

# 基于小波分析的钢桁梁桥损伤识别的试验研究

陈刚, 郑七振

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:** 在现有模态理论的基础上, 采用小波分析技术, 探索适用于桥梁结构损伤识别的方法。利用 1: 10 的钢桁梁桥缩尺结构进行模型试验, 通过拆卸杆件在节点板上螺栓的方式来模拟试验损伤, 对结构的模态振型进行曲率模态计算, 在 Matlab 软件中选用 Bior3.9 小波函数编程, 提取曲率模态信号的小波变换系数, 根据小波变换奇异点法对比分析桥梁节点各阶损伤指标, 从而判定结构损伤。研究表明: 该方法能够较好的识别出损伤节点的位置, 这为类似工程的理论研究和实践运用提供了一定的参考。

**关键词:** 小波分析; 钢桁梁桥; 损伤识别; 曲率模态; 奇异性信号; 结构损伤

中图分类号: TU311

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)06-0193-04

## Study on damage identification of steel truss bridge based on wavelet analysis

CHEN Gang, ZHENG Qizhen

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

**Abstract:** Based on the existing modal theory, the paper explored the method of damage identification of bridge structure by using wavelet analysis technique. Therefore 1: 10 steel truss girder bridge scale structure was tested simulated damage test by removing the rods in the gusset plate bolted way, and made modal curvature calculation for the modal shape of structure. Using Bior3.9 wavelet function in Matlab software to program, the paper extracted the wavelet transform coefficient of curvature mode signal and determine the structure damage according to the order of damage index and wavelet singularity analysis method of bridge nodes. The results show that the method can better identify the location of damage nodes and provide a reference for the theory research and application of similar engineering.

**Key words:** wavelet analysis; steel truss bridge; damage identification; curvature mode; singularity signal; structural damage

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, 急需采取有效的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大量的损伤识别方法和监测技术研究, 得到了许多研究成果<sup>[1-8]</sup>, 例如: 基于频率变化的结构损伤识别方法主要是通过损伤前后频率的变化来进行结构损伤识别, 该方法原理清晰, 测试简便, 但由于频率是结构的整体性能描述, 在工程应用上频率变化对损伤程度尤其是大损伤不够敏感, 很难用于具体位置损伤的识别; 基于曲率模态变化的结构损伤识别方法, 是在基于振型变化的结构损伤识别方法基础之上改进而来, 与之相比, 其对损伤敏感性更高, 但是目前国

内进行模型试验研究和工程应用案例还较少, 且桥梁的结构形式较多, 还有诸多问题需深入研究。

结构一旦发生损伤, 将会影响结构的刚度降低和阻尼增大, 进而导致其自振频率减小和模态振型改变, 结构响应的模态参数也会发生局部突变<sup>[9-13]</sup>, 而小波分析又对奇异性信号的检测和识别非常敏感<sup>[14-16]</sup>。因此, 本文拟以 1: 10 的钢桁梁桥试验模型为研究对象, 探索基于曲率模态理论和小波分析技术相结合的损伤识别方法在钢桁梁桥结构损伤检测中的适用性。

## 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<sup>[8]</sup>,公式为:

$$\phi_{i,j}'' = \frac{\phi_{i-1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j}}{l_{i-1}l_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1; j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中:  $\phi_{i,j}''$  为第  $j$  阶  $i$  节点的曲率模态;  $\phi_{i-1,j}$ 、 $\phi_{i,j}$ 、 $\phi_{i+1,j}$  为  $i-1$ 、 $i$ 、 $i+1$  三个节点的第  $j$  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,因此只需考察前三阶模态。

采用小波分析技术,将各阶曲率模态振型  $\phi_{i,j}''$  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。具体计算公式如下所示:

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

式中:  $W_{i,j}^n$ 、 $W_{i,j}^d$  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,  $D$  值可以做为一项判断结构的损伤指标。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  $D$  值也差异较大。

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,计算公式如下所示:

$$DA_i = \sum_{j=1}^m D_{i,j} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

式中:  $DA_i$  为结构在处前  $m$  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:

(1) 根据试验实测得到的结构响应信号,创建结构模态模型并进行模态分析;

(2) 当试验测点数相对较少时,为了降低二次差分法的误差,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;

(3) 通过二次差分法近似算出结构的曲率模态  $\phi_{i,j}''$ ;

(4) 对曲率模态  $\phi_{i,j}''$  进行小波变换,选择适当的小波函数求出小波变换系数  $W_{i,j}$ ;

(5) 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;

(6) 在截断模态下综合考虑损伤指标  $D_{i,j}$  的变化情况,计算综合损伤指标  $DA$ ,并根据结构节点分布进行绘图,进而判定损伤。

具体流程步骤如图 1 所示。

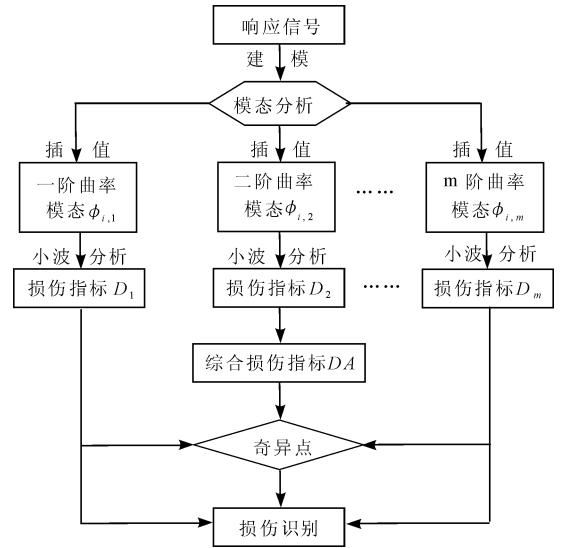


图 1 损伤识别流程图

## 2 模型试验方案

为了便于研究,参照实际钢桁梁桥结构,按照 1:10 比例做了一个钢桁梁桥试验模型。模型设计尺寸宽 1 m、长 6.4 m、高 1.1 m,上、下弦杆及斜腹杆均采用 H100 × 100 × 4.5 × 6 高频焊型钢,竖腹杆采用 H100 × 50 × 3.2 × 4.5 高频焊型钢,水平连杆采用 2 L 50 × 4 角钢,节点处采用 6 mm 厚节点板通过 M12 高强度螺栓连接,试验模型的钢材牌号选用 Q235B,弹性模量为  $2.06 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>,密度为  $7.67 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>。

本次试验主要针对桁架结构中易损的连接节点区域进行损伤识别研究,拟通过拆卸节点板上的连接螺栓来模拟损伤(图 2),共设计了 4 种节点损伤工况,如表 1 所示。在测点布置方案中综合考虑桥梁模型的结构特性和受荷形式,最终在模型节点的竖向布置了 7 个传感器。由于试验模型的两榀桁架完全对称,所以将测点集中布置在了一榀桁架上,如图 3 所示。

表 1 节点损伤工况

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

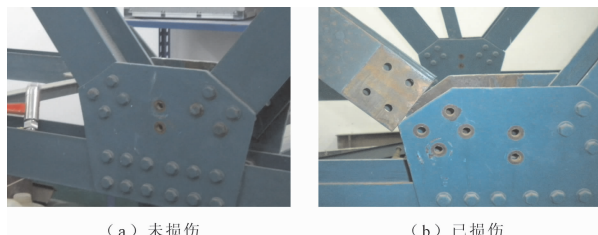


图 2 节点损伤设计

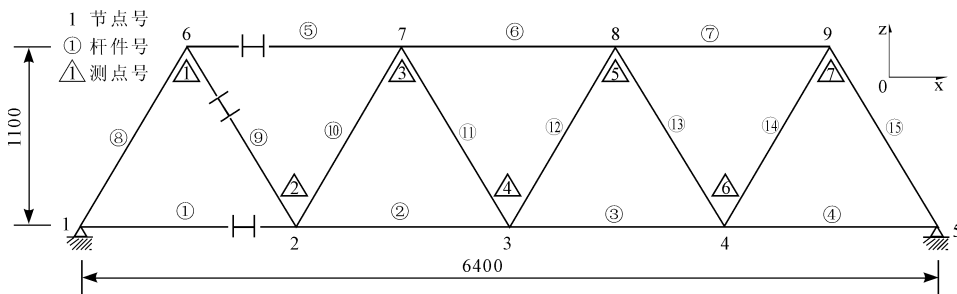


图 3 测点布置图(单位:mm)

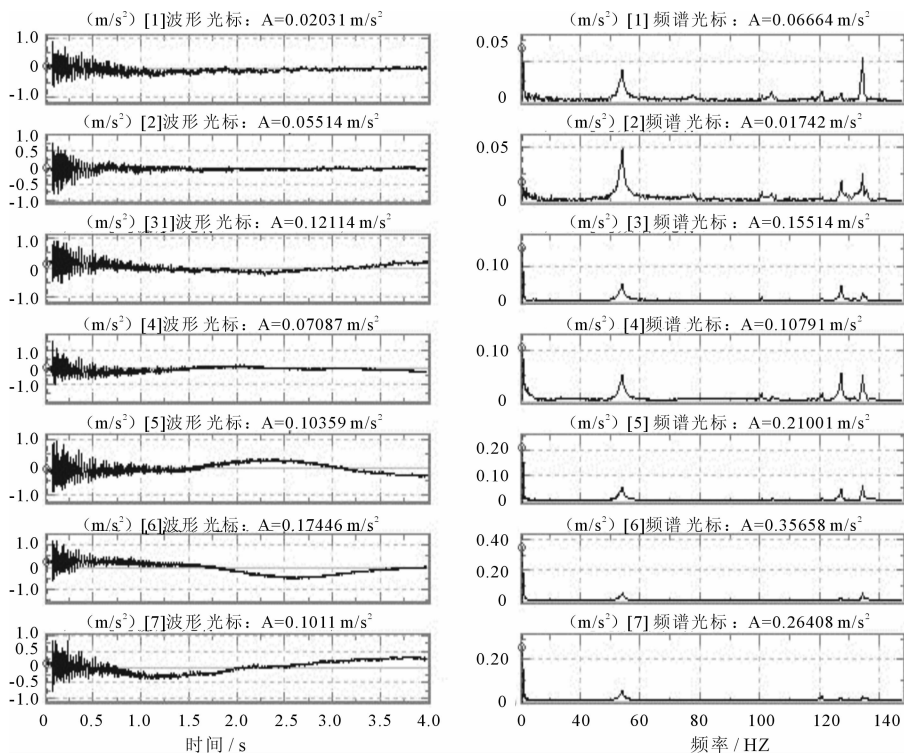
本次实验信号采集采用 INV306U 型数据采集仪,加速度传感器采用 26100 型,配套信号处理软件采用 DASP V10 工程版。采样频率设置为 200 Hz,荷载激励方式采用锤击激励,每个工况锤击 3 次。

### 3 试验结果及分析

在桥梁模型节点完好情况下,试验得到工况 1 的前 3 阶响应信号和自谱分析,如图 4 所示。

表 2 工况 1 前 3 阶模态频率、阻尼、质量、刚度、阻尼系数

阶数	频率/Hz	阻尼/%	模态质量/(N · s <sup>2</sup> · m <sup>-1</sup> )	模态刚度/(N · m <sup>-1</sup> )	模态阻尼系数 K/(N · m <sup>-1</sup> )
1	33.961	1.408	6.1357 × 10 <sup>4</sup>	2.7937 × 10 <sup>9</sup>	3.6856 × 10 <sup>5</sup>
2	84.042	0.343	6.4763 × 10 <sup>6</sup>	1.8058 × 10 <sup>12</sup>	2.3455 × 10 <sup>7</sup>
3	114.517	0.298	1.2649 × 10 <sup>6</sup>	6.5487 × 10 <sup>11</sup>	5.4281 × 10 <sup>6</sup>



DASP  
 自谱—FFT分析  
 ——数据参数——  
 试验名: 桁架桥  
 试验号: 6  
 [桁架桥]  
 [完好]  
 测点数目: 7  
 ——分析参数——  
 形式: 幅值谱Peak  
 SF: 256Hz  
 AF: 128Hz  
 Dt: 3.90625ms  
 Df: 0.25Hz  
 分析点数: 1024  
 谱线条数: 512  
 加窗: 矩形窗  
 分块分析  
 总页数: 3  
 每页: 1024点  
 谱线条数: 512  
 加窗: 矩形窗  
 分块分析  
 总页数: 3  
 每页: 1024点  
 当前: Pg1, Pt1

图 4 测点响应信号和自谱分析

结构模态参数如表2、表3所示。对位移模态进行三次样条插值,用公式(1)求出前3阶的曲率模态。

表3 工况1前3阶模态振型 mm

节点号	1阶	2阶	3阶
1	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.8913	-0.9384	-0.4581
3	1.0000	1.0000	1.0000
4	0.9131	1.7504	0.9172
5	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.7237	-1.6391	-1.0070
7	0.9226	0.0843	0.4490
8	1.0034	1.5417	1.1526
9	0.8693	1.6177	-0.3924

依次计算工况2~4的曲率模态;然后在 Matlab 软件中使用 bior3.9 小波函数编程,对4种工况下曲率模态信号进行4层分解,提取系数中的高频部分;再以损伤前工况一数据为对比,按照公式(2)和公式(3)求出各测点的损伤指标值,并绘制损伤指标沿测点分布图,如图5~7所示。图中,折线 D1~D3

依次为各工况下前3阶损伤识别图,折线 DA 为综合损伤识别图。

根据小波变换的奇异点法,对比分析图5~7,可以得出如下结论:

(1)在图5~7中,测点2的各阶损伤指标值均明显大于其它测点位置,因此可以判定2号节点处发生了损伤,这也说明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;

(2)图5和7中测点3和测点5的一阶损伤指标  $D$  值比较大,分析认为这与模型试验中的测量噪声有关;

(3)图中测点3的二阶损伤指标值以及测点3、测点6的三阶损伤指标值偏大,经过查看振型图后确认是节点的局部模态,而不是结构的整体模态;

(4)根据试验结果可以判断节点处是否有损伤以确定损伤位置,但对损伤程度不能精确定量;

(5)在同一位置处的不同阶模态对损伤的敏感程度也不相同,在实际的损伤识别中应当根据结构形式调整测点布置,通过多阶损伤指标综合对比分析,以防止判定时发生漏判和错判情况。

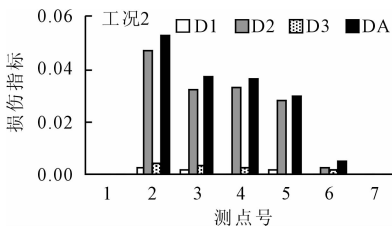


图5 工况2损伤识别图

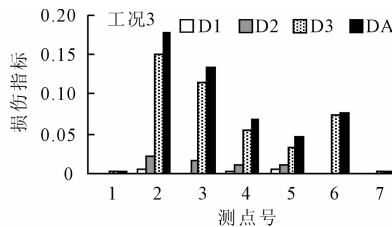


图6 工况3损伤识别图

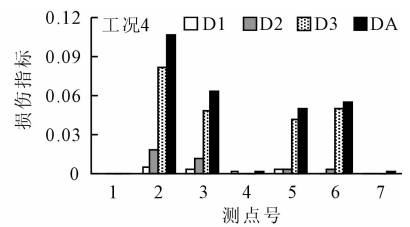


图7 工况4损伤识别图

## 4 结 语

本文以曲率模态基本理论为基础,选用准确度较高的 bior3.9 小波,用 Matlab 软件分别对结构损伤前、后的曲率模态进行小波变换,计算得到损伤指标  $D$  值和综合损伤指标  $DA$  值,找寻突变点,通过模型试验验证了该方法可以对钢桁梁桥这类结构进行损伤识别,并总结了损伤识别步骤,这为类似工程的理论研究和实践运用提供了一定的参考。

同时,本文的研究尚存在一些不足,有待于进一步研究探讨:当结构形式复杂、杆件和节点数量较多时,在测点的合理选择和传感器的优化布置上,尚需专门研究;本文的试验研究是在环境噪声较小的实验室进行,但在实际工程中,当结构损伤程度较小时,结构动力响应信号往往会被环境噪声信号所淹

没,因此,如何消除噪声、提取损伤信号也是一个重要研究方向。

## 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] Hani M., Hansang K.. Damage detection in concrete by fourier and wavelet analysis[J]. Journal of Engineering Mechanics,2003,129(5):571-577.
- [4] Bagchi A, Humar J, Xu H et al. Model-based damage identification in a continuous bridge using vibration data[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 2010,24(2):148-158.

浆,能形成与数值模拟试验基本相符的结果。

(3)采用压密注浆桩处理的实际工程,通过各种检测手段都表明其处理效果良好,完全满足工程要求。

#### 参考文献:

- [1] 王祖平. 可控压密灌浆加固地基材料的研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.
- [2] 贺茉莉,彭环云. 地质雷达在可控压密注浆桩地基加固效果检测中的应用[J]. 水利建设与管理, 2014(11): 52 - 55.
- [3] 陈雁,李志文. 压密注浆桩处理地基技术的应用[J]. 工程建设, 2014, 46(3): 26 - 28 + 34.
- [4] 张忠苗,邹健,何景愈,等. 考虑压滤效应下饱和黏土压

密注浆柱扩张理论[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(11): 1980 - 1984.

- [5] Nichols S C, Goodings D J. Physical model testing of compaction grouting in cohesionless soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 126(9): 848 - 852.
- [6] 彭振斌,胡焕校,许宏武. 注浆工程设计计算与施工[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1997.
- [7] 龚晓南. 高等土力学[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1996.
- [8] 贾红光. 基于 ANSYS 的厚壁圆筒的弹塑性应力分析[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2010, 28(3): 8 - 12.
- [9] 李妍. 基于 ANSYS 软件的接触问题分析及在工程中的运用[D]. 长春:吉林大学, 2004.

(上接第 196 页)

- [5] 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.
- [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] Hera A., Hou Z.. Application of wavelet approach for ASCE structural health monitoring benchmark studies [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(1): 96 - 104.
- [8] 李国强,李杰. 工程结构动力检测理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [9] 周奎,刘义,缪润翰,等. 基于抗弯刚度和柔度曲率的小比例 U 形梁模型损伤识别[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 189 - 192.
- [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): 75 - 80.

- [11] 付想平,彭斌,黄煜辉,等. 基于环境激励的砖砌体弹性模量识别[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4): 134 - 137.
- [12] 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.
- [13] 谈政,张华,傅玉珍. 基于正则化频率变化率的排架渡槽支撑体系损伤定位研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 28 - 32.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 姚京川,杨宜谦,王澜. 基于 Hilbert - Huang 变换的桥梁损伤预警[J], 2010, 31(4): 46 - 52.