

电 磁 学

主编 刘 平 张春光 王柏生

DIANCIXUE

哈尔滨地图出版社

图例(910)目録表并图

电 磁 学 主编 刘平 张春光 王柏生

电 磁 学

ISBN 7-311-01111-3 定价 12.00元

DIAN CI XUE

主编 刘平 张春光 王柏生

哈尔滨地图出版社

地址：哈尔滨市南岗区森林街5号 邮编：150086

电话：(0451) 5361111

开本：826mm×1166mm 1/32 印张：6.125 字数：120千字

哈尔滨地图出版社

2007年1月第1版 2007年1月第1次印刷

• 哈尔滨 •

图书在版编目(CIP)数据

电磁学/刘平, 张春光, 王柏生主编.—哈尔滨: 哈尔滨
地图出版社, 2007.4

ISBN 978-7-80717-593-3

I.电… II.①刘…②张…③王… III.电磁学 IV.0441

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 050423 号

主 编 王 平 岐 张 春 光 刘 平

哈尔滨地图出版社出版发行

(地址: 哈尔滨市南岗区测绘路 2 号 邮编: 150086)

哈尔滨庆大印刷厂印刷

开本: 850 mm×1 168 mm 1/32 印张: 6.812 5 字数: 190 千字

ISBN 978-7-80717-593-3

2007 年 4 月第 1 版 2007 年 4 月第 1 次印刷

印数: 1~500 定价: 26.50 元

内 容 提 要

本书较系统地阐述了电磁现象的基本概念和基本规律，并收编了一定数量的习题。内容包括：静电场的基本规律、导体周围的静电场、电场中的电介质、稳恒电流和电路、稳恒电流的磁场、电磁感应、磁介质、电磁场和电磁波。本书内容叙述比较详细，既考虑到了理论物理课程的衔接，也照顾到了与中学物理教材的衔接。

本书可作为高等学校物理专业电磁

学课程的试用教材，也可供其他专业有关教师、学生参考，还可供中学物理教师参考使用。

前 言

电磁学课程是物理系一门重要的主干基础课。物理学课程的教学理念是把物理学最基本、最前沿、最有用的东西交给学生，让学生掌握一个完整而真实的物理学；更强调在传授知识的同时，把物理学的基本理论、基本规律和基本方法教给学生，把素质教育与创新精神和创新能力的培养贯彻到教学实践中来。

由于编者水平有限，缺点和错漏之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

作 者
2007年4月

目 录

绪 论	1
第 1 章 静电场的基本规律	5
1.1 电荷	5
1.2 库仑定律	7
1.3 静电场	11
1.4 电场线	22
1.5 高斯定理	24
1.6 静电场的环路定理	29
1.7 电位和电位差	32
1.8 等势面与电势梯度	35
习 题	41
第 2 章 导体周围的静电场	45
2.1 静电场中的导体	45
2.2 静电屏蔽	52
2.3 电容器及其电容	54
习 题	63
第 3 章 静电场中的电介质	66
3.1 电介质的极化	66
3.2 有介质时的高斯定理, 电位移	70
3.3 静电场的能量	72
习 题	76
第 4 章 稳恒电流和电路	77
4.1 电流, 稳恒电流	77
4.2 直流电路	82
4.3 欧姆定律, 焦耳定律	83
4.4 电源和电动势	87

4.5	基尔霍夫方程组.....	95
	习 题.....	98
第 5 章	稳恒电流的磁场.....	101
5.1	基本磁现象概述.....	101
5.2	磁感应强度, 磁感应线.....	104
5.3	毕奥—萨伐尔定律.....	107
5.4	毕奥—萨伐尔定律的应用.....	111
5.5	磁通量, 磁场的“高斯定理”(通量定理).....	117
5.6	安培环路定理.....	118
5.7	安培环路定理的应用.....	121
5.8	带电粒子在磁场中的运动.....	127
5.9	磁场对载流导体的作用.....	129
	习 题.....	131
第 6 章	磁介质.....	135
6.1	磁介质的分类.....	135
6.2	磁化强度.....	138
6.3	磁场强度矢量.....	139
6.4	磁介质中的安培环路定理.....	139
6.5	铁磁质.....	143
	习 题.....	148
第 7 章	电磁感应.....	150
7.1	法拉第电磁感应定律.....	150
7.2	楞次定律.....	152
7.3	动生电动势.....	155
7.4	感生电动势, 感生电场.....	160
7.5	自感, 互感.....	162
7.6	磁场的能量.....	170
	习 题.....	176
第 8 章	电磁场和电磁波.....	180
8.1	位移电流.....	180

目 录

8.2 麦克斯韦方程组.....	187
8.3 平面电磁波.....	190
8.4 偶极振子的辐射场, 电磁波谱.....	195
习 题.....	199
习题答案.....	201
参考文献.....	208

绪 论

电磁学的研究对象及发展简史

电磁学是经典物理学的一部分，它主要研究电荷、电流产生电场、磁场的规律，电场和磁场的相互联系，电磁场对电荷、电流的作用，以及电磁场对物质的各种效应等。电磁现象是自然界存在的一种极为普遍的现象，它涉及到了很广泛的领域，电的研究和应用在认识客观世界和改造客观世界中展现了巨大的活力。因此，电磁学课程是理科和技术学科的一门重要基础课。任何一门科学都有其发展史，都是人类长期实践活动和理论思维的产物。回顾科学发展的历史可以使我們看清楚，在荒漠的知识原野上如何建造起庄严的科学大殿，从而获得科学方法论上的教益。

人类有关电磁现象的认识可追溯到公元前 600 年。

公元前 585 年，希腊哲学家泰勒斯（Thales）就知道摩擦过的琥珀能吸引小物体以及磁石相互吸引。现在西方拼音文字中“电”一词，如英文 electricity 等都是由希腊文的 $\eta \lambda \epsilon \kappa \tau ρ ο ν$ （琥珀）一词转化而来；现在西方文字中“磁学”一词，如英文的 magnetism 的来源，有人认为是古希腊色萨利的麦格尼西亚地方出产的一种石头，能互相吸引，人们把这种石头叫做麦格尼西亚，后来人们把这种石头叫做麦格尼特。

我国古代人民对电磁现象的认识曾有过重要贡献。春秋时代的《管子·地数》（公元前 600 多年）中有“上有慈石者，其下有铜金”，是我国最早关于磁石的记载；东汉已有指南针的前身司南勺；比欧洲更早，在北宋时，我国已有利用地磁场进行人工磁化制作指南针或用磁石磨尖制作指南针，并用于航海；南宋，文天祥在《扬子江》一诗中写道：“臣心一片磁针石，不指南方不肯休。”后来（也在 1276 年），他就把他的诗集命名为《指南录》，可见在当时，磁针指南在我国知识界已是普通常识了；晋朝（公元 3 世纪）还有关于摩擦起

电引起放电现象的详细记载,“今人梳头,解著衣,有随梳解结,有光者,亦有咤声”。

1269 年发现磁石有两极,仿照地理学,把球形磁石上的两极分别叫 N 极和 S 极。

1646 年英文里的 electricity 一词出现。

1733 年迪费 (Du Fay, 1698~1739) 发现电有两种。

1736 年导体 (conductor) 一词的出现。

1785 年库仑 (C.A. Coulomb) 定律。

1821 年安培 (A.M. Ampere) 分子电流假说,认为物质的磁性来源于它的分子磁性,而分子磁性则来源于分子内部有一种永远流动的电流——分子电流 (也有人把它叫做安培电流)。

1820 年毕奥—萨伐尔 (J.B. Biot—F. Savart) 定律,电流产生磁场的基本规律。

1826 年欧姆 (G.S. Ohm) 定律,在我们今天看来,欧姆定律是电学里最简单的定律,可是,在历史上,它的建立和被接受,却是很不容易的事,在欧姆创立欧姆定律时,不仅没有测量电位差和电阻等物理量的仪器,而且连这些物理量的概念都不清楚,所以困难是很大的,物理学上的开创性工作往往是这样的。

1828 年格林 (G. Green) 定律,他是一位自学成才的数学家,发展了泊松关于电学和磁学的理论。格林是用泊松用过的位函数来处理问题的,他把这个函数取名为“位函数” (potential function)。

1831 年法拉第 (M. Faraday) 发现电磁感应,他得知奥斯特发现电流磁效应的消息后,就想到,既然电能够产生磁,反过来,磁也应当能够产生电。他感到,既然电荷能在导体上产生感应电荷,电流也应该能在导体上产生感应电流,他就是本着这种信念从事实验研究的。

1834 年楞次 (H.F.E. Lenz) 定律。

1839 年高斯 (K.F. Gauss) 定律,把库仑定律提到了新的高度,成为后来麦克斯韦方程的基础之一。

1840 年焦耳 (J.P. Joule) 定律。

1843 年电荷守恒定律。

1864 年麦克斯韦 (J.C.Maxwell) 方程组和电磁波。

1864 年 12 月 8 日 Maxwell 在英国皇家学会宣读了他的总结性论文《电磁场的动力学理论》(A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field)。这篇文章总结了他 10 年间的研究成果。其中包括了我们今天熟悉的麦克斯韦方程组的分量形式。18 世纪初, 英吉利海峡两岸的自然哲学家们都以极大热情在电学这片未被开垦的处女地里辛勤耕耘, 但研究的风格却迥然不同。英国学者偏重于实验和应用, 法国学者更倾向于电现象理论的探索。这与当时英国正在进行工业革命而法国酝酿着启蒙运动有关。从 1785 年 (我国清代乾隆五十年), 到 1864 年 (我国清朝同治三年) 麦克斯韦方程出世, 人类花了 79 年的时间, 终于发现了电磁现象的基本规律。

怎样学好电磁学

1. 磁学的研究对象和主要内容: 它是研究电磁场以及它和带电粒子之间的相互作用。主要内容大致可归纳成两部分: 场 (电场和磁场) 和路 (直流电路和交流电路)。

电磁学中涉及的场有静止电荷产生的静电场, 电流产生的磁场, 变化磁场产生电场以及变化的电场产生磁场, 这些场当然有不同性质, 但有相当多的共性。

若能对其中一种场从多方面剖析, 集中精力去认识和掌握它, 然后通过类比, 弄清各种场之间的区别和共同之处, 则可较好地掌握其他的场。静电场是学习电磁学中遇到的第一个场种, 学好静电场是学好整个电磁学的关键。

2. 要学好电磁学, 还要有坚实的数学基础。因为几乎所有的电磁学定律都是有数学表达式的, 在运用和求解实际问题中无不牵扯到数学运算, 所以要学好电磁学就必须学好数学。

3. 描述场的方法: 电磁学的研究对象是场, 描述场的物理量, 如电位和场强, 完整地描述电场, 必须给出空间每一点的电位和场强。要在掌握基本概念上多下功夫。

4. 关于近似计算: 在实际工作中近似计算相当重要, 实际的问

题计算常常相当复杂。在许多情况下作复杂的严格计算并不必要，根据实际的要求作必要的近似计算也是一种能力。

电磁学的重要性

我们生活在电与磁的世界，带电粒子是自然界很重要的基本物质成分，无机物质和生命物质均由带电粒子组成，此外按理论推算，宇宙物质的 90% 以上处于等离子态，电磁作用支配着原子和分子的结构，因而在很大程度上决定着无机物质和生命物质的物理与化学性质。

电磁场和电磁波（光）是自然界普遍存在的一种物质，它由带电粒子产生，传递着带电粒子之间的相互作用，是人类至今最主要的能源，也是人类至今最广泛利用的电子信息载体。

电磁学不仅是物理学的重要基础，也是诸多高新技术领域的基础。电磁学为人类社会走向高度现代化和信息化发挥着无可替代的作用。从 20 世纪初期相对论和量子力学建立以来，源自于包括电磁学在内的许多经典物理概念和定律，在新的实验事实基础上得到了修正或丰富了内涵，促使物理学自身从宏观领域向微观、介观和宇观领域高速发展，同时也促使物理学的普遍原理和知识的广泛应用，其中就包括许多电磁效应被发现和普遍应用，由此促进了能源、激光、材料、电子器件、计算机与信息、航空航天、生物与医学、环保、军事等技术领域的高速发展。

第1章 静电场的基本规律

1.1 电荷

自然界一切电磁现象都起源于物质具有电荷属性，电现象起源于电荷，磁现象起源于电荷运动，所以“电荷”概念是电磁学中的第一个重要概念。

人们对于电的认识，最初来自人工的摩擦起电现象和自然界的雷电现象。

1. 摩擦起电 两种电荷

事实上，两个不同质料的物体，例如丝绸和玻璃棒，毛皮和硬橡胶棒等，经相互摩擦后，都能吸引羽毛、纸片等轻微物体。这表明，经摩擦后它们获得了一种属性，处于一种与原来不同的状态，我们称它为带电状态，或者说它们带了电荷。这种处于带电状态的物体，叫做带电体。

实验发现：自然界中只有两种电荷。用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷为正电荷；用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷为负电荷。同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引。当异种电荷在一起时，它们的效应有互相抵消的作用。

自然界一切物质都是由原子（或分子）组成。原子是由带负电的电子和带正电的原子核组成。在正常情况下，两种电量相等，物体呈中性。当因某种原因（摩擦、加热、化学变化等）失去或获得一部分电子时，就成为具有吸引其他微小物体的性质的带电体。带电体所带电荷的多少叫电量，通常用 Q 或 q 表示。

允许电荷通过的物体叫导体，不允许电荷通过的物体叫绝缘体或电介质。导电性能介于导体和绝缘体之间的物体叫半导体。物体具有不同的导电性，这可用物质的微观结构解释：金属之所以导电，是因为内部存在许多自由电子，它们可以摆脱原子核的束缚而自由

地在金属内部运动；酸、碱、盐的水溶液（电解液）之所以导电，是因为内部存在许多能做宏观运动的正、负离子；反之，在绝缘体内部，由于电子受到原子核的束缚，基本上没有自由电子，因而呈绝缘性质；在半导体中导电的粒子（叫做载流子），除带负电的电子外，还有带正电的“空穴”。

2. 电荷守恒定律

物体在带电过程中，总是伴随有电荷的转移。在摩擦起电过程中，电荷从一个物体转移到了另一个物体，结果使两个物体带上了等量异号电荷；在感应起电过程中，电荷从物体的一个部分转移到了物体的另一个部分，结果使物体的两个不同部分出现了等量异号电荷。相反，当两种等量异号电荷相遇时，它们互相中和，物体就不带电了，两个物体上的电荷将同时消失。

大量实验表明：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，或从物体的一部分转移到另一部分，在任何物理过程中电荷的代数和总是守恒的，或者一个电孤立系统的总电荷是不变的。这个结论叫电荷守恒定律。所谓“电孤立”系统，指的就是一个没有净电量出入其边界面的物质系统。例如光子不带电，故可以允许光线出、入该系统而不影响这个原理。

电荷守恒定律不仅在一切宏观过程中成立，而且在一切微观过程中也是成立的，它是物理学中的普适守恒定律之一。在宏观过程中，物体电荷改变，往往是由于电子的转移而引起的，从一个物体转换到另一个物体（这就是摩擦起电现象）；从物体的一部分转移到另一部分（这就是静电感应现象）。在微观领域中，譬如在核反应和基本粒子的产生、湮没过程。

3. 电荷的量子性

实验表明：在自然界中，任何带电体的电荷量值总是以某一基本单元的整数倍出现，这个基本单元就是一个质子或一个电子所带电量的绝对值 e 。电量的单位是库仑（用 C 表示），1 库仑就是电流强度为 1 安培时每秒钟通过导体任一截面的电量。根据实验测定，电子和质子各带电量 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ 库仑，因此，1 库仑的电量相当于 6.25×10^{19} 个电子或质子所带的电量。一个物体所带电荷的多少只能

是电子电量 e 的整数倍, 即:

$$q = ne \quad (n=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

可见物体所带电荷是不连续的, 或者说电荷是量子化的。为什么电荷是量子化的? 这是物理学至今仍未解决的一个难题。随着人们对物质结构更深层次的研究, 科学家目前提出了“夸克”的概念, 并且认为夸克带的电荷是 e 的分数倍, 但实验上至今还没有找到夸克。如果实验上找到了夸克, 并证实夸克所带电荷是 e 的分数倍的话, 那么电荷量子化的概念将会被修正。对这一方面有兴趣的读者可参阅其他相关书籍。

1.2 库仑定律

1. 库仑定律

任意两个静止带电体之间的静电力不仅取决于它们之间的距离, 而且取决于它们各自的大小、形状以及电荷在带电体上的分布情况, 此时静电力是复杂的。然而对于两个点电荷之间的静电力, 情况却比较简单。所谓点电荷, 从理论上讲就是只有电量而没有大小形状的带电体, 由于实际带电体都不可能小到一个点, 所以点电荷像质点力学中的质点一样是一种理想化模型。实际上, 当带电体的线度比起带电体间的距离小得多时, 带电体就可看做是点电荷。

1785 年, 法国科学家库仑用扭秤测量了两个带电小球间的作用力: 在真空中两个静止的点电荷之间的相互作用力的大小和它们所带电量 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;

作用力的方向沿着它们的连线, 同号电荷相斥, 异号电荷相吸。其数学表达式为:

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

其中, k 是比例常数, 依赖于各量单位的选取。

2. 电量的单位

物体所带电荷的多少叫电量。在国际单位制中电量是库仑, 记作 C。

在国际单位制中, 库仑定律中的比例常数 k 为实验所测量得到:

$$k \cong 8.99 \times 10^9 \quad \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

从而得到:

$$F = 9 \times 10^9 \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

式中 F 单位为牛顿, q 的单位为库仑, r 的单位为米。为了简化电学中其他的许多常用式子 (使公式中不出现 4π 因子), 往往写成:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}。其中 \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)。$$

因此, 库仑定律的常用式子写成:

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

在 MKSA 单位制中, 长度 (L)、质量 (M)、时间 (T)、电流强度 (I) 为基本量, 任何一个物理量 Q 的量纲具有如下形式:

$$[Q] = L^p M^q T^r I^n$$

$$\text{所以: } [\epsilon_0] = \frac{[q_1][q_2]}{[F][r^2]} = L^{-3} M^{-1} T^4 I^2$$

3. 库仑定律的矢量形式

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12} \quad (1-3)$$

$$F_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{21} \quad (1-4)$$

其中, F_{12} 表示点电荷 q_1 对点电荷 q_2 的作用力, F_{21} 表示点电荷 q_2 对点电荷 q_1 的作用力。

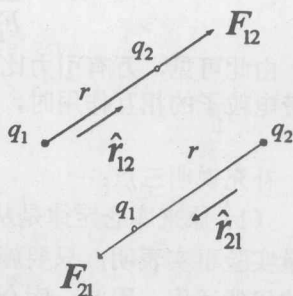


图 1.1

从上面两式可知, $F_{12} = -F_{21}$
即静止点电荷之间的库仑力满足牛顿第三定律。

如果用 $\hat{r}$ 表示由施力电荷指向受力电荷的单位矢量, 则上面两式中的附标可以删掉, 简化为式 (1-1)。

当 q_1, q_2 同号时, $q_1 q_2 > 0$, F 和 r 同向, 表示为斥力; 当 q_1, q_2 异号时, $q_1 q_2 < 0$, F 和 r 反向, 表示为引力。

例 1-1: 试求氢原子中质子与电子间库仑力与万有引力之比。

解: 氢原子核是一个质子, 其质量 $M = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 带电量 $+q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, 核外只有一个电子, 其质量 $m = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 带电量 $-q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $1/4\pi\epsilon_0 = k = 8.99 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$, $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$, 电子和质子的距离为 $r = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。

由库仑定律, 求得两粒子间的静电力大小为

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = 8.99 \times 10^9 \times \frac{(1.60 \times 10^{-19})^2}{(0.529 \times 10^{-10})^2} \text{ N} = 8.22 \times 10^{-8} \text{ N}$$

应用万有引力定律, 电子和质子之间的万有引力为

$$F_g = G \frac{Mm}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{9.11 \times 10^{-31} \times 1.67 \times 10^{-27}}{(0.529 \times 10^{-10})^2} \text{ N} = 3.63 \times 10^{-47} \text{ N}$$

由此得静电力与万有引力的比值为