



中华人民共和国工业和信息化部
有色金属计量技术规范

JJF（有色金属）XX—20XX

原子力显微镜校准规范

Calibration Specification for Atomic Force Microscopes

（报批稿）

20xx-xx-xx 发布

20xx-xx-xx 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

原子力显微镜校准规范

Calibration Specification for
Atomic Force Microscopes

JJF（有色金属）XX—20XX

归口单位：中国有色金属工业协会

主要起草单位：国合通用测试评价认证股份公司

参加起草单位：国标（北京）检验认证有限公司

有色金属技术经济研究院有限责任公司

国合通用（青岛）测试评价有限公司

国家纳米科学中心

北京师范大学

西安交通大学

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

天津大学

北京航空航天大学

包头稀土研究院

微仪光电（天津）有限公司

本规范委托有色金属行业计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

杨 银（国合通用测试评价认证股份公司）
吕琴丽（国标（北京）检验认证有限公司）
闫雁楠（有色金属技术经济研究院有限责任公司）
樊志罡（国标（北京）检验认证有限公司）
李铸铁（国合通用（青岛）测试评价有限公司）
周 进（国家纳米科学中心）
赖宇明（北京师范大学）
王琛英（西安交通大学）
狄崇庆（中国科学院宁波材料技术与工程研究所）
郭 磊（天津大学）
陈晓朋（国标（北京）检验认证有限公司）
金雨佳（北京航空航天大学）
宋海茂（包头稀土研究院）
叶志强（北京航空航天大学）
张 昌（微仪光电（天津）有限公司）
卢 硕（国合通用测试评价认证股份公司）
田济阳（国合通用测试评价认证股份公司）
郝明欣（中国科学院宁波材料技术与工程研究所）

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)
5 校准条件	(2)
5.1 环境条件	(2)
5.2 测量标准	(2)
6 校准项目和校准方法	(3)
6.1 校准项目	(3)
6.2 校准方法	(3)
7 校准结果表达	(8)
8 复校时间间隔	(9)
附录 A 测量标准参考信息	(10)
附录 B 校准原始记录参考格式	(11)
附录 C 校准证书内页参考格式	(14)
附录 D 原子力显微镜 Z 轴位移示值误差的测量结果不确定度评定示例	(15)
附录 E 原子力显微镜 X、Y 坐标正交性误差的测量结果不确定度评定示例	(18)

引 言

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

本规范参考了GB/T 27760《利用Si（111）晶面原子台阶对原子力显微镜亚纳米高度测量进行校准的方法》、GB/T 42659《表面化学分析 扫描探针显微术 采用扫描探针显微镜测定几何量：测量系统校准》、GB/T 43915《纳米几何量标准样板测试方法》、JJF 1351《扫描探针显微镜校准规范》的技术内容。

本规范为首次发布。

原子力显微镜校准规范

1 范围

本规范适用于以几何表面形貌为测量对象的原子力显微镜的校准。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

GB/T 27760-2011 利用 Si（111）晶面原子台阶对原子力显微镜亚纳米高度测量进行校准的方法

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于该规范；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

原子力显微镜是以逐点扫描方式工作的测量装置，利用一个尖端足够尖锐的探针，采用原子间作用力来描绘被测物体的表面。主要用于表征样品的表面形貌起伏、结构变化，获得样品表面的形貌、粗糙度和结构尺寸等信息，从而得到样品表面原子级的三维立体形貌图像。原子力显微镜主要由原子力检测系统、光学观察系统、带微悬臂的探针系统、样品台、扫描系统、数据处理与控制系统、反馈控制系统等组成，通过将扫描系统连接于探针系统或样品台实现X、Y、Z方向的扫描功能，结构示意图见图1。

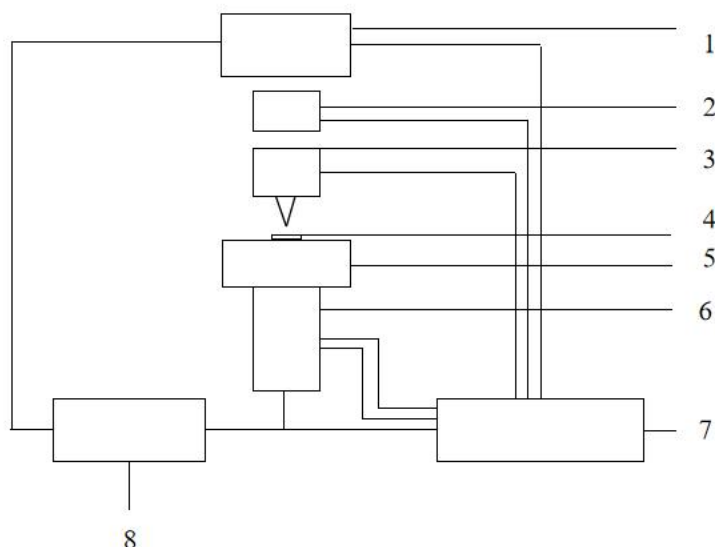


图1 原子力显微镜结构示意图

1—原子力检测系统；2—光学观察系统（含光学视窗、十字轴）；3—带微悬臂的探针系统；4—样品；5—样品台；6—扫描系统；7—数据处理与控制系统；8—反馈控制系统

4 计量特性

计量特性有Z向漂移，Z向亚纳米高度校正比例因子，Z向纳米高度校正比例因子，Z轴位移示值误差，Z轴位移测量重复性，X、Y轴位移示值误差，X、Y轴位移测量重复性和X、Y坐标正交性误差，本规范对以上计量特性没有数值要求。

5 校准条件

5.1 环境条件

环境温度：18℃~25℃。

相对湿度：不大于60%。

校准应在周围无影响测量的污染、震动、噪声和电磁干扰的环境下进行，测量标准应在测量环境中稳定不小于2h。

5.2 测量标准

测量标准的技术指标见表1，常见的测量标准见附录A。

表 1 测量标准的技术指标

测量标准	技术指标	备注
纳米级台阶样板	测量范围：(10~5000)nm，扩展不确定度 U 不大于 $(4+5\times 10^{-5}h)$ nm (h 为台阶高度)， $k=2$	校准 Z 向漂移、Z 向纳米高度校正比例因子、Z 轴位移示值误差、Z 轴位移测量重复性
原子台阶样品	测量范围：(0.1~10)nm，相对扩展不确定度 U_{rel} 不大于 7%， $k=2$	校准 Z 向亚纳米高度校正比例因子
一维纳米线间隔样板	最大允许误差：±1nm	校准 X、Y 轴位移示值误差及 X、Y 轴位移测量重复性
二维纳米线间隔样板	正交性标准值 90°，正交性最大允许误差：±0.1°	校准 X、Y 坐标正交性误差

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

校准项目有Z向漂移, Z向亚纳米高度校正比例因子, Z向纳米高度校正比例因子, Z轴位移示值误差, Z轴位移测量重复性, X、Y轴位移示值误差, X、Y轴位移测量重复性, X、Y坐标正交性误差。

6.2 校准方法

6.2.1 Z向漂移

将纳米级台阶样板放入样品台, 用台阶样板中平面测量区域作被测对象, 进行Z向扫描, 行扫描频率设置为1Hz, 扫描分辨率选取原子力显微镜的最大值, 连续采集Z向位移信号不少于60s, 获得Z向位移随时间变化的图像, 由原子力显微镜数据处理与控制系统直接计算读取Z向漂移。

6.2.2 Z向亚纳米高度校正比例因子

6.2.2.1 样品安装与定位

将原子台阶样品固定于样品台上, 通过原子力显微镜的光学视窗预定位, 调节样品方向, 尽量使单个原子台阶边缘与光学视窗内的十字 Y 轴方向平行, 以保证台阶面在扫描图像中均匀分布。

6.2.2.2 测量区域选择与校准方法

选取包含 5~6 个间距均匀的原子台阶的区域为扫描范围, 扫描分辨率不低于 512 像素, 扫描频率不高于 1Hz。在扫描图像中选取 5 个矩形小区域, 每个矩形小区域应包含一个原子台阶, 且台阶边缘位于矩形区域的中间 (见图 2)。对每个选定的矩形小区域的上台面和下台面的 Z 向高度数据点进行一元线性回归, 拟合得到直线, 以上、下拟合直线的 Z 坐标差值作为该区域的台阶高度测量值 H , 该值由原子力显微镜数据处理与控制系统直接计算得到。

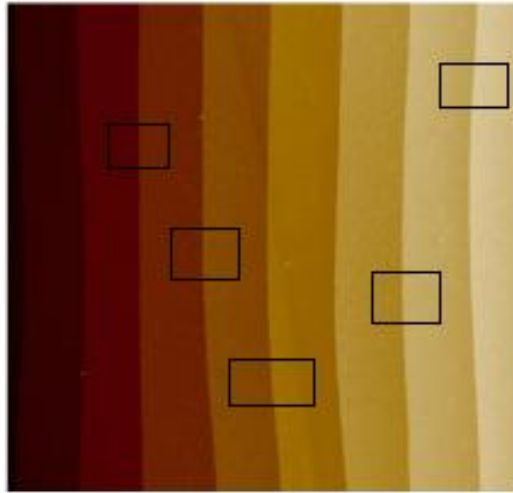


图2 Z 向亚纳米高度选取示意图

6.2.2.3 Z 向亚纳米高度校正比例因子计算

计算 5 个矩形小区域的亚纳米台阶高度测量值的算术平均值 $\overline{H}$ ，Z 向亚纳米高度校正比例因子 R 的计算见公式（1）。

$$R = \frac{H_s}{\overline{H}} \quad (1)$$

式中：

R ——Z 向亚纳米高度校正比例因子；

H_s ——原子台阶样品的亚纳米台阶高度标准值，nm；

$\overline{H}$ ——亚纳米台阶高度测量值的算术平均值，nm。

6.2.3 Z向纳米高度校正比例因子

采用纳米级台阶样板校准，校准方法见 6.2.2.1~6.2.2.2，Z 向纳米高度校正比例因子的计算见公式（2）。

$$R_n = \frac{H_n}{\overline{H_n}} \quad (2)$$

式中：

R_n ——Z 向纳米高度校正比例因子；

H_n ——纳米级台阶高度标准值，nm；

$\overline{H_n}$ ——纳米台阶高度测量值的算术平均值，nm。

6.2.4 Z轴位移示值误差

6.2.4.1 测量标准的选择

当原子力显微镜 Z 轴位移测量范围不大于 $0.5\mu\text{m}$ 时，应选用 1 块纳米级台阶样板进行校准，所选纳米级台阶样板的高度值不小于原子力显微镜 Z 轴位移测量范围的 10%。

当原子力显微镜 Z 轴位移测量范围大于 $0.5\mu\text{m}$ 时，应选用 2 块不同高度的纳米级台阶样板进行校准，其中所选较高台阶样板的台阶高度值不小于原子力显微镜 Z 轴位移测量范围的 70%，所选较低台阶样板的台阶高度值不小于原子力显微镜 Z 轴位移测量范围的 10%。

6.2.4.2 校准方法

将纳米级台阶样板固定于样品台上，通过原子力显微镜的光学视窗预定位，调节样板方向，使单个纳米台阶边缘与光学视窗内的十字 Y 轴方向平行。

Z 轴扫描范围应包含台阶上、下平台及台阶边缘，并且总宽度不小于纳米级台阶宽度的 3 倍。扫描分辨率不低于 512 像素，扫描频率不高于 1Hz，形成扫描范围内台阶图像，见图 3。在相同扫描范围共进行 10 次扫描，读取 10 次台阶高度测量值。

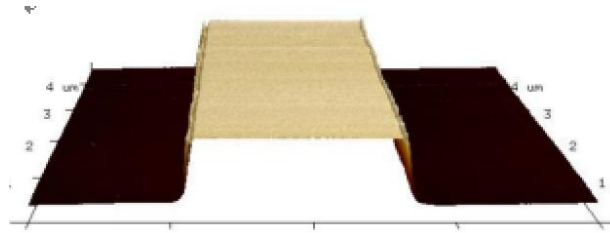


图3 扫描范围内台阶示意图

6.2.4.3 计算公式

取 10 次纳米级台阶样板台阶高度测量值的算术平均值，Z 轴位移示值误差的计算见公式（3）。

$$e = \bar{h} - h_s \quad (3)$$

式中：

e ——Z 轴位移示值误差，nm；

$\bar{h}$ ——台阶高度测量平均值，nm；

h_s ——纳米级台阶样板的台阶高度标准值，nm。

当选用 1 块纳米级台阶样板进行校准时，公式（3）所得结果即为校准结果；当选用 2 块纳米级台阶样板进行校准时，取 2 次校准的位移示值误差的最大值作为 Z 轴位移示值误差的校准结果。

6.2.5 Z轴位移测量重复性

选用 1 块纳米级台阶样板的高度值不小于原子力显微镜 Z 轴位移测量范围 20% 的纳米级台阶样板进行校准。

校准方法见 6.2.4.2。在相同环境条件下，重复测量 10 次纳米台阶高度值，Z 向位移测量重复性的计算见公式（4）。当校准 Z 轴位移示值误差时所选测量标准满足高度值不小于原子力显微镜 Z 轴位移测量范围的 20% 要求时，也可采用校准 Z 轴位移示值误差时所选测量标准的数据计算 Z 轴位移测量重复性。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$

式中：

s ——位移测量重复性，nm；

n ——测量次数， $n=10$ ；

x_i ——第 i 次台阶高度测量值，nm；

$\bar{x}$ ——10 次台阶高度测量值的算术平均值，nm。

6.2.6 X、Y轴位移示值误差

6.2.6.1 X轴位移示值误差的校准

6.2.6.1.1 将一维纳米线间隔样板固定于样品台上，通过原子力显微镜的光学视窗预定位，调节样品方向，使一维纳米线边缘与光学视窗内的十字 Y 轴方向平行。

6.2.6.1.2 沿 X 轴方向扫描得到扫描图像。在一维纳米线间隔样板上选取不少于 10 个完整周期的线间隔阵列作为测量区域，测量区域宽度应不小于原子力显微镜扫描器最大扫描范围的 1/3。扫描方向应垂直于一维纳米线方向，扫描分辨率不低于 512 像素，扫描频率不高于 1 Hz，形成扫描图像。

6.2.6.1.3 在扫描图像上，沿垂直于纳米线条的方向绘制一条截面线，原子力显微镜生成沿此线的表面轮廓曲线。在表面轮廓曲线上，标记要测量的多个周期线间隔，以曲线零点为起始基准，各周期特征位置为定位点确定终止线，见图 4，原子力显微镜输出各测量周期的间隔位移。线间隔测量值的计算见公式（5）。

$$L = \frac{L_n}{n} \quad (5)$$

式中：

L ——线间隔测量值，nm；

L_n ——各测量周期的间隔位移，nm；

n ——测量周期数， $n \geq 10$ 。

6.2.6.1.4 对线间隔进行不少于3次的重复测量，以多次测量值的平均值减去一维纳米线间隔样板标准值作为X轴位移测量示值误差，X轴位移示值误差的计算见公式（6）。

$$\Delta L_X = \bar{L} - L_S \quad (6)$$

式中：

ΔL_X ——X轴位移示值误差，nm；

$\bar{L}$ ——线间隔测量算术平均值，nm；

L_S ——一维纳米线间隔样板的线间隔标准值，nm。

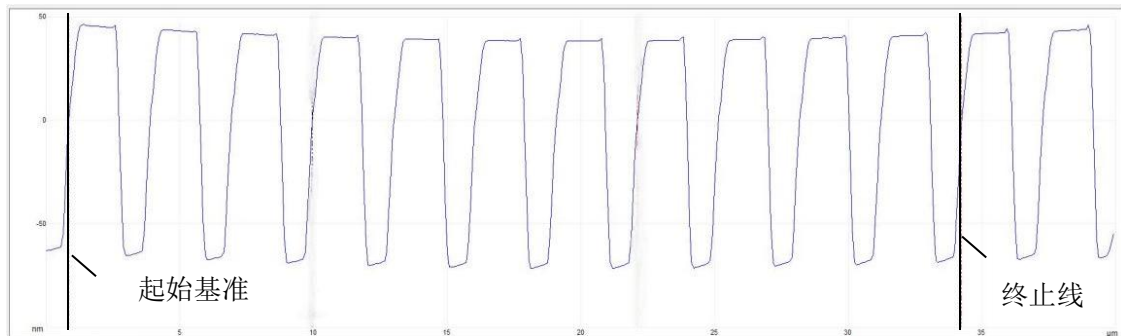


图4 一维纳米线间隔样板扫描测量表面轮廓曲线

6.2.6.2 Y轴位移示值误差的校准

将一维纳米线间隔样板沿Z轴旋转90°，校准Y轴位移示值误差，重复6.2.6.1.2～6.2.6.1.4，计算Y轴位移示值误差。

6.2.7 X、Y轴位移测量重复性

6.2.7.1 选择边缘清晰、无缺陷、信噪比好的一个典型线间隔周期作为X轴测量重复性的测量区域，重复6.2.6.2～6.2.6.4，重复测量10次，参照公式（4）计算X轴测量重复性。当X轴位移示值误差校准时所选测量标准满足本校准项目要求时，也可采用X轴位移示值误差校准时的数据计算X轴位移测量重复性。

6.2.7.2 将一维纳米线间隔样板绕Z轴旋转90°，校准Y轴测量重复性，重复6.2.6.2～6.2.6.4，Y轴测量重复性的计算参照公式（4）。

6.2.8 X、Y坐标正交性误差

采用二维纳米线间隔样板校准X、Y坐标正交性误差，通过原子力显微镜光学视窗将十字轴与二维纳米线边缘保持平行，使扫描方向与样板的X或Y轴方向对齐。扫描范围应覆盖6个以上完整周期的二维格点阵列，扫描分辨率不低于512像素，扫描频率不高于1Hz。以X与Y轴的实际夹角作为X、Y坐标正交角度的测量值，重复测量10次，计算其算术平均值。X、Y坐标正交性误差的计算见公式（7）。

$$\theta = \bar{\theta} - \theta_s \quad (7)$$

式中：

θ ——X、Y坐标正交性误差，°；

$\bar{\theta}$ ——X、Y坐标正交性测量值，°；

θ_s ——二维纳米线间隔样板正交性角度标准值，90°。

7 校准结果表达

经校准的原子力显微镜出具校准证书，校准证书至少应包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室的名称和地址；
- c) 实施校准活动的地点，包括客户设施、实验室固定设施以外的地点；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和联络信息；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准活动的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期和证书发布日期；
- h) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- i) 本次校准所用的测量标准和溯源性及有效性说明；
- j) 校准环境的描述；
- k) 校准结果及其测量不确定度的说明（给出整个测量范围校准结果测量不确定度的最大值）；
- l) 对校准规范偏离的说明；
- m) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识，以及签发日期；
- n) 校准人和核验人签名；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；

p) 未经校准实验室书面批准，不得部分复制校准证书的声明。

校准原始记录参考格式见附录B，校准证书内页参考格式见附录C。

8 复校时间间隔

复校时间间隔的长短取决于其使用情况，使用单位可根据实际使用情况自主决定复校的时间，建议复校时间间隔为 1 年。

附录 A

测量标准参考信息

本规范所用的测量标准优先选择有证标准物质,也可以根据情况选择合适的可溯源测量标准,目前可用的测量标准参考信息见表A.1。

表 A.1 测量标准参考信息

测量标准	名称	编号	标准值	备注
纳米级台阶样板	纳米台阶高度标准物质	GBW13976	10.8nm	校准 Z 向漂移、Z 向纳米高度校正比例因子、Z 轴位移示值误差
	纳米台阶高度标准物质	GBW13977	21.3nm	校准 Z 向漂移、Z 向纳米高度校正比例因子、Z 轴位移示值误差、Z 轴位移测量重复性
	纳米台阶高度标准物质	GBW13978	40.8nm	
	扫描探针显微镜校准装置	[2015]国量标计证字第 281 号	(50~1000) nm	
原子台阶样品	钛酸锶单原子台阶高度标准物质	GBW(E)136709	0.39nm	校准 Z 向亚纳米高度校正比例因子
	Si(111)晶面原子台阶样品	按 GB/T 27760-2011 附录 A 制备	314pm	
一维纳米线间隔样板	一维硅纳米光栅标准物质	GBW13983	106.4nm	校准 X、Y 轴位移示值误差及 X、Y 轴位移测量重复性
	一维硅纳米光栅标准物质	GBW13694	53.5nm	
	一维硅纳米光栅标准物质	GBW(E)130698	500.0nm	
	一维纳米栅格标准物质	GBW(E)130699	1000.0nm	
二维纳米线间隔样板	二维铬纳米栅格标准物质	GBW(E)130838	90°	校准 X、Y 坐标正交性误差

附录 B

校准原始记录参考格式

证书编号:

校准日期:

委托单位:

校准依据:

被校设备信息							
器具名称						出厂编号	
型号/规格						设备编号	
制造厂						环境条件	°C %RH
校准地点							
测量标准信息							
编号	标准值 (nm)		扩展不确定度 (k=2) (nm)			有效期	
校准结果							
1. Z 向漂移 (nm)							
扩展不确定度 $U(k=2)$							
2. Z 向亚纳米高度校正比例因子							
原子台阶高度标准值	台阶高度测量值					平均值	校正比例因子
	1	2	3	4	5		
扩展不确定度 $U(k=2)$							
3. Z 向纳米高度校正比例因子							
纳米台阶高度标准值	台阶高度测量值					平均值	校正比例因子
	1	2	3	4	5		
扩展不确定度 $U(k=2)$							
4. Z 轴位移示值误差 (nm)							
纳米台阶高度标准值	台阶高度测量值					平均值	测量误差
	1	2	3	4	5		
	6	7	8	9	10		

扩展不确定度 $U(k=2)$										
5. Z 轴位移测量重复性 (nm)										
纳米台阶高度标准值	台阶高度测量值					重复性				
	1	2	3	4	5					
	6	7	8	9	10					
扩展不确定度 $U(k=2)$										
6. X 轴位移示值误差 (nm)										
一维纳米线间隔标准值	一维纳米线间隔测量值					平均值		测量误差		
	测量周期									
	间隔位移									
	间隔周期值									
扩展不确定度 $U(k=2)$										
7. X 轴位移测量重复性 (nm)										
一维纳米线间隔标准值	一维纳米线间隔测量值					重复性				
	1	2	3	4	5					
	6	7	8	9	10					
扩展不确定度 $U(k=2)$										
8. Y 轴位移示值误差 (nm)										
一维纳米线间隔标准值	一维纳米线间隔测量值					平均值		测量误差		
	测量周期									
	间隔位移									
	间隔周期值									
扩展不确定度 $U(k=2)$										
9. Y 轴位移测量重复性 (nm)										
一维纳米线间隔标准值	一维纳米线间隔测量值					重复性				
	1	2	3	4	5					
	6	7	8	9	10					

扩展不确定度 $U(k=2)$										
10. X、Y 坐标正交性误差 (°)										
二维纳米线间隔正交性角度标准值	正交性角度测量值					平均值	正交性误差			
	1	2	3	4	5					
	6	7	8	9	10					
扩展不确定度 $U(k=2)$										

附录 C

校准证书内页参考格式

校准项目	校准结果	扩展不确定度 $U(k=2)$
Z 向漂移/nm		
Z 向亚纳米高度校正比例因子		
Z 向纳米高度校正比例因子		
Z 轴位移示值误差/nm		
Z 轴位移测量重复性/nm		
X 轴位移示值误差/nm		
X 轴位移测量重复性/nm		
Y 轴位移示值误差/nm		
Y 轴位移测量重复性/nm		
X、Y 坐标正交性误差/°		

附录 D

原子力显微镜 Z 轴位移示值误差的测量结果不确定度评定示例

D.1 概述

D.1.1 评定依据

本规范。

D.1.2 测量标准

[2015]国量标计证字第281号纳米级台阶样板，台阶高度标准值为100nm，扩展不确定度 $U=3.6\text{nm}$ ， $k=2$ 。

D.1.3 被校对象

原子力显微镜，Z 方向测量范围（0~10） μm 。

D.1.4 校准方法

原子力显微镜 Z 轴位移示值误差的测量见本规范 6.2.4。

D.2 测量模型

采用纳米级台阶标准样板进行测量，测量模型见公式（D.1）：

$$e = \bar{h} - h_s \quad (\text{D.1})$$

式中：

e ——Z 轴位移示值误差，nm；

$\bar{h}$ ——测量高度平均值，nm；

h_s ——台阶样板高度标准值，nm。

D.3 测量不确定度的来源分析

根据测量模型，原子力显微镜的Z轴位移示值误差的不确定度来源主要是：

- 1) 测量标准引入的不确定度 u_1 ；
- 2) 仪器测量重复性引入的不确定度 u_2 ；
- 3) 仪器测量分辨力引入的不确定度 u_3 ；
- 4) 图像倾斜校正引入的不确定度 u_4 ；

D.4 测量不确定度评定

D.4.1 测量标准引入的不确定度 u_1

纳米台阶样板引入的扩展不确定度 $U=3.6\text{nm}$ ， $k=2$ 。则有：

$$u_1 = \frac{U}{k} = \frac{3.6}{2} = 1.8\text{nm}$$

D.4.2 仪器测量重复性引入的不确定度 u_2

对纳米台阶样板进行10重复扫描测量，测量列见表C.1。

表C.1 纳米台阶测量列

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
纳米台阶高度（nm）	108.2	108.3	108.5	108.2	108.1	107.5	108.8	108.0	107.4	107.8

根据贝塞尔公式，单次测量标准偏差为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.43\text{nm}$$

实际测量中，以10次测量结果平均值为结果，则：

$$u_2 = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0.43}{\sqrt{10}} = 0.14\text{nm}$$

D.4.3 仪器分辨力引入的不确定度 u_3

原子力显微镜的分辨力为0.1nm，取区间半宽 $a=0.05\text{nm}$ ，假设服从均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029\text{nm}$$

考虑到 $u_3 < u_2$ ，所以不考虑分辨力引入的不确定度，即：

$$u_3 = 0$$

D.4.4 图像倾斜校正引入的不确定度 u_4

原子力显微镜形貌测量由于测量试样安装倾斜，因此必须对测量数据进行消倾处理。根据仿真实验，在倾斜角度小于 5° 的条件下，扫描长度 $L=10\mu\text{m}=10^4\text{nm}$ ，校正后仍有残余倾角残余倾角 $\Delta\theta=0.01^\circ$ ， $\Delta\theta_{\text{rad}} \approx 0.01^\circ \approx 1.75 \times 10^{-4}\text{rad}$ 。本例测量由于倾斜校正残余的引入的测量标准不确定度通过误差传递公式估算为：

$$u_4 = \frac{L\Delta\theta}{\sqrt{3}} = \frac{10^4 \times 1.75 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}} = \frac{1.75}{1.732} \approx 0.2\text{nm}$$

D.5 合成标准不确定度计算

考虑以上各输入量是彼此独立的，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_4^2} = \sqrt{1.8^2 + 0.14^2 + 0.2^2} = 1.8\text{nm}$$

D.6 扩展不确定度计算

取包含因子 $k = 2$ ，扩展不确定度为：

$$U = k \cdot u_c = 2 \times 1.8 = 3.6\text{nm}$$

附录 E

原子力显微镜 X、Y 坐标正交性误差的测量结果不确定度评定示例

E.1 概述

E.1.1 评定依据

本规范。

E.1.2 测量标准

GBW(E)130838 号，二维纳米线间隔样板，标准值为 90° 。

E.1.3 被校对象

原子力显微镜，X、Y 方向扫描范围（0~90） μm ，Z 方向扫描范围（0~10） μm 。

E.1.4 校准方法

校准方法见本规范 6.2.8。

E.2 测量模型

采用二维纳米线间隔样板进行测量，测量模型见公式（E.1）。

$$\theta = \bar{\theta} - \theta_s \quad (\text{E.1})$$

式中：

θ ——X、Y 坐标正交性误差， $^\circ$ ；

$\bar{\theta}$ ——10 次重复测量正交性角度平均值， $^\circ$ ；

θ_s ——二维纳米线间隔样板正交性角度标准值， 90° 。

E.3 测量不确定度的来源分析

根据测量模型，原子力显微镜的正交性误差测量不确定度来源主要是：

- 1) 测量标准引入的不确定度 u_1 ；
- 2) 仪器测量重复性引入的不确定度 u_2 ；
- 3) 仪器测量分辨力引入的不确定度 u_3 。

E.4 测量不确定度评定

E.4.1 测量标准引入的不确定度 u_1

二维纳米线间隔样板正交性角度测量不确定度为 $U=0.2^\circ$ ， $k=2$ ，则：

$$u_1 = \frac{U}{k} = \frac{0.2}{2} = 0.1^\circ$$

E.4.2 仪器测量重复性引入的不确定度

二维纳米线间隔样板进行10次重复测量，测量列见D.1。

表D.1 二维纳米线间隔样板正交性角度测量列

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
正交性角度 (°)	90.6	89.9	89.7	89.9	90	90.4	89.8	89.7	89.5	89.8

根据贝塞尔公式，单次测量标准偏差为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.33^\circ$$

实际测量时以10次测量的平均值为结果，取 $n=10$ ，则：

$$u_2 = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0.33}{\sqrt{10}} = 0.11^\circ$$

E.4.3 仪器分辨力引入的不确定度 u_3

原子力显微镜的分辨力为 0.1° ，则区间半宽 $a=0.05^\circ$ ，假设服从均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029^\circ$$

考虑到 $u_3 < u_2$ ，所以不考虑分辨力引入的不确定度，即：

$$u_3 = 0$$

E.5 合成标准不确定度计算

各影响量相互独立，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.1^2 + 0.11^2} = 0.15^\circ$$

E.6 扩展不确定度计算

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = k \cdot u_c = 2 \times 0.15 = 0.3^\circ$$