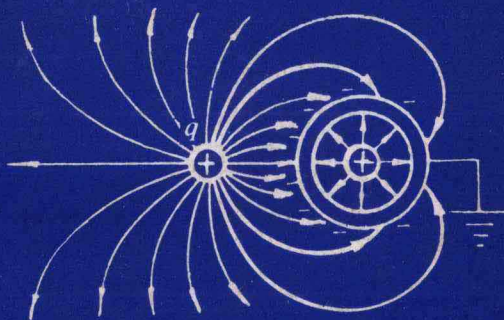


普通物理学

电磁学



山东科学技术出版社

普通物理学

平装本 高等院校教材

电 磁 学

《电磁学》编写组

李 德 著

李 德 著

李 德 著

李 德 著

(李 德 著)

李 德 著

李 德 著

李 德 著

李 德 著

山东科学技术出版社

一九八七年·济南

李 德 著

责任编辑 孟爱平

学 数 理 学

学 数 理 学

学 数 理 学 《学 数 理 学》

普通物理学

电 磁 学

《电磁学》编写组

*

山东科学技术出版社出版
(济南市南郊宾馆西路中段)

山东省新华书店发行 山东新华印刷厂潍坊厂印刷

*

787×1092毫米32开本 16.125印张 341千字

1987年4月第1版 1987年4月第1次印刷

印数: 1—1,5000

ISBN 7-5331-0016-6

O·3

书号 13195·171 定价 3.15元

前 言

为了适应师范专科学校和教育学院物理专业教学的需要,根据师专电磁学教学大纲,我们编写了普通物理学电磁学。全书共分九章,内容包括:静电场、静电场中的导体、电介质存在时的静电场、稳恒电流和电路、稳恒电流的磁场、电磁感应、磁介质、交流电路、电磁场与电磁波。讲授全书约需 80 学时。

本书在内容选取上注意考虑了专科学校的特点和实际需要,力求用较少的学时讲清楚电磁学的基本理论及有关应用;加强了基本概念、基本规律的阐述和例题的分析;问题的论证大多采用比较简洁但又较为严密的方法;注意了理论体系的完整性,对某些重要问题和难度较大的内容作了较为详细的论述。在内容的编排上尽量便于教学,既注意了各章内容的衔接,也注意了与普通物理学中其他课程的相互联系。对教学大纲中不作要求的内容,一律标以“*”号。

本书可作为师专、教育学院物理专业的教材,也可作高等师范院校物理专业的函授教材,还可供中学物理教师参考。

参加本书编写的(以姓氏笔画为序)有:马怀君、王兴孔、羊孝清、宋聚荣、屈凡亭、范昌惠、徐昌业、常初芳、甄仁波,由徐昌业、屈凡亭、王兴孔、甄仁波统稿。北京师范大学梁绍荣教授审定了本书的编写大纲并提出了指导性意见,书稿完成后又详细审阅了全书。在编写过程中,我们还得到

泰安师专梅玉初副教授及许多有关同志的帮助和指导，在此一并致以诚挚的谢意。

由于我们水平所限，书中难免出现缺点和错误，恳请读者不吝指教。

山东省师专、教育学院 物理教材编写组

1986年10月

目 录

第一章 静电场	1
§ 1.1 库仑定律	1
§ 1.2 电场 电场强度	6
§ 1.3 高斯定理	21
§ 1.4 电位 电位差	37
第二章 静电场中的导体	61
§ 2.1 导体的静电平衡	61
§ 2.2 封闭导体壳内外的电场	70
§ 2.3 电容 电容器	79
§ 2.4 带电体系的静电能	86
第三章 电介质存在时的静电场	100
§ 3.1 电介质的极化	100
§ 3.2 极化电荷	105
§ 3.3 有介质存在时的高斯定理	110
§ 3.4 静电场的边界条件	119
§ 3.5 电场的能量	122
第四章 稳恒电流和电路	131
§ 4.1 稳恒电流	131
§ 4.2 欧姆定律及其微分形式	135
§ 4.3 电流的功和功率 焦耳定律及其微分形式	140
§ 4.4 电阻的串联和并联	146

§ 4.5	电源及其电动势	148
§ 4.6	闭合电路和一段含源电路的欧姆定律	154
§ 4.7	基尔霍夫方程组	158
§ 4.8	接触电位差和温差电现象	164
§ 4.9	气体导电	170
第五章	稳恒电流的磁场	183
§ 5.1	基本磁现象	183
§ 5.2	磁感应强度	188
§ 5.3	毕奥—萨伐尔定律	190
§ 5.4	磁感应线和磁通量 磁场的高斯定理	198
§ 5.5	安培环路定理	205
§ 5.6	带电粒子在均匀磁场中的运动	219
§ 5.7	磁场对载流导线的作用	231
§ 5.8	电流强度单位的定义	242
第六章	电磁感应	264
§ 6.1	电磁感应	264
§ 6.2	楞次定律	267
§ 6.3	动生电动势	271
§ 6.4	感生电动势	277
§ 6.5	自感与互感	286
§ 6.6	涡电流 趋肤效应	298
§ 6.7	暂态过程	302
第七章	磁介质	323
§ 7.1	磁介质的磁化	323
§ 7.2	磁化电流	329
§ 7.3	有磁介质时的安培环路定理	334

*§ 7.4	磁场的边界条件	344
§ 7.5	铁磁性与铁磁质	347
§ 7.6	磁路	354
§ 7.7	磁场的能量	359
第八章	交流电路	370
§ 8.1	交流电的基本概念	370
§ 8.2	单一参数的交流电路	378
§ 8.3	交流电的矢量图解法	384
§ 8.4	交流电的复数法	391
§ 8.5	交流电的功率	409
§ 8.6	谐振电路	419
第九章	电磁场和电磁波	441
§ 9.1	位移电流	441
§ 9.2	麦克斯韦方程组	447
§ 9.3	平面电磁波	452
§ 9.4	偶极振子的辐射场 电磁波谱	459
*§ 9.5	似稳电磁场和似稳电路	468
附录	习题答案	478

第一章 静 电 场

本章研究真空中静电场的基本规律。所谓静电场，就是相对于观察者静止的电荷产生的电场。我们从两个静止点电荷相互作用的规律（库伦定律）出发，引入描写静电场的两个基本物理量：电场强度和电位。由库伦定律导出静电场的两个基本定理：静电场的高斯定理和环路定理。在此基础上讲明一些静电学的问题。

§1.1 库 伦 定 律

一、电荷

1. 电荷和电量

很早以前，人们发现用毛皮摩擦过的琥珀、硬橡胶棒或用丝绸摩擦过的玻璃棒，能吸引轻小物体，这种性质叫做带电，或叫做带有电荷。处于带电状态的物体叫做带电体。带电体所带电荷的数量叫做电量。用摩擦的方法使物体带电的过程，叫做摩擦起电。

大量事实证明，自然界中只存在两种电荷。美国科学家富兰克林提出，与用丝绸摩擦过的玻璃棒带的电荷相同的叫做正电荷；与用毛皮摩擦过的硬橡胶棒带的电荷相同的叫做负电荷。这种命名方法一直沿用到今天。

实验表明，电量相等的正、负两种电荷放在一起时，对

外作用完全抵消，叫做对外不显电性。正、负电荷完全抵消的状态叫做中和。相隔一定距离的电荷之间具有相互作用力，同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引。

近代物理的发展揭示了物质的电结构，从本质上解释了各种电现象。从而也说明了电荷是物质的一种属性。

物质是由分子、原子组成的，原子又由带正电的原子核与带负电的电子组成。原子核中有中子和质子，中子不带电，质子带正电，一个质子与一个电子所带电量的绝对值相等。在正常情况下，物体中任何一部分所包含的电子数与质子数相等，所以对外界不显电性。但在一定外界条件作用下，物体（或其中的一部分）得到或失去电子，物体就呈现电性。摩擦起电实质上是在摩擦过程中，一个物体上的电子转移到另一个物体上，使得到电子的物体带负电，失去电子的物体带正电，两物体所带的正、负电荷数量相等。由于电荷有正负，所以电量用代数数量描写。

2. 电荷守恒定律

大量实验表明，无论用什么方式起电，正、负电荷总是同时出现，而且量值相等。由此可以得出结论：电荷既不能被创生，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，在一个与外界无电荷交换的系统内，正、负电荷的代数和在任何物理过程中都保持不变。这叫做电荷守恒定律。它不仅成立于一切宏观过程，也为一切微观过程（如核反应和基本粒子过程）所普遍遵守，它是物理学的基本定律之一。

3. 电荷的量子性

从物质的电结构可以看出，自然界存在着基本电荷，即

质子或电子电量的绝对值 e 。 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 。一切带电体所带电量都是 e 的整数倍。电荷量值的这种不连续性叫做电荷的量子性。近代物理从理论上预言还存在带电量为 $\pm \frac{1}{3}e$

或 $\pm \frac{2}{3}e$ 的基本粒子(称为层子或夸克),但这还有待于实验的证实。

4. 导体和绝缘体

按照电荷在其中是否容易转移或传导,习惯上可以把物体分成导体和绝缘体(电介质)两大类。允许电荷通过的物质叫做导体。不允许电荷通过的物质叫做绝缘体。导电性能介于二者之间的叫做半导体。导体之所以导电,是因为其内部存在着可以自由移动的电荷(金属原子中的自由电子或电解液中的正、负离子以及气体中的电子、正离子、负离子);绝缘体之所以导电能力很差,是因为其内部绝大部分电荷受到原子核的束缚,因而基本上没有自由电荷。但是,导体和绝缘体之间并没有严格的界限,而且在一定条件下会发生变化,如绝缘体在强电力作用下会被击穿而成为导体。

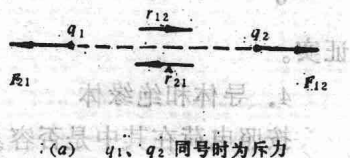
二、库仑定律

静电学研究的是静止电荷之间的相互作用规律。实验表明,两个静止带电体之间的作用力除与电量及相对位置有关外,还与带电体的大小、形状及电荷分布有关。这给研究带电体的相互作用带来了很大困难。为使问题简化,将研究的客体加以抽象,引入“点电荷”模型。如果一个带电体的几何线度比起它到其他带电体的距离小得多,那么它的形状和其中的电荷分布情况可不予考虑,从而可视为一个带电的几

何点，称为点电荷。

1875年，法国科学家库仑通过扭秤实验，总结出了两个静止的点电荷之间相互作用的规律，即库伦定律。库伦定律表述如下：

两个静止点电荷 q_1 、 q_2 间的相互作用力的大小，与电量 q_1 、 q_2 的乘积成正比，与它们之间距离 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1—1所示，点电荷 q_1 、 q_2 相距 r 。令 F_{12} 表示 q_1 对 q_2 的作用力， r_{12} 表示从 q_1 指向 q_2 方向的单位矢量，则库伦定律可表示为

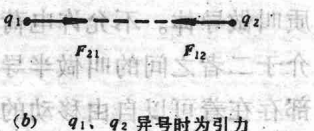


图1—1

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} r_{12} \quad (1.1.1)$$

若把下标1、2对调，便可得到 q_2 对 q_1 的作用力 F_{21} 。因 $r_{12} = -r_{21}$ ，所以 $F_{12} = -F_{21}$ 。

当 $q_1 q_2 > 0$ 时， F_{12} 沿 r_{12} 方向，为斥力；当 $q_1 q_2 < 0$ 时， F_{12} 与 r_{12} 反向，为引力。

F_{12} 与 F_{21} 的大小为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1.1.2)$$

其中， k 是比例系数，由式中各量的单位决定。

本书采用国际单位制。国际单位制的电磁学部分称为

MKSA 制, 有 4 个基本量: 长度、质量、时间和电流强度; 它们的单位分别为米(m)、千克(kg)、秒(s)和安培(A), 称为基本单位; 其他物理量的单位均由这 4 个基本单位导出。

在 MKSA 制中, 电量的单位是库伦(C)。1 C 的电量就是当电流为 1 A 时, 在 1 s 内通过导体横截面积的电量, 即

$$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$$

采用 MKSA 制, (1.1.1) 式或 (1.1.2) 式中电量的单位是 C, 距离的单位是 m, 力的单位是 N, 实验测得

$$k = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \\ \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

k 通常写成

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

其中, ϵ_0 为真空中的介电常数 (其物理意义将在第三章中阐明), 其值为

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

因而, 在 MKSA 制中, 库仑定律应写为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r} \quad (1.1.3)$$

三、静电力迭加原理

实验证明, 当空间有两个以上的点电荷时, 作用于每一个电荷上的总静电力等于其他各点电荷单独存在时作用于该电荷的静电力的矢量和。这叫做静电力的迭加原理。即

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_k = \sum_{i=1}^K \mathbf{F}_i \quad (1.1.4)$$

任何带电体都可看作是点电荷的集合。因此, 库仑定律

与迭加原理相结合，原则上可以解决所有静止带电体之间的相互作用问题。

§1.2 电场 电场强度

一、电场

电荷与电荷之间具有相互作用，库仑定律精确地表达了这种作用力的大小和方向。那么，在真空中相隔一定距离的两个电荷，又是依靠什么来传递它们之间的作用力呢？这个问题曾引起了长期的争论。

有一种观点认为，静电力的传递不需要媒介，也不需要时间，可以由一个电荷立即作用到相隔一定距离的另一个电荷上，这就是所谓的“超距作用”。但这种观点是错误的。近代物理证明，电荷周围存在着另一种形态的物质，叫做电场。电荷之间的作用力是通过电场传递的，因此，这种力又叫做电场力。凡是有电荷的地方，周围就存在电场，即任何电荷都在自己周围激发电场。

电磁场是一种物质。它是不依赖于人们意识的客观存在，并为人们的意识所反映。在场随时间变化的情况中，电磁场一经产生，即使场源消失，它还可以继续存在。这时，变化的电场和变化的磁场相互转化并以一定的速度在空间传播。因此，电磁场有完全独立存在的性质。和实物一样，电磁场具有一定的能量和动量。

电磁场也具有微粒的属性，电磁场的基本粒子叫光子，光子和实物粒子一样，也具有能量、动量和质量。

电磁场这种物质，不同于通常由电子、质子、中子等基

本粒子所构成的实物,它们的区别主要表现在以下几个方面:构成实物的基本粒子具有静止的质量,而电磁场的基本粒子光子没有静止质量;实物可以以任意的速度在空间运动,其速度相对不同的参照系不同,而电磁场在真空中运动的速度永远是 $3 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。并且其传播速度在任何参照系中都相同。实物的微粒所占据的空间不能同时为另一个微粒所占据,但几个电磁场可以互相迭加,可以占据同一空间。

电磁场和实物虽有区别,但在某些条件下,它们之间可以相互转化。例如一个负电子和一个正电子可以转化为光子。而光子也可以转化为电子和正电子。综合以上的分析可知,电磁场和实物一样,也是客观存在的物质,只是和实物具有不同的属性罢了。而这些属性和二者之间的界限也不是一成不变的;它们还会在一定的条件下相互转化。

二、电场强度

电场对其中电荷的作用力叫做电场力。电场力的大小和电场的强弱程度应有一定的关系。可以根据电场对电荷作用力的大小,来检验电场的强弱,从而研究电场中各点的性质。为研究电场的性质,引入试探电荷 q_0 。 q_0 应满足下述条件:首先,它的电量必须足够小,这样,它的存在不会影响原有电场的分布;其次,它的几何线度必须足够小,以至可以把它看作一个点电荷。

将试探电荷 q_0 放到电场中。实验表明,在电场的不同位置, q_0 所受电场力的大小和方向一般是不相同的。这说明各点电场的强弱和方向不同,也就是说电场在空间具有一定的分布。若在电场中某一确定位置放置 q_0 ,则 q_0 所受电场力的大小和方向是完全确定的。保持这个位置不变,改变 q_0

的大小,发现 F 的方向不变,但大小随 q_0 的改变而改变,且 $F \propto q_0$, 若 q_0 变为 $-q_0$, 则 F 大小不变,但方向与原来相反。

这表明在该点,比值 $\frac{F}{q_0}$ 是一个具有确定大小和方向的矢量,它与试探电荷 q_0 无关,只反映该点电场本身的性质。这个比值定义为该点的电场强度矢量,简称为场强,用 E 表示,即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (1.2.1)$$

由上式可见,场强是描述电场中某点力的性质的矢量,其大小等于单位电荷在该点所受电场力的大小,其方向与正电荷在该点所受电场力的方向一致。对于电场中的每一点,都有一个确定的 E 与之对应;电场中的不同点, E 的大小和方向一般是不同的。这说明场强是空间坐标的矢量点函数。因此说到电场强度时,必须指明是空间哪一点的电场强度。我们的着眼点不是求个别地方的场强,而是研究整个空间的场强分布,即场强与空间坐标的函数关系。在特殊情况下,空间各点的场强的大小和方向都相同,这样的电场叫均匀电场(或匀强电场)。

从(1.2.1)式可看出,场强的单位是 $N \cdot C^{-1}$ 。实际中更常用的单位是 $V \cdot m^{-1}$, 可以证明, $1 N \cdot C^{-1} = 1 V \cdot m^{-1}$ 。

三、点电荷的场强

如图1—2所示,点电荷 q 在坐标原点 O , P 为空间任意一点, $OP = r$, 求 P 点的电场强度。为求得 P 点的场强,我们在 P 点放置一试探电荷 q_0 。根

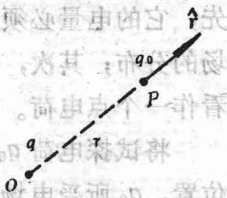


图1—2

据库仑定律, q_0 所受的力为

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

其中, $\mathbf{r}^\circ$ 是沿 OP 方向的单位矢量。根据 (1.2.1) 式, P 点的场强为

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0}{r^2} \mathbf{r}^\circ \quad (1.2.2)$$

由于 P 点是任意的, 所以 (1.2.2) 式反映了点电荷周围空间的场强分布。它具有以下特点:

(1) $\mathbf{E}$ 的方向处处沿以 q 为中心的矢径方向 ($q>0$) 或其反方向 ($q<0$)。

(2) 当电量 q 一定时, $\mathbf{E}$ 的大小只与距离 r 有关, 在以 q 为中心的每个球面上, 场强的大小相等。也就是说, 点电荷的电场是球对称的。

(3) $\mathbf{E}$ 的大小随 r 增大按平方反比律减小, 当 $r \rightarrow \infty$ 时, $E \rightarrow 0$ 。

四、场强迭加原理

假如空间有若干电荷 $q_1, q_2, \dots, q_k$, 形成点电荷系。在这个点电荷系产生的电场中, 各点的电场强度仍可用 (1.2.1) 式确定, 但式中的 $\mathbf{F}$ 应为检验电荷在该点所受的合力。根据静电力迭加原理, $\mathbf{F}$ 应为各点电荷单独存在时施于此检验电荷的静电力 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_k$ 的矢量和, 即

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_k$$

将上式除以 q_0 , 得到

$$\frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{\mathbf{F}_1}{q_0} + \frac{\mathbf{F}_2}{q_0} + \dots + \frac{\mathbf{F}_k}{q_0}$$