

文章编号 1004-924X(2015)06-1587-11

# 光学自由曲面研抛机床的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>, 林洁琼<sup>2</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 机电工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:**为提高光学自由曲面的加工精度,本文基于多体系统理论建立了五轴数控研抛机床综合误差模型。采用直接测量方式对各轴的移动误差和转角误差进行重复测量与分析,发现不同进给速度和测量间距对移动误差和转角误差没有显著影响。把误差数据代入综合误差模型中,得出研抛机床综合误差在  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴轴向上的移动误差和转角误差分量的变化规律,进而获知线性位移误差是影响综合误差最主要的因素。依据综合误差模型进行补偿实验,补偿后  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴的线性位移误差分别下降 88%、89% 和 84%,补偿效果显著。实验结果证明本文所提出的综合误差建模及补偿方法具有较高的精度和较好的鲁棒性。

**关键词:**光学自由曲面;五轴研抛机床;多体系统;综合误差模型;误差补偿

**中图分类号:**TQ171.68;TG659 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152306.1587

## Comprehensive error modeling and compensation for optical free-form surface polishing machine tool

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

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. Institute of Electrical and Mechanical Engineering,

Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

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

**Abstract:** To improve the machining accuracy of an optical free-form surface, an integrated error model for five-axis polishing machine tool was established based on multi-body system theory. The movement error and rotation error of every axis were measured and analyzed by direct and repetitive measurement model, and it shows that the feed speed and measurement spacing have no significant influence on the movement and rotation errors. By taking the error data into the integrated error model, the variation rule of movement and rotation errors which are the components in the three axes of  $x$ ,  $y$  and  $z$  from the integrated error of polishing machine tool was obtained. According to the above analysis, the main influence factor of integrated error is linear displacement errors. The compensation experiment was conducted based on integrated error model. The linear displacement errors of the three axes of  $x$ ,  $y$  and  $z$  have been compensated obviously and they are decreased by 88%, 89% and 84% respectively. The experiment results indicate that the integrated error model and compensation

收稿日期:2015-02-14;修订日期:2015-03-20.

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

method have high accuracy and excellent robustness.

**Key words:** optical free-form surface; five-axis polishing machine; multi-body system; comprehensive error modeling; error compensation

## 1 引言

高端精密数控机床已成为工业现代化的基础和进一步发展技术产业的支撑工具。随着制造业的高速发展和加工水平的快速提高,对加工机床的加工精度的要求也越来越高。在机床的众多误差源中,由几何和热引起的误差约占机床总误差的 65%<sup>[1-2]</sup>,而建立相应的综合误差模型需要运用多体动力学、统计回归、支持向量机等多种方法<sup>[3-4]</sup>。在实际加工过程中,数控机床刀具与工件位置之间的实际位移与编程位移之间的差值决定数控机床的加工精度<sup>[5-6]</sup>,必须对刀具与工件之间的综合误差进行补偿才能提高数控机床的加工精度<sup>[7]</sup>。近年来中外专家和学者将研究重点从三轴数控机床转向多轴(四轴及以上)数控机床,取得了众多研究成果并积累了宝贵的实践经验<sup>[8]</sup>,但是对于以气浮平台为传动方式的超精密数控机床的研究较少<sup>[9-10]</sup>。文献<sup>[11-12]</sup>基于多体理论,重点研究了气浮导轨的综合误差并识别了系统误差源。

五轴数控研抛机床以直线电机驱动气浮平台的传动方式进行加工,可加工几何形状复杂,表面加工精度较高的自由曲面,而复杂光学自由曲面在航空、航天、国防等领域都有着重要作用<sup>[13-17]</sup>。本文采用激光干涉仪等仪器对五轴数控研抛机床各轴的移动误差和转角误差进行了重复测量与对比分析。发现补偿前研抛机床不同的进给速度对移动误差、转角误差影响不大,相同速度下不同测量间距对线性位移误差(定位误差)也无较大影响,而线性位移误差是影响综合误差的最主要因素。文中基于多体系理论,建立五轴数控研抛机床综合误差模型,得出研抛机床联动和各误差元耦合情况下综合误差在  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴轴向上的移动误差和转角误差分量的变化规律,并依据综合误差模型进行了误差补偿实验。

## 2 基于多体系理论的综合误差建模

### 2.1 五轴研抛机床坐标系设定

图 1 所示为五轴研抛机床结构示意图。C 轴、B 轴相互连接固定在 Y 轴拖板上, X、Z 轴拖板相互垂直,工件安装在 C 轴上,刀具安装在主轴上。图 2 所示为研抛机床拓扑结构。

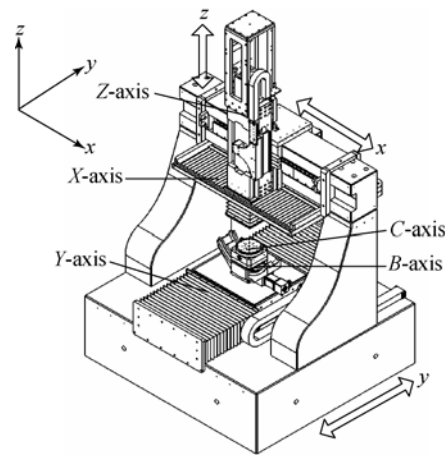


图 1 五轴研抛机床结构简图

Fig. 1 Sketch of five-axis CNC polishing machine

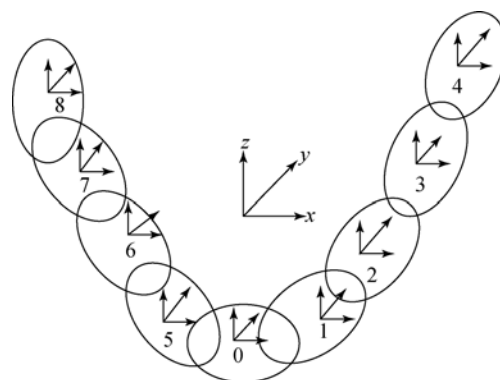


图 2 研抛机床拓扑结构

Fig. 2 Topology structure of polishing machine

文中建立了采用右手笛卡尔坐标的机床坐标系,基于多体理论<sup>[18-19]</sup>推导了机床误差综合数学模型。五轴研抛机床分为 2 条运动链,对于工件链:在床身上建立参考坐标系 0;在 Y 轴拖板上建

立坐标系 1 为低序体 1;在 B 轴转台上建立坐标系 2 为低序体 2;在 C 轴转台上建立坐标系 3 为低序体 3;在工件上建立坐标系 4 为低序体 4;对于刀具链,在 X 轴拖板上建立坐标系 5 为低序体 5;在 Z 轴拖板上建立坐标系 6 为低序体 6;在主轴上建立坐标系 7 为低序体 7;在刀具上建立坐标系 8 为低序体 8。

为使建模简单,不考虑机床几何误差中的刀具和工件安装误差以及机床受热变形,规定机床误差变换矩阵的方向从工件坐标系变换到刀具坐标系,所有误差元素包括移动误差、转角误差、垂直度误差都取正值,如果实测误差元素与规定方向相反则以负值代入综合模型。

### 2.2 误差运动转换矩阵

(1)理想(无误差)状态下相邻体间的转换矩阵。

设 X、Y、Z 拖板分别移动距离  $x$ 、 $y$ 、 $z$ ,设旋转轴 B 轴和 C 轴分别转动角度  $\theta_B$ 、 $\theta_C$ 。

工件链:从 Y 轴拖板坐标系 1 到参考坐标系 0 的齐次变换矩阵<sup>[20]</sup>为 ${}^1_0\mathbf{T}^i$ 、从 B 轴坐标系 2 到 Y 轴拖板坐标系 1 的齐次变换矩阵为 ${}^2_1\mathbf{T}^i$ 、从 C 轴坐标系 3 到 B 轴拖板坐标系 2 的齐次变换矩阵为 ${}^3_2\mathbf{T}^i$ 、从工件坐标系 4 到 C 轴坐标系 3 的齐次变换矩阵为 ${}^4_3\mathbf{T}^i$ ,理想状况下工件与 C 轴无相对转动,因此工件坐标系 4 到 C 轴坐标系 3 的齐次变换为单位矩阵,即 ${}^4_3\mathbf{T}^i = I$ 。

$${}^1_0\mathbf{T}^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$${}^4_8\mathbf{T}^i = {}^4_3\mathbf{T}^i {}^3_2\mathbf{T}^i {}^2_1\mathbf{T}^i {}^1_0\mathbf{T}^i = I$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_B \cos\theta_C & \sin\theta_C & -\cos\theta_C \sin\theta_B - \cos\theta_B \sin\theta_C & x \cos\theta_B \cos\theta_C - y \sin\theta_C - z \cos\theta_C \sin\theta_B \\ \sin\theta_B & 0 & \cos\theta_B & z \sin\theta_B \sin\theta_C - x \cos\theta_B \sin\theta_C - y \cos\theta_C \\ 0 & 0 & 0 & z \cos\theta_B + x \sin\theta_B \\ & & & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

(2)实际状态(有误差)状态下相邻体间的转换矩阵。

在实际情况下,工作台 Y 移动距离  $y$  时存在 3 个移动误差  $\delta_{yY}$ 、 $\delta_{xY}$ 、 $\delta_{zY}$ ,3 个转角误差  $\epsilon_{yY}$ 、 $\epsilon_{xY}$ 、 $\epsilon_{zY}$ ,基于小误差假设,根据齐次坐标变换原理,Y 轴拖板到参考坐标系的误差变换矩阵为:

$${}^2_1\mathbf{T}^i = \begin{bmatrix} \cos\theta_B & 0 & -\sin\theta_B & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_B & 0 & \cos\theta_B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$${}^3_2\mathbf{T}^i = \begin{bmatrix} \cos\theta_C & \sin\theta_C & 0 & 0 \\ -\sin\theta_C & \cos\theta_C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$${}^4_3\mathbf{T}^i = I. \quad (4)$$

刀具链:从参考坐标系 0 到 X 轴拖板坐标系 5 的齐次变换为 ${}^5_0\mathbf{T}^i$ 、从 X 轴拖板坐标系 5 到 Z 轴拖板坐标系 6 的齐次坐标变换为 ${}^6_5\mathbf{T}^i$ ,理想情况下主轴和 Z 轴无相对运动,因此从 Z 轴拖板坐标系 6 到主轴坐标系 7 的齐次坐标变换为单位矩阵,即 ${}^7_6\mathbf{T}^i = I$ ,刀具与主轴固连,因此从主轴坐标系 7 到刀具坐标系 8 的齐次坐标变换也为单位矩阵,即 ${}^8_7\mathbf{T}^i = I$ 。

$${}^5_0\mathbf{T}^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$${}^6_5\mathbf{T}^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$${}^7_6\mathbf{T}^i = {}^8_7\mathbf{T}^i = I. \quad (7)$$

在理想情况下,工件坐标系到刀具坐标系的齐次变换矩阵为:

$${}^1_0\mathbf{T}^i = \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_{zY} & -\epsilon_{yY} & -\delta_{xY} \\ -\epsilon_{zY} & 1 & \epsilon_{xY} & -\delta_{yY} \\ \epsilon_{yY} & -\epsilon_{xY} & 1 & -\delta_{zY} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

转轴 B 旋转  $\theta_B$  角度时存在 3 个移动误差  $\delta_{x\theta B}$ 、 $\delta_{y\theta B}$ 、 $\delta_{z\theta B}$ ,3 个转角误差  $\epsilon_{x\theta B}$ 、 $\epsilon_{y\theta B}$ 、 $\epsilon_{z\theta B}$ ,基于小误差假设,根据齐次坐标变换原理,转轴 B 到 Y

轴拖板坐标系的误差变换矩阵为:

$${}^2_1 \mathbf{T}^v = \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_{z\theta B} & -\epsilon_{y\theta B} & -\delta_{x\theta B} \\ -\epsilon_{z\theta B} & 1 & \epsilon_{x\theta B} & -\delta_{y\theta B} \\ \epsilon_{y\theta B} & -\epsilon_{x\theta B} & 1 & -\delta_{z\theta B} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

转轴 C 旋转  $\theta_C$  角度时存在 3 个移动误差  $\delta_{x\theta C}$ 、 $\delta_{y\theta C}$ 、 $\delta_{z\theta C}$ , 3 个转角误差  $\epsilon_{x\theta C}$ 、 $\epsilon_{y\theta C}$ 、 $\epsilon_{z\theta C}$ , 基于小误差假设, 根据齐次坐标变换原理, 旋转轴 C 到旋转轴 B 坐标系的误差变换矩阵为:

$${}^3_2 \mathbf{T}^v = \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_{z\theta C} & -\epsilon_{y\theta C} & -\delta_{x\theta C} \\ -\epsilon_{z\theta C} & 1 & \epsilon_{x\theta C} & -\delta_{y\theta C} \\ \epsilon_{y\theta C} & -\epsilon_{x\theta C} & 1 & -\delta_{z\theta C} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

工作台 X 移动距离  $x$  时存在 3 个移动误差  $\delta_{xX}$ 、 $\delta_{yX}$ 、 $\delta_{zX}$ , 3 个转角误差  $\epsilon_{xX}$ 、 $\epsilon_{yX}$ 、 $\epsilon_{zX}$ , 1 个垂直度误差  $S_{yX}$ , 基于小误差假设, 根据齐次坐标变换原理, 参考坐标系到 X 轴拖板的误差变换矩阵为:

$${}^4_8 \mathbf{T} = {}^4_3 \mathbf{T} {}^3_2 \mathbf{T} {}^2_1 \mathbf{T} {}^1_0 \mathbf{T} {}^0_5 \mathbf{T} {}^5_6 \mathbf{T} {}^6_7 \mathbf{T} {}^7_8 \mathbf{T} {}^8_8 \mathbf{T}^v. \quad (14)$$

在实际状态下, 工件坐标系 4 到刀具坐标系 8 的变换矩阵可看成是在理想运动矩阵基础上叠加一个误差运动矩阵  ${}^4_8 \mathbf{E}$ , 因此有:

$${}^4_8 \mathbf{T} = {}^4_8 \mathbf{T} {}^4_8 \mathbf{E}. \quad (15)$$

基于小误差假设, 工件坐标系到刀具坐标系的误差运动变换矩阵  ${}^4_8 \mathbf{E}$  可假设为:

$${}^4_8 \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\epsilon_z & \Delta\epsilon_y & \Delta x \\ \Delta\epsilon_z & 1 & -\Delta\epsilon_x & \Delta y \\ -\Delta\epsilon_y & \Delta\epsilon_x & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中:  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  为刀具实际位移点相对理想位移点的移动误差;  $\Delta\epsilon_x$ 、 $\Delta\epsilon_y$ 、 $\Delta\epsilon_z$  为刀具实际位置相对理想位置的转角误差。

综上所述, 假设不考虑二阶以及二阶以上小量, 可得五轴数控研抛机床工件坐标系到刀具坐标系的误差运动空间分量为:

$$\begin{aligned} \Delta x = & \delta_{xX} - \delta_{x\theta B} - \epsilon_{y\theta C} - \delta_{xY} + \delta_{xZ} - \\ & z(\epsilon_{z\theta C} + \epsilon_{z\theta B} - \epsilon_{yX} + \epsilon_{yY} + S_{yZ}) - \\ & y(\epsilon_{z\theta C} \cos \theta_B - \epsilon_{z\theta C} \sin \theta_B) - \delta_{z\theta C} \cos \theta_B - \delta_{z\theta C} \sin \theta_B, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Delta y = & \delta_{yX} - \delta_{y\theta C} - \delta_{y\theta B} + \delta_{yY} + \delta_{yZ} - x(\epsilon_{z\theta B} - \epsilon_{zY} + S_{yX}) - \\ & z(\epsilon_{z\theta B} + \epsilon_{zX} - \epsilon_{zY} + S_{yZ} + \epsilon_{z\theta C} \cos \theta_B - \epsilon_{z\theta C} \sin \theta_B) - \epsilon_{z\theta C} \sin \theta_B, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Delta z = & \delta_{zX} - \delta_{z\theta B} - \delta_{zY} + \delta_{zZ} + x(\epsilon_{y\theta B} + \epsilon_{y\theta C} + \epsilon_{yY}) + \\ & y(\epsilon_{y\theta B} + \epsilon_{y\theta C} \cos \theta_B + \epsilon_{y\theta C} \sin \theta_B) - \delta_{z\theta C} \cos \theta_B + \delta_{z\theta C} \sin \theta_B, \end{aligned} \quad (19)$$

$${}^0_5 \mathbf{T}^v = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{zX} & \epsilon_{yX} & \delta_{xX} \\ \epsilon_{zX} & 1 & -\epsilon_{xX} & \delta_{yX} - xS_{yX} \\ -\epsilon_{yX} & \epsilon_{xX} & 1 & \delta_{zX} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

工作台 Z 移动距离  $z$  时存在 3 个移动误差  $\delta_{xZ}$ 、 $\delta_{yZ}$ 、 $\delta_{zZ}$ , 3 个转角误差  $\epsilon_{xZ}$ 、 $\epsilon_{yZ}$ 、 $\epsilon_{zZ}$ , 2 个垂直度误差  $S_{xZ}$ 、 $S_{yZ}$ , 基于小误差假设, 根据齐次坐标变换原理, 则坐标系 X 到坐标系 Z 的误差变换矩阵为:

$${}^5_6 \mathbf{T}^v = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{zZ} & \epsilon_{yZ} & \delta_{xZ} - zS_{xZ} \\ \epsilon_{zZ} & 1 & -\epsilon_{xZ} & \delta_{yZ} - zS_{yZ} \\ -\epsilon_{yZ} & \epsilon_{xZ} & 1 & \delta_{zZ} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

在实际情况下, 当机床分别沿 X、Y、Z 方向移动  $x$ 、 $y$ 、 $z$  距离时, 转轴 B、C 分别转动角度  $\theta_B$ 、 $\theta_C$  时, 工件坐标系到刀具坐标系的齐次变换矩阵为:

$$\Delta\epsilon_x = \epsilon_{xX} - \epsilon_{y\theta B} - \epsilon_{xY} + \epsilon_{xZ} - \epsilon_{z\theta C} \cos \theta_B + \epsilon_{z\theta C} \sin \theta_B, \quad (20)$$

$$\Delta\epsilon_y = \epsilon_{yX} - \epsilon_{y\theta C} - \epsilon_{y\theta B} - \epsilon_{yY} + \epsilon_{yZ}, \quad (21)$$

$$\Delta\epsilon_z = \epsilon_{zX} - \epsilon_{z\theta B} - \epsilon_{zY} + \epsilon_{zZ} - \epsilon_{z\theta C} \cos \theta_B + \epsilon_{z\theta C} \sin \theta_B. \quad (22)$$

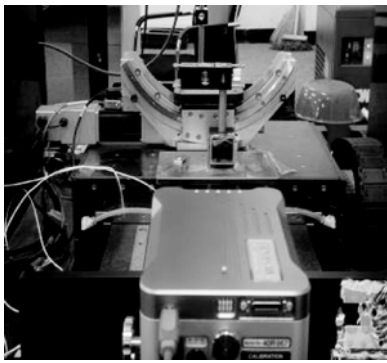
当两个旋转轴不动, 即  $\theta_B = 0$ 、 $\theta_C = 0$ , 由式 (17)~(22) 可得 X 轴和 Y 轴联动工况下各轴的移动误差和转角误差分量为:

$$\begin{cases} \Delta x = \delta_{xX} - \delta_{xY} \\ \Delta y = \delta_{yX} + \delta_{yY} + \epsilon_{zY}x - S_{yX}x \\ \Delta z = \delta_{zX} - \delta_{zY} + \epsilon_{yY}x \\ \Delta\epsilon_x = \epsilon_{xX} - \epsilon_{xY} \\ \Delta\epsilon_y = \epsilon_{yX} - \epsilon_{yY} \\ \Delta\epsilon_z = \epsilon_{zX} - \epsilon_{zY} \end{cases}. \quad (23)$$

### 3 研抛机床误差检测和综合误差分析

#### 3.1 实验设计

利用 Renishaw 公司的 XL-80 激光干涉仪、千分表等仪器在空载工况下对各个轴的单项几何误差和 2 个旋转台的角度线性位移误差进行测量与分析, 其它单项误差假设为 0。图 3 所示为实验现场照片。



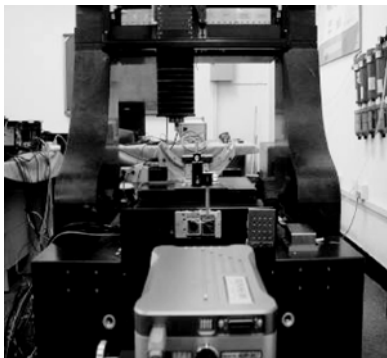
(a)线性位移误差测量

(a) Measurement of linear displacement error



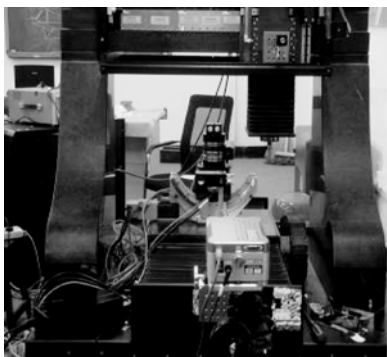
(b)直线度误差测量

(b) Measurement of straightness error



(c)角度误差测量

(c) Measurement of angle error



(d) C 转轴误差测量

(d) Measurement of C rotational axis error

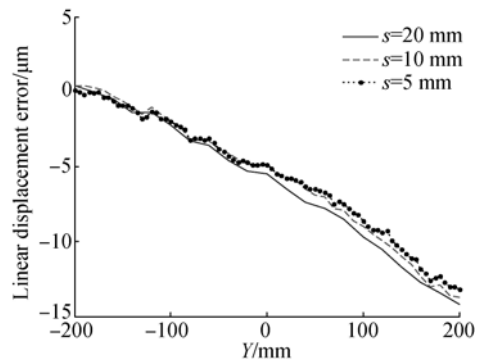
图 3 实验现场照片

Fig. 3 Photos of experimental scene

### 3.2 误差测量与数据分析

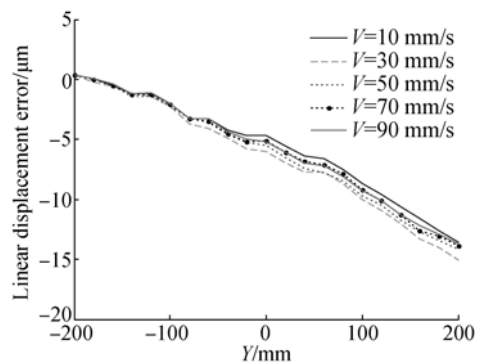
依据 ISO230-2 标准进行误差测量与数据分析。图 4 所示为 Y 轴在相同进给速度下不同测量间距的测量结果以及不同进给速度情况下 Y 轴各单项几何误差的测量结果。从图 4 中可以看出,机床的不同进给速度对 Y 轴的移动误差、转角误差影响不大,相同进给速度下不同测量间距对 Y 轴线性位移误差也无显著影响。

图 5 所示为 X 轴、Y 轴、Z 轴的各项几何误差以及 2 个旋转轴 B、C 的角度线性位移误差测量结果。由图 5 可以看出,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的线性位移误差大于其直线度误差和转角误差。其中  $x$  轴的线性位移误差明显大于  $y$ 、 $z$  轴的线性位移误差,  $z$  轴方向上的 2 个直线度误差相比  $x$ 、 $y$  轴略大,角度误差对  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴影响较小。



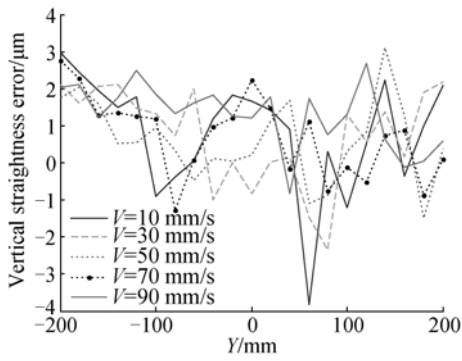
(a)不同测量间距线性位移误差测量

(a) Measurement of linear displacement error with different intervals



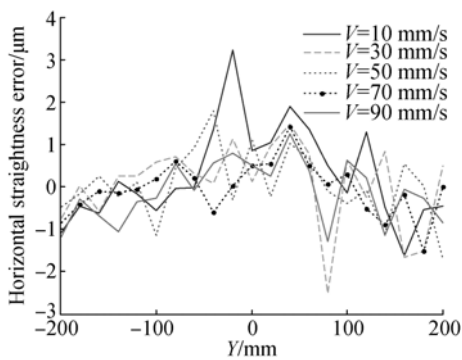
(b)线性位移误差测量

(b) Measurement of linear displacement error



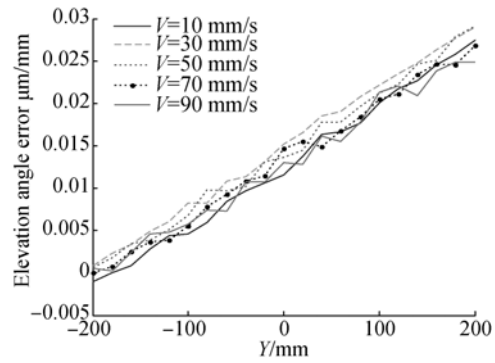
(c) 竖直直线度误差测量

(c) Measurement of vertical straightness error



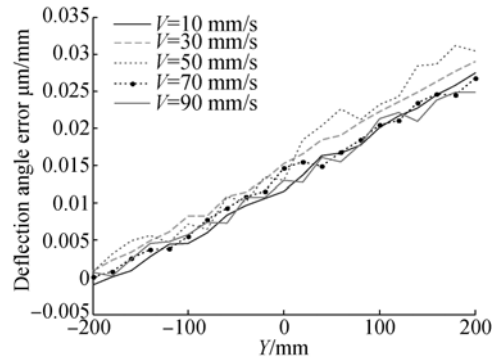
(d) 水平直线度误差测量

(d) Measurement of horizontal straightness error



(e) 俯仰角度误差测量

(e) Measurement of elevation angle error

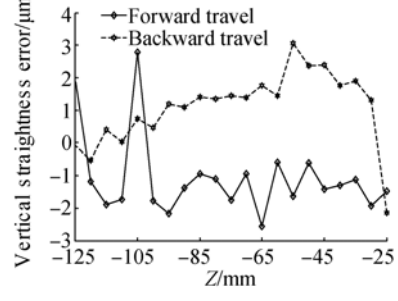
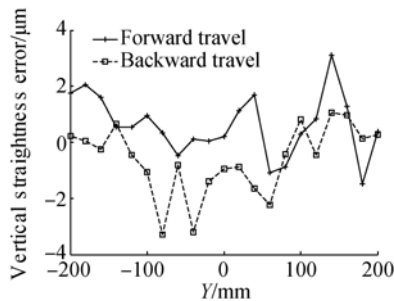
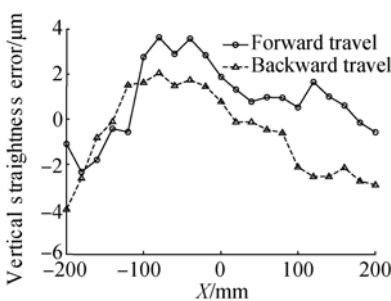
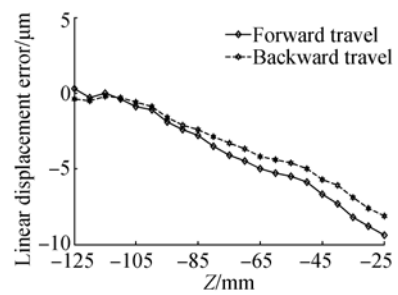
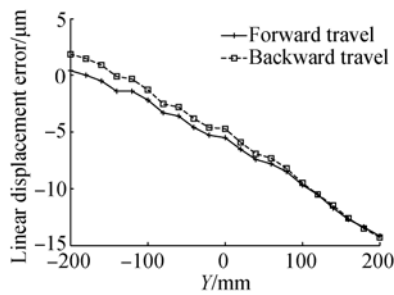
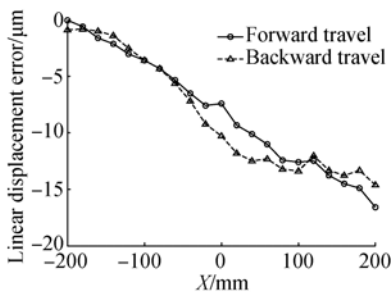


(f) 偏摆角度误差测量

(f) Measurement of deflection angle error

图 4 不同进给速度与测量间距下 Y 轴各项误差

Fig. 4 Various single errors of Y-axis under different velocities and intervals



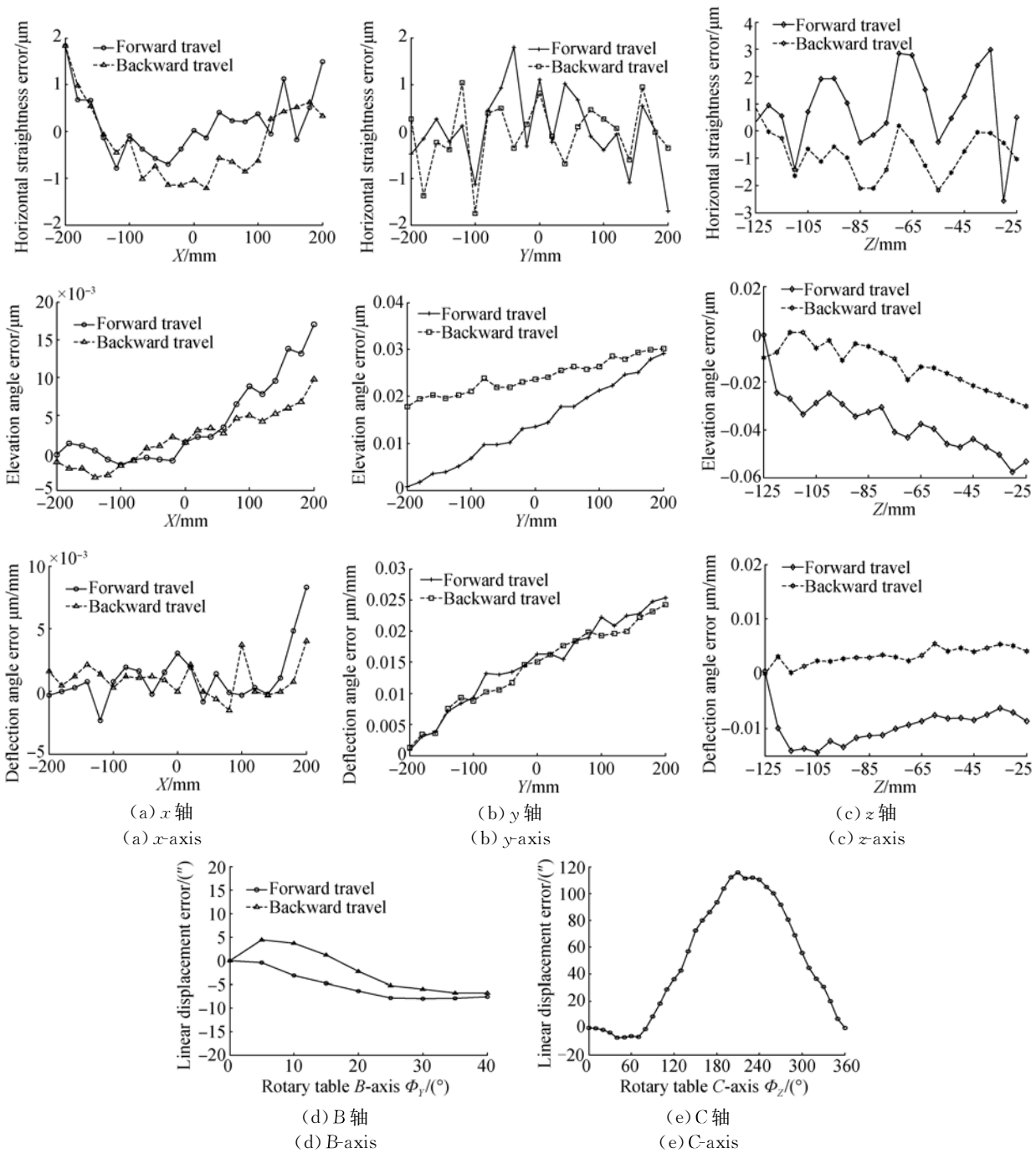


图 5 五轴研抛机床各项几何误差

Fig. 5 Various geometric errors of five-axis and polishing machine tools

### 3.3 研抛机床综合误差分析

在测量与分析各单项误差的基础上,利用综合误差模型分析空间综合误差,将误差数据代入综合误差模型中,得到了研抛机床 x 轴和 y 轴联动和各误差元耦合情况下综合误差在 x 轴、y 轴和 z 轴轴

向上的移动误差和转角误差分量的变化规律,如图 6 所示。 $\Delta x$  在 y 轴行程内有小幅度变化,随 x 轴行程有较大变化且在 x 轴行程内沿负方向呈线性增大趋势。 $\Delta y$  随 x 轴有较小波动,随 y 轴有较大波动且在 y 轴行程内沿负方面呈线性增大。

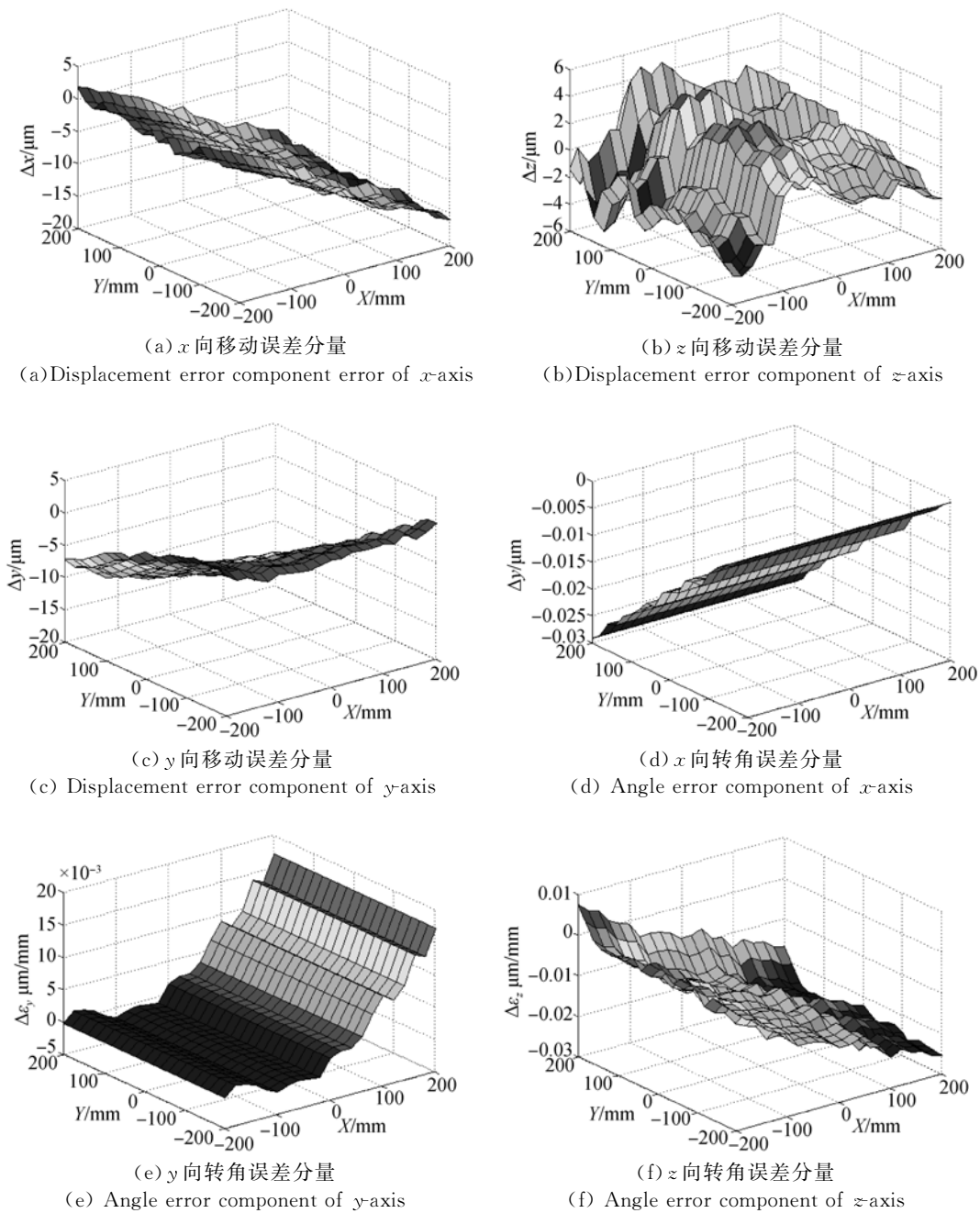


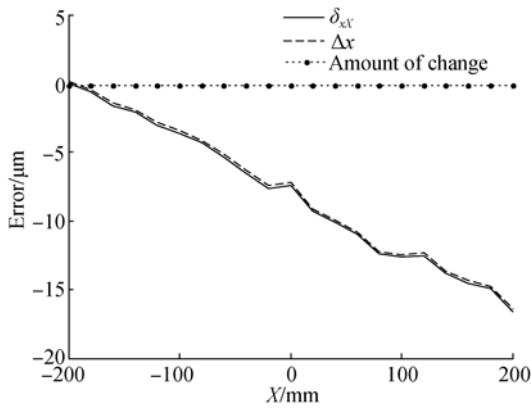
图 6 五轴研抛机床综合误差分析

Fig. 6 Components of volumetric errors for five-axis polishing machine tools

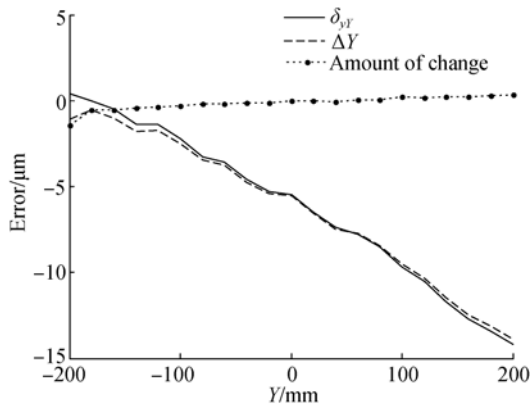
通过进一步分析,如图 7 所示,综合误差  $\Delta x$  在  $y = -180 \text{ mm}$  处的变化趋势与  $x$  轴的线性位移误差  $\delta_{xX}$  比较接近,综合误差值  $\Delta x$  略小于  $\delta_{xX}$ , 最大改变量为  $0.2 \text{ }\mu\text{m}$  左右。综合误差  $\Delta y$  在  $x = -40 \text{ mm}$  处的变化趋势与  $y$  轴的线性位移误差  $\delta_{yY}$  较为接近,综合误差值  $\Delta y$  较  $\delta_{yY}$  有微量减少, 最大改变量为  $1.3 \text{ }\mu\text{m}$  左右。可见,线性位移误差是综合误差最主要的影响因素。

在  $z$  轴没有进给的情况下,从图 8 中分析得出,相对其它误差  $x$  轴的直线度误差对  $z$  向影响较大,误差值随  $x$  向的变化趋势与  $x$  轴方向上的竖直直线度误差  $\delta_{zX}$  变化规律趋于一致,从图 6、8 中可以看出,直线度误差和角度误差对综合误差影响较小,但对于超精密加工是不可忽略的因素,尤其是  $x$  轴方向上的竖直直线度误差  $\delta_{zX}$  更是超精密加工中不可忽略的因素。





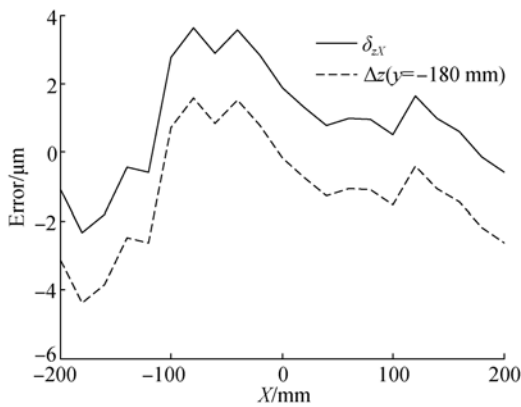
(a)  $\Delta x$  与  $\delta_{xX}$  的比较  
 (a) Comparison of  $\Delta x$  with  $\delta_{xX}$



(b)  $\Delta y$  与  $\delta_{yY}$  的比较  
 (b) Comparison of  $\Delta y$  with  $\delta_{yY}$

图 7 综合误差分量与线性位移误差比较

Fig. 7 Comparison of comprehensive error component with linear displacement error



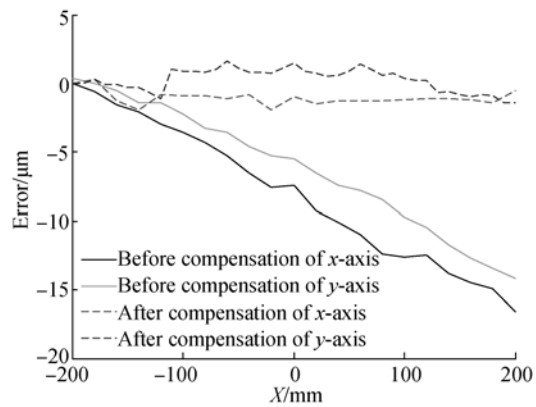
(a)  $\Delta z$  与  $\delta_{zX}$  的比较  
 (a) Comparison of  $\Delta z$  with  $\delta_{zX}$

图 8 综合误差分量与垂直直线度比较

Fig. 8 Comparison of comprehensive error component with vertical linearity error

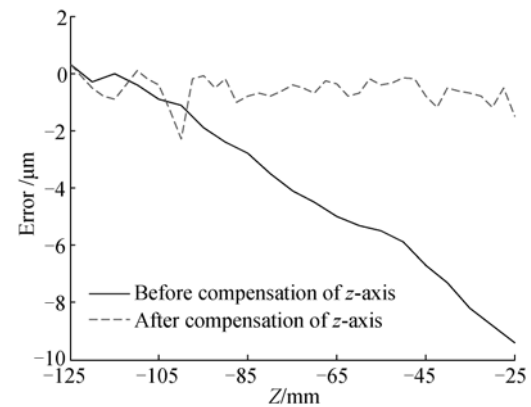
#### 4 研抛机床误差补偿与分析

在对五轴数控研抛机床综合误差建模的基础上进行误差补偿实验,图 9 中以实线绘制的为误差补偿前行程为  $-200 \sim 200$  mm,间距为 20 mm 的各轴线性位移误差曲线,以虚线绘制的是误差补偿后行程为  $-200 \sim 200$  mm,间距为 10 mm 的各轴线性位移误差曲线。补偿后  $x$  轴的线性位移误差从  $-16.6 \sim 0 \mu\text{m}$  降低到  $-1.9 \sim 0.3 \mu\text{m}$ ,  $y$  轴线性位移误差从  $-14.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$  降低到  $-1.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ ,  $z$  轴误差从  $-9.4 \sim 0.3 \mu\text{m}$  降低到  $-1.5 \sim 0.2 \mu\text{m}$ ,补偿效果明显。



(a)  $x$  和  $y$  轴误差补偿图

(a) Error compensation figure of  $x, y$ -axis



(b)  $z$  轴误差补偿图

(b) Error compensation figure of  $z$ -axis

图 9 误差补偿图

Fig. 9 Error compensation figure

#### 5 结 论

采用激光干涉仪对五轴研抛机床各轴的移动

误差和转角误差分别进行测量与分析。发现机床的进给速度和测量间距值的变化对基于直线电机驱动的以气浮方式传动的研抛机床各轴的移动误差和转角误差没有明显的影响。得出了综合误差在  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴轴向上的移动误差和转角误差分量的变化规律, 直线度误差和转角误差对综合误差影响较小, 线性位移误差是影响综合误差最主要的因素。竖直直线度误差在超精密加工中

也是不可忽略的因素。误差补偿后各轴的线性位移误差显著降低,  $x$  轴误差降低了 88%、 $y$  轴误差降低了 89%、 $z$  轴误差降低了 84%。实验结果证明五轴数控研抛机床综合误差模型正确有效, 模型简单且与机床运动相对独立, 综合误差建模及补偿方法具有较高的精度和较好的鲁棒性。本文工作为提高光学自由曲面的加工精度提供了理论依据和实践经验。

### 参考文献:

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] 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 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)
- [5] 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)
- [6] 李锐钢. 基于激光跟踪仪标定五轴数控加工中心主轴 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 477-483.  
LI R G. Calibration of tool spindle for 5-axis CNC machine using laser tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 477-483. (in Chinese)
- [7] 任永强, 杨建国, 窦小龙. 五轴数控机床综合误差建模分析[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(1): 70-75.  
REN Y Q, YANG J G, DOU X L. Synthesis error modeling analysis for 5-axis NC machine tool [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2003, 37(1): 70-75. (in Chinese)
- [8] 徐秀玲, 王红亮. 提高五轴数控机床联动精度补偿方法研究[J]. 机械设计与制造, 2012(4): 179-181.  
XU X L, WANG H L. Research compensation method for improving accuracy of 5-axis CNC [J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2012(4): 179-181. (in Chinese)
- [9] ZHANG Y, YANG J G, ZHANG K. Geometric error measurement and compensation for the rotary table of five-axis machine tool with double ballbar [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 65(14): 275-281.
- [10] 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.
- [11] 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)
- [12] 赵帼娟, 张雷, 卢磊, 等. 四轴抛光平台综合误差建模及分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2014, 44

- (6):1676-1683.
- ZHAO G J, ZHAN L, LU L, *et al.*. Modeling and analysis of the volumetric errors of four-axis polishing platform [J]. *Journal of jinlin University: Engineering and Technology Edition*, 2014, 44(6):. : 1676-1683. (in Chinese)
- [13] 李荣彬, 张志辉, 杜雪, 等. 自由曲面光学元件的设计加工及面形测量的集成制造技术[J]. *机械工程学报*:2010, 46(11):137-148.
- LI R B, ZHANG ZH H, DU X, *et al.*. Integrated manufacturing technology for design machining and measurement of freeform optics [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(11): 137-148. (in Chinese)
- [14] KONG L B, CHENG C F, TO S, *et al.*. A kinematics and experimental analysis of form error compensation in ultra-precision machining [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 2008, 48(12-13):1408-1419.
- [15] 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 jinlin University: Engineering and Technology Edition*, 2012, 42(2): 388-391. (in Chinese)
- [16] 李岩, 范大鹏. 基于多体系运动学理论的三轴转台装配误差建模分析[J]. *兵工学报*, 2007, 28(8): 981-987.
- LI Y, FAN D P. Error analysis of three-axis turntable aimed at assembling based on multi-body kinematics theory [J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(8):981-987. (in Chinese)
- [17] CHOW J H, ZHONG Z W, LIN W, *et al.*. A study of thermal deformation in the carriage of a permanent-magnet direct drive linear motor stage [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 48:89-96.
- [18] 杨建国, 范开国, 杜正春, 等. 数控机床误差实时补偿技术[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. (in Chinese)
- [19] WANG SH X, YUN J T, ZHANG ZH F, *et al.*. Modeling and compensation technique for the geometric errors of five-axis CNC machine tools [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 16(2):197-201.
- [20] 乘时平. 多轴数控机床精度建模与误差补偿方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2002.
- SU SH P. *Study on the methods of precision modeling and error compensation for multi-axis CNC machine tools*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002. (in Chinese)

## 作者简介:



张恩忠(1971—),男,内蒙古人,博士研究生,副教授,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

## 通讯简介:



赵继(1959—),男,吉林人,博士,教授,博士生导师。1995年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)