

文章编号:1673-2049(2016)05-0001-06

基于静力虚拟变形法的结构损伤识别研究

李宏男^{1,2}, 林世伟¹, 伊廷华¹

(1. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 为了提高大型结构损伤识别的计算效率, 引入静力虚拟变形法(VDM), 并结合序列二次规划(SQP)算法实现损伤定位和损伤定量。首先, 基于VDM的基本原理, 推导了损伤因子与虚拟变形的关系; 其次, 建立损伤应变与实际损伤应变的目标函数, 并利用SQP算法优化目标函数, 实现了结构损伤识别的快速计算; 最后, 以某实际大桥有限元模型为例, 对其吊杆的损伤识别进行了数值模拟研究。设计了基于恒荷载的实时监测和基于车辆静荷载的定期检测2种工况对该方法进行验证。结果表明: 该方法能够快速准确地识别出损伤发生的位置和程度。

关键词: 结构健康监测; 损伤识别; 虚拟变形法; 静力分析; 序列二次规划

中图分类号: TU311

文献标志码: A

Study on Structural Damage Identification by Static Virtual Distortion Method

LI Hong-nan^{1,2}, LIN Shi-wei¹, YI Ting-hua¹

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China)

Abstract: In order to improve the computing efficiency of large structure damage identification, the static virtual distortion method (VDM) was introduced and coupled with the sequential quadratic programming (SQP) algorithm to realize the damage localization and damage quantification. Firstly, based on the basic principle of VDM, the relationship between the damage factor and the virtual distortion was deduced. Secondly, SQP algorithm was used to optimize the objective function which was established by damage strain and actual damage strain, and the fast computation of structural damage identification was realized. Finally, a finite element model of actual bridge was taken as example, and the damage identification of suspenders were studied by the numerical simulation. Two conditions of real time monitoring based on constant load and periodical detection based on vehicle static load were designed to verify the proposed method. The results show that the proposed method can rapidly and accurately identify the damage location and degree.

Key words: structural health monitoring; damage identification; virtual distortion method; static analysis; sequential quadratic programming

0 引言

结构健康监测技术是保障土木工程结构建造和

服役安全的有效手段^[1], 其中损伤识别技术是监测数据分析中的关键环节, 它对于评价结构的运营状态具有重要意义^[2]。损伤识别的目的是通过一定的

收稿日期: 2016-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51421064, 51478081); 大连市杰出青年科技人才培养计划项目(2015J12JH209)

作者简介: 李宏男(1957-), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, 博士后, E-mail: hnli@dlut.edu.cn.

方法来判别结构有无损伤、定位损伤、量化损伤和预测损伤^[3]。目前损伤识别方法主要包括基于模型的方法和无模型方法两大类。基于虚拟变形法(Virtual Distortion Method, VDM)的损伤识别方法作为一种新近出现的基于模型的方法,因其具有快速准确的识别能力而引起了学者的广泛关注^[4]。

Holnicki-Szulc^[5]于1989年率先提出了VDM,并将其应用到某大型桁架结构的模型修正中,展示了该方法计算的高效性;随后Kolakowski等^[6-7]分别提出了基于静力、动力VDM的桁架结构损伤识别方法,并通过一个平面桁架算例验证了该方法的可行性;Swiercz等^[8]利用谐振激励将VDM损伤识别方法推广应用到了频域,其在平面桁架损伤识别中取得了良好的效果;张青霞等^[9]从有限元方法的角度推导了VDM理论,并提出了基于子结构VDM的损伤识别方法,并通过某50层框架结构数值验证了该方法的有效性;Liu等^[10]提出了一种VDM集合超单元的模型修正方法,并将其成功用于某实桥的有限元模型修正,为VDM在实际工程中的应用提供了很好的借鉴作用。然而,目前VDM损伤识别方法主要采用基于梯度的优化算法,且优化前需要对目标函数进行求导和递推,这对于复杂的目标函数还较难实现;此外,目前基于VDM的损伤识别方法主要适用于平面结构,在实际三维结构中的应用还有待研究。

为此,本文拟在上述2个方面开展研究,首先介绍了VDM的基本原理,以桁架单元为研究对象,推导了损伤因子和虚拟变形的关系,并以损伤因子为变量,建立了损伤应变的函数;然后,建立了损伤应变和实测损伤应变的目标函数,并采用序列二次规划(SQP)算法对目标函数进行优化计算;最后,以某实际大桥有限元模型为例,通过实时监测(基于恒荷载)和定期检测(基于车辆荷载)2种工况,验证了所提方法对桥梁吊杆损伤识别的有效性。

1 基于静力VDM的损伤识别方法

1.1 VDM基本原理

VDM是一种结构快速重分析方法,已被成功应用于结构的静力、动力分析和参数识别中,其基本原理是通过未损伤的结构引入虚拟变形(将该结构定义为变形结构)来等效损伤结构,从而使原结构与变形结构具有相同的变形和内力。以图1桁架结构为例,该结构为受到集中力 P 作用的损伤结构,杆件 i 由于出现损伤,其单元刚度将会减小,进而引

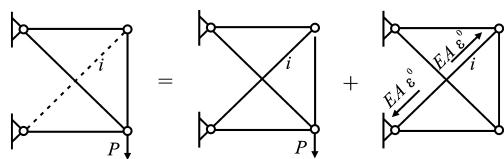


图1 损伤结构与变形结构的关系

Fig. 1 Relationship Between Damaged and Distorted Structures

起整体结构的应变发生变化,对应的变形结构假设受到相同的集中力 P 和虚拟变形 ϵ^0 作用,而虚拟变形 ϵ^0 表现为虚拟力 $EA\epsilon^0$ (E 为单元弹性模量, A 为单元截面面积)作用在单元上。根据VDM基本原理,二者具有相同的应变和应力,即

$$\hat{\epsilon}_i = \epsilon_i = \epsilon_i^L + \epsilon_i^R \quad (1)$$

$$\hat{\sigma}_i = \sigma_i = \sigma_i^L + \sigma_i^R \quad (2)$$

式中: $\hat{\epsilon}_i, \hat{\sigma}_i$ 分别为损伤结构的应变和应力; ϵ_i, σ_i 分别为变形结构的应变和应力; ϵ_i^L, σ_i^L 分别为未损伤结构受到相同荷载作用的应变和应力; ϵ_i^R, σ_i^R 分别为未损伤结构受到虚拟变形 ϵ^0 作用的应变和应力。

1.2 影响矩阵的建立

影响矩阵的计算是VDM非常重要的步骤,其表示对未损伤结构各个单元作用虚拟力时引起的所有单元应变。对于图2所示桁架结构,单元 j 作用单元虚拟应变 $\epsilon_j^0 = 1$ 时,等效于单元节点上施加一对虚拟力 EA ,虚拟力大小使单元 j 无约束时应变为1,但从图2虚线可以看到,由于其他单元的约束,单元 j 的应变将会变小,其他单元也将产生应变。此时,将所有单元的应变作为影响矩阵 D 的第 j 列。若结构有 n 个单元, j 从1依次增加到 n ,即可求出影响矩阵 D 的所有元素。影响矩阵的维度为 $n \times n$,它包含了结构的参数信息,通常属于非对称矩阵。对于静力情况下的静定结构,由于各单元间无影响,此时影响矩阵变为单位矩阵。向单元 j 引入虚拟应变 ϵ_j^0 ,根据影响矩阵的定义,所有单元受到虚拟变形作用的应变 ϵ_i^R 和应力 σ_i^R 可表示为

$$\epsilon_i^R = D_{ij} \epsilon_j^0 \quad (3)$$

$$\sigma_i^R = E_i \sum_{j=1}^n (D_{ij} - \delta_{ij}) \epsilon_j^0 \quad (4)$$

式中: D_{ij} 为影响矩阵第 i 行第 j 列的元素; δ_{ij} 为向量克罗内克符号,即 i 和 j 相等时 δ 值为1,其他情况 δ 值恒为0; E_i 为单元 i 的弹性模量。

将式(3),(4)分别代入式(1),(2),可得到变形结构的应变和应力分别为

$$\epsilon_i = \epsilon_i^L + \sum_{j=1}^n D_{ij} \epsilon_j^0 \quad (5)$$

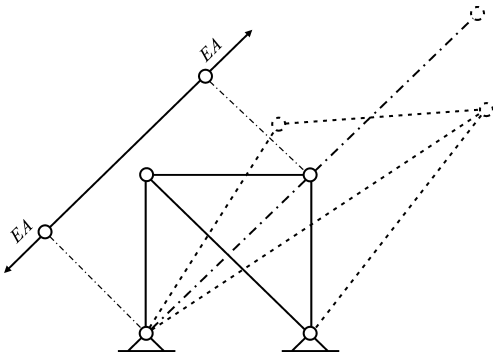


图 2 单元虚拟变形的影响

Fig. 2 Influence of Unit Virtual Distortion

$$\sigma_i = E_i \epsilon_i^L + E_i \sum_{j=1}^n (D_{ij} - \delta_{ij}) \epsilon_j^0 = E_i (\epsilon_i - \epsilon_i^0) \quad (6)$$

1.3 刚度降低的模拟

考虑结构线弹性的情况,损伤可看作是弹性模量的降低,用损伤因子 μ_i 来量化损伤程度,即

$$\mu_i = \frac{\hat{E}_i}{E_i} \quad 0 \leq \mu_i \leq 1 \quad (7)$$

式中: E_i , \hat{E}_i 分别为未损伤和损伤结构中单元 i 的弹性模量。

根据式(6),变形结构单元 i 的轴力 p_i 表示为

$$p_i = \sigma_i A_i = E_i (\epsilon_i - \epsilon_i^0) A_i \quad (8)$$

式中: A_i 为未损伤结构单元 i 的截面积。

假设损伤后单元截面面积不变,损伤结构中单元 i 的轴力 \hat{p}_i 可表示为

$$\hat{p}_i = \hat{\epsilon}_i \hat{E}_i A_i \quad (9)$$

式中: $\hat{\epsilon}_i$ 为损伤结构单元 i 的应变。

虚拟变形法的基本原理是损伤结构和变形结构的内力与变形相等,即

$$p_i = \hat{p}_i \quad (10)$$

$$\epsilon_i = \hat{\epsilon}_i \quad (11)$$

联立式(8)~(11),可以得到以下关系

$$\mu_i = \frac{\hat{E}_i}{E_i} = \frac{\epsilon_i - \epsilon_i^0}{\epsilon_i} \quad (12)$$

将式(12)代入式(5),可得

$$\sum_{j=1}^n [\delta_{ij} - (1 - \mu_i) D_{ij}] \epsilon_j^0 = (1 - \mu_i) \epsilon_i^L \quad (13)$$

单元弹性模量不变时,单元截面面积的减小同样也符合式(7),(12),(13),此时只需将弹性模量换为截面积,并采用相同的推导步骤即可。

利用式(5),(13)可以快速准确得到变形结构的应变。因式(13)中 D_{ij} 和 ϵ_i^L 已知,由未损伤结构求得,而未知变量有 μ_i 和 ϵ_j^0 。因此,给定损伤因子 μ_i ,由式(13)求得虚拟变形 ϵ_j^0 ,再将其代入式(5)就可以

快速求得损伤因子为 μ_i 时的结构应变,即结构应变可视为函数 $\epsilon(\mu)$ 。至此,VDM 实现了虚拟变形模拟损伤,在不重新建立有限元模型的情况下可快速求得结构的损伤应变 $\epsilon(\mu)$ 。

1.4 目标函数的建立和求解算法的选择

可以通过求解损伤应变 $\epsilon(\mu)$ 和实测损伤应变 ϵ^M 的最小值来识别损伤,定义目标函数为

$$f(\mu) = \lg \left(\left\| \frac{\epsilon^M - \epsilon(\mu)}{\epsilon^M} \right\|_2 \right) \quad 0 \leq \mu \leq 1 \quad (14)$$

式中: $f(\mu)$ 为目标函数; $\| \cdot \|_2$ 表示求向量 2-范数。

因此,损伤识别问题可以转化为求目标函数的最小值问题,即约束非线性规划问题,其形式为

$$\left. \begin{aligned} & \min [f(\mu)] \\ & \text{s. t.} \\ & g_i(\mu) \leq 0 \quad i=1,2,\dots,m \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: $g_i(\mu)$ 为不等式约束函数; m 为优化变量的个数。

采用基于梯度的优化算法需要提前对式(14)进行求导,而目标函数的求导是比较困难的。考虑 SQP 算法无需对目标函数进行求导和递推计算,具有收敛性好、计算效率高、边界搜索能力强的优点,是公认处理约束非线性规划问题最有效的算法之一^[11],因此本文将 SQP 算法用于该目标函数的优化。SQP 算法的原理是将约束非线性规划问题转换为约束二次规划子问题,再使用有效集法求解子问题。有效集法的特点是迭代点会遵循着约束边界前进,最终到达问题的最优解^[12]。由于大型土木工程结构的单元众多,大部分单元的损伤因子为 1,小部分单元损伤因子小于 1,所以迭代点大部分处于损伤因子为 1 的单元,从而加快了迭代的速度。因此,通过 SQP 算法求得目标函数最小时的损伤因子 μ ,即为最终识别的损伤因子。

2 数值算例

2.1 工程概况

伯官大桥位于沈阳市浑南新区沈抚新城,是中国首座六跨中承式飘带形提篮斜拱桥,如图 3 所示。桥梁总长 885 m,桥宽 32 m,桥的拱肋采用变截面矩形空心钢箱体系,最大跨径为 120 m,最大拱高 67 m,吊杆采用双索面布置,共计 86 根。吊杆是桥梁的关键受力构件,随着桥梁服役年限的增加,吊杆可能会由于钢丝的锈蚀而产生损伤,且吊杆在车辆反复荷载作用下其在横梁和钢拱肋锚固端的疲劳损伤也会影响桥梁的安全^[13],因此需要开展吊杆损伤识



图3 伯官大桥

Fig. 3 Boguan Bridge

别的研究。

2.2 有限元模型的建立

本文基于 MIDAS/Civil-2012, 对伯官大桥建立了完整的三维有限元模型, 如图 4 所示。模型中混凝土拱肋、钢拱肋、拱间横梁、吊杆横梁、桩基础等采用空间梁单元模拟; 吊杆和系杆采用桁架单元模拟; 承台和桥面板采用板单元模拟; 整个模型共有 6 597 个梁单元、174 个桁架单元、1 518 个板单元、6 365 个节点^[14]。在吊杆损伤识别前, 有必要依照现场实测结果, 将初始模型修正为符合现阶段桥梁真实情况的有限元模型^[10]。



图4 伯官大桥有限元模型

Fig. 4 Finite Element Model of Boguan Bridge

2.3 吊杆损伤识别

这里采用数值模拟的方法来验证 VDM 损伤识别方法对 3[#] 跨上下游共 32 根吊杆的损伤识别效果。上游吊杆编号如图 5 所示, 下游吊杆和上游对称。选择 B₁~B₃₂ 吊杆为研究对象(下文吊杆单元编号简写为 1~32)。

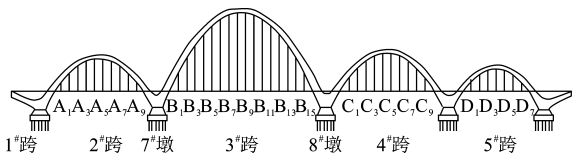


图5 吊杆编号

Fig. 5 Numbers of Suspenders

具体识别步骤如下:

(1) 利用 MIDAS 计算影响矩阵 D , 在 B₁ 吊杆两端施加沿着吊杆轴线的一对平衡节点静力 EA , 大小为吊杆弹性模量乘以截面面积。求得此时 B₁~B₃₂ 的吊杆应变, 并按顺序组成 1 个列向量, 该列向量即影响矩阵 D 的第 1 列, 然后依次对其余吊杆施加平衡静力 EA , 即可组成剩余影响矩阵 D 。

(2) 减小有限元模型吊杆材料的弹性模量, 模拟现实环境下的吊杆损伤。模拟吊杆损伤的方式一般有 2 种: 一种是减小弹性模量; 另一种是保持质量不变, 减小截面面积(实际工程中, 当吊杆损伤时其有效截面面积降低, 吊杆的质量通常不会减小^[15])。本文提出的静力 VDM 损伤识别方法对这 2 种情况均可识别, 为节约篇幅, 这里只采用第 1 种方式进行数值模拟。

(3) 设计 2 种静荷载工况。荷载工况 HZ1: 车辆静荷载, 模拟桥梁定期检测的情况。选取 8 辆单车总重 364 kN 的双后轴重车为荷载, 车辆轮距如图 6 所示, 车辆加载布置如图 7 所示。车辆停在指定位置后, 每根吊杆的损伤应变可通过应变采集仪逐个测量出。荷载工况 HZ2: 恒荷载, 包括结构自重、二期恒载、吊索初拉力及预应力荷载, 模拟桥梁健康监测系统进行实时监测的情况, 此时需在每个吊杆上均布置应变传感器。

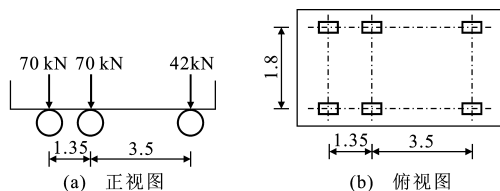
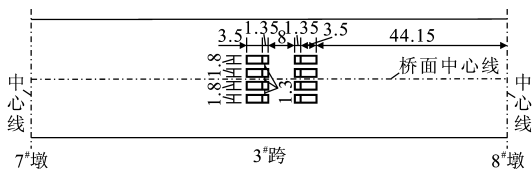


图6 荷载车辆的轮距(单位:m)

Fig. 6 Wheel Base of Loading Vehicle (Unit:m)

图7 桥梁 3[#] 跨的荷载布置(单位:m)Fig. 7 Load Arrangement of 3[#] Span of Bridge (Unit:m)

(4) 利用 MIDAS 计算 2 种荷载工况下吊杆的未损伤应变 ϵ^L 和损伤应变 ϵ^M , 计算结果如图 8 所示。VDM 损伤识别方法根据未损伤应变和损伤应变信息, 判断结构损伤的位置和大小。

(5) 采用科学计算软件 MATLAB 编写 VDM 损伤识别程序, 将影响矩阵和吊杆损伤前后的应变代入程序进行计算。

(6) 2 种荷载工况下目标函数迭代情况见图 9, 可以看到收敛非常迅速(最长迭代数为 145 步, 时间仅为 31 s), 这说明采用 SQP 算法能够快速优化 VDM 建立的目标函数。

(7) 损伤工况的识别结果如图 10 所示, 纵坐标为损伤因子, 物理意义为吊杆单元损伤前后的弹性

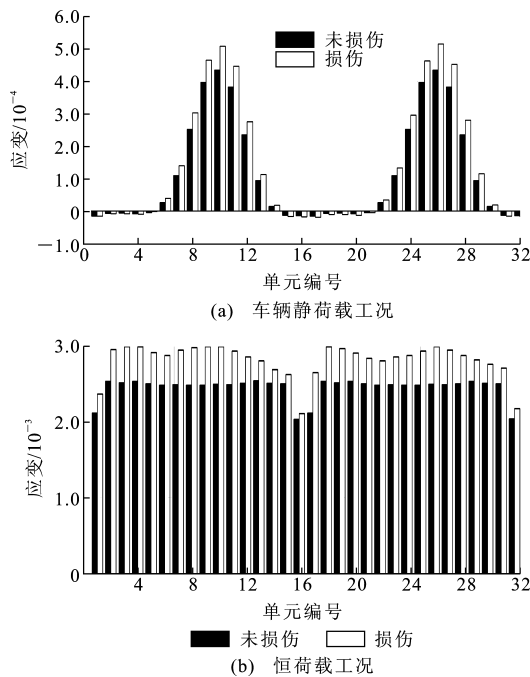


图 8 未损伤应变和损伤应变对比

Fig. 8 Contrast of Undamaged and Damaged Strain

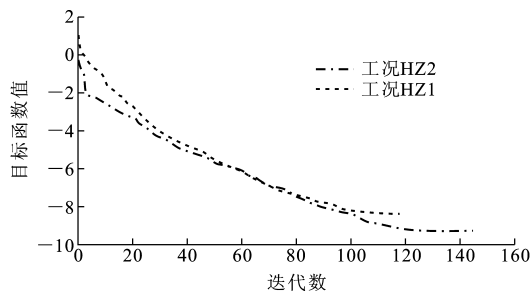


图 9 目标函数迭代

Fig. 9 Iteration of Objective Function

模量比值,例如损伤因子 0.9 表示损伤的弹性模量为未损伤的 0.9 倍,即弹性模量下降 10%。从图 10 可以看出:2[#]吊杆实际损伤因子为 0.9,而工况 HZ1 时 VDM 方法识别的损伤因子为 0.906(相对误差为 0.7%),工况 HZ2 时识别的损伤因子为 0.899(相对误差为 0.1%),即 VDM 判断 2[#]吊杆发生损伤,损伤程度为弹性模量下降约 10%。6[#]吊杆实际损伤因子为 1,即无损伤,而工况 HZ1 时 VDM 方法识别的损伤因子为 0.995(相对误差为 0.5%),工况 HZ2 时识别的损伤因子为 1.000(无误差),即 VDM 判断 6[#]吊杆无损伤。由图 10 还可以看出,工况 HZ1, HZ2 总体上识别的损伤因子接近实际值(工况 HZ1 时最大相对误差为 5[#]吊杆,为 6.9%,工况 HZ2 时最大相对误差为 26[#]吊杆,为 0.4%),且工况 HZ2 即恒荷载工况下 VDM 损伤识别方法精度相对较高。

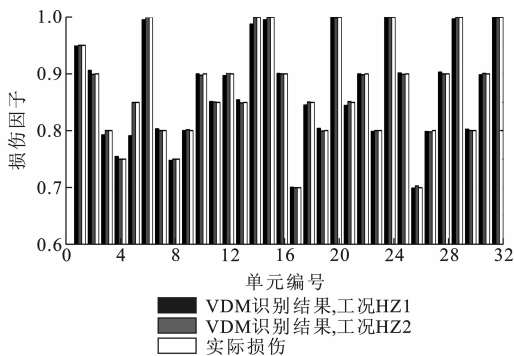


图 10 损伤工况的识别结果

Fig. 10 Identification Results of Damage Cases

(8)计算效率分析。相同计算机环境下(4G 内存,CPU 为英特尔奔腾双核,Pentium(R)Dual-Core E6600,3.06 GHz),VDM 损伤识别法的计算效率较传统模型修正方法大幅提高,传统模型修正方法用 MATLAB 软件指导有限元软件,计算 1 次修正后的应变 $\epsilon(\mu)$ 用时约 175 s,其大量时间耗费在重新建立有限元模型上,即使假设较少的修正次数为 145 次(对应上文目标函数的 145 次迭代),总用时达到了 2.5×10^4 s,而 VDM 损伤识别由于不需要重新建立有限元模型,所以仅用时 31 s,提高了约 3 个数量级,这也证明了其可显著提高大型结构损伤识别的计算效率。

3 结 语

(1)将 VDM 中的影响矩阵、虚拟变形等理论成功应用于实际三维结构有限元模型中,拓展了 VDM 的应用范围。

(2)SQP 算法优化目标函数前不需要对目标函数进行求导,优化过程中目标函数收敛迅速,优化结果准确,可以有效解决 VDM 损伤识别方法的计算负荷。

(3)对于设计的 2 种荷载工况,VDM 损伤识别方法识别的损伤因子和实际值误差都很小,可准确实现损伤的定位和定量,最大相对误差分别为 6.9% 和 0.4%,恒荷载工况的损伤识别误差比车辆静荷载工况小。

(4)VDM 损伤识别方法可快速准确进行损伤识别,较传统模型修正法可大幅提高工程损伤识别的效率。

参考文献:

References:

[1] 李宏男,李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测

- 及诊断述评[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 82-90.
- LI Hong-nan, LI Dong-sheng. Safety Assessment, Health Monitoring and Damage Diagnosis for Structures in Civil Engineering[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(3): 82-90.
- [2] 袁颖, 林皋, 柳春光, 等. 遗传算法在结构损伤识别中的应用研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(4): 369-374.
- YUAN Ying, LIN Gao, LIU Chun-guang, et al. Study on an Application of Genetic Algorithm to Damage Identification[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25(4): 369-374.
- [3] SOHN H, FARRAR C R. Damage Diagnosis Using Time Series Analysis of Vibration Signals[J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10(3): 446-451.
- [4] KOLAKOWSKI P, WIKLO M, HOLNICKI-SZULC J. The Virtual Distortion Method — A Versatile Reanalysis Tool for Structure and Systems[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2008, 36(3): 217-234.
- [5] HOLNICKI-SZULC J. Optimal Structural Remodeling — Simulation by Virtual Distortions[J]. Communications in Applied Numerical Methods, 1989, 5(5): 289-298.
- [6] KOLAKOWSKI P. Damage Identification by the Static Virtual Distortion Method[J]. Engineering Transactions, 2004, 52(4): 253-270.
- [7] KOLAKOWSKI P, ZIELINSKI T G, HOLNICKI-SZULC J. Damage Identification by the Dynamic Virtual Distortion Method[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2004, 15(6): 479-493.
- [8] SWIERCZ A, KOLAKOWSKI P, HOLNICKI-SZULC J. Damage Identification in Skeletal Structures Using the Virtual Distortion Method in Frequency Domain [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(8): 1826-1839.
- [9] 张青霞, 侯吉林, 段忠东, 等. 基于子结构虚拟变形的损伤识别方法[J]. 工程力学, 2013, 30(12): 176-182.
- ZHANG Qing-xia, HOU Ji-lin, DUAN Zhong-dong, et al. Substructural Virtual Distortion Method for Damage Identification [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(12): 176-182.
- [10] LIU Y, MA J, NIE J G, et al. Virtual Distortion Method-based Finite Element Model Updating of Bridges by Using Static Deformation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2015, 141(9): 1-9.
- [11] NOCEDAL J, WRIGHT S J. Numerical Optimization [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2006.
- [12] SUN L, HE G P, WANG Y L, et al. An Active Set Quasi-Newton Method with Projected Search for Bound Constrained Minimization[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2009, 58(1): 161-170.
- [13] 杨杰, 李爱群, 缪长青. BP 神经网络在大跨斜拉桥的斜拉索损伤识别中的应用[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 72-77, 95.
- YANG Jie, LI Ai-qun, MIAO Chang-qing. Application of BP Neural Network to Cable Damage Identification for Long Span Cable-stayed Bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 72-77, 95.
- [14] 李宏男, 田亮, 伊廷华, 等. 大跨斜拱桥结构健康监测系统的设计与开发[J]. 振动工程学报, 2015, 28(4): 574-584.
- LI Hong-nan, TIAN Liang, YI Ting-hua, et al. Design and Development of Structural Health Monitoring System for Long Span Skew Arch Bridge[J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(4): 574-584.
- [15] AN Y H, SPENCER B F, OU J P. A Test Method for Damage Diagnosis of Suspension Bridge Suspender Cables[J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2015, 30(10): 771-784.

