

文章编号:1009-3087(2013)05-0154-06

五轴机床误差建模与补偿解析新算法

要小鹏^{1,2},殷国富^{1*},方 辉¹

(1. 四川大学 制造科学与工程学院,四川 成都 610065;2. 西南科技大学 制造科学与工程学院,四川 绵阳 621010)

摘 要:为了建立高精度的五轴机床综合误差补偿模型,假设机床各部件为刚体连接,简化了机床运动拓扑关系,并解析了59项综合误差分量。基于小误差假设,运用多体动力学对机床几何误差和热误差统一建模,提出了新型综合误差补偿模型。综合机床各轴热误差解析结果,提出了针对主轴热误差和进给轴热误差的新型测量法:5点测量法和6点测量法。考虑到机床热误差测量点分布离散且数据信息不完整,运用灰色系统理论建立了变权系数GM(1, n)热误差预测模型,并完成了热误差曲线拟合。实验证明理论预测值与实验结果一致,主轴模型误差范围在0~2 μm之间,进给轴模型误差在0~12 μm之间。将该算法用SIMEMS840D数控系统中的PMC单元开发实时补偿软件,实验表明机床在完成补偿后误差变化量在0~29 μm之内。

关键词:五轴机床;多体动力学;综合误差补偿模型;变权系数

中图分类号:TG502.15

文献标志码:A

A New Synthesis Error Modeling and Compensating Algorithm of the Five-axis Machine Tools

YAO Xiao-peng^{1,2}, YIN Guo-fu^{1*}, FANG Hui¹

(1. School of Manufacturing Sci. and Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2. School of Manufacturing Sci. and Eng., Southwest Univ. of Sci. and Technol., Mianyang 621010, China)

Abstract: In order to construct the high precision error compensation model, the topological relationship of machine kinematics was simplified and 59 independent error components were analyzed. Based on the rigid body kinematics with small error assumption, a new comprehensive error model with geometric error and thermal error was given. A new thermal error measurement method was proposed based on the thermal error analysis. Five-point method was used to measure the spindle thermal error. Six-point method was used to measure the feed axis thermal error. Considering error measurement point discrete and incomplete, with the variable weights GM(1, n), the thermal error model was proposed to predict grey thermal error data. The experimental results showed that the spindle model error range was between 0~2 μm, and the feed axis model error range was between 0~12 μm. Theoretical prediction curves were consistent with the experimental results. A CNC real-time compensation software was developed with SIMEMS840D controller's PMC program based on above error model. After the compensation, the machine tool error range was between 0~29 μm.

Key words: five-axis machine tool; multi-body dynamics; synthesis error compensation model; variable weights

全球化的竞争迫使生产企业越来越重视产品的加工效率和精度,产品精度很大程度上由机床的精度所决定。五轴数控机床能实现对复杂异型曲面零件进行高速、高效、高精度加工,广泛地运用在汽车、军工、能源等行业,近年来越来越倍受机械加工行业的重视。五轴数控机床受几何误差、热变形误差、动

态误差等各种因素的影响,其加工精度往往很难满足实际生产需求。通过更换高精度传动部件和伺服控制系统来提高机床精度易受技术和生产成本等瓶颈的限制,因此对机床进行误差补偿已成为提高加工精度的一种有效方法。机床的误差主要有空间运动学误差、热变形误差、动力学误差以及运动控制与控制算法误差等,尤其是机床在加工过程中还存在热变形误差和承载变形误差,并且这类误差存在非稳定性和时序性,且分布较为复杂,因此,实现高精度误差补偿的关键技术是需要精确地建立数控机床综合误差的计算模型。目前,数控机床误差的理论建模技术主要有几何建模法、齐次误差矩阵法等几种^[1]。She

收稿日期:2013-04-13

基金项目:国家科技重大专项课题资助项目(2012ZX04011-031);
四川省科技支撑计划资助项目(2010GZ0051)

作者简介:要小鹏(1979—),男,博士生。研究方向:数控机床误差补偿。E-mail: xp_yao@126.com

* 通讯联系人 E-mail: gfyin@scu.edu.cn

Chenhua^[2]提出了一种通用型五轴机床误差补偿后处理模型,并有效地提高了补偿精度。文献[3]和文献[4]中采用多体理论对五轴机床的几何误差和热误差进行了简化与建模分析。Bohez等^[5]提出了一种分离低阶误差分量的识别方法。尽管上述研究都取得了一定成果,但这些方法都存在着鲁棒性差、数学表达式冗余复杂、误差分量不确定、补偿精度差等问题,并没有从根本上解决机床误差建模和机床误差补偿的问题。作者以五轴机床 CGM4000 为研究对象,基于多体动力学建立了误差综合补偿模型,尤其针对机床热误差,提出了5点测量法和6点测量法分别对主轴、进给轴进行热误差辨识。针对机床误差的不稳定性、不完整性等“贫信息”特性^[6],提出了变权系数灰色模型(variable weight GM(1, n), 简称 VW-GM(1, n))拟合热误差值,建立机床热误差预测模型。基于上述算法开发了易于数控系统自动解算的误差补偿单元,并通过试切加工验证了该补偿算法的有效性。

1 基于多体系统机床误差建模

1.1 五轴机床运动拓扑结构

多体系统是指由多个刚体或柔体通过一定的约束形式连结而成的复杂机械系统^[4]。五轴数控机床分别由床身、工作台、横梁、立柱、进给单元、主轴单元等部件构成,各个运动部件都可简化为刚体或柔体子系统,运用低序体阵列对各子系统间的连接拓扑结构进行数字化描述。以 CGM4000 型五轴机床作为研究对象,该机床为1台标准类型的 TTTRR (3个平移轴 T、2个旋转轴 R)型五轴机床,结构如图1所示。

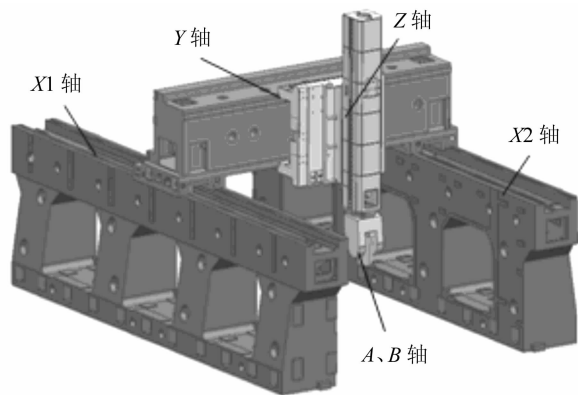


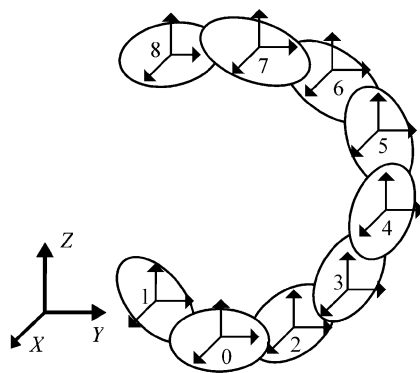
图1 五轴机床模型

Fig.1 Five-axis machine tool model

该加工中心有 X 、 Y 、 Z 3个线性轴和 A 、 B 两个回转轴(双摆头),其中 x 方向有 $X1$ 轴和 $X2$ 轴。 Z 轴上

安装了2个回转轴 A 、 B ,主轴固定安装在 B 轴上,主轴头夹持刀具,刀具可以绕2个相互正交的轴转动,以使刀具具有较大的空间操作性。

机床运动学模型是建立刀具坐标系相对于工件坐标系的运动关系,通常以各坐标轴在回零状态或对刀状态下的初始位置为起点,分析各运动刚体在运动过程中所引起的综合性误差。机床各运动刚体之间是刚性连接,每个运动刚体的运动学坐标关系都可以用一个 4×4 的转置矩阵表示。在理想情况下,笛卡尔机床坐标系中 X 、 Y 、 Z 轴之间两两相互垂直,回转轴 A 、 B (双摆头)分别绕 x 、 y 方向旋转,并与 Z 轴固连,主轴 S 固联在 B 轴上。通过多体动力学理论对机床进行运动学拓扑分析,可以得到如图2所示的低序体阵列拓扑结构图,其中机床主要部件分成9个典型体单元。在机床床身上建立固定参考坐标系,确立机床运动副之间的相对位姿关系,建立起机床运动学约束方程。为了求解该型机床的运动学方程,建立两组运动学约束链,一组是刀具运动学约束链,另一组是工件运动学约束链。在床身(低序体0)上建立参考坐标系0;工件(低序体1)上建立坐标系1; X 轴(低序体2)上建立坐标系2; Y 轴(低序体3)上建立坐标系3; Z 轴(低序体4)上建立坐标系4; A 轴(低序体5)上建立坐标系5; B 轴(低序体6)上建立坐标系6;主轴 S (低序体7)上建立坐标系7;刀具 t (低序体8)建立坐标系8;通过低序体0、1、2、3、4、5、6、7、8建立了机床运动学拓扑约束链^[7]。



0. 床身;1. 工件;2. X 轴;3. Y 轴;4. Z 轴;5. A 轴;
6. B 轴;7. 主轴;8. 刀具。

图2 低序体阵列拓扑结构

Fig.2 Low-order body topology array

1.2 误差分量化析

文中该型数控机床的 $X1$ 轴和 $X2$ 轴由于误差特性相同,故统称为 X 轴的误差,根据机床结构和热误差特性分析,该型五轴机床共有59个误差分量,其

中37个几何误差分量,22个热误差分量,具体描述如下:

1) 在空间坐标系中,3个运动平移轴有6个误差分量,双摆头A、B轴各有6个误差分量,共30个误差分量^[8]。各轴的误差分量分别为:在 x 、 y 、 z 方向的3个线性平移误差 δ_{ij} ($i = x, y, z; j = X, Y, Z, A, B$)和绕 X 、 Y 、 Z 坐标轴的3个角位移误差分量 ε_{ij} ($i = x, y, z; j = X, Y, Z, A, B$),其中, i 为误差的方向, j 为运动轴名称。 δ_{xX} 、 δ_{yX} 、 δ_{zX} 为 X 轴的坐标系原点分别在 x 、 y 、 z 方向的平移误差, ε_{xX} 、 ε_{yX} 、 ε_{zX} 为 X 轴的坐标系原点分别在 x 、 y 、 z 方向的回转误差。

2) 在空间坐标系中, X 、 Y 、 Z 轴间的相互垂直度误差 S_{xy} 、 S_{xz} 、 S_{yz} 共3个误差分量。

3) 在空间坐标系中, A 、 B 回转轴误差为: A 轴与 xy 平面及 yz 平面的平行度误差 S_{AxY} 、 S_{AyZ} ; B 轴与 xz 平面及 yz 平面的平行度误差 S_{BxZ} 、 S_{ByZ} 共4个误差分量。

4) 每一个运动轴(X 、 Y 、 Z 、 A 、 B) 在 x 、 y 、 z 方向各有3个热变形误差,共有15个热误差 $\Delta\delta_{ij}(t)$ ($i = x, y, z; j = X, Y, Z, A, B$),其中: i 为误差的方向, j 为运动轴名称,如: $\Delta\delta_{xX}(t)$ 、 $\Delta\delta_{yX}(t)$ 、 $\Delta\delta_{zX}(t)$ 为 X 轴的坐标系原点分别在 x 、 y 、 z 方向的热变形误差,主轴 S 在 x 、 y 方向有2个角位移误差 ε_{xS} 、 ε_{yS} ;主轴 S 在 x 、 y 、 z 方向有3个热变形误差 $\Delta S_j(t)$ ($j = x, y, z$),其中, j 为产生误差的方向,另外主轴还存在 x 、 y 方向上的热倾斜误差,分别为: $\Delta\varepsilon_{xS}(t)$ 、 $\Delta\varepsilon_{yS}(t)$,共22个误差分量。

1.3 建模过程

1) X 轴(低序体2)固连在床身上(低序体0),综合误差变换矩阵 T_0^2 为:

$$T_0^2 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zX} & \varepsilon_{yX} & x + \delta_{xX} + \Delta\delta_{xX}(t) \\ \varepsilon_{zX} & 1 & -\varepsilon_{xX} & \delta_{yX} + \Delta\delta_{yX}(t) \\ -\varepsilon_{yX} & \varepsilon_{xX} & 1 & \delta_{zX} + \Delta\delta_{zX}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2) Y 轴(低序体3)固连在 X 轴(低序体2)上,综合误差变换矩阵 T_2^3 为:

$$T_2^3 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zY} & \varepsilon_{yY} & \delta_{xY} + \Delta\delta_{xY}(t) - yS_{xy} \\ \varepsilon_{zY} & 1 & -\varepsilon_{xY} & y + \delta_{yY} + \Delta\delta_{yY}(t) \\ -\varepsilon_{yY} & \varepsilon_{xY} & 1 & \delta_{zZ} + \Delta\delta_{zY}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

3) Z 轴(低序体4)相对 Y 轴(低序体3)的综合误差变换矩阵 T_3^4 为:

$$T_3^4 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zZ} & \varepsilon_{yZ} & \delta_{xZ} + \Delta\delta_{xZ}(t) - zS_{xz} \\ \varepsilon_{zZ} & 1 & -\varepsilon_{xZ} & \delta_{yZ} + \Delta\delta_{yZ}(t) - zS_{yz} \\ -\varepsilon_{yZ} & \varepsilon_{xZ} & 1 & z + \delta_{zZ} + \Delta\delta_{zZ}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

4) A 轴(低序体5)固连在 Z 轴(低序体4)上,综合误差变换矩阵为 T_4^5 为:

$$T_4^5 = \begin{bmatrix} 1 & A_{12} & A_{13} & \delta_{xA} + \Delta\delta_{xA}(t) \\ -\varepsilon_{zA} & A_{22} & A_{23} & \delta_{yA} + \Delta\delta_{yA}(t) \\ \varepsilon_{yA} & A_{32} & A_{33} & \delta_{zA} + \Delta\delta_{zA}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $A_{12} = -\varepsilon_{zA}\cos\alpha + \varepsilon_{xA}\sin\alpha$; $A_{13} = \varepsilon_{zA}\sin\alpha + \varepsilon_{yA}\cos\alpha$; $A_{22} = \cos\alpha - \varepsilon_{xA}\sin\alpha$; $A_{23} = \sin\alpha - \varepsilon_{xA}\cos\alpha$; $A_{32} = \varepsilon_{xA}\cos\alpha + \sin\alpha$; $A_{33} = -\varepsilon_{xA}\sin\alpha + \cos\alpha$;其中,摆头 A 相对与 Z 轴转动 α 。

5) B 轴(低序体6)固连在 A 轴上(低序体5),综合误差变换矩阵 T_5^6 为:

$$T_5^6 = \begin{bmatrix} B_{11} & \varepsilon_{zB} & B_{13} & \delta_{xB} + \Delta\delta_{xB}(t) \\ B_{21} & 1 & B_{23} & \delta_{yB} + \Delta\delta_{yB}(t) \\ B_{31} & \varepsilon_{xB} & B_{33} & \delta_{zB} + \Delta\delta_{zB}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $B_{11} = \cos\beta - \varepsilon_{yB}\sin\beta$; $B_{13} = \sin\beta + \varepsilon_{yB}\cos\beta$; $B_{21} = \varepsilon_{zB}\cos\beta + \varepsilon_{xB}\sin\beta$; $B_{23} = \varepsilon_{zB}\sin\beta - \varepsilon_{xB}\cos\beta$; $B_{31} = -\varepsilon_{yB}\cos\beta - \sin\beta$; $B_{33} = -\varepsilon_{xB}\sin\beta + \cos\beta$;其中, B 轴相对与 A 轴转动 β 。

6) 主轴 S (低序体7)相对于 B 轴(低序体6)的综合误差变换矩阵 T_7^6 为:

$$T_7^6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta\varepsilon_{yS}(t) & \Delta S_x(t) \\ 0 & 1 & -\Delta\varepsilon_{xS}(t) & \Delta S_y(t) \\ \Delta\varepsilon_{yS}(t) & \Delta\varepsilon_{xS}(t) & 1 & \Delta S_z(t) + d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

7) 刀具(低序体8)安装在主轴 S (低序体7)上,其相对于主轴 S 的误差变化矩阵 T_8^7 为:

$$T_8^7 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, L 为刀具长度。

8) 工件(低序体1)固定在工作台上,与床身(低序体0)视为一体,空间6自由度被完全约束,其相对于床身的误差变化矩阵 T_0^1 为:

$$T_0^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, a, b 为工件坐标系相对基坐标系的位置。

在理想状况下, 刀具坐标系 T 与工件坐标系 W 是重合的, 但实际加工中由于机床的各种误差因素而导致两者之间并不重合。为了重新使其重合, 必须对机床综合误差进行补偿, 令 ${}^W E_T$ 表示刀具中心点实际位置和理论加工点的矢量偏差 (即误差矩阵), 则 $T_{r,t} = {}^W E_T W$ 忽略所有 2 阶及 2 阶以上的高阶误差项, 故综合误差模型化简为:

$${}^W E_T = T_{r,t} W^{-1} = T_0^{-2} T_2^{-3} T_3^{-4} T_4^{-5} T_5^{-6} T_6^{-7} T_7^{-8} (T_0^{-1})^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \theta_z & \theta_y & \Delta X \\ \theta_z & 1 & \theta_x & \Delta Y \\ -\theta_y & \theta_x & 1 & \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 为刀尖切削点相对于工件被切削点的位置误差, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 为刀尖切削点相对于工件被切削点的姿态误差。求解 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ 可得到机床位姿补偿量表达式。

2 综合误差模型与参数辨识

假设机床热误差序列为 $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$, $X^{(1)}$ 是 $X^{(0)}$ 的 1-AGO 序列, 即: $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$ 且 $x^{(1)}(k) = x^{(0)}(k) + x^{(0)}(k-1)$ ($k = 1, \dots, n$)。 $Z^{(1)}$ 为 $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列, $Z^{(1)} = (z^{(0)}(1), z^{(0)}(2), \dots, z^{(0)}(n))$, 其中, $z^{(1)}(k) = (x^{(1)}((k) + x^{(1)}((k-1))/2, (k = 1, 2, \dots, n)$, 则 VM-GM(1, n) 的预测模型为^[6]:

$$\begin{cases} \hat{x}_1^{(0)}(k+1) = \sum_{k=2}^n \frac{b(k)}{a} x_1^{(1)}(k+1) [1 - e^{-a(k)}] + x_1^{(1)}(0) e^{-a(k)}, \\ \hat{x}_1^{(0)}(k+1) = \hat{x}_1^{(0)}(k+1) - \hat{x}_1^{(0)}(k) \end{cases} \quad (10)$$

通过第 1.3 节分析, 基于小误差假设, 机床综合误差 E_0 可以看成机床几何误差 E_1 和热误差 E_2 的线性叠加^[9-11], 即 $E_0 = E_1 + E_2$ 。几何误差分量可以采用 15 线^[12]、22 线^[13]等方法辨识出, 已被广泛引用, 故本节不再说明。本节主要针对热误差展开研究, 提出了测量主轴热误差的 5 点测量法和测量进给轴热误差的 6 点测量法。测量系统包括: M10 激光干涉仪、EC10 环境补偿单元、分光镜、反射镜、PC 机、电感测微仪和

温度热电偶。根据文献[14], 在机床主轴和 X1 轴的热敏感点处安装热电偶温度传感器和电感测微仪进行数据采集。如图 3 所示, 测量主轴在 x, y, z 方向的热偏移误差和绕 x, y 方向的热倾斜误差, 其中 1, 3 为 x 向测量点, 2, 4 为 y 向为测量点, 5 为 z 向为测量点。通过数据采集卡获取相应的热变形量 $\sigma_i(t)$ ($i = 1, \dots, 5$), 则: $\Delta S_x(t) = (\sigma_3 - \sigma_1)$; $\Delta S_y(t) = (\sigma_4 - \sigma_2)$; $\Delta S_z(t) = -\sigma_5$; $\Delta \varepsilon_{xx}(t) = (\sigma_3 - \sigma_1)/l_1$; $\Delta \varepsilon_{yy}(t) = (\sigma_4 - \sigma_2)/l_2$; 其中, l_1 为 1, 3 测量点间的距离, l_2 为 2, 4 测量点间的距离, l 为主轴长度。

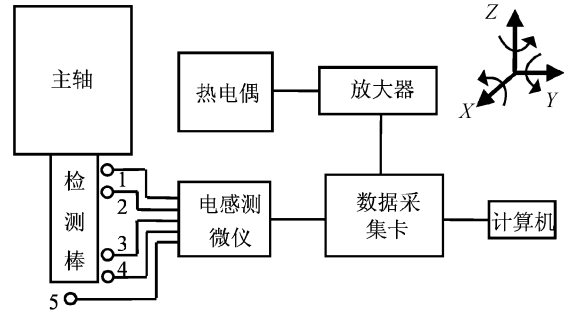


图3 主轴5点测量法

Fig.3 Spindle 5 point measurement method

如图 4 所示, 主要测量进给轴在 x, y, z 方向的热变形误差和绕 x, y, z 方向的热倾斜误差, 其中 8, 9 为 x 向测量点, 6, 11 为 y 向为测量点, 7, 10 为 z 向为测量点。通过数据采集卡获取相应的热变形量 σ_i ($i = 8, \dots, 11$), 由于进给轴的测量方法一致, 选取 X1 轴进行辨识, 则: $\Delta \delta_{xx}(t) = (\sigma_8 - \sigma_9)$; $\Delta \delta_{yx}(t) = (\sigma_6 - \sigma_{11})$; $\Delta \delta_{zx}(t) = (\sigma_7 - \sigma_{10})$ 。机床开机空载运转一段时间 (约 0.5 ~ 1 h) 后, 温升幅度不超过每小时 5 °C, 可认为达到热平衡状态^[15]。以主轴的 x 向热误差分量为例, 采集不同时间点的温度值 T_i 和对应热变形量 $\Delta S_j(t), \Delta \varepsilon_{xs}(t)$ 值, 得到主轴 x 向热误差曲线。以热误差序列 $X^{(0)}$ 为样本, 将其代入式 (10) 中求取主轴 x 向热误差预测曲线。

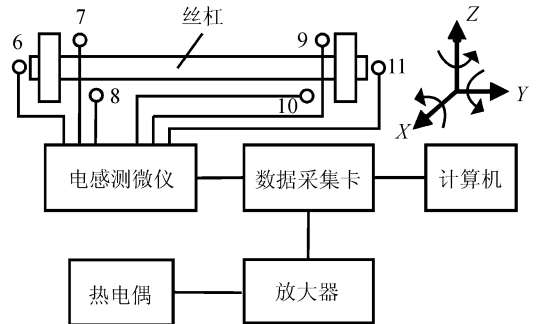


图4 X1轴6点测量法

Fig.4 6 point measurement method of X1 axis

如图 5 所示,可知实验数据与预测值吻合度较高,预测模型误差范围在 $0 \sim 2 \mu\text{m}$ 之间。同理可拟合出 X1 轴的 x 向热误差实测值与预测值曲线如图 6 所示,预测模型误差范围在 $0 \sim 12 \mu\text{m}$ 之间,表明热误差辨识预测模型精度很高。

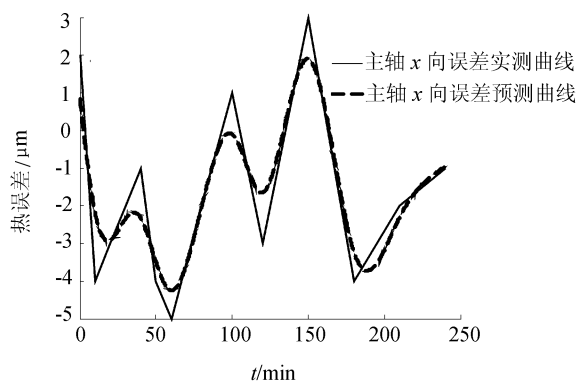


图 5 主轴热误差理论预测与实测值

Fig. 5 Theoretical results and experimental results of the spindle thermal error

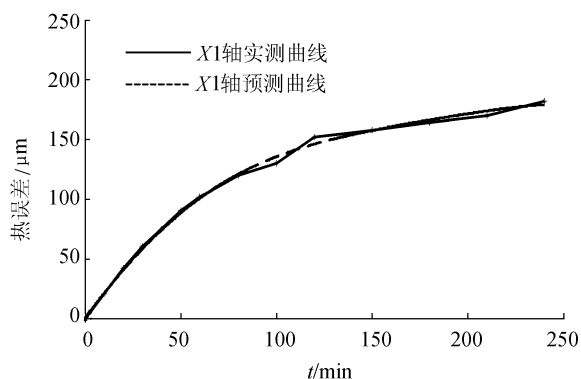


图 6 X1 轴热误差理论预测与实测值

Fig. 6 Theoretical results and experimental results of X1 axis thermal error

3 误差补偿实验与分析

基于上述模型算法,为了验证该算法的有效性,以 CGM4000 为实验对象,该机床 X、Y、Z 轴行程为: 4 000、2 500、600 mm,配置 FIDIA 的双摆头, A 轴转动范围 $+90^\circ \sim -110^\circ$ 、B 轴转动范围 $\pm 360^\circ$ 。该型数控机床承重件采用了热对称结构设计,进给轴采用一端固定,另一端浮动的结构,有效地减小了由升温而引起的丝杠翘曲变形误差,并消除了丝杠反向间隙。进给丝杠选取 THK 的空心滚珠丝杠,由于采用中空内冷方式,有效降低了滚珠丝杠的升温,最大限度的减少了滚珠丝杠副的热变形误差,从而保证了机床的高定位精度。数控系统采用 SIMEMS840D,该系统具有良好的开放性,可将机床误差补偿算法集成到数控系统中去。考虑机床加工工况因素,反复优化补偿参数,通过数控系统内部的 PMC 单元开发一种新型的

五轴机床综合误差补偿系统。在机床加工过程中,若干个关键点的温度值和热误差值可通过热电偶温度传感器、电感测微仪等仪器来采集,将数据输入误差补偿模型中进行解算得到补偿值,补偿值反馈到机床 CNC 系统,由 CNC 系统驱动各轴电机控制器,完成实时补偿。基于上述条件以 X1 轴为例进行实时综合误差补偿验证,其余进给轴验证方法相同,鉴于篇幅关系这里不再赘述。为了获取机床的热平衡区,以 X1 轴为研究对象,机床开启循环冷却系统进行试切加工,以加工某型叶轮为例,工件毛坯材料 0Cr18Ni9Ti,机床主轴转速为 1 200 r/min,进给速 200 mm/min。X1 轴位移偏差值和机床温度的关系如图 7 所示,在 $20 \sim 26.3^\circ\text{C}$ 区间内,机床温度随时间上升,变化趋势陡峭,在 $26.3 \sim 27.2^\circ\text{C}$ 区间内,机床温升曲线随时间变化趋势平缓,此温度区间为机床的热平衡区域。另外在 $20 \sim 26.8^\circ\text{C}$ 区间内, X1 轴热位移偏差随温度升高变化明显,而在 $26.8 \sim 27.8^\circ\text{C}$ 区间 X1 轴热位移偏差量热位移偏差随温度升高变化趋势平缓,此温度区间为机床的热误差稳定区域,该区间与热平衡区间部分重合,在这段区间内机床的热误差处于一个有规律的稳态。实测 X1 轴热误差偏移量如图 8 所示。

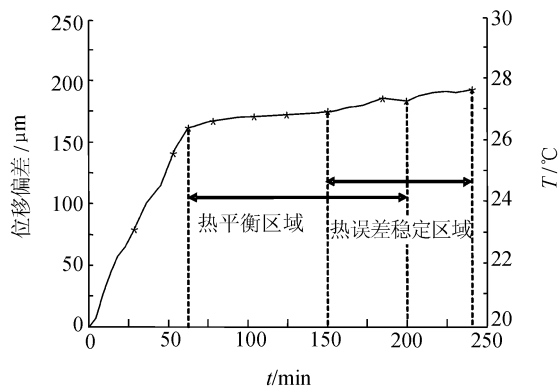


图 7 X1 轴热偏移曲线

Fig. 7 Thermal offset curve of X1 axis

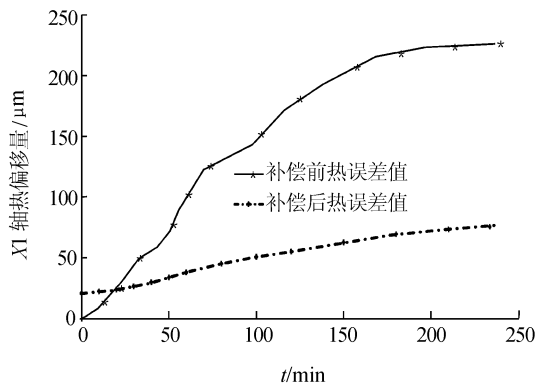


图 8 X1 轴补偿前后误差曲线

Fig. 8 Error curves of X1 axis before and after compensation

从图8中可以看出, $X1$ 各轴的热误差偏移量减慢,通过误差补偿算法,完成补偿后误差变化量在 $0 \sim 29 \mu\text{m}$ 之内。由此可见机床综合误差补偿系统是非常有效的,机床的精度有了显著的提高。另外,若因冷却系统发生故障,则会导致机床由于温升过高,数控系统报警而无法工作,此刻机床热误差处于无序状态,不在本文讨论范围之内。

4 结 论

通过对五轴数控机床的误差分量进行了解析,综合各轴误差完成了误差补偿理论建模和实验分析,得到了如下结论。

1) 利用多体运动学构建 CGM4000 五轴机床综合误差模型,并对 59 个误差分量进行相应的解析。综合机床各轴热误差产生的机理,提出了对主轴和进给轴热误差分量新的测量法:5 点测量法和 6 点测量法。大量实验证明理论预测辨识曲线与实验结果一致,主轴预测误差范围在 $0 \sim 2 \mu\text{m}$ 之间,进给轴预测误差范围在 $0 \sim 12 \mu\text{m}$ 之间。

2) 基于灰色系统理论表征离散点数据拟合出各轴热误差量曲线,建立了 VM-GM(1, n) 机床热误差预测模型,完成了五轴机床的非线性温度误差在线补偿模型。基于此模型大大提高了温度误差的预测精度,为误差补偿提供了补偿量预测值。

3) 通过修改机床数控系统的相关参数,基于数控系统 PMC 控制单元,开发了一种实时的机床误差补偿系统。以 $X1$ 轴为例,实验表明当机床达到热平衡后,补偿前和补偿后,机床 $X1$ 轴热误差偏移量有了显著的降低,误差变化量在 $0 \sim 29 \mu\text{m}$ 之内,机床精度有很大提高。实现了采用软件算法补偿硬件误差。

上述结论表明作者所提出的五轴机床综合误差解析算法和误差补偿模型得到了实验验证,能有效提高机床的加工精度。考虑切削力作用下的机床综合误差建模与补偿将是下阶段的研究重点。

参考文献:

[1] Yao Xiaopeng, Yin Guofu, Fang Hui, et al. Volumetric error modelling and decoupled error compensation analysis of five-axis CNC machine tools[J]. Chinese High Technology Letters, 2011, 21(10): 1084 - 1089. [要小鹏,殷国富,方辉,等. 五轴数控机床的空间误差建模与解耦补偿分析[J]. 高技术通讯, 2011, 21(10): 1084 - 1089.]

[2] She Chenhua, Chang Chuncheng. Design of a generic five-axis postprocessor based on generalized kinematics model of machine tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(3/4): 537 - 545.

[3] Zhu Shaowei, Ding Guofu, Qin Shengfeng, et al. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 52(1): 24 - 29.

[4] Wang Xiushan, Yang Jianguo, Yan Jiayu. Synthesis error modeling of the five-axis machine tools based on multi-body system theory[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(5): 761 - 764. [王秀山,杨建国,闫嘉钰. 基于多体系统理论的五轴机床综合误差建模技术[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(5): 761 - 764.]

[5] Bohez E L J, Ariyajunya B, Sinlapeecheewa C, et al. Systematic geometric rigid body error identification of 5-axis milling machines[J]. Computer-Aided Design, 2007, 39(4): 229 - 244.

[6] 刘思峰,党耀国,方志耕,等. 灰色系统理论及其应用[M]. 第5版. 北京:科学出版社, 2010: 146 - 181.

[7] Ren Yongqiang, Yang Jianguo. Study on decoupling of synthesis compensation for a 5-axis CNC machine tool[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(2): 55 - 59. [任永强,杨建国. 五轴数控机床综合误差补偿解耦研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(2): 55 - 59.]

[8] Liu Youwu, Zhang Qing, Zhao Xiaosong, et al. Multi-body system-based technique for compensating thermal errors in machining centers[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(1): 127 - 130. [刘又午,章青,赵小松,等. 基于多体理论模型的加工中心热误差补偿技术[J]. 机械工程学报, 2002, 38(1): 127 - 130.]

[9] Ramesh R, Mannan M A, Poo A N. Thermal error measurement and modelling in machine tools: Part I. Influence of varying operating conditions[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(4): 391 - 404.

[10] Lin Z C, Chang J S. The building of spindle thermal displacement model of high speed machine center[J]. Advance Manufacture Technology, 2007, 34(5/6): 556 - 566.

[11] Andolfatto L, Lavernhe S, Mayer J R R. Evaluation of servo, geometric and dynamic error sources on five-axis high-speed machine tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(10/11): 787 - 796.

[12] Chen Guiquan, Yuan Jingxia, Ni Jun. Displacement measurement approach for machine geometric error assessment[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(1): 149 - 162.

[13] Ahn K G, Cho D W. In-process modelling and estimation of thermally induced errors of a machine tool during cutting[J]. Advance Manufacture Technology, 1999, 15(4): 299 - 304.

[14] Krulwich Debra A. Temperature integration model and measurement point selection for thermally induced machine tool errors[J]. Mechatronics, 1998, 8(4): 395 - 412.

[15] 北京机床研究所. JB2278—78 金属切削机床通用技术标准[S]. 1978: 1 - 6.