

物 理 学

电磁学部分

余守宪 陈广汉 编
余国贤 祁祥麟

高等教育出版社

本书内容包括: 电荷与静电场、静电场中的导体和电介质、稳恒电场和电流、运动电荷与稳恒磁场、磁场中的磁介质、电磁感应、电磁场。全书注意了在保证经典物理学的基础上, 适当增加近代物理及近代工程技术的物理基础知识, 并积极运用高等数学方法表达物理规律和注意它们在科学技术、日常生活中的应用。书中例题较多, 叙述详细, 便于自学。

全书共分三册, 即“物理学”力学和热学部分, “物理学”电磁学部分, “物理学”波动、光学、量子物理部分。

本书可供高等工科院校物理教师及学生参考, 也可供有高中以上文化基础知识的读者自学使用。

物 理 学

电磁学部分

余守宪 陈广汉 编
余国贤 祁祥麟

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北 京 印 刷 三 厂 印 装

*

开本 850×1168 1/32 印张 12.75 字数 305,000

1983年5月第1版 1984年7月第1次印刷

印数 00,001—13,200

书号 13010·0882 定价 2.45 元

目 录

第三篇 电磁运动

第一章 电荷与静电场	1
§ 1 电荷与电场 库仑定律	2
一、两种电荷	2
二、电荷守恒定律	2
三、电荷与电场	4
四、库仑定律	4
§ 2 电场强度	7
一、电场强度	7
二、电场强度迭加原理	10
三、连续分布电荷的场强	14
§ 3 电力线 电通量	24
一、电场分布的实验显示	24
二、电力线	25
三、电通量	27
§ 4 高斯定理	31
一、高斯定理	31
二、高斯定理应用举例	35
§ 5 静电场力所作的功 电位差 电位	42
一、静电场力所作的功	42
二、电位差 电位	44
三、电位的计算	47
§ 6 等位面	53
一、等位面	53
二、等位面画法的规定	54
§ 7 电位与电场强度的关系 电位梯度	55
§ 8 静电场中的带电粒子及其运动	61

问 题	69
习 题	71
第二章 静电场中的导体和电介质	78
§ 1 静电场中的导体	78
一、导体的静电平衡条件	78
二、导体中的电荷分布 导体表面附近的场强	81
三、静电屏蔽	84
四、范德格喇夫起电机	86
§ 2 静电场中的电介质 电介质的极化	88
一、电介质的极化	88
二、两类电介质的极化	90
三、电极化强度	93
四、压电效应 驻极体	97
§ 3 有电介质存在时的电场	98
一、有电介质存在时的电场强度	98
二、有电介质存在时静电场的环路定理	99
三、电极化强度与电场强度的关系	99
四、充满均匀电介质的电场 相对介电系数	100
五、电介质的击穿	103
§ 4 有电介质存在时的高斯定理 电位移	104
一、有电介质存在时的高斯定理	104
二、电位移 电位移线 电位移通量	106
§ 5 两种电介质分界面上的边界条件	119
§ 6 电容 电容器	122
一、孤立导体的电容	122
二、电容器及其电容	122
三、电容的计算	123
四、电容器的联接	128
§ 7 电容器储能(电能)	131
§ 8 电场的能量和能量密度	132
问 题	135
习 题	136
第三章 稳恒电场与电流	142

§ 1 电流 电子导电与离子导电	142
一、电流	142
二、电流密度	143
三、漂移速度	144
四、电流的连续性方程 稳恒条件	147
五、稳恒电场	148
§ 2 欧姆定律 电阻 电阻率	149
一、欧姆定律 电阻 电导	149
二、电阻率 电导率	151
三、欧姆定律的微分形式	153
四、迁移率	157
五、气体放电	158
§ 3 电流的功和功率 焦耳定律	159
一、电流的功和功率	159
二、焦耳定律	160
§ 4 电源及其电动势	161
一、非静电力 电源	161
二、电动势	163
三、电源的路端电压	164
§ 5 电路中的能量转化 电路计算	167
一、电路中的能量转化	167
二、电路计算	169
§ 6 基尔霍夫定律	171
一、基尔霍夫第一定律	172
二、基尔霍夫第二定律	172
§ 7 电容器的充电和放电 时间常数	174
一、电容器的充电	174
二、电容器的放电	179
问 题	183
习 题	185
第四章 运动电荷与稳恒磁场	190
§ 1 运动电荷与磁场	190
一、基本磁现象	190

二、磁场 磁力线	194
三、磁感应强度	198
§ 2 运动电荷的磁场	201
一、运动电荷的磁场	201
二、磁感应强度迭加原理	202
§ 3 毕奥-萨伐尔定律	203
一、毕奥-萨伐尔定律	203
二、毕奥-萨伐尔定律应用举例	206
§ 4 磁通量 磁场中的高斯定理	214
一、磁通量	214
二、磁场中的高斯定理	216
§ 5 安培环路定理	217
一、安培环路定理	217
二、安培环路定理应用举例	221
§ 6 安培定律	226
一、安培定律	226
二、载流线圈在匀强磁场中所受的力矩	230
§ 7 磁场中带电粒子的运动	237
一、带电粒子垂直地射入匀强磁场的情形	237
二、电子在匀强磁场中的螺旋运动 磁聚焦	242
三、霍耳效应	247
问 题	251
习 题	253
第五章 磁场中的磁介质	261
§ 1 磁场中的磁介质 磁介质的磁化	261
一、磁介质的分类	261
二、顺磁质和抗磁质的磁性和磁化的量子理论	262
三、磁化强度	267
四、分子电流与磁化强度的关系	268
§ 2 有磁介质存在时的磁场	271
一、有磁介质存在时的磁感应强度	271
二、有磁介质存在时的高斯定理	272
三、磁化强度与磁感应强度的关系	272

四、充满均匀磁介质中的磁场 相对磁导率	273
§ 3 有磁介质存在时的安培环路定理	276
一、有磁介质存在时的安培环路定理	276
二、磁场强度 B 、 H 、 M 三者之间的关系	278
§ 4 铁磁质	284
一、磁化曲线	285
二、磁滞回线	286
三、磁畴	289
§ 5 简单磁路 磁屏蔽	291
一、简单磁路	291
二、磁屏蔽	295
§ 6 两种磁介质边界面上的边界条件	296
问 题	298
习 题	298
第六章 电磁感应	301
§ 1 电磁感应定律	301
一、电磁感应实验	302
二、楞次定律	305
三、法拉第定律	307
§ 2 动生电动势	311
一、动生电动势的实质	312
二、动生电动势的应用	315
§ 3 感生电动势	320
一、感生电动势和感生电场	320
二、感生电动势和感生电场的应用	324
§ 4 自感	330
一、自感现象	330
二、自感电动势和自感系数	331
三、含自感的电路接通后电流的增长	335
四、含自感的电路切断时电流的衰减	338
§ 5 互感	340
一、互感现象	340
二、互感电动势和互感系数	340

三、理想变压器.....	343
四、感应圈.....	345
五、互感器.....	347
§ 6 磁场的能量和能量密度.....	349
问 题.....	353
习 题.....	357
第七章 电磁场.....	365
§ 1 位移电流.....	365
§ 2 麦克斯韦方程.....	375
问 题.....	378
习 题.....	378
附 录 高斯单位制及其与国际单位制的关系.....	379
习题答案.....	387

第三篇 电 磁 运 动

电磁运动是物质的一种基本运动形式。在日常生活和生产实践中，从照明、动力直到计量、通讯等几乎各个领域都离不开电和磁。此外，电磁运动的基本知识又是一系列重要科学如电工学、无线电电子学、自动控制和物质结构等的重要基础。可见，“电磁学”的规律在现代科学技术中占有极重要的地位。

第一章 电荷与静电场

相对于观察者静止的电荷所产生的电场叫做静电场。它是电磁场的一种特殊状态。本章研究静电场的基本性质、基本规律。

静电场在生产上和科学实验上有广泛的应用。例如，静电喷漆、静电除尘、静电植绒、电子仪器（如电子管、电子射线管、示波器、显象管、电子显微镜等）、原子能实验装置（如静电加速器等）等等都用到静电场。静电场的理论不仅在生产斗争和科学实验上有着重要作用，而且也是电磁场理论的基础。

实践证明，电荷周围有电场，静电场对于放在其中的带电体来说有两个重要表现：（1）电场对位于其中的带电体有力的作用；（2）带电体在电场中移动时，电场力对带电体作的功与路径无关，这表示电场具有能量。

我们将从这两方面来研究静电场的性质，从而说明电场强度、电位等基本概念，以及它们之间相互联系的基本规律。

§1 电荷与电场 库仑定律

一、两种电荷

两种不同质的物体，例如绸子和玻璃棒或毛皮和硬橡胶棒经过互相摩擦后，都能吸引纸屑、羽毛、头发等轻微物体，我们就说，物体带了电，或有了电荷。带了电的物体通常叫做带电体。实验指出，任何带电体所带的电荷，或者与上述玻璃棒所带的电荷相同，或者与上述硬橡胶棒所带的电荷相同。所以，自然界只存在两种电荷；而且，同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引。为了区别这两种电荷，历史上把用绸子摩擦过的玻璃棒上所带的电荷叫做正电荷，而把用毛皮摩擦过的硬橡胶棒上所带的电荷叫做负电荷。

物体所带电荷数量的多少，叫做电量。国际单位制中电量的单位为库仑^①，国际代号为C。一般规定正电的电量取正值，负电的电量取负值。物体通常是由分子、原子组成的；而原子又由一个带正电的原子核和一定数目的绕核运动的电子组成；原子核又由带正电的质子和不带电的中子组成。一个质子所带的电量和一个电子所带的电量的数值相等，也就是说，如果用 e 代表一个质子的电量，则一个电子的电量就是 $-e$ 。实验证明，电荷的量值是不连续的，电荷的基本单元即一个质子或一个电子所带电量的绝对值 e ，一切物体所带的电量都只能是这个基本电荷的整数倍。测量表明，这个基本电荷的量值为

$$e = 1.6021892 \times 10^{-19} \text{ C}$$

二、电荷守恒定律

实验表明，摩擦起电时，两个物体总是同时分别带有等值异号

① 在国际单位制中，电学量的基本量是电流，它的单位是安培，国际代号为A。库仑是导出单位，它的定义是：如果导线中载有1A的稳恒电流，则1s内通过导线横截面的电量为1C。

的电量。实验还表明,同种电荷放在一起互相增强,异种电荷放在一起互相抵消。通常把正、负电荷完全抵消的状态叫做电中性状态。

物体内部固有地存在着电子和质子这两类带有基本电荷的粒子,正是各种物体带电过程的内在根据。由于通常情况下物体中任何一部分所包含的电子总数和质子总数是相等的,因此,从物质的微观结构来看,物体不带电,这并不意味着物体内没有电荷,而是物体内部具有等量异号的电荷,以致其整体处于电中性状态,所以,对外界不呈现电性。但是,如果在一定的外界作用下,物体(或其中的一部分)得到或失去一定数量的电子,使得电子的总数和质子的总数不再相等,物体就呈现电性。两种不同质的物体互相摩擦后之所以都会同时带有等值异号的电量,就是因为通过摩擦,每个物体中都有一些电子脱离了原子的束缚跑到另一物体上去了的缘故。但是,不同质的物体彼此向对方转移的电子数目并不相等,所以总体上讲,一个物体失去了电子,另一个物体得到了电子,结果,失去电子的物体就带正电,得到电子的物体就带负电。摩擦起电实际上就是通过摩擦作用,使电子从一个物体转移到另一个物体的过程。其他的起电方法,实际上也都是物体上两种电荷的分离过程,转移过程。

通过大量的实验,人们总结出了如下的定律:当一种电荷出现时,必然有量值相等的异号电荷同时出现;一种电荷消失时,也必然有量值相等的异号电荷同时消失,在一孤立系统内,无论进行怎样的物理过程,系统内电量的代数和总是保持不变。这个定律叫做电荷守恒定律。近代科学实践证明,电荷守恒定律不仅在一切宏观过程中成立,在一切微观过程(如核反应和基本粒子过程)同样也是普遍遵守的基本定律。所以它是物理学中重要的基本定律之一。

• 3 •

三、电荷与电场

带电体之间的相互作用是怎样进行的呢?通过人们的实践、研究告诉我们:凡是电荷的周围都存在着电场,或者说任何电荷都在其周围的空间激发电场;电场的基本特性是:它对处在电场中的任何其他电荷都有力的作用,这个力叫做电场力。因此,电荷与电荷之间是通过电场发生相互作用的,它可以用图式表示如下:

$$\text{电荷} \longleftrightarrow \text{电场} \longleftrightarrow \text{电荷}$$

相对于观察者是静止的电荷所产生的电场叫做静电场,本章和下一章的基本任务是研究静电场的特性、规律,以及带电粒子在电场力作用下的运动。

静电场是电磁场的一种特殊状态。现在,科学实验、生产实践和理论研究都证明了电磁场和通常的物体一样具有能量、动量、质量等等,而且电磁场还可以脱离电荷和电流而独立存在,例如当电容器和载流线圈火花放电时,即使电荷和电流已经消失,仍然有电磁场以波的形式继续存在和向前传播。可见,电磁场是客观实在,一句话,电磁场是物质的一种形态。在电磁场处于迅速变化的情况下(即在电磁波中)它的物质性则更加明显地表现出来,关于这个问题,后面我们还要讨论。

研究静电场时所用到的方法,其中不少对研究其它场(如磁场等)也是适用的,它们有着相当普遍的意义。所以,从理论上和研究方法上来看,静电场理论是电磁场理论的重要基础。

四、库仑定律

在一般情况下,带电体之间的相互作用是很复杂的,作用力的大小、方向不仅与带电体所带电荷的多少及正、负有关,还与带电体的大小、形状、它们之间的距离,以及周围物质的性质都有关系。

最早的定量研究是在十八世纪末,库仑通过实验总结出了一条规律,现在叫做库仑定律。为了研究带电体间相互作用的规律,

人们引进了点电荷的概念：如果带电体的大小(几何线度)比起带电体之间的距离小得多，它们的大小和形状对于所要研究的问题来说可以忽略不计，这样的带电体可以抽象成一个带电的几何点，叫做点电荷。

库仑定律是：真空中两个点电荷 q_1 和 q_2 之间的相互作用力的大小跟 q_1 与 q_2 的乘积成正比，而跟它们之间的距离 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(见图 3-1-1)。

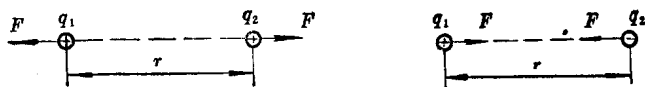


图 3-1-1

相互作用力的大小为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1)$$

式中 k 为一比例系数，其数值决定于 q 、 F 、 r 等量的单位。在国际单位制中，式(1)中所有物理量的单位都已选定，比例系数 k 的数值要通过实验测定。为了使许多从式(1)引出的公式得以简化，在国际单位制中将 k 写成 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ 的形式， ϵ_0 叫做真空的介电系数。

因此

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

实验测出

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

相应的 k 值是

$$k = \frac{1}{4\pi \times 8.85 \times 10^{-12}} = 8.99 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

如图 3-1-2 所示, 用 F_{21} 表示 q_2 受 q_1 的作用力; r_{21} 表示 q_2 相对于 q_1 的位置矢量(矢径), 则真空中两个点电荷之间的相互作用力的大小和方向可用矢量式统一表示为



图 3-1-2

$$F_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{21}^3} r_{21} \quad (3a)$$

同理

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^3} r_{12}$$

如果 q_1 与 q_2 同号, 从式(3a)可见, F_{21} 与 r_{21} 同号, 即 F_{21} 的方向与 r_{21} 的方向相同。同理, F_{12} 的方向与 r_{12} 的方向相同。这表明 F_{21} 与 F_{12} 为斥力。如果 q_1 与 q_2 异号, 从式(3a)可见, F_{21} 与 r_{21} 异号, 即 F_{21} 的方向与 r_{21} 的方向相反。同理, F_{12} 的方向与 r_{12} 的方向相反。这表明 F_{21} 与 F_{12} 为引力。

为了文字简洁, 我们也可以将公式(3a)中力和矢径的脚标省略, 统一写成

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} r \quad (3b)$$

或

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} r^0 \quad (3c)$$

虽然式(3b)、式(3c)中, F 和 r 都没有注明脚标, 但在使用它的时候, 我们必须十分清楚 F 和 r 的含义。式中 r^0 是沿矢径 r 方向的单位矢量。

最后, 应该指出, 上述库仑定律的公式只适用于点电荷, 如果这个条件不满足, 必须把带电体看作是由许多点电荷所组成的, 每一对点电荷之间的作用力可应用上述公式计算, 然后再把所有的

作用力按力的迭加原理求矢量和。应该指出,在实际问题中,常常由于数学运算复杂,并不是任何带电体间的相互作用力都可以用这种直接求矢量和的方法来计算。今后的学习将使我们了解到库仑定律的重要性远远超出了对带电体间相互作用力的计算,它是我们研究静电场的重要基础。同时,物理学的进一步研究表明:原子中原子核束缚电子的力;把原子结合在一起形成分子的力;把原子或分子结合在一起形成固体、液体的力;以至化学作用等问题的微观本质都和库仑力有关。

§2 电 场 强 度

一、电场强度

电场的基本性质之一是它对电荷有作用力——电场力。我们从这一性质出发,引入描述电场性质的一个基本物理量——电场强度。

现在,我们通过实验来研究放在真空中的带电体 q 所产生的静电场。为研究静电场中各点的性质,可引入一个试验电荷 q_0 ,用以测量电场对它的作用力。试验电荷应满足两个要求:(1)它所带的电量 q_0 必须充分的小,因为引入试验电荷的目的是为了研究空间原来存在的静电场的性质,如果 q_0 太大,它将显著改变原带电体上的电荷分布,从而也就改变了原来电场的分布情况。(2)试验电荷的几何线度必须充分的小,即可以把它看作点电荷,这样才可用它研究空间各点静电场的性质。

我们进行下列实验:(1)把同样的试验电荷 q_0 (设为正电荷)放在带电体 q 产生的电场的不同点上作试验,结果发现:试验电荷 q_0 所受的电力大小和方向都各不相同(图 3-1-3a)。但对每一定点, q_0 所受电力的大小和方向却是一定的。这反映出静电场中各点的性质不同。(2)把不同电量的试验电荷依次放在电场的同一点处。

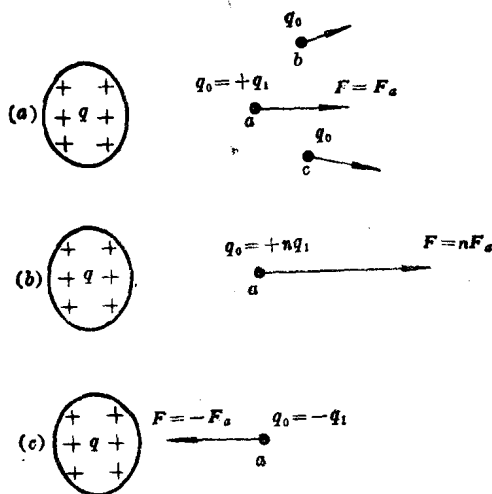


图 3-1-3

结果发现：试验电荷所受的电力与试验电荷的电量 q_0 成正比。例如我们把 a 点上试验电荷的电量增大到 n 倍（但仍满足试验电荷的条件），则 a 点的 F 大小也增大到 n 倍，而电力的方向不变（图 3-1-3b）。这反映出试验电荷在静电场中某点所受的电力，不仅和试验电荷所在点的静电场的性质有关，还与试验电荷的电量有关。但是，试验电荷在静电场中某点所受电力的大小与试验电荷电量的比值，与试验电荷本身的电量无关，（3）如果把 q_0 换成等量异号的电荷（设为负电荷），则电力的大小不变，而方向反转（图 3-1-3c）。这反映出电力的方向与 q_0 的正负有关。由上述试验可知，对电场中某定点而言，比值 F/q_0 是一个无论大小和方向都与试验电荷无关的矢量，这个比值是一个反映该点静电场本身性质的物理量，我们把它定义为电场强度，或简称场强，用符号 E 来表示。

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (4)$$

式(4)表明:静电场内某点的电场强度,是表征该点电场性质的物理量,它是一个矢量,它的大小等于单位电荷在该点所受电场力的大小,它的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,这个单位也可以写作伏特/米(参看§7),后一种写法也是国际单位制中场强单位的中文代号(国际代号为 $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$)。

$E = \frac{F}{q_0}$ 是电场强度的定义公式。只要知道电场中试验电荷 q_0 所受的电场力,就能根据这个公式计算电场强度 E 。但是前面已经指出,电场强度 E 实际上是与试验电荷 q_0 无关的量。因此,如果不借助于试验电荷,应该如何计算电场强度 E 呢?下面我们来研究这个问题。如何计算电场强度,一般要看电荷分布和场中所求点的位置。但是,任何带电体都可以看作是由许多点电荷组成的。因此,作为一个基本的重要情况,我们首先计算一个点电荷在真空中的各点所产生的电场强度。如图 3-1-4 所示,以点电荷 q

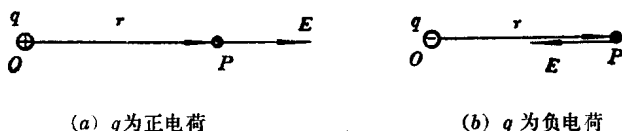


图 3-1-4

所在处为原点 O ,为了求电场中任意一点 P 的场强,我们设想把一个正试验电荷 q_0 放在 P 点,根据库仑定律, q_0 所受的电场力为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \mathbf{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \mathbf{r}^0$$

式中 $\mathbf{r}$ 是确定 P 点的矢径。根据电场强度的定义公式 $E = \frac{F}{q_0}$, 可以得到 P 点电场强度为

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{r}^0 \quad (5)$$