

基于低秩与稀疏分解的层合板损伤定位*

颜津玮, 曹善成, 徐超

(西北工业大学航天学院 西安, 710072)

摘要 针对基于结构振型参数的损伤定位方法抗噪性差、对微小损伤不敏感以及对多损伤识别性能低等问题, 基于振型低秩性与损伤分布稀疏性提出了一种复合材料层合板多损伤识别方法。首先, 使用高斯-拉普拉斯算子 (Laplacian of Gaussian, 简称 LoG) 求解曲率模态; 其次, 利用鲁棒主成分分析提取曲率模态中损伤诱导产生的奇异值进行损伤定位; 然后, 提出了一个鲁棒损伤定位指标用于融合多个曲率模态的损伤信息; 最后, 使用带损伤复合材料层合板数值模拟与实验数据验证了方法的有效性。结果表明, 该方法无需无损结构参考信息, 便可准确地定位复合材料层合板中多个小面积损伤。

关键词 复合层合板; 高斯-拉普拉斯算子; 曲率模态; 损伤定位; 鲁棒主成分分析

中图分类号 TH113; TU33

引言

复合材料结构因其比强度高、可设计性强等优点, 在航空航天领域得到广泛应用, 但在服役过程中会产生损伤或性能退化, 直接影响各有效载荷功能的发挥。因此, 迫切需要对复合材料结构开展损伤识别以及健康监测, 保证其服役期间的可靠性与安全性^[1-2]。在结构损伤识别方面, 基于振动的识别方法能同时提供全局和局部损伤特征, 因而被广泛应用于航天、土木与机械工程领域^[3-4]。本研究主要讨论一种基于结构特征挠度振型的损伤定位方法, 这里的结构特征挠度振型指的是具有结构空间挠度信息的形变特征, 如模态振型或工作振型。

在工程应用中, 特征挠度振型的高阶导数对局部损伤更为敏感, 能有效放大损伤诱导的局部结构形变^[5-6]。然而, 利用数值差分法计算特征挠度振型的高阶导数的稳定性差, 即使微小噪声也可能被成倍放大, 最终降低损伤识别的准确性^[7]。因此, 许多学者常使用统计方法、平滑技术及小波变换等方法来减少测量噪声对特征挠度振型及其导数的影响^[8-10]。Cao 等^[11]将复小波方法用于分析梁类结构的曲率模态以实现多损伤的检测, 并验证了该方法的准确性与抗噪性。

除直接检测特征挠度振型或其导数的局部形变

外, 另一类方法是基于损伤数据, 利用拟合或低秩模型构造无损结构的特征挠度振型, 计算两者之间的差异来进行损伤识别, 即认为一个无损复合材料板结构的特征挠度振型或其导数均是平滑的, 或者说当将其特征挠度振型或其导数的数据按照测量网格上各点的顺序对应排列成一个数据矩阵时, 这个矩阵是一个低秩矩阵。刘伟等^[12]等利用基函数拟合损伤结构的曲率模态, 从而构建健康状态的曲率模态模型, 利用两者差的绝对值来定位损伤。

在实际应用中, 常难以获得无损结构的参考数据, 且测量的特征挠度振型易受到测量噪声的污染。此外, 单个特征挠度振型对损伤的敏感程度依赖于损伤的位置, 且存在损伤检测盲区^[13]。针对这些问题, 笔者提出了一种基于三西格玛准则的不依赖参考数据的复合材料结构多损伤识别方法。该方法可高效提取曲率模态中的损伤信息, 并基于三西格玛准则对损伤信息进行标准化处理, 进而融合多源损伤信息构建本研究所提出的多损伤定位指标, 提高了多损伤识别的可靠性。

1 基本理论

1.1 基于高斯-拉普拉斯算子的曲率模态计算

对于正交各向异性层组成的对称层合板, 根据

* 中央高校基本科研业务费资助项目(3102019HTQD011); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2020JQ-109); 国家自然科学基金资助项目(12102346)

收稿日期: 2020-09-10; 修回日期: 2021-05-19

经典层合板理论,弯矩与板的挠度关系为

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: M_x 为 x 方向的弯矩; M_y 为 y 方向的弯矩; M_{xy} 为扭矩; $w(x,y)$ 为板在 z 方向上的位移;弯曲刚度 $D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\dot{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3)$, z_k 为第 k 层单层板的中心坐标, $(\dot{Q}_{ij})_k$ 为第 k 层单层板的刚度系数。

损伤改变了层合板的局部刚度,引起特征挠度振型在损伤位置产生了局部形变,因此能够通过特征挠度振型来进行损伤定位。在板的损伤识别中,特征挠度振型的曲率对损伤更为敏感^[11]。根据小斜率假设,曲率模态能够近似为二阶偏导数,因此常使用二阶中心差分法计算曲率模态。

使用二阶中心差分法计算曲率会严重放大噪声的影响,降低损伤识别的有效性和准确性^[14]。因此,应在损伤识别之前去除测量噪声的影响,如高斯平滑与小波变换等方法能够在不同空间尺度下对原始振型参数进行处理,抑制振型参数的测量噪声和局部细节信息,使得处理后的模态振型变得平滑。因此,笔者使用高斯平滑方法对模态振型 $\Phi(x,y)$ 进行处理,将模态振型 $\Phi(x,y)$ 与给定尺度参数 σ 的高斯函数进行卷积,得

$$L(x,y;\sigma) = \Phi(x,y) * g(x,y;\sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(x-u,y-v)g(u,v;\sigma)du dv \quad (2)$$

其中: σ 为高斯函数的标准差;*代表卷积算子; $g(u,v;\sigma)$ 为一个高斯函数。

二维各向同性高斯平滑函数是旋转对称的,其形式为

$$g(x,y;\sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

由于卷积积分的微分性质,使用拉普拉斯算子来计算经过高斯函数卷积处理后模态振型 $L(x,y;\sigma)$ 的曲率,等价于将原始模态振型 $\Phi(x,y)$ 与高斯-拉普拉斯算子进行卷积,可表示为

$$\nabla^2 L(x,y;\sigma) = \nabla^2 \Phi(x,y) * g(x,y;\sigma) = \Phi(x,y) * \nabla^2 g(x,y;\sigma) \quad (4)$$

其中: $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ 为拉普拉斯算子。

通过使用高斯-拉普拉斯算子可以避免将二阶中心差分法直接应用于模态振型 $\Phi(x,y)$,模态振型测量噪声的影响可以通过调节尺度参数 σ 的大小进行抑制。高斯-拉普拉斯算子为

$$\nabla^2 g(x,y;\sigma) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

1.2 鲁棒主成分分析方法

传统主成分分析方法易受数据中奇异值的影响,难以有效提取损伤引起模态振型的空间形变特征。因此,应研究如何基于损伤状态下的曲率模态 Φ^w 获得无损结构曲率模态 L 和损伤诱导产生的局部形变特征 S 。在鲁棒主成分分析方法中,可以通过主成分追踪(principal component pursuit,简称PCP)、离群值追踪以及重复再加权最小平方方法等不同方法将 Φ^w 分解成一个低秩矩阵 L 加上一个稀疏矩阵 S ^[15]。基于PCP方法,这个问题可以描述为

$$\min_{L,S} \|L\|_* + \xi \|S\|_1 \quad (6)$$

s.t. $L + S = \Phi^w$

其中: ξ 为平衡参数; $\|L\|_*$ 为矩阵 L 的核范数; $\|S\|_1$ 为矩阵 S 的 l_1 范数。

Φ^w 在测量或计算时总是受到测量噪声的污染,为确保稀疏矩阵 S 的稳健性和精确性,应考虑噪声对 Φ^w 每个元素的影响,改进的式(6)为

$$\min_{L,S} \|L\|_* + \xi \|S\|_1 \quad (7)$$

s.t. $\|\Phi_p^w - L - S\| \leq \epsilon$

式(6)中的约束被松弛为 $\|\Phi_p^w - L - S\| \leq \epsilon$ ($\epsilon > 0$),设 ξ 为 $1/\sqrt{\max(n_1, n_2)}$ 。这种凸优化算法^[16]有效地解决了鲁棒主成分分析方法的问题,使其在人脸图像处理和背景建模领域表现优异^[17]。

1.3 鲁棒多损伤识别指标

笔者利用计算得到的稀疏矩阵 S ,提出了一种基于三西格玛准则的鲁棒多损伤识别指标。首先将每个测量点对应的 s_{ij} 值视作随机值,再定义标准化损伤指标为

$$\tilde{s}_{ij} = (s_{ij} - \bar{s}) / \sigma_s \quad (8)$$

其中: \bar{s} 与 σ_s 分别为稀疏矩阵 S 中所有项的均值和标准差。

标准化的稀疏矩阵 \tilde{S} 中非零元素可以定位损伤,但因受测量噪声影响,其也包含了大量非损伤引起的非零元素。为了去除这些非零元素,实现鲁棒的损伤识别,笔者采用统计假设检验的方法来筛选

数据。设零假设 H_0 为在第 l 个测量点上不存在损伤,其备择假设 H_1 在第 l 个测量点上存在损伤,此时损伤识别的问题转化为了在某个显著性水平下接受 H_1 或拒绝 H_0 的概率问题。无损结构数据矩阵分离得到的稀疏矩阵 \tilde{S} 中的元素大部分位于 $[\mu - 3\sigma_s, \mu + 3\sigma_s]$ 的范围内, μ ($\mu=0$) 和 σ_s ($\sigma_s=1$) 分别为矩阵 \tilde{S} 中所有项的平均值和标准差。位于此范围之外的离群值散布于板的表面,但损伤的存在会导致更多位于 $[\mu - 3\sigma_s, \mu + 3\sigma_s]$ 之外的离群值,且这些离群值聚集于损伤附近。因此,笔者取 $[\mu - 3\sigma_s, \mu + 3\sigma_s]$ 之外的离群值 ($\tilde{s}_{a/2} = \mu + 3\sigma_s$, $\alpha = 0.0027$) 用于损伤识别。

对于落在 $|\tilde{s}_{ij}| < \tilde{s}_{a/2}$ 中的值,则认为这些值所位于的测量点处没有损伤,故将对应的 \tilde{s}_{ij} 值设为 0。因此,对某个确定的曲率模态,更新后的损伤指标为

$$\tilde{s}_{ij} = \begin{cases} |\tilde{s}_{ij}| & (|\tilde{s}_{ij}| \geq \tilde{s}_{a/2}) \\ 0 & (|\tilde{s}_{ij}| < \tilde{s}_{a/2}) \end{cases} \quad (9)$$

对于 N_r 阶曲率模态,定义一个鲁棒多损伤指数为

$$DI_{ij} = \frac{1}{N_r} \sum_{r=1}^{N_r} \tilde{s}_{ij} \quad (10)$$

笔者使用特征挠度振型中典型的模态振型对鲁棒多损伤识别方法进行说明,在实际中也可使用工作振型来进行鲁棒多损伤识别。

2 数值模拟

数值模拟选用四边固支的4层碳/环氧树脂复合材料层合板,其尺寸为 $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}$,每层厚度相等,均为 0.0025 m ,铺层角度为 $(0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ)$ 。材料具体参数如下: $E_1 = 109.34 \text{ GPa}$; $E_2 = E_3 = 8.82 \text{ GPa}$; $G_{12} = G_{13} = 4.32 \text{ GPa}$; $G_{23} = 3.20 \text{ GPa}$; $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.342$; $\nu_{23} = 0.520$; $\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$ 。在 ABAQUS 中,使用八节点的连续壳单元对复合材料层合板进行模拟计算。复合材料层合板被离散为 $60 \times 60 \times 4$ 个单元,每个单元尺寸为 $0.01 \text{ m} \times 0.01 \text{ m} \times 0.0025 \text{ m}$,并将板的四边固支。笔者分别对具有1个分层损伤区域的板件和具有2个分层损伤区域的板件进行研究,其有限元模型如图1所示。

数值算例1中,损伤中心位置位于 $(0.30 \text{ m}, 0.30 \text{ m})$ 处,损伤区域面积为 $0.08 \text{ m} \times 0.08 \text{ m}$ 。数值算例2中,2个损伤中心位置分别位于 $(0.14 \text{ m},$

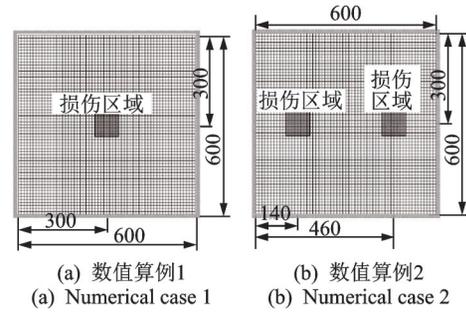


图1 复合材料层合板的有限元模型(单位:mm)

Fig.1 Finite element models of composite laminates (unit: mm)

$0.30 \text{ m})$ 和 $(0.46 \text{ m}, 0.30 \text{ m})$,面积均为 $0.08 \text{ m} \times 0.08 \text{ m}$ 。两个算例中,损伤均为复合材料层合板对称面单侧方向上 0° 与 90° 铺层之间的分层损伤。

为了更好地模拟实际实验情况,以式(11)产生的高斯白噪声施加于模态振型数据

$$\tilde{\Phi}_r(x, y) = \Phi_r(x, y) + n_n n_{\text{level}} \sigma(\Phi_r(x, y)) \quad (11)$$

其中: $\Phi_r(x, y)$ 为第 r 阶模态振型; x 和 y 为板平面上的坐标; $\tilde{\Phi}_r(x, y)$ 为加噪声后的模态振型; n_n 为均值为 0 且方差为 1 的正态分布的高斯白噪声; n_{level} 为设置在 $[0, 1]$ 范围内的噪声水平参数; $\sigma(\Phi_r(x, y))$ 为第 r 阶模态振型的标准方差。

将 $n_{\text{level}} = 0.1\%$ 的高斯白噪声(信噪比为 60.10 dB)施加于数值算例1的第11阶振型,然后分别使用二阶中心差分法和尺度参数 $\sigma = 1, 1.5, 2$ 的高斯-拉普拉斯算子计算第11阶振型在 x - y 平面上的平均曲率,结果如图2所示。

图2表明,二阶中心差分法受测量噪声的影响较大,而高斯-拉普拉斯算子在计算曲率模态时具有良好的抗噪性能^[18]。对比图2(b,c,d),随着尺度参

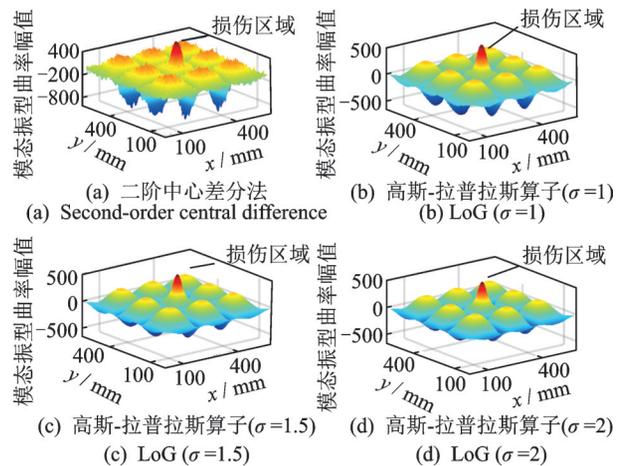


图2 数值算例1的 x - y 平面上的第11阶振型平均曲率
Fig.2 The mean curvature on the x - y plane of numerical example 1 based on the 11th mode shape

数 σ 的增大,曲率模态趋于平缓,有效去除了测量噪声的影响,但损伤诱导的特征也受到一定抑制。因此,应选择合适的尺度参数以在抑制测量噪声的同时保留损伤诱导的形状奇异点。对比图2中各尺度参数的性能,笔者使用尺度参数 $\sigma=1.5$ 的高斯-拉普拉斯算子对模态振型进行处理。

基于第11阶模态振型数据,分别使用传统主成分分析方法和鲁棒主成分分析方法对数值算例1进行损伤识别^[16],结果如图3所示。在图3中,红色矩形表示实际损伤区域。

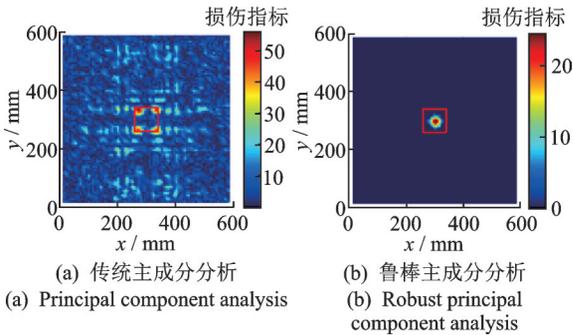


图3 数值算例1第11阶模态振型的损伤识别结果

Fig.3 Damage detection results based on the 11th mode shape of numerical example 1

实验结果表明:传统主成分分析方法对损伤区域的定位效果较差,在损伤区域出现了4个较大异常值区且受噪声影响比较严重;而鲁棒主成分分析方法可以准确地检测到分层损伤区域。此外,在图3(b)中,损伤识别结果受高斯-拉普拉斯算子尺度参数的平滑影响,由原始正方形被平滑为近似圆形。

采用数值算例1和2中的第10阶模态振型数据,用鲁棒主成分分析方法进行损伤识别,结果如图4所示。图4(a)仅能呈现数值算例1中分层损伤的损伤边界,这说明仅使用单一模态振型数据对复合材料的分层损伤进行识别,无法得到稳定的损伤识别结果。图4(b)表明,仅使用单一的第10阶模态振型数据进行损伤识别,无法有效定位数值算例2

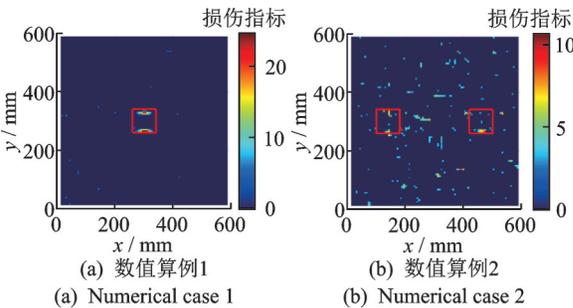


图4 基于第10阶模态振型的损伤识别结果

Fig.4 Damage detection results based on the 10th mode shape

中的多个损伤。因此,应综合使用多阶模态振型数据的损伤信息进行鲁棒多损伤识别。

为此,利用2个数值算例的第10~15阶模态振型数据来计算1.3节提出的鲁棒多损伤指数。笔者在计算前对第10~15阶模态振型数据加入 $n_{\text{level}}=0.1\%$ 的高斯白噪声污染,以更好地模拟实际实验情况。基于鲁棒主成分分析的鲁棒多损伤识别结果如图5所示,准确地识别出2个数值算例中的分层损伤区域,证明了笔者提出的鲁棒多损伤指标的有效性。此外,更改数值算例1中的损伤大小进行计算,结果表明,在信噪比为60.10 dB的条件下,鲁棒多损伤识别方法最小能够识别层合板总面积0.25%大小的分层损伤。

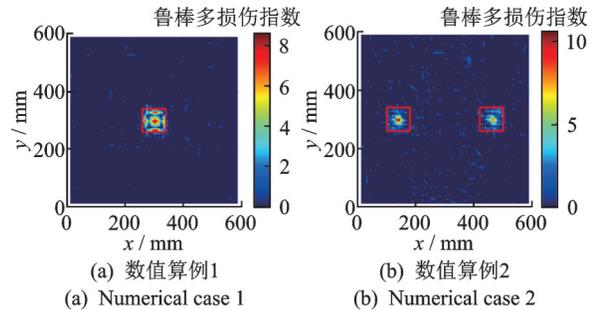


图5 基于鲁棒主成分分析的鲁棒多损伤识别结果

Fig.5 Multi-damage detection results based on robust principal component analysis

3 实验验证

为了在实际应用中验证鲁棒曲率模态计算方法和鲁棒多损伤指数的可靠性,使用Katunin等^[19]所给出的实验数据进行测试。

实验采用图6所示的3种含不同损伤的试件,均是尺寸为300 mm×300 mm×2.5 mm的12层玻璃纤维增强环氧基复合材料层合板,铺层为 $[0^{\circ}/60^{\circ}/-60^{\circ}/60^{\circ}/0^{\circ}]_s$,分别含有如下损伤:①裂纹损伤,损伤宽度为1 mm,损伤深度为0.5 mm;②正方形区面损伤,损伤深度为0.5 mm;③多损伤,含1个线形域损伤及2个面损伤,损伤深度均为0.5 mm。试件均采用四边固支,测量区域大小为250 mm×250 mm。

应用高斯-拉普拉斯算子计算曲率,基于鲁棒主成分分析方法分别采用3个实验案例中的第2阶模态振型数据进行损伤定位,结果如图7所示。由图可知,仅使用单一的第2阶模态振型数据进行损伤识别,无法有效定位实验案例的所有损伤位置。为了克服此缺点,应使用更多不同阶的模态振型数据来提供损伤识别信息,从而覆盖所有的测量区域。

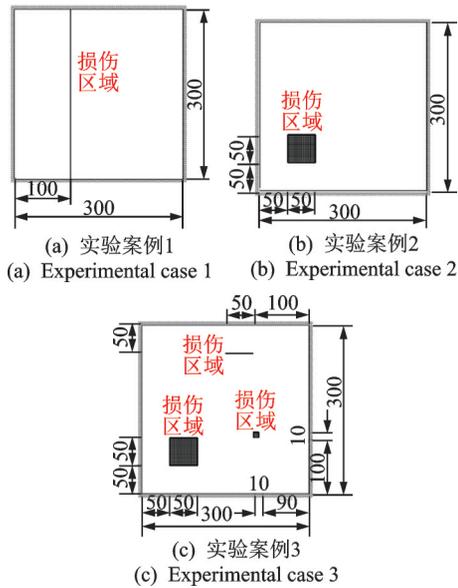


图6 损伤试件(单位:mm)

Fig.6 Damaged specimen (unit:mm)

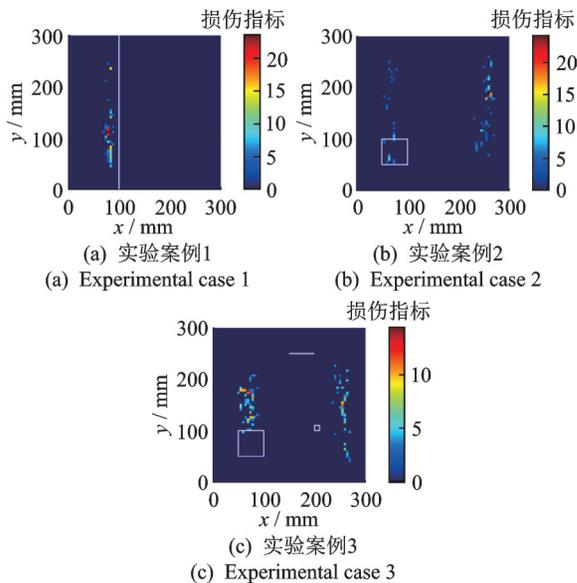


图7 基于第2阶曲率模态的损伤识别结果

Fig.7 Damage detection results based on the 2th mode shape

为了验证这一思想,将第1~5阶模态振型中损伤信息组合起来,形成一个鲁棒多损伤指数。基于鲁棒主成分分析的3个实验案例的鲁棒损伤识别结果见图8。结果表明,由第1~5阶模态振型得到的多损伤指数是鲁棒的,并且能够对3个实验案例的损伤区域有效地进行定位。

综上,在工程应用中损伤的相关信息是未知的,需使用鲁棒多损伤指数对多阶模态振型的损伤信息进行综合,以提高损伤识别的识别能力和精度。

4 结论

1) 与传统的二阶中心差分法相比,高斯-拉普

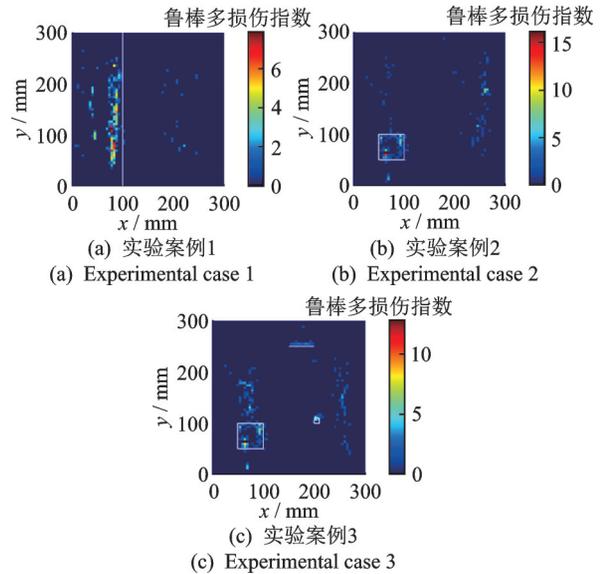


图8 基于鲁棒主成分分析的鲁棒多损伤识别结果

Fig.8 Multi-damage detection results based on robust principal component analysis

拉斯算子在曲率计算中具有更强的抗噪性。

2) 与传统主成分分析方法相比,鲁棒主成分分析方法能更有效地提取振型中损伤诱导的局部奇异点。

3) 本研究中鲁棒多损伤指数综合使用多阶模态振型数据的损伤信息,对各种可能的损伤位置都具有敏感性,且能够将复合材料的损伤完整呈像,证明了鲁棒多损伤指数的有效性。

参 考 文 献

- [1] 王惠芬,杨碧琦,刘刚. 航天器结构材料的应用现状与未来展望[J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 395-399.
WANG Huifen, YANG Biqi, LIU Gang. Application status and future prospect of materials for spacecraft structures[J]. Materials Review, 2018, 32(S1): 395-399. (in Chinese)
- [2] 熊健,李志彬,刘惠彬,等. 航空航天轻质复合材料壳体结构研究进展[J]. 复合材料学报, 2021, 38(6): 1635-1656.
XIONG Jian, LI Zhibin, LIU Huibin, et al. Advances in aerospace lightweight composite shell structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(6): 1635-1656. (in Chinese)
- [3] 贾九红,蔡晓涛,刘天阳,等. 一种基于固有频率的小支管裂纹损伤评价方法[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(6): 176-180, 234.
JIA Jiuhong, CAI Xiaotao, LIU Tianyang, et al. Damage evaluation of cracked small branch pipes based on natural frequencies [J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(6): 176-180, 234. (in Chinese)

- [4] 安永辉, 欧进萍. 简支梁桥损伤程度识别的模拟和试验[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(1):60-65.
AN Yonghui, OU Jingping. Experimental and numerical studies on damage severity identification of simply supported beam bridge[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(1):60-65. (in Chinese)
- [5] 徐华东, 王立海, 胡志栋. 运用曲率模态技术的木梁损伤定量识别[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(1):110-114.
XU Huadong, WANG Lihai, HU Zhidong. Quantitative identification of wood beam damage using modal curvature theory[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(1):110-114. (in Chinese)
- [6] 缪炳荣, 杨树旺, 王名月, 等. 利用振动响应的多种结构损伤识别方法比较[J]. 振动工程学报, 2020, 33(4):724-733.
MIAO Bingrong, YANG Shuwang, WANG Mingyue, et al. Comparison of various structural damage identification methods using vibration response[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(4):724-733. (in Chinese)
- [7] ABDO M A B. Damage detection in plate-like structures using high-order mode shape derivatives[J]. International Journal of Civil & Structural Engineering, 2012, 2(3):801-816.
- [8] XU W, CAO M, OSTACHOWICZ W, et al. Two-dimensional curvature mode shape method based on wavelets and Teager energy for damage detection in plates[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 347:266-278.
- [9] 徐宗美, 白润波, 张建刚, 等. 基于振型多分辨复杂度谱的板结构损伤检测[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(6):1267-1272.
XU Zongmei, BAI Runbo, ZHANG Jiangan, et al. Damage detection using multi-resolution complexity spectrum of mode shapes for plate structures[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(6):1267-1272. (in Chinese)
- [10] 白润波, 徐宗美, 张建刚. 基于双树复小波降噪和Katz分形迹线融合的板类结构损伤检测[J]. 振动与冲击, 2017, 36(5):87-94, 107.
BAI Runbo, XU Zongmei, ZHANG Jiangan. Damage detection for plate-like structures based on DT-CWT denoising and fusion of Katz's fractal dimension trajectories[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(5):87-94, 107. (in Chinese)
- [11] CAO M S, XU W, REN W X, et al. A concept of complex-wavelet modal curvature for detecting multiple cracks in beams under noisy conditions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 76:555-575.
- [12] 刘伟, 高维成, 李惠, 等. 钢筋混凝土空间网格结构曲率模态曲面拟合损伤识别研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(3):68-74.
LIU Wei, GAO Weicheng, LI Hui, et al. Damage detection based on surface fitting of curvature mode for a reinforced concrete spatial lattice structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(3):68-74. (in Chinese)
- [13] TONDREAU G, DERAEMAEEKER A, CUNHA A, et al. Experimental automated localization of small damages of a steel beam using local modal filters[C]//Proceedings of 9th International Conference on Structural Dynamics. Eurodyn:[s.n.], 2014:2419-2425.
- [14] MORENO-GARCÍA P, LOPES H, SANTOS J, et al. Damage localisation in composite laminated plates using higher order spatial derivatives[C]//Proceedings of the Eleventh International Conference on Computational Structures Technology. Dubrovnik, Croatia:[s.n.], 2012:4-7.
- [15] JIANG M Y, FENG J U. Robust principal component analysis for face subspace recovery[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(6):761-765.
- [16] VASWANI N, NARAYANAMURTHY P. Static and dynamic robust PCA and matrix completion: a review[J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(8):1359-1379.
- [17] CAI N, ZHOU Y, LIU G, et al. Survey of robust principal component analysis methods for moving-object detection[J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(10):1265-1275.
- [18] WANG J, XIAOLEI D, ZHOU P. Current situation and review of image segmentation[J]. Recent Patents on Computer Science, 2017, 10(1):70-79.
- [19] KATUNIN A. Nondestructive damage assessment of composite structures based on wavelet analysis of modal curvatures: state-of-the-art review and description of wavelet-based damage assessment benchmark[J]. Shock and Vibration, 2015, 2015:735219.



第一作者简介: 颜津玮, 男, 1997年9月生, 硕士。主要研究方向为飞行器结构健康监测。

E-mail: jinwei.yan@mail.nwpu.edu.cn

通信作者简介: 曹善成, 男, 1989年10月生, 副教授、硕士生导师。主要研究方向为飞行器结构健康监测技术、航天器结构动力学与控制。

E-mail: shancheng.cao@nwpu.edu.cn