

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412556

改进型密集阵列全聚焦成像算法的碳纤维 复合材料板损伤定位研究*

刘增华^{1,2}, 王美灵², 朱艳萍¹, 鲁朝静², 何存富^{1,2}

(1. 北京工业大学信息科学技术学院 北京 100124; 2. 北京工业大学机械与能源工程学院 北京 100124)

摘要:本文针对各向异性碳纤维复合材料板的损伤定位问题,提出改进型密集阵列全聚焦成像方法。首先,考虑碳纤维复合材料板的各向异性,通过实验分析超声导波在板中的传播特性,得到沿不同传播方向的群速度值。其次,对密集型传感器阵列的参数进行分析和优化研究,分别对不同阵列参数即阵元间距和阵元数量进行指向性函数的数值分析,优化阵列的参数,以保证阵列主瓣较窄、旁瓣较低且无栅瓣。然后,提出了一种考虑碳纤维复合材料板各向异性的改进型密集传感器阵列板结构缺陷定位算法。使用超声导波在碳纤维复合材料板中沿不同传播方向的群速度值,对全聚焦算法进行修正,并利用虚拟聚焦原理对板结构进行全聚焦成像。最后,通过布置碳纤维复合材料孔洞损伤实验,对基于密集阵列全聚焦成像方法的定位精度进行分析。实验结果表明,改进型密集阵列全聚焦成像算法的定位精度为 1.00 mm,相较于使用单一群速度值,该方法在定位孔洞损伤缺陷时具有更高的精度。

关键词: 碳纤维复合材料; 超声导波; 密集阵列; 全聚焦成像算法

中图分类号: TH-17 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on damage localization of carbon fiber composite plates based on improved dense array total focusing imaging algorithm

Liu Zenghua^{1,2}, Wang Meiling², Zhu Yanping¹, Lu Zhaojing², He Cunfu^{1,2}

(1. School of Information Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. College of Mechanical and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In this paper, in order to solve the problem of damage localization of anisotropic carbon fiber composite plates, an improved dense array total focusing imaging method was proposed. Firstly, considering the anisotropy of the carbon fiber composite plate, the propagation characteristics of the ultrasonic guided waves in the plate were analyzed by experimental methods, and the group velocity values along different propagation directions were obtained. Secondly the parameters of the dense sensor array were analyzed and optimized, and the directional functions of different array parameters, include the spacing of array elements and the number of array elements, were numerically analyzed, and the parameters of the array were optimized to ensure that the main lobe of the array was narrow, the side lobes were low, and there was no grating lobe. Then, an improved structural defect location algorithm for dense sensor array plates considering the anisotropy of carbon fiber composite plates was proposed. The total focusing algorithm was modified by using the ultrasonic guided waves group velocity values along different propagation directions in the carbon fiber composite plate, and the total focusing imaging of the plate structure was carried out by using the virtual focusing principle. Finally, the positioning accuracy of the dense array total focus imaging method was analyzed by arranging the hole damage experiment of carbon fiber composites. The experimental results showed that the positioning accuracy of improved dense array total focusing imaging algorithm method is 1.00 mm, compared to using a single group velocity value had high accuracy in locating hole damage defects.

Keywords: carbon fiber composite; ultrasonic guided waves; dense array; total focusing method algorithm

0 引言

碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced plastics, CFRP)是指以碳纤维为增强相,以树脂为基体^[1],经热压或真空灌注而得到的复合材料,具有优良的耐高温、耐摩擦、耐腐蚀等性能^[2],广泛应用于航空航天等领域^[3]。然而,在复合材料的加工成型过程中,由于制备工艺的复杂性和环境控制等一系列不确定因素,材料容易出现孔洞、分层、夹杂物等缺陷。这些缺陷影响材料的质量和使用寿命的安全性。

超声导波技术具有检测设备便携、无污染危害、检测范围大、检测效率高、多参数优化等优点,是检测复合材料损伤最实用、最有效的技术手段之一^[4]。然而,由于碳纤维复合材料各向异性和层状结构的影响,在无损检测中使用单个传感器无法满足灵敏度和信息处理的要求,难以检测复合材料层状结构中的损伤。因此与传统的单个传感器相比,使用超声传感器阵列可以提供更大的灵活性和卓越的性能^[5]。

传感器阵列是以一定排列方式排列的多个传感器元件的阵列,一般分为两种阵列形式:稀疏型传感器阵列和密集型传感器阵列^[6]。基于检测阵列形式的不同,目前,针对碳纤维复合材料的稀疏阵列缺陷定位方法主要有时反聚焦成像方法^[7]、延时累积成像方法^[8]、层析成像方法^[9]。然而,稀疏型传感器阵列在进行实验时主要对阵列内部区域进行缺陷检测,其检测范围具有一定的局限性,并且在接收到的时域信号中,即包含直达波信息也包含前向散射信息和后向散射信息,其成像质量会受到相干信号的影响,如果不引入基准信号,这个现象会影响成像的对比度^[10]。密集传感器阵列可以对被测试样全域进行检测,其具有多种阵列形式:除了简单的线阵列,还有平面阵列、弧形阵列、交叉阵列、环形阵列^[11]、矩形阵列等^[12]。针对碳纤维复合材料的密集阵列损伤成像方法主要有超声相控阵成像方法、多重信号分类法、波数滤波法^[13],以及无基准方法、环境参数补偿等方法与各类成像方法的结合^[14]。密集型传感器阵列相较于稀疏阵列,不仅结构紧凑,不需要基准信号,而且数据量更大,有利于缺陷的识别和成像。

超声导波相控阵检测技术中的全聚焦法(total focusing method, TFM)是一种基于全矩阵数据采集(full matrix capture, FMC)的虚拟聚焦后处理成像技术,广泛应用于碳纤维复合材料板结构的损伤检测中^[15-17]。全矩阵捕获是获取阵列传感器中每对发射器-接收器元件的完整时域信号集的一种数据采集方法^[18],提供来自阵列传感器在特定位置的最大可能独立信息量。但在使用全聚焦算法对碳纤维复合材料进行缺陷检测时,需精确传

播速度才能实现准确的损伤监测,而实际应用中的CFRP结构复杂,材料各向异性、厚度等导致难以获取精确的波速信息。目前针对碳纤维复合材料声时计算,基于模型分为3类:第1类是将复合材料视为各向同性介质;第2类则是将复合材料均质化处理;第3类则考虑复合材料的非均匀性和各向异性,采用一些噪声线示踪的方法进行声时计算^[19]。Yan等^[20]针对碳纤维复合材料中不同铺层导致复合材料内部速度发生改变的现象,考虑了1种速度变化测量方法,提供应用于全聚焦成像算法的速度分布,然而,它主要测量沿厚度方向传播时不同传播方向的速度变化。Cao等^[21]提出了一种基于射线理论的均质化方法来描述角部件中的波速分布,将不同层的碳纤维复合材料板简化为一种新的均质各向异性材料,但该方法不适用于具有较强各向异性的复合材料板。Li等^[22]通过建立CFRP板的声学模型,提出了一种基于模型的CFRP板超声传播时间计算方法,对全聚焦成像算法的延时进行修正,以增强超声成像效果,但主要考虑了层厚方向的传播速度变化。Liu等^[23-27]分析了密集型阵列的参数设置,并在成像方法上将全聚焦成像结果与符号相干因子成像结果相结合,得到复合图像,大大提高了铝板结构损伤检测成像的分辨率和对比度,但该方法未在各向异性复合材料板中进行验证。

针对上述研究现状及存在的问题,本文考虑了超声导波在碳纤维复合材料板中沿不同方向进行传播时的速度变化,提出一种改进型密集阵列全聚焦成像方法进行损伤定位研究。首先,根据碳纤维复合材料板中超声导波传播理论,设置群速度测定实验系统进而获得导波随传播方向变化的群速度分布结果。对采集到的实验数据进行Savitzky-Golay滤波以消除噪声并提取导波沿不同方向传播的趋势信息,达到群速度数据的平滑和拟合效果。使用得到的导波群速度数据对传统全聚焦成像方法中使用单一群速度的局限性进行改进。并结合密集传感器阵列的数据采集优势,对密集阵列的传感器间距和个数对指向性的影响进行分析。设置4×4的密集阵列排布形式,以实现对复合材料板孔洞损伤检测。最后,开展碳纤维复合材料板的孔洞损伤实验,以验证所提出的密集阵列全聚焦成像方法在定位碳纤维复合材料板孔洞损伤方面的性能。

1 复合材料板超声导波传播特性

频散曲线分析是说明导波在结构中传播机理的有效工具,也是完整性评估的必要工具。得到超声导波在复合板中各个方向传播的频散曲线,对导波模式选取和正确激励导波具有指导意义,可为缺陷检测和辨识提供理论参考信息。针对碳纤维复合材料板的频散曲线求解方法主要有数值解析法、有限元法^[28]、半解析有限元法^[29]、

传递矩阵法^[30]、全局矩阵法^[31]和谱元法^[32]等。本文选取试样材质为 T700 12K 的碳纤维复合材料板,如表 1 所示为该试样的材料参数,主要包括 M1 和 M2 两种材料。各层的铺层方向和所用材料如表 2 所示。尺寸参数为长 450 mm,宽 450 mm,厚 3 mm。

表 1 试样的材料参数

Table 1 Material parameters of the samples

材料	牌名	名称	克重 /(g·m ⁻²)	厚度 /mm
M1	200gsmX1000	Twill carbon fiber	200	0.21
	mm/RC44	fabric prepreg		
M2	400gsmX1000	Carbon fiber	400	0.4
	mm/RC42	fabric prepreg		

表 2 材料分布及铺层方向

Table 2 Material distribution and layup direction

铺层顺序	材料	铺层方向/(°)
1	M1	0/90
2	M2	±45
3	M2	±45
4	M2	0/90
5	M1	0/90
6	M2	0/90
7	M2	±45
8	M2	±45
9	M1	0/90

在实际应用中,导波由超声传感器产生并向四周传播,因此根据复合材料板中各个传播方向的超声导波理论频散曲线,得到特定模态的速度随传播方向的变化趋势,对于实际的复合材料缺陷检测和精确定位十分必要。由于复合材料结构的复杂性,为了实现精确地损伤定位,采用实验的方式对其在不同方向上的传播速度进行确定。

建立群速度测试实验系统如图 1 所示。实验系统包括计算机、AFG3021B 函数发生器、功率放大器、MDO4054C 型号混合域示波器和压电传感器。激励信号由任意函数信号发生器产生,然后通过功率放大器对信号发生器产生的脉冲信号进行电压放大,之后加载到压电激励传感器进行超声导波的激励,并通过压电接收传感器阵列对超声导波信号进行接收,利用混合域示波器进行导波信号的采集和存储。压电激励传感器厚度 0.5 mm,直径 8 mm,粘接在碳纤维复合材料板中心位置处,可在周向均一地激励超声导波。压电传感器接收阵列布置方式为沿复合材料板边缘处,可以有效地避免碳纤维复合材料板中的边界反射波包影响。各个接收传感器之间的角度间隔为 5°,共设置

73 个接收点。采样点数设置为 10 000,并对每个记录的波形信号进行 128 次平均。

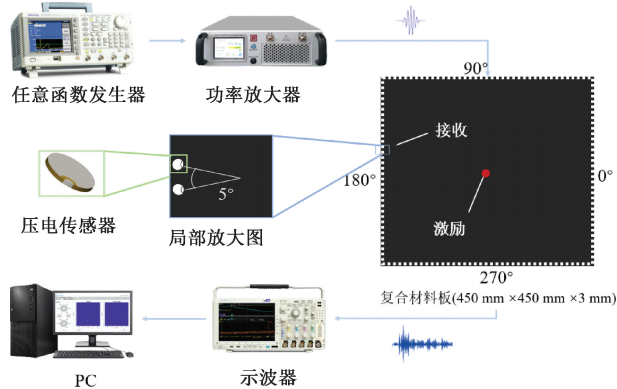


图 1 群速度测定实验系统

Fig. 1 Experimental system for group velocity determination

激励信号选用经汉宁窗调制的正弦函数,其表达式为:

$$x(t) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi f_c t}{N}\right) \right] \sin(2\pi f_c t) \quad (1)$$

式中: f_c 为激励信号的中心频率, N 为信号的周期数。

在本文中选择 $f_c = 75$ kHz, $N = 3$,即激励信号选择经汉宁窗调制的三周期正弦信号,中心频率 $f_c = 75$ kHz。激励信号时域波形和频域波形如图 2 所示。

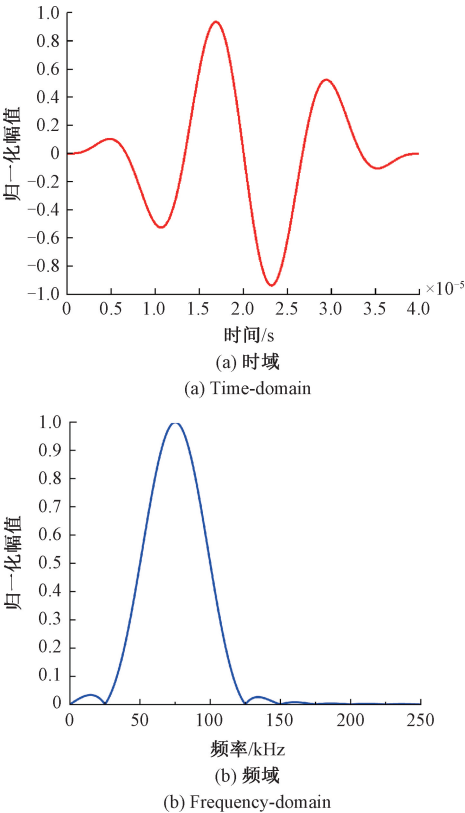


图 2 激励信号

Fig. 2 Excitation signal

图3所示为部分位置处接收到的原始时域波形,其中第1个波包为激励信号,即图3中第1个箭头所指区域覆盖的范围,第2个波包为接收到的 S_0 模态,如图3中第2个箭头所指区域所示,第3个波包为接收到的 A_0 模态,如图3中第3个箭头所指区域所示。在距离和时间已知的情况下,可以得到在激励频率为75 kHz下的 S_0 和 A_0 模态群速度幅度随传播方向变化时的极坐标图如图4所示。其中黑色原点表示通过实验采集到的信号计算出的实验值,为了消除信号中的噪声影响,对实验群速度值进行Savitzky-Golay平滑处理,曲线是经过平滑处理后的结果。

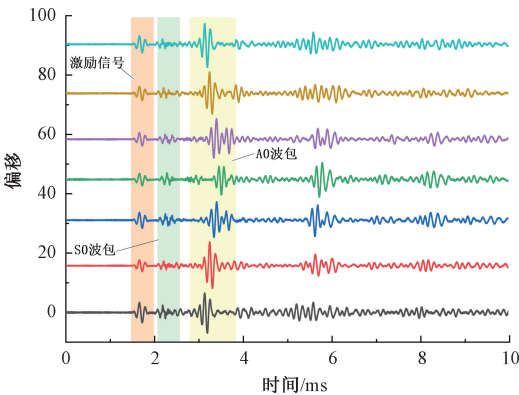
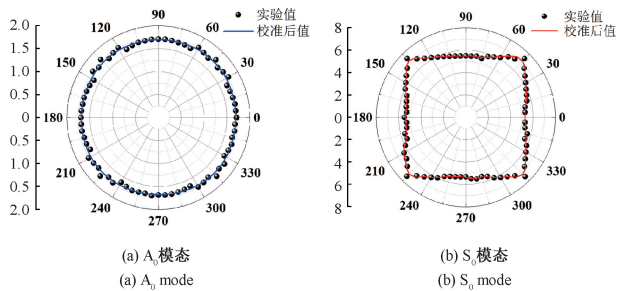


图3 原始时域信号

Fig. 3 Original time-domain signals

由图4可知,针对本文研究的碳纤维复合材料板,在激励频率为75 kHz下 S_0 模态的群速度界于5.33~6.55 km/s之间, A_0 模态的群速度界于1.60~1.71 km/s之间, S_0 模态群速度大于 A_0 模态群速度,并且 A_0 模态群速度更加稳定,其沿着不同方向进行传播时,速度变化值远小于 S_0 模态群速度。因此,通过碳纤维复合材料板的群速度采集和校准后,用得到的 A_0 模态不同群速度值进行损伤定位。



(a) A_0 模态
(a) A_0 mode

(b) S_0 模态
(b) S_0 mode

图4 复合材料板中 S_0 和 A_0 模态群速度的极坐标图

Fig. 4 Polar diagram of S_0 and A_0 mode group velocities in composite plate

对于该激励频率下, A_0 模态传播波长 λ 的计算,选择 0° 方向进行频散曲线采集实验,实验系统如图5所示,

在复合材料板中心位置处设置激励点,使用厚度为0.5 mm、直径为6 mm的压电传感器进行激励,激励信号选择三角脉冲,其时域波形和频域波形如图6所示。从距离激励10 mm处开始,每间隔1 mm使用激光超声检测接受系统进行数据接收,共设置165个接收点,采样时间设置为0.000 3 s,采样点数为10 000。由于复合材料板尺寸边界的限制会产生边界处的反射波,边界反射波提取频散曲线分布非常不利,因此通过在边界设置阻尼递增吸收层来减小边界处的反射。

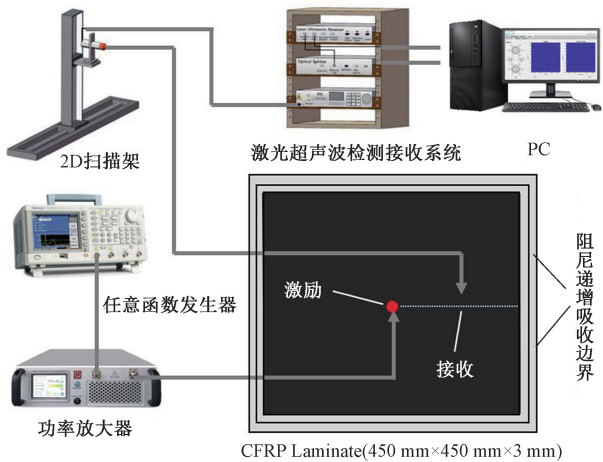
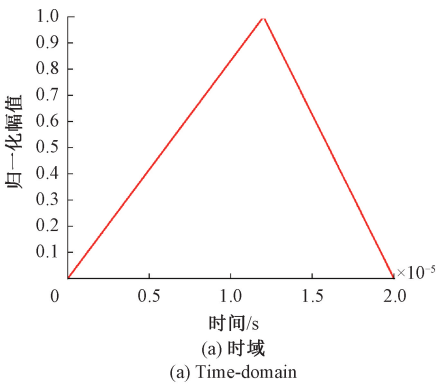
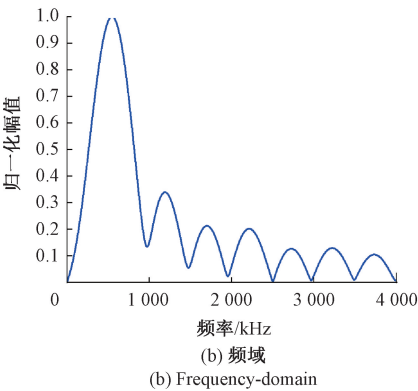


图5 频散曲线采集实验系统

Fig. 5 Dispersion curves acquisition experimental system



(a) 时域
(a) Time-domain



(b) 频域
(b) Frequency-domain

图6 三角脉冲激励信号

Fig. 6 Triangle pulse excitation signal

对采集到的实验数据通过式 (2) 进行二维傅里叶变换, 得到在 0° 方向传播时的导波频率波数分布如图 7 所示, 提取图中 75 kHz 下的波数值为 0.38, 根据波数和波长之间的关系 $k = 2\pi/\lambda$ 可以计算出在 75 kHz 下的波长 $\lambda = 1 \div 0.38 \times 2\pi = 16.53 \text{ mm}$ 。

$$H(k, \omega) = \iint y(r, t) e^{-j(\omega t - kr)} dr dt \quad (2)$$

式中: k 是波数, ω 是频率, $H(k, \omega)$ 是频率波数分布, $y(r, t)$ 是接收到的时间距离信号。

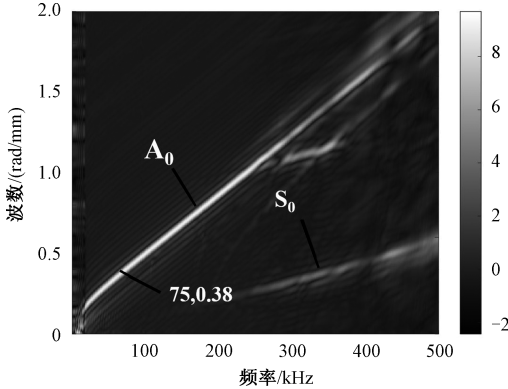


图 7 0° 方向导波频率波数分布情况

Fig. 7 Wavenumber distribution of guided waves frequency in the 0° direction

2 成像算法

2.1 连续小波变换

由于碳纤维复合材料中超声信号的高衰减特征, 接收到的缺陷回波幅值信号较小, 不易提取损伤特征信息, 且检测复合材料的超声信号具有时变特性, 即采集到的原始信号会受到板结构内部或者外部的一些因素所影响, 从而使信号含有大量的噪音信号, 这些冗余信息会严重影响后期的数据分析, 因此, 在成像之前对接收到的信号进行预处理非常重要^[33]。基于信号处理的特征提取方法, 可分为时域、变换域两种。鉴于小波变换在时频分析中有着较好的局部化的性质, 本文采用连续小波变换对实验数据进行预处理。

设定函数 $w(t) \in L^2(R)$, $W(\omega)$ 是 $w(t)$ 的傅里叶变换, 若 $W(\omega)$ 满足 $C_w = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|W(\omega)|}{\omega} d\omega < \infty$, 则称 C_w 有界, $w(t)$ 即可作为母小波或者基小波。对于时域信号 $s(t) \in L^2(R)$ 所对应母小波 $w(t)$ 的连续小波变换定义为:

$$CWT_w(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \bar{w}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中: a 为伸缩因子; b 为平移因子; $s(t)$ 为时域信号;

$\bar{w}$ 是 w 的复共轭; $w_{a,b}(t) = \bar{w}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 是母小波经过时间平移和尺度伸缩变换后的小波序列。

2.2 密集传感器阵列参数设计

传感器阵列的阵元排布方式会对阵列指向性有很大的影响^[34]。在本研究中采用一种密集型矩形的传感器阵列方式来对碳纤维复合材料板结构进行检测、分析和成像。在本研究中所应用的密集型矩形传感器阵列由沿 x 轴排列的线阵列和沿 y 轴排列的线型阵列组合而成, 如图 8 所示, 其沿 x 轴的阵元间距为 d , 沿 y 轴的阵元间距为 e , 并且其 x 轴、 y 轴方向的维度分别为 M 、 N 。

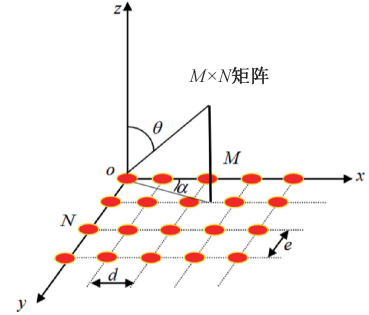


图 8 密集型矩形传感器阵列空间示意图

Fig. 8 Space diagram of compact rectangular sensor array

密集型传感器阵列的指向性分布函数表达式为:

$$D(\alpha, \theta, \alpha_0, \theta_0, \omega) = D_2(\alpha, \theta, \alpha_0, \theta_0, \omega) \cdot$$

$$D_3(\alpha, \theta, \alpha_0, \theta_0, \omega) \quad (4)$$

其中:

$$D_2(\alpha, \theta, \alpha_0, \theta_0, \omega) =$$

$$\frac{\sin\left[\frac{kMd}{2}(\cos\alpha\sin\theta - \cos\alpha_0\sin\theta_0)\right]}{M\sin\left[\frac{kd}{2}(\cos\alpha\sin\theta - \cos\alpha_0\sin\theta_0)\right]} \cdot \left| \frac{2J_1(k\sin\theta)}{k\sin\theta} \right| \quad (5)$$

$$D_3(\alpha, \theta, \alpha_0, \theta_0, \omega) =$$

$$\frac{\sin\left[\frac{kNe}{2}(\sin\alpha\sin\theta - \sin\alpha_0\sin\theta_0)\right]}{N\sin\left[\frac{ke}{2}(\sin\alpha\sin\theta - \sin\alpha_0\sin\theta_0)\right]} \cdot \left| \frac{2J_1(k\sin\theta)}{k\sin\theta} \right| \quad (6)$$

对于非相控阵列, 式 (4) 为:

$$D(\alpha, \theta, \omega) =$$

$$\frac{\sin\left[\frac{kNe}{2}(\sin\alpha\sin\theta)\right]}{N\sin\left[\frac{ke}{2}(\sin\alpha\sin\theta)\right]} \cdot \frac{\sin\left[\frac{kMd}{2}(\cos\alpha\sin\theta)\right]}{M\sin\left[\frac{kd}{2}(\cos\alpha\sin\theta)\right]} \cdot \left| \frac{2J_1(k\sin\theta)}{k\sin\theta} \right|^2 \quad (7)$$

式中: D 为指向性分布函数; J_1 为一阶柱贝塞尔函数; K 为波数, $k = 2\pi/\lambda$ 。

1) 密集阵列阵元间距的设计

由于阵元的间距会影响指向性分布, 研究不同阵元间距对于指向性的影响, 结果如图 9 所示。在本研究中, 将阵元的间距依次定为 $\lambda/2$ 、 λ 、 $3\lambda/2$ 、 2λ , 利用 MATLAB 对密集型传感器阵列的指向性进行了分析。如图所示, 当阵元间距等于 $\lambda/2$ 时没有栅瓣产生, 当阵元间距等于一个波长时, 指向性的主瓣宽度变窄, 有栅瓣产生。随着阵元间距的增大, 指向性图中主瓣宽度降低, 但是逐渐出现栅瓣并且栅瓣幅值增加, 当利用阵列进行研究时, 选取的阵元间距要保证低于 $\lambda/2$ 。在本研究中由于传感器为压电传感器, 其本身尺寸对整个阵列有一定的影响, 为了保证实验的准确性和便捷性, 选取的阵元间距为 $d(\lambda/2 < d < \lambda)$ 。

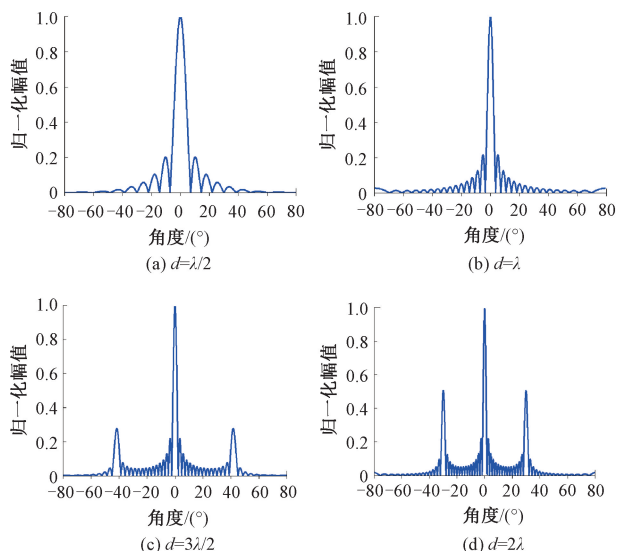


图9 不同阵元间距对于指向性的影响

Fig. 9 Beam patterns under different element spaces

2) 密集阵列阵元个数的设计

本节是在上节所得结论的前提下, 就阵元数量对阵列的指向性分布进行研究。由上节可知当阵元间距小于半个波长时, 没有栅瓣产生, 有利于对缺陷进行定位。在本节中取阵元的间距 $d = \lambda/2$, 波长为 16.53 mm, 对阵元数量参数 M 分别为 4、8、12、16 的情况下, 利用 MATLAB 对阵列的指向性进行分析, 得到结果如图 10 所示。从图中可以发现随着阵元数量的增加主瓣宽度逐渐变窄, 但是其旁瓣并没有明显的降低。此时阵列的正向分辨率得到了提高, 但是阵列的信噪比并没有得到提高。在其他参数不变的情况下, 逐渐增加阵元的数量, 发现阵列的主瓣宽度会持续降低如图 11 所示。当阵元数量低于 10 时, 主瓣的归一化宽度变窄的速度较快; 当阵元数量超过

20 时, 则变化比较缓慢。由于实验场地, 实验所用传感器的影响, 阵元的数量不能无限增加。在本研究中采用 16 个阵元来进行实验研究。

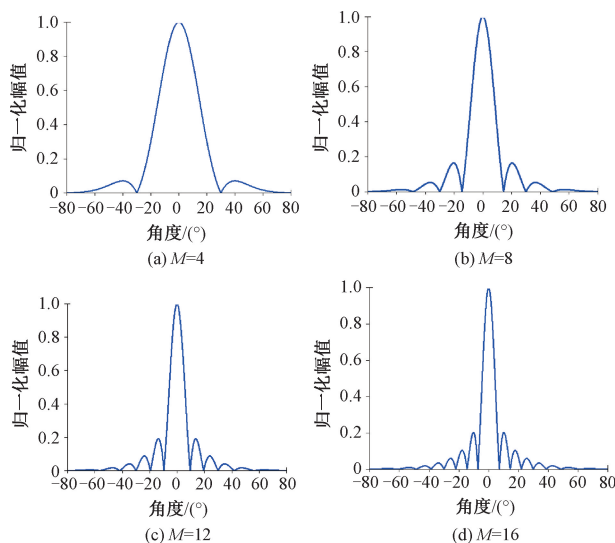


图10 不同阵元数量对阵列指向性的影响

Fig. 10 Beam pattern under different element number

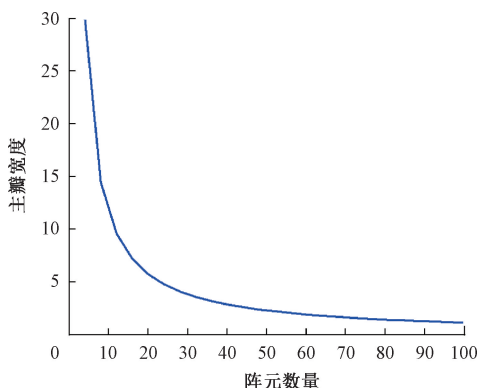


图11 阵元数量对于主瓣宽度的影响

Fig. 11 Main lobe width as a function of element number

2.3 改进型密集阵列全聚焦成像方法

由图 4 可知在各向异性的复合材料板中 A_0 模态和 S_0 模态的传播速度与方向有关。因此, 在使用全聚焦成像算法对碳纤维复合材料板进行缺陷检测时, 需要对其进行合理改进。

本文采用的密集型矩形传感器阵列如图 12 所示, 阵元的横向间距为 d_1 , 纵向间距为 d_2 , 共有 R 个阵元。阵列中所有传感器设为发射接收传感器, 采集超声回波时域信号, 包括激励传感器序列、接收传感器序列和时间序列的三维数据, 即全矩阵数据^[35], 采集到的全矩阵数据如图 13 所示。数据采集过程如下: 传感器 i 作为激励源, 其余传感器依次接收回波信号, 将收集到的时域信号定

义为 S_{ij} , 其中 $i = 1, 2, 3, \dots, R, j = 1, 2, 3, \dots, R, i \neq j$ 。通过依次激励每个传感器, 得到 $R \times (R - 1)$ 组全矩阵数据。

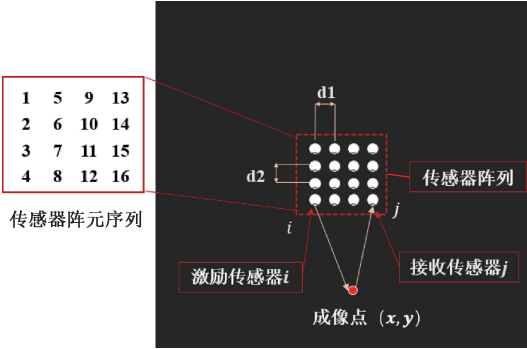


图 12 密集型矩形传感器阵列示意图

Fig. 12 Schematic diagram of a dense rectangular sensor array

		激励传感器阵元					
		1	2	...	i	...	R
接收传感器阵元	1	—	S_{21}	...	S_{i1}	...	S_{R1}
	2	S_{12}	—	...	S_{i2}	...	S_{R2}
	...	...	...	—	...	...	...
	j	S_{1j}	S_{2j}	...	—	...	S_{Rj}
	...	...	...	...	...	—	...
	R	S_{1R}	S_{2R}	...	S_{iR}	...	—

图 13 全矩阵数据

Fig. 13 Full matrix data

全聚焦成像法^[36]利用采集到的全矩阵数据, 对待检测空间中的每个点进行虚拟聚焦成像显示。具体步骤如下: 将待测块的二维空间划分为离散坐标点, 每个坐标点都视为虚拟焦点, 用于激励传感器阵元 $i(x_i, y_i)$ 和接收传感器阵元 $j(x_j, y_j)$ 的组合。从接收阵列元素 $j(x_j, y_j)$ 接收的信号中, 确定空间中某一点 (x, y) 经过同等时间时的回波幅值, 即为该点 (x, y) 的成像幅值。因此, 在常规全聚焦成像方法中, 二维空间的成像振幅可以表示为:

$$I(x, y) = \left| \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^R S_{ij}(t_{ij}(x, y)) \right| \quad (8)$$

式中: S_{ij} 为激励阵列元素 i 和接收阵列元素 j 接收的超声回波信号。 R 为阵元的数量。

$t_{ij}(x, y)$ 为 i 传感器发出经过虚拟焦点后到达 j 传感器的渡越时间, 其计算公式可以表示为:

$$t_{ij}(x, y) = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}}{c} + \frac{\sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2}}{c} \quad (9)$$

式中: c 为待测试样中的声速。

由式 (9) 所表示的全聚焦算法中, 其传播速度恒定, 更适用于各向同性材质, 不能体现导波在各向异性复合材料板中的传播性质。激励传感器和接收传感器与各个虚拟焦点的传播示意图如图 14 所示, 对于任意激励阵列元素 $i(x_i, y_i)$ 和接收阵列元素 $j(x_j, y_j)$ 的组合, 其渡越时间的计算如式 (10) 所示。

$$T_{ij}(x, y) = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}}{c_g(\alpha_t)} + \frac{\sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2}}{c_g(\alpha_r)} \quad (10)$$

式中: $c_g(\alpha)$ 为传播角度为 α 时的群速度, α_t 为激励传感器到虚拟焦点的传播角度, α_r 为虚拟焦点到接收传感器的传播角度。

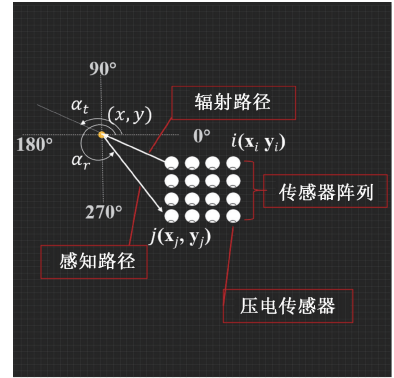


图 14 各个虚拟焦点传播角度计算示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the calculation of the propagation angle of each virtual focus

通过将复合材料板中各个方向的不同传播速度引入全聚焦缺陷定位成像算法中, 得到适用于各向异性复合材料板的全聚焦成像方法, 充分体现超声导波在各向异性复合材料板中的传播性质, 以此提高损伤定位精度。得到修正后的改进型密集阵列全聚焦成像方法的成像振幅 $I(x, y)$ 为:

$$I(x, y) = \left| \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M S_{ij}(T_{ij}(x, y)) \right| \quad (11)$$

式中: S_{ij} 为激励阵列元素 i 和接收阵列元素 j 接收的超声回波信号, $T_{ij}(x, y)$ 为 i 传感器发出经过虚拟焦点后到达 j 传感器的渡越时间。

该方法充分考虑了辐射路径和感知路径的传播速度

及其随传播方向变化情况。绘制激励频率 75 kHz 下, A_0 模态、 S_0 模态在 T700 12 K 的碳纤维复合材料板中沿不同传播方向的传播轮廓线如图 15 所示, 图中红点表示传感器的实际位置。从图中可以看出使用不同模态和不同方向速度值时, 其轮廓各有不同。当使用 A_0 和 S_0 模态时, 其传播轮廓线变化趋势如图 15(a)、(b) 所示, 与图 4(a)、(b) 中复合材料板中 S_0 和 A_0 模态群速度随传播方向的变化趋势具有较好的一致性。因此在全聚焦成像算法中对各个方向的传播速度进行修正, 能够体现碳纤维复合材料板各向异性对损伤概率分布的影响。

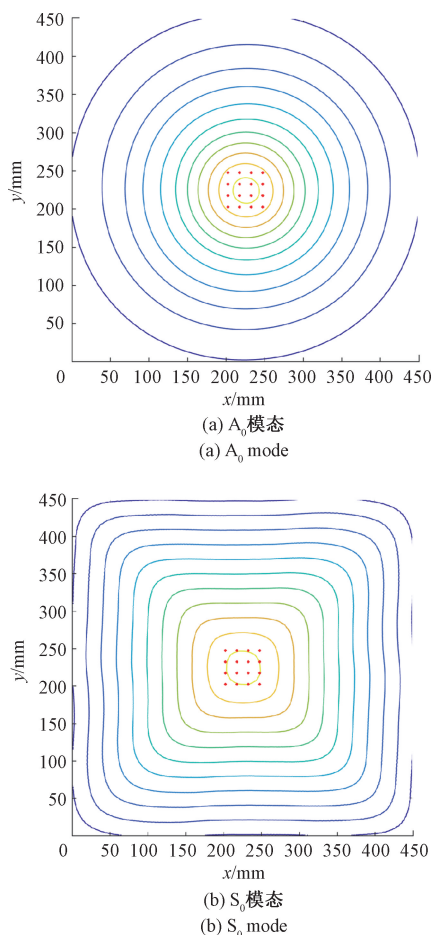


图 15 复合材料板中导波传播轮廓线分布图

Fig. 15 Guided wave propagation contour distribution map in a composite plate

3 实验验证

3.1 实验设置

实验样板实物图和人工缺陷布置示意分别如图 16(a)、(b) 所示, 复合材料板上预制 1 个圆形通孔缺陷, 以试件的左下角为坐标原点, 底边作为 x 轴, 左侧边

作为 y 轴, 缺陷的中心位置距离 x 轴为 358 mm, 距离 y 轴为 240 mm。缺陷直径为 10 mm。在复合材料板中间布置 4×4 共 16 个压电传感器组成的密集阵列, 该阵列由 16 个厚度为 0.5 mm、直径为 8 mm 的压电传感器组成。为了避免光栅瓣的形成^[37], 并结合 2.2 节 1) 的理论分析结果, 水平间距 d_1 和垂直间距 d_2 均设为 15 mm, 即小于激励频率下 A_0 波模态的一个波长。

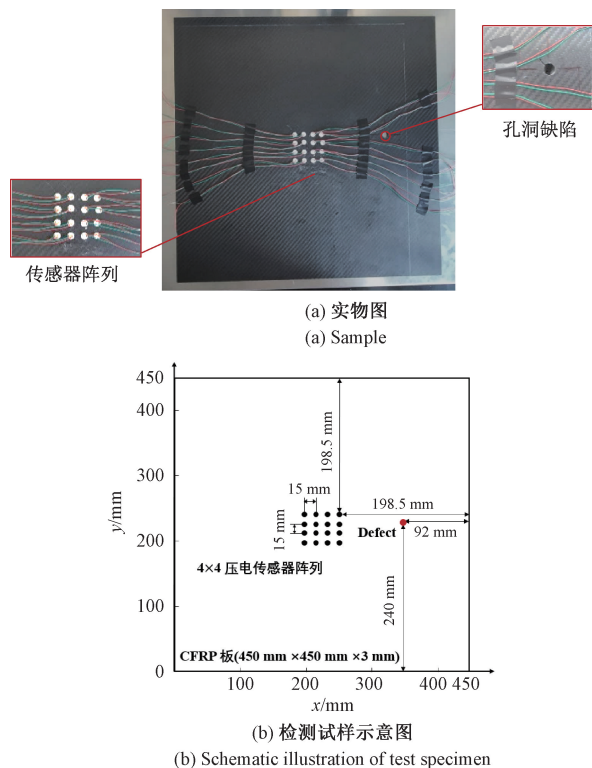


图 16 试样实物图及人工缺陷布置

Fig. 16 Physical diagram of the specimen and artificial defect arrangement

各个压电传感器的位置坐标如表 3 所示。各个传感器依次发射激励信号, 其余传感器作为接收传感器接收回波信号。采样点数设置为 10 000, 并对每个记录的波形信号进行 128 次平均。整个实验系统布置实物图如图 17 所示。激励信号与群速度测定实验保持一致, 选择经汉宁窗调制的 3 周期正弦信号, 中心频率 $f_c = 75$ kHz。

3.2 实验结果和讨论

将整个检测区域划分为大小均匀的 450×450 个网格节点, 在 x 方向和 y 方向的成像分辨率均为 1 mm, 针对图 16 所示的孔洞缺陷和阵列形式布置, 考虑各个阵元之间的传播距离远远小于波形经过缺陷再返回后的距离, 其传播的时间相对较小。该现象会在传感器阵列周围产生高亮度的点, 导致缺陷识别时成像对比度降低。因此, 在数据处理中通过去除各个传感阵元的直达 A_0 模态和

表 3 传感器阵元在板中的布置

Table 3 Sensor element distribution in the plate

阵元序号	坐标/mm	阵元序号	坐标/mm
1	(202.5,247.5)	9	(232.5,247.5)
2	(202.5,232.5)	10	(232.5,232.5)
3	(202.5,217.5)	11	(232.5,217.5)
4	(202.5,202.5)	12	(232.5,202.5)
5	(217.5,247.5)	13	(247.5,247.5)
6	(217.5,232.5)	14	(247.5,232.5)
7	(217.5,217.5)	15	(247.5,217.5)
8	(217.5,202.5)	16	(247.5,202.5)

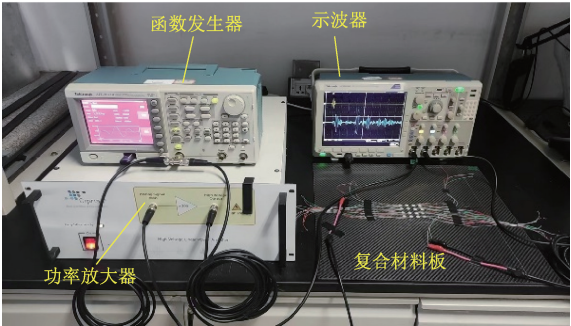


图 17 实验系统布置实物图

Fig. 17 Physical picture of the layout of the experimental system

S_0 模态消除此现象。

1) 接收时域信号预处理

图 18 所示为选取 1 号传感器作为激励传感器时,其他部分传感器接收到的原始时域波形,分析可知,由于各个传感器之间的距离较小,导致 A_0 和 S_0 模态的直达波信号与激励信号混叠,如图 18 中直达波包箭头所指,且 S_0 模态的速度过快,且反射回波幅值较小,如图 18 中 S_0 模态边界反射波包箭头所指区域,难以使用 S_0 模态进行缺陷的定位,而 A_0 模态在时域信号中可以清晰的呈现,如图 18 中

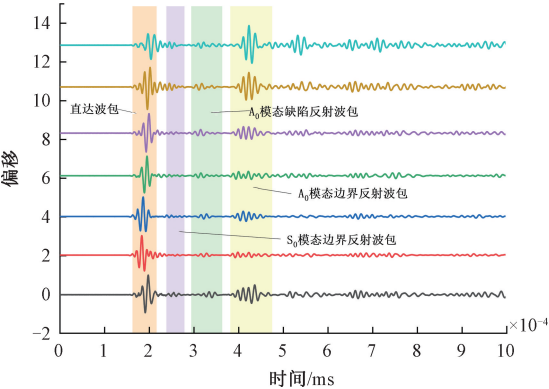


图 18 密集阵列采集的部分原始时域信号

Fig. 18 Original time-domain signal acquired by a dense array

A_0 模态缺陷反射波包箭头所指区域,第 4 个箭头所指区域为 A_0 模态的边界反射波包。与前面的理论分析一致,在 3.2 节中将选择 A_0 模态进行损伤定位。

连续小波变换可以计算出高分辨率的小波系数,提高检测技术的特性,而且连续小波变换可以获得一个窄带的,高时域分辨率的全周期的信号,利用 2.1 节连续小波变换对采集到的原始数据进行预处理,为后续缺陷定位识别做准备。采用高斯小波作为小波变换的母小波,小波的尺度长度序列为 512。以路径 1→16(1 号传感器作为激励传感器激发出导波信号,16 号传感器作为接收传感器接收信号)分析该路径下的传播情况,图 19 为该路径下的原始波形和经过连续小波降噪后的时域波形。为了更加准确地分析信号提取前后的频率成分分布,对连续小波变换前后的频谱图进行比较,其结果如图 20 所示。可知在原始频谱中除激励频率段的信号,还存在其他频率段,经过连续小波变换后的频带比没有变换前的频谱图窄,而且降低了非中心频率段的能量。

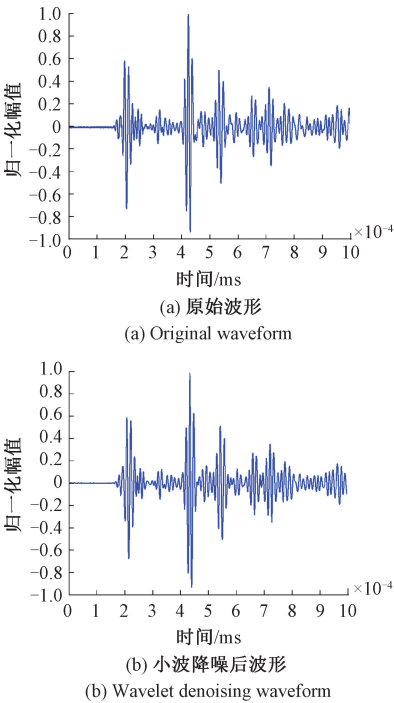


图 19 连续小波降噪后的时域波形

Fig. 19 Time-domain waveforms before and after continuous wavelet denoising

2) 孔洞损伤定位

连续小波变换不仅在频域方面对于噪音有着抑制作用,在成像方面同样有很高的改善作用。利用本文成像算法,即采用基于群速度校准的密集阵列全聚焦成像方法进行成像,对连续小波变换对于整体成像效果的影响进行验证。其中图 21(a)为对原始数据直接进行成像的

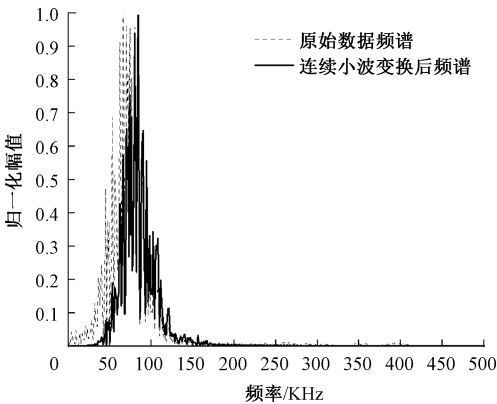
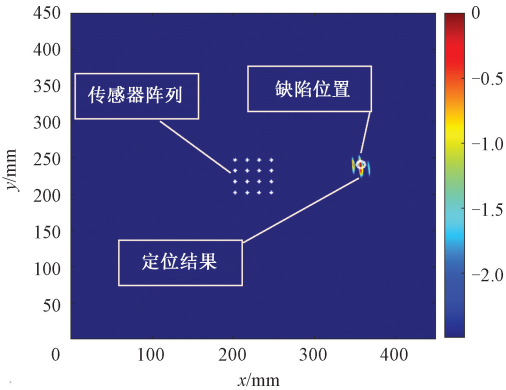


图 20 连续小波变换前后的频域波形

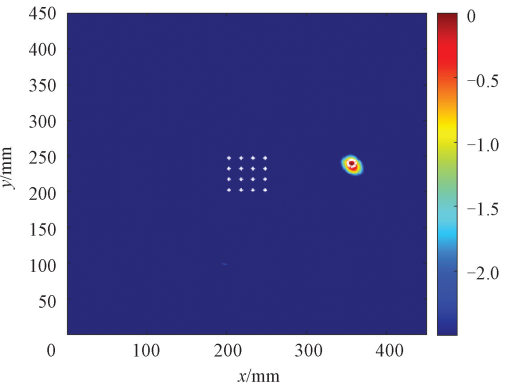
Fig. 20 Frequency-domain waveforms before and after continuous wavelet transform

结果,图 21(b)为经过连续小波变换后的成像结果。白色圆圈代表实际缺陷的位置,白点代表传感器实际位置,彩色区域为缺陷识别结果,阈值统一设置为 25%。可以看出,经过连续小波变换后得到的图像能够有效去除噪声的影响,对于缺陷的形貌识别更加准确。



(a) 连续小波变换前的全聚焦成像(阈值为25%)

(a) TFM image using threshold of 25% before CWT



(b) 连续小波变换后的全聚焦成像(阈值为25%)

(b) TFM image using threshold of 25% after CWT

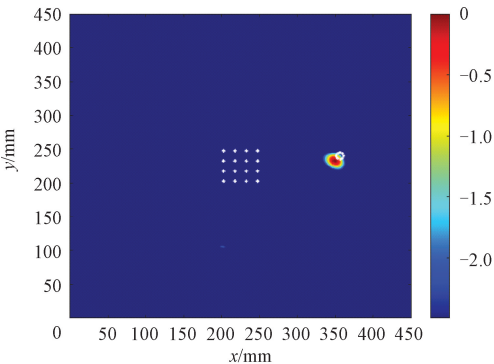
图 21 连续小波变换前后孔洞缺陷成像结果

Fig. 21 Imaging results of hole defects before and after continuous wavelet transform

为了验证本文方法的有效性,分别选择 0°和 45°方向的 A_0 模态群速度数值,进行常规全聚焦方法的损伤成像,其成像结果如图 22 所示。使用改进型密集阵列全聚焦成像算法和使用单一群速度的全聚焦成像算法的碳纤维复合材料板孔洞损伤定位结果如表 4 所示。其中定位误差计算公式如式 (12) 所示。

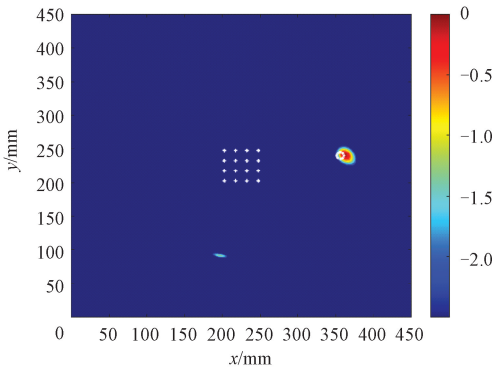
$$E = \sqrt{(x - x_d)^2 + (y - y_d)^2}$$
 (12)

式中: (x,y) 为通过实验定位缺陷的结果, (x_d,y_d) 为实际缺陷的位置。



(a) 0°方向速度全聚焦成像(阈值为25%)

(a) TFM image using threshold of 25% in the 0° direction



(b) 45°方向速度全聚焦成像(阈值为25%)

(b) TFM image using threshold of 25% in the 45° direction

图 22 单一群速度定位孔洞缺陷成像结果

Fig. 22 Imaging results of a hole defect by using single group velocity

表 4 基于 A_0 模态的缺陷定位结果与误差分析

Table 4 Defect location results and error based on A_0 mode

A_0 模态	损伤中心坐标 (x_d, y_d) /mm	成像坐标 (x, y) /mm	定位误差 E/mm
本文方法	(356, 240)	(356, 239)	1.00
0°	(356, 240)	(350, 233)	9.22
45°	(356, 240)	(361, 241)	5.10

由表 4 可知,使用单一 0°方向群速度的定位误差为

9.22 mm, 使用单一 90° 方向群速度的定位误差为 5.10 mm, 而基于本文所提方法的定位误差仅为 1 mm, 优于使用单一群速度时的损伤定位结果, 验证了本文所提方法的有效性。

4 结 论

本文基于超声导波在碳纤维复合材料板中的传播特性, 首先通过群速度测定实验得到超声导波 A_0 模态和 S_0 模态在碳纤维复合材料板中沿不同方向的传播群速度, 并采用 Savitzky-Golay 平滑处理的方法, 对采集到的实验群速度数据进行修正, 利用所得到的群速度数据, 在试样中心设置了 16 个压电传感器的密集型矩形传感器阵列, 实现对碳纤维复合材料板损伤定位检测, 并对采集到的全矩阵数据经过连续小波变换, 提取窄带信号进行后处理。在损伤定位成像算法中, 充分考虑了超声导波在复合材料板中传播时, A_0 模态和 S_0 模态传播群速度随方向变化的特点, 在全聚焦算法中引入体现复合材料板结构特征的导波传播群速度, 提出改进型密集阵列全聚焦成像算法。通过将被测结构离散化后的每一个网格节点视作潜在的损伤源, 得到对应的激励传感器、散射源和接收传感器三者之间的角度关系, 进而从碳纤维复合材料板中 A_0 模态和 S_0 模态分别沿不同方向传播的理论群速度数据中得到相应的群速度值, 从而对全聚焦成像算法中对每条传播路径的时间进行修正。最后通过碳纤维复合材料板上的孔洞损伤实验, 得到损伤定位成像结果, 定位误差仅为 1.00 mm, 验证了所提出方法在碳纤维复合材料板中导波损伤成像中的有效性。

参考文献

[1] 荆云娟, 崔博, 马军, 等. 碳纤维复合材料产业链发展现状[J]. 合成纤维, 2023, 52(10): 37-42.
JING Y J, CUI B, MA J, et al. Development status of carbon fiber composites industry chain [J]. Synthetic Fiber in China, 2023, 52(10): 37-42.

[2] 刘文静, 杨国荣, 赵晓曼. 碳纤维复合材料研究进展及其应用[J]. 进展与述评, 2023, 7: 1-4.
LIU W J, YANG G R, ZHAO X M. Research progress and application of carbon fiber composites [J]. Progress and Review, 2023, 7: 1-4.

[3] 杨文国, 杨晓鹏, 马二克. 碳纤维复合材料的制备工艺优化及其在航空航天领域的应用[J]. 当代化工研究, 2024, (7): 139-141.
YANG W G, YANG X P, MA ER K. Optimization of preparation process for carbon fiber composite materials and their application in the aerospace field application [J]. Modern Chemical Research, 2024, (7): 139-141.

[4] ROSE J L. Standing on the shoulders of giants: An example of guided wave inspection [J]. Materials Evaluation, 2002, 60(1): 53-59.

[5] WILCOX P D, HOLMES C, DRINKWATER B W. Advanced reflector characterization with ultrasonic phased arrays in NDE applications [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, 54(8): 1541-1550.

[6] MICHAELS J E, MICHAELS T E. Enhanced differential methods for guided wave phased array imaging using spatially distributed piezoelectric transducers [C]. American Institute of Physics Proceedings, 2006, 820(1): 837-844.

[7] 邱雷, 袁慎芳, 张道越, 等. 基于 Shannon 复数小波的复合材料结构时间反转聚焦多损伤成像方法[J]. 复合材料学报, 2010, 27(2): 101-107.
QIU L, YUAN SH F, ZHANG X Y, et al. Shannon complex wavelet and time reversal focusing based multi-damage imaging method on composite structures [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(2): 101-107.

[8] SHARIF K Z, ALIABADI M H. Assessment of delay and sum algorithms for damage detection in aluminum and composite plates [J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(7): 075007, 1-20.

[9] XU X J, JI H L, QIU J H, et al. Interlaminar contact resistivity and its influence on eddy currents in carbon fiber reinforced polymer laminates [J]. NDT & E International, 2018, 94: 79-91.

[10] HALL J S, MICHAELS J E. Multipath ultrasonic guided wave imaging in complex structures [J]. Structural Health Monitoring, 2015, 14(4): 345-358.

[11] 杨宁, 陆铭慧, 张萍, 等. 基于分割环阵的 CFRP 分层缺陷超声全聚焦成像[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1): 200-210.
YANG N, LU M H, ZHANG P, et al. Ultrasonic total focusing method of carbon fiber reinforced plastics delamination defects based on segmented annular arrays [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 200-210.

[12] YU L, GIURGIUTIU V. In situ 2-D piezoelectric wafer active sensors arrays for guided wave damage detection [J]. Ultrasonics, 2008, 48(2): 117-134.

[13] 朱倩, 裘进浩, 张超, 等. 双层层压材料中激光超声检测方法的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 120-127.
ZHU Q, QIU J H, ZHANG CH, et al. Application of laser ultrasonic detection method for double-layer

- laminated material [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3):120-127.
- [14] 鲍峤,邱雷,袁慎芳. 飞行器结构健康监测中压电-导波成像技术的发展与挑战[J]. *航空科学技术*, 2020, 31(3):15-33.
- BAO Q, QIU L, YUAN SH F. Development and challenges of PZT-guided wave based imaging technique in aircraft structural health monitoring[J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2020, 31(3):15-33.
- [15] 陈学宽,龙盛蓉,宋奕霖,等. 基于二维等效声速的频域全聚焦超声成像研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(8):130-140.
- CHEN X K, LONG SH R, SONG Y L, et al. Research on frequency-domain full-focus ultrasound imaging based on two-dimensional equivalent sound velocity [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(8):130-140.
- [16] 周进节,郑阳,张宗健,等. 缺陷散射对相控阵超声全聚焦成像的影响研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(2):454-461.
- ZHOU J J, ZHENG Y, ZHANG Z J, et al. Research on the effect of defect scattering on phased array ultrasonic TFM imaging [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(2):454-461.
- [17] 陈学宽,龙盛蓉,宋奕霖,等. 基于二维等效声速的频域全聚焦超声成像研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(8):130-140.
- CHEN X K, LONG SH R, SONG Y L, et al. Research on frequency-domain full-focus ultrasound imaging based on two-dimensional equivalent sound velocity [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(8):130-140.
- [18] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation[J]. *NDT & E International*, 2005, 38(8):701-711.
- [19] 杨红娟,杨正岩,杨雷,等. 碳纤维复合材料损伤的超声检测与成像方法研究进展[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(8):4295-4317.
- YANG H J, YANG ZH Y, YANG L, et al. Progress in ultrasonic testing and imaging method for damage of carbon fiber composites [J]. *Acta Materia Composita Sinica*, 2023, 40(8):4295-4317.
- [20] YAN D, SUTCLIFFE M, WRIGHT B, et al. Ultrasonic imaging of full matrix capture acquired data for carbon fiber-reinforced polymer [J]. *Insight*, 2013, 55(9):477-481.
- [21] CAO H Q, GUO SH F, ZHANG SH X, et al. Ray tracing method for ultrasonic array imaging of CFRP corner part using homogenization method [J]. *NDT & E International*, 2021, 21:102493.
- [22] LIN L, CAO H Q, LUO ZH B. Total focusing method imaging of multidirectional CFRP laminate with model-based time delay correction[J]. *NDT & E International*, 2018, 97:51-58.
- [23] 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, 70:625-636.
- [24] 刘增华,马春雷,陈洪磊,等. 激光和压电传感器密集型矩形阵列成像质量的比较分析[J]. *北京工业大学学报*, 2018, 44(8):1075-1081.
- LIU Z H, MA CH L, CHEN H L, et al. Comparison of imaging quality of compact rectangular arrays based on laser and piezoelectric transducers[J]. *Beijing University of Technology*, 2018, 44(8):1075-1081.
- [25] 刘增华,马春雷,陈洪磊,等. 密集型矩形阵列参数对激光 Lamb 波成像的影响分析[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(14):87-93.
- LIU Z H, MA CH L, CHEN H L, et al. Analysis on the influence of compact rectangular array parameters on laser-based Lamb wave imaging [J]. *Vibration and Shock*. 2020, 39(14):87-93.
- [26] 刘增华,张婷婷,苏瑞祥,等. 基于十字形阵列和 2D-MUSIC 算法的 Lamb 波检测[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(17):2038-2044.
- LIU Z H, ZHANG T T, SU R X, et al. Lamb waves inspection based on cross-shaped array and 2D-MUSIC algorithm [J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(17):2038-2044.
- [27] 陈洪磊,刘增华,吴斌,等. 基于密集阵列的参数化 Lamb 波检测技术研究[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(20):20-28.
- CHEN H L, LIU Z H, WU B, et al. Parametric Lamb waves detection technology based on compact array[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(20):20-28.
- [28] DATTA D, KISHORE N N. Features of ultrasonic wave propagation to identify defects in composite materials modelled by finite element method [J]. *NDT & E International*, 1996, 29(4):213-223.
- [29] LIU M L, ZHANG W Y, CHEN X, et al. Modelling guided waves in acoustoelastic and complex waveguides: From SAFE theory to an open-source tool [J]. *Ultrasonics*, 2024, 136:107144.
- [30] THOMSON W T. Transmission of elastic waves through a

stratified solid medium[J]. Journal of Applied Physics, 1950, 21(2): 89-93.

- [31] 张海燕,刘镇清,吕东辉. 全局矩阵法及其在层状各向异性复合板中 Lamb 波传播特性研究中的应用[J]. 复合材料学报, 2004, 21(2): 111-116.
- ZHANG H Y, LIU ZH Q, LYU D H. Global matrix and its application to study on Lamb wave propagation in layered anisotropic composite plates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(2): 111-116.
- [32] LI F C, PENG H K, SUN X W, et al. Wave propagation analysis in composite laminates containing a delamination using a three-dimensional spectral element method[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 2012: 1-19.
- [33] STASZEWSKI W J. Intelligent signal processing for damage detection in composite materials[J]. Composites Science and Technology, 2002, 62(7-8): 941-950.
- [34] 朱晓黎. 对于提高高压电超声换能器阵指向性的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2007.
- ZHU X L. Research on sharpening directivity of piezoelectric ultrasonic transducer array[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [35] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D, et al. Defect detection using ultrasonic arrays: The multi-mode total focusing method[J]. NDT & E International, 2010, 43(2): 123-133.
- [36] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation[J]. NDT & E International, 2005, 38(8): 701-711.
- [37] CAMACHO J, PARRILLA M, FRITSCH C. Phase coherence imaging[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(5): 958-974.

作者简介



刘增华, 2006 年于北京工业大学获得博士学位, 现为北京工业大学教授, 主要研究方向为无损检测和评估、结构健康监测、信号处理和智能传感器技术。

E-mail: liuzenghua@bjut.edu.cn.

Liu Zenghua received his Ph. D. degree in

2006 from Beijing University of Technology, now he is a professor in Beijing University of Technology. His main research interests include nondestructive testing and evaluation, structural health monitoring, signal processing and smart sensors technology.



王美灵, 2022 年于天津职业技术师范大学获得学士学位, 现为北京工业大学硕士研究生, 主要研究方向为超声导波检测技术。

E-mail: wangmeiling@emails.bjut.edu.cn

Wang Meiling received her B. Sc. degree in 2022 from Tianjin University of Technology and Education, now she is a M. Sc. candidate in Beijing University of Technology. Her main research interests include ultrasonic guided waves inspection technology.



朱艳萍 (通信作者), 2016 年于吉林大学获得学士学位, 2022 年于上海交通大学获得博士学位, 现为北京工业大学讲师, 主要研究方向为无损检测和结构健康监测。

E-mail: zhuyp@bjut.edu.cn

Zhu Yanping (Corresponding author)

received her B. Sc. degree in 2016 from Jilin University, received her Ph. D. degree in 2022 from Shanghai Jiao Tong University, now she is a lecturer in Beijing University of Technology. Her main research interests include nondestructive testing and structural health monitoring.



鲁朝静, 2014 年于河北师范大学获得学士学位, 2018 年于河北科技大学获得硕士学位, 现为北京工业大学博士研究生, 主要研究方向为无损检测和超声导波技术。

E-mail: 565295694@qq.com

Lu Zhaojing received her B. Sc. degree in

2014 from Hebei Normal University, received her M. Sc. degree in 2018 from Hebei University of Science and Technology, now she is a Ph. D. candidate in Beijing University of Technology. Her main research interests include non-destructive testing and ultrasonic guided waves technology.



何存富, 1985 年于太原理工大学获得学士学位, 1990 年于华中科技大学获得硕士学位, 1996 年于清华大学获得博士学位, 现为北京工业大学教授, 主要研究方向为微磁材料评估方法和超声导波检测技术。

E-mail: hecunfu@bjut.edu.cn

He Cunfu received his B. Sc. degree in 1985 from Taiyuan University of Technology, received his M. Sc. degree in 1990 from Huazhong University of Science and Technology, received his Ph. D. degree in 1996 from Tsinghua University, now he is a professor in Beijing University of Technology. His main research interests include micromagnetic material evaluation methods and ultrasonic guided waves inspection technology.