

精 密 扭 摆 研 究

陈湘湘 陈嘉言 管同仁

(中山大学引力物理研究室)

1981年11月2日收到

提 要

本研究旨在提高扭摆精度。

扭摆采用大理石——这取自地球的天然材料作摆盘；通过试验，挑选了 Q 值高、内耗小、剪切模量温度系数接近于零的恒弹性合金丝作为吊丝。特别是，我们把 Saxl 类型的每周期吸合一次的间断振荡摆回复到小阻尼情况下的自由振荡摆，减少对摆振动的人为干预；增加真空条件，以减少周围环境干扰，延长了阻尼时间；同时在摆盘中央安放多面反射镜环，增加测量点，变一周仅测一次时间为同一周期测四次以上。这就提供了用计算机求阻尼振荡方程 $\theta_i = Ae^{-t_i/\tau} \sin(\omega t_i + \phi)$ 数值解的条件，不但可直接测得周期 T 的变化，而且可望计算得振幅 A 、阻尼时间 τ 、初相角 ϕ 的变化。另外，在光电接收方面也作了一些改进。通过这些措施，我室的精密扭摆对周期的探测精度已比美国 Saxl 1964 年发表第一篇文章^[1]时的扭摆精度提高 100 倍；比其运转 17 年，经一再改进的扭摆精度^[2]提高 10 倍。测量有效数字 6 位至 7 位，周期相对误差一般达 2×10^{-6} ，最佳状况可达 8×10^{-7} ，基本达到预期设计要求，为将来探测引力异常，“区分长期间与短期间内频率起伏”^[3]提供了可能性。

一、前 言

在进行引力物理的研究工作中，引力异常现象的探测和研究是一个不可忽视的方面。在 1982 年即将出现九星联珠的罕有天文现象情况下，引力异常的探测研究变得更加令人瞩目。所谓引力异常，固然不排除自然界偶尔确有异乎一般规律的例外，但这里主要指的是用目前所掌握的引力理论无法完满解释的一些有关引力的现象。例如为了验证马若兰 (Majorana) 的引力吸收假说^[4]，几十年来各国引力物理学家在日、月蚀期间作了大量工作，本来按照马若兰的理论与拉捷夫斯基 (Радзиевский) 的计算^[5]，当日、月、地球三星共线时，太阳与地球之间有月亮作为中间质量对日、地引力进行吸收，重力应发生 $\Delta g/g \sim 10^{-6}$ 的变化。 g 为重力加速度。然而事实却是：目前测重力加速度最为有效的重力仪在日蚀期间没有明显效应^[6-10]，反倒是那些按经典观点对重力变化不敏感的锥摆^[11]，倾斜仪^[12,9,10]，扭摆^[12,13]有反应。显然，这一切无法用现有的引力理论解释，也无法用重力变化的理论解释。这种现象我们称之为引力异常现象。

这里要特别提出用扭摆探测引力异常的工作。

1960 年 3 月 13 日美国哈佛的 Saxl 博士发现月蚀时，扭摆周期作正弦波动式下降^[1]。

1970年3月7日, Saxl 和 Mount Holyoke 学院的 Allen 教授对一次 96.5% 的日偏食进行探测, 发现在初亏与食甚之间扭摆周期有一段稳定增加, 食甚后周期突然变短, 并在明显大于食前周期值的水准上迅速趋于平稳^[2].

1979年9月6日北京月全食, 中国科学院物理研究所用扭摆探测, 发现周期变短^[3]. 此结果与 1960年3月13日 Saxl 的观测相一致.

1980年2月16日, 中国云南省境内日全食, 太阳高度 5° , 我们与中国科学院物理研究所共同进行观测未发现扭摆周期有明显变化.

1980年9月, 西澳大利亚大学的 Blair 博士来华访问, 我们曾委托他到美国后就哈佛 Saxl 关于扭摆的工作征询美国研究引力物理的专家们的意见. 著名引力物理学家 Thorne, Drever 和 Hamilton 认为 Saxl 未将扭摆长期间与短期间内的频率起伏加以区分, 所以其结果可能是错误的, 希望我们能加以证实^[3].

究竟孰是孰非? 搞清这个问题意义甚大. 现象的探明往往是理论上分析问题和作出突破的先决. 如果这种“异常现象”确实存在, 尽管非现有理论所能预言, 但若能多次重复, 找出规律, 再从中探讨可能的解释和理论, 则也许能揭露引力场性质另辟一条新路. 如果这种“异常”并不存在, 证明 Thorne 等人的估计是对的, 亦可澄清思想, 使引力理论的探讨少走一些弯路.

扭摆很有希望成为有效的监测手段之一, 关键在于提高扭摆的精度.

Saxl 的扭摆精度在测量 29.580 秒的周期时, 测量值稳定在 10 毫秒量级, 数据方差一般在 ± 2.5 毫秒^[2]. 中国科学院物理研究所的扭摆精度比美国要高, 所测之部分周期为 33.144 秒, 日变化不超过 1.5 毫秒, 数据方差一般在 0.2 毫秒^[13].

我们则希望在前人工作的基础上把精度再提高一至两个数量级. 采取若干改进措施后, 实验结果基本达到预期设计要求.

二、实验设计

参照 Saxl 的扭摆设计, 又听取了中国科学院物理研究所的改进意见, 我们的扭摆装置如图 1 所示.

角钢支架高 2.815 米. 扭摆盘 (14) 由天然大理石经车床精车而成, 外径 500 毫米, 重 32.62 公斤. 吊丝 (10) 是镍铬钛恒弹性合金钢丝, 长 1970 毫米, 直径 1.19 毫米, 此丝在氢气中经热处理, 热弹性系数为 $+6.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 在 $0-70^\circ\text{C}$ 温度范围内丝的弹性参数几乎保持为常量, 这就降低了对实验室温度控制的要求.

扭摆的起动借助于两个表面磁场高达 4000—5000 高斯的圆柱形 (ϕ 16 毫米, 高 10 毫米) 钕钴磁铁, 使其对准粘在大理石盘侧面的两小软铁圆柱, 就可隔着真空室拉动摆盘.

真空室为一连串总长 1.86 米的 ϕ 220 毫米的玻璃圆筒, 下面再接 ϕ 560 毫米, 高 500 毫米的玻璃大圆筒. 抽真空时在大气压力下, 整个真空罩筒向上抽起而压紧顶板. 因为真空室材料是玻璃, 好处是透明易于实验观察.

光电接收部分分为两路. 一路专管计算时间: 氩-氦激光器 $\xrightarrow{\text{发光}}$ 置于扭摆摆盘中

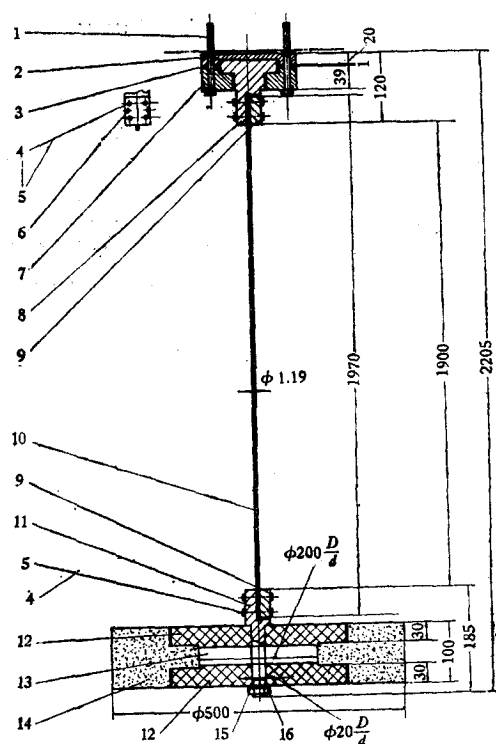


图 1

序号	图号或标准号	名 称	材 料	单位	数量	单 重 (千克)	总重 (千克)
1	GB30-76	螺栓 M 12×78	A3		6		
2		上法兰	H62		1		2.74
3		垫片 $\delta = 1$	紫铜板		1		
4	GB52-76	螺母 M 6	A3		8	0.023	0.184
5	GB30-76	螺栓 M 6×50	A3		8	0.014	0.112
6	GB117-76	圆锥销 4×50	35		4	0.0053	0.0212
7		下法兰	H62		1		5.29
8		上夹头	H62		1		2.68
9		压块	H62		2		0.7
10		金属丝			1		
11		下夹头	H62		1		0.85
12		压环	酚醛层压板		2		6.0
13		配重填料	H62				0.1
14		圆盘	大理石		1		32.62
15	GB93-76	弹簧垫圈	65 M _n		1		0.008
16	GB52-76	螺母 M 16	A3		1		0.034

心的多面反射镜环(俯视图为正 20 边形,外接圆直径是 114 毫米) $\xrightarrow{\text{反光,经光栏,透镜聚焦}}$ 接收面积为 1×1 毫米的光电管 $\xrightarrow{\text{转换为电讯号}}$ 触发 E-323A 型频率计,一次光讯号的到达启动计数器暂停,把已计的时间数存入记忆系统以便打印,同时在暂停严格由晶振控制的

20 微秒后又自动开启计数,直至下次光讯号的到达……一次计数与下一次数值是累加的,除非有复零讯号计数方从零起算。

第二路控制复零.另一部激光器→置摆盘中心的玻璃镀膜反射镜→光电池.在扭摆丝处于平衡位置时,来自反射镜的光束正好能扫过光电池,而摆盘上下两镜同时有光讯号到光电接收系统时,计数器先复零而后起计.如此一来每半周期就有复零讯号一次.我们再另加一控制机构,控制复零动作在两次半周期后第三个半周期不复零,直至第四个周期才复零,于是计数为半周期、半周期、全周期、半周期、半周期、全周期……周而复始,不断循环。

复零动作亦在暂停的 20 微秒当中进行,故实际计算所测时间除复零后第一个数外,其余每数皆需要加上 20 微秒。

三、改进措施

美国 Saxl 及中国科学院物理研究所的扭摆都是每周期吸合停顿一次的间断摆^[4]——

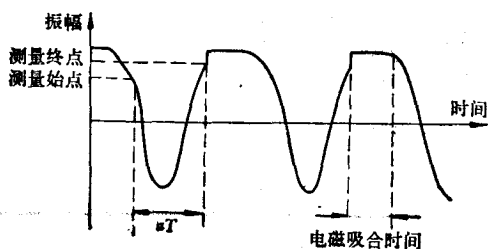


图 2

在每次摆动行将到达最大扭转之前,通过光电传感器将摆盘电磁吸合对准一固定位置,待其基本稳住后再无初速释放.这样来补充由于摩擦、阻尼等造成的能量损耗,保证扭摆运动每周期都有相同的起始位能.摆盘被释放后,自由摆过一定角度,然后从摆盘上镜子反射而来的光束扫过光电管产生电讯号开启计数器,计算此刻至下

一次电磁吸合之前的周期的一段固定分数部分.如图 2 所示.其中 a 是某固定分数, T 是周期.这种方法测定的周期是依次逐个间断的。

与 Saxl 类型的扭摆比较,我们的扭摆有如下特点:

(1) 最明显的特点是变每周期吸合一次的间断摆为小阻尼下的连续振荡摆,用上了多面反射镜进行同一周期多点测量。

在扭摆起动偏转角为 $\pi/3$ 情况下,用到的有效镜面为 7 面,一周期可记下 14 个时间数,随阻尼振荡,振幅衰减,每周可测时间数逐渐减少,直至振幅小于一周期 4 个时间数就必须重新起动.这样在每个周期里至少可测得四个以上时间,依次为 t_1, t_2, t_3, t_4 ,只要量得与之对应的四个角位移 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$,就可通过计算机用迭代法求解非线性超越方程组 $\theta_i = Ae^{-\frac{t_i}{\tau}} \cdot \sin(\omega t_i + \varphi)$ (其中 $i = 1, 2, 3, 4$).如引力异常对扭摆运动确有什么影响,则我们这种形式的摆动不但可以直接测得周期 T ($T = \frac{2\pi}{\omega}$, ω 为圆频率)的变化,而且可望一并求出振幅 A , 阻尼时间 τ , 初位相角 φ 的变化.掌握了全参数更有利于判断引力异常究竟是对哪一个参数发生影响,从而有助于探明其中的物理因素.比如仅仅是左右两个半周期的测量就已使我们比 Saxl 多得到了关于扭摆零点位置是否偏转的信息,由此可分析引力异常是否会以一扭力矩方式作用于扭摆。

除了增加测量信息外,减少起动次数的突出优点是减少了对扭摆转动的人为干预,由此而来的单摆形式的左右摆及摆盘平面的上下翘等附加振动的影响均减少了。由于直接拉动摆盘的起动方式,以及隔振条件不完善,单摆形式的附加振动在所难免。Saxl 类型的间断摆不易区分迭加在一起的扭摆周期与单摆周期,而在自由连续摆的情况下,因这两种振动都是有规振动,它们周期迭加的规律性十分明显,可从通过数据处理消除单摆影响,大大提高扭摆周期稳定度。当然最理想的解决还是尽量消除附加振动本身。

(2) 采取真空措施减少气流、温度、湿度、外来振动等对扭摆的影响。这也是我们的扭摆不同于别人的地方。

气流对扭摆周期稳定度的影响非常大。美国和中国科学院物理研究所的扭摆都是放置在地下室或单独一间暗室里,那里气温日变化小于 0.1°C ,湿度稳定,气流及外界振动影响都比较小。此外,他们在扭摆外部加上气流屏蔽,Saxl 的电扭摆^[1]还加了电屏蔽。而我们目前暂时还只能把扭摆放在实验室大厅,外界干扰(如气流,机械振动等)影响很严重。现将整个扭摆密封在玻璃筒中,至少减少了空气流动的影响,即使没抽真空,精度也可提高三倍多。

抽真空后不但消除了气流影响,而且还部份进行了声隔离,减少了温度、湿度变化的影响,一定程度上弥补了由于没有地下室的隔振及恒温条件所带来的损失,使测量精度达到 Saxl 扭摆后期的精度^[2]。

抽真空的另一好处是减少阻尼延长了可测量时间。以我们现在使用的 $\phi 1.19$ 毫米,长 1970 厘米的 788# 合金丝为例,空气条件下阻尼时间为 20 小时 45 分,低真空条件下为 41 小时 40 分,延长一倍多。由于阻尼时间长,在日、月食发生的短时间内或在其他引力异常出现的局部时间范围里,摆自身的运动几乎可以视为等幅振动,于是外来作用对摆运动产生的异常效应会显得更加突出。我们还可以在日、月食前后采集对比数据时根据需要而把两次起动之间的时隙由 40 小时缩短为 24 小时,甚至 12 小时。如图 6 所示:12 小时之中,周期 84.140 秒,绝对变化量为 2 毫秒,如此之观察结果与中国科学院物理研究所扭摆等幅振动所得的观测结果(周期 33.144 秒,日变化 1.5 毫秒)应是可作符合比较的。我室与该所地处中国南北,若能用不同形式各有特点的扭摆探测到相同的物理现象,结论的可靠性将大大提高。

(3) 经过对比试验挑选了内耗小、 Q 值高、热弹性系数最小的恒弹性镍铬钛合金钢丝作为扭摆的吊丝。

扭摆吊丝的弹性模量是否恒定直接关系扭摆周期的稳定。根据理论上计算,无阻尼情况下,

$$\text{扭摆周期 } T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{C}}, \quad (1)$$

I 为摆盘转动惯量, $I = \frac{1}{2} mR^2$, 其中 m 为摆盘质量, R 为其半径; C 为吊丝的扭转模量,在圆形截面情况下, $C = \frac{1}{2} \pi G r^4 / l$, 其中 G 为金属丝的剪切模量, r 是丝半径, l 是其长度。

由此可算得扭摆圆频率之相对变化为

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{1}{2} (\gamma + 3\alpha_1)\Delta t - \alpha_2\Delta t, \quad (2)$$

其中 $\frac{\Delta G}{G} = \gamma\Delta t$, γ 为丝剪切模量温度系数, $\frac{\Delta l}{l} = \alpha_1\Delta t$, α_1 为金属丝热膨胀系数, $\frac{\Delta R}{R} = \alpha_2\Delta t$, α_2 为大理石热膨胀系数, Δt 为温度变化值.

再由扭波传递速度公式^[15],

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = 2lf, \quad (3)$$

ρ 为吊丝质量密度, $\rho = \frac{m}{\pi r^2 l}$, f 为丝的固有频率, 故得

$$\gamma = 2\beta_G - \alpha_1, \quad (4)$$

其中 $\beta_G = \frac{df}{f dt}$, β_G 是频率温度系数, 又叫热弹性系数, 将 (4) 式代入 (2) 式, 最后得

$$\frac{\Delta\omega}{\omega\Delta t} = \beta_G + \alpha_1 - \alpha_2. \quad (5)$$

欲要在每改变单位温度时 $\left|\frac{\Delta T}{T}\right| = \left|\frac{\Delta\omega}{\omega}\right| \sim 10^{-7}$, 则要求 $(\beta_G + \alpha_1 - \alpha_2) \sim 10^{-7}/^\circ\text{C}$, 最理想的是 $\beta_G = \alpha_2 - \alpha_1$, 通常 $\alpha_1 \sim 9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\alpha_2 \sim (4 - 10) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 为物质之固有性质. 所以只能寄希望于 β_G 的调整.

镍铬钛恒弹性合金便具有热弹性系数 β_G 可调整之优点^[16]. 不仅如此, 其 β_G 还可在较宽温度范围内 (0—70°C) 保持不变, 抗张强度也比较大, 蠕变小等, 这些优点决非随便找任何别种金属所能代替得了的.

表 1

合金号	剪切模量 G (千克/毫米 ²)	杨氏模量 E (千克/毫米 ²)	$\beta_G (\times 10^{-4}/^\circ\text{C})$ [0—70°C 范围基本平直]	杨氏模量 温度系数 $\beta_E (\times 10^{-5}/^\circ\text{C})$	热膨胀 系数 $\alpha (\times 10^{-6}/^\circ\text{C})$	品质因素 Q (高频 60 千赫下)	抗张强度 (千克/毫米 ²)	样品直径 ϕ (毫米)	冷加工 (4%)
802*	6880	19300	+19.5			1.7×10^3	大于 100	$\phi 5.5$	
803*	7190	19800	+ 9.0			2.7×10^3	大于 100	$\phi 5.5$	
792*	8400	17600	+10.0	+22.3	9.0	6.95×10^3	128	$\phi 1.20$	77
							110	$\phi 1.30$	73
							92	$\phi 1.38$	70
							77	$\phi 1.56$	62
793*	8190	18200	+27.0	+25.1	8.9	4.46×10^3	70	$\phi 1.56$	62
784*	7600		+22.7		8.9	3.20×10^3	131	$\phi 1.20$	77
785*	7700		+18.0		8.4	3.60×10^3	134	$\phi 1.20$	77
							76	$\phi 1.56$	62
788*	7500	18000	+6.3		9.2	4.40×10^3	133	$\phi 1.20$	77
801*	6920		+15.9		8.9	4.20×10^3	128	$\phi 1.20$	77
							107	$\phi 1.30$	73

冶金工业部钢铁研究院向我们提供了八类热弹性系数不同的弹性合金丝, 每类各有 3—5 种不同直径规格 (从 $\phi 1.19$ 毫米— $\phi 2.0$ 毫米)。丝是直拔出来经过氢退火, 以直态运输到广州。它们的性能参数见表 1。

由表 1 可知, 直径规格小的样品, 其抗张强度大于直径大的。(而屈服限度 σ_s 通常比 σ_b 小 20 千克/毫米²)。挑选直径较细的合金丝与意欲降低 $\left| \frac{\Delta T}{T} \right|$ 值的目的一致。

我们作了不同合金号恒弹性丝的阻尼时间测定试验, 结果见表 2。从表 2 中反映出 792# 与 788# 合金内耗较小, 故而阻尼时间长。这与表 1 中的 792# 与 788# 合金品质因素 Q 较高、热弹性系数 β_G 较低相一致。试验初步选择了 788#, $\phi 1.19$ 毫米合金丝。

表 2 阻尼时间测试结果

合金号	直径 ϕ (毫米)	长度(毫米) (为减去夹持部分后的 有效长度)	周期 (秒)	阻尼时间 (空气条件下)
803#	2.0	1977	29.6	4 小时 26 分
802#	2.0	1739	28.7	4 小时 12 分
792#	1.19	1822	81.5	18 小时 09 分
788#	1.19	1900	84.1	20 小时 45 分
785#	1.19	2033	88.4	16 小时 44 分
784#	1.20	1956	87.9	17 小时 14 分

值得说明一下的是, 表 1 提供的 β_G 都是 $\phi 2.0$ 毫米规格之样品在高频条件 (0.1MHz) 下的测量值, 而我们的扭摆则是在低频使用。美国 Huntington 公司作了这方面的实验^[16], 证明工作频率对剪切模量温度系数有显著影响。高频工作条件下 TEC (即 Thermoelastic Coefficient) 比低频时的 TEC 大 $20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ 。 $\text{TEC} = \frac{2df}{f dt} = 2\beta_G$, 故 $\beta_{G\text{高}}$ 比 $\beta_{G\text{低}}$ 高 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ 。这是美国材料的特性, 对扭摆有利, 但我们只能参考, 不能套用。故何种 β_G 最合适尚须经过试验。

(4) 光电接收系统的设计与改进

图 3 是我们装置的光电接收系统的电路方框图。

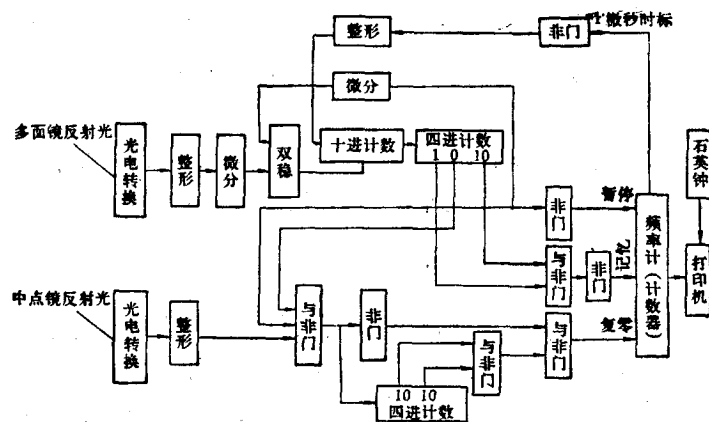


图 3

对光电转换电路来的讯号波形作了两次整形,把“钟形波”变成上升边缘非常陡的“矩形波”去触发计数,提高计时精度. 用反馈电路保证电路工作点的稳定,做到尽管扫过光电管的激光光束因强度服从高斯分布而强弱不同,但电路工作点基本不受影响. 我们给接收电路外加的金属壳电屏蔽既排除了电干扰亦起到减少背景光强度变化影响的作用.

在光电管前面放置光栏和透镜,其作用有二:一是聚焦,这有助于克服由于摆盘上下翘动造成的影响;二是经过聚焦,落到光电管的光斑变小,光强增大,这就有条件用光栏自左右横向把“○”形光斑切为窄条“□”形,这与把电讯号的钟形波整形成矩形波功用相同. 光栏窄缝现宽 0.3 毫米,经过试验还可以再缩窄一些.

此外,无论激光电源还是光电接收电路,计数器、打印机均用稳压供电确保仪器工作稳定.

四、实验数据与结果

表 3 与表 4 为部分实验数据.

表 3

测量次数	周期 $\bar{T}_{10}$ (秒)	测量次数	周期 $\bar{T}_{10}$ (秒)
91—100	84.14053	225—234	84.14024
101—110	84.14049	235—244	84.14021
111—120	84.14053	245—254	84.14023
121—130	84.14037	255—264	84.14014
131—140	84.14038	265—274	84.14005
141—150	84.14036	275—284	84.13989
151—160	84.14039	285—294	84.14013
161—170	84.14033	295—304	84.13984
171—181	84.14035	305—314	84.13988
182—192	84.14029	315—324	84.13974
193—204	84.14033	325—334	84.13980
205—214	84.14027	335—345	84.13969
215—224	84.14018	346—356	84.13970

表 3 数据采集时间为 7 月 16 日(农历六月十五日) 0:58.5—9:34.3, $\bar{T}_{10}$ 是指 10 个周期测量数的平均值.

表 4 数据采集时间为 7 月 6 日(农历六月初五) 11:15.8—13:17.5. 根据电路控制周期测量为半、半、全的特点, $T_{\frac{1}{2}}$ 是指两个半周期值的和, $T_{\frac{1}{4}}$ 对应全周期的测量值, $\bar{T}_2 = \frac{T_{\frac{1}{2}} + T_{\frac{1}{4}}}{2}$ 为相邻两个周期数的平均值.

为了更形象地从整体看变化趋势,绘制成实验曲线,见图 4 至图 6.

图 4 根据 7 月 2 日(农历六月初一)采集的数据绘制. 时间是 8:00—11:40, 气温 27.2—29.2℃, 真空度 10^{-1} 托, (真空机械泵在运转), 扭摆测量是 1 个周期 10 个测量数.

图 5 对应表 4 数据时间是 7 月 6 日(农历六月初五) 11:15.8—13:17.5, 气温 29.4—

表 4

时 间	$T_{全}$ (秒)	$T_{合}$ (秒)	$\bar{T}_2$ (秒)	数据处理
11:15.8	84.1513	84.1531	84.1532	$\left\{ \begin{array}{l} n=5 \\ \bar{T}=84.15332 \text{ 秒} \\ \sigma=7 \times 10^{-5} \text{ 秒} \\ \frac{\Delta T}{T}=8 \times 10^{-7} \end{array} \right.$
11:18.5	84.1516	84.1551	84.1534	
	84.1525	84.1542	84.1533	
	84.1532	84.1536	84.1534	
	84.1537	84.1530	84.1534	
11:29.8	84.1545	84.1524	84.1534	$\left\{ \begin{array}{l} n=5 \\ \bar{T}=84.15339 \text{ 秒} \\ \sigma=7 \times 10^{-5} \text{ 秒} \\ \frac{\Delta T}{T}=8 \times 10^{-7} \end{array} \right.$
	84.1544	84.1524	84.1534	
	84.1546	84.1520	84.1533	
	84.1549	84.1520	84.1535	
	84.1549	84.1517	84.1533	$\left\{ \begin{array}{l} n=5 \\ \bar{T}=84.15336 \text{ 秒} \\ \sigma=1 \times 10^{-4} \text{ 秒} \\ \frac{\Delta T}{T}=1 \times 10^{-6} \end{array} \right.$
	84.1551	84.1519	84.1535	
	84.1548	84.1521	84.1534	
	84.1542	84.1524	84.1533	
	84.1542	84.1523	84.1533	$\left\{ \begin{array}{l} n=5 \\ \bar{T}=84.15321 \text{ 秒} \\ \sigma=8 \times 10^{-5} \text{ 秒} \\ \frac{\Delta T}{T}=9 \times 10^{-7} \end{array} \right.$
	84.1540	84.1525	84.1533	
12:06.2	84.1540	84.1526	84.1533	
	84.1534	84.1531	84.1533	
	84.1532	84.1532	84.1532	$\left\{ \begin{array}{l} n=5 \\ \bar{T}=84.15303 \text{ 秒} \\ \sigma=7 \times 10^{-5} \text{ 秒} \\ \frac{\Delta T}{T}=8 \times 10^{-7} \end{array} \right.$
	84.1531	84.1533	84.1532	
	84.1527	84.1535	84.1531	
	84.1527	84.1536	84.1531	
	84.1525	84.1535	84.1530	$\left\{ \begin{array}{l} n=5 \\ \bar{T}=84.15303 \text{ 秒} \\ \sigma=7 \times 10^{-5} \text{ 秒} \\ \frac{\Delta T}{T}=8 \times 10^{-7} \end{array} \right.$
	84.1526	84.1536	84.1531	
	84.1525	84.1535	84.1530	
	84.1523	84.1536	84.1529	

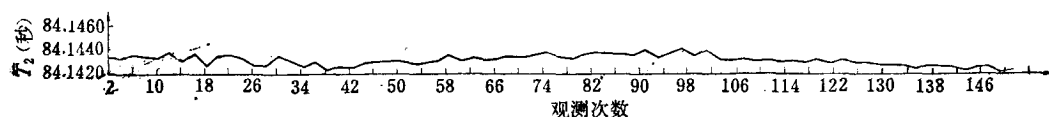


图 4

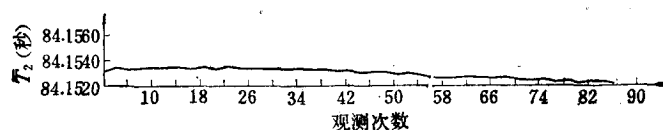


图 5

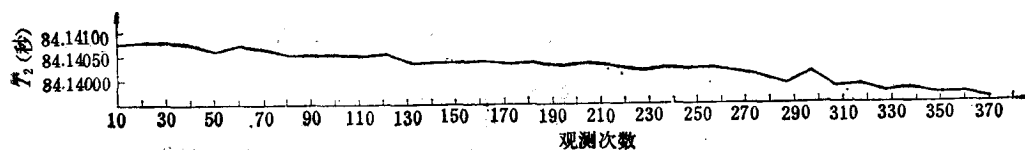


图 6

29.9℃, 未抽真空但有玻璃罩筒作气流屏蔽, 一周期 18 个测量数.

图 6 对应表 3 数据, 时间是 7 月 16 日 (农历六月十五日) 0:58.5—9:34.3, 气温 31.4—32℃, 真空度稳定在 0.9 托附近.

综合 6 月 24 日—7 月 16 日实验数据得到本扭摆精度指标: 测量有效数字 6—7 位, 数据方差 σ 一般在 1×10^{-4} 秒, 周期相对误差 $\Delta T/T$ 普遍为 1×10^{-6} — 2×10^{-6} , 最佳状况可达 8×10^{-7} . 比 Saxl 1964 年发表其关于扭摆的第一篇论文时的装置精度提高 100 倍, 比其运转 17 年 (1953—1970 年) 经一再改进的扭摆精度提高 10 倍.

五、结 论

从目前的实验结果看, 我们为提高扭摆精度所采取的改进措施, 即减少起动次数, 增加真空条件, 挑选恒弹性吊丝及改进光电接收等是切实有效的, 初步达到了预期的设计精度指标. 而且其中还大有潜力可挖, 只要沿着上述方向再做些工作, 比如改进起动方式, 增加隔振措施, 进一步发挥抽真空的优越性. 另外, 通过在扭摆频率范围作 β_G 的测定试验找出 $\beta_{G_{\text{真}}}$ 与 $\beta_{G_{\text{表}}}$ 的关系, 进一步选择更理想的吊丝, 则在现有设备基础上把扭摆精度 $\left(\frac{\Delta T}{T}\right)$ 稳定提高到 10^{-7} 数量级估计是不成问题的.

其次, 由于我们把 Saxl 类型的间断摆变成了阻尼条件下的连续摆, 摆的运动有了许多新的特点. 目前已发现随扭摆振幅衰减, 周期变短的规律 (如图 6). 估计这个问题应从弹性丝的非线性效应即对虎克定律的二级修正方面着眼考虑. 在弹性限度内增大起始扭转角度虽有使扭转运动远超过单摆附加振动的影响这一点好处 (见图 5), 但同时带来振幅衰减愈快之后果, 增大了扭摆周期的绝对变化量.

还有扭摆周期与单摆周期的迭加规律, 考虑到单摆运动初条件的随机性及单摆摆动平面受地球自转的影响, 这里尚有许多问题待深入研究.

参 考 文 献

- [1] E. J. Saxl, *Nature*, **203** July 11 (1964), 136.
 - [2] E. J. Saxl, M. Allen, *Phys. Rev. D*, **3**(1971), 823.
 - [3] 1980 年 10 月 8 日, Dr. Blair 在美国 CIT 给陈嘉言的信.
 - [4] G. Majorana, *Phil. Mag.*, **39**(1920), 488.
 - [5] В. В. Радзиевский, *БЮЛЛ. ВАГО.*, №. 31(38) (1962), 3.
 - [6] R. Tomaschek, *Nature*, **176**(1955), 937.
 - [7] T. Okudo, *Geophys. Journal*, **11** (1957—1958).
 - [8] Н. Л. Грузинский, 等, *Вест. Моск. Ун-Та, Физ-Астрон.*, (5) (1962), 46.
 - [9] 中国科学院 北京天文台, 日全食时的引力效应.
 - [10] 王榴泉等, *科学通报*, **23**(1978), 477.
 - [11] M. Allais, *Comptes Rendus*, **245**(1967), 1697, 15.
 - [12] И. И. Кагалавникова, *Бюлл. Всес. Астрон. гео. общес.*, **31**(1962), 15.
 - [13] 张平华等, *物理学报*, **29**(1980), 1479.
 - [14] E. J. Saxl, M. Allen, *J. Appl. Phys.*, **40**(1969), 2449.
 - [15] S. Spinner etc., *Proceeding American Society for Testing Materials*, **61**(1961), 1221.
 - [16] "Ni-Span-C Alloy 902" Copyright 1963 by the International Nickel Company, Inc., Now Huntington Alloys Inc., Second Edition. (1975).
- (注: Ni-Span-C 是注册商标. 美国 Saxl 的扭摆就是用这种合金丝)

THE INVESTIGATION OF THE PRECISION OF TORSIONAL PENDULUM

Chen Xiang-xiang Chen Jia-yan Guan Ton-ren

(Gravitational Physics Laboratory, Zhongshan University Guangzhou)

ABSTRACT

Our pendulum disk is made of natural marble. The suspended wire is made of isoelastic alloy which has been chosen through repeated testing for its high quality factor, low internal exhaustion and almost zero thermoelastic coefficient. A low-damping free oscillating pendulum is set up instead of the discontinuous pendulum which is electro-magnetically attracted against a stop once every swing. Thus artificial disturbance to the pendulum is reduced. The pendulum is put in a vacuum-tight chamber to avoid environmental disturbance and lengthen the damping time. Besides, a multi-faceted reflective mirror ring is located at the centre of the pendulum disk. As a result, the number of times of measurement is increased from one to four or more within a certain period. This makes it possible to numerically solve the damping oscillating equations $\theta_i = A \exp(-\frac{t_i}{\tau}) \sin(\omega t_i + \phi)$ ($i = 1, 2, 3, 4$) by means of

computer. Therefore, not only can variations of period be measured directly, the variations of amplitude A , damping time τ and initial phase ϕ can also be calculated. Some modifications have been made on the system of light-electric acceptor. Now, the precision detecting period with our torsional pendulum is one-hundred times higher than that of Dr. Saxl's as reported in his first article concerning pendulum in 1964, and ten times higher than the precision of his pendulum in 1970, which is the result of seventeen years of efforts in making improvements. The effective numbers obtained with our setup have reached six to seven figures, and the relative error of period is 2×10^{-6} , or even 8×10^{-7} in the best case. Basically, the desired requirements have been satisfied. This will provide the possibility of detecting gravitational abnormal phenomena and making a distinction between the frequency fluctuation during a long period of time and that during a short period of time.