



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 新编 基础物理学

(下册)

王少杰 顾 牡 / 主编



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 新编基础物理学

(下 册)

主 编 王少杰 顾 牡

副主编 邱明辉 杨桂娟 刘传先

参 编 罗时军 赵安庆 施昌勇

科学出版社

北 京



## 内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书依照物理基础教学指导分委会编写的《理工科类大学物理课程教学基本要求、理工科类大学物理实验课程教学基本要求(2008版)》编写,其中不仅融入作者多年教学经历所积累的成功经验,而且考虑到目前学生学习和教师教学的新特点,还为本书配备了习题分析与解答、学习指导和电子教案等教学资源。全书分为两册,本书是下册,内容包括电磁学篇、光学篇和量子物理基础篇。

本书适合普通高等学校工科各专业学生学习使用,也可作为教师或相关人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

新编基础物理学.下册/王少杰,顾牡主编. —北京:科学出版社,2009  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-03-023529-9

I. 新… II. ①王… ②顾… III. 物理学-高等学校-教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 187877 号

责任编辑:胡云志 昌盛 / 责任校对:钟 洋  
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009 年 1 月第一次印刷 印张:19

印数:1—10 000 字数:465 000

定价:29.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈明辉〉)

801	.....	3
701	.....	4
601	.....	4
501	.....	4
401	.....	4
301	.....	5
201	.....	5
101	.....	6
101	.....	6
101	.....	9
101	.....	13
101	.....	13
101	.....	14
101	.....	15
101	.....	16
101	.....	18
101	.....	19
101	.....	19
101	.....	20
101	.....	20
101	.....	21
101	.....	22
101	.....	23
101	.....	25
101	.....	25
101	.....	26
101	.....	28

## 第4篇 电 磁 学

第9章 电荷与真空中的静电场.....	3
9.1 电荷 库仑定律 .....	3
9.1.1 电荷的量子化 .....	3
9.1.2 电荷守恒定律 .....	4
9.1.3 真空中的库仑定律 .....	4
9.2 电场和电场强度 .....	5
9.2.1 电场 .....	5
9.2.2 电场强度 .....	6
9.2.3 点电荷与点电荷系的电场强度 .....	6
9.2.4 电场强度的计算 .....	9
9.3 电通量 真空中静电场的高斯定理 .....	13
9.3.1 电场线 .....	13
9.3.2 电通量 .....	14
9.3.3 真空中静电场的高斯定理 .....	15
9.3.4 高斯定理的应用 .....	16
9.4 静电场力的功 真空中静电场的环路定理 .....	18
9.4.1 静电场力做功的特点 .....	19
9.4.2 静电场的环路定理 .....	19
9.5 电势 .....	20
9.5.1 电势能 .....	20
9.5.2 电势和电势差 .....	21
9.5.3 点电荷的电势 电势的叠加原理 .....	22
9.5.4 电势的计算 .....	23
9.6 电场强度和电势的关系 .....	25
9.6.1 等势面 .....	25
9.6.2 电场强度与电势梯度 .....	26
习题 9 .....	28

## 录

第10章 导体和电介质中的静电场.....	30
10.1 静电场中的导体 .....	30
10.1.1 导体的静电平衡 .....	30
10.1.2 静电平衡时导体上的电荷分布 .....	31
10.1.3 静电屏蔽 .....	33
10.2 电容及电容器 .....	34
10.2.1 孤立导体的电容 .....	34
10.2.2 电容器的电容 .....	35
10.2.3 几种常见的电容器 .....	35
10.2.4 电容器的串联和并联 .....	37
* 10.3 静电场中的电介质 .....	39
10.3.1 电介质的极化 .....	39
10.3.2 电介质对电容器电容的影响 .....	40
10.3.3 电介质中的静电场 .....	41
10.3.4 电介质中的高斯定理 .....	42
10.4 静电场的能量 .....	44
10.4.1 电容器储存的能量 .....	44
10.4.2 静电场的能量 .....	45
习题 10 .....	47
第11章 恒定电流与真空中的恒定磁场 .....	49
11.1 恒定电流和恒定电场 电动势 .....	49
11.1.1 电流形成的条件 .....	49
11.1.2 恒定电流和恒定电场 .....	50
11.1.3 电流和电流密度 .....	51
* 11.1.4 欧姆定律的微分形式 焦耳-楞次定律的微分形式 .....	52
11.1.5 电源及电源电动势 .....	55
11.2 恒定磁场和磁感应强度 .....	57
11.2.1 磁性起源于电荷的运动 .....	57

11.2.2 磁场 磁感应强度 $B$ .....	58	线 .....	103
11.3 毕奥-萨伐尔定律 .....	60	12.3.3 磁畴 .....	105
11.3.1 毕奥-萨伐尔定律 .....	60	习题 12 .....	106
11.3.2 毕奥-萨伐尔定律应用举例 .....	61	<b>第 13 章 电磁场与麦克斯韦方程组</b> ..	107
11.3.3 匀速运动电荷的磁场 .....	67	13.1 电磁感应定律 .....	107
11.4 真空中磁场的高斯定理 .....	69	13.1.1 电磁感应现象 .....	107
11.4.1 磁感应线 .....	69	13.1.2 法拉第电磁感应定律 .....	108
11.4.2 磁通量 .....	69	13.1.3 楞次定律 .....	109
11.4.3 真空中恒定磁场的高斯定理 .....	70	13.1.4 全磁通 感应电流 感应电量 .....	111
11.5 真空中恒定磁场的安培环路定理 .....	71	13.2 动生电动势 .....	113
11.5.1 恒定磁场的安培环路定理 .....	71	13.2.1 产生动生电动势的原因——洛伦兹力 .....	113
11.5.2 安培环路定理的应用 .....	73	13.2.2 动生电动势的计算 .....	114
11.6 磁场对运动电荷和载流导线的作用 .....	77	13.3 感生电动势 .....	116
11.6.1 洛伦兹力 .....	77	13.3.1 产生感生电动势的原因——感生电场 .....	116
11.6.2 带电粒子在磁场中的运动 .....	78	13.3.2 感生电场及感生电动势的计算 .....	118
11.6.3 应用电场和磁场控制带电粒子的实例 .....	79	13.4 自感与互感 .....	119
11.6.4 安培力 .....	83	13.4.1 自感现象 自感系数 .....	119
11.7 磁力的功 .....	88	13.4.2 自感系数及自感电动势的计算 .....	121
11.7.1 磁力对运动载流导线的功 .....	88	13.4.3 互感现象及互感系数 .....	121
11.7.2 磁力矩对转动载流线圈的功 .....	88	13.4.4 互感系数及互感电动势的计算 .....	123
习题 11 .....	90	13.4.5 $LC$ 谐振电路 .....	124
<b>第 12 章 磁介质中的恒定磁场</b> .....	94	13.5 磁场的能量 .....	126
* 12.1 磁介质及其磁化 .....	94	13.5.1 自感线圈的磁能 .....	126
12.1.1 磁介质及其分类 .....	94	13.5.2 磁场的能量 .....	127
12.1.2 分子磁矩 分子附加磁矩 .....	96	13.6 位移电流与电磁场 .....	129
12.1.3 顺磁质和抗磁质的磁化 .....	97	13.6.1 位移电流的引入 .....	129
12.1.4 磁化强度矢量与磁化电流 .....	98	13.6.2 全电流定律 .....	130
12.2 磁介质中的高斯定理和安培环路定理 .....	100	13.6.3 电磁场 .....	132
12.2.1 磁介质中的高斯定理 .....	100	13.7 麦克斯韦方程组与电磁波 .....	132
12.2.2 磁介质中的安培环路定理 .....	100	13.7.1 麦克斯韦方程组 .....	132
12.3 铁磁质 .....	103	13.7.2 电磁波 .....	133
12.3.1 铁磁质的特点 .....	103		
12.3.2 铁磁质的起始磁化曲线 磁滞回			

13.7.3	平面电磁波的性质	134	15.3.1	薄膜干涉	177
13.7.4	平面电磁波的能量密度和能流密度	135	15.3.2	等厚干涉——劈尖干涉和牛顿环	180
13.7.5	电偶极振子发射的电磁波	136	15.3.3	增反膜和增透膜	183
13.7.6	电磁波谱	138	15.3.4	等倾干涉	185
习题 13		139	15.3.5	迈克耳孙干涉仪	186
<b>第 5 篇 光 学</b>					
<b>第 14 章 几何光学</b> 145					
14.1	几何光学的基本实验定律和基本原理	145	15.4	单缝衍射和圆孔衍射	187
14.1.1	几何光学的基本实验定律	145	15.4.1	惠更斯-菲涅耳原理	187
14.1.2	全反射	147	15.4.2	单缝夫琅禾费衍射	190
14.1.3	费马原理	147	15.4.3	圆孔衍射和光学仪器的分辨本领	194
14.2	几何光学成像的基本概念和薄透镜成像规律	150	15.5	光栅衍射	197
14.2.1	同心光束 物和像	150	15.5.1	衍射光栅	197
14.2.2	光在平面上的反射成像	151	15.5.2	光栅方程	198
14.2.3	光在球面上的折射和反射成像	152	15.5.3	光栅光谱和色分辨本领	200
14.2.4	光在平面上折射成像	158	15.6	X 射线的衍射	203
14.2.5	薄透镜成像	158	15.7	光的偏振现象	204
14.3	光学仪器简介	163	15.7.1	光的偏振态	204
14.3.1	照相机	163	15.7.2	偏振片 马吕斯定律	206
14.3.2	显微镜	164	15.8	反射和折射时的偏振现象 布儒斯特定律	209
14.3.3	望远镜	165	15.9	双折射现象	210
习题 14		167	15.9.1	晶体双折射现象的基本规律	210
<b>第 15 章 波动光学</b> 168					
15.1	光的相干性	168	15.9.2	惠更斯对双折射现象的解释	212
15.1.1	光的电磁理论	168	15.9.3	偏振棱镜	216
15.1.2	光的相干性	169	15.10	偏振光的干涉 人为双折射现象 旋光现象	217
15.1.3	普通光源发光微观机制的特点	171	15.10.1	偏振光的干涉	217
15.2	双缝干涉	172	15.10.2	人为双折射现象	219
15.2.1	杨氏双缝实验	172	15.10.3	旋光现象	221
15.2.2	劳埃德镜	175	习题 15		222
15.3	薄膜干涉	177	<b>第 6 篇 量子物理基础</b>		
<b>第 16 章 早期量子论</b> 227					
16.1	黑体辐射和普朗克量子假设	227	16.1.1	黑体辐射及其基本规律	228
16.1.1	黑体辐射及其基本规律	228	16.1.2	普朗克量子假设	230

16.2	光电效应和光的量子性	232	17.4	一维定态问题	267
16.2.1	光电效应	232	17.4.1	一维无限深方势阱	267
16.2.2	爱因斯坦光子假说	235	17.4.2	隧道效应	270
16.3	康普顿散射	238	17.4.3	一维谐振子	273
16.4	玻尔氢原子理论	241	17.5	原子中的电子 原子的壳层结构	274
16.4.1	经典氢原子模型	241	17.5.1	氢原子中电子的波函数及其概率分布	274
16.4.2	氢原子光谱	242	17.5.2	电子的自旋 施特恩-格拉赫实验	277
16.4.3	玻尔氢原子理论	243	17.5.3	泡利原理 多电子原子的壳层结构	279
习题 16		248	17.5.4	元素周期表	281
<b>第 17 章 量子力学简介</b>		249	习题 17		283
17.1	微观粒子的波粒二象性和不确定关系式	249	<b>参考答案</b>		284
17.1.1	微观粒子的波粒二象性	250	<b>参考文献</b>		289
17.1.2	不确定关系式	253	<b>附录 书中物理量的符号及单位</b>		290
17.2	波函数及其统计解释	257	<b>索引</b>		292
17.2.1	概率波	257			
17.2.2	态叠加原理	260			
17.3	薛定谔方程	262			

# 第 4 篇

## 电 磁 学

**电磁学**(electromagnetism)主要是研究电荷(electric charge)、电场(electric field)和磁场(magnetic field)的基本性质、基本规律以及它们之间相互联系的科学。**电磁运动**是物质的一种基本运动形式。

在 1820 年以前,人们对电现象和磁现象是分别进行研究的,直到丹麦物理学家奥斯特(H. C. Oersted, 1777~1851)发现了电流的磁效应后才结束了这种状态. 1831 年,英国物理学家法拉第(M. Faraday, 1791~1867)发现了电磁感应现象及其规律,将人类关于电、磁之间联系的认识推到了一个新阶段. 1865 年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831~1879)在《电磁场的动力学理论》中总结了前人研究电、磁现象的成果,提出了感生电场和位移电流假说,建立了完整的电磁场理论基础——麦克斯韦方程组. 根据这个方程组,麦克斯韦预言了电磁波的存在,并计算出电磁波在真空中的传播速度等于光在真空中的传播速度. 1888 年,德国物理学家赫兹(H. R. Hertz, 1857~1894)从实验上证实了电磁波的存在. 100 多年来,随着科学技术的飞跃发展,人们又从许多方面更加充分地证实了麦克斯韦方程组的正确性.

目前,电磁学的发展有两个重要方面:一方面是电磁学规律被用来解决各种各样的实际问题. 可以毫不夸张地说,当代高新技术和物质文明一刻也离不开电磁学的应用. 另一方面是理论基础方面,更深入地研究电磁相互作用,使它成为更普遍的理论. 1967 年,温伯格(S. Weinberg, 1933~)和萨拉姆(A. Salam, 1926~)在格拉肖(S. L. Glashow, 1932~)理论的基础上,先后提出了电磁相互作用和弱相互作用统一的规范理论,并为实验所证实,即电磁相互作用和弱相互作用只是同一种相互作用——电弱相互作用——的两种表现形式. 物理学家正试图找出一个“超统一理论”,即能理解一切物理现象的基本规律. 这种巨大的综合性工作,正等待着物理学家们去探索.





# 第9章 电荷与真空中的静电场

任何电荷的周围都存在着电场,相对于观察者来说静止的电荷在其周围激发的电场称为**静电场**.静电场是电磁学中首次遇到的一个矢量场,它是研究电磁学的基础.本章主要研究真空中的静电场的基本性质与规律.

## 9.1 电荷 库仑定律

### 9.1.1 电荷的量子化

人类认识电现象,开始于对**摩擦起电**(electrification by friction)现象的观察,中国古书上曾有“琥珀拾芥”的记载,也就是说,经过摩擦的琥珀能够吸引轻小的物体.后来,人们发现经毛皮摩擦过的橡胶棒和经丝绸摩擦过的玻璃棒也具有这种性质,我们说它们带了电(electricity),或者说带有了**电荷**(electric charge).美国物理学家富兰克林(B. Franklin, 1706~1790)首先以**正电荷**、**负电荷**的名称来区分两种电荷,并在实验的基础上指出,自然界中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.带电的物体称为**带电体**,带电体所带电荷的多少叫**电量**(electric quantity),用符号 $Q$ 或 $q$ 表示,在国际单位制中,其单位为库[仑](C).正电荷的电量取正值,负电荷的电量取负值.

实验还证明,在自然界中,电荷是以一个基本单元的整数倍出现的.目前,我们认为电荷的一个基本单元就是一个电子所带电量的绝对值,常以 $e$ 表示.即

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

带电体所带的电量只能是 $q = ne (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ .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**(charge quantization).即物体所带的电量不可能连续地取任意量值.

近年来,理论上已提出可能存在更小的电荷单元,即所谓的**分数电荷**,但实验上并未发现.由于电子的电量是很小的,而在一般的实验中,电量的变化都涉及大量电子的迁移,在宏观上,我们通常近似地认为电量可以连续变化.

### 9.1.2 电荷守恒定律

大量的实验表明,一个孤立系统(即与外界无电荷交换的系统)的总电荷数(正负电荷的代数和)保持不变,即电荷既不能被创造,也不能被消灭,它只能从一个物体转移到另一个物体,或者从物体的一个部分转移到物体的另一部分,这个定律称为电荷守恒定律(law of conservation of charge). 例如,用不带电的丝绸与玻璃棒摩擦使玻璃棒带正电,同时丝绸上必定带有等量的负电. 摩擦前的丝绸和玻璃棒都不带电,电荷的代数和为零,后来,尽管两者都带了电,但电荷的代数和仍为零. 电荷守恒定律是自然界的基本守恒定律之一.

### 9.1.3 真空中的库仑定律

带电体之间的相互作用十分复杂,它不仅与带电体的电量、体积、形状以及带电体之间的相对位置有关,而且还与带电体的电荷分布以及周围介质的性质有关. 在这里,我们只讨论真空中静止的点电荷之间的相互作用. 所谓点电荷,是指大小和形状可忽略不计的带电体,即可以把带电体看成是一个带电荷的几何点. 与力学中质点概念一样,点电荷是一个理想的物理模型.

1785年,法国科学家库仑(A. de. Coulomb, 1736~1806)通过扭秤实验总结出一条规律:真空中两个静止的点电荷之间存在着相互作用力,其大小与两点电荷的电量乘积成正比,与两点电荷间的距离平方成反比;作用力的方向沿着两点电荷的连线,同性电荷互相排斥,异性电荷互相吸引. 这一结论称为库仑定律(Coulomb law),其数学表达式为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

为了同时表示力  $F$  的大小和方向,可以将上式写成矢量式,即

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r$$

式中,  $k$  为比例系数,  $q_1, q_2$  分别表示两个点电荷的电量,  $r$  表示两个点电荷间的距离,  $\mathbf{e}_r$  表示由施力电荷指向受力电荷沿矢径  $r$  的单位矢量. 在国际单位制中,力的单位为牛[顿](N),电量的单位为库[仑](C),距离的单位为米(m),用实验测得比例系数为

$$k = 8.9880 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

为了今后计算方便,也可以用另一常量  $\epsilon_0$  替换常量  $k$ ,令

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

于是库仑定律又可写成

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

式中,  $\epsilon_0$  为真空电容率 (permittivity of vacuum), 又称真空介电常量, 其值为

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.885 \times 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

从表面看, 引入“ $4\pi$ ”因子使库仑定律形式变得复杂了。然而, 在今后将会看到, 经常遇到的电磁学公式却因此不出现“ $4\pi$ ”因子而变得简单些。这种做法称为单位制的有理化。

我们称静止电荷之间的相互作用力  $\mathbf{F}$  为静电力 (electrostatic force) 或库仑力。应当注意, 式 (9-1) 只适用于计算真空中两个静止的点电荷之间的静电力, 对于一般的带电体不能简单地应用。为了计算两个带电体之间的静电力, 应先将带电体分解成许多可看成点电荷的电荷元。利用式 (9-1) 求出每一对电荷元间的作用力, 再应用力的叠加原理, 便可计算出两个带电体间的静电力。

实验表明, 当两静止点电荷之间的距离在  $10^{-17} \sim 10^7 \text{m}$  时, 库仑定律仍然成立。此时, 满足牛顿第三定律。



图 9-0-1 电荷间的相互作用力

## 9.2 电场和电场强度

### 9.2.1 电场

大家知道, 要想推动或拉动一个物体, 就必须直接或通过某种媒介和它接触。例如, 从井里往上提水, 我们是用手拉住绳子, 绳子的另一端系住水桶, 绳子就是传递作用力的媒介。

电荷之间是如何进行作用的呢? 历史上曾经有过两种不同观点的长期争论。一种称为超距作用 (action at a distance) 观点, 即认为电荷之间的作用力不需要媒介传递, 也不需要时间, 而是从一个带电体瞬时地到达另一个带电体的。这种观点, 可形象地表示为

$$\text{电荷} \Rightarrow \text{电荷}$$

另一种是近距作用 (short-range action) 观点, 即认为任一电荷都在自己的周围空间激发电场, 两个带电体间的相互作用是通过媒介, 即电场来传递的, 也可形象地表示为

$$\text{电荷} \Rightarrow \text{电场} \Rightarrow \text{电荷}$$

大量的科学实验证明, 近距作用观点是正确的。电场是一种客观存在的特殊物质, 它与普通的实物物质一样, 也具有能量、质量与动量, 但

它又与普通的实物物质不同. 例如,几个电场可以占据一个空间,电场和实物也可以共占一个空间,即电场具有“可侵入性”. 而实物却不一样.

本章只讨论相对于观测者静止的电荷在其周围空间激发的电场,称为静电场(electrostatic field).

### 9.2.2 电场强度

电场的—个重要的性质,是对放入其中的电荷施加力的作用,我们就可以从这一性质出发,对静电场进行定量的分析讨论. 首先,我们在电场中放入电量为  $q_0$  的一个点电荷作为试验电荷(testing charge),检测它在场中各点所受到的静电力. 所谓试验电荷必须具备两个条件:首先,它的电量必须足够小,不致影响待探测电场的分布;其次,它的几何尺寸必须很小,可以看成是点电荷. 这是因为空间各点的电场一般是不同的,若试验电荷不是点电荷,探测到的将不是该点的电场的情况,而是该点所在区域内电场的平均情况. 实验发现,在电场中的不同位置,试验电荷  $q_0$  所受静电力的大小和方向一般并不相同. 如图 9-1 所示,显然,试验电荷  $q_0$  所受静电力不仅与试验电荷所在电场的性质有关,还与试验电荷本身所带的电量有关.

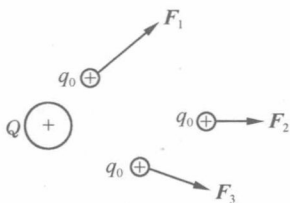


图 9-1 试验电荷  $q_0$  在电场中受力的情况

若直接用  $q_0$  受到的电场力  $F$  来描述电场显然是不恰当的. 然而,实验表明,对电场中任一确定点来说,试验电荷所受的力  $F$  与它的电量  $q_0$  的比值  $F/q_0$  是一个确定的常矢量,与试验电荷的大小、正负无关,只与该场点的位置有关. 可见比值  $F/q_0$  揭示了电场的性质,我们将它定义为电场强度(electric field strength),简称场强,用  $E$  来表示,即

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

式(9-2)说明,电场中某点的电场强度  $E$  的大小,等于单位试验电荷在该点所受到的电场力的大小,其方向与正的试验电荷受力方向相同.

在国际单位制中,电场强度的单位为牛[顿]·库[仑]<sup>-1</sup>( $N \cdot C^{-1}$ ),或伏[特]·米<sup>-1</sup>( $V \cdot m^{-1}$ ).

一般来说,空间各处的电场强度  $E$  的大小和方向并不相同, $E$  是空间坐标的矢量函数. 若  $E$  的大小和方向均与空间坐标无关,这种电场则称为均匀电场,或称匀强电场.

### 9.2.3 点电荷与点电荷系的电场强度

#### 1. 点电荷的电场强度

设真空中的静电场是由电量为  $q$  的点电荷产生的,现将电量为  $q_0$  的试验电荷置于电场中的  $P$  点,该点到  $q_0$  的距离为  $r$ . 根据库仑

定律, 试验电荷  $q_0$  受到的电场力为

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

式中,  $\mathbf{e}_r$  是由点电荷  $q$  指向点  $P$  的单位矢量, 即  $\mathbf{e}_r = \frac{\mathbf{r}}{r}$ . 由场强的定义式(9-2)可得  $P$  点的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (9-3)$$

由式(9-3)可知, 点电荷周围的电场是不均匀的, 但具有球对称性, 在以点电荷  $q$  为球心,  $r$  为半径的球面上, 各点的场强大小相等, 方向与球面垂直并沿半径方向. 当  $q > 0$  时,  $\mathbf{E}$  与  $\mathbf{e}_r$  的方向相同; 当  $q < 0$  时,  $\mathbf{E}$  与  $\mathbf{e}_r$  方向相反.

## 2. 点电荷系的电场强度

若将试验电荷  $q_0$  置于由  $n$  个点电荷  $q_1, q_2, \dots, q_n$  共同产生的静电场中, 考察场内的某点  $P$ , 以  $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_n$  分别表示  $q_1, q_2, \dots, q_n$  单独存在时对  $q_0$  的作用力, 则按力的叠加原理,  $q_0$  受到的合力  $\mathbf{F}$  为

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

将上式两端分别除以  $q_0$ , 得

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

于是有

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

式中,  $\mathbf{e}_i$  为  $r_i$  的单位矢量, 即  $\mathbf{e}_i = \frac{\mathbf{r}_i}{r_i}$ . 由此可见, 点电荷系在某一点产生的场强, 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. 这一结论称为电场强度叠加原理(superposition principle of electric field strength). 这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的场强, 因为任意带电体都可以看成是许多点电荷的集合.

## 3. 连续分布的任意带电体场强

当带电体不能当作点电荷处理时, 我们必须考虑其大小和形状, 并将带电体上的电荷看成是连续分布的. 设想将带电体分割成许多微小的电荷元  $dq$ , 则每一电荷元都可看成是点电荷, 于是, 任一电荷元在给定点  $P$  处产生的场强为

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

式中,  $r$  和  $e_r$  分别为从电荷元  $dq$  到  $P$  点的距离和单位矢量. 根据场强叠加原理, 带电体产生的电场强度为

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{dq}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (9-5)$$

上式为矢量积分式,  $\int_V$  表示对整个带电体占有空间的全部电量积分.

根据带电体电荷分布的情况, 我们引入电荷密度的概念进行描述, 可引入三种电荷分布模型, 如图 9-2 所示.

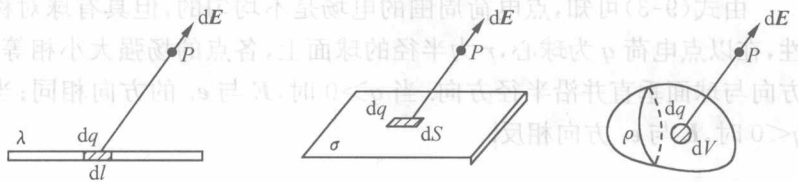


图 9-2 三种电荷分布模型

若电荷连续分布在一条细线上, 线的粗细可以忽略不计, 我们将单位长度上所带的电量称为**电荷线密度**, 通常用  $\lambda$  表示. 电荷线密度定义为

$$\lambda = \lim \frac{\Delta q}{\Delta l} = \frac{dq}{dl}$$

式中,  $dq$  为线元  $dl$  上的电量,  $\lambda$  的单位为库[仑]·米<sup>-1</sup> ( $C \cdot m^{-1}$ ).

若电荷分布在厚度可以忽略的面上, 则定义单位面积上所带的电量为**电荷面密度**, 通常用  $\sigma$  表示, 即电荷面密度定义为

$$\sigma = \lim \frac{\Delta q}{\Delta S} = \frac{dq}{dS}$$

式中,  $dq$  为面元  $dS$  上的电量,  $\sigma$  的单位为库[仑]·米<sup>-2</sup> ( $C \cdot m^{-2}$ ).

若电荷分布在一个体积内, 则定义单位体积内所带的电量为**电荷体密度**, 通常用  $\rho$  表示, 电荷体密度定义为

$$\rho = \lim \frac{\Delta q}{\Delta V} = \frac{dq}{dV}$$

式中,  $dq$  为体元  $dV$  上的电量,  $\rho$  的单位为库[仑]·米<sup>-3</sup> ( $C \cdot m^{-3}$ ).

必须指出, 只有当电荷均匀分布时,  $\lambda, \sigma, \rho$  才为常量, 而一般情况下是变量. 于是, 线、面、体分布的连续带电体在场点  $P$  处的场强计算公式由式(9-5)可以分别具体地表示为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_l \frac{\lambda dl}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (9-6)$$

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma dS}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (9-7)$$

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho dV}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (9-8)$$

应当注意,由于  $E$  是矢量,在具体计算时,必须先将矢量积分分解为沿某些坐标轴方向上的分量式,然后对每个分量积分,最后得到合场强  $E$ . 比如,在直角坐标系中可写成

$$E_x = \int dE_x, \quad E_y = \int dE_y, \quad E_z = \int dE_z$$

最后求得合场强  $E$  为

$$E = E_x i + E_y j + E_z k$$

### 9.2.4 电场强度的计算

**例 9-1** 电偶极子的场强. 设两个等量异号的点电荷  $-q$  和  $+q$  相距为  $l$ , 若所求场点到这两个点电荷中心的距离  $r \gg l$  时, 则称这两个点电荷构成的系统为一个电偶极子 (electric dipole). 连接这两个电荷的直线, 称为电偶极子轴线, 轴线的正方向为从负电荷指向正电荷的径矢  $l$  的方向, 如图 9-3 所示. 电量与径矢的乘积定义为电偶极矩 (electric dipole moment) (简称电矩), 用  $p_e$  表示, 即

$$p_e = ql \quad (9-9)$$

电偶极子是一个很重要的物理模型, 在研究电介质极化、电磁波的发射和吸收, 以及中性分子之间相互作用等问题时都要用它. 下面讨论电偶极子中垂线上的场强.

**解** 如图 9-3 所示, 设  $P$  为电偶极子中垂线上任一点, 到  $-q$  和  $+q$  的距离分别为  $r_-$  和  $r_+$ , 在  $P$  点产生的场强分别为  $E_-$  和  $E_+$ ,  $P$  点到电偶极子中心  $O$  的距离为  $r$ ,  $-q$  到  $+q$  的径矢为  $l$ , 当  $r \gg l$  时,  $r \approx r_- \approx r_+$ . 据式 (9-3) 得  $-q$  和  $+q$  在  $P$  点的场强为

$$E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)} e_{r_-} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} e_{r_-}$$

$$E_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)} e_{r_+} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} e_{r_+}$$

式中,  $e_{r_-}$ ,  $e_{r_+}$  表示从  $-q$ ,  $+q$  分别指向  $P$  点的径矢的单位矢量. 根据场强叠加原理,  $P$  点的合场强为

$$E = E_+ + E_-$$

取图 9-3 所示坐标系, 合场强沿坐标的分量为

$$E_x = -(E_+ \cos\alpha + E_- \cos\alpha) = -2E_+ \cos\alpha$$

$$E_y = E_+ \sin\alpha - E_- \sin\alpha = (E_+ - E_-) \sin\alpha = 0$$

因为

$$\cos\alpha = \frac{l}{2\sqrt{r^2 + \frac{l^2}{4}}} \approx \frac{l}{2r}$$

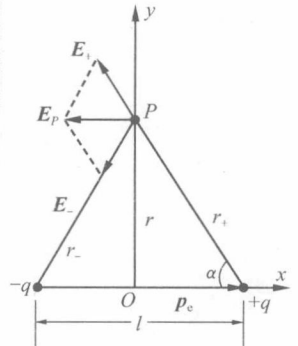


图 9-3 电偶极子的场强



所以  $E = E_x i = -2E_+ \cos \alpha i \approx -2E_+ \frac{l}{2r} i = -\frac{ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} i$

因为  $p_e = ql$ , 所以, 上式可写为

$$E = -\frac{p_e}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (9-10)$$

式中, 负号表示  $E$  与  $p_e$  方向相反.

上述计算结果表明, 电偶极子的场强与距离  $r$  的三次方成反比, 它要比点电荷的场强随  $r$  递减的速度快得多.

**例 9-2** 求均匀带电细棒的场强分布. 设有一长为  $l$  的细棒, 均匀带电为  $q$ , 棒外一点  $P$  到棒的垂直距离为  $a$ ,  $P$  点和细棒两端的连线与细棒之间的夹角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ . 如图 9-4 所示, 求  $P$  点的场强.

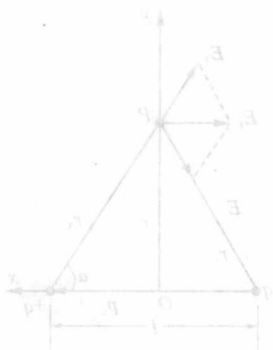


图 9-2 电偶极子的场强分布

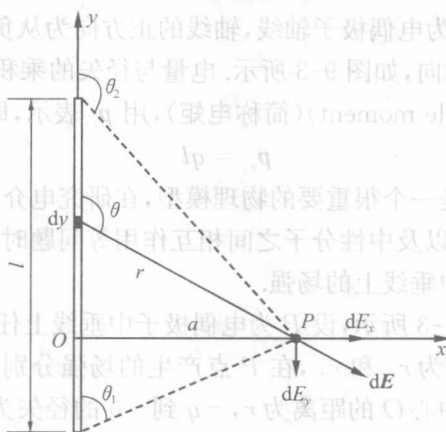


图 9-4 均匀带电细棒的场强

**解** 建立如图 9-4 所示的直角坐标系  $xOy$ , 在距原点  $O$  为  $y$  处取线元  $dy$ , 其电量为  $dq$  (可视为点电荷), 则

$$dq = \lambda dy$$

式中,  $\lambda$  为电荷线密度. 设  $dy$  到  $P$  的距离为  $r$ , 则  $dq$  在  $P$  点处产生的场强为

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dy}{r^2} e_r$$

根据场强的叠加原理, 就可以求出合场强

$$E = \int dE$$

把上述矢量积分化为标量积分, 根据所建坐标系, 有

$$dE_x = dE \sin \theta = \frac{\lambda dy}{4\pi\epsilon_0 r^2} \sin \theta$$

$$dE_y = dE \cos \theta = \frac{\lambda dy}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos \theta$$