

# 基于激光激励技术的结构损伤成像<sup>\*</sup>

裘进浩, 张超, 季宏丽, 吴郁程, 朱孔军

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

**摘要** 采用了一种新型的损伤检测技术,利用激光脉冲在板类结构中产生热弹效应,激发出板中的导波(Lamb波)。通过分析 Lamb 波的传播状态与损伤之间的关系,并利用 Morlet 复数小波变换和频散补偿能量聚焦的方法,从两个不同的角度分析信号并提取信号特征,实现了对平板结构的快速、大面积检测。实验结果表明,该系统具有较高的测量精度,能较好地检测结构缺陷。

**关键词** 激光超声技术; Lamb 波; 频散抑制; 损伤成像

**中图分类号** TB551; TB553

## 引言

为了提高结构的安全性并降低使用维护成本,无损检测系统已经成为大型结构不可或缺的一部分。在无损检测系统中超声导波已被广泛应用于针对不同材料、不同结构的检测技术中<sup>[1-3]</sup>。超声导波对多种不同形式的损伤都较为敏感,且在传播过程中衰减较少,可传播相对较长的距离。现有的一些检测技术已经能利用导波对结构内的小损伤进行有效定位<sup>[4-5]</sup>;但受限于传感器的数量,检测所能获得的损伤相关信息有限,无法充分突出损伤的特点。更为重要的是,许多基于超声导波的检测手段都依赖于提取现有信号与基准信号之间的差异<sup>[1, 3, 6]</sup>,而在某些环境中基准信号容易失效<sup>[1]</sup>,这制约了检测技术的工程应用。

激光超声技术在一定程度上解决了传统检测技术存在的这些问题<sup>[7-9]</sup>。它利用激光脉冲对需要激励的点进行非接触式激励,使激励点处产生热弹效应,激发出超声导波。通过精确而快速的调节激光光路,可对结构上的任意一点进行激励<sup>[8]</sup>。笔者利用激光在板类结构中激励出的超声导波(Lamb波),研究了 Lamb 波的传播状态与损伤之间的关系。利用 Morlet 复数小波变换和频散补偿能量聚

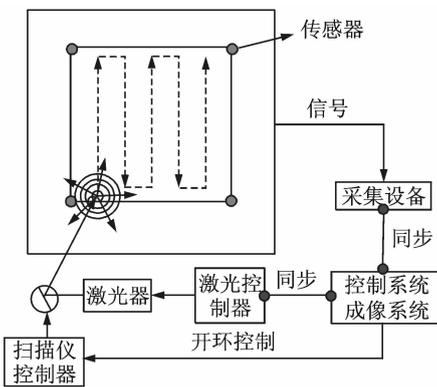
焦的方法,从两个不同的角度分析信号并提取信号特征,在无需结构基准信号的情况下,实现了损伤的定位和检测。

## 1 激光超声检测系统

图 1 为激光超声检测系统的实验装置示意图和实物图。该检测系统由激励单元、数据采集单元和控制单元 3 部分构成。激励单元为该系统的核心部分,由 Q 开关 Nd:YAG 激光器和振镜式激光反射扫描仪组成,激励单元的激励频率为 20 Hz。Nd:YAG 激光器发射的激光脉冲波长为 532 nm,光斑直径近似为 3 mm,最大能量为 55 mJ。由于激励能量过大会使试验件表面产生熔化、气化等现象<sup>[8]</sup>,所以实验所需的激励能量需要根据试验件的材料特性确定,此次研究中激励能量设定为 50 mJ。振镜式激光反射扫描仪由两块可旋转激光反射镜片组成,用于进行快速的二维扫描,其扫描分辨率为 0.007 8°,扫描范围为±24°。数据采集单元和控制单元由压电传感器、NI 6115 数据采集卡、程控电压放大器和计算机组成。数据采集卡的采样率为 1 MHz。控制单元利用 RS232 串口通讯技术对激光器进行激励控制。传感器和损伤的具体位置将在实验部分进行介绍。

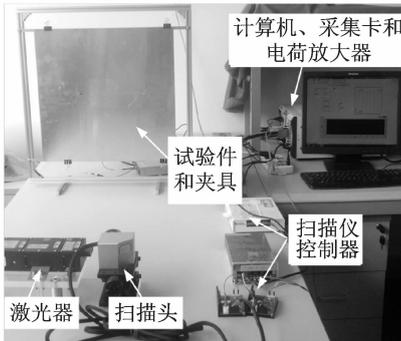
<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(2013AA041105);国家自然科学基金中美合作与交流资助项目(51161120326);国家重点实验室自主课题团队项目(0513G01);江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ13\_0157);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目  
收稿日期:2013-07-11;修回日期:2013-08-06

检测系统工作流程如下:a. 根据试验件的大小和检测的精度要求,计算出激励所需的分辨率以及各激励点在试验件上的位置坐标;b. 激励单元调整好激光的激励光路后,控制单元触发激励单元发射激光脉冲;c. 激光脉冲发出的同时,激励单元产生一个触发信号,触发数据采集单元进行数据采集工作,以确保激励与采集的时间同步;d. 传感器接收到的响应信号经过数据采集单元滤波和放大等处理后被采集卡采集,并保存在控制单元中;e. 控制单元对信号进行数据分析并进行损伤可视化处理,完成对损伤的检测和定位。



(a) 系统实验装置示意图

(a) Schematic diagram of laser ultrasonic



(b) 系统实物图

(b) Experimental setup

图1 激光超声检测系统

Fig. 1 Laser ultrasonic system

## 2 Lamb 波的传播特性和损伤的影响

在一个理想的板状结构中,结构表面的位移方程可以用  $u(x, t)$  表示,其中:  $t$  为时间;  $x$  为波的传播距离。激励点处结构的响应为  $f(t)$ , 则认为在激励点处  $u(x, t) = f(t)$  [10]。若 Lamb 波在结构中的传播特性和激励点处结构的响应都已知,则结构表面任意一点的位移方程可以表示为

$$u(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i[\omega t - k(\omega)x]} d\omega \quad (1)$$

其中:  $\omega$  为角频率;  $F(\omega)$  为  $f(t)$  的傅里叶变换;  $k(\omega)$  为 Lamb 波的波数;波数  $k(\omega)$  为角频率  $\omega$  的函数。

由式(1)可知,Lamb 波传播一段距离后不同频率的波之间会产生相位差,从而导致了波包整体的变宽。

结构表面任意一点的位移方程在频域中可表示为

$$U(\omega) = F(\omega) e^{-ik(\omega)x} = F(\omega) G(x, \omega) \quad (2)$$

波的传播与损伤的关系可大致分为如图 2 所示的 4 种情况。

1) 结构中不存在损伤(如图 2(a)所示),则 Lamb 波在结构中的传递函数为式(2)中的  $G(x, \omega)$  所示。

2) 结构存在损伤,且损伤不在激励点与传感器的直线路径内(如图 2(b)所示)。直接通过传播路径到达信号的传递函数与图 2(a)中相同。当不考虑波在损伤散射过程中的能量衰减,则损伤散射路

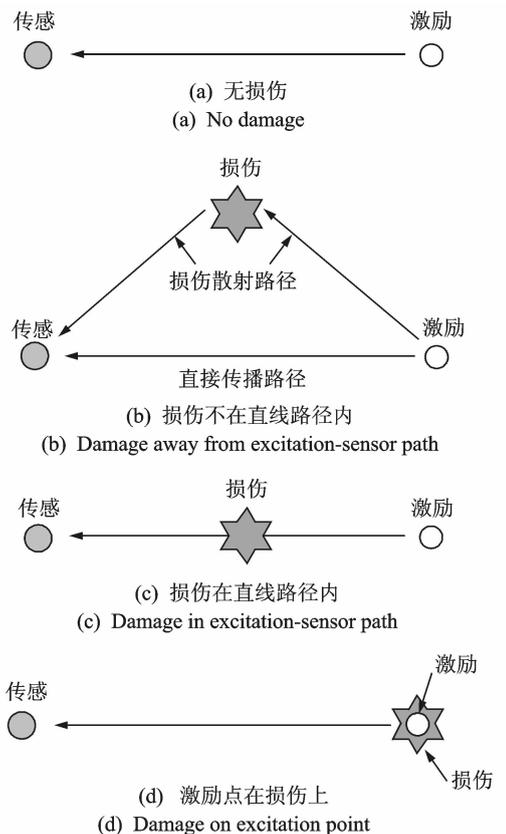


图2 波的传播路径与损伤的关系

Fig. 2 Different relations between the damage location and excitation-sensor path

径的传递函数可表示为

$$G(x_{eds}, \omega) = G(x_{ed}, \omega)G(x_{ds}, \omega) = e^{-i[k(\omega)x_{ed} + k(\omega)x_{ds}]} \quad (3)$$

其中:  $x_{eds}$  为波在损伤散射路径上传播时的距离;  $x_{ed}$  为激励点与损伤之间的距离;  $x_{ds}$  为损伤与传感器之间的距离。

3) 结构中不存在损伤,且损伤在激励点与传感器之间的直线路径内(如图 2(c)所示)。该情况下波的传播状态较为复杂,为了简化分析过程,认为损伤将导致信号幅值衰减,则其传递函数为

$$G(x_{es}, \omega) = A(\omega)e^{-ik(\omega)x_{es}} \quad (4)$$

其中:  $A(\omega)$  为与信号频率相关的衰减因子;  $x_{es}$  为激励点与传感器之间的距离。

4) 结构中不存在损伤,且损伤恰好在激励点处。激光在损伤上激励出的信号较为复杂,但可以确定的是激光在损伤处激励出的信号与在其他区域激励出的信号的幅值与波形都有较大的区别。

### 3 基于激光激励的损伤定位原理

笔者从两个不同的角度分析特定时间范围内传感信号的特征参数,由此判断 Lamb 波传播路径与损伤位置的相对关系,从而对损伤进行定位。

#### 3.1 小波提取能量特征值定位法

当损伤在激励点与传感器的连线上或直接被激光激励时,即图 2 中(c),(d)两种情况,损伤必定会对信号的前几个波包产生影响。如图 2(b)所示,当损伤不在激励点与传感器之间的连线内时,由式(3)可知,直接传播的信号与损伤散射的信号之间会存在一个相位差,该相位差在时域表现为时间差。在普通板状结构中可认为特定频率下 Lamb 波的群速度为定值,则该时间差在空间上表现为距离差,可认为在图 2(b)所示的情况下,特定频率信号的前几个波包不受损伤影响。由以上分析可知,只有当损伤在激励点与传感器的连线内或激光直接激励在损伤上时,损伤才会对特定频率信号前几个波包产生影响。可见,通过提取特定频率的信号并分析其前几个波包的能量变化,即可判断损伤、传感器、激励点三者之间的相对位置关系。

笔者利用连续小波变换提取信号中特定频率的包络作为基准信号。连续小波变换(continuous

wavelet transform, 简称 CWT)在时频域都有较高的分辨率,能高效地提取信号的特征成分。小波变换定义如下

$$\text{CWT}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} v(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (5)$$

其中:  $v(t)$  为传感信号;  $\psi^*(t)$  为母小波函数的复共轭形式;  $a$  为尺度因子;  $b$  为时间因子。

在本研究中使用复 Morlet 小波作为母小波函数,其形式为

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi\gamma}} e^{j\omega_0 t} e^{-t^2/\gamma} \quad (6)$$

其中:  $\gamma$  为窗的宽度;  $\omega_0$  为中心角频率。

复 Morlet 小波能够通过使用窄带高斯窗提取相对较窄的波包,使得波包之间有明显的界限。为了满足 Morlet 小波中  $\gamma\omega_0 \gg 1$  的要求,此次研究中  $\omega_0$  和  $\gamma$  的值设为 6.28 和 1.442 5。由式(7)获得 CWT 的频率  $f$  所对应的尺度因子  $a$  为

$$a = \frac{\omega_0}{2\pi f} \quad (7)$$

由于连续小波变换是一种线性变换,其小波系数与信号幅值之间成线性关系。此次研究认为小波系数的第 1 个波包为最先到达传感器的那部分信号的小波变换的包络。在成像过程中,与激励点位置相对应的像素点的值定义为

$$I(x, y) = \sqrt{\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_s\|} \hat{u}_{\text{cwt}} \quad (8)$$

其中:  $\mathbf{p}_i$  为激励点的位置矢量;  $\mathbf{p}_s$  为传感器的位置矢量;  $\sqrt{\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_s\|}$  用于弥补由于传播距离而导致的信号衰减<sup>[5]</sup>;  $\hat{u}_{\text{cwt}}$  对应于特定频率的小波系数第 1 个波包的峰值。

利用复小波变换获得特定频率的包络,并通过波峰提取算法获得包络线中各波峰的位置和幅值,位置最靠前的波峰幅值即为  $\hat{u}_{\text{cwt}}$ 。

#### 3.2 基于能量聚焦的均方根值(root mean square, 简称 RMS)分布定位法

由于 Lamb 波在结构中传播时会发生频散,传播不同距离时,频散程度不同,信号的形式与能量分布都不同。当先验的获得结构的频散曲线时,可根据文献[10]对采集到的信号进行频散抑制,从而达到能量聚焦的效果。

$$h(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} U(\omega) e^{i[k(\omega)x + \omega t]} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i[k(\omega)x - k(\omega)r + \omega t]} d\omega \quad (9)$$

其中： $U(\omega)$  为采集到的信号的傅里叶变换值； $r$  为激励点与传感器之间的距离。

对于图 2(a) 所示情况，当式(9)中的  $x$  等于激励点与传感器之间的距离  $r$  时，各频率信号之间的相位差将被消除，信号的频散将被抑制，信号能量将聚焦到  $u_0$  (激励信号持续时间) 时间内。对于图 2(b) 所示情况，直接传播信号的频散效应将被完全抑制，而损伤散射信号的传播距离大于激励点与传感器之间的距离  $r$ ，频散效应无法抑制，能量也无法聚焦。该情况下传感器采集到的信号经聚焦后，在  $t_0$  时间内的能量与图 2(a) 的结果差别较小。图 2(c) 和图 2(d) 所示情况较为复杂，但可以确定的是经过该变换方法，在  $t_0$  时间内聚焦得到的能量较图 2(a) 和图 2(b) 两种情况有较大的差别。由以上分析可知，只有当损伤在激励点与传感器的连线内或激光直接激励在损伤上时，损伤才会对聚焦到  $t_0$  时间内的信号能量较大产生影响；因此根据各信号经频散抑制变换后在  $t_0$  时间内的能量差异，即可判断损伤、传感器、激励点三者之间的相对位置关系。

在成像过程中，与激励点位置相对应的像素点的值定义为

$$I(x, y) = \text{RMS} \left\{ \sqrt{\| \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_s \|} W(t) F^{-1} \times [U(\omega) e^{j\omega \| \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_s \| / c(\omega)}] \right\} \quad (10)$$

其中： $\text{RMS}$  为求解均方根； $W(t)$  为宽度为  $t_0$  的矩形窗函数； $c(\omega)$  为该结构中频率相关的 Lamb 波相速度，在本研究中该值为根据 Lamb 波理论求得的理论值。

## 4 实验研究

### 4.1 典型响应信号

小波提取能量特征值定位法需要利用小波分析提取合适频率的信号。图 3(a) 和图 3(b) 为对距离传感器 100 mm 的点进行激光激励后的响应信号及其频谱。从该信号的频谱图可知，响应信号的能量主要集中在 0~50 kHz 的频带范围内，该频带范围以外的信号能量较小。由于信号的波长与频率成反比，若提取波包较宽的低频信号，定位效果较差<sup>[11]</sup>。从信号能量和定位效果两方面考虑，将从信号中提取频率成分为 50 kHz 的信号包络。从图 3(c) 可知，经小波变换提取的信号包络相邻波峰间的界限较为清晰，第 1 个波包的峰值易被提取。

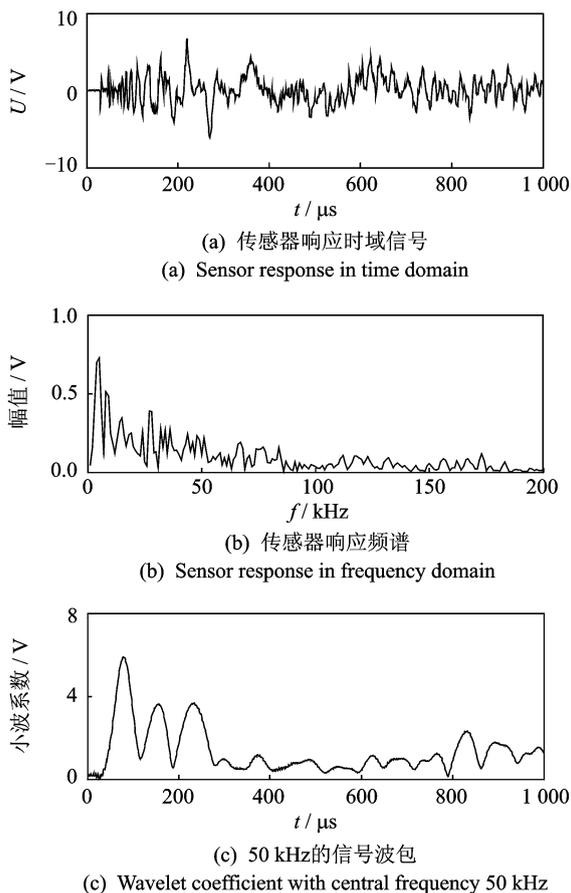
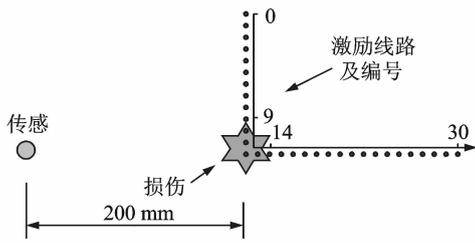


图 3 激光激励下的传感器响应信号  
Fig. 3 Sensor response to laser ultrasonic excitation

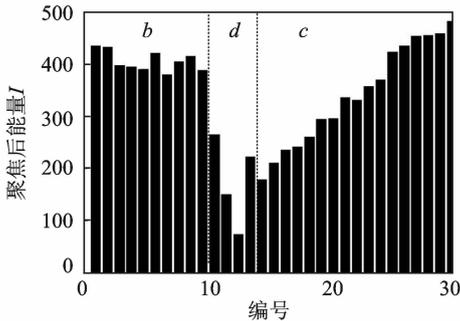
### 4.2 能量聚焦有效性的验证

对于基于能量聚焦的 RMS 分布定位法需要验证理论相速度曲线在实际结构上应用时的有效性。使用式(10)进行频散抑制时，需要使用结构的实际相速度曲线；但结构的实际相速度曲线较难获得，所以本研究使用理论相速度曲线。虽然理论相速度曲线与结构实际相速度曲线之间的差别将导致利用式进行频散抑制时，Lamb 波频散不能被完全抑制，但信号能量仍会得到很大程度的聚焦。笔者通过实验验证了该方法的有效性。为了验证图 2 中(b),(c),(d) 3 种情况，采用如图 4(a) 所示的激光扫略方式。传感器与损伤之间的距离为 200 mm，激励步长为 7 mm，共激励 30 次。计算信号相应 RMS 值时，矩形窗函数的宽度设为 100  $\mu\text{s}$ ，损伤如图 5(b) 所示。

从图 4(b) 中可以看出：编号 0~9 (损伤不在传感器与激励点的连线内) 所对应的 RMS 值较大且波动小；编号 10~13 (激励点在损伤上) 所对应的 RMS 值较小且波动较大。从编号 14~30 (损伤在



(a) Schematic diagram of target structure



(b) 实验结果  
(b) Experimental result

图 4 能量聚焦算法有效性验证

Fig. 4 Experimental validation of energy characteristic value extraction

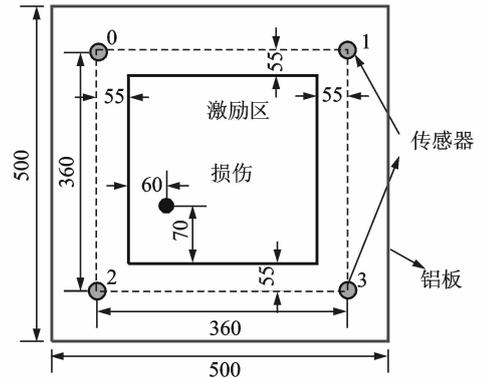
传感器与激励点的连线内)的 RMS 值可知:当激励点离损伤较近时,信号受损伤影响较大,其 RMS 值较小;随着激励点与损伤之间的距离增大,信号受损伤的影响逐渐减小,其 RMS 值逐渐增大。以上实验结果符合本研究分析结论。

需要注意的是,在图 4(a)中 30 号激励点和传感器之间的距离大于 0 号激励点和传感器之间的距离,且损伤在 30 号激励点与传感器的连线之间,但图 4(b)中编号 30 的 RMS 值却比编号 0 的稍大。形成这种反差的原因是 30 号激励点距损伤较远,损伤对信号影响较小,且式(10)中使用距离的平方根( $\sqrt{\|p_i - p_s\|}$ )做为补偿系数对信号进行衰减补偿时存在一定的误差,这些误差导致距离传感器较远的 30 号激励点对应的信号经补偿后幅值偏大。

### 4.3 实验过程及结果分析

实验对象铝板的有效尺寸为 500 mm × 500 mm × 1 mm。铝板中央布置 4 个压电传感器,组成方形传感网络,同时采用 4 个传感器是为了对利用补偿系数进行衰减补偿时产生的误差进行一定的弥补。传感器布置和检测区域在铝板内的具体位置如图 5 所示。在检测区域的反面黏贴圆形小铝

片来模拟实际损伤,图 5(b)所示。根据两种成像方法的原理,要求 4 个传感器性能具有一致性,本次实验前已对 4 个传感器进行了标定。实验时激光器与试验件的距离为 800 mm。实验过程中对图 5(a)所示激励区内部和边界上的等间隔点进行激励,水平方向和竖直方向的激励步长均设为 5 mm,共激励 2 601 次,用时为 140 s。



(a) 铝板中传感器和损伤的位置 (单位: mm)  
(a) Arrangement of sensors and damage (unit:mm)

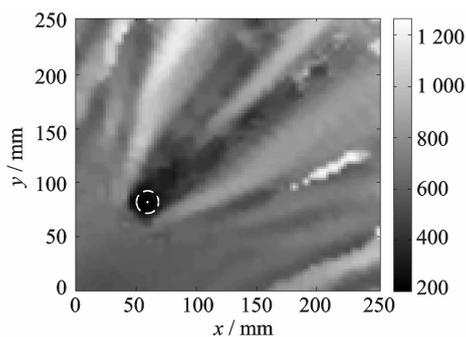


(b) 模拟损伤  
(b) Artificial damage

图 5 待检测区域示意图与模拟损伤

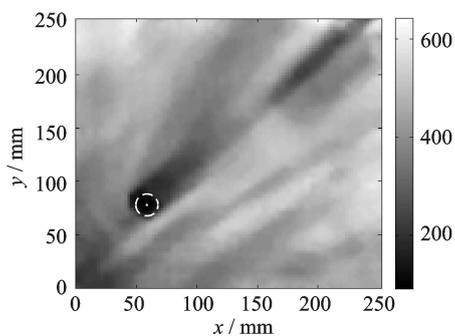
Fig. 5 Schematic diagram of target structure and artificial damage

两种成像方法使用的实验数据相同。图 6 为损伤成像结果,图中白色圈为损伤实际大小和位置。图 6(a)和图 6(b)只利用了 2 号传感器采集到的信号进行成像,分别使用了小波提取能量特征值定位法和能量聚焦的 RMS 分布定位成像法。成像结果从损伤的位置沿着传感器与损伤的连线往外扩散,从二维空间验证了分析结论。对比图 6(a),(b)两图可知,对于单个传感器的情况,能量聚焦的 RMS 分布定位成像法凸显损伤的能力较强,损伤区域与损伤以外的区域对比度较高。图 6(c)和图 6(d)使用了 4 个传感器采集到的信号进行成像,分别使用



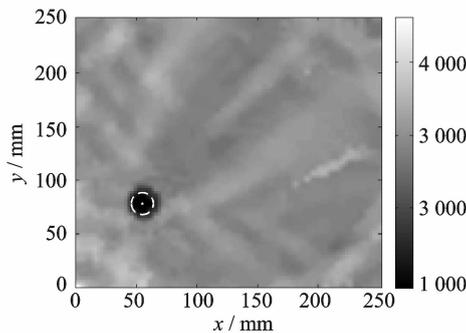
(a) 单个传感器小波特征值法成像结果

(a) Imaging result using CWT with single sensor



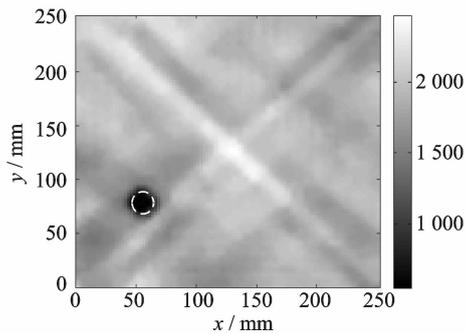
(b) 单个传感器能量聚焦RMS法成像结果

(b) Imaging result using RMS with single sensor



(c) 小波特征值法成像结果

(c) Imaging result using CWT with four sensors



(d) 能量聚焦RMS法成像结果

(d) Imaging result using RMS with four sensors

图6 损伤成像结果

Fig. 6 Summary of damage imaging results

的定位效果,损伤区域与其他区域的差别非常明显,能够看到清晰的损伤区轮廓。使用4个传感器的信号获得的成像结果为这4组信号被单独使用时成像结果的叠加和。对比图6(a),(c)或图6(b),(d)可知,使用单个传感器的信号获得的成像结果中存在从损伤处往外扩散的阴影。4个成像结果叠加后,这些阴影将被消除,成像结果中损伤区域与其他区域的对比度被增强。当合理地布置多个传感器时,这种对比度将得到进一步加强。

利用小波提取能量特征值定位法对损伤进行定位成像时,从信号中提取能量特征值能够很好地表征Lamb波的传播状态与损伤之间的关系,成像结果较为清晰;但在检测过程中需要根据实际情况提取频率合适、相邻波峰间界限清晰的信号包络,数据的分析处理过程较为复杂。相比之下,能量聚焦RMS的成像方法则不需要根据损伤情况提取特定频率的信号包络,将采集到的信号直接进行处理即可,数据处理过程较为简单;但需要先验地知道结构中Lamb波传播时的相速度曲线。计算所用数据与真实值之间的差别将直接影响定位结果,当计算所用数据与真实值之间的差别较大时,该方法的能量聚焦能力将变较差,定位结果易受影响。

## 5 结束语

采用激励的Lamb波检测技术分析了信号在传播过程中的衰减程度与损伤位置之间的关系,从两个不同的角度提取信号特征并进行损伤成像,得到了较好的检测结果。相比于传统超声导波检测法,该方法检测速度较快,所需处理的数据较少,信号处理较为简单,能粗略地勾勒出损伤的轮廓。对于该方法在复合材料结构上的功能验证将作为进一步的研究内容。

## 参 考 文 献

- [1] Michaels J E. Detection, localization and characterization of damage in plates with an in situ array of spatially distributed ultrasonic sensors[J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(3): 1-15.
- [2] Xu Buli, Giurgiutiu V. Single mode tuning effects on Lamb wave time reversal with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring[J]. Jour-

了小波提取能量特征值定位法和能量聚焦的RMS分布定位成像法。从结果可知,两种方法都有较好

- nal of Nondestructive Evaluation, 2007, 26(2-4): 123-134.
- [3] 蔡建,石立华,袁慎芳. 基于虚拟时间反转的高分辨率复合材料板结构损伤成像[J]. 复合材料学报, 2012, 29(1):183-189.  
Cai Jian, Shi Lihua, Yuan Shenfang. High-resolution damage imaging for composite plate structures based on virtual time reversal[J]. Acta Materialia Composite Sinica, 2012, 29(1): 183-189. (in Chinese)
- [4] 蔡建,石立华,袁慎芳. 一种改进的近邻多损伤“移相叠加”成像方法[J]. 振动与冲击, 2011, 30(8):67-71.  
Cai Jian, Shi Lihua, Yuan Shenfang. Improved “delay-and-sum” imaging method for adjacent multi-damages [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(8): 67-71. (in Chinese)
- [5] Morii M, Hu Ning, Fukunaga H, et al. A new inverse algorithm for tomographic reconstruction of damage images using lamb waves[J]. Computers Materials and Continua, 2011, 26(1): 37-66.
- [6] Zhao Xiang, Royer R L, Owens S E, et al. Ultrasonic Lamb wave tomography in structural health monitoring[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(10): 1-10.
- [7] Lee J R, Shin H J, Chia C C, et al. Long distance laser ultrasonic propagation imaging system for damage visualization[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(12): 1361-1371.
- [8] An Y K, Park B, Sohn H. Complete noncontact laser ultrasonic imaging for automated crack visualization in a plate[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(2): 1-10.
- [9] Lee S J, Gandhi N, Hall J S, et al. Baseline-free guided wave imaging via adaptive source removal[J]. Structural Health Monitoring, 2012, 11(4): 472-481.
- [10] Wilcox P D. A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals [J]. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on, 2003, 50(4): 419-427.
- [11] 邱雷,袁慎芳,苏永振,等. 基于 Shannon 复数小波和时间反转聚焦的复合材料结构多源冲击成像定位方法[J]. 航空学报, 2010, 31(12):2417-2424.  
Qiu Lei, Yuan Shenfang, Su Yongzhen, et al. Multiple impact source imaging and localization on composite structure based on shannon complex wavelet and time reversal focusing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(12): 2417-2424. (in Chinese)



**第一作者简介:**裘进浩,男,1963年10月生,博士生导师,“千人计划”国家特聘教授、教育部“长江学者”奖励计划特聘教授。主要研究方向为智能材料与结构,包括高性能压电材料与器件、结构的振动与噪声控制、流动控制、健康监测、能量回收、自适应结构、压电器件的精密传感与驱动技术等。曾发表《Response of metal core piezoelectric fibers to unsteady airflows》(《Modern Physics Letters B》2010, Vol. 24, No. 13)等论文。  
E-mail: qiu@nuaa.edu.cn