



21 世纪高等学校教材

大学物理

(中册)

► 范淑华 主编



华中科技大学出版社

E-mail: hustpp@wuhan.cngb.com

21 世纪高等学校教材

大学物理

(中册)

主 编 范淑华

编 者 范淑华 葛国勤

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理(中册)/范淑华 主编

武汉:华中科技大学出版社,2004年3月

ISBN 7-5609-3114-6

I. 大…

II. ①范… ②葛…

III. 物理学-高等学校-教材

IV. O4

大学物理(中册)

范淑华 主编

策划编辑:周芬娜

封面设计:刘 卉

责任编辑:周芬娜

责任监印:张正林

责任校对:朱 霞

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山

邮编:430074

电话:(027)87557437

录 排:华大图文设计室

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:850×1168 1/32

印张:9.25

字数:223 000

版次:2004年3月第1版

印次:2005年3月第3次印刷

定价:12.00元

ISBN 7-5609-3114-6/O·309

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

前 言

《大学物理》是为高等学校工科大学物理课程编写的教科书。本书是在原华中理工大学物理系1989年3月出版的《大学物理》和1998年1月出版的《大学物理》的基础上修订出版的。书中除包含前国家教委委托工科物理课程教学指导委员会制订的、并经国家教委批准印发的1995年修订版《大学物理课程教学基本要求》的全部内容外,加强了近代和现代物理方面的内容,增添了相应的专题,以便能更好地适应面向21世纪的教学需要。

本书注意加强基础、精选内容,广度和深度适中,容量适度。学生在有限的学时内可以学到物理学的基本知识和方法,为学习专业课程和掌握近代科学技术打下基础。

全书分为上、中、下三册。上册包括第一篇力学、第二篇热学。中册包括第三篇电磁学。下册包括第四篇振动与波动、第五篇波动光学、第六篇量子物理学基础。

参加本书编写工作的教师有(以所编内容先后为序):项林川(第1、2、3、4、5章,专题A),汤钧民(第6、7、8章,专题B,上册附录),范淑华(第9、10、13、14章),葛国勤(第11、12章,专题C、D),黄伯坚(第15、16、17、18、19、20章,专题F),王瑞西、肖奕(第21、22、23、24章,专题E)。

对朱苍磐、周卓嫩、高国勋、邓顺蓉、孙威娜、易丽莎、张文华、王瑞西等老师以前的工作,在此表示感谢。

书中若有错误或不足之处,热诚欢迎读者批评指正。

黄伯坚

2003年9月

目 录

第三篇 电 磁 学

第9章 静电场	(3)
第1节 电荷和库仑定律	(3)
第2节 静电场 电场强度	(9)
第3节 静电场的高斯定理	(20)
第4节 静电场的环路定理	(34)
第5节 电势差和电势	(37)
第6节 电势梯度	(44)
第7节 静电势能	(47)
习题	(52)
第10章 静电场中的导体和电介质	(57)
第1节 静电场中的导体	(57)
第2节 静电场中的电介质	(67)
第3节 电容和电容器	(77)
习题	(85)
第11章 磁场与电磁相互作用	(91)
第1节 磁性与磁场	(91)
第2节 带电粒子在电磁场中的运动	(95)
第3节 电流与磁场	(109)
第4节 毕奥-萨伐尔定律	(123)
第5节 安培环路定理	(128)
第6节 磁场的高斯定理	(136)
*第7节 运动电荷的电磁场	(140)

习题	(149)
第12章 介质中的磁性	(158)
第1节 顺磁性与抗磁性	(158)
第2节 磁化强度与介质中磁场描述	(162)
第3节 磁介质的磁化规律与铁磁性	(168)
习题	(175)
第13章 电磁感应	(177)
第1节 法拉第电磁感应定律	(177)
第2节 感应电动势	(184)
第3节 互感与自感	(194)
第4节 磁场的能量	(203)
习题	(207)
第14章 麦克斯韦方程组	(215)
第1节 位移电流	(215)
第2节 麦克斯韦方程组	(223)
习题	(227)
现代物理专题C——从麦克斯韦电磁理论到磁单极子	(229)
现代物理专题D——超导	(256)
附录	(277)
本册物理量	(277)
习题答案	(280)

第三篇

电 磁 学

本篇将讨论物质运动的另一种形态——电磁运动。电磁现象是自然界中一种普遍存在的现象,电磁相互作用使电子和原子核结合在一起形成原子,原子与原子结合形成分子,分子再结合形成宏观物体。可以说,自然界中的许多现象都与电磁相互作用相联系。例如,绿色植物吸收太阳光(电磁波),将能量转换为碳水化合物中分子的电磁势能,而碳水化合物是地球上一切生命的基础。因此,研究电磁运动对于深入认识物质世界是十分重要的。并且,在人类现代生活、生产领域以及高新科学技术研究中的许多内容都与电磁现象和电磁规律紧密相关。**电磁学就是研究物质间电磁相互作用,电磁场产生、变化和运动的规律的一门学科。**所以,学习电磁学并掌握电磁运动的基本规律具有重要意义。

本篇共分六章,先分别讨论静电场及稳恒磁场的性质和基本规律,以及它们与物质间的相互作用;然后讨论电场与磁场的相互联系——电磁感应,以及普遍情况下电磁场的运动规律;最后介绍两个有关的现代物理专题。

第9章 静 电 场

本章主要讨论在真空中相对参考系静止的电荷所激发的静电场的性质,以及电荷与场相互作用的规律。主要内容:首先阐述电荷的基本性质,从库仑定律出发引入描述静电场的基本物理量——电场强度,从而说明电荷之间的相互作用是如何进行的;再从电场通量及电荷在静电场中移动时电场力做功导出反映静电场性质的两个基本规律——高斯定理和环路定理,并引入描述静电场的另一个物理量——电势;最后讨论电荷在电场中的静电势能。

第1节 电荷和库仑定律

一、电荷

电荷作为物质的一种基本属性(如同质量是反映物质的另一种基本属性一样),它不能存在于物质之外。自然界出现的电磁现象都可归因于物体带上了电荷。因此在讨论电磁相互作用前,我们对电荷的基本性质给出以下几点阐述。

1. 电荷的种类

实验证明,物体所带电荷只有两种,即正电荷、负电荷。这是1747年美国物理学家富兰克林(B. Franklin, 1706—1790)发现电现象后首先对两种不同的电荷命名的,在国际上一直沿用到今天。实际上,“正”和“负”的规定完全是偶然的,如果把正、负电荷的名称交换,这样形成的自然界与我们现在的自然界是相同的。从根本上来讲,正电荷和负电荷是电荷对偶性的两个对立面,电荷对偶性又是自然界普遍对称性的一种反映。电荷对电荷的相互作用力表现为:同种电荷互相排斥,异种电荷互相吸引。

宏观带电物体所带电荷的种类不同,根源在组成它们的三种基本粒子所带电荷种类不同,电子带负电荷、质子带正电荷、中子不带电荷。在正常情况下,物体任何一部分所含的电子数目和质子数目是相等的,所以对外不表现电性,称为电中性。而当物体带负电时,说明它从别的物体获得了额外的电子,当物体带正电时,说明它失去了电子。

带电物体带电的多少称为**电量**,通常用 q 或 Q 表示,在国际单位制中,它的单位名称为库仑,符号为C。正电荷电量取正值,负电荷电量取负值,一个带电体所带电量为其所带正、负电量的代数和。

2. 电荷的量子性

20世纪初物理学中提出了量子化的概念。当某一物理量的值不是连续的,而只能取一系列分立值时,就称这一物理量是量子化的。实验表明,电子是自然界具有最小电量的粒子,其电量的绝对值为

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

而其他微观粒子的电量都是电子电量的整数倍,即

$$q = \pm ne \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

显然任何物体所带的电荷都不能取任意值,而是以一个个不连续的量值出现。电量的这种特性称为**电荷的量子化**。

电量的这个基本量子 e 是如此之小,一个宏观带电体所带电量是 e 的许许多多倍以至于这种量子化特性在宏观电磁现象中表现不出来。这就像我们在呼吸时感觉不出空气是一个个分子、原子组成的一样。因此,我们在讨论宏观电磁现象时,从平均效果上看,可以认为电荷是连续分布在带电体上的,从而忽略了电荷的量子化所引起的微观起伏。

那么 e 是否是最基本的呢?1964年,盖尔曼首先提出夸克模型(quark model),认为一些粒子是由更小的粒子“夸克”构成,并预

计夸克所带的电量是 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 。现代的一些粒子物理实验证实了夸克的存在,但由于夸克受到“禁闭”而未能检验到单个的自由夸克。因此,分数电荷仍然是个悬而未决的课题。不过,即使分数电荷存在,也不会影响电荷的量子性,只需把电荷的基本量子单位缩小到原来的 $1/3$ 即可。

3. 电荷守恒定律

无论是在宏观尺度,还是在微观尺度,电荷遵从电荷守恒定律,即一个孤立系统中正、负电荷的代数和是不变的。任何宏观物体的带电过程并不“产生”电荷,只是将原有的电荷部分分离开,分别聚集在物体的不同位置上,或使一种符号的电荷从一物体迁移到另一物体,整个系统内净电荷数(总电荷数)不变。近代物理实验表明,在微观粒子的相互作用中,电荷是可以产生和消灭的。例如,一个高能光子在原子核附近能转变为一个正电子和一个负电子,即产生一个电子对。反之,一个正电子和一个负电子相遇,在一定条件下,又会同时消失,而产生几个光子,这一过程又称为电子对湮灭。但在这些过程中,系统内电荷的代数和不变,即电荷守恒。电荷不能离开物质而存在,而电荷守恒定律又可归纳于物质守恒定律之中,是自然界最基本的守恒定律之一。

4. 电荷的相对论不变性

有电荷就有质量,零静止质量的粒子只能是电中性的。在相对论中,质量是与物体的运动速度相关的,或者说是与参考系有关的。对不同参考系,同一物体的质量是不同的,即质量不是相对论不变量。而理论和实验证明,电量是相对论不变量。在不同参考系观察,同一物体的运动状态不同,但所带电荷与运动状态无关。例如,在实验室测量从高能加速器发射出的微观粒子(如电子),当速度接近真空中的光速时($v=0.98c$),其质量变化非常明显($m \approx 5m_0$),但其电量却没有任何变化的迹象($e=1.60 \times 10^{-19} \text{C}$)。这一事实表明,物体的电量具有相对论不变性。

最后须指出,人类对电荷的认识是不完全的。比如,电子有多大?它能不能再分成更小的粒子?基本电荷量子为什么是 e (或 $\frac{1}{3}e$)?这些相同符号的电荷为什么能聚集在如此小的空间而不会因斥力崩溃?当然这些问题不会影响我们下面对宏观电磁运动规律的讨论。

二、库仑定律

两物体之间的电相互作用,除了与它们所带电荷和相互间的距离有关之外,还与它们的形状及电荷分布有关。实验指出,当带电体本身的线度比所研究的问题中涉及的距离小很多时,带电体的形状及电荷分布均无关紧要,该带电体就可看作是一个点带电体,简称为点电荷。此时两带电体之间的相互作用仅由它们所带电量及相互间的距离决定。当在宏观尺度讨论电子、质子等带电粒子时,完全可以把它们视为点电荷。

1785年,法国科学家库仑(Charles Augustin de Coulomb, 1736—1806)通过实验总结出静止点电荷之间相互作用的基本规律——库仑定律。定律表述如下:

在真空中,两个静止的点电荷之间相互作用力的大小与它们的带电量成正比,和它们之间距离 r 的平方成反比,作用力的方向沿着它们的连线。同号电荷相斥,异号电荷相吸。如图9-1-1所示,两个点电荷的带电量分别为 q_1 、 q_2 ,它们之间的距离为 r , e_r 代表由 q_2 指向 q_1 的单位矢量,则 q_2 对 q_1 的作用力为

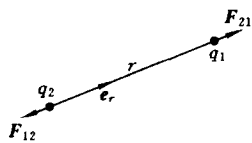


图 9-1-1 库仑定理

$$F_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} e_r, \quad (9-1-1)$$

两个静止的点电荷之间的作用力符合牛顿第三定律,所以 q_1 对 q_2 的作用力为

$$F_{12} = -F_{21}$$

当 q_1, q_2 同号时, F_{21} 与 e_r 同向, F_{12} 与 e_r 反向,两个点电荷互相排斥。

当 q_1, q_2 异号时, F_{21} 与 e_r 反向, F_{12} 与 e_r 同向,两个点电荷互相吸引。

在国际单位中,实验测得(9-1-1)式中的比例系数 k 为

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.987\,5 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

式中, ϵ_0 称为真空介电常量或真空电容率,其数值和单位为

$$\epsilon_0 = 8.854\,2 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$$

因此真空中的库仑定律可表示为

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

库仑扭秤实验是在空气中进行的,实验证实两点电荷在空气中的相互作用力与在真空中的相互作用力相差甚微,因此可认为(9-1-2)式对空气中点电荷也成立。从库仑定律表达式看,引入 4π 因子使(9-1-2)式比(9-1-1)式变复杂了,但会使以后常用到的电磁学的定理和公式的形式变得简单。

【例题9-1】 氢原子内电子和原子核之间的距离 $r=0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$,试计算电子与原子核之间的库仑力和万有引力,并比较两者的大小。已知氢原子核(即质子)的质量为 $m_p=1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$,电子的电荷为 $-e$,质量为 $m_e=9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$,原子核的电荷为 $+e$,万有引力常量 $G=6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ 。

解 根据库仑定律,电子与原子核之间库仑力的大小为

$$f_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{9.0 \times 10^9 \times (1.60 \times 10^{-19})^2}{(0.53 \times 10^{-10})^2} \text{ N} = 8.20 \times 10^{-8} \text{ N}$$

根据万有引力定律,电子与原子核之间万有引力的大小为

$$\begin{aligned} f_m &= G \frac{m_e m_p}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{9.11 \times 10^{-31} \times 1.67 \times 10^{-27}}{(0.53 \times 10^{-10})^2} \text{ N} \\ &= 3.61 \times 10^{-47} \text{ N} \end{aligned}$$

两者之比为

$$\frac{f_e}{f_m} = 2.27 \times 10^{39}$$

由此可见,在原子内电子与原子核之间的库仑力远大于电子与原子核之间的万有引力。因此,在处理电子和原子核之间的相互作用时,万有引力可以忽略不计。正是库仑力的作用,电子和原子核能够形成原子,原子和原子能够形成分子,而宏观物体主要也是靠原子、分子间的库仑力维系的。

【例题9-2】 原子核中两个质子相距约 $4.0 \times 10^{-15} \text{ m}$, 求两质子之间的库仑力。

解 根据库仑定律,两质子之间的库仑力

$$f_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{9 \times 10^9 \times (1.60 \times 10^{-19})^2}{(4.0 \times 10^{-15})^2} \text{ N} = 14 \text{ N}$$

原子核内质子之间有这样大的排斥力,这些质子又是怎样挤在这么小的空间范围呢?显然要形成原子核,必定存在一种强的吸引力,这就是核力。核力是核子间的相互作用力,不是电力,而是强相互作用的短程力。

库仑定律只适用于两个点电荷。实验证明,当空间有多个点电荷同时存在时,每两个点电荷之间的相互作用仍然遵从库仑定律。因此,多个点电荷对一个点电荷的作用力,等于各个点电荷单独存在时,对该点电荷的作用力的矢量和。这一结论称为电力叠加原理。具体地,对 n 个点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 组成的点电荷系,当它们单独存在时对另一点电荷 q_0 的作用力分别为 $F_1, F_2, \dots, F_n$, 则根据电力叠加原理, $q_1, q_2, \dots, q_n$ 同时存在时施于 q_0 的合力为

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 + \dots + \boldsymbol{F}_n = \sum_{i=1}^n \boldsymbol{F}_i = \sum_{i=1}^n \frac{q_i q_0}{4\pi\epsilon_0 r_{i0}^2} \boldsymbol{e}_{r_{i0}} \quad (9-1-3)$$

式中, r_{i0} 和 $\boldsymbol{e}_{r_{i0}}$ 分别表示点电荷 q_i 到 q_0 的距离和单位矢量。

对有限大小的带电体之间的相互作用力,显然不能用单一的距离来表达。在这种情况下,可在带电体上取足够小的体积元,以至每个体积元都可看成是一个点电荷,而整个带电体可看成是一个点电荷系。带电体之间的相互作用力可归结为两点电荷系之间的作用,因此仍可用库仑定律通过积分求解。

库仑定律与万有引力定律类似,也是平方反比规律。如何确信

库仑定律中 r 的指数也是2,而不是其他的数,如2.01或1.99呢?历史上不断有人设计各种实验来确定这个指数。若将 r 的指数设为 $2+\delta$,1773年卡文迪许的静电实验给出 $|\delta|\leq 0.02$,1873年麦克斯韦改进实验后得出 $|\delta|\leq 5\times 10^{-5}$,1971年威廉姆斯(Williams)等人的实验给出 $|\delta|\leq |2.7\pm 3.1|\times 10^{-16}$,1982年Crandall给出 $|\delta|\leq 6\times 10^{-17}$,等等。这些实验的意义不仅是对库仑定律中 r 的指数的检验,而且还在于平方反比定律在什么距离范围内成立。现代实验已证实, r 从 $10^{-17}\sim 10^7\text{m}$ 的广大范围内库仑定律都是正确有效的。

值得注意的是,近代量子理论指出,库仑定律中 r 指数的偏差 δ 与光子的静止质量有关,若 δ 的值不为零,则光子的静止质量也不为零。即库仑定律若严格遵守平方反比关系,则光子的静止质量就为零。现在的实验给出光子的静止质量的上限 $m_0\leq 10^{-51}\text{g}$,但有关光子静止质量产生的理论机制并不清楚。

第2节 静电场 电场强度

库仑给出了两个静止点电荷之间的相互作用力的规律,但是没有说明这种电相互作用力是如何传递的,历史上曾经有过两种观点:一种认为是超距作用,即两个点电荷之间的相互作用力不需要媒介,也不需要传递时间;另一种认为是近距作用,并认为电相互作用是通过一种充满在宇宙空间的稀薄、透明并且具有弹性的媒质——“以太”来传递的。近代物理学的理论和实验证实,库仑力既不是超距作用,空间也不存在“以太”,而是通过一种场物质——电场来作用的。下面先简要介绍场的概念。

一、场

在数学上,简单地讲,场是一个与空间位置有关的量。例如,大气中的温度 T ,在空间每一点上它都有一个特定的值,可用一函数

$T(x, y, z)$ 表示每一点处的温度。当然温度也可随时间变化,它也是时间 t 的函数,即 $T(x, y, z, t)$,空间不同地点有不同温度就构成一个温度场,其场量就是温度 T 。又如大气层中的风,在大气空间每一点都对应一个空气速度 v ,这个速度也是空间位置和时间的函数,即 $v(x, y, z, t)$,它构成一个速度场,场量是 v 。通常将场量是标量的场称为标量场(如温度场),而场量为矢量的场称为矢量场(如速度场)。

在物理上,场是弥漫在空间的一种物质,它具有可入性,与实物有不同的物质形态,例如,引力场、电磁场等,它们与实物具有不同的特征、性质、运动规律,实物之间的各种相互作用都是通过各种场来传递的。当然,描述这些场的场量,同样具有上面数学有关场量的特征。

二、静电场

实践证明,电荷周围存在着由它产生的电场。两电荷是通过各自在空间产生的电场与另一电荷相互作用的,因此电相互作用力也可称为电场力。产生电场的电荷称为场源电荷,相对参考系静止,且电量不随时间改变的电荷所产生的电场称为静电场,静电场对电荷的作用力又称为静电力。电场传递这种作用的速度是有限的,这个速度就是光速 c 。由于静电场和场源电荷总是相伴而生,静止电荷之间通过各自电场相互作用时,显示不出传递作用所需要的时间。但是对于运动电荷,场物质的实在性就突出地显示出来,例如,在发射电磁波的天线中加速运动的电子对远处接受天线中电子的作用就是通过电磁场来传递的。

静电场的基本性质如下:

- ① 放在电场中的带电体,都会受到电场力的作用。
- ② 带电体在电场中移动时,电场力做功,这表明电场具有能量。

下面我们根据这两个方面来研究静电场的性质及规律。

三、静电场的电场强度

1. 电场强度

如图 9-2-1 所示,设空间有一不变的电荷 Q 静止不动,则其周围存在着由它产生的静电场。根据基本性质可知,电场对其他电荷有作用力,因此可引入点电荷 q_0 来检验该电场。作为检验电荷的 q_0 必须是很小很小的点电荷,首先其带电量必须足够小,以免由于它的引入对原有的电场产生影响。其次 q_0 的几何线度也必须充分小,以便其能反映电场中每一点的性质。

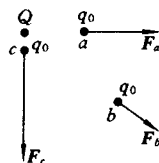


图 9-2-1 用点电荷 q_0 检验电荷 Q 的电场

实验表明,将 q_0 置于电场中不同位置并保持静止,其所受力的大小和方向逐点不同。当改变 q_0 的带电量时,发现电场中给定点处检验电荷受力 F 的方向不变,大小与 q_0 成正比,但比值 $\frac{F}{q_0}$ 与检验电荷无关。由此可知,这个比值应是描述场源电荷电场的物理量。我们定义这个物理量为电场中给定点的**电场强度矢量**,简称**场强**,用 E 表示,即

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

这表明,电场中任意点的电场强度等于静止于该点的单位正电荷所受的电场力。

在国际单位制中, E 的单位是牛顿/库仑 (N/C), 或伏特/米 (V/m) (见第 6 节 (9-6-4) 式)。

2. 场强叠加原理

当空间同时存在若干点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 时, 仍将检验电荷 q_0 放入电场中的任意点 P 处, 由电力叠加原理 (9-1-3) 式可知, q_0 受到的合力为