

文章编号 1004-924X(2015)增-0348-07

复合数控磨床螺纹成形磨削误差辨识及补偿

陈东菊,董丽华 杨 智 范晋伟

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院,北京 100124)

摘要:建立了复合数控磨床的精密加工方程,用于提高复合数控磨床的加工精度。开发了相应补偿软件,对复合数控磨床的运动方程的建模、误差辨识与补偿分析等进行了研究。首先,基于多体系统运动学理论对复合数控磨床结构进行分析建模,建立机床运动的精密加工方程。然后,利用激光干涉仪对复合数控磨床运动模型中所涉及的所有误差参数进行辨识。最后,应用螺纹磨削加工辅助软件进行螺纹磨削加工仿真和实验,验证几何误差补偿技术理论的正确和可操作性。仿真结果以及实验表明: X 轴向误差减小比例为 66.55%, Z 轴向误差减小比例为 66.65%, C 轴向误差减小比例为 66.35%,综合考虑三轴误差减小比例为 66.51%。实验表明将误差补偿技术成功地延伸到螺纹加工领域,明显提高了复合数控机床的加工精度。

关键词:螺纹磨削;数控复合磨床;误差补偿;加工精度

中图分类号: TG580.213 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0348

Geometric error identification and compensation of complex CNC grinding machine

CHEN Dong-ju, DONG Li-hua, YANG Zhi, FAN Jin-wei

(College of Mechanical Engineering & Applied Electronics Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

* Corresponding author, E-mail: djchen@bjut.edu.cn

Abstract: A complex Computed Numerical Control(CNC) grinding precision machining equation was established to improve the machining precision of the composite CNC grinding machine. A software for the corresponding compensation was developed, and the precision modeling, error identification, error compensation, etc. for the complex CNC grinding machine were researched. Firstly, the multi-body system modeling theory was used to analyze the CNC thread grinder modeling. The precision machining equation of CNC grinding machine was established. Then all the composite errors of CNC grinding machine were identified by using a laser interferometer. Finally, the error before and after error compensation were forecasted and the feasibility of the theory for geometric error compensation was finally verified. The simulation results show that errors have been decreased by 66.55%, 66.65% and 66.35% in X axis, Z axis and C axis, respectively, and the integrated error for three axis has reduced by 66.51%. It concludes that the error compensation technology can be used in thread process-

收稿日期:2015-04-15;修订日期:2015-05-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51105005, No. 51475010);北京市自然科学基金资助项目(No. 3142005)

ing fields and can improve the machining accuracy of the CNC grinding machines.

Key words: thread grinding; CNC compound grinding machine error compensation; machining accuracy

1 引言

数控磨床是制造工业的基础设备,工业生产中的各种机械零部件,都要通过螺纹联接组装成整台设备和进行机械传动。因此,制造业中的关键零部件螺纹的制造工艺水平直接影响我国工业制造水平。误差补偿法是提高机床加工精度的主要方法。误差补偿法是一种软件补偿方法,是目前应用最经济有效、最广泛的误差修正方法^[1],它通过前馈控制技术修正机械系统误差,分析加工误差来源,建立误差数学模型,通过误差修正来提高机械加工精度。

为研究方便,通常在机床误差分析之前,先把机床结构抽象成数学模型,国内外在建模方面也都做了较深入的研究,针对误差补偿技术,应用比较广泛的是基于多体系统运动学理论对数控机床误差建模。在国内,林洁琼^[2]根据多体系统运动学理论对多轴机床运动空间的几何误差进行建模,在误差补偿试验中验证了补偿方法的可行性。1998年,Eung-Suk^[3]等测量了三坐标铣床 21 项误差,采用误差合成法建立空间误差模型,通过误差补偿,提高了机床的精度。

随着数控机床的建模技术不断走向成熟,各国学者对机床误差辨识也做了大量研究。1997年,Liang JC^[4]等人研发了车削中心综合误差补偿系统,修正机床几何、热、切削力等因素带来的误差影响,加工工件精度提高 5 倍。在对数控机床几何误差补偿以及基于切削力在线辨识的智能自适应控制的研究方面,华中科技大学取得了较好成果^[5]。

综合分析当前国内外的研究水平,误差补偿技术的应用还存在以下几方面的问题^[6]:(1)误差补偿技术的建模过程比较繁琐,针对不同的机床需要建立不同的空间误差模型,缺少一种通用建模方式。(2)误差测量和辨识技术缺乏通用性,能够快速辨识机床误差的方法较少。(3)国内误差补偿技术在企业的应用推广不够,基本还停留在高校和研究单位的应用中。

本文以北京第二机床厂生产的 B2-K3032 复

合数控磨床为研究对象,把其看作一多体系统,以运用多体系统理论建立复合数控磨床的几何误差模型,对机床的运动轴的几何误差参数进行辨识,基于螺纹磨削加工的辅助软件,对螺纹磨削进行仿真和加工实验,通过对数控磨床几何误差补偿技术的综合研究,验证几何误差补偿技术理论的正确及可操作性。

2 机床模型建立

2.1 复合数控磨床结构

对 B2-K3032 复合数控进行结构分析,该机床能实现三轴联动,C-X 联动。机床回转轴上的待加工工件的运动方向为 Z 轴方向,绕 Z 轴旋转的头架带动工件的运动,运动轴为 C 轴,轴的下方高速旋转砂轮的前后运动方向为 X 轴,各个部件之间只有单自由度的相对运动。

为方便建立机床模型展示机床各部件之间的位置关系,设定床身体、工作台、定位盘体坐标系分别为 O_0 坐标系、 O_1 坐标、 O_2 坐标系;工件体、砂轮滑台、砂轮体坐标系分别为 O_3 坐标系、 O_4 坐标系和 O_5 坐标系。

2.2 运动方程

B2-K3032 复合数控磨床结构有 2 个分支,分别是“工件-床身”运动链和“砂轮-床身”运动链^[7],应用多体系统理论建立机床运动方程。

在“工件-机床”链中,假定 $\{r_w\}$ 为工件坐标系中工件上的任意一点,则在机床坐标系中此点的表达式 $\{p_w\}$ 为:

$$\{p_w\} = \mathbf{T}_{01p} \mathbf{T}_{01pe} \mathbf{T}_{01s} \mathbf{T}_{01se} \mathbf{T}_{12p} \mathbf{T}_{12pe} \mathbf{T}_{12s} \mathbf{T}_{12se} \mathbf{T}_{23p} \mathbf{T}_{23pe} \mathbf{T}_{23s} \mathbf{T}_{23se} \{r_w\}, \quad (1)$$

在“刀具-机床”链中,假定 $\{r_t\}$ 为刀具坐标系中刀具上的任意一点,则在机床坐标系中此点的表达式为:

$$\{p_t\} = \mathbf{T}_{04p} \mathbf{T}_{04pe} \mathbf{T}_{04s} \mathbf{T}_{04se} \mathbf{T}_{45p} \mathbf{T}_{45pe} \mathbf{T}_{45s} \mathbf{T}_{45se} \{r_t\}, \quad (2)$$

根据数控机床坐标系设定规则, \mathbf{T}_{23p} 、 \mathbf{T}_{45pe} 、 \mathbf{T}_{23s} 、 \mathbf{T}_{23se} 、 \mathbf{T}_{45p} 、 \mathbf{T}_{45pe} 、 \mathbf{T}_{45s} 、 \mathbf{T}_{45se} 为单位矩阵。设 $\{r_w\} = \{\omega_x, \omega_y, \omega_z, 1\}^T$, $\{r_t\} = \{t_x, t_y, t_z, 1\}^T$, 将其带入 B2-K3032 复合数控磨

床的精密加工方程 $\{p_w\} = \{p_i\}$, 并且略到单位矩阵, 得:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(z) & \varepsilon_y(z) & \delta_x(z) \\ \varepsilon_z(z) & 1 & -\varepsilon_x(z) & \delta_y(z) \\ -\varepsilon_y(z) & \varepsilon_x(z) & 1 & \delta_z(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & q_{2x} \\ 0 & 1 & 0 & q_{2y} \\ 0 & 0 & 1 & q_{2z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \varepsilon_{xz} & 0 \\ 0 & 1 & -\varepsilon_{yx} & 0 \\ -\varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yx} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(\gamma) & \varepsilon_y(\gamma) & \delta_x(\gamma) \\ \varepsilon_z(\gamma) & 1 & -\varepsilon_x(\gamma) & \delta_y(\gamma) \\ -\varepsilon_y(\gamma) & \varepsilon_x(\gamma) & 1 & \delta_z(\gamma) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & q_{4x} \\ 0 & 1 & 0 & q_{4y} \\ 0 & 0 & 1 & q_{4z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \varepsilon_{xz} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\varepsilon_{xz} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(x) & \varepsilon_y(x) & \delta_x(x) \\ \varepsilon_z(x) & 1 & -\varepsilon_x(x) & \delta_y(x) \\ -\varepsilon_y(x) & \varepsilon_x(x) & 1 & \delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: q_{2x}, q_{2y}, q_{2z} 为在机床坐标系中主轴坐标系的位置; q_{4x}, q_{4y}, q_{4z} 为在机床坐标系中砂轮坐标系的位置; w_x, w_y, w_z 为在工件坐标系中螺纹轴的磨削点的位置; t_x, t_y, t_z 为砂轮结构参数。

式(3)为 B2-K3032 复合数控磨床的精密加工方程, 以此为基础展开对机床的几何误差补偿问题的研究。

3 机床误差参数辨识

3.1 平动轴误差辨识

B2-K3032 复合数控磨床存在 2 个平动轴(X 轴和 Z 轴), 在运动过程中每个平动轴都会产生 3 个线位移误差和 3 个角位移误差, 平动轴误差采

用九线法进行辨识^[7]。

3.2 不垂直度误差辨识

3 项垂直度误差采用双频激光干涉仪测量三轴直线度的方法来计算, 以 ε_{xy} 的计算为例, 如图 1 所示。

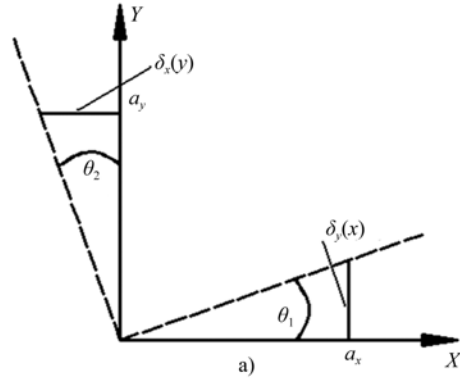


图 1 误差 ε_{xy} 的计算
Fig. 1 Calculate ε_{xy}

由 $\theta_1 = \arctan \frac{\delta_y(x)}{a_x}$ 和 $\theta_2 = \arctan \frac{\delta_x(y)}{a_y}$, 得到:

$$\varepsilon_{xy} = \theta_2 - \theta_1, \quad (4)$$

同理得到:

$$\varepsilon_{yz} = \theta_2' - \theta_1', \quad (5)$$

$$\varepsilon_{zx} = \theta_2'' - \theta_1'', \quad (6)$$

3.3 回转轴误差辨识

当回转轴绕 X 轴转动, 中心线上轴向跳动误差就等于 $\delta_x(\alpha)$, 因此, 只需测出回转中心位置的轴向跳动量。

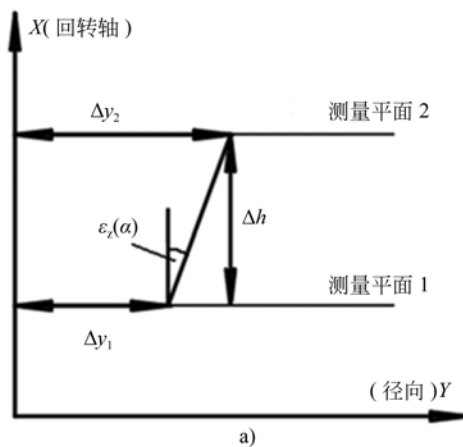


图 2 Z 轴径向跳动误差
Fig. 2 Sketch map on radial flop of Z-axes

如图 2 所示, Y 向的径向误差 Δy_1 、 Δy_2 分别在 2 个平面内测量,从而绕 Z 轴的转动误差 $\epsilon_z(\alpha)$ 即可求出。同理,绕 Y 轴的转动误差 $\epsilon_y(\alpha)$ 即得:

$$\epsilon_z(\alpha) = \arctan\left(\frac{\Delta y_2 - \Delta y_1}{\Delta h}\right), \quad (7)$$

$$\epsilon_y(\alpha) = \arctan\left(\frac{\Delta z_2 - \Delta z_1}{\Delta h}\right), \quad (8)$$

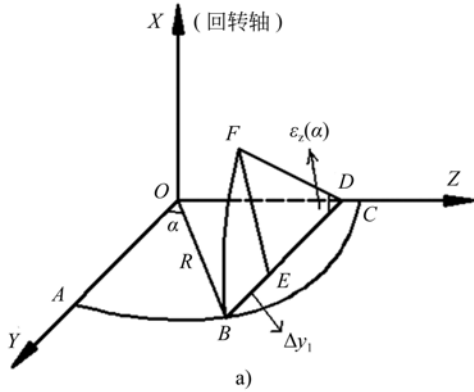


图 3 Y 向径向跳动误差
Fig. 3 Radial error of Y-axes

由图 3 知当旋转轴运动时, Y 向径向跳动误差为 $\Delta y_1 = \delta_y(\alpha) + \Delta y_1'$, 即得:

$$\delta_y(\alpha) = \Delta y_1 - R \cos \alpha [1 - \cos \epsilon_z(\alpha)], \quad (9)$$

同理,可以求出 Z 向的径向跳动误差 $\delta_z(\alpha)$, 即:

$$\delta_z(\alpha) = \Delta z_1 - R \cos \alpha (1 - \cos \epsilon_y(\alpha)), \quad (10)$$

设总回转误差测量值的表达式为 $\Delta \alpha = \Delta \alpha_1 + \Delta \alpha_2 + \Delta \alpha_3 + \Delta \alpha_4 + \Delta \alpha_5$, 其中 $\Delta \alpha_3 = \epsilon_x(\alpha)$ 。由 $\epsilon_y(\alpha)$ 引起的误差,由几何关系得到:

$$\Delta \alpha_4 = \alpha - \arctan(\tan \alpha \cdot \cos \epsilon_y(\alpha)). \quad (11)$$

同理可得:

$$\Delta \alpha_5 = 90^\circ - \alpha - \arctan(\cot \alpha \cdot \cos \epsilon_y(\alpha)), \quad (12)$$

$\delta_y(\alpha)$ 引起误差 $\Delta \alpha_1$, 由几何关系求得:

$$\Delta \alpha_1 = \alpha - \arctan\left[\tan \alpha + \frac{R \sin \alpha}{\delta_y(\alpha)}\right], \quad (13)$$

同理可得:

$$\Delta \alpha_2 = \tan\left[\tan \alpha + \frac{\delta_y(\alpha)}{R \sin \alpha}\right] - \alpha, \quad (14)$$

最终可得:

$$\epsilon_x(\alpha) = \Delta \alpha - \Delta \alpha_1 - \Delta \alpha_2 - \Delta \alpha_4 - \Delta \alpha_5. \quad (15)$$

4 磨削误差补偿

4.1 螺纹磨削加工实验

螺纹磨削实验的实验数据如下:螺纹为 1.5

mm, 螺纹长度为 15 mm, 螺纹外径为 48 mm, 采用左旋单线螺纹, 每次磨削的进给深入为 0.02 mm, 利用软件生成 ANSI 编码格式的数控指令文件, 并导入复合数控磨床。在准备好数控指令之后, 首先对数控系统的轴向定位精度进行校核。为减小工件的表面粗糙度, 螺纹加工磨削速度要逐渐提高。图 4 所示为螺纹磨削的现场。

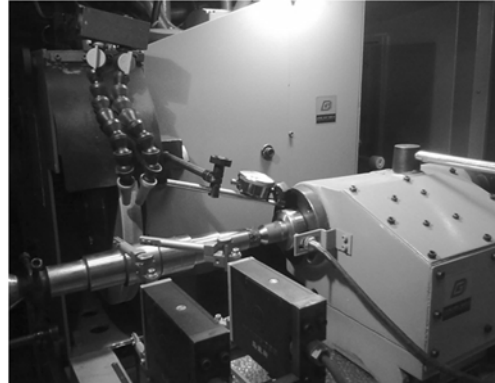


图 4 磨削现场
Fig. 4 Scene of grinding

4.2 误差补偿数值仿真

首先进入软件的误差参数辨识的对话框, 填写 X、Z 和 C 三轴的误差测量起点、测量点间距和测量点数, 同时载入各个轴向的误差值和不垂直度误差, 然后需要输入待修正的数控指令。螺纹磨削实验中用到的螺纹磨削加工代码作为仿真数据。误差补偿的数控准备工作结束之后, 点击对话框的“开始误差补偿”图标, 当系统提示“数控指令修正成功”, 则表示精密加工数控指令和误差补偿前后的各项误差已经计算完毕。

4.3 误差补偿分析

在软件结果分析对话框中进行分析, 从图 5 和图 6 中可以看出, 经过软件对数控指令修正后, 刀具轨迹与理想轨迹的差值大幅减小, 说明误差补偿可以大幅度提到数控机床的加工精度。

误差补偿前后误差值分析, 如图 7~9 所示, 分别表示 X、C 和 Z 三轴向误差值的变化。比较误差补偿前后各轴向误差值变化, 可以看出误差补偿的效果明显, 而且可以从数值上评估补偿前后效果。为了评估误差值的变化, 取误差曲线的平均值, 对于 X 轴向误差, 补偿前误差值约为 -0.096 mm, 补偿后的误差值约为 -0.032 mm。对于 C 轴向误差, 补偿前的误差值约为

0.004 mm, 补偿后的误差值约为 0.001 mm。对于 Z 轴向误差, 补偿前的误差值约为 0.157 mm, 补偿后的误差值约为 0.052 mm。

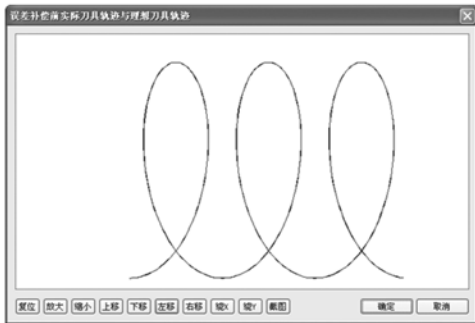


图 5 误差补偿前刀具轨迹与理想轨迹

Fig. 5 Tool path and ideal trajectory before error compensation

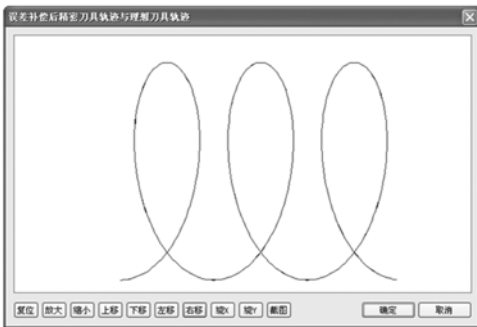


图 6 误差补偿后刀具轨迹与理想轨迹

Fig. 6 Tool path and ideal trajectory after error compensation

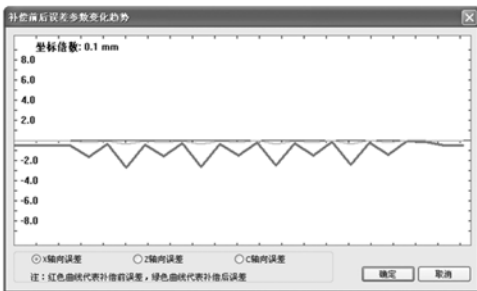


图 7 X 轴误差数据分析

Fig. 7 Error data analysis of X-axes

综上所述, 软件误差补偿技术能够大幅度减小机床的误差对工件加工精度的影响, 如图 10 所示, 本软件已经应用到螺纹磨削批量生产中。但并不能完全消除误差, 一方面由于软件误差补偿方法属于静态补偿, 另一方面, 在建模的过程中, 对机床的运动方程进行了简化处理, 导致了精密加工方程的精度降低。

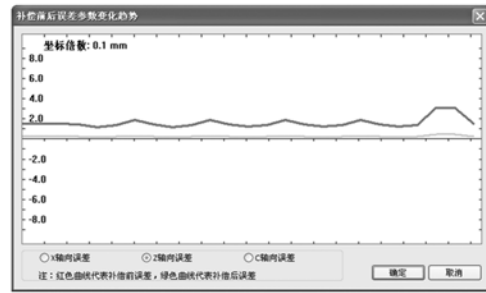


图 8 Z 轴误差数据分析

Fig. 8 Error data analysis of Z-axes

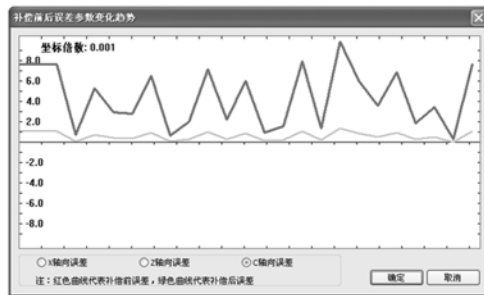


图 9 C 轴误差数据分析

Fig. 9 Error data analysis of C-axes

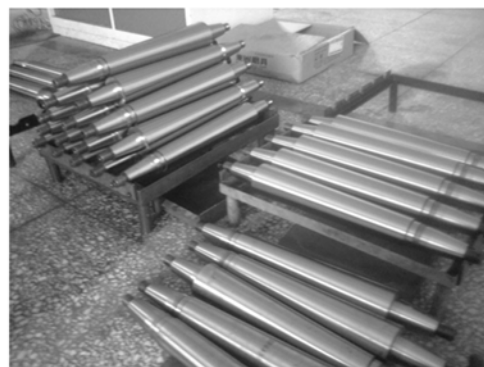


图 10 螺纹磨削批量生产

Fig. 10 Batch production of thread grinding

4 结 论

本文建立了 B2-K3032 复合数控磨床的几何误差模型, 并对模型中考虑的误差进行了补偿及实验研究, 仿真结果与实验结果的对比显示: 利用本文建立的模型对实际加工误差进行数控指令进行修正后, 误差补偿后的刀具加工轨迹在机床 3 个坐标轴上的值均以一定程度降低, 具体降低率分别为: X 轴向误差减小比例为 66.55%, Z 轴向误差减小比例为 66.65%, C 轴向误差减小比例

为66.35%,综合考虑三轴误差减小比例为66.51%,达到了几何误差补偿的预期效果,同时证明了误差补偿技术能够提高数控的加工精度。

随着复合数控磨床磨削精度的提高,误差补偿技术成为了相关课题的研究重点。运用多体系理论建立的数控磨床的运动模型虽具有简单、

可靠和准确的特点,然而不同的精密加工运动模型适用于不同的机床结构,因此需要研究更简单的机床误差建模方法。只考虑针对几何误差的误差补偿技术,其补偿效果是有局限性的,只有综合考虑机床的各项误差,误差补偿才能有更好的效果,在今后的相关研究中还需要不断的探索与完善。

参考文献:

- [1] 杨洪波,赵恒华,刘伟锐. 磨削技术的现状和未来发展趋势[J]. 机械制造与自动化,2014,43(6):7-9. YANG H B, ZHAO H H, LIU W R. Present situation and future development trend of grinding technology [J]. *Machinery Manufacturing and Automation*, 2014, 43(6):7-9. (in Chinese)
- [2] 林浩琼,马跃龙,高明辉,等. 多轴机床几何误差建模与补偿技术的研究[J]. 机床与液压,2014, 42(23):65-70. LIN J Q, M Y L, G M H, et al. Research of geometric error modeling and compensation technology of multi-axis machine tools [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2014, 42(23):65-70. (in Chinese)
- [3] 章青,赵宏林,唐华,等. 数控机床误差补偿技术及应用热误差补偿技术[J]. 制造技术与机床,1999(3):26-27. ZHANG Q, ZHAO H L, TANG H, et al.. Nc machine tool error compensation technology and applications of thermal error compensation technology [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*. 1999(3):26-27. (in Chinese)
- [4] LIANG J C, LI H F, YUAN J X, et al.. Comprehensive error compensation system for correcting geometric, thermal, and cutting force-induced errors [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1997, 13(10):708-712.
- [5] 刘焕宇. 数控机床几何误差测量及误差补偿技术的研究[D]. 武汉:华中科技大学博士毕业论文, 2005:1-13. LIU H L, CNC machine tool geometric error measurement and error compensation technology research [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Doctoral Dissertation, 2005: 1-13. (in Chinese)
- [6] 黄克,关立文,王立平. 五轴数控机床精度建模与预测研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2015(2):2-4. HUANG K, GUAN L W, WANG L P, Study on precision modeling and prediction of five-axis NC machine tool [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2015(2):02-04. (in Chinese)
- [7] 刘玲,张奕. 数控机床全误差误差补偿技术的探讨[J]. 装备制造技术,2015(2):157-159. LIU L, ZHANG Y, Nc machine tool error error compensation technique discussed [J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2015(2):157-159. (in Chinese)
- [8] 何振业. 五轴数控机床几何与热致空间误差检测辨识及模型研究[D]. 杭州:浙江大学博士毕业论文, 2014:19-25. HE ZH Y, Research on measurement identification and modeling of geometric and thermal errors of five-axis CNC machine tools [D]. Hangzhou: Zhejiang university doctoral dissertation, 2014:19-25. (in Chinese)
- [9] 王移风,汪琛琛,曹衍龙,等. 数控机床几何误差的辨识研究[J]. 机械设计与制造,2014(2):136-139. WANG Y F, WANG C C, CAO Y L, et al.. CNC machine tool geometric error identification study [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2014(2):136-139. (in Chinese)
- [10] 李新友,徐寅,李强,等. 多轴数控机床精度综合方法研究[J]. 机床与液压,2014, (42) 19:18-22. LI X Y, XU Y, LI Q, et al.. Research on accuracy synthesis method of multi-axis CNC machine tool [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2014, (42) 19:18-22. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] ZHANG S W, DING G F, JIANG L, *et al.*. Machining accuracy improvement of five-axis machine tools by geometric error compensation [C]. *International Conference on Advanced Technology of Design and Manufacture, Beijing*, 2010:348-352.
- [13] WANG X, FU X. Geometric error compensation methods of numerical control machine tool[J]. *Advanced Materials and manufacturing Technology*, 2012, 426:239-242.
- [14] ZHANG Y, YANG J, 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(1-4):257-281.
- [15] KHAN A W, CHEN W. A methodology for systematic geometric error compensation in five-axis machine tools[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 53(5-8):615-628.

作者简介:



陈东菊(1980—),女,山东济宁人,博士,副教授,2006年毕业于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2010年7月获得博士学位。2008年国家基金委公派去法国贡比涅工程技术大学留学,获得此学校博士学位。主要从事机床数控技术、精密加工技术及加工表面面形精度等方面的研究工作。E-mail: djchen@bjut.edu.cn



董丽华(1990—),女,山东日照人,硕士研究生,主要从事机床数控技术、精密加工技术及加工表面面形精度等方面的研究工作。E-mail: s201401045@emails.bjut.edu.cn