

- [10] L. G. Cohen et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, 14(1978), 855.  
 [11] D. N. Payne et al., *Electron. Lett.*, 13(1977), 628.  
 [12] D. Gloge et al., *B. S. T. J.* 52(1973), 1563  
 [13] R. Olshansky et al., *Appl. Opt.*, 15(1976), 483.  
 [14] H. M. Presby et al., *Rev. Sci. Instrum.*, 49(1978), 339.  
 [15] H. M. Presby et al., *Appl. Opt.*, 17(1978), 2209  
 [16] D. Marcuse. *Appl. Opt.*, 18(1979) 9  
 [17] L. M. Boggs et al., *B. S. T. J.*, 58(1979), 867.  
 [18] H. M. Presby et al., *Appl. Opt.*, 18(1979), 671  
 [19] H. M. Presby et al., *Appl. Opt.*, 18(1979) 3249  
 [20] D. Marcuse et al., *Appl. Opt.*, 18(1979), 3758

## 精密扭摆

### ——观察引力异常的一种仪器

吴永生 张平华 刘易成  
 (中国科学院物理研究所)

#### 一、引言

1970年3月7日美国萨克斯耳和艾伦在哈佛塔内利用扭摆作了一次日食观察<sup>[1]</sup>，他们发现扭摆的周期在初亏到食甚期间发生了显著变化——相当于在23公斤的摆盘上加了1.2公斤的重物，即增加了5%，这比按经典引力理论计算得出的数值约大十万倍。法国艾来斯在1954年6月30日用锥摆做了一次日食观察，他发现锥摆的摆动平面在初亏到食甚期间也出现异乎寻常的弹跳<sup>[2]</sup>。他们都认为要解释这种现象必须重新考虑经典的引力理论。1979年9月6日在北京的月食期间我们也用扭摆作了一次观察，其现象与萨克斯耳等人在1960年3月13日的月食期间所观察到的现象是很相似的<sup>[3]</sup>。当然，要对这种“异常”现象作出肯定的结论和解释，还须作更多的观察，积累更多的实验资料才行。

1980年2月16日在我国云南省有一次日全食，我们用扭摆等仪器又作了一次观察，其结果将在以后公布。

#### 二、扭摆的结构

扭摆基本上是由扭摆、伺服系统和自动记

录系统三部分组成。图1是扭摆的示意图。扭丝6是一根恒弹性钢丝，长约1.6米，直径1.5毫米，由北京冶金研究所提供。该丝经校直、磨光和真空热处理，以得到恒弹性和高的机械性能。测得的杨氏模量  $E = 1.85 \times 10^4$  公斤/毫米<sup>2</sup>，剪弹性模量  $G = 7.00 \times 10^3$  公斤/毫米<sup>2</sup>，频率温度稳定系数  $g_E = 2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。扭丝的上下两端分别用黄铜扭丝夹2'，2'和扭丝压块

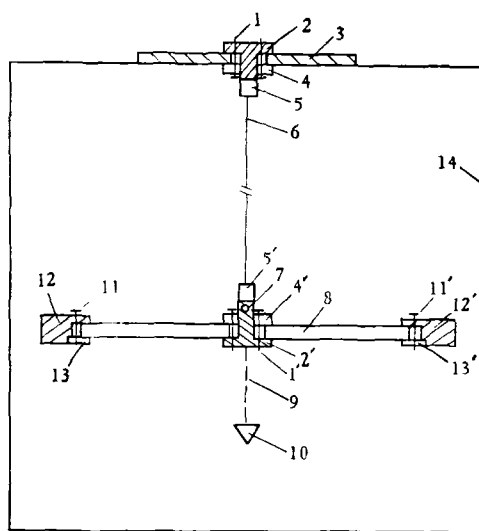


图1 扭摆的示意图

- 1, 1'——螺钉； 2, 2'——扭丝夹； 3——支撑板；  
 4, 4'——压盘； 5, 5'——扭丝压块； 6——扭丝；  
 7——反射镜； 8——玻璃转盘； 9——细棉线；  
 10——附加重物； 11, 11'——螺钉； 12, 12'——  
 衔铁； 13, 13'——衔铁固定片； 14——扭摆架

5,5' 紧紧夹住。扭丝夹和扭丝压块中间各有半径为 0.75 毫米的同心半圆，并垫了四层擦镜纸，这样就很方便地固定了扭丝。扭丝上端是通过压盘 4 和螺钉 1 固定在支撑板 3 上的。支撑板 3 是一块  $86 \times 86$  厘米<sup>2</sup>、127 公斤重的铁板，它通过四个大螺钉与大铁架 14 连结在一起。大铁架长 1.2 米、宽 1.2 米、高 2.1 米，六面都用 2 毫米厚的铁板封住，整个铁架约重 750 公斤。扭丝的下端是利用压盘 4'、螺钉 1' 固定在摆盘上。摆盘是用三块厚玻璃板做成的。其中一块大的，外径 1 米，内径 15 厘米；两块小的，外径 75 厘米，内径 10 厘米。整个摆重 25 公斤，摆的周期调在 55 秒左右。

扭摆的自动记录系统是由传感器 A、反射镜 7、光源 S、时间测定器、通用计数器(其中的晶体振荡器的频率稳定度达  $10^{-8}$ ，8 位数码显示)和数字打印机组成。为了提高时间分辨率，我们把传感器 A 放在距反射镜 7 约 8 米处，它们的相对位置如图 2 所示。传感器是由 15 个  $2DU_1$  光敏二极管组成，每个光敏管的受光面积约为  $0.8 \times 1$  毫米<sup>2</sup>，紧密地排成垂直的一条线，这样就避免了可能的漏记事例。光源 S 是采用光束很细的氦氖激光管，长为 250 毫米，放在传感器 A 旁边。反射镜 7 是一块多层介质膜凹面镜，曲率半径 8 米。这样光敏管接收到的光点与激光管出口处的光点大小相仿，从而显著地提高了扭摆的时间分辨率。

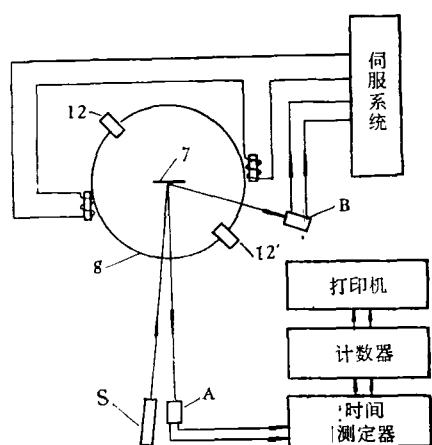


图 2 时间测定和伺服系统中使用的激光光源 S、反射镜 7、传感器 A 和 B 的相对位置示意图

我们实际测量的只是扭摆周期的一部分，为清楚起见，我们以后称它为测量周期，并用字母  $\tau$  来表示。

当扭摆从平衡位置开始顺时针转过约  $60^\circ$  时，反射镜反射的一束激光就进入传感器 A，后者输出一个电信号通过时间测定器微分和放大后进入计数器，使计数器的主门打开。当扭摆逆时针转回来时，反射镜又使一束激光射入传感器 A 中，使计数器关闭主门。计数器自动记录并显示这两个脉冲之间的时间间隔。同时，通过它的 2-10 进制编码输出使 SY3C 打印机打印。

扭摆的伺服系统是由电磁铁、衔铁 12, 12'、传感器 B 和自动延时装置组成。

电磁铁固定在扭摆架上，它可以上下、左右、前后细调。在扭摆开始工作时，首先启动扭摆，使一对电磁铁吸住摆盘上的一对衔铁，等到摆盘完全静止后(大约 30 秒)，电子系统就自动地切断电磁铁中的电流，同时输入另一反向的直流电以抵消磁铁中的剩磁，于是摆盘就顺时针转动，转过约  $30^\circ$  后，反射镜使一束激光射入与上述同样构造的传感器 B 中，使延时装置作好延时准备，转盘逆时针重新转回到该位置时，反射光束就触发了延时装置，等到衔铁将要碰到电磁铁时，延时装置就使电磁铁接通电流，从而吸住衔铁。电磁铁的通电电流约为 50—70 毫安，所用电压约为 1—2 伏，等到延时结束，就开始下一个摆周期。由于电磁铁是坚实地固定在扭摆架上的，故摆盘 8 每次都能停在固定的地方，并以固定的起始能量开始转动，扭摆一经启动，就自动地连续工作，这样就避免了人工操作所造成的误差。

### 三、试验结果

我们现在的实验是在居民住房大楼的地下室内进行的，室内的月平均温度变化保持在  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  之内，冬夏的平均温差小于  $10^\circ\text{C}$ 。光源、计数器、打印机都设在远离扭摆的其他房间内，扭摆起动后操作人员就可以离开地下室。

我们的仪器都通过稳压电源稳压。计数器特别是晶体振荡器须经过两小时以上的预热。在对摆盘重心、电磁铁位置及其吸合电流、光源位置等作了精细的调整之后，记录到的数据的相对标准偏差通常小于  $10^{-5}$ ，在深夜时小于  $3 \times 10^{-6}$ ，因此摆盘的稳定度是相当高的。

扭摆周期的基本公式是

$$T_0 = 2\pi \left( \frac{I}{L/\theta} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

其中  $I$  是转盘的转动惯量， $\theta$  是在力矩  $L$  的作用下，扭摆转动的角度。扭丝在轴向应力的作用下，其扭转弹性模量将会发生变化，扭转时的能量损耗也会发生变化，其综合的效果将使扭摆周期  $T$  改变一个小量<sup>[4]</sup>。为了能在数量上作一比较，我们实测了在扭丝下端加重物后引起的测量周期  $T$  的变化<sup>1)</sup>，实验过程仍以图 2 来说明。

在扭丝夹 4 的下端系一细棉线，细棉线下端挂一已知的重物，然后测定扭摆转过既定位置时所经历的时间，实验结果如表 1 所示。

表 1 附加重物的实验结果\*

附加重物 $\Delta W$ (克)	测量周期 $T$ (秒)	标准偏差 $\sigma$ ( $\times 10^{-4}$ 秒)	测量周期 的变化 $\Delta T$ ( $\times 10^{-4}$ 秒)	$\Delta T/T$ ( $\times 10^{-4}$ )
0	35.144344**	1.20		
30	35.142881	2.13	-14.92***	-0.4245
55	35.140977	1.65	-33.96	-0.9663
80	35.138825	3.71	-55.48	-1.5790
105	35.135692	3.80	-86.81	-2.4700
0	35.144401	2.10		

\* 附加重物时，转盘的转动惯量未变。

\*\* 每个数据都是 20 次测量的平均值。

\*\*\* 测量周期的变化是相对于  $T$  计算出来的。

从上表可以看出，在附加重物前后两次测得的不加重物的测量周期  $T$  基本上没有变化，我们取这总共 40 次测量的平均值作为扭摆的测量周期的平均值  $\bar{T} = 35.1443725$ ，其最大相

对标准偏差小于  $6 \times 10^{-6}$ ，比萨克斯耳等人做的结果为佳。

在附加重物  $\Delta W < 80$  克时， $\Delta T/\bar{T}$  与  $\Delta W$  的关系基本上是线性的，并可以用下面的公式表示：

$$\frac{\Delta T}{\bar{T}} = -1.80 \times 10^{-6} \Delta W, \quad (2)$$

这里的  $\Delta W$  表示克重数。由于 75 克重物就相当于原摆重的千分之三，而按照经典引力理论计算和实际的观察都表明在地球表面某给定地点的  $g$  的变化，最大也不过是  $1.6 \times 10^{-7} g$ 。因此，日食时如果有 0.3% 的变化，对于我们的摆来说，也就是相当于 5 毫秒的变化，那就是一种很大的“异常”了。

#### 四、结 语

上面我们介绍了精密扭摆的结构和初步的实验结果，它能够精确地定时、长期运转和自动记录，它是观测日食、月食期间引力异常现象的一种理想仪器，当然它还可以用于其他方面<sup>[4]</sup>。

这项工作得到本所有各部门的热情支持。北京冶金研究所陈其安同志为我们提供了满意的钢丝和有关知识。冶金工业部钢铁研究院、有色金属研究院热处理组、北京钢丝厂铅钢车间等单位帮助我们进行了扭丝的热处理和冷加工。我们还得到中国科学院科学仪器厂吕世勤同志和本所许祖彦、冯国胜同志的热情帮助。在这里谨向他们表示衷心感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] Erwin J. Saxl and Mildred Allen, *Phys. Rev. D*, **3**(1971), 823.
- [2] Maurice F. C. Allais, *Aerospace Engineering*, **18-9**(1959), 46
- [3] Erwin J. Saxl, *Nature*, **203**(1964), 126.
- [4] Erwin J. Saxl and Mildred Allen, *Journal of Applied Physics*, **40**(1969), 2499.

1) 加重物后未矫正平衡位置。