

《浅水底物分辨标准场校准规范》

# 不确定度评定报告

(征求意见稿)

校准规范起草组

2022年8月

# 浅水底物分辨标准场不确定度评定

本项目依据《JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示》，经过不确定度来源分析、建立满足测量不确定度评定所需的测量模型、确定各输入量的估值等工作，对本装置测量不确定度进行科学的评定。

## 1 试验水池尺寸校准不确定度评定示例

### 1.1 测量模型

水池尺寸  $L$ ：

$$L = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} \quad (1)$$

式中：

$L$  ——水池一边长度，m；

$\Delta x$  ——水池一边两个角点 $x$ 坐标差值，m；

$\Delta y$  ——水池一边两个角点 $y$ 坐标差值，m；

$\Delta z$  ——水池一边两个角点 $z$ 坐标差值，m。

### 1.2 不确定度来源分析

根据 JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》，就水池尺寸校准结果的测量不确定度进行分析评定，全站仪允许输入测量时的大气压和温度环境参数进行自动改正，因此环境因素对测量的影响可忽略不计，则尺寸校准结果除测量重复性引入的标准不确定度外，其次来源于全站仪测量误差。

### 1.3 标准测量不确定度评定

#### 1.3.1 测量重复性引入的标准不确定度

在相同的测量条件下，充分考虑环境因素对测量结果的影响，将气压、温度等参数输入全站仪进行自动改正，对水池尺寸重复测量 6 次，具体数据见表 1。

表 1 试验水池尺寸重复性测量数据

次数	$\Delta x$ (m)	$\Delta y$ (m)	$\Delta z$ (m)	尺寸 $L$ (m)
1	0.1758	41.0136	0.0081	41.0140
2	0.1760	41.0129	0.0079	41.0133

3	0.1753	41.0131	0.0080	41.0135
4	0.1753	41.0135	0.0076	41.0139
5	0.1753	41.0141	0.0081	41.0145
6	0.1749	41.0141	0.0078	41.0148
均值	0.1754	41.0136	0.0079	41.0140
$S_n$	—	—	—	0.00057

采用测量不确定度的 A 类评定方法计算标准不确定度，使用贝塞尔公式计算标准偏差，计算平均值的测量不确定度。

尺寸测量数据的标准偏差  $s=0.57\text{mm}$ ，则重复性引入的 A 类标准不确定度为：

$$u_A(L) = \frac{S_n}{\sqrt{6}} = 0.23\text{mm} \quad (2)$$

### 1.3.2 全站仪测量引入的标准不确定度

全站仪在测量的过程中，水池尺寸计算公式如下所示：

$$L = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} \quad (3)$$

对来源于仪器测量精度引入的测量不确定分量采用 B 类评定方法。基于水池尺寸计算公式，全站仪测量不确定度主要来源于 3 个分量： $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ 。由于全站仪斜距测量数学模型中的  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  互不相关，故其合成方差为：

$$u(L)^2 = c^2(\Delta x)u^2(\Delta x) + c^2(\Delta y)u^2(\Delta y) + c^2(\Delta z)u^2(\Delta z) \quad (4)$$

式中灵敏系数为：

$$c(\Delta x) = \frac{\partial(L)}{\partial(\Delta x)} = 0.004, \quad c(\Delta y) = \frac{\partial(L)}{\partial(\Delta y)} = 1, \quad c(\Delta z) = \frac{\partial(L)}{\partial(\Delta z)} = 0.0002 \quad (5)$$

试验中所采用的 TM30 全站仪（无棱镜）测距误差为  $2\text{mm}+2\text{ppm}$ ，估计其为服从均匀分布，采用标准不确定度的 B 类评定方法，取包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，以水池一边尺寸 41m 计，则：

$$u(\Delta x) = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.155\text{mm}, \quad u(\Delta y) = \frac{2.082}{\sqrt{3}} = 1.202\text{mm}, \quad u(\Delta z) = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.155\text{mm} \quad (6)$$

则水池尺寸的测量不确定度 B 类评定为:

$$u_B(L) = \sqrt{c^2(\Delta x)u^2(\Delta x) + c^2(\Delta y)u^2(\Delta y) + c^2(\Delta z)u^2(\Delta z)} = 1.202\text{mm} \quad (7)$$

#### 1.4 合成标准不确定度

计入 A 类和 B 类标准不确定度, 则合成标准不确定度为:

$$u_C(L) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 1.224\text{mm} \quad (8)$$

#### 1.5 合成扩展不确定度

取扩展因子  $k=2$ , 则试验水池尺寸测量结果的扩展不确定度为:

$$u(L) = 2u_C(L) = 2.448\text{mm} \quad (9)$$

## 2 升降杆臂垂直度校准不确定度评定

### 2.1 测量模型

升降杆臂垂直度  $p$ :

$$p = \frac{\sqrt{(\Delta x')^2 + (\Delta y')^2}}{|\Delta z'|} \times 100\% \quad (10)$$

式中:

$\Delta x'$  ——升降杆臂顶部与底部中心点  $x$  坐标差值, mm;

$\Delta y'$  ——升降杆臂顶部与底部中心点  $y$  坐标差值, mm;

$\Delta z'$  ——升降杆臂顶部与底部中心点  $z$  坐标差值, m。

### 2.2 不确定度来源分析

根据 JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》, 就升降杆臂垂直度校准结果的测量不确定度进行分析评定, 全站仪允许输入测量时的大气压和温度环境参数进行自动改正, 因此环境因素对测量的影响可忽略不计, 则尺寸校准结果除测量重复性引入的标准不确定度外, 其次来源于全站仪测量误差。

### 2.3 标准测量不确定度评定

#### 2.3.1 测量重复性引入的标准不确定度

采用 A 类方法评定。在相同的测量条件下, 充分考虑环境因素对测量结果

的影响，将气压、温度等参数输入全站仪进行自动改正，对升降杆臂重复测量 6 次，取平均值并计算标准偏差，结果如表 2 所示。

对于来源于测量重复性引入的测量不确定分量采用 A 类评定方法计算标准不确定度，使用贝塞尔公式计算标准偏差，计算平均值的测量不确定度。

表 2 升降杆臂垂直度测量数据

观测 次序	偏移量(mm)		垂直高度差(m)	垂直度(%)
	$\Delta x'$	$\Delta y'$	$\Delta z'$	
1	1.3	2.1	3.0734	0.080
2	2.0	2.5	3.0737	0.103
3	2.0	1.7	3.0736	0.087
4	1.9	3.5	3.0739	0.130
5	2.2	3.6	3.0737	0.137
6	2.8	3.3	3.0727	0.141
均值	2.03	2.78	3.0735	0.113
标准 偏差	-----	-----	-----	0.027

则重复性引入的 A 类标准不确定度为：

$$u_A(p) = \frac{S_n}{\sqrt{6}} = 0.00011 \quad (11)$$

### 2.3.2 全站仪测量精度引入的不确定度分量

全站仪在测量的过程中，垂直度计算公式如下所示：

$$p = \frac{\sqrt{(\Delta x')^2 + (\Delta y')^2}}{|\Delta z'|} \times 100\% \quad (12)$$

对来源于仪器测量精度引入的测量不确定分量采用 B 类评定方法。基于垂

直度计算公式，全站仪测量不确定度主要来源于 3 个分量： $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ 。由于全站仪斜距测量数学模型中的  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  互不相关，故其合成方差为：

$$u(p)^2 = c^2(\Delta x')u^2(\Delta x') + c^2(\Delta y')u^2(\Delta y') + c^2(\Delta z')u^2(\Delta z') \quad (13)$$

式中灵敏系数为：

$$c(\Delta x') = \frac{\partial(p)}{\partial(\Delta x')} = 0.00019 \quad (14)$$

$$c(\Delta y') = \frac{\partial(p)}{\partial(\Delta y')} = 0.00026 \quad (15)$$

$$c(\Delta z') = \frac{\partial(p)}{\partial(\Delta z')} = 0 \quad (16)$$

试验中所采用的 TM30 全站仪（无棱镜）测距测距精度 2mm+2ppm, 采用标准不确定度的 B 类评定方法, 以升降杆臂顶部至底部中心点测距 3m 计，则引入的测距误差为：

$$u(\Delta x') = u(\Delta y') = 2mm \quad (17)$$

$$u(\Delta z) = 2.006mm \quad (18)$$

则：

$$u(p) = \sqrt{c^2(\Delta x')u^2(\Delta x') + c^2(\Delta y')u^2(\Delta y') + c^2(\Delta z')u^2(\Delta z')} = 0.00064 \quad (19)$$

测量结果服从均匀分布，取包含因子  $k = \sqrt{3}$ , 升降转置垂直度测量的 B 类不确定度评定为：

$$u_B(p) = \frac{u(p)}{\sqrt{3}} = 0.00037 \quad (20)$$

## 2.4 合成标准不确定度

计入 A 类和 B 类标准不确定度，则合成标准不确定度为：

$$u_C(p) = \sqrt{u_A(p)^2 + u_B(p)^2} = 0.039\% \quad (21)$$

## 2.5 合成扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则升降杆臂垂直度测量结果的扩展不确定度为：

$$u(p) = 2u_c(p) = 0.078\% \quad (22)$$

## 3 标准目标物尺寸偏差校准不确定度评定

### 3.1 测量模型

利用钢卷尺测量标准目标物的长、宽、高，每个位置测量的读数示值与基本尺寸之差作为测量结果：

$$e = L_{\text{测}} - L_{\text{标}} \quad (23)$$

$$L_{\text{测}} = L_{\text{读}} + \Delta_t + \Delta_l \quad (24)$$

式中：

$e$  ——标准目标物的尺寸偏差，mm；

$L_{\text{测}}$  ——钢卷尺的测量值，mm；

$L_{\text{标}}$  ——标准目标物的基本尺寸，mm；

$L_{\text{读}}$  ——钢卷尺的读数值，mm；

$\Delta_t$  ——温度改正值，mm；

$\Delta_l$  ——尺长改正值，mm。

### 3.2 不确定度来源分析

根据 JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》，就标准目标物尺寸偏差校准结果的测量不确定度进行分析评定，测量过程中直接测量值均由钢卷尺测量获得。测量时标准目标物平坦放置，因此钢卷尺倾斜误差可忽略不计；测量前对钢卷尺（钢卷尺检定温度、膨胀系数、名义长度、实际长度）进行检定，因此在测量过程中钢卷尺的拉力误差和示值误差皆归算到钢卷尺的尺长改正数（钢卷尺的实际长度和名义长度之差）中；除往返测量重复性引入标准的不确定度外，钢卷尺在测量过程中的读数误差、尺长误差和温度误差是引入不确定度的分量。

### 3.3 标准测量不确定度评定

#### 3.3.1 标准目标物尺寸测量重复性引入标准的不确定度

采用 A 类方法评定。下面就以钢卷尺测量 100mm×100mm×100mm 标准目标物为例，检定后的钢卷尺的示值容许误差为±(0.3+0.2L)mm，则对于 10m 钢卷尺，其最大允许误差为±2.3mm，在相同的测量条件下，充分考虑环境因素对测量结果的影响，对标准目标物各尺寸重复测量 10 次，取平均值并计算标准偏差，得到的结果如表 3 所示。

表 3 标准目标物尺寸测量数据

钢卷尺检定时温度(°C)	钢卷尺膨胀系数	钢卷尺名义长度(m)		钢卷尺实际长度(m)
20	$11.8 \times 10^{-6}$	10		10.0023
次数	温度(°C)	长度(mm)	宽度(mm)	高度(mm)
1	27.4	99.6	99.0	99.3
2	27.3	99.6	99.0	99.3
3	27.3	99.6	99.0	99.3
4	27.4	99.6	99.0	99.3
5	27.4	99.7	99.0	99.4
6	27.4	99.6	99.1	99.3
7	27.4	99.6	99.0	99.4
8	27.4	99.6	99.0	99.3
9	27.4	99.7	99.1	99.4
10	27.4	99.7	99.1	99.4
均值	27.4	99.6	99.0	99.3
$S_n$	--	--	--	0.0667

对于来源于测量重复性引入的测量不确定分量采用 A 类评定方法计算标准不确定度，使用贝塞尔公式计算标准偏差，计算标准目标物尺寸测量值的标准偏

差  $S_n$ 。

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (l_i - \bar{l})^2}{10-1}} = 0.0667\text{mm} \quad (25)$$

则由测量重复性引入的 A 类标准不确定度  $u_A$  为:

$$u_A = \frac{S_n}{\sqrt{10}} = \frac{0.0667}{\sqrt{10}} = 0.0211\text{mm} \quad (26)$$

### 3.3.2 钢卷尺读数引入的不确定度分量

由钢卷尺读数引入的测量不确定分量采用 B 类评定方法计算标准不确定度。钢卷尺分度值是 1mm，钢卷尺的分辨力是 0.5mm，人眼的分辨力是分度值的 0.1mm，取包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，那么使用钢卷尺测量时，读数引入的不确定度分量  $\mu_l$  为:

$$\mu_l = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.0577\text{mm} \quad (27)$$

### 3.3.3 钢卷尺测量精度引入的标准不确定度分量

由钢卷尺测量精度引入的测量不确定分量采用 B 类评定方法计算标准不确定度。

钢卷尺的尺长误差具有系统性，它与所量距离成正比，且所测距离服从均匀分布，取包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则长度  $s$  的尺长改正数引入的测量不确定度分量  $\mu_k$  为:

$$\Delta_l = s \times \frac{|l - l_0|}{l_0} = 99.3 \times \frac{|10002.3 - 10000|}{10000} = 0.0228\text{mm} \quad (28)$$

$$\mu_k = \frac{\Delta_l}{k} = \frac{0.0228}{\sqrt{3}} = 0.0132\text{mm} \quad (29)$$

式中:

$\Delta_l$  ——长度  $l$  的尺长改正数，mm;

$l$  ——钢卷尺实际长度，mm;

$l_0$  ——钢卷尺名义长度，mm。

钢卷尺的长度随温度变化，丈量时温度与检定钢卷尺时温度不一致，或测定的空气温度与钢卷尺温度相差较大，都会产生温度误差，且测量时所测的温度服从均与分布，取包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则长度  $s$  的温度改正数引入的测量不确定度分量  $\mu_t$  为：

$$\Delta_t = \alpha(t - t_0)\bar{s} = 11.8 \times 10^{-6} \times (27.4 - 20) \times 99.3 = 0.0087mm \quad (30)$$

$$\mu_t = \frac{\Delta_t}{k} = \frac{0.0087}{\sqrt{3}} = 0.0050mm \quad (31)$$

式中：

$\Delta_t$  ——长度  $s$  的温度改正数，mm；

$\alpha$  ——钢卷尺膨胀系数；

$t$  ——钢卷尺测量时温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$t_0$  ——钢卷尺检定时温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

由钢卷尺测量精度引入的标准目标物尺寸的 B 类测量不确定度  $\mu_B$  为：

$$\mu_B = \sqrt{\mu_l^2 + \mu_k^2 + \mu_t^2} = \sqrt{0.0577^2 + 0.0132^2 + 0.0050^2} = 0.0594mm \quad (32)$$

### 3.4 合成标准不确定度

计入 A 类和 B 类标准不确定度，则合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.0211^2 + 0.0594^2} = 0.0630mm \quad (33)$$

### 3.5 合成扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则标准目标物尺寸偏差测量结果的扩展不确定度为：

$$U = 2u_c = 2 \times 0.0630 = 0.1260mm \quad (34)$$

## 4 标准目标物间距校准不确定度评定

### 4.1 测量模型

标准目标物间距  $D$ ：

$$D = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (35)$$

式中：

$d_1$  —— 往测距离，cm；

$d_2$  —— 返测距离，cm。

每一次所测距离都需要加 3 项改正：

$$d_i = d_{\text{测}} + \Delta k_i + \Delta t_i \quad (36)$$

式中：

$d_{\text{测}}$  —— 钢卷尺的测量值，mm；

$\Delta k_i$  —— 尺长改正值，mm；

$\Delta t_i$  —— 温度改正值，mm。

## 4.2 不确定度来源分析

根据 JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》，就标准目标物尺寸偏差校准结果的测量不确定度进行分析评定，测量过程中直接测量值均由钢卷尺测量获得。测量时标准目标物放置于平坦的池底，因此钢卷尺倾斜误差可忽略不计；测量前对钢卷尺（钢卷尺检定温度、膨胀系数、名义长度、实际长度）进行检定，因此在测量过程中钢卷尺的拉力误差和示值误差皆归算到钢卷尺的尺长改正数中；除往返测量重复性引入标准的不确定度外，钢卷尺在测量过程中的读数误差、尺长误差和温度误差是引入不确定度的分量。

## 4.3 标准测量不确定度评定

### 4.3.1 测量重复性引入标准的不确定度

采用 A 类方法评定。下面就以相邻两标准目标物间距的实测数据为例，检定后的钢卷尺钢卷尺的示值最大允许误差为  $\pm(0.3+0.2L)\text{mm}$ ，则对于 10m 钢卷尺，其最大允许误差为  $\pm 2.3\text{mm}$ ，在相同的测量条件下，充分考虑环境因素对测量结果的影响，对同一相邻两个目标物之间的距离往返重复测量 10 次，得到的结果如表 4 所示。

对于来源于测量重复性引入的测量不确定分量采用 A 类评定方法计算标准不确定度，使用贝塞尔公式计算标准偏差，并计算平均值的测量不确定度。

表 4 标准目标物间距测量数据

钢卷尺检定时温度(°C)	钢卷尺膨胀系数	钢卷尺名义长度(m)		钢卷尺实际长度(m)
20	$11.8 \times 10^{-6}$	10		10.0023
次数	温度(°C)	间距(cm)	间距(cm)	间距(cm)
1	27.3	100.10	100.00	100.05
2	27.5	100.00	100.10	100.05
3	27.3	100.10	100.10	100.10
4	27.4	100.10	100.10	100.10
5	27.5	100.10	100.10	100.05
6	27.5	100.10	100.00	100.10
7	27.3	100.10	100.10	100.10
8	27.4	100.10	100.10	100.10
9	27.5	100.10	100.10	100.10
10	27.5	100.10	100.10	100.10
均值	27.72	100.09	100.08	100.085
$S_n$	--	--	--	0.02415

由贝塞尔公式，求得标准目标物间距的标准偏差  $S_n$ 。

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (D_i - \bar{D})^2}{10-1}} = 0.2415\text{mm} \quad (37)$$

则由测量重复性引入的 A 类标准不确定度  $u_A$  为：

$$u_A = \frac{S_n}{\sqrt{n}} = \frac{0.2415}{\sqrt{10}} = 0.0764\text{mm} \quad (38)$$

#### 4.3.2 钢卷尺读数引入的不确定度分量

由钢卷尺读数引入的测量不确定分量采用 B 类评定方法计算标准不确定度。钢卷尺分度值是 1mm，钢卷尺的分辨力是 0.5mm，人眼的分辨力是分度值的 0.1mm，那么使用钢卷尺测量时，读数引入的不确定度分量为：

$$\mu_l = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.0577\text{mm} \quad (39)$$

#### 4.3.3 钢卷尺测量引入的标准不确定度分量

由钢卷尺测量精度引入的测量不确定分量采用 B 类评定方法计算标准不确定度。

钢卷尺引入的测量不确定度分量：钢卷尺的尺长误差具有系统性，它与所量距离成正比，且所测距离服从均匀分布，取包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则距离  $d_1$  和  $d_2$  的尺长误差引入的测量不确定度分量  $\mu_k$  为：

$$\Delta k_1 = \bar{d}_1 \times \frac{|l - l_0|}{l_0} = 1.0009 \times \frac{|10.0023 - 10|}{10} = 0.2300 \text{mm} \quad (40)$$

$$\Delta k_2 = \bar{d}_2 \times \frac{|l - l_0|}{l_0} = 1.0008 \times \frac{|10.003 - 10|}{10} = 0.2300 \text{mm} \quad (41)$$

$$\mu_k = \frac{\Delta k_1 + \Delta k_2}{2k} = \frac{0.2300 + 0.2300}{2 \times \sqrt{3}} = 0.1328 \text{mm} \quad (42)$$

式中：

$\Delta k_1$  ——距离  $d_1$  的尺长改正数，m；

$\Delta k_2$  ——距离  $d_2$  的尺长改正数，m；

$l$  ——钢卷尺实际长度，m；

$l_0$  ——钢卷尺名义长度，m。

钢卷尺引入的测量不确定度分量：钢卷尺的长度随温度变化，丈量时温度与检定钢卷尺时温度不一致，或测定的空气温度与钢卷尺温度相差较大，都会产生温度误差，且测量时所测的温度服从均匀分布，取包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则距离  $d_1$  和  $d_2$  的尺长误差引入的测量不确定度分量  $\mu_t$  为：

$$\Delta t_1 = \alpha(\bar{t} - t_0)\bar{d}_1 = 11.8 \times 10^{-6} \times (27.42 - 20) \times 1.0009 = 0.0876 \text{mm} \quad (43)$$

$$\Delta t_2 = \alpha(\bar{t} - t_0)\bar{d}_2 = 11.8 \times 10^{-6} \times (27.42 - 20) \times 1.0008 = 0.0876 \text{mm} \quad (44)$$

$$\mu_t = \frac{\mu_{t_1} + \mu_{t_2}}{2k} = \frac{0.0876 + 0.0876}{2 \times \sqrt{3}} = 0.0506 \text{mm} \quad (45)$$

式中:

$\Delta t_1$  ——距离  $d_1$  的温度改正数, °C;

$\Delta t_2$  ——距离  $d_2$  的温度改正数, °C;

$\alpha$  ——钢卷尺膨胀系数;

$t$  ——钢卷尺测量时温度, °C;

$t_0$  ——钢卷尺检定时温度, °C。

由钢卷尺测量精度引入的标准目标物间距的 B 类测量不确定度  $\mu_B$  为:

$$\mu_B = \sqrt{\mu_l^2 + \mu_k^2 + \mu_t^2} = \sqrt{0.0577^2 + 0.1328^2 + 0.0506^2} = 0.1534mm \quad (46)$$

#### 4.4 合成标准不确定度

计入 A 类和 B 类标准不确定度, 则合成标准不确定度为:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.0764^2 + 0.1534^2} = 0.1714mm \quad (47)$$

#### 4.5 合成扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ , 则标准目标物间距测量结果的扩展不确定度为:

$$U = 2u_c = 2 \times 0.1714 = 0.3428mm \quad (48)$$

### 5 行车速度校准不确定度评定

#### 5.1 测量模型

行车速度  $v$ :

$$v_i = \frac{\sqrt{(\Delta x'')^2 + (\Delta y'')^2 + (\Delta z'')^2}}{2 * \Delta t} \quad (49)$$

$$v = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N} \quad (50)$$

式中:

$v_i$  ——第  $i$  个采样点处行车速度, m/s;

$\Delta x''$  ——第  $i$  个采样点处行车  $x$  方向的位移增量, m;

$\Delta y^i$  ——第  $i$  个采样点处行车  $y$  方向的位移增量, m;

$\Delta z^i$  ——第  $i$  个采样点处行车  $z$  方向的位移增量, m;

$N$  ——采样点个数;

$\Delta t$  ——采样时间间隔, s。

## 5.2 不确定度来源分析

测量过程中直接测量值均由 AT930 激光跟踪仪测量获得。徠卡 AT930 激光跟踪仪有效跟踪距离为 160m, 测角精度为  $15\mu\text{m}+6\mu\text{m}/\text{m}$ , 测距精度为  $0.5\mu\text{m}/\text{m}$ , 磁性标靶的光学中心精度为  $3\mu\text{m}$ , 动态锁定精度为  $10\mu\text{m}$ 。AT930 具备集成环境单元可以自动补偿外部温度、压力和湿度因素, 因此环境因素对测量的影响可忽略不计。除测量重复性引入的标准不确定度外, 激光跟踪仪的测角、测距精度、动态锁定精度, 磁性反射标靶的光学中心精度均是引入不确定度的分量。

$$u_c(v) = \sqrt{u_A(v)^2 + u_B(v)^2} \quad (51)$$

$$u_A(v) = \frac{S(\bar{v})}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n (v_n - \bar{v})^2}{n(n-1)}} \quad (52)$$

$$u_B(v) = \frac{\sqrt{u_\theta^2 + u_{\Delta x}^2 + u_m^2 + u_R^2}}{\Delta t} \quad (53)$$

$u_c(v)$  ——行车速度的合成标准不确定度, mm/s;

$u_A$  ——行车速度的 A 类不确定度, mm/s;

$S(\bar{v})$  ——行车速度的标准偏差, mm/s;

$n$  ——测量次数;

$u_B$  ——行车速度的 B 类不确定度, mm/s;

$u_\theta$  ——激光跟踪仪测角误差引起的不确定度分量, mm;

$u_{\Delta x}$  ——激光跟踪仪测距误差引起的不确定度分量, mm;

$u_m$  ——激光跟踪仪动态锁定误差引起的不确定度分量, mm;

$u_R$  ——磁性反射标靶中心定位精度引起的不确定度分量，mm。

### 5.3 标准测量不确定度评定

#### 5.3.1 测量重复性引入的标准不确定度

采用 A 类方法评定。在相同的测量条件下，充分考虑环境因素对测量结果的影响，由激光跟踪仪的集成环境单元对温度、压力和湿度等因素进行自动改正。对行车平均速度重复测量 8 次，得到的结果如表 5 所示。

由测量重复性引入的测量不确定分量采用 A 类评定方法计算，使用贝塞尔公式计算标准偏差，计算平均值的测量不确定度。

表 5 行车速度测量数据

次数	行车速度(m/s)	次数	行车速度(m/s)
1	0.17678	5	0.17678
2	0.17624	6	0.17665
3	0.17624	7	0.17665
4	0.17678	8	0.17651
均值(m/s)		0.17658	

由贝塞尔公式，求得标准目标物的标准偏差  $S_n$ ：

$$S(\bar{v}) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^m (v_n - \bar{v})^2}{8-1}} = 2.3mm/s \quad (54)$$

则重复性引入的 A 类标准不确定度为：

$$u_A = \frac{S_n}{\sqrt{8}} = 0.8132mm/s \quad (55)$$

#### 5.3.2 激光跟踪仪测量引入的不确定度分量

试验过程中行车稳定运动全程为 15m，故以 15m 为例，基于行车速度计算公式，激光跟踪仪主要来源于三个分量：

(1) 激光跟踪仪测距引入的测量不确定度分量：

徕卡 AT930 激光跟踪仪测距误差  $0.5\mu\text{m}/\text{m}$ ，则行车不同时刻相对位置的测距误差引入的不确定度分量为：

$$u_\theta = (0.5 \times 10^{-3}) \times 15 = 0.75 \times 10^{-2} mm \quad (56)$$

(2) 激光跟踪仪测角引入的测量不确定度分量:

徕卡 AT930 激光跟踪仪测角误差为  $15\mu\text{m}+6\mu\text{m}/\text{m}$ , 则行车不同时刻相对位置的测距误差引入的不确定度分量为:

$$u_{\Delta x} = (15 \times 10^{-3} + 6 \times 10^{-3}) \times 15 = 0.315 \text{mm} \quad (57)$$

(3) 激光跟踪仪的动态锁定误差引入的测量不确定度分量:

徕卡 AT930 激光跟踪仪的动态锁定精度为  $10\mu\text{m}$ , 则激光扫描仪在动态跟踪标靶时的动态锁定误差引入的不确定度分量为:

$$u_m = 10 \times 10^{-3} = 0.01 \text{mm} \quad (58)$$

(4) 磁性反射标靶的光学中心误差引入的测量不确定度分量:

磁性反射标靶的光学中心位置精度为  $3\mu\text{m}$ , 则磁性反射标靶在动态跟踪中由于光学中心误差引入的不确定度分量为:

$$u_R = 3 \times 10^{-3} = 0.003 \text{mm} \quad (59)$$

水下标准目标物的测量不确定度 B 类评定为:

$$u_B(v) = \frac{\sqrt{u_\theta^2 + u_{\Delta x}^2 + u_m^2 + u_R^2}}{1/10} = 3.1526 \text{mm} / \text{s} \quad (60)$$

#### 5.4 合成标准不确定度

计入 A 类和 B 类标准不确定度, 则合成标准不确定度为:

$$u_c(v) = \sqrt{u_A(v)^2 + u_B(v)^2} = 3.2558 \text{mm} / \text{s} \quad (61)$$

#### 5.5 合成扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ , 则行车速度测量结果的扩展不确定度为:

$$U = 2u_c(v) = 6.5116 \text{mm} / \text{s} = 0.006512 \text{m} / \text{s} \quad (62)$$