

# 基于机器视觉与尺度空间的结构损伤定位方法\*

辛 存<sup>1,2</sup>, 杨党锋<sup>1,2</sup>, 刘晓东<sup>1</sup>, 黄 勇<sup>1,2</sup>, 徐自力<sup>3</sup>

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 西安, 710065)

(2. 西安智信数字科技有限公司 西安, 710065)

(3. 西安交通大学复杂服役环境重大装备结构强度与寿命全国重点实验室 西安, 710049)

**摘要** 基于振型的结构损伤识别方法具有直接定位损伤的优势,但振型空间分辨率低,识别精度易受噪声干扰。针对此问题,提出一种基于机器视觉与尺度空间的结构损伤定位方法。首先,提出了基于光流算法的结构振动响应视觉测量方法,对结构振动响应和振型进行高空间分辨率测量;其次,提出了融合小波变换(wavelet transform,简称 WT)-Teager 能量算子(Teager energy operator,简称 TEO)-振型曲率(mode shape curvature,简称 MSC)的损伤特征尺度空间识别方法,并结合贝叶斯融合算法,对结构损伤位置进行定位;最后,从振动响应测量精度、损伤定位精度以及鲁棒性等角度对所提方法进行了试验验证。结果表明,相较于现有的损伤定位方法,所提方法具有较高的损伤识别准确率和噪声鲁棒性。

**关键词** 机器视觉;高空间分辨率振型;尺度空间;损伤定位;数据融合

**中图分类号** TH113;TH17

## 0 引言

基于振型的结构健康监测技术可以直接定位损伤位置,是水电装备结构健康监测主流方法之一<sup>[1]</sup>。然而,现有的振型测量方法主要集中在加速度、速度等接触传感器,只能提供稀疏、散点方式的测量,振型测量空间分辨率较低,限制了基于振型的结构损伤识别方法定位损伤位置的精度<sup>[2-3]</sup>。为解决此问题,发展了包括激光位移传感器、机器视觉等多种结构非接触、高空间分辨率振动信号测量方法<sup>[4-5]</sup>。作为对比,基于机器视觉的结构运动测量方法具有易操作、远距离精度较高的优势,是目前结构振动测量的主要发展方向之一<sup>[6-7]</sup>。

根据不同的应用场景,主要包含数字图像相关算法(digital image correlation,简称 DIC)、点跟踪、图像特征匹配算法以及光流算法等多种机器视觉运动测量方法<sup>[8]</sup>。徐超等<sup>[9]</sup>利用 DIC 准确测量了空间大柔性结构的低频率、大幅值振动及变形。李萍等<sup>[10]</sup>利用点跟踪算法获得了结构的高空间分辨率振动响应,并结合曲率模态识别了简支梁结构的损伤位置。Khuc 等<sup>[11]</sup>利用特征匹配算法的结构振动响应测量方法,对螺栓结构的振动响应进行测量。Xin

等<sup>[12]</sup>提出了一种基于自适应窗口控制的多尺度稀疏光流算法,实现了混凝土结构的振动响应测量。光流算法是基于图像像素亮度建立起来的结构运动测量方法。光流是指成像平面内像素移动的瞬时速度,计算两帧图像之间的光流能够反映被测物体的运动速度,进而实现结构运动的测量。由于光流算法具有无标记、高空间分辨率测量的优势,逐渐成为提取视频图像序列中物体运动的主流技术<sup>[13-14]</sup>。

在利用振型实现结构损伤识别的过程中,现有基于振型的损伤识别方法存在损伤特征易受噪声干扰、损伤引起的振型奇异性易被噪声覆盖的问题<sup>[15-16]</sup>。为此,学者们提出了许多方法来减轻噪声干扰。其中,小波变换(wavelet transform,简称 WT)因其固有的多尺度特征被认为是最有效的方式之一。Altunışık 等<sup>[17]</sup>基于有限元模型获得高空间分辨率振型,并结合小波变换得到了多尺度振型,实现了结构损伤位置的识别。然而,基于多尺度振型的损伤识别算法由于继承了振型较大的全局波动,因此容易掩盖损伤特征。Wu 等<sup>[18]</sup>提出使用 TEO 和小波变换来处理模态振型,计算得到 WT-TEO 振型,实现了结构损伤位置的准确识别。但是,该方法仍然存在一些不足:①单尺度 WT-TEO 振型虽然可

通过奇异峰值识别损伤位置,但尺度的选择和判断依赖于检测工程师的专业知识;②振型的测量误差也会影响基于单尺度 WT-TEO 振型对损伤位置的辨识能力,容易造成误判。

针对上述问题,本研究提出基于机器视觉与尺度空间融合的结构损伤定位方法。首先,利用图像高空间分辨率的优势,采用基于光流算法的结构振动响应视觉测量方法,对结构高空间分辨率振型进行测量;其次,考虑到振型曲率(mode shape curvature, 简称 MSC)对损伤特征的敏感性高于振型,采用 TEO 和 WT 对振型曲率进行处理,计算得到 WT-TEO-MSC,对不同尺度空间的结构损伤特征进行辨识,并提出基于贝叶斯融合算法的不同尺度空间损伤概率融合策略,实现了结构损伤位置的准确辨识;最后,通过试验验证了所提方法的辨识精度。

## 1 结构高空间分辨率振动测量与多尺度空间数据融合的损伤识别算法

### 1.1 基于光流算法的结构高空间分辨率运动测量算法

光流方程的建立需满足两个假设:①亮度恒定假设,即结构上的像素亮度在相邻帧图像间保持一致,不发生变化;②时间连续或“小运动”假设,即相邻视频帧之间的时间间隔很短,相邻帧图像中的物体运动的振幅很小或运动变化较为缓慢。

亮度恒定假设可表示为

$$I(x, y, t) = I(x + dx, y + dy, t + dt) \quad (1)$$

通过 Taylor 级数对式(1)等号右边进行分解,可得

$$I(x + dx, y + dy, t + dt) =$$

$$I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} dx + \frac{\partial I}{\partial y} dy + \frac{\partial I}{\partial t} dt + H \quad (2)$$

其中: $\partial I/\partial x$ 、 $\partial I/\partial y$ 分别为像素亮度值沿水平和竖直方向上的导数; $\partial I/\partial t$ 为像素亮度对时间的导数。

基于小运动假设,高阶项  $H$  可忽略不计。结合式(1)与式(2),光流方程可描述为

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (3)$$

其中: $I_x$ 、 $I_y$ 分别为像素亮度沿水平和竖直方向上的梯度; $I_t$ 为图像亮度关于时间的导数; $u$ 、 $v$ 分别为像素在水平和竖直方向上的光流。

通过求解式(3)能够对结构中任意点的振动进行测量,得到结构高空间分辨率振动响应<sup>[12]</sup>。在此基础上,基于测量得到的结构高空间分辨率振动响应信息,采用模态盲辨识算法对结构的高空间分辨

率振型进行计算。模态盲辨识算法参见文献[19]。

### 1.2 多尺度空间数据融合的损伤识别算法

由于振型曲率对损伤的敏感性高于振型本身,且基于振型曲率的结构损伤识别方法具有无需基线健康数据的优势,因此本研究基于测量得到的结构高空间分辨率振型,使用 MSC 进一步揭示结构损伤特征。振型经过中心差分算法计算振型曲率,即

$$\varphi_i'' = \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} \approx \frac{\varphi_i(x+h) - 2\varphi_i(x) + \varphi_i(x-h)}{h^2} \quad (4)$$

其中: $\varphi_i''$ 为第  $i$  阶振型曲率; $\varphi_i$ 为第  $i$  阶振型; $h$ 为采样间隔; $x$ 为测点位置。

理论上,通过振型曲率的极值能够定位结构损伤位置,然而振型曲率计算过程中采用的中心差分算法会在放大结构损伤特征的同时放大测量噪声或测量误差,容易造成误判。本研究利用多尺度空间能够在挖掘信号特征的同时具有分离噪声的作用,并考虑高斯函数及其衍生函数具有线性和位移不变性的特点,采用高斯函数对振型曲率进行多尺度表征,得到 WT-MSC,即

$$L_{i,\sigma}''(x) = G_\sigma(x) \otimes \varphi_i'' \quad (5)$$

其中: $L_{i,\sigma}''$ 表示尺度为  $\sigma$  的第  $i$  阶多尺度振型曲率; $G_\sigma$  为高斯基函数。

基于高斯基函数线性位移不变性特征,式(5)可以写为

$$L_{i,\sigma}'' = \frac{\partial^2 L_{i,\sigma}(x)}{\partial x^2} = \frac{L_{i,\sigma}(x+h) - 2L_{i,\sigma}(x) + L_{i,\sigma}(x-h)}{h^2} \quad (6)$$

其中: $L_{i,\sigma}$ 表示尺度为  $\sigma$  的第  $i$  阶振型。

根据多尺度信号理论,随着尺度的增加,会降低原始信号的分辨率,影响多尺度空间损伤特征的辨识能力。针对此问题,本研究通过计算每个尺度上振型曲率的能量算子,获得 WT-TEO-MSC,即

$$E_{i,\sigma}(x) = (L_{i,\sigma}'')^2(x) - L_{i,\sigma}''(x-1)L_{i,\sigma}''(x+1) \quad (7)$$

其中: $E_{i,\sigma}$ 表示尺度为  $\sigma$  时振型曲率位置  $x$  处的能量算子,其值越大,该位置的损伤风险越高。

一般情况下,利用单尺度 WT-TEO-MSC 的奇异峰能够对损伤位置进行定位,但在实际应用过程中,尺度的选择和判断依赖于工程师的经验,且振型测量误差也会削弱 WT-TEO-MSC 的损伤判断能力,尤其对于结构多点微小损伤的情况。因此,本研究提出融合不同空间尺度损伤信息的结构损伤定位方法,即利用 WT-TEO-MSC 计算结构在不同尺度、不同位置的损伤概率,并通过贝叶斯融合算法融合不同尺度损伤概率对结构损伤位置进行辨识。

当尺度为  $\sigma$  时,位置  $x$  处的损伤概率定义为

$$m_{\sigma} = \left( m_{i,\sigma}(x) / \sum_{j=1}^n m_{i,\sigma}(j) \right) \quad (8)$$

其中:  $m_{\sigma}$  为尺度  $\sigma$  下位置  $x$  处的损伤概率;  $n$  为振型信息的测点数目,本研究指结构上像素点的数目。

设不同尺度上损伤概率为不同的信息源,根据贝叶斯融合算法,任意两个信息源  $S_1$  和  $S_2$  的融合可以表示为

$$m(A_i | S_1, S_2) = \frac{m(S_1, S_2 | A_i) m(A_i)}{\sum_{u=1}^N m(S_1, S_2 | A_u) m(A_u)} \quad (9)$$

由于每个尺度上的损伤概率分布是相互独立的,因此式(9)可以表示为

$$m(A_i | S_1, S_2) = \frac{m(S_1 | A_i) m(S_2 | A_i) m(A_i)}{\sum_{u=1}^N m(S_1 | A_u) m(S_2 | A_u) m(A_u)} \quad (10)$$

不失一般性,  $M$  个尺度上的损伤概率融合结果可描述为

$$m(A_i | S_1, S_2, \dots, S_M) = \frac{m(A_i) \prod_{k=1}^M m(S_k | A_i)}{\sum_{u=1}^N m(A_u) \prod_{k=1}^M m(S_k | A_u)} \quad (11)$$

其中:  $m$  为不同尺度上结构不同位置的损伤概率融合结果,概率值最大的地方即为结构的损伤位置。

基于多尺度空间信息融合的结构损伤位置辨识流程如图 1 所示。首先,对测量得到的高空间分辨率振型进行多尺度表征,从信号中分离损伤特征;其次,通过计算每个尺度上的能量算子,放大损伤特征;然后,计算不同尺度上不同位置的损伤概率分布,并利用贝叶斯融合理论将损伤概率分布进行融合;最后,通过融合后的损伤概率分布对结构损伤位置进行辨识。

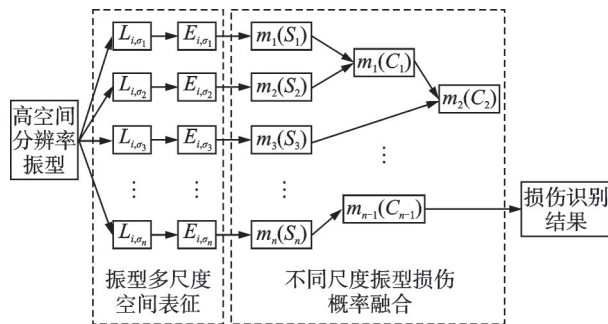


图 1 基于多尺度空间信息融合的结构损伤位置辨识流程图  
Fig.1 Flowchart of structural damage identification based on multi-scale space information fusion

## 2 试验验证

### 2.1 基于光流算法的结构振动响应测量精度

为验证所提视觉算法的测量精度,搭建了试验测试平台,包括振动试验台、高速摄像机、光源、笔记本电脑和激光传感器。试验测试平台及振动响应测量结果如图 2 所示。

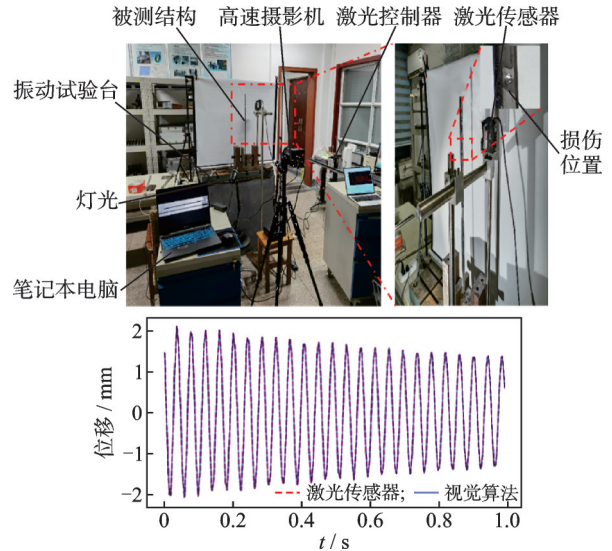


图 2 试验测试平台及振动响应测量结果

Fig.2 Experimental test platform and results of vibration response measurements

高速摄影机的拍摄频率为 3 000 帧/s,图像平面和物理平面之间的尺度因子为 7.8 mm/pixel。由图 2 可以看出,基于光流算法测量得到的振动响应与激光传感器测量结果基本一致。为进一步定量描述基于光流算法运动测量结果与激光传感器测量结果的精度,计算了 1 s 内两种方法测得位移的相关性,以及不同时刻视觉方法测得位移  $d_{\text{flow}}$  与基于激光传感器测得位移  $d_{\text{laser}}$  之间的测量误差  $\Delta(t)$ 。位移测量误差定义为

$$\Delta(t) = \frac{(d_{\text{laser}}(t) - d_{\text{flow}}(t))}{d_{\text{laser}}(t)} \times 100\% \quad (12)$$

其中:  $d_{\text{laser}}(t)$  为  $t$  时刻激光传感器测量的结构位移;  $d_{\text{flow}}(t)$  为  $t$  时刻视觉算法测量得到的结构位移。

采用光流算法测量得到的结构振动响应与激光传感器测量结果间的相关性为 99.6%。不同时刻基于激光传感器与光流算法的位移值测量误差计算结果见表 1。可以看出,在 0.2、0.4、0.6 和 0.8 s 时刻的位移值测量误差分别为 0.2%、0.3%、0.8% 和 0.4%。计算结果表明,基于光流算法的结构振动测量方法能够实现结构振动响应高精度测量。

此外,还对比了光流算法、有限元法和激光传感器测量的结构前3阶固有频率。不同方法频率计算结果见表2。可以看出,3种方法测量的结果基本一致,进一步表明所提算法可以实现结构振动响应的高精度测量。

表 1 位移值测量误差计算结果  
Tab.1 Calculation of measurement error of displacement values

| t/s | 测量位移/mm |        | 位移测量误差/% |
|-----|---------|--------|----------|
|     | 激光传感器   | 光流算法   |          |
| 0.2 | 1.996   | 1.991  | 0.2      |
| 0.4 | 0.571   | 0.573  | 0.3      |
| 0.6 | -0.356  | -0.353 | 0.8      |
| 0.8 | -1.463  | -1.470 | 0.4      |

表 2 不同方法频率计算结果  
Tab.2 Comparative frequency calculation results of various methods

| 方法    | 1 阶频率 | 2 阶频率  | 3 阶频率  |
|-------|-------|--------|--------|
| 有限元法  | 19.74 | 123.04 | 344.24 |
| 激光传感器 | 19.24 | 122.14 | 343.04 |
| 光流算法  | 19.04 | 122.91 | 343.91 |

在获得结构高空间分辨率振动响应的基础上,采用模态盲辨识算法对结构高空间分辨率振型进行计算,得到的结构前3阶振型与MAC值计算结果如图3所示。辨识结果见图3(a),每个振型都包含1 550个测点(像素点),具有较高的空间分辨率。为验证振型精度,计算了采用模态盲辨识算法得到的高空间分辨率模态振型与基于有限元仿真得到的振

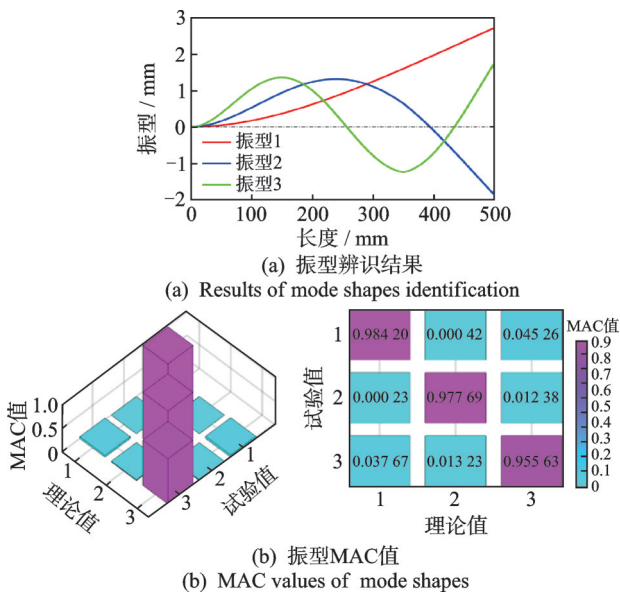


图 3 计算得到的结构前3阶振型与MAC值计算结果  
Fig.3 The first three mode shapes of the structure and MAC values between the calculated and measured mode shapes

型之间的模态置信准则(modal assurance criteria,简称MAC)值,如图3(b)所示。可以看出,前3阶振型与有限元分析得到的振型间的MAC值分别为98.4%、97.7%和95.5%,证明了光流算法结合高空间分辨率模态辨识方法能够提供高精度、高空间分辨率振型。

## 2.2 单尺度损伤位置识别算法精度

利用高速摄影机拍摄多点损伤的悬臂梁结构的振动视频,并基于光流算法与盲源分离算法计算结构的高空间分辨率振型,采用振型曲率和振型分型维数等单尺度结构损伤识别算法对结构损伤位置进行识别。多点损伤悬臂梁结构及其几何尺寸见图4。结构的几何尺寸为500 mm×20 mm×6 mm,损伤位置与固定端的距离分别为150、300和400 mm。

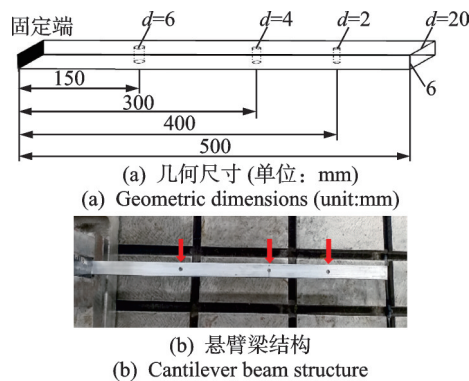


图 4 多点损伤悬臂梁结构及其几何尺寸  
Fig.4 Multi-point damage cantilever beam structure with its geometry

基于光流算法和模态盲辨识算法计算了悬臂梁结构的固有频率,并与有限元法、激光传感器得到的频率进行了对比。不同方法计算的悬臂梁损伤前后的频率见表3。可以看出,采用视觉方法与有限元、激光的测量结果基本一致,未损伤悬臂梁与损伤悬臂梁的频率前后变化不大,说明本研究所设计的损伤相对较小,对悬臂梁的振动特性影响不大。

表 3 不同方法计算的悬臂梁损伤前后的频率  
Tab.3 Frequency before and after damage of cantilever beams by different methods

| 方法    | 未损伤结构 |        |        | 多点损伤结构 |        |        |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       | 1 阶   | 2 阶    | 3 阶    | 1 阶    | 2 阶    | 3 阶    |
| 有限元法  | 19.74 | 123.04 | 344.24 | 19.57  | 122.62 | 342.17 |
| 激光传感器 | 19.24 | 122.14 | 343.04 | 18.91  | 121.85 | 340.19 |
| 光流算法  | 19.04 | 122.91 | 343.91 | 18.77  | 121.50 | 341.25 |

基于高空间分辨率振动响应计算得到的多点损伤结构前3阶振型如图5所示。在本试验中,每个振

型包含1550个测点,相当于在结构上布置了大量传感器,且不会产生质量效应。利用前3阶振型计算振型曲率和振型分型维数,基于振型曲率和振型分型维数的结构多点损伤辨识结果分别如图6、7所示。图中红线表示损伤位置,可以看出,由于振型曲

率、振型分型维数内在的中心差分算法会放大原有振型中的测量噪声,因此振型曲率无法直接辨识结构损伤位置。计算结果表明,基于单尺度的损伤位置识别算法易受测量噪声的影响,损伤特征易被噪声淹没,难以直接定位结构的损伤位置。

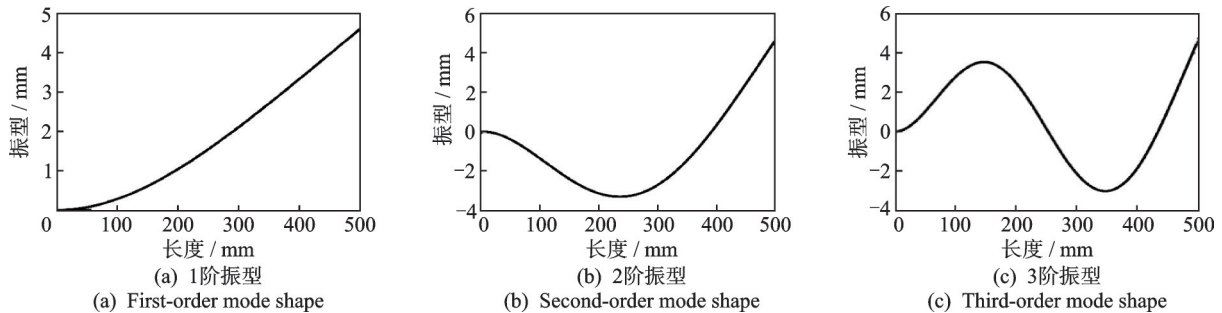


图5 基于高空间分辨率振动响应计算得到的多点损伤结构前3阶振型

Fig.5 First three orders of vibration pattern of multi-point damage structure based on high spatial resolution vibration response calculation

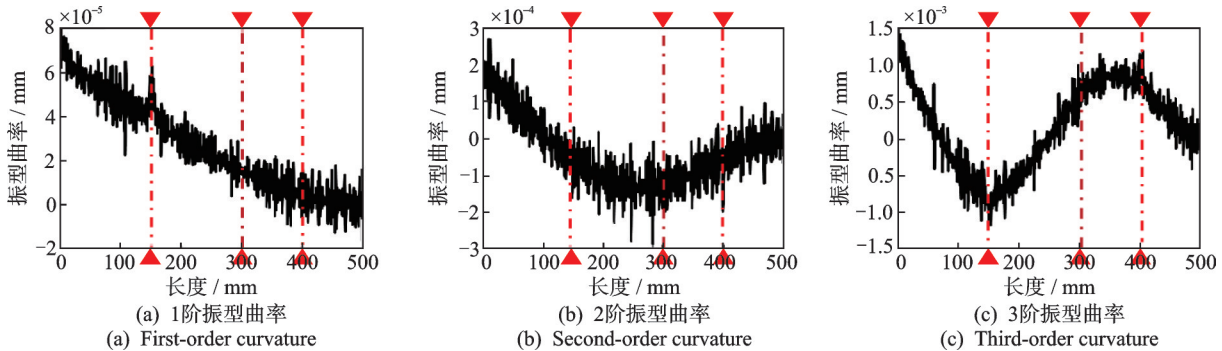


图6 基于振型曲率的结构多点损伤辨识结果

Fig.6 Results of multi-point damage identification of structure based on mode shape curvature

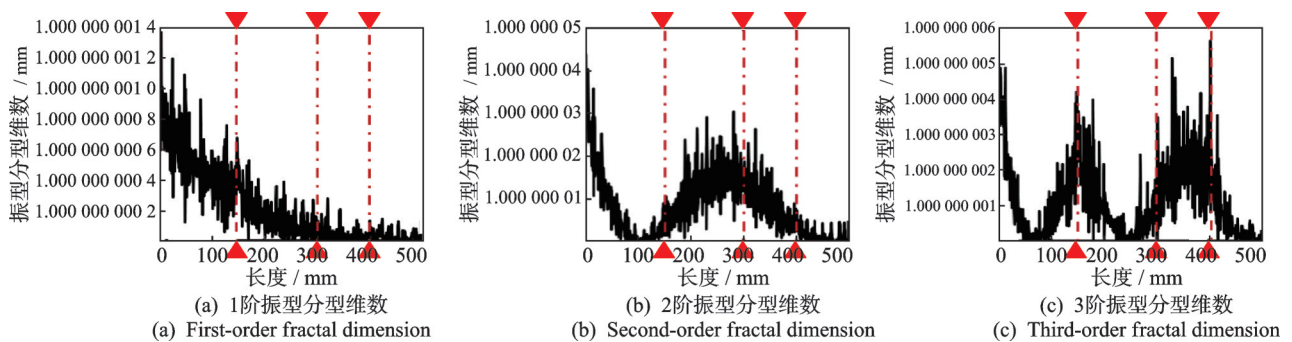


图7 基于振型分型维数的结构多点损伤辨识结果

Fig.7 Results of multi-point damage identification of structure based on mode shape fractal dimension

### 2.3 多尺度损伤位置识别算法精度

多尺度空间在提取信号特征的同时能够分离噪声,本研究对比了现有的基于多尺度振型(WT-TEO)与所提出的基于多尺度振型曲率(WT-TEO-MS)的结构损伤识别算法的识别精度,对所提算法的有效性进行了验证。

以多点损伤悬臂梁前3阶高空间分辨率振型为

基础,计算得到基于前3阶多尺度振型的结构多点损伤特征和位置分别如图8、9所示。由图8可以看出,小波尺度从0到10,随着尺度的增加,其噪声对结构损伤特征的影响逐渐降低。由图9可以看出:基于1阶振型的WT-TEO准确识别了损伤程度最大的损伤位置1,但不能对损伤程度一般的位置2和损伤程度最小的位置3进行识别;基于2、3阶振型的WT-TEO准确识别了损伤位置1和2,但未能准确识别出损伤程度最小的位置3。

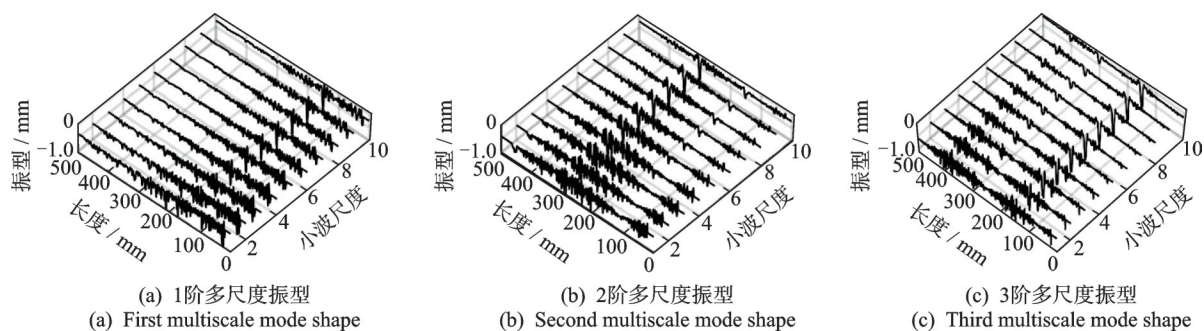


图8 基于前3阶多尺度振型的结构多点损伤特征

Fig.8 Multi-point damage feature based on the first three orders of multi-scale mode shapes

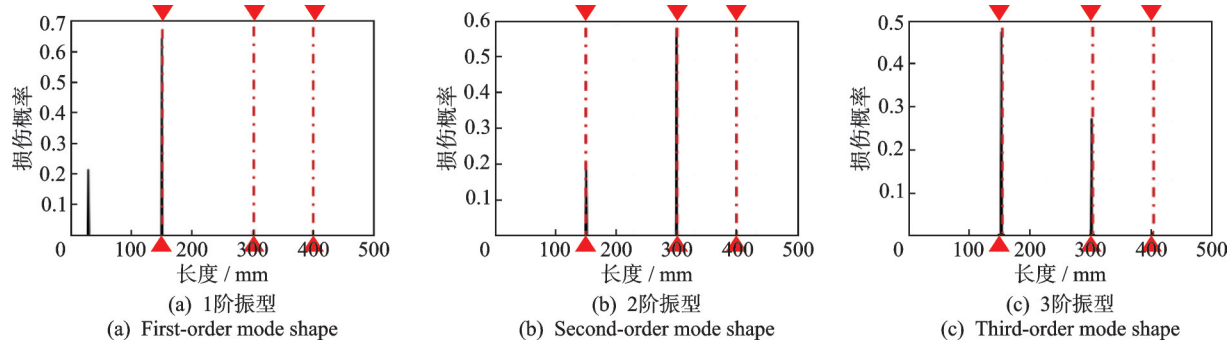


图9 基于前3阶多尺度振型的结构多点损伤位置

Fig.9 Multi-point damage location identification based on the first three orders of multi-scale mode shapes

基于前3阶高空间分辨率振型,采用本研究所提方法计算得到的多尺度振型信息融合的结构多点损伤特征识别结果如图10所示。其中,小波尺度从0到10,间隔为0.1。图10(a)为前3阶振型在尺度1~4时

WT-TEO-MSC的局部放大图像,图中损伤特征清晰可见,但噪声较大;图10(c)为前3阶振型在尺度7~10时WT-TEO-MSC的局部放大图像,可以看出,通过WT-TEO-MSC的方法能够将结构的损伤特征与噪

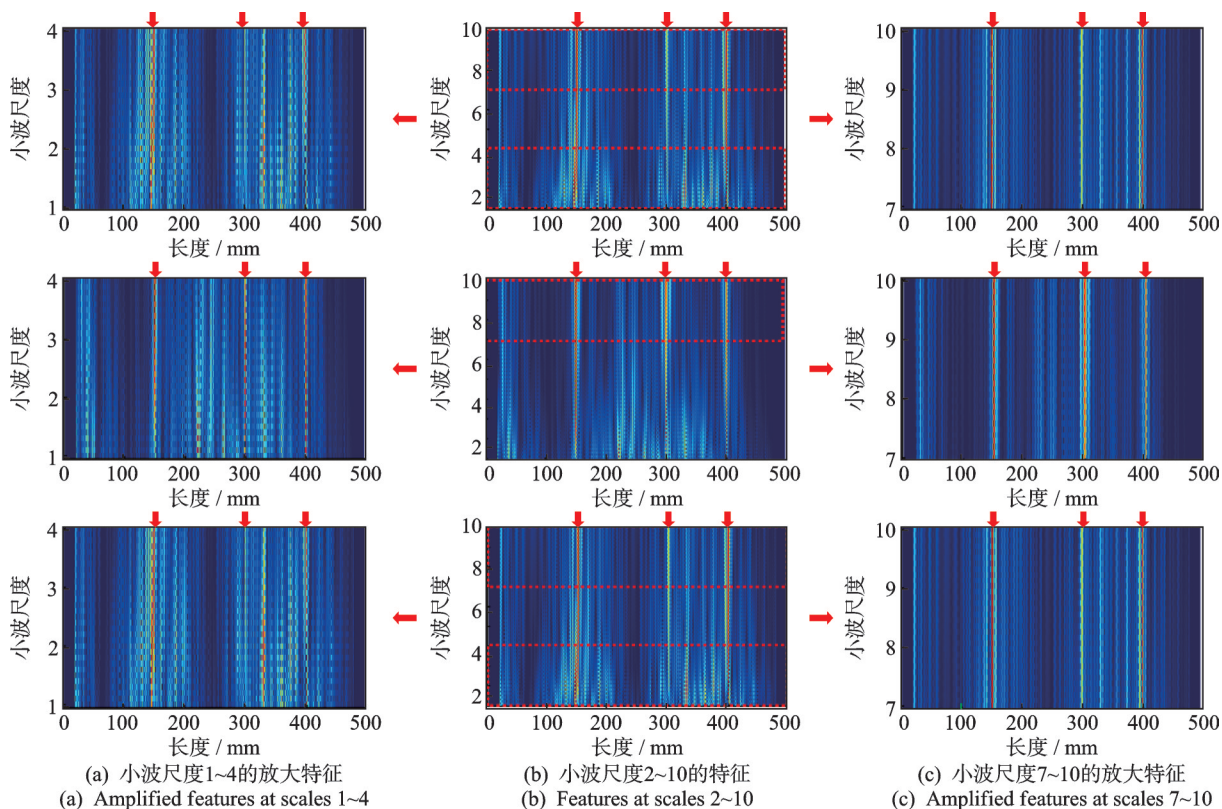


图10 多尺度振型信息融合的结构多点损伤特征识别结果

Fig.10 Structural multi-point damage feature identification results based on multi scale mode shape information fusion

声高效分离,但如何选择合适尺度的WT-TEO-MSC需要依赖于检测工程师的专业知识和主观判断。

利用损伤概率融合算法,计算得到的基于前3

阶振型的结构多点损伤辨识结果如图11所示。可以看出,本研究所提算法能够对结构的多点损伤位置高精度识别,证明了该方法的有效性。

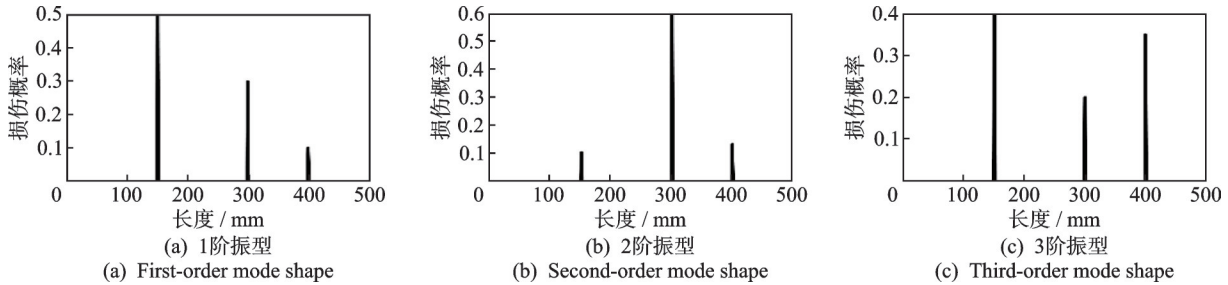


图11 基于前3阶振型的结构多点损伤辨识结果

Fig.11 Results of multi-point damage identification of the structure based on first three mode shapes

## 2.4 振型空间分辨率对损伤辨识精度的影响

本研究设计了结构单点损伤识别试验,通过对比高、低分辨率振型损伤识别结果,分析振型分辨率对损伤识别精度的影响。单点损伤悬臂梁结构及其几何尺寸见图12,损伤与固定端的距离为350 mm。

采用视觉算法对所获得的视频图像进行处理,得到结构高空间分辨率振动响应,进而计算得到多点损伤结构前3阶振型,如图13所示。其中,每个振型具有1 550个像素点。

基于振型曲率和振型分型维数的结构单点损伤辨识结果分别如图14、15所示。图中红线表示损伤

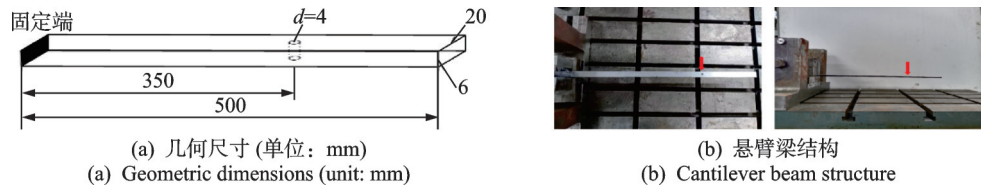


图12 单点损伤悬臂梁结构及其几何尺寸

Fig.12 Single-point damage cantilever beam structure and its geometry

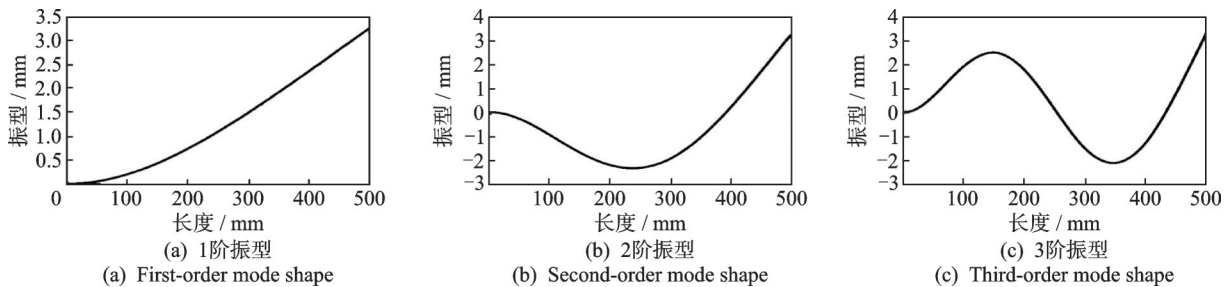


图13 基于高空间分辨率振动响应计算得到的单点损伤结构前3阶振型

Fig.13 First three orders of vibration pattern of single-point damage structure based on high spatial resolution vibration response calculation

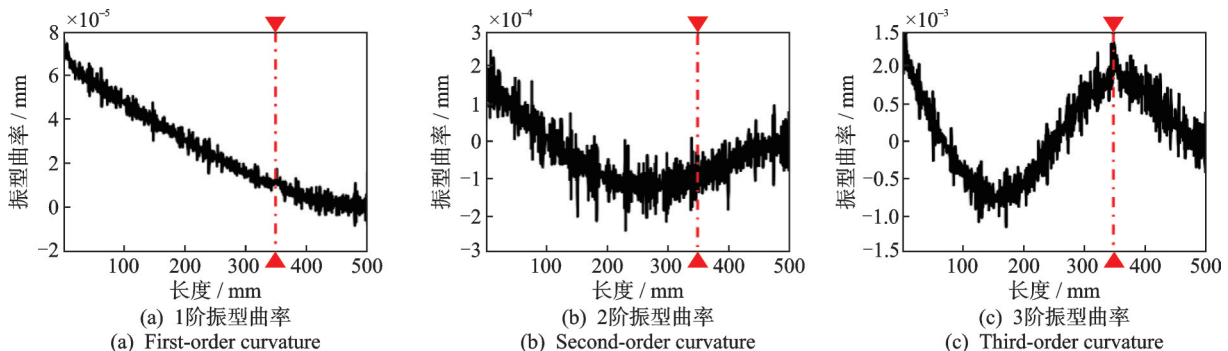


图14 基于振型曲率的单点损伤辨识结果

Fig.14 Results of single-point damage identification of structure based on mode shape curvature

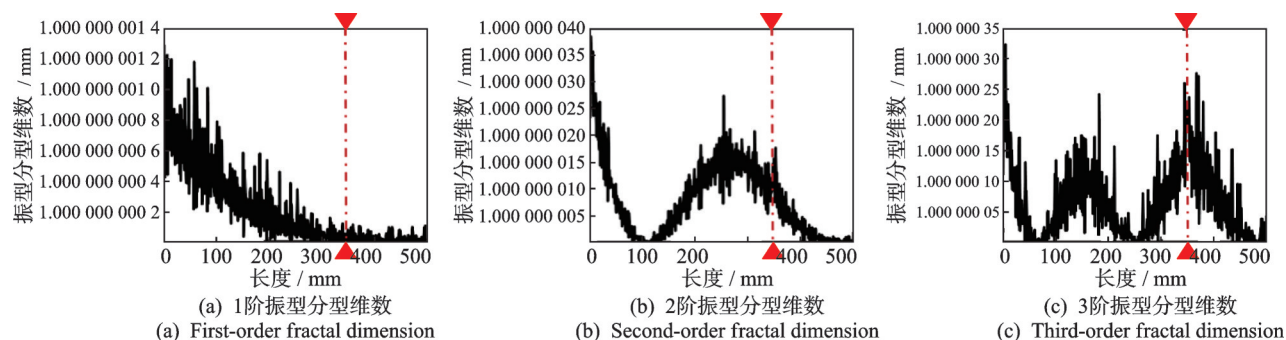


图15 基于振型分型维数的结构单点损伤辨识结果

Fig.15 Results of single-point damage identification based on mode shape fractal dimension

位置,可以看出,由于中心差分算法会放大原始振型中的噪声,因此难以直接从振型曲率、振型分型维数中对结构损伤位置进行定位。

基于前3阶高空间分辨率振型,采用本研究所提方法计算得到的多尺度振型信息融合的结构单点损伤特征识别结果如图16所示。图16(a)为尺度1~4时基于前3阶振型的局部放大图像,可以看出,损伤特征清晰可见,但噪声较大,难以直接对损伤进行定位;图16(c)为尺度7~10时的WT-TEO-MS-C计算结果,可以看出,随着尺度的增大,损伤特征变得清晰,噪声干扰较低。利用融合后的损伤概率对结构损伤进行辨识,基于前3阶

振型的结构多点损伤辨识结果如图17所示。计算结果表明,本研究所提算法能够对结构单点损伤位置进行准确识别。

为分析振型空间分辨率对损伤辨识精度的影响,采用降采样的方式对高空间分辨率振型进行处理。本研究对高空间分辨率振型降采样了8次,得到的结构前3阶低空间分辨率振型如图18所示。可以看出,由于测点数目少,其振型变得不再平滑。基于低空间分辨率振型曲率的结构单点损伤辨识结果如图19所示。基于低空间分辨率振型分型维数的结构多点损伤辨识结果如图20所示。可以看出,由于测点较少,无法对结构损伤位置进行定位。

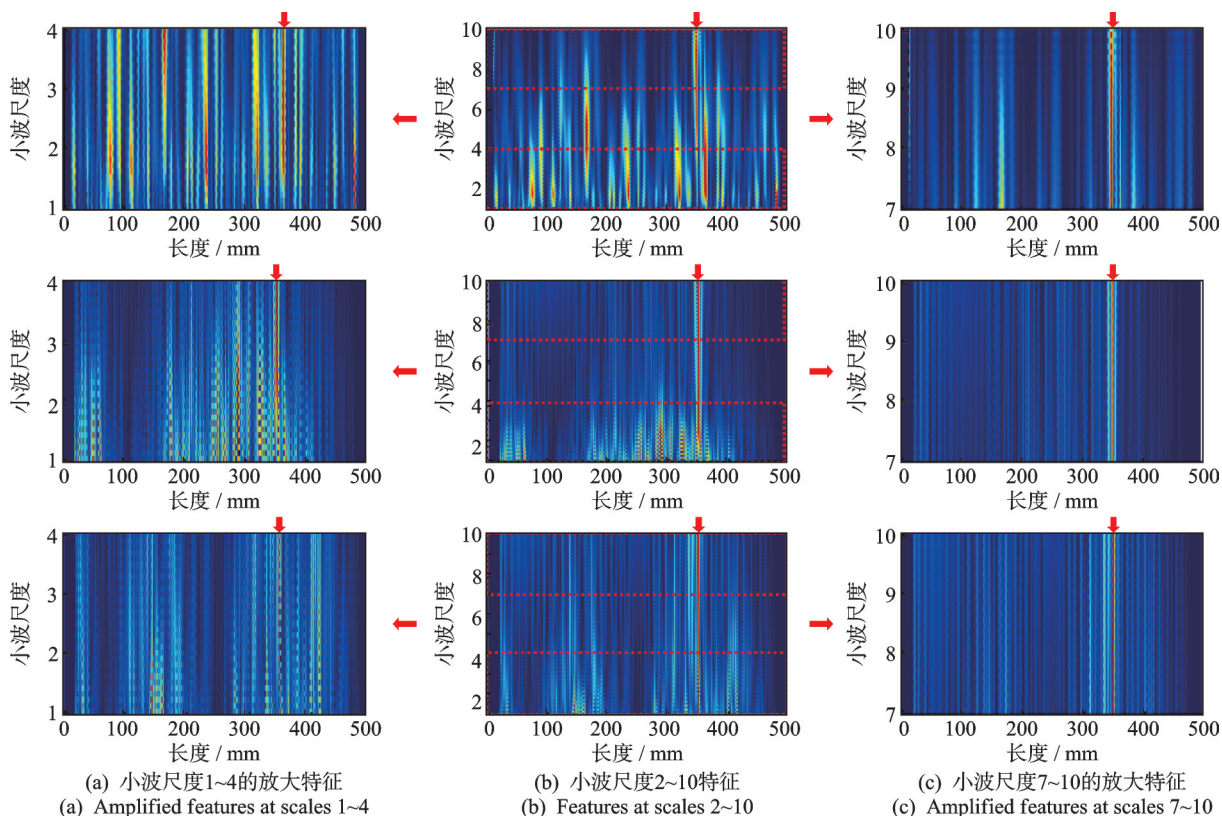


图16 多尺度振型信息融合的结构单点损伤特征识别结果

Fig.16 Structural single-point damage feature identification results based on multi scale mode shape information fusion

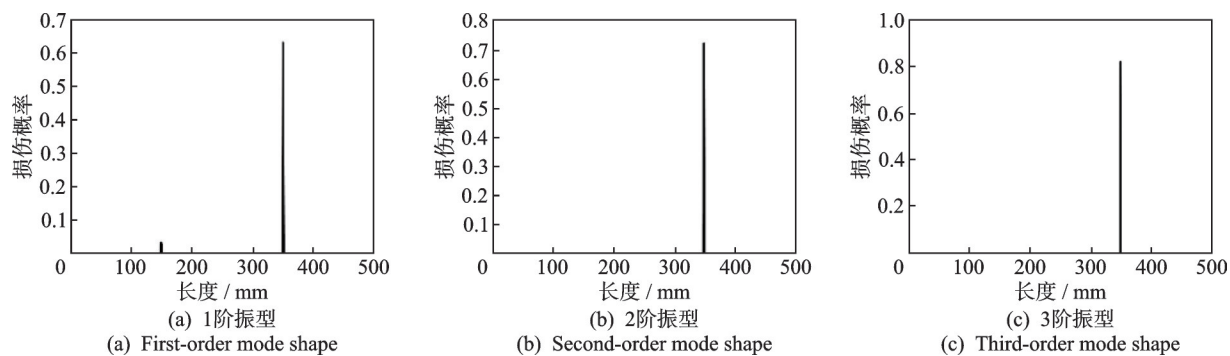


图 17 基于前 3 阶振型的结构单点损伤辨识结果

Fig.17 Results of single-point damage identification of the structure based on first three mode shapes

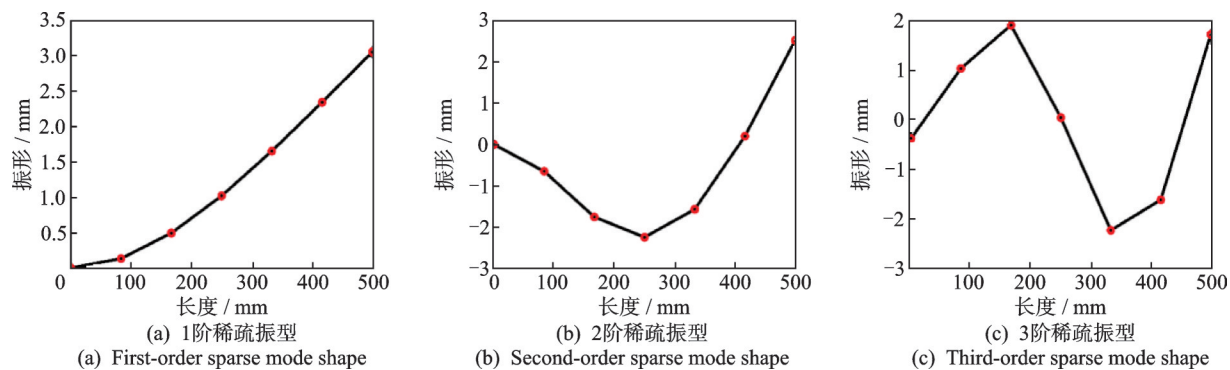


图 18 结构前 3 阶低空间分辨率振型

Fig.18 The first three orders of low-spatial-resolution mode shapes

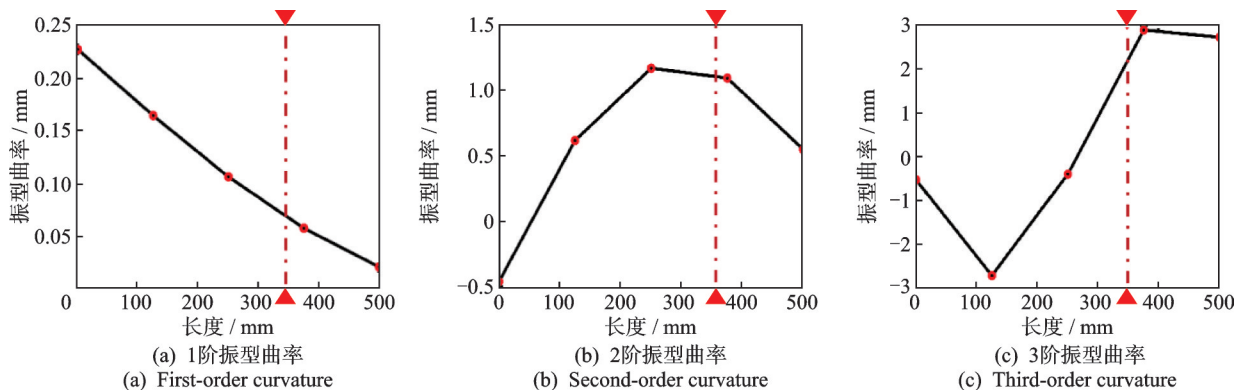


图 19 基于低空间分辨率振型曲率的结构单点损伤辨识结果

Fig.19 Results of single-point damage identification of structure based on low-spatial-resolution mode shape curvature

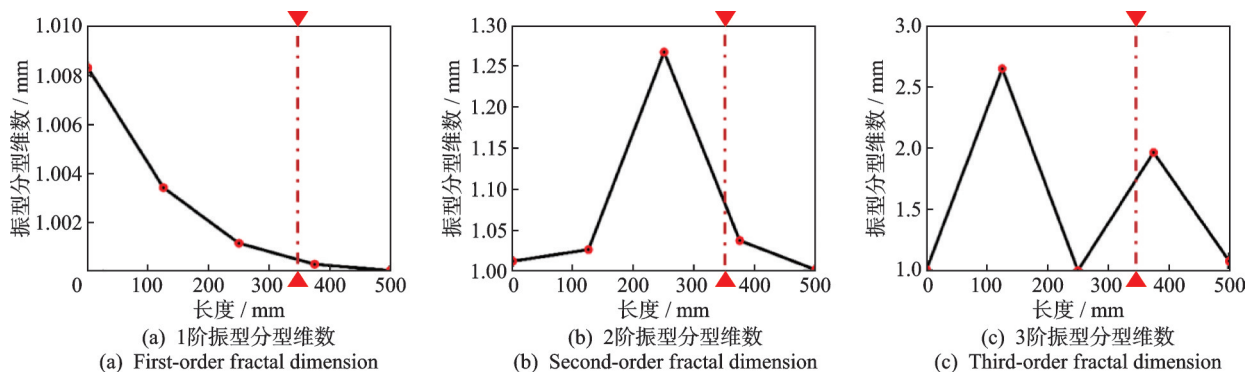


图 20 基于低空间分辨率振型分型维数的结构多点损伤辨识结果

Fig.20 Results of multi-point damage identification of structure based on low-spatial-resolution mode shape fractal dimension

作为对比,基于前 3 阶低空间分辨率振型,采用本研究所提方法计算得到的多尺度振型信息融合的结构单点损伤特征识别结果和损伤定位结果分别如图 21、22 所示。计算结果表明,在低空间分辨率振型识别中,能够确定结构损伤的位置范

围,但难以对结构损伤位置进行准确识别。这是因为在低空间分辨率结构振动响应测量时,传感器位置的稀疏布置不能高精度捕捉结构局部刚度发生的微小变化,只能定性确定结构发生损伤的位置范围。

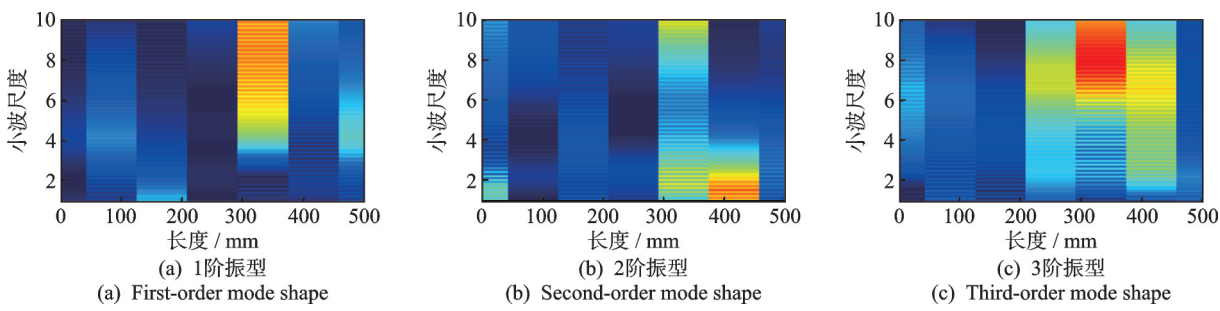


图 21 多尺度低空间分辨率振型信息融合的结构单点损伤特征识别结果

Fig.21 Structural single-point damage feature identification based on fusion multi-scale low spatial mode shape

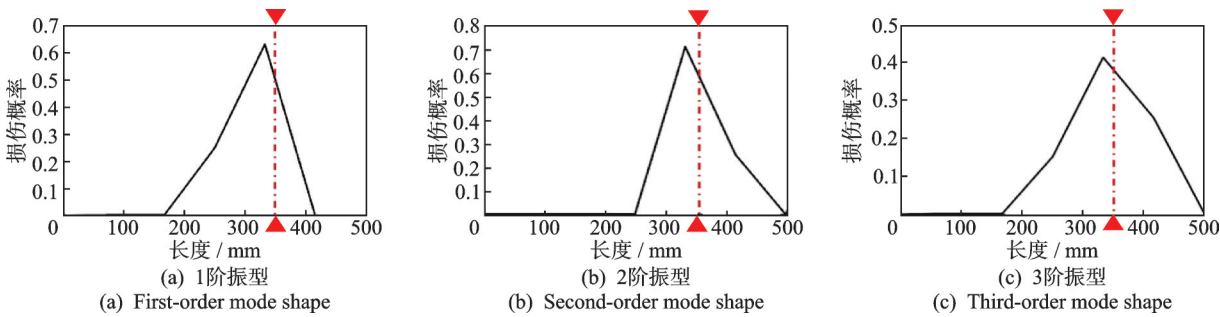


图 22 基于前 3 阶低空间分辨率振型的结构单点损伤定位结果

Fig.22 Results of single-point damage identification of the structure based on first three low-spatial-resolution mode shapes

2.5 噪声鲁棒性影响因素

本研究对所提算法在不同噪声环境中的损伤识

别精度进行了试验验证。不同损伤数目和损伤形貌的悬臂梁结构见表 4,其中包含了单圆孔损伤、两圆孔损伤、多圆孔损伤以及两矩形损伤。采用光流算

| 表 4 不同损伤数目和损伤形貌的悬臂梁结构                                                                   |           |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------|
| Tab.4 Cantilever beam structures with different number of damages and damage morphology |           |      |
| 损伤特点描述                                                                                  | 几何特征尺寸/mm | 实体结构 |
| 单点损伤(圆孔)                                                                                |           |      |
|                                                                                         |           |      |
| 多点损伤(圆孔)                                                                                |           |      |
| 两点损伤(矩形)                                                                                |           |      |

法得到不同损伤结果的高空间分辨率振型,利用 Matlab 中 awgn 函数计算得到振型信噪比在 40~100 dB 等不同噪声环境的振型,每个子仿真包含 1 000 个损伤辨识场景。损伤识别准确率定义为

$$Acc = \frac{N_{correct}}{N_{total}} \times 100\% \quad (13)$$

其中: $N_{total}$  为子仿真的总数目; $N_{correct}$  为在 1 000 个子模拟中准确识别的数量。

笔者采用不同损伤检测方法检测了不同噪声环境下的损伤情况,基于前 3 阶振型的结构损伤识别准确率统计结果如图 23 所示。由图可知,与现有基于振型曲率、振型分型维数等损伤识别算法相比,本研究所提算法在噪声环境下具有较高的噪声鲁棒性,能够有效识别出不同损伤形貌、不同噪声环境下的损伤位置。

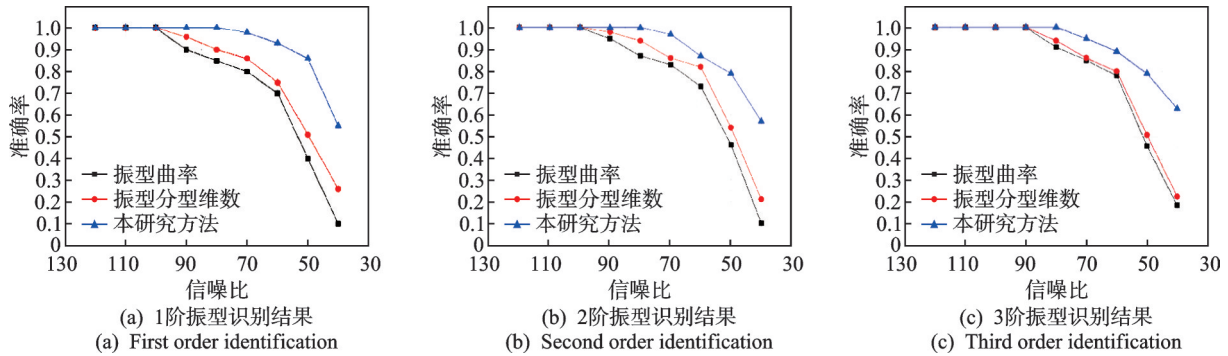


图 23 基于前 3 阶振型的结构损伤识别准确率统计结果

Fig.23 Statistical results of structural damage identification accuracy based on the first three mode shapes of a cell in the body to determine which

### 3 结 论

1) 相较于离散测量的振动信号测量方法,基于光流算法的图像运动测量方法具有高空间分辨率的结构振动响应优势,结合模态盲辨识算法,得到的前 3 阶振型与有限元法得到的振型间模态置信准则分别为 98.4%、97.7% 和 95.5%,证明了机器视觉方法具有提供高空间分辨率、高精度振动响应的能力。

2) 相较于现有的损伤识别算法,本研究所提基于 WT-TEO-MSC 的方法对损伤特征具有较强的识别能力和较高的噪声鲁棒性,无需结构健康基线数据,仅利用单阶振型数据就能实现结构损伤位置的准确辨识。

3) 光流算法虽然具有非接触、无标记及高空间分辨率测量的优势,但其在复杂光照条件下往往难以取得理想的测量效果。此外,本研究采用的结构为悬臂梁结构,但真实工业场景下的结构为复杂的三维结构。因此,还需发展所提算法在复杂结构中的应用,进一步提高其适用范围。

### 参 考 文 献

- [1] SKOWRONEK K, BARSZCZ T, ANTONI J, et al. Assessment of background noise properties in time and time-frequency domains in the context of vibration-based local damage detection in real environment[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 199: 110465.
- [2] ZHANG B Y, NI Y Q. A data-driven sensor placement strategy for reconstruction of mode shapes by using recurrent Gaussian process regression[J]. Engineering Structures, 2023, 284: 115998.
- [3] 聂振华, 蔡文, 夏子立, 等. 基于高分辨率 ECOMAC 的桥梁结构损伤识别[J]. 振动、测试与诊断, 2023, 43(1): 179-187.
- [4] 汤涛, 臧朝平, 张磊, 等. 含圆孔平板结构的连续扫描激光测振方法[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(5): 104-107.
- [5] SHA G G, RADZIENSKI M, SOMAN R, et al. Multiple damage detection in laminated composite beams by data fusion of Teager energy operator-wavelet

- transform mode shapes[J]. *Composite Structures*, 2020, 235: 111798.
- [6] SHU J H, ZHANG C, CHEN X, et al. Model-informed deep learning strategy with vision measurement for damage identification of truss structures[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 196: 110327.
- [7] 谢瑞丽, 许巍, 陈新, 等. 基于单高速相机 3D-DIC 的涡轮叶片全场振动测量[J]. *振动、测试与诊断*, 2024, 44(1): 18-23.
- XIE Ruili, XU Wei, CHEN Xin, et al. Full-field vibration measurement of turbine blades based on single high-speed camera 3D-DIC [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2024, 44(1): 18-23. (in Chinese)
- [8] 叶肖伟, 董传智. 基于计算机视觉的结构位移监测综述[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(11): 21-39.
- YE Xiaowei, DONG Chuanzhi. Review of computer vision-based structural displacement monitoring[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(11): 21-39. (in Chinese)
- [9] 徐超, 张一凡, 韩晓明, 等. 基于机器视觉的大柔性结构振动位移测量[J]. *振动、测试与诊断*, 2017, 37(4): 781-786.
- XU Chao, ZHANG Yifan, HAN Xiaoming, et al. Machine vision based vibration displacement measurement of large flexible structure[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(4): 781-786. (in Chinese)
- [10] 李萍, 张劲泉, 王磊, 等. 基于摄影测量的简支梁桥损伤识别[J]. *公路交通科技*, 2022, 39(8): 1-8.
- LI Ping, ZHANG Jinquan, WANG Lei, et al. Damage identification for simple supported beam bridge based on photogrammetry[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2022, 39(8): 1-8. (in Chinese)
- [11] KHUC T, CATBAS F N. Computer vision-based displacement and vibration monitoring without using physical target on structures[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, 13(4): 505-516.
- [12] XIN C, WANG C J, XU Z L, et al. Marker-free vision-based method for vibration measurements of RC structure under seismic vibration[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2022, 51(8): 1773-1793.
- [13] 朱美意, 陈日东, 郑德智. 基于欧拉运动放大的微小振动测量技术综述[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(11): 90-98.
- ZHU Meiyi, CHEN Ridong, ZHENG Dezhi. Review of vibration measurement techniques based on euler motion magnification[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(11): 90-98. (in Chinese)
- [14] ZHANG Z, WANG J, ZHAO H J, et al. Applicability of deep learning optical flow estimation for PIV methods [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2023, 93: 102398.
- [15] XIN C, QIN M Q, HE M F, et al. An approach for damage detection in noisy environments using DOG multi-scale space and fractal dimension[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2023, 38(5): 767-797.
- [16] 孙增寿, 李晓鹏, 韩培琰, 等. 基于小波包样本熵的连续梁桥损伤识别[J]. *振动、测试与诊断*, 2018, 38(5): 916-921.
- SUN Zengshou, LI Xiaopeng, HAN Peiyan, et al. Damage identification for continuous girder bridge based on wavelet packet sample entropy[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(5): 916-921. (in Chinese)
- [17] ALTUNİŞIK A C, OKUR F Y, KAHYA V. Modal parameter identification and vibration based damage detection of a multiple cracked cantilever beam[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 79: 154-170.
- [18] WU X, CAO M S, 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.
- [19] YANG Y C, DORN C, FARRAR C, et al. Blind, simultaneous identification of full-field vibration modes and large rigid-body motion of output-only structures from digital video measurements[J]. *Engineering Structures*, 2020, 207: 110183.



**第一作者简介:** 辛存,男,1991年9月生,博士、高级工程师。主要研究方向为机械装备健康监测与智能运维、机械装备剩余寿命预测及机械信号处理与分析。  
E-mail: xincun0904@163.com