

# 分阶段结构损伤诊断方法

李文雄, 陈存恩

(华南农业大学 水利与土木工程学院, 广州 510642)

**摘要:**在现有分步损伤诊断方法的基础上,提出了一种3阶段结构损伤诊断方法。通过对遗传算法的特点进行分析,提出以逐步评定并排除无损单元的思路来处理结构损伤诊断问题。提出的分步方法中,应用了多次灵敏度遗传算法计算来进行无损单元排除,同时结合残余力向量指标对损伤大致位置进行判断。算例证明,在单纯用1种方法难以完成损伤诊断的情况下,用分步处理的方法能得到很好的效果,同时表明了多次灵敏度遗传算法计算是逐步排除无损单元的有效途径。

**关键词:**损伤;分阶段诊断方法;遗传算法;残余力向量

**中图分类号:**TU312.3   **文献标志码:**A   **文章编号:**1674-4764(2011)06-0084-06

## Step-by-step Method of Structural Damage Diagnosis

LI Wen-xiong, CHEN Cun-en

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, P. R. China)

**Abstract:** Base on the existing step-by-step structural damage diagnosis method, a three-step structural damage diagnosis method is developed. According to the analysis of the characteristic of genetic algorithm, a new idea of excluding the undamaged element by means of step-by-step evaluation is developed to deal with the damage diagnosis problem. In this method, sensitivity genetic algorithm is used to exclude the undamaged element step by step and residual force method is used to fix the damage district. According to the simulation research of a 2D framed structure, it is shown that the step-by-step structural damage diagnosis method can gain the ideal results when it's difficult for a single damage diagnosis method to get the good results. It is also indicated that sensitivity genetic algorithm is a good way to exclude the undamaged element step by step.

**Key words:** damage; step-by-step diagnosis method; genetic algorithm; residual force

结构的损伤诊断与评估是当前结构工程学科中研究的热门课题之一。对于简单结构,已有比较成熟的损伤诊断方法<sup>[1-2]</sup>。直接损伤识别方法可直接利用坐标模态置信准则、模态应变能指标、振型曲率指标、应变模态指标、模态柔度指标及模态刚度指标等损伤指标来进行损伤位置判定;模型修正法、灵敏度分析法<sup>[3-4]</sup>、神经网络方法<sup>[5-7]</sup>、遗传算法能实现损伤程度的定量识别。但对于单元数目较多的结构,单纯的一种识别方法都存在着不足:损伤指标法只能指出大概损伤位置,无法识别损伤程度;模型修正

法一般需要充足的模态数据才能正确识别出损伤程度;灵敏度分析法受测试误差的影响较大;神经网络法的网络结构太大会使网络难以收敛。因此,多种识别方法的结合应用是解决实际问题的较有效策略。对于大型复杂结构,单独应用某种损伤识别方法进行识别会遇到困难,主要因为:大型结构的构件数目和动力自由度数目巨大,测试数据的不完备性以及测量噪声的存在使损伤诊断在实际工程中的应用受到了限制<sup>[8]</sup>。对大型结构分步进行识别是比较现实的。由于大型工程结构构件多、影响因素复杂,

收稿日期:2011-03-18

作者简介:李文雄(1979-),男,博士生,主要从事土木工程研究,(E-mail)1628167@qq.com

陈存恩(通讯作者),男,副教授,主要从事土木工程研究,(E-mail)chencunen@163.com。

试图进一步识别出具体损伤构件及其损伤程度是比较困难的。另一方面,结构如果出现局部裂缝,短时间内会迅速发展,从而影响结构的使用,因此,对大型结构局部出现损伤时的损伤诊断是十分重要的。现有大型结构损伤诊断方法主要是源于分阶段进行损伤识别的思想,其主要包括以下两种思路:1种是先查找结构损伤区域,然后在选定区域内进行具体损伤构件的定位、定量分析;另外1种是找到可能损伤的构件的位置,然后对可能损伤的构件进行定量分析。目前已有学者对分步法进行了研究,提出了各种思路<sup>[8-14]</sup>。从当前的分步方法来看,一般将诊断过程分为2阶段或3阶段,其基本思路是将可能出现损伤的范围逐步缩小,最终确定损伤。

## 1 分步结构损伤诊断方法的思路

如果发生损伤的位置比较分散,用逐步收缩范围的思路就显得不太合理了。从另一个角度去考虑,将结构的各个可能损伤单元全面考虑,通过一定的方法逐步将不可能发生损伤或损伤可能性很小的单元逐步排除,最终确定损伤位置和程度。

文献<sup>[15]</sup>提出了灵敏度修正与遗传算法的结合方法——灵敏度遗传算法。本文在灵敏度遗传算法的基础上,考虑将此方法与其它损伤诊断方法的综合应用。

遗传算法在结构损伤诊断上的研究已经取得一定成果<sup>[16-21]</sup>。遗传算法是一种概率意义上的智能搜索方法,其各个遗传算子中都包含了一定的随机因素,因此,其全局搜索能力是概率意义上的。随着损伤位置数目的增加,灵敏度遗传算法单次识别的正确率有所下降,即使增大种群也无法提高正确率,而实际上在对结构进行初步分析之前,结构损伤的位置数目也无法确定,无法锁定部分单元作为待识别单元,因此识别可靠性成为最大难题。由于目标函数值很小时仍不能保证结果正确,故从单次计算的遗传代数或目标函数都很难判别是否识别正确。另一方面,灵敏度遗传算法计算结果能保证在一定程度上与真实结果相近。为了尽量避免偶然现象的影响,提出通过多次灵敏度遗传算法计算的方法进行逐步诊断。其具体步骤如下:1)首先确定灵敏度遗传算法的各项控制参数,包括种群大小、遗传代数等;2)以所得振动参数为依据,通过灵敏度遗传算法对结构进行多次分析,并记录下每次分析的结果,在每次分析中,目标函数的权重值在一定范围内由系统随机确定;3)根据多次计算所得的各个单元的损伤程度值,计算出各单元损伤程度平均值;4)比较各

个单元的损伤程度平均值,将损伤程度较小的单元评定为无损单元,排除在外;5)通过多次以上重复操作,逐步排除无损单元,剩下最有可能发生损伤的单元。

经过多次灵敏度遗传算法对同一结构进行识别,并且目标函数中的权重值通过随机操作选取,从而使计算结果更具普遍性。在此条件下,并不要求每次都求得精确结果,从而单次灵敏度遗传算法的结束条件也可相应放宽,可以按照在一定条件下目标函数变化已经相当小或达到一定的遗传代数来结束该次计算,最后通过统计值来逐步排除无损单元。

对于大型结构,单元数目很多,如果损伤主要发生在结构的某个区域中,则没有必要以所有单元作为待识别变量进行识别。因此,还可以先用一些指标方法大致地定位损伤区域。考虑采用残余力向量<sup>[22-24]</sup>选出可能损伤单元或区域,再以可能损伤单元或区域作为多次灵敏度遗传算法的待识别变量进行计算,综合评定并逐步排除无损单元,最后确定损伤单元和损伤程度。

根据残余力向量、灵敏度遗传算法和灵敏度分析法<sup>[25]</sup>的特点,组合出新的分阶段法来处理大型结构局部损伤的诊断问题。其主要包括3个阶段:

- 1)采用残余力指示因子初步确定可能损伤单元或区域,具体步骤和动力扩阶方法见文献<sup>[23]</sup>。
- 2)采用多次灵敏度遗传算法计算结果综合评定的方法,逐步排除无损单元。
- 3)采用灵敏度遗传算法和灵敏度分析法对识别结果进行确认。

实际上,一些比较简单的情况,只用第1阶段和第3阶段就可以解决,但对于一些测试条件相对不足的情况,往往要进行第2阶段的计算,逐步排除无损单元,因此可以认为第2阶段的操作对实际诊断有重要意义。

## 2 结构损伤诊断算例

对7层3跨平面框架进行数值模拟,建立有限元模型,共有32个结点,49个单元,具体结构形式和材料见图1和表1。以杆件弹性模量降低率定义损伤,损伤情况为:单元21损伤20%,单元22损伤20%,单元44损伤40%。首先应用ANSYS进行损伤状态下振动参数计算,以beam3单元模拟杆件,根据所得的振动参数进行损伤诊断,假设测试中仅给出了前8阶频率和节点5、8、17、20、29、32的水平和竖直位移分量组成的前2阶振型。初步认为在结构的某一局部附近的3至4个单元发生了损伤。

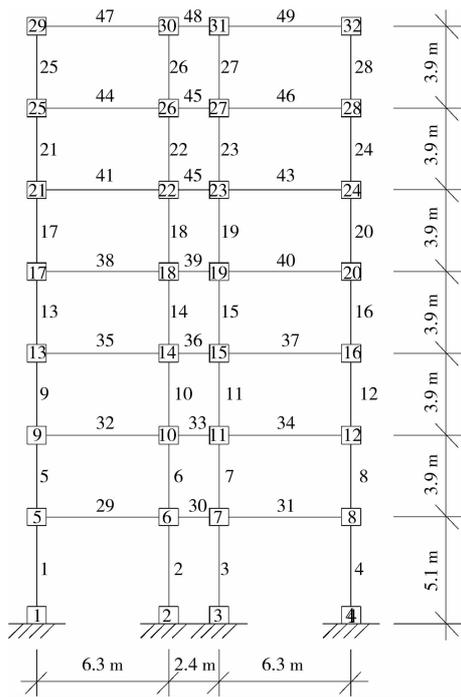


图 1 7 层平面框架结构图

表 1 结构梁柱截面尺寸和材料

层	截面尺寸/(mm×mm)			混凝土等级
	柱	边跨梁	中跨梁	
1	550×550	250×550	250×400	C35
2	550×550	250×550	250×400	C35
3	500×500	250×550	250×400	C30
4	500×500	250×550	250×400	C30
5	500×500	250×550	250×400	C25
6	500×500	250×550	250×400	C25
7	500×500	250×550	250×400	C25

对于本例,首先考虑应用灵敏度分析法(50 次迭代)和灵敏度遗传算法(种群大小为 30,运行 1 000 代,用时 1 313 s)对整个结构进行识别,其结果与理论值相差很大,说明在现有的振动参数条件下,对整个结构进行一次计算难以得到理想结果。

因此,考虑应用分阶段方法进行损伤诊断。

第 1 阶段,残余力指标值对结构损伤进行分析。所得的残余力指标如图 2。

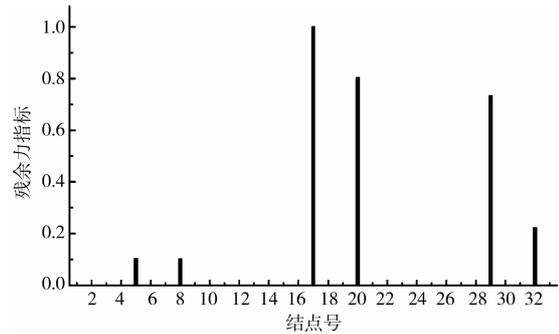


图 2 7 层框架第 1 阶段残余力指标值结果

从图 2 中残余力指标可以看到,节点 5、8 的残余力指标值相对较小,节点 17、20、29、32 的残余力指标相对较大,因此,初步认为局部损伤应出现在结构上部。原因是如果结构下部出现损伤,则其损伤应较多地反映在节点 5、8 上,而节点 29、32 的指标值应该较小,而实际情况恰恰相反。于是,将单元 1—12 和单元 29—34 认为是无损单元。

此时若试图直接进入第 3 阶段,应用灵敏度分析法和灵敏度遗传算法对可能损伤单元进行识别,结果见图 3,可见两种方法的结果相差很大,也就是说,尽管只对上部结构进行诊断,当前已有的测试数据难以直接得到可靠结果,需进入第 2 阶段。

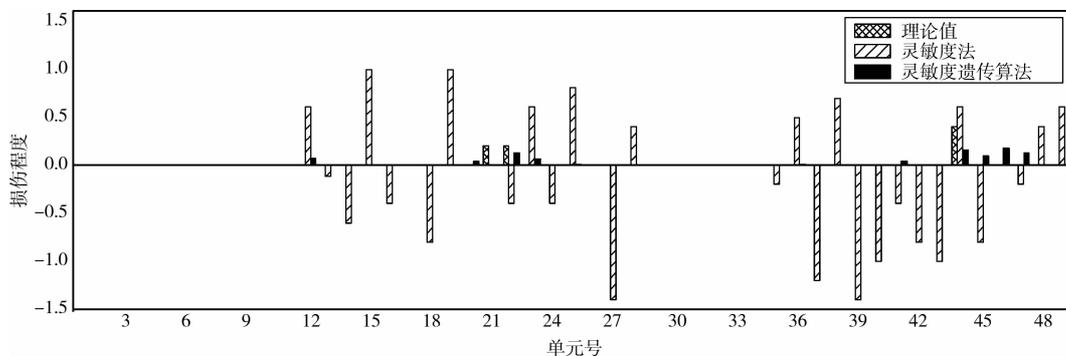


图 3 灵敏度分析法和灵敏度遗传算法对第 1 阶段后结构的识别结果

第 2 阶段,应用该文的多次灵敏度遗传算法计算评定并排除无损单元。通过第 1 阶段分析,可能损伤单元还有 31 个,灵敏度遗传算法计算时种群大小取 30,遗传代数取 500,选取 30% 个体进行修正,

每隔 10 代进行修正,频率权重取  $W_w = 800 \sim 1 000$  中的随机数,振型权重取  $W_\varphi = 700 \sim 900$  中的随机数(各参数的意义见文献[15]),通过 50 次计算后,将所得的损伤程度平均值表示如图 4。

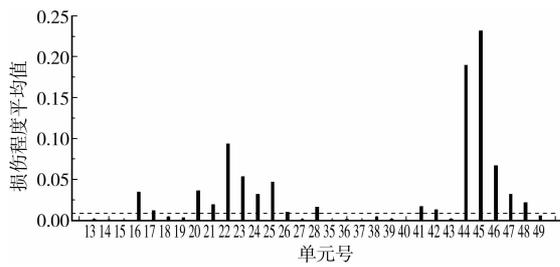


图4 50次计算后各可能损伤单元的损伤程度平均值

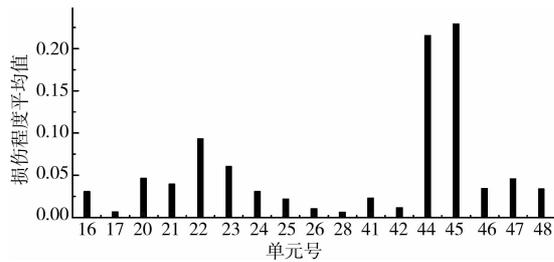


图5 10次计算后各可能损伤单元的损伤程度平均值

从图4可以看出,有部分单元的损伤程度平均值非常小,于是初步认为该单元发生损伤的概率很低,计算采用0.01作为界限,将损伤程度平均值小于0.01的单元认为不发生损伤,排除在外。从图可见,单元13、14、15、18、19、27、35、36、37、38、39、40、43、49损伤程度平均小于0.01,认为是无损单元。剩下单元16、17、20、21、22、23、24、25、26、28、41、42、44、45、46、47、48作为待识别单元。

对剩下的待识别单元重复上步计算,灵敏度遗传算法设置同上,每次计算进行200代,通过10次计算后,将损伤程度平均值表示如图5。可以看出,有部分单元的损伤程度平均值较小,可认为其发生损伤的概率很小,考虑到剩下的单元已不多,选取其中损伤程度较大的10个单元进入第3阶段,选出的单元为单元16、20、21、22、23、44、45、46、47、48。实际上,也可以按照上一步的方法,排除部分损伤概率较小的单元,再重复计算。

第3阶段,对剩下的10个单元,应用灵敏度分析法和灵敏度遗传算法(种群为100)进行反演计算,计算的结果见图6。灵敏度分析法和灵敏度遗传算法的结果与理论值均很接近,可认为其结果是正确的。

该文曾采用相同的振动参数,对第一次灵敏度遗传算法排除无损单元后剩下的单元进行识别(即单元16、17、20、21、22、23、24、25、26、28、41、42、44、45、46、47、48作为待识别变量),灵敏度法计算结果仍然是不正确的。因此,可以认为逐步排除损伤的单元的方法是识别得以继续进行的重要手段。

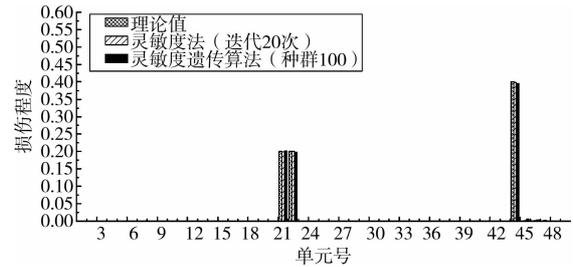


图6 7层框架第3阶段灵敏度分析法和灵敏度遗传算法的识别结果

对于本例,由于测点很少,测试数据相对不足,若对整个结构进行损伤识别,无论是灵敏度遗传算法还是灵敏度分析法都无法有效实施,原因是对所有单元进行识别时形成的解空间太大,且峰值较多,搜索时容易落入局部最优解。本文采用分阶段诊断方法,首先通过残余力指标排除部分单元,再应用多次灵敏度遗传算法逐步排除无损单元,最后确认损伤位置和程度。虽然这个过程需要很大的计算量,但多次计算并不要求在同一计算机上实现,因此,可以用多台计算机进行分别计算,以减少计算时间。另一方面,多次进行灵敏度遗传算法计算不要求每次都计算出正确结果,因此计算结束条件也可以放宽,仅需要以一定的遗传代数来确定停止计算条件,有利于实际操作。

结构损伤类型应根据具体结构特性判断,从结构损伤诊断领域的研究看,结构损伤分为单元损伤和节点损伤。本例采用杆件的弹性模量折减来模拟单元损伤,适用于疲劳损伤积累、蠕变损伤以及一些外部因素如火灾、环境侵蚀等所造成的损伤。而节点损伤则主要由动力作用造成,常发生在钢结构的梁柱连接部位。对于节点损伤,仍可用残余力向量初步判断损伤区域,然后用遗传算法进行损伤位置和程度的识别,文献[13]和文献[16]建立了节点损伤识别的力学模型,文献[16]说明了遗传算法进行节点损伤识别的有效性。因此,本文分阶段方法仍可应用于节点损伤的情况。

### 3 结论与讨论

对于大型结构出现局部损伤的情况,若仅用一种方法对整个结构进行诊断,往往会遇到很多困难。该文应用分阶段损伤诊断方法进行了数值模拟,研究表明,对于大型结构局部损伤的情况,用残余力向量指标可以对结构损伤区域进行初步诊断,然后对可能损伤区域中的单元用灵敏度遗传算法和灵敏度分析法进行损伤程度的进一步识别是有效的策略。

若待识别单元较多,灵敏度遗传算法和灵敏度分析法难以一次处理,可以采用多次灵敏度遗传算法计算结果的综合评定的方法对无损单元逐步排除,最后对剩下的可能损伤单元进行损伤程度识别。对于大型结构局部损伤的情况,分阶段法与单独一种方法相比,不但增强了识别的可操作性,也提高了识别可靠度。

实际中,测试所得的模态参数往往含有噪声,将影响诊断结果,必须加以考虑。文献[22]指出测试模态参数误差可以假定服从零均值的正态分布,从随机分析的角度,提出以残余力随机向量的均值来识别损伤区域的有效方法,本文第1阶段计算中可应用文献[22]的方法考虑模态误差,以判定损伤区域。而第2阶段所采用的灵敏度遗传算法本身具有较好的抗噪性能,这一点在文献[15]中已经说明,因此本文算法可以处理模态噪声的情况。灵敏度分析法对测试误差敏感性较大,因此,当模态参数准确时,第3阶段的2种算法可得一致结果;当模态参数含有误差时,其结果则难以统一,此时灵敏度遗传算法的结果应具有更大的可靠性,同时,可以根据2种方法识别结果差异推断模态参数含有误差,应进一步通过测试手段消除误差。

对于实际结构,在该文算法的基础上,还应结合具体情况进行分析。例如框架结构,发生相同程度损伤时,底部损伤对结构的动力特性影响较大,顶部损伤则影响微小,柱的损伤与梁的损伤相比,对结构动力特性的影响较大,因此,底部损伤或柱损伤的识别效果较好。损伤位置相同时,损伤程度越大,对结构动力参数的影响越大,识别效果越好。对于顶部梁发生微小损伤的情况,由于模态噪声的存在,有可能无法准确识别。因此,实际操作中,除了尽可能减小模态误差之外,还应根据具体结构特性,对容易发生微小损伤且其损伤对结构动力特性影响较小的部位进行局部探伤,以保证结果的可靠性。

#### 参考文献:

- [1] LIM T W. Structural damage detection using constrained eigenstructure assignment [J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1995, 18:411-418.
- [2] MORASSI A, ROVERE N. Localizing a notch in a steel frame from frequency measurements [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1997, 123(5):422-432.
- [3] TORKAMANI M A M, AHMADIA K. Stiffness identification of frame using simulated ground excitation [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 114(5): 753-776.
- [4] MESSINA A, WILLIAMS E J, CONTURSI T. Structural damage detection by a sensitivity and statistical-based method [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 216(5):791-805.
- [5] ZAPICO J L, GONZA M P. Damage assessment using neural networks [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2003, 17(1):119-125.
- [6] CHUNG-BANG YUN, JIN-HAK Y, BAHNG E Y. Joint damage assessment of framed structures using a neural networks technique [J]. *Engineering Structures*, 2001, 23:425-435.
- [7] CHUNG-BANG YUN, BAHNG E Y. Substructural identification using neural networks [J]. *Computers and structures*, 2000, 77:41-52.
- [8] 瞿伟廉, 黄东海. 大型复杂结构的两阶段损伤诊断方法 [J]. *世界地震工程*, 2003, 19(2):72-78.  
QU WEI-LIAN, HUANG DONG-HAI. Two-step damage diagnosis methods of large and complex structures [J]. *World Information On Earthquake Engineering*, 2003, 19(2):72-78.
- [9] 谢峻, 韩大建, 周毅妹. 整合统计的结构损伤动力诊断三步法 [J]. *振动与冲击*, 2004, 23(4):119-122.  
XIE JUN, HAN DA-JIAN, ZHOU YI-MEI. Three steps method integrated with statistical techniques for structural damage diagnosis [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2004, 23(4):119-122.
- [10] 郭惠勇, 张陵, 蒋建. 基于遗传算法的二阶段结构损伤探测方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2005, 39(5):485-489.  
GUO HUI-YONG, ZHANG LING, JIANG JIAN. Two-stage structural damage detection method with genetic Algorithms [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2005, 39(5):485-489.
- [11] 王柏生, 倪一清, 高赞明. 青马大桥桥板结构损伤位置识别的数值模拟 [J]. *土木工程学报*, 2001, 34(3):68-72.  
WANG BAI-SHENG, NI YI-QING, GAO ZAN-MING. Numerical study of damage localization for tsing ma bridge deck [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(3):68-72.
- [12] 高赞明, 孙宗光, 倪一清. 基于振动方法的汲水门大桥损伤检测研究 [J]. *地震工程与工程振动*, 2001, 21(4): 118-124.  
GAO ZAN-MING, SUN ZONG-GUANG, NI YI-QING. Simulation of damage identification using vibration-based method for Kap Shui Mun bridge [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2001, 21(4):118-124.
- [13] 瞿伟廉, 陈伟, 李秋胜. 基于神经网络技术的复杂框架结构节点损伤的两步诊断法 [J]. *土木工程学报*, 2003, 36

- (5):37-44.
- QU WEI-LIAN, CHEN-WEI, LI QIU-SHENG. Two-step approach for joints damage diagnosis of framed structures by artificial neural networks[J]. China Civil Engineering Journal, 2003,36(5):37-44.
- [14] 杨秋伟. 结构损伤的一种两阶段诊断方法[J]. 机械强度. 2008,30(4):555-558.
- YANG QIU-WEI. Two-stage approach for structural damage diagnosis using incomplete modal parameters [J]. Journal of Mechanical Strength, 2008,30(4):555-558.
- [15] 李文雄,陈存恩. 结构动力反演计算的灵敏度遗传算法研究[J]. 重庆建筑大学学报,2008,30(2):80-84.
- LI WEN-XIONG, CHEN CUN-EN. Research of sensitivity genetic algorithm for inverse computation of structure[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008,30(2):80-84.
- [16] 郭佳凡,于吉全. 基于遗传算法的大型钢塔结构的节点损伤参数识别方法[J]. 湖北大学学报:自然科学版, 2009,31(4):380-383.
- GUO JIA-FAN, YU JI-QUAN. Recognition approach of joint damage parameters in high-rising tower structures on the basis of genetic algorithms [J]. Journal of Hubei University; Natural Science, 2009,31(4):380-383.
- [17] FRISWELL MI, PENNY JET, GARVEY SD. A combined genetic and eigensensitivity algorithm for the location of damage in structures [J]. Computers and Structures, 1998, 69:547-556.
- [18] HONG HAO, M. ASCE, YONG XIA. Vibration-based damage detection of structures by genetic algorithm[J]. Journal of Computer in Civil Engineering, 2002(7):222-229.
- [19] CHOU JUNG-HUAI, GHABOUSSI J. Genetic algorithm in structural damage detection[J]. Computers and Structures,2001,79:1335-1353.
- [20] ANANDA RAO M, SRINIVAS J, B S N. Murthy damage detection in vibrating bodies using genetic algorithms[J]. Computers and Structures,2004,82:963-968.
- [21] 邹大力,屈福政. 基于修正模态的混合遗传算法结构损伤识别[J]. 大连理工大学学报,2005,45(3):362-365.
- ZHOU DA-LI, QU FU-ZHENG. Structural damage detection using updated modes based on hybrid genetic algorithm [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005,45(3):362-365.
- [22] 李晓妮,张景绘. 模态噪声影响下基于残余力向量的损伤识别[J]. 广西工学院学报,2008,19(4):1-4.
- LI XIAO-NI, ZHANG JING-HUI. Damage identification based on residual force vector with noisy modal data [J]. Journal of Guangxi University of Technology, 2008,19(4):1-4.
- [23] 刁延松,李华军,李军,等. 一种框架结构损伤诊断两步法[J]. 工业建筑,2005(S):966-969.
- DIAO YAN-SONG, LI HUA-JUN, LI JUN, SUN SHAODONG. A two-step damage detection approach for frame structure[J]. Industrial Construction, 2005(S1):966-969.
- [24] 邹万杰,瞿伟廉,罗臻. 基于改进残余力向量法的桁架结构损伤诊断[J]. 力学与实践,2009,31(4):41-44.
- ZOU WAN-JIE, QU WEI-LIAN, LUO ZHEN. Damage detection for truss structures based on improved residual force vector method[J]. Mechanics in Engineering, 2009, 31(4):41-44.
- [25] 陈龙珠,王建民,葛炜. 结构动力参数灵敏度的合理分析 [J]. 土木工程学报, 2003, 36(11):50-54.
- CHEN LONG-ZHU, WANG JIAN-MIN, GE WEI. Rational analysis for sensitivity of structural dynamic parameters[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(11):50-54.

(编辑 胡 玲)