

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412782

引入去噪因子的薄板结构 SH 波损伤成像研究*

营笑^{1,4}, 褚国安^{1,4}, 刘砚涛³, 李海波³, 王凯峰^{2,4}, 刘洋^{1,4}

(1. 天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072; 2. 天津大学机械工程学院 天津 300354;
3. 北京强度环境研究所 北京 100076; 4. 天津大学浙江国际创新设计与智造研究院 绍兴 312000)

摘要:提出了一种引入去噪因子的薄板结构水平剪切波(SH波)损伤概率分布成像方法,旨在提高复杂环境下的损伤检测精度。针对薄板结构导波健康监测中诸如薄板变形、环境干扰、系统误差、人员操作等因素造成的干扰,本方法通过引入去噪因子来降低噪声信号的影响,并基于局部峰值设计自适应阈值进行损伤分离,从而显著提升成像效果。分析了SH波在薄板结构中的传播特性,并通过钢板实验进行了验证。结果表明,与传统损伤概率分布成像方法相比,本方法能够更准确地进行损伤定位。此外,本研究还探讨了引入去噪因子的损伤概率分布成像在降低噪声影响、多损伤分离检测的优势,为基于SH波的薄板结构损伤检测提供了理论与工程依据。

关键词: 结构健康监测; SH波; 损伤成像; 去噪; 磁致伸缩传感器

中图分类号: TH878 TB552 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 140.20

Research on damage imaging based on sh wave in thin-plate structures with denoising factor

Ying Xiao^{1,4}, Chu Guoan^{1,4}, Liu Yantao³, Li Haibo³, Wang Kaifeng^{2,4}, Liu Yang^{1,4}

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 3. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China; 4. International Institute for Innovative Design and Intelligent Manufacturing of Tianjin University-Zhejiang, Shaoxing 312000, China)

Abstract: This study proposes a method for damage probability distribution imaging of shear horizontal (SH) waves in thin plate structures by introducing a denoising factor, aiming to improve the accuracy of damage detection in complex environments. Addressing factors such as thin plate deformation, environmental interference, system errors, and human operation in guided wave structural health monitoring, this method reduces the interference of noise signals by introducing a denoising factor. To mitigate the impact of these noise signals, this method introduces a denoising factor and employs an adaptive threshold based on local peak values to isolate damage, thereby significantly enhancing imaging effectiveness. The propagation characteristics of SH-waves in thin plate structures are analyzed, and experiments are conducted on steel plates for validation. Results demonstrate that compared to traditional RAPID imaging methods, this approach enables more accurate damage localization. Furthermore, the study explores the advantages of denoising factor-introduced tomography imaging in reducing noise influence and detecting multiple damages, providing theoretical and engineering support for SH wave based thin plate structure damage detection.

Keywords: structural health monitoring; SH wave; damage imaging; denoising; magnetostrictive transducers

0 引言

随着现代工业技术的快速进步,在航空航天、海洋和国防等关键技术领域中,越来越多地使用一体化结构。薄板结构作为重要的一体化结构,在战车车身、飞机机翼、舰船船体等部件中,得到了广泛使用。在这些领域中,薄板结构不仅是构成装备的基本结构件,也承载着保持装备在极端工作环境下安全运行的重要任务。因此,确保薄板结构在装备的持续运行下保持结构健康,对于装备的可靠性和安全性至关重要。

导波检测技术因其长距离检测能力、高灵敏度、较少的传感器数量、具备实时监测能力等独特优势^[1-2],在设备的结构健康监测(structural health monitoring, SHM)中占据着重要地位。兰姆表面波(Lamb surface waves, Lamb waves)和水平剪切波(shear horizontal wave, SH wave)是在板结构中广泛研究和应用的两种导波形式。SH波振动方向与其传播方向垂直,相比于Lamb波,具有更好的指向性,其主要在结构表面或近表面传播,且在特定频率范围内具有单一模态且非频散的特性^[3-5],在结构健康监测中具有巨大的应用潜力。

SH波的研究自20世纪末开始应用于无损检测及结构健康监测领域。近年来,随着传感器技术、信号处理方法以及计算能力的提高,SH波在检测技术中的深度和广泛性都得到了显著提升。Son等^[6]和Celorio等^[7]分别研究了SH波在层状压电介质和随机介质中的传播特性。Mi等^[8]通过有限差分模型模拟了SH波在浅层剪切波折射勘探中的传播和转换。Hrytsyna^[9]和Bharti等^[10]分别探讨了SH波在不均匀介质和周期性不规则表面结构对SH波传播的影响。钟芳桃等^[11]研究了SH波在不同角度、深度的裂纹上的反射及透射规律。代重阳等^[12]研究了SH波在覆冰碳纤维增强复合材料板中的传播特性,为结冰探测研究提供了理论基础。Wu等^[13]研究了SH波在电磁层中的传播,提供了超材料弹性波的理论参考。陈雪莲等^[14]利用沿套管轴向偏振、周向传播的准SH波,解决了传统声阻抗类声波仪器在低密度水泥胶结评价上的不适应性。孟凌霄等^[15]针对电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)在纤维缠绕储氢气瓶在线监测中回波信噪比低、洛伦兹力机制失效等问题,提出了基于编码压缩的贴附式电磁超声SH波检测方法,提高了缺陷波信噪比和检测分辨率。Dai等^[16]提出了一种利用圆柱SH波测量管道厚度的方法,为管道结构的健康监测开辟了新的可能性。

对于板结构中的SH波,Petcher等^[17-18]研究了SH波在微曲面铝板上的传播规律,为SH波在复杂结构中

的应用提供了理论依据,讨论了SH超声导波的模态混合问题,探索多种SH波模态的生成及其相互干扰问题。Lee等^[19]设计了能够生成非频散SH波的磁致伸缩贴片换能器,实现了对板结构中孔洞缺陷的检测。Rouge等^[20]研究了EMAT产生的SH波在焊接结构检测中的应用。Zhang^[21]利用近场动力学理论模拟SH导波在焊接中的传播。Castaings等^[22]通过有限元模型和对照实验,研究SH波检测板间粘接界面的性质变化,显示了SH0模态对界面粘接性质变化的高灵敏度检测。宋小春等^[23]研究了变厚度板中SH波的传播特性。

损伤概率分布成像法(reconstruction algorithm for probabilistic inspection of damage, RAPID)是结构损伤定位的重要手段,通过比较损伤前后的信号差异,能够监测结构的孔洞、裂缝、腐蚀等损伤。Zhao等^[24-25]分析了多种超声导波成像方式,证明了RAPID方法相比于其他成像方法,具有算法简单,无需提取飞行时间(time of flight, TOF)和结构先验知识等优势。吕灿等^[26]通过对信号相关系数、信号衰减系数、最大峰以及波速变化4种RAPID成像方法开展实验,确定信号相关系数具有最好的成像效果和鲁棒性。陶静雅等^[27]通过频散补偿及路径-波速映射法有效提升了RAPID成像损伤定位的准确率。Hu等^[28]提出了一种基于幅度方差的最佳基线匹配方法,以提高含液条件下RAPID成像精度。Ahmad等^[29]对不同入射角下SH波与缺口相互作用的散射波进行研究,利用方向可调SH波阵列磁致伸缩贴片传感器进行RAPID成像,实现了稀疏阵列的快速成像。Asokkumar等^[30]采用多特征融合方式对RAPID成像方法进行了改进,实现了无基线下的导波RAPID损伤成像。

RAPID成像方法基于损伤概率分布的加权计算,当输入信号具有高信噪比时,该方法能够提供高质量的成像效果并实现对损伤的准确定位。然而,当信号中存在背景噪声或信号干扰时,噪声的累积效应可能会导致损伤区域与非损伤区域之间模糊不清,从而降低损伤成像定位、分离的准确性。Abbassi等^[31]引入损伤位置概率权重,减轻传感器路径交叉点累计效应问题的影响,但对于交叉点累计效应的误差来源以及多缺陷成像,则没有进一步研究。

本文以SH波在薄板结构中的结构健康监测为对象,分析SH波在薄板结构中的传播特性,根据频散曲线选择合适的模态和监测频率,设计RAPID成像算法,并探究噪声干扰在成像过程中的叠加机理,基于此研究引入去噪因子的RAPID成像优化。通过钢板实验验证所提方法的有效性。

1 引入去噪因子的 SH 波损伤成像理论

1.1 SH 波传播特性

SH 波的基本传播机理可从固体介质的波动方程中派生出来。考虑各向同性且均匀的介质,其波动方程为:

$$(\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (1)$$

其中, λ 和 μ 分别是介质的拉梅常数和剪切模量, \mathbf{u} 是位移向量, ρ 是介质的密度。通过 Helmholtz 分解,这一波动方程可以被分解为纵波和横波两部分,而 SH 波属于横波的一种。

在 SH 波中,粒子的振动方向与波的传播方向垂直,且在传播过程中,其波速为

$$C_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

薄板结构能够高效地传导 SH 波,并且这些波在薄板中传播时能量损耗较少,当 SH 波遇到损伤时,即使损伤微小,其对波速和波形的影响也将被明显放大,因此,将 SH 波用于薄板结构检测具有较高的灵敏度。SH 波的频散特性对于超声波检测技术的设计和优化极为重要。通过建立针对特定材料的频散曲线,能够准确分析 SH 波的相速度和群速度变化,为检测系统的设计和优化提供理论支撑。

在不同材料中,SH 波的传播及其对损伤的敏感度有所不同,在探讨 SH 波对不同材料损伤的敏感度时,需考虑波在材料中的相互作用以及材料的固有特性。不同材料的机械属性,如密度、弹性模量和泊松比,会影响波的传播速度、衰减率以及在遇到界面和损伤时的行为。钢板的部分材料属性如表 1 所示。

表 1 钢板的相关材料属性

Table 1 Material properties related to steel plates

材料属性	符号	数值	单位
密度	ρ	7 850	kg/m ³
剪切模量	μ	80.77	GPa
杨氏模量	E	210	GPa
泊松比	ν	0.3	无量纲

根据式(2)计算,得到钢板的 C_T 约为 3 208 m/s,使用该速度可以进一步分析在不同频率下 SH 波的传播特性,结合波频率和板厚度,求解 SH 波频散曲线如图 1、2 所示。钢板的 Lamb 波频散曲线如图 3、4 所示。

频散曲线揭示了不同模式的波速随频率的变化。由

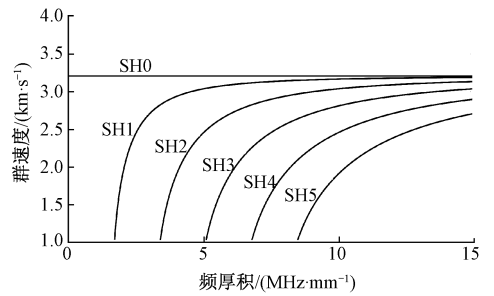


图 1 SH 波群速度频散曲线

Fig. 1 SH wave group velocity dispersion curve

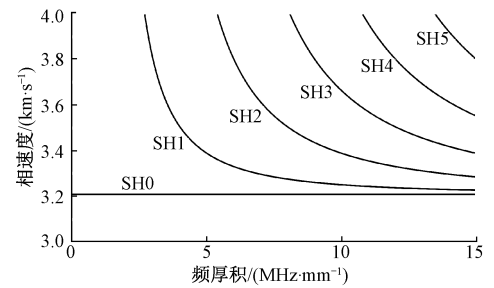


图 2 SH 波相速度频散曲线

Fig. 2 SH wave phase velocity dispersion curve

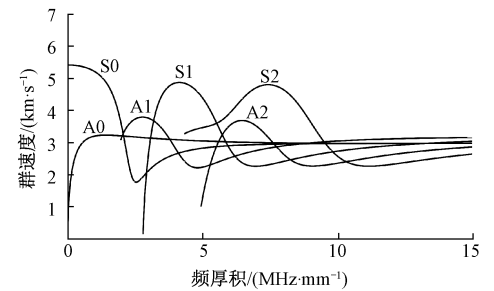


图 3 Lamb 波群速度频散曲线

Fig. 3 Lamb wave group velocity dispersion curve

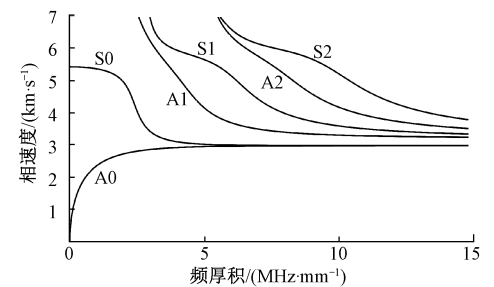


图 4 Lamb 波相速度频散曲线

Fig. 4 Lamb wave phase velocity dispersion curve

图 1~4 可知,Lamb 波具有频散特性,其波速会随频率而变化。频散会导致波速和波形随时间和距离变化,增加了信号分析的复杂性,并可能降低损伤检测的准确性。

相比于 Lamb 波及 SH 波的其他模态,SH0 模态具有非频散特性,这意味着其在传播过程中,SH 波的波速保持不变,从而降低了信号处理的复杂性,更利于信号的解析和损伤定位。

在异质材料或复合材料中,不同材料层或相异性会对波的传播产生影响。高阶模态如 SH1 或 SH2 模态能够提供更多关于材料异质性的信息,有助于分析和评估材料界面、层间连接等。

本文选用 SH0 模态,用于薄板结构的损伤检测。

1.2 RAPID 成像方法

物体内部的结构可以通过分析穿过该物体的射线的衰减来重建。在超声波层析成像中,这些“射线”即超声波路径,其幅值衰减或时间延迟反映了物体内部的结构特征。RAPID 成像基于测量信号与基线信号的信号差系数(signal difference coefficient, SDC)进行损伤概率分布计算^[32]。

在薄板表面布置超声波传感器阵列,用于接收穿过薄板的 SH 波。分别取薄板损伤前后每个传感器采集到的 SH 波信号,作为基准信号 s_x 和观测信号 s_y 。以基准信号 s_x 处理过程为例:

$$s'_x(t) = s_x(t) \otimes G(t) \quad (3)$$

其中, $s_x(t)$ 为原始信号, $s'_x(t)$ 为 SH 波的初至波信号, $G(t)$ 是设计好的窗函数滤波器,用于去除噪声的同时提取初至波信号, \otimes 表示为逐元素相乘,然后同样流程得到含损伤的钢板信号。对于激励传感器序号 i ,接收传感器序号 j 对应的传感器路径,定义信号相关系数为 ρ_{ij} ,则

$$\rho_{ij} = \frac{Cov(s'_x, s'_y)}{\sigma_{s'_x} \sigma_{s'_y}} \quad (4)$$

其中, $Cov(s'_x, s'_y)$ 为基准信号和测量信号之间的协方差, $\sigma_{s'_x}, \sigma_{s'_y}$ 为信号标准差。

信号差系数 SDC_{ij} 定义为

$$SDC_{ij} = 1 - \rho_{ij} \quad (5)$$

对于每对发射和接收传感器,计算它们与成像区域内成像点的距离函数为:

$$R_{ij}(x, y) = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} + \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} \quad (6)$$

其中, (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 分别是发射传感器 i 和接收传感器 j 的坐标, (x, y) 为计算成像点坐标。对于射线路径上的每个点,结合椭圆定位方法计算权重,以反映该点对成像的贡献程度:

$$w_{ij}(x, y) = \begin{cases} (\beta - R_{ij}(x, y)) / (\beta - 1), & R_{ij}(x, y) < \beta \\ 0, & R_{ij}(x, y) \geq \beta \end{cases} \quad (7)$$

其中, $w_{ij}(x, y)$ 为传感器路径 ij 在 (x, y) 点处的权重, β 为标定因子,用于控制成像区域的大小。

综合利用每对传感器之间的权重 $w_{ij}(x, y)$ 和信号差系数 SDC_{ij} 来重构成像区域的损伤概率分布图。成像结果是所有对传感器有效路径中任一点权重的加权和:

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N P_{ij}(x, y) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N w_{ij}(x, y) \cdot \overline{SDC_{ij}} \quad (8)$$

其中, N 为传感器总数, $\overline{SDC_{ij}}$ 为平均信号差系数,其计算公式为:

$$\overline{SDC_{ij}} = (SDC_{ij} + SDC_{ji}) / 2 \quad (9)$$

1.3 引入去噪因子的成像优化

RAPID 成像对多个传感器路径的损伤概率分布结果进行叠加,当传感器信号存在噪声干扰时,会导致传感器路径交叉区域的噪声进行累加,从而影响成像结果。

以薄板结构布置 3 个激励传感器与 3 个接收传感器为例进行说明,如图 5 所示,在靠近板中心位置存在多个传感器路径交叉区域,且在中心点 1 处交叉最多。进行成像运算时,SDC 结果会多次叠加,从而导致最终成像的高亮度区域集中在结构中心位置,损伤难以分辨和定位。

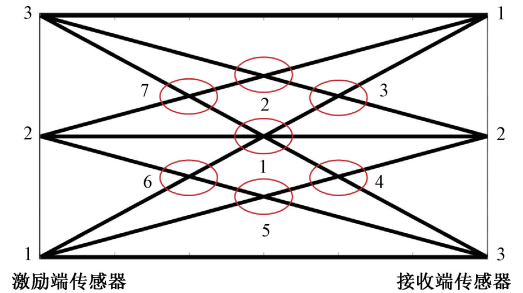


图 5 3 发-3 收传感器路径

Fig. 5 3 transmit-3 receive sensor paths

为减弱背景噪声影响,在 RAPID 成像中,引入去噪因子 η ,通过将含损伤信号产生的信号差系数与去噪因子产生的自相关信号差系数结合运算,降低传感器路径交叉点的噪声叠加效应。

去噪因子产生的自相关信号差系数表示为:

$$SDC_{ij_self} = 1 - \rho_{ij_self} + \eta_{ij} \quad (10)$$

其中, η_{ij} 为引入的去噪因子。根据 SH0 模态频散特性可知,当激励 SH0 模态时,接收传感器在一段时间后,接收到沿介质传播的导波信号,该信号到达前,接收传感器无导波信号接收,其信号波动可能由薄板变形、环境干扰、系统误差、人员操作等因素产生。因此,将 SH0 模态首个到达波前的信号作为背景噪声信号进行分析,基于此,将去噪因子定义为:

$$\eta_{ij} = \rho_{ij_n} \quad (11)$$

ρ_{ij_η} 为基准信号噪声与含损伤信号噪声的信号相关系数。

ρ_{ij_self} 为基准信号的信号自相关系数:

$$\rho_{ij_self} = \frac{Cov(s'_x, s'_x)}{\sigma_{s'_x} \sigma_{s'_x}} \quad (12)$$

将 SDC_{ij_self} 带入式 (8) 可获得去噪因子产生的自相关概率分布, 结果记为 P_η , 将损伤概率分布加权结果记为 P_{defect} , 则引入去噪因子的损伤概率分布结果为:

$$P_{\eta_defect} = \frac{P_{defect}(x, y)}{P_\eta(x, y)} \quad (13)$$

这样, 每个点的权重都会根据去噪因子 η_{ij} 进行调整, 以确保重建的图像能够更准确地反映实际的损伤情况, 同时减少背景噪声的影响。

1.4 基于局部峰值的损伤定位

引入去噪因子的成像优化虽然降低了噪声干扰引入的成像损伤干扰, 但像素级的去噪, 也导致了成像结果对比度的降低。为提高损伤的定位精度, 可采用图像阈值化的方式对成像进行进一步处理^[33-35]。但该方法在处理单个损伤成像结果时有效, 当被测物存在多个损伤时, 则可能导致损伤漏检。

未引入去噪因子时, 由于噪声干扰随损伤信号进行加权运算, 导致损伤区域与干扰混在一起, 无法判别局部峰值。对于引入去噪因子的损伤概率分布加权结果 P_{η_defect} , 其损伤区域会出现局部峰值, 基于局部峰值和自适应阈值的方法, 对成像结果进行进一步处理, 可实现损伤分离及多损伤定位。

对于每一个像素点 $P_{\eta_defect}(x, y)$, 其中心点的区域记为定义 $E, e(x', y')$ 为 E 中除中心点外的像素点。可通过如下方式遍历损伤成像结果寻找多个局部像素峰值。

$$M(x, y) = \begin{cases} P_{\eta_defect}(x, y), & P_{\eta_defect}(x, y) > e(x', y') \\ 0, & P_{\eta_defect}(x, y) \leq e(x', y') \end{cases} \quad (14)$$

图像中传感器的边缘会引入边缘峰值, 通过损伤峰值的形态学特征, 可进一步对局部像素峰值进行筛选。本文中, 考虑损伤的峰值形态是小区域中的孤立峰值点, 因此, 定义其形态特征满足如下矩阵:

$$se = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

根据形态学特征筛选的局部像素极大值, 可认为由损伤产生。直接使用局部像素极大值进行自适应阈值设计, 即可实现损伤的分离和多损伤检测。

2 损伤成像实验

2.1 实验件及实验方案

实验件采用一块 2 000 mm×6 000 mm×7 mm 的钢板。根据 SH 波频散曲线可知, 在较低频率下, SH0 能够以固定速度传播且不易发生模式转换, 基于此, 本文选择激励频率为 128 kHz 的磁致伸缩传感器进行实验。磁致伸缩传感器具有磁致伸缩效应, 能够有效地在板材中激发 SH 波。

在钢板的两端用导波耦合胶粘贴磁致伸缩带材, 并布置阵列传感器, 多通道超声采集系统激励传感器并采集接收传感器数据, 成像上位机获取采集结果并进行成像运算。实验设置及传感器的排布方式如图 6 所示。

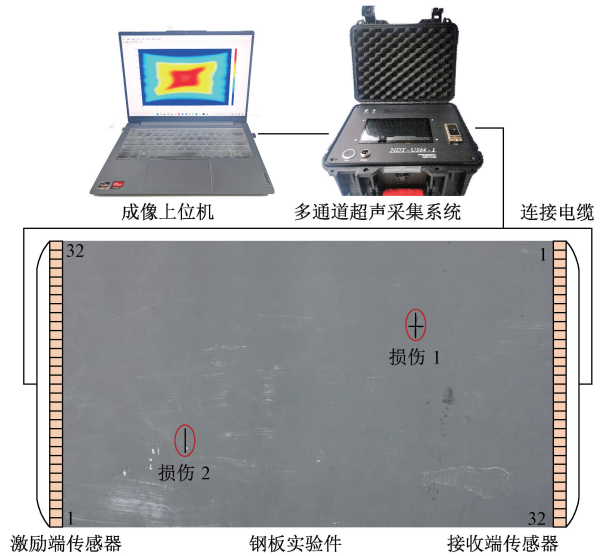


图 6 实验设置

Fig. 6 Experimental setup

损伤实验前, 首先进行基准信号采集, 按图 3 所示连接多通道超声采集系统和磁致伸缩传感器, 设置传感器激励信号为 5 个周期, 峰峰值电压 100 V, 中心频率 128 kHz 的正弦信号, 依次使能每个激励端传感器发送, 并采集所有接收端传感器的导波信号。

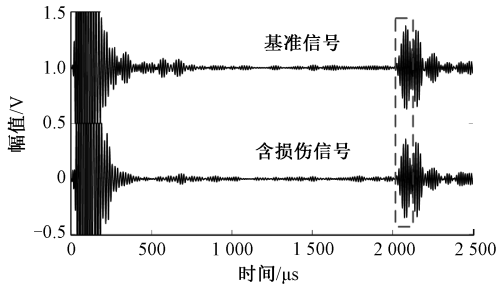
使用角磨机在钢板上加工十字形损伤和一字型损伤, 其表面形貌特征见图 6。

开展含损伤信号采集, 按图 6 所示连接多通道超声采集系统和磁致伸缩传感器, 设置传感器激励信号为 5 个周期, 峰峰值电压 100 V, 中心频率 128 kHz 的正弦信号, 设置信号采样率及采样深度, 依次使能每个激励端传感器发送, 并采集所有接收端传感器的导波信号。

2.2 成像结果及讨论

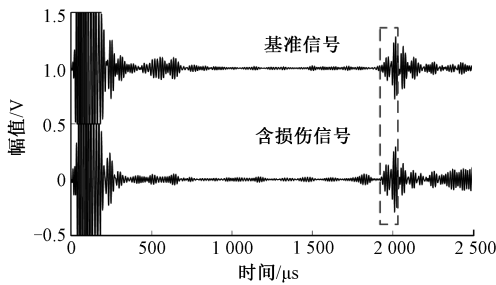
多通道超声采集系统输出的数据为 2×32×32 的信号

矩阵,其不同维度分别表示为基准信号/含损伤信号、激励传感器通道、接收传感器通道。其中,激励32-接收1的监测波形如图7(a)所示,激励32-接收32的监测波形如图7(b)所示,激励1-接收32的监测波形如图7(c)所示。



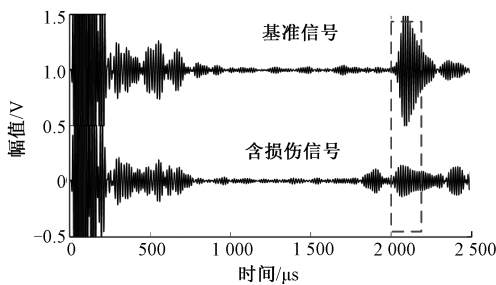
(a) 激励32-接收1的损伤监测波形

(a) Damage monitoring waveform for excitation-receive channel 32-1



(b) 激励32-接收32的损伤监测波形

(b) Damage monitoring waveform for excitation-receive channel 32-32



(c) 激励1-接收32的损伤监测波形

(c) Damage monitoring waveform for excitation-receive channel 1-32

图7 监测时域信号

Fig. 7 A-scan signal imaging results

图7中,各波形的SH波首个到达波时间与SH0波速计算获得的结果基本匹配。对信号差异性进行分析,图7(a)中激励32-接收1路径为钢板边缘路径,未穿过损伤1和损伤2区域,因此,SH0模态首个波包信号差异较小;图7(b)中激励32-接收32路径为钢板对角路径,该路径从损伤1和损伤2中间区域穿过,因此,SH0模态首个波包信号差异较小;图7(c)中激励1-接收32路径为钢板另一对角路径,该路径分别穿过损伤1和损伤2区域,因此,SH0模态首个波包信号差异明显。

基于各传感器激励-接收通道基准信号与含损伤信号差异,开展基于信号差系数的RAPID成像计算,成像结果如图8所示。

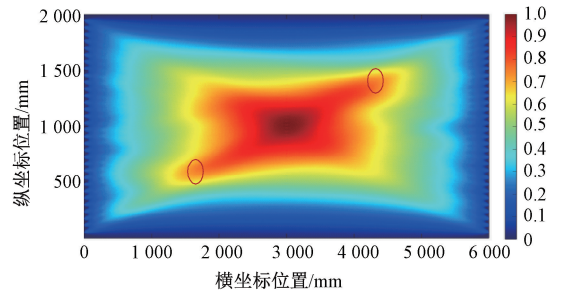


图8 基于信号差系数的RAPID成像结果

Fig. 8 RAPID imaging based on signal difference coefficient

图8中成像的高亮度区域主要集中于图像中间,并向坐标(0,0)和坐标(6000,2000)偏移。与真实损伤位置对比,可见成像虽然覆盖了真实损伤区域,但由于中心传感器路径交叉区域的干扰,损伤无法识别、定位与分离,从而导致在结构健康监测中,无法提供准确的损伤信息。

对图8进行自适应阈值处理,得到的结果如图9所示。

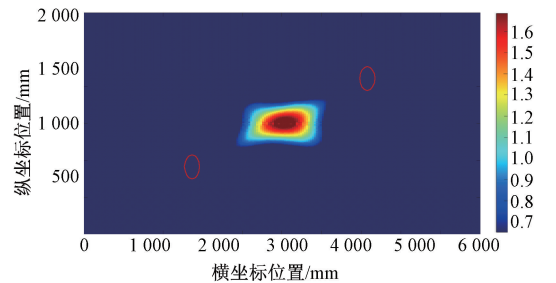


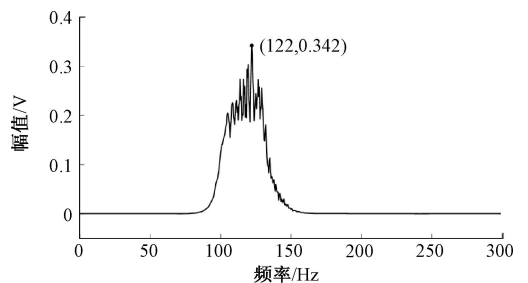
图9 阈值处理的RAPID成像结果

Fig. 9 RAPID imaging after threshold processing

可见,图9中仅中心出现高亮区域,而真实损伤区域无法识别,无法对损伤进行定位。

观察图7可知,信号中含有与SH波无关的干扰信号。对图7(c)激励-接收通道1-32的基准信号及含损伤信号进行傅里叶变换,得到信号的幅频曲线如图10所示。

可见,磁致伸缩传感器实际接收信号集中于122 kHz附近,难以通过简单的带通滤波器进行滤除。



(a) 激励-接收通道1-32基准信号幅频曲线
(a) Amplitude-frequency curve of baseline signal for excitation-receive channel 1-32

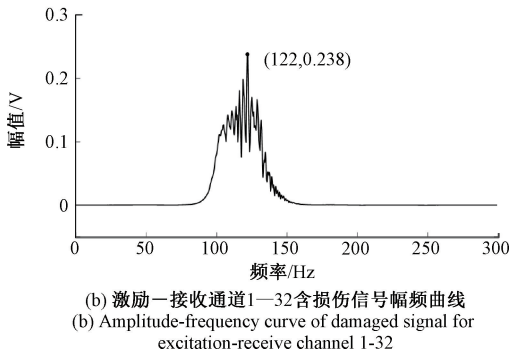


图 10 信号幅频特性曲线

Fig. 10 Signal amplitude-frequency characteristic curve

采用引入去噪因子的成像方法对 RAPID 成像结果进行优化。计算去噪因子产生的自相关概率分布结果如图 11 所示。

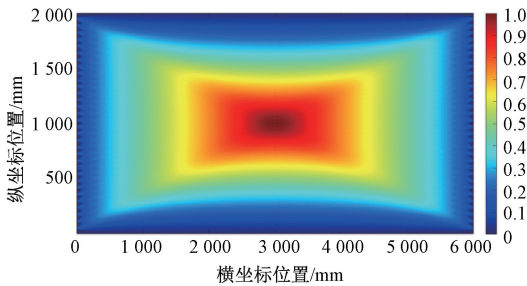


图 11 去噪因子的自相关概率分布

Fig. 11 Autocorrelation probability distribution of the denoising factor

可见,去噪因子的自相关概率分布结果表现为围绕中心区域递减,这是由于激励-接收通道传感器路径在中心区域交叉最多,并向四周逐渐减少。该结果进一步表明,RAPID 算法会强化激励-接收通道传感器路径交叉区域的噪声干扰。

结合去噪因子自相关概率分布结果与含损伤的概率分布结果进行计算,得到引入去噪因子的损伤概率分布结果如图 12 所示。

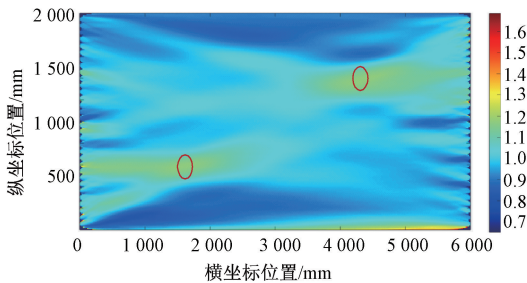


图 12 引入去噪因子的 RAPID 成像结果

Fig. 12 RAPID imaging with denoising factor

由图可见,引入去噪因子后,损伤成像结果主要集中于 2 个区域,分别对应了损伤所在的区域。观察非损伤区域的成像,可见其在中间多传感器路径交叉区域的亮度明显减弱,说明该方法有效降低了多传感器路径噪声干扰对成像的影响。

基于局部峰值的自适应阈值对成像结果进行进一步处理,获取的损伤成像结果如图 13 所示。

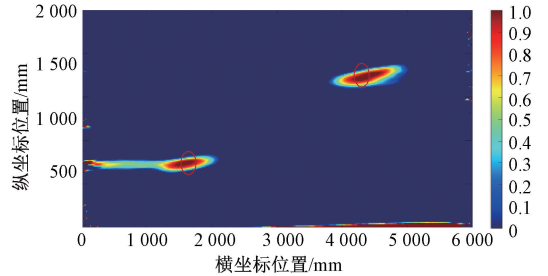


图 13 局部峰值及阈值处理后的损伤定位结果

Fig. 13 Damage localization results after local peak detection and threshold processing

可见通过形态学特征筛选局部像素峰值,能够有效提取损伤位置信息,基于局部峰值的阈值设计,能够对损伤区域进行分离与定位。

RAPID 成像及引入去噪因子的成像结果中,损伤检测结果对比如表 2 所示。其中,成像的损伤位置信息取损伤区域的局部峰值像素点位置。

表 2 成像结果对比

	损伤 1 位置/mm	损伤 2 位置/mm
实际损伤	(4 249, 1 398)	(1 589, 593)
RAPID 成像	无法定位	
引入去噪因子的成像	(4 430, 1 410)	(1 570, 590)
基于局部峰值的损伤定位	(4 430, 1 410)	(1 570, 590)

由表 2 可知,RAPID 成像仅检出了中心多路径交叉区域,无法对实际损伤进行检测;引入去噪因子的成像虽然能够通过进一步求局部峰值获取损伤位置信息,但成像边缘模糊,无法进行损伤分离,影响检测结果;基于局部峰值的损伤定位结果对多损伤区域进行了分离,对于损伤 1,其最大定位误差为 181 mm,对于损伤 2,其最大定位误差为 19 mm。损伤分离与定位结果能够较好地检测实际损伤信息。

实验结果表明,采用去噪因子优化后的成像结果,相较于未经处理的原始图像,能够更清晰地区分损伤区域和健康区域。在损伤区域,图像的对比度得到了显著提升,使得损伤区域更加鲜明,便于识别;在非损伤区域,背

景噪声和无关的干扰信号被有效地降低,使得损伤区域更加易于定位及分离。

3 结 论

本文分析了 SH 波在薄板结构中的传播特性,并开展了薄板结构的 RAPID 成像研究,针对薄板结构导波健康监测中噪声信号对 RAPID 成像结果的影响,通过引入去噪因子对成像进行优化,降低了干扰对成像结果的影响,提高了 SH 波损伤成像的精确度。

1) 分析了 SH 波在薄板结构中的传播特性,建立钢板的 SH 波频散曲线和 Lamb 波频散曲线,通过曲线分析,选取 SH₀ 模态,128 kHz 频率信号进行后续成像及实验。

2) 分析 RAPID 成像算法并开展引入去噪因子的成像优化研究,分析了噪声信号对成像结果的叠加机理,并引入去噪因子,采用含去噪因子的自相关概率加权结构对 RAPID 成像进行优化,从而降低噪声信号对成像结果的影响。

3) 针对像素级去噪导致成像对比度降低,且传统阈值算法无法实现多损伤检测的问题,设计了基于局部峰值的自适应阈值方法,结合损伤峰值的形态学特征,提取成像中的损伤峰值。

4) 使用磁致伸缩传感器在钢板上开展实验验证,分析时域信号差异,验证 RAPID 成像的基本原理,并基于时域信号信号相关系数进行 RAPID 成像。针对 RAPID 成像结果受噪声干扰而导致高亮区域集中于图像中间的问题,开展引入去噪因子的成像优化,并通过局部峰值与损伤阈值对成像结果进一步处理。实验结果表明,引入去噪因子的 SH 波成像优化能够对两个损伤区域进行识别,其定位精度高于未优化成像。该方法能够应用于复杂环境下的薄板结构损伤监测。

参考文献

- [1] CAPINERI L, BULLETTI A. Ultrasonic guided-waves sensors and integrated structural health monitoring systems for impact detection and localization: A review [J]. *Sensors*, 2021, 21(9): 2929.
- [2] 徐云飞, 孙永顺, 丁晓喜, 等. 基于 Lamb 波的数据传输与缺陷检测同步实现方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(3): 24-31.
XU Y F, SUN Y SH, DING X X, et al. A synchronous implementation method of data transmission and defect detection based on Lamb waves [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(3): 24-31.
- [3] 崔洪宇, 李德强, 李奔. 基于超声水平剪切波的加筋

- 板结构损伤识别 [J]. *无损检测*, 2021, 43(10): 12-18, 24.
- CUI H Y, LI D Q, LI B. Damage detection of stiffened panel structure based on ultrasonic SH wave [J]. *Nondestructive Testing*, 2021, 43(10): 12-18, 24.
- [4] JIANG C, LI W, DENG M. Systematic investigations on frequency mixing response of ultrasonic shear horizontal and Rayleigh Lamb waves [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2023: 10775463231196185.
- [5] WEN J W, JIANG C, CHEN H. High-precision corrosion detection via SH₁ guided wave based on full waveform inversion [J]. *Sensors*, 2023, 23(24): 9902.
- [6] SON M S, KANG Y J. Propagation behavior of SH waves in layered piezoelectric plates [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25(3): 613-619.
- [7] CELORIO M, CHALJUB E, MARGERIN L, et al. Propagation of 2-D SH waves in random media: Insights from ab initio numerical simulations and transport theory [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 1033109.
- [8] MI B B, XIA J H, XU Y X. Finite-difference modeling of SH-wave conversions in shallow shear-wave refraction surveying [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 119: 71-78.
- [9] HRYTSYNA O R. Influence of subsurface inhomogeneity on the propagation of SH waves in isotropic materials [J]. *Materials Science*, 2017, 53(2): 273-281.
- [10] BHARTI U, VAISHNAV P K, YAO S W, et al. The behavior of shear waves in the composite multi-material structure with the periodic asymmetric surfaces [J]. *Symmetry*, 2023, 15(2): 491.
- [11] 钟芳桃, 石文泽, 卢超, 等. 基于同步提取变换的钢轨踏面裂纹电磁超声表面 SH 波 B 扫成像检测研究 [J]. *铁道学报*, 2023, 45(6): 96-105.
ZHONG F T, SHI W Z, LU CH, et al. Study on B-scan imaging detection of rail tread crack with surface SH wave EMAT based on synchroextracting transform [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2023, 45(6): 96-105.
- [12] 代重阳, 陈智军, 王春涛, 等. 覆冰 CFRP 板中水平剪切波的传播特性 [J]. *无损检测*, 2022, 44(9): 52-57.
DAI CH Y, CHEN ZH J, WANG CH T, et al. Propagation characteristics of shear horizontal waves in ice-coated CFRP plate [J]. *Nondestructive Testing*,

- 2022, 44(9): 52-57.
- [13] WU ZH G, SHU H SH. Study on SH wave propagation in the elastic metamaterial layer [C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2566(1): 012007.
- [14] 陈雪莲, 唐晓明. 套管中周向传播准SH波的传播特征[J]. *石油学报*, 2020, 41(7): 895-902.
- CHEN X L, TANG X M. Propagation characteristics of quasi-SH waves propagating circumferentially in a casing[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(7): 895-902.
- [15] 孟凌霄, 石文泽, 卢超, 等. 基于编码压缩的纤维缠绕气瓶贴附式电磁超声检测方法研究[J]. *仪器仪表报*, 2023, 44(8): 82-99.
- MENG L X, SHI W Z, LU CH, et al. Research on the attached electromagnetic acoustic detection method of fiber-wrapped gas cylinder based on coded compression[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(8): 82-99.
- [16] DAI Z, LIU J, LONG Y, et al. Pipeline thickness estimation using the dispersion of higher order SH guided waves[J]. *Chinese Physics B*, 2024, 33(7): 074301.
- [17] PETCHER P A, BURROWS S E, DIXON S. Shear horizontal (SH) ultrasound wave propagation around smooth corners [J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(4): 997-1004.
- [18] PETCHER P A, DIXON S. Mode mixing in shear horizontal ultrasonic guided waves [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2017, 32(2): 113-132.
- [19] LEE J S, KIM H W, JEON B C, et al. Damage detection in a plate using beam-focused shear-horizontal wave magnetostrictive patch transducers [J]. *AIAA Journal*, 2010, 48(3): 654-663.
- [20] ROUGE C, LHEMERY A, SEGUR D. Modal solutions for SH guided waves radiated by an EMAT in a ferromagnetic plate [C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2012, 353(1): 012014.
- [21] ZHANG X L, XU ZH Y, YAO T, et al. The simulation of SH guided wave at weld by peridynamics theory [C]. 2019 Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT). *IEEE*, 2019: 100-104.
- [22] CASTAINGS M. SH ultrasonic guided waves for the evaluation of interfacial adhesion [J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(7): 1760-1775.
- [23] 宋小春, 文辉, 涂君, 等. 变厚度板中水平剪切波的传播特性分析 [J]. *中国机械工程*, 2020, 31(4): 417-424.
- SONG X CH, WEN H, TU J, et al. Propagation characteristics of SH wave in plates with variable thickness [J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(4): 417-424.
- [24] ZHAO X, ROYER R L, OWENS S E, et al. Ultrasonic Lamb wave tomography in structural health monitoring [J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(10): 105002.
- [25] 郑跃滨, 武湛君, 雷振坤, 等. 基于超声导波的航空航天结构损伤诊断成像技术研究进展 [J]. *航空制造技术*, 2020, 63(18): 24-43.
- ZHENG Y B, WU ZH J, LEI ZH K, et al. Research progress in damage diagnostic imaging of aerospace structures based on ultrasonic guided waves [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(18): 24-43.
- [26] 吕灿, 陈世利, 刘洋, 等. 手持式超声多通道系统设计与导波成像技术研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(11): 33-41.
- LYU C, CHEN SH L, LIU Y, et al. Design of hand-held multi-channel ultrasonic system and applications to ultrasonic guided wave imaging [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(11): 33-41.
- [27] 陶静雅, 袁慎芳. 基于频散补偿与路径-波速映射的损伤成像 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(4): 207-215.
- TAO J Y, YUAN SH F. Damage imaging method based on dispersion compensation and path-wave velocity mapping for complex composites [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(4): 207-215.
- [28] HU G, CHEN C, ZHOU S, et al. A study on defect tomographic imaging in pressure vessel with liquid medium [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2020, 142(4): 041601.
- [29] AHMAD M, LIU Z, BASIT A, et al. Quantification of defects in an aluminum plate using direction-tunable shear horizontal wave imaging [C]. *E3S Web of Conferences*, 2021, 233: 04030.
- [30] ASOKKUMAR A, RAISUTIS R, PASADAS D J, et al. Investigation of different features for baseline-free RAPID damage-imaging algorithm using guided waves applied to

- metallic and composite plates [J]. *Materials*, 2023, 16(23): 7390.
- [31] ABBASSI A, RÖMGENS N, DÖRPINGHAUS A, et al. A weighted correction of RAPID for precise damage localization in composites using guided waves and principal component analysis [C]. 11th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM), 2024, 29(10): 58286/29828.
- [32] ALBIRUNI F, LEE J, CHO Y, et al. Hybrid non-contact guided wave tomography for imaging of defects in plate-like structure using a probabilistic algorithm [J]. *American Institute of Physics*, 2010, 1211(1): 758-765.
- [33] 关立强, 祝伟光, 李义丰. Lamb波时间反转椭圆定位和层析成像混合技术研究[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2019, 55(2): 191-201.
GUAN L Q, ZHU W G, LI Y F. Research on hybrid techniques of time-reversal ellipse location and tomographic imaging of Lamb wave [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2019, 55(2): 191-201.
- [34] 吕伟, 文学, 付为刚, 等. 基于Lamb波和改进贝叶斯融合算法的CFRP边缘分层损伤分析[J]. *复合材料科学与工程*, 2024, (5): 114-120, 128.
LYU W, WEN X, FU W G, et al. Analysis of edge delamination damage of CFRP based on Lamb wave and improved bayesian fusion algorithm [J]. *Composites Science and Engineering*, 2024, (5): 114-120, 128.
- [35] 曾钰峻, 严刚, 芮鹏辉. 基于导波监测的复合材料加筋结构冲击后剩余强度预测[J]. *南京航空航天大学学报*, 2024, 56(1): 124-133.
ZENG Y J, YAN G, RUI P H. Prediction of residual strength of stiffened composite structure after impact with guided waves-based monitoring [J]. *Journal of Nanjing*

University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 56(1): 124-133.

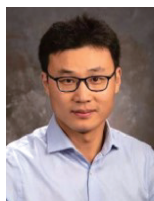
作者简介



Ying Xiao received his M.Sc. degree in 2015 from Northwestern Polytechnical University. Now he is a Ph.D. student in the School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main research interests include ultrasonic detecting instruments and high resolution imaging technology.



Wang Kaifeng (Corresponding author) received his Ph.D. degrees from Tianjin University in 2014. He is currently an associate professor at Tianjin University. His main research interests include material characterization and advanced manufacturing technology.



Liu Yang received his Ph.D. degrees from Pennsylvania State University in 2014. He is currently a professor at Tianjin University. His main research interests include sound field theory, ultrasonic sensors, and ultra-high resolution imaging technology.

营笑, 2015年于西北工业大学获得硕士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生, 主要研究方向为超声检测仪器及高分辨率成像技术。

E-mail: yingxx@tju.edu.cn

王凯峰(通信作者), 2014年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学副教授, 主要研究方向为材料表征分析及先进制造工艺技术。

E-mail: wangkf@tju.edu.cn

刘洋, 2014年于美国宾夕法尼亚州立大学获得博士学位, 现为天津大学教授, 主要研究方向为声场理论、超声传感器及超高分辨率成像技术。

E-mail: ultrasonicslab@tju.edu.cn