

普通物理学教程丛书

电 磁 学

(上册)

贾起民 郑永令编著

复旦大学出版社



普通物理学教程丛书

电 磁 学

(上册)

贾起民 郑永令 编著

复旦大学出版社

内 容 提 要

本书属于《普通物理学教程丛书》中的一种,是作者在复旦大学物理系长期使用的电磁学讲义基础上修改补充而成的。全书系统地阐述电磁学的基本现象、概念及其规律,以及处理电磁学问题的基本观点和方法。共十章,前三章讨论静电场,第四章讨论稳恒电流,五、六两章讨论静磁场,第七章用狭义相对论观点讨论电与磁之间的联系,第八章讨论电磁感应,第九章讨论交流电路,第十章讨论麦克斯韦方程和电磁波。分上、下两册出版,每册各五章。本书内容丰富、全面,对有些问题进行了较深入的分析 and 讨论。考虑到不同读者的需要,内容的安排具有一定层次,便于读者自学。书中有大量例题和习题,每节后面还附有思考题。

本书可作为高等学校物理类各专业电磁学或普通物理电磁学部分的教材或教学参考书,也可供有关的教师、学生参考。

电 磁 学

(上 册)

复旦大学出版社出版

(上海国权路 579 号)

新华书店上海发行所发行 淮安印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 13.5 字数 391 千字

1987 年 3 月第 1 版 1987 年 3 月第 1 次印刷

印数 1—8,000

统一书号: 13253·053 定价: 3.10 元

前 言

这套“普通物理学教程丛书”，是我们以历年来在复旦大学物理类专业教学中使用的讲义为基础，经过补充修订，编写而成的。多年来，在我校担任物理课教学的许多同志，曾努力结合教学实践，对普通物理学教材作出了改进。实践表明，这些改进对提高教学质量是有重要作用的。这套丛书的编写也可以说是我们对这些共同的努力所作的一点总结。

普通物理学是很成熟的课程，通行的优秀教材不少；而且很久以来已形成了传统的格式，框架结构已相对地稳定，改变的余地似乎不多。但是教学是创造性的工作，每一位教师的讲课都反映了他本人对所教内容的体会、理解，有他自己的讲授方法，会给听课的学生以不同的感受。教材的编写，集中地体现了这些方面不同的风格。正如在绘画音乐等艺术创作中同一题材，在不同作者手里总是反映出不同的个性特点一样。近几年，各类物理教材的出版，比过去繁荣得多，这不仅为教师提供了更多的选择余地，而且也加强了教学经验的交流，有力地促进了教学的改进和教学质量的提高。我们这套教材在复旦大学出版社的支持下陆续出版，我们认为也是一个学习交流的机会，使我们能把仅在自己学校里实践过的点滴经验，拿到同行老师们和广大读者中来，争取得到大家的帮助、指正，使它们逐步改进和完善。

总的说来，我们在编写过程中力求做到：

1. 重点放在基本概念和基本原理的清楚阐述上。在阐述方法方面，力求由物及理，揭示明确的物理图象（不回避使用学生已学过的数学工具，但在运用新的数学工具时，要特别注意不掩盖物理内容的实质），引导学生注意产生这些原理的实践基础，提高运用它们解决物理问题的兴趣和能力，而不停留在仅仅钻研原理本身。

2. 基本保持传统框架,适当更新题材,注意横向联系。物理学的发展和学科之间的沟通渗透,为普通物理学教学提供了大量新题材和新问题。适当地反映这些新的情况,使学生能在更广泛的意义上理解物理学的基本内容,是当前物理学教学发展的趋势和要求。在考虑内容更新的同时,也要注意普通物理学课程在物理学教学全局中的位置,注意与其他课程有恰当的分工和衔接。

3. 注意启发学生的思考。使他们对一些问题产生进一步探讨的兴趣,而不满足于接受现成的知识。

4. 运用近年来物理学教学研究的成果,适当加强过去教学中某些较为薄弱的环节。

5. 适合不同方面的需要。除了供普通物理学课程教材之用外,也可以给教师、学生和其他读者作参考书。书中加“•”号的小节和一部分附录就是为这方面的需要而补充的。

当然,就这几方面,我们也深感不容易做好,希望与读者共同切磋,力求继续改进。

这套教材是从集体教学经验中产生的。但各册由不同的作者分头编写,独立成书,因而也反映了各自的教学特点,没有企求整齐划一。前人主张“转益多师”。在科学发展的新形势下,对大学生来说,更有这样的需要。从这一意义上说,让各部分教材保持各自的特点,也许不是没有积极意义的。

丛书的出版得到校内外许多同志的大力支持、帮助,谨在此表示衷心的感谢。

复旦大学物理系普通物理学教研组

1985年4月

作者的话

本书是在1982年使用的讲义的基础上结合多年的教学经验和近年来教学改革实践修改而成的。与作者六十年代和七十年代编写的讲义相比,内容上又有更多的补充和提高。

电磁学是物理类各专业的重要基础课,内容成熟、系统严密,与其他学科和课程的关系极为密切。本书在保留传统电磁学的基本内容和体系的前提下,致力于对基本概念和基本规律的阐述,对教学中的一些难点和不易弄清楚的概念,都作了较详细的分析和较深入的讨论,尽量使阐述和分析的深度及风格有一定的特色;在保持科学上的严密性的同时,注意使论述方式尽量适合低年级学生的特点,以便学生在理解基本概念和基本规律的前提下掌握电磁学各部分内容的内在联系,逐步培养学生分析问题和解决问题的能力。全书强调了物理实验和直觉在建立理论中的作用。尽管书中并未就演示实验的具体装置花费笔墨,但增加演示实验的内容,无疑有利于学生从感性认识进入理性认识。读者将从本书中认识到演示实验在电磁学教学过程中的作用和地位。同时,在阐述过程中,力图引导学生学会使用数学。在普通物理学中,数学主要用于概括和表述物理内容,而不是用于演绎和推理。因此,以正确的方法恰当地使用高等数学,使“物”与“理”紧密结合,应是普通物理学的基本任务之一。

在传统的物理专业的教学过程中,学生接触狭义相对论的机会比较少,不少毕业生,对相对论基本概念的理解不甚深刻,有些学生往往只记得相对论的某些结论和公式,而并不了解它们的物理含义。这虽然有相对论的基本思想不易被初学者理解的原因,但学习相对论未经过必要的反复也是重要的原因之一。因而,本书以适合初学者特点的方式,专门以一章的篇幅用相对论和电荷不变性的观点讨论与匀速

运动电荷相关的电磁现象,这对主攻物理的学生将来较深入地掌握相对论,无疑是有益的。近年来,在低年级学生中讲授相对论的做法已不少见,国内外许多院校已积累了不少宝贵的经验。我系为物理类各专业一年级学生开设的力学课中,已增添了一定量的相对论内容。故在电磁学中增加本章所涉及的内容是可行的。

本书有少量内容初看起来可能略深一点,但由于我们采用的是普通物理学的处理方法,这些内容对学有余力的学生和初次从事电磁学教学的青年教师或许是有帮助的,对后继课程的学习亦会有好处。为了突出基本内容,分清主次,本书用大小两种字体排印,对有的章和全用小字排印的章节,还加了“*”号,各章例题和附录也用小字排印。除例题外,加“*”号或用小字排印的内容都具有一定的独立性,略去这些内容,并不影响基本内容的教学,但学习这部分内容,或可扩大基本内容的应用范围,使读者加深对基本内容的理解;或可使读者得到关于某些问题的补充知识,这样就使全书具有一定的层次,以满足不同专业、不同程度的读者的需要。

全书每节都有思考题,以引导学生加深对基本概念的理解,培养学生应用理论知识的能力。许多思考题都是作者在长期的教学过程中,从学生提出的问题中提炼出来的。有些思考题还要求学生阅读有关参考资料,然后才能作出圆满的回答。每节都有例题,它们大多具有典型性和启发性。有的例题着重帮助学生对基本概念和基本原理的理解,有的着重于介绍解题方法,有的则介绍原理在某些重要问题上的应用,以扩大知识面。每章后附有一定数量的习题,这些习题都是根据教学要求编选的。

王祖彝、陈璧耀两同志参加了本书的修改工作,编选了全部习题,演算和核对了习题答案;蔡怀新教授审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的意见;一并表示衷心感谢。

本书最后附有参考书目(有*者建议读者阅读其中部分内容)。作者在教学过程和编写本书的过程中曾从这些参考书中得到许多启发和帮助,在此,也对这些参考书的作者表示感谢。

我们还要感谢自 1960 年以来在复旦大学物理系学习过电磁学的已经毕业或尚未毕业的学生，他们对本课程的讲义提出过许多宝贵的意见，本书中较深入地进行讨论的有些问题以及一些思考题就是受到他们的启发而编写出来的。

本书有错误和不妥之处，恳切希望广大教师和读者给以批评和指正。

贾起民 郑永令

1985 年 1 月于复旦大学

目 录

(上 册)

前言

作者的话

第一章 静电学的基本规律

§ 1.1 物质的电结构 电荷守恒定律	1
1. 电荷 2. 物质的电结构 3. 电荷守恒定律 4. 导体和绝缘体	
思考题	6
§ 1.2 库仑定律	7
1. 库仑定律 2. 电量的单位 3. 几点说明 4. 迭加原理	
思考题	10
§ 1.3 电场和电场强度	11
1. 电场 2. 电场强度 3. 点电荷与点电荷系的电场 4. 任意形	
状带电体的电场 5. 电力线——描写电场的辅助工具 6. 例题	
思考题	32
§ 1.4 电势	34
1. 静电场的环路定理 2. 电势差和电势 3. 电势的计算	
4. 等势面 电势梯度 5. 几点说明 6. 例题	
思考题	54
§ 1.5 高斯定理	55
1. 电通量 2. 对任意封闭曲面的电通量 3. 高斯定理	
4. 几点说明 5. 例题——用高斯定理计算场强	
思考题	70
§ 1.6 静电场的基本方程式	73
1. 静电场的基本方程式 2. 静电场方程式的微分形式	
*3. 泊松方程和拉普拉斯方程 4. 简短的结论	
思考题	83
§ 1.7 静电能	83

1. 点电荷系的相互作用能 2. 电偶极子在外电场中的静电能	
3. 电偶极子在外电场中受到的力矩和力 4. 电荷连续分布的带电体的能量 5. 几点说明 6. 例题	
思考题	100
附录 1A 库仑定律的建立与验证	101
习题	104

第二章 静电场与导体

§ 2.1 静电场中的导体	113
1. 导体的特征 2. 导体的静电平衡条件 3. 导体上的电荷分布	
4. 导体表面的场强 尖端放电 5. 静电屏蔽 6. 范德格拉夫起电机 7. 例题	
思考题	131
*§ 2.2 静电场的唯一性定理	135
1. 问题的提出 2. 静电场势函数的特性 3. 唯一性定理 4. 从唯一性定理看静电屏蔽 5. 例题	
思考题	141
§ 2.3 电容和电容器	142
1. 孤立导体的电容 2. 电容器的电容 3. 几种形状的电容器的电容 4. 电容器的串联和并联 *5. 电势系数和电容系数	
6. 例题	
思考题	154
§ 2.4 静电场的能量	155
1. 带电导体系的静电能 2. 电场的能量 3. 几点说明 4. 静电场对导体的作用力 5. 从能量表示式求力 6. 例题	
思考题	166
附录 2A 孤立椭球导体上的电荷分布	166
附录 2B 两种电势零点选取法的关系	173
习题	176

第三章 静电场与介质

§ 3.1 电介质的极化	185
1. 电介质的极化 相对介电常数 2. 原子或分子系统的电矩	
3. 电介质极化的微观模型 4. 例题	
§ 3.2 极化强度和极化电荷	196

1. 极化强度 2. 极化电荷 3. 极化电荷的面密度和体密度	
4. 几点说明 5. 例题	
思考题	207
§ 3.3 电介质中的静电场	208
1. 宏观电场与微观电场 2. 极化强度与电场强度的关系	
3. 例题 *4. 分子的极化率与介质的极化率	
思考题	224
§ 3.4 介质中的高斯定理	224
1. 电位移矢量 介质中的高斯定理 2. 介质中静电场的基本方	
程式 3. 静电场的边界条件 4. 几点说明 5. 例题	
思考题	242
§ 3.5 电介质内的静电能	244
1. 电介质内静电能的定义 2. 电介质中场能的表示式 3. 说明	
4. 例题	
思考题	255
附录 3A 介质中的电场能量密度	256
习题	260

第四章 稳恒电流

§ 4.1 稳恒电流的闭合性	271
1. 电流 2. 电流强度和电流密度 3. 电流的连续性方程 稳恒	
电流的闭合性	
思考题	276
§ 4.2 欧姆定律	277
1. 欧姆定律的微分形式 2. 一段电路的欧姆定律 电阻 3. 电流	
的功率 焦耳定律 4. 金属导电性的经典微观解释 5. 例题	
思考题	287
*§ 4.3 稳恒电流场与稳恒电场	288
1. 电流连续性方程的微分形式 2. 稳恒电流场的边界条件	
3. 自由电荷在导体中的消散过程 4. 例题	
思考题	300
§ 4.4 电动势和全电路欧姆定律	300
1. 非静电起源的电力 2. 电动势 全电路欧姆定律 3. 稳恒电	
场在稳恒电路中的作用 *4. 化学电源 *5. 温差电现象 6. 例题	

思考题	316
-----------	-----

§ 4.5 电路定理	317
------------------	-----

1. 一段含源电路的欧姆定律
2. 基尔霍夫方程及其应用
- *3. 电压源与电流源
- *4. 戴维宁定理
5. 例题

思考题	332
-----------	-----

§ 4.6 真空二极管和气体中的电流	335
--------------------------	-----

1. 真空二极管中的电流
2. 气体的受激导电
3. 气体的自激导电

习题	341
----------	-----

第五章 稳恒电流的磁场

§ 5.1 基本磁现象 安培定律	352
------------------------	-----

1. 磁现象
2. 电流间的相互作用力 安培定律
3. 几点说明
4. 例题

思考题	359
-----------	-----

§ 5.2 电流的磁场 磁感应强度	360
-------------------------	-----

1. 磁场及其描写
2. 毕奥——沙伐尔定律
3. 几点说明
4. 平面载流回路在磁场中受到的力和力矩
5. 例题

思考题	373
-----------	-----

§ 5.3 稳恒电流的磁场的基本方程式	373
---------------------------	-----

1. 磁感应线的闭合性 磁场的高斯定理
2. 磁场的环流 安培环路定理
3. 稳恒电流的磁场的基本方程式
- *4. 磁场的矢量
5. 例题

思考题	389
-----------	-----

§ 5.4 带电质点在电场和磁场中的运动	391
----------------------------	-----

1. 洛伦兹力
2. 带电质点在均匀磁场中的运动
3. 回旋加速器的基本原理
4. 汤姆逊实验
5. 霍耳效应
6. 洛伦兹力与安培力
7. 例题

思考题	402
-----------	-----

附录 5.A 安培环路定理的严格证明	402
--------------------------	-----

习题	406
----------	-----

习题(双数)答案	416
----------------	-----



静电学的基本规律

静电学研究的对象是相对观察者静止的电荷和它周围的电场。在这一章中,我们只研究处在真空中的静止电荷和它的场。我们将从最基本的静电现象出发,讨论静电场的描述方法和基本规律,进而建立真空中静电场的基本方程式。本章的内容是学习以后各章的基础。

§ 1.1 物质的电结构 电荷守恒定律

1. 电荷

早在古希腊时代,雕刻玉石的匠人就发现,用毛皮摩擦过的琥珀能吸引羽毛、头发、干草等轻小物体,在我国东汉成书的《论衡》中,也早有“顿牟掇芥”的记载。以后相继发现许多材料如玻璃、水晶、硬橡胶、硫磺和火漆等经摩擦后,都有吸引轻小物体的能力。若物体具有了这种性质,就说该物体带了电,或有了电荷。带有电荷的物体称为带电体。通过摩擦使物体带电的过程称为摩擦起电。

摩擦起电现象十分普遍,特别在塑料制造、化纤纺织、溶剂生产等过程中广泛存在。在这些过程中,摩擦起电现象常会影响产品的质量,甚至引起爆炸事故。

大量实验指出,带电体之间存在相互作用。这种作用表现为相互吸引或相互排斥(图 1.1-1)。实验表明:电荷有两类,同类电荷相互排斥,异类电荷相互吸引。由于只存在两类电荷,我们可以称一类电荷为正电荷,另一类电荷为负电荷。历史上,富兰克林最早对电荷的正负作了规定:玻璃与丝绢摩擦后,玻璃所带的电荷为正电荷,凡与它有吸引作用的电荷为负电荷。直到现在,我们仍沿用富兰克林的规定。存在两类电荷及同类电荷相斥、异类电荷相吸是电荷的一种基本属性,但规

定哪种电荷为正,哪种电荷为负,完全是任意的,具有一定的历史偶然性。富兰克林的命名法原基于正电荷容易从一物体流到另一物体这种错误的推测,事实上,容易流动的电荷却是电子所带的负电。

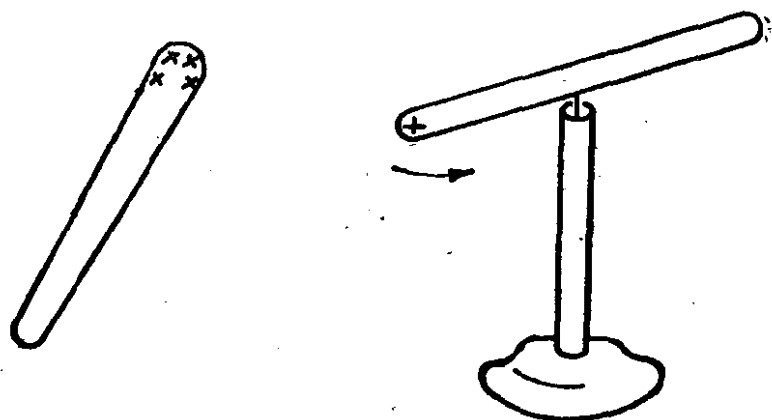


图 1.1—1 两根带同类电的棒相互排斥

摩擦起电是一个非常复杂的过程。两物体相互摩擦后各带何种符号的电荷是由许多因素决定的,如表面的杂质层、物体的温度、物体表面的光滑程度等。当玻璃表面比较粗糙(如摩擦系数 $\mu > 0.18$)或温度比较高时,经丝绢摩擦后的玻璃棒并不带正电,而带负电。因此,确切地讲,在室温下,光滑的玻璃经丝绢摩擦后所带的电荷才是正的。

2. 物质的电结构

电磁现象的基本规律和电磁学的基本理论是在十八至十九世纪期间通过实验发现和总结出来的。当时,人们对物质的微观结构了解甚少,所以在宏观电磁理论的表述中,常常不涉及物质的微观结构。但在今天,如果我们能结合物质电结构的初步知识来学习电磁学,对深入理解电磁学的基本规律是有利的。

从物理和化学的观点来看,物质结构的主要构件是电子、质子和中子。质子和中子是原子核的组成部分,统称核子。电子在核外运动,质量很小,约 10^{-30} 千克,大小很难严格确定,但如果把电子当作一个小球,则其半径的估计值约为 10^{-16} 米的数量级。电子带的电荷 e 是电荷的最小单元。至今尚未发现荷电量比一个电子的电量更小的稳定带电体。但近年来,关于分数电荷问题的研究已引起广泛的兴趣。所谓分数电荷就是指比电子电荷更小的电荷。粒子物理学认为核子等重

粒子是由电量为 $\frac{1}{3}e$ 或 $\frac{2}{3}e$ 的称为夸克的粒子组成。但是，实验上至今还没有发现独立存在的带分数电荷的粒子^①。电荷具有最小单元的性质称为电荷的量子化，它是电荷的又一基本属性。

质子和中子的质量几乎相等，约为电子质量的 1,840 倍 (10^{-27} 千克)。质子带正电，电量与电子的相等(相等的精确度达到 10^{20} 分之一)。中子不带电。质子可以稳定地单独存在，中子则不能，它将衰变(半衰期 13 分钟)为一个质子、一个电子和一个中微子。就目前我们已有的知识来说，电子作为一个基本粒子是恰当的，因尚无证据表明它可以分解成其它成分。但对核子，一般的理论认为它应有复杂的内部结构。电子和质子的质量和电量的数值(1983 年发布)，如下表所示。

电子、质子的电量和质量

	电 量 (库伦)
电子	$(1.6021892 \pm 0.0000046) \times 10^{-19}$
质子	$(1.6021892 \pm 0.0000046) \times 10^{-19}$

	质 量 (千克)
电子	$(9.109534 \pm 0.000047) \times 10^{-31}$
质子	$(1.6726485 \pm 0.0000086) \times 10^{-27}$

为什么电子和质子的电量值相等的精度如此之高？为什么所有电子都能保持这样精确的固定的电荷值？是何种力量使电子成为一个整体？这些问题至今仍使人迷惑不解。如果电子有内部结构的话，那么内部各部份之间应该有静电斥力，电子结构的稳定性说明存在某种比静电力更强的吸引力。所有这一切都是当今物理学尚未搞清的问题。这些问题的详细讨论超出了本书的范围。

不同数目的质子和中子结合成各种不同的原子核。自然界中最重的原子核是铀—238 的核 (^{238}U)，它含有 238 个核子，质量约为

^① 有关分数电荷的一些简单情况可参阅张之翔，大学物理，3(1983)。

4×10^{-26} 千克。所有原子核的密度差不多都相等，因而它们的直径大致正比于核子数的立方根。原子核的直径为 $3 \times 10^{-16} - 2 \times 10^{-14}$ 米。铀原子核的半径约 10^{-14} 米，密度为 10^{17} 千克/米³。

原子核和电子组成原子。原子核带正电，电量取决于核内的质子数。原子核外的电子数与核内的质子数相等，整个原子的净电量为零。原子的质量几乎全部集中在原子核中，如氢原子核占氢原子质量的 99.95%，铀原子核占铀原子质量的 99.98%。在第一级近似下，可以认为原子的质量就是它的原子核的质量。原子的大小要比核高出好几个数量级。原子半径的典型值的数量级为 10^{-10} 米。

分子由原子组成。由少数几个原子组成的分子，如 H_2O , CO_2 , Na_2SO_4 , C_6H_6 等，直径约为几埃。它们的大小和质量与单个原子相比，差别不大。但也有一些分子很大、很复杂。至今知道的最大的分子为蛋白质分子和脱氧核糖核酸 (DNA) 分子，DNA 的分子量达 10^9 原子质量单位。

3. 电荷守恒定律

从物质的电结构看，任何物体，不论固体、液体还是气体，内部都存在正、负电荷。不过，在通常情况下，物体内部的正、负电荷数量相等，电效应相互抵消，不呈现带电状态。如果由于某种原因，物体失去一定量的电子，它就呈现带正电状态；若物体获得一定量过剩的电子，便呈现带负电状态。物体的带电过程实质上就是使物体失去一定数量的电子或获得一定数量的电子的过程。

大量实验事实表明，电荷还有一个属性——守恒性，即在任何时刻，存在于孤立系统内部的正电荷与负电荷的代数和恒定不变，这一结论称为电荷守恒定律。

电荷守恒定律是一切宏观过程和一切微观过程都必须遵循的基本规律。电荷守恒定律在所有惯性系中都成立，而且在不同的惯性系内的观察者对电荷进行测量所得到的量值都相同。换句话说，电荷是一个相对论性不变量。

电荷守恒定律可能与电荷的量子属性有关。粒子电荷只有一种大

小这件事,从电荷守恒来看就很自然。比如说假设 π 介子的电荷等于0.73个电子电荷,那末,要平衡衰变过程的方程并保持电荷守恒,就十分困难;实际上,依据现有的衰变过程的理论,不但在衰变前后,甚至在衰变过程的每一个中间阶段,电荷都是守恒的。因此,人们可以设想单个电荷是一种不可再分割的单位,它只能从一个粒子转移给另一个粒子,而决不会削减下来或者分割开来。

电荷守恒定律还与电子的稳定性有关。电子是最轻的带电粒子,由于这个原因,电子不能衰变。假如电子发生衰变,那一定要违反电荷守恒定律。如果电荷守恒定律基本上有效,而不是完全有效,则电子的寿命将是有限的。1965年有人做了一个实验,估计出电子的寿命超过 10^{21} 年^①, (比推测的宇宙年令还要长得多)。

4. 导体和绝缘体

金属原子的原子核对离核最远的电子(价电子)的作用力较小,当受到某种影响时,价电子很容易脱离原子核的束缚而成为自由电子,失去电子的原子则成为带正电的离子。当大量金属原子组成金属时,由于原子间的相互影响,几乎所有的价电子都变成自由电子,它们在金属内部自由运动,但不会跑到金属外面,与密闭于容器中的气体分子很相似,故通常把金属中的自由电子称为电子气。酸、碱、盐溶于水时,将电离成可在溶液中自由运动的正离子和负离子。所以不论金属内部还是酸、碱、盐的溶液中都存在大量的自由电荷,当自由电荷受到力的作用时,很容易从一处向另一处迁移,因而他们有很好的导电性,故金属以及酸、碱、盐溶液称为导体。金属内部发生电荷迁移时,并不发生可觉察到的质量迁移,而酸、碱、盐中发生电荷迁移时,将伴随质量的迁移。我们把前者称为第一类导体,后者称为第二类导体。

许多非金属,其内部原子核对核外电子的作用力比较大,电子被正离子牢固地束缚着,不能自由运动(但是,电子在原子或分子内部极小范围内,仍可发生微小的移动),因而几乎没有导电的本领,称为绝

^① 关于这个实验的技术报告,见 M. K. Moe & F. Reines, *Physical Review* 140, B992(1965)。