



# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXX—XXXX

## 浅水底物分辨标准场校准规范

Calibration Specification for Shallow Water Substrate Resolution Standard

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布



# 浅水底物分辨标准场校准规范

Calibration Specification for

Shallow Water Substrate Resolution Standard Field

JJF XXX-XXXX

归口单位：全国水运专用计量器具计量技术委员会

主要起草单位：山东科技大学

交通运输部天津水运工程科学研究所

参加起草单位：国家海洋标准计量中心

本规范由全国水运专用计量器具计量技术委员会负责解释

**本规范主要起草人：**

阳凡林（山东科技大学）

窦春晖（交通运输部天津水运工程科学研究所）

**参加起草人：**

柳义成（交通运输部天津水运工程科学研究所）

于小焱（国家海洋标准计量中心）

石 波（山东科技大学）

李倩倩（山东科技大学）

杨 鲲（交通运输部天津水运工程科学研究所）

# 目 录

引 言.....	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语.....	(1)
4 概述.....	(1)
5 通用技术要求.....	(2)
6 计量特性.....	(3)
7 校准条件.....	(3)
8 校准项目及方法.....	(4)
9 校准结果表达 .....	(10)
10 复校时间间隔 .....	(11)

# 引言

JJF 1001《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》和JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》共同构成支撑本校准规范制定工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

# 浅水底物分辨标准场校准规范

## 1 范围

本规范适用于水下声呐、水下激光扫描仪、水下摄影测量系统的浅水域底物分辨力检定（或校准）所需的标准场的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 3947-1996 声学名词术语

JJF 1034-2020 声学计量名词术语及定义

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

JJF 1034-2020 界定的以及下列术语和定义适用于本规范。

### 3.1 升降杆臂垂直度 verticality of lifting lever arm

升降杆臂轴线的水平方向偏移量与垂直高度之比，指升降杆臂偏移垂直方向上的程度。

### 3.2 标准目标物套组 standard target set

用于检定（或校准）设备底物分辨力的标准装置，由一组尺寸不等的正方体目标物组成。

### 3.3 底物分辨力 substrate resolution

引起水下成像设备图像上可量测到变化的最小标准目标物的尺寸。

## 4 概述

浅水底物分辨标准场是用于开展水下声呐、水下激光扫描仪、水下摄影测量系统浅水域底物分辨力检定（或校准）的基础设施。

标准场主要由试验水池、行车、升降装置、标准目标物套组等部分组成，标准场侧视示意图见图 1，俯视示意图见图 2。

标准场中，试验水池用以提供水下声呐、水下激光扫描仪、水下摄影测量系统所需的测量环境。行车通过控制水下成像设备匀速移动，实现设备的动态测量。标准目标物套组由一组尺寸不等的正方体目标物组成，并固定于水池底部，用以检定（或校准）水下成像

设备的底物分辨力。升降装置用于控制水下成像设备与标准目标物的相对位置关系，精确完成升降功能。

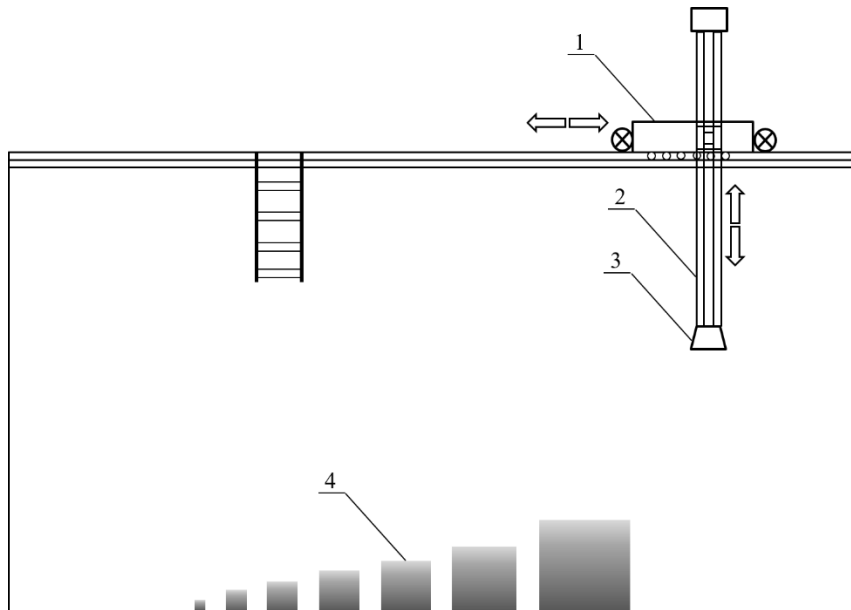


图1 浅水底物分辨标准场侧视示意图

1—行车；2—升降装置；3—换能器支架；4—标准目标物套组

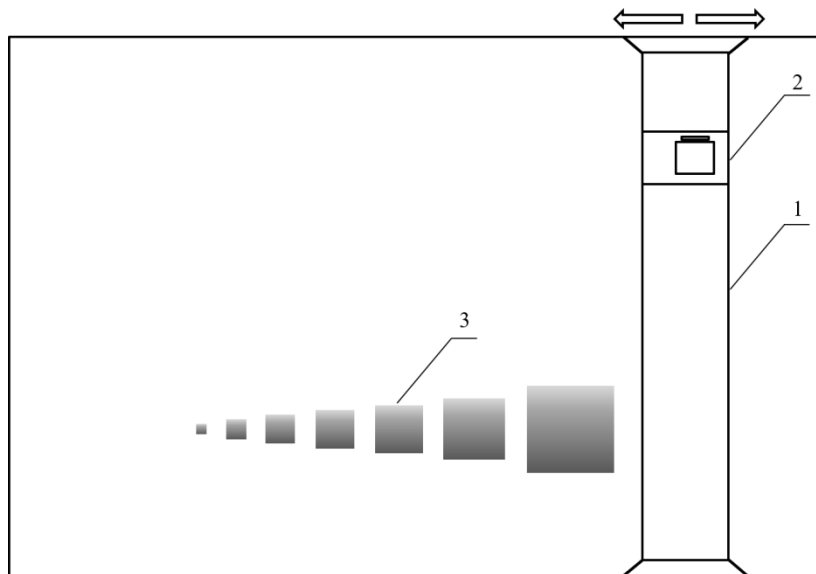


图2 浅水底物分辨标准场俯视示意图

1—行车；2—升降装置；3—标准目标物套组

## 5 通用技术要求

### 5.1 外观

5.1.1 试验水池一般应呈长方形，池体应坚固无裂缝，池底池壁应平整。

5.1.2 升降装置在负载状态下不应有明显变形，支架连接处不应有影响性能的锈蚀。

5.1.3 标准目标物金属表面一般应具有涂镀层，不应有影响性能的锈蚀和变形。

5.1.4 行车轨道不应有影响行车运行性能的锈蚀和变形。



## 5.2 功能

5.2.1 试验水池应具有良好的抗渗性能；在水池明显处，应设置水位观测标尺；试验水池大小若不满足自由场条件，应具备消声功能；试验用水应具有良好的透明度。

5.2.2 升降装置应配备具有良好承重性能的设备安装支架，并具备垂直升降功能；升降杆臂应配有刻度尺或其他设备显示位移距离。

5.2.3 标准目标物应采用防水、抗压、耐腐蚀、耐磨损、耐老化、应力均匀的材料制造。

5.2.4 行车应具有良好的承重性能，应配备速度调节装置，可沿试验水池长边匀速移动，并应配有升降装置。

## 6 计量特性

### 6.1 试验水池尺寸

试验水池尺寸测量不确定度 $U_L \leq (5+2 \times 10^{-6}L)\text{mm}$ ， $k=2$ 。

注： $L$ 为试验水池一边长度，单位为m。

### 6.2 升降装置垂直度

升降装置的杆臂垂直度测量不确定度 $U \leq 0.1\%$ ， $k=2$ 。

### 6.3 标准目标物套组

#### 6.3.1 标准目标物尺寸偏差

标准目标物套组应至少具备边长5cm、10cm、15cm、20cm、25cm、30cm的正方体目标物，尺寸最大允许误差 $\pm 2\text{mm}$ 。

#### 6.3.2 标准目标物间距

相邻标准目标物间距测量不确定 $U \leq (0.5+0.2l)\text{mm}$ ， $k=2$ 。

注： $l$ 为相邻标准目标物间距，单位为m。

### 6.4 行车速度

行车速度应可在0~0.5m/s调节，速度最大允许误差 $\pm 0.01\text{m/s}$ 。

## 7 校准条件

### 7.1 校准环境条件

7.1.1 室外的校准工作应选择气象条件稳定、大气能见度良好的环境。

7.1.2 温度： $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 15\text{ }^\circ\text{C}$ 。

7.1.3 相对湿度：应不大于90%。

### 7.2 校准用标准器

7.2.1 全站仪：测量范围0~1000m，2级。

7.2.2 激光跟踪仪：测量范围0~160m，测角最大允许误差±15μm+6μm/m，测距最大允许误差±0.5μm/m。

7.2.3 钢卷尺：测量范围0~10m，2级。

## 8 校准项目及方法

### 8.1 外观

采用目测和手检的方法检查外观。

### 8.2 功能

采用目测和手检的方法检查功能。

### 8.3 试验水池尺寸

试验水池尺寸校准步骤如下：

- a) 在试验水池一侧架设全站仪，确保全站仪可观测到试验水池池体任一个角点及其相邻的三个角点，并对中整平；
- b) 使用全站仪无棱镜模式测量水池一边的两个角点的坐标，试验水池尺寸校准示意图见图3；
- c) 按公式（1）计算水池一边尺寸：

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

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。

- d) 重复步骤b)测量6次，取均值 $\bar{L}$ 作为水池一边尺寸的测量结果：

$$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n} \quad (2)$$

式中：

$\bar{L}$  ——水池一边长度测量值，m；

$n$  ——测量次数。

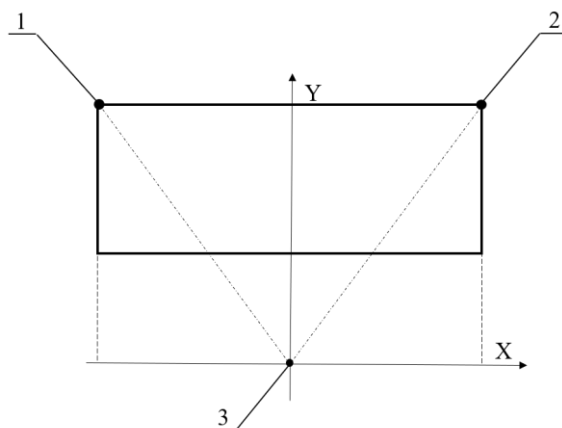


图3 试验水池尺寸校准示意图

1——水池角点 A；2——水池角点 B；3——架设全站仪的控制点

#### 8.4 升降杆臂垂直度

升降杆臂垂直度校准步骤如下：

- 在升降杆臂两条不相邻棱的顶部与底部分别做两个标记点；
- 在试验水池一侧架设全站仪，确保全站仪可观测到升降杆臂其中一条棱，并对中整平，使用无棱镜模式测量该条棱顶部与底部的标记点，两标记点坐标平均值作为顶部平面中心点坐标；
- 全站仪重新设站，确保全站仪可观测到升降杆臂的另一条棱，采用后方交会模式确定新站点坐标，使用无棱镜模式测量该条棱顶部与底部的标记点，两标记点坐标平均值作为底部平面中心点坐标，升降杆臂垂直度校准示意图见图4、图5；
- 计算顶部两个标记点的坐标差，按公式（3）计算升降杆臂的垂直度 $p$ ：

$$p = \frac{\sqrt{(\Delta x')^2 + (\Delta y')^2}}{|\Delta z'|} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

$p$  ——升降杆臂的垂直度；

$\Delta x'$  ——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。

- e) 重复步骤b)、c)测量各标记点坐标6次并计算垂直度 $p$ ，取算术平均值 $\bar{p}$ 作为升降杆臂垂直度的测量结果：

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n} \quad (4)$$

式中：

$\bar{p}$  ——升降杆臂垂直度测量值，m；

$n$  ——测量次数。

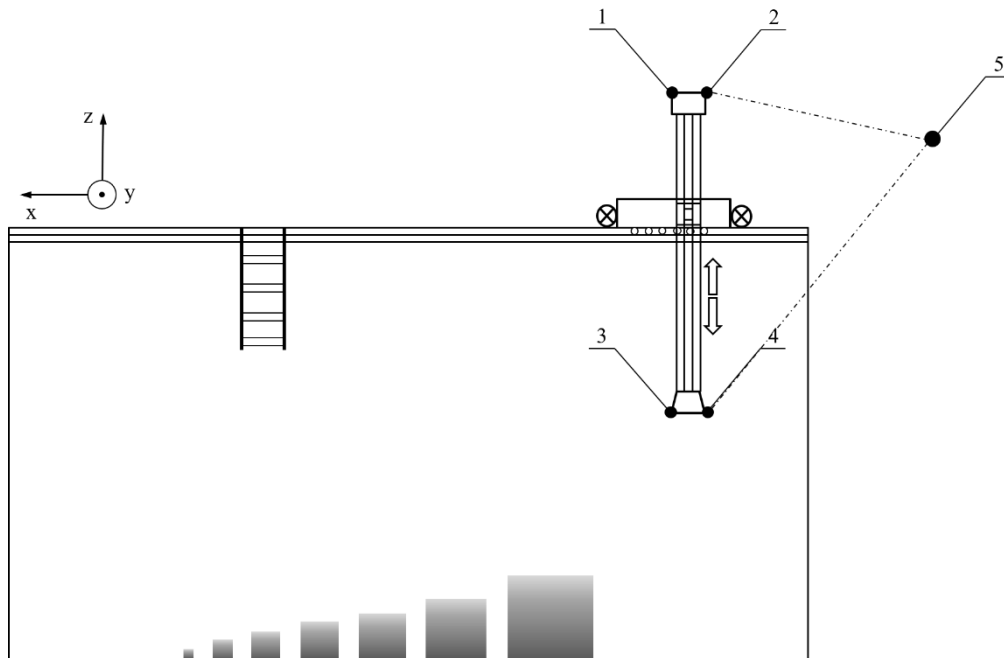


图4 升降杆臂垂直度校准侧视示意图

1——棱A顶部标记点；2——棱B顶部标记点；3——棱A底部标记点；

4——棱B底部标记点；5——架设全站仪控制点C

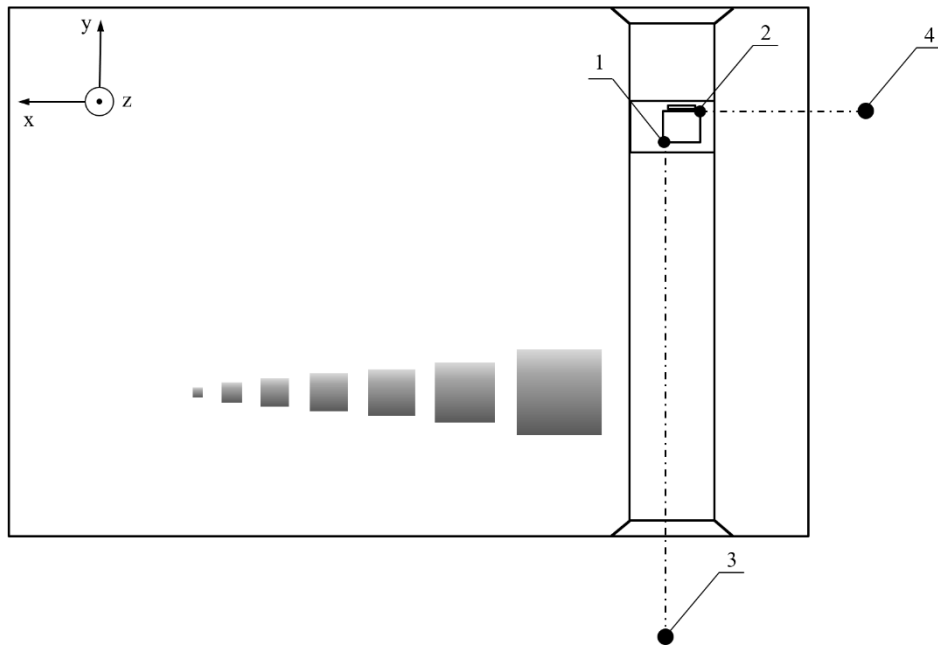


图5 升降杆臂垂直度校准俯视示意图

1——棱 A 顶部标记点；2——棱 B 顶部标记点；  
3——架设全站仪控制点 C；4——架设全站仪控制点 D

## 8.5 标准目标物

### 8.5.1 标准目标物尺寸偏差

标准目标物尺寸偏差校准步骤如下：

将标准目标物平坦放置，使用钢卷尺测量每个尺寸的两端和中间3个位置，取3个位置的算数平均值作为读数值，标准目标物尺寸偏差校准示意图见图6，读数值与基本尺寸之差作为测量结果，按公式（5）计算：

$$e = L_{\text{测}} - L_{\text{标}} \quad (5)$$

式中：

$e$  ——标准目标物的尺寸偏差，mm；

$L_{\text{测}}$  ——钢卷尺的读数值，mm；

$L_{\text{标}}$  ——标准目标物的基本尺寸，mm。

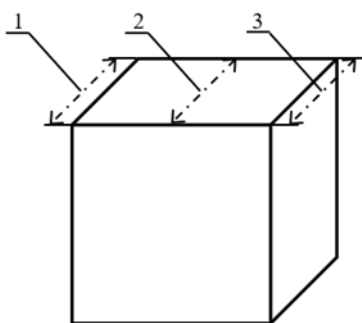


图6 目标物尺寸偏差校准示意图

1——左侧测量位置；2——中间测量位置；3——右侧测量位置

### 8.5.2 标准目标物间距

标准目标物间距校准步骤如下：

- a) 使用钢卷尺对相邻两个标准目标物之间的水平距离进行往返测量，往返平均值作为一次测量结果：

$$D = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (6)$$

式中：

$D$  ——相邻标准目标物间距，cm；

$d_1$  ——往测距离，cm；

$d_2$  ——反测距离，cm。

- b) 重复测量10次间距，按公式（7）计算间距测量结果  $\bar{D}$ ：

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \quad (7)$$

式中：

$\bar{D}$  ——相邻标准目标物间距测量值，cm；

$n$  ——测量次数。

### 8.6 行车速度

行车速度校准步骤如下：

- a) 将磁性反射标靶固定于行车上，在行车起点或终点附近位置架设激光跟踪仪，确保激光跟踪仪在行车移动全程可以始终观察到磁性反射标靶，然后开机预热；
- b) 设置时间间隔离散点模采样模式，采样频率设置为20Hz以上，调节仪器使激光瞄准标靶中心；

- c) 启动行车，待行车运行稳定后，激光跟踪仪开始采样，自动记录存储各采样点的位置坐标，行车稳定行进一定距离后结束采样；
- d) 按公式（8）、公式（9）计算行车速度：

$$v_i = \frac{\sqrt{(\Delta x'')^2 + (\Delta y'')^2 + (\Delta z'')^2}}{2 * \Delta t} \quad (8)$$

$$v = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N} \quad (9)$$

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；

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

$\Delta z''$  ——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。

- e) 重复步骤c)测量标靶移动轨迹8次并计算行车速度，取均值 $\bar{v}$ 作为行车速度测量结果，行车速度校准示意图见图7：

$$\bar{v} = \frac{\sum_{j=1}^N v_j}{n} \quad (10)$$

式中：

$\bar{v}$  ——行车速度测量值，m/s；

$n$  ——测量次数。

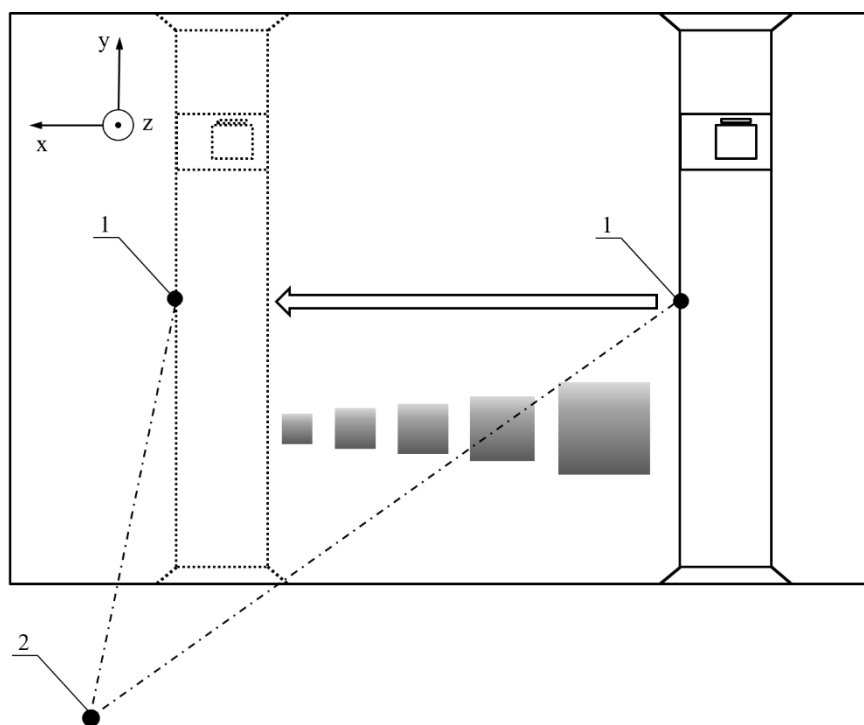


图7 行车速度校准示意图

1——磁性反射标靶；2——架设激光跟踪仪控制点

## 9 校准结果表达

经校准的浅水底物分辨标准场发给校准证书或校准报告，校准证书至少包括以下信息：

- a) 标题，“校准证书”或“校准报告”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 证书或报告的编号，每页及总页数的标识；
- d) 校准单位校准专用章；
- e) 送校单位的名称和地址；
- f) 被校设备的名称、制造商、规格型号、出厂编号；
- g) 进行校准的日期；
- h) 对校准所依据的技术规范标识，包括名称及代号；
- i) 本次校准所用的测量标准的名称、出厂编号、不确定度/准确度等级/最大允许误差、证书编号、溯源性及有效性说明；
- j) 校准环境条件的描述，包括：温度、湿度等；
- k) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- l) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务，以及签发日期；



- m) 校准试验的操作人及核验人的签名；
- n) 校准结果仅对被校设备有效的声明；
- o) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的说明。

证书式样见附录A。

## 10 复校时间间隔

用户根据使用情况自行确定复校时间间隔，建议一般不超过3年；新建设或经过调试维修后的标准场应及时进行校准。

## 附录 A

## 校准证书内容及内页格式

证书编号XXXX-XXX				
校准机构授权说明				
校准的技术依据				
校准环境条件及地点				
环境温度		℃	相对湿度	
				%
地点				
校准使用的计量（基）标准装置				
名 称	测量范围	不确定度/准确度等级/最大允许误差	计量（基）标准证书编号	有效期至
校准使用的标准器				
名 称	测量范围	不确定度/准确度等级/最大允许误差	计量（基）标准证书编号	有效期至
第1页 共2页				

序号	校准项目	校准结果				
1	试验水池尺寸	边	校准数据(m)	不确定度 $U(k=2)$ (mm)		
		长				
		宽				
		高				
2	升降杆臂 垂直度	校准数据(%)		不确定度 $U(k=2)$ (%)		
3	标准目标物尺寸偏差	序号	校准数据 (mm)	尺寸偏差 (mm)	不确定度 $U_i(k=2)$ (mm)	
		1	长			
			宽			
			高			
		2	长			
			宽			
			高			
		3	长			
			宽			
			高			
		4	长			
			宽			
			高			
		5	长			
			宽			
			高			
		6	长			
			宽			
			高			
		7	长			
			宽			
			高			
		4	标准目标物间距	序号	校准数据(cm)	不确定度 $U_i(k=2)$ (mm)
				1		
5	行车速度	校准数据(m/s)		不确定度 $U(k=2)$ (m/s)		
建议校准间隔		3 年				

## 附录B

## 试验水池尺寸校准的不确定度评定（示例）

## B.1 测量模型

试验水池尺寸 $L$ ：

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

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。

以试验水池一边尺寸41m为例，进行校准结果的不确定度评定。

## B.2 不确定度来源

一般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，全站仪测量最大允许误差由检定证书给出。

## B.3 标准测量不确定度评定

## B.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B.1。

表B.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:

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

### B.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:

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

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:

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

式中灵敏系数为:

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

试验中采用的全站仪(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  $41\text{m}$  计,则:

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

则水池尺寸的测量不确定度 B 类评定为:

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

### B.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:

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

### B.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:

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

## 附录C

## 升降杆臂垂直度校准的不确定度评定（示例）

## C.1 测量模型

升降杆臂垂直度 $p$ :

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

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。

## C.2 不确定度来源

一般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, 全站仪测量最大允许误差由检定证书给出。

## C.3 标准测量不确定度评定

## C.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 A.1 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 A.1 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：

$$u_A(p) = \frac{S_n}{\sqrt{6}} = 0.011\%$$

### C.3.2 全站仪测量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：

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

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：

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

式中灵敏系数为：

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

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

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

试验中所采用的全站仪（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：

$$u(\Delta x') = u(\Delta y') = 2\text{mm}$$

$$u(\Delta z) = 2.006\text{mm}$$

则：

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

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：

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

#### C.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：

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

#### C.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：

$$u(p) = 2u_C(p) = 0.078\%$$



## 附录D

### 标准目标物尺寸偏差校准不确定度评定（示例）

#### D.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：

$$e = L_{\text{测}} - L_{\text{标}}$$

$$L_{\text{测}} = L_{\text{读}} + \Delta_t + \Delta_l$$

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。

#### D.2 不确定度来源

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。

#### D.3 标准测量不确定度评定

##### D.3.1 测量重复性引入标准的不确定度

采用 A 类方法评定。下面就以钢卷尺测量 100mm×100mm×100mm 标准目标物为例，检定后的钢卷尺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 B.1 所示。

表 B.1 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	99.7	99.1	99.4
3	27.3	99.6	99.1	99.3
4	27.4	99.6	99.1	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	99.4
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  $S_n$ 。

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

则由测量重复性引入的 A 类标准不确定度  $u_A$  为：

$$u_A = \frac{S_n}{\sqrt{10}} = \frac{0.0667}{\sqrt{10}} = 0.0211 \text{ mm}$$

### D.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：

$$\mu_l = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.0577mm$$

### D.3.3 钢卷尺测量引入的标准不确定度分量

由钢卷尺测量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：

$$\Delta_l = s \times \frac{|l - l_0|}{l_0} = 99.3 \times \frac{|10002.3 - 10000|}{10000} = 0.0228mm$$

$$\mu_k = \frac{\Delta_l}{k} = \frac{0.0228}{\sqrt{3}} = 0.0132mm$$

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匀分布，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：

$$\Delta_t = \alpha(t - t_0)s = 11.8 \times 10^{-6} \times (27.38 - 20) \times 99.64 = 0.0087mm$$

$$\mu_t = \frac{\Delta_t}{k} = \frac{0.0087}{\sqrt{3}} = 0.0050mm$$

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，℃；

$t_0$  ——钢卷尺检定时温度，℃。

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：

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

#### D.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：

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.0211^2 + 0.0594^2} = 0.0630mm$$

#### D.4 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：

$$U = 2u_C = 2 \times 0.0630 = 0.1260mm$$

## 附录E

### 标准目标物间距校准不确定度评定（示例）

#### E.1 测量模型

标准目标物间距 $D$ :

$$D = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

式中:

$d_1$  —— 往测距离, cm;

$d_2$  —— 反测距离, cm。

每一次所测距离都需要加 3 项改正:

$$d_i = d_{\text{测}} + \Delta k_i + \Delta t_i$$

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。

#### E.2 不确定度来源

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。

#### E.3 标准测量不确定度评定

##### E.3.1 测量重复性引入标准的不确定度

采用 A 类方法评定。以检定后的钢卷尺钢卷尺的示值最大允许误差 $\pm(0.3+0.2L)$ mm 为

例，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 C.1 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 C.1 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  $S_n$ 。

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

则由测量重复性引入的 A 类标准不确定度  $u_A$  为：

$$u_A = \frac{S_n}{\sqrt{n}} = \frac{0.2415}{\sqrt{10}} = 0.0764\text{mm}$$

### E.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：

$$\mu_l = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.0577\text{mm}$$

### E.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：

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

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

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

式中：

$\Delta k_1$  ——距离  $d_1$  的尺长改正数，mm；

$\Delta k_2$  ——距离  $d_2$  的尺长改正数，mm；

$l$  ——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：

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

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

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

式中：

$\Delta t_1$  ——距离  $d_1$  的温度改正数，℃；

$\Delta t_2$  ——距离  $d_2$  的温度改正数，℃；

$\alpha$  ——钢卷尺膨胀系数；

$t$  ——钢卷尺测量时温度，℃；

$t_0$  ——钢卷尺检定时温度，℃。

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：

$$\mu_B = \sqrt{\mu_l^2 + \mu_k^2 + \mu_t^2} = \sqrt{0.0577^2 + 0.1328^2 + 0.0506^2} = 0.1534 \text{ mm}$$

#### E.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：

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.0764^2 + 0.1534^2} = 0.1714 \text{ mm}$$

#### E.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：

$$U = 2u_c = 2 \times 0.1714 = 0.3428 \text{ mm}$$



## 附录F

## 行车速度校准不确定度评定（示例）

## F.1 测量模型

行车速度  $v$ ：

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

$$v = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N}$$

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；

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

$\Delta z''$  ——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。

## F.2 不确定度来源

测量过程中直接测量值均由激光跟踪仪测量获得。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，激光跟踪仪有效跟踪距离、测角测距精度、磁性标靶的光学中心精度由其检定证书给出。

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

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

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

$u_c(v)$  ——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。

### F.3 标准测量不确定度评定

#### F.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 D.1 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 D.1 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, 求得行车速度的标准偏差  $S_n$ :

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

则重复性引入的 A 类标准不确定度为:

$$u_A = \frac{S_n}{\sqrt{8}} = 0.8132 \text{ mm/s}$$

### F.3.2 激光跟踪仪测量引入的不确定度分量

实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：

以激光跟踪仪测距误差  $0.5\mu\text{m/m}$  为例，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：

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

(2) 激光跟踪仪测角引入的测量不确定度分量：

以激光跟踪仪测角误差为  $15\mu\text{m}+6\mu\text{m/m}$  为例，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：

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

(3) 激光跟踪仪的动态锁定误差引入的测量不确定度分量：

以激光跟踪仪的动态锁定精度  $10\mu\text{m}$  为例，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：

$$u_m = 10 \times 10^{-3} = 0.01 \text{ mm}$$

(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：

以磁性反射标靶的光学中心位置精度  $3\mu\text{m}$  为例，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：

$$u_R = 3 \times 10^{-3} = 0.003 \text{ mm}$$

行车速度的测量不确定度 B 类评定为：

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

### F.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：

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

## F.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：

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

---