

# 基于i5OS数控系统的三轴立式加工中心误差建模及补偿研究

王梓伦, 印 晨, 陈光胜\*

上海理工大学机械学院, 上海

Email: \*cgs-168@163.com

收稿日期: 2020年10月30日; 录用日期: 2020年11月12日; 发布日期: 2020年11月19日

## 摘 要

三轴立式加工中心是机械加工的重要装备, 为提高其精度, 本文利用齐次坐标变换建立了三轴立式加工中心的几何误差数学模型, 开发了基于i5OS数控系统的误差补偿软件, 为了简化误差检测时间和效率, 选取对综合误差有主要贡献的直线度和定位误差进行补偿实验, 结果表明, 基于i5OS数控系统的综合误差实时性反馈补偿使数控机床的加工精度提高了38%以上, 验证了模型的准确性和补偿软件的有效性。

## 关键词

i5OS数控系统, 机床, 几何误差建模, 误差补偿

## Research on Error Modeling and Compensation for Three-Axis Vertical Machining Center Based on i5OS CNC System

Zilun Wang, Chen Yin, Guangsheng Chen\*

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Email: \*cgs-168@163.com

Received: Oct. 30<sup>th</sup>, 2020; accepted: Nov. 12<sup>th</sup>, 2020; published: Nov. 19<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Three-axis vertical machining center is an important equipment in machining. In order to improve its precision, the geometric error mathematical model of three-axis vertical machining center is

\*通讯作者。

文章引用: 王梓伦, 印晨, 陈光胜. 基于 i5OS 数控系统的三轴立式加工中心误差建模及补偿研究[J]. 建模与仿真, 2020, 9(4): 535-541. DOI: 10.12677/mos.2020.94052

established by using homogeneous coordinate transformation. Error compensation based on i50S CNC system software is developed. In order to simplify the error detection time and efficiency, comprehensive error compensation for the straightness and the position error of the experiment are selected for major contribution. The results show that real-time numerical control system of comprehensive error feedback compensation based on i50S improves the machining precision of CNC machine tools by more than 38%. The accuracy of the model and the effectiveness of the compensation software are verified.

## Keywords

i50S CNC System, Machine Tools, Geometric Error Modeling, Error Compensation

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

精度是机床的重要指标，为了提高精度，“误差补偿”是目前常用的一种有效手段，所谓“误差补偿”是事先分析数控机床误差产生的机理，用数学的手段建立其误差数学模型，以此来预测机床工作时各空间位置的误差，最后利用软件处理的方式实现补偿，达到提高机床精度的目的[1]。

数控机床综合误差数学模型是将数控机床空间误差用数学手段进行表达，从而能够预测其在数控机床整个空间位置上的误差。目前，主要手段是基于多体系统理论建立数控机床空间误差的数学模型。多体系统理论方法最大的优势在于其全面性以及通用性，将数控机床运动过程中的耦合因素进行综合考虑，适用于各种运动形式的数控机床[2] [3] [4] [5] [6]。空间误差数学模型表达式的变量就是数控机床工作时的坐标值[7]。

本文首先将利用齐次坐标法对三轴立式加工中心进行误差建模方法展开研究，采用激光干涉仪实现误差的检测，最后基于国产数控系统 i50S 开发出误差补偿系统并对模型进行有效性验证。

## 2. 数控机床几何误差建模

一般情况下，机床每一个移动轴均存在 3 项位移误差以及 3 项角度误差[3]，并且三个移动轴两两之间还存在 1 项垂直度误差。三轴立式加工中心一共存在 21 项几何误差元素[8]。本文采用沈阳机床 i5 M1.4 立式加工中心为研究对象，结构模型如图 1 所示，其运动形式为 YXTZ 型，即 Y 轴以及 Z 轴与床身固连，X 轴与 Y 轴相连，工件台于 X 轴相连，而主轴以及刀具与 Z 轴相连。

按照多体系统理论描述为：① 刀具链分支：机床床身  $F \rightarrow Z$  轴  $\rightarrow$  主轴  $S \rightarrow$  刀具  $T$ ；② 工件链分支：机床床身  $F \rightarrow Y$  轴  $\rightarrow X$  轴  $\rightarrow$  工件  $W$ 。

以床身坐标系为参考坐标系，其刀具分支的运动链为：床身  $F \rightarrow Z$  轴  $\rightarrow$  主轴  $S \rightarrow$  刀具  $T$ ，则理想情况下，从床身坐标系到刀具坐标系齐次坐标变换关系如下：

$${}^F T = \prod_{i=Z}^T {}^i T = {}^Z T {}^S T {}^T T \quad (1)$$

同理，工件分支的运动链为：机床床身  $M \rightarrow Y$  轴  $\rightarrow X$  轴  $\rightarrow$  工件  $W$ ，则理想情况下，从床身坐标系到工件坐标系齐次坐标变换关系如下：

$${}^F T = \prod_{i=Y}^W {}^i T = {}^Y T {}^X T {}^W T \quad (2)$$

设刀尖点  $t_0$  在刀具坐标系中的位置坐标为  $(t_x, t_y, t_z)$ ，则理想情况下，刀尖点在工件坐标系中的位置坐标点  $t_w$  为：

$$\begin{bmatrix} t_w^T \\ 1 \end{bmatrix} = {}^T W T \begin{bmatrix} t_0^T \\ 1 \end{bmatrix} = [{}^W F T]^{-1} {}^T F T \begin{bmatrix} t_0^T \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

则进一步可以得到：

$$\begin{bmatrix} t_w^T \\ 1 \end{bmatrix} = {}^W X T^{-1} {}^X Y T^{-1} {}^Y F T^{-1} {}^Z F T {}^S Z T {}^T S T \begin{bmatrix} t_0^T \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

同理，在实际情况下，只需要在理想情况下齐次坐标变换过程中将各相邻体间误差矩阵引入表达式，即可得到实际情况下刀尖点在工件坐标系中的坐标点  $t'_w$ ，为：

$$\begin{bmatrix} t'_w \\ 1 \end{bmatrix} = {}^T W T \Delta {}^T W T \begin{bmatrix} t_0^T \\ 1 \end{bmatrix} = \left( \prod_{i=Y}^W {}^i T \Delta_{i-1} {}^i T \right)^{-1} \left( \prod_{i=Z}^T {}^i T \Delta_{i-1} {}^i T \right) \begin{bmatrix} t_0^T \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

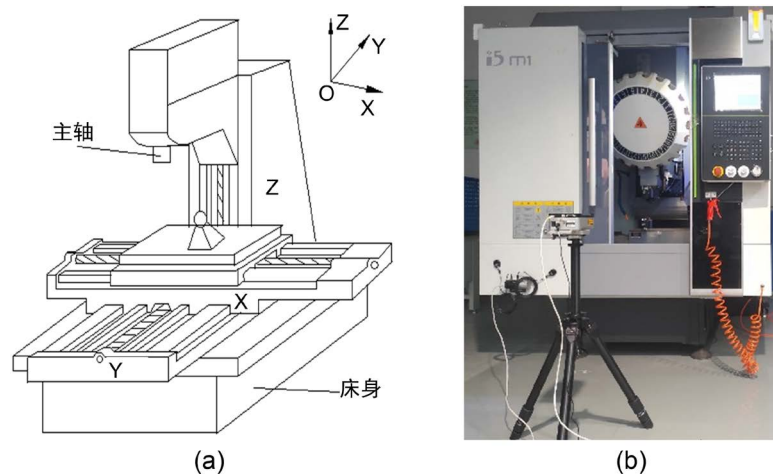
因此， $\varepsilon_n = (\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$  机床空间综合误差可以表达为：

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_n^T \\ 0 \end{bmatrix} = \left( \prod_{i=Y}^T {}^i T \Delta_{i-1} {}^i T \right)^{-1} \begin{bmatrix} t_0^T \\ 1 \end{bmatrix} - \left( \prod_{i=Z}^T {}^i T \Delta_{i-1} {}^i T \right)^{-1} \begin{bmatrix} t_0^T \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于单项误差元素都是微小量，忽略其高阶项，得到空间综合误差在  $X$  轴， $Y$  轴， $Z$  轴方向上的分量[3]：

$$\begin{cases} \varepsilon_x = -\delta_x^x - \delta_y^x + \delta_z^x - y(\theta_x^z + \theta_y^z - \varepsilon_{xy}) - z(\theta_x^y + \theta_y^y + \varepsilon_{xz}) \\ \varepsilon_y = -\delta_x^y - \delta_y^y + \delta_z^y + x\theta_x^z + z(\theta_x^x + \theta_y^x - \varepsilon_{yz}) \\ \varepsilon_z = -\delta_x^z - \delta_y^z + \delta_z^z - x\theta_x^y + y(\theta_x^x + \theta_y^x) \end{cases} \quad (7)$$

由上述数控机床的综合数学模型建模过程可知，刀具切削点的空间定位精度同时受到 21 项误差元素的影响。在机床误差的实际补偿中，如果对这 21 项误差元素都进行测量与补偿，往往会导致投入的时间与经济成本比较大，补偿效率不高。实际上，不同类型的机床由于其结构类型、运动行程大小、以及运动轴定位方式的不同，所面临的关键误差是不同的。对于立式加工中心而言，由于其运动轴行程短，角偏误差的影响往往比较小，可以忽略不计，定位误差以及直线度误差对误差有主要贡献。



**Figure 1.** Shenyang i5 M1.4 vertical machining center. (a) Schematic diagram of machine tool structure; (b) Setup of machine tool error measurement

**图 1.** 沈阳 i5 M1.4 立式加工中心。(a) 机床结构示意图；(b) 机床误差检测实验现场

### 3. 数控机床误差测量

本文实验采用的误差测量仪器为 Renishaw XL 80 型激光干涉仪,对沈阳 i5 M1.4 立式加工中心 X 轴、Y 轴进行误差测量。每个移动轴需要对线性定位误差以及直线度误差进行测量,需要用线性定位误差测量镜组以及直线度误差测量镜组。

实验中测量长度应为各移动轴的最长有效行程。但是受到被测数控机床结构的约束,各移动轴的测量行程分别为: X 轴: 0~500 mm、Y 轴: -300~0 mm、Z 轴: -300~0 mm。各移动轴从起始测点开始等间距选取 51 个测量点,且沿正、反向测量两次,再取其平均值。对于测量误差数据利用一次线性插值法进行单项误差建模。实验测量结果以及建模结果如图 2 所示。

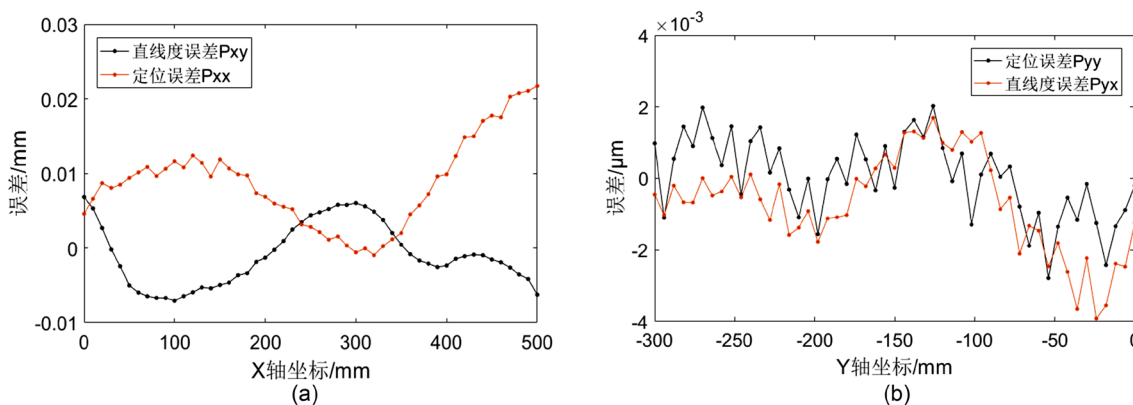


Figure 2. Experimental measurement results and modeling results. (a) X-axis straightness and positioning error; (b) Y-axis straightness and positioning error

图 2. 实验测量结果以及建模结果。(a) X 轴直线度和定位误差; (b) Y 轴直线度和定位误差

### 4. 基于 i5OS 数控系统的机床综合误差实时补偿

沈阳机床(上海)智能系统研发设计有限公司 i5OS 数控系统通过 Finch 高速通信组件将机床 CNC 参数信息提供给上层应用软件访问,在上层软件中通过 Finch 高速通信组件访问 CNC 各轴位置反馈信息,再此时各轴位置信息写入误差模型中,处理计算得到此时误差补偿值,继而将其写入 Finch 高速通信组件,最后写入 CNC 运动控制模块,完成机床误差的补偿。Finch 是一个主要用于 i5OS 本地以及局域网访问的高速通信组件,它位于应用软件中间层,主要依赖于动态链接库 libfinch.so,具有很高的开放性。该组件不限制读取的参数数据,但是会限制参数的写入,根据 CNC 的运行状态和授权权限来决定能够写入的参数(图 3)。

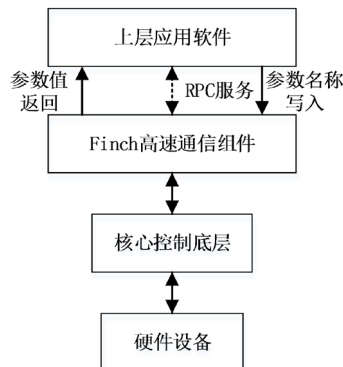


Figure 3. Finch high speed communication component communication diagram

图 3. Finch 高速通信组件通信示意图

沈机(上海)智能系统研发设计有限公司 i5OS 数控系统通过 Finch 高速通信组件将机床 CNC 参数信息提供给上层应用软件访问, 因此, 在上层软件中通过 Finch 高速通信组件访问 CNC 各轴位置反馈信息, 再此时各轴位置信息写入误差模型中, 处理计算得到此时误差补偿值, 继而将其写入 Finch 高速通信组件, 最后写入 CNC 运动控制模块, 完成机床误差的补偿。补偿原理如图 4 所示, 这种补偿方法是一种基于数控系统的动态补偿, 将数控机床空间误差与数控系统结合起来, 通过外部补偿软件修正数控系统中的各轴位置反馈, 实现对数控机床的空间误差补偿。

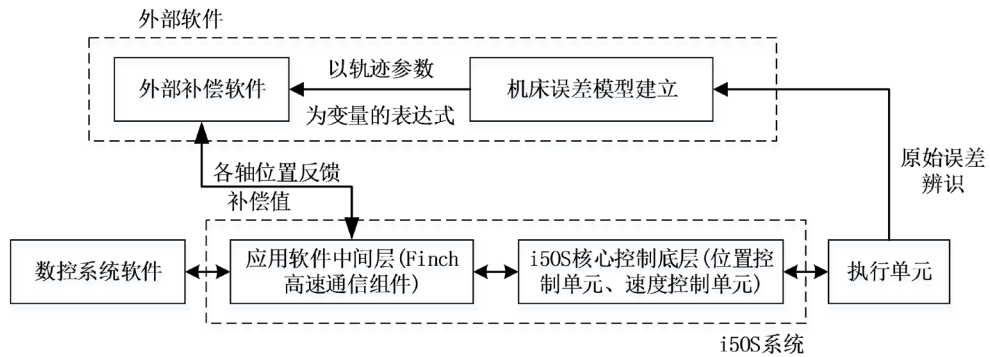


Figure 4. Position feedback correction compensation method based on i5OS CNC system  
图 4. 基于 i5OS 数控系统的位置反馈修正补偿方法

## 5. 补偿实验验证

为验证上述误差补偿方法的有效性, 对沈阳 i5 M1.4 立式加工中心 X 轴以及 Y 轴联动时圆弧插补运动进行了一组补偿实验, 实验仪器选择 Renishaw QC20\_W 型球杆仪。

实验时球杆仪球心坐标为(170, -150, -292.578), 与主轴相连, 测量半径为 100 mm, X 轴, Y 轴进给速度设为 300 mm/min, 先逆时针方向再顺时针方向旋转 360 度, 完成正向与反向圆弧插补运动的误差检测。

按照 JIS B 6190-4:2008 版本的标准分析补偿前后球杆仪所测的误差数据, 两次测量所得的运动误差轨迹及其圆度偏差分析分别如图 5 与图 6 所示。补偿前, XY 平面内的圆弧轨迹最大圆度误差为 17.9  $\mu\text{m}$ , X 轴、Y 轴的垂直度误差为 0.0934  $\mu\text{m}/\text{mm}$ ; 补偿后 XY 平面内圆弧轨迹的最大圆度误差为 10.3  $\mu\text{m}$ , X, Y 轴的垂直度误差为 0.0576  $\mu\text{m}/\text{mm}$ 。最大圆度误差补偿率为 42.45%, 垂直度误差补偿率为 38.33%。

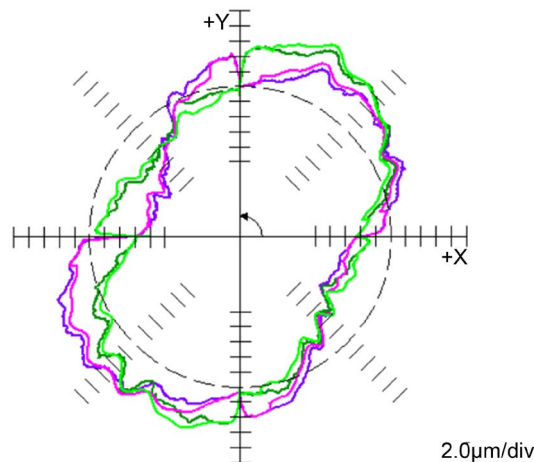
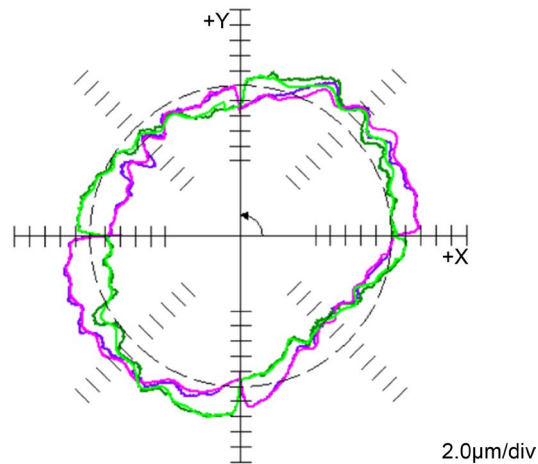


Figure 5. Circular trajectory accuracy before compensation  
图 5. 补偿前圆弧轨迹精度



**Figure 6.** Circular trajectory accuracy after compensation  
**图 6.** 补偿后圆弧轨迹精度

表 1 显示了沈阳 i5 M1.4 立式加工中心在  $XY$  平面内圆弧插补运动在补偿前后的整体效果。

**Table 1.** Overall effect of circular interpolation before and after motion compensation

**表 1.** 圆弧插补运动补偿前后的整体效果

误差项	补偿前	补偿后	提高百分比
最大圆度误差	17.9 $\mu\text{m}$	10.3 $\mu\text{m}$	42.45%
垂直度误差	0.0934 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0.0576 $\mu\text{m}/\text{mm}$	38.33%

## 6. 结论

通过齐次坐标转换的数学方法,以沈阳机床立式加工中心为研究对象,建立了 21 项误差组成的机床误差综合模型,利用机床厂商提供的接口文件,开发出基于 i5OS 数控系统的误差综合实时补偿系统,为了简化误差检测过程、节省时间和提高效率,选取对综合误差有主要贡献的直线度和定位误差进行补偿实验,结果表明,基于 i5OS 数控系统的综合误差实时性反馈补偿使数控机床的加工精度提高了 38% 以上,验证了模型的准确性和补偿软件的有效性。

## 基金项目

国家重点研发计划(2017YFB1104602),典型硬脆构件的超快激光精密制造技术及装备。

## 参考文献

- [1] 杨建国. 数控机床误差补偿技术现状与展望[J]. 航空制造技术, 2012(5): 40-45.
- [2] 章青, 王国锋, 刘又午, 赵宏林, 盛伯浩. 数控机床误差补偿技术及应用——几何误差补偿技术[J]. 制造技术与机床, 1999(1): 33-34.
- [3] 章青, 陈明娟, 赵小松, 赵宏林, 盛伯浩, 方沂, 张铁诚. 数控机床误差补偿技术及应用测头系统——误差分析和补偿技术[J]. 制造技术与机床, 1999(5): 35-37.
- [4] 刘又午, 章青, 王国锋, 盛伯浩, 赵宏林. 数控机床误差补偿技术及应用发展动态及展望[J]. 制造技术与机床, 1998(12): 8-9.
- [5] 任永强, 杨建国, 窦小龙, 邓卫国. 五轴数控机床综合误差建模分析[J]. 上海交通大学学报, 2003(1): 70-75.
- [6] 王秀山, 杨建国, 闫嘉钰. 基于多体系统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(5):

761-764.

- [7] 朱赤洲. 数控机床三维空间误差建模及补偿技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [8] 赵家黎, 张体伟, 吴丽媛. 基于 PMAC 数控系统的机床综合误差补偿研究[J]. 机械设计与制造工程, 2019, 48(9): 85-88.