

高速电主轴轴承温度预测与温升影响因素分析

廖 敏¹, 王新新²

(1. 西华大学机械能与自动化学院, 四川 成都 610039; 2. 渭南技师学院, 陕西 渭南 714000)

摘 要: 高速电主轴轴承在运转过程中产生大量的摩擦热, 而轴承温度是影响主轴系统刚度和精度的主要因素。通过高速电主轴空载运转实验, 测试了在不同转速下主轴轴承的温度, 获得了 151 组温度值; 基于 BP 神经网络, 对每个测试点温度, 利用前 100 个温度数据进行网络构建和训练, 求解了后 51 个数据的误差绝对值累积和, 网络训练结果表明所建立的 BP 神经网络泛化能力强; 进行了 5 种工况的温度预测, 其预测结果表明温度预测值与实验值绝对误差小, 精度高。此外, 文章还分析了轴承的预紧力、主轴转速及润滑油的黏度对轴承温升的影响, 其分析结果表明主轴转速是影响轴承温升的主要因素。

关键词: 高速电主轴; BP 神经网络; 温度预测; 角接触球轴承

中图分类号: TH161⁺.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2013)01-0088-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-159X.2013.01.017

Temperature Prediction and Analysis of Temperature Influence Factors for the Bearing of High Speed Motorized-Spindle

LIAO Min¹, WANG Xin-xin²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Xihua University, Chengdu 610039 China;

2. Weinan Technician College, Weinan 714000 China)

Abstract: Bearings generate a large amount of frictional heat when a high speed motorized-spindle runs, and the temperature of the bearings is a main factor affecting stiffness and accuracy of the spindle. When the high speed motorized-spindle without load runs in different speeds, 151 sets of temperature are tested. Based on the principle of BP neural network, as far as each tested temperature is concerned, the former 100 temperature data are used to establish and train the network. Then the network is used to solve absolute value of accumulated error of the latter 51 data. The network training results show that the BP neural network has higher generalization ability. Accordingly, the network is used to predict the temperature in 5 different operating conditions. The results show that there is a small absolute error between the predicted values and the experimental values. In addition, bearing preload, spindle speed and the viscosity of the lubricant are investigated so as to analyze the effect on the increase of bearing temperature. The results show that the spindle speed is the main factor affecting the bearing temperature increase.

Key words: high speed motorized-spindle; BP neural network; temperature prediction; angular contact ball bearing

高速精密加工技术是未来 20 年中国装备制造业发展趋势之一^[1]。机床的高效和高精度要求受制于主轴轴承系统的转速和刚度。目前, 机床主轴

轴承主要采用高速精密角接触球轴承。主轴的高速性能受到多种因素的影响, 其中, 轴承的高速性能是主要影响因素之一。主轴轴承的速度性能常

收稿日期: 2012-06-26

基金项目: 四川省教育厅重点资助项目(10ZA101); 四川省重点实验室开放研究基金资助项目(SZJJ2009-025)。

作者简介: 廖 敏(1971-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为机械 CAD/CAM。E-mail: liaominxhu@163.com

用速度指标 $d_m n$ 值来评定。 $d_m n$ 值用轴承的节圆直径或内径乘以轴承极限转速来表示,单位为 $\text{mm} \cdot \text{r}/\text{min}$ 。 $d_m n$ 值超过 0.6×10^6 称为高速,超过 1.8×10^6 称为超高速^[2]。在高速情况下,由于惯性载荷增加,离心力增大使内外圈接触载荷增加,同时沟道接触区绕接触法线的自旋滑动和差动滑动会产生大量的摩擦热,从而造成轴承烧伤和热咬合。摩擦热使得轴承温升严重,热膨胀会使轴承轴向移动、径向伸长,改变了主轴轴承系统的刚度,进而会影响主轴精度及机床加工质量,严重情况下会使轴承损坏,机床无法正常工作。从轴承动力学角度研究高速主轴轴承的摩擦热计算是普遍研究的重点^[3-4],而本文在主轴轴承温度实验的基础上,通过 BP 神经网络建立主轴轴承温度预测模型,根据主轴转速等条件进行轴承温度预测和分析。

BP 神经网络能学习和存储大量的输入-输出模式映射关系,通过误差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。BP 神经网络的信息是分布存储和并行处理的,所以它具有很强的容错性和很快的处理速度,通过训练网络的逼近函数可对现象进行识别,适合求解内部机制的复杂问题,如本文的主轴轴承的温度分布预测。

1 主轴轴承温度测试

图 1 是主轴轴承空载运转和温度测试实验台。在温度测试过程中利用了热电偶、点温计和 TI55FT-3L 热成像仪,分别测得了主轴温度 t_s 、轴承内圈温度 t_d 、内圈沟道温度 t_{ci} 、滚动物体温度 t_b 、外圈沟道温度 t_{co} 、轴承外圈温度 t_D 、轴承套温度 t_i 和环境温度 t_e 共 8 个测试点温度。图 2 是温度测试点示意图,表明了各个温度测试点的位置。

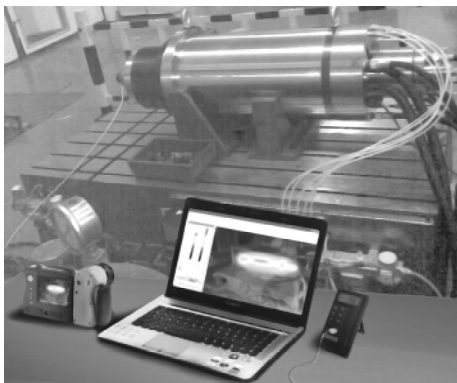
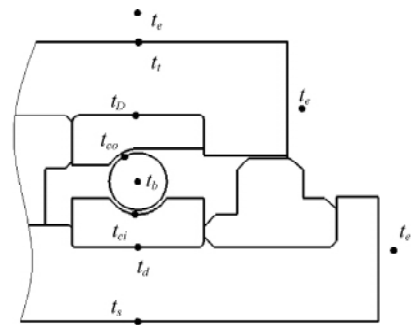


图 1 主轴轴承温度测试台



t_s —主轴温度; t_d —轴承内圈温度; t_{ci} —内圈沟道温度; t_b —滚动物体温度; t_{co} —外圈沟道温度; t_D —轴承外圈温度; t_i —轴承套温度; t_e —环境温度。

图 2 主轴轴承温度测试点示意图

测试时,通过改变电主轴转速 n (单位为 r/min) 测量得到了系统在不同的摩擦热下的 151 组温度值数据。测试的起始转速为 $8\,000 \text{ r}/\text{min}$,以 $80 \text{ r}/\text{min}$ 为间隔,记录在每个速度下的最高温度,直到最终转速 $20\,000 \text{ r}/\text{min}$ 为止,如图 3 所示。

n	t_e	t_{ci}	t_{co}	t_b	t_d	t_s	t_i
8000	22.9	28.6	28.6	30.9	27.0	26.8	26.9
8080	22.9	28.7	28.7	31.1	27.1	26.9	26.9
8160	22.8	28.8	28.8	31.2	27.1	27.0	26.9
8240	22.7	28.9	28.8	31.3	27.1	27.0	26.9
8320	22.5	28.9	28.9	31.3	27.2	27.0	26.1
8400	22.6	29.0	29.0	31.4	27.2	27.1	26.1
8480	22.7	29.0	29.0	31.5	27.2	27.1	26.1
8560	22.8	29.1	29.1	31.6	27.3	27.1	26.1
8640	22.9	29.1	29.1	31.7	27.3	27.1	26.1
8720	23.0	29.2	29.2	31.8	27.3	27.2	26.1
8800	22.8	29.3	29.2	31.8	27.4	27.2	26.2
8880	22.8	29.3	29.3	31.9	27.4	27.2	26.2
8960	22.9	29.4	29.4	32.0	27.4	27.3	26.2
9040	22.7	29.4	29.4	32.1	27.5	27.3	26.2
9120	22.8	29.5	29.5	32.2	27.5	27.3	26.2

图 3 主轴轴承温度

2 主轴轴承温度预测模型

根据图 3 中的测试数据确定 2 个输入单元数,编号为 0、1,参数分别为 n 、 t_e ;而输出层选择主轴—轴承—轴承套系统的 7 个参数,分别为 t_{ci} 、 t_{co} 、 t_b 、 t_d 、 t_s 、 t_D 、 t_i 。对每个测试温度,选用测试数据的前 100 个温度值用于构建网络,后 51 个用于测试网络的泛化能力。

2.1 BP 神经网络模型的建立

用 Matlab 软件^[5]中 BP 神经网络 newff() 函数构建一个前向 BP 神经网络,在设定训练次数为 1 000、学习率为 0.001、训练目标为 0.000 4 之后,应用 train() 对网络进行训练,并用预测函数 sim()

对训练的函数进行预测,验证网络的泛化能力。图4是BP网络训练过程图。在达到设定网络精度0.0004时,网络训练4步停止。图5为网络的线性回归图。图6—12为网络的拟合曲线图。

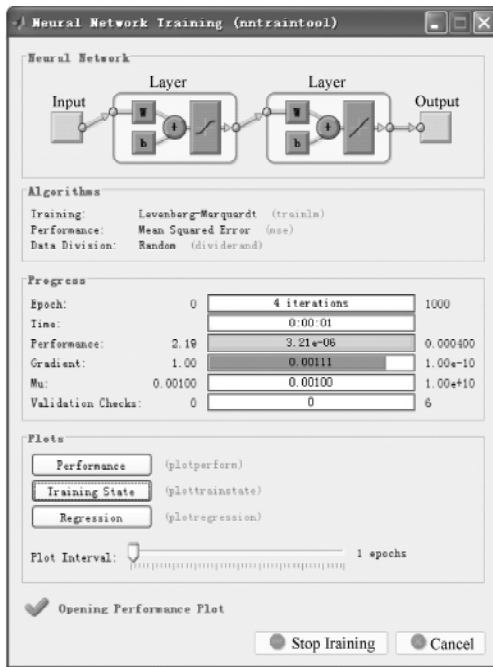


图4 BP神经网络训练过程图

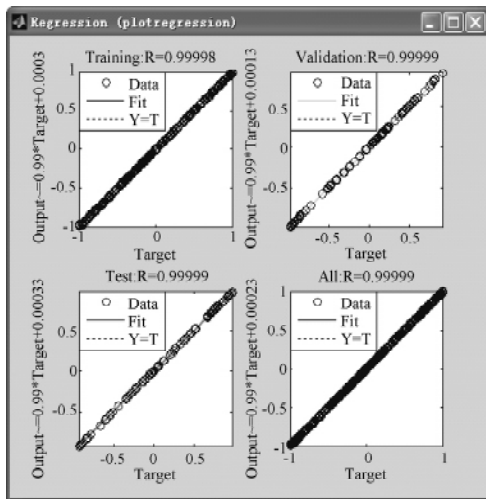


图5 BP神经网络线性回归图

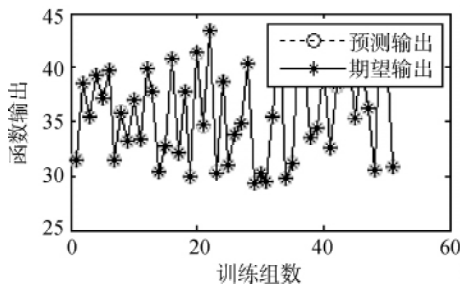


图6 内圈沟道拟合曲线

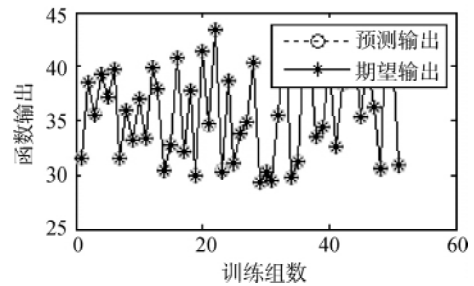


图7 外圈沟道拟合曲线

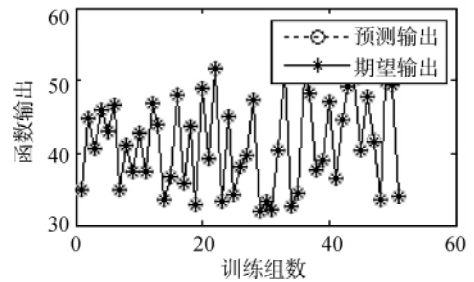


图8 滚动体拟合曲线

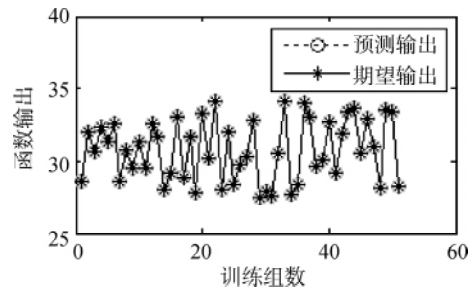


图9 轴承内圈拟合曲线

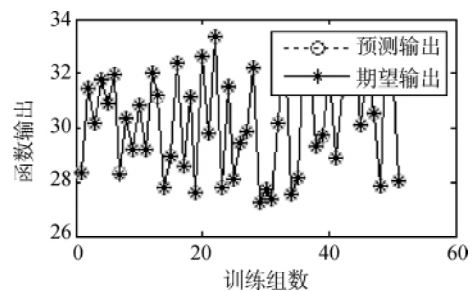


图10 主轴拟合曲线

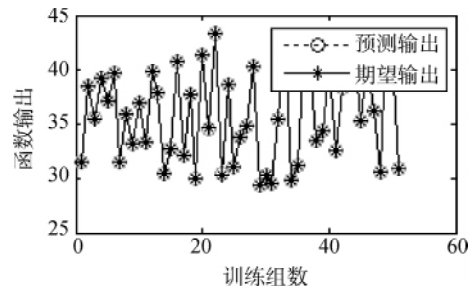


图11 轴承外圈拟合曲线

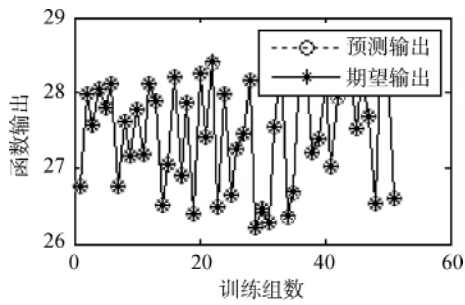


图 12 轴承套拟合曲线

在 BP 神经网络构建和训练的基础上,利用后 51 个温度值和神经网络分别求解了各输出参数误差绝对值的累积和,见表 1。

表 1 各输出参数误差绝对值累积和

序号	参数	误差绝对值累积和
1	内圈沟道	0.486 9
2	外圈沟道	0.569 9
3	滚动体	0.806 4

表 2 用 BP 神经网络预测的主轴轴承温度

分组	输入参数		输出参数							
	n	t_e	t_{ci}	t_{co}	t_b	t_d	t_s	t_D	t_i	
1	20 000	22.9	预测值	43.398 5	43.373 2	51.772 9	34.116 2	33.424 2	33.532 3	28.419 4
			真实值	43.3	43.3	51.6	34.1	33.4	33.5	28.4
			误差值	0.098 5	0.073 2	0.172 9	0.016 2	0.024 2	0.032 3	0.019 4
2	18 800	22.6	预测值	41.231 8	41.253 1	48.655 6	33.211 5	32.640 6	32.673 9	28.236
			真实值	41.3	41.4	48.8	33.3	32.6	32.7	28.3
			误差值	0.068 2	0.146 9	0.144 4	0.088 5	0.040 6	0.026 1	0.06 4
3	17 200	22.7	预测值	38.589 4	38.579 3	44.937 8	32.023 8	31.469 4	31.578 7	27.927 7
			真实值	38.6	38.7	45.0	32.1	31.5	31.6	28.0
			误差值	0.010 6	0.120 7	0.062 2	0.076 2	0.030 6	0.021 3	0.072 3
4	14 000	22.7	预测值	34.305 6	34.308 5	38.96	30.022 2	29.699	29.711 1	27.353 8
			真实值	34.3	34.3	39.0	30.1	29.7	29.7	27.4
			误差值	0.005 6	0.008 5	0.04	0.077 8	0.001	0.011 1	0.046 2
5	8 080	22.7	预测值	28.728 6	28.719 2	31.076 1	27.165	27.052 7	27.051 2	26.178 2
			真实值	28.8	28.8	31.2	27.1	27.0	27.0	26.1
			误差值	0.071 4	0.080 8	0.123 9	0.06 5	0.052 7	0.051 2	0.078 2

图 13 是每个工况(输入参数为主轴转速和环境温度)下,各个输出温度参数的预测值与真实值曲线。从图中可以看出,每组预测值与实际值的拟合度较高。由表 2 可知,预测值与实际值的误差的

表 1(续)

序号	参数	误差绝对值累积和
4	轴承内圈	0.196 9
5	轴承外圈	0.176 2
6	轴承套	0.147 9
7	主轴	0.240 2

由图 5 的线性回归图线及相关系数 R 值(0.999 99)、图 6—12 的网络拟合曲线以及表 1 的网络累积误差值可知,所建立的网络泛化能力强。下面就利用该网络进行轴承温度预测。

2.2 主轴轴承温度预测

根据所构建的 BP 神经网络,输入主轴转速和环境温度,对各个测试点输出参数(温度)进行预测。温度预测结果见表 2。

绝对值很小(误差绝对值最大为 0.172 9);因此,用 BP 神经网络建立的温度预测模型预测在一定转速和环境温度下的主轴轴承各测点温度的精确度较高,符合现场温度测试数据的规律和特点。

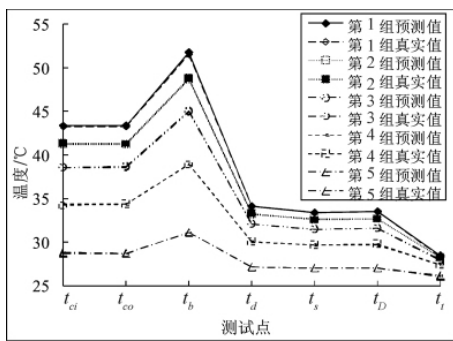


图13 预测值与实际值的曲线

3 主轴轴承温升的影响因素

高速电主轴轴承温升受多种因素的影响,如主轴转速、轴承预紧力、轴承的润滑方式、冷却油量、润滑油量等^[6-7]。根据图3中数据,绘制了轴承各测试点在不同转速下的温升曲线图(图14);并且运用同样的实验装置(图1),在轴承预紧力和润滑油黏度不同的条件下,得到轴承在各测试点的温升曲线,见图15和图16。

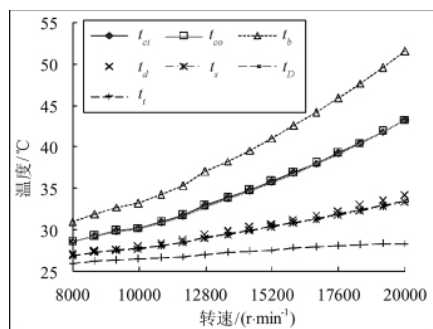


图14 转速对温升的影响

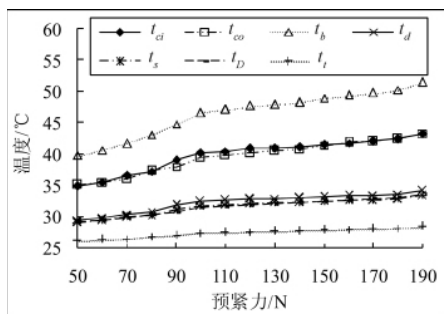


图15 预紧力对温升的影响

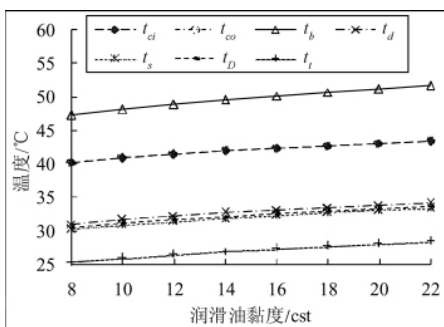


图16 润滑油黏度对温升的影响

由图14可知:随主轴转速增加,轴承系统摩擦生热越多,温升曲线上升越明显;滚动体的温度最高,轴承内外圈沟道(及内外圈)的温度次之,轴承套的温度影响最小,因为轴承生热是滚动体与沟道的摩擦产生的,远离滚动体处温度较低。

由图15可知,预紧力增大也会使轴承的温升增高,因为预紧力增大使滚动体与滚道间的摩擦增加,但是增加的幅度不明显,曲线较平滑。

由图16可知,随着黏度的增加,系统各节点的温度也会上升,但是润滑油的黏度对系统的温度影响较低,温度上升的幅度不是很大。

综上所述,转速对轴承系统的温度影响最大,转速的增加温度急剧上升。

4 结论

在温度测试的基础上,重点利用BP神经网络进行温度预测,同时还分析了轴承温升的影响因素。

1) 用BP神经网络建立了主轴轴承温度预测模型。由仿真曲线、相关系数和累积误差表明,所建的BP神经网络模型泛化能力强。同时利用网络进行了实际的预测,由预测值与实际值的曲线图及所求的误差绝对值可知,所建的模型精度较高。

2) 利用实验装置分别测试了在转速、预紧力以及润滑油黏度不同时轴承各测试点的温升情况。其结果表明转速对主轴轴承的温度影响最为明显,预紧力次之,润滑油的黏度影响不大。

参 考 文 献

[1] 中国机械工程学会. 中国机械工程技术路线图[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011: 8.
 [2] 蒋兴奇. 主轴轴承热特性及对速度和动力学性能影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
 [3] Chao Jin, Bo Wu, Youmin Hu. Heat Generation Modeling of Ball Bearing Based on Internal Load Distribution[J]. Tribology International 2012, 45(1): 8-15.
 [4] Zahedi A, Movahhedy M R. Thermo-mechanical Modeling of High Speed Spindles[J]. Scientia Iranica 2012, 19(2): 282-293.
 [5] 钟麟, 王峰. MATLAB 仿真技术与应用教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 23-45.
 [6] 李松生, 张钢. 超高速电主轴轴承的润滑条件分析[J]. 润滑与密封 2005(8): 162-165.
 [7] Kim Sun - Min, Lee Sun - Kyu. Prediction of Thermo-elastic Behavior in a Spindle-bearing System Considering Bearing Surroundings [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(6): 809-831.

(编校: 饶莉)