

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230207002

文章编号: 1672-9331(2024)06-0096-08

引用格式: 向昊南, 徐晓强, 胡宏伟, 等. 基于小波包优化的板件结构损伤概率成像研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(6): 96-103.

Citation: XIANG Haonan, XU Xiaoqiang, HU Hongwei, et al. Research on damage probability imaging based on wavelet packet optimization in plate structures[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(6): 96-103.

基于小波包优化的板件结构损伤概率成像研究

向昊南, 徐晓强, 胡宏伟, 吕铎

(长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】探讨由于试验环境和试验设备而产生的噪声对Lamb波信号缺陷成像定位精度的影响。【方法】结合仿真与试验,将在板件中采集到的Lamb波信号运用小波包分解与重构方法获得激励频率范围内的Lamb波重构信号,优化信号差异系数对损伤的敏感性。【结果】在Lamb波信号重构后,板件实际损伤位置的概率值更高,且高概率值区域更贴近损伤位置。【结论】对Lamb波信号进行小波包分解与重构后,与原始信号的损伤概率成像图相比,发现结合重构信号的损伤概率成像有效地实现了板中损伤的定位,并提高了成像的定位精度和成像对比度。

关键词: Lamb波; 噪声; 小波包分解; 信号差异系数; 损伤概率成像

中图分类号: U466; TB559

文献标志码: A

Research on damage probability imaging based on wavelet packet optimization in plate structures

XIANG Haonan, XU Xiaoqiang, HU Hongwei, LYU Duo

(College of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] This paper aims to explore the influence of noise generated by experimental environments and experimental equipment on the positioning accuracy of defect imaging by Lamb wave signal. [Methods] In order to optimize the sensitivity of the signal difference coefficient to the damage, the Lamb wave signal sampled in the plate was decomposed and reconstructed by a wavelet packet to get the reconstructed Lamb wave signal in the excitation frequency range by combining simulation and experiment. [Findings] After the Lamb wave signal is reconstructed, the probability value of the real damage location of the plate is higher, and the range with a high probability value is closer to the damage location. [Conclusions] After the Lamb wave signal is decomposed and reconstructed by a wavelet packet, compared with the damage probability imaging of the original signal, it is found that damage probability imaging considering reconstructed signals can effectively locate defects in the plate, with improved positioning accuracy and contrast ratio of imaging.

收稿日期: 2023-02-07; 修回日期: 2023-02-28; 接受日期: 2023-03-12

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2022GK2058)

通信作者: 徐晓强(1989—)(ORCID: 0000-0002-1222-1391), 男, 讲师, 主要从事机械动态信号处理、无损检测方面的研究。E-mail: xiaoqiangxu@csust.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

Key words: Lamb wave; noise; wavelet packet decomposition; signal difference coefficient; damage probability imaging

Foundation item: Project (2022GK2058) supported by Hunan Provincial Key R&D Program

Corresponding author: XU Xiaoqiang (1989—)(ORCID: 0000-0002-1222-1391), male, lecturer, research interest: mechanical dynamic signal processing, non-destructive testing. E-mail: xiaoqiangxu@csust.edu.cn

0 引言

在常见的工程结构如管道、风机叶片、飞机机身、压力容器等薄壁结构中,通常需要开展健康监测^[1-2],以满足工程设备服役期间的可用性和安全性需求,因此结构健康监测逐渐获得了越来越多的关注。在结构中布置传感器进行周期性采样,获得结构响应信号,以实时监测结构早期可能出现的破坏,或者评估结构当前的健康状况,并针对分析结果,给予及时反馈或维护,可以有效避免重大事故的发生。而基于Lamb波的导波传播技术具有低衰减、高敏感等优点,可以满足结构健康监测的要求^[3-6]。

Lamb波是由倾斜入射到薄板中的声波产生的沿薄板延伸方向传播的一种波形,其在传播时整个薄板厚度内的质点均产生振动,同时Lamb波还具有多模态^[7-10]等特性。Lamb波传播时的速度与体波不同,其相速度^[11]和群速度会随着频厚积变化而变化。在开展板件成像检测时,需要提取与缺陷相互作用的部分信号,然后评估其特征参数的变化,从而开展缺陷定位工作。而Lamb波的信号较为复杂,解析时存在一定的难度,这对板件的缺陷成像带来了一定的挑战。

HAY等^[12]基于计算机断层扫描(computed tomography, CT)提出了损伤概率成像方法(reconstruction algorithm for the probabilistic inspection of damage, RAPID),该方法主要是基于信号差异系数(signal difference coefficient, SDC)来获取结构变化的,该系数可以获得Lamb波基准信号与当前Lamb波状态信号之间超声特征参数的差异,然后结合该系数重构出各像素点的损伤概率值,从而在成像区域获得关于损伤概率值的图像;ZHAO等^[13]基于RAPID对飞机机翼上的铆钉的腐蚀开展了结构健康监测研究,发现该方法能够利用Lamb波监测到机翼上铆钉附近产生的裂纹;WANG等^[14]、SHEEN等^[15]研究了不同传感器布局和可变形参数 β 对损伤概率成像质量的影

响;GONZALEZ-JIMENEZ等^[16]则针对RAPID的概率分布不均匀等问题提出寻找成像图中像素点概率值重复覆盖的次数,然后相应地降低概率值,以提高成像质量;AZUARA等^[17]则提出使用形状函数来解决分布不均匀的问题;LIU等^[18]、夏小松等^[19]研究了无基准RAPID,缩短了前后两次信号采集时间间隔,这降低了环境变化所带来的误差,但对传感器提出了更高的要求,且成像比较费时。然而,在开展上述检测的过程中,Lamb波信号会不可避免地受到干扰^[20],从而导致即使在无损伤的传感器路径上,SDC值也会较大。因此,为了降低客观因素对成像质量的影响,防止伪高概率值区域出现,需要减少Lamb波信号中诸如噪声等干扰因素。

本文在RAPID的基础上,使用了基于小波包分解与重构的信号处理方法对测试信号进行预处理,优化了SDC对损伤的敏感性,提高了损伤的定位精度,并通过仿真和试验对提出方法进行了验证。

1 RAPID

在检测过程中,传感器包围的区域为检测区域,采用RAPID可以重构出检测区域中每一像素点存在缺陷的概率。通过算法中分布函数将每个传感器路径的SDC值映射到成像区域中,然后再将所有传感器路径在成像区域中映射的概率值进行叠加,从而获得成像区域中损伤的存在概率。成像区域中每一点的概率值定义为^[13]

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, i \neq j}^N p_{ij}(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, i \neq j}^N S_{ij} \left[\frac{\beta - R_{ij}(x, y)}{\beta - 1} \right] \quad (1)$$

式中: N 为传感器数量; $p_{ij}(x, y)$ 为每一像素点的损伤概率值; S_{ij} 为损伤指数; β 为形状参数,决定了分布函数的监测范围,即椭圆边界受形状参数 β 控制; $R_{ij}(x, y)$ 为分段函数,定义为

$$R_{ij}(x, y) = \begin{cases} D_{ij}(x, y) & D_{ij}(x, y) < \beta \\ \beta & D_{ij}(x, y) \geq \beta \end{cases} \quad (2)$$

式中: $D_{ij}(x, y)$ 为分布函数,其定义为

$$D_{ij}(x, y) = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} + \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}}{\sqrt{(x_i-x_j)^2 + (y_i-y_j)^2}} \quad (3)$$

式中: x, y 分别为检测区域中像素点的横、纵坐标; x_i, y_i 分别为激励传感器*i*位置的横、纵坐标; x_j, y_j 分别为接收传感器*j*位置的横、纵坐标。

据式(3)可知,分布函数是一个椭圆,两个传感器分别位于椭圆的两个焦点上,如图1所示。两个焦点的连线为直接路径,处于该连线上的像素点的概率值为1。随着像素点往边缘延伸,图1中间接路径上每一像素点的概率值逐渐减小,椭圆边界及其以外的区域像素点的概率值均为0。

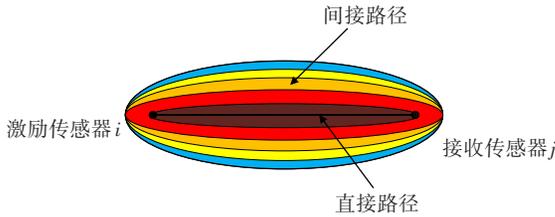


图1 椭圆分布函数示意图

Fig. 1 Elliptical distribution function

2 基于小波包优化的SDC

2.1 SDC的定义

假定两个传感器之间的结构没有变化,则其相对应的Lamb波也不会发生变化。一般在安装传感器之后立即获取信号,并称之为基准信号,在开展检测时采集到的信号则被称为当前状态信号。用SDC可进行当前状态信号与基准信号之间的统计比较,它是一个结构变化指标,可通过下式来定义:

$$S = 1 - \rho \quad (4)$$

式中: S 为信号差异系数(SDC)值; ρ 为Pearson相关系数。在统计学中用 ρ 度量变量 X 和 Y 之间的相关性,其定义为

$$\rho = \frac{C_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (5)$$

$$C_{XY} = \sum_{k=1}^K (X_k - \bar{X})(Y_k - \bar{Y}) \quad (6)$$

$$\sigma_X \sigma_Y = \sqrt{\sum_{k=1}^K (X_k - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{k=1}^K (Y_k - \bar{Y})^2} \quad (7)$$

式(5)~(7)中: C_{XY} 为变量 X 和 Y 之间的协方差; K 为

变量的长度; \bar{X} 和 \bar{Y} 分别为变量 X 和 Y 的平均值; σ_X 和 σ_Y 分别为变量 X 和 Y 的标准差。

因此,变量 X 和 Y 分别为从传感器中获取的Lamb波信号。 X 为基准信号; Y 为当前状态信号。将这两段信号进行统计比较,即可得到一对传感器间的SDC,该系数取值范围为0~1。

2.2 小波包分解与重构方法

小波包分解^[21]能够将信号分解为特定的频率范围,每一层分解都包含特定的频带信息。根据激励信号的中心频率,Lamb波的频率也应该集中在该频率范围内。通过小波包分解与重构,能够提取对应频率范围内的信号并对其进行重构,从而获得特定频率范围的信号。

每一次分解都可以理解为是一次低通或高通滤波过程,可使信号在频率上达到比较精细的程度。原信号进行3次分解得到的分解树如图2所示,图中I为原信号,L为低频部分,H为高频部分,序号是小波包分解层数。

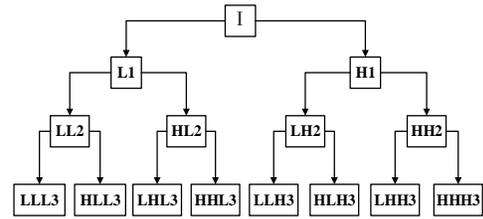


图2 小波包分解树

Fig. 2 Wavelet packet decomposition tree

基于小波包分解树,小波分解节点数分别对应不同的频率范围,根据激励信号的频率找到对应的小波分解节点数,即可获得与原始信号长度相同的重构信号。

Lamb波在传播过程中容易受到内部和外部的干扰,这会对后面的信号分析产生很大的影响。这些干扰会产生高频率的信号成分,而小波包分解可将高频分量和低频分量进行分解,从而将低频的Lamb波模态与高频噪声区分开,进而提高信号的时间分辨率。

图3所示为小波包分解前后的频谱,图中原始激励信号的中心频率为300 kHz。从图3可以看出,在小波包分解前,除激励频率带以外,还存在其他幅值较高的频率,这些频率成分可能是采集系统受环境噪声和试验设备误差的影响而产生的。在损伤检测中,只需要使用与激励频率相同的频带进行分析,故将其他的频率成分滤除。为了提高信号的可读性,有必要去除其他频率成分,

因此选用滤波性能较好的“dB7”小波基,其分解层数为8层,并选用激励频率带所在的频带。在进行小波包分解与重构后,可以明显观察到激励频率以外的其他频率成分的幅值有所降低。

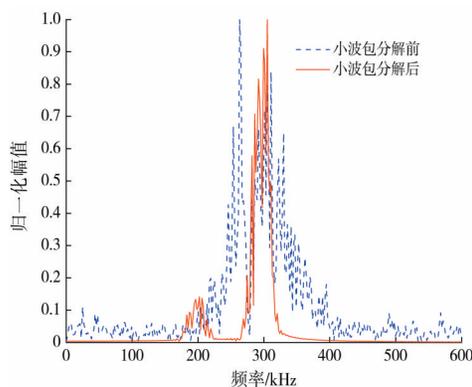


图3 小波包分解前后的频谱

Fig. 3 Spectra before and after wavelet packet decomposition

2.3 基于小波包分解与重构的SDC计算

根据式(4)计算信号差异系数,分析传感器路径上基准信号与当前状态信号之间的差异,监测是否出现结构变化,如孔洞等缺陷。在进行信号差异系数计算时,需要找到合适的位置对基准信号和当前状态信号进行截断。一般来说,原始激励信号通常使用的是5周期的汉宁窗正弦调制波。

根据原始激励信号的长度,可得到 S_0 模态和 A_0 模态在整段信号中的长度范围。根据频散曲线可以得到 S_0 模态和 A_0 模态的群速度,以激励频率300 kHz,铝板厚1 mm为例,该300 kHz激励频率下的1 mm厚的铝板群速度如图4所示。

基于传感器之间的距离,可以计算出各模态的传播时间,然后根据上述原始激励信号的长度进行截断,并计算出基准信号和当前状态信号的SDC,如图5所示。

对基准信号和当前状态信号运用2.2节提到的小波包分解,因为不同时刻采集到的信号受噪声影响的程度有所不同,且噪声通常为高频信号,而激励信号的频率与噪声的相比较小,因而可直接将噪声与激励信号在频率范围内区分开。因此,采用小波包分解原始信号,可以减少噪声等因素的影响,从而获得在激励频率范围内与之相对应的Lamb模态。接着,对激励频率段的信号进行重构,对重构信号运用图5所示的信号截断方法进行截断,计算基准信号和当前状态信号截断部分的SDC,从而获得一对传感器路径在结构健康监

测中的SDC。

与常用的SDC计算方法相比,该方法基于小波包分解原始信号,并进行重构,可以获得更好的结果。其具有以下优点:1)能够在频率范围内提取与激励频率相近的信号,降低了其他因素的影响;2)可根据各模态的速度和传感器之间的距离,获得各模态的传播时间,从而截断出相对应的模态并计算其SDC。

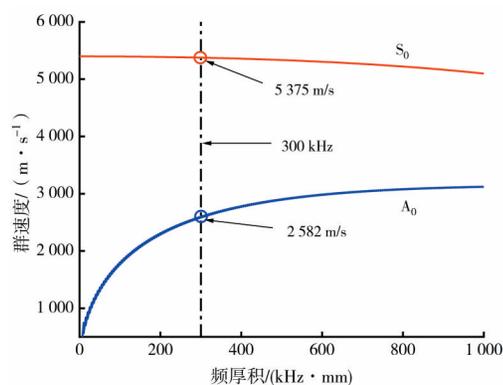


图4 1 mm厚群速度频散曲线

Fig. 4 Dispersion curves of group velocity at 1 mm thickness

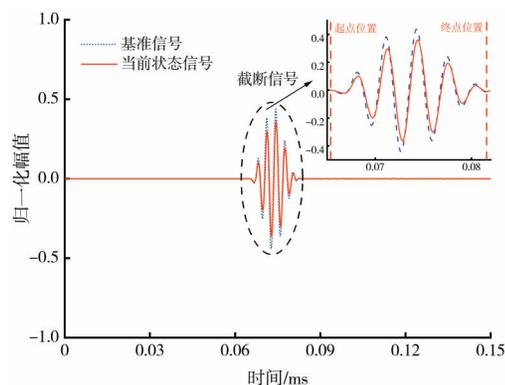


图5 激励信号的截断过程

Fig. 5 Truncation process of excitation signal

3 仿真分析与试验验证

3.1 传感器的布置与 β 值的选取

根据式(3)所示的分布函数可知,在用RAPID成像时会将各个传感器在检测区域中分布的概率值进行叠加,所以在两对传感器感知路径的交点处,其概率值总是最大的,而在传感器对数量较少的情况下,会出现不能正确定位损伤的情况。

因此,该算法会受到传感器布局数量的影响。在同样的检测区域中,交点越多、传感器路径越密集的传感器布局更容易检测出缺陷。而传感

器数量需要考虑经济性和检测效率,可以适当地增加传感器的数量,但过多则会造成浪费,同时还会增加检测的操作难度。常见的传感器布局方式有圆形、方形和平行线性。在传感器数量相同的情况下,圆形布局方式(图6)下传感器的路径更为密集,且传感器路径中的交点更多,空白区域更少,因此其检测能力更强。

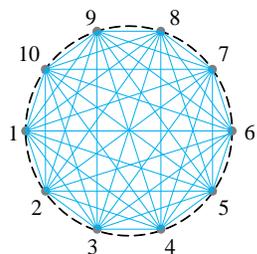


图6 圆形传感器阵列结构及传感器路径

Fig. 6 Circular sensor array structures and paths

形状参数 β 会影响传感器对的最大有效检测面积,即椭圆分布函数包裹的范围。 β 一般大于1,但不宜过大,过大会使成像精度降低; β 也不宜过小,过小会使有效检测面积太小,无法成像。实际的大小需要根据传感器数量和成像范围来确定。

3.2 仿真分析

本文在仿真软件 COMSOL Multiphysics 上进行有限元建模,计算机的处理器为8核16线程,主频为2.3 GHz,运行内存为16 GB,运行环境为Windows 11系统。检测对象为厚1 mm的均质铝板。以试件中心为有限元建模中心,仿真模型如图7所示,图中虚线大圆为检测区域,通孔缺陷的半径为8 mm,使用8个压电晶片布置成传感器网络。各压电晶片的坐标见表1。

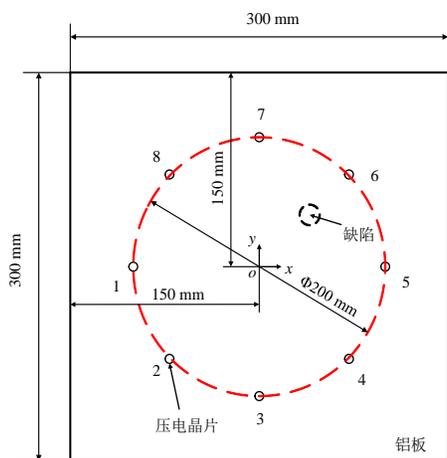


图7 仿真模型示意图

Fig. 7 Simulation model

表1 压电晶片及缺陷在板中的坐标位置

Table 1 Position of piezoelectric crystal plate and defects in plate

名称	x/mm	y/mm
压电晶片1	-100.0	0.0
压电晶片2	-70.7	-70.7
压电晶片3	0.0	-100.0
压电晶片4	70.7	-70.7
压电晶片5	100.0	0.0
压电晶片6	70.7	70.7
压电晶片7	0.0	100.0
压电晶片8	-70.7	70.7
缺陷	40.0	40.0

原始激励信号为2.3节提到的5周期汉宁窗正弦调制波,中心频率为300 kHz,最小网格单元可根据 S_0 模态的相速度 c_p 和中心频率 f 计算得到,即 $c_p/(5f)$,设置时间增量步长为64 ns,时间步长为0.32 ms。本次仿真通过去除模型中的单元格来模拟实际缺陷,且铝板的4个边界均为自由边界。

对于8个探头圆形布置的传感器阵列,共有56条传感器路径。但因为这些传感器路径是对称分布的,所以有28条重复路径。为了提高SDC计算的可靠性,故选择所有的传感器路径进行计算和成像。为了检验优化方法在不同噪声场合下的适用性,对每一组仿真数据加上不同强度的噪声,即分别加入了-5、3 dB的噪声。根据每对传感器路径的基准信号和当前状态信号可以计算出一个SDC,再运用RAPID获得概率成像图,如图8所示,图中的小圆圈为前面提到的通孔缺陷。其中,图8(a)、8(c)为加入不同强度噪声后的原始成像图,随后获得每一组数据基于小波包分解与重构后的SDC,并计算出小波包分解与重构后的概率成像图,如图8(b)、8(d)所示。从图8中可以清晰地看到,在未经小波包分解与重构的图像中,高概率值区域更加分散,且面积较大,缺陷定位精度不高;而在小波包分解与重构的图像中,高概率值区域更集中,且缺陷处的对比度也更高。图8中缺陷的实际位置为(40 mm, 40 mm),而所预测的损伤位置为概率最大处。通过计算,图8(a)中所预测的损伤位置的相对距离误差为41.72 mm,成像区域的大小为240 mm×240 mm,因此可计算出相对误差为12.3%。在小波包处理后,图8(b)中所预测的损伤位置的相对距离误差为14.84 mm,相对误差为4.4%,成像误差降低了7.9个百分点。图8

(c)的相对误差为 15.9%,图 8(d)的相对误差为 7.3%,所以在小波包分解与重构后成像误差减小了 8.6 个百分点。因此,基于小波包分解与重构后的 RAPID 成像图可以获得更精确的成像图,提高了缺陷定位精度。

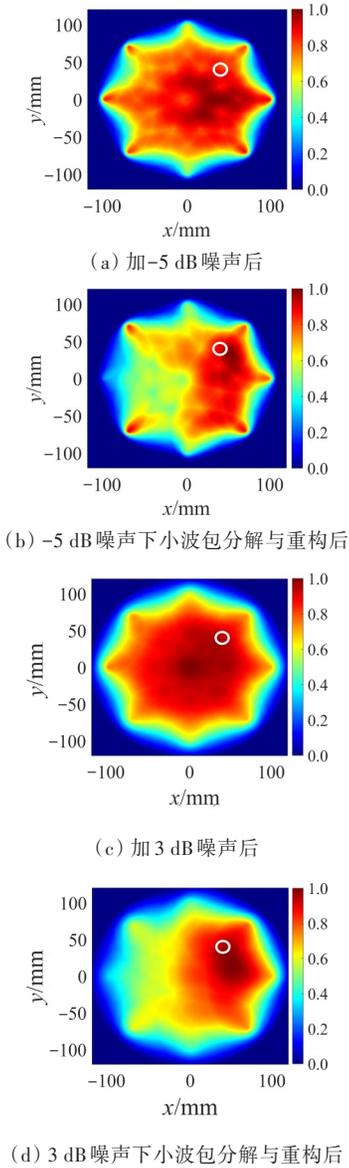


图 8 RAPID 成像结果对比
Fig. 8 RAPID imaging results comparison

3.3 试验研究

3.3.1 试验系统

图 9 为基于 RAPID 成像搭建的试验系统示意图。图中 PC 为一台带有控制软件的计算机;任意函数发生器为 Tektronix 公司的 AFG2021 型信号发生器,该仪器能通过电脑软件生成任意波形信号;前置功率放大器为 RF Power Amplifier 2100L,可以将信号进行 50 dB 增益;数据采集卡为 Spectrum

公司的 M4i-4420 高速采集卡。压电陶瓷阵列通过环氧树脂 AB 胶粘在铝板上。

铝板试件长 1 000 mm,宽 1 000 mm,厚 1 mm。压电陶瓷阵列的直径为 200 mm,如图 9 中虚线大圆所示。虚线矩形框为 240 mm×240 mm 的成像区域,阵列中心为图中 O 点,位于铝板的中心位置。

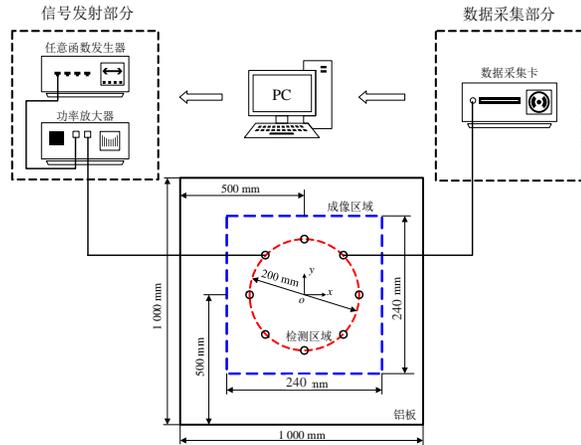


图 9 基于 RAPID 成像的试验系统示意图

Fig. 9 Experimental system for RAPID-based imaging

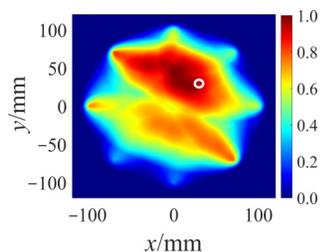
3.3.2 试验成像结果

本文采用底部直径为 10 mm 的圆柱体来模拟实际缺陷。由于圆柱体黏接在铝板上,Lamb 波通过圆柱体会减小振幅,所以可以用圆柱体来模拟缺陷。用环氧树脂 AB 胶将圆柱体固定在铝板表面,固定位置的中心坐标为(29.7 mm,29.7 mm)。8 个压电陶瓷阵列总共形成 56 条传感器路径。先计算出每条路径对应的 SDC,再根据 RAPID 生成概率成像图,如图 10 所示。

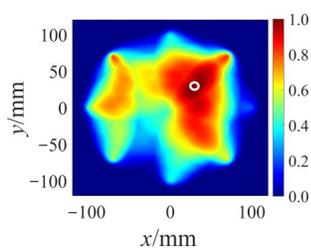
从图 10 可以看出:使用传统的 RAPID 进行成像时,由于受到其他因素的影响,成像区域中的高概率值区域较大,且缺陷位于高概率值区域的边缘;而在进行小波包分解与重构后,缺陷位于高概率值区域中心,且缺陷处的概率值较高。图 10(a)和图 10(b)中的实际缺陷位置均为(29.7 mm,29.7 mm),而图 10(a)中的预测损伤位置的相对距离误差为 29.4 mm,计算出相对误差为 8.7%,而图 10(b)中的预测损伤位置的相对距离误差为 5.3 mm,计算出其相对误差为 1.6%。因此,对信号进行小波包分解与重构后,成像对比度更高,成像定位精度也更高。

图 11 为采用不同 β 的基于小波包分解与重构后的成像图。从图 11 可以看出:当 $\beta=1.05$ 时,有效检测面积太小,成像区域内会出现传感器路径未

覆盖的区域,从而导致定位不准确;而当 $\beta=1.40$ 时,高概率值的区域较大,成像对比度较低,成像质量也有所降低;而当 β 为1.10~1.25时,可以弥补上述 β 值的不足,获得了更高的定位精度。



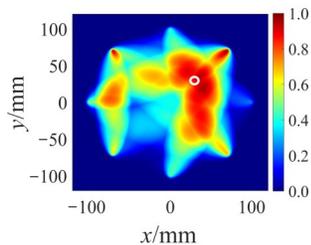
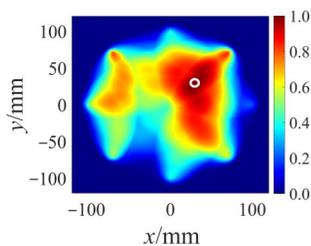
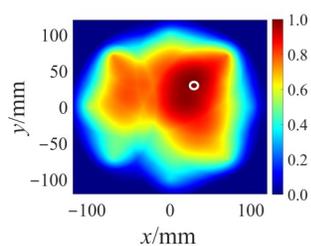
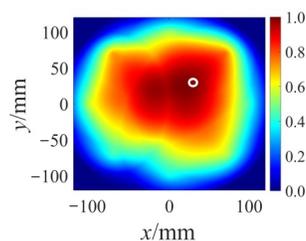
(a) 传统 RAPID 成像图



(b) 小波包分解与重构后的成像图

图 10 RAPID 成像图对比

Fig. 10 RAPID imaging results comparison

(a) $\beta=1.05$ (b) $\beta=1.10$ (c) $\beta=1.25$ (d) $\beta=1.4$ 图 11 不同 β 值的成像结果Fig. 11 Imaging results at different β values

4 结论

本文研究了基于小波包优化的损伤概率成像方法,该方法减弱了原始信号中如噪声和设备误差等干扰的影响,优化了SDC对损伤的敏感性。通过提取基准信号与当前状态信号中相同范围的直达波来计算SDC,并分析了传感器布置与不同传感器路径下的形状参数 β 对成像的影响,然后选择了适合8个传感器阵列的 β 值进行成像。仿真和试验结果表明,该方法能够有效降低噪声的影响,提高成像对比度,同时提高缺陷定位精度,更准确地确定损伤范围。

[参考文献]

- [1] DEGHAN-NIRI E, SALAMONE S. A multi-helical ultrasonic imaging approach for the structural health monitoring of cylindrical structures [J]. Structural Health Monitoring, 2015, 14 (1) : 73-85. DOI: 10.1177/1475921714548937.
- [2] RÉBILLAT M, MECHBAL N. Damage localization in geometrically complex aeronautic structures using canonical polyadic decomposition of Lamb wave difference signal tensors [J]. Structural Health Monitoring, 2020, 19 (1) : 305-321. DOI: 10.1177/1475921719843453.
- [3] GIURGIUTIU V. Tuned Lamb wave excitation and detection with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2005, 16 (4) : 291-305. DOI: 10.1177/1045389x05050106.
- [4] BAGHERI A, LI K Y, RIZZO P. Reference-free damage detection by means of wavelet transform and empirical mode decomposition applied to Lamb waves [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2013, 24 (2) : 194-208. DOI: 10.1177/1045389x12460433.
- [5] RAGHAVAN A, CESNIK C E S. Review of guided-

- wave structural health monitoring [J]. *The Shock and Vibration Digest*, 2007, 39 (2) : 91-114. DOI: 10.1177/0583102406075428.
- [6] QING X L, LI W Z, WANG Y S, et al. Piezoelectric transducer-based structural health monitoring for aircraft applications [J]. *Sensors*, 2019, 19 (3) : 545. DOI: 10.3390/s19030545.
- [7] LEONARD K R, HINDERS M K. Multi-mode Lamb wave tomography with arrival time sorting [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, 117(4 Pt 1) : 2028-2038. DOI: 10.1121/1.1867792.
- [8] THOMPSON D O, CHIMENTI D E. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation [M]. Boston: Springer, 1999: 151-158.
- [9] ALLEYNE D N, CAWLEY P. The interaction of Lamb waves with defects [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1992, 39(3) : 381-397. DOI: 10.1109/58.143172.
- [10] 刘增华, 何存富, 吴斌, 等. 利用兰姆波对板状结构中隐蔽腐蚀缺陷的检测 [J]. *实验力学*, 2005, 20 (2) : 166-170. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888. 2005. 02.002.
LIU Zenghua, HE Cunfu, WU Bin, et al. Hidden corrosion detection in plate-like structure using Lamb waves [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20(2) : 166-170. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888. 2005. 02.002.
- [11] ZENG L, CAO X W, HUANG L P, et al. The measurement of Lamb wave phase velocity using analytic cross-correlation method [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 151 : 107387. DOI: 10.1016/j.ymsp.2020.107387.
- [12] HAY T R, ROYER R L, GAO H D, et al. A comparison of embedded sensor Lamb wave ultrasonic tomography approaches for material loss detection [J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15 (4) : 946-951. DOI: 10.1088/0964-1726/15/4/007.
- [13] ZHAO X L, GAO H D, ZHANG G F, et al. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. defect detection, localization and growth monitoring [J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16 (4) : 1208-1217. DOI: 10.1088/0964-1726/16/4/032.
- [14] WANG S L, WU W R, SHEN Y P, et al. Influence of the PZT sensor array configuration on Lamb wave tomography imaging with the RAPID algorithm for hole and crack detection [J]. *Sensors*, 2020, 20 (3) : 860. DOI: 10.3390/s20030860.
- [15] SHEEN B, CHO Y. A study on quantitative Lamb wave tomogram via modified RAPID algorithm with shape factor optimization [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13 (5) : 671-677. DOI: 10.1007/s12541-012-0087-2.
- [16] GONZALEZ-JIMENEZ A, LOMAZZI L, CADINI F, et al. On the mitigation of the RAPID algorithm uneven sensing network issue employing averaging and Gaussian blur filtering techniques [J]. *Composite Structures*, 2021, 278 : 114716. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114716.
- [17] AZUARA G, BARRERA E, RUIZ M, et al. Damage detection and characterization in composites using a geometric modification of the RAPID algorithm [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20 (4) : 2084-2093. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2950748.
- [18] LIU Z H, ZHONG X W, DONG T C, et al. Delamination detection in composite plates by synthesizing time-reversed Lamb waves and a modified damage imaging algorithm based on RAPID [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, 24 (5) : e1919. DOI: 10.1002/stc.1919.
- [19] 夏小松, 郑艳萍. 基于Lamb波时间反转法的复合材料损伤检测 [J]. *中国机械工程*, 2021, 32(1) : 26-31, 53. DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2021.01.004.
XIA Xiaosong, ZHENG Yanping. Damage detection in composite based on time reversal Lamb waves method [J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(1) : 26-31, 53. DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2021.01.004.
- [20] GORGIN R, LUO Y, WU Z J. Environmental and operational conditions effects on Lamb wave based structural health monitoring systems: a review [J]. *Ultrasonics*, 2020, 105 : 106114. DOI: 10.1016/j.ultras.2020.106114.
- [21] 刘增华, 樊军伟, 何存富, 等. 基于概率损伤算法的复合材料板空气耦合Lamb波扫描成像 [J]. *复合材料学报*, 2015, 32 (1) : 227-235. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.201501.004.
LIU Zenghua, FAN Junwei, HE Cunfu, et al. Scanning imaging of composite plate using air-coupled Lamb waves based on probabilistic damage algorithm [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(1) : 227-235. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.201501.004.

(责任编辑:毛娜;校对:刘平)