

高等学校教材

电磁学教程



上册

(第二版)

梁百先 汤建国 张才国



高等教育出版社

高等学校教材

电磁学教程

上册

(第二版)

梁百先 汤建国 张才国

高等教育出版社

本书是原作者前编《普通物理学(电学部分)》一书的第二版,本版由原作者梁百先教授在汤建国、张才国两位同志协助下,参照1980年电磁学教学大纲加以修订,并将书名改为《电磁学教程》,仍分上、下两册出版。本版改用国际单位制,对原有的习题作了增删,并增设思考题,以便教学。本版还对与后续课程有重复的内容作了删节,并补充了一些电磁学在现代物理应用中新的事例。

本书上册内容包括:真空中静电现象,静电场基本规律,静电场中的导体,电介质,稳恒电流的基本定律,固体导电机理及固体中电子现象,电解质导电与气体导电。

本书可作为高等学校物理专业电磁学课程的教材,也可供其他专业有关教师、学生参考。

高等学校教材

电磁学教程

上册

(第二版)

梁百先 汤建国 张才国

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷二厂印装

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张 11.25 字数 272,000

1964年6月第1版 1983年11月第2版 1984年4月第1次印刷

印数 00,001—13,000

书号 13010·0928 定价 1.35 元

第二版序

本书原名《普通物理学(电学部分)》，分上、下两册分别于1964及1965年出版。当时国内有些学校曾采用它为教材，并有读者提出一些宝贵的意见，惜因“十年浩劫”，未遑修订。

现在，为了响应“百家争鸣”的号召，适应当前教学的需要，特由汤建国、张才国两同志协助，将原书加以修订，以飨读者。书中除包括1980年教育部颁发的教学大纲所要求的内容外，还保留了原书的某些特有章节。修订工作主要在下列几个方面：即(1)全书改用国际单位制；(2)各章新增思考题，对原来习题也有些修改和补充；(3)修改某些章节中的论述，使较有说服力；(4)精简一些与固体物理或电子学等后继课程重复的内容；(5)对某些原理的应用，增加较新的事例等等。书末还附有矢量代数及矢量分析概要，电磁学单位制，习题答案及汉英对照的索引等，以便读者参考。编写修订版时，除第一版序言中所提及的参考书外，还引用了下列书籍的有关内容，即

B. Bleaney and B. I. Bleaney: *Electricity and Magnetism*,

Feynman: *Feynman Lectures on Physics*;

F. W. Sears: *Principles of Physics*, Vol. 2.

在修订过程中，尹玉龙同志为全书插图付出了艰巨的劳动；武汉大学教务处对我们的工作给予热情的指导和鼓励；中南民族学院、大连海运学院等单位也给予了很大的支持，我们谨向上述单位和个人表示由衷的感谢。

由于我们学识浅陋、水平有限，书中种种谬误在所难免，谨以诚挚的心情欢迎读者批评和指正，并预致谢意。

编著者 1983年 月于武汉大学

原 序

本书是以1958年编者和几位青年教师在武汉大学编写的电学讲义为基础,经过逐年删改而成。现在看来,本书已接近1962年教育部委托北京大学所拟订的大纲草案的内容。我们认为可以不讲授而仅留供同学参考的材料,在书中用小字印刷,以示区别。当然,本书还有不少次要的材料,采用本书的教师可以斟酌具体情况进行适当的精简。

本书分上、下两册。上册内容为静电场、电介质、恒定电流、固体中电子现象、电解质及气体导电等,分为六章;下册内容为电流的磁场,带电质点在电场和磁场中的运动、磁介质、电磁感应、交流电及电磁波等,也分为六章。全书除绪论外共十二章。

我们用的主要参考书如下:

1. 江苏师范学院物理系编委会: 电磁学讲义
2. 福里斯与季莫列娃: 普通物理学第二卷
3. С. Г. Калашников: *Электричество*
4. 史特拉乌夫: 电与磁
5. 塔姆: 电学原理
6. Page and Adams: *Principles of Electricity*

本书是在武大物理系党组织和系行政领导的鼓励和支持下写成的。在历次编写过程中,肖景明、李鸿仪、陶经纬、王炽仑、李琪、石展之等同志写了部分章节的初稿。最近一次修改时,承系内戴春洲先生等几位老教师分章审阅,定稿前又承教育部教材编审委员会和审查人提出了很多宝贵的意见。编者谨向上述所有的同志致以衷心的感谢!

编者学识浅陋、水平有限，本书出版前虽经一些同志审阅，可能仍有不少的错误和缺点，希望采用本书的教师和同学不吝指正，以便再版时修改。

梁百先

1964年9月于珞珈山

目 录

第一章 真空中静电现象 静电场基本规律

§ 1.1	电荷与电量	1
§ 1.2	物质的电结构 导体和绝缘体	5
§ 1.3	库仑的扭秤实验 库仑定律	7
§ 1.4	静电场 场的迭加	15
§ 1.5	电场强度及场强迭加原理	17
§ 1.6	电力线与电通量	27
§ 1.7	高斯定理	34
§ 1.8	高斯定理的应用	39
§ 1.9	静电场力所作的功	46
§ 1.10	电荷在静电场中的位能 电位差与电位	50
§ 1.11	各种电荷分布的场的电位	55
§ 1.12	等位面	59
§ 1.13	电位与场强之间的关系 电位梯度	63
§ 1.14	高斯定理的微分形式 泊松方程及拉普拉斯方程	67
§ 1.15	真空中静电场的特征	69

第二章 静电场中的导体 电场能量

§ 2.1	导体达到静电平衡状态的条件 静电平衡时导体的电位	79
§ 2.2	导体上电荷的分布 库仑定律的精确验证	80
§ 2.3	静电感应 静电屏蔽	92
§ 2.4	导体表面附近的场强 面电荷密度与曲率的关系	96
§ 2.5	导体在静电场中性质的应用 静电起电机	99
§ 2.6	导体的电容	102
§ 2.7	电容器	104
§ 2.8	各种形状电容器电容的计算	106
§ 2.9	电容器的联结	109
§ 2.10	固定电容器和可变电容器	114

§ 2.11	电荷的相互作用能 电场的能量	115
§ 2.12	静电场中的力和力矩	124
§ 2.13	静电测量仪器	128

第三章 电介质

§ 3.1	电介质的极化	140
§ 3.2	极化强度 体极化电荷及面极化电荷	144
§ 3.3	有均匀电介质存在时电容器内的场强	149
§ 3.4	关于电介质中场强进一步的讨论	154
§ 3.5	电位移矢量 介质中的高斯定理	156
§ 3.6	电介质中的边界条件 电位移线的折射	161
§ 3.7	介质中电场的能量	164
§ 3.8	分子的电极化率 介电常数与密度和温度的关系	167
§ 3.9	分子的电矩与分子结构 各态物质的介电常数	170
§ 3.10	铁电体及其用途	171
§ 3.11	压电效应及其应用	174
§ 3.12	逆压电效应及其应用	177

第四章 稳恒电流的基本定律

§ 4.1	电流和它的各种效应 电动势	185
§ 4.2	电流强度 电流密度矢量	188
§ 4.3	电流连续性方程 基尔霍夫第一定律	191
§ 4.4	有稳恒电流时的电场分布	193
§ 4.5	欧姆定律 电阻及电阻率	195
§ 4.6	电阻率与温度的关系 超导电性	200
§ 4.7	电阻的串联和并联 电阻箱和可变电阻	203
§ 4.8	焦耳定律及其应用	212
§ 4.9	闭合的直流电路 闭合电路内能量的转换	215
§ 4.10	一段不均匀电路的欧姆定律 基尔霍夫第二定律	221
§ 4.11	基尔霍夫定律的应用	225
§ 4.12	电阻的测量 直流电桥	229
§ 4.13	电动势或电位差的补偿法测量 电位差计	234
§ 4.14	电容器的充电与放电	236

第五章 固体导电机理及固体中电子现象

§ 5.1	金属的经典电子论和导电机理	248
§ 5.2	用电子论的观点研究欧姆定律和焦耳定律	254
§ 5.3	经典金属电子论的局限性	259
§ 5.4	固体导电能带理论的基本概念	261
§ 5.5	金属中电子的脱出功	267
§ 5.6	接触电现象及接触电位差	269
§ 5.7	关于接触电位差的解释	271
§ 5.8	温差电现象及温差电动势	277
§ 5.9	温差电动势的理论	283
§ 5.10	有关温差电动势的几个定理	287
§ 5.11	温差电偶的应用	289
§ 5.12	灼热导体的电子发射 真空二极管	293

第六章 电解质导电和气体导电

§ 6.1	离解与电解导电	306
§ 6.2	法拉第电解定律	311
§ 6.3	离子的迁移率及电解质的电导率	314
§ 6.4	电解在技术上的应用	317
§ 6.5	电极的极化 伽伐尼电池电动势的产生	320
§ 6.6	原电池 蓄电池 新型电源	322
§ 6.7	气体的受激导电	328
§ 6.8	碰撞电离 电离电位	333
§ 6.9	自激导电	337
§ 6.10	辉光放电及其应用	339
§ 6.11	阴极射线和阳极射线	343
§ 6.12	弧光放电及其应用	345
§ 6.13	火花放电 电晕放电	349

第一章 真空中静电现象 静电场基本规律

§ 1.1 电荷与电量

1. 电荷分类 静电现象

处于一种特殊状态下的物体,譬如用丝绸摩擦过的玻璃棒,或用毛皮擦过的胶木棒,都能吸引轻微物体。凡具有这种性质的物体称为带电体。我们认为带电体上带有电荷,并且用电量这名称说明带电体上电荷的多少。按照一般习惯,有时也用电荷这名称代表微小的带电体,如带电粒子。电荷有正负两种,人们称上述玻璃棒上带的电荷为正,胶木棒上带的电荷为负;并且发现带同号电荷的带电体互相排斥,带异号电荷的带电体互相吸引。

当带电物体相对于我们是静止的时候,研究这些物体周围发生的现象和它们之间的相互作用是静电学的任务。人们对于静电现象认识较早,公元前 600 年左右希腊人就有所发现。从实验总结出来的定律和由此引伸得出的一些基本概念是非常重要的,是我们今后学习更高深的电磁理论的基础。同时,静电现象在生产实际中也早有广泛的应用,例如电容器、静电屏蔽、静电除尘、静电选矿等;而且随着工业技术的革新,更多的应用正在发展着。在科学研究中,例如用静电起电机获得高电压,使带电粒子获得高速,或应用静电透镜来聚焦电子束等,也是不胜枚举的。所以我们学习静电学还具有很实际的意义。

2. 验电器

带电体上的电量可用验电器来测量。最简单的验电器是箔验电器,其结构如图 1.1-1 所示。

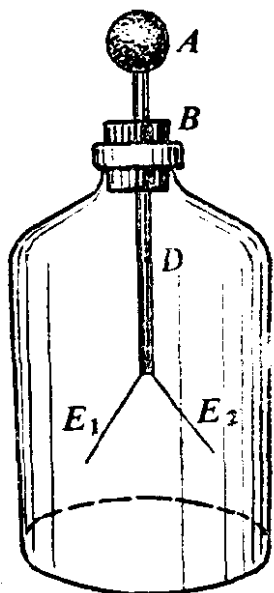


图 1.1-1 验电器

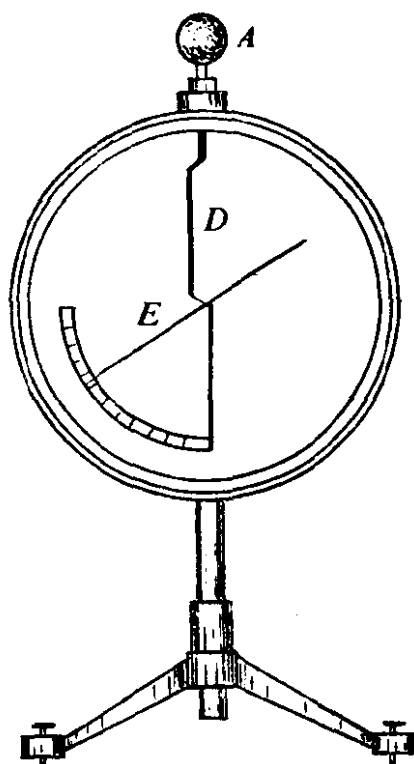


图 1.1-2 静电计

把两片薄的金属箔 E_1 和 E_2 固定在金属杆 D 上, 用硬橡皮塞 B 把带着箔的金属杆装置在一个玻璃瓶内, 如果使一带电体和金属杆上的小球 A 接触, 电荷传给杆, 则箔带电, 互相排斥而分开。根据箔的分开程度可以判断带电体上所带电荷的多少。为了更准确地, 定量地确定带电程度, 可用前后装有玻璃窗的金属盒代替玻璃瓶, 还可以将杆延长, 并用一薄金属片 E 代替两箔。在金属杆底端固定一个弧形刻度尺, 于是当带电体接触杆 D 上的小球 A 后, E 被排斥的程度可以从刻度上读出 (图 1.1-2)。经过这样改装后的验电器叫做静电计。如果要使验电器恢复不带电的状态, 只要用手或用导线将金属杆与地接通就行了。

3. 电量守恒原理

借助于上述验电器, 我们可以进行一系列实验并观察到下述结果:

(i) 使金属杆先带正电, 然后将带较多负电的物体和它接触,

观察到两箔逐渐合拢，接着又彼此分开。这说明两种符号不同的电荷相遇时，有一部分被中和，未中和的部分互相排斥。

(ii) 将装有绝缘柄的丝绸与玻璃棒摩擦后分开，以丝绸接触验电器，发现它上面带有负电荷，即与玻璃棒上所带的电荷符号相反，且通过仔细的试验可以证明，两者电荷的数量相等。对于毛皮与胶木棒的相互摩擦，也得到同样的结果。

(iii) 如果将一绝缘带电导体球 A 移近一个绝缘导体 $B、C$ (它是由两部分可以分开的独立导体 B 及 C 合拢组成的，见图 1.1-3)，则发现 BC 因感应而带电，靠近 A 的 B 端的电荷与 A 上的电荷异号，而 C 端则同号。撤走 A ， $B、C$ 两端即刻恢复不带电的状态。如果先将 $B、C$ 两部分分开，再撤走 A ，则发现 $B、C$ 两部分各带等量的异号电荷。这种带电方法，叫做感应带电。

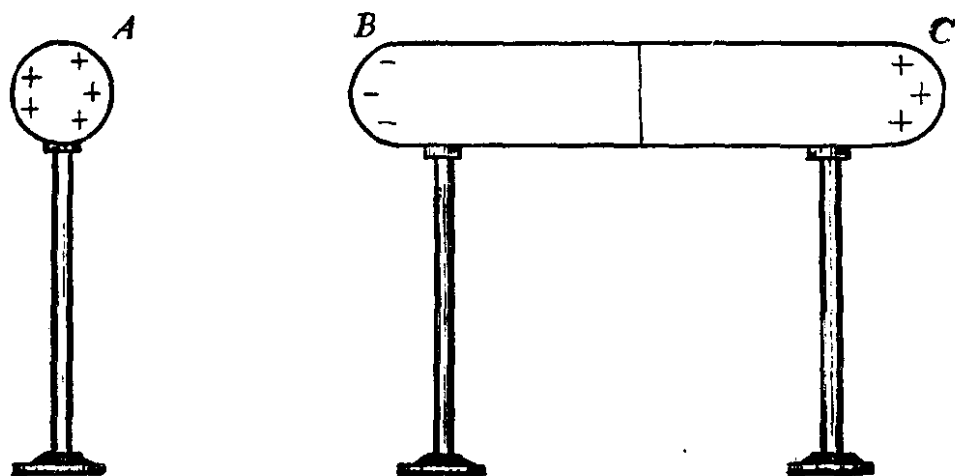


图 1.1-3 感应带电

从以上结果，我们可以得出以下结论：

第一，一切中性物体，即不带电的物体，都具有数量相等的两种异号电荷，尽管从宏观效果看来，呈现没有带电；第二，对于摩擦带电或是感应带电等起电过程，只不过是将物体上的两种异号电荷分离。在这些过程中电荷既不能产生，也不能消灭，但可以从一个物体转移到另一个物体。这就是电量守恒原理。

但是近代的实验观察发现, 一个高能光子在一定的条件下可以产生一个正电子和一个负电子; 反之, 在一定的条件下, 一个正电子和一个负电子会湮灭, 产生一个光子。所以严格来讲, 电荷既可能产生, 也可能湮灭。不过, 实验还发现, 上述这种电荷的产生、湮灭过程, 电量总数不会改变, 即要末正、负电荷一起等量产生, 要末正、负电荷一起等量湮灭。也就是说一个孤立系统的总电量是不变的。

所以电量守恒原理的严格表述是: 在任何物理过程中, 电量的代数和是守恒的。近代实验表明电量守恒原理不仅在一切实观过程中成立, 而且在已知的一切微观过程(如核反应过程和基本粒子过程)中普遍成立。它是物理学中最重要的基本规律之一, 也是目前人们已经知道的自然界的最精确的规律之一。

4. 电荷的量子化

密立根(R. A. Millikan, 1868—1953)油滴实验(见习题1-11)和其它无数实验都表明, 在自然界中, 所有带电体或带电微粒直至微观粒子, 它们所具有的电量都是电子电量的整数倍。这个事实说明: 物体所带的电荷, 不是以连续方式出现的, 而是以一个个不连续的量值出现, 这称为电荷的量子化。在近代物理中, 量子化是基本的概念。近代实验已精确地验证, 质子所带的正电荷量与电子所带的负电荷量几乎完全相等, 实验上测出, 每个原子中质子和电子的剩余电荷差(如果有的话)不到 $10^{-20}e$ (e 为电子电量), 即其相等的精度已达到 10^{-20} 。精度如此之高, 表明电荷的量子化是一条既深刻而又普遍的规律。我们用符号 e 来表示电荷的基元, 也叫做基本电荷。我国及国外有些理论物理工作者, 近年来提出了有关粒子结构的层子模型(或夸克模型), 认为可能存在具有分数电荷 $\pm\frac{1}{3}e$ 和 $\pm\frac{2}{3}e$ 的粒子, 但还有待实验的证实。不过,

分数电荷已超出了经典电磁学的范围。在经典电磁学中, 仍认为 e 为基元电荷。

当然, 在宏观实验中, 对于比密立根油滴大得多的物体, 电荷的量子化是表现不出来的。原因是电荷的量子 e 太小了。例如, 在通常的 220 伏特、100 瓦的灯泡中, 每秒通过灯丝截面的基本电荷就有 3×10^{18} 个。

§ 1.2 物质的电结构 导体和绝缘体

1. 物质的电结构

上节由实验得出的结论是与近代关于物质的电结构的观点相吻合的。十九世纪末, 人们发现了电子, 至今人们仍普遍认为它是最基本的负电荷, 它具有完全确定的电量 e , 它的质量 m_e 约为氢原子质量的 $\frac{1}{1840}$, 即等于 9.109×10^{-31} 千克。本世纪初, 通过一系列的科学实验和理论工作, 人们又形成了关于原子结构的模型, 认为每个元素的原子有一个核心部分, 称为原子核, 是由带正电的质子和不带电的中子组成的, 质子所带电量和电子所带电量大小相等, 质子的质量和中子的质量差不多相等, 原子核的半径约从 1×10^{-15} 米至 7×10^{-15} 米, 整个原子的质量几乎全部集中在原子核上。环绕着原子核, 有和核内质子数完全一样多的电子(氢原子核周围只有一个电子, 最重的原子核周围有一百个以上的电子), 沿着圆轨道或椭圆轨道运转。这些轨道直径的数量级约为 $1-3 \times 10^{-10}$ 米。在每一个原子内, 全部电子的电量总和与原子核内质子电量的总和相等, 因此整个原子是中性的。就质量及所带电量而言, 各种元素的原子核各不相同, 至于电子的性质, 则无论它是属于哪一种元素的原子, 完全是一样的。

实验表明, 物体带电后其化学组成并无改变, 而且在实际能够

达到的带电情况下，我们觉察不出它的质量的变化。这说明带电现象是由于电子的迁移——从一物体转移到另一物体或者是从同一物体的一部分转移到另一部分引起的。

关于原子结构学说，自从量子力学问世后又有了新的发展，认为电子不是按一定的轨道围绕原子核转动，而是以一定的几率出现在原子核的周围，就象云一样包围着原子核，因此叫做电子云。前面我们介绍的是旧的原子结构模型，但它对于原子电性的描述，仍然是正确的。

2. 导体和绝缘体

从导电的程度（即电荷能在物体中自由移动的程度）方面来看，一切物体大致可以分为两类——绝缘体和导体。例如玻璃、橡胶、瓷器、盐的晶体、油类和一切正常状态下的气体都是绝缘体。绝缘体分子或原子内的电子，即使是外层电子，受正电荷吸引力的约束仍极强，一般不能脱离它所从属的原子。当两种绝缘体如玻璃和丝绸互相摩擦时，由于接触紧密而且温度升高，电子的动能增加，玻璃上的少量电子有可能脱离束缚转移到丝绸上面，因而玻璃带了正电，丝绸带了负电。但是由于电子不能在绝缘体内任意移动，带电现象只限于经受摩擦的局部。对于绝缘体，我们不能用感应的方法使它仅带一种符号的电荷。有关绝缘体或电介质在其它带电体影响下所表现的性质，我们将在第三章中讨论。

导体又可以分为金属导体、电解质和等离子体等几种类型。在金属导体中，原子最外层的电子（价电子）和原子核的联系较弱，它们可以从一个正离子（即原子核和其它电子的集合体）的作用范围，跑到另一个正离子的范围去。我们知道正离子形成金属的晶体点阵，因此这些价电子在点阵之中自由来往，不再属于个别的原子。这些电子常称为自由电子。当金属与绝缘体相互摩擦或两种金属相互摩擦时，由于自由电子的转移，金属也可以带正电或带

负电,不过在实验时我们必须使金属与人体或地面绝缘,否则由于人体及地壳都是导体,自由电子将在广大的范围内重新分布,金属上过多或缺少了的电子将由人体及地壳来调剂,摩擦带电的效果便不能显示出来。用自由电子的移动来解释金属的感应带电也是很自然的,我们将在第二章中详细讨论静电感应现象,这里就不多谈了。

溶解了的酸、碱、盐和盐的水溶液都称为电解质。它们没有自由电子,但却有缺少电子或电子过多的原子或原子集团。前者称为正离子,后者称为负离子,它们是自由电荷,两者都能在外界电力的作用下发生移动。关于电解质导电问题,我们将在第六章中详细讨论。

这里值得提到的还有另外一种类型的导体——等离子体,它是普通气体加热到很高的温度或受到其他辐射照射时,被电离成电子、正负离子和中性分子的混合体。等离子体的导电性,有时甚至比金属还好。

要注意,导体和绝缘体并没有明显的界限。金属是良导体,但各种金属的导电程度还有相当大的差别。电解质的导电程度较小,随电解质的溶质及浓度而变。至于各种绝缘体,它们也有为数极少的自由电子,在通常情况下显示出程度不同的导电性。当有很强的外界电力作用在绝缘体上时,束缚电子被迫释放为自由电子,这时绝缘体变为导体。这种现象称为绝缘体的击穿。还有些物质如硅、硒、锗等元素及氧化亚铜(Cu_2O)、硫代铅(PbS)等化合物,它们的导电程度介于导体与绝缘体之间,称为半导体。当温度升高时,半导体的导电程度增加,这和金属导体的情况恰恰相反。

§ 1.3 库仑的扭秤实验 库仑定律

1. 扭秤实验与点电荷

§ 1.1 中所述静电现象的定性研究,延续了不少世纪。直到十八世纪末叶,才开始了关于电荷相互作用的定量研究。当时良好绝缘体的利用以及机械另件如弹性悬丝及扭头等的发展,使得法国科学家库仑(C. A. de Coulomb, 1736—1806)有可能作出他的著名扭秤试验(1777年)。借助于这种实验,他确定了两个点电荷之间的相互作用力与各电荷的电量及两电荷间距离的依赖关系。1785年他发表了实验总结,就是我们现在所知道的库仑定律。

在叙述扭秤实验之前,要对点电荷的意义加以说明。两个带电体的相互作用力与它们各自的形状有关,而且在一般情况下,这个关系相当复杂。为了确定相互作用力与电量及距离的关系,需要利用带电的质点,即点电荷。实际的带电体总是有大小的,但是如果让两个带电体相隔的距离比起它们的线度都大得很多,则带电体形状的影响将随着这个距离的增加而益趋微弱,从而可以忽略不计。在这种情况下,带电体就可以认为是点电荷。因此点电荷的概念是相对的,一个带电体能否作为点电荷来处理,要从问题的具体情况来考虑。

2. 扭秤实验装置

库仑的扭秤实验装置如图 1.3-1 所示。

S 为一细长银丝,下端悬一绝缘材料制成的杆 R , 杆的一端有金属小球 A , 另一端有平衡体 P 。银丝的上端固定在一个可旋转的扭头 T 上, T 转动的角度,可以从固定在仪器上的刻度圆盘 D 读出。全部设备置于一玻璃罩内,使之不受空气流动的影响。玻璃罩的盖上有一小孔,用以放入装在绝缘柄上的另一金属小球 B , B 球大小与 A 球一样。

3. 作用力与距离的关系

为了确定作用力与距离的关系,首先令 A , B 两球相接触,并调节扭头使此时悬丝毫无扭转形变,即绝缘杆完全未受扭力。然