

大学物理 (II)



■ 主 编 龙 涛
■ 副主编 胡 莉



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

大学物理(Ⅱ)

龙 涛 主编
胡 莉 副主编

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是根据教育部《理工科类大学物理课程教学基本要求(2010年版)》精神,在总结长期教学实践经验的基础上编写而成的。本套书分为三册,第1册包括力学基础、振动和波、狭义相对论、热学;第2册包括电磁学、波动光学和量子物理等内容;第3册包括基础物理知识及新科技物理基础的拓展与应用。本套书内容概括了大学物理教学的基本要求,突出物理模型,注重科学分析方法上的衔接以及基础学科与工程学科之间的联系,力求清晰、简明地阐述物理概念和规律及其应用。

本书可作为高等工科院校各专业的大学物理教材,也可作为综合性大学和高等师范院校非物理类专业大学物理的教材和参考书。书中带*号的内容教师可根据专业需要选讲。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. (II)/龙涛主编. —北京:电子工业出版社,2015.9

ISBN 978-7-121-26985-1

I. ①大… II. ①龙… 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(2015)第 196120 号

策划编辑:王赫男

责任编辑:王赫男

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:15.25 字数:390 千字

版 次:2015 年 9 月第 1 版

印 次:2015 年 9 月第 1 次印刷

定 价:38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

目 录

第三篇 电磁学

第 8 章 静电场	2
8.1 电荷 库仑定律	2
8.1.1 电荷	2
8.1.2 库仑定律	3
8.2 电场强度	4
8.2.1 电场强度	4
8.2.2 电场强度的叠加原理	6
8.2.3 电场强度的计算	6
8.3 电场强度通量 高斯定理	11
8.3.1 电场线	11
8.3.2 电场强度通量	13
8.3.3 高斯定理	14
8.3.4 高斯定理的应用	16
8.4 静电场的环路定理 电势	19
8.4.1 静电场力所做的功与路径无关	19
8.4.2 静电场的环路定理	20
8.4.3 电势能 电势	21
8.4.4 电势的计算	22
8.5 静电场中的导体和电介质	25
8.5.1 导体的静电平衡条件	25
8.5.2 静电平衡时导体上的电荷分布	26
8.5.3 尖端放电 静电屏蔽	27
8.5.4 电介质的极化	29
8.5.5 电介质中的高斯定理	30
8.6 电容器 电场能量	32
8.6.1 电容器的电容	32
8.6.2 电容的计算	33
8.6.3 电容器的串联和并联	35
8.6.4 电容器的电能	35
8.6.5 静电场的能量 能量密度	36
8.7 电流 稳恒电场	37

8.7.1	电流 电流密度	37
8.7.2	稳恒电场	38
8.7.3	电动势	38
本章小结		39
习题 8		42
第 9 章	稳恒磁场	46
9.1	磁场 磁感应强度	46
9.1.1	基本磁现象	46
9.1.2	磁场 磁感应强度	47
9.2	磁通量 磁场的高斯定理	48
9.2.1	磁感应线	48
9.2.2	磁通量 磁场的高斯定理	49
9.3	毕奥-萨伐尔定律	50
9.3.1	毕奥-萨伐尔定律	50
9.3.2	毕奥-萨伐尔定律的应用	52
9.4	安培环路定理	55
9.4.1	安培环路定理	55
9.4.2	安培环路定理的应用	57
9.5	载流导线在磁场中所受的作用力	60
9.5.1	安培力	60
9.5.2	磁场对载流线圈的作用	62
9.5.3	磁力的功	63
9.6	带电粒子在磁场中的运动	65
9.6.1	带电粒子在磁场中的运动规律	65
9.6.2	霍尔效应	66
9.6.3	回旋加速器	67
* 9.7	磁介质中的磁场	69
9.7.1	磁介质 磁化强度	69
9.7.2	磁介质中的安培环路定理 磁场强度	71
9.7.3	铁磁质	74
本章小结		76
习题 9		78
第 10 章	电磁感应和电磁波	83
10.1	电磁感应定律	83
10.1.1	电磁感应现象	83
10.1.2	楞次定律	84
10.1.3	法拉第电磁感应定律	85
10.2	动生电动势和感生电动势	86

10.2.1	动生电动势	87
10.2.2	感生电动势	89
10.2.3	涡电流	91
10.3	自感和互感	93
10.3.1	自感电动势 自感	93
10.3.2	互感电动势 互感	95
10.4	磁场的能量	97
10.5	位移电流 麦克斯韦方程组	99
10.5.1	位移电流	99
10.5.2	麦克斯韦方程组	101
* 10.6	电磁振荡 电磁波	102
10.6.1	振荡电路 电磁波的产生和传播	102
10.6.2	平面电磁波的基本性质	104
10.6.3	电磁波谱	105
	本章小结	105
	习题 10	107

第四篇 波动光学篇

第 11 章	光的干涉	114
11.1	光波	114
11.1.1	光源	114
11.1.2	光的单色性与颜色	115
11.2	光的相干性 光程差	115
11.2.1	光的相干性	115
11.2.2	光程和光程差	117
11.3	杨氏双缝干涉	118
11.3.1	杨氏双缝干涉	118
11.3.2	应用分波阵面法的其他干涉实验	120
11.4	薄膜干涉	122
11.4.1	等倾干涉	122
11.4.2	增透膜和增反膜	124
11.4.3	等厚干涉	125
11.5	迈克耳孙干涉仪	128
	本章小结	129
	习题 11	130
第 12 章	光的衍射	133
12.1	光的衍射 惠更斯-菲涅耳原理	133
12.1.1	光的衍射现象	133

12.1.2	惠更斯-菲涅耳原理	134
12.2	单缝衍射	135
12.3	圆孔衍射 光学仪器的分辨率	137
12.3.1	圆孔衍射	137
12.3.2	光学仪器的分辨率	138
12.4	衍射光栅	140
12.4.1	衍射光栅	140
12.4.2	光栅衍射规律	141
12.4.3	光栅光谱	143
12.5	X射线的衍射	144
	本章小结	145
	习题 12	146
第 13 章	光的偏振	148
13.1	自然光和偏振光	148
13.1.1	自然光	148
13.1.2	线偏振光和部分偏振光	149
13.1.3	椭圆偏振光	149
13.2	偏振片 马吕斯定律	149
13.2.1	偏振片的起偏和检偏	149
13.2.2	马吕斯定律	150
13.3	布儒斯特定律	152
13.4	光的双折射	153
	本章小结	155
	习题 13	156

第五篇 量子物理

第 14 章	量子物理基础	160
14.1	黑体辐射 普朗克的能量子假设	160
14.1.1	黑体 黑体辐射	160
14.1.2	黑体辐射定律	161
14.1.3	普朗克假设 普朗克黑体辐射公式	162
14.2	光电效应	162
14.2.1	光电效应实验规律	162
14.2.2	光子 爱因斯坦光电效应方程	163
14.2.3	光的波粒二象性	165
14.3	康普顿散射效应	166
14.4	玻尔的氢原子理论	169
14.4.1	氢原子光谱的规律	169
14.4.2	氢原子的玻尔理论	171

14.4.3	氢原子玻尔理论的困难	173
14.5	德布罗意波 实物粒子的二象性	173
14.5.1	德布罗意波	173
14.5.2	德布罗意波的实验证明——汤姆孙电子衍射实验	174
14.5.3	德布罗意波的统计解释	174
14.6	测不准关系	175
* 14.7	波函数 薛定谔方程	177
14.7.1	波函数	177
14.7.2	薛定谔方程	178
14.7.3	一维无限深势阱中运动的粒子	179
14.7.4	氢原子的薛定谔方程	180
	本章小结	181
	习题 14	183
* 第 15 章	原子核物理和粒子物理简介	186
15.1	原子核的一般性质	186
15.1.1	核的组成及大小	186
15.1.2	核的自旋和磁矩	188
15.1.3	核力	189
15.1.4	原子核的结合能	190
15.2	原子核的放射性衰变	192
15.2.1	原子核的稳定性	192
15.2.2	原子核的放射性和衰变定律	193
15.2.3	α 衰变	196
15.3	粒子物理简介	198
15.3.1	粒子特征 四种相互作用和粒子分类	199
15.3.2	强子的夸克结构	202
15.3.3	相互作用的统一	203
	本章小结	204
	习题 15	205
第 16 章	新技术的物理基础	207
16.1	半导体	207
16.1.1	固体的能带结构	207
16.1.2	本征半导体和杂质半导体	209
16.1.3	pn 结	211
16.1.4	半导体的其他特征和应用	212
16.2	激光	213
16.2.1	自发辐射 受激辐射	213
16.2.2	激光原理	214

16.2.3	激光器	216
16.2.4	激光的特性和应用	217
* 16.3	超导体	218
16.3.1	超导体的转变温度	218
16.3.2	超导体的主要特性	219
16.3.3	超导的应用前景	220
* 16.4	纳米材料简介	221
16.4.1	纳米效应	221
16.4.2	纳米材料的制备	222
16.4.3	一种纳米新材料——碳纳米管	222
16.4.4	应用前景	223
参考答案		224

第三篇

电 磁 学

电磁学是研究电磁场运动规律的学科。电磁学主要研究电荷、电流激发的电场、磁场的规律，电场和磁场之间的相互作用，电磁场对电荷、电流的作用以及电磁场对物质的各种效应等。电磁学是物理学的一个重要分支，电磁学的知识是许多工程技术和科学研究的基础，电能是应用最广泛的能源之一，电磁波的传播实现了信息传递，研究新材料的电磁性质促进了新技术的诞生，显然电磁学与工程技术的各个领域联系十分密切。电磁学的研究在理论上也很重要，物质的各种性能是由物质的电磁结构决定的，在分子和原子等微观领域，电磁力起主要作用，许多物理现象，如物质的弹性、金属的导热、光的折射率等都可以由物质的电磁结构得以解释。随着对物质运动认识的深入，人们惊奇地发现，整个物质世界，无一不与电磁现象密切联系，所以，电磁学的理论在现代物理学中占有重要的地位。

人类对电磁现象的观察和认识是非常早的，最初曾认为电现象和磁现象是互不相关的，直到1819年奥斯特发现了电流对磁针的作用，1820年安培发现了磁铁对电流的作用，才开始认识到电和磁的关系。1831年，法拉第发现电磁感应定律，提出了场和力线的概念，揭示了自然界电现象与磁现象之间的联系。麦克斯韦在前人成就的基础上，再加上他关于感应电场和位移电流的假设，于1865年建立了系统的电磁场理论，并预言光是一种电磁波，使光学成为电磁场理论的组成部分。麦克斯韦的这一成就可以认为是从牛顿建立力学理论到爱因斯坦提出相对论的这段时期中物理学史上最重要的理论成果。1905年爱因斯坦创立了相对论，它不但使人们对牛顿力学有了更全面的认识，也使得人们对已知的电磁现象和理论有了更深刻的理解，根据电磁现象的规律必须满足相对论时洛伦兹变换的要求，可以证明，从不同参考系观测，同一电磁场可以表现为只是电场，或只是磁场，或电场和磁场并存。更确切地说，表征电磁场的物理量——电场强度和磁感应强度——是随参考系改变的，这说明电磁场是一个统一的实体，且麦克斯韦方程组可以在此基础上加以统一的论证。

本篇主要介绍电磁场的基本规律，首先讲电场的描述及其规律及静电场中的导体和电介质；再讲磁场的描述及其规律及磁场中的磁介质；最后介绍电场和磁场的相互联系的规律——电磁感应和电磁波的理论。

第 8 章

静 电 场

相对于观察者为静止的电荷在周围空间所激发的电场，称为静电场。本章我们研究真空中静电场的基本特性，主要内容有：静电场的基本定律——库仑定律，反映静电场基本性质的两个重要定理——高斯定理和环路定理，描述静电场的两个重要物理量——电场强度和电势。

8.1 电荷 库仑定律

8.1.1 电荷

1. 电荷的量子化

人们对于电的认识，最初来自人为的摩擦起电现象和自然界的雷电现象。事实上，两个不同质料的物体，例如丝绸和玻璃棒互相摩擦后，都能吸引羽毛、小纸片等轻微物体，这表明两个物体经摩擦后，处于一种特殊状态，我们把处于这种状态的物体称为带电体，并说它们分别带有电荷。电荷是物体状态的一种属性，宏观物体或微观粒子处于带电状态就说它们带有电荷。

自然界只存在正负两种电荷，同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引。物体所带电荷的多少叫做电量，常用符号 Q 或 q 表示，在国际单位制(SI)中，电量的单位为库仑，简称为库，符号为 C。正电荷的电荷量取正值，负电荷的电荷量取负值。实验表明，在自然界中，电荷总是以一个基本单元的整数倍出现的，任何带电体或其他微观粒子所带的电量只能为基本单元电荷的整数倍。电荷的这种只能取离散的、不连续的量值的性质叫做电荷的量子化。1913年，密立根用油滴实验测定基本单元电荷的量值，即一个电子所带电量的绝对值，用符号 e 表示，迄今所知，电子是自然界存在的最小负电荷，质子是最小正电荷。国际推荐的电子电量的绝对值为

$$e = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{C}$$

因为 e 如此之小，以致电荷的量子性在研究宏观现象的绝大多数实验中未能表现出来，因此常把带电体当做电荷连续分布的带电体来处理，并认为电荷的变化是连续的。近代物理从理论上预言，基本粒子由若干种电量为 $\pm \frac{1}{3}e$ ， $\pm \frac{2}{3}e$ 的夸克或反夸克组成，然而到目前为止，实验上还没有发现处于自由状态的夸克。

2. 电荷守恒定律

在宏观过程中,摩擦起电、感应起电等事实表明,任何使物体带电的过程或带电体被中和的过程,都是电荷从一个物体转移到另一个物体,或从物体的一部分转移到另一部分。实验证明,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。当两种等量的异号电荷相遇时,则互相中和,物体就不带电了。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。在一个与外界没有电荷交换的系统内,无论进行怎样的物理过程,系统内正、负电荷代数和总是保持不变,这就是电荷守恒定律。

在微观过程中,近代科学研究表明电荷守恒定律仍然成立。例如高能光子(γ 射线)和一个重原子核相碰时,该光子会转化为一对正负电子(电子对产生);反之,当一对正负电子在一定条件下相遇时,又会同时消失而产生两个或三个光子(电子对湮灭),光子不带电,正负电子所带的电荷等量异号,故在此微观过程中尽管粒子产生或湮灭,但过程前后电荷的代数和仍没有变。

电荷守恒定律就像能量守恒定律、动量守恒定律和角动量守恒定律那样,也是自然界的基本守恒定律之一,无论是在宏观领域里,还是在原子、原子核和粒子范围内,电荷守恒定律也是成立的。

8.1.2 库仑定律

1. 库仑定律

1785年,法国物理学家库仑通过扭秤实验总结出了两个静止点电荷之间相互作用力的规律,即库仑定律。点电荷是从实际带电体中抽象出来的理想模型,是指带电体本身的几何线度比起它到其他带电体的距离小得多时,其形状和大小可以忽略,可把带电体抽象成一个几何点。库仑定律表述如下:

在真空中,两个静止点电荷之间的相互作用力的大小与这两个点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之间的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸。

如图8-1所示,两个点电荷分别为 q_1 和 q_2 ,由电荷 q_1 指向电荷 q_2 的矢量用 \mathbf{r} 表示,则 q_2 受到 q_1 的作用力 \mathbf{F} 为

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (8.1)$$

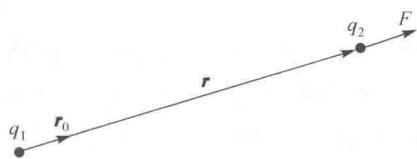


图8-1 库仑定律

式中 \mathbf{r}_0 为从电荷 q_1 指向电荷 q_2 的单位矢量, $\mathbf{r}_0 = \frac{\mathbf{r}}{r}$ 。

库仑定律公式中比例系数 k 的数值和单位取决于式中各量所采用的单位。在国际单位制中

$$k = 8.9875 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2 \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

通常引入常量 ϵ_0 来代替 k ,并把 k 写成 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$,于是真空库仑定律就可写为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (8.2)$$

式中的常量 ϵ_0 称为真空介电常数(或电容率), 也称真空介电常量。一般计算时, 其值为

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

不论 q_1 和 q_2 的正负如何, 公式(8.1)都适用。当 q_1 和 q_2 同号时, \mathbf{F} 与矢量 \mathbf{r}_0 的方向相同, 表明 q_1 对 q_2 的作用力是斥力; q_1 和 q_2 异号时, \mathbf{F} 与 \mathbf{r}_0 的方向相反, 表明 q_1 对 q_2 的作用力是引力。静止电荷之间的电作用力, 又称库仑力或静电力。库仑定律是直接由实验总结出来的规律, 它是静电场理论的基础。

2. 静电力的叠加原理

实验还证明, 当空间有两个以上的点电荷(如 $q_0, q_1, q_2, \dots, q_i$) 存在时, 各对点电荷之间的静电力彼此都是独立的, 即任何一对点电荷之间的静电力都遵守库仑定律, 并不因为邻近存在其他电荷而改变。所以, 作用在每一点电荷(如 q_0) 上的总静电力 \mathbf{F} , 等于其他各点电荷单独存在时作用于该点电荷上的静电力 \mathbf{F}_i 的矢量和, 即

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_{i0}$$

这一结论称为电场力的叠加原理。根据库仑定律和静电力的叠加原理, 原则上可以求解任意带电体之间的静电力。

【例 8.1】 按量子理论, 在氢原子中, 核外电子快速地运动着, 并以一定的概率出现在原子核(质子)的周围各处, 在基态下, 电子在以质子为中心, 半径 $r = 0.529 \times 10^{-10} \text{m}$ 的球面附近出现的概率最大。试计算在基态下, 氢原子内电子和质子之间的静电力和万有引力, 并比较两者的大小。引力常量为 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ 。

【解】 按库仑定律计算, 电子和质子之间的静电力为

$$F_e = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = 8.99 \times 10^9 \times \frac{(1.60 \times 10^{-19})^2}{(0.529 \times 10^{-10})^2} = 8.22 \times 10^{-8} \text{N}$$

应用万有引力定律及相关的数值计算, 电子和质子之间的万有引力为

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{9.11 \times 10^{-31} \times 1.67 \times 10^{-27}}{(0.529 \times 10^{-10})^2} = 3.63 \times 10^{-47} \text{N}$$

由此得静电力与万有引力的比值为

$$\frac{F_e}{F_g} = 2.26 \times 10^{39}$$

可见在原子内, 电子和质子之间的静电力远比万有引力大, 因此, 在处理电子和质子之间的相互作用时, 只需考虑静电力, 万有引力可以略去不计。而在原子结合成分子, 原子和分子组成液体或固体时, 它们的结合力在本质上都属于静电力。

8.2 电场强度

8.2.1 电场强度

1. 电场

任何电荷都在其周围空间激发电场, 电荷之间的相互作用是通过其中一个电荷所激发的电场对另一个电荷的作用来传递的。场是一种特殊形态的物质, 它和物质的另一种形态——

实物一起,构成了物质世界非常丰富的图景。静电场存在于静止电荷的周围,并分布在一定的空间。两个电荷之间的相互作用力本质上是一个电荷的电场作用在另一个电荷上的电场力。静电场是普遍存在的电磁场的一种特殊情况。

2. 电场强度

为了定量地描述电场中任一处电场的性质,可将一个试验电荷 q_0 放到电场中不同位置,并观测 q_0 受到的作用力的情况。试验电荷必须满足如下要求:首先试验电荷必须是点电荷,其次它所带的电荷量必须足够小,当把它引入电场时,不致扰乱原来的电场分布,即不会对原有电场有任何显著的影响。为了叙述方便取试验电荷 q_0 为正电荷。

如图 8-2 所示,在静止电荷 q 周围的静电场中,先后将同一试验电荷 q_0 放到电场中不同地点 A、B、C 时,发现 q_0 所受到的电场力 F 的大小和方向逐点不同。另一方面,在电场中某一给定点处,试验电荷 q_0 在该处所受到的电场力 F 只与 q_0 的大小有关,但 F 与 q_0 之比则与 q_0 无关,为一不变的矢量。显然,比值 $\frac{F}{q_0}$ 是一个无论大小和方向都与试验电荷本身无关的矢量,

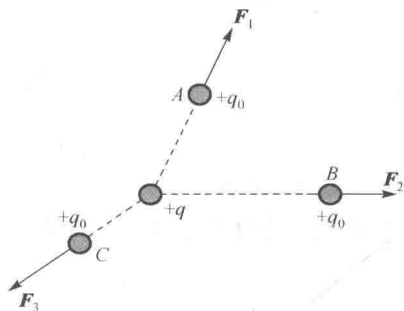


图 8-2 试验电荷 q_0 在电场中不同位置受力情况

它反映了试验电荷所在点处的电场本身的性质。所以,我们可用试验电荷所受的力和试验电荷所带电荷量之比,作为描述静电场中某一给定点的客观性质的一个物理量,定义为电场强度,简称场强,用 E 表示,有

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (8.3)$$

上式表明,电场中某点处的电场强度 E 等于单位试验电荷在该点所受的电场力。我们取试验电荷 q_0 为正时, E 的方向和电场力 F 的方向相同; q_0 为负时, E 的方向和电场力 F 的方向相反,如图 8-3 所示。

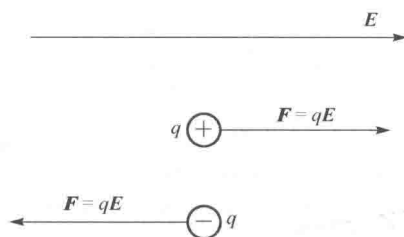


图 8-3 电场对正负电荷作用力的方向

在国际单位制中, 电场强度的单位为牛顿每库仑, 符号为 $\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$, 电场强度的单位也可以为伏特每米, 符号为 $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。这两种表示法是一样的, $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ 比 $\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$ 使用得更普遍些。

8.2.2 电场强度的叠加原理

如果电场是由 n 个点电荷 q_1, q_2, \dots, q_n 共同激发的, 这些电荷的总体称为电荷系, 将试验电荷 q_0 放在这个点电荷系所产生的电场中时, 根据电场力的叠加原理, q_0 在电场中某点 P 处所受的力等于各个点电荷单独存在时对 q_0 作用的力的矢量和, 即

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i$$

两边除以 q_0 得到

$$\frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \dots + \frac{\mathbf{F}_n}{q_0}$$

按场强的定义 $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0}$, 有

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i \quad (8.4)$$

上式说明, 电场中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, 这就是场强叠加原理, 是电场的基本性质之一。利用这一原理, 可以计算任意带电体所激发的场强, 因为任何带电体都可以看做是许多点电荷的集合。

8.2.3 电场强度的计算

如果场源电荷分布已知, 那么从点电荷的场强公式出发, 根据场强的叠加原理, 可以求出任意电荷分布所激发电场的电场强度。下面介绍电场强度的计算。

1. 点电荷的电场强度

如图 8-4 所示, 设在真空中有一个静止的点电荷 q , 则距 q 为 r 的空间任意一点 P 处的场强, 可由库仑定律和电场强度的定义求得。设在距离点电荷 q 为 r 的 P 点处放一试验电荷 q_0 , 则作用在 q_0 上的电场力是

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \mathbf{r}_0$$

式中 \mathbf{r} 是由点电荷 q 指向 P 点的矢量, \mathbf{r}_0 是沿着 \mathbf{r} 方向的单位矢量。再应用式(8.3)可求得 P 点的场强为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0 \quad (8.5)$$

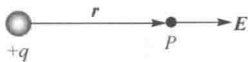


图 8-4 正点电荷的场强

由式(8.5)可知, 点电荷 q 在空间任一点所激发场强的大小与点电荷的电荷量 q 成正比, 与点电荷 q 到该点距离 r 的平方成反比。如果 q 为正电荷, 可知 \mathbf{E} 的方向与 \mathbf{r} 的方向一致, 即背离 q , 如图 8-4 所示。如果为负电荷, \mathbf{E} 的方向与 \mathbf{r} 的方向相反, 即指向 q 。

2. 点电荷系的电场强度

设真空中有 n 个点电荷 q_1, q_2, \dots, q_n 构成点电荷系, 用 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_n$ 分别表示各点电荷到场点 P 的矢径, 各点电荷单独存在时在 P 点产生的电场强度分别为

$$\mathbf{E}_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \mathbf{r}_{10}, \mathbf{E}_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \mathbf{r}_{20}, \dots, \mathbf{E}_n = \frac{q_n}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} \mathbf{r}_{n0}$$

根据场强叠加原理, 这个点电荷系在 P 点的总场强为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{r}_{i0} \quad (8.6)$$

在直角坐标系中式(8.6)的分量式分别为

$$\begin{cases} E_x = \sum_{i=1}^n E_{ix} \\ E_y = \sum_{i=1}^n E_{iy} \\ E_z = \sum_{i=1}^n E_{iz} \end{cases}$$

3. 电荷连续分布的电荷系的电场强度

引进连续分布电荷的概念, 根据电场强度叠加原理, 就可以计算电荷连续分布的电荷系的电场强度。为此, 对任一带电体所激发的场强, 我们把带电体看成是许多极小的连续分布的电荷元 dq 的集合, 每个电荷元 dq 都当做起点电荷来处理, 电荷元 dq 在 P 点激发的场强, 按点电荷的电场强度公式可写为

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}_0$$

式中 \mathbf{r}_0 是从 dq 所在点指向 P 点的单位矢量。带电体的全部电荷在 P 点激发的场强, 是所有的电荷元所激发场强 $d\mathbf{E}$ 的矢量和, 因为电荷是连续分布的, 我们把式(8.6)中的累加号 \sum 换成积分号 \int , 求得 P 点的电场强度为

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (8.7)$$

如果电荷分布在整个体积内, 这种分布称为体电荷分布, 引入体电荷密度来表征电荷在该体积上任一点附近的电荷分布情况。体上某点电荷体密度的定义为

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

相应的计算电场强度的公式为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho \mathbf{r}_0}{r^2} dV \quad (8.7a)$$

如果电荷分布在极薄的表面层里, 这时我们可以把带电薄层抽象为“带电面”并引入电荷面密度来表征电荷在该面上任一点附近的电荷分布情况。面上某点电荷面密度 σ 的定义为

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

相应的计算电场强度的公式为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma \mathbf{r}_0}{r^2} dS \quad (8.7b)$$

若电荷分布在细长的线上, 则定义电荷线密度 λ 为

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

相应的计算电场强度的公式为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_L \frac{\lambda \mathbf{r}_0}{r^2} dl \quad (8.7c)$$

【例 8.2】 真空中有一均匀带电直线, 长为 L , 总电荷量为 q , 线外一点 P 离开直线的垂直距离为 a , P 点和直线两端的连线与直线之间的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 , 如图 8-5 所示, 试求 P 点的电场强度。

【解】 取 P 点到直线 L 的垂足 O 点为坐标原点, Ox 轴沿带电直线。 Oy 轴通过 P 点, 如图 8-5 所示, 设直线上单位长度所带电量为 λ , 即 $\lambda = \frac{q}{L}$, 则距离原点为 x 处的电荷元 $dq = \lambda dx$ 在 P 点产生的场强 $d\mathbf{E}$ 为

$$d\mathbf{E} = \frac{\lambda dx}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0$$

式中 \mathbf{r} 是从 dx 指向 P 点的矢量, \mathbf{r}_0 是沿着 \mathbf{r} 方向的单位矢量。 \mathbf{r} 的大小为 $r = (x^2 + a^2)^{1/2}$, 设 $d\mathbf{E}$ 与 x 轴之间的夹角为 θ , 则 $d\mathbf{E}$ 沿 x 轴和 y 轴的两个分量分别为

$$dE_x = dE \cos\theta$$

$$dE_y = dE \sin\theta$$

$$\text{因为 } x = a \tan\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) = -a \cot\theta$$

$$dx = a \csc^2 \theta d\theta$$

$$dE_x = dE \cos\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \cos\theta d\theta$$

$$dE_y = dE \sin\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \sin\theta d\theta$$

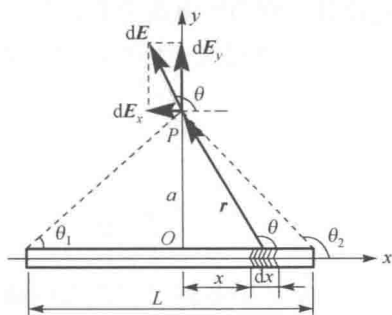


图 8-5 均匀带电直线外任一点的场强