

基于布谷鸟算法的结构损伤识别*

徐浩杰, 刘济科, 吕中荣
(中山大学力学系, 广东 广州 510275)

摘要: 布谷鸟算法作为一种模拟布谷鸟寻窝产卵行为提出的优化算法, 通过各布谷鸟个体的局部寻优行为, 最终在群体中突显全局最优解, 具有较好的收敛速度和精度。基于频率残差和模态保证准则 (MAC) 构建损伤结构的目标函数, 并运用布谷鸟算法对结构进行局部损伤的识别。双跨简支梁及桁架的数值模拟算例表明此方法能有效地检测出结构的局部损伤, 对噪声不敏感, 具有高效率、高精度等优点, 有望应用于实际工程。

关键词: 损伤检测; 布谷鸟算法; 模态保证准则; 数值模拟

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2015) 04-0019-04

Structural Damage Identification Based on Cuckoo Search Algorithm

XU Haojie, LIU Jike, LÜ Zhongrong

(Department of Applied Mechanics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Cuckoo search (CS) algorithm is an emerging approach to solve structural damage detection. By utilizing the modal assurance criteria (MAC), the objective function of the certain structure is built. Then the CS algorithm is adopted to solve the certian objective function to achieve the damage location and extent of the system. A dual-span beam and a truss are used as numerical simulation cases to prove the validity of the CS algorithm. The simulation results show that the CS algorithm is efficient and accurate even under measurement noise.

Key words: damage detection; Cuckoo search algorithm; modal assurance criteria; numerical simulation

结构损伤无损检测因其具有便捷、非损伤性和成本低廉的优点^[1], 在工程结构健康检测和损伤识别中具有广阔的应用前景。近几十年来, 如何更好的运用动力响应进行结构损伤识别一直是国内外学者的研究热点^[2]。较成熟的基于振动的传统结构损伤检测方法主要包括基于模态频率^[3-4]、模态和残余力等^[5-7]。

近年来, 随着计算机的迅猛发展, 基于优化思想涌现出新的群智能识别方法, 如基于遗传算法以及蚁群、粒子群和人工鱼群算法等^[8-10]。结构损

伤识别问题可看作为全局优化问题, 通过定义一个关于损伤系统模型的目标函数, 利用智能优化的手段对目标函数进行寻优以此来实现结构损伤参数的识别。

布谷鸟算法作为一种模拟布谷鸟种群寻窝产卵的智能优化算法, 具有参数设置简单、易现的特点^[11], 具有广阔的工程应用前景。目前, 布谷鸟算法在优化问题中已得到应用, 但是在结构损伤识别中研究较少。本文基于模态保证准则 (MAC) 和频率残差建立损伤识别问题的目标函数, 利用布

* 收稿日期: 2015-01-19

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)

作者简介: 徐浩杰 (1991年生), 男; 研究方向: 结构损伤识别; 通讯作者: 吕中荣; E-mail: lvzhr@mail.sysu.edu.cn

谷鸟算法对该目标函数求解以获得系统局部损伤情况。

本文选用双跨筒支梁及桁架结构进行局部损伤的数值模拟识别, 算例表明本文方法能够高效地识别相应结构的局部损伤, 并且具有对人工噪声不敏感的特点, 表明本文方法有应用于工程实际的潜力。

1 布谷鸟算法

布谷鸟算法是一种由模拟布谷鸟寻窝产卵以及鸟类莱维飞行行为提出的优化算法。布谷鸟会在一个区域内寻找最好的鸟窝并将自己的卵产到此鸟窝进行孵化, 其寻找适合自己产卵的鸟窝位置是随机的或类似随机的, 为了模拟布谷鸟寻窝的方式, 设定以下 3 个理想状态^[12]:

- 1) 布谷鸟一次产卵一个, 并随机选择鸟窝孵化它;
- 2) 在随机选择的一组鸟窝中, 最好的鸟窝将会被保留到下一代继续使用;
- 3) 所使用宿主鸟巢数量是固定的, 而布谷鸟的卵有可能被宿主发现而导致孵化失败。

基于以上 3 个理想状态, 布谷鸟寻窝的路径和位置更新方式如下:

$$\chi_i^{(t+1)} = \chi_i^{(t)} + \alpha \oplus L(\lambda) \quad (1)$$

式中 $\chi_i^{(t)}$ 为第 i 个鸟窝在第 t 代的鸟窝位置, \oplus 为点对点乘法, α 为步长, $L(\lambda)$ 为莱维飞行随机搜索路径, 并且 $L \sim \mu = t^{-\lambda} (1 \leq \lambda \leq 3)$ 。通过位置更新后与发现概率 Pa 进行对比筛选较优值并进行最优值保留。

在本文中, 利用布谷鸟算法对针对结构损伤参数构建的目标函数进行寻优, 可检测出损伤结构的损伤位置和程度, 从而实现结构的损伤识别, 并选用频率残差和模态置信准则构建目标函数。

2 目标函数

基于有限元解析结构, 运用模态保证准则和频率残差建立结构的目标函数。系统的自由振动方程为

$$M\{\ddot{X}\} + C\{\dot{X}\} + K\{X\} = 0 \quad (2)$$

对应的特征方程为

$$(K - \omega_j \cdot M)\varphi_j = 0 \quad (3)$$

M 和 K 分别是系统的质量和刚度矩阵, φ_j 为对应的模态, ω_j 是第 j 阶频率, 忽略质量的变化, 损伤可归结为刚度的减少。结构发生损伤时刚度的减少量可以通过一系列损伤系数 $\alpha_i (i = 1, 2, \dots, nel)$, $\alpha_i \in [0, 1)$ 来描述。损伤结构的整体刚度矩阵可以写作

$$K_d = \sum_{i=1}^{nel} (1 - \alpha_i) K_i^e \quad (4)$$

刚度的变化会导致结构频率和模态的变化, 故采用频率残差和模态置信准则建立目标函数, 具体如下:

$$MAC_j = \frac{|\varphi_j^d \cdot \varphi_j^{hT}|^2}{|\varphi_j^{dT} \cdot \varphi_j^d| \cdot |\varphi_j^{hT} \cdot \varphi_j^h|} \quad (5)$$

$$f = (1 - MAC_j) + \sum_{i=1}^{NF} \left(\frac{\omega_j^h - \omega_j^d}{\omega_j^h} \right)^2 \quad (6)$$

其中 NF 为提取的频率模态阶数。此时结构损伤识别问题可等价于全局优化问题, 当优化到目标函数极小时, 得到的一系列相关参数 $\{\alpha_i\}$ 便能反映出结构的损伤程度和位置。具体流程如图 1 所示。

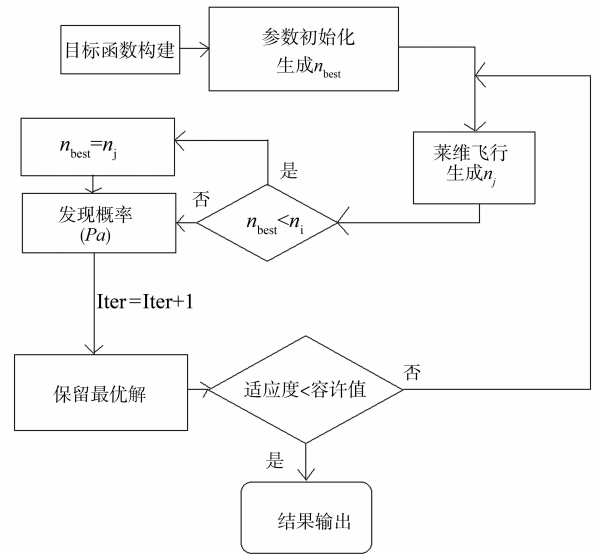


图 1 布谷鸟算法用于计算结构损伤流程图

Fig. 1 The flow chart of damage detection based on Cuckoo search algorithm

3 数值模拟

工况 1: 双跨筒支梁。

如图 2 所示, 选用双跨筒支梁模型, 选用钢质梁, 其物理参数为: 杨氏模量 $E = 210 \text{ GPa}$, 钢质梁密度 $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$, 横截面的宽度和高设为 $b = h = 0.1 \text{ m}$, 梁长 $L = 10 \text{ m}$, 系统通过有限元离散为 20 个欧拉-伯努利梁。

假定双跨筒支梁结构的第 5, 6 和 16 单元的单元刚度分别减少 10%, 15% 和 20%, 其中, 5 号和 6 号单元为邻近损伤单元。在布谷鸟算法中, 提取前 3 阶频率和振型, 初始的布谷鸟种群数目设为 25, 步长为 1, 发现概率为 0.25, 精度要求为

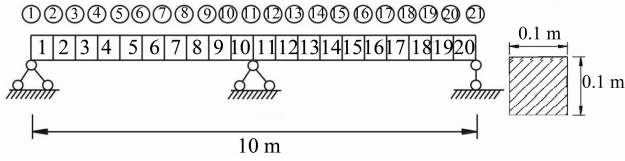


图 2 双跨简支梁模型

Fig. 2 A dual span supported beam and cross section

tol = 10⁻⁷。运用 MATLAB 软件进行编译检测系统局部损伤。为更好的模拟实际情况，添加 2% 模态随机噪声和 1% 的频率随机噪声。损伤识别的目标函数适应度迭代过程和损伤单元迭代过程及损伤结果如图 3、图 4 和图 5 所示。

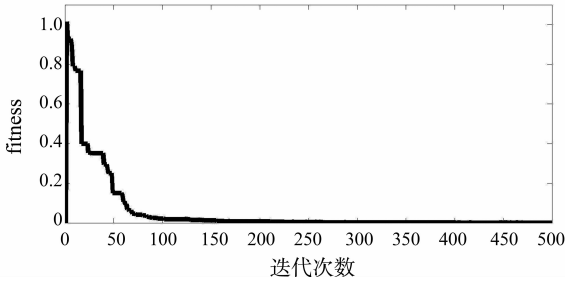


图 3 基于布谷鸟算法目标函数迭代过程

Fig. 3 Iteration process of objective function based on Cuckoo search algorithm

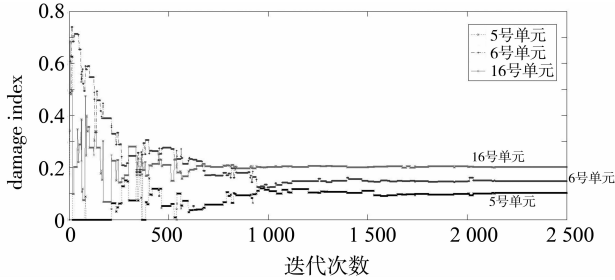


图 4 部分单元的损伤识别迭代过程

Fig. 4 Evolutionary processes of damage indices in case 1 of the beam

如图 5 所示，运用布谷鸟算法，其最大误差为 2.1%，发生在第 1 号单元，布谷鸟算法能准确的识别 5 号、6 号和 16 号损伤单元的损伤位置和程度。

工况 2：桁架。

除选用简支梁模型，如图 6 所示，选用桁架模型进行算法验证。

假定桁架结构的第 3，8，14 和 16 单元的单元刚度分别减少 10%，12%，15% 和 20%。提取损伤结构前 3 阶频率和振型（各识别参数同工况 1）

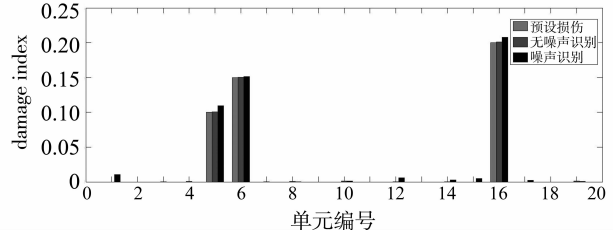


图 5 基于布谷鸟算法的简支梁损伤识别结果

Fig. 5 Damage detection results of beam based on Cuckoo search algorithm

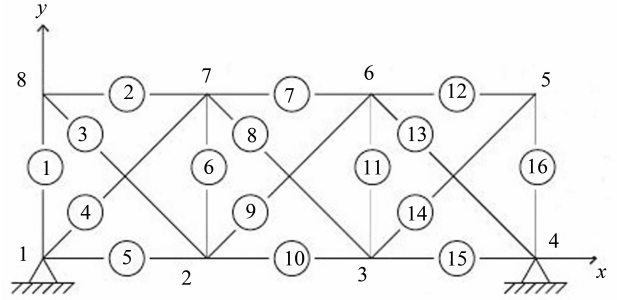


图 6 桁架模型

The model of a truss

进行计算。损伤识别的结果迭代过程和部分单元迭代过程及损伤结果如图 7、图 8 和图 9 所示。

如图 9 所示，运用布谷鸟算法，其最大误差为 1.2%，发生在第 7 号单元，能准确的识别 3 号、8 号、14 号和 16 号损伤单元。

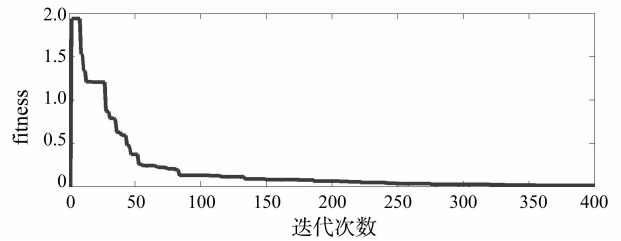


图 7 基于布谷鸟算法目标函数迭代过程

Fig. 7 Iteration process of objective function based on Cuckoo search algorithm

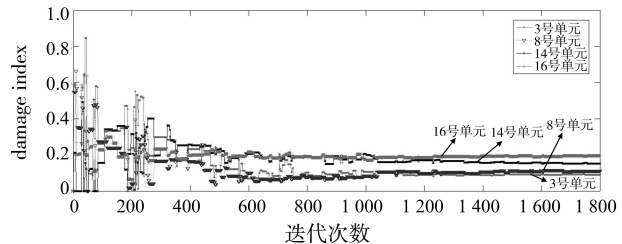


图 8 部分单元的损伤识别迭代过程

Fig. 8 Evolutionary processes of damage indices in case 2 of the truss

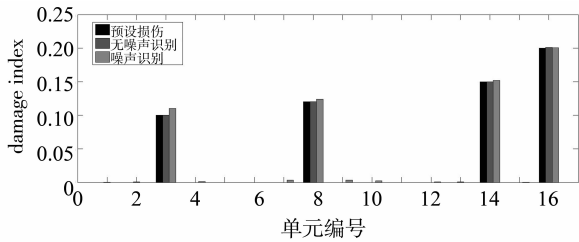


图9 基于布谷鸟算法的桁架损伤识别结果

Fig.9 Damage detection results of truss based on Cuckoo search algorithm

4 结 论

以双跨简支梁和桁架作为结构损伤识别算例, 基于系统的模态和频率构造目标函数, 以布谷鸟算法来对目标函数进行全局寻优。算例表明在随机噪声的影响下, 布谷鸟算法仍能准确、高效的识别结构的损伤位置和程度, 可在工程实际问题应用。

参考文献:

[1] LU Z R, LAW S S. Features of dynamic response sensitivity and its application in damage detection [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 303: 305 - 329.

[2] 王乐, 杨智春, 谭光辉, 等. 基于固有频率向量的结构损伤检测方法[J]. 应用力学学报, 2008, 25(4): 709 - 714.

[3] 刘济科, 汤凯. 基于振动特性的损伤识别方法的研究进展[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 43(6): 57 - 61.

[4] 吕中荣, 王文洁, 徐伟华, 等. 基于振动响应的耦合杆系统损伤识别[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2012, 51(5): 31 - 35.

[5] 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.

[6] 施洲, 赵人达. 基于模态参数考虑边界条件变异的桥梁结构损伤识别[J]. 应用力学学, 2012, 29(2): 191 - 197.

[7] 刘济科, 汤凯. 基于残余力向量的结构损伤识别二步法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2005, 44(4): 1 - 4.

[8] 黄民水, 吴玟, 朱宏平. 噪声影响下基于改进损伤识别因子和遗传算法的结构损伤识别[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 168 - 174.

[9] BONABEAU E, DORIGO M, THERAULAZ G. Inspiration for optimization from social insect behaviour [J]. Nature, 2000, 406(6): 39 - 42.

[10] SUGANTHAN P N. Particle swarm optimization with neighborhood operator [C] // Proc of the IEEE Congress of Evolutionary Computation, 1999.

[11] YANG X S, DEB S. Engineering optimisation by cuckoo search [J]. Int J Mathematical Modelling and Numerical Optimisation, 2010, 1(4): 330 - 343.

[12] YANG X S, DEB S. Cuckoo search via Levy flights [C] // Proc of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC 2009), India USA: IEEE Publication, 2009: 210 - 214.

(上接第 12 页)

[9] DORMAND J R, PRINCE P J. New runge-kutta-nystrom algorithms for simulation in dynamical astronomy [J]. Celestial Mechanics, 1978, 18(3): 223 - 232.

[10] ABIA L, SANZ-SERNA J M. Partitioned Runge-kutta methods for separable hamiltonian problems [J]. Mathematics of Computation, 1993, 60(202): 617 - 634.

[11] WENDLANDT J M, Marsden J E. Mechanical integrators derived from a discrete variational principle [J]. Physica D, 1997, 106(3): 223 - 246.

[12] MARSDEN J E, WEST M. Discrete mechanics and variational integrators [J]. Acta Numerica, 2001, 10: 357 - 514.

[13] KANE C, MARSDEN J E, ORTIZ M. Symplectic-energy-momentum preserving variational integrators [J]. Math Phys, 1999, 40(7): 3353 - 3371.

[14] GONZALEZ M, SCHMIDT B, ORTIZ M. Energy-stepping Integrators in lagrangian mechanics [J]. Int J Num Meth Eng, 2010, 82(2): 205 - 241.

[15] 高强, 彭海军, 张洪武, 等. 基于哈密顿动力系统新变分原理的保辛算法之一: 变分原理和算法构造 [J]. 计算力学学报, 2013, 30(4): 461 - 467.

[16] 罗恩, 黄伟江, 张贺忻. 相空间非传统 Hamilton 型变分原理与辛算法 [J]. 中国科学: A 辑, 2002, 32(12): 1119 - 1126.

[17] 黄伟江, 罗恩, 余慧. 弹性梁动力响应分析的一种辛算法 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2002, 41(3): 5 - 8.

[18] 章学军, 黄伟江, 罗恩. 深梁动力响应分析的一种辛算法 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2010, 49(4): 33 - 37.

[19] 高强, 彭海军, 张洪武, 等. 基于哈密顿动力系统新变分原理的保辛算法之三: 数值算例 [J]. 计算力学学报, 2013, 30(4): 473 - 478.

[20] 闫海青, 唐晨, 张隼, 等. 任意阶显式精细积分多步法的常用形式及其高阶代数数值计算 [J]. 计算物理, 2004, 21(3): 333 - 338.