

文章编号: 1001-4888(2023)04-0425-10

列车车轮钢表面硬度的微磁定量检测方法^{*}

张猛¹, 刘秀成¹, 王建国², 何存富¹

(1. 北京工业大学 材料与制造学部, 北京 100124; 2. 太原重工轨道交通设备有限公司, 山西太原 030001)

摘要: 多功能微磁检测技术在铁磁性材料力学性能的无损表征中具有良好的应用前景。本文研究该技术对 CL65、ER7 车轮钢表面硬度的无损检测能力。首先, 利用变异系数分析方法评价了多功能微磁仪器对车轮钢微磁参量的重复检测性能; 其次, 开展了标定实验, 基于斯皮尔曼秩相关系数分析了微磁参量对车轮钢表面硬度的单调表征能力; 最后, 通过融合多项磁参量, 建立了基于 BP 神经网络的车轮钢表面硬度的微磁定量预测模型。外部校验结果显示, BP 神经网络模型对 CL65、ER7 车轮钢表面硬度的预测平均误差分别约为 0.59% 和 1.22%。

关键词: 车轮钢; 微磁检测; 表面硬度; BP 神经网络

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-219

0 引言

车轮是列车的重要走行部件, 在役过程中具有承重、导向和动力传递等作用。由于车轮踏面表面与钢轨直接接触并发生剧烈摩擦, 为保障车轮产品的耐磨性能, 一般采用高碳钢(如车轮 CL65 和 ER7)加工制造而成, 并在制造过程中需要对车轮表面硬度进行严格控制。目前, 在制造阶段往往只能从抽取的车轮试件中进行破坏取样, 采用常规压痕法^[1]测得车轮取样试件的表面硬度值。在服役阶段, 车轮发生磨损后需要进行镟修, 表面硬度是评价镟修后车轮力学性能过程中的重要测试指标^[2]。由于难以直接面向车轮进行原位测试, 常规压痕式硬度测试方法不能完全评价车轮表面的硬度分布均匀性, 容易造成“性能弱区”的漏检, 因此, 需要发展车轮表面硬度的原位、无损检测技术。

车轮用高碳钢属于典型的铁磁性材料, 在外加交变磁场作用下, 车轮钢的磁特性与微观结构相关, 原因是磁畴运动特性受微观结构的钉扎效应影响^[3]。同时, 车轮钢的表面硬度也由材料组分及其微观参数(晶粒尺寸、位错密度等)决定。利用表面硬度、材料微观结构和磁特性的内在关联, 可以发展表面硬度的磁测实验方法和技术, 即通过检测铁磁性材料的磁特性间接表征材料表面硬度。例如 Kahr-obaee 等^[4]利用涡流法进行了材料硬度筛选; 杨永艳等^[5]利用磁巴克豪森噪声信号均方值、均值等特征参量与轴承套圈硬度的相关性, 实现了未热处理、合格和不合格轴承产品的分选; Kikuchi^[6]和 Wang^[7]等基于磁滞回线特征参数(如矫顽力、剩磁强度等)对表面硬度进行了定量表征; Nahak 等^[8]利用磁巴克豪森噪声对电火花加工过程中模具钢的表面硬度进行了无损表征, 结果表明磁巴克豪森噪声信号均方根值、包络线峰值均与表面硬度呈现良好的反比例关系; Franco 等^[9]实验探究了磁巴克豪森噪声信号多项特征参量与淬火钢表面硬度的关系, 证实了信号峰值、峰值位置及均方根值可用于表面硬度定量检测; 谭君洋等^[10]研究了 24CrNiMo 合金钢表面硬度的磁巴克豪森噪声定量检测方法, 通过建立多元特征磁参量输入的卷积神经网络模型, 实现了表面硬度的高精度预测; 张传栋等^[11]将磁巴克豪森噪声测

* 收稿日期: 2022-09-06; 修回日期: 2022-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(11527801, 11872081, 12122201)

通信作者: 刘秀成(1984-), 男, 教授。主要研究领域: 微磁无损检测。Email: xiuchliu@bjut.edu.cn

试方法与BP神经网络技术相结合,实现了45#钢轴表面硬度的无损定量检测,建立的BP神经网络模型对表面硬度的预测平均误差仅为4.25%。

虽然上述研究表明磁测法可以实现铁磁性材料表面硬度的无损定量检测,但要将该方法应用于列车车轮表面硬度检测,还存在以下问题待研究:(1)实验标定,列车车轮价格较高,难以制备大量表面硬度不同的试件用于标定实验,如何利用单一车轮完成磁参量和表面硬度的关系标定,需要开展实验方法研究。(2)定量预测模型,磁参量对表面硬度的依赖性具有非线性特征,如何提高磁测法对表面硬度的检测精度,需要从智能建模方面入手开展研究。夏鹏等^[12]采用德国弗朗霍夫无损检测研究所研发的多功能微磁系统对车轮钢表面硬度进行了检测,由于标定实验中采用的试件并非真实车轮,且试件数量仅有5个,不能有效评价多功能微磁方法对车轮表面硬度的检测能力。

本文利用自主研发的多功能微磁仪器对CL65和ER7材质的车轮钢表面硬度进行无损定量检测。在真实车轮试件中开展标定实验,分析车轮钢表面硬度对多项微磁参量的影响规律;重点研究融合多项微磁参量和BP神经网络的预测模型建立方法,并实验评价了模型对车轮钢表面硬度的预测精度。

1 微磁检测原理与仪器

受材料微观结构的钉扎作用影响,磁畴在外加交变低频磁场驱动下的运动呈现不连续性(如巴克豪森跳变行为),由此会激发局域化的脉冲磁场以及造成微尺度的涡流扰动。局域化的脉冲磁场被材料表面的电感线圈感应后以电压形式输出,成为磁巴克豪森噪声^[13]。微尺度的涡流扰动程度与外加低频磁场强度相关,通过在低频强磁场上进行高频涡流检测,获得材料的增量磁导率,可以以此来反映磁畴运动引起的微尺度涡流扰动信息。磁巴克豪森噪声和增量磁导率均反映了微观尺度上磁畴不连续性运动引起的局域化材料磁特性的变化,称为微磁信号。微磁检测技术是指针对磁巴克豪森噪声和增量磁导率的实验测试技术^[14]。

微观结构对表面硬度与微磁信号特征的影响机理复杂,目前尚没有完善的理论模型揭示微观结构、表面硬度和微磁信号三者之间的关系,主要原因是:(1)不同类型的微观结构(晶界、析出物、位错等)对磁畴运动过程中钉扎效应的定量描述还存在困难。(2)磁畴运动特性和微磁信号特征的关系尚不清晰。同时,车轮钢的表面硬度也由材料组分及其微观参数(晶粒尺寸、位错密度等)决定。为提供更多维的表面硬度表征参量空间,需要发展多功能微磁检测技术,即利用单一传感器对同一测试区域进行多种磁信号的同步获取。由于传感器同步获取的磁信号中必须至少包括一种微磁信号(磁巴克豪森噪声或增量磁导率),因此笼统地都称作多功能微磁检测^[15]。图1为北京工业大学何存富团队自主研发的Magin-

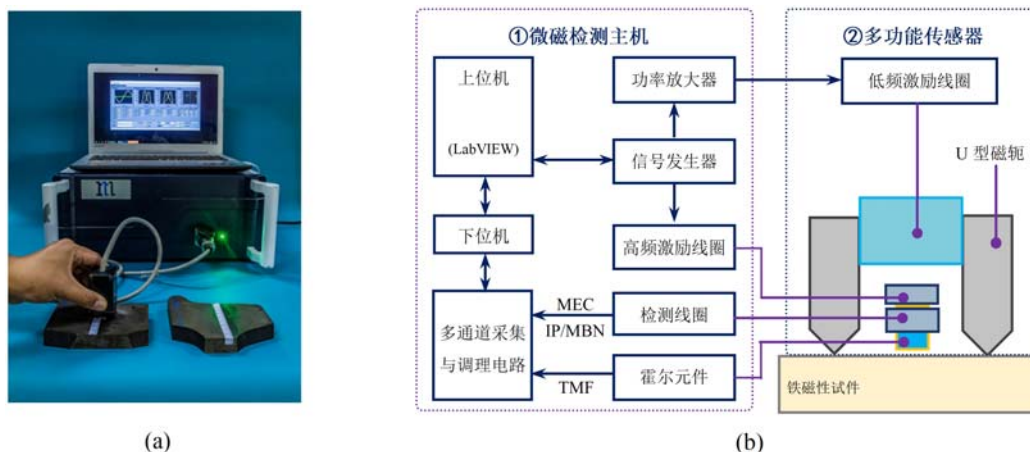


图1 多功能微磁检测仪器:(a)实物图;(b)系统框图

Frame 多功能微磁检测仪器,该仪器可以同步测试磁巴克豪森噪声(Magnetic Barkhausen Noise, MBN)、增量磁导率(Incremental Permeability, IP)、切向磁场强度(Tangential Magnetic Field, TMF)

和多频涡流(Multi-Frequency Eddy Current, MFEC)等4类磁信号。

上位机运行的 LabVIEW 主控软件可以与基于 FPGA 的下位机进行通信以控制仪器电路。检测时,信号发生器输出2路正弦波信号,一路直接进入高频(高于10kHz)激励线圈,以产生高频交变磁场,使试件表面形成涡流;另一路经过功率放大器后通入缠绕在U形硅钢磁轭的低频(低于1kHz)激励磁线圈,以提供低频强磁场对试件进行磁化。如图1(b)所示,U形磁轭末端具有倒金字塔形状,与试件表面接触的面积约为 $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ 。在高、低频叠加磁场作用下,试件发生复杂磁化并产生丰富的磁信号。将置于试件表面的霍尔元件所测得的磁化场水平分量,称为表面切向磁场。检测线圈所输出的信号依据磁化时序,可先后解调得到磁巴克豪森噪声、增量磁导率和多频涡流等磁信号。

2 表面硬度的微磁检测方法

利用多功能微磁检测仪器进行车轮表面硬度无损检测的基本流程如图2所示,主要分为实验标定(含建模)和应用测试2个阶段。实验标定的主要目的是建立表面硬度和微磁信号的映射关系模型,其主要步骤如下:

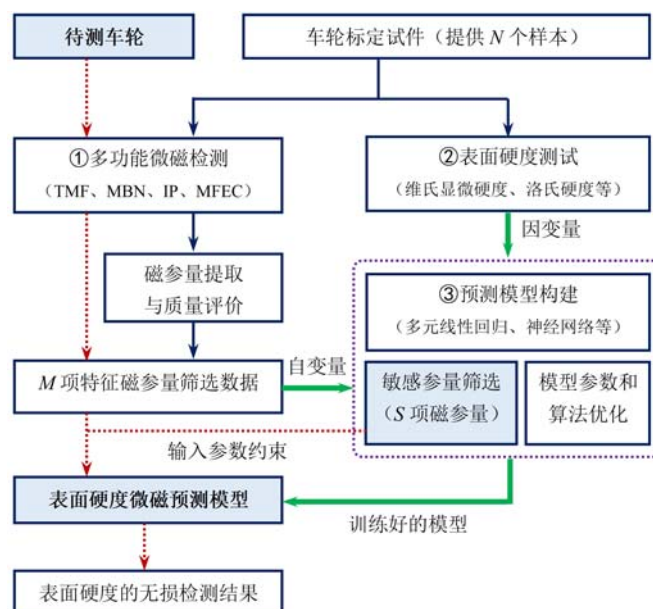


图2 表面硬度微磁定量预测流程图

Fig. 2 Flowchart of quantitative prediction of surface hardness using micromagnetic method

(1) 依据需要测试的表面硬度范围,合理选取车轮标定试件,以获得 N 个不同表面硬度的样本。样本可以是多个表面硬度值不同的车轮试件,也可以是单个车轮表面具有不同硬度值的多个区域。

(2) 利用多功能微磁检测仪器对 N 个样本进行多类微磁信号测试并进行磁参量提取,可以通过重复测试数据的变异系数统计法来评价磁参量测试数据的质量,筛选得到 $N\times M$ 组特征磁参量测试数据, M 为筛选后的特征磁参量数量;然后采用常规压痕式硬度计,按照国标测试得到 N 个样本的表面硬度标称值。

(3) 利用 $N\times M$ 组磁参量数据(模型输入或自变量)和 N 组表面硬度标称值(模型输出或因变量),进行模型构建。模型的形式(如多元线性回归、神经网络模型等)可依据实际预测精度、建模耗时等指标需求进行综合选取。模型构建过程仍会剔除部分对表面硬度不敏感的特征磁参量,将剩余的 $S(S\leq M)$ (S 为经过与表面硬度相关性筛选后的特征磁参量数量)项特征磁参量作为最终训练得到的预测模型的输入。

当预测模型训练完成并经过校验后,即可固化在多功能微磁检测仪器的主控软件中。在实际应用测试阶段,从待测车轮表面测得的微磁信号中提取 S 项特征磁参量,将其代入预测模型即可计算得到车轮表面硬度值。

3 车轮试件的微磁检测实验

选用材质为 CL65 和 ER7 的 2 种列车车轮,采用线切割加工方式从车轮中切取厚约 20mm 的车轮剖面试件。依据图 3(a)标注的坐标系,原点 O 处于车轮踏面,y 轴从踏面指向深部。实际车轮生产过程中,由于表面淬硬及后续热处理工艺将导致踏面表层材料表面硬度偏高,沿深度方向材料的硬度值逐渐下降并最终趋于稳定(过渡至心部材料)。因此,在图 3(a)所示试件中沿 y 轴方向进行逐点测试,可以获得多个表面硬度不同的样本。

依据图 2 所示的流程,首先对试件进行多功能微磁检测,因前期实验中发现多频涡流特征参量对表面硬度表征效果较差,后续检测中只采集表面切向磁场、磁巴克豪森噪声、增量磁导率等 3 类磁信号。测试过程中,信号发生器分别输出信号为 200Hz、4V 的低频正弦波和信号为 100kHz、1V 的高频正弦波。当微磁传感器置于原点 O 附近时,U 形磁轭的部分端面将外置于空气中,这会影响力场和试件的耦合效果。为避免上述情况,将测试起点坐标设置为 $y=5\text{mm}$,以步长为 5mm 沿 y 轴进行逐点微磁检测。在材质为 CL65 和 ER7 车轮试件上,分别获得了 16 个和 14 个测点的多类型微磁信号,每个位置重复检测 10 次。

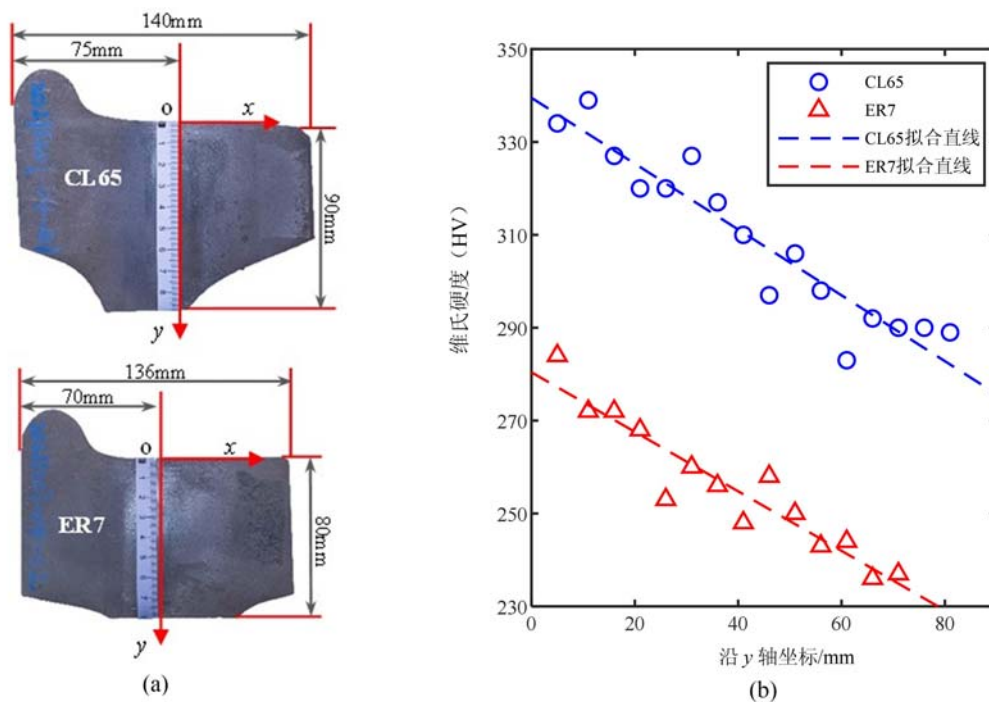


图 3 车轮:(a)试样;(b)试样表面硬度检测结果

Fig. 3 Wheel: (a) samples; (b) the hardness of samples

在完成微磁检测实验后,采用维氏显微硬度计(载荷 10kg)对所有检测位置进行维氏硬度(HV)测试,测试结果如图 3(b)所示。从图 3(b)中可以看出沿深度方向材料的表面硬度值基本呈现线性下降趋势。从测试的 3 类磁信号中共提取 25 项磁参量,它们的物理含义及符号见文后附录。2 种材质车轮试件中测得的 3 类磁信号的典型波形如图 4 所示。由图 4 可以看出,随着维氏硬度值的下降,微磁信号波形特征出现规律性变化,例如 MBN 和 IP 蝶形曲线的峰值均下降,切向磁场强度的谐波分量幅值增加,这表明部分微磁信号的特征参量对表面硬度变化较敏感,可用于车轮表面硬度的无损表征。

微磁信号与磁畴的磁化过程相关,磁畴磁化属于随机过程,多个磁化周期内测得的微磁信号(尤其是磁巴克豪森噪声)特征值具有随机波动性。此外,手持传感器对试件进行检测也易引入人为操作随机误差。为评价仪器对磁参量重复检测结果的分散性,从 2 种车轮试件中分别随机选取 1 组微磁检测结果,来统计仪器对所有 25 项磁参量重复 10 次测量值的变异系数(标准偏差和均值之比),其结果如图 5

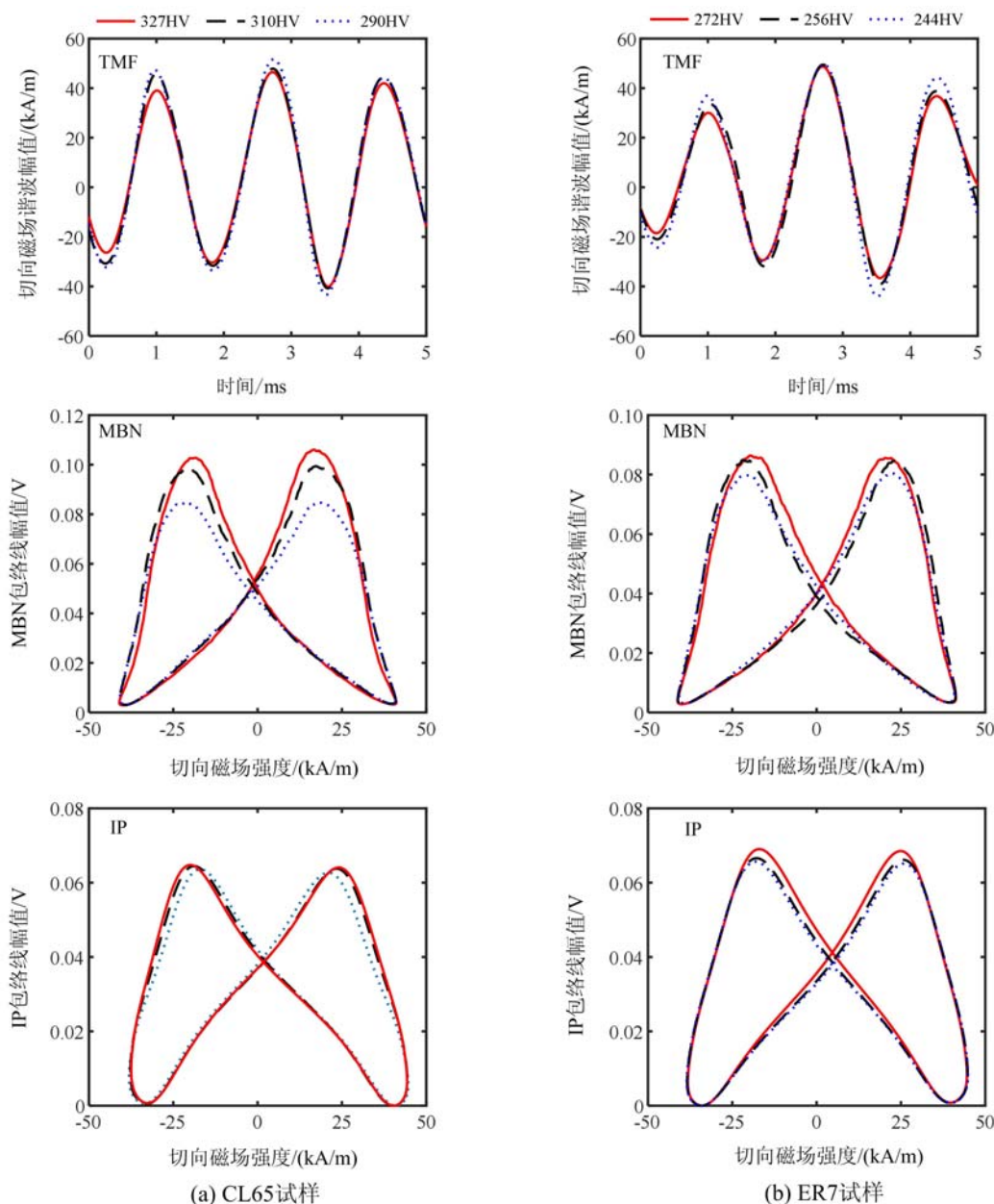


图 4 不同硬度区域测得的典型磁信号

Fig. 4 Magnetic signals measured at locations of different surface hardness

所示。由图 5 可以观察到,切向磁场强度的高次谐波幅值 A_5 、 A_7 及其对应的相角 P_5 、 P_7 的变异系数均高于 5%, 剩余磁参量的变异系数均小于 3%。对于增量磁导率的 7 项特征磁参量, 它们对应的变异系数均小于 1%。上述结果表明仪器对大部分磁参量具有良好的测试性能, 随机波动对测试结果的影响较小。

4 表面硬度的微磁定量表征

首先利用斯皮尔曼秩相关系数统计方法, 分析磁参量和表面硬度之间是否存在单调相关性。在分析过程中, 将不再讨论变异系数大于 5% 的特征磁参量, 剩余 21 项磁参量对应的秩相关系数统计结果如图 6 所示。由图 6 可以看出: 在 CL65 和 ER7 车轮试件测试结果中, 秩相关系数绝对值高于 0.8 的磁参量数量分别为 8 项和 10 项, 其中磁参量 $DH50_m$ 、 $DH50_\mu$ 在 2 种试件中均表现出对表面硬度的单调依赖性。

如果利用单一磁参量对表面硬度进行定量表征, 则秩相关系数绝对值高于 0.8 的磁参量数表现较

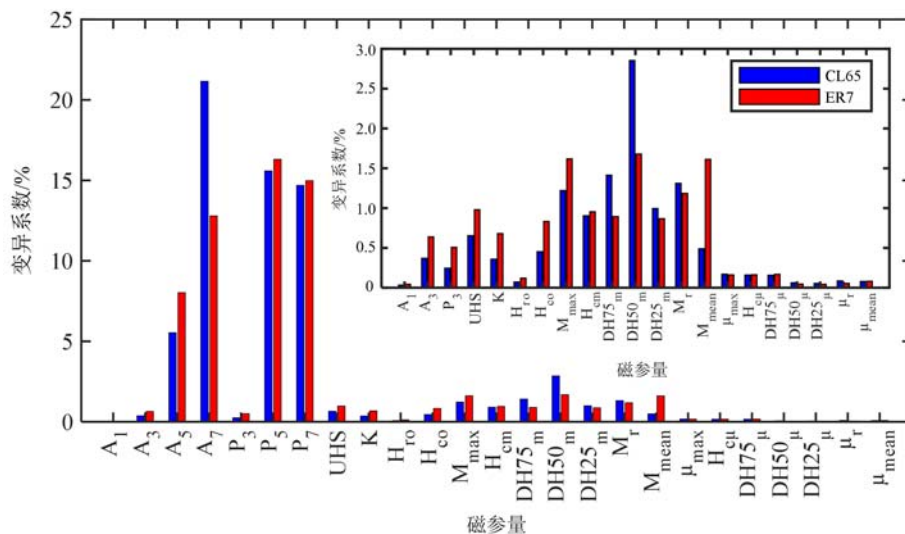


图5 磁参量重复测试结果的变异系数

Fig. 5 Coefficients of variation of the repeat test results of magnetic parameters

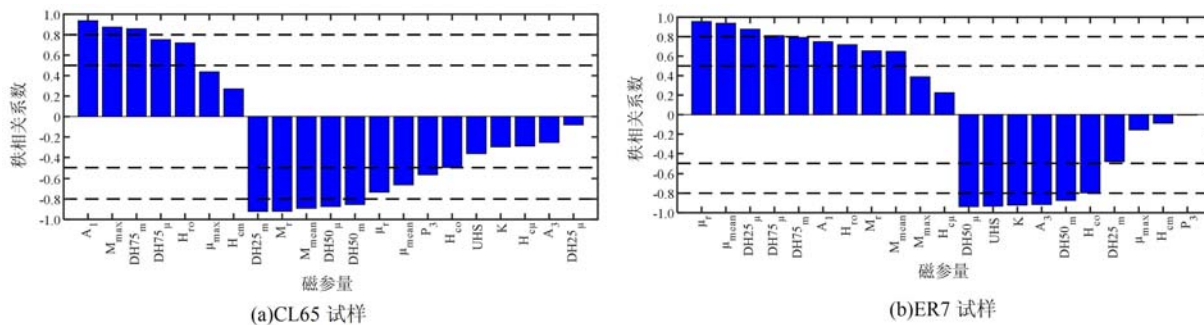


图6 磁参量斯皮尔曼秩相关系数统计

Fig. 6 Spearman rank correlation coefficient of investigated magnetic parameters

为优异,例如 CL65 车轮试件中的磁参量 A_1 和 ER7 车轮试件中的磁参量 $DH50_{\mu}$,它们与表面硬度间存在良好的线性关系,如图 7(a)、(b)所示。但对于秩相关系数处于 0.5~0.8 的磁参量,它们随表面硬度变化并非随机波动,而同样呈现出一定的非单调性规律。例如,随表面硬度增加,CL65 车轮试件中的磁参量 μ_{mean} 大致呈现先快速下降再缓慢上升的规律,如图 7(c)所示,而 ER7 车轮试件中的磁参量 H_{ro} 总体呈现振荡上升趋势,如图 7(d)所示。图 7(a)、(b)中磁参量 A_1 、 $DH50_{\mu}$ 标记的结果与表面硬度间线性拟合方程的确定系数 R^2 分别为 0.83 和 0.89,均方根误差 RMSE 分别为 2.134 和 1.876。

多功能微磁检测获得了丰富的、对表面硬度敏感的磁参量,考虑到大部分磁参量和表面硬度间存在非线性关系,这里将利用神经网络结构对非线性问题的优异表达能力,建立融合多项敏感磁参量(输入)的表面硬度(输出)神经网络预测模型。

选用具有 3 层结构(输入层、隐含层和输出层)的 BP 神经网络,建立表面硬度的定量预测模型。在输入至 BP 神经网络模型前,对训练集和验证集都进行了归一化处理,模型输出的预测值将进行反向归一化处理。结合经验公式^[11]并根据前期实验摸索,BP 神经网络模型隐含层神经元个数最终确定为 13。基于 MATLAB 软件中的神经网络工具箱(nntool),选取隐含层激活函数为“tansig”函数,输出层激活函数为“purelin”函数,训练函数为“trainlm”。所选取的敏感磁参量作为输入节点,输出节点为表面硬度值。

针对 CL65 和 ER7 材质的车轮试件,测得的数据量分别为 160×14 组和 140×15 组,从测试数据中随机选择 80%用于模型训练,10%作为模型内部校验数据,剩余 10%用于模型精度评价。以内部校验输出结果的相对误差作为训练的终止条件,实际训练时相对误差设置为 5%。根据上述流程以及参数设置,训练得到适用于 CL65 和 ER7 车轮钢表面硬度的微磁定量预测模型。模型训练过程中,先后选

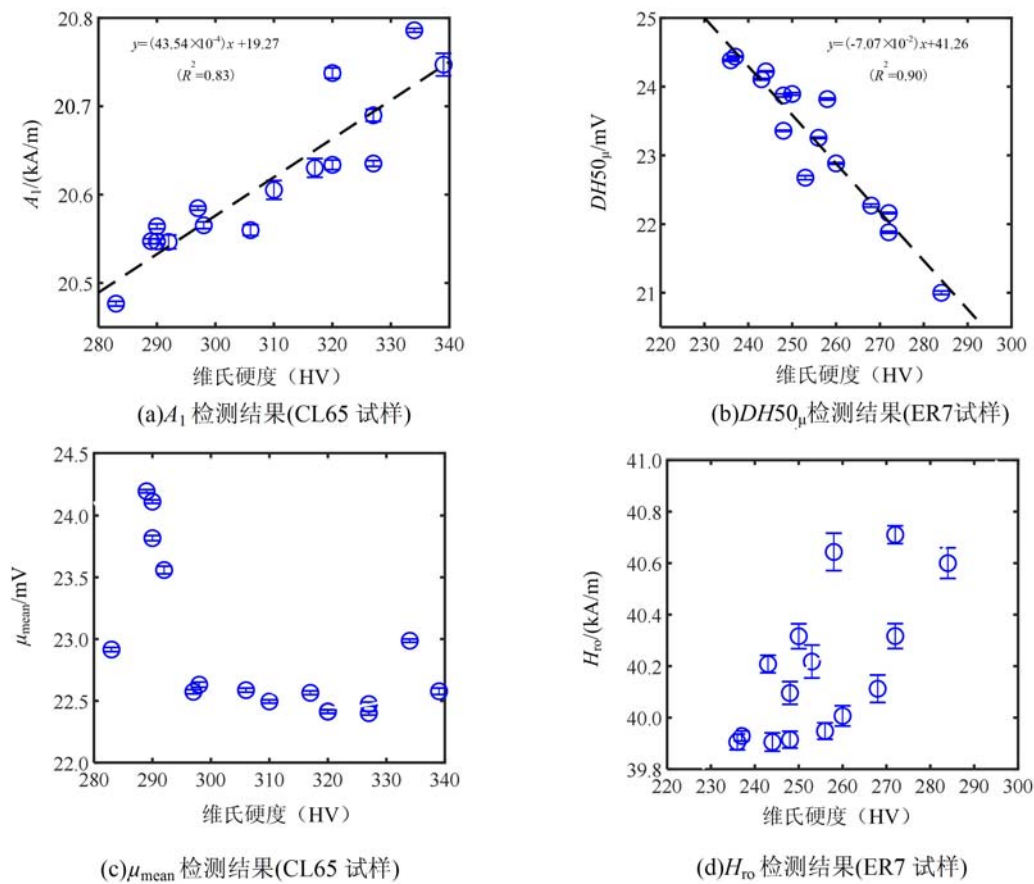


图 7 磁参量随表面硬度的变化规律

Fig. 7 Variation in magnetic parameter as the change of surface hardness

择斯皮尔曼秩相关系数绝对值高于 0.5、0.6、0.7 和 0.8 的磁参量作为模型输入节点,分别建立 BP 神经网络模型。具有不同输入节点的模型对表面硬度的预测误差分析结果见表 1。在 ER7 试件中,斯皮尔曼秩相关系数绝对值高于 0.5 和高于 0.6 时对应的磁参量完全一致,因此 2 种条件下相应模型的预测误差相同。

表 1 不同磁参量选择方案对应模型的预测误差分析结果

Tab. 1 Prediction error of models employing different schemes of magnetic parameters

斯皮尔曼秩相关系数绝对值范围	CL65 试样		ER7 试样	
	最大误差/%	平均误差/%	最大误差/%	平均误差/%
>0.5	1.75	0.59	2.22	1.22
>0.6	1.90	1.01	2.22	1.22
>0.7	2.18	0.78	2.45	1.25
>0.8	2.23	0.89	3.02	1.35

从表 1 结果来看,随着输入节点的增加(即所选择的斯皮尔曼秩相关系数阈值减小),模型精度逐步提升,因此,本文选择斯皮尔曼秩相关系数高于 0.5 的磁参量作为模型输入节点,由此得到 CL65 和 ER7 车轮对应预测模型的拟合优度分别为 $R^2=0.998$ ($RMSE=0.771$)和 $R^2=0.987$ ($RMSE=1.476$)。对训练好的模型进行外部校验的结果如图 8 所示,模型对 CL65 和 ER7 车轮钢表面硬度的最大预测误差分别为 1.75% 和 2.22%,而平均误差仅为 0.59% 和 1.22%。与利用单一磁参量对表面硬度进行定量预测的结果相比,融合多项敏感磁参量作为输入节点的神经网络模型的预测精度更高(或 RMSE 值更小)。

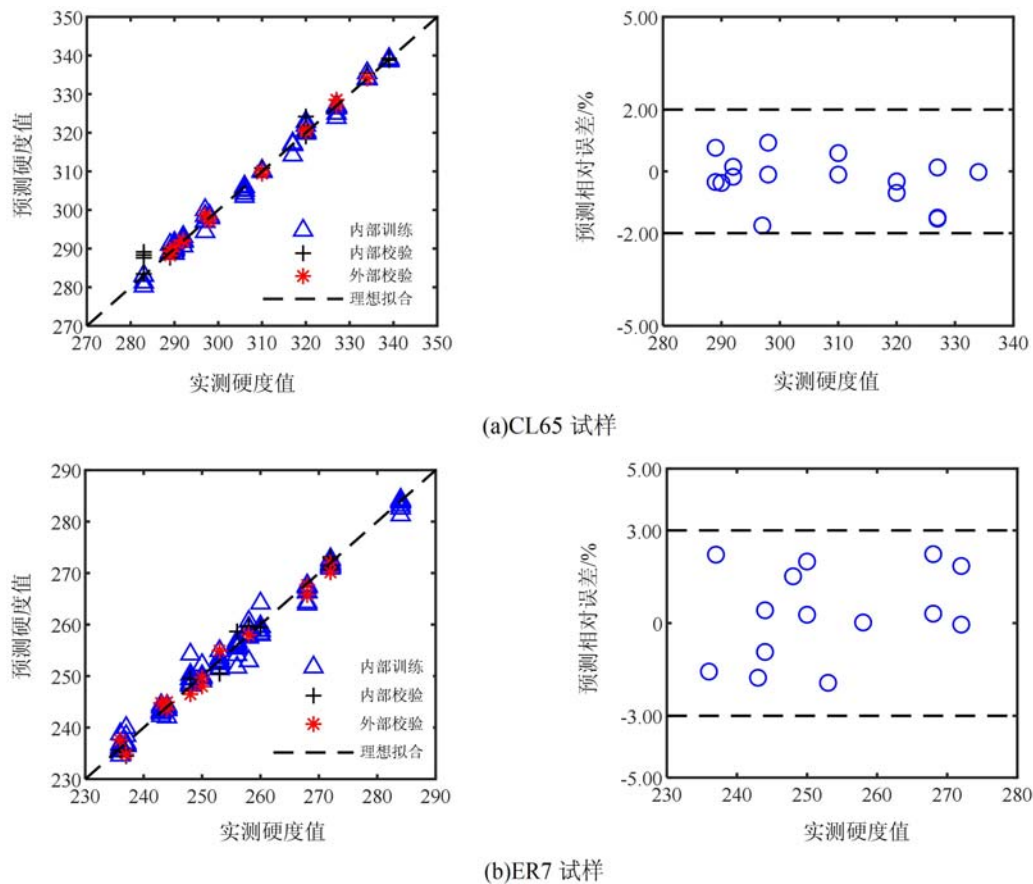


图 8 BP 预测模型结果

Fig. 8 BP neural network predicts model results

CL65、ER7 车轮产品在实际布氏硬度检测中要求其相对误差控制在 2.00% 以内。利用布氏硬度 (HB) 与维氏硬度 (HV) 转换的经验公式^[16]: $HV = 1.042 \times HB - 7.2$, 可估算出维氏硬度测试结果所允许的相对误差范围在 1.96% 以内。针对 CL65 和 ER7 车轮钢建立的微磁定量预测模型, 对表面维氏硬度的平均预测误差均小于 1.30%, 因此符合车轮产品表面硬度检测的控制要求。

5 结论

本文利用多功能微磁检测仪器, 成功实现了对 CL65 和 ER7 车轮钢表面维氏硬度的无损定量预测, 并得到以下主要结论:

(1) 微磁检测仪器的重复性检测性能优异。对磁巴克豪森噪声、切向磁场强度和增量磁导率的绝大部分磁参量进行重复测试数据的变异系数均小于 3%, 其中增量磁导率的 7 项特征磁参量的变异系数小于 1%。

(2) 利用斯皮尔曼秩相关系数分析方法, 得到了对 CL65 和 ER7 车轮试件表面硬度具有单调表征能力的多项微磁参量。磁参量 $DH50_m$ 、 $DH50_\mu$ 在 2 种试件中均表现出对表面硬度的单调依赖性。磁参量 A_1 和磁参量 $DH50_\mu$ 分别与 CL65、ER7 车轮钢表面硬度存在良好的线性关系。

(3) 采用融合多项微磁参量方法建立的 BP 神经网络模型, 可以定量预测 CL65 和 ER7 车轮钢表面硬度, 模型平均预测误差分别约为 0.59% 和 1.22%, 能够满足产品质量控制要求。

参考文献:

- [1] 冯浩洲, 王蓬, 李冬玲, 等. 火车车轮轮辋组织与显微硬度的统计分布表征[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(3): 280-287 (FENG Haozhou, WANG Peng, LI Dongling, et al. Statistical distribution characterization of train wheel rim structure and microhardness[J]. Journal of Iron and Research, 2022, 34(3):280-287 (in Chinese))

- [2] 李志刚, 李沛泽, 王林, 等. 磨损车轮镟修周期评判方法研究[J]. 机械工程与自动化, 2019(4):1-3 (LI Zhigang, LI Peize, WANG Lin, et al. Study on evaluation method of repair period of abrasive wheel[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019(4):1-3 (in Chinese))
- [3] Qiu F, Ren W, Tian G Y, et al. Characterization of applied tensile stress using domain wall dynamic behavior of grain-oriented electrical steel[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2017, 432:250-259.
- [4] Kahrobaee S, Hejazi T H, Akhlaghi I A. Electromagnetic methods to improve the nondestructive characterization of induction hardened steels: a statistical modeling approach[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 380: 125074.
- [5] 杨永艳, 范孟豹, 曹丙花, 等. 基于扫频涡流与巴克豪森噪声的轴承套圈硬度分选方法[C]//2018 远东无损检测新技术论坛论文集, 2018 (YANG Yongyan, FAN Mengbao, CAO Binghua, et al. Classification of heat treated bearing rings based on swept-frequency eddy current testing and Barkhausen noise[C]//Proceedings of 2018 Far East New NDT Technology Forum, 2018 (in Chinese))
- [6] Kikuchi H, Sasaki T, Murakami T, et al. Magnetic and hardness analysis during precipitation and recovery process of deformed Fe-Cu alloy[J]. Physics Procedia, 2015, 75:1279-1285.
- [7] Wang X, Qiang W, Shu G, et al. The ageing behavior and the correlation between hardness and coercivity of Cu-rich reactor pressure vessel model steels[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021, 527:167698.
- [8] Nahak B, Srivastava A. Non-destructive monitoring of electro-discharge machined die steel[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47:15153-15160.
- [9] 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.
- [10] 谭君洋, 夏丹, 董世运, 等. 特征参量选择对磁巴克豪森噪声评价材料硬度的影响[J]. 中国表面工程, 2021, 34(1):8-15 (TAN Junyang, XIA Dan, DONG Shiyun, et al. Influence of characteristic parameter selection on material hardness evaluation by magnetic Barkhausen noise[J] China Surface Engineering, 2021, 34(1):8-15 (in Chinese))
- [11] 张传栋, 何存富, 刘秀成, 等. 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[J]. 实验力学, 2020, 35(1):1-8 (ZHANG Chuandong, HE Cunfu, LIU Xiucheng, et al. Magnetic Barkhausen noise technology for surface hardness evaluation in steel shaft based on BP neural network[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(1):1-8 (in Chinese))
- [12] 夏鹏, 魏志辉. 基于电磁无损检测的车轮钢表面硬度检测方法[J]. 物理测试, 2021, 39(2):19-23 (XIA Peng, WEI Zhihui. Testing method of surface hardness of wheel steel based on electromagnetic nondestructive testing technology[J]. Journal of Physical Testing, 2021, 39(2):19-23 (in Chinese))
- [13] 王志, 何存富, 刘秀成, 等. 应力和组分占比对马氏体-铁素体双相钢中磁巴克豪森噪声的影响[J]. 实验力学, 2021, 36(1):43-50 (WANG Zhi, HE Cunfu, LIU Xiucheng, et al. Effect of applied stress and phase proportion on the magnetic Barkhausen noise in martensite-ferrite steel [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(1): 43-50 (in Chinese))
- [14] Szielasko K, Mironenko I, Altpeter I, et al. Minimalistic devices and sensors for micromagnetic materials characterization[J]. IEEE transactionson magnetics, 2012, 49(1):101-104.
- [15] Liu X, Dong H. Quantitative evaluation of residual stress and surface hardness in deep drawn parts based on magnetic Barkhausen noise technology[J]. Measurement, 2020, 168:108473.
- [16] 完卫国. 布氏洛氏维氏硬度值互换数字公式的探讨[J]. 马钢科研, 1991(1):76-80 (WAN Weiguo. Discussion on the numerical formula for interchangeability of Brinell Rockwell Vickers hardness values[J]. Masteel Scientific Research, 1991(1):76-80 (in Chinese))

Micromagnetic and quantitative evaluation method for surface hardness of train wheel steel

ZHANG Meng¹, LIU Xiucheng¹, WANG Jianguo², HE Cunfu¹

(1. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Taiyuan Heavy Industry Railway Transit Equipment Co., Ltd., Taiyuan 030001, Shanxi, China)

Abstract: Multifunctional micromagnetic detection technology has a good application prospect in the non-destructive characterization of mechanical properties of ferromagnetic materials. In this paper, the non-destructive testing ability of this technology on the surface hardness of CL65 and ER7 wheel steel is studied. Firstly, the coefficient of variation analysis method was used to evaluate the repeated detection performance of multifunctional micromagnetic instruments on the micromagnetic parameters of wheel steel. Secondly, calibration experiments were carried out, and the monotonic characterization ability of micromagnetic parameters on the surface hardness of wheel steel was analyzed based on the Spearman rank correlation coefficient. Finally, by fusing a number of magnetic parameters, a micromagnetic quantitative prediction model for wheel steel surface hardness based on BP neural network is established. The external verification results show that the average error of the BP neural network model for the surface hardness of CL65 and ER7 wheel steel is about 0.59% and 1.22%, respectively.

Keywords: wheel steel; micromagnetic testing; surface hardness; BP neural network

附录 微磁特征参量表

	特征参量	单位	含义
切向磁 场信号 TMF	$\Lambda_1, \Lambda_3, \Lambda_5, \Lambda_7$	kA/m	1次、3次、5次和7次谐波的幅值
	P_3, P_5, P_7	rad	3次、5次和7次谐波的相位
	K	%	畸变因子 ($K = \sqrt{\frac{\Lambda_3^2 + \Lambda_5^2 + \Lambda_7^2}{\Lambda_1^2}}$)
	UHS	kA/m	3次、5次和7次谐波($\Lambda_3, \Lambda_5, \Lambda_7$)的幅值之和
	H_{r0}	kA/m	切向磁场强度过零点处谐波幅值
	H_{c0}	kA/m	谐波信号第一个过零点处切向磁场信号幅值
磁巴克豪森 噪声信号 MBN	M_{max}	V	MBN包络线的最大值
	H_{cm}	kA/m	M_{max} 对应的切向磁场强度 H
	$DH75_m$	kA/m	75% M_{max} 处对应的峰宽
	$DH50_m$	kA/m	50% M_{max} 处对应的峰宽
	$DH25_m$	kA/m	25% M_{max} 处对应的峰宽
	M_t	V	MBN包络线与纵轴的截距
	M_{mean}	V	单一磁化周期 MBN包络线均值
增量磁导 率信号 IP	μ_{max}	V	IP包络线的最大值
	H_{cp}	kA/m	μ_{max} 对应的切向磁场强度 H
	$DH75_\mu$	kA/m	75% μ_{max} 处对应的峰宽
	$DH50_\mu$	kA/m	50% μ_{max} 处对应的峰宽
	$DH25_\mu$	kA/m	25% μ_{max} 处对应的峰宽
	μ_t	V	IP包络线与纵轴的截距
	μ_{mean}	V	单一磁化周期 IP包络线均值