

漏磁复合探伤技术及缺陷识别精度优化研究

范龙

江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江苏 江阴 214400

[摘要]漏磁探伤技术因其具有非接触、检测效率高等优势在钢铁构件、油气管道等领域的铁磁材料检测中得到了广泛的应用。但在检测的过程中单一应用漏磁探伤技术存在一定的局限性,漏磁复合探伤技术通过多传感器的融合弥补单一技术的短板。首先对漏磁复合探伤技术的核心机制进行系统性的阐述,并对其影响缺陷识别精度的相关因素进行分析,在此基础上提出一系列综合的优化方案,以此提高检测的精确度,为漏磁复合探伤技术的工程应用提供技术参考。

[关键词]漏磁复合探伤;缺陷识别;精度优化;信号处理;传感器融合

DOI: 10.33142/sca.v9i2.19097

中图分类号: TG806

文献标识码: A

Research on Magnetic Leakage Composite Testing Technology and Optimization of Defect Identification Accuracy

FAN Long

Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangyin, Jiangsu, 214400, China

Abstract: Magnetic flux leakage testing technology has been widely used in the detection of ferromagnetic materials in fields such as steel components and oil and gas pipelines due to its advantages of non-contact and high detection efficiency. However, the single application of magnetic flux leakage testing technology has certain limitations in the detection process. The magnetic flux leakage composite testing technology compensates for the shortcomings of a single technology through the fusion of multiple sensors. Firstly, a systematic explanation of the core mechanism of the bean leakage magnetic composite inspection technology is provided, and the relevant factors affecting the accuracy of defect identification are analyzed. Based on this, a series of comprehensive optimization schemes are proposed to improve the accuracy of detection and provide technical references for the engineering application of the leakage magnetic composite inspection technology.

Keywords: magnetic flux leakage composite testing; defect identification; precision optimization; signal processing; sensor fusion

引言

铁磁材料凭借其良好的力学特征、磁学性能以及低成本等优势广泛应用于油气输送管道、钢丝绳等关键构件的制造中。但是,在长期的服役过程中受到疲劳、腐蚀等相关因素的影响容易出现一系列的缺陷问题,例如裂纹、夹杂等,若未采取有效的检测方法,及时识别缺陷问题,将会造成严重的后果,导致构件失效,甚至会引发安全事故。在无损检测领域,漏磁探伤(Magnetic Flux Leakage, MFL)技术可实现快速扫查、检测效率高、对铁磁材料缺陷敏感性优势得到了广泛的使用。该检测方法的核心原理是当铁磁材料被磁化之后,材料内部的磁性也会按照一定的路线分布,传播路径发生改变,部分磁力线会泄漏到材料表面之外。通过传感器捕捉漏磁信号,然后可以根据信号的特征以及变化规律可以定位与识别缺陷。但是,在具体的实践过程中采用单一的漏磁探伤技术,对于复杂形状的缺陷以及浅表层的微小缺陷识别精度较低。其次,漏磁信号容易受到检测环境如噪声、温度等相关因素的干扰,提高缺陷的误判或漏判风险。漏磁复合探伤技术通过将漏磁探伤与其他无损检测原理或多类型传感器进行融合,有助

于提高缺陷识别的精准性,以便更加准确的识别缺陷的类型与严重程度,有助于提高铁磁材料构件的质量,减少安全事故的发生。

1 漏磁复合探伤技术核心原理与系统构建

1.1 漏磁探伤基本原理

漏磁探伤技术基于铁磁材料的磁化特性,通过磁化装置(如电磁线圈、永磁体)对铁磁材料工件施加外部磁场,使工件内部形成均匀的饱和或近饱和磁化磁场。当工件内部或表面/近表面存在缺陷时,缺陷的尺寸、形状、深度越大,磁场畸变程度越严重,漏磁信号的强度也越高。利用霍尔元件、磁阻传感器等高灵敏度的磁敏传感器捕捉漏磁场的强度、分布形态等信号,判定缺陷的位置、尺寸及性质。

1.2 漏磁-涡流复合探伤原理

单一漏磁探伤技术对浅表层微小缺陷的识别灵敏度较低,而涡流探伤技术对表面及近表面微小缺陷具有较高的敏感性,且不受工件表面油污、氧化皮等轻微污染的影响。基于此,将两种技术融合,实现优势互补,提升缺陷识别精度。通过同一检测装置中的漏磁传感器与涡流传感

器,同步采集工件的漏磁信号与涡流信号,利用两种信号的互补性,全面捕捉缺陷的多维信息。漏磁信号主要反映缺陷的深度、体积等宏观特征,涡流信号主要反映缺陷的表面形态、微小尺寸等微观特征,通过对两种信号进行融合处理,可有效提升对复杂缺陷、微小缺陷的识别精度,降低误判、漏判率。

1.3 漏磁-涡流复合探伤系统构建

采用电磁式磁化装置,可通过调节励磁电流的大小,改变磁化磁场的强度,磁化装置的磁场强度调节范围为0.1T~1.0T,可满足不同工况下的检测需求。选用霍尔传感器漏磁传感器,检测范围为0~500mT,分辨率为1mT;涡流传感器选用高频涡流传感器,工作频率为1MHz~10MHz,检测深度为0.1mm~5mm。两种传感器采用阵列式排列,间距为5mm。数据采集系统的采样频率为100kHz~1MHz,采样精度为16位,采用低通滤波器,截止频率可调节(1kHz~10kHz),信号处理系统采用嵌入式处理器,搭载专用的信号处理算法。

2 漏磁复合探伤缺陷识别精度影响因素分析

漏磁复合探伤缺陷识别精度受磁化参数、传感器性能、检测环境、信号处理方法等因素影响。经理论分析与仿真测试:磁化参数方面,磁场强度在0.3T~0.7T、频率在50Hz-500Hz、方向与缺陷延伸垂直时,缺陷识别精度高;传感器性能上,霍尔与涡流传感器灵敏度、分辨率需控制在特定范围,传感器间距在3mm~7mm时最佳;检测环境中,环境噪声、温度(应控制在-10°C~50°C)、工件表面状态(检测前需预处理)会影响精度;信号处理方法上,采用自适应滤波预处理、多维度特征提取、神经网络融合算法可提升缺陷识别精度。

3 漏磁复合探伤缺陷识别精度优化方案

3.1 信号预处理优化

信号预处理核心为去噪、修正畸变并保留有效缺陷信号。本文以“自适应滤波+小波去噪”组合法替代单一滤波,先采用LMS自适应滤波算法对原始漏磁与涡流信号初步滤波,该算法能依信号变化自适应调系数,有效滤除工业现场噪声且保留缺陷信号细节。LMS自适应滤波的核心公式为:

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu e(n)x(n) \quad (1)$$

其中, w_n 是 n 时刻滤波系数向量, μ 为步长因子 ($0 < \mu < 1$, 本文取 0.05), e_n 是 n 时刻误差信号, x_n 是 n 时刻输入信号,调整 μ 可平衡滤波速度与效果。

对自适应滤波后的信号,用db4小波进行3层分解二次去噪,滤除残留高频噪声,分解后高频系数作软阈值处理,阈值计算公式为:

$$\lambda = \sigma\sqrt{2\ln N} \quad (2)$$

其中, σ 为噪声的标准差, N 为信号长度。通过小波

去噪,可有效避免信号畸变。

3.2 缺陷特征提取优化

缺陷特征提取核心是提取反映缺陷尺寸、形状、位置的多维度参数构建特征向量。本文针对漏磁与涡流信号特点优化:漏磁信号提取峰值等四参数反映缺陷深度、长度等;涡流信号提取阻抗幅值等四参数反映表面形态、边缘特征等;因二者特征参数量纲不同,直接融合效果差,故对提取参数归一化至[0,1]范围,归一化公式为:

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}} \quad (3)$$

其中, x_{norm} 为归一化后的特征参数, x 为原始特征参数, x_{min} 为特征参数的最小值, x_{max} 为特征参数的最大值。通过提取多维度特征参数并进行归一化处理,可构建全面、准确的缺陷特征向量,提高后续信号融合与缺陷识别精确度。

3.3 多传感器信号融合算法优化

针对传统信号融合算法的不足,本文提出基于改进BP神经网络的算法,实现漏磁与涡流信号特征深度融合以提升缺陷识别精度。该算法采用3层BP神经网络结构,输入层8节点对应8个特征参数,隐藏层12节点用Sigmoid激活函数,输出层3节点用Softmax函数输出缺陷类型概率;还通过引入动量因子和自适应学习率,解决传统BP神经网络收敛慢、易陷局部最优解的问题。改进后的BP神经网络训练公式为:

$$w(n+1) = w(n) + \eta(n)e(n)x(n) + \alpha(w(n) - w(n-1)) \quad (4)$$

其中, $\eta(n)$ 为自适应学习率, α 为动量因子 ($0 < \alpha < 1$), 本文取 $\alpha=0.9$ 。

4 仿真实验与结果分析

4.1 仿真实验设计

4.1.1 仿真模型构建

采用COMSOL Multiphysics软件构建三维仿真模型,含Q235钢工件(尺寸100mm×50mm×10mm,设三种缺陷)、电磁式励磁线圈磁化装置(磁场强度0.5T、频率200Hz)、集成霍尔与涡流传感器(间距5mm、采样频率500kHz)的检测探头。网格划分用自由网格且精度精细,仿真时模拟工业环境噪声,添加5mT电磁噪声与2mT机械振动噪声。

4.1.2 实验方案

实验分为未优化组与优化组,未优化组采用传统信号处理方法与融合算法,优化组采用本文提出的综合优化方案,用相同仿真模型与检测参数开展两组实验,对比缺陷识别率、缺陷尺寸测量误差以验证优化方案有效性。其中,缺陷识别率是正确识别缺陷数与总缺陷数之比,反映识别准确性;缺陷尺寸测量误差是测量尺寸与实际尺寸差值和实际尺寸之比,误差越小精度越高。

4.2 仿真实验结果

4.2.1 缺陷识别率对比

两组实验的缺陷识别率对比结果如表 1 所示,优化组总缺陷识别率高于未优化组,且各类缺陷识别率均有提升,尤其是裂纹识别率提升显著,这表明本文提出的优化方案能有效提高缺陷识别准确性。

表 1 优化前后缺陷识别率对比

实验组别	裂纹识别率 (%)	腐蚀坑识别率 (%)	夹渣识别率 (%)	总缺陷识别率 (%)
未优化组	70	80	80	76.7
优化组	90	95	95	93.3
提升幅度 (%)	20	15	15	16.6

4.2.2 缺陷尺寸测量误差对比

两组实验的缺陷尺寸测量误差对比结果如表 2 所示,从表中可知,未优化组缺陷尺寸测量误差较大,优化组则明显降低,各类缺陷平均测量误差均控制在较小范围且符合实际检测要求,表明本文优化方案能有效提升缺陷尺寸测量精度、减少误差。

表 2 优化前后缺陷尺寸测量误差对比

实验组别	裂纹平均测量误差 (%)	腐蚀坑平均测量误差 (%)	夹渣平均测量误差 (%)	平均测量误差 (%)
未优化组	18.5	15.3	14.7	16.2
优化组	7.2	5.8	5.3	6.1
降低幅度 (%)	11.3	9.5	9.4	10.1

4.3 结果分析

通过仿真实验结果可以看出,通过实施漏磁复合探伤缺陷识别技术具有显著的优化成效:在信号的预处理环节中,通过采用自适应滤波+小波去噪能够为后续的缺陷特征提取以及信号融合奠定了坚实的基础。自适应滤波算法的应用可以根据信号的实时变化情况,精准的滤除机械振动噪声以及电磁噪声,最大程度地保留缺陷信号的细节特征,小波去噪算法选用合适的基小波并进行多层分解,精准地剔除噪声成分,两者结合应用避免信号畸变,适用工业现场复杂多变的环境,以此保障后续分析的信号是无干扰、高质量的。多维度缺陷特征提取与归一化处理也是本文中优化方案的一个重要方面,基于漏磁信号特点,提取峰值波形宽度,峰值间距等相关参数,以此能够反映出缺陷的宽度、长度以及深度等信息。基于涡流信号的特点,提取阻抗相位,阻抗幅值等相关参数会更加精准的掌握缺陷的边缘特征以及表面形态。通过这种多维度缺陷特征的提取可以使所构建出的缺陷特征更加准确全面,以便为缺陷的识别提供丰富的数据依据。与此同时充分考虑到磁信号与涡流信号特征参数量纲不同,为了提高融合效果,对提取的特征参数进行归一化处理,有助于提高缺陷识别的精准性。优化后的漏磁复合

探伤技术,总缺陷识别率达到 93.3%,缺陷尺寸平均测量误差降低至 6.1%,均满足实际检测要求,验证了优化方案的可行性与优越性。

5 结论与展望

5.1 结论

本文充分围绕漏磁复合探伤技术及缺陷识别精度优化进行了系统性的分析与探究,得出以下结论:

(1)漏磁-涡流复合探伤技术通过充分借助两种检测原理的独特优势实现了优势互补的显著效果,漏磁信号能够清晰地呈现出缺陷的尺寸、整体形态,以及在工件中的位置等关键信息。涡流信号以清晰的呈现材质不均匀、表面的划痕、裂纹等微小的缺陷。复合探伤技术通过综合两种信号的优势,可以提高缺陷识别的精度,确保检测结果的准确性与可靠性,为检测人员提供关于缺陷的可靠数据信息。

(2)在本研究中通过全面深入的分析影响漏磁复合探伤缺陷识别精度的关键因素,可知传感器的性能、磁化参数、信号处理方法以及检测环境均会影响缺陷识别的准确性,合适的磁场强度可以清晰地呈现出缺陷的信息,传感器灵敏度能够更准确地捕捉到微弱的信号变化,工业现场的机械振动噪声、电磁噪声均会影响信号的质量,降低缺陷识别的准确性,是后续优化工作的重点关注方面。

(3)提出的综合优化方案可有效提升缺陷识别的精度,优化后总缺陷识别率提升,降低缺陷尺寸的平均测量误差,自适应滤波+小波去噪的信号预处理、多维度特征提取与归一化以及改进 BP 神经网络信号融合这种优化方案可以更好的满足实际的检测要求。

5.2 展望

在当前漏磁复合探伤技术的研究进程中仍存在一些不足,仍有较大的提升空间,未来可从以下几个方面深入研究:

(1)在研究中充分融合机器学习、深度学习等先进的算法,进一步优化信号融合算法,实现缺陷特征的自动提取与融合,提升缺陷识别的精确度与效率;

(2)紧密围绕实际状况,开展多类型的符合泰山技术的深度研究,重点推进漏磁-超声-涡流三复合探伤技术的研发与应用,进一步提升缺陷识别的精度与可靠性,以便能够更好地适应工业生产复杂工况环境,为工业无损检测技术开辟新的发展方向。

(3)搭建实际的漏磁复合探伤实验平台,验证优化方案的工程实用性,推动该技术在工业现场的广泛应用。

[参考文献]

- [1]徐江,武新军,康宜华.国外油管在线无损检测技术的研究与应用现状[J].石油机械,2006,34(5):81-84.
- [2]李富成.钢管涡流探伤设备的技术改造[J].无损检

- 测,2006,28(2):84-85.
- [3] 闫萍,张国福,管建军,等.无损检测工程管理系统的研制与开发[J].河南科技大学学报(自然科学版),2007,28(4):50-52.
- [4] 康宜华,宋凯,张雅伟,等.磁饱和后的涡流检测信号的非涡流效应[J].无损检测,2009,31(4):257-260.
- [5] 武美先,张东利.BP神经网络改进及其在无损检测中的应用综述[J].中国测试,2023,49(2):1-6.
- [6] 杨洪斌,仝茂峰,刘金良,等.阵列涡流检测的缺陷定性定量探究[J].中国测试,2020,46(2):145-149.
- [7] 宋凯,康宜华,张丽攀,等.钢管磁性对涡流检测影响的研究进展[J].材料工程,2015,43(11):106-112.
- [8] 李轶名,李巍,王焱祥,等.基于阵列涡流检测法的管道内部减薄检测仿真与试验研究[J].中国电机工程学报,2021,41(1):254-260.
- 作者简介:范龙(1986.6—),毕业院校:江苏科技大学,所学专业:应用物理学,当前就职单位:江阴兴澄特种钢铁有限公司,职务:二级专家;职称级别:工程师。