

走向统一的自然力

电力与磁力的统一（I）

厉光烈 张晓芳

电闪雷鸣，是人类早在远古时期就注意到的自然现象，因此，电磁相互作用，可以说是人类最先接触到的自然力。开始人们对电和磁是分开认识的，后来经过奥斯特发现“电动生磁”和法拉第发现“电磁感应”，人们才将“电”和“磁”联系起来，最终导致麦克斯韦提出电磁理论，统一了“电力”和“磁力”。本讲座，将详细介绍“电力”和“磁力”走向统一的研究历程。



电闪雷鸣

1. 电磁现象

电现象和磁现象是人类很早就认识的两种自然现象。

古代的有关记载

起初，电与磁是被分开认识的。

对电的认识是从观察雷闪开始的。在中国，殷商时期（约前16世纪～前11世纪）的甲骨文中就有了“雷”字。在西方，公元前585年，古希腊哲学家泰勒斯就已记载“用木块摩擦过的琥珀能吸引碎草等轻小物体”，即“摩擦起电”现象。我国东汉王充（27～约97）在所著《论衡》一书中将其称

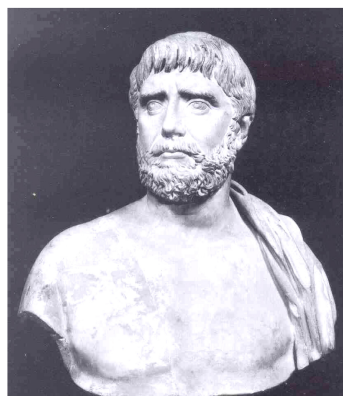
为“顿牟掇芥”，这里的“顿牟”即琥珀，“芥”是指芥籽等轻小物体；晋朝时更有关于摩擦生电引起放电现象的记载：“今人梳头，解著衣时，有随梳解结有光者，亦有咤声。”

对磁的认识开始于对天然铁矿石吸铁的观察，我国古人称其

为“慈石”，意即慈爱之石，隐含它能吸铁，这个名称后来逐渐转为“磁石”，又转为通俗名称“吸铁石”，在西方的法文、西班牙文和匈牙利文以及东方的梵文中磁石也都有“爱的石头”或“爱铁”的意思。成书约在战国时期（前4世纪～前3世纪）的《管子·地数篇》中就



甲骨文“雷”字



泰勒斯

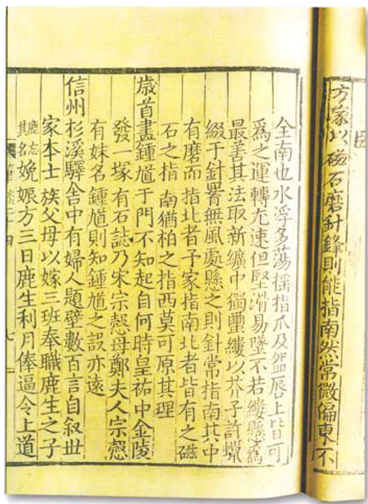


王充

有“山上有慈石者，其下有铜金”，“慈石名铁，或引之也”等有关磁石和磁石引铁的记载；汉初刘安（前179～前122）所著《淮南子》一书中也有“若以慈石之能连铁也，而取其引瓦，则难以……”；另外，在前面提到的《论衡》一书中紧跟“顿牟掇芥”一词之后就是“慈石引针”。泰勒斯和古希腊哲学家苏格拉底在他们的书中也有关于磁石的记载。我国东汉时已经发明了具有指向作用的“司南勺”，到北宋时期，著名科学家沈括在《梦溪笔谈》中第一次明确地记载了“指南针”，他写道：“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也。”



沈括



梦溪笔谈



司南勺

吉尔伯特的发现

近代有关电与磁的实验研究可以说是从英国伊丽莎白女王的御医吉尔伯特（W. Gilbert, 1544～1603）开始的。在电现象方面，他对“摩擦起电”现象进行深入研究后发现：不仅琥珀摩擦后能吸引轻小物体，而且相当多的物质，例如金刚石、蓝宝石、硫磺、硬树脂和明矾等，经摩擦后也都具有“琥珀之力”，即都能吸引轻小物体。在1600年出版的《磁石论》一书中，他在定性地描述了磁石的基本性质后进一步指出：上述琥珀、硫磺等物质经摩擦后并不具备磁石那种指南的特性。为了表明与磁性的不同，他采用希腊文 $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu$ （琥珀）一词的字母拼音

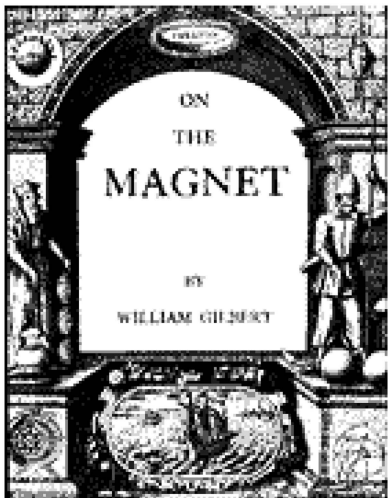


琥珀之力

把这种性质称为“电的”（electric），并把上述经摩擦后的物体称为电化了的或带了电的物体，创造了“电”这个名称。他还在实验过程中制作了第一只验电器，这是一根中心固定并可转动的金属细棒，当与摩擦过的琥珀靠近时，它便转动指向琥珀。随后，大约在1660年，德国马德堡的一位工程师盖利克（Otto-von Guericke, 1602～1686）发明了第一台摩擦起电机，他用硫磺制成形如地球仪的可转动球体，用干燥的手掌摩擦转动的球体，然后使之停止以获得电。1745年，荷兰莱顿的穆森布罗克（Pieter van Musschenbroek），为了避免电在空气中逐渐消失，他拿来一个玻璃瓶，让瓶中的水带电，当他用手接



吉尔伯特



《磁石论》

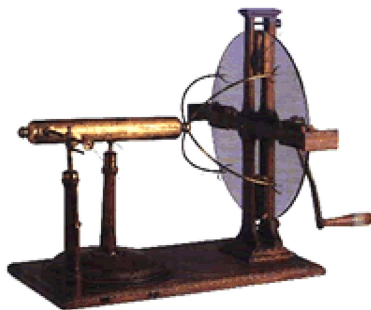


吉尔伯特向伊丽莎白女王介绍磁学新成果

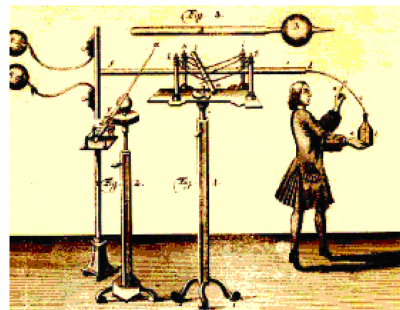
触连接水的金属丝时，手臂和胸部都感受到强烈的电击，于是他发明了具有贮电作用的莱顿瓶。谈到摩擦起电机和莱顿瓶，就不能不提及当年一次大型“魔术”表演：1748年，一个晴朗的白天，在巴黎圣母院前，面对法国国王路易十五的王室成员和大臣们，“魔术师”诺莱特（A. J. A. Nollet, 1700 ~ 1770）调来 700 个修道士，让他们手拉手排成一排，全长约 300 米，队伍十分壮观。随着诺莱特的一个手势，排在最前面的修道士用手握住了从一个大玻璃瓶口引出的金属线，一瞬间，700 个修道士几乎同时惊叫着跳了起来，在场的人无不目瞪口呆。原来，诺莱特面前的那只装着水的大玻璃瓶就是一个莱顿瓶，他侧边的玻璃大圆盘就是一台摩擦起电机，蹲在地上的人正在转动圆盘来产生电荷，然后通过一根金属线将这些电荷送入莱顿瓶储存。修道士们之所以惊叫，是因为触及了莱顿瓶里储存的电。这场“魔术”表演，实际上，就是一场大型“电震实验”。验电器、

摩擦起电机和莱顿瓶的发明大大促进了对电的实验研究。

在磁现象方面，吉尔伯特也做出了许多贡献。前面已经提到，在他所著的《磁石论》一书中定性



摩擦起电机



莱顿瓶实验

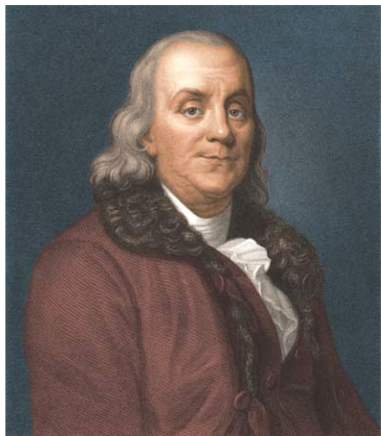


“魔术”表演

地描述了磁石的基本性质。他还曾经用一个球形磁石模拟地球做实验，考察放在球面上的小磁针的指向，发现它的行为与其在地球上时一样，从而得出地球本身就是一个巨大磁石的结论。

两类电荷与南北磁极

18 世纪初期，人们开始认识到电荷有正、负两种。1729 年，英国人格雷（Stephen Gray 1675 ~ 1736）在实验研究琥珀的电效应是否可传递给其他物体时发现：金属可以导电，丝绸不导电，也就是说，发现了导体和绝缘体的区别。格雷的实验引起了法国人杜菲（Charles-Francois du Fay 1698 ~ 1739）的注意，1733 年杜菲发现绝缘起来的金属也可摩擦起



富兰克林

电，因此他认为所有物体都可摩擦起电，并把玻璃上产生的电叫做“玻璃的”（vitreous）；琥珀上产生的电与树脂产生的相同，叫做“树脂的”（resinous）。他还发现：带相同电的物体互相排斥；带不同电的物体彼此吸引。他还进一步把电想象为二元流体，当它们结合在一起时，相互中和。后来，美国人富兰克林（Benjamin Franklin，1706～1790）又在1747年提出了电的一元流体理论：在正常条件下，电是以一定的量存在于所有物质中的一种元素；电跟流体一样，摩擦

的作用可以使它从一个物体转移到另一个物体，但不能创造；任何孤立物体的电的总量是不变的，这就是通常所说的“电荷守恒定律”。他还把用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电称为正电；用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电称为负电。他所使用的正电和负电的术语国际上沿用至今。他还做过著名的风筝实验，即在雷雨天气将风筝放入云层进行雷击实验，从而证明了雷闪就是放电现象。于是，他便将雷电和摩擦电联系了起来。后来，他还明确地把电分为“动电”和“静电”，用来分别描述雷电和摩擦电。他还曾建议用避雷针来防护建筑物免遭雷击，1754年，狄维施（Procopius Divisch）实现了他的这一建议，至今造福人类。

在我国古代西汉时，有一个名叫栾大的方士，利用磁石制作了两个棋子，发现它们有时相互吸引，有时相互排斥，他将其称为“斗棋”，并把这个新奇玩意儿献给了汉武帝，还当场做了演示，汉武帝惊奇

不已，龙心大悦，竟封栾大为“五利将军”。现在我们知道，这是因为磁体有南、北两极：同极相斥、异极相吸。所谓“磁极”，是指磁体上磁性特别强的区域。但是，正、负电荷可以单独存在，而南、北磁极却总是成对出现。地球也是一个大磁体，它的两个磁极分别在接近地理南极和地理北极的地方。因此，放在地球表面上的磁体，可以自由转动时，就会因与地磁极同性相斥，异性相吸而指示南北。中国古人正是利用磁体这一性质先后制成了司南勺、指南鱼、指南针，尽管当时人们并不明白这个道理。后来，指南针在郑和下西洋时被用来指导海轮的航向，还通过阿拉伯人传入欧洲，为开辟新航路提供了帮助，促进了欧洲航海技术的发展。

库仑定律

带电物体彼此吸引或排斥的规律是由法国物理学家库仑（Charles Auguste de Coulomb，1736～1806）于1785年通过扭秤实验总结出来的：两个静止点电荷之间的相互作用力，其大小与它们的距离的平方成反比，与它们的电量的乘积成正比；其方向是沿着这两个点电荷的连线，同号电荷相斥，异号电荷相吸。采用国际单位制，上述库仑定律可表示为

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

式中比例常数 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ ，这里 ϵ_0

称为“真空电容率”，根据现代的精确测量，其值为 $8.8541878 \times 10^{-12}$ 库²/（牛·米²）。

顺便指出，也曾有人引入“磁



风筝实验



库仑

荷”的概念，即假定在磁棒的两极上有一种叫做“磁荷”的东西：北磁极上的叫正磁荷；南磁极上的叫负磁荷，并类似地给出磁的库仑定律：

$$F = k' \frac{q_1' q_2'}{r^3} r \quad (2)$$

式中比例常数 $k' = \frac{1}{4\pi\mu_0}$ ，这里 μ_0 称为“真空磁导率”，在国际单位制中，其值取为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 牛/安²； $q_{1(2)}'$ 表示磁荷，若两个相等的点磁荷相距 1 米时的相互作用力为 $\frac{10^7}{16\pi^2}$ 牛，则每个磁荷的磁量为 1 牛·米/安。

其实，很早就有科学家，类比如牛顿万有引力定律，提出过两个电荷之间的相互作用力与它们之间距离的平方成反比：1766 年，普里斯特利（Joseph Priestley，1733 ~ 1804）就曾根据富兰克林所做的“导体内不存在静电荷”的实验猜测静电力与万有引力遵循相似的平方反比律，但未能予以证明；1769 年，罗宾逊（John Robinson 1739 ~ 1805）通过作用在一个小球上的电力和重力的平衡，第一次直接实验测定了两个电荷之间的相

互作用力与其距离的平方成反比。后来，人们之所以将发现这一定律归功于库仑，是因为他利用自己发明的扭力天平（即扭秤）作为测力计，通过实验精确地验证了上述的平方反比律。由于当时能够获得的静电荷很小，所以要精确地测量两个电荷之间的相互作用力必须要有非常灵敏的测力计。库仑曾从事过有关材料的摩擦及扭转方面的研究，并首先发现了力学中关于摩擦力与正压力成正比的定律，这些经验帮助他发明了扭力天平，进而完成了这一精确测量。顺便指出，库仑还根据对称性发明了一个比较电量大小的巧妙方法：他让两个大小相同的金属球，一个带电，一个不带电，然后互相接触，结果电量被两个球平分，各自带有原来电量的一半。用这种方法，库仑让金属球依次得到了原来电量的 1/2、1/4、1/8、1/16 等的电荷。库仑的实验得到了世界的公认，从此电学成为除力学和光学外物理学的又一支学科。

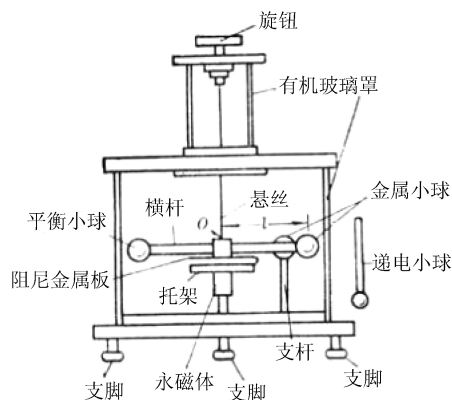
在库仑定律发现大约一个世纪以后，最终建立了电磁现象普遍理论的英国物理学家麦克斯韦（J.

C. Maxwell，1831 ~ 1879）在着手筹建卡文迪什实验室，整理出版卡文迪什手稿时发现，早在 1773 年，卡文迪什就作了两个同心金属球壳的实验，并根据测量仪器的精度得出以下结论：如果平方反比律存在偏离 δ ，即

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^{3+\delta}} r \quad (3)$$

则 $\delta \leq 0.02$ 。也就是说，卡文迪什实验证实了平方反比律至少在 2% 的精度内成立。但是，不知何故，他没有发表这个重要的结果。麦克斯韦采用稍为改进的方法重复了卡文迪什的实验，得到的结果是 $\delta \leq \frac{1}{21600}$ 。1936 年，美国的普林普顿（S. J. Plimpton）和劳顿（E. Lawton）又将精度提高了四个量级，他们的结果是 $\delta \leq 2 \times 10^{-9}$ 。1971 年，威廉姆斯（R. Williams）等的实验更将精度提高到 $\delta \leq (2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$ ，即约亿亿分之三。

库仑定律已经成为物理学最精确的实验定律之一。它不仅精确，而且适用范围极广。从大的方面讲，通过人造地球卫星对地球电磁场的测量发现，在 1 万千米（ 10^7 米，



库仑扭秤及其结构示意图

约相当于地球直径)的范围内库仑定律仍可精确适用;从小的方面讲,现代高能电子散射实验证实,在距离小到 10^{-17} 米的范围内库仑定律同样精确成立。

基本电荷与磁单极子

“电”是什么?一直到19世纪末,人们对这个问题还未认识清楚。前面曾经提到,富兰克林认为,电是存在于所有物质中的某种“元素”,获得电的物体带“正电”,失去的带“负电”,孤立物体的总电量不变,即电荷守恒。后来,也曾有人把电看作是无孔不入的“以太”的某种状态。

对“电”的本质的深入认识来自于电解。1834年,英国物理学家法拉第(Michael Faraday 1791~1867)对电解过程进行研究后发现:在电解时,每析出1摩尔的单价元素(例如,1克氢、35.5克氯等)都需要相等的电量,后人称此电量为“法拉第常数”,用 F 标记。由于1摩尔任何单质所包含的原子数是一样的,即阿伏伽德罗常数 $N_A=6.023\times 10^{23}$,因此,分摊到任意一个单价离子的电荷即 $e=\frac{F}{N_A}$ 。这个 e 就是每个单价离子所带电荷的最小量,非单价离子所带的电荷则是 e 的整数倍。由此可见,法拉第的发现揭示了电荷的量子性,即一切物体所带的电荷总是 e 的整数倍,因此,称 e 为“基本电荷”。1897年,汤姆孙(J. J. Thomson 1856~1940)发现电子后,人们进一步认识到: e 就是电子电荷;1911年,密立根(Rober Andrews Millikan 1868~1953)通过油滴实验精确测出: $e=1.60\times 10^{-19}$

库仑,并确定其为自然界中电荷的基本单位,他也因此荣获了1923年度诺贝尔物理学奖。现在我们知道,“基本电荷”就是构成物质的“基本粒子”(例如电子或质子)所带的电荷,只是电子所带的为 $-e$;质子所带的为 $+e$ 。所谓摩擦起电,以玻璃棒与丝绸相摩擦为例,摩擦前,玻璃棒和丝绸中带负电的电子的数目与原子核中带正电的质子的数目相等,玻璃棒和丝绸都呈电中性;摩擦后,玻璃原子中的一部分电子转移到丝绸原子中,玻璃原子和丝绸原子分别因失去和获得电子而带正电和负电。根据最近发布的实验数据, $e=1.60217733(49)\times 10^{-19}$ 库仑(括号中的值是测量误差);电子电量与质子电量的绝对值之差小于 $10^{-20}|e|$ 。但是,在实际应用中,常将 e 近似地取为 1.602×10^{-19} 库仑。另外,按照粒子物理夸克模型,组成强子的夸克带有分数电荷,例如 u 夸克的电荷为 $+\frac{2}{3}e$, d 夸克的电荷为 $-\frac{1}{3}e$ 等。但是,至今尚未发现单个的自由夸克和分数电荷的存在,因此 e 仍然是电荷的基本单位。

在微观世界里,既然存在大量只带单一电荷(正电荷或负电荷)的粒子,为什么不能存在只带单一磁荷(北磁极或南磁极)的粒子呢?1931年,英国物理学家保罗·狄拉克(Paul Adrien Maurice Dirac 1902~1984)从理论上预言存在带有单一磁荷的粒子,即“磁单极子”。如果存在磁单极子,麦克斯韦方程组将呈现更为对称的形式。另外,现有的经典理论和量子理论都不能排除磁单极子的存在。狄拉克在1931年和1948年,以及

其他许多物理学家在1975年以后的几十年中,从理论和实验两方面对磁单极子做了大量的探索和研究工作,但是迄今仍未能找到磁单极子,虽然其间曾有过两次可能是磁单极子的观测事例,但至今尚未得到重复证实。当然,也未见有人证实磁单极子不存在。2008年1月,美国普林斯顿大学的物理学家希瓦吉·颂提(Shivaji Sondhi)等在英国《自然》杂志上发表文章指出:“自旋冰”中可能包含磁单极子。所谓“自旋冰”,指的是一种特殊晶体,它的磁性离子的排列方式与通常冰中氢离子的排列方式相近。2009年9月,德国赫姆霍兹材料与能源中心乔纳森·莫里斯(Jonathan Morris)领导的实验组和法国劳厄-郎之万研究所汤姆·芬内尔(Tom Fennell)领导的实验组在当月出版的《科学》杂志上分别发表论文,宣布他们在自旋冰中观察到了类似磁单极子的“准粒子”。但是,很多物理学家认为,他们并没有真正发现磁单极子,因为存在于晶体中的“准粒子”是取不出来的,所以他们发现的“磁单极子”并不是狄拉克预言的那种自由的磁单极子。

对电现象和磁现象的研究,从观察到实验,从定性到定量,从库仑定律的建立到基本电荷的测定,这一切都为进一步认识电与磁的本质,揭示电与磁的内在联系创造了条件。

(厉光烈,中国科学院高能物理研究所 100049;张晓芳,江苏省宿迁中学 223800)