

洞体应变仪校准规范
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：SSY 型伸缩仪（基线长 20m）

检测地点：武汉地震台九峰山洞（温度 19.6℃，湿度 69.7%）

检测设备：激光干涉仪、数据采集器

不确定度评定项目：

洞体应变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

灵敏度计算：

$$n = \frac{\Delta \overline{y}}{\Delta \overline{L}}$$

(1.1)

式中： n —被校仪器灵敏度，单位为（V/m）；

$\Delta \overline{y}$ —应变仪输出电压变化量平均值；

$\Delta \overline{L}$ —应变变化量平均值。

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：

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

根据不确定度传播律，灵敏度系数为：

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

1.4.2 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：

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

根据不确定度传播律，灵敏度系数为：

$$c_v = \frac{\partial n}{\partial y} = \frac{1}{\Delta L}$$

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_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：

$$u_s = \sqrt{c_x^2 u_x^2 + c_v^2 u_v^2} = 0.402V/m$$

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：

$$U_s = 0.804V/m$$

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：

$$k = \frac{2 \times (n - 2)}{(d'_n - d'_2) + (d'_{-n} - d'_{-2})} \times \frac{3 \times 10^{-10}}{10^{-10}} \tag{2.1}$$

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 3×10^{-10} 相应时间间隔序列的观测值。

计算归一化序列值：

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

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

$$\overline{d_i''} = \overline{d''} + (1 + n/2 - |i|) \times 3 \quad (2.4)$$

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

$\Delta d_i''$ 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 由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 $u_s = 0.402V/m$ ，根据实验结果计算相对不确定度为：

$$u_i(NS) = 0.00079\%$$

$$u_i(EW) = 0.00077\%$$

由于灵敏度与观测值为倍乘关系，比例系数为常数，可以用灵敏度的相对不确定度作为观测值的相对不确定度，则由灵敏度误差引入的观测值不确定度为：

$$u_i(NS) = u_i \times d_i' \times 10^{-10} = 4.88 \times 10^{-13}$$

$$u_i(EW) = u_i \times d_i' \times 10^{-10} = 1.98 \times 10^{-13}$$

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：

$$u_k = \frac{-60 \times u_i}{(d_7' - d_2' + d_{-7}' - d_{-2}')^2}$$

由式 (2.2)、(2.3)、(2.4)、(2.5) 得到全过程灵敏度为：

$$c_i = \left(1 + \frac{1}{\sqrt{12}} \right) \times k + \left(d_i' - \frac{\sum_{t=2}^7 d_t' + \sum_{t=-2}^{-7} d_t'}{12} \right) \frac{-60}{(d_7' - d_2' + d_{-7}' - d_{-2}')^2}$$

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: 4.88×10^{-13} EW: 1.98×10^{-13}

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：

$$u_\delta(NS) = \sqrt{c_i^2 u_i(NS)^2} = 0.0105 \times 10^{-10}$$
$$u_\delta(EW) = \sqrt{c_i^2 u_i(EW)^2} = 0.0075 \times 10^{-10}$$

2.7 扩展不确定度 U_δ ：

取包含因子 $k=2$ ，被校仪器分辨力测量的扩展不确定度为：

$$U_\delta(NS) = 2 \times u_\delta(NS) = 0.021 \times 10^{-10}$$
$$U_\delta(EW) = 2 \times u_\delta(EW) = 0.015 \times 10^{-10}$$

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

$$\varepsilon = \frac{L' - L}{L} = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.1)$$

式中：

ε 为线应变变量，即单位长度的相对变化量；

L 为基线长度，即 A、B 两点间起始距离；

L' 为发生变化后的两点间距离；

ΔL 为变化量。

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

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

$$L_{\varepsilon\varepsilon} = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2 \quad (3.4)$$

$$L_{\varepsilon y} = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})(y_i - \bar{y}) \quad (3.5)$$

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

$$b = \frac{L_{\varepsilon y}}{L_{\varepsilon\varepsilon}} \quad (3.7)$$

直线拟合值：

$$Y_i = a + b\varepsilon_i \quad (3.8)$$

线性偏差：

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

线性度为：

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

式中：

ε_i -应变变量；

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；

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 ；

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，因此引入的相对标准不确定度为：

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

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：

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

接下来计算灵敏度系数，通过不确定度传播律得：

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

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:

$$\begin{aligned} u_d(NS) &= 0.0037\% \\ u_d(EW) &= 0.0073\% \end{aligned}$$

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:

$$\begin{aligned} U_d(NS) &= 2 \times 0.0037\% = 0.0074\% \\ U_d(EW) &= 2 \times 0.0073\% = 0.0146\% \end{aligned}$$

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

$$\varepsilon = \frac{L' - L}{L} = \frac{\Delta L}{L} \tag{4.1}$$

式中:

ε 为线应变变量, 即单位长度的相对变化量。

L 为基线长度, 即 A、B 两点间起始距离。

L' 为发生变化后的两点间距离。

ΔL 为变化量。

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 ;

4.4 标准不确定度评定

4.4.1 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 ，假设误差服从均匀分布，因此由激光干涉仪精度引入的不确定度为：

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

接下来计算灵敏度系数，通过不确定度传播律得：

$$c_X = \frac{1}{L}$$

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：

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

由不确定度传播率，取实验标称长度 $\Delta L = 102\mu\text{m}$ ，计算灵敏度系数：

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

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

4.6 合成标准不确定度 u_R

考虑到各影响量，且各不确定度分量独立不相关，则量程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：

$$u_R = 7.51 \times 10^{-11} \text{ }^{\circ}$$

4.6 扩展不确定度 U_R

取包含因子 $k = 2$ ，被校仪器量程测量的扩展不确定度为：

$$U_R = 2 \times u_R = 1.50 \times 10^{-10} \text{ }^{\circ}$$