



全国高等师范专科学校教材

电 磁 学

郑庆升 主编

华东师范大学出版社



全国高等师范专科学校教材

电 磁 学

主 审 宓子宏

主 编 郑庆升

副 主 编 卓宗基

编写组成员(按姓氏笔划为序)

史守华 卓宗基

郑庆升 彭玉堂

华东师范大学出版社

出版说明

党的十一届三中全会以来,师范专科教育有了很大的发展,但是,作为师专教学三大基本建设之一的师专教材建设,却始终没有得到很好的解决。近几年来,有的地区和学校为了改变这种状况,也零星地编写了一些师专教材,可是,不成套,有的学科甚至编写了几种,质量参差不齐。虽对师专无教材的局面有了部分改变,但终因没有一套全国统一的、高质量的教材而影响了师专的教学质量。

为了进一步发挥师专的办学效益,彻底改变师专没有适合自己特色的教材的局面,国家教委师范司在1987年制订了《二年制师范专科学校八个专业教学计划》;继之又约请了全国有教学经验的专家、教授编写了这八个专业的《教学大纲》;1988年7月在长春又召开了全国二年制师专教材编写出版规划会议,会上研究制订了《1988~1990年二年制师专八个专业教材编写出版规划》。八个专业是:中文、历史、政治教育、数学、物理、化学、生物和地理。

在国家教委师范司的统一部署、各省市自治区教委、高教局的大力帮助和出版社的积极组织下,这套教材聘请了一些长期从事师专教学工作,具有丰富的教学实践经验和较高学术水平的教授或副教授担任各科主编。各科教材由学术造诣比较深、熟悉师专教学情况的专家负责主审。各位主编根据国家教委师范司拟定的《关于编写二年制师专教材的指导思想和基本原则》及各科《教学大纲》的精神,组织编者收集资料,综合研究,争取编出一套具有师专自身特色的教材,以适应师专教育的迫切需要。

现在,在各方面的大力支持下,经过主编、主审和各位编写人

页的努力和辛勤劳动，这套教材将陆续面世。我们热忱地欢迎师专的广大师生使用它，并在使用过程中，多提宝贵意见，使之不断完善，不断提高，以保持与当代科学和师专教育实践的同步发展。

1990 年 1 月

序

电磁学是物理专业的一门重要基础课,内容成熟,系统严密,与其它学科和课程有密切的关系。本书是由四位长期从事高等师专教学工作、具有丰富的教学实践经验和较高学术水平的教师,根据国家教委师范司制定的《教学大纲》,广泛收集教学资料,经过多次修改,精心编写而成的。

本书在传统电磁学的基本内容和体系下,力求在广泛介绍电磁现象的基础上,着重于基本物理概念和基本物理规律的阐述。在保持科学上的严密性的同时,注意使论述方式尽量适合师专学生的特点,以使学生在理解基本物理概念和基本物理规律的前提下,掌握电磁学各部分内容的内在联系,逐步培养学生分析问题和解决问题的能力。

全书在每章末都有小结,以引导学生加深对基本物理概念的理解;还编选了大量的思考题和习题,以培养学生运用理论知识的能力。此外,为了让学有余力的学生扩大知识面,以活体字排版对某些问题作了比较深入的探讨,供学生选择阅读(用*号表明)。

本书最后附有参考书目,便于学生参阅。作者在教学和编写本书过程中曾从这些参考书中得到启发和帮助。

希望本书出版后,通过教学实践,不断进行修改,使内容得到进一步充实和提高,成为深受高等师范专科学校欢迎的教材。

宓子宏 1991 年

目 录

第一章 静电场	1
§1 静电现象	1
§2 库仑定律	5
§3 电场强度	10
§4 高斯定理	29
§5 静电力的功 电位	45
§6 电偶极子	70
小结	75
思考题一	77
习题一	79
第二章 静电场中的导体	86
§1 静电平衡	86
§2 电场中的导体空腔	97
§3 电容及电容器	105
§4 电荷在电场中的运动	116
§5 真空中电场的能量	122
小结	133
思考题二	135
习题二	139
第三章 静电场中的电介质	145
§1 电介质的极化	145
§2 极化强度矢量与极化电荷	149
§3 有介质时的静电场方程	156
§4 电场的边值关系	166
§5 静电场的能量和场能密度	169
小结	170
思考题三	173

习题三	175
第四章 稳恒电流	182
§1 电流	182
§2 电流的连续性方程	185
§3 欧姆定律	188
§4 焦耳定律	194
§5 金属导电的经典微观解释	197
§6 电源和电动势	203
§7 含源电路的欧姆定律	208
§8 电流、电压和电阻的测量	216
§9 基尔霍夫定律	222
§10 接触电位差 温差电现象	228
§11 液体导电与气体导电	233
小结	238
思考题四	240
习题四	241
第五章 稳恒电流的磁场	248
§1 基本磁现象	248
§2 安培定律	252
§3 磁感应强度矢量	256
§4 磁场的高斯定理	259
§5 毕奥-沙伐尔定律	263
§6 电流磁场的计算	264
§7 安培环路定理	272
§8 磁场对载流导线的作用	279
§9 安培的定义及电流强度的绝对测量	286
§10 磁场对运动带电粒子的作用	287
小结	298
思考题五	300
习题五	303
第六章 电磁感应和暂态过程	314

§1 电磁感应现象	314
§2 法拉第电磁感应定律	320
§3 动生电动势	326
§4 感生电动势 涡旋电场	332
§5 互感和自感	340
§6 涡电流 趋肤效应	351
§7 电流的磁能	356
§8 暂态过程	360
小结	376
思考题六	379
习题六	382
第七章 磁介质	390
§1 磁介质	390
§2 磁场的边值关系	401
§3 顺磁性与抗磁性	403
§4 铁磁性	409
§5 磁路	421
§6 磁场的能量 磁能密度	426
§7 地球的磁场	428
小结	431
思考题七	435
习题七	437
第八章 单相交流电路	442
§1 交流电	442
§2 单一参数的交流电路	449
§3 交流电路中的矢量图解法	455
§4 交流电路的复数解法	464
§5 交流电路定律的复数形式	472
小结	477
思考题八	480
习题八	481

第九章 电磁场和电磁波.....	487
§1 位移电流	487
§2 麦克斯韦方程组	493
§3 平面电磁波及其性质	497
§4 电磁波的产生	506
§5 光的电磁理论和电磁波谱	512
§6 电磁场的物质性	518
小结	521
思考题九	523
习题九	524
附录一 库仑扭秤实验.....	526
附录二 感应起电机.....	530
附录三 常用物理常量.....	532
附录四 电磁学单位制.....	532
参考书目.....	539
后记.....	540

第一章 静 电 场

本章研究相对惯性参照系静止的电荷激发的电场。首先讲述静电场基本定律——库仑定律。而后，从场力的角度引入电场强度，用矢量点函数 $\mathbf{E}(x, y, z)$ 这个电场强度来描述电场，并用电力线图象形象地表示电场分布。考察通过场中任意闭合面的电通量，导出静电场的高斯定理，它是静电场的基本方程之一；从场力作功的角度考察在电场中 $\mathbf{E}$ 沿任意闭合回路的线积分，导出静电场的环路定理，它也是静电场的基本方程之一。根据静电场沿闭合回路作功与路径无关的这个特性引入电位概念，用标量点函数 $V(x, y, z)$ 即电位这个物理量来描述电场，并用等位面图象形象地表现电位分布。

电场强度和电位都是描述电场的物理量，它们之间存在着密切关系，可以用积分形式和微分形式表达它们的关系。

从库仑定律结合叠加原理导出的静电场高斯定理、环路定理，它们各自反映了静电场的一个侧面；它们的结合，才完整地反映了静电场的性质。

本章讨论问题的物理思想和方法，在以后各章中经常用到。本章的内容是以后学习内容的基础。

§ 1 静电现象

一、两种电荷及其检验

大家知道，用丝绸或毛皮摩擦过的玻璃、火漆、硬橡胶等都能吸引轻小物体，这表明它们经过摩擦后进入一种特别状态，都有吸

引轻小物体的能力。我们把具有了这种性质的物体叫做带电体，并称它们带上电荷^①。如果将丝绸摩擦过的两根玻璃棒，一根悬挂起来，另一根靠近它，如图 1.1 所示，发现两根玻璃棒相互排斥；若用一根毛皮摩擦过的硬橡胶棒靠近它，则两者相互吸引。

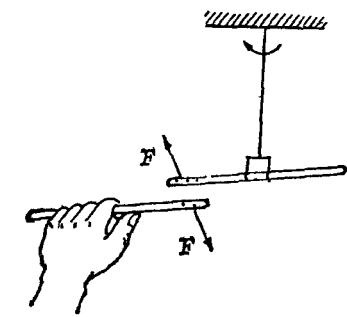


图 1.1 带电玻璃体之间的相互排斥

如果将毛皮摩擦过的两根硬橡胶棒互相靠近，它们又会相互排斥。大量的实验进一步表明：凡是与丝绸摩擦过的玻璃棒相排斥的物体，必与毛皮摩擦过的硬橡胶棒相吸。反之亦然。

上述事实表明：(1)自然界中存在着两种性质不同的电荷，而且只有两种。这是电荷的基本性质，是物质的一种属性。历史上曾规定在室温条件下，被丝绸摩擦过的玻璃棒上所带的电荷称为正电荷，被毛皮摩擦过的硬橡胶棒上带的电荷称为负电荷。这古典的规定由富兰克林最早提出，一直沿用至今。(2)电荷之间存在着相互作用：同种电荷相互排斥；异种电荷相互吸引。我们正是从这种相互排斥和相互吸引的作用，确定自然界中只有两种电荷。不是正电荷，就是负电荷。

将带有等量异号电荷放在一起时，由于正负电荷数量相等，它们对外既不显出带正电，也显不出带负电，即呈电中性，这种现象称为电中和。正是如此，我们宇宙看来是正负电荷非常均匀的混合物。大量的正负电荷中和时往往会发生火花，并伴有劈啪声，形

^① 电荷这词在希腊文中是琥珀的意思，是指琥珀被摩擦后所具有的特殊性质。在我国东汉成书的《论衡》中，也早有“顿牟掇芥”的记载。按通常理解，电荷是指带电体的一种属性，在某些情况下，电荷实际上又是指带电体本身，有时又作为电量的同义词使用。

成火花放电。人们脱腈纶衣服时,常听到劈啪声,这是正负电中和引起的。油灌车里汽油在晃动时与容器摩擦而带电,为了将电荷泄放到大地去,以免电荷积累起来引起火花放电事故,油车都有一铁链拖在地上。事物总是一分为二的,摩擦起电也有可利用的一面。掌握它们的规律,就可以用其利防其害。

我们利用同性相斥的现象,可以制成验电器,如图 1.2。它是检验物体是否带电的最简单的仪器。它的主要部分是一根上端带有金属小球的金属棒,棒下端悬挂着两片金属箔片。当带电体(如丝绸摩擦过的玻璃棒)与金属小球接触时,两片金属箔片便得到同种电荷而张开。从而检验出物体带有电荷,金属箔片上的电荷是由带电体传递给它的。同时,带电体所带电荷越多,两片金属箔片的张角越大。这样可定量确定电荷的多少。



图 1.2 验电器

二、物质的电结构

用摩擦或其他办法为什么能使物体带电?这些电荷从何而来?这些问题要从物质的微观结构去分析。

实验事实告诉我们,一切宏观物体,都是由分子组成的。分子由原子组成。原子内部有一个带正电的原子核,周围是一些带负电的电子围绕着原子核运动。原子核内部主要由带正电的质子和不带电的中子组成,所以原子核带正电。在正常情况下,核外的电子数与核内的质子数相等。

每个电子所带的电量是一样的,每个质子所带的电量也是一样的,且与电子所带的电量相等。正常情况下,由于原子中电子的数目与质子的数目相等,原子作为一个整体呈现电中性。由中性原子组成的物体当然也表现为不带电。当两个物体相互摩擦时,其中一个物体失去一些电子,另一个物体则获得电子,这样就破坏了两个物体原来的电中性,失去电子的物体,其体内正电荷总数多于负

电荷总数,表现为带正电;获得电子的物体,其体内负电荷总数多于正电荷总数,表现为带负电。所以从物质的微观结构看来,无论用什么方法使物体带电的过程,都只是使物体中原有正、负电荷分离、迁移的过程。

三、电荷守恒定律

大量实验证明: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始终保持不变。这叫做电荷守恒定律,是自然界中基本守恒律之一,也是物理学的重要规律之一。

电荷守恒定律是一切宏观过程和一切微观过程都必须遵循的基本规律。电荷守恒定律在所有惯性系中成立,而且在不同的惯性系内的观察者对电荷进行测量所得到的量值都相同。换句话说,电荷是一个相对论性不变量。

密立根油滴实验和其它实验表明,在自然界中,电荷总是以一定的量为基本单元出现的。即一个电子所带的电量,称电子电荷,记为 e 。根据实验测定, $e=(1.6021892 \pm 0.0000046) \times 10^{-19}$ 库仑^①。一个质子所带的电量与一个电子所带的电量的绝对值相等(相等的精确度达到 $1/10^{20}$)。任何带电体所带的电量都只能是 e 的整数倍。电荷不能取连续值,只能取分立值。这是电荷的重要特性,称为电荷量子化。近代物理从理论上预言有一种电量为 $\pm e/3$ 或 $\pm 2e/3$ 的基本粒子(称为层子或夸克)存在,并认为质子和中子等许多粒子都由层子组成,不过层子至今尚未直接为实验发现。

e 是一个常量,不论粒子速度如何,它都等于 1.6×10^{-19} 库仑,这叫做电荷的不变性。

① 在国际单位制中,电量的单位是库仑,符号为C,关于库仑的定义参看第三章。

§ 2 库 仑 定 律

一、库仑定律及其矢量形式

1. 库仑定律

人们已十分了解精确地描述力的定律有两个，即描述两个物体质量之间作用力的万有引力定律和描述两个电荷之间的静电力的库仑定律。万有引力与电荷间的静电力是不同性质的力，前者只有引力，力的大小与相互吸引的质量有关；后者因所带的电荷可正可负，而有吸力或斥力，力的大小与相互作用的电量有关。但是它们有一个重要的共同点，即力的大小都跟相互作用物的距离平方成反比。这就决定了它们有着重要的共同特性。因此，我们在讨论库仑定律时，可借助万有引力知识。

万有引力定律是对质点讲的，若两个相互吸引的物体不能看成质点，则“两者之间的距离”、“联线方向”都失去确定意义。

实验观察表明，在两个相对观察者静止的带电体之间的静电力，除了与电量及相对位置有关外，还依赖于带电体的大小、形状及电荷的分布情况。要用实验直接确立所有这些因素对静电力的影响是困难的。但是，如果带电体的线度比带电体间的距离小得多，以至于带电体的大小、形状及电荷分布的情况在满足讨论问题的精度要求条件下可以忽略，我们可以把带电体看成是带电的几何点，这样的带电体称为点电荷。那么点电荷之间的静电力就只取决于它们之间的距离和电量。

库仑定律是法国科学家库仑在 1785 年通过对实验结果的分析确立的^①。库仑定律包括以下两个内容：(1)两个相对观察者静止的点电荷 q_1 和 q_2 之间的静电力方向沿着两个点电荷联线，大

^① 见附录。

小相等,方向相反,同种电荷相斥,异种电荷相吸。(2)静电力大小与两个点电荷 q_1 及 q_2 的电量乘积成正比,与两个电荷之间的距离平方成反比。即

$$F \propto \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2},$$

上式写为等式

$$F = K \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}. \quad (1.1)$$

必须指出,库仑定律是对点电荷而言的,因为只有在点电荷情况下,两个点电荷之间的距离 r ,以及作用力沿着“电荷联线”才有确定意义。

式中 K 是比例系数,依赖于测量力、电荷、距离时所用的单位。我国规定使用国际单位制(记作 SI),电磁学部分叫做 MKSA 制。其基本量是:长度、质量、时间、电流强度,它们的基本单位分别为米、千克、秒及安培①。

在(1.1)式中, q_1, q_2 单位为库仑, r 的单位为米, F 的单位为牛顿,这样, K 的数值就不能任意指定,而是要由实验测定。为了使今后一些重要的公式简化,使后面所述的麦克斯韦方程组具有完美的对称形式,我们将 K 写为

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

ϵ_0 叫做真空介电常量(或真空电容率)②,根据测定

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= 8.8542 \times 10^{-12} \text{ 库仑}^2/\text{牛顿} \cdot \text{米}^2 \\ &\approx 8.9 \times 10^{-12} \text{ 库仑}^2/\text{牛顿} \cdot \text{米}^2, \end{aligned}$$

相应地

① 安培的定义及测量见第五章§9。

② ϵ_0 将出现在许多电学的基本方程中,其定义见第七章,其真正含义要到电磁波的传播时才能明确。

$$K=8.9875 \times 10^9 \text{ 牛顿} \cdot \text{米}^2 / \text{库仑}^2$$

$$\approx 9 \times 10^9 \text{ 牛顿} \cdot \text{米}^2 / \text{库仑}^2。$$

引入 ϵ_0 后, 在 SI 制中, 库仑定律的表示式(1.1)改写为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}。 \quad (1.2)$$

2. 库仑定律的矢量形式

库仑定律对两个点电荷之间的静电力的大小、方向都做了确切的描述。式(1.2)只反映了力的大小所服从的规律, 并未涉及静电力的方向, 而力是矢量, 所以要反映力的方向, 就要把它改写为如下的矢量形式^①

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12}, \quad \mathbf{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{21}。 \quad (1.3)$$

式中 $\mathbf{F}_{12}$ 表示点电荷 q_1 对点电荷 q_2 的作用力, $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ 表示由点电荷 q_1 指向点电荷 q_2 的单位矢量; $\mathbf{F}_{21}$ 表示点电荷 q_2 对点电荷 q_1 的作用力, $\hat{\mathbf{r}}_{21}$ 表示从点电荷 q_2 指向点电荷 q_1 的单位矢量(显然 $\hat{\mathbf{r}}_{12} = -\hat{\mathbf{r}}_{21}$)。只要将 q_1, q_2 理解为可正可负的代数量, 则(1.3)式可以同时反映出静电力的大小和方向。例如, 设 q_1 与 q_2 同号, 则 $q_1 q_2 > 0$, 矢量 $\mathbf{F}_{12}$ 等于正数乘矢量 $\hat{\mathbf{r}}_{12}$, 故 $\mathbf{F}_{12}$ 与 $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ 同向, 即点电荷 q_1 对 q_2 的静电力沿两个点电荷的连线, 由 q_1 指向 q_2 , 这是斥力。同理可知 $\mathbf{F}_{21}$ 也是斥力(图 1.3a)。反之, 若 q_1 与 q_2 异号, 由(1.3)式可知 $\mathbf{F}_{12}, \mathbf{F}_{21}$ 都是吸力(图 1.3b)。

矢量等式比标量等式更富有表达力, 今后在涉及矢量问题时, 将经常采用矢量表达式。要注意它们所表达的全部含意, 不可与标量式等同视之。

① 本书所用的符号, 以矢量 $\mathbf{a}$ 为例, 黑体字 $\mathbf{a}$ 为矢量, 非黑体 a 表示矢量 $\mathbf{a}$ 的长度(恒为正)。

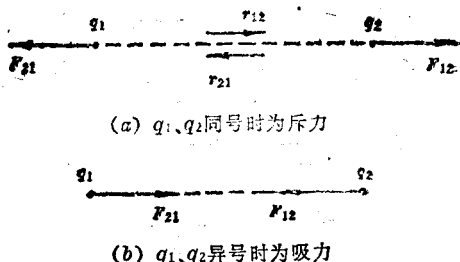


图 1.3 用库仑定律的矢量形式判断两个点电荷间静电力的方向

二、静电力的叠加原理

库仑定律描述两个点电荷间的相互静电作用力，而在许多场合，常有若干点电荷彼此同时相互作用，对于这种情况应如何解决，就必须求助于实验。实验指出：在经典范围内，两个点电荷间的作用力不因第三个电荷的存在而改变。不管一个体系中存在多少个点电荷，每一对点电荷之间的作用力都服从库仑定律。而作用在每一个电荷上的总静电力等于其他点电荷单独存在时作用在该电荷的静电力的矢量和。这个事实称为叠加原理。

设有 N 个点电荷组成的体系， f_{ij} 是第 i 个点电荷 q_i 作用于第 j 个点电荷 q_j 的静电力， r_{ij} 为 q_i 到 q_j 的距离， $\hat{r}_{ij}$ 为从 q_i 指向 q_j 方向的单位矢量。则根据叠加原理， q_j 受到的合力为

$$f_j = \sum_i f_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{q_i q_j}{r_{ij}^2} \hat{r}_{ij}.$$

事实上只有在有两个以上电荷时，电相互作用的物理现象才能得到充分的研究和应用。

在自然界中，库仑力要比万有引力大得多。后者

$$F_{\text{引}} = 6.6 \times 10^{-11} \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \hat{r}.$$

我们可以看到一个很有意义的例子。太阳(质量 = 2.0×10^{30}