

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2615043

基于大倾角 S 形试件的双转台五轴机床 旋转轴运动误差场分析*

吴 石¹, 孙 伟¹, 赵新成², 张 勇¹, 卞长和¹

(1. 哈尔滨理工大学机械动力工程学院 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨汽轮机厂有限责任公司 哈尔滨 150046)

摘 要:针对双转台五轴机床旋转轴运动误差场分析问题,提出一种基于大倾角 S 形试件旋转轴运动误差的建模及辨识方法。首先,基于机床拓扑结构建立双转台五轴机床各旋转轴运动误差传递模型,以及考虑 S 形试件曲率与倾角耦合影响的旋转轴运动误差模型;其次,基于双标准球辨识原理,根据 S 形试件曲率最大区域的两层测量点坐标分别拟合出虚拟圆心坐标,提出基于虚拟圆心的虚拟标准球心建立方法,实现 A 轴 6 项运动误差($\delta_x(a)$ 、 $\delta_y(a)$ 、 $\delta_z(a)$ 、 $\varepsilon_x(a)$ 、 $\varepsilon_y(a)$ 、 $\varepsilon_z(a)$)的辨识。然后基于 UG 建立虚拟双转台五轴机床加工模型,仿真不同倾角 S 形试件铣削过程,结合仿真与在机测量实验分析大倾角 S 形试件对 A 轴运动误差辨识结果的影响,揭示了 S 形试件倾角对 A 轴运动误差辨识的敏感性,随着倾斜角度的增加,测量得到的 A 轴的各项运动误差值呈现先增大后减小再增大的趋势,相比无倾角 S 形试件,45°~60°倾角 S 形试件的 A 轴 6 项运动误差辨识精度均提高约 10%。最后,基于 A 轴运动误差,利用 Kriging 插值方法建立五轴机床加工空间中对倾角敏感性最大的 $\varepsilon_z(a)$ 运动误差场,研究结果表明:A 轴不同旋转角度情况下,双转台五轴机床的运动误差 $\varepsilon_z(a)$ 存在“中心小、边缘大”的稳定分布情况。该结果为五轴机床在大姿态变化加工条件下的精度优化与误差补偿提供了参考依据。

关键词:双转台五轴机床;运动误差辨识;大倾角 S 形试件;虚拟标准球;空间误差场

中图分类号: TH161 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.35

Analysis of rotary axis motion errors of a dual-turntable five-axis machine tool based on large-angle S-shaped specimens

Wu Shi¹, Sun Wei¹, Zhao Xincheng², Zhang Yong¹, Bian Changhe¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. Harbin Turbine Company Limited, Harbin 150046, China)

Abstract: To analyze motion error fields in the rotary axes of a dual-turntable five-axis machine tool, this paper proposes a modeling and identification method for the rotary axis motion errors based on a large-inclination-angle S-shaped test piece. First, based on the machine tool's topological structure, a motion error propagation model for each rotary axis of the dual-turntable five-axis machine tool is established, along with a rotary axis motion error model that accounts for the coupling effect between the curvature of the S-shaped test piece and its inclination angle. Second, utilizing the dual-standard-sphere identification principle, the virtual circle center coordinates are fitted from two layers of measurement points in the region of maximum curvature of the S-shaped test piece. A method for constructing a virtual standard sphere center based on the virtual circle center is proposed, enabling the identification of the six motion errors of the A-axis ($\delta_x(a)$, $\delta_y(a)$, $\delta_z(a)$, $\varepsilon_x(a)$, $\varepsilon_y(a)$, $\varepsilon_z(a)$). Subsequently, a virtual machining model of the dual-turntable five-axis machine tool is built using UG. The milling process of S-shaped test pieces with different inclination angles is simulated. Combining the simulation results with on-machine measurement experiments, the influence of large inclination angles on the identification results of A-axis motion errors is analyzed, revealing the sensitivity of the S-shaped test piece's inclination angle to A-axis motion error identification. As the inclination angle increases, the identified values of each A-axis motion error exhibit a trend of first increasing, then decreasing, and finally increasing again. Compared with the S-shaped test piece without an inclination angle, the identification accuracy

收稿日期:2026-03-18 Received Date: 2026-03-18

* 基金项目:国家自然科学基金项目(51720105009)、黑龙江省自然科学基金项目(PL2025E051)资助

of the six A -axis motion errors is improved by approximately 10% for inclination angles between 45° and 60° . Finally, based on the identified A -axis motion errors, the Kriging interpolation method is used to establish the motion error field of $\varepsilon_z(a)$, which is the most sensitive to inclination angle in the machining workspace of the five-axis machine tool. The results show that, under different rotation angles of the A -axis, the motion error $\varepsilon_z(a)$ of the dual-turntable five-axis machine tool exhibits a stable distribution pattern, with smaller values in the center and larger values near the edges. This finding provides a reference for precision optimization and error compensation of five-axis machine tools under large posture variation machining conditions.

Keywords: dual rotary table five-axis machine tool; motion error identification; large-inclination S-shaped specimen; virtual standard sphere; spatial error field

0 前 言

双转台五轴机床因具备刀具姿态调节灵活,加工空间范围大以及复杂曲面加工能力强等特点,已成为航空航天、能源装备及精密制造等领域关键零部件加工的核心装备。复杂曲面零件的加工精度不仅受刀具路径规划和工艺参数影响,更在很大程度上取决于机床自身的几何误差与运动误差。其中,运动误差反映了机床各运动轴在运行过程中六自由度位姿偏差的综合效应,并随轴位置变化呈现显著的空间非均匀性,是制约五轴机床加工精度的重要因素。因此,开展高精度运动误差测量与辨识,是实现机床精度评价、误差补偿及加工性能提升的关键基础。近年来,基于特征样件的误差检测方法因具有成本低、实施便捷及工程适用性强等优势受到广泛关注,其中 S 形试件作为典型五轴机床检测标准件被广泛应用。然而,现有研究多基于固定姿态试件开展误差分析,不同倾角条件下 S 形试件对多轴耦合运动误差的敏感性差异尚缺乏系统研究,尤其是大倾角条件下误差辨识机理及其精度提升效果仍有待深入探讨。

运动误差建模方面,目前常用的建模方法主要包括基于刚体运动学的方法和基于多体系统运动学的方法,其中,多体系统理论结合齐次变换矩阵已成为五轴机床误差建模的主流方法^[1];Lei 等^[2]对五轴数控机床的运动误差进行了分析,设计了一套不受直线轴误差模型干扰的测量方案,并且对伺服不匹配和反向间隙误差进行建模;查俊等^[3]针对装配体导轨面几何误差难以精确测量造成运动误差定量分析困难,提出了一种基于机理驱动的建模方法;Wu 等^[4]采用齐次变换矩阵方法建立非正交五轴机床的几何误差模型,明确了相对运动约束方程的误差补偿;Fan 等^[5]基于齐次变换矩阵和多体系统理论,分别建立了 3 种测量模式中双球杆仪的相对位移模型;胡腾等^[6]以螺旋理论和串联机构运动学为理论基础,结合机床运动链拓扑分析,提出了一套较为完善的空间误差建模方法及其验证技术体系;Wang 等^[7]基于齐次变换矩阵理论建立基于双球杆仪的旋转轴识别模型;Liu 等^[8]根据布莱恩原理,将直线度误差引入机床的体积误

差中,建立了包含测量误差的几何误差模型;Peng 等^[9]采用齐次坐标变换矩阵计算误差项的解,基于敏感性分析,实现了最佳安装参数。Niu 等^[10]利用高阶傅里叶级数拟合建立几何误差解析涨落特征函数模型;上述研究为五轴机床运动误差建模提供了重要理论基础,但多数研究主要针对机床结构或测量方法本身,对特征样件几何形态及其姿态变化对误差传递特性的影响考虑较少。因此,将不同倾角 S 形试件与机床运动误差建模相结合,有助于更加真实地反映机床加工过程中多轴耦合误差的传递规律,为机床运动误差分析提供新的研究思路。

在运动误差辨识方面,五轴机床误差辨识方法主要可分为基于测量仪器的误差辨识方法和基于特征样件的误差辨识方法两类。在基于测量仪器的误差辨识中,Wang 等^[11]基于机床的运动学模型建立了机床空间运动误差与单个几何误差之间的映射关系方程,推到了两种不同的识别算法;Zheng 等^[12]提出了一种同时直接测量 CNC (computer numerical control) 六自由度几何运动误差的新方法,并开发了相应的测量系统;焦安岭等^[13]通过球杆仪在同一平面不同位置进行两次圆轨迹,辨识出平动轴线性误差,基于球杆仪的多条空间测试轨迹,求解出旋转轴几何误差;Wang 等^[14]提出了一种基于空间体对角线误差模型的两步正交化方法,辨识出机床的几何误差;刘文正等^[15]针对长距离测量中光束漂移导致的精度下降问题,从光束偏振态差异性出发,提出了参考光与测量光共路传输、分束检测的角漂差分补偿方法,实现了机床单轴几何误差的高精度、高效率获取;Xu 等^[16]采用 R-test 检测结合 3 条测量轨迹测量出了两台五轴机床的绝对运动误差和同步运动误差;Wang 等^[17]基于单元双四元数重新定义了旋转轴的各项误差,一次安装和测量辨识出 8 项旋转轴的位置误差;相比之下,基于特征样件的误差辨识方法具有成本低、测量效率高和工程应用性强等优点。倪俊涛等^[18]提出基于塔形工件的自标定方法,通过设计 5 层阶梯状塔形工件,结合线性轴三维体积误差模型,将线性轴误差离散表示于三维网格节点上,并利用多角度探测数据构建超定方程组,采用最小二乘法实现误差参数的高效估计;Tang 等^[19]提出了一种基于标准工件的机内测量来识别几何误差的方法,分析的设

置误差对识别结果的影响;Wang^[20]等设计了具有多种特征的试件,结合实际加工检测了定位误差对加工误差的影响。尽管上述研究在机床误差辨识方面取得了大量成果,但现有研究多集中于测量仪器或特征试件结构本身,对试件姿态变化对机床多轴耦合误差辨识敏感性的影响研究较少。特别是对于五轴机床常用的 S 形试件,不同倾角条件下机床运动误差辨识特性的研究仍较为有限。因此,研究不同倾角 S 形试件对五轴机床运动误差辨识精度的影响,对于提高机床误差辨识效率和准确性具有重要意义。

在机床有限采样点方面,误差辨识结果难以全面反映机床在整个加工空间内的误差分布特性,亟需进一步构建连续的空间误差表征方法。Li 等^[21]提出了一种基于机内测量的多自由度、步进接触法测量球心点的方法,通过分析基于各种位置和姿态的机床两个旋转轴的误差规律,构建了五轴机床的空间误差场;Wu 等^[22]研究了加工工艺系统与工件之间的误差映射关系,分析了五轴数控机床加工空间的综合误差场。因此,有必要结合大倾角 S 形试件的误差辨识结果,进一步研究机床加工空间误差场的构建方法及其分布规律。

综上所述,针对现有五轴机床旋转轴运动误差辨识方法在复杂曲面试件应用中对试件姿态敏感性利用不足、误差解耦能力有限等问题,本文提出一种基于大倾角 S 形试件的运动误差测量与辨识方法。首先,建立考虑试件倾角与曲率耦合影响的五轴机床旋转轴运动误差传递模型;其次,利用 S 形试件曲率分布特征,提出基于 S 形试件曲率最大区域的两层测量点的虚拟标准球心构建方法,实现旋转轴 6 项运动误差的有效解耦辨识;并通过仿真与在机测量实验分析试件倾角对误差辨识敏感性的影响;最后,基于辨识结果建立五轴机床加工空间运动误差场。本文方法充分挖掘了试件几何特征与姿态信息对误差辨识的增敏作用,可为五轴机床高精度误差建模与补偿提供参考。

1 双转台五轴机床旋转轴运动误差建模与分析

双转台五轴机床由各轴的驱动电机、床体底座、主轴组件、工作台、丝杠及 3 个平动轴 (X、Y、Z) 和两个旋转轴 (A、C) 等关键部件构成。双转台五轴机床平动轴和旋转轴共有 30 项运动误差,根据机床误差灵敏度分析可知,旋转轴的 12 项运动误差占比较大,在旋转轴中,旋转轴 A 轴的各项运动误差较大。C 轴工作台安装在 A 轴上,两旋转轴形成了同时旋转的双转台结构,因此在研究旋转轴误差值时需要优先对 A 轴进行研究。双转台五轴机床旋转轴 12 项运动误差如图 1 所示。

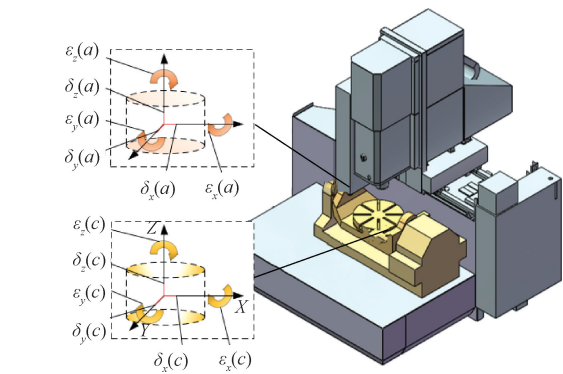


图 1 旋转轴 12 项运动误差
Fig. 1 Rotational axis 12 motion errors

根据图 1 所示各项误差,列出了旋转轴的各项误差,如表 1 所示。

表 1 旋转轴位置误差及来源
Table 1 Rotational axis position error and sources

位置误差定义	误差来源	位置误差定义	误差来源
$\varepsilon_x(a)$	A 轴绕 X 轴旋转角误差	$\varepsilon_x(c)$	C 轴绕 X 轴旋转角误差
$\varepsilon_y(a)$	A 轴绕 Y 轴旋转角误差	$\varepsilon_y(c)$	C 轴绕 Y 轴旋转角误差
$\varepsilon_z(a)$	A 轴绕 Z 轴旋转角误差	$\varepsilon_z(c)$	C 轴绕 Z 轴旋转角误差
$\delta_x(a)$	A 轴绕 X 轴线位移误差	$\delta_x(c)$	C 轴绕 X 轴线位移误差
$\delta_y(a)$	A 轴绕 Y 轴线位移误差	$\delta_y(c)$	C 轴绕 Y 轴线位移误差
$\delta_z(a)$	A 轴绕 Z 轴线位移误差	$\delta_z(c)$	C 轴绕 Z 轴线位移误差

机床各运动部件存在自己单独的运动坐标系,这些运动坐标系串联起来形成了双转台五轴机床运动坐标系链条。坐标系链条分为刀具链和工件链,刀具链包括:机床床身、X 轴、Y 轴、Z 轴,工件链包括:C 轴、A 轴、机床床身。双转台五轴机床的拓扑结构图如图 2 所示。

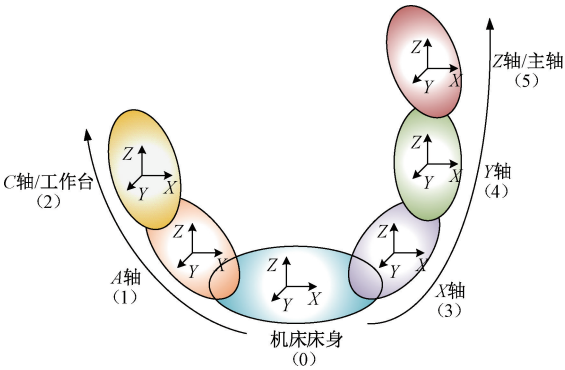


图 2 双转台五轴机床拓扑图
Fig. 2 Topology diagram of a dual-turntable five-axis machine tool

根据双转台五轴机床拓扑图,结合刀具链与工件链的运动传递关系,采用齐次变换矩阵方法对各运动轴之间的位姿关系进行统一建模。通过引入旋转轴与平动轴的运动误差项,构建了包含多轴耦合效应的运动误差传递模型,实现了各轴误差向刀具末端位置的统一映射表达。在该模型中,旋转轴与平动轴的运动误差通过坐标变换逐级累积,并最终反映为刀具在工件坐标系中的空间位置偏差。通过对实际加工状态与

理想无误差状态进行对比,建立了机床空间运动误差的表达形式,为后续误差分了解耦及误差敏感性分析提供理论基础。

在工件位置和刀具位置分别建立工件坐标系和刀具坐标系,取刀尖点 P_t 在刀具坐标系下的齐次坐标为 $(P_{tx}, P_{ty}, P_{tz})^T$,实际加工过程中,机床的运动误差会导致实际加工轨迹偏离理想加工轨迹,实际刀具位置 P_w 在工件坐标系中表示为:

$$P_w = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(x) & \varepsilon_z(x) & \delta_x(x) \\ \varepsilon_z(x) & 1 & -\varepsilon_x(x) & \delta_y(x) \\ -\varepsilon_y(x) & \varepsilon_x(x) & 1 & \delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{axes} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(y) & \varepsilon_y(y) & \delta_x(y) \\ \varepsilon_z(y) & 1 & -\varepsilon_x(y) & \delta_y(y) \\ -\varepsilon_y(y) & \varepsilon_x(y) & 1 & \delta_z(y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_{axes} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(a) & \varepsilon_y(a) & \delta_x(a) \\ \varepsilon_z(a) & 1 & -\varepsilon_x(a) & \delta_y(a) \\ -\varepsilon_y(a) & \varepsilon_x(a) & 1 & \delta_z(a) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(A_{axes}) & -\sin(A_{axes}) & 0 \\ 0 & \sin(A_{axes}) & \cos(A_{axes}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(C_{axes}) & -\sin(C_{axes}) & 0 & 0 \\ \sin(C_{axes}) & \cos(C_{axes}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{tx} \\ P_{ty} \\ P_{tz} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: A_{axes} 为 A 轴转动角度; C_{axes} 为 C 轴转动角度; X_{axes} 、 Y_{axes} 、 Z_{axes} 分别为 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的平移距离。

点随设计的理想轨迹进行切削,即令所有的误差参数为 0,理想刀具位置 $P_{w-ideal}$ 在工件坐标系中表示为:

而在理想的加工过程中没有运动误差的存在,刀尖

$$P_{w-ideal} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{axes} \\ 0 & 1 & 0 & Y_{axes} \\ 0 & 0 & 1 & Z_{axes} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(A_{axes}) & -\sin(A_{axes}) & 0 \\ 0 & \sin(A_{axes}) & \cos(A_{axes}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(C_{axes}) & -\sin(C_{axes}) & 0 & 0 \\ \sin(C_{axes}) & \cos(C_{axes}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{tx} \\ P_{ty} \\ P_{tz} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

将式(1)减去式(2)可得到双转台五轴机床的空间运动误差模型:

式中: E_x 、 E_y 、 E_z 分别为 X 、 Y 、 Z 这 3 个方向上的运动误差分量。

$$E = (E_x, E_y, E_z, 0)^T \quad (3)$$

经推导得出 E_x 、 E_y 、 E_z 为:

$$\begin{cases} E_x = \delta_x(a) \cos(C_{axes}) + \delta_x(c) \cos(C_{axes}) - \delta_y(c) \sin(C_{axes}) - 2\varepsilon_y(c) \cos(C_{axes}) - \varepsilon_x(c) [\sin(C_{axes}) + \cos(A_{axes}) \sin(C_{axes})] - \varepsilon_z(c) \sin(A_{axes}) \cos(C_{axes}) - \varepsilon_y(a) \cos(C_{axes}) - \varepsilon_x(a) \cos(A_{axes}) \sin(C_{axes}) - \delta_y(a) \cos(A_{axes}) \sin(C_{axes}) + \delta_z(a) \sin(A_{axes}) \cos(C_{axes}) \\ E_y = [\varepsilon_x(c) - \varepsilon_y(c)] [\cos(C_{axes}) + \cos(A_{axes}) \cos(C_{axes})] + \delta_y(c) \cos(C_{axes}) + \delta_x(a) \sin(C_{axes}) + \delta_x(c) \sin(C_{axes}) - \varepsilon_y(a) \sin(C_{axes}) - \varepsilon_z(c) \sin(A_{axes}) \cos(C_{axes}) + \varepsilon_x(a) \cos(A_{axes}) \sin(C_{axes}) + \delta_y(a) \cos(A_{axes}) \cos(C_{axes}) - \delta_z(a) \cos(A_{axes}) \sin(C_{axes}) \\ E_z = \delta_z(c) + \delta_z(a) \cos(A_{axes}) + \delta_y(a) \sin(A_{axes}) + \varepsilon_x(a) \sin(A_{axes}) + \varepsilon_x(c) \sin(A_{axes}) \end{cases} \quad (4)$$

试件倾角通过改变曲率和姿态,从而改变误差传递路径。为了量化运动误差中位置误差和角度误差的传

递,引入位置误差传递系数 u_i ,角度误差传递系数 l_j ,假设每个轴的误差与试件表面误差为线性关系,分别如

式(5)和(6)所示。

$$u_i = \frac{\partial E}{\partial \delta_i} \quad (5)$$

式中: δ_i 为机床的位置误差。

$$l_j = \frac{\partial E}{\partial \varepsilon_i} \quad (6)$$

式中: ε_i 为机床的角度误差。

倾角的变化会导致传递系数也随之变化,因此位置误差传递系数和角度误差传递系数可调整为:

$$u_i(\theta) = \frac{\partial E}{\partial \delta_i} \cos \theta \quad (7)$$

$$l_j(\theta) = \frac{\partial E}{\partial \varepsilon_i} \sin \theta + \frac{\partial E}{\partial \varepsilon_i} \cos \theta \quad (8)$$

式中: θ 为S形试件的倾斜角度。

随着S形试件倾角的改变,曲率和扭曲角也发生改变,进而影响运动误差的传递,即曲率 K_i 、扭曲角和倾角的关系如式(9)和(10)所示。

$$K_i(\theta) = K_i(0) \cos \theta \quad (9)$$

式中: $K_i(0)$ 为S形试件倾角为0时的曲率。

$$\tau_j(\theta) = \tau_j(0) \cos \theta + \tau_j(90) \sin \theta \quad (10)$$

式中: $\tau_j(0)$ 、 $\tau_j(90)$ 分别为S形试件倾角为0°和90°时的扭曲角。

综合考虑倾角、曲率和扭曲角的影响,可得到运动误差模型为:

$$P(\theta) = \sum_{i=1}^6 u_i(\theta) \cdot \delta_i \cdot K_i(\theta) \cdot \cos \theta + \sum_{j=1}^6 l_j(\theta) \cdot \varepsilon_i \cdot \tau_j(\theta) \cdot \cos \theta \quad (11)$$

运动误差不仅会影响S形试件的特定区域,还会影响整个工件空间的误差分布,在考虑S形试件倾角情况下,双转台五轴机床空间运动误差场模型为:

$$E_2(x \ y \ z \ \theta) = \int \left[\cos \theta + \sum_{i=1}^6 u_i(\theta) \cdot \delta_i \cdot K_i(\theta) \cdot \cos \theta + \sum_{j=1}^6 l_j(\theta) \cdot \varepsilon_i \cdot \tau_j(\theta) \cdot \cos \theta \right] dx dy dz \quad (12)$$

2 考虑大倾角S形试件的A轴6项运动误差测量及辨识

双标准球测量及辨识原理^[23],以45°倾角S形试件模型为例,该试件分为底座和缘条,在缘条上按照曲率划分为5部分,并将其分为L1和L2两层,在曲率最大处的2和4区域进行测点的选取及测量。测量大倾角S形试件两个曲率最大处坐标点,分别求解出L1和L2两层的

圆心坐标,进而拟合出两个虚拟球心坐标,然后代入所提公式辨识出A轴6项运动误差 $\delta_y(a)$ 、 $\varepsilon_x(a)$ 、 $\varepsilon_y(a)$ 、 $\varepsilon_z(a)$ 、 $\delta_z(a)$ 、 $\delta_x(a)$ 。45°倾角S形试件测量点及虚拟球心位置分布图如图3所示。

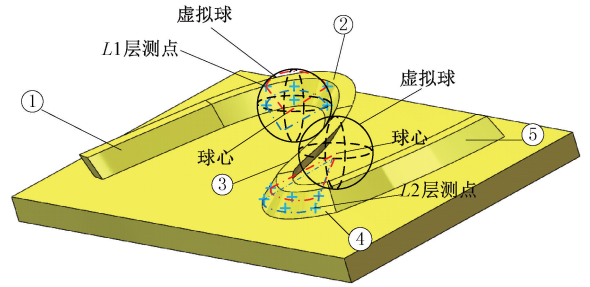


图3 45°倾角S形试件测量点及虚拟球心位置分布图

Fig. 3 Distribution diagram of measurement points and virtual sphere centers of 45° inclined s-shaped specimen

2.1 基于大倾角S形试件的虚拟球心坐标测量及计算

由于在S形试件两处曲率最大处拟合出两个虚拟标准球,选取S形试件曲率变化最大处的L1层和L2层各3个测量点,这3个测量点处于同一个平面且不共线,由L1层所测3个测点拟合出一个圆心,L2层所测3个测点拟合出一个圆心,通过两个圆心可以确定一个虚拟球心,一个S形试件确定两个虚拟球心。

已知空间中3个不共线的点 $A(x_1, y_1, z_1)$ 、 $B(x_2, y_2, z_2)$ 、 $C(x_3, y_3, z_3)$ 、圆心 $O(x, y, z)$ 。圆心到3个点的距离均相等,即:

$$\|OA\|^2 = \|OB\|^2 = \|OC\|^2 \quad (13)$$

由距离相等条件可推出两个线性方程:

$$\begin{cases} 2x(x_2 - x_1) + 2y(y_2 - y_1) + 2z(z_2 - z_1) = |B|^2 - |A|^2 \\ 2x(x_3 - x_1) + 2y(y_3 - y_1) + 2z(z_3 - z_1) = |C|^2 - |A|^2 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $|A|^2 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2$; $|B|^2 = x_2^2 + y_2^2 + z_2^2$; $|C|^2 = x_3^2 + y_3^2 + z_3^2$ 。

圆所在的平面法向量 $n = (n_x, n_y, n_z)$ 为:

$$\vec{n} = \vec{AB} \times \vec{AC} \quad (15)$$

式中: $\vec{AB} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$; $\vec{AC} = (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1)$ 。

其平面方程为:

$$n_x(x - x_1) + n_y(y - y_1) + n_z(z - z_1) = 0 \quad (16)$$

将式(14)和式(16)变为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) & 2(z_2 - z_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) & 2(z_3 - z_1) \\ \vec{n}_x & \vec{n}_y & \vec{n}_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |B|^2 - |A|^2 \\ |C|^2 - |A|^2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} |\mathbf{B}|^2 - |\mathbf{A}|^2 \\ |\mathbf{C}|^2 - |\mathbf{A}|^2 \\ n_x x_1 + n_y y_1 + n_z z_1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

通过求解式(17)即可得到 $L1$ 层圆心 $\mathbf{O}_1$, 单位法向量 $\vec{n}_1$ 和 $L2$ 层圆心 $\mathbf{O}_2$, 单位法向量 $\vec{n}_2$ 。

由于求解出的两个圆位于虚拟球面上, 即虚拟球心在过该圆圆心且垂直于圆平面的直线上, 且圆的法向量均指向虚拟球心内部。

构造直线方程, 即球心分别过第 1 个圆心和第 2 个圆心且沿法向量方向的直线上:

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{O}_1 + t_1 \vec{n}_1 \quad (18)$$

$$\mathbf{P}_2 = \mathbf{O}_2 + t_2 \vec{n}_2 \quad (19)$$

由于测量误差的存在, 两条直线不可能相交, 因此, 找最优的 t_1, t_2 , 使得点 $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$ 之间的距离最小, 然后取这两点的中点为虚拟球心。

最小化距离函数:

$$d(t_1, t_2) = \|(\mathbf{O}_1 + t_1 \vec{n}_1) - (\mathbf{O}_2 + t_2 \vec{n}_2)\|^2 \quad (20)$$

对 t_1, t_2 求偏导并令其为 0, 可得到:

$$\begin{cases} t_1 - (\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2) t_2 = \vec{n}_1 \cdot (\mathbf{O}_2 - \mathbf{O}_1) \\ (\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2) t_1 - t_2 = \vec{n}_2 \cdot (\mathbf{O}_2 - \mathbf{O}_1) \end{cases} \quad (21)$$

求解可得:

$$t_2 = \frac{(\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2) [\vec{n}_1 \cdot (\mathbf{O}_2 - \mathbf{O}_1)] - [\vec{n}_2 \cdot (\mathbf{O}_2 - \mathbf{O}_1)]}{(\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2)^2 - 1} \quad (22)$$

$$t_1 = (\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2) t_2 + \vec{n}_1 \cdot (\mathbf{O}_2 - \mathbf{O}_1) \quad (23)$$

将 t_1, t_2 代入式(18)和式(19)中, 可以求解出点 $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$, 虚拟球球心为:

$$\mathbf{O}_3 = \frac{\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2}{2} \quad (24)$$

由此可通过测量 S 形试件上曲率最大处测点的坐标位置求解出 $L1$ 层和 $L2$ 层圆心进而拟合出两个虚拟球球心坐标。

2.2 基于 S 形试件虚拟球心的 A 轴 6 项运动误差测量及辨识

在辨识中综合考虑 S 形试件倾角和 A 轴旋转角度, 在 A 轴不同旋转角度下, 测量出 S 形试件 $L1$ 层和 $L2$ 层测点坐标求解两层圆心进而拟合出两个虚拟球心坐标, 步骤如图 4 所示。

当运动误差存在时, 理论情况下球心点坐标为 $\mathbf{P} = [x_p \ y_p \ z_p \ 1]^T$, 实际情况下当 A 轴旋转时, 球心点的位置由 $\mathbf{S}_1 = [x_1 \ y_1 \ z_1 \ 1]^T$ 变为 $\mathbf{S}'_1 = [x'_1 \ y'_1 \ z'_1 \ 1]^T$, $\mathbf{S}_1$ 和 $\mathbf{S}'_1$ 为某一球心坐标点经矩阵变换得到, 理论和实际情况

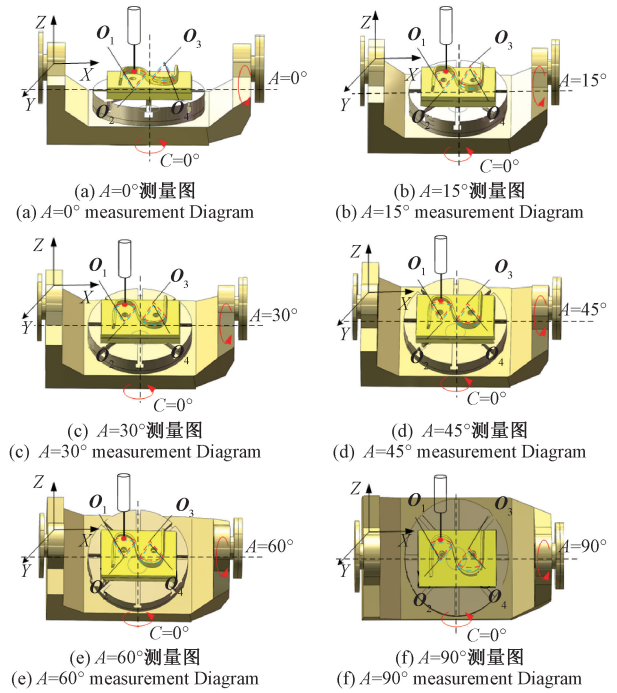


图 4 A 轴旋转不同角度下运动误差测点测量图

Fig. 4 Measurement diagram of motion error test points at different rotation angles of the A-axis

下球心位置坐标 $\mathbf{P}, \mathbf{S}_1, \mathbf{S}'_1$ 这 3 点的关系为:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_1 = \mathbf{T}_{ac} \cdot \mathbf{T}_{PDGE} \cdot \mathbf{P} \\ \mathbf{S}'_1 = \mathbf{T}_{ac} \cdot \mathbf{T}_{PDGE} \cdot \mathbf{R}(\theta) \cdot \mathbf{P} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\mathbf{R}(\theta)$ 为旋转轴 A、C 之间的运动位姿特征矩阵,

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \theta \text{ 为 S 形试件的倾斜角}$$

度; $\mathbf{T}_{ac}$ 为机床旋转轴 A、C 之间的位姿特征变换矩阵,

$$\mathbf{T}_{ac} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; d_x, d_y, d_z \text{ 为机床直线轴 X 轴、Y 轴、Z}$$

轴位移值; $\mathbf{T}_{PDGE}$ 为旋转轴 A 轴与床身之间的运动位姿误差

$$\text{特征矩阵, } \mathbf{T}_{PDGE} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(a) & \varepsilon_y(a) & \delta_x(a) \\ \varepsilon_z(a) & 1 & -\varepsilon_x(a) & \varepsilon_y(a) \\ -\varepsilon_y(a) & \varepsilon_x(a) & 1 & \varepsilon_z(a) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

故 A 轴的运动误差求解公式为:

$$\mathbf{T}_{ac}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{PDGE}^{-1} \cdot \mathbf{S}_1 = \mathbf{T}_{ac}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{PDGE}^{-1} \cdot \mathbf{R}(-\theta) \cdot \mathbf{S}'_1 \quad (26)$$

通过式(26)计算后可得:

$$\begin{cases} \Delta x_1 + \Delta y_1 \cdot \varepsilon_y(a) - \Delta z_1 \cdot \varepsilon_z(a) = 0 \\ \varepsilon_y(a) \cdot (z_1 - d_z + y'_1 - d_y) = \delta_y(a) - \delta_z(a) + C_1 \\ \varepsilon_x(a) \cdot (z'_1 - d_z - y_1 + d_y) = \delta_y(a) + \delta_z(a) + C_2 \end{cases} \quad (27)$$

式中: $\Delta x_1 = x'_1 - x_1$; $\Delta y_1 = y'_1 - y_1$; $\Delta z_1 = z'_1 - z_1$ 。

由式(27)可知,辨识出 A 轴的运动误差仍需要一组测量实验。因此在 S 形试件上增加一组 S_2 和 S'_2 ,进而求解 A 轴的各项运动误差:

$$\begin{cases} \Delta x_2 + \Delta y_2 \cdot \varepsilon_y(a) - \Delta z_2 \cdot \varepsilon_z(a) = 0 \\ \varepsilon_z(a) \cdot (z_2 - d_z + y'_2 - d_y) = \delta_y(a) - \delta_z(a) + C_3 \\ \varepsilon_x(a) \cdot (z'_2 - d_z - y_2 + d_y) = \delta_y(a) + \delta_z(a) + C_4 \end{cases} \quad (28)$$

式中: $\Delta x_2 = x'_2 - x_2$; $\Delta y_2 = y'_2 - y_2$; $\Delta z_2 = z'_2 - z_2$; $S_2 = [x_2 \ y_2 \ z_2 \ 1]^T$; $S'_2 = [x'_2 \ y'_2 \ z'_2 \ 1]^T$ 。

联立式(27)和(28)进行求解,得到 A 轴各项运动误差的表达式,如式(29)所示。

$$\begin{cases} \delta_y(a) = \frac{(z'_1 + z_1 - 2d_z + \Delta y_1)(z_1 - z_2 + y'_1 - y'_2)}{2(C_1 - C_3) - \frac{1}{2}(C_1 + C_2)} \\ \varepsilon_x(a) = \frac{z_1 - z_2 + y'_1 - y'_2}{C_1 - C_3} \\ \varepsilon_y(a) = \frac{\Delta y_1 \Delta x_2 - \Delta x_1 \Delta y_2}{\Delta y_1 \Delta z_2 - \Delta z_1 \Delta y_2} \\ \varepsilon_z(a) = \frac{\Delta z_1 \Delta x_2 - \Delta x_1 \Delta z_2}{\Delta y_1 \Delta z_2 - \Delta z_1 \Delta y_2} \\ \delta_z(a) = \frac{(y'_1 + y_1 - 2d_y - \Delta z_1)(z_1 - z_2 + y'_1 - y'_2)}{2(C_3 - C_1) - \frac{1}{2}(C_2 - C_1)} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $C_1 \sim C_4$ 为运动误差项 $\varepsilon_y(a)$ 、 $\varepsilon_z(a)$ 及 S 形试件虚拟球心点的空间坐标所组成,如式(30)所示。

$$\begin{cases} C_1 = (x'_1 - d_x) \cdot \varepsilon_y(a) + (x_1 - d_x) \cdot \varepsilon_z(a) - y_1 + z'_1 + d_y - d_z \\ C_2 = (m_x - x_1) \cdot \varepsilon_y(a) + (x'_1 - d_x) \cdot \varepsilon_z(a) - y'_1 - z_1 + d_y + d_z \\ C_3 = (x'_2 - d_x) \cdot \varepsilon_y(a) + (x_2 - d_x) \cdot \varepsilon_z(a) - y_2 + z'_2 + d_y - d_z \\ C_4 = (m_x - x_2) \cdot \varepsilon_y(a) + (x'_2 - d_x) \cdot \varepsilon_z(a) - y'_2 - z_2 + d_y + d_z \end{cases} \quad (30)$$

将式(30)代入式(29)中进行求解可得到运动误差元素 $\delta_y(a)$ 、 $\varepsilon_x(a)$ 、 $\varepsilon_y(a)$ 、 $\varepsilon_z(a)$ 、 $\delta_z(a)$,将求解到的5项运动误差元素代入到式(25)中即可得出运动误差元素 $\delta_x(a)$ 。由此辨识出双转台五轴数控机床旋转轴 A 轴的

6 项运动误差元素 $\delta_y(a)$ 、 $\varepsilon_x(a)$ 、 $\varepsilon_y(a)$ 、 $\varepsilon_z(a)$ 、 $\delta_z(a)$ 、 $\delta_x(a)$ 。

2.3 基于带倾角 S 形试件的仿真验证

为分析试件几何姿态对旋转轴运动误差辨识结果的影响,选取 0° 、 30° 、 45° 和 60° 4 种典型倾角的 S 形试件进行实验研究。其中, 0° 倾角对应标准基准状态, 30° 与 45° 为常见五轴加工中等倾斜姿态, 60° 为大倾角工况,用于增强旋转轴误差对测量结果的敏感性。通过上述多倾角设置,可实现从低敏感区到高敏感区的覆盖,从而提高误差辨识结果的可靠性与稳定性。基于双转台五轴机床进行模拟仿真,在 UG(unigraphics) 中生成相应的 0° 、 30° 、 45° 、 60° 倾角 S 形试件加工程序代码,并在 UG 中使用测量工具对 S 形试件相应的测量点进行测量,通过测量点坐标求解出 S 形试件两层圆心,通过两层圆心坐标拟合出虚拟球心坐标,将虚拟球心坐标代入到式(30)中,即可得到变倾角 S 形试件在 A 轴旋转不同角度下的 6 项运动误差值,如图 5 所示。

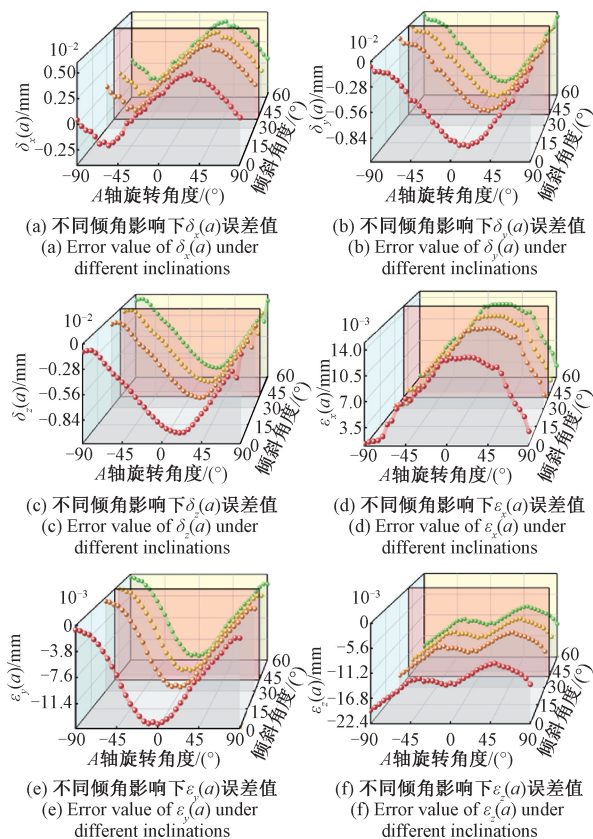


图 5 变倾角 S 形试件在 A 轴旋转不同角度下的 6 项运动误差值

Fig. 5 Six motion error values of the variable inclination S-shaped specimen under different rotation angles of the A-axis

由图 5 可知, 0° 、 30° 、 45° 、 60° 倾角 S 形试件影响下 A 轴运动误差最大值如表 2 所示。

表 2 不同倾角 S 形试件影响下 A 轴运动误差最大值

Table 2 Maximum A-axis motion error of S-shaped specimen with different inclination angles (μm)

运动误差元素	0°S 形试件	30°S 形试件	45°S 形试件	60°S 形试件
$\delta_x(a)$	5.0	5.8	5.3	6.5
$\delta_y(a)$	9.6	10.5	9.9	12.4
$\delta_z(a)$	11.2	12.3	11.8	13.6
$\varepsilon_x(a)$	14.0	14.9	14.5	15.6
$\varepsilon_y(a)$	14.5	15.4	14.8	15.8
$\varepsilon_z(a)$	18.5	19.5	18.9	20.0

由图 5 及表 2 可以看出,通过对比 6 项运动误差值,发现 3 项角度误差的数值均大于 3 项线性位移误差。随着倾斜角度的增加,测量得到的 A 轴的各项运动误差值呈现先增大后减小再增大的趋势。该变化趋势是在所用实验条件及机床结构参数下得到的结果,其具体变化形式与误差项分布及试件姿态密切相关。从误差传递机理来看,不同倾角下各误差分量的投影关系及耦合作用存在差异,可能导致整体误差呈现非单调变化特征。多组实验结果表明,该趋势具有一定重复性,并非由随机测量波动引起。本质上,该现象反映了旋转轴运动误差在空间坐标变换过程中的非线性耦合特性。采用所提出的辨识方法进行仿真发现 45°~60°倾角 S 形试件辨识出的误差值比无倾角 S 形试件辨识出的误差值精确约 10%。

3 基于大倾角 S 形试件的运动误差测量及辨识实验

根据所提辨识方法进行相应实验,在双转台五轴机床上加工 0°、30°、45°、60°倾角 S 形试件,并对加工后的 S 形试件进行补偿,部分 S 形试件加工现场如图 6 所示。

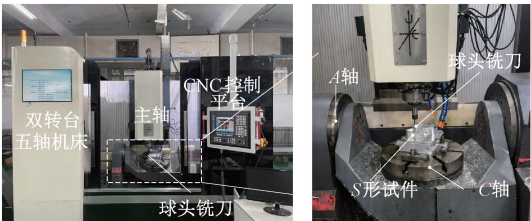


图 6 S 形试件加工图

Fig. 6 S-shaped specimen machining drawing

在 4 个 S 形试件上均匀地取两条线 ($L1 = 25\text{ mm}$, $L2 = 11\text{ mm}$), 建立一个精准的“基准 S 形曲线”, 并在每条线上等间距取 25 个测量点进行测量, 从而更准确找出两处曲率最大处, 测量中采用先锋 OP550 红宝石测头进

行在机测量。在旋转轴运动误差辨识过程中, 选取 A 轴旋转角度为 0°、30°、45°、60°及 90°进行测量。其中, 0°与 90°分别对应旋转轴的起始位置与极限位置, 30°、45°及 60°用于对旋转过程进行均匀采样, 以表征误差随旋转角度变化的分布规律。该角度设置兼顾了关键位置覆盖与测量效率, 可有效反映旋转轴全行程范围内的运动误差特性。部分 S 形试件在机测量如图 7 所示。

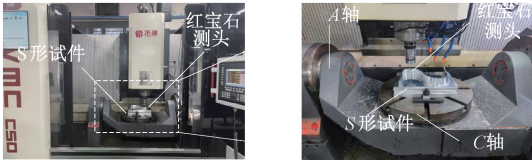


图 7 S 形试件在机测量实验图

Fig. 7 S-shaped specimen in machine measurement experiment diagram

对 0°、30°、45°、60°倾角 S 形试件进行在机测量, 测量出每层 25 组数据, 其数据结果如图 8 所示, 图 8 中上层数据点为 L1 层测量数据, 下层数据点为 L2 层测量数据。

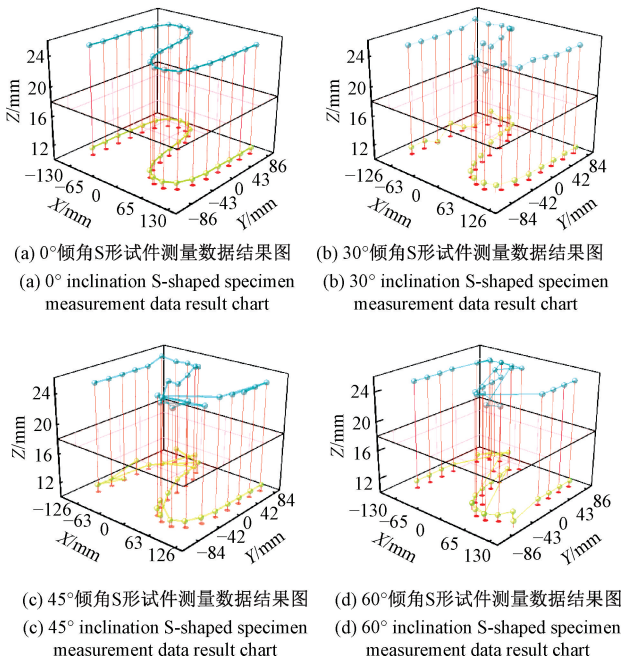


图 8 0°、30°、45°、60°倾角 S 形试件数据结果

Fig. 8 Data result chart of S-shaped specimens with inclination angles of 0°, 30°, 45°, and 60°

通过式 (29) 对 A 轴 6 项运动误差进行计算, 可以得到旋转轴 A 轴位于不同位置处映射到 0°、30°、45°和 60°倾角 S 形试件上时受倾斜角度影响的 6 项运动误差的误差分量离散点图。其 6 项运动误差的正负仅影响其位置方向, 运动误差的绝对值代表该项运动误差的大小。A 轴 6 项运动误差元素误差值离散点图如图 9 所示。

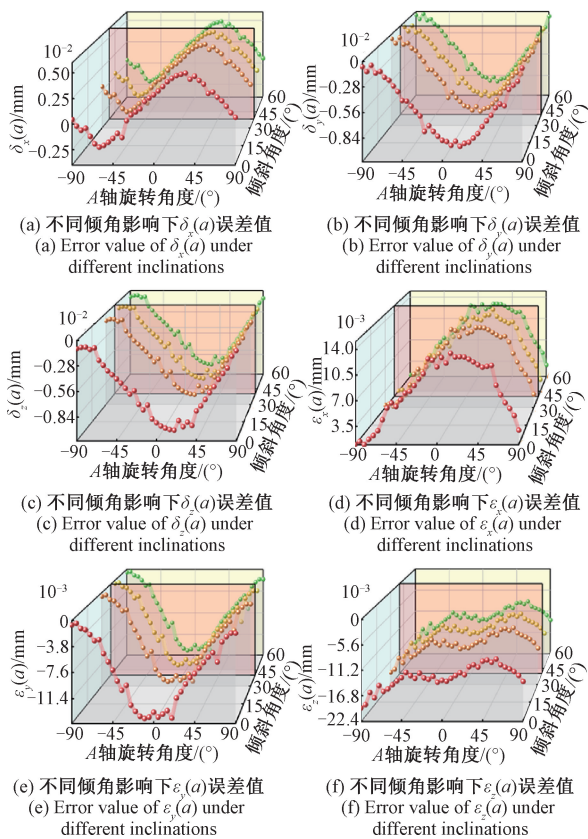


图9 不同倾角S形试件影响下A轴6项运动误差值

Fig. 9 A-axis six-degree-of-freedom motion error values under S-shaped specimen with different inclination angles

为验证所提出的基于大倾角S形样件下A轴误差辨识模型及测量辨识方法的可行性及准确性,将在不同倾角影响下,仿真所辨识出的各项误差值、实验所辨识出的各项误差值及Guo等[24]提出的几何误差辨识方法辨识出的旋转轴误差相比较。文献[24]设计了多轴驱动的空间轨迹,对旋转轴误差进行解耦,使用球杆仪测量出各项误差值。其各项结果如图10所示。

从图10可以看出,仿真值与实验值对比,误差均在 $10\mu\text{m}$ 内,验证了所提辨识方法的实用性与可行性,不同倾角下辨识结果具有良好的一致性。与对比文献所使用的辨识方法及辨识结果相比,所提出的误差测量方法测

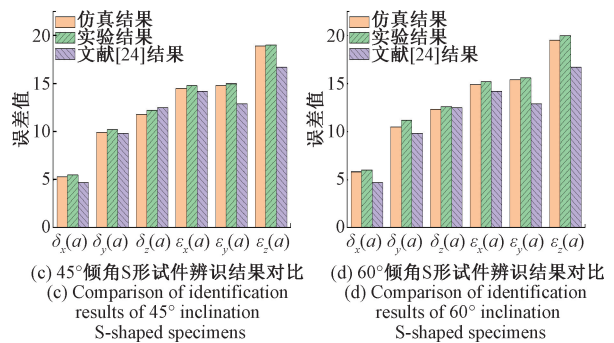
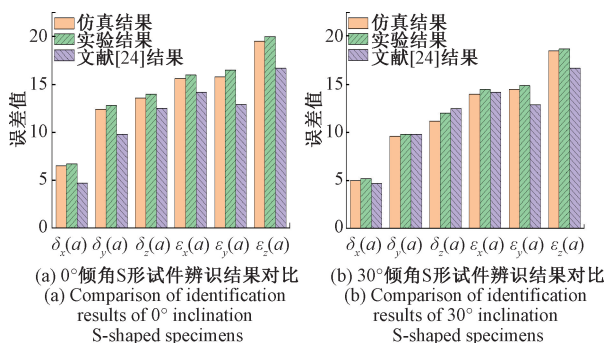


图10 不同倾角S形试件与文献[24]辨识结果对比

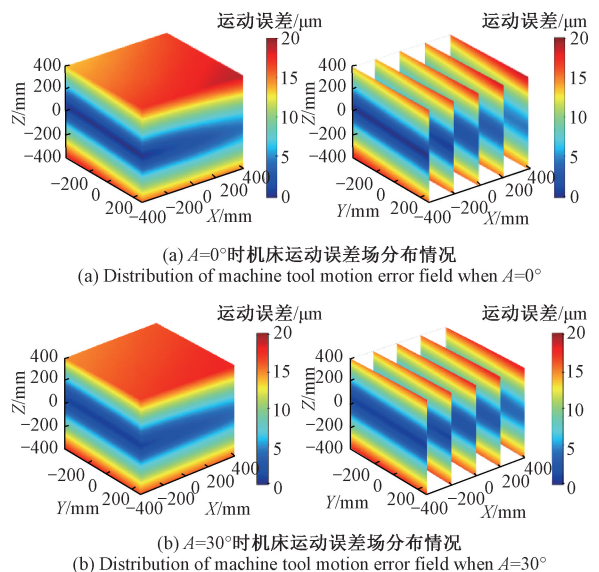
Fig. 10 Comparison of identification results between S-shaped specimens with different inclination angles and those in literature [24]

得的各项误差值精度均在一定范围内,验证了其精确性。由于倾角的增加使曲率变化增加,从而提高角度误差对测量点的敏感性。采用所提出的辨识方法进行仿真及实验发现 $45^\circ \sim 60^\circ$ 倾角S形试件辨识出的误差值比无倾角S形试件辨识出的误差值精确约10%。

4 双转台五轴机床加工空间运动误差场建立

根据式(1)采用大倾角S形试件中误差值最大的 $\varepsilon_z(a)$,建立了双转台五轴机床A轴旋转角度处于 $A=0^\circ$ 、 $A=30^\circ$ 、 $A=45^\circ$ 、 $A=60^\circ$ 、 $A=90^\circ$ 时的双转台五轴机床加工空间运动误差场,该误差场采用Kriging插值[25]进行拟合,得到了在考虑S形试件倾角情况下A轴摆动过程中的变化情况,如图11所示。

如图11所示,在考虑S形试件倾角情况下,双转台五轴机床旋转轴的空间运动误差在加工空间中心区域最小,并随着位置向工作台外侧移动而递增,在空间最外侧



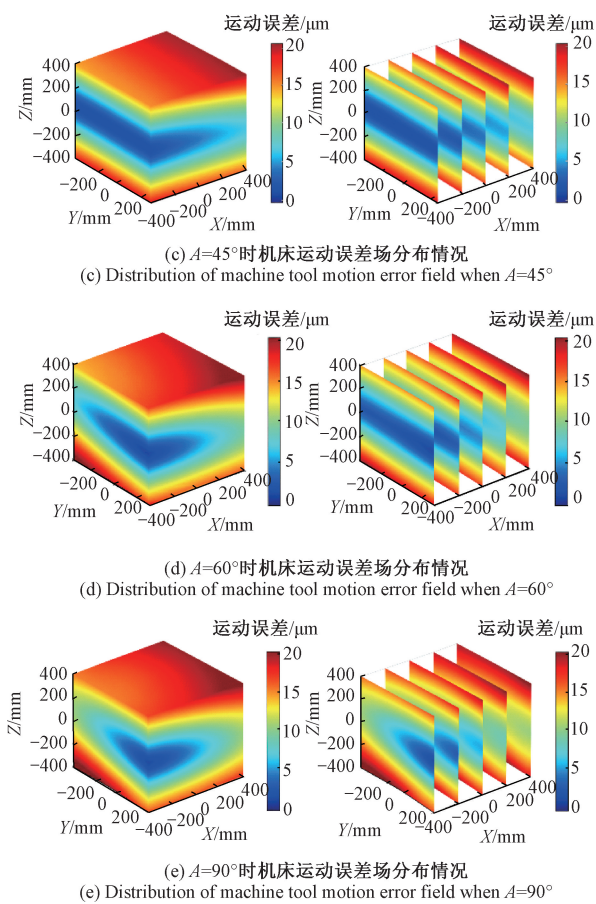


图 11 A 轴不同旋转角度下机床加工空间运动误差场分布情况

Fig. 11 Distribution of machine tool machining spatial motion error field under different rotation angles of the A axis

边缘达到最大值。双转台五轴机床的运动误差存在“中心小、边缘大”的稳定分布情况。当 A 轴的旋转角度增加时,误差值也随之增加,如表 3 所示。

表 3 考虑 S 形试件倾角下机床加工空间运动误差场分析
Table 3 Analysis of machine tool workspace motion error field considering the tilt angle of S-shaped specimens

A 轴摆动角度/(°)	最大值/ μm	最小值/ μm
0	18.0	3.0
30	18.5	3.6
45	19.0	4.2
60	19.7	4.8
90	20.0	5.8

由表 3 可知, A 轴的旋转角度显著改变了空间误差场的分布和数值。当 $C=0^\circ, A=0^\circ$ 时, 最小误差约 $3\ \mu\text{m}$, 在最外侧达到最大误差值约 $18\ \mu\text{m}$; 当 $A=30^\circ$ 时,

最小误差约 $3.6\ \mu\text{m}$, 最大误差约 $18.5\ \mu\text{m}$; 当 $A=45^\circ$ 时, 最小误差约 $4.2\ \mu\text{m}$, 最大误差约 $19\ \mu\text{m}$; 当 $A=60^\circ$ 时, 最小误差约 $4.8\ \mu\text{m}$, 最大误差约 $19.7\ \mu\text{m}$; 当 $A=90^\circ$ 时, 最小误差约 $5.8\ \mu\text{m}$, 最大误差约 $20\ \mu\text{m}$; 当旋转轴角度大于 45° 时, 不仅最大误差值增大, 而且最小误差也明显上升, 当旋转轴旋转角度小于 45° 时, 双转台五轴机床加工空间场的运动误差相对较小。因此, 在 A 轴大旋转角度不可避免的加工作况下, 应重点关注该区域内运动误差的变化特性。结合实验结果可知, 大角度区间内误差幅值较大且变化更为敏感, 可将其作为误差补偿的重点区域, 通过构建随旋转角度变化的误差映射关系或采用分区补偿策略, 以提高复杂姿态下的加工精度。该结果为五轴机床在大姿态变化加工条件下的精度优化与误差补偿提供了参考依据。

5 结 论

针对双转台五轴机床的旋转轴运动误差辨识问题, 提出了一种考虑大倾角 S 形试件的机床运动误差测量与辨识方法, 并进行了仿真分析和实验验证。主要结论为:

1) 基于双转台五轴机床拓扑结构建立了旋转轴运动误差传递模型, 在模型中引入 S 形试件倾角因素, 构建了考虑试件姿态变化的机床旋转轴运动误差模型, 为分析试件倾角对机床运动误差传递特性的影响提供了理论基础。

2) 提出一种基于虚拟标准球的旋转轴运动误差辨识方法。通过测量大倾角 S 形试件曲率最大区域两层测点坐标, 拟合得到两层圆心并构建虚拟球心, 实现了双转台五轴机床 A 轴 6 项运动误差的辨识。仿真与实验结果表明, 在 $0^\circ\sim60^\circ$ 倾角范围内, 3 项角度误差整体大于 3 项线性位移误差, 相比无倾角试件, $45^\circ\sim60^\circ$ 倾角 S 形试件的误差辨识精度均提高约 10%, 大倾角 S 形试件能够有效提高旋转轴运动误差辨识敏感性。

3) 基于辨识得到的旋转轴运动误差参数, 利用 Kriging 插值方法构建了双转台五轴机床加工空间运动误差场。结果表明, 机床加工空间运动误差整体呈现“中心小、边缘大”的分布特征, 且随着 A 轴旋转角度增大而逐渐增大, 大角度区间内误差幅值较大且变化更为敏感, 可将其作为误差补偿的重点区域, 通过构建随旋转角度变化的误差映射关系或采用分区补偿策略, 以提高复杂姿态下的加工精度。

参考文献

[1] TANG H, ZHANG Z L, LI CH P, et al. A geometric error modeling method and mrajectory optimization applied in laser welding system[J]. International Journal

- of Precision Engineering and Manufacturing, 2019, 20(8): 1423-1433.
- [2] LEI W T, SUNG M P, LIU W L, et al. Double ball bar test for the rotary axes of five-axis CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(2): 273-285.
- [3] 查俊, 陈勃昊. 机理驱动的闭式静压导轨运动误差建模方法[J]. 机械工程学报, 2025, 61(11): 301-310.
ZHA J, CHEN B H. Mechanism-driven closed-type hydrostatic guideway motion error modeling method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(11): 301-310.
- [4] WU CH J, FAN J W, WANG Q H, et al. Machining accuracy improvement of non-orthogonal five-axis machine tools by a new iterative compensation methodology based on the relative motion constraint equation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 124: 80-98.
- [5] FAN J W, WU CH J, LI ZH SH. A novel geometric error identification methodology for the tilting head of five-axis machine tools based on double ball bar[C]. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018, 221: 04001.
- [6] 胡腾, 王文款, 殷国富, 等. 基于螺旋理论的卧式加工中心空间误差建模方法及其量化验证[J]. 中国机械工程, 2020, 31(21): 2547-2556.
HU T, WANG W K, YIN G F, et al. Screw theory based modeling methodology of horizontal machining center volumetric errors and its quantitative validation [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2020, 31(21): 2547-2556.
- [7] WANG P T, FAN J W, ZHAO Q ZH, et al. An approach for improving machining accuracy of five-axis machine tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121: 3527-3527.
- [8] LIU H W, YANG R. The modeling method of machine tool geometry error based on Bryan principle [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2023, 15(3): 1-10.
- [9] PENG W CH, HUANG J F, LONG D F, et al. Measurement and identification method for geometric errors of the linear axis based on laser interferometer optimal measurement parameters method[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2023, 237(17): 4051-4061.
- [10] NIU P, CHENG Q, CHEN CH H, et al. An approach for crucial geometric error analysis and accuracy enhancement of gantry milling machines based on generalized correlation sensitivity [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 119: 401-413.
- [11] WANG J D, GUO J J. Geometric error identification algorithm of numerical control machine tool using a laser tracker[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2016, 230: 2004-2015.
- [12] ZHENG F J, FENG Q B, ZHANG B, et al. A method for simultaneously measuring 6DOF geometric motion errors of linear and rotary axes using lasers[J]. Sensors, 2019, 19(8): 1764.
- [13] 焦安铃, 陈光胜. 基于球杆仪的五轴数控机床误差快速检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1): 138-148.
JIAO AN L, CHEN G SH. Fast error identification method for five-axis machine tools based on double ball-bar[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 138-148.
- [14] WANG S T, HE G Y, TIAN W J, et al. Geometric error identification method for machine tools based on the spatial body diagonal error model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(11): 7997-8017.
- [15] 刘文正, 蓝金凤, 唐传智, 等. 基于光漂补偿与模型优化的大型机床体积误差测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(11): 39-51.
LIU W ZH, LAN J F, TANG CH ZH, et al. Measurement method for volumetric error of large machine tools based on light drift compensation and model optimization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(11): 39-51.
- [16] XU K, ZHUANG Z X, JI Y L, et al. An efficient method for measuring and identifying geometric and dynamic errors in dual five-axis machine tools [J]. Precision Engineering, 2024, 86: 359-375.
- [17] WANG H, JIANG X G. Geometric error identification of five-axis machine tools using dual quaternion [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 229: 107522.
- [18] 倪俊涛, 项四通, 陈科鉴, 等. 基于塔形工件的五轴数控机床旋转轴几何误差自标定辨识方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(5): 90-102.

NI J T, XIANG S T, CHEN K J, et al. Self-calibration identification method for rotary axis geometric errors based on tower-shaped workpiece [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(5): 90-102.

- [19] TANG Y, FENG X B, GE G Y, et al. Geometric error identification for three-axis machine tools based on on-machine measurement of a calibrated artefact [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 135(1): 735-746.
- [20] WANG T X, GUO ZH W, WANG J CH, et al. Measurement uncertainty assessment of positioning error and its effects on machining error [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2025, 39(2): 821-834.
- [21] LI CH D, LIU X L, LI R Y, et al. Geometric error identification and analysis of rotary axes on five-axis machine tool based on precision balls [J]. Applied Sciences. 2020, 10(1): 100.
- [22] WU SH, DONG Z Y, QI F, et al. Prediction of the comprehensive error field in the machining space of the five-axis machine tool based on the “S”-shaped specimen family [J]. Machines, 2022, 10(5): 408.
- [23] CHEN Y T, LIU CH SH, YAN Y J. Synchronous measurement and verification of the position-independent geometric errors of dual rotary axes on five-axis machine tools [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2025, 26(6): 1411-1429.
- [24] GUO SH J, SI Z X, SA R A, et al. Geometric error modeling and decoupling identification of rotary axis of five-axis machine tool based on spatial trajectory planning [J]. Measurement, 2024, 236: 114887.
- [25] SETIYOKO A, BASARUDDIN T, ARYMURTHY A M. Minimax approach for semivariogram fitting in ordinary kriging [J]. IEEE Access, 2020, 8: 82054-82065.

作者简介



吴石 (通信作者), 1992 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 2003 年于哈尔滨工程大学获得硕士学位, 2010 年于白俄罗斯国立大学获得博士学位, 现为哈尔滨理工大学教授, 主要研究方向为机床全局精度控制、在机测量等。

E-mail: wushi971819@163.com

Wu Shi (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1992, his M.Sc. degree from Harbin Engineering University in 2003, and his Ph.D. degree from Belarusian State University in 2010. He is currently a professor at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include global accuracy control of machine tools, on-machine measurement, etc.



孙伟, 2022 年于河北科技师范学院获得学士学位, 现为哈尔滨理工大学硕士研究生, 主要研究方向为机床误差、在机测量等。

E-mail: 18713372740@163.com

Sun Wei received his B.Sc. degree from Hebei Normal University of Science and Technology in 2022. He is currently a master's student at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include machine tool errors, on-machine measurement, etc.



赵新成, 2008 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为哈尔滨汽轮机厂有限责任公司工艺部高级工程师, 主要研究方向为汽轮机加工及装配工艺。

E-mail: haqizhaoxinchegn@163.com

Zhao Xincheng received his B.Sc. degree from Hefei University of Technology in 2008. He is currently a senior engineer in the Process Department of Harbin Turbine Company Limited. His main research interest includes machining and assembly processes of steam turbines.