

文章编号:1000-8055(2013)09-2050-05

基于递阶遗传算法的结构多损伤监测

范德礼¹, 郑世杰¹, 王宏涛²

(1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

摘 要: 基于递阶遗传算法(HGA)与结构优化思想,提出了一种针对欧拉-伯努利梁和二维板结构的多损伤监测方法.该方法利用递阶遗传算法的控制基因表示损伤的数量和位置,以参数基因表示损伤的程度,有效地避免了传统遗传算法(CGA)的早熟现象所造成的损伤误识别等问题.一个悬臂梁和悬臂方板结构模型的多损伤监测仿真计算表明该方法能够准确地监测一、二维结构中多个位置的损伤,而传统遗传算法难以识别二维结构中的多损伤情况.悬臂梁仿真算例中,该方法和传统遗传算法对多损伤程度的识别误差分别为0.144%和1.819%,所需的有限元计算次数该方法仅为传统遗传算法的16.4%.与传统遗传算法相比,递阶遗传算法明显提高了损伤识别方法的计算效率、精度和稳定性.

关 键 词: 多损伤监测;递阶遗传算法;参数基因;控制基因;结构优化

中图分类号: V214.3;TB122

文献标志码: A

Multiple damages detection of structure based on hierarchical genetic algorithm

FAN De-li¹, ZHENG Shi-jie¹, WANG Hong-tao²

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: On the basis of a hierarchical genetic algorithm (HGA) and the idea of structural optimization, a method for multiple damages detection of an Euler-Bernoulli beam and a 2-D plate structure was presented. The algorithm employed control genes to represent the number and location of multiple damages and parametric genes to denote damage extents, effectively avoiding the premature phenomenon of conventional genetic algorithm (CGA). The results of a cantilever beam and a 2-D cantilever plate simulation examples show that the good agreements with the actual situation can be obtained by using the present method, but CGA can't accurately predict multiple damages of the plate. For the simulation of the cantilever beam, the average values of depth prediction errors for HGA and CGA are 0.144% and 1.819%, respectively. The iteration numbers of finite element computation of HGA are only 16.4% of that of CGA. Compared with CGA, HGA remarkably improves the computational efficiency, accuracy and stability.

收稿日期: 2012-09-25

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130926.1103.201309.2050_004.html

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50830201);国家自然科学基金面上项目(51075202);江苏“青蓝工程”;

高校优势学科建设工程

作者简介: 范德礼(1988—),男,山东滨州人,助理工程师,硕士,主要研究方向为结构健康监测、减速箱设计.

Key words: multiple damage detection; hierarchical genetic algorithms; parametric genes; control genes; structural optimization

近20年来,结构在线健康监测已经引起社会的高度重视,为此相关人员进行不懈的研究和探索,但对于多损伤监测问题,由于满足损伤特征要求的解可能有多组甚至无穷多组,导致算法搜索空间大,效率低,且很容易误识别到错误解,因此多损伤监测至今仍然是亟待解决的棘手问题之一.遗传算法将“自然选择”原则引入优化过程中,它对目标函数既不要求连续也不要求可微,且其算法本身隐含着一种并行计算机制,因此遗传算法在结构多损伤监测领域中表现出极强的生命力^[1-3].早期的遗传算法基多损伤监测方法大多可归属于不同形式的二阶段法^[4-7],例如 Lee 和 Wooh^[6]针对对称结构提出一种粗、细搜索策略,即先确定损伤的大致区域,再利用 μ GA 进行精细化搜索;He 和 Hwang^[7]利用灰色相关分析排除出不可能的损伤位置,再利用实参数编码的遗传算法对损伤位置、程度进行精确化评估.最近, Borges 等^[8]采用启发式初始种群生成方法、动态适应度函数设计、修正变异算子等方式改进遗传算法以解决多损伤监测的多解不唯一问题; Nobahari 和 Seyedpoor^[9]则引入了两种新的遗传算子,通过建立一个有效的损伤关联基指数作为遗传算法的适应度函数实现了对一维梁结构多个损伤位置、程度的准确预测.综上所述,早期的遗传算法基多损伤监测方法大致可分为两类:一种是借助于其他辅助手段减少遗传算法的搜索空间,再利用遗传算法对损伤位置、程度进行精细化评估^[6-7];另一种方法则将损伤位置和程度间的联系人为地割裂开来,利用遗传算法和其他方法分别独立地进行损伤位置、程度的预测^[4-5].近期的研究^[8-9]则侧重于通过对遗传算法的遗传算子、适应度函数等的改进,同时实现对损伤位置和程度的定位和评估.为此,本文提出了一种基于递阶遗传算法的结构多损伤监测的方法,避免了多损伤监测中常规遗传算法极易出现的早熟现象所造成的损伤误识别等问题,提高了计算效率和预测精度.

1 多损伤识别的目标函数

在现有利用有限元模型进行损伤识别的研究中,大多采用折减系数法^[1,4-5]来表征结构损伤前后刚度矩阵和质量矩阵的变化,即给每一个有限单元赋一个实数变量 χ ,实数变量 χ 值可以在 0~

1 进行变化, $1-\chi$ 表示损伤导致的结构刚度的改变量,第 e 个单元的无损实体状态和孔洞状态对应的变量值分别为 $\chi_e = 1$ 和 $\chi_e = 0$.考虑到结构的损伤可能为轻微、严重等不同程度,还可能为纯粹的孔洞损伤,本文采用了文献^[10-11]的做法,对于第 e 个单元的质量矩阵 $\mathbf{M}_e$ 和刚度矩阵 $\mathbf{K}_e$ 分别假设为

$$\mathbf{K}_e = \chi_e^p \mathbf{K}_0$$

$$\mathbf{M}_e = \chi_e^q \mathbf{M}_0$$

$$0 < 0.001 = \chi_{e,\min} \leq \chi_e \leq 1 \quad (1)$$

文献^[10-11]的研究表明,对于非孔洞损伤,罚指数 p, q 均取 1;但当单元密度小于一定的值时,两个罚指数都取较大值,即 p 取 3, q 取 6,可以避免低密度单元导致的局部寄生模态,得到清晰的拓扑结构图^[10-11].

这里 $\mathbf{K}_0$ 和 $\mathbf{M}_0$ 表示初始状态结构的单元刚度矩阵和单元质量矩阵, $\mathbf{K}_e$ 和 $\mathbf{M}_e$ 表示损伤发生后结构的单元刚度矩阵和单元质量矩阵, χ_e^p 和 χ_e^q 分别表示单元在发生损伤后刚度矩阵与质量矩阵的比例系数,设计变量 χ_e 的取值范围应该为一个小于等于 1 的非负小数 ($0.001 \leq \chi_e \leq 1$).在优化过程中通常要给每个设计变量 χ_e (比例系数)一个最小值 $\chi_{e,\min}$,一般 $\chi_{e,\min}$ 的取值范围为 0.001~0.1,当 χ_e 的取值等于或者接近 $\chi_{e,\min}$ 时,单元的质量和刚度会变得几乎接近 0,此时单元将其视为孔洞.

对于不计阻尼的 n 个自由度的系统,系统的固有频率计算方程为

$$\det(\mathbf{K} - \omega_i^2 \mathbf{M}) = 0$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中 $\mathbf{M}, \mathbf{K}$ 分别表示结构的质量矩阵和刚度矩阵.

在大多数情况下,结构仅是在少数位置上发生损伤,结构的绝大多数部分都是“健康”的,因此在结构健康监测的算法研究中大多采用启发式种群生成等辅助措施抑制中间损伤情况的发生.再者,本文的基本学术思想是寻求一种工程实际损伤分布状态,使其对应的结构 n 阶共振频率计算值 f_i^c 无限接近于已知的 n 阶共振频率实验值 f_i^m ,综合考虑上述两点因素,本文采用如下的目标函数:

$$\min_{\chi_{e,\min} \leq \chi_k < 1} f = \sum_{k=1}^n [\chi_k(1 - \chi_k)] + \eta \sqrt{\sum_{i=1}^{10} \left(1 - \frac{f_i^c}{f_i^m}\right)^2} \quad (3)$$

其中式(3)右端的第1项关于 $\chi_k = 0.5$ 对称,保证了 χ_k 的取值更倾向于 $\chi_k = 1$ (单元不发生损伤)或 $\chi_k = 0$ (单元全部损伤),式(3)右端的第2项则为结构共振频率的约束方程, η 为罚函数。

2 用于多损伤识别的 HGA

HGA 是根据生物染色体的层次结构提出的^[2]。染色体表示为包括控制基因和参数基因的递阶结构,参数基因处于下级,控制基因处于上级,下级基因受控于上级基因(见图1)。在基因编码时,参数基因可以自由选择编码方式,控制基因必须采用二进制编码,“1”表示对应的参数基因处于激活状态(有效状态),“0”表示对应的参数基因处于休眠状态(无效状态)。对于结构多损伤监测这一具体问题而言,控制基因和参数基因均采用二进制编码。在编码中,第1层控制基因的编码位数与结构单元数目相同,位上为“1”表示对应单元位置的参数基因处于激活状态,即存在损伤;位上为“0”表示对应单元位置的参数基因处于休眠状态,即不存在损伤。计算染色体适应度时,首先对被激活的参数基因进行解码,得到损伤单元的单元号及对应的损伤程度,与完好单元一起构成结构单元特征组,然后利用有限元法计算结构的固有频率,进而评价染色体的性能。



图1 递阶遗传算法染色体结构

Fig.1 Chromosome structure of HGA

本文采用传统的最佳保留选择结合无放回随机竞争选择策略;交叉操作选用均匀交叉策略;对二进制编码染色体的基因位采取0,1切换跳跃变异以及参数基因微小变异(加或减一个微小差值)方法。此外本文还引入了重新启动算子,以这一代中适应度最佳个体编码为模板,让其逐个与子代其他个体的编码进行对比,得到一个总体差异性比值,若这个种群所有普通解与最优解的差异性比值小于设置的差异性阈值,表示种群差异性过小或可能收敛于局部最优解,此时保留最优解个体,其他个体重新随机生成,然后继续原来的遗传

算法迭代操作。鉴于通常情况下损伤单元的数目明显少于“健康”单元,为提高计算效率,本文采用了启发式种群生成策略,即对于控制基因的每个基因位,生成1的概率设置为0.2,生成0的概率为0.8,这样随机生成个体中损伤单元数目为结构单元总数目的20%。

算法步骤:①根据编码规则随机生成种群,种群的每个个体对应设计的某种损伤分布情况;②把种群中每个个体解码成一组实数数组,代入有限元程序进行计算;③把每个个体相对应的结构共振频率计算值代入设计好的目标函数中,算出目标函数值大小;④对种群个体依照目标函数进行最佳适应度筛选,然后进行选择、交叉、变异操作;⑤形成新种群,依次重复上面的操作迭代下去,直到满足迭代终止条件或者达到最大进化代数为止;⑥输出数据。

3 仿真算例

为了说明本文方法的有效性,现结合以下两个算例进行仿真计算验证。限于本文的研究范畴,以下算例中结构的 n 阶共振频率实验值均来自仿真。算例1中种群数量设置为40,目标函数式(3)中 η 取10,算例2中种群数量设置为100,目标函数式(3)中 η 取15000。

3.1 算例1 多裂纹悬臂梁模型

为了论证 HGA 较 CGA 在结构多损伤监测方面的优越性,本文首先讨论了一个悬臂梁结构的多裂纹监测仿真算例。悬臂梁模型的长度为0.5 m,高度为0.02 m,弹性模量为210 GPa,密度为7860 kg/m³。本文采用文献[12]的无质量旋转弹簧模拟存在于单元交界处的裂纹,其有限元模型及模拟方法参见文献[12-15]。表1给出了双裂纹的识别结果及求解正问题所需的有限元计算次数,括号中的数字为 HGA 的识别结果,不带括号的数字为 CGA 的识别结果。不难看出针对损伤模型 A 和 B,两种方法均给出了比较好的识别结果,但 HGA 较 CGA 有更高的识别精度和明显减少的有限元计算工作量。对模型 C,CGA 出现了早熟收敛,而 HGA 依然得到了令人满意的预测精度。

3.2 算例2 多损伤板模型

一端固支方板结构,密度为7700 kg/m³,泊松比为0.28,弹性模量为195 GPa;模型尺寸:长为0.05 m,厚为0.005 m;采用文献[2]的单元模型,依据式(1)的方法模拟结构损伤,网格划分:

表 1 悬臂梁双裂纹的识别结果

Table 1 Recognition result of double cracks in cantilever beam

损伤模型	理论值/mm		预测值/mm		误差/%		有限元 计算次数
	损伤位置	损伤程度	损伤位置	损伤程度	损伤位置	损伤程度	
A	裂纹 1	100	2	100(100)	2.0206(1.9952)	0(0)	114800
	裂纹 2	200	2	200(200)	1.9696(2.0078)	0(0)	(36040)
B	裂纹 1	100	8	100(100)	8.0058(8.0058)	0(0)	134800
	裂纹 2	200	8	200(200)	7.9678(7.9932)	0(0)	(10720)
C	裂纹 1	100	6	75(100)	6.3158(5.998)	25(0)	97200
	裂纹 2	200	8	125(200)	7.7898(8.0058)	37.5(0)	(9960)

xy 平面内每个网格的大小为 $0.01\text{ m}\times0.01\text{ m}$,单元 z 向铺层为 1,所以每个有限单元的规格为 $0.01\text{ m}\times0.01\text{ m}\times0.005\text{ m}$.结构总共被划分为 25 个单元,最左下角的单元编号为 1,按照先由下及上、再由左及右的顺序进行单元编号.二维板结构的多损伤监测较梁结构明显具有更高的难度,计算结果表明 CGA 已难以给出准确的识别结果,因此针对图 2、图 3 所示的包含 2 个损伤、3 个损伤情况,表 2、表 3 仅给出了 HGA 的识别结果.

图 2 所示 3 个模型实例为包含 2 个损伤的板结构模型,对于以上 2 个损伤的板结构模型进行了损伤识别的计算机仿真,这 3 种损伤结构模型 A,B,C 的损伤优化结果如表 2 所示.

通过以上结果可以看出,对于如表 2 所示 A,B,C 三种模型中包含 2 个损伤的识别效果均非常准确.在以上基础上,对于图 3 所示的存在于任意位置的包含 3 个损伤的板模型,进行 HGA 的优化识别测试,损伤识别结果如表 3 所示.结果表明对于任意位置的包含 3 个损伤的板模型,利用 HGA 可以得到 3 个损伤位置的准确识别结果,从而充分说明了本文提出的 HGA 进行多损伤监测识别的有效性.

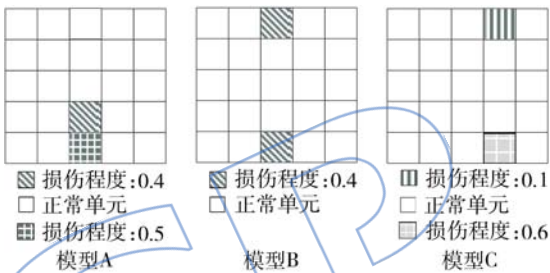


图 2 包含 2 个损伤的板及其有限元模型

Fig. 2 Plate with two damages and its finite element model

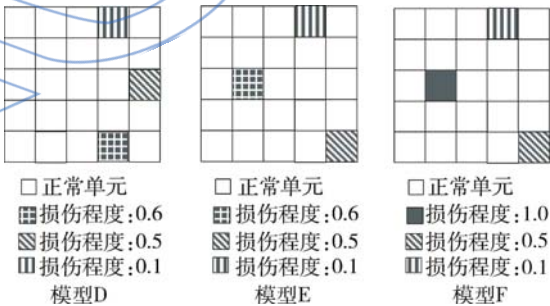


图 3 包含 3 个损伤的板及其有限元模型

Fig. 3 Plate with three damages and its finite element model

表 2 包含 2 个损伤的板的识别结果

Table 2 Recognition result of two damages in a plate

	单元 1 损伤程度	单元 2 损伤程度	损伤单元 1 编号	损伤单元 2 编号	损伤模型
理论值	0.500	0.400	11	12	A
优化值	0.499	0.400	11	12	
理论值	0.600	0.100	11	15	B
优化值	0.600	0.101	11	15	
理论值	0.600	0.100	16	20	C
优化值	0.600	0.101	16	20	

表3 包含3个损伤的板的识别结果

Table 3 Recognition result of three damages in a plate

	单元1 损伤程度	单元2 损伤程度	单元3 损伤程度	损伤单元1 编号	损伤单元2 编号	损伤单元3 编号	损伤模型
理论值	0.600	0.100	0.500	16	20	23	D
优化值	0.600	0.101	0.409	16	20	23	
理论值	0.600	0.100	0.500	8	20	21	E
优化值	0.601	0.101	0.500	8	20	21	
理论值	1.00	0.100	0.500	8	20	21	F
优化值	1.00	0.100	0.500	8	20	21	

4 结 论

本文提出了基于递阶遗传算法的结构多损伤识别理论,对悬臂梁和悬臂方板等结构模型进行了仿真计算.结果表明,本文方法可以在不需要任何先验知识和辅助措施的情况下,仅仅利用结构的前10阶固有频率,对一维、二维结构中的多个任意程度损伤(含孔洞)的位置和损伤程度进行准确地定位和程度评估.和传统遗传算法多损伤识别结果的对比表明,递阶遗传算法避免了传统遗传算法的早熟收敛等问题,显著减少了有限元计算的次数,提高了计算效率和损伤预测精度.

参考文献:

- [1] Mares C. An application of genetic algorithms to identify damage in elastic structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 195(2): 195-215.
- [2] Zheng S J, Li Z Q, Wang H T. Research on delamination monitoring for composite structures based on HHGA-WNN[J]. Applied Soft Computing, 2009, 9(3): 918-923.
- [3] Zhang R X, Zheng S J, Xia Y J. Strain profile reconstruction of fiber bragg grating with gradients using chaos genetic algorithm and modified transfer matrix formulation[J]. Optics Communications, 2008, 281(13): 3476-3485.
- [4] Friswell M, Penny J, Garvey S. A combined genetic and eigensensitivity algorithm for the location of damage in structures[J]. Computers and Structures, 1998, 69(5): 547-556.
- [5] Au F, Cheng Y, Tham L, et al. Structural damage detection based on a micro-genetic algorithm using incomplete and noisy modal test data[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 259(5): 1081-1094.
- [6] Lee S, Wooh S. Waveform-based identification of structural damage using the combined finite element method and microgenetic algorithms[J]. Journal of Structural Engineering-Asce, 2005, 131(9): 1464-1472.
- [7] He R, Hwang S. Damage detection by a hybrid real-parameter genetic algorithm under the assistance of grey relation analysis[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2007, 20(7): 980-992.
- [8] Borges C, Barbosa H, Lemonge A. A structural damage identification method based on genetic algorithm and vibrational data[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 69(13): 2663-2686.
- [9] Nobahari M, Seyedpoor S. Structural damage detection using an efficient correlation-based index and a modified genetic algorithm[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011, 53(9/10): 1798-1809.
- [10] 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 Xiaoping, ZHENG Shijie. Multi-hole damage detection in structures based on genetic algorithms and topology optimization[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(7): 201-204. (in Chinese)
- [11] Lee J S, Kim J E, Kim Y Y. Damage detection by the topology design formulation using modal parameters[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 69(7): 1480-1498.
- [12] Lee J. Identification of multiple cracks in a beam using natural frequencies[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 320(3): 482-490.
- [13] 钱管良, 顾松年, 姜节胜. 含裂纹梁的动力特性[J]. 航空学报, 1989, 10(9): 448-454.
QIAN Guanliang, GU Songnian, JIANG Jiesheng. Dynamic behavior of a cantilever beam with cracks[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1989, 10(9): 448-454. (in Chinese)
- [14] Krawczuk M, Zak A, Ostachowicz W. Elastic beam finite element with a transverse elasto-plastic crack[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2000, 34(1): 61-73.
- [15] Ostachowicz W M, Krawczuk M. Analysis of the effect of cracks on the natural frequencies of a cantilever beam[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 150(2): 191-201.