

基于激光测振扫描的 MVDR 成像方法研究

姚 晨^{1,2}, 陈海卫^{1,2}, 周德强^{1,2}, 宿 磊^{1,2}, 李丽霞^{1,2}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘 要:传统的“延迟-求和”成像方法,通过提取损伤信号幅值进行损伤定位成像,该方法存在信噪比低、定位精度不高的问题。本文结合激光测振技术,利用其检测精度高、检测模态较为单一的优点,提出一种最小方差不失真响应(MVDR)成像法。该方法在稀疏阵列中引入方向权矢量,提高损伤位置分辨能力。实验结果证实该方法能够快速高效地实现损伤的二维定位成像。

关键词:Lamb波;激光测振仪;MVDR

中图分类号:TN249;TP391.4 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.10.005

MVDR imaging method based on laser vibrometer

YAO Chen^{1,2}, CHEN Hai-wei^{1,2}, ZHOU De-qiang^{1,2}, SU Lei^{1,2}, LI Li-xia^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. The key laboratory for advanced food manufacturing equipment technology of Jiangsu province, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The traditional “delay and sum” algorithm utilizes the extraction of signal amplitude features for location and imaging of the damage, but this method has the problem of low SNR and low location accuracy. An improved MVDR (minimum variance distortionless response) imaging method was put forward based on laser vibrometer. The proposed method introduced a pre-designed unite column vector to improve the discernibility of damage location. Experimental results show that the algorithm can locate the damage and get two-dimensional images of damage fast and efficiently.

Key words: Lamb waves; laser vibrometer; MVDR

1 引 言

薄板结构是工程中常见的结构形式,广泛应用于航空航天、农业机械、大型压力容器、体育器械等领域。薄板在轧制过程中,自然地带入分层、夹杂物等微观损伤,而在使用过程中,受外部因素(例如:长期疲劳、交变载荷等)作用,极易引起微观损伤成长和恶化,进而造成事故。在众多无损检测方法中,主动 Lamb 波技术^[1]具有传播距离远、损耗低、对微观损伤敏感等优点,适用于板类结构损伤检测。

传统的压电片传感阵列技术,存在以下缺点:(1)多压电片粘贴复杂,且容易引入人为误差,影响机电转换效率;(2)耦合剂对精密结构表面造成污染;(3)压电片的附加负载,影响薄板结构振动属性。近年来,激光超声传感阵列技术^[2-3]凭借其非接触性、检测频带宽、实时性好等优点,能够实现 Lamb 波离面位移的精确测量,提高响应信号模态识别能力。其中, J. Pohl^[4]等利用压电片激励和激光测振仪采集的方式,研究了 CFRP 板中 Lamb 波频散

作者简介:姚 晨(1992-),男,硕士研究生,研究方向为激光测振无损检测。E-mail:yaochen1992@foxmail.com

通讯作者:陈海卫(1982-),男,副教授,研究方向为振动与噪声控制。E-mail:chenhaiwei@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2017-02-28

特性。L Mallet^[5]等分别利用压电片和激光测振仪检测铝板中的离面位移 A0 模态,实验证实两种方法的检测效果相一致。王杰^[6]等利用激光测振仪检测成人鼓膜的细微振动,为精细化研究耳传声功能的相关应用提供了临床依据。

本文采用“单压电片激励和激光测振仪阵列采集”的混合检测系统,定量检测铝板中损伤对 Lamb 波传播特性的影响。同时,针对“延迟-求和”成像结果信噪比低、定位精度不高等问题,引入 MVDR 高分辨率位置估计成像算法^[7]。利用方向权矢量对检测路径进行定向约束,在保持期望方向信号功率不变的情况下,使非期望方向的噪声和干扰功率最小。实现损伤位置、损伤严重程度的直观评价。

2 铝板中的 Lamb 波

在自由边界条件下,Lamb 波是在板状波导结构中传播的一种弹性应力波,由纵波和横波耦合而成。根据质点振动位移形态,Lamb 波被分成对称模态(S 型)和反对称模态(A 型)。由于自由边界条件时,板上下表面的正应力 σ_z 和剪切应力 τ_{xz} 均为零,如图 1 所示,那么板中 Lamb 波的波动方程可以表示成:

对称模态:

$$\begin{vmatrix} (q^2 - k^2)\cos(ph) & 2ikq\cos(qh) \\ 2ikp\sin(ph) & (q^2 - k^2)\sin(qh) \end{vmatrix} = 0 \quad (1)$$

反对称模态:

$$\begin{vmatrix} (q^2 - k^2)\sin(ph) & 2ikq\sin(qh) \\ 2ikp\cos(ph) & (q^2 - k^2)\cos(qh) \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

式中:

$$p^2 = \frac{\omega^2}{C_L^2} - k^2, q^2 = \frac{\omega^2}{C_T^2} - k^2, k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi}, C_L = \sqrt{\frac{2\mu(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)}}, C_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

其中, $2h$, ω , k , λ 依次为板厚、角频率、波数、波长, C_L , C_T , ρ , μ , ν 依次为自由板中横波波速、纵波波速、密度、剪切模量、泊松比。

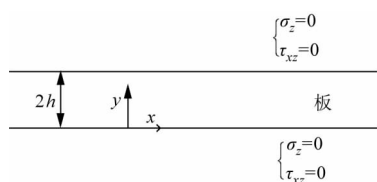


图1 自由板示意图

Fig.1 Sketch for a free plate

根据频散方程(1)的描述,运用数值二分法迭代求解,解得型号为6061-T6,厚度为2 mm 铝板的频散曲线,如图2所示。从图中可以看出,对于某一频率,铝板中至少存在两种 Lamb 波模态,并且每种模态的传播速度随着频率的变化而变化,即频散效应。在低频区,Lamb 波模态较为单一,即速度较快的 S0 模态和速度较慢的 A0 模态。在高频区,随着频率的增大,传播模态的数量随之增多,呈现出多模态特性。Lamb 波的频散效应和多模态特性增大了损伤提取难度。通过时频降噪和 MVDR 成像法可以实现损伤的二维定位成像。

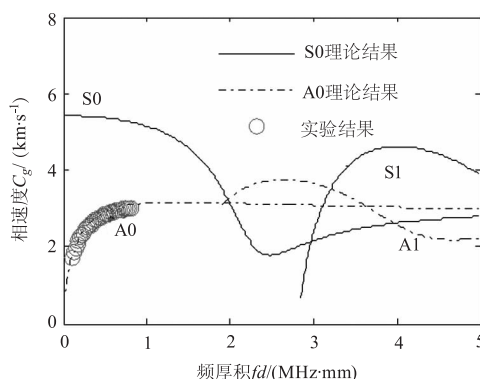


图2 2 mm 厚度铝板中 Lamb 波群速度频散曲线

Fig.2 Group dispersion curve of lamb waves in a 2mm T-thick Aluminum plate

3 损伤成像

受到随机噪声干扰,激光测振仪采集到的原始信号信噪比较低,其中损伤特征信号非常微弱,需要有效的信号处理技术从原始数据中提取损伤特征信息。

3.1 MVDR 成像步骤

假设无损伤响应信号为 $f^0(t)$,有损伤响应信号为 $f^1(t)$,那么损伤引起的残余信号为 $S(t) = f^1(t) - f^0(t)$ 。MVDR 成像步骤如下所述:

第一步:信号预处理。对原始信号作均值处理、时频处理,进行降噪。具体参见 3.2。

第二步:计算 APS 传播路径对应的传播时间:

$$t_i^{xy} = \Delta t + \frac{d_i^{xy}}{C_g} \quad (3)$$

式中, C_g 是 Lamb 波群速度; i 是传感器编号; d_i^{xy} 是任一点 $P(x,y)$ 到第 i 组“激励器-传感器”的距离和; Δt 是检测系统平均时间延迟^[8]。

第三步:根据 Hilbert 变换,提取残余信号的包络线:

$$r_i^{ENV}(t) = |s_i^{xy}(t) + i\hat{s}_i^{xy}(t)| \quad (4)$$

式中, $s_i^{xy}(t)$ 是损伤残余信号, 它的希尔伯特变换是 $\hat{s}_i^{xy}(t)$ 。

第四步: 通过幅值包络信号和传感器阵列可以得到点 $P(x, y)$ 的像素值^[9]:

$$E_{xy}(\vec{e}) = \vec{e}^H R_{xy} \vec{e} \quad (5)$$

式中, $\vec{e}^T$ 是 $\vec{e}$ 的转置矩阵; $\vec{e}$ 是预先定义的单位列向量; $\vec{e}$ 表示 $\vec{r}_{xy}(t)$ 中所有元素与点 $P(x, y)$ 之间是否存在损伤的关系; R_{xy} 是损伤响应信号的时空相关矩阵, 且 $R_{xy} = \vec{r}_{xy}(t) \cdot \vec{r}_{xy}^T(t)$ 。

第五步: 像素值 $E_{xy}(\vec{e})$ 的另一种表示形式是找到最优的 $\vec{e}$, 使它满足优化约束问题:

$$\begin{cases} \min(\vec{w}^H R_{xy} \vec{w}) \\ \vec{w}^H \vec{e} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\vec{e} \sim \left[\frac{1}{\sqrt{d_1^{xy}}}, \frac{1}{\sqrt{d_2^{xy}}}, \dots, \frac{1}{\sqrt{d_l^{xy}}} \right]$,

$$\vec{r}_{xy}^T(t) =$$

$$[r_1^{ENV}(t + t_1^{xy}), \dots, r_l^{ENV}(t + t_l^{xy})]$$

第六步: 根据 Matlab GA 工具箱求解优化约束问题。

3.2 时频分析

时频分析可以滤除随机噪声等干扰信号。引入反射系数 R 和透射系数 T , 可以定量分析损伤对薄板中 Lamb 波传播特性的影响。步骤如下所述:

第一步: 用离散小波变换 (DWT) 对原始信号进行降噪处理, 本文采用 4 分解层数的 db4 小波取得很好的降噪效果。

第二步: 用连续小波变换 (CWT) 提取小波变换系数, 本文中 Merlet 小波效果显著。

第三步: 对上述去噪信号作 Hilbert 变换, 得其包络线信号, 用于后续损伤特征量提取。

当激振器和传感器位于损伤同侧时, 采用反射系数 R 表征损伤程度:

$$R = \frac{\text{CWT}_r}{\text{CWT}_i} \quad (7)$$

当激振器和传感器位于损伤两侧时, 采用透射系数 T 表征损伤程度:

$$T = \frac{\text{CWT}_t}{\text{CWT}_i} \quad (8)$$

式中, 角标 r 是损伤反射波包; 角标 t 是损伤透射波包; 角标 i 是入射波波包。CWT 是对给定信号, 沿中心频率求其小波系数。

4 实验方法与信号处理

4.1 实验系统

实验系统由波形发生器 (ET3325)、激光测振仪 (OFV - 505、OFV - 5000)、功率放大器 (KH - 7602M)、计算机、铝板 (长度 800 mm、宽度 800 mm、厚度 2 mm) 和 PZT (材料 P - 51、直径 10 mm、厚度 2 mm) 组成, 如图 3 所示。

激励信号数学描述如公式 (9) 所示。ET3325 产生激励信号, 然后被分成两路。一路是参考信号, 输出给激光测振仪, 用来判断信号零时刻。另一路是检测信号, 输出给功率放大器, 然后通过 PZT 在铝板中产生 Lamb 波。响应信号被激光测振仪采集、显示、保存, 实现信号激励和采集控制。离面位移检测时, 在检测点位置粘贴反光带, 提高检测精度。并且对每组“激振器 - 传感器”重复采集 10 组响应信号, 通过多次采集提高信噪比。

$$V(t) = \frac{1}{2}A \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi f_c t}{n}\right) \right] \cdot \sin(2\pi f_c t) \quad (9)$$

式中, A 是信号幅值; f_c 是激励信号中心频率; n 是周期数。

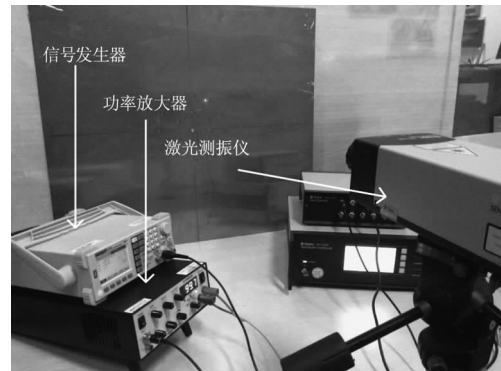


图 3 实验系统现场图

Fig. 3 Experimental system

4.2 一维方向损伤实验

当铝板中存在损伤时, 损伤会影响 Lamb 波的传播。下面研究一维方向上不同尺寸的矩形状通孔损伤对 Lamb 波传播特性的影响。

图 4 是一维方向损伤实验示意图。假设铝板的左下角为坐标原点 O , 建立二维坐标系 Oxy 。激振器 PZT (位置 A), 激光测振点 (位置 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4), 其位置坐标见表 1。

设置相同功率放大倍数, 分别对无损伤和有损伤铝板进行扫频实验, 激励信号信号扫频频率范围从 50 kHz 到 400 kHz, 扫频间隔是 10 kHz。

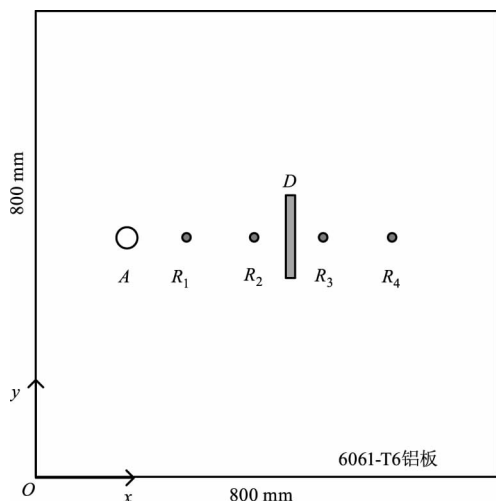


图4 一维方向损伤实验示意图

Fig. 4 Sketch for one-dimensional damage

表1 压电片和传感器检测点在铝板中的坐标

Tab. 1 Coordinate of actuator and sensors

编号	x / mm	y / mm
A	300	400
R_1	350	400
R_2	400	400
R_3	450	400
R_4	500	400

4.3 实验结果分析

在 50 kHz 到 400 kHz 扫频范围内, 计算点 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 检测信号中峰值最大波包 A0 模态的传播速度, 并绘制传播速度与频厚积的关系图, 如图 2 所示。从图中可以看出, A0 模态群速度的实验结果与其理论结果十分吻合。那么已知激励信号中心频率时, 可以用理论群速度进行 Lamb 波模态识别。

在扫频范围内, 从理论频散曲线可以看出 Lamb 波中主要是 S0 和 A0 模态。于是在 R_1 检测点, 提取响应信号中 S0 和 A0 模态直达波幅值, 如图 5 所示。可以看出, 该实验系统可以同时激励和接收 S0 和 A0 模态。当频率在 200 kHz 附近时, A0 模态幅值最大, S0 模态幅值相对而言非常小。由此分析, 200 kHz 附近得到的 Lamb 波模态较为单一。在此, 确定损伤检测时, 激励信号的中心频率为 200 kHz。

中心频率为 200 kHz 时, R_1 点检测信号如图 6 所示。第一个波包是 S0 模态直达波, 第二个波包是 A0 模态直达波, 第三和第四个波包是边界反射波, 且模态未知。可以看出激光测振仪里面检测时, 检

测信号中同时存在 S0 和 A0 模态, 但明显以 A0 模态为主。实验结果证实: 激光测振仪离面检测时, 检测信号以 A0 模态为主, 且信噪比高。与此同时, 从图 6 中可以看出 S0 模态比 A0 模态传播速度快, 这与其理论相符合。

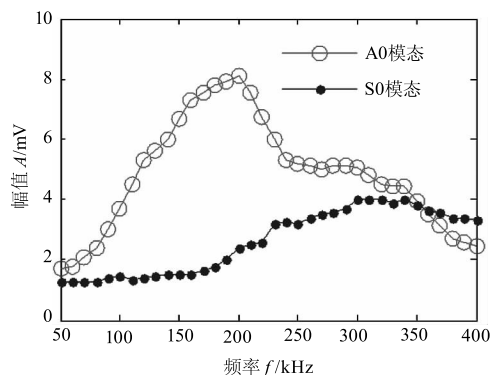
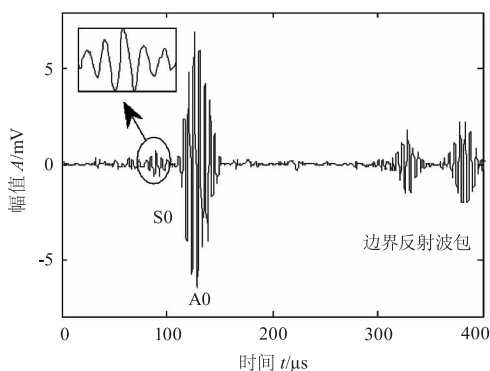
图5 点 R_1 处 S0 和 A0 幅值

Fig. 5 Amplitudes of S0 and A0 mode

图6 200 kHz 中心频率时 R_1 点检测信号Fig. 6 Received signal at the frequency of 200 kHz at the place of R_1

对于不同长度的损伤, 从 R_1 点检测信号中提取损伤反射回波 A0 模态, 如图 7 所示。反射回波 A0 模态的到达时间几乎一致, 并且反射回波 A0 模态幅值随通孔长度增加而增大。由此分析, 损伤大小对 Lamb 波传播速度的影响很小。但会影响信号衰减程度。

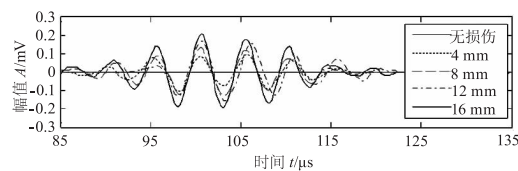
图7 200 kHz 时 R_1 点损伤反射回波 A0 模态示意Fig. 7 Reflected A0 mode at the frequency of 200 kHz at the place of R_1

图 8 是 200 kHz 中心频率时不同尺寸通孔损伤透射波示意图。从图中可以看出透射波 A0 模态的波形几乎一致, 但损伤透射波 A0 模态幅值随着通

孔长度增加而减小。由此可知, Lamb 波传播时,遇到损伤会发生能量衰减。

根据上述时频分析方法,求得 R_1 点反射系数 R 和 R_4 点透射系数 T ,如图 9 所示。

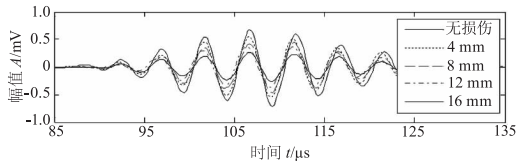


图 8 200 kHz 时 R_4 点损伤透射波 A0 模式示意

Fig. 8 Transmitted A0 mode at the frequency of 200 kHz at the place of R_4

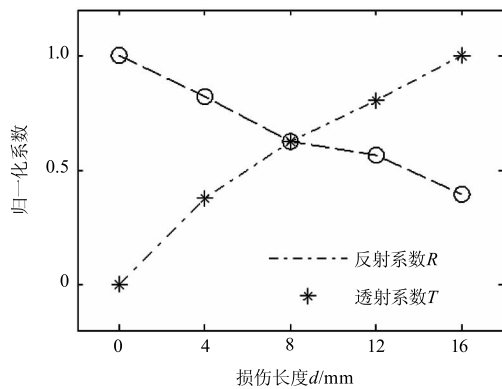


图 9 R_1 点反射系数和 R_4 点透射系数

Fig. 9 Coefficient distribution of R and T

明显看出,反射系数对损伤变化的灵敏度比透射系数高。因此,后文二维定位实验时,采用 Lamb 波反射法。

4.3 二维阵列成像实验

二维阵列成像实验示意图如图 10 所示,在压电片 $A(400,400)$ 周围均匀布置 12 个传感器检测点 S 。压电片发出 Lamb 波,经损伤 $D(529,475)$ 反射后,被传感器阵列 S 接收。其中传感器阵列周向半径 $R = 50\text{mm}$,相邻两传感器检测点间的夹角 $\theta = \pi/6$ 。在 Oxy 坐标系中, A 、 S 、 D 的坐标满足:

$$\begin{cases} x_s = 400 + R\cos(i\theta) \\ y_s = 400 + R\sin(i\theta) \\ i = 0, 1, \dots, 11 \\ I = 12 \end{cases} \quad (9)$$

4.4 成像结果分析

从原始响应信号中提取损伤残余信号,综合上述成像算法,建立损伤分布场 E_{xy} 。成像图中白色圆圈代表压电片,白色星号为激光阵列检测点,白色叉号是实际损伤中心位置。

传统的“延迟-求和”幅值算法^[8]得到的成像结果,如图 11 所示。图中颜色最深的区域与实际损

伤位置比较接近,但由于噪声和随机干扰太多,成像结果的信噪比较低,定位精度发生偏离。

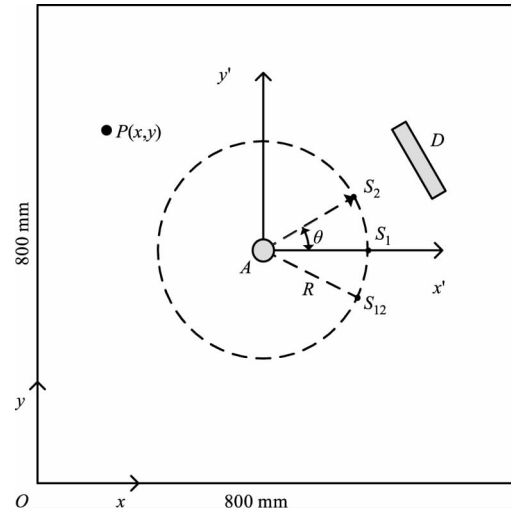


图 10 二维阵列成像实验示意图

Fig. 10 Sketch for two-dimensional imaging

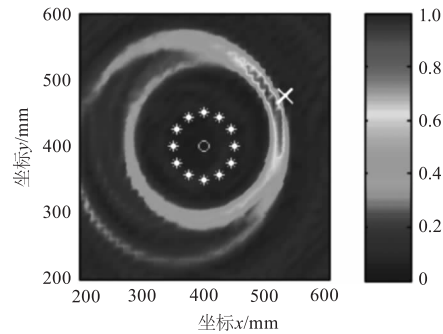


图 11 幅值成像图

Fig. 11 Image of "Delay-and-Sum" algorithm

对上述成像结果存在的问题,引入预定义的方向权矢量 $\vec{e}$ 后,用 MVDR 成像法得到的成像结果,如图 12 所示。与图 11 相比,相同残余信号在方向权矢量 $\vec{e}$ 的约束下,其信噪比和定位精度明显得以提高,但仍然存在部分噪声。

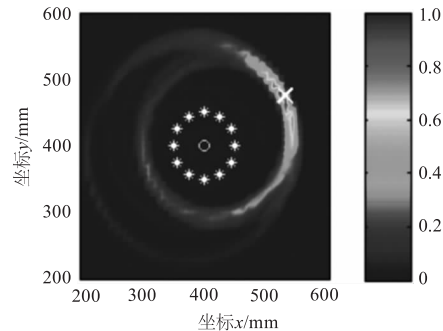


图 12 MVDR 损伤成像图(无 GA 优化)

Fig. 12 Image of MVDR (Without GA)

根据 Matlab GA 工具箱,对预定义的方向权矢

量 $\vec{e}$ 进行遗传优化,得到的成像结果,如图 13 所示。对比图 12 和图 13,发现优化后成像结果的信噪比得到了明显提升,并且颜色最深的区域形状接近于矩形形状,与实际损伤形状相似。

综上成像结果,MVDR 成像法极大地提高损伤成像质量,这对于开展二维多损伤定位成像实验提供了理论和实验依据。

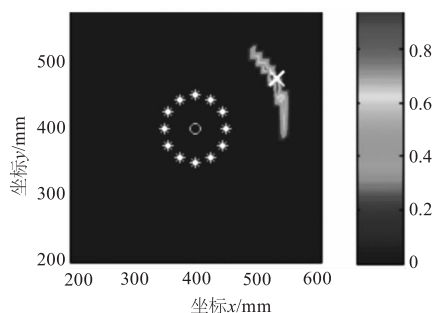


图 13 MVDR 损伤成像图(GA 优化)

Fig. 13 Image of MVDR (With GA)

5 总结

本文利用单压电片激励和激光测振仪接收离面接收的方式,获得较为单一的 A0 模态,结合 MVDR 成像法对铝板中通孔缺陷进行了实验研究。得出以下结论:

(1) Lamb 波遇到损伤时,发生反射和透射。随着损伤长度的增大,其反射系数增大,透射系数减小。

(2) 反射系数比透射系数对损伤长度变化的灵敏度较高。

(2) MVDR 成像法中的方向权矢量,可以提高损伤位置分辨能力。

参考文献:

[1] Park S, Yun C B, Roh Y. Damage diagnostics on a welded zone of a steel truss member using an active sensing network system[J]. NDT & E International, 2007, 40(1): 71-76.

[2] HE Cunfu, ZHEN Yang, ZHOU Jinjie, et al. In-plane and out-plane displacement of lamb waves test with laser vibrometer[J]. Journal of mechanical engineering, 2012, (08): 6-11. (in Chinese)

何存富,郑阳,周进节,等. 基于激光测振仪的兰姆波离面和面内位移检测[J]. 机械工程学报, 2012, (08): 6-11.

- [3] ZHANG Zhao, XIAO Yingchun, LI Minhang, et al. Applications of laser ultrasonic nondestructive testing technology in aeronautical carbon fiber coposite[J]. Advances in aeronautical science and engineering, 2014, (03): 269-274. (in Chinese)
- 张昭,肖迎春,李闵行,等. 激光超声技术在航空碳纤维复合材料无损检测中的应用[J]. 航空工程进展, 2014, (03): 269-274.
- [4] Pohl J, Mook G. Laser-vibrometric analysis of propagation and interaction of lamb waves in CFRP-plates[J]. CEAS Aeronautical Journal, 2013, 4(1): 77-85.
- [5] Mallet L, Lee B C, Scarpa F, et al. Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: II. Lamb waves for damage detection[J]. Smart Materials & Structures, 2005, 13(2): 261-269.
- [6] WANG Jie, ZHAO Fei, ZHANG Ying, et al. Measurement of tympanic membrane motion in normal adults using laser doppler vibrometry[J]. Chinese Journal of Otology, 2016, (03): 330-333. (in Chinese)
- 王杰,赵非,张颖,等. 成人正常鼓膜振动激光多普勒测振仪检测研究[J]. 中华耳科学杂志, 2016, (03): 330-333.
- [7] ZHENG Enming, LI Yuansong, CHEN Xinhua, et al. Improved bearing resolution approach for MVDR beam-forming[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, (02): 188-193. (in Chinese)
- 郑恩明,黎远松,陈新华,等. 改进的最小方差无畸变响应波束形成方法[J]. 上海交通大学学报, 2016, (02): 188-193.
- [8] Jennifer 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.
- [9] Croxford A J, Wilcox P D, Drinkwater B W, et al. Quantification of environmental compensation strategies for guided wave structural health monitoring[J]. Proc SPIE, 2008, 463(2087): 2961-2981.