 21 世纪高等学校规划教材

# 大学物理教程

主编 余燕

(下册)



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)

21 世纪高等学校规划教材

# 大学物理教程

(下)

主编 余 燕



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)

## 内容简介

本书是依据教育部颁布的“高等工业学校大学物理课程教学基本要求”，结合编者多年的教学实践经验编写而成的。

全书分上、下两册。上册内容有力学、热物理学；下册包括电磁学、光学和近代物理学。书中主要是理工科普通物理教学大纲要求的基本内容；并涉及物理学知识在各相关领域的应用及拓展，以利于开阔学生的视野。

本套教材配有学习指导书，书中对大学物理课程学习过程中的重点、难点问题，作出了更为详尽的描述。

在全书编写过程中，编者充分考虑了非物理类专业具有多样性这个因素，着重讲述对各专业来说都是最基本的内容，加强了物理理论中基本概念和重要知识的描述，降低了对数学运算的要求，对“可繁可简，可深可浅”的内容，分层次表述，以便任课教师根据实际情况自行取舍。

本书可作为高等学校非物理专业大学物理课程的教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程. 下/余燕主编. —北京:北京邮电大学出版社, 2006

ISBN 7-5635-1285-3

I. 大... II. 余 III. 物理学—高等学校—教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 113800 号

---

书 名 大学物理教程(下)  
主 编 余 燕  
责任编辑 陈露晓  
出版发行 北京邮电大学出版社  
社 址 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)  
电话传真 010-62282185(发行部) 010-62283578(传真)  
电子信箱 ctrd@buptpress.com  
经 销 各地新华书店  
印 刷 北京忠信诚胶印厂  
开 本 787mm×960mm 1/16  
印 张 17.5  
字 数 308 千字  
版 次 2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

---

ISBN 7-5635-1285-3/O·108

定 价(上、下册):46.00 元

如有质量问题请与发行部联系  
版权所有 侵权必究

## 前 言

为适应“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的需要,根据教育部颁布的“高等工业学校大学物理课程教学基本要求”,编者结合自己多年的教学实践经验、国家工科物理教学基地建设的体会和国家精品课程建设的感受编写了这套教材。

编者认真研究了国内外多种版本的同类教材,汲取了众多优秀教材的优点,以现代教育理念和现代物理思想为指导,以基础教育和素质教育为目的,构建了教材的结构体系。整套教材既继承了传统教学内容的框架,又增加了反映现代科技发展方向的前沿内容,除介绍物理学基本内容外,还适当穿插了物理学发展历史及研究方法的介绍,内容由浅入深,重点、难点突出。既能满足大学物理教学的需要,又能为素质教育作出一定的贡献是编写本书的出发点;语言通俗、生动是编者追求的目标。

全套教材分为《大学物理教程》(上、下册)和《大学物理学习指导》三册。

本书由中南大学部分老师们共同编写。中南大学是全国工科物理教学基地之一,其大学物理课程是国家精品课程。本书的作者都是基地建设和课程建设的骨干,为基地建设和课程建设作出过很多的贡献,对大学物理教学有深刻的认识和独到的见解,这些认识和见解已被融入教材之中。随着高等教育的改革与发展的需要,中南大学的大学物理教材建设步伐一直在向前迈进,每一版教材都反映了时代特色和声音。这套教材更适合于少学时非物理专业大学物理教学之用。

非物理类专业种类繁多,不同的专业对物理课有不同的要求,物理课的教学时数差异也很大。大学物理课程作为一门基础课、素质教育课,不可能针对专业不同来编写不同的教材,且物理学本身的内容和逻辑体系并不是由专业决定的,因而该课程的教学内容的主干部分是相同的。这对大学物理课程的教材提出了相当高的要求,对不同专业、不同学时的大学物理课程,主讲教师可对教材略加处理,如小字部分的舍取、数学推导的繁简等,甚至主讲教师还可在自己的心得上对某些内容加以丰富。

本书由余燕主编。蔡建国编写第 1,2,3 章;余燕编写第 4,5,6 章;周一平编写第 7,8 章;罗益民编写第 9,10,11 章;唐英编写第 12 章;吴焯编写第 13,14 章。全套书最后由余燕、罗益民负责统稿和定稿。叶善专教授对此书提出了宝贵的指导性意见;复旦大学钱列加教授审查了本书。在此一并致谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,疏漏和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 第三篇 电磁学

第 9 章 静电场	(2)
§ 9.1 电场强度	(2)
9.1.1 电荷及其性质	(2)
9.1.2 库仑定律	(3)
9.1.3 电场强度	(4)
9.1.4 带电体在外电场中所受的作用	(11)
§ 9.2 静电场中的高斯定理	(12)
9.2.1 电通量	(12)
9.2.2 静电场中的高斯定理	(13)
§ 9.3 静电场的环路定理 电势	(19)
9.3.1 静电场的环路定理	(19)
9.3.2 电势和电势差	(21)
9.3.3 等势面 电势梯度	(25)
§ 9.4 静电场中的导体	(27)
9.4.1 导体的静电平衡	(27)
9.4.2 有导体存在时场强与电势的计算	(28)
9.4.3 静电的应用	(31)
§ 9.5 静电场中的介质	(32)
9.5.1 电介质的极化	(32)
9.5.2 电介质中的电场	(34)
9.5.3 电位移矢量 电介质中的高斯定理	(37)
§ 9.6 静电场的能量	(39)
9.6.1 电容和电容器	(39)
9.6.2 电容器的储能	(42)

9.6.3 静电场的能量 .....	(43)
本章提要 .....	(45)
思考题 .....	(47)
习题 .....	(48)
<b>第 10 章 稳恒磁场</b> .....	(51)
§ 10.1 磁感应强度 .....	(51)
10.1.1 磁现象 磁场 .....	(51)
10.1.2 电流和电流密度 .....	(52)
10.1.3 磁感应强度 .....	(54)
§ 10.2 磁场中的高斯定理 .....	(55)
10.2.1 磁感应线 .....	(55)
10.2.2 磁通量 .....	(55)
10.2.3 磁场中的高斯定理 .....	(56)
§ 10.3 毕奥—萨伐尔定理及其应用 .....	(57)
10.3.1 稳恒电流的磁场 .....	(57)
10.3.2 运动电荷的磁场 .....	(58)
10.3.3 载流线圈的磁矩 .....	(59)
10.3.4 毕奥—萨伐尔定律的应用 .....	(59)
§ 10.4 磁场的安培环路定理 .....	(63)
10.4.1 安培环路定理 .....	(63)
10.4.2 安培环路定理的应用 .....	(65)
§ 10.5 磁场对运动电荷和载流导线的作用 .....	(69)
10.5.1 洛伦兹力 .....	(69)
10.5.2 带电粒子在磁场中的运动 .....	(69)
* 10.5.3 霍尔效应 .....	(71)
* 10.5.4 洛伦兹力在科学与工程中的应用实例 .....	(72)
10.5.5 安培力 .....	(76)
§ 10.6 磁力的功 .....	(81)
10.6.1 磁力对载流导线做功 .....	(81)
10.6.2 磁力矩对转动载流线圈做功 .....	(81)
§ 10.7 磁介质 .....	(83)
10.7.1 磁介质的分类 .....	(83)
10.7.2 顺磁质与抗磁质的磁化 .....	(84)

10.7.3 磁场强度、磁介质中的安培环路定理 .....	(85)
* 10.7.4 铁磁质 .....	(88)
本章提要 .....	(92)
思考题 .....	(93)
习题 .....	(95)
<b>第 11 章 电磁感应 电磁场</b> .....	(99)
§ 11.1 电磁感应的基本定律 .....	(99)
11.1.1 电磁感应现象 .....	(99)
11.1.2 法拉第电磁感应定律 .....	(100)
§ 11.2 动生电动势 .....	(102)
11.2.1 电源 电动势 .....	(102)
11.2.2 动生电动势 .....	(103)
§ 11.3 感生电动势和感生电场 .....	(105)
11.3.1 感生电动势 涡旋电场 .....	(105)
* 11.3.2 电子感应加速器 .....	(108)
* 11.3.3 涡电流 .....	(108)
§ 11.4 自感应 互感应 .....	(110)
11.4.1 自感 .....	(110)
11.4.2 互感 .....	(111)
§ 11.5 磁场的能量 .....	(113)
11.5.1 自感磁能 .....	(113)
11.5.2 互感磁能 .....	(114)
11.5.3 磁场能量 .....	(114)
§ 11.6 位移电流和全电流定律 .....	(115)
11.6.1 位移电流 .....	(115)
11.6.2 全电流定律 .....	(117)
§ 11.7 麦克斯韦方程组 .....	(119)
§ 11.8 电磁波 .....	(121)
* 11.8.1 电磁波的波动方程 .....	(121)
11.8.2 电磁波的辐射 .....	(123)
11.8.3 平面电磁波的传播 .....	(125)
11.8.4 电磁波谱 .....	(126)
§ 11.9 电磁场的物质性 .....	(127)

11.9.1 电磁场的能量 坡印廷矢量 .....	(127)
* 11.9.2 电磁场的动量 .....	(129)
本章提要 .....	(130)
思考题 .....	(132)
习题 .....	(134)

## 第四篇 光 学

第 12 章 波动光学 .....	(139)
§ 12.1 光的相干性 .....	(139)
12.1.1 光源 .....	(139)
12.1.2 光的相干性 .....	(141)
12.1.3 光程 光程差 .....	(141)
§ 12.2 分波面干涉 .....	(143)
12.2.1 杨氏双缝干涉 .....	(143)
* 12.2.2 菲涅耳双面镜 劳埃德镜 .....	(145)
§ 12.3 分振幅干涉 .....	(146)
12.3.1 薄膜干涉 .....	(146)
12.3.2 薄膜的等厚干涉 .....	(148)
12.3.3 薄膜的等倾干涉 .....	(151)
12.3.4 迈克耳孙干涉仪 .....	(153)
§ 12.4 光的衍射 .....	(155)
12.4.1 光的衍射现象及其分类 .....	(155)
12.4.2 惠更斯-菲涅耳原理 .....	(156)
12.4.3 单缝衍射 .....	(157)
12.4.4 圆孔夫琅禾费衍射 .....	(160)
12.4.5 光学仪器的分辨本领 .....	(161)
§ 12.5 光栅 .....	(163)
12.5.1 光栅衍射现象 .....	(163)
12.5.2 光栅衍射规律 .....	(163)
12.5.3 光栅光谱 .....	(165)
* § 12.6 X 射线衍射 .....	(166)
§ 12.7 光的偏振 .....	(167)
12.7.1 自然光 偏振光 .....	(168)



12.7.2 偏振片的起偏与检偏 .....	(169)
12.7.3 马吕斯定律 .....	(170)
12.7.4 反射和折射光的偏振 .....	(171)
12.7.5 晶体的双折射 .....	(173)
* § 12.8 偏振光的干涉 人为双折射 旋光现象 .....	(175)
12.8.1 偏振光的干涉 .....	(175)
12.8.2 人为双折射 .....	(176)
12.8.3 旋光现象 .....	(177)
本章提要 .....	(178)
思考题 .....	(180)
习题 .....	(181)

## 第五篇 量子物理

第 13 章 量子力学基础 .....	(185)
§ 13.1 黑体辐射和普朗克量子假设 .....	(185)
13.1.1 黑体辐射 .....	(185)
13.1.2 普朗克量子假设和普朗克公式 .....	(188)
§ 13.2 光的量子性 .....	(190)
13.2.1 光电效应 .....	(190)
13.2.2 康普顿效应 .....	(193)
§ 13.3 玻尔的氢原子理论 .....	(196)
13.3.1 氢原子光谱 .....	(196)
13.3.2 玻尔氢原子理论 .....	(197)
§ 13.4 实物粒子的波粒二象性 .....	(201)
13.4.1 德布罗意波 .....	(201)
13.4.2 德布罗意波的实验证明 .....	(202)
* 13.4.3 德布罗意波的应用 .....	(203)
13.4.4 德布罗意波的统计的解释 .....	(204)
§ 13.5 不确定性关系 .....	(205)
§ 13.6 薛定谔方程 .....	(209)
13.6.1 波函数 概率密度 .....	(209)
13.6.2 薛定谔方程 .....	(211)
13.6.3 一维无限深方势阱 .....	(213)

* 13.6.4	一维方势垒 隧道效应 .....	(215)
* § 13.7	算符与平均值 .....	(216)
13.7.1	算符的本征值和本征函数 .....	(216)
13.7.2	力学量的算符表示 .....	(217)
13.7.3	态叠加原理 .....	(219)
13.7.4	力学量测量结果概率,平均值 .....	(219)
13.7.5	算符的对易和不确定关系 .....	(220)
§ 13.8	氢原子的量子理论 .....	(222)
13.8.1	氢原子的薛定谔方程 .....	(222)
13.8.2	量子化条件三个量子数 .....	(223)
* 13.8.3	电子云 .....	(224)
§ 13.9	多电子原子中的电子分布 .....	(226)
13.9.1	电子自旋,自旋量子数 .....	(226)
13.9.2	多电子原子中的电子分布 .....	(227)
* § 13.10	激光原理 .....	(229)
13.10.1	激光的特性 .....	(229)
13.10.2	原子的激发、辐射与吸收 .....	(230)
13.10.3	粒子数反转分布 .....	(232)
13.10.4	光学谐振腔 .....	(234)
13.10.5	激光器 .....	(235)
本章提要	.....	(236)
思考题	.....	(240)
习题	.....	(241)
* 第 14 章	原子核物理和粒子物理简介 .....	(243)
§ 14.1	原子核的基本性质 .....	(243)
14.1.1	原子核的组成 .....	(243)
14.1.2	原子核的大小 .....	(244)
14.1.3	核力 .....	(244)
14.1.4	核的自旋与磁矩 .....	(245)
§ 14.2	原子核的结合能 裂变和聚变 .....	(245)
14.2.1	原子核的结合能 .....	(245)
* 14.2.2	重核的裂变 .....	(247)
* 14.2.3	轻核的聚变 .....	(248)

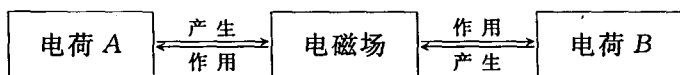
---

§ 14.3 原子核的放射性衰变	(250)
14.3.1 放射性衰变	(250)
14.3.2 放射性衰变规律	(251)
* 14.3.3 放射性强度	(252)
* § 14.4 粒子物理简介	(253)
14.4.1 粒子的基本特征	(253)
14.4.2 粒子的相互作用及其统一模型	(254)
14.4.3 粒子的分类	(254)
14.4.4 夸克模型	(256)
本章提要	(258)
思考题	(259)
习题	(260)
习题答案	(262)

## 第三篇 电磁学

电磁运动是物质的一种重要运动形式,电磁相互作用是物质间四种基本相互作用之一,电磁力是原子得以存在的基础,研究电磁现象及其规律的学科称为电磁学.电磁学理论不仅普遍应用于科学技术各个领域,而且已日益成为新技术的理论基础.

两个静止电荷之间存在电力,两个运动电荷间存在电力和磁力.关于这些相互作用力的产生机制,历史上曾有过“超距作用”的观点,即认为电磁力可以超越空间任何距离,无需中间传递媒质,也不需要传递时间.然而,随着科学技术的发展,这种观点逐步为近距离作用观点所代替,近距离作用观点认为:电磁相互作用力和其他相互作用力一样,既需要传递媒质,也需要传递时间.电荷在其周围空间激发电磁场,以电磁场为媒质和周围空间的其他电荷发生相互作用,这种相互作用以光速在电磁场中传播,其作用方式如下:



本篇将在实验事实的基础上,分别建立静电场、稳恒磁场和交变电磁场的描述体系,研究电磁场的产生、传播和相互作用规律.

## 第9章 静电场

相对于观察者静止的电荷所产生的电场称为静电场(electrostatic field), 电场强度和电势是描述电场性质的两个物理量, 库仑定律是静电场的基本实验定律. 本章从库仑定律出发, 导出静电场的高斯定理和环路定理, 并阐明静电场是有源场和保守场(无旋场). 本章还将讨论静电场中引入导体或电介质后, 电场和导体、电介质的相互作用及影响, 以及电场能量的计算等.

### § 9.1 电场强度

#### 9.1.1 电荷及其性质

自然界只存在两种电荷——正电荷和负电荷, 且同种电荷互相排斥, 异种电荷互相吸引. 在正常状态下, 物体内部正负电荷量值相等, 对外不显电性, 称为电中性(electric neutrality), 使物体带电的过程就是使它获得或失去电子(electron)的过程, 获得电子的物体带负电, 失去电子的物体带正电. 因此, 物体带电的过程实际上就是把电子从一个物体(或物体的一部分)转移到另一物体(或物体的另一部分)的过程.

实验表明, 在一个与外界没有电荷交换的系统内, 正负电荷的代数和在任何物理过程中保持不变, 称为电荷守恒定律(law of conservation of charge). 它是物理学中最普遍的规律之一. 电荷守恒定律表明, 电荷既不能被创造, 也不能被消灭.

1913年, 密立根(R. A. Millikan)用液滴法测定了电子的电荷, 首先从实验上证明了微小粒子带电量的变化是不连续的, 它只能是某个基元电荷 $e$ (电子或质子所带电量)的整数倍, 这称为电荷量子化(charge quantization). 通常, 由于

宏观带电体所带电量都远远大于  $e$ , 电荷的量子性显现不出来, 因此可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夸克(quark)或反夸克(antiquark)组成, 每一个夸克或反夸克可能带有  $\pm \frac{1}{3}e$  或  $\pm \frac{2}{3}e$  的电量. 然而, 单独存在的夸克, 至今尚未在实验中发现.

实验还表明: 一个电荷的电量与其运动状态无关. 例如在不同的参考系中观察, 同一带电粒子的运动速度可能不同, 但其电量不变. 电荷的这一特性叫做电荷的相对论不变性(relativistic invariance of electric charge).

### 9.1.2 库仑定律

点电荷间相互作用的基本规律, 称为库仑定律(Coulomb law), 可表述如下: 真空中两个静止的点电荷之间的作用力(称为静电力), 与它们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的连线. 其数学表达式为

$$\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0$$

式中,  $k$  为比例系数,  $\mathbf{r}_0 = \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}}$  为  $q_1$  和  $q_2$  连线方向上的单位矢量(见图 9-1),  $\mathbf{F}_{12}$  表示  $q_2$  对  $q_1$  的静电力,  $\mathbf{F}_{21}$  表示  $q_1$  对  $q_2$  的静电力. 在国际单位制中,  $k = 8.9880 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ . 通常引入另一常数代替  $k$ , 两者关系为

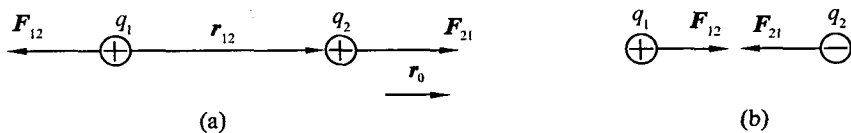


图 9-1 两个点电荷之间的作用力

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

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

$\epsilon_0$  称为真空中的介电常量(dielectric constant)或真空电容率, 于是, 真空中的库仑定律可写成

$$F_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} r_0$$

若  $q_1$  和  $q_2$  同号, 则  $F_{21}$  与  $r_0$  的方向相同, 说明同种电荷互相排斥; 若  $q_1$  与  $q_2$  异号, 则  $F_{21}$  与  $r_0$  方向相反, 说明异种电荷互相吸引。

点电荷  $q_1$  和  $q_2$  间的静电力实质上是电场力, 传递静电力的中间物质即为静电场。由  $q_1$  产生的电场对  $q_2$  施加电场力  $F_{21}$ , 由  $q_2$  产生的电场对  $q_1$  施加电场力  $F_{12}$ 。通常, 略去下标, 而将库仑定律写为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} r_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} r \quad (9-1)$$

在库仑定律中以  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  代替  $k$ , 虽然库仑定律的形式因出现  $4\pi$  因子而略显复杂, 但可使由库仑定律导出的其他公式(如高斯定理)不含  $4\pi$  而变得简单。

### 9.1.3 电场强度

#### 一、电场强度的定义

电荷的周围存在电场, 电场有强弱、方向的不同, 为定量地描述电场, 需要引入一个物理量, 该物理量能同时反映电场的强弱和方向。

把试验点电荷  $q_0$  放在电场中不同位置, 不管  $q_0$  的符号和大小如何变化, 比值  $F/q_0$  是一个确定的常矢量。一般说来, 当  $q_0$  的位置改变时, 该矢量的大小和方向也随之改变。我们用矢量  $F/q_0$  来定量描述电场的性质, 称为电场中各点的电场强度(electric field intensity), 简称场强, 用  $E$  表示, 即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (9-2)$$

由(9-2)式可知, 在电场中每一点, 可引入一个可观测量电场强度  $E$ , 其量值等于单位电荷在该处所受到的电场力, 方向与正电荷在该处所受的电场力方向相同。

如果电场中各点场强大小和方向都相同, 则该电场称为匀强电场。一般情况下, 电场中的不同点, 其场强的大小和方向各不相同, 要整体地描述电场, 必须知道空间各点的场强分布, 即  $E = E(x, y, z)$ , 故场强  $E$  是空间的点函数。

#### 二、场强叠加原理

若空间电场是由  $n$  个分立的点电荷激发的, 将试验电荷  $q_0$  放在电场中的任

一点,根据力的叠加性,它所受到的电场力  $F$  可表示为

$$F = F_1 + F_2 + \cdots + F_n = \sum_{i=1}^n F_i$$

式中  $F_1, F_2, \cdots, F_n$  分别是  $q_1, q_2, \cdots, q_n$  单独存在时施于  $q_0$  的电场力. 根据场强的定义,  $q_0$  所在处的场强

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{F_1}{q_0} + \frac{F_2}{q_0} + \cdots + \frac{F_n}{q_0} = \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{q_0}$$

上式右边各项分别为各点电荷单独存在时在  $q_0$  所在处产生的场强  $E_1, E_2, \cdots, E_n$ , 则

$$E = E_1 + E_2 + \cdots + E_n = \sum_{i=1}^n E_i \quad (9-3)$$

(9-3)式说明,一组点电荷所激发的电场中某点的电场强度等于各点电荷单独存在时在该点激发的电场强度的矢量和,这一结论称为场强叠加原理(superposition principle of electric field).

### 三、场强的计算

如果已知电荷的分布,根据场强叠加原理,从点电荷的场强公式出发,原则上可求出电场中各点的场强分布. 下面讨论几种不同的情况.

#### 1. 点电荷的场强

在真空中有一点电荷  $q$ , 设在该电荷产生的电场中的任意位置  $P$  处放置一试验电荷  $q_0$ , 按照库仑定律,  $q_0$  所受的力为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} r_0$$

根据定义,  $q_0$  处的场强为

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} r_0 \quad (9-4)$$

若  $q > 0$ ,  $E$  与  $r_0$  同向; 若  $q < 0$ ,  $E$  与  $r_0$  反向, 如图 9-2 所示.

由(9-4)式可知,  $r$  相同的点,  $E$  的大小相等, 说明点电荷的电场具有球对称性, 方向沿半径方向.

#### 2. 点电荷系的场强

若真空中场强是由  $n$  个点电荷所共同产生的,  $P$  点为电场中的任一点, 各点电荷到  $P$  点的矢径分别为  $r_1, r_2, \cdots, r_n$ , 根据场强叠加原理可得  $P$  点场强

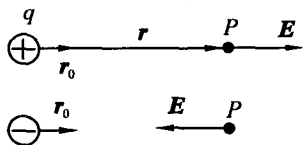


图 9-2 点电荷电场中场强的方向



$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_{i0} \quad (9-5)$$

上式为矢量求和,计算较为复杂,具体运算时,通常采用分量式

$$E_x = \sum_{i=1}^n E_{ix}, E_y = \sum_{i=1}^n E_{iy}, E_z = \sum_{i=1}^n E_{iz} \quad (9-6)$$

### 3. 任意带电体的场强

若不能将带电体视为点电荷时,我们可以认为该带电体是由许多无限小的电荷元组成的,每个电荷元都可当作点电荷处理.

电荷元  $dq$  在场中任一点  $P$  产生的场强为

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

$P$  点总场强为组成该带电体的所有  $dq$  在该点产生的场强矢量和,即

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^3} \mathbf{r} \quad (9-7)$$

上式为矢量积分,具体运算时,通常采用投影的方式,先求得  $\mathbf{E}$  的各方向分量

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

最后得总场强为

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j} + E_z \mathbf{k}$$

(9-7)式中, $dq$ 的计算视电荷分布而定,若电荷连续均匀分布在一体积内,其体密度为 $\rho$ ,则 $dq = \rho dV$ .同理,若电荷连续分布在一平面或曲面上,则 $dq = \sigma dS$ ;若电荷连续分布在一条细长线上,则 $dq = \lambda dl$ .其中 $\sigma, \lambda$ 分别表示电荷面密度和线密度.

**例 9-1** 两个等值异号的点电荷 $+q$ 和 $-q$ 组成的点电荷系,当它们之间的距离 $l$ 比所讨论问题中涉及的距离小得多时,这一对点电荷称为电偶极子(electric dipole),由负电荷 $-q$ 到正电荷 $+q$ 的矢量 $l$ 称为电偶极子的轴. $q$ 与 $l$ 的乘积称为电偶极矩,简称电矩(electric moment),用 $p$ 表示,即 $p = ql$ .

下面我们来计算电偶极子轴延长线上的 $A$ 点和轴中垂线上的 $B$ 点的场强.

**解** 选取如图9-3所示的坐标, $O$ 为电偶极子轴的中点,先计算 $A$ 点的场强,设由 $O$ 到 $A$ 的距离为 $r$ ,点电荷 $+q$ 和 $-q$ 在 $A$ 点产生的场强大小分别为

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

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