

摆头转台型五轴机床旋转轴运动误差测量与辨识

郭世杰¹ 姜歌东² 梅雪松²

(1. 内蒙古工业大学机械工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

摘要: 为了快速、系统地辨识摆头转台型五轴机床旋转轴几何误差中的12项运动误差,提出了一种基于球杆仪(Double ball bar, DBB)五次安装的运动误差测量辨识方法。首先,结合摆头转台型五轴机床旋转轴分布特征,基于多体系统理论及齐次坐标变换方法建立了旋转轴局部坐标系下的测量模型,表征了空间误差向量与几何误差项之间的映射关系。其次,通过设置DBB初始安装位置及方向,实现了不同测量模式之间的连续切换,从而构造了五次安装法,辨识了摆头转台型五轴机床2个旋转轴共计12项运动误差,降低了DBB安装误差对测量及辨识结果准确性的影响。最后,在摆头转台型五轴机床上利用五次安装法进行基于DBB的运动误差测量辨识实验以及虚拟圆锥台轨迹测量实验,利用辨识值进行误差补偿,结果显示两个旋转轴的几何误差平均降低了48.89%和51.49%,虚拟圆锥台测量轨迹的半径偏差降低了50.52%。误差补偿结果验证了测量、辨识的准确性和有效性。

关键词: 五轴机床; 旋转轴; 运动误差; 误差测量; 五次安装法

中图分类号: TH161+.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0402-09

Motion Error Measurement and Identification of Rotary Axis of Five-axis Machine Tool

GUO Shijie¹ JIANG Gedong² MEI Xuesong²

(1. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to quickly and systematically identify the 12 geometric errors of the rotary axes of five-axis machine tool with a swiveling head, a five installation method for measuring and identifying geometric error based on the double ball bar (DBB) was proposed. Firstly, based on the distribution characteristics of the rotary axes of five-axis machine tool with swiveling head, the measurement models under the local coordinate systems of the rotary axes were established based on the multi-body system theory and the homogeneous coordinate transformation method, and the mapping relationship between the volume error vectors and the geometric error terms was established, which can also be used for geometric error compensation. Secondly, initial installation position and direction of the DBB were set, the continuous switching between different measurement modes was realized, and then the five installation method was proposed, which can realize the identification of the total 12 motion errors of the two rotary axes of five-axis machine tool with swiveling head, and it reduced the impact of installation errors on the accuracy of measurement and identification. Finally, the DBB-based motion errors measurement and identification experiments were carried out on the five-axis machine tool with swiveling head by using five installation methods. The geometric errors of five-axis machine tool with a turntable-tilting head were compensated with the identification values, and the average of motion errors of the two rotary axes were reduced by 48.89% and 51.49%, respectively. The accuracy and validity of five installation method were verified.

Key words: five-axis machine tool; rotary axis; motion error; error measurement; five installation method

收稿日期: 2018-08-11 修回日期: 2018-09-24

基金项目: 国家科技重大专项(2015ZX04001051)和长江学者和创新团队发展计划项目(IRT_15R54)

作者简介: 郭世杰(1985—),男,讲师,主要从事精密机械及测量技术、数控技术研究,E-mail: zijianguoxjtu2015@163.com

通信作者: 姜歌东(1971—),女,教授,博士生导师,主要从数字控制和制造技术、精密机械及测量技术研究,E-mail: jgdjtu@gmail.com

0 引言

与三轴机床相比,五轴机床有两个旋转轴,因此它可以同时调节刀具相对工件的位姿^[1],由此可提高加工效率并提升加工表面质量^[2]。然而,两个旋转轴也为机床引入了更多的误差源,其中几何误差占机床总误差的 40% ~ 50%^[3-4]。几何误差是决定机床准静态精度的重要因素,几何误差是几何精度的直接体现,通过实施误差补偿技术可有效保证和提升机床几何精度^[5]。误差补偿技术由几何误差建模、误差测量及辨识、误差补偿 3 部分组成^[6]。几何误差测量及辨识是利用几何误差模型实施误差预测的关键,也是进行误差补偿的前提,因此针对五轴机床旋转轴几何误差测量及辨识,国内外众多学者展开了较多的研究^[7-10]。几何误差分为运动误差(位置相关几何误差)和位姿误差(位置无关几何误差)两类^[11-12],前者主要源于制造过程,后者主要形成于装配过程。基于多轴同步运动驱动球杆仪(DBB)可实现圆轨迹测量,利用几何误差与圆测量轨迹之间的映射关系,可辨识摇篮式五轴机床旋转轴的位姿误差^[13-14]。将 DBB 安装于旋转轴误差敏感方向上,通过旋转轴单轴运动,可实现旋转轴运动误差辨识^[15-18]。在此基础上,设计一次安装状态下的空间轨迹测量,可有效避免安装误差对测量结果的影响^[19]。与需进行多组测量轨迹的测量方法相比^[20-21],基于激光跟踪仪^[22]及 R-test^[23]的误差测量方法测量路径较为简单,但需要建立较为复杂的辨识模型。

上述研究对降低旋转轴几何误差的影响起到了重要推动作用,然而机床结构的差异性致使现存测量方法通用性弱。DBB 与激光干涉仪、跟踪仪及 R-test 仪相比成本低,易于实现工业现场的机床几何精度检测^[17],而现有的利用 DBB 进行旋转轴几何误差的研究主要应用于摇篮式五轴机床,针对摆头转台型五轴机床旋转轴的运动误差测量及辨识的方法较少^[20,24],已有的利用 DBB 对摆头转台型五轴机床旋转轴运动误差的测量、辨识方法中,装夹次数较多、易受安装误差累积效应的影响。

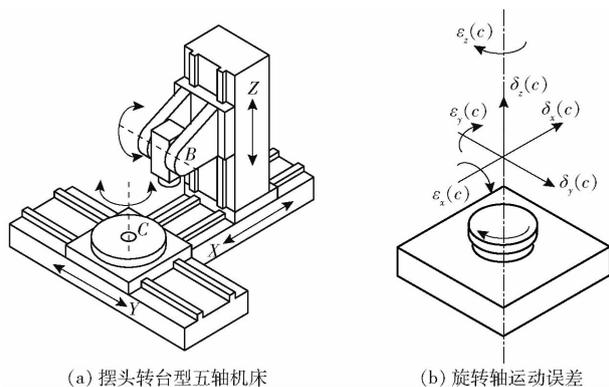
鉴于此,本文以摆头转台型五轴机床为研究对象,在已有研究基础上提出一种基于 DBB 的五次安装测量、辨识方法。首先,依据摆头转台型五轴机床旋转轴空间结构特点,对旋转轴运动误差在其局部坐标系下进行表征并建立运动误差测量模型。其次,利用 DBB 测量过程对误差敏感方向的特征,建立 DBB 的安装模式并将 DBB 相同的初始安装位置

的测量模式合并,构造基于 DBB 测量的五次安装法,基于 DBB 测量值辨识摆头转台型五轴机床 2 个旋转轴的 12 项运动误差,通过减少安装次数提升测量及辨识的准确性和精准度。最后,根据所提出的五次安装法旋转轴运动误差检测方案,运用 DBB 在摆头转台型五轴机床上进行实验,利用辨识结果进行误差补偿前后的精度对比,以验证该方法的有效性与可行性。

1 五轴机床旋转轴运动误差建模

1.1 旋转轴的运动误差

摆头转台型五轴机床结构如图 1a 所示。摆头转台型五轴机床结构由 X 轴、 Y 轴和 Z 轴 3 个直线轴,以及 C 轴和 B 轴两个旋转轴组成。旋转轴几何误差中的运动误差与运动轴的指令位置相关,即运动误差随着指令位置发生改变。因此 C 旋转轴及 B 旋转轴的运动误差可表达为旋转角 c 及 b 的函数。旋转轴的 6 项运动误差如图 1b 所示。其中, $\delta_i(j)$ 表示位置误差, $\varepsilon_i(j)$ 表示角度误差,相应的 j 表示位置坐标, i 表示误差所在方向。



(a) 摆头转台型五轴机床

(b) 旋转轴运动误差

图 1 机床结构及运动误差示意图

Fig. 1 Schematics of machine tool and motion errors

图 1a 中的摆头转台型五轴机床的 B 旋转轴具有 6 项运动误差,分别是 X 、 Y 、 Z 方向的位置误差 $\delta_x(b)$ 、 $\delta_y(b)$ 、 $\delta_z(b)$ 和绕 X 、 Y 、 Z 轴角度误差 $\varepsilon_x(b)$ 、 $\varepsilon_y(b)$ 、 $\varepsilon_z(b)$ 。对 C 轴而言,6 项运动误差分别是 3 项位置误差: $\delta_x(c)$ 、 $\delta_y(c)$ 、 $\delta_z(c)$ 和 3 项角度误差: $\varepsilon_x(c)$ 、 $\varepsilon_y(c)$ 、 $\varepsilon_z(c)$ 。

1.2 摆头转台型五轴机床测量坐标系的建立

由于运动误差表征运动轴在理想轴线位置方向上的运动偏差,因此依据多体系统理论进行误差建模时,将旋转轴所包含的运动误差在所对应的运动轴的局部坐标系下进行定义和描述,这与运动误差的本质特征相符,也与运动误差表达时矩阵相乘的运算规则相对特征体局部坐标系进行定义的形式

一致。

定义机床坐标系位于工作台中心, B 轴坐标系 $X_b Y_b Z_b$ 与主轴坐标系 $X_s Y_s Z_s$ 重合。 Y 轴坐标系 $X_y Y_y Z_y$ 、 X 轴坐标系 $X_x Y_x Z_x$ 、 Z 轴坐标系 $X_z Y_z Z_z$ 建立于各组成轴上, 以上局部坐标系方向与参考系 $X_R Y_R Z_R$ 一致。 C 轴和 B 轴的测量坐标系 $X_c Y_c Z_c$ 、 $X_b Y_b Z_b$ 与各局部坐标系之间位置关系如图 2 所示。对摆头转台型五轴机床而言, 通过将旋转轴的运动误差固结于所建立的局部坐标系下进行描述, 可实现在各旋转轴局部坐标系下的轨迹测量, 易于误差建模和辨识的进行。

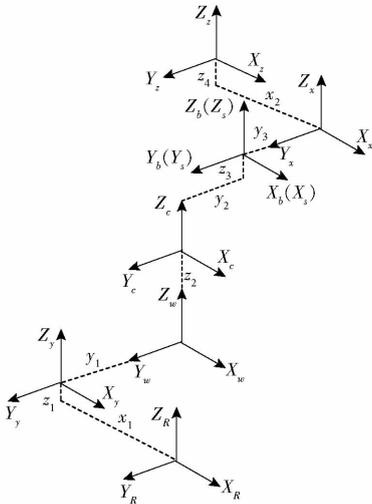


图 2 旋转轴局部坐标系示意图

Fig. 2 Structure schematic of local coordinate systems

1.3 摆头转台型五轴机床旋转轴运动误差测量模型

DBB 是检测机床精度的有效工具, 在具有圆弧插补功能的数控机床上, 可通过多轴联动或主轴端旋转轴转动带动主轴端 DBB 支座运动, 驱动工作台带动安装其上的 DBB 支座运动, 圆运动过程中可伸缩杆检测两接触球球心间距离相对圆运动半径的误差, 并形成圆运动的误差轨迹, 结合几何误差模型可实现误差解耦及误差项的最终辨识^[1,13]。由五轴机床空间几何误差的齐次表达形式可知, 五轴机床的特征体 i 和相邻低序体单元 j 之间的位置关系可由齐次变换矩阵表示为

$${}^j_k \mathbf{T} = {}^j_k \mathbf{T}_{pk} {}^j_k \mathbf{T}_{pe} {}^j_k \mathbf{T}_{mk} {}^j_k \mathbf{T}_{me} \quad (1)$$

式中 ${}^j_k \mathbf{T}_p$ ——位置变换矩阵

${}^j_k \mathbf{T}_{pe}$ ——位置误差变换矩阵

${}^j_k \mathbf{T}_m$ ——运动变换矩阵

${}^j_k \mathbf{T}_{me}$ ——运动误差变换矩阵

球杆仪的接触球 O_2 和 O_1 在测量坐标系中的位置为 $\mathbf{P}_{o2} = (x_2, y_2, z_2)^T$, $\mathbf{P}_{o1} = (x_1, y_1, z_1)^T$ 。不考虑运动误差对旋转轴精度的影响时, 小球 O_j 的理想变换矩阵为

$${}^i_{o_j} \mathbf{T} = \mathbf{I}_{4 \times 4} \mathbf{I}_{4 \times 4} \begin{bmatrix} \cos c & -\sin c & 0 & 0 \\ \sin c & \cos c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos b & 0 & \sin b & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin b & 0 & \cos b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{I}_{4 \times 4} \quad (2)$$

当旋转轴 C 运动而转动轴 B 保持静止时, 与角 b 相关的矩阵是单位阵; 类似的, 当旋转轴 B 运动而旋转轴 C 保持静止时, 与角 c 相关的矩阵是单位阵。考虑旋转轴的运动几何误差影响机床精度, 小球 O_j 在实际状态下的变换关系表达为

$${}^a_{o_j} \mathbf{T} = \mathbf{I}_{4 \times 4} \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_z(\theta) & -\sin \varepsilon_z(\theta) & 0 & 0 \\ \sin \varepsilon_z(\theta) & \cos \varepsilon_z(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon_y(\theta) & -\sin \varepsilon_y(\theta) & 0 \\ 0 & \sin \varepsilon_y(\theta) & \cos \varepsilon_y(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_x(\theta) & 0 & \sin \varepsilon_x(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \varepsilon_x(\theta) & 0 & \cos \varepsilon_x(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_x(\theta) \\ 0 & 1 & 0 & \delta_y(\theta) \\ 0 & 0 & 0 & \delta_z(\theta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos c & -\sin c & 0 & 0 \\ \sin c & \cos c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos b & 0 & \sin b & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin b & 0 & \cos b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{I}_{4 \times 4} \quad (3)$$

利用旋转轴驱动球杆仪实现圆轨迹测量时, DBB 的接触 O_j 的理想位置和实际位置为

$${}^a \mathbf{P}_{o_j} = {}^a_{o_j} \mathbf{T} \mathbf{P}_{o_j} \quad (4)$$

$${}^i \mathbf{P}_{o_j} = {}^i_{o_j} \mathbf{T} \mathbf{P}_{o_j} \quad (5)$$

将式(3)代入式(4), 式(2)代入式(5), 可确定理想状态下 DBB 接触球之间的距离 ${}^i \mathbf{L}$ 和实际状态下接触球间距离 ${}^a \mathbf{L}$, 其表达形式为

$${}^i \mathbf{L} = {}^i \mathbf{P}_{o2} - {}^i \mathbf{P}_{o1} \quad (6)$$

$${}^a \mathbf{L} = {}^a \mathbf{P}_{o2} - {}^a \mathbf{P}_{o1} \quad (7)$$

DBB 接触球之间的长度变化值在 3 个方向是空间误差向量, 可以表示为

$$[\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z \quad 1] = {}^a \mathbf{L} - {}^i \mathbf{L} \quad (8)$$

将式(6)、(7)和齐次变换矩阵代入式(8)可确定误差向量的具体表达式。对 C 轴运动几何误差进行测量时,需保证主轴端接触球不受 B 旋转轴运动的影响,以此实施圆轨迹测量可以得到 C 轴的空间误差向量,结果为

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{ci} \\ \Delta y_{ci} \\ \Delta z_{ci} \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} x_j \varepsilon_z(c) \operatorname{sinc} - y_j \varepsilon_z(c) \operatorname{cosec} + z_j \varepsilon_y(c) + \delta_x(c) \\ x_j \varepsilon_z(c) \operatorname{cosec} - y_j \varepsilon_z(c) \operatorname{sinc} - z_j \varepsilon_x(c) + \delta_y(c) \\ x_j (\varepsilon_x(c) \operatorname{sinc} - \varepsilon_y(c) \operatorname{cosec}) + y_j (\varepsilon_y(c) \operatorname{sinc} + \varepsilon_x(c) \operatorname{cosec}) + \delta_z(c) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,下标 i 表示测量模式,下标 j 表示安装位置。

类似的,对旋转轴 B 的运动几何误差进行辨识时,将相关的误差矩阵代入式(8)后,可得 B 轴误差向量表达式为

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{bi} \\ \Delta y_{bi} \\ \Delta z_{bi} \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -x_j \varepsilon_y(b) \operatorname{sinc} - y_j \varepsilon_z(b) + z_j \varepsilon_y(b) \operatorname{cosec} + \delta_x(b) \\ x_j (\varepsilon_z(b) \operatorname{cosec} + \varepsilon_x(b) \operatorname{sinc}) + z_j (\varepsilon_z(b) \operatorname{sinc} - \varepsilon_x(b) \operatorname{cosec}) + \delta_y(b) \\ -x_j \varepsilon_y(b) \operatorname{cosec} + y_j \varepsilon_x(b) - z_j \varepsilon_y(b) \operatorname{sinc} + \delta_z(b) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

2 基于五次安装法的运动几何误差测量及辨识

基于五次安装法的 PDGEs 测量及辨识的基本思路是:通过设置 DBB 的接触球在测量坐标下的初始位置,保证旋转轴相同初始安装位置下的圆轨迹测量相继进行,然后改变 DBB 的安装位置实施下一安装位置下的轨迹测量。利用旋转轴单独运动以及

直线轴联动可直接实现一次安装不同测量模式之间的切换,在此过程中 DBB 的磁致伸缩杆不与两个球面支承座分离,其本质属于同一次安装^[19,21]。

2.1 C 轴的测量模式及辨识

当测量坐标系与旋转轴的轴心位置重合,且 DBB 的球杆与测量坐标系的轴线平行时,DBB 磁致伸缩杆对相应方向的误差最为敏感^[11-12,16]。因此可通过设置球杆仪安装位置和方向,实现 DBB 的可伸缩杆沿旋转轴坐标系的坐标轴方向相对静止,通过上述处理可有效提升测量及辨识效率。此外,为简化辨识过程、提升辨识结果的准确性,需要限制旋转轴 B 轴与旋转轴 C 轴同步运动形式的出现,由此可实现 B 轴的运动几何误差不影响 C 轴的辨识结果,即通过设置旋转轴的运动形式保证辨识过程中两个旋转轴的运动几何误差测量过程中的线性无关。

通过上述方式可确保主轴端接触球沿刀具链在机床 C 轴定义的测量坐标系下位置不发生变化,因此只需考虑安装于转台端 C 轴坐标下的接触球受 C 轴运动几何误差的影响。由式(9)和式(10)可知,几何误差在 3 个方向上的误差分量、球杆仪工作台端接触球位置以及几何误差项之间可表达为矩阵形式,利用最小二乘法可准确辨识 6 项误差,也可通过设计不同测量位置,利用测量坐标系内不同位置的圆轨迹测量数据确定 6 项几何误差解析解。

由运动误差的矩阵表达形式可知,运动误差与机床的综合几何误差模型无关,仅与测量模型相关。因此需考虑测量坐标系下误差项与 DBB 安装位置之间的关系,选择合适的坐标位置使上述包含位置坐标的矩阵形式为非奇异矩阵,由此构造出 6 个线性无关的正定方程。式(9)、(10)中 (x_i, y_i, z_i) ($i = 1, 2, \dots, 6$) 是工作台一侧接触球在 C 轴坐标(测量坐标)系下的初始安装位置。测量过程中,DBB 对其伸缩杆产生位移变形方向的误差最为明显,因此,可据此设计球杆仪的放置方向。对 C 旋转轴所设计的 DBB 安装位置如图 3 所示。

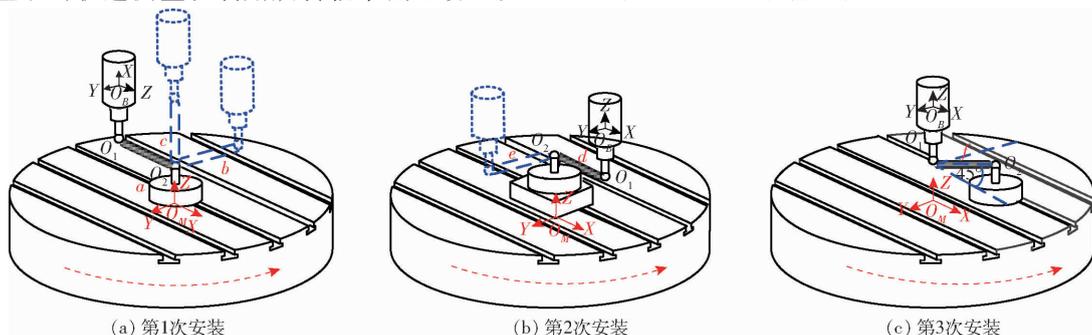


图 3 辨识 C 轴运动几何误差的安装测量模式

Fig. 3 Installation and measurement modes for identifying motion errors of C axis

设置上述3次安装并建立 $a \sim f$ 测量模式,此时对 C 轴的测量需要3次安装。具体步骤如下:

如图3所示,在对DBB实施第1次安装并进行模式 a 下的圆轨迹测量时,工作台端小球 O_2 安装于转台中心,球杆仪的伸缩杆平行于 X 轴,主轴端接触球 O_1 与接触球 O_2 距离为DBB的公称长度 L 。测量过程中,仅有旋转轴 C 轴运动其他运动轴均保持静止。此时在 C 轴的驱动下仅有工作台端小球运动,主轴端接触球 O_1 静止。这样球杆仪仅对旋转轴 C 轴 X 方向的误差敏感,即仅有 C 轴沿 X 方向的误差对测量有影响。在此时测量模式下,球杆仪测量值 ΔR 与几何误差的关系为

$$\Delta R_{Ca} = \Delta x_{ca} = \delta_x(c) \quad (11)$$

类似的,在 b 、 c 测量模式下进行沿 Y 轴和 Z 轴方向的安装时,可实现对 C 轴沿 Y 方向和沿 C 轴 Z 方向的误差测量。此时,在 b 、 c 测量模式下,球杆仪测量值 ΔR 与几何误差的关系为

$$\Delta R_{Cb} = \Delta y_{cb} = \delta_y(c) \quad (12)$$

$$\Delta R_{Cc} = \Delta z_c = \delta_z(c) \quad (13)$$

在对DBB实施第2次安装并进行模式 d 下的圆轨迹测量时,首先在 Z 方向上提升工作台端接触球 O_2 与转台中心的距离后,改变 B 轴与接触球 O_1 的距离后对球杆仪进行安装。与第1次安装下的测量模式 a 类似,球杆仪的伸缩杆平行于 X 轴,主轴端小球 O_1 与 O_2 距离为DBB的公称长度 L 。测量过程中,仅有旋转轴 C 轴运动,其他运动轴均保持静止。由于工作台端小球安装位置的改变,在 Z 方向测量坐标系与小球 O_2 的球心位置不重合,除了 C 轴沿 X 方向的误差对测量有影响外, C 轴沿 Z 方向的误差也会对测量有影响。由于在测量模式 a 中已经辨识了 C 轴沿 X 方向的误差 $\delta_x(c)$,此时 C 轴沿 Z 方向的运动误差可辨识,二者与球杆仪读数之间的关系可表达为

$$\Delta R_{Cd} = z_4 \varepsilon_y(c) + \delta_x(c) \quad (14)$$

类似的,在 e 测量模式下进行沿 Y 的安装时,可实现 C 轴沿 Y 方向的误差测量。此时,球杆仪读数的相对表达形式 ΔR 可表达为

$$\Delta R_{Ce} = -z_5 \varepsilon_x(c) + \delta_y(c) \quad (15)$$

在对DBB实施第3次安装并进行模式 f 下的圆轨迹测量时,球杆仪的安装如图3c所示。此时主轴端小球位于转台中心上方,DBB的可伸缩杆平行于 XOY 平面,且工作台端接触球 O_2 的初始位置在 X 轴与 Y 轴的角平分线。测量过程中,仅有旋转轴 C 轴运动,其他运动轴均保持静止。由于工作台端接触球 O_2 的改变,在 XOY 平面内 C 轴沿 X 方向的误差和 C 轴沿 Z 方向的误差均对测量有影响,此时影响测量轨迹的误差与球杆仪读数之间的关系可表达为

$$\Delta R_{Cf} = \sqrt{(\varepsilon_z(c)x_6 \sin c - y_6 \cos c + \delta_x(c))^2 + (\varepsilon_z(c)x_6 \cos c - y_6 \sin c + \delta_y(c))^2} \quad (16)$$

由式(11)~(16)可知,确定工作台端小球 O_2 的初始安装位置后, $\delta_x(c)$ 、 $\delta_y(c)$ 、 $\delta_z(c)$ 、 $\varepsilon_x(c)$ 、 $\varepsilon_y(c)$ 可由式(12)~(15)确定辨识值,将测量模式 a 和测量模式 b 辨识出的几何误差 $\delta_x(c)$ 、 $\delta_y(c)$ 的解析解代入式(16)后可辨识出滚转误差 $\varepsilon_z(c)$,由此可辨识 C 旋转轴的6项运动几何误差。

2.2 B轴测量模式及辨识

由于 B 轴的坐标系与工作台之间的空间距离较大,无法将球杆仪的磁性底座准确安装于 B 轴的轴线上,因此对 B 轴的测量辨识与 C 轴的测量及安装模式不同。当 B 轴转动带动主轴端小球运动时,需要通过直线轴与旋转轴的联动方式实现圆/圆弧运动轨迹的测量。

对 B 轴测量时以 B 轴的局部坐标系为测量基准坐标系。图4是设计的DBB安装示意简图。在对DBB第1次安装后进行 B 轴 a 模式下的测量,主轴端接触球 O_1 安装于距离 B 轴沿 X 方向 L_b 处,工作台端接触球 O_2 在 B 轴坐标系下的位置是 $(R + L_b, 0, H_1)$ 。DBB第1次安装后的 B 轴 a 测量模式下,进行圆轨迹测量过程中 B 轴顺时针转动, Z 轴与 X 轴通过直线插补形成圆弧轨迹, C 轴和 Y 轴保持静止。

DBB对 B 轴沿 X 方向的几何误差敏感,此时接触球 O_2 与 O_1 之间的距离在 X 轴方向的投影表征了

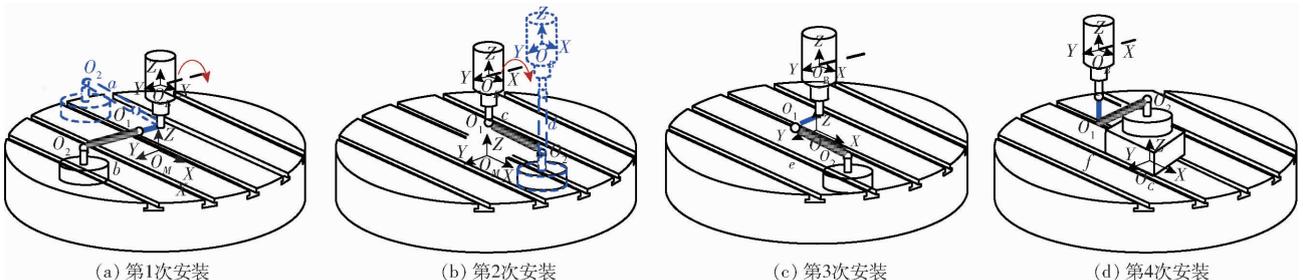


图4 辨识 B 轴运动误差的安装测量模式

Fig. 4 Installation and measurement modes for identifying motion errors of B axis

球杆仪长度。几何误差影响下的球杆仪长度变化与误差项之间的关系为

$$\Delta R_{Ba} = L_b \varepsilon_y(b) \sin b + \delta_x(b) + H_1 \varepsilon_y(b) \cos b \quad (17)$$

在对 DBB 第 1 次安装后测量模式 b 下, 此时球杆仪对 B 轴沿 Y 轴方向的误差敏感。通过 B 轴的顺时针转动, Z 轴与 X 轴通过直线插补形成圆弧轨迹, C 轴和 Y 轴保持静止。几何误差影响下的球杆仪长度变化值与误差项之间的关系为

$$\Delta R_{Bb} = \delta_y(b) + H_1 (\varepsilon_z(b) \sin b - \varepsilon_x(b) \cos b) \quad (18)$$

在对 DBB 第 2 次安装后 c 测量模式下, 几何误差影响下的球杆仪长度变化值与误差项之间的关系为

$$\Delta R_{Bc} = H_1 \varepsilon_y(b) \cos b + \delta_x(b) \quad (19)$$

在对 DBB 第 2 次安装后的 d 测量模式下, 主轴端接触球 O_1 在 B 轴坐标系下的位置是 $(R, 0, H_1)$, 工作台端接触球 O_2 安装于 X 轴方向上, 在 B 轴坐标系下的位置是 $(R, 0, H_1 - R)$, 此时 DBB 的可伸缩杆平行于 Z 轴。几何误差影响下的球杆仪长度变化与误差项之间的关系为

$$\Delta R_{Bd} = -H_1 \varepsilon_y(b) \sin b + \delta_z(b) \quad (20)$$

在对 DBB 第 3 次安装后的测量模式 e 中, 主轴端接触球 O_1 安装于 B 轴坐标中的 $\left(\frac{\sqrt{2}L_b}{2}, \frac{\sqrt{2}L_b}{2}, H_1\right)$ 位置处, 工作台端接触球 O_2 位于 B 轴坐标系 $\left(\frac{(2+\sqrt{2})L_b}{2}, \frac{\sqrt{2}L_b}{2}, H_1\right)$ 位置处, DBB 的可伸缩杆平行于 X 轴方向。此时几何误差影响下的球杆仪长度变化与误差项之间的关系为

$$\Delta R_{Be} = \frac{-\sqrt{2}L_b}{2} \varepsilon_y(b) \sin b - \frac{\sqrt{2}L_b}{2} \varepsilon_z(b) + H_1 \varepsilon_y(b) \cos b + \delta_x(b) \quad (21)$$

在对 DBB 第 4 次安装后的测量模式 f 中, 主轴端接触球 O_1 安装于 B 轴坐标下的 $(0, 0, H_2)$ 处, 工作台端接触球 O_2 安装于坐标系下 $(0, R, H_2)$ 处。DBB 的可伸缩杆平行于 Y 轴方向。此时, 几何误差影响下的球杆仪长度变化与误差项之间的关系为

$$\Delta R_{Bf} = H_2 [\varepsilon_z(b) \sin b - \varepsilon_x(b) \cos b] + \delta_y(b) \quad (22)$$

通过测量模式 a 的辨识表达式 (17) 和测量模式 c 的辨识表达式 (19) 可知角度误差 $\varepsilon_y(b)$ 的辨识表达式为

$$\varepsilon_y(b) = \frac{\Delta R_{Ba} - \Delta R_{Bc}}{L_b \sin b} \quad (23)$$

将式 (23) 代入式 (20), 可得 $\delta_z(b)$ 的表达式为

$$\delta_z(b) = \Delta R_{Bd} + H_1 \frac{\Delta R_{Ba} - \Delta R_{Bc}}{L_b} \quad (24)$$

将式 (23) 代入式 (19), 可得 $\delta_x(b)$ 的表达式为

$$\delta_x(b) = \Delta R_{Bc} - H_1 \frac{\Delta R_{Ba} - \Delta R_{Bc}}{L_b \sin b} \cos b \quad (25)$$

求解式 (21), 可得到角度误差 $\varepsilon_z(b)$ 的辨识表达式为

$$\varepsilon_z(b) = \frac{\Delta R_{Bc} + \left(\frac{\sqrt{2}L_b}{2} \sin b - H_1 \cos b\right) \frac{\Delta R_{Ba} - \Delta R_{Bc}}{L_b \sin b} - \left(\Delta R_{Bc} - H_1 \frac{\Delta R_{Ba} - \Delta R_{Bc}}{L_b \sin b} \cos b\right)}{-\frac{\sqrt{2}L_b}{2}} \quad (26)$$

基于已经辨识的 $\varepsilon_z(b)$, 由式 (18) 和式 (22) 可辨识出 $\varepsilon_x(b)$, 其表达式为

$$\varepsilon_x(b) = \left(\frac{\Delta R_{Bb} - \Delta R_{Bf}}{H_1 - H_2} + \varepsilon_z(b) \sin b\right) \frac{1}{\cos b} \quad (27)$$

利用 $\varepsilon_z(b)$ 的辨识值, 可以确定 $\delta_y(b)$ 的辨识表达式为

$$\varepsilon_y(b) = \Delta R_{Bb} - H_1 \frac{\Delta R_{Bb} - \Delta R_{Bf}}{H_1 - H_2} \quad (28)$$

2.3 五次安装法的建立

B 轴坐标系中心位置距离工作台表面沿 Z 向距离较大, 这导致构造 B 轴的运动几何误差辨识方程时 DBB 的安装位置较 C 轴多。但依据在相同的初始安装位置可连续实施不同平面内的测量, 且球杆仪仅需安装一次的特点, 本文将相同的初始安装位置的测量模式合并构造基于 DBB 测量的五次安装法。

由 C 轴和 B 轴所述的 DBB 安装及测量特征可知: 旋转轴 C 轴的测量模式 d, e 与测量 B 轴的测量模式 f 相比, 主轴端接触球和工作台端接触球在机床坐标系下的初始位置存在相似之处。此时可利用旋转轴单独运动以及直线轴联动直接实现一次安装不同测量模式之间的切换。类似的情况在 C 轴测量模式 f 与 B 轴测量模式 c, d 之间也存在。因此, 本研究所提出的测量方法可依据上述特点进行安装次数的简化, 基于 DBB 测量流程如图 5 所示。

五次安装法与其他方法^[19-20]相比可有效减少 DBB 的安装次数, 这样可以节省安装时间, 同时可进一步避免安装误差对测量结果一致性的影响。

3 实验验证

为验证所提出的五次安装测量方法的准确性, 在如图 6 所示的五轴加工中心上进行实验研究。在

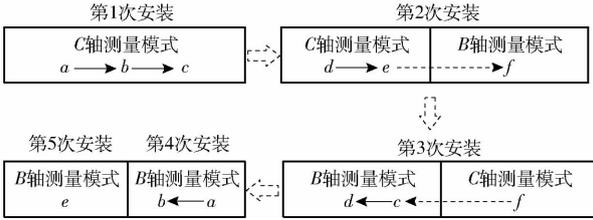


图5 基于 DBB 测量的五次安装法测量流程

Fig. 5 Measuring process of five installation method based on DBB



图6 五次安装法实验现场

Fig. 6 Experimental setup of five installation method

进行旋转轴的运动几何误差测量前,先进行直线轴的几何误差测量及补偿^[1,11],环境温度控制在(20 ± 2)℃内,由此最大程度降低热误差对测量结果的影响。

依据五次安装法建立的测量模式,利用杆仪进行圆轨迹测量。整个测量过程包括 DBB 的五次安装,其中安装参数 $L_b = 100\text{ mm}$, $R = 100\text{ mm}$, $H_1 =$

384.67 mm, $H_2 = 484.67\text{ mm}$ 。C 轴安装模式下, B 轴静止不动, C 轴的进给率 500 mm/min, C 轴的越程角为 180°, 顺时针和逆时针的运动行程是 360°。B 轴运动模式下, B 轴的进给率是 500 mm/min, B 轴的越程角为 5°, 顺时针和逆时针的运动行程是 90°。同一测量模式进行多组数据测量, 并保存数据。依据五次安装法测量流程执行完上述的圆轨迹测量后, 利用所建立的辨识模型可解耦得到 C 轴和 B 轴的 12 项运动几何误差, 辨识结果如图 7、8 所示, 利用辨识值通过逆运算确定补偿值的解析解^[8,13]。

由图 7 可知, 误差补偿后 C 轴的位置误差最大值由 12.83 μm 降低至 9.53 μm, 角度误差最大值由 $1.45 \times 10^{-4}\text{ rad}$ 降低至 $7.0 \times 10^{-5}\text{ rad}$ 。C 轴的最低补偿率是 15.85%, 平均补偿率是 48.89%, 最大补偿率达到了 92.42%。

由图 8c 和图 8d 可知, 误差补偿后 B 轴的位置误差最大值由 9.65 μm 降低至 7.11 μm, 角度误差最大值由 $1.6 \times 10^{-4}\text{ rad}$ 降低至 $2.0 \times 10^{-5}\text{ rad}$ 。B 轴的最低补偿率是 26.45%, 平均补偿率是 51.49%, 最大补偿率达到了 87.26%。为进一步验证辨识值的准确性, 依据 ISO 230-1 标准利用五轴同步运动驱动 DBB 进行虚拟圆锥台轨迹测量^[12,25], 并分别进行误差补偿前空间圆锥台轨迹测试(测量轨迹如图 9a), 以及依据文献[17]的测量方法(六次安装)和本文的五次安装法确定辨识值, 并进行误差补偿后空间锥台轨迹测量, 结果如图 9b 所示。

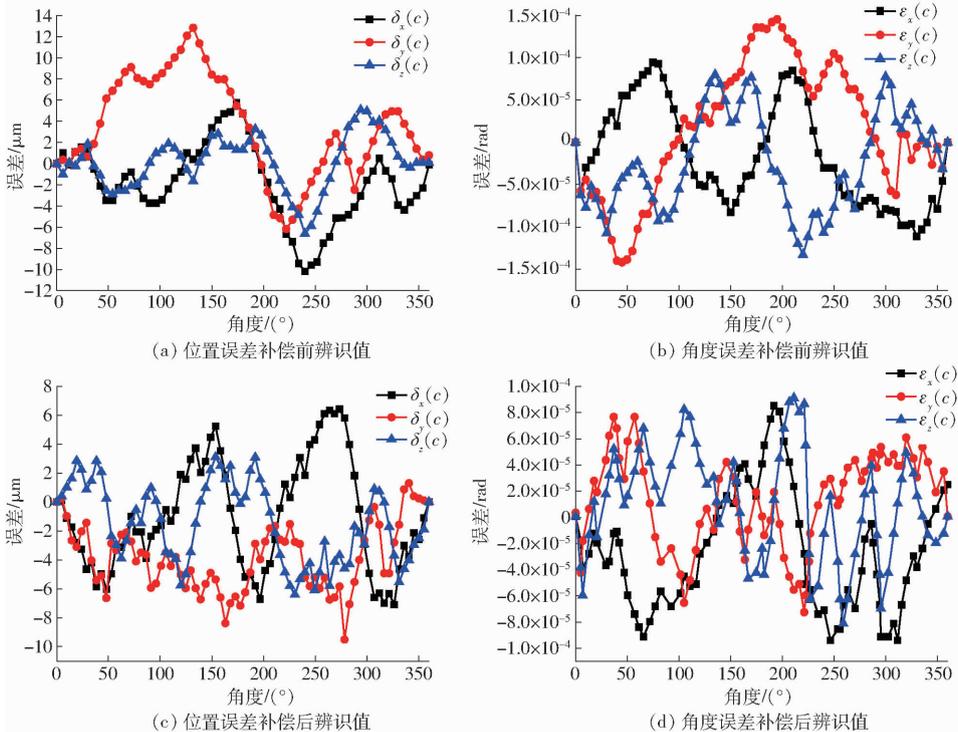


图7 C 轴运动误差辨识结果对比

Fig. 7 Comparison of motion errors of C axis

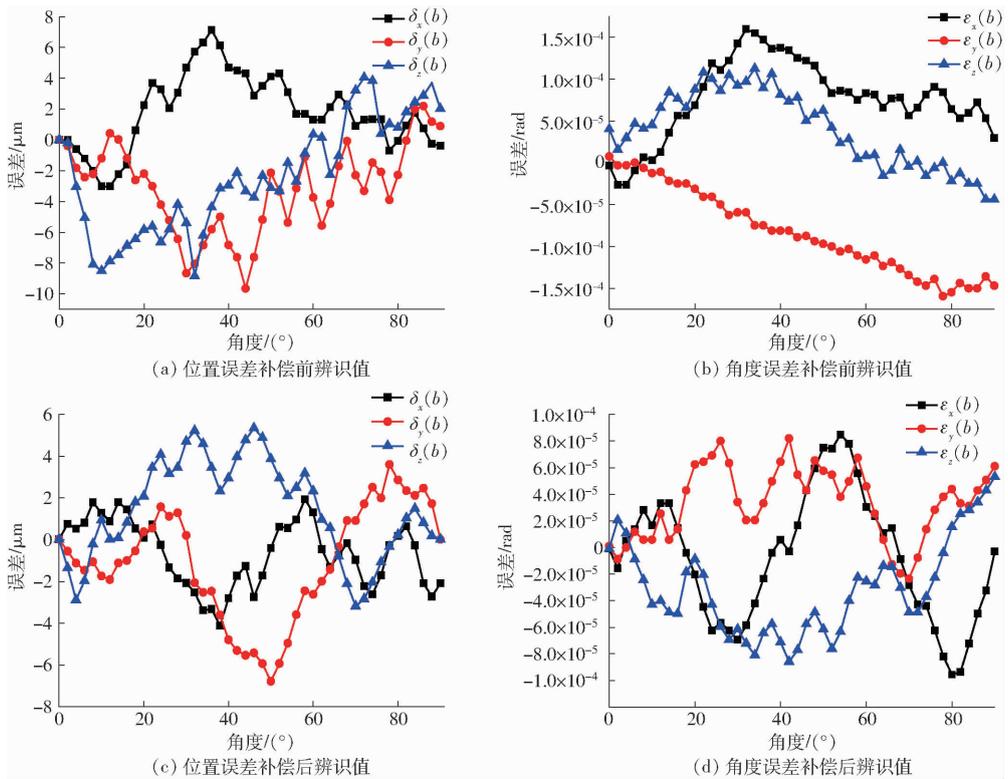
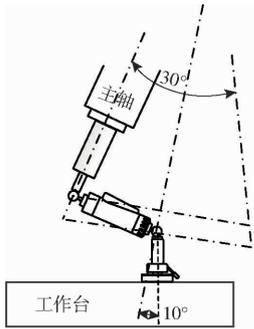
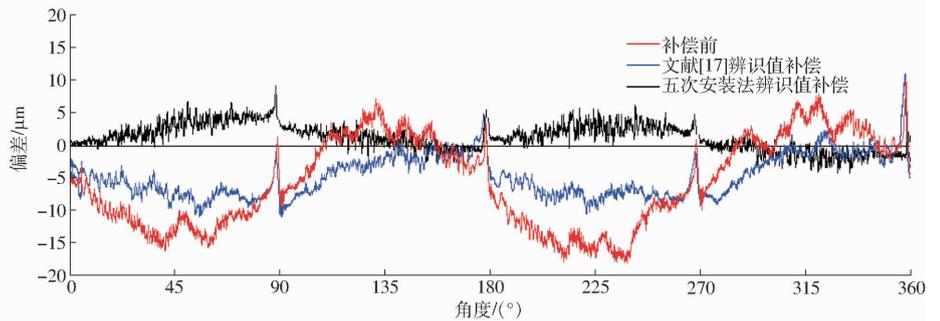


图 8 B 轴运动误差辨识结果对比

Fig. 8 Comparison of motion errors of B axis



(a) 虚拟圆锥台测量轨迹示意



(b) 补偿前后测量轨迹对比

图 9 圆锥台测量轨迹及测量结果

Fig. 9 Measurement track and measurement results of frustum of cone

由图 9b 可知,运动误差补偿前圆轨迹的半径偏差平均值达 $9.5 \mu\text{m}$,依据文献[17]所提出的测量辨识方法确定几何误差数值实施误差补偿后,圆轨迹的半径偏差平均值为 $6.8 \mu\text{m}$,利用五次安装法进行误差辨识及补偿后,圆轨迹的半径偏差平均值为 $4.7 \mu\text{m}$,降低了 50.52%。采用文献[17]的测量辨识方法进行补偿后,半径偏差明显降低,依据五次测量法的辨识值进行误差补偿后,半径偏差分布范围进一步减小。误差补偿实施以后效果显著,机床的精度得到了有效的提升。这说明本研究所提出的误差测量及辨识方法可准确量化摆头转台型五轴机床旋转轴的运动误差数值,较少的安装次数提升了辨识结果的准确性。

4 结论

(1) 运用多体系统理论和齐次坐标变换方法对几何误差进行表征,建立了摆头转台型五轴机床旋转轴运动误差测量模型。将旋转轴的运动误差在其相应的局部坐标系下进行表达,无需考虑机床的参考坐标系,符合运动误差仅与旋转轴自身制造精度相关,与轴间装配精度无关的本质特征。

(2) 根据目前机床检测精度高、速度快的要求,提出了一种基于 DBB 的五次安装的摆头转台型五轴机床旋转轴运动几何误差测量、辨识方法。通过设置 DBB 的接触球在测量坐标下的初始位置,保证旋转轴相同初始安装位置下的圆轨迹测量相继进行,利用旋转轴单独运动以及直线轴联动可直接实

现一次安装不同测量模式之间的切换,通过基于DBB圆轨迹测量的五次安装,可实现两个旋转轴的12项运动误差的全部辨识。减少了安装次数,最大程度避免了安装误差对测量结果的影响,提升了测量效率。

(3)依据五次安装法在摆头转台型五轴机床上进行运动误差辨识,利用辨识值实施误差补偿后,C

轴的最低补偿率达到15.85%,平均补偿率为48.89%;B轴的最低补偿率是26.45%,平均补偿率达到51.49%,五轴同步运动形成的虚拟圆锥台测量轨迹的半径偏差降低了50.52%,误差补偿后机床精度得到显著提升,说明本研究所提出的误差测量及辨识方法对量化摆头转台型五轴机床的运动误差准确、有效。

参 考 文 献

- [1] 杨建国,范开国,杜正春.数控机床误差实时补偿技术[M].北京:机械工业出版社,2013.
- [2] 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.
- [3] HE Zhengya, FU Jianzhong, YAO Xinhua, et al. A new error measurement method to identify all six error parameters of a rotational axis of a machine tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 88:1-8.
- [4] WANG J, GUO J. Algorithm for detecting volumetric geometric accuracy of NC machine tool by laser tracker[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(1):166-175.
- [5] BI Q, HUANG N, SUN C, et al. Identification and compensation of geometric errors of rotary axes on five-axis machine by on-machine measurement[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(1):505-512.
- [6] 褚宁,张为民.基于张量理论的数控机床误差补偿模型[J/OL].农业机械学报,2017,48(10):408-416.
CHU Ning, ZHANG Weimin. Error compensation model of CNC machine tool based on tensor theory[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10):408-416. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171052&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.052. (in Chinese)
- [7] 余文利,付国强,孙磊,等.数控加工中心空间误差场建模与仿真软件设计[J/OL].农业机械学报,2016,47(4):382-390.
YU Wenli, FU Guoqiang, SUN Lei, et al. Error field modeling and simulation software development for CNC machining center[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4):382-390. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160450&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.050. (in Chinese)
- [8] 齐继宝,杨伟民.基于微分变化构造法的数控机床几何误差补偿方法[J/OL].农业机械学报,2016,47(9):398-405.
QI Jibao, YANG Weimin. Differential change construction based geometric error compensation for machine tools[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):398-405. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160953&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.053. (in Chinese)
- [9] 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/OL].农业机械学报,2016,47(10):383-389.
GUO Shijie, MEI Xuesong, JIANG Gedong, et al. Correlation analysis of geometric error for CNC machine tool[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10):383-389. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161050&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.050. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] TSUSUMI M, TONE S, KATO N, et al. Enhancement of geometric accuracy of five-axis machining centers based on identification and compensation of geometric deviations[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 68:11-20.
- [12] ISO 230-1. Test code for machine tools-part 1: geometric accuracy of machines operating under no-load or quastic-static conditions[S]. 2012.
- [13] 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.
- [14] LEE K I, YANG S H. Compensation of position-independent and position-dependent geometric errors in the rotary axes of five-axis machine tools with a tilting rotary table[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(5-8):1677-1685.
- [15] ZARGARBASHI S H H, MAYER J R R. Single setup estimation of a five-axis machine tool eight link errors by programmed end point constraint and on the fly measurement with Capball sensor[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(10):759-766.

- [13] 李永建,王利祥,张长庚,等. 基于三维励磁结构的电工磁材料动态磁特性测试与分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1):166-174.
LI Yongjian, WANG Lixiang, ZHANG Changgeng, et al. Dynamic magnetic properties testing and analysis of the electric magnetic materials based on three-dimensional excitation structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1):166-174. (in Chinese)
- [14] 翁玲,曹晓宁,梁淑智,等. 棒状铁镓合金磁滞特性和功耗特性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2):411-418.
WENG Ling, CAO Xiaoning, LIANG Shuzhi, et al. Analysis of hysteresis and power consumption characteristics of Fe-Ga rod alloy [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):411-418. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180253&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.053. (in Chinese)
- [15] 舒亮,李传,吴桂初,等. Fe-Ga合金磁致伸缩力传感器磁化模型建立与特性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(5):344-349.
SHU Liang, LI Chuan, WU Guichu, et al. Magnetization model of Fe-Ga alloy magnetostrictive force sensor and its characteristics [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):344-349. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150548&flag=1&iournal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.048. (in Chinese)
- [16] LI J S, YANG Q X, LI Y J, et al. Anomalous loss modeling and validation of magnetic materials in electrical engineering [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4):8800105.
- [17] 孔庆奕,程志光,李悦宁. 取向硅钢片在不同环境温度下的磁特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(9):2743-2749.
KONG Qingyi, CHENG Zhiguang, LI Yuening. Magnetic properties of oriented silicon steel sheet under different ambient temperatures [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9):2743-2749. (in Chinese)
- [18] 王博文,张露予,王鹏,等. 磁致伸缩位移传感器检测信号分析[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2):358-364.
WANG Bowen, ZHANG Luyu, WANG Peng, et al. Analysis of detection signal for magnetostrictive displacement sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2):358-364. (in Chinese)
- [19] TU J Z, ZHANG J, BU G Q, et al. Analysis of the sending-side system instability caused by multiple HVDC commutation failure [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(4):37-44.
- [20] ZHANG T, YANG B T, LI H G, et al. Dynamic modeling and adaptive vibration control study for giant magnetostrictive actuators [J]. Sensors & Actuators a Physical, 2013, 190(2):96-105.

~~~~~

(上接第 410 页)

- [16] ZARGARBASHI S H H, MAYER J R R. Assessment of machine tool trunnion axis motion error, using magnetic double ball bar[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(14):1823-1834.
- [17] JIANG L, DING G, LI Z, et al. Geometric error model and measuring method based on worktable for five-axis machine tools [J]. Proc IMech E Part B Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227(1):32-44.
- [18] FU G, FU J, XU Y, et al. Accuracy enhancement of five-axis machine tool based on differential motion matrix: geometric error modeling, identification and compensation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 89:170-181.
- [19] 田文杰,郭龙真,刘海涛. 数控机床几何误差源的快速辨识方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(2):171-177.  
TIAN Wenjie, GUO Longzhen, LIU Haitao. Rapid identification method for geometric errors of CNC machine tools[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016, 49(2):171-177. (in Chinese)
- [20] ZHU S, DING G, QIN S, et al. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 52(1):24-29.
- [21] 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.
- [22] LI H, GUO J, DENG Y, et al. Identification of geometric deviations inherent to multi-axis machine tools based on the pose measurement principle[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(12):125008.
- [23] HONG C, IBARAKI S, OYAMA C. Graphical presentation of error motions of rotary axes on a five-axis machine tool by static R-test with separating the influence of squareness errors of linear axes [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 59:24-33.
- [24] GUO S, JIANG G, ZHANG D, et al. Position-independent geometric error identification and global sensitivity analysis for the rotary axes of five-axis machine tools[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(4):045006.
- [25] XIANG S, ALTINTAS Y. Modeling and compensation of volumetric errors for five-axis machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 101:65-78.