

文章编号 1004-924X(2018)11-2684-11

转台-摆头式五轴机床几何误差测量及辨识

郭世杰^{1,2,3}, 姜歌东^{1,2,3*}, 梅雪松^{1,2,3}, 陶 涛^{1,2,3}

- (1. 陕西省智能机器人重点实验室, 陕西 西安 710049;
2. 机械制造与系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049;
3. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:为降低转动轴几何误差对转台-摆头式五轴机床精度的影响,提出了基于球杆仪的位置无关几何误差测量和辨识方法。基于多体系统理论及齐次坐标变换方法建立了转台-摆头式五轴机床位置无关几何误差模型,依据旋转轴不同运动状态下的几何误差影响因素建立基于圆轨迹的四种测量模式,并实现 10 项位置无关几何误差的辨识。利用所建立的几何误差模型进行数值模拟,确定转动轴的 10 项位置无关几何误差对测量轨迹的影响。最后,采用误差补偿的形式实验验证所提出的测量及辨识方法的有效性,将位置无关几何误差补偿前后的测量轨迹进行比较。误差补偿后 10 项位置无关几何误差的平均补偿率为 70.4%,最大补偿率达到 88.4%,实验结果表明所提出的建模和辨识方法可用于转台-摆头式五轴机床转动轴精度检测,同时可为机床精度评价及几何精度提升提供依据。

关键词:五轴机床;转动轴;位置无关几何误差;误差测量;误差辨识

中图分类号:TH161; TG159 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182611.2684

Measurement and identification of geometric errors for turntable-tilting head type five-axis machine tools

GUO Shi-jie^{1,2,3}, JIANG Ge-dong^{1,2,3*}, MEI Xue-song^{1,2,3}, TAO Tao^{1,2,3}

- (1. Shaanxi Key Laboratory of Intelligent Robots, Xi'an 710049, China;
2. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an 710049, China;
3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

* Corresponding author, E-mail:gdjiang@mail.xjtu.edu.cn

Abstract: In order to reduce the influence of the geometrical error of rotary axis on the accuracy of turntable-tilting head type five-axis machine tools, a Position-Independent Geometric Error (PIGE) measurement and identification method based on the measurement of the Double Ball Bar (DBB) is proposed. Firstly, based on multi-body system theory and homogeneous coordinate transformation method, the position-independent geometric error model of turntable-tilting head type five-axis machine tool position was established. Four measurement model based on circular path measurement were established according to the influence factors of geometric errors under different motion states of rotary axes, and 10 position-independent geometric errors were identified. Secondly, the numerical

收稿日期:2018-01-16;**修订日期:**2018-02-25.

基金项目:长江学者和创新团队发展计划资助项目(No. IRT_15R54);陕西省科技统筹创新工程计划项目-智能机器人公共科技服务平台建设资助项目(No. 2015KTZDGY-02-01)

simulation was carried out by using the established geometric error model to quantify the influence of 10 geometric errors on the measurement trajectory of the rotary axes. Finally, the geometric error compensation was conducted to validate the validity of the proposed measurement and identification methods, and the measurement trajectories before and after the position-independent geometric error compensation were compared. The average compensation rate of the position-independent geometric errors of the 10 positions is 70.4%, and the maximum compensation rate is 88.4%. The experimental results show that the proposed modeling and identification method can be used to detect the accuracy of rotary axis, at the same time which can be used for the machine tool accuracy evaluation and provide the guidance for improving the accuracy.

Key words: five-axis machine tool; rotary axes; position-independent geometric error; error measurement; error identification

1 引 言

转台-摆头式五轴机床属于典型多轴联动机床,因具有刚性好、工艺范围广、运动灵活的特征,而广泛应用在转动机械装备的叶轮和叶片加工中^[1-2]。几何误差和热误差是影响五轴机床精度的关键因素^[3-4],其中几何误差占机床总误差的25%~30%^[5-7]。在温度可控的条件下,几何误差的影响比例升高^[8-9]。低速进给时几何误差与动态误差相比对五轴机床精度的影响更为严重^[4,10]。几何误差的系统性和可重复性使得通过对其测量、辨识及误差补偿可实现机床精度的显著提升。

五轴机床几何误差可分为位置相关几何误差(Position-Dependent Geometric Errors, PDGEs)和位置无关几何误差(Position-Independent Geometric Errors, PIGEs)^[11],其中 PIGEs 也称为位置误差、连接差参数或系统偏差。辨识几何误差是实施误差补偿的前提,直线轴几何误差的测量和补偿方法的研究已经取得了较大的进展,转动轴几何误差可通过直接测量和间接测量的方法来确定^[12]。由于五轴机床转动轴的几何误差比直线轴几何误差对机床精度影响大^[1,13],而 PIGEs 占转动轴几何误差的70%以上^[1],所以旋转轴的 PIGEs 是影响数控机床精度的主要原因^[16]。与旋转轴 PDGEs 测量辨识相比,针对 PIGEs 的测量辨识大多通过间接测量的形式实现。例如,基于标准件的探针测量、加工测试、

R-test测量方法、非接触 R-test 测量、激光跟踪仪测量方法和球杆仪(Double Ball Bar, DBB)测量等方法^[17]。通过转动轴的单独运动实现圆轨迹测量,可以辨识双转台式五轴机床的 PIGEs^[18-19]。Ibararki^[20]提出了采用激光位移传感器的扫描测量方法,并分析了摇篮式五轴机床旋转轴的几何误差对五轴机床测量精度的影响。Florussen 等人^[21]提出了基于 DBB 测试的方法来识别三轴机床的 PIGEs 和 PDGEs,通过去除辨识结果中对机床精度不重要和相关性弱的几何误差分量,简化了几何误差的建模和计算。圆轨迹测量已经被 ISO 230-1 所收录,但是不同类型和数量的几何误差需要设置不同的 DBB 测量方法实现辨识^[22-24]。

虽然五轴机床转动轴 PIGEs 与 PDGEs 的测量、识别和补偿研究取得了一定的效果,但大多数研究主要关注于摇篮式或双摆头式五轴机床,只有少数研究^[14-15]提出了转台-摆头式五轴机床转动轴 PIGEs 的测量方法,而机床结构的差异性导致现有的方法不能直接应用于转台-摆头式五轴机床转动轴 PIGEs 的测量和辨识上。已有的测量方法对于辨识转台-摆头式五轴机床的 PIGEs 效果较好,但未能对 ISO 230 系列标准所规定的需要测量的 PIGEs 项进行全部辨识。如文献[5, 16, 19, 25]所述,机床运动轴的 PDGEs 主要是由零件的制造误差引起的,PIGEs 主要是由装配误差引起的。前者对单轴运动的精度起决定作用,后者主要反映运动轴之间的安装精度。转动轴的单独运动可以用于测量辨识 PDGEs 的影响,多轴联动实现圆轨迹测量更适用于 PIGEs 的辨识。

为克服现有研究存在的缺陷及不足,本文提出一种基于 DBB 的机床转动轴 PIGEs 圆轨迹建模、测量及辨识方法。首先,基于多系统理论及齐次坐标变换方法建立工作台及主轴间几何的误差模型。通过设计的 4 种测量模式进行 10 项 PIGEs 的辨识。采用数值仿真方法分析 PIGEs 对测量轨迹的影响。最后,依据测量及辨识结果进行误差补偿实验,验证了所提出的测量、建模及辨识方法的有效性。

2 五轴机床旋转轴的 PIGEs 建模

2.1 转台-摆头式五轴机床结构及坐标系的建立

转台-摆头式五轴机床由 X,Y,Z 三个直线轴和分别绕 X,Z 轴方向转动的旋转轴 A 轴和 C 轴组成,其结构如图 1 所示。旋转工作台由 C 旋转轴带动其运动,A 轴带动主轴实现沿 X 轴方向转动。

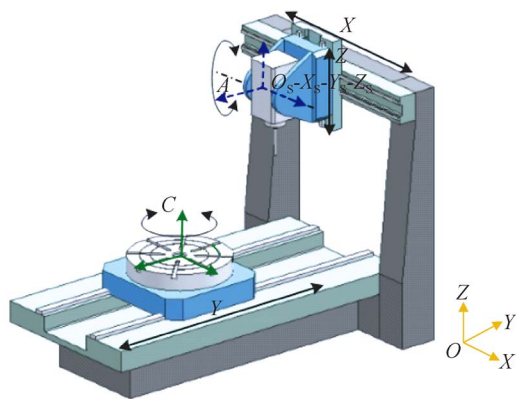


图 1 转台-摆头式五轴机床结构示意图

Fig. 1 Configuration of turntable-tilting head type five-axis machine tool

为了简化建模过程,C 轴坐标系 ($O_C-X_C Y_C Z_C$), 工件坐标系 ($O_W-X_W Y_W Z_W$) 和机床坐标系 ($O_M-X_M Y_M Z_M$) 的理想位置定义在转台中心。主轴坐标系 ($O_S-X_S Y_S Z_S$) 的理想位置与 A 轴坐标系 ($O_A-X_A Y_A Z_A$) 重合,并设置在 A 轴与主轴的交点处。

2.2 转台-摆头式五轴机床 PIGEs 的定义

五轴机床转动轴的 PIGEs 可以用绝对表达方法和相对表达方法表征^[26-28]。ISO 230 系列标准和 Inasaki I 分别通过绝对表达和相对表达定义了转台-摆头式五轴机床的直线轴和两个旋转轴之间的角度误差和位置误差。不同表达形式所定义的几何误差数目存在差异,但两种方法可以相互转换从而用于描述 PIGEs,如表 1 所示。五轴机床的运动链相对较长,利用相对表达方法较绝对表达方法可以更直观地表征运动轴之间的误差关系。相对表达方法所定义的 10 项 PIGEs 可充分描述转台-摆头式五轴机床转动轴需要考虑的最少的角度误差和位置误差。因此,本文采用相对表达方法对转台-摆头式五轴机床转动轴的 10 项 PIGEs 进行表征。各局部坐标系下旋转轴的 PIGEs 如图 2 所示。从图 2 可以看出,旋转轴有 4 项位置误差 ($\delta_{YAS}, \delta_{ZAS}, \delta_{XC_Y}, \delta_{YC_Y}$) 和 6 项角度误差 ($\alpha_{CY}, \beta_{CY}, \alpha_{ZA}, \beta_{ZA}, \gamma_{ZA}, \beta_{AS}$)。其中位置误差 $\delta_{XC_Y}, \delta_{YC_Y}$ 和角度误差 α_{CY}, β_{CY} 主要来自 C 轴和 Y 轴的安装误差。位置误差 $\delta_{YAS}, \delta_{ZAS}$ 和角度误差 $\alpha_{ZA}, \beta_{ZA}, \gamma_{ZA}, \beta_{AS}$ 主要来源于旋转轴 A 轴,直线轴 Z 轴和主轴的安装误差。

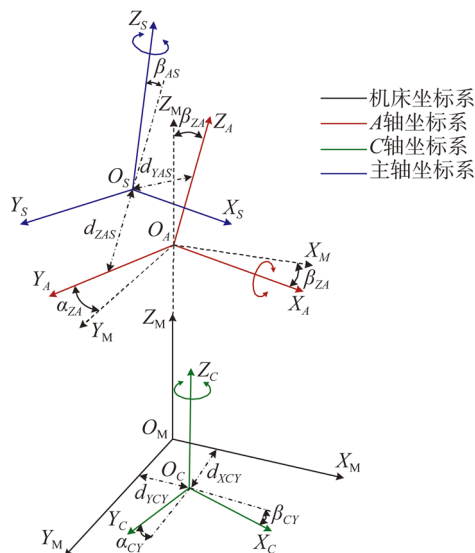


图 2 转动轴十项 PIGEs

Fig. 2 Ten PIGEs of rotary axes

表 1 转台-摆头式五轴机床 PIGEs 的定义
Tab.1 Definition of PIGEs for turntable-tilting five-axis machine tool

ISO 230 -1:2012 ^[26]	ISO 230 -7:2015 ^[27]	Inasaki I ^[28]	误差项的意义
的定义	的定义	的定义	
$E_{A(OY)C}$	E_{AOC}	α_{CY}	在 YZ 平面内,C 轴轴线绕 X 轴的垂直度误差
$E_{B(OY)C}$	E_{BOC}	β_{CY}	在 ZX 平面内,C 轴轴线绕 Y 轴的垂直度误差
E_{XOC}	$E_{XOC} - E_{XOY}$	δ_{XCY}	在 XY 平面内,C 轴原点与 Y 轴中心线在 X 方向上的位置误差
E_{YOC}	E_{YOC}	δ_{YCY}	在 XY 平面内,C 轴原点与 Y 轴中心线在 Y 方向上的位置误差
	E_{AOA}	α_{ZA}	在 ZX 平面内,A 轴初始角度偏差
E_{BOA}	E_{BOA}	β_{ZA}	在 ZY 平面内,A 轴中心线绕 X 的垂直度误差
$E_{C(OZ)A}$	E_{COA}	γ_{ZA}	在 XY 平面内,A 轴中心线绕 Z 的垂直度误差
	$E_{XO(C)1}$	δ_{yAS}	在 XY 平面内,A 轴轴线与主轴在 X 方向上的位置偏差
	$E_{ZO(C)1}$	δ_{zAS}	主轴端面到 A 轴轴线的名义距离与实际距离之间的误差
	$E_{AO(C)1}$	β_{AS}	在 ZY 平面内,A 轴中心线绕 Y 方向的垂直度误差

2.3 基于 DBB 的五轴机床 PIGEs 测量模型

球杆仪广泛应用于机床性能的评估,通过圆测试能够识别出机床运动轴的多项误差。DBB 基本结构如图 3 所示,它由磁性底座,伸缩杆和接触球组成。DBB 的接触球 O_s 固定在主轴端,另一个接触球 O_t 吸附在转台端的磁力吸座上。可以通过三轴同步插值运动实现圆形轨迹测量。在几何误差的作用下,DBB 伸缩杆的长度相对其公称长度会发生变化。在机床坐标系 $O_M-X_M Y_M Z_M$ 下主轴端接触球 O_s 的坐标位置 (X_S, Y_S, Z_S) 如式(1):

$$\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_T \\ 1 \end{bmatrix} + \mathbf{T}_A \mathbf{T}_C \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A - Z_T \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \delta_{yAS} \\ -R_m + \delta_{zAS} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: (X_A, Y_A, Z_A) 是 A 轴旋转中心 O_A 在机床坐标系 $O_M-X_M Y_M Z_M$ 中的初始位置坐标, $(0, 0, Z_T)$ 是工作台端接触球 O_t 在机床坐标系中的初始位置坐标, R_m 表示从 $O_A-X_A Y_A Z_A$ 到主轴侧接触球 O_s 的中心的距离,令 a 和 c 分别表示 A 轴和 C 轴的旋转角度, \mathbf{T}_A 和 \mathbf{T}_C 分别代表围绕 A 轴和 C 轴的 X 轴和 Z 轴的角度变化的齐次变换矩阵。

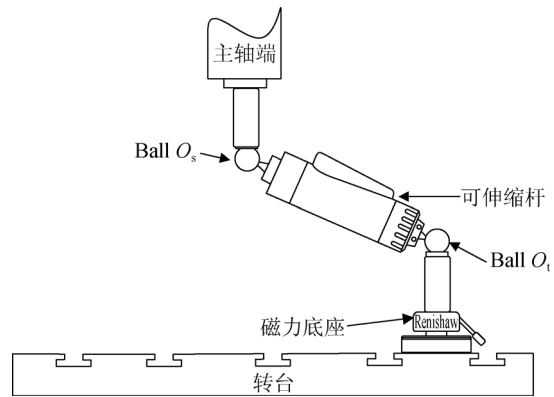


图 3 球杆仪安装测量示意图
Fig.3 Schematic of installation and measurement of DBB

矩阵 $\mathbf{T}_{\alpha ZA}, \mathbf{T}_{\beta ZA}, \mathbf{T}_{\gamma ZA}$ 和 $\mathbf{T}_{\beta AS}$ 是与 A 轴运动相关的误差矩阵。式(1)所包含的齐次坐标变换矩阵的具体表达形式如下:

$$\mathbf{T}_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(a) & -\sin(a) & 0 \\ 0 & \sin(a) & \cos(a) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{T}_C = \begin{bmatrix} \cos(c) & -\sin(c) & 0 & 0 \\ \sin(c) & \cos(c) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{T}_{\alpha ZA} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_{ZA}) & -\sin(\alpha_{ZA}) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_{ZA}) & \cos(\alpha_{ZA}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{T}_{\beta ZA} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_{ZA}) & 0 & \sin(\beta_{ZA}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\beta_{ZA}) & 0 & \cos(\beta_{ZA}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{T}_{\gamma ZA} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma_{ZA}) & -\sin(\gamma_{ZA}) & 0 & 0 \\ \sin(\gamma_{ZA}) & \cos(\gamma_{ZA}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{T}_{\beta AS} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_{AS}) & 0 & \sin(\beta_{AS}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\beta_{AS}) & 0 & \cos(\beta_{AS}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

当 A 轴运动时,接触球 O_i 的位置与 A 轴和 Z 轴的移动有关, O_i 的位置受到角度误差 β_{ZA} , α_{ZA} , γ_{ZA} 和 β_{AS} 以及位置误差 δ_{ZYS} 和 δ_{ZAS} 的影响。机床坐标系下接触球 O_i 的位置可以表示为:

$$\begin{bmatrix} X_{AT} \\ Y_{AT} \\ Z_{AT} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \\ 1 \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{\alpha ZA} \mathbf{T}_{\beta ZA} \mathbf{T}_{\gamma ZA} \mathbf{T}_{\beta AS} \begin{bmatrix} 0 \\ \delta_{yAS} \\ -R_m + \delta_{zAS} \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ R_m \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

当 C 运动时,接触球 O_i 的位置与 C 轴, X 轴, Y 轴的运动有关, O_i 的位置精度受 α_{CY} , β_{CY} , δ_{XC_Y} , δ_{YC_Y} 的影响。此时机床坐标系中的接触球 O_i 所处位置可表示为:

$$\begin{bmatrix} X_{CT} \\ Y_{CT} \\ Z_{CT} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\alpha CY} \mathbf{T}_{\beta CY} \mathbf{T}_C \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{xCY} \\ \delta_{yCY} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: $\mathbf{T}_{\alpha CY}$ 和 $\mathbf{T}_{\beta CY}$ 是接触球绕 C 轴旋转的角度误差矩阵。上述的 4×4 变换矩阵可以表示为:

$$\mathbf{T}_{\alpha CY} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_{CY}) & -\sin(\alpha_{CY}) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_{CY}) & \cos(\alpha_{CY}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{T}_{\beta CY} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_{CY}) & 0 & \sin(\beta_{CY}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\beta_{CY}) & 0 & \cos(\beta_{CY}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

由式(1)、式(8)、式(9)可知,安装于工作台端和主轴端的 DBB 的接触球 O_i , O_s 位置的影响因素与旋转轴的运动状态有关。接触球 O_i 在 A 轴和 C 轴运动过程中受到几何误差的影响因素不同,且无法用单一模型表征 O_i 在机床坐标下的位置变化。由于 PIGEs 的数值远小于运动轴的指令值,因此可基于小角度近似假设忽略二阶及其以上无穷小误差项。DBB 的测量值与公称长度 L 之间的差值可以表示为:

$$e_{ij} = \left\| \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{kT} \\ Y_{kT} \\ Z_{kT} \\ 1 \end{bmatrix} \right\| - L, \quad (12)$$

其中: e_{ij} 表示测量模式 i 沿 j 方向的圆形轨迹的离心率或半径变化, k 表示 C 轴或 A 轴。

3 基于 DBB 的转动轴测量模式

为了辨识转台-摆头式五轴机床的转动轴固有的 6 项角度误差和 4 项位置误差,所设计的 C 轴测量模式如图 4 所示。

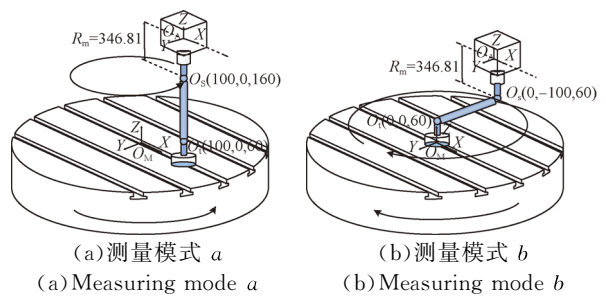


图 4 C 轴运动的测量模式

Fig. 4 Measuring modes of C-axis rotation

如图 4(a) 所示,在初始状态下接触球 O_i 安装在距离机床坐标系原点沿 X 轴方向 100 mm 的位置处。接触球 O_s 吸附于主轴端磁力吸座上。在测量模式 a 下, DBB 的伸缩杆安装在 C 轴的轴向上。当 C 轴旋转时 O_s 通过 X 轴和 Y 轴同步运动形成圆轨迹,直线轴 Z 轴和旋转轴 A 轴保持静止。测量轨迹如图 4(a) 中的蓝线表示(彩图见期

电子版)。C 轴逆时针旋转的圆周运动范围为 $0\sim 360^\circ$ 。DBB 的伸缩杆在测量模式 *b* 下沿 C 轴径向安装,机床坐标系中的接触球位置如图 4(b) 所示。 O_i 精确地位于 C 轴的轴线上,接触球 O_s 吸附于主轴端磁力吸座上。当 C 轴旋转时, O_s 通过 X 轴和 Y 轴的同步旋转而旋转,直线轴 Z 轴和旋转轴 A 轴保持静止。C 轴顺时针方向旋转,圆周运动行程为 $0\sim 360^\circ$ 。在上述测量模式中, O_s 在机床坐标系下的位置受到角度误差 $\alpha_{ZA}, \beta_{ZA}, \gamma_{ZA}, \beta_{AS}$ 和位置误差 $\delta_{YAS}, \delta_{ZAS}$ 的影响,机床坐标系中接触球 O_i 的位置受到角度误差 α_{CY}, β_{CY} 和位置误差 $\delta_{XCY}, \delta_{YCY}$ 的影响。

DBB 的接触球 O_s 精确地安装于 C 轴的轴线上,接触球 O_i 安装于转台端,DBB 的伸缩杆安装在 A 轴的轴向上,此时两接触球在机床坐标系中的初始位置如图 5(a) 所示。当 A 轴旋转时, O_s 通过 X 轴和 Y 轴的逆时针方向的同步旋转而旋转,旋转轴 C 和直线轴 X 保持静止。A 轴逆时针旋转,圆周运动范围为 $0\sim 90^\circ$ 。图 5(b) 显示了测量模式 *d* 的初始位置,接触球 O_s 和 O_i 均精确安装在 C 轴的轴线上,DBB 的伸缩杆安装在 A 轴的径向上。当 A 轴旋转时, O_s 通过 Z 轴和 Y 轴的逆时针方向的同步旋转而旋转,其他轴 C 和 X 保持静止。A 轴逆时针旋转,圆周运动范围为 $0\sim 90^\circ$ 。在上述测量模式中,角度误差 $\alpha_{ZA}, \beta_{ZA}, \gamma_{ZA}$ 和 β_{AS} 以及位置误差 $\delta_{YAS}, \delta_{ZAS}$ 会影响机床坐标系下主轴端接触球 O_s 和工作台端接触球 O_i 的位置。

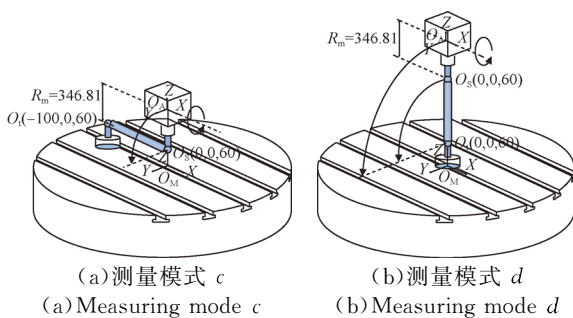


图 5 A 轴运动的测量模式
Fig. 5 Measuring modes of A-axis rotation

在不同的测量模式下,几何误差对测量轨迹的影响是不同的。位置无关几何误差对上述 4 种测量模式下各个位置处球杆仪测量轨迹的影响可以通过详细的分析而确定。

4 旋转轴 PIGEs 的仿真分析和辨识

4.1 混合式五轴机床 PIGEs 的仿真分析

通过仿真分析可确定几何误差对圆测量轨迹的影响。表 2 列出了测量参数和 10 项 PIGEs 的仿真参数。

A 轴的运动范围为 $-20\sim +90^\circ$,从易于理解几何误差对测量轨迹影响的角度出发,A 轴的仿真轨迹显示了 360° 的整圆。C 轴的运动范围是 $0\sim 360^\circ$,其仿真轨迹是 360° 的整圆。将仿真参数代入式(12)后,同时假设在 4 种测量模式时几何误差项之间线性无关,由此可确定误差作用下圆轨迹的变化曲线,仿真结果如表 3 所示。

表 2 PIGEs 的仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters of PIGEs analysis

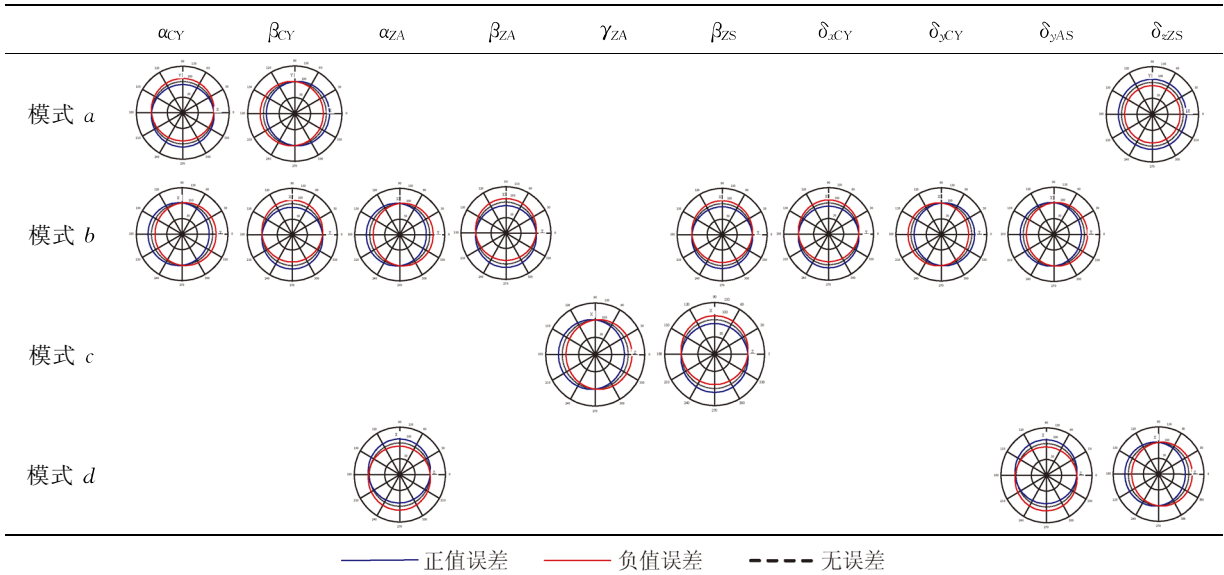
参数	数值
DBB 公称长度	$L=100\text{ mm}$
O_i 与转台间距离	$Z_i=60\text{ mm}$
O_s 与 $O_A-X_A Y_A Z_A$ 间的距离	$R_m=200\text{ mm}$
角度误差	$\alpha_{CY}, \beta_{CY}, \alpha_{ZA}, \beta_{ZA}, \gamma_{ZA}, \beta_{AS}: \pm 0.02^\circ$
位置误差	$\delta_{XCY}, \delta_{YCY}, \delta_{YAS}, \delta_{ZAS}: \pm 15\ \mu\text{m}$

表 3 中空白区域代表几何误差在相应测量模式下不会影响圆误差图谱。红色线和蓝色线圆轨迹分别表示误差分别为正值和负值时的圆测量图形,虚线表示无误差时的标准圆轨迹。

在测量模式 *a* 中,角度误差 α_{CY} 影响 Y 方向上圆误差图谱的偏心率,角度误差 β_{CY} 影响 X 方向上的偏心率,位置误差 δ_{ZAS} 影响圆误差图谱的半径,其他误差不影响圆形轨迹。在测量模式 *b* 中, $\alpha_{CY}, \alpha_{ZA}, \delta_{YCY}$ 和 δ_{YAS} 四个误差影响 Y 方向上的圆形轨迹的偏心率,4 个误差 $\beta_{CY}, \beta_{ZA}, \beta_{AS}$ 和 δ_{XCY} 影响 X 方向的偏心率,其他误差不影响圆误差图谱。

在测量模式 *c* 中, β_{ZA} 影响圆形轨迹在 Z 方向的偏心度和半径, γ_{ZA} 只影响 Y 方向的偏心率,其他误差不影响圆误差图谱。在测量模式 *d* 中,角度误差 α_{ZA} 和位置误差 δ_{YAS} 影响圆形轨迹在 Y 方向的偏心率,位置误差 δ_{YCY} 使圆形测量轨迹在 Z 方向产生偏心率。

表 3 PIGEs 作用下四种测量模式下的测量仿真轨迹
Tab. 3 Effect of PIGEs in the four measurement modes



4.2 五轴机床 10 项 PIGEs 辨识

PIGEs 与圆形轨迹的偏心和轨迹半径之间有定量关系,在圆轨迹过象限处的偏心值是几何误差作用的结果。将不同测量模式下球杆仪在机床坐标系下的初始位置坐标代入式(1)、式(8)、式(9)和式(12)后,可确定不同测量模式下的偏心值 e_{ij} 。通过 DBB 测量系统,可以直接测量得到圆形轨迹的偏心率和圆形轨迹的轨迹半径。

在测量模式 a 中,机床坐标系下 O_s 和 O_t 的初始坐标分别为 $(100, 0, 160)$ 和 $(100, 0, 60)$,将这些坐标值代入式(1)和式(8)。根据几何误差模型和模拟分析结果,用 DBB 测量的圆形轨迹的偏心率可表示为:

$$e_{AX} = R_c \sin(\beta_{CY}), \quad (13)$$

$$e_{AY} = -R_c \sin(\alpha_{CY}). \quad (14)$$

角度误差 α_{CY} 和 β_{CY} 可以通过式(13)和式(14)确定。由于篇幅限制,本文不对其推导过程进行赘述。

在测量模式 b 中,机床坐标系下接触球 O_s 和 O_t 的初始坐标分别为 $(0, -100, 60)$ 和 $(0, 0, 60)$ 。误差与圆形轨迹的偏心率可以表示为:

$$e_{BX} = -Z_T \sin(\beta_{CY}) - R_m \sin(\beta_{ZA}) - R_m \sin(\beta_{AS}) - \delta_{XCY}, \quad (15)$$

$$e_{BY} = Z_T \sin(\alpha_{CY}) + R_m \sin(\alpha_{ZA}) + \delta_{YAS} - \delta_{YCY}. \quad (16)$$

通过改变接触球 O_s 和 $O_A-X_A Y_A Z_A$ 之间的

距离可以获得:

$$e_{BX1} = -Z_T \sin(\beta_{CY}) - R_{m1} \sin(\beta_{ZA}) - R_{m1} \sin(\beta_{AS}) - \delta_{XCY}, \quad (17)$$

$$e_{BY1} = Z_T \sin(\alpha_{CY}) + R_{m1} \sin(\alpha_{ZA}) + \delta_{YAS} - \delta_{YCY}. \quad (18)$$

在测量模式 c 中,机床坐标系下 O_s 和 O_t 的初始坐标分别为 $(0, 0, 60)$ 和 $(100, 0, 60)$ 。误差与 DBB 测量的圆形轨迹的偏心可以表示为:

$$e_{CY} = -R_m \sin(\gamma_{ZA}), \quad (19)$$

$$e_{CZ} = -R_m \sin(\beta_{ZA}), \quad (20)$$

由上式可知角度误差 β_{ZA} 和 γ_{ZA} 的辨识值。

在测量模式 d 中,机床坐标系下接触球 O_s 和 O_t 的初始坐标分别为 $(0, 0, 160)$ 和 $(0, 0, 60)$ 。几何误差与 DBB 测量的圆形轨迹的偏心率之间的关系可以表示为:

$$e_{DY} = R_m \sin(\alpha_{ZA}) + \delta_{YAS}, \quad (21)$$

$$e_{DZ} = -\delta_{ZAS}, \quad (22)$$

式中:位置误差 δ_{ZAS} 可以通过式(22)直接确定。在模式 a 下辨识得到的 α_{CY} 及式(21)带至式(16)后可以获得位置偏差 δ_{YCY} 。经过 4 次测量后可确定 8 组方程,此时仅能确定 6 项偏差。通过改变 R_m 的值建立正定方程组,这就是改变接触球 O_s 和 $O_A-X_A Y_A Z_A$ 之间的距离从而确定式(17)和式(18)的原因。角度偏差 β_{ZA} 可由式(20)确定。

利用式(15)和(17)可以辨识角度偏差 β_{AS} 。将辨识出的 β_{CY}, β_{ZA} 和 β_{AS} 数值带入到式(15)中可

辨识位置偏差 δ_{XC_Y} 。类似地,将几何误差 α_{CY}, α_{ZA} 和 δ_{YC_Y} 的辨识值代入式(16),可辨识位置偏差 δ_{YAS} 。通过以上的测量及辨识,可确定转台-摆头式五轴机床的 10 项 PIGEs 的代数值。

5 PIGEs 辨识实验

为了验证所提出的测量、建模和辨识方法的有效性,在转台-摆头式五轴机床上进行实验验证。该机床 A 轴平行于 X 轴,五轴机床的结构与图 1 一致。在进行测量前,环境温度应控制在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 之内,这样可以最大程度去除热误差的影响;精确安装 DBB 以减弱安装误差对测量精度的影响^[24]。误差补偿实验验证主要由 PIGEs 测量、PIGEs 辨识和误差补偿三部分组成。

本节基于第 3 部分所建立的测量模式,利用 Renishaw QC-20W 型球杆仪进行圆轨迹测量,测量现场如图 6 所示。圆轨迹的进给速度为 1 000 mm/min。为了验证测量方法的可重复性,在相同的实验条件下进行了 3 次测量实验,获取测量数据后使用 4.2 节提出的方法辨识 PIGEs。

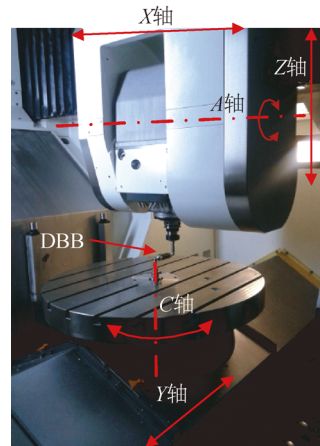


图 6 基于 DBB 的 PIGEs 测量

Fig. 6 Scenes of measurement with DBBs

在表 4 的辨识结果中,位置误差 δ_{XC_Y} 和 δ_{YAS} 的 3 次测量辨识值具有偏差,与辨识结果平均值的最大偏差分别为 $5.8 \mu\text{m}$ 和 $-3.5 \mu\text{m}$ 。这是由于旋转轴的 PIGE 是最大误差源之一,同时热误差、动态误差、PDGEs 和伺服误差会影响圆形轨迹的测量结果。这些误差共同作用会导致上述两项误差的辨识值出现波动。

表 4 误差补偿前后 PIGEs 辨识结果

Tab. 4 PIGEs identification results before and after error compensation

误差项	辨识值(补偿前)			辨识值(补偿后)			提升比例/% (均值)
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次	
$\alpha_{CY}/(^\circ)$	-15.8	-13.3	-17.0	-4.6	-7.9	-5.0	60.7
$\beta_{CY}/(^\circ)$	-17.1	-16.2	-16.8	6.8	5.3	6.5	62.9
$\delta_{XC_Y}/\mu\text{m}$	39.3	27.6	27.6	8.0	7.1	8.2	74.7
$\delta_{YC_Y}/\mu\text{m}$	43.6	40.5	41.4	11.9	10.0	9.7	74.3
$\alpha_{ZA}/(^\circ)$	4.7	4.5	5.2	2.2	1.8	3.2	50.6
$\beta_{ZA}/(^\circ)$	8.4	8.6	10.5	-3.6	-2	-4.2	64.6
$\gamma_{ZA}/(^\circ)$	11.0	11.2	13.4	-3.0	-2.1	-3.5	76.0
$\delta_{YAS}/\mu\text{m}$	21.2	20.5	20.6	1.9	2.4	2.9	88.4
$\delta_{ZAS}/\mu\text{m}$	-27.9	-26.5	-18.6	-2.7	-4.9	3.9	83.6
$\beta_{AS}/(^\circ)$	-19.8	-18.7	19.3	-6.3	-5.8	-6.0	68.7

在识别出 PIGEs 之后,将这些误差值用于误差补偿。由于五轴机床同时存在位置误差和姿态误差,在进行误差补偿时需通过在直线轴上添加等量反向指令消除位置误差,计算两个旋转轴的

补偿量消除姿态误差。根据已建立的综合几何误差模型计算刀具的位置和方向,通过修改数控指令值补偿位置和姿态误差。

本文通过计算五轴机床的逆运动并结合下述

误差补偿方法来消除 PIGEs 对机床精度的影响。首先,通过修改机床坐标系可以调整位置误差 δ_{XC_Y} 和 δ_{YC_Y} 。其次,位置误差 δ_{ZAS} 也可以通过修改刀具补偿值来调整。通过旋转 A 轴可以调整角度误差 α_{ZA} 。最后,通过修改相关轴的指令值来调整旋转轴的其他 PIGEs^[29-30]。误差补偿结束后,依据所建立的测量模式再次进行圆轨迹测量,此时 10 项 PIGE 的辨识值如表 4 所示。以其中一组补偿后的辨识结果为例,误差补偿前后 4 种测量模式下的测量结果如图 7 所示。

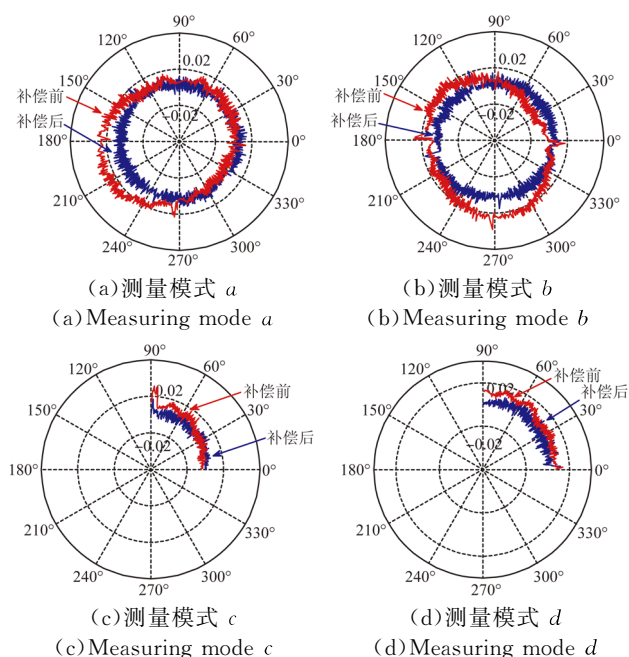


图 7 四种测量模式下的补偿结果

Fig. 7 Measure results of four measurement modes

如图 7 所示,误差补偿前后的圆度误差明显降低。由表 4 可以看出,经过误差补偿,最大位置

误差的平均值从 $41.7 \mu\text{m}$ 减小到 $10.5 \mu\text{m}$,偏差的最大值和最小值分别为 $\pm 1.9 \mu\text{m}$ 和 $\pm 1.4 \mu\text{m}$ 。最大角度偏差的平均值从 $-19.3''$ 降低到 $-6.0''$,偏差的最大值和最小值分别为 $\pm 0.5''$ 和 $\pm 0.3''$ 。 δ_{XC_Y} , δ_{YC_Y} , β_{ZA} , γ_{ZA} , δ_{YAS} 和 δ_{ZAS} 的降低幅度较大,10 项 PIGEs 的平均补偿率达到 70.4%,最小补偿率为 50.6%,最大补偿率为 88.4%。

6 结 论

本文提出了一种利用球杆仪测量辨识转台-摆头式五轴旋转机床旋转轴位置无关几何误差的方法。通过仿真分析和实验测量可知:该方法通过在 4 种测量模式下进行 5 次测量,可确定转台-摆头式五轴机床转动轴的 10 项 PIGEs。测量过程由三轴同步运动实现,多轴联动形式与仅通过旋转轴运动获得圆形轨迹相比更符合机床运行的实际情况。综合误差模型包含 10 项转台-摆头式五轴机床回转轴特有的全部 PIGEs。通过仿真分析可确定 PIGEs 对 4 种测量模式下圆轨迹的影响。通过建立轨迹偏心与 PIGEs 的量化关系可辨识 6 项角度误差和 4 项位置误差。误差补偿后最大位置误差的平均值从 $41.7 \mu\text{m}$ 降至 $10.5 \mu\text{m}$,最大角度误差均值从 $-19.3''$ 降为 $-6.0''$ 。实验结果验证了所提出的测量、建模、识别和修改方法的有效性。

本文所提出的测量辨识方法不仅可用于转台-摆头式五轴机床回转轴精度的检测和维修,还可以扩展应用到非正交的转台-摆头式五轴机床中。

参考文献:

- [1] LASEMI A, XUE D, GU P. Accurate identification and compensation of geometric errors of 5-axis CNC machine tools using double ball bar [J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27:055004.
- [2] KHAN A W, CHEN W. A methodology for systematic geometric error compensation in five-axis machine tools [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 53(5-8): 615-628.
- [3] 郭前建,赵国勇,程祥,等. 双转台五轴机床空间误

差补偿技术研究 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52(13):189-194.

GUO Q J, ZHAO G Y, CHENG X, et al.. Research on volumetric error compensation of two turntable five-axis machine tools [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(13):189-194. (in Chinese)

- [4] 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.

- [5] 程亚平,张恩忠,齐月玲,等. 光学自由曲面精密数控机床几何误差测量与综合建模 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(10s):174-182.
CHENG Y P, ZHANG E ZH, QI Y L, *et al.*. Geometric error measurement and integrated modeling for precision CNC machine tools of optical free-form surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10s): 174-182. (in Chinese)
- [6] 郭辰光,韩雪,李源,等. 精密数控车床主轴热误差建模 [J]. 光学精密工程, 2016, 24:1731-1742.
GUO CH G, HAN X, LI Y, *et al.*. Thermal error modeling for spindle system of precision CNC lathe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7): 1731-1742. (in Chinese)
- [7] 叶建华,高诚辉,江吉彬. 五轴机床旋转轴误差的在机测量与模糊径向神经网络建模 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(4):826-834.
YE J H, GAO CH H, JIANG J B. On-machine measurement and fuzzy RBF neural network modeling for geometric errors of rotary axes of five-axis machine tools [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4):826-834. (in Chinese)
- [8] 陈东菊,董丽华,杨智,等. 复合数控磨床螺纹成形磨削误差辨识及补偿 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(10z):348-354.
CHEN D J, DONG L H, YANG ZH, *et al.*. Geometric error identification and compensation of complex CNC grinding machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10z):348-354. (in Chinese)
- [9] WANG J, GUO J, ZHANG G, *et al.*. The technical method of geometric error measurement for multi-axis NC machine tool by laser tracker [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(4):45003-45013.
- [10] 王伟,陶文坚,李晴朝. 五轴数控机床动态精度检验试件特性研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(1): 101-109.
WANG W, TAO W J, LI Q CH. Research on characteristic of test specimen for five-axis CNC machine tools [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(1):101-109. (in Chinese)
- [11] GUO S, JIANG G, MEI X. Investigation of sensitivity analysis and compensation parameter optimization of geometric error for five-axis machine tool [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93:3229-3243.
- [12] IBARAKI S, KNAPP W. Indirect measurement of volumetric accuracy for three-axis and five-axis machine tools: A review [J]. *International Journal of Automation Technology*, 2012, 6(2): 110-124.
- [13] DING S, HUANG X, YU C, *et al.*. Novel method for position-independent geometric error compensation of five-axis orthogonal machine tool based on error motion [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83:1069-1078.
- [14] JIANG Z, TANG X, ZHOU X, *et al.*. Machining tests for identification of location errors on five-axis machine tools with a tilting head [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79(1-4): 245-254.
- [15] LEE K I, YANG S H. Robust measurement method and uncertainty analysis for position-independent geometric errors of a rotary axis using a double ball-bar [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(2): 231-239.
- [16] IBARAKI S, IRITANI T, MATSUSHITA T. Calibration of location errors of rotary axes on five-axis machine tools by on-the-machine measurement using a touch-trigger probe [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 58(7):44-53.
- [17] 杜正春,杨建国,冯其波. 数控机床几何误差测量研究现状及趋势 [J]. 航空制造技术, 2017, 525(6):34-44.
DU ZH CH, YANG J G, FENG Q B. Research status and trend of geometrical error measurement of CNC machine tools [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2017, 525(6):34-44. (in Chinese)
- [18] 付国强,傅建中,沈洪焱. 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 G Q, FU J ZH, SHEN H Y. One novel geometric error identification of rotary axes for five-axis machine tool [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering and Technology Edition)*, 2015, 49(5):848-857. (in Chinese)
- [19] XIANG S, YANG J. Using a double ball bar to measure 10 position-dependent geometric errors for rotary axes on five-axis machine tools [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75(1-4):559-572.
- [20] IBARAKI S, KIMURA Y, YU N, *et al.*. For-

- mulation of influence of machine geometric errors on five-axis on-machine scanning measurement by using a laser displacement sensor [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2015, 137(2):021013.
- [21] FLORUSSEN G H J, DELBRESSINE F L M, VAN DE MOLENGRAFT M J G, *et al.*. Assessing geometrical errors of multi-axis machines by three-dimensional length measurements [J]. *Measurement*, 2001, 30(4): 241-255.
- [22] 何振亚,傅建中,陈子辰. 基于球杆仪检测五轴数控机床主轴的热误差 [J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(5):1401-1408.
HE ZH Y, FU J ZH, CHEN Z CH. Thermal error measurement of spindle for 5-axis CNC machine tool based on ball bar [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1401-1408. (in Chinese)
- [23] CHEN D, DONG L, BIAN Y, *et al.*. Prediction and identification of rotary axes error of non-orthogonal five-axis machine tool [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 94:74-87.
- [24] 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*, 2013, 70(9-12): 2071-2082.
- [25] 郭世杰,梅雪松,姜歌东,等. 数控机床几何误差相关性分析方法研究 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(10):383-389.
GUO SH J, MEI X S, JIANG G D, *et al.*. Correlation analysis of geometric error for CNC machine tool [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(10):383-389. (in Chinese)
- [26] ISO 230-1:2012, Test code for machine tools-part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quastic-static conditions [S]. Geneva: ISO, 2012.
- [27] ISO 230-7: 2015, *Test code for machine tools-part 7: Geometric accuracy of axes of rotation* [S]. Geneva: ISO, 2015.
- [28] INASAKI I, KISHINAMI K, SAKAMOTO S, *et al.*. Shape Generation Theory for Machine Tools-its Basis and Applications [M]. Tokyo, Yokendo, 1997.
- [29] UDDIN MS, IBARAKI S, MATSUBARA A, *et al.*. Prediction and compensation of machining geometric errors of five-axis machining centers with kinematic errors [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(2): 194-201.
- [30] TSUSUMI 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.

作者简介:



郭世杰(1985—),男,内蒙古赤峰人,博士研究生,2010年、2013年于内蒙古工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事数控技术及精密机床等方面的研究。E-mail: zijianguoxjtu2015@163.com

导师简介:



姜歌东(1971—),女,陕西咸阳人,博士,教授,博士生导师,教育部新世纪人才,1992年、1998年于西安交通大学分别获得学士、博士学位,主要从事机电系统动力学、精密机械及测量、激光加工机器人技术的研究。E-mail: gdjiang@mail.xjtu.edu.cn