DOI: 10.3901/JME.2020.07.204

基于灵敏度分析的立式加工中心批量空间误差建模和补偿^{*}

杨 贇 朱梦瑞 李慧敏 杜正春 杨建国
(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240)

摘要: 空间误差建模和补偿已成为提高机床精度和性能的最经济方法之一。然而, 空间误差元素测量耗时多等原因限制了空间误差补偿的广泛应用。为解决这一问题, 提出了一种基于灵敏度分析的空间误差快速建模和补偿方法。首先, 基于齐次坐标变换, 建立了立式加工中心的广义运动学模型。其次, 根据立式加工中心的所有误差元素的灵敏度分析, 确定关键误差元素。根据灵敏度分析结果, 在误差补偿过程中忽略了影响因子较低的角度误差元素。然后, 基于关键误差元素的测量数据和切比雪夫多项式, 建立了简化的空间误差快速补偿模型。接着, 利用 Fanuc 数控系统的 EMZPS 功能开发了实时误差补偿系统, 实现了空间误差的补偿。为了评估所提方法的有效性, 对每个平动轴和每条体对角线误差补偿前后的测量试验结果进行比较。结果表明, 沿三个轴的最大平移误差从 21.9 μm 到 6.5 μm , 最大体对角线误差从 81.6 μm 减小到 35.5 μm 。最后, 将该方法应用于一批 20 个立式加工中心, 进行批量补偿试验。所有加工中心补偿后的精度均优于 40 μm 。本研究的创新之处在于将灵敏度分析作为简化机床误差模型的理论依据, 并提出了出一种快速批量化建模和补偿的方法。该方法能有效提高误差补偿效率, 在未来机床误差补偿的广泛工业应用中有着巨大的潜力。

关键词: 空间误差; 灵敏度分析; 分步体对角线; 批量加工中心; 实时误差补偿

中图分类号: TH161

Volumetric Error Modelling and Compensation for Batch of Vertical Machining Centers Based on Sensitivity Analysis

YANG Yun ZHU Mengrui LI Huimin DU Zhengchun YANG Jianguo
(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: Volumetric error modelling and compensation has become one of the most cost-effective ways to improve the accuracy and performance of machine tools. However, the time-consuming measurement process limits its application. Hence, a volumetric error rapid modelling and compensation method based on the sensitivity analysis is proposed. Firstly, a generalized kinematic model of the vertical machining center is established. Then the most important key error components are determined according to the sensitivity analysis of the all error components, while the less important angular errors can be neglected. Consequently, all key error components are measured and modelled with Chebyshev polynomials, and further applied in a real time error compensation system. To evaluate the effectiveness of this method, the positioning errors along each translational axis and body diagonal lines with and without error compensation are compared. The former is greatly reduced from 21.9 μm to 6.5 μm , while volumetric error similarly reduced from 81.6 μm to 35.5 μm . Finally, this method is applied into 20 vertical machining centers, all improved to less than 40 μm . This paper innovatively uses sensitivity analysis as the theoretical basis for simplifying machine tool error models, and proposes a rapid modeling and compensation method for batch of vertical machining centers. This method can effectively improve the error compensation efficiency, which shows great potential in the future industrial applications.

Key words: volumetric error; sensitivity analysis; body diagonal error evaluation; batch of CNC machining centers; real-time error compensation

^{*} 国家自然科学基金(51975372, 51527806)、国家科技重大专项(2015ZX04005001)和国家重点研发计划(2018TFB1701204)资助项目。
20190718 收到初稿, 20191104 收到修改稿

0 前言

在机床的加工过程中, 刀具切削点相对于工件的位置是工件加工精度的决定因素。误差防止法和误差补偿法^[1]是提高机床加工精度的两种基本方法。误差补偿法通过软件技术, 人为地产生一种新的误差以抵消原始误差。和误差防止法相比, 误差补偿法不需要消除系统外误差源的影响, 对机床自身的制造和装配精度要求较低, 可以通过较小的经济代价获得较高的精度水平。因此, 近年来误差补偿法受到研究人员的广泛关注。

工件的加工精度主要由机床的运动精度决定。根据数控机床的误差来源, 影响机床精度的主要误差有几何误差、热变形误差和切削力误差。RAMESH 等^[2]对机床误差的相关研究进行了综述, 并指出几何或空间误差是造成机床不准确性主要因素。空间误差的测量与补偿对于提高机床的加工精度至关重要。目前, 在机床几何误差的运动学建模方面, 主要有齐次坐标变换矩阵^[3-5], 螺旋理论^[6-7], 指数模型^[8]或微分流形^[9]等方法。以上方法均基于机床构建的刚体框架及其参考坐标系之间的坐标变换, 并被广泛运用于误差建模的相关领域。测量手段主要有激光干涉仪^[10-11]、平面正交光栅^[12]、测量实际加工工件^[13-14]或新型的激光跟踪干涉仪^[15]。其中, 激光干涉仪由于其较高的精度和相对低的成本, 是测量几何误差的最广泛使用的方法。在机床几何误差的补偿研究中, 部分学者对所有影响机床精度的误差元素进行测量和补偿^[11, 16]。由于误差元素的种类太多, 补偿过程投入的经济与时间成本太大, 补偿效率不高。部分学者仅针对部分误差元素进行测量和补偿^[17], 提高了效率, 但对误差元素的选择缺乏理论依据。

在以往的相关文献中, 大多数误差建模研究主要关注于机床精度的提高。在机床误差的灵敏度分析方面, HUANG 等^[18]使用误差映射函数分析了影响三自由度并联运动机器不可补姿态误差的误差源。HONG 等^[19]研究了五轴机床旋转轴的位置相关误差对锥台加工试验的影响。LEE 和 LIN^[20]根据成型理论研究了装配误差项对五轴机床误差的影响。LI 等^[21]提出了一种用于三轴机床的关键几何误差元素识别方法。李自汉^[22]分析了不同误差元素的影响机理, 提出了一种基于机床灵敏度分析的关键误差识别方法。武剑等^[23]对立式加工中心关键部件误差进行了基于敏感性的识别分析。上述学者的工作在灵敏度分析领域已取得了一定的成果, 但主要集

中于误差建模和机床设计等方面。

本文将从误差补偿的角度, 对机床空间误差进行灵敏度分析, 找出影响立式加工中心几何精度的关键误差元素, 并将分析结果应用于批量立式加工中心的误差测量和补偿过程, 以测试和验证机床几何精度的改进和补偿效率的提高。

1 立式加工中心误差模型

立式加工中心的运动链为 XYZ 型, 具有如图 1 所示的运动链结构与连接关系。其中 X 轴与 Y 轴属于工件运动链, 其工件可以沿着 X 轴与 Y 轴两个方向相对机床床身运动, 而 Z 轴属于刀具运动链, 刀具可以沿着 Z 轴方向相对机床床身运动。运动链的传递顺序为: “WCS→XCS→YCS→MCS→ZCS→SCS→TCS”。其中 WCS 表示工件坐标系, XCS 表示 X 轴坐标系, YCS 表示 Y 轴坐标系, ZCS 表示 Z 轴坐标系, SCS 表示主轴坐标系, TCS 表示刀具坐标系。

图1 立式加工中心运动传递链的拓扑结构

在运动链中, 参考基准为该加工中心的 MCS 床身坐标系, 并根据基准将运动链分解为刀具运动链和工件运动链。其中, 刀具运动链由 Z 轴坐标系 ZCS、主轴坐标系 SCS 与刀具坐标系 TCS 组成。

在实际情况下, 由于机床各项几何误差的影响, 刀具切削点相对于工件的空间位置误差 $\Delta P_e = (\Delta P_x \Delta P_y \Delta P_z 1)^T$ 可表述为

$$\Delta P_e = {}^W P_r - {}^W P_i = {}^W T_r^T P - {}^W T_i^T P = ({}^W T_r - {}^W T_i) \cdot (0 \ 0 \ 0 \ 1)^T \quad (1)$$

式中, ${}^W P_r$ 为实际刀具切削点的位置, ${}^W P_i$ 为理想刀具切削点的位置, ${}^W T_r$ 为刀具相对于工件的实际齐次变换矩阵, ${}^W T_i$ 为刀具相对于工件的理想齐次变换矩阵。

将 ${}^W T_r$ 、 ${}^W T_i$ 代入式(1), 并忽略高阶无穷小量, 则可以解出刀具切削点相对于工件的空间位置误差, 其在 X 、 Y 、 Z 轴方向的分量分别为

$$\begin{cases} \Delta P_x = -\delta_x(x) - \delta_x(y) + \delta_x(z) - y\delta_z(x) - y\delta_z(y) - \\ \quad z(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y)) + y\eta_{xy} - z\eta_{xz} \\ \Delta P_y = -\delta_y(x) - \delta_y(y) + \delta_y(z) + x\delta_z(x) + \\ \quad z(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y)) - z\eta_{yz} \\ \Delta P_z = -\delta_z(x) - \delta_z(y) + \delta_z(z) + x\delta_y(x) + \\ \quad y(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y)) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\delta_i(i)$ 为 i 轴($i=x, y, z$)的定位误差; $\delta_j(i)$ 为 i 轴($i=x, y, z$)在 j 轴($j=x, y, z$, 且 $j \neq i$)方向上的直线度误差; $\varepsilon_j(i)$ 为 i 轴($i=x, y, z$)在 j 轴($j=x, y, z$)方向上的角偏误差; η_{ij} 为 i 轴(x, y, z)与 j 轴($j=x, y, z$, 且 $j \neq i$)的垂直度误差, 且为常量。

2 基于灵敏度分析的关键误差辨识

机床的空间几何误差主要分为定位误差、直线度误差、垂直度误差和角偏误差。由于不同类型的机床其结构、工作行程、运动轴定位方式不同, 各项误差元素对其空间定位精度会造成不同程度的影响。在实际误差测量中, 如果测量全部 21 项误差元素, 不仅工作强度大, 而且经济成本高, 严重影响误差测量和补偿的效率。因此, 本文提出了一种基于灵敏度分析的立式加工中心关键误差元素辨识方法。该方法可以有效辨识出对立式加工中心空间几何精度影响较大的关键误差元素, 简化误差模型, 提高立式加工中心误差的测量、建模和补偿效率。

影响机床刀具切削点的空间误差主要为 21 项几何误差, 且几何误差随机床的运动位置、刀具切削点在 TCS 与 WCS 的下的坐标位置发生变化。

对机床的误差数学模型求 21 项几何误差元素的偏导数的, 可得与机床运动位置相关的空间几何误差的灵敏度系数矩阵, 如式(3)所示

$$S = \begin{pmatrix} \frac{\partial \Delta P_x}{\partial \delta_x(x)} & \frac{\partial \Delta P_x}{\partial \delta_y(x)} & \dots & \frac{\partial \Delta P_x}{\partial \eta_{xy}} & \frac{\partial \Delta P_x}{\partial \eta_{xz}} & \frac{\partial \Delta P_x}{\partial \eta_{yz}} \\ \frac{\partial \Delta P_y}{\partial \delta_x(x)} & \frac{\partial \Delta P_y}{\partial \delta_y(x)} & \dots & \frac{\partial \Delta P_y}{\partial \eta_{xy}} & \frac{\partial \Delta P_y}{\partial \eta_{xz}} & \frac{\partial \Delta P_y}{\partial \eta_{yz}} \\ \frac{\partial \Delta P_z}{\partial \delta_x(x)} & \frac{\partial \Delta P_z}{\partial \delta_y(x)} & \dots & \frac{\partial \Delta P_z}{\partial \eta_{xy}} & \frac{\partial \Delta P_z}{\partial \eta_{xz}} & \frac{\partial \Delta P_z}{\partial \eta_{yz}} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, 从左至右依次为 X 轴定位误差、 X 轴 2 项直线度误差、 X 轴 3 项角偏误差、 Y 轴 6 项误差、 Z 轴 6 项误差以及 3 项垂直度误差。对于 $XYFZ$ 型立式加工中心, 将式(2)所示误差模型代入, 可以求得其对应的灵敏度系数矩阵, 如式(4)所示。

$$S = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & -z & -y & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & z & 0 & x & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & y & -x & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -z & -y & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -y & -z & 0 \\ z & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -z \\ y & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

误差灵敏度矩阵的物理意义为 21 项几何误差的单位变化量 Δe_i 引起的空间位置误差变化的大小。误差元素 e_i 的灵敏度系数 S_i 越大, 则说明机床的空间定位精度对误差元素 e_i 的变化越敏感。为了评估各误差元素对空间误差造成的相对影响, 将各方向的误差灵敏度系数归一化处理, 如下所述

$$s_{xi} = \frac{|S_{xi}|}{\sum |S_{xi}|} \quad s_{yi} = \frac{|S_{yi}|}{\sum |S_{yi}|} \quad s_{zi} = \frac{|S_{zi}|}{\sum |S_{zi}|} \quad (5)$$

由式(4)可知, 垂直度误差和角偏误差的灵敏度为与机床三个运动行程相关的变量, 其大小由机床的运动行程、结构特点和误差产生的机理决定。

对于本文所研究的 VMC850B 型机床, 运动行程分别为 800 mm, 500 mm, 500 mm。其垂直度误差 η_{xy} 会在 X 轴方向上增加 $y\eta_{xy}$ 大小的误差, 且在 Y 轴整个工作行程中都会对机床定位精度产生影响, 所以其灵敏度系数为 0.5。同理 η_{xz} 与 η_{yz} 的灵敏度系数均为 0.5。当机床沿 X 轴运动时, 其角偏误差 $\varepsilon_z(x)$ 灵敏度系数正比于刀具实际运动轨迹相对于 X 轴定位基准线在水平平面的阿贝偏差。设定 X 轴工作台的中心线为基准线, 则实际加工时的阿贝偏差最大值为 200 mm, 因此该灵敏度系数取值 0.2。同理, 角偏误差在 X 与 Z 轴向的灵敏度系数均取值 0.2。由此得出机床在 X 、 Y 、 Z 方向的空间误差的归一化灵敏度系数分布, 如图 2 所示。

(a) X 轴关键误差元素的灵敏度系数

(b) Y 轴关键误差元素的灵敏度系数

图2 立式加工中心关键误差元素的灵敏度系数

在实际加工中,误差元素产生的空间误差的大小,不仅与该误差元素的灵敏度系数有关,也与该误差元素自身的大小有关。对于灵敏度系数大的误差元素,如果在机床设计与装配阶段,将该误差元素的误差大小控制在较小的水平,那么所产生的空间误差的尺度也会比较小。为此,本文提出式(6)所示的综合评定准则来衡量误差元素对实际空间几何精度的影响程度。

$$\begin{cases} E_{xi} = \frac{s_{xi} \cdot \Delta e_i}{\sum s_{xi} \cdot \Delta e_i} \\ E_{yi} = \frac{s_{yi} \cdot \Delta e_i}{\sum s_{yi} \cdot \Delta e_i} \\ E_{zi} = \frac{s_{zi} \cdot \Delta e_i}{\sum s_{zi} \cdot \Delta e_i} \end{cases}, i=1,2,\dots,21 \quad (6)$$

式中, E_{xi} 、 E_{yi} 、 E_{zi} 分别表示各项误差元素 e_i 对机床 X、Y、Z 轴方向实际空间几何精度影响因子的大小,各方向数值总和为 1。 Δe_i 表示各项误差元素的误差大小。影响因子越大,则表明该误差元素对机床的空间几何精度影响越大。

本文统计了沈阳机床集团的 30 台 VMC850B 立式加工中心的抽样误差测量结果,并取平均值作为各误差元素的误差评估值,如表 1 所示。

表1 立式加工中心误差测量结果统计表

参数	位置误差/ μm			角度误差/ μrad		
	$\delta_x(x)$	$\delta_y(x)$	$\delta_z(x)$	$\varepsilon_x(x)$	$\varepsilon_y(x)$	$\varepsilon_z(x)$
X 轴	20	8	8	5	10	10
Y 轴	$\delta_x(y)$	$\delta_y(y)$	$\delta_z(y)$	$\varepsilon_x(y)$	$\varepsilon_y(y)$	$\varepsilon_z(y)$
	6	16	6	10	5	10
Z 轴	$\delta_x(z)$	$\delta_y(z)$	$\delta_z(z)$	$\varepsilon_x(z)$	$\varepsilon_y(z)$	$\varepsilon_z(z)$
	6	6	16	10	10	5
垂直度误差	η_{xy} : 16 μrad ;			η_{xz} : 16 μrad ;		

将表 1 中的统计结果与各误差元素的灵敏度系数代入式(6),便可计算出各误差元素在机床 X、Y、Z 方向的加工精度影响因子分布,如图 3 所示。

图3 立式加工中心关键误差元素的精度影响因子

基于上文的分析结果可知,影响立式加工中心空间定位精度的关键误差元素包括 3 项定位误差、6 项直线度误差、3 项垂直度误差,而角偏误差的影响却较小,可以视为非关键误差元素。

该关键误差辨识方法,亦可以适用于其他种类的机床,但具体关键误差元素项可能会不同。如大型龙门加工中心中,直线度误差和部分角偏误差的影响将变得十分重要。

3 基于灵敏度分析的误差测量与建模

针对上文的 12 项关键几何误差元素,本文使用激光干涉仪测量全部误差元素在选定误差测点的几何误差值。使用 Chebyshev 正交多项式对单个误差元素全工作行程的误差分布进行建模拟合,有效提高了几何误差建模的精度与效率。

以 X 轴水平直线度误差 $\delta_y(x)$ 为例,本文选取机械坐标零点作为测量起点,测量行程为 800 mm,并基于切比雪夫插值零点选取 17 个最优测点。根据误差测点的横坐标值及其所对应的误差测量值解出直线度误差的多项式拟合模型,如式(7)所示。

$$\begin{aligned} \delta_y(x) = & 4.68T_0(X) - 2.12T_1(X) - \\ & 4.13T_2(X) + 3.62T_3(X) - 0.55T_4(X) - \\ & 1.31T_5(X) - 0.35T_6(X) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $T_i(X)$ 表示 i 阶 Chebyshev 正交多项式。

拟合结果如图 4 所示, 与 6 阶最小二乘拟合算法对比, 本方法克服了局部过拟合, 在建模精度上有了一定的提升。

采用同样的建模方法, 可以得到 X 、 Y 、 Z 三轴正向定位误差、反向定位误差、水平直线度误差以及垂直直线度误差的拟合模型, 如图 5 所示。

图 4 Chebyshev 多项式与最小二乘法的拟合对比

(a) X轴定位误差

(b) X轴直线度误差

(c) Y轴定位误差

(d) Y轴直线度误差

(e) Z轴定位误差

(f) Z轴直线度误差

图 5 X、Y、Z 三轴几何误差元素的建模拟合结果

垂直度误差为常量, 可以从水平直线度误差测量值中分离出来, 如表 2 所示。

表 2 立式加工中心的垂直度误差

垂直度误差	误差值/μrad
η_{xy}	16.85
η_{xz}	13.28
η_{yz}	12.16

4 立式加工中心空间误差补偿方法

在完成机床误差的测量与建模后, 为了实现对机床几何误差的实时补偿, 本文基于嵌入式工控机开发了一套几何误差实时补偿器, 结合数控系统的外部机械原点偏移功能(External machine zero point

shift, EMZPS), 对机床的几何误差进行实时补偿。补偿周期与机床数控系统的插补周期基本一致, 在本项目 FANUC0i 系统下, 约为 20 ms。

本文使用的误差补偿器工作原理如图 6 所示, 其工作流程如下。

(1) 数控系统通过调用 PMC 窗口功能函数, 将机床的机械坐标位置通过外部 I/O 模块实时输出给机床数据采集模块。

(2) 误差补偿器的中央控制单元通过 PCI-1753 采集卡实时读取机床的当前机械坐标位置。

(3) 工控机中的误差补偿软件, 根据机床的坐标位置实时预测其空间误差, 并通过 PCI-1753 采集卡将补偿值实时反馈给机床的外部 I/O 模块。

(4) 数控系统调用 PMC 窗口功能函数, 实时读取外部 I/O 模块的补偿值, 然后基于 EMZPS 功能实现机床误差的实时补偿。

图 6 误差补偿器的硬件框架图

5 基于灵敏度分析的误差补偿试验

为了验证所提出的三轴加工中心简化模型的有效性, 本文在沈阳机床集团(SMTCL)生产的 VCM850E 型三轴立式加工中心上进行了补偿试验。该加工中心采用 FANUC 0i 数控系统。试验所使用的误差补偿系统如图 7 所示。

在补偿实施过程中, 基于前文灵敏度分析的结果, 本文选择了对机床空间误差影响因子较大的误差项, 忽略了影响较小的 9 项角偏误差, 建立了基于 12 项关键几何误差元素的简化误差补偿模型, 大大减少了误差测量过程的工作量, 提高了补偿效率。

首先, 本文使用光动公司(Optodyne Inc)的 LDDM MCV-5000 型激光干涉仪依次测量 3 个定位误差、6 个直线度误差和 3 个垂直度误差。然后, 将数据发送到误差补偿系统, 并建立简化的误差模型。误差补偿系统将在随后的加工过程中自动补偿

空间误差。最后按照 ISO230-2^[24]和 ISO230-6^[25]规定的方法, 对加工中心的三轴定位误差和四条体对角线定位误差进行测量, 以评估补偿效果。

图 7 机床电控柜中的误差补偿系统

本文通过采用激光干涉仪测量补偿前后的定位误差, 对误差补偿的效果进行验证。补偿前后的定位误差如表 3 所示。其最大定位误差由 21.9 μm 减小到 6.5 μm 。

表 3 立式加工中心定位误差的补偿效果

误差项	补偿前/ μm	补偿后/ μm	提高百分比(%)
X 轴定位误差	19.8	6.5	67.2
Y 轴定位误差	14.9	2.5	83.2
Z 轴定位误差	21.9	2.4	89.0
最大定位误差	21.9	6.5	70.3

(a) PPP

(b) NPP

(c) PNP

(d) PPN

图 8 体对角线的测量

同理, 本文也采用激光干涉仪测量四条体对角线的定位误差来评估误差补偿的效果。激光分步体对角线测试的测量过程如图 8 所示, 试验结果如图 9 所示。本文采用四条体对角线定位误差的最大值作为评价体对角线空间误差的指标。如表 4 所示, 最大体对角线误差由 81.6 μm 降低为 35.5 μm 。

通过测量试验进行的时间来看, 本文测量 3 项定位误差、6 项直线度误差和 3 项垂直度误差的试验时间共计为 13 h。与测量 21 项误差元素的传统方法相比, 节约了角偏误差的测量时间, 省去了测

量角偏误差所需的自准直仪等仪器,保证了测量的高效性和经济性。

图 9 补偿前后的分步体对角线误差测量结果

表 4 立式加工中心补偿前后体对角线定位精度

对角线	补偿前/ μm	补偿后/ μm	提高比例
PPP	81.6	19.4	—
PPN	75.7	10.5	—
PNP	34.9	35.5	—
NPP	44.9	29.4	—
最大误差(%)	81.6	35.5	56.5

基于灵敏度分析的立式加工中心批量空间误差补偿方法已经批量应用在沈阳机床股份有限公司。为客观有效地评定补偿效果,沈阳机床股份有限公司委托第三方检测机构——机械工业机床产品质量检测中心(昆明)对其型号为 VMC850E 的 20 台智能立式加工中心补偿后机床的体对角线精度进行了检测,检测结果如表 5 所示。所有加工中心补偿后的精度均优于 $40\ \mu\text{m}$ 。

6 结论

(1) 提出一种基于灵敏度分析的立式加工中心批量误差建模与补偿方法。通过对立式加工中心进行灵敏度分析,发现影响其空间误差的关键误差元

表 5 立式加工中心对角线误差的补偿后的检测结果

机床编号	实测/ μm				
	PPP	PPN	PNP	NPP	max
i518M450267	32.6	5.6	9.6	12.6	32.6
i518M450269	25.4	32.8	21.8	28.4	32.8
i518M451019	27.4	19.6	21.2	39.2	39.2
i518M451053	19.8	33.2	21.8	30	33.2
i518M450268	32.0	28.8	11.8	23.0	32.0
i518M451012	21.0	8.0	38.8	38.4	38.8
i518M451021	10.2	7.4	14.6	29.4	29.4
i518M451022	16.2	14.8	22.2	26.0	26.0
i518M451096	29.6	16.0	15.6	11.6	29.6
i518M451023	4.6	14.0	8.8	37.2	37.2
i518M451013	7.4	13.6	21.4	30.0	30.0
i518M451014	18.8	4.6	38.0	22.6	38.0
i518M450270	23.8	15.6	12.2	10.4	23.8
i518M450266	39.0	13.6	23.0	31.0	39.0
i518M450649	6.4	23.2	7.8	19.8	23.2
i518M450493	27.8	16.0	9.8	31.6	31.6
i518M450073	40.0	6.0	24.8	39.4	40.0
i518M451051	38.0	21.6	31.8	26.6	38.0
i518M451052	24.2	20.8	12.6	28.0	28.0
i518M451097	11.6	18.6	17.2	25.0	25.0

素包括 3 个定位误差,6 个直线度误差和 3 个垂直度误差。对于这些关键误差元素,本文使用激光干涉仪的测量上述误差的数据,并采用 Chebyshev 正交多项式对上述误差进行建模。本文通过以上测量和建模,得到了该立式加工中心的简化空间误差模型,并使用开发的误差补偿器实现了实时误差补偿。

(2) 误差补偿验证试验的结果表明,本文提出的基于灵敏度分析的简化空间误差模型和补偿方法成功降低了机床的空间误差,节约了角偏误差元素所需的测量时间。此外,本方法还被成功应用于一批 20 个相同类型的立式加工中心,验证了本方法的稳定性和实用性,体现出本方法在未来机床误差补偿的工业应用中具有较大的潜力。

参 考 文 献

- [1] KHAN A, CHEN W. A methodology for systematic geometric error compensation in five-axis machine tools[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 5-8(53): 615-628.
- [2] RAMESH R, MANNAN M, POO A. Error compensation in machine tools-a review Part I: Geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 9(40): 1235-1256.

- [3] KONG L, CHEUNG C, TO S, et al. A kinematics and experimental analysis of form error compensation in ultra-precision machining[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 12-13(48): 1408-1419.
- [4] PENG F, MA J, WANG W, et al. Total differential methods based universal post processing algorithm considering geometric error for multi-axis NC machine tool[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2013(70): 53-62.
- [5] UDDIN M, IBARAKI S, MATSUBARA A, et al. Prediction and compensation of machining geometric errors of five-axis machining centers with kinematic errors[J]. *Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2009, 2(33): 194-201.
- [6] MOON S, MOON Y, KOTA S, et al. Screw theory based metrology for design and error compensation of machine tools[C]. *Proceedings of DETC*, 2001(1): 697-707.
- [7] YANG J, ALTINTAS Y. Generalized kinematics of five-axis serial machines with non-singular tool path generation[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2013(75): 119-132.
- [8] FU Guoqiang, FU Jianzhong, XU Yuetong, et al. Product of exponential model for geometric error integration of multi-axis machine tools[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 9-12(71): 1653-1667.
- [9] TIAN Wenjie, GAO Weiguo, ZHANG Dawei, et al. A general approach for error modeling of machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2014(79): 17-23.
- [10] JANEČZKO J, GRIFFIN B, WANG C. Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric position errors. Part II: Experimental verification[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 10(71): 3938-3941.
- [11] ZHU Shaowei, DING Guofu, QIN Shengfeng, et al. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, 1(52): 24-29.
- [12] DU Zhengchun, ZHANG Shujie, HONG Maisheng. Development of a multi-step measuring method for motion accuracy of NC machine tools based on cross grid encoder[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2010, 3(50): 270-280.
- [13] BRINGMANN B, KUNG A. A measuring artefact for true 3D machine testing and calibration[J]. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 2005, 54(1): 471-474.
- [14] IBARAKI S, IRITANI T, MATSUSHITA T. Calibration of location errors of rotary axes on five-axis machine tools by on-the-machine measurement using a touch-trigger probe[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012(58): 44-53.
- [15] CHEN Hongfang, JIANG Bo, SHI Zhaoyao, et al. Uncertainty modeling of the spatial coordinate error correction system of the CMM based on laser tracer multi-station measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 2(30): 025007.
- [16] WENG Lingtao, GAO Weiguo, ZHANG Dawei, et al. Influences of linear and angular compensation on volumetric accuracy of precision machine tools[C]// *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing*, 2018: 57-60.
- [17] FENG W, YAO X, AZAMAT A, et al. Straightness error compensation for large CNC gantry type milling centers based on B-spline curves modeling[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2015, (88): 165-174.
- [18] HUANG T, WHITEHOUSE D, CHETWYND D. A unified error model for tolerance design, assembly and error compensation of 3-DOF parallel kinematic machines with parallelogram struts[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2002, 51(1): 297-301.
- [19] HONG C, IBARAKI S, MATSUBARA A. Influence of position-dependent geometric errors of rotary axes on a machining test of cone frustum by five-axis machine tools[J]. *Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2011, 1(35): 1-11.
- [20] LEE R, LIN Y. Applying bidirectional kinematics to assembly error analysis for five-axis machine tools with general orthogonal configuration[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 9-12(62): 1261-1272.
- [21] LI Dianxin, FENG Pingfa, ZHANG Jianfu, et al. An identification method for key geometric errors of machine tool based on matrix differential and experimental test[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*

- Part C-Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 17(228): 3141-3155.
- [22] 李自汉. 数控机床关键误差识别、建模及实时补偿应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- LI Zihan. Research on the identification, modeling and compensation method for CNC machine tool key error sources[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [23] 武剑, 顾成劫, 杜正春, 等. 立式加工中心关键部件误差辨识分析[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(4): 81-84.
- WU Jian, GU Chengjie, DU Zhengchun, et al. Identification of key component errors in vertical machine center[J]. Machine Design and Research, 2018, 34(4): 81-84.
- [24] International Organization for Standardization. ISO 230-2 Test code for machine tools-Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes[S]. Geneva: ISO, 2014.
- [25] International Organization for Standardization. ISO 230-6 Test code for machine tools-Part 6: Determination of positioning accuracy on body and face diagonals (diagonal displacement tests)[S]. Geneva: ISO, 2002.
-
- 作者简介: 杨赞, 男, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为误差测量、建模与补偿。
E-mail: yangyun402@sjtu.edu.cn
- 杜正春(通信作者), 男, 1973 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数控机床误差测量、建模与补偿研究, 精密检测与加工, 计算机图像测量。
E-mail: zcdu@sjtu.edu.cn