

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.01.11

# 微纳米三坐标测量机Z轴六自由度误差 在线测量与补偿

李洁, 张成瑶, 林荣炜, 李瑞君\*

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 目前缺乏具备通用性且便于集成的微纳米三坐标测量机Z轴六自由度误差在线测量与补偿方案, 为解决此问题, 本研究团队提出基于激光干涉和自准直原理的Z轴直线和角度误差同步测量方法, 基于阿贝原则与布莱恩原则建立Z轴六自由度误差补偿模型, 研制相应的高精度紧凑型在线六自由度误差测量系统, 并将该系统应用于微纳米三坐标测量机中。对标称厚度为8 mm的0级量块进行测量, 结果显示: 误差补偿后, 量块厚度测量结果的标准差与示值误差分别降低了54.6%与54.3%。研究成果为提高三坐标测量机测量准确性提供了有力支撑。

**关键词:** 精密测量; 微纳米三坐标测量机; Z轴六自由度误差; 激光干涉; 自准直; 在线测量与补偿; 阿贝原则; 布莱恩原则

中图分类号: TB92; TP394.1; TH691.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2026) 01-0160-09

## Online measurement and compensation of six-degree-of-freedom errors for Z-axis of micro-nano CMMs

LI Jie, ZHANG Chengyao, LIN Rongwei, LI Ruijun \*

(Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** There is a lack of a universal and readily integrable online measurement and compensation scheme for six-degree-of-freedom (6-DOF) errors along the Z-axis of micro-nano coordinate measuring machines (CMMs). To address this challenge, this study introduces a synchronous measurement method for the axis of micro Z-axis linear and angular errors based on laser interferometry and autocollimation principles, and establishes a spatial error compensation model under Z-axis 6-DOF influence based on the Abbe principle and the Bryan principle. An in-situ and on-line Z-axis 6-DOF error measurement system based on the measurement method was developed and applied to a micro-nano CMM. Measurements were performed along the Z-axis on a grade 0 gauge block with a nominal thickness of 8 mm using the CMM. The results show that the measurement standard deviation and indication error are reduced by 54.6% and 54.3%, respectively, after compensation. This method, compensation model and the system provide a reliable solution for improving the measurement and machining accuracy of coordinate measuring machine(CMM) and other precision equipment.

**Key words:** precision measurement; micro-nano CMM; Z-axis 6-DOF errors; laser interferometry; autocollimation; online measurement and compensation; Abbe principle; Bryan principleaxis

收稿日期: 2025-10-13; 修回日期: 2025-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175506, 52475556)

引用格式: 李洁, 张成瑶, 林荣炜, 等. 微纳米三坐标测量机Z轴六自由度误差在线测量与补偿[J]. 计测技术, 2026, 46(1): 160-168.

**Citation:** LI J, ZHANG C Y, LIN R W, et al. Online measurement and compensation of six-degree-of-freedom errors for Z-axis of micro-nano CMMs[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(1): 160-168.



## 0 引言

在精密测量及加工设备中<sup>[1-2]</sup>, Z轴的定位精度直接影响整机性能<sup>[3-4]</sup>。Z轴在运动过程中,因安装误差、导轨误差及驱动振动等因素,会产生六自由度(Six-Degree of Freedom, 6-DOF)误差<sup>[5]</sup>,从而导致设备功能点(Functional Point, FP)产生空间位置误差<sup>[6]</sup>。Z轴定位精度一般基于对应的功能点进行评估<sup>[7]</sup>。为提升微纳设备的测量加工精度,需要研究Z轴6-DOF误差的高精度测量方法及误差补偿模型,以提升Z轴对应功能点的空间位置精度。

目前,直线轴的6-DOF误差测量方法包括激光干涉法<sup>[8-12]</sup>、光栅干涉法<sup>[13-16]</sup>、自准直法<sup>[7, 17]</sup>等。基于激光干涉法的多自由度(Multi-Degree of Freedom, MDOF)误差测量方法测量精度高、稳定性好,但系统复杂且成本高。光栅干涉法以光栅作为敏感单元实现高精度几何误差测量,测量精度高,但受限于光栅的物理尺寸,该方法仅适用于小范围的线性和角度误差测量。自准直法原理简单,但主要用于角度测量,自准直法通常与激光干涉原理相结合以实现高精度MDOF误差测量,但此类方法主要应用于X-Y工作台<sup>[18-19]</sup>,受安装尺寸、系统复杂度限制,很难应用于Z轴6-DOF误差在线测量。

在机床几何误差建模领域中,基于多体系统理论的齐次坐标变换矩阵(Homogeneous Coordinate Transformation Matrix, HTM)方法应用较为广泛<sup>[20-21]</sup>,此类方法具有计算简便、适配多轴系统的优势,不过因未明确系统功能点的具体定位,易导致误差补偿精度下降。基于阿贝原则与布莱恩原则的机床几何误差建模方法受到了研究者的重点关注:文献[6, 22-23]重点剖析了三轴机床几何误差的传递机制,同时探讨了阿贝误差对加工过程的具体影响;文献[24]在误差建模过程中分析了阿贝臂的影响;文献[25]构建了基于阿贝原则与布莱恩原则的整机误差离线补偿模型。上述文献为推动机床几何误差测量与补偿技术发展提供了借鉴,但目前仍缺乏具备通用性且便于集成的三坐标测量机(Coordinate Measuring Machine, CMM)Z轴6-DOF误差在线测量与补偿方案。

基于此,本研究团队提出微纳米CMM Z轴6-DOF误差在线测量与补偿方法。分析Z轴6-DOF误差对功能点空间位置的影响,建立结合阿贝原则与布莱恩原则的功能点空间误差补偿模型,研制相应的6-DOF误差在线测量与补偿系统并应用于微纳米三坐标测量机中。开展量块Z轴高度测量实验,验证微纳米三坐标测量机Z轴6-DOF误差在线测量与补偿方法的有效性。

## 1 Z轴6-DOF误差分析与建模

### 1.1 Z轴6-DOF误差分析

Z轴6-DOF误差与功能点的空间位置误差关系如图1所示,当Z轴运动时,沿X、Y、Z方向的6-DOF误差会使 $F_p$ 移至 $F_p'$ ,三维方向的偏移量(即空间误差)可以表示为 $(\Delta X_z, \Delta Y_z, \Delta Z_z)$ , $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_z$ 分别为Z轴绕X、Y、Z轴的角度误差。其中,角度误差导致的 $F_p$ 位移偏差,可依据阿贝原则与布莱恩原则实现定量计算。

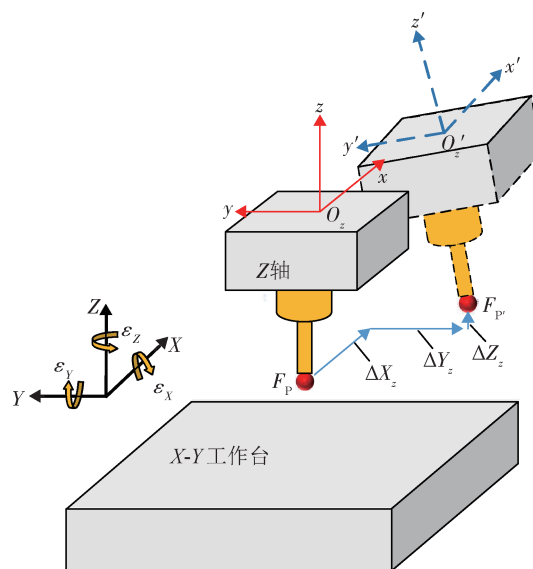


图1 Z轴6-DOF误差与功能点的空间位置误差关系示意图

Fig.1 Schematic diagram of the relationship between volumetric error of functional point and Z-axis 6-DOF error

### 1.2 测量中的阿贝原则和布莱恩原则

根据线性测量中的阿贝原则,测量轴与功能轴需共线,否则就会产生阿贝臂( $L_a$ )<sup>[26]</sup>。如图2所示,平台偏摆角 $\theta_a$ 与阿贝臂 $L_a$ 共同导致功能点和测量点间的阿贝误差为 $\delta_w = L_a \cdot \tan \theta_a \approx L_a \cdot \theta_a$ 。

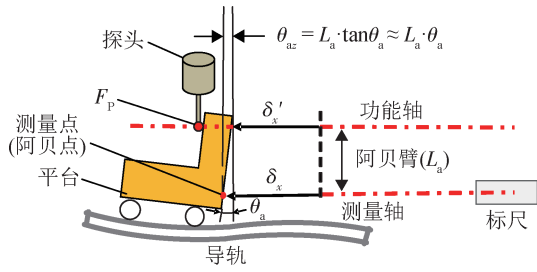


图2 位移测量过程中的阿贝误差

Fig.2 Abbe error in displacement measurement

根据布莱恩原则，当直线度误差测量轴与功能轴不共线时，需要对直线度误差测量值进行补偿<sup>[27]</sup>。如图3所示，当使用千分尺对移动平台垂直方向直线度进行测量时，布莱恩臂为 $L_b$ ，平台角度误差为 $\theta$ ，则布莱恩误差 $\delta_{bz} = L_b \cdot \tan \theta \approx L_b \cdot \theta$ 。

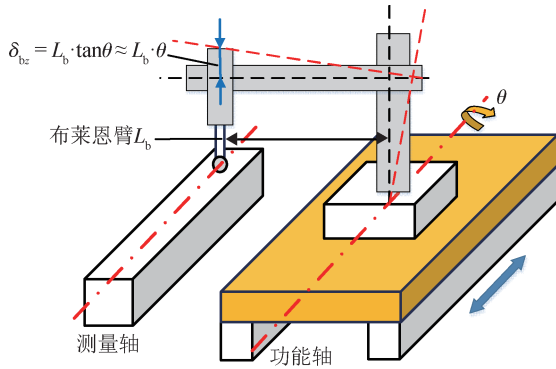


图3 直线度误差测量中的布莱恩误差

Fig.3 Bryan error in the straightness error measurement

### 1.3 Z轴6-DOF误差补偿模型

基于阿贝原则与布莱恩原则，对图4所示的Z轴结构建立工作空间内任意功能点 $F_p$ 的空间误差补偿模型。其中， $M_{p,z}$ 为Z轴位移测量点， $M_{p,x}$ 和 $M_{p,y}$ 分别为Z轴运动时X、Y方向的直线度误差测量点。 $M_{p,z}$ 与 $F_p$ 在X、Y方向的阿贝臂分别为 $L_x^a(z)$ 和 $L_y^a(z)$ 。 $M_{p,x}$ 、 $M_{p,y}$ 与 $F_p$ 在Z方向的布莱恩臂分别为 $L_z^b(z_x)$ 、 $L_z^b(z_y)$ 。

Z轴6-DOF误差造成的 $F_p$ 的空间误差为 $(\Delta X_z, \Delta Y_z, \Delta Z_z)$ ，计算公式为

$$\begin{cases} \Delta X_z = \delta_x(z) + \varepsilon_y(z)L_z^b(z_x) - \varepsilon_z(z)L_x^a(z) \\ \Delta Y_z = \delta_y(z) - \varepsilon_x(z)L_z^b(z_y) + \varepsilon_z(z)L_y^a(z) \\ \Delta Z_z = \delta_z(z) - \varepsilon_y(z)L_x^a(z) + \varepsilon_x(z)L_y^a(z) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\delta_x(z)$ 、 $\delta_y(z)$ 分别为在点 $M_{p,x}$ 、 $M_{p,y}$ 测得的X、Y方向的直线度误差测量值， $\delta_z(z)$ 为点 $M_{p,z}$ 测得的

Z轴线性误差， $\varepsilon_x(z)$ 、 $\varepsilon_y(z)$ 、 $\varepsilon_z(z)$ 为Z轴运动时的角度误差。

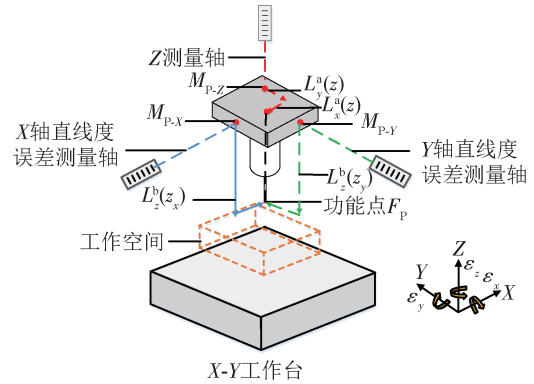


图4 Z轴测量点和功能点之间的位置关系示意图

Fig.4 Positional relationship between Z-axis measurement points and functional point

## 2 Z轴6-DOF误差测量方法与系统

### 2.1 Z轴线性误差测量方法

Z轴运动时的线性位移测量是基于偏振式迈克尔逊干涉(Polarization Michelson Interferometer, PMI)原理实现的。如图5所示，激光准直器(Laser Collimator, LC)发射的激光通过偏振式分光棱镜PBS1发生反射和透射，被分为参考光束和测量光束。测量光束和参考光束沿着各自的传播路径传播后，经过测量镜MM和参考镜RM反射，再经过PBS1、四分之一波片Q3汇聚并干涉，然后经过分光棱镜NPBS、PBS2和斜置45°的PBS3后，得到4路初始相位分别相差90°的光强信号，由4个光电探测器(PD1~PD4)接收<sup>[28]</sup>。

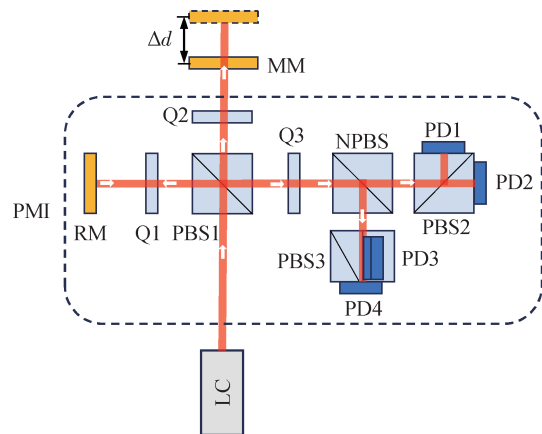


图5 偏振式迈克尔逊干涉测量原理图

Fig.5 Schematic of PMI measuring principle

干涉信号随运动位移  $\Delta d$  变化,  $\Delta d$  计算公式为

$$\Delta d = \left( N + \frac{\Delta\varphi_0 + \Delta\varphi_f}{2\pi} \right) \cdot \frac{\lambda}{2n} \quad (2)$$

式中:  $\Delta\varphi_0$  和  $\Delta\varphi_f$  分别为干涉信号初始相位和末相位,  $N$  为相移的整周期数,  $\lambda$  为激光波长,  $n$  为光传输介质的折射率。Z 轴运动时, X、Y 方向的直线度误差  $\delta_x(z)$ 、 $\delta_y(z)$  及 Z 方向的线性误差  $\delta_z(z)$  可以表示为

$$\begin{cases} \delta_x(z) = \Delta d_x \\ \delta_y(z) = \Delta d_y \\ \delta_z(z) = d_z - \Delta d_z \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\Delta d_x$ 、 $\Delta d_y$ 、 $\Delta d_z$  分别为 Z 轴运动时偏振式迈克尔逊干涉仪 PMI-X、PMI-Y、PMI-Z 的测量值,  $d_z$  为 Z 轴位移指令值。

### 2.2 角度误差测量方法

Z 轴运动时的角度误差的测量原理如图 6 所

示。LC 发出的激光经过分光镜和直角棱镜转折后通过 NPBS, 由测量镜反射, 反射光由 NPBS 进入角度测量模块 AC。

根据激光自准直原理, 当测量镜(MM-Z<sub>x</sub>、MM-Z<sub>y</sub>)随 Z 轴运动发生角度偏转时, 角度测量模块内四象限探测器(Quadrant Detector, QD)光敏面的光斑位置发生改变, 通过换算即可得到角度值。Z 轴运动时的角度误差  $\varepsilon_x(z)$ 、 $\varepsilon_y(z)$ 、 $\varepsilon_z(z)$  计算公式为

$$\begin{cases} \varepsilon_x(z) = \frac{\Delta h_1(X)}{2f} \\ \varepsilon_y(z) = \frac{\Delta h_1(Z)}{2f} \\ \varepsilon_z(z) = \frac{\Delta h_2(Z)}{2f} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\Delta h_1(X)$ 、 $\Delta h_1(Z)$  为光斑在 QD1 灵敏面上 X、Z 产生的位移,  $\Delta h_2(Z)$  为光斑在 QD2 灵敏面上产生的位移,  $f$  为聚焦透镜的焦距。

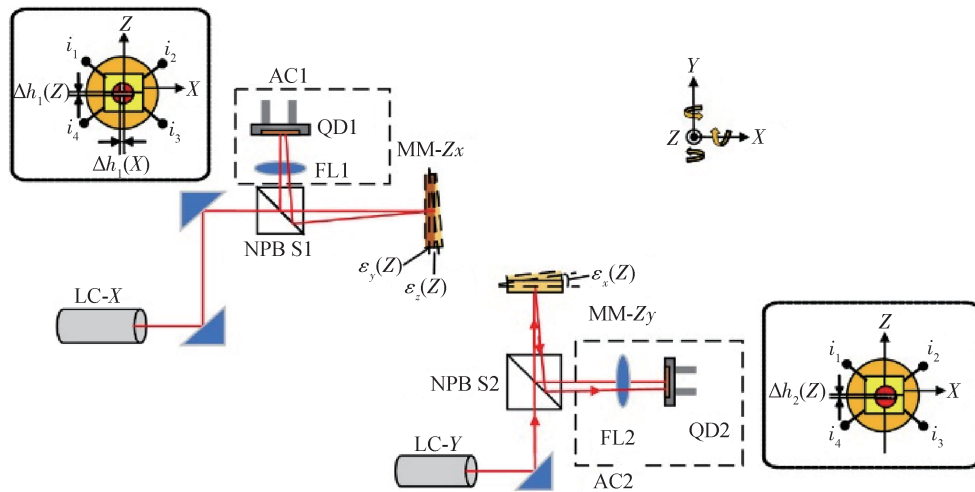


图6 角度误差的测量原理图

Fig.6 Measurement principle diagram of angular errors

### 2.3 6-DOF 误差同步测量系统

为保证误差测量系统的集成性, Z 轴 6-DOF 测量系统是在 X、Y 位移测量系统的基础上设计的。Z 轴 6-DOF 误差测量系统原理如图 7 所示, 激光准直器 LC-X 发射的光通过直角棱镜转折, MM-Z<sub>x</sub> 作为测量镜会随着 Z 轴运动产生角度和位移, 当激光经 MM-Z<sub>x</sub> 反射后, 光束分别由偏振式迈克尔逊干涉仪 PMI-X 和角度测量模块 AC1 接收。通过解算可以得到 Z 轴运动时沿 X 方向的直线度误差及绕 Y、Z 轴转动的角度误差, 其中, MM-X 和

MM-Z<sub>x</sub> 为 PMI-X 测量过程中的参考镜。同理, 激光准直器 LC-Y 发射的激光通过直角棱镜转折, 由测量镜 MM-Z<sub>y</sub> 反射, 回射光被偏振式迈克尔逊干涉仪 PMI-Y 和角度测量模块 AC2 接收, 通过解算得到 Z 轴运动时沿 Y 方向的直线度误差和绕 X 轴转动的角度误差。激光准直器 LC-Z 发射的光由镜 MM-Z 反射, 回射光被偏振式迈克尔逊干涉仪 PMI-Z 接收, 用于检测 Z 轴定位误差。以角锥棱镜作为测量镜和参考镜, 能够有效提高 Z 轴位移测量系统的稳定性。

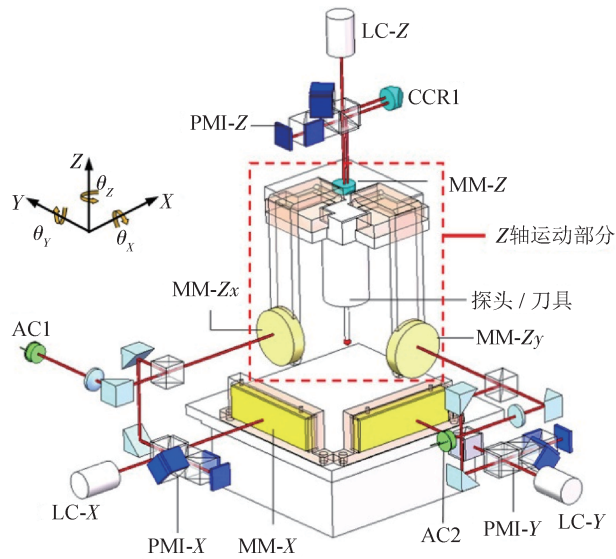


图7 Z轴6-DOF误差测量系统原理图

Fig.7 Schematic of Z-axis 6-DOF error measurement system

### 3 性能测试与验证

本研究团队开发的Z轴6-DOF误差测量系统如图8所示，所用激光光源型号为MSL-III-520 nm，其波长稳定性为0.02 pm。采用SPOT-4D型四象限光电探测器(Quadrant Photodiode, QPD)和焦距为40 mm的聚焦透镜作为自准直仪的组成元件。对直径为2 mm光斑的位置分辨力优于0.1 μm。采用NI-6259型高精度数据采集卡及上位机软件对6-DOF测量系统的输出信号进行实时采集处理。6-DOF误差测量系统整体应用在微纳米CMM中<sup>[25]</sup>，Z轴运动行程为20 mm，由具有纳米级分辨力的N-310型高精度压电陶瓷驱动电机驱动。

#### 3.1 系统精度测试

##### 3.1.1 线性误差测量单元标定

采用高精度压电纳米定位台(型号为P620.1 CD,分辨力为0.1 nm,定位重复性为1 nm)作为位移基准,使其多次产生精确的2 nm阶跃位移,使用PMI进行同步测量,结果如图9所示。PMI-X、PMI-Y、PMI-Z测量结果均呈现出与输入信号吻合的阶梯状变化。每个台阶高度稳定,表明干涉仪能够准确识别并响应2 nm的微小位移。对台阶高度进行统计分析,测得的位移阶跃均值为2.2 nm,标准差小于0.3 nm,表明PMI能够实现约2 nm的位移分辨力。

为验证PMI-X、PMI-Y、PMI-Z的精度性能,

利用SP2000-TR型商用干涉仪开展对比测试。测量中以商用干涉仪的示值作为标准量,同时调整商用干涉仪和自研干涉仪测量轴同轴,以减小标定过程的阿贝误差。测量过程中,平台以1 mm为间距运动20 mm,依次记录每段间距运动结束后商用干涉仪与自研干涉仪的位移数值。PMI-X、PMI-Y、PMI-Z精度标定结果如图10所示,经过分析可

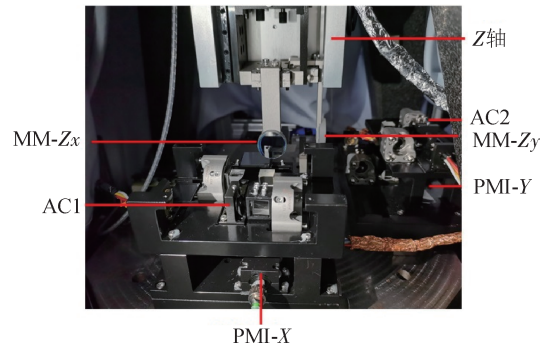


图8 Z轴6-DOF误差测量系统实物图

Fig.8 Photo of Z-axis 6-DOF error measurement system

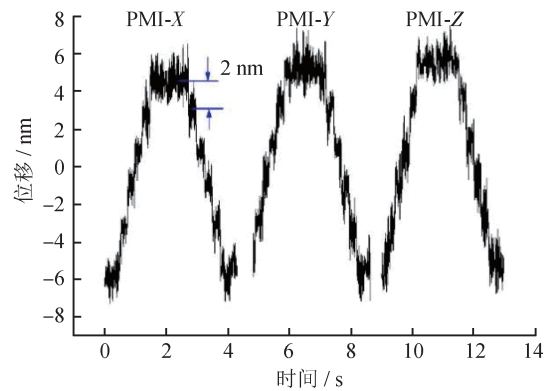


图9 PMI-X、PMI-Y、PMI-Z位移分辨力测试结果

Fig.9 Test results of the resolution of PMI-X, PMI-Y and PMI-Z

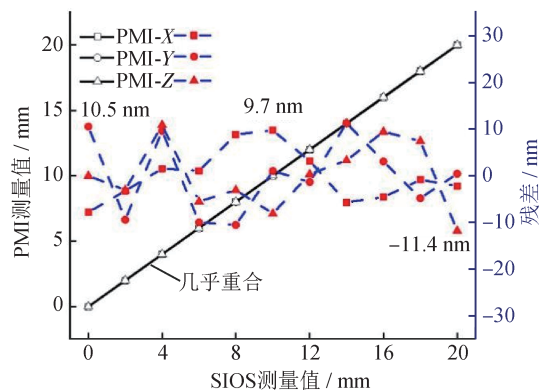


图10 PMI-X、PMI-Y、PMI-Z精度标定结果

Fig.10 Calibration results of PMI-X, PMI-Y and PMI-Z

知：3套自研干涉仪最大位移偏差分别为9.7、10.5、11.4 nm，对应的残余标准差分别为5.6、8.2、7.3 nm。

### 3.1.2 角度测量单元标定

使用自主研发的标准角度产生装置(Angle Generation Device, AGD)开展实验，该装置的工作方式为：通过纳米定位台驱动弹性铰链，进而生成所需角度。在0" ~ 100"的角度条件下，此AGD可实现0.002"的分辨力与0.02"的重复性<sup>[29]</sup>。激光自准直仪标定装置原理如图11所示，角度分辨力测试过程为：AGD多次产生0.01"的角度阶跃，使用AC同步测量角度。角度测量单元分辨力标定结果如图12所示，分析可知：角度测量单元(AC1和AC2)的角度测量分辨力能够达到0.01"。

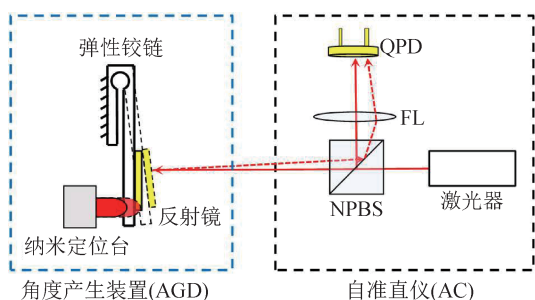


图11 激光自准直仪标定装置原理图

Fig.11 Schematic diagram of the laser AC calibration device

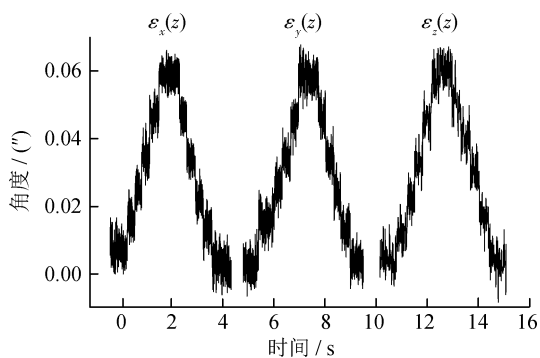


图12 角度测量单元分辨力标定结果

Fig.12 Resolution test of AC1 and AC2

以AGD生成的角位移(步距为5"，总行程为40")为输入，标定自准直仪的测量精度。角度测量单元精度标定结果如图13所示，分析可知： $\epsilon_x(z)$ 、 $\epsilon_y(z)$ 、 $\epsilon_z(z)$ 方向的最大角度偏差分别为0.25"、0.23"、0.30"，对应的残余标准差分别为0.14"、0.11"、0.17"。

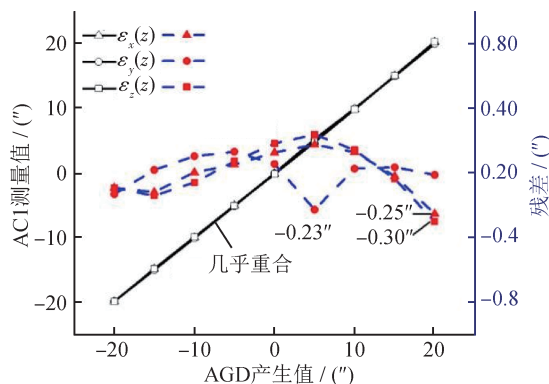
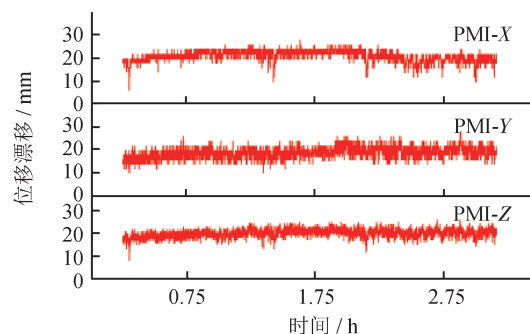


图13 角度测量单元精度标定结果

Fig.13 Calibration results of AC1 and AC2

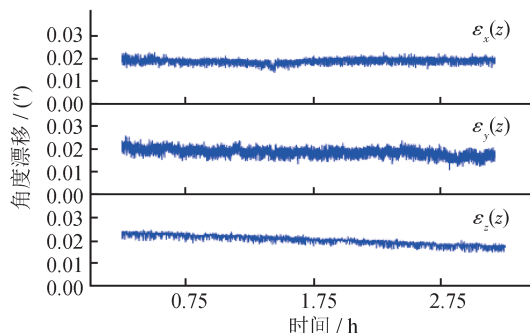
### 3.2 系统稳定性测试

在温度为(20 ± 0.05)°C、相对湿度为50%的恒温恒湿箱中，测试Z轴6-DOF误差测量系统的稳定性，结果如图14所示。在3 h的采样时间内，PMI-X、PMI-Y、PMI-Z的数值变化均不超过± 6 nm，角度 $\epsilon_x(z)$ 、 $\epsilon_y(z)$ 、 $\epsilon_z(z)$ 的数值变化均不超过± 0.06"。测试结果表明：位移及角度测量系统稳定性良好，能够满足较长时间及微纳精度的测量需求。



(a) 位移漂移测试结果

(a) Displacement drift test results



(b) 角度漂移测试结果

(b) Angle drift test results

图14 6-DOF误差测量系统稳定性测试结果

Fig.14 Stability test results of 6-DOF error measurement system

### 3.3 模型补偿效果测试

根据阿贝和布莱恩原则，当嵌入Z轴误差测量系统后，微纳米CMM中的测量点、功能点及布莱恩臂如图15所示。测头测量点与Z轴测量轴线共线。Z轴运动时，沿X、Y方向的直线度误差测量点 $M_{p,x}$ 与 $M_{p,y}$ 如图15标注。实际设计布局中，为使测量镜MM-Zx与MM-Zy不干扰测量空间，X方向直线度测量轴与功能轴在Y和Z方向的偏移分别设计为0 mm和35 mm，Y方向测量轴与功能轴在X、Z方向的偏移分别设计为0 mm和35 mm。因此，布莱恩臂 $L_z^b(z_x)$ 和 $L_z^b(z_y)$ 计算公式为

$$\begin{cases} L_z^b(z_x) = 35 \text{ mm} - d_z \\ L_z^b(z_y) = 35 \text{ mm} - d_z \end{cases} \quad (5)$$

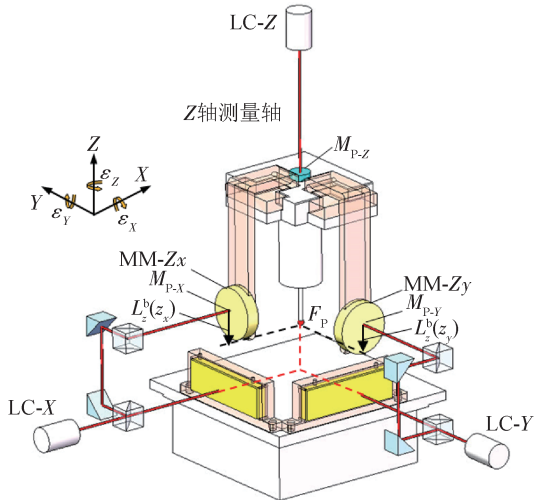


图15 微纳米CMM中测量点、功能点及布莱恩臂位置关系  
Fig.15 Relationship among the measuring points, functional point and Byran offsets in the micro-nano CMM

当Z轴测量系统嵌入CMM后，空间误差模型可具体表示为

$$\begin{cases} \Delta X_z = \delta_x(z) + \epsilon_y(z)L_z^b(z_x) \\ \Delta Y_z = \delta_y(z) - \epsilon_x(z)L_z^b(z_y) \\ \Delta Z_z = \delta_z(z) \end{cases} \quad (6)$$

为验证Z轴误差补偿方案的有效性，沿Z轴方向对标称厚度为8 mm的0级量块展开测量，量块Z向高度测量示意图如图16所示。采用团队自研的接触式触发探头进行测量<sup>[30]</sup>，其重复性为4 nm，分辨力为5 nm。测量过程依据文献<sup>[31]</sup>执行，具体流程为：首先，在一个测量面上，通过探头探测3个均匀分布的测量点。这3个点位于量块中

段，利用最小二乘法对这3个点进行拟合，以确定该表面的基准面方程及法向矢量；随后，探测量块另一表面的单个点，通过计算该点至已建立基准面的垂直距离，得到量块的实际厚度。实验在恒温恒湿箱内完成，共重复测量8次，单次测量时长约0.1 h。补偿前后量块Z向高度测量结果对比如表1所示。

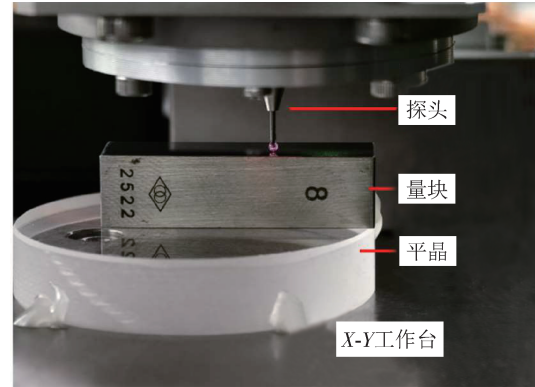


图16 量块Z向高度测量示意图

Fig.16 Schematic diagram of gauge block measurement in Z-direction

表1 补偿前后量块Z向高度测量结果对比

Tab.1 Measurement results of the gauge block before and after compensation in Z direction

序号	厚度/ $\mu\text{m}$	
	补偿前	补偿后
1	8 001.027	8 000.467
2	8 000.727	8 000.331
3	8 001.462	8 000.664
4	8 001.095	8 000.498
5	8 001.227	8 000.558
6	7 999.824	7 999.922
7	7 999.375	7 999.719
8	7 999.468	7 999.761
均值	8 000.526	8 000.240
标准差	0.838	0.380
指示误差	0.526	0.240

由表1分析可知：经Z轴误差补偿模型修正后，量块厚度测量结果的标准差与示值误差分别降低了54.6%和54.3%，有效证明了该补偿方案的可行性。

## 4 结论

提出了一套针对Z轴6-DOF误差的在线测量方法,建立了结合阿贝原则与布莱恩原则的Z轴6-DOF误差空间误差补偿模型,并研制了配套系统。将该系统部署于一台微纳米CMM,利用标称厚度为8 mm的0级量块开展高度测量实验,结果表明:与补偿前相比,量块高度测量的标准差及示值误差分别降低了54.6%和54.3%,有效验证了本研究团队提出的在线误差测量方法及补偿模型的可靠性。研制的Z轴6-DOF误差测量及补偿系统具有结构紧凑、测量精度高的优点;提出的误差补偿模型具有较广的适用范围,可用于提升不同型号CMM的测量精度,为推动精密加工技术发展提供了有力支撑。未来将研究微纳米CMM整机误差补偿方案及测量效率的提升方法。

### 参考文献

- [1] DAI G L, NEUGEBAUER M, STEIN M, et al. Overview of 3D micro- and nanocoordinate metrology at PTB [J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(9): 257.
- [2] 王耀南, 谢核, 邓晶丹, 等. 智能制造测量机器人关键技术研究综述[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(16): 1-18.  
WANG Y N, XIE H, DENG J D, et al. Overview of key technologies for measurement robots in intelligent manufacturing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(16): 1-18. (in Chinese)
- [3] FAN K C, LI R J, XU P. Design and verification of micro / nano - probes for coordinate measuring machines [J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2019, 2(1): 1-15.
- [4] 吴俊杰, 李源. 基于纳米测量机的微结构三维坐标测量[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2252-2259.  
WU J J, LI Y. Three-dimensional coordinate measurement of microstructures based on nano measuring machine [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2252-2259. (in Chinese)
- [5] XIANG S T, ALTINTAS Y. Modeling and compensation of volumetric errors for five-axis machine tools [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 101: 65-78.
- [6] 范光照, 曾百由. 精密机械精度基础[M]. 新北: 高立图书有限公司, 2018.  
FAN G Z, ZENG B Y. Precision basis of precision machinery [M]. Xinbei: Gaoli Book Co., Ltd., 2018. (in Chinese)
- [7] CAI Y D, WANG L H, LIU Y, et al. Accuracy improvement of linear stages using on-machine geometric error measurement system and error transformation model [J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 7539-7550.
- [8] LOU Y T, YAN L P, CHEN B Y, et al. Laser homodyne straightness interferometer with simultaneous measurement of six degrees of freedom motion errors for precision linear stage metrology [J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6805-6821.
- [9] OKAFOR A C, ERTEKIN Y M. Vertical machining center accuracy characterization using laser interferometer [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 105(3): 394-406.
- [10] ZHANG J H, MENQ C H. A linear/angular interferometer capable of measuring large angular motion [J]. *Measurement Science and Technology*, 1999, 10(12): 1247-1253.
- [11] SHEN J C, JYWE W Y, WU C H. Control of an equipment for fabricating periodic nanostructure [J]. *Precision Engineering*, 2014, 38(2): 391-397.
- [12] MOLNAR G, STRUBE S, KÖCHERT P, et al. Simultaneous multiple Degrees of Freedom (DoF) measurement system [J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(8): 084011.
- [13] HU P C, CHANG D, TAN J B, et al. Displacement measuring grating interferometer: a review [J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2019, 20(5): 631-654.
- [14] LV Q, LIU Z W, WANG W, et al. Fast method to detect and calculate displacement errors in a Littrow grating-based interferometer [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(12): 3193-3199.
- [15] CHANG D, XING X, HU P C, et al. Double-diffracted spatially separated heterodyne grating interferometer and analysis on its alignment tolerance [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(2): 263.
- [16] HSIEH H L, PAN S W. Development of a grating-based interferometer for six-degree-of-freedom displacement and angle measurements [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2451-65.
- [17] 张聪, 刘文正, 段发阶, 等. 长导轨五自由度测量中直线度精度提升方法与优化设计 [J]. *光学精密工程*, 2022, 30(20): 2467-2478.  
ZHANG C, LIU W Z, DUAN F J, et al. Accuracy improvement method and optimal design of straightness in five-degree-of-freedom measurement of long guide [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(20): 2467-

2478. (in Chinese)
- [18] 蔡引娣, 王路辉, 高英豪, 等. 线性运动平台多自由度几何运动误差测量技术[J]. 计测技术, 2021, 41(5): 42-51.  
CAI Y D, WANG L H, GAO Y H, et al. Technique of measuring multi-degree-of-freedom geometric motion errors of linear stages[J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(5): 42-51. (in Chinese)
- [19] 林荣炜, 程真英, 何亚雄, 等. XY工作台六自由度误差在线测量和补偿[J]. 光学精密工程, 2023, 31(12): 1761-1773.  
LIN R W, CHENG Z Y, HE Y X, et al. On-line six-degree-of-freedom errors measurement and compensation for XY stages[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(12): 1761-1773. (in Chinese)
- [20] SCHWENKE H, KNAPP W, HAITJEMA H, et al. Geometric error measurement and compensation of machines — an update[J]. CIRP Annals, 2008, 57(2): 660-675.
- [21] 江文松, 王妍, 罗哉, 等. 六自由度机器人末端位姿校准误差链路分析[J]. 计测技术, 2025, 45(2):48-55.  
JIANG W S, WANG Y, LUO Z, et al. Analysis of calibration error propagation in the kinematic chain of a six-DOF robotic manipulator's end-effector pose[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(2):48-55. (in Chinese)
- [22] FAN K C, WANG T H, WANG C H, et al. Development of an Abbé error compensator for NC machine tools [C]// Proceedings of the 37th International MATADOR 2012 Conference. London: Springer, 2012: 91-120.
- [23] VAHEBI M, AREZOO B. Accuracy improvement of volumetric error modeling in CNC machine tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(5): 2243-2257.
- [24] LI Z H, FENG W L, YANG J G, et al. An investigation on modeling and compensation of synthetic geometric errors on large machine tools based on moving least squares method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2018, 232(3): 412-427.
- [25] HE Y X, LI R J, LI J, et al. Novel compensation method of volumetric errors for micro-coordinate measuring machines using Abbe and Bryan principles [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1004510.
- [26] ABBE E. Meßapparate für physiker [J]. Zeitschrift Für Instrumentenkunde, 1890, 10(12): 446-448.
- [27] BRYAN J B. The Abbé principle revisited: an updated interpretation [J]. Precision Engineering, 1979, 1(3): 129-132.
- [28] 张晴. 纳米三坐标测量机软件开发及其应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.  
ZHANG Q. Software development and application for a nano-coordinate measuring machine [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [29] HE Y X, LIN R W, LI R J, et al. Nanopositioning X-Y stage with an embedded six-DOF error compensation system based on Abbe and Bryan principles [J]. Measurement, 2024, 227: 114218.
- [30] LI R J, XIANG M, HE Y X, et al. Development of a high-precision touch-trigger probe using a single sensor [J]. Applied Sciences, 2016, 6(3):86.
- [31] 国家标准化管理委员会. 产品几何技术规范(GPS)坐标测量机的验收检测和复检检测 第2部分: 用于测量线性尺寸的坐标测量机: GB/T 16857.2—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
State Standardization Administration. Geometrical product specifications (GPS) — acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — part 2: CMMs used for measuring linear dimensions: GB/T 16857.2—2017 [S]. Beijing: China Standards Press, 2017. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



**第一作者:** 李洁(1997—), 女, 安徽六安人, 博士研究生, 2022年于合肥工业大学获得硕士学位, 主要从事微纳三坐标测量机的研究。



**通信作者:** 李瑞君(1976—), 男, 内蒙古和林格尔人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微纳测量技术与系统、光电检测技术与系统、精密控制技术与系统。主持国家自然科学基金、国家重点研发计划课题等项目。研制高精度测量仪器10余台, 发表学术论文100余篇, 获授权发明专利40余项。任中国计量测试学会几何量专业委员会委员、中国仪器仪表学会精密工程分会委员、中国机械工程学会生产工程分会测试技术专业委员会委员。