



黑龙江省地方计量技术规范

JJF (黑) 02-2014

共焦显微镜(几何参量)校准规范

Calibration Specification for Confocal Microscope
(Geometry Parameter)

2014-08-12 发布

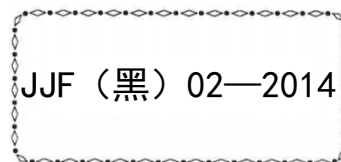
2014-09-01 实施

黑龙江省质量技术监督局 发布

共焦显微镜 (几何参量)

校准规范

Calibration Specification for
Confocal Microscope (Geometry
Parameter)



归 口 单 位：黑龙江省质量技术监督局

主要起草单位：哈尔滨工业大学

国家量仪产品质量监督检验中心

本规程由黑龙江省质量技术监督局负责解释

本规范主要起草人：

谭久彬（哈尔滨工业大学）

王伟波（哈尔滨工业大学）

刘 俭（哈尔滨工业大学）

王宇航（哈尔滨工业大学）

李旭辉（国家量仪产品质量监督检验中心）

目 录

引 言.....	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语和定义.....	(1)
4 概述.....	(1)
5 计量特性.....	(2)
6 校准条件.....	(2)
6.1 环境条件.....	(2)
7 校准项目和校准方法.....	(3)
7.1 校准项目.....	(3)
7.2 X、Y 轴微动测量示值允许误差	(3)
7.3 Z 轴微动测量示值允许误差	(3)
7.4 X、Y 轴微动测量重复性	(5)
7.5 Z 轴微动测量重复性	(5)
7.6 X、Y、Z 轴拼接机构单向定位偏差	(5)
7.7 X、Y 轴拼接机构直线度	(6)
7.8 Z 轴拼接机构直线度	(7)
8 校准结果表达.....	(7)
9 复校时间间隔.....	(8)
附录 A Z 轴微动测量示值允许误差的不确定度评定.....	(9)
附录 B 校准证书内容	(12)
附录 C 校准证书内页格式	(13)

引 言

本规范经查询未见“共焦显微镜（几何参量）”的国际建议、国际标准或国家标准，本规范的主要性能指标参考黑龙江省地方标准“DB 23/ T1531—2013 移相差动共焦显微镜技术要求”。

本规范为首次制定文件。

共焦显微镜（几何参量）校准规范

1 范围

本规范适用于基于共焦显微原理进行被测样品三维几何参量测量的共焦显微镜（几何参量）的校准。该类仪器由负责三维测量功能的共焦显微测量模块和负责拼接功能的高精度三维载物台组成，其中共焦显微测量模块 X、Y 和 Z 轴的测量范围均在 100 μm ~1000 μm 之间；高精度三维载物台 X、Y 和 Z 轴的拼接范围均在 1mm~20mm 之间。

2 引用文件

本规范引用下列文件

JJF 1094—2002	测量仪器特性评定
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 1251—2010	坐标定位测量系统校准规范
JJF1059.1-2012	测量不确定度评定与表示
GB/T11336-2004	直线度误差检测
GB/T 19067.1-2003	产品几何量技术规范（GPS）表面结构轮廓法测量标准 第1部分：实物测量标准
GB/T 1958-2004	产品几何量技术规范(GPS)形状和位置公差检测规定

凡是注明日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修订单）适用于本规范。

3 术语和定义

共焦显微镜 confocal microscopy

一种利用逐点照明和空间针孔调制来去除样品非焦点平面的散射光的光学成像显微镜。

4 概述

共焦显微镜（几何参量）通过在光学系统照明端和探测端面处引入针孔，有效抑制了杂散光的影响，获得了独特的轴向层析能力，实现了较高的轴向分辨力，结合水平方向高精度扫描实现了对被测样品的三维形貌测量。

其测量过程分为共焦显微测量模块微动扫描测量和高精度三维载物台进行拼接区

域移动两个步骤，其中共焦显微测量模块微动扫描测量是核心部分。首先进行微动扫描测量，通过 X、Y、Z 轴的微动机构完成显微物镜焦点在样品表面三维空间的扫描过程，得到样品在该三维空间大小范围内的几何参量数据。其中 X、Y 和 Z 轴测量范围均在 $100\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ 之间。其次高精度三维载物台进行拼接区域移动，将第一步中共焦显微测量模块完成测量区域移动，并将邻近区域移入，进行拼接测量，该类高精度三维载物台 X、Y 和 Z 轴的拼接范围均在 $1\text{mm}\sim 20\text{mm}$ 之间。

其硬件组成结构包括：共焦显微测量模块微动扫描测量系统、高精度三维载物台拼接测量系统、基座及计算机系统组成。共焦显微镜结构示意图如图 1 所示。

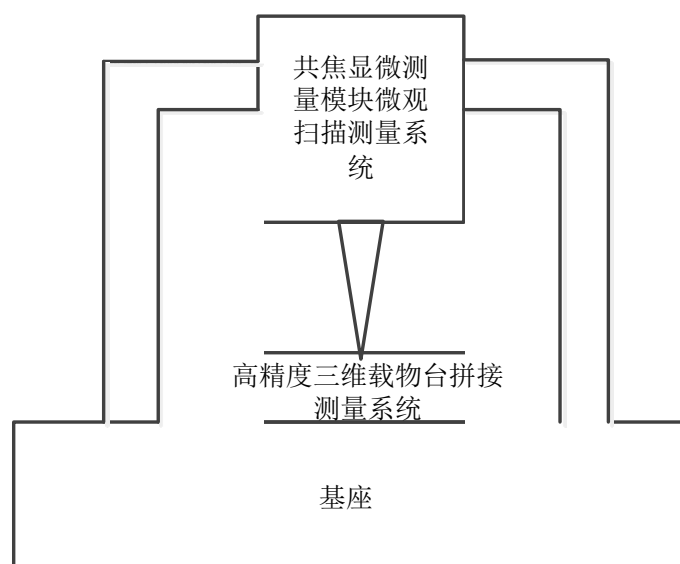


图 1 共焦显微镜结构示意图

5 计量特性

计量特性名称及要求见表 1。

表 1 计量特性名称及要求

序号	计量特性名称	要求
1	X、Y 轴微动测量示值允许误差绝对值（MPEV）	≤ 0.1
2	Z 轴微动测量示值允许误差绝对值（MPEV）	$\leq 0.04\mu\text{m}$
3	X、Y 轴微动测量重复性	$\leq 0.05\mu\text{m}$
4	Z 轴微动测量重复性	$\leq 0.02\mu\text{m}$
5	X、Y、Z 轴拼接机构单向定位偏差	$\leq 0.2\mu\text{m}$
6	X、Y、Z 轴拼接机构直线度	$\leq 0.05\mu\text{m}/10\text{mm}$

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 实验室温度、湿度和平衡温度时间的要求见表 2。

表 2 环境条件

校准室内温度 (°C)	室 温 变 化 (°C/h)	相 对 湿 度 (%)	被校准仪器在室内平衡温度的时间 (h)
20±2	2	30~65	≥4

6.1.2 电源电压的波动不应超过额定值的±10%，实验室内应避开强交变电磁场或近距离的交变磁场（如电机、电焊机等）的干扰。

6.1.3 校准系统应放置于隔振地基上。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目和标准器见表 3。

表 3 校准项目和标准器

序号	校准项目	标准器及技术要求	
		标准器	技术要求
1	X、Y 轴微动测量示值允许误差	标准光栅样板	MPE: ±5nm
2	Z 轴微动测量示值允许误差	标准台阶样板	MPE: ±1nm
3	X、Y 轴微动测量重复性	标准光栅样板	MPE: ±5nm
4	Z 轴微动测量重复性	标准台阶样板	MPE: ±1nm
5	X、Y、Z 轴拼接机构单向定位 偏差	双频激光干涉仪	MPE: ±(0.03+1.5L) μm
6	X、Y 轴拼接机构直线度	位移传感器 平晶 φ30 双频激光干涉仪	MPE: ±5nm 1 级 MPE: ±(0.03+1.5L) μm
7	Z 轴拼接机构直线度	平晶 双频激光干涉仪	1 级 MPE: ±(0.03+1.5L) μm

7.2 X、Y 轴微动测量示值允许误差

7.2.1 X 轴微动测量示值允许误差

采用标准光栅样板进行 X 轴微动测量示值允许误差的校准。测量时通常在标准光栅样板上选取大于 10 个周期范围的区域进行校准，同时应兼顾所选取范围不小于采用最大放大倍率显微物镜时其物方视场范围的 1/3。记录标准光栅样板被测区域每个周期的测量结果 T_i ，其中 i 表示不同位置光栅周期序号 ($i \geq 10$)。校准证书记录标准光栅的周期为 T_s 。

则 X 轴微动测量示值允许误差 Δ 应如下计算：

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i - T_s \quad (1)$$

7.2.2 Y 轴微动测量示值允许误差

Y 轴微动测量示值允许误差校准方法参考 7.2.1 条的方法。

7.3 Z 轴微动测量示值允许误差

采用标准台阶进行共焦显微镜（几何参量）Z 轴微动测量示值允许误差的校准。如图 2 所示，以标准台阶 A、B、C 三个区域作为测量计算区域，其中 W 代表台阶宽度， h 为台阶高度或者深度， W_s 代表 A、C 的计算测量区域宽度， W_d 代表边缘宽度， W_m 代表 B 段计算测量区域宽度。

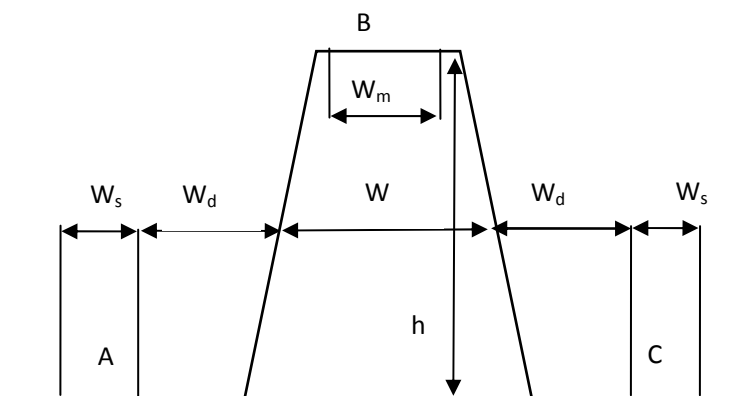


图 2 台阶高度测量原理示意图

$$\text{台阶高度为: } h = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B_i - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i}{2} \quad (2)$$

式中：

h ——台阶高度仪器测量值

A_i ——区域 A 中 Z 轴位移测量值

B_i ——区域 B 中 Z 轴位移测量值

C_i ——区域 C 中 Z 轴位移测量值

m ——区域 B 测量点数

n ——区域 A、C 测量点数

由上所述可计算 Z 轴微动测量示值允许误差：

$$\Delta = h - h_s \quad (3)$$

其中 h_s 是标准台阶样板高度。

7.4 X、Y 轴微动测量重复性

7.4.1 X 轴微动测量重复性

采用标准光栅样板校准 X 轴微动测量重复性。采用 7.2.1 中 X 轴微动测量示值允许误差 Δ 的测量方法，在相同条件下重复进行 10 次，则 X 轴微动测量重复性校准结果为：

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n-1}}, \text{ 其中 } \bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} \quad (4)$$

s_x ——X 轴微动测量重复性

Δ_i ——第 i 次 X 轴微动测量示值允许误差

$\bar{\Delta}$ ——测量结果的平均值

n ——重复次数

7.4.2 Y 轴微动测量重复性

Y 轴微动测量重复性校准方法参考 7.4.1 条的方法。

7.5 Z 轴微动测量重复性

采用标准台阶校准 Z 轴微动测量重复性。采用 7.3 中标准台阶高度的测量方法，重复测量 10 次，以 10 次台阶高度测量值的实验标准偏差作为 Z 轴微动测量重复性校准结果：

$$s_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n-1}}, \text{ 其中 } \bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (5)$$

s_z ——Z 轴重复性测量的标准偏差

h_i ——第 i 次标准台阶的高度测量结果

\bar{h} ——测量结果的平均值

n ——测量次数

7.6 X、Y、Z 轴拼接机构单向定位偏差

7.6.1 X 轴拼接机构单向定位偏差

采用激光干涉仪按图 3 组成测量光路。调整激光干涉仪及干涉仪镜组使光轴与 X 轴平行。在 X 轴行程上任意选取一个目标位置 i 在 X 轴方向上单向趋近 10 次。记录目标

位置第 j 次从正方向和负方向趋近的位置偏差 $\overline{X}_{ij} \uparrow$ 、 $\overline{X}_{ij} \downarrow$ ，从而可得到单向平均位置偏差：

$$\overline{X}_i \uparrow = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} \overline{X}_{ij} \uparrow \quad \text{和} \quad \overline{X}_i \downarrow = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} \overline{X}_{ij} \downarrow \quad (6)$$

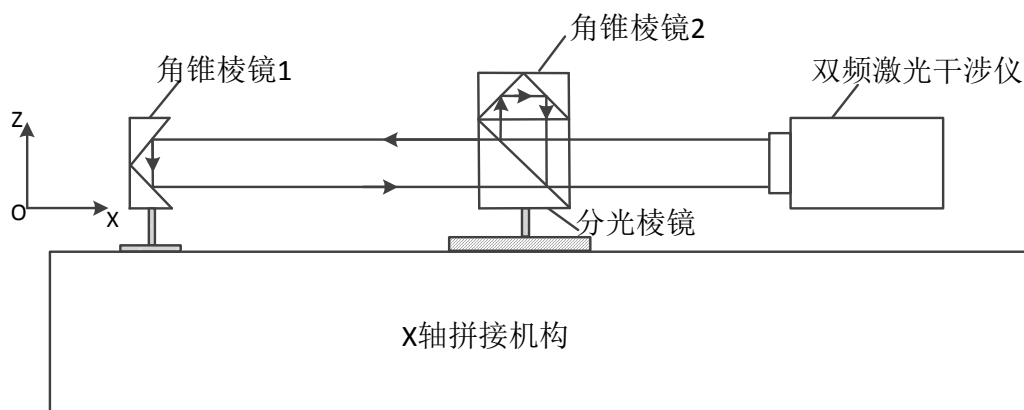


图3 X轴定位偏差测量示意图

则 X 轴第 i 个目标位置单向定位偏差为单向平均位置偏差 $\overline{X}_i \uparrow$ 和 $\overline{X}_i \downarrow$ 的最大值与最小值之差，即：

$$A_i \uparrow = \max[\overline{X}_i \uparrow] - \min[\overline{X}_i \uparrow] \quad (7)$$

$$A_i \downarrow = \max[\overline{X}_i \downarrow] - \min[\overline{X}_i \downarrow] \quad (8)$$

7.6.2 Y 轴拼接机构单向定位偏差

Y 轴拼接机构单向定位偏差校准方法参考 7.6.1 条的方法。

7.6.3 Z 轴拼接机构单向定位偏差

Z 轴拼接机构单向定位偏差校准方法参考 7.6.1 条的方法。

7.7 X、Y 轴拼接机构直线度

7.7.1 X 轴拼接机构直线度

采用直径不小于 30mm 的 1 级平晶，测量不确定度不超过 $0.05\mu\text{m}$ 的位移传感器，与测量装置上的激光干涉仪和镜组组成如图 4 所示的光路。通过改变平晶和位移传感器的相对位置，分别测量 X 轴拼接机构在 Y 向和 Z 向的直线度。以 Z 向为例，在 X 轴导轨中间的有效行程上，等位移量首尾衔接地移动滑架，步进位移量设为 1mm。在第 i 个位置记录位移传感器和激光干涉仪的示值 $z_i (\mu\text{m})$ 和 $x_i (\mu\text{m})$ ，其中 $i=1\sim 11$ ， $x_1 = 0$ 。按最小二乘法评定得到 X 轴拼接机构在 Z 轴的直线度。以 X 轴运动在 Y 轴和 Z 轴中较大者

作为最终检验结果。

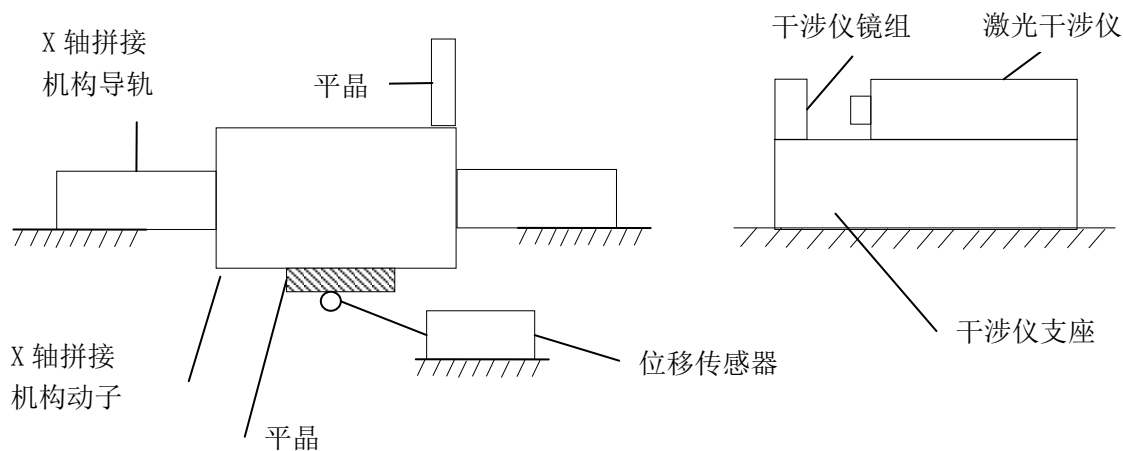


图 4 X 轴拼接机构直线度检验方法示意图

7.7.2 Y 轴拼接机构直线度

Y 轴拼接机构直线度校准方法参考 7.7.1 条的方法。

7.8 Z 轴拼接机构直线度

采用直径不小于 30mm 的 1 级平晶和激光干涉仪，组成如图 5 所示的光路。通过改变平晶和激光干涉仪的相对位置，分别测量 Z 轴拼接机构在 X 向和 Y 向的直线度。以 X 向为例，首先调整激光干涉仪的光轴与 X 轴平行，调整平晶使其工作面与 Z 轴平行，然后在 Z 轴拼接机构有效行程上，通过移动 Z 轴拼接机构，等位移量首尾衔接地升降工作台，步进位移量设为 1mm。在第 i 个位置记录位移传感器和激光干涉仪的示值 $z_i (\mu m)$ 和 $x_i (\mu m)$ ，其中 $i=1\sim11$ ， $z_1 = 0$ 。按最小二乘法评定得到 X 轴拼接机构在 Z 轴的直线度。

以 Z 轴运动在 X 轴和 Y 轴中较大者作为最终检验结果。

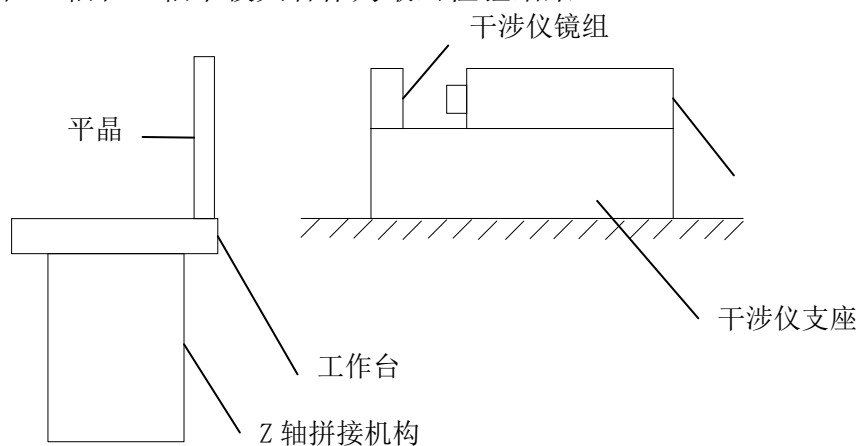


图 5 Z 轴拼接机构直线度检验方法示意图

8 校准结果表达

经过校准的共焦显微镜（几何参量）出具校准证书，校准证书内容及内页格式见附录 B。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为一年。

注：由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，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

Z 轴微动测量示值允许误差的不确定度评定

A.1 校准方法

采用标准台阶样板进行校准时，Z 轴微动测量示值允许误差可以表示为：

$$\Delta = h - h_s$$

式中：

h ——共焦显微镜（几何参量）对标准台阶的测量示值；

h_s ——标准台阶的标称值；

A.2 测量模型

影响校准 Z 轴微动测量示值允许误差的主要不确定因素即为数学模型中的输入量 h 和 h_s 。此外，标准台阶测量过程中的温度变化 δ_t 也会导致台阶高度变化，引入测量不确定度。

因此 Z 轴微动测量示值允许误差可以进一步表示为：

$$\Delta = h - h_s - \alpha \delta_t$$

式中：

h ——共焦显微镜（几何参量）对标准台阶的测量示值；

h_s ——标准台阶的标称值；

α ——标准台阶制造材料热膨胀系数

δ_t ——标准台阶测量时间内温度变化

A.3 测量不确定度分析

根据测量模型 $\Delta = f(h, h_s, \delta_t)$ ，即 $\Delta = h - h_s - \alpha \delta_t$ 。由于各输入量间不相关，所以合成标准不确定度的计算公式为：

$$u_c(\Delta) = \sqrt{c_1^2 u(h) + c_2^2 u(h_s) + c_3^2 u(\delta_t)}$$

式中灵敏度系数为：

$$c_1 = \frac{\partial f}{\partial h} = 1$$

$$c_2 = \frac{\partial f}{\partial h_s} = -1$$

$$c_3 = \frac{\partial f}{\partial \delta_i} = -\alpha$$

A.4 不确定度分量的评定

A.4.1 共焦显微镜（几何参量）测量导致测量示值的标准不确定度 $u(h)$

测量标准台阶高度 h 的不确定度即为 Z 轴微动测量的重复性，属于 A 类不确定度。利用共焦显微镜（几何参量）在相同条件下对同一标准台阶（1000nm）进行 10 次测量得到：

表 1 对标准台阶高度进行重复性测试

序号	台阶高度 (nm)	序号	台阶高度 (nm)
1	1029	6	1025
2	1000	7	998
3	1019	8	995
4	1004	9	1028
5	1027	10	1013

其均值和标准差分别为：

$$\begin{aligned}\bar{h} &= \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} h_i = \frac{1}{10} (1029 + 1000 + 1019 + 1004 + 1027 + 1025 + 998 + 995 + 1028 + 1013) \\ &= 1009 \text{ nm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}s &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (h_i - \bar{h})^2}{10 - 1}} \\ &= \sqrt{\frac{(20)^2 + (-9)^2 + (10)^2 + (-5)^2 + (18)^2 + (16)^2 + (-11)^2 + (-14)^2 + (19)^2 + (4)^2}{10 - 1}} \\ &\approx 14.45 \text{ nm}\end{aligned}$$

$$u(h) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{14.45}{\sqrt{10}} \approx 4.57 \text{ nm}$$

A.4.2 校准报告中标准台阶高度的标准不确定度 $u(h_s)$

其中标准光栅校准报告中注明其扩展不确定度 $u_o = 5 \text{ nm}$ ，包含因子 $k_o = 3$ 。

故其引起 h_s 的标准不确定度 $u(h_s)$ 为：

$$u(h_s) = u_o / k_o = 5nm / 3 \approx 1.67nm$$

A. 4.3 标准台阶测量过程温度变化导致台阶高度的不确定度 $u(\delta_t)$

标准台阶标称高度为 1000nm，材料为单晶硅，热膨胀系数为 $6 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，校准前标准台阶需要在室温下放置 24 小时，进行同温处理，且在测量过程中温度变化不会超过 2 度，故标准台阶测量过程中的温度变化 δ_t 引起 h_s 的标准不确定度 $u(h_{st})$ 为：

$$u(\delta_t) = h_s \times \delta_t \times \alpha = 1\mu m \times 2^\circ\text{C} \times 6 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} = 0.12nm$$

表 2 标准不确定度分量汇总表

不确定度分量	标准不确定度来源	$u(x_i)$ 的值	灵敏度系数	$u_i = c_i u(x_i)$
$u(h)$	仪器多次测量	4.57nm	1	4.57nm
$u(h_s)$	标准台阶出厂检测报告	1.67nm	-1	1.67nm
$u(\delta_t)$	标准台阶热膨胀	2°C	$-6 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	0.12nm

A. 5 计算合成标准不确定度

$$u_c(\Delta) = \sqrt{c_1^2 u(h) + c_2^2 u(h_s) + c_3^2 u(\delta_t)} = \sqrt{4.57^2 + 1.67^2 + 0.12^2} \approx 4.9nm$$

A. 6 确定扩展不确定度

$$U = k u_c(h) = 10.0nm, k = 2$$

A. 7 校准结果

$$Z \text{ 轴微动测量示值允许误差: } \Delta = \bar{h} - h_s = 1009 - 1000 = 9nm$$

不确定度为：10.0nm

附录 B

校准证书内容

1. 标题：校准证书；
2. 实验室名称和地址；
3. 证书或报告的唯一标识（如编号）、每页及总页数的标识；
4. 送校单位的名称和地址；
5. 被校对象的描述和明确标识；
6. 进行校准的日期；
7. 对校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代码；
8. 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
9. 校准环境的描述；
10. 仪器测量不确定度的说明；
11. 校准证书或校准报告签发人的签名或等效标识，以及签发日期；
12. 校准结果仅对被校对象有效的声明；
13. 未经校准实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

附录 C

校准证书内页格式

证书编号：

校准所依据的技术文件（代号、名称）： JJF（黑）XXXX-XXXX 共焦显微镜（几何参量）校准规范				
校准环境	温度(℃)	相对湿度 (%)	被校准仪器在室内平衡温度的时间(h)	
校准地点				
本次校准所用测量标准				
名称	测量范围	准确度	证书编号	有效日期
校准项目与校准结果				
序号	校准项目	校准结果		
1	X、Y 轴微动测量示值允许误差			
2	Z 轴微动测量示值允许误差			
3	X、Y 轴微动测量重复性			
4	Z 轴微动测量重复性			
5	X、Y、Z 轴拼接机构单向定位偏差			
6	X、Y 轴拼接机构直线度			
7	Z 轴拼接机构直线度			
Z 轴微动测量示值允许误差测量不确定度				

校准员：

核验员：

