

SSQ-II 双轴气泡倾斜仪及其调和分析

戴 邦 雯

(上海市地震局)

摘 要

SSQ-II 双轴气泡倾斜仪，在全国倾斜仪器比测中，其灵敏度达 10^{-9} 量级，漂移量小，固体潮汐记录清晰， M_2 波 γ 值精度能够满足我国 I 类台的要求。

根据 1983 年 12 月—1984 年 5 月，共 6 个月在徐州比测的资料，用维涅第科夫法进行调和分析， M_2 波的 $\Delta\gamma$ 达 0.004， S_2 波的 $\Delta\gamma$ 为 0.009。

关键词 倾斜仪；固体潮汐；调和分析

一、SSQ-II 双轴气泡倾斜仪简介

1. 传感器

传感器分上盖与容器两部分，上盖是 K，光学玻璃，呈圆形，其内表面为凹球，并溅射光刻四条正交的铂电极和相应的引出极。容器底部溅射一圆形铂电极，其中心和铂管紧密接触。上盖与容器，铂管与容器中心用低熔点玻璃及树脂胶封接，铂管可充导电液，充好后用铂金芯封口。在传感器内留一个气泡，当传感器处于水平位置时，导电液覆盖四条电极面积相等。

2. 电气部分

当仪器倾斜时气泡移动，使其中一个电极上的导电液覆盖面积减小，另一个电极上覆盖面积增加。由于电极与公共电极之间电阻的变化，通过交流电桥引起输出电压的变化，经交流放大、解调、滤波，输出模拟的倾斜量；接数字电路，可输出数字量并传输出去。

3. 机械部分

基座用不锈钢制成（直角三角形）X，Y 方向可调整置平。

4. 模拟量的输出

接 XWC 系列电子电位差计进行模拟记录。

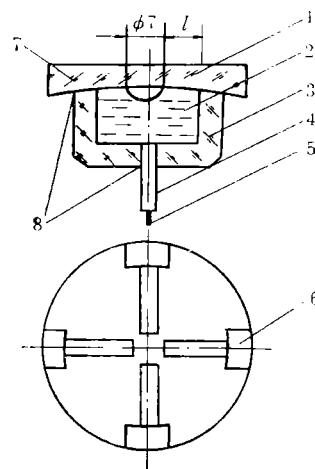


图 1 SSQ-II 双轴气泡构造图
1—气泡 2—导电液
3—容器 4—铂金管
5—铂金芯 6—电极
7—上盖 8—低熔点玻
璃及树脂胶

1986 年 11 月 18 日收到初稿。1987 年 5 月 20 日决定采用。

5. 标定

将国家地震局地震仪器厂的胀盒标定器改装，使其可沿东西和南北方向分别进行标定。

6. 制造与工艺

- (1) 模拟放大电路用固定电阻记录，日漂移量小于 1.4 mV
- (2) 传感器上盖，研磨成毛面。 $R = 335.78\text{mm}$, ΔN 要求在 $0.1\text{--}0.2$ 光圈。
- (3) 导电液采用甲醇及氯化钾，含水量小于 0.2% ，其粘度为 $5.93 \times 10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- (4) 用 7892# 低熔点玻璃作为封接材料，封接前后局部误差 ΔN 的变化在 $0.3\text{--}0.5$ 光圈，传感器的气密性好，真漏率可达 $10^{-7} \text{ Pa}\cdot\text{L}/\text{s}$ 。7892# 低熔点玻璃具有良好的化学稳定性，与导电液的化学反应仅为 ppm 级。
- (5) 为了使传感器具有良好的气密性，我们在 7892# 低熔点玻璃封接的基础上，再用 E-7 树脂胶封接一次，E-7 胶有良好的耐热性和耐有机溶剂性，能在 $80^\circ\text{--}100^\circ\text{C}$ 固化，热应力小。传感器上引出极是用双组份导电胶粘剂——40# 导电胶，它的导电性能好。

二、传感器的设计与原理

1. 电压灵敏度

传感器上盖溅射有 4 个铂电极和容器中圆形铂电极分别构成四个电阻，其中横向的一对电阻为 R_{x_1}, R_{x_2} ，纵向的一对电阻为 R_{y_1}, R_{y_2} 。当气泡居中时，传感器处于水平状态， $R_{x_1} = R_{x_2} = R_{y_1} = R_{y_2} = R_0$ ，仪器中采用 $R_B = 7.96\text{k}\Omega$ 为导电液的等效电阻相匹配，线路如图 2 所示。

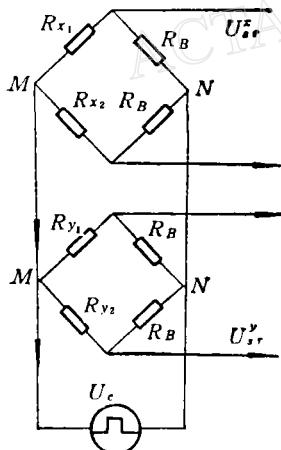


图 2 传感器原理图

U_c 为一方波激励电源，频率为 1kHz ，幅值为 1V 。

当气泡倾斜时，假定

$$dl = -dl', \quad dR = -dR' \quad (1)$$

这时一端为 $R_0 + dR$ ，另一端为 $R_0 - dR$

$$\begin{aligned} U_{xx'} &= \frac{U_c(R_0 + dR)}{R_0 + dR + R_B} - \frac{U_c(R_0 - dR)}{R_0 - dR + R_B} \\ &= \frac{2R_B dR U_c}{(R_B + R_0)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)表明，电桥的输出与激励电压 U_c ，电阻变化 dR 成正比。通过交流电桥，可以把微小角度的变化转变为输出的电压信号。当角度不大时，电桥输出信号 dU 与传感器倾角 $d\theta$ 呈线性关系。

$$K = dU/d\theta[\text{mV}/('')] \quad (3)$$

K 为传感器的电压灵敏度，其定义为：电桥在 1 伏激励电压的作用下，每角秒倾斜输入时，传感器输出的电压毫伏值。电压灵敏度 K 与传感器上盖曲率半径、气泡大小、导电液覆盖长度、导电液的水平电阻 R_0 、匹配电阻 R_B 、激励电位 U_c 等因素有关。

$$K = \frac{dU}{d\theta} = U_c \cdot \frac{R_B + R_0}{(R_B + R_0)^2} \cdot \frac{r}{l} \left(1 + \frac{2l \sin \beta}{L} \right) \times 4.85 \times 10^{-3} \quad (4)$$

本仪器设计参数为: 曲率半径 $r = 335.78 \text{ mm}$, 气泡直径取 7.6 mm , 容器高为 4.5 mm , 内腔直径为 12 mm , $R_B = R_0 = 8000 \Omega$, $l = 2.2 \text{ mm}$, $L = 5.89 \text{ mm}$, $\sin \beta = 0.645$, 当 $U_c = 1 \text{ V}$ 时, 将以上各参数代入(4)式得:

$$K \leq 0.274 \text{ mV/('')}$$
 (5)

从(4)式可知, 若 R_B , R , r , L , l , β 为常数时, 则电压灵敏度 K 为常数, 即 $dU = K d\theta$. 当增加曲率半径 r 、激励电压 U_c , 减少导电液与铂电极的接触长度 l , 及公共铂电极到气泡边缘的长度 L , 则电压灵敏度 K 增加. 但激励电压 U_c 过高会影响导电液的寿命; 缩短 L 、增大气泡直径(即减小 l), 又会使传感器的线性变差.

2. 幅频与相频特性

当摆动较小时, 传感器的每一个轴可近似地看作是过阻尼的单摆, 其动态特性是非线性的.

如果传感器受到回转运动(ϕ)及移动(X)的强迫振动时

$$\begin{aligned} \delta(s) &= \frac{r \left(M_b s^2 - M_b \frac{g}{r} \right) \phi(s) + M_b s^2 X(s)}{M_c s^2 + q_D s + \frac{M_b g}{R}} \\ &\equiv \frac{r \left(s^2 - \frac{g}{r} \right) \phi(s) + s^2 X(s)}{\frac{M_c}{M_b} s^2 + \frac{q_D}{M_b} s + \frac{g}{R}}^{[1]} \end{aligned} \quad (6)$$

对于曲率半径 $R = 335.78 \text{ mm}$ 的传感器, 其自振频率与自振周期为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{R}} = 5.4 \text{ rad/s}$$
 (7)

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = 1.16 \text{ s}$$
 (8)

传感器对回转运动的幅频与相频特性^[2]:

$$A_{\phi}(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (11\omega)^2}}$$
 (9)

$$\varphi_{\phi}(\omega) = \operatorname{tg}^{-1} \frac{11\omega}{\omega_n^2 - \omega^2}$$
 (10)

同样, 可得传感器对移动的幅频和相频特性^[2]:

$$A_x(\omega) = \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (11\omega)^2}}$$
 (11)

$$\varphi_x(\omega) = \operatorname{tg}^{-1} \frac{11\omega}{\omega_n^2 - \omega^2}$$
 (12)

我们曾在上海市地震局振动台上, 对传感器幅频特性的测试, 其结果如图 3 所示. 由于二阶系统的系数不是常量, 可能阻尼系数与 ω_n 有关, 所以理论上移动的幅频特性与

实验上的移动幅频特性是不同的。

3. 双轴气泡倾斜仪存在的问题与电子水准器的研制

Cooper^[1] 推导公式时有一个假定, 即当气泡位移 $dl = -dl'$ 时, $dR = -dR'$. 但实际上 dR 不等于 $-dR'$. 我们用 DDS-11 电导率仪在小角度检定仪上每隔 $2'$ 读数一次, 用 80-11 传感器测试, 结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出, dR 不等于 $-dR'$, 而且随着位移的增加而增大。

根据我们的研究, 当气泡移动时, 虽然 $dl = -dl'$, 但是公共电极与 $-dl'$ 一端所减少的导电液的体积比 dl 一端增加的体积要多, 而造成 dR 不等于 $-dR'$. 此种仪器记录固体潮效果好。因为固体潮汐变化范围小, 每日变化约百分之几角秒。本传感器在小角度工作的情况下, 线性是好的。

我们已研制出来的电子水准器样机, 是一种新型结构的传感器。当气泡移动, $dl = -dl'$ 时, 使 $dR = -dR'$.

表 1 观测值 R 随角度的变化

角 度	观测值 R ($k\Omega$)	dR ($k\Omega$)	观测值 R ($k\Omega$)	$-dR'$ ($k\Omega$)	$dR + (-dR')$ ($k\Omega$)
0'	8.13	0.57	8.06	0.40	0.17
2'	8.70	0.63	7.66	0.40	0.23
4'	9.33	0.94	7.26	0.45	0.19
6'	9.97	0.98	6.81	0.38	0.60
8'	10.95	1.05	6.43	0.31	0.74
10'	12.10	1.10	6.12	0.30	0.80
12'	13.20	1.70	5.82	0.24	1.46
14'	14.90		5.58		

此外, 双轴气泡倾斜仪是利用电桥输出为零时, 即认为气泡已居中。实际上, 工艺制造与相应的电路不可能做得完全对称。这样, 电桥输出为零时, 气泡并未居中, 即双轴气泡倾斜仪没有利用液重力水准面这一重要特性。

电子水准器基本上可以解决以上存在的问题。这样, 液体摆传感器的线性度, 就会提高, 用途也更为广泛。

三、线性测试与标定

传感器的线性度可用下式表示:

$$\text{线性度} = \frac{|\Delta K_i - \bar{\Delta K}_i|}{\bar{\Delta K}_i} \times 100\% \quad (13)$$

\bar{K}_i 是传感器倾斜 $\Delta\theta$, 输出电压的平均值。下表列出的是,为了得到某一气泡传感器线性度而进行测试的结果。

表 2 线性测试

输入 $\theta(^{\circ})$	X 输出电压 (V)					Y 输出电压 (V)					
	$k_{往}$	$k_{返}$	K_i	ΔK_i	$ \Delta K_i - \bar{K}_i $	$k_{往}$	$k_{返}$	K_i	ΔK_i	$ \Delta K_i - \bar{K}_i $	
-24	-5.796	-5.921	-5.809	1.536	0.030	-4.103	-4.066	-4.084	1.581	0.038	
-16	-4.200	-4.346	-4.273	1.611	0.045	-2.546	-2.460	-2.503	1.561	0.058	
-8	-2.601	-2.723	-2.662	1.668	0.102	-1.003	-0.880	-0.942	1.670	0.051	
0	-0.952	-1.036	-0.994	1.552	0.014	0.643	0.814	0.728	1.716	0.097	
+8	0.590	0.527	0.558	1.504	0.062	2.345	2.544	2.444	1.674	0.055	
+16	2.070	2.055	2.062	1.522	0.044	3.988	4.247	4.118	1.510	0.109	
+24	3.603	3.566	3.584			5.504	5.752	5.628			
平均值				1.566	0.050	平均值				1.619	0.068
仪器总电压灵敏度 196mV/('')						仪器总电压灵敏度 202mV/('')					
传感器电压灵敏度 0.245mV/('')						传感器电压灵敏度 0.254mV/('')					
线性度 3.2%						线性度 4.2%					

下面列出了两种型号倾斜仪测试的结果。

表 3 气泡传感器静态特性一览表

型 号	气泡编号	传感器灵敏度 mV/('')		仪器电压总灵敏度 mV/('')		线性度(%)		放大倍数	激励电压
		X	Y	X	Y	X	Y		
SSQ-II 型 双轴气泡倾斜仪	80-08	0.250	0.258	199	206	3.5	1.8	797	1V
	80-13	0.198	0.208	158	166	2.5	4.0		
	80-15	0.287	0.269	229	214	6.1	5.5		
	80-17	0.240	0.235	191	187	4.8	4.3		
	82-42	0.245	0.254	196	202	3.2	4.2		
	85-71	0.256	0.257	204	205	3.8	4.3		
	平均	0.246mV/('')		196mV/('')		4.0%			
TM-1B 型 双轴钻孔式 倾斜仪	207	0.223	0.236	196	208	8.1	5.4	800	1.1V
	245	0.218	0.222	192	195	3.1	7.3		
	平均	0.225mV/('')		198mV/('') (当激励 电压 1V 时为 180 mV/(''))		6.0%			

将国家地震局地震仪器厂胀盒标定器安放在两个可调节的脚螺旋下。改装标定器，

使东西、南北方向能够分别进行标定,计算公式为:

$$C = \frac{\phi}{\delta} = \frac{\alpha \Delta H}{\delta s} \quad (14)$$

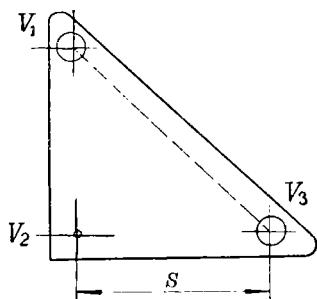


图 4 脚螺旋位置示意图

C —格值; ϕ —胀盒升高时,气泡倾斜的角度;
 δ —倾斜 ϕ 角时,记录笔头在电子电位差计上的位移;
 α —胀盒常数; s —固定脚螺旋到可调节脚螺旋间距离。

标定算例: 双轴气泡倾斜仪(气泡编号 80—23),安装在余山地震台基岩墩上,先后在 V_1 , V_3 脚螺旋下面(见图 4),放一 43# 胀盒 ($\alpha = 0.7023 \times 10^{-6}$), $\Delta H = 55\text{cm}$, EW 向衰减 2.817 倍后为 59.1 格(观测固体潮时,未衰减), XWC-300 型全量程为 40 mV (100 格)。

$$\varphi = \frac{\alpha \Delta H}{s} \rho'' = 0.2845('')$$

$$C_{\text{东西}} = \frac{\varphi}{\delta_{\text{东西}}} = \frac{0.2845}{2.817 \times 59.1} = 1.71\text{m('')/格}$$

表 4 列出在余山地震台及南昌中心地震台标定的结果。

表 4 在两个台站上标定的结果

记录地点	记录方式	格 值	
		EW	NS
余山地震台	XWC-200 型 (±20mV)	1.71m('')/格	1.66m('')/格
南昌 中心地震台	XWC-200 型 (0—10mV)	7.75m('')/格	6.25m('')/格

四、徐州试验资料及调和分析

1. SSQ-II 型双轴气泡倾斜仪,在参加全国倾斜仪“徐州比测”时,于 1983 年 8 月 31 日开始安装在徐州地震台,9 月 10 日正式记录。为防止湿度的影响,对仪器的本体及模拟放大器进行腊封。

(1) 胀盒标定器标定

格值: EW 1.14m('')/格

NS 1.39m('')/格

(2) 漂移量 (EW)

1984 年 1 月份 2.0 m('')/d

1984 年 2 月份 2.0 m('')/d

1984 年 3 月份 5.9m('')/d

1984年4月份 $4.0 \text{ m}(\text{''})/\text{d}$

1985年5月份 $5.9 \text{ m}(\text{''})/\text{d}$

2. 1984年5月份 EW 向及 NS 向固体潮汐观测记录及固体潮理论值(见图5、图6)。

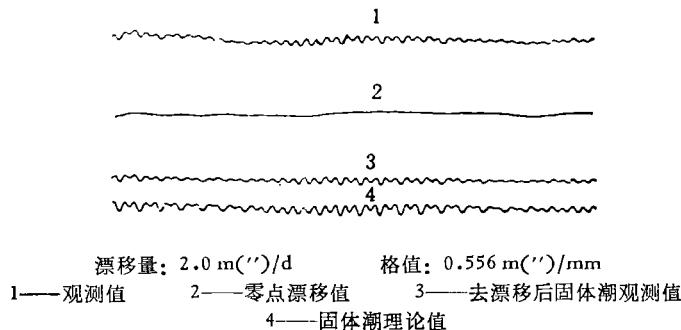


图5 SSQ-II 双轴气泡倾斜仪 NS 向记录(1984年5月)(徐州地震台)。

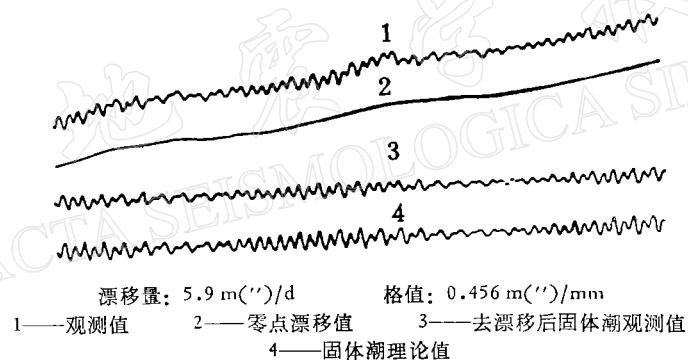


图6 SSQ-II 型双气泡倾斜仪 EW 向记录(1984年5月)(徐州地震台)。

3. 对1984年3月和5月EW向的M波,用维涅第科夫法计算结果如下表所示:

表 5

时 间 (年.月)	方 向	M ₂ 月 的 主 半 日 波			
		γ	$\Delta\gamma$	ΔK	ΔK
1984.3	EW	0.685	± 0.0118	4.2°	± 0.17
1984.5	EW	0.694	± 0.0118	5.1°	± 0.017

注: 1.此表计算者为武汉地震研究所;

2.国家地震局倾斜I类台站 M₂ 波的 $\Delta\gamma < \pm 0.022$ 。

4. 根据 SSQ-II 双轴气泡倾斜仪在徐州地震台试验的资料(1983年12月—1984年5月),进行全潮汐位(363个分波)展开的维涅第科夫法的调和分析结果如下表所示:

表 6

波 名	实测值	理论值	潮汐因子 γ	相位差 K	$\Delta\gamma$	ΔK
Q_1	0.389650	0.700227	0.556462	4.082625	0.157075	16.179810
O_1	2.543320	3.657249	0.695419	12.164150	0.031741	2.617272
M_1	0.496388	0.287581	1.726079	5.953452	0.306357	10.168370
P_1	1.540325	1.702104	0.904953	10.900350	0.072805	4.591691
S_1K_1	4.313676	5.143376	0.838686	8.744781	0.023021	1.569208
J_1	0.287995	0.287581	1.001440	-15.916840	0.370630	21.184770
OO_1	0.197305	0.157568	1.252186	-36.213020	0.542688	24.832610
$2N_2$	0.184207	0.330331	0.557642	-4.865275	0.098811	10.175440
N_2	1.705584	2.495932	0.683345	4.298520	0.021059	1.763269
M_2	9.204239	13.036530	0.706035	4.071207	0.004282	0.347634
L_2	0.273940	0.368518	0.743357	12.523540	0.182301	14.049960
S_2	4.575183	6.065117	0.754344	0.670667	0.009045	0.677334
K_2	1.194398	1.650651	0.723592	-0.896895	0.029383	2.323844

现将在斯克累克斯,用 VM 水平摆 No. 31 (EW) 1964—1965 年记录的分析结果^[3]列于下表:

表 7

波 名	γ	K	均 方 差	
			$\Delta\gamma$	ΔK
K_1	0.744	+6.48°	0.014	0.29
O_1	0.678	+10.04°	0.019	0.40
P_1	0.706	+15.13°	0.044	0.92
Q_1	0.744	+17.76°	0.100	2.04
J_1	0.558	+11.81°	0.230	4.70
M_1	0.580	-80.90°	0.370	7.58
OO_1	0.782	+16.04°	0.413	8.47
S_1	1.967	-62.89°	2.663	54.50
M_2	0.922	+4.82°	0.004	0.09
S_2	0.837	+1.02°	0.009	0.19
N_2	0.898	+7.77°	0.022	0.45
K_2	0.836	+2.73°	0.032	0.66
$2N_2$	0.957	-8.11°	0.110	2.26
L_2	1.234	+25.66°	0.174	3.56

比较上面所列的两个表可看出, M_2 波的 $\Delta\gamma$ 均为 0.004, 说明 SSQ-II 型双轴气泡倾斜仪所记录的固体潮曲线与国际上公布的资料水平相当.

国内地震台站一般使用的石英摆倾斜仪、水管倾斜仪、金属水平摆倾斜仪, 其周期为 15 秒和 100 秒左右. SSQ-II 双轴气泡倾斜仪其传感器周期仅为 1 秒, 可以记录的频带较宽, 所含地震前兆信息较丰富. 所以 SSQ-II 双轴气泡倾斜仪的记录资料, 同时可以进行潮汐及非潮汐与地震关系的研究.

本文得到朱顺之高级工程师以及杨军、段华深的支持和帮助, 在此表示感谢.

本项工作得到地震科学联合基金资助。

参 考 文 献

- [1] ALLA Guidance, 1970. Control and Flight Mechanics Conference Santa Barbara California/August 17—19.
- [2] 戴邦雯, 1985. SSQ-II 双轴气泡倾斜仪及其在南黄海 6.2 级地震的前兆信息. 中美地壳形变与地震学术讨论会论文集.
- [3] Venedikov, A. P., 1980. 对任意长度的固体潮记录资料进行分析的方法. 固体潮译文集, 科学技术文献出版社.

SSQ-II BIAXIAL BUBBLE TILTMETER AND HARMONIC ANALYSIS

DAI BANGWEN

(Seismological Bureau of Shanghai)

Abstract

The SSQ-II biaxial bubble tiltmeter was successful in taking part in the comparison test of tiltmeters from all parts of China at the Xuzhou Observatory.

Its sensitivity reaches the order of 10^{-9} , and the zero drift is rather small. It can clearly record the crustal tide. The γ value of M_2 wave can meet the requirements of first class observatories in China.

By using the data of six months (1983.12—1984.5) from comparison test at the Xuzhou observatory some harmonic analysis with the Venedikov method was carried out. The result is that the $\Delta\gamma$ value of M_2 wave reached 0.004, while that of S_2 wave reached about 0.009.