

# 基于激光跟踪仪的五轴机床旋转轴误差测量

殷建<sup>1,2</sup> 李明<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海大学上海市智能制造及机器人重点实验室, 上海 200732

<sup>2</sup>铜陵学院机械工程系, 安徽 铜陵 244000

**摘要** 为了提高大型复杂型体件加工用龙门式双摆头五轴机床的加工精度,用激光跟踪仪对五轴机床两个旋转轴准静态误差以及旋转轴中心轴线与三个直线轴间垂直度误差进行了辨识测量。基于刚体运动学原理和齐次变换矩阵方法建立了包含旋转轴准静态误差和旋转轴中心轴线与三个直线轴间垂直度误差的误差模型;用激光跟踪仪测出旋转轴循圆运动到不同角度位置时其端面上点的空间坐标,由此建立旋转轴误差方程组,求出旋转轴各项误差值。对循圆轨迹进行拟合得到圆心坐标,进而得到旋转轴中心轴线方程,求出旋转轴中心轴线与直线轴间的垂直度误差值。将旋转轴各项误差值代入误差补偿模型中,通过圆锥台误差补偿前后加工实验结果对比,表明所采用的旋转轴误差测量方法可以有效提高五轴机床的加工精度。

**关键词** 测量; 准静态误差; 误差模型; 循圆辨识; 激光跟踪仪

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0408005

## Errors Measurement for Rotation Axis of Five-Axis Machine Tool Based on Laser Tracker

Yin Jian<sup>1,2</sup> Li Ming<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Key Laboratory for Intelligent Manufacturing and Robot, Shanghai University, Shanghai 200732, China

<sup>2</sup>Mechanical Department, Tongling University, Tongling, Anhui 244000, China

**Abstract** In order to improve the large-scale curved surface parts machining accuracy of five axis machine tool, a new method using laser tracker to identify quasi-static errors of rotary axis is proposed and a compensation experiment is also implemented. the error model of rotary axis is established based on the rigid body kinematics and at the same time the errors of perpendicularity between the rotation axis and linear axis are also given. Different circle paths are designed in different planes and spatial coordinates of four positions are measured. Some equations including all the error components of rotation axis are established and the error components can be obtained by solving the equations. The perpendicularity errors between the rotation axis and linear axis are obtained through the relationship with the fitting center of two following circle and linear axis. The proposed method is applied to a double swivel head spindle five axis machine tool for error measurement and compensation. Experimental results show that this method is quite convenient and effective.

**Key words** measurement; quasi-static errors; error model; identification through following circle motion; laser tracker

**OCIS codes** 120.1880; 120.3930; 120.4640

### 1 引言

航空、汽车、模具等大型复杂曲面外形结构特征的产品对高速高精五轴龙门式加工中心需求越来越多,这些产品大多数为薄壁结构,产品尺寸变化范围从不足1 m到十几米,对精度要求(尤其是对接、装配部位精

收稿日期: 2014-09-30; 收到修改稿日期: 2014-12-04

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX04003-022)、国家自然科学基金青年基金(51205243)

作者简介: 殷建(1974—),男,博士研究生,讲师,主要从事数控机床误差测量、补偿等方面的研究。

E-mail: yinjianshanghai@163.com

导师简介: 李明(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事精密测量方面的研究。E-mail: Robotli@shu.edu.cn

度)很高。五轴机床加工相对于传统三轴机床加工具有额外的两个转动副,因此可以调整刀具相对于工件的角度和方位,使得刀具相对于切削面可以做最佳的方向配合,同时减少工件装夹的次数,大幅减小了加工时间,提高了加工精度。但两个旋转轴同时也增加了机床自身误差数量,而且旋转轴误差很难进行高精度测量,所以对旋转轴进行误差测量和补偿对提高机床加工精度非常重要<sup>[1]</sup>。

目前机床旋转轴误差测量大多只针对角度定位误差,测量方式多采用打表法进行,精度不高,对操作人员经验和技术要求严格<sup>[2-3]</sup>,且旋转轴中心轴线和直线轴间的垂直度误差测量很少有研究涉及。Bryan首次利用球杆仪对机床性能包括直线轴的热误差、直线轴间的垂直度等进行了评价<sup>[4]</sup>。其他很多学者也应用球杆仪对直线轴误差以及部分旋转轴误差进行了测量研究,但是还缺乏一种系统有效的方法对旋转轴误差进行综合全面的测量,尤其是对旋转轴中心轴线和三个直线轴间的垂直度误差的测量没有一种有效的手段。

本文采用激光干涉仪循圆测量的方法,对旋转轴准静态误差以及旋转轴中心轴线和直线轴间垂直度误差进行全面测量辨识,并通过圆锥台工件补偿前后的加工精度对比,验证了旋转轴误差测量辨识方法的有效性和准确性。

## 2 旋转轴误差数学模型

在切削加工过程中,数控机床由于部件自身的几何误差、材料的有限刚度、热变形等因素,机床运动副的运动准确性受到影响,使得刀具相对于工件的最终位姿发生偏差,造成工件的加工精度降低<sup>[5-6]</sup>。因为在精加工工序中刀具切削力较小,由切削力引起的变形可以忽略不计,这里将热变形误差和几何误差看作为准静态误差用于旋转轴误差模型计算,此类准静态误差在机床整体误差中比例可达到50%~70%。

根据刚体运动学原理,空间刚体具有六个自由度。如图1所示以C轴为例,C轴旋转时会产生6项误差, $\delta_{xc}(c)$ 、 $\delta_{yc}(c)$ 、 $\delta_{zc}(c)$ 为C轴的平动误差, $\varepsilon_{xc}(c)$ 、 $\varepsilon_{yc}(c)$ 、 $\varepsilon_{zc}(c)$ 为转角误差。由小角度假设并且忽略二阶以上误差项,可以得到旋转轴C轴的误差模型,表达为

$$T_c^c = \begin{bmatrix} C_{ce} & -S_{ce} & \varepsilon_{yc}(c) & \delta_{xc}(c) \\ S_{ce} & C_{ce} & -\varepsilon_{xc}(c) & \delta_{yc}(c) \\ \varepsilon_{xc}(c)S_{ce} - \varepsilon_{yc}(c)C_{ce} & \varepsilon_{xc}(c)C_{ce} + \varepsilon_{yc}(c)S_{ce} & 1 & \delta_{zc}(c) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $S_{ce} = \sin[\theta + \varepsilon_{zc}(c)]$ ,  $C_{ce} = \cos[\theta + \varepsilon_{zc}(c)]$ 。

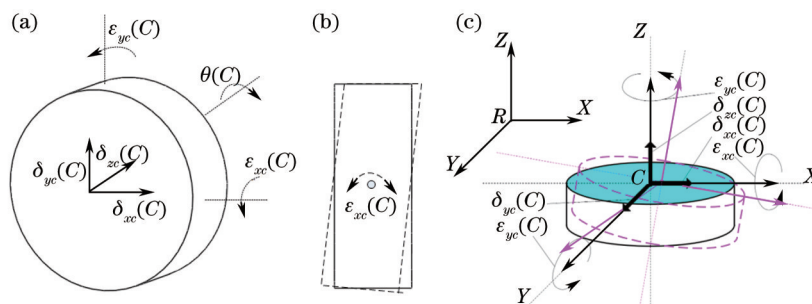


图1 旋转轴6项误差

Fig.1 Six degrees of freedom errors for rotary motion

对于大型结构件加工用龙门框架式双摆头五轴机床,由于其三个直线轴行程很大,除了三个直线轴和两个旋转轴自身误差外,必须同时考虑两个旋转轴中心轴线与三个直线轴间的垂直度误差: $\alpha_{yA}$ 、 $\alpha_{zA}$ 、 $\gamma_{xc}$ 、 $\gamma_{yc}$ 。

### 2.1 旋转轴C轴相对于Z轴的误差变换矩阵

旋转轴C绕Z轴转动角度 $\theta$ 时,此时相对于机床Z轴误差为:沿X、Y、Z三个方向的线性位移误差 $\delta_{xc}(c)$ 、 $\delta_{yc}(c)$ 、 $\delta_{zc}(c)$ ,绕X、Y、Z三个轴的转角误差 $\varepsilon_{xc}(c)$ 、 $\varepsilon_{yc}(c)$ 、 $\varepsilon_{zc}(c)$ ,C轴中心轴线与X、Y轴间的垂直度误差 $\gamma_{xc}$ 、 $\gamma_{yc}$ 。因此得到其误差变换矩阵为

$${}^zT_C^e = \begin{bmatrix} c\theta - \varepsilon_{zc}(c)s\theta & -\varepsilon_{zc}(c)c\theta - s\theta & \varepsilon_{yc}(c)c\theta + \varepsilon_{zc}(c)s\theta + c\theta\gamma_{yc} + s\theta\gamma_{xc} & \delta_{zc}(c) \\ s\theta + \varepsilon_{zc}(c)c\theta & -\varepsilon_{zc}(c)s\theta + c\theta & \varepsilon_{yc}(c)s\theta - \varepsilon_{zc}(c)c\theta + s\theta\gamma_{xc} - c\theta\gamma_{yc} & \delta_{yc}(c) \\ -\varepsilon_{yc}(c) - \gamma_{yc} & \varepsilon_{xc}(c) + \gamma_{xc} & 1 & \delta_{zc}(c) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $s\theta = \sin \theta$ ,  $c\theta = \cos \theta$ 。

### 2.2 A轴相对于C轴的误差变换矩阵

旋转轴A绕X轴转动角度 $\psi$ 时,产生的误差为:沿X、Y、Z三个方向的线性位移误差 $\delta_{xa}(A)$ 、 $\delta_{ya}(A)$ 、 $\delta_{za}(A)$ ,绕X、Y、Z三个轴的转角误差 $\varepsilon_{xa}(A)$ 、 $\varepsilon_{ya}(A)$ 、 $\varepsilon_{za}(A)$ , $\alpha_{yA}$ 、 $\alpha_{zA}$ 为A轴中心线与Y、Z直线轴之间垂直度误差,因此得到其误差变换矩阵

$${}^cT_A^e = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{ya}(A)s\psi - \varepsilon_{za}(A)c\psi + \varepsilon_{ya}(A)s\psi + \varepsilon_{za}(A)c\psi + \delta_{xa}(A) \\ \varepsilon_{za}(A) + \alpha_{zA} & c\psi\alpha_{zA} + s\psi\alpha_{yA} & s\psi\alpha_{zA} - c\psi\alpha_{yA} & \delta_{ya}(A) \\ -\varepsilon_{ya}(A) - \alpha_{yA} & c\psi + s\psi\varepsilon_{xa}(A) & -\varepsilon_{xa}(A)s\psi - \varepsilon_{za}(A)c\psi & \delta_{za}(A) \\ 0 & \varepsilon_{xa}(A)s\psi + \varepsilon_{za}(A)c\psi & c\psi + s\psi\varepsilon_{xa}(A) & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $s\psi = \sin \psi$ ,  $c\psi = \cos \psi$ 。

## 3 旋转轴误差测量方法

五轴机床的两个旋转轴提高了机床加工的灵活性,同时也增加了误差项,特别是决定刀具位置姿态的误差,直接影响机床的加工精度。传统三轴机床的21项误差元素的检测已经较为成熟,但是对五轴数控机床两个旋转轴的误差检测标定技术国内外尚无统一标准<sup>[7-8]</sup>。对于大型结构件加工用龙门式机床,其三个直线轴运动长度从几米到数十米,受机床部件几何误差和热误差的影响,旋转轴在机床工作空间不同位置处的误差并不相同,如图2所示。而球杆仪由于测量范围小,很难测量不同位置时旋转轴的误差。这里采用激光跟踪仪循圆测量的方法,快速测量辨识出旋转轴的多项误差。

激光跟踪测量具有测量精度高、测量距离大的优点,在航空航天、汽车制造、精密加工等行业中得到了广泛的应用。激光跟踪仪由跟踪仪本体、激光跟踪头、反射镜和伺服跟踪控制器组成<sup>[9-10]</sup>,如图3所示。

激光跟踪仪对空间目标点的坐标测量是通过测量水平方位角、垂直俯仰角和斜距 $d$ ,然后按球坐标原理得到空间点P的三维坐标(如图3所示),再通过齐次坐标变换将P点坐标转换到用户自定义的坐标系中。选用美国自动精密工程公司的API激光跟踪仪作为旋转轴误差测量的仪器,其三维空间的测距量精度为 $5 \mu\text{m}$ 、重复精度为 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ ,分辨率为 $1 \mu\text{m}$ ,角度测量精度为 $3.5 \mu\text{m}$ 、分辨率为 $0.07''$ ,使用API激光跟踪仪测量机床旋转轴的误差在小范围内具备足够精度,同时还可实现旋转轴的动态测量<sup>[11-13]</sup>。

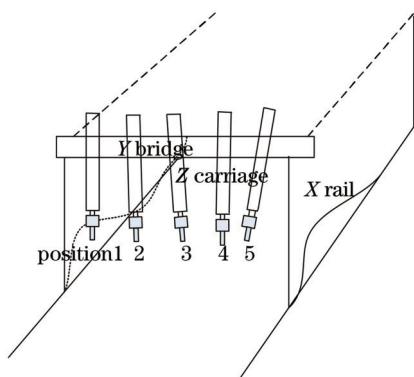


图2 旋转轴不同位置时误差

Fig.2 Rotation axis errors in different positions

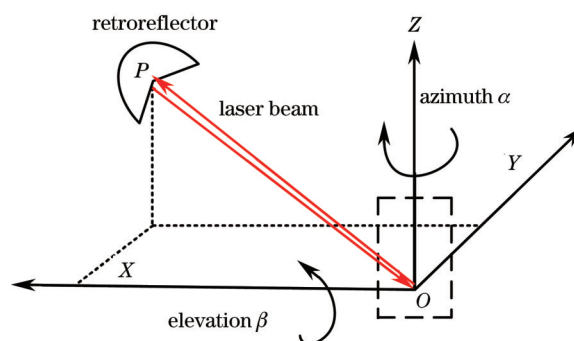


图3 跟踪仪测量原理

Fig.3 Measuring principle of laser tracking system

测量实验在宁波海天精工机械有限公司生产的一台五坐标桥式龙门高速加工中心进行,其参数为:直线轴行程,20 m×3 m×1.2 m,A轴(+/-110°),C轴(+/-360°)。为减小热变形误差变化的影响,测量前机床按照实际加工时某一工艺参数X、Y、Z三轴以4 m/min进给速度、两个旋转轴以50 r/min、主轴转速12000 r/min空载

运行 3 h, 根据文献[7]的研究, 此时机床各部件基本达到热平衡状态, 热误差达到稳定值。旋转轴误差测量时, 激光发射头固定在工作台上, 猫眼反射镜安放在旋转轴端面上, 旋转轴顺时针、逆时针运动用于端面上点的坐标数据采集。选择机床工作空间 5 个不同位置点  $P_1(3000, 500, 400)$ 、 $P_2(3000, 1000, 400)$ 、 $P_3(3000, 1500, 400)$ 、 $P_4(3000, 2000, 400)$ 、 $P_5(3000, 2500, 400)$  进行测量(如图 2 所示)。旋转轴 C 轴(在点  $P_3$  处)误差测量过程如图 4 所示。

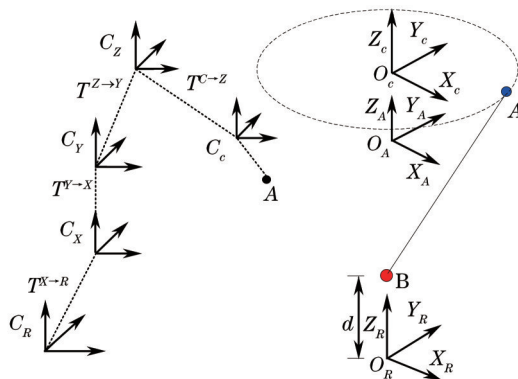


图 4 旋转轴误差测量示意图

Fig.4 Measuring principle of rotary axis errors

点  $O_c$  表示旋转轴 C 轴坐标系的中心原点, A 点表示猫眼反射镜位置, B 表示激光头位置, AB 表示测量激光束的长度, 设为  $L$ 。一个参考坐标系 R 设在工作台上, 其原点  $O_R$  在 A、C 轴中心轴线上, 各坐标轴初始方向如图 4 所示。在循圆测量过程中, 只有 C 轴做旋转运动, 其他四个轴保持静止, 为简化误差模型, X、Y、Z、A 轴在各自位置静止时不考虑其自身误差项, 这样只有 C 轴的运动影响激光跟踪仪测量结果。

如图 4 所示, A 点(猫眼反射镜)固定在旋转轴上, 它在 C 轴坐标系的坐标表达为

$${}^c P_A = \begin{bmatrix} R_x \\ 0 \\ R_z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $R_x$ 、 $R_z$  是 A 点在 C 轴坐标系中到坐标原点的 X 向和 Z 向距离, 此时 Y 向距离为零。这样 A 点在参考坐标系中实际坐标值  ${}^R P_A$  为

$${}^R P_A = {}^R T_X {}^X T_Y {}^Y T_Z {}^Z T_C {}^C P_A, \quad (5)$$

式中  ${}^i T_j$  表示 i 轴坐标系相对于 j 轴坐标系理想情况下坐标变换矩阵。B 点(激光头)安放在工作台上, 它在参考坐标系中表达为

$${}^R P_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中  $d$  是点 B(激光头)到参考坐标系的垂直距离。这样在参考坐标系中, 线段 AB 包含误差在内的实际长度为

$$L_c = |AB| = |{}^R P_A - {}^R P_B|. \quad (7)$$

设  $\Delta L = |L_c| - |L|$ ,  $|L|$  是 AB 两点理论距离。为了方便计算误差值, 对两个长度  $|L_c|$ 、 $|L|$  分别取平方后再计算其差值。由小角度假设, 忽略 2 阶以上误差乘积项, 计算结果为

$$\Delta(L)^2 = 2R_x \delta_{xc}(c) \cos \theta - 2R_z \delta_{yc}(c) \sin \theta + 2(R_z - H + d) \delta_{zc}(c) - 2R_x H \varepsilon_{xc}(c) \cos \theta + 2R_x H \varepsilon_{yc}(c) \sin \theta, \quad (8)$$

式中  $H$  表示 C 轴坐标系到参考坐标系的垂直距离。从(8)式可以看到  $\Delta(L)^2$  是角位置  $\theta$  和旋转轴五项误差元素的函数, 只有角定位误差  $\varepsilon_{xc}(\theta)$  不在(8)式中, 无法通过辨识得到, 但它可以由自准仪或角度干涉仪单独测量获得<sup>[14-16]</sup>。这里采用图 5 所示雷尼绍公司的 ML20 激光干涉仪组件加上 RX10 基准回转分度器直接对旋转轴角度定位误差进行测量, 旋转轴 A、C 轴角度定位误差测量结果如图 6、7 所示, CW 表示顺时针, AW 表示逆时针。

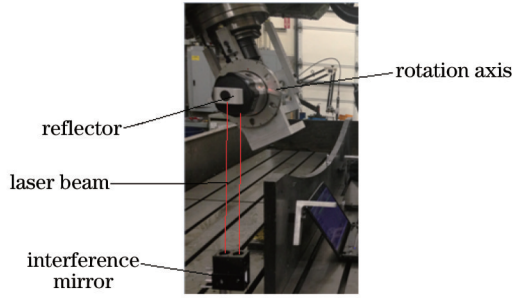


图5 旋转轴角度定位误差测量示意图

Fig.5 Position error measuring schematic diagram of rotary axis

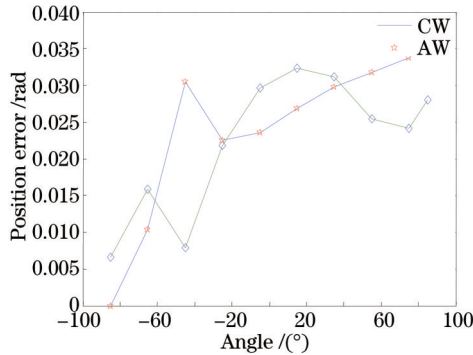


图6 A轴定位误差

Fig.6 Position errors of rotary axis A

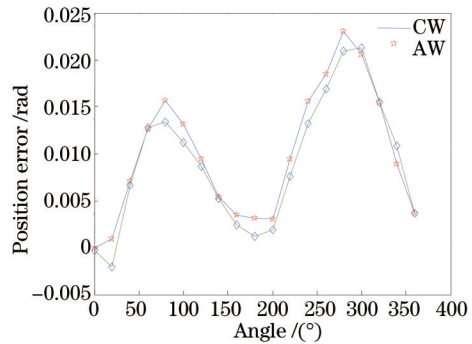


图7 C轴定位误差

Fig.7 Position errors of rotary axis C

为了计算(8)式中旋转轴其他几项误差,激光跟踪仪须做两次循圆测量,测量过程如图8所示。首先,猫眼反射镜固定在旋转轴端面的A点,激光头在工作台上的B点位置,C轴坐标系到参考坐标系高度为 $H_1$ ,激光跟踪仪跟随旋转轴C轴做一次循圆测量,此时激光跟踪仪测量长度为 $(L_1, \theta)$ , $\theta$ 为旋转轴运动的角度。然后,改变旋转轴C轴高度为 $H_2$ ,同样猫眼反射镜一端还是固定在旋转轴端面的A点,再做一次循圆测量,此时激光跟踪仪测量长度为 $(L_2, \theta)$ 。

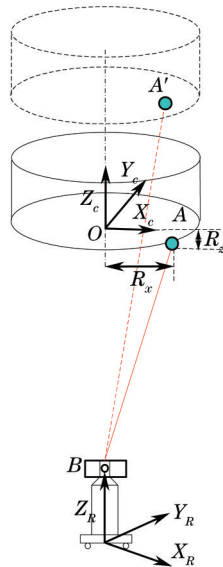


图8 变旋转轴高度误差辨识过程

Fig.8 Altering the height of the rotation axis to identification errors

在两次测量中,选取旋转角度 $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 四个测量路径来求解(8)式。这样可以得到8个方程,这些方程可以用矩阵 $\Delta'(L, \theta)^2 = P \cdot E$ 来表示, $\Delta'(L, \theta)^2$ 是激光跟踪仪测量值平方与理想值平方的差值, $E$ 是旋转轴准静态误差的列向量, $P$ 是由坐标位置确定的系数矩阵。具体表达为



$$\begin{bmatrix} 2R_x & 0 & 2(R_z - H_1 + d) & -2R_x H_1 & 0 \\ 0 & -2R_x & 2(R_z - H_1 + d) & 0 & 2R_x H_1 \\ -2R_x & 0 & 2(R_z - H_1 + d) & 2R_x H_1 & 0 \\ 0 & 2R_x & 2(R_z - H_1 + d) & 0 & -2R_x H_1 \\ 2R_x & 0 & 2(R_z - H_2 + d) & -2R_x H_2 & 0 \\ 0 & -2R_x & 2(R_z - H_2 + d) & 0 & 2R_x H_2 \\ -2R_x & 0 & 2(R_z - H_2 + d) & 2R_x H_2 & 0 \\ 0 & 2R_x & 2(R_z - H_2 + d) & 0 & -2R_x H_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{xc}(c) \\ \delta_{yc}(c) \\ \delta_{zc}(c) \\ \varepsilon_{xc}(c) \\ \varepsilon_{yc}(c) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta'(L_1, 0^\circ) \\ \Delta'(L_1, 90^\circ) \\ \Delta'(L_1, 180^\circ) \\ \Delta'(L_1, 270^\circ) \\ \Delta'(L_2, 0^\circ) \\ \Delta'(L_2, 90^\circ) \\ \Delta'(L_2, 180^\circ) \\ \Delta'(L_2, 270^\circ) \end{bmatrix} \quad (9)$$

由文献[12]分析表明系数矩阵  $P$  不是满秩的,不论  $H$ 、 $R_x$ 、 $R_z$  的取值,  $P$  的秩都等于 5。旋转轴中除角定位误差  $\varepsilon_{zc}(\theta)$  外的其余 5 项几何误差均可以由(9)式计算得到。在机床空间点(3000,1500,400)处,旋转轴误差计算结果如表 1 所示。

表 1 A、C 轴几何误差

Table 1 Geometric errors of A and C axes

Geometric errors of A axis		Geometric errors of C axis	
$\delta_{xa}(A)$	7.6 $\mu\text{m}$	$\delta_{xc}(C)$	6.4 $\mu\text{m}$
$\delta_{ya}(A)$	-5.5 $\mu\text{m}$	$\delta_{yc}(C)$	4.6 $\mu\text{m}$
$\delta_{za}(A)$	6.7 $\mu\text{m}$	$\delta_{zc}(C)$	5 $\mu\text{m}$
$\varepsilon_{xa}(A)$	5.4"	$\varepsilon_{xc}(C)$	5.5"
$\varepsilon_{ya}(A)$	4.7"	$\varepsilon_{yc}(C)$	-4.5"
$\varepsilon_{za}(A)$	5.2"	$\varepsilon_{zc}(\theta)$	4.3"

### 4 旋转轴与直线轴之间垂直度误差测量

激光跟踪仪测量机床旋转轴中心轴线和直线轴之间垂直度误差测量方法如图 9 所示,以 C 轴为例,安装靶镜在 C 轴端面某一位置,转动 C 轴,得到一系列点  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $\dots$ 、 $P_n(x_n, y_n, z_n)$  的坐标,由观测数据根据最小二乘原理拟合出一平面方程,再将这些测量点投影到该平面上,在平面内进行圆的拟合,求解出拟合圆的圆心  $O_c(x_c, y_c, z_c)$  坐标,通过  $O_c$  点与拟合平面垂直的法向量  $Z$  即 C 轴的中心在轴线。利用激光跟踪仪自带的软件计算 C 轴中心轴线如图 10 所示。

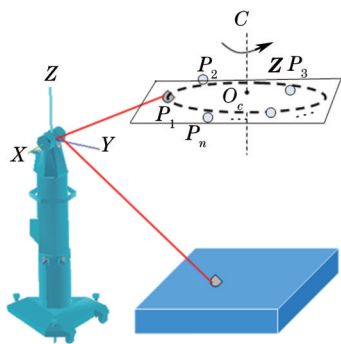


图 9 激光跟踪仪测量 C 轴中心轴线原理图

Fig.9 Central axis of C axis measuring principle

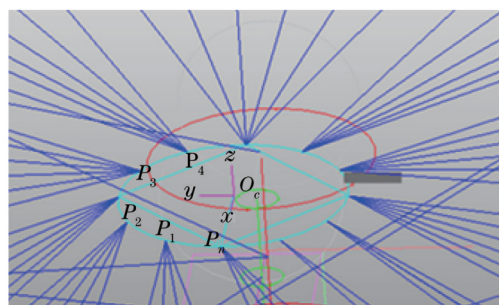


图 10 测量计算 C 轴中心轴线

Fig.10 Measuring and calculating the central axis of C rotary axis

A 轴和直线轴间垂直度误差测量原理同 C 轴。在图 3 所示 5 处不同位置分别进行测量计算,可以得出 C 轴和 X、Y 轴间在不同坐标位置处的垂直度误差以及 A 轴与 Y、Z 轴间垂直度误差值,如图 11 所示。

### 5 实 验

在龙门式双摆头五轴机床上对一个典型锥台试件(如图 12 所示)进行加工,以验证误差测量值和机床误差补偿模型的有效性。先按照理论刀位参数加工一个零件,再将测量辨识出的旋转轴误差值代入误差补偿模型中,计算出旋转轴运动到不同位置时的误差补偿值,将此补偿值输入数控误差补偿程序中进行误差修正<sup>[17-18]</sup>,再用修正后的刀位参数加工一个相同尺寸零件。在 ZEISS 三坐标测量机上选择两个试件的锥度和上

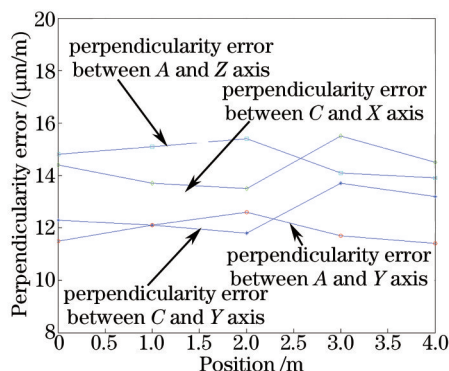


图 11 A、C轴垂直度误差

Fig.11 Perpendicularity errors of A and C axis

下两个面的圆度进行测量,对比工件补偿前后的加工精度值,如表 2 所示,可以看出这里测量出的旋转轴误差值代入补偿模型加工后,可以有效提高工件的加工精度。

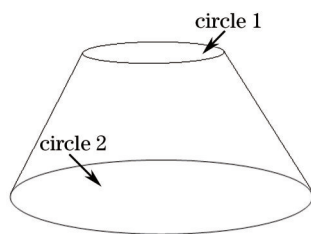


图 12 试验用圆锥台

Fig.12 Cone frustum for test machining

表 2 补偿前后锥台误差参数值对比

Table 2 Errors contrast of cone frustum before compensation and after compensation

	Theoretical value	Before compensation	After compensation
Roundness of circle 1	$\Phi 40$ mm	23.7 $\mu\text{m}$	14.5 $\mu\text{m}$
Roundness of circle 2	$\Phi 86$ mm	27.7 $\mu\text{m}$	18.4 $\mu\text{m}$
Taper	30°	30°2'14"	30°1'20"

## 6 结 论

旋转轴误差测量是多轴机床误差补偿的重要部分,本文提出使用激光跟踪仪测量机床旋转轴准静态误差的循圆辨识法以及旋转轴和直线轴间垂直度误差测量方法。首先根据刚体运动学给出机床旋转轴的误差模型,通过激光跟踪仪的循圆测量对旋转轴误差多项误差进行了辨识,同时利用旋转轴运动得到的循圆轨迹拟合圆及圆心,求出旋转轴中心轴线和直线轴间垂直度误差。最后将测量计算出的旋转轴误差值代入补偿模型中,通过误差补偿程序,对圆锥台工件进行了补偿加工实验,加工结果证明了所提出的旋转轴误差辨识测量方法在误差补偿中的有效性。

### 参 考 文 献

- 1 Schwenke H, Knapp W, Haitjema H, *et al.*. Geometric error measurement and compensation of machines—an update[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2008, 57(2): 660–675.
- 2 H F F Castro. A method for evaluating spindle rotation errors of machine tools using a laser interferometer[J]. Measurement, 2008, 41(5): 526–537.
- 3 W T Lei, M P Sung, W L Liu, *et al.*. Double ballbar test for the rotary axes of five-axis CNC machine tools[J]. Int J Mach Tool and Manuf, 2007, 47(2): 273–285.
- 4 Guiquan Chen, Jingxia Yuan, Jun Ni. A displacement measurement approach for machine geometric error assessment[J]. Int J Mach Tool Manuf, 2011, 41(1): 149–161.

- 5 Zhu Jia, Li Xingfei, Tan Wenbin, *et al.*. Method of geometric error detection for measuring machine based on laser tracker[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 25-30.  
朱 嘉, 李醒飞, 谭文斌, 等. 基于激光干涉仪的测量机几何误差检定技术[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 25-30.
- 6 Wang Xiushan, Yang Jianguo, Yu Yongchang, *et al.*. Research on thermal error modeling, measurement and compensation for the two turntable 5-axis NC machine tools[J]. Journal of Chinese Mechanical Engineer, 2009, 20(4): 405-408.  
王秀山, 杨建国, 余永昌, 等. 双转台五轴数控机床热误差建模、检测及补偿实验研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(4): 405-408.
- 7 Tian Liude, Liu Chaohui, Zhao Jianke, *et al.*. Indoor test method of attitude measurement accuracy of photoelectric theodolite[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0812002.  
田留德, 刘朝晖, 赵建科, 等. 光电经纬仪姿态测量精度室内检测方法[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0812002.
- 8 Chi Feng, Zhu Yu, Zhang Zhiping, *et al.*. Environment compensation technologies in dual-frequency laser interferometer measurement system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0408004.  
池 峰, 朱 煜, 张志兵, 等. 双频激光干涉测量中的环境补偿技术[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0408004.
- 9 Li Ruigang. Calibration of tool spindle for 5-axis CNC machine using laser tracker [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 477-483.  
李锐刚. 基于激光跟踪仪标定五轴数控加工中心主轴[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(3): 477-483.
- 10 Wang Jindong, Guo Junjie, Fei Zhigeng, *et al.*. Method of geometric identification for numerical control machine tool based on laser tracker[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(14): 13-19.  
王金栋, 郭俊杰, 费致根, 等. 基于激光跟踪仪的数控机床几何误差辨识方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(14): 13-19.
- 11 Zhang Zhenjiu, Hu Hong, Liu Xin. Measurement of geometric error of machine tool guideway system based on laser tracker[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0908002.  
张振久, 胡 泓, 刘 欣. 基于激光跟踪仪的机床导轨系统误差检测[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0908002.
- 12 Yi Zhang, Jianguo Yang, Kun Zhang. Geometric error measurement and compensation for the rotary table of five axis machine tool with double ballbar[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2013, 65(1-4): 275-281.
- 13 Ren Yongjie, Zhu Jigui, Yang Xueyou, *et al.*. Method of robot calibration based on laser tracker[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9): 195-200.  
任永杰, 郝继贵, 杨学友, 等. 利用激光跟踪仪对机器人进行标定的方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(9): 195-200.
- 14 Guo Lingling, Zhang Xingxiang, Ren Jianyue, *et al.*. Method to measure the radius of curvature of conic off-axis aspheric mirror using a laser tracker[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(9): 091202.  
郭玲玲, 张星祥, 任建岳, 等. 激光跟踪仪测量二次离轴非球面曲率半径的方法[J]. 激光与光电子进展, 2013, 50(9): 091202.
- 15 Hu Jinzhong, Yu Xiaofen, Peng Peng, *et al.*. Layout optimization of three-dimensional coordinate measurement system based on laser multi-lateration[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0108006.  
胡进忠, 余晓芬, 彭 鹏, 等. 基于激光多边法的坐标测量系统布局优化[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0108006.
- 16 Jie Zhu. Robust Thermal Error Modeling and Compensation for CNC Machine Tools[D]. Michigan: University of Michigan, 2008: 93-97.
- 17 E L J Bohez, B Ariyajunya, C Sinlapeecheewa, *et al.*. Systematic geometric rigid body error identification of 5-axis milling machines [J]. Computer-Aided Design, 2007, 39(4): 229-244.
- 18 Y Y Hsu, S S Wang. A new compensation method for geometry errors of five-axis machine tools[J]. Int J Mach Tool Manuf, 2007, 47(2): 352-360.

栏目编辑: 何卓铭