

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311983

基于球杆仪的五轴数控机床误差快速检测方法

焦安铃, 陈光胜

(上海理工大学机械工程学院 上海 200093)

摘要:几何误差是五轴数控机床重要误差源,针对传统测量方法仪器昂贵、测量周期长问题,提出基于球杆仪的五轴数控机床几何误差快速检测方法。对于机床的平动轴误差,利用多体系统理论及齐次坐标变换法,建立平动轴空间误差模型,通过球杆仪在同一平面不同位置进行两次圆轨迹,辨识出 4 项平动轴关键线性误差;针对五轴机床的转台和摆动轴,设计基于球杆仪的多条空间测试轨迹,完整求解出旋转轴 12 项几何误差。实验结果显示,所提方法获得转角定位误差与激光干涉仪法最大误差为 0.0018° ,利用检测结果进行机床空间误差补偿,测试轨迹偏差由 $16\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $4\text{ }\mu\text{m}$,为补偿前的 25%,验证了方法的有效性。提出的五轴机床几何误差检测方法方便、便捷,适用于工业现场。

关键词:五轴数控机床;几何误差;快速检测;球杆仪

中图分类号: TH39 TG80 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.50

Fast error identification method for five-axis machine tools based on double ball-bar

Jiao Anling, Chen Guangsheng

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Geometric errors are important error sources of the computer numerically controlled (CNC) five-axis machine tool. The conventional measurement methods and instruments are expensive and have a long measurement period. To address these issues, a fast identification method for geometric errors of a five-axis machine tool based on a double ball-bar is proposed. For the errors of linear axes of the machine tool, a spatial error model for linear axes is formulated, which is based on the multi-body system theory and homogeneous coordinate transformation. By measuring two circular trajectories of a double ball-bar (DBB) at different positions on the same plane, 4 key linear errors of the linear axes are identified. For the rotary table and swing axis of the five-axis machine tool, 12 geometric errors of the rotary axes are ascertained using the axial, radial, and conical measurement modes of the DBB, combined with the polynomial model. The experimental results of angle positing error show that the maximum error of the proposed method is 0.0018° , compared with that of the laser interferometer method. By using the identification results of the machine tool space error, the error of the test track is reduced from $16\text{ }\mu\text{m}$ to $4\text{ }\mu\text{m}$, which is 25% before compensation. It evaluates the effectiveness of the method. The proposed method of geometric error identification for five-axis machine tools is convenient, and suitable for the industrial field.

Keywords: five-axis machine tool; geometric error; fast identification method; double ball-bar

0 引 言

五轴数控机床是加工叶轮、叶片等复杂曲面工件的重要装备,在影响五轴机床精度的因素中,几何误差影响巨大,因此,对几何误差进行精确测量并补偿是提高五轴机床精度的关键^[1]。

激光干涉仪法对机床几何误差测量已经得到机床行业的认可,以英国 RENISHAW 公司产品最为典型。研究者分别提出 12 线法^[2]、15 线法^[3]等对机床平动轴误差进行测量。ISO230-6^[4]提出用激光干涉仪测量机床 4 条对角线运动时的空间位置误差,从而评估机床三维空间精度。任永强等^[5]通过测量机床体对角线的位置误差实现对机床三轴间的垂直度误差测量。美国光动公司^[6]提

出分步体对角线法,即测量机床 X 、 Y 、 Z 轴分步运动时 4 条对角线的误差来辨识得到空间位置误差。激光干涉虽然得到精确的几何误差,然而,基于激光干涉仪的测量方法不仅设备昂贵、而且方法步骤繁冗,需要熟练的操作者,消耗较长时间。

机床旋转轴误差的检测与辨识研究一直受到工业界的关注,虽然 RENISHAW 激光干涉仪在转台组件的配合下,能得到转角定位误差,但对旋转轴的其他 5 项误差无能为力。Jywe^[7]通过 R-TEST 对五轴机床转角定位误差进行测量与补偿。Lonkweic 等^[8]采用 R-TEST 对旋转轴相对于平动轴的运动中心位置进行了评价,R-TEST 虽测量效率高,但检测轨迹复杂且容易受到测量范围限制。Chen 等^[9]根据刀具位置相对于转轴角度的误差模型,辨识及补偿了旋转轴和刀具的位置及方向误差。Chen 等^[10]还利用经验模态检测 (empirical mode detection, EMD) 方法,对五轴超精密机床 C 轴的 4 个位置无关误差和 6 个位置相关误差进行分离和补偿。球杆仪操作简单,价格低廉,已形成了多项国际通用标准,被广泛应用于机床误差检测^[11-13]。Chen 等^[14]根据两轴联动圆轨迹的球中心导数和基于齐次变换的辨识模型,预测出四轴加工中心旋转轴综合误差。Xiang 等^[15]设计了球杆仪 3 种测量方式,根据运动方程描述 A 轴和 C 轴同步运动的圆周轨迹,从而得到旋转轴的 8 项几何误差。Wang^[16]提出了基于球杆仪试验和可重构机构模型的机床误差识别的统一方法,将球杆仪的测量数据、机构的结构参数和运动参数通过位移方程耦合在一起,利用实测数据,结合机构的运动学综合和鞍点规划,辨识得到了位置无关误差、位置相关误差及安装误差。Li 等^[17]提出了一种基于 NURBS 投影曲线的旋转轴空间误差解耦方法,将球杆仪的识别范围从二维平面扩展到空间半球,实现了平动轴与旋转轴的误差解耦。

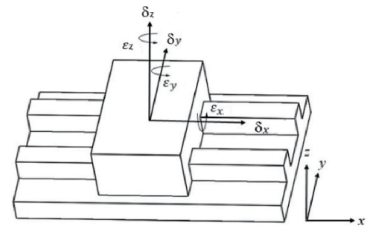
综上,五轴机床结构复杂,误差项目多达 40 多项,而传统的激光干涉仪法只能测量有限项目,调整测量时间冗长,效率低下,目前研究者已尝试采用球杆仪等仪器得到某关键项目,如回转行程为 360° 的转台的误差,应用范围有限,得到更多的关键误差项目和提高测量效率仍然是研究者面临挑战。本文基于球杆仪提出五轴数控机床平动轴和旋转轴多项关键误差辨识和测量方法,并实现快速检测。

1 基于球杆仪圆轨迹的五轴机床平动轴关键误差辨识

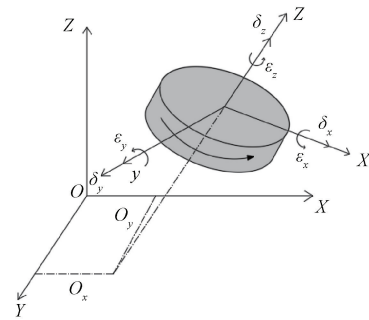
1.1 五轴机床平动轴误差建模

对于机床的每个平动轴或旋转轴,运动时均会在 6 个自由度方向产生误差,分别是沿 X 、 Y 、 Z 轴的平移误差 δ_x 、 δ_y 、 δ_z 和绕 X 、 Y 、 Z 轴的滚转误差 ϵ_x 、偏摆误差 ϵ_y 和

转角定位误差 ϵ_z ^[18] (旋转轴以 C 轴为例),如图 1 所示。五轴数控机床由 3 个平动轴和 2 个旋转轴组成,以 TTTRR 型五轴数控机床为例,其结构如图 2(a)所示。



(a) 平移轴的几何误差
(a) Geometric error of translation axis



(b) 旋转轴的几何误差
(b) Geometric error of rotation axis

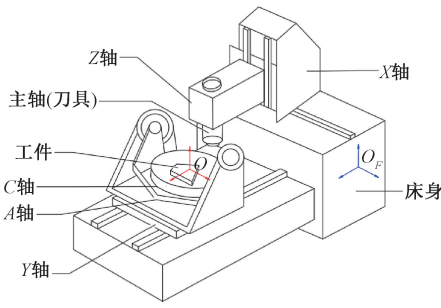
图 1 机床运动轴几何误差

Fig. 1 Geometric error of motion axis

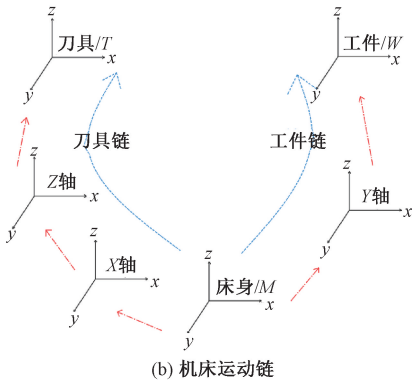
针对五轴机床的平动轴部分,可以看作 3 轴机床结构。根据多系统理论及齐次坐标变换进行建模^[19],以床身作为参考坐标系,在各运动部件上分别建立各自的局部坐标系,将机床分解为两条运动链:刀具运动链: $M \rightarrow X \rightarrow Z \rightarrow T$;工作台运动链: $M \rightarrow Y \rightarrow W$,如图 2(b)所示。理想情况下在运动时刀尖点和切削点是重合的,然而由于误差的存在, X 、 Y 、 Z 轴在执行完机床指令后,运动链末端点的实际位置与理想位置的偏差量 E 为:

$$\begin{cases} E = P_{T \rightarrow M} - P_{W \rightarrow M} \\ P_{W \rightarrow M} = T_{Y \rightarrow M} \Delta T_Y P_W \\ P_{T \rightarrow M} = T_{X \rightarrow M} \Delta T_X T_{Z \rightarrow X} \Delta T_Z P_T \end{cases} \quad (1)$$

其中, $P_{T \rightarrow M}$ 和 $P_{W \rightarrow M}$ 分别表示刀具切削点和工件上对应点在床身坐标系下的坐标; P_T 表示刀具切削点在刀具坐标系内的坐标; P_W 表示工件对应点在工件坐标系内的坐标;以上坐标均表示成 $[x \ y \ z \ 1]$ 齐次坐标形式。 E 表达为 $[\Delta x_s \ \Delta y_s \ \Delta z_s \ 1]$, Δx_s 、 Δy_s 和 Δz_s 分别是 E 在 x 、 y 、 z 坐标轴分量。 $T_{X \rightarrow M}$ 、 $T_{Y \rightarrow M}$ 、 $T_{Z \rightarrow X}$ 和 ΔT_X 、 ΔT_Y 、 ΔT_Z 分别表示 X 、 Y 、 Z 轴的理想运动矩阵和运动误差矩阵,表达形式见文献[20]。由式(1)可以得到刀具切削点相对于工件的空间位置误差在 X 、 Y 、 Z 轴方向上的分量,即机床刀具端的平动轴误差模型:



(a) 五轴数控机床结构示意图
(a) Diagram of five axis CNC machine tool structure



(b) 机床运动链
(b) Motion chain of machine tool with 5 axes

图2 五轴数控机床结构及运动链

Fig. 2 Structure and motion chain of a five axis CNC machine tool

$$\begin{cases} \Delta x_s = \delta_x(x) - \delta_x(y) + \delta_x(z) - y\varepsilon_z(y) + \\ z\varepsilon_y(x) - z\varepsilon_y(y) + yS_x(y) - zS_x(z) \\ \Delta y_s = \delta_y(x) - \delta_y(y) + \delta_y(z) - x\varepsilon_z(y) - \\ z\varepsilon_x(x) + z\varepsilon_x(y) - zS_y(z) \\ \Delta z_s = \delta_z(x) - \delta_z(y) + \delta_z(z) + x\varepsilon_y(y) + \\ y\varepsilon_x(y) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\delta_m(n)$ 、 $\varepsilon_m(n)$ (m, n 对应下标为 x, y, z) 分别为第 n 轴 m 方向的线性误差和角度误差, $S_m(n)$ ($m, n = x, y, z$) 为 m 与 n 轴间的垂直度误差。

$S_m(n)$ 是与进给轴位置无关的固定误差值, 以 XY 轴间垂直度误差 $S_x(y)$ 为例, 如图3所示, $S_x(y)$ 会对 X 轴和 Y 轴产生不同的影响, 当以 X 轴为垂直度基准, Y 轴的实际运动会存在 X 方向的偏移, 其值为 $-yS_x(y)$, 可以等效为 Y 轴在 X 方向的线性误差, 其与误差 $\delta_y(x)$ 均表现为变量 x 函数, 不妨令 $\delta'_y(x) = \delta_y(x) - yS_x(y)$ 。

同理, 令:

$$\begin{cases} \delta'_x(y) = \delta_x(y) - yS_x(y) \\ \delta'_y(z) = \delta_y(z) - zS_y(z) \\ \delta'_z(x) = \delta_z(x) - xS_z(x) \end{cases} \quad (3)$$

根据文献[21], 平动轴角度误差 $\varepsilon_m(n)$ 对机床误差

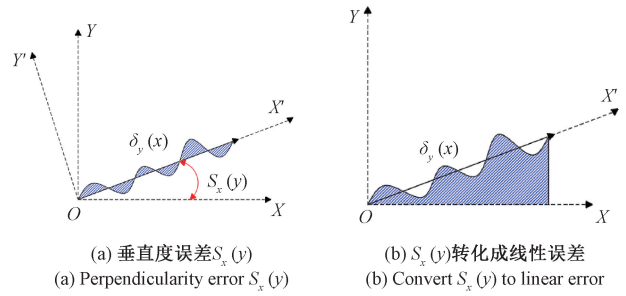


图3 平动轴垂直度到线性误差转化

Fig. 3 Conversion from perpendicularity of the translation axis to linear error

的贡献很小, 可以忽略, 式(2)写成:

$$\begin{cases} \Delta x_s = \delta'_x(x) - \delta'_x(y) + \delta'_x(z) \\ \Delta y_s = \delta'_y(x) - \delta'_y(y) + \delta'_y(z) \\ \Delta z_s = \delta'_z(x) - \delta'_z(y) + \delta'_z(z) \end{cases} \quad (4)$$

1.2 球杆仪测量原理

球杆仪测量误差原理如图4所示, 坐标系 $OXYZ$ 与机床进给轴方向一致, 球杆仪两端精密小球分别安装在工具杯和中心杯上, 球心坐标为 $M(X_t, Y_t, Z_t)$ 和 $N(X_w, Y_w, Z_w)$, 并分别与机床主轴和工作台相连, 两球之间有位移传感器, 用于测量杆长 MN 之间长度变化。当球杆仪随主轴在某平面进行理想半径为 R 圆周测试, 杆长变化轨迹为 T 。存在基本近似公式^[22]:

$$\Delta R \cdot R = (X_t - X_w) \Delta_x + (Y_t - Y_w) \Delta_y + (Z_t - Z_w) \Delta_z \quad (5)$$

其中, Δ_x 、 Δ_y 和 Δ_z 分别为机床误差在 X 、 Y 和 Z 坐标方向的误差分量, ΔR 是由这些误差引起的球杆仪的伸长量, 当进给速度足够慢, 机床的动态误差可以忽略不计, 误差主要由几何误差组成。

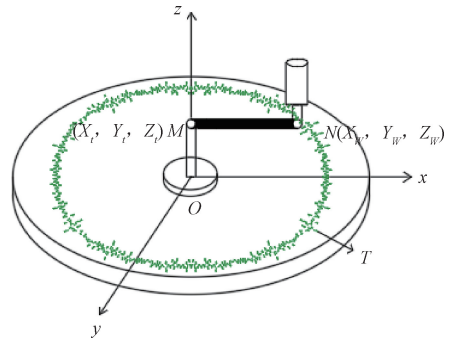


图4 球杆仪圆轨迹误差测量原理

Fig. 4 Principle of measuring circular trajectory error by ball-bar

1.3 平动轴关键误差项的辨识

为了得到式(4)中误差项, 设计在 XOY 平面内的球

杆仪测试圆轨迹,为避免圆轨迹测试容易出现线性相关不能求解问题,测试轨迹由2个不同圆心的圆组成,如图5所示。圆心分别为 O_1 和 O_2 。

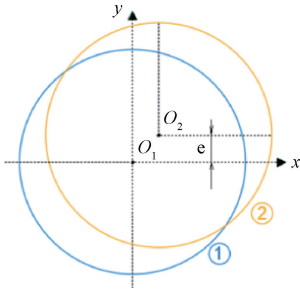


图5 XOY平面内的两条检测轨迹

Fig. 5 Two detection trajectories in the XOY plane

测试XOY平面内,由于Z向没有运动, $\delta'_x(z)$ 、 $\delta'_y(z)$ 为常值,对球杆仪的伸长没有贡献,并且机床常值误差可通过对刀操作来消除,式(5)变为:

$$R \cdot \Delta R = X \cdot \Delta x_s + Y \cdot \Delta y_s \quad (6)$$

同时:

$$\begin{cases} \Delta x_s = \delta_x(x) - \delta'_x(y) \\ \Delta y_s = \delta_y(x) - \delta'_y(y) \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\delta_x(x)$ 为X轴的定位误差, $\delta'_x(y)$ 为X轴在XOY平面内的直线度, $\delta_y(y)$ 为Y轴的定位误差, $\delta_y(x)$ 为Y轴在XOY平面内的直线度。

将式(7)中的误差项表示为高阶位置相关的多项式函数,当阶数为5时,这些误差项表达为:

$$\begin{cases} \delta_x(x) = a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4 + a_5 \cdot x^5 \\ \delta_y(y) = b_1 \cdot y + b_2 \cdot y^2 + b_3 \cdot y^3 + b_4 \cdot y^4 + b_5 \cdot y^5 \\ \delta_y(x) = c_1 \cdot x + c_2 \cdot x^2 + c_3 \cdot x^3 + c_4 \cdot x^4 + c_5 \cdot x^5 \\ \delta'_x(y) = d_1 \cdot y + d_2 \cdot y^2 + d_3 \cdot y^3 + d_4 \cdot y^4 + d_5 \cdot y^5 \end{cases} \quad (8)$$

式中: a_i , b_i , c_i , d_i ,为待定系数, $i=1, \dots, 5$ 。

对于圆轨迹1,假定整圆周运动共采集 n 个数据,记录伸长量值得到向量 $\Delta R_1 = [\Delta r_1 \ \Delta r_2 \ \dots \ \Delta r_n]$,各采样点所对应的坐标组成向量 $X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]$ 、 $Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]$,联立式(6)~(8),得到误差与位置的关系式:

$$R \cdot \Delta R_1 = Q_1 \cdot C \quad (9)$$

其中,

$$Q_1 = \begin{bmatrix} x_1^2 & \dots & x_1^6 & x_1 y_1 & \dots & x_1 y_1^5 \\ x_2^2 & \dots & x_2^6 & x_2 y_2 & \dots & x_2 y_2^5 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & \dots & x_n^6 & x_n y_n & \dots & x_n y_n^5 \\ x_1 y_1 & \dots & x_1^5 y_1 & y_1^2 & \dots & y_1^6 \\ x_2 y_2 & \dots & x_2^5 y_2 & y_2^2 & \dots & y_2^6 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n y_n & \dots & x_n^5 y_n & y_n^2 & \dots & y_n^6 \end{bmatrix}$$

$$C = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ \dots \ d_4 \ d_5]^T。$$

同样原理,对于轨迹2,得到向量 ΔR_2 , Q_2 ,将两轨迹的对应向量合并,写成如下形式,得到 Q 和 ΔR :

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix}, \Delta R = \begin{bmatrix} \Delta R_1 \\ \Delta R_2 \end{bmatrix}$$

根据最小二乘法,得到(9)式中系数的估计值:

$$C = [Q^T Q]^{-1} Q^T (R \cdot \Delta R) \quad (10)$$

将 C 代入式(8)得到 $\delta_x(x)$, $\delta'_x(y)$, $\delta_y(y)$ 和 $\delta_y(x)$ 。

同理,建立YOZ测试平面,可以得到式(4)中其余平动轴误差项。

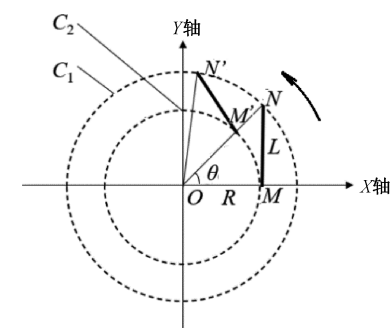
2 基于球杆仪的旋转轴误差辨识

五轴机床2个旋转轴,受运动范围和结构的差异,误差测量方法也会不同,以图2中所示TTTRR型五轴数控机床为例,旋转轴分为转台和摆动轴。

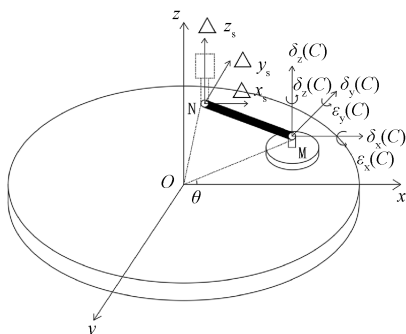
2.1 转台的误差测量与辨识

转角定位误差是旋转轴最重要的误差源。转角定位误差的敏感方向为其旋转轨迹的切线方向。 C 轴转台为例,将球杆仪安装如图6(a)所示,点 N 、 M 分别为球杆仪两端小球球心的初始安装位置,分别位于机床主轴端和工作台端。初始位置工作台端小球位于 X 轴线上,球杆仪轴线 MN 垂直于 X 轴。检测过程中,控制旋转轴绕自身轴线进行旋转运动,并使机床主轴端小球和旋转轴端小球做同步圆周运动。主轴端小球运动轨迹为圆周 C_1 ,工作台端小球运动轨迹为圆周 C_2 ,将 C_1 所在的平面与旋转轴轴线的交点记为 O 。检测过程中 OM 始终垂直于 NM ,将工件球的回转半径 $|OM|$ 记为 R ,旋转轴转动 θ 时杆长变化量记为 ΔD 。

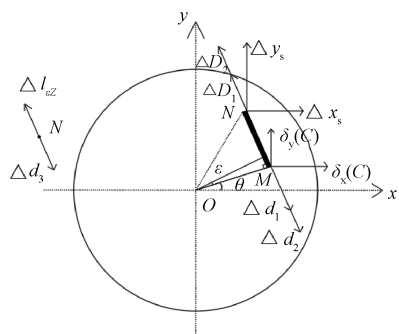
当机床联动时进给速度较慢,运动轴的动态误差可以忽略,此时引起 ΔD 的误差有两类:刀具端 N 点引入的机床平动轴误差 Δx_s 、 Δy_s 、 Δz_s 和工作台端 M 点引入的由旋转轴6项误差所造成的影响,如图6(b)所示。在数值上, ΔD 是上述各项误差在 M 、 N 两点引起线性位移在 MN 方向上的投影的线性叠加,如图6(c)所示。



(a) 切向测量原理
(a) Tangential measurement principle



(b) 球杆仪所引入误差
(b) Error introduced by the ball and club instrument



(c) XOY平面各误差切向分量
(c) Tangential components of errors in the XOY plane

图6 球杆仪切向测量原理及误差源分析

Fig. 6 Tangential measurement principle and error source analysis by ball-bar

根据三角关系:

$$\begin{cases} \Delta D_1 = -\Delta x_s \sin \theta \\ \Delta D_2 = \Delta y_s \cos \theta \\ \Delta d_1 = \delta_x(C) \sin \theta \\ \Delta d_2 = -\delta_y(C) \cos \theta \\ \Delta d_3 = \varepsilon_z(C) R \end{cases} \quad (11)$$

其中, ΔD_1 、 ΔD_2 分别是主轴端平动误差 Δx_s 、 Δy_s 引起球杆仪的伸长, Δd_1 、 Δd_2 和 Δd_3 分别是旋转轴平动误差 $\delta_x(C)$ 、 $\delta_y(C)$ 和 $\varepsilon_z(C)$ 引起球杆仪的伸长, 由于 $\varepsilon_x(C)$ 、 $\varepsilon_y(C)$ 、 Δz_s 和 $\delta_z(C)$ 引起的位移垂直与球杆仪轴线, 与误差敏感方向垂直, 引起的伸长忽略不计。

球杆仪的总伸长量为:

$$\Delta D = \Delta D_1 + \Delta D_2 - \Delta d_1 - \Delta d_2 - \Delta d_3 \quad (12)$$

得到转角定位误差:

$$\varepsilon_z(C) =$$

$$\frac{\Delta D - \Delta y_s \cos \theta + \Delta x_s \sin \theta - \delta_y(C) \cos \theta + \delta_x(C) \sin \theta}{R} \quad (13)$$

对于旋转轴的其他 5 项误差, 包括线性误差 $\delta_x(C)$ 、 $\delta_y(C)$ 、 $\delta_z(C)$ 和滚转误差 $\varepsilon_x(C)$ 、偏摆误差 $\varepsilon_y(C)$ 和转角定位误差 $\varepsilon_z(C)$, 根据标准 ISO230-1^[23], 通过 3 种球杆仪轴向测量模式可以分别得到三项线性误差 $\delta_x(C)$ 、 $\delta_y(C)$ 、 $\delta_z(C)$, 如图 7(a)、(b)、(c) 所示, 根据 2 种锥形测量模式可以得到滚转误差 $\varepsilon_x(C)$ 、偏摆误差 $\varepsilon_y(C)$, 如图 7(d) 所示。

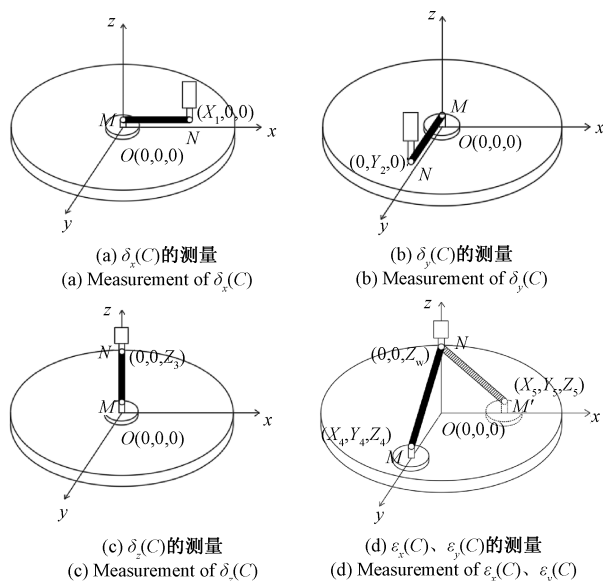


图7 旋转轴(C轴)误差的测量

Fig. 7 Measurement of rotation C-axis error

2.2 摆动轴的误差测量与辨识

与转台不同, 机床的摆动轴运动范围有限, 典型如 $[-90, 90]^\circ$, 由于结构限制, 上述的误差辨识方法不适用于摆动轴误差测量。

将摆动 A 轴运动时 3 项线性误差记为: $\delta_x(A)$ 、 $\delta_y(A)$ 、 $\delta_z(A)$, 3 项角度误差记为: $\varepsilon_x(A)$ 、 $\varepsilon_y(A)$ 、 $\varepsilon_z(A)$ 。如图 8 所示, 分别建立 A 轴、C 轴坐标系, 将 A 轴和 C 轴轴线的交点记为原点 O_A , C 轴轴线与转台台面的交点记为 O_C 。M 点为球杆仪工件台端小球球心, N 点为刀具端小球球心, O_A 与 M 点的距离为 H, 球杆仪杆长为 L。

首先, 将球杆仪轴线平行于 A 轴轴线进行安装, 测量时 C 轴静止, 工件球和刀具球绕 A 轴轴线做旋转运动, 旋转角度为 α 。工件球在 A 轴坐标系中的安装坐标为: $(0, 0, H)$, 理想状态下不存在几何误差, 此时理想 M

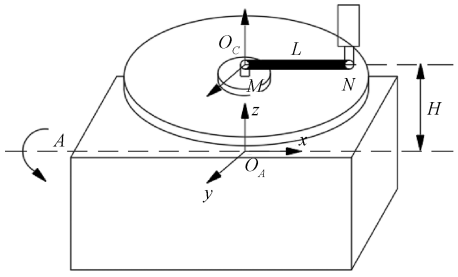


图8 轴向测量A轴几何误差示意图

Fig. 8 Diagram of axial measurement A-axis geometric error

点坐标:

$$\mathbf{P}_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -H\sin\alpha \\ H\cos\alpha \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

考虑几何误差时, M 的实际坐标:

$$\mathbf{P}'_m = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(A) & \varepsilon_y(A) & \delta_x(A) \\ \varepsilon_z(A) & 1 & -\varepsilon_x(A) & \delta_y(A) \\ -\varepsilon_y(A) & \varepsilon_x(A) & 1 & \delta_z(A) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ -H\sin\alpha \\ H\cos\alpha \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

刀具球安装坐标为: $(L, 0, H)$ 。在检测过程中, Y, Z 轴和 A 轴需保持同步运动, 因此测量时不可避免地引入了 Y, Z 平动轴的联动误差, 需将其去除。不考虑几何误差时, 理想 N 点坐标:

$$\mathbf{P}_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} L \\ 0 \\ H \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

去除平动轴误差后, 实际 N 点坐标:

$$\mathbf{P}'_n = \begin{bmatrix} L - \Delta x_s \\ -H\sin\alpha - \Delta y_s \\ H\cos\alpha - \Delta z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

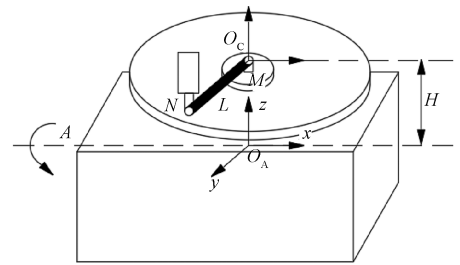
结合式(14)~(17), 通过空间两点间距离公式计算出球杆仪理论杆长, 将其与实际杆长等式进行联立, 得:

$$|MN| = [(\varepsilon_z(A)H\sin\alpha + \varepsilon_y(A)H\cos\alpha + \delta_x(A) - L + \Delta x_s)^2 + (-\varepsilon_x(A)H\cos\alpha + \delta_y(A) + \Delta y_s)^2 + (-\varepsilon_x(A)H\sin\alpha + \delta_z(A) + \Delta z_s)^2]^{\frac{1}{2}} = L + \Delta L1 \quad (18)$$

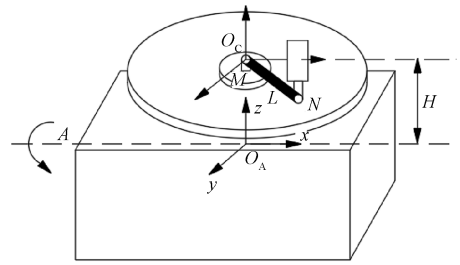
其中, $\Delta L1$ 表示轴向测量模式下球杆仪的杆长变化量。将上式两边取平方并忽略误差的高次项, 化简得到轴向测量模式的杆长变化量:

$$\Delta L1 = \varepsilon_z(A)H\sin\alpha + \varepsilon_y(A)H\cos\alpha + \delta_x(A) + \Delta x_s \quad (19)$$

将球杆仪沿 A 轴径向摆放, 如图9(a)所示, 刀具球安装坐标为: $(0, L, H)$ 。



(a) 径向测量模式
(a) Radial measurement mode



(b) “三角法”测量模式
(b) Triangulation measurement mode

图9 A轴几何误差测量示意图

Fig. 9 Diagram of A-axis geometric error measurement

参照前文, 同理可得径向测量时杆长变化量:

$$\Delta L2 = -\varepsilon_x(A)H - (\delta_y(A) + \Delta y_s)\cos\alpha - (\delta_z(A) + \Delta z_s)\sin\alpha \quad (20)$$

如图9(b)所示, 球杆与 A 轴夹角为 θ , 此时, 刀具球安装坐标为: $(L\cos\theta, L\sin\theta, H, 1)$, 同理可得:

$$\Delta L3 = -L\cos\theta(\varepsilon_z(A)\sin\alpha H + \varepsilon_y(A)\cos\alpha H + \delta_x(A)) - L\sin\theta(\delta_y(A)\cos\alpha + \Delta y_s\cos\alpha + \delta_z(A)\sin\alpha + \Delta z_s\sin\alpha) \quad (21)$$

在上述3种测量模式下, 改变 H 值, 进行6组测量, 参数如表1所示。

结合6次杆长测量结果与式(19)~(21), 解耦得到 A 轴的6项误差。

表 1 A 轴几何误差测量参数

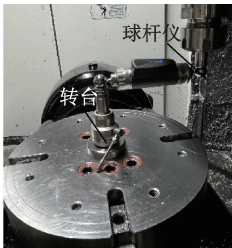
Table 1 A-axis geometric error measurement parameters

项目	工件球坐标	刀具球坐标
三次轴向	$(0,0,H1)$	$(L,0,H1)$
	$(0,0,H2)$	$(L,0,H2)$
	$(0,0,H3)$	$(L,0,H3)$
一次径向	$(0,0,H1)$	$(0,L,H1)$
两次三角摆放	$(0,0,H1)$	$(L\cos\theta,L\sin\theta,H1)$
	$(0,0,H2)$	$(L\cos\theta,L\sin\theta,H2)$

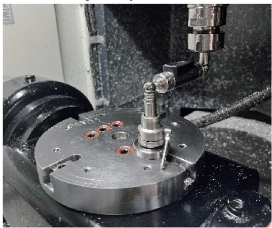
3 五轴机床误差辨识实验与验证

3.1 平动轴关键误差辨识与验证

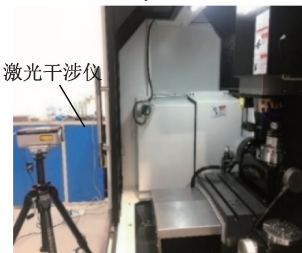
根据已建立的机床关键误差项的多项式误差模型,结合球杆仪的两轨迹法可得到 4 项线性误差。在 TC-E650 雕铣机的工作台进行了实验,球杆仪采用 RENISHAW 公司的 QC20-W,实验现场如图 10(a)所示。



(a) 两轨迹法测量误差
(a) Measurement error of two trajectory methods



(b) 球杆仪测旋转轴误差
(b) Measurement of rotation axis error by ball-bar

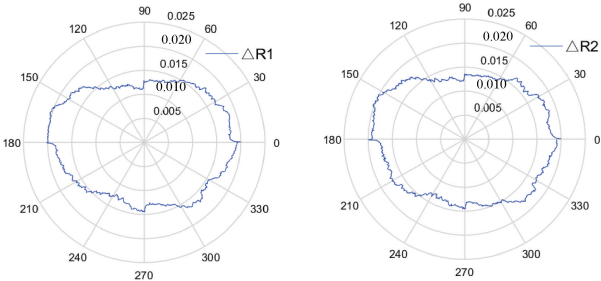


(c) 激光干涉仪测量误差
(c) Measurement error of laser interferometer

图 10 误差测量现场

Fig. 10 Error measurement site

以 XOY 平面测试为例,两轨迹法测试的参数选择如下:球杆仪杆长为 100 mm,工件坐标系下的两条圆轨迹的圆心机械坐标分别为 $(0,0,0)$ 、 $(10,10,0)$,得到球杆仪原始杆长伸长量如图 11 所示。



(a) 测试轨迹1伸长量
(a) Elongation of trajectory 1
(b) 测试轨迹2伸长量
(b) Elongation of trajectory 2

图 11 球杆仪平动轴测量原始伸长量

Fig. 11 Measurement of original elongation on the horizontal axis of the ball-bar

利用最小二乘法求解多项式模型的系数,辨识结果如表 2 所示。

表 2 多项式系数辨识结果

Table 2 Polynomial coefficient identification results

系数	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$
a_i	-4.682×10^{-4}	1.317×10^{-6}	2.676×10^{-8}	-7.697×10^{-11}	-6.949×10^{-13}
b_i	8.689×10^{-7}	5.981×10^{-9}	-2.146×10^{-11}	5.148×10^{-14}	-1.215×10^{-4}
c_i	-1.859×10^{-5}	-1.219×10^{-7}	2.099×10^{-9}	8.274×10^{-12}	-1.846×10^{-13}
d_i	1.5108×10^{-6}	1.1450×10^{-8}	-6.328×10^{-11}	-2.402×10^{-13}	-8.446×10^{-5}

根据多项式结果,进一步辨识得到机床平动轴误差 $\delta_x(x),\delta_x(y),\delta_y(x),\delta_y(y)$,如图 12(a)~(d),利用式(7),进一步得到 $\Delta x_s,\Delta y_s$,如图 12(e),(f)。

为验证结果的正确性,利用 API 公司 XD Laser 进行了测量,XY 测轴线交点为 $(0,0,0)$,得到机床平动轴原始的定位误差和直线度误差如图 12 所示。

对比结果表明,球杆仪所得 $\delta_x(x),\delta_x(y),\delta_y(x),\delta_y(y)$ 与激光干涉仪测量结果所得曲线整体走势相近,二者具有良好的一致性,所提出的关键误差辨识法有效。

3.2 旋转轴误差辨识与验证

对于转台误差,以 TC-E650 雕铣机的 C 轴转台为对象进行了实验,转台旋转范围 $0^\circ\sim360^\circ$,实验前机床充分预热,测量现场如图 10(b)所示。工件坐标系的机械坐标为 $(-168.706,-134.158,-182.330)$,选用 100 mm 球杆,进行 3 次水平模式测量。工具杯在工件坐标系中的安装坐标依次为 $(100,0,0),(0,100,0),(0,0,100)$,两次锥形安装,M 坐标依次为 $(50,0,0),(0,50,0)$,进给率 $F=100\text{ mm/min}$ 。 $\delta_x(C),\delta_y(C),\delta_z(C),\varepsilon_x(C),\varepsilon_y(C)$ 结果如图 13 所示。

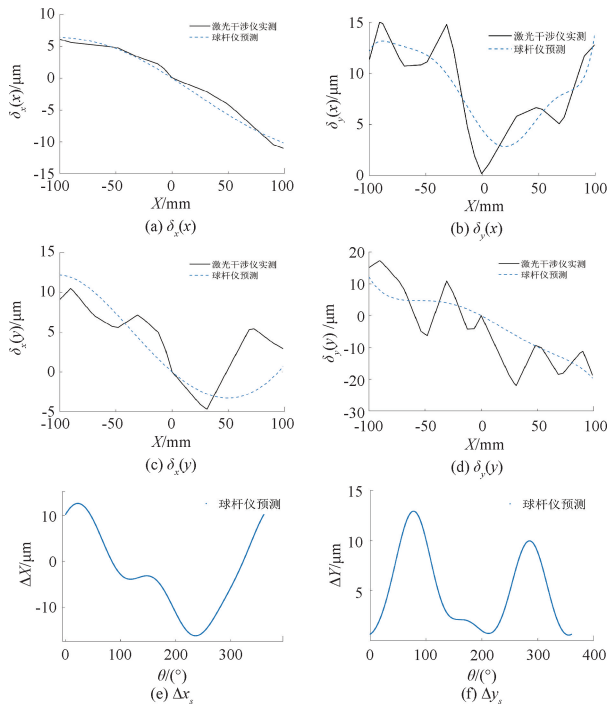


图 12 XOY 平面关键误差测量与预测对比

Fig. 12 Comparison of key error measurement and prediction in XOY plane

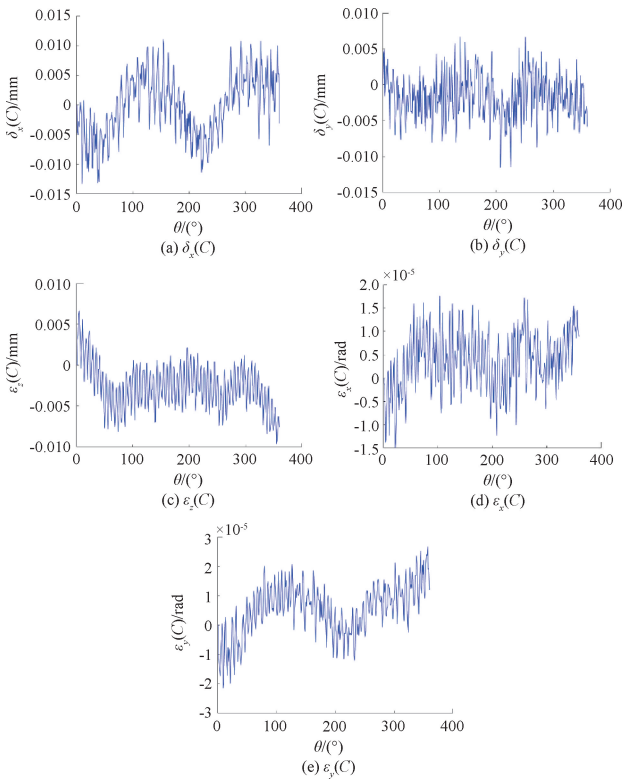
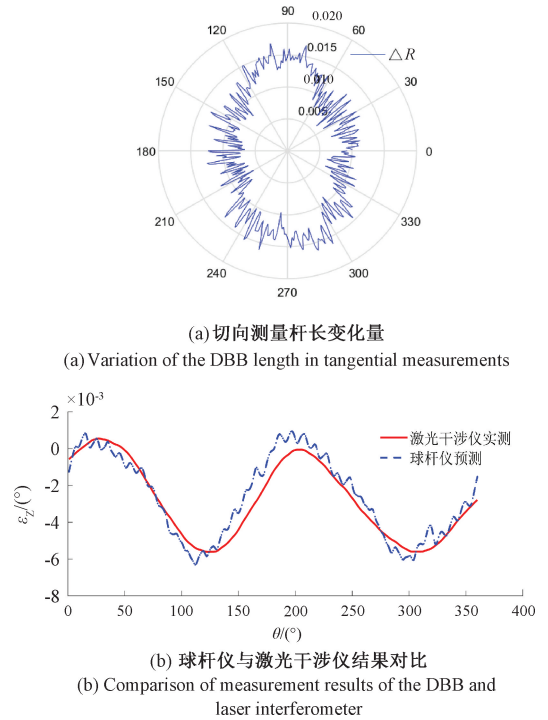


图 13 旋转轴 5 项几何误差测量结果

Fig. 13 Measurement results of five geometric errors of the rotating Axis

可以看出, $\delta_x(C)$ 、 $\delta_y(C)$ 、 $\delta_z(C)$ 误差范围在 $[-0.013\ 3, 0.011\ 1]$ mm, 角度误差 $\varepsilon_x(C)$ 、 $\varepsilon_y(C)$ 相对较小, 范围在 $[-2.155\ 9 \times 10^{-5}, 2.678 \times 10^{-5}]$ rad。

针对转角定位误差刀具和转轴同步运动, 球杆仪 MN 两端安装坐标为 $(50, 0, 0)$ 、 $(50, 100, 0)$, 测量得到球杆仪伸长量如图 14(a) 所示。选用 API 激光干涉仪测得平动轴各项误差, 并将误差数据带入到平动轴误差模型, 得到 Δx_s 和 Δy_s , 代入式 (13) 得到转角定位误差, 如图 14(b) 所示。验证实验采用 RENISHAW XL 激光干涉仪和 XR20-W 转角测量组件完成, 测量分辨率 0.1 arcsec, 精度 ± 0.1 arcsec, 转轴旋转范围 $0^\circ \sim 360^\circ$, 每旋转 0.5° 时转轴暂停并等待, 共采集 721 个误差值, 测量现场如图 10(c) 所示, 测量结果如图 14(b) 所示。

图 14 转角定位误差预测与实测对比
Fig. 14 Comparison of predicted and measured angle positioning errors

RENISHAW 激光干涉仪和球杆仪分别得到了转角定位误差, 二者间误差范围为 $[-0.001\ 8, 9.186\ 6 \times 10^{-4}]^\circ$, 最大值小于 2.59%。本文提出的基于球杆仪的测量结果与激光干涉仪测量结果具有很好的一致性, 所提方法能较准确地预测转角定位误差, 解决了联动误差难以分离的问题。

对于摆动轴, 仍以该机床的 A 轴为例测量, 选用球杆仪 100 mm 杆长, 共进行 6 组测量, H 值分别为 157.785、177.957、233.547 mm, 进给率 $F = 100$ mm/min。将 6 次

4 结 论

本文提出一种基于球杆仪的五轴数控机床几何误差的快速测量和分离方法,结论如下:

1) 基于多体系统理论及齐次坐标变换法建立了TTTTR型机床的平动轴误差模型,并通过关键误差项对模型进行化简。以多项式拟合法对关键线性误差进行建模,根据球杆仪的两条圆弧轨迹,使用最小二乘法求解出预设多项式的系数,辨识出了平动轴的关键线性误差项。

2) 分别建立了转台和摆动轴几何误差的多项式模型,针对转台,将球杆仪分别安装在平行于 X 、 Y 、 Z 轴和锥形的位置,通过简单的5次测量,依次分离出转台的3项线性误差和2项角度误差;建立了包含平动轴运动误差和旋转轴几何误差的转角定位误差模型,基于球杆仪切向测量方法,辨识得到转角定位误差;针对摆动轴,在球杆仪轴向、径向和三角法测量模式下,更改参数进行6组测量,测量时平动轴与摆动轴三轴联动,模型中去除了联动误差的影响,最终解耦出6项误差。

3) 在五轴数控机床上进行实验,通过预测误差的方式验证了基于球杆仪辨识平动轴误差方法的准确性;用球杆仪和激光干涉仪分别测量转角定位误差,二者间最大误差为 0.0018° ,不大于2.59%,通过空间误差补偿实验,误差降为原有误差25%,验证了所提方法的有效,该方法快速、简单,减少了误差检测设备的安装和测量时间,适用于工业现场。

参考文献

- [1] 陶浩浩,陈丰,李同杰,等.一种基于新灵敏度指标的五轴数控机床关键几何误差辨识方法[J].仪器仪表学报,2022,43(12):120-128.
TAO H H, CHEN F, LI T J, et al. A key geometric error identification method for five-axis NC machine tool based on new sensitivity index[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2022, 43(12):120-128.
- [2] SU S. Identification method for errors of machining center based on volumetric error model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(7):121-125.
- [3] CHEN G, YUAN J, NI J. A displacement measurement approach for machine geometric error assessment[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(1):149-161.
- [4] ISO 230-6:2002. Test code for machine tools — Part 6: Determination of positioning accuracy on body and face diagonals (Diagonal displacement tests)[S]. Geneva, ISO, 2002.

- [5] 任永强,杨建国,沈金华,等.基于体对角线的机床垂直度误差的高效测量分析[J].中国机械工程,2005,16(8):1435-1438.
REN Y Q, YANG J G, SHEN J H, et al. Analysis on efficient measurement of squareness errors along body diagonals for machine tools[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(8):1435-1438.
- [6] WANG C. Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors. Part I: Basic theory[J]. Review of scientific instruments, 2000, 71(10):3933-3937.
- [7] JYWE W Y. Laser R-test for angular positioning calibration and compensation of the five-axis machine tools[J]. Applied Sciences, 2021, 11.
- [8] LONKWIC P, JÓZWIK J, KURIC I, et al. R-test static measurement of the 5-axis CNC machining centre rotary axis kinematic centre error[J]. Manufacturing Technology, 2014, 14(2):186-193.
- [9] CHEN Q, 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]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(3-4).
- [10] CHEN Q, LI W, JIANG C, et al. Separation and compensation of geometric errors of rotary axis in 5-axis ultra-precision machine tool by empirical mode decomposition method[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68:1509-1523. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.06.057.
- [11] DING S, WU W, HUANG X, et al. Single-axis driven measurement method to identify position-dependent geometric errors of a rotary table using double ball bar[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(5):1715-1724.
- [12] LI Q, WANG W, ZHANG J, et al. All position-dependent geometric error identification for rotary axes of five-axis machine tool using double ball bar[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(5):1351-1366.
- [13] XU K, LI G, HE K, et al. Identification of position-dependent geometric errors with non-integer exponents for Linear axis using double ball bar[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 170:105326.
- [14] CHEN J X, LIN S W, HE B W. Geometric error measurement and identification for rotary table of multi-axis machine tool using double ballbar[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 77:47-55.

- [15] XIANG S, YANG J, ZHANG Y. Using a double ball bar to identify position-independent geometric errors on the rotary axes of five-axis machine tools [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(9): 2071-2082.
- [16] WANG X D H. A reconfigurable mechanism model for error identification in the double ball bar tests of machine tools [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture: Design, research and application, 2021, 165(1): 103737.
- [17] LI W, FENG Y, ZHANG S, et al. Research on geometric error modelling and decoupling of machine tool based on NURBS projection curve [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117(9-10): 2727-2740.
- [18] JIAO A, CHEN G. A rapid identification method for angular positioning error of rotary axes for machine tools with 5 axes based on a double ball-bar [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 126(3-4): 1567-1575.
- [19] 项四通, 杨建国, Altintas Y, 等. 五轴数控机床空间误差测量、建模与补偿技术研究 [J]. 金属加工(冷加工), 2018(10): 84.
- XIANG S T, YANG J G, ALTINTAS Y, et al. Modeling and compensation of volumetric errors for five-axis machine tools [J]. Metal Working (Metal Cutting), 2018 (10): 84.
- [20] CHEN G, ZHANG Y, YUAN B. A method of identifying geometric errors for machine tools with 3 axes based on a set of sine functions using double ballbar [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(1): 559-571.
- [21] JIANG X, CRIPPS R J. A method of testing position independent geometric errors in rotary axes of a five-axis machine tool using a double ball bar [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 89: 151-158.

- [22] 陈光胜, 李郝林. 多轴数控机床转台误差快速检测与分离 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2499-2505.
- Chen G SH, Li H L. Fast geometric error measurement and identification of rotary table for multi-axis CNC machining tools [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2013, 34(11): 2499-2505.
- [23] ISO-230-1:2012 Test code for machine tools—— Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions [S]. Geneva, ISO, 2012.

作者简介



焦安铃, 2020 年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 2023 年于上海理工大学获得硕士学位, 现为上海微电子装备股份有限公司机械工程师, 主要研究方向为数控装备误差检测及补偿。

E-mail: jaler525@163.com

Jiao Anling received her B. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 2020, and received her M. Sc. degree from University of Shanghai for Science and Technology in 2023. She is currently a mechanical engineer at Shanghai Microelectronics Equipment Co., LTD. Her main research interests include CNC equipment error detection and compensation.



陈光胜 (通信作者), 1995 年于山东大学获得学士学位, 2005 年于西安交通大学获得硕士学位, 2011 年于西安交通大学获得博士学位, 现为上海理工大学教授, 主要研究方向为数控技术及装备、误差检测及补偿。

E-mail: cgs-168@163.com

Chen Guangsheng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shandong University in 1995, received his M. Sc. degree from Xi'an Jiaotong university in 2005, and received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong university in 2011. He is currently a professor at University of Shanghai for Science and Technology. His main research interests include CNC technology and equipment, error measurement and compensation.