

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023120823121984

文章编号:1674-599X(2023)06-0012-12

引用格式:马亚飞,汤洋,李祚,等.基于混沌粒子群随机子空间的桥梁多点损伤识别[J].交通科学与工程,2023,39(6):12-23.

Citation: MA Yafei, TANG Yang, LI Zuo, et al. Multi-point damage identification of bridge based on chaotic particle swarm random subspace[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(6): 12-23.

# 基于混沌粒子群随机子空间的桥梁多点损伤识别

马亚飞,汤洋,李祚,王磊

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘 要:**受复杂荷载与不利环境影响,桥梁结构服役性能日趋退化。结构模态参数是结构整体力学性态的特征指标,通过敏感模态参数可对结构服役状态进行判识。针对传统模态识别存在虚假模态,易遗漏真实模态,且计算效率较低的不足,采用混沌局部搜索对粒子群算法进行改进,优化加速度信号加窗截断位置和大小,结合协方差随机子空间法对各子信号进行模态识别;构建基于比例柔度矩阵和均布荷载曲率的损伤识别模型,通过挠度曲率相对变化判断结构损伤位置和程度;并通过开展斜拉桥缩尺模型损伤识别试验,对本方法的有效性进行验证。研究结果表明:混沌粒子群随机子空间方法具有较好的模态识别精度,可实现斜拉桥拉索、主梁等典型损伤准确定量和定位识别;结构跨中位置发生损伤对结构性能影响更大,实际工程中应提高跨中区域主梁和拉索的承载力储备以提升结构安全性。

**关键词:**桥梁工程;损伤识别;模态参数;随机子空间;混沌粒子群寻优算法

中图分类号:U446.1

文献标志码:A

## Multi-point damage identification of bridge based on chaotic particle swarm stochastic subspace

MA Yafei, TANG Yang, LI Zuo, WANG Lei

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** Due to the influence of complex loads and adverse environments, the service performance of bridge structures is gradually deteriorating. Structural modal parameters are the characteristic indexes of the overall mechanical behavior of the structure, and the structural service state can be identified by sensitive modal parameters. This paper mainly focused on the problem of false modes, easy omission of real modes, and low computational efficiency in traditional modal recognition. The chaotic local search was used to improve the particle swarm algorithm, and the position and size of the window truncation of the acceleration signal were optimized. The modal identification of each sub-signal was carried out by combining covariance-driven stochastic subspace identification. A damage identification model based on proportional flexibility matrix and uniform load curvature was established, and the location and degree of structural damage were determined by the relative change of deflection curvature. Finally, the effectiveness of the proposed method was verified by conducting damage identification tests on the scaled models of cable-stayed bridges. The results

收稿日期:2023-12-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600900);长沙理工大学研究生实践创新与创业能力提升计划项目(CLSJXC23031)

通信作者:马亚飞(1984—),男,长沙理工大学教授,博士生导师。E-mail: yafei.ma@csust.edu.cn

show that the proposed chaotic particle swarm stochastic subspace method had a better accuracy of modal identification, and could realize accurate quantitative and location identification of typical damages such as cables and girders of cable-stayed bridges. The damage at the mid-span position of the structure had a greater impact on structural behavior. In practical engineering, the bearing capacity reserve of the main beam and cable in the mid-span area should be increased to enhance structural safety.

**Key words:** bridge engineering; damage identification; modal parameter; stochastic subspace; chaotic particle swarm optimization

在不利环境与反复荷载共同作用下,斜拉桥主梁开裂、拉索损伤等典型病害日益突出<sup>[1]</sup>。为保障斜拉桥安全服役,避免结构垮塌事故发生,往往采用少量传感数据对桥梁力学响应进行监测。基于智能算法挖掘桥梁服役期传感数据时序特征,获取敏感参数时变规律,进而实现结构损伤状态量化识别,这对保障桥梁安全运维具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。

模态参数识别是结构健康监测的重要环节之一,参数识别精度直接影响结构的状态评估<sup>[4-5]</sup>。随机子空间方法(stochastic subspace identification, SSI)作为目前使用广泛的模态参数识别算法之一<sup>[6-7]</sup>,主要分为协方差驱动随机子空间方法(COV-SSI)<sup>[8-9]</sup>和数据驱动随机子空间方法(DATA-SSI)<sup>[10]</sup>两种,其均能有效识别环境激励下结构的固有频率、阻尼比及模态振型<sup>[11]</sup>。REYNDERS<sup>[12]</sup>将COV-SSI用于损伤预应力混凝土桥梁振动数据识别,通过隐式算法提高了Jacobian行列式模态识别的效率。HOOFAR等<sup>[13]</sup>采用权重矩阵与DATA-SSI结合的方法,降低了识别过程的复杂性,并对不同权重矩阵的优劣性进行了对比。BUI等<sup>[14]</sup>分别采用能量谱密度、COV-SSI及DATA-SSI,结合峰值拾取法和稳定图,对混凝土梁在强迫激励下的系统辨识及模态参数进行了分析。然而,随机子空间法的计算参数需人工设定<sup>[15]</sup>,识别结果存在大量失真模态<sup>[16]</sup>。当结构响应信号中噪信比较大时,随机子空间方法的模态识别效率和准确性均会降低,影响结构损伤定位与定量识别精度,难以实现对结构状态的长期、高效、健康的监测。

针对现有随机子空间方法的不足,国内外学者在模态识别效率与计算速度方面进行了改进。陈永高等<sup>[17]</sup>将滑窗技术应用于随机子空间方法,实现了结构模态参数的实时跟踪识别。张二华等<sup>[18]</sup>采用张量平行因子分解理论,构建了三维张量的

Hankel矩阵,解决了传统模态识别精度低与抗噪性弱的问题,并通过斜拉桥模型试验进行了验证。ANELA等<sup>[19]</sup>针对非线性结构模态识别难的问题,对随机子空间方法进行改进,可适用于迟滞阻尼动态系统,并在不同激励水平下验证了模态参数。REZA等<sup>[20]</sup>将随机子空间法与蜜蜂优化算法结合,将其应用于太阳能电站的模态分析,并基于模态识别结果更新了结构有限元模型,有效提升了模态识别效率与精度。ZHOU等<sup>[21]</sup>引入Grubbs准则优化随机子空间辨识算法,消除了阻尼比矩阵中的离群点,提高了模态参数的辨识精度。黄焱等<sup>[22]</sup>提出一种Hankel元素重构方式,对随机子空间方法进行改进,有效降低了计算矩阵的维度,模态识别准确度和效率显著提升。祝青鑫等<sup>[23]</sup>结合随机子空间方法、主成分分析法和层次聚类方法滤除虚假模态,提出了一种桥梁结构自动模态参数识别方法。然而,运用该方法在降低噪声干扰、选取最优信号截断长度方面仍存在挑战,尚需发展一种适用于结构损伤在线识别的大规模数据处理方法。因此,作者基于协方差驱动随机子空间方法,引入混沌粒子群算法对其进行改进,对加速度信号加窗截断位置和大小进行优化,拟提出桥梁多点损伤识别方法;构建基于比例柔度矩阵和均布荷载曲率的损伤识别模型,通过挠度曲率相对变化判断结构损伤位置和程度;并以斜拉索、主梁等典型损伤定量和定位识别为例,对所提出的方法进行验证。

## 1 改进随机子空间法

### 1.1 COV-SSI方法计算流程

协方差驱动随机子空间方法的计算流程:首先,将结构响应数据表达为Hankel矩阵,按矩阵行列数将Hankel矩阵分为一个过去响应矩阵和两个未来响应矩阵;再建立两个Toeplitz矩阵,计算过去

响应矩阵与未来响应矩阵的相关性;然后,对其中一个Toeplitz矩阵进行奇异值分解,并与另一个Toeplitz矩阵共同计算,得到随机离散状态系统矩阵 $A$ 和输出矩阵 $C$ ;最后,通过状态矩阵 $A$ 和输出矩阵 $C$ 求解结构模态参数。COV-SSI计算流程如图1所示。

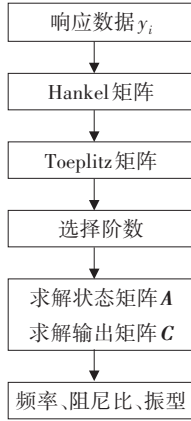


图1 COV-SSI计算流程

Fig. 1 Calculation process of COV-SSI

Hankel 矩阵由原始数据构成,包含  $2i$  块行和  $j$  列,各块均由  $l$  行组成( $l$  为输出通道数)。通常将矩阵分为“过去矩阵”与“将来矩阵”两部分,分别以  $Y_f$  与  $Y_p$  表示,即

$$Y = \frac{1}{\sqrt{j}} \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & y_2 & \cdots & y_{j-1} \\ y_1 & y_2 & y_3 & \cdots & y_j \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{i-1} & y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-2} \\ y_i & y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+j-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & y_{i+3} & \cdots & y_{i+j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & y_{2i+1} & \cdots & y_{2i+j-2} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} Y_p \\ Y_f \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: $y_k$  为某时刻输出; $i, j$  为 Hankel 矩阵的行列值。

此外, Hankel 矩阵还可表示为:

$$Y = \frac{1}{\sqrt{j}} \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & y_2 & \cdots & y_{j-1} \\ y_1 & y_2 & y_3 & \cdots & y_j \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{i-1} & y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-2} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & y_{i+3} & \cdots & y_{i+j} \\ y_{i+2} & y_{i+3} & y_{i+4} & \cdots & y_{i+j+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{2i} & y_{2i+1} & y_{2i+2} & \cdots & y_{2i+j-1} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} Y_p \\ Y_f \end{pmatrix} \quad (2)$$

系统模态参数可通过结构输出向量协方差计算求得,需构建输出向量的协方差矩阵,建立两个 Toeplitz 矩阵  $T_{1i}$ 、 $T_{2i+1}$ :

$$T_{1i} = Y_f Y_p^T = \begin{bmatrix} \Lambda_i & \Lambda_{i-1} & \cdots & \Lambda_1 \\ \Lambda_{i+1} & \Lambda_i & \cdots & \Lambda_2 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \Lambda_{2i-1} & \Lambda_{2i-2} & \cdots & \Lambda_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_{2i+1} = Y_f Y_p^T = \begin{bmatrix} \Lambda_{i+1} & \Lambda_i & \cdots & \Lambda_2 \\ \Lambda_{i+2} & \Lambda_{i+1} & \cdots & \Lambda_3 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \Lambda_{2i} & \Lambda_{2i-1} & \cdots & \Lambda_{i+1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\Lambda_i$  为输出协方差的估计值。

在实际工程中,由于测点数量有限,采用输出协方差的估计值  $\Lambda'$  进行计算,其计算公式为:

$$\Lambda' = \frac{1}{j} \sum_{k=0}^{j-1} y_{k+i} y_k^T \quad (5)$$

为求解状态矩阵  $A$  与输出矩阵  $C$ ,需对 Toeplitz 矩阵进行奇异值分解,对状态空间方程进行推导:

$$T_{1i} = O_i \Gamma_i \quad (6)$$

$$T_{2i+1} = O_i A \Gamma_i \quad (7)$$

$$O_i = U_1 S_1^{1/2} \quad (8)$$

$$\Gamma_i = S_1^{1/2} V_1^T \quad (9)$$

式中: $A$  为状态矩阵; $O_i$  为观测矩阵; $\Gamma_i$  为扩展可控矩阵; $S_1 \in R^{n \times n}$  为元素从大到小排列的奇异值对角矩阵; $n$  为系统阶次(利用标准值判定系统阶数的依据就是  $S_1$  中非零值的个数), $U_1$ 、 $V_1$  分别为对应于非零奇异值的左、右奇异向量构成的两矩阵; $U$ 、 $V$  分别为正交矩阵,即  $U^T U = V^T V = I$ 。

对于离散系统,通过获取系统矩阵  $A$  及输出矩阵  $C$  即可完成模态参数识别,其中,  $C$  为观测矩阵  $O$  的前  $l$  行构成的矩阵。

## 1.2 混沌粒子群寻优算法

混沌粒子群寻优算法(chaotic particle swarm optimization, CPSO)结合了混沌局部搜索和粒子群寻优算法,利用混沌局部搜索特性,增强了粒子群寻优算法的全局搜索能力。CPSO 算法较传统粒子群寻优算法可更准确地搜寻最优解。

Logistic 映射模型<sup>[24]</sup>作为混沌局部搜索的一种,使用方便、形式简单,同时该映射模型具有较好的遍历性。因此,本研究采用 Logistic 映射模型与粒子群寻优算法结合,其可表示为:

$$y_{n+1} = \alpha y_n (1 - y_n) \quad (10)$$

式中: $\alpha$ 为常数,本研究取4; $y_n \in (0, 1)$ 且 $y_n \neq (0.25, 0.50, 0.75)$ ,当满足条件时,系统可被认为处于混沌状态,即通过Logistic映射使系统中的序列具有强随机性,其中粒子移动轨迹表现出混沌特性。

CPSO算法的粒子位置可表示为<sup>[25]</sup>:

$$x_j = x_j^* + \eta_j z_{j,k} \quad (11)$$

式中: $x_j^*$ 为第 $j$ 次迭代时的种群最优结果; $z_{j,k}$ 分别为混沌变量,其值范围为 $[-1, 1]$ ;  $\eta_j$ 为调整系数,在搜索程序开始时,取值较大,便于跳出局部最优,但随迭代次数增加,其值逐渐降低,即 $\eta_j$ 取值与迭代次数相关。

$\eta_j$ 计算公式为:

$$\eta_j = \gamma [(k_{\max} - k + 1)/k_{\max}] x_j^* \quad (12)$$

式中: $\gamma$ 为搜索半径,其值为0.1; $k_{\max}$ 为最大迭代次数; $k$ 为当前迭代次数。

### 1.3 混沌粒子群随机子空间法

将CPSO与COV-SSI方法结合,得到混沌粒子群随机子空间方法(CPSO-SSI)。选取矩形窗函数进行信号截断,矩形窗函数可表示为:

$$s(t) = \begin{cases} 1, & t \in [T_{\min}, T_{\max}] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $T_{\min}$ 和 $T_{\max}$ 分别为信号中选择的最小时间点与最大时间点。

通过CPSO-SSI方法,将采集到的加速度响应信号进行加窗截断处理,再对截断的子信号进行模态识别,然后将各子信号模态参数进行对比,最后选取最相似的模态识别结果为最优。本研究所采用的模态参数相似判别条件可表示为:

$$|(\omega_i - \omega_j)/\omega_i| < f_w, (f_w \leq 5\%) \quad (14)$$

$$|(\xi_i - \xi_j)/\xi_i| < f_\xi, (f_\xi \leq 5\%) \quad (15)$$

$$1 - \text{MAC}(\varphi_i, \varphi_j) < f_\varphi, (f_\varphi \leq 10\%) \quad (16)$$

式中: $\omega_{i(j)}$ 为第 $i(j)$ 个截断信号模态识别下的固有频率值; $f_w$ 为固有频率相似值, $f_w \leq 5\%$ ;  $\xi_i$ 为第 $i$ 个截断信号模态识别下的阻尼比; $f_\xi$ 为阻尼比相似值, $f_\xi \leq 5\%$ ;  $\varphi_i$ 为第 $i$ 个截断信号模态识别下的振型;MAC(model assurance criterion)为模态置信准则,其描述了振型间的相关性,表达式为:

$$\text{MAC}(\varphi_i, \varphi_j) = \frac{(\varphi_i^T \varphi_j)^2}{(\varphi_i^T \varphi_i)(\varphi_j^T \varphi_j)} \quad (17)$$

当模态参数判别完成后,进行下一步迭代,通过混沌粒子群寻优算法不断调整窗口大小,直到模

态识别结果具有一致性。为提升计算效率以及防止偶然性,以识别出最优模态识别结果子信号长度的中位数作为群体最优解。CPSO-SSI计算流程如图2所示。

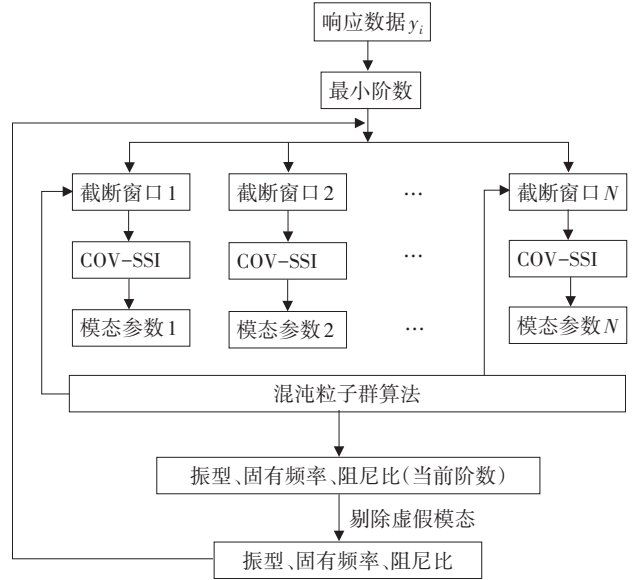


图2 CPSO-SSI 计算流程

Fig. 2 Calculation process of CPSO-SSI

## 2 损伤识别指标

通过模态参数对结构进行损伤状态评估与损伤位置识别需明确损伤指标,本研究结合比例柔度矩阵与均布荷载面曲率两个指标进行损伤定位与定量识别。

### 2.1 比例柔度矩阵

结构柔度为单位静荷载作用下各点的静位移,其作为结构的固有属性之一,通过模态参数可计算结构模态柔度矩阵:

$$F = \Phi \Omega^{-1} \Phi^T = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i^2} \varphi_i \varphi_i^T \quad (18)$$

式中: $\omega$ 为结构固有频率; $n$ 为模态总阶数; $\varphi_i$ 为第 $i$ 阶质量归一化振型; $\Phi$ 为振型矩阵; $\Omega$ 为结构模态频率的对角矩阵。

在实际工程中,由于结构的质量矩阵难以直接获取,一些学者提出了结构比例柔度矩阵<sup>[26]</sup>。假定结构质量矩阵为 $M$ ,刚度矩阵为 $K$ ,由动力学基本方程,可得特征值方程:

$$M \varphi_0 \omega_0^2 = K \varphi_0 \quad (19)$$



式中:  $\omega_0$  为固有频率;  $\varphi_0$  为质量归一化振型。

当结构质量与刚度分别变化  $\Delta M$  与  $\Delta K$  时, 式 (19) 可改写为:

$$(M\varphi_0 + \Delta M\varphi_0)A_i\omega_{l,i}^2 = (K\varphi_0 + \Delta K\varphi_0)A_i \quad (20)$$

式中:  $\omega_{l,i}$  为结构变化后第  $i$  阶模态固有频率;  $A$  为结构变化前质量归一化振型  $\varphi_0$  与结构变化后质量归一化振型  $\varphi_1$  的关系向量, 则有关系:

$$\varphi_1 = \varphi_0 \cdot A \quad (21)$$

设存在关系向量  $B$ , 结构变化前未标度归一振型  $\psi_0$  与结构变化后未标度归一振型  $\psi_1$  的关系可表示为:

$$\psi_1 = \psi_0 \cdot B \quad (22)$$

结构变化前第  $i$  阶未标度归一振型  $\psi_{0,i}$  与质量归一化振型  $\varphi_{0,i}$  的关系可表示为:

$$\psi_{0,i} = \alpha_{0,i} \varphi_{0,i} \quad (23)$$

式中:  $\alpha_{0,i}$  为相关系数。

设  $\alpha_{l,i}$  为相关系数, 相应结构变化后第  $i$  阶未标度归一振型  $\psi_{l,i}$  与质量归一化振型  $\varphi_{l,i}$  的关系式为:

$$\psi_{l,i} = \alpha_{l,i} \varphi_{l,i} \quad (24)$$

由式 (23) 与式 (24) 可知, 在  $i$  阶模态下, 关系向量  $A$  的每一个元素  $A_{j,i}$  与关系向量  $B$  的每一个元素  $B_{j,i}$  的关系可表示为:

$$B_{j,i} = \frac{\alpha_{0,j} \cdot A_{j,i}}{\alpha_{l,i}} \quad (25)$$

式中:  $\alpha_{0,j}$  为相关系数。

将式 (20) 等号左右同乘未扰动质量归一化振型  $\varphi_{0,j}^T$ , 得:

$$\varphi_{0,j}^T (M\varphi_0 + \Delta M\varphi_0) A_i \omega_{l,i}^2 = \varphi_0^T (K\varphi_0 + \Delta K\varphi_0) A_i \quad (26)$$

式中:  $\omega_{l,i}$ 、 $A_i$  分别为第  $i$  阶模态的固有频率和特征向量。

将式 (26) 带入式 (25) 中, 得:

$$\alpha_{0,j}^2 = \frac{(\omega_{0,j}^2 - \omega_{l,i}^2) \cdot B_{j,i}}{\psi_{0,j}^T \cdot (\omega_{l,i}^2 \cdot \Delta M - \Delta K) \cdot \psi_{l,i}} \quad (27)$$

式中:  $\omega_{0,j}$  为无扰动系统的第  $j$  阶模态固有频率。

通过布林克和安德森改进式, 进一步得<sup>[27]</sup>:

$$\alpha_{0,i}^2 = \frac{(\omega_{0,i}^2 - \omega_{l,i}^2)}{\omega_{l,i}^2 \cdot \psi_{0,i}^T \cdot \Delta M \cdot \psi_{0,i}} \quad (28)$$

式中:  $\omega_{0,i}$  为无扰动系统的第  $i$  阶模态固有频率。

则比例柔度矩阵可表示为:

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i^2} \varphi_i \varphi_i^T = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_{0,i} \omega_i^2} \psi_i \psi_i^T \quad (29)$$

## 2.2 均布荷载面曲率

依据比例柔度矩阵进行损伤识别是难以实现损伤精准定位与损伤评估的, 需与均布荷载面曲率结合进行损伤定位与定量识别。

假定柔度矩阵为  $F$  表达式为:

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1j} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2j} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ f_{i1} & f_{i2} & \cdots & f_{ij} & \cdots & f_{in} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nj} & \cdots & f_{nn} \end{bmatrix} \quad (30)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n; f_{ij}$  为在结构  $j$  点上作用单位荷载后, 在  $i$  点的挠度。

均布荷载面法通过计算结构在单位均布荷载作用下产生的挠度变形分析结构受损位置  $W$ , 可表示为:

$$W = FL \quad (31)$$

其中,  $L = [1, 1, \dots, 1]^T$  为作用在结构上的单位均布荷载向量。通过将结构损伤前后的均布荷载面通过中心差分法获得曲率值, 并计算曲率差占比, 即:

$$N_{c_d} = \frac{N_{s_d}(i-1) - 2N_{s_d}(i) + N_{s_d}(i+1)}{l^2} \quad (32)$$

$$N_{c_u} = \frac{N_{s_u}(i-1) - 2N_{s_u}(i) + N_{s_u}(i+1)}{l^2} \quad (33)$$

$$N_{cs} = \left| \frac{N_{c_d} - N_{c_u}}{N_{c_u}} \right| \quad (34)$$

式中:  $N_{c_d}$  与  $N_{c_u}$  分别为损伤与未损下的均布荷载面曲率;  $N_{s_d}(i)$ 、 $N_{s_u}(i)$  分别为损伤与未损下的均布荷载面中第  $i$  个元素;  $N_{cs}$  为损伤前后的均布荷载面曲率差。

## 3 斜拉桥模型试验设计

### 3.1 传感器布置与信号采集

斜拉桥模型如图 3 所示。由于模型尺寸与质量均较小, 故通过附加质量法采集结构比例柔度矩阵, 即主要依据低阶模态进行结构损伤识别。因此, 所需加速度传感器数量较少。分别在主梁 625、1 825 和 2 825 mm 处布置传感器, 以识别前三阶模态参数, 如图 4 所示。此外, 采用比例柔度矩阵进行损伤定位与定量评估时, 结构附加质量应为结

构整体质量的 2%~5%。因此,在跨中放置 5 kg 砝码作为附加质量,并识别质量变化后的固有频率。通过对结构施加环境随机激励获得响应信号,每次采集时长 3~5 min,采样频率 1 kHz。通过 DH3822 动态信号采集仪,获取结构的响应加速度。

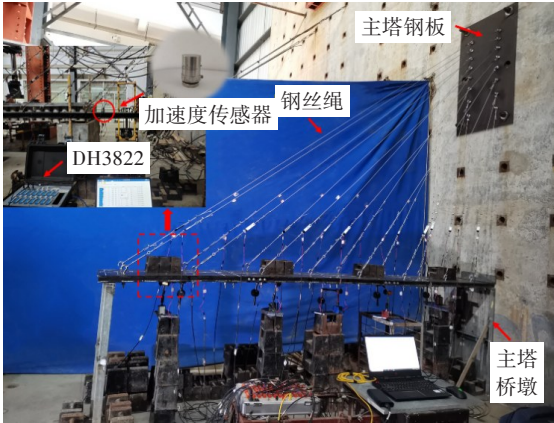


图3 桥梁缩尺模型试验

Fig. 3 Scaled model test of bridge

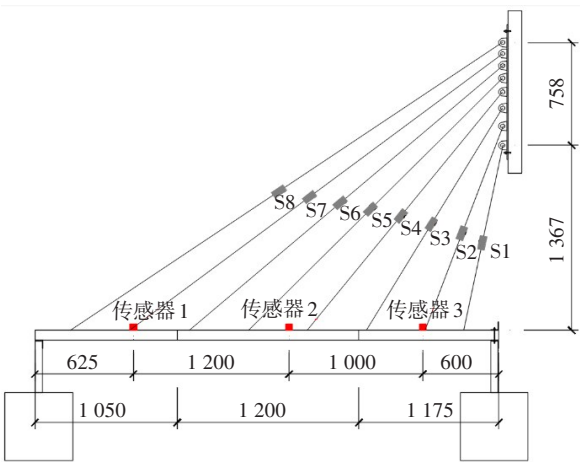


图4 传感器布置(单位:mm)

Fig. 4 Sensors arrangement (unit: mm)

3.2 损伤工况设置

为对斜拉桥模型进行损伤识别,设置了断索与主梁损伤工况,见表 1~2。拉索编号为 S1~S8,如图 4 所示。通过花篮螺丝进行断索模拟,设置 8 组断索工况。通过改变底板厚度模拟主梁损伤程度,共 15 个工况,其中,DB1 底板位于主梁 806~906 mm 处,损伤工况编号 B11~B15;DB2 底板位于主梁 1 662~1 762 mm 处,损伤工况编号 B21~B25;DB3 底板位于主梁 2 518~2 618 mm 处,损伤工况编号 B31~B35。

表 1 拉索损伤工况

Table 1 Cable damage condition

工况编号	断裂拉索编号	拉索长度/mm
SS1	S1	1 341.4
SS2	S2	1 563.5
SS3	S3	1 890.1
SS4	S4	2 255.9
SS5	S5	2 641.6
SS6	S6	3 042.7
SS7	S7	3 420.6
SS8	S8	3 875.9

表 2 底板损伤工况

Table 2 Bottom plate damage conditions

工况编号	底板编号	底板厚度/mm
B11	DB1	5
B12	DB1	4
B13	DB1	3
B14	DB1	2
B15	DB1	0
B21	DB2	5
B22	DB2	4
B23	DB2	3
B24	DB2	2
B25	DB2	0
B31	DB3	5
B32	DB3	4
B33	DB3	3
B34	DB3	2
B35	DB3	0

## 4 损伤识别结果分析

### 4.1 模态识别

通过 CPSO-SSI 方法获取斜拉桥模型的模态分布,采用 ABAQUS 建立有限元计算模型,如图 5 所示,并与试验结果进行对比。拉索损伤工况 SS1 和 SS2 的振型如图 6~7 所示,拉索损伤工况 SS1 至 SS8 的 MAC 值见表 3。从图 6~7 可以看出,在拉索损伤工况下,采用 CPSO-SSI 方法得到的结果与有限元计算方法识别的模态振型相吻合,验证了 CPSO-SSI 方法的可行性。MAC 值反映了振型相关性。在各损伤工况下,CPSO-SSI 方法与有限元模态振型二者比的均值为 0.93,各阶模态 MAC 均值分别为 0.95、0.89 和 0.89,这表明所提出的 CPSO-SSI 方法对不同拉索损伤工况下各阶模态振型均能有效识别。

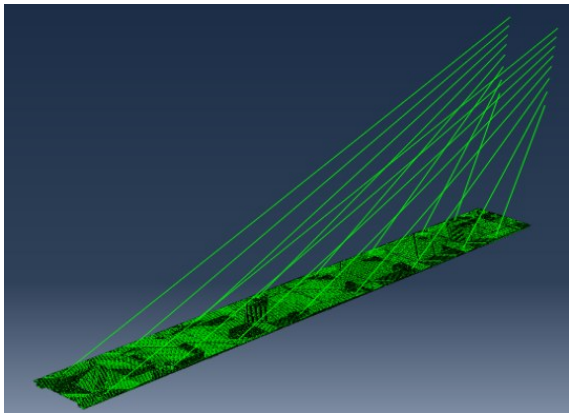
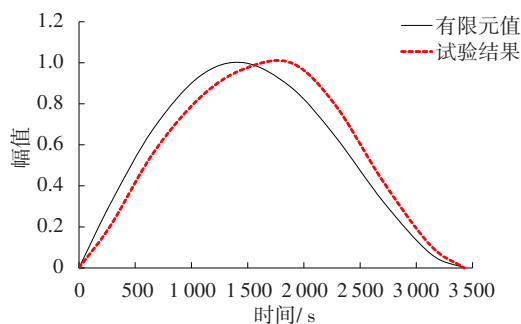
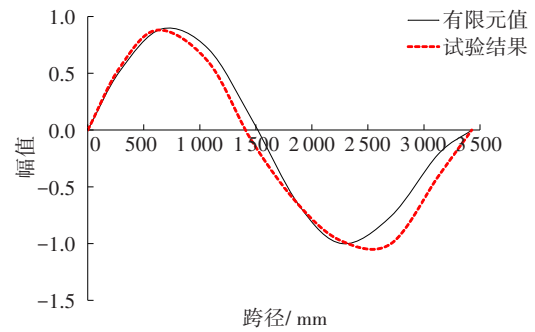


图5 斜拉桥有限元计算模型

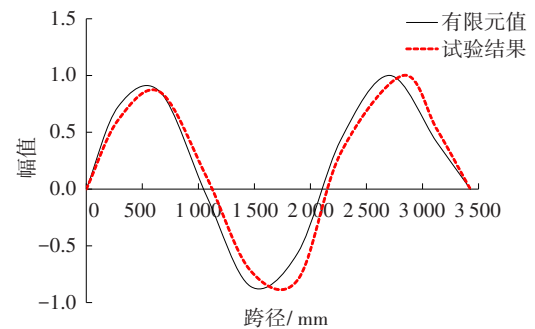
Fig. 5 Finite element model of cable-stayed bridge



(a) 一阶振型



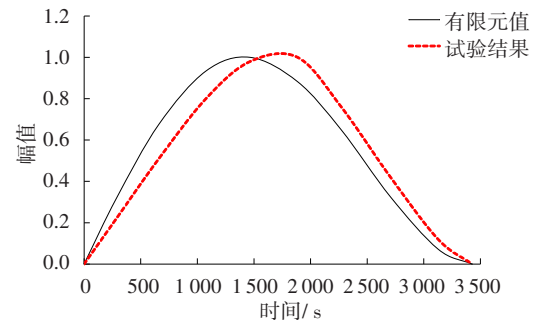
(b) 二阶振型



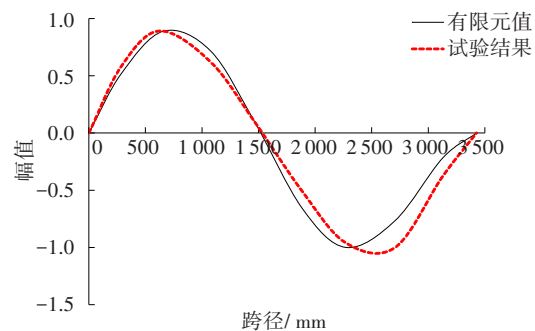
(c) 三阶振型

图6 SS1 工况下模态振型

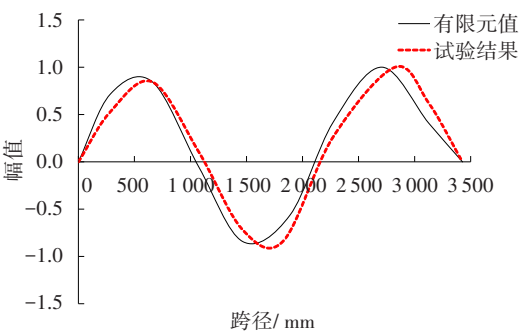
Fig. 6 Bridge mode shapes under SS1 situation



(a) 一阶振型



(b) 二阶振型



(c) 三阶振型

图7 SS2工况下模态振型

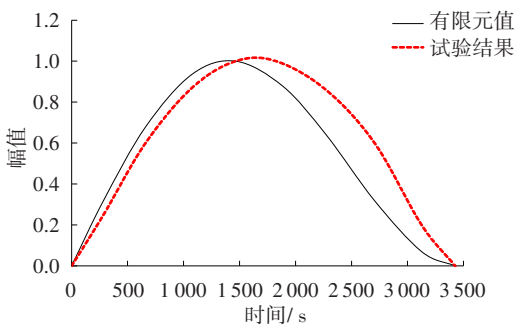
Fig. 7 Bridge mode shapes under SS2 situation

表3 拉索损伤下有限元与CPSO-SSI法MAC值

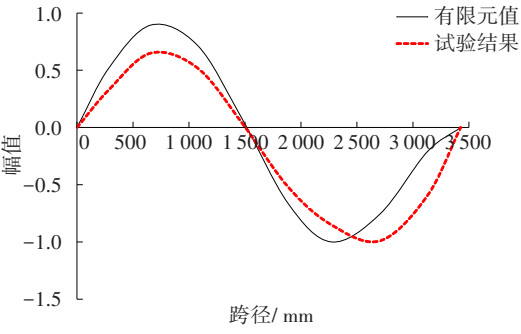
Table 3 The values of MAC under finite element and CPSO-SSI method with cable damage

模态阶数	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8
一	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.92	0.93	0.95
二	0.90	0.91	0.87	0.89	0.92	0.89	0.87	0.87
三	0.91	0.91	0.90	0.89	0.87	0.87	0.90	0.89

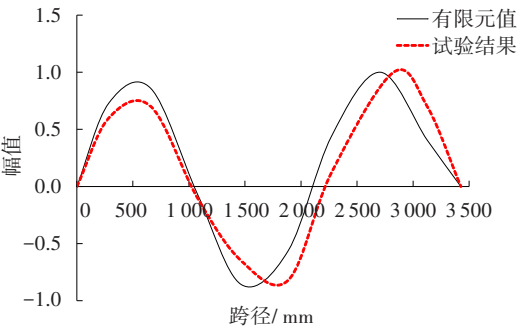
为测试 CPSO-SSI 方法识别底板损伤的可靠性,以底板 DB1 损伤工况为例,B11 和 B14 工况下结构振型如图 8~9 所示,底板 DB1 损伤工况的 MAC 值如表 4 所示。从图 8~9 可以看出,在底板损伤工况下,CPSO-SSI 方法与有限元方法识别的模态振型相吻合。在各损伤工况下,基于 CPSO-SSI 方法与有限元的振型结果较接近,MAC 值最低为 B15 工况下的二阶模态振型,其值为 0.86;MAC 值最高为 B12 工况下的一阶模态振型,其值为 0.95。不同工况下,各阶振型差异主要在于振型峰值点。此外,一阶模态 MAC 均值为 0.93,二阶模态 MAC 均值为 0.88,三阶模态 MAC 均值为 0.87。这表明:CPSO-SSI 方法对底板损伤具有较高的识别精度。



(a) 一阶振型



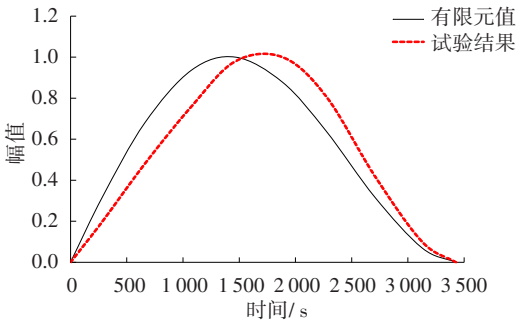
(b) 二阶振型



(c) 三阶振型

图8 B11工况下模态振型

Fig. 8 Bridge mode shape under B11 situation



(a) 一阶振型



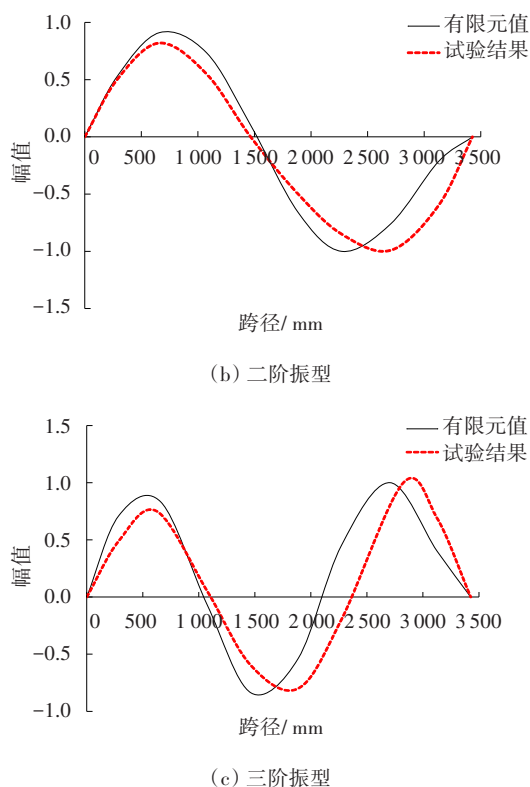


图9 B14工况下模态振型

Fig. 9 Bridge mode shape under B14 situation

表4 底板损伤下有限元与CPSO-SSI法MAC值

Table 4 The values of MAC under finite element and CPSO-SSI method with bottom plate damage

模态阶数	B11	B12	B13	B14	B15
一	0.93	0.95	0.92	0.92	0.93
二	0.89	0.90	0.89	0.87	0.86
三	0.90	0.89	0.87	0.86	0.88

#### 4.2 损伤识别

基于模态识别结果,采用均布荷载面曲率法对结构进行损伤识别,拉索损伤结果如图10所示。从图10(a)可以看出,随着损伤拉索逐渐接近跨中位置, $N_{CS}$ 值呈逐步增大的趋势, $N_{CS}$ 值最大为工况SS4,其值为0.33;其次为工况SS5,其峰值为0.31。工况SS8的 $N_{CS}$ 峰值为拉索损伤工况中的最小值,其值为0.15,且各拉索损伤工况均在断索位置出现了 $N_{CS}$ 值突变,这表明CPSO-SSI方法能对拉索损伤进行定位与定量识别。近支座处拉索S8与S1损伤后的 $N_{CS}$ 值分别为0.15与0.16,占跨中位置拉索S4损伤

后 $N_{CS}$ 值的44%和47%,即跨中位置损伤后影响更大,在实际工程中,类似边界条件的斜拉桥应提升跨中区域主梁和拉索的承载力储备。

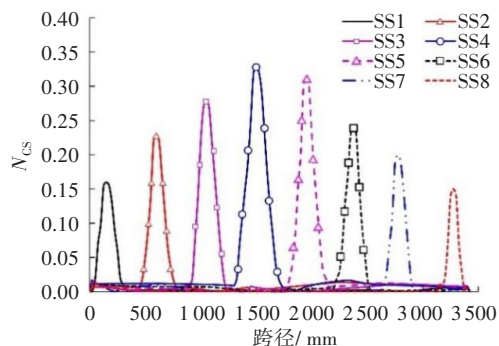
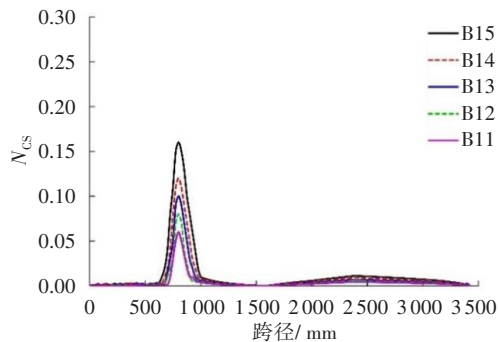
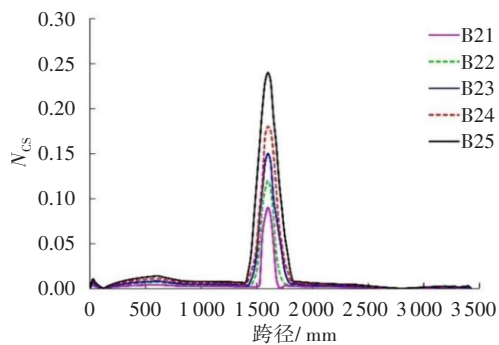
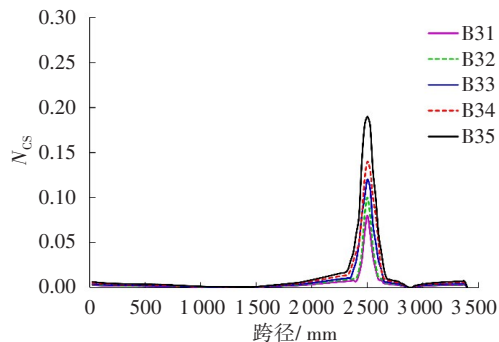
(a) SS1 ~ SS8 工况下  $N_{CS}$  值(b) B11 ~ B15 工况下  $N_{CS}$  值(c) B21 ~ B25 工况下  $N_{CS}$  值(d) B31 ~ B35 工况下  $N_{CS}$  值

图10 桥梁损伤识别结果

Fig. 10 The damage identification results of bridge

底板损伤工况如图10(b)~(d)所示。由图10可知,随底板损伤程度增加, $N_{cs}$ 值逐渐增大, $N_{cs}$ 值突变位置对应底板损伤位置,与结构损伤位置及损伤程度相似,表明:CPSO-SSI方法可实现底板损伤定位识别。

相较于底板DB1和DB3损伤,底板DB2损伤的 $N_{cs}$ 值较大,B25工况下最大 $N_{cs}$ 值为0.24,B15与B35的最大 $N_{cs}$ 值分别为0.16和0.19。底板DB2不同损伤程度下的最大 $N_{cs}$ 值变化较大,B25工况下 $N_{cs}$ 峰值为0.24,B21工况下 $N_{cs}$ 峰值为0.09,差值为0.15;底板DB1损伤工况下,B11与B15工况 $N_{cs}$ 值峰值差为0.10。这表明:跨中位置底板损伤对结构安全的影响较其他位置更大,应加强跨中部位的主梁维护。

此外,底板DB1与DB3损伤后的 $N_{cs}$ 值最大值较接近,B15工况下最大 $N_{cs}$ 值为0.16,与B35工况的最大 $N_{cs}$ 值差值为0.03,B11工况与B31工况的最大 $N_{cs}$ 差值为0.03,这表明靠近主梁两端位置的损伤对结构影响相似。然而,底板DB3损伤各工况值均大于底板DB1损伤,如:B34与B14工况下最大 $N_{cs}$ 值分别为0.14和0.12,表明:靠近长索处的底板损伤对结构安全性影响更大,在实际工程中,应加强对靠近长索部位的主梁维护。

## 5 结论

1) 采用混沌局部搜索增强粒子群寻优算法的全局搜索能力,对加速度序列信号加窗截断位置和大小进行优化,CPSO算法较传统粒子群寻优算法可更准确搜寻最优解,有效剔除虚假模态,获得最优模态参数识别结果。

2) 开展了缩尺斜拉桥模型试验与有限元模拟,建立了基于CPSO-SSI的结构模态分析法,并将模态MAC结果与有限元方法进行了对比,结果表明:不同工况下模态振型识别结果均较接近,验证了CPSO-SSI法的可行性。

3) 基于CPSO-SSI模态识别结果,通过附加质量法计算结构比例柔度矩阵,以均布荷载曲率为损伤指标对结构多点损伤进行了计算,损伤定位与定量识别结果与实际吻合较好。跨中位置拉索与主梁损伤对结构安全影响最为显著。

4) 本研究主要对传统随机子空间方法进行改进,以实现结构多点损伤识别,然而实际传感数据易受环境噪声等干扰,尚需考虑传感故障对结构损伤识别的影响。此外,如何结合智能传感与大数据处理技术,实现桥梁结构多点损伤在线识别与风险预警,仍需进一步研究。

## 参考文献(References):

- [1] 马亚飞,彭安银,王磊,等.拉索失效和主梁损伤斜拉桥静力性能退化模型试验[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(2):653-664. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.02.028.  
MA Yafei, PENG Anyin, WANG Lei, et al. Model test on static performance degradation of cable-stayed bridge with cable rupture and main girder damage[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(2): 653-664. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.02.028.
- [2] XIANG W, WEI J Y, ZHANG F L. Structural health monitoring design and performance evaluation of a middle-span bridge[J]. Sensors, 2023, 23(21): 8702. DOI: 10.3390/s23218702.
- [3] ZHOU S D, HEYLEN W, SAS P, et al. Parametric modal identification of time-varying structures and the validation approach of modal parameters[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 47(1): 94-119. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.07.021.
- [4] CHEEMA P, ALAMDARI M M, VIO G A, et al. Infinite mixture models for operational modal analysis: an automated and principled approach [J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 491: 115757. DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115757.
- [5] 王凌波,王秋玲,朱钊,等.桥梁健康监测技术研究现状及展望[J].中国公路学报,2021,34(12):25-45. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.12.003.  
WANG Lingbo, WANG Qiuling, ZHU Zhao, et al. Current status and prospects of research on bridge health monitoring technology [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(12): 25-45. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.12.003.
- [6] XU X Z, ZHANG X, ZHU W D, et al. Modal parameter identification of a quayside container crane

- based on data-driven stochastic subspace identification [J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2021, 9 (5) : 919-938. DOI: 10.1007/s42417-020-00273-8.
- [7] 李雪艳, 官宇航, 罗铭涛, 等. 基于 Welch 法的协方差随机子空间方法的模态参数识别[J]. *力学学报*, 2022, 54(10): 2850-2860.
- LI Xueyan, GUAN Yuhang, LUO Mingtao, et al. Modal parameter identification of covariance-based stochastic subspace identification based on welch method [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(10): 2850-2860.
- [8] GUO J, HU C J, ZHU M J, et al. Monitoring-based evaluation of dynamic characteristics of a long span suspension bridge under typhoons [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2021, 11 (2) : 397-410. DOI: 10.1007/s13349-020-00458-5.
- [9] LI J T, ZHU X Q, LAW S S, et al. Indirect bridge modal parameters identification with one stationary and one moving sensors and stochastic subspace identification [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 446: 1-21. DOI: 10.1016/j.jsv.2019.01.024.
- [10] LIU X L, ZHAO S X, WANG P P, et al. Improved data-driven stochastic subspace identification with autocorrelation matrix modal order estimation for bridge modal parameter extraction using GB-SAR data [J]. *Buildings*, 2022, 12 (2) : 253. DOI: 10.3390/buildings12020253.
- [11] LI J H, ZHU L, JI W Y, et al. Development of a software platform for bridge modal and damage identification based on ambient excitation [J]. *High-Speed Railway*, 2023, 1(3): 162-170. DOI: 10.1016/j.hspr.2023.09.003.
- [12] REYNDERS E P B. Uncertainty quantification in data-driven stochastic subspace identification [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 151: 107338. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107338.
- [13] SHOKRAVI H, SHOKRAVI H, BAKHARY N, et al. A comparative study of the data-driven stochastic subspace methods for health monitoring of structures: a bridge case study [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10 (9) : 3132. DOI: 10.3390/app10093132.
- [14] HO V L, TRAN N H, DE ROECK G, et al. System identification based on vibration testing of a steel I-beam [C]//ABDEL Wahab M. *International Conference on Numerical Modelling in Engineering*. Singapore: Springer, 2019: 254-268. DOI: 10.1007/978-981-13-2405-5\_21.
- [15] HE Y C, LI Z, FU J Y, et al. Enhancing the performance of stochastic subspace identification method via energy-oriented categorization of modal components [J]. *Engineering Structures*, 2021, 233: 111917. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.111917.
- [16] ZHOU K, LI Q S, HAN X L. Modal identification of civil structures via stochastic subspace algorithm with Monte carlo - based stabilization diagram [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2022, 148(6): 04022066. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0003353.
- [17] 陈永高, 钟振宇, 何杰. 基于改进确定-随机子空间算法的桥梁结构模态参数识别[J]. *振动与冲击*, 2021, 40 (2): 220-227. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.02.030.
- CHEN Yonggao, ZHONG Zhenyu, HE Jie. Modal parameter identification of bridge structures based on an improved deterministic-stochastic subspace identification method [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40 (2): 220-227. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.02.030.
- [18] 张二华, 吴涤, 刘昊, 等. 桥梁时变系统的张量子空间识别方法研究及试验验证[J]. *振动与冲击*, 2021, 40 (23): 66-73. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.23.010.
- ZHANG Erhua, WU Di, LIU Hao, et al. Tensor subspace identification method for bridge time-varying system and its test verification [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(23): 66-73. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.23.010.
- [19] BAJRIĆ A, HØGSBERG J. Estimation of hysteretic damping of structures by stochastic subspace identification [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 105: 36-50. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.11.042.
- [20] KHADEMI-ZAHEDI R, ALIMOURI P. Finite element model updating of a large structure using multi-setup stochastic subspace identification method and bees optimization algorithm [J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2019, 13 (4) : 965-980. DOI: 10.1007/s11709-019-0530-x.

- [21] ZHOU Y L, JIANG X L, ZHANG M J, et al. Modal parameters identification of bridge by improved stochastic subspace identification method with grubbs criterion[J]. Measurement and Control, 2021, 54(3/4): 457-464. DOI: 10.1177/0020294021993831.
- [22] 黄焱, 陈涛, 朱本瑞. 基于随机子空间法的海洋平台模态特征实时提取方法研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(3): 147-155. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.03.020.  
HUANG Yan, CHEN Tao, ZHU Benrui. Modal features real-time extraction of offshore platform based on stochastic subspace method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(3): 147-155. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.03.020.
- [23] 祝青鑫, 王浩, 茅建校, 等. 基于聚类分析的桥梁结构模态参数自动识别方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(5): 837-843. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2020.05.007.  
ZHU Qingxin, WANG Hao, MAO Jianxiao, et al. Automated modal parameter identification method for bridges based on cluster analysis[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(5): 837-843. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2020.05.007.
- [24] MAY R M. Simple mathematical models with very complicated dynamics[J]. Nature, 1976, 261(5560): 459-467. DOI: 10.1038/261459a0.
- [25] LIU B, WANG L, JIN Y H, et al. Improved particle swarm optimization combined with chaos[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2005, 25(5): 1261-1271. DOI: 10.1016/j.chaos.2004.11.095.
- [26] 段忠东, 闫桂荣, 欧进萍, 等. 结构比例柔度矩阵[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8): 1236-1238, 1242. DOI: 10.3321/j.issn: 0367-6234.2006.08.007.  
DUAN Zhongdong, YAN Guirong, OU Jinping, et al. Proportional flexibility matrix of structures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(8): 1236-1238, 1242. DOI: 10.3321/j.issn: 0367-6234.2006.08.007.
- [27] LÓPEZ-AENLLE M, BRINCKER R, PELAYO F, et al. On exact and approximated formulations for scaling-mode shapes in operational modal analysis by mass and stiffness change[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(3): 622-637. DOI: 10.1016/j.jsv.2011.09.017.
- (责任编辑:欧兆虎;校对:罗容;英文编辑:郭一鹏)