

基于SIEMENS数控系统的机床综合误差实时补偿方法研究*

肖晓¹,张聘¹,魏亚飞¹,汪建²,连成哲²,叶文华²

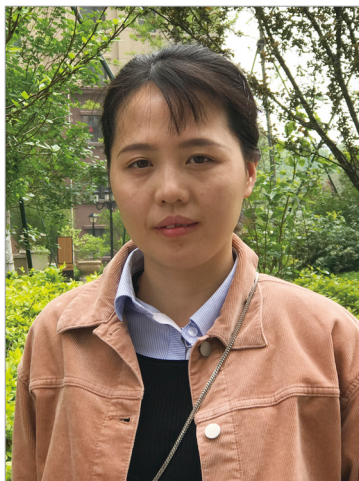
(1. 航空工业济南特种结构研究所, 济南 250023;

2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 误差补偿技术是一种有效且经济的提高机床加工精度的方法。基于 SIEMENS 数控系统提供的温度补偿功能, 结合基于 BP 神经网络的综合误差模型, 提出了一种机床综合误差实时补偿方法。基于提出的误差补偿方法和 ARM 平台, 设计开发了一套综合误差实时补偿系统。以 QLM27100 型龙门加工中心为对象进行零件加工时的机床综合误差补偿试验, 试验结果显示试件最大误差减小了 59.1%, 验证了该补偿方法的有效性。

关键词: SIEMENS 数控系统; 误差实时补偿; BP 神经网络; ARM 微处理器; 误差模型

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.05.035



肖晓

硕士, 工程师, 主要从事数控加工工艺技术和仿真应用研究。

误差补偿技术可以有效且经济地提高数控机床的加工精度^[1]。数控机床的误差补偿通常可分为以下步骤^[2]: 误差源的分析和检测、误差数学模型的建立、误差元素的辨识和建模、误差计算与补偿。其中, 误差补偿是通过刀具或工件在空间误差的逆方向产生一定的位移实现, 是误差补偿技术的最终环节。

误差实时补偿方法主要分为反馈中断法和原点平移法^[3]。反馈中断法的实现是将误差的相位信号插入伺服系统的反馈环中, 但插入相位信号比较复杂, 所以该方法使用较少。原点平移法将误差补偿值发送至 CNC 控制器, 在加工过程中实时地将控制系统的参考原点向误差反向平移, 因其不影响坐标值和加工程序的优点, 获得了大量使用。如吴昊^[4]针对双主轴立式车床 AC-300, 以外接计算机为处理器搭建软硬件平台, 通过 I/O 口将误差补偿值发

送至数控系统 CNC 控制器, 实现切削力误差的实时补偿; 姜辉^[5]针对 FANUC 0i 数控系统, 自行研制的基于单片机的误差补偿器, 与 CNC 系统进行实时数据交互, 基于外部坐标原点偏移功能实现机床几何误差与热误差的实时补偿; 胡胜海等^[6]针对数控火焰切割机提出一种在线修正加工误差的实时补偿方法, 根据加工误差综合预测模型, 建立动态补偿策略, 在原有加工过程中较小干扰的前提下进行补偿运动。

虽然误差实时补偿技术受到越来越多学者的重视, 对各类误差研究有了很大的进步, 但依然存在没有充分利用现代数控系统本身的功能、需要开发专用补偿器、开发难度大、通用性差等问题。

本文针对 SIEMENS 840D 数控系统, 在深入研究数控系统本身具有的误差补偿方法的基础上, 利用温度补偿功能, 结合 BP 神经网络, 提出

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51775277, 51575272)。

了一种能对力误差、热误差等误差进行综合补偿的实时补偿方法,仅需在PLC中加入少量程序,可在不影响机床正常运行的前提下实现误差补偿,并利用自行开发的误差补偿平台验证该方法的有效性。

基于 SIEMENS 数控系统的机床误差实时补偿方法

1 数控机床误差实时补偿的一般方法

数控机床误差实时补偿一般采用基于半闭环反馈的补偿方式,其原理如图1所示。在加工过程中,通过对一些能表征机床当前加工状态、环境变化的参量如温度、切削力、加工位置、加工参数等进行监测,建立机床加工误差与这些变量之间的关系,按误差模型实时计算当前条件下的误差值,并以一定手段进行误差补偿。

误差实时补偿方法中,反馈中断法是将相位信号插入伺服回路,这种方法实现起来比较复杂,且容易对机床造成不可预料的影响。原点偏移法不需要对机床进行复杂的操作,只需要在PLC中添加少量程序便可实现,目前西门子、发那科等主流数控系统都提供了用原点偏移法进行热误差补偿的功能接口。本文对西门子840D数控系统进行了综合误差实时补偿技术研究。

2 SIEMENS 数控系统的温度补偿功能

SIEMENS的某些高端数控系统(如840D、840D sl等)针对由环境温度变化、切削热传导、运动部件生热等因素引起的机床部件热变形误差提供了温度补偿功能^[7]。对于每一个轴来说,在一定温度下,热误差与位置的曲线可表示如下:

$$\Delta k_i = k_o(T) + \tan\beta(T) \times (P_i - P_{i0}) \quad (1)$$

式中, P_i 是 i 轴的当前位置,其中 i 表示坐标轴,如 X 、 Y 、 Z 轴; P_{i0} 是 i 轴上热误差测量的参考点; $k_o(T)$ 是

参考点在温度 T 下的误差值; $\tan\beta$ 是温度补偿系数。

该功能通过测得的当前温度值按照温度误差曲线实时计算误差值并在插补中进行补偿。但由于上述温度误差值的计算方法过于简单,热误差的计算值与实际值差异较大,难以实现高精度的热误差补偿。

3 基于 SIEMENS 数控系统温度补偿功能的综合误差实时补偿方法

对式(1)表示的热误差计算式,SIEMENS数控系统还提供了进一步简化计算的方法:

$$\Delta k_x = k_o(T) \quad (2)$$

此时,数控系统中生效的补偿值等于变量 $k_o(T)$ 的值。

因此,如果将外部误差模型计算得到的误差补偿值实时写入该变量,即可实现机床误差的实时补偿。不仅可实现热误差的补偿,还可以实现包括力误差和其他误差在内的机床

误差综合补偿。基于SIEMENS数控系统温度补偿功能的综合误差实时补偿原理如图2所示。

目前,国内外已有大量关于机床误差模型的研究^[8],包括三角函数模型、矢量模型、二次模型、变分模型、基于运动链的模型、多项式回归模型、神经网络模型等。但上述这些模型大部分只适用于几何误差、热误差等单项误差建模。机床误差主要包括几何误差、热误差、切削力误差。由于机床加工过程中情况复杂,各类误差相互耦合,要建立准确的机床单项误差模型是十分困难的。考虑到式(2)的误差补偿值是一个综合误差补偿值,因此,本文通过建立综合误差模型来计算综合误差补偿值。

由于神经网络具有很强的非线性映射能力和自适应能力^[9],可以通过学习提取样本中的规律建立输入与输出之间的关系,很容易建立机床

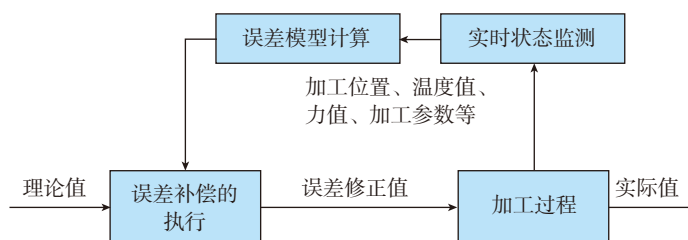


图1 误差实时补偿原理

Fig.1 Principle of error real-time compensation

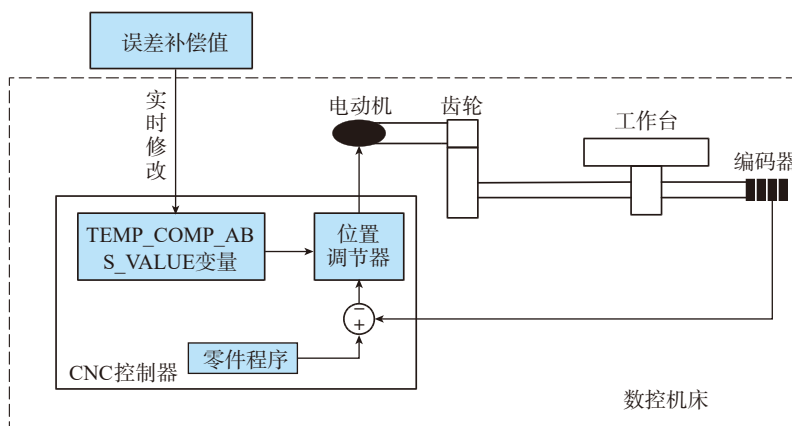


图2 基于温度补偿功能的实时补偿原理

Fig.2 Real-time compensation principle based on temperature compensation

加工参数与误差之间的模型。由于单隐层 BP 神经网络几乎可以用来拟合所有的非线性函数关系^[10],因此本文采用单隐层 BP 神经网络建立机床综合误差模型。其神经网络模型的结构如图 3 所示。

基于 BP 神经网络建立机床综合误差模型,首先需要确定神经网络的输入参数,要求参数可以直接或间接反映出当前加工位置的实际误差。参考国内外对于各类机床误差模型的研究结果^[11-13],本文确定几何误差相关的输入参数为机床各轴的位置坐标,热误差相关的输入参数主要为机床关键温度测点,切削力误差相关的输入参数为主轴负载、主轴转速、

切削进给量、切削深度。机床综合误差模型所有输入相关参数见图 4,神经网络模型的输出为加工过程中机床各个进给轴的综合误差补偿值。补偿值不仅包含进给轴的丝杠热膨胀、机床导轨滑块热变形等热误差和机床导轨移动中产生的几何误差,还包括因切削力引起的进给机构变形而产生的加工误差。

综合误差实时补偿系统开发

ARM (Advanced RISC Machines) 是目前在工控领域得到广泛应用的微处理器,基于 ARM 的嵌入式系统不仅具有较强的数据处理能力,同时也可以搭载不同的嵌入式操作系统,

并能提供友好的人机交互。因此本文采用 ARM 嵌入式系统作为平台,设计开发了机床误差实时补偿系统,在采集机床参数时建立了 ARM 和数控系统 PLC 的 Modbus 通信,通过这种方式可以方便地将补偿值发送给数控系统 PLC。综合误差实时补偿系统结构如图 5 所示。

采用符合机床温升范围的温度传感器对机床加工过程中关键点温度变化进行实时监测^[13]。机床加工参数如主轴转速、切削深度、主轴负载、各轴位置坐标等可以通过 ARM 与 PLC 建立的 Modbus 通信进行读取。

软件开发在 Qt Creator 的集成开发环境中完成,主要实现机床加工过程中温度变化监测、机床加工参数监测、基于神经网络的综合误差模型计算、补偿值发送等功能。程序流程图如图 6 所示。

为了计算补偿周期,计算了补偿系统在上述配置下误差模型的计算时间为 18.41ms。同时,综合考虑采集硬件和补偿值写入 PLC 后机床执行零点偏置所需的延时时间在 8ms 左右,所以最终确定补偿周期为 30ms。

试验验证

以图 7 所示的基于 SIEMENS 840D 数控系统加工中心为试验平台,以图 8 所示的铝合金 6061 试件为切削加工对象进行综合误差补偿试验。验证试验分两步进行,第 1 步为神经网络模型训练与验证,第 2 步为实时误差补偿试验。试件上设计了左右对称的两组壁厚为 2mm 的薄壁曲面,其中第 1 组左曲面用于神经网络模型训练,第 1 组右曲面用于神经网络模型验证;第 2 组左曲面加工时进行实时误差补偿,第 2 组右曲面加工时不进行误差补偿,用于对比。左右两组曲面的切削条件相同,分别为切深 1mm、进给量 200mm/min、转速 3000r/min。

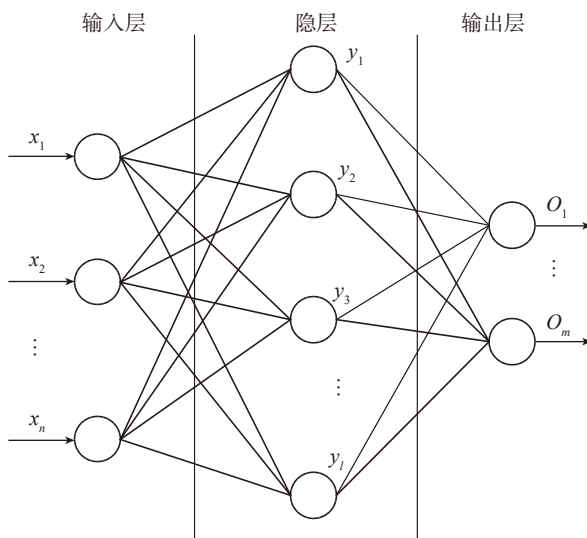


图3 机床综合误差的神经网络模型结构

Fig.3 Neural network model structure of comprehensive machine error

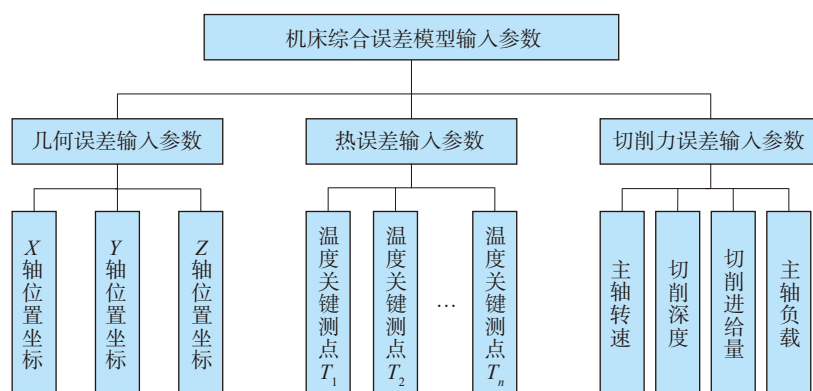


图4 机床综合误差模型输入参数

Fig.4 Input parameters of comprehensive machine error model

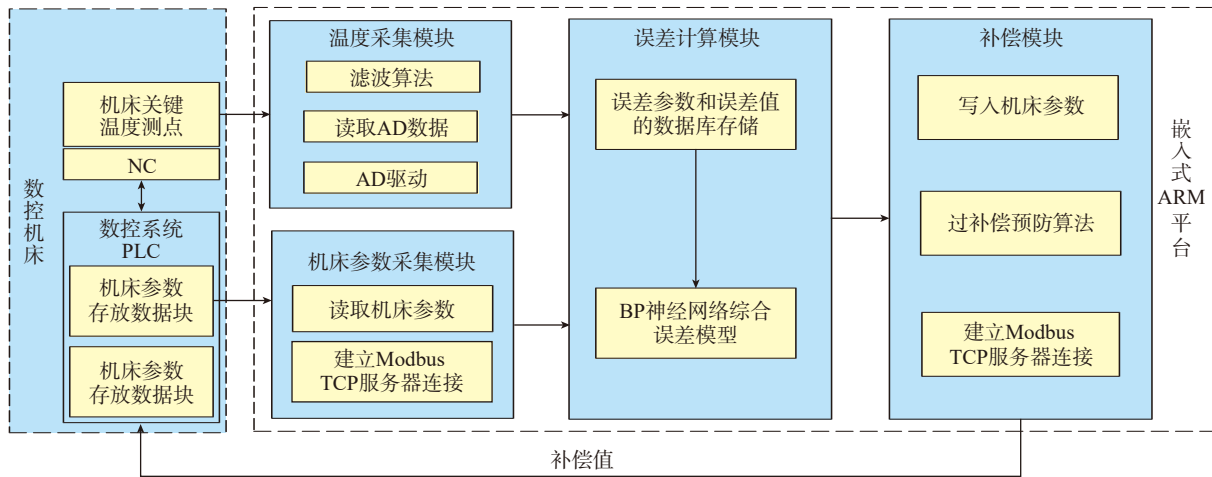


图5 综合误差实时补偿系统总体结构

Fig.5 Overall structure of comprehensive error real-time compensation system

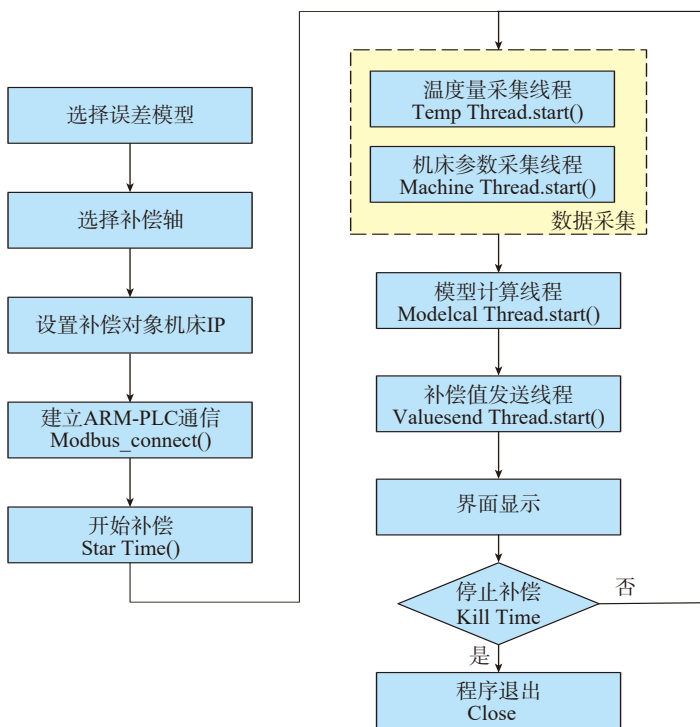


图6 误差实时补偿系统程序开发流程

Fig.6 Program development flow of real-time error compensation system

首先进行神经网络模型训练与验证试验。模型中几何误差与力误差有关的输入参数与图4相同。热误差有关的输入参数为温度关键测点,温度关键测点可按一般热误差建模中的方法来确定。本文基于课题组以前对该机床温度场研究,采用模糊聚类分析与灰色关联度相结合的方法来确定机床温度关键测点,即优化选取对热误差影响较大的温度变量,然后对这些温度变量进行分类,最后在各类测点中选取具有代表性的测点作为热误差建模所用的温度变量。最终确定每个移动轴进给机构的4个关键温度测点,分别位于螺母、轴承座、电机和导轨上。机床温度传感器布置示意图如图9所示。模型输出为曲面测得的X、Y、Z方向的误差值。按上述切削条件对试件第1组左右2个曲面分别进行加工,并用在线测量系统对2个曲面各取



图7 SIEMENS 840D数控加工中心

Fig.7 SIEMENS 840D CNC machine center

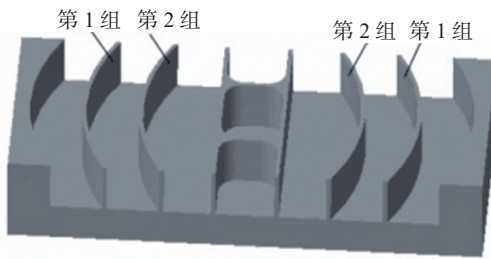


图8 试件模型与试件

Fig.8 Test part and its model

100个测点进行测量。100个测点分成 X 方向均布的10组,每组又分成 Z 方向均布的10个测点,见图10。最后用左曲面的数据来训练BP神经网络,右曲面的数据用于神经网络模型验证。试验结果证明模型是有效的。

然后基于上面建立的神经网络模型进行综合误差实时补偿试验。按上述切削条件对试件第2组左右2个曲面分别进行加工,并在加工左曲面时进行综合误差实时补偿。加工后同样用在线测量系统对2个曲面各取100个测点进行测量,2个曲面的 Y 向误差如图11所示。

通过测量结果可见,右曲面 Y 向峰值最大误差为 $175.13\mu\text{m}$,补偿误差后左曲面 Y 向峰值最大误差为 $71.66\mu\text{m}$,最大误差减小了59.1%,验证了本文所提出的误差实时补偿方法的有效性。

鉴于零件加工误差涉及机床、刀具、工件等众多因素,本文方法中考虑的因素相对比较简单,尚不能满足实际应用需要。

结论

本文介绍了数控机床误差实时补偿一般方法。根据SIEMENS数控系统提供的温度补偿功能,结合基于BP神经网络的综合误差模型,提出了一种机床综合误差实时补偿方法,并以ARM嵌入式为平台开发了

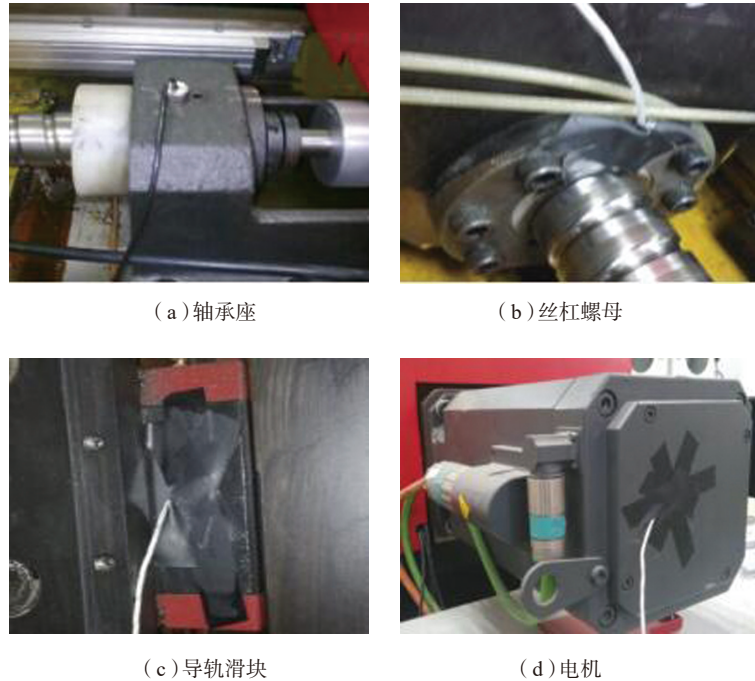


图9 温度传感器布置示意图

Fig.9 Schematic diagram of temperature sensor arrangement

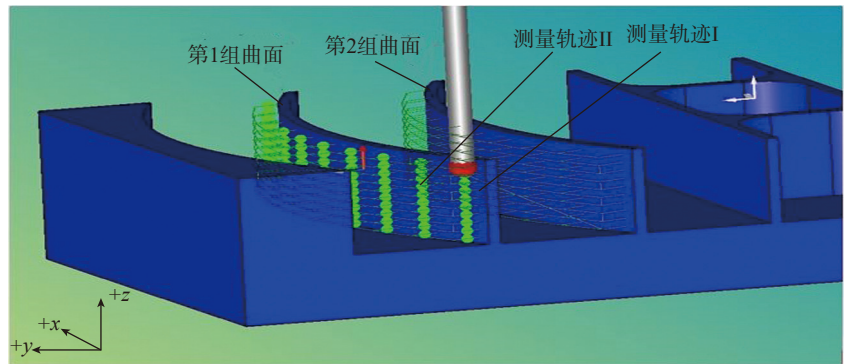


图10 曲面测点位置

Fig.10 Surface measuring point

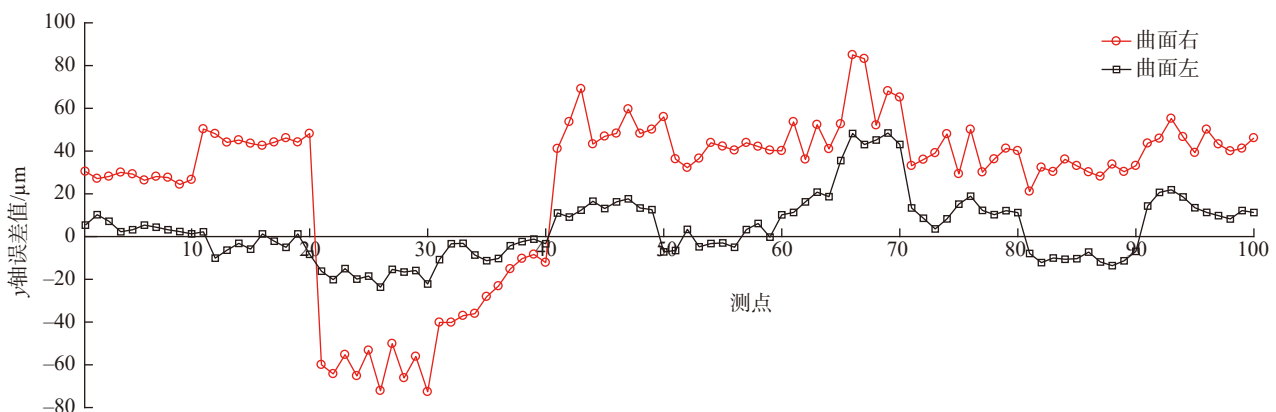


图11 第2组曲面左、右两边的 Y 向误差值对比

Fig.11 Comparison of Y -direction error values of left and right sides of two sets of surfaces

综合误差实时补偿系统。

以西门子 840D 数控系统机床为试验对象,对铝合金 6061 试件进行切削加工,并在加工过程中利用开发的综合误差实时补偿系统进行机床综合误差实时补偿,与误差未补偿时相比,试件最大误差减小 59.1%,验证了本文所提出的补偿方法的有效性。

参考文献

[1] LI S H, ZHANG Y Q, ZHANG G X, et al. A study of pre-compensation for thermal errors of CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1997, 37(12): 1715-1719.

[2] 章婷. 多轴数控机床准静态空间误差建模及误差辨识方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

ZHANG Ting. Research on quasi static volumetric error modeling and error identification of multi-axis NC machine tool[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[3] 杨建国, 范开国, 杜长春. 数控机床误差实时补偿技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

YANG Jianguo, FAN Kaiguang, DU Zhengchun. Real-time error compensation technology for CNC machine tools[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.

[4] 吴昊. 数控机床切削力误差实时补偿研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.

WU Hao. Research on real-time

compensation for cutting force errors of CNC machine tools[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2005.

[5] 姜辉. FA-32M 数控铣床误差建模与实时补偿技术研究及应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.

JIANG Hui. Research and application of error modeling and real-time error compensation for FA-32M CNC milling machine[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.

[6] 胡胜海, 张满慧, 周超, 等. 数控火焰切割机加工误差实时补偿[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(3): 620-630.

HU Shenghai, ZHANG Manhui, ZHOU Chao, et al. Novel real-time compensation method of processing errors of computer numerical control flame cutting machines[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(3): 620-630.

[7] 肖慧孝. 基于 FANUC 和 SIEMENS 840D 系统的数控机床误差补偿实施研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.

XIAO Huixiao. Implementation study of machine tool error compensation based on FANUC and SIEMENS 840D CNC systems[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.

[8] 曹永洁, 傅建中. 数控机床误差检测及其误差补偿技术研究[J]. 制造技术与机床, 2007(4): 38-41.

CAO Yongjie, FU Jianzhong. Research on error detection and error compensation technology of CNC machine tools[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2007(4): 38-41.

[9] 周静, 陈蔚芳, 曲绍朋, 等. 数控加工误差主动补偿方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010(9): 1902-1907.

ZHOU Jing, CHEN Weifang, QU Shaopeng, et al. Active compensation method for NC machining errors[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010(9): 1902-1907.

[10] 李连玉, 宋智勇, 夏远猛, 等. 基于 SIEMENS 840D 框架功能的龙门铣床热误差补偿方法[J]. 制造业自动化, 2016, 38(11): 75-77.

LI Lianyu, SONG Zhiyong, XIA Yuanmeng, et al. The compensation method for thermal error of gantry type milling machine based on SIEMENS 840D frame function[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(11): 75-77.

[11] 齐继宝, 杨伟民. 基于微分变化构造法的数控机床几何误差补偿方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 398-405.

QI Jibao, YANG Weimin. Differential change construction based geometric error compensation for machine tools[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 398-405.

[12] ZHANG Z L, LIU Z F, CAI L G, et al. An accuracy design approach for a multi-axis NC machine tool based on reliability theory[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(5-8): 1547-1566.

[13] 刘朝华, 戴怡, 石秀敏, 等. 西门子 840D 数控系统温度误差补偿的研究与应用[J]. 机床与液压, 2009, 37(9): 12-13.

LIU Zhao-hua, DAI Yi, SHI Xiu-min, et al. Study and application on temperature error compensation based on SIEMENS 840D CNC system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(9): 12-13.

通讯作者: 叶文华, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代集成制造、柔性制造自动化、制造执行系统等, E-mail: whye@nuaa.edu.cn.

Research on Comprehensive Error Real-Time Compensation Method for SIEMENS CNC Machine Tools

XIAO Xiao¹, ZHANG Pin¹, WEI Yafei¹, WANG Jian², LIAN Chengzhe², YE Wenhua²

(1. AVIC Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composites, Jinan 250023, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Error compensation technology is an effective and economical method to improve the machining accuracy of machine tools. Based on the temperature compensation function provided by SIEMENS numerical control system and the comprehensive error model based on BP neural network, a real-time compensation method of comprehensive errors for machine tool is proposed. Based on the proposed error compensation method and ARM platform, a set of real-time error compensation system is designed and developed. The comprehensive error compensation experiment of machine tools during processing is tested on linkage gantry CNC machine tool QLM27100. The experimental results show that the maximum error of the test part is reduced by 59.1%, which verifies the effectiveness of the compensation method.

Keywords: SIEMENS CNC system; Real-time error compensation; BP neural network; Advanced RISC machines (ARM); Error model

(责编 思齐)