



21世纪高等教育系列规划教材
21SHIJI GAODENG JIAOYU XILIEGUIHUA JIAOCAI

大学物理

COLLEGE PHYSICS

主编 范中和 徐军

下册



西北大学出版社
NORTHWEST UNIVERSITY PRESS

21 世纪高等教育系列规划教材

大学物理

下 册

主 编 范中和 徐 军
副主编 翟学军 吕 茂
张清华

西北大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 下册/ 范中和, 徐军主编. —西安: 西北大学出版社,
2005. 9

ISBN 7-5604-2033-8

I. 大... II. ①范... ②徐... III. 物理学—高等学校—教材
IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 118570 号

书 名	大学物理 下册
主 编	范中和 徐 军
出版发行	西北大学出版社
通信地址	西安市太白北路 229 号 邮编 710069 电话 (029) 88302590
经 销	新华书店经销
印 刷	陕西向阳印务有限公司
开 本	787mm×960mm 1/16
印 张	19.25
字 数	314 千字
版 次	2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5604-2033-8/O·124
定 价	24.00 元

大学物理是工科大学生必修的一门重要基础课。大学物理教学的宗旨,一方面为后续课程及以后的再学习打下必要的物理基础,另一方面也使使学生受到良好的物理学思想和物理学方法的培养训练。

时至今日,爆炸式的知识信息增长,使知识更新的周期不断缩短。大学扩招,变原来的“精英教育”为“大众教育”,引起生源的改变。同时,各学校又不同程度地压缩了大学物理课程的学时。为了适应这种变化,我们编写出版了这套《大学物理》教材。

本书从新时期工科应用型人才的需求出发,立足于实用性、时代性、普适性。其主要特色是:

1. 取材立足于“精”和“反映现代”。用现代观念审视传统物理内容,在保证达到普通高等工科院校本科大学物理课程基本要求的基础上,加强了近代物理的分量,增加了反映物理学前沿进展的内容。

2. 在内容组织和教材结构上,从大学生的认知特点、教学规律、物理知识体系出发,强调物理知识的系统性、整体性,强调各部分知识间的相互联系。

3. 近代物理学的许多新进展是与普通物理课程的内容相关联的。在讲述近代物理知识及物理学新进展时,强调物理学新进展与经典物理或原有知识的联系。

4. 结合工科特点和现代技术发展的实际,选编了一定数量的反映新技术或联系工程实际的问题。

本书上册的主编是范中和教授、王晋国副教授,下册主编是范中和教授、徐军教授,上下册副主编是翟学军、吕茂、张清华.参加本书编写的人员有:陕西师范大学的范中和、李树华、卢永智、隋峰,长安大学的王晋国、王明祥、杨富社,西安工程科技学院的张英堂、翟学军、刘汉臣、于长丰,西安工业学院的房鸿、吕茂,第二炮兵工程学院的徐军、张清华、罗积军、师琳、侯素霞,西安石油大学的罗俊.本书编写大纲初稿由范中和教授拟订,经编写组会议讨论修改并最终确定.初稿完成后由范中和教授、徐军教授、王晋国副教授统稿.

本书在编写过程中,西北大学出版社李保宁同志给予了大力协助,在此表示诚挚的谢意.由于编者水平有限,时间仓促,书中难免有不足和疏漏之处,恳请读者批评指正.

编者

2005年9月

目 录

第 10 章 静电场	/316
§ 10.1 电荷 库仑定律	/316
§ 10.2 电场强度	/320
§ 10.3 静电场中的高斯定理	/329
§ 10.4 静电场的环路定理	/338
§ 10.5 电势	/341
§ 10.6 电场强度与电势梯度	/346
思考题	/348
习题	/349
第 11 章 静电场中的导体和电介质	/351
§ 11.1 静电场中的导体	/351
§ 11.2 静电场中的电介质	/359
§ 11.3 电容和电容器	/365
§ 11.4 静电场的能量	/370
思考题	/373
习题	/374
第 12 章 稳恒磁场	/375
§ 12.1 电流 电流密度	/375
§ 12.2 磁场 磁感强度	/379
§ 12.3 毕奥—萨伐尔定律	/380
§ 12.4 磁场的高斯定理	/387

§ 12.5	磁场的安培环路定理	/389
§ 12.6	磁场对运动电荷的作用	/396
§ 12.7	磁场对载流导线的作用	/402
§ 12.8	磁介质中的磁场	/408
	思考题	/415
	习题	/416
第 13 章	电磁感应	/420
§ 13.1	电磁感应定律	/420
§ 13.2	电源 电动势	/425
§ 13.3	动生电动势和感生电动势	/426
§ 13.4	自感和互感	/432
§ 13.5	磁场的能量	/437
	思考题	/439
	习题	/440
第 14 章	麦克斯韦方程组和电磁波	/444
§ 14.1	位移电流	/444
§ 14.2	麦克斯韦方程组	/447
§ 14.3	电磁振荡	/449
§ 14.4	电磁波	/452
	思考题	/459
	习题	/459

目 录

第 15 章 波动光学	/461
§ 15.1 光源 单色光 相干光	/462
§ 15.2 光程和光程差	/466
§ 15.3 分波阵面干涉	/469
§ 15.4 分振幅干涉	/476
§ 15.5 迈克尔孙干涉仪	/490
§ 15.6 光的衍射	/493
§ 15.7 夫琅禾费衍射	/495
§ 15.8 衍射光栅	/503
§ 15.9 X 射线的衍射	/510
§ 15.10 光的偏振	/512
§ 15.11 双折射	/515
思考题	/520
习题	/523
第 16 章 相对论基础	/529
§ 16.1 狭义相对论产生的背景	/529
§ 16.2 狭义相对论的基本原理	/532
§ 16.3 狭义相对论的时空观	/540
§ 16.4 狭义相对论质量、动量和能量	/544
§ 16.5 广义相对论简介	/549
思考题	/552
习题	/553

第 17 章 量子物理基础	/555
§ 17.1 普朗克能量子假设	/556
§ 17.2 光的波粒二象性	/560
§ 17.3 氢原子的玻尔理论	/567
§ 17.4 实物粒子的波粒二象性	/572
§ 17.5 不确定关系	/580
§ 17.6 薛定谔方程 波函数的统计解释	/583
§ 17.7 一维势阱和势垒	/587
§ 17.8 氢原子理论简介	/593
§ 17.9 多电子原子中的电子分布	/595
§ 17.10 激光	/598
思考题	/604
习题	/605
习题答案	/607

第 10 章 静电场

电磁运动是物质的一种基本的运动形式,自然界里的所有变化,几乎都与电和磁相联系.电磁学就是研究电磁运动的基本规律及其应用的一门基础性学科.人类对电现象和磁现象的认识,从公元前六世纪就开始了,但电磁学的发展却是十分缓慢的.直到 19 世纪,由于生产和科学技术的迅速发展,电磁学才获得了重大进展.1820 年奥斯特发现了电流的磁效应,此后,安培又提出了分子电流假说,使人们认识到磁现象的本质是电荷的运动.1831 年法拉第发现了电磁感应的规律,使人们进一步认识到电磁现象的内在联系.到 19 世纪 80 年代,麦克斯韦在前人工作的基础上,把电磁规律归纳成麦克斯韦方程组,确立了电荷、电流、电场和磁场之间的普遍关系,建立了经典电磁场理论.

电磁学的内容按性质来分,主要有“场”和“路”两部分.作为非物理专业的一门基础课,电磁学这部分内容中学生的难点在于“场”.场具有空间分布,这样的对象(特别是非均匀场),从概念到方法,对学生来说都是新的.在这部分中有关矢量场的基本特征,大部分在前两章静电学中都可遇到.从这种意义上讲,静电学是整个电磁学的基础和重点,学好这两章,后面的困难就会小得多.而在学习静电学的内容时,应逐渐习惯于接受并使用“通量”和“环路”这类形式的定理,这对后面章节乃至其他课程的学习将大有裨益.

静电场是相对于观察者静止的电荷所产生的电场.本章只研究真空中静电场的性质和规律.

§ 10.1 电荷 库仑定律

一、电荷 电荷的量子化

人们对于电的认识最初来自摩擦起电.人们发现许多物质(如玻璃、硬橡胶、金刚石、蓝宝石和明矾等)经过毛皮或丝绸等摩擦后,都能吸引轻小物体,于是人们就

说它们带了电,或者说它们有了电荷。

实验发现,自然界中只存在两种性质不同的电荷,称为正电荷和负电荷。电荷与电荷之间存在相互作用(电相互作用比引力相互作用强得多,而且具有与引力相互作用根本不同的性质),同种电荷相互排斥,异种电荷相互吸引。而且,当异种电荷在一起时,它们的效应互相抵消。大多数物体是由等量的正电荷和负电荷组成的,称为电中性。因此,通常两宏观物体之间的电相互作用接近于零,从而它们之间的引力相互作用才显示出来。

物体所带电荷数量的多少,称为电量。如图 10.1 所示的验电器,是检测电荷和电量的最简单的一种仪器。在玻璃瓶等外壳上绝缘地安装一根金属杆,杆的上端有一金属球,下端有一对悬挂着的金属箔,一旦它们带电,“同种电荷互相排斥”这一性质就会使金属箔张开,所带的电荷越多,张角就越大。

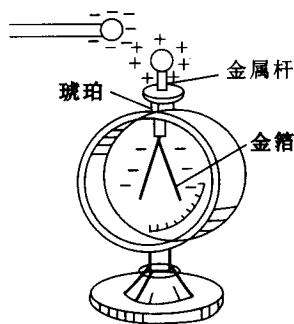


图 10.1

从验电器的实验可以看出,电荷可以从金属棒的一端移至另一端。这种允许电荷通过的物体称为导体,而不允许电荷通过的物体称为绝缘体或电介质。半导体是导电性质介于导体和绝缘体之间的、具有特殊电性质的材料。

物体具有不同的导电性,可以用物质的微观结构来解释。金属之所以导电,是因为组成金属的原子的最外层价电子,可以摆脱原子核的束缚而在金属中自由运动,称为自由电子;电解液之所以导电,是因为其内部存在许多可以作宏观运动的正、负离子。反之,在绝缘体内部,由于电子所受到的原子核的束缚较紧,基本上没有自由电荷,所以几乎不导电。在半导体中,通常把导电的粒子称为载流子,包括带负电的电子和带正电的空穴。O 型半导体中的多数载流子是电子,q 型半导体中的多数载流子是空穴。

密立根油滴实验和无数其他的实验表明,在自然界中,任何带电体的电量都只能是某一基本电荷 e 的整数倍。这个基本电荷就是一个电子所带的电量,叫做电子电量,记作 $-e$ 。质子的电量与电子电量等值异号,所以是 $+e$,其 1986 年推荐值为 $e = 1.60217733 \times 10^{-19}$ 库仑(C)。因此可以把带电体的电量 q 写成

$$q = \pm ne$$

n 只能取正整数。显然,如果带电体上的电量发生变化,它也只能按电子电量的整数

倍变化,而不能任意变化.电荷的这一特点称为电荷的量子化.近代物理从理论上预言有一种电量为 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 的基本粒子(称为夸克)存在,并认为质子和中子等许多粒子是由夸克组成的.但迄今为止,单独存在的夸克尚未在实验中发现.需要说明的是,在电磁学范围内所遇到的电量要比电子电量大很多,电荷的量子化是显示不出来的.

二、电荷守恒定律

两种材料的物体互相摩擦后之所以会带电,是因为通过摩擦,每个物体中都有一些电子获得能量脱离了原子束缚而转移到另一个物体上去.但是,不同材料的物体彼此向对方转移的电子数目往往不相等,所以从总体上讲,一个物体失去了电子而带正电,另一个物体得到了电子而带负电,这就是摩擦起电现象.如图 10.1 所示,当我们把带负电的物体移近导体时,导体中的自由电子在负电荷的排斥力作用下向远离带电体一端移动,结果导体的这一端因电子过少而带正电,另一端则因电子过多而带负电,这就是静电感应现象.由此可见,摩擦起电和静电感应现象中的起电过程,都是电荷从一个物体转移到另一个物体,或从物体的一部分转移到另一部分的过程.

大量的事实表明:电荷既不能被创造,也不能被消灭,只能从一个物体转移到另一个物体,或从物体的一部分转移到另一部分.也就是说,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,这称为电荷守恒定律.

近代科学实验证明,电荷守恒定律不仅在一切宏观过程中成立,而且被一切微观过程(例如核反应和基本粒子过程)所普遍遵守.电荷是在一切相互作用下都守恒的一个守恒量,电荷守恒定律是自然界中普遍的基本定律之一.

三、库仑定律

库仑定律是由法国科学家库仑,于 1875 年通过扭秤实验,直接测定两个静止点电荷之间的相互作用而总结出的定量规律.

1. 点电荷

实验发现,带电体之间具有相互作用力,而这种相互作用力和带电体间的距离以及所带的电量有关,同时与带电体的大小、形状以及电荷在带电体上的分布有关.但当带电体本身的几何线度比带电体间的距离小很多时,在测量的精度范围内,带电体的形状与其上的电荷分布对作用力没有影响,此时,作用力仅与带电体间的距

离以及所带的电量有关. 针对这样的事实, 我们引入点电荷的概念. 当带电体的大小和带电体间的距离相比小很多时, 我们把这样的带电体看作是点电荷. 点电荷与力学中的质点相似, 是从实际的带电体中抽象出来的, 只具有相对的意义, 它本身不一定是很小的带电体. 对于不能当作点电荷处理的带电体, 我们可以把它当作多个点电荷所组成的体系来处理.

2. 库仑定律

库仑定律的内容是: 在真空中, 两个静止的点电荷之间的相互作用力的大小与两电荷电量的乘积成正比, 与两电荷之间距离的平方成反比; 作用力的方向沿着两电荷的连线, 同号相斥, 异号相吸.

如图 10.2 所示, \hat{r}_{12} 表示从点电荷 q_1 指向点电荷 q_2 的单位矢量, 用 r 表示两电荷之间的距离, 于是, q_1 对 q_2 的作用力为

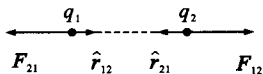


图 10.2

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12} \quad (10-1)$$

式中 k 为比例系数. 在国际单位制中,

$$k = 8.98755 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

通常还引入另一常量 ϵ_0 来代替 k , 使

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

式中 ϵ_0 叫做真空电容率或真空介电常量.

$$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$$

于是真空中库仑定律就可以写成

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}^2} \hat{r}_{12}$$

当 q_1 与 q_2 同号时, 两者乘积为正, \mathbf{F}_{12} 与 \hat{r}_{12} 方向相同, 这是斥力; 当 q_1 与 q_2 异号时, 两者乘积为负, \mathbf{F}_{12} 与 \hat{r}_{12} 反向, 这是引力.

同理, q_2 对 q_1 的作用力为

$$\mathbf{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{21} \quad (10-2)$$

显然

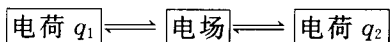
$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21} \quad (10-3)$$

§ 10.2 电场强度

一、静电场

库仑定律揭示了电荷之间相互作用的规律,提供了定量计算静电力的基本方法.但是,并没有告诉我们电荷之间的相互作用是怎样传递的.力学中我们熟知的摩擦力、弹力都是接触力,但两个电荷并没有直接接触,那么,电荷之间存在的静电力是如何传递的呢?

对于电荷之间作用力的性质,历史上有过两种不同的观点.一种观点认为相隔一定距离的两个带电体之间的静电力是“超距作用”,它的传递既不需要媒质,也不需要时间.另一种是近距作用观点,认为静电力是物质间的相互作用,既然电荷 q_2 处在 q_1 周围任一点都要受静电力的作用,说明 q_1 周围整个空间存在着一种特殊的物质,它虽然不像实物那样由电子、质子和中子构成,但确实是一种客观实在;同样,电荷 q_2 在周围空间也存在这种特殊的物质,所以它们的作用才是相互的.我们把电荷周围存在的这种特殊的物质叫做电荷所激发的电场.因此,可以把电荷之间的相互作用过程归结为:电荷在周围空间激发电场,电场对位于其中的电荷施以作用力.若将两个电荷间的相互作用概括为一个图式,即为



可见,两个电荷之间的静电力实际上是每个电荷的电场作用在另一个电荷上的电场力.

当电荷静止不变时,从上述两种观点出发所做出的计算结果完全相同,不易判断哪一种观点正确.但当电荷运动变化时,两种观点的差别则非常明显.近代物理的理论和实验都证明,场的观点是正确的,“超距作用”的观点是错误的.变化的电磁场是以有限速度(光速)传播的,并且可以脱离场源而独立存在.电磁场与实物一样也具有能量、质量和动量.场是物质存在的一种形式,它既具有实物的一些基本属性,但与分子、原子等实物相比,也有其特殊之处,分子和原子等实物不具有空间叠加性,而场则具有空间叠加性,所以,我们称场为特殊的物质.

相对于观察者静止的电荷所激发的电场叫做静电场.从静电场的对外表现来看,它主要有以下几个方面的特性:

- (1) 电场对处在其中的电荷具有作用力；
- (2) 电场对在其中运动的电荷做功；
- (3) 电场对置于其中的导体和电介质将产生影响。

二、电场强度

对于电场来说,既看不见又摸不着,我们如何描述电场本身的物理性质呢?很显然,必须从电场所表现的外在特性方面来描述电场。

为了研究电场中各点的性质,引入试探电荷 q_0 ,它应满足两个条件:其一是它的电量必须足够小,以保证由于它的置入不引起原有电荷的重新分布;其二是它的线度必须小到可以被看作点电荷,以便确定电场中每点的性质。

实验表明,将试探电荷引入电场中后,它在不同位置上所受作用力 F 的大小和方向一般是不同的,并且 F 的大小与试探电荷的电量 q_0 成正比, F 的方向与试探电荷 q_0 的符号有关。但是 F 与 q_0 的比值 $\frac{F}{q_0}$,无论其大小和方向都与 q_0 无关,只与 q_0 所在处的电场状况有关。也就是说,在电场中某一确定点,试探电荷 q_0 所受的电场力与其电量的比值 $\frac{F}{q_0}$,反映了电场本身在该点的物理性质,而与所选的试探电荷无关。对

于电场中不同点,这一比值 $\frac{F}{q_0}$ 一般不同,恰恰反映了电场固有属性的空间分布状况。

因此,可以用比值 $\frac{F}{q_0}$ 来描述电场的性质,比值 $\frac{F}{q_0}$ 就称为电场强度,简称场强,用 E 表示。即

$$E = \frac{F}{q} \quad (10-4)$$

换言之,某处的电场强度定义为这样一个矢量,其大小等于单位电荷在该处所受到的电场力的大小,其方向与正电荷在该处所受到的电场力的方向一致。在国际单位制中,电场强度的单位是 N/C (牛顿/库仑)。

对于电场强度,要注意以下几点:

- (1) 并非一定要有单位电荷才能检验电场强度的大小。
- (2) 并非一定要有一个正电荷才能检验电场强度的方向。
- (3) 并非一定要有检验电荷才有场强,电场是客观存在的。

三、点电荷电场的电场强度

现在计算点电荷 Q 的电场分布. 以 Q 所在位置为原点, 在距离为 r 的场点 P , 放置一试验电荷 q , 根据库仑定律, q 受到的电场力为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (10-5)$$

所以 P 点的场强为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (10-6)$$

上式常称为点电荷的场强公式. 其中 $\hat{\mathbf{r}}$ 为场点 P 相对于场源 Q 的位置矢量的单位矢量. 由上式可见, 点电荷电场有两个显著特点: (1) r 相同的点, 即在同一球面上的各点, F 的大小相等. (2) 各点场强的方向均沿径向: 当 $Q > 0$ 时, \mathbf{E} 与 \mathbf{r} 同向, \mathbf{E} 沿径向外指; 当 $Q < 0$ 时, \mathbf{E} 与 \mathbf{r} 反向, \mathbf{E} 沿径向内指, 即指向球心, 如图 10.3 所示. 可见点电荷电场具有球对称性.

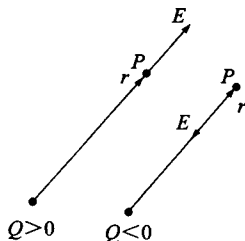


图 10.3

从场的观点来看, 点电荷 q 在场强为 \mathbf{E} 的点处所受的电场力为

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (10-7)$$

四、场强叠加原理

在多个(设为 n 个)点电荷激发的电场中, 如何求场强呢? 根据力的加原理, 试探电荷在电场中某点, 受到各个点电荷对它的作用力之和为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \cdots + \mathbf{F}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i \quad (10-8)$$

根据场强的定义, 若 n 个点电荷分别为 q_1, q_2, \cdots, q_n , 则

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{1}{q_0} \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i \quad (10-9)$$

其中, $\mathbf{E}_i = \frac{\mathbf{F}_i}{q_0}$ 表示第 i 个点电荷单独存在时, 在该点产生的场强. 由此可见, 在多个点电荷所产生的电场中, 某点的总场强等于各个点电荷单独存在时在该点产生的场强的矢量和, 这称为场强叠加原理.

从微观结构来看, 电荷集中在一个个带电的微观粒子上, 例如电子和原子核上.

但从宏观效果来看,在某些问题中可以把电荷看成是连续分布在带电体上.对于连续带电体,怎样应用场强叠加原理求其场强分布呢?

如图 10.4 所示,将带电体分割成许多微小的带电元 ΔV ,将每个带电元称为一个电荷元 Δq ,只要 ΔV 取得足够小,那么每个带电体又可以看作一个点电荷,这样,整体就可以看作是由许多电荷元所组成的点电荷体系.需要说明的是,从宏观上来看, ΔV 取得越小,即 $\Delta V \rightarrow 0$ 时,电荷元才越接近点电荷;从微观上看,电荷具有量子化特点,电荷又是一粒粒地分立分布

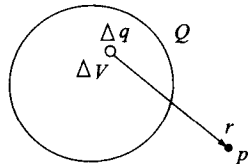


图 10.4 带电体的分割状态,具有一定的分布起伏性.可见电荷元的体积 ΔV 又不能无限趋于零.在宏观电磁学范围内,对所取的电荷元应理解为:宏观小,微观大,既包含大量的带电粒子,以免造成微观起伏性,同时又满足点电荷模型的必要条件,这样的微元称为物理无限小体元.

现在将任意电荷元 Δq 以 dq 表示,场点 P 相对于该电荷元的矢径以 \hat{r} 表示,则电荷元 dq 在场点 P 所产生的场强为

$$\mathbf{E} = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \hat{r} \quad (10-10)$$

在某些情况下,电荷分布在导体或电介质的表面附近很薄的一层里.当场点与薄层的距离远大于薄层的厚度时,可以忽略这个厚度而认为电荷分布在一个几何面上.这时,可以定义一点的面电荷密度或电荷面密度 σ 为该点附近单位面积内的电荷,即

$$\sigma = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta s} = \frac{dq}{ds} \quad (10-11)$$

于是,带电面所激发的电场强度为

$$\mathbf{E} = \iint \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma ds}{r^2} \hat{r} \quad (10-12)$$

五、场强的计算

根据场强叠加原理,具体计算多个点电荷体系或电荷连续分布的带电体场强时,各个点电荷或电荷元在场点产生的场强 \mathbf{E}_i 或 $d\mathbf{E}$ 的大小和方向一般不同,不便于进行矢量加法或矢量积分运算.在处理具体问题时,先选取适当的坐标系,将 \mathbf{E}_i 或 $d\mathbf{E}$ 分解为各个坐标分量,以便将矢量运算变为简单的标量运算,求出总场强的各坐