

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.06.007

改进分层遗传算法在斜拉桥主梁损伤识别中的应用

李延强, 张 阳

(石家庄铁道大学 工程力学系, 石家庄 050043)

摘 要:标准遗传算法在解决像斜拉桥这类复杂结构的损伤识别问题时会出现提前收敛,即所谓“早熟”的现象。为了避免此现象的发生,提高损伤识别的效率与精度,提出一种基于改进分层遗传算法的斜拉桥主梁损伤识别方法。采用索力变化作为优化目标函数,将3种具有不同遗传算子的标准遗传算法与变量微调和灾变策略相结合,形成了一种具有灾变特性的分层遗传算法,以实验室独塔斜拉桥模型作为研究对象进行了数值仿真,结果表明:改进的分层遗传算法成功的避免了标准遗传算法“早熟”现象的发生,能快速有效的完成斜拉桥主梁各种损伤的识别;同时对此方法进行抗噪性分析发现,该方法具有良好的抗噪能力。

关键词:斜拉桥;损伤识别;遗传算法;损伤因子;索力

中图分类号:U448.27 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)06-0041-07

Application of Improved Hierarchic Genetic Algorithm to Damage Detection of the Main Girder for Cable-stayed Bridge

Li Yanqiang, Zhang Yang

(Mechanics Engineering Department, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 040053, P. R. China)

Abstract: In the process of damage identification for high-order nonlinear structure such as cable-stayed bridges by the standard genetic algorithm, premature convergence would appear. In order to avoid this, an improved hierarchic genetic algorithm was proposed. The cable force change was used to establish the optimization function and threetypes of standard genetic algorithm were combined with variable fine-tuning and hierarchic strategy. To establish a hierarchical genetic algorithm with catastrophe characteristics A single-tower cable-stayed bridge model was used in the numerical simulation and the result showed that the probability of premature convergence was reduced in the improved hierarchic genetic algorithm and and the cable-stayed bridge damage was identified effectively. The anti-noise performance was better.

Key words: cable-stayed bridge; damage identification; improved genetic algorithm; damage factor; cable force

随着架桥技术日渐成熟,中国已经成为世界上建造斜拉桥最多的国家。在斜拉桥的正常使用过程中不可避免的会出现老化、破损等现象,如何准确有效地对斜拉桥这样的复杂桥梁进行损伤识别一直是工程研究人员关心的话题。目前常用的损伤识别方法有动力指纹分析法和模型修正法^[1]等,这些方法

在简单的梁、桁架结构的损伤识别中已得到了广泛的应用,但对于斜拉桥这种退化源复杂的高次超静定结构,通过现有的测量手段并不能得到高精度的完备测量信息,导致以上方法很难应用于斜拉桥结构中。由于损伤识别属于力学中的反问题,需要通过已获得的结构响应信息来反演结构损伤退化情

收稿日期:2014-04-12

基金项目:国家自然科学基金(50778116);河北省自然科学基金(E2012210061);河北省教育厅重点项目(ZH2012068)

作者简介:李延强(1973-),男,教授,博士,主要从事大跨桥梁损伤识别研究,(E-mail)yanleeq1973@163.com。

况,而反演的过程在数学上属于优化问题,因此许多学者将数学中的寻优方法应用于损伤识别领域。

遗传算法因其广泛的适用性和良好的全局搜索能力,备受工程人员的关注^[2-10]。朱劲松等^[11]以3年期索力检测的为基础,根据参数化模型反演出主梁应力并构造相应的目标函数,利用标准的遗传算法对招宝山大桥主梁上的损伤进行了模糊识别。荆江龙^[12]以主梁各测点模态柔度作为损伤识别指标,应用标准遗传算法初步判断主梁的损伤位置,然后根据得到的模态柔度变化率曲线间接估计相应损伤位置上的损伤程度。这些现有文献主要讨论了遗传算法应用于斜拉桥损伤识别的可行性问题,且大多结合结构的频率、振型等动力指标进行损伤识别。但对于斜拉桥这样复杂的结构,动力特性的低频和模态耦合会导致测量精度的不足,且容易出现“早熟”现象,因此基于动力指标的损伤识别方法很难应用于实际中。针对上述问题,本文提出一种改进的分层遗传算法,利用斜拉索的索力差来构建遗传算法的目标函数,对斜拉桥主梁的损伤进行识别。

1 改进分层遗传算法

遗传算法进行斜拉桥损伤识别其实质是把参数反分析问题转化为一个目标函数的优化问题,具体可分为两个过程:由初始种群出发利用选择、交叉、变异算子迭代计算求解出更优的种群,这一步是目标函数寻优的过程,即反分析过程,主要工作由遗传算法完成;然后将已得到的新种群中的个体依次代入有限元分析软件中得到相应个体的适应度函数值并返回给遗传算法评价解的优劣,这一步是计算结构响应值的过程,即正分析过程。通过正反分析迭代计算,使计算值和测量值的某种偏差达到最小,获得结构参数的最优解,以此识别损伤的位置与程度。

1.1 利用变量微调策略生成灾变种群

随着遗传算法的进行,种群中的个体会出现同化现象,这会直接导致进化后期“早熟”的发生,因此当种群进化到一定代数后需要引入灾变操作。与大变异灾变操作不同,本文不对遗传算子进行改进,而是采用变量微调策略生成灾变种群,即在上一代最优解的基础上对最优解个体作多次小范围的调整,将微调后的每一个解作为新的个体加入到新种群当中形成灾变种群。变量微调的方法为

$$X(i) = X(i) + \theta(i), \theta(i) \in [-0.05, 0.05] \\ i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: $X(i)$ 为最优解个体 X 中的第 i 个基因值, $\theta(i)$ 则是新施加的随机数。将最优解进行 T 次这样的变量微调操作(T 为种群规模),就能产生出一个即能提高种群多样性又不破坏原有有效模式的灾变种群,灾变的思想与变量微调策略的结合可以在一定程度上使遗传算法跳出局部最优解。

1.2 分层策略

分层策略将遗传算法的进化过程分为3层。第1层遗传算法需要在计算初期尽可能快的搜索到所求问题的有效模式,它注重全局搜索能力;第2层遗传算法利用另一套遗传算子对上一代种群进行深化寻优,所以在兼顾全局搜索的同时,要加强局部搜索能力;第3层遗传算法不再采用具有较强全局搜索能力的算子,而是选用局部搜索算子,使种群中的个体在进化过程中缓慢逼近全局最优解,然而这样的小范围内局部寻优操作不会使解的质量大幅度提升,但可以使局部最优解向优化方向前进一个很小的距离,使种群跳出局部最优解,尤其当局部最优解很小时,这种跳出局部最优解的优势能力就越明显。所以只有当算法陷入较小的局部最优解时才启用第3层遗传算法。

每层遗传算法通过上一层算法得到的最终种群相互联系。算法的初期和中期由前两层遗传算法控制,当种群中的最优解达到控制阈值时,可判定进化过程进入了后期阶段,此时加入第3层遗传算法与前两层算法共同完成进化后期的计算,直到寻找出全局最优解。

2 改进分层遗传算法适应度函数的建立及损伤识别过程

适应度函数的选取直接影响到遗传算法的收敛速度以及是否能找到问题的最优解,因此适应度函数的设计应尽可能简单,使计算的时间复杂度最小。通常适应度函数由目标函数加罚函数来构造。

目标函数是把损伤识别问题转化成优化问题的关键,一般采用桥梁结构的动力参数来构造,考虑到斜拉桥结构的复杂性,动力测试的不完备性会造成损伤识别结果并不理想。而斜拉索是沿斜拉桥的桥面分布的,含有主梁参数的空间信息,主梁发生损伤时,势必引起索力发生相应的变化,同时索力的测量具有简单、经济、精度高的特点,因此本文选用索力差构造遗传算法的目标函数。

一般认为主梁发生损伤时只引起相应单元的刚

度变化而质量并未改变,用 α_i 表示主梁第 i 个单元的刚度折减系数,目标函数表示成每根斜拉索实测索力与计算索力差值的平方和形式

$$\text{Obj}(a_1, a_2, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n (F_i^c - F_i^s)^2, i = 1, \dots, n \quad (2)$$

其中: m 为主梁上单元的个数; n 为斜拉索的根数; F_i^c 为实测索力,本文取为主梁模拟损伤工况下的索力值; F_i^s 为计算索力,本文指在寻优过程中某一个体所对应的索力计算值。通过构造目标函数,使斜拉桥损伤识别问题转化为满足最优化目标函数的非线性规划问题。通过使目标函数最小,反演结构参数(刚度折减系数)的变化量,以此来识别主梁损伤的位置和程度。

如果仅将目标函数直接转化为适应度函数进行损伤识别寻优计算,必然会出现“多对一”的现象,即全局最优解并不是唯一对应某一确定的工况,出现错误识别的问题,因此需要在目标函数中加入一定数量的约束条件。考虑到索塔横桥向位移比索塔纵桥向位移对主梁损伤更敏感,而主梁锚固点位移同时具有斜拉索与主梁两种构件的变形信息,故将索塔横桥向位移(沿 X 轴方向位移)、主梁锚固点竖向位移(沿 Y 轴方向位移)作为约束条件监测反演过程中的变形结果,筛选出“潜在”的不可行解,不等式约束为

$$|X_i^c - X_i^s| = \zeta_1 \leq \eta, |Y_j^c - Y_j^s| = \zeta_2 \leq \eta, i = 1, \dots, \chi \quad j = 1, \dots, \omega \quad (3)$$

其中: χ 为索塔上测点的个数; ω 为主梁锚固点个数; X_i^c, X_i^s 与 Y_j^c, Y_j^s 分别为索塔 X 轴方向与锚固点 Y 轴方向的实际位移值与计算位移值 η 为预定的控制精度。因为部分单元的损伤不会引起结构位移的剧烈变化,同时为了提高识别精度, η 取较小的值以 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 为宜。约束条件的处理方法采用罚函数法:当索塔、锚固点的实际位移值与计算位移值的差值超过了控制精度时,在原有的位移差值的基础上乘以一个系数形成罚函数。为了惩罚不可行解,将罚函数加入目标函数中,构造成带有惩罚项的适应度函数

$$\begin{cases} \text{fitness}(a_1, a_2, \dots, a_m) = \text{Obj}(a_1, a_2, \dots, a_m) + \\ \quad \ell_1 \times \zeta_1 + \ell_2 \times \zeta_2, \text{ if } \zeta_1 \geq \eta, \zeta_2 \geq \eta \\ \text{fitness}(a_1, a_2, \dots, a_m) = \text{Obj}(a_1, a_2, \dots, a_m), \\ \quad \text{if } \zeta_1 \leq \eta, \zeta_2 \leq \eta \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\text{Obj}(a_1, a_2, \dots, a_m)$ 是目标函数; $\text{fitness}(a_1,$

$a_2, \dots, a_m)$ 是适应度函数; ℓ_1 与 ℓ_2 为惩罚系数。 ℓ_1 与 ℓ_2 的取值与主梁单元网分形式和索力值的变化量有直接联系。当主梁中划分的单元较少,以大单元模拟损伤时,索力值变化显著目标函数值较大,而结构的位移改变却远不及索力值的变化明显,此时惩罚系数取较大值,以加大不可行解的惩罚力度;相反如果主梁单元网分较多,索力变化不明显,则惩罚系数选择较小值。经大量的试算发现,当主梁单元的个数小于 50 时, ℓ_1 与 ℓ_2 取 $10^4 \sim 10^6$ 为宜。

改进分层遗传算法的损伤识别流程如图 1 所示,损伤识别步骤如下:1)随机生成初始种群 $\{a_i\}$,代入有限元分析软件,依据式(4)计算各个体的适应度值;2)判定种群中最优个体适应度值是否达到设定的精度,如满足输出最优解,否则进行下一步的操作;3)将种群依次经过第 1、2 层遗传算法进行寻优,通过变量微调方法生成灾变种群,并将上一代的最优个体保留在灾变种群中;4)判定最优个体适应度值是否满足启用第 3 层遗传算法的条件,若不满足重复 2)~3)过程,直到适应度值小于某一特定值时,开启第 3 层遗传算法。5)若第 3 层遗传算法得到的最优个体不满足设定的精度重复步骤 3)~4),直到满足终止条件时停止程序并输出最优解。图 1 中各层遗传算法算子的选取原则满足分层策略的要求,不再赘述;个体适应度值的计算需要 Ansys 与 Matlab 两种数值分析软件相互调用,共同协作完成。

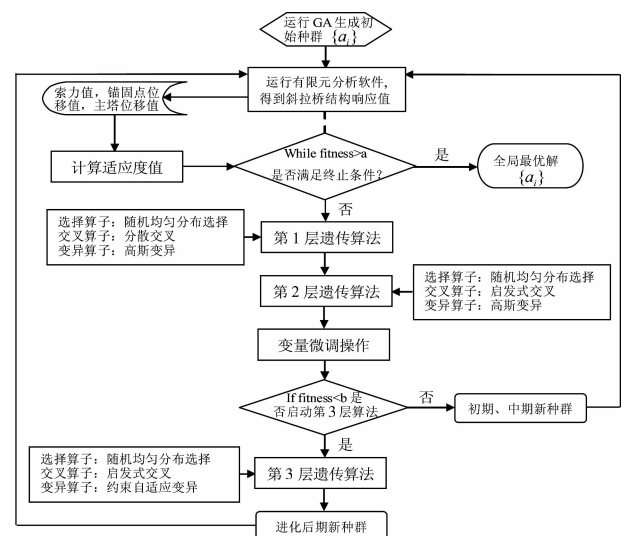


图 1 改进分层遗传算法的损伤识别流程图

3 数值算例

3.1 计算模型

对实验室的模型桥进行数值仿真,桥跨布置为

2.6 m+2.6 m,主梁选用铝合金材料,单箱 3 室截面,桥面宽 0.75 m,梁高 0.06 m,分 5 节段栓接而成;主塔选用 I10 型钢。斜拉索采用双索面布置,全桥共 9 组,每组 4 根,采用高强钢丝。基于 Ansys 有限元分析软件建立模型桥的单主梁分析模型。主梁和主塔采用 Beam44 梁单元模拟,斜拉索采用 Link10 受拉单元模拟。主梁从左到右依次划分成 20 个单元,斜拉索每根视为一个单元,共计 36 个单元。桥塔下部与基础的连接视为固结,约束全部的自由度,主梁两端视为铰接,约束平动自由度,主梁与主塔固结,斜拉索与主梁采用刚臂连接。为了增

大索力的变化在主梁上施加一均布荷载,初始有限元模型如图 2 所示,斜拉桥各构件的相关参数如表 1 所示。

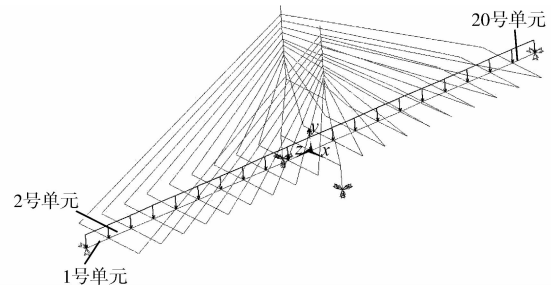


图 2 斜拉桥模型图

表 1 斜拉桥组成构件的相关参数

构件	截面面积/m ²	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	抗扭惯性矩 $I_{yy}/10^{-5}\text{m}^4$	抗弯惯性矩 $I_{zz}/10^{-5}\text{m}^4$
主梁	5.75×10^{-3}	70	0.3	2 700	0.284×10^{-5}	0.27×10^{-5}
主塔	1.03×10^{-3}	210	0.3	7 850	0.79×10^{-5}	0.24×10^{-5}
斜拉索	2.82×10^{-5}	80	0.3	7 850		

3.2 斜拉桥损伤识别的结果分析

改进分层遗传算法的主要参数:种群规模 50,每一层遗传算法进化代数为 30 代,均采用最优保存策略,保留较优个体数量为 2 个;第 1 层的交叉概率为 0.8,第 2、3 层交叉概率为 0.75,高斯变异的参数为:Scale=0.8 和 Shrink=1,终止条件为适应度函数值等于 10^{-4} 。

在工程测试时不可避免的会受到噪声的影响,并直接影响识别效果,因此在损伤识别时可人为在信号数据中加入噪声,用来考察算法的抗噪能力。本文通过在有限元模型反演得到的结构计算响应值上按式(5)直接添加随机噪声。

$$\begin{cases} F'_i = F_i^c(1 + \beta_1 M) \\ X'_i = X_i^c(1 + \beta_2 M) \\ Y'_i = Y_i^c(1 + \beta_3 M) \end{cases} \quad (5)$$

式中: F_i^c 、 X_i^c 、 Y_i^c 分别为通过有限元分析反演得到的索力值、索塔 X 轴方向和锚固点 Y 轴方向的位移值; F'_i 、 X'_i 、 Y'_i 分别为被噪声污染的索力值、索

塔 X 轴方向和锚固点 Y 轴方向的位移值; β_1 、 β_2 、 β_3 为百分比表示的噪声水平; M 为 $[-1, 1]$ 上符合正态分布的随机数, M 由 Matlab 工具箱自带的 randn 函数实现。结合工程实际,本文仅讨论噪声水平低于 20% 时的影响。

对于斜拉桥主梁损伤程度识别的准确性可用式(6)评价。

$$\psi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\mu_{s,i} - \mu_{n,i}| \quad (6)$$

式中: N 表示损伤单元的个数; $\mu_{s,i}$ 为噪声影响下主梁损伤程度的识别值; $\mu_{n,i}$ 为主梁损伤程度的理论值(在有限元分析中用单元弹性模量的折减模拟); ψ 值越小表明损伤识别的结果越精确。此算例根据实际情况将主梁损伤大致分为:同一损伤位置不同损伤程度、同一损伤程度不同损伤位置与不同损伤位置不同损伤程度这 3 种损伤类型,随机抽取一些单元进行多种损伤程度的模拟。各模拟损伤工况详细数据如表 2 所示。

表 2 损伤工况一览表

损伤类型	损伤位置	损伤程度/%
同一损伤位置不同损伤程度	12 号单元	7、15、26、40、60
同一损伤程度不同损伤位置	1、4、6、9、13、15、17、20 号单元	18
	2、18 单元	20、30
不同损伤位置不同损伤程度	11、12、13 单元(含噪声分析)	40、20、10
	9、10、11、14 号单元(含噪声分析)	10、15、7、27
	1、4、8、13、16、19 号单元	32、24、10、7、18、36

为探讨噪声对不同测试数据的影响,表2中所列含噪声分析工况施加了不同的噪声影响:其中11、12、13单元损伤工况添加的噪声为索塔位移噪声8%,锚固点位移噪声15%;9、10、11、14单元损伤工况添加的噪声为索塔位移噪声10%,锚固点位移噪声5%。

如表2列出的3种损伤类型:同一损伤位置不同损伤程度、同一损伤程度不同损伤位置、不同损伤位置不同损伤程度(含噪声分析)的识别结果,如图3~6所示。

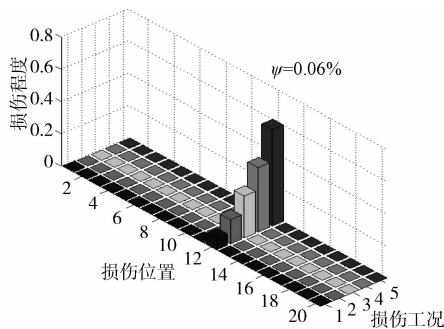


图3 同一损伤位置不同损伤程度的识别结果

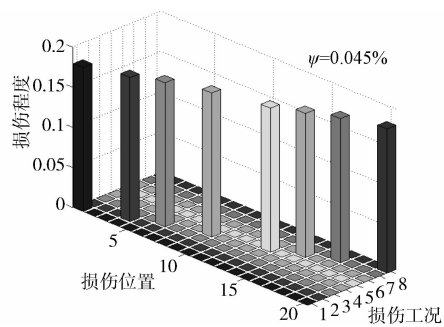


图4 同一损伤程度不同损伤位置的识别结果

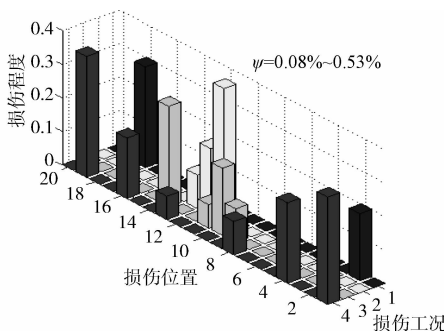


图5 不同损伤位置不同损伤程度的识别结果

由图3~5可知:在无噪声的理想情况下,改进的分层遗传算法能准确识别出单元的损伤位置和损伤程度(单损伤可做到精确识别)。当损伤单元的个数较少时,改进的分层遗传算法能在100~200代以

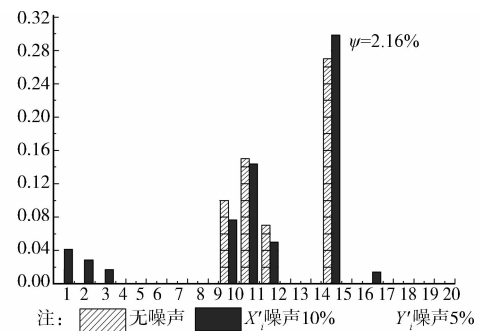


图6 主梁单元9、10、11、14分别发生10%、15%、7%、27%的损伤(索塔位移噪声10%,锚固点位移噪声5%)

内收敛于全局最优解(单损伤最快35代),且 ψ 值可控制在0.1%~0.6%之间;对于大规模的多点连续损伤, ψ 值会随损伤数量的增加而变大,要想获得较高精度的识别结果,需要经过长时间的迭代计算,此时为了节约运算时间可选择适应度值较小的次优解作为识别的结果输出。由图6可知,在噪声污染情况下,该方法可以准确判断发生损伤的位置,对损伤程度的识别精度有一定的影响,但基本不会出现误判的现象,说明该方法具有较强的抗噪声能力。

在噪声影响下11、12、13号单元分别发生40%、20%、10%损伤时,各层算法的计算结果如表3所示(因本文是将斜拉桥损伤识别转化为使适应度函数最小化的寻优问题,所以表3中适应度函数值越小表明结果越优越)。

由表3可知,经过第1层的遗传算法寻优计算后可能的损伤单元锁定在3~5、9~15、18~19号单元中;经过第2层遗传算法解的质量进一步提高,适应度函数值由376.45降低到221.23;再经过微调一灾变操作生成了一个 50×20 的灾变种群,为以后的遗传操作提供了更多的基因型,提升了种群的多样性;而第3层算法具有小范围寻优的能力,使最优解的质量进一步改善,但该操作却使种群中个体与个体的差异降低。经过第1次循环操作可以判定损伤可能出现9~13号单元中。

第2次循环种群在原有基因型基础上开始重新进行第1层遗传算法的寻优计算,由于第1层遗传算法选用了全局搜索算子,采用大交叉、大变异的操作,为原本已经陷入相近模式的种群,提供了更多的基因型,提高了种群模式的多样性,最终将损伤重新定位在4~6、10~14单元中,虽然可能损伤的单元与上一代相比增多了,但是最优个体的适应度函数值却由上一代的15.34降低到了3.77,解的质量有所提升;将具有更多模式的新种群经过第2层遗传算法后损伤定位在11~13单元中,并且经过验证,

即使该种群再经过多次循环计算,解的模式也不会发生改变,说明算法已经收敛。该损伤工况能在 150 代左右找到理想的解答($\psi=3.6\%$)。应当指出

的是由于噪声的干扰,此时只能输出次优解,同时由于遗传算法的随机搜索特性,重新启动程序时会使每一次得到的次优解答略有不同。

表 3 在噪声影响下 11、12、13 号单元分别发生 40%、20%、10% 损伤时各层算法的计算结果

单元号	3	4	5	9	10	11	12	13	15	18	19	适应度值	
第 1 次循环	第 1 层遗传算法(第 30 代结果)	0.38	0.21	0.12	0.45	0.23	0.34	0.15	0.18	0.00	0.16	0.28	376.45
	第 2 层遗传算法(第 60 代结果)	0.14	0.22	0.06	0.35	0.16	0.32	0.22	0.14	0.08	0.09	0.00	221.23
	变量微调	通过变量微调操作生成了一个由 50 个个体组成的灾变种群,每个个体由 20 个变量组成											
第 3 层遗传算法(第 90 代结果)	0.03	0.06	0	0.16	0.18	0.42	0.21	0.17	0	0	0	15.34	
第 2 次循环	单元号	4	5	6	10	11	12	13	14	适应度值			
	第 1 层遗传算法(第 120 代结果)	0.12	0.04	0.09	0.07	0.45	0.23	0.19	0.05	3.77			
	第 2 层遗传算法(第 135 代结果)	0.05	0.02	0.00	0.00	0.42	0.20	0.14	0.00	0.54			

3.3 改进分层遗传算法性能的讨论

以 1、4、8、13、16、19 号单元分别损伤 32%、24%、10%、7%、18%、36% 为例,对比标准遗传算法与改进分层遗传算法的识别结果,如表 4 所示。

表 4 1、4、8、13、16、19 号单元分别损伤 32%、24%、10%、7%、18%、36% 时两种算法的结果对比

单元号	标准遗传算法的识别结果	改进分层遗传算法识别结果
1	0.15	0.32
4	0.2	0.26
8	0.11	0.11
13	0.42	0.07
16	0.00	0.18
19	0.18	0.36

由表 4 可知,对于 1、4、8、13、16、19 号单元连续损伤的情况,标准遗传算法在 25 873 代以内不能搜索到任何具有有效模式的解答,但改进的分层遗传算法却可以在 4 410 代左右找到一个较好的次优解($\psi=0.53\%$),所以改进的分层遗传算法的寻优性能远远优于标准遗传算法。

在相同条件下,分别使用标准的遗传算法与改进的分层遗传算法对同一工况(2 号与 18 号单元损伤时)进行计算,得到最佳个体适应度值与种群平均适应度值随迭代次数变化的规律,如图 7~8 所示。

由以上两图的最优适应度值曲线可知:标准遗传算法计算到 1 000 代时收敛于局部最优解,而改进的分层遗传算法能在 100 代左右找到全局最优解,说明改进的分层遗传算法能增强遗传算法的搜索性能,提高搜索效率,节约计算时间。

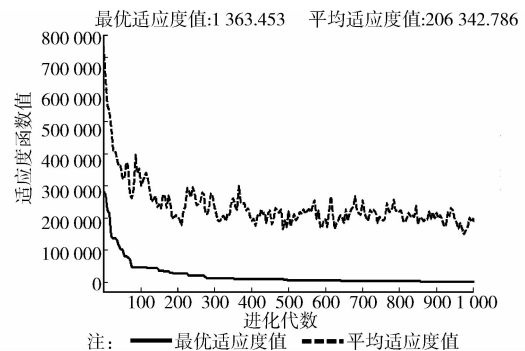


图 7 标准遗传算法迭代过程

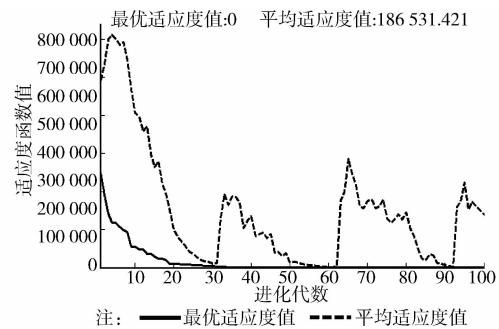


图 8 改进分层遗传算法迭代过程

种群平均适应度值是衡量算法好坏的又一依据,由图 7 的平均适应度值曲线可知,随着迭代次数的增加,种群平均适应度值会在某一个数值附近发生震荡现象,这说明种群并没有随着计算的进行而得到充分的进化,这会使种群中的最优个体长时间的陷入局部最优解不能跳出,从而发生“早熟”现象;由图 8 的平均适应度值曲线可知,改进的分层遗传算法的平均适应度值会每隔 32 代发生一次大的突变,突变使个体之间的差异增大,提高了种群的多样性,有效防止了“早熟”的发生。随着进化的开展,平

均适应度值又急剧下降,当每一层遗传算法结束时,当前种群中的最优解会优于上一层遗传算法的最优解,确保了种群能在较短的时间内得到充分进化。

4 结论

1)改进的分层遗传算法都能在较短的时间内准确识别出斜拉桥主梁的损伤位置与损伤程度,其寻优性能要远优于标准遗传算法,提高了桥梁损伤识别效率。

2)经抗噪性分析可知,本文的损伤识别方法具有较强的抗噪能力,但为提高识别精度,在实际应用中,应注意削弱噪声对测量数据的影响。

3)基于改进分层遗传算法的损伤识别方法对所求问题的模型及目标函数的形式没有严格的要求,所以可将此方法应用于其它复杂桥型的损伤识别中。

参考文献:

- [1] 杨小森,闫维明,陈彦江,等. 基于模型修正的大跨斜拉桥损伤识别方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(2): 276-281, 344, 345.
Yang X S, Yan W M, Chen Y J, et al. Damage detection method for long span cable-stayed bridge based on model updating [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(2): 276-281, 344, 345.
- [2] Meruane V, Heylen W. An hybrid real genetic algorithm to detect structural damage using modal properties [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(5): 1559-1573.
- [3] Villalba J D, Laier J E. Localising and quantifying damage by means of a multi-chromosome genetic algorithm [J]. Advances in Engineering Software, 2012, 50: 150-157.
- [4] 刘礼标,张永兴,陈建功. 改进多种群遗传算法在墙土系统损伤识别中的应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(3): 1-6.
Liu L B, Zhang Y X, Cheng J G. Application of Improved multi-population genetic algorithm to damage identification of soil-wall system [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(3): 1-6.
- [5] Liu H, Xin K G, Qi Q Q. Study of structural damage detection with multi-objective function genetic algorithms [J]. Procedia Engineering, CEMS, 2011, 12: 80-86.
- [6] Nobahari M, Seyedpoor S M. 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.
- [7] 黄民水,吴功,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.
Huang M S, Wu G, Zhu H P. Structural damage identification based on improved damage identification factor and genetic algorithm under noise [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21): 168-174.
- [8] Sandesh S, Shankar K. Application of a hybrid of particle swarm and genetic algorithm for structural damage detection [J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2010, 18(7): 997-1021.
- [9] Chen B, Nagarajaiah S. Observer-based structural damage detection using genetic algorithm [J]. Structural Control & Health Monitoring, 2013, 20(4): 520-531.
- [10] Buezas F S, Rosales M B, Filipich C P. Damage detection with genetic algorithms taking into account a crack contact model [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(4): 695-712.
- [11] 朱劲松,肖汝诚. 基于定期检测与遗传算法的大跨度斜拉桥损伤识别[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 85-89.
Zhu J S, Xiao R C. Damage identification of long-span concrete cable-stayed bridge based on periodic detection and genetic algorithms [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 85-89.
- [12] 荆龙江. 预应力混凝土斜拉桥损伤识别理论及应用研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.

(编辑 王秀玲)