Journal of Image and Signal Processing 图像与信号处理, 2027, 16(1), 1-12
Published Online January 2027 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/jisp
https://doi.org/10.12677/jisp.2027.161001

Hans汉斯

基于小波变换与变分模态分解的结构多尺度损伤识别方法

李小奇[1,2*]，黄　灿[1]，邓小天[1]，黄启硕[1]，曹海萍[1]，黄俊钦[1]

[1]滁州学院智能建造与水利工程学院，安徽 滁州
[2]桥梁结构数据诊断与智慧运维国际联合研究中心，安徽 滁州

收稿日期：2026年10月18日；录用日期：2026年11月9日；发布日期：2026年11月19日

摘　要

针对大型混凝土结构强震损伤识别中单一尺度对比难以反映测点损伤敏感性的问题，本文以多自由度结构模型为对象，开展时频域多尺度损伤定性识别方法研究。首先建立基于小波变换(WT)的多尺度时域分解方法和基于变分模态分解(VMD)的频域分解方法，将结构响应信号分解为不同尺度的信号分量；其次，利用排列熵(PE)对动力学突变的敏感性，构建WT-PE与VMD-PE联合辨识方法，并通过Feigenbaum与Logistic混沌模型验证了PE对非线性非平稳序列突变的敏感性；进一步引入多尺度信号能量指标，对损伤前后各尺度信号分量的波动进行定量描述。以3自由度结构模型为对象，设置3种损伤工况，对3个测点、3种工况下的响应信号进行综合分析，结果表明：三种工况下WT-PE与VMD-PE曲线均能反映损伤引起的突变，二者互补验证。所提方法能够在多测点多工况条件下实现结构损伤的定性辨识，为后续损伤定位与定量分析提供基础。需要指出的是，本文工作是基于简化模型的初步探索，相关结论仍需通过实际结构动力试验与更多损伤工况进一步验证。

关键词

混凝土坝，结构损伤识别，多尺度分析，小波变换，排列熵，变分模态分解

Damage Identification Method for Structures Based on Wavelet Transform and Variational Mode Decomposition with Multi-Scale Analysis

Xiaoqi Li[1,2*], Can Huang[1], Xiaotian Deng[1], Qishuo Huang[1], Haiping Cao[1], Junqin Huang[1]

*通讯作者。

文章引用: 李小奇, 黄灿, 邓小天, 黄启硕, 曹海萍, 黄俊钦. 基于小波变换与变分模态分解的结构多尺度损伤识别方法[J]. 图像与信号处理, 2027, 16(1): 1-12. DOI: 10.12677/jisp.2027.161001

[1]School of Intelligent Construction and Hydraulic Engineering, Chuzhou University, Chuzhou Anhui
[2]International Joint Research Center for Bridge Structural Data Diagnosis and Intelligent Operation and Maintenance, Chuzhou Anhui

Received: October 18, 2026; accepted: November 9, 2026; published: November 19, 2026

Abstract

Aiming at the problem that single-scale comparison can hardly reflect the damage sensitivity of measuring points in strong-earthquake damage identification of large concrete structures, this paper takes a multi-degree-of-freedom (MDOF) structural model as the object and carries out research on the qualitative damage identification method based on time-frequency multi-scale analysis. Firstly, the multi-scale time-domain decomposition method based on wavelet transform (WT) and the frequency-domain decomposition method based on variational mode decomposition (VMD) are established to decompose the structural response signal into signal components of different scales. Secondly, taking advantage of the sensitivity of permutation entropy (PE) to dynamic transitions, the combined WT-PE and VMD-PE identification methods are constructed, and the sensitivity of PE to transitions of nonlinear non-stationary sequences is verified by Feigenbaum and Logistic chaotic models. Furthermore, a multi-scale signal energy index is introduced to quantitatively describe the fluctuation of each scale component before and after damage. A 3-degree-of-freedom structural model is employed, and three damage conditions are designed; the response signals of the three measuring points under the three conditions are comprehensively analyzed. Results show that under all three conditions both the WT-PE and VMD-PE curves can reflect the transitions caused by damage, and the two methods complement and verify each other. The proposed method can achieve qualitative identification of structural damage under multi-measuring-point and multi-condition scenarios, providing a basis for subsequent damage localization and quantitative analysis. It should be noted that this work is a preliminary exploration based on simplified models, and the conclusions still need further verification through dynamic tests of actual structures and more damage scenarios.

Keywords

Concrete Dam, Structural Damage Identification, Multi-Scale Analysis, Wavelet Transform, Permutation Entropy, Variational Mode Decomposition

Copyright © 2027 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

对于大型混凝土结构而言，强震下的损伤识别主要通过动力测试或环境激励得到的响应信号来识别结构的损伤状态，这是一个系统辨识的过程，可以划分为模态参数(频率、阻尼比、振型)的辨识和物理参数(刚度或弹性模量)的辨识[1] [2]。由于大型结构难以进行动力试验，输入难以测量，因此需要利用多自由度模型来进行模拟测试，通过测试数据建立各类参数的动力指纹或损伤指标，然后利用实测值与损伤指标的对比来判断损伤的程度和位置。

目前，针对大型结构损伤识别的研究主要集中在单一尺度的对比[3]-[5]。本文以时域、频域的多尺度

分析为基础，借助多自由度模型，建立基于小波变换(WT)、变分模态分解(VMD)的时频域多尺度分析与排列熵(PE)相结合的损伤识别方法，解决单一尺度下损伤突变难以准确识别的问题。

2. 单自由度模型多尺度分解方法

2.1. 基于小波变换(WT)的多尺度分解

当结构产生损伤时，其刚度、阻尼和质量会发生变化。对于混凝土坝而言，发生的损伤大都是裂缝或者材料刚度的变化，质量和阻尼基本不变，因此刚度的变化成为判断损伤的一个重要指标。目前，观察刚度变化最有效的方式是小波多尺度分解方法，通过不同尺度的投影来观察信号的突变[6]。然而，伴随着信号掺杂的噪声和分解尺度的不同，并不能准确识别哪些是真实的突变，也无法定量分析突变的能量大小，因此本文提出利用排列熵(PE)法对此进行优化。由于小波多尺度分析主要集中在测点响应信息的处理，因此以单自由度模型来进行研究。

小波变换(WT)的多尺度分解主要思想是将响应信号利用 WT 方法在不同尺度上分解，分别得到粗尺度和细尺度的概貌信号和细节信号。假设如图 1 所示的单自由度结构动力方程为：

$$m\ddot{x}(t)+c\dot{x}(t)+kx(t)=f(t) \tag{1}$$

式中，m、c、k 分别为质点的质量、阻尼和刚度参数，$f(t)$ 为外部激励。

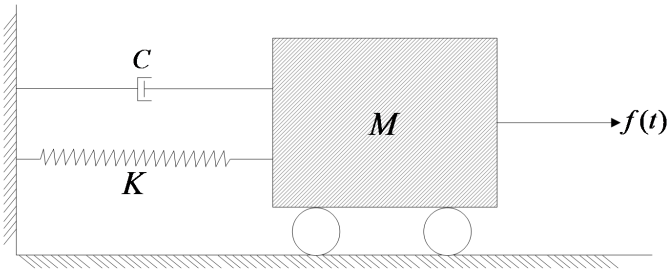


Figure 1. Dynamic model of single-degree-of-freedom structure
图 1. 单自由度结构动力模型

式(1)两侧除以 m，可以得到：

$$\ddot{x}(t)+\frac{c}{m}\dot{x}(t)+\frac{k}{m}x(t)=\frac{1}{m}f(t) \tag{2}$$

利用正交小波函数对式(2)两端进行小波变换，可以得到：

$$WT_G(a,b)=WT_F(a,b) \tag{3}$$

根据 WT 法在不同尺度的分解原理，可以将式(3)分解为 1 阶粗、细尺度的结合：

$$\left(d_{\ddot{x}}^1+c_{\ddot{x}}^1\right)+\frac{c}{m}\left(d_{\dot{x}}^1+c_{\dot{x}}^1\right)+\frac{k}{m}\left(d_x^1+c_x^1\right)=\frac{1}{m}\left(d_f^1+c_f^1\right) \tag{4}$$

式中，$d_{\ddot{x}}^1$、$d_{\dot{x}}^1$、d_x^1、d_f^1 分别表示 $\ddot{x}(t)$、$\dot{x}(t)$、$x(t)$、$f(t)$ 在第 1 尺度小波细节空间 W_1 上的投影；$c_{\ddot{x}}^1$、$c_{\dot{x}}^1$、c_x^1、c_f^1 分别表示 $\ddot{x}(t)$、$\dot{x}(t)$、$x(t)$、$f(t)$ 在第 1 尺度小波概貌空间 V_1 上的投影。

相应的，继续进行各空间上的投影分解，直到第 J 尺度，同时利用 WT 方法在不同尺度上的正交性，可以得到各尺度的等价关系：

$$\begin{cases} d_{\ddot{x}}^{1}+\dfrac{c}{m}d_{\dot{x}}^{1}+\dfrac{k}{m}d_{x}^{1}=\dfrac{1}{m}d_{f}^{1} \\ d_{\ddot{x}}^{2}+\dfrac{c}{m}d_{\dot{x}}^{2}+\dfrac{k}{m}d_{x}^{2}=\dfrac{1}{m}d_{f}^{2} \\ \vdots \\ d_{\ddot{x}}^{J}+\dfrac{c}{m}d_{\dot{x}}^{J}+\dfrac{k}{m}d_{x}^{J}=\dfrac{1}{m}d_{f}^{J} \\ c_{\ddot{x}}^{J}+\dfrac{c}{m}c_{\dot{x}}^{J}+\dfrac{k}{m}c_{x}^{J}=\dfrac{1}{m}c_{f}^{J} \end{cases} \tag{5}$$

假如在激励过程中的某一时刻，结构刚度发生了变化，可以通过观察式(5)中某一尺度上的变化来判断刚度变化的大小，不同的尺度代表不同的分辨率，通过对相应尺度分量的观察可以感知损伤的程度和位置，这便是基于 WT 的多尺度损伤识别的原理。由于能量守恒的缘故，当刚度发生变化时，第 J 尺度上分量越大，其变化也越大。

2.2. 基于变分模态分解(VMD)的多尺度分解

VMD 分解方法是按照频率的高低将信号进行分解，得到近似独立固有频率的各阶信号分量[7]。由于强震激励下的坝体响应信号是非线性非稳态的，小波多尺度分解在某些情况下无法辨别幅值的突变是结构损伤导致的还是非线性波动导致的，如图 2 所示，因此无法准确判别结构是否发生了损伤。

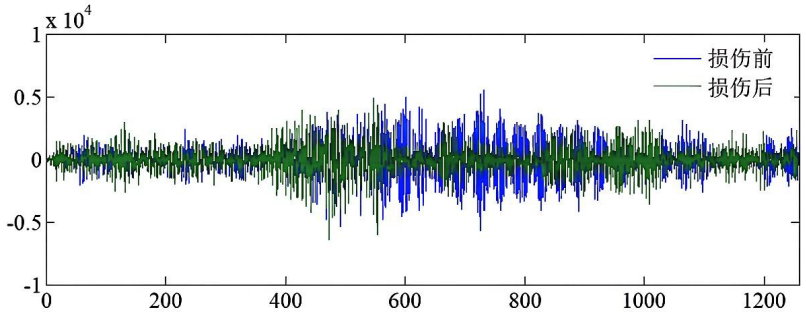


Figure 2. WT decomposition changes before and after damage at a certain scale
图 2. WT 分解某尺度损伤前后变化

既然从信号的时域尺度上不易辨别损伤，那就从频域着手，利用模态分解方法对不同阶的频率变化进行研究，通过观察固有频率在频谱上的波动来判断结构是否发生了损伤[8]。VMD 分解得到的对象一致，均是近似固有频率的独立频率分量，但前提是不存在模态混叠，因此本文选择近似维纳滤波的 VMD 方法进行分析，它具有更好的噪声鲁棒性。

3. 排列熵敏感性分析与多尺度联合辨识

3.1. 排列熵对动力学突变的敏感性

排列熵(PE)方法作为一种新的序列检测手段，适合处理非线性非平稳数据，可以衡量出相邻数据间的差异，非常适合于强震破坏等动力学突变的检测[9]。为了进一步证明 PE 方法对信号检测的敏感性，利用经典的 Feigenbaum 混沌时间模型对非线性动力系统的映射进行分析，假定 Feigenbaum 映射为：

$$x_{n+1}=\mu\sin\left(\pi x_{n}\right) \tag{6}$$

式中，x_n 为 Feigenbaum 映射值，$n=1,2,\cdots$；μ 为控制变量。

图 3 显示了 Feigenbaum 映射的分岔位置，图 4 为以样本点为横轴的映射幅值及相应的 PE 计算结果。从图中可以发现，PE 值所在的突变位置与 Feigenbaum 映射的分岔位置完全相符，意味着时间序列的演化过程中，混沌区域的周期性分岔窗口在排列熵的时序演化中有明显的反应，因此，可以利用排列熵来观察不同尺度时域信号的微小波动，进而检测出它的动力学突变。

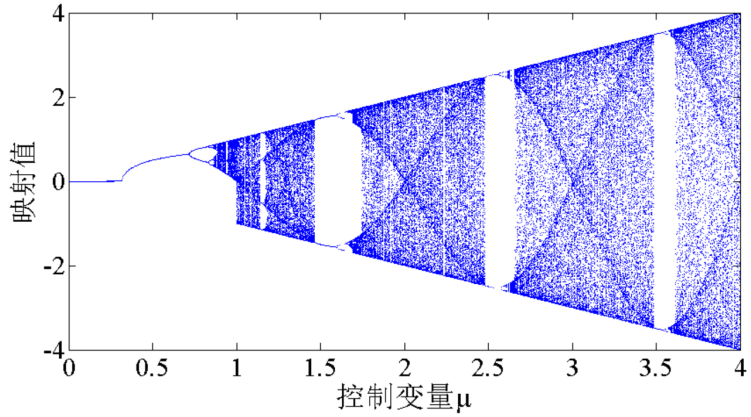


Figure 3. Bifurcation evolution of Feigenbaum map
图 3. Feigenbaum 映射分岔演化

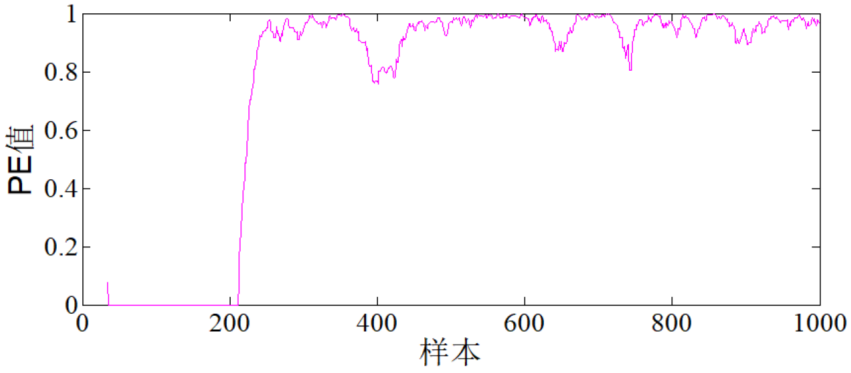


Figure 4. Permutation entropy of Feigenbaum map
图 4. Feigenbaum 映射排列熵

为了进一步验证 PE 方法对平稳与非平稳序列突变的敏感性，建立 Logistic 映射：

$$x_{n+1} = \mu\left(1 - x_n\right) \tag{7}$$

式中，x_n 为 Logistic 映射值，$x_n \in [0,1]$，$n = 1,2,\cdots$；μ 为控制变量。

Logistic 混沌分岔模型的分岔比较靠后，可以检验平稳段和分岔处 PE 值的演化效果。从计算结果可以发现，时序平稳部分 PE 值没有任何波动，当在分岔附近发生突变时，PE 值同样产生了突变性跳跃，这进一步证明了 PE 值对非平稳非线性序列突变的敏感性，适合对不同尺度振动响应序列进行分析。

值得指出的是，排列熵在结构损伤识别领域已有直接应用。张建伟等[10]将排列熵应用于水工结构损伤诊断，通过不同工况下信号熵值的变化规律识别结构损伤状态；邹龙庆等[11]将内禀时间尺度分解(ITD)与排列熵相结合，提取石油井架损伤位置的特征向量；张翌娜等[12]基于 PE-HMM 模型对渡槽结构的运行状态进行了量化评价。上述研究表明，排列熵对结构损伤引起的响应变化具有直接的敏感性，可作为

多尺度分量突变检测的有效指标。

3.2. WT-PE/VMD-PE 联合辨识

小波多尺度分解虽然可以在不同尺度上观察信号的突变和异常，但只适合于简谐振动或者较为平稳的白噪声激励，当遇到加速度响应振幅较大的情况，容易导致误判，因此需要利用灵敏度更高的 PE 方法对不同尺度的细节信号进行观察。小波多尺度分解与 PE 计算流程如图 5 所示。在 Matlab 计算中，可以用“wavedec”函数来进行多尺度分解，得到各层的细节信号，进而计算其 PE 值，通过观察损伤前后 PE 值的突变来辨识损伤，这种方法适用于振动较弱的加速度响应信号的分析。VMD-PE 方法与此类似，先利用 VMD 将信号分解为不同频率尺度的分量，再计算各分量的 PE 值进行联合辨识：

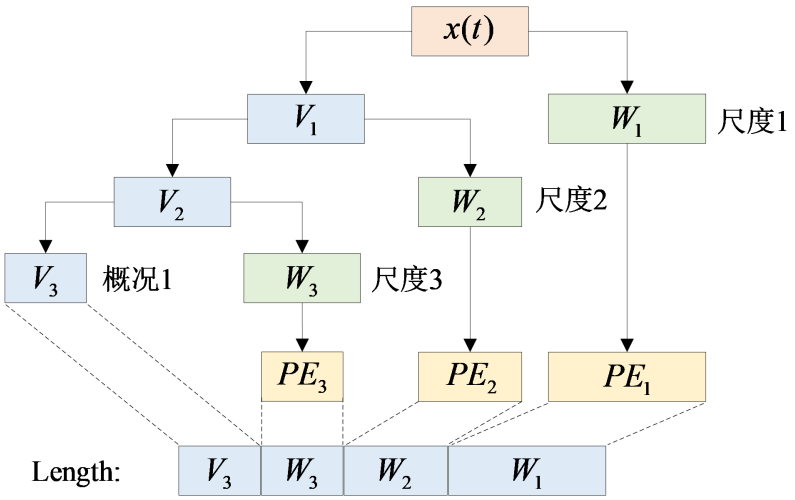


Figure 5. Calculation process of WT-PE
图 5. WT-PE 计算流程

4. 基于信号多尺度能量的损伤辨识

当我们通过 WT 多尺度变换和 VMD 多尺度分解得到信号的精细分量后，如果损伤较小，不同尺度信号的响应序列的变化不易察觉，因此需要利用一个指标来衡量。PE 值通过信号突变的敏感性来识别损伤发生的位置，如果振动信号的非线性导致响应信号本身的突变较多，容易导致判断的混淆，因此可以考虑利用能量或者能量曲率方法进行判别[13]。

借助小波分解的能量检测原理，Sun 等提出了 WT 多尺度分量的能量计算方法，并证明了它比小波系数具有更好的鲁棒性[14]。因此本文利用能量法来对不同尺度的信号分量的突变和波动进行更精细的分析。小波信号多尺度分量的能量可以定义为：

$$E_f = \int_0^{\infty} f_i(t)^2 \,\mathrm{d}t \tag{8}$$

式(8)的基本思想是：结构发生损伤时，特定尺度的信号分量一定会发生波动，于是其能量也会相应发生改变。

5. 案例验证

5.1. 计算模型与工况

以图 6 所示的 3 自由度模型为例，刚度为 $k_1 = k_3 = 7000\ \mathrm{N/m}$，$k_2 = 8000\ \mathrm{N/m}$；质量为 $m_1 = m_2 = 1.0\ \mathrm{kg}$，

$m_3=0.9$ kg 阻尼为 $c_1=c_3=0.6\ \mathrm{N\cdot s^2/m}$，$c_2=0.55\ \mathrm{N\cdot s^2/m}$，输入激励采用某坝 SE1 测点振动加速度，取前 100 秒数据，采样率 $fs=100$，由于输入激励含噪，所以不必额外加噪。假定损伤为局部损伤，各测点的损伤发生于信号 70 s~80 s 处，刚度折减设置为渐进折减，折减区间为$[70\,\mathrm{s},80\,\mathrm{s}]$，通过对比损伤前后的信号差异来验证方法的有效性。为了研究不同测点输出加速度响应数据对损伤的敏感性，取三种损伤工况进行分析：G1 工况，测点 1 刚度损失 10%；G2 工况：测点 2 刚度损失 10%；G3 工况：测点 3 刚度损失 10%。各工况刚度变化趋势如图 7 所示。

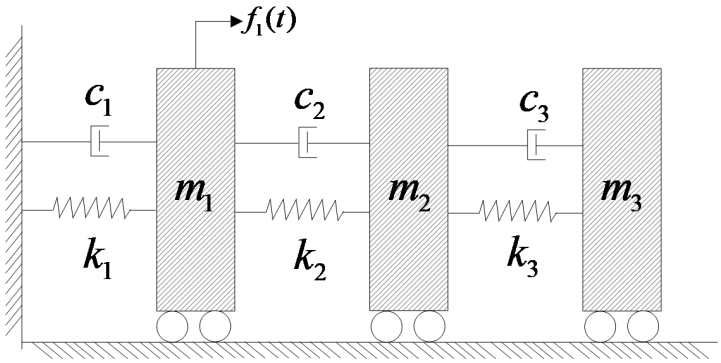


Figure 6. Dynamic model of multi-degree-of-freedom structure
图 6. 多自由度结构动力模型

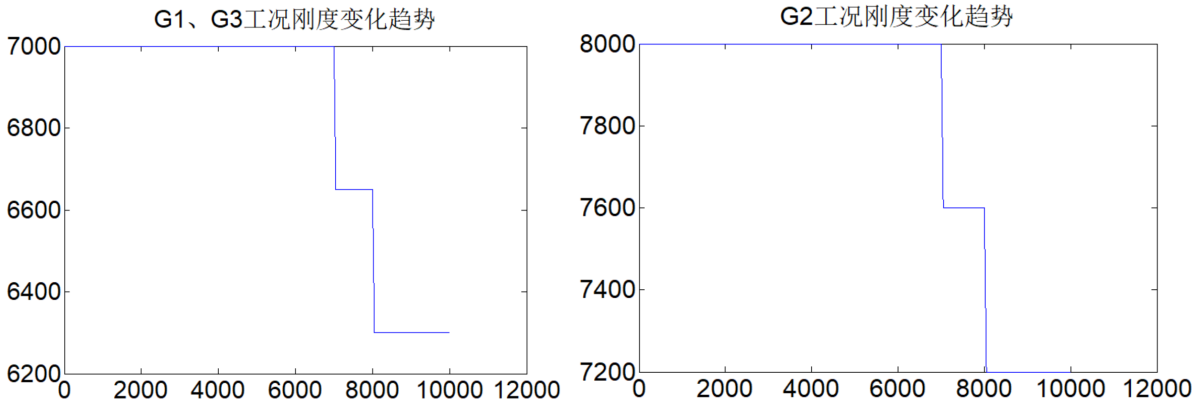


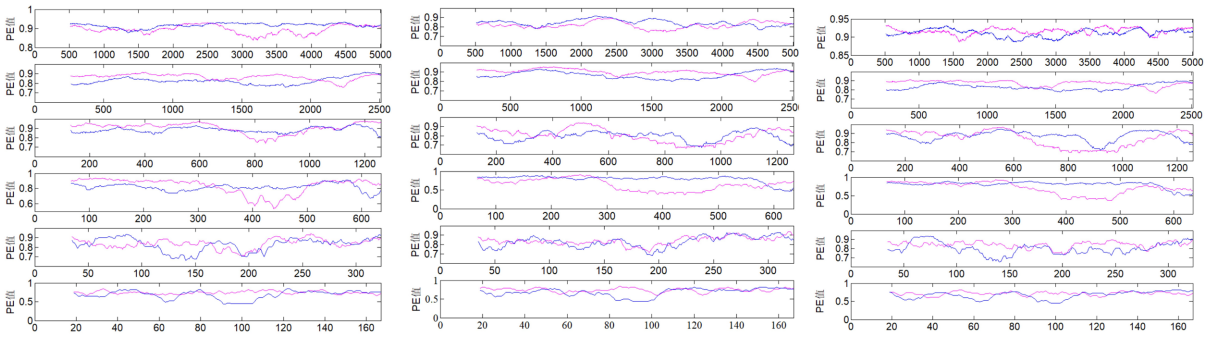
Figure 7. Variation trend of stiffness k in various working conditions
图 7. 各工况刚度 k 变化趋势

5.2. 基于 WT 与 VMD 多尺度分解的损伤定性分析

考虑到信号长度以及信号的复杂性，WT 采用 6 层多尺度分解，选择具有较高消失矩的 Db6 小波作为基函数，VMD 按频率高低将信号分解为近似固有频率的各阶分量，二者分别从时域和频域两个尺度视角对 G1-G3 工况各测点的响应信号进行分析。

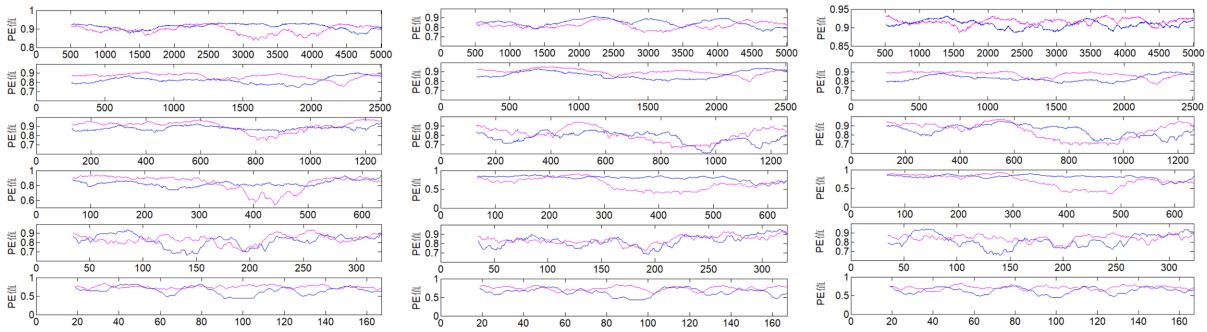
从图 8~10 所示的 WT-PE 曲线来看，单纯从损伤前后的信号时程分析，无法得到是否发生损伤的确定依据；对信号进行多尺度分解并计算各尺度 PE 值后可以发现，在损伤发生时及发生后的时间段，第 3~第 4 尺度的 PE 曲线出现显著震荡，且 G1、G2、G3 三种工况下，测点 2、测点 3 的震荡幅度均较测点 1 更为剧烈，这与实际震害规律相符。VMD 分解得到的都是不同阶的频率分量，且 VMD 可避免模态重叠对损伤突变识别的干扰，因此进一步采用 VMD-PE 进行频域多尺度辨识。同样以图 6 所示的多自由度模

型和 G1~G3 工况进行分析，G1~G3 工况各测点的 VMD-PE 曲线如图 11~13 所示。从图中可以发现，损伤后各尺度的 PE 值在不同时段均出现突变与震荡，说明损伤引起了各频率分量响应特征的变化；其中 G1 工况下测点 1 的变化主要集中于基频附近的低阶分量，测点 2、测点 3 的变化则集中在中高频分量，G2 与 G3 工况亦呈现相同规律，且损伤后各阶分量的中心频率相应下降。若将其类比为坝段，坝基部位的损伤主要引起基频或低频分量的变化，坝顶部位的损伤则引起主频及更高阶固有频率分量的变化，这与地震破坏的一般规律相符，说明依靠多尺度 PE 曲线的突变特征来定性判别坝体是否发生损伤是可行的。



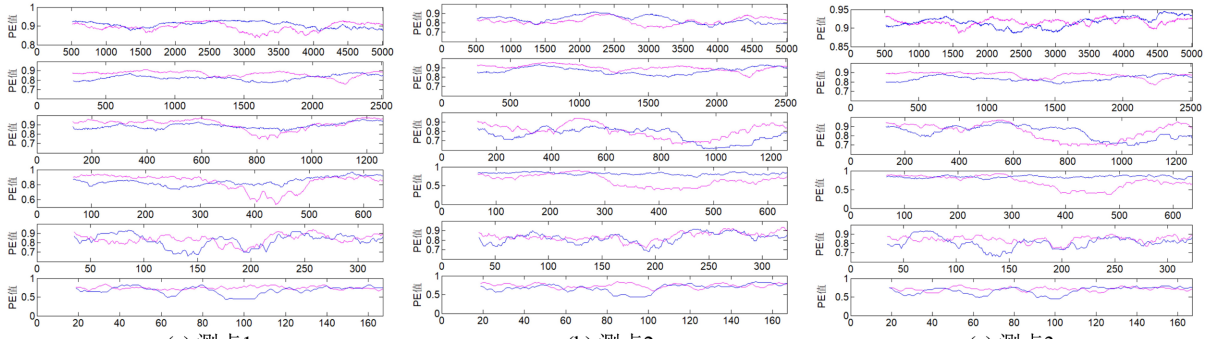
(a) 测点1　(b) 测点2　(c) 测点3

Figure 8. Comparison of WT-PE values at each measurement point under G1 operating condition before and after damage
图 8. G1 工况各测点损伤前后的 WT-PE 值对比



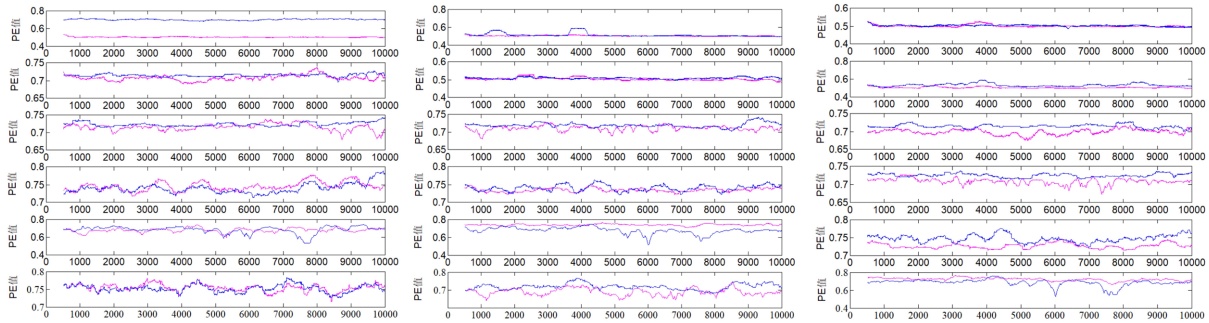
(a) 测点1　(b) 测点2　(c) 测点3

Figure 9. Comparison of WT-PE values at each measurement point under G2 operating condition before and after damage
图 9. G2 工况各测点损伤前后的 WT-PE 值对比



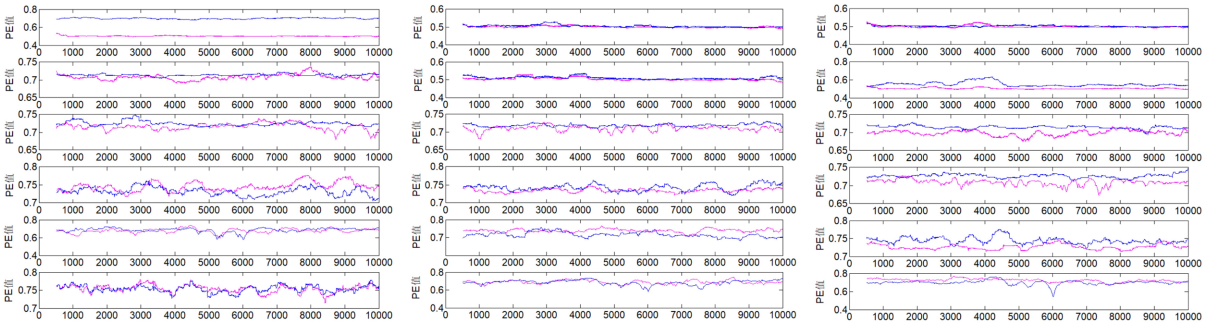
(a) 测点1　(b) 测点2　(c) 测点3

Figure 10. Comparison of WT-PE values at each measurement point under G3 operating condition before and after damage
图 10. G3 工况各测点损伤前后的 WT-PE 值对比



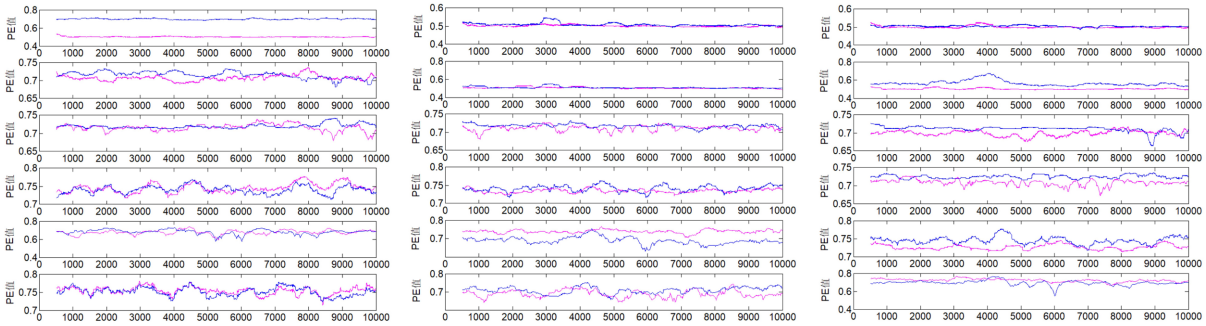
(a) 测点1 (b) 测点2 (c) 测点3

Figure 11. Comparison of VMD-PE values at each measurement point under G1 operating condition before and after damage
图 11. G1 工况各测点损伤前后的 VMD-PE 值对比



(a) 测点1 (b) 测点2 (c) 测点3

Figure 12. Comparison of VMD-PE values at each measurement point under G2 operating condition before and after damage
图 12. G2 工况各测点损伤前后的 VMD-PE 值对比



(a) 测点1 (b) 测点2 (c) 测点3

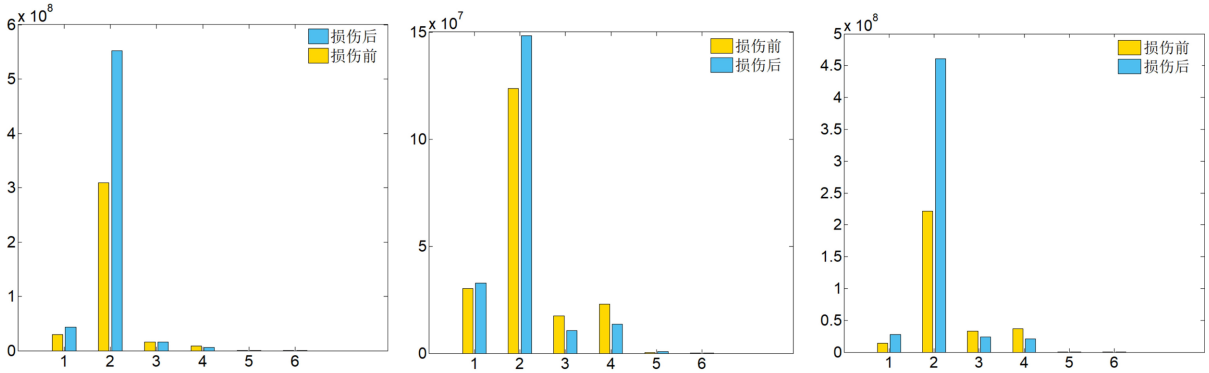
Figure 13. Comparison of VMD-PE values at each measurement point under G3 operating condition before and after damage
图 13. G3 工况各测点损伤前后的 VMD-PE 值对比

5.3. 基于 WT-PE 及 VMD-PE 的多尺度联合损伤辨识

为了对 WT 与 VMD 分解后各尺度信号的能量进行观察，从而判别是否发生了突变或损伤，绘制损伤前后能量变化的柱状图，如图 14~19 所示。PE 值与能量值的分析原理一致，均是对波动和突变进行敏感性分析，区别在于能量指标在尺度层面给出了定量描述，相当于在更精细的层次上对突变进行度量。

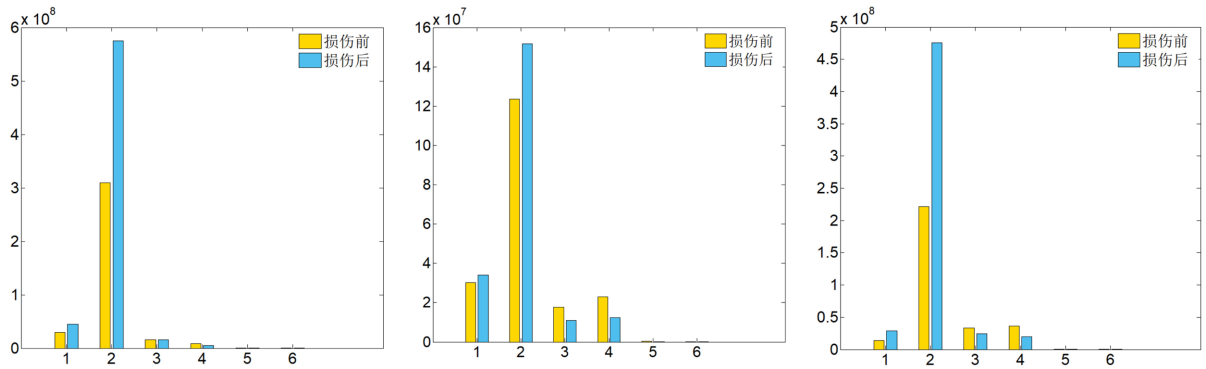
从图 14~16 中 WT 的多尺度能量分布可以发现，整体来看，在损伤波动最大的尺度上，损伤信号的能量明显高于未损伤状态，说明此时曲线发生了震荡或突变，可能产生了损伤或频率上的变化，但仅凭

WT 能量尚难以确定是高频还是低频分量发生了突变。进一步观察图 17~19 中 VMD 的多尺度信号能量分布可以发现，G1、G2、G3 三种工况下，测点 1~测点 3 的能量突变基本维持在 VMD 第 3~5 阶分量，说明固有频率的变化发生在第 3~5 分量的频率尺度内；其中测点 2、测点 3 的能量增幅较测点 1 更为明显，与前述 PE 曲线的突变规律一致，进一步印证了测点 2、测点 3 对损伤的敏感性更高，也说明依靠多尺度能量指标对坝体损伤进行定性判别是可行的。



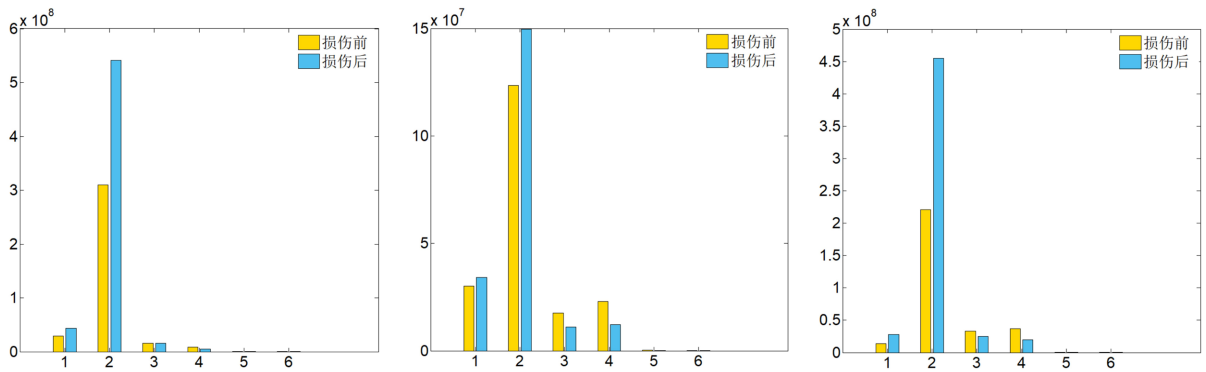
(a) 测点1　(b) 测点2　(c) 测点3

Figure 14. Comparison of WT multi-scale energy values before and after damage at measuring points in G1
图 14. G1 工况各测点损伤前后的 WT 多尺度能量值对比



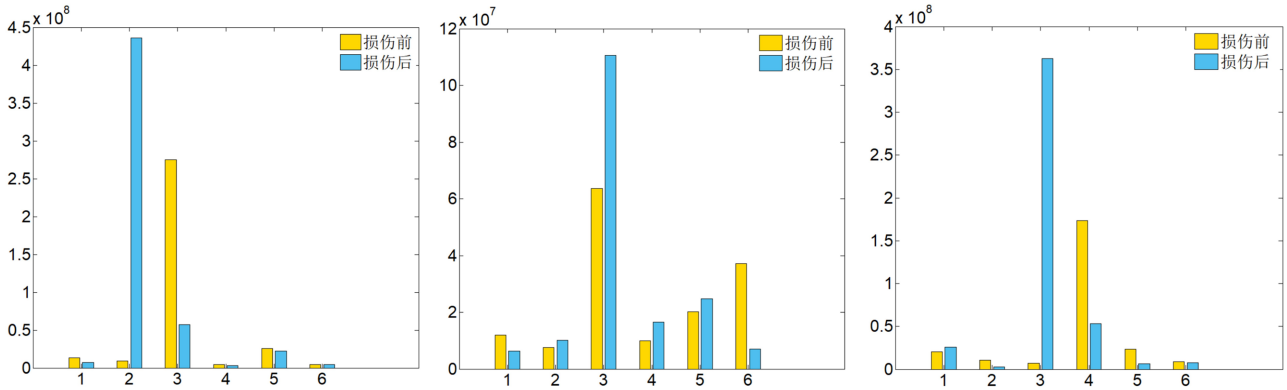
(a) 测点1　(b) 测点2　(c) 测点3

Figure 15. Comparison of WT multi-scale energy values before and after damage at measuring points in G2
图 15. G2 工况各测点损伤前后的 WT 多尺度能量值对比



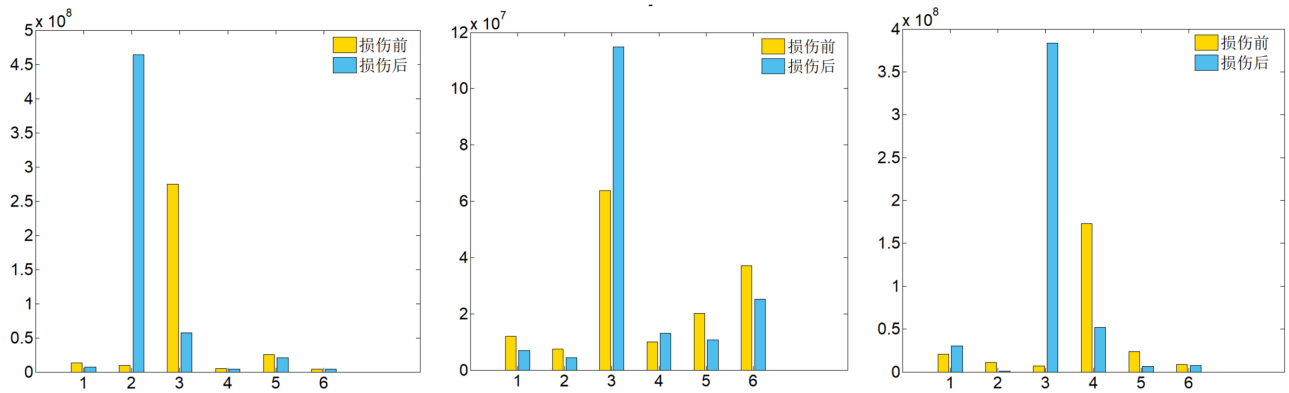
(a) 测点1　(b) 测点2　(c) 测点3

Figure 16. Comparison of WT multi-scale energy values before and after damage at measuring points in G3
图 16. G3 工况各测点损伤前后的 WT 多尺度能量值对比



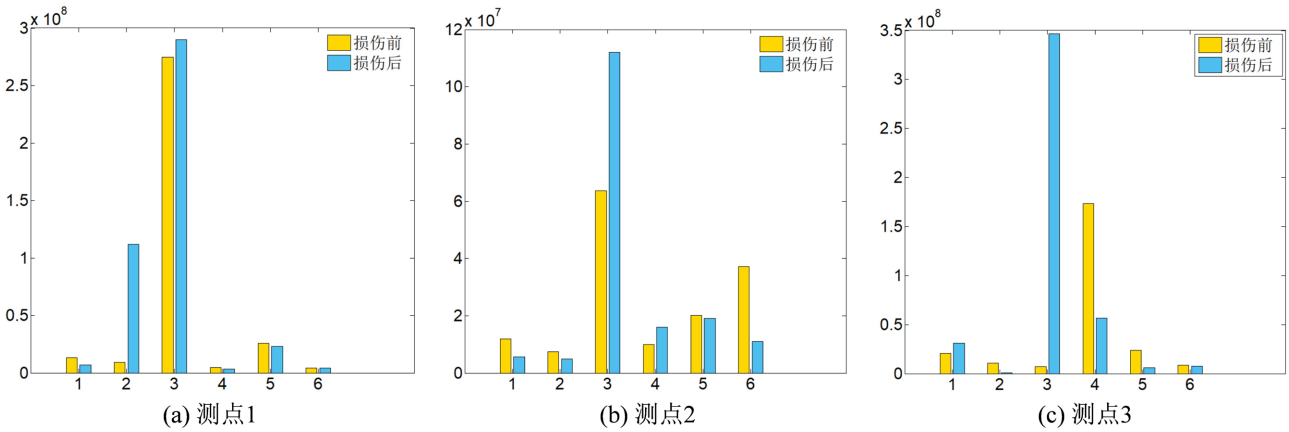
(a) 测点1 (b) 测点2 (c) 测点3

Figure 17. Comparison of VMD multi-scale energy values before and after damage at measuring points in G1
图 17. G1 工况各测点损伤前后的 VMD 多尺度能量值对比



(a) 测点1 (b) 测点2 (c) 测点3

Figure 18. Comparison of VMD multi-scale energy values before and after damage at measuring points in G2
图 18. G2 工况各测点损伤前后的 VMD 多尺度能量值对比



(a) 测点1 (b) 测点2 (c) 测点3

Figure 19. Comparison of VMD multi-scale energy values before and after damage at measuring points in G3
图 19. G3 工况各测点损伤前后的 VMD 多尺度能量值对比

6. 结论

本文针对多自由度模型下的结构损伤定性辨识问题，提出了基于 WT 多尺度时序分解与 VMD 多尺

度频域分解相结合的损伤识别方法，分析了排列熵对动力学突变的敏感性并将其与WT、VMD方法结合，最后利用多尺度信号能量对不同尺度分量的突变进行描述，实现了结构损伤的定性辨识。通过Feigenbaum与Logistic混沌模型的验证表明，PE值突变位置与映射分岔位置完全相符，排列熵能够灵敏地检测非线性非平稳序列的动力学突变；在3自由度模型G1~G3三种损伤工况(测点1~测点3分别发生10%刚度损失)的综合分析中，WT-PE曲线在第3~第4尺度的后半时程均出现显著震荡，且测点2、测点3的震荡幅度大于测点1，与坝顶响应强于坝基的实际规律相符，VMD-PE曲线同样反映出损伤后各尺度分量的突变与降频特征，其中测点1的降频发生在基频附近，测点2、测点3则发生在中高频段，VMD各阶能量的增幅主要集中在第3~5阶，说明固有频率的变化发生在第3~5分量的频率尺度内。上述结果表明，WT与VMD分别从时域和频域两个尺度反映了损伤引起的信号突变，二者相互补充、联合验证，结合多尺度能量指标能够实现多测点多工况下结构损伤的定性辨识。需要指出的是，本文工作基于简化模型开展，属于初步探索性研究，后续将结合模型试验与实际结构动力测试，进一步验证所提方法在工程应用中的适用性与鲁棒性。

基金项目

论文依托于滁州学院2023年度安徽省高校自然科学研究项目(2023AH051615)，滁州学院2023年度校级科研启动基金资助项目(2023qd54)，滁州学院2025年度大学生创新创业训练计划项目(S202510377095)。

参考文献

[1] 王焱楠, 尚旭强, 黄天立. 改进VMD及其在时变结构地震响应瞬时频率识别中的应用[J]. 振动工程学报, 2024, 37(3): 402-413.

[2] 姚小俊, 吕玉春. 基于变分模态逐步抽取的结构弱模态识别[J]. 工程力学, 2024, 41(3): 106-113.

[3] 张健飞, 衡琰. 基于VMD-PE-CNN的混凝土坝变形预测模型[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(11): 100-109.

[4] 罗亦泳, 姚宜斌, 黄城, 等. 基于改进VMD的变形特征提取与分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2020, 45(4): 8.

[5] Zhou, X., Li, Q., Cui, R. and Zhu, X. (2025) Deep Neural Network Based Time-Frequency Decomposition for Structural Seismic Responses Training with Synthetic Samples. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **40**, 54-74. https://doi.org/10.1111/mice.13242

[6] Panahi Boroujeni, M., Zareei, S.A., Birzhandi, M.S. and Zafarani, M.M. (2024) Development of Seismic Fragility Functions for Reinforced Concrete Buildings Using Damage-Sensitive Features Based on Wavelet Theory. *Structural Control and Health Monitoring*, **2024**, Article ID: 8754191. https://doi.org/10.1155/2024/8754191

[7] Dragomiretskiy, K. and Zosso, D. (2014) Variational Mode Decomposition. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **62**, 531-544. https://doi.org/10.1109/tsp.2013.2288675

[8] 赵维刚, 石壮, 杨勇, 等. 基于优化变分模态分解的混凝土浅层空洞病害识别[J]. 振动与冲击, 2024, 43(14): 91-102.

[9] Bandt, C. and Pompe, B. (2002) Permutation Entropy: A Natural Complexity Measure for Time Series. *Physical Review Letters*, **88**, Article 174102. https://doi.org/10.1103/physrevlett.88.174102

[10] 张建伟, 侯鸽, 赵瑜, 等. 排列熵算法在水工结构损伤诊断中的应用[J]. 振动·测试与诊断, 2018, 38(2): 234-239.

[11] 邹龙庆, 陈桂娟, 贾春雨, 等. 基于ITD与排列熵的石油井架损伤识别方法[J]. 石油机械, 2014, 42(10): 26-29.

[12] 张翌娜, 李紫瑜, 张建伟, 等. 基于PE-HMM的渡槽结构运行状态评价[J]. 水电能源科学, 2024, 42(10): 140-143.

[13] 张国培. 基于多尺度信号分量的复合结构损伤识别方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.

[14] Sun, Z. and Chang, C.C. (2002) Structural Damage Assessment Based on Wavelet Packet Transform. *Journal of Structural Engineering*, **128**, 1354-1361. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2002)128:10(1354)