

文章编号: 1007- 2985(2008) 03- 0055- 04

大质量物体间引力常数测量设计方案*

胡清桂

(内江师范学院, 四川 内江 641112)

摘要:设计了一种新的测量大质量物体间万有引力常数 G 的实验方案, 笔者先阐述了该方案总体设计结构, 然后分析了预期的理论观察值. 设计分析表明: 该方案中被照物投影在接收屏上将会出现 3.75 mm 的预期位移. 最后提出了降低测量误差的方法.

关键词: 万有引力常数; 扭秤实验; 精度; 位移

中图分类号: O314; O412; O572

文献标识码: A

众所周知, 物体之间的万有引力非常微小, 测量难度较大. 牛顿发现了万有引力定律之后, 卡文迪什于 1978 年改进了前人扭秤实验方案, 测量了万有引力常数^[1]. 笔者介绍了一种新的实验设计方案, 它不同于卡文迪什扭秤实验, 可以测量大质量物体之间万有引力常数. 从而克服了卡文迪什扭秤实验的只能测量小质量物体之间的万有引力常数的局限性.

1 设计方案

1.1 设计原理

笔者提出的测量大质量物体间万有引力常数的设计方案如图 1 所示, 设长度约 60 m 的细线悬挂一物体 B , 该物体被另一个巨大质量物体 (300~ 500) t 吸引, 用一光源 C 照射悬挂物 B , 在约 75 m 远处放置刻度盘 M 接收投影. 在没有巨大质量物体吸引悬挂物时, 记录悬挂物体被照射后在刻度盘上的投影位置. 用巨大质量物体吸引悬挂物, 再次记录悬挂物投影位置. 根据刻度盘上投影位置的微小变化, 就可以计算两物体之间的万有引力数值, 从而计算出两物体之间的万有引力常数 G .

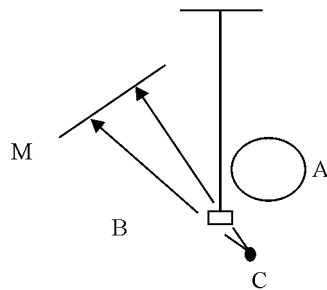


图 1 实验设计原理

1.2 设计方案要领

为了顺利开展实验, 需要注意以下几个要点.

- (1) 悬挂物体细线的支点只能选择悬崖, 不能选择楼房桥梁等建筑物, 建筑物受风, 日照等外界条件影响.
- (2) 需要安装屏蔽塑料管道, 细线穿过塑料管道就不会受到风的影响, 同时悬挂物体的 2 个侧面也可以安装挡板以减小风对悬挂物体的影响.
- (3) 接收屏需用反光材料制作, 使读数更加清晰, 同时接收屏上需要雕刻精度为 1 mm 的刻度表.
- (4) 安装接收屏时保证接收屏平面同悬挂物被吸引后的移动方向平行, 接收屏上刻度线与悬挂物(被

* 收稿日期: 2008- 01- 11

作者简介: 胡清桂 (1973-), 男, 四川泸县人, 内江师范学院讲师, 硕士, 主要从事理论物理研究.

照物)的质心水平高度保持一致。

(5) 光源发光面几何尺寸需要小于被照射物体几何尺寸,使被照物在接收屏上有投影出现。

(6) 采用光强度探测仪(光强度探针)记录悬挂物被吸引后在接收屏上的移动距离。具体做法:在带有刻度的接收屏上安装数个光强度探测仪,由于被照射物在接收屏上的投影存在从明亮到黑暗的过渡区,在被照射物未被大质量物体吸引前,各个光强度探测仪分别测得从明亮到黑暗过渡区光强度数值。在被照射物被大质量吸引后,各个光强度探测仪再次分别测得从明亮到黑暗过渡区的另一组数值,这样就可以通过比较得到悬挂物被大质量物体吸引后其投影在接收屏上的位移了。记录被照物在刻度盘上投影位置位移也可以使用录象,拍照等不同方法,拍照需使用较高分辨率的相机,根据刻度盘上光线的明暗程度确定曝光时间。

(7) 为了使实验成功开展,可以在光源和被照物之间增加一个反光镜,这样可以使更多的光线到达投影屏,从而读数更加清晰,如图 2 所示。在读取被照物被吸引后在投影屏上的位移时,可以将被照物没有被吸引前在投影屏上的位移底片同被照物被吸引后在投影屏上的位移底片进行对比,使读数更加准确,如图 3 所示。

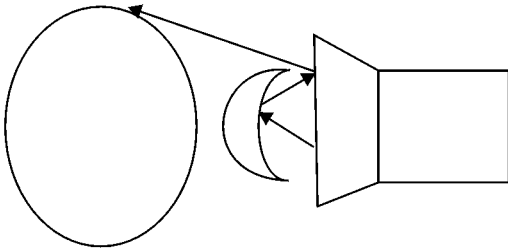


图 2 光源和被照物之间放置反光镜

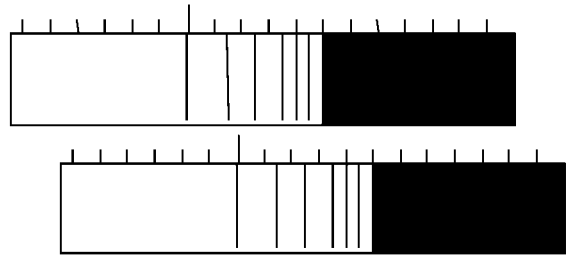


图 3 对比悬挂物被吸引前和被吸引后的照片

2 投影位移的计算

依据万有引力定律可以计算被照物投影在刻度盘上位移值。反之,若实验中测量被照物投影在刻度盘上实际的位移值就可以由 $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$ 求解万有引力常数 G 的值。

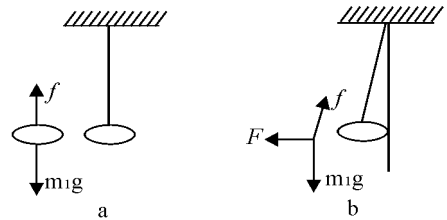
2.1 悬挂物体的受力分析

没有巨大质量物体吸引时,悬挂物体被光源照射后,在刻度盘上有一投影,把这一投影位置看作是悬挂物体受周围其它物体包括地球在内吸引悬挂物的“本底”位置。用另一巨大质量物体吸引悬挂物,悬挂物将会有微小移动。分析悬挂物因受到万有引力吸引后产生的位移,也就是实验预期的理论值,当然这里的分析只是近似计算,而不是精确计算。如图 4 所示,悬挂物体受到 3 个作用力平衡,这 3 个力分别为重力、细线拉力和水平拉力(即万有引力)。物体受重力是恒定的,水平拉力即万有引力大小决定拉线即细线的夹角的大小。

悬挂物体的细线长度越长,被挂物体的水平方向位移越大,且细线夹角不变。水平拉力即万有引力 F ,悬挂物体自身重力 $m_1 g$,悬挂物因受到万有引力作用(大质量物体吸引)移动的位移 l 和细线长度 L 之间的关系满足方程

$$F = m_1 g \frac{l}{L}, \quad (1)$$

其中:细线 $L = 60 \text{ m}$; 位移 l 非常小。(1) 式中大质量物体与悬挂物之间万有引力 F 满足^[2]: $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$,



a—悬挂物体被吸引前的受力意图;

b—悬挂物体被吸引后的受力示意图

图 4 悬挂物体被吸引前和被吸引后的受力变化示意图

则由 $m_1 g \frac{l}{L} = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$ 可知:

$$l = LG \frac{m_2}{gR^2}, \tag{2}$$

其中细线长度 L 取 63 m, 大物体质量取 200 t (即 200×10^3 kg), 悬挂物体和大质量物体距离取 2.3 m. 假设大质量物体选用铁(铁的质量密度), 形状为正方体, 那么可以计算出边长为 4 m 的正方体铁的质量为 499×10^3 kg, 所以悬挂物体和大质量物体距离取 2.3 m 是允许的^[3]. 将以上数据代入(2)式中, 可以得到悬挂物体位移:

$$l = LG \frac{m_2}{gR^2} = 63 \times (6.672 \ 0 \times 10^{-11}) \frac{200 \times 10^3}{(2.3)^2 \times 9.8} = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}.$$

可见, 悬挂物体被吸引后产生的位移 l 约为 0.02 mm. 实际上, 在实验中悬挂细线可以选择更长, 大质量物体可以选择更重, 则效果越明显.

2.2 理想点光源的放大效果

如图 5 所示, 假设光源为理想点光源, 当被照物未被吸引时, 光源发出的一条光线通过被照物边缘到达刻度盘, 同样, 当被照物被吸引产生微小偏移后, 光源发出的另一条光线通过被照物边缘到达刻度盘, 2 条光线是同一点发出, 由三角几何知识, 被照物被吸引后产生的微小位移和 2 条光线投射在刻度盘上的距离之比等于光源到被照物体距离 L_1 与光源到刻度盘距离($L_2 + L_1$)之比.

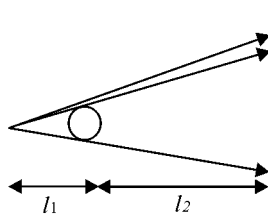


图 5 理想点光源放大示意图

假设光源到被照物体距离 L_1 取 0.3 m, 被照物体到刻度盘距离 L_2 取 75 m, 那么放大倍数 $k = (75 + 0.3)/0.3 = 251$. 如果将光源到被照物体距离 L_1 设置更小, 而被照物体到刻度盘距离 L_2 设置更大, 那么,

放大倍数将更大.

2.3 非理想点光源的放大效果

如图 6 所示, 若光源不是点光源时的放大倍数和光源是点光源时的放大倍数相同, 仍然是光源到刻度盘距离($L_2 + L_1$)与光源到被照物体距离 L_1 之比, 但刻度盘上投影将会出现从明亮到黑暗的过渡区域. 当光源不是点光源时, 通常把光源发光面看作是无数个发光点. 由于光源发光面尺寸小于被照射

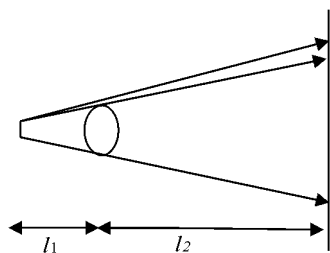


图 6 光源非点光源示意图

物体尺寸, 在记录投影在刻度盘的位置时, 应根据阴影明暗情况, 适当延长拍摄照片时的曝光时间. 当被照物未被吸引时, 光源边缘发光点发出的一条光线通过被照物边缘到达刻度盘. 当被照物被吸引产生微小偏移后, 光源边缘处同一发光点发出的另一条光线通过被照物边缘到达刻度盘, 2 条光线是同一点发出的, 放大倍数仍为 $(75 \times 0.3)/0.3 = 251$.

2.4 被照物投影在刻度盘上位移的预期值

从上面分析可以看出, 被照物投影在接收屏上的位移是悬挂物被吸引后的实际位移乘以放大倍数, 即: $2 \times 10^{-5} \times 251 = 5 \times 10^{-3} \text{ m} = 5 \text{ mm}$, 5 mm 的位移完全可以观察了. 在实际实验中, 如果悬挂细线选择更长, 物体质量选择更大, 光源到被照物体距离取更小, 而光源到刻度盘距离取更大, 那么被照物投影在接收屏上的位移将会更大. 很明显, 5 mm 位移这个值是理论值, 也就是预期的值. 通过该设计方案, 测定大质量物体间万有引力常数, 将有助于进一步研究万有引力理论.

3 误差分析

通过上面的分析可以看出, 该实验的误差主要由实验设备位置不准确产生, 包括接收屏平面同悬挂物

被吸引后的移动方向未能绝对平行、接收屏上刻度线水平高度与悬挂物(被照物)的质量中心水平高度不相同,悬挂物质量中心与大质量物体质量中心未能处于相同水平高度等,所以在进行实验时应将实验设备尽量安装在精确位置,从而减小误差。

同时,细线自身重力也会使实验结果出现误差,细线受力分析如图 7 所示。从整条细线受力情况来看,细线下方端点将会受到一个水平向右的拉力从而使细线倾斜。考察细线最上方端点,忽略端点自身受到的重力,该端点受到沿细线方向向下的拉力,同时受到支点提供的一个反作用力 f_2 。它受到的沿细

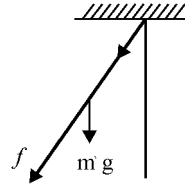


图 7 细线受力示意图

线本身方向向下的拉力在垂直向下方向的分量等于这条细线自身重力,而在水平方向的分量实际上就等于细线下面端点受到的水平向左的拉力。这样,细线需要的水平向左的拉力 f_1 与细线自身重力 $m'g$ 之比近似等于细线下方端点的水平位移 l 和细线长度 L 之比^[5],即 $f_1 = m'g \frac{l}{L}$ 。在实验中,测量得到悬挂物因受到万有引力作用(大质量物体吸引)移动的位移 l 后,万有引力可由 $F = m_1g \frac{l}{L}$ 得到。通过这样的修正,可以使实验结果更加精确。这里计算的拉力 f_1 是一个近似值,因为细线受到水平拉力后将会成为一条弧线,而笔者还是将它看作直线处理,虽然这样的处理不能达到绝对精确的效果,但已经把误差最大限度地降低了,和经典的卡文迪什扭秤实验相比,该实验方案精度将会更高,误差将会更小。

4 结语

物体之间的万有引力常数 G 是非常微小,难以测量。笔者设计的方案通过伸长悬挂物体的拉线,采用大质量物体吸引悬挂物以及利用光的放大原理等手段,将万有引力的效果放大,将对万有引力的测量改变为对距离的测量,从而较准确地达到了测量万有引力常数的目的。

参考文献:

- [1] 曾金根. 大学物理实验教程 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [2] 李平. 物理实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [3] KIEINEVOB U, MEYER H, SCHUMACHER A, Hartmann S [J]. Meas. Sci. Technol., 2005, 10: 492- 493.
- [4] CHEN Y T, COOK A H. Gravitational Experiments in the Laboratory [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [5] MOBR P J, Taylr B N [J]. Rev. Mod. Phys., 2005, 72: 351- 353.
- [6] FIZGERALD M P, Amstrong T R [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 1995, 44: 494- 495.
- [7] FIZGERALD M P, Amstrong T R [J]. Meas. Sci. Technol., 1999, 10: 439- 440.
- [8] WALESCH H, MEYER H, PIEL H, Schurr [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 1995, 44: 491- 493.
- [9] KIEINEVOB U, MEYER H, SCHUMACHER A, Hartmann Gravitation [J]. Meas. Sci. Technol., 1999, 10: 489- 493.

New Experimental Scheme to Measure the Gravitational Constant G Between Big Objects

HU Qing-gui

(Neijiang Teachers' College, Neijiang 641112, Sichuan China)

Abstract: A new experimental scheme to measure the gravitational constant G between big objects is introduced. Firstly, the overall arrangement of the new experimental scheme is presented. Then, the anticipated observation value is analyzed. Finally, the error in the new experimental scheme is analyzed and the method to reduce the error is put forward. Analysis shows that the displacement of small objects' shadow on the screen will be 3.75 mm.

Key words: gravitational constant G ; torsion balance; precision; displacement

(责任编辑 陈炳权)