

文章编号 1004-924X(2023)21-3111-14

二维线性模组空间运动误差实时测量

娄志峰^{1*}, 张汉平¹, 周竞杰¹, 张记云¹, 钱 钧², 范光照¹

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工高邮研究院有限公司, 江苏 高邮 225600)

摘要:为实时检测二维线性模组的运动误差,搭建了误差实时测量系统。该系统由四自由度运动误差测量模块、滚动角误差测量模块和线性光栅尺组成,实现单轴六自由度运动误差测量。基于齐次坐标转换矩阵(Homogeneous Transformation Matrix, HTM)原理构建二维模组的空间误差模型,对功能点的实际空间位置进行表示;完成测量系统标定实验,并基于阿贝-布莱恩原则处理实验数据完成比对实验。最终,测量系统的定位误差、直线度误差和角度误差测量精度分别达到 $\pm 1.2\ \mu\text{m}$, $\pm 1.3\ \mu\text{m}$ 和 $\pm 1''$,并根据空间误差模型分析二维线性模组XZ平面对角线位置的测量误差。结果表明,使用二维线性模组空间误差模型求解后,XZ平面对角线位置的测量误差由 $68\ \mu\text{m}$ 降至 $13\ \mu\text{m}$,证明采用该系统进行线性模组误差测量是有效的;此外,因为加载状态下二维线性模组各位置的运动误差会改变,为验证测量系统能够实时测量出线性模组的空间误差变化,在Z轴滑块上加装质量为2 kg的标准砝码进行对照实验。结果显示,在使用二维线性模组空间误差模型求解后,XZ平面对角线位置的测量误差由 $56\ \mu\text{m}$ 降至 $14\ \mu\text{m}$ 。

关键词:误差测量系统;二维线性模组;空间误差模型;实时测量

中国分类号: TH161.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233121.3111

Real-time spatial error measurement of two-dimensional linear module

LOU Zhifeng¹, ZHANG Hanping^{1*}, ZHOU Jingjie¹, ZHANG Jiyun¹, QIAN Jun², FAN Guangchao¹

(1. College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, China;

2. Dalian Institute of Technology Gaoyou Research Institute Co. Ltd, Gaoyou 225600, China)

* Corresponding author, E-mail: 18437952875@163.com

Abstract: A real-time error measurement system was developed to measure the motion error of a two-dimensional linear module. The system consisted of a four-degree-of-freedom motion error measurement module (for measuring the horizontal straightness, vertical straightness, pitch angle, and yaw angle errors), roll angle error measurement module (for measuring the roll angle error), and linear grating ruler (for measuring the axial positioning error); thus, it measured six degrees of freedom motion errors in a single axis. The principle of the homogeneous transformation matrix (HTM), was used to construct a spatial error model for the two-dimensional module to represent the actual spatial positions of functional points.

收稿日期:2023-02-27;修订日期:2023-04-04.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52275521);中央高校基本科研业务费资助项目(No.DUT22YG209);江苏省政策引导类计划资助项目(No. BZ2020051)

The calibration experiments of the measurement system were performed, and the experimental data were processed based on the Abbe-Bryan principle to complete the comparison experiment. Finally, the positioning, straightness, and measurement accuracies of angular errors reach $\pm 1.2 \mu\text{m}$, $\pm 1.3 \mu\text{m}$, and $\pm 1''$, respectively. The measurement error of the diagonal position in the XZ plane of the two-dimensional linear module was analyzed based on the proposed spatial error model. The results indicate that the measurement error of the diagonal position in the XZ plane decreases from $68 \mu\text{m}$ to $13 \mu\text{m}$ after using the two-dimensional linear module spatial error model. In addition, because the motion errors of the two-dimensional linear module at different positions changes under loading, a comparative experiment was conducted by adding a standard weight of 2 kg to the Z-axis slider to verify the measurement system could capture real-time spatial error variations of the linear module. The results show that the measurement error of the diagonal position in the XZ plane decreases from $56 \mu\text{m}$ to $14 \mu\text{m}$ after using the two-dimensional linear module spatial error model.

Key words: error measurement system; two-dimensional linear module; spatial error model; real-time measurement

1 引 言

二维直线运动平台广泛应用于电子元件封装、3D 打印机和坐标测量等领域^[1-3]。组成二维平台的单根导轨存在 6 项几何误差:3 个位置误差(轴向定位误差、水平直线度误差和竖直直线度误差)和 3 个姿态角误差(偏摆角误差、俯仰角误差和滚动角误差)^[4],几何误差是影响平台空间位置精度的重要因素^[5]。对导轨的多自由度误差进行测量,并建立二维线性模组的空间误差模型对提升模组的应用范围尤为重要。

激光测量广泛应用于导轨运动误差测量领域。Huang 等^[6]基于全反射原理、郭俊康等^[7]运用光学与倾角传感器组合的方式分别设计了五自由度运动误差测量系统,美国 API 公司^[8]基于单光束准直测量法研制了六自由度测量系统,Chang 等^[9]基于多测头组合式激光光栅干涉提出了六自由度位姿测量方法。上述方法均可实现导轨多自由度运动误差的测量,缺点则是光路比较复杂、成本高^[10]。

在导轨的 6 项几何误差中,滚动角误差较难测量^[11-12]。目前,水平仪是滚动角误差测量的主要设备,但水平仪无法测量竖直轴运动的滚动角误差^[13-15]。Jin 等^[16]利用测量信号与参考信号之间的相位差设计了外差式干涉仪测量滚动角误

差。匡翠方等^[17]基于光束的偏振状态对角度的敏感特性,利用沃拉斯顿棱镜产生两束偏振光,通过测量沃拉斯顿棱镜转动前后光强的变化实现滚动角的测量。Shi 等^[18]研制了基于差动平面镜干涉法的精密滚转角测量系统,通过检测光程差或相位差变化实现滚动角的测量。但上述方法结构复杂,易受环境光与测量环境的影响。采用平行双光束^[19-20],通过测量导轨滑块不同位置处的直线度运动误差,可以间接得到滚动角误差,但此方法中双光束调平行较为困难且光束间的平行度会随时间变化。

上述针对导轨运动误差的测量均采用离线测量方法,无法准确得知导轨运动过程中的实时运动误差。本文研制了导轨六自由度运动误差实时测量系统,基于自准直原理测量滚动角误差。该测量系统结构简单,可实时测量导轨运动位姿。此外,建立了二维线性模组的空间误差模型,通过代入实时测量数据得到了二维线性模组功能点的空间运动误差。

2 原 理

二维线性模组由两根导轨在 XZ 平面装配而成,因六自由度测量系统体积小、模块化程度高,所以可装在二维模组的两轴中实现导轨运动误差的实时测量。该测量系统由光栅尺、四自由度

运动误差测量模块和滚动角测量模块组成。其中,光栅尺测得定位误差,四自由度运动误差测量模块测得直线度误差、偏摆角及俯仰角误差,滚动角误差测量模块测得滚动角误差。图1为单轴测量系统的安装图,光栅尺安装在导轨一侧,四自由度运动误差测量模块的激光端安装在基台上,感测端安装在滑块上,滚动角测量模块的自准直模块安装在滑块侧端,平面反射镜安装在导轨另一侧。

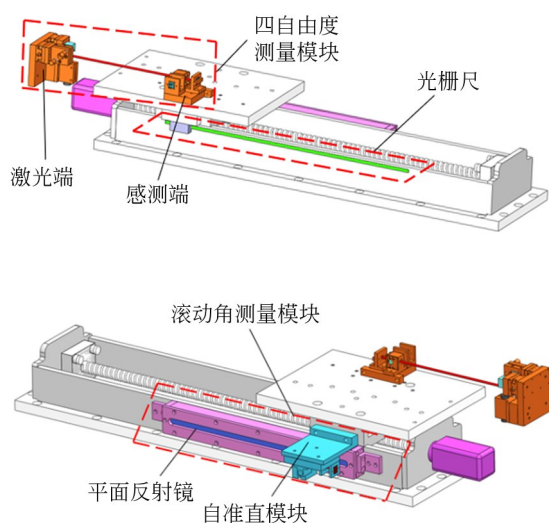


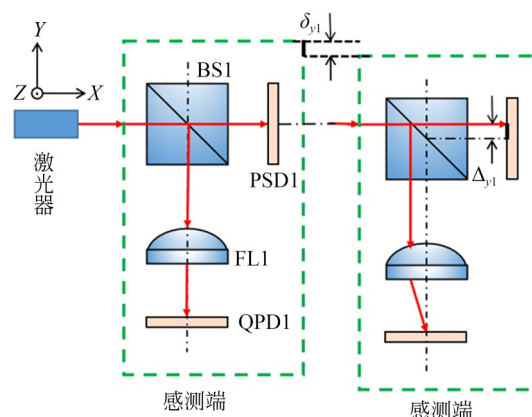
图1 单轴测量系统安装图

Fig. 1 Installation diagram of single-axis measuring system

2.1 四自由度运动误差测量

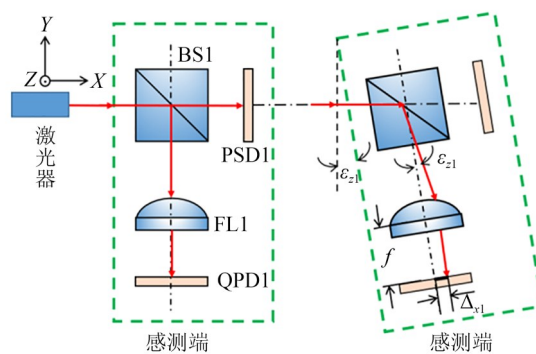
四自由度运动误差测量模块完成直线度误差、偏摆角以及俯仰角误差测量。其中,直线度误差基于激光准直原理测得,所用传感器为位置敏感探测器 (Position Sensitive Detector, PSD) (滨松公司, S5990-01, 日本), 如图 2(a) 所示; 偏摆角和俯仰角误差基于激光自准直原理测得, 所用传感器为四象限光电探测器 (Four-quadrant Photo Detector, QPD) (First Sensor, QP10-6, 德国), 如图 2(b) 所示。

四自由度运动误差测量模块感测端跟随滑块沿导轨运动时, 若导轨存在直线度误差, 原本打在 PSD1 中心的光斑会在 Y 方向和 Z 方向产生偏移, 从而实现直线度误差的测量。直线度误差



(a) 直线度误差测量原理

(a) Measuring principle for straightness error



(b) 角度误差测量原理

(b) Measuring principle for angle error

图2 四自由度运动误差测量原理

Fig. 2 Measuring principle for four-degrees-of freedom motion errors

分别为:

$$\delta_{y1} = \Delta_{y1}, \delta_{z1} = \Delta_{z1}, \quad (1)$$

式中 Δ_{y1}, Δ_{z1} 为光斑在 PSD1 上的位置变化值。

QPD1 的位置预先放在聚焦透镜 FL1 的焦平面上, 激光端发出的光束经分光镜 BS1 后通过聚焦透镜 FL1 汇聚到 QPD1 上。若导轨运动时有角度误差, 激光会以倾斜的方式射入聚焦透镜, 此时光斑在 QPD1 上的位置相对于 QPD1 中心会发生偏移。偏摆角 ϵ_{x1} 和俯仰角 ϵ_{y1} 为:

$$\epsilon_{x1} = \frac{\Delta_{x1}}{f_1}, \epsilon_{y1} = \frac{\Delta_{y1}}{f_1}, \quad (2)$$

式中: Δ_{x1}, Δ_{y1} 为光斑在 QPD1 上的位置变化值; f_1 为聚焦透镜 FL1 焦距。

2.2 滚动角误差测量

滚动角误差测量模块基于激光自准直原理

测得滚动角误差,所用传感器为 QPD(First Sensor, QP10-6, 德国)。

如图 3 所示,激光器发出光束经分光棱镜 BS2 后一分为二,透射光射入固定在导轨上的平面反射镜,反射光束再次经过分光棱镜 BS2,经聚焦透镜 FL2 后入射光电探测器 QPD2。若导轨运动时存在滚动角误差 ϵ_x ,则经平面反射镜反射回的光束角度会有变化,光斑在 QPD2 上的位置在相对于 QPD2 的中心在 Z 方向上发生偏移。此时通过计算光斑在 QPD2 的位置变化可得到滚动角误差。滚动角误差为:

$$\epsilon_x = \frac{\Delta_{z2}}{2f_2}, \tag{3}$$

式中: Δ_{z2} 为光斑在 QPD2 上的位置变化值; f_2 为聚焦透镜 FL2 的焦距。

二维线性模组总成见图 4。其中,六自由度测量系统先安装在单轴中,之后再两轴装配在 XZ 平面内。

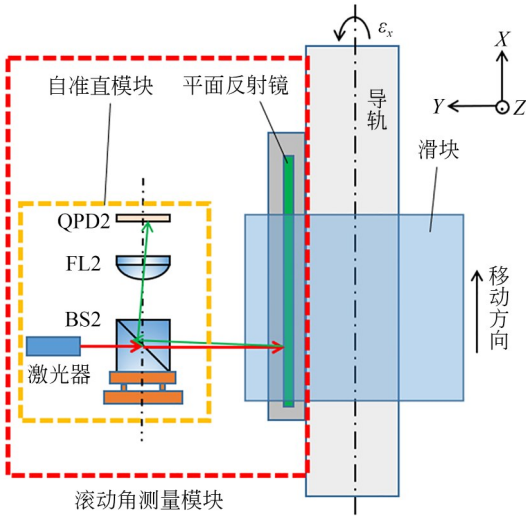


图 3 滚动角误差测量原理
Fig. 3 Measuring principle for roll error

3 二维模组误差模型

以往对于二维线性模组的空间运动误差,直接利用光栅尺测出每轴位置,进而求解功能点的空间位置,但这种方法未考虑测量时各位置其他误差对测量的影响。本文将搭建的六自由度运动误差测量系统装在二维线性模组中,可对二维线性模组的位姿误差进行实时测量,并根据提出

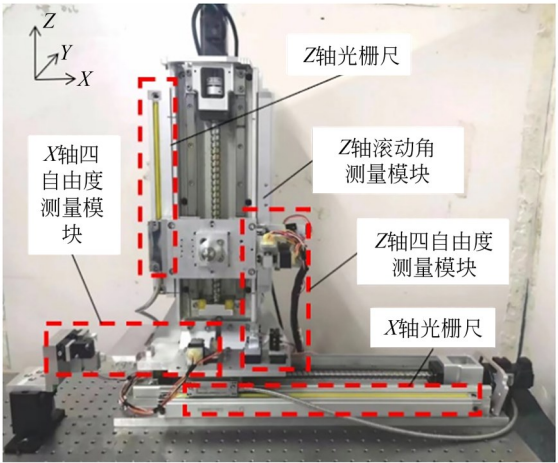


图 4 二维线性模组总成
Fig. 4 Two-dimensional linear module assembly

的空间误差模型确定二维线性模组功能点的空间位置。相较于传统方法,测量结果更加准确。

在实际测量中,导轨存在制造误差,导致二维线性模组运动过程中的实际运动位姿与理想运动位姿存在偏差。而二维线性模组整体上可看作两根导轨的组合,其几何误差可看成两个单根导轨的误差加上两根导轨之间的垂直度误差。故二维线性模组的几何误差共有 13 项,如表 1 所示。

表 1 二维线性模组的误差表达式		
Tab. 1 Error expression of two-dimensional linear module		
Geometrical error	X-axis	Z-axis
Positioning error	$\delta_x(x)$	$\delta_z(z)$
Horizontal straightness error	$\delta_y(x)$	$\delta_x(z)$
Vertical straightness error	$\delta_z(x)$	$\delta_y(z)$
Yaw error	$\epsilon_z(x)$	$\epsilon_y(z)$
Pitch error	$\epsilon_y(x)$	$\epsilon_x(z)$
Roll error	$\epsilon_x(x)$	$\epsilon_z(z)$
Squareness error	α_{xz}	

本文基于齐次坐标转换矩阵(Homogeneous Transformation Matrix, HTM)原理对二维线性模组进行空间误差建模。HTM 原理是基于刚体运动学中的多体理论,使用低序体阵列来描述空间位置关系的一种建模理论。其核心思路是对每个运动轴建立局部坐标系,根据齐次坐标变

换,将各个坐标系下的运动误差转换到同一个坐标系中进行分析。首先,依照多体理论和低序体阵列法^[21],假设二维线性模组中的X,Z运动轴和Z轴滑块为存在相对运动的低序体,并进行编号。其中,X轴为体0,Z轴为体1,Z轴上滑块为体2,并在各低序体内预设一个固连坐标系。如图5所示,体0坐标系O-XYZ(即二维线性模组的绝对坐标系)设置在X轴电机处的丝杠上,体1坐标系O-X₁Y₁Z₁设置在X轴滑块中心下方的丝杠上,体2坐标系O-X₂Y₂Z₂设置在Z轴滑块中心下方的丝杠上,P点为Z轴滑块上的一个点。然后,通过相邻低序体进行坐标转换,将P点在体2坐标系内的相对坐标转换到体0坐标系中,最后通过齐次坐标矩阵运算可得到P点的空间误差。

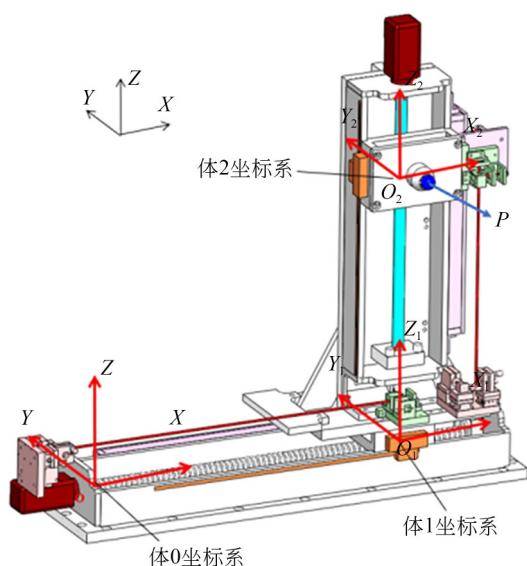


图5 二维线性模组及低序体坐标系设置

Fig. 5 Setting of two-dimensional linear module and low-order volume coordinate system

本文基于HTM原理推导了二维线性模组的空间误差模型,因此,其几何误差测量点必须处于同一位置。将测量数据代入误差模型前,应先用阿贝原则和布莱恩原则对所测数据进行转换,即将测量点(光栅尺读数头和PSD)处的误差值转换到X,Z轴上的功能点FP1和FP2上^[22]。如图6所示,在每个轴上,将光栅尺读数头点定义为阿贝点,直线度误差测量点(PSD上的点)定义为布莱恩点。在二维线性模组空间误差测量中,

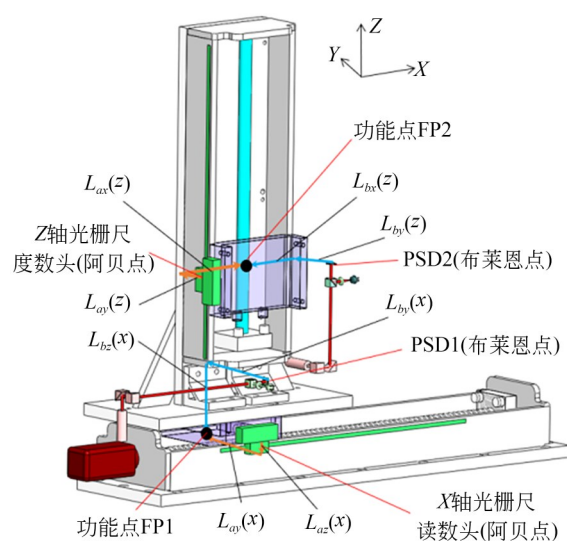


图6 基于阿贝-布莱恩原则的误差转换图

Fig. 6 Error conversion diagram based on abbe-bryan principle

基于阿贝-布莱恩原则进行的误差转换。X轴上各传感器测得的定位误差和直线度误差经阿贝-布莱恩原则处理后有:

$$\begin{cases} \delta'_x(x) = \delta_x(x) + \epsilon_y(x)L_{ax}(x) - \epsilon_z(x)L_{ay}(x) \\ \delta'_y(x) = \delta_y(x) - \epsilon_x(x)L_{bx}(x) + \epsilon_z(x)L_{bx}(x) \\ \delta'_z(x) = \delta_z(x) + \epsilon_x(x)L_{by}(x) - \epsilon_y(x)L_{bx}(x) \end{cases} \quad (4)$$

同理对Z轴处理后的误差如下:

$$\begin{cases} \delta'_x(z) = \delta_x(z) - \epsilon_z(z)L_{by}(z) + \epsilon_y(z)L_{bz}(z) \\ \delta'_y(z) = \delta_y(z) + \epsilon_z(z)L_{bx}(z) - \epsilon_x(z)L_{bz}(z) \\ \delta'_z(z) = \delta_z(z) - \epsilon_y(z)L_{ax}(z) + \epsilon_x(z)L_{ay}(z) \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\delta_x(x)$, $\delta_z(z)$ 分别为X,Z轴光栅尺读数头处测量的定位误差, $\delta_y(x)$, $\delta_z(x)$ 和 $\delta_y(z)$, $\delta_x(z)$ 分别为X,Z轴PSD处测量的直线度误差; $\delta'_x(x)$, $\delta'_z(z)$ 标记的为阿贝-布莱恩原则处理后的误差值; $L_{ax}(x)$, $L_{ay}(x)$ 和 $L_{bx}(x)$, $L_{by}(x)$, $L_{bz}(x)$ 分别为X轴上的阿贝偏位和布莱恩偏位, $L_{ax}(z)$, $L_{ay}(z)$ 和 $L_{bx}(z)$, $L_{by}(z)$, $L_{bz}(z)$ 分别为Z轴上的阿贝偏位和布莱恩偏位,这里 $L_{bx}(x)$ 和 $L_{bz}(z)$ 的值为0。

在计算二维线性模组空间误差时,用理想运动矩阵表示导轨的理论运动值,误差特征矩阵表示导轨运动时的几何误差,如下:

$$\Delta T_{01} = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z(x) & \epsilon_y(x) & \delta'_x(x) \\ \epsilon_z(x) & 1 & -\epsilon_x(x) & \delta'_y(x) \\ -\epsilon_y(x) & \epsilon_x(x) & 1 & \delta'_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \Delta T_{12} = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z(z) & \epsilon_y(z) & \delta'_x(z) \\ \epsilon_z(z) & 1 & -\epsilon_x(z) & \delta'_y(z) \\ -\epsilon_y(z) & \epsilon_x(z) & 1 & \delta'_z(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$T_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_m \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_m + z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$C_{xz} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \alpha_{xz} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\alpha_{xz} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中: T_{01} , T_{02} 分别为体 0 到体 1, 体 1 到体 2 的理

想运动矩阵, ΔT_{01} , ΔT_{02} 为对应的误差特征, x_m 和 z_m 分别为滑块在 X, Z 方向的运动距离, z_0 为 Z 方向上的初始偏移距离。

假设 P 点在体 2 坐标系 $O-X_2Y_2Z_2$ 中的齐次坐标为 $P_2(0, -y_2, 0, 1)$, 则通过齐次坐标矩阵运算后 P 点在体 0 坐标系中的齐次坐标为:

$$P'_0 = T_{01} \Delta T_{01} C_{xz} T_{12} \Delta T_{12} P_2 = \begin{bmatrix} x_m + \delta'_x(x) + \delta'_x(z) + (z_m + z_0)(\epsilon_y(x) + \alpha_{xz}) + y_2(\epsilon_z(z) + \epsilon_z(x)) \\ \delta'_y(x) + \delta'_y(z) - (z_m + z_0)\epsilon_x(x) - y_2 \\ z_m + z_0 + \delta'_z(z) + \delta'_z(x) - y_2(\epsilon_x(x) + \epsilon_x(z)) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

不考虑运动误差时 P 点在体 0 坐标系中的齐次坐标为 $P_0(x_m, -y_2, z_0 + z_m, 1)$, 故由二维

线性模组 13 项几何误差引起的 P 点的空间误差为:

$$E = P'_0 - P_0 = \begin{bmatrix} \delta'_x(x) + \delta'_x(z) + (z_m + z_0)(\epsilon_y(x) + \alpha_{xz}) + y_2(\epsilon_z(z) + \epsilon_z(x)) \\ \delta'_y(x) + \delta'_y(z) - (z_m + z_0)\epsilon_x(x) \\ \delta'_z(z) + \delta'_z(x) - y_2(\epsilon_x(x) + \epsilon_x(z)) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

4 实 验

4.1 标定实验

4.1.1 直线度测量传感器灵敏度标定

使用电感测微仪(型号为 Mahr1240, 分辨率为 $0.01 \mu\text{m}$)对直线度测量传感器(PSD)进行灵敏度标定^[23]。实验结果表明, 在传感器 $\pm 100 \mu\text{m}$ 的量程内, 直线度误差灵敏度的标定残差均小于 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。

4.1.2 角度测量传感器灵敏度标定

使用光电自准直仪(AutoMAT5000U 型, 分辨率为 $0.01''$)对角度测量传感器(QPD)的灵敏度进行标定^[23]。实验结果表明: 在传感器 $\pm 100''$ 的量程内, 偏摆角和俯仰角的标定残差均小于 $\pm 1''$ 。

由图 2 可知, 滚动角测量模块中的传感器也为 QPD, 其灵敏度标定方法与上述一致。

4.1.3 平面反射镜误差标定

由于平面反射镜存在制造误差, 反射镜表面质量不均匀, 进而会对滚动角测量造成影响, 因此, 测量前需要先标定平面反射镜的系统误差。标定设备架设如图 7(a)所示, 滑块沿 X 向移动时, 在位置 i 处, 滚动角测量模块与水平仪同时对滚动角进行测量。以水平仪测量的滚动角 $\epsilon_{\text{level}(i)}$ 为基准, 模块测量值 $\epsilon'_{x(i)}$ 与水平仪测量的残差即为位置 i 处平面反射镜的系统误差 $\epsilon_{\text{error}(i)}$, 如下:

$$\epsilon_{\text{error}(i)} = \epsilon'_{x(i)} - \epsilon_{\text{level}(i)}. \quad (11)$$

测量数据 $\epsilon_{\text{error}(i)}$ 为散点值, 因此对它进行拟合处理, 得到平面反射镜在测量范围内各位置的误差。标定结果如图 7(b)所示。

在测量出平面镜系统误差后, 使用本测量模块进行其他导轨滚动角测量时, 直接测量得到数值 $\epsilon'_{x(i)}$ 后, 可通过式(12)进行补偿, 求解出任意位置 i 处导轨的实际滚动角误差 $\epsilon_{x(i)}$ 。

$$\epsilon_{x(i)} = \epsilon'_{x(i)} - \epsilon_{\text{error}(i)}. \quad (12)$$

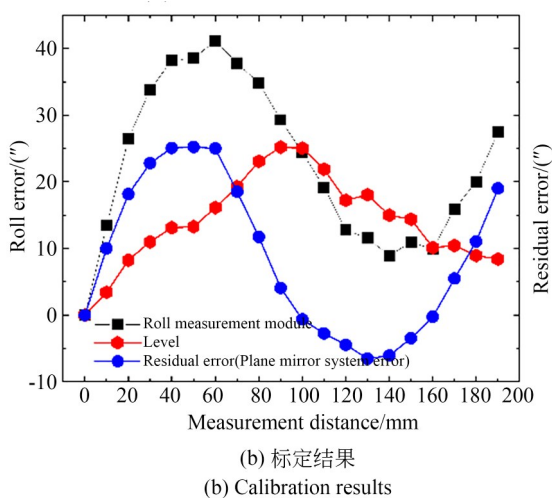
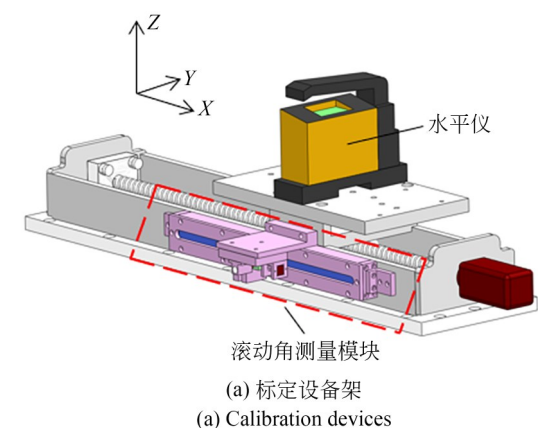


图 7 平面反射镜误差标定

Fig. 7 Error calibration of plane mirror system

4.2 精度比对实验

4.2.1 定位误差比对

本文使用激光干涉仪(美国光动 MCV-500 型,分辨率为 1 nm)和光栅尺完成定位误差的比对实验。然而,MCV-500 的测量光线与光栅尺读数头的运动轴线存在偏位,因此,需要通过阿贝原理将激光干涉仪的测量值转换到光栅尺后再与光栅尺所测数据进行比对。数据处理参照式(4)和式(5)中的定位误差公式。

按图 8(a)架设实验设备。实验时,角耦棱镜与光栅尺读数头跟随滑块在 X 轴 0~190 mm 内运动,记录各位置激光干涉仪与光栅尺的值。比对结果如图 8(b)所示,在 0~190 mm 内,X 轴定位误差的比对残差为 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。

同理,按图 9(a)架设实验设备,可对 Z 轴定位误差进行比对,结果如图 9(b)所示,在 0~190 mm

内 Z 轴定位误差的比对残差为 $\pm 1.2 \mu\text{m}$ 。

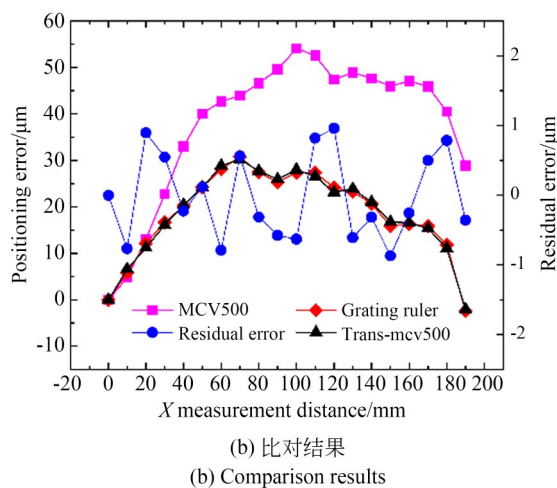
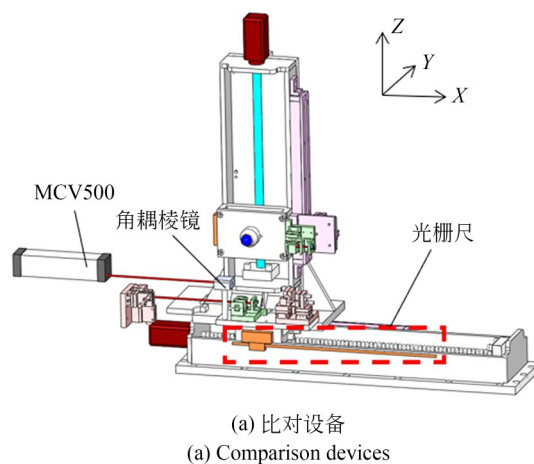
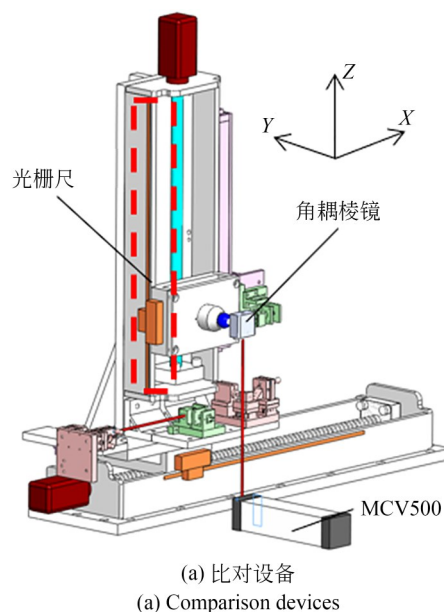


图 8 X 轴定位误差比对

Fig. 8 Comparison of X axial positioning error



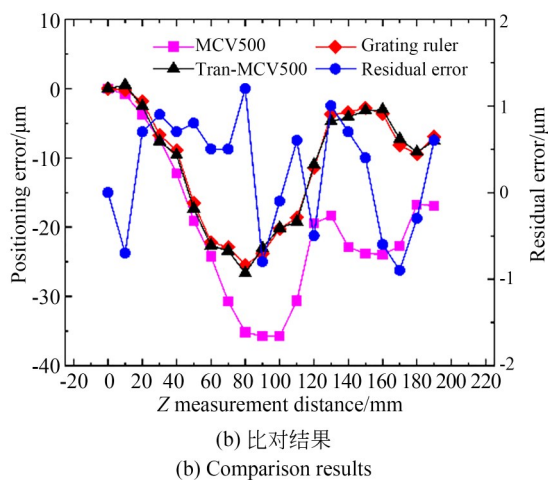


图 9 Z轴定位误差比对

Fig. 9 Comparison of Z axial positioning error

4.2.2 直线度误差比对

本文使用电感测微仪搭配大理石平尺(精度等级为00,平面度误差为 $3\text{ }\mu\text{m}$)和PSD完成直线度误差的比对实验。但电感测头的运动轨迹与PSD测量光线存在偏位,因此,需要通过布莱恩原理将电感测头的测量值转换到PSD处后再与PSD所测数据进行比对。数据处理参照式(4)和式(5)中的直线度误差公式。

按图10架设实验设备,将电感测头打在固定在光学平台上的大理石平尺上。实验时,电感测头随水平轴滑块在测量范围内移动,记录各位置

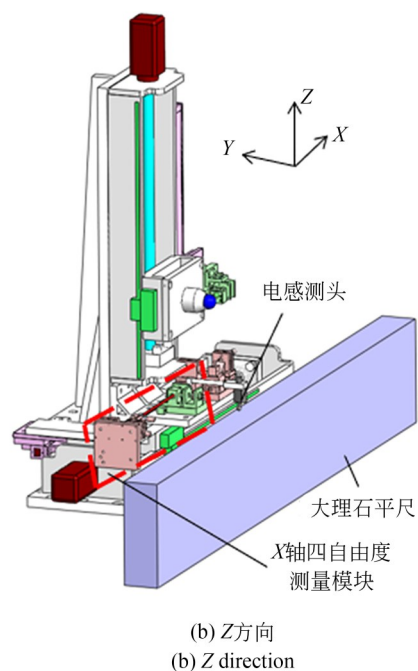
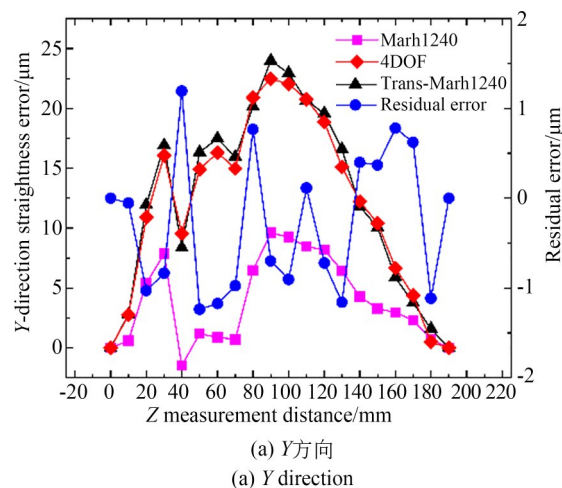
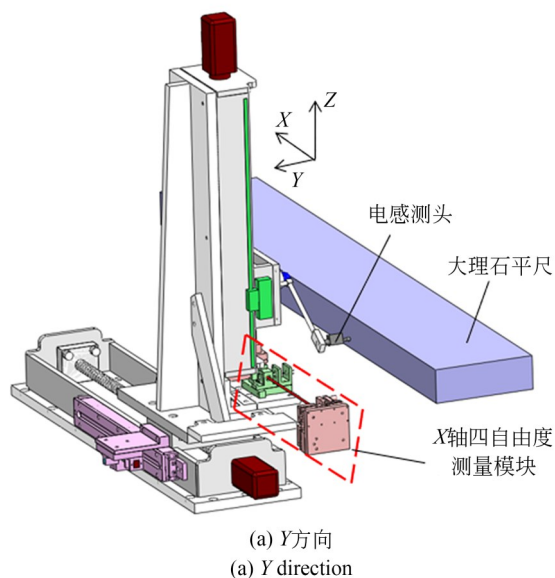


图 10 X轴直线度比对设备

Fig. 10 Devices for comparison of X axial straightness error

电感测头与PSD1传感器在Y,Z方向的值。比对结果如图11所示,在0~190 mm内X轴Y方向直线度比对残差为 $\pm 1.3\text{ }\mu\text{m}$,Z方向直线度比对残差为 $\pm 1.3\text{ }\mu\text{m}$ 。

同理,按图12固定测头,利用大理石方尺(精度等级为0,平面度误差为 $3\text{ }\mu\text{m}$)完成Z轴直线度误差动态比对。比对结果如图13所示,在0~190 mm内Z轴X方向直线度的比对残差为 $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$,Y方向直线度的比对残差为 $\pm 0.8\text{ }\mu\text{m}$ 。



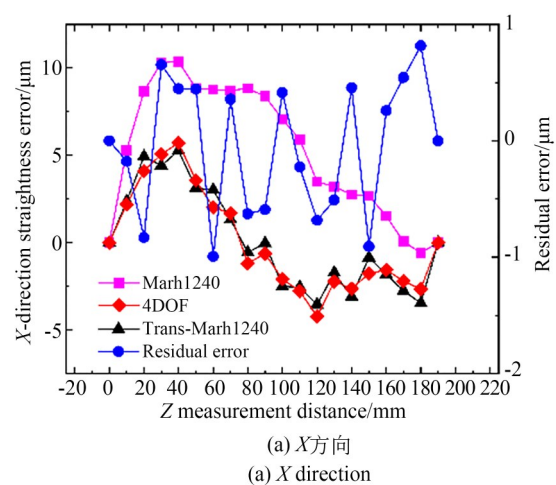
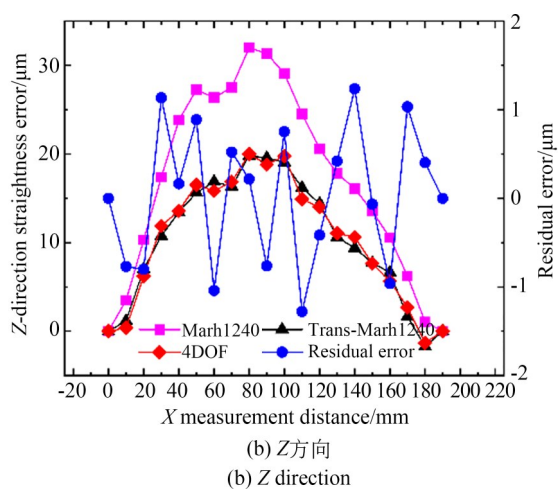


图 11 X轴直线度比对结果

Fig. 11 Comparison results of X axial straightness error

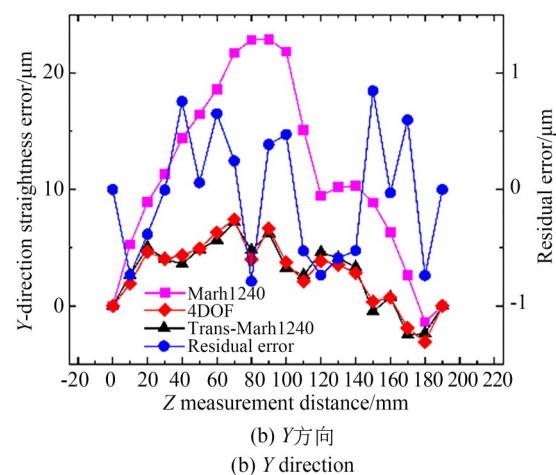
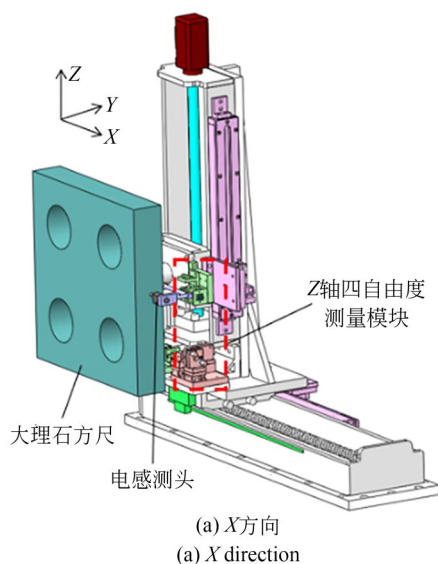


图 13 Z轴直线度比对结果

Fig. 13 Comparison results of Z axial straightness error

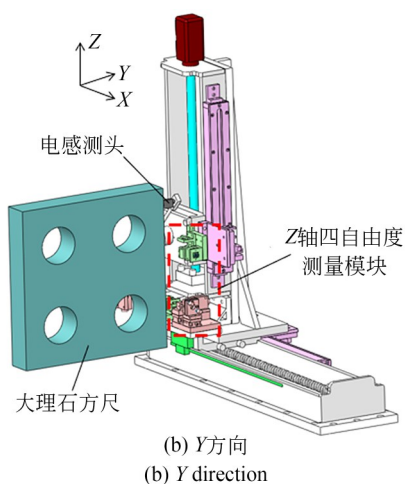


图 12 Z轴直线度比对设备

Fig. 12 Devices for comparison of Z axial straightness error

4.2.3 轴系姿态角度测量比对

4.2.3.1 偏摆角、俯仰角误差比对

按图 14 所示架设实验设备。实验时,四自由度运动误差测量模块激光端固定,感测端与靶镜

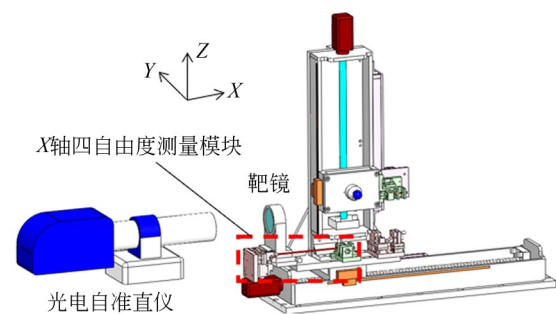
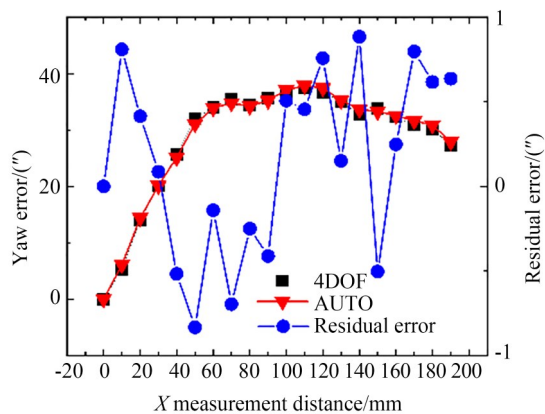


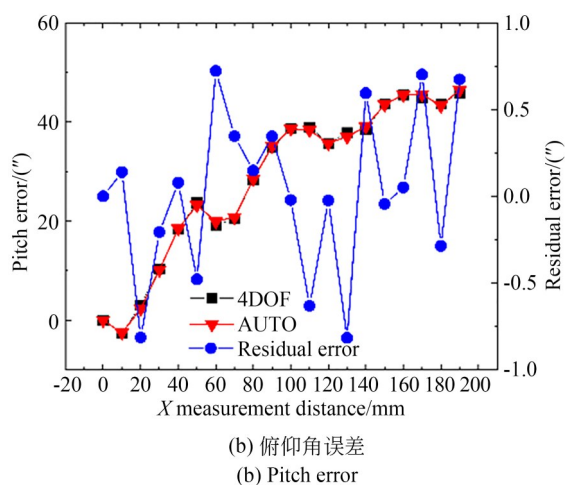
图 14 X轴偏摆角、俯仰角比对设备

Fig. 14 Device for comparison of X axial angular errors

跟随滑块在测量范围内运动,记录光电自准直仪与四自由度运动误差测量模块的偏摆角与俯仰角的值。比对结果如图 15 所示,在 0~190 mm 内 X 轴偏摆角与俯仰角的比对残差均为 $\pm 1''$ 。



(a) 偏摆角误差
(a) Yaw error



(b) 俯仰角误差
(b) Pitch error

图 15 X 轴角度误差比对结果

Fig. 15 Comparison results of X axial angular errors

同理,按图 16 架设实验设备,将靶镜换装在 Z 轴滑块上,借助 Z 轴四自由度运动误差测量系统完成偏摆角、俯仰角的误差比对。比对结果如图 17 所示,在 0~190 mm 内 Z 轴偏摆角与俯仰角的比对残差均为 $\pm 1.5''$ 。

4.2.3.2 滚动角误差比对

按图 18(a)架设实验设备。实验时,平面反射镜固定在导轨侧面,滚动角测量模块与水平仪(青岛前哨 WLL11 型,分辨率为 $0.2''$)跟随滑块在测量范围内运动,记录各位置水平仪示数与滚

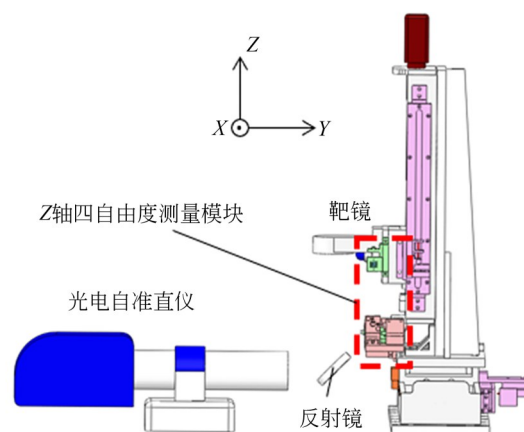
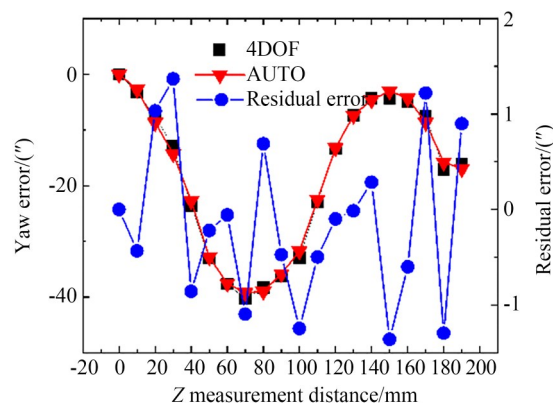
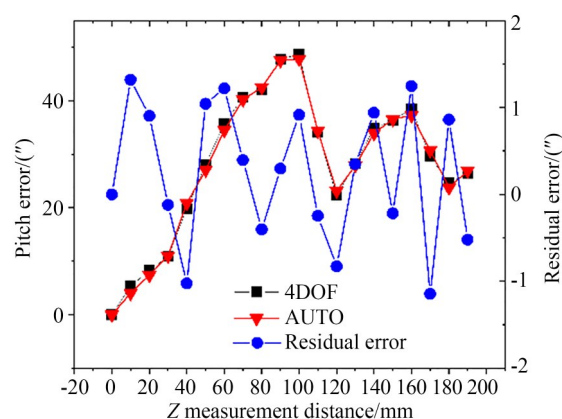


图 16 Z 轴角度比对设备架设

Fig. 16 Device for comparison of Z axial angular errors



(a) 偏摆角误差
(a) Yaw error

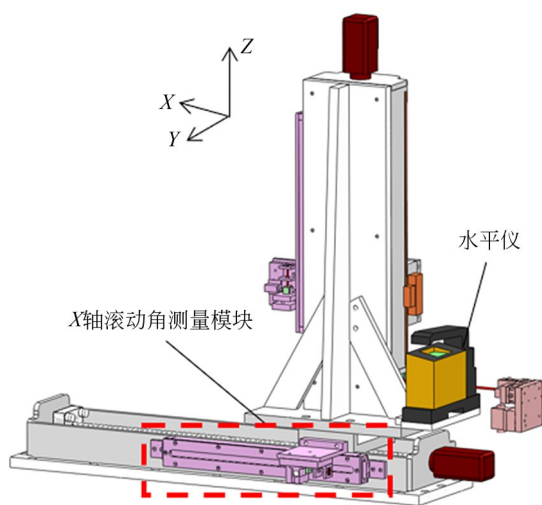


(b) 俯仰角误差
(b) Pitch error

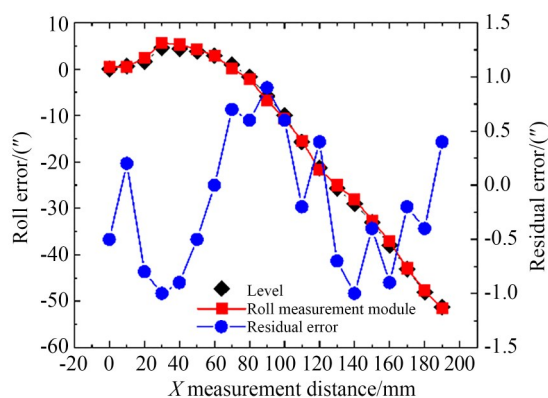
图 17 Z 轴角度误差比对结果

Fig. 17 Comparison results of Z axial angular errors

动角测量模块所测示数。比对结果如图 18(b)所示,在 0~190 mm 内 X 轴滚动角的比对残差在



(a) 比对设备
(a) Comparison devices



(b) 比对结果
(b) Comparison results

图 18 X轴滚动角比对

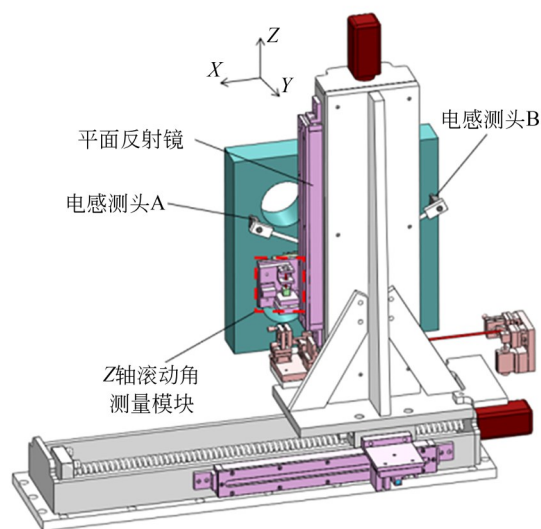
Fig. 18 Comparison of X axial roll error

$\pm 1''$ 以内。

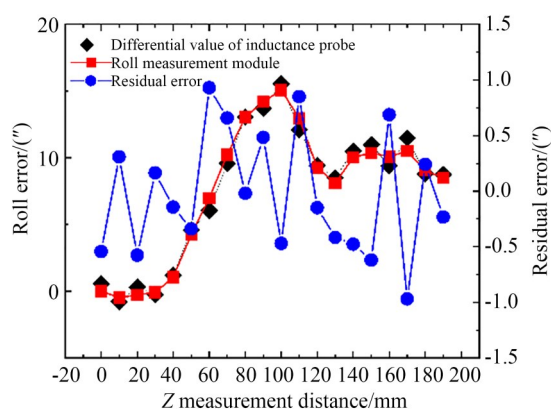
按图 19(a)架设实验设备,电感测头 A,B 打在大理石方尺同一表面,记录各位置电感测头示数的差值与滚动角测量模块的示数进行比对。比对结果如图 19(b)所示,在 0~190 mm 内 Z 轴滚动角的比对残差在 $\pm 1''$ 以内。

5 空间误差测量比对实验

由式(6)可知,二维线性模组空间误差模型求解中需要垂直度误差,因此需要进行垂直度测量^[24]。经 5 次测量,二维线性模组的垂直度误差为 $-42.4''$,标准差为 $0.45''$;大理石方尺的垂直



(a) 比对设备
(a) Comparison devices



(b) 比对结果
(b) Comparison results

图 19 Z轴滚动角比对

Fig. 19 Comparison of Z axial roll error

度误差为 $8.18''$,标准差为 $0.18''$ 。

为实现二维线性模组的误差实时测量,本文对图 20 所示的工作平面(XZ 平面,190 mm×190 mm 正方形)的对角线位置进行测量,并与激光干涉仪(MCV-500)所测位置值进行比对。在该对角线上选取 19 个等间距点($P_1 \sim P_{19}$)进行比对。

按图 21 架设实验设备,实验时,X 轴与 Z 轴均从起始位置间隔 10 mm 沿正方向运动,记录激光干涉仪的数值。记公式(10)求出的空间误差 E 的坐标为 (x_e, y_e, z_e) ,根据式(13)将测量系统测出数据代入误差模型后求解的对角线值与 MCV-500 测出的对角线值进行比较,即:

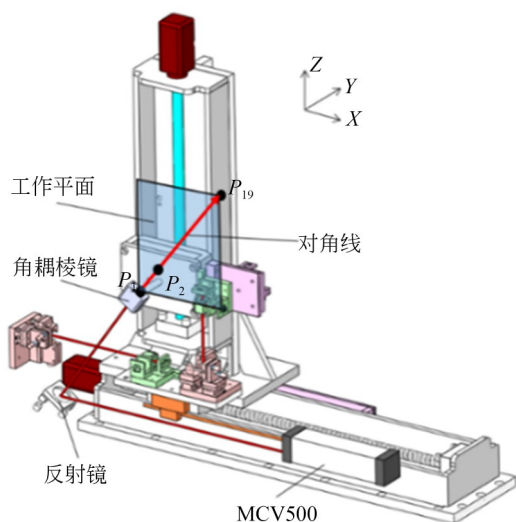


图 20 XZ 平面对角线位置测量示意图

Fig. 20 Schematic diagram of XZ plane diagonal position measurement

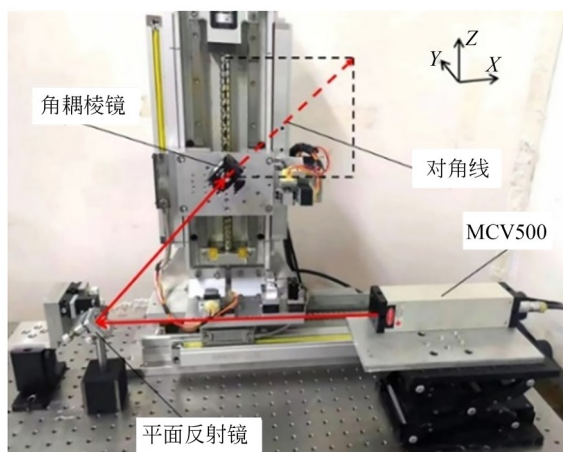


图 21 XZ 平面对角线位置测量设备

Fig. 21 Measuring devices of XZ plane diagonal position

$$\begin{cases} E_{BD} = \sqrt{x_m^2 + z_m^2} - P_{MCV} \\ E_{AD} = \sqrt{(x_m + x_e)^2 + y_e^2 + (z_m + z_e)^2} - P_{MCV} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: E_{BD} 和 E_{AD} 分别为使用误差模型前后计算出的 XZ 平面对角线位置的测量误差, P_{MCV} 为 MCV500 测出的 XZ 平面对角线位置的测量误差。测量结果如图 22 所示, 使用二维线性模组空间误差模型求解前后, XZ 平面对角线位置的测量误差值由 $68 \mu\text{m}$ 降至 $13 \mu\text{m}$, 说明该系统能够有效地测量线性模组误差。

上述实验均在空载状态下进行。由于在加载

状态下二维线性模组各位置的运动误差会发生变化, 为验证测量系统能够实时测量线性模组的空间误差变化, 在 Z 轴滑块上加装质量为 2 kg 的标准砝码作为对照组实验。加载实验测量结果如图 22 所示, 使用二维线性模组空间误差模型求解前后, XZ 平面对角线位置的测量误差由 $56 \mu\text{m}$ 降至 $14 \mu\text{m}$, 该误差测量系统能够实现实时测量。

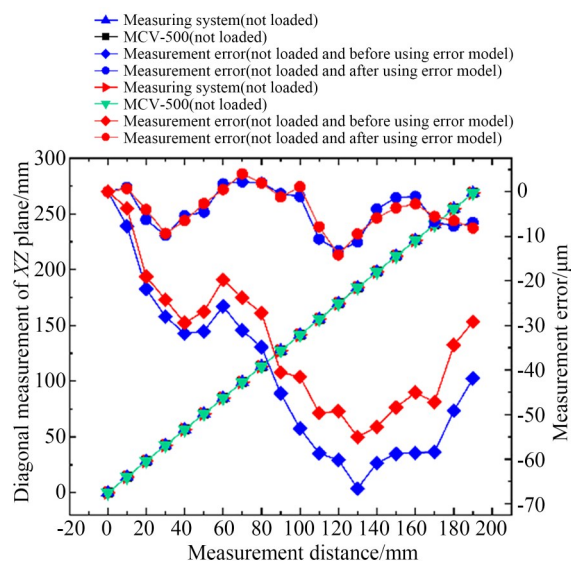


图 22 XZ 平面对角线位置测量误差对比

Fig. 22 Comparison of diagonal position measurement error of XZ plane

6 结 论

为测量二维线性模组的运动误差, 本文搭建了由光栅尺、四自由度运动误差测量模块和滚动角误差测量模块组成的误差实时测量系统, 基于 HTM 原理构建二维模组空间误差模型, 完成测量系统标定和比对实验。最终, 误差实时测量系统的定位误差、直线度误差和角度误差分别达到 $\pm 1.2 \mu\text{m}$, $\pm 1.3 \mu\text{m}$ 和 $\pm 1''$ 。根据所提出的空间误差模型分析二维线性模组 XZ 平面对角线位置的测量误差。结果表明, 使用二维线性模组空间误差模型求解前后, XZ 平面对角线位置的测量误差由 $68 \mu\text{m}$ 降至 $13 \mu\text{m}$ 。此外, 在加载状态下进行线性模组的空间误差测量, 在 Z 轴滑块上加装质量为 2 kg 的标准砝码进行对照实验。结果显示, 在使用二维线性模组空间误差模型求解前后, XZ 平面对角线位置的测量误差由 $56 \mu\text{m}$ 降

至 14 μm 。由此表明,该系统能够实现线性模组

误差的实时测量。

参考文献:

- [1] 王斐然,廖有用,罗均,等. 二维直线运动平台几何误差建模与数字化分析[J]. 机械设计与制造, 2018(2): 160-163.
WANG F R, LIAO Y Y, LUO J, *et al.* Modeling and digital analysis of the geometric errors of two-dimensional linear motion stage[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2018(2): 160-163. (in Chinese)
- [2] 杨滨赫,蔡引娣,文志祥,等. 长距离激光测量中光束漂移的自动补偿[J]. 光学精密工程, 2020, 28(11): 2393-2402.
YANG B H, CAI Y D, WEN ZH X, *et al.* Automatic compensation method for beam drift in long-distance laser measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(11): 2393-2402. (in Chinese)
- [3] 范光照,朱志良,钟添东. 小型微/纳米级三坐标测量机的研制[J]. 纳米技术与精密工程, 2003, 1(1):17-23.
FAN G ZH, ZHU ZH L, ZHONG T D. Development of a small coordinate measuring machine with micro/nano-accuracy[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2003, 1(1):17-23. (in Chinese)
- [4] 赵东升,张健,贾敏强,等. 测量数控机床定位误差的两种方法之比较[J]. 计量学报, 2019, 40(S1):33-35.
ZHAO D SH, ZHANG J, JIA M Q, *et al.* Comparison of two methods for measuring the error of CNC machine tool[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2019, 40(S1):33-35. (in Chinese)
- [5] 李永祥,焦万堂,武文斌. 机床导轨误差对零件加工精度的影响[J]. 制造技术与机床, 2005(8): 82-85.
LI Y X, JIAO W T, WU W B. Influence of lathe guide errors on machining accuracy[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2005(8): 82-85. (in Chinese)
- [6] HUANG P S, LI Y. Laser measurement instrument for fast calibration of machine tools[C]. *Proceedings of ASPE annual Meeting*, 1996, 14: 644-647
- [7] 郭俊康,李鑫波,李颀. 导轨五自由度运动误差的光学与倾角传感器组合测量方法[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(2):64-72.
GUO J K, LI X B, LI X. Five degrees of freedom simultaneous measurement of linear motion system by combination of optical with inclination sensors [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(2):64-72. (in Chinese)
- [8] CHENG J, CHEN J F, CHENG Z, *et al.* Interferometer with six axes and 4 subdivisions: WO, WO/2013/013345[P]. 2013
- [9] CHANG D, HU P C, TAN J B. Fused-like angles: replacement for roll-pitch-yaw angles for a six-degree-of-freedom grating interferometer[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, 22(12): 1677-1684.
- [10] ZHAO Y Q, FENG Q B, ZHANG B, *et al.* Influence of beam radii on a common-path compensation method for laser beam drifts in laser collimation systems[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(8): 084013.
- [11] 匡萃芳,冯其波,刘斌. 滚转角测量方法综述[J]. 光学技术, 2004, 30(6): 699-702.
KUANG C F, FENG Q B, LIU B. Survey of rolling angle measurement methods [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(6): 699-702. (in Chinese)
- [12] CAI Y D, YANG B H, FAN K C. Robust roll angular error measurement system for precision machines[J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8027.
- [13] FENG Q B, ZHANG B, CUI C X, *et al.* Development of a simple system for simultaneously measuring 6DOF geometric motion errors of a linear guide[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 25805-25819.
- [14] 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 ZH, DUAN F J, *et al.* Accuracy improvement method and optimal design of straightness in five-degree-of-freedom measurement of long guide [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(20):2467-2478. (in Chinese)
- [15] 张忠宁,宋治崑,范宇超,等. 五自由度运动误差测量系统关键技术研究[J]. 计测技术, 2021, 41(3):39-45.
ZHANG ZH N, SONG ZH K, FAN Y CH, *et al.* Research on key technology of five-degree-of-freedom motion error measurement system [J].

- Metrology & Measurement Technology*, 2021, 41 (3):39-45. (in Chinese)
- [16] JIN T, HAN M Y, LIU J L, *et al.* A heterodyne interferometer for simultaneous measurement of roll and straightness[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 133257-133264.
- [17] 匡翠方, 冯其波, 张斌, 等. 一种新的滚转角测量方法[J]. 光电子·激光, 2006, 17(4):1085-1089. KUANG C F, FENG Q B, ZHANG B, *et al.* A novel method for measuring roll[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2006, 17(4):1085-1089. (in Chinese)
- [18] SHI K, SU J H, HOU W M. Roll angle measurement system based on differential plane mirror interferometer [J]. *Optics Express*, 2018, 26 (16): 19826.
- [19] FAN K C, CHEN M J, HUANG W M. A six-degree-of-freedom measurement system for the motion accuracy of linear stages [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1998, 38(3): 155-164.
- [20] FAN Y C, LOU Z F, HUANG Y B, *et al.* Self-compensation method for dual-beam roll angle measurement of linear stages [J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 26340.
- [21] 栗时平, 李圣怡, 王贵林. 基于多体系统理论的数控机床空间误差建模[J]. 长沙电力学院学报(自然科学版), 2001(4): 75-78. SU SH P, LI SH Y, WANG G L. Modeling of volumetric errors for NC machine tools based on multi-body system theories[J]. *Journal of Changsha Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2001(4): 75-78. (in Chinese)
- [22] 赵壮, 姜志峰, 张忠宁, 等. 符合阿贝原则的数控机床几何误差建模[J]. 光学 精密工程, 2020, 28 (4): 885-897. ZHAO ZH, LOU ZH F, ZHANG ZH N, *et al.* Geometric error model of CNC machine tools based on Abbe principle[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 885-897. (in Chinese)
- [23] HUANG Y B, FAN K C, SUN W, *et al.* Low cost, compact 4-DOF measurement system with active compensation of beam angular drift error[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17185-17198.
- [24] 宋治崑. 导轨运动误差测量方法及装备空间误差分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2022. SONG ZH K. *Measurement Method of Guide Rail Motion Error and Analysis of Equipment Space Error*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. (in Chinese)

作者简介:



姜志峰(1978—),男,黑龙江肇东人,副教授,研究方向为微小组件自动装配技术、数控机床误差测量与补偿技术等。E-mail:louzfi@dlut.edu.cn



张汉平(1994—),男,河南洛阳人,硕士研究生,2018年于河南科技大学获得学士学位,主要从事机床多自由度运动误差测量方面的研究。E-mail:18437952875@163.com