

文章编号 1004-924X(2015)05-1401-08

基于球杆仪检测五轴数控机床主轴的热误差

何振亚^{1,2}, 傅建中^{1*}, 陈子辰¹

- (1. 浙江大学 机械工程学系 浙江省先进制造技术重点实验室, 浙江 杭州 310027;
2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院 广东省精密装备与制造技术重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:提出了一种基于球杆仪的主轴热误差检测新方法用于五轴数控机床主轴热误差的便捷检测。该方法借助五轴数控机床的两个旋转轴分别单独运动,实现两个正交圆或圆弧构成的球杆仪空间轨迹测量;采用最小二乘方法对测量数据进行处理,求解主轴空间位置;通过初始状态和经过一定时间间隔测量多组数据,分离得到相应时间段的主轴热误差,包括 1 个轴向热伸长和 2 个径向热误差。以双转台五轴数控机床为例,从安装方法、测量步骤和辨识原理等方面介绍基于球杆仪的主轴热误差检测方法,并与 ISO 230-3 中的 5 点法进行了对比实验。实验结果显示:该方法的辨识结果与 5 点法测量结果的平均相对偏差小于 15.8%,验证了本文方法的可行性和有效性。该方法测量装置简洁,便于携带、安装和测量,测试结果可为五轴数控机床主轴热误差补偿提供依据,从而有效地提高机床的加工精度。

关键词:五轴数控机床;主轴;热误差;误差测量;球杆仪

中图分类号: TG659 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152305.1401

Thermal error measurement of spindle for 5-axis CNC machine tool based on ball bar

HE Zhen-ya^{1,2}, FU Jian-zhong^{1*}, CHEN Zi-chen¹

- (1. Zhejiang Province Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology,
Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory Precision Equipment and Manufacturing Technology,
School of Mechanical and Automotive Engineering,
South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

* Corresponding author, E-mail: fjz@zju.edu.cn

Abstract: A novel method based on a ball bar to measure the thermal errors of machine tool spindles was proposed to compensate the thermal error of 5-axis Computer Numerical Control(CNC) machine tools. With the help of the movements of the two rotational axes, the volumetric paths comprised of two orthogonal circles or arcs were measured by the ball bar. The least square method was used to process the measurement data to obtain the volumetric positions of the machine tool spindles. Through frequently testing with this method at certain intervals, the thermal errors of machine tool spindles could be calculated, including 1 axial elongation and 2 radial thermal errors. To explain this

收稿日期:2014-08-20;修订日期:2014-10-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175461);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20120101110055);华南理工大学中央高校基本科研业务费资助

method, a 5-axis CNC machine tool with a titling rotary table was taken as an example to elaborate the installation, measurement procedure and the identification principle. Finally, a contrast experiment was conducted with the 5-point method mentioned in ISO 230-3. The result shows that measurement results of the presented method are consistent with those of 5-point method mentioned in ISO 230-3 and the mean relative deviation of the two methods is less than 15.8%, which verifies the feasibility and reliability of the presented method. The equipment is concise, portable, and easy to install. Moreover, the obtained results could be used for thermal error compensation of spindles to improve the machining precision of 5-axis machine tools.

Key words: 5-axis Computer Numerical Control(CNC) machine tool; spindle; thermal error; error measurement; ball bar

1 引言

机床热误差是指机床加工过程中由机床各部件温升和环境温度扰动而引起的热变形,其会导致刀具切削点与工件间原来的相对位置产生变化,从而引起加工误差。大量研究表明,热误差是引起机床加工误差的最大误差源之一^[1]。其中,主轴又是热误差的主要来源^[2]。因此,通过对数控机床主轴进行热误差检测和补偿对提高机床加工精度具有显著效果。

由于热变形主要热源的变化规律比较复杂,故不易直接对其引起的热误差进行识别及补偿。因此,有不少学者提出通过测量机床的温度场信息和热变形信息,建立机床热变形与温度场变化之间的数学模型来间接地对热误差进行预测。纵观现有关于机床热误差的研究,预测建模方法主要有:多元线性回归^[3]、人工神经网络(Artificial Neural Net, ANN)建模^[4-6]、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)模型^[7-10]、贝叶斯网络模型^[11-12]、蚁群算法^[13]、动态递归模型^[14]、灰色神经网络^[15]等。

值得注意的是,在对主轴热误差进行建模和补偿前需要得到主轴热误差的具体数据。因此,首先要对主轴热误差进行检测。Mayr等^[16]对机床热误差检测的研究现状作了全面的综述;国际标准 ISO 230-3^[17]对机床热效应的确定作了详细规范,包括检验常用工具、检测方法、主轴热误差检测工况等;Pahk和Lee^[18]采用 ISO 230-3 中 5 点法对机床主轴的 5 个自由度误差进行检测;林伟青等^[10]采用激光位移传感器直接测量主轴热伸长和径向热变形;张毅等^[15]采用位移传感器采集数控车削加工中心 Z 轴和 X 轴方向的热误差数据。

通常采用激光测量系统或球杆仪测量系统对机

床几何误差进行测量,而机床热误差则常采用传感器或触发式测头进行测量。但采用两种不同的测量仪器检测机床误差,无疑将增加经济成本、并且仪器携带也不方便。针对上述问题,Srinivasa等^[19]提出采用球杆仪对机床主轴热误差进行测量,但其测量过程需要 4 个球杆仪。Yang等^[20]提出了基于球杆仪的主轴热误差测量方法,其测量过程只需 1 个球杆仪,但测量轨迹为 3 个平动轴联动构成的半球形螺旋轨迹,需通过空间矢量几何关系辨识分离出主轴的热误差。Delbressine等^[21]根据球杆仪的空间半球分布的 25 个测点,通过矢量点积运算辨识主轴的 3D 位置误差矢量,从而求解热误差。商鹏^[22]提出了采用球杆仪对主轴热漂移误差进行测量。该方法将球杆仪倾斜安装,旋转轴 C 轴运动,其测量扫过区域为一圆锥面;然后从原始测量数据中任意选取三点,根据空间几何关系,反求主轴端热漂移。该方法较简单直观,但所选 3 个采样点之间的距离往往不容易精确获得。

鉴于此,本文基于球杆仪的便携性和易于安装的优点,提出一种较为精确的基于球杆仪的五轴数控机床主轴热误差检测方法。该方法利用球杆仪进行空间轨迹测量,基于最小二乘法对测量数据进行处理,得到主轴刀具切削点的实际空间位置。最后以一定的时间间隔进行多次测量,得到相应时刻的主轴热误差,包括 1 个轴向热伸长和 2 个热漂移误差。文中对本文方法与 ISO 230-3 中 5 点法进行了对比实验,验证了所提检测方法的可行性和有效性。

2 基于球杆仪的主轴热误差检测原理

球杆仪已广泛应用于机床运动精度的评价和诊断,如通过测量平面圆轨迹来评价机床的圆度、垂直度、直线度和反向间隙等。随着多轴数控机

床的应用,球杆仪的测量轨迹向多样化发展,即用户可以自定义空间测量轨迹,借助球杆仪的这一功能,本文提出一种基于球杆仪的五轴数控机床主轴热误差检测方法。

该测量方法的原理是:根据球杆仪的空间轨迹测量功能,令五轴数控机床的两个旋转轴分别单独运动,以实现空间两个正交圆(或圆弧)测量轨迹;采用最小二乘法对测量原始数据进行拟合,获得两个圆(或圆弧)的实际圆心,从而得到主轴刀具切削点的实际空间位置。最后,通过初始状态测量和经过一定时间间隔测量得到的多组数据,获得不同时刻主轴刀具切削点的实际空间位置,计算出其与参考时刻间隔 Δt 的位置偏差 $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$,即为机床主轴 Δt 相对应的热误差,它们分别为轴向热伸长和沿其它两个方向的热漂移。

常规的球杆仪测量方法均直接以球杆仪杆长方向的测量值作为分析数据,而本文方法是通过球杆仪的测量数据间接得到被测圆弧的中心位置,从而得到主轴的空间位置。这也是球杆仪测量功能的一种新的拓展。

为了减小安装误差对测量结果的影响,采用球杆仪两端支座一次安装的方法。即当第一次测量完后,仅拆下球杆仪,两端支座不拆除,待下一次测量时,先关掉主轴转速,然后再把球杆仪安装到其两端支座上,这样可以确保多个时刻测量时的安装误差基本一致,故可设为常量,在辨识过程中它们可以相互抵消,以减小安装误差对辨识结果的影响。注意:为了实验仪器和实验操作人员的安全,每次测量完成后,打开主轴转速前,必须拆下球杆仪。

下面以双转台五轴数控机床为例,详细介绍其检测原理,如图 1 所示。安装球杆仪两端支座时,A 轴和 C 轴处于回零状态,假设 O 点为 A 轴和 C 轴的轴线交点,并使杆长方向直线 ON 沿 Y 轴方向。测量时,以图 1 所示位置为球杆仪的安装位置。

测量步骤:首先使 C 轴沿逆时针方向旋转一周,测量轨迹从 N 点重回 N 点,完成路径 1 的测量;然后 A 轴顺时针运动,从 N 点到达 P 点,准备路径 2 的测量;最后 A 轴逆时针运动,从 P 点运动到 Q 点,完成路径 2 圆弧轨迹。其中路径 2 的测量范围需根据机床结构和测量安装位置来决定,注意防止碰撞。每隔一定时间测量一次,即重复以上步骤,完成路径 1 和 2 的球杆仪的空间轨

迹测量。可见,此测量方法仅需一次安装,便可完成两条路径的空间轨迹测量;并且安装较容易,测量路径简单、直观。

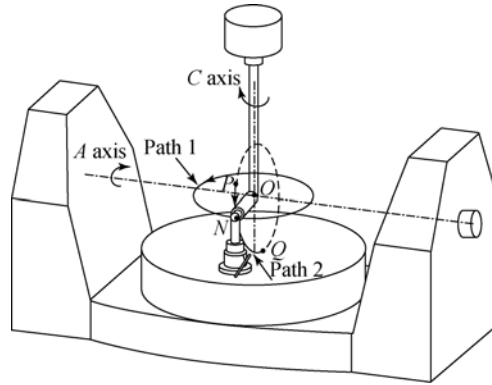


图 1 基于球杆仪的主轴热误差测量原理

Fig. 1 Measurement principle of thermal errors of spindle based on ball bar

图 2 为球杆仪主轴热误差辨识原理图。安装时设球杆仪安装点 O 的理论位置为零点,球杆仪的杆长为 L。以测量路径 1 为例:在 t_0 时刻,球杆仪安装点 O 的实际位置为 $O_0(x_0, y_0)$,实际杆长为 l_0 ;经过时间 t 后,由于机床主轴热变形的影响,球杆仪的安装点 O 的实际位置为 $O_t(x_t, y_t)$,实际杆长为 l_t 。因此,从 t_0 到 t_t ,机床主轴沿 X 轴和 Y 轴方向的热漂移可表示为:

$$\begin{cases} \delta_{xs}(t) = x_t - x_0 \\ \delta_{ys}(t) = y_t - y_0 \end{cases} \quad (1)$$

采用最小二乘法对球杆仪测量数据进行拟合,可得到圆心位置和半径,它们即为机床主轴实际位置 $O_0(x_0, y_0)$ 和 $O_t(x_t, y_t)$ 以及实际杆长 l_0 和 l_t 。

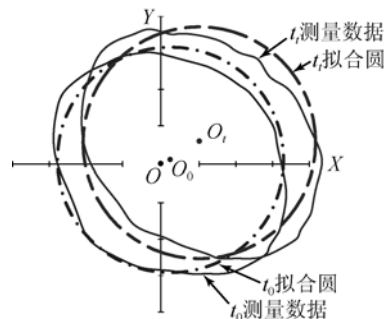


图 2 主轴热误差辨识原理

Fig. 2 Identification principle of thermal errors of spindle

同理,处理路径 2 的测量数据。因此,从 t_0 到 t_t ,机床主轴沿 Y 轴方向的热漂移和 Z 方向的

轴向热伸长可表示为:

$$\begin{cases} \delta_{ys}(l) = y'_t - y'_0 \\ \delta_{zs}(l) = z_t - z_0 \end{cases}, \quad (2)$$

其中: (y'_t, z_t) 和 (y'_0, z_0) 通过最小二乘拟合得到。

由于测量过程中, 路径 1 和路径 2 的测量是在一次安装中完成, 即有:

$$y'_t = y_t, y'_0 = y_0. \quad (3)$$

值得注意的是, 受机床结构的影响, 路径 2 的测量范围很难覆盖整个圆周; 而从拟合角度讲, 测量圆周角度范围越大, 拟合精度越高。因此, 为了提高路径 2 测量数据的拟合精度, 可以将路径 1 测量数据的拟合结果 y_t 和 y_0 代入路径 2 进行拟合, 以减少相应的未知量, 从而提高拟合精度。

3 实验及结果分析

为了验证所提方法的可行性和可靠性, 采用 ISO 230-3 中的 5 点法进行对比实验。依据 ISO 230-3 中数控机床热误差的测试标准, 建立双转台五轴加工中心的主轴热误差检测环境, 检验过程中, 主轴将与最大恒定转速成某一比例的速度恒定转动。

3.1 球杆仪测量实验

基于球杆仪的五轴加工中心主轴热误差测量实验如图 3 所示。除 T3、T7 外, 温度传感器还有环境温度监测器 T14 和水冷却机中冷却液温度监测器 T16。实验设定主轴转速 $S=14\ 000\ \text{r/min}$ 。

打开机床转速前设为 t_0 时刻, 开始测量第一组数据; 打开机床转速后, 前 1 h 每隔 8 min 测量一次; 后半段每隔 20 min 测量一次。每次测量所需时间约为 1 min, 检测实验总历时约为 160 min。

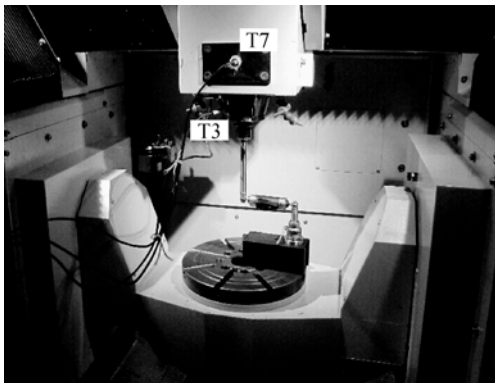


图 3 基于球杆仪的主轴热误差测量实验

Fig. 3 Measurement experiment of thermal errors of spindle based on ball bar

图 4 为球杆仪主轴热误差测量过程中的温度变化情况, 大致可分为 4 个阶段, 如表 1 所示。在第 3 阶段和第 4 阶段, 温度有明显、且规律的波动。这主要是由水冷却机的工作引起的, 测量过程中水冷却机采用固定温度模式, 设置为 $2/14$ 。即固定温度为 $14\text{ }^\circ\text{C}$, 当水温低于 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 设备制冷停止, 但水泵继续工作, 即将水温维持在设定值的 $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内。第 3 阶段比第 4 阶段波动频度高, 这是由于当打开转速时, 热量较多, 水冷却机工作较频繁。由于本文主要研究热误差的检测, 关于温度与热误差关系预测建模在此不详细展开。

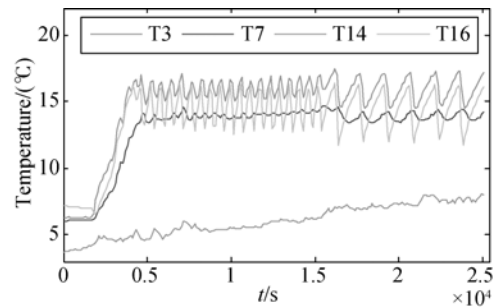


图 4 温度传感器读数

Fig. 4 Readings of temperature sensors

表 1 测量过程机床工作状态

Tab. 1 Work conditions of machine tool during measurement process

时间	第 1 阶段	第 2 阶段	第 3 阶段	第 4 阶段
机床	转速关	转速开	转速开	转速关
工作	仪器安装	冷却水开	冷却水开	冷却水开
状态	初始状态	快速升温	热平衡	冷却滞后

$t_0=0$ 和 $t_t=64\ \text{min}$ 时的球杆仪测量路径 1 所得的原始数据如图 5 所示; 采用最小二乘方法对其进行处理, 处理结果如图 6 所示; 在 t_0 和 t_t 时测量路径 2 所得的原始数据如图 7 所示; 同理采用最小二乘法对数据进行处理, 结果如图 8 所示。基于最小二乘数据处理的圆心拟合结果如表 2 所示。设 t_0 时刻所对应的空间位置为标准位置 (其包含安装误差), 计算其它时刻与 t_0 时刻相应参数的差值, 它们分别为主轴沿各轴方向的热误差。即从 t_0 到 $t_t=64\ \text{min}$ 的主轴的热误差为 $(4.4, 30.1, 4.6)$ 。

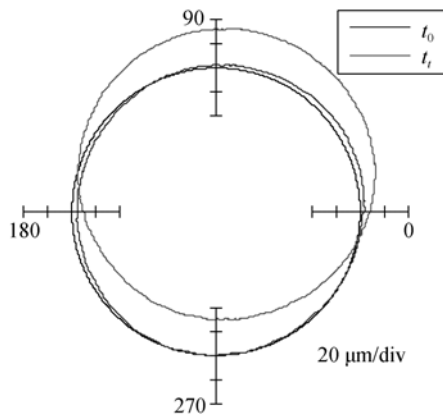


图 5 路径 1 球杆仪的测量数据
Fig. 5 Data of path 1 based on ball bar

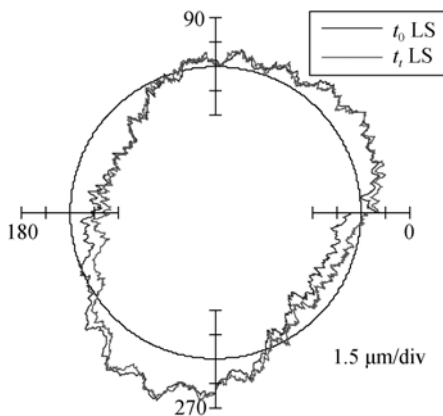


图 6 经最小二乘处理后路径 1 数据
Fig. 6 Data of path 1 after least square processing

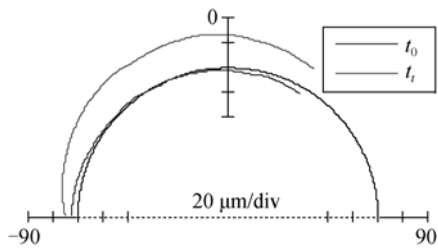


图 7 路径 2 球杆仪测量数据
Fig. 7 Data of path 2 based on ball bar

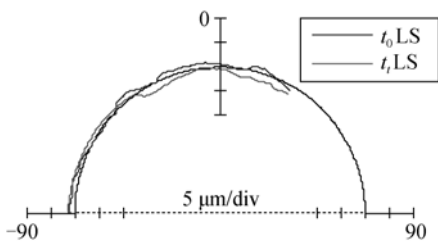


图 8 经最小二乘处理后路径 2 数据
Fig. 8 Data of path 2 after least square processing

表 2 基于最小二乘球杆仪测量数据拟合结果

Tab. 2 Fitted results of measurement data for ball bar based on least square (μm)

时间	x_0	y_0	z_0
$t_0=0$	3.0	2.1	3.9
$t_t=64$	7.4	32.2	8.5
差值	4.4	30.1	4.6

同理,对球杆仪测量的其余数据进行处理,可辨识出主轴从开机到热平衡过程的热误差。

3.2 5 点法测量实验

本文采用 5 点法进行对比实验。ISO 230-3 中的 5 点法测量原理,如图 9 所示。在主轴刀柄上安装检验棒,并在机床工作台上安装 5 个位置测量装置对检验棒进行测量。图 10 为基于 5 点法的双转台五轴加工中心的主轴热误差测量实验现场。实验设定:主轴转速 $S=14\ 000\ \text{r/min}$,检验棒材料为优质碳素工具钢(外径为 12 mm,长度为 150 mm),采用电容式位移传感器对检验棒的位移进行测量。

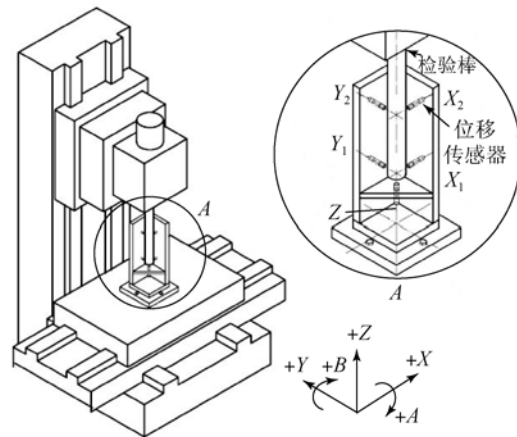


图 9 5 点法测量原理

Fig. 9 Measurement principle of 5-point method



图 10 5 点法测量实验

Fig. 10 Measurement experiment of 5-point method

3.3 实验结果分析

基于球杆仪和 5 点法的主轴热误差测量实验的辨识结果,如图 11~图 13 所示。图 11 为主轴沿 X 方向的热漂移,图 12 为主轴沿 Y 方向的热漂移,图 13 为主轴的轴向热伸长。由结果可见,基于球杆仪测量辨识结果的拟合曲线与 ISO 230-3 标准中的 5 点法的测量结果基本一致,两者的平均差异小于 15.8%。因此,基于球杆仪的主轴热误差检测方法是可行、有效的,可为五轴数控机床的热误差补偿提供依据。

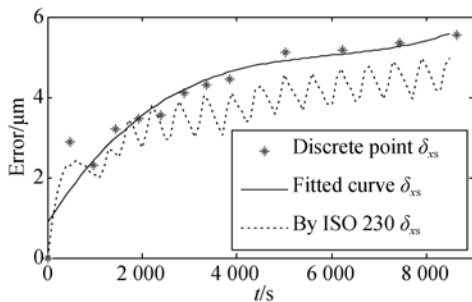


图 11 主轴沿 X 方向的热漂移

Fig. 11 Thermal drifts of spindle along X direction

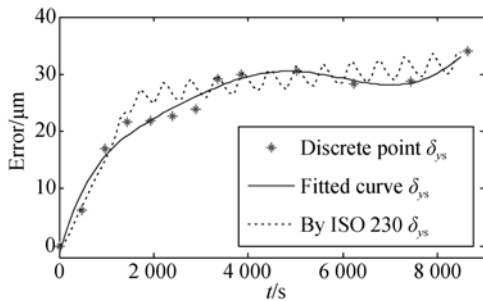


图 12 主轴沿 Y 方向的热漂移

Fig. 12 Thermal drifts of spindle along Y direction

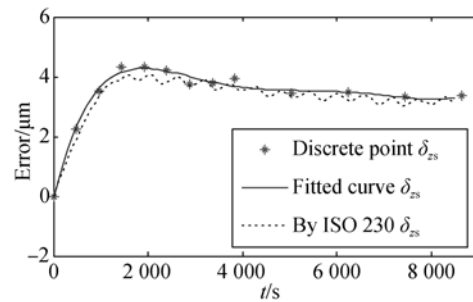


图 13 主轴的轴向热伸长量

Fig. 13 Thermal elongations of spindle along axial direction

4 结 论

本文提出一种基于球杆仪的五轴数控机床主轴热误差检测方法。采用球杆仪对五轴机床两旋转轴分别单独运动所形成的空间轨迹进行测量,并利用最小二乘法对测量数据进行处理,以辨识主轴的实际空间位置;通过对不同时刻的多次测量,便可求出相应时刻的主轴热误差,包括轴向热伸长和另两个方向的热漂移。通过与 ISO230-3 中 5 点法的对比实验,验证了该方法的可行性和有效性。实验结果表明:该方法的辨识结果与 5 点法测量结果的平均相对偏差小于 15.8%,两者结果吻合较好。该方法具有以下特点:(1)与 5 点法相比,该方法安装简单;(2)测量装置简洁、便于携带;(3)辨识过程不需要数学模型,原理直观、简单易懂。

该检测方法可较便捷、精确地为五轴数控机床的热误差补偿提供依据,从而提高机床加工精度。同时,该方法拓展了球杆仪的检测项目。

参考文献:

- [1] SHEN H, FU J, HE Y, et al.. On-line asynchronous compensation methods for static/quasi-static error implemented on CNC machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, 60: 14-26.
- [2] CREIGHTON E, HONEGGER A, TULSIAN A, et al.. Analysis of thermal errors in a high-speed micro-milling spindle[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50(4): 386-393.
- [3] CHEN J S. A study of thermally induced machine tool errors in real cutting conditions[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996, 36(12): 1401-1411.
- [4] MOU J. A method of using neural networks and inverse kinematics for machine tools error estimation and correction[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1997, 119(2): 247-254.
- [5] 岳红新, 石岩, 李国芹. 基于神经网络的主轴热误差补偿技术研究[J]. *制造技术与机床*, 2012(3): 23-25.

YUE H X, SHI Y, LI G Q. Research on thermal

- error compensate of spindle based on neural network [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2012(3): 23-25. (in Chinese)
- [6] 谢春, 张为民. 车铣复合加工中心综合误差检测及补偿策略[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 1004-1011.
XIE CH, ZHANG W M. Comprehensive measurement errors of 5-axis turning-milling centers and their compensation strategies [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 1004-1011. (in Chinese)
- [7] RAMESH R, MANNAN M, POO A. Support vector machines model for classification of thermal error in machine tools [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2002, 20(2): 114-120.
- [8] 林伟青, 傅建中, 许亚洲, 等. 基于最小二乘支持向量机的数控机床热误差预测[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2008, 42(6): 905-908.
LIN W Q, FU J ZH, XU Y ZH, *et al.*. Thermal error prediction of numerical control machine tools based on least squares support vector machines [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2008, 42(6): 905-908. (in Chinese)
- [9] 苗恩铭, 龚亚运, 成天驹, 等. 支持向量回归机在数控加工中心热误差建模中的应用[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 980-986.
MIAO E M, GONG Y Y, CHENG T H, *et al.*. Application of support vector regression machine to thermal error modelling of machine tools [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 980-986. (in Chinese)
- [10] 林伟青, 傅建中, 许亚洲, 等. 基于LS-SVM与遗传算法的数控机床热误差辨识温度传感器优化策略[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(9): 1682-1687.
LIN W Q, FU J ZH, XU Y ZH, *et al.*. Optimal sensor placement for thermal error identification of NC machine tool based on LS-SVM and genetic algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1682-1687. (in Chinese)
- [11] YAN X H, FU J Z, CHEN Z C. Bayesian networks modeling for thermal error of numerical control machine tools [J]. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2008, 9(11): 1524-1530.
- [12] RAMESH R, MANNAN M, POO A, *et al.*. Thermal error measurement and modelling in machine tools. Part II. Hybrid Bayesian network-support vector machine model [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(4): 405-419.
- [13] 郭前建, 杨建国. 基于蚁群算法的机床热误差建模技术 [J]. *上海交通大学学报*, 2009(5): 803-806.
GUO Q J, YANG J G. Thermal error modeling on machine tools based on ant colony algorithm [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2009(5): 803-806. (in Chinese)
- [14] YANG H, NI J. Adaptive model estimation of machine-tool thermal errors based on recursive dynamic modeling strategy [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(1): 1-11.
- [15] 张毅, 杨建国. 基于灰色神经网络的机床热误差建模 [J]. *上海交通大学学报*, 2011, 45(11): 1581-1586.
ZHANG Y, YANG J G. Grey neural network modeling for machine tool thermal error [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2011, 45(11): 1581-1586. (in Chinese)
- [16] MAYR J, JEDRZEJEWSKI J, UHLMANN E, *et al.*. Thermal issues in machine tools [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2012, 61(2): 771-791.
- [17] ISO 230-3: 2001, Test code for machine tools-Part3: Determination of thermal effects[S]. ISO, Geneva, Switzerland.
- [18] PAHK H, LEE S. Thermal error measurement and real time compensation system for the CNC machine tools incorporating the spindle thermal error and the feed axis thermal error [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2002, 20(7): 487-494.
- [19] SRINIVASA N, ZIEGERT J, MIZE C. Spindle thermal drift measurement using the laser ball bar [J]. *Precision Engineering*, 1996, 18(2): 118-128.
- [20] YANG S H, KIM K H, PARK Y K. Measurement of spindle thermal errors in machine tool using hemispherical ball bar test [J]. *International*

Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(2): 333-340.

- [21] DELBRESSINE F, FLORUSSEN G, SCHIJVE-NAARS L, *et al.*. Modelling thermomechanical behaviour of multi-axis machine tools[J]. *Precision Engineering*, 2006, 30(1): 47-53.

- [22] 商鹏. 基于球杆仪的高速五轴数控机床综合误差建模与检测方法[D]. 天津: 天津大学, 2008.

SHANG P. *The DBB-based errors modeling and measurement method for 5-axis high speed CNC machine tools* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)

作者简介:



何振亚(1985—),女,广东梅州人,博士研究生,2010年于浙江大学获得硕士学位,主要从事数控技术、精密机床等方面的研究。E-mail: hezhanya@zju.edu.cn



傅建中(1968—),男,浙江衢州人,博士,教授,博士生导师,1996年于浙江大学获得博士学位,主要从事高档数控机床及数控技术、精密制造技术、智能制造装备等方面的研究。E-mail: fjz@zju.edu.cn



陈子辰(1950—),男,福建福州人,博士,教授,博士生导师,1989年于浙江大学获得博士学位,主要从事新型数控系统研究、精密工程、微机电系统理论和微制造技术、仿生学技术等方面的研究。E-mail: chenzc@zju.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)