



## 探秘高中物理两个扭秤实验

尹林娜

(昆明市第八中学 云南 昆明 650000)

(收稿日期:2023-02-01)

**摘要:**库伦和卡文迪什都用扭秤实验实现了微小力的测定,两个扭秤实验的历史渊源以及仪器设计和科学方法的异同是本文探讨的内容。

**关键词:**库伦;卡文迪什;扭秤实验

人教版新教材中介绍了两个扭秤实验——库伦扭秤实验和卡文迪什扭秤实验,两个扭秤实验有什么样的联系和区别呢?由于两个实验蕴含的思想方法比较复杂,这便成为遗留在学生脑里的谜团.本文将探秘高中物理两个扭秤实验,寻找两者的异曲同工之妙.

### 1 起源

1687年在牛顿的传世之作《自然哲学的数学原理》发表了万有引力定律,宣告了任何两个物体遵循完全相同的科学准则:任何两个物体都相互吸引,引力的方向在它们的连线上,大小与物理质量乘积成正比,与它们之间距离的二次方成反比,即  $F = \frac{GMm}{r^2}$ .  $G$  是比例系数,叫做引力常量,但因无法算出两个天体之间万有引力的大小,牛顿并不知道引力常量的值.牛顿还在书中指出,如果引力服从平方反比关系,则质量分布均匀的球壳对壳内物体没有力的作用.牛顿把电力、磁力和引力归为一组,称之为“长程力”,这也为后面科学家对电荷相互作用力指明了猜想方向,引力理论根深蒂固的影响指引研究者把引力和电力进行类比,提出了电力服从平方反比的猜测.

普里斯特利在多次实验中发现,空心金属容器电荷只分布在外表面,容器内表面没有电荷分布,空心的带电金属容器对内表面电荷没有力的作用,这与万有引力的情形很相似.1767年普里斯特利在《电学历史的现状及其原理实验》<sup>[1]</sup>一书中大胆猜测:“电的吸引力与万有引力服从同一定律,与距离的平方成反比”,但此观点仅停留在猜测阶段,没有

进一步的实验论证.

1773年卡文迪什用“同心金属球实验”对电荷间力的作用规律进行了研究,但他生前并未发表这一研究成果.实验装置中心是球形容器,中间插一根绝缘支架起到固定作用,两个空心外球直径稍大一些,固定在可以开合的绝缘支架上,球表面都包裹上锡箔,如图1所示.先用莱顿瓶给空心外球充电,然后用导线把内球和外球相连,取走导线后把绝缘支架打开,用木髓球验电器接触内球,检验是否带电,结果发现内球没有带电,电荷完全分布在外球上<sup>[2]</sup>.卡文迪什进行了多次实验,并且对实验结果用牛顿引力平方反比关系进行数学论证,证明了电荷静电力与距离的二次方成反比定律,指数偏差不超过0.02.

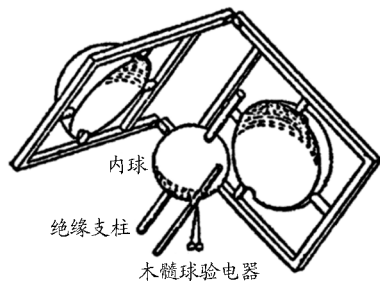


图1 同心金属球实验

米歇尔是卡文迪什在剑桥大学的老师,两人共同的理想和信念是把牛顿的引力思想从天体拓展到地球,拓展到电力和磁力.1750年,米歇尔在著作《人造磁体论》中提到,用线把磁体悬挂起来,当另一个磁体靠近时,因为排斥细线发生扭转,根据细线的扭转程度可以计算磁力的大小.这就是扭秤天平的应用原型,扭秤天平可以解决微小力测量的困难,遗憾的是米歇尔还来不及实验就离开了人世.

## 2 库仑扭秤实验

1775年法国科学院悬赏,征集提高航海指南针精度的最佳方案,库仑认为磁针支架在轴上会受到摩擦力的影响,提出丝线悬挂磁针的方法.但是丝线的抗干扰能力差,容易受到地磁场和大气电的影响,库仑用金属丝替代丝线改进了实验装置,在发生相同扭转程度的条件下金属丝需要的力更大,抗干扰能力更强,灵敏度偏低.当时金属丝的弹性性能具体数值还不知道,库仑做了大量实验,研究了不同粗细和长度的金属丝弹性性能,发现金属丝的扭力矩与扭转角成正比.在1784年发表的论文《关于扭力和金属丝弹性的理论和实验研究》,给出了扭力矩计算公式<sup>[3]</sup>: $M = \frac{\mu d^4 \theta}{l}$ ,其中 $d$ 、 $l$ 、 $\mu$ 分别是金属丝的直径、长度、弹性系数, $\theta$ 是金属丝的扭转角.这为扭秤实验的实施创建了理论条件,可借此定量测出电荷之间的静电力.

1785年库仑用自己创造的扭秤装置,以极高的精确度测量出微小的力,建立了著名的库仑定律.扭秤装置如图2所示.

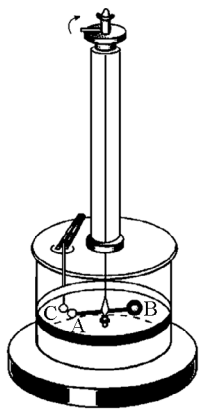


图2 库仑扭秤装置

细银丝上端和顶部的旋钮相连,下端悬挂于绝缘棒中心,转动旋钮可以扭转悬丝带动绝缘杆转动,停在某一合适的位置.绝缘棒一端是金属小球A,另一端是用来平衡绝缘棒始终处于水平状态的物体B,悬丝处于自然状态.让带电金属小球C接触小球A,使球A和球C带上同种电荷,球A和球C分开后再让球C靠近球A,玻璃圆筒上刻有360个刻度,用来记录球A和球C之间的距离 $r$ .因为斥力球A远离球C,扭转悬丝,使球A回到初位置并静止,记录悬丝扭转的角度,根据力矩平衡,悬丝扭力矩等于静

电力力矩,可计算球A和球C之间的排斥力.

原理如下:悬丝扭力矩 $M = \frac{\mu d^4 \theta}{l} = k\theta$ ,静电力力矩 $M = FL$ , $L$ 是球A到绝缘杆中点的水平距离,因为每次实验用的是同一绝缘杆,所以 $L$ 一定,可得静电力正比于悬丝扭转角,即 $F \propto \theta$ ,实际不用计算静电力的具体数值,悬丝扭转角也可以反映力的大小.改变球A和球C的距离 $r$ ,多次实验,可以找到静电力和距离 $r$ 之间的关系.库仑的论文中有一组数据,当两个小球距离分别为36个刻度、18个刻度、8.5个刻度,即比值约为4:2:1时,测出扭转角度分别为36个刻度、144个刻度、576个刻度,即比值约为1:4:16,对应的静电力之比约为1:4:16,得出了电荷间的静电力与距离的平方成反比的结论.

当时,电荷量的单位和测量方法都还没有定义,库仑一开始并没有研究电荷间的相互作用力和电荷量的关系,而是类比引力定律,假设静电力与电荷量乘积成反比的基础上,验证静电力和距离的关系.后面库仑在实验中发现,完全相同的金属球接触后电荷平分的特点,可以按照对称性原理实现带电体电荷量的改变.扭秤实验中的电力只是同种电荷的排斥力,如果带异种电荷的带电体靠近时,因金属丝的扭转回复力与扭转角度仅成一次方关系,故很难保持扭秤的稳定,并且两物体容易吸引在一起而发生电中和现象.1787年库仑受到牛顿单摆的启示,通过电摆实验如图3所示,发现带电体间的吸引力使物体发生摆动,摆动周期和带电体间的距离成正比,而吸引力又和摆动周期的平方成反比,因而说明了异种电荷间吸引力与距离的平方成反比的关系.至此,库仑确认了真空中两个静止点电荷之间的相互作用力,与它们电荷量的乘积成反比,与它们距离的平方成反比的定律.静电力常量是在确定了电荷的单位后,后人通过库仑定律计算出的.

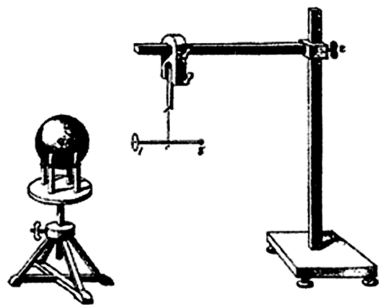


图3 电摆实验

### 3 卡文迪什扭秤实验

一般物体间的引力非常小,很难用实验测量出来,卡文迪什在米歇尔的启发下设计扭秤试图进行引力测量,但很多次实验都失败了,库仑扭秤实验的成功,鼓舞着卡文迪什继续改良扭秤装置来测量物体间的万有引力.卡文迪什经历50多年的摸索,在1798年第一次比较精确地测出万有引力常量的数值,实际上扭秤实验的原始目的是测量地球密度,在文章《地球密度的实验确定》中发表首次精确测出地球密度是水密度5.48倍的结论(现代测定的地球密度数值为 $5.52\text{ g/cm}^3$ ),引力常量是后人根据实验结果推算而得,基于对卡文迪什的尊重,物理学家情感上更认同是他测出了引力常量.

万有引力比库仑力要小很多,氢原子核与电子之间的静电力是万有引力的 $10^{39}$ 倍,要测量万有引力难度更大,必需对扭秤装置进行升级改造.扭秤装置的主体如图4所示是一个轻而坚固的T形架,通过一根石英丝N倒挂,T形架的竖直部分放一面平面镜M,光线射到平面镜M上后反射到刻度尺上,通过光点在刻度尺上的移动距离,可以获得石英丝N的扭转角度.T形架水平部分的两端各有一个质量为 $m$ 的小铅球,在与小球距离为 $r$ 的地方各放一个质量为 $m'$ 的大铅球,在大球的引力作用下,T形架发生转动,带动石英丝N扭转,通过石英丝N的扭转角度,可以求出铅球间的引力大小,根据万有引力公式计算出引力常量.

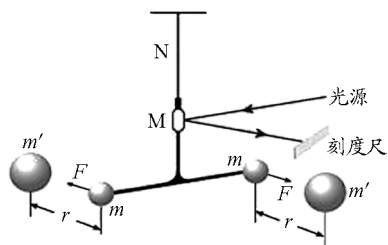


图4 改造后的扭秤装置主体示意图

原理如下:力矩平衡时万有引力力矩 $M_1$ 等于石英丝扭转力矩 $M_2$ , $M_1 = 2FL$ , $F = \frac{Gmm'}{r^2}$ , $M_2 = k\theta$ ,化简得 $G = \frac{k\theta r^2}{2mm'L}$ ,可以准确算出引力常量,其中 $L$ 为小铅球球心到T形架中心的距离, $\theta$ 是石英丝扭转角度, $k$ 为石英丝的弹性性能系数.石英丝扭转角度 $\theta$ 等于平面镜的扭转角度,是发射光反射后移

动角度的2倍,根据光标移动的距离,构建几何三角形可以算出 $\theta$ .假设光标移动的距离为 $x$ ,平面镜到刻度尺距离为 $d$ ,因为 $d \gg x$ , $2\theta \approx \frac{x}{d}$ ,即 $\theta \approx \frac{x}{2d}$ .

因为万有引力很小,容易受到周围环境的影响,卡文迪什把扭秤放在密闭空间,通过望远镜来远距离操作和观察实验现象,如图5所示.卡文迪什的扭秤实验巧妙之处是对微小力进行了3次转化和3次放大:力转化为力矩,力矩转化为扭转角,扭转角转化为光标位移;T形架增大力臂,反射光增大偏角,拉开平面镜和刻度尺的距离增大光标位移.卡文迪什扭秤实验的成功开启了测微小力的新时代,在万有引力定律提出100多年后终于测出了引力常量的数值.

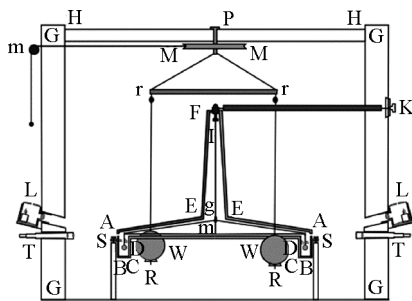


图5 卡文迪什扭秤实验示意图

### 4 总结

库仑定律是电学领域的第一个定律,是电学迈出从定性研究到定量研究的关键一步,在电磁学发展史上有极其重要的地位.卡文迪什扭秤实验被称为“最美十大实验”之一,测量出引力常量和地球密度,验证了万有引力的正确性,使其具有了真正的使用价值,历史上称卡文迪什为第一个“称量地球质量”的人.两个扭秤实验装置简洁、构思巧妙,蕴含丰富的科学思想,为微小力测量提供了一种重要途径.两位科学家都做了大量精湛的实验,有相互的借鉴、创新和超越,敬佩他们严谨的科学态度,每一个物理规律探索和发现的背后,都是一群物理学家共同智慧的结晶.

### 参考文献

- [1] 金向阳. 牛顿引力理论对发现库仑定律的影响[J]. 海南广播电视大学学报, 2001(4): 52-54.
- [2] 刘立军. “库仑扭秤”与“卡文迪什扭秤”[J]. 物理教学探讨, 2010(5): 52-54.
- [3] 张欣怡. 扭秤实验蕴含的科学方法及其在高中物理教学中的应用研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2020: 7-12.