

引用格式: 邹明霞, 关立强, 李义丰. 基于时间反转加权分布的复合材料 Lamb 波损伤成像[J]. 声学技术, 2021, 40(5): 630-638. [ZOU Mingxia, GUAN Liqiang, LI Yifeng. Lamb wave damage imaging of composite plate based on time reversal and weighted distribution[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(5): 630-638.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.05.007

基于时间反转加权分布的复合材料 Lamb 波损伤成像

邹明霞, 关立强, 李义丰

(南京工业大学计算机科学与技术学院, 江苏南京 211800)

摘要: 超声 Lamb 波是检测板状结构损伤的常用方法, 然而碳纤维增强聚合物基复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)本身的各向异性会对 Lamb 波的损伤成像和定位造成很大的影响。且大多数检测方法均采用健康结构的检测信号作为参考信号, 用差信号的方法来实现损伤成像, 该过程容易受到待测结构和实验环境变化等外界因素的影响。针对该问题, 采用时间反转和加权分布成像相结合的方法, 将其应用在复合材料板状结构的 Lamb 波损伤检测和成像中。仿真结果表明, 该方法能够有效地实现板中单源脱层损伤和多源脱层损伤的二维成像与定位, 且具有较高的精度和准确性。

关键词: 复合材料; Lamb 波; 时间反转; 加权分布; 损伤成像

中图分类号: TH212; TH213.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-05-0630-09

Lamb wave damage imaging of composite plate based on time reversal and weighted distribution

ZOU Mingxia, GUAN Liqiang, LI Yifeng

(College of Computer Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, Jiangsu, China)

Abstract: Ultrasonic Lamb wave method is a common way to detect the structural damage of plate structure. However, the anisotropy of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) material properties has a greatly effect on the accuracy of Lamb wave based damage imaging and location. Most detection methods use the detection signal of health structure as the reference signal, and use the difference signal method to realize the damage imaging, however, the detection is easy to be affected by the changes in the structure to be tested and the experimental environment. To solve this problem, a combination of time reversal and weighted distribution imaging is applied to detect the damage in composite sheet materials by Lamb wave. The simulation results show that the method can effectively realize two-dimensional imaging and localization of single delamination damage, multi-delamination damage in the plate with high accuracy.

Key words: composite materials; Lamb wave; time reversal; weighted distribution; damage imaging

0 引言

碳纤维增强聚合物基复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)是一种由碳纤维和各种树脂制成的先进复合材料, 具有高强度、低密度、易加工、耐腐蚀、抗疲劳等优势, 近年来被广泛运用于航空航天、国防、汽车、能源、土木、机械等不同的工程领域^[1]。然而, 由于复合材料的横向强

度较低, 因此在生产和使用的过程中, 不可避免的会产生分层、纤维断裂、脱粘或基体开裂等不可见损伤, 这些损伤若不及时处理则可能造成灾难性的破坏, 因此能够快速有效地检测出复合材料层合板中存在的损伤就变得极为重要。在针对复合材料层合板缺陷检测的众多方法中, 超声 Lamb 波检测方法因为 Lamb 波传播距离远、衰减慢等优势被广泛使用^[2-4]。

Lamb 波是在具有两个平行表面介质中传播的由横波和纵波相互耦合而形成的特殊模式的应力波。与传统的超声波相比, 其具有衰减慢, 传播距离远, 对传播路径上的微小损伤有很高敏感性的特点^[5], 在大型的各向异性金属板结构的无损检测和结构健康监测中具有良好的应用潜力。目前常用的

收稿日期: 2020-04-17; 修回日期: 2020-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(61571222)资助项目、江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目

作者简介: 邹明霞(1993—), 女, 四川自贡人, 硕士研究生, 研究方向为超声无损检测。

通讯作者: 李义丰, E-mail: lyffz4637@163.com

Lamb 波损伤检测方法都需要以健康结构的检测信号作为基准, 通过对比实验信号与健康基准信号的差异程度来实现损伤的检测^[6-7]。但是缺陷、实验检测条件、环境变化、人为操作误差等方面的影响都会使得检测信号发生变化, 因此很难分辨信号的差异是否为损伤引起; 而且有时候可能无法获得健康状态下的参考信号, 因此采用基于健康状态下参考信号的检测方法在实际检测中容易造成损伤的误判^[8]。

时间反转是指将传感器接收到的信号在时域上进行反转再重新激发回到声源处的过程, 是一种基于声学互易性原理的自适应技术, 可以实现能量在空间和时间上的聚焦, 从而实现信号的重构^[9]。何存富等^[10]利用时间反转方法与 Lamb 波检测技术, 对铝板中存在的缺陷进行检测研究, 实现了缺陷波包的能量聚焦, 提高了对铝板中缺陷的识别能力。王强等^[11]针对现有的基于健康结构基准信号损伤检测方法的不足, 利用时间反转的聚焦特性, 结合 Lamb 波时间反转和椭圆成像方法, 实现对铝板中固有缺陷的检测。以上的研究对象都是各向同性的大面积铝制板状结构, 近些年也有一些学者利用时间反转法针对复合材料板状结构中的损伤检测做了相关研究。Huang 等^[12]基于 Lamb 波的时间可逆性, 提出了一种改进的时间反转方法, 实现了对复合材料板中冲击损伤的定位。但是运用此方法对复合材料层合板结构中多源损伤进行定位及成像检测的研究目前还有许多不足。

针对以上提出的基于基准信号的 Lamb 波损伤检测技术中存在的无法准确获得健康状态下基准信号的问题, 以及复合材料层合板中对多源损伤成像定位研究上的不足, 本文根据板类结构中 Lamb 波传播的时间反转聚焦原理, 结合概率成像的加权分布方法对碳纤维增强聚合物基复合材料进行仿真实验研究, 实现对该复合材料板中单源损伤和多源损伤的检测定位与成像。

1 理论分析

1.1 Lamb 波时间反转过程及时间反转损伤指数

时间反转, 是一种无需传播媒介的性质和结构等先验知识就可以实现声波能量在时间与空间上的自适应聚焦和检测的方法, 最先由法国科学家 Fink 从光学领域应用到声学领域中, 并对此开展了大量的理论和实验研究工作^[13-14]。时间反转的过程是指在传感器接收到声源发射的时域信号后, 将这

个信号在时域上进行反转, 并加载到对应的传感器上再发射出去, 即实现先到后发, 后到先发, 最终回到声源处以实现响应信号的聚焦与重构。目前已有大量的理论和实验研究表明: 时间反转方法可以将多模态的 Lamb 波信号重新聚焦重构成为单一模态的 Lamb 波信号, 可以有效克服因 Lamb 波散射带来的影响^[15-17]。

将时间反转方法应用到复合材料层合板中, 用如下图 1 所示的时间反转过程图进行分析和解释^[18-19], 具体步骤为:

- (1) 在传感器 M 上加载原始信号, 于传感器 N 上接收结构响应信号;
- (2) 对传感器 N 接收的信号在时域上进行时间反转处理, 即在频域内进行共轭处理;
- (3) 把时间反转处理后的信号加载到 N 上, 在传感器 M 上接收响应信号;
- (4) 将 M 上得到的时间反转信号进行信号重构并与原始激励信号进行比较。

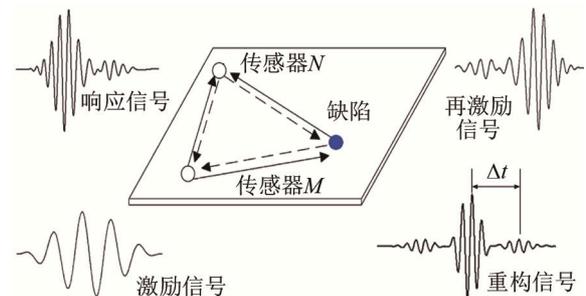


图 1 时间反转过程示意图
Fig.1 Schematic diagram of time reversal process

图 2 给出了复合材料板中的时间反转重构图, 其中, 图 2(a)是在完好的复合材料层合板中使用时间反转方法得到的重构信号与原始激励信号的归一化对比图, 从图中可以看出两条曲线形状基本相似。图 2(b)是含有内部脱层损伤的复合材料层合板通过时间反转方法得到的重构信号与原始激励信号的归一化对比图, 图中重构信号与原始激励信号在相位和幅值均发生了偏移和变化, 因此可以采用特定的计算方法来表征该信号的差异程度, 从而对复合材料层合板中的缺陷进行检测。

根据时间反转 Lamb 波检测技术对检测信号的重构特性, 通过比较重构信号与原始激励信号差异, 可以判断检测路径上的损伤情况。Sohn 等^[20]提出了利用损伤指数(Damage index, DI)来表征两个信号之间的差异程度, 其定义为

$$I_D = \sqrt{\frac{\sum_{i \in N} [I(t_i) - V(t_i)]^2}{\sum_{i \in N} V(t_i)^2}} \quad (1)$$

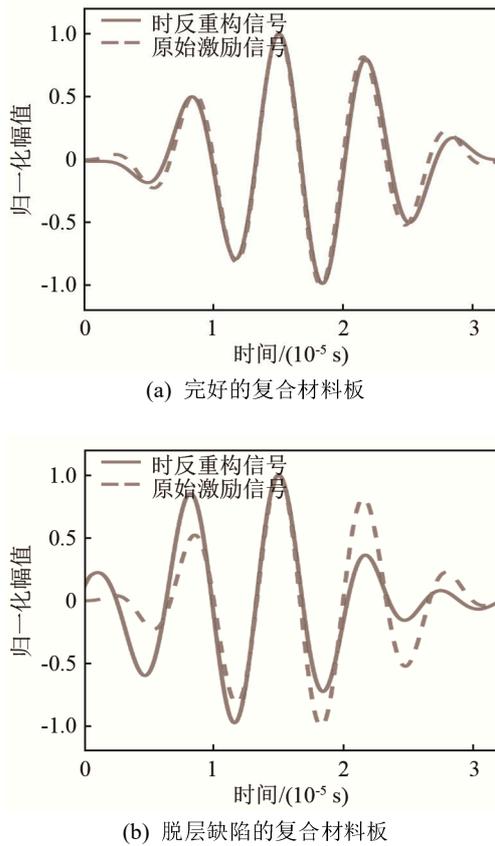


图2 原始激励信号与时间反转重构信号归一化对比图
Fig.2 Normalized comparison of original excitation signal and time reversal reconstructed signal

其中, N 为采样点数, $I(t)$ 和 $V(t)$ 分别表示原始激励信号和待检测结构中的时间反转重构响应信号, 这两个信号都用他们的最大值归一化。损伤指数的变化范围是 $[0,1]$, 当传感路径上不存在损伤时, 信号可以实现完全重构与原始激励信号波形一致, 则 I_D 的值为 0。值得注意的是, 在实际应用中, 受检测环境、人为操作等因素的影响, 无缺陷路径的损伤指数通常也只是趋近于 0, 但是不等于 0。随着时间反转重构信号与原始输入信号之间差异的增大, I_D 值会逐渐增大甚至接近于 1, 说明检测路径上存在损伤。时间反转过程是一个线性过程, 利用该时间反转重构信号进行检测时, 只受传感路线上引入的非线性因素的影响, 而无需健康结构的基准信号, 因此在超声 Lamb 波损伤检测方面具有很好的应用潜力。

1.2 结合时间反转的加权分布成像方法

由于检测过程中截取直达波作为时间反转二次激励信号, 决定了一对传感器的检测范围在直线路径的周围。Sheen 等^[21]的研究表明, 损伤位置距直线路径越远, 检测敏感性越差, 损伤指数越小。图 3 所示为损伤概率的椭圆分布, i 为激励器, j 为

传感器, 损伤位置距离激励器 i 与传感器 j 的直线路径越近, 概率值越大, 反之, 概率值越小。

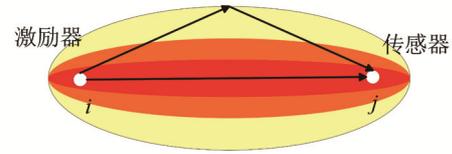


图3 损伤概率的椭圆分布
Fig.3 Elliptical distribution of damage probability

加权分布函数能把每条传感路径所对应的损伤指数映射为检测区域内每个像素点的概率值, 表示该点存在损伤的概率。本文采用的加权分布函数成像算式为

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N I_{D,ij} S_{ij}(x, y) \quad (2)$$

式中: $P(x, y)$ 为检测范围内离散点 (x, y) 处的缺陷概率, N 是传感器阵列中激励—传感路径总数, $I_{D,ij}$ 为传感器路径对应的损伤指数, 即上文中提出的根据时间反转重构信号与原始激励信号所求得的损伤指数, 此处作为权值, $S_{ij}(x, y)$ 为概率分布函数, 表征传感路径覆盖范围内坐标点的像素初始值。

概率分布函数 $S_{ij}(x, y)$ 的计算方法为

$$\begin{cases} S_{ij}(x, y) = \frac{\beta - R_{ij}(x, y)}{1 - \beta}, & \beta > R_{ij}(x, y) \\ S_{ij}(x, y) = 0, & \beta < R_{ij}(x, y) \end{cases} \quad (3)$$

式中参数 β 决定激励 i —传感 j 路径影响区域的大小, 通常, β 在 1.05 附近, 本次仿真实验中 $\beta = 1.05$ ^[22], 如果 β 值大于 1.05, 可能会导致分辨率降低, 而如果 β 值小于 1.05, 可能会引入伪影。在式(3)中, $R_{ij}(x, y)$ 为结构中损伤的中心位置 (x, y) 到激励器 (x_{ik}, y_{ik}) 和传感器 (x_{jk}, y_{jk}) 距离之和与激励器到传感器距离的比值, 其表达式为

$$R_{ij}(x, y) = \frac{\sqrt{(x-x_{ik})^2 + (y-y_{ik})^2} + \sqrt{(x-x_{jk})^2 + (y-y_{jk})^2}}{\sqrt{(x_{ik}-x_{jk})^2 + (y_{ik}-y_{jk})^2}} \quad (4)$$

根据以上基于概率成像的加权分布成像方法, 计算出图像中每一点的像素值, 继而实现对结构板中损伤的成像定位。

2 实验验证

2.1 仿真模型建立

对板中 Lamb 波传播特性建模。本文使用有限元分析方法, 利用有限元分析软件 ABAQUS 中的显示动力学分析法对 Lamb 波在复合材料层合板中

的传播进行三维数值仿真，从而对本文提出的理论方法进行验证。模拟研究对象为碳纤维复合板，此处的 CFPR 板为 T300/QY8911 的碳纤维/环氧树脂基铺设的 FPR 板，板的几何尺寸为 300 mm×300 mm×2 mm，碳纤维方向为 45°、-45°、0°、90°的单层板的循环铺层，每一层碳纤维的厚度均为 0.25 mm，共 8 层。CFPR 板的材料参数如表 1 所示，包括弹性模量 E 、剪切模量 G 、泊松比 ν 、密度 ρ 等。建立损伤模型示意图如图 4 所示，CFPR 板的中心为坐标原点，传感器组是以原点为圆心，在板状结构

上下表面建立半径为 60 mm 的等角度接收阵列，每两个传感器之间相隔 30°，分别为 $P_1(P'_1)$, $P_2(P'_2)$, $P_3(P'_3)$, ..., $P_{12}(P'_{12})$ ，一共 24 个传感器。上方传感器用来激励与接收信号，下方传感器只用来激励信号，这样就可以组成 66 组激励—接收路径。

表 1 T300/QY8911 CFPR 板参数
Table 1 Parameters of T300/QY8911 CFPR plate

$E_1/$ GPa	$E_2/$ GPa	$E_3/$ GPa	$G_{12}/$ GPa	$G_{13}/$ GPa	$G_{23}/$ GPa	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	$\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
135	8.8	8.8	4.47	4.47	3.45	0.3	0.3	0.34	1560

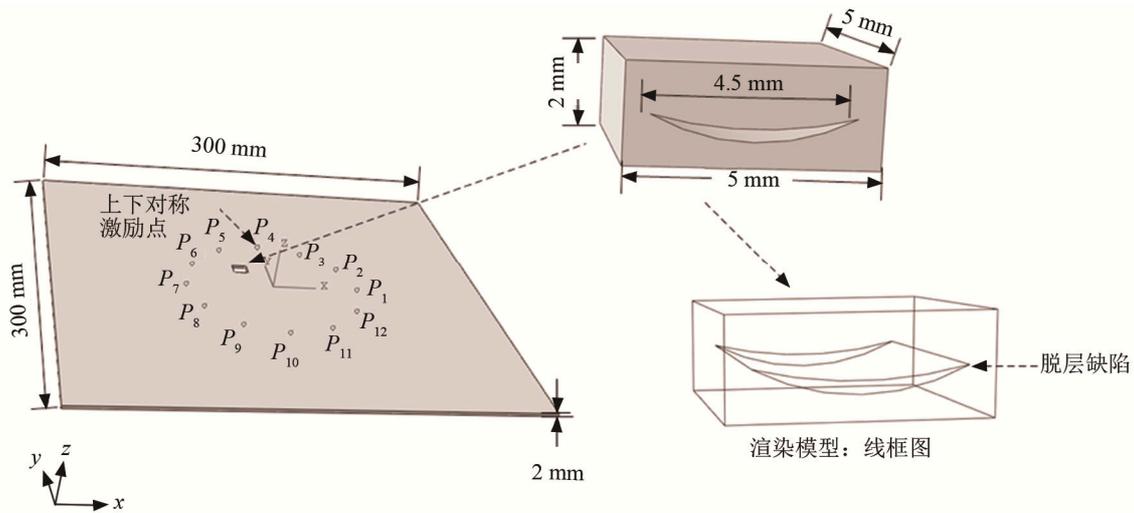


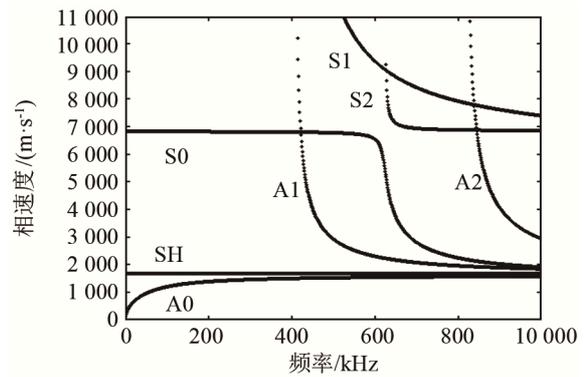
图 4 复合板 3D 仿真模型尺寸及损伤模式示意图

Fig.4 The 3D simulation model dimensions of composite plate and schematic diagram of damage modes

2.2 Lamb 波激励模式选择

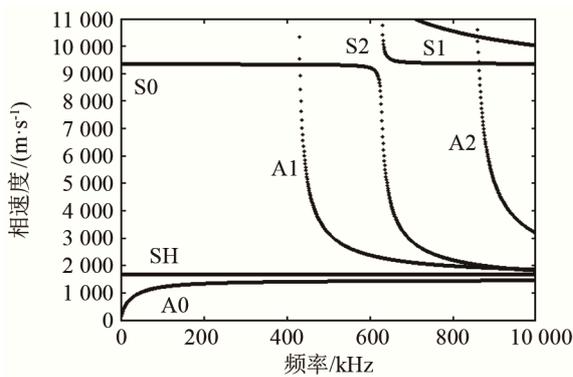
复合层板在不同铺层方向时所对应频散曲线不同，本文采用 GUIGUW 软件数值分析求解^[23]，分别求解出 0°、45°、-45°、90°方向上单层板的频散曲线，图 5 为 0°和 45°方向上的相速度频散曲线，从图中可以看出当频率小于 300 kHz 时，Lamb 波只存在低阶的 A0 和 S0 模态。

通过 Matlab 软件读取频散曲线图形数据中的



(b) 45°方向

图 5 复合层板在 0°和 45°铺层方向的相速度频散曲线
Fig.5 Phase velocity dispersion curve in 0° and 45° laying directions of CFRR plate



(a) 0°方向

A0 模态部分，得到如图 6 所示的 CFPR 板中 Lamb 波 A0 模态在不同铺层方向上的传播频散曲线图。对于 Lamb 波的激励频率，应尽量选择模态较少的低频区域和反对称模态中群速度和相速度频散较小的频率。低频激励下信号带宽较宽，对损伤不敏感，采用较高频率会产生多模态问题，给信号的解析带来困难。

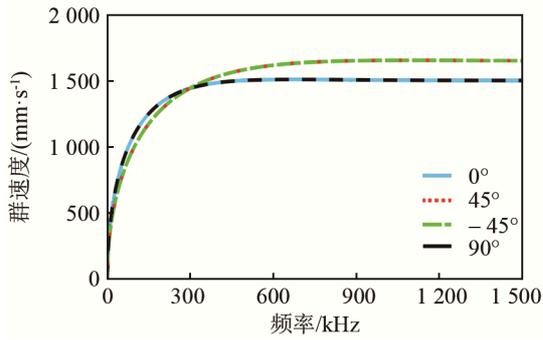


图 6 CFPR 板中 Lamb 波 A0 模态在不同铺层方向上的传播频散曲线图

Fig.6 Dispersion curves of the A0 mode Lamb wave in CFPR plate in different laying directions

综上，本文的信号激励频率选择在 150 kHz 时，其模态只存在低阶 A0 和 S0 模态。因此，仿真时采用激励信号中心频率为 150 kHz 的汉宁(Hanning)窗调制的 5 周期正弦波信号，其表达式为

$$x(t) = \left[\frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi f_c t}{n} \right) \right] \sin 2\pi f_c t \quad (5)$$

式中： n 为正弦波的周期数； f_c 为信号的中心频率。

激励的方式是在板的同一位置的上下两点以压力的方式在同一时刻同向激发，即激发单一的 A0 模态 Lamb 波信号。

2.3 单损伤检测成像

建立单损伤脱层模型 I 如图 7 所示，脱层损伤坐标为(-20, 20)mm，损伤位置在第三层和第四层之间，用拉伸的方式模拟凹陷椭圆形脱层损伤，损伤类型示意图如图 4 中所示。

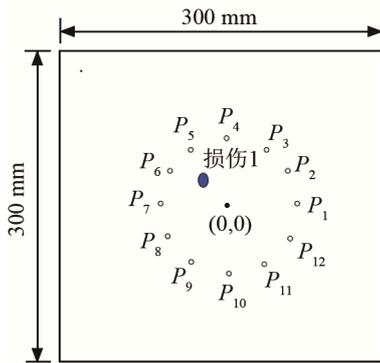


图 7 单损伤示意图
Fig.7 Single damage diagram

对模型 I 进行仿真分析，获得 66 个独立的时间反转重构信号，通过式(1)与原始激励信号进行比较计算，得到损伤指数 I_D 如表 2 所示，从表中可以看出路径 P_1-P_6 、 P_3-P_7 、 P_4-P_8 、 P_5-P_{10} 上所得出的损伤指数 I_D 明显大于其他通道的 I_D ，说明损伤位于这些通道上或者在这些通道附近。

表 2 不同传感路径上的损伤指数
Table 2 The DI values along different sensing paths

路径	I_D	路径	I_D	路径	I_D	路径	I_D
P_1-P_2	6.2×10^{-4}	P_2-P_9	2.1×10^{-4}	P_4-P_9	0.020 9	P_7-P_8	0.012 6
P_1-P_3	4.1×10^{-4}	P_2-P_{10}	8.0×10^{-4}	P_4-P_{10}	0.001 2	P_7-P_9	0.015 6
P_1-P_4	0.002 0	P_2-P_{11}	0.004 1	P_4-P_{11}	0.001 5	P_7-P_{10}	0.004 9
P_1-P_5	0.001 6	P_1-P_{12}	0.004 0	P_4-P_{12}	7.2×10^{-4}	P_7-P_{11}	0.003 1
P_1-P_6	0.131 5	P_3-P_4	0.013 0	P_5-P_6	0.026 9	P_7-P_{12}	0.001 2
P_1-P_7	0.001 9	P_3-P_5	0.024 1	P_5-P_7	0.024 1	P_8-P_9	0.002 9
P_1-P_8	0.001 1	P_3-P_6	0.008 3	P_5-P_8	0.007 3	P_8-P_{10}	0.002 3
P_1-P_9	0.001 9	P_3-P_7	0.192 8	P_5-P_9	0.011 9	P_8-P_{11}	0.002 0
P_1-P_{10}	0.002 0	P_3-P_8	0.015 1	P_5-P_{10}	0.329 3	P_8-P_{12}	0.002 0
P_1-P_{11}	0.002 0	P_3-P_9	5.1×10^{-4}	P_5-P_{11}	0.002 7	P_9-P_{10}	0.001 7
P_1-P_{12}	0.001 6	P_3-P_{10}	0.001 3	P_5-P_{12}	0.001 6	P_9-P_{11}	0.002 1
P_2-P_3	0.001 6	P_3-P_{11}	0.004 1	P_6-P_7	0.017 2	P_9-P_{12}	0.002 0
P_2-P_4	0.007 4	P_3-P_{12}	0.002 1	P_6-P_8	0.021 8	$P_{10}-P_{11}$	0.001 7
P_2-P_5	0.008 2	P_4-P_5	0.019 1	P_6-P_9	0.023 6	$P_{10}-P_{12}$	0.002 1
P_2-P_6	0.014 5	P_4-P_6	0.021 8	P_6-P_{10}	9.3×10^{-4}	$P_{11}-P_{12}$	0.001 6
P_2-P_7	0.001 7	P_4-P_7	0.005 1	P_6-P_{11}	0.001 4		
P_2-P_8	4.7×10^{-4}	P_4-P_8	0.228 6	P_6-P_{12}	0.013 0		

将上述 I_D 代入式(2)中，得到如图 8 所示的损伤图像，图中 12 个红色小圆圈为 12 个传感器的位置，成像显示的黄色区域表示传感器通道交叉点处是脱层损伤存在的最大概率位置。为了便于对比与观察，对得到的损伤图像进行阈值化处理，结果如图 9 所示，图 9 中红色区域为实际损伤所在位置，黄色区域为检测到的损伤所在位置。从图 9 中可以看出，检测到的损伤中心为(-20.3, 20.4)mm，与实际损伤的中心相比误差为(-0.3, 0.4)mm，计算出最大误差率为 1.75%。与何存富等^[10]提出的基于时间反转与 Lamb 波相结合的方法对缺陷的定位误差 4.18%相比，准确率提高了 2.43 个百分点。由此看出此方法可以很好地定位到单源损伤时的脱层，从而证明了此方法对检测脱层损伤成像的有效性。

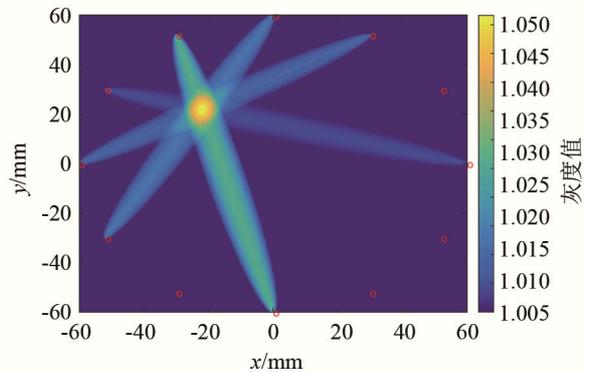


图 8 单损伤成像图
Fig.8 Single damage imaging

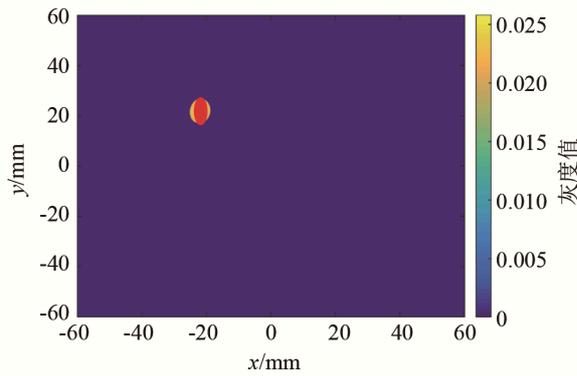
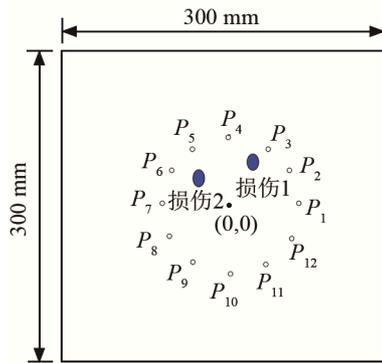


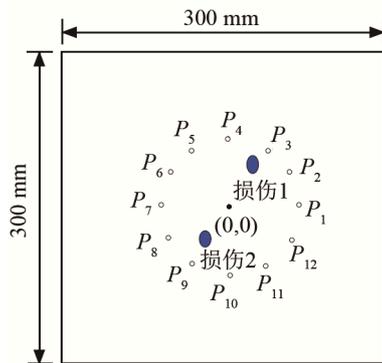
图 9 阈值化处理后损伤的成像图
Fig.9 Damage image after threshold processing

2.4 多损伤检测成像

采用相同的建模方式，建立如图 10(a)、10(b) 所示脱层损伤模型 II 和模型 III。模型 II 模拟的损伤位置位于一、二象限，脱层损伤 1 坐标为(25, 30)mm、脱层损伤 2 坐标为(-20, 25)mm。模型 III 中模拟的损伤位置位于一、三象限，脱层损伤 1 坐标为(25, 35)mm、脱层损伤 2 坐标为(-15, -15)mm。



(a) 模型 II 损伤示意图



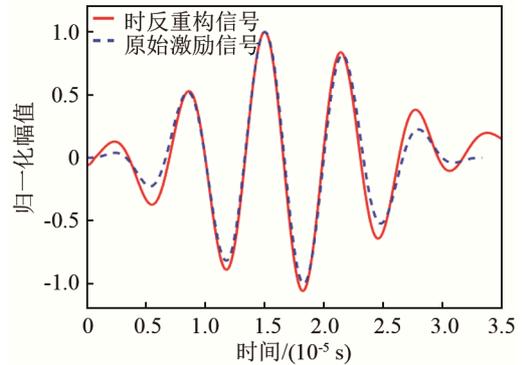
(b) 模型 III 损伤示意图

图 10 多损伤模型 II 和 III 示意图

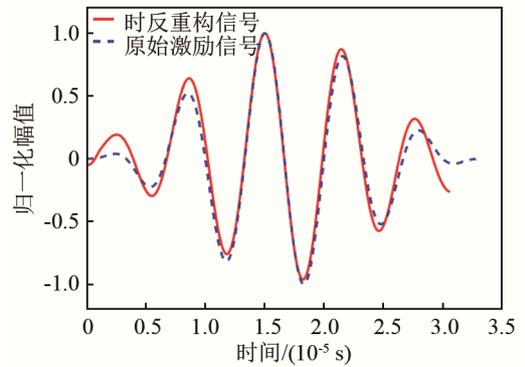
Fig.10 Schematic diagrams of multi-damage model II and III

对模型 II 和模型 III 进行实验仿真分析，分别获得 66 个独立的时间反转重构信号，为了便于观察时间反转重构信号与原始激励信号的对比结果，绘制了模型 II 中 P_3-P_7 、 P_4-P_9 、 P_5-P_{11} 三条损伤指

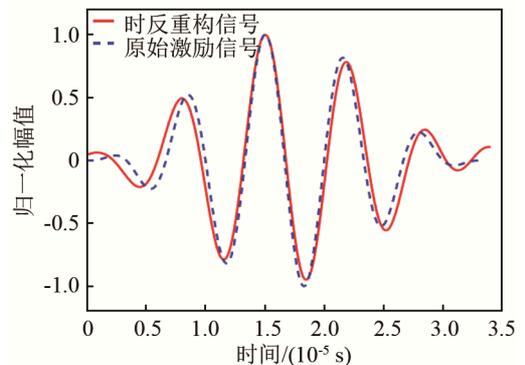
数较小的路径与 P_3-P_{10} 、 P_2-P_6 、 P_1-P_6 三条损伤指数较大的路径的波形对比图，如图 11 所示。



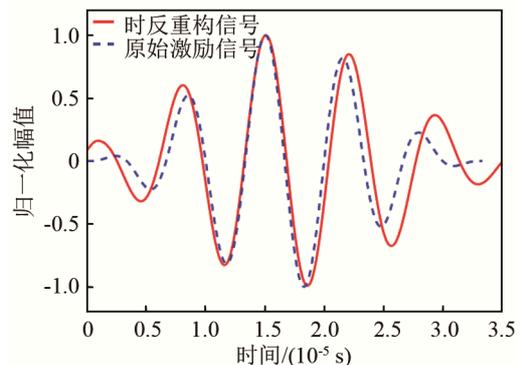
(a) 路径 P_3-P_7



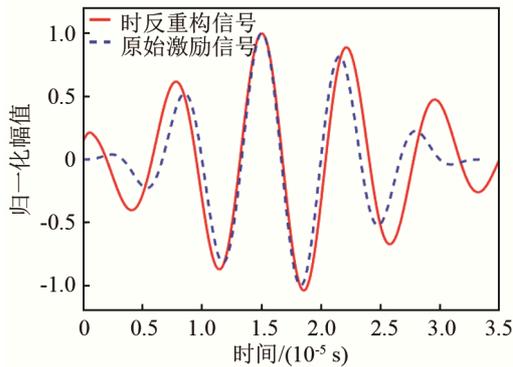
(b) 路径 P_4-P_9



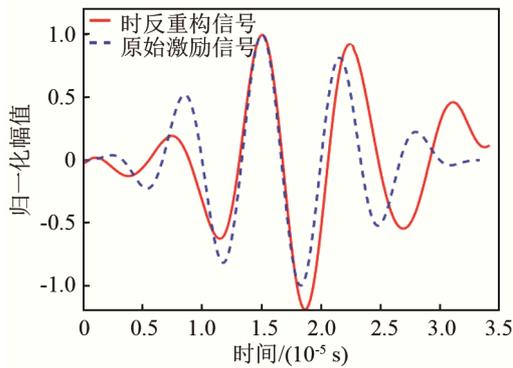
(c) 路径 P_5-P_{11}



(d) 路径 P_3-P_{10}



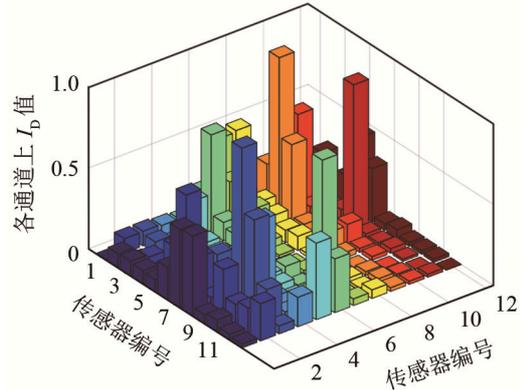
(e) 路径 P_2-P_6



(f) 路径 P_1-P_6

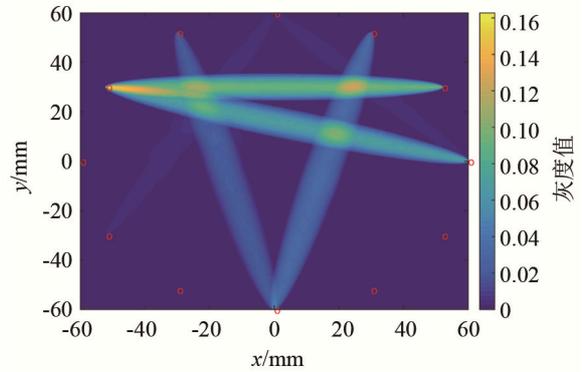
图 11 不同路径上, 重构信号与激励信号归一化波形对比图
Fig.11 Comparison of normalized reconstructed signal and excitation signal along different paths

通过式(1)与原始激励信号进行比较计算, 得到各通道的损伤指数并生成如图 12(a)、12(b)所示的损伤指数示意图。由图可知, 通过缺陷的通道或者离缺陷很近的通道的 I_D 明显大于没有缺陷的通道或者远离缺陷通道的 I_D 。将损伤指数 I_D 值代入式(2)中, 分别得到图 13(a)、13(b)所示的脱层损伤成像效果图, 图中红色小圈为 12 个传感器点位, 成像显示出黄色区域最深的传感器通道交叉点处是脱层损伤存在的最大概率位置。对模型 II 和模型 III 损伤图像结果进行阈值化处理结果如图 14(a)、

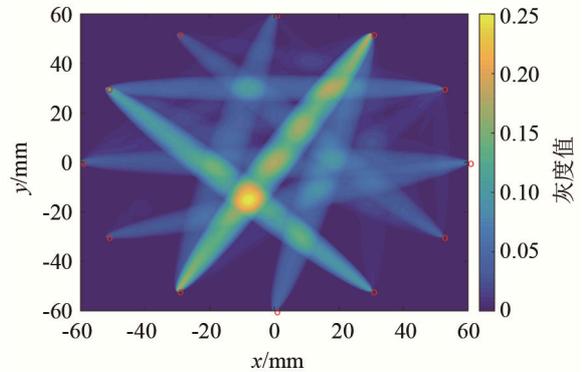


(b) 模型 III 各通道 I_D

图 12 多损伤模型 II 和 III 中不同传感路径损伤指数 I_D 值
Fig.12 The I_D values along different sensing paths in multi-damage model II and III



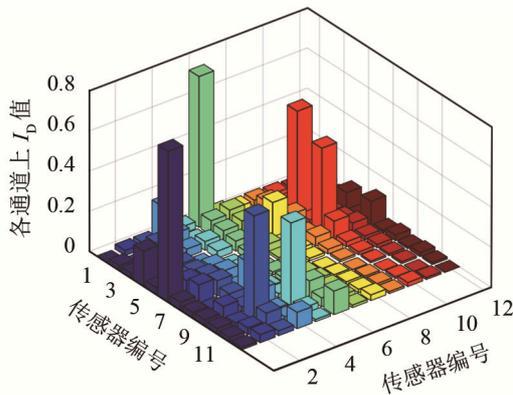
(a) 模型 II 损伤成像图



(b) 模型 III 损伤成像图

图 13 模型 II 和 III 的损伤成像图

Fig.13 Damage images of model II and III



(a) 模型 II 各通道 I_D

14(b)所示, 两图中红色区域为实际损伤所在的位置, 黄色区域为检测到的损伤所在位置。

实际损伤位置与实验仿真得到的损伤位置如表 3 所示。从测量结果可以看出, 采用时间反转与加权概率分布成像相结合的方法能有效检测出两处脱层损伤的位置。模型 II 中脱层损伤 2 的定位误差较大, 误差率为 18.8%, 而模型 II 脱层损伤 1 的定位比较准确, 误差率为 1.48%, 主要由于通过模型 II 中脱层 1 的传感路径更多, 能更好地定位到损伤所在位置。而脱层损伤 2 由于受到脱层损伤 1 散

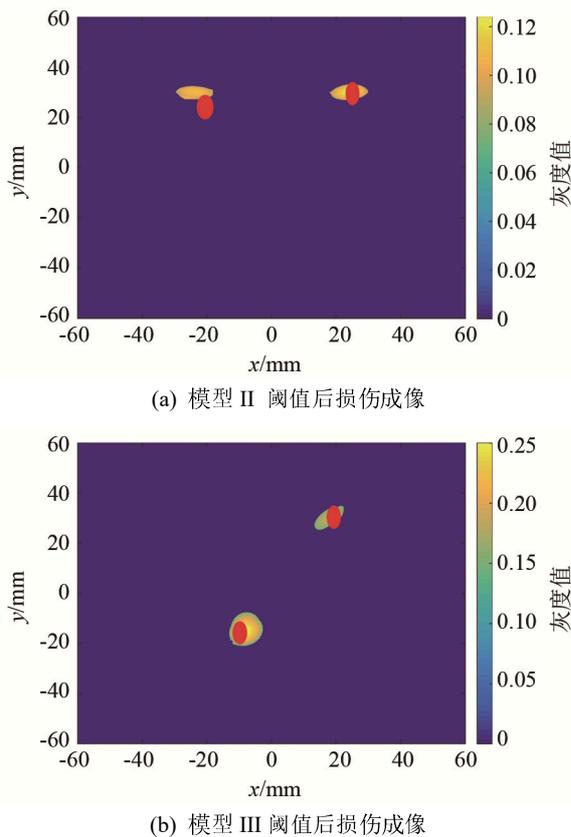


图 14 阈值化处理后模型 II 和 III 的损伤成像图
Fig.14 Damage images of model II and III after threshold processing

射信号的干扰，以及传感路径更少的原因，导致定位中心出现一定的偏差。模型 III 中的两个脱层损伤均能较好地成像，误差率分别为 4.56%和 7.65%，但由于两个损伤散射波的互相干扰，导致定位到的中心点都分别向中间偏移。综上，模型 III 与模型 II 相比较，模型 III 的成像效果优于模型 II，主要由于模型 II 中的两个损伤距离较近，导致模型 II 中成像定位结果的准确度受到更多散射信号的干扰，使得其中一个损伤的成像结果出现一定的误差。

表 3 模型 II 和 III 的多损伤测量结果
Table 3 Multi-damage measurement results for model II and III

损伤	实际中心坐标/mm	检测中心坐标/mm	误差/%
模型 II 损伤 1	(25, 30)	(24.1, 30)	1.48
模型 II 损伤 2	(-20, 25)	(-23.5, 29.9)	18.80
模型 III 损伤 1	(25, 35)	(22.4, 34.4)	4.56
模型 III 损伤 2	(-15, -15)	(-12.6, -15)	7.65

3 结论

针对现有的基于无损板基准信号损伤检测方法所存在的固有问题，以及对复合材料板多源损伤

定位成像研究的不足。本文采用 Lamb 波时间反转和加权分布成像相结合的方法，利用时间反转方法的重构特性，对结构响应信号进行时间反转重构处理，消除 Lamb 波的频散效应，并根据时间反转重构信号与原始激励信号的对比，计算与损伤相关的损伤指数，并将该损伤指数作为概率加权分布的权重系数，对待检测复合材料层合板结构中存在的损伤进行定位成像。仿真实验结果表明，该方法对单源脱层损伤成像具有较高的精度和准确性，对多源脱层损伤亦能进行有效成像，但因多个损伤之间的散射信号产生相互干扰，使得成像结果产生一定的定位误差。

参 考 文 献

- [1] ZHANG X F, LUO D R, HE Y Z, et al. CFRP barely visible impact damage inspection based on nonlinear ultrasound signal sparse reconstruction[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(15): 6303-6310.
- [2] HE Y Z, CHEN S, ZHOU D Q, et al. Shared excitation based nonlinear ultrasound and vibrothermography testing for CFRP barely visible impact damage inspection[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(12): 5575-5584.
- [3] 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. 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.
- [4] 刘增华, 徐庆龙, 董拓灿, 等. 基于时间反转法的 Lamb 波检测技术的研究进展[J]. 实验力学, 2015, 30(2): 131-141. LIU Zenghua, XU Qinglong, DONG Tuocan, et al. Progress of lamb wave detection technology based on time reversal method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(2): 131-141.
- [5] SU Z Q, YE L, LU Y. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: a review[J]. Journal of sound and Vibration, 2006, 295(3-5): 753-780.
- [6] 刘增华, 徐营赞, 何存富, 等. 板状结构中基于 Lamb 波单模态的缺陷成像试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 232-238. LIU Zenghua, XU Yingzan, HE Cunfu, et al. Experimental study on defect imaging based on single lamb wave mode in plate-like structures[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(4): 232-238.
- [7] 欧阳清华, 周丽, 刘晓同. 采用有效信号段自提取算法识别结构多损伤位置[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(4): 35-41. OUYANG Qinghua, ZHOU Li, LIU Xiaotong. Identification of structural multiple damage locations using an effective signal automatic extraction algorithm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(4): 35-41.
- [8] SOHN H. Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring[J]. Philosophical Transactions of the Royal society A: Mathematical, Physical and Engineering sciences, 2007, 365(1851): 539-560.
- [9] ING R K, FINK M. Time-reversed Lamb waves[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(4): 1032-1043.
- [10] 何存富, 周文桢, 刘增华, 等. 基于多通道时间反转 Lamb 波的铝板小缺陷检测[J]. 实验力学, 2015, 30(6): 683-689. HE Cunfu, ZHOU Wenzhen, LIU Zenghua, et al. small-sized

- defect detection in aluminum plate based on time reversal lamb waves[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2015, **30**(6): 683-689.
- [11] 王强, 严夏君, 陈小惠, 等. 无基准 Lamb 波时间反转损伤概率成像监测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2013, **34**(7): 149-155.
WANG Qiang, YAN Xiajun, CHEN Xiaohui, et al. Baseline free Lamb wave damage probability imaging monitoring method based on time reversal theory[J]. *Chinese Journal of scientific Instrument*, 2013, **34**(7): 149-155.
- [12] HUANG L P, ZENG L, LIN J, et al. An improved time reversal method for diagnostics of composite plates using Lamb waves[J]. *Composite structures*, 2018, **190**: 10-19.
- [13] FINK M. Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1992, **39**(5): 555-566.
- [14] WU F, THOMAS J L, FINK M. Time reversal of ultrasonic fields. II. Experimental results[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1992, **39**(5): 567-578.
- [15] JUN Y J, LEE U. Computer-aided hybrid time reversal process for structural health monitoring[J]. *Journal of Mechanical science and Technology*, 2012, **26**(1): 53-61.
- [16] 蔡建, 石立华, 袁慎芳, 等. 一种基于宽带激励的虚拟时间反转方法[J]. *仪器仪表学报*, 2011, **32**(1): 218-224.
CAI Jian, SHI Lihua, YUAN shenfāng, et al. Virtual time reversal method based on broadband excitation[J]. *Chinese Journal of scientific Instrument*, 2011, **32**(1): 218-224.
- [17] CHEN C L, YUAN F G. Impact source identification in finite isotropic plates using a time-reversal method: theoretical study[J]. *smart Materials and structures*, 2010, **19**(10): 105028.
- [18] WATKINS R, JHA R. A modified time reversal method for Lamb wave based diagnostics of composite structures[J]. *Mechanical systems and signal Processing*, 2012, **31**: 345-354.
- [19] PARK H W, SOHN H, LAW K H, et al. Time reversal active sensing for health monitoring of a composite plate[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, **302**(1-2): 50-66.
- [20] PARK H W, KIM S B, SOHN H. Understanding a time reversal process in Lamb wave propagation[J]. *Wave Motion*, 2009, **46**(7): 451-467.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 许颖, 陈锐, 卢苗苗, 等. 考虑材料各向异性的纤维增强聚合物基复合材料板损伤 Lamb 波检测和定位[J]. *复合材料学报*, 2019, **36**(2): 389-399.
XU Ying, CHEN Rui, LU Miaomiao, et al. Detection and location of damage in fiber reinforced plastics plates by Lamb wave considering material anisotropy[J]. *Acta Materiae Compositae sinica*, 2019, **36**(2): 389-399.