

面向21世纪普通高等教育规划教材

P U T O N G W U L I X U E

普通物理学 (下册)

主 编 王殿元 谢卫军



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

面向 21 世纪普通高等教育规划教材

普通物理学

(下册)

主 编 王殿元 谢卫军
副主编 潮兴兵 余傲秋
编 者 王殿元 余剑敏 潮兴兵 徐高平
刘坚强 黄天成 罗江龙 谢卫军



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书是根据教育部最新发布的《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求(正式报告稿)》,借鉴国内外优秀大学物理教材,结合多年教学改革与实践经验,由多名富有教学经验的一线教师编写而成的。在内容编排上,充分保证了新“基本要求”中 A 类知识点,同时对 B 类知识点亦有选择性地适当拓展。

全书分上、下两册,上册包括力学、机械振动和机械波、热学,其中,力学部分增加了流体力学和狭义相对论;下册包括电磁学、光学和近代物理学,其中光学中增加了几何光学,在近代物理学中增加了核物理与粒子物理简介。每章后面附有习题及阅读材料,书后附有习题的参考答案。

全书思路清晰、语言简练、知识系统、结构合理,重物理思想和物理图像,可读性和趣味性都很强,可作为普通高等院校理科、工科和医科等各专业大学物理课教材,并可兼作函授、夜大、网络教育、高职高专及高等自学考试的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

普通物理学. 下册/王殿元,谢卫军主编. —上海:同济大学出版社,2008.9

面向 21 世纪普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5608-3824-3

I. 普… II. ①王…②谢… III. 普通物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 123176 号

面向 21 世纪普通高等教育规划教材

普通物理学(下册)

主 编 王殿元 谢卫军

责任编辑 张 莉 责任校对 徐春莲 封面设计 潘向葵

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787 mm×960 mm 1/16

印 张 18

印 数 1-5100

字 数 360 000

版 次 2008 年 9 月第 1 版 2008 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-3824-3/O·326

定 价 28.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前 言

物理学是一门以实验为基础的自然科学,是高等学校理工科各专业学生重要的通识教育必修课之一.该课程所教授的基本概念、基本理论和基本方法是构成学生科学素养的重要组成部分,是一个科学工作者和工程技术人员所必备的基本技能.同时,大学物理课程在培养学生树立科学的世界观,增强学生分析问题和解决问题的能力,培养学生的探索精神和创新意识等方面,具有其他课程不能替代的重要作用.

本书是根据教育部最新发布的《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求(正式报告稿)》(以下简称“基本要求”),借鉴国内外优秀大学物理教材,结合多年教学改革与实践经验,由多名富有教学经验的一线教师编写而成的.总的说来,本书在编写的过程中力求做到以下几点:

(1) 在内容编排上,充分保证了新“基本要求”中 A 类知识点,特别是重要章节,不惜重墨缕述;同时对 B 类知识点,亦根据需要,有选择性地作适当拓展.

(2) 在内容叙述上,重物理学基本知识、基本概念、基本原理和定律的清晰阐述以及物理图像的明确揭示,而轻定理和定律的复杂数学推导.旨在使读者从中领会一些物理学的思想和方法.

(3) 在阅读材料选择上,以联系工程技术实际和科技前沿为原则,反映近代物理成就及其在科学和技术领域中的应用,力求激发学生对物理等自然学科的兴趣.

(4) 适当考虑到双语教学的需要,在书中首次出现的重要物理名词加了英文注释,以适应不同高校教师和学生的需要.

全书分上、下两册出版,上册包括第 1 篇力学,第 2 篇机械振动和机械波,第 3 篇热学;下册包括第 4 篇电磁学,第 5 篇光学和第 6 篇近代物理学.书中除每章之后的阅读材料供学生选读外,凡冠有 * 号的章节可供教师根据课时数和专业的需要选用.

本书由王殿元、谢卫军主编,潮兴兵、余傲秋副主编,参加编写的人员有王殿元、余剑敏、潮兴兵、徐高平、刘坚强、黄天成、罗江龙、谢卫军.

在本书的编写过程中,得到编者所在学校领导们的大力支持.同时,在编写时参阅了有关书籍和文献,在此一并表示诚挚的谢意.

由于本书的编写比较仓促,也限于编者的学术水平,书中难免存在错漏之处,望老师和同学们在使用过程中多提宝贵意见,我们将在今后的再版中加以纠正,使教材日趋完善.

编 者

2008年6月

目 录

第4篇 电磁学

13 真空中的静电场	2
13.1 电荷 库仑定律	2
13.1.1 电荷	2
13.1.2 库仑定律	2
13.2 电场 电场强度	3
13.2.1 电场	3
13.2.2 电场强度	4
13.2.3 电场强度叠加原理	4
13.3 电通量 静电场的高斯定理	9
13.3.1 电场线	9
13.3.2 电通量	9
13.3.3 高斯定理	11
13.4 静电场的环路定理	14
13.5 电势能 电势	15
13.5.1 电势能	15
13.5.2 电势	15
13.5.3 电势叠加原理	15
13.6 电场强度与电势的关系	17
13.6.1 等势面	17
13.6.2 电场强度与电势的关系	17
阅读材料(13) 卡文迪许关于点电荷相互作用力的研究	18
习题 13	19
14 静电场中的导体和电介质	22
14.1 静电场中的导体	22
14.1.1 导体的静电平衡	22
14.1.2 静电屏蔽	23
14.2 静电场中的电介质	23

14.2.1	电介质的极化	23
14.2.2	电极化强度	24
14.2.3	有介质时的高斯定理	25
14.3	电容和电容器	26
14.3.1	孤立导体的电容	26
14.3.2	电容器	26
14.3.3	电容器的联接	28
14.4	静电场的能量	30
14.4.1	点电荷系的相互作用能	31
14.4.2	电容器的能量	31
14.4.3	静电场的能量	32
	阅读材料(14) 压电效应 驻极体	33
	习题 14	36
15	稳恒磁场	38
15.1	稳恒电流	38
15.1.1	电流与电流密度	38
15.1.2	电流的连续方程与稳恒条件	39
15.1.3	电源 电动势	40
15.2	磁场 磁感应强度	40
15.2.1	磁的基本现象	40
15.2.2	磁场 磁感应强度	41
15.2.3	磁感应线	41
15.3	毕奥-萨伐尔定律	42
15.3.1	毕奥-萨伐尔定律	42
15.3.2	运动电荷的磁场	45
15.4	磁场中的高斯定理	45
15.4.1	磁通量	45
15.4.2	磁场中的高斯定理	45
15.5	安培环路定理	46
15.6	磁场对运动电荷的作用	49
15.6.1	带电粒子在磁场中的运动	49
15.6.2	应用举例	50
15.7	磁场对载流导线的作用	53
15.7.1	安培力	53

15.7.2 载流线圈在磁场中所受的力矩	53
15.8 磁场中的磁介质	54
15.8.1 磁介质 磁化强度	54
15.8.2 磁介质中的高斯定理和安培环路定理	57
15.8.3 铁磁质	59
阅读材料(15) 有趣的生物磁	60
习题 15	62
16 电磁感应 电磁波	65
16.1 电磁感应	65
16.2 感应电动势	66
16.2.1 动生电动势	66
16.2.2 感生电动势	67
16.3 自感和互感	68
16.3.1 自感	68
16.3.2 互感	69
16.4 磁场的能量	70
16.5 位移电流 全电流安培环路定理	71
16.5.1 位移电流	71
16.5.2 全电流安培环路定理	73
16.6 麦克斯韦方程组	73
阅读材料(16) 科学家简介——法拉第	74
习题 16	75

第5篇 光 学

17 几何光学	81
17.1 几何光学基本原理	81
17.1.1 几何光学的基本概念	81
17.1.2 几何光学的基本定律	82
17.1.3 光路可逆性原理 全反射	83
17.1.4 费马原理	83
17.2 平面反射和折射成像	85
17.2.1 平面反射成像	85
17.2.2 平面折射成像	86
17.3 球面反射和折射成像	87

17.3.1	符号法则	88
17.3.2	近轴光线条件下球面反射的物像公式	88
17.3.3	近轴光线条件下球面折射的物像公式	90
17.3.4	横向放大率	91
17.4	薄透镜成像	92
17.4.1	近轴条件下薄透镜的物像公式	92
17.4.2	薄透镜成像的作图法	94
	阅读材料(17) 大气奇景的形成	97
	习题 17	98
18	光的干涉	100
18.1	光源和光的相干性	100
18.1.1	光源	100
18.1.2	光的相干性	102
18.2	分波阵面干涉	104
18.2.1	杨氏双缝干涉	104
18.2.2	菲涅耳双面镜干涉	106
18.2.3	洛埃镜干涉	107
* 18.2.4	空间相干性	107
18.3	分振幅干涉	108
18.3.1	薄膜干涉	108
* 18.3.2	等倾干涉	112
18.3.3	等厚干涉	113
18.4	迈克耳孙干涉仪 时间相干性	118
18.4.1	迈克耳孙干涉仪的结构及原理	118
* 18.4.2	时间相干性	120
	阅读材料(18) 激光干涉仪	121
	习题 18	123
19	光的衍射	125
19.1	光的衍射	125
19.1.1	光的衍射现象	125
19.1.2	惠更斯-菲涅耳原理	126
19.1.3	菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射	128
19.2	夫琅禾费单缝衍射	129

19.2.1	单缝衍射实验装置	129
19.2.2	菲涅耳半波带法	130
19.2.3	单缝衍射图样分析	131
19.3	夫琅禾费圆孔衍射	134
19.3.1	夫琅禾费圆孔衍射	134
19.3.2	光学仪器分辨率	135
19.4	光栅衍射	138
19.4.1	衍射光栅	138
19.4.2	光栅衍射条纹	139
19.4.3	光栅光谱	141
19.5	X射线的晶体衍射	143
19.5.1	X射线	143
19.5.2	劳厄实验	144
19.5.3	布拉格方程	144
	阅读材料(19) 全息照相	147
	习题 19	150
20	光的偏振	152
20.1	光的横波特性 自然光和偏振光	152
20.1.1	光的横波特性	152
20.1.2	自然光与偏振光	153
20.2	偏振片 马吕斯定律	154
20.2.1	偏振片	154
20.2.2	起偏与检偏	156
20.2.3	马吕斯定律	156
20.3	反射光和折射光的偏振	157
20.4	光的双折射	160
20.4.1	双折射现象	160
* 20.4.2	波片	162
	阅读材料(20) 液晶	164
	习题 20	166
第 6 篇 近代物理学		
21	早期量子论	170
21.1	黑体辐射和普朗克量子假设	170

21.1.1	黑体辐射	171
21.1.2	普朗克量子假设	174
21.2	光的量子性	176
21.2.1	光电效应	176
21.2.2	爱因斯坦光子假说	179
21.3	康普顿散射	181
21.4	玻尔氢原子理论	185
21.4.1	经典氢原子模型	185
21.4.2	氢原子光谱	187
21.4.3	玻尔氢原子理论	189
	阅读材料(21) 量子理论的发展	193
	习题 21	194
22	量子力学简介	196
22.1	微观粒子的波粒二象性和不确定关系	196
22.1.1	微观粒子的波粒二象性	197
22.1.2	不确定关系	200
22.2	波函数及其统计解释	204
22.2.1	概率波	205
22.2.2	态叠加原理	209
22.3	薛定谔方程	210
22.4	一维定态问题	215
22.4.1	一维无限深方势阱	216
22.4.2	隧道效应	220
22.4.3	一维谐振子	222
22.5	原子中的电子	224
22.5.1	氢原子定态	225
22.5.2	电子自旋	229
22.5.3	泡利原理 多电子原子的壳层结构	231
	阅读材料(22) 激光	235
	习题 22	237
23	核物理与粒子物理简介	238
23.1	原子核的基本性质	238
23.1.1	原子核的组成	238

23.1.2	核的自旋和磁距	240
23.1.3	核力	241
23.1.4	结合能	242
23.2	放射性衰变和核反应	245
23.2.1	放射性衰变	245
23.2.2	核反应	249
23.2.3	核裂变和核聚变	253
23.3	粒子的分类以及粒子间的相互作用	256
23.3.1	粒子的分类	257
23.3.2	四种基本相互作用	258
23.4	守恒定律	261
23.4.1	重子数和轻子数	261
23.4.2	同位旋 I 和同位旋 z 分量 I_z	262
23.4.3	奇异数	262
23.4.4	超荷	262
23.4.5	宇称	263
	阅读材料(23) 核磁共振	265
	习题 23	266
习题参考答案		268
参考文献		274

第 4 篇 电 磁 学

电磁学是研究电荷、电场与磁场的相互作用现象及其规律和应用的物理学分支学科。由于电磁现象的普遍存在和广泛应用,电磁学已成为自然科学和技术科学的重要基础,无线电电子学、电工学、材料科学都是以电磁学为基础建立和发展起来的。

人类对电磁现象及其规律和本质的认识与探索经历了漫长的历史过程。早在中国古代,就已有“慈石(磁石)召铁”等记载,并发明了司南勺(指南针前身)。在西方,古希腊哲学家塞利斯(Thales)就记载了木头摩擦过的琥珀能吸收革屑等轻小物体,以及天然磁石吸引铁的现象。18 世纪,电现象的研究有了迅速的发展,如区别导体和绝缘体,认识电荷的种类及性质,发明避雷针、莱顿瓶、伏打电池等,特别是库仑定律的建立,标志着电学步入了科学的行列。

1820 年,奥斯特发现的电流磁效应,揭示了电和磁之间的联系,宣告了电磁学的诞生。紧接着毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律、安培定律相继提出,1826 年欧姆定律建立,为电路的研究奠定了基础。1831 年前后,亨利和法拉第分别独立地发现电磁感应现象,从另一侧面揭示了电磁现象之间的联系。法拉第还发现了电解定律、磁光效应,验证了电荷守恒定律及电的同一性,研究了极化和静电感应等现象,发明了世界上第一台直流发电机。

1865 年,麦克斯韦在前人工作的基础上,提出有旋电场和位移电流假说,并建立了电磁场理论的完备方程组——麦克斯韦方程组,他预言的电磁波被赫兹的实验所证实。1896 年,洛伦兹提出电子论,将麦克斯韦理论应用到了微观领域,并把物质的电磁性质归结为原子中电子的效应,进一步解释了电、磁、光现象。1905 年,爱因斯坦建立的狭义相对论,证明了麦克斯韦方程组满足洛伦兹变换,并在任何惯性系中都有相同的形式,验证了电场和磁场、电力和磁力的统一,使经典电磁理论达到了完善的地步。

13 真空中的静电场

任何电荷都在其周围空间激发电场,相对观察者静止的电荷所激发的电场称为静电场(electrostatic field).静电场是电磁学中非常重要的矢量场之一,是研究电磁学的基础,本章将研究真空中静电场的基本性质与规律.

13.1 电荷 库仑定律

13.1.1 电荷

近代物理学认为,电荷(electric charge)是某些基本粒子(如电子、质子、 μ 子等)的一种属性.当物体经摩擦后,具有了吸引轻小物体的性质,我们就说物体带了电荷,带电荷物体称为带电体.电荷具有以下特性:

(1) 自然界只存在两种电荷:正电荷和负电荷.人们把丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷称为正电荷,把毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷称为负电荷.实验表明同种电荷相排斥,异种电荷相吸引.物体所带电荷的多少称为电荷量,简称电量(electric quantity),用 Q 或 q 表示.电量的国际单位为库仑,记作 C.

(2) 电荷是量子化的.实验表明,自然界中的任何带电体的电量都是电子电量 e 的整数倍,即电量是不连续的,这种现象称为电荷的量子化.1964 年,盖尔曼提出的一种基本粒子——夸克,其电荷为 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$,但至今我们未从实验上观测到自由夸克.即便发现了带分数电荷的粒子,也不破坏电荷的量子性,仅仅是将现在所测到的最小电量变得更小而已.

(3) 电荷存在对称性.粒子物理研究表明,对于某种带正电荷的基本粒子,必然存在与之对应的、带负电荷的另一种基本粒子.如电子和正电子,质子和反质子, π^+ 介子和 π^- 介子,等等.

(4) 电荷守恒.一个孤立系统,无论发生怎样的过程,电荷的代数和是守恒的,电荷不能被创造,也不能被消灭,这就是电荷守恒定律.电荷守恒是自然界最普遍的规律之一,对核反应同样成立.

13.1.2 库仑定律

直到 18 世纪中叶,人们对电磁现象的研究基本上还是处于定性的观察探索

阶段. 1750 年前后, 德国科学家埃皮诺斯发现, 当发生相互作用的电荷之间的距离缩短时, 两者之间的吸引力和排斥力便增加, 但遗憾的是他没有继续对其进行定量的研究. 1785 年, 法国物理学家库仑设计了精确的扭秤, 研究了两个可视为点电荷的静止带电体在真空中的相互作用规律, 称为库仑定律(coulomb law). 库仑定律开创了电磁学史上定量研究的先河, 为静电学的建立奠定了基础. 这一定律的表述如下: 真空中两个静止点电荷之间的相互作用力 F 与它们所带电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比, 与它们之间距离 r 的平方成反比, 作用力的方向沿它们的连线, 同种电荷相斥, 异种电荷相吸. 其数学表达式为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} e_r, \quad (13-1)$$

式中 e_r ——由施力电荷指向受力电荷方向的单位矢量;

ϵ_0 ——真空介电常数, 其实验精确值为 $\epsilon_0 = 8.854\ 187\ 818 \times 10^{-12}$
 $C^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$.

需要说明的是, 库仑定律的适用对象为静止的点电荷, 当点电荷发生运动时, 由库仑定律所预言的相互作用力需要进行修改. 另外, 库仑定律和万有引力定律形式非常相似, 但是静电力和万有引力是不同性质的力, 一种是源于物质的电量, 另一种是源于物质的引力质量, 静电力的强度约是万有引力的 2.3×10^{39} 倍; 而且, 静电力可以是引力, 也可以是斥力, 可以被屏蔽, 但万有引力只能是引力, 无法屏蔽.

13.2 电场 电场强度

13.2.1 电场

库仑定律给出了两个点电荷之间相互作用的定量关系, 但并未指明互不接触的两个点电荷间的作用力是通过什么方式传递的. 关于这个问题, 历史上曾经有过两种不同观点的长期争论. 一种观点认为, 电荷间的相互作用力是不需要任何媒介传递的, 也不需要时间的, 这种作用称为“超距作用”(action at a distance); 另一种观点认为, 不存在“超距作用”, 电荷间的作用也是通过一种看不见、摸不着的“以太”介质来传递的. 但是, 1887 年迈克耳孙-莫雷实验否定了“以太”的存在.

近代物理的观点认为, 任何电荷都在其周围空间激发电场, 进入这个电场的带电体都会受到这个电场的作用. 因此, 电荷之间的相互作用, 是通过其中一个电荷所激发的电场对另一个电荷的作用来传递的, 这种作用传递速度约为 $3 \times$

$10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 这种观点称为场的观点, 该观点的正确性已被理论和大量实验所证明.

电磁场是一种特殊状态的物质, 分布在一定范围的空间里, 并和物质一样具有能量、动量、质量等属性.

13.2.2 电场强度

为了定量研究电场对电荷作用的性质, 我们引入一试验点电荷 q_0 , 它满足以下两个条件: (1) 电荷的几何线度很小, 以至于可以看作点电荷, 以确定电场中各点的性质; (2) 其电量必须足够小, 以免影响原电场的分布. 为简便起见, 我们选取试验电荷为正电荷 $+q_0$.

将试验电荷放入电场的不同位置, 发现其所受电场力 $\boldsymbol{F}$ 一般是不同的. 当改变置于电场中同一点的试验电荷电量时, 发现电场力的大小也改变, 但 $\frac{\boldsymbol{F}}{q_0}$ 不变, 为一个不变的矢量. 因此, 该矢量反映了该点处电场的性质, 我们定义该矢量为电场的电场强度 (electric field intensity), 简称场强, 用 $\boldsymbol{E}$ 表示, 即

$$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{F}}{q_0}. \quad (13-2)$$

式(13-2)表明, 静电场中某一点的电场强度 $\boldsymbol{E}$ 是一个矢量, 其大小等于单位正电荷在该点处所受电场力的大小, 其方向与正电荷在该点所受电场力方向相同.

在国际单位制中, 电场强度的单位为牛顿每库仑, 记为 $\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$, 另一常用单位为伏特每米, 记为 $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$.

13.2.3 电场强度叠加原理

如果电场是由几个点电荷共同激发的, 则根据电场力的叠加原理易得, 点电荷系在空间某一点产生的总场强, 等于点电荷系中每一个点电荷单独存在时在该点激发场强的矢量和, 这一结论称为电场强度叠加原理 (principle of superposition of electric field intensity). 其数学表达式为

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_1 + \boldsymbol{E}_2 + \cdots + \boldsymbol{E}_n = \sum_i \boldsymbol{E}_i = \sum_i \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \boldsymbol{e}_{r_i}, \quad (13-3)$$

式中, $\boldsymbol{e}_{r_i}$ 表示场点对各个源电荷 $q_1, q_2, \cdots, q_n$ 的位矢 $r_1, r_2, \cdots, r_n$ 方向上的单位矢量.

对于电荷连续分布的带电体, 可以设想将其分割成许多个体电荷元, 这些电荷元都可被近似为点电荷 dq , 因此体电荷元 dq 的电场强度为

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{e}_r. \quad (13-4)$$

式中 r ——电荷元 dq 到场点 P 的矢径大小;

$\mathbf{e}_r$ —— dq 指向场点 P 的单位矢量.

根据电场强度的叠加原理,整个带电体在 P 点的场强则可表示为

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\mathbf{e}_r}{r^2} dq. \quad (13-5)$$

若带电体的电荷体密度为 ρ , 电荷元体积为 dV , 则 $dq = \rho dV$; 对于面带电体和线带电体, 则 dq 分别为 $dq = \sigma dS$ 和 $dq = \lambda dl$, 其中, σ 为电荷面密度, λ 为电荷线密度.

例 13-1 两个等量异号的点电荷 $+q$ 和 $-q$ 组成的点电荷系, 当它们之间的距离 l 比起所讨论问题中涉及的距离 r 小得多时, 这对点电荷系称为电偶极子 (electric dipole). 由负电荷 $-q$ 指向正电荷 $+q$ 的矢径 $\mathbf{l}$ 称为电偶极子的轴. $q\mathbf{l}$ 为电偶极矩 (electric dipole moment), 简称电矩, 用 $\mathbf{p}$ 表示, 即 $\mathbf{p} = q\mathbf{l}$. 试计算电偶极子轴线延长线上一点 A 和轴的中垂面上一点 B 的场强, 设 A 点和 B 点到两电荷连线中点 O 的距离都是 r .

解 (1) 求 A 点的场强

选取如图 13-1 所示的坐标, A 点到点电荷 $+q$ 和 $-q$ 的距离分别为 $r - \frac{l}{2}$ 和 $r + \frac{l}{2}$, 所以, 点电荷 $+q$ 和 $-q$ 在 A 点产生场强的大小分别为

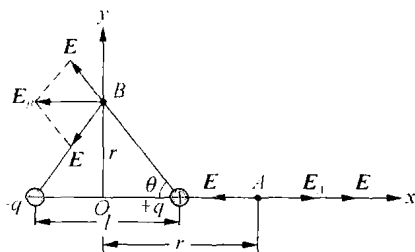


图 13-1 电偶极子的场强

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

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

E_+ 沿 x 轴向右, E_- 沿 x 轴向左, 故总场强 E_A 的大小为

$$\begin{aligned} E_A &= E_+ - E_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - \frac{1}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} \right] \\ &= \frac{2qlr}{4\pi\epsilon_0 \left[\left(r - \frac{l}{2}\right)^2 \left(r + \frac{l}{2}\right)^2 \right]}. \end{aligned}$$