

21世纪应用型高等院校教材

# 大学物理 (下册)

陈春彩 骆明辉 陈春荣 主编 陈荣泉 章进炳 余小刚 副主编

清华大学出版社



# 大学物理 (下册)

陈春彩 骆明辉 陈春荣 主编 陈荣泉 章进炳 余小刚 副主编

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书是高等院校应用型特色教材,实践性、应用性和技术性较强。本书以经典物理为主要内容,近代物理适当简介,理论与企业生产实际结合紧密,内容通俗易懂。

本书共分上、下两册。上册内容包括:质点运动学、牛顿运动定律、质点系动力学、刚体力学基础、机械振动和机械波、气体动理论、热力学基础。下册内容包括:静电场、恒定磁场、电磁感应 电磁场和电磁波、波动光学、近代物理简介。

本书可作为应用型高等院校工科各专业的大学物理基础课本科生教材或企业工程技术人员的参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理.下册/陈春彩,骆明辉,陈春荣主编. —北京:清华大学出版社,2018  
ISBN 978-7-302-49538-3

I. ①大… II. ①陈… ②骆… ③陈… 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(2018)第 020873 号

责任编辑:朱红莲

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:13.5

字 数:324千字

版 次:2018年2月第1版

印 次:2018年2月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:33.00元

产品编号:073434-01

# 前 言

## FOREWORD

近年来随着教学改革不断深入,一些新建本科高等院校正在向培养应用型人才转型。各专业对教材的要求既有普通本科的共性,又有别于普通本科的自身特点,即更加注重实践性、应用性和技术性。为适应这类应用型本科院校的需要,我们根据教育部最近制定的《理工科非物理专业课程教学基本要求》及应用型本科院校工科专业需求的特点,结合编者多年的教学实践,参照国内外教学改革的成果编写本教材。

由于本教材是以培养应用型人才为目标,所以在编写过程中注重物理知识与生产技术、生活实际和自然现象相结合。本教材的主要特点表现在以下几个方面:

1. 为适应企业生产技术的需要,本教材以经典物理为主要内容,近代物理压缩为一章,仅介绍狭义相对论和量子物理的基本概念,且尽量做到通俗易懂,拓宽学生的知识面,有助于培养学生树立正确的世界观、价值观。

2. 各章节内容的编写重点强调物理思想和物理图像的构建,在正文的叙述中某些定理、定律等知识能用物理图像说清楚的就不用复杂的数学推证。

3. 书中的例题和练习题的选取注重对基础知识的理解和巩固,选择与生产实际联系紧密的应用题及对其基本解题方法进行训练,避开需要复杂的数学推导的例题和练习题。

4. 每章开头设计了本章内容的知识框架图,每章最后列出了内容概述,以便学生、读者把握教材的知识要点和线索。

5. 本教材配有多媒体课件(PPT)、电子教案和习题集等教学资源。

考虑到新建本科应用型高等院校不同专业教学计划学时可能存在较大差异,本教材各章内容相对独立,使用时可根据具体情况对内容进行重组或取舍。教学可在72~96学时范围内,对有“\*”号标示的内容可作为学生阅读或拓展内容,删除也不影响整本书的完整性和连续性。

本书由闽南理工学院具有多年教学与实际工作经验的教师集体编写而成。由陈春荣老师策划并撰写前言,由陈春彩、陈源福统稿。其中第1章的全部内容,第2~4章的插图及阅读材料由施一峰执笔;第2~4章其他内容由余小刚执笔;第5章由蔡琳敏执笔;第6、7章由陈源福执笔;第8、9、12章

(除了第8章图8-1至图8-24插图由章进炳绘制外)全部由陈春彩执笔;第10章由骆明辉执笔;第11章由陈荣泉执笔。

本书在编写过程中得到了哈尔滨工业大学郭重雄教授悉心指导,也得到了闽南理工学院领导的大力支持,在此表示衷心的感谢!并向本书编写过程中参阅的书籍、文献的作者表示感谢!

由于我们水平有限,时间仓促,书中难免有不足之处,敬请有关老师和读者批评指正。我们将在今后再版中加以改正,使本教材在使用中不断完善。

编者

2017年7月 于闽南理工学院

# 目 录

## CONTENTS

第 8 章 静电场	1
8.1 库仑定律	2
8.1.1 电荷	2
8.1.2 库仑定律	2
8.2 电场强度	3
8.2.1 电场强度的定义	3
8.2.2 点电荷的电场强度	4
8.2.3 场强叠加原理	4
8.3 高斯定理	8
8.3.1 电场线	8
8.3.2 电场强度通量	9
8.3.3 高斯定理	10
8.3.4 高斯定理的应用	12
8.4 电场的环路定理 电势	16
8.4.1 静电场的保守性——环路定理	16
8.4.2 电势能 电势	17
8.4.3 电势的计算	19
8.5 电场强度与电势的关系	22
8.5.1 等势面和电场线	22
*8.5.2 电场强度和电势梯度	23
8.6 静电场中的导体	24
8.6.1 静电平衡	24
8.6.2 静电平衡时导体上的电荷分布	25
8.6.3 静电屏蔽	28
8.7 静电场中的电介质	28
8.7.1 电介质的极化	28
8.7.2 电介质对电场的影响	30
8.7.3 电介质中的电场强度	30
8.7.4 有电介质时的高斯定理	31

8.8	电容 电容器	33
8.8.1	电容器的电容	33
8.8.2	电容器的连接	35
8.9	静电场的能量	35
8.9.1	电容器的能量	35
8.9.2	静电场的能量	36
8.10	稳恒电场	38
8.10.1	电流密度矢量	38
*8.10.2	稳恒电流与稳恒电场	40
8.10.3	电源电动势	40
	阅读材料八 动物电的研究和伏打电堆的发明	41
	本章提要	43
	思考题	46
	习题	47
<b>第9章</b>	<b>恒定磁场</b>	<b>51</b>
9.1	磁场	52
9.1.1	基本的磁现象	52
9.1.2	磁场的性质	53
9.2	磁感强度	53
9.3	毕奥-萨伐尔定律	55
9.3.1	毕奥-萨伐尔定律	55
9.3.2	毕奥-萨伐尔定律应用举例	56
9.4	磁通量 磁场的高斯定理	59
9.4.1	磁感线	59
9.4.2	磁通量	60
9.4.3	磁场的高斯定理	61
9.5	安培环路定理	62
9.5.1	安培环路定理	62
9.5.2	安培环路定理的应用	63
9.6	磁场对运动电荷及电流的作用	65
9.6.1	洛伦兹力	66
9.6.2	安培定律	73
9.6.3	磁场对载流线圈的作用	76
*9.6.4	磁力的功	77
9.7	磁场中的磁介质	78
9.7.1	磁介质 磁化强度	78
9.7.2	磁介质中的安培环路定理	80
*9.7.3	铁磁质	83

阅读材料九 电流的磁效应 .....	86
本章提要 .....	88
思考题 .....	89
习题 .....	90
<b>第 10 章 电磁感应 电磁场和电磁波 .....</b>	<b>94</b>
10.1 电磁感应现象 .....	95
10.2 动生电动势和感生电动势 .....	95
10.2.1 动生电动势 .....	95
10.2.2 感生电动势 .....	97
10.3 电磁感应定律 .....	98
10.4 楞次定律 .....	99
10.5 涡流 .....	100
10.6 互感和自感 .....	101
10.6.1 互感 .....	101
10.6.2 自感 .....	102
10.7 磁场的能量 .....	104
10.8 电磁场与电磁波 .....	105
10.8.1 位移电流 .....	105
10.8.2 麦克斯韦方程组 .....	106
10.8.3 电磁波 .....	107
阅读材料十 无线充电技术 .....	110
本章提要 .....	111
思考题 .....	113
习题 .....	113
<b>第 11 章 波动光学 .....</b>	<b>119</b>
11.1 光的干涉性 .....	120
11.1.1 光源 .....	120
11.1.2 相干光的获得 .....	120
11.2 杨氏双缝干涉 劳埃德镜 光程与光程差 .....	121
11.2.1 杨氏双缝干涉实验 .....	121
11.2.2 杨氏双缝干涉条纹的分析 .....	122
11.2.3 劳埃德镜 .....	124
11.2.4 光程与光程差 .....	124
11.3 薄膜干涉 .....	127
11.3.1 薄膜干涉原理 .....	127
11.3.2 增透膜和增反膜 .....	129
11.4 劈尖 牛顿环 .....	130

11.4.1	劈尖	130
11.4.2	牛顿环	131
11.5	迈克耳孙干涉仪	133
11.5.1	迈克耳孙干涉仪原理	133
11.5.2	迈克耳孙干涉仪测光波波长	134
11.6	光的衍射	135
11.6.1	光的衍射现象及分类	135
11.6.2	惠更斯-菲涅耳原理	136
11.6.3	单缝夫琅禾费衍射	136
11.7	圆孔衍射 光学仪器的分辨本领	139
11.7.1	圆孔的夫琅禾费衍射	139
11.7.2	光学仪器的分辨本领	140
11.8	光栅衍射	141
11.8.1	光栅及衍射图样	141
11.8.2	光栅衍射条纹的形成	142
11.8.3	衍射条纹的特征	143
11.8.4	光栅光谱	144
11.9	光的偏振	145
11.9.1	光的偏振现象	145
11.9.2	起偏和检偏 马吕斯定律	146
*11.10	光的双折射现象	149
11.10.1	寻常光和非寻常光 主平面 光轴	149
11.10.2	双折射产生的原因	150
11.10.3	人为的双折射现象	151
*11.11	旋光现象	152
	阅读材料十一 光纤及光纤通信简介	153
	本章提要	156
	思考题	157
	习题	158
<b>第 12 章</b>	<b>近代物理简介</b>	<b>161</b>
12.1	狭义相对论	162
12.1.1	伽利略变换和力学相对性原理	162
12.1.2	狭义相对论的基本原理 洛伦兹变换	163
12.1.3	狭义相对论的时空观	165
12.1.4	狭义相对论动力学基础	167
12.2	光的量子性	170
12.2.1	黑体辐射 普朗克量子假设	170
12.2.2	光电效应 光的波粒二象性	172

12.2.3 玻尔的氢原子理论 .....	175
12.3 量子力学基本原理 .....	177
12.3.1 德布罗意波 实物粒子的二象性 .....	177
12.3.2 不确定关系 .....	178
12.3.3 波函数 薛定谔方程 .....	179
*12.3.4 薛定谔方程的简单应用 .....	180
12.4 量子力学应用简介 .....	182
12.4.1 激光 .....	182
12.4.2 液晶 .....	186
12.4.3 纳米材料 .....	189
阅读材料十二 软物质物理学的兴起 .....	192
本章提要 .....	193
思考题 .....	195
习题 .....	195
<b>习题参考答案</b> .....	<b>198</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>203</b>

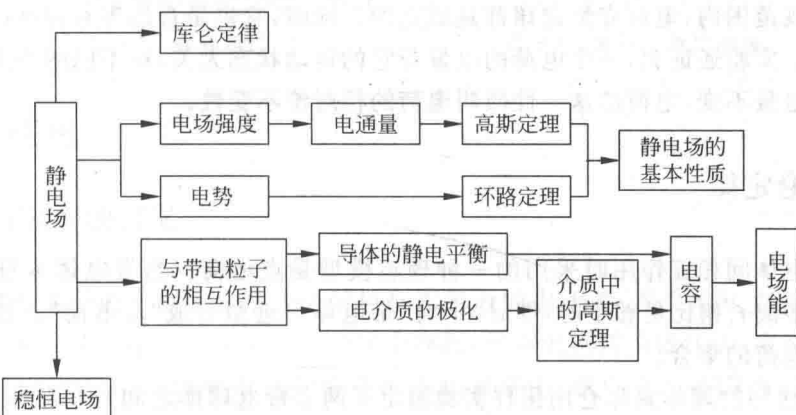
## 静 电 场

电学起源于古希腊哲学家塞利斯(Thales, 公元前 600 年)所知道的一种现象: 一块琥珀经摩擦后会吸引草屑。直到 18 世纪以后电学理论才建立在“场”的基础上, 场是物质的一种存在形式, 它看不见摸不着, 但场是客观存在的。场在某些方面特性和实物粒子一样, 也具有能量、动量和质量等; 但场又与实物粒子具有很大的不同, 几个场可以同时占有同一个空间。电荷之间的相互作用是通过电场来实现的。

一般来说, 运动电荷将同时激发电场和磁场, 电场和磁场是相互关联的。但是, 在某些情况下, 比如当我们所研究的电荷相对某参考系静止时, 电荷在这个静止参考系中就只激发电场, 而无磁场。我们把相对于观察者静止的电荷所激发的电场称为静电场。

本章将讨论静止电荷之间的相互作用和静电场的基本性质, 以及静电场与导体、电介质的相互作用, 同时指出稳恒电流的电场具有与静电场相似的性质。

## 本章结构框图



## 8.1 库仑定律

### 8.1.1 电荷

电是物质的一种基本属性,物质的电性质来自物质的微观结构。物体带电的多少称为**电荷量**,简称**电荷**或**电量**。在国际单位制(SI)中,电量的单位是库仑,符号是C。自然界中,物体或者微观粒子所带的电荷有两种,一种是正电荷,一种是负电荷。同种电荷相互排斥,异种电荷相互吸引。我们知道,原子核中质子带正电,核外电子带等量负电。由于原子核内质子数与核外电子数相等,通常原子呈现电中性,宏观物体也呈电中性。

一个电子所带电量的绝对值叫做**基本电荷**(或叫元电荷),用 $e$ 表示,大小近似等于

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

实验证明,自然界中的任何带电体(除了夸克或反夸克以外)所带电量都是基本电量 $e$ 的整数倍。像这种电量只能取分立的、不连续的量值的性质称为**电荷的量子化**。由于宏观物体带有大量的基本电荷,而 $e$ 非常小,所以电荷的量子性在研究宏观现象的绝大多数实验中没有表现出来。因此通常把带电体看成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每个夸克或反夸克带电量为 $\pm \frac{e}{3}$ 或 $\pm \frac{2e}{3}$ ,但是实验上至今尚未发现单独存在的夸克,即使得到证实,在夸克这一层面上,以 $e$ 为基本电荷,电荷仍是量子化的。

由物质的分子结构知识可知,在一般状态下,物体是电中性的,物体内部的正电荷和负电荷的代数和为零。使物体带电的过程就是使它获得或者失去电子的过程,假如在一个系统中有两个电中性的物体,由于某些原因,使一些电子从一个物体转移到另一个物体上,失去电子的物体带正电,得到电子的物体带负电,不过两物体的正、负电荷的代数和仍为零。所以,对于一个系统,如果没有电荷出入其边界,那么该系统正、负电荷的代数和将保持不变,这就是**电荷守恒定律**。电荷守恒定律也是自然界的基本守恒定律之一,无论是在宏观领域还是在微观范围内,电荷守恒定律都是成立的。同时,它也是自然界对称性(规范对称性)的一种反映。实验还证明,一个电荷的电量与它的运动状态无关,在不同的参考系观察同一带电粒子的电量不变,电荷的这一性质叫**电荷的相对论不变性**。

### 8.1.2 库仑定律

研究带电体间相互作用时采用的一种理想模型是点电荷。当带电体本身的线度 $d$ 与它们之间的距离 $r$ 相比足够小时,即 $d \ll r$ 时,带电体可近似看成“点电荷”。任何带电体均可以视为点电荷的集合。

1785年法国物理学家库仑用扭秤实验测定了两个带电球体之间的相互作用力,并在实验的基础上提出了两个点电荷之间的相互作用的规律,即**库仑定律**,可表述如下:在真空中,两个静止的点电荷之间的相互作用力,其大小与它们电荷的乘积成正比,与它们之间距离的二次方成反比;作用力的方向沿着两点电荷的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸。

设真空中有两个点电荷,电量分别为  $q_1$ 、 $q_2$ ,两个点电荷之间的距离为  $r$ ,并把电荷  $q_1$  指向电荷  $q_2$  的矢量用  $\mathbf{r}$  表示,如图 8-1 所示,则电荷  $q_2$  受到  $q_1$  的作用力  $\mathbf{F}$  表示为

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

式中,  $\mathbf{e}_r$  指从电荷  $q_1$  指向电荷  $q_2$  的单位矢量,即  $\mathbf{e}_r = \frac{\mathbf{r}}{r}$ ; 而  $k$  是比例系数,在 SI 中  $k \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ 。为了使以后的电磁学公式简化,引入真空中的电容率  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_0$  的值为

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

则库仑定律可以表示为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (8-1)$$

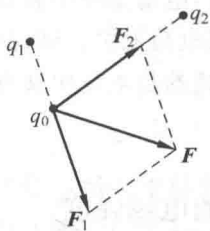
由上式可知,当  $q_1$  和  $q_2$  同号时,  $q_1 q_2 > 0$ ,  $q_2$  受到斥力作用; 当  $q_1$  和  $q_2$  异号时,  $q_1 q_2 < 0$ ,  $q_2$  受到引力作用。

库仑定律虽然是从宏观带电体间相互作用的实验中总结出来的,但是近代物理实验表明,当两个点电荷之间的距离在  $10^{-17} \sim 10^7 \text{ m}$  范围内库仑定律是成立的。库仑定律只适用于真空中的两个点电荷之间的作用。如果空间同时存在几个点电荷时,如图 8-2 所示,它们共同作用于某个点电荷的静电力,等于其他各点电荷单独存在时作用在该点电荷上的静电力的矢量和,这就是静电力的叠加原理。即

$$\mathbf{F} = \sum \mathbf{F}_i = \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_0 q_i \mathbf{r}_i}{r_i^3} \quad (8-2)$$



图 8-1 库仑定律



$q_0$ 与 $q_1$ 同号,与 $q_2$ 异号

图 8-2 电场力叠加原理

## 8.2 电场强度

### 8.2.1 电场强度的定义

库仑定律给出了两个静止点电荷之间相互作用力的表达式,那么电场力是如何从一个点电荷作用到另一个点电荷上的呢? 对于这个问题,早期电磁理论曾认为,电荷之间的相互作用是一种“超距作用”,即两个点电荷突然出现在真空中,它们之间不需通过任何介质传达,也不需要时间,而能够立即发生相互作用。而现代理论和实验都表明,电荷之间的相互作用实际上是通过电场作为中间介质传递的,而电场在真空中以光速  $c$  向前传播。相对于观察者静止的带电体周围的场称为静电场。

静电场是电磁场的一种特殊情况,其特点是电场的分布不随时间变化。静电场对外表现主要有:(1)处于电场中的任何带电体都受到电场力的作用(即场与带电粒子间的动量传递);(2)当带电体在电场中移动时,电场力对带电体做功(即场与带电粒子间的能量传递)。为了研究电场中任一点处电场的性质,可从电荷在电场中受力的特点来定量描述。把产生电场的电荷称为**场源电荷**,并引入**试探电荷**(亦可称为**检验电荷**)。场源电荷可以是点电荷、点电荷系或者是具有某种电荷分布的带电体,而试探电荷 $q_0$ 必须是电量足够小的点电荷,以至于把它放进电场中对原有的电场几乎没有什么影响。

实验发现:同一个试探电荷在电场中不同场点受力的大小、方向一般各不相同,而在每一确定的场点受力的大小、方向是恒定的;不同的试探电荷在同一场点受力的大小与试探电荷的电量成正比,而当试探电荷异号时所受电场力的方向也相反。换句话说,试探电荷 $q_0$ 在电场中某一个固定点处,当 $q_0$ 的电量改变时它所受的力的方向不变,但力的大小会随电量的改变而改变,然而始终保持力 $F$ 和 $q_0$ 的比值 $\frac{F}{q_0}$ 为一恒矢量。于是, $\frac{F}{q_0}$ 反映了 $q_0$ 所在点处电场的性质,称为**电场强度**,用符号 $E$ 表示,即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (8-3)$$

式(8-3)为电场强度的定义式。它表明,电场中某点处的电场强度 $E$ 在数值上等于位于该点处的单位试探电荷所受的电场力,方向与正试探电荷在该点受力方向相同。所以,电场强度描述了电场各点对电荷施力的强弱和方向的特性。在SI中,电场强度 $E$ 的单位是牛顿每库仑( $N \cdot C^{-1}$ ),也可以写成伏特每米( $V \cdot m^{-1}$ )。

需要注意的是,电场是一个客观实体,只要有电荷存在,就有电场存在。电场的存在与否和是否引入试探电荷无关。试探电荷的引入只是为了检验电场的存在和讨论电场的性质而已。式(8-3)描述的是电场中某点的电场强度,它由静电场的基本性质推出,但适用于所有电场。

## 8.2.2 点电荷的电场强度

如图8-3所示,在真空中有一个点电荷 $q$ 位于 $O$ 点,将试探电荷 $q_0$ 引入场中任意一场点 $P$ 处, $OP$ 之间的距离为 $r$ 。由库仑定律可得 $q_0$ 所受的电场力 $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} e_r$ ,式中 $e_r$ 为矢径 $r$ 方向的单位矢量,则 $P$ 点的电场强度为

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} e_r \quad (8-4)$$



图8-3 点电荷电场强度

当场源电荷 $q$ 为正电荷时, $E$ 与矢径 $r$ 的方向相同; $q$ 为负电荷时, $E$ 与矢径 $r$ 的方向相反。

## 8.2.3 场强叠加原理

当电场是由点电荷系 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 共同激发时,由电场力的叠加原理,试探电荷 $q_0$ 在场点 $P$ 所受电场力 $F$ 等于各个场源点电荷单独存在时作用于 $q_0$ 的电场力 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 的矢

量和。即

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

由场强的定义,  $P$  点场强

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \cdots + \frac{\mathbf{F}_n}{q_0} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_n = \sum_i \mathbf{E}_i \quad (8-5)$$

式中,  $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \cdots, \mathbf{E}_n$  分别为  $q_1, q_2, \cdots, q_n$  单独存在时在  $P$  点产生的场强。式(8-5)表明, 点电荷系电场中任一点的场强等于各点电荷单独存在时在该点产生的场强的矢量和。这个结论称为场强叠加原理。

由式(8-4)和式(8-5)我们得到点电荷系的场强

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{e}_r \quad (8-6)$$

式中,  $r_i$  为第  $i$  个点电荷  $q_i$  到场点  $P$  的距离。

若场源是电荷连续分布的带电体, 可将其分割为无限多个线度足够小的电荷元  $dq$ , 使得所讨论的问题中的每个电荷元都可以看作是点电荷。则由式(8-4)可得电荷元  $dq$  在空间某点的场强

$$d\mathbf{E} = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (8-7)$$

根据场强叠加原理, 整个带电体在该点的电场强度为

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

所以, 只要知道了带电体上的电荷分布, 就可以求出其场强分布。带电体的电荷分布通常有三种情况: 线分布, 面分布, 体分布。即

$$dq = \begin{cases} \lambda dl \\ \sigma dS \\ \rho dV \end{cases}$$

其中,  $\lambda$  是指带电体的电荷线密度,  $\sigma$  指带电体的电荷面密度,  $\rho$  指带电体的电荷体密度。应当指出的是, 积分元  $dl, dS, dV$  均应具有宏观足够小、微观足够大的意义。

实际计算中, 式(8-8)的积分通常是通过分量积分进行的, 即

$$\begin{aligned} d\mathbf{E} &= dE_x \mathbf{i} + dE_y \mathbf{j} + dE_z \mathbf{k} \\ \mathbf{E} &= E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j} + E_z \mathbf{k} \end{aligned}$$

其中

$$\begin{cases} E_x = \int dE_x \\ E_y = \int dE_y \\ E_z = \int dE_z \end{cases}$$

### 例1 求电偶极子的电场强度。

设有两个大小相等, 符号相反的点电荷  $+q$  和  $-q$  组成的点电荷系, 当它们之间的距离  $r_0$  比它们到所讨论的场点的距离  $x$  小得多时, 这一对点电荷系称为电偶极子[见图 8-4(a)]。从负电荷  $-q$  指向正电荷  $+q$  的矢径  $\mathbf{r}_0$  称为电偶极子的极轴, 电荷  $q$  与极轴  $\mathbf{r}_0$  的乘积称为电

偶极矩, 即  $p = qr_0$ 。试计算电偶极子轴线延长线上的一点  $A$  和轴的中垂面上的一点  $B$  的电场强度。

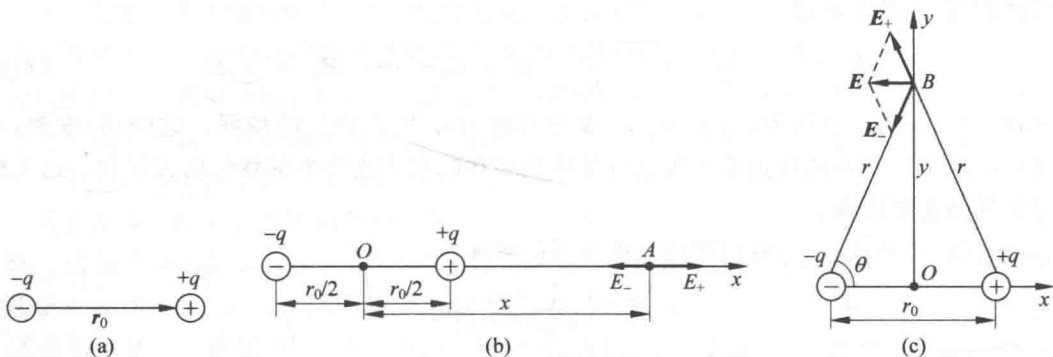


图 8-4 例 1 用图

**解** 1) 选取如图 8-4(b) 所示的坐标,  $O$  为电偶极子的中点, 点电荷  $+q$  和  $-q$  在  $A$  点产生的电场强度大小为

$$E_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(x - \frac{r_0}{2}\right)^2}$$

$$E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\left(x + \frac{r_0}{2}\right)^2}$$

$E_+$  沿  $x$  轴的正方向,  $E_-$  沿  $x$  轴的负方向, 所以  $A$  点总电场强度大小为

$$E_A = E_+ - E_-$$

化简得

$$E_A = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{1}{\left(x - \frac{r_0}{2}\right)^2} - \frac{1}{\left(x + \frac{r_0}{2}\right)^2} \right] = \frac{q \cdot 2xr_0}{4\pi\epsilon_0 \left[ \left(x - \frac{r_0}{2}\right) \left(x + \frac{r_0}{2}\right) \right]^2}$$

因为  $x \gg r_0$ , 故  $E_A \approx \frac{2qr_0}{4\pi\epsilon_0 x^3}$ 。

$E_A$  沿  $x$  轴正方向, 与电矩  $p$  同方向, 所以  $E_A \approx \frac{2p}{4\pi\epsilon_0 x^3}$ 。

2) 坐标系如图 8-4(c),  $r_0$  的中点为原点  $O$ 。设中垂线上任意点  $B$  到  $O$  点的距离为  $y$ , 到点电荷的距离为  $r$ , 则  $+q$  和  $-q$  在  $B$  点的场强分别为  $E_+$  和  $E_-$ , 两者大小相等, 方向如图 8-4(c) 所示

$$E_+ = E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

由图 8-4 可看出

$$E_B = -2E_+ \cos\theta$$

式中,  $r = \sqrt{y^2 + \left(\frac{r_0}{2}\right)^2}$ ,  $\cos\theta = \frac{\frac{r_0}{2}}{r}$ , 所以

$$E_B = -\frac{qr_0}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

因为  $y \gg r_0$ , 故

$$E_B \approx -\frac{qr_0}{4\pi\epsilon_0 y^3}$$

$E_B$  沿  $x$  轴负方向, 与电矩  $p$  方向相反, 所以

$$E_B \approx -\frac{p}{4\pi\epsilon_0 y^3}$$

电偶极子是一种十分重要的理想模型, 我们在研究电介质极化、电磁波的发射和吸收、中性原子间的相互作用时都要用到这个模型。

**例2** 求长为  $L$  的均匀带电细棒的电场。

设细棒电荷线密度为  $\lambda$ , 场点  $P$  离细棒距离为  $a$ , 细棒两端与  $P$  点的连线与细棒  $y$  方向间夹角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 如图 8-5 所示。

**解** 建立如图 8-5 所示直角坐标系。在细棒上取电荷元  $dq = \lambda dy$ 。

设  $dq$  到点  $P$  距离为  $r$ ,  $dq$  在  $P$  点的场强  $dE = \frac{\lambda dy}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ 。

$dE$  在  $Oxy$  平面内, 与  $y$  轴的夹角为  $\theta$ 。

由场强的叠加原理:  $E = \int_L dE$ , 由于不同位置的电荷元在  $P$  点  $dE$  的方向不同, 此积分应该用分量积分计算。把  $dE$  分解为  $x$  和  $y$  方向如下:

$$dE_x = dE \sin\theta$$

$$dE_y = dE \cos\theta$$

统一变量,

$$y = -a \cot\theta$$

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

$$r^2 = a^2 + y^2 = a^2 \csc^2\theta$$

则有

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

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

积分后得

$$E_x = \int_L dE_x = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \sin\theta d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$$

$$E_y = \int_L dE_y = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} \cos\theta d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 a} (\sin\theta_2 - \sin\theta_1)$$

写成矢量形式为

$$E = E_x i + E_y j$$

当  $\lambda$  为常量,  $L \rightarrow \infty$  时,  $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi$ , 则  $E_y = 0, E_x = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 a}$ 。

所以, 在实际问题中, 如一个带电细棒可以被视为无限长均匀带电直线时, 则由  $E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 a}$  可知场强  $E$  与场点离直线的距离  $a$  成反比, 方向垂直于带电直线。

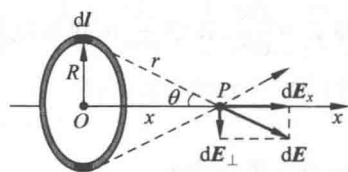


图 8-6 例 3 用图

**例3** 求均匀带电细圆环轴线上的电场。

设圆环半径为  $R$ , 带电量为  $q$ , 以圆环的环心为原点, 沿圆环轴线建立  $Ox$  坐标轴, 如图 8-6 所示。场点  $P$  与环心相距  $x$ 。

**解** 在圆环上取电荷元  $dq = \lambda dl = \frac{q}{2\pi R} dl$ ,  $dq$  在  $P$  点场强