

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.06.017



# 改进粒子群算法的两阶段梁式结构损伤识别

牛维枫<sup>a</sup>, 曹晖<sup>a,b</sup>

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:**针对实际工程监测时损伤识别误差大的问题,提出一种基于改进粒子群算法的两阶段识别方案。第1阶段利用D-S证据理论融合算法进行损伤定位;第2阶段利用改进的粒子群算法,对定位结果进行修正,同时准确定量损伤。仿真算例和实验分析结果表明:由于第1阶段损伤定位减少了可能损伤单元的数量,第2阶段基于改进粒子群算法的搜索范围减小,能更准确地识别多损伤和小损伤的位置和程度,且抗噪性能良好。

**关键词:**损伤识别;噪声;信息融合;粒子群算法

**中图分类号:** TB123      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2018)06-0123-08

## Two-stage beam structure damage detection based on improved particle swarm optimization

Niu Weifeng<sup>a</sup>, Cao Hui<sup>a,b</sup>

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** Considering large errors of damage identification during actual monitoring process, a two-stage detection method based on the improved particle swarm optimization(PSO) algorithm was proposed. The algorithm is then used to detect the structural damage locations preliminarily, and to validate the locating results and determine the damage extents precisely. The comparisons between the simulation and experiments show that the first phase of damage identification reduced the number of suspected damage locations, making the search domain of the second stage based on the improved particle swarm optimization algorithm significantly reduced. The presented two-stage recognition method can identify the damage locations and detect the damage extent precisely for multi-damage and small damage, with considerable capacity in anti-noise.

**Keywords:** damage identification; noise; information fusion; particle swarm optimization

为确保大型结构的安全性和耐久性,有必要进行健康监测。健康监测的基础为结构的损伤检测<sup>[1]</sup>。近年来,基于频域、时域的损伤识别方法得到了大力发展。李世龙等<sup>[2]</sup>针对复杂结构损伤识别时多自由度无法测量的问题,提出了一种利用已测量的模态振型和频率来表示未测量部分的模态扩阶方

法。Gillich等<sup>[3]</sup>对如何从振动信号中准确地识别出结构的固有频率进行了试验研究和有限元分析,提出了估计频率范围、定位相关信号段、以信号分量的功率谱来识别精确频率的方法。Wei等<sup>[4]</sup>对薄板的损伤识别进行了研究,改进了应用传统模态应变能改变率指标识别的方法,以削弱损伤单元所带来的

收稿日期:2017-05-15

作者简介:牛维枫(1990-),男,主要从事结构损伤识别研究,E-mail:weiree@foxmail.com。

曹晖(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:caohui@cqu.edu.cn。

Received: 2017-05-15

Author brief: Niu Weifeng (1990-), main interest: structural damage identification, E-mail: weiree@foxmail.com.

Cao Hui (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: caohui@cqu.edu.cn.

“邻近效应”，减少误判。粒子群等群体智能算法由于其收敛速度快、参数设置简单等优点也被广泛应用于损伤识别领域。欧阳秋平等<sup>[5]</sup>将实数编码克隆选择与粒子群算法结合，优化了基于模态频率的损伤指标，用于水工结构的损伤诊断。巩文龙等<sup>[6]</sup>基于量子粒子群优化算法，提出了一种以广义柔度矩阵构造的目标函数，解决了柔度矩阵损伤定量误差大、不稳定的缺陷。郭惠勇等<sup>[7]</sup>对粒子群算法提出了粒子位置突变、最优记忆粒子微搜索等改进措施，以防止算法陷入局部最优解。但很多理论成果不能在实际工程中得到应用，因为在实际监测过程中，结构振动响应实测的不确定性、随机噪声的影响、所提取的模态参数的不完备性以及粒子群算法的“早熟问题”等都是制约将识别理论应用于实际工程的难题。

笔者通过对粒子群算法(PSO)的改进，提出一种两阶段的损伤识别方案。第 1 阶段利用 D-S 证据理论融合算法进行损伤定位；第 2 阶段利用改进的粒子群算法，对定位结果进行修正，同时准确定量损伤。

## 1 两阶段损伤识别方案

1) 针对结构的振动信号，利用随机子空间法提取结构损伤前后的模态平动位移和自振频率；

2) 将提取的平动位移利用静力凝聚法<sup>[8]</sup>进行重构，得到相应的转角位移；

3) 由自振频率和包含平动与转角信息的振型计算单元损伤变量以及单元刚度折减系数，使用 D-S 证据理论进行融合，从而进行第 1 阶段损伤定位；

4) 利用改进的 PSO 算法，进行第 2 阶段损伤识别。

## 2 第 1 阶段损伤定位

### 2.1 模态参数识别

采用基于协方差驱动的随机子空间法<sup>[9-12]</sup>进行结构模态参数识别，以结构离散状态空间方程模型为基础，对由输出协方差序列组成的块 Toeplitz 矩阵进行奇异值分解(SVD)，从而获得可观矩阵和可控矩阵，然后由此得出系统矩阵，最后对系统模态参数进行识别。

在得到系统矩阵之后，对于离散的时间系统模型进行特征值分解

$$\mathbf{A} = \mathbf{\Psi}\mathbf{\Lambda}\mathbf{\Psi}^{-1} \quad (1)$$

式中： $\mathbf{A} = \text{diag}[\mu_i]$  是由离散时间的复特征值  $\mu_i$  组成的对角  $n$  阶矩阵； $\mathbf{\Psi}$  矩阵由特征向量组成； $\mathbf{A}$  为系

统的状态矩阵，其特征值与系统特征值的关系为

$$\lambda_i = \frac{\ln \mu_i}{\Delta t} \quad (2)$$

式中： $\lambda_i$  是系统特征值； $\Delta t$  是采样时间间隔。

系统固有频率  $\omega_i$ 、系统模态阻尼比  $\xi_i$  的关系可以表示为

$$\lambda_i, \bar{\lambda}_i = -\xi_i \omega_i \pm j \omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2} \quad (3)$$

式中： $j$  是虚数单位； $\lambda_i$  与  $\bar{\lambda}_i$  互为共轭。

则结构第  $i$  阶的模态参数：振型  $\Phi_i$ 、阻尼比  $\xi_i$  以及固有频率  $f_i$  分别表示为

$$\Phi_i = C \mathbf{\Psi}_i \xi_i = -\frac{\lambda_i + \bar{\lambda}_i}{2\sqrt{\lambda_i \bar{\lambda}_i}} f_i = \frac{\sqrt{|\lambda_i|}}{2\pi} \quad (4)$$

### 2.2 损伤初步定位

应用 D-S 证据理论<sup>[13-14]</sup>进行损伤定位，设  $D$  为结构损伤识别推理框架，函数  $m: 2^D \rightarrow [0, 1]$ ，则满足

$$m(D) = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{A \subseteq D} m(A) = 1 \quad (6)$$

式中： $m$  为框架  $D$  上的基本概率； $A$  为  $m$  的焦点； $m(A)$  为损伤状态  $A$  的发生率。

结构损伤识别中，设有  $n$  个信息源，即有  $n$  个子损伤识别方法，共有  $k$  个结构单元，第  $i$  个信息源识别结构单元  $j$  发生损伤为  $A_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k$ )， $m(A_{ij})$  表示用信息源  $i$  进行识别，单元  $j$  发生损伤  $A_{ij}$  的概率值。

D-S 证据理论组合规则为对各个信息源检测的基本概率  $m(A_{ij})$  进行融合，证据理论组合规则为

$$m(A_j) = C^{-1} \sum_{\cap_{j=k} 1 \leq i \leq n} \prod m(A_{ij}) \quad (7)$$

$$C = 1 - \left| \sum_{\cap_{j=\emptyset} 1 \leq i \leq n} \prod m(A_{ij}) \right| = \left| \sum_{\cap_{j \neq \emptyset} 1 \leq i \leq n} \prod m(A_{ij}) \right| \quad (8)$$

笔者采用的损伤定位指标为单元损伤变量和单元刚度折减系数，则有

$$m(A_{1j}) = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^k D_j} \quad (9)$$

$$m(A_{2j}) = \frac{\Delta \alpha_j}{\sum_{j=1}^k \Delta \alpha_j} \quad (10)$$

式(9)中的  $D_j$  为曹永红等<sup>[15]</sup>改进刘晖等<sup>[16]</sup>提出的单元损伤变量

$$D_j = \frac{\text{EMSE}_j^d - \text{EMSE}_j^u}{|\text{EMSE}_j^d - \text{EMSE}_j^u| + \text{EMSE}_j^u} \quad (11)$$

式中： $\text{EMSE}_j^u = \sum_{i=1}^m \boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{K}_j \boldsymbol{\varphi}_i$ 、 $\text{EMSE}_j^d = \sum_{i=1}^m \tilde{\boldsymbol{\varphi}}_i^T \mathbf{K}_j \tilde{\boldsymbol{\varphi}}_i$ ，分

别为损伤前后的单元应变能;  $\mathbf{K}_j$  为整体坐标下  $j$  单元的刚度矩阵,  $\boldsymbol{\varphi}_i$  和  $\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_i$  分别为损伤前后的第  $i$  阶振型。

式(10)中的  $\Delta\alpha_j$  为单元刚度折减系数<sup>[17]</sup>, 假定结构在损伤时只引起刚度矩阵发生变化, 取值位于  $[0, 1]$  之间。

将式(9)、式(10)代入式(7)和式(8)可得

$$m(A_j) = C^{-1} \sum_{\cap j=k} m(A_{1j}) m(A_{2j}) \quad (12)$$

$$C = 1 - \left| \sum_{\cap j=\Phi} m(A_{1j}) m(A_{2j}) \right| = \left| \sum_{\cap j \neq \Phi} m(A_{1j}) m(A_{2j}) \right| \quad (13)$$

通过式(12)和式(13)可得信息融合后的概率, 数值越大, 代表单元损伤的可能性越大。

### 3 第 2 阶段损伤识别

利用 D-S 证据理论融合算法进行损伤定位后, 再应用改进的 PSO 算法进行精确识别。第 1 阶段识别出可能损伤的  $n$  个单元, 然后对这  $n$  个单元进行 2 次识别, 使得空间的搜索维数减少, 从而使 PSO 算法的收敛速度和准确度大幅提高。

#### 3.1 改进 PSO 算法

标准 PSO 算法<sup>[18]</sup>描述为

$$\begin{aligned} v_{id}^{t+1} &= \omega v_{id}^t + c_1 \cdot \text{rand}_1 \cdot (\text{pbest}_{id}^t - x_{id}^t) + \\ & c_2 \cdot \text{rand}_2 \cdot (\text{gbest}_{id}^t - x_{id}^t) \\ x_{id}^{t+1} &= x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $v_{id}^t$  和  $x_{id}^t$  为  $t$  时刻粒子  $i$  的速度和位置向量的  $d$  维分量;  $\text{pbest}_{id}^t$  和  $\text{gbest}_{id}^t$  则分别为个体极值和全局极值的  $d$  维分量;  $c_1$  和  $c_2$  是学习因子, 通常取 2;  $\text{rand}_1$  和  $\text{rand}_2$  为  $(0, 1)$  之间的随机数;  $\omega$  为惯性权重, 一般认为  $\omega$  较大有利于全局搜索、 $\omega$  较小有利于局部搜索。

3.1.1 改进 1 基本粒子群算法含有早熟的问题<sup>[19]</sup>, 可以通过惯性权重  $\omega$  来改变种群收敛速度, 惯性权重的取法一般有自适应法和线性递减法, 但是种群的搜索是一个复杂的非线性过程, 仅仅让  $\omega$  线性减少不能有助于全局搜索, 因此, 可以采用动态的调整算法。在群体搜索过程初期, 各个粒子的适应度值差异较大, 随着迭代的增加, 粒子群体会向精确性偏移, 适应度值偏差逐渐缩小。依据概率统计中标准差的概念, 利用收敛成熟度<sup>[20]</sup>来表示粒子群的聚散度。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((f_i - \bar{f}) / \Delta f)^2} \quad (15)$$

式中:  $N$  为粒子群规模;  $\bar{f}$  为当前所有粒子的平均

适应度值,  $\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i$ ;  $f_i$  为当前迭代次数的种群适应度值;  $\Delta f = \max_{1 \leq i \leq N} \{f_i - \bar{f}\}$  则表示当前和平均的最大差值。

在迭代的过程中, 利用式(15)计算粒子群体适应度的离散度, 并根据  $\sigma$  值调整  $\omega$ ,  $\sigma$  在  $(0, 1)$  之间, 所以为  $\sigma$  提前设定一个界限值 0.5, 如果  $\sigma$  低于 0.5, 可以认为收敛成熟度较低, 搜索可能会陷入局部最优, 此时应该赋予  $\omega$  较大的值来保持更广的搜索范围; 相反, 如果  $\sigma$  高于 0.5, 相应地赋予  $\omega$  较小的值来使得群体更快地收敛。利用式(16)来更新惯性权重。

$$\begin{aligned} \sigma < 0.5, \quad \omega' &= \sqrt{\omega_{\min} \left(1 - \frac{\omega_{\min}}{\omega_{\max}}\right) \left(\frac{T_{\max} - t}{T_{\max}}\right)^3} \\ \sigma \geq 0.5, \quad \omega' &= \left(\omega_{\min} \left(1 - \frac{\omega_{\min}}{\omega_{\max}}\right) \left(\frac{T_{\max} - t}{T_{\max}}\right)^3\right)^2 \end{aligned} \quad (16)$$

式中:  $\omega_{\max}$  和  $\omega_{\min}$  分别为惯性权重的最大值和最小值,  $\omega_{\max} = 0.9$ ,  $\omega_{\min} = 0.4$ ;  $T_{\max}$  为迭代总次数;  $t$  为当前迭代次数。

3.1.2 改进 2 在 PSO 算法的后期, 式(14)的后 2 项改变会很小, 意味粒子的位置变化很小, 由于在改进 1 方法中通过惯性权重对运行后期的速度进行了调整, 因此, 在改进 2 中对位置公式进行修正, 并对突变概率  $P_c$ <sup>[7]</sup>进行了改进。

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} + u_1 \cdot \text{rand}_3 \cdot \text{sign}(P_c - \text{rand}_4) \quad (17)$$

式中:  $u_1$  为粒子位置变化幅度;  $\text{rand}_3$  为  $(-1, 1)$  之间的随机数;  $\text{rand}_4$  为  $(0, 1)$  之间的随机数;  $P_c$  为突变概率, 突变概率根据迭代次数和运算情况进行调整: 如果迭代步数小于  $n$ , 突变概率为 0.01; 如果迭代步数大于  $n$ , 且相邻两代  $g_{\text{best}}$  没有明显改进时, 突变概率增大为 0.1, 否则突变概率不变, 粒子继续寻优;  $\text{sign}()$  为符号函数。

这样改进后, 种群粒子在搜索过程中有一定的突变性能, 将在一定程度上防止粒子群陷入局部最优而无法跳出的情况。

#### 3.2 改进目标函数

PSO 算法需要构建目标函数。将频率、振型和柔度 3 种数据结合起来, 对文献[19]中的目标函数(见式(18))进行改进, 利用模态置信准则 MAC 来表示损伤前后的柔度矩阵和振型矩阵的相关性。

$$f(x) = \sum_{i=1}^s \left( (1 - \text{MAC}(\boldsymbol{\Phi}_i^c, \boldsymbol{\Phi}_i^d)) + \left| \frac{\omega_i^d - \omega_i^c}{\omega_i^d} \right| \right) \quad (18)$$

MAC 准则对于损伤的敏感度与损坏性质有关。

如果损伤是分布式的,如混凝土大面积开裂,振型变化不大;对于局部损伤,MAC 值又可能大幅降低。另一方面,由文献[22]推导出的由振型和频率之间的表达式可知,频率平方的差异也应该以规范化的方式反映出来。考虑到 MAC 值在 0 和 1 之间,当测量频率和计算频率之间相关性很高时,其值应接近于 1,故对模态置信度表达式进行修正,弥补单独使用振型时灵敏度不高的缺点,也避免了目标函数值大部分由固有频率左右的问题。修正系数为

$$\lambda = 1 + \left| \frac{(\omega_i^c)^2 - (\omega_i^d)^2}{(\omega_i^c)^2 + (\omega_i^d)^2} \right| \quad (19)$$

将柔度模态置信度和振型模态置信度结合起来建立目标函数。

$$f = \left( 1 - \prod_{j=1}^s \frac{|F_i^{dT} \cdot F_i^c| \times 2}{|F_i^{dT} \cdot F_i^{dT}| + |F_i^c \cdot F_i^c|} \right) + \left( 1 - \prod_{j=1}^s \frac{|\Phi_i^{dT} \cdot \Phi_i^c|^2}{\frac{|\Phi_i^{dT} \cdot \Phi_i^{dT}| \cdot |\Phi_i^c \cdot \Phi_i^c|}{\lambda}} \right) \quad (20)$$

式中:柔度矩阵  $[F] = \sum_{j=1}^s \frac{1}{\omega_j^2} \{\Phi_j\} \{\Phi_j\}^T$ ,  $(\omega_i^d, \Phi_i^d)$  为损伤状况下的频率和振型测量值,  $(\omega_i^c, \Phi_i^c)$  为损伤状况下的频率和振型计算值;  $s$  为结构模态阶数。

## 4 简支梁仿真算例

### 4.1 有限元模型

在 ANSYS 中建立如图 1 所示的简支梁的有限元模型,梁截面为  $0.25 \text{ m} \times 0.20 \text{ m}$ ,跨度  $6 \text{ m}$ ,弹性模量  $E=32 \text{ GPa}$ ,密度  $R=2500 \text{ kg/m}^3$ 。将梁沿跨度划分成等长 12 个单元,从左至右编号,单位长度为  $0.5 \text{ m}$ 。

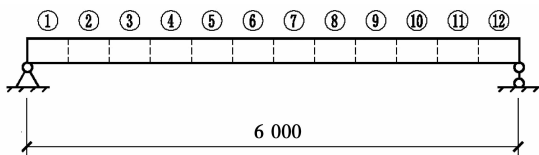


图 1 简支梁有限元模型

Fig. 1 Finite element model of simply supported beam

### 4.2 数值模拟

1)对损伤工况进行假定,并以折减单元刚度的形式对损伤进行模拟;

2)在简支梁的第 4 节点处施加白噪声,并提取损伤前后节点的加速度响应信号;

3)在加速度响应信号中加入不同程度的两种白噪声,信噪比为  $30 \text{ dB}$  和  $40 \text{ dB}$ <sup>[21]</sup>;

4)依照两阶段损伤识别方案的步骤进行损伤

识别。

### 4.3 结果及分析

假设一种多损伤工况:单元 4、7、9 发生损伤,损伤程度分别为  $10\%$ 、 $30\%$  和  $50\%$ 。

采用 PSO 算法时,种群大小为 1 000,当适应度值低于  $10^{-4}$  时停止迭代,位置  $x$  的范围限定在  $[0, 0.9]$ 。

利用随机子空间法提取模态信息,限于篇幅,仅给出完好状态和无噪声水平下该损伤工况的振型和频率,如表 1、表 2 所示。

表 1 完好工况下模态信息

Table 1 The modal information of the normal operating condition

节 点	1 阶(9.012 9 Hz)		2 阶(36.053 2 Hz)		3 阶(81.136 6 Hz)	
	平动位移	转角位移	平动位移	转角位移	平动位移	转角位移
1	0.000 0	-0.525 5	0.000 0	1.041 6	0.0000	1.5552
2	-0.259 7	-0.507 3	0.497 5	0.901 6	0.701 6	1.099 1
3	-0.501 4	-0.454 1	0.861 2	0.519 2	0.991 6	-0.001 8
4	-0.708 6	-0.370 0	0.993 2	-0.003 7	0.699 1	-1.107 0
5	-0.867 3	-0.260 9	0.857 9	-0.524 1	-0.007 0	-1.562 1
6	-0.966 6	-0.134 2	0.491 6	-0.910 0	-0.710 2	-1.100 2
7	-1.000 0	0.001 2	-0.009 9	-1.043 2	-1.000 0	0.004 8
8	-0.965 5	0.136 2	-0.505 0	-0.896 9	-0.705 3	1.110 6
9	-0.865 4	0.261 9	-0.868 3	-0.519 2	0.002 1	1.565 8
10	-0.706 5	0.370 0	-1.000 0	0.003 7	0.707 8	1.105 1
11	-0.499 5	0.453 0	-0.865 0	0.524 1	0.999 6	-0.001 4
12	-0.258 6	0.505 2	-0.499 1	0.905 2	0.706 5	-1.107 6
13	0.000 0	0.523 1	0.000 0	1.044 6	0.000 0	-1.565 6

表 2 损伤工况下模态信息(无噪声)

Table 2 The modal information of the damage condition (without noise)

节 点	1 阶(8.332 9 Hz)		2 阶(33.633 4 Hz)		3 阶(77.885 8 Hz)	
	平动位移	转角位移	平动位移	转角位移	平动位移	转角位移
1	0.000 0	-0.498 2	0.000 0	0.997 5	0.000 0	1.436 5
2	-0.246 3	-0.481 7	0.477 9	0.872 3	0.650 6	1.030 8
3	-0.476 9	-0.436 1	0.837 0	0.535 0	0.935 0	0.050 1
4	-0.678 4	-0.366 5	0.988 3	0.050 0	0.692 2	-0.981 8
5	-0.839 0	-0.270 8	0.881 3	-0.468 9	0.042 7	-1.476 6
6	-0.947 4	-0.164 5	0.540 7	-0.859 9	-0.650 4	-1.167 4
7	-1.000 0	-0.037 4	0.058 5	-1.028 1	-1.000 0	-0.109 8
8	-0.982 8	0.101 7	-0.450 4	-0.974 2	-0.726 0	1.153 1
9	-0.898 1	0.241 9	-0.861 6	-0.596 2	0.021 3	1.624 8
10	-0.739 7	0.389 7	-1.000 0	0.061 3	0.710 6	0.967 1

续表 2

节 点	1 阶(8.332 9 Hz)		2 阶(33.633 4 Hz)		3 阶(77.885 8 Hz)	
	平动位移	转角位移	平动位移	转角位移	平动位移	转角位移
11	-0.517 7	0.482 1	-0.824 5	0.574 0	0.918 8	-0.108 2
12	-0.266 4	0.521 3	-0.465 3	0.850 5	0.632 7	-1.001 8
13	0.000 0	0.538 6	0.000 0	0.970 8	0.000 0	-1.397 3

表 1 和表 2 中的振型是归一化处理后的结果。由表 1 和表 2 中模态参数计算  $D_j$  和  $\Delta\alpha_j$ , 融合后利用 PSO 分步识别结果如图 2 所示。

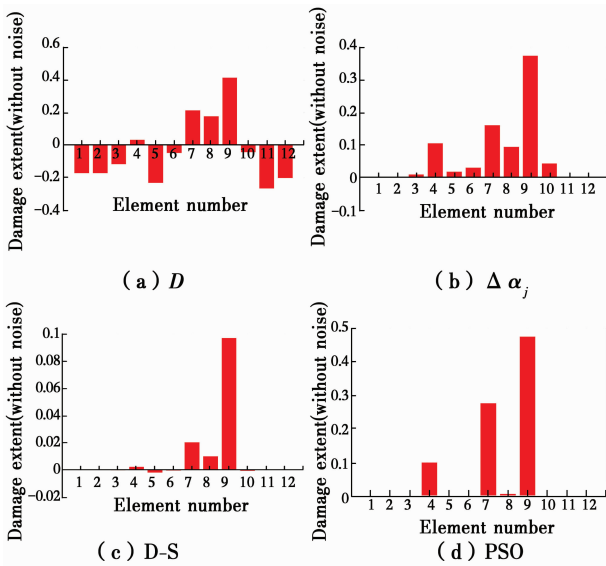


图 2 无噪声水平下损伤识别结果

Fig. 2 Damage identification result without noise

限于篇幅,后面的识别结果直接给出融合后的概率图和 PSO 定量图。

从图 2~图 4 中可以看出,在多损伤工况下,考虑不同噪声水平的影响,第 1 阶段使用 D-S 证据理论来进行损伤定位时,可以粗略地识别出损伤可能发生的位置,而且损伤指标为较大正值的 3 个单元,即为结构损伤的单元。但是,在损伤程度较小的 4 单元处,可能会出现漏判,在损伤部位邻近的 8 单元处,容易出现误判,因此,需要进行进一步的精确识别。采用改进 PSO 算法,选取 4、7、8、9 作为需要二次检测的单元,从结果可以看出,在不同噪声水平的影响下,可以准确识别出单元损伤的位置和程度。

为了进行比较,在第 2 阶段识别过程中,将分别使用 3 种算法:1)标准 PSO 算法和目标函数(式(18));2)改进 PSO 算法和目标函数(式(18));3)改进 PSO 算法和改进目标函数(式(20))。每种算法运行 10 次,计算结果见表 3。从表 3 可见,标准 PSO 算法可以基本识别出损伤位置及损伤程度,但对于小损伤则误差较大;对 PSO 算法进行改进后,

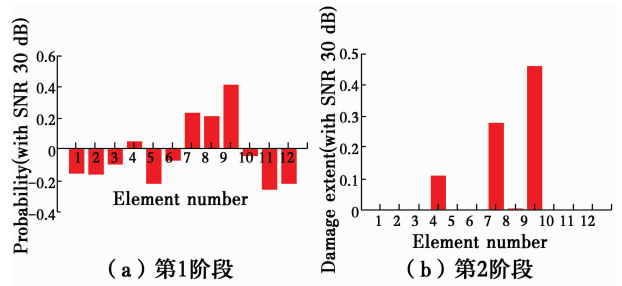


图 3 30 dB 噪声水平下损伤识别结果

Fig. 3 Damage identification result with SNR 30 dB

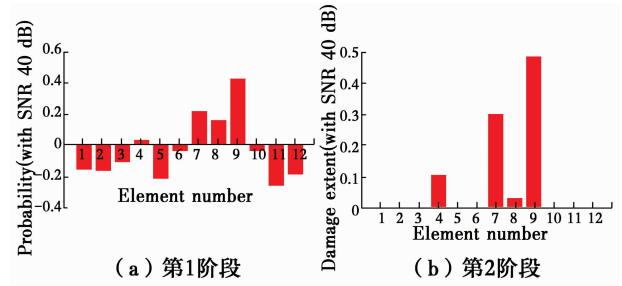


图 4 40 dB 噪声水平下损伤识别结果

Fig. 4 Damage identification result with SNR 40 dB

识别精度有所提高,平均迭代次数有所降低,但在 8 单元处出现了误判;采用改进 PSO 算法和新目标函数时,损伤程度的识别值与真实值误差较小,且迭代次数明显降低。

表 3 3 种算法平均计算结果

Table 3 Average calculation results of three kinds of method

噪声水平	算法	各单元损伤程度				迭代次数
		4	7	8	9	
无噪声	1)	0.192 3	0.290 5	0.048 4	0.399 6	99.4
	2)	0.117 8	0.274 0	0.115 9	0.460 8	85.2
	3)	0.099 6	0.276 0	0.005 7	0.474 9	45.2
信噪比 30 dB	1)	0.253 0	0.283 4	0.044 0	0.358 1	175.0
	2)	0.136 7	0.271 2	0.186 3	0.416 9	91.4
	3)	0.108 4	0.277 5	0.003 0	0.460 0	44.0
信噪比 40 dB	1)	0.239 8	0.304 9	0.112 8	0.379 1	162.6
	2)	0.138 9	0.313 1	0.094 7	0.436 4	79.4
	3)	0.104 0	0.302 0	0.029 1	0.490 0	46.5

## 5 钢筋混凝土梁实验

### 5.1 相关信息

采用文献[23]中的简支梁进行损伤识别验证。梁截面尺寸为 210 mm×190 mm,梁的计算跨度为 4.5 m,受拉区和受压区分别配 3Φ12(HRB335)钢筋和 2Φ12(HRB335)钢筋,箍筋配 Φ8 @ 225(HPB235)。梁的保护层厚度为 20 mm。梁顶均布

加速度传感器,见图 5。

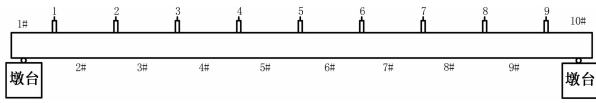


图 5 实验梁加速度传感器布置图

Fig. 5 The layout of acceleration sensors on a test beam

实验利用人工切槽的方式对梁进行损伤模拟,槽的尺寸为 20 mm×100 mm×210 mm。3 处开槽的位置依次为 3#、6#、8#,使用激震锤敲击梁体,记录每次开槽后的振动信号。开槽后的单元刚度折减量为 11.55%。

### 5.2 结果及分析

由于现场环境影响嘈杂,需要在获取的信号中提取信噪比较高的信号用于结构的损伤识别,采用基于多源信息融合的概率方法和改进 PSO 算法的两阶段损伤识别方法对该简支梁进行损伤定位,识别结果如图 6~图 8 所示。

1) 工况 1(3 单元损伤),识别结果见图 6。

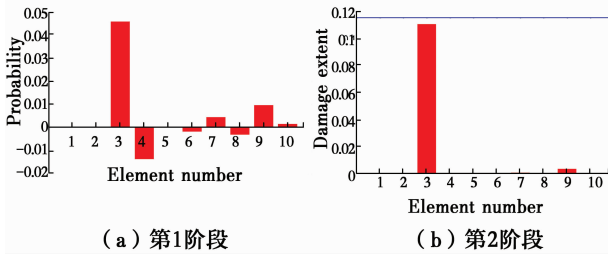


图 6 损伤识别结果(工况 1)

Fig. 6 Damage identification result(Condition 1)

2) 工况 2(3 和 6 单元损伤),识别结果见图 7。

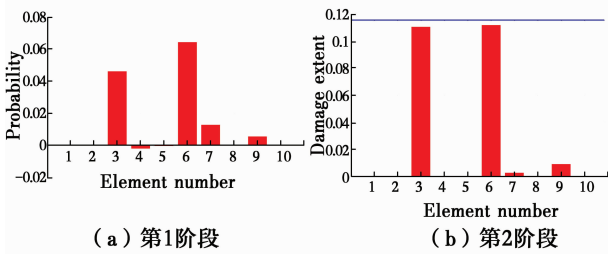


图 7 损伤识别结果(工况 2)

Fig. 7 Damage identification result(Condition 2)

3) 工况 3(3、6 和 8 单元损伤),识别结果见图 8。

从图 6~图 8 可以看出,基于多源信息融合的概率方法和改进 PSO 算法的两阶段识别方法能够比较准确地定位出损伤单元;在多损伤的情况下,对于损伤程度的确定也较为准确。

同样将上述 3 种算法的识别结果进行比较,见表 4。标准 PSO 算法识别精度仍然不高;改进 PSO 算法识别效果有一定程度的提高,但与真实值还有

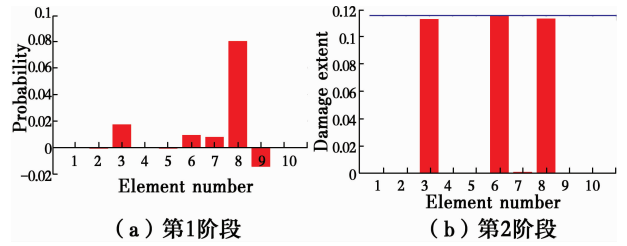


图 8 损伤识别结果(工况 3)

Fig. 8 Damage identification result(Condition 3)

20%的误差;采用改进算法和新目标函数则将识别误差进一步缩小,且计算效率高。

表 4 3 种算法平均计算结果

Table 4 Average calculation results of three kinds of method

噪声水平	算法	各单元损伤程度					迭代次数
		3	6	7	8	9	
工况 1	1)	0.093 8		0.019 1		0.012 0	93.0
	2)	0.110 4		0.009 8		0.002 6	53.6
	3)	0.110 9		0.000 9		0.003 6	37.3
工况 2	1)	0.090 5	0.102 4	0.031 2		0.023 6	83.8
	2)	0.095 5	0.108 6	0.019 2		0.016 8	52.0
	3)	0.110 5	0.111 8	0.002 5		0.009 0	37.0
工况 3	1)	0.113 6	0.113 4	0.012 0	0.107 3		101.6
	2)	0.108 0	0.116 1	0.024 7	0.102 5		59.8
	3)	0.112 9	0.115 6	0.007 0	0.113 3		20.8

## 6 结论

对于梁式结构,建议了一种两阶段损伤识别方案,通过数值模拟和实验分析,得到以下结论:

1) 直接采用粒子群算法进行损伤识别时,如果结构单元数过多,则粒子的维度也会增加,计算效率不高。

2) 采用多源信息融合算法初步识别,然后在此基础上用改进 PSO 算法进行二次识别,可以对损伤进行准确的定位,并对损伤单元的损伤程度进行定量,且抗噪性良好。

3) 采用改进 PSO 算法和新目标函数的定量误差小于使用标准 PSO 算法和传统目标函数时的误差。

### 参考文献:

[1] ANTUNES P C, DIAS J M, VARUM H, et al. Dynamic structural health monitoring of a civil engineering structure with a POF accelerometer [J]. Sensor Review, 2014, 34(1):36-41.

[2] 李世龙,马立元,田海雷,等. 基于不完备实测模态数据

- 的结构损伤识别方法研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(3): 196-203.
- LI S L, MA L Y, TIAN H L, et al. Structural damage detection method using incomplete measured modal data [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(3): 196-203. (in Chinese)
- [3] GILLICH G R, PRAISACH Z I. Modal identification and damage detection in beam-like structures using the power spectrum and time-frequency analysis [J]. Signal Processing, 2014, 96(Part A): 29-44.
- [4] WEI Z T, LIU J K, LU Z R. Damage identification in plates based on the ratio of modal strain energy change and sensitivity analysis [J]. Inverse Problems in Science & Engineering, 2015, 24(2): 265-283.
- [5] 欧阳秋平, 何龙军, 练继建, 等. 基于克隆选择和粒子群混合算法的导墙结构损伤识别[J]. 振动与冲击, 2014, 33(17): 120-126.
- OUYANG Q P, HE L J, LIAN J J, et al. Damage identification method for guide wall structures based on a hybrid algorithm of clonal selection and particle swarm optimization [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(17): 120-126. (in Chinese)
- [6] 巩文龙, 常军, 刘大山, 等. 基于量子粒子群优化算法的结构损伤识别[J]. 动力学与控制学报, 2015, 13(5): 388-393.
- GONG W L, CHANG J, LIU D S, et al. Structural damage identification based on quantum-behaved particle swarm optimization [J]. Journal of Dynamics and Control, 2015, 13(5): 388-393. (in Chinese)
- [7] 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 H Y, WANG L, LI Z L. 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)
- [8] 幸静. 采用转角信息重构的梁式结构损伤识别[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- XING J. Damage identification of beam-type structures based on the reconstructed modal rotations [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [9] PEETERS B, DE ROECK G. Stochastic subspace system identification of a steel transmitter Mast [C] // Proceedings of the International Modal Analysis Conference-IMAC, Santa Barbara, CA, 1991: 130-136.
- [10] DERAEMAERKER A, REYNDERS E, ROECK G D, et al. Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22: 34-56.
- [11] CHEN A L, ZHANG L M. Study of stochastic subspace system identification method [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2001, 14(4): 222.
- [12] DE COCK K, PEETERS B, VECCHIO A, et al. Subspace system identification for mechanical engineering [C] // Proceedings of ISMA 2002: International Conference on Noise and Vibration Engineering, 2002, 1-5: 1333-1352.
- [13] 韩崇昭, 朱红艳, 段战胜. 多源信息融合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- HAN C Z, ZHU H Y, DUAN Z S. Multi-source information fusion [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [14] ZHOU X, JIANG P. Variation source identification for deep hole boring process of cutting-hard workpiece based on multi-source information fusion using evidence theory [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2017, 28(2): 255-270.
- [15] 曹永红, 张新亮. 基于实用完备模态空间的两阶段损伤识别方案[J]. 工程力学, 2009, 26(3): 168-175.
- CAO Y H, ZHANG X L. Two-stage damage identification scheme based on practical complete modal space [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(3): 168-175. (in Chinese)
- [16] 刘晖, 瞿伟廉, 袁润章. 基于模态应变能耗散率理论的结构损伤识别方法[J]. 振动与冲击, 2004, 23(2): 118-121.
- LIU H, QU W L, YUAN R Z. Structural damage detection method based on the theory of dissipation ratio of modal strain energy [J]. Journal of Vibration and Shock, 2004, 23(2): 118-121. (in Chinese)
- [17] 刘爱丽. 基于多源信息两阶段融合的结构损伤概率诊断方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- LIU A L. The studies on structural damage detection using the method of probability statistics based on two-stage data fusion [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [18] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995: 1942-1948.
- [19] 万祖勇, 朱宏平, 余玲. 基于改进 PSO 算法的结构损伤检测[J]. 工程力学, 2006, 23(Sup1): 73-78.
- WAN Z Y, ZHU H P, YU L. Structural damage detection based on an improved PSO algorithm [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(Sup1): 73-78. (in Chinese)

- [20] YANG T, SUN Z, WANG S, et al. PSC ship-selecting model based on improved particle swarm optimization and BP neural network algorithm [M]. Algorithms and Architectures for Parallel Processing, 2014: 509-520.
- [21] 曹晖,林秀萍. 结构损伤识别中噪声的模拟[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5): 106-109.  
CAO H, LIN X P. Noise simulation in structural damage identification [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(5): 106-109. (in Chinese)
- [22] PERERA R, RUIZ A, MANZANO C. An evolutionary multiobjective framework for structural damage localization and quantification [J]. Engineering Structures, 2007, 29: 2540-2550.
- [23] 曹晖,陈兴华,华建民,等. 用于结构减振的聚合物混凝土试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 188-191.  
CAO H, CHEN X H, HUA J M. Test of polymer concrete used for structural vibration mitigation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(5): 188-191. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)