

国家计量技术规范
涉水工程精密定位校准规范
（征求意见稿）
不确定度评定报告

规范起草组

2026 年 5 月

目 录

一、概述.....	1
二、不确定度评定示例.....	1
三、结论.....	9

一、概述

应用不确定度评定方法，分析所规定的计量性能、技术条件、检定条件（所使用的标准器及有关设备仪器，环境条件等）、校准方法是否科学合理，给出测量不确定度评定示例。

二、不确定度评定示例

1 卫星定位误差测量不确定度评定

1.1 测量模型

$$\Delta G = \frac{\sum_{i=1}^{10} \sqrt{(N_{G,i} - N_{G,0})^2 + (E_{G,i} - E_{G,0})^2}}{10} \quad (1)$$

式中：

ΔG ——卫星定位平面定位误差，m；

$(N_{G,i}, E_{G,i})$ ——GNSS 接收机相对于 CORS 站点的平面坐标测量值，m；

$(N_{G,0}, E_{G,0})$ ——标准观测点相对于 CORS 站点的平面坐标标准值，m。

1.2 灵敏系数

由于测量模型中各输入量互不相关，则灵敏系数为

$$\begin{aligned} c(N_{G,i}) &= \frac{\partial(\Delta G)}{\partial(N_{G,i})} = \frac{(N_{G,i} - N_{G,0})}{10\sqrt{(N_{G,i} - N_{G,0})^2 + (E_{G,i} - E_{G,0})^2}} \\ c(E_{G,i}) &= \frac{\partial(\Delta G)}{\partial(E_{G,i})} = \frac{(E_{G,i} - E_{G,0})}{10\sqrt{(N_{G,i} - N_{G,0})^2 + (E_{G,i} - E_{G,0})^2}} \\ c(N_{G,0}) &= \frac{\partial(\Delta G)}{\partial(N_{G,0})} = \frac{-(N_{G,i} - N_{G,0})}{\sqrt{(N_{G,i} - N_{G,0})^2 + (E_{G,i} - E_{G,0})^2}} \\ c(E_{G,0}) &= \frac{\partial(\Delta G)}{\partial(E_{G,0})} = \frac{-(E_{G,i} - E_{G,0})}{\sqrt{(N_{G,i} - N_{G,0})^2 + (E_{G,i} - E_{G,0})^2}} \end{aligned}$$

1.3 测量不确定度来源分析

- (1) 测量重复性引入的标准不确定度 $u(N_{G,i})$ ；
- (2) 测量重复性引入的标准不确定度 $u(E_{G,i})$ ；
- (3) 标准值测量引入的标准不确定度 $u(N_{G,0})$ ；
- (4) 标准值测量引入的标准不确定度 $u(E_{G,0})$ 。

1.4 各输入量的标准不确定度分量评定

1.4.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u(N_{G,i})$ 和 $u(E_{G,i})$

以平面坐标（4308842.251，560564.818）m 为例进行重复性测量，计算算术平均值，作为本次卫星定位平面坐标测量值参与重复性计算。

表 1 平面重复性试验数据

测量次数	测量值 m		测量次数	测量值 m	
	N	E		N	E
1	4308842.240	560564.826	6	4308842.250	560564.833
2	4308842.265	560564.801	7	4308842.248	560564.809
3	4308842.234	560564.828	8	4308842.265	560564.800
4	4308842.237	560564.803	9	4308842.251	560564.809
5	4308842.240	560564.800	10	4308842.237	560564.836

使用贝塞尔公式计算单次测量标准偏差，得 $s_N = 0.011\text{m}$ ， $s_E = 0.014\text{m}$ 。校准时，单次测量值作为测量结果，则测量重复性引入的测量不确定度为 $u(N_{G,i}) = 0.011\text{m}$ ， $u(E_{G,i}) = 0.016\text{m}$ 。

1.4.2 标准值测量引入的标准不确定度 $u(N_{G,0})$ 和 $u(E_{G,0})$

标准值测量引入的标准不确定度 $u(N_{G,0})$ 和 $u(E_{G,0})$ 相等，下面以 $u(N_{G,0})$ 为例进行评定。此外，标准值测量引入的标准不确定度主要来源于标准观测点基线测量标准差。

对标准观测点采用标准不确定度的 B 类评定方法，基线测量最大允许误差为 $\leq 3\text{mm} + 0.5 \times 10^{-6}D$ ，以中基线 10000m 为例，则基线测量最大允许误差为 8mm。估计其为均匀分布，则其不确定度 $u(X_{G,0})$ 为 $u(X_{G,0}) = \frac{0.008\text{m}}{\sqrt{3}} = 0.0046\text{m}$ 。

1.5 各不确定度分量汇总

表 2 卫星定位平面定位误差标准不确定度分量一览表

序号	来源	类型	标准不确定度	灵敏系数
1	测量重复性引入的标准不确定度 $u(N_{G,i})$	A	0.011m	-0.026

序号	来源	类型	标准不确定度	灵敏系数
2	测量重复性引入的标准不确定度 $u(E_{G,i})$	A	0.016m	-0.022
3	标准值测量引入的标准不确定度 $u(N_{G,0})$	B	0.0046m	0.26
4	标准值测量引入的标准不确定度 $u(E_{G,0})$	B	0.0046m	0.22

1.6 合成标准不确定度

$$u_c(\Delta G) = \sqrt{c(X_{G,i})^2 u(X_{G,i})^2 + c(X_{G,0})^2 u(X_{G,0})^2 + c(X_{G,i})^2 u(X_{G,i})^2 + c(X_{G,0})^2 u(X_{G,0})^2} = 0.0016\text{m}$$

1.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为： $U = k \times u_c(\Delta G) \approx 0.004\text{m}$ 。

2 声学定位误差测量不确定度评定

2.1 测量模型

$$\Delta S = \sqrt{(X_s - X_0^s)^2 + (Y_s - Y_0^s)^2 + (Z_s - Z_0^s)^2} \quad (2)$$

式中：

ΔS ——声学定位误差，m。

(X_s, Y_s, Z_s) ——声学换能器测量的信标位置，m；

X_0^s ——信标操作平台平移装置相对于起始点的平移距离，m；

Y_0^s ——信标操作平台升降装置相对于起始点的升降距离，m；

Z_0^s ——信标操作平台至声学换能器的水平距离，m。

2.2 灵敏系数

由于测量模型中各输入量互不相关，则灵敏系数为

$$c(X_s) = \frac{(X_s - X_0^s)}{\sqrt{(X_s - X_0^s)^2 + (Y_s - Y_0^s)^2 + (Z_s - Z_0^s)^2}}$$

$$c(Y_s) = \frac{(Y_s - Y_0^s)}{\sqrt{(X_s - X_0^s)^2 + (Y_s - Y_0^s)^2 + (Z_s - Z_0^s)^2}}$$

$$c(Z_s) = \frac{(Z_s - Z_0^s)}{\sqrt{(X_s - X_0^s)^2 + (Y_s - Y_0^s)^2 + (Z_s - Z_0^s)^2}}$$

$$c(X_0^s) = \frac{-(X_s - X_0^s)}{\sqrt{(X_s - X_0^s)^2 + (Y_s - Y_0^s)^2 + (Z_s - Z_0^s)^2}}$$

$$c(Y_0^s) = \frac{-(Y_s - Y_0^s)}{\sqrt{(X_s - X_0^s)^2 + (Y_s - Y_0^s)^2 + (Z_s - Z_0^s)^2}}$$

$$c(Z_0^s) = \frac{-(Z_s - Z_0^s)}{\sqrt{(X_s - X_0^s)^2 + (Y_s - Y_0^s)^2 + (Z_s - Z_0^s)^2}}$$

2.3 测量不确定度来源分析

(1) 测量重复性引入的标准不确定度。

(2) 标准值测量引入的标准不确定度。

2.4 各输入量的标准不确定度分量评定

2.4.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u(X_s)$ 、 $u(Y_s)$ 和 $u(Z_s)$

以 (1.000, 1.000, 50.000) m 为例进行重复性测量。

表 3 测量重复性试验数据

测量次数	测量值 m		
	X	Y	Z
1	0.999	1.004	49.996
2	1.007	1.005	50.009
3	1.005	0.998	49.996
4	1.003	1.009	50.006
5	1.005	1.006	50.008
6	1.002	1.005	49.992
7	1.010	0.994	50.000
8	1.002	1.003	49.992
9	1.000	1.001	49.995

测量次数	测量值 m		
	X	Y	Z
10	0.997	1.001	50.007

使用贝塞尔公式计算实验标准偏差，得 $s(X_s)=0.0039\text{m}$ ， $s(Y_s)=0.0043\text{m}$ ， $s(Z_s)=0.0068\text{m}$ 。校准时，取单次测量值作为测量结果，则测量重复性引入的测量不确定度与实验标准偏差相同。

2.4.2. 标准值测量引入的标准不确定度 $u(X_0^s)$ 、 $u(Y_0^s)$ 和 $u(Z_0^s)$

标准值测量引入的标准不确定度 $u(X_0^s)$ 、 $u(Y_0^s)$ 和 $u(Z_0^s)$ 相等，下面以 $u(X_0^s)$ 为例进行评定。

2.4.2.1 全站仪测量引入的标准不确定度 $u_1(X_0^s)$

标准值测量的标准不确定来源全站仪的测距误差，对全站仪采用标准不确定度的 B 类评定方法，全站仪的准确度等级为 I 级，最大允许误差为 $\pm(1\text{mm}+1\text{ppm})$ 。斜距为 100m 时，计算得最大允许误差 $\pm 1.1\text{mm}$ ，估计其为均匀分布，则其不确定度 $u(X_0^s)$ 为

$$u(X_0^s) = \frac{1.1\text{mm}}{\sqrt{3}} = 0.63\text{mm}。$$

2.4.2.2 操作平台测量引入的标准不确定度 $u_2(X_0^s)$

标准值测量的标准不确定来源操作平台的位移误差，对操作平台采用标准不确定度的 B 类评定方法，操作平台的最大允许误差为 $\pm 5\text{mm}$ ，估计其为均匀分布，则其不确定度为

$$u_2(X_0^s) = \frac{5\text{mm}}{\sqrt{3}} = 2.9\text{mm}。$$

全站仪测量引入的标准不确定度与操作平台测量引入的标准不确定度互不相关，则标准值测量引入的标准不确定度为 $u(X_0^s) = \sqrt{u_1^2(X_0^s) + u_2^2(X_0^s)} = 3\text{mm}。$

2.5 各不确定度分量汇总

表 5 不确定度分量一览表

序号	来源	类型	标准不确定度	灵敏系数
1	测量重复性引入的标准不确定度 $u(X_s)$	A	3.9mm	0.755
2	测量重复性引入的标准不确定度 $u(Y_s)$	A	4.3mm	0.654
3	测量重复性引入的标准不确定度 $u(Z_s)$	A	6.8mm	0.025
4	标准值测量引入的标准不确定度 $u(X_0^S)$	B	3mm	-0.755
5	标准值测量引入的标准不确定度 $u(Y_0^S)$	B	3mm	-0.654
6	标准值测量引入的标准不确定度 $u(Z_0^S)$	B	3mm	-0.025

2.6 合成标准不确定度

$$u_c(\Delta S) = \sqrt{c(X_s)^2 u(X_s)^2 + c(Y_s)^2 u(Y_s)^2 + c(Z_s)^2 u(Z_s)^2 + c(X_0^S)^2 u(X_0^S)^2 + c(Y_0^S)^2 u(Y_0^S)^2 + c(Z_0^S)^2 u(Z_0^S)^2} = 5\text{mm}$$

2.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为： $U = k \times u_c(\Delta S) = 10\text{mm}$ 。

3 光学定位示值误差测量不确定度评定

3.1 测量模型

$$\Delta D = \sqrt{(\bar{X}_D - X_0^D)^2 + (\bar{Y}_D - Y_0^D)^2 + (\bar{Z}_D - Z_0^D)^2} \quad (3)$$

式中：

ΔD_i ——光学定位误差，m；

$(\bar{X}_D, \bar{Y}_D, \bar{Z}_D)$ ——水下光学定位测量值，m；

(X_0^D, Y_0^D, Z_0^D) ——水下光学定位标准值，m。

3.2 灵敏系数

由于测量模型中各输入量互不相关，则灵敏系数为

$$c(\bar{X}_D) = \frac{(\bar{X}_D - X_0^D)}{\sqrt{(\bar{X}_D - X_0^D)^2 + (\bar{Y}_D - Y_0^D)^2 + (\bar{Z}_D - Z_0^D)^2}}$$

$$c(\bar{Y}_D) = \frac{(\bar{Y}_D - Y_0^D)}{\sqrt{(\bar{X}_D - X_0^D)^2 + (\bar{Y}_D - Y_0^D)^2 + (\bar{Z}_D - Z_0^D)^2}}$$

$$c(\bar{Z}_D) = \frac{(\bar{Z}_D - Z_0^D)}{\sqrt{(\bar{X}_D - X_0^D)^2 + (\bar{Y}_D - Y_0^D)^2 + (\bar{Z}_D - Z_0^D)^2}}$$

$$c(X_0^D) = \frac{-(\bar{X}_D - X_0^D)}{\sqrt{(\bar{X}_D - X_0^D)^2 + (\bar{Y}_D - Y_0^D)^2 + (\bar{Z}_D - Z_0^D)^2}}$$

$$c(Y_0^D) = \frac{-(\bar{Y}_D - Y_0^D)}{\sqrt{(\bar{X}_D - X_0^D)^2 + (\bar{Y}_D - Y_0^D)^2 + (\bar{Z}_D - Z_0^D)^2}}$$

$$c(Z_0^D) = \frac{-(\bar{Z}_D - Z_0^D)}{\sqrt{(\bar{X}_D - X_0^D)^2 + (\bar{Y}_D - Y_0^D)^2 + (\bar{Z}_D - Z_0^D)^2}}$$

3.3 测量不确定度来源分析

(1) 测量重复性引入的标准不确定度。

(2) 标准值测量引入的标准不确定度。

3.4 各输入量的标准不确定度分量评定

3.4.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u(\bar{X}_D)$ 、 $u(\bar{Y}_D)$ 和 $u(\bar{Z}_D)$

以 (0.000, 0.000, 1.000) m 为例进行重复性测量, 计算算术平均值, 作为本次光学定位测量值参与重复性计算。

表 6 重复性试验数据

测量次数	测量值 m		
	$\bar{X}_D$	$\bar{Y}_D$	$\bar{Z}_D$
1	0.001	0.002	0.999
2	-0.001	0.000	0.999
3	0.002	-0.001	1.001
4	0.001	0.002	1.002
5	-0.001	0.000	1.000
6	0.002	0.002	1.002
7	0.000	0.001	1.002
8	-0.001	0.000	1.000

测量次数	测量值 m		
	$\bar{X}_D$	$\bar{Y}_D$	$\bar{Z}_D$
9	0.001	0.000	0.999
10	0.000	0.002	1.002

使用贝塞尔公式计算单次测量标准偏差，得 $s(\bar{X}_D)=0.001\text{m}$ ， $s(\bar{Y}_D)=0.001\text{m}$ ， $s(\bar{Z}_D)=0.001\text{m}$ 。校准时，取 10 个测量值的平均值作为测量结果，则测量重复性引入的测量不确定度为 $u(\bar{X}_D)=\frac{s(\bar{X}_D)}{\sqrt{10}}=0.4\text{mm}$ ， $u(\bar{Y}_D)=\frac{s(\bar{Y}_D)}{\sqrt{10}}=0.4\text{mm}$ ， $u(\bar{Z}_D)=\frac{s(\bar{Z}_D)}{\sqrt{10}}=0.4\text{mm}$ 。

3.4.2 标准值测量引入的标准不确定度 $u(X_0^D)$ 、 $u(Y_0^D)$ 和 $u(Z_0^D)$

标准值测量引入的标准不确定度 $u(X_0^D)$ 、 $u(Y_0^D)$ 和 $u(Z_0^D)$ 相等，下面以 $u(X_0^D)$ 为例进行评定。标准值测量引入的标准不确定度主要来源于全站仪，因此评定全站仪引入的不确定度即可。

对全站仪采用标准不确定度的 B 类评定方法，全站仪的准确度等级为 I 级，最大允许误差为 $\pm(1\text{mm}+1\text{ppm})$ 。斜距为 10m 时，计算得最大允许误差 $\pm 1\text{mm}$ ，估计其为均匀分布，则其不确定度为 $u(X_0^D)=\frac{1\text{mm}}{\sqrt{3}}=0.58\text{mm}$ 。

3.5 各不确定度分量汇总

表 7 不确定度分量一览表

序号	来源	类型	标准不确定度	灵敏系数
1	测量重复性引入的标准不确定度 $u(\bar{X}_D)$	A	0.4mm	0
2	测量重复性引入的标准不确定度 $u(\bar{Y}_D)$	A	0.4mm	0.74
3	测量重复性引入的标准不确定度 $u(\bar{Z}_D)$	A	0.4mm	0.56
4	标准值测量引入的标准不确定度 $u(X_0^D)$	B	0.58mm	0

序号	来源	类型	标准不确定度	灵敏系数
5	标准值测量引入的标准不确定度 $u(Y_0^D)$	B	0.58mm	-0.74
6	标准值测量引入的标准不确定度 $u(Z_0^D)$	B	0.58mm	-0.56

3.6 合成标准不确定度

$$u_c(\Delta D) = \sqrt{c(\bar{X}_D)^2 u(\bar{X}_D)^2 + c(X_0^D)^2 u(X_0^D)^2 + c(\bar{Y}_D)^2 u(\bar{Y}_D)^2 + c(Y_0^D)^2 u(Y_0^D)^2 + c(\bar{Z}_D)^2 u(\bar{Z}_D)^2 + c(Z_0^D)^2 u(Z_0^D)^2} = 0.65\text{mm}$$

3.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为： $U = k \times u_c(\Delta D) = 1.3\text{mm} \approx 1\text{mm}$ 。

三、结论

在测量范围内，卫星定位误差、声学定位误差和光学定位误差校准结果的扩展不确定度均符合量传比。