

呼吸裂纹的非线性虚拟激励识别方法研究^{*}

曹善成^{1†} 李岩坤¹ 郭宁¹ 徐超¹ 欧阳华江²

(1. 西北工业大学 航天学院, 西安 710072)
(2. 西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031)

摘要 呼吸裂纹是一种常见的局部非线性损伤,如疲劳裂纹和脱层损伤,其“呼吸”作用引起局部结构刚度周期性变化,增加了损伤表征与辨识难度.传统基于非线性振动特性的损伤识别方法,因测量信息有限难以对局部呼吸裂纹损伤进行精准定位与量化.随着全场振动位移测量技术的发展,板类结构表面振动位移场可快速获取,为呼吸裂纹的精准识别带来新的机遇.为此,本文结合振动位移场信息和局部微元动力学模型,提出了一种基于非线性虚拟激励的板类结构“脱层型”呼吸裂纹损伤定位方法.该方法首先通过构造正交基函数对振动位移场进行高效的非线性参数辨识,然后利用辨识得到的高频及其特征变形形状来计算非线性虚拟激励以实现呼吸裂纹的高精度定位.最后通过含“脱层型”呼吸裂纹薄板结构验证了本文所提方法的正确性.

关键词 呼吸裂纹, 非线性振动, 振动位移场, 虚拟激励, 参数辨识

中图分类号:O322;O327

文献标志码:A

Breathing Crack Identification Based on Nonlinear Pseudo-Excitation Method^{*}

Cao Shancheng^{1†} Li Yankun¹ Guo Ning¹ Xu Chao¹ Ouyang Huajiang²

(1. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)
(2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract Breathing cracks are a common type of local nonlinear damage, such as fatigue cracks and delamination damage, whose “breathing” effect causes cyclic changes in the local structural stiffness, which increases the difficulty of damage characterization. Traditional damage identification methods based on nonlinear vibration characteristics are difficult to accurately locate and quantify local breathing cracks due to limited measurement information. With the development of full-field vibration displacement measurement technology, the vibration displacement field on the surface of plate structures can be readily obtained, which brings new opportunities for the accurate identification of breathing cracks. In this paper, a nonlinear pseudo-excitation based method is proposed to localize the “delamination-type” breathing crack in plate structures by combining the vibration displacement field information and the local dynamic equilibrium. The method firstly performs feature extraction and efficient nonlinear feature parameter identification of the vibration displacement field by constructing orthogonal basis functions, and then calculates the nonlinear pseudo-excitation by using the identified super-harmonic frequencies and their characteristic deflection shapes in order to realize the high-precision localization of breathing

2024-12-24 收到第 1 稿,2025-01-27 收到修改稿.

^{*} 国家自然科学基金资助项目(12102346,12432002), National Natural Science Foundation of China(12102346,12432002).

[†] 通信作者 E-mail:shancheng.cao@nwpu.edu.cn

cracks. Finally, the correctness of the proposed method is verified by a thin plate structure with “delamination-type” breathing cracks.

Key words breathing crack, nonlinear vibration, full-field dynamic displacements, pseudo-excitation, parameter identification

引言

呼吸裂纹是一种在运营环境下呈现张开/闭合的裂缝型损伤,如金属结构的疲劳裂纹、复合材料结构的脱层损伤等^[1,2].在外载荷激励下,呼吸裂纹以张开/闭合的非线性方式使得初始线性结构产生非线性振动响应,因此可将结构展现的非线性动力响应特征作为呼吸裂纹识别指标^[3,4].相较于传统基于固有频率、模态振型、阻尼或传递函数的呼吸裂纹识别方法^[5],基于非线性振动特性的损伤识别方法,因能够利用呼吸裂纹产生的非线性损伤敏感特征,可对裂纹类损伤进行高效准确识别^[6,7].

简谐激励下,呼吸裂纹引起的超谐波成分被广泛用于呼吸裂纹识别^[8,9].程长明等提出了一种利用 NARMAX 模型和 NOFRF 的结构损伤检测方法,该损伤检测方法可有效地检测出非线性梁中的疲劳裂纹^[10].Broda 等研究了激励幅度、接触刚度和摩擦对非线性水平的影响,以及裂纹深度和位置对非线性响应的影响.结果表明,裂纹的存在可以在裂纹附近显著增加高次谐波的幅度,这可以用来检测和定位裂纹^[11].Lu 等通过对裂纹转子损伤识别研究,表明超谐成分对应的特征变形形状(characteristic deflection shape, CDS)对裂纹定位更有效,而其他线性特征如转轴上的阶梯由于不能产生超谐成分,因而其干扰可以被排除^[12].Cao 等针对复合材料层合板,通过假设脱层区弯曲刚度服从余弦函数变化,表明了非线性损伤可以引起振动响应产生高倍频成分,进而基于高倍频对应的特征变形形状实现了脱层区域的高效检测^[13].然而,此类方法利用超谐波特征变形形状的局部畸变进行损伤定位,难以深层次地挖掘呼吸裂纹的非线性识别机理及辨识其力学性能参数信息.

近年来,随着全场振动位移测量技术的发展,如三维数字图像相关技术^[14]以及基于应变数据的逆有限元位移场重构技术^[15],为将微元动力学参数辨识方法应用于局部损伤的探测和量化分析提

供了工程技术支撑^[16].为实现基于微元动力学参数辨识方法的高效损伤量化与检测,香港理工大学成利教授团队以梁结构的 Euler-Bernoulli 理论为基础,建立了用于损伤定位的损伤等效虚拟激励方法^[17-19].虚拟激励方法研究思路为:当被测结构局部某处合外力为零时,一旦结构中局部出现损伤,那么局部结构微元动力学平衡方程也将会受到局部扰动,此时利用各点的振动位移重构载荷会出现由损伤引起的“虚拟激励”,根据虚拟激励的存在与否可判断出损伤位置.Xu 等采用区域检测的形式将梁结构划分成许多虚拟单元以进行虚拟激励计算,此方法提高了损伤定位的抗噪性能^[20].曹善成等建立了考虑阻尼影响的薄板结构的虚拟激励模型,并利用局部多项式平滑方法来提高损伤定位的抗噪能力^[21].

针对呼吸裂纹,Xu 等提出“非线性虚拟激励”概念,解释了呼吸裂纹产生高阶谐波的物理机制^[13,22].然而,如何对具有呼吸裂纹效应的非线性损伤产生的非线性虚拟激励进行抗噪辨识,以及从振动位移场中挖掘虚拟激励的非线性特征以实现高效的呼吸裂纹定位尚未解决,是目前亟待突破的难题.

为此,本文首先针对“脱层型”呼吸裂纹,结合局部微元动力学方程,提出了一种基于非线性虚拟激励的板结构呼吸裂纹识别方法.其次,为从振动位移场高效辨识出超谐波及其特征变形形状,提出了一种基于正交基投影系数和频域分解的超谐波参数辨识方法.此外,本文使用一种基于局部多项式拟合的高阶空间导数抗噪计算方法以实现非线性虚拟激励的抗噪辨识.最后通过含“脱层型”呼吸裂纹的板结构数值算例验证了所提方法的正确性.

1 呼吸裂纹的虚拟激励识别方法

以等厚 h 的正交各向异性复合材料层合板为例,其动力学控制方程为

$$D \nabla^4 w + \bar{\rho} h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial w}{\partial t} = f \quad (1)$$

式中, $w(x, y)$ 和 $f(x, y)$ 为位移场和外激励; 本文定义 $\nabla^4 = \left[\frac{\partial^4}{\partial x^4}, 2 \times \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2}, \frac{\partial^4}{\partial y^4} \right]^T$ 为列向量, $\bar{\rho}$ 为等效密度, c 为阻尼系数, $\mathbf{D} = [D_{11}, D_{12} + 2D_{66}, D_{22}]$. 对于各向同性均质板, $D_{11} = D_{22} = D, D_{12} = \nu D, D_{66} = D(1 - \nu)/2, D = Eh^3/[12(1 - \nu^2)]$.

在简谐激励 ω_f 下, 当外加激励位于所检测区域外部时, 则公式(1)转化为:

$$\mathbf{D} \nabla^4 w(\omega_f) - \bar{\rho} h \omega_f^2 w(\omega_f) + j c \omega_f w(\omega_f) = 0 \quad (2)$$

式中, $j = \sqrt{-1}$. 公式(2)可以简化为

$$L w(\omega_f) = 0 \quad (3)$$

式中, $L = \mathbf{D} \nabla^4 - \bar{\rho} h \omega_f^2 + j c \omega_f$.

针对无损伤区域, $L = 0$. 损伤引起结构刚度变化可以等效为右侧的虚拟激励进行辨识, 进而实现损伤的定位与量化, 具体方法如下.

1.1 线性虚拟激励

针对开裂损伤区域 Ω_d , 局部刚度变化为 $\Delta \mathbf{D} = [D_{11} - D_{11}^d, D_{12} + 2D_{66} - D_{12}^d - 2D_{66}^d, D_{22} - D_{22}^d]$. 假设损伤区域结构的密度和阻尼保持不变, 则公式(3)整理为

$$L w(\omega_f) = f_{Ld}(\omega_f) \quad (4)$$

线性虚拟激励定义为:

$$f_{Ld}(\omega_f) = \begin{cases} \Delta \mathbf{D} \nabla^4 w(\omega_f) & x, y \in \Omega_d \\ 0 & x, y \notin \Omega_d \end{cases} \quad (5)$$

因此, 线性损伤的定位与量化指标为

$$I(x, y) = f_{Ld}(\omega_f) \quad (6)$$

简谐激励 ω_f 作用下, 公式(4)代入任一时刻的位移场 $w(t)$ 即可计算 $I(x, y)$. 通常为提高位移场 $w(x, y)$ 的抗噪特性, 对振动位移场进行频域分析以提取 ω_f 对应的特征变形形状 $\Psi(\omega_f)$ 作为等效 $w(\omega_f)$ 进行 $I(x, y)$ 计算, $\Psi(\omega_f)$ 的具体计算过程见 2.1 节. 此外, 当单阶频率特征变形形状难以辨识损伤位置时, 可综合不同频率下的损伤信息进行损伤定位如公式(7)所示. 一般高阶频率下的特征变形形状对局部损伤敏感, 但是高阶频率下的特征变形形状易受测量噪声影响, 信噪比低.

$$I(x, y) = \sum_{i=1}^l \alpha_i f_{Ld}(\omega_i) \quad (7)$$

式中, α_i 为权重系数. 在随机激励下, 可通过对振动位移场进行工作模态分析, 辨识得到各阶固有频率 ω_i 和模态振型 $\Psi(\omega_i)$, 进而基于公式(4)和(7)

进行线性损伤辨识.

1.2 非线性虚拟激励

在仿真建模时, 呼吸裂纹开闭规律可以通过余弦函数或方波函数来表征^[23]. 当使用余弦函数时, “脱层型”呼吸裂纹损伤区 Ω_{Nd} 的刚度变化量表示为 $\Delta \mathbf{D}(1 + \cos \omega_d t)/2$, 则公式(1)整理为

$$\mathbf{D} \nabla^4 w + \bar{\rho} h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial w}{\partial t} = f_{Ld} + f_{Nd} \quad (8)$$

式中 f_{Ld} 为谐波激励 ω_f 下线性虚拟激励, f_{Nd} 为高频对应的非线性虚拟激励.

非线性虚拟激励定义为:

$$f_{Nd} = \begin{cases} \frac{1}{2} \Delta \mathbf{D}(1 + \cos \omega_d t) \nabla^4 w & x, y \in \Omega_{Nd} \\ 0 & x, y \notin \Omega_{Nd} \end{cases} \quad (9)$$

谐波激励 ω_f 下, 通常裂纹损伤的呼吸频率与简谐激励频率一致, 即 $\omega_d = \omega_f$ ^[24, 25]. 含呼吸裂纹结构某一测点 (x, y) 处的单个超谐波成分可表示为

$$w(x, y, k\omega_f) = A_k \sin(k\omega_f t + \phi_k) \quad (10)$$

式中, $k = 2, 3, 4, \dots$. 将公式(10)代入公式(8), 可得到各高频下的振动控制方程为

$$(\mathbf{D} \nabla^4 - \bar{\rho} h k^2 \omega_f^2 + j c k \omega_f) w(k\omega_f) = f_{Nd}(k\omega_f) \quad (11)$$

此外, 综合多个高阶谐波成分的呼吸裂纹综合定位指标为

$$I(x, y) = \sum_{k=2}^l \beta_k f_{Nd}(k\omega_f) \quad (12)$$

式中, β_k 为权重系数.

基于公式(11)进行呼吸裂纹损伤识别, 存在两个主要困难: (1) 如何从振动位移场中高效辨识超谐波及其对应的高空间分辨率特征变形形状信息; (2) 计算非线性虚拟激励时需求解位移场的空间四次偏导数, 因其对测量噪声敏感, 如何抗噪的计算位移场高阶导数.

2 非线性虚拟激励的抗噪辨识

随着全场振动位移测量手段的发展如激光扫描方法和高速摄像数字图像相关方法, 板结构表面位移场信息可准确快速测量, 如图 1 所示.

直接使用测量的位移场进行损伤识别, 易受测量噪声影响, 且难以利用非线性特征对呼吸裂纹进

行高效识别. 为此需对振动位移场进行处理, 以获得简谐激励下超谐波及其对应的特征变形形状信息. 因振动位移场由成百上千的测点组成, 常规频域分析方法难以处理并获得高空间分辨率的空间变形信息. 为此, 基于振动位移场信息, 首先利用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)构造一组正交基函数, 然后基于正交基系数和频域分解方法进行超谐波及其空间特征变形形状辨识.

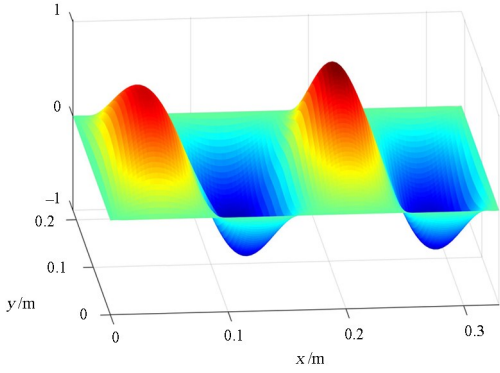


图1 板结构表面位移场示意图

Fig. 1 Full-field displacement demonstration of plates

2.1 超谐波及其特征变形形状辨识

首先, 将二维位移场 $w(x_i, y_j, t_k) \in \mathbf{R}^{r_1 \times r_2}$ 的行与列展开重构成列向量形式 $\mathbf{w}(t_k) \in \mathbf{R}^{m \times 1}$, 并进一步将不同时刻 (t_1, t_2, \dots, t_n) 位移数据表征为矩阵 $\mathbf{W} \in \mathbf{R}^{m \times n}$ ($m < n$).

$$\mathbf{W} = \{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_i, \dots, \mathbf{w}_n\} \quad (13)$$

式中, \mathbf{w}_i 为 $\mathbf{w}(t_i)$ 且 $m = r_1 \times r_2$. 然后, 对 \mathbf{W} 进行奇异值分解

$$\mathbf{W} = \mathbf{U}\mathbf{A}\mathbf{V}^T \quad (14)$$

式中, $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_m] \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 是 $\mathbf{W}\mathbf{W}^T$ 的特征向量矩阵, $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n] \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 是 $\mathbf{W}^T\mathbf{W}$ 的特征向量矩阵, $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 为奇异值矩阵且对角线奇异值按 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$ 排列. 公式(14)可改写为

$$\mathbf{W} = \sum_{i=1}^m \lambda_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T \quad (15)$$

通常, 选取前 k ($k < m$) 阶特征向量与特征值即可精确近似 \mathbf{W}

$$\mathbf{W} \approx \mathbf{U}_k \mathbf{A}_k \mathbf{V}_k^T = \sum_{i=1}^k \lambda_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T \quad (16)$$

$\mathbf{U}_k = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_k] \in \mathbf{R}^{m \times k}$ 包含前 k 阶特征向量, 其为空间的 1 组正交基函数, 且保留了位

移场空间形变的主要特征. \mathbf{W} 在 $[\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_k]$ 这组基函数上的投影系数为

$$\mathbf{C}_k = \mathbf{U}_k^T \mathbf{W} = \mathbf{A}_k \mathbf{V}_k^T \quad (17)$$

式中, $\mathbf{C}_k \in \mathbf{R}^{k \times n}$ 为系数矩阵. 因 $k \ll m$, 基于正交基函数投影系数 \mathbf{C}_k 可以得到能量谱密度(power spectral density, PSD) 矩阵 $\mathbf{S}_{cc}(\omega) \in \mathbf{R}^{k \times k}$, 并对 $\mathbf{S}_{cc}(\omega_i)$ 进行奇异值分解

$$\mathbf{S}_{cc}(\omega_i) = \mathbf{\Phi}_i \mathbf{\Sigma}_i \mathbf{\Phi}_i^T \quad (18)$$

式中, $\mathbf{\Sigma}_i \in \mathbf{R}^{k \times k}$ 为特征值矩阵. 基于 $\mathbf{\Sigma}$ 中特征值随频率变化展示图即可辨识得到基频和高倍频, 如图 2 所示. 本方法也可用于工作模态分析, 辨识结构共振频率. $\mathbf{\Phi}_i = \mathbf{\Phi}(\omega_i) = [\boldsymbol{\varphi}_{i1}, \boldsymbol{\varphi}_{i2}, \dots, \boldsymbol{\varphi}_{ik}]$ 为能量谱矩阵 $\mathbf{S}_{cc}(\omega_i)$ 的特征向量矩阵. 针对图 2 峰值点 ω_r , 能量谱矩阵的第一阶特征向量 $\mathbf{\Phi}_{r1} \in \mathbf{R}^{k \times 1}$ 即可表征其对应的投影系数空间的特征变形形状, 进而可以得到 ω_r 在实际空间的特征变形形状

$$\boldsymbol{\Psi}(\omega_r) = \mathbf{U}_k \mathbf{\Phi}_{r1} \quad (19)$$

将 $\boldsymbol{\Psi}(\omega_r) \in \mathbf{R}^{m \times 1}$ 重组为 $r_1 \times r_2$ 的矩阵 $\boldsymbol{\Psi}(x_i, y_j, \omega_r)$ 即为基频或非线性引起的超谐波的空间特征变形形状, 进而将其等效为 $\hat{w}(x, y, \omega_r)$ 并利用公式(11)进行呼吸裂纹识别.

本方法通过奇异值分解来构造正交基函数效率高, 且自适应于被测板结构的几何形状. 其次, 构造的正交基函数按照其对位移场的贡献程度依次排序, 选取方便, 克服了传统正交基函数如契比雪夫多项式基函数贡献度难测算的问题. 此外, 基于奇异值向量构造的正交基函数是基于含损伤的位移场提取而来, 保留了损伤引起的局部畸变信息, 而契比雪夫多项式等基函数是与被测数据无关的全局平滑函数, 难以保留局部损伤特征.

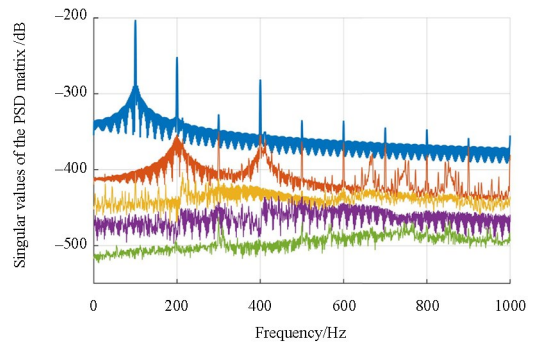


图2 能量谱矩阵前5阶特征值随频率变化图

Fig. 2 The first 5 singular values of the PSD matrix against the frequency

2.2 高阶空间导数的抗噪计算

当使用公式(11)进行呼吸裂纹损伤识别时,位移场的四阶偏导数一般通过差分算法计算,其计算过程易受噪声影响.为此,本文提出使用局部多项式拟合进行高阶导数计算.若直接使用包含 x^4 、 x^3y 、 x^2y^2 、 xy^3 、 y^4 的高阶项的多项式进行拟合,未知系数过多,对局部测点数量要求高.为此,可以通过两步二次偏导数计算规避上述问题:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{2 \times \partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \nabla^2 \nabla^2 w \quad (20)$$

位移场的局部拟合形函数及二阶偏导数如式(21)和式(22)所示:

$$w(x, y) = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 \quad (21)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 2b_3 \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 2b_5 \\ \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = b_4 \end{cases} \quad (22)$$

在此基础上,对二阶导数计算得 $\nabla^4 w(x, y)$. $\nabla^4 w(x, y)$ 的计算精度与 $w(x, y)$ 拟合所选局部区域大小有关.图 3 展示了以计算点为中心选取周围测点的方法.

当 $\eta=1$ 时,5 个测点信息无法对公式(21)进行求解,所以 $\eta \geq 2$. η 取值越大,对测量噪声滤除效果越好,但同时也会过滤掉损伤信息.

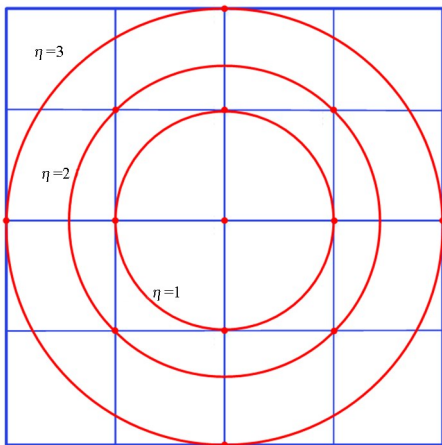


图 3 基于参数 η 的局部拟合区域大小示意图
Fig. 3 Local fitting points indicating by η

3 数值算例分析

针对 1.2 节提出的基于非线性激励的呼吸裂纹识别方法,本节通过 1 块带有 2 个损伤区域的四边简支板结构进行有效性验证,这里将板结构简化为各向同性材料.根据 Mindlin 板理论,使用四节点壳单元对该板进行有限元建模.在刚度矩阵计算过程中, 2×2 的高斯点用于计算弯曲刚度,1 个高斯点用于计算剪切刚度,这可以有效地避免剪切自锁现象.矩形板的尺寸及材料参数如表 1 所示

表 1 矩形板的几何和材料参数

Table 1 The geometry and material properties of the plate

Property	Value
Thickness	0.003 m
Length \times width	0.33 m \times 0.22 m
Young's modulus E	69 GPa
Mass density ρ	2700 kg/m ³
Poisson ratio ν	0.35

矩形板被划分为 33×22 个单元,每个单元大小为 $0.01 \text{ m} \times 0.01 \text{ m} \times 0.003 \text{ m}$.在本算例中,通过降低损伤区域的杨氏模量来模拟损伤.两个损伤区域如图 4 所示,其中心位置分别位于 $(0.12 \text{ m}, 0.13 \text{ m})$ 和 $(0.21 \text{ m}, 0.115 \text{ m})$ 处,面积分别为 $0.02 \text{ m} \times 0.02 \text{ m}$ 和 $0.02 \text{ m} \times 0.03 \text{ m}$.本文重点研究了 2 种损伤工况:

(1) 损伤工况一:损伤区域 1 为“脱层型”呼吸裂纹损伤,损伤区域 2 为线性开裂纹损伤;

(2) 损伤工况二:损伤区域 1 为线性开裂纹损伤,损伤区域 2 为“脱层型”呼吸裂纹损伤.

线性损伤区域杨氏模量降低为 $0.5E$,“脱层型”呼吸裂纹损伤区域,裂纹开闭规律由公式(9)余弦函数进一步简化为方波函数,其杨氏模量定义为

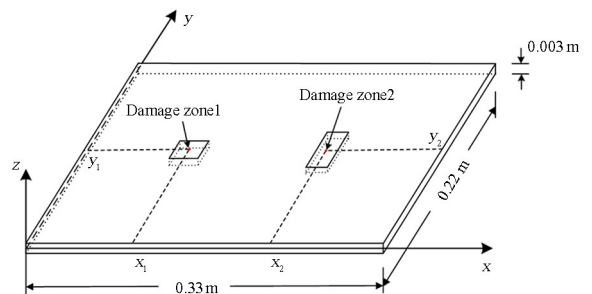


图 4 含 2 个损伤区域的四边简支板结构
Fig. 4 A simply supported plate with two damage zones

$$E = \begin{cases} E & \sin\omega_d t \geq 0 \\ E/2 & \sin\omega_d t < 0 \end{cases} \quad (23)$$

将振幅为 $2N$ 的简谐激励 $F = 2\sin(\omega_f t)$ 施加于点 $(0.32 \text{ m}, 0.11 \text{ m})$ 处, 激励频率为 100 Hz . 在采样率为 2000 Hz 的情况下, 采集矩形板表面 782 个单元节点 8 s 的振动位移数据以用于损伤识别. 此外, 为了验证所提方法对测量噪声的抗噪性, 对采集的数据添加 40 dB 的高斯白噪声.

3.1 损伤工况一的损伤识别研究

首先, 使用 2.1 节方法, 基于奇异值分解提取二维正交基函数 U_k , 前 4 阶如图 5 所示.

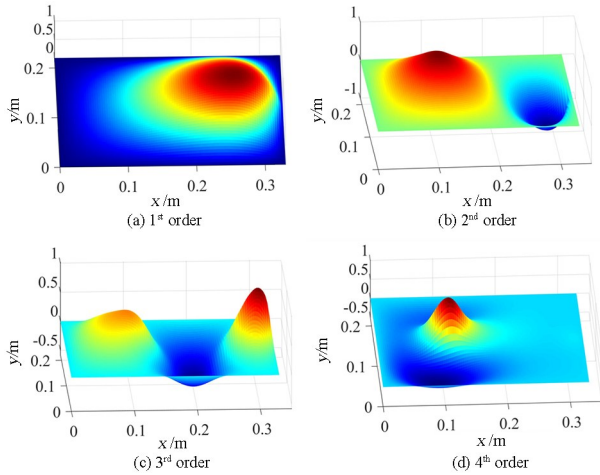


图 5 基于 SVD 的前 4 阶正交基函数

Fig. 5 The first 4 order of orthogonal basis functions by SVD method

基于基函数系数 C_k , 通过频域分解方法, 可得到超谐波频率的辨识结果如图 6 所示. 图 6 中 100 Hz 峰值为简谐激励频率. 相较于三倍频 300 Hz , 二倍频 200 Hz 与四倍频 400 Hz 因临近简支板第 1 阶和第 2 阶固有频率而振幅较大, 信噪比高. 图 6 中更高阶谐波成分被噪声淹没而无法辨识.

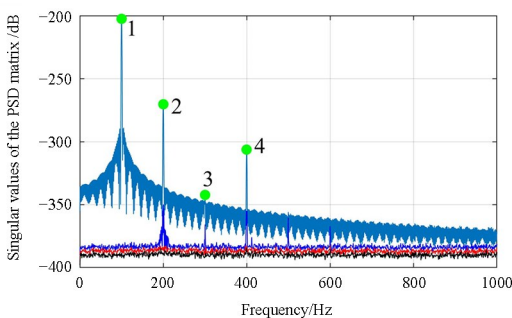


图 6 损伤工况一共振频率峰值辨识结果

Fig. 6 Peak frequency identification results of damage scenario one

基于频域分解方法和公式 (19), 可辨识得到图 6 中各峰值频率所对应的特征变形形状, 如图 7 所示. 图 7(c) 表明第 3 阶高倍频对应的特征变形形状受噪声影响较大. 将图 6 中辨识的高倍频信息和图 7 中的特征变形形状代入公式 (11) 得到各阶频率损伤定位结果如图 8 所示.

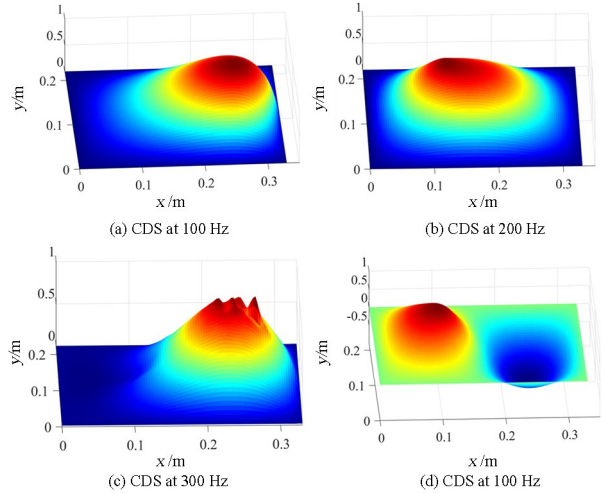


图 7 图 6 中基频与高倍频相应特征变形形状
Fig. 7 CDS's at the peak frequencies of figure 6

图 8 中, 使用 3σ 准则进行滤波, 将噪声引起的小扰动点滤除, 保留由损伤引起的较大的非线性虚拟激励点. 图 8(a) 为基频损伤定位结果, 其可准确辨识出线性损伤 2 的位置, 但对非线性损伤 1 无效. 图 8(b) 和图 8(d) 分别为二倍频和四倍频的辨识结果, 其对非线性损伤 1 可以准确识别, 但对线性损伤 2 无法辨识. 图 8(c) 因三倍频信噪比低而无法给出有效的辨识结果. 因此, 虽然高倍频对非线性损伤敏感, 但容易受噪声影响, 建议基于公式 (12) 综合不同高倍频下的损伤信息进行高可靠性损伤辨识. 图 8 还表明, 超谐波对线性损伤不敏感.

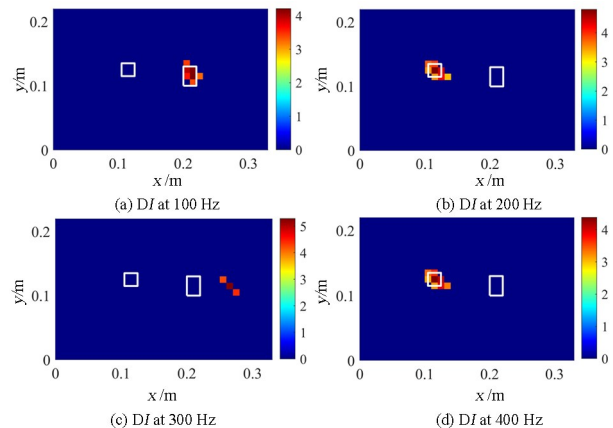


图 8 损伤工况一损伤定位结果 ($\eta=3$)

Fig. 8 Damage localization results of damage scenario one ($\eta=3$)

3.2 损伤工况二的损伤识别研究

针对损伤工况二获得的振动位移场信息,基于2.1节提出的超谐波及其特征变形形状辨识方法,频率辨识结果如图9所示。基于峰值处特征变形形状的损伤定位结果如图10所示。从图9和图6的对比可以看出,损伤工况二的非线性特性更加明显,有更多的高倍频成分可以被辨识,其原因为非线性损伤区域2靠近激励位置,非线性响应幅值大,信噪比高。

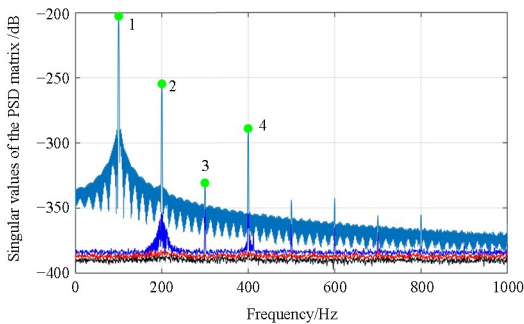


图9 损伤工况二共振频率峰值辨识结果

Fig. 9 Peak frequency identification results of damage scenario two

图10(a)无法对两处损伤进行辨识。通过与图8(a)对比可知,线性虚拟激励无法保证对线性损伤及非线性损伤给出有效的损伤定位结果。又因非线性损伤等效损伤刚度小于线性损伤刚度折减,使得非线性损伤更加难于识别。由图10(b)~(d)二倍频、三倍频和四倍频处非线性激励辨识结果可知,非线性激励对非线性损伤敏感,综合各阶高倍频信息可得到更可靠的损伤定位结果。

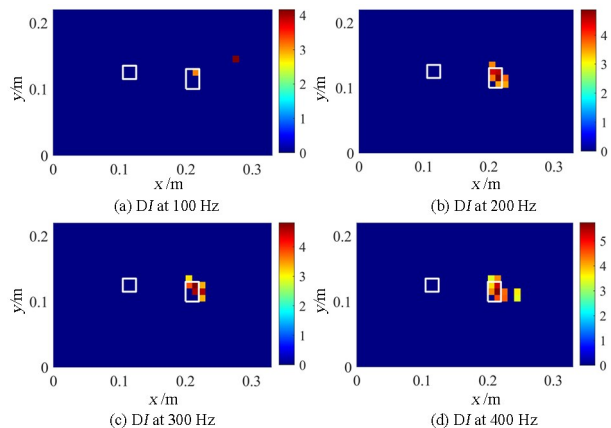


图10 损伤工况二损伤定位结果($\eta=3$)

Fig. 10 Damage localization results of damage scenario two ($\eta=3$)

4 结论

本文提出了一种基于非线性激励的板类结构“脱层型”呼吸裂纹识别方法,克服了线性虚拟激励对非线性损伤不敏感的缺点。为准确辨识超谐波及其高空间分辨率特征变形形状,本文提出了一种基于特征值分解的正交基函数构造方法,可高效压缩振动位移场数据并进行超谐波参数辨识。此外,针对非线性虚拟激励计算过程中高阶空间导数易受噪声影响问题,本文提出了一种基于局部多项式拟合的抗噪计算方法。主要结论如下:

- (1)非线性虚拟激励将呼吸裂纹损伤引起的局部结构力学参数变化等效为单参数虚拟激励进行辨识,提高了辨识效率且物理含义明确;
- (2)非线性虚拟激励方法利用超谐波成分对呼吸裂纹进行高效辨识,对线性损伤不敏感;
- (3)本文利用局部微元动力学扰动进行逐点损伤辨识,未来可利用积分特性,构造虚拟激励的分区分位方法,以降低位移场空间测量点数。

参考文献

- [1] 李志航,肖黎,屈文忠. 黏接界面脱黏损伤的缺陷局部内共振识别方法[J]. 振动与冲击, 2023, 42(13): 1-9,24.
LI Z H, XIAO L, QU W Z. Debonding damage recognition of bonding interface based on local internal resonance of defects [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(13): 1-9,24. (in Chinese)
- [2] BRUNETTI J, KHOR W, D'AMBROGIO W, et al. Contact acoustic nonlinearity and local damage resonance for the detection of kissing bonds in structural adhesive joints [J]. Journal of Sound and Vibration, 2024, 573: 118202.
- [3] BOVSUNOVSKY A, SURACE C. Non-linearities in the vibrations of elastic structures with a closing crack: a state of the art review [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 62: 129-148.
- [4] 李姚,南国防,丘学文,等. 滚动轴承支承下松动-裂纹耦合故障转子系统动力学特性分析[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(3): 62-70.
LI Y, NAN G F, QIU X W, et al. Analysis of rotor system dynamic characteristics of looseness-crack coupling fault supported by rolling bearing

- [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024, 22(3): 62–70. (in Chinese)
- [5] 孙禹晗, 王泽峰, 宋智广. 基于模态参数及小波变换的旋转梁结构损伤识别[J]. *动力学与控制学报*, 2023, 21(1): 51–59.
SUN Y H, WANG Z F, SONG Z G. Damage identification of rotating beams based on mode parameters and wavelet transform [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2023, 21(1): 51–59. (in Chinese)
- [6] ZHAO B X, CHENG C M, PENG Z K, et al. Detecting the early damages in structures with nonlinear output frequency response functions and the CNN-LSTM model [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(12): 9557–9567.
- [7] CHENG C M, PENG Z K, DONG X J, et al. Locating non-linear components in two dimensional periodic structures based on NOFRFs [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2014, 67: 198–208.
- [8] HUANG X, QU W Z, XIAO L, et al. A subharmonic modulation-based approach for debonding damage detection of composite stiffened plates [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2024, 39(4): 802–831.
- [9] LIU Y, LONG W F, CHEN Y G, et al. Nonlinear vibration characteristics and damage detection method of blade with breathing fatigue crack [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2024, 155: 109715.
- [10] 程长明, 彭志科, 孟光. 基于 NARMAX 模型和 NOFRF 结构损伤检测的实验研究[J]. *动力学与控制学报*, 2013, 11(1): 89–96.
CHENG C M, PENG Z K, MENG G. The experimental study of damage detection based on NARMAX model and NOFRF [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2013, 11(1): 89–96. (in Chinese)
- [11] BRODA D, PIECZONKA L, HIWARKAR V, et al. Generation of higher harmonics in longitudinal vibration of beams with breathing cracks [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 381: 206–219.
- [12] LU Z W, CAO S C, OUYANG H J, et al. Crack localization in stepped rotors based on Bayesian fusion of multiscale superharmonic characteristic deflection shapes [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2020, 43(10): 2200–2213.
- [13] CAO M S, SU Z Q, DENG T F, et al. Nonlinear pseudo-force in “breathing” delamination to generate harmonics: a mechanism and application study [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 192: 106124.
- [14] PENG F H, ZHAO R, JIANG G Q, et al. Variational mode decomposition framework for modal shape visualization of honeycomb sandwich structures for full-field vibration measurements in non-uniform temperature fields [J]. *Measurement*, 2024, 227: 114278.
- [15] ABDOLLAHZADEH M A, ALI H Q, YILDIZ M, et al. Experimental and numerical investigation on large deformation reconstruction of thin laminated composite structures using inverse finite element method [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 178: 109485.
- [16] ZHANG C, JI H L, QIU J H, et al. A local specific stiffness identification method based on a multi-scale “weak” formulation [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 140: 106650.
- [17] XU H, SU Z Q, CHENG L, et al. A “Pseudo-excitation” approach for structural damage identification: From “Strong” to “Weak” modality [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 337: 181–198.
- [18] CAO S C, OUYANG H J, CHENG L. Adaptive damage localization based on locally perturbed dynamic equilibrium and hierarchical clustering [J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(7): 075003.
- [19] CAO M S, SU Z Q, CHENG L, et al. A multi-scale pseudo-force model for characterization of damage in beam components with unknown material and structural parameters [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(21): 5566–5583.
- [20] XU H, SU Z Q, CHENG L, et al. On a hybrid use of structural vibration signatures for damage identification: a virtual vibration deflection (VVD) method [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2017, 23(4): 615–631.
- [21] CAO S C, NIAN H B, YAN J W, et al. Modal analysis and damage localization in plate-type structures via TDD and PE methods based on the data of an integrated highspeed camera system [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 178: 109309.

- [22] XU W, SU Z Q, RADZIENSKI M, et al. Nonlinear pseudo-force in a breathing crack to generate harmonics [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2021, 492: 115734.
- [23] AFTAB H, BANEEN U, ISRAR A. Identification and severity estimation of a breathing crack in a plate via nonlinear dynamics [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021, 104(3): 1973–1989.
- [24] ZHAO S Y, CHENG C M, LIN M M, et al. Detection of breathing cracks using physics-constrained hybrid network [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 281: 109568.
- [25] CAO M S, LU Q T, SU Z Q, et al. A nonlinearity-sensitive approach for detection of “breathing” cracks relying on energy modulation effect [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 524: 116754.