

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210069

变压预紧电主轴热位移预测模型研究^{*}

戴 野¹, 陶学士², 战士强³, 李兆龙¹, 王建辉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. 哈尔滨理工大学数字化设计与自动机械产品开发研究所 哈尔滨 150080; 3. 宁波天控五轴数控技术有限公司 余姚 315400)

摘 要:为解决高速电主轴在变速过程中产生的热位移引起加工质量的问题,通过搭建变压预紧电主轴实验平台,提出一种不同预紧力下电主轴自然降速实验方法,基于能量守恒理论建立轴承摩擦生热模型,构建预紧力与轴承发热量的函数关系;在此基础上,进一步探究轴承温升导致主轴产生热位移的影响规律。分别以预紧力为 1 450、1 550 和 1 700 N 工况下,电主轴的轴承温度数据和时间作为输入,构建电主轴 BP 神经网络热位移预测模型。结果表明,构建的热位移预测模型能有效地预测电主轴的热位移,预测模型的残差在 0.5 μm 以内,研究成果为高精密机床主轴热误差智能补偿提供一种新思路。

关键词: 高速电主轴; 自然降速实验; 轴承摩擦生热模型; 热位移预测模型; BP 神经网络

中图分类号: TH164 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460-50

Research on thermal displacement modeling of the variable pressure preload motorized spindle

Dai Ye¹, Tao Xueshi², Zhan Shiqiang³, Li Zhaolong¹, Wang Jianhui²

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Intelligent Technology of Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. Institute of Digital Design and Automatic Machinery Product Development, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 3. Ningbo Tiankong Five-Axis CNC Technology Co., Ltd., Yuyao 315400, China)

Abstract: There is the problem of machining quality caused by the thermal displacement of the motorized spindle at variable speed. To address this issue, an experimental method of natural speed reduction for the motorized spindle under different preload forces is proposed by building an experimental platform of the variable pressure preload motorized spindle. The frictional heat generation model of bearings based on the energy conservation theory is formulated, and the function relationship between preload forces and bearing heat generation are constructed. On this basis, the influence law of bearings temperature leading to the thermal displacement of the spindle is further investigated. The temperature data of bearings and the time of the motorized spindle with preload forces of 1 450, 1 550 and 1 700 N are used as input to construct a BP neural network thermal displacement prediction model of the motorized spindle. Results show that the fomulated thermal displacement prediction model can effectively predict the thermal displacement of the motorized spindle, and the residuals of the prediction model are within 0.5 μm . The research results provide a new method for the intelligent compensation of thermal error in high-precision machine tool spindles.

Keywords: high-speed motorized spindle; natural speed reduction experiment; frictional heat generation model of bearings; thermal displacement prediction model; BP neural network

收稿日期: 2022-07-05 Received Date: 2022-07-05

^{*} 基金项目: 哈尔滨理工大学先进制造智能化技术教育部重点实验室开放课题(KFKT202105)、黑龙江省博士后科研启动项目(LBH-Q20097)资助

0 引言

高速电主轴是集原动机传动装置执行机构控制系统于一身、实现“近零传动”的机电耦合系统,它已经成为高端数控机床的核心功能部件^[1-3]。高速电主轴的发热源主要包括电机和轴承生热,尤其是轴承的摩擦损耗造成其功率大量损失,进而导致机床加工精度的偏差,这也是其发热升温的重要因素^[4]。轴承预紧力是影响电主轴工作性能的关键因素,预紧力偏小会造成动刚度小于最大进给速度所需的刚度^[5]。预紧力偏大会使轴承温升加剧,增大电主轴前端热位移量等问题,降低轴承寿命并产生加工误差^[6-7]。同时在实际加工中,电主轴的变速过程将引起主轴的热位移发生改变,转换加工方式进行切削,会出现加工误差,严重影响加工质量。

Bossmanns 等^[8]建立高速电主轴功率损耗产热和传热于一体的功率流模型,分析电主轴各零部件的热功率损耗和能量分布流动情况,计算各零件的温升。孟庆宇等^[9]建立基于分形理论建立电主轴热阻网络模型,进行温升试验验证模型的准确性,分析分形参数对系统温升的影响,结果表明采用分形理论结合热阻网络模型可较准确预测系统的温升变化。吴玉厚等^[10]建立电主轴有限元模型,仿真分析电主轴温度场分布和热变形情况,基于电主轴损耗实验,在计算电机和轴承生热率的前提下,获取电主轴温升分布,搭建电主轴温升实验平台,测量电主轴外壳不同部位的温升,验证有限元模型的准确性,但研究中未分析热源对主轴热变形的影响规律。Than 等^[11]提出一种统一的方法和新算法对热接触热阻、轴承参数、热源的瞬态温度的变化进行瞬态分析,研究主要热源附近的温升变化和主轴轴端的热变形趋势,表明电主轴温度变化与综合参数是非线性关系。陈小安等^[12]考虑电主轴系统的热响应和预紧方式影响的角接触球轴承热-机耦合动力学模型,分析运行状态下主轴电机的电磁损耗、轴承的摩擦损耗及动态支承刚度。熊万里等^[13]针对电机转子温度场的接触式和非接触式测量均难以实施,考虑采用实测轴承温度、电机定子绕组温度和进出通风孔的空气温度,间接得到电机温升的变化规律,但实测结果受各种因素干扰,导致结果存在一定误差。张丽秀等^[14]搭建实验平台并采用动态误差分析仪对电主轴的 X、Y、Z 方向热漂移进行监测,所测的温度值为热误差分析和预测提供支持。Yang 等^[15]根据电主轴的热条件参数进行理论分析,基于键合图法建立热特性模型,设计实验并校准模型的热参数,结果表明键合图法的预测性能稳定性较好。Du 等^[16]提出自然指数模型,在不使用温度传感器的情况下,根据热分析和仿真结果预测随机转速下运行一段时间的热误差,基于随机转速和两个重要

参数的实验,验证模型的可靠性,自然指数模型可有效减少主轴轴向误差值。上述研究多数是通过有限元软件仿真分析的,但这些分析大多都只是在对系统的热源、电主轴的结构等简化处理的基础上进行的,很少有准确的热变形实验结合热学理论的计算进行分析,很难做到对电主轴热特性的准确研究。另外,这些研究并未考虑从轴承摩擦生热和电机损耗产热的角度分别对电主轴温升和热误差的影响进行研究。

高速电主轴主要的两大热源分别为电机损耗产热和轴承摩擦生热,而热源的产生严重影响电主轴热位移的变化。因此本文对空气摩擦生热、轴承的陀螺效应和杂散的负载生热等因素忽略不计,提出一种自然降速实验方法,根据时间和转速关系确定轴承摩擦生热模型,建立预紧力与轴承生热量的函数关系,通过分析轴承摩擦生热对主轴热位移的影响规律,构建轴承温升变化影响主轴热位移的 BP 神经网络预测模型。

1 高速电主轴实验平台的搭建

由于内置电机和轴承内部安放传感器极为困难,在实际中无法获悉准确的电主轴温度场分布规律,采用一种电主轴自然降速的创新实验方法,多组实验采用不同的预紧力,为后续联立求解能量方程,建立轴承系统摩擦生热模型提供数据支持。

1.1 实验方案设计与平台搭建

变预紧力电主轴的整体结构如图 1 所示,主要结构包括前轴承组、压力调节管道口、滑动轴承座、主轴体、电机转子、电机定子、冷却水套和后轴承。

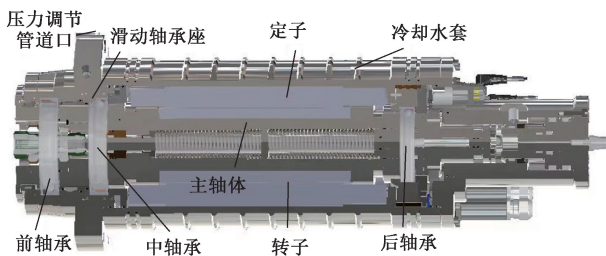


图 1 变预紧力电主轴结构图

Fig. 1 Structural diagram of variable preload motorized spindle

变预紧力装置可使前轴承预紧力分别从 1 400 N 变化到 1 450、1 550 和 1 700 N。并根据变压预紧电主轴结构,预紧力与气压转换公式如下:

$$F = P \times ((D - d)/2)^2 \pi \quad (1)$$

式中: D 为轴承外圈直径,单位为 mm; d 为轴承内圈直径,单位为 mm; F 为所需压力,单位为 N。前轴承组采用的舍弗勒主轴轴承和背对背安装方式,轴承的主要参数如表 1 所示。

表 1 轴承的主要参数
Table 1 Main parameters of bearings

轴承参数	HCM71916	HCM71912
内径 d /mm	80	60
外径 D /mm	110	85
宽度 B /mm	16	13
初预紧力/N	1 400	600
润滑方式	脂润滑	脂润滑
重量/g	306.81	146.1
基本额定静载荷/N	15 800	10 000
节圆直径/mm	95	72.5

实验分为 4 组,环境温度设置为 25℃,综合考虑电主轴运行的振动和冷却问题,设定 3 组实验都以恒定转速 5 000 r/min 进行。电主轴工作前,轴承初始预紧力为 1 400 N,改变前轴承预紧力为 1 450、1 550 和 1 700 N,采用电涡流位移传感器测取电主轴的轴向热位移,利用热电阻温度传感器测量轴承外圈与轴承座之间的温度,保证各实验仪器连接畅通,标定完毕且测试正常,即可运行电主轴。电主轴系统的实验平台如图 2 所示。

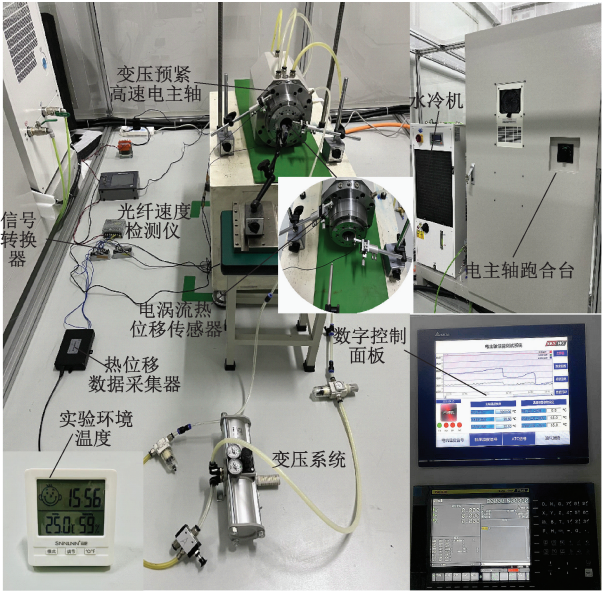


图 2 自然降速实验平台图

Fig. 2 Experimental platform for natural speed reduction

值得注意的是,为了更好地保护电主轴,减少主轴磨损,虽然电主轴按 5 000 r/min 的恒定转速运行,但必须按照从低速到高速的运行原则逐级对电主轴进行预热。因此变压预紧电主轴从 0~5 000 r/min 的逐级升速过程的时长为 30 min。由于电主轴的内部结构紧密不易散热,为了减小 3 组实验之间的相互影响,本文每组实验

的电主轴冷却间隔为 1 h,即做完上一组实验之后等待电主轴完全冷却之后,再进行下一组实验。变压预紧电主轴的温度测试实验方案如表 2 所示。

表 2 温度测试实验方案
Table 2 Experimental program for temperature testing

试验阶段	实验步骤
实验准备阶段	保证电主轴在恒定室温条件下。前轴承初始预紧力 1 400 N,水冷机温度设置为 25℃。
变压预紧力阶段	电主轴开始逐级升速,5 min 后主轴转速提升至 5 000 r/min,电主轴在恒转速 5 000 r/min 工作 30 min 稳定后,提高前轴承预紧力至 1 450 N,工作 60 s。
自然降速阶段	在 60 s 后立刻关停跑台和冷却机,去除电机阻尼,排除电机影响主轴降速因素;保持各轴承预紧力,主轴开始降速至停止。
记录数据阶段	记录电主轴前后轴承温度、电机温度和主轴热伸长。
主轴冷却阶段	等待电主轴完全冷却,再进行下一阶段实验
对比实验阶段	主轴转速 5 000 r/min 工作 30 min 后,分别提升预紧力至 1 550 N 和 1 700 N,工作 60 s 后开始降速。

1.2 实验结果分析

主轴自然降速过程中,记录电主轴自然降速过程的时间和转速,具体如图 3 所示,显示前轴承在几种预紧力下主轴停止时间与主轴转速的关系,随着预紧力的不断升高,主轴停止时间逐渐加快,测试之后,速度与时间的导数被计算出来,由此产生的角加速度是对摩擦力矩的测量。

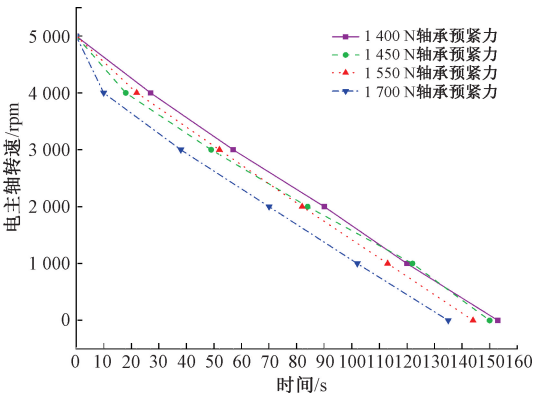


图 3 自然降速时间和转速关系

Fig. 3 Relationship between natural deceleration time and speed

通过采集电主轴的温度数据,获得电主轴的轴承和电机温升变化规律如图4所示。

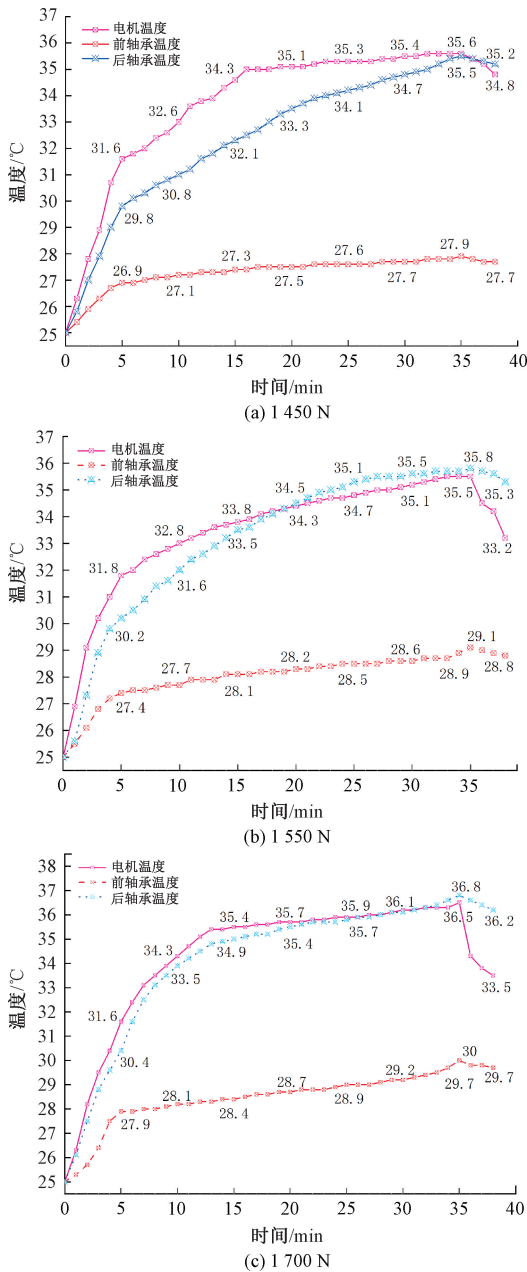


图4 不同预紧力下电主轴的温升

Fig.4 Temperature rise of a motorized spindle at varied preload

由图4可知,在电主轴降速阶段,电机温度下降较快,由于前轴承和后轴承采用的冷却方式不同,气冷却的后轴承温降速率比液冷却的前轴承组更快。

通过电涡流位移传感器测取电主轴在轴承预紧力分别为1 450、1 550和1 700 N下的主轴鼻端热位移变化规律如图5所示。

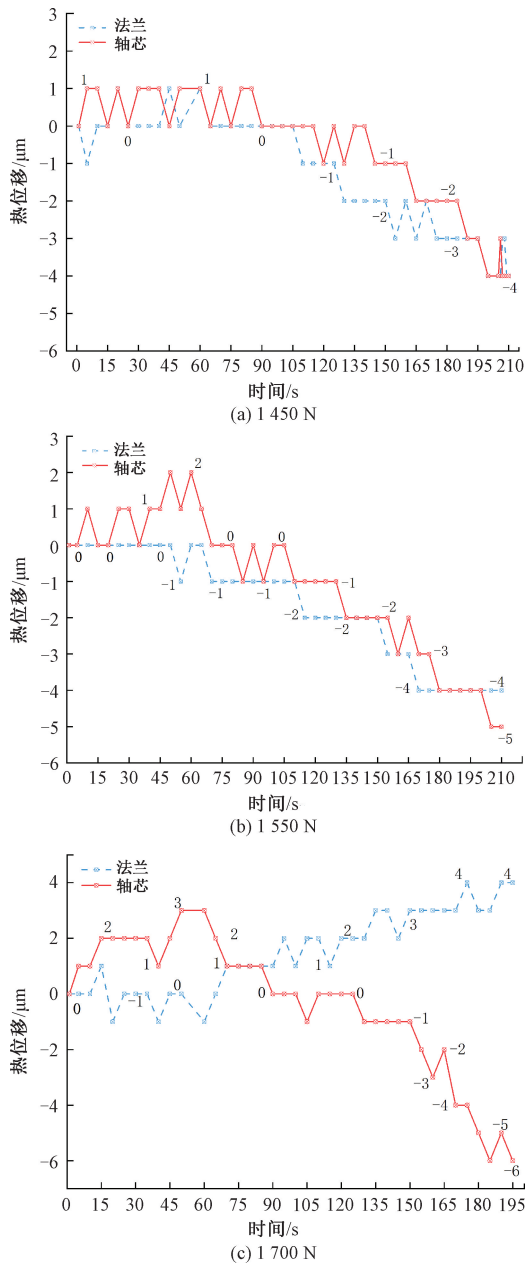


图5 不同预紧力下热位移的实测图

Fig.5 Chart of measured thermal displacement at varied preload

2 高速电主轴轴承摩擦生热模型

高速电主轴的轴承生热主要由摩擦引起,实际加工中前轴承发生故障的概率较大。电主轴工作时的滚动体与轴承内外圈接触面积受转速与预紧力影响,摩擦产生的热量也是不同的^[17]。根据能量守恒理论中动能的改变可将能量转化为内能,基于电主轴自然降速实验得到的速度和时间变化量,根据角加速度求得摩擦力矩并参照 Palmgren 经验公式计算轴承生热量,由于热量通过轴

承内环向轴承外环和主轴等周围零件进行扩散, 采用比热容公式求得温度变化量^[18], 公式为:

$$\begin{cases} M = M_v + M_l \cong M_0 + M_1 \\ M_v = \frac{1}{2} m_s R_i^2 \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ M_l = 1.06 \times 10^{-3} \times D_b^3 \cdot F_a^{1.2} \\ Q_B = W = 1.047 \times 10^{-4} \times M \cdot n \\ T = T_0 + \frac{1}{C \cdot m_b} \int_0^t Q_B dt \end{cases} \quad (2)$$

其中, Q_B 为轴承摩擦生热, 单位为 W; M 为轴承总摩擦力矩, 单位为 N/mm; M 为轴承总摩擦力矩, 单位为 N/mm; n 为主轴转速, 单位为 r/min; R_i 为轴承内圈半径, 单位为 mm; ω 为轴承角速度, 单位为 rad/s; m_s 为主轴和轴承的重量, 单位为 kg; D_b 为滚动体直径, 单位为 mm; F_a 为轴承轴向变预紧力, 单位为 N; M_v 为与速度有关的主轴-轴承的旋转摩擦力矩, 单位为 N/mm; M_l 为与轴承预紧力有关的非流体摩擦旋转力矩, 单位为 N/mm; dt 为降速的间隔时间, 单位为 s; T_0 为轴承外圈初始温度, 单位为 °C; C 为钢的比热容, 单位为 rad/s; m_b 为轴承重量, 单位为 kg。电主轴降速时的轴承预紧力是通过轴承摩擦力矩造成轴承温升的改变, 由于轴承摩擦力矩也可分为润滑剂粘性和与速度无关的预紧作用产生的摩擦力矩^[19], 如式(3)所示。

$$\begin{cases} M = M_0 + M_1 \\ M_0 = \begin{cases} 10^{-7} f_0 (v \cdot n)^{2/3} \cdot d_m^3, & v \cdot n \geq 2000 \\ 160 \times 10^{-7} f_0 \cdot d_m^3, & v \cdot n < 2000 \end{cases} \\ M_1 = f_1 F_1 d_m, f_1 = 0.0013 \times (p_0/c_0)^{0.33} \\ F_a = 0.68 F_r, F = F_a - 0.1 F_r \end{cases} \quad (3)$$

式中: M_0 为轴承润滑剂粘性产生的摩擦力矩, 单位为 N/mm; M_1 为速度无关的预紧作用产生的摩擦力矩, 单位为 N/mm; v 为工作温度下润滑剂的运动粘度, 单位为 mm²/s; f_0 为轴承类型和脂润滑方式的相关系数; f_1 为轴承类型和所受负载的相关系数; d_m 为轴承节圆直径, 单位为 mm; F 为轴承摩擦力矩发热从而计算的载荷, 单位为 N; F_a 为轴承轴向载荷, 单位为 N; F_r 为轴承径向载荷, 单位为 N; p_0 为轴承的等效额静载荷, 单位为 N; c_0 为基本额定静载荷, 单位为 N; 根据工况设定主轴恒定转速 5 000 r/min, 脂润滑相关系数选取 $f_0 = 2$, 并在一般的速度和载荷温度下, 轴承温度在 20°C ~ 30°C 间的最低运动粘度应不低于 15 mm²/s, 以保证润滑效果, 故取润滑剂的运动粘度 $v = 15$ mm²/s。结合式(2)和(3), 整理可得轴承的摩擦力矩和轴承预紧力的关系如(4)所示。

$$F = \frac{29}{34} \left[\frac{(10^{-7} (v \cdot n)^{2/3} f_0 \cdot d_m^3 + f_1 F_0 d_m^3 - M_v)}{1.06 \times 10^{-4} D_b^3} \right]^{5/6} \quad (4)$$

通过求解前轴承在不同预紧力下的摩擦力矩与热功率变化规律如图 6 所示, 当电主轴以 5 000 r/min 的转速开始降速, 前轴承组和后轴承的摩擦力矩和热功率明显下降。前轴承组受变预紧力的影响, 摩擦力矩和热功率的下降速率比定预紧力的后轴承更大。

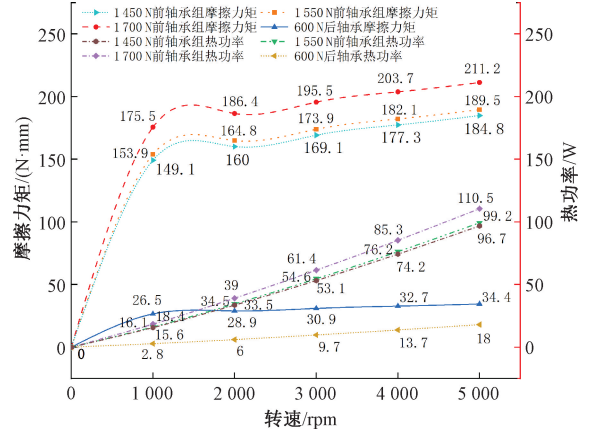


图 6 轴承摩擦生热的曲线图

Fig. 6 Curves of frictional heat generation in bearings

当初始预紧力改变后, 电主轴正常运转下的主轴轴承摩擦生热将导致轴承预紧力发生改变, 由于轴承预紧力等于初始预紧力和热诱导预紧力之和, 预紧力的变化量可视作轴承热预紧力的大小。通过式(2)和(3)可得到不同转速下轴承预紧力和轴承生热量间的变化规律, 如图 7 所示。

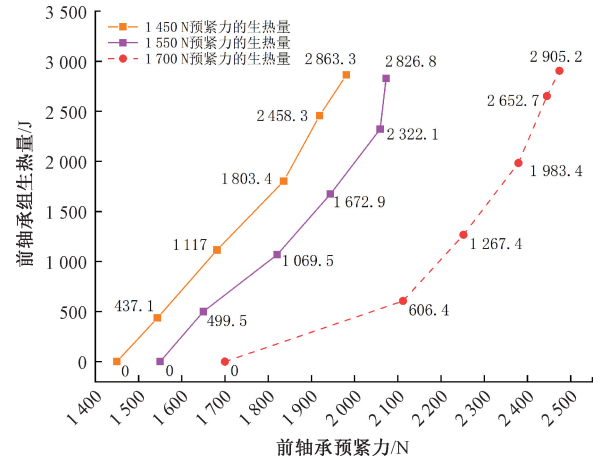


图 7 降速中的轴承预紧力与生热量的曲线图

Fig. 7 Curves of bearing preload and heat in decelerating

如图 8 所示, 基于实验数据, 在轴承预紧力分别为 1 450、1 550 和 1 700 N 的工况下, 摩擦生热模型计算得到前轴承组的理论温度值与实测温度值最大误差不超过 0.1°C, 后轴承温度值的最大误差在 0.6°C 以内。温度对比结果表明轴承摩擦生热模型与实验结果具有一致性。

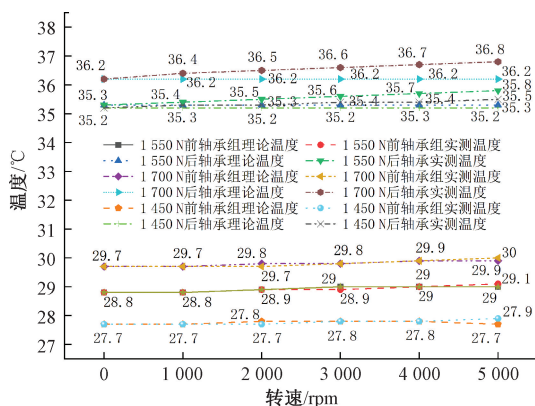


图8 轴承温度对比图

Fig. 8 Bearings temperature comparison chart

由于电主轴结构任何部件的热变形都可简化为一维杆热变形 ΔL 进行分析^[20], 由于主轴的径向被轴承所约束, 主轴的热位移不能自由产生, 于是在主轴内产生热应力 δ , 温升时为压应力, 温降时为拉应力, 因此轴承温升导致主轴轴向热位移为:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta L &= \frac{\alpha_s L \Delta T}{1 + \frac{E_j \cdot L}{A_s \cdot E_s}} \\ \sum \Delta x_i &= \sum (\Delta L_b^i + \Delta L_m^i), i = 1, \dots, 5 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

其中, α_s 为热膨胀系数, 单位为 $1/^\circ\text{C}$; σ 为一维杆压力, 单位为 MPa ; E_r 为弹性模量, 单位为 N/m^2 ; E_j 为轴向刚度, 单位为 N/m ; A_r 为横截面积, 单位为 mm^2 ; ΔT 为轴承温差; Δx 为主轴热位移量; ΔL_b 为轴承温升导致主轴的热位移量; ΔL_m 为电机温降导致主轴的热位移量。如图9所示, 电主轴降速过程中, 当轴承预紧力分别提升至 1 450、1 550 和 1 700 N 时, 轴承温升影响电主轴前端的轴向最大热位移量分别为 1.22、1.95 和 2.25 μm 。

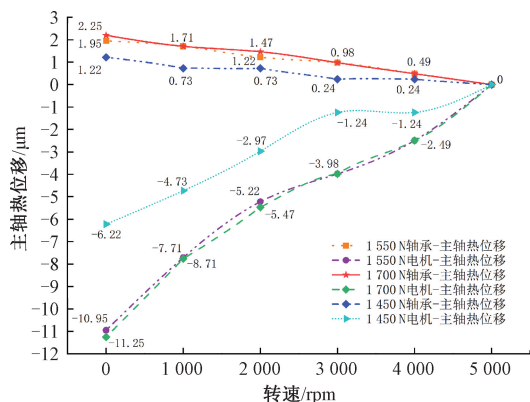


图9 热源的温度影响热位移

Fig. 9 Temperatures of heat sources affect thermal displacement

3 电主轴热位移预测模型的构建

3.1 BP神经网络热位移预测模型构建

BP神经网络(back propagation, BP)能学习和存贮大量的输入-输出模式映射关系, BP神经网络预测模型的本质为非线性参数拟合的过程, 是基于输入集和期望模式而训练的一种非线性映射关系, 通过反向传播来不断调整网络的权值和阈值, 使网络的误差平方和最小^[21-23]。BP神经网络热位移预测建模以电主轴的轴承温度为基础, 结合自然降速实验所测的零部件温度数据和主轴的热位移数据进行建模, 提升电主轴在实际加工过程中的加工精度, 模型的原理如图10所示。

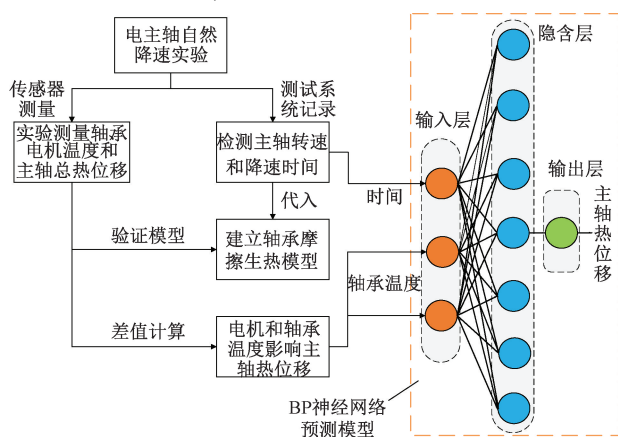


图10 BP神经网络预测模型原理

Fig. 10 Schematic diagram of the BP prediction model

电主轴内部结构紧凑复杂, 存在热辐射、热对流等问题影响主轴热位移, 因此, 采用BP神经网络能够排除干扰因素, 通过预测主轴热位移的收敛趋势, 判定主轴达到稳定状态的时间。根据电主轴热位移变化规律, 考虑剔除电机生热对主轴热位移的影响因素, 通过构建BP神经网络模型, 分析轴承温升导致主轴鼻端产生热位移的影响规律, 选择将轴承的温度和时间作为输入层数据集, 电主轴热位移作为输出层预测集。因此, BP神经网络的输入和输出可表示为:

$$\begin{cases} P_i = [t, T] \\ Y_i = \Delta x_i \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_i 为输入数据; Y_i 为输出数据, t 为时间, T 为电机温度, x_i 为热位移。以时间和轴承温度作为训练集, 另一组主轴热位移和时间作为预测集, 最终确定BP神经网络模型输入层的节点数为3, 输出层的节点数为1。若隐藏层节点足够多, 就能以任意精度逼近一个非线性函数, 根据经验公式计算隐含层节点数为7个, 故采用7个隐藏层节点的多输入单输出的预测模型。预测模型的具体

实现步骤为:1)数据选择和归一化处理。选择电主轴的转速在 1 000~5 000 r/min 范围内的数据作为网络训练数据,转速在 0~1 000 r/min 范围内的其余组数据作为网络预测对比数据,并利用 mapminmax 函数将训练数据进行归一化处理。2)神经网络训练。利用 newff 函数构建 BP 神经网络,隐藏层神经元数初设为 7。设定网络参数,网络迭代次数 epochs 为 1 000 次,期望误差 goal 为 10^{-8} ,学习速率 l_r 为 0.01。设定完参数后,利用 train 函数训练网络。3)神经网络预测。利用 sim 函数实现已训练好的 BP 神经网络预测输出值,并通过 BP 神经网络的期望值和预测值来分析网络的预测误差。

3.2 热位移预测模型的预测结果分析

以 1 400 N 预紧力和转速为 5 000 r/min 的数据作为训练数据集,在模型验证部分,采用预紧力为 1 450、1 550 和 1 700 N 的数据作为验证数据集验证 BP 预测模型的泛化性。如图 11 所示为不同预紧力下电主轴自然降速过程中轴承温升导致主轴鼻端产生热位移的预测曲线,电主轴加压后降速的前 60 s 内,由于轴承倾角的变化,电主轴在 5 000 r/min 的转速下降时轴承的摩擦力变大导致温差增大,主轴热位移增长的速率相对变快。随着电主轴的转速下降加快,主轴热位移的增长趋势将逐渐变缓,当轴承温差较小时,主轴热位移保持相对稳定状态,此时电主轴停止运行。同时,从预测曲线可看出此预测模型具有较好的预测能力。如表 3 所示为不同预紧力

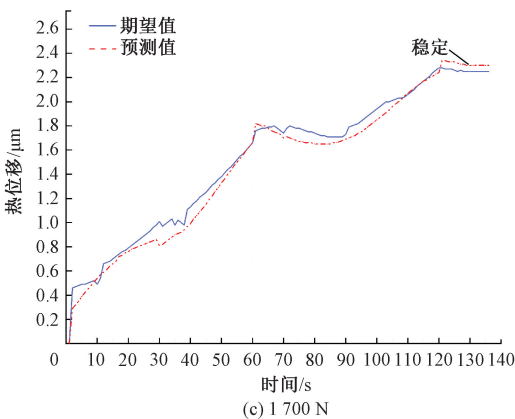
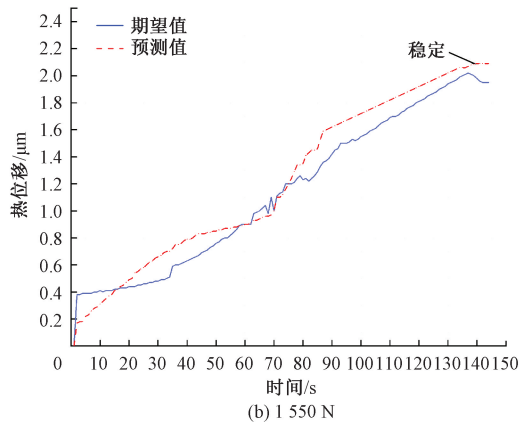
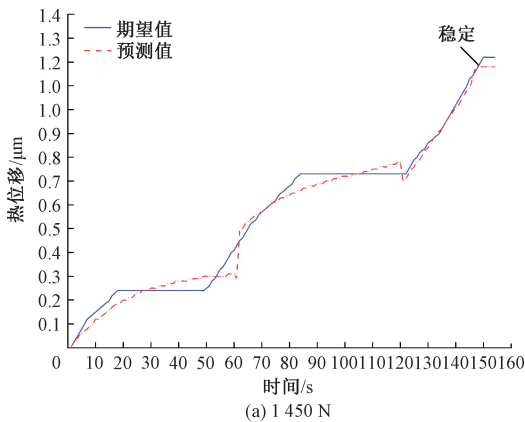


图 11 不同预载下 BP 模型预测的热位移
Fig. 11 BP model prediction of thermal displacement under preloads

表 3 预测误差计算结果
Table 3 Calculative results of prediction errors

误差/ μm	1 450 N 预测	1 550 N 预测	1 700 N 预测
MAE	0.030 9	0.081 7	0.046 4
MSE	0.002	0.016	0.005
RMSE	0.041	0.126	0.075
R^2	0.991	0.973	0.987

下电主轴热位移的最大预测残差分别为 0.17、0.23 和 0.2 μm ,残差在 0.5 μm 以内,表明 BP 神经网络预测模型是可行的,该模型具有较高的精度,满足实际工程应用的要求。

以不同预紧力下 BP 神经网络预测模型的平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 和均方误差 (mean squared error, MSE) 作为两种预测模型评定依据,采用均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 和拟合优度 (R^2) 进行评价,误差值计算结果如图 12 所示。结果说明 BP 神经网络预测模型的精度高,有较高的拟合优度、

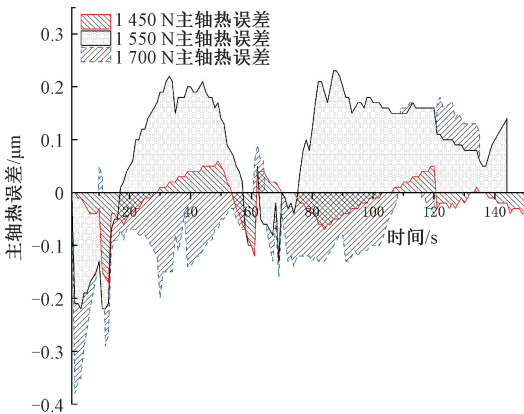


图 12 BP 预测模型的预测误差
Fig. 12 Prediction errors of the BP prediction model

强稳定性和预测误差小的特点,且模型具有良好的准确性、抗干扰能力和泛化性。

4 结 论

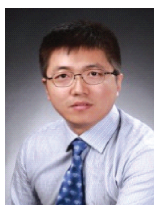
本文针对电主轴变速过程中产生的主轴热位移影响加工质量的问题,得出如下结论:1) 通过提出一种高速电主轴自然降速的创新实验方法,得到降速时间和主轴转速的关系,并在此基础上,建立轴承摩擦生热模型,得到轴承的热量值。2) 构建预紧力与轴承发热量的函数关系,分析轴承摩擦生热对电主轴轴向热位移的影响,在此基础上进一步研究轴承温升影响主轴热位移的变化规律,并构建电主轴热位移的 BP 神经网络预测模型。3) 确定热位移预测模型的残差在 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 以内,所建立的预测模型准确性高且泛化性强。为数控机床主轴智能补偿提供一种新策略。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 熊万里,孙文彪,刘侃,等. 高速电主轴主动磁悬浮技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(13): 1-17.
XIONG W L, SUN W B, LIU K, et al. Active magnetic bearing technology development in high-speed motorized spindles[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 57(13): 1-17.
- [3] 魏许杰,王洪军,邢济收,等. 基于 CGA-SVR 的电主轴磨损故障诊断方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(6): 107-112.
WEI X J, WANG H J, XING J SH, et al. Research on wear fault diagnosis of motorized spindle based on CGA-SVR [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(6): 107-112.
- [4] LI S S, YANG T X, LIU Y Y, et al. Temperature rise experiment and prediction modeling for key position of preload adjustable motorized [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1965(1): 012129.
- [5] 闫轩,许涛,曾柄杰. 基于旋滚比的电主轴轴承预紧力优化研究[J]. 机械与电子, 2020, 38(12): 14-18, 23.
YAN X, XU T, ZENG B J. Optimization research on pre-tightening force of electro-spindle bearing based on spin-to-roll ratio [J]. Machinery & Electronics, 2020, 38(12): 14-18, 23.
- [6] 雷春丽,贾希斌,巩宝如,等. 高速角接触球轴承摩擦扭矩的影响因素研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(21): 68-72, 116.
LEI CH L, JIA X B, GONG B R, et al. Research on the influencing factors of friction torque of high-speed angular contact ball bearing [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(21): 68-72, 116.
- [7] 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.
- [8] BOSSMANN S B, TU J F. A power flow model for high speed motorized spindles — Heat generation characterization [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123(3): 494-505.
- [9] 孟庆宇,刘杨,鄢欣欣,等. 基于分形理论的电主轴系统热态分布特性研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(13): 63-69.
MENG Q Y, LIU Y, YAN X X, et al. Research on thermal distribution characteristics of motorized spindle system based on fractal theory [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(13): 63-69.
- [10] 吴玉厚,于文达,张丽秀,等. 基于损耗实验的电主轴温度场分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(1): 142-146.
WU Y H, YU W D, ZHANG L X, et al. Motorized spindle temperature field analysis based on the loss [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2014, 30(1): 142-146.
- [11] THAN V T, HUANG J H. Nonlinear thermal effects on high-speed spindle bearings subjected to preload [J]. Tribology International, 2016, 96: 361-372.
- [12] 陈小安,刘俊峰,合烨,等. 高速电主轴热态性能及其影响[J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 135-142.
CHEN X AN, LIU J F, HE Y, et al. Thermal properties of high speed motorized spindle and their effects [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(11): 135-142.
- [13] 熊万里,徐光帅,吕浪,等. 高速大功率电机转子通风孔散热效率优化研究[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(5): 735-740.
XIONG W L, XU G SH, LYU L, et al. Optimizing heat dissipation efficiency for air-cooling holes of rotor of high-

- speed and large-power motor [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(5): 735-740.
- [14] 张丽秀, 李金鹏, 李超群, 等. 数控机床高速主轴温升与热变形实验研究 [J]. 机械设计与制造, 2018(1): 129-332.
- ZHANG L X, LI J P, LI CH Q, et al. The experimental research on temperature rise and thermal deformation of high speed spindle of CNC machine tools [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(1): 129-132.
- [15] YANG Y, DU Z C, FENG X B, et al. Real-time thermal modelling approach of a machine tool spindle based on bond graph method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing of Technology, 2021, 113: 99-115.
- [16] DU Z C, YAO S Y, YANG J G, et al. Thermal behavior analysis and thermal error compensation for motorized spindle of machine tools [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(7): 1571-1581.
- [17] 卢黎明, 李夫, 李中豪. 基于 ADAMS 的滚滑轴承摩擦扭矩研究 [J]. 机电工程, 2020, 37(9): 1026-1031.
- LU L M, LI F, LI ZH H. Research on friction torque of roller sliding bearing based on ADAMS [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(9): 1026-1031.
- [18] GAO F, JIA W T, LI Y, et al. Analysis and experimental research on the fluid-solid coupled heat transfer of high-speed motorized spindle bearing under oil-air lubrication [J]. Journal of Tribology, 2021, 143(7): 1-10.
- [19] 阳雪兵, 章滔, 何录忠, 等. 带有浮动变位轴承的高速主轴系统轴承生热研究 [J]. 轴承, 2021(5): 1-9.
- YANG X B, ZHANG T, HE L ZH, et al. Study on heat generation in bearing of high-speed spindle system with floating displacement bearing [J]. Bearing, 2021(5): 1-9.
- [20] 张珂, 吴智鹏, 王子男, 等. 考虑温度场影响的电主轴最佳间隙量研究 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(6): 1115-1123.
- ZHANG K, WU ZH P, WANG Z N, et al. Research on optimal clearance of motorized spindle considering temperature influence [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2021, 37(6): 1115-1123.
- [21] 刘怡琳, 刘怡. 基于 BP 神经网络的智能电表动态测量数据自动化分类 [J]. 自动化与仪器仪表, 2021(5): 61-64, 68.
- LIU Y L, LIU Y. Auto classification of dynamic measurement data of smart meter based on BP neural network [J]. Automation & Instrumentation, 2021(5): 61-64, 68.
- [22] 唐思豪, 腾召胜, 孙彪, 等. ADAM 改进 BP 神经网络与动态称重应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 127-135.
- TANG S H, TENG ZH SH, SUN B, et al. Improved BP neural network with ADAM Optimizer and the application of dynamic weighing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 127-135.
- [23] 肖师云, 冯成良, 陈文, 等. 基于 BP 神经网络的破片聚焦曲线优化 [J]. 兵工自动化, 2022, 41(1): 43-47.
- XIAO SH Y, FENG CH L, CHEN W, et al. Optimization of fragment focusing curve based on BP neural network [J]. Ordnance Industry Automation, 2022, 41(1): 43-47.

作者简介



戴野(通信作者), 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教授, 主要研究方向为高速电主轴技术。

E-mail: daiye312@163.com

Dai Ye (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 2006, received his M.Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 2009, and received his Ph.D. degree from Harbin University of Science and Technology in 2012. He is currently a professor at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include thermal error of high-speed motorized spindle.