

融合 Radon 变换的孔边裂纹 Lamb 波 定位成像研究

张祥虎¹, 刘宏业¹, 孙茂循², 杨 晖¹, 陶东辉¹,
吕 炎³, 刘秀成³

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093;
3. 北京工业大学 材料与制造学部, 北京 100124)

摘要: 基于不同模态 Lamb 波与孔边裂纹相互作用的基本原理, 聚焦不同模态 Lamb 波波包飞行时间精确检测问题, 以各向同性板中的孔边裂纹为研究对象, 开展了融合 Radon 变换的孔边裂纹 Lamb 波定位成像研究。首先, 使用宽频 chirp 信号激励稀疏传感器阵列产生 Lamb 波, 并采集通孔散射信号作为基线信号, 采集孔边裂纹散射信号作为缺陷信号。其次, 对 chirp 响应信号进行滤波处理, 优化选取窄带单音频脉冲响应信号的中心频率和调制周期数。然后, 对基线单音频脉冲响应信号进行 Radon 变换, 得到优化后的群速度和偏移时间, 并计算出 Lamb 波波包飞行时间。最后, 使用椭圆定位成像算法对孔边裂纹进行定位成像, 并将成像结果与名义群速度法的结果进行对比。结果表明, 使用 Radon 变换可以准确获取 Lamb 波波包飞行时间, 提升了不同模态 Lamb 波对孔边裂纹缺陷的检测能力。

关键词: Radon 变换; 孔边裂纹; Lamb 波; 定位成像算法; 飞行时间

中图分类号: TH 878; TB 553 文献标志码: A

Lamb wave localization and imaging of crack originating from a through-hole by fusing Radon transform

ZHANG Xianghu¹, LIU Hongye¹, SUN Maoxun², YANG Hui¹, TAO Donghui¹, LÜ Yan³, LIU Xiucheng³

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Based on the basic principle of the interaction between Lamb waves of different modes and cracks originating from a through-hole, the current work focused on the precise detection of time-of-flight (ToF) for Lamb wave packets of different modes, and implements the Lamb wave localization and imaging of cracks originating from a through-hole by fusing Radon transform with taking the crack originating from the hole in an isotropic plate as the research object. Firstly, a broadband chirp signal

收稿日期: 2023-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52175513, 51705325)

第一作者: 张祥虎(1998-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 智能传感与结构健康监测. E-mail: 15609640889@163.com

通信作者: 刘宏业(1986-), 男, 副教授. 研究方向: 智能传感与结构健康监测、无损检测新技术. E-mail: liuhongye@usst.edu.cn

was used to excite the sparse sensor array for the generation of Lamb waves, and the scattering signals of through-hole were obtained as the baseline signals, where the scattering ones of the crack originating from the hole were collected as monitoring signals. Secondly, the chirp response signals were filtered and the center frequency and modulation cycle number of the corresponding narrowband responses of tone burst were optimized. Then, the Radon transform was performed on the baseline singles of tone burst response to obtain the optimized group velocity and offset time, and the ToF of Lamb wave packet was calculated. Finally, the elliptical imaging algorithm was used to locate and image the crack originating from the hole, and the imaging results were compared with those by the nominal group velocity method. The results showed that the ToF of Lamb wave packet can be accurately calculated with the fusion of Radon transform, which improved the detection capability of different modal Lamb waves for the defects of crack originating from the hole.

Keywords: Radon transform; cracks; Lamb wave; localization and imaging algorithm; time-of-flight

硬质金属合金具有密度小、强度高、抗腐蚀性、成型性好及成本低等优点,在航空航天、汽车船舶、兵器工业等领域有着广泛应用^[1-3]。就航空工业而言,我国在役主要机型的机身和机翼等主承力结构,其材料仍以金属铝合金为主,且多以铆孔和紧固孔的形式连接。铆孔和紧固孔作为航空结构中典型的应力集中结构,在交变载荷的作用下极易产生疲劳裂纹,且裂纹多沿孔的边缘产生。Lamb 波因具有传播距离远、敏感度高、多模态等特点,被用于该类结构无损检测和结构健康监测^[4-5]。

根据裂纹的大小,可以将疲劳裂纹分为微观裂纹和宏观裂纹。当金属构件受到循环交变载荷作用时,其内部产生应力形成大量位错,随着位错逐渐增多累积,进而形成驻留滑移带,因滑移带不断扩大而形成微观裂纹,通常称其为早期疲劳裂纹。国内外学者将非线性 Lamb 波应用于早期疲劳裂纹的检测。Shen 等^[6]利用具有吸收边界的小尺寸局部相互作用有限元模型,研究了 Lamb 波在呼吸裂纹处的非线性散射和模态转换问题。张硕^[7]通过将 Lamb 波 S_0 模态与概率扫描矩阵结合的方法,进行有限元仿真和实验研究,实现了对微观裂纹的定位成像。Aslam 等^[8]考虑反向传播的 Lamb 波混频技术,实现了平板中微裂纹的非线性 Lamb 波定位和检测。但是当早期疲劳裂纹进一步发展为宏观裂纹时,使用非线性 Lamb 波对其进行检测效果不甚理想,国内外学者普遍使用线性 Lamb 波检测金属结构上的宏观裂纹^[9-11]。考虑 Lamb 波与宏观裂纹的作用机理, Liu 等^[12]基于线

性三维有限元模型,研究了 Lamb 波 A_0 模态在孔边裂纹处的增量散射问题。焦敬品等^[13]提出融合极性一致成像、全聚焦成像及矢量全聚焦成像的方法,实现了对裂纹方向的识别及定量检测。Barski 等^[14]设计了一种结构健康监测系统,通过数值模拟和实验测试验证了该系统的有效性,实现了对裂缝早期形成阶段的检测和裂缝长度的估计。针对利用线性 Lamb 波技术的结构损伤定位与成像, Luo 等^[15]采用一种基于信号幅度的椭圆定位成像算法,实现了对铝板上损伤位置的准确表征。陈洪磊等^[16]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,并提出了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,实现了对裂纹缺陷位置的参数化表示。关立强等^[17]采用椭圆定位技术和层析成像技术相结合的无损检测方法,提高了损伤的检测效率和成像质量。Xia 等^[18]通过将时间反转 Lamb 波与概率损伤成像和椭圆定位成像算法相结合,实现了对铝板上单孔缺陷和双孔缺陷的定位成像。

上述研究多在实验室条件下聚焦 Lamb 波对不同类型缺陷的无损检测问题,就实时性要求更高的结构健康监测而言,准确获取不同模态 Lamb 波的波包飞行时间对金属板状结构孔边裂纹的定位和成像效果有着显著影响。本文以金属板状结构孔边裂纹缺陷为研究对象,将不同模态 Lamb 波的波包飞行时间 (time-of-flight, ToF) 优化问题转化为 Radon 变换平面的极值问题,提出了融合 Radon 变换的孔边裂纹 Lamb 波定位与成像方法。首先,使

用宽频 chirp 信号激发 Lamb 波, 采集通孔和孔边不同尺寸孔边裂纹的监测信号, 得到 chirp 响应信号。其次, 为了提取 Lamb 波模态, 优化选取窄带单音频脉冲激励信号的中心频率和调制周期数, 对 chirp 响应信号进行滤波处理, 得到单音频脉冲响应信号。然后, 对滤波后的通孔监测信号作 Radon 变换, 精确获取群速度和偏移时间。接着, 计算出波包飞行时间, 使用椭圆定位成像算法对孔边裂纹进行定位和成像。最后, 将融合 Radon 变换得到的拟合直线和定位成像结果与使用名义群速度法^[19]得到的结果进行对比, 以此来说明本文方法在定位精度上带来的提升。

1 各向同性板中的 Lamb 波

Lamb 波在各向同性板中的传播可以利用位移势函数法对其进行求解^[20], 现对该过程进行简要概述。假设在笛卡尔坐标系中有一水平方向无限长、上下表面应力自由的各向同性板, 如图 1 所示。令自由板中间厚度某任意点为坐标原点, x_1 轴为 Lamb 波的传播方向, x_2 轴为板宽度方向, x_3 轴为板厚度方向且垂直于 x_1 轴, 若各向同性板在 x_3 轴方向的厚度为 $2d$ 。在不考虑彻体力和波振动形式的情况下, 可以将 Lamb 波在各向同性板中的传播用笛卡尔张量符号的形式进行如下描述:

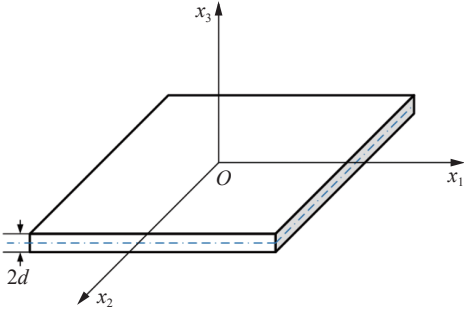


图 1 各向同性板空间坐标示意图

Fig.1 Schematic diagram of the space coordinate in isotropic plate

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,ji} = \rho_d \ddot{u}_i, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

式中: u_i 为 x_i 方向上的位移; $\ddot{u}_i$ 为 u_i 的二阶偏微分; ρ_d , μ 分别为平板的密度和剪切模量; λ 是 Lamé 常数, $\lambda = 2\mu\nu/(1-\nu)$; ν 为泊松比。

Helmholtz 分解的位移势函数法是指在平面应变条件下将式 (1) 分解为 2 个解耦合的波动方程。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (2a)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (2b)$$

在式 (2a) 和 (2b) 中,

$$\phi = [A_1 \sin(px_3) + A_2 \cos(px_3)] \exp[i(kx_1 - \omega t)] \quad (3a)$$

$$\psi = [B_1 \sin(qx_3) + B_2 \cos(qx_3)] \exp[i(kx_1 - \omega t)] \quad (3b)$$

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2 - k^2}, \quad q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2 - k^2}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda_w} \quad (3c)$$

式中: A_1, A_2, B_1, B_2 是由边界条件决定的 4 个常数; k, ω, λ_w 分别是波数、角频率、波长; c_T 和 c_L 分别是纵波波速和横波波速。

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho_d(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{2\mu(1-\nu)}{\rho_d(1-2\nu)}} \quad (4)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho_d(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_d}}$$

其中, $E = 2\mu(1+\nu)$ 是所用材料的杨氏模量。可以看出, Lamb 波实质上是纵向模态和横向模态波的叠加, 即 Lamb 波是一种由纵波和横波在薄板上下表面相互耦合形成的特殊形式的导波。

2 Radon 变换和椭圆定位成像算法

在数字图像处理领域, 对 $o-xy$ 平面内的图像 $f(x, y)$ 作 Radon 变换, 可以将图像上的像素按照某一方向进行投影变换映射到 $o-\theta\rho$ 平面 (Radon 平面) 内, 得到一条投影强度曲线, 该曲线上的点对应图像在该方向上的像素的累加, 其本质相当于对二维矩阵沿着某一方向进行投影变换映射到 Radon 平面内, 则原来在二维矩阵中该方向上的所有数值会在 Radon 平面上累加到同一点。故可以将 15 组传感器路径监测信号看作一个二维矩阵, 并对其作 Radon 变换, 提取监测信号中的关键信息。

2.1 Radon 变换

若 $o-xy$ 平面内存在一个二维信号矩阵 $f(x, y)$, 现对其沿着某一方向做 Radon 变换, 可以得到二维信号矩阵在该方向上的投影强度 R_L , 其数学表达式可以用函数 $f(x, y)$ 在投影直线方向上的线积分来表示。

$$R_L = \int_L f(x, y) ds \quad (5)$$

式中: L 为投影方向上的任意一条投影直线; ds 为投影直线 L 的微分。

现将 $o-xy$ 平面内的投影直线 L 转换到 $o-\theta\rho$ 平面上, 可以用极坐标参数表示为

$$L(\theta, \rho) : \rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (6)$$

式中: ρ 为直角坐标系的原点到直线 L 的法线距离; θ 为直线 L 的法线与 x 轴的正向夹角。

因 Radon 变换相当于把 $o-xy$ 直角坐标系内的问题转化为了 $o-\theta\rho$ 极坐标系内的极值问题, 故可以将式 (5) 改写为

$$R(\theta, \rho) = \int_{L(\theta, \rho)} f(x, y) ds \quad (7)$$

为了便于积分计算, 引入狄利克雷函数 $\delta(t)$

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0 \\ 1, & t = 0 \end{cases} \quad (8)$$

则 Radon 变换方程可表示为

$$R(\theta, \rho) = \iint f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - \rho) dx dy \quad (9)$$

2.2 椭圆定位成像算法

所谓椭圆成像算法, 即令稀疏传感器阵列中的任意 2 个传感器作为焦点画椭圆, 若有 3 个及以上的椭圆相交, 则这些椭圆的交点位置处即为缺陷可能存在的位置。

令 j 为监测试样平面上的任意一个发射传感器, k 为接收传感器 ($j, k = 1, 2, 3, \dots, 6; j \neq k$), D 为两传感器之间的直线距离, c_g 为监测试样中 Lamb 波传播模态的群速度值, t_0 为监测试样中 Lamb 波传播模态的偏移时间, 则该传感器路径上 Lamb 波模态的波包到达时间为

$$t_s = \frac{D}{c_g} + t_0 \quad (10)$$

若基线信号和缺陷信号分别记为 $b_{jk}(t)$ 和 $d_{jk}(t)$, 则两者的差值信号可表示为

$$z_{jk}(t) = d_{jk}(t) - b_{jk}(t) \quad (11)$$

令式 (11) 中的差值信号的希尔伯特变换为 $H_{jk}(t)$, 可得其复信号为

$$c_{jk}(t) = z_{jk}(t) + iH_{jk}(t) \quad (12)$$

则差值信号包络检波信号的幅值为

$$A_{jk}(t) = \sqrt{z_{jk}(t)^2 + H_{jk}(t)^2} \quad (13)$$

通过测量采集了监测试样上发射传感器 j 和接收传感器 k 的位置坐标, 分别为 (x_j, y_j) 和 (x_k, y_k) , 则监测位置 (x, y) 处的 Lamb 波模态直达波到达时间为

$$t_m(x, y) = \frac{\sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2} + \sqrt{(x_k - x)^2 + (y_k - y)^2}}{c_g} + t_0 \quad (14)$$

对金属铝板孔边裂纹缺陷进行椭圆定位成像, 铝板上的监测区域 (x, y) 处的像素大小为

$$I(x, y) = \frac{1}{N_p} \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N A_{jk}(t_m(x, y)) \quad (15)$$

式中: N 为压电传感器的个数; N_p 为传感器对的个数。

$$N_p = \frac{N(N-1)}{2} \quad (16)$$

3 实验系统

实验系统框图如图 2(a) 所示, 该实验系统由 NI PXI-5412 任意波形发生器、ATA-2021 高压放大器、NI PXI-2593 多路复用器、NI PXI-5122 示波器、NI PXI-8186 嵌入式计算机、信号处理模块、试样铝板、稀疏传感器阵列组成。实验中所用 6061-T6 航空铝板的尺寸为 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 试样铝板材料性能参数为密度 $\rho_d = 2700 \text{ kg/m}^3$, 杨氏模量 $E = 69 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.33$ 。稀疏传感器阵列由 6 片锆钛酸铅 ($\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$, PZT) 压电片组成, 其中, 每个传感器单元的编号如图 2(a) 所示, PZT 压电片的直径为 7 mm , 中心频率为 300 kHz 。实验过程中室内温度始终保持在 $(27 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 范围内, 以消除环境温度变化对实验结果的影响。实验装置和孔边裂纹放大图像如图 2(b) 所示, 图中, 直径为 10 mm 的通孔位于航空铝板几何中心。在采集完铝板通孔信号之后, 使用精密激光切割机床沿着圆孔下边缘且垂直于铝板下边界的方向依次切割了尺寸为 $2 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 和 $5 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 的裂纹, 并依次采集信号制作数据集。稀疏传感器阵列中每个传感器的位置坐标以及圆孔和孔边裂纹的位置坐标如表 1 所示。

实验中采用线性 chirp 信号作为激励信号, 激励信号的频率范围从 50 kHz 到 500 kHz 线性变化, 激励信号时长为 $1000 \mu\text{s}$ 。实验过程中的稀疏传感器阵列采用“一发多收”的方式轮流工作, 即当其中一个传感器发射信号时, 其他传感器均接收信号, 每次监测过程需要 6 个传感器轮流作为发射器完成一组测量工作。实验中采集铝板通孔信号作为基线信号, 采集 2 mm 、 5 mm 孔边裂纹信号作为缺陷信号, 此类信号均为宽带 chirp 响应信号。铝板孔边裂纹的散射信号由传感器接收后经由 NI PXI-2593 多路复用器和 NI PXI-5122 示

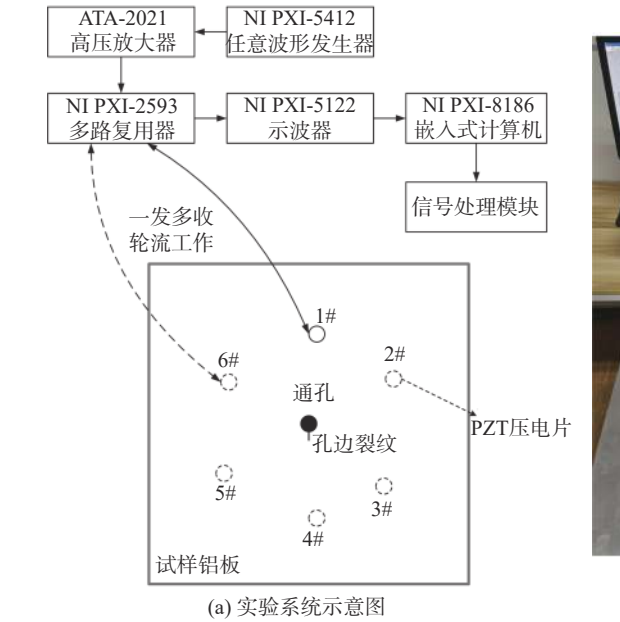


图 2 实验系统

Fig.2 Experimental system

表 1 传感器、通孔、孔边裂纹的位置坐标

Tab.1 Localization coordinates of sensors, through-hole, and cracks originating from the through-hole

位置类型	位置坐标/mm
传感器1#	(302.0, 422.0)
传感器2#	(412.5, 361.0)
传感器3#	(392.0, 208.5)
传感器4#	(302.0, 171.5)
传感器5#	(186.5, 242.0)
传感器6#	(193.0, 343.0)
10 mm通孔	(300.0, 300.0)
2 mm裂纹	(300.0, 293.0)
5 mm裂纹	(300.0, 290.0)

波器采样存储在 NI PXI-8186 嵌入式计算机中，监测信号的采样频率为 20 MHz。因两传感器收发信号遵循互易性原理，故每次裂纹长度发生改变，均可以采集到 15 组不同的 chirp 响应信号。

实验中的成像区域为以圆孔为中心的 300 mm×300 mm 的正方形区域，故在最终定位成像时需要将表 1 中给出的位置坐标数值减去 150 mm 用于图像可视化。

4 窄带滤波

在常规的检测过程中，因 Lamb 波的频散特

性，常使用窄带音频脉冲激励信号激发 Lamb 波，以保证检测模式的单一性。但是，在扫频实验中，该方式具有信号采集效率低、数据存储大等缺点，所以本文将宽频 chirp 用作激励信号。由于 chirp 响应信号难以进行模式识别，故基于文献 [21] 中 chirp 滤波的方法，可以获取稀疏阵列不同传感器对监测信号的单音频脉冲响应信号。窄带单音频脉冲信号的检测频率和调制周期数对检测过程中的导波模式、频散特性均有很大影响，因此，需要先对检测过程中采用的激励信号中心频率和调制周期数进行优化。

4.1 中心频率优化

图 3(a) 给出了 5 周期时由 chirp 响应提取的中心频率从 100 kHz 变化到 400 kHz 时的单音频脉冲响应信号，这里使用的是 2 mm 孔边裂纹数据集，其中传感器 4# 为发射器，传感器 6# 为接收器。由图 3(a) 可知，当中心频率为 300 kHz 时，单音频脉冲响应信号的起始端有 2 个波包清晰可辨。根据“各向同性板中的 Lamb 波”部分的理论分析可知，厚度为 3 mm 的 6061-T6 航空铝板在 300 kHz 时 S_0 模式和 A_0 模式的理论群速度值分别为 5 140, 3 102 m/s，结合波包到达时间的相关计算可知图中直达波波包为 Lamb 波 S_0 模式，第 2 个波包为 A_0 模式。当中心频率从 250 kHz 逐渐减小到 100 kHz 时，响应信号中 S_0 模式波包幅值将逐渐减小，至 100 kHz 时单音频脉冲响应信号中的 A_0 模式明显

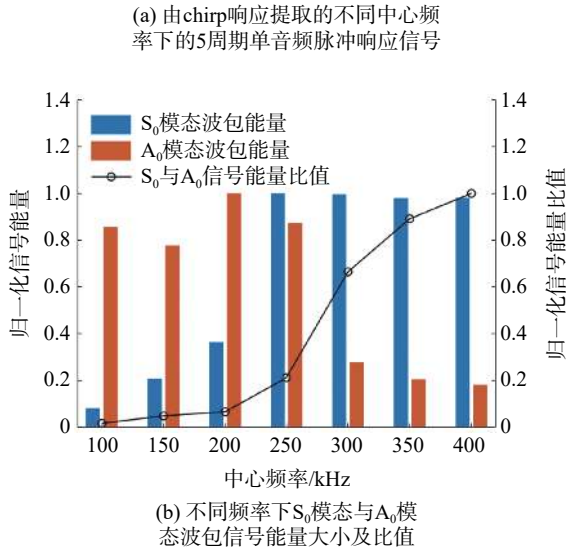
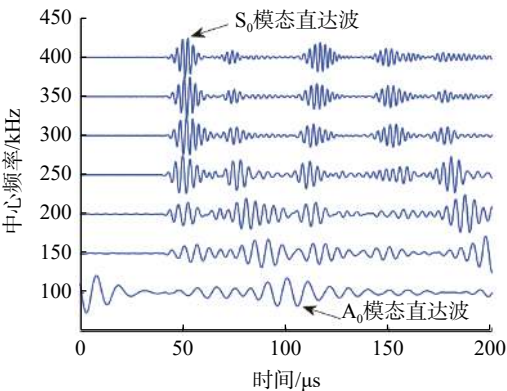


图 3 2 mm 孔边裂纹窄带单音频脉冲激励信号中心频率优化选取过程

Fig.3 Optimization selection process for the narrow band single audio pulse excitation signal center frequency in the 2 mm crack originating from the through-hole

占据主导地位。同时,当中心频率从 300 kHz 逐渐增大到 400 kHz 时,响应信号中 Lamb 波 A_0 模式波包幅值将逐渐减小,400 kHz 时单音频脉冲响应信号中的 S_0 模式明显占据主导地位。

图 3(b) 为响应信号中 Lamb 波低频模式波包能量的频率分布图和波包能量比值趋势图。考虑信号信噪比的影响,根据经验公式取波包幅值大于信号峰-峰值 20% 以上的信号用于能量计算。由图 3(b) 可知,当中心频率为 250 kHz 时, S_0 模式波包能量和 A_0 模式波包能量相差不大,当频率从 200 kHz 逐渐减小到 100 kHz 时,2 种模式波包能量随之减小,但 A_0 模式波包能量始终大于 S_0 模式波包能量。同时,当中心频率从 300 kHz 逐渐增大到 400 kHz 时, S_0 模式波包能量先增大后减小, A_0 模式波包能量逐渐减小, S_0 模式波包能量始终大于 A_0 模式波包能量,且 S_0 模式波包能量在

350 kHz 时最大。从图 (3b) 中折线图可以看出, S_0 模式波包能量与 A_0 模式波包能量的比值随着频率的增大先缓慢增大,然后比值从 250 kHz 开始突然增大,到 350 kHz 折线上升变得平缓。综上所述,选择 350 kHz 及以上的频率较适合 Lamb 波 S_0 模式的定位与成像,在本文的 Lamb 波 S_0 模式检测研究中选择中心频率为 350 kHz。

4.2 周期数优化

图 4(a) 给出了中心频率 300 kHz 时由 chirp 响应信号提取得到的不同调制周期数的单音频脉冲响应信号,这里选择 4#到 6#传感器路径上得到的监测信号进行实验,其中,4#为发射器,6#为接收器。由图 4(a) 可以看出,当信号调制周期数较大时, Lamb 波 S_0 模式和 A_0 模式直达波波包发生混叠。当调制周期数逐渐减小时, S_0 模式和 A_0 模式直达波波包清晰可辨,在 3 周期时最为清晰。

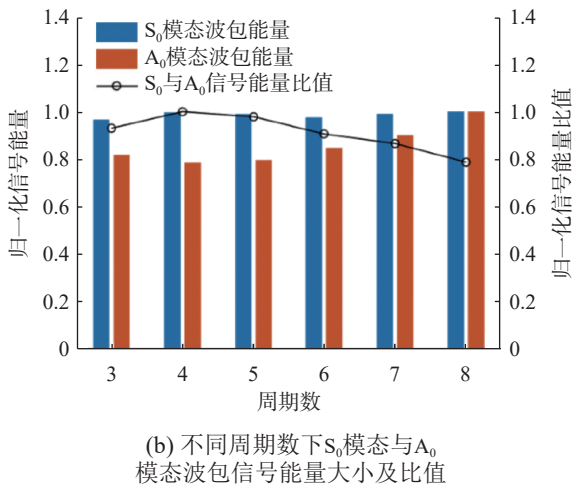
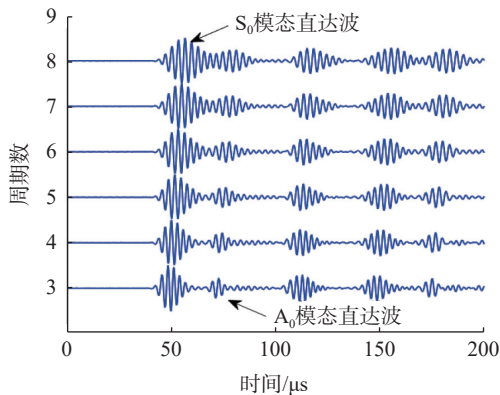


图 4 2 mm 孔边裂纹窄带单音频脉冲激励信号周期数优化选取过程

Fig.4 Optimization selection process for the narrow band single audio pulse excitation signal period number in the 2 mm crack originating from the through-hole

图 4(b) 为响应信号中 Lamb 波低频模态波包能量的周期分布图和波包能量比值趋势图, 这里分别截取 2 种模态波包信号峰-峰值的 20% 区域内的信号用于能量计算。图中随着周期数的逐渐减小, S_0 模态波包能量逐渐增大, A_0 模态波包能量逐渐减小, 2 种模态波包能量的比值随着周期数的减小逐步增大。综上所述, 选择 3 周期较适合 Lamb 波 S_0 模态的定位与成像, 在本文的 Lamb 波 S_0 模态检测研究中选择周期数为 3 周期。

由于本文篇幅有限, 不再另外赘述 Lamb 波 A_0 模态窄带单音频脉冲激励信号中心频率和调制周期数的分析过程。本文的 Lamb 波 A_0 模态检测研究中选择中心频率为 146 kHz, 周期数为 6 周期。

5 孔边裂纹的定位成像

5.1 Radon 变换过程

图 5 给出了单音频脉冲响应信号进行 Radon

变换后响应信号幅值映射到 Radon 平面的结果。图中 Radon 平面的横轴和纵轴分别用偏移时间和群速度来表示, 其坐标轴范围代表了这 2 个变量的取值范围。Radon 平面上的像素大小为 15 组不同传感器路径单音频脉冲响应信号的幅值叠加, 幅值叠加结果越大, 该位置的像素越大, 图像显示越亮; 反之, 图像显示越暗。图 5(a) 为对 2 mm 孔边裂纹缺陷的响应信号进行 Radon 变换得到的图像, 此时对应 Lamb 波 S_0 模态波长和缺陷比为 7.5 的情形, 图中亮黄色区域为积分计算结果较大的区域。通过最大值寻优算法, 可以进一步获得 Lamb 波 S_0 模态波包的群速度 $c_g = 4.93 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 和偏移时间 $t_0 = 8.2 \mu\text{s}$ 。图 5(b) 为对 5 mm 孔边裂纹缺陷的响应信号进行 Radon 变换得到的图像, 对应于 Lamb 波 A_0 模态波长和缺陷比为 2.4 的情形。根据积分计算结果中亮黄色区域的最大值坐标, 可以获得 Lamb 波 A_0 模态波包的群速度 $c_g = 2.94 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 和偏移时间 $t_0 = 25.6 \mu\text{s}$ 。

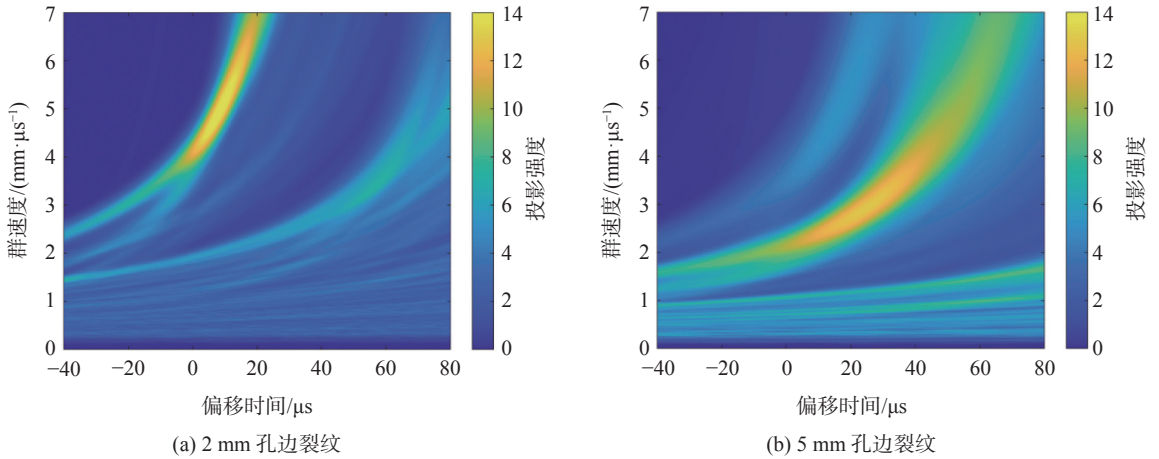


图 5 Radon 变换平面可视化图像

Fig.5 Visualization image for the Radon transform plane

5.2 群速度实验校正

图 6 给出了基于名义群速度法和 Radon 变换法的 Lamb 波低频模态实验群速度线性拟合结果, 其中图 6(a) 对应裂纹长度 2 mm 时 Lamb 波 S_0 模态的情形, 图 6(b) 是裂纹长度 5 mm 时 Lamb 波 A_0 模态的拟合结果。如图 6 所示, 红色拟合直线的斜率表示由名义群速度法得到的 Lamb 波直达波包的名义群速度值, 拟合直线与时间轴的截距即为名义到达时间与实际测量值之间的时间补偿误差, 名义群速度法约定以 Lamb 波模态直达波包幅值最大值的 20% 阈值对应的时刻为名义到达时间。

蓝色拟合直线的斜率表示由 Radon 变换得到的 Lamb 波直达波包的群速度值, 拟合直线与时间轴的截距即为到达时间与实际测量值之间的时间补偿误差。由图 6 中的拟合直线可知, 通过 Radon 变换法得到的群速度测量点较为集中, 而名义群速度法得到的群速度测量点较为分散, 故使用 Radon 变换法绘制的拟合直线较名义群速度法的拟合效果更好, 计算得出的波包飞行时间也就更准确。

5.3 成像定位结果

根据式 (10)~(16) 所述的椭圆定位成像算法步骤, 可以得到如图 7 所示的不同长度孔边裂纹可

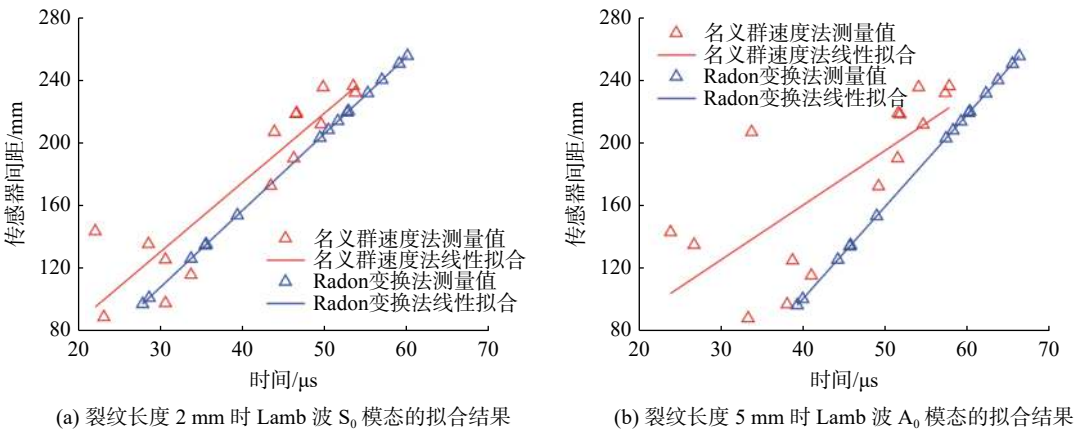


图 6 名义群速度法和 Radon 变换拟合结果

Fig.6 Fitting results by the nominal group velocity method and Radon transform

可视化定位图像，其中，白色“o”对应着稀疏传感器阵列中每个 PZT 压电片的粘贴位置，黑色“+”对应着孔边裂纹的实际位置。其中，Lamb 波 S_0 模态孔边裂纹定位结果如图 7(a) 和图 7(b) 所示，由于 Radon 变换将 $\theta - xy$ 平面中 Lamb 波 S_0 模态的波包飞行时间寻优问题转化为 $\theta - \rho$ 极坐标平面的极值问题，使得 Lamb 波波包飞行时间的计算精度得到了极大的提升。上述结果表明，融合 Radon 变换法得到的裂纹定位结果与实际位置更加接近，而使用名义群速度法得到的定位结果与实际位置

偏差较大。Lamb 波 A_0 模态孔边裂纹定位结果如图 7(c) 和图 7(d) 所示。研究表明，使用名义群速度法计算得到的 Lamb 波 A_0 模态波包飞行时间无法定位 5 mm 孔边裂纹的位置，而 Radon 变换法通过将波包飞行时间寻优问题转换为极值问题，使得 Lamb 波 A_0 模态对 5 mm 孔边裂纹的定位精度较高。综上所述，相较于传统的名义群速度法，融合 Radon 变换的 Lamb 波定位成像技术有效地提高了 Lamb 波波包飞行时间的检测精度和成像效果。

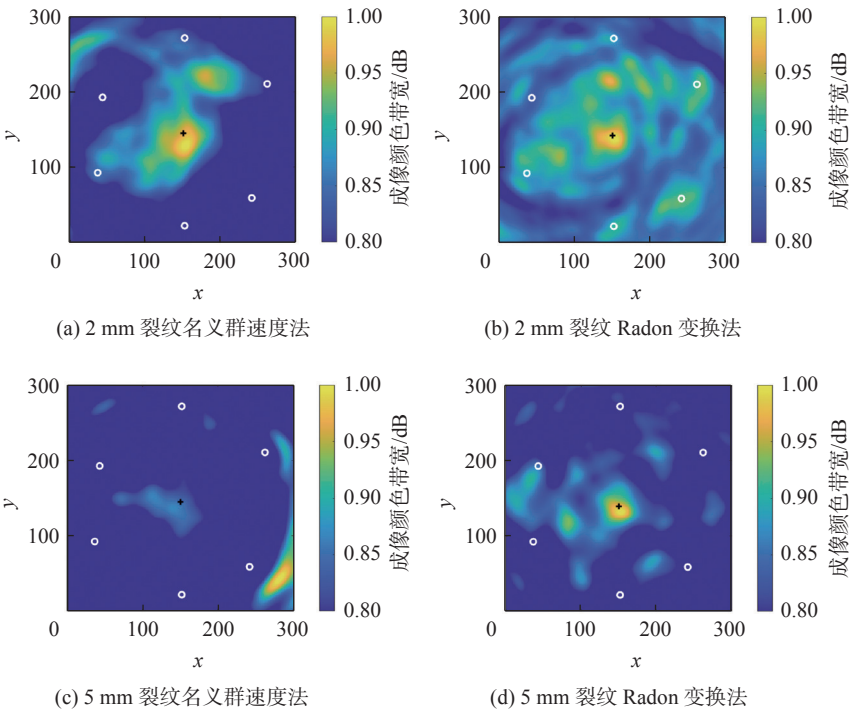


图 7 孔边裂纹的定位成像

Fig.7 Localization imaging of cracks originating from the through-hole

6 结 论

以航空航天中金属板状结构通孔边缘形成的裂纹为研究对象，基于不同模态 Lamb 波与孔边裂纹相互作用的基本原理，聚焦不同模态 Lamb 波波包飞行时间精确检测问题，开展了融合 Radon 变换的 Lamb 波孔边裂纹定位成像研究。研究结果表明，Radon 变换可以将 $\rho-xy$ 平面中不同模态 Lamb 波监测信号的波包飞行时间寻优问题转化为 $\rho-\theta\rho$ 极坐标平面的极值问题，从而极大地提高了 Lamb 波波包飞行时间的计算精度。在基于 ToF 的孔边裂纹 Lamb 波结构健康监测技术中，Radon 变换的融合极大地提高了椭圆算法的定位和成像能力。本文所提出的融合 Radon 变换的 Lamb 波结构缺陷定位成像方法和有关结论，对航空航天中金属板状结构的无损检测和结构健康监测具有重要的指导意义和参考价值。

参考文献：

[1] 孙振起, 黄明辉. 航空用铝合金表面处理的研究现状与展望 [J]. 材料导报, 2011, 25(23): 146–151.

[2] BHUIYAN M Y, SHEN Y F, GIURGIUTIU V. Guided wave based crack detection in the rivet hole using global analytical with local FEM approach[J]. *Materials*, 2016, 9(7): 602.

[3] 马浩, 张玲. 金铜双金属表面增强拉曼散射基底制备及应用 [J]. 光学仪器, 2022, 44(5): 35–41.

[4] SU Z Q, YE L. Identification of damage using Lamb waves: from fundamentals to applications[M]. London: Springer, 2009.

[5] 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): 1713–1735.

[6] SHEN Y F, CESNIK C E S. Nonlinear scattering and mode conversion of Lamb waves at breathing cracks: an efficient numerical approach[J]. *Ultrasonics*, 2019, 94: 202–217.

[7] 张硕. 基于非线性超声和概率扫描矩阵的微裂纹定位研究 [D]. 天津: 天津大学, 2019.

[8] ASLAM M, NAGARAJAN P, REMANAN M. Defect localization using nonlinear Lamb wave mixing technique[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2021, 40(1): 16.

[9] 张正罡, 刘丹, 他得安. 多通道超声兰姆波检测板状结构

中的裂纹 [J]. 应用声学, 2015, 34(3): 189–194.

[10] 何志全, 周丽, 孙虎. 基于传递阻抗能量的无基准 Lamb 波裂纹检测 [J]. 工程力学, 2014, 31(7): 250–256.

[11] CHIU W K, ROSE L R F, VIEN B S. Scattering of the edge-guided wave by an edge crack at a circular hole in an isotropic plate[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 188: 309–316.

[12] LIU H Y, CHEN X, MICHAELS J E, et al. Incremental scattering of the A_0 Lamb wave mode from a notch emanating from a through-hole[J]. *Ultrasonics*, 2019, 91: 220–230.

[13] 焦敬品, 李勇强, 杜礼, 等. 板结构裂纹兰姆波阵列复合成像方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 593–601.

[14] BARSKI M, STAWIARSKI A. The crack detection and evaluation by elastic wave propagation in open hole structures for aerospace application[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 81: 141–156.

[15] LUO C, LI P J, ZHU X J, et al. Research of damage imaging algorithm in plate based on signal magnitude[M]//MA S W, JIA L, LI X, et al. Life System Modeling and Simulation. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014: 319–328.

[16] 陈洪磊, 刘增华, 吴斌, 等. 基于密集阵列的参数化 Lamb 波检测技术研究 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(20): 20–28.

[17] 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.

[18] XIA Q W, LIU Y Y, LU Y, et al. A modified damage index probability imaging algorithm based on delay-and-sum imaging for synthesizing time-reversed Lamb waves[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2019, 21(8): 2140–2147.

[19] 刘宏业, 金娇延, 范彦平, 等. 单水滴附载的 Lamb 波宽频 Chirp 激励成像研究 [J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(5): 749–756.

[20] LOWE M J S, ALLEYNE D N, CAWLEY P. The mode conversion of a guided wave by a part-circumferential notch in a pipe[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1998, 65(3): 649–656.

[21] MICHAELS J E, LEE S J, CROXFORD A J, et al. Chirp excitation of ultrasonic guided waves[J]. *Ultrasonics*, 2013, 53(1): 265–270.

(编辑：黄 娟)