

# 多阵列超声导波频相联控激励下复合材料损伤聚焦成像方法

胡权耀, 钟永腾

(温州大学 机电工程学院, 温州 325035)

**摘要:** 针对超声导波相控阵方法中相位控制参数缺少距离和频率变量的不足, 提出了多阵列超声导波频相联控激励下复合材料损伤聚焦成像方法。相比于标准的超声导波相控阵技术, 该方法通过在各阵元上设置不同的激励频率, 实现了在复合材料板上对点的角度-距离聚焦扫描和损伤定位。首先, 建立了多阵列超声导波频相联控激励聚焦信号模型; 其次, 设计了一种分布式多输入多输出(MIMO)线性阵列, 对监测区域逐点聚焦扫描, 并建立阵列超声导波损伤回波接收, 运用多重信号分类(MUSIC)方法, 实现复合材料损伤成像。玻璃纤维板的仿真和试验结果表明, 该方法对复合材料具有较好的聚焦性能, 较高的损伤成像和定位精度。

**关键词:** 超声导波阵列; 频相联控; 角度-距离聚焦; 复合材料; 损伤成像

**中图分类号:** TG115.28      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6656(2023)11-0024-06

## Damage focusing imaging method for composite materials using multiple array of ultrasonic guided wave frequency-phased joint control excitation

HU Quanyao, ZHONG Yongteng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of the ultrasonic guided wave phased array method, this paper proposed a damage focusing imaging method for composite materials using multiple array of ultrasonic guided wave frequency-phased joint control excitation. Compared with the standard ultrasonic guided wave phased array technology, this method realized angle-distance focused scanning and damage location on composite material plates by setting different excitation frequencies on each array element. Firstly, the signal model of multi-array ultrasonic guided wave frequency and phase joint control excitation focusing was established; Secondly, a distributed multiple-input multiple-output (MIMO) linear array was designed to focus and scan the monitoring area point by point, and the array ultrasonic guided wave damage echo reception was established, and the multiple signal classification (MUSIC) method was used to realize composite material Imaging of damage. The simulation and experimental results of glass fiber plate showed that the method had good focusing performance, high damage imaging and positioning accuracy for composite materials.

**Key words:** ultrasonic guided wave array; frequency-phase joint control; angle-distance focus; composite material; damage imaging

复合材料由于其良好的材料性能, 在工业领域

中使用广泛。在严峻的服役条件下, 复合材料会不可避免地受到冲击而产生损伤, 影响设备的安全运行<sup>[1]</sup>。利用结构健康监测技术对复合材料结构进行损伤监测识别, 是一种避免产生安全问题的重要手段。在各种损伤监测方法中, Lamb 波被公认为复合材料结构损伤识别的最有效工具之一<sup>[2]</sup>。而基于

**收稿日期:** 2023-01-19  
**作者简介:** 胡权耀(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为结构健康监测, 20451438003@stu.wzu.edu.cn  
**通信作者:** 钟永腾(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为结构健康监测, zhongyongteng@wzu.edu.cn

Lamb 波的压电超声相控阵技术, 可以通过时间延迟控制波束聚焦, 实现大范围 and 特定区域内的损伤扫查, 具有识别范围广、识别速度快的特点<sup>[3]</sup>。因此, 关于相控阵及其聚焦方法的研究一直是结构健康监测领域中的热门。LIU 等<sup>[4]</sup>通过符号相干因子图像和 TFM 图像的融合, 识别到铝板中的紧凑多损伤; KUDELA 等<sup>[5]</sup>将相控阵聚焦与色散补偿结合, 有效提高了损伤成像的分辨率; TENG 等<sup>[6]</sup>将延迟乘法求和与全聚焦法结合, 实现了一种非线性合成聚焦方法。近年来, 尽管大量学者致力于加强相控阵聚焦能力, 但其波束指向在距离维度上始终恒定<sup>[7]</sup>, 本质都是对角度的聚焦, 对一些距离相关的损伤识别仍存在限制。

频控阵这一概念最早是由 ANTONIK 和 WICKS 提出的<sup>[8]</sup>, 之后众多学者对其展开了研究。KHAN 等<sup>[9]</sup>通过阵元间对数方式增加频率偏移, 在目标位置实现具有单个最大值的波束图, 即点聚焦; 之后, 其又与 BASIT 等<sup>[10]</sup>提出汉宁窗非均匀频率偏移方式, 增强其点聚焦特性; XU 等<sup>[11]</sup>在频控聚焦基础上引入 MIMO 阵列配置, 实现频控阵目标距离-角度的联合估计; CHEN 等<sup>[12]</sup>通过空间距离多普勒聚焦的方法, 实现频控阵对动目标的检测; ZHENG 等<sup>[13]</sup>推导了米波 FDA-MIMO 雷达的信号模型, 并提出了一种广义 MUSIC 算法。雷达领域的研究表明, 频控阵可以实现距离-角度的点聚焦, 且配合一些特定算法能够达到对目标角度-距离的高分辨率估计。

基于此, 文章从雷达领域引入频控阵, 将其与 Lamb 波结合, 提出了多阵列超声导波频相联控激励下复合材料损伤聚焦成像方法。首先, 建立了多阵列超声导波频相联控激励聚焦信号模型; 其次, 设计了一种分布式多输入多输出 (MIMO) 线性阵列, 对监测区域逐点聚焦扫查, 并建立阵列超声导波损伤回波接收, 运用多重信号分类 (MUSIC) 方法, 实现复合材料损伤成像; 最后, 通过玻璃纤维复合材料的仿真和试验对该方法进行了验证。

## 1 频相联控激励信号建模

压电超声相控阵由多个相互独立的压电晶片组成, 阵列中各阵元发射相干激励信号, 通过相互叠加形成一个能量较大的波阵面, 使信号获得增益。一维超声相控阵列示意如图 1 所示,  $xOy$  平面内,  $2N+1$  个压电阵元沿着  $x$  轴等间距排列形成一维超声相控阵列。

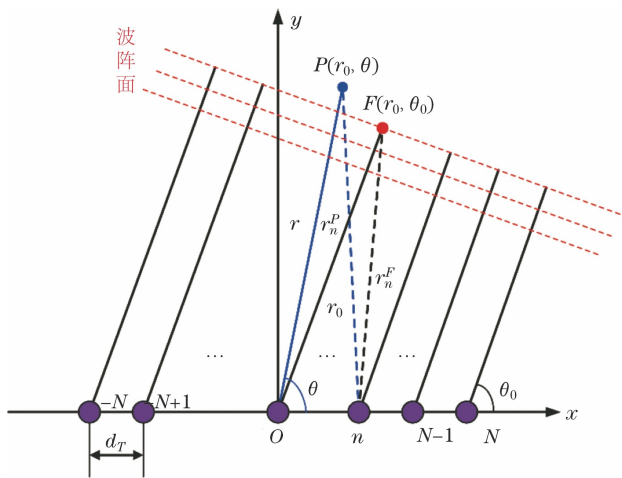


图 1 一维超声相控阵列示意

图 1 中, 灰色圆圈为压电阵元,  $d_T$  为阵元间距。以阵列中心为原点建立笛卡尔坐标系, 则中心阵元位置坐标为  $(0, 0)$ , 称其为基准阵元; 设  $P(r, \theta)$  为坐标系平面中任意一点,  $r$  为  $P$  点与中心阵元的距离,  $\theta$  为  $P$  点与  $x$  轴正方向的夹角, 则第  $n$  个阵元到点  $P$  的距离为

$$r_n^P = \sqrt{(r \sin \theta)^2 + (r \cos \theta - n \cdot d_T)^2} \quad (1)$$

当任意点  $P$  位于阵列远场时

$$r_n^P \approx r - n d_T \cdot \cos \theta \quad (2)$$

则第  $n$  个阵元激励信号到点  $P$  的相位为

$$\varphi_n^P = \frac{2\pi}{\lambda} r_n^P = \frac{2\pi f}{c} r_n^P \quad (3)$$

式中:  $c$  为激励信号传播速度;  $\lambda$  为波长;  $f$  为激励信号频率。

在不施加任何时间延迟的情况下, 相控阵激励信号的最大能量集中于阵列法线方向, 当需要对某目标点  $F(r_0, \theta_0)$  聚焦时, 需要对各阵元施加一组时间延迟, 定义第  $n$  个阵元时间延迟为  $t_n^{PA}$ , 则  $t_n^{PA} = \frac{r_n^F}{c}$ ,  $r_n^F$  为第  $n$  个阵元到聚焦点的距离, 其表达式与 (1) 类似。

与相控阵不同的是, 频控阵各阵元相对于中心基准阵元附加了一个远小于其载频的频率偏移, 使发射信号频率中心产生偏移, 但主要频率成分重叠。频控阵与相控阵聚焦方式对比如图 2 所示。

频控阵各阵元激励信号频率不同, 第  $n$  个阵元信号为

$$S_n^{FDA}(t) = \exp(j 2\pi f_n t), 0 \leq t \leq T \quad (4)$$

式中:  $f_n$  为第  $n$  个阵元激励信号频率,  $f_n = f_0 + \Delta f_n$ ,  $f_0$  为中心基准阵元激励信号频率,  $\Delta f_n$  为两者间的频率偏移。

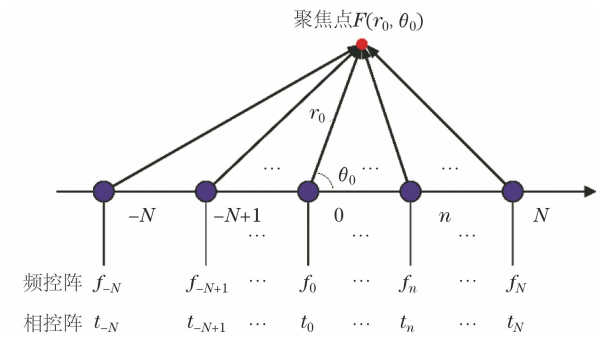


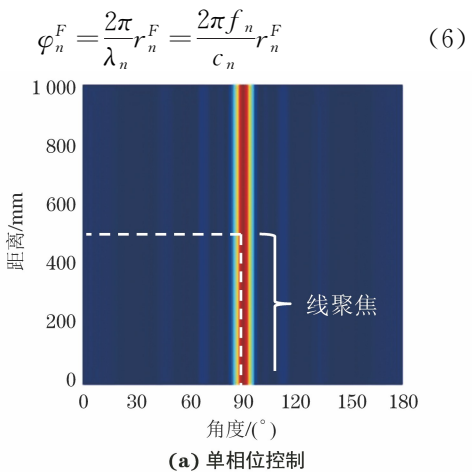
图 2 频控阵与相控阵聚焦方式对比

频控阵各阵元传播至任意点  $P(r, \theta)$  的信号总和为

$$A_{FDA}(t, r, \theta) = \sum_{n=-N}^N \exp \left[ j 2 \pi f_n \left( t - \frac{r_n^P}{c_n} \right) \right] \quad (5)$$

式中:  $c_n$  为第  $n$  个压电阵元激励信号  $f_n$  对应的传播速度。

第  $n$  个阵元激励信号到聚焦点  $F(r_0, \theta_0)$  的相位为



根据相位  $\varphi_n^F$  和各阵元频率  $f_n$  的关系,可以联合控阵列信号在任意点上聚焦,文章将此种聚焦方式称为频相联控激励聚焦,阵列对点  $F(r_0, \theta_0)$  的聚焦信号总和为

$$\begin{aligned} B_{FDA}(t, r_0, \theta_0) &= \sum_{n=-N}^N \exp \left[ j 2 \pi f_n \left( t + \frac{r_n^F}{c_n} - \frac{r_n^P}{c_n} \right) \right] \\ &= \sum_{n=-N}^N \exp \left( j 2 \pi f_n \left\{ t + \frac{1}{c_n} \cdot \left[ \sqrt{(r_0 \sin \theta_0)^2 + (r_0 \cos \theta_0 - n \cdot d_T)^2} - \sqrt{(r \sin \theta)^2 + (r \cos \theta - n \cdot d_T)^2} \right] \right\} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

当聚焦点位于远场时,信号总和为

$$B_{FDA}(t, r_0, \theta_0) = \sum_{n=-N}^N \exp \left( j 2 \pi f_n \left\{ t + \frac{1}{c_n} \cdot \left[ (r_0 - r) - n d_T (\cos \theta_0 - \cos \theta) \right] \right\} \right) \quad (8)$$

通过方向图比较单相位控制聚焦和频相联控聚焦性能,两者方向图对比如图 3 所示。

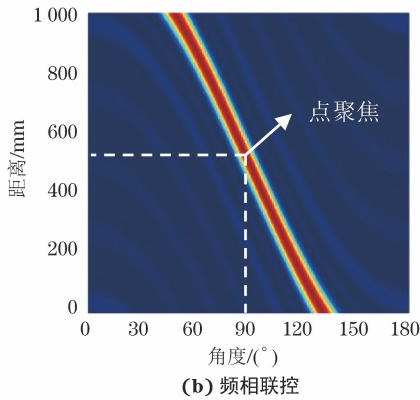


图 3 单相位控制与频相联控聚焦方向图对比

在方向图中,对点  $(500 \text{ mm}, 0^\circ)$  进行聚焦,单相位控制只能在角度上进行线聚焦,相比之下,施加频率偏移后,频相联控波束产生角度-距离依赖特性,能够实现对点的聚焦。

2 损伤定位成像方法

设计了一种分布式多输入多输出(MIMO)线性阵列(见图 4),其由两个子阵列组成,发射端子阵列通过频相联合控制激励聚焦将激励信号汇聚于目标点处,接收端子阵列负责获取响应信号,两阵列均为线性等间距阵列,且传感器数量、阵元间距均一致。

激励端选用单位幅值的汉宁窗调制五波峰窄带信号作为激发信号,对点  $F(r_0, \theta_0)$  聚焦时,各阵元

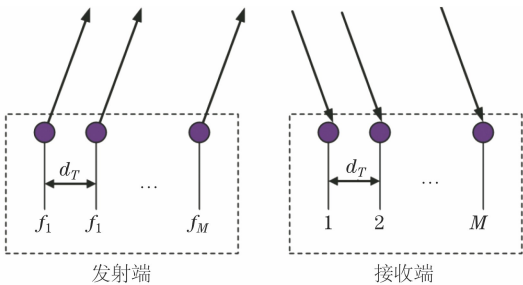


图 4 MIMO 阵列示意

激励信号为

$$\begin{aligned} S_n^{\text{Lamb}}(t) &= \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 - \cos \left( \frac{2 \pi f_n t + \varphi_n^F}{5} \right) \right] \cdot \\ &\quad \sin(2 \pi f_n t + \varphi_n^F), 0 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (9)$$

通过相位  $\varphi_n^F$ 、频率  $f_n$  以及  $(r_0, \theta_0)$  的关系,可

控制阵列 Lamb 波在任意聚焦点  $F(r_0, \theta_0)$  的角度-距离聚焦,  $\varphi_n^F$  的变换使得阵列 Lamb 波聚焦位置变换, 从而实现对结构的逐点聚焦扫查。当聚焦位置与损伤位置重合时, 损伤处产生一个能量较大的散射波, 该散射波经过一段时间传播后被接收端各阵元接收。对接收端各阵元响应信号进行处理, 加窗去除直达波和边界发射, 得到只包含损伤散射的信号, 将第  $m$  个接收阵元的损伤散射信号记为  $x_m(t)$ 。对于整个接收端, 所接收到的所有损伤散射信号表示为矩阵形式

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), \cdots, x_m(t), \cdots, x_M(t)]^T \quad (10)$$

式中:  $M$  为接收阵元总数。

再对  $\mathbf{X}(t)$  的协方差矩阵进行特征值分解, 然后利用 MUSIC 算法, 通过发射阵列导向矢量和接收阵列导向矢量等参量进行损伤位置估计。

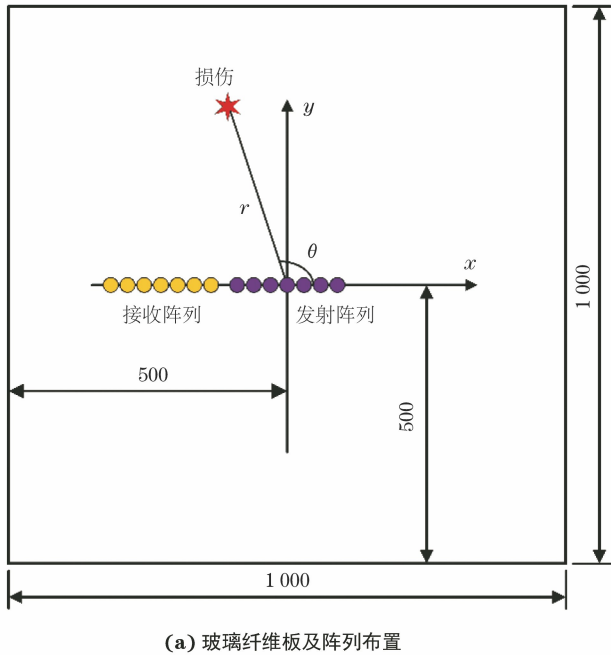
### 3 仿真与试验

#### 3.1 仿真分析

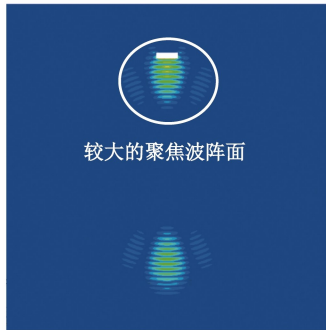
在 ABAQUS 有限元仿真软件中建立结构模型, 选用玻璃纤维板(含损伤)为模拟对象, 材料的弹

性模量  $E_1, E_2, E_3$  均为 6.9 GPa; 剪切模量  $G_{12}, G_{13}$  均为 4.65 GPa,  $G_{23}$  为 1.6 GPa; 泊松比  $\mu_{12}, \mu_{13}$  均为 0.344,  $\mu_{23}$  为 0.46; 单层板铺层顺序为  $[0_2/90_4/0_2]_s$ , 每层厚度为 0.125 mm; 板的尺寸(长×宽×高)为 1 000 mm×1 000 mm×2 mm, 以板中心为原点建立坐标系, MIMO 阵列发射端阵列中心坐标为 (0, 0), 接收端阵列中心坐标为 (-160, 0), 两阵列间距均为 10 mm, 玻璃纤维板及阵列布置示意图 5(a)所示。

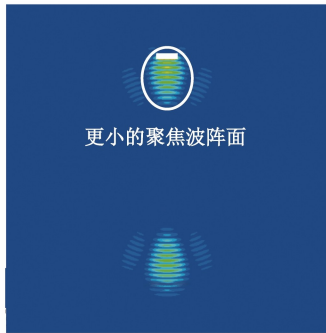
如图 5(b)和 5(c)所示, 通过相位控制和频相联控对点(300 mm, 0°)进行聚焦, 令相位控制各阵元频率和频相联控基准频率  $f_0$  均为 50 kHz, 频相联控频率偏移分别为 -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 kHz, 各阵元频率为 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53 kHz, 图中, 频相联控聚焦的波阵面能量更为集中, 对点的聚焦能力更强。基准频率和频偏不变, 用频相联控方式对点(300 mm, 105°)进行聚焦, 聚焦信号在玻璃纤维板中的各时刻传播情况如图 6 所示。图 6 中, 各阵激励信号于  $t = 0.25$  ms 时刻聚焦至损伤位置, 并产生一个损伤散射波, 该散射波在 0.45 ms 时刻被接收阵列接收。



(a) 玻璃纤维板及阵列布置



(b) 单相位控制聚焦



(c) 频相联控聚焦

图 5 仿真结构模型及两种聚焦方式对比

如图 7(a)所示, 接收阵列各阵元响应信号由 3 部分组成, 第一个波包为直达波, 第二个波包为损伤散射, 之后的波包为边界反射, 加窗取出散射信号, 计算协方差及特征值, 根据 MUSIC 算法得到空间

谱估计结果如图 7(b)所示, 谱峰位置为损伤定位成像结果, 为 (298 mm, 104°), 与实际损伤位置的距离误差为 2 mm, 角度误差为 1°, 定位结果与实际位置较符合。



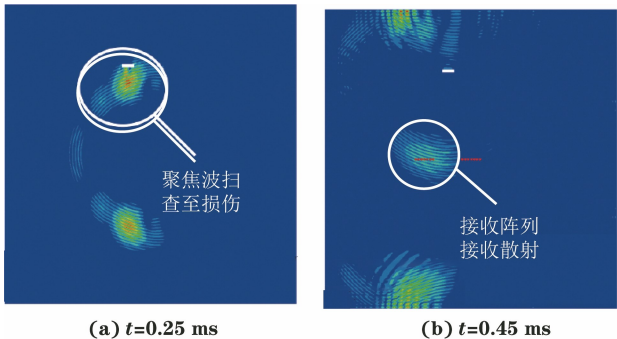


图6 玻璃纤维板中频相联控聚焦信号传播情况(仿真)

3.2 试验分析

为验证方法在工程实际中的可行性,以玻璃纤

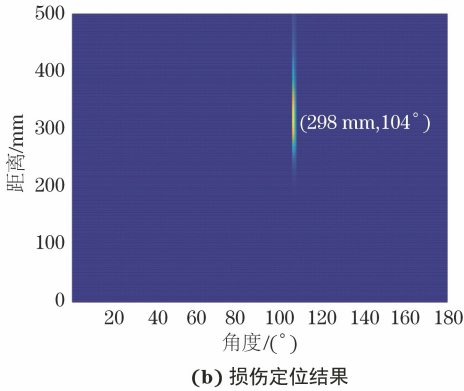
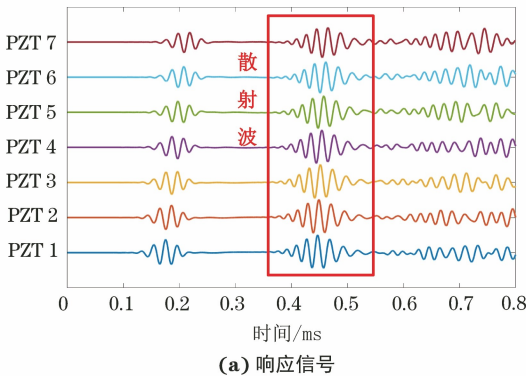


图7 玻璃纤维板的响应信号和损伤定位结果(仿真)

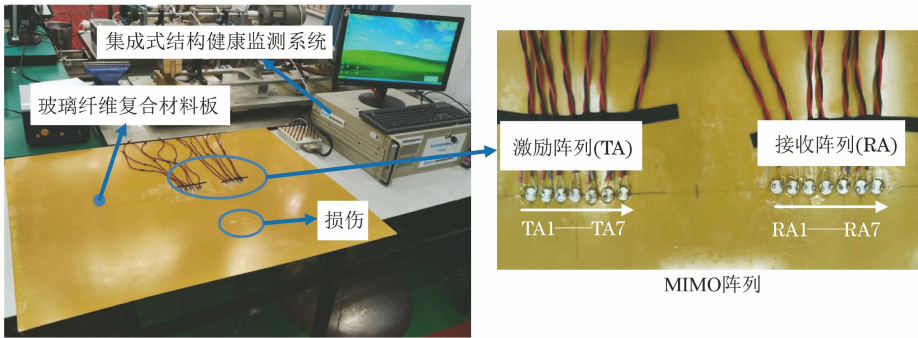


图8 验证试验装置示意

设定激励端中心基准阵元频率  $f_0$  为 50 kHz, 频率偏移分别为  $-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$  kHz, 则各阵元激励信号频率为 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53 kHz。与仿真不同的是, 发射端每个阵元单独进行一次激励, 再由接收端获取响应信号。接收阵列响应信号共 49 组, 分别为 TA1 至 RA1, TA1 至 RA2, TA1 至 RA3, ..., TA7 至 RA7。图 9(a) 所示为 RA1 到 RA7 接收到的未聚焦的 TA4 激励信号, 从信号图上看, 未聚焦的响应信号包含两个较为明显的波包, 首波包为串扰, 由导线间的电磁感应引起, 次波包为直达波, 由于 Lamb 波能量衰减过大, 并未出现明显

维复合材料板为对象进行试验, 试验装置示意图 8 所示。玻璃纤维复合材料板的尺寸(长×宽×高)为 1 300 mm×800 mm×2 mm, 板的铺层顺序为  $[0_2/90_4/0_2]_s$ , 每层厚度为 0.125 mm。试验中使用的压电陶瓷传感器型号为 PSN-33, 各传感器的直径为 8 mm, 厚度为 0.48 mm, 共布置 14 个相同型号的传感器, 构成 MIMO 线性阵列, 阵元间距为 10 mm。以板中心为原点建立坐标系, 激励阵列中心坐标为 (0, 0), 损伤位置为  $(-53, 193)$ , 其极坐标位置为  $(200\text{ mm}, 75^\circ)$ 。

的损伤散射和边界反射。此外, 串扰出现的时间恰好为信号激励的时间, 通过直达波包络峰值和串扰包络峰值恰好可以计算不同频率下的波速。对 49 组信号进行频相联合聚焦合成, 聚焦点位置为  $(200\text{ mm}, 75^\circ)$ , 得到聚焦信号如图 9(b) 所示。

聚焦后, 散射信号明显, 证明该聚焦方法对于 Lamb 波能量衰减大的材料有可行性, 在损伤散射波处加窗, 计算其协方差矩阵及特征值, 代入 MUSIC 算法, 得到损伤成像结果如图 10 所示。损伤成像结果为  $(197\text{ mm}, 76^\circ)$ , 距离误差为 3 mm, 角度误差为  $1^\circ$ , 估计位置与实际位置较符合。在板

中布置不同位置的损伤,再次进行聚焦扫查与损伤成像,其定位成像结果及误差如表 1 所示,表中,

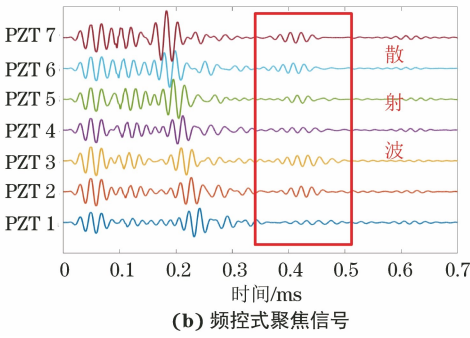
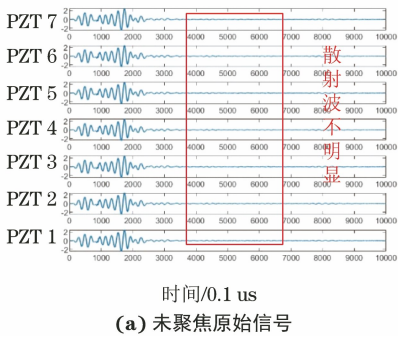


图 9 复合材料板的未聚焦与频控式聚焦信号(试验)

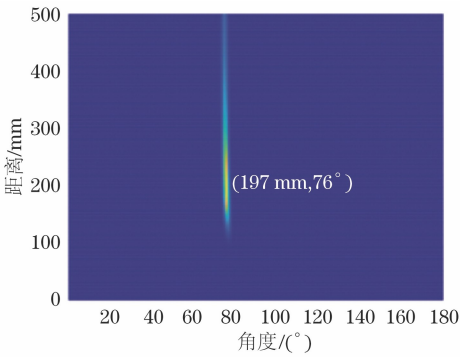


图 10 复合材料板损伤成像结果(试验)

表 1 不同位置损伤定位结果及误差

实际位置	定位结果	角度误差/ (°)	距离误差/ mm
(100 mm, 105°)	(99 mm, 103°)	2	1
(200 mm, 135°)	(202 mm, 132°)	3	2
(300 mm, 75°)	(298 mm, 76°)	1	2
(400 mm, 105°)	(392 mm, 102°)	3	8
(300 mm, 120°)	(296mm, 116°)	4	4

4 结语

针对超声导波相控阵方法中相位控制参数缺少距离和频率变量的不足,提出了多阵列超声导波频相联控激励聚焦下复合材料损伤成像方法。首先,建立了多阵列超声导波频相联控激励聚焦信号模型;其次,设计了一种分布式多输入多输出(MIMO)线性阵列,对监测区域逐点聚焦扫查,并建立阵列超声导波损伤回波接收,运用多重信号分类(MUSIC)方法,实现复合材料损伤成像。玻璃纤维板仿真和试验验证结果表明该方法对复合材料具有较好的聚焦性能和较高的损伤成像定位精度。

相比于标准的超声导波相控阵技术,该方法通过在各阵元上设置不同的激励频率,实现在复合材料板上对点的角度-距离聚焦扫查和损伤定位,且具

5 个损伤的定位结果与实际位置误差依然较小,角度上最大误差为 4°,距离上最大误差为 8 mm。

有较好的聚焦能力和较高的损伤成像分辨率,为无损检测和结构健康监测技术提供了一种新思路,在复合材料损伤监测中具有一定的应用前景。但频相联控激励聚焦方法对各向异性非常强的复合材料进行监测时,需要考虑不同角度的 Lamb 波传播速度,依次对各阵元不同频率的 Lamb 波进行速度补偿,算法实现上较为复杂。

参考文献:

[1] ROCHA H, SEMPRIMOSCHNIG C, NUNES J P. Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites: a review[J]. Engineering Structures, 2021, 237: 112231.

[2] SU Z Q, YE L, LU Y. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: a review[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295 (3/4/5): 753-780.

[3] HUAN Q, CHEN M T, LI F X. A high-sensitivity and long-distance structural health monitoring system based on bidirectional SH wave phased array[J]. Ultrasonics, 2020, 108: 106190.

[4] LIU Z H, SUN K M, SONG G R, et al. Damage localization in aluminum plate with compact rectangular phased piezoelectric transducer array[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 70/ 71: 625-636.

[5] KUDELA P, RADZIENSKI M, OSTACHOWICZ W, et al. Structural Health Monitoring system based on a concept of Lamb wave focusing by the piezoelectric array[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 108: 21-32.

[6] TENG D, LIU L S, XIANG Y X, et al. An optimized total focusing method based on delay-multiply-and-sum for nondestructive testing[J]. Ultrasonics, 2023, 128: 106881.

(下转第 58 页)

跟踪方法:使用缺陷成像检测工件内部缺陷的位置及大小;使用底波成像判断工件内部是否存在缺陷,使用位置成像测量工件厚度及缺陷深度;使用检测闸门同时跟踪上表面回波闸门和底面回波闸门,能够更加精准地检测工件内部缺陷的位置及大小。

参考文献:

[1] 常少文,高志凌,崔二炜,等. 焊接钢管超声波自动探伤中的闸门设置方法[J]. 无损探伤,2013,37(5):6-9.

[2] 竺科仪,徐志农,祝建礼. 变厚度曲面复合构件超声检测中的自动波形跟踪技术[J]. 机床与液压,2007,35(1):177-179.

[3] 杨辰龙. 曲面变厚度工件超声检测中的波形自动跟踪技术研究[C]//中国自动化学会控制理论专业委员会 C 卷. 烟台:IEEE Press,2011:1274-1277.

[4] 吴思源,周晓军,李雄兵,等. 变厚度航空锻件超声 C

扫描技术研究[J]. 传感技术学报,2006,19(4):1052-1055.

[5] 张婷,刘奎,周辉,等. 变厚度碳纤维/环氧树脂基复合材料层压板的多电子闸门 C 扫成像[J]. 无损检测,2013,35(7):16-18.

[6] 张继敏,周晖,刘奎,等. 大厚度复合材料结构的超声相控阵检测成像与缺陷定量表征[J]. 无损检测,2017,39(3):35-39.

[7] 徐莹,张德魁,郝威,等. 变厚度复合材料结构超声反射法成像的缺陷识别与定量表征[J]. 无损检测,2021,43(7):21-26,30.

[8] 吴玄,周世圆,张翰明,等. 变壁厚回转体零件超声检测动态闸门技术研究[J]. 中国测试,2018,44(5):103-107.

[9] 郑慧峰. 曲面复合材料工件超声自动检测中若干关键问题的研究[D]. 杭州:浙江大学,2009.

[10] 郑晖,林树青. 超声检测[M]. 2 版. 北京:中国劳动社会保障出版社,2008:74.



(上接第 29 页)

[7] 王文钦,邵怀宗,陈慧. 频控阵雷达:概念、原理与应用[J]. 电子与信息学报,2016,38(4):1000-1011.

[8] WICKS M C, ANTONIK P. Frequency diverse array with independent modulation of frequency, amplitude, and phase:US7319427[P]. 2008-01-15.

[9] KHAN W, QURESHI I M, SAEED S. Frequency diverse array radar with logarithmically increasing frequency offset [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2015,14:499-502.

[10] BASIT A, QURESHI I M, KHAN W, et al. Beam pattern synthesis for an FDA radar with hamming window-based nonuniform frequency offset[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2017,16:

2283-2286.

[11] XU J W, LIAO G S, ZHU S Q, et al. Joint range and angle estimation using MIMO radar with frequency diverse array [J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2015,63(13):3396-3410.

[12] CHEN X, CHEN B, HUANG Y, et al. Frequency diverse array radar signal processing via Space-Range-Doppler focus (SRDF) method[J]. 雷达学报, 2018, 7(2): 183-193.

[13] ZHENG G M, SONG Y W. Signal model and method for joint angle and range estimation of low-elevation target in meter-wave FDA-MIMO radar [J]. IEEE Communications Letters,2022,26(2):449-453.

欢迎网上投稿      欢迎订阅      欢迎刊登广告