

激光超声检测中干涉特征提取算法的研究

张 超 季宏丽* 裘进浩 吴郁程

(南京航空航天大学航空宇航学院机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 江苏 210016)

摘要 为了有效地检测结构中的损伤位置及其形状,开展了基于超声导波干涉特征提取算法的损伤成像技术研究。在波场可视化的基础上,从波场历程中进一步分析了损伤对超声导波传播的影响;为了提取损伤附近超声导波干涉的能量,采用时间与空间域上的傅里叶变换对波场中的入射波和反射波进行分离,并根据计算出的干涉能量分布完成了损伤的成像;由于损伤产生的干涉能量在空间上的分布较广,为了减少损伤区域外的干涉能量,提高图像中损伤形状的分辨率,利用实 Morlet 小波分析的方法对宽频信号进行处理,提取窄带信号分量再进行干涉能量计算,提高了损伤成像的信噪比。

关键词 激光技术;激光超声;损伤成像;干涉能量;小波变换

中图分类号 TB551; TB553 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0714001

Research on Interference Energy Calculation Method in Laser Ultrasonic Technique

Zhang Chao Ji Hongli Qiu Jinhao Wu Yucheng

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

Abstract In order to evaluate the position and shape of the structural damage, a damage visualization technique using interference energy calculation method is presented. Based on the wavefield visualization technique, this study analyzes the effects on ultrasonic wave propagation caused by the damage. To extract the interference energy from the wavefield near the damage, Fourier transform in both time and space domains is used to separate the incident and reflected wavefields and then the inference energy is calculated to image the damage. Due to the interference energy caused by the damage spreads widely, Morlet wavelet transform is used in broadband signal processing to improve the resolution of the damage imaging. After narrowband signal extraction, interference energy calculation is followed and the signal to noise ratio of the damage imaging is improved.

Key words laser technique; laser-ultrasonic; damage visualization; interference energy; wavelet transform

OCIS codes 140.3460; 310.2785; 350.6980; 350.7420

1 引 言

随着工程结构对安全和可靠性能要求的日益增高,对材料和结构进行定期、有效的无损检测与评估成为了结构制造和维护过程中必不可少的环节。由于超声导波在结构中传播距离远且对损伤敏感,所以利用超声导波进行结构的无损检测已被广泛地应

用于各个领域。目前利用该方法进行检测时,通常需要在结构上布置多个相隔一定距离的超声传感器构成传感网络。利用其中一个传感器激发超声导波,其余传感器采集信号的形式获取结构的相关信息,再通过信号处理与数据融合的手段就能够完成对结构损伤的识别与定位^[1-3]。很多检测方法需要

收稿日期: 2013-11-14; **收到修改稿日期**: 2014-01-25

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(0513G01)、中央高校基本科研业务费专项资金、江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXZZ13_0157)、江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 张 超(1988—),男,博士研究生,主要从事激光超声检测方面的研究。E-mail: zenuaa@gmail.com

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

* **通信联系人**。E-mail: jihongli@nuaa.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

采集结构健康状况时的超声导波信号作为基准信号,通过比较当前信号与基准信号的差异来判断结构是否存在损伤,然而,很多情况下健康状况的基准信号无法获取,所以不基于健康信号的无损检测技术成为了研究热点^[4]。随着激光激励技术的日益发展,激光超声检测技术得到了越来越多的关注。在传统的超声导波检测技术中,如水浸式超声检测系统,通常利用压电材料制成的超声换能器激励超声波,并通过声耦合介质(水、油)将波传入结构当中。该方法能够用于结构制造、焊接等过程中的损伤检测,然而,鉴于扫描过程中对声耦合介质的需求以及探头与结构间距离的要求,该方法很难用于实际正在使用的结构。而激光超声技术采用了激光照射的方式激励结构中的超声导波,其特点在于激励是非接触的方式、激励信号的能量稳定且可以通过控制改变光路来选择激励的位置,所以非常适合应用于超声导波的无损检测技术中。目前,该技术已被成功地用于表征材料表面特性^[5]、结构的损伤评估^[6]等方面,特别是在一些结构表面复杂的情况下(如钻头、曲管和发动机涡轮叶片)有很好的检测效果^[7-9]。在激光超声检测方法中,波场可视化技术通过提取相同时刻所对应的超声导波信号幅值获得该时刻的二维波场图。这些不同时刻的波场图中包含了波传播的信息,能够显示波从波源向外传播的过程。通过观察由于损伤引起的反射、衍射等异常现象,可识别损伤的位置和大小。然而,逐一观察不同时刻的波场图不仅给检测者带来了巨大的工作量,同时也极易造成误判和漏判的情况。所以根据采集到的所有时间下的波场信息,提取其中的特征参数,形成一张最终的能够表示结构损伤情况的强度图成为了提高激光超声检测技术效率的方法。

本课题组利用激光超声检测系统开展了结构损伤成像技术的研究。在波场可视化的基础之上,提出了反射波波场过滤的方法^[10]。在计算了波差异信号之后,过滤了入射波带来的噪声,完成了结构损伤的成像。然而,前期的损伤成像方法都是基于信号处理手段提出的,对于损伤影响波传播的物理现象没有深入的研究。本文进一步分析了损伤对波传播的影响。为了分别给出损伤对入射波的衰减作用和自身产生的反射作用,使用了时间与空间域上的傅里叶变换方法^[11]分离了入射波与反射波两个波场,并根据损伤附近产生的超声导波干涉能量完成了结构损伤位置的成像。为了更好地提高图像中损伤的分辨率,采用了实 Morlet 小波变换的方法提取了宽频超声导波信

号中的窄带分量,提高了检测的信噪比。

2 超声导波的波场成像方法

激光超声检测技术是在声学互易理论的基础上发展而来的,其原理如图 1 所示,利用激光脉冲对试件表面进行非接触式激励,通过激光在物体表面产生的热应力区激发出结构的超声波(热弹效应^[6])。本文所针对的检测对象是板类结构,超声波在板中受到了板表面边界条件的约束形成了沿板表面方向传播的超声导波,即 Lamb 波,传感超声导波则是采用声发射传感器在固定位置采集对应的信号的方式。根据激励和传感在空间位置上可以互易的原理,将激光激励点扫描整个试件并采集固定位置声信号的过程可以等效为在固定位置激励并同时采集整个波场信号的过程。因此,利用激光超声检测技术的方法可以充分展现波在结构中的传播过程,实现波场的成像。

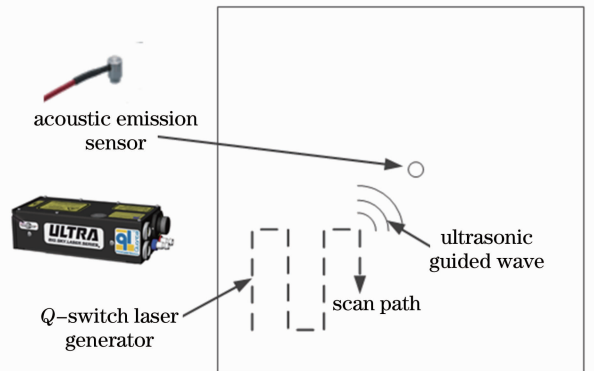


图 1 激光超声实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser ultrasonic experiment

2.1 激光超声检测系统介绍

激光超声检测实验系统^[10]如图 2 所示。激励超声导波的装置是 Q 开关 Nd:YAG 激光器,其工作状态下能产生 532 nm 波长的绿光,单个脉冲的最大能量为 55 mJ,持续时间为 7 ns,激励重复频率最大为 20 Hz。激光从激光器中产生后进入二维振镜平台,通过调节振镜的角度能将激光反射到试件的不同位置。二维振镜平台的转角分辨率为 136 μ rad,最大扫描范围为 ± 0.42 rad。实验中,试件与二维振镜平台的距离为 0.7 m,根据振镜的最小偏转角可以算出激光在试件上的最小移动距离约为 0.1 mm。考虑到采集数据量的大小,实际采用的激励空间间隔为 1 mm。传感超声导波的装置是超小型共振式声发射(AE)传感器 M31。后续信号

的调理过程则包括了信号的放大和滤波,滤波选择的通频带为 20~500 kHz。信号调理过程由前置放大器和声发射信号分析仪实现。声发射信号的采集则是利用了 NI 公司的 PXI-5105 数据采集卡完成,采样频率为 10 Hz。

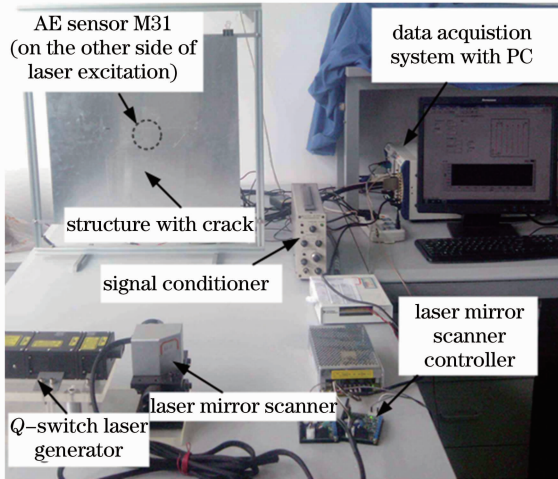


图 2 激光超声实验装置

Fig. 2 Experimental setup of laser ultrasonic

上述激光超声检测系统满足超声导波波场成像技术的使用要求。首先,为了保证采集到的信号能够表示不同位置的波场情况,每次激励产生的超声导波能量必须有较好的一致性。系统使用的调 Q 激光器能量稳定,具有较高的信噪比,无需在检测过程中使用多次测量取平均的方法。其次,为了能够将不同位置信号进行时间重排,激励与传感的时间必须保持同步。本系统采用了 RS232 串口通信与触发采集技术结合的方法,保证了每次激励与采集信号的时间间隔相同,系统的重复性较好。

2.2 超声导波的波场成像

实验所用的试件为 480 mm×480 mm×4 mm 的铝板,结构中设置的模拟损伤是 20 mm×2 mm×3 mm 的槽,如图 3 所示。传感器与激光扫描区域的相对位置如图 4 所示,坐标系以激励扫描起点为原点,单位长度为 1 mm。传感器安放位置与损伤在同一个表面,激光激励则处于试件的另一面,以保证激励超声导波的过程不会受到损伤的影响。整个激光扫描区域为边长是 100 mm 的正方形,由于激励点是沿 x 轴和 y 轴以 1 mm 距离等间隔分布的,所以扫描的总点数为 10201,采用最大激励频率进行激励的时间约为 8 min。

实验过程中,对试件中某一点 (x, y) 进行激光激励并把采集到的信号记为 $w(x, y, t)$ 。根据声学互易原理,将 $w(x, y, t)$ 放入以 x, y, t 为 3 个轴的

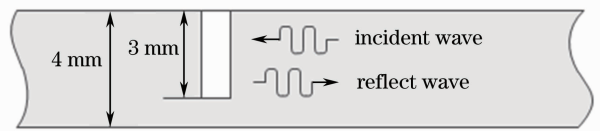


图 3 铝板截面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of aluminum plate section

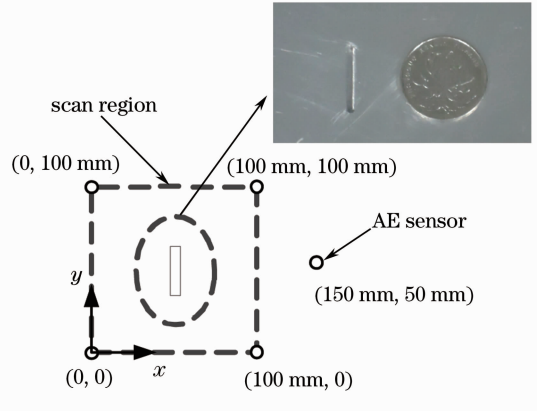


图 4 传感器与激光扫描区域的位置

Fig. 4 Positions of sensor and scanning area

坐标系中作为在传感器位置处激励时的 (x, y) 点处响应。通过这样的数据重排手段,采集到的声发射信号就能够从一维数据转化为表示波场情况的三维数据。截取三维数据中相同时刻的信号强度图,就能表示该时刻下超声导波的波场强度。如果将强度图以时间 t 顺序排布,就能得到整个波在结构中的传播视频。图 5 为 $t=20, 30, 40 \mu\text{s}$ 3 个时刻下的超声导波波场图。以图 5(b)为例,入射波沿着 x 轴负方向移动,反射波出现在损伤附近,产生的反射波方向沿着 x 轴正方向传播。从入射波的波长上可以很明显地区分出 S_0 和 A_0 两个模态。 S_0 模态的相速度要高于 A_0 模态,所以入射波的开始阶段为 S_0 模态,且相同振动频率下的 S_0 模态波长要大于 A_0 模态。由于激光激励只存在于结构的一侧,在结构厚度方向上,激励区域的应力分布是不对称的,所以 A_0 模态的波在幅值上要大于 S_0 模态。在损伤区域附近,波发生了复杂的反射现象,由于反射波的能量较入射波要小很多,但是从明暗条纹的变化中仍能够观察到反射的过程。在图 5(c)中反射与入射波叠加后,反射显得非常清晰。

3 传统激光超声检测成像方法

根据不同时刻的波场情况,计算整个采样时间内的波场能量是激光超声检测中最常用的方法^[12]。任意一点的波场能量为

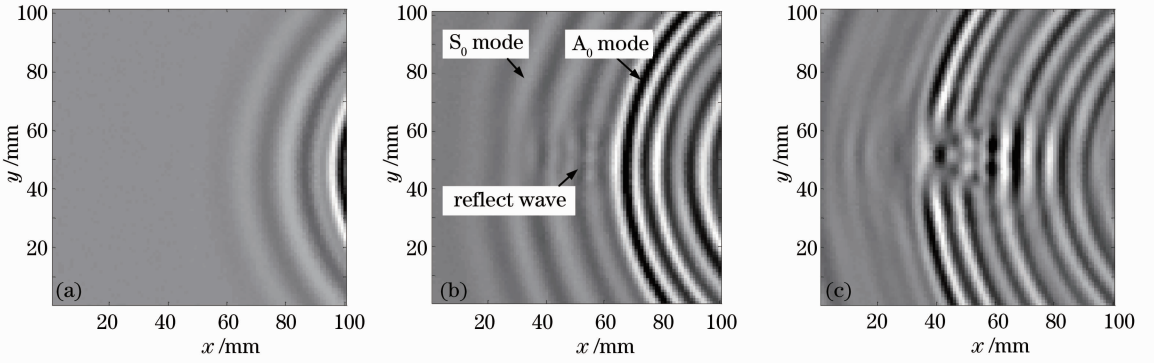


图 5 不同时刻下的波场图。(a) 20 μs ; (b) 30 μs ; (c) 40 μs

Fig. 5 Wavefield images of different propagation time. (a) 20 μs ; (b) 30 μs ; (c) 40 μs

$$E_T(x, y) = \int_0^T \omega(x, y, t) dt, \quad (1)$$

式中 T 为采样总时间, $\omega(x, y, t)$ 表示坐标为 (x, y) 的点在 t 时刻下的超声导波信号。经过对时间的积分, 三维的波场数据转换成了如图 6 所示的二维波场能量图。波场能量在损伤附近的分布情况主要分为 3 种区域。区域 1 是损伤没有影响波传播的地方, 该区域的能量随传播距离的增加而衰减。由于激光激励出的超声导波是宽频的信号, 且波的传播速度随频率的变化而变化, 不同频率的波相互叠加出现了复杂的干涉现象, 导致波场能量图出现了明暗相间的条纹。区域 2 是入射波被损伤阻挡的区域, 由于大部分波的能量被损伤反射, 该区域的波场能量明显小于其他区域。然而, 超声导波在损伤的边界上会产生衍射现象, 衍射波与损伤区域透射出的入射波相互叠加, 形成了区域 2 中的亮点。区域 3 是波场最为复杂的区域。该区域中入射波和反射波的能量都比较大, 且由于入射波和反射波的相互

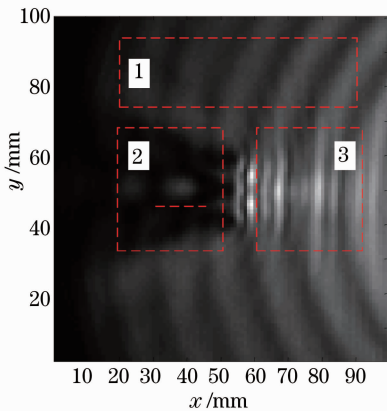


图 6 基于波场能量的损伤成像结果

Fig. 6 Result of damage visualization using wavefield energy

叠加, 能量出现了更加密集的明暗条纹。由于复杂的能量分布情况, 利用如图 6 所示的波场能量图很难分辨出损伤的具体位置及形状, 只有损伤过后的区域能够从明显的能量衰减中被识别出来。文献 [12] 通过增加不同位置的传感器和波场能量图的叠加完成了损伤的成像, 然而增加不同位置的传感器不仅使得数据量变得更加庞大, 而且采集信号的过程花费了更多的时间。为了尽可能地利用波场传播的信息, 提高激光超声检测的效率, 本文研究了基于干涉能量的损伤成像方法。

4 干涉特征提取算法

当结构中存在损伤时, 在损伤附近会产生与入射波方向相反的反射波, 当入射波与反射波相互叠加时就会形成干涉。然而, 由于激励信号是瞬态的信号, 结构中的某一点并不是一直随时间而振动, 所以形成的干涉并不是稳定的干涉。针对损伤对超声导波产生的这一影响, 开展了基于三维频率波数域的干涉特征提取算法研究, 通过计算超声导波形成干涉瞬时产生的功率用于损伤的定位成像中。

4.1 损伤产生的超声导波干涉

如图 3 所示, 只考虑一维的情况下, 损伤附近同时存在入射波和反射波时, 其波场 $w(x, t)$ 可以表示为^[11,13]

$$w(x, t) = w_i(x, t) + w_r(x, t), \quad (2)$$

式中 $w_i(x, t)$ 和 $w_r(x, t)$ 分别表示入射波与反射波, 它们的差别在于波数 k 前的符号, 具体如下所示:

$$w_i(x, t) = A \cos(\omega t - kx), \quad (3)$$

$$w_r(x, t) = B \cos(\omega t + kx + \phi), \quad (4)$$

其中, ω 为角频率, ϕ 为入射和反射波的相角变化, A, B 分别为入射波和反射波的振幅。经过三角函数

的和差化积变换后, $w(x, t)$ 可以写成

$$w(x, t) = (A - B) \cos\left(\omega t - k\bar{x} + \frac{\phi}{2}\right) + 2B \cos(k\bar{x}) \cos\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right), \quad (5)$$

式中 $\bar{x} = x + \phi/2k$ 。(5)式中第二项表示由于干涉产生的波场。

通常, 信号的能量特征可以用瞬时功率来表示。对于波场中的一点, 其瞬时功率为

$$w^2(x, t) = w_i^2(x, t) + w_r^2(x, t) + 2w_i(t)w_r(x, t). \quad (6)$$

波场的瞬时功率不仅包含了入射波和反射波的瞬时功率, 还叠加了入射波和反射波的交叉项, 这个交叉项表示了入射波与反射波耦合形成干涉所带来的能量。干涉特征提取方法就是基于分离交叉项引起的瞬时功率的算法。

4.2 频率波数域分析

根据(6)式, 为了求得波干涉产生的瞬时功率, 必须先要从总波场中分离出入射波和反射波, 通过比较两个方向上行波的瞬时功率与总波场功率的关系就能得到干涉产生的瞬时功率。采用了傅里叶变换和加窗过滤的方法进行波场的分析。

利用三维傅里叶变换(3D-FT)技术能够将空间-时间(x - y - t)域内的三维数据转换到波数-频率(k_x - k_y - ω)域上。本文所针对的波场, 其入射与反射方向的差异仅存在于 x 轴, 为了提高检测过程的计算速度, 无需对 y 轴上的分量进行变换, 所以频率波数域的变换只应用在二维的空间上, 计算时只需要选择相同 y 轴位置上的数据进行操作, 最后按 y 轴位置排列即得到了三维数据。其变换的计算过程为^[14-15]

$$W(k_x, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(x, t) \exp[-i(\omega t + k_x x)] dx dt, \quad (7)$$

式中 $W(k_x, \omega)$ 为 $w(x, t)$ 的二维傅里叶变换, k_x 表示 x 轴方向波矢。在 k_x - ω 域上, 有物理意义的部分在 $\omega > 0$ 区域中, 该区域在 $k_x < 0$ 的部分表示波场中沿 x 轴正方向传播的分量, 即 k_x 与 ω 异号表示正向传播; 反之, 在 $k_x > 0$ 的部分表示波场中沿 x 轴负方向传播的分量。负频率部分则是由于实信号在变换过程中引入的对称分量, 同样也满足 k_x 与 ω 异号表示正向传播。

为了分别得到入射波(反射波)传播的波场分量, 需要通过对 $W(k_x, \omega)$ 进行加窗过滤, 去除反射波(入射波)对应的区域。波场的入射波(反射波)分量为^[11]

$$W_{i(r)}(k_x, \omega) = W(k_x, \omega) F_{i(r)}(k_x, \omega), \quad (8)$$

式中 $W_{i(r)}(k_x, \omega)$ 为 k_x - ω 域内入射波(反射波)对应的波场分量, 窗函数

$$F_{i(r)}(k_x, \omega) = \begin{cases} 0, & \omega k_x < 0 (\omega k_x > 0) \\ 1, & \text{else} \end{cases}.$$

加窗过滤后, 再对剩余成分进行逆傅里叶变换, 即可获得需要的波场。二维逆傅里叶变换计算过程为

$$w_{i(r)}(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_{i(r)}(k_x, \omega) \times \exp[i(\omega t + k_x x)] dk_x d\omega. \quad (9)$$

4.3 干涉特征提取

图 7(a) 为波场数据进行了 3D-FT 以后得到的 k_x - k_y - ω 域截图, 选择的截取角频率为 $2.6 \text{ rad}/\mu\text{m}$, 对应波场中 420 kHz 的频率分量。由于 $\omega > 0$, 所以

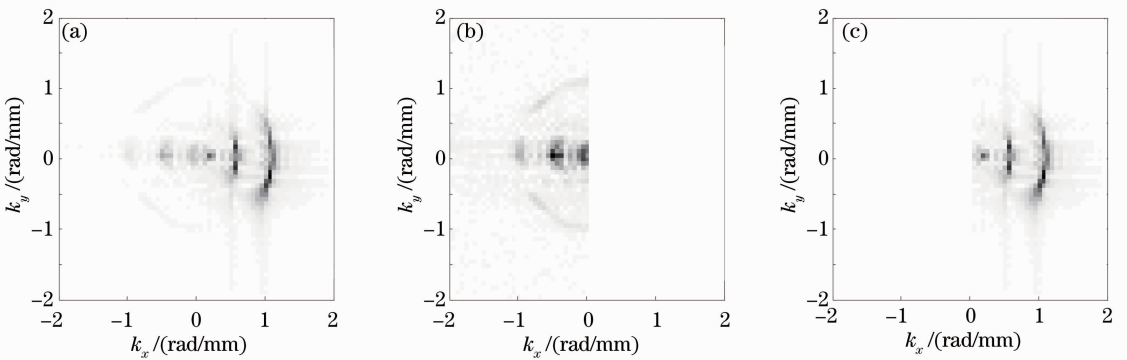


图 7 当 $\omega = 2.6 \text{ rad}/\mu\text{s}$ 时的波场 k_x - k_y 域图像。(a)完整波; (b)反射波场; (c)入射波场

Fig. 7 Results of wavefield in k_x - k_y domain when $\omega = 2.6 \text{ rad}/\mu\text{s}$. (a) Entire wavefield; (b) reflect wavefield; (c) incident wavefield

经加窗过滤后, k_x 为负的部分表示方向沿 x 轴正向传播的波, 即反射波[如图 7(b) 所示]; 相反, k_x 为正的部分表示了入射波的波场[如图 7(c) 所示]。从 k_x - k_y - ω 域中可以很明显的发现, 入射波的能量要远大于反射波的能量。图 7(a) 中能量的分布呈现环状, 表示在各向同性材料中, 波的传播沿各个方向的速度是相同的。由于分析的区域只在激励的一侧并以 x 轴正负方向为主要的传播方向, 所以能量环在靠近的 k_x 轴区域附近较大。

图 8 和图 9 分别为利用(8)式分离后的入射波波场和反射波波场, 为了方便比较, 截取的波场图所对应的时间与图 5 一致。从结果上看, 入射波的波场图在损伤区域有明显的变化, 其原因在于入射波

经过损伤后只有部分能量通过透射的方式继续传播, 一部分能量被反射, 另一部分能量由于在损伤边缘发生衍射现象而改变。反射波波场图中几乎没有损伤以左区域的分量, 反射出的波形由于损伤的形状, 呈现长条状。图 9(a) 中可以观察到明显的噪声信号, 图像的分辨率不高, 其原因是在做 k_x - ω 域截取时, 采用的窗函数是阶跃函数, 截断边缘不连续导致了逆变换后噪声增大; 另一方面, 实验过程中激励点的位置可能与理想位置发生偏差, 导致二维傅里叶变换不准, 这也会影响入射波与反射波分离的精度。实际上, 噪声在图 8 和图 9 中同时存在, 由于反射波能量较弱, 导致图 9 的信噪比相对较低。

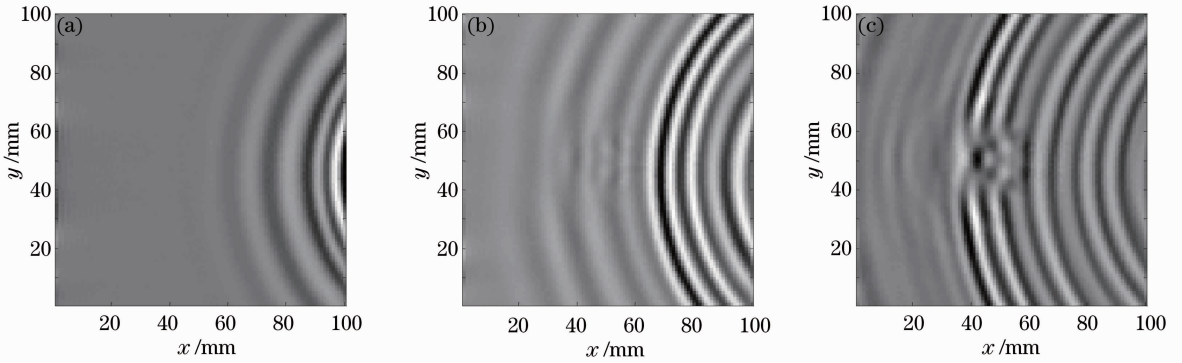


图 8 不同时刻下的入射波波场图。(a) 20 μs ; (b) 30 μs ; (c) 40 μs

Fig. 8 Incident wavefield images at different propagation time. (a) 20 μs ; (b) 30 μs ; (c) 40 μs

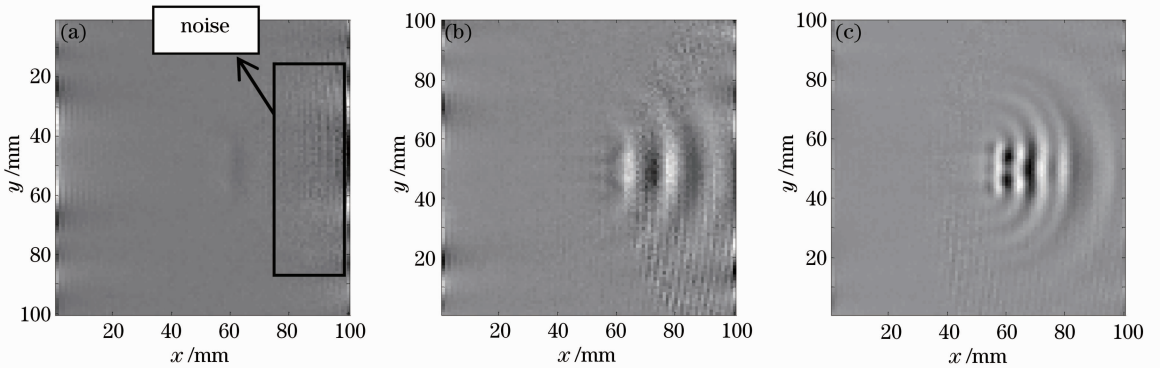


图 9 不同时刻下的反射波波场图。(a) 20 μs ; (b) 30 μs ; (c) 40 μs

Fig. 9 Reflect wavefield images at different propagation time. (a) 20 μs ; (b) 30 μs ; (c) 40 μs

根据(6)式, 可以定义损伤引入的干涉能量 E_1 为

$$E_1(x) = \int_0^T [\omega^2(x, t) - \omega_i^2(x, t) - \omega_r^2(x, t)] dt, \quad (10)$$

式中 $\omega(x, t)$ 由实验获取, $\omega_i(x, t)$ 和 $\omega_r(x, t)$ 通过分离算法得到。

4.4 结构损伤成像

根据(10)式, 将三维数据包中的 t 进行积分后就得到了一张二维的强度图。该强度图显示了不同位置下干涉能量的强弱。而波是随着传播距离的增加而减小的, 干涉产生位置在损伤附近, 所以损伤附近的干涉能量最强, 远离损伤的位置干涉能量越小。图 10 为基于干涉能量计算出的损伤成像结果, 可以看出能量最高的地方出现在损伤的两侧边缘, 而损

伤中心由于是超声导波能量小而导致干涉能量也小。在损伤的右侧(虚线框内)同时也出现了干涉能量的残余,这是由于激光激励的超声导波频带较宽,不同频率的超声导波其波速也是不相同的,所以波的振荡时间长,在空间上的分布也广,形成的干涉范围也大,这导致利用该方法对结构损伤成像的清晰度小。

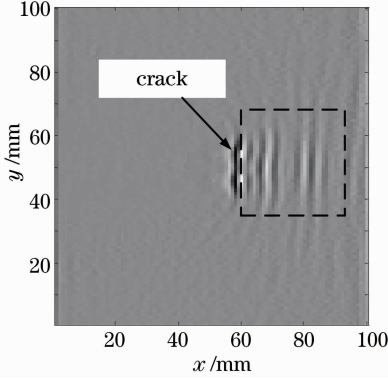


图 10 损伤成像结果

Fig. 10 Result of damage visualization

5 小波分析在成像中的应用

图 11 是激光在坐标为(90 mm, 50 mm)的位置处激励下的传感器响应信号。激光激励后的信号持续振荡,这导致了入射波和反射波在空间上分布也很广。为了提取较单一的模态和较窄的声波频带,选择了小波变换的手段对信号进行分析。连续小波变换(CWT)的过程如下^[16]:

$$C(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (11)$$

式中 C 为 CWT 结果, a, b 分别是小波变换中的尺度因子和平移因子, $s(t)$ 表示需要变换的时间信号, $\psi^*(t)$ 是母小波函数 $\psi(t)$ 的复共轭函数。由于实 Morlet 小波的频谱为中心频率在 f_0 处的高斯型函数,在时域和频域上都有较好的聚集性,所以对宽频激光激励信号的处理使用实 Morlet 母小波是非常适合的。实 Morlet 母小波函数为

$$\phi(t) = \exp(-t^2/2) \cos(5t). \quad (12)$$

小波系数对应的中心频率 f 由尺度因子 a 和采样频率 f_s 确定,即

$$f = \frac{5}{2\pi a} f_s. \quad (13)$$

不同尺度因子 a 下的实 Morlet 小波系数表示了不同频率下的信号分量。通过小波变换的提取,文献[17]成功地从宽频的信号中分离出了不同频率的超

声导波信号,并研究了板中超声导波的群(相)速度与频率的关系。采用相同的原理对宽频的激光超声信号进行分析。由于在相同的振荡周期数下,高频信号在时域上的持续时间要比低频信号短。为了尽可能获得振荡时间短的信号,选择了通频带范围(20~500 kHz)内相对较高的频率进行小波系数的计算,即取 $a=19$ 对应选择的分析频率为 420 kHz。图 12 为图 11 所示信号对应的小波系数。与原始信号相比,小波处理过的信号能够清晰的分清主要的 4 个波包,分别是入射波 S_0 模态和 A_0 模态,损伤反射波 S_0 模态和 A_0 模态。每个成分的波包振荡 4~5 个周期,其对应的空间分布也比原始信号要小很多。

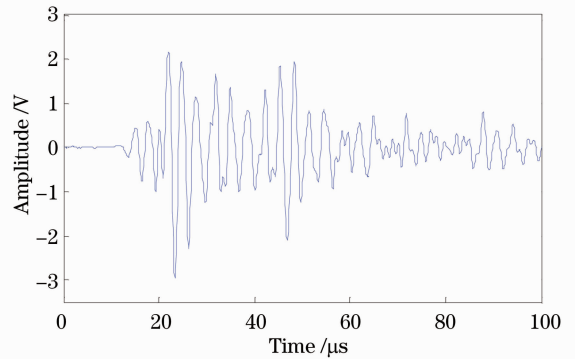


图 11 (90 mm, 50 mm)激励位置下的传感器响应

Fig. 11 Sensor response to laser at (90 mm, 50 mm)

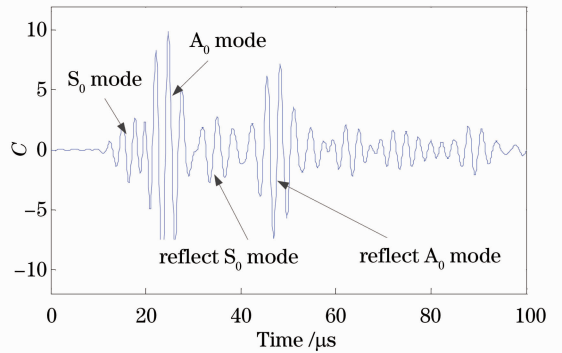


图 12 中心频率为 420 kHz 的小波系数

Fig. 12 Coefficient of wavelet with center frequency of 420 kHz

将采集到的信号经过小波变换后,再利用干涉能量计算方法得到的损伤成像结果如图 13 所示。和图 10 相比,虚线框区域的干涉能量有了明显的减少。为了定量地比较两个结果,利用信号分析手段中信噪比的计算方式可以定义损伤成像的信噪比(SNR, R_{SN}),即

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{I_{rms, damage}}{I_{rms, health}}, \quad (14)$$

式中 $I_{rms, damage}$ 表示图像中在实际损伤区域的强度均方根, 而 $I_{rms, health}$ 表示健康区域的强度均方根。在图 10 中, 损伤的信噪比为 8.40, 而在图 13 中, 损伤的信噪比为 9.88。显然经过小波变换后, 超声导波干涉的能量被缩小到了损伤周围很小的区域内, 成像结果更加精确。虽然在信噪比方面仅提升了 17.62%, 但这里计算的信噪比是针对整个检测区域来计算的, 考虑到未滤波前, 噪声出现区域局限在损伤右侧, 所以小波变换方法对降低损伤右侧成像噪声的效果是明显的。取 $y=50$ mm 处的点, 对比小波处理前与小波处理后的归一化干涉能量, 如图 14 所示。实线部分为经过滤波的干涉能量曲线, 可以发现在 $60 \text{ mm} < x < 80 \text{ mm}$ 时, 干涉能量比利用原始信号求得的能量要小很多, 干涉能量仅在损伤位置 $57 \text{ mm} < x < 60 \text{ mm}$ 附近出现了明显的振荡。

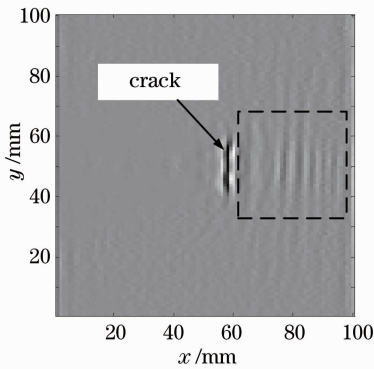


图 13 小波变换后的损伤成像结果

Fig. 13 Result of damage visualization after wavelet transform

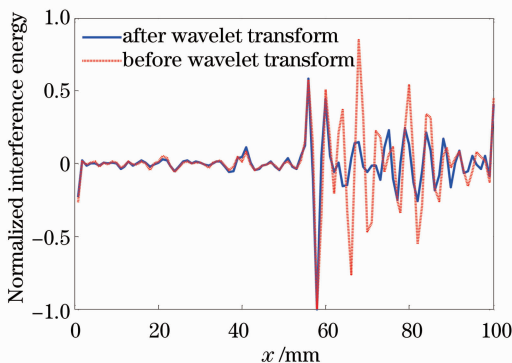


图 14 $y=50$ mm 处小波变换前、后的对比

Fig. 14 Comparison of the results before and after wavelet transform at $y=50$ mm

6 结 论

提出了一种基于小波变换的干涉特征参数提取方法, 并对结构中存在的损伤进行了检测, 完成了损伤成像过程。该方法使用了激光超声技术激发了结构中的超声导波, 在声学互易原理的基础上通过二维扫描激励位置实现了波场可视化的过程; 利用了时空傅里叶变换得到了频率波数域中的波场信息, 通过合理地删减频率波数域中的波场分量, 得到了波场中由损伤引起的干涉能量; 完成了基于干涉能量提取的损伤成像, 并使用了小波分析手段进一步优化了检测结果的信噪比。研究结果证明:

1) 损伤对超声导波的传播产生了反射的作用, 反射波与入射波相互叠加会引起损伤区域出现干涉现象, 从而影响波场能量的变化;

2) 利用 3D-FT 进行波场的频率波数域变换能够有效地区分声波的传播方向, 通过入射波和反射波能量的比较可以实现干涉能量的提取;

3) 宽频激励产生的超声导波在板中存在多个模式, 且由于频散效应的原因, 随着传播距离的增长, 信号的振荡周期变多, 这导致了损伤检测效果的信噪比降低。通过小波分析的手段, 提取信号中较窄带宽的信息, 能够很好地抑制频散效应, 提高损伤成像结果的准确性。

参 考 文 献

- Jian Xiaoming, Li Mingxuan. Ultrasonic quantitative flaw evaluation using neural networks [J]. Acta Acustica, 2000, 25 (1): 71-77.
- 简晓明, 李明轩. 超声检测中神经网络对缺陷定量评价[J]. 声学学报, 2000, 25(1): 71-77.
- J E Michaels. 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.
- X Zhao, H Gao, G Zhang, *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.
- H Lee, J Yang, H Sohn. Baseline-free pipeline monitoring using optical fiber-guided laser ultrasonics [J]. Structural Health Monitoring, 2012, 11(6): 684-695.
- Yan Gang, Xu Xiaodong, Shen Zhonghua, *et al.*. An experimental method of the laser generated ultrasonic waves for detecting the surface breaking defects [J]. J Optoelectronics • Laser, 2006, 17(1): 107-110.
- 严刚, 徐晓东, 沈中华, 等. 激光超声表面缺陷检测的实验方法[J]. 光电子·激光, 2006, 17(1): 107-110.
- Shi Deheng, Chen Yuke, Sun Jinfeng, *et al.*. A review on laser ultrasonic technique and its applications in non-destructive testing [J]. Laser Journal, 2004, 25(5): 1-4.
- 施德恒, 陈玉科, 孙金锋, 等. 激光超声技术及其在无损检测中的应用概况[J]. 激光杂志, 2004, 25(5): 1-4.
- Dong Liming, Li Jia, Ni Chenyin, *et al.*. Crack detection of

- engine blade based 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.
- 8 S Yashiro, J Takatsubo, N Toyama. An NDT technique for composite structures using visualized Lamb-wave propagation [J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(15): 3202–3208.
- 9 J R Lee, J takatsubo, N Toyama, *et al.*. Health monitoring of complex curved structures using an ultrasonic wavefield propagation imaging system [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18(12): 3816–3824.
- 10 Wu Yucheng, Qiu Jinhao, Zhang Chao. A method to improve the visibility of the damage reflected wave [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0308001.
- 吴郁程, 裘进浩, 张超. 损伤反射波波场可视化方法的研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0308001.
- 11 H Sohn, D Dutta, J Y Yang, *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.
- 12 Y Liu, N Hu, H Xu, *et al.*. Damage evaluation based on a wave energy flow map using multiple PZT sensors [J]. *Sensors*, 2014, 14(2): 1902–1917.
- 13 Y K An, B Park, H Sohn. Complete noncontact laser ultrasonic imaging for automated crack visualization in a plate [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(2): 025022.
- 14 T E Michaels, J E Michaels, M Ruzzene. Frequency-wavenumber domain analysis of guided wavefields [J]. *Ultrasonics*, 2011, 51(4): 452–466.
- 15 M Ruzzene. Frequency-wavenumber domain filtering for improved damage visualization [J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(6): 2116–2129.
- 16 Liu Shunlan, Qian Huisheng, Xu Pingyuan. Application of Morlet wavelet transform to detection of transient signals [J]. *Journal of Hangzhou Institute of Electronic Engineering*, 1999, 19(3): 29–36.
- 刘顺兰, 钱惠生, 徐平原. Morlet小波变换在检测瞬时信号中的应用[J]. *杭州电子工业学院学报*, 1999, 19(3): 29–36.
- 17 H Nishino, T Tanaka, K Yoshida, *et al.*. Simultaneous measurement of the phase and group velocities of Lamb waves in a laser-generation based imaging method [J]. *Ultrasonics*, 2012, 52(4): 530–535.

栏目编辑：史敏