

库仑定律的实验验证

郭奕玲

(清华大学)

库仑定律是电磁学的基本定律之一，是1785年由法国人库仑 (Charles Augustin de Coulomb) 创立的。但是库仑定律的实验验证却比库仑的扭秤实验^[1]还早30年！直到今天，还不断有人在作这方面的工作。回顾这段历史，是颇有启发与教益的。

(一) 美国人富兰克林 (Benjamin Franklin) 作的绝缘金属桶实验，观察到金属导体内表面不带电的事实。他甚至还亲自钻在带电的金属箱中做实验。这段历史在某些教科书^[2]上有所介绍。那是1755年的事，早于库仑扭秤实验三十年。不过，富兰克林并没有把观察到的现象跟电力的平方反比定律联系起来。

(二) 英国人普利斯特里 (Joseph Priestley) 从富兰克林那里得知金属桶的实验后，自己重复了这个实验。1767年，他发表了“电学的历史和现状以及初始的实验”这一篇论文，结尾部分提到了这个实验，并解释说：电的引力跟万有引力一样，也应服从平方反比定律。普利斯特里的这个解释不是凭空想象出来的，而是因为牛顿在推出万有引力定律时 (1687年) 曾证明过，如果万有引力服从平方反比定律，则均匀的物质球壳对壳内物体应无引力作用。当时的物理学家一般都熟悉这一推论，因此，早就有人作这样的猜想：电力和万有引力会不会有类似的规律。普利斯特里只是提到这个可能性，没有具体推算平方指数的偏差。

(三) 英国苏格兰人罗宾孙 (John Robinson)，1769年第一次定量地作了电力平方反比定律的实验，比库仑早16年，但一直到1801年才发表。

罗宾孙是受到富兰克林的启示而做这个实验的。有一天他偶然读到一本1759年一个德国人叫 Franz Aepinus 用拉丁文写的书，书上根据富兰克林的实验猜测到电力的平方反比定律，于是决定亲自动手做个实验。他的实验很精巧，装置如图1。两带电小球之间产生斥力，这斥力被支起的转臂受到的重力所平衡。调整支梁的角度，即可测出不同距离的斥力。

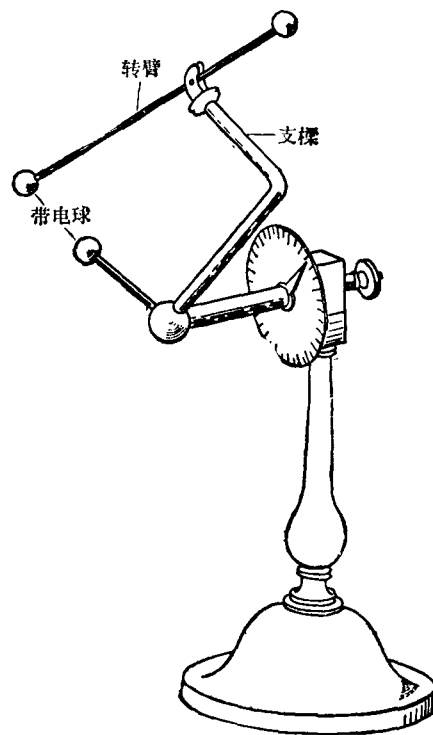


图1 罗宾孙的实验装置

罗宾孙把实验结果用公式 $F \propto 1/r^n$ 表示出来，即电力 F 与距离 r 的 n 次方成反比。先假设指数 n 不是准确为2，而是 $n = 2 + \delta$ ，得到

$\delta = 0.06$ 。他认为这是实验误差,于是得出电力服从平方反比定律的结论。

(四) 1773年卡文迪许(Henry Cavendish)用两个同心金属球壳作实验,如图2。外球壳由两个半球装配而成,两半球合起来正好把内球封在其中。通过一根导线将内外球联在一起,外球壳带电后,取走导线,打开外壳,用木髓球验电器试验有没有带电,结果发现木髓球验电器没有指示,内球不带电荷。

根据这个实验,卡文迪许确定指数偏差并不大,于0.02。

卡文迪许的同心球电荷分布实验比库仑的扭秤实验精确而且早十几年,但是卡文迪许并没有发表自己的著作。直到1871年麦克斯韦(James Clerk Maxwell)主持剑桥大学的卡文迪许实验室后,卡文迪许的手稿才转传到了麦克斯韦手中。麦克斯韦亲自动手重复了卡文迪许的许多实验。手稿经麦克斯韦的整理后出版,他的工作才为世人所知。

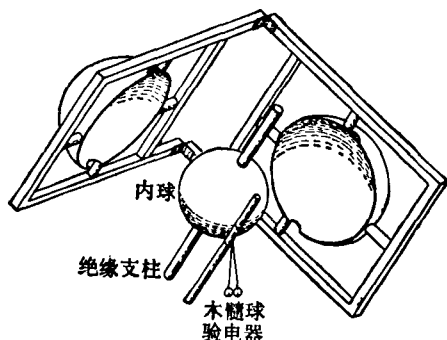


图2 卡文迪许的实验装置

(五) 1873年麦克斯韦和麦克阿利斯特(Donald MacAlister)的工作。麦克斯韦在整理和重复卡文迪许的工作时,十分重视同心球电荷分布的实验。为了改进这个实验,他亲自设计实验装置和实验方法,并推算了实验的处理公式。麦克斯韦设想,当内外球连通时,外球充电至 V (电位值)。如果库仑定律的指数不等于2,而是 $2 + \delta$,则内球应有一定的电荷分布。然后去掉连线,再将外球接地,则内球将具有某一电位值 v 。

$$v = \frac{1}{2} V \delta \left[\ln \left(\frac{4a^2}{a^2 - b^2} \right) - \frac{a}{b} \ln \left(\frac{a + b}{a - b} \right) \right],$$

其中 a, b 分别为外球半径与内球半径。

但是,实际上 v 测不出来,而外球的高电位当时无法直接测量。麦克斯韦的办法是取仪器无法察觉的最大测量值作为 v ,从静电感应的电荷间接推算 V ,求得 v/V 的比值,再计算 δ 值^[3,7]。具体实验是麦克阿利斯特作的。关于这个实验,麦克斯韦曾经有过描述^[3]:

“两个外半球固定在绝缘支架上,两球靠胶木环架在固定的位置。这样安装可使内球的绝缘支架不致暴露在任何可感受到的电力作用之下,因此也就不致带电,所以可以完全避免沿绝缘体表面放电的干扰。

“在试测内球电位之前,外半球并不移开,而是留在原处,但要接地放电。外半球不移开,内球带电对验电计的作用会比外半球移开的情况差些。但导体容器¹⁾避免外界干扰而得到的可靠保证,远远补偿了这一不利之处。

“在外壳的开口处用小金属盘作为盖子,盘上固定一根短导线,使外壳和内球连结,用一根丝线将盖子和导线提起,就可以从开口处插入静电计的电极,以接触到内球上。

“验电器是汤姆孙式象限静电计。象限静电计的外盒及电极之一常处于接地状态,探试电极也接地直到同心球的外壳放完电为止。

“为了估计外壳原来充电到什么程度,在外壳不远处放置一带绝缘支架的小铜球。

“实验步骤如下:

“外壳接于莱顿瓶而充电。

“小铜球接地,于是小铜球因静电感应而带负电荷,再让它与地隔绝。

“外壳与内球间的连接导线用丝线移走。

“外壳放电,并保持接地。

“静电计的探试电极脱离接地,由外壳的小口伸入,触及内球。

“在静电计上一点反应也观察不到。

“为了试验仪器的灵敏度,外壳脱离接地小

1) 即作为导体的内球——本文脚注除署名者外均为作者所加。

铜球接地放电, 静电计显示一正向偏转 D^3 。

“小铜球的负电荷大约是外壳原来带电的 $1/54$ 。当外壳接地时, 外壳从铜球感应而得的正电荷大约是铜球电荷的 $1/9$ 。因此, 当铜球接地时, 外壳的电位即静电计所指示的数值, 大约为外壳原来电位的 $1/486$ 。

“但如斥力符合 r^{-2} 的规律²⁾, 依照计算公式可得内球电位应为外壳电位的 $-0.1478q$ 。

“于是, 设静电计观察不到的最大偏转为 $\pm d$, 实验第二部分观察到的偏转为 D , 则 q 不致超过 $\pm \frac{1}{72} \frac{d^3}{D}$, 即使在粗糙的实验中偏转 D 也会大于 $300d$, 所以 q 不致超过 $\pm \frac{1}{21600}$ 。”

这个实验做得十分精细, 以致直到 1936 年的五六十年未曾有人超过他们。

(六) 1936 年, 美国沃赛斯特 (Worcester) 工学院的 Plimpton 和 Lawton 在新的基础上验证了库仑定律⁴⁾。他们运用新的测量手段, 改进了卡文迪许和麦克斯韦的零值法, 消除和避免了实验中几项主要误差, 从而大大地提高了测量精度。

实验线路和装置如图 3⁵⁾。

外球壳 A 由两块直径为 5 英尺的半球形铁皮焊成, 用陶瓷绝缘支起, 内球只是一个直径为 4 英尺的金属半球壳 B, 与一个封闭的铜盒连在一起, 铜盒内放置检测器 D。内电极不是球形, 不会影响实验结果。检测器经五级电子管放大, 由封在铜盒内的电池组供电。放大器的最后一级带低阻尼电流计 G, 其固有振动频率特意选定为大约 2 周/秒。内外球经检测器 D 相联。如内外球间有电位差, 就会有电流通过检测器, 电流计就会有反应。

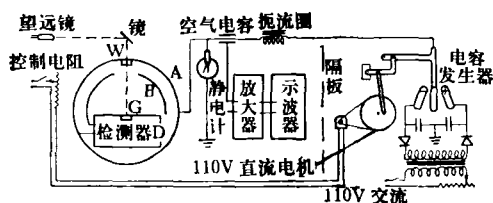


图 3 Plimpton 和 Lawton 的实验线路和装置

外球壳上加高压超低频的交流电。其频率及放大器系统都调谐到电流计的固有振动频率, 即大约 2 周/秒。这样的好处是: (1) 尽可能提高检测的灵敏度; (2) 避免接触电位差的影响; (3) 避免内外球之间的互感作用。但是不管电压加到多高 (他们加到 3 千伏), 电流计仍无反应。这种方法他们取名为准静态法 (quasi-static method)。

外球壳的密封很重要。为了能用望远镜观察到电流计的偏转, 必须在外球壳上开口, 但又要保证外球壳的密封性, 解决的办法是用一玻璃底的金属盘 W 作盖, 盘内盛有盐水, 盐水液面与球壳取齐。这个实验的灵敏度是如此之高, 只要把盐液撤去, 就可以观察到电流计出现了振动。

超低频的高电压是用所谓电容 (感应) 发生器 (condenser generator), 靠静电感应作用得到的。频率用直流电机的转速来控制。

他们用这套装置进行了多次实验, 不同的实验者都确认电流计除了由于热运动造成的 1 微伏指示外没有其它振动。他们用麦克斯韦推出的公式进行计算, 令 $V = 3000$ 伏, $v = 1 \times 10^{-6}$ 伏, $a = 2.5$ 英尺, $b = 2$ 英尺, 得到的 δ 值为 $\leq 2 \times 10^{-9}$ 。

(七) 1971 年, 美国 Wesleyan 大学的 Edwin R. Williams, James E. Faller 及 Henry A. Hill 用现代的测试手段, 将平方反比定律的指数偏差 δ 又延伸了好几个数量级⁵⁾。在此之前已有好几起实验结果, 不断地刷新记录 (见表 1)。Williams 等人采用高频高压信号、锁定放大器和光学纤维传输来保证实验条件, 但基本方法和设计思想跟卡文迪许和麦克斯韦是一脉

- 1) 原编者 J. J. 汤姆孙注: 探试电极保持与内球接触。
- 2) 即 $F \propto \frac{1}{r^n}$, 而 $n = 2 \pm \delta$ 。
- 3) 原编者 J. J. 汤姆孙注: 因 $0.1478 qV / \frac{1}{486} V$ 应小于 d/D 。
- 4) 即 $\delta \leq \frac{1}{21600}$ 。
- 5) 哈里德、瑞斯尼克合著的《物理学》第二卷介绍了这个实验, 画有一个图, 但那是一张理想示意图, 与实际情况出入颇大。

相承的。

图4是简单示意图。他们用五个同心金属壳,而不是两个,采用十二面体形,而不是球形。

峰峰值为10千伏的4兆赫高频高压信号加在最外面两层金属壳上,检测器接到最里面的两层,检验是否接收到信号。检测器的方框图如图5。

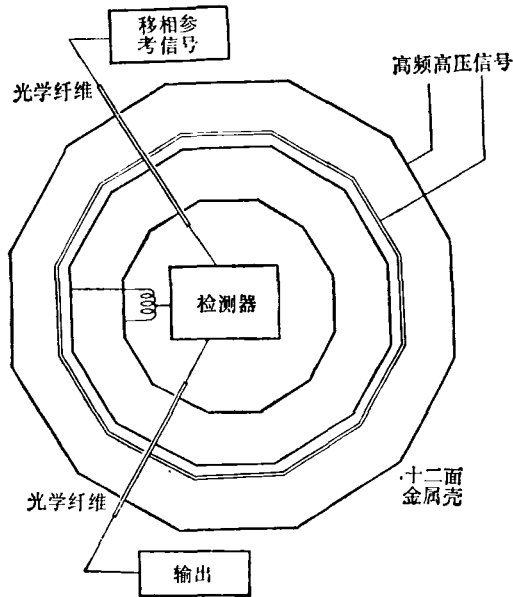


图4 E. R. Williams 等人的实验装置

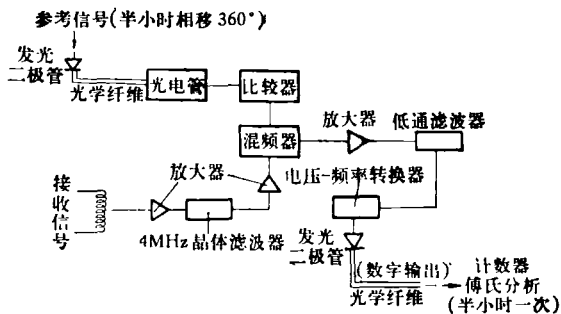


图5 检测器方框图

为了检测可能接收到的信号,从壳外经光学纤维送入一参考信号。这参考信号直接由外壳上的高频高压取得,经移相器(每半小时移相 360°)投到光电管上,与可能接收到的信号混频,再经放大滤波,送入电压-频率转换器,最后发光二极管变成光信号送出。

用光学纤维传输信号,只需在金属壳上开

表1 库仑定律的验证结果和光子的静质量

工作者	年代	库仑定律的指数偏差 δ 不大于	由此推算得出的光子静质量不大于(克)
罗宾孙	1769	6×10^{-2}	
卡文迪许	1773	2×10^{-2}	
库仑	1785	4×10^{-2}	
麦克斯韦	1873	4.9×10^{-5}	
S. J. Plimpton 和 E. Lawton	1936	2.0×10^{-9}	3.4×10^{-44}
Cochran 与 Franken	1967	9.2×10^{-12}	3×10^{-45}
Bartlett 等人	1970	1.3×10^{-13}	3×10^{-46}
R. Williams 等人	1971	$(2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$	1.6×10^{-47}
薛定谔	1943		2×10^{-47} *
Гинзбург	1963		8×10^{-48} **
Nieto 与 Goldhaber	1968		4×10^{-48} **
Feinberg	1969		10^{-44} ***
Davis 等人	1975		7×10^{-49} ***

* 从地磁数据检验安培环路定律得到的数据。

** 根据光的色散得出的数据。

*** 从木星磁场测得的数据。

一针孔,而高频信号是通不过针孔的。从检测器输出的任何以半小时为周期的信号都将是违反库仑定律的证据。实验证明,检测到的信号经过最小二乘法处理峰峰值不超过 10^{-12} 伏,而这正是由于布朗运动造成的所谓约翰孙效应(Johnson effect)的噪音电平的近似值。

根据麦克斯韦的公式,得到平方反比定律的指数偏差 $\delta \leq (2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$ 。

* * *

最后,要回答一个问题,为什么科学家对库仑定律的指数偏差这样感兴趣,竟有越来越多的人从事实验进行验证呢?

原来,库仑定律是电磁学的基石,也是麦克斯韦方程的基石。如果电力与平方反比定律有偏差,麦克斯韦方程就要作重大修正,光子就应有静质量,不同频率的电磁波,就应以不同的速度传播,狭义相对论的“光速不变原理”就要被动摇。这一系列的问题,可以归结到一点,就是光子究竟有没有静质量^[6]。这不仅是理论上的

(下转第760页)