

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2160—2024

激光共聚焦显微镜校准规范

Calibration Specification for Laser Confocal Microscopes



2024-10-19 发布

2025-04-19 实施

国家市场监督管理总局 发布

激光共聚焦显微镜校准规范

Calibration Specification for
Laser Confocal Microscopes

JJF 2160—2024

归口单位：全国几何量长度计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

哈尔滨工业大学

参加起草单位：南京市计量监督检测院

本规范委托全国几何量长度计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

施玉书（中国计量科学研究院）

刘 俭（哈尔滨工业大学）

张 树（中国计量科学研究院）

参加起草人：

王 珉（南京市计量监督检测院）

刘辰光（哈尔滨工业大学）

皮 磊（中国计量科学研究院）

郭 鑫（南京市计量监督检测院）

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 水平方向长度测量误差	(2)
4.2 垂直方向长度测量误差	(2)
4.3 水平方向长度测量重复性	(2)
4.4 垂直方向长度测量重复性	(2)
4.5 水平方向正交误差	(2)
4.6 畸变	(2)
4.7 最大可测倾角	(2)
4.8 水平方向拼接误差	(2)
4.9 垂直方向拼接误差	(2)
4.10 载物台定位误差	(2)
5 校准条件	(3)
5.1 环境条件	(3)
5.2 校准项目和校准用标准器	(3)
6 校准项目和校准方法	(4)
6.1 水平方向长度测量误差	(4)
6.2 垂直方向长度测量误差	(6)
6.3 水平方向长度测量重复性	(8)
6.4 垂直方向长度测量重复性	(8)
6.5 水平方向正交误差	(8)
6.6 畸变	(9)
6.7 最大可测倾角	(10)
6.8 水平方向拼接误差	(11)
6.9 垂直方向拼接误差	(11)
6.10 载物台定位误差	(12)
7 校准结果表达	(12)
8 复校时间间隔	(12)
附录 A 激光共聚焦显微镜长度测量误差的不确定度评定	(13)
附录 B 激光共聚焦显微镜校准证书 (内页) 格式	(15)

引 言

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》、JJF 1094—2002《测量仪器特性评定》共同构成支撑本规范制定的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

激光共聚焦显微镜校准规范

1 范围

本规范适用于激光共聚焦显微镜的校准，其他基于共聚焦原理的显微镜校准也可参照本规范。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 19067.1—2003 产品几何技术规范（GPS） 表面结构 轮廓法 测量标准 第1部分：实物测量标准

GB/T 34879—2017 产品几何技术规范（GPS） 光学共焦显微镜计量特性及测量不确定度评定导则

ISO 25178-607：2019 产品几何量技术规范（GPS） 表面结构：区域法 第607部分：非接触（共焦显微镜）仪器的标称特性 [Geometrical product specifications (GPS)—Surface texture: Areal—Part 607: Nominal characteristics of non-contact (confocal microscopy) instruments]

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）适用本规范。

3 概述

激光共聚焦显微镜（以下简称共聚焦显微镜）是一种利用共轭点照明、点探测原理，通过激光逐点照明扫描和空间针孔调制技术获取光学层析图像，从而得到被测物体二维图像或三维表面形貌参数的仪器。共聚焦显微镜具有多种照明约束和探测形式，被广泛应用于材料科学、微纳米加工、半导体器件和生命科学等领域。共聚焦显微镜的结构示意图见图1。

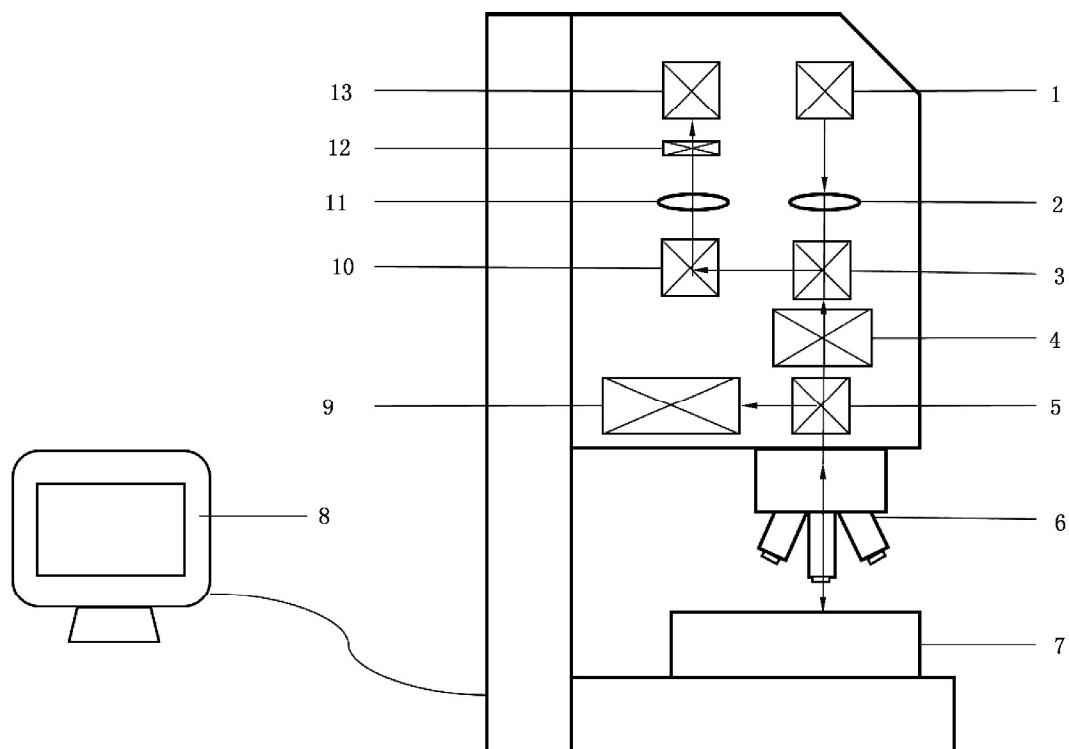


图 1 共聚焦显微镜结构示意图

共聚焦显微镜计量特性见表 1，性能指标供校准时参考。

表 1 共聚焦显微镜计量特性

序号	计量特性	性能指标
1	水平方向长度测量误差	不超过 $\pm 5\%$
2	垂直方向长度测量误差	不超过 $\pm 5\%$
3	水平方向长度测量重复性	不超过 2%
4	垂直方向长度测量重复性	不超过 2%
5	水平方向正交误差	不超过 1°
6	畸变	不超过 $\pm 10\%$
7	最大可测倾角	$20^\circ \sim 80^\circ$
8	水平方向拼接误差	不超过 10%
9	垂直方向拼接误差	不超过 10%
10	载物台定位误差	不超过 0.05 mm

5 校准条件

5.1 环境条件

5.1.1 温度： $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，温度变化量： 0.5°C/h 。

5.1.2 相对湿度：不超过 75% 。

5.1.3 校准用标准器与被校仪器等温时间不少于 0.5 h 。

5.1.4 实验室内应无影响校准结果的振动、电磁辐射等因素。

5.2 校准项目和校准用标准器

共聚焦显微镜校准项目和校准用标准器见表 2。

表 2 共聚焦显微镜校准项目和校准用标准器

序号	校准项目	物镜倍率	标准器	技术要求
1	水平方向长度测量误差	<50	一维标准 立体栅格	栅格平均间距 $(5 \sim 20)\ \mu\text{m}$ $U_{\text{rel}} \leq 0.5\%, k=2$
		≥ 50		栅格平均间距 $(500 \sim 5\ 000)\ \text{nm}$ $U_{\text{rel}} \leq 1\%, k=2$
2	垂直方向长度测量误差	<50	标准台阶/凹槽	标准台阶高度/沟槽深度 $(200 \sim 10\ 000)\ \text{nm}$ $U_{\text{rel}} \leq 1\%, k=2$
		≥ 50		
3	水平方向长度测量重复性	<50	一维标准 立体栅格	栅格平均间距 $(5 \sim 20)\ \mu\text{m}$ $U_{\text{rel}} \leq 0.5\%, k=2$
		≥ 50		栅格平均间距 $(500 \sim 5\ 000)\ \text{nm}$ $U_{\text{rel}} \leq 1\%, k=2$

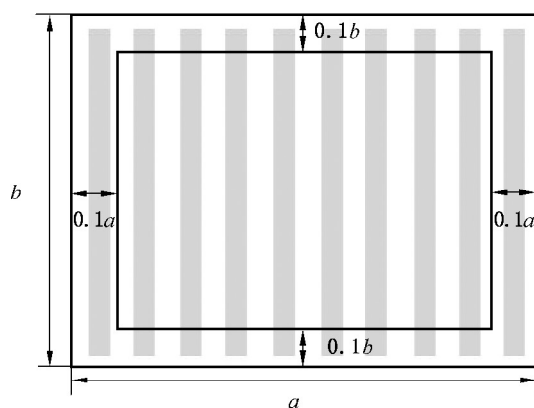
表 2 (续)

序号	校准项目	物镜倍率	标准器	技术要求
4	垂直方向长度测量重复性	<50	标准台阶/凹槽	标准台阶高度/沟槽深度 (200~10 000) nm $U_{\text{rel}} \leq 1\%, k=2$
		≥ 50		
5	水平方向正交误差	<50	二维标准立体栅格	栅格平均间距 20 μm $U_{\text{rel}} \leq 0.5\%, k=2$
		≥ 50		栅格平均间距 10 μm $U_{\text{rel}} \leq 0.5\%, k=2$
6	畸变	<50	二维标准立体栅格	栅格平均间距 20 μm $U_{\text{rel}} \leq 0.5\%, k=2$
		≥ 50		栅格平均间距 10 μm $U_{\text{rel}} \leq 0.5\%, k=2$
7	最大可测倾角	<50	标准球	标准球直径 (0.3~5) mm 形状误差 $\leq 0.3 \mu\text{m}$
		≥ 50		
8	水平方向拼接误差	<50	标准台阶/凹槽	标准台阶高度/沟槽深度 (200~10 000) nm $U_{\text{rel}} \leq 1\%, k=2$
		≥ 50		
9	垂直方向拼接误差	<50	标准台阶/凹槽	标准台阶高度/沟槽深度 (200~10 000) nm $U_{\text{rel}} \leq 1\%, k=2$
		≥ 50		
10	载物台定位误差	任意放大倍率	激光干涉仪	线性测量精度 $\pm 5.0 \times 10^{-7}$
注：校准项目所采用的一维、二维标准立体栅格包含 10 个以上周期，标准器应根据被校仪器的物镜放大倍率、视场范围等因素选取。				

6 校准项目和校准方法

6.1 水平方向长度测量误差

使用一维标准立体栅格校准水平方向长度测量误差。将一维标准立体栅格置于样品载物台，在明场条件下将一维标准立体栅格的线条边缘垂直于 X 轴放置，在标准器的有效特征区域内，去除图像各边缘尺寸 10%（如图 2 所示）后，均匀选取上、中、下 3 个区域进行测量。



a ——共聚焦显微镜 X 轴方向有效特征区域尺寸；

b ——共聚焦显微镜 Y 轴方向有效特征区域尺寸；

图 2 去除图像边缘示意图

在每个测量区域等间隔均匀提取 5 条轮廓线（如图 3 所示），计算 5 条轮廓线栅格平均间隔的算术平均值作为该区域的栅格平均间隔测得值，多个区域的栅格平均间隔测得值的算术平均值作为 X 方向栅格平均间隔的测得值。使用“重心法”评价轮廓线的栅格平均间隔，具体评价过程如下。

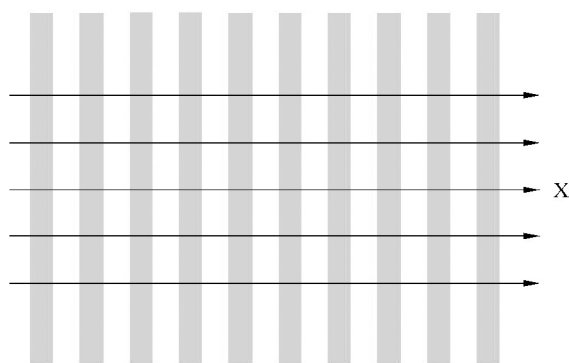
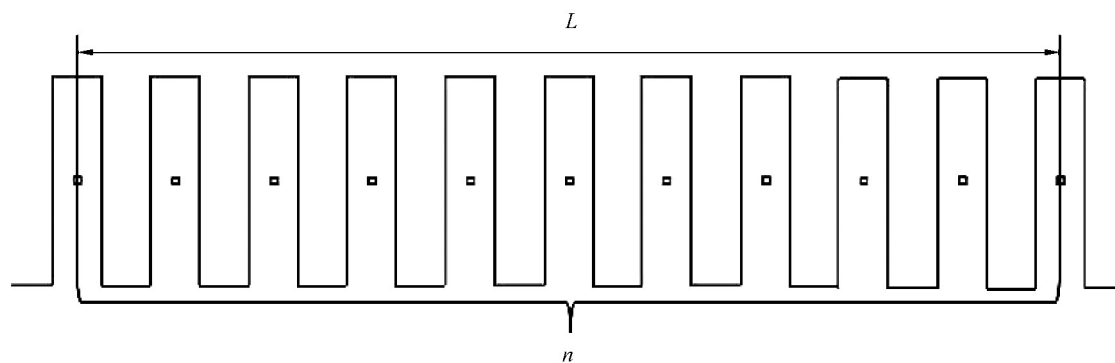


图 3 X 方向长度测量误差校准示意图

在轮廓线上选取完整连续的且不少于 10 个周期的栅格结构作为评价区域，分别计算每个周期的重心位置。首尾重心间的水平距离即为评定长度 L （如图 4 所示），X 方向一维标准立体栅格平均间距的测得值 P 可由式（1）计算。



L ——首尾重心间的水平距离；

n ——评价区域内栅格的周期数量

图 4 重心法测量栅格平均间距示意图

$$P = \frac{L}{n} \quad (1)$$

式中：

P ——一维标准立体栅格平均间距的测得值，nm；

L ——评定长度，nm；

n ——评定长度对应的周期数。

共聚焦显微镜的长度测量误差与相对误差可分别由式（2）与式（3）计算。

$$\Delta P = P - P_s \quad (2)$$

$$\Delta_x = \frac{P - P_s}{P_s} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

ΔP ——共聚焦显微镜 X 方向上的长度测量误差，nm；

P ——一维标准立体栅格平均间距的测得值，nm；

P_s ——一维标准立体栅格平均间距的标准值，nm；

Δ_x ——共聚焦显微镜 X 方向上的长度相对测量误差。

进行 Y 方向校准时，只需旋转一维标准立体栅格使其线条边缘与 Y 轴垂直放置，并按照上述 X 方向校准方法进行校准。

6.2 垂直方向长度测量误差

使用标准台阶进行垂直方向的长度测量误差校准。将标准台阶放置于视场中心，在标准器的有效特征区内，去除图像尺寸 10% 的边缘后，均匀选取上、中、下 3 个区域进行测量。在每个测量区域等间隔（一般选取间隔为图像宽度的 10%）均匀提取 5 条轮廓线（如图 5 所示）。计算 5 条轮廓线台阶高度的算术平均值作为该区域的台阶高度测得值，多个区域台阶高度测得值的算术平均值作为该标准台阶的高度测得值。共聚焦显微镜的垂直方向长度测量误差与相对误差可分别由式（4）与式（5）计算。轮廓线的台阶高度评价方法遵循以下两种方法（二选一）。标准凹槽同样适应于垂直方向长度测量误差校准。

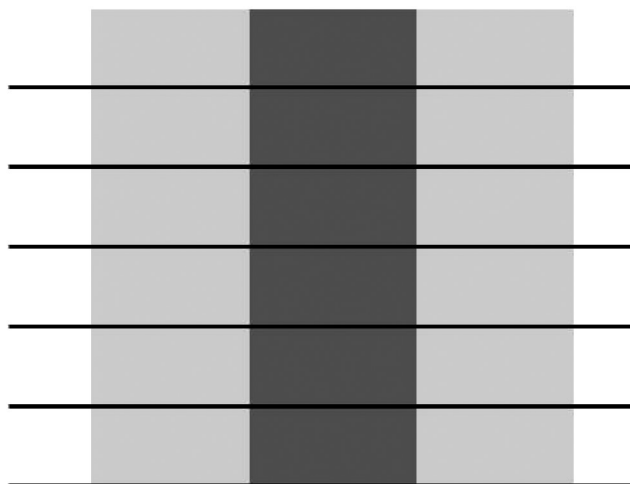


图 5 垂直方向长度测量误差校准示意图

$$\Delta H = H - H_s \quad (4)$$

$$\Delta_z = \frac{P - P_s}{P_s} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

ΔH ——共聚焦显微镜垂直方向上的长度测量误差，nm；

H ——标准台阶高度的测得值，nm；

H_s ——标准台阶高度的标准值，nm；

Δ_z ——共聚焦显微镜垂直方向上的长度相对测量误差。

6.2.1 标准台阶高度评定方法 A

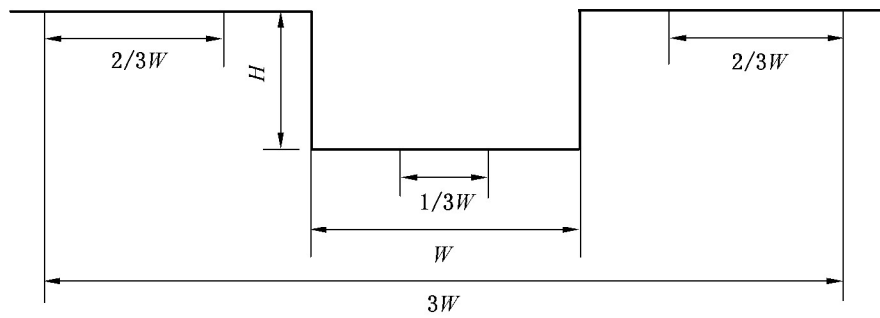


图 6 3W 准则示意图

依据 GB/T 19067.1—2003 中的 A1 型标准值的评定方法对标准台阶高度进行测量。如图 6 所示，将台阶底部宽度定义为 W ，评定长度为 $3W$ ，将台阶顶部两侧 $2/3W$ 的平均 Z 向高度值与底部中心 $1/3W$ 的 Z 向高度值作差，即为轮廓线的台阶高度测得值 H 。

6.2.2 标准台阶高度评定方法 B

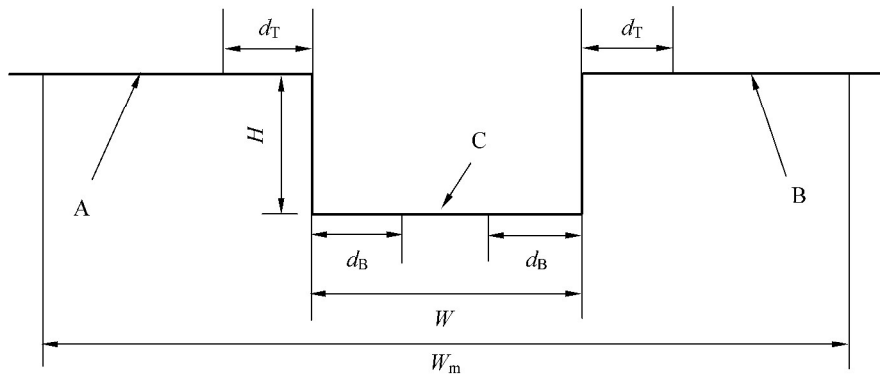


图 7 LEL 准则示意图

根据 GB/T 34879—2017 中的标准台阶高度评定方法 B（LEL 准则）对标准台阶高度进行测量。如图 7 所示，标准台阶宽度应该满足 $W > 2d_B$ ，标准台阶测量宽度应满足 $W_m > 2d_T + 2d_B$ 。其中 W 代表标准台阶宽度， W_m 代表标准台阶宽度的测得值， d_T 代表满足解耦条件的高度测量值的顶部避让区间， d_B 代表满足解耦条件的高度测量值的底部避让区间， d_T 与 d_B 按式（6）与式（7）计算。

$$d_T = 1.2K_1 \frac{\lambda_0}{A_N} \quad (6)$$

$$d_B = \begin{cases} K_2 \left(1.19 \frac{\lambda_0}{A_N} + 1.49 \frac{1 - \sqrt{1 - A_N^2}}{A_N} H_s \right), & H_s \in \left(0, 0.97 \frac{\lambda_0}{1 - \sqrt{1 - A_N^2}} \right) \\ K_2 \left(0.90 \frac{\lambda_0}{A_N} + 1.79 \frac{1 - \sqrt{1 - A_N^2}}{A_N} H_s \right), & H_s \in \left(0.97 \frac{\lambda_0}{1 - \sqrt{1 - A_N^2}}, +\infty \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中：

λ_0 ——测量光波长，nm；

A_N ——显微镜数值孔径；

H_s ——标准台阶高度的标准值，nm；

K_1 、 K_2 ——常数，根据仪器性能和样品加工工艺选定。

标准台阶高度计算方法采用最小二乘回归法，计算公式见式（8）。

$$z = \alpha x + \beta + \delta h \quad (8)$$

式中：

z ——与 x 对应的表面位置，nm；

α 、 β 、 h ——待定参数，通过最小二乘回归法确定；

x ——采样点的横向坐标，nm；

δ ——变量，在 A、B 区域为+1，在 C 区域为-1。

标准台阶高度的测得值 H 是估计值 h 的 2 倍。

6.3 水平方向长度测量重复性

按照 6.1 所述方法选取和放置一维标准立体栅格标准器，使用被校仪器对标准器的同一有效特征区域进行连续多次重复测量，测量次数不少于 6 次，两次测量之间的时间间隔不小于 1 min。并按照 6.1 中的计算方法得到每幅测量图像的栅格平均间距测得值，计算多次重复测量的水平方向栅格平均间距的标准偏差 s 即为水平方向长度测量重复性测得值 [式（9）]。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}{n - 1}} \quad (9)$$

式中：

s ——共焦显微镜长度测量重复性，nm；

L_i ——第 i 次测量的间距长度测量值，nm；

$\bar{L}$ —— n 次间距长度测量值的算术平均值，nm；

n ——测量次数。

6.4 垂直方向长度测量重复性

按照 6.2 所述方法选取和放置标准台阶标准器，使用被校仪器对标准器的同一有效特征区域进行连续多次重复测量，测量次数不少于 6 次，两次测量之间的时间间隔不小于 1 min。并按照 6.2 中的计算方法得到每幅测量图像的台阶高度测得值，多次重复测量的垂直方向台阶高度值的标准偏差 s 即为垂直方向长度测量重复性测得值 [式（9）]。

6.5 水平方向正交误差

选用二维标准立体栅格校准水平方向正交误差，将二维标准立体栅格的横向线条平

行于 X 方向放置，如图 8 所示。使用专用软件对测量数据进行计算可得二维栅格图像上横向与纵向线条的夹角，夹角的测得值 θ 与标准值 θ_s 之差为水平方向正交误差 [式 (10)]。

$$\Delta\theta = \theta - \theta_s \quad (10)$$

式中：

$\Delta\theta$ ——共聚焦显微镜正交误差，(°)；

θ ——二维标准立体栅格 XY 夹角的测得值，(°)；

θ_s ——二维标准立体栅格 XY 夹角的标准值，(°)。

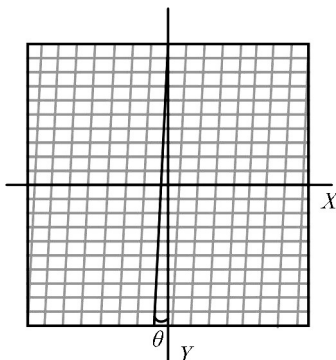


图 8 水平方向正交误差示意图

6.6 畸变

选取相应二维标准立体栅格进行校准。将显微镜调至正常工作状态，测量一张不少于 9 个完整方格的扫描图像。取单个方格的 4 个端点为 A、B、C、D，区分畸变类型，如图 9 所示。分别计算枕形畸变的最短距离 d_p 和桶形畸变的最长距离 d_b 。按式 (11)～式 (14) 计算畸变相对误差。

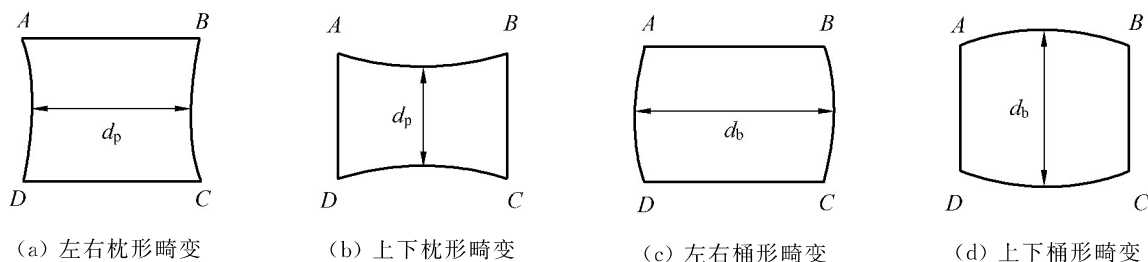


图 9 畸变测量示意图

左右枕形畸变：

$$P_H = \left(1 - \frac{2 d_p}{d_{AB} + d_{CD}}\right) \times 100\% \quad (11)$$

式中：

P_H ——左右枕形畸变相对误差；

d_p ——发生枕形畸变的最短距离，nm；

d_{AB} ——方格 AB 边长，nm；

d_{CD} ——方格 CD 边长，nm。

上下枕形畸变：

$$P_V = \left(1 - \frac{2 d_p}{d_{AD} + d_{BC}}\right) \times 100\% \quad (12)$$

式中：

P_V ——上下枕形畸变相对误差；

d_p ——发生枕形畸变的最短距离，nm；

d_{AD} ——方格 AD 边长，nm；

d_{BC} ——方格 BC 边长，nm。

左右桶形畸变：

$$B_H = \left(1 - \frac{2 d_b}{d_{AB} + d_{CD}}\right) \times 100\% \quad (13)$$

式中：

B_H ——左右桶形畸变相对误差；

d_b ——发生桶形畸变的最短距离，nm；

d_{AB} ——方格 AB 边长，nm；

d_{CD} ——方格 CD 边长，nm。

上下桶形畸变：

$$B_V = \left(1 - \frac{2 d_b}{d_{AD} + d_{BC}}\right) \times 100\% \quad (14)$$

式中：

B_V ——左右枕形畸变相对误差；

d_b ——发生桶形畸变的最短距离，nm；

d_{AD} ——方格 AD 边长，nm；

d_{BC} ——方格 BC 边长，nm。

6.7 最大可测倾角

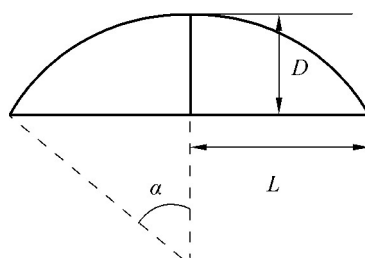


图 10 最大可测倾角测量计算示意图

使用标准球校准共聚焦显微镜最大可测倾角。如图 10 所示，对标准球的球冠表面进行扫描测量，由测得球冠的弦长与弓高计算标准球圆心角半角，即最大可测倾斜角 [式 (15)]。

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{2DL}{D^2 + L^2}\right) \quad (15)$$

式中：

α ——最大可测倾斜角；

L ——二分之一弦长；

D ——弓高。

6.8 水平方向拼接误差

选取相应的标准台阶进行校准。通过两个视场分别对获得标准器有效特征区的两部分图像进行拼接。在拼接后的图像上均匀选取 3 条垂直于拼接线的轮廓线，如图 11 所示。计算 3 条轮廓线在拼接线两侧的 Y 方向高度差（如图 12 所示），其算术平均值作为 X 方向拼接误差 [式 (16)]。

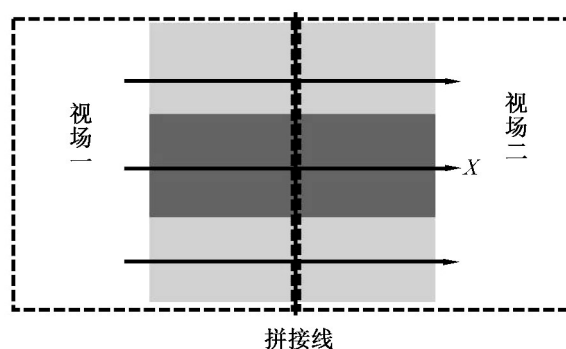


图 11 拼接误差校准示意图

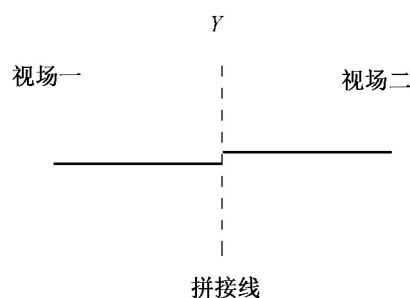


图 12 X 方向拼接误差校准切面图

$$\Delta X = \frac{\sum_{i=1}^n |c_i - d_i|}{n} \quad (16)$$

式中：

ΔX ——共聚焦显微镜 X 方向上的拼接误差，nm；

c_i ——第 i 次测量拼接线左侧轮廓线在 Y 方向上的高度测得值，nm；

d_i ——第 i 次测量拼接线右侧轮廓线在 Y 方向上的高度测得值，nm；

n ——测量次数， $n=3$ 。

进行 Y 方向校准时，只需旋转标准台阶的方向 90° ，按照 X 方向拼接误差的校准方法校准即可。

6.9 垂直方向拼接误差

选取相应的标准台阶进行校准。通过两个视场分别对获得标准器有效特征区的两部分图像进行拼接。在拼接后的图像上均匀选取 3 条垂直于拼接线的轮廓线，如图 11 所示。计算 3 条轮廓线在拼接线两侧的高度差（如图 13 所示），其算术平均值作为垂直方

向拼接误差 [式 (17)]。

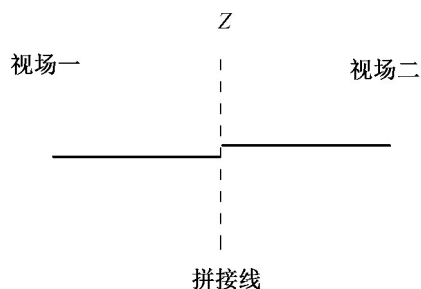


图 13 垂直方向拼接误差校准切面图

$$\Delta Z = \frac{\sum_{i=1}^n |a_i - b_i|}{n} \quad (17)$$

式中：

ΔZ ——共聚焦显微镜垂直方向上的拼接误差，nm；

a_i ——第 i 次测量拼接线左侧轮廓线在 Z 方向上的高度测得值，nm；

b_i ——第 i 次测量拼接线右侧轮廓线在 Z 方向上的高度测得值，nm；

n ——测量次数， $n=3$ 。

6.10 载物台定位误差

仪器首次验收一般使用激光干涉仪对载物台 X 、 Y 两个方向进行校准。载物台定位误差为载物台位移量示数与激光干涉仪示数之差 [式 (18)]。

$$\Delta M = M_a - M_s \quad (18)$$

式中：

ΔM ——载物台定位误差，nm；

M_a ——载物台位移量示数，nm；

M_s ——激光干涉仪示数，nm。

7 校准结果表达

应符合 JJF 1071 中对校准证书的通用要求，经过校准的共聚焦显微镜出具校准证书。校准结果应至少包含以下内容：校准项目名称和校准结果。测量不确定度的评定见附录 A，校准结果的表达见附录 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，建议一般不超过 1 年。

附录 A

激光共聚焦显微镜长度测量误差的不确定度评定

激光共聚焦显微镜测量误差的不确定度受到放大倍数、位移扫描系统漂移、光学系统像差等因素的影响。本附录为激光共聚焦显微镜进行水平方向、垂直方向测量误差校准结果的测量不确定度评定。

A.1 垂直方向校准结果的测量不确定度评定模型与评定示例

A.1.1 垂直方向校准结果的测量不确定度评定模型

A.1.1.1 垂直方向测量模型

根据测量方法，用标准台阶对共聚焦显微镜校准时，测量结果可以表示为：

$$\Delta P = P - P_s$$

式中：

ΔP ——仪器的测量误差；

P ——共聚焦显微镜的测得值；

P_s ——标准器的标准值。

A.1.1.2 合成标准不确定度及扩展不确定度

以上校准值的各分量互不相关，所以校准结果的合成标准不确定度可表示为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$$

测量不确定度来源：

u_1 ——测量重复性引入的不确定度；

u_2 ——标准台阶标准值的不确定度；

u_3 ——仪器示值分辨力引入的不确定度。

扩展不确定度 $U = k \cdot u_c$ ， $k = 2$ 。

A.1.2 垂直方向校准结果的测量不确定度评定示例

本示例中采用的标准台阶是标称值为 4 967 nm 的标准台阶，选用 10 倍物镜。

A.1.2.1 测量重复性引入的不确定度

对标准台阶测量 6 次，测量的实验标准偏差为 1.81 nm。

A.1.2.2 根据证书提供的数据，标准样板的不确定度为 48 nm。

A.1.2.3 仪器的示值分辨力为 0.5 nm，按照均匀分布，引入的不确定度分量为 0.29 nm。该分量远小于测量重复性引入的不确定度，可忽略。

A.1.2.4 测量结果的合成标准不确定度及扩展不确定度

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \approx 49 \text{ nm}$$

扩展不确定度 $U = k \cdot u_c = 98 \text{ nm}$ ， $k = 2$ 。

A.2 水平方向校准结果的测量不确定度评定模型与评定示例

A.2.1 水平方向校准结果的测量不确定度评定模型

A.2.1.1 X 或 Y 方向测量模型

根据测量方法，用一维标准立体栅格对共聚焦显微镜校准时，X 或 Y 方向测量结果可表示为：

$$\Delta P = P - P_s$$

式中：

ΔP ——仪器的测量误差；

P ——共聚焦显微镜的测得值；

P_s ——标准器的标准值。

A.2.1.2 合成标准不确定度及扩展不确定度

以上校准值的各分量互不相关，所以校准结果的合成标准不确定度可表示为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$$

测量不确定度来源：

u_1 ——测量重复性引入的不确定度；

u_2 ——一维标准立体栅格标准值的不确定度；

u_3 ——仪器示值分辨力引入的不确定度。

扩展不确定度 $U = k \cdot u_c$ ， $k = 2$ 。

A.2.2 水平方向校准结果的测量不确定度评定示例

本示例中采用的是栅格平均间距标称值为 10 026 nm 的一维标准立体栅格，选用 20 倍物镜。

A.2.2.1 测量重复性引入的不确定度

对一维标准立体栅格测量 6 次，测量的实验标准偏差为 5.07 nm。

A.2.2.2 根据证书提供的数据，一维标准立体栅格的不确定度为 60 nm。

A.2.2.3 仪器的示值分辨力为 1 nm，按照均匀分布，引入的不确定度分量为 0.58 nm。该分量远小于测量重复性引入的不确定度，可忽略。

A.2.2.4 测量结果的合成标准不确定度及扩展不确定度

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \approx 61 \text{ nm}$$

扩展不确定度 $U = k \cdot u_c = 122 \text{ nm}$ ， $k = 2$ 。

附录 B

激光共聚焦显微镜校准证书(内页)格式

证书编号: ××××—××××

校准结果

1. 水平、垂直方向长度测量误差

放大倍率	长度测量误差/nm	长度测量误差的扩展 不确定度($k=2$)/nm

2. 水平、垂直方向长度测量重复性

放大倍率	长度测量重复性/nm

3. 水平方向正交误差

放大倍率	正交误差/(°)

4. 畸变

放大倍率	左右桶形畸变/%	上下桶形畸变/%	左右枕形畸变/%	上下枕形畸变/%

5. 最大可测倾角

放大倍率	二分之一弦长 L /nm	弓高 D /nm	圆心半角/(°)

6. 水平方向拼接误差

放大倍率	X 方向拼接误差	Y 方向拼接误差

7. 垂直方向拼接误差	
放大倍率	垂直方向拼接误差
8. 载物台定位误差	
X 方向定位误差	Y 方向定位误差
说明： 根据客户要求和校准文件的规定，通常情况下_____个月校准一次。 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。	
声明： 1 本证书的校准结果仅对本次所校准的计量器具有效。 2 未经本实验室书面批准，部分复印本证书无效。	

校准员：

核验员：