DOI: 10.3901/JME.2021.20.020

基于密集阵列的参数化 Lamb 波检测技术研究*

陈洪磊^{1,2} 刘增华^{1,2} 吴斌^{1,2} 何存富^{1,2}

(1. 北京工业大学材料与制造学部 北京 100124;

2. 北京工业大学北京市精密测控与仪器工程技术研究中心 北京 100124)

摘要: Lamb 波具有衰减慢、模态多、对结构几何特性和材料属性变化敏感等特点,在大型板壳结构的远距离、大范围快速检测技术研究领域得到了众多的关注。传统 Lamb 波成像算法将多组散射信号时间相关参数映射到结构每一个离散空间网格上实现缺陷信息的可视化。该类算法的执行效率低,且无法直接提供缺陷位置参数信息。将缺陷成像问题转换为散射信号源点求解问题进行分析,提出一种基于十字形密集阵列的参数化 Lamb 波检测技术。首先基于时飞原理建立散射信号源点求解函数模型;并提出一种融合烟火算法和统计分析技术的信号源点求解函数模型分析算法,实现缺陷空间位置的参数化分析。最后通过有限元模型和试验验证了所提出的检测技术对不同角度裂纹缺陷检测的有效性,并分析了模型参数设置对检测效果的影响。

关键词: Lamb 波; 成像算法; 参数化检测; 密集阵列; 烟火算法

中图分类号: TG156

Parametric Lamb Waves Detection Technology Based on Compact Array

CHEN Honglei^{1,2} LIU Zenghua^{1,2} WU Bin^{1,2} HE Cunfu^{1,2}

(1. Faculty of Materials and Manufacturing,
Beijing University of Technology, Beijing 100124;

2. Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments,
Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: Lamb waves have the low attenuation, multi-modes and sensitive to the change of geometry and material property of structures. They have been attractive much attention for rapid detection large plate/shell in long distance and large scale. In classical Lamb waves based imaging algorithms, the visualization of defects information is realized through mapping time relative parameters of multi-scatter signals into every discrete space grid of structures. It has low execution efficiency and cannot provide defect location parameter information directly. In this research, a parametric Lamb waves detection technology used for compact cross array is proposed through transforming the defect imaging problem into the scattering signal source point solving problem to analyse. In the first, a function model to estimate the scattering signal source points is established based on the time-of-flight principle; then an intelligent algorithm to solve the proposed model is developed through combining the fireworks algorithm and the statistical analysis technology. Parameters information of defects location is realized. Finally, the effectiveness of the proposed technology in parametric detection of cracks with different angles is verified with the finite element method and experiment. And the influence of parameter setting on the detection effect is analysed.

Key words: Lamb waves; imaging algorithm; parametric detection; compact array; fireworks algorithm

0 前言

板壳结构是飞行器、船舶和大型罐体的重要组

成部分,在航空航天、船舶舰艇和能源领域有着大量的应用。然而受材料老化、环境腐蚀、冲击载荷等影响板壳结构在服役期间会出现裂纹、腐蚀凹槽、过孔等各类缺陷,危及设施的结构健康^[1-2]。Lamb 波是一种在板壳结构中传播的超声导波,具有衰减慢、模态多、对缺陷敏感的特点,被大量用于板壳

* 国家重点研发计划(2018YFC0809003)和国家自然科学基金(11772014)资助项目。20201117 收到初稿,20210523 收到修改稿

结构缺陷的远距离快速无损检测和监测技术的研究^[3-5]。

超声导波检测技术研究中依据检测阵列空间分布形式采用不同的成像算法进行导波信号处理,实现缺陷位置和损伤程度的图形可视化,诸如稀疏阵列检测中应用的椭圆成像算法、双曲线成像算法;密集阵列检测中应用的全聚焦成像算法、符号相干因子成像算法等。其中椭圆成像算法、全聚焦成像算法和符号相干因子成像算法通过将多个检测位采集信号的包络信息或相位信息映射到空间点到激励位和检测位距离之和等于定长的椭圆路径上实现缺陷成像;双曲线成像算法通过将相关检测信号信息映射到空间点到激励位和检测位距离之差等于定长的双曲线路径上实现缺陷成像^[6]。SHAN 等^[7]采用基于椭圆路径分析的延迟求和算法实现大尺寸复杂航空板材中多个缺陷的成像检测。朱新杰等^[8]分析了阵列形式对基于椭圆轨迹特征的超声导波阵列检测成像效果的影响。YU 等^[9]分析了 1 维线性阵列、2 维十字阵列、矩形检测阵列下椭圆路径法缺陷成像效果。现有超声导波成像算法多为被动式缺陷定位成像,将缺陷散射信号整个时间序列对应的幅值、包络或相位信息映射到结构空间每个离散网格实现缺陷信息的可视化,算法执行效率较低,且不能直接给出缺陷空间坐标参数信息。智能算法通过模拟自然界生物进化、群体活动或物理现象进行数学问题求解,分析函数模型可以为非线性、不可微或不连续的,具有原理简单、并行执行的特点^[10]。典型智能算法包括遗传算法、聚类算法、烟花算法等^[11]。ANDHALE 等^[12]融合遗传算法和基于多检测位散射信号抵达时间差的星形算法进行金属板中 Lamb 波缺陷成像。首先采用星形算法对稀疏阵列检测散射信号抵达时间进行处理,初步确定缺陷位置;然后采用遗传算法对初步确定的缺陷位置信息进行分析实现缺陷区域精确定位。CHEN 等^[13-14]采用聚类算法对环形密集阵列和稀疏阵列检测 Lamb 波信号进行分析,实现板中缺陷的智能检测;将缺陷定位问题转换为散射点源搜索问题进行分析,采用空间离散个体表征潜在的散射源。首先基于模糊控制参数和椭圆成像原理提取各激励-接收检测对检测散射信号波包相关的个体;而后采用 k-means 算法对提取个体的空间欧式距离进行聚类分析,确定出缺陷位置。

本文将传统缺陷定位成像问题转化为散射信号源点评估问题进行分析,提出一种基于密集阵列的参数化 Lamb 波检测技术。首先基于散射信号椭圆

路径融合原理和双曲线路径原理构建散射信号源点评估模型;而后基于烟花算法和统计分析技术提出一种评估模型分析算法,进行缺陷位置参数化检测;分析基于火花空间分布最大集中区间设置截止条件;最后采用有限元仿真和激光 Lamb 波试验对与密集十字形阵列呈不同角度的通槽缺陷进行检测,验证了所提技术的有效性;并分析了椭圆成像算法和双曲线法筛选阈值设置对检测效果的影响。

1 参数化 Lamb 波检测技术原理

将缺陷成像问题转化为缺陷散射信号源点评估问题进行研究,最终实现裂纹参数化定位检测,所提算法主要由散射信号源点评估函数模型和分析算法两部分组成。

1.1 散射信号源点评估函数模型

散射信号源点评估函数模型主要由 1 个优化目标函数和 2 个约束函数构成。优化目标函数见式(1),即确定到激励位和检测位距离的和与激励位经过散射信号源点到检测位距离之差最小的空间点。当式(1)达到最小时,则认为该空间点为分布在缺陷上的散射信号源点。依据椭圆路径法和双曲线法建立两个约束函数用于空间点筛选,使分析快速收敛到散射信号源点。两约束条件函数分别为式(2)和式(3)

$$\min f(\theta) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^M |d_{i,j} - \tilde{d}_{i,j}| \quad (1)$$

$$|d - \tilde{d}| \leq \delta_d \quad (2)$$

$$|d_c - \tilde{d}_c| \leq \varepsilon_d \quad (3)$$

式中, $f(\theta)$ 为优化目标函数, θ 为二维空间矢量 (x, y) , 表示散射信号源点在空间的坐标; δ_d 为椭圆路径法筛选控制阈值, ε_d 双曲线法筛选控制阈值, d 为空间点到激励位和检测位距离的和, $\tilde{d}$ 为激励位经散射信号源点到检测位的距离, d_c 为空间点到相邻检测位距离的差, $\tilde{d}_c$ 为激励位经散射信号源点到相邻检测位的距离差; i 和 j 分别为检测位和激励位的编号; N 和 M 分别为检测位和激励位的个数。 $\tilde{d}$ 和 $\tilde{d}_c$ 可分别表示为

$$\begin{cases} \tilde{d} = t_i \times v_g \\ \tilde{d}_c = (t_{i+1} - t_i) \times v_g \end{cases} \quad (4)$$

式中, t 为散射信号抵达时间, v_g 为 Lamb 波群速度。

图 1 空间点筛选原理示意图,其中黑色圆点和空心圆点分别表示检测位和激励位,空心方格表示

理论散射信号源点, 黑色和灰色实心方格分别为分析中的保留点和剔除点。图 1a 为椭圆路径法空间点筛选原理图, 理论散射信号源点位于由黑色实线标记出到激励位和检测位 r_1 的距离之和等于理论距离 $\tilde{d}$ 的椭圆弧路径上。当空间点位于黑色虚线标记范围之内时, 则保留该点用于后续分析, 否则将其剔除。图 1b 为双曲线法空间点筛选原理示意图, 图 1b 中理论散射信号源点位于用黑色实线标记的到相邻检测位 r_1 和 r_2 的距离差等于 $\tilde{d}_c$ 的双曲线上。当空间点位于黑色虚线标记范围内时则保留, 否则将其剔除。

图 1 空间点筛选原理示意图

1.2 模型分析算法

烟花算法通过模拟烟花释放将火花散布在数学模型解空间中进行问题求解, 具有较好的全局收敛性和局部搜索特性^[15]。算法执行中主要包含火花释放个数和释放半径两个参数。为适应高维数据空间目标解的搜索, 烟花算法采用爆炸或高斯变异原理在解空间中以不同的爆炸半径释放不同数目的火花。本研究中将基于爆炸烟花算法进行密集阵列导波缺陷定位检测模型分析。图 2 为散射源点评估函数模型分析算法流程图, 算法主要由 5 个部分组成: 缺陷散射信号抵达时间和散射信号源点理论位置评估; 种群初始化; 火花种群筛选及火花分布评估; 算法截止条件判据; 烟花释放, 生成新一代分析火花。算法具体执行过程如下。

图 2 散射源点评估函数模型分析算法流程图

(1) 阵列检测信号分析: 提取缺陷散射信号抵达时间矢量 t ; 计算缺陷信号源点所在椭圆路径和双曲线路径相关参数 $\tilde{d}$ 和 $\tilde{d}_c$ 。

(2) 种群初始化: 设置最大分析代数 g_m 、种群规模 m_g , 参数精度控制矢量 α_r , 火花筛选保留数目 n_s ; 设置椭圆法和双曲线法筛选阈值参数值 δ_d 、 ε_d ; 坐标相同统计结果次数标识 k ; 烟花释放半径 f_r , 烟花释放个数 f_n ; 依据模型尺寸生成初始化烟花种群 p_0 , 初始化公式为

$$p_0(\theta) = \theta_L + \text{rand} \times (\theta_U - \theta_L) \quad (5)$$

式中, U 和 L 分别为变量上下截止标识符, rand 为值在 $0 \sim 1$ 之间的随机函数。

(3) 火花种群筛选: 依据式(1)计算火花对应 $f(\theta)$ 和参数 d ; 依据式(2)对火花进行椭圆法筛选, 得到筛选保留火花。如果 $g=1$ 则执行步骤(4), 以保证后续分析中有足够数目的火花数目; 否则进行双曲线法火花筛选, 计算椭圆筛选保留火花到相邻检测位的距离 $\tilde{d}_c$, 依据式(3)得到筛选保留火花 $\tilde{p}$ 。当保留火花数目小于 n_s 时, 将所有保留火花赋予该激励-检测对; 否则提取前 n_s 个 $f(\theta)$ 值较小的火花保留到该激励-检测对。

(4) 对保留火花进行统计分析, 并进行截止判据。将所有激励-检测对保留火花组合得到散射信号源点统计分析火花种群; 对种群进行统计分析, 评估裂纹空间位置信息。当 $g \geq 3$ 且连续三代中最大坐标统计信息分布区间相同或 $g = g_m$ 则停止计算, 否则执行步骤(5)。

(5) 烟花释放, 生成新一代分析烟花。采用随机爆炸方式对保留火花 $\tilde{p}$ 进行处理, 释放新的火

花; 新火花参数控制精度, 剔除参数值超出 θ 范围的火花得到新一代火花; 将保留火花同新火花组合得到后续分析烟花种群; 继续执行步骤(3)。火花更新公式和精度控制公式分别为式(6)和式(7)。

$$p_{i+1}(\theta) = p_i(\theta) - \text{sign}(\text{mean}(\tilde{d}_p - \tilde{d})) \times r_f \times \text{rand}(n_p, f_n) \quad (6)$$

$$p_{i+1}(\theta) = \text{round}(p_{i+1}(\theta)/a_r) \times a_r \quad (7)$$

式中, $\tilde{d}_p$ 为 $\tilde{p}$ 到各检测位的距离, n_p 为 $\tilde{p}$ 中火花数目。

2 检测技术有限元验证

2.1 有限元模型

采用 ABAQUS 软件建立基准模型和损伤模型, 验证所提检测技术的有效性。图 3 为十字形阵列裂纹检测缺陷模型示意图。模型几何尺寸为 $1\,000\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 1.8\text{ mm}$ 。材料的弹性模量 $70\,753\text{ MPa}$, 密度 $2\,700\text{ kg/m}^3$, 泊松比 0.33 。以结构左下角为坐标原点, A 、 B 点坐标分别为 $(570.6, 330)$ 和 $(426.2, 385)$ 。在 A 点标记的结构上下位置点施加反相集中力载荷激发 A_0 模态。以 5 mm 为间隔沿激励点右侧和下方分别设置 15 个信号检测点, 分别标记为 $c_1 \sim c_{15}$ 和 $l_1 \sim l_{15}$ 。以 B 点为起点、与 x 轴夹角约为 66.59° 方向设置一个长宽为 $30\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的通槽缺陷。单元类型为 C3D8R, 网格大小为 $0.6\text{ mm} \times 0.6\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$, 计算步长为 1 ns 。

图 3 十字形阵列裂纹检测缺陷模型示意图

分别提取基准模型和损伤模型各检测点接收信号作为基准信号和损伤检测信号, 由损伤检测信号减去基准信号得到缺陷信号。采用 Hilbert 变换法提取缺陷信号和基准信号包络, 分别计算得到缺陷信号波包抵达时间 t 和基准信号首次波包抵达时间。由基准模型中行检测位到激励点的距离差同各点接收信号首次波

包抵达时间之差的比值计算得到信号群速度 v_g 。

2.2 裂纹缺陷定位检测

算法基本参数设置: 初始种群规模 m_g 为 2 000, g_m 为 10, f_r 为 100 mm, f_n 为 10; 种群取值范围 $x \in [1, 1\,000]$, $y \in [1, 600]$, 空间离散精度为 1 mm , δ_d 为 50 mm, ε_d 为 10 mm, n_s 为 150。

图 4 为参数化 Lamb 波缺陷检测技术代表步骤

(a) 初始化种群分布图

(b) 初代保留火花分布图

(c) 烟火释放火花和初代保留火花分布图

(d) 第 2 代保留火花分布图

图 4 参数化 Lamb 波缺陷检测技术代表步骤分析效果图

分析效果图,其中通槽缺陷由白色斜线标记、黑色小点代表火花。图 4a 为初始化种群分布图,其中初始生成烟花随机分布在板面。图 4b 为初代保留火花分布图。由于仅经过椭圆法筛选,保留火花零散的分布在散射信号源点所在椭圆弧附近区域,且距离缺陷位置仍有一定的距离。后续对保留火花进行爆炸释放,产生新的火花。图 4c 为烟火释放火花和初代保留火花分布图。对比图 4b 和图 4c,新生成的火花在散射信号源点所在椭圆弧周围随机分布,在缺陷周围出现了新的靠近真实散射源点的火花。但也产生了大量偏离椭圆路径区域的火花。图 4d 为第 2 代保留火花分布图,由于经过 δ_d 和 ε_d 筛选控制,保留火花位置很好的集中在了理论缺陷位置周围,但火花数目较少。说明算法执行中火花位置在快速收敛于散射信号源点附近。

在第 7 代,保留火花最大统计分布区间连续三代相等,分析截止。图 5 为第 7 代保留火花分析结果图,其中火花在 x 轴和 y 轴方向上的统计分布图被分别绘制在相应坐标轴上。图 5 中火花较好地聚集在缺陷周围,火花在 x 轴和 y 轴方向集中分布区间分别为 420~430 和 380~390,统计数目沿两坐标轴正向逐渐降低。火花的空间坐标统计特征有助于表征缺陷的几何结构。

图 5 第 7 代保留火花分析结果

2.3 参数设置对检测的影响

分析椭圆路径法筛选阈值参数和双曲线路径法筛选阈值参数设置对分析结果的影响。固定双曲线路径法空间点筛选阈值,改变 δ_d 分析椭圆路径法筛选阈值变化对检测的影响。图 6 和图 7 分别为 ε_d 为 10、 δ_d 为 25 和 20 时分析截止时缺陷定位分析结果图。对比图 5 和图 6, δ_d 由 50 mm 变化到 25 mm 时散射源点评估结果基本相同。两图中散射源点 x 轴坐标统计分布均在 420~430 达到最大,且沿 x 轴正向拥

有相似的统计数目分布形式; y 轴坐标统计分布最大值分布区间虽然有所不同,但密度均集中在 380~410 区间。

图 6 $\delta_d=25$ 、 $\varepsilon_d=10$ 时第 3 代截止,缺陷定位分析结果

图 7 为 δ_d 为 20 mm、 ε_d 为 10 时缺陷定位分析结果,算法在第 3 代分析截止。火花集中分布在缺陷周围,但火花数目明显低于 δ_d 为 25 mm 和 50 mm 时的情况; x 轴和 y 轴的统计分布最大值没有位于缺陷中心位置,说明当椭圆法筛选阈值为 20 mm 时检测结果和真实情况出现了偏差。分析中建议采用较大的椭圆路径筛选阈值进行火花筛选。

图 7 $\delta_d=20$ 、 $\varepsilon_d=10$ 时第 3 代截止,缺陷定位分析结果

固定椭圆路径法筛选阈值,改变 ε_d 分析双曲线路径法筛选阈值参数对检测分析的影响。图 8 和图 9 分别为 δ_d 为 50 mm、 ε_d 为 15 mm 和 5 mm 分析截止时缺陷定位分析结果。图 8 和图 9 中火花个体均在缺陷周围有集中分布,结合统计柱状图中最大统计数目分布,图 8 和图 9 中的火花集中区域均位于缺陷所在位置;而图 8 中火花在 x 轴和 y 轴的分布范围要高于图 9 中火花的。综合对比图 8、图 5 和图 9 显示,在固定椭圆弧筛选阈值情况下,随着双曲线路径法筛选阈值参数取值的降低,散射信号源点评估结果愈加收敛于缺陷中心区域。

图 8 $\delta_d=50$ 、 $\varepsilon_d=15$ 时第 9 代截止, 缺陷定位分析结果

图 9 $\delta_d=50$ 、 $\varepsilon_d=5$ 时第 5 代截止, 缺陷定位分析结果

3 检测技术试验验证

3.1 试验设置

基于 AIR-1550-TWM 激光超声系统进行参数化 Lamb 波检测技术试验验证。图 10 为激光超声结构缺陷检测试验设置图。图 10a 为试验设置系统图。整个试验系统主要由 1 套激光超声检测系统、1 块铝板、2 片压电片、1 台任意函数发生器和 2 台示波器构成。激光超声检测系统主要包含激光接收探头、扫描架、解调器、分光器和连续激光器及扫描控制软件平台 6 个部分。铝板尺寸为 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 在板面中心位置设置一个长宽分别为 30 mm 、 2 mm 的通槽缺陷。压电片的直径和厚度分别为 15 mm 、 0.5 mm 。6 号和 5 号示波器分别连接到解调器直流端和交流端, 用于直流信号参量监测和激光超声信号接收。任意信号发生器先后连接到两压电片进行超声导波激励。激励信号为汉宁窗调制的中心频率 100 kHz 、5 周期的正弦信号。通过扫描控制软件控制扫描架带动激光探头移到指定检测位进行超声导波信号接收, 试验中激光探头同板面垂直。

图 10b 为激励和检测阵列设置示意图。采用 502 胶将两个压电片分别粘贴在缺陷 0° 和 90° 方向、贴近板边缘位置处, 分别标记为 P_1 、 P_2 。在相对于两个压电片的正前方设置两个具有相同分布形式的检测位阵列, 用于确定激光超声系统激光照射点位置, 实现 Lamb 波信号的非接触检测。从压电片及所靠近板边沿法向方向、距离压电片边沿 30 mm 处开始, 以 5 mm 为间隔连续设置 28 个检测点, 标记为 $r_0 \sim r_{27}$; 以 r_0 和 r_{27} 连线为对称轴、 r_{13} 为中心向两侧以 5 mm 为间隔设置 18 个检测点, 分别标记为 $r_{28} \sim r_{45}$ 、 $r_{46} \sim r_{63}$ 。各检测位标记顺序如图中箭头所示。试验中采用 64 个检测点构成的十字形阵列相对于普通的环形或线性阵列可以在较少检测点数目检测的情况下检测到更多的缺陷回波信息。

(a) 试验设置系统图

(b) 激励和检测阵列设置示意图

图 10 激光超声结构缺陷检测试验设置图

1. 铝板 2. 激光接收探头 3. 扫描架 4. 任意函数发生器
5. 信号采集示波器 6. 直流监测示波器 7. 解调器 8. 分光器
9. 连续激光器 10. 扫描架控制软件

3.2 检测信号特征分析

图 11 为典型检测信号对比图。其中灰色虚线和灰色点线分别为 P_2 激励和 P_1 激励时各检测位的检测信号; 将对应检测位接收信号作差得到缺陷散

射信号, 由黑色实线绘制。受压电片差异、粘贴效果影响, 图 11 中对应检测点检测信号首次抵达波存在一定的差异, 但 0、13、27、28 和 46 号位检测信号中仍能清楚地看到缺陷回波。对比 0、13 和 27 号检测信号发现随着检测位离缺陷距离的减少, 首次波包和缺陷回波的抵达时间分别增加和降低。28 和 46、36 和 54 及 45 和 63 号分别为与激励位-缺陷连线呈空间对称分布的检测位, 但 45 和 63 号检测位接收信号的首次抵达波包和缺陷回波均存在明显差异。研究中提取特定检测位接收信号进行缺陷检测分析。

图 11 典型检测信号对比图

采用希尔伯特变换提取 P_1 传感器激励、 $r_0 \sim r_{27}$ 检测信号包络, 以首次抵达波包络峰值时刻作为信号传播到各检测位的时间。 $r_1 \sim r_{27}$ 检测位与 r_0 检测位距离差与各检测位接收信号的首次抵达波抵达时间之差的比作为试验测量群速度值。图 12 为试验测量群速度箱式图, 群速度变化范围在 $1.2 \sim 2.3 \mu\text{s}$, 中位数为 $2.196 2 \mu\text{s}$ 。研究中采用试验测得的群速度中位数作为 Lamb 波群速度值。

图 12 试验测量群速度箱式图

3.3 缺陷定位检测

算法中双曲线法种群筛选阈值参数 ε_d 为 15 mm , 种群取值范围 $x \in [1, 500]$, $y \in [1, 500]$, 其他参数设置见第 2.2 节。分析阵列阵元个数对缺陷定位检测效果的影响。

图 13 为 7~27、28~35 和 46~53 号检测位情况下第 4 代截止时刻缺陷定位分析结果。火花集中在缺陷周围, 在 x 轴和 y 轴方向火花分别集中在 $240 \sim 250$ 和 $250 \sim 260$ 之间。散射源点统计个数沿 x 轴和 y 轴的分布趋势和裂纹所占空间具有较好的一致性, 即火花个数沿 x 轴正向存在一定数目的分布、沿 y 轴 $250 \sim 260$ 区间两侧存在一定数目的分布, 这些分布很好地覆盖了缺陷空间坐标。

图 13 7~27、28~35、46~53 号检测位、第 4 代截止时缺陷定位分析结果

图 14 是 7~19、28~31、46~49 号检测位、第 5 代截止时裂纹定位分析结果。图 15 为 13~19、28~31、46~49 号检测位、第 5 代截止时裂纹定位分析结果图。图 14 和图 15 中火花均集中在缺陷周围, 在 x 轴方向和图 13 拥有相同的坐标统计分布形式。虽然各图中火花在 y 轴方向统计分布的最大区间有所不同, 但统计分布的密集区域均和缺陷位置具有较好的一致性。综合分析显示, 所提参数化检测技术可用于不同密集阵元数目十字形阵列的缺陷检测。

图 14 7~19、28~31、46~49 号检测位、第 5 代截止时缺陷定位分析结果

图 15 13~19、28~31、46~49 号检测位、第 5 代截止时缺陷定位分析结果

4 结论

本文将经典 Lamb 波缺陷成像问题转化为散射信号源点评估问题进行分析, 进行基于密集阵列的参数化 Lamb 波检测技术研究。研究中基于椭圆路径法和双曲线法建立了一个散射信号源点评估函数模型, 并基于烟花算法提出一种函数模型智能分析算法。通过有限元和试验验证了所提检测技术在缺陷位置参数化表征和可视化应用中的有效性, 实现与阵列呈 66.59° 和 90° 裂纹缺陷的检测, 并分析了函数模型参数设置及阵元数目对检测效果的影响。

(1) 通过对不同分析代数之间散射信号源点的统计分析, 设计算法截止条件, 避免算法陷入持续运行, 有效提升了参数化缺陷检测分析的效率。

(2) 缺陷定位分析结果中散射信号源点集中分布在缺陷周围, 实现了缺陷位置的可视化; 而散射信号源点坐标统计分布集中区间准确地标记出了缺陷位置, 实现缺陷位置的参数化表示。

(3) 椭圆法筛选阈值的改变不会影响散射信号源点评估中火花分布形式, 但较低的取值会降低散射信号源点在缺陷周边的分布密度。双曲线法筛选阈值的改变会直接影响散射信号源点评估中火花分布形式, 但对检测评估中统计密集分布形式的影响较弱; 较低的取值会使火花集中分布在缺陷中心区域附近。密集十字型阵列阵元数目的变化对所提参数化 Lamb 波缺陷检测效果的影响较弱。

(4) 本研究将缺陷定位检测技术同智能分析算法融合进行参数化缺陷定位检测, 对密集阵列超声检测技术的智能化和定量化发展和应用具有重要指导意义和参考价值。但所提检测技术需要检测阵列能够接收到来自缺陷的回波, 否则无法实现裂纹这类具有声场指向性缺陷的检测; 研究中发现散射信号抵达时间和群速度计算偏差会对检测结果产生较大的影响, 后续研究中将分析检测信号参数提取精度对检测误差的影响; 并对所提检测技术进行发展实现多缺陷的定量检测和评估。

参 考 文 献

- [1] 何存富, 郑明方, 吕炎, 等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 35-57.
HE Cunfu, ZHENG Mingfang, LÜ Yan, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 35-57.
- [2] 刘瑶璐, 胡宁, 邓明晰, 等. 板壳结构中的非线性兰姆波[J]. 力学进展, 2017, 47: 503-533.
LIU Yaolu, HU Ning, DENG Mingxi, et al. Nonlinear Lamb waves in plate/shell structures[J]. Advances in Mechanics, 2017, 47: 503-533.
- [3] ABBAS M, SHAFIEE M. Structural health monitoring (SHM) and determination of surface defects in large metallic structures using ultrasonic guided waves[J]. Sensor, 2018, 18(11): 1-26.
- [4] 刘增华, 冯雪健, 陈洪磊, 等. 基于波数分析的激光 Lamb 波缺陷检测试验研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(18): 23-32.
LIU Zenghua, FENG Xuejian, CHEN Honglei, et al. Experimental research on defect detection of laser-induced Lamb waves based on wavenumber analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(18): 23-32.
- [5] LIU Z H, CHEN H L, SUN K M, et al. Full non-contact laser-based Lamb waves phased array inspection of

- aluminum plate[J]. *Journal of Visualization*, 2018, 21(5): 751-761.
- [6] WAHAB M A. Structural health monitoring from sensing to processing[M]. London: IntechOpen, 2018: 87-115.
- [7] SHAN S B, QIU J H, ZHANG C, et al. Multi-damage localization on large complex structures through an extended delay-and-sum based method[J]. *Structural Health Monitoring-An International Journal*, 2016, 15(1): 50-64.
- [8] 朱新杰, 韩赞东, 都东, 等. 基于椭圆簇轨迹特征的板中超声导波线弧类阵列成像研究[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(22): 14-20.
- ZHU Xinjie, HAN Zandong, DU Dong, et al. Imaging of ultrasonic guided waves in plate based on characteristic of elliptical cluster tracks for line-arc kind of array[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(22): 14-20.
- [9] YU L, GIURGIUTIU V. In situ 2-D piezoelectric wafer active sensors arrays for guided wave damage detection[J]. *Ultrasonics*, 2008, 48(2): 117-134.
- [10] EIBEN A E, SMITH J. From evolutionary computation to the evolution of things[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 476-482.
- [11] 谭营, 郑少秋. 烟花算法研究进展[J]. *智能系统学报*, 2014, 9(5): 515-528.
- TAN Ying, ZHENG Shaoqiu. Recent advances in fireworks algorithm[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2014, 9(5): 515-528.
- [12] ANDHALE Y S, MASURKAR F A, YELVE N P. Localization of damages in plain and riveted aluminum specimens using Lamb waves[J]. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 2019, 24(1): 150-165.
- [13] CHEN S J, ZHOU S P, CHEN C F, et al. Detection of double defects for plate-like structures based on a fuzzy c-means clustering algorithm[J]. *Structural Health Monitoring-An International Journal*, 2018, 18(3): 757-766.
- [14] DENG F, CHEN H L. A defects localization algorithm based on the Lamb wave of plate structures[J]. *ASME Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*, 2021, 4(2): 021001.
- [15] TAN Y, ZHU Y C. Fireworks algorithm for optimization[C]//*Advances in Swarm Intelligence Proceedings*. Beijing, 1st International Conference on Swarm Intelligence, 2010: 355-364.
-
- 作者简介: 陈洪磊, 男, 1987 年出生, 博士研究生。主要研究方向为超声无损检测技术, 智能分析算法, 信号处理技术。
E-mail: chenhonglei@emails.bjtu.edu.cn
- 刘增华(通信作者), 男, 1973 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为超声和电磁无损检测技术、结构健康监测和传感器检测技术等。
E-mail: liuzenghua@bjut.edu.cn