

基于混沌人工蜂群算法的结构损伤识别*

丁政豪, 徐浩杰, 刘济科, 吕中荣
(中山大学力学系, 广东 广州 510006)

摘要: 人工蜂群算法作为一种模拟蜜蜂采蜜行为提出的优化算法, 通过各人工蜂个体的局部寻优行为, 最终在群体中使全局最优解突显出来, 具有较好的收敛速度, 有广泛的工程应用前景。基于人工蜂群算法和 MAC (模态保证准则) 对强、弱耦合双梁系统进行局部损伤的识别。为了避免算法过早陷入局部最优解, 引入锦标赛机制和混沌搜索机制对算法进行改进。算例表明此方法能有效快速的检测出耦合双梁系统的局部损伤、对测量噪声不敏感, 较原算法相比, 具有更高效、更高精度等优点, 有望用于实际工程应用。

关键词: 损伤检测; 耦合双梁; 改进人工蜂群算法; 模态保证准则

中图分类号: O39 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2015) 05-0039-04

Damage Identification Based on Chaotic ABC Algorithm

DING Zhenghao, XU Haojie, LIU Jike, LU Zhongrong

(Department of Applied Mechanics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Artificial bee colony (ABC) algorithm is an effective approach to solve structural local damage detection. The damage detection in a double-beam system coupled via a set of springs based on a modified artificial bee colony algorithm is discussed. By using the system natural frequencies and modal assurance criteria (MAC), the ABC algorithm is utilized to solve the nonlinear objective function from the coupled double-beam system. To avoid the algorithm trapped local optimize easily, the ABC algorithm is modified by choosing the tournament selection instead of roulette, and chaotic search mechanism is applied to improve algorithm's global search capability. The simulation results shows that the modified ABC algorithm can identify the local damage of the coupled system effective even under measurement noise, better than the original algorithm.

Key words: damage detection; coupled double-beam system; chaotic ABC; MAC

无损检测因其具有非损伤性、便捷和成本较低的优点^[1], 在工程结构损伤识别和健康检测中具有广阔的前景。近 30 年来, 运用动力响应进行结构损伤识别一直是国内外学者的一个研究热点。基于振动的传统结构损伤检测方法主要包括基于模态振型^[2]、柔度^[3]、模态频率和曲率等^[4-7]。

随着计算机和优化思想的发展, 涌现出群智能

识别方法等, 基于遗传算法以及粒子群^[8]、蚁群^[9]、人工鱼群算法等。从计算和优化的角度来看, 结构损伤识别问题可以看作优化问题, 通过定义一个关于系统模型的目标函数, 可以利用优化的手段来实现损伤参数的识别。

蜂群算法作为一种模拟群体蜜蜂觅食特性的智能优化算法, 具有参数设置简单、易于实现的特

* 收稿日期: 2014-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (1117233, 11272361); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (131gzd06); 广东省科技计划资助项目 (2012A030200011, 2014A020218004)

作者简介: 丁政豪 (1991 年生) 男; 研究方向: 无损检测, 进化计算; 通讯作者: 吕中荣; E-mail: lvzhr@mail.sysu.edu.cn

点^[10]。本文在原有蜂群算法的基础上引入混沌搜索机制和锦标赛选择机制,以改善蜂群算法易于陷入局部最优的缺点,改善搜索精度。同时本文基于模态保证准则(MAC)建立损伤识别问题的目标函数,利用蜂群算法对该目标函数求解以获得系统局部损伤情况。人工蜂群算法在一些基本构件的损伤识别上取得应用,但在耦合系统中尚较少研究。本文引入耦合双梁系统,探讨改进后的人工蜂群算法在耦合双梁系统损伤识别的应用。为方便研究,通过有限元法将一系列弹簧连接的耦合双梁系统离散成耦合的欧拉-伯努利梁模型。

本文对强、弱耦合的耦合双梁系统的局部损伤进行识别,同时加入人工噪声,研究其对识别精度的影响。算例表明本文方法能够高效地识别出强、弱耦合双梁系统的局部损伤,并且具有对人工噪声不敏感的特点,充分证明此方法可用于工程实际。

1 蜂群算法

人工蜂群算法是一种根据蜜蜂采蜜行为提出的优化算法^[11],通过各雇佣蜂随机探索食物源并将信息告知非雇佣蜂,非雇佣的蜜蜂依据食物收益率的高低决定是否跟随雇佣蜂飞往食物源或自己探索新的食物源。其中,每个食物源代表优化问题的一个可行解,食物源的收益率决定了解的优劣,收益率越高,所得到的解越接近最优解。人工蜂群的具体算法在文献中有提及^[12],在本文不在赘述。为避免算法过早陷入局部最优,本文引入混沌搜索机制,并选用锦标赛选择策略代替算法的轮盘赌选择策略,具体介绍如下。

1.1 混沌搜索机制

混沌作为非线性现象的一个显著特征,具有“遍历性”,“随机性”和“规律性”的特点,它在某种程度上能够按照其自身“规律”,不重复地遍历所有的状态。常用的 Logistic 映射就是一个典型的混沌系统,其方程如下

$$z_{n+1} = \mu \times z_n + (1 - z_n) \quad (1)$$

参数 μ 为控制参数,方程(1)可以看作是一个动力系统,当参数确定后,基于一组随机的初值,一组随机序列能够确定下来,控制参数为4时表示该系统是完全混沌状态。混沌搜索机制的“遍历性”能够使算法跳出局部最优,文献[13]在遗传算法中加入了混沌搜索机制,提出了混沌遗传算法,文献[14]在粒子群算法中融入了混沌搜索机制,提出了混沌粒子群算法,并且都取得了较好地改进效果。本文在侦查蜂的阶段引入混沌搜

索机制,设置混沌迭代最大次数 C_{\max} ,将停滞的解利用(1)映射到 logistic 方程的定义域 $[0, 1]$ 上,设停滞解 $x_{ki} \in [a, b]$,维数为 d ,

$$z_{ki}^0 = \frac{(x_{ki} - a)}{(b - a)} \quad k = 1, 2, \dots, n, i = 1, 2, \dots, d \quad (2)$$

再次利用式(1) logistic 方程生成混沌序列

然后用式(3)做逆映射,返回到原解空间。

$$x'_{ki} = a + (b - a) \times z_{ki}^m \quad (m = 1, 2, \dots, C_{\max}) \quad (3)$$

计算适应度,用适应度最大的值对应的解替换停滞的解,直到最迭代次数结束。

1.2 锦标赛选择策略

锦标赛选择策略是基于局部竞争机制的选择过程,它的主要思路是随机在群体中选择 m 组个体进行比较,适应度大的个体被选择。利用锦标赛选择的思想,将种群在第 k 代个体的适应度进行两两比较,如果当前个体的适应度好于另一个适应度,则每次授予该个体1分,对每组个体重复这一过程,得分高者,权重较大。此选择方式削弱了超级个体对算法的影响,避免了过早收敛和停滞现象。经过引入锦标赛选择策略和混沌搜索机制,人工蜂群算法的算法流程框架如下。

1) 随机初始化参数,设某一种群蜜蜂总量 N ,其中雇佣蜂和跟随蜂的数量各占一半,雇佣蜂随机选择一个食物源,并且计算当前收益率,然后在食物源周边进行搜索,选择收益率更好的食物源。

2) 进入跟随蜂阶段,跟随蜂基于锦标赛选择机制选择前往雇佣蜂所寻找到的食物源,进行食物的二次开采,选择收益率更好的食物源。

3) 如果雇佣蜂的最优食物源在最大迭代次数里未发生变化,则雇佣蜂变为侦查蜂,随机在定义域中选取另一个食物源代替,进行新的搜索。

4) 如果雇佣蜂的最优食物源在最大迭代次数里未发生变化,则雇佣蜂变为侦查蜂,侦查蜂阶段引入混沌搜索机制。

2 目标函数

结构发生损伤将会导致结构频率和模态等参数的变化,而损伤识别反问题则可以利用结构的模态参数构造目标函数,不断缩小计算值与测量值之间的差异,即通过求目标函数的最小值来实现结构的损伤识别。无损结构自由振动的模态参数特征方程

$$(\mathbf{K} - \omega_i^2 \mathbf{M}) \Phi_i = 0 \quad (4)$$

其中 \mathbf{K}, \mathbf{M} 是系统刚度和质量矩阵, ω_i 是第 i 阶频

率, Φ_i 为相应的模态, 忽略质量的变化, 归结损伤为刚度的减少。将结构离散成单元, 发生损伤时刚度的减少量可以通过一系列损伤系数 $\alpha_i \in [0, 1]$ ($i = 1, 2, \dots, nel$) 来描述。 $\alpha_i = 0$ 时, 结构无损, $\alpha_i = 1$ 时, 结构完全破坏, 所以损伤结构的整体刚度矩阵写作

$$k_d = \sum_{i=1}^{nel} (1 - \alpha_i) k_i^e \quad (5)$$

基于频率残差和模态确保准则建立的目标函数如下所示

$$f = \sum_{i=1}^{NF} \Delta\omega_i^2 + \sum_{i=1}^{NM} MAC_i \quad (6)$$

$$\Delta\omega_i = \frac{|\omega_i^c - \omega_i^d|}{\omega_i^d} \quad (7)$$

$$MAC_i = \frac{(\Phi_i^c \times \Phi_i^{mT})}{\|\Phi_i^c\|} \times \|\Phi_i^m\| \quad (8)$$

其中 (ω_i^c, Φ_i^c) 和 (ω_i^d, Φ_i^d) 为结构第 i 阶计算和测量得到的频率和振型, NF 为提取的频率阶数, NM 为提取的振型阶数, 当识别参数与预设损伤参数相等时, 目标函数值为最小, 也就是说, 损伤识别问题等价成了一个优化问题, 当目标函数达到极小值时, 得到的一系列相关参数 $\{\alpha_i\}$ 便能反映出结构的损伤程度。

3 数值模拟

由一系列弹簧连接的耦合双梁结构如图 1 所示, 上、下梁选用钢质梁, 其参数为杨氏模量为 210 GPa, $\rho_1 = \rho_2 = 7800 \text{ kg/m}^3$ 横截面宽为 $b_1 = b_2 = 0.15 \text{ m}$, 高为 $h_1 = h_2 = 0.15 \text{ m}$, 梁长 $L_1 = L_2 = 10 \text{ m}$, 系统同通过有限元离散为 20 个欧拉-伯努利梁, 共 22 个节点。当弹簧刚度为 $Kr = 1 \times 10^5 \text{ N/m}$, 系统为弱耦合系统, 当弹簧刚度为 $Kr = 1 \times 10^9 \text{ N/m}$ 时, 则为强耦合系统。

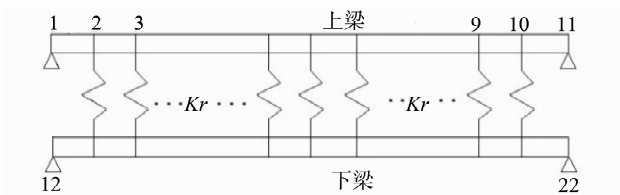


图 1 双梁耦合模型 (1, 11, 12, 22 为单元节点号)

Fig. 1 The coupled double-beam system

(1, 11, 12, 22 denote the node)

工况 1: 多损伤的强耦合双梁结构。

假定耦合双梁结构的第 2, 3, 12 和 17 单元的单元刚度分别减少 15%, 20%, 10% 和 10%, 采

用前 6 阶频率和模态进行计算, 模态中引入 10% 的白噪声。对于人工蜂群算法中, 初始总群数目设为 50, 当食物源经过 50 次后都为更新, 进入侦察蜂阶段^[9], 对于混沌人工蜂群算法, 当食物源经过 50 次后, 进行 10 次混沌搜索, 用适应度最好的解替换原来的解。为了消除不确定性对算法的影响, 对于每种工况, 计算 10 次取平均值。图 2 和 3 记录了基于这两种算法的折损因子的迭代曲线, 可以很明显地发现混沌蜂群算法在经过大约 50 次的迭代后就收敛到预设值附近, 而原始蜂群算法则大约要迭代 150 次, 另外图 4 和表 1 记录了最终的识别结果, 可以很明显地发现改进后的算法得到的结果更精确, 标准差更小。

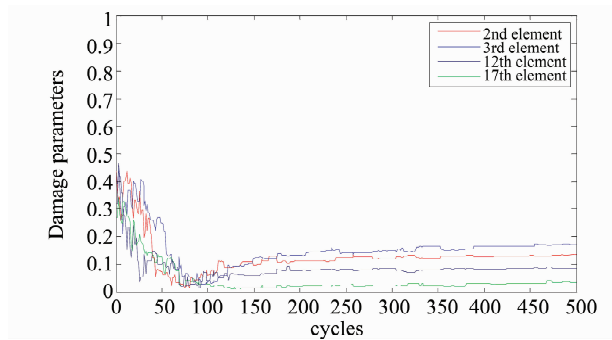


图 2 强耦合双梁结构折损因子的迭代进程 (ABC)

Fig. 2 Iteration process based on ABC

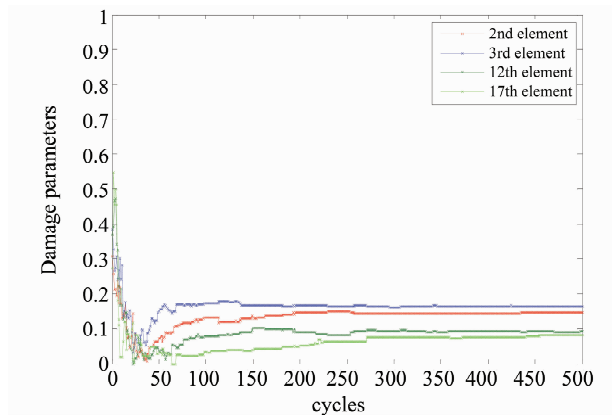


图 3 强耦合双梁结构折损因子的迭代进程 (CABC)

Fig. 3 Iteration process based on CABC

工况 2: 多损伤的弱耦合结构。

工况与算法参数设置与工况 1 相同, 计算 10 次取平均值。图 5 和表 1 记录了此次的识别结果。对于损伤但愿, 改进算法的最大误差为 2.64%, 而原始算法得到的最大误差为 5.71%, 在标准差方面, 改进后的算法也是比原始算法的小, 这充分说明了混沌蜂群算法更稳定, 抗噪声能力更强。

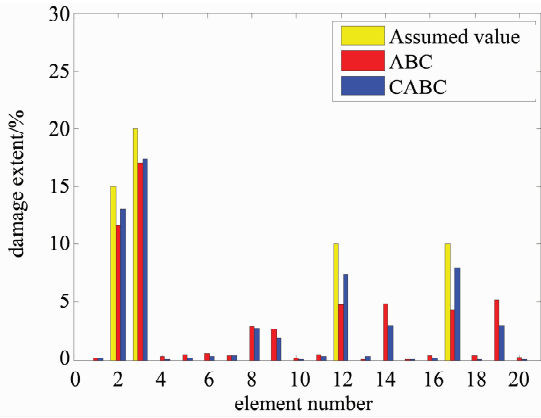


图 4 强耦合双梁结构的识别结果

Fig. 4 Identified results of strongly coupled beam

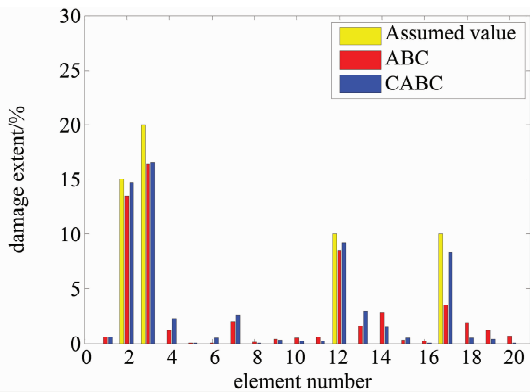


图 5 弱耦合双梁结构的识别结果

Fig. 5 Identified results of weakly coupled beam

表 1 基于两种算法的损伤识别结果¹⁾

Table 1 Identified results based on two methods

		单元编号			
		2nd	3rd	12th	17th
强耦合	预设值	0.15	0.2	0.1	0.1
	ABC results	0.135	0.165	0.085	0.035
	ABC std.	0.029	0.022	0.023	0.034
	CABC results	0.147	0.165	0.092	0.083
	CABC std.	0.008	0.019	0.012	0.020
弱耦合	ABC results	0.116	0.171	0.047	0.043
	ABC std.	0.034	0.037	0.028	0.032
	CABC results	0.131	0.174	0.074	0.079
	CABC std.	0.016	0.013	0.014	0.020

1) std. 表示标准差

3 结论

本文采用锦标赛机制和混沌搜索机制来改进人工蜂群算法,使之拥有更好的搜索效率和全局搜索能力。利用通过频率残差和模态保证准则构造耦合双梁结构的目标函数,然后用算法优化目标函数,得

到识别结果。最终结果表明,无论是均值还是标准差,都是混沌蜂群算法得到的较为接近预设值,这充分说明了改进后的算法更加有利于识别结构损伤。

参考文献:

- [1] 刘济科,汤凯. 基于振动特性的损伤识别的方法的研究进展[J]. 中山大学学报:自然科学版,2004,43(6):57-61.
- [2] SHI Z Y, LAW S S, ZHANG L M. Damage localization by directly using incomplete mode shapes [J]. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 2000, 126(6):656-660.
- [3] 杨秋伟,刘济科. 结构损伤识别的柔度灵敏度方法[J]. 中山大学学报:自然科学版,2010,49(1):16-19.
- [4] 吕中荣,徐伟华,刘济科. 基于振动响应的耦合弦系统损伤检测[J]. 应用力学学报,2009,26(4):657-661.
- [5] CAWLEY P, ADAMS R D. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies [J]. Journal of Strain Analysis, 1979, 14(2):49-57.
- [6] 吕中荣,王文洁,徐伟华. 基于振动响应的耦合杆系统损伤检测[J]. 中山大学学报:自然科学版,2012,51(5):31-35.
- [7] PANDY A K, BISWAS M, SAMMAN M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes [J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145(2):321-332.
- [8] SUGANTHAN P N. Particle swarm optimization with neighborhood operator[C]. Proc of the IEEE Congress of Evolutionary Computation,1999.
- [9] BONABEAU E, DORIGO M, THERAULAZ G. Inspiration for optimization from ants behavior [J]. Nature, 2000, 406:1712-1782.
- [10] SONMEZ M. Artificial Bee Colony algorithm for optimization of truss [C]. Structures Applied Soft Computing, 2011:2406-2418.
- [11] KARABOGA D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization [C] // Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, Turkey, 2005.
- [12] KARABOGA D, BASTURK B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization Artificial Bee Colony (ABC) algorithm [J]. Journal of Global Optimization, 2007, 39(3):459-471.
- [13] YUAN X, YUAN Y. A hybrid chaotic GA algorithm for short-term hydro system schedule [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2002, 59:319-327.
- [14] LIU B, WANG L. Improved particle swarm optimization combined with chaos [J]. Chaos Solitons&Fractals (s0960-0779),2005, 25(5):1261-71.