

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514065

基于波形相关因子加权的变厚度板 Lamb 波全聚焦成像*

黄尹, 王旗, 许才彬, 邓明晰
(重庆大学航空航天学院 重庆 400044)

摘要:变厚度板因其轻量化等结构优势在航空航天、核能工程等重要领域具有广泛应用,其缺陷检测对保障服役安全具有重要意义。然而,变厚度板的几何非均匀性会显著影响其中 Lamb 波的传播特性,导致 Lamb 波传播行为复杂、频散效应加剧,并使得常规适用于等厚度波导结构的 Lamb 波缺陷成像方法失效。针对变厚度板缺陷检测问题,提出一种基于波形相关因子加权的 Lamb 波全聚焦成像方法,用于变厚度板中缺陷的定位成像。该方法首先构建了 Lamb 波在变厚度板中传播的理论模型,将厚度渐变波导等效为一系列局部均匀的等厚度短波导的组合。其次,利用基于传播路径的虚拟反向传播技术对缺陷散射波包进行频散补偿,修正波形畸变。在此基础上,计算频散补偿后各通道信号的波形相关系数,作为权重因子与经典全聚焦方法的幅值叠加机制复合,构建基于权重因子的幅值成像指标。该成像指标通过波形相关因子加权抑制了非相关噪声对幅值叠加的贡献,提升了缺陷成像的信噪比。在线性变厚度铝合金板中的数值仿真结果表明,所提出的方法能实现缺陷的有效定位成像,且最大缺陷中心定位误差 <4 mm,成像背景噪声幅值显著低于传统全聚焦方法,实验结果进一步验证了该方法的有效性。本研究可为变厚度板中的缺陷检测与成像提供有益参考。

关键词: Lamb 波;缺陷成像;变厚度;全聚焦;波形相关因子

中图分类号: TH89 O426.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40 140.20

Waveform correlation factor-weighted Lamb wave total focusing imaging for variable-thickness plates

Huang Yin, Wang Qi, Xu Caibin, Deng Mingxi

(College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Variable-thickness plates are widely used in critical fields such as aerospace and nuclear engineering due to their structural advantages, such as lightweight properties, making defect detection essential for ensuring operational safety. However, the geometric non-uniformity of such plates significantly affects the propagation characteristics of Lamb waves, leading to complex wave behavior, intensified dispersion effects, and rendering conventional Lamb wave defect imaging methods designed for uniform-thickness waveguides ineffective. To address the defect detection challenges in variable-thickness plates, this paper proposes a Lamb wave total focusing imaging method weighted by waveform correlation factors for defect localization and imaging. First, a theoretical model of Lamb wave propagation in variable-thickness plates is established by approximating the thickness-varying waveguide as a series of locally uniform, constant-thickness short waveguides. Then, a propagation-path-based virtual backpropagation technique is employed to perform dispersion compensation on defect-scattered wave packets, correcting waveform distortions. On this basis, the waveform correlation coefficients of the dispersion-compensated signals from each channel are calculated and used as weighting factors, which are integrated with the amplitude superposition mechanism of the classical total focusing method to construct a weighted amplitude imaging metric. By introducing the waveform correlation factor, this metric suppresses the contribution of uncorrelated noise to amplitude superposition, thereby improving the signal-to-noise ratio of defect imaging. Numerical simulations on a linearly varying-thickness aluminum alloy plate demonstrate that the proposed method can achieve effective accurate defect localization, with a maximum defect center localization error of less than 4 mm, and the imaging background noise amplitude is significantly lower than that of the conventional total focusing method.

收稿日期: 2025-05-22 Received Date: 2025-05-22

* 基金项目: 国家自然科学基金(12374430, 12134002)项目资助

Experimental results further verify the effectiveness of the proposed approach. This study provides a valuable reference for defect detection and imaging in variable-thickness plates.

Keywords: Lamb wave; defect imaging; variable thickness; total focusing method; waveform correlation

0 引言

近年来,基于超声导波的无损检测技术在航空航天、核能工程等领域中展现出显著优势^[1-4]。其中,Lamb 波因其独特的传播特性和优越的损伤检测能力的而受到广泛关注^[5],作为一种在薄板结构中传播的弹性波,它具备长距离检测能力。此外,通过激发不同的 Lamb 波模式,能够沿着波传播方向对被测板材的整个厚度进行探测,从而实现对外部损伤的检测^[6-8]。然而,Lamb 波的传播特性本质上与频厚积(频率与厚度的乘积)密切相关^[9];当波导厚度沿传播路径变化时,其中的 Lamb 波频散关系会随之改变,导致传统等厚度板中的缺陷成像方法不再适用。

在现代工业中,变厚度板因其独特的结构优势和功能特性而被广泛应用,如纵向型材板(longitudinally profiled plate, LP 板)通过厚度连续变化设计,能够根据实际载荷分布优化材料配置,显著减少结构重量和施工焊接接缝,提升结构效率^[10]。例如,在建造 17 万吨级货船时,由于使用了 2 500 t 的 LP 板,焊缝长度可减少 700 m,可节省钢材 218 t^[11]。因此,研究 Lamb 波在变厚度结构中的损伤检测问题,对于拓展 Lamb 波在变厚度板中的应用以及实现变厚度结构中的损伤检测具有重要意义。

针对 Lamb 波在变厚度板中的传播问题,国内外相关学者进行了研究。Moll 等^[12-13]研究了在具有线性变化截面的各向异性结构中反对称波模式的传播特性,发现相速度和群速度在沿非均匀波导传播时会发生变化,导致传统损伤定位方法出现系统性损伤定位误差;De Marchi 等^[14-15]提出了一种预测变截面波导中 Lamb 波群延迟的方法,并在已知 Lamb 波准确传播路径的前提下,提出了基于 Lamb 波传播路径先验信息的变厚度波导中 Lamb 波频散补偿方法;El-Kettani 等^[16]通过实验和数值模拟手段,探讨了在厚度线性变化的自由弹性板中导波的传播行为;Pagneux 等^[17]开展了变截面板中 Lamb 波的传播特性研究。

关于超声导波在变厚度板中的传播特性已有不少研究,但基于 Lamb 波的变厚度板损伤检测,尤其是缺陷成像仍较为缺乏。在超声缺陷成像方法中,全聚焦方法(total focusing method, TFM)是一种高效的后处理算法,近年来,该方法也被用于板状结构的损伤成像。Holmes^[18]研究了基于全矩阵数据采集(full matrix

capture, FMC)的全聚焦方法,显著提高了无损检测中超声相控阵的成像质量;Zhang 等^[19]提出了一种基于稀疏阵列的 TFM 成像算法,降低了计算时间;周至伟等^[20]提出了一种基于改进稀疏表示的超声信号处理方法,解决了高衰减厚壁结构超声检测中缺陷特征提取困难和信噪比较低的问题。然而,目前关于超声导波 TFM 的应用大多只适用于等厚度波导,变厚度波导中应用 TFM 方法的主要难点在于:由于波传播路径的先验信息缺失,Lamb 波的频散补偿难以有效实现,进而无法实现变厚度板中 Lamb 波的动态聚焦。因此,在变厚度波导中定位缺陷以及进行缺陷成像仍然具有挑战性。

针对变厚度板中 Lamb 波缺陷检测问题,提出了一种用于变厚度板缺陷定位的 Lamb 波成像方法,通过将厚度渐变的波导结构等效为一系列局部均匀等厚的短波导结构的组合,建立了变厚度板中的 Lamb 波透射波传播模型。在此基础上,基于传感器阵列全矩阵采集数据,提出了改进的变厚度板 Lamb 波加权全聚焦成像方法:首先利用虚拟反向传播消除厚度梯度引起的相位畸变,从而实现 Lamb 波的频散补偿,再通过波形相关系数(waveform correlation factor, WCF)加权全聚焦成像指标,抑制噪声,提高成像质量。

1 Lamb 波传播模型

1.1 均匀厚度板

为了深入探究厚度变化对 Lamb 波传播特性的影响,有必要首先讨论 Lamb 波在均匀厚度薄板中的传播行为。假设一个厚度保持恒定的无限大薄板,并忽略边缘反射,如图 1 所示。

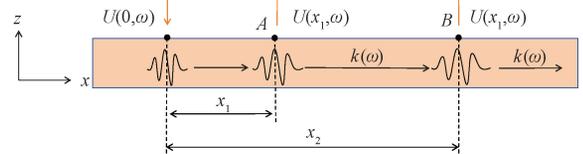


图 1 Lamb 波在等厚度板中的传播

Fig. 1 Lamb wave propagation in a uniform-thickness plate

在初始激励信号的激励下,距离激励源处 x_1 处 A 点的响应信号可以表示^[21]为:

$$u(x_1, t) = A(x_1) \int_{-\infty}^{+\infty} U(0, \omega) e^{i(\omega t - k(\omega)x_1)} d\omega \quad (1)$$

式中: $u(x_1, t)$ 表示距离激励源处 x_1 处的时域响应信号;

$U(0, \omega)$ 是激励信号的频域形式; i 是虚数单位; ω 是角频率; $A(x_1)$ 是描述振幅衰减的因子, 其大小传播距离有关; $k(\omega)$ 为在角频率 ω 下的波数。在板厚恒定时, $k(\omega)$ 的大小取决于角频率。图 2(a) 和 (b) 分别给出了不同模式下 Lamb 波的相速度和波数随频厚积变化的频散曲线。

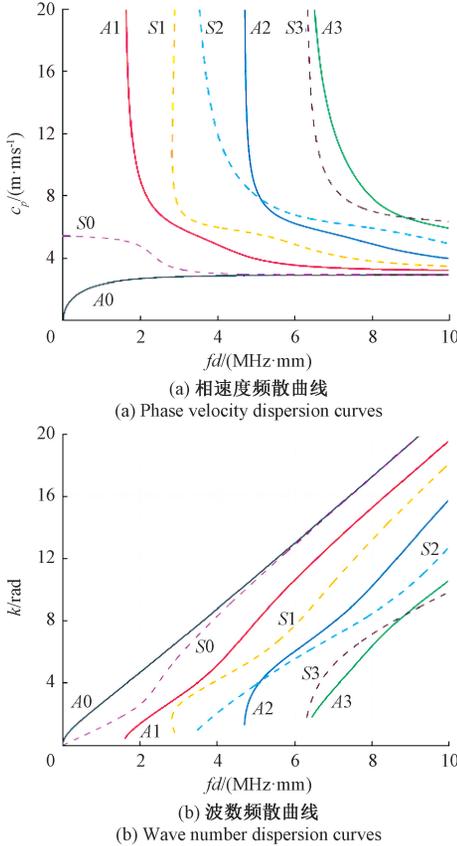


图2 铝板中不同模式的 Lamb 波频散曲线

Fig. 2 Dispersion curves of different Lamb wave modes in an aluminum plate

现暂不考虑 Lamb 波传播过程中的幅值改变, 仅考虑其响应信号波形的变化, 则对式 (1) 进行傅里叶变换, 将时间 t 变换到频率 ω , 可得到该等式的频域形式, 即:

$$U(x_1, \omega) = U(0, \omega) e^{-ik(\omega)x_1} \quad (2)$$

式中: $U(x_1, \omega)$ 即为时域响应信号 $u(x_1, t)$ 的频域形式。由式 (2) 可知, 只要确定了波的传播距离、波数以及激励点处的信号, 就可以预测任一点处的响应信号波形 (即透射波波形)。此时, 若要讨论点 B 处的响应信号, 可以将点 A 处的响应信号视为新的激励信号, 且其传播距离为 $x_2 - x_1$, 则点 B 处响应信号可表示为:

$$U(x_2, \omega) = U(x_1, \omega) e^{-ik(\omega)(x_2 - x_1)} \quad (3)$$

1.2 变厚度板

上述 Lamb 波在等厚度板中的传播模型可以进一步推广至更为复杂的变厚度板场景中, 通过将变厚度板视

为一系列短的等厚度单元的组合, 可以有效地利用等厚度板的传播模型来描述和预测 Lamb 波透射波在变厚度板中的行为。

如图 3 所示, 假设 Lamb 波在厚度变化的板中沿 x 方向传播, 其中 z 方向为板的厚度方向, 且该变厚度板在 y 方向上的尺寸视为无限延伸。对于沿传播方向厚度变化的任意波导结构, 可将其近似为一系列短的、厚度恒定但各不相同的单元。每个特定单元均保持恒定的厚度, 且沿传播方向的长度均为 Δx 。在波的传播路径上, 前一单元的输出响应信号可视为后一单元的输入激励。

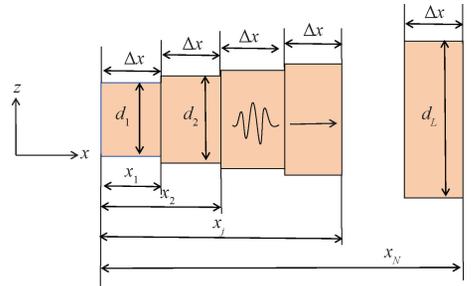


图3 变厚度波导的近似等效模型

Fig. 3 Approximate equivalent model for variable-thickness waveguide

由于每个单元内的 Lamb 波传播可通过式 (2) 进行预测, 只要 Δx 足够小, 即可预测任意单元处的响应波形。因此, 各单元的输出响应信号 (即透射波信号) 可以表示为:

$$\begin{cases} U(x_1, \omega) = \alpha_0 U(0, \omega) e^{-ik(d_1, \omega)x_1} \\ U(x_2, \omega) = \alpha_1 U(x_1, \omega) e^{-ik(d_2, \omega)(x_2 - x_1)} \\ \vdots \\ U(x_L, \omega) = \alpha_0 \alpha_1 \cdots \alpha_L U(0, \omega) e^{-ik(\omega)\Delta x} \end{cases} \quad (4)$$

式中: α_j 表示透射波能量的比例系数; 定义总波数 $\bar{k}(\omega)$ 为:

$$\bar{k}(\omega) = \sum_{j=1}^L k(d_j, \omega) \quad (5)$$

式中: $k(d_j, \omega)$ 是具有厚度 d_j 的第 j 个厚度单元内的 Lamb 波的波数。由式 (5) 可以看出, 若板的厚度不随传播方向改变, 总波数将等于 $Lk(\omega)$ 。此时, 式 (4) 将转化为式 (2), 也即恒定厚度板中的导波传播模型是变厚度板导波传播模型的一种特殊情况。

由式 (3) 与 (4) 可知, 输出响应信号的预测依赖于传播路径上各单元厚度对应的波数。在确定模式的情形下, Lamb 波频散曲线本质上是频厚积的函数, 由已知的波数曲线 $k(\omega, d)$, 可通过一维插值实现任意厚度下的波数快速计算, 即:

$$k(d_j, \omega) = f_{\text{interp1}}(\omega \cdot d, k(d, \omega), \omega \cdot d_j) \quad (6)$$

式中: f_{interp1} 是插值函数算子, 利用已知厚度的频散数据点 $(\omega, k(d, \omega))$ 生成任意厚度下的波数曲线^[22]。此方法避免了反复逐点求解 Rayleigh-Lamb 方程的复杂计算, 显著提升了计算效率。

从式(2)和(4)可以看出, 输出响应信号仅与传播距离以及板的厚度分布相关联, 而与具体的传播路径无关。由于频散效应会引起相位畸变, 从而降低缺陷定位的精度, 因此需要利用信号处理技术消除或补偿频散。当平板厚度恒定时, 可以在不知道传播路径的情况下, 通过已有频散补偿方法来消除接收到的响应信号中的频散效应^[23]。然而, 在板的厚度变化的情况下, 现有的频散补偿方法无法继续发挥作用, 因为频散特性会随着传播路径的变化而变化, 第 2 章将介绍在变厚度板中进行频散补偿的方式。

2 变厚度板 WCF-TFM 理论

2.1 全聚焦成像原理

TFM 的实现依赖于 FMC 提供的数据集^[24]。该技术的核心在于通过系统性遍历所有可能的发射-接收传感器对, 构建覆盖完整的时域信号矩阵。具体操作流程为: 在由 r 个阵元成的传感器阵列中, 依次选定单个阵元作为激励阵元发射超声脉冲, 其余 r 个阵元同步作为接收阵元, 记录由发射阵元激发产生的散射信号时域波形。完成所有阵元遍历后, 形成维度为 $r \times r$ 的全矩阵数据, 即:

$$S = \begin{bmatrix} s_{11}(t) & s_{12}(t) & \cdots & s_{1r}(t) \\ s_{21}(t) & s_{22}(t) & \cdots & s_{2r}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{r1}(t) & s_{r2}(t) & \cdots & s_{rr}(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: 矩阵中元素的第 1 个下标表示激励阵元编号; 第 2 个元素表示接受阵元编号。例如, $s_{r,1}(t)$ 表示由第 r 个阵元作为激励、第 1 个阵元作为接收所得响应信号。

全聚焦成像核心思想在于通过逐像素动态聚焦实现全域成像。与传统超声成像方法不同, TFM 对检测区域内每个虚拟聚焦点独立叠加计算声压幅值, 其原理如图 4 所示。

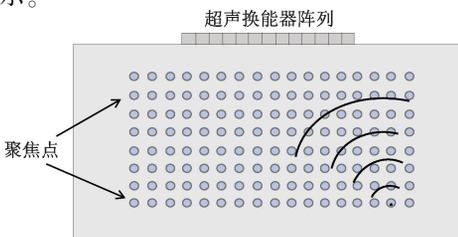


图 4 超声相控阵全聚焦成像原理

Fig. 4 Principle of phased-array total focusing imaging

具体过程可表述为: 将检测区域离散为一系列聚焦点, 对于每个聚焦点, 遍历所有收发对, 计算该聚焦点的散射信号的理论传播时延。然后, 通过对时延补偿后的信号幅值进行叠加, 生成反映材料内部缺陷空间分布的图像。

对于某一聚焦点, 其叠加声压幅值可以表示为:

$$I_{\text{TFM}} = \left| \sum_{l=1}^r \sum_{p=1}^r s_{l,p}(tof_{l,p}(x,y)) \right| \quad (8)$$

式中: $I_{\text{TFM}}(x,y)$ 是聚焦点 (x,y) 处的全聚焦成像结果; $s_{l,p}(t)$ 是第 l 个阵元作为激励、第 p 个阵元作为接收所得响应信号; $tof_{l,p}(x,y)$ 是从第 l 个阵元激励后传播到 (x,y) 点, 再由该点反射后被第 p 个阵元接收所经历的总飞行时间。式(8)综合了从各个阵元发射和接收的声波传播时间, 并与采集到的信号进行匹配, 从而得出该点的声压幅值。

但式(8)仅适用于体波、表面波等非频散信号, 对于具有显著频散效应的 Lamb 波并不适用。导波的频散效应表现为其相速度与群速度随频率变化, 导致波包在传播过程中发生时域展宽与波形失真。在 TFM 成像中, 需基于信号到达时间计算散射点位置。传统用于无频散效应波的 TFM 假设波速恒定, 但导波传播时速度是频率的函数, 导致理论声程时间与真实传播时间偏离, 且各接收信号在对应声程下的相位因频散效应而不一致, 若直接叠加幅值则无法实现“同相叠加”效果, 显著降低缺陷信号的幅值信噪比。因此, 将全聚焦方法应用于 Lamb 波的损伤检测时, 需要考虑频散效应的影响, 并采用有效信号处理方法消除频散效应对信号聚焦的影响。

2.2 变厚度板缺陷全聚焦成像方法

针对含损伤的变厚度板结构, 可将其损伤区域简化为点状散射体的线性组合, 并基于一发一收模式对散射信号进行理论建模。假设发射阵元与接收阵元的物理尺寸远小于波传播路径长度, 可将其简化为点源模型, 如图 5 所示。

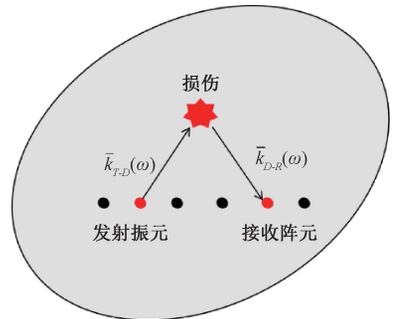


图 5 缺陷引起的散射信号示意图

Fig. 5 Schematic diagram of scattered signals induced by defects

在此框架下, 忽略直达波及边界反射效应, 仅考虑发射阵元至损伤再至接收阵元的散射波传播路径。类比等

厚度板中散射信号建模方法,变厚度板损伤散射过程可分解为激励信号从发射阵元传播至损伤点的直达波和损伤点作为次级波源,向接收阵元传播的散射波。若忽略损伤与 Lamb 波相互作用中的模式转换及非线性效应,缺陷散射信号的频域表达式可近似为:

$$U_{T-D-R}(\omega) = \alpha U(0, \omega) e^{-i\Delta x[\bar{k}_{T-D}(\omega) + \bar{k}_{D-R}(\omega)]} \quad (9)$$

式中: $U_{T-D-R}(\omega)$ 是频域中的散射信号,下标“T”、“D”和“R”分别表示“发射阵元”、“缺陷”和“接收阵元”; α 同式(4),它包含散射系数以及方程中透射波能量的比例,用于表征损伤严重程度;参数 α 越大,损伤将越严重; $\bar{k}_{T-D}(\omega)$ 和 $\bar{k}_{D-R}(\omega)$ 分别是 Lamb 波从发射阵元传播到损伤和从损伤传播到接收阵元的两个总波数。其数值可通过式(5)结合特定模式的频散关系计算获得。

由式(4)中角频率 ω 与总波数的非线性关联性可知,响应信号的相位特性受频率与传播距离的双重影响。针对恒定厚度结构,可采用频散补偿方法消除相位畸变,使不同散射信号经时移修正后实现相位同步。然而,对于厚度变化的波导,常规补偿方法无法有效校正接收信号的相位误差。为解决这一问题,可通过路径已知的逆向传播策略,将散射信号从接收阵元回溯至损伤点,再正向传递至发射阵元。该过程的数学表述为:

$$U_b(\omega) = U_{T-D-R}(\omega) e^{-i\Delta x[\bar{k}_{R-D}(\omega) + \bar{k}_{D-T}(\omega)]} \quad (10)$$

式中: $\bar{k}_{R-D}(\omega)$ 和 $\bar{k}_{D-T}(\omega)$ 分别表示 Lamb 波从损伤点至接收阵元与从发射阵元至损伤点的总波数。结合式(5)中总波数的可逆性原理可知, $\bar{k}_{R-D}(\omega) = \bar{k}_{D-R}(\omega)$ 和 $\bar{k}_{D-T}(\omega) = \bar{k}_{T-D}(\omega)$ 。因此,将式(9)代入式(10),反向传播后的信号可简化为:

$$U_b(\omega) = \alpha U(0, \omega) \quad (11)$$

式(11)揭示了虚拟反向传播信号与初始激励的波形相似性,仅存在幅度系数 α 的差异。此特性表明,散射信号的频散效应可被完全消除,使得阵列接收信号经逆向传播后实现相位对齐。其核心优势在于:同相信号的叠加可显著增强损伤散射成分,而噪声因相位随机性被部分抵消。

然而,式(10)的实现需预先获取散射路径信息,而实际损伤位置未知导致该条件难以满足。为此,需将成像区域内所有潜在损伤点依次作为假设损伤位置点输入式(10)。若假设位置与实际损伤位置重合,逆向信号将严格满足式(11);反之,当假设位置偏离真实损伤时,逆向信号表达式为:

$$U_b(\omega) = \alpha U(0, \omega) e^{-i\Delta x[\bar{k}_{T-D}(\omega) - \bar{k}_{P-T}(\omega) + \bar{k}_{D-R}(\omega) - \bar{k}_{R-P}(\omega)]} \quad (12)$$

式中: $\bar{k}_{P-T}(\omega)$ 和 $\bar{k}_{R-P}(\omega)$ 分别为 Lamb 波从可能损伤位置传播到发射阵元和从可能损伤位置传播到接收阵元的总波数。由于可能损伤位置与实际损伤位置不一致,则

$\bar{k}_{T-D}(\omega) \neq \bar{k}_{P-T}(\omega)$ 和 $\bar{k}_{D-R}(\omega) \neq \bar{k}_{R-P}(\omega)$ 。在这种情况下,式(12)中反向传播信号的相位 $U_b(\omega)$ 并不总是与激励的相位相同,而是与输入位置点(可能损伤位置)、发射阵元位置和接收阵元位置相关联。因此,不同收发组合的逆向信号呈现非相关性,其叠加幅值显著低于同相条件下的结果。这一机制为基于逆向传播的损伤成像提供了理论依据:通过遍历可能损伤点并计算信号相关性,可实现损伤位置的精准定位。

为实现变厚度板中损伤的精准定位,需构建超声阵列系统以激励并接收 Lamb 波信号。为构建损伤指示图像,将目标成像区域离散为总共 M 个成像点,其中每个点均作为可能损伤位置进行遍历计算。假设一共收集到 N 个信号,它们对第 m 个成像点的反向传播信号可以表示为:

$$U_{b,n}(\omega, m) = U_n(\omega) e^{i\Delta x[\bar{k}_{R-m,n}(\omega) + \bar{k}_{m-T,n}(\omega)]} \quad (13)$$

式中: $U_{b,n}(\omega, m)$ 为第 m 个成像点的第 n 个反向传播信号; $U_n(\omega)$ 为频域内第 n 个采集信号; $\bar{k}_{R-m,n}(\omega)$ 和 $\bar{k}_{m-T,n}(\omega)$ 为第 n 个收发对的接收阵元位置到第 m 个成像点的 Lamb 波总波数,和分别从第 m 个成像点到第 n 个收发对的发射阵元位置的总波数。由于传播路径已知, $\bar{k}_{R-m,n}(\omega)$ 和 $\bar{k}_{m-T,n}(\omega)$ 可由式(5)和(6)计算。

如前所述,如果当前成像点与真实损伤位置重合,则不同的反向传播信号中所含的损伤散射分量 $U_{b,n}(\omega)$ 将转化为激励波形的形状。在实际应用中, $U_{b,n}(\omega)$ 不仅包含损伤引起的分量,还包含模式转换等性质引起的干扰。因此,使用窗函数从反向传播的信号中提取由损伤引起的分量,其位置与当前成像点重合,即:

$$u_D(t, m) = \sum_n^{N=1} w(t) u_{b,n}(t, m) \quad (14)$$

式中: $u_{b,n}(t, m)$ 是 $U_{b,n}(\omega, m)$ 的时域信号; $w(t)$ 是一个矩形窗函数,定义为:

$$w(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, T_0] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中: T_0 为激励的时间持续时间。在提取散射信号(损伤引起的分量)后,可以将成像指数定义为散射信号的希尔伯特包络的幅值,即:

$$I_m = |u_D(t, m) + iH[u_D(t, m)]|_{t=T_0/2} \quad (16)$$

式中: $H[\cdot]$ 是希尔伯特变换; $|u_D(t, m) + iH[u_D(t, m)]|$ 是 $u_D(t, m)$ 的希尔伯特包络。计算出 M 个成像点的所有成像指标后,就可以生成一幅图像来指示损伤位置。

2.3 WCF-TFM

传统全聚焦成像方法依赖信号幅值的叠加构建图像,其局限性在于未充分利用波形形态特征。实际采集信号中,除了目标点的散射信号以外,常混杂其他位置散射波包及环境噪声,导致图像信噪比降低。

如式(11)所示,通过反向传播进行频散补偿后,同一点引起的波包波形将变成激励信号的形状。相反,如果波包不是由同一点引起的,那么它们的波形也不会完全相同。基于频散补偿波形的相似性,将成像指数 WCF 定义为:

$$I_{\text{WCF}}(x, y) = \left| \frac{1}{r(r-1)} \sum_{p=1}^r \sum_{q=1}^r \rho_{p,q}(x, y) \right|, \quad p \neq q \quad (17)$$

式中: $\rho_{p,q}(x, y)$ 为波形相关系数, 定义为:

$$\rho_{p,q}(x, y) = \frac{\text{Cov}(u_p(x, t), u_q(x, t))}{\sigma(u_p(x, t))\sigma(u_q(x, t))}, \quad \frac{T-\tau}{2} \leq t \leq \frac{T+\tau}{2} \quad (18)$$

式中: $\text{Cov}(\cdot)$ 和 $\sigma(\cdot)$ 分别是协方差和标准偏差的算子。其中 t 的取值表示用于相关系数计算的波形被限制在一定时间范围内, τ 则是控制选取时间范围宽度的参数。

由式(19)可知, 成像指数 $I_{\text{WCF}}(x, y)$ 计算的所有频散补偿波形之间任意两两波形相关系数的均值, 与传统仅依赖信号幅值的 TFM 成像方法不同。如果波形 $u_p(\omega)$ 和 $u_q(\omega)$ 是由同一点引起的, 则成像指数 $I_{\text{WCF}}(x, y)$ 较大。相反, 如果波形不是由同一点引起的, 则其波形的形状将因频散而不同。

将 WCF 和 TFM 两种成像指标的优势复合在一起, 即:

$$I(x, y) = I_{\text{WCF}}(x, y) I_{\text{TFM}}(x, y) \quad (19)$$

式中: WCF 作为权重因子引入 TFM, 抑制低相关区域的幅值贡献, 从而提升缺陷信噪比。该方法即为 WCF-TFM 成像算法, 可视为经典 TFM 的增强版本。需特别说明的是, 传统 TFM 适用于非频散的体波和频散补偿后的 Lamb 波缺陷成像, 而 WCF 仅对频散信号有效。这是因为非频散波包在不同传播距离下波形保持不变, 导致相关系数无法区分散射源差异。而频散信号经逆向传播补偿后, 波形相似性与散射源位置强相关, 为 WCF 提供了物理基础。综上所述, 提出的变厚度板损伤成像方法的主要步骤如图 6 所示。

3 有限元仿真验证

3.1 仿真模型设置

以均匀线性渐变厚度铝板为研究对象, 基于 Abaqus/Explicit 显式动力学分析模块建立三维有限元模型, 模型材料参数如表 1 所示。

表 1 铝合金材料参数

Table 1 Material parameters of aluminium alloy

密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
2 700	69	0.33

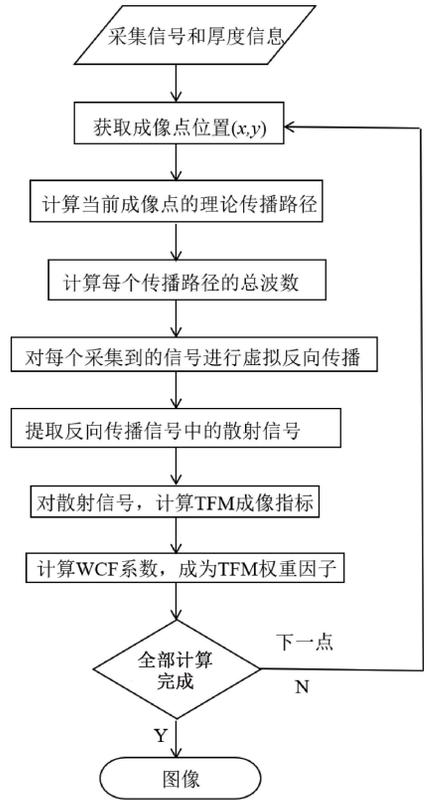


图 6 提出的变厚度板损伤成像方法的主要步骤
Fig. 6 The main steps of the damage imaging method for variable-thickness plates proposed in this paper

整体数值模拟设置如图 7 所示, 模型几何参数设定为 $1\,000\text{ mm}\times 500\text{ mm}$, 厚度沿 x 轴由 2 mm 线性递增至 4 mm 。在坐标 $(40\text{ mm}, 251\text{ mm})$ 处设置一个直径为 10 mm 的通孔缺陷(星形表示)。设置 8 个阵元组成均匀线性阵列, 该阵列沿底部 $y=1\text{ mm}$ 边界等间距排布, 阵元间距 5 mm 。

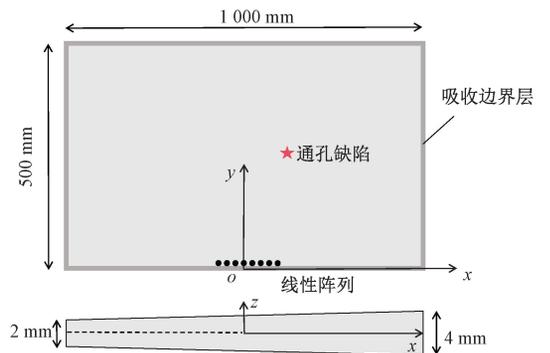


图 7 仿真模型尺寸、缺陷、阵元设置示意图
Fig. 7 Schematic diagram of the simulation model, including dimensions, defect, and array configuration

为避免多模式 Lamb 波耦合干扰, 对 8 个阵元沿厚度方向依次施加反对称面外位移载荷激发 A0 模式 Lamb

波,以确定单一 A0 模式激发条件。虽然在加载时沿着厚度方向的反对称位移加载仅激发出 A0 模式 Lamb 波,但由于 Lamb 波在传播时会发生模式转换,因此整个波场中仍然存在对称模式 Lamb 波。

在采集全矩阵信号时,依次激发每个阵元,其他阵元则都用于接收信号。激励信号采用 5 个周期的汉宁窗调制的窄带脉冲,中心频率为 100 kHz,其时域和频谱图如图 8 所示。

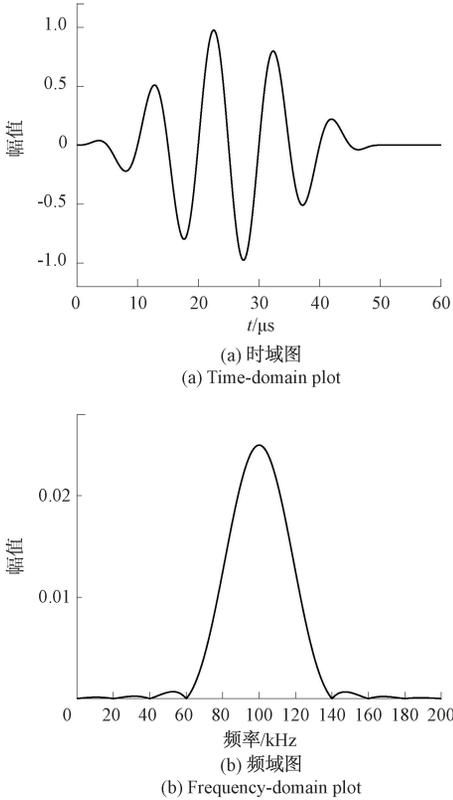


图 8 中心频率 100 kHz 的 5 个周期的汉宁窗调制正弦信号

Fig. 8 A 5-cycle Hanning windowed modulated sinusoidal signal with a center frequency of 100 kHz

为保证计算精度和可靠性,模型的网格划分尺寸和最小时间步长设置基于的原则为:

$$\begin{cases} \Delta l \leq \frac{\lambda_c}{10} \\ \Delta t \leq \frac{1}{10f_c} \end{cases} \quad (20)$$

式中: f_c 为激励信号的中心频率; λ_c 为此中心频率下对应的波长。因此,网格尺寸设置为 1 mm,最小时间步长设置为 1×10^{-8} s。另外,为了抑制边界反射的影响,在试件 xy 平面边缘区域引入无限元作为吸收边界层,其他区域则采用 C3D8R 单元进行网格划分。

当计算波形相关系数时,应首先确定频散补偿信号的长度,通过改变式(18)中的 τ 值以控制该参数。设定

τ 的初始值为激励信号中心频率对应的一个完整周期。

$$\tau_0 = 1/f_c \quad (21)$$

式中: f_c 为激励信号的中心频率。3.2 节将通过对比不同 τ 值大小对成像结果的影响。

图 9 显示了当在第 1 个阵元处激励,在第 7 个阵元处接收的时域回波信号。如图 9 所示,接收信号包含直达波、损伤散射波、模式转换量与边界反射波。值得注意的是:直达波幅值约为散射信号的 10 倍,吸波边界虽然有效降低了边界反射,但未能完全消除边界反射。另外,尽管采用单模式激励策略,数值模拟结果仍存在模式转换现象。

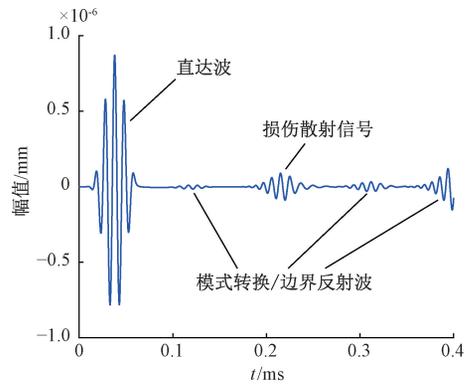


图 9 激励 1 阵元时 7 阵元接收到的响应信号时域波形

Fig. 9 Time-domain waveform of the response at array element 7 when excited by array element 1

为确保有限元模型准确模拟 Lamb 波传播特性,采用理论预测与数值仿真对比的验证方法。理论预测信号基于 100 kHz 的 A0 模式 Lamb 波计算获得。仿真结果与理论预测结果吻合良好,二者的飞行时间相对误差仅为 0.37%,验证了有限元模型中 Lamb 波激励模式的准确性。

3.2 成像结果

图 10 展示了有限元模拟成像结果,其中图 10(a) 为传统 TFM 方法成像结果,图 10(b) 为 WCF-TFM 成像结果。为了生成显示缺陷的图像,选择 $-300 \text{ mm} \leq x \leq 300 \text{ mm}$ 和 $50 \text{ mm} \leq y \leq 400 \text{ mm}$ 的区域作为成像区域。成像时,将成像区域划分为一系列大小为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的网格。图像经过最大值归一化处理,并以 $-20 \sim 0 \text{ dB}$ 的动态范围显示。图像中圆圈标记了通孔损伤的真实位置。

结果显示,传统 TFM 无法有效定位和成像通孔缺陷,定位误差 $> 30 \text{ mm}$,且噪声干扰明显。而提出的针对变厚度板的 WCF-TFM 能有效定位通孔缺陷,定位误差 $< 4 \text{ mm}$,且成像的背景噪声幅值普遍低。在非缺陷区域也存在部分干扰噪声,如坐标 $(20 \text{ mm}, 380 \text{ mm})$ 和 $(0 \text{ mm}, 100 \text{ mm})$ 附近。这些噪声干扰的成因主要有 2 个:1) 由于模式转换和残余的边界反射波影响;2) 在接近传感器阵列的区域,直达波的影响会较大。

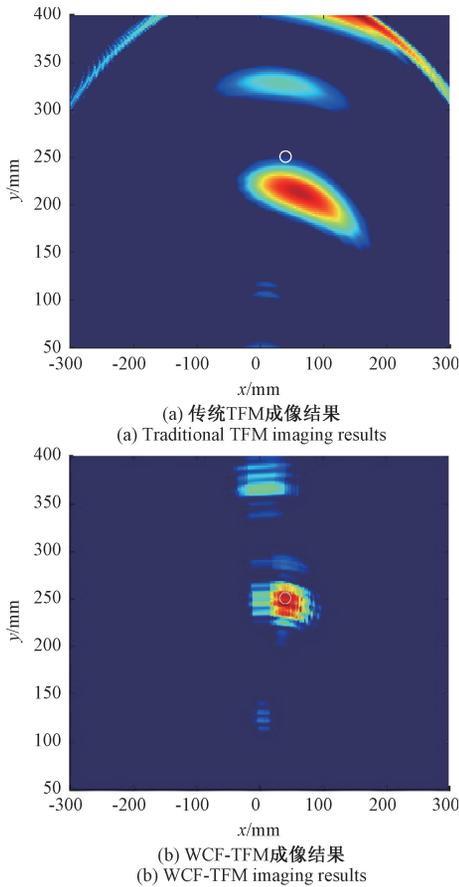


图 10 有限元模拟成像结果

Fig. 10 Imaging results from finite element simulation

对图 10 的缺陷中心位置分别沿 x 和 y 轴进行剖分, 得到缺陷处的横向及纵向成像幅值分布图 11(a) 和 (b), 其中虚线代表缺陷的真实位置, 竖直线划代表实际缺陷位置。

可以看到, 传统 TFM 无法准确定位缺陷, 幅值最大位置和真实缺陷位置差距大。WCF-TFM 成像结果中缺陷成像幅值的最大值出现在缺陷中心位置附近, 且与实际缺陷位置基本对齐。另外, 剖面图中缺陷区域的幅值集中, 背景噪声幅值普遍较低, 在纵向剖面图中, 虽然旁瓣幅值略高, 但始终低于主瓣幅值, 验证了波形相关性因子对随机噪声信号的过滤能力。

3.3 讨论

如 3.2 节所述, 在计算波形相关系数时, τ 值控制着频散补偿信号的长度。数值模拟时, 基于信号完整性和计算效率的考量, 参数 τ 被选择为 τ_0 , 即激励信号中心频率下的一个完整周期。为了进一步讨论该参数对成像结果的影响, 使用不同的 τ 值分别进行了成像, 结果如图 12 所示。

由图 12 可以看出, 当参数 τ 足够大 ($4\tau_0$) 或足够小

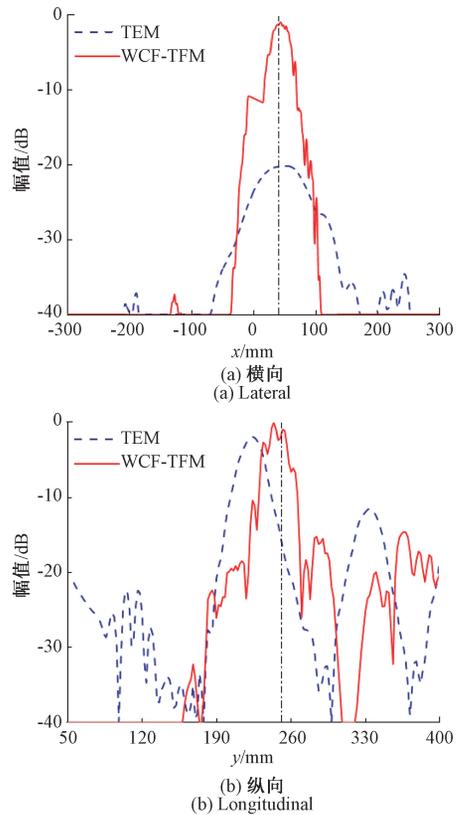
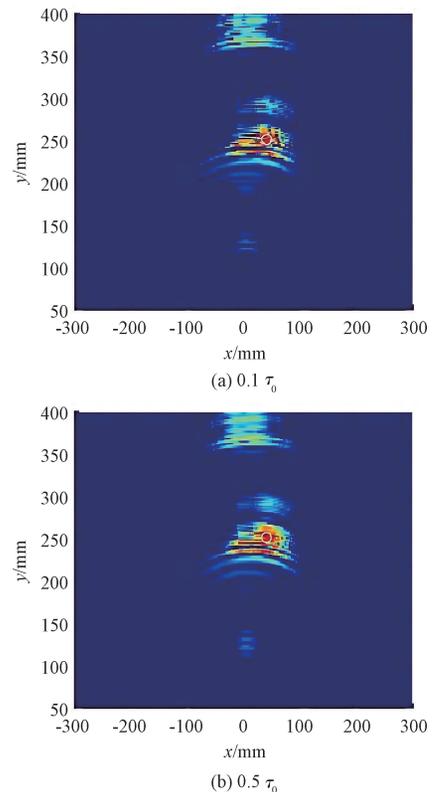


图 11 缺陷处的横向及纵向成像幅值分布

Fig. 11 Lateral and longitudinal imaging amplitude distributions at the defect location



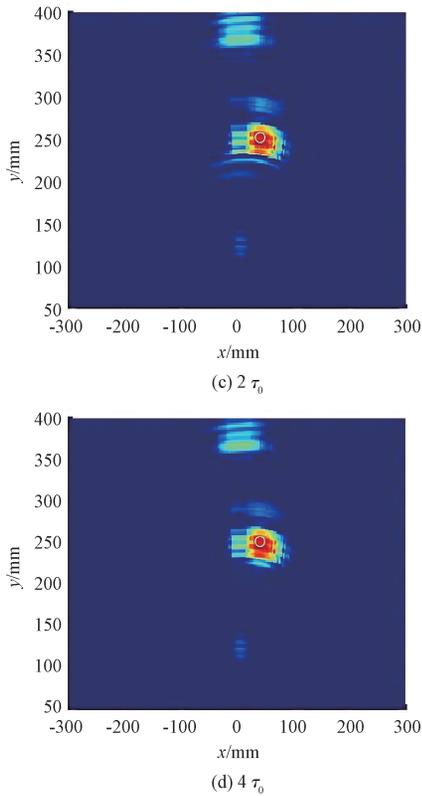


图 12 不同 τ 值下 WCF-TFM 缺陷成像结果
Fig. 12 Defect imaging results of the WCF-TFM method under different τ values

($0.1\tau_0$) 时, 都可以成功对缺陷进行成像, 但相比图 10 的成像结果 ($\tau = \tau_0$), 缺陷周围出现更多噪声干扰。造成这个现象的原因是: 当参数 τ 很小时, 用于相关系数计算的波形仅为真实缺陷引起的完整散射波形的一小部分, 从而限制了对背景噪声的抑制; 而当选择较大的 τ 时, 由于时间范围大, 真实缺陷周围成像点对应的波形可能覆盖真实缺陷周围响应的散射波形。

对图 12 的缺陷中心位置分别进行沿 x 轴和沿 y 轴剖分, 得到缺陷处的横向及纵向成像幅值分布图 13 (a) 和 (b), 其中虚线代表缺陷的真实位置, 竖点划线代表实际缺陷位置。

从这 2 幅图中可以看到, 4 条曲线的峰值处与缺陷位置基本对齐, 缺陷定位误差如表 2 所示。

表 2 不同 τ 值下的缺陷定位误差

Table 2 Defect localization errors under different τ values

τ 值	缺陷中心定位误差/mm
$0.1\tau_0$	8
$0.5\tau_0$	8
$2.0\tau_0$	6
$4.0\tau_0$	6

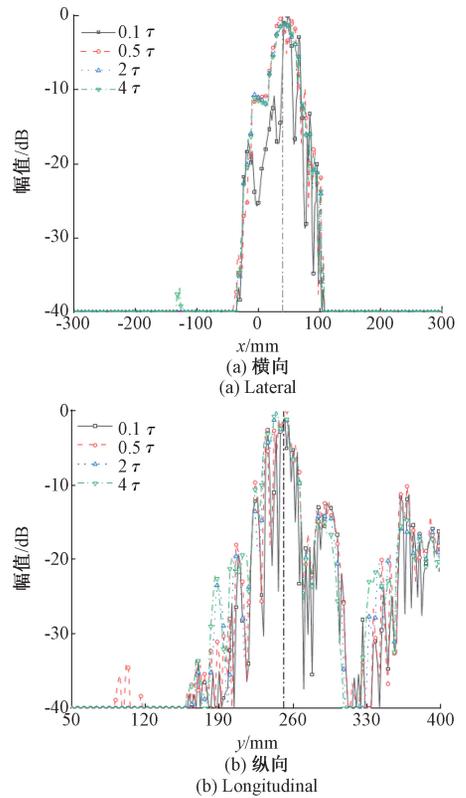


图 13 不同 τ 值下缺陷处的横向及纵向成像幅值分布
Fig. 13 Lateral and longitudinal imaging amplitude distributions at the defect location under different τ values

另外, 横向纵向的幅值不平滑, 呈锯齿状, 这可能是因为并没有利用接收信号的包络进行成像。曲线在不同 τ 值下的总体差别非常有限, 这说明了 τ 值对该成像方法具有鲁棒性, 不会因为 τ 值的选取不当导致无法进行缺陷的成像。因此, 为方便起见, 参数 τ 大小可以简单地选择为 τ_0 。

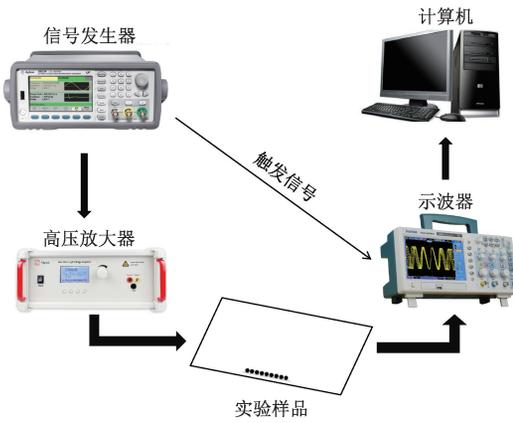
4 实验验证

4.1 实验设置

为了验证提出的变厚度板中的 WCF-TFM 成像方法的可行性与有效性, 搭建了如图 14 所示的超声导波缺陷检测实验平台, 该实验平台由 Tektronix AFG31022 信号发生器任意函数发生器产生初始激励信号, 经 ATA-2042 高压放大器传输至传感器阵列; 传感器阵列由 9 个压电陶瓷圆片 (直径 8 mm, 厚度 0.5 mm) 组成, 沿 x 轴方向间距 10 mm 分布, 其厚度方向谐振频率为 4 MHz, 径向谐振频率 250 kHz; 使用 Tektronix DPO3014 数字示波器以 10 MHz 采样率记录信号, 并通过接口与控制计算机同步, 使用计算机实现激励及采集控制与数据预处理。



(a) 实验仪器示意图
(a) Schematic diagram of the experimental



(b) 实验系统示意图
(b) Schematic diagram of the experimental system

图 14 超声导波缺陷检测系统

Fig. 14 Ultrasonic guided waves defect detection system

被测铝板的几何尺寸、传感器阵列及缺陷设置情况如图 15 所示。实验对象为铝合金变厚度板 (尺寸 1 000 mm×1 000 mm), 其厚度沿 z 轴从 2 mm 线性递增至 4 mm。材料参数与数值仿真一致。为模拟实际缺陷, 在板表面粘贴尺寸直径为 8 mm、厚度为 0.5 mm 的压电陶瓷圆片, 通过局部阻抗突变模拟表面缺陷。传感器阵列紧邻板底边 (y=5 mm) 布置, 从左至右第 5 个压电陶瓷圆片位于 x=500 mm 处。

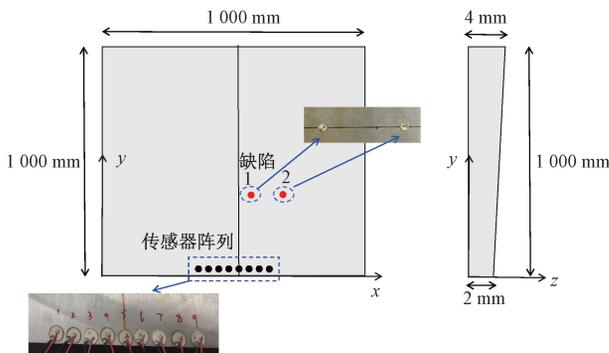


图 15 被测结构、传感器阵列及模拟缺陷示意图

Fig. 15 Schematic diagram of the structure under test, the sensor array and the simulated defects

实验中, 设置了单缺陷和双缺陷两种缺陷情形。在单缺陷时, 被测结构中仅在如图 15 所示的位置 1 处存在缺陷; 双缺陷时, 其位置如图 15 中 1 和 2 所示 (中心位置分别位于 [500 mm, 300 mm] 和 [575 mm, 300 mm] 处)。

信号的采集以循环方式实现: 依次激活 9 个压电陶瓷圆片中的一个作为发射阵元, 其余阵元同步接收响应信号, 总共接收到 72 个信号。根据互易性原理, 当激励第 i 个阵元并由第 j 个阵元接收时, 其响应信号与激励第 j 个阵元并由第 i 个阵元接收时获得的信号一致, 基于这一特性将原始 72 组信号压缩至 36 组, 减少冗余数据量。

4.2 激励信号及响应信号提取

第 3 章的有限元仿真中, 采用的激励信号为汉宁窗调制的 5 个周期的正弦脉冲信号。为避免因中心频率变化导致的重设信号参数问题, 在实验中采用宽带线性调频 (Chirp) 信号作为激励信号, 通过滤波的方法提取带宽范围内感兴趣的窄带响应信号^[25-26], 其表达式为:

$$s_c(t) = w(t) \sin\left(2\pi f_{0,c}t + \frac{\pi B t^2}{T}\right) \quad (22)$$

式中: $s_c(t)$ 即为 Chirp 信号的时域表达形式; $f_{0,c}$ 为起始频率; B 为带宽; T 为持续时间; $w(t)$ 为矩形窗函数, 范围为 $[0, T]$ 。

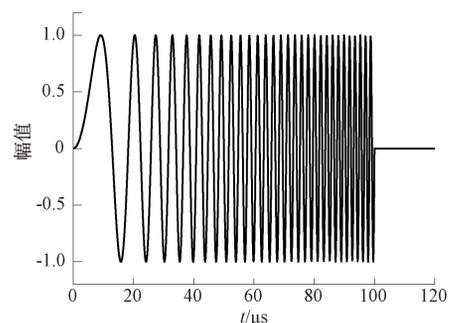
已知 Chirp 信号的响应, 就可以提取任意窄带信号的响应^[27], 即:

$$R_d(\omega) = R_c(\omega) \frac{S_d(\omega)}{S_c(\omega)} \quad (23)$$

式中: $S_c(\omega)$ 为 Chirp 激励信号 $s_c(t)$ 的频域形式; $R_c(\omega)$ 为 Chirp 响应信号; $S_c(\omega)$ 为所期望的窄带激励信号; $R_d(\omega)$ 为窄带响应信号。图 16 为一个起始频率 $f_{0,c}$ 为 0 Hz、信号带宽 B 为 600 kHz、持续时间 T 为 100 μ s 的 Chirp 信号的时域和频域图。

4.3 缺陷成像结果

选择 $350 \text{ mm} \leq x \leq 650 \text{ mm}$ 和 $100 \text{ mm} \leq y \leq 400 \text{ mm}$ 的区域作为成像区域, 成像时将成像区域划分为一系列



(a) 时域图
(a) Time-domain plot

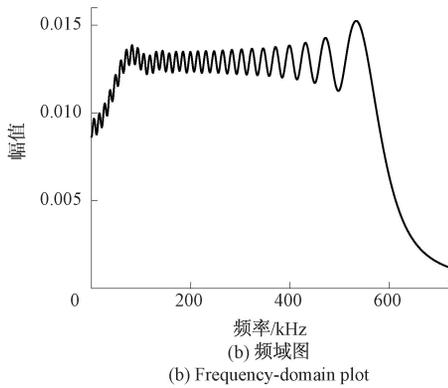


图 16 Chirp 信号

Fig. 16 Chirp excitation signal

大小为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的网格。与有限元模拟类似,将所有传播路径划分为一系列厚度不同的短且恒定厚度的单元,沿着路径方向的单元长度设置为 1 mm 。将成像结果归一化,并在 $0\sim 20\text{ dB}$ 范围内显示。成像结果中,圆圈表示实际缺陷的中心位置。

单缺陷和双缺陷两种情况下的成像结果分别如图 17 所示。

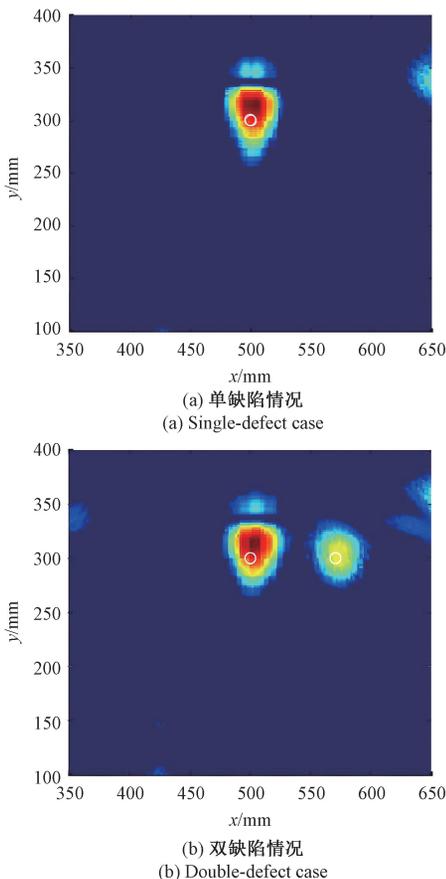


图 17 实验缺陷成像结果

Fig. 17 Experimental defect imaging results

结果表明,所提出的变厚度板中的 WCF-TFM 方法能够在两种场景下准确识别缺陷位置。从成像图中可以看到,缺陷周围存在噪声干扰,在 $(500\text{ mm}, 350\text{ mm})$ 和 $(650\text{ mm}, 350\text{ mm})$ 区域出现了干扰噪声,这些噪声的成因包括模式转换和边界反射波的影响。与有限元仿真结果对比,实验结果中的边界反射信号干扰更加严重,这是由于实验设置中未使用吸收边界所导致的。

5 结 论

本研究提出了一种基于 Lamb 波的变厚度板缺陷定位成像方法,首先介绍了均匀厚度板和变厚度板的 Lamb 波传播模型,将变厚度板中传播的 Lamb 波视为在一系列均匀等厚的短板中传播的组合,通过离散化波导的结构并测量响应波形,并利用信号处理方法消除频散效应。针对检测中多路径散射信号混叠的问题,将成像区域内的每个点视为潜在损伤位置,并计算相应路径的散射信号。当该点与实际损伤位置重合时,不同传感器对的反向传播信号同相,否则不为同相,以此作为损伤指标。在此基础上,提出了一种 WCF 加权 TFM 成像算法,通过定义 WCF 因子作为 TFM 成像指数的权重,利用了更多波形相关信息,有效降低了背景噪声,提高了图像的信噪比。实验结果表明,所提出的成像方法对变厚度板的损伤成像是有效的。

参考文献

- [1] LEE H, LIM H J, SKINNER T, et al. Automated fatigue damage detection and classification technique for composite structures using Lamb waves and deep autoencoder[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 163: 108148.
- [2] RABBI M, TERAMOTO K, ISHIBASHI H, et al. Imaging of sub-surface defect in CFRP laminate using A0-mode Lamb wave: Analytical, numerical and experimental studies[J]. Ultrasonics, 2022, 127: 106849.
- [3] 刘增华,王美灵,朱艳萍,等. 改进型密集阵列全聚焦成像算法的碳纤维复合材料板损伤定位研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(6): 120-132.
LIU Z H, WANG M L, ZHU Y P, et al. Research on damage localization of carbon fiber composite plates based on improved dense array total focusing imaging algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(6): 120-132.
- [4] 刘远,彭炜亮,卢超,等. 航空复合材料板非接触空气耦合超声导波多损伤快速成像方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 103-115.

- LIU Y, PENG W L, LU CH, et al. Multi-damage rapid imaging method of non-contact air-coupled ultrasonic guided wave for aircraft composite plates [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 103-115.
- [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.
- HE C F, ZHENG M F, LYU Y, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016,37(8):1713-1735.
- [6] HAIDER M F, BHUIYAN M Y, PODDAR B, et al. Analytical and experimental investigation of the interaction of Lamb waves in a stiffened aluminum plate with a horizontal crack at the root of the stiffener[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 431: 212-225.
- [7] YU S Q, FAN CH G, ZHAO Y, et al. Lamb wave based total focusing method for integral grid-stiffened plate damage identification[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(16): 15769-15781.
- [8] 华佳东,崔春,林京,等. 基于声学超材料的串扰抑制与多通道 Lamb 波通信[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(11): 141-151.
- HUA J D, CUI CH, LIN J, et al. Crosstalk suppression and multi-channel Lamb wave communication based on acoustic metamaterials[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(11): 141-151.
- [9] 尚世同,尚瑜娟. 超声板波法在变厚度板检测中的应用[J]. 无损检测, 1998(3): 80-82, 85.
- SHANG SH T, SHANG Y J. Application of ultrasonic plate wave method to inspecting the plates with varied thicknesses[J]. Nondestructive Testing, 1998(3): 80-82, 85.
- [10] WANG Y Q, XU D D, BU Y D, et al. Elastic buckling analysis of rectangular longitudinally profiled (LP) steel plates under uniform compression [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 157: 107003.
- [11] SHINICHI S, RYUJI M, TADASHI O, et al. Steel products for shipbuilding [J]. JFE Technical Report, 2004(2): 41-48.
- [12] MOLL J. Damage localization in composite structures with smoothly varying thickness based on the fundamental antisymmetric adiabatic wave mode [J]. Ultrasonics, 2016, 71: 111-114.
- [13] MOLL J, WANDOWSKI T, MALINOWSKI P, et al. Experimental analysis and prediction of antisymmetric wave motion in a tapered anisotropic waveguide[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 138(1): 299-306.
- [14] DE MARCHI L, MARZANI A, SPECIALE N, et al. Prediction of pulse dispersion in tapered waveguides[J]. NDT & E International, 2010, 43(3): 265-271.
- [15] DE MARCHI L, MARZANI A, MINIACI M. A dispersion compensation procedure to extend pulse-echo defects location to irregular waveguides [J]. NDT & E International, 2013, 54: 115-122.
- [16] EL-KETTANI M E C, LUPPÉ F, GUILLET A. Guided waves in a plate with linearly varying thickness: Experimental and numerical results [J]. Ultrasonics, 2004, 42(1/9): 807-812.
- [17] PAGNEUX V, MAUREL A. Lamb wave propagation in elastic waveguides with variable thickness[J]. Proceedings of the Royal Society. Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2006, 462(2068): 1315-1339.
- [18] HOLMES C, BRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation [J]. NDT & E International, 2005, 38(8): 701-711.
- [19] ZHANG H Y, LIU Y Q, FAN G P, et al. Sparse-TFM imaging of lamb waves for the near-distance defects in plate-like structures[J]. Metals, 2019, 9(5): 503.
- [20] 周至伟,饶静,牛伟. 基于改进稀疏表示的高衰减厚壁结构超声相控阵全聚焦成像[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(12): 246-255.
- ZHOU ZH W, RAO J, NIU W. Total focusing method for highly attenuated thick-walled structures based on improved sparse representation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 246-255.
- [21] ZIMA B, MOLL J. Numerical and experimental investigation of guided ultrasonic wave propagation in non-uniform plates with structural phase variations [J]. Ultrasonics, 2023, 128: 106885.
- [22] XU C B, WANG Q, GAO G J, et al. Lamb wave based damage imaging in variable thickness plates[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 223: 111926.
- [23] XU C B, YANG ZH B, CHEN X F, et al. A guided wave dispersion compensation method based on

compressed sensing[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 103: 89-104.

- [24] 张昊, 陈世利, 贾乐成. 基于超声相控线阵的缺陷全聚焦三维成像[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(7): 992-999.

ZHANG H, CHEN SH L, JIA L CH. Three-dimensional total-focus imaging based on ultrasonic linear phased array[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(7): 992-999.

- [25] HUA J D, MICHAELS J E, CHEN X, et al. Simultaneous excitation system for efficient guided wave structural health monitoring[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 95: 506-523.

- [26] YANG ZH B, ZHU M F, LANG Y F, et al. FRF-based lamb wave phased array[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 166: 108462.

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

作者简介



黄尹, 2024 年于重庆大学获得学士学位, 现为重庆大学航空航天学院硕士研究生, 主要研究方向为超声检测与成像。

E-mail: duziyoubaole@163.com

Huang Yin received her B. Sc. degree from Chongqing University in 2024. She is currently pursuing her M. Sc. degree in the College of Aerospace Engineering at Chongqing University. Her research interests focus on ultrasonic testing and imaging.



王旗, 2023 年于中国矿业大学(北京)获得学士学位, 现为重庆大学航空航天学院硕士研究生, 主要研究方向为超声检测与成像。

E-mail: 1666481132@qq.com

Wang Qi received his B. Sc. degree from China University of Mining & Technology (Beijing) in 2023. He is currently pursuing his M. Sc. degree in the College of Aerospace Engineering at Chongqing University. His research interests focus on ultrasonic testing and imaging.



许才彬(通信作者), 2014 年于西南交通大学获得学士学位, 2019 于西安交通大学获得博士学位, 现为重庆大学航空航天学院研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为超声检测与成像、非线性超声。

E-mail: caibinxu0839@cqu.edu.cn

Xu Caibin(corresponding author) received his B. Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2014 and his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2019. He is currently a researcher and master's supervisor in the College of Aerospace Engineering at Chongqing University. His research interests include ultrasonic testing and imaging, as well as nonlinear ultrasound.



邓明晰, 1986 年于四川大学获得学士学位, 1989 年于南京大学获得硕士学位, 2002 年于同济大学获得博士学位, 现为重庆大学航空航天学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为超声和非线性超声。

E-mail: mx deng@cqu.edu.cn

Deng Mingxi received his B. Sc. degree from Sichuan University in 1986, M. Sc. degree from Nanjing University in 1989, and Ph. D. degree from Tongji University in 2002. He is currently a professor and Ph. D. supervisor in the College of Aerospace Engineering at Chongqing University. His research interests include linear and nonlinear ultrasound.