

基于 BMO 算法的损伤识别方法*

秦昌富, 陈衍茂, 吕中荣

(中山大学工学院应用力学与工程系, 广东 广州 510275)

摘要: 基于自适应鸟类交配优化算法 (BMO), 提出了一种新的群智能优化算法, 利用鸟类社会中的交配模式及其可以得到一个最优后代的特点, 将其用于结构刚度损伤识别中经过迭代得到最优解; 以简支梁和桁架作为算例, 对两种结构的有限元模型进行了分析, 并运用 Matlab 软件来进行了程序的设计和数值模拟计算。最后, 与传统的遗传算法进行对比, 验证了新算法的有效性。

关键词: 损伤识别; BMO 算法; 有限元模型

中图分类号: O34 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2018) 04-0099-05

The damage identification method based on BMO algorithm

QIN Changfu, CHEN Yanmao, LU Zhongrong

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

Abstract: Adaptive bird mating optimization (BMO) algorithm based on damage identification technology is a kind of new swarm intelligence optimization method, which uses mating patterns of birds'society, to get an optimal offspring in model, used to simulate the structure damage identification in the stiffness of the solution obtained after optimal iteration. The simply supported beam and truss example is chosen as samples using the Matlab software to simulate the design and data of the program. Compared with the traditional genetic algorithm, the finite element model of these two structures is analyzed to verify the effectiveness of the method.

Key words: damage identification; BMO algorithm; finite element model

随着现代传感技术、无线通讯技术、微处理技术、信号采集与处理、信息融合以及系统建模技术的日益精确和完善, 结构损伤动力监测技术也迅速发展起来。利用采集的振动信息对发生在结构上的损伤进行识别、定位和定量的研究取得了很大的进展, 成为了一门适应工程实际需要的综合学科。已有的损伤识别技术主要基于结构的振动特性来确定损伤程度和位置^[1], 主要有: 基于固有频率变化的方法^[2-5]、基于结构振型的方法^[6]、基于结构刚

度矩阵和柔度矩阵的方法^[7-8]和基于残余力向量的方法^[9-10]。

20 世纪 70 年代开始, 多种群智能优化算法被陆续提出, 这些算法在工程领域中得到了广泛的应用。例如: 20 世纪 60 年代初期 Holland 教授和他的学生 Bagley^[11]提出的“遗传算法”; 20 世纪 70 年代 Jerne^[12]提出的免疫网络假说等。Mares 和 Surace^[13]在 1996 年提出了基于遗传算法的结构损伤识别方法, 并以桁架结构为例进行了分析。研究表

* 收稿日期: 2017-05-13

基金项目: 国家自然科学基金 (11572356); 广东省科技计划项目 (2016A020223006)

作者简介: 秦昌富 (1992 年生), 男; 研究方向: 损伤识别; E-mail: 1814981651@qq.com

通信作者: 吕中荣 (1975 年生), 男; 研究方向: 损伤识别; E-mail: lvzhr@mail.sysu.edu.cn

明: 基于遗传算法的损伤识别可以有效的定位和量化损伤单元。Chou 和 Ghaboussi^[14]通过静定位移建立了目标函数, 将一种基于遗传算法的损伤别方法运用到五跨桁架桥的数值算例上。Begambre 和 Laiser^[15]则提出了将 Nelder-Mead 算法和粒子群算法相结合的损伤识别技术。由于目标函数和算法的搜索能力决定了基于优化算法的结构损伤识别技术的效率, 所以目前出现的多种群智能算法都致力于提高自己的搜索能力以提高识别的准确性。Yu 和 Xu^[16]提出了一种基于连续蚁群算法的损伤识别方法, 并通过针对三层框架结构的实验验证了该方法的损伤检测能力。Majumdar 等^[17]基于蚁群优化算法提出了一种结构损伤识别方法, 并以固有频率建立了目标函数, 借助桁架结构的数值算例分析了该方法的适用性。本文用 BMO 群智能算法对结构的刚度损伤进行了识别, 分别对简支梁结构和桁架结构的不同工况进行了研究, 并将获得的结果与传统遗传算法进行了对比, 验证了该方法的有效性。

1 基于 BMO 算法的损伤识别方法

1.1 频域损伤模型

在一般的情况下, 一个未损坏结构有限元模型的本征方程可以描述为:

$$(\mathbf{K} - \omega_j^2 \mathbf{M}) \boldsymbol{\varphi}_j = 0 \quad (1)$$

其中, \mathbf{K} 和 \mathbf{M} 分别是结构的刚度矩阵和质量矩阵, ω_j 是结构的固有频率, 而 $\boldsymbol{\varphi}_j$ 是与该结构相应的振型。

对于一个结构来说, 质量的改变对系统损伤的影响是非常小的, 可以忽略不计。对于结构的刚度损伤而言, 当有 nel 个单元的结构被破坏时, 它的刚度减少可以由一组损伤参数向量 $\boldsymbol{\alpha}_i (i = 1, 2, \dots, nel)$ 来直观的描述, 损伤的刚度矩阵可以写为:

$$\mathbf{K}_d = \sum_{i=1}^{nel} \alpha_i \mathbf{k}_i^e \quad (2)$$

其中, \mathbf{K}_d 表示损伤系统的刚度矩阵; \mathbf{k}_i^e 表示结构第 i 个单元的刚度矩阵; 参数向量 $\boldsymbol{\alpha}_i$ 所含第 i 个单元损伤参数范围是 0 ~ 1, 表示第 i 个单元的损伤程度。当它等于 1 时表示这个单元是完整的, 当它等于 0 时表示单元处于完全损伤状态。基于这种损伤模型, 确定结构的内部损伤就可以等价于确定结构的损伤参数向量 $\boldsymbol{\alpha}_i$ 。

1.2 确定目标函数

考虑到不同振型数据之间的差异, 采用模态控制系数 (MAC) 来使得理论模型和实际模型更加接近, 模态控制系数的表达式为:

$$MAC_j = \frac{(\{\boldsymbol{\varphi}_j\}^T \{\boldsymbol{\varphi}_j^M\})^2}{|\{\boldsymbol{\varphi}_j\}|^2 |\{\boldsymbol{\varphi}_j^M\}|^2} \quad (3)$$

式中, $\boldsymbol{\varphi}_j$ 和 $\boldsymbol{\varphi}_j^M$ 分别表示第 j 个振型的计算值和测量值, 易得出当 MAC 值为 1 的时候, 振型的计算值和测量值相等。事实上, 工程实际问题往往比理论研究模型复杂得多, 这就导致很难获得第 j 个振型的完整数据, MAC 的引入就很必要了。同时, 选取一个含有 0 和 1 元素的矩阵来表述与测量值振型有关的自由度。振型的计算值由下式给出:

$$\{\boldsymbol{\varphi}_j^C\} = [\mathbf{Q}] \{\boldsymbol{\varphi}_j\} \quad (4)$$

式中, $\{\boldsymbol{\varphi}_j^C\}$ 表示振型的计算值估值, \mathbf{Q} 为修正系数矩阵。基于以上两式, 可以得到的 MAC 值可以表示为:

$$MAC_j^R = \frac{(\{\boldsymbol{\varphi}_j^C\}^T \{\boldsymbol{\varphi}_j^M\})^2}{|\{\boldsymbol{\varphi}_j^C\}|^2 |\{\boldsymbol{\varphi}_j^M\}|^2} \quad (5)$$

式中, 等式左边表示由不完整的模态数据确定的第 j 个 MAC 值。和 MAC 一样, 当等式左边的值为 1 的时候, MAC_j^R 表示振型的计算值和测量值一样大。

只有振型一个数据很难确定损伤状态, 且不够准确。结合考虑结构固有频率的不同, 结构的固有频率表达式用下式表示:

$$\Delta w_j = \left| \frac{w_j^C - w_j^M}{w_j^M} \right| \quad (6)$$

式中, w_j^C 和 w_j^M 分别表示结构固有频率的计算值和测量值。

综合考虑 (5) 和 (6) 式的振型和固有频率, 得到结构损伤的目标函数为:

$$f = \sum_{j=1}^{NF} w_{\omega_j}^2 \Delta w_j^2 + \sum_{j=1}^{NM} w_{\varphi_j}^2 (1 - MAC_j^R) \quad (7)$$

式中, w_{ω_j} 表示第 j 个固有频率输出错误所占的比重; w_{φ_j} 表示第 j 个振型输出错误所占的比例; NF 和 NM 分别表示固有频率和振型的数量。

通过观察振型和固有频率数据的关系, 结合公式 (2), 可以看出式 (7) 是关于损伤参数向量的目标函数。如果损伤参数向量 $\boldsymbol{\alpha}_i$ 与特定条件下的损伤相适应的话, 那么目标函数取最小值, 即为 0。而当目标函数取最小值时, 相应的损伤参数向量就可以表述损伤状态。

2 数值算例

2.1 简支梁算例

简支梁的总单元数为 20, 每个单元的节点数为 2, 每个节点的自由度也为 2, 总的节点数则为 21。系统的总自由度为总的节点数与每个节点自由度的乘积, 为 42 个。所选简支梁的结构见图 1。

简支梁的横截面宽度和高度分别为 $b = 0.05$ m, $h = 0.006$ m, 跨度为 $l = 1.2$ m, 杨氏模量 $E = 70$

GPa, 材料的密度 $\rho = 2.70 \times 10^3$ kg/m³, 泊松比 $\mu = 0.33$ 。

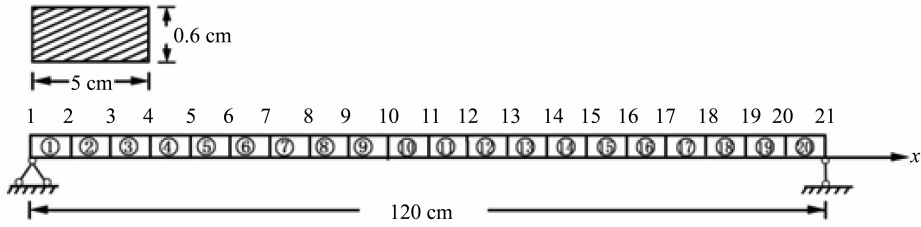


图 1 简支梁结构示意图

Fig. 1 The simply supported beam structure

选取的损伤单元为 4 和 19, 在该算例中我们只用到前 4 阶的固有频率和振型, 并且计算过程中的迭代数最大值为 500。对单元 4 取 15% 的损伤, 对单元 19 取 20% 的损伤, 进行算法模拟, 结果如图 2-3 和表 1 所示。

表 1 简支梁结构损伤识别结果

Table 1 Identity results of simply supported beam structure

位置	损伤程度	噪声	算法类型	识别结果相对误差	
				/%	/%
4	15%	无噪声	BMO 算法	14.900 9	0.661
			遗传算法	14.549 3	3.004
		10% 噪声	BMO 算法	14.782 4	1.451
			遗传算法	14.289 1	4.739
19	20%	无噪声	BMO 算法	19.900 1	0.499
			遗传算法	19.302 1	3.490
		10% 噪声	BMO 算法	19.594 8	2.026
			遗传算法	19.027 4	4.863

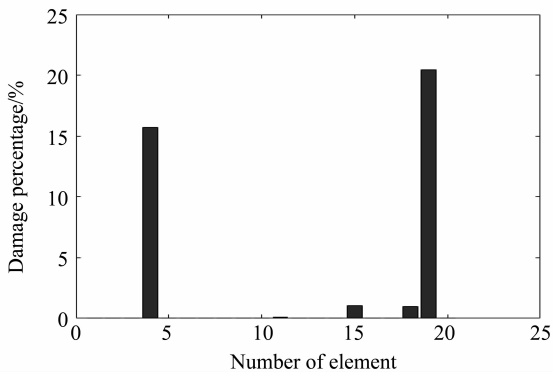


图 2 无噪声下识别结果

Fig. 2 Identity results without noise

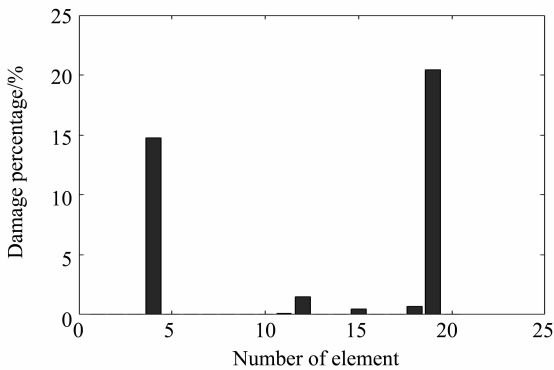


图 3 10% 噪声下识别结果

Fig. 3 Identity results with 10% noise

简支梁结构刚度损伤识别比遗传算法精度高, 抗噪声能力也比较强。

2.2 桁架算例

引入较复杂一些的桁架作为算例, 选取一个 31 杆的桁架, 每根杆的长度为 $l = 1$ m, 并且每根杆的横截面积为 $A = 0.004$ m², 杨氏模量为 $E = 200$ GPa。本算例中材料密度为 $\rho = 7.8 \times 10^3$ kg/m³, 桁架结构的示意图如下:

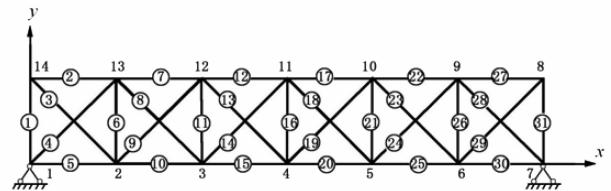


图 4 桁架结构

Fig. 4 Truss structure

对单元 8 取 5% 的损伤, 对单元 20 取 10% 的损伤, 对单元 26 取 20% 的损伤, 得到算法的模拟结果如图 5-6 和表 2 所示。

由图 2-3 和表 1 数据可得, 基于 BMO 算法的

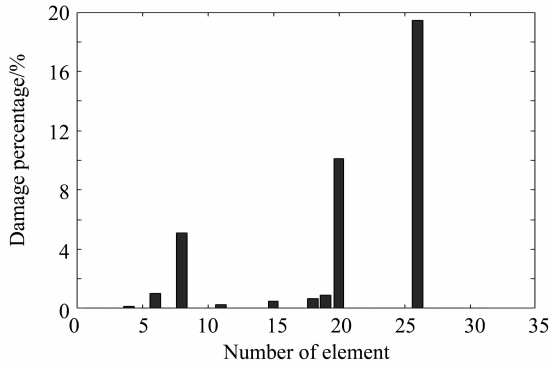


图5 无噪声下识别结果

Fig. 5 Identity results without noise

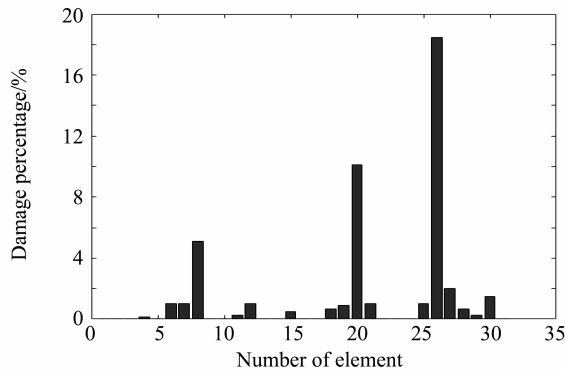


图6 10%噪声下识别结果

Fig. 6 Identity results with 10% noise

由图5-6以及表2易得,基于BMO算法的桁架结构刚度损伤识别效果非常明显。且,与传统的

遗传算法相比,BMO算法精度较高,抗噪声能力也较强。

表2 桁架结构损伤识别结果

Table 2 Identity results of truss structure

位置	损伤程度	算法	类型	识别结果	相对误差
				/%	/%
8	5%	无噪声	BMO算法	4.966 6	0.668
			遗传算法	4.881 3	2.374
		10%噪声	BMO算法	4.949 1	1.018
			遗传算法	4.872 9	2.542
20	10%	无噪声	BMO算法	49.923 8	0.762
			遗传算法	9.752 3	2.477
		10%噪声	BMO算法	9.878 5	1.215
			遗传算法	9.531 2	4.688
26	20%	无噪声	BMO算法	19.739 0	1.302
			遗传算法	18.923 4	5.383
		10%噪声	BMO算法	19.471 0	2.642
			遗传算法	18.502 4	7.488

3 结论

本文利用自适应BMO方法分别对简支梁和桁架结构进行了刚度损伤识别。首先采用MAC准则和频率变化构造了目标函数,并在无噪声和有噪声情况下分别对两种结构的损伤进行了分析,发现该方法可以有效地用于两种结构的识别,并且结果与传统遗传算法相比较精确很多,抗噪声能力也较强。

参考文献:

- [1] 张春丽,吕中荣. 考虑温度影响的桥梁结构损伤识别[J]. 中山大学学报(自然科学版),2016,55(3):102-105.
ZHANG C L, LU Z R. Bridge structure damage identification considering temperature effect[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2016,55(3): 102-105.
- [2] 李书明,何亮,程关兵. 基于振动分析的结构损伤检测方法研究[J]. 中国民航学院学报,2006,24(5):26-29.
LI S M, HE L, CHENG G B. Research on structural damage detection based on vibration analysis[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2006,24(5):26-29.
- [3] LIFSHITZ J M, ROTEM A. Determination of reinforcement unbonding of composites by a vibration technique [J]. Journal of Composite Materials, 1969, 3(3): 412-423.
- [4] GARDNER-MORSE M G, HUSTOND R. Modal identification of cable-stayed pedestrian bridge [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(11): 3384-3404.
- [5] 郑栋梁,李中付,华宏星. 结构早期识别技术的现状和发展趋势[J]. 振动与冲击,2002,21(2):1-6.
ZHENG D L, LI Z F, HUA H X. The status and development trend of early structure identification technology[J]. Journal of Vibration and Shock, 2002,21(2):1-6.
- [6] WEST W M. Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an orbiter test specimen [C]//GARY K. Proceedings of Air Force Conference on Aircraft Structural Integrity. Los Angeles: Schenectady, NY, Union College, 1984: 1-6.
- [7] ALLEMANG R J, BROWM D L. A correlation coefficient

- for modal vector analysis [C] // RICHARD V. Proceedings of the First International Modal Analysis Conference. Washington DC: Dept. of Physics, American University, 1982; 110 – 116.
- [8] LIN C S. Location of modeling errors using modal test data [J]. AIAA Journal, 1990, 28(9): 1650 – 1654.
- [9] ZIMMERMAN D C, KAOUK M. Structural damage detection using a minimum rank update theory [J]. Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of ASME, 1994, 116(2): 222 – 231.
- [10] 周先雁, 沈蒲生, 程翔云. 用振动参数识别技术对混凝土框架进行破坏评估 [J]. 土木工程学报, 1998, 31(2): 39 – 45.
ZHOU X Y, SHEN P S, CHENG X Y. Destruction assessment of concrete frames using vibration parameter identification technology [J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(2): 39 – 45.
- [11] BAGLEY J D. The behavior of adaptive systems which employ genetic and correlation algorithms [D]. Michigan, USA: University of Michigan, 1967.
- [12] JERNE N K. Towards a network theory of the immune system [J]. Annual Immunology, 1974, 125C: 373 – 389.
- [13] MARES C, SURACE C. An application of genetic algorithms to identify damage in elastic structures [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 195(2): 195 – 215.
- [14] CHOU J H, GHABOUSSI J. Genetic algorithm in structural damage detection [J]. Computers & Structures, 2001, 79(14): 1335 – 1353.
- [15] BEGAMBRE O, LAIER J E. A hybrid Particle Swarm Optimization-Simplex algorithm (PSOS) for structural damage identification [J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40(9): 883 – 891.
- [16] LING Yu, PENG Xu. Structural health monitoring based on continuous ACO method [J]. Microelectronics Reliability, 2011, 51(2): 270 – 278.
- [17] MAJUMDAR A, MAITI D K, MAITY D. Damage assessment of truss structures from changes in natural frequencies using ant colony optimization [J]. Applied Mathematics and Computation, 2012, 218(19): 9759 – 9772.