

基于 PZT 结 Lamb 波方向算法的损伤定位方法*

赵竹君, 李成, 侯玉亮, 铁瑛, 宋成杰

(郑州大学机械工程学院 郑州, 450001)

摘要 基于 Lamb 波在板中的传播特性, 针对复合材料的损伤检测, 提出一种新型的损伤定位方法。该方法采用 3 个压电陶瓷片 (piezoelectric transducers, 简称 PZT) 组成 PZT 结, 通过从各 PZT 中提取出损伤散射信号, 找到其损伤波包到达的时间差, 并依据 Lamb 波的传播速度得到位移差。首先, 结合 PZT 结中各 PZT 的几何位置, 具体推导出损伤方向算法, 运用方向算法找到 Lamb 波在损伤位置发生散射后的其中一个传播方向, 通过传播方向的交点来实现损伤位置的判定; 其次, 分析了互相关理论的基本原理, 并运用互相关算法提取出损伤散射信号; 最后, 在碳纤维增强树脂基复合材料薄板上对该算法进行实验验证, 求出了损伤方向以及损伤位置。验证结果表明, 该方法能够对复合材料损伤进行有效的定位。

关键词 Lamb 波; 方向算法; 互相关; PZT 结

中图分类号 TH145.9; TB332

引言

Lamb 波是在具有自由边界的固体板或层状结构中传输的一种弹性导波, 由于其本身的传播特性, 如沿传播路径衰减小, 能量损失小, 传输距离远等, 成为现行无损检测领域研究的重要手段。对于由碳纤维增强树脂基复合材料制造的航空航天结构, Lamb 波的应用则更为普遍。在对其进行无损检测时, 采用何种损伤检测工具及方法非常重要。

在损伤检测过程中, 检测工具通常采用压电换能器 (piezoelectric transducers, 简称 PZT), PZT 的轻薄特性使之在超声无损检测中得到广泛的应用。Matt 等^[1]证明当 PZT 直径与 Lamb 波波长之比足够小时, 其可被视为完美的检测工具。蔡建等^[2]通过双面激励法, 即在板的上下表面分别布置 PZT, 有效抑制了 Lamb 波的多模式特性。Wandowski 等^[3]研究了 PZT 的不同布置方式对损伤定位结果的影响, 并证明了 PZT 在损伤检测中比激光测震计具有更高的敏感性。近些年, Lamb 波损伤检测的方法有了很大的发展。Hay 等^[4]提出概率成像方法对损伤进行成像定位。孙亚杰等^[5]利用超声相控阵技术对复合材料结构进行损伤识别。冯勇明等^[6]利用时间反转方法对复合材料结构进行损伤检测, 并用改进的 RAPID 算法进行损伤成像。

笔者以复合材料板的损伤定位为研究对象, 在板上布置 PZT 结对结构损伤进行定位检测, 通过选择 PZT 结的布置位置以及 PZT 结的数量, 运用互相关算法提取出损伤散射信号并用 PZT 结中各 PZT 接收损伤散射信号的位移差, 找到遇损伤发生散射的 Lamb 波方向, 多个 PZT 结即可确定多个方向, 根据找到的损伤方向得到损伤位置。

1 PZT 结损伤判定原理

1.1 损伤方向算法

由于 Lamb 波在板中传播时遇到损伤会产生散射, 因此可以在散射方向的合适位置布置相应的 PZT 结, 以得到板中经由损伤位置散射过来的 Lamb 波信号。为确定损伤的准确位置, 至少需要两束由损伤位置散射而来的 Lamb 波响应信号, 如图 1 所示。如果可以得到两个损伤散射方向, 则其方向交点即为损伤位置。通过运用由 3 个 PZT 组成的 PZT 结, 图 1 中 P_1, P_2, P_3 组成 PZT 结 1; P_4, P_5, P_6 组成 PZT 结 2。运用损伤方向算法, 可以求出图中 θ_1, θ_2 的角度, 从而确定损伤散射的其中两个方向。同理, 如果有 3 个及以上多个 PZT 结, 将得到多个损伤方向, 任意两个损伤方向的交点都为损伤位置中心。在对损伤方向进行求解时, 各 PZT 应

* 国家自然科学基金及民航联合基金重点支持项目 (U1333201)

收稿日期: 2017-05-10; 修回日期: 2017-07-03

呈三角形布置,且 PZT 之间间距不宜过大,最小为两 PZT 半径之和。

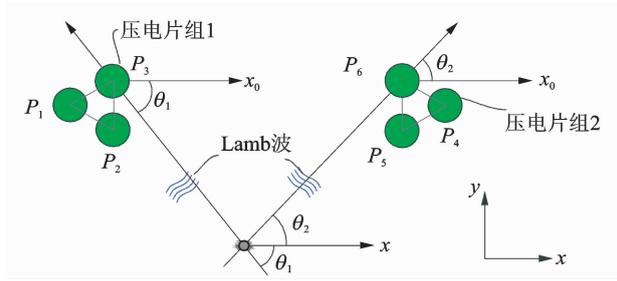


图 1 两个 PZT 结接收到的在板中传播的两个方向 Lamb 波

Fig. 1 Lamb wave in two directions collected by two PZT knot

由于复合材料薄板尺寸为 $l \times w$,以板的中心为原点,长边为 x 轴,短边为 y 轴,建立坐标系,PZT 结的各 PZT 中心坐标为 $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, 6)$ 。选取各 PZT 结中最先接收到损伤信号的 PZT 为基准,其坐标为 (x_b, y_b) 。损伤信号到达各 PZT 的时间为 t_i ,到达基准 PZT 的时间为 t_b 。以一个 PZT 结为例,则有 $\Delta t_i = t_i - t_b$,由 Lamb 波在板中传播的速度 v 可得 $\Delta l_i = \Delta t_i \cdot v$,以基准 PZT 的中心为圆心, Δl_i 为半径画圆,如图 2 所示,分别过 PZT 结中另外两个 PZT 的中心做圆 1,2 的切线 m_1, m_2 ,其斜率分别为 k_1, k_2 。理想状态下 $m_1 \parallel m_2$,结合波的传播理论,则损伤信号的方向为与 m_1, m_2 垂直的方向。

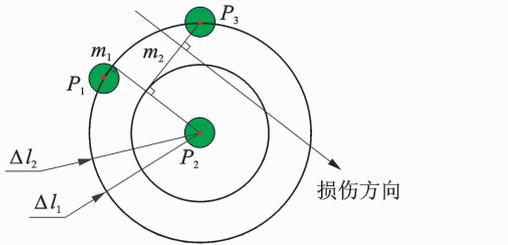


图 2 损伤方向算法示意图

Fig. 2 Damage direction algorithm schematic diagram

现依据各点在坐标系中位置可推导出损伤方向的计算表达式。由分析可得,以基准 PZT 的中心为圆心的圆方程为

$$(x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 = \Delta l_i^2 \quad (1)$$

过第 i 个 PZT 中心做圆切线方程为

$$k_i - y - k_i x_i + y_i = 0 \quad (2)$$

点到直线的距离公式为

$$d = |Ax_0 + By_0 + C| / \sqrt{A^2 + B^2} \quad (3)$$

基准 PZT 中心到过点 1 的圆切线距离为 Δl_i ,得

$$\Delta l_i = |kx_b - y_b - kx_i + y_i| / \sqrt{k^2 + 1} \quad (4)$$

$$k_i =$$

$$\frac{-(x_b - x_i)(y_i - y_b) \pm \Delta l_i \sqrt{(x_b - x_i)^2 + (y_i - y_b)^2 - \Delta l_i^2}}{(x_b - x_i)^2 - \Delta l_i^2} \quad (5)$$

设损伤方向为 k_d ,则有 $k_d k_i = -1$ 。

1.2 损伤信号的提取

在 Lamb 波无损检测过程中,PZT 分别采集损伤前后两种响应信号,损伤前信号为结构健康响应信号,损伤后信号为结构损伤信号。Lamb 波在板中传播过程中发生边界反射,因此损伤后的响应信号中不仅包括 Lamb 波遇损伤散射的损伤散射信号,还有 Lamb 波遇边界反射的信号。通常损伤散射信号的提取是根据健康响应信号和结构损伤信号之间的差异,由于 Lamb 波在传播时其散射信号会出现衰减,且会出现多模式混叠现象,单纯的以有损信号与无损信号相减无法得到实际的损伤散射信号。结构健康信号与结构损伤信号在同频条件下,时域上具有不同特征,存在不相关性,但二者皆由同一窄带激励信号激励,因此,激励信号作为损伤前后响应信号的基本单元与响应信号在时域上具有相同特征,通过相关性的计算分别提取出损伤前后响应信号与激励信号之间的差异,其二者的差值即为损伤散射信号。设两列信号为 $\alpha(t), \beta(t)$,则两列信号的互相关函数定义为

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \alpha(t) \beta(t + \tau) dt \quad (6)$$

它表征了对各态历经随机过程中,信号 $\beta(t)$ 对信号 $\alpha(t)$ 的依赖程度。在 $\tau = \tau_0$ 时, $R(\tau)$ 达到最大值,此时两信号之间的时间间隔为 τ_0 ,即两列信号的时间延迟为 τ_0 ,此时信号 $\beta(t)$ 对信号 $\alpha(t)$ 的依赖程度最大,即两列信号相关性最强。设激励信号为 $f_b(t)$,压电片接收到的响应信号为 $f(t)$,以激励信号为基准,将响应信号与基准信号做互相关运算,互相关函数达到最大值时,对应的时刻为 τ_0 ,此时响应信号与基准信号相关性最强。同时,求出基准信号的自相关函数,互相关函数与自相关函数二者最大值的比值为响应信号中基准信号幅值 a_b 。 τ_0 与 a_b 可表达为

$$\begin{cases} \tau_0 = \max_t \langle f(t), f_b(t) \rangle \\ a_b = \frac{\max \langle f(t), f_b(t) \rangle}{\max \langle f_b(t), f_b(t) \rangle} \end{cases} \quad (7)$$

其中: \langle, \rangle 表示相关运算。

最后,将基准信号 $f_b(t)$ 与求出的幅值 a_b 相乘,即响应信号中与激励信号相关性很强的部分,再将其从响应信号中减去,得到与基准信号相关程度很低的响应信号 $\hat{f}(t)$

$$\hat{f}(t) = f(t) - a_b f_b(t) \quad (8)$$

设结构健康响应信号为 $f_h(t)$ ，结构损伤信号为 $f_d(t)$ ，与激励信号分别作互相关运算，设 τ_1, τ_2 为 $f_h(t), f_d(t)$ 中激励信号 $f_b(t)$ 的出现时刻， a_{bh} 为 $f_h(t)$ 中激励信号 $f_b(t)$ 的幅值， a_{bd} 为 $f_d(t)$ 信号中激励信号 $f_b(t)$ 的幅值。根据式(7)可得

$$\begin{cases} \tau_1 = \max_t \langle f_h(t), f_b(t) \rangle \\ a_{bh} = \frac{\max_t \langle f_h(t), f_b(t) \rangle}{\max_t \langle f_b(t), f_b(t) \rangle} \\ \hat{f}(t) = f_h(t) - a_{bh} f_b(t) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \tau_2 = \max_t \langle f_d(t), f_b(t) \rangle \\ a_{bd} = \frac{\max_t \langle f_d(t), f_b(t) \rangle}{\max_t \langle f_b(t), f_b(t) \rangle} \\ \hat{f}(t) = f_d(t) - a_{bd} f_b(t) \end{cases} \quad (10)$$

最终，两信号相减即得损伤散射信号 $d(t) = \hat{f}_d(t) - \hat{f}_h(t)$ 。

2 实验

2.1 实验系统的搭建

本实验系统采用传统的 Lamb 波激励和接收装置，系统装置如图 3 所示。该系统包括 NI PXI5421 任意波发生器、HA-205 电压放大器以及 PIC 255 型 PZT 换能器，接收仪器包括 PZT 传感器、PXIe5122 数字化仪，任意波发生器和数字化仪均是由 PX-Ie8840 控制器控制，波形发生器和数字化仪与 PZT 的连接均是通过 GTP-150A-2 探棒。系统通过任意波发生器产生的输入信号再经电压放大器放大后进入 PZT 激励器，PZT 激发的 Lamb 波信号在复合材料板中传播一段距离后由 PZT 接收器接收，并由数字化仪对数据进行采集保存到计算机中。实验中波形发生器产生的激励波形为加汉宁窗调制的 5 周期正弦波，频率为 f_0 (300 kHz)。

实验所用的试件，如图 4(a)所示：24 层的碳纤维增强树脂复合材料矩形板长为 720 mm，宽为 500 mm，在其上粘贴有 2 组 PZT 结与 1 个激励 PZT，实验中的损伤设置为典型的通孔损伤，采用电钻钻出

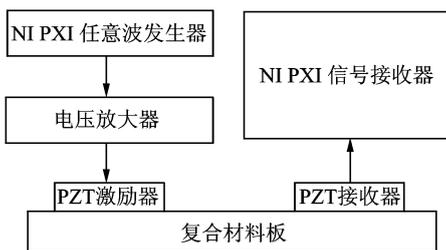
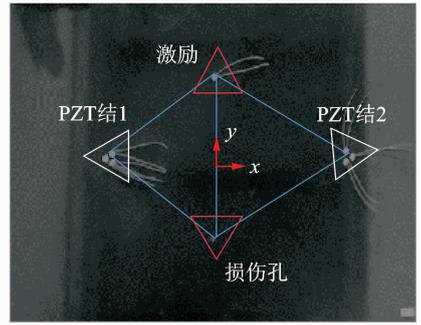


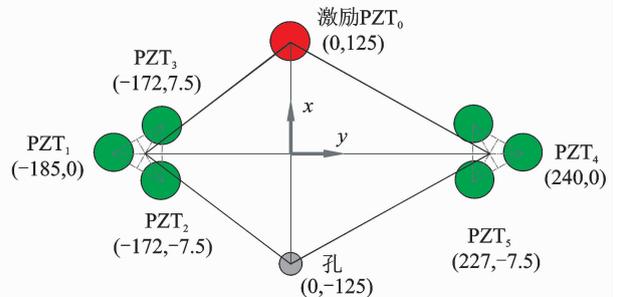
图 3 实验系统装置

Fig. 3 Experimental system devices



(a) 复合材料实验板

(a) Experimental board made of composite material



(b) 各 PZT 和损伤的方位及坐标

(b) Location and coordinates of each PZT and damage

图 4 实验试件及各 PZT 和孔位置

Fig. 4 Test specimen and location of PZT and damage

直径为 6 mm 孔。

为验证方法的可行性，笔者直接选用两个 PZT 结验证是否可以算出方向交点，得到损伤位置。在实际应用中，由于损伤所在位置具有不确定性，例如损伤位置在 PZT 结附近或者 PZT 结的连线上，因此需采用 3 个及以上 PZT 结，通过计算每个 PZT 结接收到的不同损伤方向，并对最终得出的各损伤方向求交点，任意两个损伤方向的交点即为损伤位置。在布置各 PZT 时，考虑到各 PZT 坐标值将代入损伤方向算法公式中计算，为使计算精度更高，使得定位结果更加准确，各 PZT 的坐标值需更为精确，因此文中各 PZT 结均采用 3 个圆形 PZT 呈等边三角形布置。由于每个 PZT 的直径为 10 mm，板尺寸较大，设置 PZT 间距为 15 mm，且经实验研究表明 PZT 结中的压电片间距设为 15 mm 可行。以板的中心为坐标原点，建立直角坐标系，各 PZT 编号及 7 个 PZT 和孔的位置坐标如图 4(b)所示。

2.2 采集响应信号并提取损伤散射信号

首先采集无损伤状态下的响应信号，对 0 号 PZT 施加激励信号，分别采集其他 6 个 PZT 接收到的 Lamb 波响应信号。为了消除外界环境对数据的影

响,对每个频率的数据在同一结果状态下进行多次测量求平均值,并利用 LabView 软件中的有限冲击滤波器进行滤波,实验时对采集信号进行归一化处理,其中 PZT₃ 接收到的健康响应信号如图 5 所示。

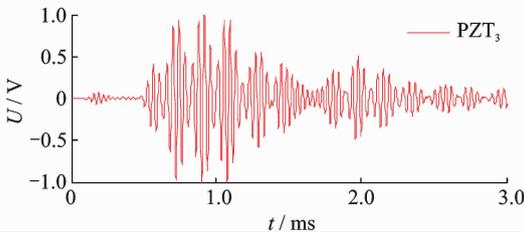
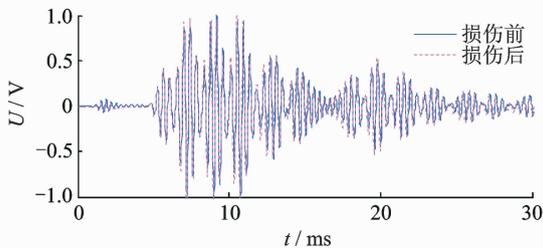


图 5 PZT₃ 采集的健康响应信号

Fig. 5 Health response signal collected by PZT₃

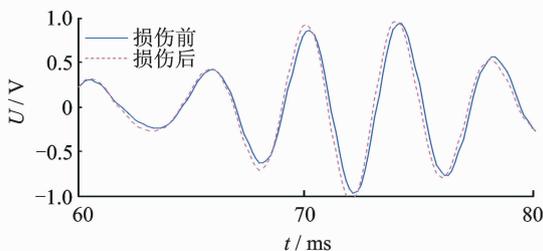
文中选用的损伤形式是在实验结构中形成一个通孔,损伤后信号采集时依然选择 PZT₀。施加激励,现选择 PZT₃ 接收到的损伤后信号与其健康信号作对比分析,如图 6 所示。图 6(a)为 PZT₃ 损伤前后响应信号,选取 6×10^{-5} 至 8×10^{-5} s 时间段响应信号局部放大如图 6(b)所示,可以看出,在损伤前、后信号差异并不十分明显,且幅值发生微弱变化。由于实验板的尺寸无法达到理论要求的无限大,Lamb 波在板中传播一段距离后,波包的混叠现象增强,如果直接采用单纯的损伤前后信号相减的方法,并不能完全得到损伤信号。

根据互相关理论,响应信号由激励信号激发得到,因此响应信号与激励信号的相关程度最高,运用文中提出的方法,对损伤前后响应信号分别与激励信



(a) PZT₃接收到的损伤前后响应信号

(a) Health and damage response signal collected by PZT₃



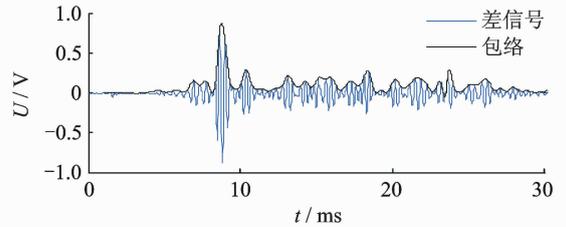
(b) 响应信号局部放大

(b) Local amplification of response signal

图 6 PZT₃ 损伤前后响应信号

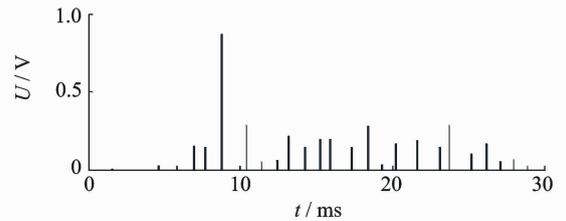
Fig. 6 Health and damage response signal collected by PZT₃ and local amplification

号进行互相关运算,并将相关运算后的信号做差,得到差信号,即得到损伤散射信号,对差信号的波包进行重构,便可提取到损伤散射信号波包的峰值到达时间。分别对 6 个 PZT 接收的损伤前后响应信号进行损伤散射信号提取,其中 PZT₃ 处理后的信号如图 7 所示,损伤散射信号能够被提取,且可得到完整波包。



(a) PZT₃处理后的差信号

(a) Differential signal after processing in PZT₃



(b) PZT₃的差信号重构结果

(b) Reconstruction result of differential signal in PZT₃

图 7 用文中提出的方法得到的 PZT₃ 损伤散射信号结果

Fig. 7 Damage scattering signal results got by PZT₃

2.3 求解 Lamb 波在板中传播速度与损伤方向

在无损状态下,将波形发生器与波形接收器直接相连,得到直连信号,再将波形发生器与激励压电片连接,同时 6 个 PZT 依次接收,得到 Lamb 波健康响应信号。由直连信号可得设备的延时为 $t_0 = 8.16 \times 10^{-6}$ s。6 个接收 PZT 得到的响应信号的第一个包络峰值的到达时间如表 1 所示。根据激励压电片与接收压电片在板中的位置,可求得 PZT₀ 与 PZT₁, ..., PZT₆ 的距离。由速度计算公式 $v = s/t$ 可得 Lamb 波到达各 PZT 的传播速度,对各 PZT 结的各 PZT 速度求平均值,得到 PZT 结的速度。

由于各 PZT 的距离较近,其接收到的损伤散射信号时间间隔很短,速度差异引起的位移差异很小,相对于 Lamb 波传播路径,各 PZT 接收到响应信号的方向偏差较小,因此考虑各 PZT 结的各个压电片接收到的 Lamb 波速度选为相同值,如表 1 所示。由于实验用复合材料板尺寸较小,板材对于损伤前后 Lamb 波波速影响差异较小,所以损伤前后 Lamb 波在板中速度取相同值。

根据提取到的损伤信号,对每个压电片接收到响应信号的差信号重构如图 8 所示,提取重构信号

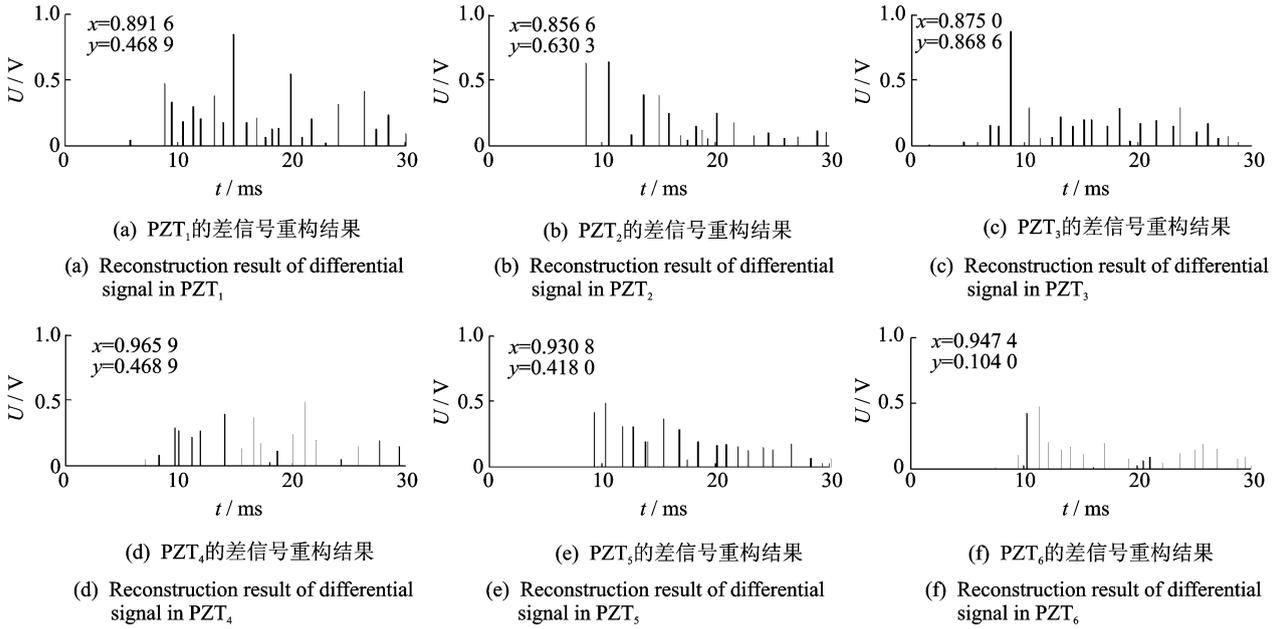


图 8 各 PZT 损伤散射信号重构

Fig. 8 Reconstruction of damage scattering signals collected by each PZT

表 1 Lamb 波传播速度

Tab. 1 the velocity of Lamb wave propagation

PZT 编号	到达时间/ μs	距离/ mm	速度/ $(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	平均速度/ $(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$
PZT ₁	53.26	223.271 1	4.192 1	
PZT ₂	51.06	217.118 1	4.252 2	4.244 6
PZT ₃	48.56	208.303 3	4.289 6	
PZT ₄	62.88	270.601 2	4.303 4	
PZT ₅	61.76	262.840 7	4.255 8	4.251 9
PZT ₆	60.81	255.607 6	4.196 5	

表 2 损伤散射信号波包到达时间

Tab. 2 Damage scattering signal packet arrival time

PZT 编号	到达时间/ μs	时间差/ μs	位移差/ mm
PZT ₁	89.16		
PZT ₂	85.66	3.50	14.856 1
PZT ₃	87.50	1.84	7.810 1
PZT ₄	96.59		
PZT ₅	93.08	3.51	14.924 2
PZT ₆	94.74	1.66	7.058 2

中第 1 个峰值到达时间,图 8 中坐标值 x 即为峰值到达时间, y 为峰值。

由图中提取的各峰值坐标 x 值可以得出损伤信号到达 2,5 号 PZT 的时间最短,因此选取两个 PZT 结的 2 号和 5 号 PZT 为基准压电片。根据位置坐标,由损伤信号重构结果可得损伤波包到达各 PZT 的时间及波包传播距离提取如表 2 所示。将表 2 中得出的 PZT₁ 与 PZT₂ 的时间差和位移差、PZT₂ 与 PZT₃ 的时间差和位移差、PZT₄ 与 PZT₅ 的时间差和位移差、PZT₅ 与 PZT₆ 的时间差和位移差带入式(5)得: $k_1 = 2.498 4/1.273 1, k_2 = 1.639 7/-1.639 7, k_3 = -2.255 3/-1.373 8, k_4 = -1.875 2/1.875 2$ 。对应角度分别为: $\alpha_1 = 68.185 9^\circ/51.850 9^\circ, \alpha_2 = 58.622 3^\circ/-58.622 3^\circ, \alpha_3 = -66.087 5^\circ/-53.948 8^\circ, \alpha_4 = -61.930 1^\circ/61.930 1^\circ$ 。理论上, k_1 与 k_2 相等, k_3 与 k_4 相等,考虑到实验过程中存在

误差,选取近似相等的角度数据, $\alpha_1 = 51.850 9^\circ, \alpha_2 = 58.622 3^\circ, \alpha_3 = -66.087 5^\circ, \alpha_4 = -61.930 1^\circ$ 。分别取 2 者平均值,可得 PZT 结 1 的损伤方向 $\theta_1 = 34.763 4^\circ$,PZT 结 2 求得损伤方向 $\theta_2 = 25.991 2^\circ$,损伤位置坐标为 $(-7.37, -121.77)$,实际损伤位置为 $(0, -125)$,误差为 8.05 mm,其中误差值为本文提出方法计算得损伤位置与实际损伤位置的距离。

3 结束语

利用 MATLAB 软件编写了基于互相关理论的信号处理方法,在激励频率 300 kHz 的条件下,对实验测得的信号数据进行处理,根据处理后结构健康响应信号与结构损伤响应信号的差异,用本方法能够提取出损伤散射信号,且对散射信号重构后可以得到损伤散射信号各波包峰值对应的时间;

根据PZT结在板中的位置,并选择2,5号PZT为基准PZT,将各PZT坐标代入损伤方向计算公式结损伤判定方法利用损伤方向算法得到了各PZT结接收到的经由损伤孔散射的其中一个Lamb波方向,且方向交点确定的损伤位置与实际损伤位置距离为8.05 mm,误差在可接受范围内。

今后将进一步研究多损伤问题,针对多损伤的多方向性,考虑到多损伤问题信号处理的复杂性,对Lamb波在碳纤维增强树脂基复合材料中的传播速度以及信号处理方法进行优化,从而提取出多损伤散射信号的多个损伤包络的到达时间,实现多损伤定位。同时,对PZT结的最大间距进行讨论,得到PZT间距的范围,改进损伤方向算法,从而进一步完善损伤定位方法。

参 考 文 献

- [1] Matt H, Scalea F L D. Macro-fiber composite piezoelectricosettes for acoustic source location in complex structures[J]. *Smart Materials & Structures*, 2007, 16(4):1489-1499.
- [2] 蔡建,袁慎芳,张逍越,等. Lamb波双面激励方法及其在近邻损伤监测中的应用[J]. *南京航空航天大学学报*, 2010, 42(1):62-67.
- Cai Jian, Yuan Shenfang, Zhang Xiaoyue, et al. Lamb wave double side excitation and its application in adjacent damage monitoring [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 42(1):62-67. (in Chinese)
- [3] Wandowski T, Malinowski P H, Ostachowicz W M. Circular sensing networks for guided waves based structural health monitoring [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2015, 66-67:248-267.
- [4] Hay T R, Royer R L, Gao H, et al. A comparison of embedded sensor Lamb wave ultrasonic tomography approaches for material loss detection [J]. *Smart Materials & Structures*, 2006, 15(4):946.
- [5] 孙亚杰,张永宏,刘青山,等. 基于相控阵的结构损伤范围监测与图像表征[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(11):2582-2588.
- Sun Yajie, Zhang Yonghong, Liu Qingshan, et al. Phased array based structural damage range monitoring and imaging analysis [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(11):2582-2588. (in Chinese)
- [6] 冯勇明,周丽. 基于Lamb波时间反转的复合材料结构损伤监测[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(20):2476-2480.
- Feng Yongming, Zhou Li. Damage detection for composites based on time reversal lamb waves method [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(20):2476-2480. (in Chinese)
- [7] Rathod V T, Mahapatra D R. Ultrasonic Lamb wave based monitoring of corrosion type of damage in plate using a circular array of piezoelectric transducers[J]. *NDT and E International*, 2011, 44(7):628-636.
- [8] Giurgiutiu V, Xu B L, Santoni G B, et al. Lamb wave-mode tuning of piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring[J]. *Journal of Vibration and Acoustics: Transactions of the ASME*, 2007, 129(6):752-762.
- [9] 陈洪磊,邓菲,刘增华. 基于Lamb波传播路径分析的复合材料板中缺陷成像[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(24):72-79.
- Chen Honglei, Deng Fei, Liu Zenghua. Defect imaging in composite plates based on propagation paths analysis of lamb waves [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(24):72-79. (in Chinese)
- [10] 曹莹,段玉波,刘继承. Hilbert-Huang变换中的模态混叠问题[J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(3):518-523.
- Cao Ying, Duan Yubo, Liu Jicheng. Research and application of mode-mixing in Hilbert-Huang transform [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(3):518-523. (in Chinese)
- [11] 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 Zenghu, 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. (in Chinese)
- [12] Golato A, Demirli R, Santhanam S. Lamb wave scattering by a symmetric pair of surface-breaking cracks in a plate[J]. *Wave Motion*, 2014, 51(8):1349-1363.
- [13] Niu Dongdong, Li Cheng, Tie Ying. Numerical analysis of the damage detection in composite plates based on the electromechanical impedance method [J]. *Materials Research Innovations*, 2015, 19(510):5-9.
- [14] 崔建国,张文生,齐义文,等. 基于LTSA和RVM的复合材料损伤预测分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2017, 37(1):26-32.
- Cui Jianguo, Zhang Wensheng, Qi Yiwen, et al. Damage prediction analysis and verification of the composite material based on LTSA and RVM [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(1):26-32. (in Chinese)



第一作者简介:赵竹君,女,1992年10月生,硕士生。主要研究方向为复合材料超声无损检测及信号处理。
E-mail: zzhj_ncwu@163.com

