

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311514

基于环形阵列的空间滤波器结构损伤扫描监测方法研究

常 琦, 徐 勇, 赵 恒

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

摘 要:本文提出了一种基于环形阵列的空间滤波器结构损伤扫描监测方法,在结构中央布置环形压电传感器阵列实现对结构的全方位扫描监测,消除了主动 Lamb 波空间滤波器监测方法中盲区及远场对监测效果的影响。环形阵列由直径方向不同角度的 4 个线阵组成,每个线阵采用主动 Lamb 波空间滤波监测方法对结构损伤进行监测、成像,各阵列成像结果通过 PCA-小波变换进行融合对损伤位置进行判别,从而实现结构全方位损伤扫描监测,消除单个阵列损伤监测的盲区、远场及虚假成像等影响,进而获得更加准确的损伤监测结果。通过实验研究,验证了该方法的有效性和实用性。

关键词: Lamb 波;空间滤波器;损伤扫描监测;多阵列成像融合

中图分类号: TH212 TH213.3 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590.65

Research on the spatial filter structure damage scanning monitoring method based on circular array

Chang Qi, Xu Yong, Zhao Heng

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In this article, a spatial filter structure damage scanning monitoring method based on the annular array is proposed. The annular piezoelectric sensor array is arranged in the center of the structure to realize the omnidirectional scanning monitoring of the structure, which eliminates the influence of the blind area and far field on the monitoring effect in the active Lamb wave spatial filter monitoring method. The circular array consists of four linear arrays with different angles in the diameter direction. Each linear array uses the active Lamb wave spatial filtering monitoring method to monitor and image the structural damage. The imaging results of each array are fused by the PCA-wavelet transform to identify the location of damage. Thus, the omnidirectional damage scanning monitoring of the structure is realized, and the blind area, far-field, and false imaging of single array damage monitoring are eliminated. Then, more accurate damage monitoring results are obtained. The effectiveness and practicability of the method are verified by experimental research.

Keywords: Lamb wave; spatial filtering; damage scanning monitoring; multi-array imaging fusion

0 引言

航空航天飞行器在服役过程中要长期承受复杂的载荷,易出现不易察觉的微小损伤,在运行过程中不断累积会导致应力集中从而使结构失效^[1-2],因此对损伤在线监测是十分必要的。结构健康监测(structural health monitoring, SHM)技术作为无损检测的一种方法被广泛应用于航空航天^[3-4],可及时发现损伤以保障飞行器的可靠性和安全性^[4]。

基于主动 Lamb 波的监测方法是结构健康监测中常用的方法,该方法具有对损伤敏感度高、传播距离远、监测范围大等优点,其中基于空间滤波器的监测方法通过对结构中布置的压电传感器阵列虚拟偏转,即对时域信号进行相位移动,实现对损伤散射信号的相干聚焦,继而实现对损伤的监测,具有无监测盲区、方法简单易行等优点被广泛研究和应用。Purekar 等^[5]针对空间滤波器对金属结构上的损伤监测展开了理论和实验研究,采用线性压电传感器阵列获取 Lamb 波采样信号,实现对损伤的监测。王瑜等^[6]针对铝板中的损伤监测,在结构边缘

布置一维传感器阵列,通过空间滤波器方法实现对损伤的监测。Qiu 等^[7-9]针对复合材料中的损伤定位,通过在结构中布置传感器阵列,在空间-波数域实现对损伤的监测。Ren 等^[10]采用空间滤波器方法,实现了碳纤维复合材料平板结构上的多损伤成像定位,最终定位结果的误差在 21 mm 左右。何存富等^[11]针对铝梁中的分层缺陷采用空间滤波器对该损伤进行定位和定量评估,通过有限元仿真和实验验证了该方法的有效性与实用性。刘增华等^[12]针对铝板中的损伤,提出采用频率-波数分析方法对损伤进行监测,利用二维傅里叶变换方法实现结构响应信号从时域到频率波数域的转换,通过实验研究验证了该方法的有效性和实用性。张猛等^[13]采用空间滤波算法对三明治复合装甲结构损伤进行了定位研究,通过结构两边对侧布置线阵对结构损伤进行定位,误差达到 1 cm 以内。Mohammad 等^[14]提出一种 3 阶段定位算法,分别通过计算近场波达时间差、通过空间滤波补偿时间差确定损伤方向,确定损伤位置 3 个阶段基于空间宽带效应和近场性质进行损伤定位。Lakshmi^[15]提出一种空间滤波器与逆算法相结合的损伤信号处理方法,通过多聚类混合自适应搜索算法检测损伤。

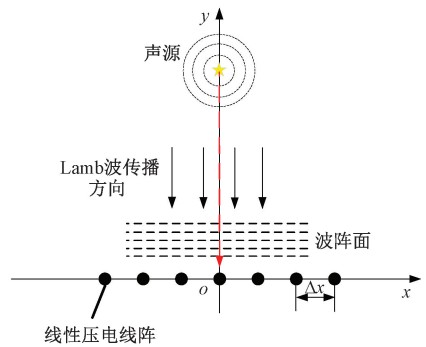
以上基于空间滤波器原理的主动 Lamb 波监测方法研究大都以线阵为研究对象,一般将线阵布置在结构一侧,监测效果受到监测盲区和远场效应的影响。为提高基于主动 Lamb 波空间滤波器方法的监测效果,提高损伤监测精度,消除监测盲区和远场效应的影响,本文提出了一种基于环形阵列的空间滤波器扫描监测方法,通过结构中央布置环形阵列,其直径方向的线阵采用空间滤波算法依次对损伤进行扫描监测成像,从而实现结构全方位损伤扫描监测。每个线阵的成像结果通过 PCA-小波变换进行叠加融合,获得更加准确的损伤监测结果。最后,通过实验研究验证了该方法的有效性和实用性。

1 基于环形阵列的空间滤波器扫描监测方法研究

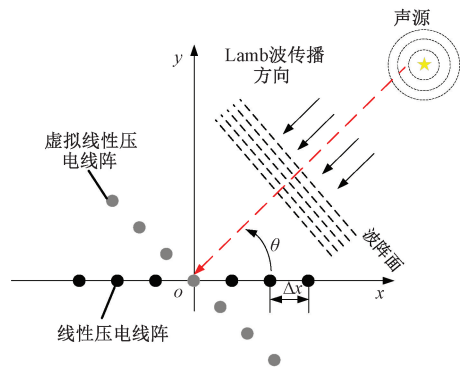
1.1 主动 Lamb 波空间滤波器损伤监测原理

在主动 Lamb 波的损伤监测方法中,压电传感器以阵列的排列方式进行激励-传感,激励元件在结构中激发 Lamb 波,其他压电传感器进行回波接收。当 Lamb 波在结构中传播遇到损伤时,会发生反射、散射现象,此时损伤处可以看作是一个“声源”,其余 PZT 采集含有损伤信息的散射回波信号。

如图 1(a)所示,在监测区域布置 N 元等间距线性压电传感器阵列,以线阵中心为坐标原点、轴线方向为 X 轴建立直角坐标系。损伤与线阵夹角为 90° 时的合成响应信号如式(1)所示。



(a) 垂直于线阵入射
(a) Incident perpendicular to the linear array



(b) 信号任意角度入射
(b) Signal incident at any angle

图1 空间滤波器示意图

Fig. 1 Spatial filter diagram

$$\psi(t) = \sum_{n=1}^N f(x_n, t) \quad (1)$$

式中: $\psi(t)$ 为合成响应信号, $f(x_n, t)$ 是坐标为 x_n 的传感器接收到的信号, N 为线阵中 PZT 的个数。

因无法事前获知 Lamb 波回波信号的传播方向,为实现各方位上的信号相干叠加,可以通过空间滤波器方法实现压电线阵的任意角度虚拟旋转,实现压电线阵对任意方向损伤源的 90° 匹配和扫描。如图 1(b)所示,此时合成的相干聚焦信号如式(2)所示。

$$\psi(t, \theta) = \sum_{n=1}^N f(x_n, t) * \phi(x_n) \quad (2)$$

式中: $\psi(t, \theta)$ 为相干叠加后的信号, θ 为扫描角度, t 为损伤散射信号波达时间, $*$ 表示卷积运算, $\phi(x_n)$ 为传感器坐标为 x_n 上的空间滤波器权重函数,如式(3)所示。

$$\phi(x_n, \theta) = g\left(t - \frac{x_n \cos(\theta)}{v}\right) \quad (3)$$

式中: v 为 Lamb 波传播速度, $g(t)$ 为单位激励信号。

1.2 空间滤波器的损伤成像方法

1) 空间滤波器阵列优化

目前基于空间滤波器结构损伤监测研究中,压电阵列多采用一维线阵,布置方式如图 2 所示。该方法简单

有效,但同时存在不足:由于空间滤波器虚拟偏转角度对 90°方向的损伤最敏感,当损伤位于传感器阵列轴向附近靠近 0°与 180°时,采用空间滤波方法损伤定位结果误差较大,这一区域属于定位盲区。此外由于采用空间滤波方法,损伤定位结果会产生以传感器阵列轴对称的一个虚假定位,因此线阵一般布置在结构边缘,对于大型结构会带来远场效应。

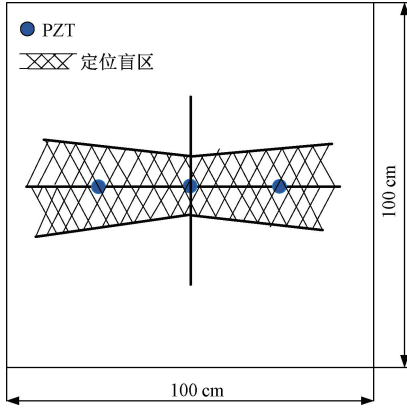


图 2 一维线阵布置示意图

Fig. 2 One-dimensional linear array layout diagram

针对上述压电阵列布置方法在空间滤波器定位算法中的弊端,本文提出了基于环形阵列的空间滤波器结构损伤扫描监测方法,阵列布置方式如图 3 所示,结构正面布置 9 个 PZT 进行 Lamb 波信号接收,PZT0 传感器布置在环阵列中心,PZT1~PZT8 传感器按照 45°等间隔布置;结构背面中心粘贴同样型号的 PZT 作为 Lamb 波激励器。环形阵列中直径方向的 3 个 PZT 组成线阵,通过环形阵列的 4 (Line-1~Line-4) 个线阵实现对结构各方向的损伤扫描监测。

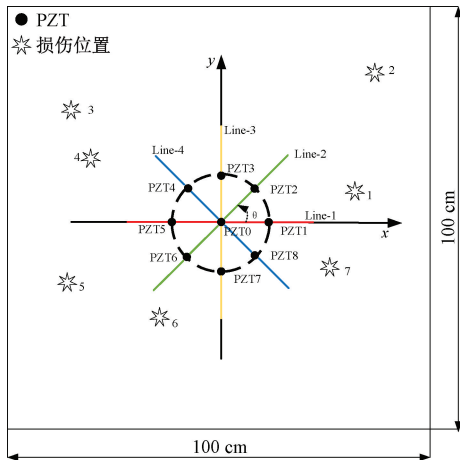


图 3 环形压电阵列布置及模拟损伤示意图

Fig. 3 Circular PZT array layout and damage simulation diagram

2) 基于环形压电阵列空间滤波器定位方法研究

如图 3 所示,激励器在结构中激发 Lamb 波,当结构中存在损伤,Lamb 波遇到损伤会发生反射、散射等,环形阵列采集回波中的损伤散射信号,对损伤散射信号进行相干叠加处理,并以能量值进行成像显示,获得结构损伤的监测结果。

由一维线性阵列空间滤波权重函数,本文提出环形阵列的空间滤波权重函数如式(4)所示。

$$\varphi_m(\theta, x_{m-n}) = g\left(t - \frac{x_{m-n} \times \left(\cos\left(\theta - \frac{180^\circ(m-1)}{M}\right)\right)}{v}\right) \quad (4)$$

式中: φ_m 为第 m 线性阵列所对应的空间滤波器权重函数, $\varphi_m(\theta, x_{m-n})$ 为第 m 线性阵列中传感器坐标为 x_n 所对应的空间滤波器权重函数, x_{m-n} 为 m 线性阵列中传感器坐标为 x_n , M 为传感器阵列总数, m 为传感器阵列编号, $m \in [1, M]$ 。

由式(4)可知,对于结构中的任意位置出现损伤时,环形阵列中每个直径方向的线阵具有不同的权重函数,通过多个线阵的信息互补可以避免单一线阵当损伤位于阵列径向附近(定位盲区)无法准确定位的缺点并且消除虚像。环形阵列的结构中央布置相比边缘布置,可以降低远场效应。由式(4)可知,Lamb 波波速 v 的测量直接影响权重函数从而影响定位精度,需要进行准确测量,其次,各个线阵的定位结果需要通过融合从而获得最终结果,本文采用 PCA-小波变换进行融合。

环形阵列的合成响应信号为:

$$\psi(t, \theta) = \sum_{n=1}^N f(x_n, t) * \varphi_m(x_{m-n}, \theta) \quad (5)$$

其中, $\psi(t, \theta)$ 为合成信号, $f(x_n, t)$ 为各阵列响应信号, $\varphi_m(x_{m-n}, \theta)$ 为空间滤波权重函数。以角度 θ 为自变量, 1° 为步长,根据式(5)计算出 $0^\circ \sim 359^\circ$ 各方位下的空间滤波合成响应信号,以能量值进行损伤聚焦成像,此时所对应的坐标为损伤位置。

3) 波速测量

在结构损伤扫描监测过程中,波速测量直接影响定位结果^[16-17]。影响波速测量的误差主要有波达时间、传感器自身性能等。因此,本文采取对波速进行多次测量取平均值的方法。Lamb 波波速计算如式(6)所示。

$$v = \frac{x_n - x_m}{t_n - t_m} \quad n \neq m \quad (6)$$

其中, n, m 分别为接收传感器所对应的编号, x 为激励传感器到接收传感器的距离, t 为 Lamb 波到达对应传感器的时间。本文结构研究对象采用厚度为 2.5 mm 的 Lv-26 航空硬铝,其为各向同性材料。在不同距离上激励中心频率为 40 kHz 的 Lamb 波进行 100 次波速标定实

验,其波速概率分布如图4所示,可见铝板上的中心频率为40 kHz的Lamb波的波速为 $c_g = 1\ 625\ \text{m/s}$ 。

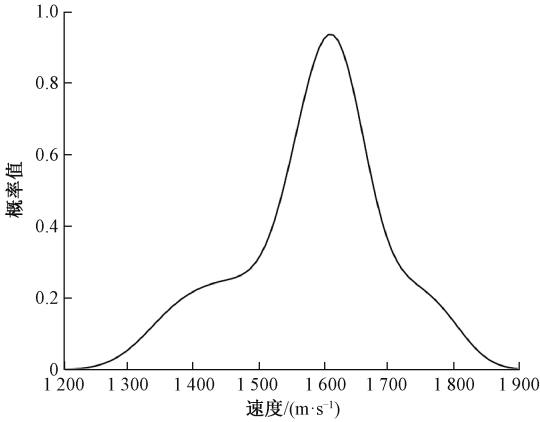


图4 波速分布概率图

Fig. 4 Wave velocity distribution probability diagram

1.3 PCA-小波变换图像融合

为消除线阵虚假定位对结果的影响,将4个线阵分别获得的损伤成像结果进行融合消除虚像。PCA-小波融合方法利用PCA提取图像的主要特征,并通过小波变换进行多尺度的分析和融合,全面地保留图像的细节信息和局部特征,具有保留多尺度信息、有效提取特征、减少冗余信息等优点,基于PCA-小波变换的基本步骤为^[18-19]:

1) 源图像 A ,有 N 个特征,即: $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n]^T$

2) 建立协方差矩阵:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1N} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \cdots & \sigma_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{N1} & \sigma_{N2} & \cdots & \sigma_{NN} \end{bmatrix} \quad (7)$$

3) 求协方差矩阵的特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$ 和特征向量:

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} c_{11} \\ c_{21} \\ \vdots \\ c_{N1} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} c_{12} \\ c_{22} \\ \vdots \\ c_{N2} \end{bmatrix}, \dots, \mathbf{C}_N = \begin{bmatrix} c_{1N} \\ c_{2N} \\ \vdots \\ c_{NN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

4) 计算主成分

令 $\mathbf{Y} = \mathbf{U}^T \mathbf{X}$,则求出 \mathbf{Y} 的 N 个特征向量为: $\mathbf{Y} = (\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_N)^T$,式中: $\mathbf{U} = (\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_N)^T$,此时 $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_N$ 分别为第1,2, \dots , N 个主分量,变换后 \mathbf{y}_1 方差最大,包含了源图像 A 中的大量信息,为第一主分量 PC_1 ;

5) 对图像 A 的 PC_1 与源图像 B 进行直方图匹配,使其具有相同的均值和方差: $g(x, y) = 0.299R(x, y) + 0.587G(x, y) + 0.114B(x, y)$,式中: $R(x, y), G(x, y), B(x, y)$ 分别为源图像 B 在RGB通道点 (x, y) 处的值。

6) 对第一主分量 PC_1 和新的源图像 B 进行小波变换分别得到低频信号和高频信号;

7) 在尺度为 2^j 下利用小波变换融合方法后的高频细节分量和低频细节分量分别为:

$$\mathbf{W}^{(k)}(2^j; \mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} \mathbf{W}_B^{(k)}(2^j; \mathbf{x}, \mathbf{y}), & \mathbf{D}_B^{(k)}(2^j; \mathbf{x}, \mathbf{y}) > \mathbf{D}_{PC_1}^{(k)}(2^j; \mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \mathbf{W}_{PC_1}^{(k)}(2^j; \mathbf{x}, \mathbf{y}), & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$\mathbf{S}(2^j; \mathbf{x}, \mathbf{y}) = k_1 \times \mathbf{S}_B(2^j; \mathbf{x}, \mathbf{y}) + k_2 \times \mathbf{S}_{PC_1}(2^j; \mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (10)$$

其中, $k = 1, 2, 3$ 表示了3个方向; $j = 1, 2, \dots$, J 表示不同的分辨率, k_1, k_2 为权重系数,满足条件 $k_1 + k_2 = 1$ 。

8) 对融合之后的低频分量和高频分量作逆小波变换获得新的第一主分量;

9) 对新的第一主分量和其他主分量进行PCA逆变换即可获得最终的融合图像。

根据两种方法的互补性,采用基于PCA变换与小波变换融合的图像融合方法。

1.4 基于环形阵列的空间滤波损伤监测方法流程

基于环形阵列的空间滤波损伤扫描监测方法流程如图5所示。在监测结构上布置 N 条线性压电传感器阵列($N \geq 2$)组成环形阵列;采集结构健康信号和实时在线监

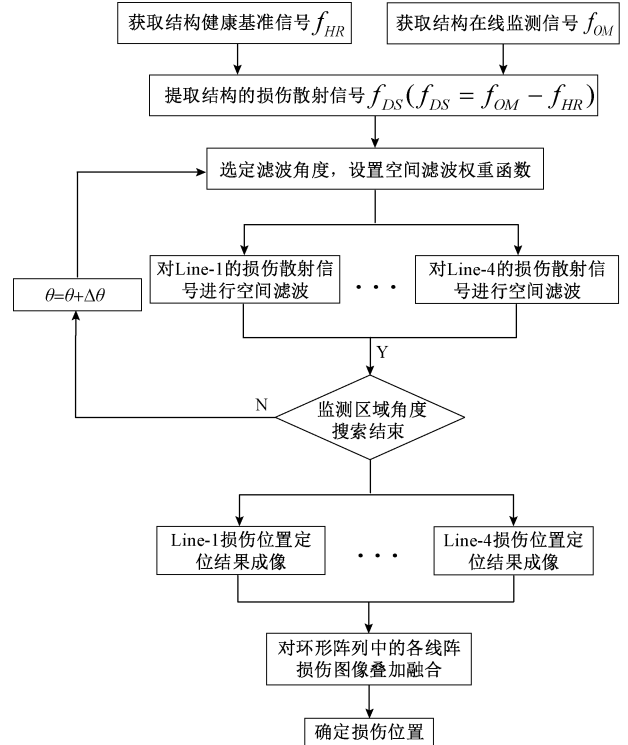


图5 基于环形阵列的结构损伤扫描监测流程图
Fig. 5 Structural damage scanning monitoring flow chart based on circular array

测信号,并对两信号作差提取结构损伤散射信号;对各线性压电传感器阵列的损伤散射信号根据式(5)分别进行空间滤波运算并进行成像,损伤图像中能量值最大处所对应的位置即为损伤可能发生的位置。由方法原理可知压电阵列数 N 越大,有关损伤的信息越多,定位越准确可靠,但同时会带来成本的增加,如传感器及接线的增加、运算量的增加等,因此在实用时可进行成本效益和精度要求的综合分析确定合理的压电阵列数。本文为研究该方法的可行性传感器阵列数取 $N=4$ 。

为表征损伤定位的精度和质量,本文采用损伤定位位置与真实位置之间的绝对距离和相对误差对损伤定位的精度进行表述,如式(11)、(12)所示。

$$D = \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2} \quad (11)$$

$$\Delta = \frac{D}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (12)$$

式中: (x, y) 为损伤真实位置坐标, (a, b) 为损伤定位结果。

2 实验研究

2.1 损伤定位实验系统

实验过程采用 Lamb 波作为激励信号,为消除 Lamb 波频散现象及多模特性带来的影响,降低分析信号的复杂度,选用汉宁窗调制的 5 波峰正弦窄带信号作为激励信号^[20-21],其数学表达式如下:

$$u(t) = [H(t) - H(t - N/f_c)] \cdot (1 - \cos(2\pi f_c t/N)) \sin(2\pi f_c t) \quad (13)$$

其中, f_c 为激励信号的中心频率; $H(t)$ 为 Heaviside 阶梯函数; N 为 Sin 调制信号的波峰数(本文选取 $N=5$)。

实验试件选用 1 000 mm×1 000 mm×2.5 mm 的航空硬铝板, 四边通过螺栓紧固在夹具, 实验系统图如图 6 所示。结构中的 PZT 阵列布置及损伤位置如图 3 所示, PZT0 为各阵列中心, 以此为圆心, 其余 8 个 PZT 以 45° 等间隔地布置在半径为 50 mm 的圆环上, 以 Line-1 轴线为 X 轴, Line-5 轴线为 Y 轴建立直角坐标系, 在试件背面中心处粘贴一个 PZT 作为激励器。在板结构中放置实心钢球模拟损伤, 使该区域局部应力集中, 其作用与真实损伤相类似, 均可引起 Lamb 波信号散射。图中“☆”为模拟损伤点, 各信号均采用 PicoScope-4824 示波器进行采集。

实验中选定中心频率为 40 kHz, 峰峰值为 ±20 V 的激励信号施加到激励压电传感器上, 采样频率为 16 MHz。分别在图 3 所示结构中 7 个点位置放置质量块模拟损伤, 通过激励器激励 Lamb 波, 压电环形阵列分别采集并提取损伤散射信号。

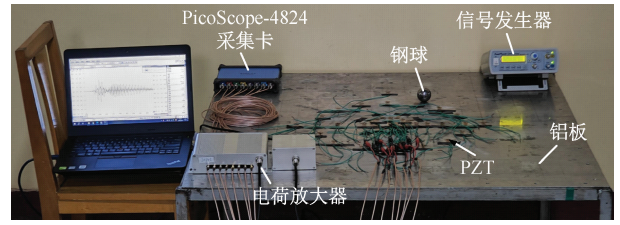


图 6 结构损伤监测实验系统

Fig. 6 Structural damage monitoring experimental system

通过激励元件在板结构中激发 Lamb 波, 环形阵列采集结构中响应信号, 作为健康基准信号; 依次在图 9 中的模拟损伤位置处放置质量块模拟结构发生损伤, 引起 Lamb 波信号发生散射, 环形阵列再次采集结构中响应信号; 将含有损伤信息的实时监测信号减去健康基准信号得到损伤散射信号, 对损伤散射信号进行空间滤波可得到合成响应信号, 进行损伤监测成像。

2.2 损伤信号分析

结构无损伤时, Line-1 采集结构健康基准信号 f_{HR} 如图 7 所示, 由图可见健康基准信号包含直达波及边缘反射的各阶模态 Lamb 波, 在结构位置坐标 (20, 18) 处放置实心钢球模拟损伤后, 各 PZT 采集实时在线监测信号 f_{OM} 如图 8 所示, 其构成与健康基准信号相似, 但包含损伤造成的散射信号, 将实时在线监测信号减去健康基准信号可得到含有损伤信息的损伤散射信号 f_{DS} , 并对各阵列损伤散射信号进行归一化处理, 如图 9 所示, 图中框线内为含有损伤信息的损伤散射信号, 本文采用 Lamb 波模态中能量最明显的 A0 模式作为特征模式, 由图可知不同传感器损伤散射信号的到达时间不同。

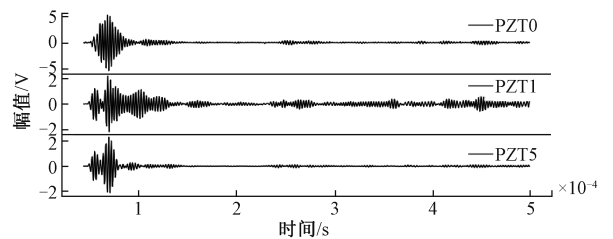


图 7 健康基准信号(f_{HR})

Fig. 7 Health benchmark signal(f_{HR})

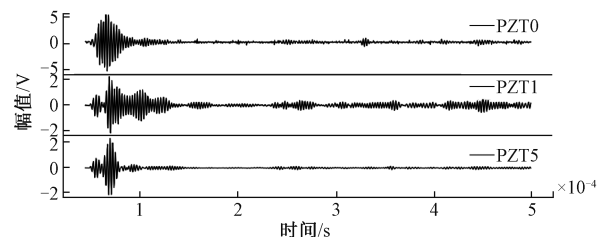


图 8 实时在线监测信号(f_{OM})

Fig. 8 Real-time online monitoring signal(f_{OM})

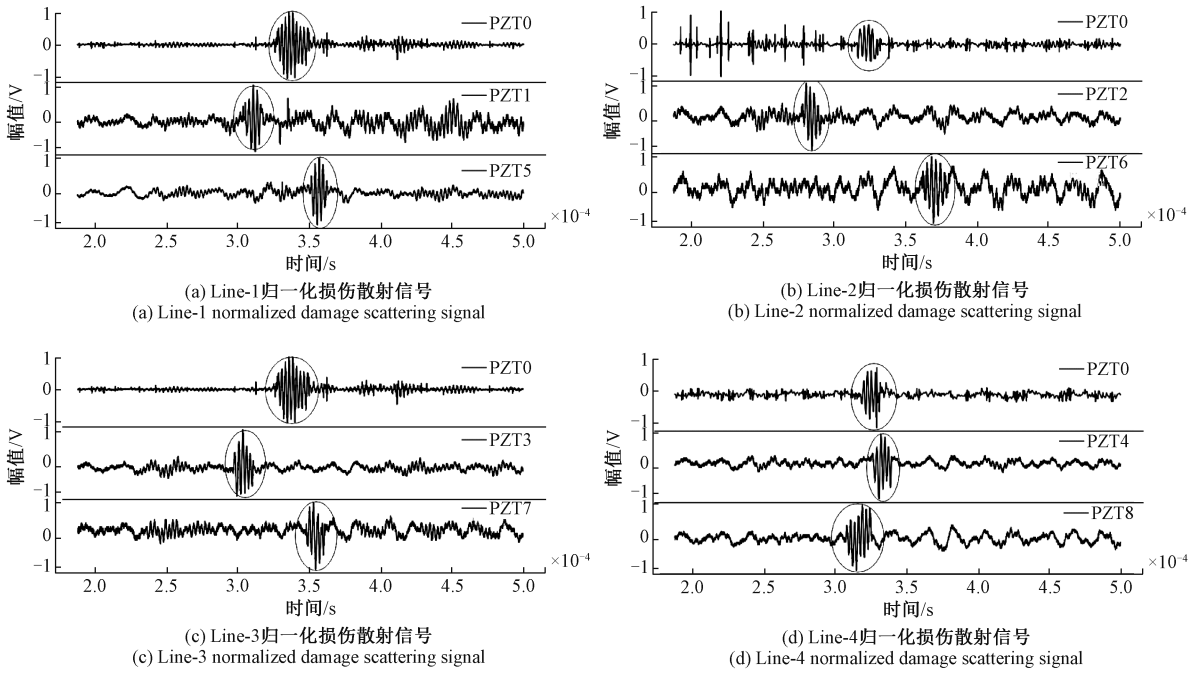


图9 损伤散射信号(f_{DS})

Fig. 9 Damage scattering signal(f_{DS})

根据流程图5确定监测区域角度为 $0^\circ \sim 359^\circ$, 1° 为步长,依据空间滤波权重函数使线阵3个传感器损伤散射信号叠加,根据式(5),求取环形阵列下的结

构响应信号,建立合成响应信号矩阵并以能量值大小进行损伤成像,各阵列所对应的损伤图像如图10(a)~(d)所示。

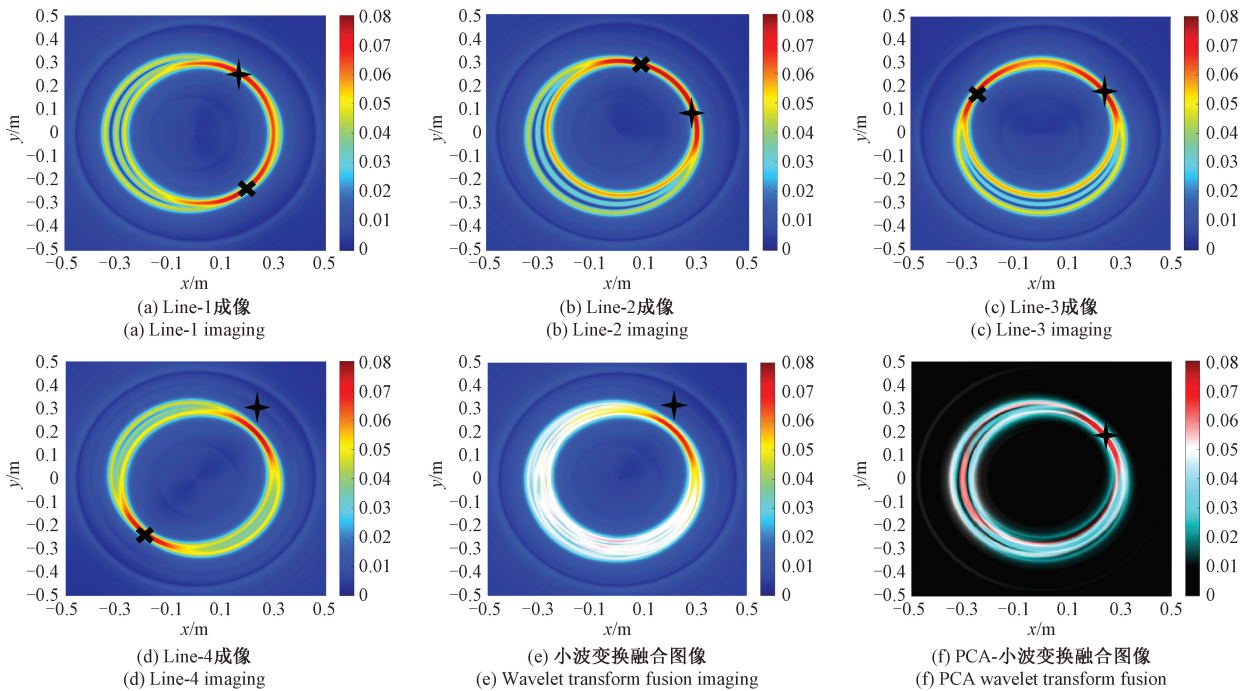


图10 损伤成像结果

Fig. 10 Damage location images

由图 10(a)~(d)可知每个线阵通过空间滤波算法可对损伤进行图像描述,该图像以传感器阵列所在径向为对称轴对称,图中可见明显能量集中位置“+”、“×”为损伤可能发生的位置,通过分析发现图中“×”为虚像。为消除虚像的影响,对各阵列损伤成像进行小波变换、PCA-小波变换图像融合,如图 10(e)~(f)所示。图 10(e)为小波变换图像融合结果,其中能量最大点为损伤定位坐标(20.73,18.71),与真实损伤位置的绝对距

离为 $D=1.02\text{ cm}$,图 10(f)为 PCA-小波变换图像融合结果,其得到损伤定位坐标为(20.65,18.41),与真实损伤位置的绝对距离为 $D=0.76\text{ cm}$,可见定位准确度较高。

2.3 损伤定位分析

本文模拟损伤实验点依次选取图 3 中的模拟损伤位置,并对环阵中各阵列的损伤成像分别采用小波变换及 PCA-小波变换图像融合方法,融合后的损伤定位坐标及定位精度如表 1 所示。

表 1 损伤定位结果

Table 1 Damage localization results

cm

损伤位置	小波变换			PCA-小波变换		
	定位坐标	绝对距离	相对误差/%	定位坐标	绝对距离	相对误差/%
(25,3)	(24.00,2.00)	1.41	5.62	(24.35,2.13)	1.08	4.31
(20,18)	(20.73,18.71)	1.02	3.01	(20.65,18.41)	0.76	2.82
(-17,13)	(-17.82,12.17)	1.17	5.47	(-17.68,13.70)	0.98	4.58
(-21,7)	(-20.15,6.38)	1.05	4.75	(-21.43,6.56)	0.62	2.78
(-18,-6)	(-17.35,-6.79)	1.02	5.39	(-17.64,-6.64)	0.73	3.87
(4,-17)	(2.94,-16.56)	1.14	6.57	(4.83,-17.64)	0.90	5.15
(18,-3)	(17.05,-2.18)	1.26	6.88	(17.46,-2.58)	0.68	3.75

由表 1 知,基于环形阵列的空间滤波器损伤扫描监测方法无定位盲区,可实现全方位扫描监测。同时,针对各阵列损伤成像结果采用小波变换、PCA-小波变换图像融合方法进行融合,可消除虚假镜像问题。基于小波变换图像融合方法的损伤定位最大绝对距离为 $D=1.41\text{ cm}$,最大相对误差为 $\Delta=6.88\%$,基于 PCA-小波变换图像融合方法的损伤定位最大绝对距离为 $D=1.08\text{ cm}$,最大相对误差为 $\Delta=5.15\%$,相较于小波变换图像融合定位结果误差更小,定位结果准确性较高。

3 结 论

本文提出一种基于环形阵列的空间滤波器结构损伤扫描监测方法,通过在结构中央布置环形压电传感器阵列实现对结构的全方位扫描监测,基于此传感器布置方法消除了主动 Lamb 波空间滤波器监测方法中盲区及远场对监测效果的影响,增加了有效定位区域。每个线阵采用主动 Lamb 波空间滤波监测方法对结构损伤进行监测、成像,各阵列成像结果采用小波变换、PCA-小波变换图像融合方法进行叠加融合,从而实现结构全方位损伤扫描监测,消除单个阵列损伤监测的盲区、远场及虚假镜像等影响,进而获得更加准确的损伤监测结果。通过实

验研究,验证了该方法的有效性和实用性。在接下来的研究中,将会将环形阵列的空间滤波器损伤扫描方法应用到飞机中常见的复合材料损伤监测中,由于复合材料具有各向异性的特点,Lamb 波在各个方向传播速度不同,而本文中环形阵列多个方向线阵的特点对于解决各向波速不同的问题具有先天优势,相信可以获得较好的监测效果。

参考文献

- [1] 房芳,郑辉,汪玉,等. 机械结构健康监测综述[J]. 机械工程学报,2021,57(16):269-292.
FANG F, ZHENG H, WANG Y, et al. Mechanical structural health monitoring: A review [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(16): 269-292.
- [2] 袁慎芳. 结构健康监测[M]. 北京:国防工业出版社, 2007.
YUAN SH F. Structural health monitoring[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [3] 王卉,袁慎芳,孟义兴,等. 时变异方差不确定影响下的疲劳裂纹在线评估[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(11): 181-189.
WANG H, YUAN SH F, MENG Y X, et al. Online evaluation of fatigue crack under the influence of heteroscedastic uncertainty [J]. Chinese Journal of

- Scientific Instrument, 2022,43(11):181-189.
- [4] GIUGIUTIU V. Structural health monitoring (SHM) of aerospace composites [M]. Lancaster: Woodhead Publishing, 2020: 491-558.
- [5] PUREKAR A S, PINES D J, SUNDARARAMAN S, et al. Directional piezoelectric phased array filters for detecting damage in isotropic plates[J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13(4): 838.
- [6] 王瑜,袁慎芳,邱雷,等. 主动 Lamb 波中的空间滤波器结构健康监测[J]. 振动. 测试与诊断, 2011, 31(6): 794-797, 817-818.
- WANG Y, YUAN SH F, QIU L, et al. Direction filter method in active Lamb wave structural health monitoring[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(6): 794-797, 817-818.
- [7] QIU L, LIU B, YUAN S F, et al. Impact imaging of aircraft composite structure based on a model-independent spatial-wavenumber filter [J]. Ultrasonics, 2016, 64: 10-14.
- [8] QIU L, LIU B, YUAN S F, et al. A scanning spatial-wavenumber filter and PZT 2-D cruciform array based on-line damage imaging method of composite structure [J]. Sensors and Actuators A: physical, 2016, 248: 62-72.
- [9] 刘彬,邱雷,袁慎芳,等. 基于多维阵列和空间滤波器的损伤无波速成像定位方法[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 835-844.
- LIU B, QIU L, YUAN SH F, et al. Damage imaging and localization method based on multi-dimension arrays and spatial filter without wave velocity [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 835-844.
- [10] REN Y, QIU L, YUAN S, et al. A diagnostic imaging approach for online characterization of multi-impact in aircraft composite structures based on a scanning spatial-wavenumber filter of guided wave [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 90: 44-63.
- [11] 何存富,李志明,刘增华,等. 基于空间-频率-波数法的梁中分层缺陷定量检测[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 74-82.
- HE C F, LI Z M, LIU Z H, et al. Quantitative detection of lamination defect in beams based on space-frequency-wavenumber method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 74-82.
- [12] 刘增华,冯雪健,任捷,等. 基于频率-波数分析的激光 Lamb 波传播特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(22): 70-78.
- LIU Z H, FENG X J, REN J, et al. Experimental study on the propagation characteristics of laser-induced Lamb waves based on frequency-wavenumber analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(22): 70-78.
- [13] 张猛,江剑,高尚,等. 基于空间滤波器的三明治装甲复合材料结构损伤监测研究[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(1): 119-125.
- ZHANG M, JIANG J, GAO SH, et al. Research on damage monitoring of sandwich armor composite structure based on spatial filter [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(1): 119-125.
- [14] MOHAMMAD M B, AMIR Z, REZA R. Three-stage Lamb-wave damage localization algorithm in plate-like structures for structural health monitoring applications [J]. Signal Processing, 2020, 168: 107360.
- [15] LAKSHMI K. Detection and quantification of damage in bridges using a hybrid algorithm with spatial filters under environmental and operational variability [J]. Structures, 2021, 32: 617-631.
- [16] 王丹宏,叶波,段启明,等. 基于 Lamb 波能量和飞行时间的碳纤维复合材料疲劳损伤成像[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 205-213.
- WANG D H, YE B, DUAN Q M, et al. Imaging of fatigue damage for carbon fiber reinforced polymer based on Lamb wave energy and time-of-flight [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 35(4): 205-213.
- [17] 周琛,何建,胡暮平,等. 基于 L(0,2) 超声导波的管段结构损伤定位研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 181-191.
- ZHOU CH, HE J, HU M P, et al. Research on damage location of pipe section based on L(0,2) ultrasonic guided wave [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 181-191.
- [18] BHAT S, KOUNDAL D. Multi-focus image focusing using neutrosophic based wavelet transform [J]. Applied Soft Computing, 2021, 106: 107307.
- [19] CHARFI M O, MASMOUDI C C, HAMZAOU M, et al. Improvement of sentinel-1 remote sensing data classification by DWT and PCA [J]. Journal of Sensors, 2021: 1-12.
- [20] 徐云飞,孙永顺,丁晓喜,等. 基于 Lamb 波的数据传输与缺陷检测同步实现方法[J]. 仪器仪表学报,

2022,43(3):24-31.

XU Y F, SUN Y SH, DING X X, et al. A synchronous implementation method of data transmission and defect detection based on Lamb waves[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3):24-31.

- [21] 刘小峰,张天瑀,柏林. 基于异常指数的铝板损伤量化表征[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(10): 115-122.

LIU X F, ZHANG T Y, BO L. Quantitative characterization of aluminum plate damage based on anomaly index[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(10):115-122.

作者简介



常琦(通信作者),2011年于南京航空航天大学获得博士学位,现为西安理工大学讲师,主要研究方向为结构健康监测、结构健康管理、智能监测技术等。

E-mail:cqhardrocker@163.com

Chang Qi (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2011. He is currently a lecturer at Xi'an University of Technology. His main research interests include structural health monitoring, structural health management, and intelligent monitoring technology.