

# 基于IGA-FNN方法的数控机床主轴热误差补偿优化

屈晓莉, 侯佳

(郑州职业技术学院, 智能制造学院, 河南省郑州市, 440010)

**摘要** 机床主轴热误差补偿效果会影响到数控机床的加工误差。为此设计了一种基于IGA改进FNN方法的数控机床主轴热误差补偿优化。利用优化遗传算法改进前馈神经网络,完成机床主轴热误差预测。实验测试结果表明:补偿后真实值均比预测值表现出更稳定变化,残差基本控制在 $3\mu\text{m}$ 以内。通过模糊手段对神经网络改进后RMSE和MAPE结果提高了约40%,获得了更优综合性能。该研究有助于提高数控机床加工精度,为后续的工艺优化奠定一定的理论基础。

**关键词** 数控机床;热误差补偿;IGA-FNN;误差预测

中图分类号: TG659 文献标识码: B

文章编号: 1008-0899(2026)04-0027-02

进行机床主轴热误差补偿时,需要重点关注机床温度的测试位置分布情况<sup>[1]</sup>。根据前期文献报道可知,目前已形成了支持向量机、有限元分析、最小二乘算法等多种方法分析技术,此外还有灰色关联、模糊聚类、相关系数分析、偏相关分析多种改进技术<sup>[2]</sup>。然后相关的研究仍然存在精度的不足,期待引入更为深度的算法对其控制进行加强。

李慧敏等<sup>[3]</sup>设计了一种半闭环调控系统,通过构建几何与热复合的误差定位方法实现补偿,重点测试了丝杠螺母的热性能,并在半闭环立式加工系统中验证了其几何参数、热复合误差及补偿效果。舒启林等<sup>[4]</sup>提出了一种基于判定系数的磨床热误差建模方法,利用最优变量组合提升了预测精度,但通用性有限。为此,本研究提出了一种基于IGA改进FNN的主轴热误差优化方法,显著增强了检测稳健性与预测精度。

## 1 IGA算法

先对确定的IGA初始种群进行改进,并执行寻优操作,以构建初步模糊方法。邓聪颖等<sup>[5]</sup>提出支持向量回归机改进GA的切削稳定性预测方法,获取样本空间不同加工位置与进给方向的刀尖频响函

数,通过遗传算法求解各运动的最优配置。在此基础上,以增量调整原则确定误差阈值,从而在特定代数中筛选出适应度最高的模糊方法。在选择过程中,代价函数的影响需要考虑得到误差最小样本。根据IGA条件建立以下改进流程:

与其他编码方式进行比较,采用二进制编码方式可以获得更高效编码效果。经过编码后,生成0和1的二进制序列。

将方法的最大遗传代数设定在80,也可以根据先验知识设置初值。测试期间,以获得最优预测结果的网络参数作为IGA寻优结果。种群内的个体分别对应各自网络参数,利用训练集样本对方法开展训练。根据编码参数计算适应度,再通过计算目标得到适应度函数:

$$F = \frac{2}{\sum_i (y_{di} - y_i)^2}$$

通过IGA算法模拟突变过程,从个体中选取基因片段并实施反处理。控制变异概率 $pm=0.01$ 。

建立函数算式如下:

$$f(g) = r_2(1 - g / G_{\max})$$

$$A_{ij} = \begin{cases} a_{ij} + (a_{ij} - a_{\max}) * f(g), & r \geq 0.5 \\ a_{ij} + (a_{\max} - a_{ij}) * f(g), & r < 0.5 \end{cases}$$

式中, $g$ 是迭代数, $G_{\max}$ 是进化数, $r$ 属于 $[0, 1]$ 的随机值, $a_{ij}$ 为个体, $A_{ij}$ 是新个体, $a_{\max}$ 与 $a_{\min}$ 分别对应最大值与最小值。

## 2 前馈神经网络分析

针对机床热误差补偿的前馈神经网络检测研究,刘斌等<sup>[6]</sup>利用经验模态分解对机床电机定子电

项目名称:中德先进职业教育合作项目

作者简介:屈晓莉(1979~),女,陕西咸阳人,硕士,副教授,研究方向:机械加工及材料的研究。

流信号测试,利用前馈神经网络进行故障样本的模式识别,诊断具有准确率高以及检测成本低等优点。本文在其基础上,设计了前馈四层网络。前馈网络的输入层负责将输入变量 $X$ 传输;第二层负责计算输入模糊隶属度;第三层代表模糊规则并规则匹配计算适用度 $\alpha$ ;最后归一化层完成归一化操作。后网络由三个层级构成,负责完成机床主轴热误差预测。

在前馈神经网络架构中,隶属度函数确定通常是以随机方式来实现,必须对隶属度函数中心 $C_{ij}$ 和带宽 $\sigma_{ij}$ 精确调整,并同步修正网络前件与后件连接权重 $P_{ji}$ <sup>[7]</sup>。

### 3 实验验证

#### 3.1 实验过程和方案

以高速数控机床为实验对象,进行热误差预测研究。实验中采用每5min自动采集一次磨床温度的方式,通过USB-3120温度采集卡建立温度传感器与计算机间的数据传输通道,持续采集Z向热误差数据10h,获取各测点温度与热误差对应数据<sup>[8]</sup>。基于具体应用场景,将相关变量划分为小、中、大三个等级,并设定每个语言变量涵盖三个维度。通过前馈神经网络对温度进行预测,最终输出一维热误差向量。

#### 3.2 结果分析

FNN方法和IGA改进FNN方法的预测结果分别见图1和图2所示。分析图1和图2可以知道,无论FNN方法还是IGA改进FNN方法,补偿后的真实值均比预测值表现出更稳定的变化规律,残差基本控制在 $3\mu\text{m}$ 以内。

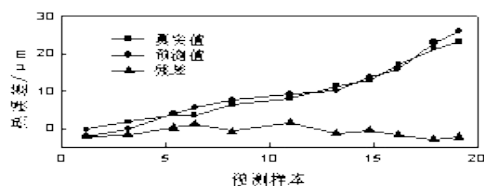


图1 FNN方法预测结果

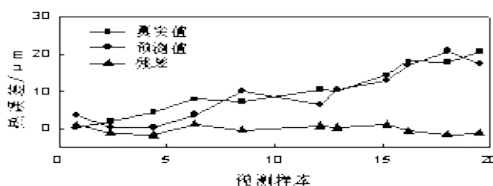


图2 IGA改进FNN方法预测结果

相比较FNN方法,IGA改进FNN方法的残差控制精度更高,满足控制要求。以均方根差(RMSE)和平均绝对误差(MAPE)两个指标作为定量评价标准,FNN方法下RMSE和MAPE结果分别为11.20和5.69%,IGA改进FNN方法下RMSE和MAPE结果分别为15.78和3.25%,可以看出通过IGA对FNN改进后获得了更优综合性能。

### 4 结语

本文开展基于IGA改进FNN方法的数控机床主轴热误差补偿优化分析。补偿后真实值均比预测值表现出更稳定变化,残差基本控制在 $3\mu\text{m}$ 以内。通过模糊手段对神经网络改进后RMSE和MAPE结果提高了约40%,获得更优综合性能。该研究在面对突变情况的时候存在收敛效率偏低问题,期待后续引入深度学习模型进行加强。

### 参考文献

- [1] 丁强强,郭世杰,苏哲,等.机床直线轴温度测点筛选与热误差预测方法[J].组合机床与自动化加工技术,2024,(08):22-27+32.
- [2] 杜柳青,吕发良,余永维.数字孪生下基于DACS-MFAC的数控机床热误差自适应预测方法[J].仪器仪表学报,2024,45(04):248-257.
- [3] 李慧敏,邓铭,刘璞凌,等.半闭环数控机床几何与热复合的定位误差建模与补偿[J].机械设计与研究,2021,37(01):123-128.
- [4] 舒启林,吕玉山,李玉龙.数控微磨床热误差的补偿方法[J].机床与液压,2013,41(15):42-44,49.
- [5] 邓聪颖,冯义,魏博,等.基于SVR-GA算法的广义加工空间机床切削稳定性预测与优化研究[J].仪器仪表学报,2019,40(10):227-236.
- [6] 刘斌,刘佳,张海鹏.基于经验模态分析的机床主轴轴承外圈非接触式故障检测方法[J].制造技术与机床,2023,(01):21-28.
- [7] 张宏韬,姜辉,杨建国.前馈神经网络理论在数控机床热误差补偿建模中的应用[J].上海交通大学学报,2009,43(12):1950-1952,1961.
- [8] 王子涵,杨秀芝,段现银,蒋宇辉,王兴东.基于贝叶斯神经网络的机床热误差建模[J].制造技术与机床,2022(01):141-145.