

文章编号 1004-924X(2017)增-0174-09

光学自由曲面精密数控机床几何误差测量与综合建模

程亚平¹, 张恩忠^{1*}, 齐月玲², 林洁琼¹

- (1. 长春工业大学 机电学院, 吉林 长春 130012;
2. 吉林省新闻出版广电局, 吉林 长春 130022)

摘要:为提高自主研发的光学自由曲面精密数控机床的加工精度,对机床几何误差进行测量与建模。利用激光干涉仪对精密数控机床运动轴的几何误差进行测量,根据切比雪夫多项式建立基本几何误差项模型。通过对比实测曲线与拟合曲线,发现基本几何误差模型逼近程度高。经计算得出 x 、 y 、 z 轴移动误差的残差偏差带宽范围为 $(0.63, 2.84) \mu\text{m}$, 角度误差的残差偏差带宽范围为 $(0.39, 1.19)$ 弧秒,表明建立的模型预测精度高。基于多体系统理论建立精密数控几何误差模型,将基本误差几何误差模型代入该模型,得到两轴联动工况下的综合几何误差模型。建模过程简单且易于程序设计,有效提高了光学自由曲面精密数控加工精度与效率。

关键词:数控机床;几何误差;切比雪夫多项式;误差模型

中图分类号: TH161; TG659 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172513.0174

Geometric error measurement and integrated modeling for precision CNC machine tools of optical free-form surface

CHENG Ya-ping¹, ZHANG En-zhong^{1*}, QI Yue-ling², LIN Jie-qiong¹

- (1. *Institute of Electrical and Mechanical, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;*
2. *Jilin Provincial Press and Publication Bureau of Radio and Television, Changchun 130022, China)*

* *Corresponding author, E-mail: znz612@sina.com*

Abstract: In order to improve processing precision of independently developed precision CNC machine tools of optical free-form surface, geometrical error of the machine was measured and modeled. Geometric error of motion axis of precision CNC machine tools was measured by laser interferometer and basic geometric error term model was established according to Chebyshev polynomials. It was found that approximation level of basic geometric error model was high by comparing measured curves and matched curve. It is obtained by calculation that residual deviation bandwidth range of moving error of x , y and z axis is $(0.63, 2.84) \mu\text{m}$, and residual deviation bandwidth range of angle error is $(0.39, 1.19)$ arc second, which shows that prediction precision of established model is high. The geometric error model of basic error was substituted into the model based on multi-body system theory to

收稿日期:2017-04-28;修订日期:2017-06-05.

基金项目:吉林省教育厅科学研究资助项目(No. JJKH20170560KJ);国家自然科学基金资助项目(No. 51075041)

obtain integrated geometric error model under the operating condition of two-axis linkage. The modeling process is simple with easy program design and improves processing precision and efficiency of precision CNC of optical free-form surface.

Key words: CNC machine tools; geometric error; Chebyshev polynomial; error model

1 引言

数控机床作为一种不可或缺的精密切加工载体,提高其加工精度对于制造业高效率、高精度、高集成的发展方向具有重要的意义。数控机床加工精度受几何误差、热误差、切削力误差等多个误差源影响,其中,几何误差和热误差是主要的误差来源之一^[1-3]。目前常规的提高数控机床加工精度的方法是误差补偿法。其分为硬件补偿和软件补偿,硬件补偿经济成本高,补偿装置建立以后就难以更改,不能进行实时补偿;软件补偿是一种柔性补偿方法,补偿精度高,经济成本低,能够进行实时补偿。误差补偿的前提是对误差进行准确地测量并建立精确的误差模型^[4-6]。国内外专家学者对数控机床几何误差的辨识、建模和补偿等作了大量的研究^[7-9]。Lee^[10-11]等人利用球杆仪对旋转轴的位置误差和垂直误差进行了辨识并分析了误差辨识精度,奠定了旋转轴几何误差辨识方法的基础;曲永兴^[12]等人根据多体系统理论对串并混联机床的几何误差作了研究,建立了几何误差模型并对部分几何误差进行了误差分析;齐继宝、陈建雄^[13-14]等人利用微分变换理论分别对数控机床几何误差补偿方法、解耦进行了研究;韩飞飞^[15]等人根据多体理论建立了三轴数控机床综合误差模型,研究了工作空间综合误差分布和演变规律;付国强^[16]等人提出了六圈法进行几何误差辨识,六圈法建立在球杆仪测量的基础上,能够简便地测量出旋转轴的所有几何误差项,提高了工作效率。

切比雪夫多项式在函数逼近方面精度高,广泛应用于卫星轨道、数字信号处理等方面^[17]。本文基于切比雪夫多项式对五轴精密直线电机驱动的气浮数控机床的几何误差建立了综合几何误差模型。首先根据切比雪夫多项式的定义域,将运动轴位移变量进行归一化处理,并计算出每个测量点所对应不同阶次的切比雪夫值;然后建立基

本几何误差项的切比雪夫多项式模型,依据最小二乘法求出多项式系数;最后对切比雪夫变量进行反归一化处理得到以各个运动轴位移为自变量的综合几何误差模型。

2 精密数控机床的几何误差建模

五轴精密数控机床包括 3 个移动轴即 x 、 y 、 z 轴,两个旋转轴即 B 、 C 轴,能对表面加工精度要求较高的光学自由曲面进行加工。图 1 所示为自主研制的五轴精密数控机床结构简图,其中, δ_{xX} 表示数控机床沿 x 方向运动的定位误差, δ_{yX} 表示沿 x 方向运动的垂直直线度误差, δ_{zX} 表示沿 x 方向运动的水平直线度误差, ϵ_{xX} 表示沿 x 方向运动的偏摆误差, ϵ_{yX} 表示沿 x 方向运动的俯仰误差;同理, δ_{yY} 、 δ_{zY} 、 δ_{xY} 分别表示数控机床沿 y 方向运动的定位误差,垂直直线度误差,水平直线度误差, ϵ_{xY} 、 ϵ_{zY} 分别表示沿 y 向运动的俯仰误差和偏摆误差; δ_{zZ} 、 δ_{xZ} 、 δ_{yZ} 分别表示机床沿 z 方向运动时的定位误差、水平直线度误差、垂直直线度误差, ϵ_{yZ} 、 ϵ_{xZ} 分别表示机床沿 z 方向运动时的偏摆

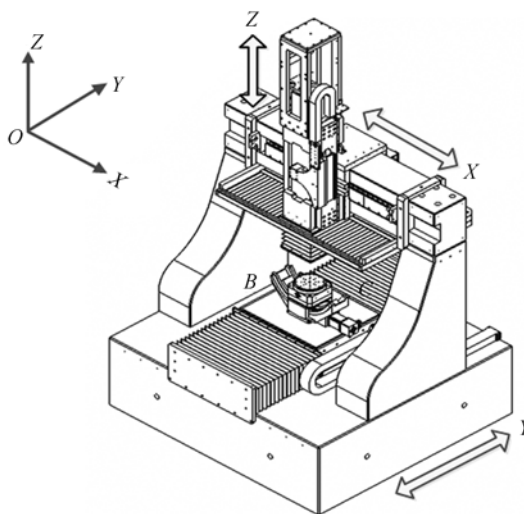


图 1 五轴精密数控机床结构简图

Fig. 1 Sketch of five-axis CNC polishing machine

误差、俯仰误差。 $\delta_{\theta B}$ 、 $\delta_{y\theta B}$ 、 $\delta_{z\theta B}$ 表示沿旋转轴 B 轴运动时的移动误差， $\epsilon_{\theta B}$ 、 $\epsilon_{y\theta B}$ 、 $\epsilon_{z\theta B}$ 表示沿旋转轴 B 轴运动时的角度误差； $\delta_{\theta C}$ 、 $\delta_{y\theta C}$ 、 $\delta_{z\theta C}$ 表示沿旋转轴 C 轴运动时的移动误差， $\epsilon_{\theta C}$ 、 $\epsilon_{y\theta C}$ 、 $\epsilon_{z\theta C}$ 表示沿旋转轴 C 轴运动时的角度误差；图 2 所示为五轴精密数控机床拓扑结构图。

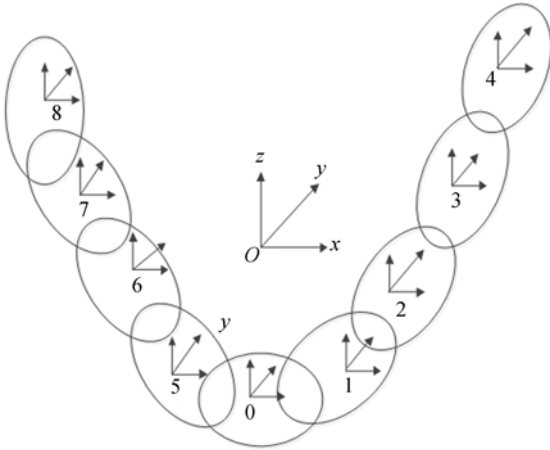


图 2 五轴精密数控机床拓扑结构

Fig. 2 Topology structure of polishing machine

基于多体理论^[18]建立五轴数控机床几何误差综合模型，机床可视为两个运动链：工件链和刀具链。工件链为“床身→Y 轴→B 轴→C 轴→工件”，刀具链为“床身→X 轴→Z 轴→主轴 S 轴→刀具”。根据小误差假设原理，不考虑二阶以及二阶以上小量，经推导可得五轴精密数控机床工件坐标系到刀具坐标系的误差运动空间分量为：

$$\begin{cases} \Delta x = \delta_{xX} - \delta_{y\theta B} - \epsilon_{y\theta C} - \delta_{xY} + \delta_{xZ} - z(\epsilon_{\theta B} + \epsilon_{\theta C} - \epsilon_{yX} + \epsilon_{yY} + S_{xZ}) - y(\epsilon_{\theta C} \cos \theta_B - \epsilon_{\theta C} \sin \theta_B) - \delta_{\theta C} \cos \theta_B - \delta_{\theta C} \sin \theta_B \\ \Delta y = \delta_{yX} - \delta_{x\theta C} - \delta_{y\theta B} + \delta_{yY} + \delta_{yZ} - x(\epsilon_{\theta B} - \epsilon_{zY} + S_{yX}) - z(\epsilon_{\theta B} + \epsilon_{xX} - \epsilon_{xY} + S_{yz} + \epsilon_{\theta C} \cos \theta_B - \epsilon_{\theta C} \sin \theta_B - \epsilon_{\theta C} \sin \theta_B) \\ \Delta z = \delta_{zX} - \delta_{z\theta B} - \delta_{zY} + \delta_{zZ} + x(\epsilon_{y\theta B} + \epsilon_{y\theta C} + \epsilon_{yY}) + y(\epsilon_{\theta B} + \epsilon_{x\theta C} \cos \theta_B + \epsilon_{\theta C} \sin \theta_B) - \delta_{\theta C} \cos \theta_B + \delta_{\theta C} \sin \theta_B \\ \Delta \epsilon_x = \epsilon_{xX} - \epsilon_{\theta B} - \epsilon_{xY} + \epsilon_{zZ} - \epsilon_{\theta C} \cos \theta_B + \epsilon_{\theta C} \sin \theta_B \\ \Delta \epsilon_y = \epsilon_{yX} - \epsilon_{y\theta C} - \epsilon_{y\theta B} - \epsilon_{yY} + \epsilon_{yZ} \\ \Delta \epsilon_z = \epsilon_{zX} - \epsilon_{z\theta B} - \epsilon_{zY} + \epsilon_{zZ} - \epsilon_{\theta C} \cos \theta_B + \epsilon_{\theta C} \sin \theta_B \end{cases} \quad (1)$$

当 $\theta_B = 0$ ， $\theta_C = 0$ 且 z 轴不运动时，根据工件坐标系到刀具坐标系的误差运动空间分量，可得 x 、 y 轴联动工况下各轴的移动误差和转角误差分量为：

$$\begin{cases} \Delta x = \delta_{xX} - \delta_{xY} \\ \Delta y = \delta_{yX} + \delta_{yY} + \epsilon_{zY}x \\ \Delta z = \delta_{zX} - \delta_{zY} + \epsilon_{yY}x \\ \Delta \epsilon_x = \epsilon_{xX} - \epsilon_{xY} \\ \Delta \epsilon_y = \epsilon_{yX} - \epsilon_{yY} \\ \Delta \epsilon_z = \epsilon_{zX} - \epsilon_{zY} \end{cases} \quad (2)$$

3 基于切比雪夫多项式的综合几何误差建模

3.1 切比雪夫多项式

切比雪夫多项式是以递归方式定义，与棣美弗定理有关的一系列正交多项式序列，并在逼近问题、物理学和技术科学中有非常重要的应用。第一类切比雪夫多项式有很多良好的性质，应用于多项式插值时可以最大限度地降低龙格现象，并且能够实现连续函数的最佳逼近。第一类切比雪夫多项式定义为：

$$T_n(x) = \cos(\arccos x), \quad (3)$$

其中， $n \in \mathbb{N}$ ， $x \in \mathbb{R}$ ， $|x| \leq 1$ ，该定义也可扩展为：

$$T_n(x) = \sum_{k=0}^n (-1)^k \binom{n}{2k} x^{n-2k} (1-x^2)^k, \quad (4)$$

其中， $\binom{n}{2k}$ 表示组合数， $\frac{n!}{(2k)!(n-2k)!}$ ($n \geq 2k$) 或 ($n < m$) $n, m \in \mathbb{N}$ ， $x \in \mathbb{C}$ (复数集)。

$T_n(x)$ 为第 n 个第一类切比雪夫多项式，即：

$$\begin{aligned} T_0(x) &= 1 \\ T_1(x) &= x \\ T_2(x) &= 2x^2 - 1 \\ T_3(x) &= 4x^3 - 3x \\ &\vdots \end{aligned} \quad (5)$$

3.2 五轴精密数控机床建模步骤

- (1) 对运动轴行程进行归一化处理；
- 实验中数控机床运动轴运动的行程为 (x_{\max} ,

x_{\min}),依据切比雪夫多项式定义域对运动轴行程归一化线性处理,转换关系如下:

$$e = \frac{2x - (x_{\max} + x_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (6)$$

其中 e 表示切比雪夫变量。

(2)计算每个测量点对应的不同阶次的切比雪夫值;

切比雪夫多项式的前 4 项可以表示为:

$$\begin{aligned} T_0(e) &= 1 \\ T_1(e) &= e \\ T_2(e) &= 2e^2 - 1 \\ T_3(e) &= 4e^3 - 3e \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^l T_0(e_j)T_0(e_j) & \sum_{j=1}^l T_1(e_j)T_0(e_j) & \cdots & \sum_{j=1}^l T_r(e_j)T_0(e_j) \\ \sum_{j=1}^l T_0(e_j)T_1(e_j) & \sum_{j=1}^l T_1(e_j)T_1(e_j) & \cdots & \sum_{j=1}^l T_r(e_j)T_1(e_j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{j=1}^l T_0(e_j)T_r(e_j) & \sum_{j=1}^l T_1(e_j)T_r(e_j) & \cdots & \sum_{j=1}^l T_r(e_j)T_r(e_j) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \omega_0 \\ \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^l T_0(e_j)\delta_j \\ \sum_{j=1}^l T_1(e_j)\delta_j \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^l T_r(e_j)\delta_j \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中, l 为数据个数, e_j 为测量的第 j 个数据, δ_j 为误差数据, $T_r(e_j)$ 为 r 阶切比雪夫多项式。

通过公式(9)计算得到系数,并将系数和切比雪夫多项式代入公式(8)初步得到含有切比雪夫变量的模型。

(5)根据变量转换关系,将公式(6)代入含有切比雪夫变量的模型即可得到最终的模型。

4 五轴精密数控机床实验设计

利用 Renishaw 公司的 XL-80 激光干涉仪对空载工况下移动轴的单项几何误差进行测量与分析。由于实验条件所限,垂直度误差和倾斜误差假设为零。图 3 为实验现场照片。

根据提出的基于切比雪夫多项式的几何误差建模方法建立基本误差项的数学模型。移动轴的基本几何误差项模型如下:

$$\delta_{rx} = 1.209 \times 10^{-7} x^3 + 4.14 \times 10^{-6} x^2 - 0.045x - 8.142$$

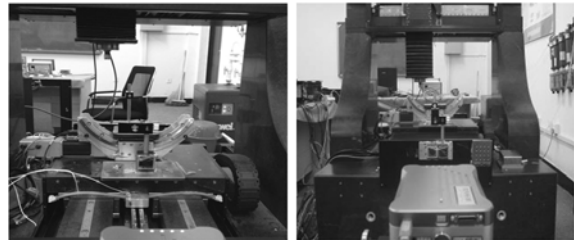
(3)建立基本几何误差项的切比雪夫多项式模型;

$$\begin{aligned} \delta &= \omega_0 T_0(e) + \omega_1 T_1(e) + \omega_2 T_2(e) \\ &+ \omega_3 T_3(e) + \cdots + \omega_k T_k(e) = \sum_{i=0}^k \omega_i T_i(e), \end{aligned} \quad (8)$$

其中, ω_i 为模型回归系数。

(4)计算切比雪夫多项式模型的回归系数;

根据最小二乘法可以计算出回归系数,移动轴误差数据与回归系数之间的关系可以表示为:



(a)定位误差测量 (a)Positioning error measurement
(b)转角误差测量 (b)Rotation angle error measurement

图 3 实验现场照片

Fig. 3 Photos of experimental scene

$$\delta_{yx} = -1.81 \times 10^{-7} x^3 + 3.635 \times 10^{-5} x^2 + 5.477 \times 10^{-3} x - 0.337$$

$$\delta_{zx} = 3.282 \times 10^{-7} x^3 - 9.376 \times 10^{-5} x^2 - 6.490 \times 10^{-3} x + 2.248$$

$$\epsilon_{zx} = 1.66 \times 10^{-7} x^3 + 1.004 \times 10^{-5} x^2 - 2.637 \times 10^{-3} x + 8.601 \times 10^{-2}$$

$$\epsilon_{yx} = 4.093 \times 10^{-9} x^3 + 4.156 \times 10^{-5} y^2 +$$

$$7.944 \times 10^{-3} y + 0.1809$$

$$\delta_{yY} = -2.145 \times 10^{-8} y^3 - 3.01 \times 10^{-5} y^2 - 3.636 \times 10^{-2} y - 5.739$$

$$\delta_{xY} = -3.486 \times 10^{-8} y^3 - 3.176 \times 10^{-5} y^2 - 1.381 \times 10^{-4} y + 5.118 \times 10^{-1}$$

$$\delta_{zY} = -2.189 \times 10^{-7} y^3 + 2.401 \times 10^{-5} y^2 + 3.557 \times 10^{-3} y + 2.630 \times 10^{-1}$$

$$\epsilon_{xY} = 4.623 \times 10^{-9} y^3 + 4.966 \times 10^6 y^2 + 1.460 \times 10^{-2} y + 2.865$$

$$\epsilon_{zY} = 7.772 \times 10^{-8} y^3 - 1.390 \times 10^{-5} y^2 + 9.760 \times 10^{-3} y + 3.256$$

$$\delta_{zZ} = 2.80 \times 10^{-4} z + (0.02z + 1.5)^2 \times 10^{-3} + 2.30 \times 10^{-4} \times (0.02z + 1.5)^3 + 0.0349$$

$$\delta_{xZ} = 0.023z - 1.01 \times (0.02z + 1.5)^2 - 1.485 \times (0.02z + 1.5)^3 + 2.938$$

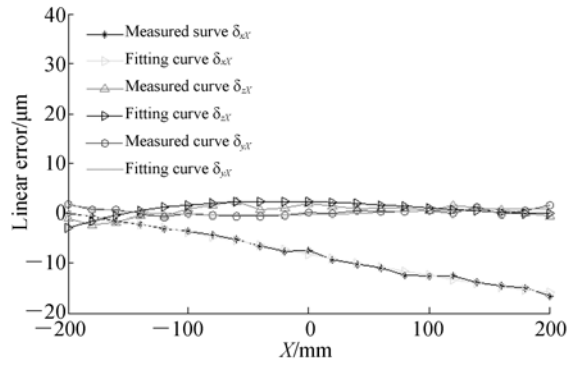
$$\delta_{yZ} = 5.2 \times 10^{-3} z + 0.809 \times (0.02z + 1.5)^2 - 1.362 \times (0.02z + 1.5)^3 - 0.986$$

$$\epsilon_{xZ} = 0.711 \times (0.02z + 1.5)^2 - 0.043z - 2.551 \times (0.02z + 1.5)^3 - 11.049$$

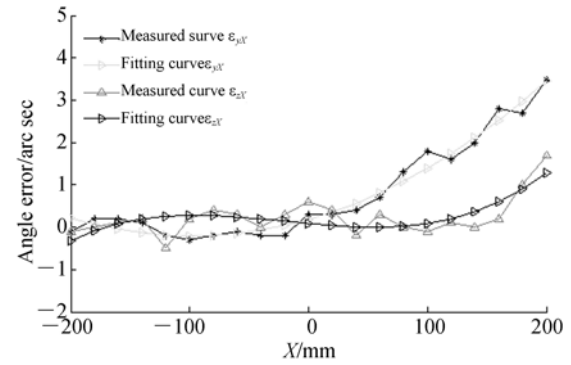
$$\epsilon_{yZ} = 0.041z + 0.829 \times (0.02z + 1.5)^2 - 2.562 \times (0.02z + 1.5)^3 + 0.782$$

图 4 为移动轴单项几何误差测量曲线与切比雪夫多项式模型拟合曲线对比图。从图中可以得出基本几何误差项模型拟合程度好, 经过计算得出 x 、 y 、 z 定位误差残差范围分别为 $(-0.76, 0.64) \mu\text{m}$ 、 $(-0.37, 0.28) \mu\text{m}$ 、 $(-0.44, 0.29) \mu\text{m}$, 垂直直线度误差的残差范围分别为 $(-0.96, 1.69) \mu\text{m}$ 、 $(-1.32, 1.37) \mu\text{m}$ 、 $(-1.34, 1.51) \mu\text{m}$, 水平直线度的残差范围为 $(-0.72, 0.46) \mu\text{m}$ 、 $(-0.38, 1.60) \mu\text{m}$ 、 $(-1.35, 1.81) \mu\text{m}$, 偏转角误差的残差范围分别为 $(-0.36, 0.36)$ 弧秒、 $(-0.24, 0.15)$ 弧秒、 $(-0.37, 0.82)$ 弧秒, 俯仰角误差的残差范围分别为 $(-0.26, 0.28)$ 弧秒、 $(-0.35, 0.16)$ 弧秒、 $(-1.31, 1.13)$ 弧秒; 这表明基本几何误差模型逼近精度高, 能够很好地反映出实际误差。

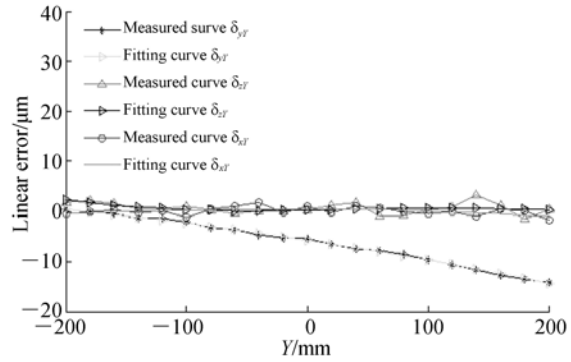
将移动轴基本几何误差模型表达式代入 x 、 y 两轴联动工况下的几何误差综合模型中, 得到以 x 、 y 轴进给量为自变量的综合几何误差模型表达式。



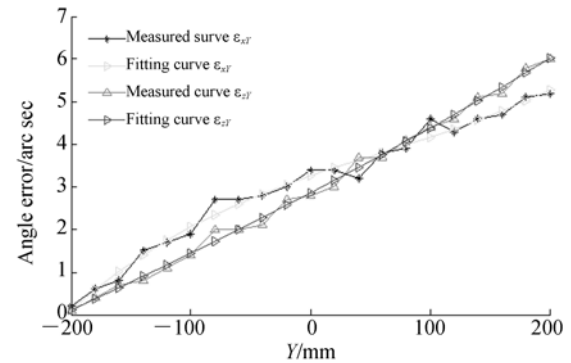
(a) x 轴移动误差曲线对比图
(a) Comparison of movement error curve of x -axis



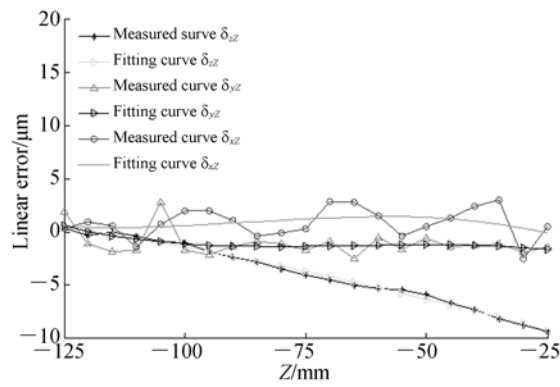
(b) x 轴转角误差曲线对比图
(b) Comparison of rotation angle error curve of x -axis



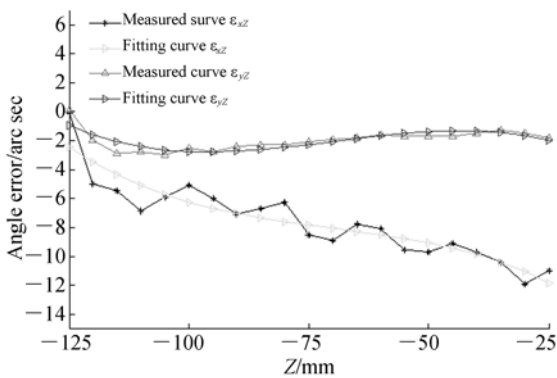
(c) y 轴移动误差曲线对比图
(c) Comparison of movement error curve of y -axis



(d) y 轴转角误差曲线对比图
(d) Comparison of rotation angle error curve of y -axis



(e)z轴移动误差曲线对比图
(e)Comparison of movement error curve of z-axis



(f)z轴转角误差曲线对比图
(f)Comparison of rotation angle error curve of z-axis

图 4 实测、拟合曲线对比图

Fig. 4 Comparison figure of measured and fitted curve

$$\Delta x = 1.209 \times 10^{-7} x^3 + 4.138 \times 10^{-6} x^2 - 4.475 \times 10^{-2} x + 3.486 \times 10^{-8} \times y^3 + 3.176 \times 10^{-5} y^2 + 1.381 \times 10^{-4} y - 8.653$$

$$\Delta y = 5.477 \times 10^{-3} x - 3.636 \times 10^{-2} y + x (7.772 \times 10^{-8} y^3 - 1.390 \times 10^{-5} y^2 + 9.760 \times 10^{-3} y + 3.256) + 3.635 \times 10^{-5} x^2 - 1.810 \times 10^{-7} x^3 - 3.007 \times 10^{-5} y^2 - 2.145 \times 10^{-8} y^3 - 6.077$$

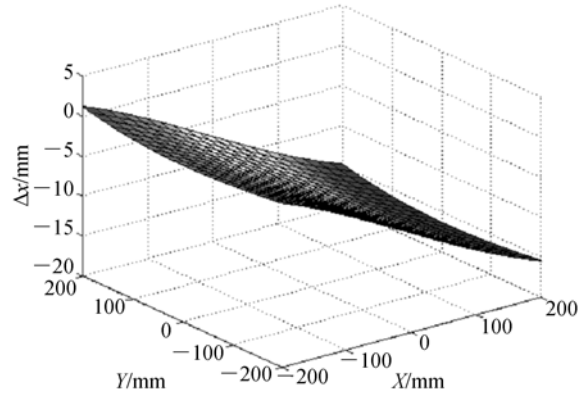
$$\Delta z = 3.281 \times 10^{-7} x^3 - 9.376 \times 10^{-5} x^2 - 6.489 \times 10^{-3} x + 2.189 \times 10^{-7} y^3 - 2.401 \times 10^{-5} y^2 - 3.557 \times 10^{-3} y + 1.985$$

$$\Delta \epsilon_x = -4.623 \times 10^{-9} y^3 - 4.966 \times 10^{-6} y^2 - 1.460 \times 10^{-2} y - 2.865$$

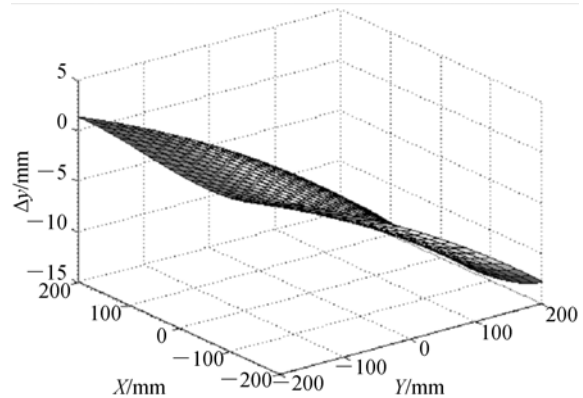
$$\Delta \epsilon_y = 4.093 \times 10^{-9} x^3 + 4.156 \times 10^{-5} y^2 + 7.944 \times 10^{-3} y + 0.1809$$

$$\Delta \epsilon_z = 1.658 \times 10^{-7} x^3 + 1.004 \times 10^{-5} x^2 - 2.637 \times 10^{-3} x - 7.772 \times 10^{-8} y^3 + 1.390 \times 10^{-5} y^2 - 9.760 \times 10^{-3} y - 3.170$$

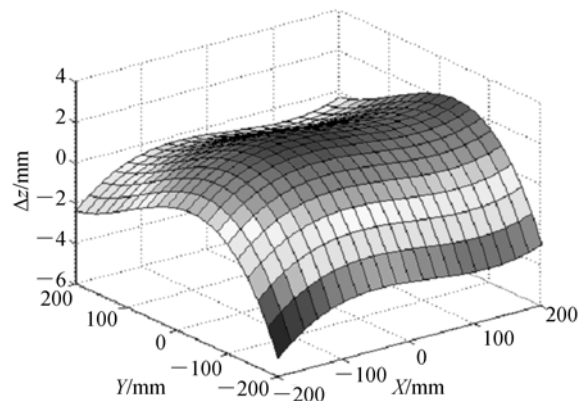
基于切比雪夫多项式的综合几何误差模型表达式是以移动轴进给量为自变量,可以得到数控机床任意一点的几何误差。图 5 表示了 x 、 y 两轴联动工况下,移动轴各个方向上的移动误差分量和转角误差分量。



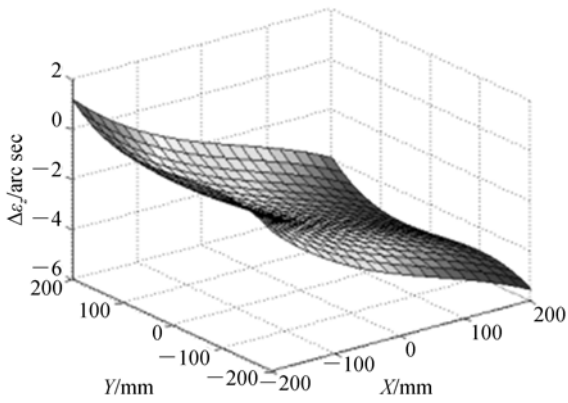
(a)x轴移动误差分量
(a)Displacement error component error of x-axis



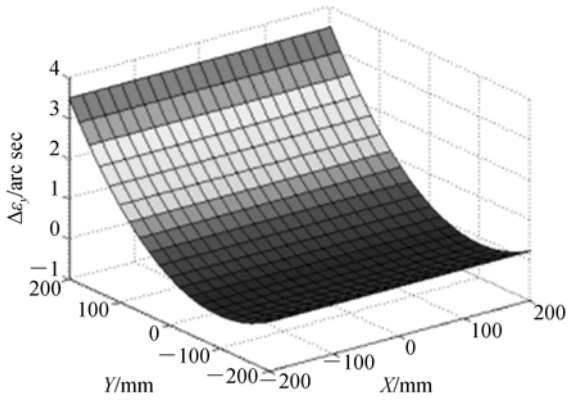
(b)y轴移动误差分量
(b)Displacement error component error of y-axis



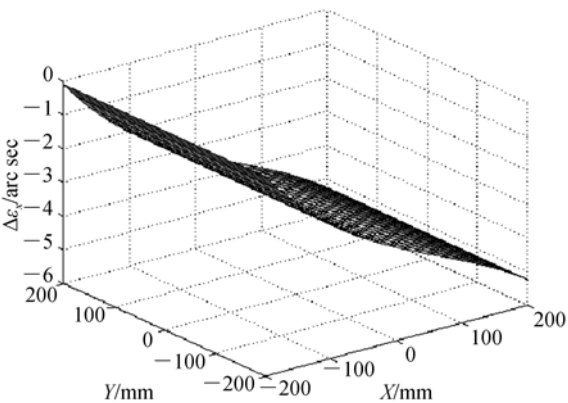
(c)z轴移动误差分量
(c)Displacement error component error of z-axis



(d)z轴转角误差分量
(d)Rotation angle error component of z-axis



(e)y轴转角误差分量
(e)Rotation angle error component of y-axis



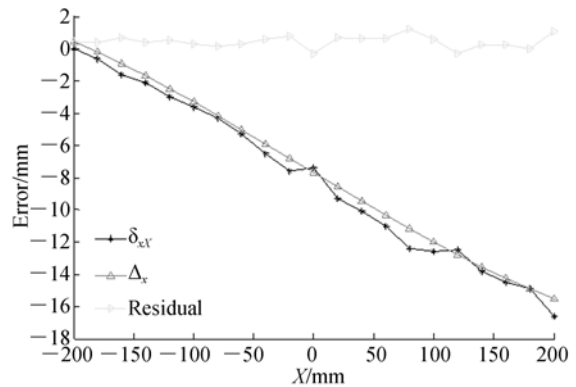
(f)x轴转角误差分量
(f)Rotation angle error component of x-axis

图 5 五轴数控机床综合误差

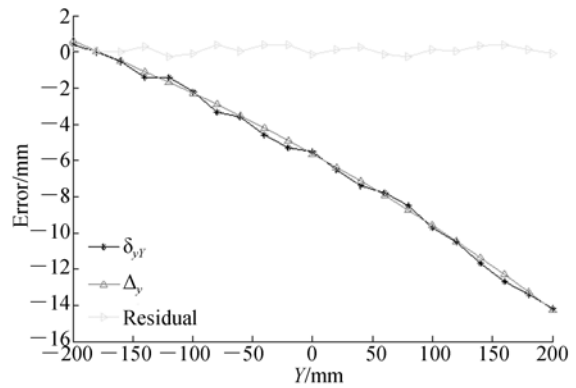
Fig. 5 Volumetric error for five-axis CNC machine tools

图 5 描述了精密数控机床综合误差在 x 、 y 、 z 方向的移动误差分量 Δx 、 Δy 、 Δz 和转角误差分

量 $\Delta \epsilon_x$ 、 $\Delta \epsilon_y$ 、 $\Delta \epsilon_z$ 的变化规律。 Δx 在 y 轴上有较小波动,在 x 轴上随着 x 轴行程从 -200 mm 至 200 mm 的变化而逐渐减小; Δy 在 x 轴上变化幅度较小,在 y 轴上随着 y 轴行程从 -200 mm 至 200 mm 的变化而呈逐渐减小趋势。通过对图 6 进一步分析可知,移动轴误差分量 Δx 变化规律和 x 轴定位误差变化规律相近,移动轴误差分量 Δy 变化规律和 y 轴定位误差变化规律趋于一致,因此,定位误差是数控机床几何综合误差主要的影响因素。根据误差分布,在加工精度要求不高的情况下,通过优化算法选择最佳的工作空间,只要对定位误差进行补偿,就可以达到加工精度。



(a) Δx 与 δ_{xX} 的比较
(a)Comparison of Δx and δ_{xX}



(b) Δy 与 δ_{yY} 的比较
(b)Comparison of Δy and δ_{yY}

图 6 综合误差分量与线性位移误差比较

Fig. 6 Comprehensive error component compare with linear displacement error

5 结 论

利用激光干涉仪对光学自由曲面精密数控机

床移动轴几何误差进行测量,发现定位误差是数控机床几何综合误差主要的影响因素;通过对比分析了实测曲线与拟合曲线,发现切比雪夫多项式模型逼近程度高。经计算得出移动轴误差的残差偏差带宽为(0.63,2.84) μm ,角度误差的残差偏差带宽为(0.39,1.19)弧秒,这表明该模型能精确预测数控机床的几何误差;基于多系统理论、

切比雪夫多项式建立了两轴联动工况下的机床综合几何误差模型。该模型可预测数控机床任意一点的几何误差值,且具有预测精度高、稳健性好、建模简单,易于程序化等优点,并明显提高了光学自由曲面数控机床加工精度与效率,为数控机床误差建模和补偿技术提供了理论依据和实践经验。

参考文献:

- [1] 夏毅敏,张刚强,罗松保,等. 非球面超精密机床静压轴承温度的分布[J]. 光学精密工程,2012,20(8):1759-1761.
XIA Y M,ZHANG G Q,LUO S B, *et al.*. Temperature field distribution of non-spherical hydrostatic bearings for ultra-precision machine tools[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1759-1761 (in Chinese)
- [2] 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 EN M,GONG Y Y,CHENG T J, *et al.*. Application of support vector regression machine to thermal error modeling of machine tools [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 980-986. (in Chinese)
- [3] 王秀山,杨建国,闫佳钰. 基于多体系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.
WANG X SH, YANG J G, YAN J Y. 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. (in Chinese)
- [4] 张恩忠,赵继,冀世军,等. 光学自由曲面研抛机床综合误差建模与补偿研究[J]. 光学精密工程,2015,23(6):1587-1597.
ZHANG E ZH,ZHAO J, JJ SH J, *et al.*. Comprehensive error modeling and compensation for an optical free-form surface polishing machine tool[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1587-1597. (in Chinese)
- [5] FU G,FU J,SHEN H, *et al.*. Product-of-exponential formulas for precision enhancement of five-axis machine tools via geometric error modeling and compensation[J]. *The Interbational Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(1-4): 289-305.
- [6] ZHONG G,WANG C,YANG S, *et al.*. Position geometric error modeling,identification and compensation for large 5-axis machining center prototype[J]. *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, 2015, 89:142-150.
- [7] FENG W L,LI ZI H,GU Q Y, *et al.*. Thermally induced positioning error modelling and compensation based on thermal characteristic analysis [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 93(6): 26-36.
- [8] LI Z H, YANG J G, FAN K G, *et al.*. Integrated geometric and thermal error modeling and compensation for vertical machining centers[J]. *International Journal Advance Manufacture Technology*, 2015, 76(5-8): 1139-1150.
- [9] 王维,杨建国,姚晓栋,等. 数控机床几何误差与热误差综合建模及其实时补偿[J]. 机械工程学报, 2012, 48(7): 165-175.
WANG W, YANG J G, YAO X D, *et al.*. Synthesis modeling and real-time compensation of geometric error and thermal error for CNC machine tools[J]. *Journal of Mechanical EngineerIng*, 2012, 48(7): 165-170. (in Chinese)
- [10] LEE K I, YANG S H. Robust measurement method and uncertainty analysis for position-independent geometric errors of a rotary axis using a double ball-bar[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(2): 231-239.
- [11] LEE K I, YANG S H. Measurement and verification of position-independent geometric errors of a five-axis machine tool using a double ball-bar[J]. *International Journal of Mchine Tools and Manufacture*, 2013, 70: 45-52.
- [12] 曲永兴,赵永兵,刘海忠,等. 串并混联机床几何误

- 差建模与实验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(1):137-144.
- QU Y X, ZHANO Y B, LIU H ZH, *et al.*. Modeling and experiment of spatial geometric errors of hybrid serial-parallel machine tool[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2017, 47(1):137-144. (in Chinese)
- [13] 陈建雄, 林述温. 基于微分变换的多轴数控机床几何误差解耦研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(17): 2290-2294.
- CHEN J X, LIN SH W. Geometric error decoupling for multi-axis CNC machines based on differential transformation[J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(17):2290-2294. (in Chinese)
- [14] 齐继宝, 杨伟氏. 基于微分变化构造法的数控机床几何误差补偿方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9):398-405.
- QI J B, YANG W M. Differential change construction based geometric error compensation for machine tools[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9): 398-405. (in Chinese)
- [15] 韩飞飞, 赵继, 张雷, 等. 数控机床几何精度综合解析与实验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(21): 141-148.
- HAN F F, ZHAO J, ZHANG L, *et al.*. Synthetic analysis and experimental study of the geometric accuracy of CNC machine tools[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(21): 141-148. (in Chinese)
- [16] 付国强, 傅建中, 沈洪焱. 五轴精密数控旋转轴几何误差辨识新方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(5):848-857.
- FU G Q, FU J ZH, SHEN H Y. One novel geometric error identification of rotary axes for five-axis machine tool[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering and Technology Edition)*, 2015, 49(5):848-857. (in Chinese)
- [17] 王万金, 玄志武, 张志国. 切比雪夫多项式在动态载荷识别中的应用[J]. 强度与环境, 2013(6):39-44.
- WANG W J, XUAN ZH W, ZHANG ZH G. Application of the Chebyshev polynomials for dynamic loads identification[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2013(6):39-44. (in Chinese)
- [18] 刘志峰, 刘广博, 程强, 等. 基于多体系理论的精密立式加工中心精度建模与预测[J]. 吉林大学学报:工学版, 2012, 42(2):388-391.
- LIU ZH F, LIU G B, CHENG Q, *et al.*. Precision modeling and prediction of precise vertical machining center based on theory of multi-body system[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2012, 42(2):388-391. (in Chinese)

作者简介:



程亚平(1990—),女,山东人,硕士,2015年于烟台大学文经学院获得学士学位,主要研究方向为智能精密制造。E-mail: mailto: brightlishi @ gmail. com326985417@qq. com

通讯作者:



张恩忠(1971—),男,内蒙古人,副教授,博士研究生,2006年于吉林大学获得硕士学位,主要研究方向为智能精密制造。E-mail: znz612@sina. com