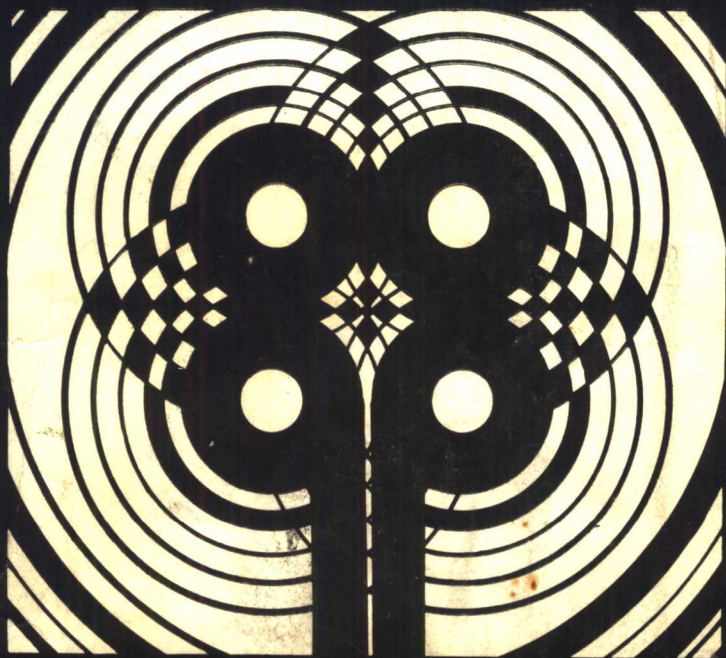


电磁学基本概念

学习指导

苏铁力 马德录 编



辽宁大学出版社

电 磁 学 基 本 概 念

学 习 指 导

苏铁力 马德录 编

辽 宁 大 学 出 版 社

责任编辑 张春光
封面设计 李 丽
责任校对 赵书正

电磁学基本概念学习指导

苏铁力 马德录 编

辽宁大学出版社出版 (沈阳市崇山西路3段4号)

辽宁省新华书店发行 沈阳市四建印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 10.75 字数: 220千

1987年7月第1版 1987年7月第1次印刷

印数 1—3,000册

统一书号: 13429·021 定价: 1.70元

ISBN 7-5610-0016-2/O·2

前 言

电磁学是物理学中的一个重要分支，它研究的主要对象是电场和磁场，研究的主要问题是电现象、磁现象以及它们之间的相互作用和相互联系。

电磁学的发展不仅加深了人们对客观物质世界的认识，而且加速了生产技术的发展。电磁学在物理学的各分支中最先给出了场的概念，电磁场本身就是一种特殊形式的物质，因此在研究物质结构的基本理论时，电磁学占有重要的地位。同时，电磁学的知识也被广泛地应用于科学研究、工程技术和人们的日常生活之中。所以说电磁学是一门极其重要的基础课。

长期的教学实践告诉我们，电磁学也是学生感到难学的课程之一。有相当数量的学生由于对电磁学基本概念理解不深，致使分析问题和解决问题的能力较差，面对习题和思考题往往处于“无从下手”、“似是而非”的状态，对于缺乏辅导条件的电大学生和自学青年更是如此。当前电磁学的习题集解已有不少版本，而关于电磁学基本概念，除教科书之外，学习参考书却很少见。鉴于这种情况，为了帮助学生加深对电磁学基本概念的理解，掌握好使用的方法，我们编写了这本《电磁学基本概念学习指导》。全书共分八章，对普通物理电磁学的基本定理、定律进行了较深入的讲解，并指出其成立的条件、应用范围以及应注意的问题等。在每个概念的后面有针对性的自编或选编了相应的例题，以加深对概念的

理解，具体地说明容易出现错误和容易混淆的问题。我们希望通过这本书使读者对电磁学基本概念能理解和掌握得更好一些。

原辽宁省物理学会理事长、东北工学院杨德新教授生前审阅了本书全部书稿并提出了很多宝贵意见，在此我们表示衷心的感谢和深切的悼念。辽宁大学物理系董振德副教授和辛宗政讲师也对本书稿给了许多帮助，在此一并表示谢意。

在编写本书的过程中，我们参考了国内外的许多电磁学教科书和参考书，由于书目太多，请恕我们不能一一列在书后的参考文献中，对于这些书的作者我们也表示衷心的感谢。由于我们的水平有限，书中错误和不当之处在所难免，欢迎批评指正。

编 者

86.5.

目 录

第一章 真空中的静电场	(1)
§ 1—1 电 荷.....	(1)
§ 1—2 库仑定律.....	(3)
§ 1—3 电 场.....	(8)
§ 1—4 电场强度.....	(9)
§ 1—5 电力线 电通量 高斯定理.....	(25)
§ 1—6 电场力的功 电势能.....	(53)
§ 1—7 电势 电势差.....	(60)
§ 1—8 电场强度与电势梯度的关系.....	(77)
第二章 静电场中的导体和电介质	(85)
§ 2—1 静电场中的导体.....	(85)
§ 2—2 电容 电容器.....	(112)
§ 2—3 静电场中的电介质.....	(124)
§ 2—4 有介质存在时的高斯定理 电位移矢量 $\vec{D}$	(144)
§ 2—5 电场的能量.....	(165)
第三章 稳恒电流	(185)
§ 3—1 稳恒电流 电流密度.....	(185)
§ 3—2 电流连续方程 电流稳恒 条件.....	(191)
§ 3—3 欧姆定律 焦耳定律.....	(197)

§ 3—4	电源及其电动势 闭合电路及 一段含源电路的欧姆定律·····	(205)
§ 3—5	基尔霍夫方程组及其应用·····	(220)
第四章	电流的磁场·····	(226)
§ 4—1	磁现象 磁场·····	(226)
§ 4—2	磁感应强度·····	(228)
§ 4—3	磁学中的高斯定理·····	(231)
§ 4—4	毕奥—沙伐尔—拉普拉斯定律·····	(233)
§ 4—5	安培环路定律·····	(237)
§ 4—6	毕沙拉定律与安培环路定律的 应用·····	(241)
第五章	磁场对电流的作用·····	(246)
§ 5—1	洛仑兹力——磁场对运动电荷 的作用·····	(246)
§ 5—2	带电粒子在磁场中的运动·····	(249)
§ 5—3	带电粒子在电场和磁场中的运动··	(253)
§ 5—4	霍尔效应·····	(258)
§ 5—5	安培力——磁场对载流导线的 作用·····	(261)
§ 5—6	平行电流间的相互作用力, 电流 强度单位“安培”的定义·····	(264)
§ 5—7	磁力的功·····	(266)
第六章	电磁感应·····	(269)
§ 6—1	电磁感应的基本定律·····	(269)
§ 6—2	动生电动势·····	(274)
§ 6—3	涡旋电场·····	(277)

§ 6—4	自感与互感.....	(280)
§ 6—5	RL 电路的暂态过程	(284)
§ 6—6	RC 电路的暂态过程	(288)
§ 6—7	磁场的能量.....	(292)
第七章	物质的磁性.....	(296)
§ 7—1	磁导率.....	(296)
§ 7—2	顺磁质 抗磁质.....	(297)
§ 7—3	磁场强度.....	(300)
§ 7—4	磁场的边界条件.....	(304)
§ 7—5	铁磁质.....	(306)
§ 7—6	简单磁路.....	(310)
第八章	电磁场理论 电磁振荡 电磁波.....	(313)
§ 8—1	位移电流.....	(313)
§ 8—2	麦克斯韦方程组.....	(316)
§ 8—3	电磁场的物质性、统一性和 相对性.....	(320)
§ 8—4	电磁振荡.....	(323)
§ 8—5	电磁波.....	(328)
参考书目		(332)

第一章 真空中的静电场

相对于观察者为静止的电荷所产生的电场称为静电场。
本章主要是研究真空中静电场的基本性质和规律。

§ 1—1 电 荷

一、电荷的种类 实验证明，自然界中有两种电荷，而且只有两种电荷，称为正电荷和负电荷。

二、两种电荷间的作用力 同种电荷之间相互排斥，异种电荷之间相互吸引。电荷间的这种相互作用称为“电力”。

三、电荷的量值 自然界中所存在的电荷量值是不连续的，任何带电体所带的电量（简称为带电量），总是一定极小电荷的整数倍，这种极小电荷也称为基本电荷。常用符号 e 表示，其量值为 1.602×10^{-19} 库仑。自然界中不存在 $0.5e$ 或 $1.8e$ 的带电粒子。电荷的这种以分离的颗粒形式存在，而不是以连续方式存在的性质，我们称之为“量子化”。（注：科学家已经预言“夸克”所带的电量不是基本电荷的整数倍，而是 $\frac{1}{3}e$ ，或 $\frac{2}{3}e$ 。）

四、物体带电的原因 物质内部存在着带负电的电子和带正电的质子，这是物体能够带电的内因。在正常情况下，二者总数相等，所以对外不显电性。如果在一定的外界因素作用下，物体或物体的一部分得到或失去一些电子，以致电

子总数与质子总数不再相等，物体就呈现电性。如果是得到电子，物体就带负电，反之失去电子，就带正电。

五、电荷守恒定律 电荷既不能被创造，也不能被消灭，它们只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到另一部分。这也就是说：在一个孤立的系统中，电荷的代数和是守恒的。这个定律叫做电荷守恒定律。它是物理学中的主要基本定律之一。它不仅在一切宏观过程中成立，而且在一切微观过程中也普遍成立。

〔例1〕在带电棒吸引轻小纸屑时，会出现两种不同的现象：纸屑被带电棒吸引后，有一些被吸附在带电棒上，而另一些却在接触到带电棒后，又剧烈地跳离该棒。这是为什么？

答：当带电棒接近轻小纸屑的时候，在每个纸屑靠近带电棒的一端出现了与带电棒异号的电荷（其原因见第二章），于是由于异号电荷相吸，纸屑被吸引到带电棒上。其中有些纸屑与带电棒接触面甚小，它们上面所带的异号电荷，除在与带电棒接触处的那很少一部分被中和以外，其余的绝大部分还得留在纸屑上，因而这些纸屑与带电棒之间仍是呈吸引状态，纸屑被吸附在带电棒的表面上。而另一些纸屑与带电棒的接触面甚大，带电棒除了将它们上面所带的异号电荷的绝大部分中和掉以外，又将棒上所带的部分电荷转移到了纸屑上，使它们带上了与带电棒同号的电荷，因同号电荷相斥，所以它们又剧烈地跳离了带电棒。

〔例2〕电荷在带电体上是以量子化方式存在的，但是我们在研究带电体的性质时，一般并不考虑这一点，而认为电荷在带电体上是连续分布的，这是为什么？

答：在带电体上，从微观看来电荷虽然是呈分离的量子化方式存在的，但从宏观上看，这种由于量子化所引起的起伏在研究带电体及其性质时，是完全可以忽略不计的。因此为方便起见，一般认为电荷在带电体上是连续分布的。

〔例3〕一个物体带上了电，那么它上面就一定有了多余的正电荷或者负电荷，为什么还说电荷是守恒的呢？

答：电荷守恒不是对一个带电体来说的，而是对于一个与外界没有电荷交换的所谓“孤立系统”而言的。例如毛皮与硬橡胶棒摩擦时，二者分别带上了正电荷和负电荷，对于它们之中的任何一个来说，电荷是不守恒的，而对于由毛皮和硬橡胶棒所组成的这个系统来说，正电荷和负电荷的总量却是守恒的。

在这里应该注意的是，现代对基本粒子的研究表明，在一个孤立的系统中，正负电荷各自的数量可以增加，也可以减少。并非“只能从一个物体转移到另一个物体上去”。因此在学习电荷守恒定律时，应该进一步强调的是：在一个孤立的系统内，正负电荷的代数和保持不变。这一点在微观过程中也是普遍成立的。

§ 1—2 库仑定律

库仑定律是通过实验总结出来的，它确立了两个静止点电荷之间相互作用的基本规律，是静电学的基础。

一、定律内容

在真空中，两个点电荷 q_1 和 q_2 之间的相互作用力的大小与 q_1 和 q_2 的乘积成正比，与它们之间的距离 r 的平方成反比，作用力的方向沿着 q_1 和 q_2 的连线，同号相斥，异号相

吸。

数学表达式：

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

式中： $\vec{F}$ 为 q_1 对 q_2 的作用力，它与 q_2 对 q_1 的作用力 $\vec{F}'$ 是一对作用力与反作用力，显然 $\vec{F} = -\vec{F}'$ 。 $\hat{r}$ 是从 q_1 到 q_2 方向上的单位矢量。（如图 1—1 所示）

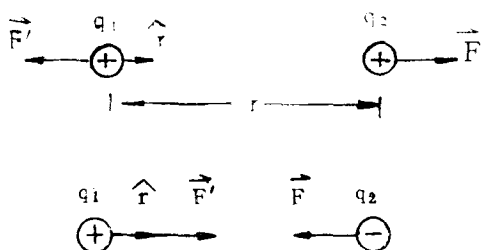


图 1—1

当 q_1 和 q_2 同号，即 $q_1 q_2 > 0$ 时，则 $\vec{F}$ 与 $\hat{r}$ 方向相同， $\vec{F}'$ 与 $\hat{r}$ 方向相反，二者间表现为斥力。

当 q_1 和 q_2 异号，即 $q_1 q_2 < 0$ 时，则 $\vec{F}$ 与 $\hat{r}$ 反向，而 $\vec{F}'$ 与 $\hat{r}$ 同向，二者间表现为引力。

k 为比例系数，在国际单位制，即 $[SI]$ 单位制中，由于式中各物理量的单位均已被选定：力的单位为牛顿，电量的单位为库仑，距离的单位为米，因此 k 的数值根据实验测定为：

$$k = 8.9880 \times 10^9 \text{ 牛顿} \cdot \text{米}^2 / \text{库仑}^2$$

$$\approx 9.00 \times 10^9 \text{ 牛顿} \cdot \text{米}^2 / \text{库仑}^2$$

为使以后公式在形式上变得简单，计算方便，引入一新的恒量 ϵ_0 ，将 k 写成： $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ 的形式

$$\text{显然 } \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = \frac{1}{4\pi \times 8.9880 \times 10^9}$$

$$\approx 8.85 \times 10^{-12} \text{ 库仑}^2 / (\text{牛顿} \cdot \text{米}^2)$$

ϵ_0 称为真空中的介电常数，它将出现在许多电学方程中，它的真正含义要等到学习电磁波的传播时，才能明确。

二、定律的成立条件及适用范围

只有在相互作用的电荷 q_1 和 q_2 均为相对于观察者静止的点电荷时，库仑定律才成立。库仑定律仅适用于计算点电荷之间的相互作用力。如果二者中有一个不能被看成是点电荷，而必须看成有一定大小和形状的带电体，则不能直接套用库仑定律来计算它们之间的相互作用力。在这种情况下，应将该带电体分成无数个体积足够小的小块（这种小块常被称为电荷元），使每一小块都可以看成是点电荷，然后再应用库仑定律计算它们与另一个点电荷间相互作用力的矢量和。如果相互作用的两个带电体都是电荷连续分布的带电体，也可应用类似上述的方法处理。

三、应注意的问题

a. 库仑定律中所说的点电荷是一个相对概念：如果一个带电体本身的线度与它到别的带电体的距离相比足够小时，它的形状、大小在所研究的问题中就可以忽略不计了，

在这种情况下，这个带电体就叫做点电荷。对于点电荷的理解一定要有一个相对性的观点。绝不能用电荷的实际大小来判断它是不是点电荷。至于带电体的线度与它到别的带电体的距离相比相差多少时才能被视为点电荷，这要由所讨论问题的精度要求而定。

b. 两个点电荷间的作用力仅仅决定于库仑定律，并不因有其它电荷存在而改变，这称为静电力的“独立性”作用原理。如果相互作用的电荷不只两个，实验证明，每两个电荷间的相互作用力仍决定于库仑定律。而每个点电荷所受到的总作用力，等于其它各点电荷对它的作用力的矢量和。静电力的这种性质称之为“迭加性”原理。从这里我们可以看出静电力的“迭加性”原理是以静电力的“独立性”作用原理为基础的。

c. 库仑定律是静电学的重要定律之一，它的重要性不仅在于它给出了两个点电荷间的作用力，在以后的学习中我们将逐渐认识到它是研究静电场的重要基础。

〔例1〕从库仑定律的表达式

$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

可以看出，当 $r \rightarrow 0$ 时， $F \rightarrow \infty$ 。可是实验证明，我们不必用很大的力量就可以将两个不太大的带同性电的带电体推靠在一起，这是为什么？

答：库仑定律表达的是点电荷间的相互作用力，当 $r \rightarrow 0$ 时，任何实际的带电体都不能被看成是点电荷，所以在这种情况下，不能再直接套用库仑定律，故 $r \rightarrow 0$ 时， $F \rightarrow \infty$ 的结论是错误的。

〔例2〕有两个点电荷 q_1 和 q_2 ，它们之间的相互作用力为 $\vec{F}$ ，如果把第三个点电荷 q_3 恰好放在它们之间，试问此时 q_1 和 q_2 间的作用力应等于多少？

答：由静电力的独立性作用原理我们知道，两个电荷间的作用力不因其它电荷的存在而改变，因此 q_1 和 q_2 间的作用力仍为 $\vec{F}$ ，其大小和方向由库仑定律决定。 q_3 的引入不会影响 q_1 和 q_2 间的作用力。

〔例3〕在上题中，放入 q_3 后，对 q_2 所受的作用力进行实际测量，其测量结果是否仍为 $\vec{F}$ ？

答：在这种情况下，当对 q_2 所受的力进行实际测量时，其值应为 q_1 对它的作用力 $\vec{F}$ 和 q_3 对它的作用力 $\vec{F}'$ 的矢量和，因此测量的结果不再等于 $\vec{F}$ 。

注意：〔例2〕与〔例3〕是性质完全不同的两类题。在〔例2〕中，由于题中所问的只是两个特定的点电荷间的作用力，因此不应该考虑除他们以外的其它电荷的影响。属于这类的问题，还有诸如：在上述的两个点电荷间放入一块绸或者将它们之中的一个置入空心的金属球壳中，问这两个点电荷间的作用力是否改变等。而在〔例3〕中所问的是 q_2 受力的全部情况，显然在这种情况下，除考虑 q_1 的作用外，还要考虑其它电荷的作用。

〔例4〕O、P及Q三点分别放置一点电荷，它们各自的受力情况如图1—2所示。试说明图中有什么错误？

答：从图中可以看出：P与O间为斥力，Q与O间也为斥力，由此可判断出O、P、Q三点上的电荷皆为同号。即P与Q之间也应显示斥力，而图中却错误的画成为引力了。

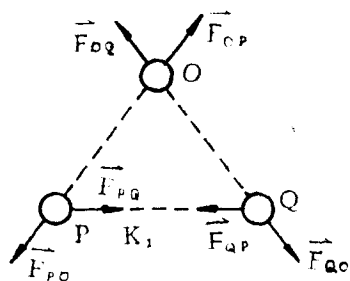


图 1—2

〔例 5〕有两个带电量不相等的点电荷，当它们相互作用时，是否带电量大的电荷受力大，带电量小的电荷受力小？

答：不是。它们之间的相互作用力由库仑定律给出，而不仅仅决定于它们之中任何一个的带电量，二者

是一对作用力与反作用力。

§ 1—3 电 场

一、电 场

给静止电荷以作用力的物理场叫做电场。

如果空间某一区域内的各点都具有给予在该点的静止电荷以作用力的属性，就说该区域存在着电场。

电荷在其周围的空间激发电场。以后的学习可以使我们知道，变化着的磁场也会在其周围空间激发电场。

判别空间中是否存在电场，就看其是否能够给静止电荷以作用力。电场给予电荷的作用力，称为“电场力”。

电场是物质的一种形态，它也和由原子、分子组成的实物一样，具有能量、动量等物质属性，同时它还具有作为自己特点的波动性和叠加性。因此可以说电场是一种特殊的物质。

在这里应该注意的是：运动电荷受到力的作用不能作为判断电场是否存在的唯一依据，这是因为磁场也会给运动电

荷以力的作用，这一点以后会学习到的。

二、静 电 场

相对于观察者为静止的带电体周围所存在的电场，称为静电场。静电场也常被称为库仑场，它是电磁场的一种特殊形式。

静止电荷之间的作用力是通过静电场来传递的。

静电场对外的表现，重要的有：

(1) 引入电场的任何带电体，都受到电场的作用力。

(2) 当带电体在电场中移动时，电场的作用力对带电体做功，这表明电场具有能量。

因此，我们可以根据上述电场的对外表现，来研究电场的性质。

§ 1—4 电场强度

静电场对位于其中的电荷有力的作用，这是静电场的重要性质。

一、电场强度的定义

为了确定在电场中某给定点处电场对电荷作用的情况，我们可以引入一个电量很小，体积也很小的试验电荷 q_0 ，测定它在该点受力的大小和方向。

实验表明：

(1) 试验电荷 q_0 在电场中任一给定点处所受的电场力 $\vec{F}$ 的大小与它的电量 q_0 成正比， $\vec{F}$ 的方向决定于 q_0 的符号。

(2) 对任一给定点来说，试验电荷所受的力 $\vec{F}$ 与其电