

文章编号: 1001-4888(2020)01-0001-08

基于 BP 神经网络的钢轴表面硬度 磁巴克豪森噪声定量检测技术*

张传栋, 何存富, 刘秀成, 吴斌, 张秀

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘要: 利用磁巴克豪森噪声测试方法, 实现了钢轴曲表面硬度的无损检测。首先, 实验测试了传感器对曲表面磁巴克豪森噪声信号的重复检测性能, 统计出不同励磁频率与幅值条件下的磁巴克豪森噪声信号包络线峰值和重复测试数据的变异系数图谱, 并利用磁巴克豪森噪声的峰值与其变异系数的比值作为评价指标, 优选了传感器工作参数; 其次, 利用变异系数评价传感器对磁巴克豪森噪声和切向磁场磁参量的重复测试性能, 并筛选出变异系数较小的磁参量作为 BP 神经网络模型的输入; 最后, 研究了 BP 神经网络模型隐含层节点数对模型精度的影响, 采用最佳优化模型对钢轴表面硬度进行预测, 其预测平均误差仅为 4.25%。

关键词: BP 神经网络; 钢轴; 表面硬度; 磁巴克豪森噪声; 无损检测

中图分类号: TH89

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-19-097

0 引言

硬度是指材料抵抗弹性变形、塑性变形和破坏的能力, 能够定性反映材料的耐磨性能和疲劳强度等, 是评定材料力学性能常用指标之一^[1,2]。利用常规硬度检测仪对材料表面进行硬度检测时, 会在表面留下压痕, 对于装配要求高的零件, 压痕缺陷可能影响装配体的整体性能, 因此需要发展无损方法用于金属材料表面硬度检测。

磁巴克豪森噪声 (Magnetic Barkhausen Noise, MBN) 对铁磁性材料的微观结构、残余应力变化敏感, 已成功用于表面硬度、残余应力无损检测。例如芬兰 Sui Sanata-aho 团队^[3,4] 和 Stresstech 公司已开发出成熟的 MBN 检测仪器, 实现了齿轮、曲轴等表面硬度的无损检测; 德国 Fraunhofer 团队^[5] 开发的 3MA 多功能检测仪能够对滚珠丝杠、汽车发动机活塞等复杂零部件表面进行硬度无损检测。国内, 钱王洁等^[6] 研究表明磁巴克豪森噪声信号均方根值随着 Fe-Cu 合金硬度增大呈线性下降趋势; Liu 等^[7] 利用 MBN 检测方法对 12CrMoV 平板进行检测, 对比分析了多元线性回归和 BP 神经网络模型对表面硬度的预测精度。上述研究主要面向平板构件, 传感器难以直接用于钢轴等曲面检测。

要将 MBN 无损检测技术应用于钢轴零件表面硬度检测, 首先需研制适用于曲面检测的传感器, 并对传感器的检测参数进行优化; 其次由于硬度与 MBN 单一磁参量间存在非线性关系, 还需细致研究 MBN 磁参量与表面硬度关系的建模方法, 以提高模型对表面硬度的预测精度, 目前这两方面研究报道还较少。

本文利用自主研制的 MBN 检测传感器对钢轴表面硬度进行检测, 重点分析励磁参数对 MBN 重复

* 收稿日期: 2019-06-04; 修回日期: 2019-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(11527801)资助

通讯作者: 何存富(1958—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究领域为机械测试理论、方法及技术、超声无损检测新技术, 传感器测试技术。Email: hecunfu@bjut.edu.cn

检测幅值的影响规律,以优选励磁参数;另一方面,统计各磁参量重复检测结果的变异系数,以对 BP 神经网络输入参量进行预筛选,提高模型对表面硬度的预测精度。

1 传感器检测原理及励磁参数优化

1.1 检测原理

铁磁性材料内部磁畴(壁)在外加磁场的作用下将发生移动或偏转等运动。磁畴(壁)的运动受晶界、析出物等微观结构的钉扎作用而呈现不连续性,这一过程称为巴克豪森跳变^[8]。该不连续性跳变过程将在材料内部诱发脉冲磁场,传播至试件表面后可被感应线圈和磁敏元件检测到,以电压的形式表现,即为 MBN 信号。材料微观结构的变化一方面引起表面硬度改变,另一方面影响磁畴的钉扎效应,进而使 MBN 信号的特征值发生变化。因此,可以利用检测 MBN 信号特征值间接表征材料微观结构或表面硬度的变化。

Zheng 等^[9]采用逐点测试方法获得 Q235 平板试件上的 MBN 信号分布图,得到了材料磁化强度与 MBN 信号发射强度的分布关系,为传感器中感应线圈放置位置提供了理论依据。本文针对钢轴曲表面进行 MBN 检测,设计图 1(a)所示的传感器对钢轴曲表面进行 MBN 检测。传感器采用末端内凸型磁芯,内凸段侧面与钢轴表面以线接触形式进行励磁耦合,磁芯材质为坡莫合金;磁芯顶端绕制线径 0.3mm 铜制漆包线 200 匝作为传感器励磁线圈;MBN 接收线圈外径 4mm,内径 2mm,高约 5mm,采用线径 0.09mm 的铜制漆包线绕制而成,匝数约为 500 匝。为测量被测试件表面的切向磁场强度,采用型号 SS49E 高灵敏度线性霍尔元件放置于 MBN 检测线圈旁侧。

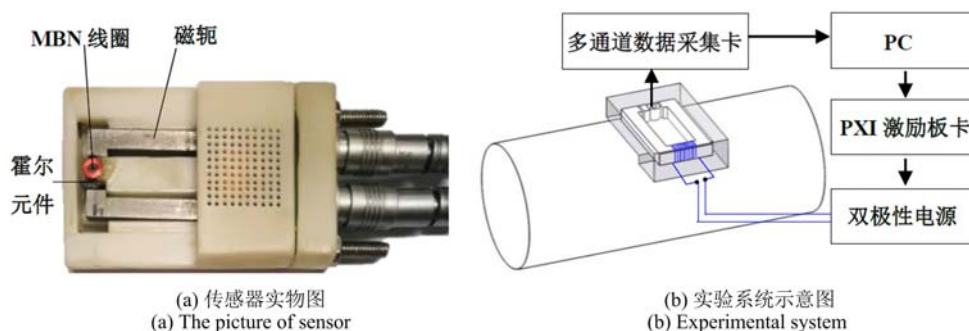


图 1 实验系统

Fig. 1 The experimental system

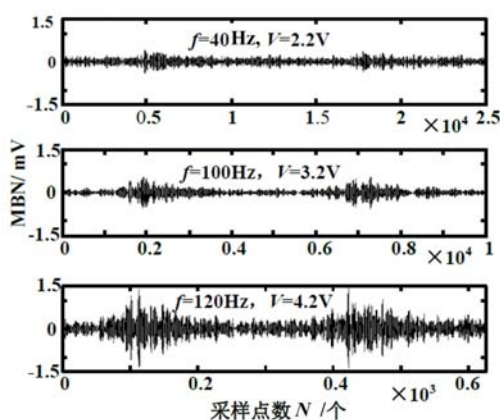


图 2 不同激励参数时检测的 MBN 信号

Fig. 2 MBN signal obtained under different excitation parameters

图 1(b)为检测装置示意图。PC 电脑中运行的 LabVIEW 程序控制 NI 系列信号激励卡生成正弦波信号,经过双极性电源放大后,通入 U 型磁芯顶端的励磁线圈,置于试件表面霍尔元件与 MBN 检测线圈输出的电压信号被多通道采集卡采集传输到 PC 中进行后续处理。

1.2 励磁参数优化

MBN 信号与传感器的励磁频率、强度有关。控制双极性电源的放大倍数不变,改变信号激励卡生成正弦波的电压幅值、频率。电压幅值在 2~4.4V 范围内变化(步长为 0.2V),频率在 20~200Hz 内以 20Hz 为步长逐渐增加。当励磁参数固定时,共进行 3 次重复性 MBN 检测。

图 2 给出了不同励磁参数时检测到的典型 MBN 信号。对 MBN 信号进行滤波、滑动平均(RMS)处理绘制 MBN 信号包络线并提取包络线峰值 $M_{\max}$,

3 次重复测得的峰值平均值随励磁电压和频率的变化趋势如图 3 所示。

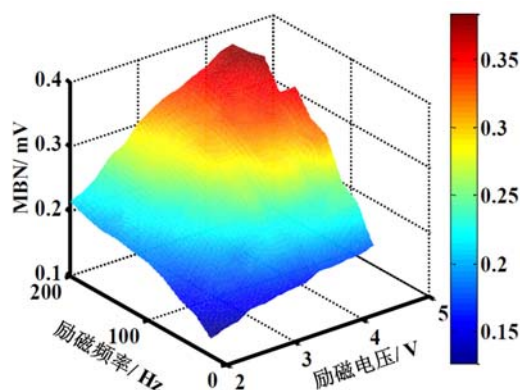


图 3 MBN 峰值变化图谱

Fig. 3 The map of peak amplitude of MBN

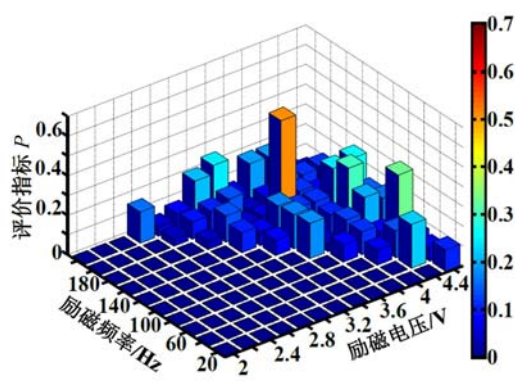


图 4 评价指标 P 三维柱状图

Fig. 4 The histogram of parameter P

从图 3 可知,随着励磁电压和频率的增加,传感器检测得到的 MBN 信号幅值呈上升趋势。MBN 信号的峰值 $M_{\max}$ 越大越利于硬度的良好表征。传感器对 MBN 信号的重复检测性能也会影响硬度表征效果,利用 3 次检测结果的变异系数 $C_v = \sigma/\mu$ (其中 σ 为重复实验磁参量对应标准差, μ 为重复实验磁参量对应平均值) 评价不同励磁参数条件下传感器对 MBN 信号的重复检测性能,当 C_v 取值越小,传感器重复性能越好。为了综合评价传感器的 MBN 检测性能,定义评价指标 $P = M_{\max}/C_v$,当 P 值越大时,传感器检测 MBN 性能越好。图 4 给出了部分 P 值计算结果,可以看出,在频率处于 80~140 Hz,电压处于 4~4.4 V 区间时 P 值取值较高。因此后续实验过程中,选择励磁信号为频率 100 Hz,幅值 4.4 V 的正弦波。

2 试样制备与表面硬度测试

制备直径为 40 mm,长 320 mm 的 16 根 45# 钢轴,通过高频感应淬火工艺调制钢轴的表面硬度。

在每根钢轴表面选取 6 个位置进行 MBN 检测,利用显微硬度计测试 6 个检测位置的硬度值。测点的位置如图 5 所示,编号 1~16 的试件进行测试得到的显微硬度 (HV30) 如表 1 所示。

3 实验结果分析

所研制的传感器能够同时检测 MBN 信号和切向磁场 (Tangential Magnetic Field Signal, TMF) 信号,研究表明上述两种信号均对材料表面硬度变化敏感。因此在进行实验结果分析时,从两类信号中均提取磁参量,分析磁参量与钢轴表面硬度的相关性。

图 6 为典型的检测信号波形;以 TMF 为横坐标 MBN 包络线 (RMS) 为纵坐标可得到图 7 所示的蝶形曲线。随着硬度的增加,相应蝶形曲线的峰值降低,峰值对应切向磁场位置向强磁场方向移动,这与文献 [10, 11] 描述相符。

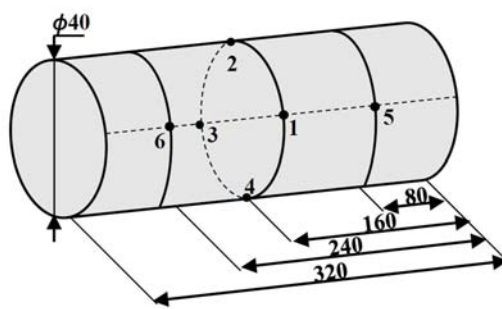


图 5 试样检测点分布示意图

Fig. 5 The locations of testing points

表 1 钢轴表面硬度检测结果
Tab.1 The hardness of samples

试样 编号	表面维氏硬度(HV30)					
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	位置 6
1	505.3	490.3	511.7	505	508.7	515.3
2	240.7	247	247.3	282.3	268.7	254.3
3	419.7	416	432	419	420.3	432.3
4	261.7	268.3	258	229	223.3	242.3
5	604	615	593.7	539.3	537	536
6	281	206.3	279.3	281	265.7	292.3
7	652.7	685.3	661.3	626.3	694.3	679
8	685.7	604.3	668.3	649.3	657.3	677.7
9	695.7	626.7	737	702.3	719	739.3
10	540.3	520	532.3	520.7	512.7	548.7
11	509.3	495	543.7	510.3	514.7	521
12	703.7	660	669.3	684.7	666.7	678
13	381	372.3	379.3	381	379	380.7
14	371.3	376.7	424.7	375.3	381.3	406.3
15	684.3	675	682.7	679	664.7	693
16	230.7	229.3	272	247	230.3	225

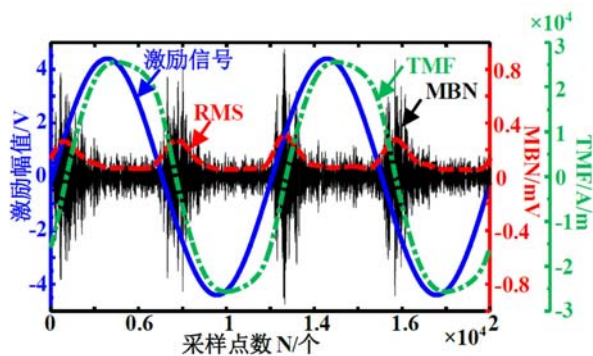


图 6 典型 MBN/TMF 信号
Fig. 6 Typical MBN/TMF signal

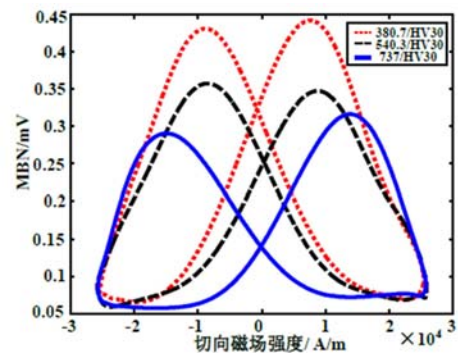


图 7 不同硬度钢轴 MBN 信号
Fig. 7 MBN profiles obtained from rods
with different surface hardness

从 MBN 蝶形曲线与 TMF 信号中共提取 18 项磁参量,如表 2 所示。为分析传感器对各项磁参量的检测性能,在不同的时间段内进行 4 次重复实验,每次实验在同一检测点进行 3 次 MBN 检测,共计获得 12 次检测点的实验结果。统计试样编号为 1 的试样上 2 号检测点所测 18 个磁参量重复检测结果的变异系数。如表 2 所示,部分磁参量(A_3 , ph_3 , ph_1)的变异系数较高,这可能与手动重复实验检测时磁路与试件表面的耦合不一致有关。在实际检测时建议不采用上述磁参量进行硬度表征。

选取变异系数较小的磁参量(M_r 、DH50、DH25、 $M_{\max}$),它们与表面硬度的关系分别如图 8(a~d)所示。通过对比发现磁参数 DH25、DH50 与试件表面硬度存在非线性关系,磁参数 $M_{\max}$ 、 M_r 随着的表面硬度的增加呈现近似线性下降趋势,但是两者的拟合方程最大确定系数 $R^2 = 0.857 < 0.9$ 。综上所述,采用单参量拟合方程用于表面硬度检测时精度有限,因此本文提出利用多项磁特征参量建立 BP 神经

网络模型对钢轴表面硬度进行表征。

表 2 MBN 信号、TMF 信号常用磁参量及其变异系数

Tab. 2 The variation coefficient of MBN and TMF magnetic parameters

特征参量	参量来源	$C_v/\%$	备注
M_{max}	MBN	1.97	MBN 包络线的最大值
M_{mean}	MBN	3.15	单磁化周期内 MBN 的平均值
M_r	MBN	2.10	MBN 与纵轴的截距
H_{cm}	MBN	5.57	M_{max} 对应的切向磁场强度
DH25	MBN	1.98	25% M_{max} 处对应的峰宽
DH50	MBN	2.81	50% M_{max} 处对应的峰宽
DH75	MBN	5.28	75% M_{max} 处对应的峰宽
A_1	TMF	1.21	1 次谐波的幅值
A_3	TMF	11.60	3 次谐波的幅值
A_5	TMF	6.61	5 次谐波的幅值
A_7	TMF	8.20	7 次谐波的幅值
ph_1	TMF	9.68	1 次谐波的相位
ph_3	TMF	19.90	3 次谐波的相位
ph_5	TMF	7.41	5 次谐波的相位
ph_7	TMF	3.89	7 次谐波的相位
ph_9	TMF	0.55	9 次谐波的相位
UHS	TMF	2.12	3,5,7 次谐波成分的幅值之和
K	TMF	7.81	畸变因子 K ($K = \sqrt{\frac{A_3^2 + A_5^2 + A_7^2}{A_1^2}}$)

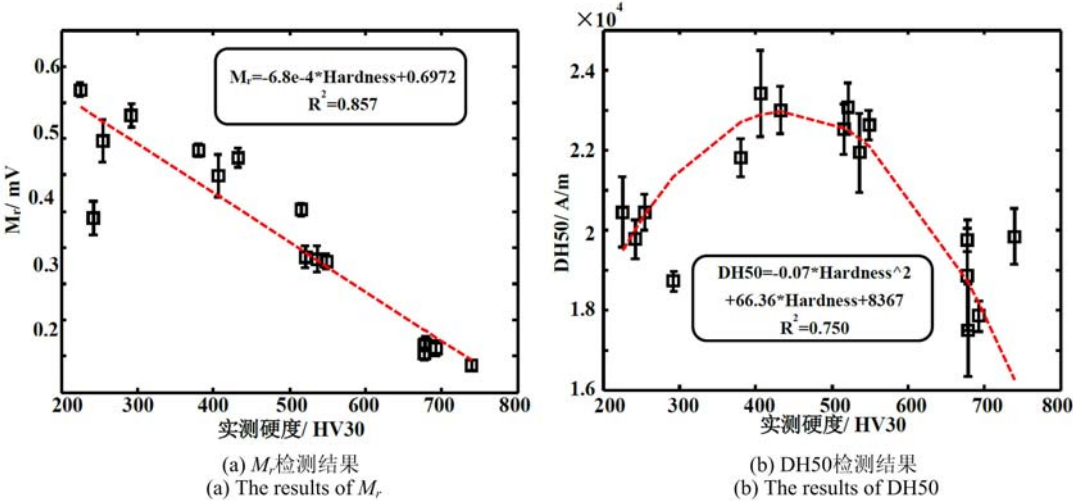


图 8 不同磁参数随硬度变化趋势

Fig. 8 Tendency of magnetic parameters on the surface hardness

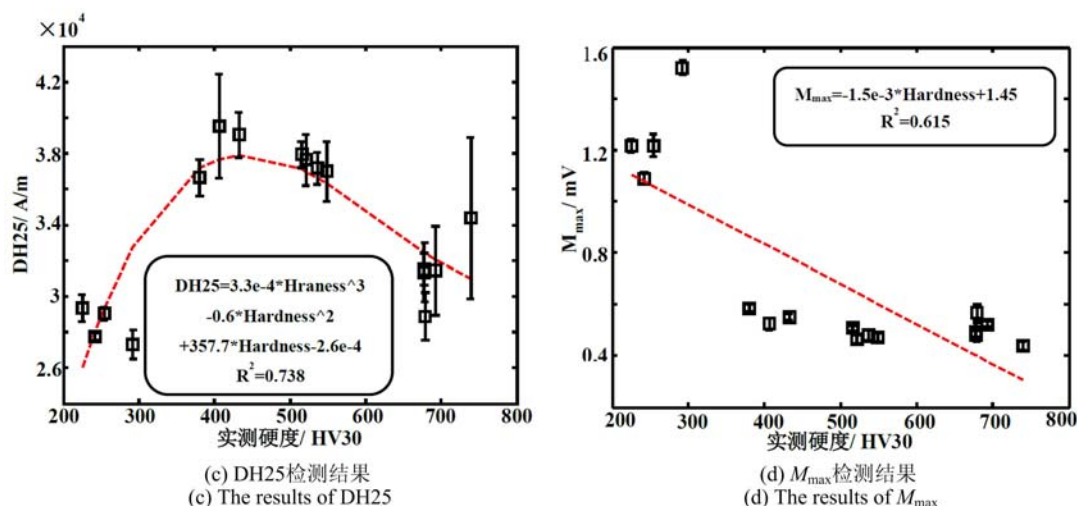


图 8(续) 不同磁参数随硬度变化趋势

Fig. 8 Tendency of magnetic parameters on the surface hardness

4 硬度的神经网络定量预测

目前基于 BP 神经网络技术建立多项磁参量输入表面硬度输出的定量预测模型已有研究^[12,13]。相比单一磁参量对硬度的表征结果, BP 神经网络模型具有更高的预测精度, 但之前关于输入磁特征参量对硬度预测模型精度的影响讨论较少。

本文采用具有单一隐含层的 BP 神经网络模型对表面硬度进行预测。隐含层和输出层传输函数分别是 tansig 函数和 puerlin 函数, 从表 2 中选取变异系数小于 4% 的磁参量作为模型的输入。

为确定隐含层节点数, 首先利用经验公式 $n_1 = (m + n)^{1/2} + a$ 对隐含层节点数进行计算, 式中 n 为输入层节点数, m 为输出层节点数, a 为 1~10 的常数, 估算的隐含层节点数处于 [5, 14]。为进一步优选节点数 n_1 , 从 6 个检测点中随机选择 5 个检测点数据用于具有不同隐含层节点数的 BP 神经网络模型训练, 利用训练误差对隐含层节点数进行优化, 如图 9 所示, 当节点数选择为 7 时, 模型训练误差最小, 因此在后续分析中, 选择固定模型隐含层节点数为 $n_1 = 7$ 。利用剩余一组数据作为外部校验, 图 10 给出了优化模型对表面硬度的预测结果。其最大预测误差约为 9.67%, 平均相对误差为 4.25%。

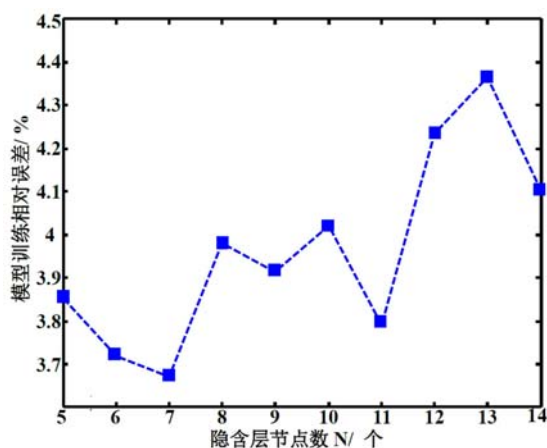


图 9 模型训练误差曲线

Fig. 9 The error of BP training model

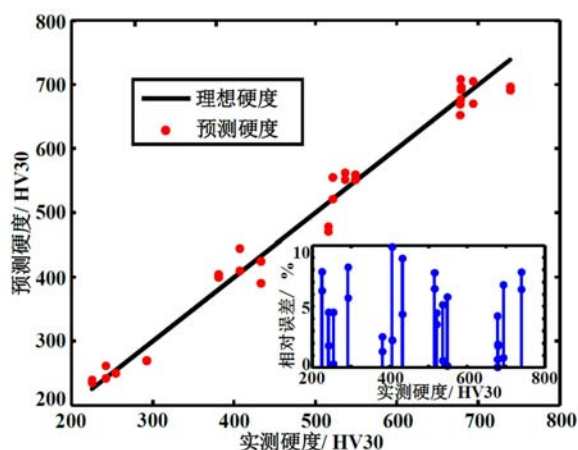


图 10 BP 神经网络模型预测结果

Fig. 10 The results predicted of BP neural network

5 结论

- (1) 提出利用 $P=M_{\max}/C_v$ 指标, 对钢轴曲表面 MBN 检测传感器的励磁参数进行优化;
- (2) 利用模型的相对训练误差对 BP 神经网络模型的隐含层节点数进行优化, 提高了神经网络模型的预测精度;
- (3) 采用 BP 神经网络模型对钢轴表面硬度进行预测, 其预测平均相对误差仅为 4.25%, 实现了钢轴表面硬度的无损检测。

参考文献:

- [1] 李强, 缪龙秀, 王润志, 等. 利用巴克豪森噪声无损测量铁磁材料硬度试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2000, 24(1):80—82 (LI Qiang, MIAO Longxiu, WANG Runzhi, et al. Research on nondestructive hardness testing of ferromagnetic material by barkhausen noise[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2000, 24(1):80—82 (in Chinese))
- [2] 贾永军. 表面硬度对采煤机滚筒太阳轮力学性能的影响研究[D]. 西安科技大学, 2017 (JIA Yongjun. Study on effect of surface hardness on mechanical properties of shearer drum sun gear[D]. Xi'an University of Science and Technology, 2017 (in Chinese))
- [3] Santa-aho S, Hakanen M, Sorsa A, et al. Case depth verification of hardened samples with Barkhausen noise sweeps[C]//AIP Conference Proceedings. AIP, 2014, 1581(1):1307—1314.
- [4] Santa-aho S, Vippola M, Sorsa A, et al. Utilization of Barkhausen noise magnetizing sweeps for case-depth detection from hardened steel[J]. Ndt & E International, 2012, 52:95—102.
- [5] Meyendorf R. Nondestructive determination of case depth in surface hardened steels by combination of electromagnetic test methods[D]. University of Dayton, 2011.
- [6] 钱王洁, 刘向兵, 徐超亮, 等. Fe-Cu 合金热老化的巴克豪森噪声研究[J]. 金属热处理, 2017, 12:61 (QIAN Wangjie, LIU Xiangbing, XU Chaoliang, et al. Study of magnetic Barkhausen noise in thermally aged Fe-Cu alloys[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 12:61 (in Chinese))
- [7] Xiucheng L, Ruihuan Z, Bin W, et al. Quantitative prediction of surface hardness in 12CrMoV steel plate based on magnetic Barkhausen noise and tangential magnetic field measurements [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2018, 37(2):38.
- [8] Dobmann G, Altpeter I, Kopp M. Nondestructive materials characterization of irradiated nuclear pressure-vessel steel samples by the use of micromagnetic techniques and in terms of mechanical properties[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2006, 42(4):272—277.
- [9] 郑阳, 沈功田, 谭继东, 等. U 型磁轭励磁时磁巴克豪森噪声信号分布规律研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(24):1—6 (ZHENG Yang, SHEN Gongtian, TAN Jidong, et al. Characteristics of magnetic Barkhausen noise with U-shaped electromagnet magnetizer [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(24):1—6 (in Chinese))
- [10] Meyendorf R. Nondestructive determination of case depth in surface hardened steels by combination of electromagnetic test methods[D]. University of Dayton, 2011.
- [11] Franco F A, González M F R, De Campos M F, et al. Relation between magnetic Barkhausen noise and hardness for Jominy quench tests in SAE 4140 and 6150 steels[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2013, 32(1):93—103.
- [12] Li Z, Sun G, He C, et al. Multi-variable regression methods using modified Chebyshev polynomials of class 2[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2019, 346:609—619.
- [13] Wang P, Zhu L, Zhu Q, et al. An application of back propagation neural network for the steel stress detection based on Barkhausen noise theory[J]. NDT & E International, 2013, 55:9—14.
- [14] 张宏龙, 张晓语, 裴永茂, 等. 超磁致伸缩材料的擦除特性和同余特性实验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(6): 699—707 (ZHANG Honglong, ZHANG Xiaoyu, PEI Yongmao, et al. Experimental study of wiping-out property and congruency property for giant magnetostrictive material[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(6):

699—707 (in Chinese))

- [15] 李强, 刘志明. 高速客车转向架残余应力的试验研究[J]. 实验力学, 1999, 14(2):260—266 (LI Qiang, LIU Zhiming. Research on the residual stress in bogie frames of high-speed passenger car[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1999, 14(2):260—266 (in Chinese))

Magnetic barkhausen noise technology for surface hardness evaluation in steel shaft based on BP neural network

ZHANG Chuan-dong, HE Cun-fu, LIU Xiu-cheng, WU Bin, ZHANG Xiu

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Non-destructive evaluation of surface hardness in steel shaft is achieved using magnetic Barkhausen noise (MBN) method. First, experiments are performed under the condition of different excitation frequencies and amplitudes to investigate the repeated detection performance of the sensor on measuring MBN signals. The charts, representing the average peak value of MBN envelope and the variation coefficient of the repeated test data are drawn. The ratio of the average peak value of MBN signals to the variation coefficient of the peak value of MBN signals is used as a criteria to help optimize the excitation parameters of the sensor. Second, the variation coefficient of measured magnetic parameters of MBN and tangential magnetic field is analyzed and magnetic parameters with smaller variation coefficient are selected as the input nodes of the BP neural network. Finally, the influence of the number of hidden layer nodes of BP neural network model on the accuracy of the model is investigated. The model with optimal structure is used to predict the surface hardness of the steel shaft and the average prediction error is only 4.25%.

Keywords: BP neural network; steel shaft; surface hardness; magnetic barkhausen noise; nondestructive evaluations