， e_r 是这一方向上的单位矢量。

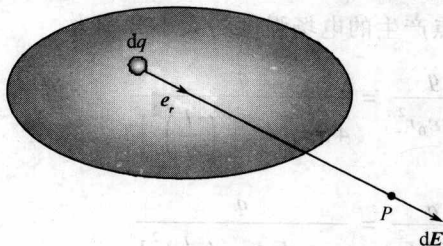


图 7-4 连续带电体的电场强度

根据场强叠加原理，整个带电体在 P 点产生的电场强度可用积分式表示为

$$E = \int dE = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r \quad (7-11)$$

积分遍及整个带电体。上式为矢量积分，一般不能直接计算。在具体计算时，可以先将 dE 沿各坐标轴分解，然后分别积分，求出 E 的各分量，最后再确定电场强度 E 的大小和方向。

在计算连续带电体的电场强度时，常需要引入电荷密度的概念。若电荷连续分布在整个体积中，定义电荷体密度为

$$\rho = \frac{dq}{dV}$$

式中， dq 为体积元 dV 所带的电量。若电荷连续分布在一个面上，定义电荷面密度为

$$\sigma = \frac{dq}{dS}$$

式中， dq 为面元 dS 所带的电量。若电荷连续分布在一条线上，定义电荷线密度为

$$\lambda = \frac{dq}{dl}$$

式中， dq 为线元 dl 所带的电量。应用电荷密度的概念，式 (7-11) 中的 dq 可表示为

$$dq = \begin{cases} \rho dV & (\text{体分布}) \\ \sigma dS & (\text{面分布}) \\ \lambda dl & (\text{线分布}) \end{cases}$$

综上所述，根据场强叠加原理和点电荷的电场强度公式，原则上可以计算任意电荷分布所产生的电场分布。考虑电荷分布的对称性，常常可以简化电场矢量叠加的计算。下面举例说明。

例 7-3 求电偶极子中垂线上任一点的电场强度。

解 由等量异号点电荷 $+q$ 和 $-q$ 所组成的电荷系统，当它们之间的距离 l 比从它们到所讨论的场点的距离 r 小得多时 ($l \ll r$)，称为电偶极子，如图 7-5 所示。 l 表示从负电荷

指向正电荷的矢量线段,电量 q 与矢量 l 的乘积 ql 反映了电偶极子本身的特征,称为电偶极子的电偶极矩,简称电矩,用 p 表示,即

$$p = ql$$

设 $+q$ 和 $-q$ 到电偶极子中垂线上任一点 P 的距离分别为 r_+ 和 r_- , r 为电偶极子中心到 P 点的距离, α 为 r_+ 与 l 之间的夹角。根据式 (7-8), $+q$ 和 $-q$ 在 P 点产生的电场强度的大小分别为

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

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

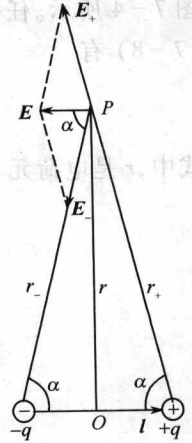


图 7-5 电偶极子

方向分别沿着两个电荷与 P 点的连线。由对称性,正、负电荷在 P 点产生的电场强度沿竖直方向的分量相互抵消,而水平方向的分量相等。 P 点的合电场强度大小为

$$E = E_+ \cos\alpha + E_- \cos\alpha = 2E_+ \cos\alpha$$

因为 $\cos\alpha = \frac{l/2}{\sqrt{r^2 + (l/2)^2}}$, 所以

$$E = \frac{ql}{4\pi\epsilon_0 \left(r^2 + \frac{l^2}{4} \right)^{3/2}} = \frac{ql}{4\pi\epsilon_0 r^3 \left(1 + \frac{l^2}{4r^2} \right)^{3/2}}$$

由于 $l \ll r$, $\left(1 + \frac{l^2}{4r^2} \right) \approx 1$, 故上式简化为

$$E = \frac{ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

考虑到 E 的方向与电偶极矩 p 的方向相反, 上式可写为矢量式

$$E = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3} \quad (7-12)$$

此结果表明,电偶极子中垂线上任一点的电场强度与电偶极子的电矩成正比,与距离 r 的三次方成反比,方向与电矩的方向相反。

电偶极子是继点电荷之后最简单、且重要的带电系统。在研究电介质的极化等问题时,常要用到电偶极子的概念。

例 7-4 一均匀带电直线长为 L , 电荷线密度为 λ (设 $\lambda > 0$), 求空间一点 P 处的电场强度。设点 P 到线的垂直距离为 a , 点 P 与线的两端所形成的角度为 θ_1 和 θ_2 (图 7-6)。

解 在带电直线上任取一线元 dx , 其坐标为 x , 电

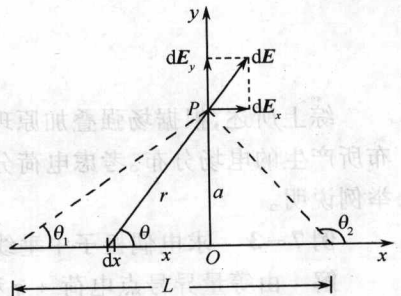


图 7-6 均匀带电直线的电场