

数控加工中心主轴热误差 SFO-Bilstm 预测建模

陈庚 刘龙 袁粼 蔡依琳 高文文*

新疆理工职业大学, 新疆, 844004;

摘要: 在高精度加工过程中, 数控机床主轴误差对加工精度的影响较为严重。其中, 数控机床热误差占总误差比例高达 40%~70%, 是主要的误差源之一。为了提高热误差预测的精度, 提出了一种使用旗鱼优化算法(SFO)优化双向时序预测网络(Bilstm)的数控机床主轴热误差预测建模方法。以机床主轴五点法获取的热误差数据和测量得到的温度数据作为输入, 使用 SFO 对 Bilstm 的隐含层节点、全连接层节点、学习率、L2 正则化常数进行优化, 建立主轴热误差 SFO-Bilstm 预测模型。在 VDL-600A 型数控机床上进行实例验证, 使用五点法进行测量辨识, 同时测量主轴附近的温度。实验结果表明: 所提出的旗鱼优化算法(SFO)优化双向时序预测网络(Bilstm)的鲁棒性和准确性更高。

关键词: 数控机床; 主轴热误差; 热误差建模; SFO-Bilstm 网络

Prediction Modeling of Spindle Thermal Error in CNC Machining Center Based on SFO-BiLSTM

Chen Geng, Liu Long, Yuan Lin, Cai Yilin, Gao Wenwen*

Xinjiang Vocational University of Technology, Xinjiang, 844004;

Abstract: In high-precision machining processes, the spindle error of CNC machine tools has a significant impact on machining accuracy. Among them, the thermal error of CNC machine tools accounts for 40% to 70% of the total error, making it one of the main error sources. To improve the accuracy of thermal error prediction, a method for predicting and modeling the thermal error of CNC machine tool spindles is proposed, which uses the Sailfish Optimization algorithm (SFO) to optimize the Bidirectional Long Short-Term Short-Term Memory network (BiLSTM). Taking the thermal error data obtained by the five-point method of the machine tool spindle and the measured temperature data as inputs, the SFO is used to optimize the number of hidden layer nodes, fully connected layer nodes, learning rate, and L2 regularization constant of BiLSTM, so as to establish the SFO-BiLSTM prediction model for spindle thermal errors. Case verification is carried out on the VDL-600A CNC machine tool, where measurement and identification are performed using the five-point method, and the temperature near the spindle is measured simultaneously. The experimental results show that the Bidirectional Long Short-Term Memory network (BiLSTM) optimized by the proposed Sailfish Optimization algorithm (SFO) has higher robustness and accuracy.

Key words: CNC machine tools; spindle thermal error; thermal error modeling; SFO-Bilstm network

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 03. 060

引言

随着制造业的快速发展以及高精度零件需求的不断增加, 对数控机床的加工精度提出了更高要求。然而, 在高精度加工领域中, 机床主轴误差对加工精度的影响越来越严重^[1]。因此减小热误差的影响对提高数控机床加工精度具有重要意义。

误差补偿法是一种直接、有效的减小热误差影响的方法^[2]。而所建立的热误差模型的精度和鲁棒性直接影响着热误差补偿效果^[3]。目前, 国内外研究人员^[4]针对数控机床误差测量辨识、温度测点优化、热误差建模及热误差补偿方法进行了大量的探索和研究。主轴热误差的测量方法包括三点法、五点法、球杆仪等^[5]。五点法

在三点法的基础上增加了两个位移传感器, 可辨识出主轴的两项热倾斜误差^[6]。五点法因其能够完整测量主轴 X、Y、Z 三个方向的热误差而被广泛使用^[7]。H. J. Pank 等^[8]在进行机床主轴热误差测量时, 忽略主轴的分度误差运动, 使用五点法进行主轴五自由度的热误差测量。Cao 等^[9]分析数控机床主轴系统热源温度场热特性建立了主轴系统热力有限元分析 (FEA) 模型, 并提出了一种基于线性相关研究的测量点位置最优组合计算方法。利用多元线性回归 (MR), 建立了热误差预测模型 (CAMI-PCAMR)。通过对数控端磨床测试机床系统的热误差进行实验测量和分析, 将实际测量热误差与预测热误差进行比较, 验证了预测模型的准确性。Sun 等^[10]提出了一种基于时空轴向注意力双向长短期记忆网络的迁移

预测方法，以预测数控机床主轴在不同工况下的热误差。

1 主轴五点法热误差测量原理

在主轴回转过程中，主轴热误差主要包括热伸长误差 E_{ZOC1} ，热偏移误差 E_{XOC1} 、 E_{YOC1} 以及热倾斜误差 E_{AOC1} 、 E_{BOC1} 。

五点法热误差辨识公式如式(1)所示：

$$\begin{cases} E_{ZOC_1} = Z \\ E_{AOC_1} = (X_1 - X_2) / D \\ E_{BOC_1} = (Y_1 - Y_2) / D \\ E_{XOC_1} = X_1 - (L - l) \times E_{AOC_1} \\ E_{YOC_1} = Y_1 - (L - l) \times E_{BOC_1} \end{cases} \quad (1)$$

式中，D 表示检验棒上位于同一侧的两个位移传感器之间的距离；L 表示检验棒全长； X_1 、 Y_1 、 X_2 、 Y_2 、Z 分别表示五个位移传感器的数值；l 表示检验棒底端至传感器 X_2/Y_2 测点的距离。

2 热误差预测建模

2.1 SF0 算法优化 Bilstm 网络

使用 SF0 优化算法对 Bilstm 网络的两个隐含层节点数、全连接层节点数、L2 正则化常数、学习效率进行寻优。

SF0 算法优化 Bilstm 网络流程如下：

- 1) 设置旗鱼和沙丁鱼的种群规模、最大迭代次数以及优化目标的范围；
 - 2) 随机生成初始种群，初始种群的维度与优化目标数量一致；
 - 3) 使用初始种群对 Bilstm 网络进行训练，通过训练好的网络进行预测的残差大小反应个体的适应度，残差越低适应度越高，将适应度最高的个体作为最优个体；
 - 4) 旗鱼种群模拟交替攻击行为更新位置信息，同时沙丁鱼种群根据旗鱼种群更新后的位置信息调整自身位置信息。使用更新位置信息后的种群对 Bilstm 网络进行训练，计算个体的适应度值，将适应度最高的个体作为最优个体；
 - 5) 重复上述步骤，直到达到最大迭代次数。
- 流程图如图 1 所示。

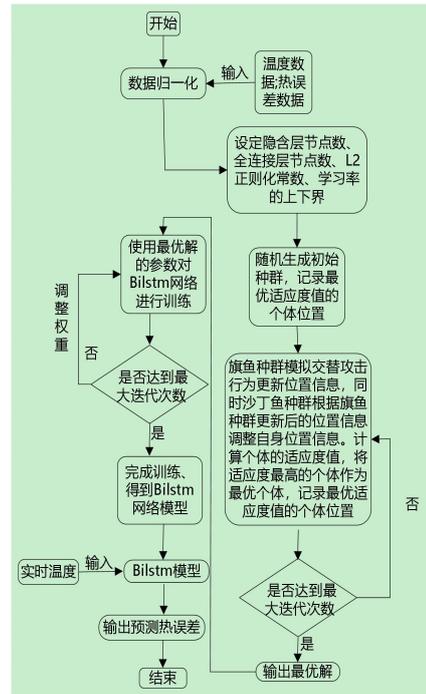


图 1 SF0-Bilstm 流程图

Fig.1 Flow chart of SF0-Bilstm

3 实例验证

3.1 实验过程

为验证旗鱼算法优化双向时序预测网络的准确性和鲁棒性，对大连机床厂生产的 VDL-600A 型数控立式铣床加工中心的主轴进行测试。

3.2 温度测量结果

机床主轴摩擦发热是产生热变形的直接原因，机床温度测量的准确与否直接影响着后续建模的可靠性。对主轴结构进行分析后，在主轴上下轴承、主轴附近、主轴支撑柱处布置温度传感器。

以某次实验为例，采集到的温度数据如图 2 所示。

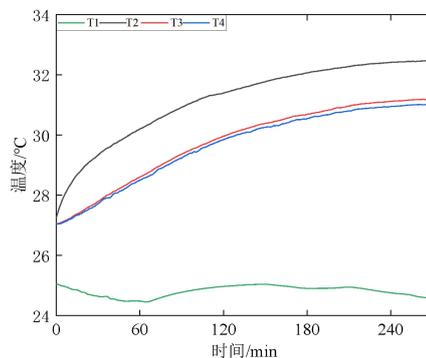


图 2 主轴 5000 转温度数据

Fig.7 Fifteen temperature data

3.3 五点法热误差测量辨识

使用 ICEEMDAN-EWT 算法对相同工况下采集到的热

位移数据进行处理,图3为经过处理后的五项热位移数据。

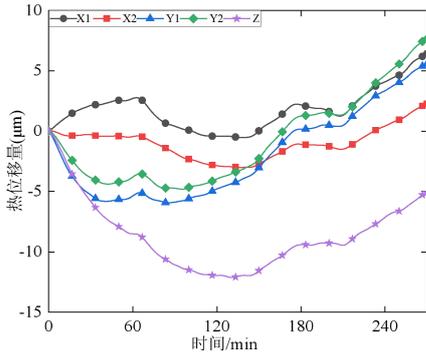


图3 5000r/min 下的位移数据

Fig.3 Displacement data at 5000r/min

使用五点法误差辨识公式对图3分离出的五项热位移进行辨识,辨识结果如图4所示。

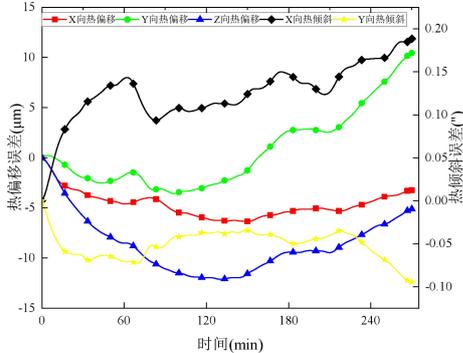


图4 主轴热误差辨识曲线

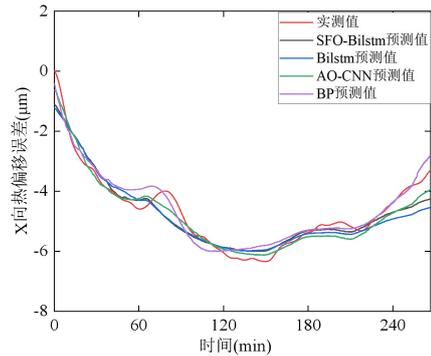
Fig.4 Spindle thermal error identification curve

3.4 SFO-Bilstm 热误差预测

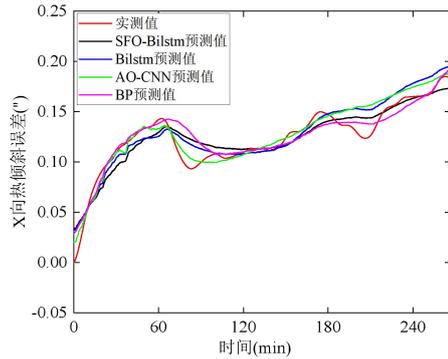
将采集辨识得到的温度数据和五项热误差数据输入 Bilstm 网络模型,同时使用 SFO 优化算法对 Bilstm 网络模型的两个隐含层节点数、全连接层节点数、L2 正则化常数、学习率进行优化。优化过程中根据均方根误差评估优化效果。

优化后模型的均方根误差为 0.3104,最优参数分别为隐含层节点 1 数量 155、隐含层节点 2 数量 170、全连接层节点 218、L2 正则化常数 0.001642、学习率 0.007079。

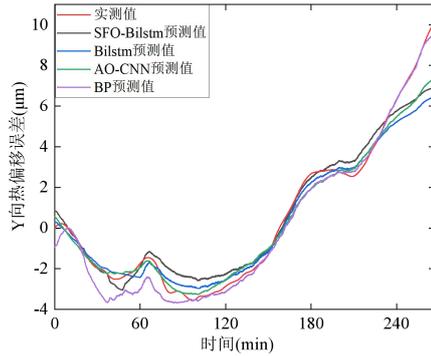
以 4.2 节采集到的温度测点数据作为输入,分别使用 SFO-Bilstm、BP、Bilstm 和 AO-CNN 网络模型对机床主轴的五项误差进行预测。



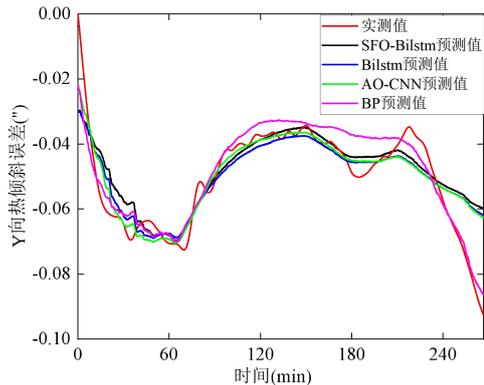
(a) X 向热偏移误差



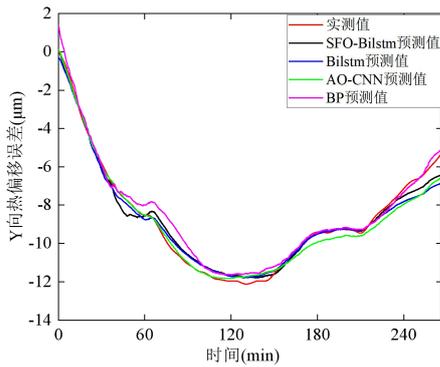
(b) X 向热倾斜误差



(c) Y 向热偏移误差



(d) Y 向热倾斜误差



(e) Z 向热偏移误差

图5 主轴五向热偏移误差预测结果

Fig.5 Prediction results and residual error of spindle thermal deviation

对图5中各模型预测的残差使用均方根误差 RMSE 和平均绝对百分比误差 MAPE 进行评估,结果如表1所示。

表1 各模型优度

Tab.10 Model goodness

	SFO- Bilstm	Bilstm	AO-CNN	BP
RMSE	0.3104	0.4636	0.7602	0.9356
MAE	0.2284	0.2348	0.4011	0.3403
MAPE	6.9%	7.09%	12.12%	10.28%

表1对比结果表明,SFO-Bilstm模型准确性和鲁棒性更优。

4 结论

本文以数控立式铣床加工中心主轴为研究对象,完成了主轴热误差的建模,总结如下:

(1)本文建立了基于SFO-Bilstm的热误差预测模型,通过对Bilstm网络的隐含层节点数、全连接层节点数、学习效率、L2正则化常数进行寻优,有效的解决了Bilstm网络在训练过程中易出现过拟合和局部最优的问题。

(2)在VDL-600A型数控立式铣床加工中心上进行试验,试验结果表明:与Bilstm、AO-CNN和BP网络模型相比,SFO-Bilstm算法的平均绝对误差MAE降低了4%~44%,均方根误差RMSE降低了33%~67%,平均绝对百分比误差MAPE降低了2%~44%。

参考文献

[1]Zhang H,Xiang S,Liu C,et al.Reverse identification of dynamic and static motion errors for five-axis machine based on specimen feature decomposition[J].ISA Transactions,2023,134:302-311.
 [2]Feng W,Li Z,Gu Q,et al.Thermally induced positioning error modelling and compensation bas

ed on thermal characteristic analysis[J].International Journal of Machine Tools and Manufacture,2015,93:26-36.

[3]孙惠娟,殷国富,方辉,et al.五轴数控机床综合误差建模评价方法研究[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(6):197-202.

[4]Tanaka S,Kizaki T,Tomita K,et al.Robust thermal error estimation for machine tools based on in-process multi-point temperature measurement of a single axis actuated by a ball screw feed drive system[J].Journal of Manufacturing Processes,2023,85:262-271.

[5]Fu G,Zheng Y,Zhou L,et al.Look ahead prediction of spindle thermal errors with on machine measurement and the cubic exponential smoothing unscented Kalman filter-ing-based temperature prediction model of the machine tools[J].Measurement,2023,210:112536.

[6]Fu G,Zhou L,Zheng Y,et al.Improved unscented Kalman filter algorithm-based rapid identification of thermal errors of machine tool spindle for shortening thermal equilibrium time[J].Measurement,2022,195:111121.

[7]马驰,赵亮,梅雪松,etal.基于粒子群算法与BP网络的机床主轴热误差建模[J].上海交通大学学报,2016,50(5):686-695.

[8]Pahk H,Lee S W.Thermal error measurement and real time compensation system for the CNC machine tools in-corporating the spindle thermal error and the feed axis thermal error[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2002,20(7):487-494.

[9]Wenjie Cao,Haolin Li,Qiang Li.A method of thermal error prediction modeling for CNC machine tool spindle system based on linear correlation[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2022,118:3079-3090.

[10]Jiacheng Sun,Zhenyu Liu,Chan Qiu,et al. An axial attention-BiLSTM-based method for predicting the migration of CNC machine tool spindle thermal error under varying working conditions[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2024,130:1405-1419.

通讯作者: 高文文, 硕士