

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107533

基于键合图的变压预紧力电主轴热误差建模研究^{*}戴 野¹, 战士强¹, 王建辉¹, 宣立宇¹, 王 刚²

(1. 哈尔滨理工大学先进制造智能化技术教育部重点实验室 哈尔滨 150080;

2. 宁波天控五轴数控技术有限公司 余姚 315400)

摘 要:高速电主轴工作过程中产生大量的热,导致主轴前端产生热变形,严重影响主轴加工精度。本文提出变压预紧力电主轴热误差预测模型,将传热学理论计算与键合图模型相结合,可实时且准确预测同类结构的电主轴热伸长。建立主轴的热-固耦合模型,通过有限元分析得到耦合作用下主轴温度场分布规律;根据温度场分布规律及热能流向,运用热力学理论将主轴整体模型划分节点,并计算出节点的热参数;搭配 20-sim 平台构建主轴热学键合图模型,将关键节点温度实时监测模块与热伸长模块关联,针对鼻端热伸长量,计算各关键点热变形并完成热误差建模。实验验证表明,所建立的键合图预测模型误差在 $0.5\ \mu\text{m}$ 之内,研究成果可为不同工况下的智能电主轴实时热误差补偿提供理论基础。

关键词: 高速电主轴;键合图;热力学特性;热误差建模;热固耦合

中图分类号: TH164 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.50

Thermal error modeling of motorized spindle under variable pressure
preload based on the bonding graph methodDai Ye¹, Zhan Shiqiang¹, Wang Jianhui¹, Xuan Liyu¹, Wang Gang²

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Intelligent Technology of Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. Ningbo Tiankong Five-Axis CNC Technology Co., Ltd., Yuyao 315400, China)

Abstract: A large amount of heat is generated during the working process of high-speed motorized spindle, which leads to thermal deformation of the front end of the spindle. The machining accuracy of the spindle is affected seriously. In this study, the thermal error prediction model of the motorized spindle with variable load preload is proposed. The heat transfer theory calculation and the bond diagram model are combined. In this way, the thermal elongation of the motorized spindle with similar structure can be predicted accurately in real time. The thermal-solid coupling model of the spindle is formulated, and the distribution of temperature field of the spindle under coupling action is achieved by the finite element analysis. According to the distribution law of temperature field and the flow direction of heat energy, the integral model of the spindle is divided into nodes by the thermodynamic theory. The thermal parameters of the nodes are calculated. The 20-sim platform is used to establish the thermal bond diagram model of the spindle, and the real-time temperature monitoring module of the key nodes is associated with the thermal elongation module. According to the thermal elongation of the nose end, the thermal deformation of each key point is calculated and the thermal error modeling is completed. Experimental results show that the prediction model error of the formulated bond graph is within $0.5\ \mu\text{m}$. Research results can provide a theoretical basis for real-time thermal error compensation of intelligent motorized spindle under different working conditions.

Keywords: high-speed motorized spindle; bond graph; thermodynamic characteristics; thermal error modeling; thermal-solid coupling

收稿日期: 2021-02-24 Received Date: 2021-02-24

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金 (52075134)、黑龙江省自然科学基金 (LH2019E062)、黑龙江省普通高校基本科研业务费专项 (LGYC2018JC040)、黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划项目 (UNPYSCT-2017077)、黑龙江省博士后专项经费项目 (LBH-Q20097) 资助

0 引言

高速、高精密电主轴是高档数控机床的核心部件,其具有结构紧凑、回转精度和机械效率高、重量轻、惯性小等特点^[1-2]。主轴预紧机构为轴承提供必要的支撑刚度和安全可靠的工作环境,但是随着主轴转速不断增加,固定的预紧力会使主轴转速增加时生热加剧,严重影响主轴加工精度^[3]。研究表明,热变形导致的误差占到机床总误差的60%至80%^[4]。为减小主轴由于热变形产生的影响,智能主轴的可变预紧装置可以随着主轴工况改变对轴承施加合适预紧力,同时对电主轴进行热误差补偿。满足现代复杂的加工需求,保障轴系刚度的同时减少主轴升温。

Bossmanns 等^[5]提出两种提高精度方法,从源头上减小误差和通过模型补偿误差,根据此原理建立一种基于功率的电主轴热力学模型。Ramesh 等^[6]发现主轴在连续运行后,内部温度升高,误差显著,通过建模,发现热误差影响因素不是单一的,而是多个条件混合影响的。刘阔等^[7]阐述预紧条件对热变形影响及机理,介绍多种温度测点位置优化方法。杜望等^[8]针对滚动轴承故障信号的非线性、随机性和复杂性等特点,检验特征变量的协整关系,构建向量误差修正模型,对滚动轴承 RUL 进行预测。黄智等^[9]采用狮群优化算法优化最小二乘支持向量机的方法对热误差模型的重要参数进行求解,有效的提高热误差预测模型的效率和精度。Holkup 等^[10]考虑温度、变形、润滑油等因素轴承的瞬态变化,基于有限元法建立滚动轴承主轴的热力学模型。Jin 等^[11]分析在正常工况下主轴热率的解析模型,获得运转条件对主轴轴承发热的影响。Zahedi 等^[12]建立主轴转速、负载和热特性关系模型,结果表明主轴热变形与主轴负载、转速、前轴承装配条件有着密切关系。Than 等^[13]认为预紧力作用下的轴承热特性是非线性的,并基于有限元法,分析热特性、轴承刚度与预紧力之间关系。Liu 等^[14]基于闭环迭代建立电主轴热平衡模型,进行热特性分析。张丽秀等^[15]考虑冷却系统、润滑系统参数及环境条件对换热系数的影响,采用最小二乘算法,优化换热系数,提升仿真精度。杨哲等^[16]提出一种分块建模、分块试验方法,设置动态和静态两种模型边界条件,通过仿真优化结构。谭峰等^[17]利用模糊 C 均值聚类进行测点优化,建立 LSTM 循环神经网络热误差预测模型,优越电主轴误差预测精度和泛化性能。Lei 等^[18]采用神经网络算法,对改进后的神经网络进行测试训练,模型误差降低 79%。张捷等^[19]针对测温点、算法等做出合理优化,基于径向基函数神经网络提出遗传算法优化 RBF 策略使得减少温度检测点后热误差模型的精度和鲁棒性均有所提高。Han 等^[20]通过模糊聚类分析,对自变量进行筛选,消除

变量间耦合干扰,随后建立回归分析模型,并揭示温度变量与热变形关系。Fan 等^[21]对解析模型和最小二乘回归模型进行综合混合,对解析模型中无法提取的信息采用回归模型分析,用有限元模型预测热变形,提高回归模型泛化能力。

综上所述,尽管电主轴热特性模型理论研究较成熟,热误差模型精度也满足要求,但预测模型对象单一,且大多建立在稳态基础上,预测实时性差,无法根据实际工况做出相应的调整,因此在实际生产加工中作用甚微。为克服以上问题,本文基于键合图法,利用最小二乘法优化得到精确误差参数化模块,并将其添加至电主轴热伸长模型中,采用训练组实验数据优化热误差预测键和图模型,通过验证组实验数据对比校核可变预紧力下预测模型的可行性与准确度。

1 电主轴预紧结构及热变形机理

1.1 电主轴可变预紧力结构

电主轴工作过程中,轴承预紧对轴承生热、寿命、工作状态等有较大影响。为保证主轴加工精度和轴承寿命,高速电主轴可变预紧力装置可在低速高扭工况时提供较大刚度,高速低扭工况时提供小预紧力,保障轴系的刚度同时减少主轴升温。本文采用一种弹簧及可调气压复合的变预紧力结构如图 1 所示。

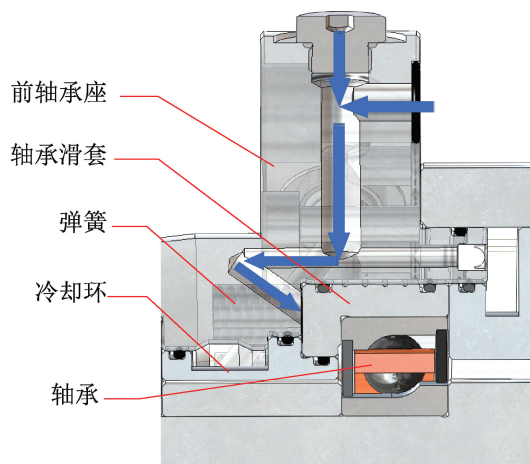


图 1 变压预紧力结构

Fig. 1 Variable pressure preloading structure

前轴承座,轴承滑套,冷却环进行密封设计,形成可对中轴承外环施压的气腔,与弹簧施压的位置相同。单路进出气,可通过单项换气阀进行控制。进气口设计为通过机床安装壳体进气和通过前法兰盘侧面直连进气两种。在弹性预紧力的基础上变压预紧可使前轴承预紧力达到 1 200 N。

变压预紧装置属于可控预紧,可根据实际工况调节轴承预紧力,提高加工精度。此预紧装置原理较为简单,抗干扰能力强,两种进气方式使主轴适应各种安装情况,采用弹簧和可调气压复合的轴承预紧方式可以提供更大的预紧力调节范围。

1.2 电主轴热变形机理分析

电主轴内部结构紧凑。工作时,轴承与电机生热部件不能及时散热,导致局部温度过高产生热膨胀现象,最终产生热误差。

电主轴传热主要由两方面组成,即热传导和热对流。在主轴工作过程中,转轴高速旋转,内部空气流速快,形成强迫对流换热。外部零件静止,对流换热系数参考 Bossmanns 进行实验测得恒定的常数 9.7、5.33、0.8^[5]。换热系数是有限元分析边界条件及键合图节点参数参考条件。

1.3 可变预紧力下电主轴热-固耦合分析

运用 Workbench 平台对不同预紧力下的电主轴模型进行有限元仿真分析,通过热-固耦合分析得到电主轴重点位置的温度及鼻端轴向伸长量。

将主轴模型中回转零部件及固定零部件保留,回转零部件包括主轴、各隔环、转子、轴承;固定零部件包括定子、前轴承座、后轴承座。其他功能性零部件可视为一个整体零部件。通过简化零部件,使得模型更加简洁、分析运算更加高效,并且不影响整体系统准确性,进行稳态热分析得到电主轴全面工作状态信息。简化后的电主轴三维模型如图 2 所示。根据计算的电机相关参数设置有限元分析边界条件,得到主轴前轴承在 1 200 N 预紧力下稳态温度云图如图 3 所示。

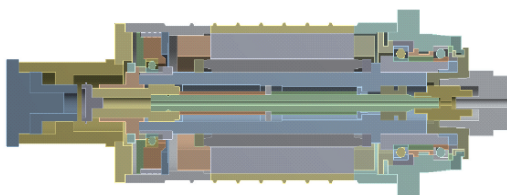


图 2 电主轴简化三维模型

Fig. 2 The simplified 3D model of motorized spindle

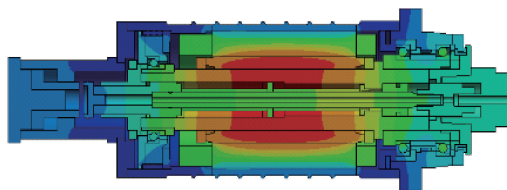


图 3 轴承预紧力 1 200 N 温度云

Fig. 3 Temperature cloud diagram of bearing preload 1 200 N

观察温度云图可知,主轴电机转子部位的温度最高,其次是前后轴承和主轴鼻端。当以电机冷却水套安装面为参考面时,热伸长的最终表现为主轴鼻端向前伸长。

2 变压预紧力下电主轴键合图法建模

键合图理论被用来研究系统动力学问题,是描述系统功率的传输、转化、贮存、耗散的图形表示。键合图方法适合于描述多变量同时存在的系统,其最大的特点是能较方便地囊括各种不相干的参数。键合图热伸长预测模型顶层原理图如图 4 所示。

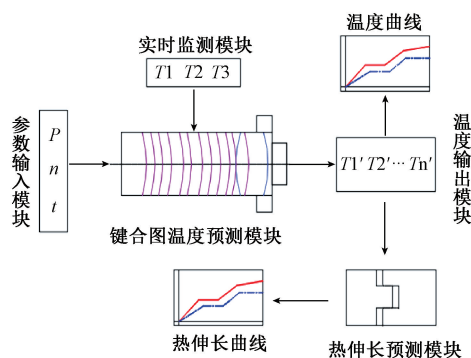


图 4 键合图热伸长预测模型顶层原理

Fig. 4 Top level schematic of the bond graph thermal elongation prediction model

2.1 键合图法电主轴温度场建模

键合图法是基于现代工业系统的复杂性和多样性提出的一种图形化建模方法,是一种对于电路、液压和机械等多能量领域同时存在的复杂系统的统一建模方法^[22]。键合图仿真技术广泛应用于电气系统、传输系统、液压系统、热系统、机械系统以及多域系统等。

键合图温度场建模以电主轴所有零部件为基础,结合有限元分析的热云图结果作为参考,划分节点,参数设定构成一个完整的电主轴温度场模型,并仿真分析得出关键点实时温度数据。使用机器代码运行速度比等效 C 代码更快的 20-Sim 平台进行建模,依托于此键合图建模方法具有实时性,可以根据实际工况反应及时预测主轴温度场分布。

键合图法运用与有限元法结构一致的模型,简化一些不必要的节点温度信息。根据键合图的原理,每个零件可定义一个节点,同时每个零件内部也可分无数个节点。但材质单一零件多节点设定使系统变得臃肿复杂,且会降低运算分析的效率。

关键性零件按特性进行分区设节点,轴承分成 3 个节点分别是:轴承内环,轴承外环,陶瓷球。主轴以转子中线为参考,分成前后 2 个节点,原因是转子产生热量后

向主轴传递,主轴材料均匀且相同,热流会沿着主轴轴向均匀的流向低温处,主轴前部两个角接触球轴承视为两个热源,主轴后部角接触球轴承视为一个热源,主轴温度场节点划分如图5所示。运用20-sim平台搭建主轴温度场键合图, (0)为温度节点, (1)为传导节点, (R)为热阻, (C)为热容, (Sf)为发热功率, (Se)为冷却温度, 主轴温度场键合图如图6所示。

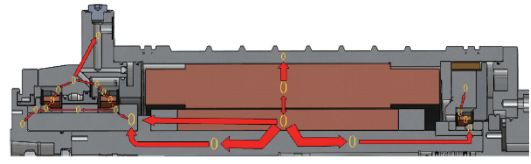


图5 主轴温度场节点设定

Fig. 5 Spindle temperature field node setting

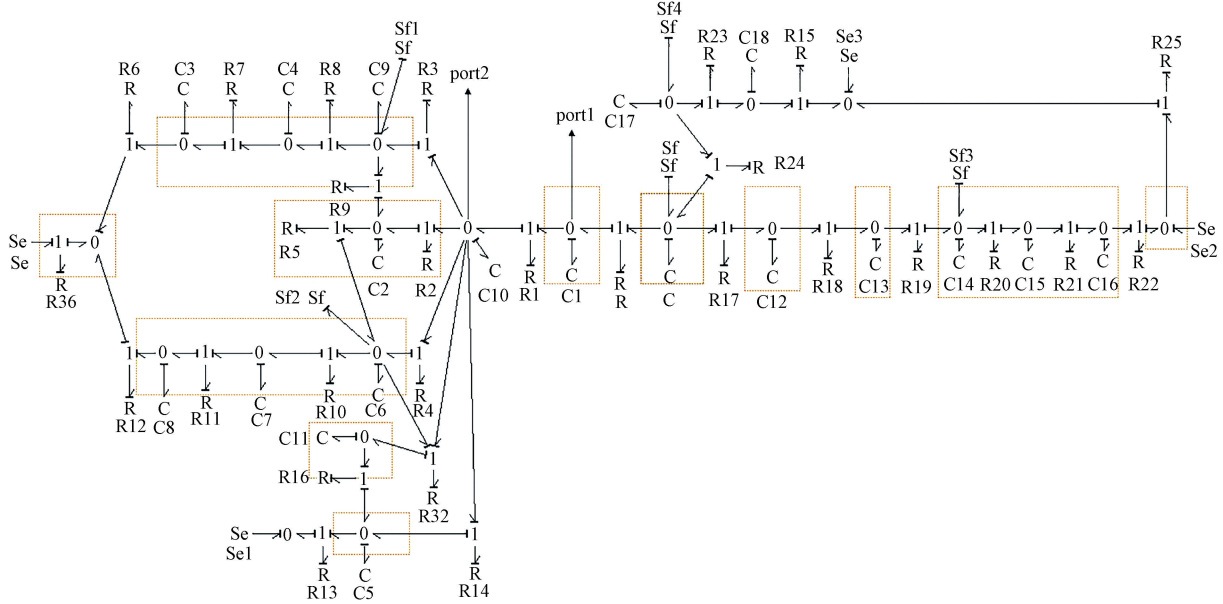


图6 主轴温度场键合图

Fig. 6 Diagram of spindle temperature field bonding

2.2 键合图法位移场建模

热伸长键合图将主轴零件简化成一维杆热变形 ΔL , 设定稳定的零件和因果关系, 引用温度场键合图关键点实时温度数据, 仿真分析得出主轴鼻端的热伸长量。由原理图的“热伸长预测模块”进行位移场建模。

由于主轴的径向被轴承所约束, 轴的热伸长不能自由发生, 于是在轴内产生热应力, 温升时为压应力、温降时为拉应力, 因此得出式(1):

$$\begin{cases} \Delta L = \alpha_R L \Delta T + \frac{\sigma L}{E_R} \\ \Delta L = \frac{-P}{j} \\ \Delta L = A_R \sigma \end{cases} \quad (1)$$

式中: α_R 为热膨胀系数, $1/^\circ\text{C}$; σ 为一维杆压力, MPa; P 为轴向力, N; E_R 为弹性模量, N/m^2 ; j 为轴向刚度, N/m ; A_R 为横截面积, mm^2 。

式(1)可进而简化为式:

$$\Delta L = \frac{\alpha_R L \Delta T}{1 + \frac{jL}{A_R E_R}} \quad (2)$$

从有限元分析中得到主轴热伸长的规律, 以中轴承内环右端面为零点, 轴热伸长是以零点为界双向伸长。热伸长分析可针对前部伸长量进行局部分析。

建立如图7所示的一维坐标系, 主轴伸长以中轴承内环右端面为零点 O_1 , 中轴承、轴承滑套、前轴承座会因为温升出现热伸长的现象, 导致中轴承内环右端面于主轴刀柄安装面反向伸长, 因此设定以主轴前法兰安装面为零点 O_2 。

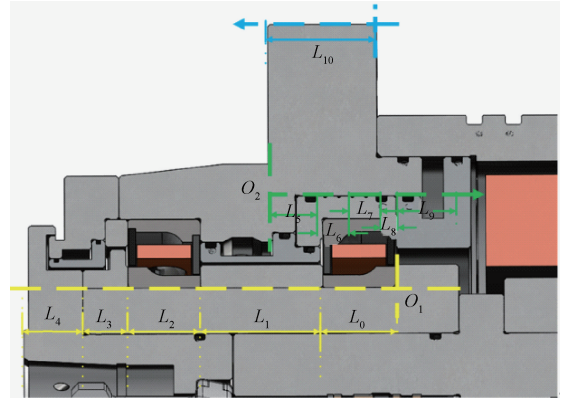


图7 主轴热伸长键合图

Fig. 7 Diagram of spindle thermal elongation bonding

$$\Delta x_1 = \frac{\Delta L_0}{2} + \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 + \Delta L_4$$
$$\Delta x_2 = \Delta L_5 + \Delta L_6 + \Delta L_7 + \Delta L_8 + \Delta L_9$$
$$\Delta x = \Delta x_2 - \Delta x_1$$

(3)

另新增一个以主轴前法兰安装面的背面热伸长量为参考,此量的新增是便于电主轴安装在机床上时,主轴前法兰安装面并不能准确的被测量,需设与前法兰安装面距离相近且便于测量的面的参考。

$$\Delta x_3 = \Delta x - \Delta L_{10}$$

(4)

仿真分析结果与键合图建模结果相比,温度曲线有些许偏差±2℃范围内,热伸长偏差±4 μm 范围。二者存在误差原因在于:有限元仿真分析并没有考虑由于接触表面之间的粗糙度,由于接触面间凹凸不平,空气积聚在表面凹处形成对流换热,换热系数与零件相接触处相差较大。

3 电主轴热误差实验

3.1 实验平台搭建

通过热电偶传感器和电涡流传感器对实际工况下电主轴各个部件的温度进行采集,测量鼻端位移量变化,校验变压预紧电主轴温度场键合图预测模型的准确性和可行性。实验平台搭建如图 8 所示。

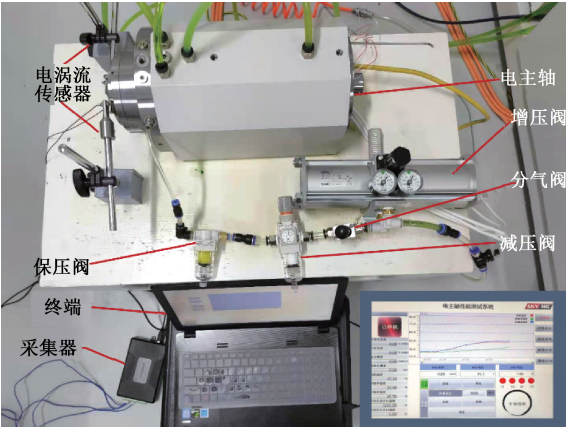


图 8 温度场测试实验平台

Fig. 8 Temperature field test platform

3.2 实验方案

进行电主轴变压预紧实验,实验步骤如表 1 所示。电主轴转速升高过程中,为防止润滑脂因高温变态而导致润滑失效,主轴转速缓慢升高,分段升高。温度上升是电机生热大于主轴系统散热的原因,是一个随着时间增加而累积的过程量,具有一定的延迟效应。由于在电机内部即转子与定子间安放温度传感器极为困难,因此电机所产生的热量、提升的温度在实际中无法得到准确的

数值,所以轴承的温度值是判定仿真拟合实际工况的重要标准。

表 1 电主轴温度测量实验

Table 1 Temperature measurement experiment of motorized spindle

实验阶段	实验步骤
准备阶段	保证电主轴在恒定室温条件下。主轴前轴承预紧力 1 400 N,中间轴承预紧力 800 N,后轴承预紧力 600 N。保证与仿真情况相同。工业水冷机温度设置为 25℃。
验证温度场模型, 主轴预紧力升高	在电主轴在 5 000 r/min 工作 110 min 后,提高前轴承预紧力至 1 800 N,中间轴承预紧力 1 200 N,工作 60 s。
主轴预紧力恢复至稳态	在 60 s 后降低各轴承预紧力至初始状态,电主轴温度达到稳态,停机。

3.3 实验结果数据分析

1) 实验结果温度场对比键合图建模

图 9 为验证优化后的前轴承温度场预测模型结果,可见主轴在 5 000 r/min 转速达到平衡及加压再次达到平衡,预测模型误差值在 0.2℃ 范围内。

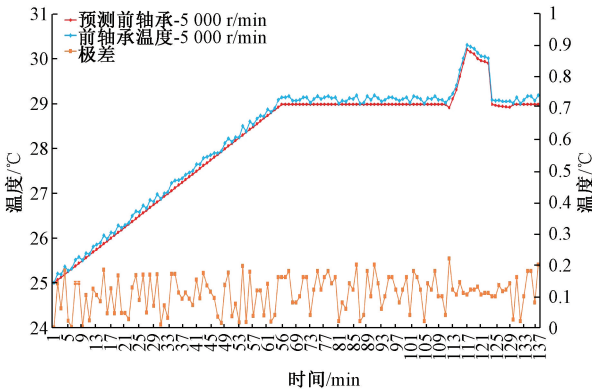


图 9 验证优化温度场模型

Fig. 9 Optimized temperature field evaluation model

2) 实验结果热位移对比键合图建模

测量电主轴热伸长验证热伸长预测模型的准确性。电主轴产生形变的原因主要是因为电主轴在工作过程中,主轴系统单元由于温度导致部件热伸长,主轴伸长是各部件热变形累加结果。通过有限元分析仿真得到的数据曲线,得知主轴鼻端轴向位移与预紧力大小呈线性关系。由于仿真条件的理想化,实际工况的复杂性,主轴系统仿真与实际偏差很大,很难保证主轴温度和位移的平稳性。通过模拟验证温度场模型的操作步骤进一步测量电主轴热伸长,实验检验键合图热伸长模型的准确性及可行性。

图10为验证优化温度场模型图,从图中的热伸长数据可见,主轴在5 000 r/min转速时的变压预测模型最大极差1.3 μm ,此原因在于实验数据在变压前后出现跳动过大的情况。其根本原因推测:其一,在变压时,由于大压强的气体直接作用在中轴承外环上,受力不均导致出现跳动;其二,加压后,轴承倾角改变,主轴固有频率增加,在主轴固有频率突然向高固有频率转化时引起振动,导致传感器识别出较大的波动。如去掉最高误差点及最低误差点,误差在0.5 μm 之内,说明热误差键合图模型是可行的。

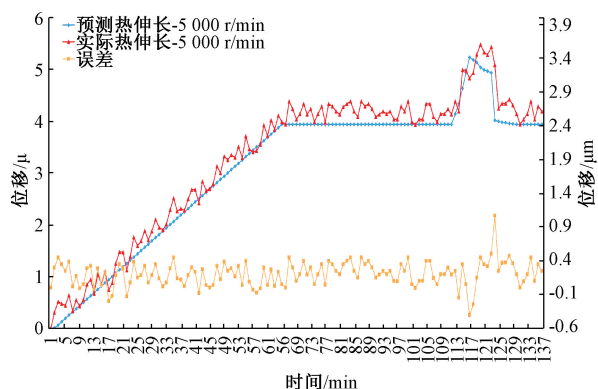


图10 验证优化温度场模型

Fig. 10 Verify the optimized temperature field model diagram

4 结 论

本文针对电主轴长时间工作产生的热量积累导致主轴加工过程中产生的热变形问题,提出一种建模难度小、精度高的基于键合图方法建立电主轴温度场模型及热位移模型。通过实验数据验证方法可行性高,误差小,同时可用于实时误差补偿。

1) 通过仿真分析主轴热-固耦合模型,得到主轴在不同转速及变压的条件下热能传递趋势。根据有限元分析出的热能传递趋势,结合热力学运用键合图法建立主轴的温度场模型。

2) 定义键合图伸长零点,在温度场键合图基础上增加热伸长模块,建立完整热伸长键合图,热误差模型误差在0.5 μm 以内。

3) 键合图法建模具有很好的普适性、实时性以及建模方式简单、速度快等优点,可根据实际工况改变预紧力大小,机床配合键合图预测模型进行实时补偿,提高加工精度。

参考文献

[1] 吴玉厚,潘振宁,张丽秀.改进型BBO算法抑制电主轴转矩脉动[J].机械工程学报,2020,56(18):197-204.

WU Y H, PAN ZH N, ZHANG L X, et al. Improved BBO algorithm suppressed torque ripple of motorized spindle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(18):197-204.

[2] 高峰,程明科,李艳,等.永磁同步型磨削电主轴偏心振动分析及实验[J].仪器仪表学报,2019,40(2):38-50.

GAO F, CHENG M K, LI Y, et al. Eccentric vibration analysis and test of permanent magnet synchronous grinding motorized spindle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2):38-50.

[3] 卢团良,邱明,董艳方,等.基于FBG传感器的机床主轴轴承热诱导预紧力研究[J/OL].中国机械工程:1-9 [2021-03-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20200623.1005.004.html>.

LU T L, QIU M, DONG Y F, et al. Research on thermally induced preload of machine tool spindle bearings based on FBG sensor [J]. China Mechanical Engineering: 1-9 [2021-03-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20200623.1005.004.html>.

[4] 戴野,尹相茗,魏文强,等.基于ANFIS的高速电主轴热误差建模研究[J].仪器仪表学报,2020,41(6):50-58.

DAI Y, YIN X M, WEI W Q, et al. Thermal error modeling of high-speed motorized spindle based on ANFIS[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6):50-58.

[5] BOSSMANN B, JAY F. A power flow model for high-speed motorized spindles-heat generation characterization[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2001, 123(3):494-505.

[6] RAMESH R, MANNAN M A, POO A N. Thermal error measurement and modelling in machine tools [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(4):391-404.

[7] 刘阔,韩伟,王永青,等.数控机床进给轴热误差补偿技术研究综述[J].机械工程学报,2021,57(3):156-173.

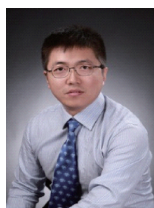
LIU K, HAN W, WANG Y Q, et al. Review on thermal error compensation for feed axes of CNC machine tools [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(3):156-173.

[8] 杜望,王衍学.基于协整和向量误差修正的轴承剩余寿命预测[J].电子测量与仪器学报,2020,34(9):32-39.

DU W, WANG Y X. RUL prediction method for rolling bearing based on cointegration system and vector error correction [J]. Journal of Electronic Measurement and

- Instrumentation, 2020, 34(9):32-39.
- [9] 黄智, 刘永超, 邓涛, 等. 一种五轴数控机床热误差建模方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(13):1529-1538.
HUANG ZH, LIU Y CH, DENG T, et al. A method for thermal error modeling of FAMT [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(13):1529-1538.
- [10] HOLKUP T, CAO H, KOLÁ P, et al. Thermo-mechanical model of spindles [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1):365-368.
- [11] JIN C, WU B, HU Y. Heat generation modeling of ball bearing based on internal load distribution[J]. Tribology International, 2012, 45(1):8-15.
- [12] ZAHEDI A, MOVAHHEDY M R. Thermo-mechanical modeling of high-speed spindles [J]. Scientia Iranica, 2012, 19(2):282-293.
- [13] THAN V T, HUANG J H. Nonlinear thermal effects on high-speed spindle bearings subjected to preload [J]. Tribology International, 2016, 96:361-372.
- [14] LIU J L, MA CH, WANG SH L, et al. Thermal-structure interaction characteristics of a high-speed spindle-bearing system [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 137:42-57.
- [15] 张丽秀, 李超群, 李金鹏, 等. 高速高精度电主轴温升预测模型[J]. 机械工程学报, 2017, 53(23):129-136.
ZHANG L X, LI CH Q, LI J P, et al. The temperature prediction mode of high speed and high precision motorized spindle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(23):129-136.
- [16] 杨哲, 刘成颖. 基于试验参数拟合的摆角铣头分块建模方法及特性分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(17):165-172.
YANG ZH, LIU CH Y. Finite element modeling method and analysis for bi-rotarymilling head based on experimental parameter [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(17):165-172.
- [17] 谭峰, 李成南, 萧红, 等. 基于 LSTM 循环神经网络的数控机床热误差预测方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9):79-87.
TAN F, LI CH N, XIAO H, et al. A thermal error prediction method for CNC machine tool based on LSTM recurrent neural network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9):79-87.
- [18] LEI C L, RUI Z Y. Thermal error modeling and compensating of motorized spindle based on improved neural network [J]. Advanced Materials Research, 2010, 129-131:556-560.
- [19] 张捷, 李岳, 王书亭, 等. 基于遗传 RBF 神经网络的高速电主轴热误差建模[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(7):73-77.
ZHANG J, LI Y, WANG SH T, et al. High-speed motorized spindle thermal error modeling based on genetic RBF neural network[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(7):73-77.
- [20] HAN J, WANG L, WANG H, et al. A new thermal error modeling method for CNC machine tools [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(1-4):205-212.
- [21] FAN L T, JING X R, ZHANG L X, et al. Hybrid modelling for thermal deformation prediction of high-speed motorized spindle[J]. IOP Conference, 2018, 399(1):012017.
- [22] 肖晨雨, 郁明. 未知离散故障下切换电路系统的故障参数辨识[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4):195-204.
XIAO CH Y, YU M. Fault parameter identification for switched circuit system under unknown discrete faults[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4):195-204.

作者简介



戴野, 2006 年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 2009 年于哈尔滨理工大学获得硕士学位, 2012 年于哈尔滨理工大学获得博士学位, 现为哈尔滨理工大学副教授, 主要研究方向为高速电主轴技术。
E-mail: daiye312@163.com

Dai ye received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Harbin University of Science and Technology in 2006, 2009, and 2012, respectively. He is currently an associate professor at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include thermal error of high-speed motorized spindle.



王建辉 (通信作者), 2019 年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 现为哈尔滨理工大学硕士研究生, 主要研究方向为高速电主轴技术。
E-mail: wjhdelemon@163.com

Wang Jianhui received his B. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 2019. Now he is a graduate student in Harbin University of Science and Technology. His main research interests include high-speed motorized spindle technology.