

水管倾斜仪校准规范

测量不确定度评定报告

中国地震局地震研究所

二〇二五年九月

0 概述

实验室：中国地震局地震研究所

被检设备：DSQ 型水管倾斜仪

检测地点：武汉地震台九峰山洞（温度 19.5℃，湿度 70.2%）

检测设备：激光干涉仪、数据采集器

不确定度评定项目：

水管倾斜仪不确定度评定项目共 4 项，见表：

序号	校准项目	评定过程序号
1	灵敏度	1
2	分辨力	2
3	线性度误差	3
4	量程	4

1 灵敏度测量不确定度评定

1.1 测量方法

依据本校准规范 7.1 中的灵敏度校准方法，对被校设备进行测试。

1.2 数学模型

检测平台倾斜变化量 x 按式（1.1）计算：

$$x = \frac{\Delta H}{L/2} \rho \times 2 \tag{1.1}$$

式中： x -检测平台倾斜变化量，单位为角秒（"）；

ΔH -被校设备水位变化量，单位为米（m）；

L -被校设备基线长度，单位为米（m）；

ρ -转换系数， $\rho=206265$ 。

灵敏度计算：

$$n = \frac{\Delta \bar{y}}{\Delta \bar{x}} \tag{1.2}$$

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；

$\Delta \bar{x}$ -倾斜变化量平均值

1.3 测量不确定度的主要来源

灵敏度的测量不确定度的主要来源有：

- a) 由激光干涉仪精度引入的测量不确定度分量 u_x

b) 由基线长度测量误差引入的测量不确定度分量 u_L

c) 由数采电压分辨力引入的测量不确定度分量 u_v

1.4 标准不确定度评定

1.4.1 由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，假设误差服从均匀分布，因此引入的标准不确定度 u_x 计算如下：

$$u_x = \frac{1 \text{ nm}}{2\sqrt{3}} \approx 0.289 \text{ nm}$$

灵敏度根据不确定度传播律得：

$$c_x = \frac{\partial n}{\partial \Delta H} = -\frac{L \Delta \bar{y}}{4\rho \Delta H^2}$$

1.4.2 由基线长度测量误差引入的测量不确定度分量 u_L

基线长度测量误差为 1mm，假设误差服从均匀分布，则由基线长度误差引入的不确定度为：

$$u_L = \frac{1 \text{ mm}}{2\sqrt{3}} = 0.289 \text{ mm}$$

灵敏度根据不确定度传播律得：

$$c_L = \frac{\partial n}{\partial L} = \frac{\Delta \bar{y}}{4\rho \Delta H}$$

1.4.3 由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 0.1mV，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：

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

灵敏度根据不确定度传播律得：

$$c_v = \frac{\partial n}{\partial y} = \frac{L}{4\rho \Delta H}$$

1.5 标准不确定度分量一览表

表 1 灵敏度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	0.289nm
u_L	基线长度测量误差	B	均匀	c_L	0.289mm
u_v	数采电压分辨力	B	均匀	c_v	0.029mV

1.6 合成标准不确定度 u_s

考虑到各影响量，且各不确定度分量独立不相关，则灵敏度的合成标准不确定度为：

$$u_s = \sqrt{c_x^2 u_x^2 + c_L^2 u_L^2 + c_v^2 u_v^2} = 1.56 \times 10^{-5} \text{ V/}''$$

1.7 扩展不确定度 U_s

取包含因子 $k = 2$ ，被校仪器灵敏度测量的扩展不确定度为：

$$U_s = 3.12 \times 10^{-5} V/''$$

2 分辨力测量不确定度评定

2.1 测量方法

依据本校准规范 7.2 中的分辨力校准方法，对被校设备进行测试。

2.2 数学模型

按式 (2.1) 计算归一化系数：

$$k = \frac{2 \times (n-2)}{(d'_n - d'_2) + (d'_{-n} - d'_{-2})} \times \frac{0.0001''}{0.001''} \quad (2.1)$$

式中： k -归一化系数。

n -取值以 7~15 为宜，在本次试验取 $n=7$ 。

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

计算归一化序列值：

$$d_i'' = k \cdot d_i', \quad i = -n, \dots, -1, 0, 1, \dots, n \quad (2.2)$$

$$\overline{d''} = \left(\frac{\sum_{i=2}^n d_i''}{(n-2)+1} + \frac{\sum_{i=-2}^{-n} d_i''}{(n-2)+1} \right) / 2 \quad (2.3)$$

$$\overline{d_i''} = \overline{d''} + (1 + n/2 - |i|) \times 0.1 \quad (2.4)$$

$$\Delta d_i'' = d_i'' - \overline{d_i''} \quad (2.5)$$

$\Delta d_i''$ 中最大值即为推算的仪器分辨力。

2.3 测量不确定度的主要来源

分辨力的测量不确定度主要来源有：

a) 由灵敏度测量误差引入的测量不确定度分量 u_i ；

2.4 标准不确定度评定

2.4.1 灵敏度测量误差引入的测量不确定度分量 u_i

由上述灵敏度测量不确定度评定得到 $u_s = 1.56 \times 10^{-5} V/''$ ，根据实验结果计算相对不确定度为：

$$u_i(NS) = 0.0033\%$$

$$u_i(EW) = 0.0031\%$$

则由灵敏度误差引入的不确定度为：

$$u_i(NS) = u_i \times d'_i \times 0.001'' = -1.92 \times 10^{-6}''$$

$$u_i(EW) = u_i \times d'_i \times 0.001'' = 9.56 \times 10^{-7}''$$

其中 d'_i 为 $\Delta d''_i$ 取到最大值时对应的观测值（作为典型值）。

接下来计算灵敏度系数，通过不确定度传播律得， k 的不确定度为：

$$u_k = \frac{2u_i}{(d'_7 - d'_2 + d'_{-7} - d'_{-2})^2}$$

由式（2.2）、（2.3）、（2.4）、（2.5）得到全过程灵敏度为：

$$c_s = \left(1 + \frac{1}{\sqrt{12}}\right) \times k + \left(d'_i - \frac{\sum_{t=2}^7 d'_t + \sum_{t=-2}^{-7} d'_t}{12}\right) \frac{-2}{(d'_7 - d'_2 + d'_{-7} - d'_{-2})^2}$$

2.5 标准不确定度分量一览表

表 2 分辨力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_i	灵敏度测量误差	B	均匀	c_i	NS: $-1.92 \times 10^{-6}''$ EW: $9.56 \times 10^{-7}''$

2.6 合成标准不确定度 u_δ

考虑到分辨力校准的不确定度来源唯一，则分辨力的合成标准不确定度为：

$$u_\delta \text{ (NS)} = \sqrt{c_i^2 u_i(NS)^2} = 4.18 \times 10^{-6}''$$

$$u_\delta \text{ (EW)} = \sqrt{c_i^2 u_i(EW)^2} = 2.61 \times 10^{-6}''$$

2.7 扩展不确定度 U_δ ：

按 $k=2$ ，被校仪器分辨力测量的扩展不确定度为：

$$U_\delta(NS) = 2 \times u_\delta \text{ (NS)} = 8.36 \times 10^{-6}''$$

$$U_\delta(EW) = 2 \times u_\delta \text{ (EW)} = 5.22 \times 10^{-6}''$$

3 线性度误差测量不确定度评定

3.1 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。

3.2 数学模型

$$x = \frac{\Delta H}{L/2} \rho \times 2 \tag{3.1}$$

式中： x -被校设备倾斜变化量，单位为角秒（''）；

ΔH -被校设备水位变化量，单位为米（m）；

L -被校设备基线长度，单位为米（m）；

ρ -系数, $\rho=206265$ 。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (i=1, 2, \dots, 10) \quad (3.2)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.3)$$

$$L_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.4)$$

$$L_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (3.5)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (3.6)$$

$$b = \frac{L_{xy}}{L_{xx}} \quad (3.7)$$

直线拟合值:

$$Y_i = a + bx_i \quad (3.8)$$

线性偏差:

$$\Delta y_i = y_i - Y_i \quad (3.9)$$

线性度误差为:

$$d = \frac{\Delta y_{\max}}{\Delta y_{FS}} \times 100\% \quad (3.10)$$

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;

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

Δy_{FS} -实际测试输出满度值;

3.3 测量不确定度的主要来源

线性度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 ;

3.4 标准不确定度评定

3.4.1 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 $1\mu m$, 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：

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

接下来计算灵敏度系数，通过不确定度传播律得：

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

其中 ΔH 为最大线性偏差 Δy_{max} 对应的激光干涉仪的读数（作为典型值）。

3.4.2 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 ，假设其服从均匀分布，则由数采电压分辨力引入的测量不确定度分量 u_v 为：

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

通过不确定度传播律得灵敏度系数：

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

3.5 标准不确定度分量一览表

表 3 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	0.029 mV

3.6 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，则分辨力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：

$$u_d(NS) = 0.004\%$$

$$u_d(EW) = 0.029\%$$

3.7 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：

$$U_d(NS) = 2 \times 0.004\% = 0.008\%$$

$$U_d(EW) = 2 \times 0.029\% = 0.058\%$$

4 量程测量不确定度评定

4.1 测量方法

依据本校准规范 7.4 中的量程校准方法，对被校设备进行测试。

4.2 数学模型

$$x = \frac{\Delta H}{L/2} \rho \times 2 \tag{4.1}$$

式中： x -被校设备倾斜变化量，单位为角秒（"）；

ΔH -被校设备水位变化量，单位为米（m）；

L -被校设备基线长度，单位为米（m）；

ρ -系数， $\rho=206265$ 。

4.3 不确定度来源

量程的测量不确定度主要来源有：

- a) 由激光干涉仪引入的测量不确定度分量 u_X ；
- b) 由基线长度测量误差引入的测量不确定度分量 u_L ；

4.4 标准不确定度评定

4.4.1 激光干涉仪引入的测量不确定度分量 u_X

激光干涉仪的分辨力为 $1nm$ ，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：

$$u_x = \frac{0.5}{\sqrt{3}}nm \approx 0.289nm$$

通过不确定度传播律得灵敏度系数：

$$c_X = \frac{4\rho}{L}$$

4.4.2 基线长度测量误差引入的测量不确定度分量 u_L

基线长度测量误差为 $1mm$ ，假设误差服从均匀分布，则由平台基线误差引入的不确定度为：

$$u_L = \frac{1mm}{2\sqrt{3}} = 0.289mm$$

由不确定度传播律，取实验标称长度 $\Delta H = 64.3\mu m$ ，计算灵敏度系数：

$$c_L = -\frac{4\Delta H\rho}{L^2}$$

4.5 标准不确定度分量一览表

表 4 量程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	B	均匀	c_X	0.289nm
u_L	基线长度测量误差	B	均匀	c_L	0.289mm

4.6 合成标准不确定度 u_L

考虑到各影响量，且各不确定度分量独立不相关，则分辨力的合成标准不确定度为：

$$u_R = \sqrt{c_X^2 u_x^2 + c_L^2 u_L^2}$$

计算得到：

$$u_R = 1.19 \times 10^{-5}''$$

4.7 扩展不确定度 U_L

取包含因子 $k = 2$ ，被校仪器量程测量的扩展不确定度为：

$$U_R = 2 \times u_R = 2.38 \times 10^{-5}''$$