

上海电视大学物理系試用教材

电 磁 学 讲 义

(附学习指导书)

上 册

姚启鈞
华东师范大学物理系必子宏节編
宣桂鑫

上 海 电 视 大 学

目 录

导 言	1
第一章 基本静电现象	5
§ 1-1 电荷	5
§ 1-2 导体和绝缘体	10
§ 1-3 静电场、库仑定律	12
§ 1-4 静电场的强度	17
§ 1-5 电力线	21
§ 1-6 电通量、奥斯特洛格拉得斯基-高斯定理	23
§ 1-7 奥斯特洛格拉得斯基-高斯定理底应用	28
§ 1-8 静电场底力所作的功、电位	36
§ 1-9 等位面	44
§ 1-10 静电场强与电位之间的关系	47
§ 1-11 泊松方程与拉普拉斯方程	51
§ 1-12 静电场中的导体	52
§ 1-13 导体表面附近的场强	56
§ 1-14 外电场中的电偶极子	60
§ 1-15 导体底电容	62
§ 1-16 电荷系底能量	66
§ 1-17 静电场底能量	72
第二章 电介质中的静电现象	75
§ 2-1 电介质、介电常数	75
§ 2-2 有电介质的电容器底能量	80
§ 2-3 电介质底极化、极化矢量	82

§ 2-4 包围着一个带电导体球的均匀电介质	86
§ 2-5 有电介质存在时作用于带电体上的力	89
§ 2-6 电介质中的奥斯特洛格拉得斯基-高斯定理、电位移矢量	94
§ 2-7 矢量 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{D}$ 底测量	101
§ 2-8 铁电性、压电	104
§ 2-9 电容器	106
§ 2-10 电位差底量度	111
§ 2-11 很小的电荷底测定、电子底电荷	115
§ 2-12 静电场底性质	119
 第三章 稳恒电流底基本定律	 123
§ 3-1 稳恒电流、欧姆定律	123
§ 3-2 导体底电阻	125
§ 3-3 电流密度矢量	129
§ 3-4 电荷守恒定律、稳定电流底闭合性	132
§ 3-5 楞次-焦耳定律	134
§ 3-6 电流强度和电位差底测定	139
§ 3-7 电阻和它底测定	144
§ 3-8 闭合的直流电路	147
§ 3-9 关于非均匀电路的欧姆定律、基尔霍夫定律	151
§ 3-10 应用基尔霍夫方程式解各种问题	156
§ 3-11 接触电位差	162
§ 3-12 化学电源	166
§ 3-13 温差电现象	168
 第四章 电解质与气体中的电流	 173
§ 4-1 电解导电性	173
§ 4-2 法拉第定律	176
§ 4-3 离解	180
§ 4-4 电解导电底理论	183

§ 4-5 电极底极化	185
§ 4-6 电解在技术上的应用	188
§ 4-7 气体中的电流	192
§ 4-8 气体被激导电底理論	195
§ 4-9 电子流通过真空	201
§ 4-10 电子与原子和分子之間的碰撞	205
§ 4-11 气体底自激导电	208
参考书目	215
学习指导	217
第一章 基本靜电現象	217
学习指导	217
例题示范	228
复习提綱	250
思考提綱	251
习题	254
第二章 电介质中的靜电現象	260
学习指导	260
例题示范	265
复习提綱	267
习题	268
第三章 稳恒电流	269
学习指导	269
例题示范	274
复习提綱	290
习题	292
第四章 电解质与气体中的电流	297

学习指导	297
例题示范	301
复习提綱	303
思考提綱	303
习题	304

导 言

紀元前第七世紀的時候，希臘哲學家法列士密列次奇曾敘述過織工們所觀察到的，用毛織物摩擦過的琥珀能夠吸引某些輕微物體的現象，我國晉代郭璞所著《山海經圖贊》上也早有“琥珀拾芥”的記載。這個有趣的事實，在許多世紀的時期內始終是孤立着的，僅僅引起人們的驚奇。直到二千多年之後，即在1600年左右，英國醫生吉柏才把這使人驚奇的事實擴大；在他所著的《論磁鐵》一書中，記載着玻璃和許多其他物質同絲、毛織物摩擦之後，也能得到類似的性質。在這種狀態中的物體，叫做帶電體。在希臘文中，所謂帶電體，原來的意義是琥珀化的物體。吉柏並注意到金屬和一切潮濕的物體都不能帶電。但約在一百年後(1729)，格來對這種不能帶電的物質作了另一種解釋。他認為金屬在摩擦時也帶電，但電可以沿着金屬傳導。當我們手里拿着一根金屬棒而把它摩擦時，電便分布在整個棒上和整個我們的(含有水份的)身體上，有時還分布在房子的地板上和牆壁上。所以比起摩擦琥珀來電的表現得微弱得多，這是在琥珀上電只停留在摩擦過的地方的緣故。與格來同時代的人賓弗確定了有二種電，一種是玻璃與呢絨摩擦過後玻璃上所帶的正電，另一種是松香與呢絨摩擦過後松香上所帶的負電。

十八世紀中葉，羅蒙諾索夫研究大氣中的電現象。他認為大氣電的形成是由于上升和下降的氣流之間的摩擦。他又在1856年所著的《用數學方法研究出來的電學理論》一書中，提出

了一个假设；他认为电是运动很快的“以太”质点（“以太”是一种假想的没有重量的液体，并充满于一切物质之中）。

直到十八世纪末，物体带电的研究发展得很慢，而且基本上是和其他自然现象的研究分离地进行着。主要地仅是研究摩擦带电，和带电体间的相互作用力。

伽伐尼于1789年作了有名的关于青蛙筋肉收缩的实验。他用铜钩子钩住新解剖开的蛙的腰神经，把它挂在阳台的铁栏杆上。这时他注意到，每当栏杆和蛙的筋肉接触的时候，筋肉就收缩一下。不久，伏打于1792年对这个现象作了解释，认为在两种不同金属的接触处有特殊的“激电力”发生。这样便发明了电池，由此产生电流。

十九世纪初，才出现了一些重大的发现。1820年奥斯特发现电流对磁针的作用。关于天然磁铁（磁铁矿）的存在，我国在公元前六世纪时就已有记载，希腊人知道得也很早。我国利用天然磁铁来作为指示南北方向之用，至少比西方国家要早好几个世纪。上面所提到的吉柏，在他所著的《论磁铁》一书中，给当时所有关于磁铁的知识作了总结。但一直认为电的现象和磁的现象是各不相关，互相孤立着的。奥斯的发现开始了电学理论的新纪元。它把磁的现象也包括在电的现象统一理论中；这就证明了一切自然现象都密切地联系着的这一辩证唯物论的基本原理。电流及其性质的研究在这个时期中是特别紧张的，有欧姆，安培，毕奥，萨伐尔等人的经典研究，同时法拉第的科学活动也开始了。法拉第的两个发现有着特殊的地位；第一，电磁感应现象（1831年），这是全部电工学的主要基础，也是整个电学理论的基础之一；第二，电解现象（1834年），这是引向“物质的电

的构造理論”道路上第一步,和电化学的基础。法拉第并提出了电力綫和磁力綫的观念。楞次发现了电磁感应在导体中所产生的电流的方向的定律。楞次又与焦耳彼此独立地,同时用比焦耳更精确的实验,确定了电流的热效应的定律。

十九世紀下半期,电学有了更深入的,迅速的发展。麦克斯韦綜合了以前所发现的关于物质相互間电磁作用的許多定律,并且使这些定律成为一个严正的系統。他在理論上主要的成就——电磁場論——已經很巩固地成为电学的基础。从这个理論所推出的主要結果之一,便是:一切电磁場的变化都不能局限在一处,总是要向外傳播开去,但不是刹那間傳播开去的,而总是以一定有限的速度向各方傳播。这个情况,对于光的电磁理論的創立,是一个直接的启发。1887年,赫芝用实验証实了电磁波的存在,和用电的方法,得到电磁波的可能。1895年,波波夫发明了无綫电报。

但麦克斯韦的电磁場理論实际上只是現象的理論,沒有提到电磁現象的本质問題,也沒有提到分子原子的物质結構对电磁現象的联系問題。例如这个理論虽然包括了光的現象,但欲解釋光通过物质时的色散,散射等現象时,即使是定性的,麦克斯韦理論已經显得无能为力了。

差不多直到十九世紀末期,电还是被看成某种无重量的液体。1881年亥姆霍茲首先根据法拉第电解定律肯定地指出有基元电量(不可再分割的最小量电荷)存在的这一假設。从这个时候起电子理論便开始有了很大的发展。它冲破了麦克斯韦理論的藩籬,并在很多方面預示了电荷不連續性的直接实验証据。阴极射綫(真空中的电子流),熾热导体的电子发射,稀薄气体导

电,以及光电效应,和放射性等现象都是电子论的实验基础。所有这些现象无可置辩地证明了电的微粒性和不连续性。从此以后,更重要地证明了物质分子原子电结构理论,从此人类对于物质开始了新的认识。

现在简单地说明一下近代关于物质电结构的理论。物质的原子中央部份,是体积很小的(10^{-13} [厘米])原子核,正电荷集中在这里。带正电的原子核同时又是原子主要的质量的所在。在原子核周围一个比较大的距离上(10^{-8} [厘米])有若干带负电的电子在绕核而转动,形象地说,好象行星绕日的转动一样。电子的质量很小,约比最轻的原子(氢原子)质量小 1840 倍。不论什么物质原子中的电子都是一样的,都是这么小,都带着同量的负电。电子的质量是自然界中存在着的最小的质量,电子的电量是自然界中存在着的最小的电量。在普通中性(不带电)的原子中,原子核的正电荷的电量,在数值上等于该原子中所有电子的负电荷的总和。各种元素的原子,其原子核的质量和电子的数目各有不同。最简单的原子为氢原子。它仅有一个电子。氢的原子核称为质子。

洛伦兹的电子论假定电子的运动也遵守麦克斯韦理论。从组成物质的基元电荷的微观分布、运动、和相互作用来解释大多数实验中直接观察到的宏观电磁现象,都得到成功。麦克斯韦理论与实验符合的地方,洛伦兹电子论也导出同一结果;对于麦克斯韦理论不能够包含的一些宏观现象,电子论也能给以合理的解释。例如关于介电常数,电导率磁导率等物质常数,究竟与物质的电结构有怎样的联系,电子论都给以明白的意义。此外有关光学的一些现象,也得到了与实验符合的解释,因而充实了

光的电磁理論。

在實驗的特殊情況下曾經(1932年)發現了質量和電量都相同於電子，但電荷符號相反(正電荷)的所謂正子或正電子。但它們很少在自由狀態中出現，所以在電磁學這一學科中，不去研究它。

大約與正子同時，還發現了質量相同於質子但沒有電荷的微粒。這便是所謂中子。這也是一種基本微粒，具有一系列獨特的性質。就中子發現之後，伊凡年克提出了原子核是由質子和中子所組成的見解。這已經得到了完全的証實。

在本世紀初，還發現電子同時具有微粒性和波動性。這對經典電子論帶來了嚴重的困難。這一困難引起了物理學的大改革，即量子力學的誕生。但這種改革並不意味着經典電子論的廢除。隨着新理論的建立和新現象的發現，許多基本的概念和觀點都有了改變，更加明確了經典理論的應用範圍。在這些範圍內，經典理論還充份地保留着它的價值。初學者只有把經典理論充份認識之後，才能循序漸進地了解近代的量子理論。

第一章 基本靜电現象

§ 1-1 电 荷

十八世紀初时所作的实验,就已表明带电状态有两种,而且只有两种:一种和用毛皮摩擦过的玻璃底带电性质相同(叫做正的),另一种和用玻璃摩擦过的毛皮底带电性质相同(叫做負的)。带同号电的物体(例如都带正电)互相排斥;带异号电的物体則相互吸引。接触的时候,带电状态能够从一个組物体傳遞到另一組物体上去。

在带电状态中的物体具有所謂电荷。电荷是物质固有的一种属性。

由带电体之間的相互作用力能够确定带电底程度。例如,用两个系在长綫上的輕的小球(图 1-1),就能够定性地确定带电底程度;在小球带同种电的情形下,它們之間发生排斥力,因

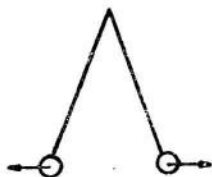


图 1-1 带电小球底相互作用

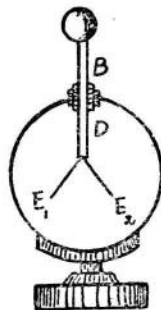


图 1-2 箱驗电器

此它們分离开;小球带电愈强,則分开愈甚。实际使用的是一种特制的仪器——驗电器,如图 1-2 所示。

图 1-2 所表示的驗电器底构造如下:把两片薄的鋁箔 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金属盒子里,盒子上有一小玻璃窗,以备观察金属箔之用。如果使一带电体和金属杆 D 接触,把电荷傳給它,則箔带电,互相排斥而分离开。由箔底分开程度,能够判断箔的带电程度。

为了更准确地、定量地确定带电程度,驗电器必須备有刻度。这种仪器叫作“靜电指示器”,或者叫作靜电計,是 T. B. 里赫曼于 1745 年同 M. B. 罗蒙諾索夫为了观察雷雨放电时发生的带电現象而首次作出的。图 1-3 是 T. B. 里赫曼底“靜电指示器”底簡图,在这个图里, g 表示一垂直挂起的金属直尺。絲綫 f 底一端固定在直尺上。带电的时候,綫就离开直尺,綫底偏轉程度可以从画在木制的象限 ab 上的分度确定。

图 1-4 所表示的是按里赫曼底图作成的、現代的靜电計。

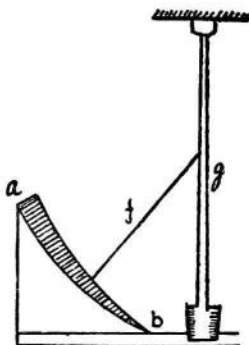


图 1-3 T. B. 里赫曼底靜电指示器

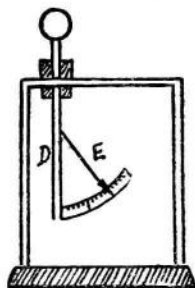


图 1-4 靜电計

如果使杆 D 带电, 铝箔 E 就离开固定的杆 D ; 箔偏轉底大小, 与带电程度有关系, 可以从刻度决定。

下述的重要现象能够帮助我們理解物体底带电过程: 如果开始使一个, 比如說, 带正电的物体带負电, 則这物体底带电程度起初减小, 以后完全消失, 只有在这以后, 这物体才开始带負电。由此可知, 异号电荷对外的作用互相抵消。由这一事实得出一个假說: 即使在不带电的物体中, 也总有电荷存在, 不过它們底符号相反, 而量則恰使它們底作用完全抵消。含有过多正电荷的物体带正电。含有过多負电荷的物体带負电。摩擦带电的时候, 两个物体都带电, 而且总是一个带正电, 另外一个带負电。由此我們得到結論: 电荷既不产生, 也不消灭, 只能够从一个物体轉移到另外一个物体上, 或者在同一物体內移动。这个原理, 叫做电荷守恒定律, 是电学底基本定律之一, 为許多的事实所証实, 其中的一件就是爱皮努司所发现的感应带电。

感应带电现象如下所述: 如果将一带电体 A (图 1-5 a) 移近一个絕緣导体 B , 則在导体 B 上有电荷出現, 而且在 B 底靠近 A 的一端出現符号相反的电荷, 而在較远的一端, 电荷符号

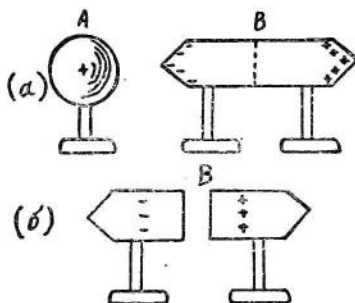


图 1-5 感应带电

則與物體 A 的相同。如果將帶電體 A 移去，則導體 B 上的電荷消失。但是，如果在帶電體 A 移去之前把導體 B 分割為兩部分（圖 1-56），那麼，即使在帶電體 A 移去之後，這兩部分上面的電荷也仍保留着。如果假定導體 B 中總有兩種符號的電荷存在：正電荷和負電荷，並且假定這些電荷（或者至少是一種符號的電荷）能夠自由地在導體內移動，那就能夠直接說明上述的實驗。當我們把帶正電的物體 A 移近導體 B 的時候，導體 B 內的負電荷被吸引，而正電荷被排斥，因此，在導體 B 底兩端發生符號不同的帶電。如果把帶電體 A 移去，則外力對於導體 B 內的電荷的作用停止，電荷“混合”起來，因而整個導體 B 底各部分又變為中性的。但是，如果當帶電體 A 還在導體 B 近旁的時候，把導體 B 分成兩部分，則當帶電體 A 移去之後，導體 B 內的電荷不能夠“混合”，因而由導體 B 分成的兩部分仍然帶電。如果使由導體 B 分成的兩部分接觸，就很易証實這兩部分上保留的電荷底大小相等，因為接觸以後，物體 B 變為中性的。

中性物質中兩種電荷底存在和這兩種電荷底守恒性，可以認為是完全確立了的。

上世紀末發現了元電荷底存在；原子或分子的電荷只能是這元電荷底整數倍。後來發現這是一種基元微粒存在底結果，這些基元微粒帶有完全一定的負電荷 e ；這種微粒叫做電子。電子不僅有一定的電荷 e ，而且有一定的質量 m ，以及其他一系列的物理量（轉矩，磁矩）。

電子底質量約等於最輕的原子（氫原子）底質量底 $1/1840$ 。電子是一切原子底組成部分；原子底中心部分，即所謂原子核，

帶有正电荷；几乎整个原子底质量都集中在它的核里。在現代，我們知道还有正电子存在，但是它們只在某些特殊情况下出現，我們这里不研究它們。

§ 1-2 导体和絕緣体

实验表明，一切物体可分为两类：(1)傳电的物体，叫做导体，(2)不傳电的物体，叫做非导体（也叫做絕緣体或电介质）。导体分为第一类导体和第二类导体。在第一类导体中，电荷底移动并不使导体底化学性质发生任何变化，也不引起物质发生任何显著的迁移；在第二类导体中，电荷底移动是和化学变化联系着的，这种化学变化使构成这种导体的物质在它和其他导体接触的地方分离出来。一切金属都属于第一类导体；熔解了的盐、酸硷和盐底溶液是第二类导体。盐底晶体、油、空气、玻璃、磁器、硬橡皮、橡皮、琥珀和一系列的其他物质是絕緣体。

在現代，还再分出半导体这一类。半导体是具有虽然很小但却可以观察出来的导电性和一系列其他性质（根据这些性质而將它們合并为特殊的一类）的物体。

在金属（第一类导体）中，一部分电子能够自由地在各个原子之間移动。在未带电的金属中，和金属底結晶点陣联系着的正电荷，抵消了自由移动的电子底电荷。导体带电是由于导体中电子数目底变化：帶負电的时候，有过多的电子由外面附加于导体上，在帶正电的情形下，导体底一部分电子被剝夺，結果未被完全抵消的原子核底正电荷开始呈現。出現在导体上的电荷叫做自由电荷。

在感應帶電的情形下，電子在外界電荷底引力或斥力作用下移動到導體底一端；在這一端就有過多的電子，這就引起負電荷底出現；而在導體底另一端，由於缺乏電子，就出現未被抵消的正電荷。

一切金屬中的所有電子都是相同的，因此，電子底移動並不引起化學組成發生變化。而電子底質量是這樣微小，以致在實際所能達到的帶電情形下，無法觀察出由於導體內電子數目變化而發生的質量變化。

第二類導體中沒有自由電子，但在第二類導體中卻存在着缺少電子（或者有過多電子）的原子或分子。這種帶電的原子或分子，叫作離子。第二類導體中電荷底移動是由於離子底移動，以此可以說明在這種情形下在第二類導體中發生的化學變化。

電介質——電底非導體——或者是由中性分子構成的，在這種分子中，有等量的正電荷和負電荷；或者是由離子構成的，這些離子不能夠自由地在電介質中移動。在電力底作用下，電介質中的電荷僅能稍微地改變自己的位置，或者改變自己的取向。可以用下述十分簡化的圖象作為離子電介質底模型：在這種物質中，成對結合着的異號電荷（有極分子）底取向是無規則的（圖1-6a），所以不論就整體看，還是就各部分看，電介質都是中性的。將一帶電體移近電介質的時候，電介質中的電荷並不移動，而僅取向相同（圖1-6b），結果在電介質上，在和被移近的帶電體相近的一端，出現符號相反

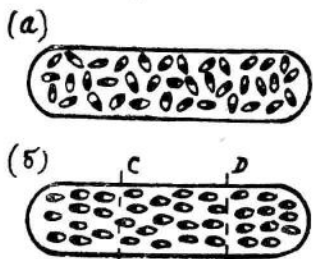


圖 1-6 電介質底極化

的电荷,而在另一端出现同号的电荷。电介质底这种状态,叫做极化。它和感应现象中导体上发生的带电不同。

如果将极化了的电介质分割开,比如说,沿直线 D 和 C (图 1-6 δ) 分割开,则就整体看,每一部分都仍是中性的,仅在表面上呈现某种符号的电荷。这种电荷叫做极化电荷,也叫做束缚电荷。

在电力很强的情形下,电介质底分子可能被破坏,这时候电介质就变成导体。这种现象叫做电介质底击穿。

§ 1-3 静电场、库仑定律

电荷底相互作用定律是静电学底基本定律。最初是根据与万有引力定律形式上的相似来说明电荷底相互作用。当时曾假定电力和万有引力都是不需任何中介空间作用的“超距作用”。但实际上电荷底周围存在着某种物理作用(与引力质量的情形相同)。这种作用首先表现在:位于该电荷周围任一点处的另外的电荷都将受到力的作用。我们暂不研究这种作用底性质,而只说:在静止电荷底周围有静电场存在;电荷和电场总是相互联系依存着的。

例如,两个电荷底相互作用是这样的:一个电荷的周围存在着一个场,而这场以确定的力作用在另一个电荷上。

静电场是物质底特殊形式;它传递一些带电体对于另外一些带电体的作用。根据场作用于电荷上的力所遵从的那些规律,能够研究场底性质。

因为带电体底相互作用是和它们的形状、大小有关系的,所以为了确定相互作用定律,我们研究所谓点电荷。点电荷表示