



Damage Identification of Frame Structure Based on Wavelet Analysis-Bat Algorithm

Guan Deqing^{*}, Bai Yuanwei, Tang Zhou

College of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, China

Email address:

91596452@qq.com (Guan Deqing), 1255082629@qq.com (Bai Yuanwei), 425189434@qq.com (Tang Zhou)

^{*}Corresponding author

To cite this article:

Guan Deqing, Bai Yuanwei, Tang Zhou. Damage Identification of Frame Structure Based on Wavelet Analysis-Bat Algorithm. *Asia-Pacific Journal of Civil Engineering and Architecture*. Vol. 1, No. 1, 2019, pp. 1-6.

Received: January 7, 2019; Accepted: March 29, 2019; Published: May 8, 2019

Abstract: Using wavelet and bat algorithm to study the damage identification of frame structure. Firstly, solving the curvature mode of the damaged structure by finite element analysis. Secondly, by using continuous wavelet transform, the curvature mode is processed to obtain the wavelet coefficient figure. The damage position of the structure was identified by the position point of the maximum modulus in the wavelet coefficient figure. Finally, constructing the objective function based on the frequency and mode shape of the structure and using the bat algorithm to solve the objective function, the degree of structural damage is obtained. A two-stage structural damage identification method based on wavelet and bat algorithm was established. Using this method to analyze one - floor one - span and two - floor two - span frame structure. The results showed that the combination of wavelet and bat algorithm could effectively identify the damage location and damage degree of the structure.

Keywords: Wavelet Transform, Damage Identification, Bat Algorithm, Finite Element Method, Frame Structure

基于小波分析-蝙蝠算法的框架结构损伤识别研究

管德清^{*}, 柏元伟, 唐舟

长沙理工大学土木工程学院, 长沙, 中国

邮箱

491596452@qq.com (管德清), 1255082629@qq.com (柏元伟), 425189434@qq.com (唐舟)

摘要: 将小波和蝙蝠算法相结合研究框架结构损伤识别问题。首先, 通过有限元分析求解得到含损伤结构的曲率模态, 其次, 用小波对得到的曲率模态进行连续小波变换, 得到小波系数图, 由小波系数图中模极大值位置点来识别结构损伤位置。最后, 以结构的频率和模态振型为基础构造目标函数, 采用蝙蝠算法对目标函数进行求解, 对结构损伤程度进行识别。建立了一种基于小波-蝙蝠算法的两阶段识别结构损伤的方法。运用该方法, 以一层一跨和两层两跨框架结构为例进行数值模拟分析, 结果表明将小波和蝙蝠算法相结合能够对结构的损伤位置及损伤程度进行有效的识别。

关键词: 小波变换, 损伤识别, 蝙蝠算法, 有限元方法, 框架结构

1. 引言

建筑与人们生活息息相关, 尤其是在当今社会, 科学技术迅猛发展, 土木工程行业也迅速发展了起来, 各种超

高、超限和大跨度结构层出不穷。土木工程结构安全性也得到人们极大的重视, 这就要求我们不断提高现有工程技术, 保证结构在可靠性范围内为人们提供服务。由于复杂的自然环境和人为使用的不确定性, 往往会给建筑结构带

来不同程度的损伤,当损伤的量积累到一定程度超过结构可承受的范围时就会给人们的生产生活造成威胁,严重时会导致整个建筑物倒塌破坏,给人们的生命和财产带来巨大的损失。如何在早期发现结构损伤,采取措施对结构进行加固,防止损伤扩大是我们一直研究的问题。建筑结构形式多样,而框架结构因其空间布置灵活、跨度大,在工程应用中十分广泛,所以研究框架结构损伤识别的方法,具有十分重大的理论和现实意义。

小波变换是对信号在时间(空间)频率的局部化分解,可以通过伸缩平移运算对信号进行多尺度细化,使信号在高频处细分时间,低频处细分频率,能根据信号的特点自动改变,所以能够检测到信号里包含的有用信息,小波变换对非平稳信号却很敏感,工程当中大多都是非平稳信号,响应信号的频率成分都是随时间变化的,所以小波土木工程结构损伤诊断方面有着很大应用优势。Yi等采用小波理论对一个三层钢筋混凝土框架-剪力墙模型进行试验,有效识别了结构损伤[1]。Khorram等用两种基于小波的损伤检测方法对一受移动荷载的梁进行损伤检测,找出受移动荷载的梁中裂缝的位置和尺寸,并比较了两种方法的优劣[2]。Zhang等通过软件Ansys计算简支梁的速度响应。使用小波变换,可以成功识别损伤位置[3]。Masoumi等基于二维空间小波变换和柔度方法,研究了一受均布荷载的板式结构损伤识别问题[4]。Hsueh等利用改进的复Morlet小波对一双塔钢结构和一三层钢结构两种不同的框架结构进行损伤识别,结果表明该方法可行[5]。Xiang等将小波和支持向量机相结合,考虑损伤引起的曲率模态形状和固有频率变化形成混合损伤检测方法,研究结构损伤识别问题[6]。李宏男等利用小波包分析和神经网络方法以美国土木工程师学会提出的基准结构为例,研究了结构损伤的发生、位置和程度诊断过程,取得了令人满意的结果[7]。雷里通过小波变换方法提取模拟响应信号的模态频率,到对结构进行损伤识别的,结果显示,基于小波变换的结构损伤识别方法较以往仅在时间或频率域识别方法更能准确地识别结构损伤[8]。杨海鸣等提出了信号降阶概念以悬臂梁为例,说明了有损信号和无损信号之差是对梁结构位移信号的一种有效的降阶方法。提出了利用小波系数模极大值分布图判断结构损伤的办法[9]。管德清等根据小波奇异性原理及小波去噪方法,研究了框架结构的损伤问题,成功识别了平面框架的损伤位置[10]。Janeliukstis等提出基于空间连续小波变换和模态曲率方法,并通过实验研究了梁结构的损伤定位[11]。Patel等采用复连续高斯小波变换对六层钢筋混凝土框架结构加速度响应信号进行分析,结果表明小波系数能够检测结构损伤[12]。

蝙蝠算法(Bat Algorithm, 缩写BA)是一种元启发式优化算法,是Xin-She Yang在2010年提出[13-14]。蝙蝠算法以微蝙蝠(microbats)回声定位行为为基础,采用不同的脉冲发射率和响度。该算法在连续空间和离散空间的优化方面具有很强的优势,所以有很多学者将其运用在目标优化问题上。李煜等将蝙蝠算法用在函数极值优化问题上,取得了良好的结果,同时仿真结果表明,蝙蝠算法的性能优于粒子群算法[15]。陈绍炜等将蝙蝠算法引入到极限学习机输入权值和阈值的优化中,有机结合2种算法的优点,建立了基于蝙蝠算法优化极限学习机的故障模型,仿真和实

验结果表明蝙蝠算法使得计算结果得到很大的[16]。韩忠华等为解决柔性流水车间调度问题(flexible flow shop scheduling problem,FFSP),提出了一种基于精英个体集自适应蝙蝠算法(self-adaptive elite bat algorithm,SEBA),实验结果验证了改进蝙蝠算法求解FFSP问题的有效性[17]。Alemu等将蝙蝠算法应用于燃气轮机发电系统模型中,并结合局部线性模型树算法对系统进行训练,结果表明与单一的局部线性模型树算法相比,两种算法的结合结果更具有有效性[18]。Nakamura等结合BA强大的搜索能力和快速查找能力结合将其应用于拓扑优化问题中的弹簧问题和减速器问题,实验测试结果表明蝙蝠算法具有很强的优势[19]。Tholath等将蝙蝠算法应用到求解机组负荷经济调度问题中,并同时用PSO做对比实验,实验结果表明BA更具可行性与有效性[20]。Dao等提出了演化蝙蝠算法(EBA)作为一种基于进化的方法来解决热电厂约束经济负荷调度问题[21]。现有研究表明,若单纯用小波分析方法识别结构损伤程度,识别精度不高,蝙蝠算法由于算法本身的局限性,在结构损伤定位方面会产生大量计算,可能会陷入局部最优解。本文结合了小波理论与BA的优点,建立了基于小波和BA的结构损伤识别方法,该方法可对结构损伤位置和损伤程度进行识别。

2. 小波-蝙蝠算法的结构损伤识别原理

2.1. 基于小波变换的结构损伤位置识别原理

小波变换是一种新的变换分析方法,它是把某一种被称为母小波或基本小波的函数 $\psi(t)$ 做平移 $\tau(\tau \in R)$ 后,再在尺度因子 $a(a \in R, a \neq 0)$ 下与要分析的信号 $x(t)$ 做不同尺度下内积,这个基函数会伸缩、会平移。当缩得窄时,对应高频;当伸得宽时,对应低频。这个基函数不断和信号做内积。某一个尺度下乘出来的结果,我们就可以理解成信号所包含的当前尺度对应频率成分有多少。在某些尺度下,当二者有合关系时,基函数与信号相乘会得到一个很大的值。我们就能知道信号里包含了怎样的信息。内积公式如下

$$WT_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt, a > 0 \quad (1)$$

式中, a 为尺度因子,反映的是信号的频率信息; τ 为平移因子,反映的是信号的时间信息; ψ^* 为 $\psi(t)$ 的复共轭。随着尺度因子和平移因子的改变,使得小波变换具有多分辨率的特点,可以充分找到信号里包含的有用信息。

根据力学知识可以得到梁的截面曲率 κ 表达式

$$\kappa = \frac{M}{EI} \quad (2)$$

偏导表达式为

$$\kappa = \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (3)$$

式中, M 表示截面弯矩; E 表示弹性模量; I 表示截面惯性矩; θ 和 y 分别表示梁的转角和位移模态。

将(2)式代入(3)式中, 运用中心差分法可得

$$\kappa = \frac{M}{EI} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{l^2} = \phi_n''(x) \quad (4)$$

其中, i 表示第 i 个测点; l 表示两个测点间的距离; $\phi_n(x)$ 表示梁的第 n 阶的曲率模态振型。

根据式(4)可知: 若结构某一局部发生损伤, 则该损伤将导致结构局部刚度 EI 下降, 进而会引起曲率模态振型 $\phi_n(x)$ 发生突变, 那么曲率模态在损伤位置处会不连续从而存在奇异点, 由奇异点检测理论可知, 曲率模态的小波变换系数会在损伤处出现局部模极大值, 根据小波系数模极大值位置就可以确定结构损伤位置。

2.2. 蝙蝠算法的过程机理

蝙蝠在搜寻猎物过程中, 通过喉部发出超声波脉冲, 音强可达110db。在搜寻猎物时脉冲音强最大, 在飞向猎物时慢慢变小, 同时脉冲频度逐渐增加, 达到每秒发射约两百个脉冲, 这可以帮助蝙蝠精确掌握猎物的空间位置。蝙蝠发出的回声定位声波一般由单谐波或多谐波宽频带的调频信号构成(频率通常在25~100赫兹)。声脉冲宽度较窄(小于5毫秒), 每个谐波频率由高到低, 下降较快, 根据多谐波、宽频带的调频声, 蝙蝠可以准确的掌握复杂环境和猎物的精细结构。通过探测发出的超声波回波时间间隔, 利用回波到达两耳的时间差、回波音强的改变建立起周围环境的三维场景, 蝙蝠不仅能感知猎物的距离, 还能识别其体型情况、坐标方位和角度。蝙蝠在复杂环境中能够精确定位、捕食的规律为模拟其生物学机理进行人工智能优化带来了启发。蝙蝠算法的仿生原理是: 用搜索空间中的点模拟自然界中的蝙蝠个体, 利用蝙蝠个体搜寻猎物和移

动模拟搜索和优化过程, 把所需求解问题的目标函数度量成个体所处位置的好坏, 在搜索和优化过程中用较好的解取代较差的解, 模仿自然界中蝙蝠个体优胜劣汰过程。首先将整个蝙蝠群随机分散在解域中, 各个蝙蝠分别以不同的脉冲频率来寻找猎物。蝙蝠寻找猎物时采取的方法是, 刚开始时采用较低的脉冲频度和较大的脉冲音强大范围搜索, 一旦感知到了猎物, 则慢慢增大脉冲频度同时适当减小脉冲音强。通过蝙蝠自身比较, 较差位置处的蝙蝠慢慢向处于较优位置的蝙蝠移动, 通过多次不断的搜索和移动后, 最后所有蝙蝠都将会发现猎物, 即聚集在最优解处, 通过这个过程达到寻优的目的。

BA中包含三个不可或缺的元素, 搜索过程中脉冲频率、脉冲音强和发射脉冲的频度。具体的算法步骤如下。

步骤1 设置初始算法基本参数, 包括设置蝙蝠数目、惯性权重、搜索脉冲频率范围、精度等等。

步骤2 随机分布蝙蝠的位置 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, m)$, 搜索出当前群体中处于最佳位置 x^* 的个体。

步骤3 给定一个初始频率, 计算蝙蝠的飞行速度, 更新蝙蝠的位置。

步骤4 生成随机数 $rand1$, 如果 $rand1 > r_i$, 则对处在最佳位置的蝙蝠进行随机扰动, 用扰动后的位置代替当前蝙蝠位置; 否则, 更新蝙蝠空间位置。

步骤5 生成随机数 $rand2$, 如果 $rand1 > A_i$, 且如果蝙蝠当前所处位置改变的较好, 则移动至更新后的位置。

步骤6 若更新位置后蝙蝠 i 优于当前最佳蝙蝠位置, 更新脉冲频率 r 和脉冲音强 A 。

步骤7 对所有蝙蝠进行评价, 搜索出当前最佳蝙蝠及其所在的空间位置。

步骤8 当精度达到设置精度或搜索次数已经达到设置值时, 转入步骤9, 否则转步骤3, 进行下一次迭代。

步骤9 输出全局极值点和最佳个体值。
连续优化问题的BA流程图如图1所示:

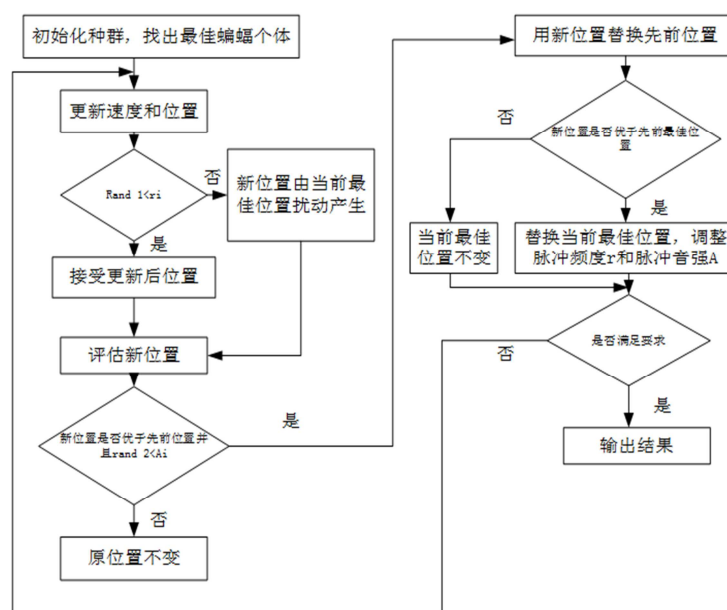


图1 蝙蝠算法流程图。

2.3. 基于蝙蝠算法结构损伤程度识别

在结构损伤识别中,固有频率是结构的整体属性,不同的损伤位置和损伤程度可能使固有频率发生相同变化,若使用固有频率的改变来识别结构的损伤,则可能造成识别的损伤程度不准确。振型是结构的局部属性,但是在实际操作中精度较高的振型数据较难获得,所以仅用振型数据作为结构损伤识别参数,会因不能准确测得振型数据而导致识别结果产生误差。单独使用固有频率和模态振型不能较好的识别结构损伤程度,本文将两者综合考虑。结合结构的频率和模态振型,将频率误差函数和模态振型误差函数的加权后相加,当其和最小时,得到损伤程度。数学表达式如下:

$$J = F_{\omega} \sum_{i=1}^m \left(\frac{f_i^{\text{test}} - f_i^{\text{cai}}}{f_i^{\text{test}}} \right)^2 + F_{\phi} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (\phi_{ij}^{\text{test}} - \phi_{ij}^{\text{cai}})^2 \quad (5)$$

式中, F_{ω} 、 F_{ϕ} 为加权因子; f_i^{test} 、 f_i^{cai} 为第 i 阶实测和计算得到的固有频率; ϕ_{ij}^{test} 、 ϕ_{ij}^{cai} 为第 i 阶经过归一化处理后的实测和计算的曲率; m 表示频率阶数; n 表示振型阶数; k 表示节点位移数目。该目标函数是求最小值问题,通过BA对该目标函数进行寻优,得到最优解即为结构损伤程度。

3. 框架结构损伤位置识别

为了验证以上方法的有效性,研究一层一跨平面钢框架的损伤识别问题。首先建立如图2所示一单层框架结构有限元模型,梁与柱之间的连接方式为刚接,柱与地面的连接方式为固接,梁的跨度和柱的高度均为3000mm,柱与梁的截面尺寸为 $b \times h = 300\text{mm} \times 500\text{mm}$,材料的密度为

$\rho = 7800\text{kg/m}^3$,泊松比为 $\mu = 0.3$,弹性模量为 $E = 2.1 \times 10^{11}\text{N/m}^2$,整个结构按 $A-B-C-D$ 的顺序等分为300个单元,按顺序进行编码。

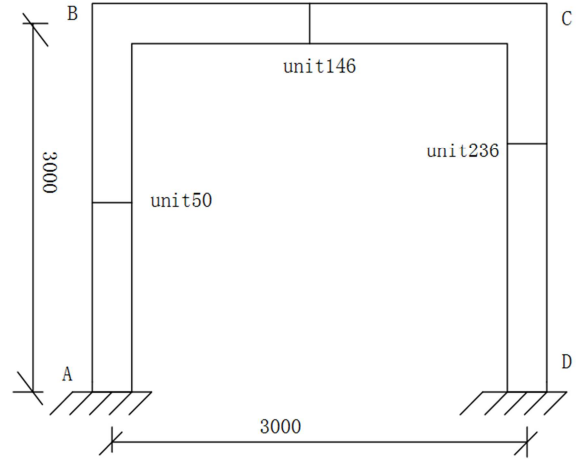


图2 一层一跨框架结构模型。

结构损伤工况设置如表1所示。

表1 损伤工况表。

损伤工况	损伤位置	损伤程度
工况	50号单元	6%
	146号单元	7%
	236号单元	8%

对结构的曲率模态进行连续小波变换得到如图3所示小波系数图。

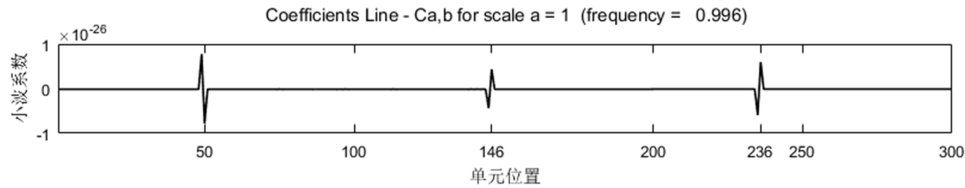


图3 小波系数图。

由图3可知,小波系数在50号、146号和236号单元处小波系数有明显的突变,这与损伤设置的位置一致,表明运用小波变换可以识别出结构损伤位置。

4. 框架结构损伤程度识别

采用结构前5阶频率和第一阶曲率模态对结构进行损伤程度识别,运行十次结果如图4所示。

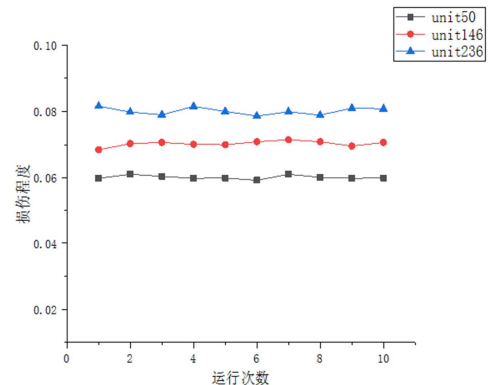


图4 运行十次结果。

求10次运算结果的平均值，得到50号单元的损伤程度为6.019%，146号单元的损伤程度为7.032%，236号单元的损伤程度为8.011%，满足工程精度要求。识别结果如图5所示。

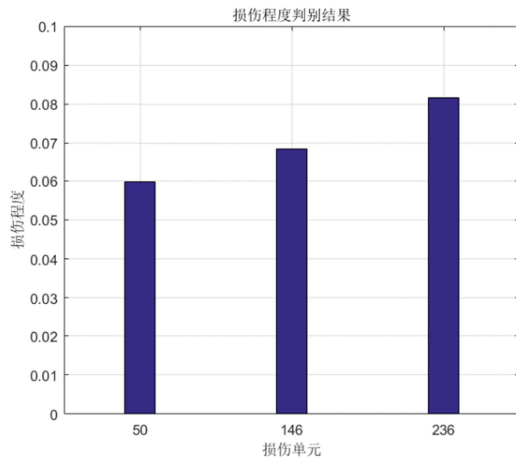


图5 损伤识别结果。

从图5可以看出，各个单元的损伤程度均与实际相符，证明了该方法的有效性。

为了验证该方法可适用更复杂的框架结构，建立如图6所示框架结构，整个结构按 $A-B-C-D-E-F-G$ ， $B-H-F$ ， $D-H-I$ 的顺序分为1000个单元，并依次编码。

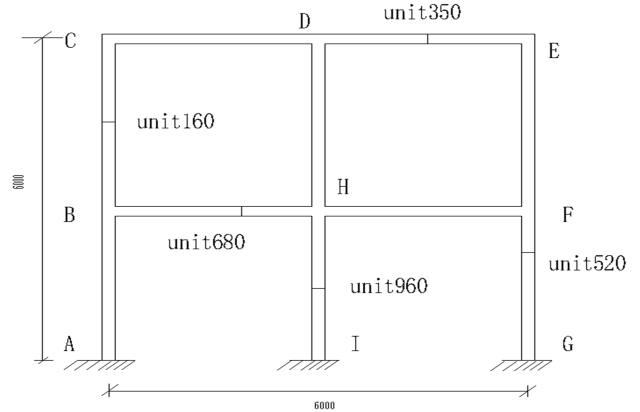


图6 一层一跨框架结构模型。

损伤工况设置如表2所示

表2 损伤工况表。

损伤工况	损伤位置	损伤程度
工况	160号单元	2%
	350号单元	5%
	520号单元	3%
	680号单元	6%
	960号单元	4%

对结构的曲率模态进行连续小波变换得到如图7所示小波系数图。

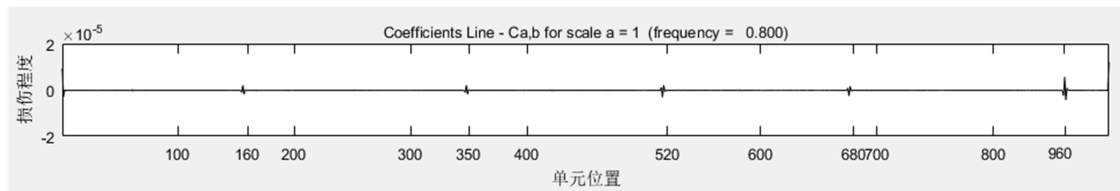


图7 小波系数图。

由图7可知，小波系数在160号、350号、520号、680号和960号单元处小波系数有明显的突变，这与损伤设置的位置一致，表明运用小波变换可以识别出结构损伤位置。

运行十次结果如图8所示。

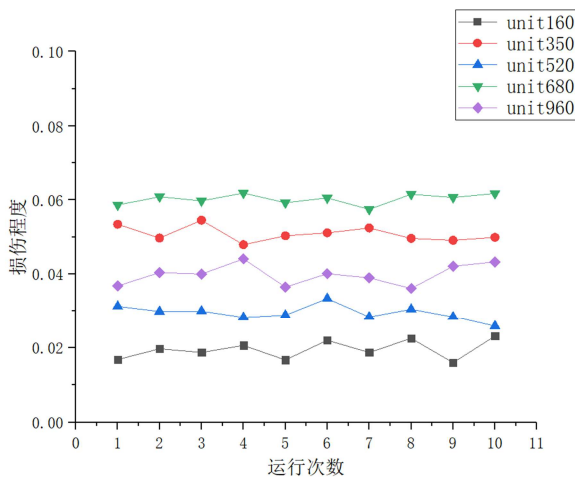


图8 运行十次结果。

求10次运算结果的平均值，得到160号单元的损伤程度为1.948%，350号单元的损伤程度为5.079%，520号单元的损伤程度为2.949%，680号单元的损伤程度为6.018%，960号单元的损伤程度为3.984%，满足工程精度要求。识别结果如图9所示。

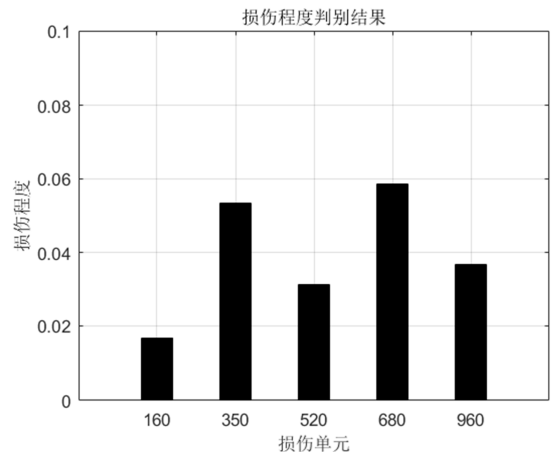


图9 损伤识别结果。

5. 结论

结合小波分析和蝙蝠算法理论,建立了一种基于小波分析蝙蝠算法的识别结构损伤位置及程度的新方法;通过建立有限元模型,分析得到结构的曲率模态,利用小波对结构的曲率模态进行连续小波变换,由小波系数图中奇异点来识别结构损伤位置。在得到损伤位置的基础上,建立目标函数,利用蝙蝠算法对目标函数进行寻优,从而准确识别出了结构损伤程度验证了该方法能够用于结构损伤识别;用小波变换奇异点对损伤进行定位,再利用蝙蝠算法对结构损伤程度进行识别,使搜索空间大大减小,提高了计算的效率和精度;本文以一层一跨和两层两跨框架结构为例,通过数值计算分析验证了方法的可行性,该方法可推广至其他更复杂的结构的损伤识别中。

基金项目

国家自然科学基金(51378079)。

参考文献

- [1] Yi, Ting-Hua, Li, Hong-Nan, Li, Bing. Structural damage assessment based on wavelet spectrum analysis [J]. Harbin Gongye Daxue Xuebao/Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37: 53-56
- [2] Khorram A, Bakhtiari-Nejad F, Rezaeian M. Comparison studies between two wavelet based crack detection methods of a beam subjected to a moving load[J]. International Journal of Engineering Science, 2012, 51(none):204-215.
- [3] Zhang W W, Geng J, Zhao Z L, et al. Numerical Studies on Wavelet-Based Crack Detection Based on Velocity Response of a Beam Subjected to Moving Load[J]. Key Engineering Materials, 2013, 569-570:854-859.
- [4] Masoumi M, Ashory M R. Damage Identification in Plate-type Structures Using 2-D Spatial Wavelet Transform and Flexibility-Based Methods[J]. International Journal of Fracture, 2013, 183(2):259-266.
- [5] Hsueh Wen, Loh Chin-Hsiung. Damage detection of structures by wavelet analysis: Application to seismic response of steel frames [C]. SPIE, 2017
- [6] Xiang J, Matsumoto T, Wang Y, et al. Detect damages in conical shells using curvature mode shape and wavelet finite element method[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 66:83-93.
- [7] 李宏男, 孙鸿敏. 基于小波分析和神经网络的框架结构损伤诊断方法[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(5).
- [8] 雷理. 一种基于小波的结构损伤识别方法研究[J]. 工程地球物理学报, 2012, 09(2):238-240.
- [9] 杨海鸣, 杨帆. 小波在结构损伤鉴定中的应用[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(4):836-839.
- [10] 管德清, 黄燕. 基于应变模态小波变换的框架结构损伤识别研究[J]. 计算力学学报, 2010, 27(02):325-329+341.
- [11] Janeliukstis R, Rucevskis S, Wesolowski M, et al. Experimental structural damage localization in beam structure using spatial continuous wavelet transform and mode shape curvature methods[J]. Measurement, 2017, 102:253-270.
- [12] Patel S.S. Chourasia, A.P. Panigrahi, S.K.. Damage Identification of RC Structures Using Wavelet Transformation [C]. India, 2016
- [13] Yang X S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm[C]. Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization(NICSO 2010), Springer, 2010.
- [14] Yang X S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm[J]. Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization, 2012, 284: 65-74.
- [15] 李煜, 马良. 新型全局优化蝙蝠算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(9):225-229.
- [16] 陈绍炜, 柳光峰, 冶帅. 基于蝙蝠算法优化ELM的模拟电路故障诊断研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(2):138-141.
- [17] 韩忠华, 朱伯秋, 史海波, 等. 基于改进蝙蝠算法的柔性流水车间排产优化问题研究[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(7):1935-1938.
- [18] Alemu Lemma T, Mohd Hashim F. Fuzzy Systems and Bat Algorithm for Exergy Modeling in a Gas Turbine Generator[C]. Humanities, Science & Engineering. IEEE, 2012.
- [19] Nakamura R Y M, Pereira L A M, Costa K A, et al. BBA: A binary bat algorithm for feature selection[C]. Graphics, Patterns & Images. IEEE, 2012.
- [20] Tholath Jose J. Economic load dispatch including wind power using Bat Algorithm[C]. International Conference on Advances in Electrical Engineering. IEEE, 2014.
- [21] Dao T K, Pan T S, Nguyen T T, et al. Evolved Bat Algorithm for Solving the Economic Load Dispatch Problem[M]. Genetic and Evolutionary Computing. Springer International Publishing, 2015.

作者简介



管德清(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 湖南汉寿人, 博士, 湖南省重点学科带头人, 湖南省跨世纪学术与技术培养对象, 湖南省新世纪“121”人才工程人选。湖南省力学学会常务理事。长沙理工大学土木工程学院教授。