

中学教师进修丛书

电 磁 学

上海教育学院 编



教育科学出版社

中学教师进修丛书

电 磁 学

上海教育学院 编

教育科学出版社

一九八二年·北京

内 容 简 介

本书共分六章，内容包括静电学、直流电、稳恒电流的磁场、电磁感应、交流电、电磁场理论和电磁波。书中对许多重要的理论问题作了较为详细的论述，书末附有《电磁学的单位制》以及思考题、练习题和答案。

本书可供中学物理教师自学、进修或教学参考之用。

中学教师进修丛书

电 磁 学

上海教育学院 编

★

教育科学出版社出版

(北京北环西路 10 号)

新华书店北京发行所发行

北京市房山县印刷厂印刷

★

开本 787×1092 毫米 1/32 印张17.875字数399,000

1982 年 8 月第 1 版 1982 年 12 月第 1 次印刷

印数：1—15,000册

书号：7232·135 定价1.65元

前 言

为了适应当前中学物理教师进修的需要，我们在上海市教育局的领导和支持下，根据在职和师范的特点，参照全日制高等师范院校普通物理学课程的内容和要求，编写了这本《电磁学》教材，供中学物理教师在职进修之用。

本书共分六章，内容包括静电学、直流电、稳恒电流的磁场、电磁感应、交流电、电磁场理论和电磁波的基础知识与基本理论。书末并附有《电磁学的单位制》以及思考题、练习题和答案，以便查考。

本书由俞乐同志主编和统稿，参加编写的有俞乐、刘敬德、陈宏范和朱仁龙、胡世伦、张伯泉同志，并承上海师范学院物理系主任束世杰同志审稿。由于时间仓促，且限于水平，不当之处，请读者批评指正。

编 者

1981年9月于上海教育学院

目 录

第一章 静电学	(1)
§1.1 静电理论的基础	(1)
一、电荷、电荷守恒和电荷量子化	(1)
二、电场和电场的物质性	(6)
三、电荷—电场—电荷的作用力规律	(8)
四、电量的单位和量纲	(12)
§1.2 电场性质的力的描述	(17)
一、电场强度 E	(17)
二、几种不同电荷分布的电场强度	(19)
三、电力线和用电力线描绘电场的分布	(33)
§1.3 高斯定理及其应用	(37)
一、电通量	(37)
二、高斯定理	(40)
三、高斯定理应用举例	(46)
§1.4 电场性质的能的描述	(59)
一、静电场力做功的特点	(59)
二、电荷在静电场中的电势能	(65)
三、电势 U 和电势差 V	(70)
四、等势面和用等势面描绘电场的分布	(83)
§1.5 静电场中的导体	(91)
一、导体的静电平衡和静电分布	(91)
二、带电导体表面附近的场强	(96)
三、感应起电机的工作原理	(100)
§1.6 电容和电容器	(103)
一、导体的电容	(103)

二、电容器和电容器的电容	(108)
三、电容器的组合和应用	(116)
§ 1.7 电介质的极化和极化程度的描述	(121)
一、电极化现象	(122)
二、无极分子的极化	(124)
三、有极分子的极化	(125)
四、电极化强度 P	(126)
五、电极化强度和束缚电荷面密度的关系	(128)
§ 1.8 电解质中的高斯定理	(130)
一、存在电介质时的电场强度	(130)
二、电极化矢量与合场强的关系	(131)
三、电位移 D	(132)
四、电介质中的高斯定理	(134)
五、电位移线	(134)
六、电位移矢量与合场强的关系	(135)
七、电介质中的场强和自由电荷的场强的关系	(135)
八、用电位移线描绘电场	(138)
§ 1.9 压电效应	(140)
§ 1.10 电场的能量	(142)
一、静电场能	(142)
二、电场能量体密度	(146)
§ 1.11 静电的应用	(149)
一、静电植绒	(149)
二、静电除尘	(150)
三、静电分离	(151)
四、静电复印	(152)
第二章 直流电	(155)
§ 2.1 电流现象和电流现象的描述	(155)
一、物质的导电性	(155)

二、电流和电流强度 I	(155)
三、电流密度 j 和电流线	(158)
四、电流的稳恒条件和稳恒电场	(163)
§ 2.2 电源的电动势	(164)
一、电源的工作原理	(164)
二、电源的电动势 $\mathcal{E}$	(168)
§ 2.3 导体的电阻	(170)
一、伏安特性和电阻	(170)
二、电阻率	(171)
§ 2.4 欧姆定律	(174)
§ 2.5 电流的能量	(176)
一、电流的功和功率	(176)
二、电流的热效应	(178)
§ 2.6 闭合电路的欧姆定律	(180)
一、内电路、外电路和全电路欧姆定律	(180)
二、电源的输出功率和负载的匹配	(182)
§ 2.7 电阻的组合	(184)
一、电阻的串联	(184)
二、电阻的并联	(186)
三、应用举例	(188)
§ 2.8 多回路电路	(196)
一、节点定律	(197)
二、回路定律	(198)
三、应用举例	(200)
§ 2.9 平衡电桥和电位差计	(206)
一、平衡电桥	(206)
二、电位差计	(208)
§ 2.10 金属导电的经典解释	(211)
一、基元电荷的测定	(211)

二、金属导电的经典电子理论	(214)
三、关于金属的导电性与温度关系的解释	(219)
四、关于电流热效应的解释	(220)
§ 2.11 金属导电的能带理论	(222)
§ 2.12 接触电势差和温差电现象	(225)
一、金属的接触电势差	(225)
二、温差电现象及其应用	(228)
§ 2.13 热电子发射	(231)
§ 2.14 电解质的导电	(234)
§ 2.15 气体的导电	(240)
第三章 稳恒电流的磁场	(246)
§ 3.1 磁现象和磁场	(246)
一、基本磁现象	(246)
二、电流的磁效应	(247)
三、磁场	(249)
四、磁感应强度	(249)
五、洛伦兹力	(251)
§ 3.2 电流和电流磁场的关系	(252)
一、毕奥—沙伐尔定律	(252)
二、载流直导线的磁场	(254)
三、载流圆线圈轴线上的磁场	(255)
四、载流螺线管轴线上的磁场	(256)
五、亥姆霍兹线圈	(258)
§ 3.3 磁场性质的描述	(259)
一、用磁感应线描述磁场	(259)
二、磁场中的高斯定理	(261)
三、磁场环路定理	(263)
四、磁场环路定理的应用	(267)
§ 3.4 磁场对载流导线的作用	(270)

一、载流导线在磁场中所受的力	(270)
二、载流平面线圈在均匀磁场中所受的力矩	(273)
三、直流电动机基本原理	(275)
四、动圈式量电表的基本原理	(277)
§ 3.5 电荷在磁场中的运动	(279)
一、带电粒子在均匀磁场中的运动	(279)
二、带电粒子在非均匀磁场中的运动	(283)
三、荷质比的测定	(284)
四、霍尔效应	(287)
§ 3.6 磁场中的磁介质	(290)
一、磁介质的磁化 磁化电流	(290)
二、磁化强度矢量	(293)
§ 3.7 磁介质中的磁场	(295)
§ 3.8 铁磁性	(301)
一、铁磁质的磁化和磁化曲线	(301)
二、磁滞回线	(304)
三、磁滞损耗	(307)
四、最大磁能积	(307)
五、居里温度	(308)
§ 3.9 磁路定理	(308)
一、磁路定理	(308)
二、磁路的串并联	(310)
第四章 电磁感应	(314)
§ 4.1 电磁感应现象及其基本规律	(314)
§ 4.2 楞次定律	(319)
§ 4.3 自感和互感	(321)
一、自感现象及其规律	(321)
二、 RL 电路中的暂态过程	(324)
三、互感现象及其规律	(327)

四、感应圈	(332)
§ 4.4 感应电动势与非静电力	(334)
一、感生电动势与感应电场	(334)
二、动生电动势与洛伦兹力	(339)
§ 4.5 电磁感应现象的应用	(342)
一、电子感应加速器	(342)
二、感应加热	(344)
三、电磁阻尼	(346)
四、电磁驱动	(347)
五、趋肤效应	(347)
§ 4.6 磁场的能量	(349)
第五章 交流电	(354)
§ 5.1 交流电的基本概念	(354)
§ 5.2 简谐交流电	(357)
一、交流电的产生	(357)
二、简谐交流电的描述	(362)
§ 5.3 交流电路	(369)
一、纯电阻电路	(369)
二、纯电感电路	(371)
三、纯电容电路	(374)
§ 5.4 交流电路的矢量图解法和复数解法	(378)
一、旋转矢量图解法	(379)
二、复数解法	(383)
§ 5.5 谐振电路	(393)
一、串联谐振	(393)
二、并联谐振	(401)
§ 5.6 交流电路的功率	(410)
§ 5.7 三相交流电路	(418)
一、三相交流电的产生	(418)

二、三相电源的联接	(421)
三、三相电路中负载的联接	(423)
四、三相电功率	(428)
五、旋转磁场和感应电动机原理	(429)
§ 5.8 变压器	(433)
一、理想变压器	(433)
二、变压器的几个主要性能	(434)
三、变压器的应用	(438)
第六章 电磁场理论和电磁波	(440)
§ 6.1 麦克斯韦电磁场理论	(440)
一、稳恒电磁场的基本规律	(441)
二、麦克斯韦关于涡旋电场和位移电流的假说	(442)
三、麦克斯韦方程组	(450)
* 四、麦克斯韦方程组微分形式的推导	(454)
§ 6.2 电磁波	(456)
一、电磁波的产生和传播	(456)
二、电磁波的性质	(468)
三、电磁波的能量	(470)
四、电磁波的物质性	(474)
五、电磁波谱	(476)
附录 电磁学的单位制	(480)
思考题和练习题	(504)
练习题答案	(549)

第一章 静 电 学

§ 1.1 静电理论的基础

一、电荷、电荷守恒和电荷量子化

电的应用是现代科学技术和现代生产的重要标志。今天，人们几乎每时每刻都要用到电。

电的广泛应用是人类长期对各种电现象进行研究并取得认识的结果。在形形色色的电现象中，大量是静电现象。静电现象是最基本、最普遍的一种电现象。

闪光忽忽，雷声隆隆，这是由带电的云所引起的电现象。这种电现象在地球上发生得很频繁，平均每秒有好几百次，它是大自然向我们提供的天然静电现象。事实上，由人类的日常生活和生产活动所引起的静电现象则更多：在空气干燥的季节里，当你穿着塑料底子的布鞋，长时在干净的地毯上行走之后，如果用手去抓住金属的门把，往往会有火花在手指和门把之间跳过，这就是人为的静电现象。在工厂里，在印刷机上，你可以看到，有些被滚筒挤压、传送过的纸张，突然被滚筒吸住了，这同样也是一种静电现象。有时候，在纺纱机边，你也会发现，一些纤维在拈结成纱的过程中会相互排斥散开；在电子元件车间里，封装用的聚乙稀塑料，仅仅因为经过室内搬运或填充装箱，竟能在它上面出现数百伏特以至上千伏特的电压。在石油生产场地或贮运设备里，甚至于，因为石油在管道中的流动，而使管壁带了电。或者，由于油车、油船在行驶途中的颠簸，使贮油

罐也帶上了很高的電壓。正因為這個緣故，所以輸油管不得不每隔幾百米就接地一次，油罐車也不得不拖着一根金屬的鏈條在路上奔馳。自然更不用說用明角梳子梳理頭髮的時候，許多人曾經觀察到過微弱的火星和聽到“辟、拍”的爆裂聲；在穿着化纖衣服和使用塑料制品的時候，不少人都已經感受到它們似乎特別容易沾染污垢和吸附灰塵。所有這些，全都是經常出現在我們周圍的與靜電有關的現象。

在科學發展的历史上，人們正是從一些極平凡的现象中逐步認識電的。最早，人們把摩擦後分開的物體所具有的吸引輕微物體的能力，叫做物體帶了電。例如，用一塊絲綢摩擦玻璃棒，或者用一塊毛皮摩擦膠木棒，摩擦以後的玻璃棒和膠木棒都會吸引輕微的物體。而在同樣用絲綢摩擦過的玻璃棒之間，或者同樣用毛皮摩擦過的膠木棒之間，則互相排斥。但玻璃棒與膠木棒之間又互相吸引。如果你用一塊乾淨的塑料薄膜，在清潔的衣服上摩擦几下，你同樣也可以看到，摩擦後的塑料薄膜能夠吸起撒在桌上的紙屑之類的輕微物體，而塑料薄膜之間則彼此排斥。

這樣的現象告訴我們：帶電物體對紙屑之類輕小物體的吸引力，實際上要比龐大的地球對它們的吸引力大得多。而且這種電性的力和萬有引力一樣，可以發生在兩個相隔一定距離的物體之間。可見電性的力也一定是通過類似引力場之類的物質作為媒介而施加作用的。同時，這些現象還告訴我們，因為吸引和排斥是兩種相反的作用，可見用絲綢摩擦過後的玻璃棒上所帶的電，與用毛皮摩擦過的膠木棒上所帶的電，是性質截然相反的。

大量的實驗證明，一切帶電物體之間都有排斥或吸引的作用。所以，帶電的物體，或則與用絲綢摩擦過的玻璃棒相

排斥，而与用毛皮摩擦过的胶木棒相吸引；或则与用丝绸摩擦过的玻璃棒相吸引，而与用毛皮摩擦过的胶木棒相排斥。因此，人们根据这种性质，把物体上所带的电区分为两种：具有前一种性质的，称为物体带了正电；具有后一种性质的，称为物体带了负电。

物体带电在很多情况下也叫做物体带有了电荷。带电的物体叫做带电体。使物体带电的方法叫做起电。摩擦是使物体带电的最简单、最基本的方法。

怎样解释前面说过的摩擦起电现象呢？

原来，物体的带电是与物质的结构分不开的。近代关于物质结构的研究使我们知道：物质是不依赖于人的意识的客观存在。物质是作用于我们的感官而引起感觉的东西，物质是我们感觉到的客观实在。物质可以区分为实物和场两种基本形态。丝绸、玻璃、毛皮、胶木之类都是实物形态的物质。一切实物都是由分子、原子组成的。而原子又由原子核和电子所组成。原子核则又由中子和质子所组成。中子不带电，电子带负电，质子带正电。由于在通常情况下，原子核内质子的数目和核外电子的数目相等，所以原子呈电中性。同样地，当物体的任意大小的一部分内所包含的电子的数目和质子的数目相等时，整个物体对外不呈现带电的性质。但是，当两种不同种类的物体相互摩擦时，由于物体之间的紧密接触，两个物体各自都会有一些电子因热运动而转移到对方去。不过，在同一时间内不同物体向对方转移的电子数目是不相等的。这样，在摩擦后分开的两个物体上，便都带有了电荷：净失去电子的物体因多余正电而带正电荷，净获得电子的物体因多余负电而带负电荷。

所以，物体带电并不是人为地创生了电荷。物体之所以

会呈现带电现象，是因为物体本身在其内部存在着带正电的质子和带负电的电子。质子和电子的存在，是物体带电的内在依据，而任何一种起电的方式，只不过是把客观存在的正、负电荷分开的手段吧了。正因为这个缘故，所以任一物体上的某种电荷的出现，必然同时还有等量的异名电荷的出现。起电的过程，必然是一个克服异名电荷间吸引力做功的过程，因而也必然是某种形式的能量与电性的能量转换的过程。

不论用什么方法获得的等量的异名电荷，在一定条件下，例如把它们置于同一个金属物体上时，它们的作用会互相抵消。这种正、负电荷作用相消的现象，叫做电的中和。

电的中和跟起电现象一样，它揭示了电荷可以从一个物体转移到另一个物体的性质。同时它还告诉我们，一个不呈现带电现象的物体，并不是它的内部就不存在着电荷。

静电感应现象是这个论点的有力证明之一。用一个带电体 A (图1-1) 去接近另一个本来不呈现带电现象的、用有机

玻璃柱支撑着的金属物体 B 。这时， B 上就有电荷出现，而且在靠近 A 的一端出现的是与 A 异名的电荷，在远离 A 的一端出现的是与 A 同名的电荷。如果将带电体 A 移去，则 B 上的带电现象消失。但是，如果在移去带电体 A 之前先将 B 分割成两部分，那末，即使移去了带电体 A ，在 B 的两部分上仍然保持着电荷。倘使在移去带电体 A 的条件下，把

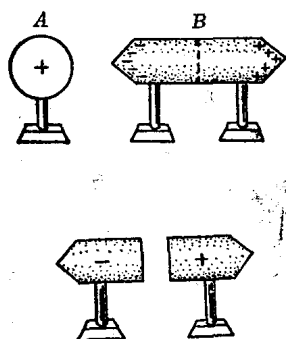


图 1-1 静电感应

B 的两部分重新拼合，可以发现，这两部分的带电现象立即消失。由此可见，在 B 的两部分上所带的电荷，不但是异名的，而且是等量的。

这个现象可以解释为在物体 B 内本来就有两种等量的异名电荷存在，而且其中的负电荷能够自由地在 B 内移动。当带正电的物体 A 接近金属物体 B 时， B 内的负电荷被吸引而移动到接近 A 的一端，故在 B 的两端出现了等量而异名的电荷。当用带负电的物体 A 接近 B 时， B 内的负电荷被排斥而移到远离 A 的一端，因而 B 的两端也出现带电的现象。这种由于带电物体的接近而使物体上的电荷重新分布的现象，叫做静电感应。静电感应现象可以因移去附近的带电体而消失，并且可以无限次地重复，所以电的中和绝不是电荷的消灭。

在概括了大量实验之后，人们得到了一条关于电荷的重要规律，就是：电荷不能创生，也不会消灭，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。这就是说，在一个没有任何物质通过它的边界的“孤立”系统里，正、负电荷的代数和，即电荷的总量是保持不变的。这个规律叫做电荷守恒定律，它是物理学中重要的守恒定律之一。

在带电体上所带电荷的多少是用电量来描述的。国际单位制（简称SI）中电量的单位是库仑。电子所带的电量是很小的，只有 1.6×10^{-19} 库仑。质子所带的电量也精确地等于这个数值。迄今为止的实验表明，一切带电体的电量，都是这一数值的整数倍，所以电荷在量的方面的取值是不连续的。质子或者电子所带的电量的绝对值，通常记作 e 。一切微观粒子或宏观物体所带的电量都是 e 的整数倍。电荷的这个特性，在物理学中叫做电荷的量子化。

两种电荷、电荷守恒和电荷的量子化，是电荷的基本属性。

二、电场和电场的物质性

从带电物体之间并不接触但会相互排斥或吸引的事实，以及静电感应等现象中，我们可以清楚地看到，电荷周围的空间具有这样一种特殊的物理表现：把另外的电荷放置在这个空间中任何一点时，它要受到作用力。

近代物理学的研究表明，这种电性力的作用是以有限速度传递的。这个速度约为 3×10^8 米/秒。

其它大量的科学实验证明，任何形式的相互作用都是物质之间的作用。物理性质的表现是物质存在的表现。自然界中虽然有非直接接触的相互作用，但正如声源的振动对人的听觉器官的作用是通过媒质（空气）的传递一样，电荷之间的相互作用，是通过一种不同于由原子、分子组成的实物形态的物质传递的。人们把这种与电荷相密切联系的特殊物质叫做电场。

因此，电荷之间的相互作用，可以归结为如下的图式来表示：

$$\text{电荷} \Longleftrightarrow \text{电场} \Longleftrightarrow \text{电荷}$$

这就是说，如果有两个电荷 Q_1 和 Q_2 ，那末电荷 Q_2 所受到的电荷 Q_1 的作用力，是通过电荷 Q_1 的电场施加给它的。反之也一样，电荷 Q_1 受到的 Q_2 的作用力，是通过 Q_2 的电场施加给 Q_1 的。所以，位于电场中某一点上的电荷所受到的作用力，永远由电荷所在的位置以及该时刻这一位置的电场所决定。

人们对各种电现象更加广泛和深入的研究发现，任何一个电现象，如果完整地研究起来，也总是一个电磁现象。以