



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

国家工科物理教学基地 国家级精品课程使用教材

Nucleus
新核心

理工基础教材

大学物理教程

(下册)

第三版

上海交通大学物理教研室 组编



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

国家工科物理教学基地 国家级精品课程使用教材

Nucleus
新核心

理工基础教材

大学物理教程

(下册)

第三版

上海交通大学物理教研室 组编



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



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、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。

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组编. —3 版. —上海: 上海交通大学出版社, 2019
ISBN 978-7-313-22523-8

I. ①大… II. ①上… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 250397 号

大学物理教程(下册)(第三版)

DAXUE WULI JIAOCHENG (XIACE)(DI - SAN BAN)

组 编: 上海交通大学物理教研室

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

印 制: 常熟市文化印刷有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

字 数: 450 千字

版 次: 2011 年 8 月第 1 版 2019 年 12 月第 3 版

书 号: ISBN 978-7-313-22523-8

定 价: 45.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 22.5

印 次: 2019 年 12 月第 7 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0512-52219025

前 言

根据 2010 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、机械波和热物理学。下册包括电磁学、波动光学和量子物理。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 1~4 章），高景（第 5, 6 章和第 16, 17 章），董占海（第 7~9 章和第 18~21 章），李铜忠（第 10~15 章和第 22 章）。

由于编者水平有限，编写时间仓促，书中存在的错误之处，期望广大读者提出宝贵意见。

编 者

2019 年 6 月

目 录

第 10 章 真空中的静电场	1
10.1 电学基本概念	1
10.1.1 电荷	1
10.1.2 电荷守恒	2
10.1.3 电荷量子化	2
10.1.4 点电荷模型	3
10.1.5 库仑定律	3
10.1.6 电力叠加原理	4
10.2 电场与电场强度	4
10.2.1 电场	4
10.2.2 电场强度	5
10.2.3 电场强度的计算	5
10.3 高斯定理	10
10.3.1 电场线	10
10.3.2 电通量	11
10.3.3 高斯定理	12
10.4 环流定理 电势	16
10.4.1 电场力做功	16
10.4.2 电势能和电势	17
10.4.3 电势叠加原理	19
10.5 电势与电场强度的微分关系	21
10.5.1 等势面	21
10.5.2 电势与电场强度的微分关系	22
习题 10	25
思考题 10	30

第 11 章 静电场与物质的相互作用	33
11.1 静电场中的导体	33
11.1.1 导体的静电平衡	34
11.1.2 导体电荷分布	34
11.2 静电场中的电介质	39
11.2.1 电介质与电场的相互作用	40
11.2.2 极化强度和极化电荷	41
11.2.3 介质中静电场的基本规律	43
11.2.4 介质交界面两侧电场的关系	47
11.3 电容和电容器	50
11.3.1 孤立导体的电容	50
11.3.2 电容器的电容	50
11.3.3 电容器的连接	52
11.4 静电场的能量	53
11.4.1 带电体系的静电能	53
11.4.2 点电荷系的静电能量	53
11.4.3 带电电容器的静电能	56
11.4.4 静电场的能量	57
习题 11	59
思考题 11	63
第 12 章 电流与磁场	66
12.1 电流与电源	66
12.1.1 电流、稳恒电场与电源	66
12.1.2 电流强度和电流密度	68
12.2 磁场的磁感应强度	70
12.3 毕奥-萨伐尔定律	71
12.4 磁场的基本规律	75
12.4.1 磁感应强度线与磁通量	75
12.4.2 磁场的高斯定理	76
12.4.3 安培环路定理	76
12.5 磁场对电流的作用	83
12.5.1 安培力公式	83
12.5.2 载流线圈在磁场中受到的作用	85
12.5.3 安培力的功	86
12.6 带电粒子的运动	88

12.6.1	运动带电粒子的磁场	88
12.6.2	带电粒子在匀强磁场中的运动	89
12.6.3	霍尔效应	91
习题 12		93
思考题 12		99
第 13 章	磁场与物质的相互作用	102
13.1	抗磁性和顺磁性	103
13.1.1	原子中电子的磁矩	103
13.1.2	处于磁场中的核外电子	103
13.1.3	抗磁质和顺磁质	104
13.2	磁化强度和磁化电流	105
13.2.1	磁化强度矢量	105
13.2.2	磁化电流	106
13.3	介质中磁场的基本规律	107
13.3.1	介质中磁场的高斯定理	108
13.3.2	介质中磁场的安培环路定理	108
13.3.3	介质交界面两侧磁场的关系	111
13.4	铁磁材料	111
13.4.1	铁磁材料的磁滞回线	111
13.4.2	铁磁现象的理论解释	113
13.4.3	铁磁材料的应用	114
习题 13		115
思考题 13		117
第 14 章	电磁感应	119
14.1	电磁感应定律	119
14.1.1	电磁感应现象	119
14.1.2	法拉第定律	121
14.2	动生电动势	123
14.3	感生电动势	129
14.3.1	感应电场与感生电动势	129
14.3.2	电子感应加速器	133
14.3.3	涡旋电场与涡电流	135
14.4	自感和互感	137
14.4.1	自感	137

14.4.2 互感	140
14.5 磁场能量	143
习题 14	147
思考题 14	153
第 15 章 电磁场与电磁波	156
15.1 麦克斯韦电磁理论	156
15.1.1 位移电流	156
15.1.2 麦克斯韦方程组	160
15.2 电磁波	162
15.2.1 电磁波波动方程	162
15.2.2 电磁波的性质	163
15.2.3 坡印廷矢量	164
15.2.4 电磁场的物质性	167
15.3 电磁波的产生	170
15.3.1 LC 振荡电路	170
15.3.2 电磁波的产生	171
15.3.3 赫兹实验	172
15.3.4 电磁波谱	173
习题 15	176
思考题 15	178
第 16 章 光的干涉与衍射	180
16.1 光的相干性	180
16.2 双缝干涉	182
16.2.1 杨氏双缝实验	182
16.2.2 光源宽度与单色性对干涉条纹的影响	186
16.3 薄膜干涉	189
16.3.1 等倾干涉条纹	189
16.3.2 等厚干涉条纹	191
16.3.3 迈克耳孙干涉仪	195
16.4 夫琅禾费衍射	196
16.4.1 单缝夫琅禾费衍射	197
16.4.2 双缝衍射	199
16.4.3 圆孔衍射、光学仪器的分辨本领	200
16.4.4 光栅衍射	202

16.4.5 衍射与信息	206
习题 16	210
思考题 16	214
第 17 章 光的偏振	216
17.1 偏振光与自然光	216
17.1.1 线偏振光	216
17.1.2 椭圆偏振光与圆偏振光	217
17.1.3 自然光	218
17.1.4 部分偏振光	219
17.2 偏振片、马吕斯定律	219
17.3 反射和折射时的偏振现象	221
17.4 晶体的双折射现象	222
17.5 偏振光的获得与检验	225
习题 17	227
思考题 17	229
第 18 章 量子力学的发展	232
18.1 普朗克的能量子假说	232
18.1.1 热辐射现象	232
18.1.2 黑体辐射的基本规律	234
18.1.3 普朗克的能量子假说	236
18.2 爱因斯坦的光量子假设	237
18.2.1 光电效应	237
18.2.2 爱因斯坦的光量子假设	239
18.2.3 康普顿效应	241
18.3 氢原子光谱、玻尔理论	245
18.3.1 氢原子光谱实验规律	245
18.3.2 经典原子模型的困难	247
18.3.3 玻尔理论	248
习题 18	250
思考题 18	252
第 19 章 量子力学的基本原理	255
19.1 波函数及统计解释	255
19.1.1 德布罗意物质波假设	255

19.1.2	物质波实验验证	257
19.1.3	波函数	258
19.2	不确定关系	260
19.2.1	位置和动量不确定关系	261
19.2.2	能量和时间的不确定关系	264
19.3	薛定谔方程	265
19.3.1	薛定谔方程的建立	265
19.3.2	定态薛定谔方程	267
19.4	量子力学的基本假设	269
19.4.1	力学量的算符表示	269
19.4.2	态叠加原理	270
19.5	一维定态问题	271
19.5.1	一维无限深势阱中的粒子	272
19.5.2	一维谐振子(抛物线势阱)	277
19.5.3	一维散射问题	279
19.6	氢原子量子理论	282
19.6.1	氢原子的能量和角动量	282
19.6.2	氢原子电子概率密度	285
19.6.3	电子的自旋、泡利不相容原理	287
习题 19		289
思考题 19		292
第 20 章 量子力学的应用		295
20.1	激光	295
20.1.1	自发辐射、受激吸收和受激辐射	295
20.1.2	激光器的工作原理	297
20.1.3	激光的应用	300
20.2	量子信息	300
20.2.1	量子计算机	301
20.2.2	量子比特	302
20.2.3	量子纠缠	303
20.2.4	量子隐形传态	305
20.2.5	量子不可克隆原理	306
习题 20		307
思考题 20		308

第 21 章 固体量子理论简介	309
21.1 晶体	309
21.2 固体的能带结构	310
21.2.1 能带	310
21.2.2 能带的宽度	312
21.2.3 满带、导带和价带	312
21.2.4 导体、半导体和绝缘体	313
21.3 半导体的电子论	314
21.3.1 近满带和空穴	314
21.3.2 p 型半导体和 n 型半导体	314
21.3.3 p-n 结	316
21.4 超导电现象	317
21.4.1 零电阻	317
21.4.2 完全抗磁性	318
21.4.3 临界磁场与临界电流	319
21.4.4 两类超导体	319
21.4.5 BCS 理论	320
习题 21	321
思考题 21	322
第 22 章 原子核物理和粒子物理简介	323
22.1 原子核的基本性质	323
22.1.1 原子核的组成	323
22.1.2 原子核的模型	325
22.1.3 核力和介子	326
22.2 原子核的量子性质	327
22.2.1 原子核的自旋	327
22.2.2 原子核的磁矩	328
22.2.3 核磁共振	329
22.3 原子核的放射性衰变	330
22.3.1 放射性衰变规律	330
22.3.2 α 衰变	331
22.3.3 β 衰变	332
22.3.4 γ 衰变	333
22.4 核裂变和核聚变	334
22.4.1 原子核的结合能	334

22.4.2	重核的裂变	335
22.4.3	轻核的聚变	337
22.5	粒子物理简介	338
22.5.1	粒子及其分类	339
22.5.2	强子的夸克模型	341
22.5.3	基本粒子的相互作用	343
22.5.4	粒子的对称性和守恒定律	344

第 10 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,首先讨论电学的一些基本概念。

10.1 电学基本概念

10.1.1 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,或说物体有了电荷。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 10-1),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。

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 $1 C = 1 A \cdot s$,即 $1 C$ 等于 $1 A$ 的电流强度在 $1 s$ 内流过某截面的电量。

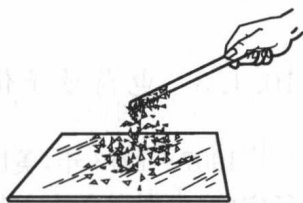


图 10-1

10.1.2 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,反应前后的电量代数和是守恒的,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,若光子能量足够大,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。

10.1.3 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。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,这样,我们就可以用连续可变的物理量来描述宏观物体的带电状态。

10.1.4 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。

10.1.5 库仑定律

带电体间会有电相互作用力,称为静电力。静电力是一种长程力,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做了定量的研究。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

$$f = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} e_r \quad (10-1)$$

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 10-2); k_e 为比例系数。

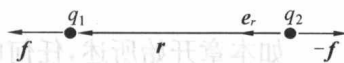


图 10-2

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_e 的单位应为 $N \cdot m^2/C^2$ 。实验表明, 在真空中, $k_e = 8.9875 \times 10^9 N \cdot m^2/C^2$ 。实际计算中, 常取近似值 $k_e = 9 \times 10^9 N \cdot m^2/C^2$ 。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 $\epsilon_0 = 8.8541 \times 10^{-12} C^2/(N \cdot m^2)$, ϵ_0 称为真空介电常数。由此, 可将库仑定律完整地表示为如下的常用形式:

$$f = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r \quad (10-2)$$

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成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 $10^{-15} \sim 10^7 m$ 的相当大的空间范围内被证明是正确有效的。

10.1.6 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作用力应等于所有其他点电荷单独作用时的静电作用力的矢量和, 这就是电力叠加原理。如图 10-3 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作用力

$$\begin{aligned} f &= \sum_{i=1}^n f_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q q_i}{r_i^2} e_{r_i} \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q q_i}{r_i^3} r_i \end{aligned} \quad (10-3)$$

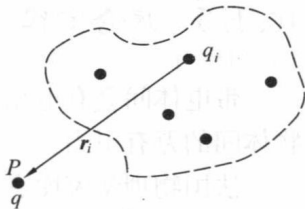


图 10-3

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。

10.2 电场与电场强度

10.2.1 电场

如本章开始所述, 任何电荷都会在其周围的空间产生电场, 通过电场实现对其他电荷的电作用力。反过来, 其他电荷也会在其周围的空间产生电场, 通过电场实

现对处于电场中的任意电荷产生电作用力。因此,电荷间的电相互作用是通过电场这种中间媒介来传递的,如图 10-4 所示。正因为如此,电相互作用力又称为电场力。

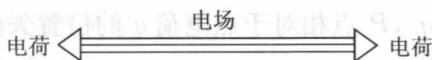


图 10-4

按照场的观点,因为电场在空间传播速度有限,上限为真空中的光速 c ,则在空间激发(或建立)电场是需要时间的。那么,电荷间电相互作用的传递是需要时间的。比如,由于某种原因,在同一时刻不同空间位置突然出现两个电荷。这两个电荷间并不是在电荷出现的同时就有电相互作用,而是经过一段时间后才发生电相互作用。理论和实验都证明这种由场传递电相互作用的观点是正确的。

静止不变的电荷在空间产生的电场分布不随时间发生变化,称为静电场。静电场是本章重点研究的对象。

10.2.2 电场强度

对电场的定量描述有两种方式:一是从电场对电荷作用力的角度引入电场强度的概念,用电场强度描述电场的性质;二是从电场对电荷作用能量的角度引入电势的概念,用电势描述电场的性质。

首先从电场对电荷作用力的角度引入反映电场性质的物理量——电场强度。

考虑静电场中的试验点电荷 q_0 ($q_0 > 0$) 的受力情况。试验表明:① 相同电量的 q_0 在不同空间点(场点)的受力 f 的方向和大小不同,说明在不同空间点电场的性质不同;② 在同一空间点,不同电量的 q_0 的受力 f 的方向相同,大小不同,而 f/q_0 保持不变,说明在相同空间点的电场性质不因实验电荷的不同而不同。则 f/q_0 一定是反映电场性质的物理量,称为电场的电场强度,用 E 来表示,即

$$E = \frac{f}{q_0} \quad (10-4)$$

这个定义式对带负电的试验电荷亦适用。

依式(10-4)定义,电场中一场点的电场强度等于该点处的单位正电荷所受的力。一般说来,不同场点上的电场强度大小和方向各不相同,是空间位置的矢量函数,可表示为 $E(x, y, z)$ 或 $E(r)$ 。

在国际单位制中,电场强度的单位为 N/C 或 V/m 。如果一个电场的空间分布确定,则在电场中,点电荷 q 的受力可以由 $f = qE$ 来表示。

10.2.3 电场强度的计算

10.2.3.1 点电荷的电场

首先讨论点电荷 q 的电场分布。如图 10-5 所示,在场点 P 放一试验电荷