

钢丝绳无损检测信号处理算法的进展

许钟奇, 杨建华, 李尚袁, 杨岩, 王亮, 孙博文, 黄升平

(中国矿业大学 机电工程学院 江苏省矿山机电装备重点实验室, 徐州 221116)

摘要: 电磁无损检测技术是实现钢丝绳状态监测的重要方法。从钢丝绳的电磁检测方法、信号预处理、特征提取和定性判断及定量分析等 4 方面对钢丝绳电磁检测技术进行综述。概述了钢丝绳电磁检测技术的研究现状和相关进展;探讨了不同检测技术对钢丝绳缺陷检测的影响;并从信号处理角度分析了常用的降噪方法,特征提取算法和定性及定量分析方法,论述了股波、振动等噪声对钢丝绳缺陷信号的影响及对应的降噪方法;在对比特征提取算法优缺点的基础上给出了损伤定性判定及定量分析的有效方法。最后,探讨了钢丝绳电磁检测技术的不足和未来发展方向。

关键词: 钢丝绳; 无损检测; 冲击信号处理; 振动分析; 损伤评判

中图分类号: TB 533.1; TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2023)11-0072-08

Research progress in signal processing algorithms for nondestructive testing of steel wire ropes

XU Zhongqi, YANG Jianhua, LI Shangyuan, YANG Yan, WANG Liang, SUN Bowen, HUANG Shengping

(Jiangsu Key Laboratory of Mine Mechanical and Electrical Equipment, School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Electromagnetic nondestructive testing technology is an important method for monitoring the condition of steel wire ropes. This paper summarized electromagnetic testing technology for steel wire ropes, from four parts: electromagnetic testing methods for steel wire ropes, signal preprocessing, feature extraction, qualitative judgment, and quantitative analysis. This paper summarized outlined the research status and related progress of electromagnetic testing technology for steel wire ropes. The impact of different detection techniques on the detection of steel wire rope defects also plored, and from the perspective of signal processing, commonly used noise reduction methods, feature extraction algorithms, and qualitative and quantitative analysis methods were analyzed. The impact of noise such as strand waves and vibrations on steel wire rope defect signals and corresponding noise reduction methods were discussed. On the basis of comparing the advantages and disadvantages of feature extraction algorithms, an effective method for qualitative judgment and quantitative analysis of damage was proposed. Finally, the shortcomings and future development directions of electromagnetic testing technology for steel wire ropes were discussed.

Key words: wire rope; nondestructive testing; impact signal processing; analysis of vibration; evaluation of damage

收稿日期: 2023-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(12072362); 江苏高校优势学科建设工程项目资助课题

作者简介: 许钟奇(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为钢丝绳无损检测, zhongqixu@cumt.edu.cn

通信作者: 杨建华(1982—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高端装备智能运维, jianhuayang@cumt.edu.cn

钢丝绳具有柔韧性能好, 抗拉强度高和负载传递距离长等优点, 在提升、承载以及牵引等过程中有着无可替代的作用, 在矿山提升、港口起重、索道运输、电梯、吊桥等行业广泛应用。

钢丝绳无损检测方法包括电磁检测法^[1]、视觉检测法^[2]、声发射检测法^[3]、射线检测法^[4]和涡流检

测法^[5]等。一些学者对钢丝绳及其无损检测技术开展了研究, 黄姗姗等^[6]提出了一种基于经验模态分解的缺陷检测方法。孙燕华等^[7]研制了基于STM32F4芯片的嵌入式钢丝绳漏磁检测数据采集系统。贾博涵等^[8]对开环永磁磁化器及其探靴槽进行了仿真优化。ZHOU等^[9]介绍了钢丝绳损坏的类型及其产生原因, 总结了几种主要的钢丝绳无损检测方法。LIU等^[10]从检测方法、传感器及信号处理3个角度介绍了钢丝绳无损检测近些年研究进展。视觉检测法、声发射检测法、射线检测法、涡流检测法等因环境恶劣、成本较高以及抗干扰能力低, 在工程应用中受到限制, 仍处于理论和实验室阶段。而基于电磁检测法的仪器逐渐在市场上得到应用。

文章介绍了钢丝绳无损检测方法、信号预处理、特征提取、定性判断和定量分析、总结与展望5部分内容。首先, 系统介绍了钢丝绳无损检测方法; 然后, 重点分析基于电磁检测法的信号预处理, 主要论述了股波、振动等噪声对钢丝绳非周期冲击缺陷信号的影响及其相关降噪方法; 给出了现有特征提取算法的优缺点; 最后, 总结了定性判定和定量分析的处理方法, 并对钢丝绳无损检测技术的发展进行总结与展望。

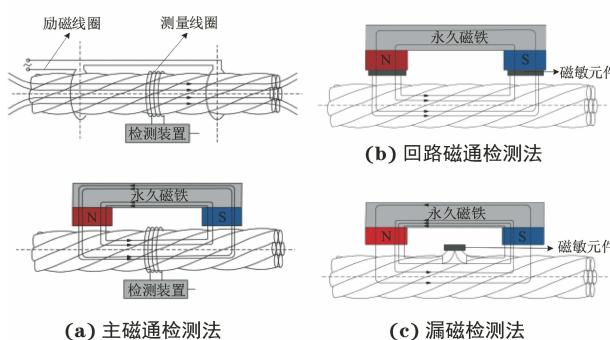


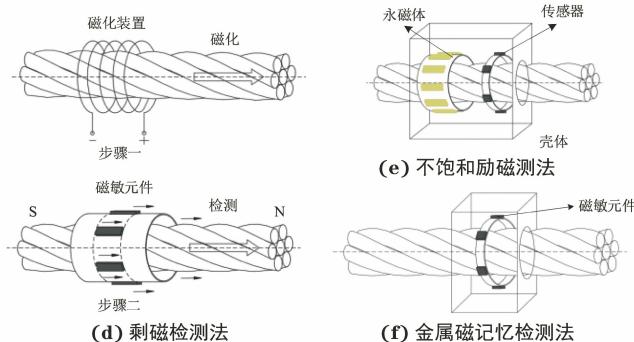
图1 钢丝绳电磁检测方法原理示意

上述钢丝绳检测原理中, 主磁通检测法、回路磁通检测法、剩磁检测法、不饱和励磁检测法和金属磁记忆法多用于钢丝绳金属横截面积损伤的检测。漏磁检测法多用于钢丝绳断丝和腐蚀损伤的检测。剩磁检测法是新开发的一种钢丝绳检测技术, 有待进一步的跟踪研究和应用验证; 不饱和励磁检测法是基于剩磁检测法提出的, 相较于剩磁检测法, 其不需要先对钢丝绳励磁一遍后再进行检测, 且其设备结构更加简单、体积更小和质量更轻^[17]。金属磁记忆检测法无需外加磁场, 钢丝绳在地磁场和工况载荷的共同作用下会产生磁状态的变化, 通过传感器测量钢丝绳表面的弱磁信号来实现对钢丝绳损伤的检

1 钢丝绳无损检测方法

钢丝绳具有良好的导磁性, 因此电磁检测方法也成为检测的首选方法, 也是国际标准ISO 4309: 2017《起重机. 绳索. 维护和保养, 检修和报废》中公认的标准工业方法。依据励磁强度, 电磁检测法可以分为强磁检测法和弱磁检测法。强磁检测法研究起步早、技术较为成熟, 而弱磁检测法研究起步较晚, 大致分为金属磁记忆检测法^[11]和弱磁场激励检测法^[12]。金属磁记忆检测法无需外加激励磁场, 通过测量铁磁材料表面的弱磁信号, 来实现对铁磁材料应力集中处的定位、早期损伤识别和损伤程度评估^[13]。JURASZEK等^[14]和SU等^[15]将金属磁记忆检测法运用于钢丝绳损伤检测中。弱磁场激励检测法基于Jiles-Atherton磁机效应理论模型, 表面弱磁场激励在力-磁耦合作用下对磁记忆信号有增强作用。LIU等^[16]将弱磁场激励检测法运用于钢丝绳损伤检测中, 取得了较好的检测效果。

传统电磁检测方法主要包括主磁通检测法、回路磁通检测法和漏磁检测法等。近年来新出现的检测方法主要包括剩磁检测法、不饱和励磁检测法和金属磁记忆检测法等。以上方法检测原理示意如图1所示。



测, 但该方法目前研究尚不成熟且容易受到外磁场干扰, 对外部环境要求较高。

2 信号预处理

钢丝绳特殊的螺旋结构产生的股波信号和缺陷信号常常混在一起, 使得钢丝绳非周期冲击缺陷信号检测十分困难。此外, 在钢丝绳磁检测过程中, 受到探测传感器的抖动、钢丝绳振动和电子元器件背景噪声等影响, 检测信号中含有大量噪声信号, 导致检测结果不可靠。因此钢丝绳信号预处理对钢丝绳检测结果的准确性有着至关重要的意义, 是钢丝绳损伤信号特征提取和定量识别的前提。

2.1 股波噪声

钢丝绳通过多股金属丝绞合制成, 整体呈螺旋结构, 由于钢丝绳表面不平整, 在励磁时会出现磁化不均匀的现象, 从而产生钢丝绳损伤信号中特有的股波噪声, 示例如图 2 所示。

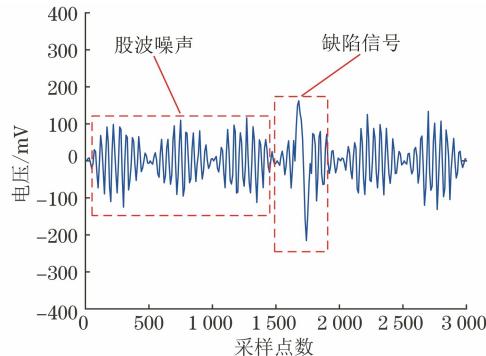


图 2 钢丝绳损伤信号中的股波噪声示例

针对钢丝绳损伤信号中的股波噪声, 一些学者提出了相关的抑制方法。LIU 等^[18]提出了一种基于陷波滤波和连续小波变换的组合信号处理方法, 与传统的单一方法相比较, 该方法能够区分钢丝绳缺陷信号和股波噪声, 检测精度高, 对钢丝绳缺陷的准确检测具有重要价值。ZHENG 等^[19]将采集到的原始信号通过小波软阈值对股波噪声去噪, 并采用伪彩色成像技术将漏磁信号转化为图像, 从图像中提取颜色矩、统计纹理和光谱纹理特征来表征钢丝绳缺陷。ZHANG 等^[20]采用梯度法对信号进行滤波, 较好地抑制了股波噪声, 提高了信噪比。

以上方法主要采用陷波滤波法和梯度法来消除股波噪声, 但包含在股波噪声中的缺陷信号也会严重衰减。基于此问题, ZHOU 等^[21]分析了股波噪声在轴向、周向和斜向的空间特性, 根据其斜向噪声特性, 提出了一种基于多通道信息融合原理的斜向重采样和滤波方法, 解决了股波噪声问题, 避免了缺陷信号的严重衰减。ZHANG 等^[22]提出了一种利用 HT 中的瞬时相位解来消除股波噪声的新方法, 根据股波噪声在轴向和周向的相位连续性来抑制噪声。与前述方法相比, 该方法不仅抑制了股波噪声, 还突出了缺陷信号。

2.2 振动噪声

钢丝绳损伤信号中振动噪声产生的原因主要有 3 种: 一是操作人员在使用便携式检测装置时, 仪器出现抖动引起的振动噪声; 二是设备运行时钢丝绳自身抖动产生的振动噪声; 三是钢丝绳特殊的螺旋结构且表面的污泥和凸起作用于检测仪器的行走轮, 导致

仪器运行时伴随出现抖动, 从而出现振动噪声。钢丝绳损伤信号中的振动噪声示例如图 3 所示。

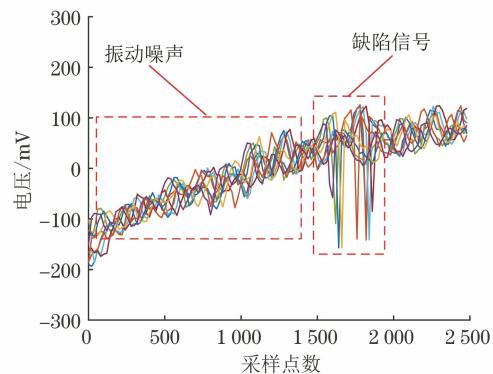


图 3 钢丝绳损伤信号中的振动噪声示例

针对上述原因造成的振动噪声, 一些学者开展了相关研究。CHEN 等^[23]将振动噪声、系统噪声和其他噪声建模为加性高斯白噪声, 利用 EMD (经验模态分解) 方法来提高钢丝绳信号的信噪比, 结果表明该方法能够有效消除钢丝绳信号中的振动噪声。但该研究是基于加性高斯白噪声替代振动噪声来实现的, 在某些场合不能准确分析振动噪声的相关特征。基于此, REN 等^[24-25]依据霍尔传感器的工作原理和磁场分布, 研究了振动噪声产生的原因和特点, 重点分析了振动噪声对缺陷信号检测的影响, 建立了振动噪声的数学模型。针对振动噪声和局部缺陷信号的差异, 提出了一种振动噪声消除方法, 能够有效地识别强噪声振动下的局部缺陷, 改善了强振动噪声下缺陷信号的检测。LIU 等^[26]通过分析振动噪声、股波噪声和缺陷信号的形态学特征, 提出了基于形态学图像处理的方法来抑制振动噪声, 特别适合缺陷信号被强振动噪声覆盖和包围的情况, 该方法不仅抑制了股波噪声和强振动噪声, 而且提高了缺陷信号的信噪比, 从而能更好地检测缺陷信号。

2.3 其他噪声

在对钢丝绳信号处理时除了上述的股波噪声和振动噪声, 还会有电子元器件、环境等背景噪声, 背景噪声示例如图 4 所示。这些噪声都会叠加在钢丝绳损伤信号上, 使得缺陷信号的处理变得非常困难。

针对钢丝绳在检测中遇到异常点、工频干扰等问题, 一些学者进行了研究。YAO 等^[27]基于小波多分辨率方法对钢丝绳缺陷信号进行去噪处理, 通过对断丝损伤信号特征分解与重构能有效消除异常点和功率频率干扰等。王红尧等^[28]采用基于双树复小波变换的方法取得了较好的去噪效果, 能够保

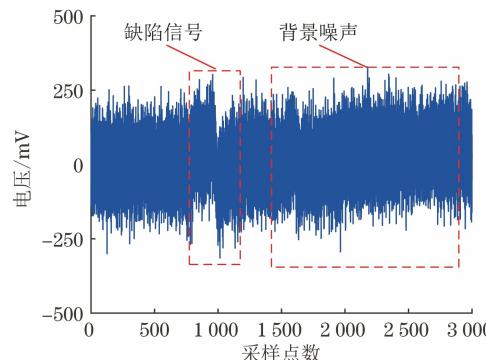


图 4 钢丝绳损伤信号中的背景噪声示例

留并且增大损伤信号中较小的奇异点,有利于后续的特征提取。针对钢丝绳在检测中遇到强磁场干扰的问题, YAN 等^[29]提出了简化的磁路来励磁钢丝绳,信号调理通过四阶带通滤波器,不仅消除了干扰信号,也进一步放大了缺陷信号。针对钢丝绳信号中出现的基线漂移问题, TIAN 等^[30]提出形态学非采样小波方法解决了矿用钢丝绳检测信号中出现的基线漂移问题,弥补了现有矿用钢丝绳在线检测信号预处理方法的不足。针对一些背景噪声和叠加噪声, SHAN 等^[31]提出了一种自适应移动平均滤波方法,该方法可以嗅探信号的内在特征,并为信号处理分配时变的最优参数,从而解决了死区和固定窗问题。PENG 等^[32]基于集合经验模态分解和最优小波的多级滤波方法处理非饱和磁激励的漏磁三维信号,有效抑制了噪声干扰。

由于钢丝绳自身结构及工况复杂性,在采集钢丝绳信号时往往掺杂多种噪声,对缺陷信号而言,是始终存在的干扰,影响钢丝绳损伤信号的识别与判定。一些学者对此进行了研究。CHEN 等^[33]提出了一种基于改进的奇异值分解和相空间重构的缺陷识别方法,从相空间重构的角度分析了钢丝绳检测信号的混沌动态特性。通过与传统算法比较,该算法的信噪比有明显提高。LIU 等^[34]提出了一种 e 指数随机共振模型及微弱信号检测方法,通过输出信号分析混沌特性并对模型性能进行仿真和评价,通过对比 3 种典型钢丝绳缺陷检测和微弱信号识别的模型比较、试验和案例分析,验证了该方法的有效性。LIU 等^[35]提出了基于改进的 HT 弱信号处理方法和钢丝绳过滤技术,研究了该方法的平滑类型和移动平均跨度的影响因素。通过与传统滤波比较,证明了该组合方法对钢丝绳弱缺陷信号处理的有效性和可行性。不同噪声下的信号预处理方法为实际应用中钢丝绳缺陷识别提供了直接参考。

3 特征提取

钢丝绳损伤特征提取是对钢丝绳损伤进行定性判断和定量分析的关键环节。特征提取实质是发现钢丝绳损伤信号与正常信号的差异,并从中提取反映钢丝绳损伤的特征值。目前电磁检测技术主要有基于信号的特征提取和基于磁性成像的特征提取。

3.1 信号的特征提取

基于信号的特征提取是通过传感器获得的原始信号经预处理后,直接用于特征值的提取和分析。下面是基于信号常用的特征值及其提取算法。

(1) 常用特征

目前常用的特征值及其提取算法有绝对峰值、峰峰值、相邻信号差分值、波宽、波形下面积、短时波动能量等,此外还有钢丝绳的直径、钢丝直径、断丝信号相关性特征、小波能量特征等。一般通过多个特征提取方法结合,来提高钢丝绳定性判定和定量分析的准确性。

(2) 相关性特征

钢丝绳断丝信号除了局部特征指标外,考虑了断丝信号与正常信号的统计差异,提出了相关性特征值,弥补了局部断丝提取特征的不足。相关性特征通过与其他特征识别方法结合,对提高断丝识别准确率有重要作用。

(3) 小波能量特征

小波信号分析可以描述信号中的非平稳成分,尤其是小波包技术。小波包分析技术将信号分解在任意频带上,在这些频带上做能量统计,形成特征向量。钢丝绳损伤信号大部分集中在低频信号上,高频信号能量很小,可以忽略。

3.2 磁性成像的特征提取

检测传感器获得的钢丝绳原始信号经预处理后,通过传感器阵列技术和灰度变换技术得到钢丝绳漏磁图像,接着基于磁性成像进行特征提取。不同类型缺陷的漏磁图像表现出不同的形态特征、纹理特征、不变矩特征和颜色特征等。文章介绍基于磁性成像常用的特征值及其提取算法。

(1) 形态特征和纹理特征

基于磁性成像的形态特征主要包括面积、周长、等效面积、伸长率和圆度等。基于磁性成像的纹理特征值主要包括平均灰度、平滑度、一致性和熵等。

(2) 不变矩特征

不变矩特征通过对目标灰度分布的统计分析,

建立不变矩面积, 是一种平均统计描述。不变矩特征从全局角度描述一个物体的整体特征, 不易受噪声影响, 不会随着图像的平移、旋转和缩放而改变。

(3) 颜色矩特征

颜色矩是一种简单有效的颜色特征。通过颜色矩中的矩来表示图像中的颜色分布, 一般颜色信息集中在低阶矩, 所以一般用其一阶、二阶和三阶矩来表达图像的颜色分布。

4 定性判定和定量分析

定性判断和定量检测是准确评估钢丝绳剩余

载荷能力, 预防断绳事故的重要方法。同时, 损伤的定性判断和定量分析也是钢丝绳信号处理中最关键的环节, 钢丝绳是否有损伤、损伤位置与大小、是否能继续使用以及钢丝绳剩余寿命等都是依据定性判定和定量分析的结果进行决策的。目前钢丝绳损伤的定性判断和定量分析从表现形式上主要有信号表示、灰度图表示和伪彩色图表示, 也有学者将红外图像与灰度图像或伪彩色图像结合的方法进行钢丝绳损伤定性和定量分析。钢丝绳常用的定性判断和定量分析方法及其损伤定性和定量结果如表 1 所示。

表 1 钢丝绳定性判断和定量分析方法

方法	表现形式	特征值	损伤定性/定量结果
BP 神经网络		峰峰值, 波宽, 波形下面积	断丝识别准确率 95.71%
支持向量机		最大峰值通道与总通道之比, 频率特性, 峰值高宽比	分类切割、腐蚀和压缩 分类识别准确率 100%
粒子群优化算法-支持向量机	信号	峰值, 峰峰值, 波形上/下面积 钢丝绳直径, 钢丝直径, 小波能量熵	内外损伤识别率 97.1% (多组实验平均准确率)
径向基函数-神经网络		峰值, 峰峰值, 峰间宽度	宽度最大误差 3 mm 截面损失率最大误差 1.86% 内外缺陷误判 7.14% 内部缺陷深度最大误差 5.87 mm
变步长增量极限学习机		峰值, 波宽, 波形下面积	断丝分类准确率高达 97.5%
小波神经网络	空间波形特征, 量化后的谱特征, 小波内积等		定性识别 内/外 91%/97% 定量识别(95% ± 1 根)
BP 神经网络		垂直度, 拉伸长度 七阶不变矩	断丝识别准确率 98.63% 允许识别误差 1.85% 最大识别误差不超过 2.78%
AdaBoost 分类器	灰度图	标准差, 平滑度, 一致性 熵 七阶不变矩	断丝识别准确率 93.55% 允许识别误差 0.45% 最大识别误差不超过 0.9%
Elman 神经网络		平均值, 标准差, 平滑度, 一致性, 熵, 缺陷面积, 方形, 伸长率, 七阶不变矩	断丝识别准确率 92% 允许识别误差 1.17% 最大识别误差不超过 2.5%
BP 神经网络	伪彩色图	颜色矩	断丝识别准确率 96.875% 允许识别误差 0.901%
粒子群优化算法-支持向量机		颜色矩	断丝识别准确率 98.15% 允许识别误差 0.901% 最大识别误差不超过 1.351%
内核极限学习机	灰度图 +红外	平均亮度, 标准差, 平滑度, 一致性, 熵, 奇数不变矩, 颜色矩	最高准确率 98.4% 最大误差 2 根
K 近邻分类算法	伪彩色图+红外	标准差, 平滑度, 一致性, 熵, 颜色矩	断丝识别准确率 98.44% 允许识别误差 0.463% 最大识别误差不超过 0.93%

表 1 给出了近些年来针对钢丝绳损伤定性判断和定量分析的处理方法, 主要包括一些神经网络算法和分类器算法。这些方法可归纳如下: ① 采用传统的信号处理方法, 利用传感器采集到的漏磁信号, 预处理后提取缺陷处的特征向量直接代入神经网络模型和分类器算法中进行训练; ② 为了更方便直观

地提取数据, 将采集到的漏磁信号转换为灰度图像进行处理, 常用漏磁成像技术有传感器阵列和灰度变化技术, 此外还出现了基于矩阵重构、重构正弦函数、小波变换和网格熵矩阵重构的漏磁成像技术; ③ 人眼只能区分几十种不同的灰度, 却可以区分数百种不同的颜色, 因此将漏磁信号通过彩色成像技

术转换为伪彩色图像,更加有利于钢丝绳微弱缺陷特征的识别和提取;④ 使用多源缺陷信息融合识别技术获得不同类型图像中特征值并进行特征融合,相较单一信号来源的方法,能有效提高钢丝绳损伤的检出率。

5 结论与展望

电磁检测技术作为钢丝绳最有效的无损检测技术之一,具有缺陷识别率高、稳定性好等优势,在近年取得了丰硕的研究成果。文章概述了近年来钢丝绳电磁检测法的新进展,从信号预处理、特征提取、定性判断和定量分析等方面介绍了钢丝绳损伤方法。但钢丝绳无损检测技术还存在一些问题亟待解决,将来的研究还需重点关注以下方面。

(1) 不能忽视钢丝绳种类和结构对检测结果的影响。钢丝绳按照股横截面形状分为圆股钢丝绳和异形股钢丝绳,目前对钢丝绳缺陷的研究多采用圆股钢丝绳,而对异形股钢丝绳缺陷的研究较少。由于捻制方式、绳芯材料以及编制层数的不同,即使同种钢丝绳在磁化和缺陷检测中也具有较大的差异。因此,对不同种类钢丝绳缺陷信号的振动波形特点及损伤识别还需进一步研究。

(2) 注重钢丝绳冲击缺陷形态和空间分布在损伤识别中的影响。钢丝绳冲击缺陷处的断口形状、断口深度及宽度是影响缺陷识别准确性的重要因素。钢丝绳冲击缺陷处的空间分布不同,即内/外部缺陷、同股/不同股集中缺陷等对缺陷处定量分析的准确性有着重要的影响。因此,对钢丝绳冲击缺陷形态和空间分布的深入研究,对损伤识别和定量分析具有重大意义。

(3) 提高钢丝绳缺陷信号的信噪比及运算速度。钢丝绳非周期冲击缺陷信号与股波噪声、振动噪声和背景噪声等混合在一起,严重影响了缺陷信号的识别。特别是强噪声背景下钢丝绳微弱信号的识别与提取,亟需进一步的研究。研究适用于强噪声背景下钢丝绳微弱信号的识别与提取的新方法,以及提高现有方法的实用性,是未来研究重点。将种群优化、自适应寻优等思想用于改进这些算法的参数选取,能够提高损伤识别的效率和准确性。

(4) 重视钢丝绳缺陷定量分析及寿命预测的研究。钢丝绳缺陷定量分析和寿命预测是目前研究的难点和热点问题。钢丝绳结构、缺陷形态、信号处理以及定量分析方法的选取都对缺陷定量的准确性有

着至关重要的影响。钢丝绳冲击缺陷形态、程度的演化通常又是影响钢丝绳寿命预测的重要参数。因此,钢丝绳冲击缺陷定量分析及寿命预测还需更深入地研究。

(5) 迁移新技术、新方法的融合应用。目前钢丝绳电磁检测技术主要包括信号预处理、特征提取、损伤定性判定和定量分析等3步,而特征值的选择和提取方式对定性识别和定量分析结果的影响较大且步骤繁琐。因此基于深度学习方法,即无需特征提取而直接代入深度神经网络进行训练将成为钢丝绳损伤定性判断和定量分析的研究趋势。并且,单一的检测技术无法解决所有钢丝绳损伤问题,需要研究多检测技术下多方法、多指标融合检测技术,来提高钢丝绳损伤识别与定量分析的准确性。

(6) 加强理论成果转化和现场应用。由于钢丝绳的结构、规格、矿井工况的多样性,现有的无损检测设备无法进行通用检测。对不同钢丝绳结构带来的不同信号特征,应研究一定的算法去削弱信号中的结构特征。对于钢丝绳规格不同导致的提离值变化,应研究一定的算法进行补偿或采用变提离值调节结构。对于钢丝绳现场工况的多样性,如高速检测、重载检测、离线停机检测和在线实时监测等,应针对特殊工况进行深入研究。

参考文献:

- [1] 杨叔子,康宜华,陈厚桂.钢丝绳电磁无损检测[M].北京:机械工业出版社,2017.
- [2] SHI L X, TAN J P, XUE S H, et al. Inspection method of rope arrangement in the ultra-deep mine hoist based on optical projection and machine vision[J]. Sensors, 2021, 21(5): 1769.
- [3] DRUMMOND G, WATSON J F, ACARNLEY P P. Acoustic emission from wire ropes during proof load and fatigue testing[J]. NDT & E International, 2007, 40(1): 94-101.
- [4] PENG P C, WANG C Y. Use of gamma rays in the inspection of steel wire ropes in suspension bridges [J]. NDT & E International, 2015, 75: 80-86.
- [5] 于小杰,李旭东,解社娟,等.钢丝绳断丝缺陷涡流检测方法[J].中国机械工程,2019,30(22):2757-2763.
- [6] 黄姗姗,李志农,毛清华,等.基于经验模态分解的钢丝绳缺陷漏磁检测[J].无损检测,2023,45(2):23-27,59.
- [7] 孙燕华,马文家,田晓贺,等.基于STM32F4嵌入式的钢丝绳漏磁检测数据采集系统[J].无损检测,

- 2018,40(9):56-59,67.
- [8] 贾博涵,张来明,姜宵园,等.钢丝绳开环永磁磁化漏磁检测传感器探靴槽的仿真优化[J].无损检测,2022,44(8):20-24.
- [9] ZHOU P,ZHOU G B,ZHU Z C,et al. A review of non-destructive damage detection methods for steel wire ropes[J]. Applied Sciences,2019,9(13):2771.
- [10] LIU S W,SUN Y H,JIANG X Y,et al. A review of wire rope detection methods, sensors and signal processing techniques[J]. Journal of Nondestructive Evaluation,2020,39(4):85.
- [11] DUBOV A A. A study of metal properties using the method of magnetic memory[J]. Metal Science and Heat Treatment,1997,39(9):401-405.
- [12] LIU B, ZHANG J W, ZHANG Z G. Modeling, simulation and experimental exploration of metal magnetic memory under weak magnetic excitation [J]. SN Applied Sciences,2022,4(6):167.
- [13] 苏三庆,刘馨为,王威,等.金属磁记忆检测技术研究新进展与关键问题[J].工程科学学报,2020,42(12):1557-1572.
- [14] JURASZEK J. Residual magnetic field for identification of damage in steel wire rope [J]. Archives of Mining Sciences,2023.
- [15] SU S Q,MA X P,WANG W,et al. Stress-dependent magnetic charge model for micro-defects of steel wire based on the magnetic memory method[J]. Research in Nondestructive Evaluation,2020,31(1):24-47.
- [16] LIU X C,WANG Y J,WU B,et al. Design of tunnel magnetoresistive-based circular MFL sensor array for the detection of flaws in steel wire rope[J]. Journal of Sensors,2016,2016:1-8.
- [17] TAN X J,ZHANG J W. Evaluation of composite wire ropes using unsaturated magnetic excitation and reconstruction image with super-resolution [J]. Applied Sciences,2018,8(5):767.
- [18] LIU S W,SUN Y H,MA W J,et al. A new signal processing method based on Notch filtering and wavelet denoising in wire rope inspection[J]. Journal of Nondestructive Evaluation,2019,38(2):1-14.
- [19] ZHENG P B, ZHANG J W. Quantitative nondestructive testing of wire rope based on pseudo-color image enhancement technology [J]. Nondestructive Testing and Evaluation,2019,34(3):221-242.
- [20] ZHANG D L,ZHANG E C,PAN S M. A new signal processing method for the nondestructive testing of a steel wire rope using a small device[J]. NDT & E International,2020,114:102299.
- [21] ZHOU Z P, LIU Z L. Fault diagnosis of steel wire ropes based on magnetic flux leakage imaging under strong shaking and strand noises [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2021,68(3):2543-2553.
- [22] ZHANG E C,ZHANG D L,PAN S M. Magnetic flux leakage testing of wire rope defects with denoising [C]//2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking: Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Chengdu: IEEE, 2019: 1574-1577.
- [23] CHEN L A,LI X B,QIN G X,et al. Signal processing of magnetic flux leakage surface flaw inspect in pipeline steel[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing,2008,44(12):859-867.
- [24] REN L Y, LIU Z L, WANG H R, et al. Eliminating shaking noise for defect detection of steel wire ropes based on magnetic flux leakage signals [C]//2019 IEEE 4th Advanced Information Technology: Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chengdu: IEEE,2020:1037-1041.
- [25] REN L Y, LIU Z L, ZHOU J G. Shaking noise elimination for detecting local flaw in steel wire ropes based on magnetic flux leakage detection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2021,70:1-9.
- [26] LIU Z L, REN L Y. Shaking noise exploration and elimination for detecting local flaws of steel wire ropes based on magnetic flux leakages [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2023,70(4):4206-4216.
- [27] YAO Y, LI G P, ZHANG X F, et al. Research on wavelet denoising method based on soft threshold in wire rope damage detection [C]//2020 IEEE 8th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT). Dalian: IEEE,2021: 165-170.
- [28] 王红尧,吴佳奇,李长恒,等.矿用钢丝绳损伤检测信号处理方法研究[J].工矿自动化,2021,47(2):58-62.
- [29] YAN X L, ZHANG D L, PAN S M, et al. Online nondestructive testing for fine steel wire rope in electromagnetic interference environment[J]. NDT & E International,2017,92:75-81.
- [30] TIAN J E, WANG H Y, BILEN S, et al. Application of a morphological non-sampling wavelet method to the online detection signal processing of coal mine

- wire rope[J]. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2019, 61(9): 521-527.
- [31] SHAN Z, YANG J H, SANJUÁN M A F, et al. A novel adaptive moving average method for signal denoising in strong noise background [J]. The European Physical Journal Plus, 2022, 137: 50.
- [32] PENG F C, ZHANG J W. The broken wires identification of wire rope based on multilevel filtering method using EEMD and wavelet analysis[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2021, 21(1): 280-289.
- [33] CHEN M C, HE Y X. Wire rope weak defect signal processing methods based on improved SVD and phase space reconstruction [J]. Information Technology and Control, 2021, 50(4): 752-768.
- [34] LIU S W, SUN Y H, KANG Y H. A novel E-exponential stochastic resonance model and weak signal detection method for steel wire rope[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(7): 7428-7440.
- [35] LIU S W, SUN Y H, HE L S, et al. Weak signal processing methods based on improved HHT and filtering techniques for steel wire rope[J]. Applied Sciences, 2022, 12(14): 6969.

(上接第 46 页)

螺栓紧固力的关系式;紧固力检测效率高,测量结果可靠,满足工程要求。

(2) 随着螺栓夹紧长度的增大, B 值呈线性减小;在一定的误差范围内,可通过测量服役螺栓的夹紧长度来快速估计标定公式中 B 值的大小。

(3) 温度变化对横纵波渡越时间比的影响较大,温度补偿系数可提高紧固力的检测精度。

参考文献:

- [1] PAN Q, PAN R, SHAO C, et al. Research review of principles and methods for ultrasonic measurement of axial stress in bolts[J]. 中国机械工程学报:英文版, 2020(1): 16.
- [2] 徐春广,李骁,潘勤学,等.螺栓拉应力超声无损检测方法[J].应用声学,2014,33(2):102-106.
- [3] 张俊.基于声弹性原理的超声波螺栓紧固力测量技术研究[D].杭州:浙江大学,2005.
- [4] 张亮亮,王玉林.扭矩法与扭矩/转角法预紧力的计算及对比研究[J].内燃机与配件,2016(1):7-8.
- [5] LIU E X, LIU Y M, WANG X M, et al. Ultrasonic measurement method of bolt axial stress based on time difference compensation of coupling layer thickness change[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-12.
- [6] 贾雪,王雪梅,甘文成,等.声弹性效应螺栓轴向应力标定试验研究[J].中国测试,2018,44(3):23-27.
- [7] 储火,石小岗.螺栓轴力超声波测量技术中残余轴力的测量方法[J].精密成形工程,2017,9(1):119-124.
- [8] 马楠,刘峰,蔡桂喜,等.超声法测量高强螺栓应力试验研究[J].石油机械,2018,46(7):22-26.
- [9] 宋文涛,徐春广.超声法的残余应力场无损检测与表征[J].机械设计与制造,2015(10):9-12,17.
- [10] 王路,季献武,张道钢,等.螺栓轴向应力的超声波测量[J].热力发电,2000,29(1):53-55,63.
- [11] 何存富,吴克成.温度对螺栓紧固应力超声测量的影响研究[J].实验力学,1992,7(3):238-244.