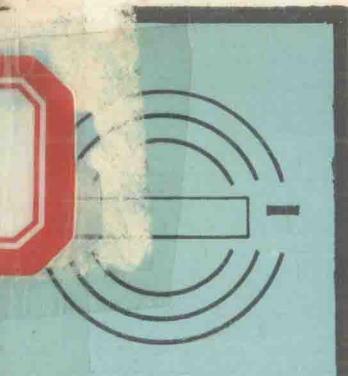


高等师范专科学校通用教材

电 磁 学

● 中南五省（区）师专
《电磁学》编写组 编

● 湖南大学出版社



高等师范专科学校通用教材

电 磁 学

中南五省(区)师专教材编委会

《电 磁 学》编 写 组 编

盛镇华 主编

湖南大学出版社

普通高等教育出版社

湖南大学出版

湖南大学出版

湖南大学出版

高等师范专科学校通用教材

电 磁 学

中南五省(区)师专教材编委会

《电磁学》编写组编

盛镇华 主编

责任编辑 孔照荣

☆

湖南大学出版社出版发行

(长沙岳麓山)

湖南省新华书店经销

湖南大学印刷厂印装

☆

787×1092毫米 32开 12.5印张 280千字

1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷

印数：0001—5000册

ISBN 7-314-00413-7/TM·9

定价：2.45元

前 言

教材建设是学校三大基本建设之一。长期以来，高等师范专科学校没有一套具有自己特点的较为系统的教材，影响了教学质量的提高。为了深化高等师范专科教育的改革，为普及九年制义务教育培养更多的合格教师，中南五省（区）教委（高教局）高教（教学）处共同组织五省（区）师专及部分有关高校的教师，协作编写了师专12个专业85门主干课程的通用教材。

编写这套教材的指导思想是：从高等师范专科教育人才培养的目标出发，根据国家教委新制定的二年制师专教学计划、教学大纲的要求，兼顾三年制和双科制专业的需要，力求突出科学性、适用性及高等师范专科的特点。因此，这套教材不仅适用于普通高等师范专科教育，而且适用于教育学院和电大普通师范教育相关专业的教学，同时还可作为在职初中教师培训和自修的教材。

电磁学是物理专业的重要课程之一，其教学内容属于经典物理学，是比较系统的。本书编写主要以梁灿彬等所编的《电磁学》为依据材料，结合师专教学特点在内容上作了适当的精简，同时注意了有关史料的介绍，加强了对问题分析的阐述；对某些前沿内容，用阅读资料的方式介绍，供读者参考。本书由常德师专负责主编，第一、二章由惠阳师专王文清撰稿，第三章由孝感师专赵孝祥撰稿，第四章由常德师专梁金顺撰稿，第五、七章由玉林师专郑绍福撰稿，第六章和绪论由周口师专李玉振编写，全书由常德师专盛镇华统稿。

由于这样大规模有组织地进行教材编写在我们还是第一次，因而错误和缺点在所难免，恳请读者批评指正。

中南五省（区）师专协作教材编委会

1988年3月

绪 论

我们在初、高中阶段的学习中已经对电磁现象有所认识。现在我们继续学习的电磁学，是师专物理系（科）的一门基础理论课，它将进一步研究电磁现象所具有的特殊矛盾，揭示电荷与电场、电流与磁场以及变化的电场与磁场之间的相互作用的基本规律。学习和掌握这些内容，运用它们去分析和解决电磁学中的问题，不仅为后续课程打下基础，而且是将来作为初中物理教师必须具备的基本知识和基本技能。

物理学是在人类长期实践活动和顽强探索、不断进行理论思维的基础上发展起来的。作为经典物理学的一个分支，电磁学的发展也是如此。简单地追述电磁学的发展过程，有助于我们了解获得这些科学成果的基本过程，掌握获取知识的方法。作为未来的初中物理教师，在对学生传授物理知识的同时，能对他们进行正确的理论思维和研究方法的教育，有助于学生辩证唯物主义世界观的形成，并在学习电磁学中逐步掌握科学的方法论。

早在公元前六世纪，希腊哲学家泰勒描写过用布摩擦过的琥珀能够吸引毛发的现象，我国也有“琥珀拾芥”的描写。磁现象更是在远古时就被发现。我国最早发现了天然磁铁并创制了指南针。

十六世纪末，英国伊丽莎白女王的御医吉尔伯特（1544—1603）第一个系统地研究电和磁，认为地球本身就是一块巨大的磁石，许多磁现象都与这块大磁石有关，并且制作了

第一只实验用的验电器。

大约在1660年德国马德堡的一位酿酒商和工程师奥托·冯·葛利克发明了第一台能产生大量电荷的摩擦起电机。

1720年，美国卡尔特修道院的格雷（约1675—1736）发现摩擦过的玻璃管上带的电荷可以转移到木塞上及导体和绝缘体的区别。法国王家花园的管家杜菲（1698—1739）提出了一切物体都可以摩擦起电，否定了吉尔伯特、格雷等人关于物体可以分为“电的”和“非电的”论断。他还改造了验电器，并指出同性电荷相斥，异性电荷相吸的规律，并提出了二元电液理论。荷兰莱顿大学教授马森布洛克（1692—1761）对电荷贮存进行了大量实验，发明了莱顿瓶。美国费城的本杰明·富兰克林利用莱顿瓶实验提出了正负电的概念和电荷守恒定律，创造了世界上第一个避雷针。第一次将电学研究为人类自身服务。

1780年意大利波洛尼亚的一位解剖学教授伽伐尼认为物体内存存在“动物电”。意大利尼维大学的自然哲学教授伏打（1745—1827）经过多年研究和实验，制成了伏打电池，使人们能获得稳定而持续的电流，为人类从对静电的研究跃进到对动电的研究创造了条件。

十八世纪上半叶，人类对电学的研究只是定性的探索。十八世纪末，开始了电荷间相互作用的定量研究。在普利斯特利（德国人1733—1804）、罗宾森（英国人1739—1805）等人的实验和推测的基础上，法国物理学家库仑（1736—1806）于1785年得出著名的库仑定律。1820年7月21日丹麦物理学家奥斯特（1777—1851）发表了题为《关于磁针上电流碰撞的实验》的文章，宣布了“电流的磁效应”。随后，法国物理学家安培（1775—1836）通过实验总结出右手定

则，提出了安培定律。并于1821年1月提出了著名的分子电流假说。法国科学家毕奥（1774—1862）和沙伐尔（1791—1841）及数学家拉普拉斯（1729—1827）经实验及数学分析总结出毕奥—沙伐尔—拉普拉斯定律。德国科学家欧姆（1787—1854）确定了电路定律。直到1848年基尔霍夫把欧姆的电路定律和电场强度、电位差等静电学概念协调起来。

英国物理学家法拉第（1791—1867）于1831年8月29日发现了电磁感应现象。美国物理学家亨利发现了自感现象。1838年俄国科学家楞次（1804—1865）发明了楞次定律，指出了感应电动势的方向和判别方法。1845年德国科学家诺埃曼（1798—1895）推出电磁感应定律的数学形式。英国物理学家麦克斯韦（1831—1879）于1865年提出了“电磁场理论”，并用一套完整的方程组——麦克斯韦方程组来表示，同时他还提出了光的电磁理论，大胆预言光是电磁波。1887年德国物理学家赫兹（1857—1894）证实了麦克斯韦的预言，并证明了电磁波同光一样具有反射、折射、衍射、偏振等。1896年洛仑兹（1853—1928）提出电子论，成功地解释了物质的电磁性质。1905年爱因斯坦（1879—1955）建立了狭义相对论，使麦克斯韦——洛仑兹电磁理论与伽利略变换之间的矛盾得到解决，用洛仑兹变换从电场得到磁场，使电力和磁力第一次得到统一。

我们学习电磁学，应当全面地、系统地掌握电磁运动的基本现象、基本概念和基本规律。由于电磁学的发展源于实践，因而我们不能仅仅偏重于理论知识的学习，要认真做好实验。通过对实验现象的观察和判断、分析和总结，加深对电磁学基本概念和规律的认识。培养分析、综合等抽象思维能力。

本书的内容包括：静电场的基本规律；静电场中的导体和电介质；稳恒电流和电路；静磁场、磁介质；电磁感应与暂态过程；交流电路；电磁场与电磁波。前两章是电磁学的基础，对于较难理解的“场”的概念和有关“通量”、“环路”等形式的定理要借助于数学的推导，达到逐步接受并能应用。本书各章都有一定的思考题和习题，以便读者加深对概念和规律的理解，培养分析和解决问题的能力。

目 录

绪 论

第一章 静电场的基本规律

§ 1—1	电 荷	1
§ 1—2	真空中的库仑定律	3
§ 1—3	电场强度	5
§ 1—4	高斯定理	12
§ 1—5	电 位	23

第二章 静电场中的导体和电介质

§ 2—1	静电场中的导体	48
§ 2—2	导体壳内外的电场	54
§ 2—3	电容器及其电容	59
§ 2—4	静电场中的电介质	67
§ 2—5	静电场的能量	82

第三章 稳恒电流和电路

§ 3—1	电流、稳恒电流	99
§ 3—2	直流电路及其规律	104
§ 3—3	电源和电动势	118
§ 3—4	复杂电路	134
§ 3—5	接触电现象和温差电现象	144
§ 3—6	液体导电和气体导电	150

第四章 静磁场 磁介质

§ 4—1	磁现象及其本质	173
§ 4—2	磁感应强度	176
§ 4—3	毕奥——萨伐尔定律	180

§ 4—4	磁场的“高斯定理”和“安培环路定理”	187
§ 4—5	带电粒子和载流导体在磁场中的运动	200
§ 4—6	有磁介质时静磁场的基本规律	215
§ 4—7	顺磁质 抗磁质和铁磁质	221
§ 4—8	磁路及其计算	230

第五章 电磁感应

§ 5—1	电磁感应及其基本规律	252
§ 5—2	动生电动势和感生电动势	258
§ 5—3	自感 互感	271
§ 5—4	涡电流	278
§ 5—5	磁能 磁能密度	281
§ 5—6	暂态过程	284

第六章 交流电路

§ 6—1	交流电的特性	307
§ 6—2	讨论交流电路的矢量法与复数法	315
§ 6—3	交流电桥	333
§ 6—4	交流电路的功率 功率因数	337
§ 6—5	谐振现象	346

第七章 电磁场与电磁波

§ 7—1	位移电流	363
§ 7—2	麦克斯韦方程组	368
§ 7—3	电磁波	369

附录：一、备用字母、常数及数学知识。

二、主要电磁学量的量纲和单位。

三、国际单位制和高斯单位制单位换算。

四、国际单位制和高斯单位制电磁学主要公式对照。

第一章 静电场的基本规律

§ 1-1 电荷

一、物质的电结构

科学已经证明，物质由分子组成，分子由原子组成，原子由原子核和核外电子组成，原子核又由质子和中子组成。中子不带电，质子带正电，而且一个电子与一个质子所带电荷的量值相等、符号相反。通常情况下，原子中的质子数与核外电子数相等，这种对立而又和谐统一的原子呈现电中性，这就是物质的电结构。

然而，物质的运动变化（包括原子本身的运动变化）常常会打破原子的这种和谐统一，破坏原子的电中性，使失去电子的原子呈现带正电，得到多余电子的原子呈现带负电，这种带电粒子的运动、变化、转移以及它们之间的相互作用是许多大自然现象发生的根源。众多物质领域的物理和化学性质，在很大程度上都取决于电作用力，从分子的形成到动植物的生长，从电脑的运行到人脑的活动，都和电现象有关。

二、电荷 电荷守恒定律

由物质的电结构可知，哪里有中性原子的电分离，哪里就将同时出现分别带正、负电的带电微粒。任一种带电微粒（或同种带电微粒的集合），都叫做电荷。电荷附在哪一物体上，哪一物体就成为带电体。

原子中的核外电子一方面受到原子核的吸引，被束缚在原子核周围，另一方面，它们又由于本身在运动而具有摆脱原子核束缚的势头。金属原子中的外层电子，受原子核的束缚较弱，很容易摆脱所属原子的束缚而造成电分离。但分离后的电子在金属内部发生相互作用，不可能聚集而造成金属中某一部分的带电状态。它们只能在金属内部作无规则的热运动。这样的电子，称为自由电子。金属等善于导电的物体，叫做导体。另一些物质，例如塑料，橡胶等材料中的电子，受原子核的束缚作用很强，很难造成电分离，因而通常情况下，这类物质中几乎没有可以自由移动的带电粒子。这些物质不善于导电，称为绝缘体（又叫电介质）。

必须指出，不能把自由电子和自由电荷混淆起来，金属中存在着大量的自由电子，但却不能说金属中有大量的自由电荷。只有当金属整体的电中性受到破坏时，才能说金属中存在自由电荷。

电荷的属性之一是存在着两种电荷：正电荷与负电荷。人们把用毛皮摩擦过的火漆棒所带的电荷称为负电荷，把用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷，称为正电荷。后来发现电子所带的电荷与前者相同，所以就说电子带负电。完全是人为的规定。无数实验表明，同种电荷间存在着相互排斥的作用力，异种电荷间存在着相互吸引的作用力。

电荷的另一种属性，在电荷周围的空间存在着“电场”，运动电荷的周围空间还同时存在着“磁场”。同号电荷相斥，异号电荷相吸以及更复杂的其他一些相互作用，就是通过“电场”或“磁场”来实现的。

电荷的第三种属性，是它的量子化。近代物理表明，任何电荷只能是一个电子所带的电荷（记作 e ）的整数倍。至

于今后是否会发现比 e 更小的电荷，目前还无定论①。

大量实验表明，电荷既不能创生，也不能消灭，只能从一个物体转移至另一个物体，或者从物体的一部分转移至另一部分，对于任何一个与外界无电荷交换的封闭系统来说，电荷的总量（正负电荷的代数和），在任何物理过程中都保持不变，这个结论，叫做电荷守恒定律。电荷守恒定律不仅适用于一切宏观过程，也为一切微观过程所遵守，它是物理学的基本定律之一。

§ 1-2 真空中的库仑定律

一、真空中的库仑定律

实验表明，两个电荷间相互作用力的大小与它们相距的远近有关。当我们定量地研究电荷之间的相互作用力时，要考虑电荷之间的距离这一因素。任何带电体都有一定的大小，它们所带的电荷之间的距离很不一致，这就很难确定电荷的相互作用的大小与距离的关系。因此分析问题要从最简单的理想模型开始。如果在确定带电体之间的距离时，带电体本身的线度可以忽略，我们就可以用两个几何点来标志它们的位置。这种线度可以忽略的带电体，称为点电荷。点电荷是一种理想化的物理模型。与质点的概念相似，点电荷也是相对的。同一个带电体，能否被看作点电荷，取决于满足测量的精确度要求的前提下，带电体本身的线度是否可以忽略。

注①：近代物理从理论上预言，组成质子、中子等的基子（称为夸克），它们所带的电荷为 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ ，不过夸克的存在尚未被实验证实。

真空中的库仑定律描述了真空中两个静止点电荷相互作用的规律：两个静止的点电荷相互作用的斥力或引力，处于两个点电荷的连线上，其大小与两个点电荷的电荷量的乘积成正比，而与它们之间的距离的平方成反比①。写成矢量表达式如下：

$$F_{12} = K \frac{q_1 q_2}{r^2} r_{12} \quad (1-1)$$

式中 F_{12} 是点电荷 1 对点电荷 2 的作用力， K 是比例系数， q_1 、 q_2 分别是两个点电荷的电荷量。 r 是它们之间的距离， r_{12} 是点电荷 1 指向点电荷 2 的单位矢。两个点电荷的序号可以由我们随意确定，式 (1-1) 可表示两个静止点电荷之间的相互作用力。由式 (1-1) 不难看出，当 q_1 、 q_2 同号时， F_{12} 和 r_{12} 方向一致，表现为斥力；当 q_1 、 q_2 异号时， F_{12} 跟 r_{12} 方向相反，表现为吸力。

二、电荷量的单位

在国际单位制中，与电磁学有关的四个基本单位是米 (m)、千克(kg)、秒(s)和安培(A)其余都是导出单位，电荷量的单位名称叫库仑，其符号为 C 。1 库仑就是：当电流强度为 1 安培时，在 1 秒内通过导体横截面的电荷量。

采用国际单位制时，由于(1-1)式中力(F)，距离(r)和电荷量(q)的单位均已确定，分别为 N 、 m 和 C ，因而比例系数 K 不能任意给定，而只能由实验确定。实验表明，两个电荷量均为 1 库仑的点电荷，相距 1 米时，它们之间的作用力等于 $8.98 \times 10^9 N$ ，于是得到

注①：大量实验表明，只要施力电荷静止，即使受力电荷在运动，根据 (1-1) 式所得的结果，仍与实验结果相符。

$$K = 8.98 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 \text{c}^{-2} \simeq 9.0 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{c}^{-2}$$

在国际单位制中，电磁学引入新的常数 ϵ_0 来取代 K ，令

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

式中 ϵ_0 是真空的绝对介电常数（ ϵ_0 的意义见第二章），它的数值为

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi K} \simeq 8.9 \times 10^{-12} \text{C}^2 \text{N}^{-1} \text{m}^{-2}$$

于是，库仑定律将写成如下形式：

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} r_{12}$$

引入了因数 4π ，这似乎把库仑定律弄复杂了，其实这样做的结果，将使由库仑定律导出的定理及公式，可避免 4π 这个因素。这一点今后会清楚地看到。

§ 1-3 电场强度

一、电场

两个电荷虽然不直接接触，它们之间都存在相互作用力。这种作用力的传递是否借助于媒介呢？历史上有过几种不同的看法。一种是既不需要媒介，也不需要时间的所谓“超距作用”的观点；另一种是通过“电场”来实现相互作用的观点。现代科学证明了，前一种观点是错误的。实验表明，带电体周围空间存在着一种称为“电场”的物质，电荷所受的力就是带电体的电场对它产生的作用。电荷之间的相互作用都是通过电场来实现的。之所以称“电场”为特殊的物质，是因为它不是由分子、原子所组成的，但它确实是一

种具有质量和能量的客观实在。

只要有电荷，它的周围空间就存在着电场。电荷运动时，它的电场亦作相应的运动。电荷静止不动，它的电场亦静止不动。不随时间变化的电场，叫做静电场。本章只研究静电场的基本规律。

二、电场强度矢量

电场的一个重要特性，就是它对处于电场中的电荷施加电作用力（简称电场力）。为了找到电场力的性质，我们作如下研究。为方便起见，我们假定电场是由点电荷 Q （可称为源电荷）产生的，电场中任一个点称为场点。我们用另外的、能够被看成是点电荷的电荷 q 放进场点作探测（可称为探测电荷），并假定探测电荷很小，它的引入不会导致原来电场的变化，或者说这种变化可以忽略。探测的计算可根据库仑定律进行。

对电场的探测可分两步进行，（1）在同一个场点，相继放入不同的电荷 q_1, q_2, \dots 等，结果测得不同的探测电荷力 F_1, F_2, \dots 等，亦各不相同，但是比值 $\frac{F_1}{q_1}, \frac{F_2}{q_2}, \dots$ 等，却是一个恒矢量。（2）在不同的场点做类似的探测，结果发现，比值 $\frac{F}{q}$ 却是另外一些恒矢量。可见，比值 $\frac{F}{q}$ 反映了场点

电场力方面的特性，我们用电场强度（简称场强，记作 E ）这个物理量来表征这种特性，即

$$E = \frac{F}{q} \quad (1-2)$$

只要知道任一场点的场强 E 及处于该点的电荷 q ，就可根据式（1-2）计算电荷在该场点所受的电场力 F ，即

$$F = qE \quad (1-3)$$

一个电场中，如果各个场点的场强的大小和方向都相同，这样的电场称为匀强电场。

根据库仑定律，我们可以得到源电荷是点电荷 Q 的场强表达式：

$$E = \frac{F}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \mathbf{r} \quad (1-4)$$

式中 \mathbf{r} 是由源电荷指向场点的单位矢， r 是源电荷到场点的距离。显然，当 $Q > 0$ 时， \mathbf{E} 与 \mathbf{r} 方向一致；当 $Q < 0$ 时， \mathbf{E} 跟 \mathbf{r} 方向相反。见图 1-1。

必须指出，式(1-2)只反映了场强的量度法则，它在原则上提供了测定场强的方法，不能认为 \mathbf{E} 的大小由 q 来决定。电场强度是电场中客观存在的物理量，它具有确定的大小和方向，与探测电荷是否存在无关。

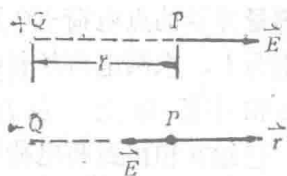


图 1-1

三、场强的叠加原理

如果源电荷是一组点电荷，那么，任一场点的场强将如何确定呢？实验表明，当一组点电荷 Q_1, Q_2, \dots, Q_n ，同时存在时，任一场点的总场强 \mathbf{E} 等于各点电荷单独存在时的场强 $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \dots, \mathbf{E}_n$ 的矢量和。这个规律，叫做场强的叠加原理。即

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i \quad (1-5)$$

叠加原理为我们提供了一个求总场强的办法。例如，求两个点电荷 Q_1, Q_2 在任一场点 p 的合场强，可以象图 1-2