

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202210006



# 采用 VMD 和归一化峭度的 钢管混凝土柱内部脱空缺陷识别方法

刘景良<sup>1</sup>, 彭佳敏<sup>1</sup>, 方露<sup>1</sup>, 姜洋<sup>2</sup>, 蔡宏爽<sup>1</sup>, 张羲岭<sup>3</sup>

(1. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 福建农业职业技术学院 园艺园林学院, 福建 福州 350303;

3. 福建省国电调试院有限公司, 福建 福州 350025)

**摘要:** 提出一种基于变分模态分解(VMD)与归一化峭度的钢管混凝土柱内部脱空缺陷识别方法. 首先, 采用 VMD 分解响应信号; 然后, 选取加权峭度值大于平均值的模态分量作为有效分量并进行信号重构; 对重构后的信号求取 Teager 能量算子(TEO)并进行快速傅里叶变换(FFT); 最后, 对经 FFT 处理的 TEO 值进行归一化峭度求解. 通过数值算例和动力试验对文中方法的有效性和准确性进行验证. 研究表明: 文中方法对钢管混凝土柱内部损伤位置的识别效果较好, 且不依赖于原始未损工况的基准信息.

**关键词:** 钢管混凝土柱; 脱空缺陷; 变分模态分解; 峭度; 缺陷识别

**中图分类号:** TU 311.3; TU 392.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2023)03-0328-08

## Cavity Defect Detection Method for Concrete-Filled Steel Tubular Column Using VMD and Normalized Kurtosis

LIU Jingliang<sup>1</sup>, PENG Jiamin<sup>1</sup>, FANG Lu<sup>1</sup>,  
JIANG Yang<sup>2</sup>, CAI Hongshuang<sup>1</sup>, ZHANG Xiling<sup>3</sup>

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108, China;

2. College of Horticulture and Landscape Architecture, Fujian Vocational College of Agriculture, Fuzhou 350303, China;

3. Fujian Guodian Commissioning Institute Limited Company, Fuzhou 350025, China)

**Abstract:** A cavity defect detection method is proposed for concrete-filled steel tubular columns (CFSTC) based on variational mode decomposition (VMD) and kurtosis. VMD is used to decompose response signals. The modal components whose weighted kurtosis are larger than mean value are selected as the effective components and used to reconstruct signals. The reconstructed signal is processed by Teager's energy operator (TEO), and the fast Fourier transform (FFT) is carried out. The values of TEO processed by FFT are used to calculate the normalized kurtosis. The effectiveness and accuracy of this method are verified by a numerical case and a dynamic test. The research results show that this method is effective in identifying the internal damage location of CFSTC, and does not depend on the reference information of the original undamaged condition.

**Keywords:** concrete-filled steel tubular column; cavity defect; variational mode decomposition; kurtosis; defect detection

服役期间的钢管混凝土结构难免遭受工作荷载和极端荷载的影响, 因而会出现一定程度的脱空现

收稿日期: 2022-10-13

通信作者: 刘景良(1983-), 男, 副教授, 博士, 主要从事桥梁结构健康监测的研究. E-mail: liujingliang@fafu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51608122); 福建省自然科学基金面上资助项目(2020J01581)

象<sup>[1]</sup>. 脱空缺陷严重影响了钢管混凝土结构的承载力和稳定性, 因此, 对其进行检测和定位具有十分重要的工程意义.

目前, 钢管混凝土结构脱空缺陷的检测方法包括无损检测和有损检测. 常用的有损检测方法主要为钻芯取样法, 即直接对可能出现脱空的位置进行钻孔取样<sup>[2]</sup>. 钻芯取样法虽能直观地检测出钢管混凝土试件的脱空情况, 但对结构造成的破坏往往是不可逆的. 常见的无损检测方法有红外热成像法、超声波法等. 根据超声波在传播过程中会发生一定程度的损耗这一特性, 研究人员可以探测出钢管混凝土的密度和均匀性. 然而, 超声波法不仅对试件本身的条件要求较高, 而且需要检测人员具有丰富的检测经验, 因此, 其检测精度和效率相对较低<sup>[3-4]</sup>. 在环境温度良好的情况下, 红外热成像法能够较好地识别钢管内、外表面的温度差异和内部脱空缺陷情况<sup>[5]</sup>. 然而, 红外热成像法对气候条件要求较高, 难以在阴天和背阴面的环境下进行, 这极大地限制了该方法的应用范围和检测精度<sup>[6]</sup>. 冯琪智等<sup>[7]</sup>针对红外热成像法在缺陷处成像分辨率较低的问题, 提出基于区域生长和热图信息重构的融合算法. 蔡萍等<sup>[8]</sup>对压电陶瓷片采集到的波动信号进行频响函数分析, 并成功检测钢管与核心混凝土之间的剥离缺陷. 为克服超声波法在钢管混凝土结构缺陷检测过程中可能出现的误判现象, 陈禾等<sup>[5]</sup>提出基于红外热成像法与超声波法相结合的混凝土无损检测技术.

随着新型信号处理技术的飞速发展, 基于振动的损伤诊断方法在土木工程领域获得了广泛关注, 其核心思想就是模态参数为物理参数的函数<sup>[9-11]</sup>. 虽然基于振动特性的缺陷检测方法已经广泛应用于混凝土结构缺陷检测, 但其在钢管混凝土结构中的应用还并不多见. 基于此, 本文紧密结合钢管混凝土结构的动力特性和服役环境特点, 以振动响应信号处理为出发点, 采用变分模态分解(VMD)将结构响应分解为多个模态分量; 然后, 依据加权峭度指标选择有效的模态分量进行信号重构, 并计算重构信号的 Teager 能量算子 (TEO); 最后, 采用快速傅里叶变换 (FFT) 对 TEO 值进行处理和归一化峭度求解, 最终达到识别钢管混凝土试件内部脱空缺陷的目的.

## 1 信号分解方法

为更好地从振动信号中获取缺陷信息, 有必要通过信号分解方法寻找一些仅对结构损伤或缺陷敏感的分量信号, 然后, 根据分量信号构建损伤指标并探测钢管混凝土结构的内部缺陷. 常见的模态信号分解方法包括经验模态分解<sup>[12]</sup>、集合经验模态分解<sup>[13]</sup>、补充经验模态分解<sup>[14]</sup>、解析模态分解<sup>[15]</sup>, 以及变分模态分解<sup>[16]</sup>. 其中, VMD 是 Dragomiretskiy 等<sup>[16]</sup>提出的一种新型自适应模态信号分解方法. 该方法拥有较高的运算效率, 且在抗噪方面表现出鲁棒性, 因而, 适用于土木工程结构振动响应信号的分解.

若预设钢管混凝土结构原始振动响应信号  $x(t)$  的模态分量个数为  $S$ , 则 VMD 可将其分解为  $S$  个模态分量, 其中, 第  $k$  个分量为  $u_k(t)$  且中心频率为  $\omega_k(t)$ . 与经验模态分解理论不同是, 经 VMD 分解后的模态分量信号  $u_k(t)$  为 1 个调幅调频信号, 即

$$u_k(t) = A_k(t) \cos[\varphi_k(t)]. \tag{1}$$

式(1)中:  $A_k(t)$  为  $u_k(t)$  的瞬时幅值;  $\varphi_k(t)$  为  $u_k(t)$  的瞬时相位.

VMD 本质上是通过求解模态分量的变分问题来确定各分量信号的带宽和中心频率. 在各阶模态分量之和等于原信号的约束条件下, VMD 将有关模态分量的变分问题转化为寻求估计带宽之和最小的模态函数. 具体来说, 首先, 对分解后的模态分量信号  $u_k(t)$  进行希尔伯特变换, 得到对应的单边频谱; 其次, 将单边频谱与  $e^{-i\omega_k t}$  相乘, 从而使每个分量的频谱调整至以预估中心频率  $\omega_k$  为中心的频带; 最后, 计算频率混合后信号梯度范数的平方, 并估计移频后分量信号的带宽; 最终, 得到约束优化问题为

$$\begin{aligned} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} & \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[ \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \times u_k(t) \right] e^{-i\omega_k t} \right\|_2^2 \right\}, \\ \text{s. t. } & \sum_k u_k(t) = x(t). \end{aligned} \tag{2}$$

式(2)中:  $x(t)$ ,  $\delta(t)$  分别为原始响应信号和脉冲函数.

为确保外界噪声情况下信号的重构精度及约束条件的严格性, 首先, 引入拉格朗日乘法算子  $\lambda$  和二次罚函数因子  $\alpha$ ; 然后, 采用拓展拉格朗日表达式  $L$  表征无约束优化问题, 即

$$L(\{u_k\},\{\omega_k\},\lambda)=\alpha\sum_k\left\|\partial_t[\delta(t)+\frac{j}{\pi t}\times u_k(t)]e^{-i\omega_k t}\right\|_2^2+\left\|f(t)-\sum_k u_k(t)\right\|_2^2+\langle\lambda(t),f(t)-\sum_k u_k(t)\rangle.$$

(3)

此后,采用交替方向乘子算法<sup>[17]</sup>求解并更新  $u_k^{n+1},\omega_k^{n+1}$  和  $\lambda^{n+1}$ ,具体有以下 6 个求解步骤.

- 1) 初始化  $\{u_k^1\},\{\omega_k^1\},\lambda^1,n$ ,并赋值为零.
- 2) 设置循环条件  $n=n+1$ .
- 3) 迭代更新  $u_k^{n+1}$ ,即

$$u_k^{n+1}(\omega)=\frac{x(\omega)-\sum_{i\neq k}u_i(\omega)+\frac{\lambda(\omega)}{2}}{1+2\alpha(\omega-\omega_k)^2}.$$

(4)

- 4) 迭代更新  $\omega_k^{n+1}$ ,即

$$\omega_k^{n+1}=\frac{\int_0^\infty\omega|u_k(\omega)|^2d\omega}{\int_0^\infty|u_k(\omega)|^2d\omega}.$$

(5)

- 5) 迭代更新  $\lambda^{n+1}$ ,即

$$\lambda^{n+1}=\lambda^n+\tau(x(t)-\sum_k u_k^{n+1}).$$

(6)

- 6) 重复步骤 2)~5),直至满足迭代收敛条件

$$\sum_k\frac{\|u_k^{n+1}-u_k^n\|_2^2}{\|u_k^n\|_2^2}<\varepsilon.$$

(7)

式(7)中: $\varepsilon$  为收敛容许值.

经过上述迭代步骤后,离散的各阶模态分量信号将从原信号  $x(t)$  中分离出来.更多关于 VMD 的理论和算法可参考文献[16].

2 内部脱空缺陷损伤指标

作为一种无量纲参数,峭度指标对冲击信号特别敏感,同时又富含关于损伤的信息,因而特别适合机械故障、结构损伤等方面的诊断<sup>[18]</sup>.一般来说,结构损伤位置的峭度在损伤前、后会发生较大的变化,可以用来表征结构的损伤状况.除此以外,峭度还具有数学上易于处理、计算方便和有限采样时具有鲁棒性等优点.为此,将峭度指标引入土木工程领域并用于估计钢管混凝土结构的脱空缺陷位置.

在通过 VMD 将结构某一测点的原始响应信号  $x(t)$  分解为多个模态分量信号后,建立峭度  $K$  和相关系数  $C$ ,其表达式分别为

$$K=\frac{1}{N}\frac{\sum_{t=0}^{N-1}u_k^4}{\left[\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N-1}u_k^2\right]^2},$$

(8)

$$C=\frac{\sum u_k(t)x(t)-\frac{\sum u_k(t)\sum x(t)}{N}}{\sqrt{\left[\sum u_k^2(t)-\frac{(\sum u_k(t))^2}{N}\right]\left[\sum x^2(t)-\frac{(\sum x(t))^2}{N}\right]}}.$$

(9)

式(8),(9)中: $N$  为原始信号的采样点数; $u_k(t)$  为信号分解后的第  $k$  个模态分量信号,即式(7)中的  $u_k^{n+1}$ .需要注意的是,式(9)中的  $u_k(t)$  和  $x(t)$  不但可以采用时域形式,亦可采用频域形式.

为更好地提取原始振动响应信号的有效模态分量信号,首先,构造加权峭度( $K_w$ )指标;然后,选取  $K_w$  指标大于其平均值的分量为有效模态分量,并用于重构信号  $x'(t)$ .加权峭度指标表达式为

$$K_w=K\cdot C.$$

(10)

在此基础上,为提取微弱损伤成分,引入 Teager 能量算子<sup>[19]</sup>并记作  $\psi$ .对于重构信号  $x'(t)$ ,其

Teager 能量算子为

$$\psi_x' = \psi[x'(t)] = \left(\frac{dx'(t)}{dt}\right)^2 - x'(t) \frac{d^2x'(t)}{dt^2}.$$

然后,对重构信号  $x'(t)$  的瞬时 TEO 值进行 FFT 变换,即

$$F_{x'} = F[\psi_{x'}] = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{x'} e^{-j\omega t} dt.$$

最后,针对傅里叶变换系数计算峭度指标,即

$$K_{x'} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} F_{x'}^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-1} F_{x'}^2\right]^2}.$$

若结构共设置  $M$  个测点,且第  $i$  个测点的峭度指标定义为  $K_{x'}^i$ ,则各测点的归一化峭度为

$$\overline{K} = \frac{K_{x'}^i}{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M K_{x'}^i}.$$

与既有的基于动力反应的损伤指标(频率、振型等)相比,采用 VMD 和归一化峭度识别钢管混凝土内部脱空缺陷的优点十分明显,主要表现如下.

- 1) VMD 对噪声信号具有良好的鲁棒性,可在复杂噪声环境中提取响应信号中的关键信息.
- 2) 在不依赖于未损工况基准信息的条件下,文中方法也能有效识别钢管混凝土试件的内部脱空缺陷,因而具备在实际工程中的应用潜力.

3 数值算例验证

3.1 钢管混凝土柱有限元模型的建立

采用 ABAQUS 程序建立 4 根带脱空缺陷的钢管混凝土圆形柱有限元模型,如图 1 所示. 钢管混凝土的局部冠形脱空通过布尔运算实现. 钢管每根柱长 1 200 mm,直径为 150 mm,端板边长为 240 mm,端板厚度为 20 mm,钢管厚度为 3.75 mm. 钢材材质为 Q235,弹性模量为 206 GPa,密度为  $7.85 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . 混凝土强度等级为 C30,弹性模量为 33.5 GPa,密度为  $2.41 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

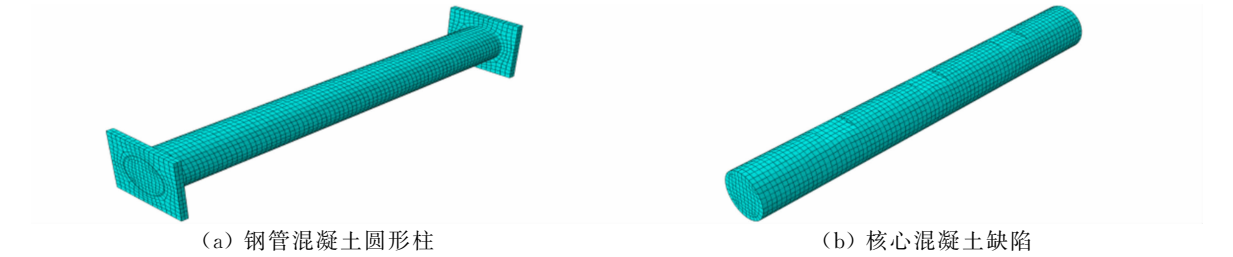


图 1 钢管混凝土柱有限元模型  
Fig. 1 Finite element model of CFSTC

将建立的有限元模型均匀地划分为 11 个单元,如图 2 所示. 在钢管混凝土圆形柱有限元模型上等间距布置 11 个加速度传感器,设置增量步为  $5 \times 10^{-5} \text{ s}$ ,采样频率为 2 kHz,采样时间为 1 s,然后,在单元 1 和单元 2 之间施加脉冲荷载,并提取不同损伤工况下每个测点的加速度时程响应. 钢管混凝土柱有

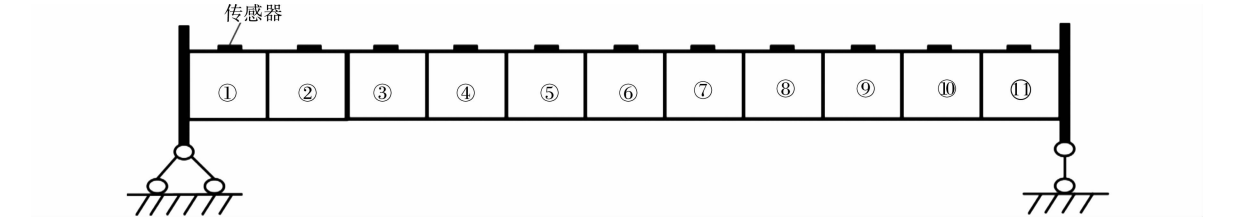


图 2 钢管混凝土柱有限元模型划分示意图  
Fig. 2 Division diagram of CFSTC finite element model

限元模型脱空缺陷工况,如表 1 所示.

3.2 钢管混凝土柱有限元模型内部脱空缺陷识别结果

以表 1 中 B1 工况下节点 6 的响应信号为例,首先,对该信号进行倒序排列;然后,再将节点信号正序排列并组成 1 个新的信号序列;最后,对其进行复 Morlet 小波连续变换,其小波量图,如图 3(a)所示.图 3(a)中: $f$  为频率; $t$  为时间.

由图 3(a)可知:响应信号的频率主要集中在 $[0\text{ Hz}, 100\text{ Hz}]$ , $[300\text{ Hz}, 450\text{ Hz}]$ , $[500\text{ Hz}, 600\text{ Hz}]$ , $[650\text{ Hz}, 850\text{ Hz}]$ , $[900\text{ Hz}, 1\ 100\text{ Hz}]$ 这 5 个频率区间内,因此,可判断分量信号的个数为 5,然后,通过 VMD 将目标信号分解为 5 个模态分量信号.在此基础上,构建节点 6 响应信号的各阶模态分量的加权峭度值,如图 3(b)所示.

由图 3(b)可知:第 4 阶和第 5 阶模态分量的加权峭度值大于平均值,可将其视为有效模态分量并进行后续操作.

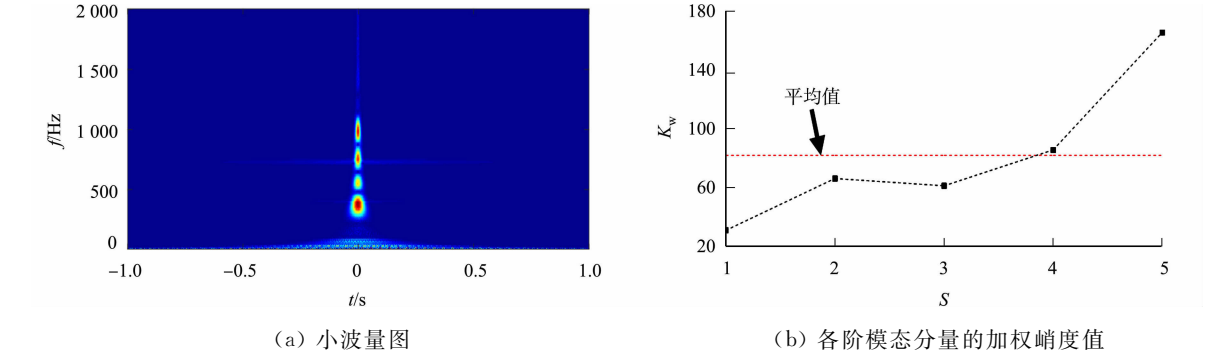


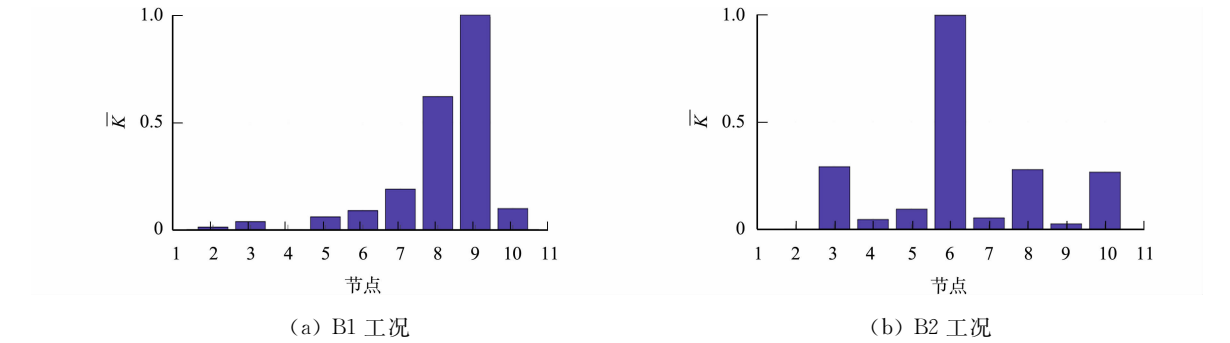
图 3 B1 工况下节点 6 响应信号的小波量图和各阶模态分量的加权峭度值  
Fig. 3 Wavelet magnitude diagram and weighted kurtosis value of each order modal component of node 6 response signal under B1 condition

同样地,对 B1 工况下钢管混凝土柱有限元模型其余节点的响应信号进行类似处理,即选取各节点信号分量中加权峭度值大于平均值的模态分量进行统计.经统计后可知,大多数节点响应信号中的第 3,4,5 阶模态分量占比最大,因此,选择第 3,4,5 阶模态分量进行信号重构.在完成信号重构后,进行 TEO 计算,并采用 FFT 对 TEO 值进行处理.最后,对获得的傅里叶变换系数进行峭度求解和归一化处理,得到钢管混凝土柱有限元模型内部缺陷位置识别结果,如图 4(a)所示.

同理,B2,B3,B4 工况下的钢管混凝土柱有限元模型内部缺陷位置识别结果,如图 4(b)~(d)所示.

在对数值模拟和试验结果进行多次统计分析的基础上,建议当某一测点的归一化峭度值超过 0.5 且表现为大于相邻测点的相应值时,可将其判定为缺陷位置.在对实际工程结构进行缺陷探测时,检测人员可在条件允许的情况下,采用 2~3 种方法对结构的缺陷位置进行识别和相互验证,这在一定程度上能够防止结构缺陷位置的误判和漏判.

由图 4(a)可知:节点 9 的归一化峭度值超过了 0.5 的界限,且相对于两侧节点的指标值较为突出,



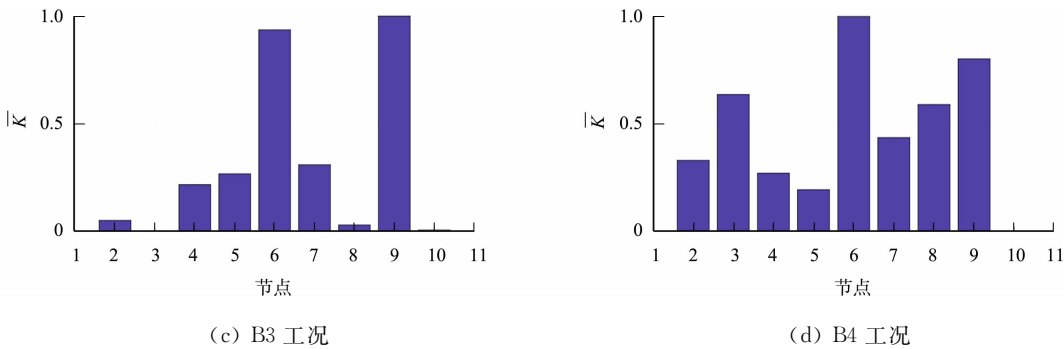


图 4 钢管混凝土柱有限元模型内部缺陷位置识别结果

Fig. 4 Identification results of internal defect location of CFSTC finite element model

可判定其为脱空位置,这与 B1 工况十分吻合.由图 4(b)可知:节点 6 处的指标值明显高于其两侧测点的相应值,这表明该处节点附近存在脱空缺陷.由图 4(c)可知:节点 6,9 处的指标值明显大于其两侧测点的相应值且大于 0.5,这也说明节点 6,9 附近发生了脱空现象.同样地,图 4(d)中节点 3,6,9 处的指标值较两侧测点的相应值也偏大,且大于阈值 0.5,亦可判定为脱空缺陷位置.

需要注意的是,上述缺陷位置识别过程均是在未知原始未损结构工况信息的情况下进行的,说明文中方法无需预知钢管混凝土结构无损状态下的基准信息,因而具有良好的应用前景.

4 动力试验验证

4.1 钢管混凝土柱试件

为验证所提损伤指标在实际工程结构中的识别效果,以 4 根现浇带脱空缺陷的钢管混凝土柱试件为研究对象,对其进行动力测试,并对提出的损伤指标进行验证.钢管混凝土柱试件及测点布置,如图 5 所示.验用钢管混凝土柱的脱空工况,如表 2 所示.试验模型为现浇钢管混凝土圆形柱,柱长为 1 200 mm,直径为 150 mm.



图 5 钢管混凝土柱试件及测点布置

Fig. 5 CFSTC test pieces and layout of measuring points

首先,将钢管混凝土柱试件沿长度方向分为 11 等分,并分别设置测点;然后,采用力锤在单元 1 和单元 2 之间施加激励;最后,通过 DH5922N 型加速度采集器采集加速度时程.由于钢管混凝土柱试件刚度较大且力锤敲击时间非常短,为充分记录到信号特征,设置采样频率为 20 kHz,采样时间为 2 s.

4.2 钢管混凝土柱试件内部脱空缺陷识别结果

将表 2 中 C1 工况下节点 6 的响应信号作为分析对象,由于其衰减较快,只选取前 0.5 s 响应数据作为目标信号.首先,对该目标信号进行倒序排列;然后,将节点信号正序排列并组成 1 个新的信号序列;最后,对其进行复 Morlet 小波连续变换,得到的小波量图,如图 6(a)所示.由图 6(a)可知:目标信号的频率主要集中在[0 Hz,500 Hz],[3 000 Hz,4 000 Hz],[4 400 Hz,4 900 Hz],[5 100 Hz,6 000 Hz],[7 100 Hz,8 500 Hz]这 5 个频率区间内,因此,判断分量信号的个数为 5,然后,采用 VMD 对其进行信号分解.

C1 工况下节点 6 响应信号的各阶模态分量的加权峭度值,如图 6(b)所示.由图 6(b)可知:第 2~5 阶分量的加权峭度值大于平均值,因此,可选择第 2,3,4,5 阶模态分量进行信号重构.

同样地,对 C1 工况下钢管混凝土柱试件其余节点的响应信号进行类似处理;然后,选取各节点信号分量中加权峭度值大于平均值的模态分量进行统计分析.经统计后可知,所有节点的分量信号中,第 2,3,4,5 阶分量占比最大,因此,选择各节点的 2,3,4,5 阶分量进行重构.在此之后,对重构后的各节点

表 2 试验用钢管混凝土柱的脱空工况

Tab. 2 Cavity conditions of tested CFSTC

工况设置	编号	脱空单元
单脱空工况	C1	单元 9
	C2	单元 6
多脱空工况	C3	单元 6 和单元 9
	C4	单元 3、单元 6 和单元 9



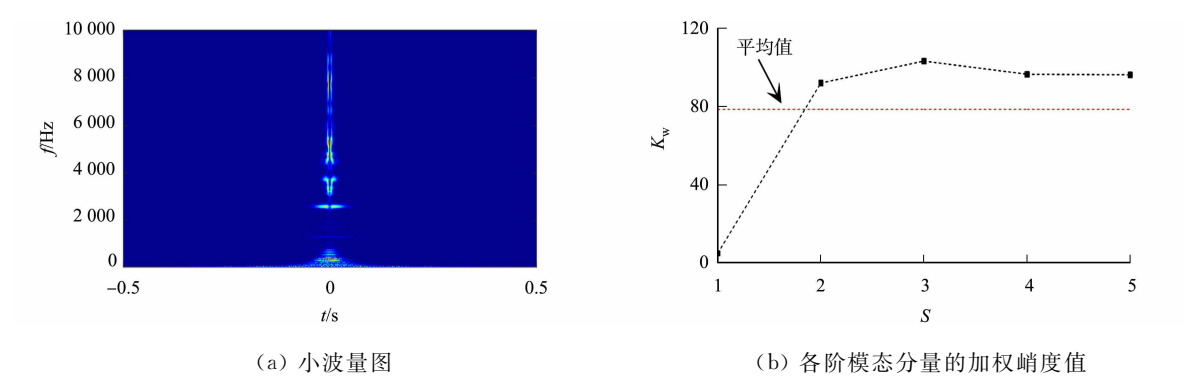


图 6 C1 工况下节点 6 响应信号的小波量图和各阶模态分量的加权峭度值

Fig. 6 Wavelet magnitude diagram and weighted kurtosis value of each order modal component of node 6 response signal under C1 condition

信号进行 TEO 值计算, 并采用 FFT 进行处理. 最后, 对经 FFT 处理的数据进行峭度求解和归一化处理, 得到钢管混凝土柱试件内部缺陷位置识别结果, 如图 7(a) 所示.

同理, C2, C3, C4 工况下的钢管混凝土柱试件内部缺陷位置识别结果, 如图 7(b)~(d) 所示.

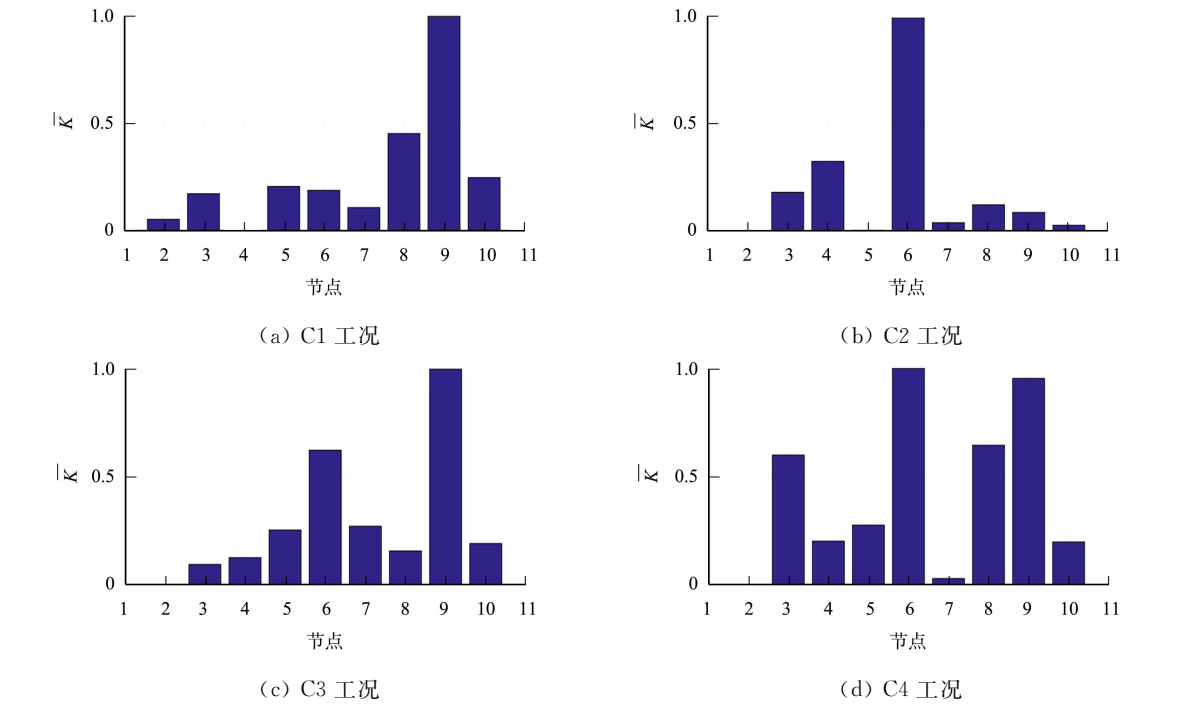


图 7 钢管混凝土柱试件内部缺陷位置识别结果

Fig. 7 Identification results of internal defect location of CFSTC test pieces

由图 7(a) 可知: 节点 9 处的归一化峭度指标值相对于其两侧节点的指标值突出且大于阈值 0.5, 可判定该节点为脱空缺陷位置, 这与 C1 工况相吻合. 由图 7(b) 可知: 节点 6 附近也存在脱空缺陷. 由图 7(c) 可知: 节点 6, 9 处的指标值不仅大于 0.5, 而且明显大于两侧节点的指标值, 可判断这些位置附近发生了脱空现象. 由图 7(d) 可知: 节点 3, 6, 9 处的指标值均超过 0.5 且比相邻两侧节点的相应值大, 因此, 可判断上述位置附近存在脱空缺陷. 由此可知, 在不依赖于未损工况基准信息的基础上, 文中方法能够有效识别钢管混凝土试件的内部脱空缺陷.

值得注意的是, 为保证缺陷识别的精准度, 在实际工程应用中需在钢管混凝土壁上合理布置测点. 理论上, 测点越靠近损伤位置时, 归一化峭度指标表现出增大的趋势. 因此, 测点与损伤位置的距离远近只会影响文中方法的精度, 但不会从根本上改变文中方法的有效性. 若要更加精确地识别钢管混凝土结构的具体缺陷位置, 可在归一化峭度值较大的区域加密布设测点. 然而, 测点越多, 检测的成本越高, 因此, 需要对经济性和精确性进行一个折中, 对于较小的试件, 以间距 0.5~1.0 m 为宜. 针对实际工程结构, 检测人员可以根据自身条件和业主方的要求进行合理的测点布设. 目前为止, 测点优化布设仍然是

一个重要且前沿的研究课题。

## 5 结束语

为准确探测钢管混凝土试件的内部脱空缺陷位置,从钢管混凝土结构的振动响应出发,提出一种基于变分模态分解与归一化峭度的钢管混凝土柱内部缺陷识别方法。通过钢管混凝土柱有限元模型算例和带脱空缺陷的钢管混凝土柱试件动力试验,对提出的内部脱空缺陷识别方法的有效性和准确性进行验证。研究结果表明:文中方法不但能够有效定位钢管混凝土柱试件和有限元模型的单点及多点脱空缺陷位置,而且不依赖于原始未损工况的基准信息。

## 参考文献:

[1] 苏俊臣. 钢管混凝土拱桥调查及其脱空问题研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.

[2] 鲁学伟,徐蓉,王桂玲. 钢管混凝土内部常见缺陷及检测方法综述[J]. 施工技术,2011,40(增刊 1):46-48.

[3] 傅斌. 超声波法在定量检测钢管混凝土拱桥脱空缺陷中的应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2008.

[4] 钱琛. 基于超声波的混凝土缺陷检测方法研究与实现[D]. 南京:南京信息工程大学,2018.

[5] 陈禾,秦迎,陈劲,等. 基于红外热成像法和超声波法的钢管混凝土无损检测技术试验研究[J]. 建筑结构,2020,50(增刊 1):890-895. DOI:10.19701/j.jzjg.2020.s1.174.

[6] 陈劲,陈晓东,赵辉,等. 基于红外热成像法和超声波法的钢管混凝土无损检测技术的试验研究与应用[J]. 建筑结构学报,2021,42(增刊 2):444-453. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2021.S2.0052.

[7] 冯琪智,高斌,杨扬. 基于热图重构区域生长算法的碳纤维增强复合材料脱粘缺陷检测[J]. 无损检测,2017,39(9):29-34. DOI:10.11973/wsje201709007.

[8] 蔡萍,许斌,周宇. 基于外贴压电材料的钢管混凝土界面缺陷检测[J]. 压电与声光,2015,37(2):337-341.

[9] 骆勇鹏,谢隆博,廖飞宇. 基于时序分析理论的钢管混凝土脱空缺陷检测方法研究[J]. 工业建筑,2019,49(10):48-53. DOI:10.13204/j.gyjz201910008.

[10] 安宁,夏禾,战家旺. 基于参数不确定列车作用下桥梁振动响应的桥梁损伤识别研究[J]. 工程力学,2012,29(10):275-281. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2011.12.0867.

[11] DAS S,SAHA P,PATRO S K. Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: A review[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring,2016,6:477-507. DOI:10.1007/s13349-016-0168-5.

[12] 陈建灿,刘晓梅. 运用 EMD 分形盒维数的电梯机械故障诊断[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2013,34(5):494-499. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2013.05.0494.

[13] WU Zhaohua,HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method[J]. Advance in Adaptive Data Analysis,2009,1(1):1-41. DOI:10.1142/S1793536909000047.

[14] YEH J R,SHIEH J S,HUANG N E. Complementary ensemble empirical mode decomposition: A novel noise enhanced data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis,2010,2(2):135-156. DOI:10.1142/S1793536910000422.

[15] CHEN Genda,WANG Zuocai. A signal decomposition theorem with Hilbert transform and its application to narrowband time series with closely spaced frequency components[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2012,28(2):258-279. DOI:10.1016/j.ymssp.2011.02.002.

[16] DRAGOMIRETSKIY K,ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2014,62(3):531-544. DOI:10.1109/TSP.2013.2288675.

[17] 李涛涛. 基于变分模态分解和支持向量机的风电机组振动故障诊断[D]. 西安:西安理工大学,2018.

[18] 田赛,姚斌,陈彬强,等. 基于 Morlet 小波和改进峭度的滚动轴承故障诊断方法[J]. 工具技术,2022,56(10):141-146. DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2022.10.029.

[19] 马增强,李亚超,刘政,等. 基于变分模态分解和 Teager 能量算子的滚动轴承故障特征提取[J]. 振动与冲击,2016,35(13):134-139. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2016.13.022.

(责任编辑:黄晓楠      英文审校:方德平)