



普通物理学

■ 胡炳元 / 主编

下

General
Physics

General
Physics



华东师范大学出版社

普通物理学(下)

主 编 胡炳元

General Physics

华东师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

普通物理学(下)/胡炳元主编. —上海:华东师范大学出版社,2009

ISBN 978 - 7 - 5617 - 6953 - 9

I. 普… II. 胡… III. 普通物理学—师范大学—教材
IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 028257 号

普通物理学(下)

主 编 胡炳元
策 划 高等教育分社
责任编辑 朱建宝
审读编辑 于克明
封面设计 陆 弦

出版发行 华东师范大学出版社
社 址 上海市中山北路 3663 号 邮编 200062
电话总机 021 - 62450163 转各部门 行政传真 021 - 62572105
客服电话 021 - 62865537(兼传真)
门市(邮购)电话 021 - 62869887
门市地址 上海市中山北路 3663 号华东师范大学校内先锋路口
网 址 www.ecnupress.com.cn

印 刷 者 苏州市永新印刷包装有限公司
开 本 787 × 1092 16 开
印 张 18
字 数 352 千字
版 次 2009 年 8 月第 1 版
印 次 2009 年 8 月第 1 次
印 数 1—3100
书 号 ISBN 978 - 7 - 5617 - 6953 - 9/O · 207
定 价 32.00 元

出 版 人 朱杰人

(如发现本版图书有印订质量问题,请寄回本社客服中心调换或电话 021 - 62865537 联系)

目 录

第九章 真空中的静电场

§ 9.1 电荷 库仑定律	1
§ 9.2 电场 电场强度	6
§ 9.3 电通量 高斯定理	16
§ 9.4 电功 静电场的环路定理	24
§ 9.5 电势能 电势	27
§ 9.6 场强与电势的关系	32
本章小结	39

第十章 静电场中的导体与电介质

§ 10.1 静电场中的导体	43
§ 10.2 导体静电平衡性质的应用	48
§ 10.3 静电场中的电介质	54
§ 10.4 有介质时的高斯定理	57
§ 10.5 电容 电容器	60
§ 10.6 静电场的能量	67
本章小结	74

第十一章 恒定电流

§ 11.1 电流 电流密度	78
§ 11.2 电阻率 欧姆定律的微分形式	81
§ 11.3 电源及其电动势 全电路的欧姆定律	85
本章小结	91

第十二章 稳恒磁场

§ 12.1 基本磁现象	93
§ 12.2 磁场 磁感应强度	95

§ 12.3	磁通量 磁场的高斯定理	99
§ 12.4	毕奥—萨伐尔定律及其应用	101
§ 12.5	安培环路定律及其应用	106
§ 12.6	磁场对运动电荷的作用	111
§ 12.7	磁场对载流导线的作用	115
§ 12.8	磁介质 介质中的安培环路定理	120
	本章小结	125

第十三章 电磁感应与电磁场

§ 13.1	电磁感应现象及其基本规律	128
§ 13.2	动生电动势	133
§ 13.3	感生电动势和涡旋电场	139
§ 13.4	自感与互感 磁场能量	143
§ 13.5	麦克斯韦电磁场理论	149
§ 13.6	电磁波的辐射与传播	152
§ 13.7	电磁场的物质性	155
§ 13.8	电磁波谱	157
	本章小结	159

第十四章 光的干涉

§ 14.1	光的描述	163
§ 14.2	分波前干涉	169
§ 14.3	分振幅干涉	174
§ 14.4	单缝和圆孔的夫琅禾费衍射	181
§ 14.5	光栅和 X 射线衍射	189
§ 14.6	光的偏振	197
	本章小结	209

第十五章 原子物理及核物理初步

§ 15.1	量子论的起源	216
§ 15.2	光的量子性	220
§ 15.3	氢原子光谱	225
§ 15.4	实物粒子的波动性	234
§ 15.5	波函数和薛定谔方程	238
§ 15.6	原子核的基本性质	243
§ 15.7	原子核的结合能	247

§ 15.8 原子核的放射衰变	251
本章小结	259

第十六章 广义相对论的基本思想

§ 16.1 狭义相对论的局限性 广义相对性原理	264
§ 16.2 爱因斯坦升降机和等效原理	266
§ 16.3 惯性质量与引力质量	267
§ 16.4 广义相对论的实验验证	269
§ 16.5 引力几何化与 Einstein 场方程	271
习题答案	276
后 记	281

第九章 真空中的静电场

相对于观察者静止的电荷称为静电荷. 由静电荷产生的电场称为静电场. 静电场是一种物理实在, 它分布于电荷周围的空间, 是位置和时间的函数. 电场的重要性质在于它对放入其中的电荷有力的作用, 而且当电荷在电场中运动时, 电场力会对运动电荷做功, 也就是说, 电场具有力与能的性质. 为了描述电场的力与能的性质, 本章将引入电场强度与电势两个物理量, 并围绕这两个物理量引出高斯定理和安培环路定理等, 相信本章的知识将会为同学们打开学习电磁学之门.

§ 9.1 电荷 库仑定律

9.1.1 电荷

人们对电荷的最初认识是来自于对日常生活的细致观察. 据记载, 最早对电现象进行认真研究的是古希腊哲学家泰利斯(Thales), 他发现被丝织物摩擦过的琥珀能够吸引灰尘、绒毛、麦秆等轻小物体. 东汉初期我国的王充在《论衡》一书中提到“顿牟掇芥”, 也就是说摩擦过的琥珀能吸引轻小物体. 晋朝有“今人梳头、解著衣, 有随梳解结, 有光者, 亦有咤声”的记叙. 随着人类实践范围的扩大, 人们发现用毛皮摩擦玻璃棒、硬橡胶棒、硫磺块或水晶块等, 也都能吸引轻小物体. 物体有了这种能吸引轻小物体的性质, 人们就说它带了电, 带电的物体叫带电体. 人们通过不断研究发现两根用毛皮摩擦过的硬橡胶棒互相排斥; 两根用绸子摩擦

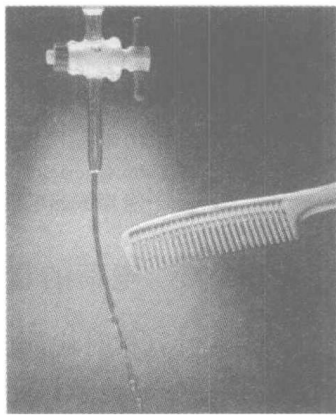


图 9.1.1 摩擦过的梳子能吸引细小的水流

过的玻璃棒也互相排斥; 硬橡胶棒与玻璃棒却相互吸引. 大量的实验证明, 所有的带电体所带的电荷或者与玻璃棒上的电荷相同, 或者与硬橡胶棒上的电荷相同, 也就是说自然界中只存在两种电荷, 而且同种电荷相互排斥, 异种电荷相互吸引. 为了区别两种电荷, 美国科学家富兰克林将用绸子摩擦过的玻璃棒所带的电荷叫做正电荷, 将用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷叫做负电荷, 这种命名法国际

上一直沿用到今天。

9.1.2 电荷守恒定律

使物体带电有三种方式:摩擦起电、感应起电、接触带电。摩擦起电的微观机理在于物质的原子结构。任何物体都是由分子、原子构成,原子又由原子核和核外电子构成。原子核带正电,电子带负电。在通常情况下,原子核所带电量与核外电子所带电量相等,电性相反,所以对外不显电性。但是对于不同原子,它的原子核对其核外电子的束缚能力不相同,不同物体相互摩擦时,对核外电子束缚能力强的物体得到电子而带上负电,对核外电子束缚能力弱的物体失去电子而带上正电,但电子只是从一个物体转移到另一个物体,它并没有增加,也没有减少。摩擦起电如此,感应起电和接触带电也是如此。大量实验表明:在一个孤立系统中,无论发生了怎样的物理过程,电荷都既不会创生,也不会消失,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,即在任何过程中,电荷的代数和守恒。这就是电荷的守恒定律。

电荷守恒定律不仅在中观领域成立,而且在宇观、宏观与微观领域都成立。研究表明,电荷守恒定律适用爱因斯坦的广义相对论与狭义相对论,在量子领域,电荷守恒定律也同样适用。例如,电子和正电子相遇而湮灭为一对光子,这时系统内正、负电子的电荷量各自减少为零,但是反应前后,整个粒子系统的电荷量的代数和保持不变。

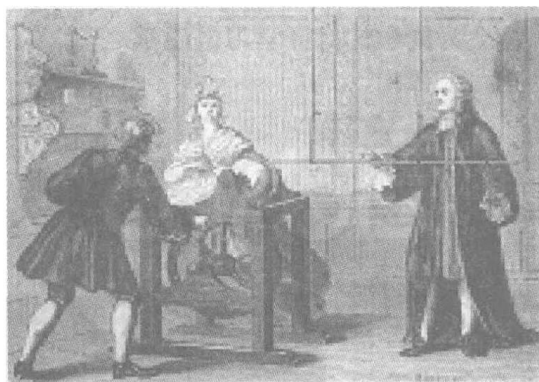


图 9.1.2 1660 年,德国马德堡市市长盖里克(von Guericke, 1602—1686)发明第一台摩擦起电机

9.1.3 电荷的量子性

在富兰克林时代,电荷被设想成连续的流体,而现代物理认为电子是不可分的,物体所带的电量只能是电子电量的整数倍,物体所带电量的变化是不连续的,而是以电子的电量为最小单位一份一份地增加或减少的,这一特性称为电荷的量子化(charge quantization)。人们把电子的电量(与质子电量等量异号)叫做**基本电量**(elementary unit of electric charge),也称元电荷的电量,以 e 表示。基本电量是物理学中的极为重要的基本参量,但由于其数值非常之小,为了准确地测出其量值,许多优秀科学家倾注数年的心血,著名的美

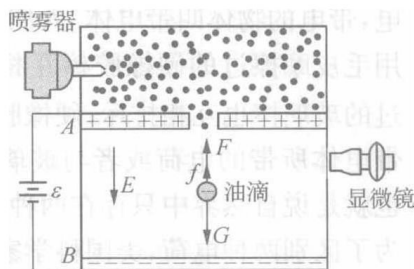


图 9.1.3 密立根油滴实验装置



图 9.1.4 美国科学家密立根

国科学家密立根(Robert Andrews Millikan, 1868—1953)就是如此,值得庆幸的是,1910年,他通过精心设计的油滴实验精确测定出元电荷的电量,后又经过多次实验修正,元电荷所带电荷量 $e = (1.602\,177\,33 \pm 0.000\,000\,49) \times 10^{-19} \text{ C}$,根据1979年科学界发布的数据,基本电荷的量值确

$$e = 1.602\,189\,2(46) \times 10^{-19} \text{ C}$$

任何带电体所带的电荷量总是等于最小电荷量的整数倍,即电子所带电荷量的整数倍,也就是说电量具有量子性。密立根由此获得了1923年度诺贝尔物理学奖。

表 9-1 若干基本粒子的电量和质量数据

	符 号	电荷(以 e 为单位)	静止质量(以 m_e 为单位)
电子	e^-	-1	1
质子	p	+1	1836.2
中子	n	0	1838.7
μ 介子	μ	-1	206.8
π 介子	π^+	± 1	273.2
	π^0	0	264.2
中微子	ν	0	0

近代物理学从理论上预言基本粒子由若干种夸克或反夸克组成,每一个夸克或反夸克可能带有 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 的电量,然而至今单独存在的夸克尚未在实验中发现,即使发现了夸克,只是把基本电量的大小缩小到目前的 $\frac{1}{3}$,电荷的量子化依然不变。

9.1.4 库仑定律

历史视窗

库仑扭秤实验

库仑扭秤实验被后人评为物理学史上十大最美丽的实验之一,它巧妙的构思一直为后人津津乐道。库仑扭秤由悬丝、横杆、两个带电金属小球、一个平衡小球、一个递电小球、旋扭和电磁阻尼部分等组成。两个带电金属小球中,一个固定在绝缘竖直支杆上,另一个固定在水平绝缘横杆的一端,横杆的另一端固定一个平衡

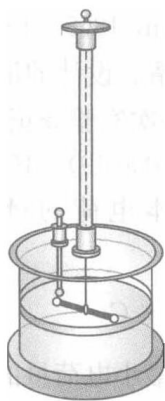


图 9.1.5 库仑扭秤实验

小球. 横杆的中心用悬丝吊起, 和顶部的旋钮相连, 转动旋钮, 可以扭转悬丝带动绝缘横杆转动, 停在某一适当的位置. 横杆上的金属小球(称为动球)和竖直支杆上的固定小球都在以 O 为圆心, 半杆长 L 为半径的圆周上, 动球相对于固定小球的位置, 可通过扭秤外壳上的刻线标出的圆心角读出. 当两个金属小球带电时, 横杆在动球受到的库仑力力矩作用下旋转, 悬丝发生扭转形变, 悬丝的扭转力矩和库仑力力矩相平衡时, 横杆处于静止状态. 经校准、标定悬丝的扭力矩与扭转角度之间的关系后, 根据旋钮上指针转过的角度和横杆的长度, 即可读出某距离下两带电小球之间的相互作用力.

由简单到复杂, 由定性到定量, 这是人们研究自然的基本路向. 人们对电的认识停留在定性阶段长达两千多年, 直到 18 世纪中叶开始, 许多科学家才开始有目的地进行一系列实验性研究, 以便找到静止带电体之间相互作用力的规律. 科学发现之路是艰难的, 科学本质往往隐藏在各种非本质现象之后, 带电体之间力的作用就是如此. 实验发现两带电体之间的相互作用力与带电体所带电荷量以及它们之间的距离有关, 还与带电体的形状、大小和所处的环境有关. 为了突出本质因素, 法国科学家库仑(C. A. Coulomb, 1736—1806)于 1785 年首先提出了点电荷(point charge)的理想模型, 认为当带电体的大小和带电体之间的距离相比很小时, 可以忽略其形状和大小, 把它看作一个带电的几何点. 点电荷类似于力学中质点, 它是人类抽象思维的产物, 它在电学中的地位如同质点模型在力学中的地位.

为了对不同带电体间力的相互作用进行定量研究, 库仑设计了一台精密的扭秤, 史称库仑扭秤实验, 它堪称物理实验的典范之作.

经过大量的实验研究, 库仑总结出了两个点电荷在真空中的相互作用规律, 人们称之为库仑定律. 其表述为:

真空中两个静止点电荷之间的相互作用力 F 的大小与这两个点电荷所带的电荷量 q_1 和 q_2 的乘积成正比, 与它们之间的距离的二次方成反比, 作用力 F 的方向沿着它们之间的连线, 同种电荷相互排斥, 异种电荷相互吸引, 即:

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{e}}_r \quad (9-1-1)$$

$\hat{\mathbf{e}}_r$ 为一单位矢量, 它的方向是由施力物体指向受力物体, 如图 9.1.6 所示. k 为比例常数, 它的值取决于式中各物理量的单位. 当 q_1 和 q_2 同号时, $\mathbf{F}$ 与 $\hat{\mathbf{e}}_r$ 方向相同, 表现为斥力; 当 q_1 和 q_2 异号时, $\mathbf{F}$ 与 $\hat{\mathbf{e}}_r$ 方向相反, 表现为引力.

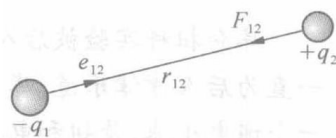


图 9.1.6 库仑力示意图

在国际单位制中, k 的量值为

$$k = 8.987\,551\,787 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

为了简化物理学有关公式,通常引入一个新的物理常数 ϵ_0 , 它与 k 的关系为:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (9-1-2)$$

新的物理常数 ϵ_0 常被称为真空介电常量,也称真空电容率(permittivity of vacuum),它的量值为

$$\epsilon_0 = 8.854\,187\,818 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

因此,真空中的库仑定律表达式又可写为:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{e}}_r \quad (9-1-3)$$

$\mathbf{F}$ 为静电力,或称之为库仑力. 应当注意,式 9-1-3 只适用于计算真空中两个静止的电荷之间的静电力,这种作用力满足牛顿第三定律. 虽然库仑定律是通过宏观带电体的实验研究总结出来的规律,但它的正确性不断经历着实验的考验. 现代高能粒子散射实验进一步证实,在 r 小到 10^{-17} m 的范围内,库仑定律仍然精确地成立. 大距离的结果是通过人造地球卫星研究地球磁场时得到的,它证实库仑定律精确地适用于大到 10^7 m 的范围. 由此可见,库仑定律在 $10^{-17} \sim 10^7 \text{ m}$ 范围内是极其准确而可靠的.



思考题

查阅最新研究资料,考虑当 r 小于 10^{-20} m 时,库仑定律是否准确可靠? 当 r 大于 10^9 m 呢?

静电力属于力的一种,它服从力的叠加原理(superposition principle of force). 设有多个点电荷同时对某一个点电荷作用, $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_n$ 分别为点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 单独存在时对点电荷 q_0 作用的静电力,则 q_0 所受静电力的合力 $\mathbf{F}$ 的矢量和为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i \quad (9-1-4)$$

将库仑定律表达式代入式 9-1-4, 即得静电力叠加原理的表达式

$$\mathbf{F} = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_{i0}^2} \hat{\mathbf{e}}_{i0} \quad (9-1-5)$$

式中 r_{i0} 为 q_i 与 q_0 之间的距离, $\hat{\mathbf{e}}_{i0}$ 为从点电荷 q_i 指向 q_0 的单位矢量. 根据叠

加原理及库仑定律,可求两个不能简化为点电荷的带电体之间作用力,即将带电体划分成无数个能看成为点电荷的小块,求出一个带电体上每一小块对另一带电体上每一小块的相互作用力,再求其矢量和,就可得到两个带电体之间相互作用的静电力.

例题 有两个正的点电荷 q_1 、 q_2 , q_2 的电量是 q_1 的 4 倍,它们的距离为 L . 若将另一点电荷 q_0 放入其中,使 q_0 受到的库仑力为零,试确定 q_0 放置的位置.

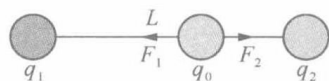


图 9.1.7

解 q_0 分别受到点电荷 q_1 、 q_2 施加的库仑力 F_1 和 F_2 ,若使 q_0 受到的库仑力合力为零,则 F_1 和 F_2 应大小相等,方向相反,分析 F_1 和 F_2 方向的特点,则可以确定 q_0 应放置在 q_1 、 q_2 连线中间的某位置. 设 q_0 距 q_1 为 d ,则距 q_2 为 $L-d$,有

$$F_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_1}{d^2} \hat{e}_r$$

$$F_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_2}{(L-d)^2} \hat{e}_r$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_1}{d^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_2}{(L-d)^2}$$

解得 $d = \frac{L}{3}$.

总之,若有多个电荷静置在空间,它们对其中任一个点电荷作用的总静电力为每一个点电荷对该点电荷的静电力的矢量之和. 任意带电体都可看作是点电荷的集合,运用库仑定律及矢量叠加原理可以计算任意带电体之间的相互作用力,只不过要运用到微积分原理.

§ 9.2 电场 电场强度

人推桌子,通过手和桌子直接接触,把力作用在桌子上;马拉车,通过绳子和车直接接触,把力作用到车上. 在这些例子里,力的作用是通过物体与物体直接接触而发生的,这种力的作用,叫做接触作用或近距作用. 但是,两个点电荷之间的相互作用却可以发生在两个相隔一定距离的点电荷之间. 静电力究竟是怎样传递的呢? 围绕着这个问题,在历史上曾有过长期的争论. 一种观点认为静电力不需要任何媒介,也不需要时间,就能够由一个带电体立即作用到相隔一定距离的另一个带电体上,这种观点叫做超距作用观点;另一种观点认为静电力是通过一种充满在空间的弹性媒质——“以太”来传递的,这种观点称之为近距作用观点. 近代物理学的发展证明,“超距作用”的观点是错误的,静电力的传递虽然速度很快,等于光速,约为 3×10^8 m/s,但并非不需要时间;而历史上持近距作用观点的人所

假定的那种“弹性以太”也是不存在的. 实际上, 静电力是通过电场和磁场来作用的.

历史视窗

以太

以太(ether)是一个饱受争议的名词, 在古希腊, 以太指青天或上层大气, 而在宇宙学中, 人们又用以太表示占据天体空间的物质. 第一个将以太引入物理学的是法国科学家笛卡尔, 它赋予以太某种力学性质. 在笛卡尔看来, 物体之间的所有作用力都必须通过某种中间媒介物质来传递, 不存在任何超距作用. 在光学和电磁学的发展过程中, 以太曾经发挥了重要作用. 为了解释新的观察与实验事实, 许多科学家提出了各种各样的以太假说, 如惠更斯、麦克斯韦、菲涅耳等. 将以太思想推到高潮的是洛仑兹, 他的理论中的以太除了作为电磁波的荷载物和绝对参照系以外, 已失去所有其他具体生动的物理性质. 为了测出地球相对以太参照系的运动, 19 世纪 80 年代, 迈克尔逊和莫雷进行了光速实验, 却得到否定的结果, 即地球相对以太不运动. 在 19 世纪末和 20 世纪初, 虽然仍有科学家还努力拯救以太, 但在狭义相对论确立以后, 它终于被物理学家们抛弃, 人们取而代之的是场的思想. 随着量子力学的兴起, 人们认识到真空并不是绝对的空, 科学家虽然摒弃了机械的以太, 但并非意味着以太绝对的消亡. 不管怎样, 以太作为一种思想, 一种科学方法, 它蕴涵的科学精神将永远具有旺盛的生命力.

9.2.1 电场

19 世纪初, 英国物理学家法拉第提出新的观点: 在电荷周围存在着一种特殊形态的物质, 称为**电场**(electric field). 电荷与电荷之间的相互作用是通过电场来传递的, 电场的的一个重要特性就是它能对放入其中的任何带电体有力的作用, 即**电场力**(force due to electric field). 例如前面所说的两个点电荷 q_1 、 q_2 之间的库仑力可理解为 q_2 处在 q_1 所产生的电场中受该电场施加给它的力. 其作用可用图 9.2.1 来表示.

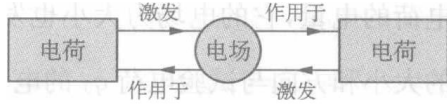


图 9.2.1 电场作用原理图

法拉第提出“场”的概念, 是对传统科学观念的一个重大突破, 他将近距媒质传递作用观念引进了物理学中, 对于电磁学以及整个物理学的发展都产生了深远的影响, 显示了他惊人的想象力, 为此, 爱因斯坦高度评价“想象力比知识更重要, 因为知识是有限的, 而想象力概括着世界上的一切, 推动着进步, 并且是知识进化的源泉.”

现代物理学表明, 场是客观存在的, 它也是物质存在的一种形式, 它与实物粒子一样具有质量、能量、动量等物质的基本属性. 相对于观察者静止的电荷在其周围空间激发的电场称为**静电场**.

9.2.2 电场强度

风看不见摸不着,但可以根据红旗飘动的方向判断风的方向;电场看不见摸不着,可在电场中引入一个试验电荷(test charge) q_0 来定量研究.电场的一个重要性质是对放入其中的电荷有力的作用,为了描述电场对试验电荷力的作用,可引入描述电场的物理量.为了使测量精确,试验电荷必须满足两个条件:试验电荷的电量 q_0 必须充分小,以免改变原有的电荷分布,从而改变了原来的电场分布;试验电荷 q_0 的几何线度也要充分小,即可以把它看作点电荷,这样才可以用它来确定空间各点的电场性质.今后把满足这样条件的电荷 q_0 叫做试验电荷.



思考题

试验电荷要求所带电量足够小,几何线度也要求充分小,“小”分别是相对什么而言,相关研究资料对“小”如何界定?

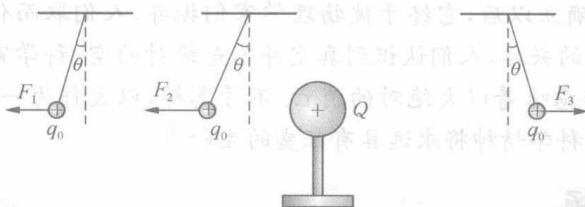


图 9.2.2 试探电荷所受电场力 F 的大小和方向都与场点位置有关

如图 9.2.2 所示,空间有一场源电荷 Q ,它在其周围空间相应地激发一个电场,现将一个试验电荷放入电场某一位置,它受电场力如图 9.2.2 所示,改变试验电荷的电量,它的电场力大小也发生变化.实验表明,对于电场中同一点,比值 $\frac{F}{q_0}$ 的大小和方向与试验电荷 q_0 的电荷量无关,仅取决于场源电荷的分布和场点的位置.因此,这个比值反应了空间某一点的电场性质,它被定义为**电场强度**,简称**场强**,记作 E ,即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (9-2-1)$$

可见,静电场中某一点的电场强度是描述该点电场性质的一个矢量,其大小等于单位电荷在该点所受到电场力的大小,其方向与正电荷在该点所受电场力的方向一致.电场强度的单位是牛顿/库仑($\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$),也可表示为伏特/米($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$).一般说来,电场空间不同点的场强,其大小和方向都可以不同.如果电场空间各点的场强,其大小和方向都相同,这种电场叫做**均匀电场**,它是一种特殊情况.由于场强是空间坐标的矢量函数,所以电场是**矢量场**.

9.2.3 点电荷的电场强度

点电荷在空间产生电场,研究点电荷产生的电场是研究点电荷系和带电体产生电场的基础.设点电荷 q 激发电场,它为场源电荷,它所在处为源点,将距离场源 r 处某点称为场点.若在场点处放一个试验电荷 q_0 ,根据库仑定律,作用在 q_0 上的电场力为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \hat{\mathbf{e}}_r \quad (9-2-2)$$

根据场强的定义,该场点的场强为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{e}}_r \quad (9-2-3)$$

由上式可知,在场源为点电荷的真空电场中,任一点的场强 $\mathbf{E}$ 的大小与场源电荷 q 的大小成正比,与场点到场源的距离 r 的平方成反比,与试验电荷 q_0 的大小无关.当场源电荷 q 为正值时, $\mathbf{E}$ 的方向由场源指向场点;当场源电荷 q 为负值时, $\mathbf{E}$ 的方向由场点指向场源.在以场源电荷为中心的同心球面上各场点处,场强 $\mathbf{E}$ 的大小相同,但是方向不同,可以证明同心球面各场点处场强的方向与球面垂直,即点电荷所在空间的电场分布为球对称.

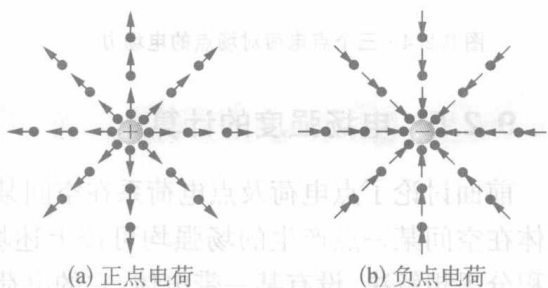


图 9.2.3 点电荷产生的场强分布

9.2.4 场强叠加原理

设有 n 个点电荷同时在空间激发电场,将试验电荷 q_0 放置在场点 P 处, q_0 所受的总电场力等于各个点电荷单独存在时对 q_0 所施加的电场力的矢量和,即

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \cdots + \mathbf{F}_n \quad (9-2-4)$$

将上式两边分别除以 q_0 ,则有

$$\frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \cdots + \frac{\mathbf{F}_n}{q_0} \quad (9-2-5)$$

根据场强定义,可得

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i \quad (9-2-6)$$

$\mathbf{E}$ 为试验电荷所在场点处的总场强, $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \cdots, \mathbf{E}_n$ 分别为各个点电荷单独

存在时在该点所激发的场强, 即

多个点电荷组成的点电荷系在空间某点激发的电场强度, 等于各个点电荷单独存在时在该点激发电场强度的矢量和, 这就是场强叠加原理。

将点电荷的电场强度公式代入上式, 可得场点 P 处的电场强度为

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \hat{\mathbf{e}}_r \quad (9-2-7)$$

式中 $\hat{\mathbf{e}}_{r_1}, \hat{\mathbf{e}}_{r_2}, \dots, \hat{\mathbf{e}}_{r_n}$ 分别是场点 P 相对于各个场源电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 的位矢 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_n$ 方向上的单位矢量。

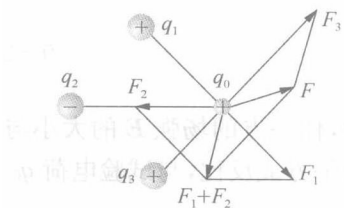


图 9.2.4 三个点电荷对场点的电场力

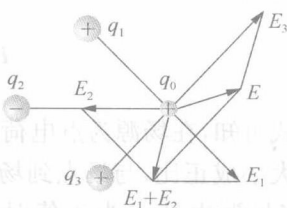


图 9.2.5 三个点电荷对场点的总场强

9.2.5 电场强度的计算

前面讨论了点电荷及点电荷系在空间某一点的电场强度公式, 实际上任意带电体在空间某一点产生的场强均可按上述场强公式及场强叠加原理和数学上的微积分思想解决。设有某一带电体, 它的电荷是连续分布的, 可以将它看成为无数电荷元 dq 的集合, 每一个电荷元 dq 可视作点电荷, 它在场点 P 处的电场强度为

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \hat{\mathbf{e}}_r \quad (9-2-8)$$

式中 r 是电荷元 dq 到场点 P 的位矢大小, $\hat{\mathbf{e}}_r$ 为其单位矢量, 根据电场强度叠加原理, 整个带电体在该点产生的合电场强度可用积分式表示为

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\hat{\mathbf{e}}_r}{r^2} dq \quad (9-2-9)$$

注意

体元、面元、线元是非常重要的数学思想, 它们具备宏观上无限小和微观上无限大的特性。只有在宏观上无限小, 才能认为某些物理量是相等的; 而在微观上无限大, 才能认为它的某些物理量是均匀分布而非点状分布。

一般的带电体形状各异, 根据不同的情况, 有时把电荷看成在一定体积内连

续分布(体分布),有时把电荷看成在一定曲面上连续分布(面分布),有时把电荷看成在一定曲线上连续分布(线分布),等等.与此相应地,就需要引入电荷的体密度、面密度、线密度等概念.下面分别介绍电荷体密度 ρ (volume density of charge)、面密度 σ (surface density of charge)、线密度 λ (linear density of charge) 三个重要概念.

电荷体密度就是单位体积内的电荷量 设在体电荷内任一点处取一个体积元 $\Delta\tau$,该体积元内电荷量为 Δq ,则该点的电荷体密度定义则为

$$\rho = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta\tau} = \frac{dq}{d\tau} \quad (9-2-10)$$

若任一个体积元 $d\tau$ 中的电荷 $dq = \rho d\tau$ 在空间某处产生的电场为 $d\mathbf{E}$,则整个体电荷在该处激发的总场强为

$$\mathbf{E} = \int_{(\tau)} d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{(\tau)} \frac{\rho d\tau}{r^2} \hat{\mathbf{e}}_r \quad (9-2-11)$$

电荷面密度就是单位面积上的电荷量 设在带电面上任取一面积元 ΔS ,该面积元上电荷量为 Δq ,则该点的电荷面密度定义则为

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta S} = \frac{dq}{dS} \quad (9-2-12)$$

若任一个面积元 dS 中的电荷 $dq = \sigma dS$ 在空间某处产生的电场为 $d\mathbf{E}$,则整个体电荷在该处激发的总场强为

$$\mathbf{E} = \int_{(S)} d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{(S)} \frac{\sigma dS}{r^2} \hat{\mathbf{e}}_r \quad (9-2-13)$$

电荷线密度就是单位长度上的电荷量 设在细线上任取一线元 Δl ,该线元上电荷量为 Δq ,则该点的电荷线密度定义则为

$$\lambda = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta l} = \frac{dq}{dl} \quad (9-2-14)$$

若任一个线元 dl 中的电荷 $dq = \lambda dl$ 在空间某处产生的电场为 $d\mathbf{E}$,则整个体电荷在该处激发的总场强为

$$\mathbf{E} = \int_{(l)} d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{(l)} \frac{\lambda dl}{r^2} \hat{\mathbf{e}}_r \quad (9-2-15)$$

例题 1 如图 9.2.6 所示,一对相距 l 的等量异号点电荷 $\pm q$ 组成一个点电荷系统,求两电荷中垂面上一点 B 和延长线上一点 A 的电场强度.

解 (1) 当两个等量异种点电荷 $+q$ 和 $-q$ 的距离 l 比从它们连线中点到所