

基于小波变换的钢桁梁桥损伤识别数值分析

陈 刚, 郑七振

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 为了验证基于曲率模态理论和小波变换相结合的损伤识别方法在桥梁结构监测中的适用性,采用 SAP2000 软件创建钢桁梁桥有限元分析模型.通过调整节点处单元弹性模量的方法改变节点的连接刚度,并模拟节点的不同损伤工况,然后对结构的模态振型进行曲率模态计算.在 Matlab 软件中应用 Bior3.9 小波函数编程,提取曲率模态信号的小波变换系数得到损伤指标 D 值,根据小波变换模极大值法对桥梁节点进行损伤识别.研究表明,该方法能够较好地识别出损伤节点的位置,并且损伤指标会随着损伤程度的提高而增大,为钢桁梁桥的损伤检测和健康监测提供了一定的参考和借鉴.

关键词: 小波变换; 钢桁梁桥; 损伤识别; 数值分析

中图分类号: TU 311 **文献标志码:** A

Numerical Analysis on Damage Identification of Steel Truss Bridge Based on Wavelet Transform

CHEN Gang, ZHENG Qizhen

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to verify the applicability of the damage identification method based on curvature mode theory and wavelet transform, the finite element model of a steel truss bridge was created by using the SAP2000 software. By adjusting the elastic modulus of the nodes, the nodes' connection stiffness was modified to simulate different damage conditions of the nodes, then according to the vibration mode shapes, the curvature modes of the structure were calculated. By using the Bior3.9 wavelet function programming in the Matlab software, the D value of damage index was extracted from the wavelet transform coefficients. The results show that the method can identify the location of damage nodes, and the damage index will increase with the degree of damage, which provides a reference to the damage detection and health monitoring of steel truss bridges.

Key words: wavelet analysis; steel truss bridge; damage identification; numerical analysis

收稿日期: 2014-09-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208300)

第一作者: 陈 刚(1980-),男,实验师.研究方向:工程结构损伤识别与健康监测. E-mail: cg.sh.2008@163.com

随着国民经济的发展,目前国内大量在役桥梁结构存在超负荷运营、维护保养不到位等状况.为了便于及时修缮和加固,急需采取有效技术手段定期开展桥梁检测并评估其安全状况.因此,许多专家学者进行了损伤识别方法和监测技术研究,虽然取得了很多研究成果^[1-4],但由于理论研究和监测技术还不够成熟,而且桥梁的结构形式较多,还有很多问题需深入研究.

结构一旦发生损伤,相应的模态参数会发生局部突变^[5-7],而小波分析又对奇异性信号的检测和识别非常敏感^[8-12].因此,本文拟以钢桁梁桥有限元模型为研究对象,探索基于曲率模态理论和小波分析相结合的损伤识别方法在钢桁梁桥结构监测中的适用性.

1 理论原理

本文所研究的钢桁梁桥可简化为梁式结构,主要受到竖向荷载作用,以梁的受弯变形为主.梁的位移模态振型可以通过试验直接测得,其曲率模态振型则需对位移模态二次差分近似计算,公式为

$$\varphi''_{i,j} = \frac{\varphi_{i-1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i+1,j}}{l_{i-1}l_i},$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1; j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

式中: $\varphi''_{i,j}$ 为第 j 阶 i 节点的曲率模态; $\varphi_{i-1,j}$, $\varphi_{i,j}$, $\varphi_{i+1,j}$ 为 $i-1, i, i+1$ 这3个节点的第 j 阶位移模态; l 为节点间距; m 为截断模态阶数.

在桥梁结构振动中低阶模态起主导作用,且在动力试验测试中低阶模态的测量精度容易得到保证,因此只需考察少量的低阶模态.

采用小波分析技术,将各阶曲率模态振型 $\varphi''_{i,j}$ 作为信号,通过小波变换的系数变化情况,检测和识别信号中的突变信息,找寻突变点,对结构进行损伤分析和诊断.具体计算公式为

$$D_{i,j} = W_{i,j}^u - W_{i,j}^d \quad (2)$$

式中: $W_{i,j}^u$, $W_{i,j}^d$ 依次为结构损伤前和损伤后在第 j 阶曲率模态下第 i 节点处小波变换系数残差; $D_{i,j}$ 为结构在第 j 阶曲率模态下第 i 节点处小波变换系数残差.根据上式残差信号,结合结构特性分析其奇异点,易知在损伤节点处的 D 值绝对值显然大于其余节点,因此, D 值可以作为一项判断结构损伤的指标.但在同一损伤程度下,各阶曲率模态的 D 值差异较大,而且不同位置相同程度的损伤在同一阶曲率模态下的 D 值差异也较大.所以在实际损伤检

测中,应当根据结构的实际特性及损伤位置,综合考虑各阶曲率模态下的 D 值变化情况,用综合损伤指标 DA 来进行损伤定位,计算公式为

$$DA_i = \sum_{j=1}^m D_{i,j},$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

式中, DA_i 为结构在前 m 阶曲率模态下第 i 节点处小波变化系数残差.

综上所述,结构损伤识别大致可分为如下步骤:

- 根据测得的结构响应信号,创建结构模态模型并进行模态分析;
- 当测点数相对较少时,为了降低二次差分法的误差,应首先计算出相应测点的位移响应,再采用多项式或三次样条函数对位移模态进行插值计算;
- 通过二次差分法近似算出结构的曲率模态 $\varphi''_{i,j}$;
- 对曲率模态 $\varphi''_{i,j}$ 进行小波变换,选择适当的小波函数求出小波变换系数残差 $W_{i,j}$;
- 计算结构各阶模态下损伤前后的损伤指标 $D_{i,j}$,并根据结构节点分布进行绘图,分析奇异节点,初步判定损伤位置;
- 计算综合损伤指标 DA ,并结合 m 阶截断模态下各阶损伤指标 $D_{i,j}$ 的变化情况,进而判定损伤.具体流程步骤如图1所示.

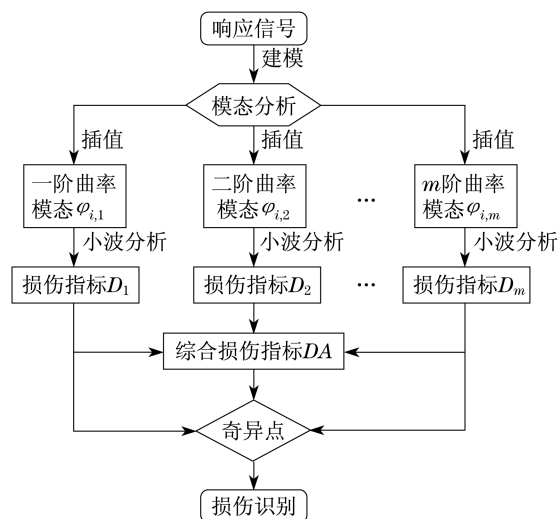


图1 损伤识别流程图

Fig.1 Damage identification flow chart

2 数值分析模型

为了便于研究,参照实际钢桁梁桥结构设计图纸的具体尺寸,在SAP2000软件中创建有限元模

型,如图 2 所示.本模型中的构件均为同种连续材料,构件单元相关物理参数如下:构件标准弹性模量为 $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$;构件密度为 $7\,697 \text{ kg/m}^3$;上、下弦杆和斜腹杆截面积为 $1.446 \times 10^{-3} \text{ m}^2$;构件截面惯性矩为 $2.431 \times 10^{-7} \text{ m}^4$;构件和节点编号如图 3 所示.

本次研究主要针对钢桁梁桥模型节点区域进行

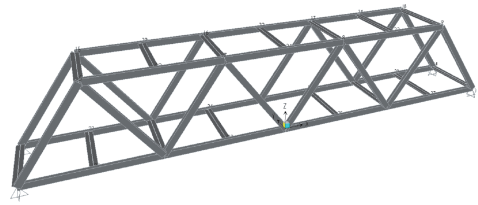


图 2 钢桁梁桥有限元模型图

Fig.2 Finite element model of the steel truss bridge

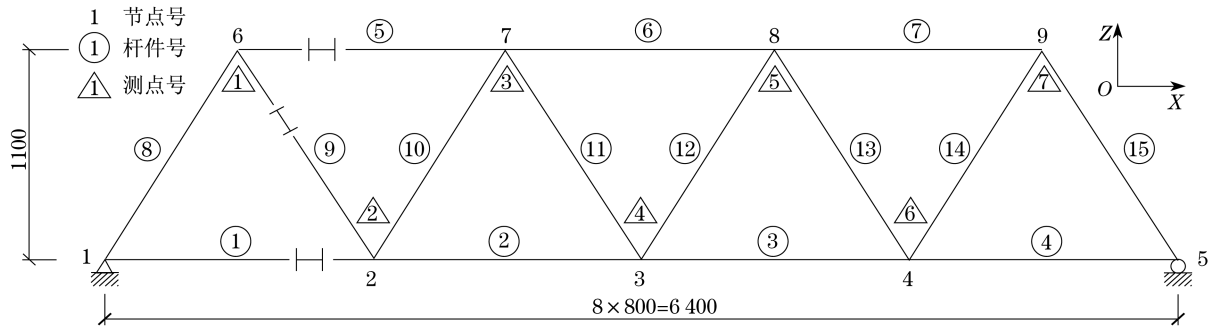


图 3 构件和节点编号图

Fig.3 Component and node numbering diagram

损伤识别研究,拟通过降低节点处单元弹性模量的方法降低单元刚度来模拟结构中节点损伤.数值分析将考虑钢桁梁桥模型健康时、节点损伤不同位置和不同损伤程度等多种工况,首先对结构健康时进行模态分析,提取前 3 阶的模态频率和模态振型数据,详见表 1 和表 2.

表 1 结构健康时前 3 阶模态频率

Tab.1 First 3 order modal frequencies of the structure

阶数	1 阶	2 阶	3 阶
频率/Hz	55.849	131.03	185.95

表 2 结构健康时前 3 阶模态振型

Tab.2 First 3 order vibration mode shapes of the structure

节点号	1 阶	2 阶	3 阶
1	0.000 0E+00	0.000 0E+00	0.000 0E+00
2	-6.045 6E+01	-7.289 9E+00	-9.089 4E+01
3	-8.440 8E+01	3.220 3E+01	-1.264 0E+01
4	-5.909 7E+01	4.192 6E+01	8.176 1E+01
5	0.000 0E+00	0.000 0E+00	0.000 0E+00
6	-3.356 1E+01	-2.441 7E+01	-4.953 4E+01
7	-7.889 3E+01	2.461 5E+00	-6.634 9E+01
8	-7.785 4E+01	3.896 4E+01	5.735 4E+01
9	-3.186 8E+01	2.310 8E+01	5.825 6E+01

对位移模态进行 3 次样条插值,用式(1)进行二次差分求出前 3 阶的曲率模态.使用 Matlab 软件中的 Bior3.9 小波函数进行编程,对曲率模态信号进行 5 层分解,提取小波变换系数残差 $W_{i,j}$,为接下来的损伤工况提供对比数据.

3 损伤位置识别

考虑结构的对称性,具体的损伤工况设置详见表 3.

表 3 节点损伤工况

Tab.3 Node damage condition

工况	损伤位置	损伤程度/%	弹性模量/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)
1	斜腹杆 9 在测点 1 节点板上的连接损伤	3	$1.94\text{E}+5$
2	斜腹杆 9 在测点 1 节点板上的连接损伤	10	$1.8\text{E}+5$
3	斜腹杆 9 在测点 1 节点板上的连接损伤	30	$1.4\text{E}+5$
4	斜腹杆 9 在测点 2 节点板上的连接损伤	3	$1.94\text{E}+5$
5	斜腹杆 9 在测点 2 节点板上的连接损伤	10	$1.8\text{E}+5$
6	斜腹杆 9 在测点 2 节点板上的连接损伤	30	$1.4\text{E}+5$
7	斜腹杆 11 在测点 3 节点板上的连接损伤	3	$1.94\text{E}+5$
8	斜腹杆 11 在测点 3 节点板上的连接损伤	10	$1.8\text{E}+5$
9	斜腹杆 11 在测点 3 节点板上的连接损伤	30	$1.4\text{E}+5$
10	斜腹杆 12 在测点 4 节点板上的连接损伤	3	$1.94\text{E}+5$
11	斜腹杆 12 在测点 4 节点板上的连接损伤	10	$1.8\text{E}+5$
12	斜腹杆 12 在测点 4 节点板上的连接损伤	30	$1.4\text{E}+5$

按照结构健康时的计算步骤,依次对 12 种损伤工况下的结构动力响应参数计算提取小波变换系数残差 $W_{i,j}$;再以结构健康时数据为对比,根据式(2)和式(3)计算出结构各测点的损伤指标 D 值,并绘

制损伤指标沿测点分布直方图,如图 4 所示.图中 $D_1 - D_3$ 依次为各工况下前 3 阶损伤指标, DA 为综合损伤指标.

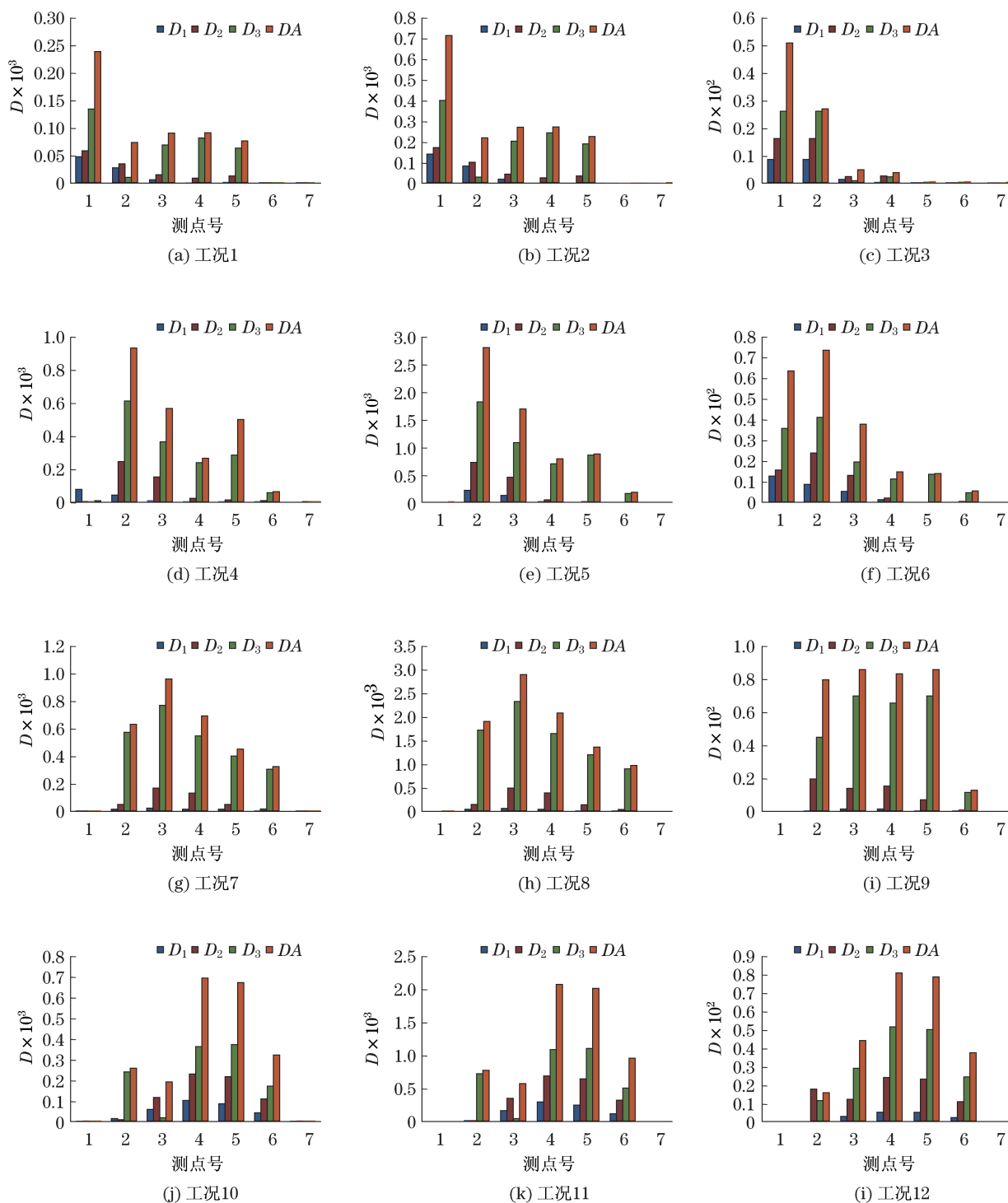


图4 工况1-12损伤识别图

Fig.4 Damage identification chart for condition 1 to 12

根据小波变换的奇异性理论,从图 4(a) - 4(f) 的结构前 3 阶及综合损伤识别图中,均能明确反映

测点 1 和测点 2 处的损伤指标值明显大于其他测点.因此,可以判定结构发生了损伤,而且随着损伤

程度的提高,其损伤指标 D 值也随之增大. 在图 4(g)–4(i)中,工况 7 和工况 8 的损伤程度较低,但从图中能较好地识别出测点 3 发生了损伤,随着损伤程度的提高,在工况 9 的图中,发现与斜腹杆 11 相连的测点 3 和测点 4 处的 D 值较为接近,且均明显大于其余测点. 在图 4(j)–4(l)中,同样发现与斜腹杆 12 相连的测点 4 和测点 5 处的 D 值较为接近,且均明显大于其余测点. 结合结构图 3 分析,对称测点 1 与测点 7、测点 2 与测点 6 都获得了良好的识别效果,而测点 4 恰好位于对称结构的跨中位置,尚无法对其损伤精准定位,但已将范围缩小到与损伤节点相邻的 1~2 个节点内,可由超声波和红外线等局部检测手段来辅助解决,这对于大型复杂结构已相当经济、实用.

4 损伤程度识别

前面仅仅识别出了结构的损伤位置,本节将针对同一节点的不同损伤程度,研究损伤指标 D 值与损伤程度的关系. 以测点 2 为例,在有限元模型中采用降低其单元弹性模量的方法,对斜腹杆 9 在 2 号节点板上的连接进行损伤模拟,损伤程度以 5% 的幅度递增,共设置了 14 种工况,如表 4 所示.

表 4 不同损伤程度工况

Tab.4 Different damage degree conditions

工况	损伤程度/%	弹性模量/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	工况	损伤程度/%	弹性模量/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)
1	5	$1.9\text{E}+5$	8	40	$1.2\text{E}+5$
2	10	$1.8\text{E}+5$	9	45	$1.1\text{E}+5$
3	17	$1.7\text{E}+5$	10	50	$1.0\text{E}+5$
4	20	$1.6\text{E}+5$	11	55	$9.0\text{E}+4$
5	25	$1.5\text{E}+5$	12	60	$8.0\text{E}+4$
6	30	$1.4\text{E}+5$	13	65	$7.0\text{E}+4$
7	35	$1.3\text{E}+5$	14	70	$6.0\text{E}+4$

对比 14 种工况下的损伤识别图,测点 2 的损伤指标 D 值均随着损伤程度的不断提高而逐渐增大,而且与其他测点的比值也在逐渐增大.

将测点 2 损伤指标 D 值与损伤程度的关系绘图,如图 5 所示. 当损伤程度小于 40% 时,损伤指标与损伤程度基本上成线性关系;当损伤程度大于 40% 后,损伤指标将随着损伤程度提高迅速增大,失去线性关系.

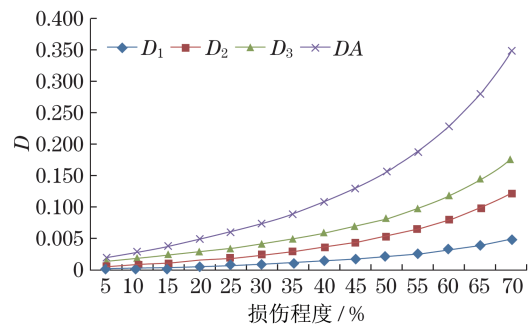


图 5 测点 2 损伤指标与损伤程度关系图

Fig.5 Relationship between the damage index and the damage degree at measurement point 2

5 试验验证

为验证上述损伤识别法在工程中的适用性,进行 1:10 钢桁梁桥模型试验. 钢材牌号选用 Q235B,弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,密度为 $7.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. 上、下弦杆及斜腹杆均采用 $\text{H}100 \times 100 \times 4.5 \times 6$ 高频焊型钢,竖腹杆采用 $\text{H}100 \times 50 \times 3.2 \times 4.5$ 高频焊型钢,水平连杆采用 $2 \text{ L } 50 \times 4$ 角钢,节点处采用 6 mm 厚节点板通过 M12 高强度螺栓连接.

实验信号采集采用 INV306U 型数据采集仪,加速度传感器采用 26100 型,测点布置如图 3 所示. 配套信号处理软件采用 DASP V10 工程版. 采样频率设置为 200 Hz,荷载激励方式采用锤击激励,每个工况锤击 3 次. 拟通过拆卸节点板上的连接螺栓来进行模拟损伤,共设计了 4 种节点损伤工况,如表 5 所示.

表 5 节点损伤工况

Tab.5 Node damage conditions

工况	损伤节点	损伤设计
1	无	节点完好,无损伤
2	2	拆卸单元 9 在 2 号节点板上的半数螺栓
3	2	拆卸单元 9 在 2 号节点板上的全部螺栓
4	2,6	拆卸单元 9 在 2,6 号节点板上的全部螺栓

测试得到桥梁模型的前 3 阶模态参数,并按照图 1 所示步骤,依次计算并绘制工况 2–4 的前 3 阶损伤识别图,如图 6 所示.

根据小波变换的奇异点法,对比分析各种试验工况下的损伤识别图,可以得出测点 2 的各阶损伤指标值均明显大于其他测点位置,因此可以判定 2 号节点处发生了损伤,试验数据分析结果验证了基于模态理论和小波分析技术的损伤识别方法的适用性.

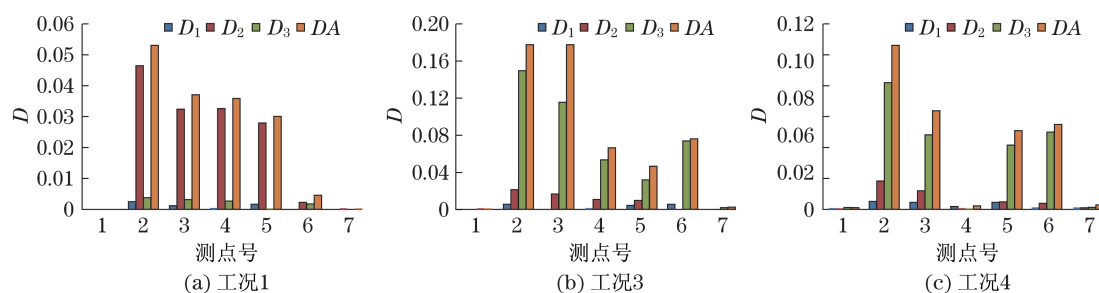


图6 工况2-4损伤识别图

Fig.6 Damage identification chart for condition 2 to 4

6 结 论

a. 利用损伤前后的小波变换系数残差提出的单阶损伤指标 D 值和综合损伤指标 DA 值,能够用于判定结构中是否存在损伤;

b. 通过对比各阶的损伤识别图,发现结构在低阶模态尤其是在前3阶模态下能够获得良好的识别效果;

c. 对结构跨中位置附近节点的损伤不能准确定位,但已将范围缩小到与损伤节点相邻的1~2个节点内,可由超声波和红外线等局部检测手段来辅助解决,这对于大型复杂结构相当经济、实用;

d. 随着损伤程度的提高,损伤指标 D 值随之增大,且损伤程度小于40%时,损伤指标与其成线性关系。

本文通过数值分析和模型试验,验证了一种对钢桁梁桥结构进行损伤识别的方法,并总结了损伤识别步骤,为类似工程的损伤检测和健康监测提供了一定的参考和借鉴。同时,本文的研究尚存在一些不足之处,有待于进一步研究探讨。比如对结构跨中位置附近节点的损伤定位尚不够精准,在计算分析方法上仍需优化改进;对结构中出现两个及以上多点损伤的这种情况尚需专门研究。

参考文献:

[1] 朱宏平,余璟,张俊兵. 结构损伤动力检测与健康监测研究现状与展望[J]. 工程力学, 2011, 28(2): 1-11.
[2] 秦权. 桥梁结构的健康监测[J]. 中国公路学报, 2000,

13(2): 37-42.
[3] Bagchi A, Humar J, Xu H P, et al. Model-based damage identification in a continuous bridge using vibration data [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2010, 24(2): 148-158.
[4] 常军. 在役桥梁结构损伤位置识别的综合指标方法研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(10): 87-90.
[5] 周奎, 宁娜娜, 林杰. 基于频率响应的悬臂工字型钢梁的结构损伤分析[J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(5): 497-501.
[6] Brownjohn J M W, Moyo P, Omenzetter P, et al. Lessons from monitoring the performance of highway bridges[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2005, 12(3/4): 227-244.
[7] 安永辉, 欧进萍. 大跨度钢桁桥模型的精细化损伤定位模拟和试验研究[J]. 计算力学学报, 2011, 28(5): 730-736.
[8] 钟儒勉, 宗周红, 郑沛娟, 等. 基于节点曲率和小波分析的梁式桥多尺度损伤识别[J]. 振动与冲击, 2015, 34(12): 108-114.
[9] Melhem H, Kim H. Damage detection in concrete by fourier and Wavelet analysis[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, 129(5): 571-577.
[10] 李胡生, 宋子收, 周奎, 等. 基于模态柔度差曲率的梁结构损伤识别[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2010, 9(1): 75-80.
[11] 孙增寿, 张耀, 王希东. 基于运营环境和提升小波变换的桥梁损伤检测研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(6): 718-724.
[12] 姚京川, 杨宜谦, 王澜. 基于 Hilbert-Huang 变换的桥梁损伤预警[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(4): 46-52.

(编辑: 丁红艺)