doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.050

数控加工中心空间误差场建模与仿真软件设计

余文利[1]　付国强[2]　孙　磊[2]　傅建中[2]

(1.衢州职业技术学院信息工程学院,衢州 324000;2.浙江大学机械工程学院,杭州 310027)

摘要:针对数控加工中心中存在影响加工精度的几何误差问题,进行了空间几何误差场建模分析并设计了一种通用的空间误差场仿真分析软件。首先,基于多体系统理论对几何误差元素进行了分析,根据加工中心拓扑结构建立了空间误差场模型,模型与加工中心的工件链和刀具链中的运动轴类型和位置密切相关。为了方便分析不同类型加工中心的误差场,基于 Visual Studio 平台设计了三轴数控加工中心通用的空间误差场仿真软件,可实现加工中心误差场的可视化,同时可针对工件的加工代码生成补偿后加工代码,有利于加工中心的结构设计和后续误差补偿。最后将误差场仿真软件应用到 Carver800T 型立式加工中心。结合测量得到的误差项数据对加工中心工作空间误差场进行分析,得到工作空间误差分布曲线以及整个工作空间的误差场分布,同时得到工件补偿加工代码,为该加工中心的精度提高和误差补偿提供了依据。

关键词:数控加工中心;拓扑结构;空间误差场建模;仿真软件

中图分类号:TH161⁺.5;TG659　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2016)04-0382-09

Error Field Modeling and Simulation Software Development for CNC Machining Center

Yu Wenli[1]　Fu Guoqiang[2]　Sun Lei[2]　Fu Jianzhong[2]

(1. *College of Information Engineering*, *Quzhou College of Technology*, *Quzhou* 324000, *China*

2. *School of Mechanical Engineering*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310027, *China*)

Abstract: For the geometric error elements of three-axis CNC machining center which greatly affect the machining precision, the spatial geometric error fields were analyzed, and the universe simulation software of error fields was developed. Firstly, error elements were analyzed based on multi-body theory; the spatial geometric error fields of machining center were modeled according to the topological structure of the machining center. It can be seen that the models of spatial geometric error fields were closely relative to the types and the positions of axes in the working piece chain and tool chain of the machining center. The models were different for machine centers with different topological structures. Then, the simulation software of error fields for universe three-axis CNC machining centers was developed due to the modeling process using Visual Studio platform in order to conveniently analyze the different machining centers. The software can realize the visualization of error fields and generate the compensated machining code based on the nominal code. It can give help for the structural design and error compensation of machining centers. Finally, the simulation software was applied to Carver800T vertical machining center. The error fields of this center were analyzed with all measured geometric error data to obtain the error distribution curve and the whole error fields of the machine tool. The compensated machining code was also obtained based on the nominal code of workpiece and the error fields of this machine center. It

收稿日期:2015-10-09　修回日期:2015-11-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51175461)、国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(51221004)、浙江省科技厅公益性应用研究计划项目(2014C31089)和浙江省教育厅科研项目(Y201327389)

作者简介:余文利(1968—),男,副教授,主要从事数控机床热误差和空间误差的计算机建模和仿真研究,E-mail:yujimmy@163.com

通信作者:傅建中(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事智能制造技术与装备和 CAM/CNC 研究,E-mail:fjz@zju.edu.cn

provided basis for the precision improvement and error compensation of machining center.

Key words: CNC machining center; topological structure; modeling of spatial error fields; simulation software

引言

工业技术的快速发展要求不断提高零部件的精度,同时随着工件曲面几何形状复杂程度的提高,对高精密机床的要求也越来越高[1]。机床的几何误差和热误差占总机床误差的60%左右[2],对机床几何误差进行补偿是提高机床精度的重要手段之一[3]。补偿的前提是先建立完善的、精确的误差模型,同时要对机床空间的误差场进行仿真分析。目前,国内外学者在机床误差建模方面展开了很多的研究[4-7]。OKAFOR 和 ERTEKIN 针对三轴数控机床利用多体理论建立了包括几何误差和热误差在内的误差模型[8]。LIN 和 SHEN 根据多体理论从误差模型物理意义出发,采用矩阵求和方法将机床误差模型分为6个部分[9]。JUNG 等基于多体理论分析机床误差项影响,建立参数化机床空间误差模型,以补偿机床误差提高机床精度[10]。FAN 等基于多体系统理论分别建立了4种不同类型的三轴数控机床的几何误差模型,采用正交多项式对运动轴误差项进行建模,并分析总结了这4种类型机床的拓扑结构与三轴数控机床几何误差建模的规律[11-13]。CHENG 等采用 Sobol 法对三轴数控机床的几何误差进行了灵敏性分析,分别计算了 X、Y 和 Z 方向上各个误差的一阶灵敏系数和全局灵敏系数,得到影响机床精度的关键误差项[14-15]。FU 等采用指数积理论分别对三轴和五轴数控机床进行误差建模研究,对机床的垂直度误差和基本误差项进行了分析建模,并提出相应补偿方法[16-17]。坐标系之间的微分变换关系也被用来进行误差建模和补偿[18-20]。

三轴数控加工中心的几何误差模型与机床拓扑结构密切相关,不同类型拓扑结构的机床误差模型不一样,所以对不同类型数控机床的误差建模和分析具有一定的困难。本文通过分析三轴数控加工中心空间几何误差场模型开发一种数控机床误差场仿真分析软件,该软件可对不同类型的三轴加工中心进行误差分析。首先建立三轴数控加工中心空间几何误差场模型并提出相应补偿方法,分析机床误差场模型与拓扑结构之间的关系,然后采用 VC++进行误差场仿真软件开发,应用该软件可以得到机床工作空间内误差场分布,开展机床精度可视化分析,为机床结构设计提供依据。同时软件可根据输入的加工代码,得到相应的加工补偿代码,有利于进行机床误差补偿研究。

1　三轴数控加工中心空间误差场建模

1.1　加工轴中心空间几何误差项

三轴数控加工中心包含3个线性运动轴,由于部件制造、安装等原因机床产生误差。刚体在空间上有6个自由度,所以每个运动轴应该有6项基本空间误差元素,包括3项线性空间误差和3项转角误差。以 X 轴为例,x 方向的线性误差为 δ_{xx},表示了 X 轴运动时在 x 方向引起的线性误差;δ_{yx} 表示了 X 轴运动时在 y 方向引起的线性误差;δ_{zx} 表示了 X 轴运动时在 z 方向引起的线性误差,如图1所示。而3项转角误差为 ε_{xx}、ε_{yx} 和 ε_{zx},分别表示 X 轴运动时绕 x、y、z 轴方向的转角误差。同样的,Y 轴的6项基本误差项为:δ_{xy}、δ_{yy}、δ_{zy} 和 ε_{xy}、ε_{yy}、ε_{zy}。Z 轴的6项基本误差项为:δ_{xz}、δ_{yz}、δ_{zz} 和 ε_{xz}、ε_{yz}、ε_{zz}。

机床3个运动轴在理论上应该是两两垂直的,而由于种种原因,运动轴两两之间不是绝对的垂直,那么机床就存在垂直度误差。3个运动轴两两之间存在3个垂直度误差。X 轴与 Y 轴之间的垂直度误差为 S_{xy},X 轴与 Z 轴之间的垂直度误差为 S_{xz},Y 轴与 Z 轴之间的垂直度误差为 S_{yz}。将 Y 轴定义为参考轴,$X-Y$ 平面定义为参考平面,则垂直度误差 S_{xy} 属于 X 轴,S_{xz} 和 S_{yz} 属于 Z 轴。

X 轴有7项几何误差元素,Y 轴有6项几何误差元素,而 Z 轴有8项几何误差项,这样机床共有21项几何误差元素。同时各个轴的误差对机床加工精度的影响并不是简单线性叠加的关系,不同运动轴误差会对其他运动轴精度产生影响,即存在耦合关系,则需要建立机床误差模型,将机床所有误差项综合起来得到机床空间误差场模型。

1.2　空间几何误差场模型

数控加工中心空间误差模型的建立首先是根据多体系统理论建立机床拓扑结构,然后建立各个轴坐标系,用齐次变换矩阵表示坐标系之间的变换关系,最后根据机床拓扑结构得到机床刀具相对于床身的齐次变换矩阵从而得到误差场模型。以机床床身作为参考坐标系,机床的拓扑结构可视为由2个开环运动链组成:工件运动链和刀具运动链。以YXFZ型三轴数控加工中心为例,简述机床空间误差场建模过程。图2为机床结构简图和拓扑结构示意图。其工件运动链为床身—X 轴—Y 轴—工作

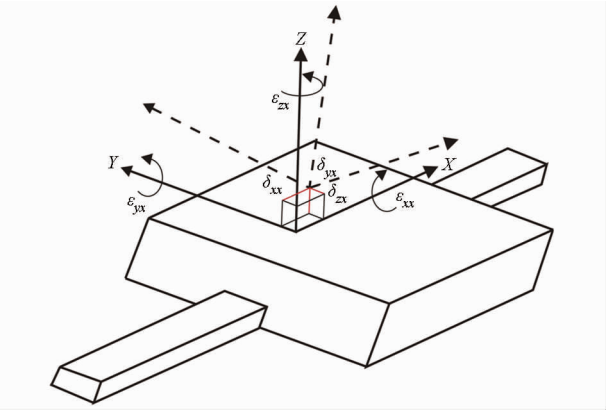


图 1 X 轴 6 项基本误差项

Fig. 1 Six basic errors of X-axis

台,刀具运动链为床身—Z 轴—刀具。

每个运动轴坐标系与相邻坐标系之间的关系可由理想齐次变换矩阵和误差齐次矩阵表示。对于工件运动链,X 轴相对于床身的理想齐次变换矩阵${}_i\boldsymbol{T}_F^X$和误差齐次矩阵为${}_e\boldsymbol{T}_F^X$ 为

$$\begin{cases} {}_i\boldsymbol{T}_F^X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}_e\boldsymbol{T}_F^X = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zx} & \varepsilon_{yx} & \delta_{xx} \\ \varepsilon_{zx} & 1 & -\varepsilon_{xx} & \delta_{yx} - xS_{xy} \\ -\varepsilon_{yx} & \varepsilon_{xx} & 1 & \delta_{zx} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{1}$$

在实际情况中,由于装配、制造等一系列的原因,使得相邻部件之间存在几何误差,故部件之间的齐次变换矩阵就应包括误差齐次矩阵,则 X 轴相对于床身的实际变换矩阵

$${}_a\boldsymbol{T}_F^X = {}_i\boldsymbol{T}_F^X \, {}_e\boldsymbol{T}_F^X \tag{2}$$

式中 ${}_i\boldsymbol{T}_F^X$——X 轴理想齐次交换矩阵

${}_e\boldsymbol{T}_F^X$——X 轴误差齐次矩阵

同样地,Y 轴相对于 X 轴的实际齐次变换矩阵

$${}_a\boldsymbol{T}_X^Y = {}_i\boldsymbol{T}_X^Y \, {}_e\boldsymbol{T}_X^Y \tag{3}$$

其中

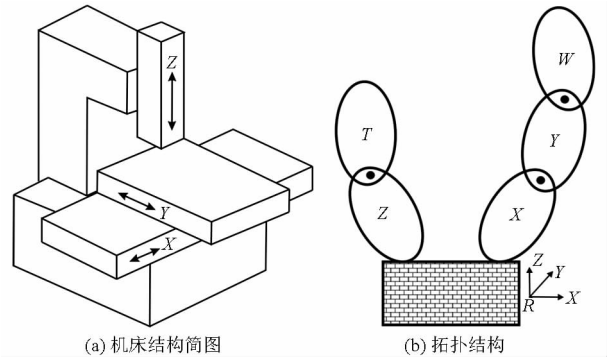
$${}_i\boldsymbol{T}_X^Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}_e\boldsymbol{T}_X^Y = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zy} & \varepsilon_{yy} & \delta_{xy} \\ \varepsilon_{zy} & 1 & -\varepsilon_{xy} & \delta_{yy} \\ -\varepsilon_{yy} & \varepsilon_{xy} & 1 & \delta_{zy} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中 ${}_i\boldsymbol{T}_X^Y$——理想齐次变换矩阵

${}_e\boldsymbol{T}_X^Y$——误差齐次矩阵

因为工作台固定在 Y 轴上,与 Y 轴一起运动,



(a) 机床结构简图 (b) 拓扑结构

图 2 YXFZ 型数控加工中心结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of YXFZ machining center

所以认为工作台相对于 Y 轴的理想齐次变换矩阵${}_i\boldsymbol{T}_Y^W$ 为单位阵,同时对工作台的误差忽略不计,则工作台相对于 Y 轴的实际变换矩阵${}_a\boldsymbol{T}_Y^W$ 也为单位阵。根据工件链的运动传递顺序,工作台上工件相对于床身的理想齐次变换矩阵表示为

$${}_i\boldsymbol{T}_F^W = {}_i\boldsymbol{T}_{Fi}^X \, {}_i\boldsymbol{T}_{Xi}^Y \, {}_i\boldsymbol{T}_Y^W \tag{4}$$

相应的包含空间几何误差项的实际变换矩阵表示为

$${}_a\boldsymbol{T}_F^W = {}_a\boldsymbol{T}_{Fa}^X \, {}_a\boldsymbol{T}_{Xa}^Y \, {}_a\boldsymbol{T}_Y^W = {}_i\boldsymbol{T}_{Fe}^X \, {}_i\boldsymbol{T}_{Fi}^X \, {}_i\boldsymbol{T}_{Xe}^Y \, {}_i\boldsymbol{T}_{Xi}^Y \, {}_i\boldsymbol{T}_Y^W \tag{5}$$

对于刀具运动链,Z 轴相对于床身的实际变换矩阵

$${}_a\boldsymbol{T}_F^Z = {}_i\boldsymbol{T}_{Fe}^Z \, {}_i\boldsymbol{T}_F^Z \tag{6}$$

其中

$${}_i\boldsymbol{T}_F^Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}_e\boldsymbol{T}_F^Z = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zz} & \varepsilon_{yz} & \delta_{xz} - zS_{xz} \\ \varepsilon_{zz} & 1 & -\varepsilon_{xz} & \delta_{yz} - zS_{yz} \\ -\varepsilon_{yz} & \varepsilon_{xz} & 1 & \delta_{zz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中 ${}_i\boldsymbol{T}_F^Z$——Z 轴理想齐次变换矩阵

${}_e\boldsymbol{T}_F^Z$——Z 轴误差齐次矩阵

刀具安装在 Z 轴上并同时运动,所以刀具相对于 Z 轴的理想齐次变换矩阵${}_i\boldsymbol{T}_Z^t$ 为单位齐次矩阵,忽略刀具的安装等误差,认为其实际变换矩阵${}_a\boldsymbol{T}_Z^t$ 也为单位阵,则根据刀具链运动传递顺序,刀具相对于床身的理想齐次变换矩阵可表示为

$${}_i\boldsymbol{T}_F^t = {}_i\boldsymbol{T}_{Fi}^Z \, {}_i\boldsymbol{T}_Z^t \tag{7}$$

则相应的实际变换矩阵可表示为

$${}_a\boldsymbol{T}_F^t = {}_a\boldsymbol{T}_{Fa}^Z \, {}_a\boldsymbol{T}_Z^t = {}_i\boldsymbol{T}_{Fe}^Z \, {}_i\boldsymbol{T}_{Fi}^Z \, {}_i\boldsymbol{T}_Z^t \tag{8}$$

为了得到机床工作空间的误差场模型,需要将机床误差表示在工作台坐标系下,根据机床拓扑结构,刀具在工作台坐标系下的理想齐次变换矩阵可表示为

$${}_i\boldsymbol{T}_W^t = {}_i\boldsymbol{T}_{Wi}^F \, {}_i\boldsymbol{T}_F^t = ({}_i\boldsymbol{T}_F^W)^{-1} \, {}_i\boldsymbol{T}_F^t = ({}_i\boldsymbol{T}_{Fi}^X \, {}_i\boldsymbol{T}_{Xi}^Y \, {}_i\boldsymbol{T}_Y^W)^{-1} \, {}_i\boldsymbol{T}_{Fi}^Z \, {}_i\boldsymbol{T}_Z^t \tag{9}$$

包含空间误差的实际齐次变换矩阵可表示为

$$ {}_a\boldsymbol{T}_W^t = ({}_a\boldsymbol{T}_F^W)^{-1}\,{}_a\boldsymbol{T}_F^t = ({}_i\boldsymbol{T}_{Fe}^X\boldsymbol{T}_{Fi}^X\boldsymbol{T}_{Xe}^Y\boldsymbol{T}_{Xi}^Y\boldsymbol{T}_Y^W)^{-1}\,{}_i\boldsymbol{T}_{Fe}^Z\boldsymbol{T}_{Fi}^Z\boldsymbol{T}_Z^t \tag{10} $$

数控加工中心刀具相对于工作台的综合误差场 $\boldsymbol{P}_e$ 可表示为

$$ [\boldsymbol{P}_e \quad 0] = [p_x \quad p_y \quad p_z \quad 0]^{\mathrm{T}} = {}_a\boldsymbol{T}_W^t[0\quad 0\quad 0\quad 1]^{\mathrm{T}} - {}_i\boldsymbol{T}_W^i[0\quad 0\quad 0\quad 1]^{\mathrm{T}} \tag{11} $$

其中

$$ \begin{cases} p_x = -\delta_{xx} - \delta_{xy} + \delta_{xz} - z\varepsilon_{yx} - z\varepsilon_{yy} - y\varepsilon_{zy} - zS_{xz} \\ p_y = -\delta_{yx} - \delta_{yy} + \delta_{yz} + z\varepsilon_{xx} + z\varepsilon_{xy} + x\varepsilon_{zx} + \\ \qquad x\varepsilon_{zy} + xS_{xy} - zS_{yz} \\ p_z = -\delta_{zx} - \delta_{zy} + \delta_{zz} - x\varepsilon_{yx} - x\varepsilon_{yy} + y\varepsilon_{xy} \end{cases} \tag{12} $$

式中　$\boldsymbol{P}_e$——机床综合误差在工作空间上的分布

p_x、p_y、p_z——x、y、z 方向上的误差

三轴数控加工中心没有旋转轴，无法对刀具的姿态进行补偿，只能对刀具位置误差进行补偿，其相应的加工代码反映的是 3 个平动轴的进给量，那么根据建立的加工中心的误差场对加工代码进行修正，得到补偿后的加工代码为

$$ \boldsymbol{\Gamma}' = \boldsymbol{\Gamma} - \boldsymbol{P}_e = [x \quad y \quad z]^{\mathrm{T}} - [p_x \quad p_y \quad p_z]^{\mathrm{T}} \tag{13} $$

其中　　$\boldsymbol{\Gamma} = [x \quad y \quad z]^{\mathrm{T}}$

式中　$\boldsymbol{\Gamma}$——机床加工代码

$\boldsymbol{\Gamma}'$——补偿后加工代码

通过上述建模可以发现加工中心空间误差场模型与拓扑结构密切相关，工作台上工件相对于参考坐标系（床身）下的齐次变换矩阵与机床工件链中的运动部件类型和相应的顺序紧密关联，而刀具相对于床身的齐次变换矩阵与机床刀具链中运动部件类型和顺序相关。对于三轴数控机床来说，工件链和刀具链的组合有很多种，因此存在多种不同类型的加工中心。误差模型式（12）只适合于 XYFZ 型数控加工中心，对于其他类型的加工中心就需要重新建立相应的空间误差场模型，这给机床结构设计、精度分析以及后期误差补偿带来很大困难和麻烦。由此，适合不同类型加工中心的误差场仿真软件是亟需的一种研究手段。

2　空间误差场仿真软件开发

误差建模过程表明，机床综合误差模型与机床的拓扑结构有关，即与工件运动链和刀具运动链上的机床运动轴类型和位置有关。本节基于 Visual studio 平台采用 C + + 语言开发一种通用的数控加工中心空间误差场仿真软件，为不同类型的加工中心提供误差场分布仿真分析，并可根据加工代码生成相应的补偿修正代码，为后期误差补偿提供依据。图 3 所示为误差场仿真软件的功能框图，主要包括参数输入、误差场建模、空间误差可视化和误差补偿 4 大模块。其中参数输入包括加工中心类型选择、加工中心误差项数据输入、以及工件加工代码读取。该软件提供不同类型的三轴数控加工中心供选择，用户只需选择相应的机床类型，输入该机床相应的 21 项空间几何误差项数值，就可以进行机床空间误差场计算。误差场建模是根据用户选择的加工中心类型，建立机床拓扑结构，从而根据建模方法建立空间误差场模型。误差可视化包括误差计算、误差曲线绘制以及空间误差场文件输出，不仅可以得到空间上任一点误差，也可以得到一条线，一个面上的误差分布，同时可输出机床整个加工空间中误差数据，实现误差场可视化。误差补偿是根据读取的工件加工代码，依据空间误差场模型计算相应的代码修正

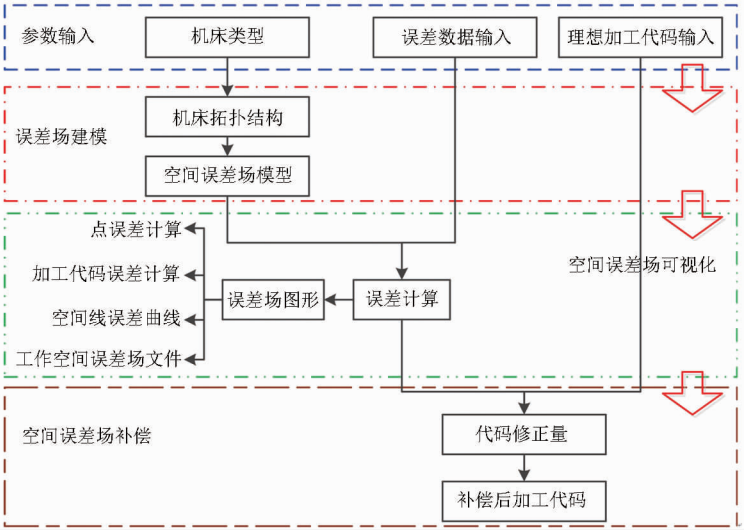


图 3　空间误差场仿真软件功能框图

Fig. 3　Function blockdiagram of simulation software of error fields

量,输出相应修正后的补偿代码。

“轴数控加工中心空间误差场仿真软件”界面可分为 3 个主区域:功能目录区、功能窗口区和机床信息区,如图 4 所示。软件提供机床类型选择、设置参数、计算误差、绘制误差、和补偿代码生成五大功能,每个功能会在功能窗口区现实其详细功能,按照每个功能窗口输入或选择相应信息,最后就可以绘制得到相应的空间误差场。下面详细介绍各个功能。

(1)选择机床类型:该功能提供 5 种常见的三轴数控加工中心类型:XYFZ 型、YXFZ 型、XFYZ 型、XYZF 型和 FXYZ 型机床,如图 4 所示。每种类型机床对应的误差模型是不同的。根据上节中的误差建模方法建立不同类型加工中心的空间误差模型。

(2)设置参数:该功能提供相应参数的读取、输入和保存。可以输入相应的误差值并保存,也可以读取相应的误差文件,如图 5a 所示。读取误差文件后参数根据运动轴坐标值大小自动排序。参数是指机床相应的 21 项误差项。其中每个运动轴的线性误差和转角误差是随着运动周位置不同而变化的,而垂直度误差是定值。线性误差单位是微米,转角误差单位是微弧度,垂直度误差是微弧度。

(3)计算误差:该功能提供误差的计算和保存,如图 5b 所示。只需输入机床指令位置,可计算得到工件坐标系下切削点坐标,即理想条件下刀具在工作台上位置,同时也可计算得到工件坐标系下刀尖点坐标,即在误差作用下刀具实际位置,最后可得到相应的空间误差值。另外该功能区不仅可计算单点

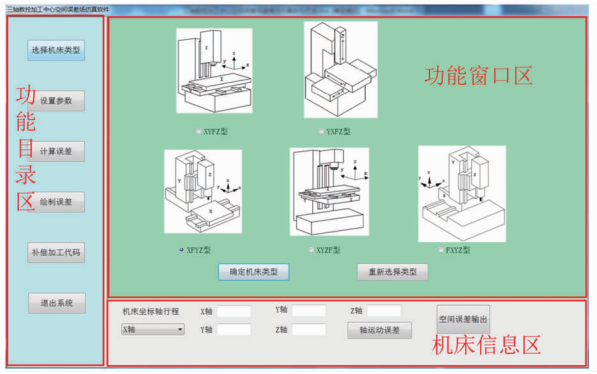


图 4 三轴数控加工中心空间误差场仿真软件

Fig. 4 Simulation software of error fields for three-axis machining centers

误差,也提供系列点误差计算功能,即可根据机床加工时 NC 代码计算加工过程中的误差场分布。

误差计算过程中,机床指令位置处各个空间几何误差项的数值通过插值计算的方法得到,根据各个运动轴的指令数值,搜索各个运动轴输入的误差参数得到与指令数值相邻的进给位置,然后根据其误差采用线性插值的方法得到指令数值对应的误差,然后将误差代入相应的空间综合误差模型中计算误差数值。

(4)绘制误差:该功能绘制机床误差曲线,如图 5c 所示。可读取误差文件并绘制,也可绘制机床上每个运动轴误差曲线,以及机床工作空间上对角线、体对角线上误差分布。

(5)补偿加工代码:包括读取加工代码、生成加工代码以及输出加工代码功能,如图 5d 所示。读取

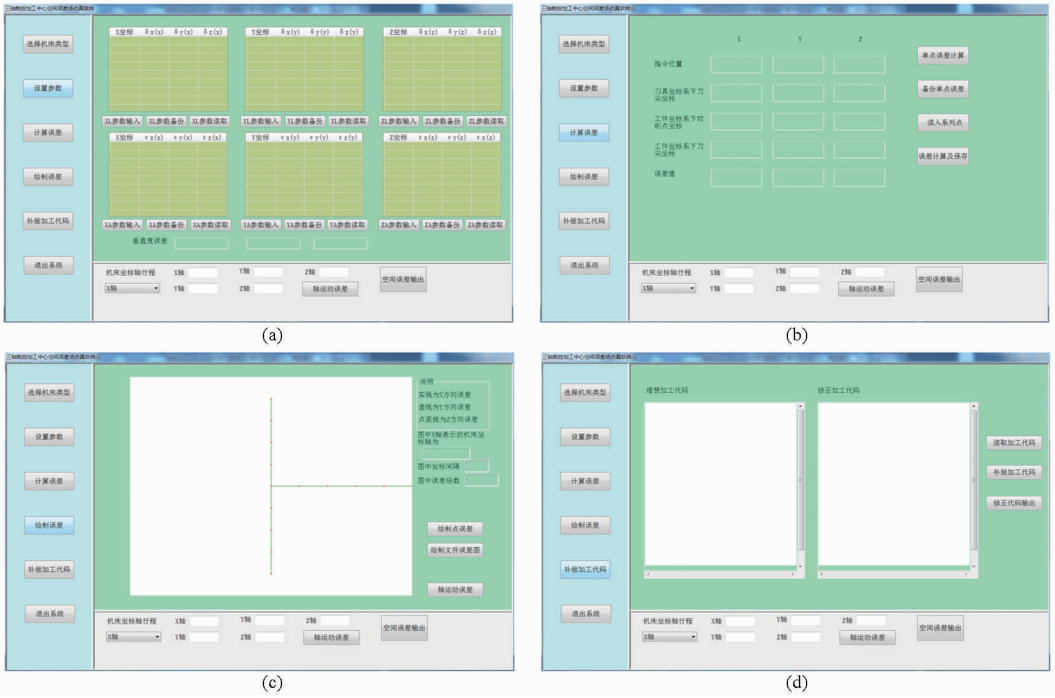


图 5 空间误差场仿真软件各个功能

Fig. 5 Functions of simulation software of error fields for three-axis machining centers

工件理想加工代码，根据加工中心误差模型和误差补偿方法，计算生成相应的修正加工代码。读取的理想加工代码和生成的补偿加工代码均可在窗口中进行显示。加工代码对工件进行加工可实现误差补偿效果。

(6)机床信息区：该区域主要输入机床 X 轴、Y 轴和 Z 轴的行程。同时选择绘制误差功能区的中要绘制的机床工作空间的直线。同时可生成机床工作空间的误差文件，为实现误差场可视化提供基础。

3　实验与软件应用

将开发的误差场仿真软件应用到北京精雕 Carver800T 型立式加工中心中，对该机床工作空间误差场进行分析。首先用美国光动公司的激光干涉仪(LDDM)采用 9 线法测量得到该机床的对应的 21 项误差数据。图 6 为激光干涉仪误差测量图。Carver800T 型加工中心工作空间为 800 mm × 800 mm × 420 mm，因为 LDDM 安装位置的限制，测量机床空间范围为 700 mm × 550 mm × 360 mm。测量辨识的 X 轴基本几何误差项如表 1 所示。图 7 为 Y 轴基本几何误差曲线，图 8 所示为 Z 轴几何误差曲线。

应用开发的软件对 Carver800T 型立式加工中心进行误差场分析，基本功能的操作步骤如下：



图 6　LDDM 测量误差

Fig. 6　Error measurement with LDDM

表 1　X 轴 6 项几何误差数据

Tab. 1　Six geometric error components of X-axis

x/mm	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
δ_{xx}/μm	0	-4.29	-9.58	-15.09	-20.85	-27.34	-32.91	-39.38	-45.20	-50.40	-55.64	-60.76	-66.23	-70.31	-73.94
δ_{yx}/μm	0	-1.07	-1.81	-2.15	-1.96	-1.07	0.43	2.50	5.11	8.33	12.13	16.40	21.15	26.46	32.30
δ_{zx}/μm	0	0.50	1.34	2.52	3.99	5.81	7.97	10.31	12.97	16.02	19.23	22.58	26.13	29.90	33.92
ε_{xx}/μrad	0	-7.90	-22.17	-35.85	-50.33	-72.57	-99.60	-127.14	-156.69	-188.57	-222.44	-258.40	-292.24	-326.92	-369.29
ε_{yx}/μrad	0	6.95	13.60	20.67	25.05	34.85	38.60	41.67	51.82	57.23	58.22	62.83	66.20	71.37	76.53
ε_{zx}/μrad	0	4.97	13.32	20.97	34.87	48.37	59.60	71.15	81.13	95.32	104.58	114.15	123.95	136.07	145.77

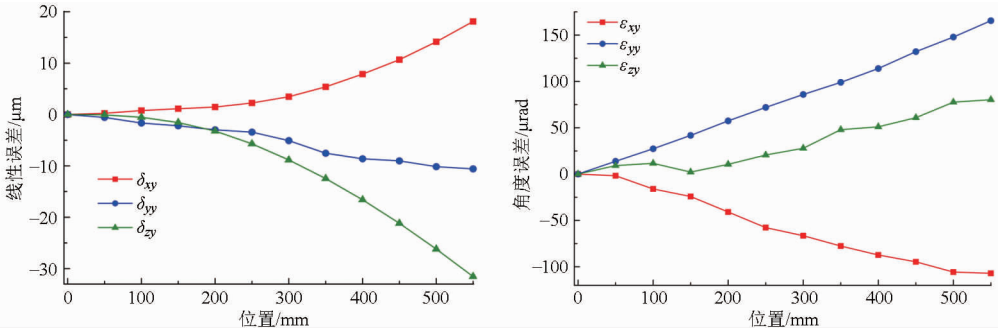


图 7　Y 轴基本误差项辨识数据

Fig. 7　Identified data of basic geometric errors of Y-axis

(1)首先 Carver800T 型立式加工中心属于 XFYZ 型，选择相应的机床类型。

(2)进入设置参数功能，读取测量得到的误差数据。先后读取 X 轴、Y 轴和 Z 轴线性误差数据以及转角误差数据，如表 1、图 7 和图 8 所示，并输入垂直度误差数据，如图 9a 所示。可手动输入运动轴误差，也可从文件中读取误差。

(3)计算误差，输入相应指令，计算单点误差，

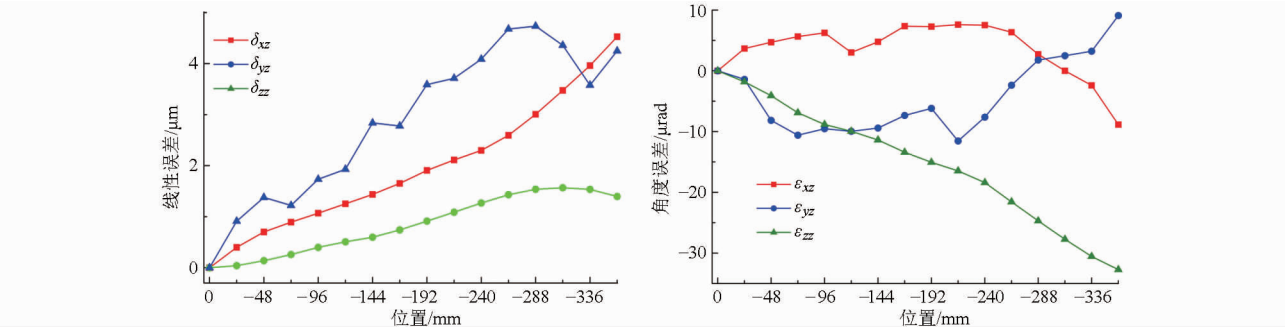


图 8 Z 轴基本误差项辨识数据

Fig. 8 Identified data of basic geometric errors of Z-axis

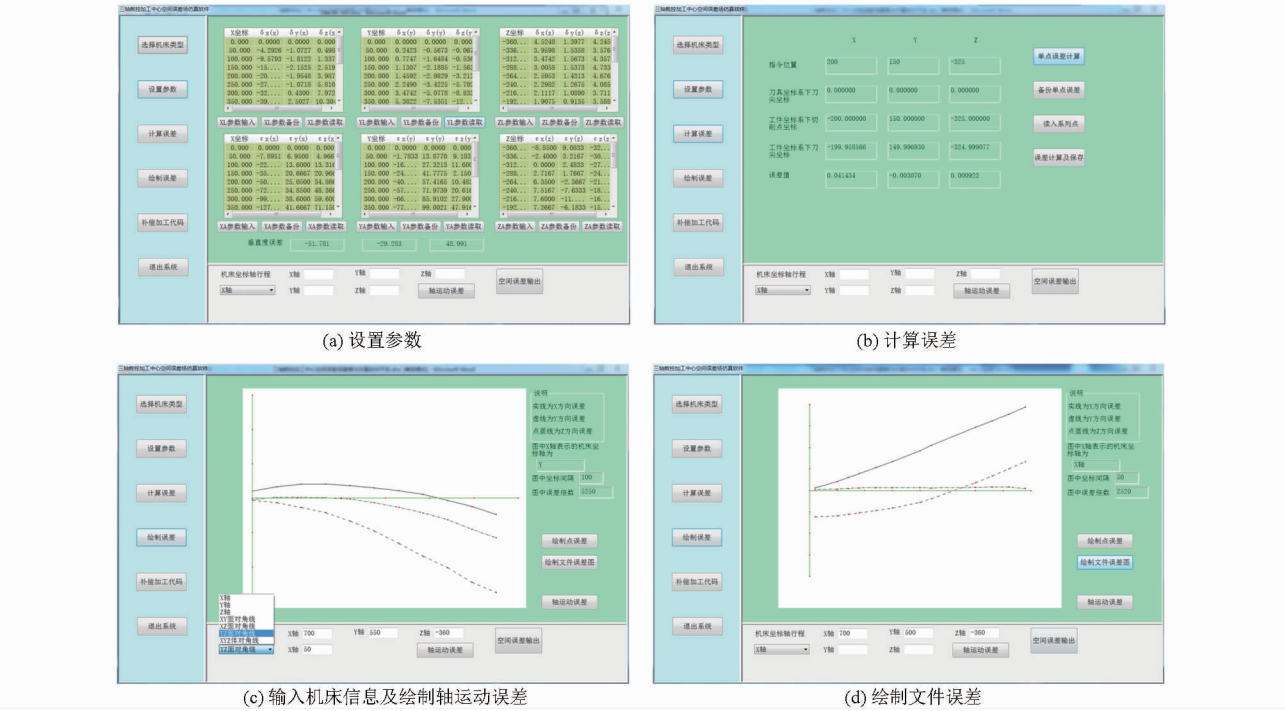


图 9 误差场仿真软件使用实例

Fig. 9 Application of simulation software

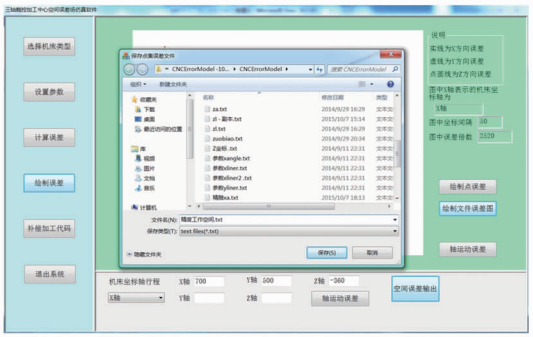
并保存,可计算机床工作空间内任意点的空间误差值;读取加工 NC 代码对应机床指令,即系列点,计算误差值并保存相应文件,可对机床工作空间内任意平面或任意线上点进行误差计算,如图 9b 所示。

(4)在机床信息区输入机床信息,机床 X 轴测量行程为 700 mm,Y 轴测量行程为 550 mm,Z 轴测量行程为 -360 mm。同时选择需要显示机床工作空间上某条线位置上误差分布,包括各个运动轴、各个面对角线以及体对角线,如图 9c 所示。

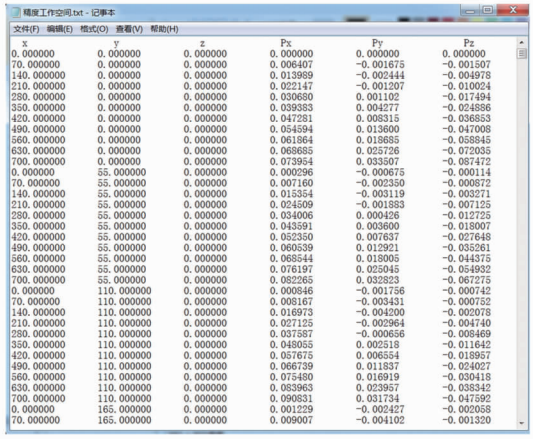
(5)绘制误差,选择“轴运动误差”按钮,功能窗口区会绘制出步骤(4)中选择特定先的误差曲线图,如图 9c 所示;点击“绘制文件误差图”按钮,打开步骤(3)中保存的误差文件,功能窗口中会绘制出相应的曲线,如图 9d 所示。

同时,误差场仿真软件可以计算加工中心整个工作空间均匀分布点的误差值,从而得到机床这个歌工作空间的误差场分布。工作空间误差值输出文件如图 10 所示,根据输出文件对机床空间误差场分布进行可视化处理,图 11 所示为加工中心工作空间的误差场分布,包括 3 个方向上误差的分布以及总误差在工作空间上分布。通过对误差场分析可获得机床部件安装、制造对机床精度的影响,有利于提高机床精度,为机床设计制造提供理论基础。

加工中心加工机床时一般先将工件三维模型输入 CAM 软件设置好参数生成相应的加工代码,然后将代码输入加工中心操作系统进行加工。误差场仿真软件可以读取工件加工代码,生成相应的修正加工代码,来补偿加工中心的空间几何误差。修正加工代码是从工件理想加工代码中除去加工中心综合几何误差。修正加工代码对工件进行加工可提高加工精度。图 12 所示为某工件三维模型及相应加工路径。图 13 所示为误差场仿真软件中的理想加工代码和生成的修正加工代码。



(a)

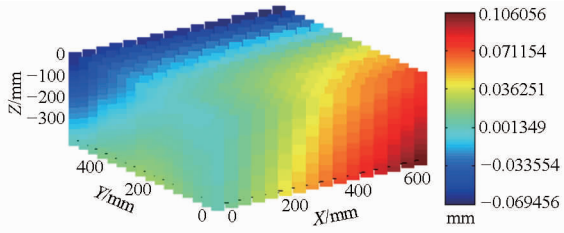


x	y	z	Px	Py	Pz
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
70.000000	0.000000	0.000000	0.006407	-0.001675	-0.001507
140.000000	0.000000	0.000000	0.013989	-0.002444	-0.004978
210.000000	0.000000	0.000000	0.022147	-0.001207	-0.010024
280.000000	0.000000	0.000000	0.030680	0.001102	-0.017494
350.000000	0.000000	0.000000	0.039383	0.004277	-0.024886
420.000000	0.000000	0.000000	0.047281	0.008315	-0.036853
490.000000	0.000000	0.000000	0.054594	0.013600	-0.047008
560.000000	0.000000	0.000000	0.061864	0.018685	-0.058945
630.000000	0.000000	0.000000	0.068685	0.025726	-0.072035
700.000000	0.000000	0.000000	0.073954	0.033507	-0.087472
0.000000	55.000000	0.000000	0.000296	-0.000675	-0.000114
70.000000	55.000000	0.000000	0.007160	-0.002350	-0.000872
140.000000	55.000000	0.000000	0.015354	-0.003119	-0.003271
210.000000	55.000000	0.000000	0.024509	-0.001883	-0.007125
280.000000	55.000000	0.000000	0.034006	0.000426	-0.012725
350.000000	55.000000	0.000000	0.043591	0.003600	-0.018007
420.000000	55.000000	0.000000	0.052350	0.007637	-0.027648
490.000000	55.000000	0.000000	0.060539	0.012921	-0.035261
560.000000	55.000000	0.000000	0.068544	0.018005	-0.044375
630.000000	55.000000	0.000000	0.076197	0.025045	-0.054932
700.000000	55.000000	0.000000	0.082265	0.032823	-0.067275
0.000000	110.000000	0.000000	0.000846	-0.001756	-0.000742
70.000000	110.000000	0.000000	0.008167	-0.003431	-0.000782
140.000000	110.000000	0.000000	0.016973	-0.004200	-0.002078
210.000000	110.000000	0.000000	0.027125	-0.002964	-0.004740
280.000000	110.000000	0.000000	0.037587	-0.000656	-0.008469
350.000000	110.000000	0.000000	0.048055	0.002518	-0.011642
420.000000	110.000000	0.000000	0.057675	0.006554	-0.018957
490.000000	110.000000	0.000000	0.066739	0.011837	-0.024027
560.000000	110.000000	0.000000	0.075480	0.016919	-0.030418
630.000000	110.000000	0.000000	0.083963	0.023957	-0.038342
700.000000	110.000000	0.000000	0.090831	0.031734	-0.047592
0.000000	165.000000	0.000000	0.001229	-0.002427	-0.002058
70.000000	165.000000	0.000000	0.009007	-0.004102	-0.001320

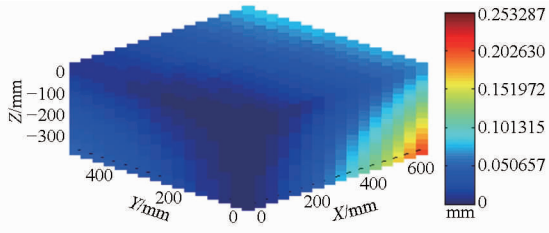
(b)

图 10　工作空间误差文件及其输出

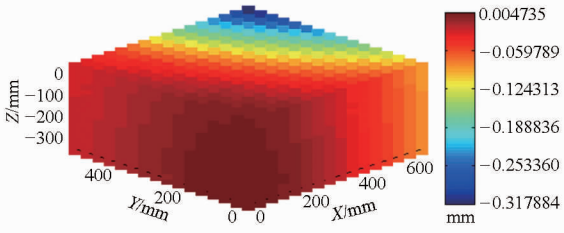
Fig. 10　Output and file of spatial error field of whole working zone



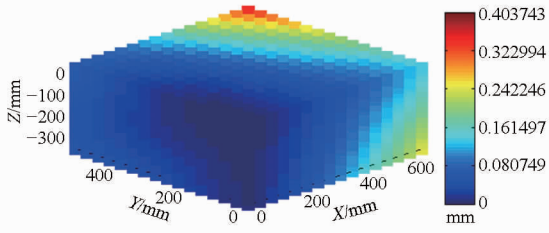
(a) x方向误差场



(b) y方向误差场



(c) z方向误差场



(d) 综合误差场

图 11　工作空间的空间几何误差场

Fig. 11　Spatial error fields of whole working zone

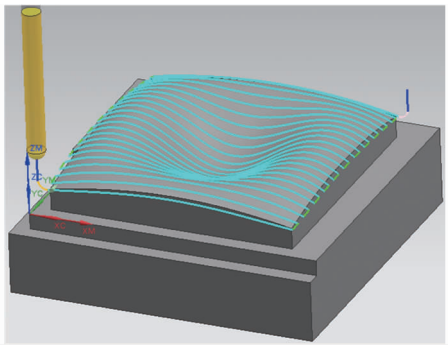


图 12　工件模型及加工路径

Fig. 12　Workpiece model and its corresponding tool path



图 13　误差场仿真软件理想加工代码读取和修正加工代码生成

Fig. 13　Input of machining code and generation of compensated code for simulation software of error fields

4　结束语

针对三轴数控加工中心进行误差场建模研究并开发相应的误差场仿真软件。误差场仿真软件可分析不同类型的三轴加工中心误差场分布，实现误差场可视化，为加工中心的设计以及精度提高提供依据。首先分析三轴加工中心各个运动轴误差项以及轴之间的误差元素，根据多体系统理论和机床拓扑结构建立加工中心空间误差场模型，分析得到机床空间几何误差场模型与机床拓扑结构紧密相关。其次，基于 Visual Studio 平台采用 C + + 开发了三轴

数控加工中心误差场仿真软件,包括机床类型选择、误差参数输入保存、误差计算、误差场曲线绘制和补偿代码生成等功能,能够绘制出机床工作空间误差曲线,实现机床误差可视化,同时根据工件加工代码生成补偿代码,实现误差补偿。最后以精雕 Carver800T 型立式加工中心为例,将各个几何误差项输入误差场仿真软件中,生成该机床工作空间几何误差场分布模型,同时根据工件加工代码生成补偿代码,实现误差补偿,为机床设计和误差补偿提供理论依据。

参 考 文 献

1 UDDIN M S, IBARAKI S, MATSUBARA A, et al. Prediction and compensation of machining geometric errors of five-axis machining centers with kinematic errors [J]. Precision Engineering, 2009, 33(2): 194 – 201.

2 SHEN H, FU J, HE Y, et al. On-line Asynchronous Compensation Methods for static/quasi-static error implemented on CNC machine tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 60: 14 – 26.

3 FU G, FU J, SHEN H, et al. NC codes optimization for geometric error compensation of five-axis machine tools with one novel mathematical model [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(9 – 12): 1879 – 1894.

4 TSUTSUMI M, TONE S, KATO N, et al. Enhancement of geometric accuracy of five-axis machining centers based on identification and compensation of geometric deviations [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 68: 11 – 20.

5 KIRIDENA V S B, FERREIRA P M. Kinematic modeling of quasistatic errors of three-axis machining centers [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1994, 34(1): 85 – 100.

6 ZHU S, DING G, QIN S, 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.

7 郭然, 付国强, 孙磊,等. 基于切比雪夫多项式的数控机床几何误差参数化建模 [J]. 农业机械学报, 2015,46(5): 336 – 343.
GUO Ran, FU Guoqiang, SUN Lei, et al. Chebyshev polynomials based parametric modeling of geometric errors for CNC machine tools [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(5): 336 – 343. (in Chinese)

8 OKAFOR A C, ERTEKIN Y M. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(8): 1199 – 1213.

9 LIN Y, SHEN Y. Modelling of five-axis machine tool metrology models using the matrix summation approach [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(4): 243 – 248.

10 JUNG J H, CHOI J P, LEE S J. Machining accuracy enhancement by compensating for volumetric errors of a machine tool and on-machine measurement [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174(1 – 3): 56 – 66.

11 FAN K, YANG J, YANG L. Unified error model based spatial error compensation for four types of CNC machining center: part II—unified model based spatial error compensation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 49(1 – 2): 63 – 76.

12 FAN K, YANG J, YANG L. Unified error model based spatial error compensation for four types of CNC machining center: part I—Singular function based unified error model [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 60 – 61(0): 656 – 667.

13 FAN K, YANG J, YANG L. Orthogonal polynomials-based thermally induced spindle and geometric error modeling and compensation [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(9 – 12): 1791 – 1800.

14 CHENG Q, ZHAO H W, ZHANG G J, et al. An analytical approach for crucial geometric errors identification of multi-axis machine tool based on global sensitivity analysis [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(1 – 4): 107 – 121.

15 CAI L G, ZHANG Z L, CHENG Q, et al. A geometric accuracy design method of multi-axis NC machine tool for improving machining accuracy reliability [J]. Eksploatacja I Niezawodnosc-Maintenance and Reliability, 2015, 17(1): 143 – 155.

16 FU G, FU J, XU Y, et al. Product of exponential model for geometric error integration of multi-axis machine tools [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(9 – 12): 1653 – 1667.

17 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]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1 – 4): 289 – 305.

18 FU G, FU J, XU Y, et al. Accuracy enhancement of five-axis machine tool based on differential motion matrix: geometric error modeling, identification and compensation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 89: 170 – 181.

19 CHEN J, LIN S, HE B. Geometric error compensation for multi-axis CNC machines based on differential transformation [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(1 – 4): 635 – 642.

20 陈剑雄,林述温. 基于微分变换的数控机床几何误差建模的研究 [J]. 工具技术, 2013(8): 66 – 69.
CHEN Jianxiong, LIN Shuwen. Geometry error modeling method for CNC machines based on differential transform method [J]. Tool Engineering, 2013(8): 66 – 69. (in Chinese)