

# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—XXXX

## 垂直摆倾斜仪校准规范

Calibration Specification for Vertical Pendulum Tiltmeter

(征求意见稿)

202X - XX - XX 发布

202X - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

# 垂直摆倾斜仪校准规范

Calibration Specification for Vertical  
Pendulum Tiltmeter

JJF XXXX—XXXX

归口单位：全国地震专用计量测试技术委员会

起草单位：湖北省地震局

本规范委托全国地震专用计量测试技术委员会负责解释

**本规范起草人：**

周云耀（湖北省地震局）

吴 欢（湖北省地震局）

吕永清（湖北省地震局）

吕品姬（湖北省地震局）

马武刚（湖北省地震局）

# 目 录

引 言 .....	II
1 范围 .....	1
2 引用文件 .....	1
3 术语 .....	1
4 概述 .....	1
5 计量特性 .....	2
6 校准条件 .....	2
6.1 环境条件 .....	2
6.2 测量标准及其他设备 .....	2
7 校准项目和校准方法 .....	3
8 校准结果 .....	6
9 复校时间间隔 .....	6
附录 A .....	8
附录 B .....	9
附录 C .....	12
附录 D .....	15

# 引 言

JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

# 垂直摆倾斜仪校准规范

## 1 范围

本规范适用于地震监测专用设备垂直摆倾斜仪的校准，也可用于其它摆式倾斜仪的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 19531.3—2004 地震台站观测环境技术要求第3部分：地壳形变观测

DB/T 8.1—2003 地震台站建设规范 地形变台站 第1部分：洞室地倾斜和地应变台站

DB/T 31.1—2008 地震观测仪器进网技术要求 地壳形变观测仪 第1部分：倾斜仪

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

## 3 术语

下列术语和定义适用于本规范。

### 3.1 灵敏度 sensitivity

测量仪器响应的变化除以对应的激励变化。

### 3.2 分辨力 resolution

仪器仪表指示装置可有意义地辨别被指示量两邻近值的能力。

### 3.3 量程 span

范围上限值与下限值的代数差。

### 3.4 线性度误差 linearity error

校准曲线与规定直线之间的最大偏差。

## 4 概述

垂直摆倾斜仪是一种至今仍广泛用于地壳形变学科研究的地形变基本仪器，能精确反应地倾斜量的细微变化，其主要用于地震监测领域定点连续监测地球固体潮汐、长期地形变和水库大坝形变的高精度观测。

垂直摆倾斜仪测量原理如图 1 所示。A 点为倾斜仪摆系的固定点，B 点为摆

锤质心初始位置，AB 为折合摆杆长度  $L$ ，倾斜仪器安置于基岩墩上。当地面发生倾斜形变时，受惯性作用，摆锤将由 B 点相对移动至新平衡位置 B' 点，变化距离为  $\Delta d$ ，产生的倾斜变化量  $\phi$  按 (1) 式计算。 $\phi$  表示了地面垂直运动在 ABB' 平面上产生的倾斜变化。

$$\phi = \arctan\left(\frac{\Delta d}{L}\right) \quad (4.1)$$

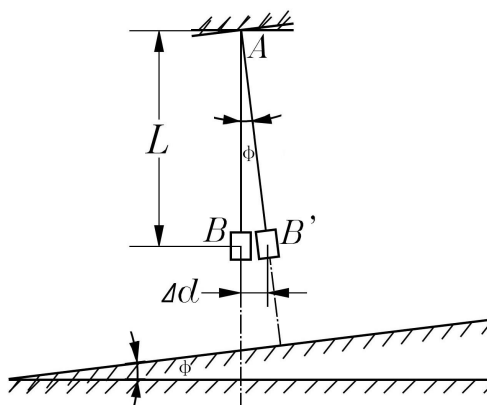


图1 垂直摆倾斜仪观测原理示意图

## 5 计量特性

5.1 灵敏度：以标称灵敏度为基准，最大允许误差： $\pm 3\%$ ；

5.2 分辨力：不大于  $0.0002''$ ；

5.3 量程：不小于  $2''$ ；

5.4 线性度误差：不大于  $1\%$ ；

5.5 频带范围：应包含  $0.1\text{Hz}$  ( $10\text{s}$ )  $\sim 1\text{a}$ 。

注：以上指标不是用于合格性判定，仅供参考

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

6.1.1 环境温度： $5^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ ，温度变化应小于  $0.5^{\circ}\text{C}$ 。

6.1.2 相对湿度：小于  $98\%$ 。

6.1.3 电源电压：AC  $198\text{V} \sim 242\text{V}$  或 DC  $10.5\text{V} \sim 15.0\text{V}$ 。

6.1.4 磁场条件：无影响校准工作的电磁干扰。

### 6.2 测量标准及其他设备

## 6.2.1 测量标准

(1) 激光干涉仪：测量范围（0~1）m，分辨力 1nm。

(2) 数据采集器：满量程±20V，最大允许误差小于满量程 1%，线性度误差小于 0.003%，分辨力不小于 24 位。

## 6.2.2 其它设备

倾斜检测平台系统（系统组成和指标详见附录 A）。

# 7 校准项目和校准方法

## 7.1 灵敏度

对被校设备北南向和东西向分别进行校准。

(1) 使用倾斜检测平台，在量程范围内驱动检测平台的一端发生垂直位移变化（共 10 次相同驱动往返）。

(2) 使用激光干涉仪测定平台的垂直位移变化量  $\Delta H$ ，检测平台倾斜变化量  $x$  按式（7.1）计算得出。

$$x = \frac{\Delta H}{L} \rho \quad (7.1)$$

式中：  $x$ -检测平台倾斜变化量，单位为角秒（"）；

$\Delta H$ -检测平台垂直位移变化量，单位为米（m）；

$L$ -检测平台基线长度，单位为米（m）；

$\rho$ -转换系数， $\rho=206265$ 。

(3) 数据采集器记录倾斜仪输出电压变化量  $y$ 。

$$(4) \text{ 计算灵敏度} \quad n = \frac{\Delta \bar{y}}{\Delta \bar{x}} \quad (7.2)$$

式中：  $n$ -被校仪器灵敏度，单位为（V/"）；

$\Delta \bar{y}$ -倾斜仪输出电压变化量平均值；

$\Delta \bar{x}$ -检测平台倾斜变化量平均值。

## 7.2 分辨力

被校设备北南向和东西向分别进行校准。

(1) 分辨力按式（7.3）计算得出。

$$d' = \frac{y}{n} \quad (7.3)$$

(2) 采用固体潮推算的方法, 在固体潮信号 (理论值) 极值点附近约 10 个~20 个分辨力指标 (即  $0.002''\sim 0.004''$ ) 范围内, 将以时间为变量的信号序列变换为以 0.5 倍~1.0 倍分辨力的倾斜量为变量的信号序列, 在极值点区域 (小于  $1\times 0.0002''\sim 2\times 0.0002''$ ) 归算后的测量值和理论值之差就是仪器不能响应部分, 即仪器的分辨力。

(3) 按式 (7.4) 计算归一化系数

$$k = \frac{2 \times (n-2)}{(d'_n - d'_2) + (d'_{-n} - d'_{-2})} \times \frac{0.0001''}{0.001''} \quad (7.4)$$

式中:  $k$  -归一化系数;

$n$  -取值以 7~15 为宜;

$d'$  -为理论值  $d$  间隔  $0.0001''$  相应时间间隔序列的观测值。

(4) 计算归一化序列值  $d''_i = k \cdot d'_i$ ,  $i = -n, \dots, -1, 0, 1, \dots, n$ 。 (7.5)

$$\overline{d''} = \left( \frac{\sum_{i=2}^n d''_i}{(n-2)+1} + \frac{\sum_{i=-2}^{-n} d''_i}{(n-2)+1} \right) / 2 \quad (7.6)$$

$$\overline{d''}_i = \overline{d''} + (1 + n/2 - |i|) \times 0.1 \quad (7.7)$$

$$\Delta d''_i = d''_i - \overline{d''}_i \quad (7.8)$$

$\Delta d''_i$  中最大值即为推算的仪器分辨力。

### 7.3 线性度误差

对被校设备北南向和东西向分别进行校准。

(1) 使用倾斜检测平台, 对按量程的 10% 的间隔驱动检测平台的一端发生垂直位移变化 (共 10 次驱动往返)。

(2) 使用激光干涉仪测定平台的垂直位移变化量  $\Delta H$ , 检测平台倾斜变化量  $x$  按式 (7.1) 计算得出。

(3) 数据采集器记录倾斜仪输出电压变化量  $y$ , 通过下列数据处理方法分析处理所记录测试数据, 计算出仪器的线性度误差。

$x_i$  为平台倾斜变化量,  $y_i$  为每次变化时仪器上、下两个输出值的平均值;

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (i=1, 2, \dots, 10) \quad (7.9)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (7.10)$$

$$L_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (7.11)$$

$$L_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (7.12)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (7.13)$$

$$b = \frac{L_{xy}}{L_{xx}} \quad (7.14)$$

直线拟合值:

$$Y_i = a + bx_i \quad (7.15)$$

线性偏差

$$\Delta y_i = y_i - Y_i \quad (7.16)$$

线性度误差为:

$$d = \frac{\Delta y_{\max}}{\Delta y_{FS}} \times 100\% \quad (7.17)$$

式中:  $d$  - 线性度误差;

$\Delta y_{\max} - \Delta y_i$  中最大极差值;

$\Delta y_{FS}$  - 实际测试输出满度值。

## 7.4 量程

对被校设备北南向和东西向分别进行校准。

(1) 使用倾斜检测平台, 按量程的 10% 的间隔驱动检测平台的一端发生垂直位移变化 (共 10 次驱动往返)。

(2) 使用激光干涉仪测定平台的垂直位移变化  $\Delta H$ , 检测平台倾斜变化量  $x$  按式 (7.1) 计算得出, 在线性度范围内其最大倾斜变化量  $x_{\max}$  即量程。

## 7.5 频带范围

被校设备北南向和东西向分别进行校准。

(1) 使用倾斜检测平台测试。驱动倾斜平台产生一个阶跃信号, 激光干涉仪测定平台的垂直位移变化量  $\Delta H$ , 数据采集器记录倾斜仪输出电压变化量  $y$ 。

(2) 根据记录和得到测试曲线及数据，通过二阶传递函数

$$G(s) = \frac{Kw_0^2}{s^2 + 2\xi w_0 s + w_0^2}$$

等效进行数据处理，其中  $K = \frac{y}{\Delta H}$ ， $\xi$  和  $w_0$  通过将测定平台的垂直位移变化量作为输入量，倾斜仪输出电压变化量作为输出量，通过数据处理计算得出。

(3) 最后通过计算得出的传递函数并画出相应的幅频特性图，取-3dB处的值即为频带范围。

## 8 校准结果

校准结果应在校准证书上反映。校准证书至少应包含以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室的名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

## 9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸

因素所决定的，因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔，建议不超过 1 年。

## 附录 A

## 倾斜检测平台系统

## A.1 系统组成

倾斜检测平台系统主要由倾斜平台、压电陶瓷及控制器、激光干涉仪、数据采集器和 PC 机等模块组成。倾斜仪主体置于倾斜平台，压电陶瓷驱动倾斜平台微量倾斜运动，输出记录为数据采集器，平台微位移由激光干涉仪测量，最后由 PC 机对数据进行记录和处理。

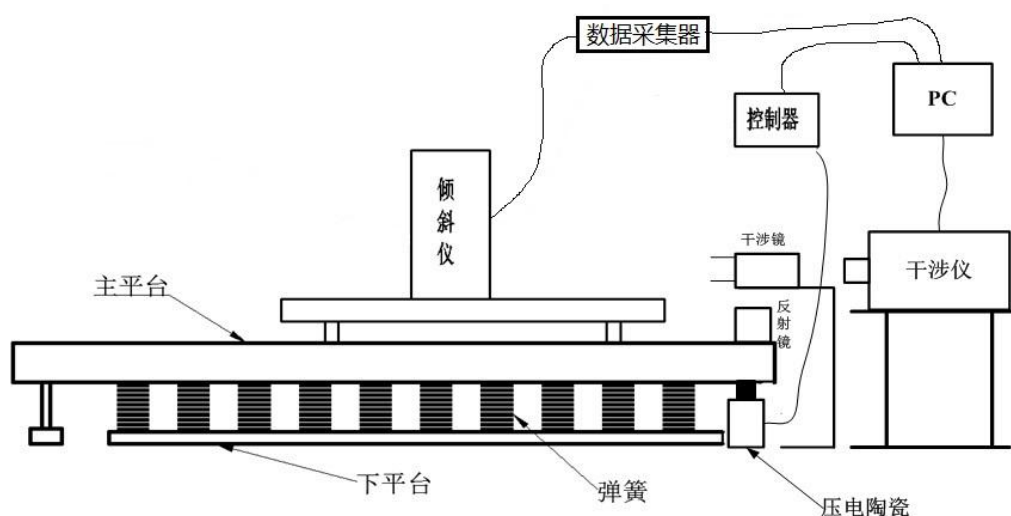


图 2 倾斜检测平台系统设备连接图

## A.2 技术指标

1) 平台量程：不小于 2"；

2) 平台量程 =  $\frac{\text{平台垂直位移变化量}}{\text{平台基线长度}} \times \text{转换系数} \rho$  ( $\rho = 206265$ )。

## 附录 B

## 线性度误差不确定度评定

## B.1 测量方法

依据本校准规范 7.3 中的线性度误差校准方法，对被校设备进行测试。

## B.2 测量模型

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (i=1, 2, \dots, 10) \quad (\text{B.1})$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{B.2})$$

$$L_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{B.3})$$

$$L_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (\text{B.4})$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (\text{B.5})$$

$$b = \frac{L_{xy}}{L_{xx}} \quad (\text{B.6})$$

直线拟合值：

$$Y_i = a + bx_i \quad (\text{B.7})$$

线性偏差：

$$\Delta y_i = y_i - Y_i \quad (\text{B.8})$$

线性度误差为：

$$d = \frac{\Delta y_{\max}}{\Delta y_{FS}} \times 100\% \quad (\text{B.9})$$

式中：

$x_i$  - 平台倾斜变化量；

$y_i$  - 每次变化时仪器上、下两个输出值的平均值；

$d$  - 线性度误差；

$\Delta y_{\max}$  -  $\Delta y_i$  中最大极差值；

$\Delta y_{FS}$  - 实际测试输出满度值。

### B.3 测量不确定度的主要来源

线性度误差的测量不确定度主要来源有：

- a) 由激光干涉仪精度引入的测量不确定度分量  $u_x$ ；
- b) 由数采电压分辨力引入的测量不确定度分量  $u_v$ 。

### B.4 标准不确定度评定

#### B.4.1 激光干涉仪精度引入的测量不确定度分量 $u_x$

激光干涉仪的分辨力为 1nm，取实验标称长度 1μm，假设误差服从均匀分布，则由激光干涉仪精度引入的不确定度为：

$$u_x = \frac{1\text{nm}}{2\sqrt{3}} \approx 0.29\text{nm}$$

通过不确定度传播律计算得灵敏度系数：

$$c_x = \frac{1}{\Delta H}$$

其中  $\Delta H$  为最大线性偏差  $\Delta y_{\max}$  对应的激光干涉仪的读数（作为典型值）。

#### B.4.2 数采电压分辨力引入的测量不确定度分量 $u_v$

数采电压分辨力为 0.1 mV，假设误差服从均匀分布，则由数采电压分辨力引入的测量不确定度分量  $u_v$  为：

$$u_v = \frac{0.1\text{mV}}{2\sqrt{3}} = 0.029\text{mV}$$

接下来计算灵敏度系数，通过不确定度传播律得：

$$c_v = \frac{1}{\Delta y_{FS}}$$

### B.5 标准不确定度分量一览表

表 B.1 线性度误差校准的不确定度分量一览表

分量	来源	评定方法	分布	$c_i$	$u(x_i)$
$u_x$	激光干涉仪精度	B	均匀	$c_x$	0.29nm
$u_v$	数采电压分辨力	B	均匀	$c_v$	0.029mV

### B.6 合成标准不确定度 $u_d$

考虑到各影响量，且各不确定度分量独立不相关，则线性度误差的合成标准

不确定度为：

$$u_d = \sqrt{c_X^2 u_X^2 + c_V^2 u_V^2}$$

计算得到：

$$u_d(NS) = 0.003\%$$

$$u_d(EW) = 0.003\%$$

#### B.7 扩展不确定度 $U_d$

取包含因子  $k=2$ ，被校仪器线性度误差测量的扩展不确定度为：

$$U_d(NS) = 2 \times 0.003\% = 0.006\%$$

$$U_d(EW) = 2 \times 0.003\% = 0.006\%$$

## 附录 C

## 校准结果记录样式

## 校准结果记录

## C.1、被校仪器概况

送校单位：

仪器名称：

仪器型号：

仪器出厂编号：

## C.2、校准设备及校准地点

计量器具	器具名称	器具型号	出厂编号	溯源证书编号	有效期至
校准地点					
环境条件					

## C.3、校准人员

## C.4、校准结果记录

## 1、校准项目：灵敏度

分量：

	输入		仪器输出	灵敏度
	干涉仪	倾角		
序号	$\Delta H$ ( $\mu\text{m}$ )	$x$ (")	$y$ (V)	$n$ (V/")
1				
2				

3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
平均值				

## 2、校准项目：分辨力

校准结果：

固体潮推算分辨力记录表

分量：

$i$	日期和 时间	理论值 $d_i$ (0.001")	时间间隔 $T_i$ (min)	观测值 $d'_i$ (0.001")	归一化 $d''_i$ (0.001")	拟合值 $\overline{d''_i}$ (0.001")	差值 $\Delta d''_i$ (0.001")
$K=$				分辨力 $\Delta d''_{i \max} =$			

## 3、校准项目：量程

校准结果：

量程测试数据表格

分量：

序号	干涉仪读 $\Delta H$ ( $\mu\text{m}$ )	倾斜量 $x_i$ ( $''$ )
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

## 3、校准项目：线性度误差

校准结果：

线性度校准记录表格

分量：

序号	干涉仪读数 $\Delta H$ ( $\mu\text{m}$ )	平台倾斜量 $x_i$ ( $''$ )	倾斜仪输出 $y_i$ (mV)	直线拟合值 $Y_i$ (mV)	线性偏差 $\Delta y_i$ (mV)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
		$x = \frac{\Delta H}{L} \rho$	$\Delta y_{FS} =$	$d =$	

## 4、校准项目：频带范围

校准结果：

## 附录 D

### 校准证书内页格式

# 校准证书

证书编号：

仪器名称：\_\_\_\_\_  
型    号：\_\_\_\_\_  
出厂编号：\_\_\_\_\_  
校准依据：\_\_\_\_\_

批准人：

(校准机构章) 核验员：

检测员：

年  月  日

校准所使用的标准计量器具及校准地点

计量器具	器具名称	器具型号	出厂编号	溯源证书编号	有效期至
校准地点					
环境条件					

校准结果

序号	项目	校准结果	不确定度
1	灵敏度		
2	分辨力		
3	线性度误差		
4	量程		
5	频带范围		

声明：本报告只对申请校准设备有效，未经校准实验室书面批准，不得复制本报告！

正文部分以下空白！