

水平摆倾斜仪的精确定向

罗荣祥

(国家地震局地震研究所)

摘 要

本文推导出水平摆倾斜仪摆杆初始平衡位置的计算公式,并对其精度及各参数的选取进行了分析。据此,提出了一种可快速、准确地检测和调整摆杆方位的方法。全国50多个台站运用该法测得了各仪器摆杆的偏角,并重新调准仪器,取得了较好的效益。

一、问题的提出

水平摆倾斜仪具有分辨率高、占地少及可连续自记等优点,故在固体潮观测及大地形变、地震前兆等观测与研究中得到广泛使用。但其摆杆工作位置(初始平衡面)的确定和调整问题却悬而未决。以往采用的“逐步趋近法”[1、2],尽管其原理正确,但因调试是在高灵敏度、低稳定状态下进行,人为干扰非常突出,故精度很低。笔者推导出摆杆初始平衡位置的解算公式,并总结出一套较为实用的调试、检测方法,两年来经泰安等50多个台站使用,取得了较好的效果。本文对这种方法作一介绍。

二、基本原理与计算公式

由水平摆、上下吊丝及其与底座支架相连接的两个支点构成的摆系,是水平摆倾斜仪的核心部件。上下两支点的连线称为摆轴,它与铅垂线的夹角称为 i 角。调节周期螺旋与旁移螺旋可改变 i 角大小及 i 角平面的空间位置,从而确定仪器灵敏度及摆杆相对于底座的方位,在底座调零向确知后,可按下述方法确定摆杆的测倾方位。

当 i 角平面垂直于底座调零向所确定的铅垂面时,我们定义该 i 角平面为“摆系初始平衡面”。若吊丝未受预扭(设计、制造和安装仪器时应力求作到这点),则摆杆应平衡于该平面内,摆镜反射光点位置即为初始平衡点位。仪器底座定向妥当后,摆系初始平衡面也便确定下来,只有当摆杆位于初始平衡面内时,仪器才能如实记录地基在仪器定向方位(一般为南北、东西)上的倾变,且稳定性最好,这是仪器的最佳工作位置。

如图1所示,以摆系下支点 O 为顶点建立空间直角坐标系 $O-XYZ$, OZ 为铅垂线, OY 为仪器底座调零向(仪器墩面水平时, OY 为水平线), ZOX 为初始平衡面。当摆轴位于 ZOX 面内(例如 OC_1 或 OC_2)时,调节周期螺旋只改变 i 角大小而不会改变 i 角平面位置;

于是, 可按算得的 δ 值将摆杆调至初始平衡面 XOZ 内。事实上因 i_1 、 i_2 、 θ 、 γ 等角很小, 故有

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \gamma &\approx \gamma, & \sin i_1 &\approx i_1, \\ \sin i_2 &\approx i_2, & \sin \theta &\approx \theta, \\ \cos \theta &\approx 1. \end{aligned}$$

将其代入(1)式, 简化得

$$\gamma = \frac{i_2 \cdot \theta}{i_1 - i_2}. \quad (5)$$

再将(5)式代入(4)式, 并结合(2)、(3)式, 便得

$$\delta = \frac{T_1^2}{T_2^2 - T_1^2} \cdot \Delta \quad (6)$$

(6)式表明, 只须测得升(降)周期过程中任意两个周期值 T_1 、 T_2 及光点平衡位置相应的移动距离 Δ , 便能立即算出光点应调至的初始平衡点 K 的位置。

三、精度估算及参数选取

对(6)式进行全微分, 整理后得:

$$d\delta = \frac{T_1^2}{T_2^2 - T_1^2} d\Delta + \frac{2 T_1 \cdot T_2^2 \cdot \Delta}{(T_2^2 - T_1^2)^2} dT_1 - \frac{2 T_1^2 \cdot T_2 \cdot \Delta}{(T_2^2 - T_1^2)^2} dT_2 \quad (7)$$

按误差传播定律得

$$m_\delta = \pm \sqrt{\left(\frac{T_1^2}{T_2^2 - T_1^2}\right)^2 m_\Delta^2 + \left(\frac{2 T_1 \cdot T_2^2 \cdot \Delta}{(T_2^2 - T_1^2)^2}\right)^2 m_{T_1}^2 + \left(\frac{2 T_1^2 \cdot T_2 \cdot \Delta}{(T_2^2 - T_1^2)^2}\right)^2 m_{T_2}^2} \quad (7')$$

可见, δ 的测算精度 m_δ 既与光点位移 Δ 及 T_2 、 T_1 两个周期值的大小及其搭配组合有关, 也与测量精度 m_Δ 、 m_{T_1} 、 m_{T_2} 有关。据实测可知, T_1 可调至1秒(JB型)或5秒(SQ型)左右, 该值愈小愈好; $m_{T_1} < \pm 0.1$ 秒; T_2 升至较高时, m_{T_2} 不超过 ± 1.0 秒; Δ 可达400mm。

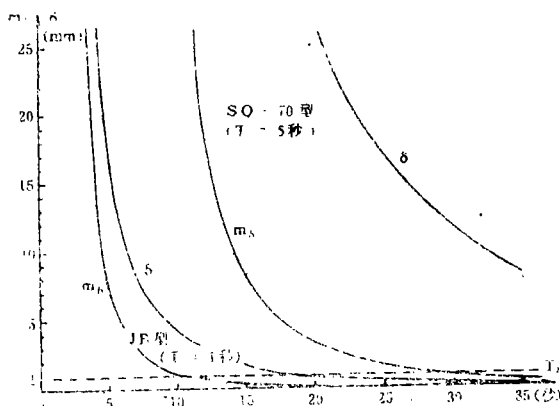


图2 仪器调试中 δ 、 m_δ 与 T_2 之关系

Fig. 2 Relation between δ , m_δ and T_2 in adjusting horizontal pendulum position

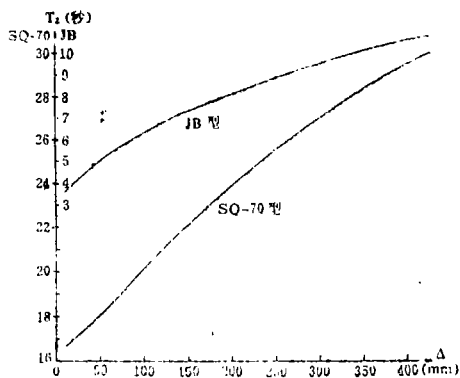


图3 在 $m_\delta \leq \pm 1$ mm时, Δ 值与 T_2 的最小取值之关系

Fig. 8 Relation between minimum values of Δ and T_2 under the condition of precision $m_\delta \leq \pm 1$ mm

表 1

两种倾斜仪的 δ 值及 m_s

JB 型 倾 斜 仪			SQ-70 型 倾 斜 仪		
T_2	δ	m_s	T_2	δ	m_s
(秒)	(mm)	(mm)	(秒)	(mm)	(mm)
2	133.3	181.33	6	909.9	991.11
4	26.7	15.33	8	255.4	106.72
6	11.4	4.58	10	133.3	36.42
8	6.4	2.07	14	58.5	10.05
10	4.0	1.16	20	26.7	3.13
12	2.8	0.73	25	16.7	1.61
14	2.0	0.50	30	11.4	0.96
18	1.2	0.29	40	6.4	0.44
22	0.8	0.19	50	4.0	0.25
26	0.6	0.13	60	3.8	0.16
30	0.4	0.10	70	2.0	0.11

注: 1. m_s 值前应有 $\pm$ 号, 表中从略.

2. $m_{T_1} = \pm 0.1$ 秒, $m_{T_2} = \pm 1.0$ 秒, $m_{\Delta} = \pm 10$ mm.

3. $\Delta = 400$ mm, $T_1 = 1$ 秒 (JB型) 或 5 秒 (SQ-70型).

m_{Δ} 约为 ± 10 mm. 将这些参数代入 (7) 及 (7') 式, 其计算结果见表 1 和图 2. 由表 1 及图 2 可以看出:

(1) T_2 愈接近 T_1 , 则 δ 与 m_s 愈大, 反之愈小.

(2) 当 T_2 增至 10.6 秒 (JB型) 或 29.5 秒 (SQ型) 后, m_s 减至 ± 1 mm 以下.

(3) JB型仪器的 δ 及 m_s 随 T_2 的增大而减小的速率比 SQ 型的快得多, 即更容易试调一些.

实际调试时, Δ 是个变量, 在 $m_s \leq \pm 1$ mm 的情况下, Δ 与 T_2 的最小取值之关系如图 3 所示.

四、现有台网水平摆方位的检测及重调

1. 检测

借助 (6) 式可方便地确定出正在工作中的仪器之初始平衡光点位置 K , 则摆杆平均工作位置 (光点位于记录器中央 Q 时) 偏离初始平衡面的角度 ϕ' 由下式计算 (参看图 1):

$$\phi' = \frac{1}{2} \text{tg}^{-1} \left(\frac{S \pm \delta}{A} \right) \quad (8)$$

若 K_1 介于 K_2 与 Q 之间, 则 (8) 式中 δ 前取 “-” 号. 考虑到仪器底座的定向偏角 ϕ_0 , 则摆杆平均位置的实测方位为:

$$\phi = \phi_0 + \phi' \quad (9)$$

我们约定 ϕ_0 、 ϕ' 的正负号, 即北偏西和东偏北为 “+”, 反之为 “-” (也即按反时针方向偏转为 “+”), 如图 1 所示的 ϕ' 即为 “+”.

检测步骤大体如下:

(1) 首先记下记录光点位置 K_2 , 然后让摆起振测得仪器工作周期 T_2 ;

(2) 调节周期螺旋降低周期, 测得仪器可调节到的最低周期 T_1 , 并记下光点新的平衡位置 K_1 , 量取 K_1 至 K_2 的水平距离 Δ ;

(3) 量取 K_1 至记录器中央(基线“缺口”)Q的水平距离S;

(4) 按(6)式算得 δ 值, 于是初始平衡光点位置K被确定下来, 按(8)式、(9)式算得摆杆平均工作位置偏离初始平衡面的角度 ϕ' 及其实测方位 ϕ 。

另一分量的检测步骤相同。两分量的检测、量算可穿插或同时进行。

自1985年底至1987年底止, 全国已有52个台站采用本方法对97套水平摆倾斜仪(金属摆44套, 石英摆21套, 整体摆2套)的摆杆偏角 ϕ' 进行了检测。经统计, 最大值达 -29.20° (涞源台JB型南北摆), 最小值为 0.001° (赤城台SQ型东西摆), 各摆 $|\phi'|$ 的均值为 2.03° ; 超过 $\pm 1^\circ$ 者有75个摆, 占总摆数(134个)的56%。考虑到摆杆工作量程为 1° , 可算得检测前有60.93%的观测资料是在摆杆偏离初始平衡面 1° 以上(超出《规范》允许范围)的状况下取得的。这说明我国台网摆杆定向普遍欠佳, 故有必要继续普查并校正。

2. 重新调整

摆杆定向不准的原因主要是: 摆镜装歪, 即反光镜面不垂直或不平行于摆杆; 光源灯位置未放妥当; 仪器调零向放偏。但其根本原因则是沿用“逐步趋近法”调试仪器存在较大误差之故。

根据我们的经验, 对仪器进行校正时, 除少数仪器因调零向偏差较大须转动本体重新定向外, 其余均可借助移动光源灯位置, 或同时适当移动记录器的办法而将初始平衡光点K重合于记录器中央Q处。固定好光源灯和记录器的位置后, 逐步升高仪器周期至所需值, 并微旋旁移螺旋使记录光点落于Q点附近。

1986年12月18日对山东郯城(马陵山)台JB型倾斜仪的检测、计算数据列于表2。该仪器两分量的初始平衡光点均在记录器中央Q点之右, 且偏得较远, 故在检查仪器底座定

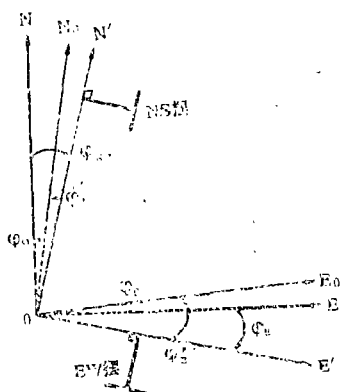


图4 郯城台水平摆方位检测结果示意图
(ON_0 、 OE_0 为底座定向方位, ON' 、 OE' 为摆杆实测方位)

Fig. 4 Sketch of checking the orientation of horizontal pendulum operating at Tancheng station

表2

郯城台JB型水平摆倾斜仪摆杆方位检测

分量	T_2 (S)	T_1 (S)	Δ (mm)	S (mm)	δ (mm)	ϕ' ($^\circ$)	ϕ_0 ($^\circ$)	$\phi = \phi' + \phi_0$ ($^\circ$)
NS	25.5	1.40	148	130	0.45	-2.07	-1.97	-4.04
EW	24.7	1.45	585	544	2.02	-8.43	1.12	-7.31

注: 光杆距 $A = 1802\text{mm}$

向,测得 ϕ 值后,重新定向并再次确定出初始平衡光点,适当移动光源灯与记录器位置,使其合乎《规范》要求。图4为放大尺度的检测结果示意图。

五、小 结

1.应用本文提出的方法,只须测得调节仪器周期螺旋过程中的高、低两个周期值及光点平衡位置的相应移动距离,便可立即算出初始平衡光点位置,並调妥仪器,故本方法具快速、简便的优点。因受几何条件及仪器加工精度限制,据抽样重复调测试验可知,所定初始平衡点误差为 $\pm 4\text{ mm}$ (光杆距 5 m),普查结果证实,其精度为“逐步趋近法”的80倍以上。

2.对现有一些台网摆杆偏角进行了普查,超限率达60.9%,重调后均符合《规范》要求。

3.利用本文提出的方法,在生产仪器时可精确校准摆镜位置,以利用户使用。建议今后生产石英摆、整体摆等型倾斜仪时,适当增大周期螺旋的调节范围,以便得到2秒左右的最小可调周期(目前为4秒上下),有利于摆杆方位的调试工作。

本项工作承蒙吴翼麟、蔡维鑫、李平等指点,实验、普查工作得到张锡铃、张兴赤、叶传潜和黄跃华等的帮助,众多台站在运用、推广和完善本方法中做了大量工作,在此深表感谢。

(本文1988年2月3日收到)

参 考 文 献

- [1]国家地震局,地倾斜台站观测规范,地震出版社,1986.
- [2]南昌地震台倾斜组,水平摆初始平衡位置的调整,地震战线, No. 2, 1978.
- [3]冯锐,地倾斜与地震,地震出版社,1978.
- [4]彭自正,定位误差对水平摆观测的影响及其修正方法,地壳形变与地震, Vol. 8, No. 2, 1983.
- [5]李平、李旭东,用固体潮水平分量预报地震的可能性,地震科学研究, No. 2, 1981.

ACCURACY ORIENTATION OF HORIZONTAL PENDULUM TILTMETER

Luo Rongxiang

(Institute of Seismology, SSB)

Abstract

In this paper, formulae of calculating best operating position of horizontal pendulum tiltmeter are derived, choice of precision and parameter are discussed. After horizontal pendulum tiltmeter is fast and precisely adjusted by using this method given in this paper, tiltmeter operates in best position. Deflection angles of true operating position of instruments from their best positions, which were installed at more than 50 stations in China, were determined by using this method, and these instruments were readjusted, better effect was taken.