



13.2001/1  
0278605

高等学校试用教材

# 电 磁 学

上 册

赵凯华 陈熙谋



\*21113000822561\*



Y02517

人民教育出版社

本书是由赵凯华、陈熙谋两同志,在北京大学物理系使用的电磁学讲义的基础上,根据1977年10月全国高等学校理科物理教材会议所订的教材编写大纲改编而成的。

本书内容较丰富,较系统地阐述了电磁现象的基本规律和基本概念,收集了较多的思考题和习题。全书分上、下两册。上册内容包括:静电场、静电场中的导体和电介质、稳恒电流、稳恒磁场;下册内容包括:电磁感应和暂态过程、磁介质、交流电、麦克斯韦电磁理论和电磁波、电磁单位制。

本书可作为高等学校物理专业电磁学课程试用教材,也可供其它专业有关教师、学生参考。

## 电 磁 学

上 册

赵凯华 陈熙谋

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北人民印刷厂印装

1978年4月第1版 1978年8月第1次印刷

书号 13012·0127 定价 1.15元

## 前 言

1958年以来作者之一在北京大学物理系讲授电磁学，曾多次编写讲义。本教材以历年来所用的讲义为基础，根据1977年10月在苏州召开的全国高等学校理科物理教材会议制订的教材编写大纲改编而成。

电磁学是理科物理类各专业的一门重要基础课。编写本教材时，我们力求在广泛介绍电磁现象的基础上，着重于基本规律和基本概念的系统阐述，尽可能保证理论体系的完整。关于实际应用，我们不过多地去介绍具体的细节，而是试图对理论在实际中的应用有哪些方面、问题是以怎样的方式提出的、以及理论在各个领域中的适用条件等作些概括，以求读者对电磁理论的应用，从整体上有了解，从而在工作中具备较广的适应性。以上是我们的一些想法。我们感到本教材尚不很成熟，在某些方面仅仅是一些初步的尝试，还有待于在教学实践的基础上进一步改进和提高。

本教材部分内容取材较为深广，介绍了一些现代物理的应用，以适应不同的专业要求，并有利于开阔学生的眼界。为了分清主次，突出基本内容，本书用大、小两种字体排印。大字部分自成体系，反映教学的基本要求；小字部分可作进一步学习的参考。

为了教学方便，书中附有若干附录，介绍一些与内容有关的数学工具。书中收集了一些思考题、习题，其中有的反映了现代物理内容。思考题和习题总的数量较大，可供教师、学生根据不同情况加以选择。

本教材很多地方吸取了我校任课教师的教学经验。章立源、钟锡华二同志过去参加过本课的讲义编写工作。这次在本教材的

改编过程中,郭敦仁同志修改了部分初稿;钟锡华同志详细地阅读了初稿,和我们多次进行了有益的讨论,提供了他在教学中的心得和体会。张之翔同志把多年来收编的习题集提供给我们选择。周岳明、史凤起、冯庆荣等同志帮助演算和核对了习题答案。今年2—3月在本教材的审稿会议上,北京师范大学(主审)、中国科学技术大学、南开大学、山东大学、吉林大学、河北大学、内蒙古大学、北京师范学院等八个兄弟院校的同志们提出了不少宝贵的修改意见。温承诚、艾铁友同志帮助绘制了一部分插图。作者谨此一并表示感谢。

本教材分上、下两册。上册的内容有静电场、静电场中的导体和电介质、稳恒电流、稳恒磁场;下册的内容有电磁感应和暂态过程、磁介质、交流电、麦克斯韦电磁理论和电磁波、电磁单位制。

本教材内容涉猎较广,作者水平有限,加以脱稿仓促,错误和不妥之处在所难免。我们诚恳地希望广大教师和读者给以批评和指正。

赵凯华 陈熙谋

1978年3月于北京大学

# 目 录

## 上 册

第一章 静电场	1
§ 1 静电的基本现象和基本规律	1
1.1 两种电荷(1) 1.2 静电感应 电荷守恒定律(3) 1.3 导体、绝缘体和半导体(4) 1.4 物质的电结构(5) 1.5 库仑定律(7)	
思考题(10) 习题(11)	
§ 2 电场 电场强度	12
2.1 电场(12) 2.2 电场强度矢量 $E$ (13) 2.3 电场强度迭加原理(16)	
2.4 电荷的连续分布(19) 2.5 带电体在电场中受的力及其运动(23)	
思考题(25) 习题(26)	
§ 3 高斯定理	28
3.1 电力线及其数密度(28) 3.2 电通量(32) 3.3 高斯定理的表述和证明(35) 3.4 从高斯定理看电力线的性质(39) 3.5 高斯定理应用举例(41)	
思考题(48) 习题(49)	
§ 4 电位及其梯度	51
4.1 静电场力所做的功与路径无关(51) 4.2 电位差与电位(54) 4.3 电位迭加原理(60) 4.4 等位面(62) 4.5 电位的梯度(65) 4.6 小结(69)	
思考题(69) 习题(71)	
* § 5 带电体系的静电能	76
*5.1 点电荷之间的相互作用能(76) *5.2 电荷连续分布情形的静电能(81)	
*5.3 电荷在外电场中的能量(83) *5.4 带电体系受力问题(84)	
思考题(85) 习题(85)	
附录 A 矢量乘积 立体角 曲线坐标系	86
A.1 矢量的乘积(86) A.2 立体角 (89) A.3 柱坐标系和球坐标系(91)	

## 第二章 静电场中的导体和电介质 .....96

### § 1 静电场中的导体.....96

- 1.1 导体的静电平衡条件(96) 1.2 电荷分布(100) 1.3 导体壳(腔内无带电体的情形)(104) 1.4 导体壳(腔内有带电体的情形)(109)

思考题(112) 习题(115)

### § 2 电容和电容器.....118

- 2.1 孤立导体的电容(118) 2.2 电容器及其电容(119) 2.3 电容器的并联、串联(124) 2.4 电容器储能(电能)(126)

思考题(129) 习题(131)

### § 3 电介质.....137

- 3.1 电介质的极化(137) 3.2 极化的微观机制(139) 3.3 极化强度矢量 $P$ (141) 3.4 退极化场(144) 3.5 电介质的极化规律 极化率(147) 3.6 电位移矢量 $D$ 与有介质时的高斯定理 介电常数(149)\*3.7 电介质在电容器中的作用(154) \*3.8 压电效应和电致伸缩效应(155)3.9 小结(156)

思考题(157) 习题(158)

### § 4 电场的能量和能量密度.....165

习题(168)

## 第三章 稳恒电流 .....170

### § 1 电流的稳恒条件和导电规律.....170

- 1.1 电流强度 电流密度矢量(170) 1.2 电流的连续方程 稳恒条件(173)

- 1.3 欧姆定律 电阻 电阻率(174)1.4 电功率 焦耳定律(180)1.5 金属导电的经典微观解释(183)

思考题(187) 习题(188)

### § 2 电源及其电动势.....191

- 2.1 非静电力(191)2.2 电动势(192)2.3 电源的路端电压(193)2.4 闭合回路的电流强度和输出功率(196) \*2.5 丹聂耳电池(197) 2.6 稳恒电路中电荷和静电场的作用(200)

思考题(202) 习题(203)

### § 3 简单电路.....203

- 3.1 串联和并联电路(203) 3.2 平衡电桥(212) 3.3 电位差计(215)

思考题(218) 习题(222)	
§ 4 复杂电路.....	229
4.1 基尔霍夫方程组(230) *4.2 电压源与电流源 等效电源定理(234)	
*4.3 迭加定理(240) *4.4 Y- $\Delta$ 电路的等效代换(241)	
思考题(243) 习题(244)	
§ 5 温差电现象.....	248
5.1 汤姆逊电动势(248) 5.2 珀耳帖电动势(250) 5.3 温差电效应及其 应用(251)	
思考题(255)	
§ 6 电子发射与气体导电.....	255
6.1 脱出功和电子发射(255)*6.2 气体的被激导电(257)*6.3 气体的自 激导电(259) *6.4 等离子体与受控热核实验(261)	
习题(263)	
<b>第四章 稳恒磁场.....</b>	<b>265</b>
§ 1 磁的基本现象和基本规律.....	265
1.1 磁的基本现象(265) 1.2 磁场(269) 1.3 安培定律(270) 1.4 电流 强度单位——安培的定义和绝对测量(274) 1.5 磁感应强度矢量 $B$ (276)	
思考题(280)	
§ 2 载流回路的磁场.....	281
2.1 毕奥-萨伐尔定律(281) 2.2 载流直导线的磁场(282) 2.3 载流圆线圈 轴线上的磁场(283) 2.4 载流螺线管中的磁场(288)	
习题(292)	
§ 3 磁场的“高斯定理”与安培环路定理.....	296
3.1 磁场的“高斯定理”(297) 3.2 安培环路定理的表述和证明(299)	
3.3 安培环路定理应用举例(303)	
思考题(305) 习题(306)	
§ 4 磁场对载流导线的作用.....	308
4.1 安培力(308) 4.2 平行无限长直导线间的相互作用(308) 4.3 矩形 载流线圈在均匀磁场中所受的力矩(309) 4.4 载流线圈的磁矩(311)	
4.5 直流电动机的基本原理(313) 4.6 电流计线圈所受的磁偏转力矩(315)	
习题(317)	



§ 5 带电粒子在磁场中的运动.....323

5.1 洛仑兹力(323) 5.2 洛仑兹力与安培力的关系(326) 5.3 带电粒子  
在均匀磁场中的运动(328) 5.4 荷质比的测定(330) 5.5 回旋加速器的  
基本原理(334) 5.6 霍耳效应(336) \*5.7 等离子体的磁约束(339)  
思考题(341) 习题(342)

上册习题答案.....349

(带\*号章节为小字部分)

# 第一章 静 电 场

## § 1 静电的基本现象和基本规律

### 1.1 两种电荷

在很早的时候，人们就发现了用毛皮摩擦过的琥珀能够吸引羽毛、头发等轻小物体。后来发现，摩擦后能吸引轻小物体的现象，并不是琥珀所独有的，象玻璃棒、火漆棒、硬橡胶棒、硫磺块或水晶块等，用毛皮或丝绸摩擦后，也都能吸引轻小物体(图 1-1)。

物体有了这种吸引轻小物体的性质，就说它带了电，或有了电荷。带电的物体叫带电体。

使物体带电叫做起电。用摩擦方法使物体带电叫做摩擦起电。

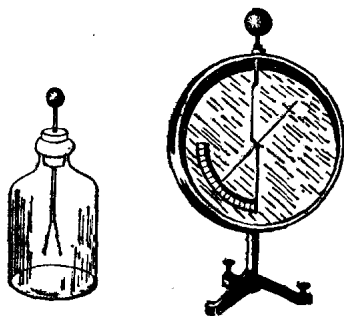
实验指出，两根用毛皮摩擦过的硬橡胶棒互相排斥；两根用绸子摩擦过的玻璃棒<sup>①</sup>也互相排斥；可是，用毛皮摩擦过的硬橡胶棒与用绸子摩擦过的玻璃棒互相吸引。这表明硬橡胶棒上的电荷和玻璃棒上的电荷是不同的。实验证明，所有其他物体，无论用什么方法起电，所带的电荷或者与玻璃棒上的电荷相同，或者与硬橡胶棒上的电荷相同。所以，自然界中只存在两种电荷；而且，同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引。



图 1-1 摩擦起电

① 用硬质玻璃效果较好。

物体所带电荷数量的多少，叫做电量。测量电量的最简单的仪器是验电器，其构造如图 1-2a 所示。在玻璃瓶上装一橡胶塞，塞中插一根金属杆，杆的上端有一金属球，下端有一对悬挂的金箔（或铝箔）。当带电体和金属杆上端的小球接触时，就有一部分电荷传到金属杆下端的两块金箔上，它们就因带同种电荷互相排斥而张开，所带的电荷越多，张角就越大。为了便于定量地测量电荷的多少，还可以不用金箔，而在金属杆上安装一根可以偏转的金属指针，并在杆的下端装一个弧形标度尺来量度指针偏转的角度（见图 1-2b），这样的仪器叫做静电计。



a 验电器

b 静电计

图 1-2

如果静电计原已带了电，我们再把同种电荷加到它上面，指针的偏转角就会增大；把异种电荷逐渐加上去，就会看到指针的偏转角开始时缩小，减到零之后又复张开，这时它所带的是后加上去的电荷。这些事实表明，两种电荷象正数和负数一样，同种的放在一起互相增强，异种的放在一起互相抵消。为了区别两种电荷，我们把其中的一种（用绸子摩擦过的玻璃棒所带的电荷）叫做正电荷，另一种（用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷）叫做负电荷，它们的数量分别用正数和负数来表示。电荷的正、负本来是相对的，把两种电荷中的哪一种叫做“正”，哪一种叫做“负”，带有一定的任意性。上述命名法历史上是由夫兰克林首先提出来的，国际上一直沿用到今天。

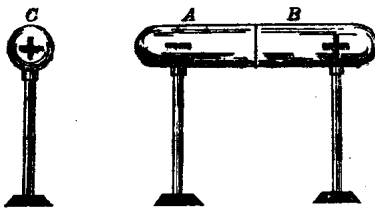
正、负电荷互相完全抵消的状态叫做中和。下面我们将从物质的微观结构看到，任何所谓不带电的物体，并不意味着其中根本

没有电荷,而是其中具有等量异号的电荷,以致其整体处在中和状态,所以对外界不呈现电性。

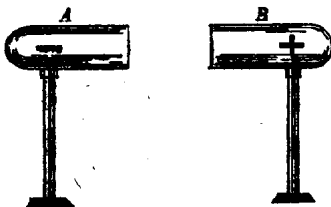
实验表明,摩擦起电还有一个重要的特点,就是相互摩擦的两个物体总是同时带电的,而且所带的电荷等量异号。

### 1.2 静电感应 电荷守恒定律

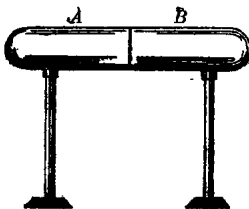
另一种重要的起电方法是静电感应。如图 1-3 所示,取一对



a 将带电体 C 移近 A、B



b 将 A、B 分开后,移去 C



c A、B 重新接触

图 1-3 静电感应

由玻璃柱支持着的金属柱体 A 和 B, 它们起初彼此接触, 且不带电。当我们把另一个带电的金属球 C 移近时, 将发现 A、B 都带了电, 靠近 C 的柱体 A

带的电荷与 C 异号, 较远的柱体 B 带的电荷与 C 同号 (图 1-3a)。这种现象叫做静电感应。如果先把 A、B 分开, 然后移去 C, 则发现 A、B 上仍保持一定的电荷 (图 1-3b)。最后如果让 A、B 重新接触, 它们所带的电荷就会全部消失 (图 1-3c)。这表明, A、B 重新接触前所带的电是等量异号的。

摩擦起电和静电感应的实验表明, 起电过程是电荷从一个物体 (或物体的一部分) 转移到另一物体 (或同一物体的另一部分) 的过程。摩擦起电时, 某种电荷从一物体转移到另一物体, 从而使两物体的中和状态都遭到破坏, 各显电性。譬如在负电荷转移的过程中, 失去它的一方带上正电, 获得它的一方带上负电, 因此

两物体带上等量异号的电荷。在静电感应的现象里也是一样，把带电体  $C$  移近时，金属柱  $A$  和  $B$  中与  $C$  同号的电荷被排斥，异号电荷被吸引，于是在  $A$ 、 $B$  之间发生了电荷的转移，使它们带上等量异号的电荷。

从以上一些事实可以总结出如下的定律：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，也就是说，在任何物理过程中，电荷的代数和是守恒的。这个定律叫做电荷守恒定律。电荷守恒定律不仅在一切宏观过程中成立，近代科学实践证明，它也是一切微观过程（如核反应和基本粒子过程）所普遍遵守的。它是物理学中重要的基本定律之一。

### 1.3 导体、绝缘体和半导体

如果使带电体同玻璃棒的某个地方接触，玻璃棒的那个地方就带上电荷，可是别的地方仍旧不带电。如果使带电体同金属物体的某个地方（例如验电器中金属杆上端的球）接触，那么，不仅接触的地方带电，而且金属物体的其他部分（如金属杆下端的金箔）也带上了电。图 1-3 中金属柱体  $A$ 、 $B$  因静电感应而带的电荷并不会沿玻璃支柱跑掉，但是当它们重新接触时，两边的电荷却能跑到一起而中和。

从许多这类实验中可以得到一个结论，就是按照电荷在其中是否容易转移或传导，习惯上可以把物体大致分成两类：（1）电荷能够从产生的地方迅速转移或传导到其它部分的那种物体，叫做导体；（2）电荷几乎只能停留在产生的地方的那种物体，叫做绝缘体。金属、石墨、电解液（酸、碱、盐类的水溶液）、人体、地、电离了的气体等都是导体；玻璃、橡胶、丝绸、琥珀、松香、硫磺、瓷器、油类、未电离的气体等都是绝缘体。

应当指出，这种分类不是绝对的，导体和绝缘体之间并没有严

格的界限。在一定的条件下，物体转移或传导电荷的能力(称为导电能力)将发生变化。例如，绝缘体在强电力作用下，将被击穿而成为导体。另外，还有许多称为半导体的物质，它们的导电能力介于导体和绝缘体之间，而且对温度、光照、杂质、压力、电磁场等外加条件极为敏感。

#### 1.4 物质的电结构

近代物理学的发展已使我们对带电现象的本质有了深入的了解。物质是由分子、原子组成的，而原子又由带正电的原子核和带负电的电子组成。原子核中有质子和中子，中子不带电，质子带正电。一个质子所带的电量和一个电子所带的电量数值相等，也就是说，如果用 $e$ 代表一个质子的电量，则一个电子的电量就是 $-e$ 。

物质内部固有地存在着电子和质子这两类基本电荷正是各种物体带电过程的内在根据。由于在正常情况下物体中任何一部分所包含的电子的总数和质子的总数是相等的，所以对外界不表现出电性。但是，如果在一定的外因作用下，物体(或其中的一部分)得到或失去一定数量的电子，使得电子的总数和质子的总数不再相等，物体就呈现电性。

两种不同质料的物体互相摩擦后所以都会带电，是因为通过摩擦，每个物体中都有一些电子脱离了原子的束缚，并跑到另一物体上去。但是，不同材料的物体彼此向对方转移的电子数目往往不相等，所以总体上讲，一个物体失去了电子，另一个物体得到了电子，结果失去电子的物体就带正电，得到电子的物体就带负电。因此，摩擦带电实际上就是通过摩擦作用，使电子从一个物体转移到另一个物体的过程。

在金属导体里，原子中的最外层电子(价电子)可以摆脱原子的束缚，在整个导体中自由运动。这类电子叫做自由电子。原子中除价电子外的其余部分叫原子实。在固态金属中原子实排列成

整齐的点阵，称为晶格或晶体点阵。自由电子在晶体点阵间跑来跑去，象气体的分子那样作无规运动，并不时地彼此碰撞或与点阵上的原子实碰撞。这就是金属微观结构的经典图象。

图 1-8 所示的静电感应现象可解释如下。当我们把带正电的物体(图 1-3a 中的  $C$ )移到金属导体(图中的  $A$  和  $B$ )的附近时，导体内的自由电子就受到正电荷的吸引力，向靠近带电体的一端移动。结果导体的这一端就因电子过多而带负电，另一端则因电子过少而带正电。从这里可以看出，感应带电实际上是在外界电力的作用下，自由电子由导体的一部分转移到另一部分造成的。

一切导体所以能够导电，是因为它们内部都存在着可以自由移动的电荷，这种电荷叫做自由电荷。在不同类型的导体中，自由电荷的微观本质是不一样的。金属中的自由电荷就是自由电子。在电解液中，自由电荷不是电子，而是溶解在其中的酸、碱、盐等溶质分子离解成的正、负离子。在电离的气体(如日光灯中的汞蒸汽)中，自由电荷也是正、负离子，不过气体中的负离子往往就是电子。

在绝缘体中，绝大部分电荷都只能在一个原子或分子的范围作微小的位移，这种电荷叫做束缚电荷。由于绝缘体中自由电子很少，所以它们的导电性能很差。

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”。当半导体中多数载流子是电子时，称为  $n$  型半导体；当多数载流子是“空穴”时，称为  $p$  型半导体。将  $n$  型和  $p$  型半导体结合起来，可以制成各种半导体器件，如晶体二极管、晶体三极管等，它们在现代电子技术中有着广泛的应用。

上述物质结构的图象表明，电荷的量值是不连续的(近代物理学中把这叫做“量子化的”)。电荷的量值有个基本单元，即一个质子或一个电子所带电量的绝对值  $e$ ，每个原子核、原子或离子、分

子，以至宏观物体所带的电量，都只能是这个基本电荷  $e$  的整数倍。测量表明，这个基本电荷的量值为

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ 库仑,}$$

库仑是电量的单位，简称库，用 C 表示，它的定义将在后文阐述。不过根据上式我们也可以说，1 库仑的电量是基本电荷的

$$\frac{1}{1.602 \times 10^{-19}} = 6.24 \times 10^{18} \text{ 倍。}$$

### 1.5 库仑定律

在发现电现象后两千多年的长时期内，人们对电的了解一直处于定性的初级阶段。这是因为，一方面社会生产力的发展还没有提出应用电力的急迫需要，另一方面，人们对电的规律的研究必须借助于较精密的仪器，这也只有在生产水平达到一定高度时才能实现。这种状况一直延续很久，到了十九世纪人们才开始对电的规律及其本质有比较深入的了解。

最早的定量研究是在十八世纪末，库仑通过实验总结出点电荷间相互作用的规律，现称之为库仑定律。所谓点电荷，是指这样的带电体，它本身的几何线度比起它到其它带电体的距离小得多。这种带电体的形状和电荷在其中的分布已无关紧要，因此我们可以把它抽象成一个几何的点。

库仑定律表述如下：

两个点电荷  $q_1$  及  $q_2$  之间的相互作用力的大小和  $q_1$  与  $q_2$  的乘积成正比，和它们之间距离  $r$  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。

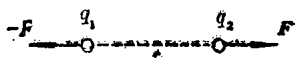


图 1-4 库仑定律

令  $F$  代表  $q_1$  给  $q_2$  的力， $\hat{r}$  代表由  $q_1$  到  $q_2$  方向的单位矢量，则



$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}, \quad (1.1)$$

无论  $q_1, q_2$  的正负如何, 此式都适用。当  $q_1, q_2$  同号时,  $\mathbf{F}$  沿  $\hat{r}$  方向, 即为排斥力; 当  $q_1, q_2$  异号时,  $q_1$  与  $q_2$  的乘积为负,  $\mathbf{F}$  沿  $-\hat{r}$  方向, 即为吸引力。根据牛顿第三定律,  $q_2$  给  $q_1$  的力为  $-\mathbf{F}$  (见图 1-4)。

$\mathbf{F}$  的大小为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (1.2)$$

式中  $k$  是比例系数, 它的数值取决于式中各量的单位。

库仑定律是 1784—1785 年间由库仑通过扭秤实验总结出来的。扭秤的结构示于图 1-5, 在细金属丝下悬挂一根秤杆, 它的一端有一小球  $A$ , 另一端有平衡体  $P$ , 在  $A$  旁还置有另一与它一样大小的固定小球  $B$ 。为了研究带电体之间的作用力, 先使  $A, B$  各带一定的电荷, 这时秤杆会因  $A$  端受力而偏转。转动悬丝上端的旋钮, 使小球回到原来位置。这时悬丝的扭力矩等于施于小球  $A$  上电力的力矩。如果悬丝的扭力矩与扭转角度之间的关系已事先校准、标定, 则由旋钮上指针转过的角度读数和已知的秤杆长度, 可以得知在此距离下  $A, B$  之间的相互作用力。

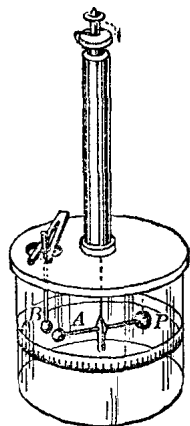


图 1-5 库仑扭秤

很多书籍和文献中常采用的一种电学单位制, 称为厘米·克·秒静电单位制, 通常以 CGSE 或 e. s. u. 表示它。在这单位制中选式(1.1)或(1.2)中的比例系数  $k=1$ , 并由此来定义电量的单位 (详见第九章 2.2 节)。

本书采用的单位制是 MKSA 单位制, 它是目前国际上公认的单位制, 记作 SI 制。在这单位制中有四个基本量: 长度、质量、时间和电流强度。长度以米 (M) 为单位, 质量以千克 (K) 为单位,