

文章编号 1004-924X(2015)12-3422-08

## 基于正交与插值算法的 精密抛光平台综合误差建模与补偿

张恩忠<sup>1,2</sup>, 赵 继<sup>1\*</sup>, 冀世军<sup>1</sup>, 李 刚<sup>2</sup>

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 长春工业大学 机电学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 为了提高四轴抛光平台的加工精度, 本文针对以气浮平台和旋转台为主要运动方式的四轴抛光平台进行了几何与热综合误差建模与补偿研究。采用激光干涉仪、温度传感器等测量仪器分别对平台 X、Z 轴在不同温度下的定位误差进行重复测量与分析, 证实了不同进给速度对定位误差没有显著影响。得到了四轴抛光平台 X、Z 轴的定位误差与温度之间的变化规律。基于正交多项式和插值算法分别建立了 X、Z 轴的几何与热综合误差模型。根据综合误差模型计算出预测数据曲线, 并分别对 X、Z 轴的 7 组实验数据进行了数据拟合, 拟合残差绝对值均不超过  $0.2 \mu\text{m}$ 。依据预测数据进行了补偿实验。结果显示, 补偿后四轴抛光平台在常温下、温升 (60 min) 下和稳态下的 Z 轴定位误差分别降低了 93.05%、92.45%、85.71%, X 轴定位误差分别降低了 89.28%、93.59%、93.33%。实验结果证明本文所提出的综合模型及补偿方法精度高, 鲁棒性好。

**关键词:** 抛光机床; 正交多项式; 插值算法; 综合误差模型; 误差补偿

中图分类号: TH703; TN305.7 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20152312.3422

## Comprehensive error modeling and compensation for precision polishing platform based on orthogonal experiment and interpolation algorithm

ZHANG En-zhong<sup>1,2</sup>, ZHAO Ji<sup>1\*</sup>, JI Shi-jun<sup>1</sup>, LI Gang<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;  
2. School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

\* Corresponding author, E-mail: jzhao@jlu.cdu.cn

**Abstract:** To improve the machining precision of four-axis polishing platforms, a geometric and thermal comprehensive error model and an error compensation method were researched for a four-axis polishing platform with a float platform and a rotation platform. Several kinds of instruments such as laser interferometer, temperature sensor were used to repeatedly measure and analyze respectively the positioning errors of X, Z axes at different temperatures and to verify that different feeding speeds were no significant influence on the positioning error. The change rules of between position error and temperature change for the polishing platform in X, Z axes were obtained. Based on orthogonal poly-

收稿日期: 2015-06-30; 修订日期: 2015-08-16.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2011CB706702)

nomial and interpolation algorithm, the geometric and thermal comprehensive error model of X, Z axes was established. According to the comprehensive error model, the prediction data curves were calculated, and seven groups of experimental data of X, Z axes were fitted and the fitting residual error absolute value was verified to be less than  $0.2 \mu\text{m}$ . A compensation experiment was carried out according to the forecasting data. The results show that the X axis positioning errors of polishing platform under the normal temperature, the temperature rise of 60 min and steady state are respectively decreased by 89.33%, 92.45% and 85.7% after compensation, and the Z-axis positioning errors are respectively reduced by 89.23%, 93.59% and 93.33% after compensation. The experimental results demonstrate that the presented comprehensive model and compensation method have high precision and good robustness.

**Key words:** polishing machine; orthogonal polynomial; interpolation algorithm; comprehensive error model; error compensation

## 1 引言

精密和超精密加工是现代制造技术的重要组成部分,对航天、航空、国防等领域有着重要的作用<sup>[1-2]</sup>。热变形误差与几何误差占数控机床各种误差的 70%左右<sup>[3]</sup>,故补偿控制热误差已成为误差补偿的重要研究方向<sup>[4-6]</sup>。误差补偿法可分为误差预防法和误差补偿法<sup>[7]</sup>,误差预防法是一种硬技术,存在很大的局限性,而且花费巨大;误差补偿法是为人为地在系统中引入一个附加的误差值,用以抵消当前误差,达到减少或消除零件加工误差的方法,它用很小的代价便可获得较高的加工精度。

国内外学者对数控机床误差建模与补偿进行了大量的研究和报道。<sup>[8-11]</sup>崔卫岗等对一台重型机床进行了几何与热误差分离并取得了相应成果<sup>[12]</sup>。郭钱建等运用神经网络建立了一台精密磨削机床的误差补偿模型<sup>[13-14]</sup>。闫嘉钰等运用灰色关联度的方法进行了机床温度测点的优化<sup>[15]</sup>。王福吉等利用模糊神经网络建立了一台三轴数控铣床定位误差的预测模型<sup>[16]</sup>。虽然这些建模方法的预测精度高,但存在计算量大,不易于程序设计且鲁棒性不好等缺点。

本文针对以气浮平台和旋转台为主要运动方式的四轴抛光平台进行了几何与热综合误差建模与补偿研究,利用激光干涉仪和温度传感器对四轴抛光平台的 X, Z 轴进行不同时间下的定位误差和温度测量<sup>[17]</sup>,分析了四轴抛光平台从常温到

热稳态过程中关键测量点温度与定位误差之间的变化规律,建立了基于正交多项式和插值算法的几何与热的综合误差模型。最后通过补偿实验验证了该模型的有效性,为提高四轴抛光平台的加工精度提供了理论与实践依据。

## 2 四轴抛光平台误差测量与建模

四轴抛光平台结构如图 1 所示。

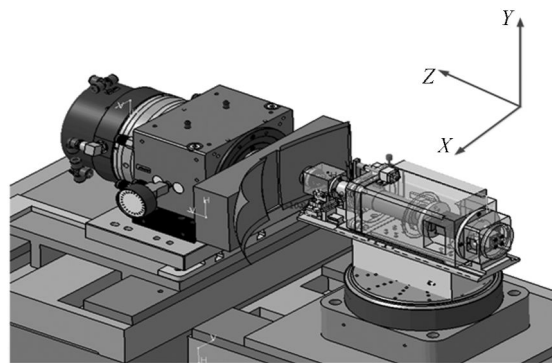
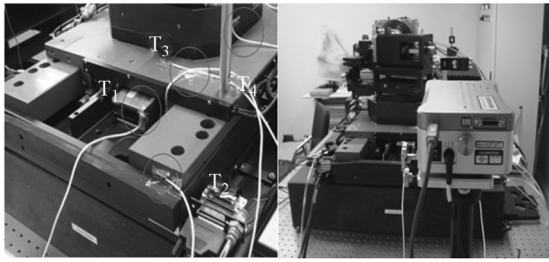


图 1 四轴抛光平台结构简图

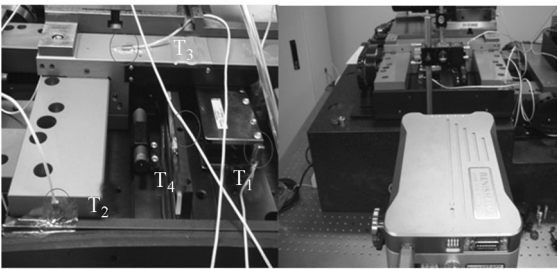
Fig. 1 Sketch of four-axis polishing platform

### 2.1 误差测量

为了测量四轴抛光平台 X, Z 轴在不同时间下的定位误差和温度变化,依据抛光平台的结构特点和实验室条件,采用  $T_1, T_2, T_3, T_4$  铂电阻式 PT100 温度传感器实时测量抛光平台上测量点的温度变化情况。如图 2 所示,  $T_1$  用来测量抛光平台 Z 轴直线电机的定子温度,  $T_2$  和  $T_3$  用来测量平台的定导轨和动导轨温度,  $T_4$  用来测量床身



(a) Z轴温度测量 (b) Z轴误差测量  
(a) Temperature measurement of Z-axis (b) Error measurement of Z-axis



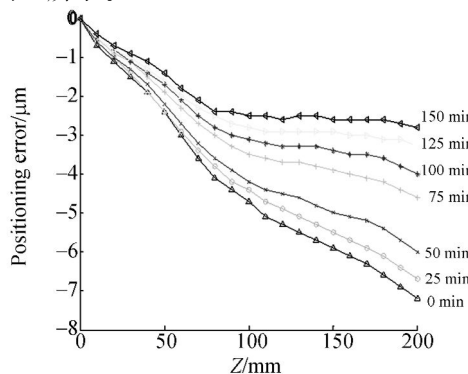
(c) X轴温度测量 (d) X轴误差测量  
(c) Temperature measurement of X-axis (d) Error measurement of X-axis

图 2 误差测量现场

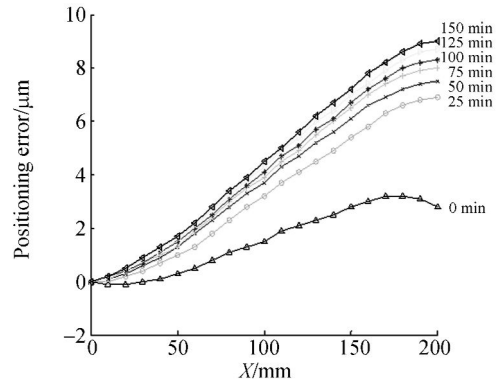
Fig. 2 Scene of error measurement

温度。首先记录四轴抛光平台各测量点常温时的温度,然后每隔 25 min 记录各测量点的温度。

利用激光干涉仪测量两个轴的初始定位误差,然后使四轴抛光平台沿 X、Z 轴不断往复运动,直至抛光平台达到热平衡状态,并实时测量抛光平台 X、Z 轴在温升时间为 25 min, 50 min, 75 min, 100 min, 125 及 150 min 时的定位误差,结果如图 3 所示。



(a) Z轴不同温升时间下的定位误差  
(a) Positioning errors at different temperature rising time in Z-axis



(b) X轴不同温升时间下的定位误差  
(b) Positioning errors at different temperature rising time in X-axis

图 3 Z、X轴定位误差曲线

Fig. 3 Curves of positioning errors in Z, X axes

从图 3 中可以看出, Z 轴、X 轴从 0~150 min 温升期间, Z 轴定子温度从 18.1 °C 上升到了 19.1 °C, X 轴定子温度从 17.8 °C 上升到了 18.9 °C, 同时四轴抛光平台 X、Z 向的 7 条定位误差曲线值随着温度的不断上升而增大, 抛光平台运行 125 min 以后基本达到热平衡状态, 其 X、Z 向的定位误差值和温度在一定范围内微小的变化。图 4 为四轴抛光平台 X 轴达到热稳态时不同进给速度下的 5 条定位误差曲线, 从图 4 可以看出不同进给速度对 X 轴的定位误差并没有显著的影响。

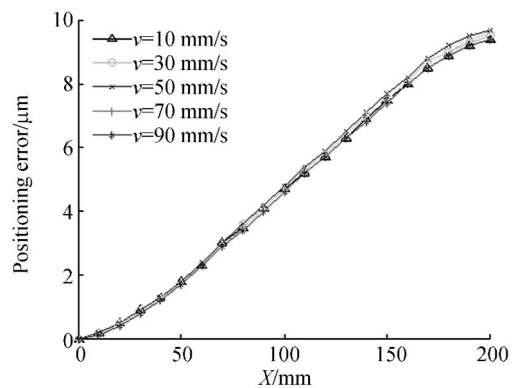


图 4 X轴不同速度误差曲线

Fig. 4 Error curves in X-axis at different speeds

## 2.2 正交实验法建模

用激光干涉仪对四轴平台进行误差测量, 因几何误差是等间距的测量, 所以可以使用正交多项式法进行建模。这里以 Z 轴定位误差为例具体

说明建模过程。

如表 1 所示,每组测量误差元素有 21 个实验数据,选择  $N=21$  的正交多项式。表 1 中左上部分摘自正交多项式表,  $\phi_i$  为正交函数族,  $B_i = \sum \phi_i(\chi_i) \delta_i$ ,  $p_i = \beta_i B_i$ ,  $\beta_0 = \sum \delta_{zxi} / N$ 。

表 1 正交多项表

Tab. 1 Monohydric orthogonal polynomials

N	$\phi_1$	$3\phi_2$	$5\phi_2/6$	$7\phi_2/12$	$\delta_{zz}$	$\delta_{zz}^2$
1	-10	190	-285	969	0	0
2	-9	133	-114	0	-0.7	0.49
3	-8	82	12	-510	-1.1	1.21
4	-7	37	98	-680	-1.5	2.25
5	-6	-2	149	-615	-1.9	3.61
6	-5	-35	170	-406	-2.4	5.76
7	-4	-62	166	-130	-3	9
8	-3	-83	142	150	-3.6	12.96
9	-2	-98	103	385	-4.1	16.81
10	-1	-107	54	540	-4.4	19.36
11	0	-110	0	594	-4.7	22.09
12	1	-107	-54	540	-5.1	26.01
13	2	-98	-103	385	-5.3	28.09
14	3	-83	-142	150	-5.5	30.25
15	4	-62	-166	-130	-5.7	32.49
16	5	-35	-170	-406	-5.9	34.81
17	6	-2	-149	-615	-6.1	37.21
18	7	37	-98	-680	-6.3	39.69
19	8	82	-12	-510	-6.6	43.56
20	9	133	114	0	-6.9	47.61
21	10	190	285	969	-7.2	51.84
$B_i$	-267.7	757.1	-122.2	-1 230.8	-88	465.1
$S_i$	770	201 894	432 630	5 720 330		
$\beta_i$	-0.347 7	0.003 7	-0.000 3	-0.000 2		
$\rho_i$	93.069 2	2.839 1	0.034 5	0.264 8	$\beta_0 = -4.190 5$	

计算总偏差为:

$$l_{zz} = \sum \delta_{zxi}^2 - (\sum \delta_{zxi})^2 / 21 = 465.1 - 368.76 = 96.34.$$

$$\delta_{zz} = -4.190 5 - 0.347 7 \phi_1[(z+10)/10] + 0.003 7 \times 3 \phi_2[(z+10)/10] + 0 \times 5 \phi_3[(z+10)/10] / 6 - 0.000 2 \times 7 \phi_4[(z+10)/10] / 12. \tag{3}$$

由式(1)、式(3)可知,定位误差曲线不同,相应的正交多项式系数是不一样的,而其它部分都相

F 检验。对于  $F_{0.1}(1,16) = 3.05$ 、 $F_{0.05}(1,16) = 4.49$ 、 $F_{0.01}(1,16) = 8.53$ ,由表 2 可知一次项、二次项和四次项显著,因此建立回归方程:

表 2 方差分析表

Tab. 2 Variance analysis

变差来源	平方和	自由度	方差	F 值
$\phi_1$	93.07	1	93.07	11416
$\phi_2$	2.84	1	2.84	348.3
$\phi_3$	0.03	1	0.03	4.23
$\phi_4$	0.26	1	0.26	32.5
剩余	0.14	16	0.008 2	
总计	96.34	$N-1$		

$$\delta_{zz} = -4.190 5 - 0.347 7 \phi_1(z) + 0.003 7 \times 3 \phi_2(z) + 0 \times 5 \phi_3(z) / 6 - 0.000 2 \times 7 \phi_4(z) / 12. \tag{1}$$

由于正交函数族中的变量为自然数,因此进行函数变换  $Z = (Z+10)/10$ ,其中  $Z$  为  $Z$  轴的位置坐标。将  $\phi_1(z)$ ,  $\phi_2(z)$ ,  $\phi_3(z)$ ,  $\phi_4(z)$  代入回归方程中得到:

$$\begin{cases} \phi_1(z) = z - \bar{z} \\ \phi_2(z) = (z - \bar{z})^2 - \frac{N^2 - 1}{12} \\ \phi_3(z) = (z - \bar{z})^3 - \frac{3N^2 - 7}{20}(z - \bar{z}) \\ \phi_4(z) = (z - \bar{z})^4 - \frac{3N^2 - 13}{14}(z - \bar{z})^2 + \frac{3(N^2 - 1)(N^2 - 9)}{500} \\ \dots\dots \\ \phi_{p+1}(z) = \phi_1(z)\phi_p(z) - \frac{p^2(N^2 - p^2)}{4(4p^2 - 1)}\phi_{p-1}(z) \end{cases}, \tag{2}$$

式中:  $\phi_1(z)$ ,  $\phi_2(z)$ ,  $\phi_3(z)$ ,  $\phi_4(z)$  为正交函数组。那么有:

同,所以可设系数  $a = -4.190 5$ ,  $b = -0.347 7$ ,  $c = 0.003 7$ ,  $d = 0$ ,  $e = -0.000 2$ ,则式(3)可变为:

$$\delta_{zz} = a + b \phi_1[(z+10)/10] + c \times 3 \phi_2[(z+10)/10] + d \times 5 \phi_3[(z+10)/10] / 6 + e \times 7 \phi_4[(z+10)/10] / 12, \tag{4}$$

式中:  $a$  为正交多项式的常数、 $b$  为一次项系数、 $c$  为二次项系数、 $d$  为三次项系数、 $e$  为四次项系数。  $a, b, c, d, e$  的值会随着抛光平台温度的变化而变化, 所以抛光平台  $z$  轴在不同温度下的定位误差曲线可以用不同的  $a, b, c, d, e$  来表示, 那么就需要分析抛光平台  $z$  轴温度与其定位误差的对应关系。

依据相关性分析<sup>[7,18]</sup>, 定子是抛光平台热误差的关键点, 由温度传感器测得抛光平台定子的温度及其温度变化量  $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$  ( $Z, X$  轴的定子测量温度与室温之差) 如表 3 所示。

表 3 温度变化统计表

Tab. 3 Statistics of temperature change

温升时间 /min	Z 轴定子 温度 $t/^\circ\text{C}$	X 轴定子 温度 $t/^\circ\text{C}$	$\Delta t_1/^\circ\text{C}$	$\Delta t_2/^\circ\text{C}$
0	18.1	17.8	0	0
25	18.4	18.1	0.3	0.3
50	18.6	18.4	0.5	0.6
75	18.8	18.6	0.7	0.8
100	18.9	18.7	0.8	0.9
125	19.0	18.8	0.9	1
150	19.1	18.9	1.0	1.1

表 4 Z 轴误差系数

Tab. 4 Error coefficients in Z-axis

$a$	$b$	$c$	$d$	$e$
-4.191	-0.348	0.003 7	0	-0.000 2
-3.919	-0.321	0.003 7	-0.000 5	-0.000 2
-3.576	-0.283	0.003 9	-0.000 5	-0.000 2
-2.891	-0.213	0.003 8	-0.000 5	-0.000 2
-2.567	-0.18	0.003 7	-0.000 6	-0.000 2
-2.262	-0.145	0.003 8	-0.000 6	-0.000 2
-1.986	-0.124	0.003 7	-0.000 6	-0.000 2

$$\begin{aligned} \delta_{z_z} = & -59.613 8\Delta t^6 + 226.496 8\Delta t^5 - 336.516 1\Delta t^4 + 240.259 3\Delta t^3 - 78.713 4\Delta t^2 + 10.219 8\Delta t - \\ & 4.109 5 + (-13.328\Delta t^6 + 46.215 9\Delta t^5 - 62.657 2\Delta t^4 + 41.070 6\Delta t^3 - 12.599 6\Delta t^2 + 1.522 3\Delta t - \\ & 0.347 7)\phi_1[(z+10)/10] + (-0.362 4\Delta t^6 + 1.188 9\Delta t^5 - 1.493 9\Delta t^4 + 0.891 1\Delta t^3 - 0.25\Delta t^2 + \\ & 0.026 4\Delta t + 0.003 7) \times 3\phi_2[(z+10)/10] + (-0.226 2\Delta t^6 + 0.777 4\Delta t^5 - 1.025 8\Delta t^4 + 0.642 2\Delta t^3 - \\ & 0.186 6\Delta t^2 + 0.018 5\Delta t) \times 5\phi_3[(z+10)/10] / 6 - 0.000 2 \times 7\phi_4[(z+10)/10] / 12. \end{aligned} \quad (5)$$

同理可得到 X 轴几何误差与热误差综合误差模型的表达式为:

$$\begin{aligned} \delta_{z_x} = & -25.328 5\Delta t^6 + 96.885 1\Delta t^5 - 148.029 7\Delta t^4 + 117.298 3\Delta t^3 - 52.198 3\Delta t^2 + 14.153 9\Delta t - \\ & 1.538 1 + (-10.846 6\Delta t^6 + 41.641 5\Delta t^5 - 62.693 1\Delta t^4 + 46.581 7\Delta t^3 - 17.458 3\Delta t^2 + 3.091 7\Delta t - \\ & 0.195 6) \times \phi_1[(x+10)/10] + (-0.066 1\Delta t^6 + 0.291 0\Delta t^5 - 0.507 3\Delta t^4 + 0.437 6\Delta t^3 - 0.186 6\Delta t^2 + \\ & 0.031 4\Delta t) \times 3\phi_2[(x+10)/10], \end{aligned} \quad (6)$$

由式(5)、式(6)与实验测得的定位误差值得 X 向、Z 向定位误差的拟合结果及拟合残差。

表 5 X 轴误差系数

Tab. 5 Error coefficients in X-axis

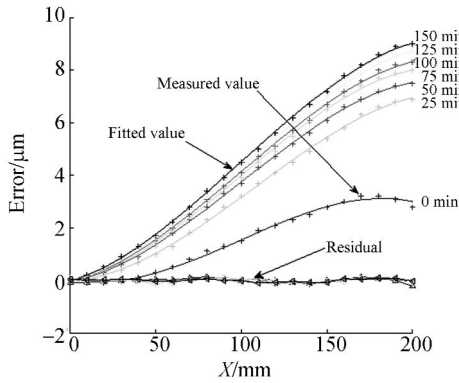
$a$	$b$	$c$	$d$	$e$
1.538 1	0.195 6	0	-0.001 7	0
3.271 4	0.392 6	0.001	-0.001 5	0
3.742 9	0.424 5	0	-0.001 6	0
3.985 7	0.450 8	0	-0.001 7	0
4.133 3	0.464 7	0	-0.001 6	0
4.319	0.485 5	0	-0.001 5	0
4.504 8	0.499 2	0	-0.001 6	0

表 4、表 5 分别列出了 Z、X 轴误差曲线表达式的系数。基于牛顿插值法由表 4 分别构造系数  $a, b, c, d, e$  与  $\Delta t$  的 6 阶均差, 可得系数  $a, b, c, d, e$  的 6 次插值多项式为:

$$\begin{aligned} a = & -59.613 8\Delta t^6 + 226.496 8\Delta t^5 - \\ & 336.516 1\Delta t^4 + 240.259 3\Delta t^3 - \\ & 78.713 4\Delta t^2 + 10.219 8\Delta t - 4.109 5, \\ b = & -13.328\Delta t^6 + 46.215 9\Delta t^5 - 62.657 2\Delta t^4 + \\ & 41.070 6\Delta t^3 - 12.599 6\Delta t^2 + 1.522 3\Delta t - \\ & 0.347 7, \\ c = & -0.362 4\Delta t^6 + 1.188 9\Delta t^5 - 1.493 9\Delta t^4 + \\ & 0.891\Delta t^3 - 0.25\Delta t^2 + 0.026 4\Delta t + 0.003 7, \\ d = & -0.226 2\Delta t^6 + 0.777 4\Delta t^5 - 1.025 8\Delta t^4 + \\ & 0.642 2\Delta t^3 - 0.186 6\Delta t^2 + 0.018 5\Delta t, \\ e = & -0.000 2. \end{aligned}$$

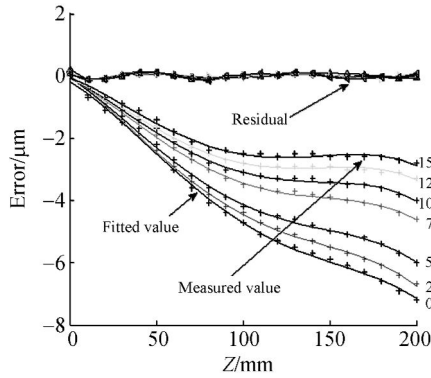
将以上系数代入式(4)中, 计算得到 Z 轴几何与热误差的综合误差模型表达式为:

如图 5 所示, 其中十字符号为实际测量值, 实线为拟合值。X 向 7 条曲线拟合残差的最小值与最大



(a) X 轴误差拟合

(a) Error fitting in X-axis



(b) Z 轴误差拟合

(b) Error fitting in Z-axis

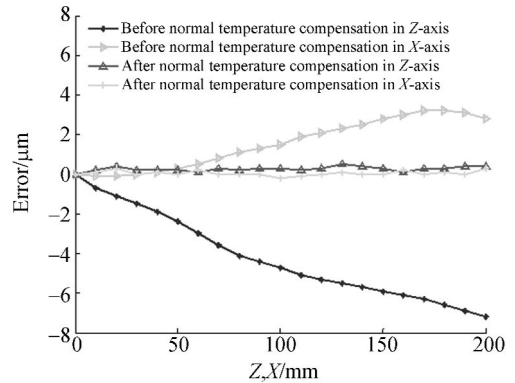
图 5 误差拟合结果

Fig. 5 Errors and its fitting results

值为 $[-0.2 \sim +0.13 \mu\text{m}]$ , Z 向 7 条曲线拟合残差的最小值与最大值为 $[-0.15 \sim +0.2 \mu\text{m}]$ , X 向、Z 向最小和最大残差的绝对值均不超过  $0.2 \mu\text{m}$ ,故建模精度较高。

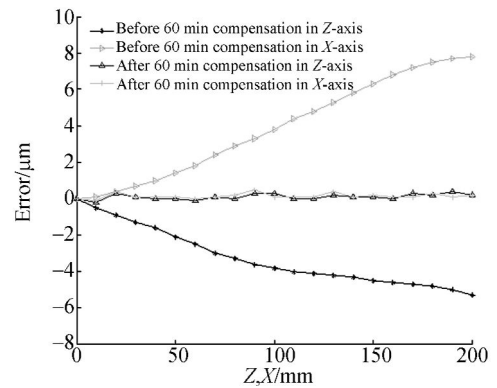
### 3 误差补偿试验验证

根据 X、Z 轴几何误差与热误差综合误差模型,分别计算得出四轴抛光平台 X、Z 轴在常温、温升(60 min)、稳态 3 种情况下的误差值,将误差值输入到四轴抛光平台的补偿控制模块中进行误差补偿试验。补偿试验结果如图 6 所示,从图 6 中可以看出四轴抛光平台在常温时 Z 轴的定位误差从  $-7.2 \mu\text{m}$  降低到  $0.5 \mu\text{m}$ , X 轴定位误差从  $2.8 \mu\text{m}$  降低到  $0.3 \mu\text{m}$ 。在温升(60 min)时,平台 Z 轴的定位误差从  $-5.3 \mu\text{m}$  降低到  $0.4 \mu\text{m}$ , X 轴的定位误差从  $7.8 \mu\text{m}$  降低到  $0.5 \mu\text{m}$ 。



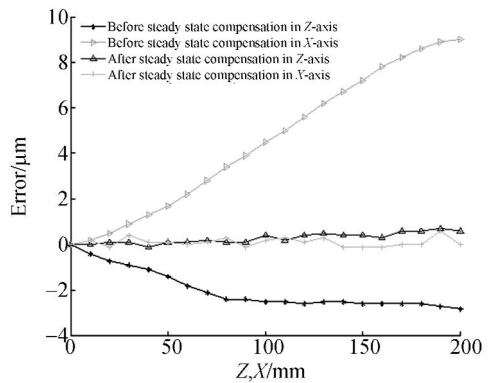
(a) 常温补偿

(a) Normal temperature compensation



(b) 温升 60 min 补偿

(b) 60 min compensation



(c) 稳态补偿

(c) Steady state compensation

图 6 误差补偿图

Fig. 6 Error compensation results

在四轴抛光平台达到热稳态时,其 Z 轴的定位误差从  $-2.8 \mu\text{m}$  降低到  $0.4 \mu\text{m}$ , X 轴的定位误差从  $9 \mu\text{m}$  降低到  $0.6 \mu\text{m}$ 。补偿实验数据证明补偿效果好,四轴抛光平台的定位误差显著降低。

## 4 结 论

本文对抛光平台 X, Z 轴在不同温度下的定位误差分别进行了重复测量与分析, 验证了不同进给速度对定位误差没有显著影响, 得到了 X, Z 轴的定位误差与温度之间的变化规律。应用正交多项式和插值算法进行了四轴抛光平台的综合误差建模, 综合模型具有计算简便、预测精度高、鲁棒性较好等优点。此模型不需要进行误差的分离

就能快速达到误差补偿目的, 易于程序设计、效率高。依据综合模型进行补偿试验, 补偿后抛光平台的定位误差值明显降低, Z 轴误差在常温、温升 (60 min)、稳态 3 种状态下分别降低了 93.05%, 92.45%, 85.71%, X 轴误差分别降低了 89.28%, 93.59%, 93.33%, 实验结果充分证明本文所提出的补偿方法不仅精度高, 而且效果显著。该方法为提高精密、超精密数控机床的加工精度和效率提供了理论依据与实践经验。

### 参考文献:

- [1] LEE E S, SUH S H, SHON J W. A compensative method for calibration of volumetric position accuracy for CNC machines[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1998, 14:43-49.
- [2] 刘又午. 多体动力学在机械工程领域的应用[J]. *中国机械工程*, 2000, 11(2):144-149.
- LIU Y W. Application of multibody dynamic in mechanical engineering[J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, 11(2):144-149. (in Chinese)
- [3] RAMESH R, MANNAN M A, POO A N. Error compensation in machine tools-a review part II: Thermal errors[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, 40(9):1257-1284.
- [4] CHEN J S, YUAN J X, NI J, et al.. Real-time compensation of time-variant volumetric errors on a machining center[J]. *J. Eng. Ind.*, 1993, 115(4):472-479.
- [5] ZHU W D, WANG ZH G, YAMAZAKI K. Machine tool component error extraction and error component error extraction and error compensation by incorporating statistical analysis[J]. *International Journal of Machine, Tools & Manufacture*, 2010, 50:798-806.
- [6] 何振亚, 傅建中, 陈子辰. 基于球杆仪检测五轴数控机床主轴的热误差[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5):1401-1408.
- HE ZH Y, FU J ZH, CHEN Z CH. Thermal error measurement of spindle for 5-axis CNC machine tool based on ball bar[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5):1401-1408. (in Chinese)
- [7] 杨建国, 范开国, 杜正春, 等. 数控机床误差补偿技
- 术[M]. 北京:机械工业出版社, 2013.
- YANG J G, FAN K G, DU ZH CH, et al.. *Real Time Error Compensation Technology for CNC Machine Tools* [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [8] RAMMESH R, MANNAN M A. Error compensation in machine tools-A review. Part II. Thermal errors[J]. *Internation Journal of Machine Tool & Manufacture*, 2000, 40(9):1257-1284.
- [9] VAN TUTTERVELT C A, PENG J. Symbiosis of modeling and sensing to improve the accuracy of workpieces in small batch machining operations[J]. *The Internation Journal of Manufacturing Technology*, 1999, 15(10):699-710.
- [10] 神经网络与模糊控制[M]. 北京:清华大学出版社, 1998.
- Neural Network and Fuzzy Control* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.
- [11] 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)
- [12] 崔卫岗, 高栋, 姚英学. 重型数控机床热误差的分离与建模[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, 44(9):51-56.
- CUI W G, GAO D, YAO Y X. Thermal error separating and modeling for heavy duty CNC machine tools[J]. *Journal of Harbing Institute of Technology*, 2012, 44(9):51-56. (in Chinese)
- [13] 杨漪, 姚国栋, 杨建国, 等. 基于主成分分析与 BP 神经网络相结合的机床主轴热漂移误差建模[J].

- 上海交通大学学报,2013,47(5):750-754.
- YANG Y, YAO G D, YANG J G, *et al.*. Thermodrifting error modeling of spindle based on combination of principal component analysis and BP neural network[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2013,47(5):750-754. (in Chinese)
- [14] 郭前建,杨建国,李永祥,等. 聚类回归分析在滚齿机热误差建模中的应用[J]. 上海交通大学学报 2008,42(7):1055-1059.
- GUO Q J, YANG J G, LI Y X, *et al.*. Applation of clustering regression analysis to thermal error modeling of gear hobbing machine[J]. *Journal of shanghai Jiaotong University*. 2008,42(7):1055-1059. (in Chinese)
- [15] 闫嘉钰,张宏涛,刘国良,等. 基于灰色综合关联度的数控机床热误差测点优化新方法及应用[J]. 四川大学学报:工程科学版,2008. 40(2):160-164.
- YAN J Y. ZHANG H T. LIU G L, *et al.*. Application of a new optimizing method for the measuring points of CNC machine thermal error based on grey systhetic degree of association[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*,2008,40(2):160-164. (in Chinese)
- [16] 王福吉,贾振元,阳江源,等. 基于动态模糊神经网络的机床时变定位误差补偿[J]. 机械工程学报, 2011,47(13):175-179.
- WANG F J, JIA ZH Y, YANG J Y, *et al.*. Time-varying position error compensation of machine tools based on dynamic fuzzy neural networks[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011,47(13):175-179. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 罗佑新,张龙庭,李敏. 灰色系统理论及其在机械工程中的应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2001.
- RUO Y X, ZHANG L T, LI M, *et al.*. *The Grey System Theory and Its Application in Mechanical Engineering*[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press,2011. (in Chinese)

## 作者简介:



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

## 通信作者:



赵继(1959-),男,吉林人,博士,教授,博士生导师,1995年于吉林工业大学获得博士学位,主要研究方向为智能精密制造。E-mail:jzhao@jlu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)