

库仑对电学和磁学的贡献

——纪念库仑定律发现两百周年

宋德生

(桂林电子工业学院)

库仑 (Charles Augustin Coulomb, 1736—1806) 是十八世纪法国著名的工程师和伟大的物理学家。从库仑定律的发现到现在, 已经整整两百年了。库仑用他发明的扭力秤测量出静电相互作用和静磁相互作用与距离平方成反比, 把牛顿所谓的三种“长程力”(引力、静电力和静磁力) 统一了起来。库仑还娴熟地运用扭力秤来研究电漏、电荷沿物体表面的分布、金属的弹性与内聚力和液体对运动物体的阻力等现象, 为经典物理学的实验研究提供了一种崭新的方法。他提出的电张力概念, 为十九世纪静电学的数学理论的发展, 为泊松 (S. D. Poisson, 1781—1840) 等人的静电学理论奠定了基础。他还最早提出了分子磁化假说, 将历史上的“磁流体”理论唯象地推进到物质的微观粒子的水平, 为安培 (M. A. Ampère, 1775—1836) 在后来提出的“分子电流”假说提供了可以借鉴的思想方法。

本文拟就库仑在电学和磁学方面的工作作一初步论述。

一、扭力理论和扭力秤

十八世纪天文学和航海事业的发展, 对磁针和指南针的设计提出了新的要求。当时普遍使用的是轴托式磁针, 这类指南针或磁针的摩擦力大, 不足以指示微小的磁变, 但对于震动又特别敏感。天文学家们希望获得一种用于观察周日磁变的灵敏的新型磁针, 航海家们也希望有一种新型指南针来代替盒式轴托罗盘。当时法国人已经直觉发现, 丝悬磁针可能是一种

更优越的磁针。中国人沈括在《梦溪笔谈》(1086) 中曾介绍过丝悬磁针, 这种磁针是否也经阿拉伯人传到了法国尚不清楚。在西方, 拉纳 (F. Lana) 在六百年后 (1686) 首次设计了这种磁针, 但他未进行过计算, 也未由此发展起一套关于悬丝的扭力理论。1773 年, 法国科学院以《什么是制造磁针的最佳方法》为题悬赏, 决定在 1775 年开奖, 但到时无一人获奖。法国科学院于是再度设奖, 拟在 1777 年开奖。库仑和万·斯温登 (H. Van Swinden, 1746—1823) 分享了这次科学奖的头等奖^[1]。

万·斯温登的获奖论文是《关于磁针及其规则变化的研究》^[2] 他在这篇数十万字的论文中主要总结了前人和他本人对磁变的观察, 提出了可用丝悬磁针代替轴托磁针的见解, 但未提出丝悬磁针的设计方法和有关的扭力理论。库仑以《关于制造磁针的最优方法的研究》^[3] 一文获奖, 他在论文中给出了一种丝悬指南针 (thread-suspended compass) 的结构, 并给出了悬丝的扭力公式:

$$M = \frac{\mu B D^3}{L}, \quad (1)$$

式中 M 为扭力力矩, B 为扭角, D 和 L 分别表示悬丝的直径和长度, μ 是决定于悬丝材料的常数。当时的技术还不足以精确测量出象头发这样细的悬丝的直径, 库仑关于扭矩与悬丝直径三次方成正比的结论多少带有点猜测性质。正如他所说: 之所以暂定这样的关系, 是因为测量头发或很细的绸丝的直径方面的困难, 也是因为难于肯定在它的全部长度上产生变化的结果是否是均匀的”^[3]。

库仑在 1776 年于瑟堡就设计出他的丝悬磁针，并于同年 3 月到 7 月间用它来观测地磁偏角的周日磁变。他发现，最大的偏角发生于凌晨 1 时，然后递减，直至上午 7 时停止，从晚上 8 时开始偏角又逐渐增大，直到凌晨 1 时。当时一般人认为，白天磁偏角变小的原因是由于太阳的辐射热破坏了地球磁场。库仑不同意这样的观点，他争辩说：“如果果真如此，地球的磁力早就应在多少亿年前就被热辐射所破坏而损失殆尽，何以直至今日还具有磁力？”这种观点引起了巴黎天文台台长卡西尼 (J. D. de Cassini) 的共鸣，使卡西尼对上述错误作出有力的批判^[4]。

1780 年，卡西尼用改进的库仑丝悬磁针代替沿用了多年的勒蒙尼厄 (Le Monnier) 的轴托磁针来观测磁变。为了减少街道人行车辆和风对磁针的影响，他又把地磁观测工作台整个地移到了地下室。情况虽然有所好转，但不稳定的因素还未根除。他发现，当把地下室大门猛烈关上时，其震动并未引起丝悬磁针显著的变化。由此可见，这种磁针具有较强的抗震性。但他用显微镜来观察磁针时，发现磁针总在作微小的振动，无论怎样也永不停息。库仑很快就认识到，这是空气中的电所引起的现象。于是他建议卡西尼用金属丝代替头发或绢丝，以使吸附在磁针上的电荷传到地下。金属丝与非金属丝的性质显著不同，一般来说，金属丝弹性较大，对于同样的扭角，需要更大的外加扭力；另外，金属材料的弹性范围和塑性范围都很大，要设计出金属丝悬磁针就得精确研究金属材料的这些性质。库仑这时重新开始了对扭力的研究，发展了他的扭力理论，并发明了扭力秤。

图 1 所示装置是库仑在 1784 年发明的扭力秤。P 为一重物，用来产生张力使金属丝保持垂直，同时又具有转动惯量。实验时使 P 锤转一角度，松手后，它就会在丝悬扭力作用下回转振荡。如果扭角很小，它满足简谐振荡方程：

$$I \frac{d^2 B}{dt^2} = -nB, \quad (2)$$

式中 I 为 P 锤的转动惯量， B 为扭角， n 为常

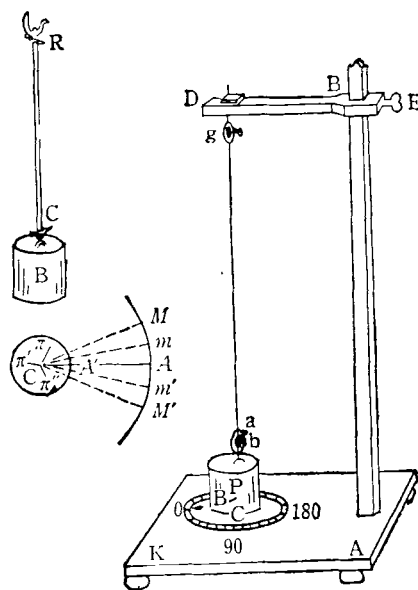


图 1 用于建立扭力公式的扭力秤(引自 Gillmor, «库仑»)

数。库仑由此得到振荡周期为¹⁾

$$T = \pi \sqrt{\frac{I}{n}}. \quad (3)$$

他在这次实验中总结出扭力定律：

$$M = \frac{\mu B D^4}{L}, \quad (4)$$

式中各符号意义与(1)式相同。他在这里纠正了他在 1777 年得到的扭矩与悬丝直径三次方成正比的错误。

扭力秤的发明为库仑研究静电相互作用和静磁相互作用准备了基本条件，使他得以在 1785 年发现同性电荷按距离平方反比相互排斥的规律，进而发现电的和磁的相互排斥或吸引的基本力学规律，即库仑定律。

二、库仑定律的发现

从 1785 年到 1789 年，库仑共宣读了七篇《论电和磁》(Sur l'électricité et le magnétisme)。

1) 库仑习惯把 0—180° 的转动当作一个周期，他定义的周期实际为半周期。

我们现以库仑在 1785 年宣读的第一篇《论电和磁》来标志库仑定律的诞生。这虽则是历史上公认的事实，但库仑在这篇论文中只得到了静电排斥作用与距离平方成反比的结论。下面分析一下库仑的实验。

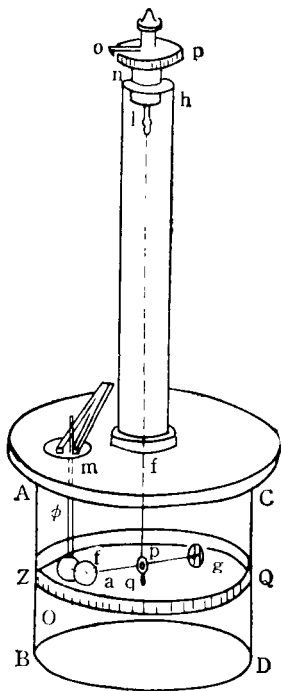


图 2 库仑扭力秤(引自 Gillmor, 《库仑》)

图 2 所示装置是库仑观测静电相互作用的扭力秤。ABCD 是一高度和直径都为 12 英寸的玻璃筒，上面盖有一块玻璃板。板的中上方立有一根长 24 英寸的玻璃管。玻璃管上端装有扭力测微计(torsion micrometer)。扭力测微计下悬有细丝一根，细丝下端有一根水平木杆，杆的左端有一木芯球 a，右端有一平衡重物 g。与木芯球 a 相接触另一木芯球被固定于杆 ϕ 的下端，其直径与 a 相等。

实验时先使固定小球带电，它的电荷又有一半传给了球 a(因为它们的大小相等，电量势必平分)。这时小球 a 便在同性电荷的斥力作用下被推向右边，产生转动。当排斥力被悬丝的扭力所平衡时，小球 a 就停止在平衡位置上。这样就能根据 ZQ 上的刻度读出两个小球间的角度，从而算出它们的距离。另外，还要根据(4)

式计算出悬丝所受的扭矩，从而计算出排斥力的大小。如果小球所带电量很大的话，扭角就会过大，会造成实验误差。为了克服这种现象，就得使扭力测微计向左旋转一个角度，这时测量的扭角应是从 ZQ 上读出的度数和从扭力测微计上读出的度数之和。库仑在这篇论文的附录中记录了三次实验的数据，如表 1 所示。

表 1

实验序号	1	2	3
木芯球分开度数	36°	18°	8.5°
扭力测微计读数	0	126°	567°
悬丝扭角	36°	144°	575.5°

库仑根据这些读数、扭力秤悬丝的参数及扭力定律，计算出静电排斥力与距离平方成反比。他在论文部分给出^[5]“电学基本定律——两个带同号电荷的小球间的排斥力，与两球中心间距的平方成反比。”

这就是库仑在 1785 年所得出的结论。至于静电吸引力及静磁吸引力和排斥力的规律，直到 1787 年宣读第二篇《论电和磁》才给出^[6]。

对静电吸引力的测量是十分棘手的事情。首先，要给两个小球分别带上等量的异号电荷，是一个比较费时的过程，此间必有电量损失。其次，两个带异号电荷的小球总要相互吸引，它们往往会相互碰撞而使电荷湮灭。如果事先在两个小球间加一隔板，虽则可以避免相撞，但与隔板相碰的小球难免不将它的部分电荷传给隔板。鉴于这种困难，库仑使用动力学的方法——小球振荡法来测量静电吸引力。实验仍在扭力秤上进行，不过要把两个小球间距离拉大(约 22.86cm)，保证扭力臂上的小球振荡的方向大体处于作用力的方向上。库仑第一步发现，小球的受力与振荡周期的平方成反比，即

$$F \propto \frac{1}{T^2}, \quad (5)$$

这里的力由扭力定律计算。

接着，库仑改变小球的间距反复实验，又发现小球的振荡周期随距离而线性地增加，即

$$T \propto d. \quad (6)$$

由(5)和(6)式便能推知静电吸引力也遵循距离平方的反比定律:

$$F \propto \frac{1}{d^2}. \quad (7)$$

库仑在第二篇论文的后半部分讨论了磁作用定律。他仍然使用振荡的方法。实验可在扭力秤上进行,也可以完全不使用扭力秤,因为他在观测静电吸引力时发现的力与振荡周期平方成反比的关系完全可以搬过来使用,这里无需再测出磁力的绝对值,而只需肯定磁针振荡周期与磁极间距成正比就行了。

实验是这样进行的:用一细丝悬吊一根长

为 2.54cm 的短磁针,在它的下面固定一根长为 63.50cm 的磁针。短磁针处于磁子午面内,长磁针垂直于磁子午面。库仑使短磁针振荡,数出它在每分钟内的振荡次数;然后又加大磁针间距,再次实验,数出振荡次数,如此反复实验多次。这里要设法“消除”地磁的影响。当时的条件还不足以使地磁场屏蔽起来。库仑采用了这种方法:使短磁针在地磁场作用下振荡,数出它的振荡次数,而后将这个振荡次数扣除。库仑简单地使用平方差的方法来“扣除”地磁效应,实测数据如表 2 所示。

表 2

实验序号	1	2	3	4
磁极的距离(英寸)	∞	10.16	20.32	40.64
每分钟振荡次数的平方值	$0 - (15)^2$	$(41)^2 - (15)^2 = 1456$	$(24)^2 - (15)^2 = 351$	$(17)^2 - (15)^2 = 64$

第一组实验是使短磁针在地磁场中振荡,每分针振荡数为15次。二、三、四组实验加入了长磁针,振荡次数分别为 41,24和 17,在扣除地磁影响后的振荡次数的平方值分别为 1456, 351 和 64。考察这些数值可以发现:

$$\frac{1456}{351} \approx \frac{\left(\frac{1}{4}\right)^2}{\left(\frac{1}{8}\right)^2}$$

这就是说,第二、三组实验证明磁针的振荡周期与距离成正比,从而证明磁作用与距离平方成反比。然而第四组实验与这种规律有较大的出入,如要符合距离平方的反比定律,它的振荡次数的平方值应是 79。由此可见,第四组实验与库仑要总结的规律有约 20% 的误差。我们至少可以说,库仑观察静磁相互作用的实验是比较粗糙的,只是由于他坚信牛顿提出的“三位一体”的“长程力”(万有引力、静电力和静磁力)是可以统一的思想,才最后总结出电力和磁力都遵循距离平方的反比规律。

另一个值得注意的是,库仑没有精确地证明电力(或磁力)与电量之积(或磁极强度之积)成正比。虽然在测量静电排斥力时他可以易如

反掌地做到这一点(因为只要使木芯球直径加倍,所带电量也就能够加倍),但在做静电吸引力实验时就要增加实验手续,延长实验时间,引起电量散失,而无法达到较高的精度。在做静磁力实验时则更为困难,甚至根本不行。原因很简单,当时还没有磁极强度的概念,更没有确定磁极强度的单位。与我们通常的理解不同,库仑不是在确定了电量和磁极强度的单位后才总结出以他的名字命名的定律,而是后人用他的定律来确定电量和磁极强度单位。如高斯(C. F. Gauss, 1777—1855)后来用库仑定律来确定电量的绝对单位^[7]。

库仑认为存在这样的关系:

$$F \propto q_1 q_2 \text{ 或 } F \propto m_1 m_2. \quad (8)$$

他并先验地把这种关系当作他总结的定律的第一部分内容,坦率地说道:“这个命题的第一部分是无需证明的”。^[8]这就说明,库仑的整个实验是建立在牛顿引力理论的框架上的。

三、关于电漏和电荷在物体上的分布

如上所说,库仑在研究静电相吸作用时,电漏问题使他煞费苦心。于是他在总结出电和磁

的作用定律后就研究电漏现象。他在 1787 年宣读的第三篇《论电和磁》^[9] 是一篇关于电漏的实验研究论文。他在论文中指出电漏主要来自两方面原因：其一，不存在所谓完全的电介质；其二，潮湿空气中的水分子或带电粒子将电荷从物体表面上带走。库仑在这里再次使用了扭力秤技术，将它用于研究电荷在空气中散失和被悬丝（电介质）带走的情况。他这种触类旁通的实验技艺以后还在其他方面发挥出重要作用。卡文迪什（H. Cavendish, 1731—1810）在 1798 年用扭秤来测量地球的质量密度，多少是受到库仑的实验方法影响的结果。

库仑用图 2 所示的扭力秤观测电漏。他将两个大小相等的木芯球调到相隔一定距离的位置上（即调节扭力测微计使悬丝的扭矩抵消静电力产生的扭矩）。在这个实验中距离应当是一个常数。由于电荷的散失，静电力渐渐变小，这就得定时调节扭力测微计，使扭力秤上的木芯球回到原来的位置。整个实验就集中在记录各个时刻的扭力测微计的刻度方面，刻度的变化反映电量的损失。这样，如果以时间为横坐标，以扭力测微计刻度（度数）为纵坐标，就得出一条电漏曲线。库仑发现这条曲线属于指数型曲线。

根据库仑定律，由于 $-dQ$ 电量的损失，使静电力减小了：

$$-dF = -\frac{2QdQ}{r^2} = -\frac{2FdQ}{Q}$$

显然，

$$-\frac{dF}{F} \propto -\frac{dQ}{Q}$$

又根据扭力定律[(4)式]，有

$$-\frac{dQ}{Q} \propto -\frac{dF}{F} \propto -\frac{dB}{B}$$

这里 B 为扭角。根据实验数据

$$-\frac{dB}{B} \propto -\frac{dQ}{Q} = mdt \quad (9)$$

利用此关系式中后一等式可以解出一条指数曲线， $Q = Q_0 e^{-mt}$ 。 m 为由空气成分和扭力秤参数所决定的一个常数。这正好反映电漏的实际

规律。

电荷分布于导体表面的现象，是库仑研究的另一个重要课题。卡文迪什通过著名的同心双层球实验证明：由于电荷分布于导体表面，静电相互作用服从于 $F \propto \frac{1}{r^{2 \pm (1/50)}}$ 的关系^[10]。

库仑与此不同，他是使用扭力秤技术来精确观测电荷分布于导体表面的。他在 1787 年宣读的第四篇《论电和磁》论文中提出了电荷分布的两条原理^[11]：

“第一，这种[电]流体不是根据[化学]亲和力或根据某种有择吸引力分布于物体上，而仅根据其排斥力分布于接触过的不同物体中”。

“第二，在导体中，已经达到平衡的[电]流体分布于物体表面，不会渗入物体的内部。”

对第一条原理的证明是很简单的，只要用不同材料做成直径相同的小球，使它们带电并相互接触，然后分开，分别拿到扭力秤上“秤”一下。如果它们反映出静电力相等，就说明电荷的分布不因材料（即化合力）而异¹⁾。

为了证明电荷分布于导体表面，库仑设计出微型扭力秤，它可以测量小至 9×10^{-4} 达因的力；另外，他又做了一个所谓“证明平面”（Plan d'épreuve），它实际是一个直径极小的金叶，金叶上系着一根绝缘丝。实验时手握绝缘丝，把“证明平面”放在导体表面上（它实际上获得了所接触点上的全部电荷），而后将“证明平面”放在微型扭力秤上测量，就能根据扭力的大小来确定导体该点上的电荷分布。库仑在导体上钻一些孔，其直径大于“证明平面”，让导体带电后将“证明平面”探入小孔，与孔底接触，然后小心翼翼地取出“证明平面”，拿到微型扭力“秤”上“秤”一下，结果发现扭力秤没有偏转，从而证明在电平衡状态下电荷只能分布在导体表面。

库仑在 1787 年宣读的第五篇论文和 1789 年宣读的第六篇《论电和磁》^[12,13] 论文中定量地给出了面电荷密度 σ 与导体表面电张力的关

1) 值得注意的是，伏打在 1782 年已经建立了电量 Q 、电势 V 和电容 C 的关系： $Q = CV$ ，库仑的这个实验表明他已经了解了这个定律。

系。他的结论是：^[14]

(1) 对于一个面积无限大的带电平面，其表面的电张力为 $2\pi\sigma$ ；

(2) 对于任何带电曲面，其表面上任一点附近的电张力为 $4\pi\sigma$ ， σ 是该点的面电荷密度。

值得注意的是，库仑在提出电张力概念后并没有进一步提出电势的概念。实际上从力的概念过渡到势的概念在这里只有一步之差。从理论上完成这种过渡的是法国物理学家泊松，他后来在 1813 年利用他建立的泊松公式，从势的角度反过来推导出了库仑定律^[15]。

四、库仑提出分子磁化概念

十八世纪的二元磁流体论者认为，磁棒之所以出现两极，是因为南极磁流体和北极磁流体分别富集于磁棒两端的缘故。这种磁流体假说把磁性与物质分离开来，用虚无缥缈的无质流体来解释磁现象。库仑在 1789 年宣读的第七篇《论电和磁》论文中批判了这种假说，最先把磁性与分子结合起来^[16]。他认为，磁体中任一分子都含有南极和北极，它们串联成一条有序的长链，按照他的话来说，即是磁分子“纤维”（fibre）。其中任意两个相邻分子间的极性相互抵消，只是在磁体的磁分子“纤维”的两端才显示磁性。这样，不论将磁体破碎成多少截，每截都能同时具有南、北两个磁极。显然，这是二元磁流体论者所不能解释的问题。后来，法国资产阶级大革命（1789—1794）爆发了，库仑中断了这项研究。直到 1799 年才又一次撰文探讨这个问题，并提出了分子磁化概念^[17]。这时库仑提出，铁分子中仍然存在南、北磁性，它们通常相互抵消而呈中性，但在外磁力作用下，在磁场方向上分子被拉长，显示出极性，这时分子就被磁化了。在这些分子中始终存在着磁化力和分子内聚力的矛盾，磁化力小于内聚力就不足以使分子磁化，一旦磁化后的分子获得足够的磁化力，即便撤出外场也不会完全恢复中性状

态，这就叫做剩余磁性。

库仑的磁分子模型和分子磁化概念，结束了—个多世纪以来的形形色色的无质磁流体假说，是对笛卡尔分子涡旋理论的宣战。安培在 1820 年根据库仑的理论，提出了分子电流假说，在电流的基础上统一了电和磁，进一步解决了分子磁性和分子磁化的问题。从历史上来看，磁极性成对出现，磁单极不存在，这是安培的经典电动力学的一个重要结论，而这里又能找到库仑的磁学成就的影响。如果有朝一日找到磁单极证据的话，那么安培的分子电流假说和库仑的分子磁化概念就要受到批判，或是将它们作为特例包括在未来的电磁学理论中。

在本文写作过程中，得到李国栋先生的鼓励和帮助，在此谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] S. Gillmor, *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in Eighteenth-Century France*, Princeton University Press, N. J., (1970), 140.
- [2] J. H. Van Swinden, *Mémoires de Mathématique et Physique Présentés à L'Académie Royale des Sciences*, 8(1780), 1—576.
- [3] C. A. Coulomb, *ibid.*, 9(1780), 166—264.
- [4] 宋德生, *物理*, 13(1984), 692.
- [5] C. A. Coulomb, Ref. [22], (1788), 569—572, 572.
- [6] C. A. Coulomb, Ref [2], (1788), 578—611.
- [7] M. V. 劳厄 (Laue) 著, 范岱年、戴念祖译, *物理学史*, 北京, 商务印书馆, (1978), 44.
- [8] C. A. Coulomb, Ref. [2], (1788), 191.
- [9] C. A. Coulomb, Ref. [2], (1788), 612—638.
- [10] J. C. Maxwell ed., *The Scientific Papers of the Hon. Henry Cavendish*, F. R. S., Cambridge University Press, 1 (1921), arts. 217—235.
- [11] C. A. Coulomb, Ref. [2], (1788), 67—77, arts. 3, 7.
- [12] C. A. Coulomb, Ref. [2], (1789), 421—467.
- [13] C. A. Coulomb, Ref. [2], (1791), 617—705.
- [14] E. Bauer, *L'électromagnétisme Hier et Aujourd'hui*. Paris, (1945), 213—235.
- [15] D. S. Poisson, *Bulletin de la Société Philomatique*, 3(1813), 388.
- [16] C. A. Coulomb, Ref. [2], (1793), 455—505.
- [17] J. Daujat, *Origines et Formation de la Théorie des Phénomènes Electrique et Magnétiques*, Paris, (1945), 499.