

DA XUE WU LI

大学物理

(网络教材) 下册

主编 吴王杰 副主编 陆起图

上海科学技术出版社

大学物理

(网络教材)

下 册

主 编 吴王杰
副主编 陆起图

上海科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

大学物理 . 下册: 网络教材 / 吴王杰主编. —上海:
上海科学技术出版社, 2002.2
ISBN 7-5323-6418-6

I . 大 ... II . 吴 ... III . 物理学 - 高等学校 - 教材
IV . 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第001923号

责任编辑 张晨

上海科学技术出版社出版发行

(上海瑞金二路 450 号 邮政编码 200020)

常熟市兴达印刷有限公司印刷 新华书店上海发行所经销

2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷

开本 787×1092 1/16 印张 23.5 字数 559 000

印数 1—3 000 定价: 36.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向本社出版科联系调换

内 容 提 要

本书是作者在多年教学和科研的基础上完成的,它吸取了近年来国内外大学物理教学改革最新成果,是一部将大学物理的教育思想、课程体系、教学内容和教学手段紧密融合在一起的现代化教材。教材内容按教育部制定颁发的本课程的教学基本要求进行取舍,并适当有所拓宽,分上、下两册,上册包括力学(含机械振动和波)、热学,下册包括电磁学、波动光学和近代物理学(含狭义相对论),共五篇 26 章。内容精炼,文字流畅,知识面宽,时代感强,注意培养学生的科学素质。

本书的讲义稿已在解放军理工大学试用了一学年,在试用的过程中进行了反复修改。

本教材现已形成完整系列,除本书的文字版外,电子版《大学物理(网络教材)》已由高等教育出版社出版发行。作为军队院校首批网络课程,本教材还有与之配套的 120 学时远程教学视频节目及电子教案,这些内容已在全军军事训练信息网上发布。

本书最显著的特色是有相应的网络电子版教材,网络电子版采用了先进的多媒体技术和教学设计,电子版中的大量演示程序、动画和生动的插图不仅有利于提高教学效果和效率,还有利于提高学生学习的兴趣和探索精神。

本书大量运用了制作精良的插图,一改传统教材呆板面貌。另外本书对习题的形式也进行了改革,习题分选择、填空、计算(或证明)三类,题量适中,便于学生和教师对基本知识的自测和检测。

本书可作为高等院校和远程教育非物理专业的大学物理教材,也可供广大物理教师 and 各类学习大学物理的读者参考。

序 言

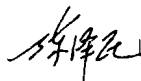
高等学校理工类专业开设大学物理课程,其作用一方面在于较系统地为学生打好必要的物理基础,另一方面,更重要的是使学生初步学习科学的思想方法和研究问题的方法,开阔思路,激发探索和创新精神。

为了实现物理课程教育思想的这一转变,20 世纪 90 年代以来,大学物理课程体系已有了很大的创新,已经出版了部分面向 21 世纪的新教材,教学内容现代化的程度大为提高。课程体系创新和教学内容现代化需要现代化的教学手段,同时信息技术的发展也为教学手段的现代化创造了条件。近年来已有了大量的电子教案、多媒体课件,它们在教学中发挥着越来越重要的作用。但是,到目前为止还没有一部内容完整的适应教学资源网络化的大学物理教材。解放军理工大学吴王杰等同志吸取了国内外物理教改方面的成果与经验,研制编写的这一套《大学物理(网络教材)》正好填补了这一空缺。这套网络教材既有文字版又有电子版,有配套的电子教案,此外还制成了远程教学视频节目。因此,它既可用于课堂教学,又可用于远程网络教学。

这套教材最显著的特色是,文字版保持了传统教材的优点,电子版中有大量的演示程序、动画和生动的插图。师生们可以上网演示电子版的动画和程序,在演示程序中学生可以自己设定参数,进行人机交互,有利于培养学生的探索精神。文字版和电子版两种教材形式配合使用,无论是对教还是学,都是一次十分有意义的尝试。

我相信这部完整的《大学物理(网络教材)》的出版发行,定将受到广大师生们的欢迎,并对我国大学物理教学有所促进。

清华大学教授



2001年8月10日

目 录

第三篇 电 磁 学

第 11 章 静电场	3
11.1 电荷和库仑定律	3
11.2 电场和电场强度	5
11.3 高斯定理	10
11.4 静电场的环路定理和电势	16
11.5 电场强度和电势梯度的关系	21
11.6 静电场的能量	24
11.7 带电粒子在静电场中的运动	26
习题	27
第 12 章 导体和电介质	33
12.1 导体的静电平衡	33
12.2 空腔导体与静电屏蔽	37
12.3 静电场中的电介质	40
12.4 电位移矢量	44
12.5 静电场的边值关系*	46
12.6 电容和电容器	48
习题	54
第 13 章 稳恒电流和稳恒电场	59
13.1 电流和电流密度	59
13.2 稳恒电流和稳恒电场	61
13.3 稳恒电流电路定律	63
13.4 应用:输电线路等效电阻问题*	68
习题	70
第 14 章 稳恒磁场	73
14.1 磁感应强度	73
14.2 毕奥-萨伐尔定律	75
14.3 磁场的高斯定理	81
14.4 安培环路定理	82
14.5 带电粒子在磁场中的运动	87

14.6 磁场对载流导线的作用	93
习题	100
第 15 章 磁介质	106
15.1 顺磁性和抗磁性	106
15.2 磁化强度和磁化电流	109
15.3 介质中的磁场和磁场强度	111
15.4 铁磁质	114
习题	117
第 16 章 变化的电磁场	119
16.1 电磁感应定律	119
16.2 动生电动势	124
16.3 感生电动势和感生电场	129
16.4 自感和互感	134
16.5 电感和电容电路的暂态过程	138
16.6 磁场的能量	141
16.7 位移电流	145
16.8 麦克斯韦方程组	149
16.9 电磁波的产生	151
附录:麦克斯韦	156
习题	157

第四篇 波动光学

第 17 章 光的干涉	167
17.1 光源、相干光和光程	167
17.2 双缝干涉	172
17.3 薄膜的等倾干涉	176
17.4 薄膜的等厚干涉	180
17.5 迈克耳孙干涉仪	185
习题	188
第 18 章 光的衍射	193
18.1 光的衍射现象和惠更斯-菲涅耳原理	193
18.2 单缝衍射	195
18.3 圆孔衍射	201
18.4 光栅衍射	203
18.5 X 射线衍射*	210
习题	213
第 19 章 光的偏振	216
19.1 偏振光和自然光	216

19.2 起偏和检偏及马吕斯定律	218
19.3 反射和折射时的偏振	220
19.4 双折射与光的偏振	222
19.5 偏振光的干涉	226
习题	231

第五篇 近代物理学

近代物理学绪论	237
第 20 章 狭义相对论	241
20.1 伽利略变换	241
20.2 洛伦兹变换	243
20.3 速度变换公式	247
20.4 狭义相对论的时空观	249
20.5 狭义相对论动力学基础	254
附录:爱因斯坦	259
习题	260
第 21 章 光的粒子性	263
21.1 黑体辐射	263
21.2 光电效应	269
21.3 玻尔原子理论	272
21.4 康普顿效应	277
附录:普朗克	280
习题	281
第 22 章 微观粒子的波动性和状态描述	284
22.1 德布罗意波	284
22.2 不确定关系	287
22.3 波函数与概率密度	290
习题	293
第 23 章 薛定谔方程	295
23.1 薛定谔方程	295
23.2 量子力学中的算符*	298
23.3 一维势阱	300
23.4 隧道效应	305
23.5 谐振子	309
习题	311
第 24 章 原子	313
24.1 氢原子	313
24.2 电子的自旋	317

24.3	原子的电子壳层结构·····	319
24.4	激光·····	322
24.5	X 射线* ·····	326
	习题·····	328
第 25 章	固体的量子理论 ·····	331
25.1	固体的能带·····	331
25.2	固体的导电机制·····	335
25.3	半导体·····	336
25.4	超导电性* ·····	340
	习题·····	344
第 26 章	核物理与粒子物理简介 ·····	346
26.1	原子核的基本性质与组成·····	346
26.2	原子核的结合能和核力·····	349
26.3	原子核的衰变·····	351
26.4	粒子物理简介* ·····	354
	习题·····	357
附录 1	常用物理常量 ·····	359
附录 2	SI 基本单位 ·····	361
附录 3	具有专用名称的 SI 导出单位 ·····	362
附录 4	主要参考书目 ·····	363

第三篇

电 磁 学

电 磁 学

原书空白页

第 11 章 静 电 场

电磁现象是自然界中普遍存在的现象,电磁学广泛应用于日常生活、生产、工程技术和科学研究。从本章起学习电磁学的知识,电磁学是研究电荷和电流产生电场和磁场的规律。静止电荷所激发的电场称为静电场,本章介绍静电场的性质和描述,电场和电荷的相互作用。

11.1 电荷和库仑定律

11.1.1 电荷

1747 年,富兰克林发现了电。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。电荷可以由摩擦起电、静电感应产生。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种性质,它不能脱离这些基本粒子而存在。

(1) 电荷守恒定律

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。这就是电荷守恒定律。电荷守恒定律适用于一切宏观和微观过程(例如核反应和基本粒子过程),是物理学中普遍的基本定律之一。

(2) 电荷量子化

1906—1917 年,密立根(R. A. Millikan)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,电子带有自然界中存在的最小负电荷,质子带有最小的正电荷。它们的带电量都是基本电荷 e :

$$e = 1.602\,177\,33 \times 10^{-19} \text{ C}$$

在国际单位制中电量的单位为 C。

电荷量子化是个实验规律,现有的实验结果表明:质子和电子的带电量差异是

$$\frac{|q_e| - |q_p|}{|q_e|} < 10^{-21}$$

电荷量子化已在相当高的精度下得到了检验。

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,尚未在实验中找到处于自由状态的夸克。

值得一提的是,1909年密立根在一篇论文中记录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的 e 值小30%左右。

现在,分数电荷仍是一个悬而未决的问题。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是原来的 $1/3$ 而已。

(3) 电荷的相对论不变性

当加速器将带电的基本粒子加速时,实验表明随着粒子速度的变化,它们的质量会发生改变,但电量却不发生任何变化。这是电荷与质量的不同之处。电荷的这一性质表明电荷的电量与它的运动速度或加速度均无关。或者说,在不同的参考系内观察,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。

11.1.2 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相互作用静电力所满足的规律,这就是库仑定律(如图11.1所示):

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。

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^3} \mathbf{r}_{12} \quad (11.1.1)$$

比例系数 k 由实验确定为

$$k = 8.9875 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

引入真空电容率或真空介电常量

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

则库仑定律可写作

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^3} \mathbf{r}_{12} \quad (11.1.2)$$

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。

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,也不是超距作用。按照现代物理学的观点,相互作用是通过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 2.2×10^{39} 。

库仑定律的平方反比规律的精确性及定律的使用范围一直是物理学家关心的问题。可以将 r^{-2} 写作

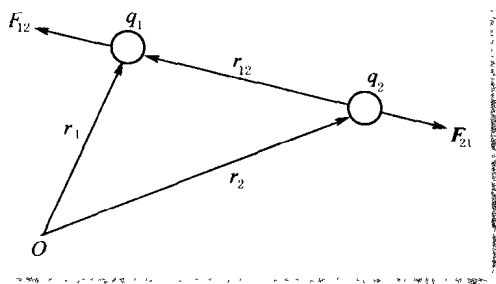


图 11.1 库仑定律

$$\frac{1}{r^{2+\epsilon}}$$

库仑定律是否是严格的平方反比关系,由 ϵ 是否为零来验证。现代实验表明:

$$\epsilon \leqslant (2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$$

而现代理论研究指出,有限的 ϵ 值是和光子质量的有限值相联系的,假如库仑定律偏离了平方反比关系,光子将有有限的静止质量。

11.2 电场和电场强度

11.2.1 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:

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

电场的物质性体现在:①给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,电场力做功,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。但电场是一种特殊的物质,电场与实物之间的显著不同在于电场具有可叠加性。

11.2.2 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,其电量必须很小,以避免由于它的引入而对源电荷产生影响;其次,其几何尺寸也必须很小,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 作用的电场力,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

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} \quad (11.2.1)$$

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。电场强度 $\mathbf{E}$ 是一个矢量。在国际单位制中,场强的单位为 $\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$ 或 $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

由(11.1.2)式可得真空中点电荷 q 的场强

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} \mathbf{r} \quad (11.2.2)$$

由此可以看出,在距点电荷 q 距离相等的球面上所有点的电场大小相等,即点电荷的电场具有球对称性。

11.2.3 电场线

静电场是矢量场,静电场中各点的场强,不仅方向可以不同,而且大小一般是空间坐标的矢量函数。为了使电场的分布形象化,表达某一点电场的方向和大小可以采用电场线($\mathbf{E}$ 线)的概念。

首先,规定电场线上任意一点的切线给出该点场强的方向,即

$$\frac{dx}{E_x} = \frac{dy}{E_y} = \frac{dz}{E_z} \quad (11.2.3)$$

其次,使垂直通过某点处单位截面的电场线数目正比于该点场的大小。

电场线具有以下性质:电场线不会中断,不会相交,不会形成闭合曲线。它发自正电荷而终止于负电荷。电场线较密集处,电场强度也较大。

下面,我们来求真空中点电荷周围的电场线方程。点电荷的电场为:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} (x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k})$$

在 x - y 平面,有

$$\frac{dy}{dx} = \frac{E_y}{E_x} = \frac{y}{x}$$

这样得到曲线族的方程为

$$y = kx$$

再根据通过某点处单位截面的电场线数目正比于该点场的大小的规定和点电荷电场的对称性,得到点电荷的电场线是从点电荷均匀辐射出的一族直线,请看图 11.2 所示的演示。

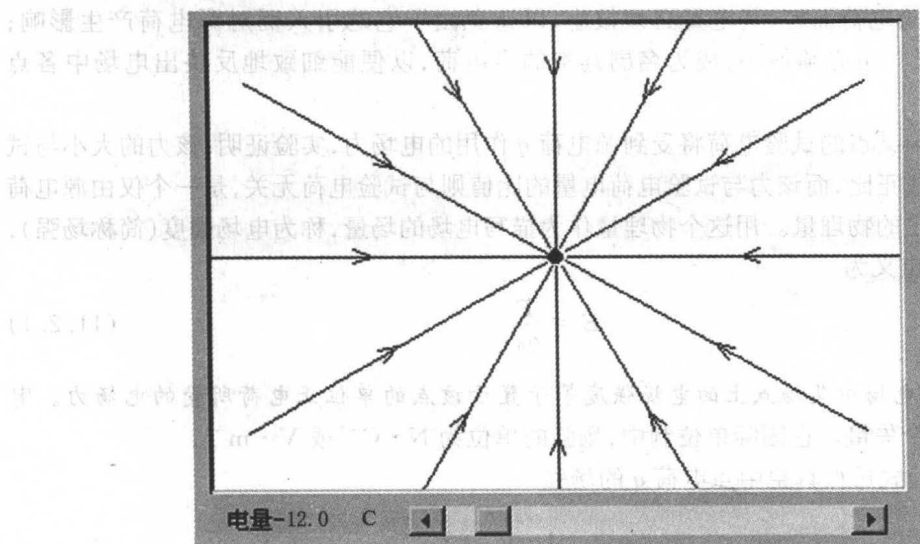


图 11.2 点电荷的电场线

11.2.4 场强的计算

根据静电力的叠加原理和场强的定义,电场中任意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

$$\mathbf{E} = \sum_i \mathbf{E}_i \quad (11.2.4)$$

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) 点电荷系电场中的场强

如图 11.3 所示,设各点电荷 q_1 、 q_2 、 q_3 、 $\cdots$ 指向 P 点的位置矢量分别为 $\mathbf{r}_1$ 、 $\mathbf{r}_2$ 、 $\mathbf{r}_3$ 、 $\cdots$, 则空间任意 P 点处的电场强度为

$$\mathbf{E} = \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^3} \mathbf{r}_i \quad (11.2.5)$$

(2) 任意带电体(连续带电体)电场中的场强

将带电体分成很多元电荷 dq , 先求出它在任意场点 P 的场强

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

对场源求积分,可得总场强

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^3} \mathbf{r} \quad (11.2.6)$$

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

$$\lambda_e = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta l} = \frac{dq}{dl}$$

$$\sigma_e = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta S} = \frac{dq}{dS}$$

$$\rho_e = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V} = \frac{dq}{dV}$$

因此

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_l \frac{\lambda_e dl}{r^3} \mathbf{r} \quad (11.2.7a)$$

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iint_s \frac{\sigma_e dS}{r^3} \mathbf{r} \quad (11.2.7b)$$

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint_v \frac{\rho_e dV}{r^3} \mathbf{r} \quad (11.2.7c)$$

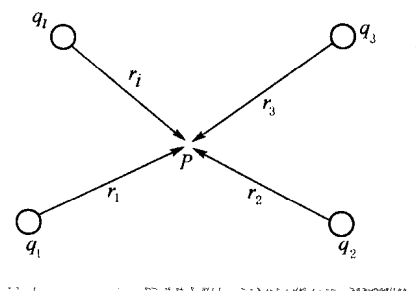


图 11.3 点电荷系的电场

11.2.5 电偶极子

等量异号电荷 $+q$ 和 $-q$,相距为 l ,该带电体系为电偶极子。用 $\boldsymbol{l}$ 表示从 $-q$ 到 $+q$ 的矢量线段,定义电偶极矩为

$$\boldsymbol{p} = q\boldsymbol{l} \quad (11.2.8)$$

(1) 电偶极子中垂线上距离中心较远处一点的场强

如图 11.4 所示,

$$\boldsymbol{E}_+ = \frac{q\boldsymbol{r}_+}{4\pi\epsilon_0 r_+^3}$$

$$\boldsymbol{E}_- = -\frac{q\boldsymbol{r}_-}{4\pi\epsilon_0 r_-^3}$$

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_+ + \boldsymbol{E}_- = \frac{q\boldsymbol{r}_+}{4\pi\epsilon_0 r_+^3} - \frac{q\boldsymbol{r}_-}{4\pi\epsilon_0 r_-^3}$$

因 $r \gg l$,有 $|\boldsymbol{r}_+| \approx |\boldsymbol{r}_-| \approx |\boldsymbol{r}|$,所以

$$\boldsymbol{E} \approx \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} (\boldsymbol{r}_+ - \boldsymbol{r}_-) = \frac{-q\boldsymbol{l}}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{-\boldsymbol{p}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (11.2.9)$$

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。

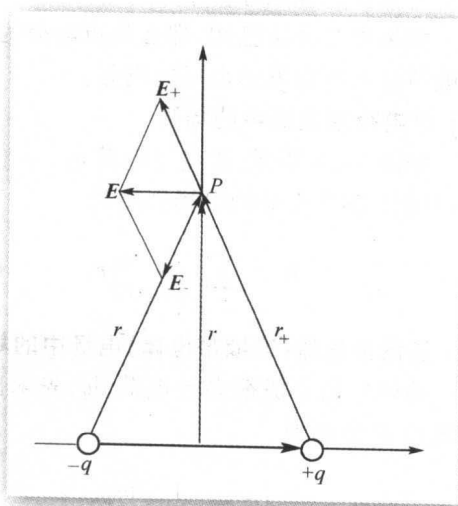


图 11.4 电偶极子中垂线上的场强

(2) 电偶极子延长线上距离中心较远处一点的场强

如图 11.5 所示, $\boldsymbol{r}$ 是从电偶极子中心到场点的矢量,矢量端点处的场强

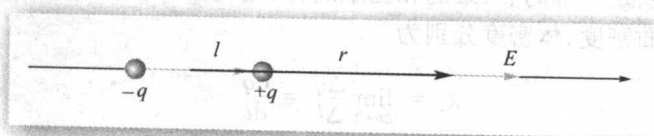


图 11.5 电偶极子延长线上的场强

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_+ + \boldsymbol{E}_- = \left[\frac{q}{4\pi\epsilon_0 (r - l/2)^2} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 (r + l/2)^2} \right] \boldsymbol{i}$$

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

$$\boldsymbol{E} = \frac{2\boldsymbol{p}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (11.2.10)$$

电偶极子延长线上一点的场强与电偶极子电偶极矩的两倍成正比,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。

(3) 电偶极子在空间任意一点产生的电场