

DOI: 10.7511/jslx20221124003

# 基于混合 PSO 算法和损伤概率均值的 两阶段梁式结构损伤识别

陈泽鹏<sup>\*1,2</sup>, 王伟龙<sup>1</sup>, 刘琪钿<sup>1</sup>, 吴京涛<sup>1</sup>

(1. 佛山科学技术学院 交通与土木建筑学院, 佛山 528225;

2. 暨南大学 重大工程灾害与控制教育部重点实验室, 广州 510632)

**摘要:** 受算法随机参数和测量噪声等因素的影响, 基于群智能算法的结构损伤识别法容易出现单次识别误差大和多次识别波动大的问题。针对该问题, 本文基于混合 PSO 算法和损伤概率均值提出一种两阶段梁式结构损伤识别方法。定义了包括单元容许损伤值  $\alpha_{cr}$  和临界概率  $p_c$  的损伤有效原则, 以计算损伤概率均值。第一阶段, 对混合 PSO 算法的多次识别结果分批计算一阶段损伤概率均值, 第二阶段, 在此基础上计算两阶段损伤概率均值。本文方法能够有效地提高高噪声水平影响下的结构损伤识别精度。简支梁和两跨连续梁的损伤工况试验研究表明, 该算法能够有效地应用于不同结构和不同工况的结构损伤识别, 在减少损伤误判的同时保证损伤单元的识别精度。

**关键词:** 结构损伤识别; 混合粒子群算法; 有效损伤原则; 损伤概率均值; 梁式结构损伤识别

**中图分类号:** TU312; O346.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-4708(2024)03-0525-09

## 1 引言

交通运输部在 2020 年底发布的《交通运输部关于进一步提升公路桥梁安全耐久水平的意见》中提到, 中国在 2035 年要全面建立公路桥梁的结构健康监测 SHM (Structural health monitoring) 系统作为交通系统的关键性枢纽, 桥梁在复杂环境及往复荷载作用下, 不可避免会发生损伤, 且结构承载力随损伤积累不断下降。必要的监测系统和维护措施的缺失容易引发严重灾害<sup>[1]</sup>。其中, 结构损伤识别 SDD (Structural damage detection) 是结构健康监测重要的一步, 也是其最终目标<sup>[2]</sup>。由于材料老化、环境腐蚀、超限使用和物理破坏等结构损伤诱因会反映在结构的响应/特征中, 故如何通过这些参量的变化识别结构状态改变, 进而定位甚至定量结构损伤, 是结构损伤识别研究的关键<sup>[3]</sup>。

Worden 等<sup>[4]</sup>指出结构损伤识别必须涉及两个系统状态之间的比较, 这是进行结构损伤识别的重要依据。依据有限元模型的有无, 可将结构损伤识别方法分为有模型法和无模型法两大类<sup>[5]</sup>。其

中, 有模型方法以结构有限元模型为基础, 通过特征提取、目标函数定义和优化问题求解, 实现结构损伤判定、定位和定量。而无模型方法则直接依据前后两段测量数据某些特征的变化识别结构损伤。在大部分情况下, 无模型方法无法实现损伤的定位和定量。因此, 能够定位甚至定量的有模型法在结构损伤识别领域具有更广泛的研究意义。

随着计算机算力的不断提升, 基于群智能算法的结构损伤识别有模型方法得到快速发展。其中, 粒子群算法<sup>[6]</sup>、人工鱼群算法<sup>[7]</sup>、萤火虫算法<sup>[8]</sup>、蚁狮算法<sup>[9]</sup>、人工蜂群算法<sup>[10]</sup>和飞蛾扑火算法<sup>[11]</sup>等已成功应用于结构损伤识别, 取得诸多研究成果。本质上, 这些算法思路可以归纳为以下统一框架, (1) 在解的可行域中按照一定的概率分布抽样产生多个备选解; (2) 按照算法迭代公式, 更新所有备选解; (3) (非必须) 引进启发式规则进行解的优胜劣汰, 加速解的全局收敛; (4) 判断是否满足停止准则。

群智能算法在实际使用中, 存在容易陷入局部

收稿日期: 2022-11-24; 修改稿收到日期: 2023-04-24.

基金项目: 国家自然科学基金(52008109)资助项目.

作者简介: 陈泽鹏<sup>\*</sup> (1992-), 男, 博士, 讲师 (E-mail: zpchen2014@foxmail.com).

引用本文: 陈泽鹏, 王伟龙, 刘琪钿, 等. 基于混合 PSO 算法和损伤概率均值的两阶段梁式结构损伤识别 [J]. 计算力学学报, 2024, 41(3): 525-533.  
CHEN Ze-peng, WANG Wei-long, LIU Qi-tian, et al. A two-stage structural damage detection method for beam-like structures based on hybrid PSO and probabilistic mean of damage vector factor [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2024, 41(3): 525-533.

最优导致解的精度下降的问题。因此,为了改善该问题,常采用算法自身策略<sup>[12]</sup>的调整和不同算法的混合<sup>[13,14]</sup>以及分阶段结构损伤识别<sup>[15,16]</sup>等策略。但是,智能算法受本身随机参数、测量噪声等因素的影响,无法每次都收敛于同一个解,存在单次识别误差大、多次识别波动大的问题。传统的直接均值法对多次识别求算术平均值的方式在一定程度上可以抑制非损伤单元的损伤误判。但是,噪声水平增加会加剧测量数据误差,导致更严重的损伤误判,使得直接均值法获取的结构损伤识别解难以满足精度要求。

基于此,本文融合混合 PSO 算法和损伤概率均值提出一种两阶段梁式结构损伤识别方法。首先,提出一种混合 PSO 算法,其中调整了 NM 算法的嵌入策略,以提升结构损伤识别效率。其次,提出有效损伤原则,依据单元容许损伤值和临界概率对混合 PSO 多次识别结果进行两阶段损伤概率均值计算,避免了偶然性导致的结构损伤识别精度下降。最后,通过简支梁和两跨连续梁的结构损伤识别验证了本文方法的可行性和有效性。

## 2 基于模型修正的结构损伤识别

模型修正是结构损伤识别中常用的一类方法。该方法的基本思路是通过模型参数进行迭代更新,使得优化后模型的响应或特征与实际测量的误差最小化,以此得到可以准确表征实际结构损伤的数值模型。模型修正方法通常将结构损伤识别问题转化为数学上的优化问题(式(1)),可采用灵敏度分析、群智能算法和贝叶斯分析等算法进行迭代求解。

$$\boldsymbol{\alpha}_{\text{opt}} = \arg \min_{\boldsymbol{\alpha}} J(\boldsymbol{\alpha}) \quad (1)$$

式中  $\boldsymbol{\alpha}_{\text{opt}}$  为最优损伤因子向量,  $J(\boldsymbol{\alpha})$  为选定的目标函数。

在结构损伤识别问题中,选择合适的损伤因子向量对于准确描述结构损伤至关重要。现阶段,在结构损伤识别领域广泛采用单元刚度折减模型进行损伤描述<sup>[17]</sup>。该模型忽略损伤对于质量分布的影响,将损伤后的整体刚度矩阵  $\mathbf{K}_d$  表示为单元刚度矩阵  $\mathbf{K}_{ui}$  的线性叠加,具有表达简单和物理意义明确的优点,即

$$\mathbf{K}_d = \sum_{i=1}^{N_{\text{ele}}} (1 - \alpha_i) \mathbf{K}_{ui} \quad (2)$$

式中  $\alpha_i$  为第  $i$  个单元的损伤因子 ( $0 \leq \alpha_i < 1$ ), 0 表示单元无损伤, 1 表示单元完全损伤,  $N_{\text{ele}}$  为单元数。

## 3 两阶段 PSO 优化算法

### 3.1 混合 PSO 算法

Kennedy 等<sup>[18]</sup>基于对鸟群觅食这一动物行为

的观察和提炼,形成了标准粒子群算法(PSO)。该算法是一种典型的启发式算法,以粒子位置代表可行域中的每一个可能解。每个粒子根据个体历史最优和群体历史最优选择更新方向,并叠加当前位置到达更新位置,其位置信息和速度信息的更新公式为

$$\begin{cases} v_i^{k+1} = \omega \cdot v_i^k + c_1 r_1 (x_{ib}^k - x_i^k) + c_2 r_2 (x_g^k - x_i^k) \\ x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $x_i^k$  和  $v_i^k$  分别为第  $k$  次迭代中第  $k$  个粒子的位置和速度,  $\omega$  为惯性权重,  $c_1$  和  $c_2$  分别用于调节粒子飞向个体历史最优位置方向和飞向全局最优方向的步长,  $r_1$  和  $r_2$  均表示相互独立的伪随机数,服从  $[0, 1]$  上的均匀分布。

PSO 算法具有迭代格式简单和收敛速度快的优点,但算法在单元较多和测量数据受噪声干扰严重等情况下,依然存在容易陷入局部最优的问题。为了解决该问题,本文结合 NM(Nelder-Mead)算法,提出一种混合 PSO 算法,以改进算法的识别精度和抗噪性能。

NM 算法是求多维函数极值的一种优化算法。该算法在初始解  $x_0$  邻域构建单纯形(多面体),并通过反射、扩展、压缩和收缩四种基本变换进行顶点的更新替换,使单纯形最终收敛到最优解  $\alpha_{\text{opt}}$ 。将 NM 算法嵌套在 PSO 算法的每一次迭代过程中,可以在粒子邻域内进行更精细化的搜索,避免 PSO 算法陷入局部最优。相比于文献<sup>[13]</sup>,对全部粒子都进行 NM 算法局部搜索的计算效率较低。因此,本文仅选择具有最好适应度值的前  $a\%$  的粒子进行 NM 算法局部搜索,以提高计算效率。同时,为了加速收敛,  $a$  的取值随着迭代线性递减。混合 PSO 算法的具体流程如下。

- (1) 初始化种群和最大迭代次数  $k_{\text{max}} (k=1)$ 。
- (2) 计算惯性权重(线性递减策略)和学习因子  $\omega = 0.95 - \frac{0.55k}{k_{\text{max}}}$ ,  $c_1 = 2.5 - \frac{2k}{k_{\text{max}}}$ ,  $c_2 = 0.5 + \frac{2k}{k_{\text{max}}}$ 。
- (3) 如果  $k > k_{\text{max}}$ , 则输出  $\alpha_{\text{opt}}$ ; 否则根据式(3)更新粒子的速度  $v_k$  和位置  $x_k$ 。
- (4) 计算  $a = a_1 * (k_{\text{max}} - k) / (k_{\text{max}} - 1) + a_2 * (k - 1) / (k_{\text{max}} - 1)$ , 选取具有最好适应度值的前  $a\%$  的粒子进行 NM 算法局部搜索,并用得到的优化解替代原来粒子群中  $a\%$  适应度值最差的粒子。
- (5) 计算  $k = k + 1$ , 并返回步骤(2)。

### 3.2 损伤概率均值

噪声干扰及测量误差等因素影响下,基于群智能算法的结构损伤识别结果容易出现损伤误判,表现为无损伤单元的弱识别值和损伤单元处的低精

度识别值。据观察,结构无损伤单元的识别结果具有识别值小和显著为零概率大的特征。基于该特征,本文提出有效损伤原则,计算同一工况多次结构损伤识别结果的损伤概率均值,以提高结构损伤识别精度。

针对无损伤单元处的识别结果具有识别值小的特征,本文首先设定单元容许损伤值  $\alpha_{cr}$ 。当结构单元损伤未超过该值时,则认为该单元未发生损伤,将其损伤识别值置零。即对于第  $i$  个单元的第  $j$  次识别结果  $\alpha_{i,j}$  做以下处理

$$\alpha_{i,j} = \begin{cases} \alpha_{i,j} & (\alpha_{i,j} > \alpha_{cr}) \\ 0 & (\alpha_{i,j} \leq \alpha_{cr}) \end{cases} \quad (4)$$

其次,基于未损伤处识别结果显著为零概率大的特征,设定临界概率值  $p_c$ 。在同一工况的  $N$  次识别结果中,如果第  $i$  个单元的显著为零概率大于该临界概率值,则认为该单元为无效损伤,否则认为该单元为有效损伤。对于无效损伤,单元识别值置零。而对于有效损伤,则对其中的非零识别值取平均值作为最终的单元识别结果。因此,基于有效损伤原则,对第  $i$  个单元的  $N$  次识别结果的损伤概率均值为

$$\alpha_i = \begin{cases} 0 & (p_{i,dam}(\alpha_{cr}) \geq p_c) \\ \text{mean}\{\alpha_{i,j} : \alpha_{i,j} > 0\} & (\text{其他}) \end{cases} \quad (5)$$

式中  $p_{i,dam}(\alpha_{cr})$  表示第  $i$  个单元在  $N$  次识别中小于  $\alpha_{cr}$  的概率;  $\text{mean}\{\alpha_{i,j} : \alpha_{i,j} > 0\}$  表示对  $\alpha_{i,j}$  中的非零值取平均值。

### 3.3 结构损伤两阶段识别法

结合混合 PSO 算法和有效损伤原则,本文提出一种结构损伤两阶段识别法。首先,需要对同一工况进行  $n_1 \times n_2$  次识别。在第一阶段的  $n_1$  次识别中,应用有效损伤原则得到结构损伤识别的损伤概率均值  $\text{mean}_1$ 。在算法的第二阶段,对  $n_2$  个  $\text{mean}_1$  值应用有效损伤原则计算二次损伤概率均值,最终得到该工况下的结构损伤识别结果  $\text{mean}_2$ 。两阶段混合 PSO 算法的流程如图 1 所示。

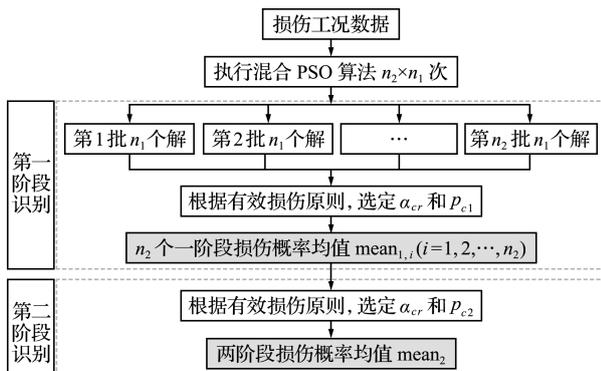


图 1 结构损伤两阶段识别法  
Fig. 1 A two-step SDD method

## 4 简支梁的结构损伤识别

考虑如图 2 所示的 10 单元简支梁有限元模型,用于验证本文方法的有效性。同时,通过数值算例研究确定  $p_{c1}$  和  $p_{c2}$  的合理取值。

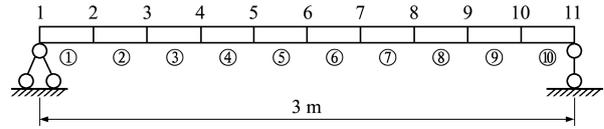


图 2 简支梁数值仿真模型  
Fig. 2 FE model of a simply-supported beam with 10 elements

简支梁有限元模型的弹性模量  $E = 210 \text{ GPa}$ ,材料密度  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ ,长度  $l = 3.0 \text{ m}$ ,横截面为矩形截面,面积  $A = 1.164 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ,惯性矩  $I = 7.6165 \times 10^{-7} \text{ m}^4$ 。简支梁模型划分为 10 个等长度单元,单元类型为两节点四自由度的平面弯曲梁单元。取结构前七阶固有频率与模态振型进行目标函数的定义,其中振型只提取各单元节点的竖向自由度。目标函数的定义如下

$$\alpha_{\text{opt}} = \underset{\alpha}{\text{argmin}} \sum_{i=1}^{N_m} \left[ \left| \frac{\omega_i^m - \omega_i(\alpha)}{\omega_i^m} \right| + 1 - \frac{\boldsymbol{\varphi}_i^{mT} \boldsymbol{\varphi}_i(\alpha)}{\boldsymbol{\varphi}_i^{mT} \boldsymbol{\varphi}_i^m \boldsymbol{\varphi}_i(\alpha)^T \boldsymbol{\varphi}_i(\alpha)} \right]$$

$$\text{s.t. } 0 < \alpha_j < 1 \quad (j = 1, 2, \dots, N_{\text{ele}})$$

$$[K(\alpha) - \omega_i^2(\alpha)M] \boldsymbol{\varphi}_i(\alpha) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N_m) \quad (6)$$

式中  $N_m$  为考虑的模态阶数,  $\omega_i$  和  $\boldsymbol{\varphi}_i$  分别为第  $i$  阶结构频率和振型,上标  $m$  和  $T$  分别表示测量值和向量转置,下标  $i$  表示第  $i$  阶。

### 4.1 基于混合 PSO 的结构损伤识别结果

考虑如表 1 所示工况。噪声添加公式为

$$r_n = r_{\text{cal}}(1 + E_p N_{\text{oise}}) \quad (7)$$

式中  $r_n$  和  $r_{\text{cal}}$  分别为添加噪声数据和无噪声数据,  $E_p$  为噪声水平,  $N_{\text{oise}}$  为服从  $N(0,1)$  的高斯分布随机数。

表 1 损伤工况设置

Tab. 1 Damage cases

工况	损伤程度@损伤单元	噪声水平/%
1	20% @ 3	0.1, 3
2	20% @ 3, 25% @ 6	0.1, 3

采用本文提出的混合 PSO 算法对不同工况进行 200 次计算。其中,粒子数量设置为 100,最大迭代次数  $k_{\text{max}} = 50$ ,  $a_1$  和  $a_2$  根据经验取值为 20 和 10。将 200 次计算结果直接均值作为最终识别结果,得到如图 3 所示的结构损伤识别结果。在无

噪声情况下,结构损伤识别结果与假设工况基本一致。噪声水平增加时,真实损伤处的损伤识别精度下降,但其损伤识别值明显高于其他非损伤单元。这说明,本文提出的混合 PSO 算法能够有效识别损伤单元,且在无噪声情况下精确定量损伤。但是从图 3 也可以看出,传统的多次识别求均值的方式无法有效利用无损伤单元处识别值小、显著为零概率大的特征,在噪声水平增加的情况下,精度出现较大下降,难以满足实际应用的要求。

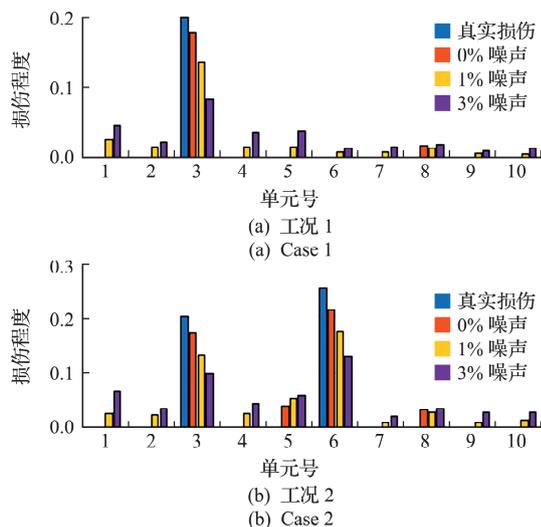


图 3 结构损伤识别结果  
Fig. 3 SDD results of damage cases

#### 4.2 有效损伤原则参数的确定

在采用本文提出的两阶段混合 PSO 识别法之前,需要确定有效损伤原则的单元容许损伤值和临界概率值。本文主要研究大损伤( $\alpha_i \geq 0.10$ )工况,因此在识别过程中,依经验取单元容许损伤值  $\alpha_{cr} = 0.05$ 。对于临界概率  $p_{c1}$  和  $p_{c2}$ ,本文采用在工况 1 和工况 2 的测量频率和振型中添加 5% 噪声作为研究工况,并取  $n_1 = 10, n_2 = 20$ ,通过试算得到其最佳取值。

在实际应用中,临界概率  $p_c$  相当于滤波阈值,用于将多次识别情况下识别值显著为零的单元的损伤值进行置零操作。 $p_c$  取值过低则第  $i$  个单元的  $p_{i,dam}(\alpha_{cr})$  很容易超过该临界概率,造成损伤识别结果大部分为零;相反,如果临界概率取值过高,则所有识别结果都能够接受,无法有效滤除非损伤单元处的识别值。根据上述分析,考虑到第一阶段识别为损伤识别解的初步优选,因此  $p_{c1}$  取 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 四个中间概率值进行试算,该取值区间的合理性在下述损伤工况研究中得到验证。而第二阶段为损伤识别解的进一步优选,因此  $p_{c2}$  取 0:0.01:0.8 进行更细致的分析。

对 5% 噪声工况 1 和工况 2 的损伤概率均值

提取如图 4 所示,其中图例表示单元号。可以看出,当  $p_{c1}$  取值 0.4 时,过小的损伤临界值导致工况 1 的所有损伤都置零,损伤识别结果不准确。同时,当  $p_{c1}$  取值 0.7 时,由于大部分单元的显著为零概率达不到该临界值,其识别结果均能够得到接受并进行概率均值计算,这导致大量损伤单元误判的出现。相对而言,当  $p_{c1}$  取值 0.5 或者 0.6 时,工况 1 和工况 2 均能得到较为精确的识别结果,在避免过多损伤误判的同时保证了损伤单元处的损伤识别精度。这也说明了取区间  $[0.4, 0.7]$  研究  $p_{c1}$  的取值是合理的。从图 4 同样可以看出,过小的  $p_{c2}$  将抑制单元的损伤识别解,而过大的取值则造成过多的损伤误判。综合上述分析,本文取临界概率值为  $p_{c1} = 0.6$  和  $p_{c2} = 0.5$ ,以确保损伤概率均值的有效性和准确性。

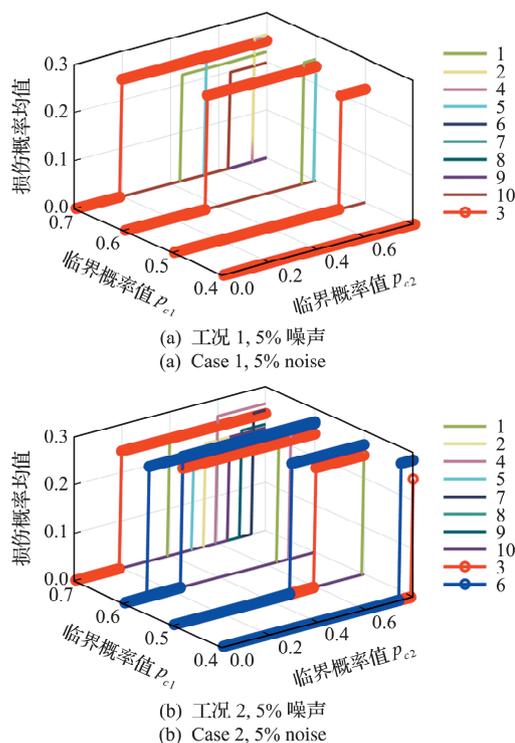


图 4 不同临界概率值下的结构损伤识别结果  
Fig. 4 SDD results with different values of critical probability

#### 4.3 基于两阶段混合 PSO 的结构损伤识别结果

采用本文方法得到的结构损伤识别结果如图 5 所示。在无噪声及高噪声情况下,结构损伤识别结果与假设工况基本一致。可以看出,两种工况均没有出现损伤单元误判,对于真实损伤处的损伤程度识别结果也与假设损伤值高度吻合,这相比于图 3 未采用本文方法的结构损伤识别结果有明显的精度提升效果。表明本文方法在不同噪声水平下均能实现准确的结构损伤定位和定量。另外,随着噪声水平的增加,损伤单元处的识别值出现递增

趋势。这可能是由于损伤概率均值仅对非零值进行均值计算,而单元损伤容许值的设定使得非零识别值都偏大。

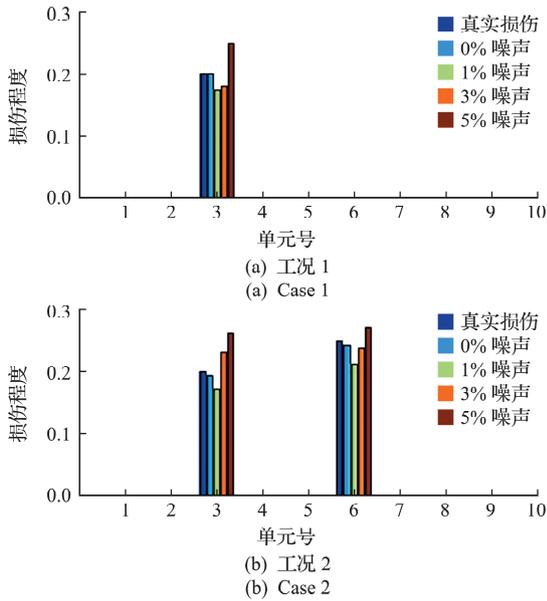


图5 不同噪声水平下的损伤识别结果  
Fig. 5 SDD results under different noise level

为了进一步说明本文方法的有效性,对采用不同均值方法计算的损伤识别结果进行比较,得到如图6所示的结构损伤识别结果。其中,直接均值表示对所有识别结果取算术平均值;概率均值1表示一阶段损伤概率均值,即对所有200次识别结果计算损伤概率均值,且取 $p_c=0.6$ ;概率均值2表示两阶段损伤概率均值计算结果,即采用图1所示流程分批计算损伤概率均值再进行二次计算。可以看出,直接均值在高噪声情况下识别出所有单元均有损伤,其中真实损伤单元识别值仅略大于非损伤单元识别值,几乎无法提供有效的损伤定量或者损伤定位信息。直接均值出现多个损伤误判的原因是因为少数次非损伤单元识别值较大导致相应的平均值亦处于较高水平。其次,一阶段概率均值虽然能有效过滤非损伤单元的损伤值,但其对于损伤单元的强抑制作用,导致了工况1的无识别结果和工况2单元3的零识别结果。相比之下,采用两阶段损伤概率均值则没有出现损伤误判,且损伤单元识别值与假设工况高度吻合。结构非损伤单元的损伤误判很大程度上是由于噪声污染导致了目标函数局部极小值点增多,继而降低了智能算法识别到全局最优解的概率。本文提出的概率均值计算方法,考虑了非损伤单元识别值小、显著为零概率大的先验信息,对多次识别解进行筛选,有效提高了结构损伤识别的精度。简支梁的结构损伤识别结果表明,损伤概率均值可以提高结构损伤识别精度,且

本文方法在高噪声环境下的结构损伤识别领域具有一定应用前景。

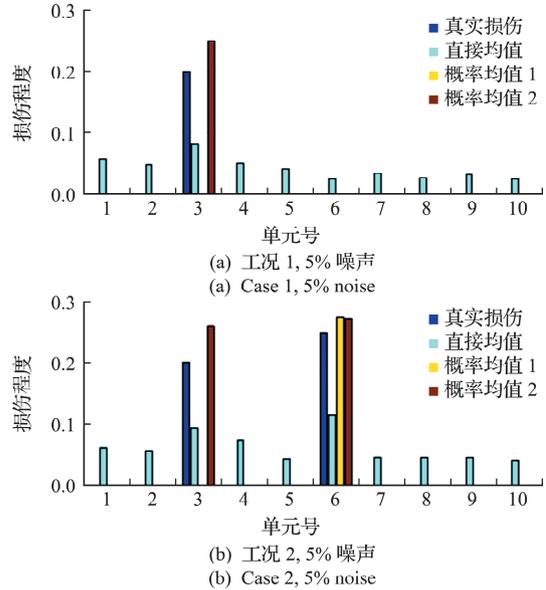


图6 不同均值下的结构损伤识别结果  
Fig. 6 SDD results based on different mean tools

### 5 两跨连续梁的结构损伤识别

为了进一步说明本文方法对于不同模型的有效性,同时验证损伤概率均值对于不同策略 PSO 算法的适用性,本节采用两跨连续梁模型进行进一步的损伤识别研究。其中,不同策略 PSO 算法包括 PSOLw、PSORw 和 PSOAw,分别代表线性权重递减策略 PSO、惯性权重随机策略 PSO 和惯性权重自适应策略 PSO<sup>[6]</sup>。

该两跨连续梁有限元模型如图7所示,其物理和几何参数保持与上述简支梁一致。本节设置的结构损伤工况列入表2,包含单损伤、两损伤和多损伤工况,可以比较全面地衡量本文算法的有效性。考虑的噪声水平包括1%,3%和5%,分别添加到结构频率和振型中。混合 PSO 算法的参数设置保持和简支梁算例一致。

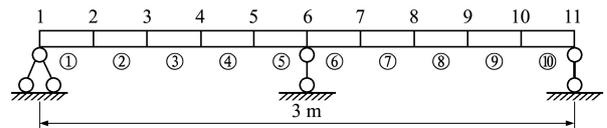


图7 两跨连续梁数值仿真模型  
Fig. 7 FE model of a two-span continuous beam structure

表2 损伤工况设置  
Tab. 2 Damage cases

工况	损伤程度@损伤单元	噪声水平
1	20% @ 3	0%, 1%, 3%, 5%
2	20% @ 3, 25% @ 6	0%, 1%, 3%, 5%
3	20% @ 3, 25% @ 8	0%, 1%, 3%, 5%
4	20% @ 3, 25% @ 6, 20% @ 8	0%, 1%, 3%, 5%

### 5.1 不同均值计算的结构损伤识别结果比较

为了进一步说明本文方法两阶段概率均值对结构损伤识别解精度的提升效果,本节主要研究最大噪声水平下4种工况分别采用直接均值法、一阶段损伤概率均值法和两阶段损伤概率均值法的结构损伤识别,最终得到基于PSOLw的结构损伤识别结果如图8所示。

可以看出,采用直接均值法对200次识别结果直接求均值得到的损伤识别结果在非损伤单元处出现了严重误判。虽然真实损伤单元的识别值大于非损伤单元,但两者大小差异不大,难以有效指导实际结构状态评估。相对而言,采用本文提出的

损伤概率均值计算方法可以有效保留真实损伤单元识别值而抑制非损伤单元识别值,得到的损伤识别结果与假设损伤基本接近,且适用于不同损伤工况的应用。对比一阶段概率均值和两阶段概率均值可以进一步发现,采用两阶段概率均值得到的结构损伤识别结果精度相比于一阶段概率均值具有一定改善。结合本节及4.3节的内容,可以看出本文提出的损伤概率均值计算可以有效提高结构损伤识别精度,且两阶段损伤概率均值效果更优。

### 5.2 不同工况结构损伤识别结果

两跨连续梁不同工况的结构损伤识别结果如图9所示,其中临界概率值和前一个有限元模型保

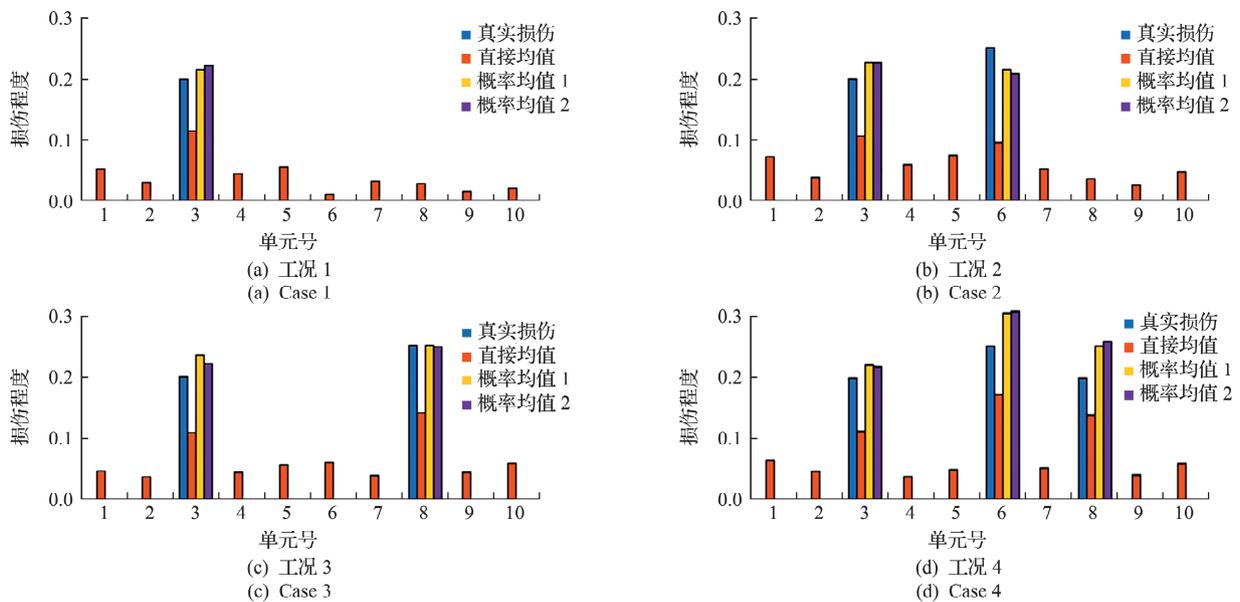


图8 基于不同均值计算的4种工况结构损伤识别结果  
Fig. 8 SDD of 4 cases based on different mean tools

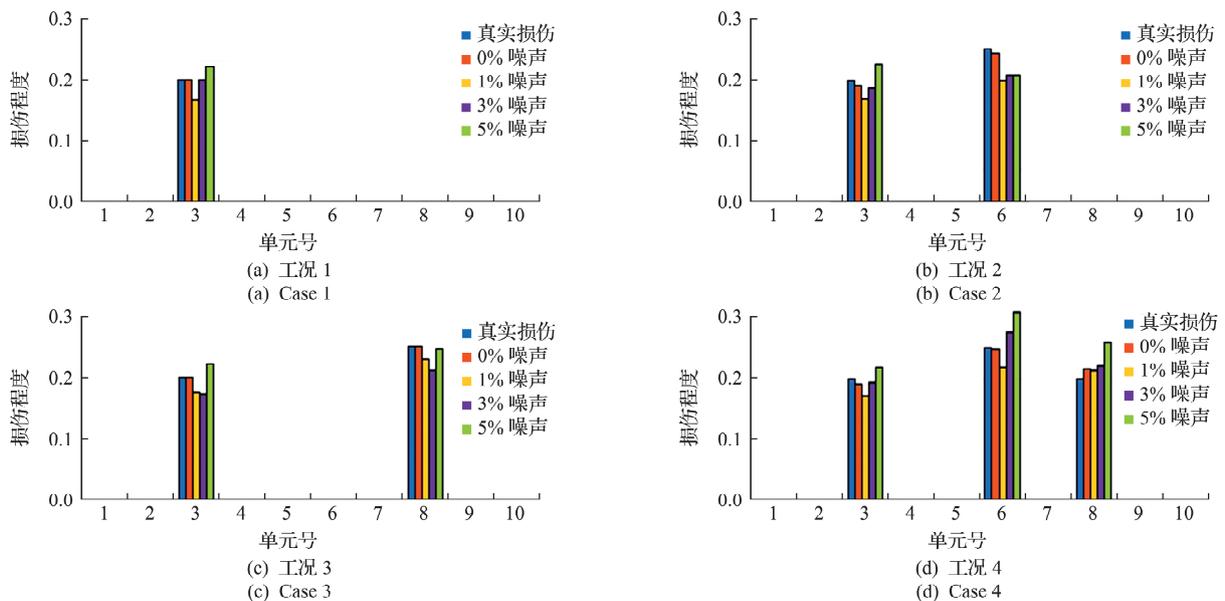


图9 基于PSOLw的两跨连续梁的结构损伤识别结果  
Fig. 9 SDD results of the two-span continuous beam structure based on PSOLw algorithm

持一致,即  $p_{c1}=0.6$  和  $p_{c2}=0.5$ 。可以看出,在不同噪声水平下,不同工况的结构损伤识别结果与假设工况基本一致。这说明本文算法对于两类不同结构均能实现准确的结构损伤识别,具有较好的适用性。同时,也说明本文取  $p_{c1}=0.6$  和  $p_{c2}=0.5$  可以满足不同结构精确的结构损伤识别。

在无噪声时,结构损伤识别结果精度最高,此时未出现非损伤单元误判,且损伤处的识别值与假设损伤值之间的误差很小。随着噪声的增加,4种工况的结构损伤识别结果均出现一定的精度下降。其中,工况1、工况3和工况4的识别结果随着噪声水平的提高而成递增趋势,但该误判类型属于假阳性,是在准确定位损伤情况下的损伤程度误判,对结构而言是偏安全的结果。工况2的识别结果则随着噪声水平的变化出现小范围波动,但对于损伤定位和定量精度影响较小。综上所述,本文算法适用于两跨连续梁不同损伤工况的结构损伤识别,且具有较好的鲁棒性。

### 5.3 损伤概率均值的适用性研究

为了进一步研究本文提出的损伤概率均值计算方法对于不同智能算法的适用性,采取 PSOLw、PSORw 和 PSOAw 对工况4进行结构损伤识别,得到识别结果列入表3。

表3 基于不同 PSO 算法的工况4结构损伤识别结果

Tab.3 SDD results for case 4 based different PSO

噪声水平	识别结果		
	PSOLw	PSORw	PSOAw
0%	19.12%@3	19.17%@3	18.79%@3
	24.76%@6	24.56%@6	24.59%@6
	21.42%@8	21.36%@8	21.33%@8
1%	17.08%@3	18.25%@3	17.60%@3
	21.85%@6	22.50%@6	22.40%@6
	21.14%@8	19.80%@8	20.57%@8
3%	19.32%@3	19.81%@3	19.74%@3
	27.69%@6	28.05%@6	27.96%@6
	22.04%@8	21.97%@8	22.64%@8
5%	21.72%@3	22.28%@3	20.63%@3
	30.82%@6	30.16%@6	30.72%@6
	25.87%@8	23.89%@8	23.12%@8

由表3可知,对不同智能算法的多次识别结果进行损伤概率均值计算,均能得到精确的结构损伤

识别结果,且避免了非损伤单元误判的发生。同时可以看出,三种不同的 PSO 算法在识别精度上几乎一致,这说明损伤概率均值能够适用于不同智能算法,精确识别不同噪声水平下的结构损伤。

## 6 结论

针对模型修正方法中存在的噪声影响下识别精度不高的问题,本文提出一种混合 PSO 算法和损伤概率均值的两阶段梁式结构损伤识别方法。其中,损伤概率均值利用非损伤单元识别值小和显著为零概率大的特征,有效提取多次识别结果的主要损伤,提高了结构损伤识别的精度。通过对简支梁和两跨连续梁的损伤工况试验和研究,验证了本文提出的结构损伤识别方法的有效性。具体结论如下。

(1) 损伤概率均值相比于传统的多次识别直接均值,能够有效提取主要的结构损伤信息,提高结构损伤识别精度。同时,两阶段损伤概率均值识别效果优于一阶段损伤概率均值识别效果。

(2) 对多次识别结果计算损伤概率均值时,可以取  $p_{c1}=0.6$  和  $p_{c2}=0.5$ 。第一阶段取值较高可以滤除较多的非损伤单元识别值,而第二阶段取值较低可以更好地保留损伤单元识别值。

(3) 本文方法能够适用于不同结构、不同噪声水平和不同工况的结构损伤识别,具有较高的识别精度。同时,损伤概率均值适用于不同权重更新策略的粒子群算法,具有广阔的应用前景。

## 参考文献(References):

- [1] 单德山,罗凌峰,李乔.桥梁健康监测2020年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(S1):129-134. (SHAN De-shan, LUO Ling-feng, LI Qiao. Research progress of bridge health monitoring in 2020[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(S1):129-134. (in Chinese))
- [2] An Y H, Chatzi E, Sim S H, et al. Recent progress and future trends on damage identification methods for bridge structures [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2019, 26(10). DOI:10.1002/stc.2416.
- [3] 杜彦良,孙宝臣,吴智深,等.关于建立健全交通基础设施长寿命安全保障体系的战略思考[J].中国工程科学,2017,19(6):1-5. (DU Yan-liang, SUN Bao-chen, WU Zhi-shen, et al. Strategies for establis-

- hing and perfecting long-life security strategy of transportation infrastructure[J]. *Strategic Study of CAE*, 2017, **19**(6):1-5. (in Chinese))
- [4] Worden K, Farrar C R, Manson G, et al. The fundamental axioms of structural health monitoring[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, **463**(2082):1639-1664.
- [5] Yu L Z, Nie Z H, Ma H W. Structural damage detection with automatic feature-extraction through deep learning[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, **32**(12):1025-1046.
- [6] Chen Z P, Yu L. A new structural damage detection strategy of hybrid PSO with Monte Carlo simulations and experimental verifications[J]. *Measurement*, 2018, **122**:658-669.
- [7] 李成, 余岭. 基于人工鱼群算法的结构模型修正与损伤检测[J]. *振动与冲击*, 2014, **33**(2):112-116. (LI Cheng, YU Ling. Structural model updating and damage detection based on artificial fish swarm algorithm[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, **33**(2):112-116. (in Chinese))
- [8] Pan C D, Yu L, Chen Z P, et al. A hybrid self-adaptive firefly-nelder-mead algorithm for structural damage detection[J]. *Smart Structures and Systems*, 2016, **17**(6):957-980.
- [9] 陈承滨, 余岭, 潘楚东, 等. 基于蚁狮优化算法与迹稀疏正则化的结构损伤识别[J]. *振动与冲击*, 2019, **38**(16):71-76, 99. (CHEN Cheng-bin, YU Ling, PAN Chu-dong, et al. Structural damage detection based on an ant lion optimizer algorithm and trace sparse regularization[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, **38**(16):71-76, 99. (in Chinese))
- [10] 丁政豪, 吕中荣, 刘济科. 基于多种搜索策略的人工蜂群算法的结构损伤识别[J]. *计算力学学报*, 2016, **33**(5):791-795. (DING Zheng-hao, LÜ Zhong-rong, LIU Ji-ke. Structural damage identification based on ABC algorithm with variable search strategy[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2016, **33**(5):791-795. (in Chinese))
- [11] 雷勇志, 黄民水, 顾箭峰, 等. 环境温度影响下基于支持向量机与强化飞蛾扑火优化算法的结构稀疏损伤识别[J]. *计算力学学报*, 2022, **39**(2):170-177. (LEI Yong-zhi, HUANG Min-shui, GU Jian-feng, et al. Structural sparse damage identification considering ambient temperature variations based on support vector machine and enhanced moth-flame optimization[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, **39**(2):170-177. (in Chinese))
- [12] 万祖勇, 朱宏平, 余岭. 基于改进 PSO 算法的结构损伤检测[J]. *工程力学*, 2006, **23**(S1):73-78, 116. (WAN Zu-yong, ZHU Hong-ping, YU Ling. Structural damage detection based on an improved PSO algorithm[J]. *Engineering Mechanics*, 2006, **23**(S1):73-78, 116. (in Chinese))
- [13] Vakil Baghmisheh M T, Peimani M, Sadeghi M H, et al. A hybrid particle Swarm-Nelder-Mead optimization method for crack detection in cantilever beams[J]. *Applied Soft Computing*, 2012, **12**(8):2217-2226.
- [14] 黄民水, 罗金, 雷勇志. 基于改进 MH 算法的结构损伤识别[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, **50**(8):136-141. (HUANG Min-shui, LUO Jin, LEI Yong-zhi. Damage identification based on improved MH algorithm[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, **50**(8):136-141. (in Chinese))
- [15] 郭惠勇, 王磊, 李正良. 基于改进 PSO 算法的两阶段损伤识别方法[J]. *西南交通大学学报*, 2011, **46**(6):926-932. (GUO Hui-yong, WANG Lei, LI Zheng-liang. Two-stage damage detection method based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2011, **46**(6):926-932. (in Chinese))
- [16] Xu M Q, Wang S Q, Jiang Y F. Iterative two-stage approach for identifying structural damage by combining the modal strain energy decomposition method with the multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2019, **26**(2):e2301.
- [17] 孙健敏, 李丹, 颜王吉. 基于模态参数灵敏度的损伤方程组求解正则化方法研究[J]. *计算力学学报*, 2022, **39**(1):70-79. (SUN Jian-min, LI Dan, YAN Wang-ji. Regularization methods for solving modal sensitivity-based damage equations: A comparative study[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, **39**(1):70-79. (in Chinese))
- [18] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [A]. *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*[C]. 1995.

## A two-stage structural damage detection method for beam-like structures based on hybrid PSO and probabilistic mean of damage vector factor

CHEN Ze-peng<sup>\*1,2</sup>, WANG Wei-long<sup>1</sup>, LIU Qi-tian<sup>1</sup>, WU Jing-tao<sup>1</sup>

(1. School of Transportation and Civil Engineering and Architecture, Foshan University, Foshan 528225, China;

2. MOE Key Laboratory of Disaster Forecast and Control in Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632)

**Abstract:** Due to the random parameters of algorithms and measurement noise, structural damage detection methods based on swarm intelligence algorithms are prone to large errors in single identification and large fluctuation in multiple identification. Therefore, this paper proposes a two-stage a damage detection method for beam structures based on a hybrid PSO algorithm and the probabilistic mean of a damage vector factor. An effective damage principle is defined including an elemental allowable damage value  $\alpha_{cr}$  and two critical probability parameters  $p_{c1}$  and  $p_{c2}$ . In the first stage, multiple SDD results based on the hybrid PSO are divided into several batches and the corresponding probabilistic means of the damage vector factor are calculated as the first stage probabilistic means. Then, a new probabilistic means of the damage vector factor is determined as the final SDD results based on the results in the first stage. The proposed method can effectively improve the accuracy of structural damage detection under the influence of high noise. Numerical studies on damage cases of a simply-supported beam and a two-span continuous beam demonstrate the effectiveness and efficiency of the proposed method.

**Key words:** structural damage detection; hybrid PSO algorithm; effective damage principle; probabilistic mean of damage vector factor; beam-like structures

(上接第 518 页)

## Static compression performance analysis of simple cubic lattice structure

YANG Xiao-feng, SHENG Ya-peng, SU Yu-feng\*

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to improve the flat pressure performance of simple cubic (SC) lattice structures, a periodic boundary constraint equation is established for an SC unit cell in ABAQUS, and the topological optimization design of an SC unit cell having a periodic boundary condition is carried out by ESO algorithm. Subsequently, the equivalent elastic modulus of optimized SC unit cell is determined, and it is found that the equivalent elastic modulus of the optimized SC unit cell is significantly higher than that of a traditional SC unit cell, and the equivalent compression modulus of the optimized unit cell could be increased by 27.14% by removing the material from the outside, and the equivalent shear modulus of the unit cell could be increased by 46.18%. Finally, the optimized SC unit cell is extended from the unit cell level to the macroscopic structure, and the static flat pressure performance of the three types of SC lattice structures is explored. The results show that: the topology optimization method combining periodic boundary conditions and ESO can significantly improve the resistance of SC structures under static compression. Compared with the traditional SC lattice structure, the resistance of the optimized SC lattice structure is increased by more than 20%.

**Key words:** lattice structure; periodic boundary conditions; ESO algorithm; topology optimization; compression