第 15 卷 3 期　　地 震 学 报　　Vol. 15, No. 3
1993 年 8 月 (353－359)　　ACTA SEISMOLOGICA SINICA　　Aug., 1993

SSQ-1 型数字磁带记录水平摆式倾斜仪*

朱　虎　　冯海英

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

高法成　　汤忠国　　欧阳飙

(中国北京 100093 国家地震局香山地震台)

摘　要

SSQ-1 型数字磁带记录水平摆式倾斜仪是测量地倾斜变化的高灵敏度仪器. 它采用 Zöllner 双吊丝悬挂的石英水平摆接收地倾斜信号,通过电涡流传感器把摆端的位移变成电信号输出,由袖珍计算机采集数据并进行数字显示、数字打印及数字磁带记录,由笔绘记录连续监测仪器的工作情况. 仪器的格值用胀盒——水银杯产生的已知倾角,通过计算机进行标定,格值为 0.3－0.5 m(″)/mV

经台站试验,白家疃台东西向固体潮观测结果为

$r(O_1)$: 0.6490 ± 0.0179,　$\alpha(O_1)$: − 3.83° ± 1.58°

$r(K_1)$: 0.8049 ± 0.0128,　$\alpha(K_1)$: 1.40° ± 0.90°

$r(M_2)$: 0.6699 ± 0.0040,　$\alpha(M_2)$: − 0.27° ± 0.34°

$r(S_2)$: 0.7316 ± 0.0075,　$\alpha(S_2)$: 2.83° ± 0.58°

$r(M_3)$: 0.8497 ± 0.0964,　$\alpha(M_3)$: 1.61° ± 6.51°

关键词　石英水平摆;电涡流传感器;数字磁带记录器;胀盒;固体潮

1. 引　　言

SQ-70 型照相记录的石英水平摆式倾斜仪因摆系具有放大作用,且其支架、吊丝、摆杆都用透明的熔凝石英经高温烧焊成一体,故仪器灵敏度高、稳定性好,并由于仪器结构简单,安装使用都较方便. 这种仪器在国内外不少台站取得了长期可靠的观测资料,使我国地倾斜观测在监测地壳形变、探索地震预报、研究固体潮及震源机制等方面取得了可喜的成果,并引起国内外有关学者的注意.

虽然照相记录有许多优点:记录没有摩擦,也不产生漂移,能最真实地反映摆的运动情况. 但照相记录必须经过洗相方能显示,量图、抄数要花费大量的手工劳动,不仅容易引

* 国家地震局地球物理研究所论著 93A0026.
1992 年 3 月 14 日收到本文初稿,1992 年 11 月 21 日决定采用.

http://www.dizhenxb.org.cn

进误差也容易出差错.随着分析研究工作的深入,近代电子技术的飞速发展,电信号传输技术和电子计算机的应用日益普遍,而现有的照相记录资料不能直接输入这些装置,这便影响了记录数据的快速传递及分析.因此,研究数字磁带记录的水平摆倾斜仪是十分必要的.

SSQ-1 型倾斜仪采用石英水平摆接收地倾斜信号.当地面发生倾斜时,摆杆绕旋转轴偏转,用电涡流传感器把摆端的位移变成电压信号输出,其中一路经过滤波后输入模拟记录器进行笔绘记录,另一路经 A/D 变换后输入微机数字采集器,由微机控制,完成定时采集数据、格值常数标定及数据运算等工作,每次采集完数据后,便进行数字显示及数字打印,每天的 23 时工作结束后,还打印出东西向和南北向两个分量的日均值,同时由磁带记录全天的数据,以便于分析处理.仪器的结构原理如图 1 所示.仪器的整机灵敏度如下.

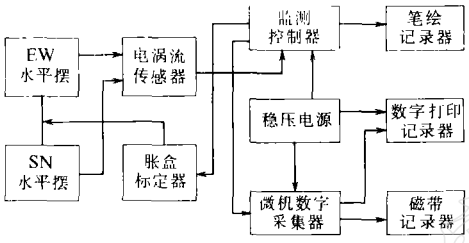

图 1 SSQ-1 型倾斜仪结构原理图

笔绘记录格值:0.3—0.5 m(″)/mm;数字记录格值:0.3—0.5 m(″)/mV(1 mV 为一个字码,采集到 0.1 mV,即 0.1 字码).

2. 石英水平摆及有关参数

水平摆是整套仪器的核心,由它检测地倾斜变化.本仪器采用 Zöllner 双吊丝悬挂的石英水平摆,其吊丝、摆杆、支架都用透明的熔凝石英烧焊成一体制成,石英材料的优良物性是众所周知的,没有一种金属能与之相比.水平摆的主要优点是摆系具有放大作用,地面很小的倾斜可以造成摆杆较大的偏转,照相记录的水平摆其摆系放大可达二万多倍.但是,若再加大摆系的放大则摆系便不稳定.数字记录的水平摆适当地利用摆系的放大而降低了电子部分的放大要求,从而提高了整个仪器的灵敏度和稳定性.水平摆的原理已有许多论著(朱虎和冯海英,1980;Melchior,1966;1978)无需赘述.我们根据水平摆的平衡方程和运动方程定出有关参数,计算方法虽然不难但较繁琐,这里不一一详细介绍.为了便于说明问题,我们把照相记录的水平摆参数作了对比,详见表 1.

表 1 水平摆的主要参数

主要参数	SQ-70 型照相记录倾斜仪	SSQ-1 型数字磁带记录倾斜仪
格值 η	1 m(″)/mm	0.5 m(″)/mV
折合摆长 l_0	70 mm	70 mm
摆的周期 T	76.3 s	12.9 s
ι 角	5.5″	336″
吊丝断裂力	0.558 N	1.177 N
摆系放大	2.06×10^4	573
光杠杆放大	142	
电子放大		1.02×10^4
整机放大	2.93×10^6	5.86×10^6

从表 1 中可以看出:在摆杆长度相同,即仪器大小相同时,数字倾斜仪的录敏度比光

http://www.dizhenxb.org.cn

记录倾斜仪要高一倍；数字倾斜仪的 ι 角比照相记录倾斜仪大 60 倍，ι 角越大，水平摆的稳定性越好；吊丝的断裂力提高了一倍，即吊丝的安全系数由原来的三倍提高到六倍，所以在数字倾斜仪中基本上消除了吊丝的自然断裂现象. 此外，数字倾斜仪不用 5 m 光杠杆，仪器室只要原来的五分之一便足够使用.

在水平摆本体的结构方面，为了与电涡流传感器配套，把摆重锤做成扁圆形，它一方面满足了电涡流传感器要求两个平行的平面，同时还给摆带来了适当的阻尼，有效地减小了摆的振幅，这种摆锤也有利于发现吊丝的接头焊接是否正确，防止了因上下吊丝焊接偏心而造成吊丝的扭曲或折断；夹摆器采用同一丝杆的正反向螺纹来夹固摆系，它除了搬运时固定摆杆外，烧焊石英吊丝时可以保证摆杆在初始平衡位置，在这位置吊丝的扭角为零，摆的漂移最小.

3. 电涡流传感器

电涡流传感器是本世纪 70 年代中发展起来的一种非接触传感器，因建立在电涡流原理上而得名，它主要由一只绕在框架上的扁平线圈与一只电容并联，构成并联谐振回路，线圈由高频讯号激励，在线圈周围产生高频交变磁场，当被测金属平板接近线圈时，由于交变磁场的感应，使与线圈中心垂直的金属平板产生了电涡流. 电涡流是以线圈为中心的同心环，它又产生跟原线圈磁场变化方向相反的磁场，由此减小原线圈的电感，距离越小，电感的减小量越大；从能量角度来看，在被测导体内存在着电涡流的损耗. 能量的损耗，使传感器的 Q 值和等效阻抗 Z 减低，因此当被测体与传感器的距离改变时，传感器的 Q 值、阻抗 Z、电感 L 发生变化，这样把位移量变成电量输出.（冯冠平等，1978；刘长恩，1980；谭祖根、陈守川，1980）.

我们研制的 DW-10 型传感器，用两只电感线圈与电容并联构成电桥两壁，由阻抗构成电桥的另外两臂，组成差动电桥，被测导体放在两只线圈的中间，移动导体则其输出电压发生变化，使位移信号变成电信号输出. 传感器的灵敏度、线性范围等与线圈的内外径，厚度等有关. DW-10 型电涡流传感器的主要技术参数为：

线圈外径 11mm；灵敏度 10—15 mV/μm；线性范围 ±0.5 mm；线性度 <±0.8%.

4. 数字记录器

数字记录器是把由传感器输出的模拟电压信号经多路开关、A/D 变换后变成数字信号记录下来. 它有控制时间进行数字采样、数据预处理、格值标定及数值运算等功能，最终以数码显示、数字打印及磁带记录等方式记录（南开大学电子工程系，1981）. 其主要技术性能为：(1)输入信号为两路慢变化电压信号，最大输入信号为±1.999V；(2)每小时整点采集数据，1 mV 为一个字码，可以采到 0.1 字码；(3)每次采集数据的时间长度为水平摆自振周期 T 的两倍或数倍，在这采集时间内每秒钟取 3 次数，求平均值，作为整点值记录下来；(4)每天的 23 时采集数据完毕后，打印出 24 小时的日平均值，打印出这天的记录曲线，并把全天的数据输入磁带记录；(5)通过操作键可以随时检查当时的输出电压信号、格值等有关常数. 也可以随时输入或修改这些常数；(6)通过标定求得仪器的格值后，它与采

http://www.dizhenxb.org.cn

集到的电压值相乘得到倾斜值，每张记录上都有格值，整点电压值及倾斜值等. 图 2 是打印记录图，原记录是用四种不同颜色的笔打印出来的，故十分醒目.

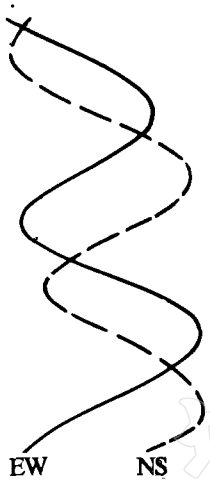

图 2 香山地震台的打印记录

SSQ-Xiangshan(香山)1991. 08. 13

NS:C/ 0. 47366 m(″)/mV U/0. 0 m(″)

EW:C/ 0. 48033 m(″)/mV U/0. 0 m(″)

HOUR	NS(mV)	m(″)	EW (mV)	m(″)
0	34. 4	15. 2	347. 1	166. 7
1	29. 2	13. 8	355. 8	170. 9
2	27. 7	13. 1	366. 6	176. 0
3	30. 6	14. 4	377. 4	181. 2
4	36. 6	17. 3	384. 2	184. 5
5	45. 2	21. 4	386. 4	185. 6
6	63. 3	25. 2	383. 0	183. 9
7	59. 9	28. 3	375. 4	180. 3
8	63. 1	29. 8	366. 5	176. 0
9	62. 7	29. 6	357. 6	171. 7
10	59. 1	27. 9	351. 0	168. 5
11	51. 4	24. 3	349. 5	167. 8
12	44. 0	20. 8	355. 5	170. 7
13	37. 9	17. 9	366. 1	175. 8
14	34. 0	16. 1	377. 2	181. 1
15	34. 3	16. 2	388. 2	186. 4
16	39. 5	18. 7	395. 3	189. 8
17	46. 8	22. 1	397. 9	191. 1
18	54. 3	25. 7	395. 0	189. 7
19	60. 6	28. 7	386. 7	185. 7
20	63. 5	30. 0	375. 4	180. 3
21	65. 1	30. 8	364. 2	174. 9
22	61. 9	29. 3	354. 6	170. 3
23	53. 6	25. 3	350. 0	168. 1
		22. 5		178. 2

5. 标定装置

本仪器用胀盒标定格值(朱虎、冯海英，1980，Verbaander，1962)，仪器的格值 η:

$$\eta = \frac{\alpha \cdot \Delta H}{S\Delta V} 206265$$

式中，α 为胀盒常数，ΔH 为水银杯的高差变化，S 为水平摆底脚支撑螺钉与旁移螺钉的间距，ΔV 为水银杯高度变化 ΔH 时相应的输出电压变化

令 $$\frac{\alpha \cdot \Delta H}{S} 206265 = M \qquad (\text{单位:m}(″))$$

则 $$\eta = \frac{M}{\Delta V} \qquad (\text{单位: m}(″)/\text{字码，即 m}(″)/\text{mV})$$

由于 α，ΔH，S 都是常数，所以 M 也是常数，可以预先存入计算机中. 通过步进电机驱动使水银杯停在转梁的最高位置或最低位置，逐次采得电压 $V_1, V_2, \cdots, V_7$，则

http://www.dizhenxb.org.cn

$$\Delta V = |(V_1 + V_3 + V_5 + V_7)/4 - (V_2 + V_4 + V_6)/3|$$

多次重复标定的中误差为±0.8%.

步进电机的步数及脉冲频率可以调节，故转梁的转速可以调节，若转速太快，摆会起振，太慢，则受潮汐变化影响，都会降低标定精度. 标定时在仪器室外遥控操作，自动采样、运算并打印出格值，其工作原理如图 3.

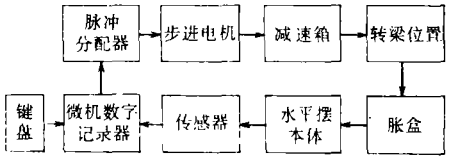

图 3　标定装置工作原理

6. 台站观测试验的结果

本仪器的样机先后在山东泰安台及云南永胜台进过观测，因路途遥远，不便于直接了解试验中出现的问题，1987 年就近迁到北京的白家疃台及香山台. 通过试验发现了一些问题——改进了传感器及二次仪表(监测控制器)，提高了电子线路的可靠性. 在试验中还发现传感器与摆耦合后出现的新问题，经过努力也得到解决. 在试验期间，白家疃台及香山台多次遭受雷击，白家疃有三次被击中电源线，仪器遭受不同程度的损坏. 香山台的 GS 型重力仪、白疃台的 763 长周期地震仪，用 SONY 磁变换器的石英伸缩仪和浮子水管倾斜仪都曾被击坏，而同台工作的 SSQ-1 型数字记录倾斜仪却未受损坏，说明这种仪器的电子部件有一定的抗雷电能力. 这两个台的电涡流传感器、监测控制器等电子部件都已连续工作三年以上未出故障. 图 4 为白家疃台的笔绘记录曲线；图 5 为白家疃台的逐时曲线.

表 2　固体潮调和分析结果(南北分量)*

波　名	波序号	波群	潮汐因子	中误差	相位滞差	中误差
全日波	1—62	Q_1	1.9439	±0.6114	−40.11	±18.02
	63—88	O_1	0.9126	±0.1385	−19.25	±8.70
	89—110	M_1	1.3917	±1.2659	−18.80	±52.13
	111—143	$P_1S_1K_1$	1.0854	±0.0966	−63.49	±5.08
	144—165	J_1	1.2074	±1.1223	60.08	±53.29
	166—197	OO_1	4.1364	±2.8845	−13.46	±39.83
	M.S.E = 7.3273					
半日波	198—236	$2N_2$	0.7342	±0.1685	20.41	±13.18
	237—260	N_2	0.6648	±0.0334	−8.36	±2.76
	261—286	M_2	0.6796	±0.0063	−5.08	±0.53
	287—300	L_2	0.6279	±0.2232	21.94	±20.35
	301—347	S_2	0.6854	±0.0119	−11.83	±1.01
	M.S.E = 2.1139					
1/3 日波	348—363	M_3	0.5308	±0.2063	−34.92	±22.25
	M.S.E = 1.2066					
比 值	$O_1/K_1 = 0.8408$		$(1-O)_1/(1-K)_1 = -1.0231$		$M_2/O_1 = 0.7447$	

* 白家疃台：经度 116.17°E，纬度 40.01°N；
高程 197.5 m. 南北分量，方位角 0.00°；
格值 0.4760 m(″)/mV；
1991 年 9 月 21 日 0 时至 1992 年 4 月 29 日 23 时有效日期共 200 天.

用河南省地震局李安印、骆鸣津提供的程序对白家疃地震台 1991 年 9 月 12 日至

http://www.dizhenxb.org.cn

1992年4月23日的观测资料进行调和分析，其南北分量及东西分量的分析结果见表2及表3.

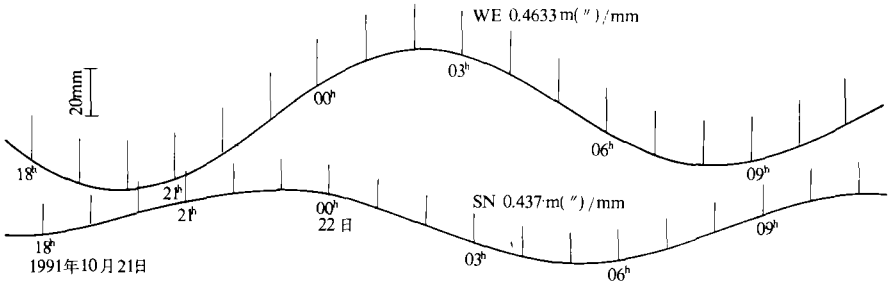

图4 白家疃台笔绘记录

表3 固体潮调和分析结果(东西分量)*

波 名	波序号	波群	潮汐因子	中误差	相位滞差	中误差
全日波	1—62	Q_1	0.7537	±0.0914	−14.00	±6.95
	63—88	O_1	0.6490	±0.0179	−3.83	±1.58
	89—110	M_1	0.6961	±0.2319	5.31	±19.08
	111—143	$P_1S_1K_1$	0.8049	±0.0128	1.40	±0.90
	144—165	J_1	0.7202	±0.2142	4.33	±17.03
	166—197	OO_1	0.8390	±0.3494	−29.32	±23.86
	M.S.E = 3.4822					
半日波	198—236	$2N_2$	0.7721	±0.1008	11.48	±7.45
	237—260	N_2	0.6857	±0.0202	−1.79	±1.69
	261—286	M_2	0.6699	±0.0040	−0.27	±0.34
	287—300	L_2	0.4621	±0.1798	16.34	±22.30
	301—347	S_2	0.7316	±0.0075	2.83	±0.58
	M.S.E = 2.1077					
1/3日波	348—363	M_3	0.8497	±0.0964	1.61	±6.51
	M.S.E = 0.8949					
比 值	$O_1/K_1 = 0.8062$		$(1-O_1)/(1-K_1) = 1.7995$		$M_2/O_1 = 1.0323$	

* 白家疃台：经度116.17E°，纬度40.01°N；
高程197.5 m. 东西分量，方位角90.00°；
格值0.4650 m(″)/mV；
1991年9月12日0时至1992年4月20日23时有效日期共206天.

7. 结 语

1966年邢台地震以来，我国地震台站定点地形变连续观测技术有了飞速的发展，大部台站获得的观测资料在固体潮研究、地震监测预报等方面初见成效，这是可喜的现象. 众所周知，地震孕育过程引起的地壳形变是一个极为缓慢的长期变化过程，而且变化量又很微小. 为了取得这些信息，仪器要有很高的灵敏度，同时要排除因高灵敏度引入的各种干扰；又因所需观测的持续时间特别长，这就要求仪器有良好的长期稳定性；更由于这种仪器安装在湿度很大的坑道里，要保证在这样的环境中仪器能正常工作. 所有这些要求，无疑加大了研制工作的难度.

http://www.dizhenxb.org.cn

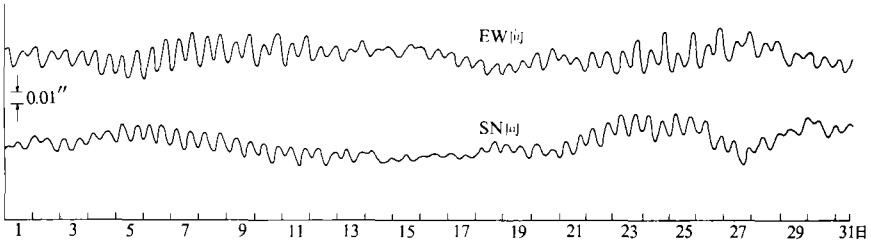

图 5　白家疃台 1991 年 10 月份观测记录

SSQ-1 型数字磁带记录石英水平摆式倾斜仪，早在 1985 年便制出样机，在长达 6 年多的台站观测试验中，发现了不少问题，通过各种测试并不断加以解决. 总的说来主要解决了长期稳定性和使用可靠性问题. 现在整套仪器都能长期稳定工作. 在研制过程中考虑了加工工艺、操作使用方便及生产成本等问题，以利于推广使用，我们希望这种新仪器的研制成功能更好地为地震监测预报工作、为地球科学的研究工作做出贡献.

参加本工作的还有潘怀文等. 在仪器研制、观测过程中得到席云藻、郗钦文、唐伯雄、陈益惠和武安绪等同志的帮助.

参 考 文 献

冯冠平、卢道江、付尚新、陈立基，1978. 感应电涡流原理及调频线路在非接触位移测量中的应用. 清华大学学报，**3**，32—41.

湖南大学电子工程系，1981. 微型计算机及其应用，196—303. 机械工业出版社，北京.

刘长恩，1980. 电涡流位移传感器特性的研究. 地震学刊，**1**，51—59

谭祖根、陈守川，1980. 电涡流传感器的基本原理分析与参数选择. 仪器仪表学报 **1**，1，113—122

朱虎、冯海英，1980. SQ-70 型石英水平摆式倾斜仪的格值常数测定. 地震学报，3，332—341.

Verbaandert, J., 1962. L'etalonnage des pendules horizontaux. *Bollettno Di Geofisica*. **4**, 16, 419—446.

Melchior, P., 1966. *The Earth Tides*, 126—176. Pergamon Press, London.

Melchior, P., 1978. *The Tides of the Planet Earth*, 212—256. Pergamon Press, London.

http://www.dizhenxb.org.cn