

文章编号 1004-924X(2023)21-3125-10

基于错位塔形工件的旋转轴几何误差辨识

程 涛¹, 项四通^{1*}, 张海南¹, 杨建国²

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 旋转轴的几何误差直接影响五轴机床的加工精度, 但由于其误差项多且高度耦合, 因此辨识难度较大。提出了一种工件切削在机测量方法, 用于辨识五轴机床旋转轴 6 项与位置相关的几何误差。设计并加工一种错位塔形工件, 它由三层错位叠加的矩形块组成。在工件不同层级的底面与侧面布置测点并进行在机测量, 基于空间误差模型推导出每项误差的辨识原理与解析解, 并采用蒙特卡洛模拟进行不确定性分析。最后, 通过与球杆仪误差辨识方法进行对比验证, 线性误差 E_{xc} , E_{yc} 与 E_{zc} 的辨识结果偏差最大为 2.7, -1.7 与 -1.3 μm ; 角度误差 E_{ac} , E_{bc} 与 E_{cc} 的辨识结果偏差最大为 1.3", -0.6" 与 -2.1", 两者辨识平均吻合度达 95.4%。本方法通过工件切削与在机测量, 每项误差的辨识原理与解析解形式简单, 可辨识实际工况下的旋转轴 6 项位置相关的几何误差。

关键词: 五轴机床; 旋转轴; 几何误差; 误差辨识; 工件切削; 在机测量

中图分类号: TH161 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233121.3125

Geometric error identification of rotary axes based on misaligned tower-shaped artefact

CHENG Tao¹, XIANG Sitong^{1*}, ZHANG Hainan¹, YANG Jianguo²

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

* Corresponding author, E-mail: xiangsitong@nbu.edu.cn

Abstract: The geometric error of the rotary axis significantly impacts the machining accuracy of the five-axis machine tool. However, its identification is challenging due to the multitude of error terms and high coupling. This paper introduces a novel machining test and on-machine measurement method designed to identify the six position-dependent geometric errors (PDGE) of the rotary axis. Initially, a misaligned tower-shaped artifact, consisting of three layers of misaligned superimposed rectangular blocks, was designed and processed. Subsequently, measurement points were strategically arranged on the bottom and sides of the artifact at different levels, and on-machine measurements were executed. Using the volumetric error model, the identification principle and analytical solution for each error were derived, and uncertainty analysis was conducted through Monte Carlo simulation. Comparing with the ball-bar error identification method, the maximum deviation of the linearity errors E_{xc} , E_{yc} and E_{zc} are 2.7 μm , -1.7 μm and -1.3 μm ,

收稿日期: 2023-06-15; 修订日期: 2023-07-17.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 52175470); 宁波市自然科学基金重点项目 (No. 2022J074); 宁波市重点研发计划资助项目 (No. 2021Z077)

respectively. Meanwhile, the maximum deviation of the angle error the maximum deviation of the angle errors E_{AC} , E_{BC} and E_{CC} are 1.3", -0.6", and -2.1", respectively, with an overall agreement degree of 95.4% for the PDGE. Through the machining test and on-machine measurement, the identification principles and analytical solutions for each error are straightforward, allowing for the identification of the six PDGE of the rotary axis under actual working conditions.

Key words: five-axis machine tool; rotary axis; geometric error; error identification; machining test; on-machine measurement

1 引言

五轴机床作为工业母机,广泛应用于航空、航天和国防等领域。作为五轴机床的重要零部件,旋转轴在装配与制造过程中,存在4项与位置无关的几何误差(Position-Independent Geometric Error, PIGE)和6项与位置有关的几何误差(Position-Dependent Geometric Error, PDGE)^[1]。上述误差直接影响五轴加工精度,因此有必要进行辨识与补偿^[2]。

球杆仪^[3]、R-test^[4]、激光^[5]与视觉类^[6]设备常用于旋转轴的误差测量。其中,球杆仪操作简单,通过圆轨迹可辨识出旋转轴的几何误差。Seth等^[7]基于齐次坐标变换建立运动学模型,利用3种不同的球杆仪安装模式辨识旋转轴8项PIGE。郭世杰等^[8]依据旋转轴不同运动状态下几何误差的影响因素,建立4种球杆仪测量模式,辨识旋转轴10项PIGE。郑华林等^[9]采用区别建模方法,利用多种球杆仪测量策略并结合运动学模型迭代分离出旋转轴的PIGE与PDGE。球杆仪价格便宜且测量精度高,但因误差耦合于圆轨迹,通常需设定巧妙的测量模式以便于误差解耦。

ISO 230-1:2012^[10]中提出了R-test测量装置,通过一次采样即可获得三维球体的球心坐标,可用于旋转轴的误差测量。阮大文等^[11]基于R-Test辨识了双五轴系统中旋转轴的安装误差与运动误差。Pu等^[12]基于所提出的刀尖点坐标误差建模与运动链传动误差建模两种误差建模方法,利用R-test辨识了旋转轴XYZ3个方向上的体积误差。相比于球杆仪,R-Test可同样连续测量机床误差且效率更高,但设备成本高昂。

在激光类测量方法中,皮世威等^[13]采用激光干涉仪对旋转轴与直线轴联动测量,实现了旋转

轴转角误差及重复转角误差的测量与补偿。针对大型龙门机床,殷建等^[5]利用激光跟踪仪测量旋转轴不同角度下靶镜的位置,辨识出旋转轴12项几何误差以及3项垂直度误差。对于小型机床,Deng^[14]通过引入刚体运动约束,采用激光跟踪干涉仪测量旋转轴误差,辨识得到旋转轴的4项PIGE与6项PDGE。激光测量虽然精度高,但设备成本和对光要求较高,因此测量效率较低。

近年来,视觉测量常用于旋转轴的误差测量。Yin等^[6]以视觉测量为基础,提出了一种用于辨识紧凑空间中运动的旋转轴几何误差方法。Chen等^[15]基于视觉测量安装于主轴上标靶的三维位移,辨识旋转轴10项PDGE。视觉测量具有非接触、实时性与动态测量等优势,在工业领域得到广泛应用^[16]。但相机与旋转台位置定位操作较为复杂,且对光源、环境等要求较高,因此测量精度难以保证^[17]。

在机测量与数控系统具有良好的通信能力,可实现高效与自动化的测量^[18]。基于工件切削的在机测量可真实地反映机床的加工精度^[19]。ISO-10791-7:2014^[20]中提出4种工件,在加工中采用直线插补、圆插补与钻孔等不同指令,基于加工后工件尺寸精度以检查加工中心的整体性能。由中国成飞集团自主设计研发的“S”件目前已收录于ISO-10791-7:2020^[21],可综合评定五轴机床联动加工的性能。Ibaraki等^[22]通过阶梯形工件切削与在机测量,结合空间误差模型推导出的误差辨识模型,精确辨识出旋转轴8项PIGE。Jiang等^[23]利用激光位移传感器代替在机测头,通过切削工件辨识旋转轴PIGE,同时通过预先辨识线性轴垂直度误差以消除它对辨识结果的影响。利用工件切削与在机测量辨识机床误差,能反映实际工况下的机床几何误差,该方法的测量

成本较低,且辨识精度与效率较高。

本文设计并加工了一种错位塔形工件,基于在机测量以辨识旋转轴的 6 项 PDGE。在工件不同层级的底面与侧面规划在机测量测点,并基于空间误差模型推导出每项误差的辨识原理与解析解。工件在机床充分预热后进行加工,机床线性轴几何误差已通过激光干涉仪进行预先辨识与补偿,对旋转轴误差辨识结果的影响可以忽略不计。该错位塔形工件设计方便,且每项误差的辨识原理与辨识结果简易,可辨识旋转轴 PDGE。

2 错位塔形工件设计

2.1 工件设计

本文在 XZRYBC 型双转台五轴机床上开展研究,其运动链中的刀具链为 $T-Z-X-R$,工件链为 $W-C-B-Y-R$ 。以旋转轴 C 轴为例,为辨识其 PDGE 设计错位塔形工件,具体尺寸如图 1(a)~1(b)所示。

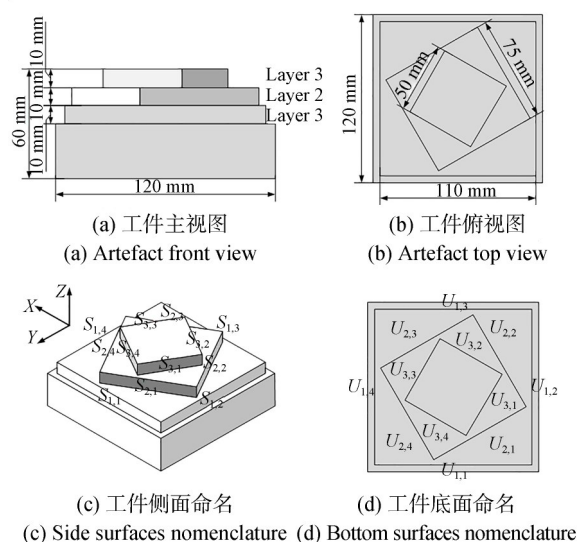


图 1 错位塔形工件

Fig. 1 Misaligned tower-shaped artefact

工件主体为三层错位叠加的矩形块,相邻两层矩形块之间错位 30° 。如图 1(c)~1(d)所示,对工件侧面与底面以 $S_{i,j}$ 与 $U_{i,j}$ ($i=1,2,3;j=1,2,3,4$) 进行命名,其中 S 与 U 分别表示工件的侧面与底面, i 表示层数, j 表示同一层的 4 个方向

面。如图 1(c)所示,以第一层垂直于 $+Y$ 轴的侧面为第一个面,记为 $S_{1,1}$,以逆时针为正方向,依次为面 $S_{1,2}, S_{1,3}$ 与 $S_{1,4}$ 。记第一层垂直于面 $S_{1,1}$ 的底面为 $U_{1,1}$,以逆时针为正方向,依次为面 $U_{1,2}, U_{1,3}$ 与 $U_{1,4}$ 。其他层的侧面与底面的命名以此类推。

2.2 工件优势分析

与球杆仪^[3]辨识 PDGE 方法相比,球杆仪需经径向、轴向与切向等多次安装才能将旋转轴误差分离辨识。该方法所需步骤繁杂,且多次安装时引入的多项安装误差对辨识结果的影响较大。所提出的错位塔形工件切削测量方法,仅通过一次安装便可完成后续辨识工作,降低了安装误差的影响。

R-Test^[10]与激光跟踪干涉仪^[14]等专用测量设备价格昂贵,且操作技术要求较高,人工成本也相应上升。与所提出的方法相比,错位塔形工件成本较低,且技术要求较低,适用于实际生产加工过程中的旋转轴误差辨识。

ISO-10791-7:2020^[21]中提出了“S”件等 5 种特征工件,采用特定的加工方式与三坐标测量模式,但此类工件主要用于评估机床的加工性能,无法用于辨识旋转轴的单项运动误差。

Ibaraki 等^[22]提出了塔形工件用于辨识旋转轴几何误差。如图 2 所示,以 C 轴为例,旋转轴在 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 与 270° 位置完成四层阶梯的切削,将 4 个角度位置的旋转轴误差反映至工件上,最终在三坐标测量机上完成测量。该工件仅在旋转轴 4 个角度位置进行加工,因此仅能反映 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 与 270° 的旋转轴误差,无法反映更多角度位置。

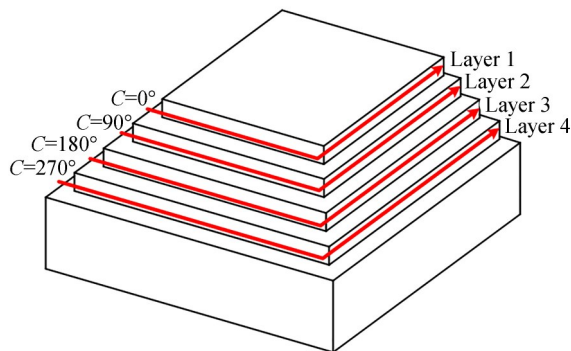


图 2 Ibaraki 提出的塔形特征工件^[22]

Fig. 2 Tower-shaped artefact proposed by Ibaraki^[22]

与上述工件不同的是,本文对阶梯进行错位设计,相邻两层阶梯之间依次同向错位 30°。通过工件切削与测量方法辨识误差的前提是保证工件存在有效测量面,而错位 30°的设计则保证了旋转轴每旋转 30°均有可用来测量的矩形特征面。一方面,同一矩形特征面可多次利用,增加矩形特征面的利用率;另一方面,共有 13 个角度位置(0°,30°,⋯,360°)可反映旋转轴误差,相比于非错位的塔形工件增加了旋转轴误差的采样频率。

2.3 工件在机测量

2.3.1 测点规划

分别在 $S_{i,j}$ 与 $U_{i,j}$ 面上沿工件坐标系 X 轴与 Y 轴方向布置测点,测点间距为 3 mm。工件在机测量后,将侧面测点拟合为 $l(S_{i,j})$,底面测点拟合为 $l(U_{i,j})$ 。在图 3 所示测点中,第一层侧面底面测点的拟合线为 $l(S_{1,1})$ 与 $l(U_{1,1})$;第二层测点的拟合线为 $l(S_{2,1})$ 与 $l(U_{2,1})$;其他测点拟合线的命名以此类推。

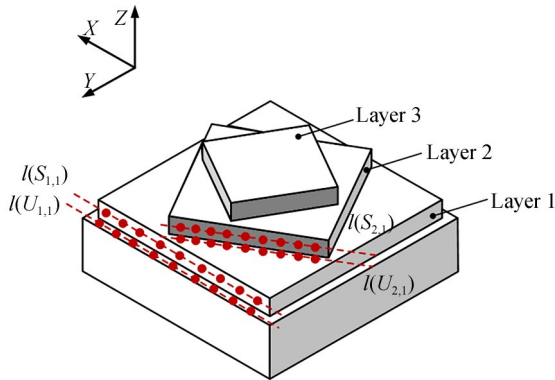


图 3 工件在机测量的测点分布与拟合线示意图
Fig. 3 Schematic diagram of measurement points distribution and fitting line of artefact on-machine measurement

2.3.2 在机测量

工件在 $C=0^\circ$ 时由线性轴联动完成加工,待机床冷却后进行在机测量。 C 轴由 0° 转至 360° ,每转 30° 测量平行于 X 和 Y 方向的侧面与底面,整个过程共进行 13 步测量,具体测量过程如图 4 所示。

如图 4(a) 所示,当 $C=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 与

360° 时,分别测量第一层中与 X 和 Y 方向平行的侧面与底面。例如, $C=0^\circ$ 时,测量侧面 $S_{1,1}$ 与 $S_{1,4}$ 及底面 $U_{1,1}$ 与 $U_{1,4}$; $C=90^\circ$ 时,测量侧面 $S_{1,2}$ 与 $S_{1,1}$ 及底面 $U_{1,2}$ 与 $U_{1,1}$ 。其他角度以此类推。

如图 4(b) 所示,当 $C=30^\circ, 120^\circ, 210^\circ$ 与 300° 时,分别测量第二层中与 X 和 Y 方向平行的侧面与底面。例如, $C=30^\circ$ 时,测量侧面 $S_{2,1}$ 与 $S_{2,4}$ 及底面 $U_{2,1}$ 与 $U_{2,4}$; $C=120^\circ$ 时,测量侧面 $S_{2,2}$ 与 $S_{2,1}$ 及底面 $U_{2,2}$ 与 $U_{2,1}$ 。其他角度以此类推。

如图 4(c) 所示,当 $C=60^\circ, 150^\circ, 240^\circ$ 与 330° 时,分别测量第三层中与 X 和 Y 方向平行的侧面与底面。例如, $C=60^\circ$ 时,测量侧面 $S_{3,1}$ 与 $S_{3,4}$ 及底面 $U_{3,1}$ 与 $U_{3,4}$; $C=150^\circ$ 时,测量侧面 $S_{3,2}$ 与 $S_{3,1}$ 及底面 $U_{3,2}$ 与 $U_{3,1}$ 。其他角度以此类推。

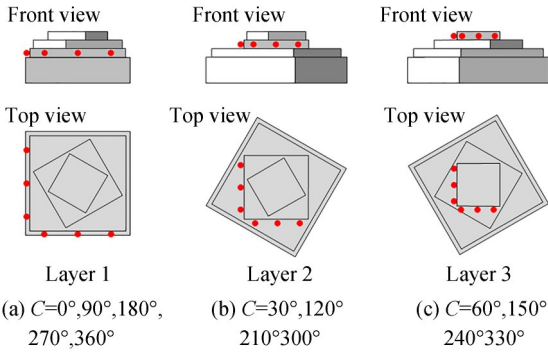


图 4 在机测量策略
Fig. 4 On-machine measurement strategy

3 旋转轴 PDGE 辨识

3.1 误差定义与建模

根据 ISO-230-1^[10], 旋转轴 C 轴的 6 项 PDGE 如表 1 所示。

表 1 C 轴的 6 项 PDGE

Tab. 1 Six PGDE for C -axis

误差类型	线性误差	角度误差
误差	E_{XC}, E_{YC}, E_{ZC}	E_{AC}, E_{BC}, E_{CC}

在工件加工及测量过程中, B 轴固定于 0° 位置不动,建立 C 轴 6 项 PDGE 影响下的五轴机床空间误差模型,如下:

$$\begin{cases} {}^M_T = {}^M_T \cdot {}^Y_T \cdot {}^B_T \cdot {}^C_T \cdot {}^W_T \\ {}^M_T = {}^M_T \cdot {}^X_T \cdot {}^Z_T \cdot {}^T_T \\ {}^W_T = ({}^M_T)^{-1} \cdot {}^M_T \\ \Delta P = ({}^W_T T_e - {}^W_T T_i) \cdot [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \\ \Delta O = ({}^W_T T_e - {}^W_T T_i) \cdot [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T \end{cases}, \quad (1)$$

式中: ${}^W_T T_i$ 与 ${}^W_T T_e$ 分别表示理想状态与实际状态下刀具坐标系相对于工件坐标系的空间位置, ΔP 与 ΔO 分别为位置与姿态误差。

将位置误差 $\Delta P(P_x(\theta), P_y(\theta), P_z(\theta))$ 与方向误差 $\Delta O(O_x(\theta), O_y(\theta), O_z(\theta))$ 展开, 如下:

$$\begin{cases} P_x(\theta) = z \cdot E_{AC} \cdot \sin \theta - z \cdot E_{BC} \cdot \cos \theta - E_{XC} \cdot \cos \theta - E_{YC} \cdot \sin \theta - y \cdot \cos \theta \cdot E_{CC} - x \cdot \sin \theta \cdot E_{CC} \\ P_y(\theta) = z \cdot E_{AC} \cdot \cos \theta + z \cdot E_{BC} \cdot \sin \theta - E_{YC} \cdot \cos \theta + E_{XC} \cdot \sin \theta + y \cdot \sin \theta \cdot E_{CC} - x \cdot \cos \theta \cdot E_{CC} \\ P_z(\theta) = y \cdot E_{AC} + x \cdot E_{BC} - E_{ZC} \\ O_x(\theta) = E_{AC} \cdot \sin \theta - E_{BC} \cdot \cos \theta \\ O_y(\theta) = E_{AC} \cdot \cos \theta + E_{BC} \cdot \sin \theta \\ O_z(\theta) = E_{CC} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: θ 为 C 轴转动角度, x, y 与 z 为工件切削与测量时 X 轴、 Y 轴与 Z 轴的运动量。

3.2 PDGE 辨识原理

3.2.1 坐标系变换

如图 5 所示, $C=0^\circ$ 时, 工件坐标系 (Workpiece Coordinate System, WCS) 与机床坐标系 (Machine Coordinate System, MCS) 重合; 在机测量时, 工件随 C 轴转动角度 θ ($\theta=30^\circ, 60^\circ, \dots, 360^\circ$), 即 WCS 相对于 MCS 反向转动 θ 。 $C=360^\circ$ 时, 与 $C=0^\circ$ 的 WCS 重合, 因此共建立 12 个 WCS。

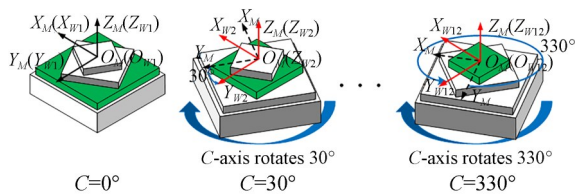


图 5 C 轴不同角度下的坐标系

Fig. 5 WCS at different angles of C -axis

将空间误差测量值与理论值进行比较, 可辨识出 C 轴的 6 项 PDGE。在不同 WCS 下, 基于在机测量可获取侧面与底面的测点数据, 其测点拟合直线 ($l(S_{i,j}), l(U_{i,j})$) 与理论面的距离与角度偏差, 即空间误差测量值。为计算不同 WCS 下的空间误差理论值, 需对空间误差模型作旋转变换, 将式 (1) 中的 M_T 反转 θ , 即乘以

$[R(Z_M, \theta)]^{-1}$, 以获得不同 WCS 的空间误差模型, 即:

$${}^M_T^* = {}^M_T \cdot [R(Z_M, \theta)]^{-1}. \quad (3)$$

将式 (3) 代入空间误差模型式 (1) 后, 展开后得到不同 WCS 下的空间误差理论值, 如下:

$$\begin{cases} P_x^*(\theta) = -E_{XC} - z \cdot E_{BC} - y \cdot E_{CC} \\ P_y^*(\theta) = -E_{YC} + z \cdot E_{AC} - x \cdot E_{CC} \\ P_z^*(\theta) = -E_{ZC} + x \cdot E_{BC} + y \cdot E_{AC} \\ O_x^*(\theta) = -E_{BC} \\ O_y^*(\theta) = E_{AC} \\ O_z^*(\theta) = E_{CC} \end{cases}. \quad (4)$$

基于上述空间误差测量值与理论值, 可辨识出 C 轴的 6 项 PDGE。

3.2.2 辨识原理

在不同 WCS 下对工件的侧面与底面进行在机测量, 通过比较在机测量的空间误差测量值与理论值, 可辨识出 C 轴的 6 项 PDGE, 其辨识原理如图 6 所示。

如图 6(a) 所示, 在 XY 平面上, 以理论测点线 $l^*(S_{i,j})$ 为基准, $\|l(S_{i,j}) - l^*(S_{i,j})\|_X$ 与 $\|l(S_{i,j}) - l^*(S_{i,j})\|_Y$ 为实测点拟合线 $l(S_{i,j})$ 相对于基准在 X 与 Y 方向上的实测距离偏差。其中, 符号 $\|$ 表示两直线在 X 轴方向上的距离。同时, 根据式 (4) 可计算出 X 与 Y 方向的理论距离偏差 $P_x^*(\theta)$ 与 $P_y^*(\theta)$, 由此得到辨识方程式

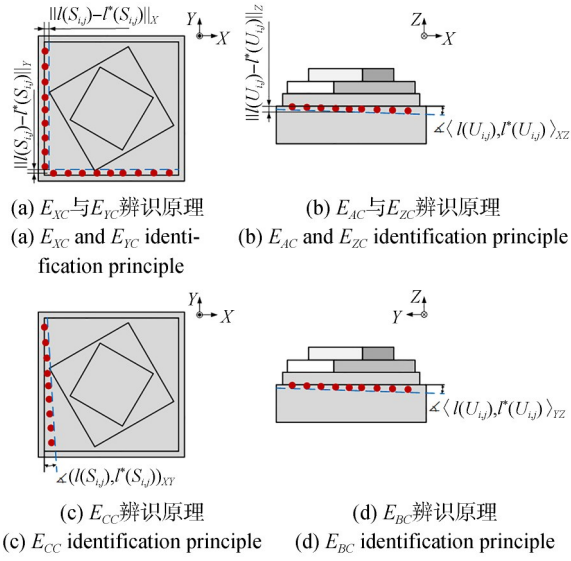


图 6 PDGE 辨识原理

Fig. 6 PGDE identification principle

如下:

$$\begin{cases} \|l(S_{i,j}) - l^*(S_{i,j})\|_X = -E_{XC} - z \cdot E_{BC} - y \cdot E_{CC} \\ \|l(S_{i,j}) - l^*(S_{i,j})\|_Y = -E_{YC} + z \cdot E_{AC} - x \cdot E_{CC} \end{cases} \quad (5)$$

类似地,如图 6(b)所示,在 YZ 平面上,以理论测点线 $l^*(U_{i,j})$ 为基准,基于 Z 向实测距离偏差

$$\begin{cases} E_{XC} = z \cdot \angle \langle l(U_{i,j}), l^*(U_{i,j}) \rangle_{XZ} - y \cdot \angle \langle l(S_{i,j}), l^*(S_{i,j}) \rangle_{XY} - \|l(S_{i,j}) - l^*(S_{i,j})\|_X \\ E_{YC} = z \cdot \angle \langle l(U_{i,j}), l^*(U_{i,j}) \rangle_{YZ} - x \cdot \angle \langle l(S_{i,j}), l^*(S_{i,j}) \rangle_{XY} - \|l(S_{i,j}) - l^*(S_{i,j})\|_Y \\ E_{ZC} = y \cdot \angle \langle l(U_{i,j}), l^*(U_{i,j}) \rangle_{YZ} - x \cdot \angle \langle l(U_{i,j}), l^*(U_{i,j}) \rangle_{XZ} - \|l(U_{i,j}) - l^*(U_{i,j})\|_Z \\ E_{AC} = \angle \langle l(U_{i,j}), l^*(U_{i,j}) \rangle_{YZ} \\ E_{BC} = -\angle \langle l(U_{i,j}), l^*(U_{i,j}) \rangle_{XZ} \\ E_{CC} = \angle \langle l(S_{i,j}), l^*(S_{i,j}) \rangle_{XY} \end{cases} \quad (9)$$

4 实验

4.1 工件加工与在机测量

实验在一台 XZRYBC 型双转台五轴机床上进行,机床放置于恒温实验室中,环境温度控制在 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。加工前,首先对机床充分预热,工件材料选用 6061 铝合金,刀具采用直径为

$\|l(U_{i,j}) - l^*(U_{i,j})\|_Z$ 与理论偏差 $P_z^*(\theta)$,可得:

$$\|l(U_{i,j}) - l^*(U_{i,j})\|_Z = -E_{ZC} + x \cdot E_{BC} + y \cdot E_{AC}. \quad (6)$$

如图 6(b)与 6(d)所示,分别在 XZ 与 YZ 平面上,以理论测点线 $l^*(U_{i,j})$ 为基准,以 $\angle \langle l(U_{i,j}), l^*(U_{i,j}) \rangle_{XZ}$ 与 $\angle \langle l(U_{i,j}), l^*(U_{i,j}) \rangle_{YZ}$ 为实测拟合线相对于基准绕 Y 轴与 X 轴的实测角度偏差。其中,符号 $\angle \langle \rangle$ 表示两直线夹角。同时,根据式(4)计算出理论角度偏差 $O_x^*(\theta)$ 与 $O_y^*(\theta)$,可得辨识方程如下:

$$\begin{cases} \angle \langle l(U_{i,j}), l^*(U_{i,j}) \rangle_{XZ} = -E_{BC} \\ \angle \langle l(U_{i,j}), l^*(U_{i,j}) \rangle_{YZ} = E_{AC} \end{cases} \quad (7)$$

类似地,如图 6(c)所示,在 XY 平面上,以理论测点线 $l^*(S_{i,j})$ 为基准,可得绕 Z 轴的角度偏差 $\angle \langle l(S_{i,j}), l^*(S_{i,j}) \rangle_{XY}$,该误差仅由 C 轴的角度定位误差 E_{CC} 引起,故得辨识方程如下:

$$\angle \langle l(S_{i,j}), l^*(S_{i,j}) \rangle_{XY} = E_{CC}. \quad (8)$$

求解式(5)~式(8),可辨识出 C 轴全部 6 项 PDGE,其辨识解析式如下:

4 mm 的硬质合金平底铣刀,刀距设置为 1.5 mm。

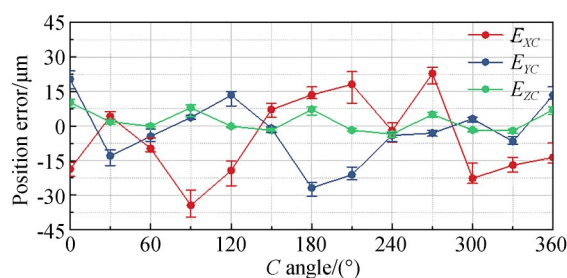
粗加工结束后,在开始精加工之前需对刀具重新标定,主轴带动刀具进行预热,每两分钟进行一次激光对刀,直至相邻两次对刀误差控制在 $2 \mu\text{m}$ 以内。精加工采用高主轴转速低进给率,主轴转速为 10 000 r/min,进给率为 1 000 mm/m,

确保加工面具有较好的表面质量。

加工完成后静置机床 4 h,待机床充分冷却后,在不同 C 轴角度下对工件各层侧面与底面进行在机测量。在机测量系统使用 Marposs VOP40,其测头直径为 2 mm,测杆长度为 35 mm,重复精度为 $2\ \mu\text{m}$ 。工件的在机测量过程如图 7 所示,测量时长约 20 min。由于测量时间较短,测量过程几乎不受机床热误差的影响。

4.2 辨识结果与验证

C 轴 6 项 PDGE 的辨识结果如图 8 所示。 E_{XC} 总体在 $\pm 40\ \mu\text{m}$ 内,该误差在 $C=270^\circ$ 时达到最大值 $22.8\ \mu\text{m}$;在 $C=90^\circ$ 时达到最小值 $-34.4\ \mu\text{m}$ 。 E_{YC} 在 $[-26.8\ \mu\text{m}, 20.4\ \mu\text{m}]$ 内变化。 E_{ZC}



(a) 线性误差 E_{XC} , E_{YC} 与 E_{ZC} 的辨识结果
(a) Identification result of position errors E_{XC} , E_{YC} and E_{ZC}

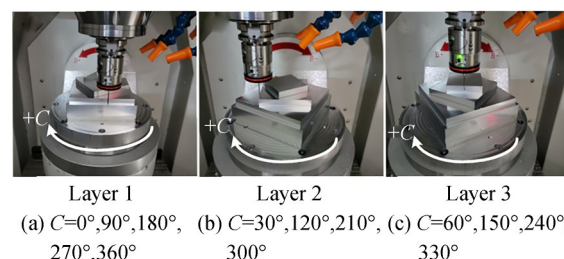
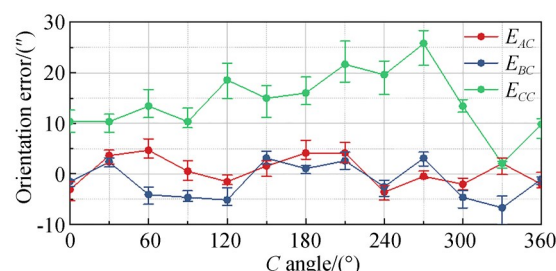


图 7 C 轴不同角度下的在机测量

Fig. 7 On-machine measurement at different angles of C -axis

在 $[-3.5\ \mu\text{m}, 10.2\ \mu\text{m}]$ 内变化,较为平稳。角度误差 E_{AC} 与 E_{BC} 的范围分别为 $[-3.6'', 4.6'']$ 与 $[-6.7'', 3.1'']$,角度定位误差 E_{CC} 的范围为 $[2.1'', 25.8'']$ 。



(b) 角度误差 E_{AC} , E_{BC} 与 E_{CC} 的辨识结果
(b) Identification result of orientation errors E_{AC} , E_{BC} and E_{CC}

图 8 C 轴 6 项 PDGE 的辨识结果

Fig. 8 Identification results of 6 PDGE of C -axis

不确定性分析对于旋转轴几何误差辨识至关重要,本研究通过蒙特卡洛模拟进行不确定性分析,以明确不确定因素对辨识结果的影响^[24]。以 E_{YC} 辨识为例,实测距离偏差 $\|l(S_{1,3}) - l^*(S_{1,3})\|_Y$ 可由 $S_{1,3}$ 面上随机选取 5 个测点拟合计算而得。选取不同的测点组合,重复此操作,将辨识结果的标准差视为不确定度 ($k=1$),如图 8 中的误差棒所示。

为验证辨识结果的准确性,使用球杆仪进行验证。如图 9 所示,分别在径向、切向与轴向 3 种测量模式^[23]下各进行球杆仪测试以辨识 C 轴 6 项 PDGE。图 10 对比了球杆仪辨识与本辨识方法的结果。如图 10(a)所示,线性误差 E_{XC} , E_{YC} 与 E_{ZC} 的辨识结果偏差分别在 $[-1.9\ \mu\text{m}, 2.7\ \mu\text{m}]$, $[-1.7\ \mu\text{m}, 1.5\ \mu\text{m}]$ 与 $[-1.3\ \mu\text{m},$

$0.9\ \mu\text{m}]$ 之间;如图 10(b)所示,角度误差 E_{AC} , E_{BC} 与 E_{CC} 的辨识结果偏差分别在 $[-1.0'', 1.3'']$, $[-0.6'', 0.4'']$ 与 $[-2.1'', 1.8'']$ 之间。两者辨识结果的平均吻合度达 95.4%,证实了本方法的准确性。

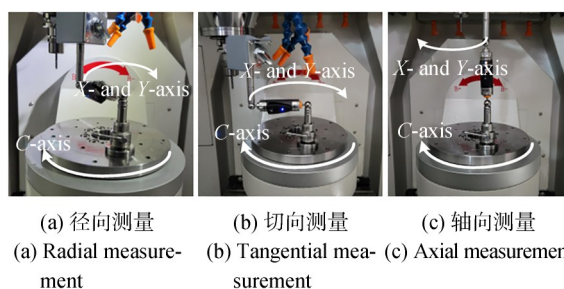


图 9 球杆仪辨识方法

Fig. 9 Identification method based on ball-bar

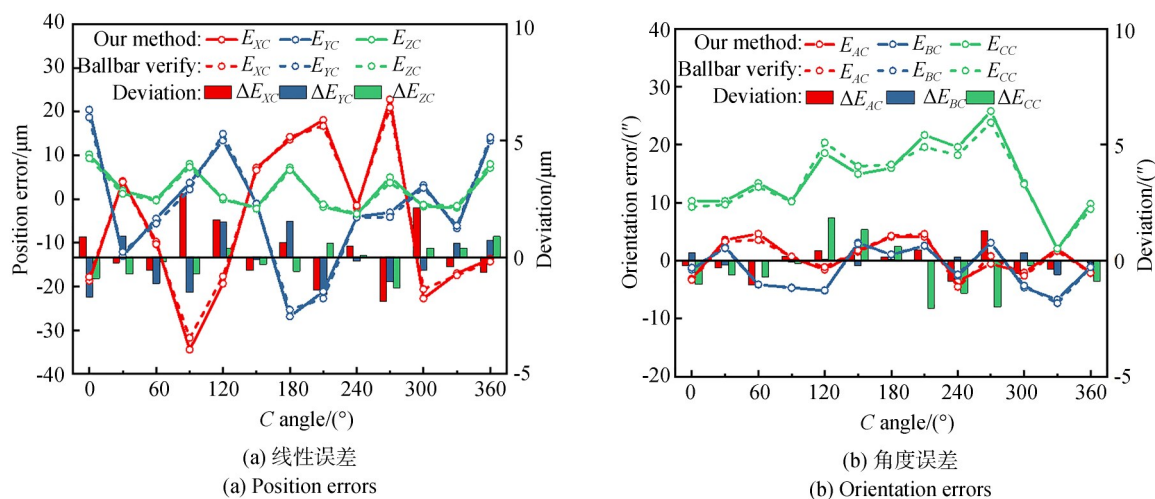


图 10 球杆仪对比实验结果

Fig. 10 Comparison of test results between proposed method and ball-bar identification

5 结 论

本文提出了一种工件切削测量方法,可辨识旋转轴的 6 项 PDGE。设计了一种错位塔形工件,它由三层错位叠加的矩形块组成,工件特征简单且加工测量方便。通过在工件不同层级的底面与侧面布置在机测量测点,可求解出每项误差的解析解,且辨识原理与辨识结果形式简单。

参考文献:

- [1] GAO W, IBARAKI S, DONMEZ M A, *et al.* Machine tool calibration: measurement, modeling, and compensation of machine tool errors[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2023, 187: 104017.
- [2] ZHANG Z, JIANG F, LU M, *et al.* Geometric error measuring, modeling, and compensation for CNC machine tools: a review[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023.
- [3] 徐凯, 李国龙, 李喆裕, 等. 基于参数化建模的旋转轴误差快速辨识方法[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(8): 21-29.
XU K, LI G L, LI ZH Y, *et al.* Fast error identification method for rotary axis based on parametric modeling[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(8): 21-29. (in Chinese)
- [4] RUAN D W, MAO J, LIU G, *et al.* Synchronous motion error identification method of dual-five-axis

与现有的球杆仪辨识方法相比,线性误差 E_{XC} , E_{YC} 与 E_{ZC} 的辨识结果偏差分别在 $[-1.9 \mu\text{m}, 2.7 \mu\text{m}]$, $[-1.7 \mu\text{m}, 1.5 \mu\text{m}]$ 与 $[-1.3 \mu\text{m}, 0.9 \mu\text{m}]$ 之间;角度误差 E_{AC} , E_{BC} 与 E_{CC} 的辨识结果偏差分别在 $[-1.0^\circ, 1.3^\circ]$, $[-0.6^\circ, 0.4^\circ]$ 与 $[-2.1^\circ, 1.8^\circ]$ 之间,辨识结果的吻合度达 95.4%,证实了本方法的准确性。本辨识方法基于工件切削,可辨识实际工况下旋转轴的 6 项 PDGE。

- CNC machine tool based on R-test[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021: 1-9.
- [5] 殷建, 李明. 基于激光跟踪仪的五轴机床旋转轴误差测量[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0408005.
YIN J, LI M. Error measurement of rotating shaft of five-axis machine tool based on laser tracker[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0408005. (in Chinese)
- [6] YIN S, ZHOU H. A vision-based error identification method for separating geometric errors of rotating axes in five-axis platforms[J]. *Measurement*, 2022, 205: 112185.
- [7] OSEI S, WANG W, DING Q. A new method to identify the position-independent geometric errors in the rotary axes of five-axis machine tools[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 87: 46-53.
- [8] 郭世杰, 姜歌东, 梅雪松, 等. 转台-摆头式五轴机床几何误差测量及辨识[J]. *光学精密工程*,

- 2018, 26(11):2684-2694.
- GUO SH J, JIANG G D, MEI X S, *et al.* Measurement and identification of geometric errors for turntable-tilting head type five-axis machine tools [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(11): 2684-2694. (in Chinese)
- [9] 郑华林, 项锡平, 胡腾, 等. 五轴加工中心旋转轴几何误差元素区别建模辨识技术[J]. 中国机械工程, 2021, 32(5):547-555.
- ZHENG H L, XIANG X P, HU T, *et al.* Distinct modeling and identification technology for rotary axes geometric error elements of five axis machining centers[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(5):547-555. (in Chinese)
- [10] Test code for machine tools-Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions: ISO 230-1[S]. Geneva: International Organization for standardization, 2012.
- [11] 阮大文, 茅健, 刘钢, 等. 双五轴数控铣削机床旋转轴误差辨识方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(13):1548-1554.
- RUAN D W, MAO J, LIU G, *et al.* A method for error identification of rotation axes of dual-five-axis CNC milling machines[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(13):1548-1554. (in Chinese)
- [12] PU Y Z, WANG L, YIN M, *et al.* Modeling, identification, and measurement of geometric errors for a rotary axis of a machine tool using a new R-test[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 117(5/6): 1491-1503.
- [13] 皮世威, 刘强, 孙鹏鹏. 基于激光干涉仪的旋转轴误差快速检定方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2484-2491.
- PI SH W, LIU Q, SUN P P. Geometric error detection for rotary feed drive based on laser interferometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(10): 2484-2491. (in Chinese)
- [14] DENG M, LI H, XIANG S, *et al.* Geometric errors identification considering rigid-body motion constraint for rotary axis of multi-axis machine tool using a tracking interferometer [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 158: 103625.
- [15] CHEN W H, LI B R, ZHAO T, *et al.* Vision measurement system for position-dependent geometric error calibration of five-axis machine tools [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 123(11/12): 3969-3981.
- [16] 刘巍, 李肖, 李辉, 等. 基于双目视觉的数控机床动态轮廓误差三维测量方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10):1-9.
- LIU W, LI X, LI H, *et al.* Binocular vision-based three-dimensional contouring error calibration method for NC machine tools[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(10):1-9. (in Chinese)
- [17] 侯艳丽, 苏显渝, 陈文静. 旋转视觉测量系统相机光心与转轴距离的标定方法[J]. 光学学报, 2022, 42(21): 2112001.
- HOU Y L, SU X Y, CHEN W J. Calibration method of distance between optical center of camera and rotation axis in rotating vision measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(21): 2112001. (in Chinese)
- [18] FANG Z, CHEN Z C, FANG T, *et al.* Simultaneous calibration of probe parameters and location errors of rotary axes on multi-axis CNC machines by using a sphere [J]. *Measurement*, 2022, 188: 110389.
- [19] IBARAKI S, OKUMURA R. A machining test to evaluate thermal influence on the kinematics of a five-axis machine tool[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, 163: 103702.
- [20] Test conditions for machining centres - Part 7: Accuracy of finished test pieces: ISO 10791-7: 2014 [S]. International Organization for Standardization [iso], 2014.
- [21] Test conditions for machining centres - Part 7: Accuracy of finished test pieces: ISO 10791-7: 2020 [S]. International Organization for Standardization [iso], 2020.
- [22] IBARAKI S, OTA Y. A machining test to calibrate rotary axis error motions of five-axis machine tools and its application to thermal deformation test [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 86: 81-88.
- [23] JIANG Z, SONG B, ZHOU X, *et al.* On-machine measurement of location errors on five-axis machine tools by machining tests and a laser displacement sensor[J]. *International Journal of Ma-*

chine Tools and Manufacture, 2015, 95: 1-12.

- [24] IBARAKI S, YOSHIDA I, ASANO T. A machining test to identify rotary axis geometric errors

on a five-axis machine tool with a swiveling rotary table for turning operations[J]. *Precision Engineering*, 2019, 55: 22-32.

作者简介:



程 涛(1998—),男,浙江宁波人,硕士研究生,主要研究方向为精密加工与测试。E-mail: 1016977535@qq.com

通讯作者:



项四通(1989—),男,浙江绍兴人,副教授,主要研究方向为精密加工与测试、高端装备精密化技术。E-mail: xiangsitong@nbu.edu.cn