

引文格式:谭智,王培吕,刘春时,等.基于三球交会定位原理的旋转轴几何误差辨识方法[J].航空制造技术,2026,69(8):25020021.  
TAN Zhi, WANG Peilü, LIU Chunshi, et al. Geometric error identification method for rotary axes based on three-sphere intersection positioning principle[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(8): 25020021.

## 基于三球交会定位原理的旋转轴几何误差辨识方法

谭智<sup>1,2</sup>,王培吕<sup>1</sup>,刘春时<sup>2</sup>,何改云<sup>1</sup>

(1. 天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室,天津 300072;  
2. 通用技术集团机床工程研究院有限公司,北京 100102)

[摘要] 为实现五轴机床旋转轴几何误差的快速精准辨识,本文提出了一种基于三球交会定位原理的旋转轴几何误差检测与辨识方法。该方法通过在旋转轴轴线上选取两点,将球杆仪分别沿 X、Y、Z 3 个方向固定安装,驱动旋转轴转动进行测量,获取旋转过程中轴线上两点的空间位置数据,从而确定旋转轴实际轴线的空间位置;通过分析实际轴线与理想轴线的偏差,实现了旋转轴 5 项位置相关项几何误差的准确辨识。本方法在测量过程中仅需旋转轴单独运动,无需直线轴联动,有效避免了直线轴误差源对测量结果的干扰,实验结果表明,该方法对旋转轴轴线上点位置的预测误差为 0.78  $\mu\text{m}$ ,验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词:五轴机床;旋转轴;球杆仪;几何误差;误差辨识;三球交会定位原理

中图分类号:V2 文献标志码:A DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020021

### Geometric Error Identification Method for Rotary Axes Based on Three-Sphere Intersection Positioning Principle

TAN Zhi<sup>1,2</sup>, WANG Peilü<sup>1</sup>, LIU Chunshi<sup>2</sup>, HE Gaiyun<sup>1</sup>

(1. Key Lab of Mechanism Theory & Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;  
2. Genertec Machine Tool Engineering Research Institute Co., Ltd., Beijing 100102, China)

[ABSTRACT] To achieve rapid and accurate identification of geometric errors in the rotary axes of five-axis machine tools, this paper proposes a geometric error detection and identification method based on the three-sphere intersection positioning principle. The method involves selecting two points on the rotary axis and fixing the ballbar in the X, Y, and Z directions. By driving only the rotary axes and measuring the spatial positions of the two points during rotation, the actual spatial trajectory of the rotary axes is precisely determined. By analyzing the deviation between the actual axis and the ideal axis, five position dependent geometric errors of the rotary axis are accurately identified. This approach requires only the rotary axes to move independently, eliminating the need for linear axes motion, thus effectively avoiding interference from linear axes errors. Experimental results demonstrate that the prediction error for the position of points on the rotary axes is as low as 0.78  $\mu\text{m}$ , confirming the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: Five-axis machine tool; Rotary axes; Ballbar; Geometric error; Error identification;  
Three-sphere intersection positioning principle

收稿日期:2025-01-13;退修日期:2025-02-18;录用日期:2025-09-02

通信作者:何改云,教授,主要研究方向为数控制造装备误差检测与补偿。

机床的精度提升是提高机床加工质量关键环节,很多原因都会导致机床的精度降低,使零件加工后的实际几何参数和位置相对于理想几何参数和位置发生偏离。目前将影响机床精度的误差源归纳成4类:伺服误差、热误差、几何误差和动态误差<sup>[1]</sup>。其中,机床几何误差,主要由机床本身制造以及装配精度等决定,在机床的各种误差源中,几何误差约占总误差的20%~30%<sup>[2]</sup>。识别机床的几何误差至关重要,对机床进行几何误差建模、测量与辨识是几何误差补偿的前提<sup>[3-4]</sup>。

机床几何误差建模的常用方法主要有多系统理论法<sup>[5]</sup>和旋量理论法<sup>[6]</sup>等。通过误差模型的建立,可以实现对机床几何误差的预测与补偿。其中,旋转轴几何误差的辨识是五轴机床建模与误差补偿中的重要环节,常用的测量设备包括激光跟踪仪、球杆仪和R-test装置等。在使用球杆仪对旋转轴测量中,Tsutsumi等<sup>[7]</sup>提出了一种经典的测量与位置相关的误差项(Position dependent geometric error parameters, PDGEs)的方法,用球杆仪分别测量径向、切向和轴向3个模式,最终通过分析球杆仪圆轨迹的偏心率来分离与位置无关的误差项(Position independent geometric error parameters, PIGEs)。付国强等<sup>[8]</sup>根据九线法原理提出了一种基于球杆仪的六圈辨识法,通过分析回转轴各几何误差项的性质,可辨识出包括2项垂直度误差、2项安装位置误差在内的全部10项几何误差。Liang等<sup>[9]</sup>提出了一种使用径向、切向和轴向测试模式识别转台几何误差的解耦方法。Deng等<sup>[10]</sup>提出了一种基于跟踪干涉仪的几何误差辨识方法,该方法考虑了多边测量中的刚体运动约束,辨识了PIGEs和PDGEs。Lin等<sup>[11]</sup>使用激光跟踪仪提出了一种基于体对角线误差测量的数控机床几何误差辨识与补偿方法,选择正则化方法来识别几何误差参数。Pu等<sup>[12]</sup>使用R-test装置成功地辨识了转台的6个PDGEs。Lyu等<sup>[13-14]</sup>使用R-test装置辨识了一台带有摆头和转台的五轴机床中两个旋转轴的20项几何误差。

Chen等<sup>[15]</sup>设计了一种新的特征工件,包括圆弧面和方槽两个特征,根据工件的在机测量,可以识别两个旋转轴的5个与位置无关的几何误差。在误差辨识方面,Yang等<sup>[16]</sup>确定了几何误差敏感系数的均方根值与工件几何误差之间的关系,自适应地确定最小值的最佳测量路径,以识别旋转轴与位置无关的几何误差并进行补偿,使得旋转轴径向偏差得到了有效降低。Yao等<sup>[17]</sup>为了分析几何误差的耦合效应,基于几何误差模型提出了一种同时识别双旋转轴的PIGEs和PDGEs方法,并通过预测体积误差验证了方法的有效性。为提高旋转轴的PIGEs和PDGEs识别精度,Peng等<sup>[18]</sup>建立了一种基于无边界约束优化法的新型识别方法,通过设置不

同的测量方向和测量路径进行误差辨识,并通过仿真和试验证明了所提方法的有效性。

虽然上述方法在机床几何误差检测与误差识别方面取得了显著的成果,但在旋转轴的检测过程中均需直线轴进行关联运动,从而不可避免地引入了直线轴误差对辨识结果的影响,进一步增加了辨识难度。为此,本文提出了一种分析旋转轴轴线偏置的几何误差检测辨识方法,通过测量旋转轴在旋转过程中的轴线偏置,将其与理想轴线进行比较进而可实现旋转轴位置相关误差的辨识。该方法在测量时只进行旋转轴转动,无需直线轴联动,减少了直线轴引入的误差。

## 1 五轴数控机床几何误差模型

### 1.1 五轴机床几何误差建模

几何误差是影响五轴数控机床精度的主要因素之一,使用旋量理论进行建模将所有误差运动都建立在全局坐标系中,不需要在各运动轴部件上都建立局部坐标系,其物理参数更加明确,适用于表达复杂的运动关系,且易于进行运动学反解。以CAFXYZ型双转台五轴数控机床为例,其拓扑结构如图1所示。

按照机床结构可以分为从床身到工件的工件运动链和从床身到刀具的刀具运动链,将具有共同起点的两条开环运动链连接成从工件到刀具的闭环运动链,可得到刀具相对于工件的空间位置和姿态关系,即空间误差模型。使用旋量理论对机床理想状态进行建模,可得工件链和刀具链的变换矩阵表达式(1)和(2)。

$$\mathbf{g}_{fw} = e^{\dot{\xi}_x \theta_x} e^{\dot{\xi}_y \theta_y} e^{\dot{\xi}_z \theta_z} \mathbf{g}_{fw}(0) \quad (1)$$

$$\mathbf{g}_{ft} = e^{\dot{\xi}_x \theta_x} e^{\dot{\xi}_y \theta_y} e^{\dot{\xi}_z \theta_z} \mathbf{g}_{ft}(0) \quad (2)$$

式中, $f$ 为床身; $w$ 为工件; $t$ 为刀具; $e^{\dot{\xi}_i \theta_i}$ 为*i*轴( $i=X, Y, Z, A, C$ )的理想运动矩阵; $\mathbf{g}_{fw}(0)$ 和 $\mathbf{g}_{ft}(0)$ 分别为初始状态下刀具坐标系和工件坐标系相对全局坐标系的齐次变换矩阵。推出的刀具相对于工件的齐次变换矩阵为式(3)。

$$\mathbf{g}_{wt} = \mathbf{g}_{wf} \cdot \mathbf{g}_{ft} = (\mathbf{g}_{fw})^{-1} \cdot \mathbf{g}_{ft} = \mathbf{g}_{fw}^{-1}(0) \cdot e^{-\dot{\xi}_z \theta_z} \cdot e^{-\dot{\xi}_y \theta_y} \cdot e^{-\dot{\xi}_x \theta_x} \cdot e^{\dot{\xi}_x \theta_x} \cdot e^{\dot{\xi}_y \theta_y} \cdot e^{\dot{\xi}_z \theta_z} \cdot \mathbf{g}_{ft}(0) \quad (3)$$

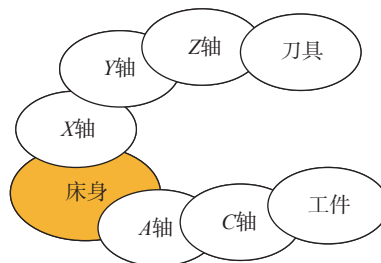


图1 拓扑结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of topological structure

在实际情况下,由于装配、制造等一系列的原因,使得相邻部件之间存在几何误差,因此部件之间的齐次变换矩阵就应包括误差矩阵,则实际的齐次变换矩阵应表示为

$$e^{\hat{s}_i^r \cdot \theta_i^r} = e^{\hat{s}_i^e \cdot \theta_i^e} \cdot e^{\hat{s}_i^i \cdot \theta_i^i} \quad (4)$$

式中,  $e^{\hat{s}_i^r \cdot \theta_i^r}$  为  $i$  轴的实际变换矩阵,  $e^{\hat{s}_i^i \cdot \theta_i^i}$  为理想运动矩阵,  $e^{\hat{s}_i^e \cdot \theta_i^e}$  为误差矩阵。参照式(1)和(2),则实际情况下刀具相对于工件坐标系的齐次变换矩阵可以表示为

$$\begin{aligned} g_{fw}^r &= (e^{\hat{s}_A^e \cdot \theta_A^e} \cdot e^{\hat{s}_A^i \cdot \theta_A^i}) (e^{\hat{s}_C^e \cdot \theta_C^e} \cdot e^{\hat{s}_C^i \cdot \theta_C^i}) \cdot g_{fw}(0) \\ g_{fi}^r &= (e^{\hat{s}_X^e \cdot \theta_X^e} \cdot e^{\hat{s}_X^i \cdot \theta_X^i}) (e^{\hat{s}_Y^e \cdot \theta_Y^e} \cdot e^{\hat{s}_Y^i \cdot \theta_Y^i}) (e^{\hat{s}_Z^e \cdot \theta_Z^e} \cdot e^{\hat{s}_Z^i \cdot \theta_Z^i}) \cdot g_{fi}(0) \\ g_{wt}^r &= (g_{fw}^r)^{-1} \cdot g_{fi}^r \end{aligned} \quad (5)$$

五轴机床刀具相对于工作台的综合几何误差可表示为

$$\begin{bmatrix} p_x & o_i \\ p_y & o_j \\ p_z & o_k \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = g_{wt}^r \begin{bmatrix} r_{pt} & r_{ot} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} - g_{wt} \begin{bmatrix} r_{pt} & r_{ot} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)描述了实际情况与理想情况下刀具相对于工件坐标系的位姿矩阵之差。式中,  $r_{pt}$  和  $r_{ot}$  为刀具在工件坐标系的位姿向量,例如,刀具坐标系中的刀尖点为原点,位置向量  $r_{pt}=[0,0,0]^T$ , 刀具的方向为  $Z$  轴负方向;姿态向量  $r_{ot}=[0,0,-1]^T$ 。  $[p_x, p_y, p_z, 0]^T$  为刀具相对于工作台的位置误差;  $[o_i, o_j, o_k, 0]^T$  为刀具相对于工作台的姿态误差。

### 1.2 旋转轴几何误差

旋转轴与位置有关的几何误差一共有 6 项,如图 2 所示为五轴机床旋转轴  $C$  轴的 6 项基本几何误差,包含 3 项位移误差和 3 项角度误差,其中,  $\delta_{xc}$ 、 $\delta_{yc}$ 、 $\delta_{zc}$  分别为  $C$  轴转动时在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向产生的位移误差项;  $\varepsilon_{xc}$ 、 $\varepsilon_{yc}$ 、 $\varepsilon_{zc}$  分别为  $C$  轴转动时绕  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴旋转产生的转角误

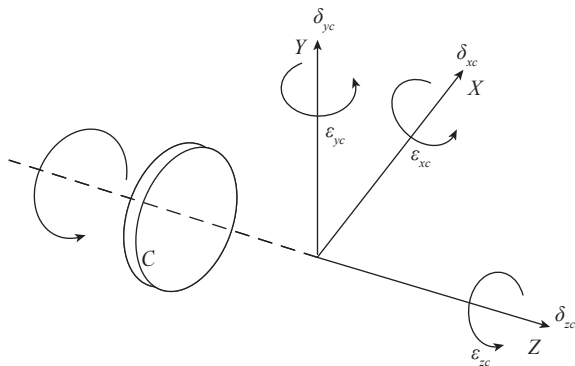


图 2 C 轴的 6 项几何误差  
Fig.2 Six geometric errors of C-axis

差项(旋转轴的与位置无关的几何误差 PIGEs 可以看作是位置相关几何误差 PDGEs 的一部分<sup>[7]</sup>)。

以五轴机床旋转轴  $C$  轴为例,对旋转轴的误差元素进行表达,则  $C$  轴位置相关误差变换矩阵可表示为

$$e^{\hat{s}_C^e \cdot \theta_C^e} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zc} & \varepsilon_{yc} & \delta_{xc} \\ \varepsilon_{zc} & 1 & -\varepsilon_{xc} & \delta_{yc} \\ -\varepsilon_{yc} & \varepsilon_{xc} & 1 & \delta_{zc} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

当旋转角度为  $\theta_c$  时,  $C$  轴的理想运动矩阵为

$$e^{\hat{s}_C^i \cdot \theta_C^i} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & -\sin \theta_c & 0 & 0 \\ \sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

则  $C$  轴的实际运动矩阵为误差矩阵与理想矩阵的相乘,其实际运动矩阵可表示为

$$e^{\hat{s}_C^e \cdot \theta_C^e} = e^{\hat{s}_C^i \cdot \theta_C^i} \cdot e^{\hat{s}_C^e \cdot \theta_C^e} \quad (9)$$

## 2 旋转轴几何误差测量与辨识

### 2.1 基于三球交会定位原理的测量方法

为了快速、准确地辨识数控机床的旋转轴几何误差,本文提出了一种通过测量旋转轴在旋转过程中的轴线偏置,将其与理想轴线进行比较的旋转轴几何误差辨识方法。将球杆仪在旋转轴轴线上不同两点处分别沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向放置并保持静止,旋转轴转动进行测量,考虑重复会产生定位误差,3 次测量取平均值;由 3 种方向放置的球杆仪固定球坐标以及球杆仪的读数,可求得在不同旋转角度时旋转轴轴线上的点,不同的两点即可确定旋转轴轴线的空间位置;通过对旋转轴转动时的实际轴线与理想轴线进行比较,借助相应的几何误差辨识公式可确定旋转轴的 5 项位置相关误差。将旋转轴行程等距分成一系列测量角度,在相同的测量角度时分别进行实际轴线的测量以及与理想轴线的比较,由此可辨识包含旋转轴全行程角度的几何误差值。该方法在测量时只进行旋转轴转动,无需直线轴跟随运动。

如图 3 所示为  $C$  轴转台测量时球杆仪的安装方式。球杆仪中心底座安装在旋转轴  $C$  轴轴线上,将  $C$  轴转台端面回转中心设为工件坐标系原点,在两种安装模式下工作台侧球距离工作台端面高度分别为  $h_1$  和  $h_2$ ,球杆仪自身的长度为  $L$ ,球杆仪分别沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向放置并保持静止,旋转轴转动进行测量并记录对应杆长示数  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 。

在安装高度为  $h_1$  时,工作台侧球位置为  $(0,0,h_1)$ ,刀具侧球在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向安装时的位置分别为  $(L,0,h_1)$ 、 $(0,L,h_1)$  和  $(0,0,h_1+L)$ 。在不同旋转角度时,分

别以3种方向放置时工作台侧球坐标为球心,对应球杆仪的实际长度 $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 为半径,绘制出3个相交的空间球面。根据图4所示的三球交会定位原理<sup>[19]</sup>,空间中两个相交的球面交于一条圆线 $k$ ,3个相交的球面则交于两点 $D$ 和 $D'$ ,结合球杆仪工作台侧球的安装位置在旋转轴轴线附近,可进一步确定3个空间球面的相交点为靠近旋转轴轴线的点 $D$ ,记为旋转轴轴线上的点 $D_1$ ,假设其坐标为 $(x_1, y_1, z_1)$ 。

同理,在安装高度 $h_2$ 时,工作台侧球位置为 $(0, 0,$

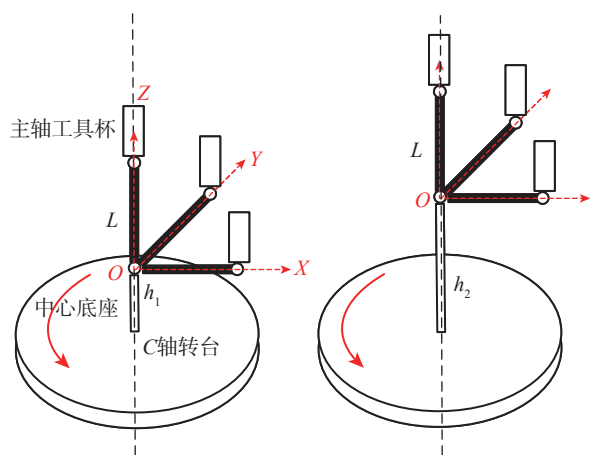


图3 球杆仪安装位置  
Fig.3 Installation position of ball bar

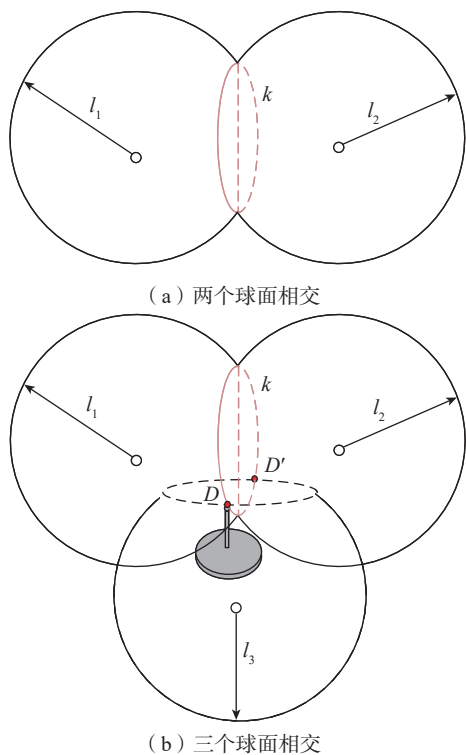


图4 三球交会定位原理  
Fig.4 Three-sphere intersection positioning principle

$h_2)$ ,刀具侧球在 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向安装时的位置分别为 $(L, 0, h_2)$ 、 $(0, L, h_2)$ 和 $(0, 0, h_2+L)$ 。在不同旋转角度时,由3种方向放置时工作台侧球坐标以及球杆仪的实际长度可求得旋转轴轴线上的点 $D_2$ ,假设其坐标为 $(x_2, y_2, z_2)$ 。

### 2.2 旋转轴几何误差辨识方法

辨识原理如图5所示,点 $D_1$ 和点 $D_2$ 的连线 $l'$ 即为旋转轴轴线在当前旋转角度下的实际空间位置,球杆仪在两种安装高度下的工作台侧球 $(0, 0, h_1)$ 和 $(0, 0, h_2)$ 连线 $l$ 为旋转轴轴线的理想位置,将旋转轴实际轴线 $l'$ 与理想轴线 $l$ 进行比较,可得到旋转轴轴线在旋转时的偏置情况,借助相应的误差辨识公式可辨识出旋转轴的5项位置相关误差。

具体辨识方法为:

实际轴线上点 $D_1$ 和 $D_2$ 的 $Z$ 坐标平均值为 $\bar{Z}_D = (z_1 + z_2)/2$ ;两种安装高度时中心球坐标 $(0, 0, h_1)$ 和 $(0, 0, h_2)$ 的 $Z$ 坐标平均值为 $\bar{Z}_T = (h_1 + h_2)/2$ ,则 $C$ 轴位置相关项误差 $\delta_{zc} = \bar{Z}_D - \bar{Z}_T$ ,可将其表示为

$$\delta_{zc} = \frac{z_1 + z_2}{2} - \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (10)$$

当直线 $l'$ 的 $Z$ 坐标值为0时,直线的 $X$ 坐标值即为位置相关项误差 $\delta_{xc}$ ;直线的 $Y$ 坐标值即为位置相关项误差 $\delta_{yc}$ 。由空间两点求直线的方程可表达为

$$\delta_{xc} = z_1(x_1 - x_2)/(z_2 - z_1) + x_1 \quad (11)$$

$$\delta_{yc} = z_1(y_1 - y_2)/(z_2 - z_1) + y_1 \quad (12)$$

位置相关项误差 $\epsilon_{xc}$ 为 $D_1$ 指向 $D_2$ 的向量 $\overline{D_1D_2}$ 在 $YOZ$ 平面上的投影 $\overline{D_1D_{2YOZ}}$ 与 $Z$ 轴正方向的夹角;位置相关项误差 $\epsilon_{yc}$ 为向量 $\overline{D_1D_2}$ 在 $XOZ$ 平面上的投影 $\overline{D_1D_{2XOZ}}$ 与 $Z$ 轴正方向的夹角。由空间向量的夹角计算公式可表达为

$$\epsilon_{xc} = \arcsin \frac{y_1 - y_2}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} \quad (13)$$

$$\epsilon_{yc} = \arcsin \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} \quad (14)$$

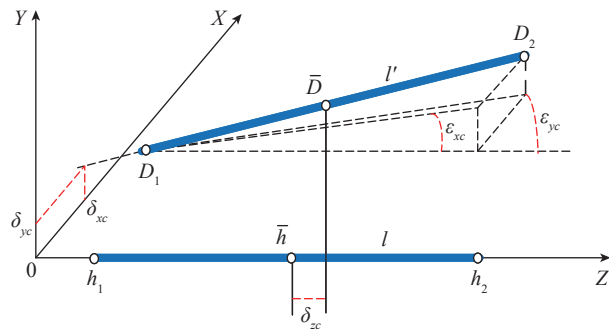


图5 误差辨识示意图

Fig.5 Diagram of error identification

定位误差  $\varepsilon_{zc}$  可通过激光干涉仪结合雷尼绍 XR20-W 转台设备对其进行测量,在此仅研究  $\delta_{xc}$ 、 $\delta_{yc}$ 、 $\delta_{zc}$ 、 $\varepsilon_{xc}$ 、 $\varepsilon_{yc}$  的检测与辨识方法。

### 3 试验验证

#### 3.1 旋转轴几何误差测量

将辨识方法应用到某五轴试验样机上,使用雷尼绍公司的 QW20 球杆仪对机床 C 轴转台进行测量辨识。在球杆仪安装前使用千分表测量机床 C 轴转台的回转中心,以及对机床直线轴误差进行补偿,使得球杆仪的计算位置为机床实际位置。图 6 所示为在两种安

装高度时分别将球杆仪沿 X、Y、Z 方向放置时的测量情况,球杆仪工作台侧球杆安装在 C 轴轴线上,分别距离工作台端面 100 mm 和 200 mm 处,球杆仪自身杆长  $L$  为 100 mm。驱动旋转轴转动进行测量,并记录不同旋转角度时对应的 3 种安装方向的杆长示数值。

#### 3.2 旋转轴几何误差辨识结果分析

根据式 (10)~(14) 对测得的数据进行误差辨识,结果如图 7 所示。

由图 7 可知旋转轴 C 轴在 X、Y 方向的位移项误差波动较大,处于  $-5\sim 44\ \mu\text{m}$  区间,在 X、Y 方向的转角项误差波动较小,处于  $-20\sim 50\ \mu\text{rad}$  区间。而旋转轴 C 轴在

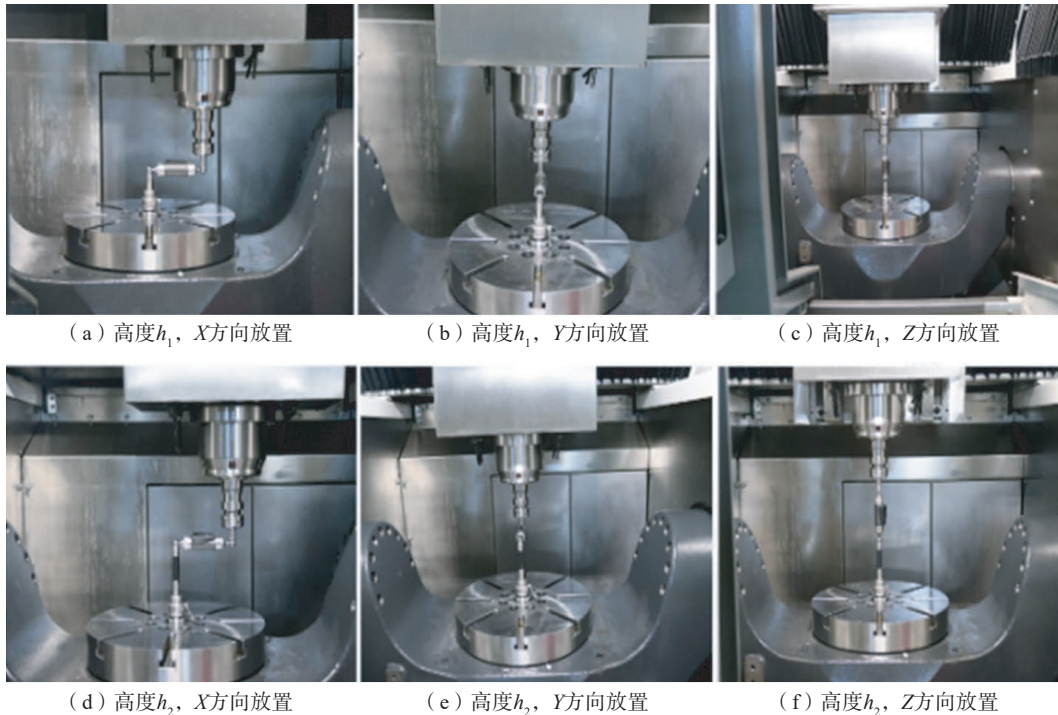


图 6 球杆仪测量 C 轴误差

Fig.6 Measurement of C-axis error by using ball bar

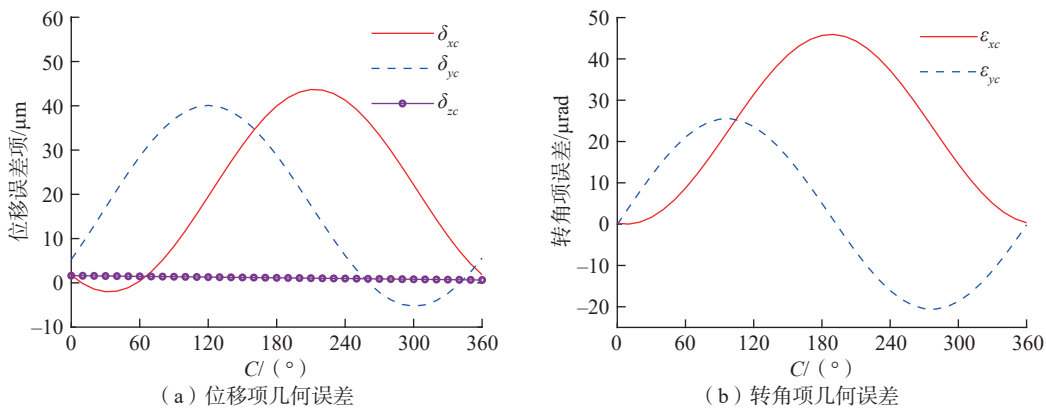


图 7 辨识得到的误差

Fig.7 Error identified

Z方向的位移项误差较小且稳定,但由于球杆仪在3个方向测得的数据并不直接体现对应方向的几何误差,而是综合应用于确定旋转轴的回转轴,进而辨识几何误差,因此,纵使Z方向位移误差较小,但是在Z方布置球杆仪是不可缺少的。

将辨识得到的5项几何误差数据代入式(9)所示的C轴实际运动矩阵,可对C轴转台旋转时轴上点的空间位置进行预测。将C轴转台端面回转中心点的预测数据与实际测得数据进行比较以分析辨识方法是否准确,预测数据的误差计算方法如式(15)所示。各点预测值与实际测得数据的点云分布图如图8所示,可知轴线在旋转过程中偏移较多,两者分布情况大致拟合。

$$d = \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2 + (z_4 - z_3)^2} \quad (15)$$

式中, $d$ 为误差值; $(x_4, y_4, z_4)$ 为预测点坐标值; $(x_3, y_3, z_3)$ 为实际测得点坐标值。

图9为各预测点与实际点间的误差值(预测值与实际值之差),分析图9中所示的各预测点与实际点间的

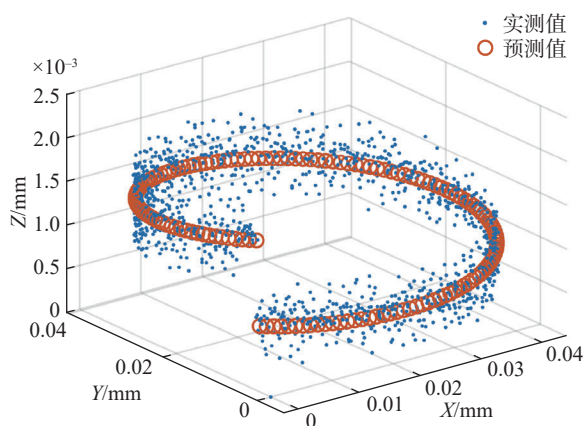


图8 数据分布图

Fig.8 Diagram of data distribution

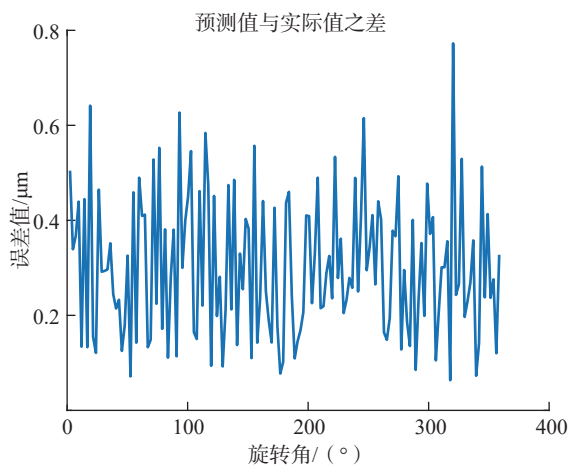


图9 预测差值图

Fig.9 Prediction difference plot

误差值,总体预测值与实际值误差在 $1 \mu\text{m}$ 内,其中,误差平均值为 $0.3 \mu\text{m}$ ,误差最大值为 $0.78 \mu\text{m}$ ,可验证此辨识方法有效。

## 4 结论

旋转轴几何误差是影响五轴机床精度的主要因素之一,本文提出了一种通过测量旋转轴在旋转过程中的轴线偏置情况进而辨识旋转轴几何误差的方法,并在五轴机床上对所提方法进行了检测、辨识以及试验验证。得出以下主要结论。

(1)提出了一种基于三球交会定位原理的五轴机床旋转轴几何误差检测与辨识方法,可辨识旋转轴的5项位置相关误差。

(2)将辨识得到的几何误差代入运动学模型,预测得到的轴线位置与实际轴线位置误差在 $0.78 \mu\text{m}$ 内,验证了此辨识方法的有效性。

## 参考文献

- [1] ANDOLFATTO L, LAVERNHE S, MAYER J R R. Evaluation of servo, geometric and dynamic error sources on five-axis high-speed machine tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(10-11): 787-796.
- [2] SHEN H Y, FU J Z, HE Y, et al. On-line asynchronous compensation methods for static/quasi-static error implemented on CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 60: 14-26.
- [3] 张文斌, 刘焕牢, 王宇林, 等. 双转台五轴数控机床旋转轴位置无关几何误差辨识[J]. 中国机械工程, 2024, 35(6): 1023-1033.
- ZHANG Wenbin, LIU Huanlao, WANG Yulin, et al. Identification of rotary axes PIGES of five-axis CNC machines with double rotary tables[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(6): 1023-1033.
- [4] WANG H, JIANG X G. Identification and compensation of position independent geometric errors of dual rotary axes for hybrid-type five-axis machine tool based on unit dual quaternions[J]. Measurement, 2023, 211: 112587.
- [5] CHEN Q D, MAENG S, LI W, et al. Geometric- and force-induced errors compensation and uncertainty analysis of rotary axis in 5-axis ultra-precision machine tool[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(3): 841-856.
- [6] MURRAY R M, LI Z X, SASTRY S S. A mathematical introduction to robotic manipulation[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [7] TSUTSUMI M, SAITO A. Identification and compensation of systematic deviations particular to 5-axis machining centers[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(8): 771-780.
- [8] 付国强, 傅建中, 沈洪奎. 五轴数控机床旋转轴几何误差辨识新方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(5): 848-857.
- FU Guoqiang, FU Jianzhong, SHEN Hongyao. One novel geometric error identification of rotary axes for five-axis machine tool[J]. Journal of

Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(5): 848–857.

[9] LIANG R J, LI W, WANG Z Q, et al. A method to decouple the geometric errors for rotary axis in a five-axis CNC machine[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(8): 085007.

[10] DENG M, LI H M, XIANG S T, et al. Geometric errors identification considering rigid-body motion constraint for rotary axis of multi-axis machine tool using a tracking interferometer[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 158: 103625.

[11] LIN Z X, TIAN W J, ZHANG D W, et al. A method of geometric error identification and compensation of CNC machine tools based on volumetric diagonal error measurements[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 124(1): 51–68.

[12] PU Y Z, WANG L, YIN M, et al. Modeling, identification, and measurement of geometric errors for a rotary axis of a machine tool using a new R-test[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117(5): 1491–1503.

[13] LYU D, ZHANG J H, CHEN Y H, et al. Efficient calculation of continuous trajectory spherical center displacements by using non-contact R-test[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(1): 015107.

[14] LYU D, ZHANG J H, WANG J H, et al. R-test-based identification method for geometric errors of rotary axes in a five-axis machine tool with a rotary table and tilting head[J]. Measurement, 2024,

225: 113932.

[15] CHEN K J, XIANG S T, CHENG T, et al. A new machining test to identify position-independent geometric errors of rotary axes for five-axis machine tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 132(9): 4903–4913.

[16] YANG S H, LEE K I. Adaptive identification of the position-independent geometric errors for the rotary axis of five-axis machine tools to directly improve workpiece geometric errors[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2024, 25(5): 995–1010.

[17] YAO S H, HUANG H Z, TIAN W J, et al. Simultaneous identification for geometric error of dual rotary axes in five-axis machine tools[J]. Measurement, 2023, 220: 113368.

[18] PENG W C, HUANG J F, WAN K, et al. A novel identification method for all geometric errors of rotary axis based on boundaryless constraint optimization method[J]. Measurement, 2024, 234: 114876.

[19] 林雪原, 王捷, 胡昊. 一种简易的双星定位系统定位解算方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2011, 26(2): 161–164.

LIN Xueyuan, WANG Jie, HU Hao. One position solution method of double-star positioning system[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2011, 26(2): 161–164.

(责编 晓月)