

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX-XXXX

工程测量仪器在工业检测中的 测量不确定度评定

Measurement Uncertainty Evaluation

for Engineering Surveying Instruments in Industrial Testing

(草案)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

工程测量仪器在工业检测 中的测量不确定度评定

JJFXXXX-XXXX

Measurement Uncertainty Evaluation for

Engineering Surveying Instruments in Industrial Testing

归口单位：全国测量不确定度计量技术委员会

主要起草单位：福建省计量科学研究院

中国航空工业集团公司北京长城

计量测试技术研究所

中国计量科学研究院

参加起草单位：国家光电测距仪检测中心

西安计量技术研究院

本规范委托全国测量不确定度计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参加起草人：

目 录

引 言

本规范是以 JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》、JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》为基础性系列规范进行编写。

本规范为首次发布。

工程测量仪器在工业检测中的测量不确定度评定

1 范围

本规范适用于全站仪、经纬仪在工业现场（大型设备拼接测量、大尺寸形位检测、大型精密工程定位安装测量等）中的几何量测量不确定度评定。主要涵盖角度测量、距离测量和坐标测量。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》

JJG 1152-2018《工业测量型全站仪检定规程》

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 术语及定义

3.1 工业测量

在工业生产和科研各环节中，为产品的设计、制造、安装、放样、检测、质量控制和动态监测中提供目标的形状、尺寸及运动状态等相关的测量。

3.2 目标不确定度

根据工业需求设定的最大允许不确定度（如钢结构安装要求 $U \leq 0.5\text{mm}$, $k=2$ ）。

3.3 测站稳定性

测量过程中仪器对中/整平变化引入的不确定度分量。

4 测量不确定度来源

4.1 测量不确定度来源分析

工业检测中的测量不确定来源很多，包括仪器本身的误差、操作安装误差、环境因素带来的误差、测量对象和方法带来的误差等。

表 1 工业检测中的不确定度来源及影响

不确定度来源类别	具体因素	对测量结果的影响
仪器本身的误差	测距误差（加常数、乘常数）	直接影响距离测量结果
	测角误差（度盘刻划误差、轴系误差）	直接影响角度及坐标测量结果
	电子补偿器（竖轴倾斜补偿）误差	影响高程和天顶距测量

操作安装误差	仪器对中误差	引入系统性坐标平移
	目标（棱镜/反射片）偏心误差	引入点位误差
	仪器整平误差	影响角度基准
环境因素带来的误差	温度、湿度、气压变化	引起大气折射率变化，影响测距； 引起仪器形变
	温度梯度与气流	导致光线抖动，引入角度和距离噪声
	振动	导致仪器轴系关系变化，读数不稳定
测量对象和方法带来的误差	目标反射特性	影响测距信号的强度和精度
	数学模型近似	计算公式的简化引入的误差

5. 测量不确定度评定方法

5.1 测量模型的建立

根据测量任务建立数学模型，工业检测中的测量模型主要包括角度测量模型、距离测量模型和坐标测量模型。

（1）角度测量模型：角度包括水平角和垂直角。经纬仪或全站仪架设在测站 O 点，分别照准目标 A 和 B，各读取一个方向值，两方向值之差即为水平角或垂直角。

$$\alpha = L_B - L_A$$

式中： α —待测水平角或垂直角；

L_B 、 L_A —经纬仪或全站仪照准目标 A 和 B 时的方向观测值。

根据测量模型、现场条件以及测量经验，识别影响角度测量的主要不确定度来源，包括测量重复性、仪器测角误差、仪器对中误差、目标偏心误差等。但这些误差对角度测量结果的影响无法用解析形式的数学表达式进行表示，因此需要用黑箱模型对角度测量模型进行表示。

完整的角度测量模型如下式：

$$\alpha = L_B - L_A + \delta_s + \delta_a + \delta_c + \delta_e$$

式中： δ_s —测角重复性带来的误差，包括人员瞄准、环境抖动、电子读数噪声等随

机效应的综合影响；

δ_a —仪器自身的测角误差；

δ_c —仪器中心未严格对准测站点 O 的垂线带来的误差；

δ_e —目标（棱镜或标志点）中心未严格对准目标点 A 或 B 的垂线带来的误差。

（2）距离测量模型：在测站 O 点架设全站仪，在目标点 P 架设棱镜。使用全站仪对棱镜进行距离测量。根据测量模型、现场条件以及测量经验，识别影响距离测量的主要不确定度来源，包括：测量重复性、大气折射率误差、仪器对中误差、目标偏心误差等。但这些误差对距离测量结果的影响无法用解析形式的数学表达式进行表示，因此需要用黑箱模型对距离测量模型进行表示。

$$D = D_i + \delta D_n + \delta D_s + \delta D_c + \delta D_t$$

式中：D—被测距离；

D_i —全站仪读数值；

δD_n —大气折射率修正引入的残余误差；

δD_s —仪器比例误差；

δD_c —仪器对中整平引入的测距误差；

δD_t —温度变化引入的测距误差。

（3）坐标测量模型：

工业型全站仪点位测量采用的是空间球坐标测量原理。在测站 O 整平对中后，照准目标点 P 上的圆棱镜，测量斜距 D 、水平角 H_z 和天顶距 V 。测站坐标 (X_0, Y_0, Z_0) 为已知点，其不确定度可忽略。仪器高 h 和棱镜高 v 均精确量取。

按照右手坐标系即可解算测量点的三维坐标值为：

$$\begin{cases} X = X_0 + D \cdot \sin(V) \cdot \cos(H_z) \\ Y = Y_0 + D \cdot \sin(V) \cdot \sin(H_z) \\ Z = Z_0 + D \cdot \cos(V) + h - v \end{cases}$$

式中：(X, Y, Z)—目标点空间坐标；

(X_0, Y_0, Z_0) —测站点空间坐标；

D_i —斜距；

H_Z —水平角；

V —天顶距；

h —仪器高；

v —棱镜高。

5.2 标准不确定度的评定

测量不确定度一般由若干分量组成，每个分量用其概率分布的标准偏差估计值表征，称标准不确定度。用标准不确定度表示的各分量用 u_i 表示。根据对 X_i 的一系列测得值 x_i 得到实验标准偏差的方法为 A 类评定。根据有关信息估计的先验概率分布得到标准偏差估计值的方法为 B 类评定。

标准不确定度的 A 类评定和标准不确定度的 B 类评定参照 JJF 1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》。

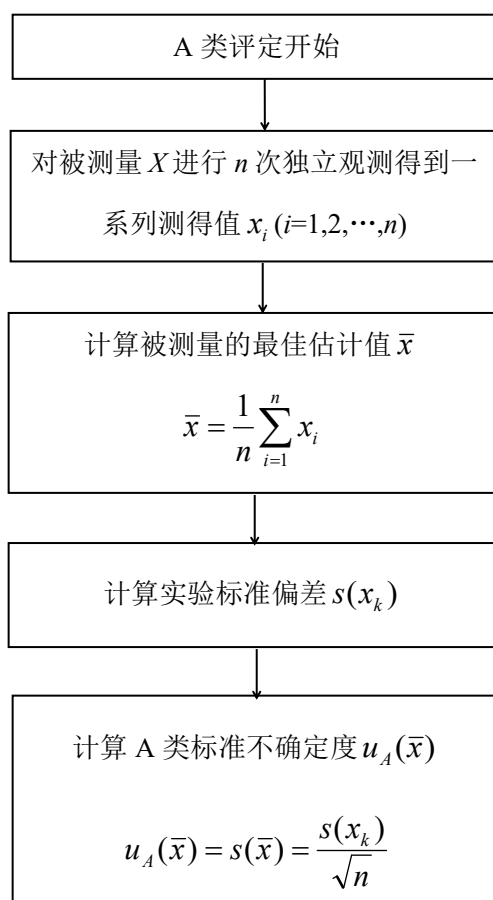


图 1 标准不确定度的 A 类评定流程图

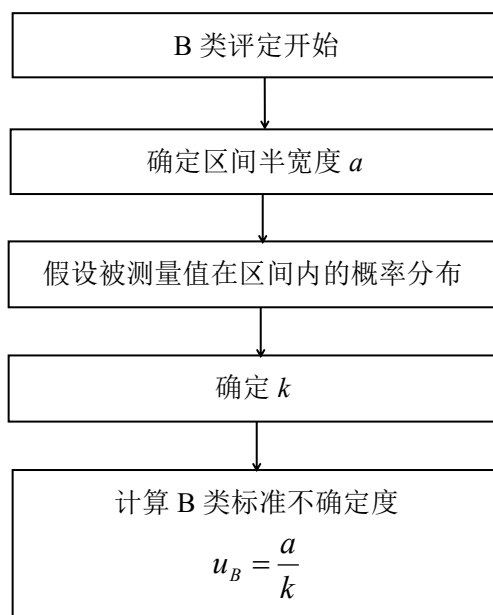


图 2 标准不确定度的 B 类评定流程图

5.3 合成标准不确定度评定

根据测量模型，计算灵敏系数，根据不确定度传播率，计算合成标准不确定度。

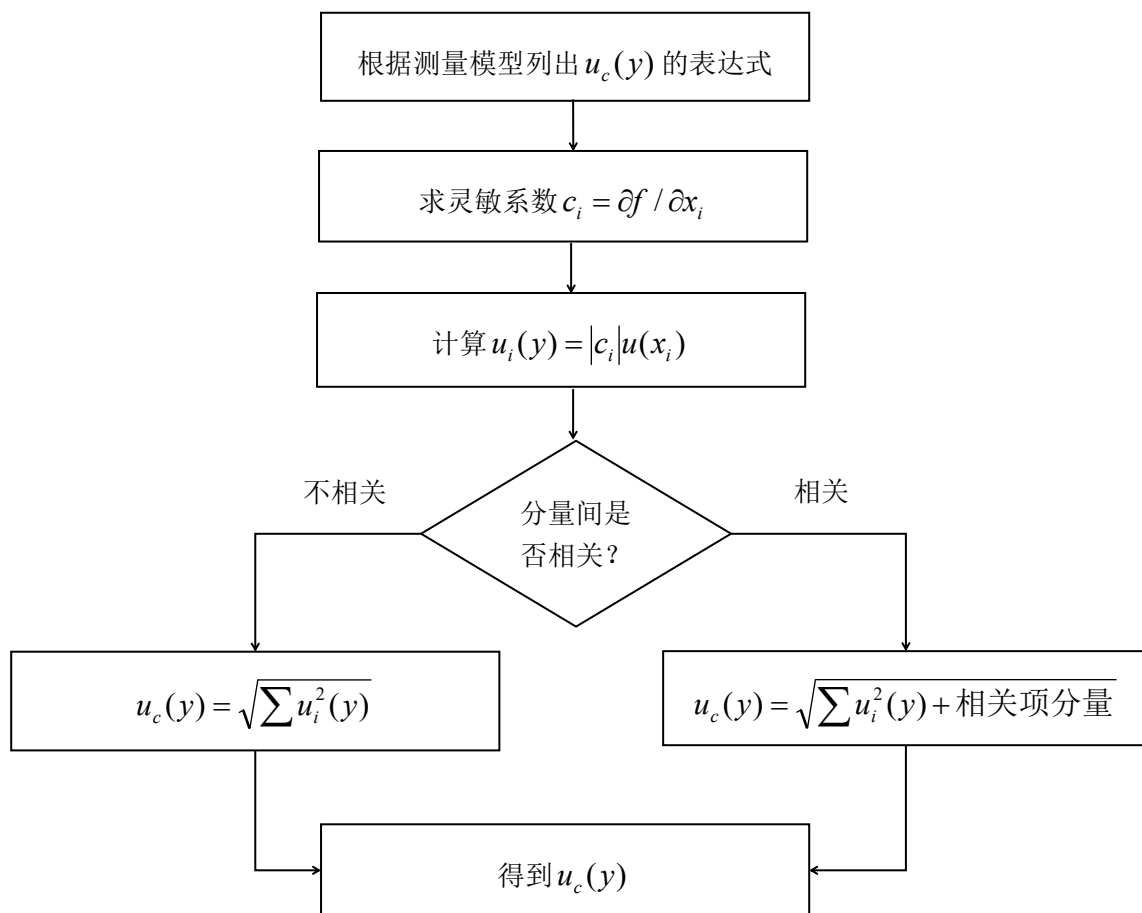


图 3 合成标准不确定度评定流程图

5.4 计算扩展不确定度

扩展不确定度 U 由合成标准不确定度 u_c 乘包含因子 k 得到，一般情况取 $k=2$ ，则：

$$U = k \cdot u_c$$

测量结果可用下式表示：

$$Y = y \pm U$$

附录 A

角度测量结果不确定度评定示例

1. 测量任务概述

测量设备：高精度全站仪（例如：标称测角精度为 $\pm 1''$ 的仪器）

测量方法：在测站 O 点整平、对中安置全站仪。分别照准目标点 A 和目标点 B，在盘左（或盘右）位置各读取一个方向观测值 L_A 和 L_B 。

测量模型：水平角（或垂直角） α 由下式计算得出：

$$\alpha = L_B - L_A$$

式中： α —待测水平角或垂直角；

L_B 、 L_A —经纬仪或全站仪照准目标 A 和 B 时的方向观测值。

2. 不确定度来源分析

根据测量方法和仪器特性，影响角度 α 测量不确定度的主要来源包括：

2.1 全站仪测角系统的重复性（ u_1 ）：

仪器在相同条件下对同一目标进行多次照准和读数的离散性。这是最主要的分量。

2.2 全站仪测角系统的系统误差（ u_2 ）：

包括度盘刻划误差、轴系误差（视准轴误差、横轴误差、竖轴倾斜误差）等。虽然部分误差可以通过盘左盘右观测消除，但在单次观测中会引入不确定度。仪器的标称精度通常已包含此项。

2.3 照准误差（ u_3 ）：

由于目标（如棱镜、觇牌）的清晰度、大气湍流等原因导致照准不精确。

2.4 仪器对中误差（ u_4 ）：

仪器中心与测站点 O 不重合产生的误差。

2.5 目标偏心误差（ u_5 ）：

目标中心（如棱镜中心）与目标点 A 或 B 不重合产生的误差。

3. 测量模型与不确定度传播律

测量模型为： $\alpha = L_B - L_A$

根据不确定度传播律，角度 α 的合成标准不确定度 $u_c(\alpha)$ 为：

$$u_c^2(\alpha) = c_A^2 u^2(L_A) + c_B^2 u^2(L_B)$$

其中，灵敏系数 $c_A = \frac{\partial \alpha}{\partial L_A} = -1$ ， $c_B = \frac{\partial \alpha}{\partial L_B} = 1$ 。

假设 L_A 和 L_B 不相关，且其不确定度来源和大小基本相同， $u(L_A) = u(L_B) = u(L)$ 则：

$$u_c(\alpha) = \sqrt{u^2(L_A) + u^2(L_B)} = \sqrt{2}u(L)$$

4. 标准不确定度分量的评定

4.1 全站仪测角系统的重复性与系统误差 (u_{inst})

这个分量通常由仪器的标称测角精度来综合评定。制造商给出的精度（如 1"）是包含重复性和主要系统误差在内的扩展不确定度，通常服从正态分布或均匀分布。

取包含因子 $k=2$ ，则单方向观测的标准不确定度为：

$$u_{inst} = \frac{1''}{2} = 0.5''$$

4.2 照准误差 (u_{tgt})

照准误差与望远镜放大倍率、目标形状和大气条件有关。经验上，对于一个放大倍率为 $30\times$ 的全站仪，照准误差约为 $\pm 2.0''$ ，假设为均匀分布。

$$u_{tgt} = \frac{2''}{\sqrt{3}} = 1.155''$$

4.3 仪器对中误差 ($u_{cen-inst}$)

假设使用光学对中器，其对中误差约为 $\pm 1\text{mm}$ 。设测站 O 至目标 A、B 的距离均为 $D=100\text{m}$ 。其对角度的影响为：

$$\theta_{cen} \approx \frac{e_{cen}}{D} \cdot \rho = \frac{0.001\text{m}}{100\text{m}} \cdot 206265'' = 2.06''$$

其中 $\rho=206265''$ 是弧秒换算常数。此为极限误差，假设为均匀分布，则对单方向的影响为：

$$u_{cen-inst} = \frac{\theta_{cen}}{\sqrt{3}} = \frac{2.06''}{\sqrt{3}} = 1.189''$$

4.4 目标偏心误差 ($u_{cen-tgt}$)

假设棱镜对中杆的倾斜和对中导致目标偏心误差约为 $\pm 2\text{mm}$ 。距离同样为 100m 。其对角度的影响为：

$$\theta_{tgt} \approx \frac{e_{tgt}}{D} \cdot \rho = \frac{0.002\text{m}}{100\text{m}} \cdot 206265'' = 4.12''$$

此为极限误差，假设为均匀分布，则对单方向的影响为：

$$u_{cen-tgt} = \frac{\theta_{tgt}}{\sqrt{3}} = \frac{4.12''}{\sqrt{3}} = 2.379''$$

5. 单方向观测值的合成标准不确定度

以上各分量相互独立，因此单方向观测值 L 的合成标准不确定度为：

$$u(L) = \sqrt{u_{inst}^2 + u_{tgt}^2 + u_{cen-inst}^2 + u_{cen-tgt}^2} = \sqrt{(0.500)^2 + (1.155)^2 + (1.189)^2 + (2.379)^2} \approx 2.943''$$

6. 角度 α 的合成标准不确定度

$$u_c(\alpha) = \sqrt{2}u(L) = \sqrt{2} \cdot 2.943'' \approx 4.162''$$

7. 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k=2$ ，则角度 α 测量的扩展不确定度 U 为：

$$U = k \times u_c(\alpha) = 2 \times 4.162'' \approx 8.3''$$

附录 B

距离测量结果的不确定度评定示例

1. 测量任务概述

测量对象：全站仪对固定棱镜的斜距测量。

测量距离： $D \approx 100\text{m}$ 。

测量仪器：Leica TS16 全站仪（测距标称精度： $\pm(1\text{ mm} + 1.5\text{ ppm})$ ）。

测量条件：室外场地，温度 $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，气压 $(1013 \pm 10)\text{ hPa}$ ，存在轻微气流。

测量方法：在测站 O 整平对中，在目标点 P 架设棱镜，连续测量 6 次取平均值。

测量模型：

$$D = \bar{D}_{obs} + \delta D_{scale} + \delta D_{atm} + \delta D_{cen}$$

式中： D —被测距离；

$\bar{D}_{obs}$ —全站仪读数值平均值；

δD_{scale} —仪器比例误差；

δD_{atm} —大气折射率修正引入的残余误差；

δD_{cen} —仪器对中整平引入的测距误差；

2. 不确定度来源分析

来源	符号	评定方法
测量重复性	u_A	由重复性试验数据得到
仪器比例误差	$u_B(S)$	根据仪器的最大允许误差计算得到
大气折射率修正残余误差	u_{atm}	基于气象测量误差
仪器对中误差	$u_{cen-inst}$	基于对中装置精度
目标偏心误差	$u_{cen-tgt}$	基于对中杆精度

3. 标准不确定度分量评定：

3.1 测量重复性 u_A ：

试验得到 10 次距离测量数据为：

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
实测值 (m)	104.781 1	104.781 3	104.781 3	104.781 2	104.781 4	104.781 3	104.780 9	104.781 1	104.781 1	104.781 1
测量次数	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
实测值 (m)	104.781 2	104.781 0	104.781 0	104.781 3	104.781 5	104.781 1	104.780 9	104.781 0	104.781 2	104.781 3

单次实验标准偏差： $s=0.16\text{mm}$

标准不确定度： $u_A = s = 0.16\text{ mm}$

3.2 仪器比例误差 $u_B(S)$ ：

仪器 MPE： $\pm(1\text{ mm}+1.5\times 10^{-6}\times D)$ 。

对于 100 m 距离： $a=1+1.5\times 10^{-6}\times 100000=1.15\text{ mm}$ 。

按均匀分布： $u_B(S) = a/\sqrt{3}=0.66\text{mm}$ 。

3.3 大气折射率修正残余误差 u_{atm} ：

考虑温度测量误差 ($\pm 1^\circ\text{C}$)、气压测量误差 ($\pm 3\text{ hPa}$) 和模型近似性，综合导致约 $\pm 2\text{ ppm}$ 的折射率修正误差。

半宽： $a=2\times 10^{-6}\times 100000\text{ mm}=0.2\text{ mm}$ 。

均匀分布： $u_{atm} = a/\sqrt{3}=0.115\text{mm}$ 。

3.4 仪器对中误差 $u_{cen-inst}$ ：

使用光学对中器，其对中误差限约为 $\pm 1\text{ mm}$ 。此误差直接影响测站坐标。

半宽： $a=1.0\text{ mm}$ 。

按均匀分布： $u_{cen-inst} = a/\sqrt{3}=0.58\text{mm}$ 。

3.5 目标偏心误差 $u_{cen-tgt}$ ：

棱镜对中杆的对中误差限约为 $\pm 1 \text{ mm}$ 。保守估计其在测线方向上的投影影响为 $\pm 1 \text{ mm}$ 。

半宽： $a=1.0 \text{ mm}$

按均匀分布： $u_{\text{cen-tgt}} = a/\sqrt{3} = 0.58 \text{ mm}$ 。

4.合成标准不确定度

以上各分量相互独立，因此距离测量的合成标准不确定度为：

$$\begin{aligned} u(D) &= \sqrt{u_A^2 + u_B(S) + u_{\text{atm}}^2 + u_{\text{cen-inst}}^2 + u_{\text{cen-tgt}}^2} \\ &= \sqrt{(0.16)^2 + (0.66)^2 + (0.115)^2 + (0.58)^2 + (0.58)^2} \approx 1.07 \text{ mm} \end{aligned}$$

5.扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度：

$$U = k \cdot u(D) = 2 \times 1.07 \text{ mm} = 2.2 \text{ mm}$$

附录 C

坐标测量不确定度评定示例

1. 测量任务概述

测量对象：目标点 P 的三维坐标(X , Y , Z)。

测量仪器：Leica TS16 全站仪（测角精度 $\pm 1''$ ，测距精度 $\pm(1 \text{ mm} + 1.5 \text{ ppm})$ ）。

测量条件：室外，距离约 100 m。温度 $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ，气压 $1013 \text{ hPa} \pm 10 \text{ hPa}$ 。使用圆棱镜。

测量方法：在已知点 O 架设仪器，后视已知点 A，测量目标点 P 的斜距 S 、水平角 H_z 和天顶距 V 。重复测量 3 测回取平均值。仪器高 i 和棱镜高 v 均精确量取。

测量模型：

$$\begin{cases} X = X_0 + D \cdot \sin(V) \cdot \cos(H_z) \\ Y = Y_0 + D \cdot \sin(V) \cdot \sin(H_z) \\ Z = Z_0 + D \cdot \cos(V) + h - v \end{cases}$$

式中：(X, Y, Z)—目标点空间坐标；

(X_0, Y_0, Z_0)—测站点空间坐标；

D_i —斜距；

H_z —水平角；

V —天顶距；

h —仪器高；

v —棱镜高。

求偏导计算灵敏系数：

坐标	对 S 的偏导	对 V 的偏导	对 H_z 的偏导
X	$c_{s_x} = \sin(V) \cos(H_z)$	$c_{v_x} = S \cdot \cos(V) \cos(H_z)$	$c_{H_{zx}} = -S \cdot \sin(V) \sin(H_z)$
Y	$c_{s_y} = \sin(V) \sin(H_z)$	$c_{v_y} = S \cdot \cos(V) \sin(H_z)$	$c_{H_{zy}} = S \cdot \sin(V) \cos(H_z)$

Z	$c_{s_z} = \cos(V)$	$c_{v_z} = -S \cdot \sin(V)$	$c_{H_{zz}} = 0$
-----	---------------------	------------------------------	------------------

注： $u(V)$ 和 $u(H_z)$ 需以弧度为单位。

2.标准不确定度分量评定：

2.1 全站仪角度测量的不确定度经评定为：

$$U = 8.3'' = 4.02 \times 10^{-5} \text{rad}, k=2$$

则水平角和天顶距的标准不确定度为： $u(V) = u(H_z) = 2.01 \times 10^{-5} \text{rad}$ 。

2.2 全站仪距离测量的不确定度经评定为：

$$U = 2.2 \text{mm}, k=2。$$

则距离测量的标准不确定度为： $u(S) = 1.1 \text{mm}$

2.3 来自仪器高 i 的测量误差：假设量取误差为 $\pm 1 \text{ mm}$ ，均匀分布。

$$u(i) = \frac{1.0}{\sqrt{3}} \approx 0.58 \text{mm}$$

2.4 来自棱镜高 v 的测量误差：

假设量取误差为 $\pm 1 \text{ mm}$ ，均匀分布。

$$u(v) = \frac{1.0}{\sqrt{3}} \approx 0.58 \text{mm}$$

3.计算合成标准不确定度

假设观测值： $S=100.0000 \text{ m}$, $V=80.0000^\circ \approx 1.39626 \text{ rad}$, $H_z=45.0000^\circ \approx 0.78540 \text{ rad}$

3.1 计算灵敏系数：

$$c_{s_x} = \sin(V) \cos(H_z) \approx 0.9848 \times 0.7071 \approx 0.696$$

$$c_{v_x} = S \cdot \cos(V) \cos(H_z) \approx 100 \times 0.1736 \times 0.7071 \approx 12.27 \text{m}$$

$$c_{H_{ZX}} = -S \cdot \sin(V) \sin(H_z) \approx -100 \times 0.9848 \times 0.7071 \approx -69.62\text{m}$$

按同样方法计算 Y、Z 坐标的灵敏系数。

坐标	对 S 的偏导	对 V 的偏导	对 H _z 的偏导
X	$c_{s_x} = 0.696$	$c_{v_x} = 12.27\text{m}$	$c_{H_{ZX}} = -69.62\text{m}$
Y	$c_{s_y} = 0.696$	$c_{v_y} = 12.27\text{m}$	$c_{H_{ZY}} = 69.62\text{m}$
Z	$c_{s_z} = 0.174$	$c_{v_z} = -98.48\text{m}$	$c_{H_{ZZ}} = 0$

3.2 合成坐标不确定度

X 坐标合成不确定度为：

$$\begin{aligned}
 u_c(X) &= \sqrt{(c_{s_x} \cdot u(s))^2 + (c_{v_x} \cdot u(V))^2 + (c_{H_{ZX}} \cdot u(H_z))^2} \\
 &= \sqrt{(0.696 \times 0.0011)^2 + (12.27 \times 2.01 \times 10^{-5})^2 + (-69.62 \times 2.01 \times 10^{-5})^2} \\
 &= \sqrt{(0.000766)^2 + (0.000247)^2 + (-0.001399)^2} \approx 0.0016\text{m} = 1.6\text{mm}
 \end{aligned}$$

Y 坐标合成不确定度为：

$$\begin{aligned}
 u_c(Y) &= \sqrt{(c_{s_y} \cdot u(s))^2 + (c_{v_y} \cdot u(V))^2 + (c_{H_{ZY}} \cdot u(H_z))^2} \\
 &= \sqrt{(0.696 \times 0.0011)^2 + (12.27 \times 2.01 \times 10^{-5})^2 + (69.62 \times 2.01 \times 10^{-5})^2} \\
 &= \sqrt{(0.000766)^2 + (0.000247)^2 + (0.001399)^2} \approx 0.0016\text{m} = 1.6\text{mm}
 \end{aligned}$$

Z 坐标合成不确定度为：

$$\begin{aligned}
 u_c(Z) &= \sqrt{(c_{s_z} \cdot u(s))^2 + (c_{v_z} \cdot u(V))^2 + (c_{H_{ZZ}} \cdot u(H_z))^2 + u^2(i) + u^2(v)} \\
 &= \sqrt{(0.174 \times 0.0011)^2 + (-98.48 \times 2.01 \times 10^{-5})^2 + (0.00058)^2 + (0.00058)^2} \\
 &= \sqrt{(0.000191)^2 + (0.001979)^2 + (0.00058)^2 + (0.00058)^2} \approx 0.0022\text{m} = 2.2\text{mm}
 \end{aligned}$$

4. 扩展不确定度：

取包含因子 $k=2$ ，则坐标测量的扩展不确定度为：

$$U(X)=2\times 1.6=3.2\text{mm}$$

$$U(Y)=2\times 1.6=3.2\text{mm}$$

$$U(Z)=2\times 2.2=4.4\text{mm}$$

中华人民共和国
国家计量技术规范
XXXXXXXXXX 校准规范
JJFXXXX—XXXX
国家市场监督管理总局发布