

大学物理

下册

主编 姚建明 孔令民

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

04/332

:2

2008

大学物理

下册

主 编 姚建明 孔令民

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书是编者结合自己多年使用的多媒体课件编写的。本书强调物理知识介绍的系统性、内容的可读性并力求简单明了的编写风格。本书每一章的最前面都给出了学习建议,可以帮助读者学习;每一章的最后面都有“知识扩展”、“历史连接”或“实验连接”,开阔读者的视野;习题只给出了最基本的要求题目,力求少而精,针对性强,并给出复习简表。全书分为 23 章,上下两册,本书是下册。

本书可供综合大学和师范大学理工科非物理类专业 90~130 学时基础物理学课程作为教材使用,也可供其他高等学校的理工科专业选用,并可供中学物理教师进修、自学使用。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 下册 / 姚建明, 孔令民主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2008. 1

ISBN 978-7-5640-1416-2

I. 大… II. ①姚…②孔… 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 009282 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / [http:// www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 12.75

字 数 / 292 千字

版 次 / 2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷

印 数 / 1~7000 册

责任校对 / 陈玉梅

定 价 / 23.00 元

责任印制 / 周瑞红

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

PREFACE

《物理学》是一门古老而基础的学科,这是每个自然科学工作者和学习者所认同的。但是,在认同的背后,在理解的层面上却存在着巨大的差异。许多人,只看到了《物理学》的古老,而跟不上科学发展的步伐;许多人,只强调了基础,忽视了《物理学》的实用性和科学前瞻性。《大学物理》在高等学校中始终是一门很重要的基础课,无论是教师还是学生,都能认识到它的古老和基础的特性。同样,也有很多人,就只认识到了这一层面。尤其体现在教材上,存在着包含的知识越来越多,延伸的知识越来越深奥,学生越来越看不懂直至放弃教科书的现象。

我国的高等教育已经进入了“大众化教育”阶段,学生整体的基本素质在下降,学生之间的水平差距也在加大。这就使得我们不能再用老一套的教学方法和教材去教授《大学物理》。而且,目前越来越多的老师和学生认识到,大学并不是学生学习知识的场所,而是锻炼自己能力,提高生存本能的训练“基地”。这就要求我们的课程,包括基础课程,首先要做到贴近学生和教师,也就是首先要具备“可读性”;其次,“大众化教育”导致层次较低的高等院校的学生水平更加跟不上“正常”的要求,这就需要在教学中要花很多的精力去调动学生学习物理学的积极性,而一本更适合他们知识水平和理解能力的,简单而实用的教材,将起到“事半功倍”的作用。

现在,高等院校的《大学物理》教学,基本上都已经采用了多媒体技术,比较受学生的欢迎,但也存在着很多的问题。这时有一本与它们配套的教材将是十分必要的。每个学校的教学都有他们独自的特点,我们目前采用的“课件”经过我们精心的制作和N次的改造之后,已经很受学生的欢迎。但是,课件可以针对需要随时改造,课本就不行了,所以造成课本和课件之间出现“脱节”的现象,而且,这种“脱节”恐怕会越来越严重。所以,



我们以我们的课件为蓝本,编写了这一套教材,优点是它将很适合我们自己的学生,缺点一定是适应面比较小。但在编写中我们是尽量避免这种情况发生的。所以,在知识的选择时,首先注意的是系统性,不打破物理学的正常体系;其次,注意知识点之间的连带关系。我们在每一章的最前面,都给出了学习建议,其中包括:需要的上课学时、本章节的特点和与其他内容的连带关系以及主要内容及要求。在学习内容的处理上,首要的要求是尽量简单明了,只介绍大学生应该知道的内容。为了让读者对章节的内容有一个深入的认识,我们在每一章的末尾都加入了“知识扩展”或者“历史连接”等内容。以期让读者对知识有一个立体化的认识。为了加强学生的自主学习和让学生随时复习学过的内容,每一章习题的第一题都是我们设计的复习表格,让学生们去填空。习题的完整答案没有在本书中,我们把他们安排到了教材的辅助读物《大学物理复习指南》里。

本书的编写工作,第1~5章电学部分由宿刚老师完成;第6~9章磁学和电磁感应部分由郑敏章老师完成;第10~11章热学部分由姚建明老师完成;第12章量子力学由孔令民老师完成。孔令民和程雪苹老师负责统稿和最后校准;张红燕老师负责资料收集和插图及封面设计;姚建明老师负责制订编写计划、内容选择和最后定稿。

本教材适用于《大学物理》课时在90~130之间的教学安排,教学内容和教学要求比较适合本科生中中等偏下水平的学生。由于本书的基础素材来源于教学多媒体课件,所以更适合于多媒体教学使用。

由于编者水平有限,书中难免出现错误和不当之处,希望使用本书的老师、学生和其他读者,随时提出宝贵意见。

编 者

2007-10-25 于浙江舟山

目 录

CONTENTS

第 1 章 静电场 / 1

1.1 电荷	1
1.1.1 电荷守恒定律	1
1.1.2 电荷量子化	2
1.2 库仑定律	2
1.3 电场及电场强度	3
1.3.1 电场	3
1.3.2 电场强度	3
1.4 点电荷的电场及其叠加	4
1.4.1 电场强度叠加原理	4
1.4.2 点电荷系电场中的场强	4
1.4.3 电偶极子	4
1.4.4 任意带电体(连续带电体)电场中的场强	5
1.5 电场线和电通量	7
1.5.1 电场线	7
1.5.2 电通量	8
1.6 高斯定理及其应用	8
1.6.1 高斯定理	8
1.6.2 高斯定理的应用	10
知识扩展: 静电除尘	13
思考与讨论	14
习题	15

第 2 章 电势 / 16

2.1 静电场的保守性	16
2.1.1 静电场力做功	16



* 2.1.2 静电场的环路定理	17
2.2 电势	17
* 2.2.1 电势能和电势	17
* 2.2.2 电势零点	18
2.3 电势的计算	18
2.4 电场强度与电势梯度	21
2.5 电荷在外电场中的静电势能	22
习题	23

第3章 静电场中的导体 / 25

3.1 静电场中的导体	25
* 3.1.1 导体的静电平衡性质	26
* 3.1.2 导体上的电荷分布	26
3.2 空腔导体	27
* 3.2.1 空腔导体内部无带电体	27
* 3.2.2 空腔导体内部有带电体	27
3.3 静电屏蔽	28
知识扩展：静电屏蔽物理原理	29
思考与讨论	32
习题	33

第4章 静电场中的电介质 / 34

4.1 电介质的极化	34
4.2 电极化强度	36
4.3 电位移矢量	37
* 4.3.1 高斯定理的电位移表述	38
* 4.3.2 电位移矢量	38
4.4 电容和电容器	39
4.4.1 孤立导体的电容	39
4.4.2 电容器	40
4.4.3 电容器的连接	41
4.5 电容器储存的能量	42
4.6 电场的能量密度	43
知识扩展：压电效应及其应用	45
习题	47

第5章 稳恒电流和稳恒电场 / 48

5.1 稳恒电流	48
----------------	----

* 5.1.1 电流强度	48
* 5.1.2 电流密度	49
* 5.1.3 电流的连续性方程	49
5.2 稳恒电场	50
* 5.2.1 非静电力 电源	50
* 5.2.2 电动势	50
5.3 欧姆定律	51
* 5.3.1 电阻率	51
* 5.3.2 超导体	51
* 5.3.3 欧姆定律微分形式	52
* 5.3.4 一段含源电路的欧姆定律	53
知识扩展: 超导电性	54
习题	61
第 6 章 稳恒磁场 / 63	
6.1 磁场 磁感强度	63
6.2 带电粒子在磁场中的运动	66
* 6.2.1 带电粒子在磁场中的运动	66
* 6.2.2 带电粒子在电场和磁场中的运动	68
6.3 载流导线在磁场中受的力	69
知识扩展: 地球磁层	72
习题	72
第 7 章 磁力 / 75	
7.1 毕奥—萨伐尔定律	75
7.2 安培环路定理	79
7.3 安培环路定理的应用	81
7.4 与变化电场相联系的磁场	84
历史连接: 安培与安培定律	86
习题	88
第 8 章 磁介质 / 91	
8.1 磁介质 磁化强度	91
8.2 磁介质中的安培环路定理	93
8.3 铁磁质	95
知识扩展: 磁流体发电	98
习题	100



第9章 电磁感应 / 101

9.1 电磁感应定律	101
9.2 动生电动势和感生电动势	103
9.2.1 动生电动势	103
9.2.2 感生电动势	105
9.3 自感和互感	106
9.3.1 互感电动势 互感	107
9.3.2 自感电动势 自感	109
9.4 磁场的能量 磁场能量密度	110
9.5 电磁场基本方程的积分形式	112
知识扩展: 等离子体	113
习题	115

第10章 热力学基础 / 118

10.1 气体的物态参量 平衡态 理想气体物态方程	118
10.1.1 气体的物态参量	119
10.1.2 平衡态	119
10.1.3 理想气体物态方程	120
10.2 准静态过程 功 热量	120
10.2.1 准静态过程	120
10.2.2 功	120
10.2.3 热量	121
10.3 内能 热力学第一定律	121
10.3.1 内能	121
10.3.2 热力学第一定律	122
10.4 理想气体的等体过程和等压过程	122
10.4.1 等体过程 定体摩尔热容量	122
10.4.2 等压过程 定压摩尔热容量	123
10.5 理想气体的等温过程和绝热过程	124
10.5.1 等温过程	124
10.5.2 绝热过程	124
10.5.3 多方过程	126
10.6 循环过程 卡诺循环	127
10.6.1 循环过程	127
10.6.2 热机和制冷机	127
10.6.3 卡诺循环	129
10.7 热力学第二定律 卡诺定律	130
10.7.1 热力学第二定律	130

* 10.7.2 卡诺定律	131
历史连接: 热力学四大定律	132
习题	134

第 11 章 气体分子运动论 / 136

11.1 物质的微观模型 统计规律性	136
* 11.1.1 分子的数密度和线度	136
* 11.1.2 分子力	137
* 11.1.3 分子热运动的无序性及统计规律	137
11.2 理想气体的压强公式	137
* 11.2.1 理想气体的微观模型	137
* 11.2.2 理想气体压强公式	138
11.3 理想气体分子的平均平动动能与温度的关系	139
11.4 自由度与能量均分定理	139
* 11.4.1 自由度	139
* 11.4.2 能量均分定理	140
* 11.4.3 理想气体的内能摩尔热容	141
11.5 麦克斯韦气体分子速率分布	142
* 11.5.1 测定气体分子速率分布的实验	142
* 11.5.2 麦克斯韦气体分子速率分布定律	143
* 11.5.3 三种统计速率	144
11.6 分子平均碰撞次数和平均自由程	145
11.7 热力学第二定律的统计意义	146
* 11.7.1 自然过程的方向和系统的无序程度	146
* 11.7.2 无序度与微观状态数	147
* 11.7.3 熵与热力学概率	147
知识扩展: 熵流与生命	148
习题	151

第 12 章 量子物理 / 153

12.1 黑体辐射 普朗克能量子假设	154
* 12.1.1 黑体 黑体辐射	154
* 12.1.2 斯特藩—波尔兹曼定律 维恩位移定律	155
* 12.1.3 瑞利—金斯公式 经典物理的困难	156
* 12.1.4 普朗克量子假设与黑体辐射公式	157
12.2 光电效应 光的波粒二象性	158
* 12.2.1 光电效应及其实验规律	158
* 12.2.2 光电效应在近代技术中的应用	160
12.3 康普顿效应	162



* 12.3.1 实验装置	162
* 12.3.2 实验结果	162
* 12.3.3 对康普顿效应的解释	163
12.4 氢原子的玻尔理论	164
* 12.4.1 氢原子光谱的规律性	164
* 12.4.2 卢瑟福核式结构模型	165
* 12.4.3 玻尔氢原子理论	167
* 12.4.4 玻尔氢原子理论的缺陷	168
12.5 德布罗意波 实物粒子的二象性	169
* 12.5.1 德布罗意假设	169
* 12.5.2 德布罗意波实验证明	171
* 12.5.3 德布罗意波的统计解释	172
12.6 不确定关系(测不准原理)	174
* 12.6.1 不确定关系的物理表述及物理意义	174
* 12.6.2 不确定关系的应用	176
12.7 量子力学简介	177
* 12.7.1 量子力学的发展简史	177
* 12.7.2 量子力学的基本内容	178
* 12.7.3 波函数 概率密度	179
* 12.7.4 薛定谔方程	180
* 12.7.5 一维势阱问题	183
* 12.7.6 一维方势垒、隧道效应	185
* 12.7.7 隧道效应的应用	186
* 12.7.8 对应原理	186
知识扩展: 奇妙的激光制导、静电复印	187
习题	190

参考文献 / 192

第1章 静 电 场

学 习 建 议

1. 课堂讲授为6学时左右；
2. 本章作为电磁学的开始,是电磁学学习的基础；
3. 教学基本要求:

(1) 掌握描述静电场的一个物理量——电场强度的概念,理解电场强度是矢量点函数；

(2) 理解高斯定理这个重要定理,它们表明静电场是有源场；

(3) 掌握用点电荷电场强度和叠加原理以及高斯定理求解带电系统电场强度的方法。

电磁运动是物质的又一种基本运动形式。电磁相互作用是自然界已知的四种基本相互作用之一。

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,在某种情况下,例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。当然,我们也可以认为静电场的理想化的存在,这是为了简化问题的讨论而假设的一个理想模型。这个电场(理想模型)就是本章所要讨论的静电场。

1.1 电 荷

1747年富兰克林发现了电。现在我们知道物体所带的电荷有两种,分别称为正电荷、负电荷。同号电荷相斥,异号电荷相吸。使电中性物体带电(起电)的方式一般有两种:摩擦起电和静电感应。历史上约定:用丝绸摩擦的玻璃棒带正电,用毛皮摩擦的塑料棒带负电。

电荷是基本粒子的一个性质,它不能脱离这些基本粒子而存在。

1.1.1 电荷守恒定律

在正常状态下,物体是电中性的,物体中正、负电荷的代数和为零。如果在一个孤立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移到另一个物体上,则前者带正电,后者带负电,不过两物体正、负电荷的代数和仍为零。总之,在孤立系统中,不管系统中的电荷如何迁移,系统电荷的代数和保持不变,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。

1.1.2 电荷量子化

1906—1917年,密立根用液滴法测定了电子电荷,证明微小粒子带电量的变化是不连续的,它只能是基本电荷 e 的整数倍,即粒子的电荷是量子化的。

迄今所知,电子是自然界中存在的最小负电荷,质子是最小的正电荷。它们的带电量都是基本电荷 e ,

$$e = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ 库仑(C)}。$$

库仑是电量的国际单位。

那么基本电荷 e 是不是最基本的呢?在强子结构的夸克模型(1964年)中,夸克带分数电荷,相应的“反夸克”带等量反号的电荷。上(up)夸克的带电量为 $2e/3$;下(down)夸克的带电量为 $-e/3$;奇异(strange)夸克的带电量为 $-e/3$ 。

在这一模型中,夸克是受到“禁闭”的。迄今为止,尚未在实验中找到自由状态的夸克。

值得一提的是,1909年密立根在一篇论文中记述了一个油滴上出现的数据,由于不太确定、未重复出现而被他丢掉了,这一电荷数据比最终得到 e 值小30%左右。

现在,分数电荷仍是一个悬而未决的命题。不过即使分数电荷存在,仍然不会改变电荷量子化的结论,只不过新的基本电荷可能是原来的 $1/3$ 而已。

近代物理学中,在不同的参照系内观察,同一个带电粒子的电量不变。电荷的这一性质叫做电荷的相对论不变性。

1.2 库仑定律

当带电体的形状和大小与它们之间的距离相比允许忽略时,可以将带电体看作点电荷。

1785年库仑从扭秤实验结果,总结出点电荷之间的静电力相互作用所满足的规律,这就是库仑定律:

在真空中两个静止点电荷之间的作用力与它们的电量的乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比。即(见图1.1)

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \mathbf{e}_{r_{12}}。 \quad (1-1)$$

比例系数 k 由实验确定

$$k = 8.9875 \times 10^9 \text{ (N} \cdot \text{m}^2 \text{) / C}^2 \text{。}$$

为了使方程中的系数更具有物理意义,通常引入真空电容率或真空介电常量

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.854187817 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ / (N} \cdot \text{m}^2 \text{) ,}$$

则库仑定律可写作

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \mathbf{e}_{r_{12}}。$$

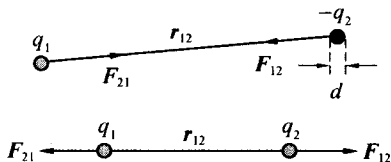


图 1.1 库仑定律

当空间有两个以上的点电荷时,作用在某一点电荷上的总静电力,等于其他各点电荷单独存在时对该点电荷所施静电力的矢量和。这是静电力的叠加原理。它等同于力学里的力的叠加原理。当然静电力就是力的一种存在形式。

库仑定律是直接由实验总结出来的规律,是静电场理论的基础。库仑定律与牛顿万有引力定律类似,也是超距作用。按照现代物理学的观点,相互作用是由场以有限速度传播的。

库仑定律和万有引力定律都是平方反比规律,从数量级上比较,引力要弱得多。在氢原子内,电子和质子之间的静电力与万有引力的比值为 2.26×10^{39} 。

1.3 电场及电场强度

1.3.1 电场

电荷之间的相互作用是通过电场传递的,或者说电荷周围存在有电场,在电场中的任何带电体,都受到电场的作用力:

$$\text{电荷} \longleftrightarrow \text{电场} \longleftrightarrow \text{电荷}$$

电场是物质存在的一种形式。电场的物质性体现在:(1)能进入电场中的带电体施以力的作用;(2)当带电体在电场中移动时,电场力作功,这表明电场具有能量;(3)变化的电场以光速在空间传播,表明电场具有动量。

电场具有动量、质量、能量,体现了它的物质性。

1.3.2 电场强度

为描述静止电荷在空间产生的静电场,很自然的做法是根据此电场对其他电荷作用的电场力来定量地分析和描述。为此,可利用一个正电荷 q_0 (称其为试验电荷)来检测该电场。对于试验电荷而言,其电量必须足够小,以避免由于它的引入而对源电荷产生影响;其次,其几何尺寸也必须足够小,成为名副其实的“点电荷”,以便能细致地反映出电场中各点的性质。

置于电场中某点的试验电荷将受到源电荷 q 的电场力作用,实验证明:该力的大小与试验电荷的电量成正比,而该力与试验电荷电量的比值则与试验电荷无关,是一个仅由源电荷产生的电场决定的物理量。用这个物理量作为描写电场的场量,称为电场强度(简称场强),用 \mathbf{E} 表示。其定义为:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} \quad (1-2)$$

由此可知,电场中某场点上的电场强度等于置于该点的单位正电荷所受的电场力。在SI单位制中,场强的单位为 N/C 或 V/m。

由(1-2)式可得点电荷 q 的场强

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (1-3)$$



1.4 点电荷的电场及其叠加

1.4.1 电场强度叠加原理

利用力的叠加原理我们可以很容易地推出：电场中任何一点的总场强等于各个点电荷在该点各自产生的场强的矢量和，即

$$\mathbf{E} = \sum_i \mathbf{E}_i. \quad (1-4)$$

这就是场强叠加原理。

如果电荷分布已知，那么从点电荷的场强公式出发，利用场强叠加原理，就可以求出任意电荷分布所激发的电场的场强。

1.4.2 点电荷系电场中的场强

设各点电荷 q_1, q_2, q_3, \dots 指向 P 点的位置矢量分别为 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3, \dots$ ，则 P 点处的电场强度（见图 1.2）

$$\mathbf{E} = \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^3} \mathbf{r}_i. \quad (1-5)$$

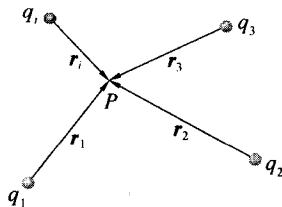


图 1.2 场强叠加

1.4.3 电偶极子

由等量异号电荷 $+q, -q$ ，相距为 r_0 而组成的系统，而当 r_0 远小于该系统中某一场点到该系统的距离 d 时，我们称该带电体系为电偶极子。用 \mathbf{p} 表示从 $-q$ 到 $+q$ 的矢量，定义电偶极矩为：

$$\mathbf{p} = q\mathbf{r}_0. \quad (1-6)$$

1. 电偶极子中垂线上距离中心较远处一点的场强

如图 1.3 所示，以电偶极子轴线中点为坐标原点 O ，并取 Ox 轴和 Oy 轴如图所示，中垂线上任意一点 B 点的电场强度应为正负电荷产生的电场的叠加而产生的，即

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_-,$$

由对称性得 $E_{By} = 0$ ，而

$$E_{Bx} = E_+ \cos\alpha + E_- \cos\alpha = 2E_+ \cos\alpha,$$

其中
$$E_+ = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_+^2}, \quad \cos\alpha = \frac{r_0}{2r},$$

则
$$E = E_{Bx} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qr_0}{\left(y^2 + \frac{r_0^2}{4}\right)^{3/2}}.$$

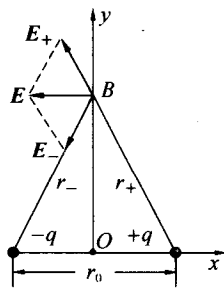


图 1.3 电偶极子的电场

电偶极子中垂线上距离中心较远处一点的场强，与电偶极子的电偶极矩成正比，与该点

离电偶极子中心的距离的三次方成反比,方向与电偶极矩方向相反。

2. 电偶极子延长线上距离中心较远处一点的场强

如图 1.4 所示, r_0 是从电偶极子中心到场点的矢量,

根据电场的叠加原理(见图 1.4)

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_-,$$

则 \mathbf{E} 的大小 $E = E_+ + E_-$, 其中

$$E_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(x - r_0/2)^2}, \quad E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(x + r_0/2)^2}.$$

当 $x \gg r_0$,

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2r_0q}{x^3} \mathbf{i} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\mathbf{p}}{x^3}.$$

电偶极子延长线上一点的场强与电偶极子电偶极矩的二倍成正比,与该点离电偶极子中心的距离的三次方成反比,方向与电偶极矩方向相同。

1.4.4 任意带电体(连续带电体)电场中的场强

对于任意形状连续带电体我们可以把它们看成为电荷元的组合,即将带电体分成很多元电荷元 dq ,先求出 dq 在任意场点 P 的场强

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^3} \mathbf{r},$$

再对场源求积分,可得总场强

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^3} \mathbf{r}. \quad (1-7)$$

连续带电体可以是一维的、二维的和三维的,其电荷分布分别是线分布、面分布和体分布,电荷的线密度、面密度、体密度分别为

$$\lambda = \frac{dq}{dl}; \sigma = \frac{dq}{ds}; \rho = \frac{dq}{dV}.$$

对应的总场强分别为

$$\mathbf{E} = \int_l \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dl}{r^2} \mathbf{e}_r; \quad \mathbf{E} = \int_s \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma ds}{r^2} \mathbf{e}_r; \quad \mathbf{E} = \int_v \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\rho dV}{r^2} \mathbf{e}_r.$$

例 1.1 正电荷 q 均匀分布在半径为 R 的圆环上。计算在环的轴线上任一点 P 的电场强度。

解 设圆环在如图 1.5 所示的 yz 平面上,坐标原点与环心相重合。点 P 与环心 O 的距离为 x 。由题意知圆环上的电荷是均匀分布的,故其电荷线密度 λ 为一常量,且 $\lambda = \frac{q}{2\pi R}$ 。在环上取线段元 dl (见图 1.6),其电荷元 $dq = \lambda dl$,此电荷元对点 P 处激起的电场强度为

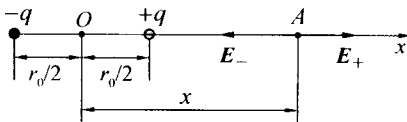


图 1.4 电偶极子的电场



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

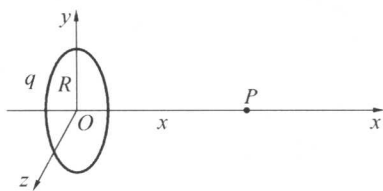


图 1.5 例 1.1 用图

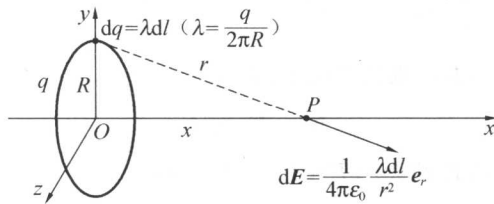


图 1.6 例 1.1 用图

由于电荷分布的对称性,圆环上各电荷元对点 P 处激发的电场强度 dE 的分布也具有对称性,故 $E_y = E_z = 0$ 。

于是

$$\begin{aligned} E &= \int_q dE_x = \int_q dE \cos\theta = \int_l \frac{\lambda dl}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \frac{x}{r}, \\ &= \int_0^{2\pi R} \frac{x\lambda dl}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{qx}{4\pi\epsilon_0 (x^2 + R^2)^{3/2}}. \end{aligned}$$

上式表明,均匀带电圆环对轴线上任意点处的电场强度,是该点距环心 O 距离 x 的函数,即 $E = E(x)$ 。下面对几个特殊点的情况作一些讨论。

(1) $x \gg R$, 则 $(x^2 + R^2)^{3/2} \approx x^3$, 这时有 $E \approx \frac{q}{4\pi\epsilon_0 x^2}$, 亦即在远离圆环的地方,可以把带电圆环看成为点电荷。这正与我们在前面对点电荷的论述相一致。

(2) $x \approx 0$, 则 $E_0 \approx 0$ 。这表明环心处的电场强度为零。

(3) 由 $\frac{dE}{dx} = 0$, 可求得电场强度极大的位置 $x = \pm \frac{\sqrt{2}}{2}R$ 。这表明,圆环轴线上具有最大电

场强度的位置,位于原点 O 两侧的 $x = \pm \frac{\sqrt{2}}{2}R$ 处。(请你自己做出 $E-r$ 分布图)

例 1.2 均匀带电薄圆盘轴线上的电场强度。如图 1.7 所示,有一半径为 R_0 电荷均匀分布的薄圆盘,其电荷面密度为 σ 。求通过盘心且垂直盘面的轴线上任意一点处的电场强度。

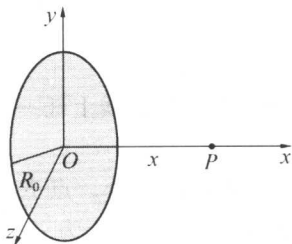


图 1.7 例 1.2 用图

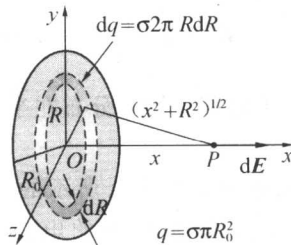


图 1.8 例 1.2 用图