

基于RSM-NSGA-II的主轴精度调控参数优化

杨成杰,陈蔚芳,吕铭

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:数控机床主轴系统的性能直接影响其加工精度。热误差和回转误差作为主轴系统精度的两个关键指标,研究其多工况下误差变化规律与对应的调控参数优化方法对主轴系统精度的提升具有重要的应用价值。基于响应面(RSM)分析法,以获取的主轴系统热误差和回转误差数据为响应值,建立多工况下的主轴精度RSM模型,基于多目标遗传算法,研究多工况下的主轴系统调控参数优化方法,得到不同工况下的主轴系统最优运行参数,并在自主搭建的主轴精度调控实验台上进行了有效性验证。

关键词:主轴系统;热误差;回转误差;响应面分析;多目标精度调控

中图分类号:TH161+.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)04-0169-04

Optimization of Precision Control Parameters of Spindle System Based on RSM-NSGA-II

YANG Chengjie, CHEN Weifang, LYU Ming

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The performance of CNC machine tool spindle system directly affects its machining accuracy, while thermal error and rotation error are two key indexes of spindle system accuracy, therefore, studying the error variation law and corresponding control parameter optimization method under multiple working conditions has important application value for improving the accuracy of spindle system. Based on the response surface (RSM) analysis method, taking the obtained thermal error and rotation error data of the spindle system as the response value, this paper establishes the spindle accuracy RSM model under multiple working conditions. Based on the multi-objective genetic algorithm, the optimization method of the regulation parameters of the spindle system under multiple working conditions is studied, obtaining the optimal operating parameters of the spindle system under different working conditions, whose effectiveness of the model is verified on the self built spindle precision control experimental platform.

Keywords: spindle system; thermal error; rotation error; response surface analysis; multi-target precision control

0 引言

主轴系统是数控机床的关键部件,其工作性能直接影响数控机床的加工精度、加工效率以及加工稳定性。电主轴是将电机与旋转主轴融为一体,集合机、电、液、气等技术的高性能机床主轴单元,因其具有高度集成化、高加工精度、高转速极限、运行平稳、响应快和输出功率大等特点,是高速数控机床主轴系统的首要选择,其工作性能将直接影响数控机床的精度、稳定性及应用范围。

由于电主轴高度集成化的结构设计,高速运转下的驱动电机与支撑轴承等部位产生的大量热量会在主轴内部积累,导致主轴内部结构发生热变形,这使得主轴在运转过程中的热变成为影响高端主轴加工精度的关键因素之一。与此同时,主轴系统内各结构的热变形加剧还会使主轴回转误差增大,进一步导致主轴的加工精度下降^[1]。

当前数控机床精度调控方法的研究主要集中在进给系统方面,对机床精度影响较大的主轴系统精度调控方法研究则相对较少,且主要集中在热误差补偿技术研究方面。BLASER P等^[2]提出了一种五轴机床长期热误差补偿的自适应方法;MAREŠ M等^[3]研究了一种基于传输函数的机床热

误差建模方法;WANG J等^[4]结合粒子群优化算法和后传播神经网络建立了机床主轴的热误差补偿模型,并以此模型进行机床的热误差预测与补偿;CREIGHTON E等^[5]提出了一种基于指数增长模型的高速铣削电主轴的热误差补偿方案,该补偿方案能够在实际加工中将热误差的影响降低80%。

本文提出了一种新的主轴精度调控参数优化方法,构建基于主轴系统热误差和回转误差的主轴精度RSM模型,并以该模型为基础对主轴系统进行了多目标优化,实现多工况下主轴系统精度调控的目标。

1 基于RSM-NSGA-II的主轴精度多目标优化参数求解

热误差和回转误差作为主轴系统精度的两个关键指标,其误差变大会导致加工工件的形状精度和表面质量降低^[6]。故对主轴系统的热误差和回转误差进行调控可以有效地提高机床的加工精度。本文借助已有的主轴系统热误差模型和主轴回转误差检测系统,并根据图1所示优化流程,首先通过试验获取多工况下的主轴系统热误差和

基金项目:国家自然科学基金项目(51775277)

第一作者简介:杨成杰(1998—),男,浙江绍兴人,硕士研究生,研究方向为主轴系统精度调控,614772981@qq.com。

回转误差数据,并以此为响应值,建立多工况下的主轴精度RSM模型,其次根据得到的主轴精度RSM模型,使用多目标遗传算法对主轴的运行参数进行优化,最后寻找不同工况下的主轴系统最优运行参数,实现主轴系统工作精度调控的目标,提高主轴系统的加工性能。

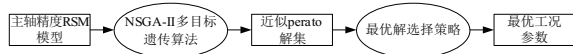


图1 RSM-NSGA-II协同求解流程

1.1 主轴精度RSM模型建立

机床主轴加工过程中,主轴的热变形和回转误差均会对主轴系统的加工性能产生影响。针对主轴精度RSM模型的建立,调控变量选取主轴热误差建模过程中涉及到的主要变量:转速A(2000 r/min~12000 r/min)、油气流量B(30 L/min~300 L/min)、冷却液流量C(2 L/min~12 L/min)、冷却液温度D(12℃~24℃)和负载转矩E(0 Nm~5 Nm)。由于主轴轴向精度性能稳定,轴向窜动幅度很小,故本文选取的目标变量为:轴向热变形 δ_a (μm)、径向热变形 δ_r (μm)、径向回转误差 η_r (μm)和倾角误差 $\Delta\theta$ ($^\circ$)。主轴精度RSM模型中,调控变量有5个,基于CCD实验设计方法将上述5个目标变量进行数值转化,得到了5个设计变量的规范水平,如表1所示,以此规范化的设计变量划分实验组进行响应值的计算和检测。

表1 主轴精度实验设计变量规范水平

变量名称	设计变量	水平		
		-1	0	1
转速/(r/min)	A	2 000	7 000	12 000
油气流量/(L/min)	B	30	165	300
冷却液流量/(L/min)	C	2	7	12
冷却液温度/℃	D	12	18	24
负载转矩/(Nm)	E	0	2.5	5.0

本文使用Design Expert完成主轴精度响应面的拟合与分析,为确保RSM模型的拟合精度,选用包含二次项的Quadratic模型对各响应值进行响应面模型求解,将各设计变量归一化后得到各响应值的二次回归方程,对回归方程

进行精确度检查,模型的决定系数、校正决定系数和信噪比,结果见表2。结果表明:各响应值对应的二次回归RSM模型的决定系数和校正决定系数均接近1,且模型的信噪比均大于10;模型具有较好的拟合精度,模型结果可靠。

表2 模型精确度检查结果

目标变量	决定系数	校正决定系数	信噪比
$\delta_a/\mu\text{m}$	0.994 0	0.986 3	39.022
$\delta_r/\mu\text{m}$	0.977 5	0.953 1	23.123
$\eta_r/\mu\text{m}$	0.993 5	0.985 3	41.609
$\Delta\theta/^\circ$	0.962 9	0.954 1	21.547

1.2 基于NSGA-II的主轴精度多目标优化求解

1) NSGA-II优化数学模型的建立

选取转速 x_1 、油气流量 x_2 、冷却液流量 x_3 、冷却液温度 x_4 和负载转矩 x_5 这5个参数作为设计变量,以轴向热变形 δ_a 、径向热变形 δ_r 、径向回转误差 η_r 、倾角误差 $\Delta\theta$ 这4个响应值作为目标函数F。为保证参数的优化范围不超出响应面模型的预测空间,各设计变量的约束条件设置为响应面模型建立时的设计变量取值区间。将上述问题转化为数学模型为

$$\begin{cases} \min F(x) = \min [F_1(x), F_2(x), F_3(x), F_4(x)]^T \\ \text{s.t. } 2\ 000 \leq x_1 \leq 12\ 000 \\ 30 \leq x_2 \leq 300 \\ 2 \leq x_3 \leq 12 \\ 12 \leq x_4 \leq 24 \\ 0 \leq x_5 \leq 5 \end{cases} \quad (1)$$

本文的主轴精度优化目标为主轴热变形误差和回转误差,实际加工过程中,回转误差决定了工件的表面质量,且径向回转误差与倾角误差之间存在相关性,故最优解选取的过程中以径向回转误差为决策指标,挑选出最佳的运行参数组合。

2) 主轴精度优化计算与结果

经过图2所示流程优化计算后,不同工况下的最优运

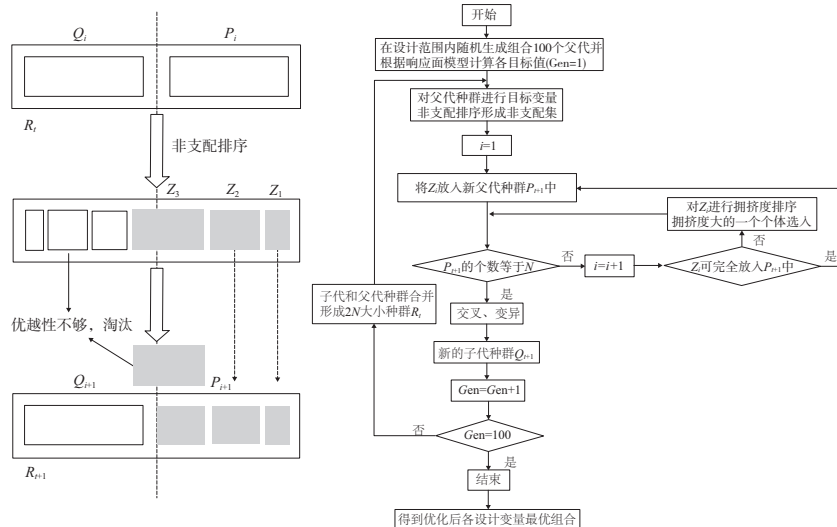


图2 NSGA-II工作原理流程图

行参数如表3所示,参考文献[7-8],粗铣对应的刀具加工条件为径向切削深度20 mm,每齿进给量0.11 mm,铣削深度2 mm,对应铣削力为400 N,转矩为5 Nm。精铣对应

的刀具加工条件为径向切削深度5 mm,每齿进给量0.055 mm,铣削深度2 mm,对应铣削力为50 N,转矩为0.625 Nm。

表3 主轴系统运行参数优化结果

转速/(r/min)	工况	油气流量/(L/min)	冷却液流量/(L/min)	冷却液温度/℃	负载转矩/(Nm)	$(\delta_a/\delta_r)/(\mu\text{m})$	$(\eta_r/\Delta\theta)/(\mu\text{m}/^\circ)$
2 000	粗铣	225.96	2.009	12.009	5.010	1.341/0.221	0.551/0.010
2 000	精铣	206.35	11.943	23.908	0.625	1.571/0.197	0.484/0.012
4 000	粗铣	277.42	11.990	12.063	5.010	1.617/0.393	0.625/0.028
4 000	精铣	240.44	11.962	23.971	0.625	1.650/0.314	0.554/0.017
6 000	粗铣	293.29	11.965	12.023	5.010	3.973/0.612	0.751/0.041
6 000	精铣	263.05	12.000	23.926	0.625	6.288/0.328	0.652/0.031
8 000	粗铣	299.68	11.988	12.022	5.010	9.766/1.813	0.813/0.061
8 000	精铣	296.01	11.995	23.653	0.625	8.837/1.145	0.784/0.045
10 000	粗铣	299.97	11.990	12.01	5.010	14.932/2.528	0.937/0.070
10 000	精铣	299.76	11.953	12.105	0.625	13.582/1.941	0.915/0.067
12 000	粗铣	300.00	12.000	12.000	5.010	19.530/2.716	1.093/0.099
12 000	精铣	300.00	12.000	12.000	0.625	17.822/2.152	1.063/0.078

2 主轴精度调控试验分析

为了验证主轴系统精度调控方法的有效性,本文以主轴系统的负载转矩、转速、油气润滑参数和冷却系统参数为变量对主轴系统进行精度调控试验。本试验选择在主轴精度调控试验台上进行,并使用主轴加载系统模拟实际加工过程中的主轴负载情况。在主轴系统运行参数优化前后分别进行多工况下的热误差和回转误差检测,根

据主轴系统的精度提升效果检验主轴系统精度调控方法的有效性。

按照上文主轴精度优化时设计的试验方案和各工况下主轴系统的最优运行参数,对主轴系统进行多工况下的精度检测试验,得到的不同工况下的主轴系统在精度调控前后的热误差和回转误差,并将试验数据用折线图进行绘制,如图3所示,对比多工况下主轴系统的轴向热误差、径向热误差、径向回转误差和倾角误差在精度调控前后的变化,以此检验主轴精度多目标优化算法的有效性。

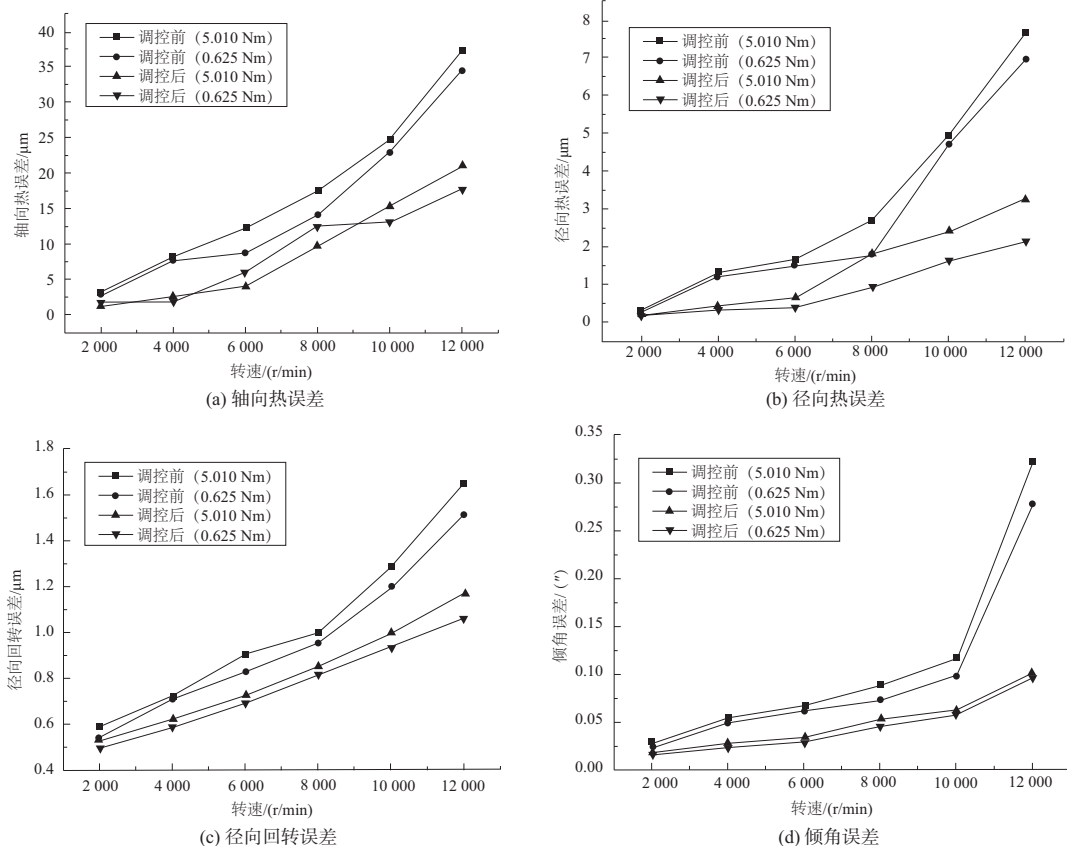


图3 调控前后的主轴精度变化图

3 结语

1) 主轴转速提升和负载转矩变大均会使主轴系统的热误差和回转误差变大,且转速对于主轴系统精度的影响更加明显。因为主轴转速的提升会导致主轴电机和轴承组的发热功率同时上升,而负载转矩的增大会使电机的电损耗增加从而导致电机生热功率上升,对轴承组的生热功率影响不大。

2) 主轴精度多目标优化算法对主轴精度的调控效果良好,且对高转速下的主轴精度提升效果更加明显,主轴的热误差和回转误差均有明显改善。同时,由于主轴精度多目标优化算法以径向回转误差为决策指标从 Pareto 解集中选取最优解,精度调控后主轴系统的回转误差对比热误差,改善效果更加稳定。

综上所述,本文提出的基于 RSM-NSGA-II 算法的主轴精度多目标优化方法可以对多工况下的主轴系统精度进行有效调控,使主轴系统的加工精度得到一定提升。

参考文献:

- [1] 白丰瑞. 电主轴回转精度退化研究及保持性评估[D]. 长春: 吉林大学, 2020.

- [2] BLASER P, PAVLICEK F, MORI K, et al. Adaptive learning control for thermal error compensation of 5-axis machine tools[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 44: 302-309.
- [3] MAREŠ M, HOREJŠO, HAVLÍK L. Thermal error compensation of a 5-axis machine tool using indigenous temperature sensors and CNC integrated Python code validated with a machined test piece[J]. Precision Engineering, 2020, 66: 21-30.
- [4] WANG J, JIANG T, SHEN J, et al. Thermal error compensation of spindle system of computer numerically controlled machine tools through experiments and modeling[J]. Instrumentation Measure Métrologie, 2020, 19(4): 1374-1412.
- [5] CREIGHTON E, HONEGGER A, TULSIAN A, et al. Analysis of thermal errors in a high-speed micro-milling spindle[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(4): 386-393.
- [6] 薛海涛, 胡鹏浩, 苗恩铭, 等. 数控车床主轴热变形对零件形位加工精度影响分析[J]. 工具技术, 2011, 45(3): 35-38.
- [7] 袁哲俊, 刘华明. 刀具设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [8] 刘强, 李忠群. 数控铣削加工过程仿真与优化: 建模、算法与工程应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.

收稿日期: 2022-02-14

(上接第 159 页)

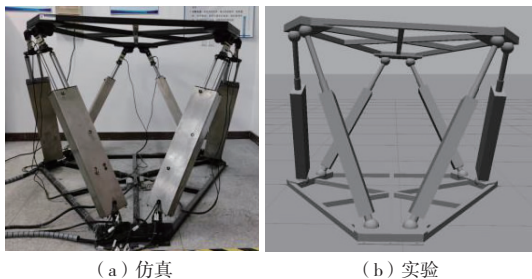


图 12 机器人运行状态

5 结语

针对传统的机器人控制系统存在的同步性差、实时性差的问题,通过开源的 Xenomai 和 EtherCAT 构建了开放的机器人控制系统,舍弃了传统的采用运动控制器+PC 的方式,采用 EtherCAT 实现了机器人的伺服控制。利用 ROS 系统资源丰富的优势,开发了机器人的上位机系统,利用 ROS 松散耦合的通信方式,开发了相应的功能包,有利于代码的复用和移植。使得整个机器人控制系统具有开源、易拓展的优势,对于工业软件国产化也具有重要的意义。各项测试实验结果表明,所设计的机器人控制系统可以有效地实现机器人的控制。

参考文献:

- [1] 孟明辉, 周传德, 陈礼彬, 等. 工业机器人的研发及应用综述[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(增刊1): 98-101.
- [2] CEREIA M, BERTOLOTTI I C, SCANZIO S. Performance of a real-time EtherCAT master under linux[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(4): 679-687.
- [3] LIM S, LEE S Y, KIM J H, et al. Development and analysis of Korea open source motion system based on real-time Ethernet[J]. The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2017, 66(1): 186-193.
- [4] 韩守谦, 裴海龙, 王清阳. 基于 Xenomai 的实时嵌入式 Linux 操作系统的构建[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(1): 96-98, 102.
- [5] 刘豪志, 刘凯, 王欢, 等. 基于嵌入式 Linux 平台 EtherCAT 主站设计[J]. 机械与电子, 2020, 38(3): 44-47, 52.
- [6] ZHANG G J, LI Z Q, NI F L, et al. A real-time robot control framework using ROS control for 7-DoF light-weight robot[C]// 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Hong Kong, China: IEEE, 2019: 1574-1579.
- [7] 孙凌云, 罗福源, 刘鹏. 基于 V-REP 和 MATLAB 的机器人建模及轨迹规划仿真实验[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(1): 108-112.

收稿日期: 2021-11-23