

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—202X

激光准直测量仪校准规范

Calibration Specification for Laser Alignment System

(征求意见稿)

202X - XX - XX 发布

202X - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局发布

激光准直测量仪校准规范

Calibration Specification for Laser

Alignment System

JJF XXXX—202X

本规范经国家市场监督管理总局于202X年XX月XX日批准，并自202X年XX月XX日起施行。

归口单位：全国几何量工程参量计量技术委员会

主要起草单位：上海市计量测试技术研究院

浙江省计量科学研究院

中国计量科学研究院

参加起草单位：广东省计量科学研究院

杭州光尺科技有限公司

雷尼绍（上海）贸易有限公司

本规范委托全国几何量工程参量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	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 概述	(1)
4 计量特性	(2)
4.1 测量单元线位移示值误差	(2)
4.2 测量单元测量重复性	(2)
4.3 测量单元倾角零值误差	(3)
4.4 测量单元倾角示值误差	(3)
4.5 激光扫平误差	(3)
4.6 激光光轴的垂直度	(3)
5 校准条件	(3)
5.1 环境条件	(3)
5.2 测量标准及辅助设备	(3)
6 校准项目和校准方法	(3)
6.1 测量单元线位移示值误差	(3)
6.2 测量单元测量重复性	(4)
6.3 测量单元倾角零值误差	(5)
6.4 测量单元倾角示值误差	(5)
6.5 激光扫平误差	(5)
6.6 激光光轴的垂直度	(6)
7 校准结果表达	(7)
8 复校时间间隔	(7)
附录 A 测量不确定度评定示例	(8)
附录 B 校准证书内页格式	(20)

引 言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、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 1094—2002《测量仪器特性评定》共同构成本规范制定的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

激光准直测量仪校准规范

1 范围

本规范适用于激光对中仪、激光几何测量仪、激光平直度测量仪等激光准直测量仪的校准，其他以激光准直技术为测量原理的仪器可参照执行。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJF 1915 倾角仪校准规范

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 概述

激光准直测量仪通常由激光发射单元、测量单元和数据采集处理单元组成。激光发射单元按激光在空间的形态可以分为固定式和旋转式，旋转式激光发射单元可以配置 90° 转角棱镜将水平激光折转 90° 。测量单元通过位置传感器或图像传感器，给出相对于激光光斑的一维或二维位置信息；测量单元同时可以配置倾角仪，给出测量单元相对于水平方向的角度信息。激光发射单元可以是独立的，也可以与测量单元组合成为一个部件。根据激光发射单元和测量单元的不同组合，数据采集处理单元将不同被测对象的测量值，经数据处理给出对中偏差值，直线度、平面度、垂直度、平行度误差等计算结果。

激光准直测量仪典型结构示意图和测量单元示意图见图 1、图 2。

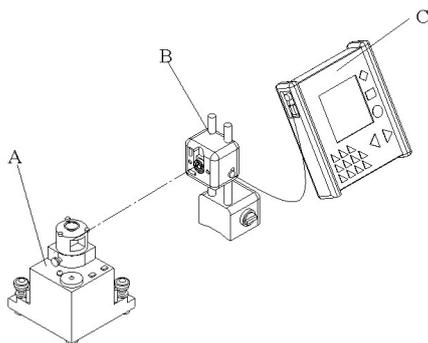


图 1-a 旋转准线式

A—激光发射单元 B—测量单元 C—数据采集处理单元

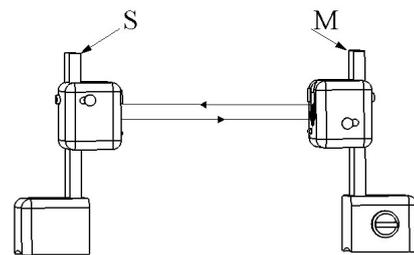


图 1-b 固定准线式

S—固定测量单元 M—移动测量单元

图 1 激光准直测量仪典型结构示意图

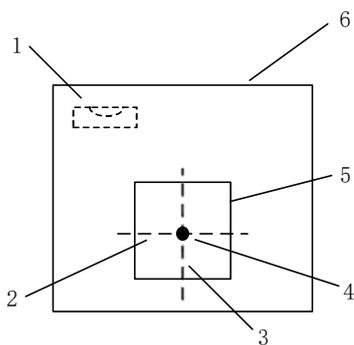


图2 测量单元结构示意图

1—倾角仪 2—测量单元水平方向测量轴(H) 3—测量单元竖直方向测量轴(V)
4—测量单元测量面中心 5—测量单元测量面 6—测量单元

4 计量特性

4.1 测量单元线位移示值误差

4.2 测量单元测量重复性

4.3 测量单元倾角零值误差

4.4 测量单元倾角示值误差

4.5 激光扫平误差

4.6 激光光轴的垂直度误差

激光准直测量仪计量特性可参照表 1。

表 1 激光准直测量仪计量特性表

项目	标称技术指标	
测量单元线位移示值误差	$\pm(0.01\text{mm}+1\%L)$	$\pm(0.001\text{mm}+1\%L)$
测量单元测量重复性	测量点标称示值误差的 1/5	
测量单元倾角零值误差	0.5°	
测量单元倾角示值误差	$\pm 1.0^\circ$	
激光扫平误差	0.02mm/m	0.01mm/m
激光光轴的垂直度误差	0.01mm/m	
L —测量单元位移示值		

注：上述计量特性仅作参考，不作为判断依据。如需做符合性判断，应依据制造商或用户提供的计量特性的指标要求。

5 校准条件

5.1 环境条件

5.1.1 环境温度：(20±5) °C，温度变化不大于 1°C/h。

5.1.2 相对湿度：不大于 75%。

5.1.2 其他条件：被校准仪器在室内温度平衡时间不少于 4h；校准场所照明条件稳定、无明显空气扰动、振动、电磁干扰等影响因素。

5.2 测量标准及辅助设备

推荐使用表 2 所列测量标准及辅助设备，允许使用满足不确定度要求的其他测量标准及设备进行校准。

表 2 测量标准及辅助设备

序号	校准项目	测量标准及辅助设备
1	测量单元线位移示值误差	激光干涉仪，最大允许误差 $\pm(0.03\mu\text{m}+1.5\times 10^{-6}L)$ 位移台：位移方向偏摆角/俯仰角最大允许误差 10"
2	测量单元测量重复性	
3	测量单元倾角零值误差	平板：0 级 圆柱检验棒，直线度 0.001mm
4	测量单元倾角示值误差	分度头：最大分度间隔误差 20"
5	激光扫平误差	10m 钢卷尺：I 级
6	激光光轴的垂直度误差	带微倾台的多齿分度台：最大分度间隔误差 0.3" 水平仪，格值：0.02mm/m

6 校准项目和校准方法

校准前应进行外观及功能检查，确定没有影响计量特性的因素后再进行校准。

6.1 测量单元线位移示值误差

将测量单元和激光干涉仪反射镜安置于位移台上，激光出射口与测量面的距离 D 由供应商提供或用户规定。调整激光发射单元、测量单元及激光干涉仪，尽可能使测量单元的被校测量轴在激光干涉仪光轴的延长线上，且激光光斑落于测量单元测量面中心，并将激光干涉仪和测量单元同时置零。示意图见图 3。

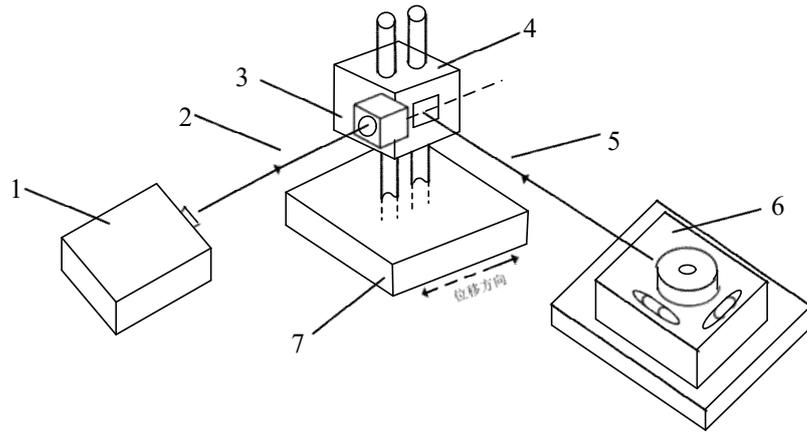


图3 位移示值误差校准示意图

1—激光干涉仪；2—干涉仪光轴；3—干涉仪反射镜测量单元；4—测量单元；
5—激光准直测量仪光轴；6—激光发射单元；7—位移台

校准时，以零位置为起始分别沿水平方向(H)和竖直方向(V)向两侧进行示值误差的正、反方向的校准测量，顺序为 $0 \rightarrow +H \rightarrow 0 \rightarrow -H \rightarrow 0$ ， $0 \rightarrow +V \rightarrow 0 \rightarrow -V \rightarrow 0$ ，具体测量间隔要求见表3。记录激光干涉仪和测量单元的示值，测量单元各向各点的示值误差按公式(1)计算，取正、反向示值误差中绝对值的最大值为该测量点的示值误差。

$$\Delta l_i = l_i - L_i \quad (1)$$

式中：

Δl_i —第*i*个测量点上，测量单元正（或反）向测量的示值误差；

l_i —第*i*个测量点上，测量单元正（或反）向测量的示值；

L_i —第*i*个测量点上，激光干涉仪正（或反）向的示值；

i—测量点序号，*i*=1、2、3、4、5……。

表3 测量点分布表

测量区间	<i>l</i> ≤ 0.5mm				<i>l</i> > 0.5mm			
	0→+H	0→-H	0→+V	0→-V	0→+H	0→-H	0→+V	0→-V
测量间隔	0.1mm				1mm			

6.2 测量单元测量重复性

在测量单元的水平方向和竖直方向测量轴上，各任意选一个测量点进行测量，重复测量10次，按公式(2)计算重复性*s*。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中：

δ_i —单次测量示值误差；

$\bar{\delta}$ — n 次示值误差的平均值；

n —测量次数， $n=10$ 。

6.3 测量单元倾角零值误差

按 JJF 1915 倾角仪校准规范中 5.3 条款执行。

6.4 测量单元倾角示值误差

按 JJF 1915 倾角仪校准规范中 5.4 条款执行。

6.5 激光扫平误差

本条款适用于激光旋转的发射单元，测量单元应先进行 6.1 的校准测量。

在平坦的室内直线场地上，按图4所示布置两个测量点A、B（ D 大致5m~10m）和三个仪器安置点S1、S2和S3，在测量点A、B分别放置测量单元。

测量时，先将激光发射单元安置于 S1 位置并整平至长水准器偏差小于 1/4 格，将测量单元分别安置于 A、B 点处，调整测量单元高度，使激光光斑落于测量单元测量面中心。然后按 90° 间隔单方向转动激光发射单元，分别记录测量单元 V 方向示值 V_{A1} ， V_{B1} ， V_{A2} ， V_{B2} ， V_{A3} ， V_{B3} ， V_{A4} ， V_{B4} 。

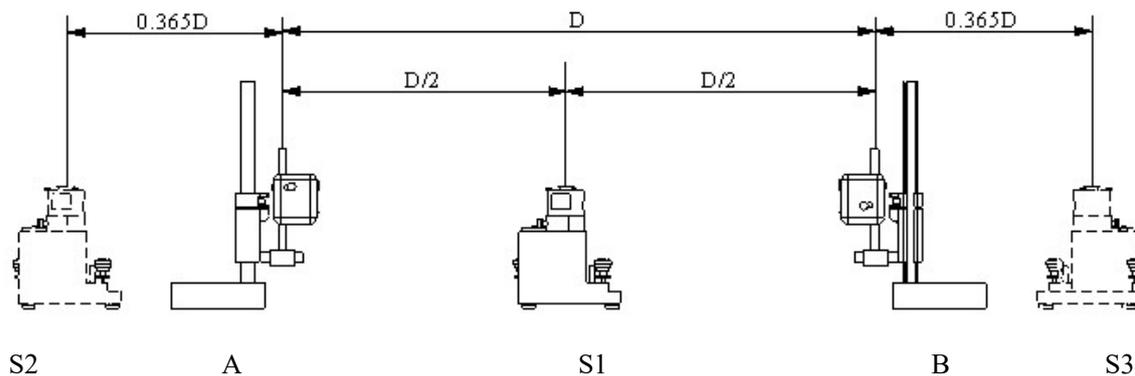


图4 测量示意图

将激光发射单元移至 S2 位置（方向应保持与 S1 处相同），重复上述操作，并记录测量单元 V 方向示值 V_{A5} ， V_{B5} ， V_{A6} ， V_{B6} ， V_{A7} ， V_{B7} ， V_{A8} ， V_{B8} 。

将激光发射单元移至 S3 位置（方向应保持与 S1 处相同），重复上述操作，并记录测量

单元 V 方向示值 V_{A9} , V_{B9} , V_{A1} , V_{B1} , V_{A1} , V_{B1} , V_{A12} , V_{B12} 。

按公式(3)分别计算在第 j 角度位置测得的 A、B 位置高度差。

$$\Delta V_j = V_{Bj} - V_{Aj} \quad (3)$$

式中: ΔV_j —第 j 角度位置测得的 A、B 位置高度差;

V_{Bj} , V_{Aj} —第 j 角度位置分别在 A、B 位置的 V 方向示值。

按公式(4)计算激光扫平误差。

$$e = \left| \frac{\frac{1}{4}(0.5\sum_{j=5}^8 \Delta V_j - 0.5\sum_{j=9}^{12} \Delta V_j)}{D} \right| + \left(\frac{\sqrt{[2.0(\Delta V_3 - \Delta V_1) + 0.5(\Delta V_7 - \Delta V_5 + \Delta V_{11} - \Delta V_9)]^2 + [2.0(\Delta V_2 - \Delta V_4) + 0.5(\Delta V_6 - \Delta V_8 + \Delta V_{10} - \Delta V_{12})]^2}}{6D} \right) \quad (4)$$

式中:

e —激光扫平误差;

$\Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_{12}$ —各位置测得的 A、B 位置高度差;

D —测量点 A、B 间的距离。

激光扫平误差亦可采用测量不确定度相同的其他方法测量。

6.6 激光光轴垂直度误差

本条款适用于出射激光旋转且带 90° 折光镜的激光发射单元。

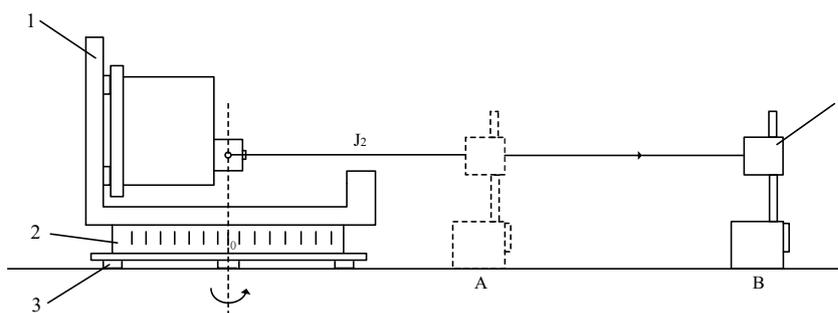


图5 激光光轴垂直度误差测量意图

1—夹具 2—多齿分度台 3—调整装置 4—测量单元

测量前调整多齿分度台,使水平仪的长水泡居中,偏差不得超过 $1/4$ 格值。安装激光发射单元,使原天顶方向的激光光轴(J_2)成水平方向,距离激光发射单元大于 2m 处设置测量固定点 B,沿激光光轴在激光发射单元与 B 点间设置测量固定点 A, A、B 两点间的距离

D 不小于 2m。调整激光发射单元，使两光轴交点 O' 与多齿分度台旋转中心 O 尽可能重合，且使激光光轴 J_1 和 J_2 在 B 点处测量单元上 V 方向的示值的差值不超过 0.050mm。示意图见图 5。

测量时，先将激光光轴(J_2)对准 A 处测量单元，此时激光光斑应在测量面的中心附近，记录示值(H_A, V_A)，将测量单元移至 B 点，记录示值(H_B, V_B)；旋转多齿分度台 90° ，使原水平方向激光光轴(J_1)射入测量面，分别记录 A 、 B 点测量单元的示值(H_A', V_A')(H_B', V_B')。按公式(5)计算该方向激光光轴的垂直度误差。

$$\Delta\beta = \frac{(H_B' - H_B) - (H_A' - H_A)}{D} \quad (5)$$

式中：

$\Delta\beta$ —天顶方向激光光轴(J_2)与水平方向激光光轴(J_1)的夹角与 90° 的偏差值；

H_A, V_A —激光光轴(J_2)在 A 点处测量单元的示值；

H_B, V_B —激光光轴(J_2)在 B 点处测量单元的示值；

H_A', V_A' —激光光轴(J_1)在 A 点处测量单元的示值；

H_B', V_B' —激光光轴(J_1)在 B 点处测量单元的示值；

按 90° 间隔单方向转动被校激光发射单元，在 4 个不同方向上按上述方法测量，取最大值为激光光轴垂直度误差。

激光光轴垂直度误差亦可采用测量不确定度相同的其他方法测量。

7 校准结果表达

校准后的激光准直测量仪，应填发校准证书或报告，校准结果应在校准证书上反映，校准证书至少应包括 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》5.12 条款中的信息。校准结果内页格式可参见附录 B。

8 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等因素所决定的，因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

测量不确定度评定示例

A.1 测量单元线位移示值误差的测量不确定度评定示例

A.1.1 校准对象：

对标称测量范围为 $\pm 5\text{mm}$ ，显示分辨力为 0.001mm 的测量单元的线位移示值误差进行校准。

A.1.2 校准方法：

按 6.1 的方法进行校准测量，记录测量单元示值 l_i ，激光干涉仪示值 L_i ，计算各测量点的示值误差 Δl_i ：

$$\Delta l_i = l_i - L_i \quad (1)$$

A.1.3 校准条件

——环境温度： $(20.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$

——相对湿度：45%

A.1.4 测量模型

上述计算式(1)，可转化为某测量点上示值误差的测量模型

$$\Delta l = l - L \quad (2)$$

式中：

Δl —某测量点上，测量单元正（或反）向测量的示值误差；

l —某测量点上，测量单元正（或反）向测量的示值；

L —某测量点上，激光干涉仪正（或反）向的示值；

A.1.5 合成标准不确定度计算公式

依据公式 $u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n (\partial f / \partial x_i)^2 u_i^2(x)$ ，令 $c_i = \partial f / \partial x_i$ ，由测量模型可得 $c_i(l) = 1$ ；
 $c_i(L) = -1$

$$\text{则：} u_c^2(\Delta l) = \sum_{i=1}^n c_i^2(L) u_{1i}^2(L) + \sum_{j=1}^m c_j^2(l) u_{2j}^2(l) = \sum_{i=1}^n u_{1i}^2(L) + \sum_{j=1}^m u_{2j}^2(l) \quad (3)$$

式中：

i, n —第 i 个激光干涉仪位移示值不确定度分量来源，数量 n ；

j, m —第 j 个测量单元线位移示值的不确定度分量来源，数量 m 。

A.1.6 测量不确定度来源及说明

表 A.1 不确定度来源及说明

序号	不确定度来源	说明
1	测量标准	——
1.1	激光干涉仪示值误差	激光干涉仪示值误差引入的不确定度分量
1.2	激光干涉仪分辨力	激光干涉仪分辨力引入的不确定度分量，本例中设置为 0.0001mm
1.3	温度偏离及波动	温度偏离 20℃及温度波动引入的不确定度分量
2	被测对象	——
2.1	测量重复性	测量单元的测量重复性引入的不确定度分量
2.2	测量单元的显示分辨力	测量单元显示分辨力引入的不确定度分量，本例中为 0.001mm
2.3	安装误差	由于安装误差，被测测量单元的坐标轴与激光干涉仪测量轴不符合阿贝原则引入的不确定度分量
2.4	温度偏离及波动	温度偏离 20℃及温度波动引入的不确定度分量

A.1.7 标准不确定度评定

A.1.7.1 激光干涉仪引入的不确定度分量 u_1 A.1.7.1.1 激光干涉仪示值误差引入的不确定度分量 u_{11}

由激光干涉仪检定规程可知，激光干涉仪的使用补偿单元时最大允许示值误差 MPE: $\pm(0.03\mu\text{m}+1.5\times 10^{-6}L)$ ， L —测量位移值。取最大允许示值误差的半宽 $0.03\mu\text{m}+1.5\times 10^{-6}L$ 为该不确定度分量的区间半宽 α_{11} ，服从均匀分布 $k = \sqrt{3}$ ，则 $u_{11} = \frac{\alpha_{11}}{k} = 0.0173\mu\text{m} + 0.866 \times 10^{-6}L$ 。

A.1.7.1.2 激光干涉仪示值误差引入的不确定度分量 u_{12}

激光干涉仪分辨力引入的不确定度分量，本例中干涉仪的分辨力 $\delta(L)$ 设为 $0.1\mu\text{m}$ ，区间半宽为 0.00005mm ，服从均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，则 $u_{12} = \frac{\delta(L)}{2\sqrt{3}} = 0.0289\mu\text{m}$ 。

A.1.7.1.3 实验室温度偏离及波动对激光干涉仪示值引入的不确定度分量 u_{13}

根据本规范测量条件得要求，实验室温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，温度波动不大于 1°C/h 。由于激光干涉仪自带补偿单元，温度补偿单元对温度偏离补偿引入的测量不确定度分量已在 A.1.7.1.1 中已做评估。此处仅考虑温度波动引入的不确定度分量，由于温度波动不大于 1°C/h ，取区间半宽 $\Delta t = 0.5^\circ\text{C}$ ，服从均匀分布 $k = \sqrt{3}$ 。由 Edlén 公式可知，温度每变化 1°C ，

对干涉仪示值的影响为 $1 \times 10^{-6}L$ ，则： $u_{13} = \frac{\alpha_{13} \times 1 \times 10^{-6}L}{k} = \frac{0.5 \times 1 \times 10^{-6}L}{\sqrt{3}} = 0.289 \times 10^{-6}L$ 。

A.1.7.2 测量单元引入的不确定度分量 u_2

A.1.7.2.1 测量单元测量重复性引入的不确定度分量 u_{21}

测量单元在 0.5mm 处重复测量 10 次，得到测量列（单位 mm），0.0012, 0.0012, 0.0012, 0.0012, 0.0012, 0.0013, 0.0012, 0.0012, 0.0012, 0.0012。按贝塞尔公式计算，则实验标准差为：

$$u_{21} = s_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}{n-1}} = 0.316 \mu\text{m} \quad (4)$$

A.1.7.2.2 测量单元测量分辨力引入的不确定度分量 u_{22}

测量单元显示分辨力 $\delta(l)$ 为 0.001mm，区间半宽 α 为 0.0005mm，服从均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，则 $u_{22} = \frac{\delta(l)}{2\sqrt{3}} = 0.289 \mu\text{m}$ 。

A.1.7.2.3 由于安装误差对测量单元线位移引入的不确定度分量 u_{23}

测量时，由于存在安装误差，测量单元的被校测量轴与激光干涉仪光轴不同轴，两轴的高度差和左右间距不大于 2mm，夹角不大于 0.5° 。此时位移台位移方向的俯仰角偏摆角对位移测量值的影响量如计算式 (5)(6)所示：

$$\text{俯仰角：} \Delta l(\theta) = \sin\theta \times h \quad (5)$$

$$\text{偏摆角：} \Delta l(\beta) = \sin\beta \times w \quad (6)$$

式中：

θ —位移方向的俯仰角最大变化值；

h —激光干涉仪测量轴与测量单元测量轴的高度差；

β —位移方向的偏摆角最大变化值；

w —激光干涉仪测量轴与测量单元测量轴的左右间距；

根据实际安装高度差和左右间距的估计值为 $h \approx 2$ ， $w \approx 2\text{mm}$ ；位移台沿位移轴方向的俯仰角和偏摆角的最大变化量为 $10''$ ，服从均匀分布 $k = \sqrt{3}$ 。将上述信息代入公式(3)(4)，则

$$\Delta l(\theta) = \frac{\sin\theta \times h}{\sqrt{3}} = \frac{\sin 10'' \times h}{\sqrt{3}} = \frac{5 \times 10^{-5} \times 2000 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0.0577 \mu\text{m}$$

$$\Delta l(\beta) = \frac{\sin\beta \times w}{\sqrt{3}} = \frac{\sin 10'' \times w}{\sqrt{3}} = \frac{5 \times 10^{-5} \times 2000 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0.0577 \mu\text{m}$$

安装时，测量单元的测量轴与激光干涉仪的测量轴存在两个方向的不平行，夹角分别为 α 和 ω ，则对测量轴长度的影响量分别为： $1 - \cos\alpha$ 及 $1 - \cos\omega$ 。以外形目测偏移量 0.5mm 估计，对于 60mm 的边长，夹角约为 0.5° ，设两个方向均为 0.5° ，位移量为 L 时，

$$\Delta l(\alpha) = \sqrt{(1 - \cos\alpha)^2 L^2 + (1 - \cos\omega)^2 L^2} = \sqrt{2}(1 - \cos 0.5^\circ)L = 5.38 \times 10^{-5}L。$$

上述两种安装误差引入的分量各不相关，因此

$$u_{23} = \sqrt{2 \times (0.0577\mu\text{m})^2 + 0.289 \times 10^{-8}L^2}。$$

A.1.7.2.4 由于实验室温度偏离及波动对测量单元线位移引入的不确定度分量 u_{24}

根据本规范测量条件的要求，实验室温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，温度波动不大于 1°C/h 。被测测量单元的基底材料为硅，其热膨胀系数为 $2.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。由于实验室温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，取温度偏离的区间半宽 $\Delta t_1 = 5^\circ\text{C}$ ；由于温度波动不大于 1°C/h ，取区间半宽 $\Delta t_2 = 0.5^\circ\text{C}$ ，

服从均匀分布 $k = \sqrt{3}$ ，则由于温度偏离引入的不确定度分量为： $\frac{\Delta t_1 \times 2.4 \times 10^{-6}L}{k} =$

$$\frac{5 \times 2.4 \times 10^{-6}L}{\sqrt{3}} = 6.93 \times 10^{-6}L；$$

由于温度波动引入的不确定度分量为： $\frac{\Delta t_2 \times 2.4 \times 10^{-6}L}{k} =$

$$\frac{0.5 \times 2.4 \times 10^{-6}L}{\sqrt{3}} = 0.693 \times 10^{-6}L。$$

由于温度偏离和温度波动引入的分量不相关，因此，

$$u_{24} = \frac{(\Delta t_1 + \Delta t_2) \times 2.4 \times 10^{-6}L}{k} = \sqrt{(6.93 \times 10^{-6}L)^2 + (0.693 \times 10^{-6}L)^2} = 6.96 \times 10^{-6}L$$

A.1.8 合成不确定度

表 A.2 主要标准不确定度汇总表

序号	不确定度来源	评定方法	分布类型	影响量	包含因子 k	标准不确定度分量 u_i
1	激光干涉仪示值误差 u_{11}	B	均匀	$\pm(0.03\mu\text{m} + 1.5 \times 10^{-6}L)$	$\sqrt{3}$	$0.0173\mu\text{m} + 0.866 \times 10^{-6}L$
2	激光干涉仪分辨力 u_{12}	B	均匀	$0.1\mu\text{m}$	$\sqrt{3}$	$0.0289\mu\text{m}$
3	实验室温度波动 u_{13}	B	均匀	1°C/h	$\sqrt{3}$	$0.289 \times 10^{-6}L$
4	测量单元测量重复性 u_{21}	A	/	/	1	$0.316\mu\text{m}$
5	测量单元的显示分辨力 u_{22}	B	均匀	$1\mu\text{m}$	$\sqrt{3}$	$0.289\mu\text{m}$
6	安装误差 u_{23}	B	均匀	位移俯仰/偏摆角各 $10''$ 高度差/左右间距各 2mm	$\sqrt{3}$	$\sqrt{2 \times (0.0577\mu\text{m})^2 + 0.289 \times 10^{-8}L^2}$

				不平行 0.5°		
7	实验室温度 偏离及波动 u_{24}	B	均匀	温度偏离: $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ 温度波动: 1°C/h	$\sqrt{3}$	$6.96 \times 10^{-6}L$

各分量不相关,

$$\begin{aligned}
 u_c^2(\delta) &= \sum_{i=1}^n u_{1i}^2(L) + \sum_{j=1}^m u_{2j}^2(l) \\
 &= \left(\frac{\alpha_{11}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\delta(L)}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_{13} \times 1 \times 10^{-6}L}{\sqrt{3}}\right)^2 + (s_p)^2 + \left(\frac{\delta(L)}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\sin\theta \times h}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\sin\beta \times w}{\sqrt{3}}\right)^2 + \\
 &\quad (1 - \cos\alpha)^2 L^2 + (1 - \cos\omega)^2 L^2 + \left(\frac{(\Delta t_1 + \Delta t_2) \times 2.4 \times 10^{-6}L}{\sqrt{3}}\right)^2 \quad (7) \\
 &= (0.0173\mu\text{m} + 0.866 \times 10^{-6}L)^2 + (0.029\mu\text{m})^2 + (0.289 \times 10^{-6}L)^2 \\
 &\quad + (0.316\mu\text{m})^2 + (0.289\mu\text{m})^2 + 2 \times (0.0577\mu\text{m})^2 + 0.289 \\
 &\quad \times 10^{-8}L^2 + (6.96 \times 10^{-6}L)^2
 \end{aligned}$$

当测量点为 0.1mm 时, $u_c = 0.437\mu\text{m}$;

当测量点为 5mm 时, $u_c = 0.440\mu\text{m}$ 。

A.1.9 扩展不确定度

取 $k=2$ $U = 0.44 \times 2 = 0.88\mu\text{m} \approx 0.9\mu\text{m}$

A.2 激光轴垂直度的测量不确定度评定示例

A.2.1 校准对象:

对出射激光旋转且带 90°折光镜的激光发射单元进行激光光轴垂直度校准。

A.2.2 校准方法:

按 6.6 的方法进行校准测量, A、B 两点相距 2m, 分别记录测量单元示值(H_A, V_A), (H_B, V_B), (H'_A, V'_A), (H'_B, V'_B), 按式(8)计算垂直度误差

$$\Delta\beta = \frac{(H'_B - H_B) - (H'_A - H_A)}{D} \quad (8)$$

旋转被校仪器, 在 4 个不同方向上进行测量, 取最大值为测量值。

A.2.3 校准条件

——环境温度: $(20.0 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$

——相对湿度: 50%

A.2.4 测量模型

在考虑到影响量后, 上述计算式(8), 可转换为测量模型

$$\Delta\beta = \frac{H_B' - H_B - H_A' + H_A}{D} + \delta_0 + s + \delta(\alpha) \quad (9)$$

式中：

H_A, V_A —原天顶方向光轴 A 点处测量单元的示值；

H_B, V_B —原天顶方向光轴 B 点处测量单元的示值；

H_A', V_A' —原水平方向光轴 A 点处测量单元的示值；

H_B', V_B' —原水平方向光轴 B 点处测量单元的示值；

δ_0 —多齿分度台示值误差；

s — $\Delta\beta$ 的测量重复性；

$\delta(\alpha)$ —安装误差。

A.2.5 合成标准不确定度计算公式

依据公式 $u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n (\partial f / \partial x_i)^2 u_i^2(x)$ ， $c_i = \partial f / \partial x_i$ ，则 $u_c^2(\Delta\beta) = c^2(H_B')u^2(H_B') + c^2(H_B)u^2(H_B) + c^2(H_A')u^2(H_A') + c^2(H_A)u^2(H_A) + c^2(D)u^2(D) + c^2(\delta_0)u^2(\delta_0) + c^2(s)u^2(s) + c^2(\delta(\alpha))u^2(\delta(\alpha))$

式中：

$$c(H_B') = \frac{1}{D}; c(H_B) = \frac{-1}{D}; c(H_A') = \frac{-1}{D}; c(H_A) = \frac{1}{D}; c(D) = -\frac{H_B' - H_B - H_A' + H_A}{D^2}; c(\delta_0) = 1;$$

$$c(s) = 1; c(\delta(\alpha)) = 1。$$

式 $c(D) = -\frac{H_B' - H_B - H_A' + H_A}{D^2}$ 中， D 的最小值为 1m， H 的范围为 (0.0~0.02)mm，因此 $c(D)$ 很小接近 0， $c^2(D)u^2(D)$ 可忽略不计。

测量单元示值 H_A, H_A', H_B, H_B' 的不确定度来源相同，独立测量各不相关，因此，

$$u_c^2(\Delta\beta) = 4 \times \frac{1}{D^2} u^2(H) + u^2(\delta_0) + u^2(s) + u^2(\delta(\alpha)) \quad (10)$$

A.2.6 测量不确定度来源及说明

表 A.3 不确定度来源及说明

序号	不确定度来源	说明
1	测量标准 u_1	——
1.1	多齿分度台的最大分度间隔误差	多齿分度台的最大分度间隔误差引入的不确定度分量
2	测量单元 u_2	——

2.1	测量单元示值误差 u_{21}	测量单元示值误差引入的不确定度分量, 本例中为 $\pm(0.001\text{mm}+1\%L)$
2.2	测量单元显示分辨力 u_{22}	测量单元显示分辨力引入的不确定度分量, 本例中为 0.001mm
2.3	温度偏离及波动 u_{23}	温度偏离 20°C 及温度波动引入的不确定度分量
3	测量重复性 u_3	测量重复性引入的不确定度分量
4	安装误差 u_4	由于安装误差, 激光光轴形成的夹角顶点与多齿分度台旋转中心不一致引入的不确定度分量

A.2.7 标准不确定度评定

A.2.7.1 多齿分度台引入的不确定度分量 u_1

多齿分度台的最大分度间隔误差 MPE: $0.3''$, 区间半宽 α_{11} 为 $0.15''$, 服从均匀分布 $k = \sqrt{3}$, 则多齿分度台引入的不确定度分量 $u_1 = \frac{\alpha_{11}}{\sqrt{3}} = \frac{0.3}{\sqrt{3}} = 0.0866'' = 0.420\mu\text{m}/\text{m}$ 。

A.2.7.2 测量单元引入的不确定度分量 u_2

A.2.7.2.1 测量单元的示值误差引入的不确定度分量 u_{21}

测量单元的示值误差 MPE: $\pm(0.001\text{mm}+1\%L)$, 区间半宽 α_{21} 为 $0.001\text{mm}+1\%L$, 服从均匀分布 $k = \sqrt{3}$, 则 $u_{21} = \frac{\alpha_{21}}{\sqrt{3}} = \frac{1\mu\text{m}+1\%L}{\sqrt{3}} = 0.58\mu\text{m} + 0.58\%L$ 。

A.2.7.2.2 测量单元分辨力引入的不确定度分量 u_{22}

测量单元显示分辨力为 0.001mm , 区间半宽为 0.0005mm , 假设服从均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 则 $u_{22} = \frac{\delta(l)}{2\sqrt{3}} = \frac{0.001}{2\sqrt{3}} = 0.289\mu\text{m}$ 。

A.2.7.2.3 实验室温度偏离及波动对位移示值引入的不确定度分量 u_{23}

根据本规范测量条件的要求, 实验室温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, 温度波动不大于 $1^\circ\text{C}/\text{h}$ 。被测测量单元的基底材料为硅, 其热膨胀系数为 $2.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。由于实验室温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, 取温度偏离的区间半宽 $\alpha = \Delta t_1 = 5^\circ\text{C}$; 由于温度波动不大于 $1^\circ\text{C}/\text{h}$, 取区间半宽 $\alpha = \Delta t_2 = 0.5^\circ\text{C}$, 服从均匀分布 $k = \sqrt{3}$, 则由于温度偏离引入的不确定度分量为:

$$\frac{\Delta t_1 \times 2.4 \times 10^{-6} L}{k} = \frac{5 \times 2.4 \times 10^{-6} L}{\sqrt{3}} = 6.93 \times 10^{-6} L; \text{ 由于温度波动引入的不确定度分量为:}$$

$$\frac{\Delta t_2 \times 2.4 \times 10^{-6} L}{k} = \frac{0.5 \times 2.4 \times 10^{-6} L}{\sqrt{3}} = 0.693 \times 10^{-6} L。 \text{由于温度偏离和温度波动引入的分量不相关,}$$

$$\text{因此, } u_{23} = \frac{(\Delta t_1 + \Delta t_2) \times 2.4 \times 10^{-6} L}{k} = \sqrt{(6.93 \times 10^{-6} L)^2 + (0.693 \times 10^{-6} L)^2} = 6.96 \times 10^{-6} L$$

A.2.7.3 测量重复性引入的不确定度分量 u_3

按正文 6.6 的方法重复测量 3 次, 得到测量列 0.019mm/m, 0.017mm/m, 0.016mm/m, 用极差法计算, $u_3 = \frac{R}{C} = \frac{0.003}{1.69} = 0.00178\text{mm/m}$

A.2.7.4 安装误差引入的不确定度分量 u_4

按正文 6.6 的调整要求, 多齿分度台的调平误差不大于 $\frac{1}{4}$ 格值, 激光 J_1 和 J_2 在 B 点处测量单元上 V 方向的示值的差值不超过 0.050mm, 经计算, $\Delta\alpha_{\max} = \frac{0.02\text{mm/m}}{4} + \frac{0.050\text{mm}}{D}$, 本例中 $D = 2\text{m}$, 则 $\Delta\alpha_{\max} = \frac{0.02\text{mm/m}}{4} + \frac{0.050\text{mm}}{2\text{m}} = 0.03\text{mm/m} = 6.2'' \approx 0.002^\circ$, 由于安装误差引入的不确定度分量 $u_4 = 90^\circ(1 - \cos\Delta\alpha) = 0.00020'' \approx 0\mu\text{m/m}$, 忽略不计。

A.2.8 合成不确定度

表 A.4 主要标准不确定度汇总表

序号	不确定度来源	评定方法	分布类型	影响量	包含因子 k	相关系数 c_i	标准不确定度分量 u_i
1	多齿分度台的最大分度间隔误差 u_1	B	均匀	0.3''	$\sqrt{3}$	1	0.420 $\mu\text{m/m}$
2	测量单元示值误差 u_{21}	B	均匀	1 $\mu\text{m}+1\%L$	$\sqrt{3}$	1/D	0.577 $\mu\text{m} + 0.577\%L$
3	测量单元显示分辨力 u_{22}	B	均匀	1 μm	$\sqrt{3}$	1/D	0.289 μm
4	温度偏离及波动 u_{23}	B	均匀	0.5 $^\circ\text{C}$	$\sqrt{3}$	1/D	6.96 $\times 10^{-6}L$
5	测量重复性 u_3	A	/	/	/	1	1.78 $\mu\text{m} / \text{m}$
6	安装误差 u_4	B	投影	$90^\circ \times (1 - \cos\Delta\alpha)$	/	1	0 $\mu\text{m/m}$

各分量不相关, 本例中 $D = 2\text{m}$, $L \leq 0.05\text{mm}$

$$u_c^2(\Delta\beta) = u_c^2(\Delta\beta) = 4 \times \frac{1}{D^2} u^2(H) + u^2(\delta_0) + u^2(s) + u^2(\delta(\alpha))$$

$$= 4 \times \frac{1}{D^2} [u_{21}^2 + u_{22}^2 + u_{23}^2] + u^2(\delta_0) + u^2(s) + u^2(\delta(\alpha))$$

$$= \left(\frac{\alpha_{11}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \frac{4}{D^2} \left[\left(\frac{\alpha_{21}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\delta(l)}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{(\Delta t_1 + \Delta t_2) \times 2.4 \times 10^{-6}L}{\sqrt{3}}\right)^2 \right] + \left(\frac{R}{C}\right)^2 + (90^\circ \times (1 - \cos\alpha))^2 \quad (11)$$

$$= \left(\frac{0.420\mu\text{m}}{\text{m}}\right)^2 + \frac{4}{D^2} [(0.577\mu\text{m} + 0.577\%L)^2 + 0.289^2 + (6.96 \times 10^{-6}L)^2] \\ + \left(\frac{1.78\mu\text{m}}{\text{m}}\right)^2 + 0$$

$$= \{(0.420)^2 + [(0.577)^2 + 0.289^2] + (1.78)^2\}(\mu\text{m}/\text{m})^2$$

$$u_c(\Delta l_\beta) = \sqrt{u_c^2(\Delta l_\beta)} = 1.94\mu\text{m}/\text{m}$$

A.2.9 扩展不确定度

$$\text{取 } k=2 \quad U = 1.94 \times 2 = 3.88\mu\text{m}/\text{m} \approx 4\mu\text{m}/\text{m}$$

A.3 激光扫平误差的测量不确定度评定

A.3.1 校准对象:

对标称激光扫平误差为 0.02mm/m 的激光准直测量仪进行校准测量。扫平误差测量时，所配置测量单元的线位移标称最大允许误差 MPE: $\pm(0.01\text{mm}+1\%L)$ 。

A.3.2 校准方法:

按 6.5 的方法进行校准测量，固定点 A、B 间的距离 $D = 5\text{m}$ ，分别记录 V_{Aj} 、 V_{Bj}

$$\Delta V_j = V_{Bj} - V_{Aj} \quad (12)$$

式中： ΔV_j —第 j 角度位置测得的 A、B 位置高度差；

V_{Bj} ， V_{Aj} —第 j 角度位置分别在 A、B 位置的读数。

A.3.3 校准条件

——环境温度： $(20.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$

——相对湿度： 45%

A.3.4 测量模型

在考虑到影响量后，测量模型如公式(13):

$$e = \left| \frac{\frac{1}{4} (0.5 \sum_{j=5}^8 \Delta V_j - 0.5 \sum_{j=9}^{12} \Delta V_j)}{D} \right| \\ + \left(\frac{\sqrt{[2.0(\Delta V_3 - \Delta V_1) + 0.5(\Delta V_7 - \Delta V_5 + \Delta V_{11} - \Delta V_9)]^2 + [2.0(\Delta V_2 - \Delta V_4) + 0.5(\Delta V_6 - \Delta V_8 + \Delta V_{10} - \Delta V_{12})]^2}}{6D} \right) + s \quad (13)$$

式中:

e —激光扫平误差;

$\Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_{12}$ —各位置测得的 A、B 位置高度差；

D —固定点 A、B 间的距离；

s —测量重复性

A.3.5 合成标准不确定度计算公式

由式(13)得：

$$u_c^2(e) = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{\partial e}{\partial \Delta V_j} \right)^2 u^2(\Delta V_j) + \left(\frac{\partial e}{\partial D} \right)^2 u^2(D) + u^2(s)$$

因 V_j 为等精度测量，故可得：

$$u_c^2(e) = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{\partial e}{\partial \Delta V_j} \right)^2 u^2(\Delta V) + \left(\frac{\partial e}{\partial D} \right)^2 u^2(D) + u^2(s)$$

经推导，有：

$$u_c^2(e) = \frac{3}{8D^2} \sum_{i=1}^n u_i^2(\Delta V) + \frac{e^2}{D^2} u^2(D) + u^2(s) \quad (14)$$

A.3.6 测量不确定度来源及说明

由式(14)可知，激光扫平误差的测量不确定度来源主要由测量单元线位移示值误差、测量单元测量面不铅垂、扫平测量的重复性、A/B 固定点间距离 D 的测量不确定度引入。

表 A.5 不确定度来源及说明

序号	不确定度来源	说明
1	测量单元	——
1.1	测量单元线位移示值误差	测量单元示值误差引入的不确定度分量，本例中为 $\pm(0.01\text{mm}+1\%L)$
1.2	测量单元测量面不铅垂	测量单元测量面不铅垂引入的不确定度分量，
2	测量重复性	扫平误差的测量重复性引入的不确定度分量
3	距离 D 的测量不确定度	A、B 固定点间的距离 D 的测量不确定度引入的分量

A.3.7 标准不确定度评定

A.3.7.1 测量单元引入的不确定度分量 u_1

A.3.7.1.1 测量单元线位移示值误差引入的不确定度分量 u_{11}

在本例中激光扫平误差测量时选择分辨力 0.01mm，此时 MPE: $\pm(0.01\text{mm}+1\%L)$ ，半宽区间 α_{11} 为 $0.01\text{mm}+1\%L$ ，服从均匀分布 $k = \sqrt{3}$ ， ΔV 由两次读数得到，因此

$$u_{11} = \sqrt{2} \frac{\text{MPE}}{2\sqrt{3}} = \frac{\text{MPE}}{\sqrt{6}} = \frac{\sqrt{2}(0.01\text{mm} + \%L)}{\sqrt{3}}$$

A.3.7.1.2 测量单元测量面不铅垂引入的不确定度分量 u_{12}

测量单元测量面不铅垂主要与测量单元的夹具和实验场地相关，在本例中使用格值为30'的圆水准器评估测量单元测量面的铅垂性，经估测在A、B位置测量单元的测量面与铅垂面的夹角 θ 不大于 1° ，服从投影分布 $k = (1 - \cos\theta)$ ， ΔV 由两次读数得到，因此

$$u_{12} = \sqrt{2} (1 - \cos\theta) L = 2.16 \times 10^{-4} L$$

A.3.7.2 测量重复性引入的不确定度分量 u_2

按6.5条款，重复测量3次，得到扫平误差测量值：0.017mm/m, 0.020mm/m, 0.016mm/m，极差法计算单次测量标准差， $u_2 = s = \frac{R}{C} = \frac{0.004\text{mm/m}}{1.69} = 0.00237\text{mm/m}$ 。

A.3.7.3 A/B 固定点间距离 D 的测量不确定度引入的不确定度分量 u_3

测量距离 D 所用10m钢卷尺，准确等级I级，MPE： $\pm(0.1\text{mm} + 1 \times 10^{-4}D)$ ，半宽区间 α 为 $0.1\text{mm} + 1 \times 10^{-4}D$ ，服从均匀分布 $k = \sqrt{3}$ ， $u_3 = \frac{\text{MP}}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1\text{mm} + 1 \times 10^{-4}D}{\sqrt{3}}$

A.3.8 合成不确定度

表 A.6 主要标准不确定度汇总表

序号	不确定度来源	评定方法	分布类型	影响量	包含因子 k	相关系数 c_i	标准不确定度分量 u_i
1	测量单元线位移示值误差 u_{11}	B	均匀	$0.01\text{mm} + 1\%L$	$\sqrt{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{8}D}$	$0.00816\text{mm} + 0.00816L$
2	测量单元测量面不铅垂 u_{12}	B	投影	1°	$1 - \cos\theta$	$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{8}D}$	$2.16 \times 10^{-4}L$
3	测量重复性 u_2	A	/	/	/	1	$2.37\mu\text{m/m}$
4	距离 D 的测量不确定度 u_3	B	均匀	$0.1\text{mm} + 1 \times 10^{-4}D$	$\sqrt{3}$	$\frac{e}{D}$	$0.0577\text{mm} + 0.0577 \times 10^{-4}D$

各分量不相关，本例中 $D = 5\text{m}$ ， $L \leq 0.5\text{mm}$ ， $e = 0.02\text{mm/m}$

由式(14)可得：

$$\begin{aligned} u_c^2(e) &= \frac{3}{8D^2} \sum_{i=1}^n u_i^2(\Delta V) + \frac{e^2}{D^2} u^2(D) + u^2(s) \\ &= \frac{3}{8D^2} \left[\left(\frac{\text{MPE}}{\sqrt{6}} \right)^2 + (\sqrt{2} (1 - \cos\theta) L)^2 \right] + \frac{e^2}{D^2} \left(\frac{\text{MPE}}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{R}{C} \right)^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{3}{8D^2} \left[\left(\frac{\sqrt{2}(0.01\text{mm} + 1\%L)}{\sqrt{3}} \right)^2 + (2.16 \times 10^{-4}L)^2 \right] + \frac{e^2}{D^2} \left(\frac{0.1\text{mm} + 1 \times 10^{-4}D}{\sqrt{3}} \right)^2 \\
&\quad + (0.00237\text{mm/m})^2 \\
&= 6.72 \times 10^{-6}(\text{mm/m})^2 \\
u_c &= 0.0026\text{mm/m}
\end{aligned}$$

A.3.9 扩展不确定度

取 $k=2$ $U = 0.0026 \times 2 = 0.0052\text{mm/m} \approx 0.005\text{mm/m}$

A.4 倾角示值误差的测量不确定度评定见 JJF 1915—2021 倾斜仪校准规范附录 B.1

附录 B

校准证书内页格式

证书编号：

序号	校准项目		校准结果	测量不确定度
1	测量单元线位移示值误差		见附表	
2	测量单元测量重复性	水平方向		
		竖直方向		
3	测量单元倾角示值误差			
4	测量单元倾角零位正确性			
5	激光扫平误差			
6	激光光轴的垂直度误差			

附表：测量单元线位移示值误差

单位：

序号	测量点	测量单元线位移示值误差	
		水平方向(H)	竖直方向(V)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
测量不确定度 $U(k=2)$			

注：校准时测量单元与激光发射单元的距离为：