

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202506006

# 基于振型分形表征的圆柱壳结构损伤识别

施斌凯, 王鑫峰, 郭剑锋, 杨正伟, 师世豪, 杨德鑫  
(火箭军工程大学, 西安 710025)

**摘 要:** 针对振动模态原始参数振型存在的定位能力弱、抗噪性差等弊端, 提出一种基于振型分形表征的损伤检测算法。首先, 利用圆柱壳纵向线振型分形维数构建等高线图, 从而直观地表征损伤的位置、程度并近似其形状。然后, 在自由边界下的圆柱壳数值模型上验证算法的有效性和可行性, 通过与常用曲率检测算法进行对比, 证明了所提的高差分形维数算法在不同噪声环境下具有显著更优的抗噪性和鲁棒性。最后, 将算法应用于基于力锤激励和加速度计响应的金属圆柱壳人工凹口损伤实验模态测试中。结果表明: 所提算法能够有效识别实验模态中的损伤, 定位精度可达 $\pm 1$ 测点间距范围, 验证了其对实际工程应用的适用性和有效性。

**关键词:** 圆柱壳; 振动; 损伤识别; 分形

**中图分类号:** O329

**文献标志码:** A

**开放科学标识码(OSID):**

**文章编号:** 2097-2741(2025)06-0055-09



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Damage Identification of Cylindrical Shell Structures Based on Fractal Characterization of Vibration Modes

SHI Binkai, WANG Xinfeng, GUO Jianfeng, YANG Zhengwei,  
SHI Shihao, YANG Dexin

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**ABSTRACT:** A damage identification algorithm based on fractal characterization of vibration mode shapes was proposed to address the weak positioning capability and poor damage resistance in the original parameter arrays of vibration modes. First, a contour map was constructed using the fractal dimension of the longitudinal line vibration modes of a cylindrical shell to intuitively characterize the location and degree of damage and approximate its shape. Subsequently, the effectiveness and feasibility of the algorithm were verified using a numerical model of the cylindrical shell under free boundaries. Comparisons with commonly used curvature detection algorithms demonstrated that the proposed high-dimensional fractal algorithm exhibits significantly better noise resistance and robustness in different noise environments. Finally, the algorithm was applied to the experimental modal testings of metal cylindrical shells with artificially notched damage, us-

**收稿日期:** 2025-05-15

**修回日期:** 2025-08-27

**录用日期:** 2025-09-08

**基金项目:** 国家自然科学基金(52375558); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2023-JC-QN-0602); 中国博士后科学基金面上项目(2022M723887)

**第一作者:** 施斌凯(1987—), 男, 讲师, 主要从事智能材料致振及无损检测研究。E-mail: hhusbk2009@hhu.edu.cn

**引用格式:** 施斌凯, 王鑫峰, 郭剑锋, 等. 基于振型分形表征的圆柱壳结构损伤识别[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39(6): 55-63. SHI Binkai, WANG Xinfeng, GUO Jianfeng, et al. Damage identification of cylindrical shell structures based on fractal characterization of vibration modes[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39(6): 55-63.

ing force hammer excitation and accelerometer measurements. The results show that the proposed algorithm can effectively identify the damage in the experimental mode, achieving a positioning accuracy within  $\pm 1$  measuring-point spacing range. The applicability and effectiveness of this algorithm in practical engineering are verified.

**KEYWORDS:** cylindrical shell; vibration; damage identification; fractal

壳体结构因其能以较小的构件厚度实现高承载能力和大刚度的特点,成为许多高性能装备中常见的结构形式<sup>[1]</sup>。在当前强调提升复杂环境下运行可靠性与效能的背景下,装备面临着全天候、大范围、跨区域、远距离的综合高强度应用需求。圆柱壳作为壳体结构的重要代表,常具有大长径比、薄壁、大尺寸等特征,其结构完整性至关重要。在此类严苛工况下,壳体结构在长期、高频次的强负荷运转中,其损伤(如金属壳体的疲劳裂纹、腐蚀、局部屈曲、凹痕<sup>[2-3]</sup>,以及复合材料的分层、基体开裂、纤维断裂等渐进损伤<sup>[4-5]</sup>)会不断累积。同时,复杂环境条件(如温湿度剧变<sup>[6]</sup>、化学腐蚀<sup>[7]</sup>、辐照<sup>[8]</sup>等)还会加速金属/非金属壳体的材料老化进程。这些损伤的累积和材料老化会显著削弱结构性能,对装备的整体安全性构成潜在风险<sup>[9]</sup>。因此,对此类结构进行原位、快速、精准的损伤检测与状态评估是实现装备预测性维护和保障运行安全的关键。

基于振动的全局性无损检测技术无需预先知道损伤的位置,即可从整体上快速评估结构的健康状况,非常适合大型、复杂且难以接近的结构,已得到广泛关注。壳体损伤可以通过模态参数,如频率<sup>[10]</sup>、振型<sup>[11-12]</sup>和阻尼<sup>[13]</sup>等的变化来定量识别,振型由于同时包含空间信息和幅值信息,常被用来定位和定量损伤。识别损伤的可靠性在于从振型提取损伤特征的能力,常用策略是与健康振型对比构建损伤指标,但已服役装备往往缺少历史振型数据。直接从实测振型中提取损伤特征更适合实战化检测,振型衍生量如曲率<sup>[14-15]</sup>、应变能<sup>[16]</sup>、柔度<sup>[17]</sup>等是常见策略,但在实战强噪音污染下效果不好,需配合合理降噪算法使用,如小波分析<sup>[18-19]</sup>、卡尔曼滤波<sup>[20]</sup>、复合滤波<sup>[21]</sup>等。上述损伤识别方法通常缺乏适应性,基函数、模型参数的选择严重影响损伤识别效果且计算复杂程度高。

对于实战化检测提供的振型数据,为了避免做预降噪处理和分析,直接进行初步损伤特征提取,提出一种计算圆柱壳面分形维数的高差分形维数(high-difference fractal dimension, HFD)算

法,基于该分形维数建立了专用于圆柱壳类结构损伤识别的窗口轨迹表征不规则性识别算法,同时提出仿射变换解决高阶振型表征损伤的峰值误判问题,最终形成损伤分形表征识别流程。

## 1 分形分析

### 1.1 损伤的分形维数表征

Mandelbort 在 1986 年将分形定义为局部和整体有某种方式相似的形。但对于离散的点集、粗糙曲线及无规则运动轨迹等不规则分形,其只有统计意义下的自相似性。不规则分形也可理解为一个集合填充空间的程度,通常用分形维数来描述。目前测定不规则分形维数的方法一般根据二维曲线特征来选择,如开放曲线的圆规法<sup>[22]</sup>、封闭曲线的周长面积法<sup>[23]</sup>及含多个团簇的面积回转半径法<sup>[24]</sup>等。

损伤在圆柱壳振型上的表现形式为局部的微“振荡”特征,为了描述上下起伏的复杂性,定义一种高差分形维数。考虑具有点序列 $(d_1, d_2, \dots, d_N)$ 形式的离散曲线 $\mathfrak{S}(d)$ ,  $N$ 表示序列的点数。每个序列点在 $xOy$ 坐标系下可表示为 $d_i(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。高差分形维数的值可定义为

$$D_{\text{HFD}} = \frac{\lg \left( \sum_{i=1}^{N-1} |y(i+1) - y(i)| \right)}{\lg \left( |x(i+1) - x(i)| \right)} \quad (1)$$

式中:  $D_{\text{HFD}}$  为高差分形维数;  $(x(i), y(i))$  为测点在 $xOy$ 坐标系下的坐标。

对于实测含有 $P \times Q$ 测点的圆柱壳而言,既可以做是由纵向 $P$ 条一维开放直线组成,又可以做是由周向 $Q$ 条一维封闭环线组成。一般而言,损伤会同时让纵向线和周向线产生振荡特征。由于圆柱壳结构纵向线初始状态是一条直线,更容易观察分形特征,因此,采用纵向线来分析圆柱壳振型的分形特征,建立圆柱壳结构损伤的振型分形表征算法如下:对圆柱壳振型上的某条纵向线,建立包含 $M$ 个测点的滑窗,移动步长为 $S$ ;利用式(1)计算滑窗内的高差分形维数,将其作为

滑窗中点处的分形维数值; 在滑窗完成各条纵向线的扫描后, 得到整个振型的分形表征壳面。分形壳面本质上提供了振型不同位置处的复杂程度对比, 其中奇异性较大处即为损伤发生的地方。

在振型分形表征算法中, 滑窗的大小和步长是 2 个重要参数。窗口的大小决定了损伤检测的可靠性, 窗口的步长决定了分形表征壳面的光滑性。一般来说, 窗口的大小和步长应在能满足损伤检测实时性的要求下尽可能小。

1.2 高阶振型的仿射变换

相比于低阶振型, 损伤在高阶振型中表现出轻微扩散性和高分辨率性, 所以高阶振型在损伤识别中更具有优势。然而, 高阶振型中的反弯点在分形表征下也会产生峰值从而导致损伤引起的峰值无法被直观识别。Qiao 等<sup>[25]</sup>通过仿射变换来解决梁在高阶振型中出现的反弯点。将该策略应用到圆柱壳纵向线的分形表征中, 从而解决高阶振型分形表征的峰值误判问题。

假设向量空间  $\zeta$  由第  $m$  阶振型纵向线组成, 进行线性仿射变换  $f: \zeta \rightarrow \zeta^*$  将向量空间映射到另一个向量空间  $\zeta^*$ , 该向量空间是对第  $m$  阶振型的替换, 表达式为

$$\begin{bmatrix} x_i^* \\ y_i^* \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \sin a & \cos a \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $M$  为线性映射矩阵;  $a$  的取值范围为  $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ ;  $(x_i, y_i)$  和  $(x_i^*, y_i^*)$  分别为测点在向量空间  $\zeta$  和  $\zeta^*$  下的坐标值。

仿射变换的剪切效果可以去除高阶振型中由波峰和波谷产生的反弯点峰值, 还能保持振型的平直性和平行性, 从而避免消除损伤引起的峰值。

1.3 损伤分形表征识别流程

基于振型分形表征的圆柱壳结构损伤识别流程如图 1 所示。

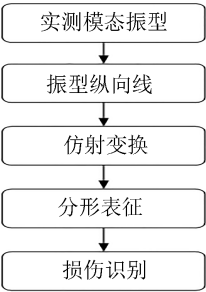


图 1 圆柱壳结构损伤识别流程

Fig. 1 Flowchart of damage identification of a cylindrical shell structure

首先, 利用模态测试系统得到圆柱壳结构的模态振型或工作振型。其次, 对振型的每一条纵向曲线按式 (2) 进行仿射变换, 得到弱化反弯点的振型。然后, 对变换后的振型纵向线执行式 (1) 的高差分形维数表征, 得到分形表征后的振型。最后, 根据分形振型的局部突变峰值识别圆柱壳结构中的损伤状况, 其中, 峰值的位置、隆起范围和形状分别对应损伤的位置、程度和类型。

2 损伤识别数值模拟

2.1 含损伤圆柱壳数值模型

为了验证所提损伤识别方法的有效性, 利用 Abaqus 软件构建圆柱壳结构, 尺寸参数采用某型号火箭第三子级外壳估算数据, 材料采用铝镁合金, 具体材料和尺寸参数如表 1 所示。采用 4 种损伤工况进行验证, 损伤参数如表 2 所示。

表 1 圆柱的材料属性和尺寸

Table 1 Material properties and dimensions of a cylinder

| 弹性模量 /<br>Gpa | 泊松比  | 密度 /<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 高度 /<br>mm | 外径 /<br>mm | 厚度 /<br>mm |
|---------------|------|---------------------------------------------|------------|------------|------------|
| 50            | 0.33 | 2 660                                       | 1 500      | 1 400      | 3          |

表 2 损伤工况

Table 2 Damage conditions

| 工况 | 损伤<br>形状 | 损伤中心位置<br>( $\theta, R, z$ )     | 损伤尺寸 /<br>mm | 损伤深度 /<br>mm |
|----|----------|----------------------------------|--------------|--------------|
| 1  | 圆形       | 中部<br>( $0^\circ, 700, 750$ )    | $R=10$       | 2            |
| 2  | 圆形       | 中部<br>( $0^\circ, 700, 750$ )    | $R=20$       | 2            |
| 3  | 圆形       | 底部<br>( $0^\circ, 700, 1\,313$ ) | $R=20$       | 2            |
| 4  | 矩形       | 顶部<br>( $8.3^\circ, 700, 390$ )  | $L=393$      | 2            |

含损伤的圆柱壳体大约采用 90 000 个 C3D10 单元, 损伤局部放大图及其网格划分如图 2 所示。由于针对已服役圆柱壳体类结构的模态测试大都是将传感器贴置外表面测得, 利用 Abaqus/Step 模块中的 Frequency 分析步即可得到含损圆柱壳结构的各阶径向位移振型, 因此, 圆柱壳体的径向位移振型从圆柱壳体外表面  $440 \times 151$  个节点数据中提取。损伤工况 2 圆柱壳体的典型低阶振型 (6 阶、10 阶、16 阶)、高阶振型 (25 阶、35 阶、45 阶) 如图 3 所示。可以看出, 高阶振型表现出密集的凹凸性, 同时仅凭振型很难观察到是否有损伤



的存在。

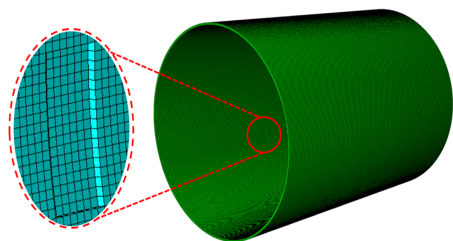


图 2 带损伤圆柱壳体的网格划分

Fig. 2 Meshing of the cylindrical shell with damage

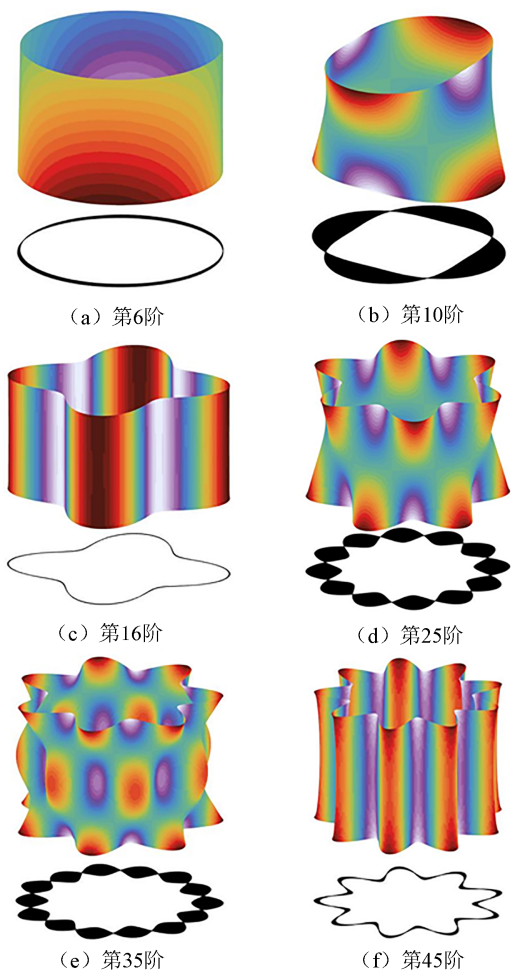


图 3 损伤工况 2 下圆柱壳体的典型低、高阶振型

Fig. 3 Typical low- and high-order vibration modes of the cylindrical shell in damage condition 2

## 2.2 损伤位置的识别

为了研究所提方法的损伤定位能力,选择表 2 中工况 1 和工况 3 的圆形损伤进行损伤识别对比研究。算法中的滑窗大小包含 5 个节点,节点间距为 10 mm。滑窗的步长设定为 10 mm。振型选择第 16 阶振型。为了更好地展示损伤识别效果,整个振型的分形表征壳面未采用柱面表现形式,而是

采用平铺等高线的方式。如图 4 所示,在每一个  $D_{\text{HFD}}$  域的等高线图中都可以看到多个局簇的封闭曲线,代表多个局部小峰值,表明损伤的分形特征是以局簇峰的形式展现的。在图 4 (a) 中,预测到的损伤位置大致在滑窗位置索引  $(0^\circ, 130)$ ,将该位置索引乘以相应的窗口步长并叠初始窗口位置 20 mm,结果得到损伤的位置在  $(0^\circ, 1320)$  处。通过与表 2 工况 3 真实的圆形损伤中点位置坐标  $(0^\circ, 700, 1\ 313)$  相比较,说明  $D_{\text{HFD}}$  域中的峰值能准确定位圆形损伤的位置。同样,从图 4 (b) 中也可看出局簇峰的表现形式,定位损伤位置在滑窗位置索引  $(0^\circ, 73)$ ,对应的损伤位置在  $(0^\circ, 750)$ ,与表 2 工况 1 中真实损伤位置完全一致,表明所提算法的损伤识别方法具备准确定位损伤的能力。

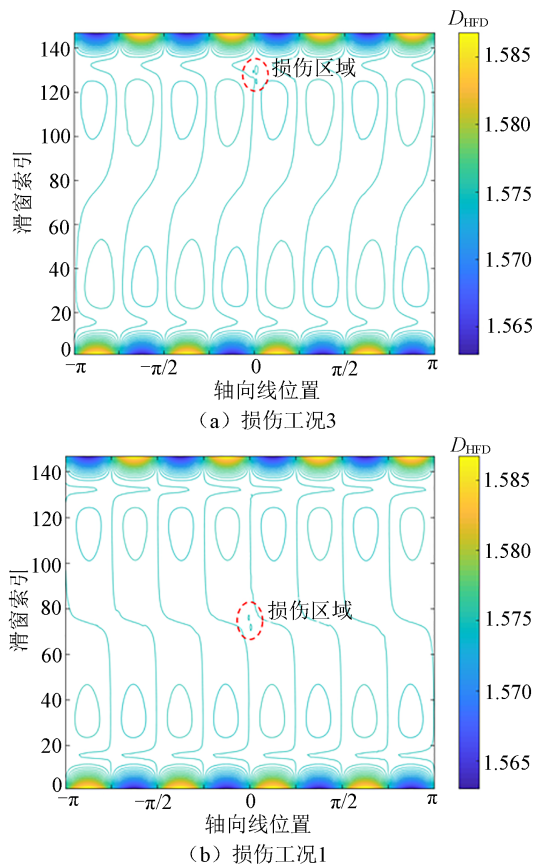


图 4 第 16 阶  $D_{\text{HFD}}$  域下圆柱壳振型平铺等高线

Fig. 4 Flat-laid contour lines of cylindrical shell vibration modes in the 16th  $D_{\text{HFD}}$  domain

## 2.3 损伤程度的识别

为了研究所提方法对损伤程度的识别能力,选择表 2 中工况 1 和工况 2 的圆形损伤进行损伤程度识别对比研究。其中,损伤程度是从损伤程度



的尺寸角度考虑, 并不涉及深度。算法中的滑窗大小包含 5 个节点, 节点间距为 10 mm。滑窗的步长设定为 10 mm, 振型选择第 16 阶振型, 振型的分形表征壳面同样采用平铺等高线的方式。从图 5 可以看出, 损伤区域封闭曲线的面积明显大于图 4 (b) 中损伤区域封闭曲线的面积, 表明基于高差分形维数算法的损伤识别方法具备判断损伤程度的能力。此外, 为了量化损伤程度, 可以利用封闭曲线的面积作为量化指标。

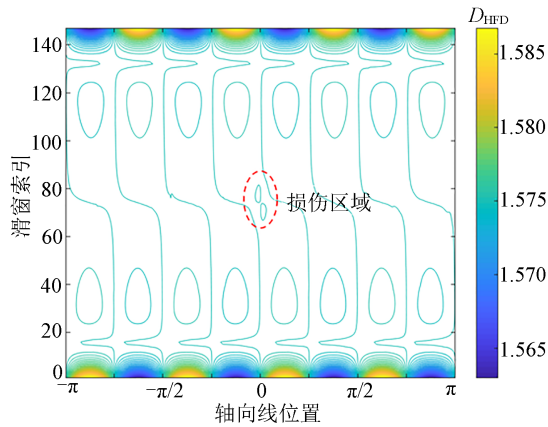


图 5 工况 2 对应的圆柱壳振型平铺等高线

Fig. 5 Flat-laid contour lines of cylindrical shell vibration modes in damage condition 2

#### 2.4 损伤类型的识别

为了研究所提方法对损伤类型识别的能力, 选择工况 4 的裂纹损伤进行损伤识别研究。算法中的滑窗大小包含 5 个节点, 节点间距为 10 mm, 滑窗的步长设定为 10 mm, 振型选择第 15 阶振型, 振型的分形表征壳面同样采用平铺等高线的方式, 工况 4 对应的圆柱壳振型平铺等高线如图 6 所示。

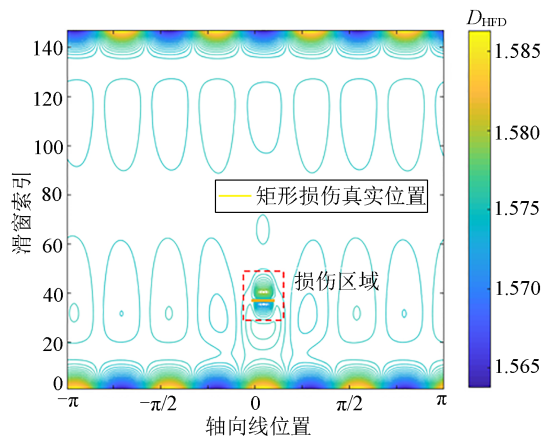


图 6 工况 4 对应的圆柱壳振型平铺等高线

Fig. 6 Flat-laid contour lines of cylindrical shell vibration modes in damage condition 4

从图 6 可以看出, 在  $D_{HFD}$  域出现了一个波峰和波谷对, 其交界处即为矩形损伤的真实位置, 图中黄线的两端对应的滑窗索引值分别为  $(0^\circ, 37)$  和  $(16.36^\circ, 37)$ , 将该位置索引乘以相应的窗口步长并叠初始窗口位置 20 mm, 得到矩形损伤的 2 个端点位置分别为  $(0^\circ, 390)$  和  $(16.36^\circ, 390)$ , 与表 2 工况 4 中真实损伤位置接近一致, 误差为 1.4%。同时, 识别出的损伤形状与真实损伤形状一致, 说明所提方法具备对损伤类型识别的能力。

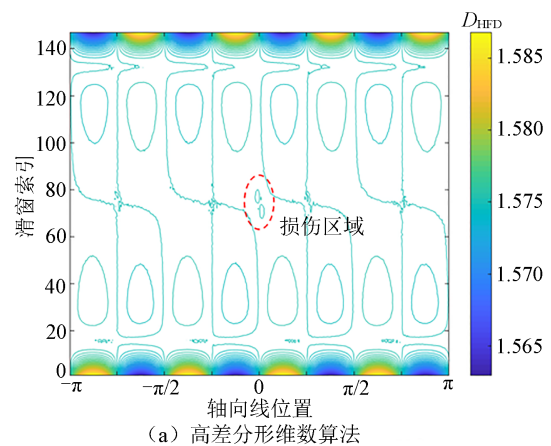
#### 2.5 抗噪性分析

在实验模态测试中, 噪音会降低损伤识别的敏感性和质量, 因此, 测试损伤识别方法的噪音免疫性, 是判断现场检测可靠性的重要指标之一。为了模拟真实的检测环境, 在含损伤圆柱壳振型中添加一系列正态分布的随机数, 用来生成受噪声污染的振型。同时以表 2 中的工况 2 作为典型工况来考虑所提方法的抗噪性。以曲率算法作为比较算法来评估新算法的抗噪性。受噪音污染的振型可表示为

$$w'(x, y) = w(x, y) + n \cdot r \cdot w_{RMS} \quad (3)$$

式中:  $w'$  和  $w$  分别表示噪音污染后和污染前的位移振型;  $r$  为服从标准正态分布的随机矩阵;  $n$  为噪声水平;  $w_{RMS}$  为噪音污染前位移振型的均方根值。

基于式 (3) 建立含噪声模态振型数据, 其中噪音污染前的振型选取表 2 中的工况 2 对应的第 16 阶振型。为充分考虑不同的环境条件, 分别选取  $n = 1 \times 10^{-5}$ 、 $1 \times 10^{-4}$ 、 $1 \times 10^{-3}$  时 3 种典型噪声水平来对损伤识别算法的抗噪性进行评估。在 3 种噪声水平下, 高差分形维数算法和曲率算法抗噪性的比较分别如图 7~9 所示。由图 7 可以看出, 当噪声水平  $n = 1 \times 10^{-5}$  时, 2 种算法均能检测出损伤的位置, 但曲率算法表现出明显的噪音污染。



(a) 高差分形维数算法

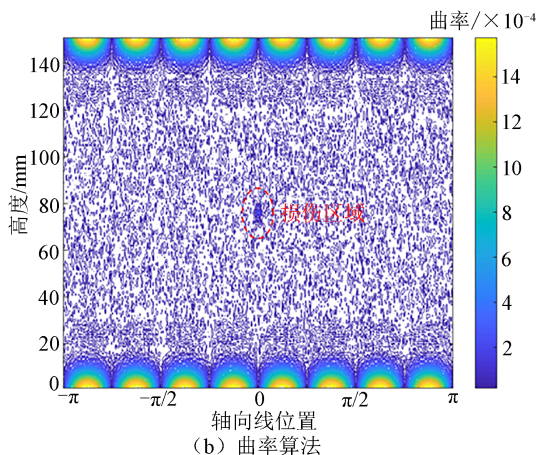


图 7 噪声水平  $n=1 \times 10^{-5}$  时 2 种算法抗噪性对比

Fig. 7 Comparison of noise resistances of two algorithms at the noise level  $n=1 \times 10^{-5}$

由图 8 可以看出, 当噪声水平达到  $n=1 \times 10^{-4}$  时, 高差分形维数算法仍能精准识别出损伤, 但曲率算法已经丧失损伤识别能力, 说明高差分形维数算法的抗噪性优于常用的曲率算法。

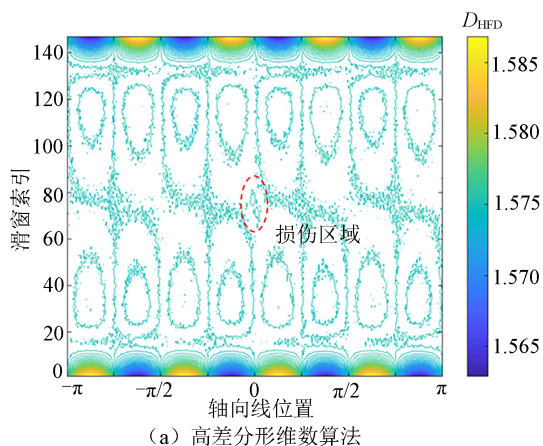


图 8 噪声水平  $n=1 \times 10^{-4}$  时 2 种算法抗噪性对比

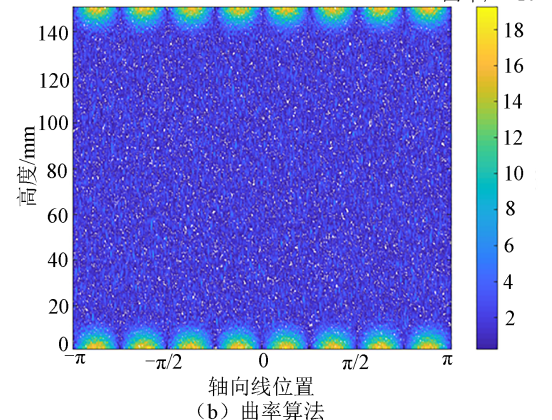


Fig. 8 Comparison of the noise resistance of the two algorithms at the noise level  $n=1 \times 10^{-4}$

由图 9 可以看出, 当噪声水平达到  $n=1 \times 10^{-3}$

时, 2 种算法均不能识别出损伤, 但高差分形维数算法还能够隐约看出振型的凹凸性。此时, 需先对振型进行去噪处理后, 再进行相应的损伤识别。

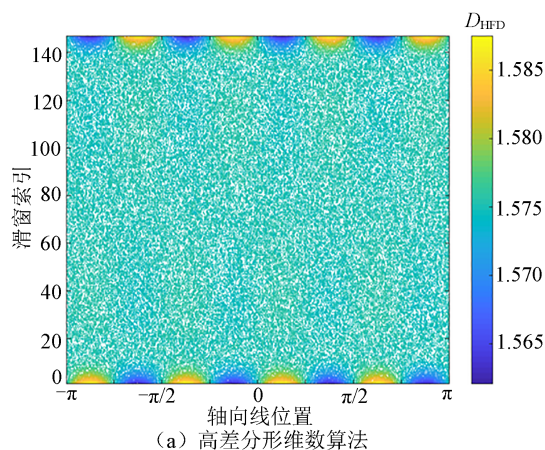


图 9 噪声水平  $n=1 \times 10^{-3}$  时 2 种算法抗噪性对比

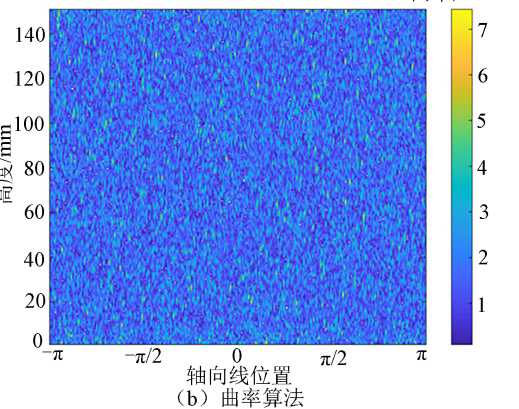


Fig. 9 Comparison of noise resistances of two algorithms at the noise level of  $n=1 \times 10^{-3}$

### 3 实验验证

#### 3.1 实验搭建和模态测试

为验证基于高差分形维数算法对圆柱壳类结构的损伤识别能力, 对一块高度为 300 mm、外直径为 270 mm、厚度为 5 mm 的 45 号钢圆柱壳进行实验测试。该圆柱壳的一端由抱箍夹具夹紧, 抱箍夹具固定在光学隔振平台上, 如图 10 所示。模态测试前, 在圆柱壳的内壁施加了一个边长约为 40 mm 的人工开凿凹口损伤, 损伤中心大致在测点 27 处, 如图 11 所示。

对受损圆柱壳的模态测试采用移动力锤固定加速度计的方式进行。如图 11 (b) 所示, 将圆柱壳的外表面划分为  $10 \times 10$  的结构化网格点。圆柱壳在每个网格点上受到动态脉冲载荷的加载, 敲击顺序按照每条纵向线从下往上, 使用的模态测



试力锤为 PCB086D05。总共测试了  $10 \times 10$  个网格点, 对应于实际的圆周采样间隔为 84.8 mm, 纵向采样间隔为 25 mm。响应测量使用加速度计来记录圆柱壳在力锤冲击下的响应, 布置在测点 29 处。激励和响应模拟信号均通过 MI8008 数据采集和分析仪进行数字化采集, 采样频率为 200 kHz。每个测点重复采样 3 次, 对来自激励及对应响应的时域信号进行平均以提高信噪比 (signal to noise ratio, SNR)。然后, 根据激励和响应时域信号计算这些点的频响函数 (frequency response function, FRF)。测试得到的 1 号测点的频响函数曲线, 如图 12 所示。之后, 将每个测点的频响函数曲线导入到模态分析程序 Mescope 中进行曲线拟合和模态提取, 得到金属圆柱壳的实测第二阶模态振型, 用于后续的损伤检测, 如图 13 所示。

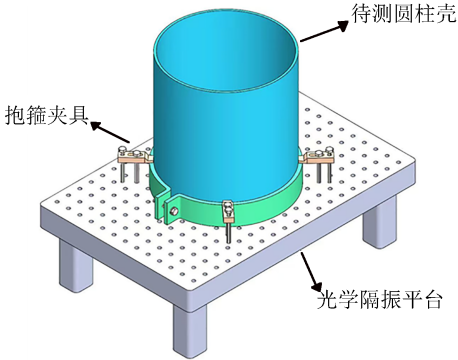


图 10 钢圆柱壳固定方式

Fig. 10 Fixing method of the steel cylindrical shell

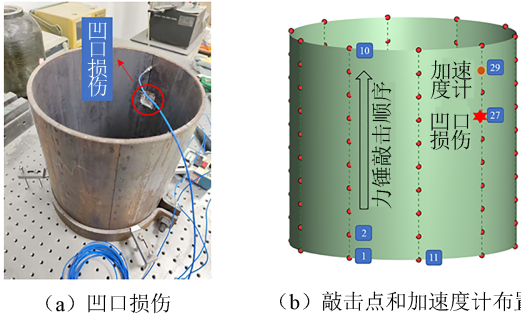


图 11 用于模态测试的人工开凿凹口损伤悬臂圆柱壳

Fig. 11 Cantilever cylindrical shell damaged by manually chiseled notches for mode testings

3.2 结果分析

将所提算法应用于实验得到的圆柱壳第二阶振型, 进行损伤检测。首先, 使用二元三次样条插值对模态振型数据进行 5 倍的过采样, 将圆周采样间隔从 84.8 mm 缩短到 16.96 mm, 纵向采样间隔从 25 mm 缩短至 5 mm。然后, 将基于 HFD 的

损伤检测算法应用于过采样数据的振型, 损伤识别效果如图 14 所示, 并采用等高线图进行展示。可以看出, 落差最大的封闭曲线处的顶点定位了真实损伤所在的大致位置。通过提取等高线图中落差最大区域的中心顶点坐标, 识别出的损伤中心位置为 (14, 36)。与实验预设的真实损伤中心位置 (15, 35) 相比, 纵向定位误差为 5 mm, 周向定位误差为 16.96 mm。结果表明, HFD 算法的识别结果与真实损伤位置高度吻合, 定位误差在  $\pm 1$  测点布设间距范围内, 证明了算法的损伤定位能力。此外, 封闭等高线在纵向和周向的投影范围约为  $13.6 \text{ cm}^2$ , 与真实的损伤面积  $16 \text{ cm}^2$  在量级上基本一致。等高线的椭圆形形态也有效反映了真实损伤的宏观形状特征, 尺寸上存在的微小偏差主要源于振型数据采集误差、测点间距过大以及环境测试噪声的影响。

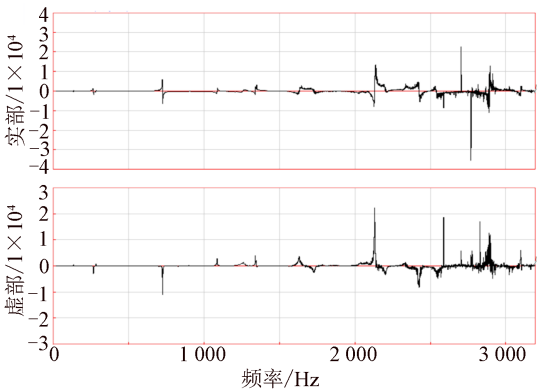


图 12 1号测点的频响函数曲线

Fig. 12 Frequency response function curves of measuring point 1

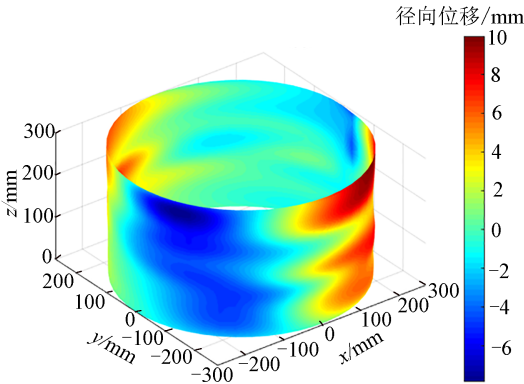


图 13 模态测试得到的圆柱壳第2阶振型

Fig. 13 Second vibration mode of cylindrical shell derived from mode testings

尽管图 14 中也有测试误差导致的封闭曲线, 但损伤产生的封闭曲线范围及落差要明显大于测



试误差, 因此, 可以很容易地区分出损伤。综上所述, 本实验结果不仅定性证明了基于高差分形维数的损伤检测算法应用于实验模态振型数据的有效性, 更定量证实了该算法在损伤精确定位和尺寸估算方面具有良好的性能, 能够满足工程应用中对于损伤快速识别与评估的需求。

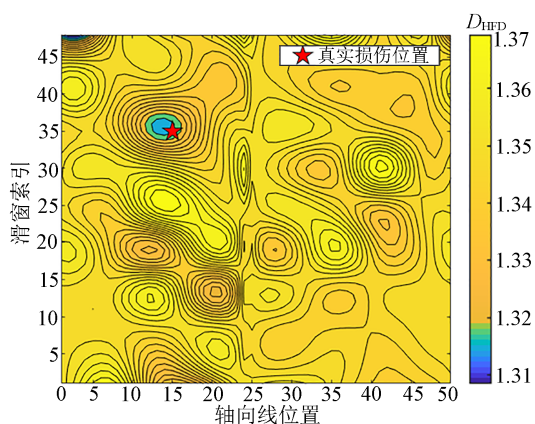


图 14 利用实验模态得到的圆柱壳振型平铺等高线

Fig. 14 Flat-laid contour lines of cylindrical shell vibration modes derived from mode testings

## 4 结论

为提升圆柱壳结构损伤检测的精度与鲁棒性, 针对振动模态参数中振型定位能力弱、抗噪性差的问题, 提出了基于振型分形表征的损伤识别方法。通过构建高差分形维数算法, 结合仿射变换处理高阶振型反弯点干扰, 建立了完整的损伤识别流程, 并采用数值仿真与实验验证, 系统评估了该方法的有效性, 主要结论如下。

1) 所提方法能够有效提取损伤引起的局部微“振荡”特征, 实现对损伤位置的精准识别。数值仿真表明, 该方法对不同位置、尺寸和类型的损伤均具备可靠的定位能力, 最小可识别损伤半径约为 10 mm。

2) 所提方法在抗噪性方面表现优异。在噪声水平  $n=1 \times 10^{-4}$  时, HFD 算法仍能准确识别损伤, 而传统曲率算法已失效; 即使在较高噪声水平 ( $n=1 \times 10^{-3}$ ) 下, HFD 算法仍能保留振型轮廓特征, 为后续去噪处理提供了基础。

3) 通过仿射变换有效抑制了高阶振型中反弯点引起的峰值干扰, 提升了损伤识别抗噪性, 解决了高阶模态应用于损伤识别时的误判问题。

4) 实验结果表明, 该方法在实测模态数据中

具有良好的工程适用性, 可实现损伤区域的初步定位与形状估计, 定位误差在测点布设间距以内, 验证了其在实际应用中的可行性和有效性。

未来的研究工作将重点面向大型装备的实际应用挑战展开: 一是探索算法与环境激励模态分析技术的融合, 利用装备运行中的自然激励源, 实现真正的无干预在线健康监测; 二是研究基于子结构的局部损伤识别策略, 通过便携装置激励局部区域并结合模型缩聚技术, 降低对全局模态数据的依赖, 推动本方法在大型现场装备检测中的实用化进程。此外, 还可以结合深度学习技术, 对该算法得到的大量圆柱壳结构损伤图像进行训练, 实现对圆柱壳类结构不同类型损伤的自动识别和分类。

## 参考文献

- [1] GANENDRA B, PRABOWO A R, MUTTAQIE T, et al. Thin-walled cylindrical shells in engineering designs and critical infrastructures: a systematic review based on the loading response[J]. Curved and Layered Structures, 2023, 10: 20220202.
- [2] YIN Z Y, CHEN X W. Typical fracture modes of metal cylindrical shells under internal explosive loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2024, 183: 104803.
- [3] YUE F, WU Z Y. Fracture mechanical analysis of thin-walled cylindrical shells with cracks[J]. Metals, 2021, 11(4): 592.
- [4] LI W B, LYU H, ZHANG L J, et al. Experiment, simulation, optimization design, and damage detection of composite shell of hydrogen storage vessel—a review[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2023, 42(11/12): 507–536.
- [5] ZHANG L W, ZHAO L Y, PAN L, et al. Research progress of composite cylindrical shells[J]. Polymer Composites, 2023, 44(11): 7298–7316.
- [6] HIRWANI C K, MISHRA P K, PANDA S K. Nonlinear steady-state responses of weakly bonded composite shell structure under hygro-thermo-mechanical loading[J]. Composite Structures, 2021, 265: 113768.
- [7] ZHU Y M, HE X L, LIU W, et al. Ultimate strength of cylindrical shells with corrosion damage: comparing theoretical and experimental results[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2023, 202: 104888.
- [8] 孙宗保, 张鹏, 朱晓琳, 等. 紫外老化对 EVAC/

- PBO 复合材料力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(6): 111-116.
- SUN Z B, ZHANG P, ZHU X L, et al. Effects of ultraviolet aging on mechanical properties of EVAC/PBO composites[J]. Engineering Plastic Application, 2022, 50(6): 111-116.
- [9] 王蕊, 吴玲玲, 李淑娟, 等. 基于无线传感网络的重气泄漏监测与定位[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39(2): 70-78.
- WANG R, WU L L, LI S J, et al. Wireless sensor network-based heavy gas leakage monitoring and positioning[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39(2): 70-78.
- [10] ZHANG Y, LIE S T, XIANG Z H, et al. A frequency shift curve based damage detection method for cylindrical shell structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(6): 1671-1683.
- [11] DINH-CONG D, NGUYEN-THOI T. A new efficient two-stage method for damage localization and quantification in shell structures[J]. Applied Soft Computing, 2021, 108: 107468.
- [12] XI Y S, SHI B K, XU W, et al. Identification of internal damage in circular cylinders through laser scanning of vibrating surfaces[J]. SDHM Structural Durability & Health Monitoring, 2022, 16(2): 163-177.
- [13] CAO M S, SHA G G, GAO Y F, et al. Structural damage identification using damping: a compendium of uses and features[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(4): 043001.
- [14] DESSI D, PASSACANTILLI F, VENTURI A. Analysis and mitigation of uncertainties in damage identification by modal-curvature based methods[J]. Journal of Sound and Vibration, 2025, 596: 118769.
- [15] 孙海航. 基于曲率模态和频响函数的复杂曲面结构损伤识别分析与研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2023: 11-14.
- SUN H H. Damage identification analysis and research of complex surface structure based on curvature mode and frequency response function[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2023: 11-14.
- [16] 杨海军, 马磊, 吴文斌, 等. 基于单元模态应变能的结构两阶段损伤识别方法[J]. 建筑科学, 2025, 41(3): 129-139.
- YANG H J, MA L, WU W B, et al. Two stage damage identification method for structures based on unit modal strain energy[J]. Building Science, 2025, 41(3): 129-139.
- [17] LIN Y M, ZHU Z M, MA H W, et al. Deflection influence line-based bridge damage detection using high-resolution modal flexibility matrix with limited sensors[J]. Engineering Structures, 2025, 330: 119847.
- [18] SRIVASTAVA M, ANDERSON C L, FREED J H. A new wavelet denoising method for selecting decomposition levels and noise thresholds[J]. IEEE Access, 2016, 4: 3862-3877.
- [19] NIE Z H, ZHANG H, ZHU Z M, et al. Baseline-free bridge damage identification using proper orthogonal decomposition and continuous wavelet transform with limited sensors[J]. Journal of Sound and Vibration, 2025, 605: 119012.
- [20] SHEREENA O A, KUNCHAM E, JAIN P C, et al. Mitigating high dimensionality in damage identification for plate-like structures through substructuring with interacting filtering-based approaches[J]. Engineering Structures, 2025, 323: 119190.
- [21] 董孟琛, 杨剑, 李传祥, 等. 一种基于复合滤波的海面雷达距离多普勒图像去噪算法[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39(1): 13-20.
- DONG M C, YANG J, LI C X, et al. Composite filtering-based denoising algorithm for sea surface radar range-Doppler images[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39(1): 13-20.
- [22] MOVASSAGH A, ZHANG X, ARJOMAND E, et al. A comparison of fractal methods for evaluation of hydraulic fracturing surface roughness[J]. The APPEA Journal, 2020, 60(1): 184.
- [23] FLORIO B J, FAWELL P D, SMALL M. The use of the perimeter-area method to calculate the fractal dimension of aggregates[J]. Powder Technology, 2019, 343: 551-559.
- [24] HADJILEONTIADIS L J, DOUKA E, TROCHIDIS A. Fractal dimension analysis for crack identification in beam structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(3): 659-674.
- [25] QIAO P Z, CAO M S. Waveform fractal dimension for mode shape-based damage identification of beam-type structures[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(22/23): 5946-5961.

(编辑: 于福兴)