普通高等教育“十五”国家级规划教材

大学物理学基础教程

(下册)

宋 峰 张小兵 吴 雪 编

高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

04/352
:2
2008

普通高等教育“十五”国家级规划教材

大学物理学基础教程

（下册）

宋 峰 张小兵 吴 雪 编

高等教育出版社

内容提要

本书考虑到近年来中学的课程改革，在内容上做到衔接和匹配，并强调大学物理与中学物理的不同。本教材起点较低，涵盖面广，内容精练，重点突出。教材中尽量减少繁琐的数学公式推导，但是对于重点概念、定理和典型例题则有详细阐述、证明、解题思路、分析和讨论，以使学生更好地运用所学的物理概念、物理规律，并形成一个清晰的物理图像。教材注重理论联系实际，讲述了很多实际应用的例子。针对近年来大学物理的教研动态，以及各学科对于量子力学等知识的要求，本书还特别加强了近代物理学方面的内容。

本书分上下册。下册内容包括：真空及介质中的静电场、直流电和交流电、恒定磁场、电磁感应与电磁波、光学基础、光的干涉衍射及偏振、量子物理基础及应用等。

本书可作为高等学校理工科非物理类专业本科物理教材，也可供其他学科和专业的教师和学生及社会读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学基础教程．下册/宋峰，张小兵，吴雪编．
—北京：高等教育出版社，2008.5
ISBN 978－7－04－023610－1

Ⅰ．大… Ⅱ．①宋…②张…③吴… 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 039416 号

策划编辑 郭亚螺 **责任编辑** 张海雁 **封面设计** 王凌波 **责任绘图** 吴文信
版式设计 王艳红 **责任校对** 刘 莉 **责任印制** 陈伟光

出版发行	高等教育出版社	**购书热线**	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	**免费咨询**	800-810-0598
邮政编码	100120	**网 址**	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landraco.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landraco.com.cn
印 刷	北京印刷一厂	**畅想教育**	http://www.widedu.com
开 本	787×960 1/16	**版 次**	2008 年 5 月第 1 版
印 张	21	**印 次**	2008 年 5 月第 1 次印刷
字 数	390 000	**定 价**	24.20 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 23610－00

目　录

第三部分　电　磁　学

第十章　真空中的静电场 …… 3
§10.1　电荷　库仑定律 …… 3
§10.2　电场　电场强度 …… 5
§10.3　静电场的高斯定理 …… 11
§10.4　静电场的环路定理　电势 …… 18
习题 …… 24

第十一章　导体与电介质中的静电场 …… 27
§11.1　导体的静电平衡 …… 27
§11.2　电容器及其电容 …… 32
§11.3　静电场中的电介质 …… 37
§11.4　有电介质时的高斯定理 …… 40
§11.5　静电场中的能量 …… 45
习题 …… 50

第十二章　直流电和交流电 …… 54
§12.1　电流　恒定电流 …… 54
§12.2　欧姆定律　焦耳定律 …… 56
§12.3　电源　电动势 …… 59
§12.4　全电路欧姆定律 …… 61
§12.5　基尔霍夫方程组 …… 63
§12.6　电容器的充放电过程 …… 68
§12.7　交流电 …… 70
习题 …… 73

第十三章　恒定磁场 …… 77
§13.1　磁场　磁感应强度 …… 77
§13.2　毕奥－萨伐尔定律 …… 80

§13.3 恒定磁场的安培环路定理 …… 85
§13.4 磁介质 磁化 …… 90
§13.5 有磁介质时的安培环路定理 高斯定理 …… 94
§13.6 铁磁质 …… 97
§13.7 带电粒子在磁场中的运动 …… 99
§13.8 磁场对载流导线的作用 …… 104
习题 …… 109

第十四章 电磁感应与电磁波 …… 114
§14.1 电磁感应现象及其基本规律 …… 114
§14.2 感应电动势 …… 117
§14.3 互感与自感 …… 124
§14.4 磁场的能量 …… 129
§14.5 位移电流 麦克斯韦方程 …… 131
§14.6 电磁振荡和电磁波 …… 134
习题 …… 139

第四部分 光 学

第十五章 光学基础知识 …… 147
§15.1 光学的发展历史和学科分支 …… 147
§15.2 光源 光的基本性质 …… 149
§15.3 光的传播 …… 153
§15.4 球面镜 透镜 …… 156
§15.5 光的探测 …… 158
§15.6 光的吸收、散射与色散 …… 160
习题 …… 163

第十六章 光的干涉 …… 165
§16.1 光的相干性 …… 165
§16.2 分波前双光束干涉 …… 167
§16.3 时间相干性 空间相干性 …… 173
§16.4 分振幅薄膜干涉 …… 175
§16.5 迈克耳孙干涉仪 …… 182
习题 …… 185

第十七章 光的衍射 …… 188
§17.1 光的衍射分类 惠更斯－菲涅耳原理 …… 188

需要全本请访问 www.ertongbook.com

§17.2　单缝和圆孔的夫琅禾费衍射 …… 190
§17.3　光学仪器的分辨本领 …… 196
§17.4　光栅衍射 …… 200
§17.5　光栅光谱 …… 206
§17.6　X射线在晶体中的衍射 …… 210
习题 …… 211

第十八章　光的偏振 …… 214
§18.1　自然光和偏振光 …… 214
§18.2　起偏和检偏　马吕斯定律 …… 217
§18.3　反射和折射时光的偏振 …… 221
§18.4　光的双折射 …… 223
§18.5　完全偏振光的获得和检验 …… 230
§18.6　偏振光干涉 …… 232
§18.7　人为双折射 …… 235
§18.8　旋光现象 …… 237
习题 …… 239

第五部分　量子物理基础

第十九章　光的量子性 …… 243
§19.1　热辐射　黑体辐射　普朗克假说 …… 243
§19.2　光电效应 …… 247
§19.3　康普顿效应 …… 253
§19.4　光子 …… 257
习题 …… 260

第二十章　原子结构与玻尔的量子论 …… 261
§20.1　氢原子光谱实验规律 …… 262
§20.2　原子的核式结构模型 …… 264
§20.3　玻尔的原子理论 …… 266
习题 …… 270

第二十一章　量子力学基础 …… 272
§21.1　波粒二象性 …… 272
§21.2　不确定关系 …… 275
§21.3　波函数及其统计解释 …… 278
§21.4　薛定谔方程 …… 283

§21.5 一维无限深方势阱 …… 286
§21.6 隧道效应 势垒 …… 291
习题 …… 295

第二十二章 量子力学在原子分子中的应用 …… 296
§22.1 氢原子 …… 296
§22.2 电子自旋 氢原子精细结构 …… 300
§22.3 碱金属 …… 303
§22.4 泡利原理 壳层结构 元素周期 …… 304
§22.5 分子能级和分子光谱 …… 307
习题 …… 308

第二十三章 固体 激光 原子核 …… 310
§23.1 固体的类型 …… 310
§23.2 声子和热容 …… 311
§23.3 晶体的能带理论 …… 312
§23.4 激光的特点和工作原理 …… 314
§23.5 常见激光器 …… 318
§23.6 激光技术简介 …… 319
§23.7 原子核物理概述 …… 320
§23.8 粒子物理简介 …… 326
习题 …… 327

第三部分
电　磁　学

第十章　真空中的静电场

电磁学主要研究电磁现象规律以及电磁场与物质的相互作用。电磁相互作用是自然界中四种基本相互作用之一，电磁运动是物质的一种基本运动形式。电磁学已渗透到现代科技的各个领域，是一系列重要学科，如电工学、电子学、自动控制、计算机、信息与通信、物质结构等的重要基础。在日常生活、生产实践中，都要涉及电磁运动。因此，深入理解、掌握电磁运动的规律是极为重要的。

§10.1　电荷　库仑定律

（一）电荷　电荷守恒定律

1. 两种电荷

许多物质（如玻璃、硬橡胶等）经过毛皮或丝绸等摩擦后，能吸引羽毛、纸片等轻小物体，人们就说它们带了电，或者说它们有了电荷（electric charge）。

自然界存在两种电荷：正电荷和负电荷。同号电荷互相排斥，异号电荷互相吸引。这是电荷的基本属性之一。

通过物质结构的研究，人们知道了物质是由原子组成的，原子是由带正电荷的原子核和带负电荷的电子组成的。有些物质允许电荷通过，如金属，称为导体（conductor），而不允许电荷通过的物体称为绝缘体（insulator）或电介质（dielectric）。半导体（semiconductor）是导电性质介于导体和绝缘体之间的具有特殊电性质的材料。一般情况下，物质内部有等量的正电荷和负电荷，因而是电中性的。从物质的微观结构来看，导体之所以导电，是因为组成金属原子的最外层价电子，可以摆脱原子的束缚而在金属中自由运动，这些电子称为自由电子。电解液之所以导电，是因为其内部存在许多可以做宏观运动的正、负离子。在绝缘体（电介质）内部，由于电子所受到的原子核的束缚较紧，基本上没有自由电荷，所以几乎不导电。

2. 电荷量　电荷的量子化

用电荷量（electric quantity，简称电荷）来表示物体所带电荷的多少。如图10－1所示的验电器，是检测电荷的一种最简单的仪器。在玻璃瓶外壳上安装一根金属杆，杆的上端有一金属球，下端有一对悬挂着的金属箔。当它们带电

时，由于同种电荷互相排斥，会使金属箔张开，所带的电荷越多，张角就越大。

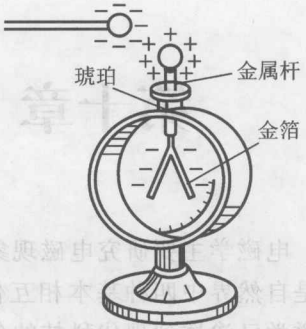


图 10－1

1906—1917 年，密立根（R. A. Millikan）通过油滴实验证明了任何带电粒子所带的电荷量总是等于一个最小电荷量的整数倍，这就是说粒子的电荷是量子化的。该最小电荷称为元电荷（elementary charge），用 e 表示，$e = 1.602\ 176\ 53(14) \times 10^{-19}$ C，其中 C（库仑）是电荷量的单位。迄今所知，电子电荷是自然界存在的最小负电荷，质子电荷是最小正电荷。

尽管在 1964 年盖尔曼等人提出了夸克模型，认为质子和中子等强子都是由分别具有 $-e/3$ 和 $2e/3$ 电荷的夸克组成的，但这并不破坏电荷量子化的规律。况且，迄今实验上还没有发现处于自由状态的夸克。电荷量子化是一个实验规律，并在相当高的精度下得到了检验。

3. 摩擦起电和静电感应

前面提到的橡胶摩擦毛皮等会带电，这称为摩擦起电。两个物体互相摩擦后之所以会带电，是因为通过摩擦，每个物体中都有一些电子脱离了原子束缚而转移到另一个物体上去，所以，一个物体失去了电子而带正电，另一个物体得到了电子而带负电。

实验表明，当我们把带负电的物体移近金属球时，导体（金属杆上端）中的自由电子在负电荷的排斥力作用下向远离带电体一端移动，结果导体的这一端因电子过少而带正电，另一端则因电子过多而带负电，这就是静电感应（electrostatic induction）现象。

摩擦起电和静电感应现象中的起电过程，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的过程。

4. 电荷守恒定律

电荷既不能被创造，也不能被消灭。在孤立系统中（一个与外界没有电荷交换的系统内），不管发生什么变化，正、负电荷的代数和保持不变，这称为电荷守恒定律（Law of conservation of charge）。

近代科学实验证明，电荷守恒定律不仅在一切宏观过程中成立，而且在一切微观过程（例如核反应和基本粒子过程）中也都普遍成立。电荷是在一切相互作用下都守恒的一个守恒量，电荷守恒定律是物理学中普遍的基本定律之一。

（二）库仑定律　静电力的叠加原理

静电相互作用比万有引力相互作用强得多，而且具有与引力相互作用根本

需要全本请访问 www.ertongbook.com

不同的性质。1785 年，库仑[①]提出了关于两个静止的点电荷之间相互作用的规律：在真空中，两个静止的点电荷之间的相互作用力，其大小与它们所带电荷量的乘积成正比，与它们之间距离的平方成反比；作用力的方向沿着两点电荷的连线，同号电荷相斥，异号电荷相吸。该定律称为库仑定律（Coulomb Law）。

如图 10－2 所示，用 $\boldsymbol{F}_{12}$ 表示 q_1 对 q_2 的作用力，$\boldsymbol{r}_{12}$ 表示由 q_1 指向 q_2 的矢量，$\boldsymbol{e}_{12}$ 表示其单位矢量，则库仑定律的数学表达式为

$$\boldsymbol{F}_{12}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r_{12}^2}\boldsymbol{e}_{12} \qquad (10.1)$$

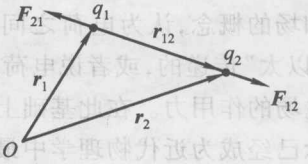


图 10－2

式中，ε_0 称为真空电容率（permittivity of vacuum）或真空介电常量（dielectric constant of vacuum），其值为 $\varepsilon_0=8.854\ 187\ 817\cdots\times10^{-12}\ \mathrm{C^2/(N\cdot m^2)}$。

由于 $\boldsymbol{e}_{12}=-\boldsymbol{e}_{21}$，因此有 $\boldsymbol{F}_{12}=-\boldsymbol{F}_{21}$，即静止电荷之间的库仑力满足牛顿第三定律。

库仑定律是物理学中最精确的实验定律之一，是电磁学理论的基础。

实验表明，两个静止点电荷（point charge）之间的相互作用力，并不会因为有第三个静止点电荷的存在而改变；当有若干个点电荷 $q_0,q_1,q_2,\cdots,q_n$ 同时存在时，如图 10－3 所示，作用在每一个点电荷（如 q_0）上的总静电力 $\boldsymbol{F}_0$，等于其他点电荷单独存在时作用于该点电荷上的静电力 $\boldsymbol{F}_{0i}$ 的矢量和，即

$$\boldsymbol{F}_0=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{F}_{i0}=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_iq_0}{r_{i0}^2}\boldsymbol{e}_{i0} \qquad (10.2)$$



图 10－3

称为静电力叠加原理。原则上，库仑定律加上静电力叠加原理，可以求出任意带电体之间的静电力。

§10.2　电场　电场强度

（一）电场

库仑定律给出了两个点电荷间的作用力规律，但并没有告诉我们，电荷之间

① 库仑（C. A. de Coulomb，1736—1806），法国物理学家，他通过滚动和滑动摩擦的实验研究，得到摩擦定律。通过自创的扭秤确定了电荷间的作用力，得到库仑定律。

的相互作用是如何在两个不接触的带电体间进行的，是否需要作用时间？早期电磁理论有一种超距作用观点，认为相隔一定距离的两个物体之间所存在的相互作用，既不需要介质传递，也不需要时间传递；另一种观点则认为电力是近距作用的，是通过一种无处不在的弹性介质——“以太”来传递的。后来，法拉第等人在大量实验研究的基础上，提出了以近距作用观点为基础的力线（电场线）和场的概念，认为电荷之间的相互作用是通过电场（electric field）而不是所谓“以太”传递的，或者说电荷周围存在有电场，在该电场内的任何带电体，都受到电场的作用力。在此基础上麦克斯韦建立起了完整的电磁理论。现在，场的概念已经成为近代物理学中最重要的基本概念之一。

有电荷的地方，其四周就存在着电场，即任何电荷都在自己周围的空间激发电场。相对于观测者静止的电荷在其周围空间所产生的电场，称为静电场（electrostatic field），它是不随时间变化的。电场对处在其中的任何其他电荷都有作用力，称为电场力，电场力会移动其他电荷而做功。

（二）电场强度

1. 试探电荷

为研究电场各点性质，将试探电荷（test charge）q_0 置于电场中。试探电荷必须具备两个条件：其一是它所带的电荷量必须足够小，以保证由于它的置入不引起场源电荷的重新分布；其二是它的线度必须小到可以被看作点电荷，以便能够确定电场中各点的性质。

2. 电场强度

将试探电荷 q_0 静止地放置在电场中，测量它在各处所受到的电场力 $\boldsymbol{F}$，由库仑定律可以证明，对于电场中的任何一个固定点来说，单位正试探电荷受到的力，即比值 $\boldsymbol{F}/q_0$ 是一个大小和方向都与试探电荷 q_0 无关的矢量，所以它能反映电场施力本身的性质，定义为电场强度（electric field intensity），简称场强，用 $\boldsymbol{E}$ 表示，即

$$\boldsymbol{E}=\frac{\boldsymbol{F}}{q_0} \tag{10.3}$$

空间某处电场强度的大小等于单位正电荷在该处所受到的电场力的大小，其方向与正电荷在该处所受到的电场力的方向一致。在国际单位制中，电场强度的单位是牛每库，符号是 N/C。

一般而言，在电场中，空间不同点的场强的大小和方向都可以不同，即 $\boldsymbol{E}$ 是空间坐标的一个矢量函数。

3. 点电荷的场强

如图 10－4 所示，在点电荷 q 产生的电场中，用一试探电荷 q_0 放在任意一点，受到的电场力由（10.1）式决定，根据定义

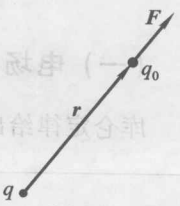


图 10－4

式(10.3),可以知道该点的电场强度为

$$\boldsymbol{E}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\boldsymbol{e}_r \tag{10.4}$$

$\boldsymbol{e}_r$ 是 r 的单位矢量。

(三) 场强的叠加原理

若静电场是由许多点电荷 $q_1,q_2,\cdots,q_n$ 产生的,在空间某点 P,试探电荷 q_0 所受作用力 $\boldsymbol{F}$ 是各点电荷单独存在时所产生电场的作用力之和,即 $\boldsymbol{F}=\sum_i \boldsymbol{F}_i$,由场强的定义(10.3)式,可得

$$\boldsymbol{E}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{F}_i}{q_0}=\sum_{i=1}^{n}\frac{\boldsymbol{F}_i}{q_0}=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{E}_i \tag{10.5}$$

$\boldsymbol{E}_i$ 代表点电荷 q_i 单独存在时,在试探电荷 q_0 所在处 P 点的场强,而 $\boldsymbol{E}$ 代表这些点电荷 $q_1,q_2,\cdots,q_n$ 同时存在时,在 P 点的总场强。由此可见,一组点电荷产生的电场中任何一点的总场强等于各个点电荷单独存在时在该点产生的场强的矢量和,这就是场强叠加原理。

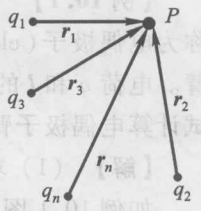


图 10-5

根据(10.4)式和(10.5)式,可写出如图 10-5 所示的包含点电荷 $q_1,q_2,\cdots,q_n$ 的系统中,P 处的场强为

$$\boldsymbol{E}=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{E}_i=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{r_i^2}\boldsymbol{e}_{ri} \tag{10.6}$$

从微观结构来看,电荷集中在一个个带电的微观粒子上,例如电子和原子核上。但从宏观效果来看,电荷可能在一定体积内连续分布,称为体电荷(body charge),电荷体密度 ρ 为该点附近单位体积内的电荷,即

$$\rho=\lim_{\Delta V\to 0}\frac{\Delta q}{\Delta V}=\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}V} \tag{10.7}$$

其中 ΔV 是宏观上足够小、微观上足够大的体积元,Δq 是在 ΔV 内全部电荷的代数和。根据场强的叠加原理,电荷连续分布的带电体所产生的总场强为

$$\boldsymbol{E}=\int \mathrm{d}\boldsymbol{E}=\int\frac{\mathrm{d}q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\boldsymbol{e}_r=\iiint_V\frac{\rho\mathrm{d}V}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\boldsymbol{e}_r \tag{10.8}$$

在某些情况下,电荷分布在导体或电介质的表面附近很薄的一层里,当场点与薄层的距离远大于薄层的厚度时,可以忽略这个厚度而认为电荷分布在一个几何面上,称为面电荷(surface charge)。可以定义一点的电荷面密度 σ 为该点附近单位面积内的电荷,即

$$\sigma = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta S} = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}S} \tag{10.9}$$

于是,带电面所激发的电场强度为

$$\boldsymbol{E} = \iint_S \frac{\mathrm{d}q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\boldsymbol{e}_r = \iint_S \frac{\sigma \mathrm{d}S}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\boldsymbol{e}_r \tag{10.10}$$

如果电荷分布在细线或细棒上,即线电荷(line charge)。任一点附近单位长度内的电荷称为电荷线密度 λ,定义为

$$\lambda = \lim_{\Delta l \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta l} = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}l} \tag{10.11}$$

则线电荷激发的电场强度为

$$\boldsymbol{E} = \int_l \frac{\lambda \mathrm{d}l}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\boldsymbol{e}_r \tag{10.12}$$

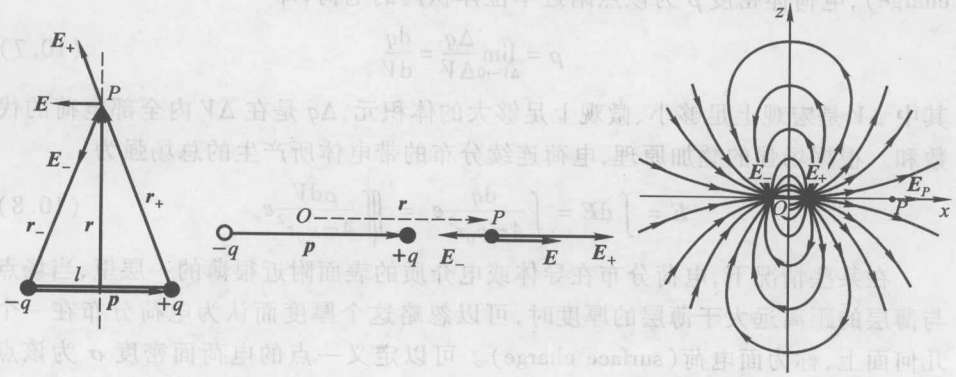
以上各积分式中,矢量 $\boldsymbol{r}$ 都是从电荷元 $\mathrm{d}q$ 指向场点 P 的。对场源求积分,可得出总场强。

【例 10.1】 两个大小相等、符号相反的点电荷 $+q$ 和 $-q$ 组成的点电荷系称为电偶极子(electric dipole)。从负电荷到正电荷的矢量 $\boldsymbol{l}$ 称为电偶极子的臂。电荷 q 和 $\boldsymbol{l}$ 的乘积 $\boldsymbol{p} = q\boldsymbol{l}$ 称为电偶极矩(electric dipole moment),简称电矩。试计算电偶极子臂(连线)的中垂面上和延长线上的场强分布。

【解】 (1) 求电偶极子中垂面上的场强分布。

如例 10.1 图(a)所示,在电偶极子的中垂面上任取一点 P,点电荷 $+q$ 和 $-q$ 到 P 点的距离都是 $\sqrt{r^2 + l^2/4}$,r 是 P 点到电偶极子中点的距离。它们在 P 点产生的场强方向不同,但大小相等,为

$$\boldsymbol{E}_+ = \frac{q\boldsymbol{r}_+}{4\pi\varepsilon_0 r_+^3}, \qquad \boldsymbol{E}_- = \frac{-q\boldsymbol{r}_-}{4\pi\varepsilon_0 r_-^3}$$



例 10.1 图

当场点较远时，因为 $r \gg l$，可取近似 $r_+ = r_- \approx r$。因此，P 点的总场强的大小为

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_+ + \boldsymbol{E}_- = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^3}(\boldsymbol{r}_+ - \boldsymbol{r}_-)$$

而 $\boldsymbol{r}_+ - \boldsymbol{r}_- = -\boldsymbol{l}$，则有

$$\boldsymbol{E} = \frac{-q\boldsymbol{l}}{4\pi\varepsilon_0 r^3} = \frac{-\boldsymbol{p}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$

可见，电偶极子中垂面上距离中心较远处一点的场强，与电偶极子的电矩成正比，与该点离中心的距离的三次方成反比，方向与电矩方向相反。

（2）求电偶极子臂（连线）延长线上的场强分布。

如例 10.1 图(b)所示，在臂的延长线上任取一点 P，它们在 P 点产生的场强方向不同。取电偶极子中点 O 到 P 的距离为 r，点电荷 $+q$ 和 $-q$ 在 P 点的场强的大小分别为

$$|\boldsymbol{E}_+| = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 (r - l/2)^2}, \quad |\boldsymbol{E}_-| = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 (r + l/2)^2}$$

因此，P 点的总场强的大小为

$$E = E_+ - E_- = \frac{2qlr}{4\pi\varepsilon_0 (r^2 - l^2/4)^2}$$

当 $r \gg l$ 时，$\left(r^2 - \frac{l^2}{4}\right)^2 \approx r^4$，有

$$\boldsymbol{E} = \frac{2\boldsymbol{p}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$

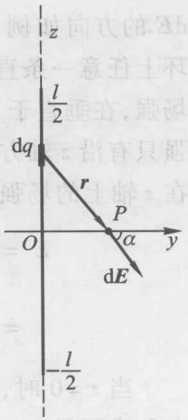
因此，电偶极子臂（连线）延长线上的场强 $\boldsymbol{E}$ 的方向和电偶极矩 $\boldsymbol{p}$ 的方向一致。场强大小与二倍电矩成正比，与距离 r 的三次方成反比，它比点电荷的场强随 r 递减的速度快得多。例 10.1 图(c)给出了电偶极子的场强分布。

【例 10.2】 求均匀带电细棒中垂面上一点的场强。如例 10.2 图所示，已知棒长为 l，总带电荷量为 q，电荷线密度为 λ。

【解】 根据题意，场分布具有以细棒为轴的轴对称性，选用如图所示的柱坐标。以 OP 为中垂线，把细棒分成一对对称的线元，其电荷元 $\mathrm{d}q = \lambda \mathrm{d}z$。任意一对线元在 P 点的场强之和在 z 和 x 方向无分量，只有 y 方向的分量。一个电荷元在 P 点的场强大小为

$$\mathrm{d}E = \frac{\lambda \cdot \mathrm{d}z}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

在 y 方向上的分量为 $\mathrm{d}E_y = \mathrm{d}E\cos\alpha$，对场源（均匀带电细棒）求积分，得出均匀带电细棒的场强为



例 10.2 图

$$E_y = \int dE_y = \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\int_{-l/2}^{l/2}\frac{\cos\alpha \cdot dz}{r^2}$$

$$= \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\int_{-l/2}^{l/2}\frac{y \cdot dz}{(y^2+z^2)^{3/2}} = \frac{2\lambda y}{4\pi\varepsilon_0}\frac{z}{y^2\sqrt{y^2+z^2}}\Bigg|_{z=0}^{z=l/2}$$

$$= \frac{\lambda l/2}{2\pi\varepsilon_0 y\sqrt{y^2+\left(\frac{l}{2}\right)^2}} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 y\sqrt{y^2+\left(\frac{l}{2}\right)^2}}$$

方向垂直于细棒。

当 $y << l$ 时，由上式可得 $E \approx \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 y}$，相当于是无限长均匀带电细棒的场强。

当 $y >> l$ 时，$E = \frac{\eta l/2}{2\pi\varepsilon_0 \cdot y^2}$ 相当于点电荷的场强。所带电荷量的正负决定场强方向。

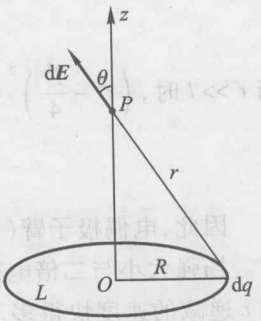
【例 10.3】 设均匀带电圆环半径为 R，总带电荷量为 q，求圆环轴线上的场强分布。

【解】 在例 10.3 图中，取圆心 O 为原点，轴线向上为 z 轴正方向，P 点在轴线上距离圆心为 z，圆环上任一线电荷元的电荷量为

$$dq = \lambda dl = \frac{q}{2\pi R}dl$$

在 P 点所产生的场强的大小为

$$dE = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda}{z^2+R^2}dl$$



例 10.3 图

$d\boldsymbol{E}$ 的方向如例 10.3 图所示。根据对称性分析，圆环上任意一条直径两端的两电荷元在 P 点所产生的场强，在垂直于 z 轴的平面上的分量大小相等、方向相反，互相抵消。因此，合场强只有沿 z 轴方向上的分量。均匀带电圆环在 P 点产生的场强是所有带电线元在 z 轴上的场强分量的代数和，即

$$E = \int dE_z = \int dE \cdot \cos\theta = \int_L \frac{dq}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\cos\theta = \frac{\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\int_L dq$$

$$= \frac{qz}{4\pi\varepsilon_0(R^2+z^2)^{3/2}}$$

当 $z=0$ 时，由上式可得 $\boldsymbol{E}=0$，即带电圆环中心处的场强为零；当 $z >> R$ 时，由上式可得

需要全本请访问 www.ertongbook.com