

文章编号: 1000-3851(2009)03-0099-06

复合材料板脱层损伤的时间反转成像监测

王 强, 袁慎芳*

(南京航空航天大学 智能材料与结构航空科技重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 基于时间反转理论, 对主动 Lamb 波复合材料结构脱层损伤成像监测技术进行了研究。分析了时间反转方法的理论基础以及对波源的信号聚焦过程。根据信号传播自身的特性, 研究采用时间反转聚焦方法使损伤散射信号能量叠加放大, 从而提高信号的信噪比, 分析给出了具体的损伤信号时间反转聚焦增强过程; 利用时间反转法对波源的自适应聚焦能力, 重建信号传播波动图, 通过信号聚焦显示损伤位置和区域。在玻璃纤维复合材料板上的真实损伤实验结果表明, 该方法能有效提高损伤散射信号的能量, 较为准确地监测出损伤的位置、大致范围等特征。

关键词: 复合材料; 脱层; 监测; Lamb 波; 时间反转

中图分类号: TB302.5; TB33 **文献标志码:** A

Time reversal imaging method for composite delamination monitoring

WANG Qiang, YUAN Shenfang*

(The Aeronautic Key Laboratory for Smart Material and Structure, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the time reversal theory, the active Lamb wave damage imaging method for composite structural delamination detection was researched. The theory basis of the time reversal process was analyzed, and the focusing process to the source was discussed. Depending on the character of Lamb wave propagation, the damage scattering signals were time reversed and reemitted to the damage, and then they will arrive at the damage synchronously so that the damage scattering signal caught again will be amplified. Details about the time reversal amplifying process were analyzed and given. Based on the focalization ability of time reversal theory to the wave origin, the wave propagation was rebuilt by an image method which displays the damage as the focusing point. Experiments on the glass fiber reinforced composite board indicate that the sensing data energy can be amplified by this method, and the location and range of the damage can be expressed well.

Keywords: composite materials; delamination; monitoring; Lamb wave; time reversal

当前, 复合材料以其优越的力学性能得到了越来越广泛的应用, 尤其在航空航天结构中^[1]。然而, 该类材料在制造和长期的使用过程中, 可能产生脱层、裂纹等结构损伤, 若不能及时发现, 将导致结构的迅速破坏, 造成事故隐患^[2-4]。脱层损伤是复合材料主要损伤形式之一, 对脱层损伤的监测研究具有积极意义。主动 Lamb 波技术是目前研究较多的一种复合材料板结构健康监测技术^[5-6]。由于 Lamb 波在复合材料结构板中的传播过程以及结构损伤发生的机制很复杂, 采用主动 Lamb 波结构健康监测技术时, 信号分析较为困难; 且真实结构

往往还带有加筋、通孔等散射体, 容易造成信噪比较低, 使得信号的分析 and 处理难度进一步增加, 从而降低了监测效率和精度^[6-7]。同时由于传感器数量和位置的限制, 得到的信号中包含的数据量有限, 大部分的分析方法只能确定损伤的位置, 无法较为准确地描述损伤范围。美国北卡大学 Yuan 等人根据惠更斯原理, 采用波阵面逆推的思想实现对损伤的监测和成像, 该方法为了获取较为完整准确的波阵面, 往往需要一定数量的传感器, 且监测效果依然受制于损伤散射信号的质量^[8-9]。借助时间反转理论的聚焦原理可以实现对波源的信号聚焦,

收稿日期: 2008-06-02; 收修改稿日期: 2008-11-11

基金项目: 国家 863 计划(2007AA03Z117); 国家自然科学基金(50830201; 10872217); 江苏省研究生科研创新计划(CX07B_076z)

通讯作者: 袁慎芳, 教授, 研究方向为结构健康监测、传感器技术等 E-mail: ysf@nuaa.edu.cn

因此该理论已经被一些国内外学者用于无损检测技术研究中^[10-12],但目前在复合材料板结构健康监测研究中的应用还较粗浅^[13-15]。

本文中基于时间反转理论对波源的自适应聚焦原理,通过时间反转处理实现对损伤处 Lamb 波信号能量的聚焦,增强损伤散射信号的能量从而提高传感信号的信噪比;同时,根据时间反转自适应聚焦原理,利用增强信号实现复合材料板结构脱层损伤的定位与成像。

1 时间反转理论基础

时间反转(简称时反,在频域里称作相共轭)是指传感器接收到声源发射的时域信号后,将其信号时反再发射出去,即先到后发、后到先发。它是声互易性原理的应用之一,可以实现声源信号重构,是一种不需要介质和激励器/传感器性质和结构的先验知识就可以实现声波自适应聚焦和检测的方法。法国科学家 Fink 最先将时间反转法由光学领域应用到声学领域中,并开展了大量理论和实验研究^[10-12]。

由于边界等散射体的存在,波在固体板中传播时存在多径效应。借鉴信号与系统分析的思想,传感器、激励器和传播媒介组成了一个信号传输系统,如果用 $S(\omega)$ 表示激励信号的频谱, $H_i(\omega)$ 表示传输系统的第 i 通道传递函数,则信号经过传输在对应传感器输出的传感频谱可写成

$$R_i(\omega) = S(\omega) \cdot H_i(\omega) \quad (1)$$

令 $X_i(\omega)$ 是 $R_i(\omega)$ 的复共轭(时域中即为时反),即

$$X_i(\omega) = R_i^*(\omega) = S^*(\omega) \cdot H_i^*(\omega) \quad (2)$$

根据声波传播的互易性原理,一旦传播通道确定,输入输出端口可互易,因此分别将时反后的传感信号 $X_i(\omega)$ 在对应的传感器上加载,即在式(2)两边同乘 $H_i(\omega)$,在激励元件即波源处可得到信号如下:

$$Z(\omega) = S^*(\omega) \cdot \sum_i H_i(\omega) \cdot H_i^*(\omega) \quad (3)$$

式中: $S^*(\omega)$ 为激励信号的频域共轭即时反信号;“ $H_i(\omega) \cdot H_i^*(\omega)$ ”一项是实、偶、正函数,它在时间零点的傅里叶反变换是同相叠加的,会得到主相关峰值,各通道的累加结果使得该时刻点的信号峰值显著增强,形成聚焦。这就是时间反转法聚焦的基本原理。在式(1)~式(3)中, $X_i(\omega)$ 可认为是传感器接收信号时反后的频谱, $Z(\omega)$ 可认为是时反加载

处理后波源处输出的频谱^[13-16]。

2 复合材料板脱层损伤的时间反转图像监测原理

在常规的基于 Lamb 波主动监测方法中,传感得到的各损伤散射信号一般是被独立分析、处理并加以利用的。事实上各传感信号均来自于同一个波源——损伤,按照时间反转理论,将这些信号时反并在对应传感器加载,可以实现在损伤处的叠加聚焦,这说明各传感信号存在着关联性。利用这种关联性,可以实现对信号的增强和损伤图像监测。

2.1 信号增强方法

基于正反压电效应,在主动 Lamb 波损伤监测技术中一般采用压电元件作为激励元件和传感元件。设初始激励元件为 A,各传感元件为 R_i , ($i = 1, 2, 3, \dots$),可以设定从激励元件到损伤处的信号传递函数为 $H_{AD}(\omega)$,而损伤处到各传感器的传递函数为 $H_{DR_i}(\omega)$,则损伤处的信号 $D(\omega)$ 和各传感器接收到的损伤散射信号 $R_i(\omega)$ 为

$$D(\omega) = S(\omega) \cdot H_{AD}(\omega) \quad (4)$$

$$R_i(\omega) = S(\omega) \cdot H_{AD}(\omega) \cdot H_{DR_i}(\omega) \quad (5)$$

将传感信号 $R_i(\omega)$ 时反加载,则在损伤处可以得到信号 $D_e(\omega)$ 如下:

$$\begin{aligned} D_e(\omega) &= \sum_i S^*(\omega) \cdot H_{AD}^*(\omega) \cdot H_{DR_i}^*(\omega) \cdot H_{DR_i}(\omega) \\ &= \sum_i S^*(\omega) \cdot H_{AD}^*(\omega) \cdot \sum_i H_{DR_i}^*(\omega) \cdot H_{DR_i}(\omega) \end{aligned} \quad (6)$$

根据时间反转理论中对波源的自适应聚焦特性及第 1 节分析结果, $D_e(\omega)$ 是各传感信号时反加载后得到的损伤处聚焦增强波源信号。各传感器再次接收到的增强了的损伤散射信号将变为

$$\begin{aligned} R_k(\omega) &= H_{DR_k}(\omega) \cdot S^*(\omega) \cdot H_{AD}^*(\omega) \cdot \\ &\quad \sum_i H_{DR_i}^*(\omega) \cdot H_{DR_i}(\omega) \\ &= \sum_i [S^*(\omega) \cdot H_{AD}^*(\omega) \cdot H_{DR_i}^*(\omega)] \cdot \\ &\quad [H_{DR_i}(\omega) \cdot H_{DR_k}(\omega)] \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $k = 1, 2, 3, \dots$ 。从式(7)中不难发现:“ $S^*(\omega) \cdot H_{AD}^*(\omega) \cdot H_{DR_i}^*(\omega)$ ”为第 i 个传感器接收初始激励元件 A 激励时的损伤散射信号的时间反转信号;而“ $H_{DR_i}(\omega) \cdot H_{DR_k}(\omega)$ ”恰为第 i 个压电元件作为激励器、第 k 个压电元件作为传感器时的损伤散射传感通道传递函数。

在上述的处理过程中, 虽然各传感信号中存在除损伤散射信号之外的其他响应信号, 如噪声、边界反射或散射信号, 但这些响应由于来源不一, 发生的时刻也不尽相同, 在时间反转加载时也就不存在统一的聚焦点, 因此处理中只是随机叠加而无法增强。故按照式(7)处理步骤就可实现传感信号中损伤散射信号能量的突出增强, 从而实现信噪比提高。

考虑到复合材料中 Lamb 波传播函数比较复杂, 在式(7)两端同乘以 $S(\omega)$, 得到

$$\begin{aligned} R'_k &= R_k(\omega) \cdot S(\omega) \\ &= \sum_i [S^*(\omega) \cdot H_{AD}^*(\omega) \cdot H_{DR_i}^*(\omega)] \cdot \\ &\quad [S(\omega) \cdot H_{DR_i}(\omega) \cdot H_{DR_k}(\omega)] \\ &= \sum_i R_{Ai}^*(\omega) \cdot R_{ik}(\omega) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $R_{Ai}^*(\omega)$ 为初始激励源 A 激励时第 i 个压电元件得到的损伤散射信号的时反信号; $R_{ik}(\omega)$ 为第 i 个压电元件作激励时第 k 个压电元件得到的损伤散射信号。按照式(7)推导过程, 可以认为 $R'_k(\omega)$ 为信号 $S^*(\omega) \cdot S(\omega)$ 作为初始激励信号时的增强损伤散射信号。这样的处理将大大简化计算难度和过程, 而且由于 $S^*(\omega) \cdot S(\omega)$ 与原激励信号具有相同的频域特征, 根据 Lamb 波传播特性, 该处理也不会对信号的传播速度等产生影响。

2.2 损伤成像原理

根据式(6)的表述, 在聚焦时刻各时反传感信号同时到达损伤处并相互叠加, 此时损伤处成为整个结构中波能量最大的地方。按照 Lamb 波传播的原理, 可以模拟计算出增强信号再次时反聚焦时在结构中的传播情况, 即结构中各点处振动的能量和幅值。以能量为参数把这一计算结果用图像的方法表示出来, 则所成像中能量最大之处即为损伤处, 这样就可以实现对损伤的成像监测^[15]。假设损伤散射信号的发生时刻为 t_0 , 损伤信号到达最后一个传感器的时刻为 t_1 , 选取 $t_w > t_1$, 以 $t_w - t_0$ 为时间窗口, 分别截取各传感信号, 并在时窗内将他们反转得到反转信号 $f_i (i=1, 2, \dots, N)$; 将反转后的传感信号在对应的传感器上同时加载, 则在损伤处——即二次波源处可以得到波源的重建聚焦信号, 设定聚焦时刻为 t_f 。考虑到压电阵列中压电元件的间距都较小, 在此范围内由于各项异性引起的传播时间差可以忽略。将复合材料板等间距划分为若干单元, 每个单元对应一定的坐标, 根据声波传播原理, 可以在板中建立 t_f 时刻的瞬态波动图, 该

时刻每一个单元的波动幅值可以由下式求得:

$$S_{mi} = \sum_{i=1}^N A_i \cdot f_i(t_{mi}), \quad t_{mi} = t_w - t_0 - \frac{R_{mi}}{v} \quad (9)$$

其中: A_i 为补偿各传感信号路径不同引起能量衰减的放大系数; v 为 Lamb 波的传播速度; R_{mi} 为图像单元 (m, n) 到对应传感器距离。

采用压电阵列技术, 分别选取阵列中的压电元件作为激励元件, 其他元件作为传感元件, 各自反转聚焦成像, 将这些损伤图像进行叠加可以从各个角度反映损伤特征, 避免激励波发射方向引起的失真。

不同于基于惠更斯原理的偏移成像技术^[8-9], 这样的成像方法由于不是按照声波传播的波阵面逆向推移获得波源, 因此对压电片数量的要求不高, 4 个压电元件就可以组成一个监测单元; 同时, 采用压电阵列扫描技术可以最大化地对损伤各方向上的特征进行扫描, 减少损伤细节特征的丢失。本文中设定 4 个压电元件为最小压电阵列, 并实验考察了压电片数量对实施效果的影响; 采用经典的四点圆弧定位法确定损伤位置和损伤发生时刻^[17]。

3 实验研究

3.1 实验设备及试件

实验中采用的激励信号为窄带调制 5 波峰正弦信号, 如图 1 所示, 选择的频率为 40 kHz, 经实验测定在该频率激励下产生的 Lamb 波将以 A_0 模式为主, 这样可以降低信号分析与处理难度。实验中信号发生及采集设备是南航智能所自行开发的多通道压电扫描系统, 该系统可实现任意激励信号的发生、功率放大及传感信号的放大采集, 系统如图 2(a)所示。实验时传感信号采样频率为 5 MHz。

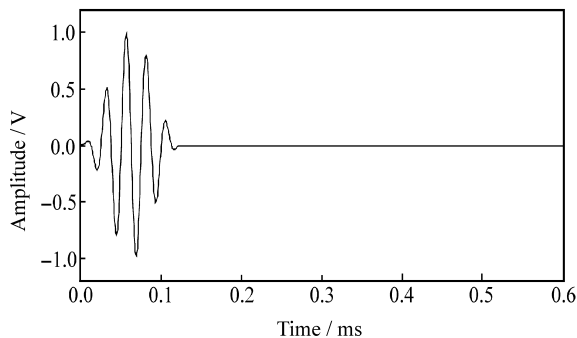


图 1 激励信号波形

Fig. 1 Exciting signal waveform

实验对象为是玻璃纤维板, 尺寸为 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。利用压电元件的正逆压电效应, 在结构上根据监测内容和区域布置一定数量的压电

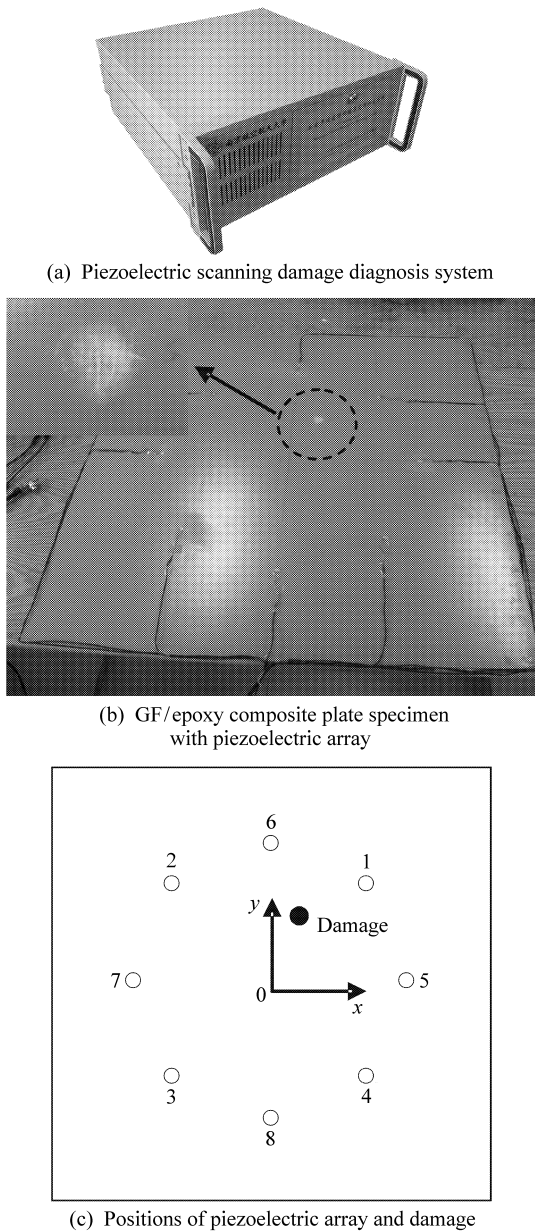


图 2 实验设备和玻璃纤维复合材料板实验试件情况

Fig. 2 Experiment set-up and epoxy glass composite plate specimen

元件组成压电传感/激励阵列。图 2(b)、2(c)显示的是实验件以及压电传感/激励阵列、损伤的位置情况。实验中在板结构上对称布置了 8 片压电片，以考察压电片数量对监测结果的影响程度，压电片编号与坐标分别如图 2(c)和表 1 所示，坐标原点为板中心点。考虑到压电元件之间的距离较小，由于材料各向异性引起的差异很小，故 Lamb 波传播速度取固定值。实验中板结构的脱层损伤采用铁锤敲击的方式产生，如图 2(b)左上角所示，损伤中心位置坐标约为 (50 mm, 102 mm)，损伤直径约为 20 mm。

3.2 实验结果分析

图 3 显示的是选择最小压电阵列组合，即由压电片 1、2、3、4 组成压电阵列时，压电片 4 激励压电片 1 和 3 接受到的损伤散射信号。从图中可以看出，当传感点靠近损伤点时，损伤散射信号较为清晰，但在传感器远离损伤点时，由于边界反射、模式变换的存在，信号将会复杂起来，对损伤监测带来困难。利用式(8)对所有的损伤散射信号进行增强处理，其中为了避免散射点不同造成的时间传递和相位误差，信号的增强叠加采用的是包络线叠加。图 4 是对图 3 信号进行增强处理后的损伤信号图。从结果可以看出增强信号中各损伤信号的聚焦波峰突出，即使原信号较为复杂也可以得到相同的增强效果。相比于原始传感信号，有用信号的能量被放大，波峰明显，提高了抗干扰的能力。

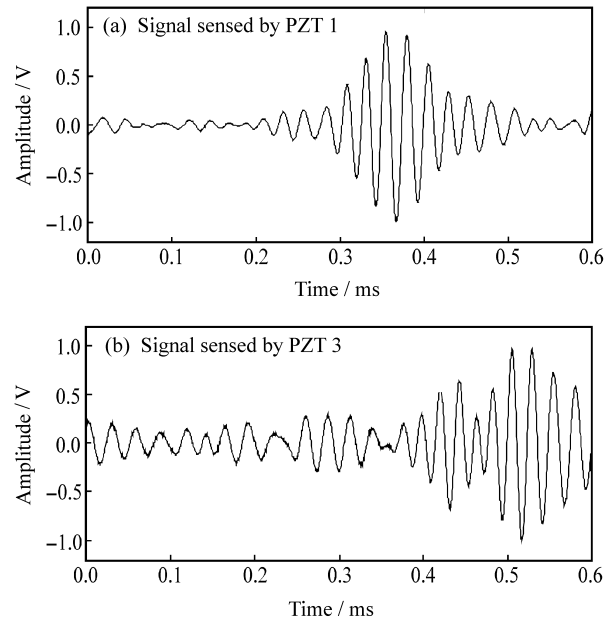


图 3 最小压电阵列组合中压电片 4 激励时的损伤散射信号

Fig. 3 Damage scattering signals actuated by PZT 4 in minimum PZT array combination

选取各增强信号峰值电压到达时刻作为损伤散射信号的到达时刻，利用四点圆弧定位法可求得各时反传感信号在损伤处聚焦的时刻，也是损伤再次发射散射信号的时刻。据此，按照前文介绍的步骤，建立聚焦图像重建区域，该区域被划分成 500×500 个单元，每个单元大小为 $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ ，重建监测区域；根据信号重建聚焦图像，可以得重建聚焦损伤信号图。在成像过程中，各信号先分别成像

表 1 压电阵列中的各压电片坐标
Table 1 Piezoelectric patch(PZT)coordinate in piezoelectric array

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Coordinate(<i>x</i> , <i>y</i>)/mm	(177,177)	(-177,177)	(-177,-177)	(177,-177)	(250,0)	(0,250)	(-250,0)	(0,-250)

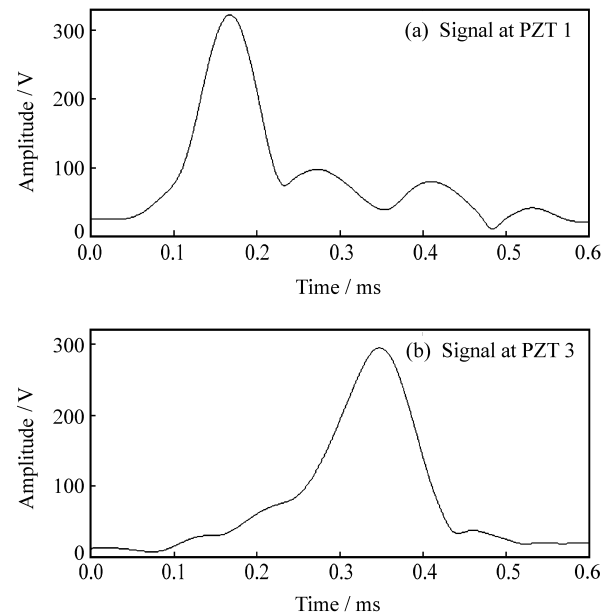


图 4 对图 3 信号进行增强处理结果
Fig. 4 Enhanced sensing signals in Fig. 3

后再叠加,以消除各信号由于传播路径不同引起的信号衰减差异,成像结果进行了阈值化处理,仅显示超过阈值的像素和像素值,阈值大小根据实验采用经验值。最终的成像结果如图 5 所示,该图为灰度显示,灰度从亮到暗对应着能量从低到高,其中图 5(a)为原始图像,图 5(b)为阈值化处理后的图像。定义能量最大处为监测的损伤中心点,图 5 显示的损伤中心点为(49 mm, 99 mm)。

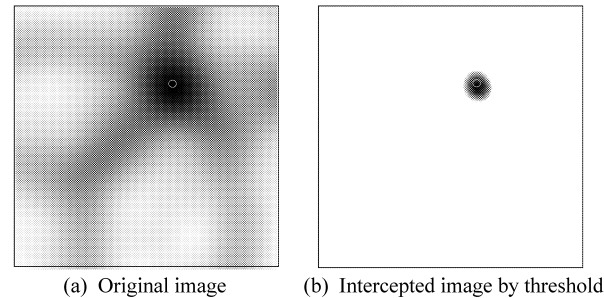


图 5 采用最小压电阵列组合时的损伤成像结果
Fig. 5 Damage imaging by minimum PZT array combination

从图中可以很清楚地看到损伤的发生,图中白

色线圈指示处为真实损伤的中心位置,可以看出,监测结果的准确度很高。相同的处理过程,采用最大压电阵列组合时的处理结果如图 6 所示,相应的监测损伤中心点为(54 mm, 94 mm)。对比图 5、图 6 可以发现,最终的处理结果基本相同,只是在损伤范围的表征上图 6 更加接近真实情况,这表明本文中方法在实现时并不需要额外数量的压电片。经过分析,实验存在的误差主要来源于对波速的估计误差和各向异性,可以借助于 Lamb 波速度频散曲线,修正这一误差,得到更加精确的结果。

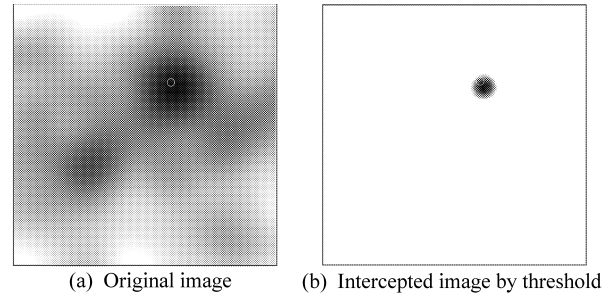


图 6 采用最大压电阵列组合时的损伤成像结果
Fig. 6 Damage imaging by maximum PZT array combination

4 结 论

(1) 基于时间反转理论聚焦原理,利用信号传播的基本特性,可以有效提高主动 Lamb 波损伤监测中监测信号有用成分的能量,从而提高监测信号的信噪比。

(2) 利用增强的损伤散射信号,对脱层损伤的图像监测可以更加直观地表示损伤的发生位置、区域和特征。

(3) 监测方法无需增加额外的传感器,可以采用现有的监测设备实现。

复合材料结构的损伤形式和机制往往较为复杂,进一步的工作将着重研究结构的损伤模型以及 Lamb 波对不同形式损伤的响应情况,在损伤位置、区域监测的基础上实现对损伤形式的识别和评估;同时,开展技术方法的实用化研究,推动复合材料结构健康监测技术的发展。

参考文献:

- [1] 杜善义, 关志东. 我国大型客机先进复合材料技术应对策略思考[J]. 复合材料学报, 2008, 25(1): 1-10.
Du Shanyi, Guan Zhidong. Strategic considerations for development of advanced composite technology for large commercial aircraft in China [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(1): 1-10.
- [2] Boller C. Next generation structural health monitoring and its integration into aircraft design [J]. International Journal of Systems Science, 2000, 31(11): 1333-1349.
- [3] Yuan Shenfang, Wang Lei, Shi Lihua. On-line damage monitoring in composite structures [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2003, 125: 178-186.
- [4] 张彦, 朱平, 来新民, 等. 低速冲击作用下碳纤维复合材料铺层板的损伤分析[J]. 复合材料学报, 2006, 23(2): 150-157.
Zhang Yan, Zhu Ping, Lai Xinmin, et al. Low velocity impact damage analysis in carbon fiber reinforced composite laminated plates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(2): 150-157.
- [5] 彭 鸽, 袁慎芳. 主动 Lamb 波监测技术中的传感元件优化布置研究[J]. 航空学报, 2006, 27(5): 957-962.
Peng Ge, Yuan Shenfang. Optimization for collocation of sensors in active lamb wave-based monitoring [J]. Acta Aeronoutica et Astronautica Sinica, 2006, 27(5): 957-962.
- [6] 彭 鸽, 袁慎芳. 基于主动监测技术的结构冲击损伤 BP 神经网络识别[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(6): 574-577.
Peng Ge, Yuan Shenfang. BP neural network recognition of the impact damage in structures based on active monitoring method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(6): 574-577.
- [7] 徐颖娣, 袁慎芳, 彭 鸽. 二维结构损伤的主动 Lamb 波定位技术研究[J]. 航空学报, 2004, 25(5): 476-479.
Xu Yindi, Yuan Shenfang, Peng Ge. Study on two-dimensional damage location in structure based on active Lamb wave detection technique [J]. Acta Aeronoutica et Astronautica Sinica, 2004, 25(5): 476-479.
- [8] Lin X, Yuan F G. Detection of multiple damages by prestack reverse-time migration [J]. AIAA Journal, 2001, 39: 2206-2215.
- [9] Wang Lei, Yuan F G. Damage identification in a composite plate using prestack reverse-time migration technique [J]. Structural Health Monitoring, 2005, 4(3): 195-211.
- [10] Fink M. Time reversal of ultrasonic fields, Part I: Basic principles [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1992, 39(5): 555-565.
- [11] Wu F, Thomas J L, Fink M. Time reversal of ultrasonic fields, Part II: Experimental Results [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1992, 39(5): 567-578.
- [12] Ing R K, Fink M. Time reversed Lamb waves [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(4): 1032-1043.
- [13] Xu Buli, Giurgiutiu V. Single mode tuning effects on Lamb wave time reversal with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2007, 26: 123-134.
- [14] Park Hyun - Woo, Sohn Hoon, Law K H, et al. Time reversal active sensing for health monitoring of a composite plate [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 302: 50-66.
- [15] Wang C H, Rose J T, Chang Fu - Kuo. A synthetic time-reversal imaging method for structural health monitoring [J]. Smart Material and Structure, 2004, 13: 415-423.
- [16] 生雪莉, 惠俊英, 梁国龙. 时间反转镜用于被动检测技术的研究[J]. 应用声学, 2005, 24(6): 351-358.
Sheng Xueli, Hui Junying, Liang Guolong. Study on passive detecting technology based on an acoustic time-reversal mirror [J]. Applied Acoustics, 2005, 24(6): 351-358.
- [17] 陶宝祺. 智能材料结构[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 275-281.