

一种损伤反射波波场可视化的改进方法

吴郁程 裘进浩 张 超 朱孔军 季宏丽

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要 基于频率波数域过滤的波场分离方法常被用来从波场数据中提取反射波的波场,但由于检测误差的存在,该方法获得的反射波波场中噪声较多。利用高分辨率的激光超声检测,实现了铝板中超声导波波场的可视化,并将波场中相邻信号时间匹配后做差以弱化入射波,而后使用频率波数域过滤的方法对入射波进行深度过滤,对反射波波场进行有效提取。实验结果表明,利用该手段进行二次过滤提取的反射波波场轮廓清晰,所含噪声少。

关键词 激光技术; 超声; 波场可视化; 频率波数域; 无损检测

中图分类号 TB551; TB553 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0308001

A Method to Improve the Visibility of the Damage-Reflected Wave

Wu Yucheng Qiu Jinhao Zhang Chao Zhu Kongjun Ji Hongli

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract The method based on frequency-wavenumber domain filtering has great potential in suppressing the incident wave. However, the inspection error can't be avoided, the noise in reflection wave field got by this method is so much. High-resolution laser ultrasonic testing is used to realize the wavefield visualization in the aluminum plate. Adjacent waves subtraction after arrival time matching and the frequency-wavenumber domain filtering are both used in this paper to weaken the incident wave. The results show that the proposed filtering method has a good performance in improving the visibility of the damage-reflected wave, and the included noise is less.

Key words laser technique; ultrasonic; wavefield visualization; frequency-wavenumber domain; nondestructive examination

OCIS codes 140.3460; 310.2785; 350.6980; 350.7420

1 引 言

超声导波已被广泛应用于针对不同结构的损伤检测技术中^[1-2]。现有的一些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^[3],但因某些环境中基准信号容易失效^[2],导致这类方法的工程应用性较差。由于在检测过程中无需基准信号,只需进行简单的逐点数据采集即可获得检测所需信息,波场可视化技术已经成为对结构进行无损检测的有效方法^[4-6]。Lee 等^[7]使用波场可视化技术在复杂表面的结构(钻头、曲管、和碳纤维

壁板)上检测出了存在的损伤。Chia 等^[8]研发了一种高温传感器,并对最高温度为 145 °C 的结构表面进行了波场可视化检测,取得了较好的效果。An 等^[9]使用多普勒测振仪采集结构表面的信号,搭建了一套完全非接触式的波场可视化检测系统。

由于反射波与入射波的传播方向相反,且幅值较小,在许多情况下反射波常被入射波或噪声覆盖,肉眼无法直接从波场中提取有效信息以量化损伤的位置及大小。基于频率波数域变换的波场过滤方法在分离波场中的损伤反射波时有很好的效果,是现在国

收稿日期: 2013-08-08; 收到修改稿日期: 2013-09-25

基金项目: 国家 863 计划(2013AA041105)、国家重点实验室自主课题团队项目、2011 年度高等学校博士学科点专项科研基金(20113218110026)、江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 吴郁程(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光超声检测等方面的研究。E-mail: wyc2316@126.com

导师简介: 裘进浩(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事智能材料与结构等方面的研究。E-mail: qiu@nuaa.edu.cn

内外研究的热点。Ruzzene^[10]对该方法进行了理论验证和实验分析。Michaels 等^[11]对这种方法进行了更深入的研究,不仅从波场中分离出了反射波还将导波的模态进行了分离。但由于检测获得的波场数据与实际波场存在一定的误差,这些误差将导致使用该方法过滤出的反射波波场中含有噪声,影响反射波波场的成像效果。本文利用激光超声检测系统采集试验件的波场信息,将波场中相邻两时域信号时间匹配后做差以弱化入射波^[12],而后使用频率波数域过滤的方法对入射波进行深度过滤,以此改善反射波波场的成像效果,提高损伤成像检测的准确性。

2 激光超声成像方法

2.1 激光超声系统

图 1 为激光超声检测系统的实验装置示意图和

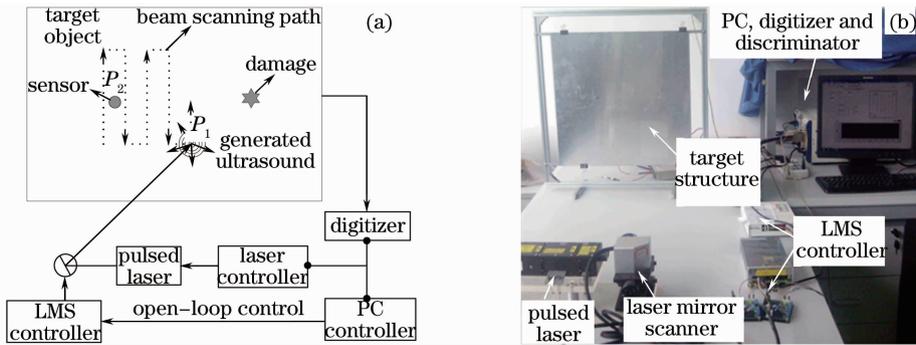


图 1 激光超声检测系统。(a) 系统示意图; (b) 系统实物图

Fig. 1 Laser ultrasonic examination system. (a) Schematic diagram of system; (b) experimental setup of system

激光超声检测系统利用激光脉冲对试件表面进行非接触式激励,使激励点处产生热弹效应,激发出超声导波。同时利用振镜式激光反射扫描仪对激光的光路进行偏转,使激励点在扫描区域内沿着激励路径精确移动。系统使用 AE 传感器接收激光激励出的超声导波,信号经解调仪解调后被采集然后存储在计算机内。由于激光脉冲的能量十分稳定,检测过程中无需多次测量以提高信噪比。

2.2 超声导波的波场成像

该激光超声检测系统基于声学互易假设获得超声导波的波场^[5],即激光脉冲在 P_1 点[图 1(a)]激励时 P_2 点的传感器接收到的结构响应信号,与激光脉冲在 P_2 点激励传感器在 P_1 点接收到的结构响应信号是完全相同的。基于这一假设可知激光沿着激励路径激励时,固定在 P_2 点的传感器接收到的一系列响应信号,等同于激光对 P_2 点激励,相同路径上各点采集到的一系列响应信号。检测区域内各激励位置所对应的响应信号在同一时刻的幅值分

实物图。该检测系统由激励单元、数据采集单元和控制单元三部分构成。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,激励单元激励的重复频率为 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。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的激光反射镜片组成,用于进行快速的二维扫描,其扫描分辨率为 0.000136 rad,扫描范围为 ± 0.42 rad。数据采集单元和控制单元由 AE 传感器(富士陶瓷公司 M31)、解调仪(NF AE9922)、数据采集卡(NI 6115)和计算机组(PC)组成。解调仪的增益为 10 dB,滤波带宽为 20~500 kHz。数据采集卡的采样率为 10^7 s⁻¹。控制单元利用 RS232 串口通讯技术对激光器进行激励控制。

布表征了这一时刻波场状态。

此次研究试验件为一块 400 mm × 400 mm × 2 mm 的铝板。激光激励区域、传感器、损伤及局部坐标系的具体位置如图 2(a)所示,损伤为用铣床铣出的直径 12 mm,深度为 1 mm 的盲孔,如图 2(b)所示。传感器与损伤都在激励区的背面。激光器与试件的距离为 1 m。实验过程中对图 2(a)所示激励区内部和边界上的等间隔点进行激励,X 轴方向和 Y 轴方向的激励步长 Δ 均为 2 mm,为了保证 2 mm 的等间距扫描,扫描头偏振镜旋转所需的精度约为 0.0009 rad,实验使用的扫描头满足这一要求。实验过程中对试件共激励 5151 次,用时 260 s。

对激励点进行激励的同时采集响应信号 $u(x, y, t)$,其中 x 和 y 为激励点的坐标。采集到的响应信号将被放置在三维数据中与激励点坐标相对应的位置。通过这种数据处理方式,激励区内采集到的一维数据被整合成空间时域的三维波场数据。将三维波场数据中任意时刻的数据截面用强度图表示,即

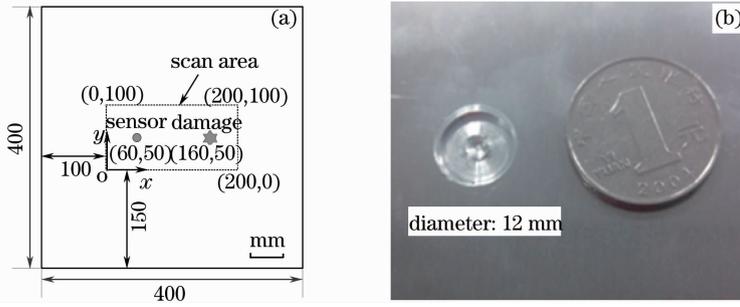


图2 (a) 铝板中传感器和损伤的位置;(b) 模拟损伤

Fig. 2 (a) Positions of the sensor and damage; (b) simulated damage

可获得该时刻激励区内导波的传播状态(波场图)。沿着时间轴抽取相应数据截面进行以上操作,可获得随时间变化的波场图,即以动画形式表现出超声波场在各个时间的状态。图3分别为 $t=11、40、55 \mu\text{s}$ 时的波场图,图中右侧黑点为损伤中心所在位置。此次实验铝板厚度和解调仪滤波带宽的限定,使采集到的信号中只存在 A_0 和 S_0 两个模态。根据不同模态的导波的传播速度不同,从图3(a)中可以清晰地分辨出 A_0 和 S_0 两个模态,观察可知 S_0 模态的幅值较 A_0

模态小。图3(b)为波传播到损伤处时的状态,导波在损伤处发生了反射现象,但很不清晰,基本被入射波所掩盖。图3(c)为导波经损伤反射一段时间之后的状态,虽然入射波依然比反射波强,但已经可以观察到非常清晰的以损伤为中心往外发散的反射波轮廓。通过比较图3(a)~(c)可知,入射波的 A_0 模态所对应的波峰与波谷(图中的相邻明暗条纹)之间的间距随着时间的推移逐步增大,从空间波场的角度验证了导波的频散特性。

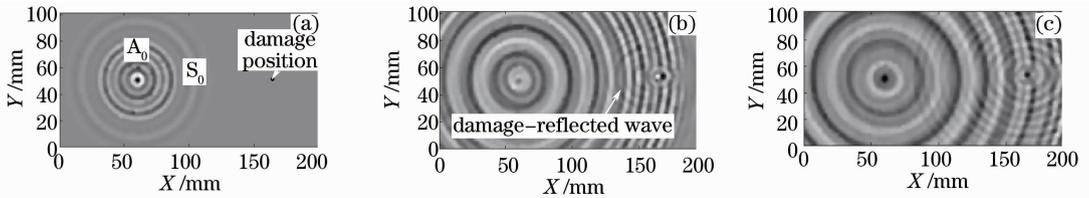

 图3 不同时刻的波场图。(a) $11 \mu\text{s}$; (b) $40 \mu\text{s}$; (c) $55 \mu\text{s}$

 Fig. 3 Wavefield images of various propagation time. (a) $11 \mu\text{s}$; (b) $40 \mu\text{s}$; (c) $55 \mu\text{s}$

3 频率波数域分析

通过观察不同时刻的波场图,可以分辨出导波在损伤处发生的反射、衍射等现象。但反射波与入射波的传播方向相反,且幅值较小,在许多情况下反射波常被入射波或噪声覆盖,肉眼无法直接从中提取有效信息以量化损伤的位置及大小。通过频率波数 $\omega\mathbf{k}$ 域分析,去除入射波,提高损伤反射波的可视程度,并通过分析反射波的特征参数确定损伤的位置。

3.1 三维频率波数域分析

$\omega\mathbf{k}$ 域分析基于多维傅里叶变换,通过同时分析波场在空间域和时间域内的信息,解耦得到不同频率、不同传播方向导波的特征信息。对多维傅里叶变换的结果进行加窗过滤后,即可分离出不同传播方向(沿 X 轴正向 u_+ 和沿 X 轴负向 u_-) 的导波。图2(a)所示检测区域内任意一点的位移方程可表示为^[10-11]

$$u(x, y, t) = u_+(x, y, t) + u_-(x, y, t) = A\{\exp[i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] + \mathcal{R}\exp[i(\omega t + \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - 2\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_s)]\}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{k} 为波矢,在笛卡尔坐标系中表示为 $\mathbf{k} = k_x \mathbf{e}_x + k_y \mathbf{e}_y$; \mathbf{r} 为以传感器的位置为原点的位置矢量; \mathbf{r}_s 为以传感器坐标为原点损伤位置为终点的位置矢量; \mathcal{R} 为损伤反射因子。利用三维傅里叶变换(3D FT)将 $u(x, y, t)$ 变换到三维频率波数域中^[13]

$$U(k_x, k_y, \omega) = F_{3D}[u(x, y, t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, y, t) \exp[-i(\omega t + k_x x + k_y y)] dx dy dt. \quad (2)$$

$U(k_x, k_y, \omega)$ 为 $\omega\mathbf{k}$ 域内波场的全部信息。由 (1)、(2) 式可知检测区内所有点的位移信息经 3D FT 变换到 $U(k_x, k_y, \omega)$ 中 $\omega > 0$ 的区域中。该区域内 $k_x < 0$ 的部分对应沿着 X 轴正向传播的波场, 而 $k_x > 0$ 的部分对应沿着 X 轴负向传播的波场^[8]。

通过对 $U(k_x, k_y, \omega)$ 的加窗过滤, 去除沿着 X 轴正向(负向)传播对应的成分, 保留波场中沿着 X 轴负向(正向)传播对应的成分, 经三维逆傅里叶变换(3D IFT), 将 $\omega\mathbf{k}$ 域中保存下的信息转换回空间时域内, 即可获得沿着 X 轴负向(正向)传播的波场。

通过 $\omega\mathbf{k}$ 域分析分离不同传播方向的波场在实际应用中非常有效, 但由于对波场进行空间采样时, 相邻采样点之间距离较大(文中为 2 mm), 获得的波场与实际波场存在一定的误差。这种检测误差的存在将使部分波场信息被错误的解读, 导致通过以上方法分离出的波场中存在较多的噪声。

3.2 反射波分离

实际检测过程中, 由于无法先验的获得波场的

有效持续时间, 为了保证采集效果, 采集时间会大于波场的有效持续时间, 有效持续时间之外的信息对于波场分离是冗余的。同时从图 3(b) 中可知, 往 X 轴负方向传播波中, 除了损伤散射的波, 还有从波源发出的波(波源左侧)。进行 3D FT 后, 这部分波将与损伤反射波耦合在一起, 对于反射波波场分离操作, 这些信息也是冗余的。这些冗余数据将占用大量系统资源, 降低系统运行效率。基于上述原因对三维波场数据进行以上变换前, 需要分别对三个维度进行加窗过滤, 限定波场的持续时间并去除波源左侧的波场信息:

$$u_w(x, y, t) = u(x, y, t)w(x, y, t), \quad (3)$$

式中 $w(x, y, t)$ 为空间时间窗, 限定了三维波场的空间范围和时间范围, 定义如下:

$$w(x, y, t) = w_x(x)w_y(y)w_t(t), \quad (4)$$

式中 $w_\xi(\xi)$ 为施加在坐标轴 ξ 上的一维窗函数。此次研究中使用(5)式所示窗函数^[11]对三个维度进行加窗过滤:

$$w_\xi(\xi) = \begin{cases} 0, & |\xi - \xi_0| > w \\ 1, & 0 < |\xi - \xi_0| < \alpha w \\ 0.5 + 0.5 \cos\left[\pi \frac{\xi - \xi_0 - \alpha w}{2(1 - \alpha)w}\right], & \alpha w < |\xi - \xi_0| < w \end{cases} \quad (5)$$

式中 ξ_0 和 $2w$ 分别表示为窗的中心和窗的宽度, α 是一个用于控制窗形状的参数。文中对于三个维度 α 的值均设为 0.25。为了去除冗余数据, 对损伤附近的波场进行快速有效的分析, 此次实验 x 轴上窗的中心和宽度分别设为 150 mm 和 100 mm; y 轴上窗的中心和宽度分别设为 50 mm 和 100 mm; 通过观察随时间变化的波场图, 70 μs 内的波场中未出现边界反射波, 波场较为清晰, 因此 t 轴上窗的中心和

宽度分别设为 35 μs 和 70 μs 。

将上述加窗后的 3D 波场数据进行 3D FT 变换, 映射到 $\omega\mathbf{k}$ 域内可得 $U_w(k_x, k_y, \omega)$ 。在 $\omega\mathbf{k}$ 域内通过对数据的加窗过滤, 即可滤除入射波^[9]

$$U_R(k_x, k_y, \omega) = U_w(k_x, k_y, \omega)W_R(k_x, k_y, \omega), \quad (6)$$

式中

$$W_R(k_x, k_y, \omega) = \begin{cases} 0, & \omega > 0 \& k_x < 0, \omega < 0 \& k_x > 0 \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

对经过加窗过滤之后的数据 $U_R(k_x, k_y, \omega)$ 进行 3D IFT 变化以获得空间时域中反射波的波场:

$$u_R(x, y, t) = F_{3D}^{-1}[U_R(k_x, k_y, \omega)]. \quad (8)$$

图 4(a) 所示波场图中同时存在入射波和反射波, 且反射波非常不明显, 几乎被入射波所掩盖。图 4(b) 为过滤前 285 kHz 对应 k_x-k_y 平面图, 从图中可知该频率下入射波的幅值比反射波的幅值大得多, 加窗过滤去除入射波的相应成分后如图 4(d) 所示。

图 4(c) 为去除入射波后获得的 $t = 40 \mu\text{s}$ 时反射波波场图, 与图 4(a) 相比可以看到清晰的反射波弧形轮廓。但由于检测误差的存在, 通过以上处理之后在反射波之外的区域有噪声。对于图 4(a) 损伤右侧[即 $x \in (160, 200)$]的区域, 损伤反射波传播方向较为复杂, 但其主方向与入射波的方向相同, 经过滤后被去除。图 4(c) 中该区域沿着 X 轴正向传播的反射波已被去除, 仅存在一些噪声。

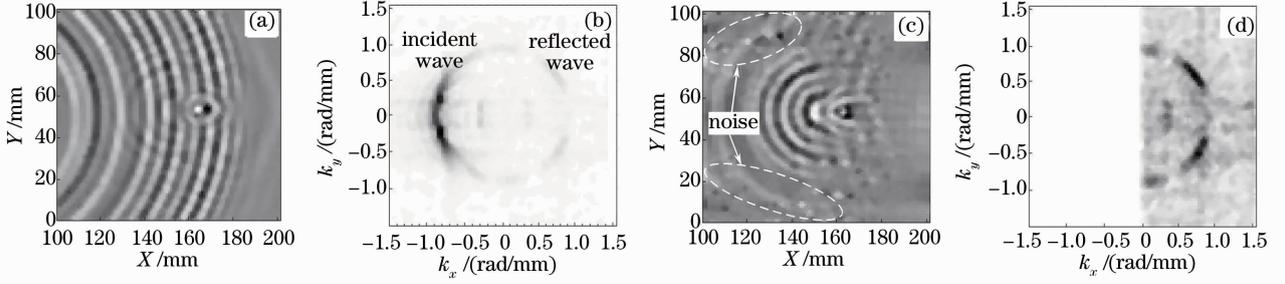


图4 滤除入射波后的结果。(a) 过滤前 $t=40 \mu\text{s}$ 的波场；(b) 过滤前 285 kHz 对应的波数；
(c) 过滤后 $t=40 \mu\text{s}$ 的波场；(d) 过滤后 285 kHz 对应的波数图

Fig. 4 Result of filtering incident wave. (a) Wavefield of $t=40 \mu\text{s}$ before filtering; (b) corresponding wavenumber plots at 285 kHz; (c) wavefield of $t=40 \mu\text{s}$ after filtering; (d) corresponding wavenumber plots at 285 kHz

3.3 损伤定位成像

通过求解损伤反射波的波场的均方根 (RMS) 分布, 可对损伤进行可视化和定位^[10]。此次实验反射波波场的 RMS 分布定义为

$$u_{\text{R}}^{\text{RMS}}(x, y) = \left\{ \int_0^{T_s} [u_{\text{R}}(x, y, t)]^2 dt \right\}^{1/2}, \quad (9)$$

式中 T_s 为波场的持续时间。损伤反射波的 RMS 分布如图 5 所示。

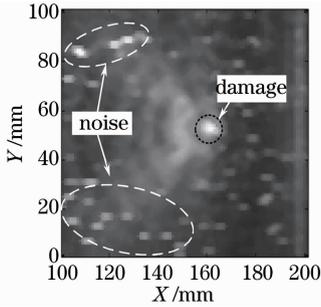


图5 反射波场 RMS 分布

Fig. 5 RMS distribution of the reflected wavefield

由图 5 可以看出虽然损伤区域的 RMS 值较高, 但损伤左侧反射波对应 RMS 值的轮廓非常模糊且存在大量噪声。为了量化成像结果, 认为损伤所在区域波场的 RMS 值为有用信息, 其余区域波场的 RMS 值为噪声^[12]。使用下式所示信噪比公式可知其所对应的 SNR 为 3.3149 dB:

$$u_{\text{R}}^{\text{SNR}} = 10 \lg \frac{\text{mean}[u_{\text{R-damage}}^{\text{RMS}}(x, y)]}{\text{mean}[u_{\text{R-health}}^{\text{RMS}}(x, y)]}, \quad (10)$$

式中 mean 为求均值。 $u_{\text{R-damage}}^{\text{RMS}}(x, y)$ 为损伤所在区域中各点对应的 RMS 值, $u_{\text{R-health}}^{\text{RMS}}(x, y)$ 为损伤之外区域中各点对应的 RMS 值。

4 成像效果优化算法

据上文所述在进行空间变换时有部分波场信息被错误解读, 导致反射波之外的区域噪声较多, 反射波场 RMS 分布信噪比较低。为了提高反射波波场的成像效果及损伤成像的 SNR, 利用相邻激励点激励出的信号的高相似度, 对入射波波场进行弱化, 以减少波场中入射波的成分, 提高过滤反射波波场时的效果。

4.1 入射波弱化算法

提取现有信号与健康信号 (基准信号) 之间的差异, 获得损伤反射信号的方法已经广泛应用于损伤检测领域^[14]。在健康信号不失效的情况下, 该方法提取的反射信号信噪比较高。由于激光激励过程中相邻激励点之间的空间距离很小 (2 mm), 且激光激励出的信号具有较高的稳定性, 所以相邻激励点所对应的响应信号之间具有很高的相似度, 即波场中左右相邻两点所对应的信号相似度很高。图 6(a) 中为波场中相邻两点 $P_3(150, 68)$ 和 $P_4(150, 70)$ 所对应的信号。从图中可以看出两个信号的相似度极高, 局部放大区内的信号幅值基本相同, 仅由于传播距离不同存在时间上的微小偏差。若将两信号直接做差以弱化入射信号, 效果较差。为了消除两信号由于传播距离不同而产生的时间偏差, 以提高入射波弱化的效果, 对两个信号进行了时间匹配。

对相邻两信号进行时间匹配时, 以其中一个信号为参考信号, 将另一个信号进行时移, 所需时移量的大小由两信号互相关结果决定。相邻两信号 $u(x, y, t)$ 和 $u(x - \Delta_x, y, t)$ 的互相关关系为

$$R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x, y, \tau) \cdot u(x - \Delta_x, y, t + \tau) d\tau, \quad (11)$$

$R(t)$ 取得最大值时, $u(x, y, t)$ 和 $u(x - \Delta_x, y, t)$ 时间匹配得最好, 信号的相对时移为 t_{\max} 。图 6(b) 为图 6(a) 中的信号经时间匹配之后的结果。从局部放大区内可以看出相邻两信号进行时间匹配后, 幅值较大的入射波之间的时间错位已被消除。由 P_3 、 P_4 、传感器及损伤在波场中的相对位置关系可知, 入射波先到达 P_3 点后到达 P_4 点, 但反射波先到达 P_4 点后到达 P_3 点, 这种关系导致入射波之间的时间错位被消除时, 反射波之间的时间错位更严重。对时间匹配之后的信号做差, 入射波将被弱化而损伤反射波几乎不受影响, 图 6(c) 为图 6(b) 中两信号做差的结果为

$$\Delta u(x, y, t) = u(x, y, t) - u(x - \Delta_x, y, t + t_{\max}). \quad (12)$$

在传感器与损伤之间的区域内, 即 $x \in (60, 160)$ 时, 波场中左右相邻的两点所对应的信号都满足上述关系。但在损伤右侧的区域内, 即 $x \in (160, 200)$ 时, 由相邻两点、传感器和损伤之间的相对位置可知, 波场中的入射波和损伤处发出的波都会先到达靠左的那个点, 两信号进行时间匹配后, 入射波部分的时间将被匹配, 但反射波之间的时间错位也被弥补, 进行做差处理后, 入射波和反射波都将被弱化。

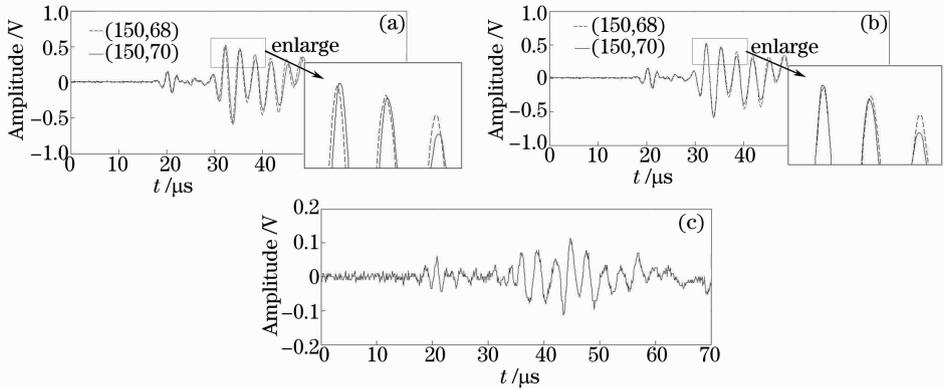


图 6 入射波弱化。(a) 相邻激励点的响应信号; (b) 相邻信号时间匹配后; (c) 入射波弱化后的信号

Fig. 6 Weaken the incident waves. (a) Response signals of adjacent points; (b) adjacent signals after time matching; (c) signals after weakening the incident wave

图 7 分别为入射波弱化后 $t=11, 40, 55 \mu\text{s}$ 时的波场图。据上文所述, 图 3(a) 中 S_0 模态的幅值较 A_0 模态的小, 对波场中相邻两信号进行互相关操作后, 互相关结果的峰值所对应的时刻是幅值较大的 A_0 模态间的时间错位。将信号进行时移后, 信号中 A_0 模态之间的时间错位被消除, 而 S_0 模态间还存在时间错位, 所以做差之后 A_0 模态将被弱化, 而 S_0 模

态受影响较小。对比图 7(a) 与图 3(a) 可知, A_0 模态被弱化, S_0 模态受影响较小, 符合上述分析。图 7(b)、(c) 与图 3(b)、(c) 对比可知, 在 $x \in (60, 160)$ 区域内, 入射波虽然没有被完全去除但已被弱化, 因此反射波变得更为清晰, 而在 $x \in (160, 200)$ 区域内, 入射波和反射波均被弱化, 符合上文的分析结论。

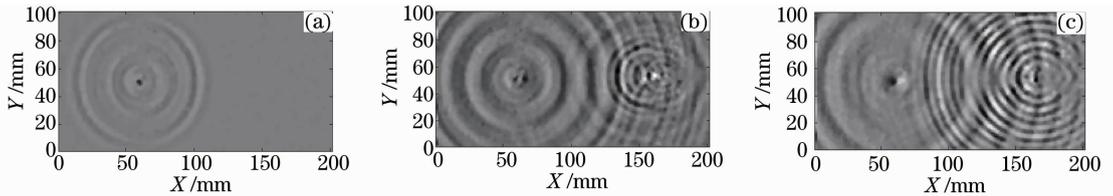


图 7 入射波弱化后的波场。(a) $11 \mu\text{s}$; (b) $40 \mu\text{s}$; (c) $55 \mu\text{s}$

Fig. 7 Wavefield after weakening the incident wave. (a) $11 \mu\text{s}$; (b) $40 \mu\text{s}$; (c) $55 \mu\text{s}$

图 8(a) 中为图 7(b) 加窗之后的结果。图 8(a) 与图 4(c) 对比可知, 经弱化处理后入射波还有残留, 但由于不使用空间变换, 处理过程受检测误差影响较小, 波场中几乎不存在噪声。将入射波弱化后的波场进行上文所述加窗处理, 限定其空间时域的

范围, 并通过 3D FT 将其转换到 $\omega\mathbf{k}$ 域中。图 8(b) 为 285 kHz 对应的 k_x-k_y 平面图, 与图 4(b) 相比, 入射波部分的值明显变小, 而在图 4(b) 中较模糊的反射波部分已被凸显出来。

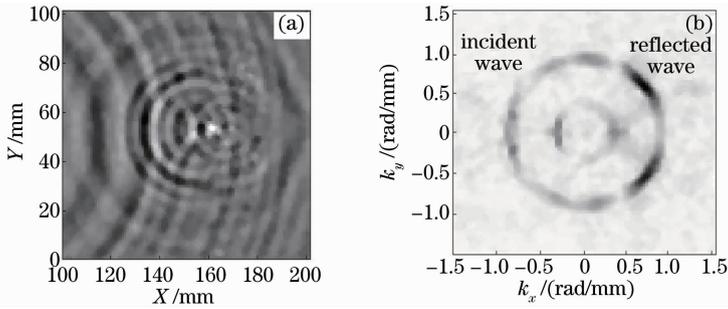


图 8 (a) 弱化后 $t=40 \mu\text{s}$ 的波场; (b) 弱化后 285 kHz 对应的波数图

Fig. 8 (a) Wavefield of $40 \mu\text{s}$ after weakening the incident wave; (b) corresponding wavenumber plots at 285 kHz

4.2 二次过滤入射波

将上文进行入射波弱化之后的波场进行 $\omega\mathbf{k}$ 域加窗过滤, 将弱化后的入射波彻底去除, 以增强损伤反射波的可视程度。图 9(a) 为二次过滤后 $t=40 \mu\text{s}$ 时反射波的波场, 与图 4(c) 相比, 反射波的轮廓更为清晰, 且损伤左侧区域不存在明显的噪声点。损伤右侧区域中虽然依然存在一些噪声点, 但较图 4(c) 已经有了很大的改善。图 9(b) 为二次过滤后反射波场的 RMS 分布, 与图 5 相比, 反射波对应区域弧形轮廓更为清晰, 覆盖范围更广, 基本布满了损伤左侧区域, 且在损伤的左侧区域内不存在明显的噪声点。损伤右侧区域内虽然还有噪声, 但其分布密

度和值都较图 5 的小。利用 (9) 式可得其 $u_R^{\text{SNR}} = 3.83271 \text{ dB}$, 较之前结果有所提升但幅度不是很大。上升幅度不是很大的原因主要为进行信噪比计算时, 认为损伤所在区域波场的 RMS 值为有用信息, 其余区域波场的 RMS 值为噪声。噪声所对应的值在整个非损伤区域中所占比例较少, 所以将噪声去除之后, RMS 图中的 SNR 值上升不大。且采用相邻信号时间匹配后作差以减弱入射波的同时会对反射波的波场有一定影响。进行这一处理后, 损伤区域外的反射波的 RMS 值有可能有所提高, 这同样会导致经二次过滤后反射波场的 RMS 图的 SNR 上升不大。

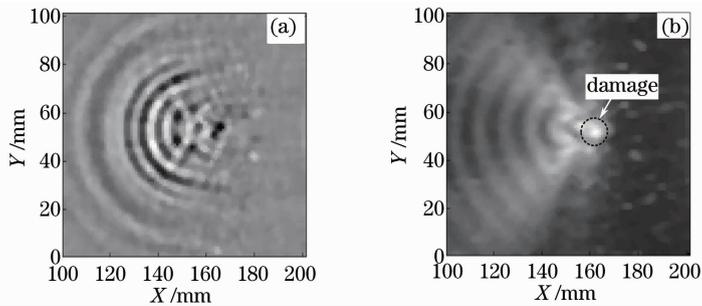


图 9 (a) 二次过滤后 $t=40 \mu\text{s}$ 的反射波; (b) 二次过滤后反射波场 RMS 分布

Fig. 9 (a) Wavefield images of $40 \mu\text{s}$ after twice filtered; (b) RMS distribution corresponding to the twice filtered wavefield

5 结 论

使用激光脉冲在板类结构中激发出超声导波以获得波场的信息, 在声源互易假设的基础上通过二维扫略实现了超声导波波场的可视化。分析了使用频率波数域过滤入射波的方法存在的缺点, 提出了对反射波场进行二次过滤的方法。先通过对波场中相邻两时域信号时间匹配后做差弱化入射波, 而后使用频率波数域过滤的方法对入射波进行深度过滤。实验证明该方法改善了反射波波场的成像效果, 提高了损伤成像检测准确性。对于该方法在曲面结构及复合

材料结构上的功能验证将作进一步的研究。

参 考 文 献

- Xu B, Giurgiutiu V. Single mode tuning effects on lamb wave time reversal with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring[J]. J Nondestructive Evaluation, 2007, 26(2-4): 123-134.
- 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): 035035.
- Zhao X, Gao H, Zhang G, 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.
- 4 Dong Liming, Li Jia, Ni Chenyin, *et al.*. Crack detection of engine blade on laser-heating assisted surface acoustic waves generated by scanning laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(11): 1103001.
- 董利明, 李 加, 倪辰荫, 等. 基于光热调制检测发动机叶片疲劳裂纹的激光声表面波方法[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1103001.
- 5 Yashiro S, Takatsubo J, Toyama N. An NDT technique for composite structures using visualized Lamb-wave propagation[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(15): 3202–3208.
- 6 Li Jia, Ni Chenyin, Zhang Hongchao, *et al.*. Detection of micro-crack by ultrasonic approach of one-sided pitch-catch method based on laser assisted heating[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0408008.
- 李 加, 倪辰荫, 张宏超, 等. 基于激光辅助加热的激光超声投捕法识别微裂纹[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0408008.
- 7 Lee J R, Takatsubo J, Toyama N, *et al.*. Health monitoring of complex curved structures using an ultrasonic wavefield propagation imaging system[J]. *Meas Sci & Technol*, 2007, 18(12): 3816–3824.
- 8 Chia C C, Lee J R, Shin H J. Hot target inspection using a welded fibre acoustic wave piezoelectric sensor and a laser-ultrasonic mirror scanner[J]. *Meas Sci & Technol*, 2009, 20(12): 127003.
- 9 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): 025022.
- 10 Ruzzene M. Frequency-wavenumber domain filtering for improved damage visualization [J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(6): 2116–2129.
- 11 Michaels T E, Michaels J E, Ruzzene M. Frequency-wavenumber domain analysis of guided wavefields [J]. *Ultrasonics*, 2011, 51(4): 452–466.
- 12 Lee J R, Ciang Chia C, Park C Y, *et al.*. Laser ultrasonic anomalous wave propagation imaging method with adjacent wave subtraction: Algorithm[J]. *Opt & Laser Technol*, 2012, 44(5): 1507–1515.
- 13 Sohn H, Dutta D, Yang J Y, *et al.*. Automated detection of delamination and disbond from wavefield images obtained using a scanning laser vibrometer[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(4): 045017.
- 14 Michaels J E, Croxford A J, Wilcox P D. Imaging algorithms for locating damage via in situ ultrasonic sensors [C]. *Sensors Applications Symposium*, 2008. 63–67.

栏目编辑:何卓铭