

基于双传感器差分机制的铁磁性金属板件 亚表面腐蚀缺陷脉冲涡流可视化检测

王瑾¹ 李勇^{1*} 苏冰洁¹ 高文龙¹ 向异^{1,2} 刘正帅¹ 陈振茂¹

1.西安交通大学航天航空学院,西安,710049

2.国家电网有限公司西北分部,西安,710048

摘要:针对铁磁性金属板件亚表面腐蚀缺陷,提出了一种基于双传感器差分机制的脉冲涡流可视化检测方法。该方法利用双传感器差分探头拾取脉冲涡流检测信号,提取检测信号下降沿对数曲线斜率和归一化差分信号峰值作为信号特征,用于对不同尺寸缺陷进行可视化检测。通过仿真及实验研究,建立了所提信号特征与缺陷尺寸间的关联规律,并验证了双传感器差分探头相较于传统单传感器探头在降低噪声干扰和提高检测灵敏度方面具有优势。此外,提出了对两种信号特征进行融合的方法,结果表明,使用融合信号特征的缺陷图像信噪比更高。所提方法为铁磁性金属板件亚表面腐蚀缺陷的可视化检测提供了一种有效且可靠的解决方案。

关键词:电磁无损检测;脉冲涡流检测;亚表面腐蚀缺陷;信号特征融合;可视化检测

中图分类号: TG115.28

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.03.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Visual Detection of Subsurface Corrosions in Ferromagnetic Metal Plates Using Pulsed Eddy Current Based on Dual-sensor Differential Mechanism

WANG Jin¹ LI Yong^{1*} SU Bingjie¹ GAO Wenlong¹ XIANG Yi^{1,2}
LIU Zhengshuai¹ CHEN Zhenmao¹

1.School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049

2.Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an, 710048

Abstract: A pulse eddy current visual detection method was proposed based on a dual-sensor differential mechanism for subsurface corrosions in ferromagnetic metal plates. In this method, a dual-sensor differential probe was used to pick up the pulsed eddy current testing signals, and the slope of the logarithmic curve along the falling edge of the testing signals and the peak value of the normalized differential signals were extracted as signal features, which were used for visual detection of defects of different sizes. Through simulation and experimental research, the correlation laws between the proposed signal features and the sizes of defects were established, and it is verified that the dual-sensor differential probe has the advantages of reducing noise interference and improving the detection sensitivity compared with traditional single-sensor probes. In addition, a method was proposed to fuse the two signal features, and the results indicate that the defect images using fused signal features have a higher image signal-to-noise ratio. The research method proposed herein provides an effective and reliable solution for the visual detection of subsurface corrosions in ferromagnetic metal plates.

Key words: electromagnetic nondestructive evaluation; pulsed eddy current detection; subsurface corrosion; signal feature fusion; visual detection

0 引言

铁磁性金属构件在工业中的应用非常广泛,如管道、铁轨、特种压力设备、建筑桥梁等^[1-3],由其制成的铁磁材料设备在服役过程中受多种因素影响,可能形成减薄、局部孔洞等腐蚀缺陷,对设

备的安全性和可靠性构成威胁。因此,对铁磁性金属构件定期进行有效的无损检测和评估至关重要。目前,针对铁磁性金属构件的无损检测方法有漏磁检测^[4-6]、磁记忆检测^[7]、红外热成像检测^[8]、脉冲涡流检测^[9-11]等。其中,脉冲涡流检测采用方波激励信号,其显著特点在于,该信号包含丰富的谐波成分,特别是低频谐波成分能够有效克服趋肤效应的影响,从而使检测系统具有探测更深层缺陷的能力,为铁磁性金属构件表面及亚

收稿日期:2024-04-03

基金项目:国家磁约束核聚变能发展研究专项(2019YFE03130003);国家自然科学基金(52177007, 52311540018, 11927801)

表面缺陷的检测提供了坚实的理论基础。

目前,针对脉冲涡流检测方法已有很多研究。针对铁磁性金属管道壁厚减薄缺陷的检测,李建^[12]和 NAFIAH 等^[13]证明了检测信号下降沿部分反映了涡流在试件中的衰减规律。CHENG 等^[14]提出了将轴向双 AMR 传感器拾取的磁场 z 矢量之差作为检测信号,可以提高检测信噪比。张超等^[15]证明了归一化差分信号负峰值与缺陷尺寸之间存在定量关系。另外,任淑廷等^[16]利用基于匀强激励磁场梯度的脉冲涡流检测方法,提高了非铁磁性金属亚表面腐蚀缺陷检测灵敏度和成像精度。为进一步提高腐蚀缺陷检测灵敏度,LIU 等^[17]基于脉冲调制涡流检测技术(pulse-modulation eddy current, PMEC),提出了一种融合 PMEC 信号谐波特性和脉冲特性的融合信号特征,进一步提高了检测的灵敏度和信噪比。

本文围绕脉冲涡流检测技术,针对铁磁性金属板件亚表面腐蚀缺陷的可视化检测技术,利用脉冲涡流双传感器差分探头拾取脉冲涡流检测信号,提取检测信号下降沿对数曲线斜率以及归一化差分信号峰值作为信号特征,对缺陷进行可视化处理。通过建立有限元仿真模型开展仿真分析,探究所提信号特征与缺陷尺寸间的关联规律,同时搭建实验平台,结合实验研究,对不同形貌缺陷进行可视化处理,验证所提方法的可行性。

1 铁磁性金属板件亚表面腐蚀缺陷脉冲涡流检测的数值仿真

1.1 仿真模型设置

针对铁磁性金属板件亚表面腐蚀缺陷的脉冲涡流检测方法,利用自主开发的快速有限元仿真程序^[18-19]进行分析。建立二维仿真模型,见图 1。

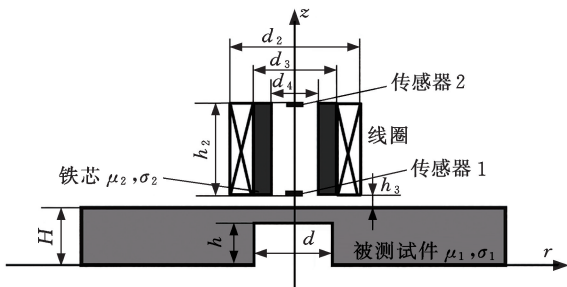


图 1 仿真模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the simulation model

仿真中,以磁场传感器拾取的磁场 z 分量(B_z)作为检测信号。值得一提的是,所提探头中引入了双磁场传感器,用于同时实现两种磁场感测机制:①传统绝对磁场感测;②轴向梯度磁场

感测。其中,轴向梯度磁场感测将传感器 1 以及传感器 2 所拾取的检测信号做差,将做差结果作为双传感器差分检测信号。该方法有提高检测信噪比^[14]和提高检测灵敏度^[16]的潜在优势。在本文中,将对两种磁场感测机制的检测效果进行对比。

线圈中所加载的激励电流重复频率为 15 Hz,最大幅值为 1 A,占空比为 50%。为比较仿真模型中两种磁场感测机制在降低噪声干扰方面的效果差异,将激励电流依次设置为理想激励电流以及受三种不同强度随机噪声干扰的激励电流。引入信噪比(SNR)用以评估激励电流受噪声干扰的程度:

$$R_{\text{SNR}} = 10 \lg(P_s/P_n)$$

式中: P_s 为激励电流的功率; P_n 为随机噪声的功率。

仿真中,SNR 分别为 48 dB、42 dB、38 dB。四种激励电流信号如图 2 所示。

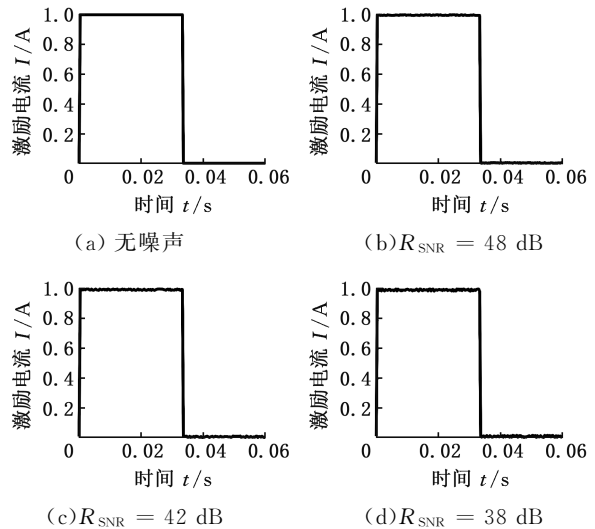


图 2 激励电流信号

Fig.2 Excitation current signals

二维仿真模型中,被测试件按缺陷类型分为两组:第一组模拟不同深度缺陷(缺陷长度 d 为 25 mm,缺陷深度 h 取 0, 2, 3, 4, 6 mm);第二组模拟不同长度缺陷(缺陷深度 h 为 4 mm,缺陷长度 d 取 0, 10, 20, 30, 40 mm)。两组被测试件厚度均为 7 mm,模型各部分参数如表 1 所列。

1.2 仿真结果与分析

1.2.1 检测信号的处理与特征提取

通过系列仿真,能够得到不同缺陷情况下传感器 1 和传感器 2 所拾取的检测信号。在此基础上,通过对两个传感器拾取的检测信号做差,获得双传感器差分检测信号。以无缺陷模型为例,绘制传感器 1 与传感器 2 在不同噪声情况下拾取到的检测信号以及双传感器差分检测信号,如图 3 所示。由图 3 可知,当激励信号受噪声干扰时,

表 1 有限元仿真模型的主要参数

Tab.1 Main parameters of the finite element simulation model

线圈匝数	215
线圈外径 d_2/mm	14
线圈内径(铁芯外径) d_3/mm	9
铁芯内径 d_4/mm	4.6
铁芯、线圈高度 h_2/mm	16
传感器 1、2 轴向距离 h_2/mm	16
铁芯相对磁导率 μ_2	2000
铁芯电导率 $\sigma_2/(\text{MS} \cdot \text{m}^{-1})$	0
被测试件厚度 H/mm	7
被测试件磁导率 μ_1	250
被测试件电导率 $\sigma_1/(\text{MS} \cdot \text{m}^{-1})$	6
探头提高高度 h_3/mm	0.5

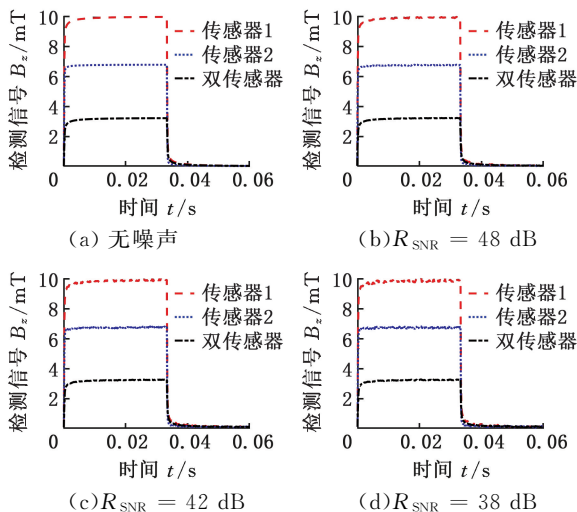
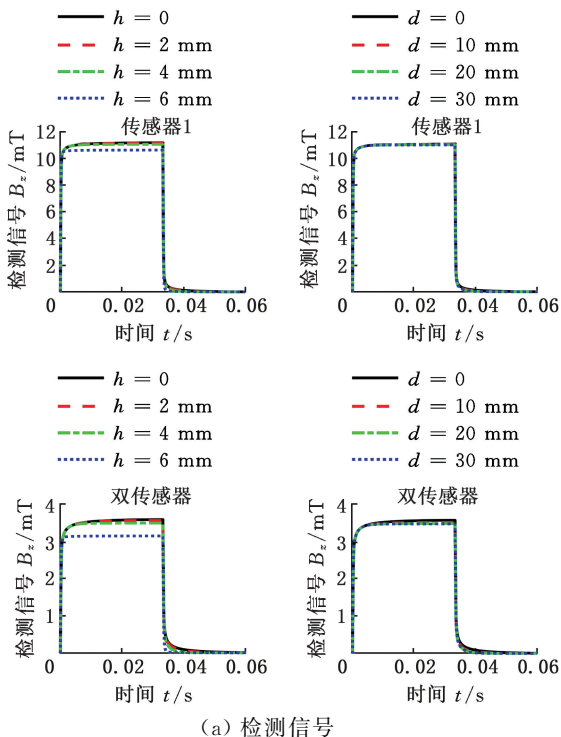


图 3 不同传感器输出的检测信号

Fig.3 Testing signals from different sensors

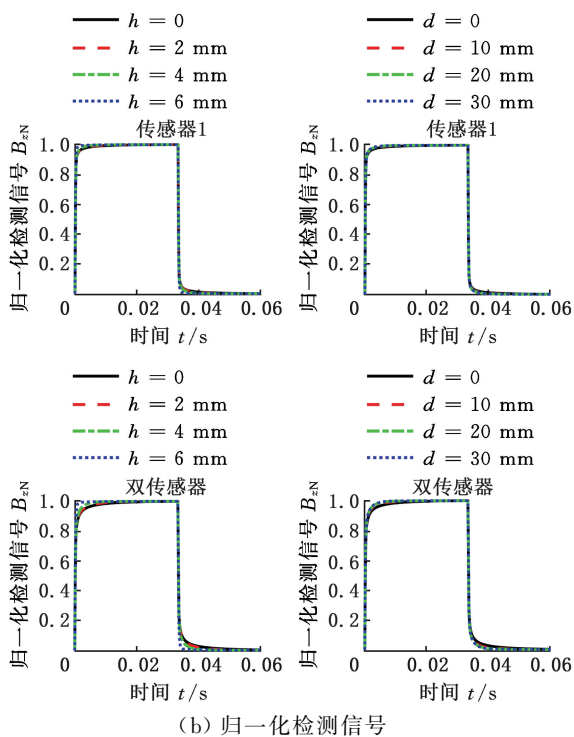


(a) 检测信号

传感器 1 与传感器 2 拾取到的检测信号以及差分检测信号均会受到噪声的干扰,噪声强度越大,检测信号波动越明显。

本文着重讨论两种磁场感测机制的检测效果差异,因此,后续检测信号的处理不再赘述传感器 2 单独输出的结果。为研究缺陷尺寸不同对检测信号的影响,以理想激励为例,研究典型情况下检测信号与缺陷尺寸之间的规律,分别绘制被测试件无缺陷处与不同尺寸缺陷处,两种磁场感测机制下的检测信号,见图 4a。另外,由于检测信号同时与铁磁性金属的相对磁导率和电导率相关,为抑制相对磁导率对检测信号的影响,将检测信号进行归一化处理,见图 4b。由图 4a 可知,当缺陷不同时,检测信号存在明显差异。这是因为铁磁性金属有聚磁能力,当被测试件有缺陷时,其磁导率下降,聚磁能力减弱,信号平缓区域幅值产生变化,表现为在一个检测周期中,检测信号幅值呈现整体下降趋势。由图 4b 可以看出,缺陷尺寸越大,归一化检测信号从零上升至平缓区域的速率越大。

基于此,为研究缺陷尺寸参数与检测信号的映射关系,本文提出两种信号特征:① 检测信号下降沿对数曲线斜率(S_K);② 归一化差分信号峰值(S_P)。所用归一化差分信号峰值为负峰值的绝对值^[15]。对于信号特征 S_K ,为了突出信号的衰减规律,将检测信号下降沿部分进行单对数处理,得到检测信号下降沿对数曲线,见图 5a。对

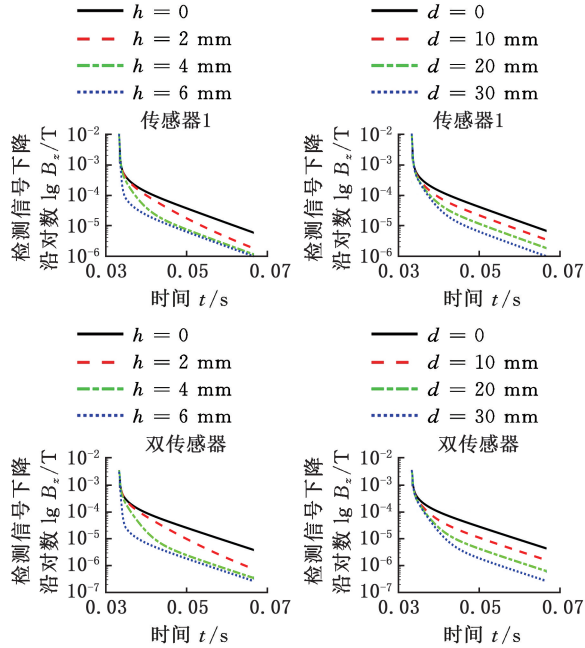


(b) 归一化检测信号

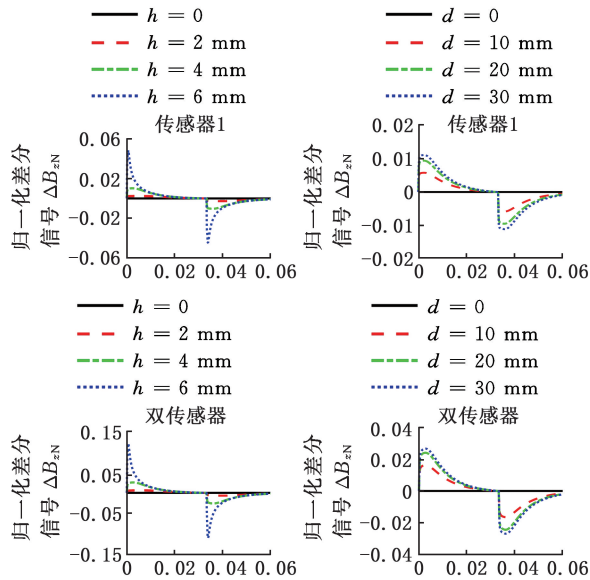
图 4 不同缺陷处的检测信号与归一化检测信号

Fig.4 Testing signals and normalized testing signals for different defects

于信号特征 S_P , 将无缺陷处对应的归一化检测信号作为参考信号 (reference signal, RS), 将不同缺陷处的归一化检测信号与参考信号做差, 得到归一化差分信号, 见图 5b。由图 5a 可知, 缺陷越大, 检测信号下降沿对数曲线斜率越大。这是因为被测试件缺陷越大, 涡流在被测试件中的衰减速率越快, 导致检测信号衰减越快。由图 5b 可知, 缺陷越大, 归一化差分信号的峰值越大, 这是因为被测试件缺陷越大, 归一化检测信号与参考信号的差异越大。



(a) 检测信号下降沿对数曲线



(b) 归一化差分信号曲线

图 5 检测信号的处理结果

Fig.5 Processed results of the testing signals

1.2.2 不同尺寸缺陷检测与磁场感测机制评估

以无缺陷模型为例, 绘制不同噪声条件下的

检测信号, 如图 6 所示。由图 6 可以看出, 当激励信号受到噪声干扰时, 检测信号中会存在噪声, 但是, 双传感器差分检测信号较传感器 1 所输出的检测信号, 噪声波动较小。

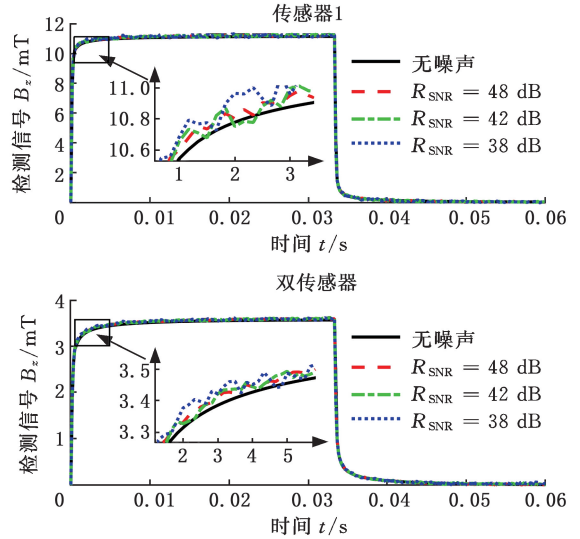


图 6 不同强度噪声干扰下的检测信号

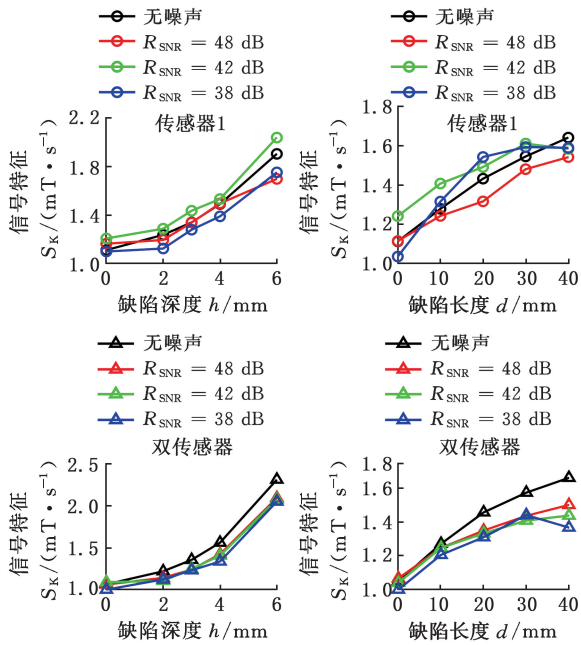
Fig.6 Testing signals under noise interference of different intensities

为进一步比较传统单传感器探头与双传感器差分探头在对不同尺寸缺陷检测时的抗噪性能差异, 绘制不同磁场感测机制下的信号特征-缺陷尺寸关联曲线, 如图 7 所示。可知, 检测信号下降沿对数曲线斜率与归一化差分信号峰值均与缺陷尺寸成单调关系, 缺陷越大, 信号特征量越大。将无噪声激励条件下获取的信号特征-缺陷尺寸关联曲线作为理想条件下的关联曲线, 对比激励信号受不同强度噪声干扰条件下的关联曲线发现, 噪声越大, 检测得到的信号特征-缺陷尺寸关联曲线偏离理想条件下的关联曲线越多, 甚至失去信号特征与缺陷尺寸之间的单调关系。而使用双传感器时的关联规律, 相比于仅使用传感器 1 单独检测时, 更接近理想条件下的关联规律, 说明使用双传感器差分探头检测具有更好的抗噪性能。另外, 观察图 7b 可知, 使用双传感器时, 信号特征-缺陷尺寸关联曲线的斜率明显增大, 说明使用双传感器差分探头检测能够使检测灵敏度明显提高。

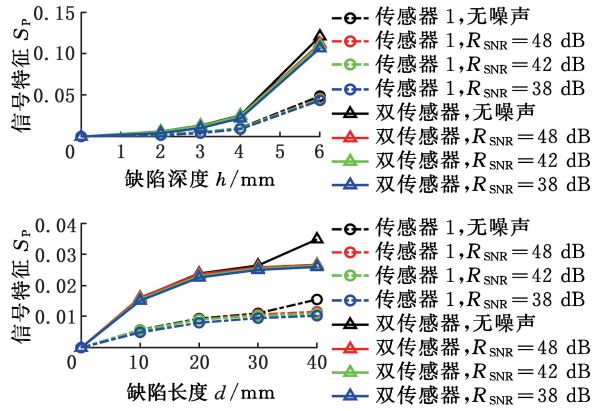
2 实验研究

2.1 实验系统以及参数设置

所搭建的铁磁性金属板件亚表面腐蚀缺陷检测实验系统如图 8 所示。该系统主要包括: 由信号发生器 AFG3022C 和功率放大器 HSA4011 组成的探头激励模块, 由激励线圈、磁场传感器和聚



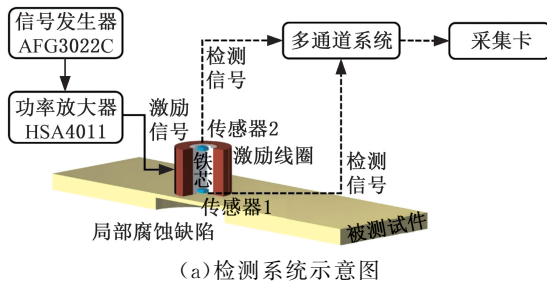
(a) 检测信号下降沿对数曲线斜率-缺陷尺寸关联曲线



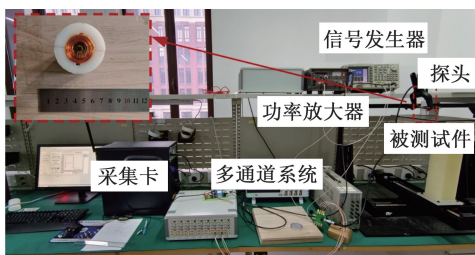
(b) 归一化差分信号峰值-缺陷尺寸关联曲线

图 7 信号特征-缺陷尺寸关联曲线

Fig.7 Correlation curves of signal features against defect size



(a) 检测系统示意图



(b) 实物图

图 8 检测系统示意图及实物图

Fig.8 Schematic diagram and practical picture of the testing system

磁铁芯构成的双传感器差分探头, 以及由多通道系统、采集卡和计算机组成的检测信号拾取模块。其中多通道系统用于对检测信号进行放大滤波处理。

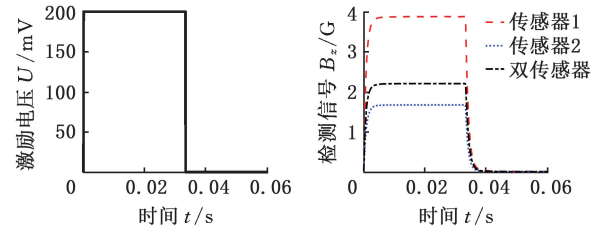
检测探头的激励线圈由 0.4 mm 的漆包线绕制而成。两个磁场传感器均采用 TMR2584 隧道磁阻传感器, 传感器 1 与传感器 2 同轴放置, 传感器 1 放置于线圈底部, 传感器 2 放置于线圈顶部。铁芯材料为 Ni-Zn 铁氧体, 探头几何参数如表 2 所列。

表 2 探头几何参数

Tab.2 Geometric parameters of the probe

线圈匝数	215
线圈外径/mm	14
线圈内径(铁芯外径)/mm	9
铁芯内径/mm	4.6
铁芯、线圈高度/mm	16
传感器 1、2 轴向距离/mm	16

实验中, 探头放置于被测试件上方, 向激励线圈中通入重复频率为 15Hz、占空比为 50%、周期内电压幅值为 200mV 的脉冲方波信号。激励信号如图 9a 所示, 探头所拾取的检测信号如图 9b 所示。



(a) 激励信号

(b) 检测信号

图 9 激励信号与检测信号

Fig.9 Excitation signal and testing signals

实验所用被测试件为 Q235 板, 其背面预制有 11 种不同尺寸的平底孔, 用于模拟局部腐蚀缺陷, 如图 10 所示。其中试件 1 的缺陷为一系列直径相同、深度不同的圆形平底孔, 试件 2 的缺陷为一系列深度相同、直径不同的圆形平底孔, 试件 3 的缺陷为单个圆形平底孔, 试件 4 和试件 5 的缺陷是由两个直径以及深度均不相同的圆形平底孔组成, 用于模拟复杂形貌腐蚀缺陷。Q235 板的厚度均为 7 mm。亚表面腐蚀缺陷具体尺寸如表 3 所示。

2.2 信号特征讨论及局部腐蚀缺陷扫查结果分析

实验中, 探头放置于被测试件上方, 对亚表面腐蚀缺陷进行检测。针对试件 1 以及试件 2 的系列平底孔缺陷, 首先, 将探头分别放置于无缺陷处以及各缺陷中心处, 获得不同磁场感测机制下的检测信号下降沿对数曲线以及归一化差分信号,

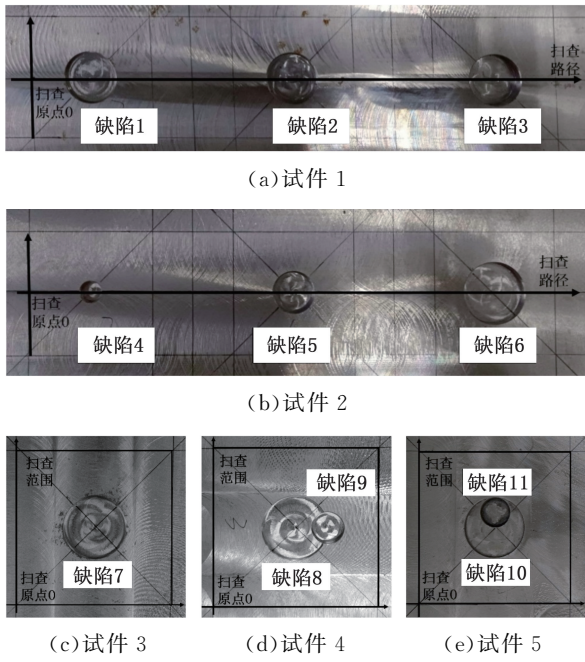


图 10 被测试件实物图

Fig.10 Pictures of the specimens

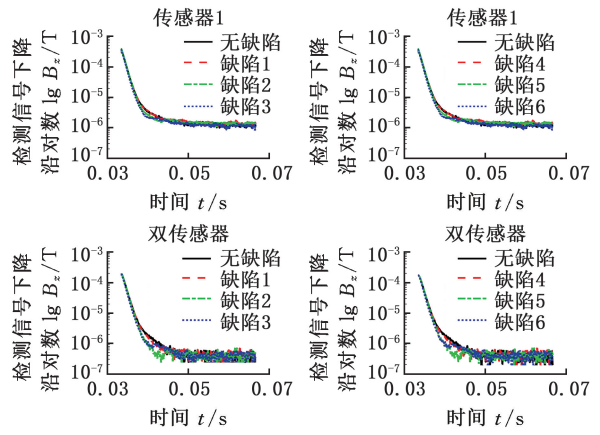
表 3 亚表面腐蚀缺陷尺寸

Tab.3 Sizing parameters of subsurface corrosions

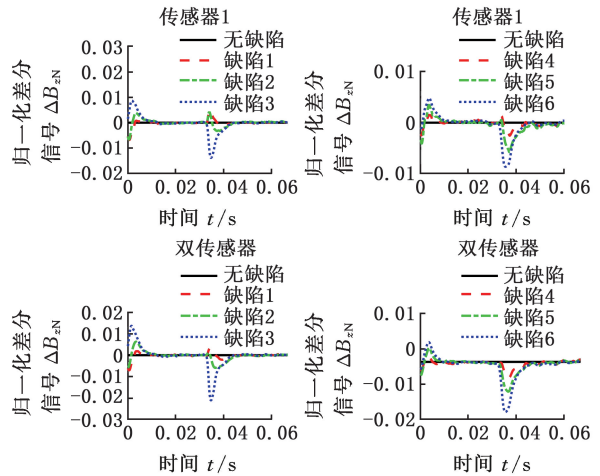
缺陷编号	直径×深度/ (mm×mm)	缺陷编号	直径×深度/ (mm×mm)
缺陷 1	25×2	缺陷 7	40×4
缺陷 2	25×4	缺陷 8	40×2
缺陷 3	25×6	缺陷 9	20×5
缺陷 4	10×4	缺陷 10	40×1
缺陷 5	20×4	缺陷 11	20×4
缺陷 6	30×4		

如图 11 所示。由图 11 可知，缺陷越大，检测信号下降沿对数曲线斜率越大，归一化差分信号峰值也越大。实验中检测信号处理结果与仿真中检测信号处理结果规律一致，验证了两种信号特征均能对不同尺寸缺陷进行有效检测。另外，值得一提的是，由图 11b 可以看出，在实验当中，归一化差分信号的负峰值绝对值相比于正峰值的绝对值更大，因此，选择归一化差分信号负峰值的绝对值作为信号特征，能够提高检测灵敏度。

在明确所提检测信号特征能够有效地对 Q235 板中不同尺寸的腐蚀缺陷进行检测的基础上，对试件 1 以及试件 2 进行局部缺陷扫查，获取的信号特征扫查曲线如图 12 所示。由图 12 可以看出，两种信号特征均存在缺陷深度越大，信号特征量越大，缺陷直径越大，信号特征量越大的规律，与仿真结果一致。另外，对比两种信号特征的扫查曲线可知，当检测缺陷较小时，使用 S_K 作为信号特征时，缺陷处的信号特征量相比于非缺陷处的信号特征量突出得更明显，说明信号特征 S_K



(a) 检测信号下降沿对数曲线



(b) 归一化差分信号曲线

图 11 检测信号的处理结果

Fig.11 Processed results of the testing signals

对缺陷检测具有更高的灵敏度；而使用 S_P 作为信号特征时，非缺陷处的信号特征量波动更小，说明信号特征 S_P 具有更好的抗噪性能。

由上文仿真分析可知，使用双传感器差分探头检测能够使检测灵敏度提高。为直观对比两种磁场感测机制在实验中检测灵敏度的差异，提取不同缺陷中心处的信号特征量作为缺陷标定值，绘制信号特征标定曲线如图 13 所示。由图 13 可以看出，使用双传感器差分探头检测的标定曲线斜率更大，说明使用双传感器的轴向梯度磁场感测机制检测比使用传统单传感器检测能够提高检测灵敏度。

2.3 缺陷成像及融合信号特征的提出

2.3.1 缺陷成像

为了显示缺陷外观形貌，对局部缺陷进行面扫成像。首先，将两种信号特征进行归一化处理，便于在同一水平下对比不同磁场感测机制以及基于不同信号特征的效果。归一化信号特征定义为

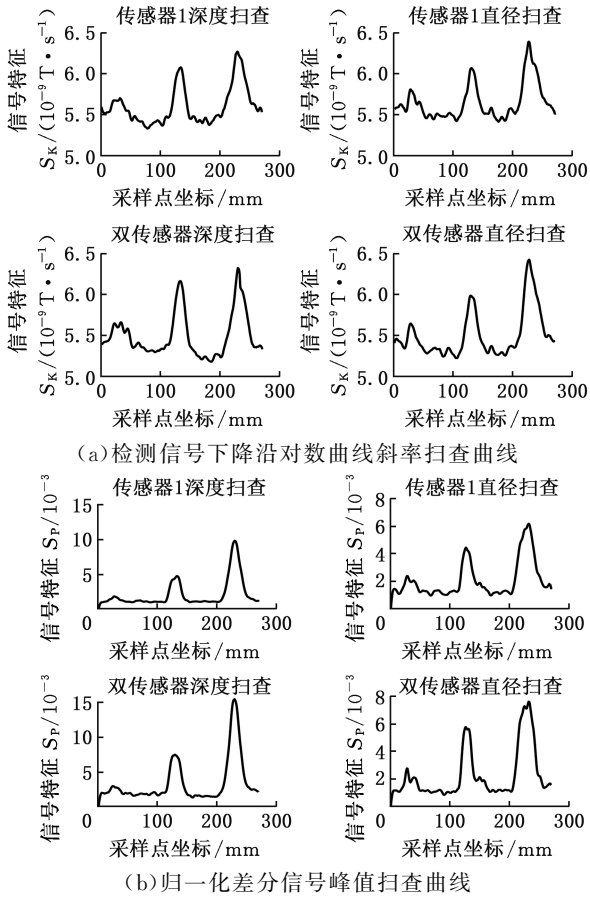


图 12 信号特征扫描曲线

Fig.12 Scanning curves of signal features

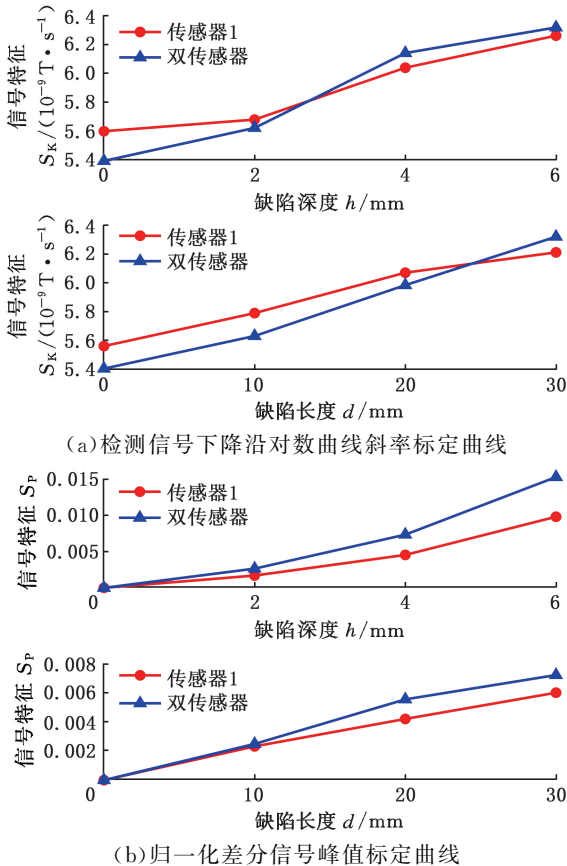


图 13 信号特征标定曲线

Fig.13 Calibration curves of signal features

$$\left. \begin{aligned} N_{SK} &= \frac{S_K - \min(S_K)}{\max(S_K)} \\ N_{SP} &= \frac{S_P - \min(S_P)}{\max(S_P)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： N_{SK} 为信号特征 S_K 归一化处理后的结果； N_{SP} 为信号特征 S_P 归一化处理后的结果。

对试件 3、试件 4 以及试件 5 在图 10 所示的扫描范围内进行扫描，基于归一化信号特征的缺陷成像结果如图 14~图 16 所示。由图 14~图 16 成像结果能够明显看出局部腐蚀缺陷的形貌，对试件 4、试件 5 亦能识别出复杂形貌腐蚀缺陷概貌。另外，由缺陷成像图可以看出，对于两种信号特征，使用双传感器差分探头检测时，在无缺陷区域的信号特征量波动更小，说明使用双传感器差分探头检测的轴向梯度磁场感测机制的抗噪性能更好。

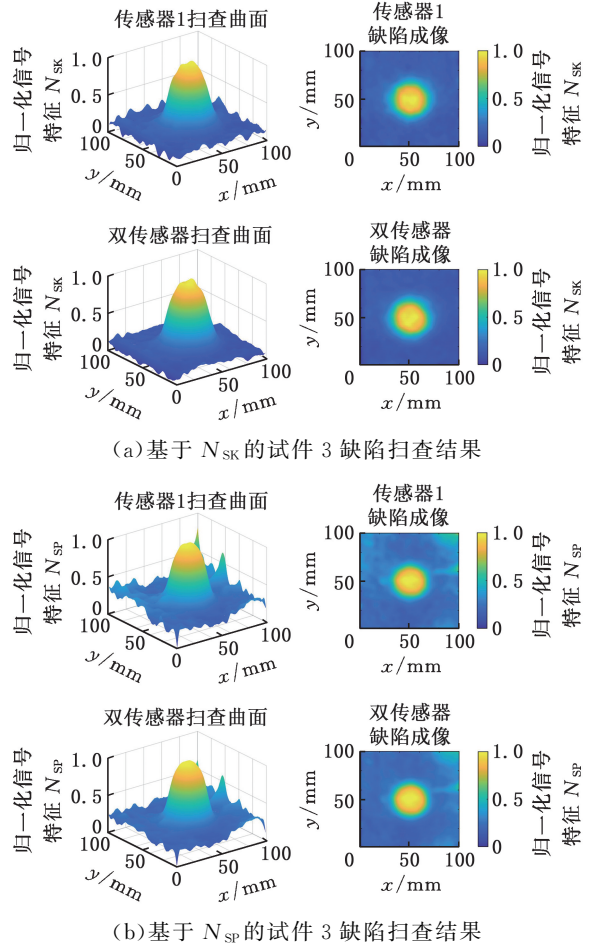
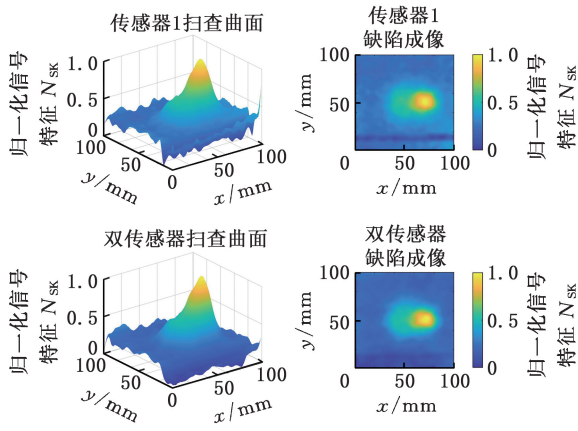


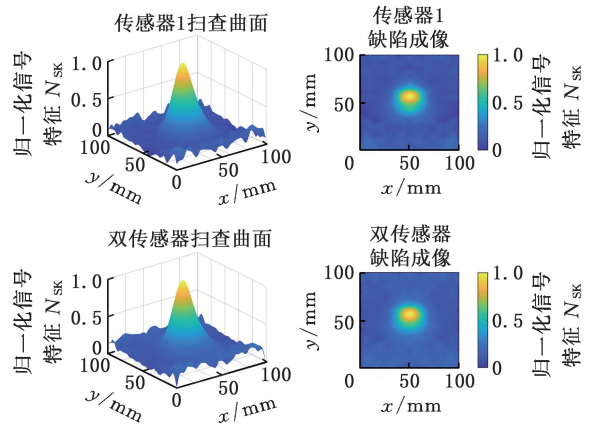
图 14 试件 3 缺陷扫描结果

Fig.14 Scanning results of specimen 3

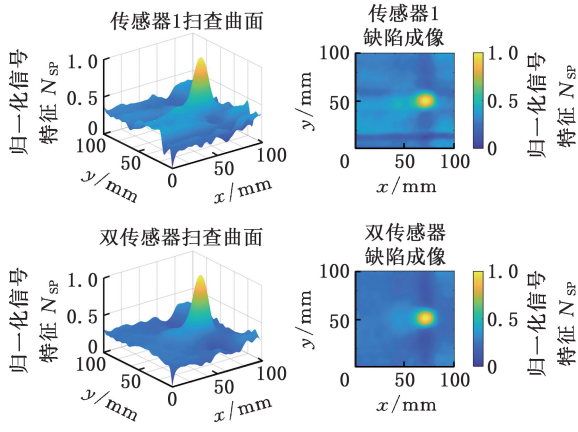
为评估不同磁场感测机制下缺陷成像图的图像质量，引入图像信噪比(R_{SNRimg})的计算方法： $R_{SNRimg} = 10 \lg(P_{DA}/P_{NDA})$ 。式中， P_{DA} 是缺陷区域(defective areas, DA)的归一化信号特征平均功率， P_{NDA} 是非缺陷区域(non-defective areas, NDA)的归一化信号特征平均功率。图像信噪比



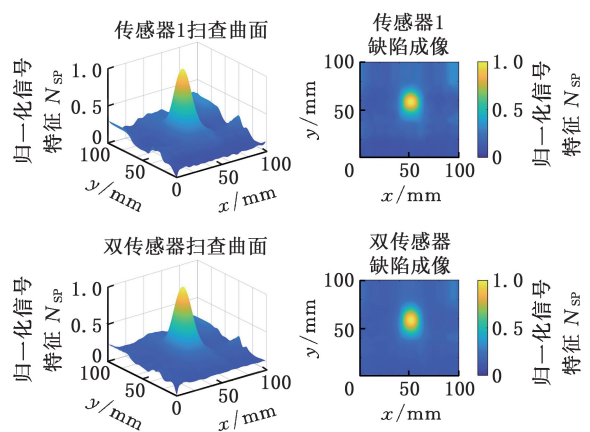
(a) 基于 N_{SK} 的试件 4 缺陷扫查结果



(a) 基于 N_{SK} 的试件 5 缺陷扫查结果



(b) 基于 N_{SP} 的试件 4 缺陷扫查结果



(b) 基于 N_{SP} 的试件 5 缺陷扫查结果

图 15 试件 4 缺陷扫查结果

Fig.15 Scanning results of specimen 4

图 16 试件 5 缺陷扫查结果

Fig.16 Scanning results of specimen 5

越大,说明图像质量越好。不同磁场检测机制下的缺陷图像信噪比如图 17 所示。可以看出,无论是基于 N_{SK} 还是基于 N_{SP} ,使用双传感器的缺陷图像信噪比均大于仅使用传感器 1 的缺陷图像信噪比,且使用双传感器后,缺陷图像信噪比增长率均在 5% 以上。因此能够得出结论:使用双传感器差分探头的轴向梯度磁场感测机制检测,可以使可视化处理结果的缺陷图像信噪比增大,即缺陷成像图的图像质量更高。

2.3.2 融合信号特征的提出

由之前讨论分析,两种信号特征均与缺陷尺寸存在相同的单调映射关系。在此规律的基础上,通过对图 12 扫查曲线分析,发现了两种信号特征存在各自的优势,即信号特征 S_K 对缺陷检测具有更高的灵敏度,信号特征 S_P 具有更好的抗噪性能。因此,考虑将两种信号特征进行有效融合,形成融合信号特征 N_{SF} ,旨在实现缺陷图像信噪比更高的缺陷成像效果。根据上文初步扫查结果,将信号特征扫查矩阵分为缺陷区域 A_{DA} 与非缺陷区域 A_{NDA} 。将两种信号特征进行融合:

$$N_{SF}(m, n) = \max(N_{SK}(A_{DA}), N_{SP}(A_{DA})) +$$

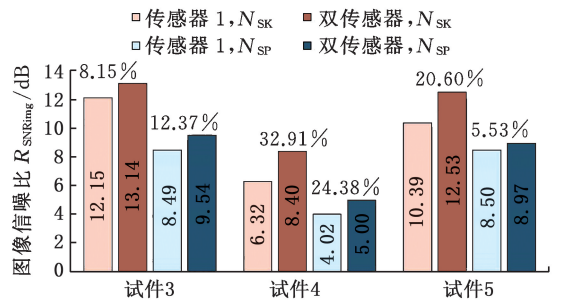


图 17 缺陷图像信噪比

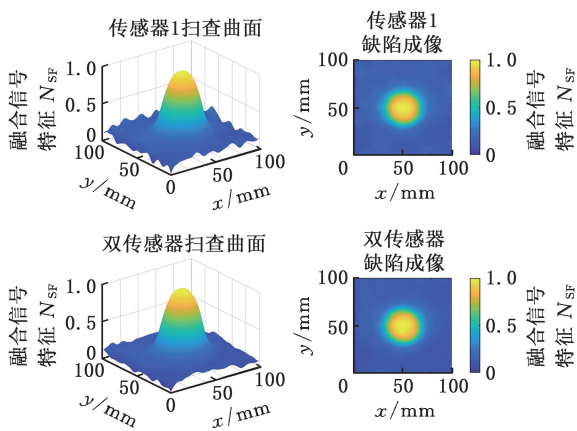
Fig.17 The SNR of the defect images

$$\min(N_{SK}(A_{NDA}), N_{SP}(A_{NDA})) \quad (2)$$

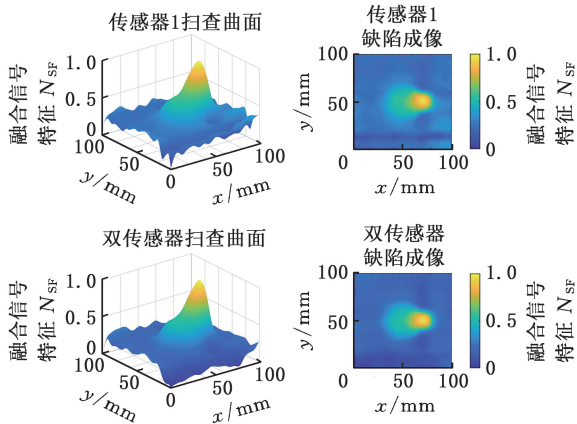
式中: $N_{SF}(m, n)$ 为融合信号特征扫查结果矩阵, m 和 n 分别为融合信号特征扫查结果矩阵中的行号和列号。

在融合过程中,于缺陷区域取信号特征 N_{SK} 与 N_{SP} 中的较大值,非缺陷区域取信号特征 N_{SK} 与 N_{SP} 中的较小值,最后形成融合信号特征。基于融合信号特征所得的缺陷扫查图像如图 18 所示。

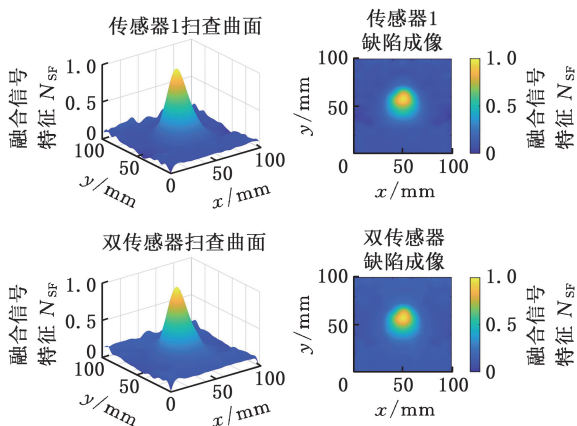
为定量评估融合信号特征 N_{SF} 的优势所在,分别计算基于 N_{SK} 、 N_{SP} 、 N_{SF} 进行缺陷成像的缺陷图像信噪比,结果如图 19 所示。由图 19 可知,对于两种磁场感测机制,基于 N_{SF} 所得的缺陷图像信噪比均比基于 N_{SK} 和 N_{SP} 所得的缺陷图像信



(a) 基于 N_{SF} 的试件 3 缺陷扫描结果



(b) 基于 N_{SF} 的试件 4 缺陷扫描结果



(c) 基于 N_{SF} 的试件 5 缺陷扫描结果

图 18 基于融合信号特征的缺陷成像图

Fig.18 Defect images based on the fused signal feature

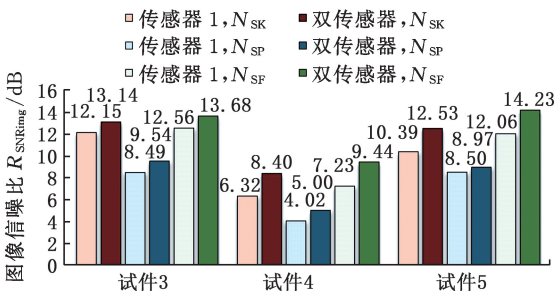


图 19 缺陷图像信噪比对比结果

Fig.19 Comparison of the SNR of defect images

噪比更大。由此,通过定量分析,进一步体现了融合信号特征可以有效提高缺陷成像图的图像质量。

3 结论

针对铁磁性金属板件亚表面腐蚀缺陷的可视化检测,本文提出利用双传感器差分探头拾取脉冲涡流检测信号,获得检测信号下降沿对数曲线斜率以及归一化差分信号峰值,将两者作为信号特征对缺陷尺寸进行评估。通过仿真分析以及实验验证,建立了信号特征与缺陷尺寸间的关联规律。结果表明,两种信号特征均与缺陷尺寸存在单调关系,缺陷尺寸越大,信号特征量越大。同时,通过两种磁场感测机制检测结果的比较得出结论,使用双传感器差分探头的轴向梯度磁场感测机制相较于传统单传感器探头的绝对磁场感测机制在提高检测灵敏度以及降低噪声干扰方面具有优势。在缺陷可视化处理方面,基于两种信号特征,分别对缺陷进行成像,发现双传感器差分探头的应用能够提高缺陷成像图的信噪比。基于两种信号特征与缺陷尺寸间的映射关系以及两种信号特征各自存在的优势,提出了融合信号特征。研究发现,所提融合信号特征的缺陷成像图相较于上述两种信号特征的缺陷成像图具有更高的图像信噪比。

参考文献:

[1] 徐志远. 带包覆层管道壁厚减薄脉冲涡流检测理论与方法[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
 XU Zhiyuan. Theory and Method of Pulsed Eddy Current Detection for Wall Thickness Reduction of Pipeline with Coating[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

[2] LOU Weimin, SHEN Changyu, ZHU Zhouhong, et al. Internal Defect Detection in Ferromagnetic Material Equipment Based on Low-frequency Electromagnetic Technique in 20# Steel Plate[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(16):6540-6546.

[3] WANG Rui, KAWAMURA Y. An Automated Sensing System for Steel Bridge Inspection Using GMR Sensor Array and Magnetic Wheels of Climbing Robot[J]. Journal of Sensors, 2016, 2016: 8121678.

[4] AL-NAEMI F I, HALL J P, MOSES A J. FEM Modelling Techniques of Magnetic Flux Leakage-type NDT for Ferromagnetic Plate Inspections[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2006, 304(2):e790-e793.

- [5] EGE Y, CORAMIK M. A New Measurement System Using Magnetic Flux Leakage Method in Pipeline Inspection[J]. Measurement, 2018, 123:163-174.
- [6] SHI Mingjiang, NI Mao, QIN Liansheng, et al. Quantification Method of Tubing Defects Based on Machine Learning Algorithm and Magnetic Flux Leakage Signals[J]. The Review of Scientific Instruments, 2023, 94(1):015111.
- [7] SUN Bingcai, CHU Shengli. Design of a Magnetic Memory Detecting Sensor for Oil Well Casing Well Damage[C]//Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2018(IFEDC 2018). Xi'an, 2018:1463-1471.
- [8] LAHIRI B B, BAGAVATHIAPPAN S, SOUMYA C, et al. Infrared Thermography Based Defect Detection in Ferromagnetic Specimens Using a Low Frequency Alternating Magnetic Field[J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 64:125-133.
- [9] YANG Binfeng, XU Junmin, WU Hao, et al. Magnetic Field Shielding Technique for Pulsed Remote Field Eddy Current Inspection of Planar Conductors[J]. NDT & E International, 2017, 90:48-54.
- [10] SHE Saibo, CHEN Yifang, HE Yunze, et al. Optimal Design of Remote Field Eddy Current Testing Probe for Ferromagnetic Pipeline Inspection[J]. Measurement, 2021, 168:108306.
- [11] LIU Changzan, DANG Bo, WANG Haiyan, et al. Synthesized Magnetic Field Focusing for the Non-destructive Testing of Oil and Gas Well Casing Pipes Using Pulsed Eddy-current Array[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(9):6201710.
- [12] 李建. 铁磁构件脉冲涡流测厚中磁通量检测模型与方法[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.
- LI Jian. Magnetic Flux Detection Model and Method in Pulsed Eddy Current Thickness Measurement of Ferromagnetic Components[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [13] NAFIAH F, TOKHI M O, MAJIDNIA S, et al. Pulsed Eddy Current: Feature Extraction Enabling In-situ Calibration and Improved Estimation for Ferromagnetic Application[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(3):52.
- [14] CHENG Weiyang. Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes' Wall-thinning through Insulation and Cladding[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2012, 31(3):215-224.
- [15] 张超, 李勇, 闫贝, 等. 双层异质金属套管缺陷的脉冲涡流检测研究[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(11):8-10.
- ZHANG Chao, LI Yong, YAN Bei, et al. Research on Defect Detection in Double-casing Tube with Layers of Different Materials via PEC[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(11):8-10.
- [16] 任淑廷, 李勇, 张曦郁, 等. 基于磁场梯度脉冲涡流检测的航空结构亚表面腐蚀缺陷可视化方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(3):84-89.
- REN Shuting, LI Yong, ZHANG Xiyu, et al. Visualization of Subsurface Corrosion in Aviation Structures Based on Gradient-field Pulsed Eddy Current Testing[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(3):84-89.
- [17] LIU Zhengshuai, LI Yong, SU Bingjie, et al. Feature Fusion for Pulse-modulation Eddy Current Imaging and Evaluation of Defects in Layered Conductors[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2023, 71(S1):S283-S293.
- [18] CHEN Zhenmao, TAKASHIMA H, MIYA K. A Hybrid Database Approach for Simulating Signals of Remote Field Eddy Current Testing[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2004, 19(1/2/3/4):219-223.
- [19] XIE Shejuan, CHEN Zhenmao, TAKAGI T, et al. Efficient Numerical Solver for Simulation of Pulsed Eddy-current Testing Signals[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(11):4582-4591.

(编辑 王旻玥)

作者简介:王瑾,女,1998年生,硕士研究生。研究方向为电磁无损检测。E-mail:wangjin123@stu.xjtu.edu.cn。李勇*(通信作者),男,1978年生,教授、博士研究生导师。研究方向为机械结构无损定量检测及完整性评估。E-mail:yongli@mail.xjtu.edu.cn。

本文引用格式:

王瑾,李勇,苏冰洁,等.基于双传感器差分机制的铁磁性金属板件亚表面腐蚀缺陷脉冲涡流可视化检测[J].中国机械工程,2025,36(3):381-390.

WANG Jin, LI Yong, SU Bingjie, et al. Visual Detection of Subsurface Corrosions in Ferromagnetic Metal Plates Using Pulsed Eddy Current Based on Dual-sensor Differential Mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(3):381-390.