

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514426

基于在机测量的五轴机床旋转轴几何误差高效测量与辨识

葛清扬^{1,2}, 杜正春^{1,2}, 卢成斌^{1,2,3}, 葛广言^{1,2}

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240; 2. 上海交通大学机械系统与振动全国重点实验室 上海 200240; 3. 通用技术集团机床工程研究院有限公司沈阳分公司 沈阳 110142)

摘 要: 五轴数控机床凭借其在加工精度、效率和适应性方面的突出优势,已广泛应用于精密零件的加工。然而,五轴机床几何误差元素繁多,而传统的测量方法由于测量时间长、仪器成本高,无法满足机床精度高效检测的广泛应用要求。为此,提出一种基于在机测量的旋转轴几何误差一次性安装测量装置与方法,同时针对该测量方法设计了旋转轴几何误差的分步辨识算法。该测量方法利用在机测头,在机床运动过程中对标准件工装的实际位置进行测量,将测量数据与理想理论数据进行比对,结合机床空间误差模型与辨识算法能够将旋转轴的位置无关误差(PIGEs)和位置相关误差(PDGEs)完全辨识。数值仿真结果表明,所提方法能够准确辨识出 10 项几何误差,辨识准确度均在 95% 以上。试验验证结果显示,该方法能显著提高角定位误差补偿效果,补偿精度提升超过 70%,为进一步验证其准确性,以 XR20 无线型回转轴校准装置与 XL-80 激光干涉仪对同一试验对象进行对比试验,结果显示两者在辨识结果上的平均吻合度达到以 97%。测量全程可在 15 min 内完成,大幅提升了测量效率,并能为进一步的热误差研究提供支持。所提出的测量方法是一种面向多种尺寸与构型机床旋转轴几何误差的通用测量方法,其在降低测量工具成本和提高测量效率方面具有明显优势,具备良好的应用前景。

关键词: 五轴数控机床;空间误差;在机测量;标准件工装;误差辨识;误差补偿

中图分类号: TH161 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.50

Efficient measurement and identification of geometric errors in rotary axes of five-axis machine tools based on on-machine measurement

Ge Qingyang^{1,2}, Du Zhengchun^{1,2}, Lu Chengbin^{1,2,3}, Ge Guangyan^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
3. Genertec Machine Tool Engineering Research Institute Co., Ltd., Shenyang Company, Shenyang 110142, China)

Abstract: CNC five-axis machine tools, with their outstanding advantages in machining accuracy, efficiency, and adaptability, have been widely used in the machining of precision components. However, due to the numerous geometric error elements in five-axis machine tools, conventional measurement methods suffer from long measurement time and high equipment cost, thus failing to meet the widespread demand for efficient accuracy testing. In this paper, a one-installation measurement device and method for geometric errors of rotary axes of five-axis machine tools based on on-machine measurement is proposed. A stepwise identification algorithm for rotary axis geometric errors is also designed for this measurement method. The method utilizes an on-machine probe to measure the actual position of the standard workpiece fixture during the machine tool's motion. The measured data are then compared with the theoretical values. By combining the machine tool's spatial error model with the identification algorithm, it is possible to fully identify both position-independent geometric errors (PIGEs) and position-dependent geometric errors (PDGEs) of the rotary axis. Numerical simulation results show that the proposed method can accurately identify ten geometric error elements, with identification accuracy over 95%. Experimental results demonstrate that this method significantly improves the compensation effect for angular positioning errors, with compensation accuracy increased by over 70%. To further validate its accuracy, comparative tests were conducted on the identical test specimen using the XR20

wireless rotary axis calibration device and the XL-80 laser interferometer. The results indicate that the average agreement of the identification results obtained by the two instruments exceeds 97%. The entire measurement process can be completed within 15 minutes, greatly improving measurement efficiency and providing support for further research on thermal errors. The measurement method proposed in this paper is a universal method for the geometric error measurement of rotary axes in machine tools with various sizes and configurations. It has obvious advantages in reducing the cost of measuring tools and improving measurement efficiency, and possesses good application prospects.

Keywords: five-axis machine tools; volumetric error; on-machine measurement; standard workpiece; error identification; error compensation

0 引言

高端五轴数控机床凭借其多自由度加工能力,在航天航空、汽车和精密模具等领域的复杂零件制造中发挥着关键作用^[1]。然而,在旋转轴的制造和安装过程中,由于制造精度和装配精度等因素的影响,刀具在空间中的实际位置与理想位置存在偏差,从而导致工件在加工过程中产生形位误差,这直接影响到机床的加工精度^[2]。另一方面,随着机床在高负荷、高频率的工作环境中,机械部件会发生逐渐磨损、变形、意外碰撞等情况,导致各部件之间的配合精度降低,从而影响机床整体的加工精度。因此,定期对机床精度评估是非常有必要的,国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)在 ISO 230-2^[3]准则中也强调了“定期检验”的重要性。因此,随着对加工精度要求的不断提高,几何误差的高效测量与辨识成为提升高精密五轴机床性能的关键问题^[4]。为有效避免因机床精度误差导致的零件缺陷和成本增加,众多学者已开展了旋转轴几何误差测量与辨识的深入研究。

数控机床上常用的高精度测量仪器有激光干涉仪^[5-6]、R-test^[7-8]、球杆仪^[9-11]、激光跟踪仪^[12-13]、在机测头^[14-15]等。旋转轴几何误差呈现为相互耦合的形式,因此需要采用误差分离算法对包含的各个单项几何误差进行解耦与辨识。激光干涉仪一般用于直线轴的误差测量,针对于旋转轴,皮世威等^[16]提出一种旋转轴与平动轴联动的测量方法,实现了对 AC 双转台和 BC 摆头转台型五轴机床旋转轴转角误差的测量。该方法虽然能测量旋转轴的关键转角误差,但是对机床的构型有一定要求且难以将全部综合误差进行分离。R-test 是一种针对于旋转轴的误差测量方法,其测量仪器主要由高精度位移传感器和配套的精密测量球组成,通过测量机床运动后的球心位置变化完成空间误差的测量。Ibaraki 等^[17]提出了用 R-test 自动测量旋转轴的静态误差和运动误差的方法。球杆仪是一种新型的高精度测量仪器,可用于空间误差的校准、三坐标机的精度检测和旋转轴相关误差的测量^[18],相比于 R-test 测量设备,其价格相对便宜

且方便购置。Tsutsumi 等^[11]提出了一种经典的测量旋转轴静态误差的方法,通过设计 3 种不同的运动模式,让机床在空间中做插补运动,分析球杆仪测量出的圆轨迹与标准轨迹的偏心率最终分离出所有静态误差。在此基础上,Wang 等^[19]提出了一种基于解析式而非计算偏心率的解耦方法。除此之外,研究人员还提出激光跟踪干涉仪测量方案^[20]和视觉测量方案^[21-22]的方法。以上方法的试验较为复杂,在同时测量静态误差和运动误差时存在一定局限性,由于大部分方案的测量过程依赖高精度仪器,其不仅价格相对较高,并且机床系统集成有一定难度,对操作人员的专业知识水平有较高要求。

近年来,越来越多的机床集成了在机测量系统,相比于上述测量仪器,其精度虽然难以达到同一水平,但可以满足高精度机床的几何误差测量要求,且非常适合进行短时间、周期性的精度检查。目前基于测头的在机测量方法已被广泛应用于数控机床误差的检测与评定领域。Ibaraki 等^[17]在该领域开展了系统而深入的研究,并于 2012 年提出了一种利用接触式测头对矩形特征的标准件进行在机测量的方法^[17],通过相应的误差辨识算法实现对旋转轴各项几何误差的求解。Los 等^[23]则提出了一种基于标准球体件的测量方法,用于识别旋转轴轴线的偏移误差,并采用蒙特卡罗方法对相关几何误差参数的不确定度进行了评估。此外,在考虑机床实际负载工况的情况下,常通过切削试件与在机测头相结合的方式,对机床误差进行测量和辨识。在工业生产中,较为广泛采用的是由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提出的 NAS949 试件,主要用于三轴机床的精度评估,试件的特征结构包括圆孔、四棱台、圆锥台和菱形等;后有研究者提出锥台试件,但该试件对五轴机床的误差测量有一定局限性;项四通团队^[24-25]分别提出基于错位塔型工件和双特征槽工件的在机测量检测方法。

然而,基于切削特征工件的测量方法仍然存在一定的局限性。一方面,为了放大几何误差对切削特征工件的影响,通常需要设计具有较大平面或较深切削特征的工件,这一过程中不可避免地引入了除几何误差外的其他误差源,例如刀具误差、工件误差以及直线轴几何误差

等,这些因素对误差辨识精度产生了显著干扰。另一方面,为了解旋转轴的所有几何误差项,需要针对不同类型的切削特征工件设计专门的误差求解算法和不同的测量模式,对于不同构型或尺寸的机床,其测量与误差辨识的复杂性和时间消耗较大,进一步增加了方法应用的难度和实际操作的挑战。

基于此,本文提出一种面向多种尺寸与构型机床旋转轴几何误差的通用测量方法,具有设备成本低、测量周期短、操作实施便捷等特点,并可实现对五轴机床几何误差的高效、精确辨识。

1 旋转轴几何误差辨识方法

1.1 五轴机床几何误差空间模型

根据不同的工业应用场景,五轴机床的结构各有不同,但他们都由 X 、 Y 、 Z 这 3 个平动轴和 2 个旋转轴组合而成。旋转轴之一为绕 Z 轴旋转的 C 轴,另一个为绕 X 轴旋转的 A 轴或者绕 Y 轴旋转的 B 轴。根据运动学原理,空间中每个运动构件有 6 个自由度,因此机床的旋转轴在加工过程中会有 6 个误差项,分别表现为 3 个位移误差和 3 个角度误差。在 ISO 230-7 标准^[26]中,又将回转轴线的误差分为 6 项运动误差和 4 项位置误差,即位置相关的几何误差 (position-dependent geometric errors, PDGEs) 和位置无关的几何误差 (position-independent geometric errors, PIGEs)。

以 C 轴为例,图 1 所示为 C 轴的 4 项 PIGEs;两项线性误差 XOC 、 YOC 和两项角度误差 AOC 、 BOC 。

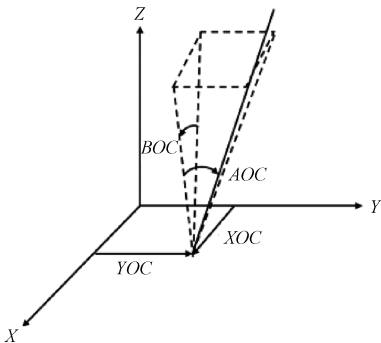


图 1 C 轴的 4 项 PIGEs 定义

Fig. 1 The definition of 4 PIGEs for C -axis

图 2 所示为 C 轴的 6 项 PDGEs:3 项线性误差 EXC 、 EYC 和 EZC 以及 3 项角度误差 EAC 、 EBC 和 ECC 。

表 1 总结了五轴机床旋转轴几何误差的定义,其中角度误差项的第 2 个符号 A 、 B 、 C 分别表示绕 X 、 Y 、 Z 的转动误差 (即 ECC 、 EAA 和 EBB 表示角定位误差);第 3 个符号表示旋转轴。

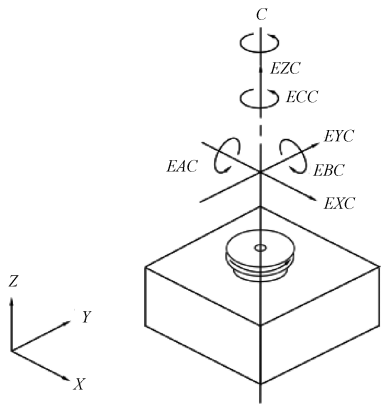


图 2 C 轴的 6 项 PDGEs 定义

Fig. 2 The definition of 6 PDGEs for C -axis

表 1 ISO 230-7 标准下的五轴机床旋转轴 20 项误差定义

Table 1 Definition of 20 geometric errors in 5-axis machine tools according to ISO 230-7 standard

误差类型	C 轴	定义— C 轴	B/A 轴
PIGEs	XOC	C 轴在 X 方位的位置误差	XOB/XOA
	YOC	C 轴在 Y 方位的位置误差	YOB/YOA
	AOC	C 轴相对于 Y 轴的垂直度	AOB/AOA
	BOC	C 轴相对于 X 轴的垂直度	BOB/BOA
PDGEs	EXC	C 轴在 X 方向的径向运动	EXB/EXA
	EYC	C 轴在 Y 方向的径向运动	EYB/EYA
	EZC	C 轴的轴向运动	EZB/EZA
	EAC	C 轴绕 X 轴的倾斜运动	EAB/EAA
	EBC	C 轴绕 Y 轴的倾斜运动	EBB/EBA
	ECC	C 轴角定位误差	ECB/EBA

五轴数控机床根据旋转轴的类型可以分为 BC 型五轴机床、AC 型五轴机床和 AB 型五轴机床;根据旋转轴的位置可以分为 3 类:1) 双摆头型,旋转轴在主轴一侧;2) 双转台型,旋转轴在工作台一侧;3) 摆头转台混合型,主轴侧和工作台侧各分布一个旋转轴。上述 3 种类型的五轴机床可以表示为 TTTRR、RRTTT 和 RTTTR,其中符号“T”代表平动轴,符号“R”代表旋转轴。根据多系统理论,整个机床由刀具工作链和工件运动链构成,两个运动链共同完成加工任务。以 RRTTT 双转台 BC 型五轴机床为例,刀具运动链的连接顺序为:刀具坐标系 (TCS)→主轴坐标系 (SCS)→ Z 轴坐标系 (ZCS)→ Y 轴坐标系 (YCS)→ X 轴坐标系 (XCS)→机床坐标系 (MCS);工件运动链的连接顺序为:工件坐标系 (WCS)→ C 轴坐标系 (CCS)→ B 轴坐标系 (BCS)→机床坐标系 (MCS),各个部件的运动都有各自的坐标系,根据坐标变换原理将所

有坐标系串联起来构建如图3所示运动链,建立综合误差模型。

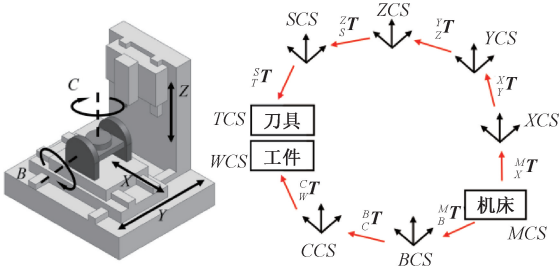


图3 RRTTT 双转台 BC 型五轴机床运动链

Fig.3 Motion chain of an RRTTT-BC-structured five-axis machine tool

一般机床坐标系的原点在主轴端面的旋转中心处,在刀具坐标系(TCS)下,假设刀尖点的坐标为(0,0,-L,0),L为刀具长度,则刀具坐标系到机床坐标系的运动变化矩阵如式(1)所示。

$${}^M_T = {}^M_X \cdot {}^X_Y \cdot {}^Y_Z \cdot {}^Z_S \cdot {}^S_T \quad (1)$$

其中, ${}^i_k T$ 表示 k 坐标系相对于 i 坐标系的运动变化矩阵。式(1)中 ${}^M_X T$ 、 ${}^X_Y T$ 、 ${}^Y_Z T$ 、 ${}^Z_S T$ 、 ${}^S_T T$ 各运动变化矩阵分别为:

$$\begin{cases} {}^M_X T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^X_Y T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^Y_Z T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^Z_S T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^S_T T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

类似的,工件坐标系到机床坐标系的运动变换矩阵为:

$${}^M_W T = {}^M_B T \cdot {}^B_C T \cdot {}^C_W T \quad (3)$$

式(3)中各矩阵为:

$$\begin{cases} {}^M_B T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(a) & -\sin(a) & 0 \\ 0 & \sin(a) & \cos(a) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^B_C T = \begin{bmatrix} \cos(c) & -\sin(c) & 0 & 0 \\ \sin(c) & \cos(c) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^C_W T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & w_x \\ 0 & 1 & 0 & w_y \\ 0 & 0 & 1 & w_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

其中, x 、 y 、 z 、 a 和 c 分别表示五轴机床各个轴的运动量, w_x 、 w_y 和 w_z 分别表示 WCS 原点相对于 MCS 原点的 X、Y 和 Z 方向的初始偏置。

机床在加工过程中,工件上的实际加工点位置和刀尖理论位置相重合,据此建立无误差状态下的坐标变换方程:

$${}^M_X T \cdot {}^X_Y T \cdot {}^Y_Z T \cdot {}^Z_S T \cdot {}^S_T T \cdot [0,0,0,1]^T = {}^M_B T \cdot {}^B_C T \cdot {}^C_W T \cdot p_i \quad (5)$$

其中, p_i 表示刀具在工件坐标系下的理论位置。将 p_i 提取出来,得到理论加工点的绝对位置,即:

$$p_i = ({}^M_B T \cdot {}^B_C T \cdot {}^C_W T)^{-1} \cdot {}^M_X T \cdot {}^X_Y T \cdot {}^Y_Z T \cdot {}^Z_S T \cdot {}^S_T T \cdot [0,0,0,1]^T \quad (6)$$

考虑 C 轴 10 项几何误差情况下,式(6)将变为:

$$p_i = (E_B \cdot {}^M_B T \cdot E_C \cdot {}^B_C T \cdot {}^C_W T \cdot T_{PIGE})^{-1} \cdot {}^M_X T \cdot {}^X_Y T \cdot {}^Y_Z T \cdot {}^Z_S T \cdot {}^S_T T \cdot [0,0,0,1]^T \quad (7)$$

其中, E_B 和 E_C 为该旋转角度下 B 轴和 C 轴的误差矩阵,忽略高阶项,根据小误差理论它们分别表示为:

$$E_C = \begin{bmatrix} 1 & -ECC & EBC & EXC \\ ECC & 1 & -EAC & EYC \\ -EBC & EAC & 1 & EZC \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$E_B = \begin{bmatrix} 1 & -ECB & EBB & EXB \\ ECB & 1 & -EAB & EYB \\ -EBB & EAB & 1 & EZB \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$T_{PIGE} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & BOC & XOC \\ 0 & 1 & -AOC & YOC \\ -BOC & AOC & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

将各个矩阵代入式(7)中即可得到推导的 RRTTT 双转台 BC 型五轴数控机床实际情况下的综合运动学模型。同理可推导其他构型五轴机床的综合运动学模型。

1.2 旋转轴几何误差测量方案与辨识算法

本节研究基于在机测量方案的旋转轴几何误差辨识算法,如图4所示拟采用标准球工件,其优点在于球体的几何形状规则,易于描述其在空间中的位置和大小,同时

球体工件在于测头接触时,接触面积小,压力分布均匀,在一定程度上可以减小测量误差。



图4 标准球模型

Fig. 4 Model of the standard sphere

实际测量的标准球坐标和理论坐标在 X 、 Y 和 Z 方向上存在偏差,该偏差是由 PIGEs 和 PDGEs 共同作用的结果,下文将详细阐述分离辨识算法,辨识每个旋转轴的 10 项几何误差元素。

球体在空间中可以用式(11)表示,即:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 = r^2 \quad (11)$$

其中, (x, y, z) 为球面上任意一点的坐标, r 为半径。

根据五点法拟合球心算法,将式(11)扩展到 5 个点,并改写式(11)为式(12)形式,即:

$$\begin{cases} 2x_1a + 2y_1b + 2z_1c + a^2 + b^2 + c^2 - r^2 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ 2x_2a + 2y_2b + 2z_2c + a^2 + b^2 + c^2 - r^2 = x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 \\ 2x_3a + 2y_3b + 2z_3c + a^2 + b^2 + c^2 - r^2 = x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \\ 2x_4a + 2y_4b + 2z_4c + a^2 + b^2 + c^2 - r^2 = x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 \\ 2x_5a + 2y_5b + 2z_5c + a^2 + b^2 + c^2 - r^2 = x_5^2 + y_5^2 + z_5^2 \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)改写为矩阵形式,即:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ D \end{bmatrix} = \mathbf{B} \quad (13)$$

其中, $\mathbf{A}$ 为一次项系数矩阵, $\mathbf{B}$ 为二次项系数矩阵, (a, b, c) 为待求的拟合球心坐标, D 为包含圆心坐标和半径的未知量参数,具体定义如式(14)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & 2z_1 & 1 \\ 2x_2 & 2y_2 & 2z_2 & 1 \\ 2x_3 & 2y_3 & 2z_3 & 1 \\ 2x_4 & 2y_4 & 2z_4 & 1 \\ 2x_5 & 2y_5 & 2z_5 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \\ x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 \\ x_5^2 + y_5^2 + z_5^2 \end{bmatrix} \\ D = a^2 + b^2 + c^2 - r^2 \end{cases} \quad (14)$$

根据式(13)利用最小二乘法求得唯一解,计算得到的拟合球心即为待测标准球的球心坐标。

辨识步骤分为 3 个步骤:

1) PIGEs 的辨识。首先如图 5 所示,以机床的 C 轴为例,建立 C 轴的理论坐标系 WCS_{ic} ,该坐标系坐标原点 O_{ci} 选在转台平面和该旋转轴轴线的交点,则 Z 轴所在的直线即为理论的回转轴线 C_i 。将 C 轴旋转至不同角度,测量每次旋转后的标准球坐标,直至旋转一周结束。将测量的数据按照球序号分为 3 个集合 S_1 、 S_2 和 S_3 。集合中的坐标记为 $l(i, nk)$, i 表示第 i 标准球, n 为第 n 次测量, k 为每次旋转的角度。

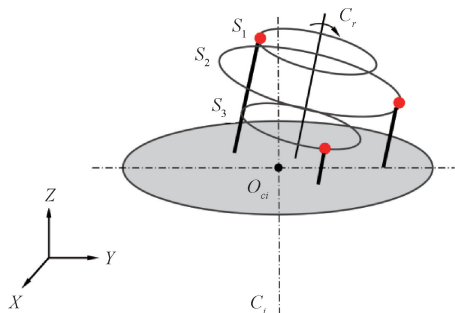


图5 标准球测量点的分布

Fig. 5 The distribution of measurement points for standard balls

根据 S_1 、 S_2 和 S_3 数据可以计算出每个集合实际的旋转中心点,记为 R_1 、 R_2 和 R_3 。由于每个集合中的数据较多且各项误差相互耦合,若用向量叉乘的方法求平面法向量,计算误差较大,因此本文采用式(12)形式的拟合球心算法来计算旋转中心。以集合 S_1 为例,将测量的所有 $l(i, k)$ 按照式(12)扩展到 $n = 2\pi/k$ 个方程,即:

$$\begin{cases} 2x_1a + 2y_1b + 2z_1c + a^2 + b^2 + c^2 - r^2 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ \vdots \\ 2x_na + 2y_nb + 2z_nc + a^2 + b^2 + c^2 - r^2 = x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 \end{cases} \quad (15)$$

再改写成式(15)的矩阵方程形式,并用最小二乘法得到球心坐标 $O_1(x_1, y_1, z_1)$,也就是旋转中心的坐标。集合 S_2 和 S_3 中的数据经过同样计算得到另外两个旋转中心 $O_2(x_2, y_2, z_2)$ 和 $O_3(x_3, y_3, z_3)$,分别选择两个不重复的点计算出方向向量,即:

$$\begin{cases} \overrightarrow{O_1O_2} = [x_1 - x_2 \quad y_1 - y_2 \quad z_1 - z_2]^T \\ \overrightarrow{O_1O_3} = [x_1 - x_3 \quad y_1 - y_3 \quad z_1 - z_3]^T \end{cases} \quad (16)$$

如图 6 所示,根据向量加法法则求取平均方向向量所在直线作为实际的回转轴线 C_r 。 C_r 的方向向量表示为:

$$\mathbf{v} = \left[\frac{2x_1 - x_2 - x_3}{2} \quad \frac{2y_1 - y_2 - y_3}{2} \quad \frac{2z_1 - z_2 - z_3}{2} \right]^T = [a \quad b \quad c]^T \quad (17)$$

将直线 C_r 写成参数方程形式:

$$C_r: [x, y, z]^T = [x_1, y_1, z_1]^T + t[a, b, c]^T \quad (18)$$

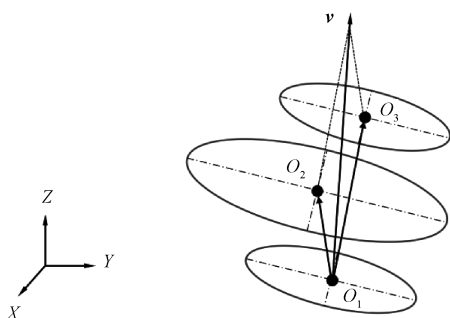


图6 实际回转轴线

Fig. 6 The real axis average line

将理论坐标系的原点 O_{ci} 所在的 Z 坐标值代入式(18),求解该参数方程得到 (x, y, z) 即为 C 轴的实际坐标系 WCS_{ir} 的原点 O_{er} 。

根据图1关于PIGEs的定义,处于零位时旋转轴线的偏差都认为是来自PIGEs,则 O_{ci} 与 O_{er} 在 X 和 Y 方向上的偏差即为 XOC 和 YOC 。接着将 C_i 和 C_r 分别投影到 XOZ 和 YOZ 平面,如图7所示,根据平面几何原理可知投影后的 C_r 与 Z 轴所夹的锐角即为相对于 X 和 Y 轴的垂直度误差 AOC 和 BOC ,符号取欧拉角的正负定义。

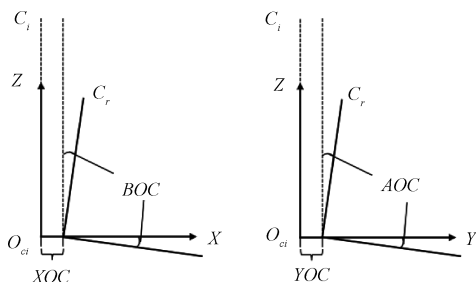


图7 4项PIGEs的解算

Fig. 7 The solutions of 4 PIGEs

最终4项PIGEs的辨识计算公式如式(19)所示。

$$\begin{cases} XOC = O_{er}(x) - O_{ci}(x) \\ YOC = O_{er}(y) - O_{ci}(y) \\ AOC = -\arctan \frac{v_y}{v_z} \\ BOC = \arctan \frac{v_x}{v_z} \end{cases} \quad (19)$$

2) PDGEs的辨识。以 C 轴处于绝对零位时3个标准球为参考点,每旋转步长 k 角度后进行一次测量,假设第 i 个参考球的坐标为 $\mathbf{P}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$,扣除PIGEs各项误差后,经过旋转后的无误差的理论坐标向量为 $\mathbf{l}(i, nk) = [x_2 \ y_2 \ z_2]^T$,而实际测量的坐标向量为 $\mathbf{l}(i, nk)' = [x_2' \ y_2' \ z_2']^T$,根据式(7)推导的运动变换模型,可以列出的关系式为:

$$\mathbf{l}(i, nk)' = (\mathbf{E}_B \cdot \mathbf{T}_B^M \cdot \mathbf{E}_C \cdot \mathbf{T}_C^B \cdot \mathbf{T}_W^C)^{-1} \cdot \mathbf{T}_X^M \cdot \mathbf{T}_Y^X \cdot \mathbf{T}_Z^Y \cdot \mathbf{T}_S^Z \cdot \mathbf{l}(i, nk) \quad (20)$$

其中,待测球心坐标相对于对应标准球仅有旋转轴运动,故式(19)中的 $\mathbf{E}_B \cdot \mathbf{T}_B^M \cdot \mathbf{T}_W^C \cdot \mathbf{T}_X^M \cdot \mathbf{T}_Y^X \cdot \mathbf{T}_Z^Y \cdot \mathbf{T}_S^Z$ 均为单位矩阵 $\mathbf{E}$,式(19)经简化后变为:

$$\begin{cases} \mathbf{T}_{PIGE}^{-1} \cdot \mathbf{l}(i, nk) = \mathbf{R}(c) \cdot \mathbf{T}_{PIGE}^{-1} \cdot \mathbf{P}_i \\ \mathbf{T}_{PIGE}^{-1} \cdot \mathbf{l}(i, nk)' = \mathbf{E}_C \cdot \mathbf{R}(c) \cdot \mathbf{T}_{PIGE}^{-1} \cdot \mathbf{P}_i \end{cases} \quad (21)$$

其中 $\mathbf{R}(c)$ 为旋转变换矩阵,在数值上与 $\mathbf{T}_C^B$ 一致。

将步骤1)辨识出的 AOC 、 BOC 、 XOC 和 YOC 代入 $\mathbf{T}_{PIGE}$ 中,经计算后将式(20)简化为式(22)所示解析式。

$$\begin{cases} \Delta x_i = EXC + l(i, nk)_z \cdot EBC - l(i, nk)_y \cdot ECC \\ \Delta y_i = EYC - l(i, nk)_z \cdot EAC + l(i, nk)_x \cdot ECC \\ \Delta z_i = EZC + l(i, nk)_y \cdot EAC - l(i, nk)_x \cdot EBC \end{cases} \quad (22)$$

其中, $i=1, 2, 3$, $\Delta x_i = x_i' - x_i$, $\Delta y_i = y_i' - y_i$, $\Delta z_i = z_i' - z_i$ 。

将式(22)转化为线性方程组。在每个旋转角度下,通过3个标准球的测量可建立3个独立方程,因此累计可列写9个方程。而未知数的个数仅为6,即方程数多于未知量数,构成超定线性方程组。采用Moore-Penrose广义逆矩阵解法,可求得该超定方程组的唯一最小二乘解。

3)迭代计算过程。将测量数据减去步骤2)中计算得到的对应位置的PDGEs后,重复步骤1)计算得到更新后的PIGEs,继而使用更新的误差补偿矩阵重新计算PDGEs。经迭代后,可获得精确的4项PIGEs与6项PDGEs。

类似于 C 轴的处理方式,对于 B/A 轴,首先依据1.1节所述的齐次坐标变换模型确定理论坐标,随后重复执行步骤1)~3)测量流程,即可实现该轴全部10项几何误差的辨识。

求解过程中需要注意的是将长度单位统一为mm,角度单位统一为rad。

基于本节的辨识方法,可以辨识出所有影响旋转轴精度的几何误差项,方法简单高效。

2 旋转轴几何误差辨识算法仿真验证

为了评估算法的有效性和解耦能力,本文基于MATLAB针对于RRTTT双转台BC型五轴机床进行数值仿真模拟,仿真过程中需分别构造并输入PIGEs和PDGEs。依据几何误差定义的独立性假设,PIGE和PDGE各误差项应独立:一方面,PDGEs中各误差分量的模拟输入应满足其在一个旋转周期内的代数和为0,以避免引入系统性偏置;另一方面,PDGEs的设定不应应对PIGEs各误差元素产生耦合影响。为提高仿真实现的可操作性并便于结果对比分析,本文采用“分步施加误差—分步补偿”的仿真验证策略,具体流程为:

1)在机床坐标系中建立3个参考点的坐标 P_i 。

2)以参考点 P_i 标定所有理论坐标 S ,见1.1节。

3) 输入模拟 PIGEs 值,并辨识该误差 E_1 , 见 1.2 节辨识算法步骤 1)。

4) 模拟输入各个位置的误差值,以当前坐标作为实际测量值 S' , 并辨识新的 PIGEs (E_2), 以 E_2 对理论坐标 S 进行补偿。

5) 辨识 PDGEs(E_3), 见 1.2 节辨识算法步骤 2)。

在流程 4) 中输入的误差量包括了 PIGEs 分量和 PDGEs。两次模拟输入得到综合 PIGEs 为 E_2 , 对其进行补偿后, 辨识出的 PDGEs 为准确值。后文以 E_1 的仿真结果来描述 PIGEs 的统计学特性。

通过以上流程, PIGEs 和 PDGEs 的所有误差项均可以被辨识, 各误差项的辨识结果与其仿真设定值高度一致, 其中 XOC 、 YOC 辨识误差与输入误差完全一致, AOC 、 BOC 辨识误差分别为 29.999 和 29.996 μrad , 相对偏差都在 1% 以内, 辨识过程仅引入了极小的数值计算精度误差, 且其量级相对于误差项本身可忽略不计。表 2 列出了 PIGEs 的辨识结果。

表 2 无测量误差的 PIGEs 误差辨识结果
Table 2 The results of error identification for PIGEs without measurement errors

误差类型	误差项	输入误差	辨识误差
PIGEs	XOC	10 μm	10.00 μm
	YOC	10 μm	10.00 μm
	AOC	30 μrad	29.999 μrad
	BOC	30 μrad	29.996 μrad

实际测量中还存在测量误差, 为了评估单次测量数据的可靠性和稳定性, 需要对数据进行不确定度分析。

蒙特卡洛模拟是一种常用的统计学模拟方法, 通过模拟大量随机变量的变化来求解数学问题和评估系统行为的概率分布。其核心思想是通过生成随机数或随机过程来模拟复杂系统的行为, 进而估算系统输出的统计特性。在测量过程中在机测头的重复精度为 0.25 μm , 其他包括机械振动、测头的接触力波动、测头和球面的不均匀性这些误差均会影响实际的测量结果, 影响测量重复性误差中重复定位误差为主要因素, 将这些误差的综合影响视为均值为 0、标准差为 0.001 的标准正态分布随机误差, 再把这些随机误差加入 S' 中, 进行 1 000 次模拟。单次测量的标准差和不确定度按式 (23) 和 (24) 计算。

$$S(x)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n\left(X_i-\bar{X}\right)}{n-1}}$$

(23)

$$u_A=\frac{S(x)}{\sqrt{n}}$$

(24)

其中, $S(x)$ 为标准偏差, u_A 为 A 类不确定度。1 000 次模拟结果后 PIGE 辨识结果如表 3 所示, PDGE 辨识结果如图 8 所示。

表 3 有测量误差的 PIGEs 误差辨识结果
Table 3 The results of error identification for PIGEs with measurement errors

误差项	单位	输入误差	均值	标准差	不确定度
XOC	μm	10	9.8	0.411 5	$1.301\ 9\times10^{-2}$
YOC	μm	10	9.8	0.195 1	$6.171\ 8\times10^{-3}$
AOC	μrad	30	28.905	4.439 6	$1.404\ 6\times10^{-1}$
BOC	μrad	30	28.304	2.992 7	$9.468\ 5\times10^{-2}$

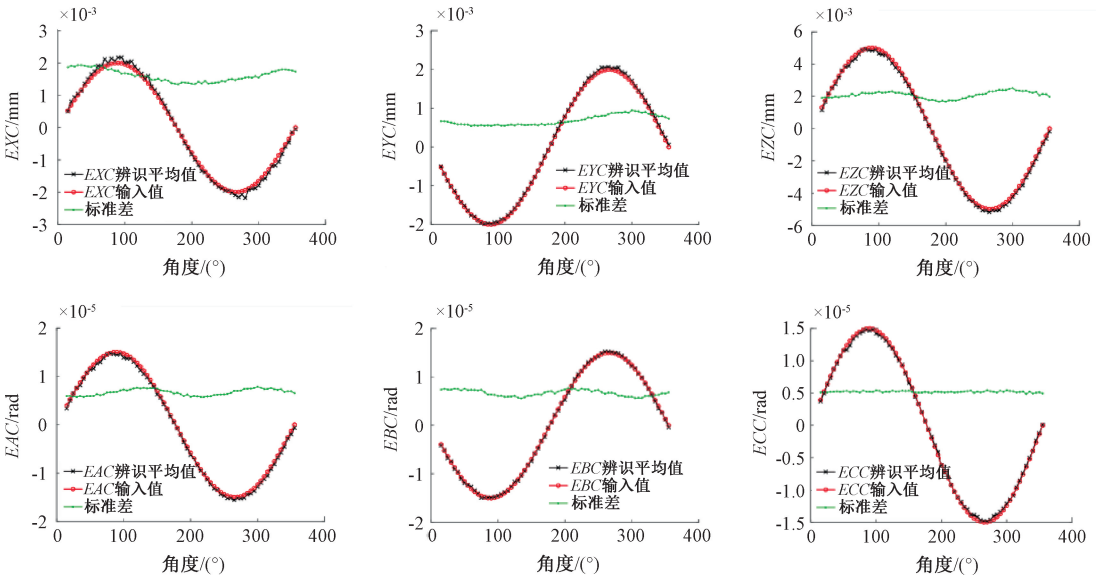


图 8 考虑测量误差的 PDGEs 误差辨识结果

Fig. 8 The results of error identification for PDGEs with measurement errors

根据仿真模拟辨识结果可知, XOC 、 YOC 、 AOC 和 BOC 的辨识的相对偏差分别为 3.7%、2.2%、8.25% 和 3.88%, 均在 10% 以内。在 PDGEs 各项误差项中: 定位误差 ECC 最大相对偏差为 2.41%, 角度误差 EAC 和 EBC 的最大相对偏差分别为 3.32% 和 1.66%, 线性位移 EXC 、 EYC 和 EZC 偏差的最大相对偏差分别为 4.93%、1.19% 和 9.13%, 均在 10% 以内。

参照 ISO 230 系列关于机床几何精度检验的精度表述方式, 并综合考虑求解精度与误差补偿需求, 本文设置如下判据: 各误差项的最大绝对偏差不超过允许误差上限的 10% (允许误差上限由机床精度水平确定), 相对偏差不超过 10%, 重复性标准差不超过允许误差上限的 2%。仿真统计结果均满足上述要求, 表明算法能够有效表征回转轴几何精度。

3 工件的设计

工件实物如图 9 所示, 其包括 1 个底座和 3 个不同高度的锥杆。底座为直径 200 mm 的圆盘, 锥杆的高度分别为 10、60 和 110 mm。该工件采用可便携式安装结构, 便于在转台上灵活布置和固定, 从而满足五轴机床多姿态情况下的测量。

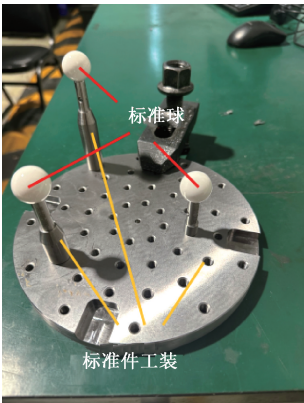


图 9 旋转轴几何误差测量和辨识工件

Fig. 9 The workpiece for measurement and identification of geometric errors of rotation axis

工件配合 3 个高精度陶瓷标准球使用。由于在机测量的测针精度极高, 为了确保测量结果的准确性和可靠性, 标准球必须具备极高的几何精度, 要求其直径公差、圆度、公差等级等指标达到微米级别。其表面质量也必须达到非常高的标准, 表面光洁度需要经过精细抛光, 以避免表面粗糙度对测量结果造成影响。除了几何精度外, 其材料特性也应满足可靠性要求, 比如热稳定性、结构均匀性、耐腐蚀性、耐磨性、抗静电性等特性。

考虑到上述要求标准球的材料选用哑光陶瓷, 其出

厂直径为 20.001 2 mm, 球的圆度精度 $\leq 0.25\text{ }\mu\text{m}$, 球下方为不锈钢支撑杆, 杆长 23 mm, 底部含有 M6 螺纹, 可安装在加工工件上作为空间坐标测量中的稳定参考点。

工件在在机测量过程中, 受测头接触力以及自身重力载荷共同作用, 可能产生微小的弹性弯曲变形, 从而引入附加的形位偏差并影响测点坐标的真实性。考虑到在机测头的最小测量分辨率为 $1\text{ }\mu\text{m}$, 为避免工件弹性变形成为主导误差源, 并确保变形引起的位移不会被误判为真实几何误差, 本文将工件最大弯曲变形控制指标设定为不超过 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。该阈值的设定能够保证: 在最不利测量姿态与最大测触力条件下, 变形误差仍被限制在测量系统分辨能力以内, 从而提高测量数据的可重复性与参数辨识结果的可信度。根据式 (25) 可以对锥杆的直径进行初步计算, 即:

$$\begin{cases} \omega_1 = -\frac{Fl^3}{3EI} \\ \omega_2 = -\frac{ql^3}{8EI} \\ \omega_1 + \omega_2 < 1 \end{cases} \quad (25)$$

其中, ω 为扰度, F 为杆顶端受到的轴向力, l 为杆的长度, E 为材料的弹性模量, I 为圆杆截面的惯性矩, 第 3 行中 1 的单位为 μm 。

考虑到工件的强度、重量、热稳定性等因素, 加工原料选用钢。本次试验以分别模具钢、不锈钢和殷瓦钢这 3 种材料作为加工原材料, 表 4 列举了 3 种材料相关的力学参数和物理参数。

表 4 3 种材料的力学性能和物理性能参数

Table 4 Mechanical and physical properties of the three materials

材料	屈服强度/ MPa	弹性模量/ GPa	硬度/ HRC	热膨胀系数 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
模具钢	800 ~ 1 200	200 ~ 230	45 ~ 60	10.0 ~ 12.0
不锈钢	200 ~ 700	190 ~ 210	20 ~ 40	16.0 ~ 18.0
殷瓦钢	800 ~ 1 500	200 ~ 220	45 ~ 60	1.2 ~ 1.4

基于上述内容在 NX UG 软件中对设计完成的工件模型进行仿真, 如图 10 所示, 工件在 90° 姿态时, 其结构受力变形最显著, 其变形在重力方向的最大值为 $0.79\text{ }\mu\text{m}$, 满足最小变形量的设计原则。因单次测量时间约为 15 min 左右, 故不考虑热变形对工件的影响。

4 综合试验验证

在五轴机床上, 使用本文提出的测量及辨识方案研究旋转轴的几何误差。同时, 依据空间误差补偿方法, 对比前后关键误差项的结果, 验证本文方法的准确性。

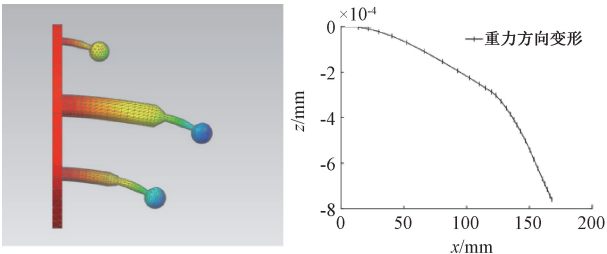


图 10 90°姿态的变形仿真

Fig. 10 The simulation results of deformation at 90°

4.1 试验设置

如图 11 所示,试验机床为沈阳机床股份有限公司的 SMU350 型叶片五轴加工中心,该机床 X/Y/Z 行程分别为 900/350/350 mm,旋转轴 A1 与 U1 轴,其转角行程为±360°,B 轴转角行程为±45°机床采用西门子数控系统。

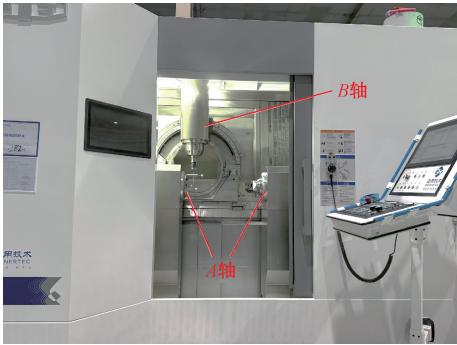


图 11 SMU350 型叶片机
Fig. 11 SMU350 blade machine

测头型号为雷尼绍 RMP600,配合长度 150 mm、测球直径 6 mm 的测杆使用。测量精度为 1 μm,重复度误差为 0.25 μm,其在各个方向探测精度相同,能够实现 A 轴多个角度上的工件探测。

试验流程为:1)设备的安装与标定,如图 12 所示,首先将工件组装并固定到机床的转台上,安装位置不做精确要求,标定包括测球半径标定和姿态标定,其中需要标定红宝石球的+X、+Y、-X、-Y 以及 30°、60°、120°、150°、

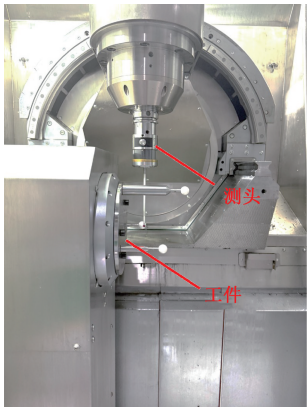


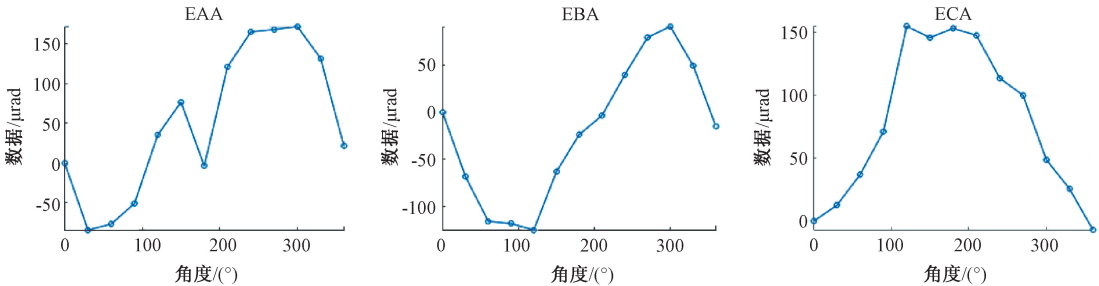
图 12 标准件工装与测头安装
Fig. 12 The installation of standard workpiece and probe

4.2 测量结果及与验证

在 SMU350 型叶片五轴加工中心上进行多次试验,其测量结果与辨识结果均有重复性。式(26)给出了试验机床的 A 轴的 PIGEs 各项误差辨识结果,即:

$$\begin{cases} YOA = 0.002\ 6\ \mu\text{m} \\ ZOA = 0.025\ 2\ \mu\text{m} \\ BOA = 51.963\ \mu\text{rad} \\ COA = 27.322\ \mu\text{rad} \end{cases} \quad (26)$$

图 13 展示了 PDGEs 各项误差的辨识结果。在测量过程中,考虑到测头与工件之间的运动干涉问题,特别是在 A 轴处于 180°位置时只能测到两个标准球数据。因此,需要单独考虑该位置的辨识结果,或直接剔除。



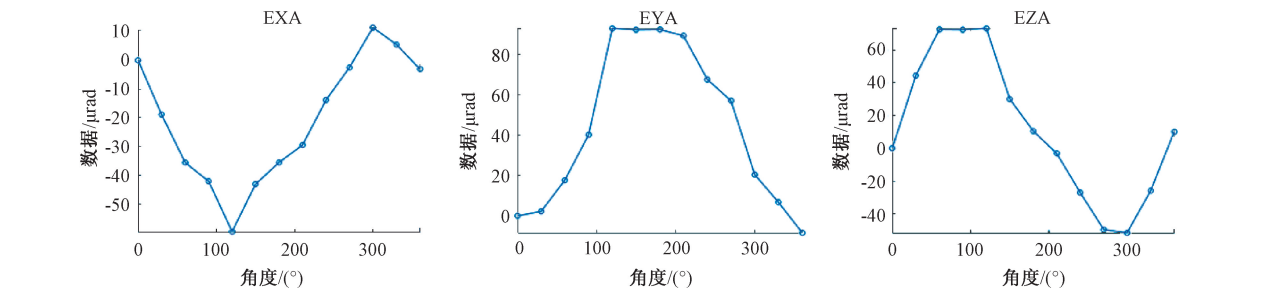


图 13 试验机床的 PDGEs 的辨识结果

Fig. 13 The identification results of PDGEs of test machine tools

由于该机床没有集成的多误差补偿系统,因此针对关键误差项:A 轴角定位误差,进行 G 代码补偿,即在每次旋转时,补偿该角度下的角定位误差,接着重复测量与辨识步骤,对比补偿前后的结果。该补偿方法简单高效,可以快速验证辨识算法的有效性。图 14 展示了 EAA 补偿前后的对比结果。

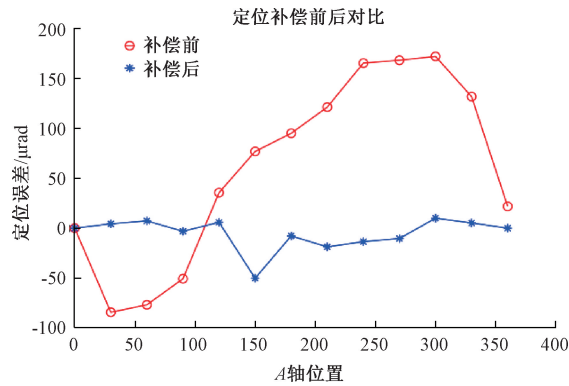


图 14 角定位误差 EAA 补偿前后辨识结果

Fig. 14 The identification results of EAA before and after compensation

可以看到,补偿后 30°~330°的角定位误差有明显的减小,表 5 列出了补偿前后的具体辨识结果。

EAA 分别降低到 -4.51、7.75、-1.35、-3.85、-34.36、-8.13、34.03、26.71、21.88、13.90、23.46 μrad,补偿前的误差变化范围为-84~168.23 μrad,最大幅值差为 252.48 μrad,补偿后的变化范围降低至 -34.4~34.4 μrad,最大幅值差为 68.38 μrad,降低了 72.92%。说明该机床的角定位误差被有效补偿,本文算法的有效性和自补偿性得以验证。

进一步验证本文辨识算法的准确性,利用雷尼绍回转轴校准装置对机床 A 轴进行直接测量。XR20 无线型回转轴校准装置包含一个安装在精密伺服控制轴上的集成式角度反射镜。配合雷尼绍 XL-80 激光干涉仪使用,可以对回转轴进行高精度、可重复的测量与校准,该型号激光干涉仪能够以 50 kHz 频率采集数据,最高线性测

表 5 误差补偿前后的 EAA			
Table 5 EAA errors before and after compensation			
角度/(°)	补偿前/μrad	补偿后/μrad	提升率/%
0	-	-	-
30	-84.239	-4.51	94.65
60	-76.779	7.75	89.91
90	-50.660	-1.35	97.34
120	35.584	-3.85	89.18
150	76.852	-34.36	55.29
180	-	-	-
210	121.280	34.03	71.94
240	165.370	26.71	83.85
270	168.240	21.88	86.99
300	172.090	13.90	91.92
330	131.810	23.46	82.20

量速度达到 4 m/s,测量分辨率为 1 nm,在整个环境范围内,精度高达±0.5 ppm。试验布置如图 15 所示。



图 15 XR20 转角测量仪试验设置

Fig. 15 The XR20 angle measuring instrument experimental arrangement

雷尼绍 XR20 转角测量仪的测量原理及流程为:已知试验机床的 A 轴为工作台,其旋转中心位置已标定。

首先从机床系统读取A轴旋转中心坐标,并将集成式角度反射镜精确安装于该旋转中心处。随后将A轴行程($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$)按等角度划分为 n 个区间;A轴每旋转一个分度角 θ 时,反射镜随转轴转至对应测量位置。转动完成并稳定后进行一次转角测量。角度测量原理如图16所示:角度反射镜相对于角度干涉镜发生转动,使两束反射光的光程产生差异。测量软件根据接收的发射光与反射光之间的光程差进行计算,并将其换算为对应的角度误差。

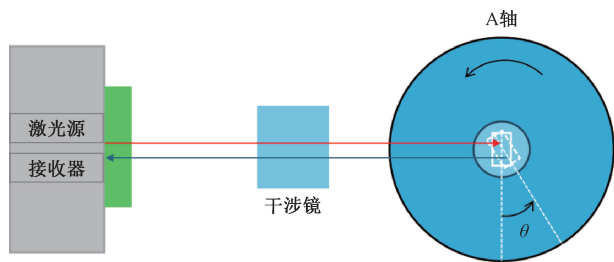


图16 激光干涉仪测量角定位误差原理

Fig. 16 Principle of angular positioning error measurement with laser interferometer

为了确保测量结果的准确性和重复性,本次试验对A轴的角定位误差进行5次测量,并与在机测量试验中A轴在相同位置处的角定位误差值进行对比,结果如图17所示。

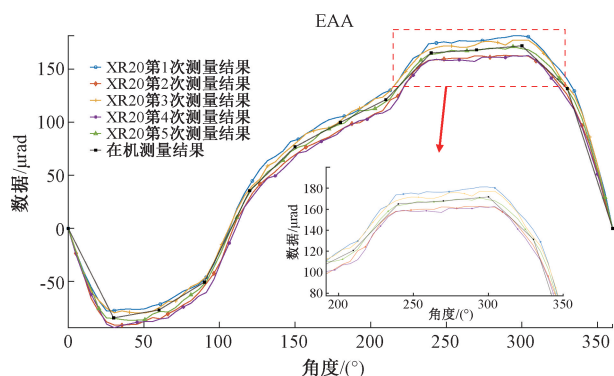


图17 在机测量结果与XR20测量结果对比

Fig. 17 Comparison between on-machine measurement results and XR20 measurement results

以在机测量辨识结果为参考,将激光干涉仪5次测量值取平均后比较可得:两者的平均绝对偏差为 $-1.091\ \mu\text{rad}$,平均相对偏差约为1.59%。从各测点分布看,120°位置处相对偏差最大,3.78%;240°位置处最小,为0.55%。按重合测点逐一统计,两种方法在各位置处的绝对差值约为0.872~1.707 μrad ,二者之间存在一定系统性差异。该差异主要来源于旋转轴自身的重复定位

误差;此外,激光干涉仪测量结果还可能包含一定的累积误差,其主要成因为旋转轴热漂移及反向间隙等因素的影响。

综上所述,对比试验结果表明,本文方法的测量结果与激光干涉仪直接测量结果在总体上具有良好一致性,两者之间的偏差相对于角定位误差本身的量级较小,验证了本文方法的有效性。

5 结 论

针对五轴机床旋转轴的空间误差快速测量与辨识,本文提出了基于在机测量的标准件测量装置和辨识算法,该方法的贡献为:

1) 建立五轴联动数控机床的空间误差模型,提出了旋转轴几何误差的高效测量方案与辨识算法。

2) 设计了一种标准件工件,配合高精度在机测头快速测量标准球在机床空间中的位置。工件结构简单且方便携带和储存。工件和标准球均由高精度机床加工,具有高可靠性。

3) 根据本文提出的算法,仅一次测量和安装便可以在短时间内完成全部测量,大大缩短了机床精度检测时间,并且可以对4项PICEs和6项PDGEs的综合误差进行高效准确的解耦,经数值仿真与试验补偿验证证明了该方法的有效性,关键误差项精度提高70%以上。

本文提出的测量方案实际所耗时间在15 min以内,在辨识几何误差的基础上,若进行长时间不间断测量,可以为机床热误差的研究提供数据和方法的支持,具有较大研究意义和工业应用潜力。

参考文献

- [1] 陈虎,江世琳,汤洪涛,等. 国产高端装备在航空发动机制造领域应用现状和发展趋势[J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(5): 888-895.
CHEN H, JIANG SH L, YANG H T, et al. Current status and development trends of domestic high-end equipment in aero-engine manufacturing[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(5): 888-895.
- [2] 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(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]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(6): 34-44.
- [3] Test code for machine tools-part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes: ISO-230-2: 2014 [S]. Switzerland:

- International Organization for Standardization, 2014.
- [4] 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.
- [5] CHEN Y T, LIN W CH, LIU CH SH. Design and experimental verification of novel six-degree-of freedom geometric error measurement system for linear stage[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 92: 94-104.
- [6] MARUYAMA D, IBARAKI S, SAKATA R, et al. Measurement of machine tool two-dimensional error motions using direction-regulated laser interferometers[J]. *International Journal of Automation Technology*, 2022, 16(2): 157-166.
- [7] LYU D, ZHANG J H, WANG J H, et al. R-test-based identification method for geometric errors of rotary axes in a five-axis machine tool with a rotary table and tilting head[J]. *Measurement*, 2024, 225: 113932.
- [8] HONG C, IBARAKI S. Non-contact R-test with laser displacement sensors for error calibration of five-axis machine tools[J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(1): 159-171.
- [9] TSUTSUMI 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.
- [10] 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.
- [11] TSUTSUMI 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.
- [12] LI Q ZH, WANG W, ZHANG J, et al. Measurement method for volumetric error of five-axis machine tool considering measurement point distribution and adaptive identification process [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 147: 103465.
- [13] DENG M, FENG X B, DU ZH CH. Non-redundant identification of geometric errors in multilateration of rotary axis [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 256: 108529.
- [14] 程涛, 项四通, 张海南, 等. 基于错位塔形工件的旋转轴几何误差辨识[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(21): 3125-3134.
- CHENG T, XIANG S T, ZHANG H N, et al. Geometric error identification of rotary axes based on misaligned tower-shaped artefact[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(21): 3125-3134.
- [15] 黄诺帝. 基于原位测量的五轴机床几何误差与侧铣变形误差补偿方法[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- HUANG N D. Compensation of geometric errors of 5-axis machine tool and deformation in flank milling based on on-machine measurement[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [16] 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.
- [17] IBARAKI S, OYAMA C, OTSUBO H. Construction of an error map of rotary axes on a five-axis machining center by static R-test [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51(3): 190-200.
- [18] 肖域坤, 曾治霖, 唐越, 等. 基于激光球杆干涉仪的数控机床空间误差高效测量、辨识与补偿[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(10): 222-233.
- XIAO Y K, ZENG ZH L, TANG Y, et al. Efficient measurement, identification and compensation of volumetric errors on machine tools using laserbar [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(10): 222-233.
- [19] WANG M, HU J ZH, ZAN T. Kinematic error separation on five-axis NC machine tool based on telescoping double ball bar [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 2010, 5(4): 431-437.
- [20] 杜正春, 周语祺, 毕庆贞, 等. AC 摆头五轴龙门加工中心全域几何误差测量、辨识与实时补偿[J/OL]. *制造技术与机床*, 1-15[2026-01-10].
- DU ZH CH, ZHOU Y Q, BI Q ZH, et al. Geometric

error measurement, identification and real-time compensation of AC swing head five-axis gantry machining center[J/OL]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 1-15[2026-01-10].

- [21] 刘光举, 刘琼, 杜荣谦. 基于双目立体视觉的连铸坯缺陷定位研究[J]. *电子测量技术*, 2024, 47(20): 24-31.

LIU G J, LIU Q, DU R Q. Research on defect localization of continuous casting billet based on binocular stereo vision[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(20): 24-31.

- [22] 汤澳, 许四祥, 宋昱宸, 等. 基于二维熵与低维度描述符的双目视觉测量[J]. *电子测量与仪器学报*, 2025, 39(3): 169-176.

TANG AO, XU S X, SONG Y CH, et al. Binocular vision measurement based on two-dimensional entropy and low-dimensional descriptors[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2025, 39(3): 169-176.

- [23] LOS A, MAYER J R R. Application of the adaptive Monte Carlo method in a five-axis machine tool calibration uncertainty estimation including the thermal behavior[J]. *Precision Engineering*, 2018, 53: 17-25.

- [24] 张奥, 项四通, 杨建国. 基于双特征槽工件的旋转轴几何误差辨识[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(11): 1750-1760.

ZHANG AO, XIANG S T, YANG J G, et al. Geometric error identification of rotary axes based on dual-feature grooved workpiece[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(11): 1750-1760.

- [25] 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.

- [26] Test code for machine tools-part 7: Geometric accuracy of axes of rotation; ISO-230-7: 2015[S]. Switzerland;

International Organization for Standardization, 2015.

作者简介



葛清扬, 2023年于武汉大学获得学士学位, 现为上海交通大学硕士研究生, 主要研究方向为数控机床误差测量、建模与补偿。

E-mail: shuaigqy@sjtu.edu.cn

Ge Qingyang received his B.Sc. degree from Wuhan University in 2023. He is currently pursuing the M.Sc. degree at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include error measurement, modeling, and compensation for CNC machine tools.



杜正春(通信作者), 1995年于东南大学获得学士学位, 1997年于东南大学获得硕士学位, 2000年于东南大学获得博士学位, 现为上海交通大学副教授, 主要研究方向为数控机床误差测量、建模与补偿、精密检测与加工、计算机图像测量。

E-mail: zcdu@sjtu.edu.cn

Du Zhengchun (Corresponding author) received his B.Sc. degree, M.Sc. degree, and Ph.D. degree all from Southeast University in 1995, 1997, and 2000, respectively. He is currently an associate professor at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include CNC machine tool error measurement, modeling and compensation, precision inspection and processing, computer image measurement.



卢成斌, 2005年于青岛理工大学获得学士学位, 2009年于上海理工大学硕士学位, 现为上海交通大学在读博士研究生, 同时担任通用技术集团机床工程研究院有限公司(沈阳分公司)高级工程师, 主要研究方向为数控机床误差测量、建模与补偿。

E-mail: luchengbin@gt.cn

Lu Chengbin received his B.Sc. degree from Qingdao University of Technology in 2005, and his M.Sc. degree from Shanghai University of Science and Technology in 2009. He is currently a Ph.D. student at Shanghai Jiao Tong University and also serves as a senior engineer at the Machine Tool Engineering Research Institute Co., Ltd. of the General Technology Group (Shenyang Branch). His main research interests include error measurement, modeling, and compensation for CNC machine tools.