

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.03.001

改进多种群遗传算法在墙土系统损伤识别中的应用

刘礼标,张永兴,陈建功

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

摘要:针对墙土系统损伤识别方法进行研究,提出了一种基于改进多种群遗传算法的墙土系统损伤识别方法。首先,建立了墙土系统动测简化模型,同时对土体发生损伤时墙土系统的特征方程进行理论分析,基于系统的特征方程构造目标函数;其次,对多种群遗传算法进行改进,改进的内容主要包括采用实数编码、采用自适应交叉概率、采用自适应变异概率;最后,利用改进多种群遗传算法分别进行了无噪声条件和噪声条件下的墙土系统损伤定位和定量研究。通过分析结果表明:无论对单处损伤还是多处损伤、单一损伤程度还是多损伤程度,按所提出的方法都能较好的识别出损伤位置和损伤程度,具有较强的抗噪声能力。因此,所提出的方法为墙土系统的损伤识别提供一种简单有效的途径。

关键词:墙土系统;损伤识别;改进多种群遗传算法;损伤程度;噪声

中图分类号:TU317 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)03-0001-06

Application of Improved Multi-population Genetic Algorithm to Damage Identification of Soil-wall System

Liu Libiao, Zhang Yongxing, Chen Jianguo

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

Abstract: The method of damage identification in soil-wall system was studied; a new approach based on improved multi-population genetic algorithm (IMGA) was developed. First, the simplified dynamic-detection model of soil-wall system was established, meanwhile, the theoretical analysis of characteristic equations in soil-wall system was conducted when soil in damage status. The objective function based on characteristic equations was established. Then, the improvements of multi-population genetic algorithm, including the adoption of real-valued representation, adaptive cross operator and adaptive mutation operator, were conducted. Finally, the localization and quantification of the soil-wall system damage were performed by IMGA with and without the consideration of noise, respectively. The results indicate that damage location and damage extent can be detected efficiently, and anti-noise performance is better.

Key words: soil-wall system; damage identification; improved multi-population genetic algorithm; damage extent; noise

结构系统损伤表现为结构动态特性的变化,将导致结构产生不同程度的安全隐患。土木工程设施

(如高层住宅、大跨度桥梁、地铁和支挡结构等)在现实中具有非常重要的地位,及时对结构进行损伤检

收稿日期:2012-04-23

基金项目:中央高校基本科研业务费(CDJXS11200003)

作者简介:刘礼标(1985-),男,博士生,主要从事岩土工程无损检测研究,(E-mail)llb0222@126.com。

张永兴(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)cqyxzhang@163.com。

测可以减少很多安全事故的发生,准确识别出结构损伤位置和损伤程度是有必要的。在过去几十年里许多结构损伤识别方法不断地被提出,其中采用最优化方法识别结构损伤位置和程度被广泛应用。

遗传算法作为一种基于人工智能的优化算法,具有更强的全局搜索能力,在不同结构类型损伤诊断中的应用很广泛^[1-14]。Chou 等^[1]采用遗传算法对一桁架桥进行损伤识别;Perera 等^[2]结合特征方程、MTMAC 指标构造的目标函数和遗传算法对一简支梁结构进行损伤定位;Koh 等^[3]基于综合 MDLAC 指标的遗传算法对结构多处损伤位置和损伤程度进行识别;Meruane 等^[5]基于模态特性和实数编码的混合遗传算法对三维空间桁架结构进行损伤识别;Nobahari 等^[6]基于综合 MDLAC 指标和改进遗传算法分别对悬臂梁结构和桁架结构进行损伤识别;Liu 等^[7]采用频率改变率和 MAC 指标值构造多目标函数,基于遗传算法优化求解对简支梁结构进行损伤识别;袁颖等^[8-9]提出了一种基于残余力向量和改进遗传算法相结合的结构损伤识别方法,以节点的残余力向量构造用于遗传搜索优化的目标函数形式,利用改进的遗传算法进行了噪声条件下的结构损伤定位和定量研究;尹涛等^[10]在传统遗传算法的变异算子里引入零变异率因子,使种群中时刻保持一定数量的零值元素,即相当于用结构的损伤只是发生在局部这个信息约束了传统的遗传算法,对框架结构进行损伤定位;陈存恩等^[11]提出一种结合灵敏度修正的遗传算法对一个 4 层平面框架结构进行损伤诊断等。然而,现有遗传算法的大多数研究文献都是针对简单的梁结构、桁架结构、框架结构等。

针对板结构的墙土系统损伤识别研究相对较少,张永兴等^[15]对墙土系统模态特性进行分析,仅研究了损伤对模态特性的影响,但并未对损伤识别方法进行研究。为此,本文提出一种改进的多种群遗传算法的墙土系统损伤识别方法,首先利用模态参数和物理参数关系,通过系统特征方程建立目标函数,再利用改进的多种群遗传算法搜索得到系统的损伤位置和损伤程度。主要研究墙后土体存在不同程度损伤时的识别方法,对于挡墙本身存在损伤时,按本文思路也可对损伤位置和损伤程度进行识别。

1 基本模型

1.1 墙土系统简化动测模型

本文旨在通过反映墙土系统模态特性的特征方

程来识别墙土系统的损伤,建立了简化动测模型,为便于分析作以下基本假定:1)悬臂挡墙底板的刚度较大,忽略底板的影响,将立板底部视作固接;2)悬臂挡墙视为薄板单元,离散后计算挡墙结构的质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵;3)土体简化成附加刚度和附加阻尼来模拟,和挡墙附着在一起共同运动的墙后土体简化成附加质量集中在节点处;4)挡墙与土体之间完全接触,模型见图 1。

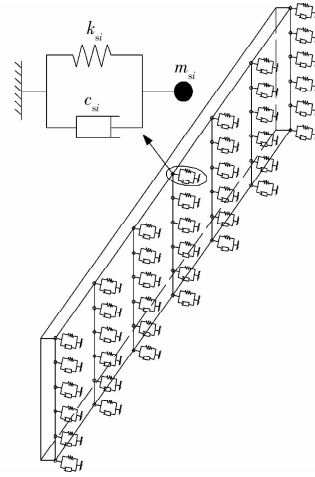


图 1 悬臂挡墙-岩土系统的简化动测模型

文中主要基于墙土系统模态特性进行墙土系统损伤识别,一般情况下阻尼可以忽略不计,因此,图 1 中土体附加阻尼系数 c_{si} 取 0。

1.2 墙土系统损伤动力特性模型

当墙后填土存在不同程度的损伤(如不密实、空洞等现象)时,假定损伤后土体附加刚度可以表示成无损伤状态下土体附加刚度乘以反映损伤程度 β_i 的系数 α_i ,此时简化模型中土体附加刚度可表示为:

$$k_{si}^d = (1 - \beta_i)k_{si} = \alpha_i k_{si} \quad (1)$$

式中: α_i 称为附加刚度折减系数,其值介于 $[0, 1]$ 之间,对于无损伤单元, $\alpha_i = 1$ 。

土体发生损伤时的墙土系统特征方程为:

$$(\mathbf{K}_w^d + \mathbf{K}_s^d)\Phi = (\mathbf{M}_w^d + \mathbf{M}_s^d)\Phi\Omega \quad (2)$$

式中: \mathbf{K}_w^d 、 \mathbf{M}_w^d 分别为挡墙结构的刚度矩阵、质量矩阵; \mathbf{K}_s^d 、 \mathbf{M}_s^d 分别为土体损伤后的附加刚度矩阵、附加质量矩阵; Φ 为振型矩阵, $\Phi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_i, \dots, \varphi_n]$, φ_i 为相应的第 i 阶振型向量; Ω 为各阶固有角频率平方构成的对角矩阵, $\Omega = \text{diag}(\omega_i^2)$; n 为系统总自由度数。

假设土体发生损伤仅降低附加刚度,而不考虑附加质量降低,并且土体发生损伤后仍满足线性振动。若 q 对应无土体附加参数的自由度, r 对应有附加土体参数自由度,则有:

$$\mathbf{K}_s^d = \begin{bmatrix} 0_{q \times q} & 0_{q \times r} \\ 0_{r \times q} & \text{diag}(\alpha_i k_{si}) \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_s^d = \begin{bmatrix} 0_{q \times q} & 0_{q \times r} \\ 0_{r \times q} & \text{diag}(m_{si}) \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (4)$$

$$\mathbf{K}_w^d = \begin{bmatrix} k_{w,11} & k_{w,12} & \cdots & k_{w,1n} \\ k_{w,21} & k_{w,22} & \cdots & k_{w,2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{w,n1} & k_{w,n2} & \cdots & k_{w,nm} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_w^d = \begin{bmatrix} m_{w,11} & m_{w,12} & \cdots & m_{w,1n} \\ m_{w,21} & m_{w,22} & \cdots & m_{w,2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{w,n1} & m_{w,n2} & \cdots & m_{w,nm} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (6)$$

由式(3)和(4),式(2)可分块表示为:

$$\left(\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{w1}^d \\ \mathbf{K}_{w2}^d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{K}_{s2}^d \end{bmatrix} \right) \Phi = \left(\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{w1}^d \\ \mathbf{M}_{w2}^d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}_{s2}^d \end{bmatrix} \right) \Phi \Omega \quad (7)$$

上式可拆分为:

$$\mathbf{K}_{w1}^d \Phi = \mathbf{M}_{w1}^d \Phi \Omega \quad (8)$$

$$(\mathbf{K}_{w2}^d + \mathbf{K}_{s2}^d) \Phi = (\mathbf{M}_{w2}^d + \mathbf{M}_{s2}^d) \Phi \Omega \quad (9)$$

2 损伤识别的改进多种群遗传算法

简单遗传算法容易出现早熟和停滞现象,为了克服简单遗传算法的缺点,提高全局搜索能力,本文提出应用改进多种群遗传算法(IMGGA)进行墙土系统损伤识别,主要对编码方案、交叉算子和变异算子进行改进。IMGGA主要思想是每个子种群分别独立采用遗传算法进行复制、交叉、变异操作,子种群每进化若干代就进行子种群间的迁移。

2.1 初始化种群

设计的初始种群长度为52,包含的变量分别为各测点对应的墙后土体附加刚度折减系数 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{52})$ 。由于识别变量较多,为了提高算法性能,文中采用实数编码方式,同时每个实数个体均能反映1个测点的损伤程度等优点。按照每个变量的范围,随机产生初始种群并分割成 M 个子种群。

2.2 适应值函数的确定及选择操作

墙土系统损伤识别主要目的是识别出各点的附加刚度损伤程度。由于式(8)中不含反映土体损伤程度系数,因此,损伤程度识别问题的关键是如何根据式(9)识别出附加刚度折减系数 α_i 。因此,利用最小二乘法准则,式(9)可转化为求解如下非线性优化问题。

$$\begin{cases} \min f(\alpha_i) = \\ \frac{1}{2} \| (\mathbf{K}_{w2}^d + \mathbf{K}_{s2}^d) \Phi - (\mathbf{M}_{w2}^d + \mathbf{M}_{s2}^d) \Phi \Omega \|^2 \\ s. t. \quad 0 \leq \alpha_i \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, 52) \end{cases} \quad (10)$$

选择 $f(\alpha)$ 为算法的适应值函数,然后根据非线性排序独立计算各子种群中个体的适应度值。根据个体的适应度值按随机遍历抽样进行选择操作,从种群中选择优良个体。

2.3 交叉、变异操作

简单遗传算法中交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 是不变的,易造成较优个体破坏。因此,本文引入自适应交叉概率 P_c 和自适应变异概率 P_m ,其表达式分别如下:

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - \bar{f})}{f_{\max} - \bar{f}} & f' \geq \bar{f} \\ P_{c1} & f' < \bar{f} \end{cases} \quad (11)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f - \bar{f})}{f_{\max} - \bar{f}} & f \geq \bar{f} \\ P_{m1} & f < \bar{f} \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_{c1} 、 P_{c2} 、 P_{m1} 、 P_{m2} 为相应参数; f_{\max} 为种群中最大适应度值; \bar{f} 为种群平均适应度值; f' 为要交叉的两个个体中较大的适应度值; f 为要变异的个体适应度值。

交叉操作:由于采用实数编码,按自适应交叉概率 P_c 执行算术交叉操作,按下式产生两个新个体:

$$\begin{cases} \alpha_A^{t+1} = r\alpha_B^t + (1-r)\alpha_A^t \\ \alpha_B^{t+1} = r\alpha_A^t + (1-r)\alpha_B^t \end{cases} \quad (13)$$

式中: r 是 $[0,1]$ 上的随机数, t 是当前代数。

变异操作:采用实数编码时,变异算子变成一个主要的搜索算子,按照自适应变异概率 P_m 执行非均匀变异操作,按下式产生新个体:

$$\alpha_A^{t+1} = \begin{cases} \alpha_A^t + r(1 - \alpha_A^t)(1 - t/T)^2 & R > 0.5 \\ \alpha_A^t - r(\alpha_A^t - 0)(1 - t/T)^2 & R \leq 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

式中: r 、 R 是 $[0,1]$ 上的随机数, t 是当前代数。

2.4 迁移操作

满足迁移条件时,将子种群中最适应的20%(迁移率为0.2)的个体被选择迁移,最邻近的子种群在他们之间交换个体。

2.5 终止条件

循环执行2.2~2.4步的操作,直到目标函数 $\min f(\alpha)$ 达到满意值或达到最大迭代次数时,终止计算。这时输出的变量即为识别损伤位置和损伤程度。损伤识别的改进多种群遗传算法流程图见图2。

本文计算中改进的多种群遗传算法的主要参数:子种群数量 $M=5$,子种群规模 $N=40$,变量个数 $N_{\text{var}}=52$,交叉概率参数 $P_{c1}=0.9$ 、 $P_{c2}=0.5$,变

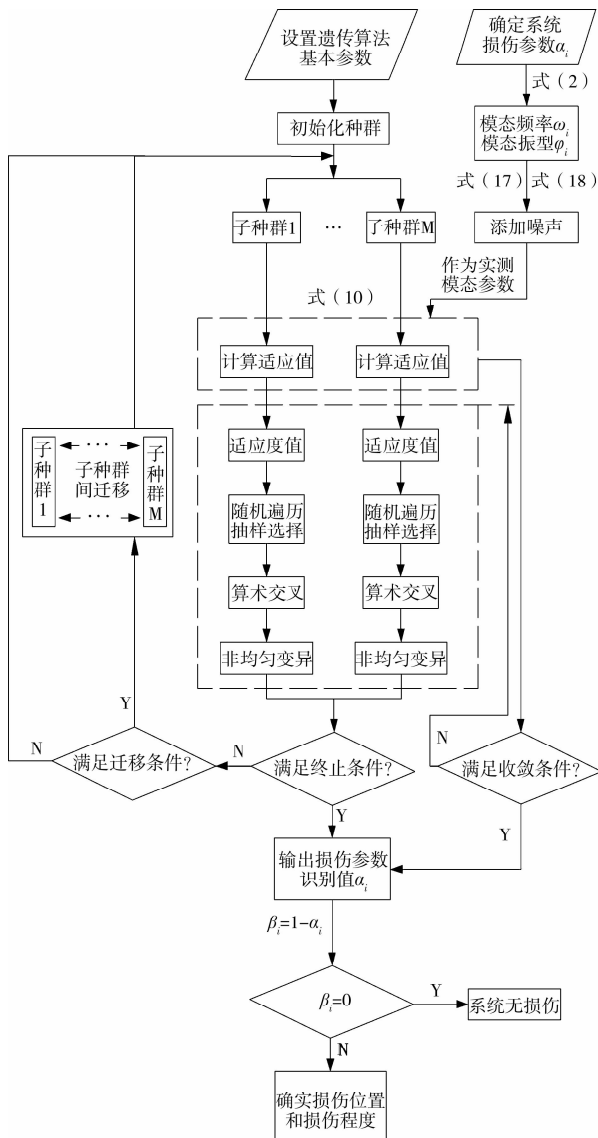


图 2 改进多种群遗传算法流程图

异概率参数 $P_{m1} = 0.4$ 、 $P_{m2} = 0.1$ ，子种群迁移率 $r_{MIGR} = 0.2$ ，遗传代数 $T = 5\ 000$ 。

3 算例研究

研究算例基本参数：某悬臂挡墙弹性模量 $E_w = 28\text{ GPa}$ ，泊松比 $\mu_w = 0.2$ ，密度 $\rho_w = 2\ 450\text{ kg/m}^3$ ，阻尼比 $\xi_w = 0.02$ ；墙后填土弹性模量 $E_s = 288\text{ MPa}$ ，泊松比 $\mu_s = 0.3$ ，密度 $\rho_s = 1\ 800\text{ kg/m}^3$ ，阻尼比 $\xi_s = 0.05$ ，粘聚力 $C_s = 3.8\text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\varphi_s = 31^\circ$ 。墙土系统整体有限元模型尺寸见图 3，挡墙纵向长度方向取 12 m ，测点布置图见图 4。

3.1 研究方式

在有限元离散处理中，挡墙按图 3 测点布置图进行离散化，从左往右从下往上的单元编号用矩阵 E 表示，相应节点编号用矩阵 N 表示：

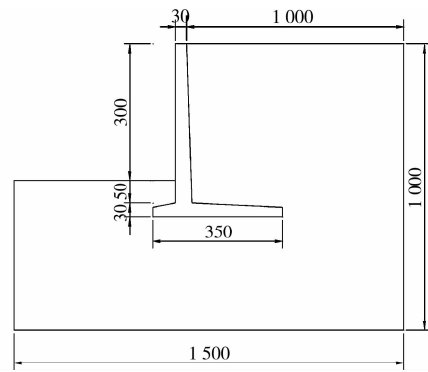
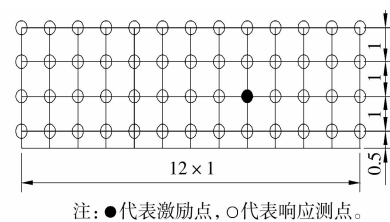


图 3 墙土系统整体模型尺寸示意图(单位:mm)



注：●代表激励点，○代表响应测点。

图 4 测点布置图

$$E = \begin{bmatrix} 37 & 38 & \cdots & 48 \\ 25 & 26 & \cdots & 36 \\ 13 & 14 & \cdots & 24 \\ 1 & 2 & \cdots & 12 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$N = \begin{bmatrix} 53 & 54 & \cdots & 65 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 14 & 15 & \cdots & 26 \\ 1 & 2 & \cdots & 13 \end{bmatrix} \quad (16)$$

采用 ANSYS 对墙土系统无损状态下的整体模型进行瞬态分析得到测点加速度响应曲线，识别到系统频率和振型。为使问题简化，假定无损状态下基于模态参数的物理参数识别方法得到的土体附加参数是精确的，部分节点土体附加参数见表 1。

表 1 土体附加参数

节点号	附加刚度/(MN·m ⁻¹)	附加质量/kg
1	25.980	2.218
2	51.960	4.436
14	57.979	16.505
15	115.958	33.010
27	41.200	37.253
28	82.400	75.506
40	12.353	51.574
41	24.706	103.148
53	0.975	29.968
54	1.952	59.936

假设墙后填土发生损伤时引起相邻节点处附加刚度损伤程度是已知的,计算出墙土系统模态参数,同时为了验证本文提出的墙土系统损伤识别方法的抗噪性能,按式(17)和(18)考虑随机噪声影响,然后将其作为式(10)的输入数据分析噪声对识别结果的影响。

$$\omega'_i = \omega_i [1 + \alpha R] \quad (17)$$

$$\varphi'_i = \varphi_i [1 + \beta R] \quad (18)$$

式中: α 和 β 分别表示频率和振型的噪声水平; R 为 $[-1,1]$ 上正态分布分布的随机数。模拟的损伤工况见表2。

表2 损伤工况

工况	损伤单元	噪声水平/%	损伤程度/%
1	18		10
2	18,34		10,20
3	18,34	3,5	10,20
4	25~36	3,5	10

注:表中损伤单元表示该挡墙单元后填土产生损伤;损伤程度表示与损伤单元相邻节点土体附加刚度的损伤程度。

由于对实际挡墙进行现场振动测量时受到多方面因素制约,不可能得到墙土系统所有的模态振型,一般只能获得低阶的模态振型,因此,本文分析中仅采用前三阶模态振型 $\varphi_1 \sim \varphi_3$ 和前三阶模态频率 $\omega_1 \sim \omega_3$ 来识别墙后土体损伤位置和损伤程度。

对于土体附加刚度损伤程度识别准确性的评价用平均程度误差表示,即:

$$M_{MEE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\beta_{I,i} - \beta_{A,i}| \quad (19)$$

式中: N 为待识别参数个数; $\beta_{I,i}$ 为识别得到的附加刚度损伤程度值; $\beta_{A,i}$ 为附加刚度实际损伤程度值; M_{MEE} 值越小意味着损伤识别结果越准确。

3.2 损伤识别结果分析

分别对4种工况进行损伤识别,损伤识别结果分别见图5~8,图中 x 轴为挡墙高度方向, y 轴为挡墙纵向长度方向。

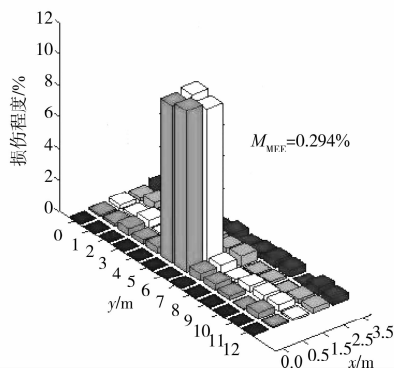


图5 工况1损伤识别结果

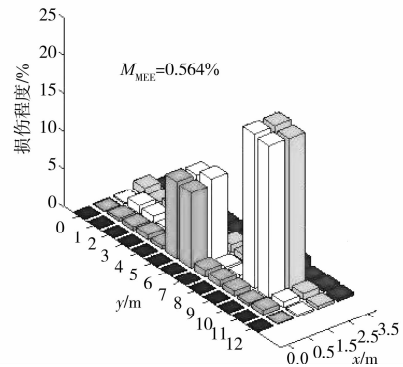


图6 工况2损伤识别结果

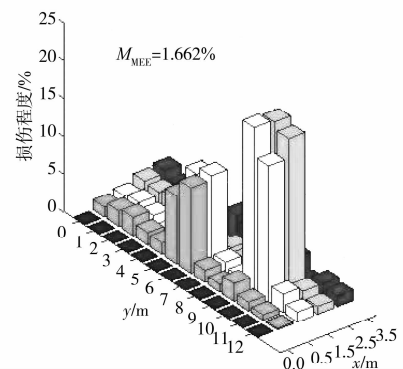


图7 工况3损伤识别结果

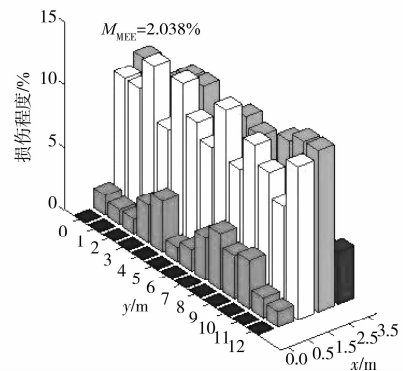


图8 工况4损伤识别结果

由图5~8分析可知:在无噪声状态下,无论对单处损伤还是多处损伤、单一损伤程度还是多损伤程度,都能够精确的识别出土体损伤程度;对模态参数添加噪声后,本文方法识别的精度比无噪声状态下识别精度低,但仍然能够比较准确的识别出相应的损伤位置和损伤程度;根据不同工况的 M_{MEE} 值,可以得到噪声对损伤识别有一定的影响,且随着损伤数量的增加 M_{MEE} 值也增加,即损伤识别精度逐渐下降,因此,为了提高识别结果的精度,对现场测试数据处理时要注意消除噪声。

3.3 算法性能的比较

为了便于比较改进多种群遗传算法和简单遗传算法计算性能的优越性,使 IMGA 和 GA 的初始种群保持一致,其他参数均相同。以工况 2 为例,同时不考虑测试噪声的影响。运行结果见图 9。

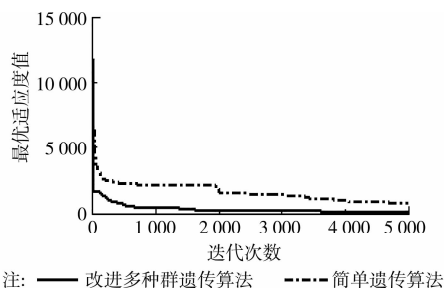


图 9 算法性能比较图

由图 9 可知,改进多种群遗传算法收敛速度更快,在 2 000 代基本收敛到了近优解,迭代到 5 000 代时, M_{MEE} 值降低到了 0.564%,得到了比较满意的结果;简单遗传算法在迭代到 5 000 代时,仍未收敛到较为理想的结果,因此,采用改进多种群遗传算法的寻优能力强于简单遗传算法。

4 结 论

本文基于墙土系统特征方程构造损伤识别的目标函数,结合改进的多种群遗传算法进行最优化计算来识别墙土系统的损伤,得到以下结论:

1) 文中改进的多种群遗传算法能有效的同时识别出墙土系统的损伤位置和损伤程度,弥补了现有的损伤识别方法中需要先识别出损伤位置,再进一步判定损伤程度的缺点。

2) 无论对单处损伤还是多处损伤、单一损伤程度还是多损伤程度,按本文识别方法都能较好的识别出墙土系统的损伤位置和损伤程度。

3) 为了验证本文识别方法的抗噪性能,对理论模态参数引入随机噪声的影响,采用改进的多种群遗传算法的损伤识别方法同样具有较好的识别效果,具有较强的抗噪声能力。

参考文献:

[1] Chou J H, Ghaboussi J. Genetic algorithm in structural damage detection [J]. Computers and Structures, 2001, 79: 1335-1353.

[2] Perera R, Torres R. Structural damage detection via modal data with genetic algorithms [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(9): 1491-1501.

[3] Koh B H, Dyke S J. Structural health monitoring for

flexible bridge structures using correlation and sensitivity of modal data [J]. Computers & Structures, 2007, 85: 117-130.

- [4] He X, Kawatani M, Hayashikawa T, et al. A bridge damage detection approach using train-bridge interaction analysis and GA optimization [J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 769-776.
- [5] Meruane V, Heylen W. An hybrid real genetic algorithm to detect structural damage using modal properties [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25: 1559-1573.
- [6] Nobahari M, Seyedpoor S M. Structural damage detection using an efficient correlation-based index and a modified genetic algorithm [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2011, 53: 1798-1809.
- [7] Liu H, Xin K G, Qi Q Q. Study of structural damage detection with multi-objective function genetic algorithms [J]. Procedia Engineering, 2011, 12: 80-86.
- [8] 袁颖,林皋,闫东明,等.基于残余力向量法和改进遗传算法的结构损伤识别研究[J].计算力学学报,2007,24(2):224-230.
- Yuan Y, Lin G, Yan D M, et al. Study on structural damage identification based on residual force method and improved genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(2): 224-230.
- [9] 袁颖,林皋,闫东明,等.基于改进遗传算法的桥梁结构损伤识别应用研究[J].应用力学学报,2007,24(2):186-190.
- Yuan Y, Lin G, Yan D M, et al. Improved genetic algorithm for bridge damage detection [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, 24(2): 186-190.
- [10] 尹涛,朱宏平,余岭.运用改进的遗传算法进行框架结构损伤检测[J].振动工程学报,2006,19(4):525-531.
- Yin T, Zhu H P, Yu L. Application study of an improved genetic algorithm for frame structure damage detection [J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(4): 525-531.
- [11] 陈存恩,李文雄.结合灵敏度修正的遗传算法的结构损伤诊断[J].地震工程与工程振动,2006,26(5):172-176.
- Chen C E, Li W X. Structural damage diagnosis by genetic algorithm with sensitivity updating [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(5): 172-176.
- [12] 尹强,周丽.基于遗传优化最小二乘算法的结构损伤识别[J].振动与冲击,2010,29(8):155-159.

(下转第 100 页)

- Three Gorges, Hubei, China; IEEE eXpress Conference Publishing, 2012.
- [9] Huang W X, Tan L Y. Analysis of local stress and improvement of stress state on key parts of the polyline pretensioned beam [C]//2012 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE 2012), Three Gorges, Hubei, China; IEEE eXpress Conference Publishing, 2012.
- [10] Sankar G S, Shetty V S, Karanth H S D. A comparative study of physical and mechanical properties of the different grades of Australian stainless steel wires [J]. Trends in Biomaterials and Artificial Organs, 2011, 25(2): 67-74.
- [11] Budzik R, Glis B, Wludzik R, et al. Estimation of standard PN-EN 10264 steel wire for rope [J]. Wire Journal International, 2010, 43(1): 64-69.
- [12] 中华人民共和国交通部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京, 2004.
- [13] 刘立新, 胡丹丹, 于秋波, 等. 先张法折线形预应力梁钢绞线摩擦损失试验研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2006, 27(4): 6-9.
- Liu L X, Hu D D, Yu Q B, et al. Experimental studies on pre-stressing frictional loss of the fold-line pre-tension pre-stressed beam [J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2006, 27(4): 6-9.
- [14] Cheng H, Yang P, Cheng Q. Frictional resistance analysis on prestressed curved channel under cosine distribution assumption of contact pressure [C]// Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2011.
- [15] Robitaille S, Bartlett F M, Youssef M A, et al. Evaluating prestress losses during pre-tensioning [C]// St. Johns, NL, Canada; Canadian Society for Civil Engineering, 2009.
- [16] Zhou Z, He J, Chen G, et al. A smart steel strand for the evaluation of prestress loss distribution in post-tensioned concrete structures [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(16): 1901-1912.

(编辑 胡 玲)

(上接第 6 页)

- Yin Q, Zhou L. Structural damage identification based on GA optimized least square estimation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(8): 155-159.
- [13] 李小平, 郑世杰. 基于遗传算法和拓扑优化的结构多孔洞损伤识别[J]. 振动与冲击, 2011, 30(7): 201-204.
- Li X P, Zheng S J. Multi-hole damage detection in structures based on genetic algorithms and topology optimization [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(7): 201-204.
- [14] 黄天立, 楼梦麟, 任伟新. 基于 CMDLAC 指标和遗传算法的结构损伤定位研究[J]. 计算力学学报, 2009, 26(4): 529-534.
- Huang T L, Lou M L, Ren W X. Structural damage localization based on the CMDLAC and genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(4): 529-534.
- [15] 张永兴, 刘世安, 陈建功. 土体对悬臂挡墙模态的影响与应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(3): 72-77.
- Zhang Y X, Liu S A, Chen J G. Influence and its application of soil on the mode of cantilever retaining wall [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(3): 72-77.

(编辑 薛婧媛)