

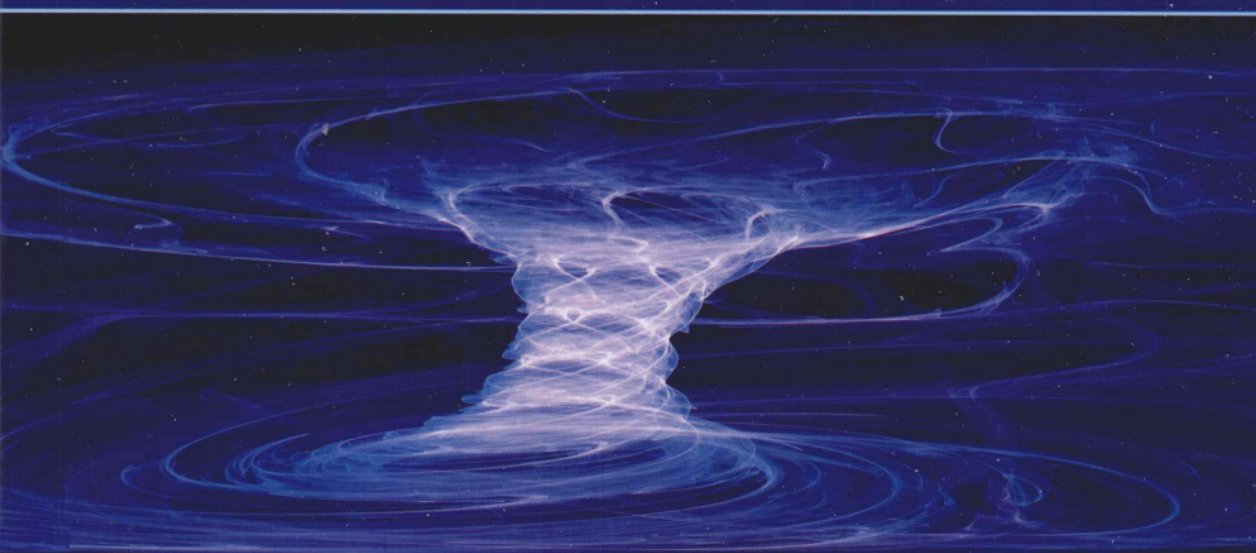


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理教程

(下册)

上海交通大学物理教研室 编



DAXUE WULI JIAOCHENG



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

大学物理教程

(下册)

上海交通大学物理教研室 编

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书由上海交通大学物理教研室教师根据多年教学经验和实践编写而成。本书内容简练,重点突出,基础扎实。全书分为上、下两册。上册内容包括:力学、机械振动与机械波和热物理学;下册内容包括:电磁学、波动光学和量子物理学。

本书为非物理专业的大学物理教程,可作为高等院校工科各专业的大学物理教科书,也可作为综合性大学和师范院校非物理专业的教材或参考书。

读者联系邮箱:wuli_sjtu@126.com

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程. 下册/上海交通大学物理教研室编.

—上海:上海交通大学出版社,2011

ISBN 978-7-313-07229-0

I. 大... II. 上... III. 物理学—高等学校—
教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 069510 号

大学物理教程(下册)

上海交通大学物理教研室 编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

上海交大印务有限公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:23.75 字数:447 千字

2011 年 7 月第 1 版 2011 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-07229-0/O 定价:40.00 元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-54742979

前言 Foreword

根据 2004 年教育部颁发的“非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求”，为了适应物理学和科学技术的发展，结合多年的教学实践，我们编写了这套大学物理教材。在编写过程中，我们借鉴了部分国内外新版优秀教材，力求贯彻理论体系的少而精、理论联系实际的原则，在做到加强理论基础的叙述、加强对学生分析与实际问题能力培养的同时，增加对近现代物理知识和观点的介绍。在教材编写过程中，我们注重把培养学生具有科学的思维能力、辩证分析的能力和科学的研究方法作为目标。同时，我们还注重加强工科大学生的科学素养的培养，拓宽学生的科学视野。

全书采用国际单位制，书中物理量的名称和表示符号尽量采用国家现行标准。

全书分为上、下两册。上册包括：力学、机械振动与机械波和热物理学。下册包括：电磁学、波动光学和量子物理学。本书另配有一套完整的电子教案，与主教材内容对应。电子教案提供 PowerPoint 格式的文件，在此基础上，可以进行二次开发并形成教师具有个人特色的电子教案。

本书内容全部讲授大约需要 140 学时，教师可以根据学时要求选讲其中部分内容。

本书由高景主编，参加编写工作的有：袁晓忠（第一、二、三章），高景（第四、五章和第十八、十九、二十章），董占海（第六、七、八、九、十、十一章和第二十一、二十二、二十三、二十四、二十五章），李铜忠（第十二、十三、十四、十五、十六、十七章和第二十六章）。上海交通大学出版社的同志为编辑、出版本书做了大量的工作，编者对此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，对书中错误之处我们衷心希望广大读者提出宝贵意见。

编 者

2010 年 12 月

目 录 Contents

第 12 章 真空中的静电场	1
12.1 电学基本概念	1
12.1.1 电荷	1
12.1.2 电荷守恒	2
12.1.3 电荷量子化	2
12.1.4 点电荷模型	3
12.1.5 库仑定律	3
12.1.6 电力叠加原理	4
12.2 电场与电场强度	5
12.2.1 电场	5
12.2.2 电场强度	5
12.2.3 电场强度的计算	6
12.3 高斯定理	10
12.3.1 电场线	10
12.3.2 电通量	11
12.3.3 高斯定理	12
12.4 环流定理 电势	16
12.4.1 电场力做功	16
12.4.2 电势能和电势	17
12.4.3 电势叠加原理	19
12.5 电势与电场强度的微分关系	21
12.5.1 等势面	21
12.5.2 电势与电场强度的微分关系	22
习题 12	25
思考题 12	30

第 13 章 静电场与物质的相互作用	33
13.1 静电场中的导体	33
13.1.1 导体的静电平衡	34
13.1.2 导体电荷分布	34
13.2 静电场中的电介质	39
13.2.1 电介质与电场的相互作用	40
13.2.2 极化强度和极化电荷	41
13.2.3 介质中静电场的基本规律	44
13.2.4 介质交界面两侧电场的关系	47
13.3 电容和电容器	50
13.3.1 孤立导体的电容	50
13.3.2 电容器的电容	50
13.3.3 电容器的连接	52
13.4 静电场的能量	53
13.4.1 带电体系的静电能	53
13.4.2 点电荷系的静电能量	54
13.4.3 带电电容器的静电能	56
13.4.4 静电场的能量	57
习题 13	59
思考题 13	63
 第 14 章 电流与磁场	 66
14.1 电流与电源	66
14.1.1 电流、稳恒电场与电源	66
14.1.2 电流强度和电流密度	68
14.2 磁场的磁感应强度	70
14.3 毕奥-萨伐尔定律	70
14.4 磁场的基本规律	74
14.4.1 磁感应强度线与磁通量	74
14.4.2 磁场的高斯定理	75
14.4.3 安培环路定理	76
14.5 磁场对电流的作用	82
14.5.1 安培力公式	82
14.5.2 载流线圈在磁场中受到的作用	84

14.5.3	安培力的功	86
14.6	带电粒子的运动	87
14.6.1	运动带电粒子的磁场	87
14.6.2	带电粒子在均匀磁场中的运动	88
14.6.3	霍尔效应	90
习题 14	.....	92
思考题 14	.....	98
第 15 章	磁场与物质的相互作用	102
15.1	顺磁性和抗磁性	103
15.1.1	原子中电子的磁矩	103
15.1.2	处于磁场中的核外电子	103
15.1.3	抗磁质和顺磁质	104
15.2	磁化强度和磁化电流	105
15.2.1	磁化强度矢量	105
15.2.2	磁化电流	106
15.3	介质中磁场的基本规律	107
15.3.1	介质中磁场的高斯定理	108
15.3.2	介质中磁场的安培环路定理	108
15.3.3	介质交界面两侧磁场的关系	111
15.4	铁磁材料	111
15.4.1	铁磁材料的磁滞回线	111
15.4.2	铁磁现象的理论解释	113
15.4.3	铁磁材料的应用	114
习题 15	.....	115
思考题 15	.....	118
第 16 章	电磁感应	120
16.1	电磁感应定律	120
16.1.1	电磁感应现象	120
16.1.2	法拉第定律	122
16.2	动生电动势	125
16.3	感生电动势	129
16.3.1	感应电场与感生电动势	129

16.3.2	电子感应加速器	134
16.3.3	涡旋电场与涡电流	135
16.4	自感和互感	137
16.4.1	自感	137
16.4.2	互感	140
16.5	磁场能量	143
习题 16	.....	147
思考题 16	.....	153
第 17 章	电磁场与电磁波	156
17.1	麦克斯韦电磁理论	156
17.1.1	位移电流	156
17.1.2	麦克斯韦方程组	160
17.2	电磁波	161
17.2.1	电磁波波动方程	161
17.2.2	电磁波的性质	163
17.2.3	坡印廷矢量	164
17.2.4	电磁场的物质性	166
17.3	电磁波的产生	169
17.3.1	LC 振荡电路	169
17.3.2	电磁波的产生	171
17.3.3	赫兹实验	172
17.3.4	电磁波谱	173
习题 17	.....	176
思考题 17	.....	177
第 18 章	光的传播	179
18.1	光源	179
18.1.1	光源的发光机理	180
18.1.2	单色辐射和多色辐射	180
18.2	与光的传播有关的一些基本概念	181
18.2.1	光的直线传播和衍射	181
18.2.2	光速与折射率	182
18.2.3	波面与光程	182

18.3	光的反射与折射	183
18.3.1	费马原理	183
18.3.2	费涅尔公式	187
18.4	光在光纤中的传播	190
习题 18	.....	193
思考题 18	.....	194
第 19 章	光的偏振	195
19.1	偏振光与自然光	195
19.1.1	线偏振光	195
19.1.2	椭圆偏振光与圆偏振光	196
19.1.3	自然光	196
19.1.4	部分偏振光	197
19.2	偏振片、马吕斯定律	197
19.3	反射和折射时的偏振现象	199
19.4	晶体的双折射现象	200
19.5	偏振光的获得与检验	202
习题 19	.....	204
思考题 19	.....	205
第 20 章	光的干涉与衍射	208
20.1	光的相干性	208
20.2	惠更斯-菲涅尔原理	209
20.3	双缝干涉	211
20.3.1	杨氏双缝实验	211
20.3.2	光源宽度与单色性对干涉条纹的影响	215
20.4	薄膜干涉	219
20.4.1	等倾干涉条纹	219
20.4.2	等厚干涉条纹	221
20.4.3	迈克尔逊干涉仪	225
20.5	夫琅禾费衍射	227
20.5.1	单缝夫琅禾费衍射	227
20.5.2	双缝衍射	229
20.5.3	圆孔衍射、光学仪器的分辨本领	231

20.5.4	光栅衍射	233
20.5.5	衍射与信息	237
习题 20	.....	241
思考题 20	.....	247
第 21 章	量子力学的发展	250
21.1	普朗克的能量子假说	250
21.1.1	热辐射现象	250
21.1.2	黑体辐射的基本规律	252
21.1.3	普朗克的能量子假说	254
21.2	爱因斯坦的光量子假设	255
21.2.1	光电效应	255
21.2.2	爱因斯坦的光量子假设	257
21.2.3	康普顿效应	259
21.3	氢原子光谱、玻尔理论	263
21.3.1	氢原子光谱实验规律	263
21.3.2	经典原子模型的困难	265
21.3.3	玻尔理论	265
习题 21	.....	268
思考题 21	.....	269
第 22 章	量子力学的基本原理	273
22.1	波函数及统计解释	273
22.1.1	德布罗意物质波假设	273
22.1.2	物质波的实验验证	275
22.1.3	波函数	276
22.2	不确定关系	278
22.2.1	位置和动量不确定关系	279
22.2.2	能量和时间的不确定关系	282
22.3	态叠加原理	283
22.4	薛定谔方程	283
22.4.1	薛定谔方程的建立	284
22.4.2	定态薛定谔方程	286
22.5	力学量的算符表示	287

22.5.1	力学量的算符表示	287
22.5.2	算符的本征值问题	288
习题 22	.....	289
思考题 22	.....	290
第 23 章	定态问题	292
23.1	一维定态问题	292
23.1.1	一维无限深势阱中的粒子	292
23.1.2	一维谐振子(抛物线势阱)	297
23.1.3	一维散射问题	299
23.2	氢原子量子理论	301
23.2.1	氢原子的能量和角动量	302
23.2.2	氢原子电子几率密度	305
23.2.3	电子的自旋、泡利不相容原理	306
习题 23	.....	309
思考题 23	.....	311
第 24 章	量子力学的应用	313
24.1	量子力学的基本公设	313
24.2	激光	314
24.2.1	自发辐射、受激吸收和受激辐射	314
24.2.2	粒子数反转和光放大	316
24.2.3	激光器的工作原理	316
24.2.4	增益系数	319
24.2.5	激光的应用	319
24.3	量子信息	320
24.3.1	量子计算机	320
24.3.2	量子比特	321
24.3.3	量子纠缠	322
24.3.4	量子隐形传态	325
24.3.5	量子不可克隆原理	326
习题 24	.....	327
思考题 24	.....	327

第 25 章 固体量子理论简介	328
25.1 晶体	328
25.2 固体的能带结构	329
25.2.1 能带	329
25.2.2 能带的宽度	331
25.2.3 满带、导带和价带	331
25.2.4 导体、半导体和绝缘体	332
25.3 半导体的电子论	333
25.3.1 近满带和空穴	333
25.3.2 p 型半导体和 n 型半导体	334
25.3.3 p-n 结	336
25.4 超导现象	337
25.4.1 零电阻	337
25.4.2 完全抗磁性	338
25.4.3 临界磁场与临界电流	339
25.4.4 两类超导体	339
25.4.5 BCS 理论	340
习题 25	341
思考题 25	342
第 26 章 原子核物理和粒子物理简介	343
26.1 原子核的基本性质	343
26.1.1 原子核的组成	343
26.1.2 原子核的模型	345
26.1.3 核力和介子	346
26.2 原子核的量子性质	347
26.2.1 原子核的自旋	347
26.2.2 原子核的磁矩	348
26.2.3 核磁共振	349
26.3 原子核的放射性衰变	350
26.3.1 放射性衰变规律	350
26.3.2 α 衰变	352
26.3.3 β 衰变	353
26.3.4 γ 衰变	353

26.4	核裂变和核聚变	354
26.4.1	原子核的结合能	354
26.4.2	重核的裂变	355
26.4.3	轻核的聚变	357
26.5	粒子物理简介	358
26.5.1	粒子及其分类	359
26.5.2	强子的夸克模型	360
26.5.3	基本粒子的相互作用	363
26.5.4	粒子的对称性和守恒定律	364

第 12 章 真空中的静电场

电磁学是研究物质世界中电磁现象规律的学科,是物理学的一个重要内容。电磁学主要研究电荷(电流或运动电荷)产生电场(磁场)的规律,电场(磁场)对电荷(电流或运动电荷)的作用,电磁场与物质之间的相互作用关系,以及电场和磁场间的相互关系等。

实验表明,相对于观测者静止的电荷(简称为静电荷)间只有电相互作用。静电荷间电相互作用不是超距作用,而是通过电场来实现电相互作用的传递。电荷可以在空间产生电场,其他电荷在该电荷所产生的电场中要受到电场的作用。这就是电荷间电相互作用的物理机制。静电荷产生的电场称为静电场。本章将讨论静电场的基本规律。

在讨论静电场的基本规律之前,我们首先讨论电学的一些基本概念。

12.1 电学基本概念

12.1.1 电荷

当物体之间有电相互作用时,我们说这些物体处于带电状态,称其为带电体,简称为电荷。电荷是反映物质间发生电相互作用的一种属性,就像引力质量是反映物质间万有引力的属性一样,它与物质是不可分的。

很早以前人们就发现,用毛皮摩擦过的琥珀能够吸引羽毛、小纸片、头发等轻微物体(见图 12-1),我们就说琥珀和毛皮这两样物体都已处于带电状态。这种用摩擦使物体带电的方法称为摩擦起电。

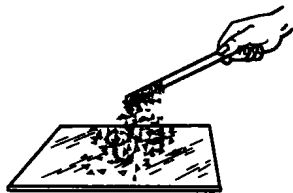


图 12-1

通过对带电体间相互作用规律的研究,人们发现电荷有两种:正电荷和负电荷。带同号电荷的物体间相互排斥,带异号电荷的物体间相互吸引。通过实验,根据物体间电相互作用强弱可以确定物体带电多少。表示物体带电多少的物理量称为电量,通常用 q 来表示。

国际单位制中,电量的单位为库仑,用 C 表示。需要说明的是,库仑是一个导出单位,而基本单位是电流强度的单位——安培(A),它们的关系是 $1\text{ C}=1\text{ A}\cdot\text{s}$,即 1 C 等于 1 A 的电流强度在 1 s 内流过某截面的电量。

12.1.2 电荷守恒

实验证明,在一个和外界没有电荷交换的系统中,正负电荷电量的代数和保持不变,与系统内的任何物理过程以及系统运动与否无关。这一性质称为电荷守恒定律。在微观粒子的反应过程中,反应前后的元电荷总数是守恒的,例如有下面这个方程:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$$

表明电子和正电子在相遇时将湮灭,转变为电中性的光子,保持总电荷守恒。如果一个光子与一个重原子核作用时,如光子能量足够大,就可以产生正负电子对,即一个正电子和一个负电子,用如下方程表示:

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

此过程中仍然保持电荷守恒。电荷守恒定律与能量守恒定律、角动量守恒定律一样,是自然界中的基本定律。

物体处于电中性时,我们认为物体带有等量的正负电荷。现代物理学认为,宏观物体都是由分子、原子组成的。任何化学元素的原子,从微观上看都是由带正电的原子核和若干带有负电的电子组成。原子内电子所带的负电荷和原子核所带的正电荷的代数和为零,则原子是电中性的。因此,由电中性原子结合成的分子是电中性的,电中性分子构成的物质也是电中性的。

不同原子束缚其外围电子的能力是不同的,对电子束缚弱的原子易失去电子而变成带正电的离子,对电子束缚强的原子易得到电子而变成带负电的离子。摩擦起电过程实际上是电荷从一个物体转移到另一个物体的过程,虽然两物体的电中性状态都被打破,都处于带电状态,但是如果一个带正电,另一个就一定带负电,而两物体构成的系统的电荷代数和仍然为零。

12.1.3 电荷量子化

1907~1913年,美国物理学家密立根用在电场和重力场中运动的带电油滴进行实验,发现微小油滴带电量的变化不连续。所有油滴所带的电量均是某一最小电荷值的整数倍,该最小电荷值就是电子电荷。电荷的这一性质称为电荷量子化。电子电量的近代测量值为 $|e|=1.602\,177\,33\times 10^{-19}\text{ C}$ 。

现代物理实验表明,质子所带电量 q_p 和电子电量的绝对值可看作严格相同,因为相对误差小于 10^{-20} 。中子是电中性的,则原子核所带的电量就完全由原子核所包含的质子数决定。因为原子包含相同数目的质子和电子,则原子就是电中性的。

多少年来,人们一直试图从理论上解释电荷量子化这一基本事实。夸克理论认为,强子是由更小的夸克构成的。夸克带有分数电荷, $\pm \frac{1}{3}|e|$ 、 $\pm \frac{2}{3}|e|$ 。如质子是由两个 u 夸克和一个 d 夸克组成。u 夸克带电 $+\frac{2}{3}|e|$, d 夸克带电 $-\frac{1}{3}|e|$, 因此,质子带电 $+|e|$,与电子带电量的绝对值相同。在这个意义上讲,物质电荷量子化可以得到部分解释。但由于夸克的分数电荷是人为赋予的,因此,电荷量子化的问题并没有得到根本的解释。

对于宏观物体的带电量的描述问题,电荷量子化并不重要。因为宏观物体所带电量远远大于电荷最小单位的值,我们可以用连续可变的物理量来描述宏观物体的带电状态。

12.1.4 点电荷模型

点电荷是描述带电体的理想化模型。当带电体的大小和形状在所研究的问题中对结果没有影响或影响可以忽略时,可以把带电体看作没有大小和形状的点状电荷,简称为点电荷,该点电荷的带电量和带电体相同。例如,当带电体的线度远远小于带电体间的距离时,带电体就可以看作点电荷。因此,点电荷的概念实际上是相对的,并没有绝对意义上的点电荷。

点电荷的物理模型在现代物理实验中得到强力的支持,如质子的线度小于 10^{-15}m ,电子的线度小于 10^{-18}m 。在原子中,电子与原子核间的距离在 10^{-10}m 的量级,原子核的线度在 10^{-15}m 量级,因此可以把原子核和电子都看成点电荷。

12.1.5 库仑定律

带电体间会有电相互作用力,称为电力。电力是一种长程力,强度远大于物体间的万有引力。

法国物理学家库仑(C. A. Coulomb)对电荷间的电相互作用作了定量的研究。1785年,通过库仑扭秤实验,总结出真空中两个静止的点电荷间相互作用的基本规律,即库仑定律。可表述为:在真空中两个静止点电荷间的电相互作用力的方向沿两个点电荷的连线,大小与两点电荷的电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比,与它们

之间距离的平方成反比。用数学公式可表示为

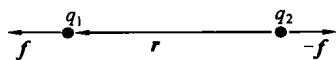


图 12-2

$$f = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} e_r \quad (12-1)$$

式中 f 为 q_2 对 q_1 的作用力; r 为两点电荷间的距离; e_r 为由 q_2 到 q_1 方向的单位矢量(见图 12-2);

k_e 为比例系数。

当 q_1 与 q_2 同号时, f 与 e_r 同向; 当 q_1 与 q_2 异号时, f 与 e_r 反向。因此库仑定律的表达式满足同号电荷相斥、异号电荷相吸的实验规律。

在国际单位制中, 距离以 m 为单位, 电量以 C 为单位, 力的单位是 N, 则 k 的单位应为 $\text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ 。实验表明, 在真空中, $k_e = 8.9875 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ 。实际计算中, 常取近似值 $k_e = 9 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ 。在国际单位制中, 还常用 ϵ_0 来替代 k_e , 即 $k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, 则 $\epsilon_0 = 8.8541 \times 10^{-12} \text{C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$, ϵ_0 称为真空介电常数。由此, 可将库仑定律完整地表示成如下的常用形式:

$$f = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r \quad (12-2)$$

人们历来对库仑定律中两个点电荷之间的作用力与其距离平方反比的精确程度和适用范围很感兴趣。根据库仑当时的实验条件, 发现力 $f \propto \frac{1}{r^{2+\delta}}$, 其中 $\delta \leq 0.02$ 。到了 1971 年, 威廉斯(E. R. Williams)等人的实验证明 $\delta \leq (2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$ 。另一方面, 库仑定律在 $10^{-15} \sim 10^7 \text{m}$ 的相当大的空间范围内被证明是正确有效的。

12.1.6 电力叠加原理

实验表明, 当空间有多个点电荷同时存在时, 其中每个点电荷所受的总静电力应等于所有其他点电荷单独作用时的静电力的矢量和, 这就是电力叠加原理。如图 12-3 所示, 由 n 个点电荷组成点电荷系, 则电量为 q 的点电荷受到的点电荷系总静电力

$$\begin{aligned} f &= \sum_{i=1}^n f_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q q_i}{r_i^2} e_{r_i} \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q q_i}{r_i^3} r_i \end{aligned} \quad (12-3)$$

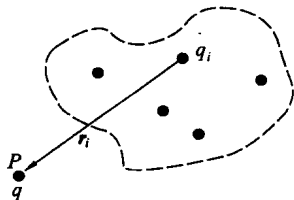


图 12-3

式中 r_i 和 e_{r_i} 分别表示从点电荷 q_i 到点电荷 q 的距离和方向单位矢量。