



基于曲率模态和小波变换的 码头排架损伤识别方法*

张 迅¹, 李决龙^{1,2}, 邢建春¹, 王 平¹, 杨启亮¹

(1. 解放军理工大学 国防工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 海军海防工程研究中心, 北京 100841)

摘要: 为准确识别高桩码头的结构损伤, 采用曲率模态、曲率模态差和小波变换法进行结构损伤识别, 通过对码头排架不同损伤工况下的实例分析, 验证了这3种方法在码头结构损伤识别中的可行性和适用性。研究表明, 当结构无损模态未知时, 采用曲率模态小波变换法能够较好地定位结构损伤; 当结构无损模态已知时, 运用曲率模态差法能准确定位结构损伤。进一步分析表明, 曲率模态小波变换系数峰值和曲率模态差突变量还能用于初步判定码头结构多点损伤的损伤程度。

关键词: 高桩码头; 曲率模态; 小波变换; 曲率模态差; 损伤识别

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)06-0055-06

Damage identification of high-piled wharf's bent structure based on curvature modal and wavelet transform

ZHANG Xun¹, LI Jue-long^{1,2}, XING Jian-chun¹, WANG Ping¹, YANG Qi-liang¹

(1. College of Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2. Research Center of Coastal Defense Engineering, Beijing 100841, China)

Abstract: The curvature modal, curvature modal difference and wavelet transform are employed to correctly identify the damage of the high-piled wharf structure. The feasibility and applicability of these methods are verified through simulation experiments of a high-piled bent under different operating conditions. The comparison results show that the wavelet transform of curvature modal can localize the structural damage when the non-destructive modal is unknown. Besides, the curvature modal difference can exactly localize the structural damage when the non-destructive modal is known. The further analysis shows that the peaks of wavelet transform coefficients and the sudden changing values of the curvature modal difference can be utilized to determine the damage extent for multi-damage of high-piled wharf structure.

Keywords: high-piled wharf; curvature modal; wavelet transform; curvature modal difference; damage identification

高桩码头由于具有结构简单、自重轻、材料用量少、波浪反射小、船舶泊稳条件好以及适用于软土地基等优点, 已经成为目前我国在役港口码头广泛应用的 forms 形式^[1]。多数高桩码头结构主要是由钢筋混凝土面板、梁、桩基等构件组

成^[2], 一般要在其服役期内承担相应的使用功能, 然而由于自身设计缺陷、海洋环境、运营荷载、材料老化、岸坡变形以及突发性事故等多方面因素的影响, 在高桩码头运营过程中容易发生损伤, 导致结构承载能力下降, 影响其正常使用, 极端

收稿日期: 2016-01-07

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (61321491); 江苏省自然科学基金项目 (BK20151451)

作者简介: 张迅 (1987—), 男, 博士研究生, 研究方向为码头结构健康监测。

情况下甚至引发灾难性的突发事件。为保障高桩码头结构的安全性、耐久性和完整性,建立全方位的结构健康监测系统进行监测和评估其健康状况非常有必要^[3]。高桩码头结构健康监测系统是用现场监测方式获取结构内部信息并处理数据,由此来判断和评估结构因损伤或退化导致的主要性能指标的改变^[4],因而研究结构损伤识别方法是高桩码头结构健康监测系统的主要内容之一。由于结构损伤会引起结构振动特性的改变,通过监测结构振动、分析并处理结构振动特性的变化,就能达到识别结构损伤的目的^[4]。近二十年来,基于振动监测的结构损伤识别方法已被证明具有广泛的应用前景,并逐渐发展成为结构健康监测领域的研究热点。以振动监测为基础的识别方法多数是根据结构模态参数(如固有频率、位移模态振型等)的改变来识别损伤,但这些参数反映的是结构整体的动力性能,对结构的局部损伤并不特别敏感。而由位移模态得到的曲率模态对局部结构具有较高的敏感性,可以很好地反映结构局部特性的变化,因而能够更准确地识别结构损伤^[5-6]。根据采用模态信息的不同,可将基于曲率模态的损伤识别方法分为只采用损伤后模态的曲率模态法和同时利用损伤前后模态的曲率模态差法^[7],这两种方法在一些结构的损伤识别中得到了较好的应用,如基于曲率模态的拱桥损伤识别^[8]、基于曲率模态差的梁结构损伤诊断^[9]等。还有学者结合了曲率模态对局部结构的高敏感性和小波变换在时频域内局部化分析的能力,运用曲率模态小波变换法对结构损伤进行识别,如基于曲率模态小波变换系数差的桥梁损伤检测^[10]、基于曲率模态差和小波变换的网架损伤识别^[11]、基于小波变换的码头结构损伤预警^[12]等。鉴于此,本文采用曲率模态、曲率模态差和小波变换法对高桩码头排架结构进行损伤识别,探讨了利用曲率模态小波变换法识别码头结构损伤的可行性,比较了曲率模态差和曲率模态法对定位码头结构损伤的敏感性,并进一步讨论了小波变换系数峰值和曲率模态差突变量与结构损伤程度之间的关系。

1 理论基础

1.1 曲率模态理论

直梁结构某截面处弯曲静力关系表达式为:

$$q(x) = \frac{1}{\rho(x)} = \frac{M(x)}{EI(x)} \quad (1)$$

式中: $q(x)$ 为直梁 x 截面处的曲率函数; $\rho(x)$ 为直梁 x 截面处的曲率半径; $M(x)$ 为直梁 x 截面处所受弯矩; $EI(x)$ 为直梁 x 截面处抗弯刚度。

根据振动力学中直梁弯曲振动方程求解可得直梁 x 截面处的结构弯曲振动曲率函数 $q(x)$ 的表达式为:

$$q(x) = \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = \sum_{i=1}^N \phi_i''(x) Q_i e^{j\omega t} \quad (2)$$

式中: $u(x, t)$ 为直梁 x 截面处 t 时刻的振动位移; $\phi_i(x)$ 为第 i 阶位移模态振型; $\phi_i''(x)$ 为第 i 阶曲率模态振型; Q_i 为第 i 阶正则坐标的广义力; ω 为第 i 阶固有频率。

由式(1)可知,当直梁某截面发生损伤时,结构局部刚度 $EI(x)$ 会因损伤而降低,从而导致损伤处的曲率 $q(x)$ 增大;再由式(2)可知,曲率函数 $q(x)$ 与曲率模态振型 $\phi_i''(x)$ 的幅值成正比,这样曲率模态振型幅值会随着曲率的增大而增大。因此,可以通过分析直梁某阶曲率模态振型的突变来判定结构是否损伤以及损伤发生的位置。

根据结构有限元模型的振动模态分析理论,如果已知结构有限元离散单元节点位置处的位移模态振型,则可通过中央差分方程近似求出结构的离散曲率模态振型,具体表达式如下:

$$\phi_{ik}'' = \frac{\phi_{i,k-1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,k+1}}{dx^2} \approx \frac{\phi_{i,k-1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,k+1}}{l_{k-1,k} l_{k,k+1}} \quad (3)$$

式中: ϕ_{ik}'' 为第 i 阶模态第 k 个节点的曲率模态; $l_{k-1,k}$ 为节点 $(k-1)$ 与节点 k 之间的距离。

在实际工程中,结构曲率模态振型无法直接获取,可以在结构上布置一定数量的加速度传感器,先通过传感器测得结构位移模态,再利用式(3)近似计算出结构的曲率模态。

1.2 曲率模态差理论

当结构损伤前的模态已知时,可通过结构损

伤前后的曲率模态之差来确定损伤位置, 曲率模态差的计算式为:

$$\Delta\phi_{im}'' = \phi_{im}^{m''} - \phi_{im}^{nd''} \quad (4)$$

式中: $\Delta\phi_{im}''$ 为结构第 i 阶模态第 m 节点处的曲率模态差; $\phi_{im}^{m''}$ 、 $\phi_{im}^{nd''}$ 分别为结构损伤前、后第 i 阶 m 节点处的曲率模态。

1.3 小波变换理论

结构损伤表现为曲率模态的突变, 因而可通过对突变点的检测来确定损伤发生的位置。小波分析同时兼备时域和频域的分析能力, 且具有空间局部化性质, 因此, 可以利用小波变换来分析曲率模态的突变性从而确定损伤发生的位置。

设平方可积函数 $\psi(t) \in L^2(R)$ 满足有界的容许性条件, 则称 $\psi(t)$ 为一个小波基函数或小波母函数。将母小波函数伸缩和平移后, 可得到如下的小波序列:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (5)$$

式中: a 为伸缩因子; b 为平移因子。

对于能量有限函数 $f(t) \in L^2(R)$, 其基于母小波函数 ψ 的小波变换定义为:

$$W_{df}(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (6)$$

式中: 上标 * 表示求共轭运算。

类似地, 函数 $f(t)$ 基于尺度小波函数 φ 的小波变换式可定义为:

$$W_{af}(a,b) = \langle f, \varphi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \varphi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (7)$$

2 排架模型与损伤工况

以某高桩码头物理模型排架结构为例, 在实验室条件下, 采用曲率模态和小波变换法识别其结构损伤可通过以下步骤实现: 先在排架桩基上按等间距的方式布置一定数量的加速度传感器, 并将传感器连接数据采集分析系统; 通过锤击对物理模型进行激励, 分别测得结构完好状态和损伤状态下的加速度时程响应; 采用模态参数识别

程序, 识别模型的位移模态振型, 再由此计算出曲率模态振型并对其进行小波分析, 从而完成对结构的损伤识别。本文探讨采用曲率模态和小波变换法对码头排架进行损伤识别的可行性, 因而只是进行了仿真研究, 主要通过 Ansys 软件对排架进行建模并提取了其相应的位移模态振型。该排架横梁宽 2 m, 截面尺寸为 0.1 m×0.2 m, 直桩长 3 m, 叉桩长 3.3 m, 桩基的截面尺寸为 0.08 m×0.08 m。排架结构横梁和桩基均选用梁单元 beam4 进行离散, 每个节点有 6 个方向自由度, 横梁和桩基的材料属性为: 无损弹性模量 $E=2.5 \text{ GN/m}^2$, 泊松比 $\mu=0.17$, 材料密度 $\rho=2 \text{ 500 kg/m}^3$ 。不考虑桩土接触, 采用假想嵌固点的方法对桩底进行完全约束。将整个排架结构划分为 352 个单元, 网格划分均匀, 每个单元的长度均为 0.05 m, 其中横梁划分 40 个单元, 3 个直桩各划分 60 个单元, 2 个叉桩各划分 66 个单元。图 1 给出了划分网格后的排架结构有限元模型、单元编号以及桩基的编号。本文通过计算排架结构的第一阶曲率模态, 对结构进行损伤识别。要计算曲率模态先要对排架进行模态分析, 提取结构的位移模态振型, 然后将位移模态振型代入式(3)中近似计算结构的曲率模态。采用子空间法分析有限元模型得到的第一阶位移模态振型见图 2。

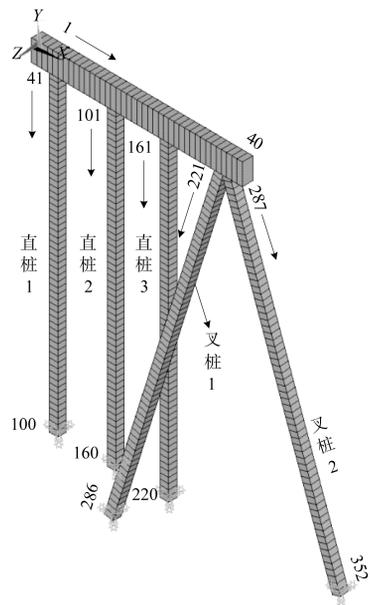


图 1 排架模型及单元编号

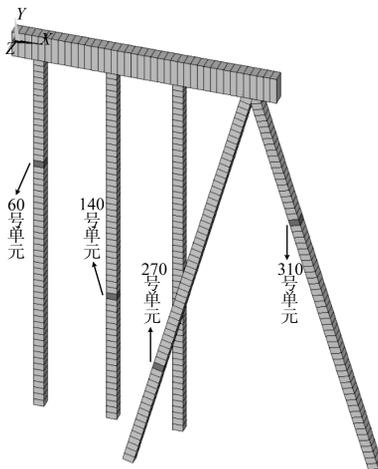


图2 排架第一阶位移振型

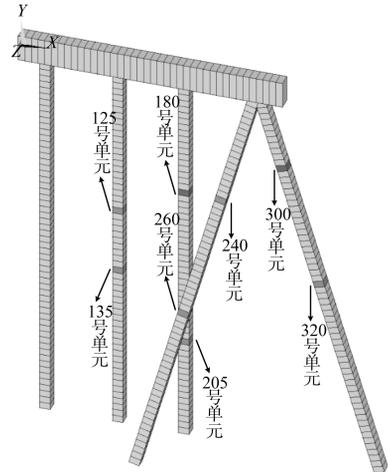
通过单用刚度折减法来模拟结构的损伤，主要设置了单点损伤和多点损伤两种工况，其中单点损伤在1号直桩、2号直桩、1号叉桩和2号叉桩上模拟，多点损伤在2号直桩、3号直桩、1号叉桩和2号叉桩上模拟。两种工况下的损伤单元号及其损伤程度见表1，损伤单元在排架结构上的分布位置见图3。

表1 排架结构损伤工况

桩	单点损伤		多点损伤			
	单元号	程度/1%	单元号	程度/1%	单元号	程度/1%
直桩1	60	20				
直桩2	140	20	125	15	135	25
直桩3			180	20	205	30
叉桩1	270	20	240	15	260	25
叉桩2	310	20	300	20	320	30



a) 工况1



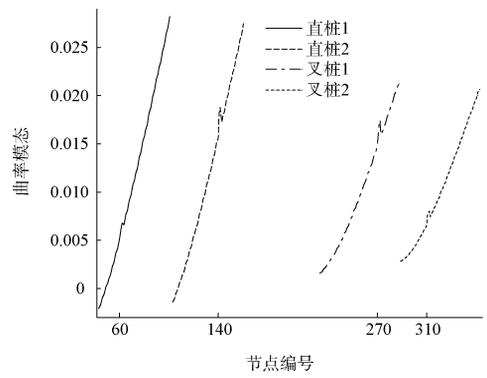
b) 工况2

图3 各工况损伤单元分布

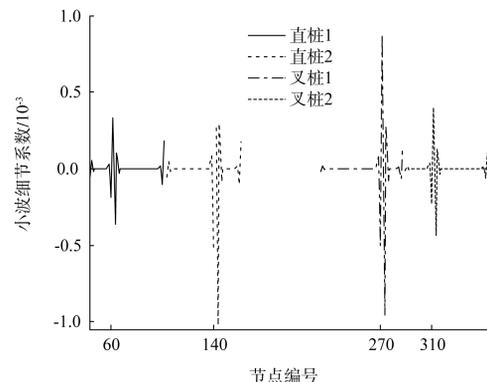
3 损伤识别结果与分析

3.1 基于曲率模态及小波变换的损伤识别

在实际测试中，对已建成的高桩码头结构要知道其无损伤时的状态比较困难，因而可只采用损伤后的曲率进行损伤识别。图4、5分别给出了工况1、2采用曲率模态及其小波变换的损伤定位结果。



a) 曲率模态曲线



b) 曲率模态小波变换系数

图4 工况1 损伤识别对比结果

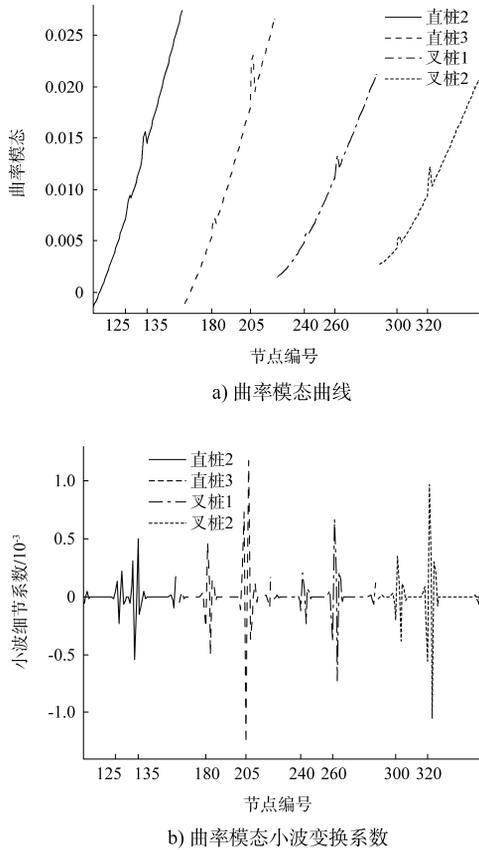


图 5 工况 2 损伤识别对比结果

从图 4a)可以看出,曲率模态曲线在 2 号直桩 140 号单元和 1 号叉桩 270 号单元处有较为明显的突变,可以确定为损伤发生位置;1 号直桩 60 号单元和 2 号叉桩 310 号单元处也有突变,但突变程度并不是很明显,可见仅由该方法不能准确定位损伤。从图 5a)可以看出,对于桩基的多点损伤,曲率模态在损伤程度较大的单元处突变量较大,但在损伤程度较小的单元处突变量并不明显,可见采用此方法无法对多点损伤进行准确定位。从图 4b)、5b)可以看出,曲率模态小波变换系数明显地指示了两种工况下的损伤位置,可见曲率模态小波变换法比只采用曲率模态的损伤识别法更为敏感。但是在边界处小波系数也有较大的突变,这将不可避免地给损伤定位结果造成一定影响,若结构边界处有损伤存在,该方法有可能会产生误判。

由图 4b)中单点损伤可以看出,相同损伤程度的单元,曲率模态小波系数的峰值大小不同,说明小波系数的峰值与单点损伤的损伤程度之间

没有必然联系;由图 5b)中多点损伤可以看出,相同桩基不同损伤程度的单元,损伤程度越大,曲率模态小波系数的峰值也越大。但不同桩基相同损伤程度的单元,曲率模态小波系数的峰值并不相等,说明损伤程度与小波系数峰值并不存在严格的比例关系,只能用于初步指示多点损伤的损伤程度。

3.2 基于曲率模态差的损伤识别

若能够获取码头结构损伤前、后的模态,则可采用损伤前后的曲率模态差来识别结构损伤。图 6 分别给出了工况 1、2 的曲率模态差曲线。从图中可以看出,对于两种不同的损伤工况,曲率模态差曲线在损伤单元处均有明显的突变,因而能够很好地定位损伤。

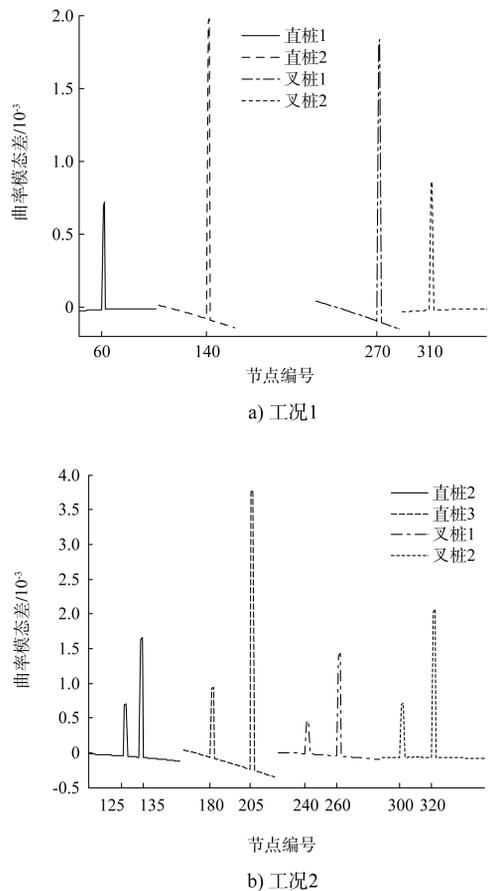


图 6 各工况曲率模态差曲线

对比图 6 中曲率模态差突变量与损伤程度之间的关系,可以得到与基于曲率模态小波变换损伤识别相似的结论,即对于桩基多点不同程度损伤,损伤程度越大,曲率模态差突变量越大,但

损伤程度与曲率模态差突变量也不存在严格的比例关系，同样只能用于初步判断损伤程度。

另外，再比较曲率模态曲线和曲率模态差曲线，可以发现曲率模态差在结构损伤位置处有非常明显的突变，比曲率模态对损伤更加敏感，其主要原因是利用了结构的无损模态信息，因此根据曲率模态差就能准确判断损伤位置，而无需再对其进行小波变换。

4 结论

本文以曲率模态为基础，比较分析了码头结构损伤识别方法，通过对一个高桩码头物理模型排架实例的仿真分析，主要得到以下结论：

1) 若只能获取结构损伤后曲率模态，采用曲率模态小波变换法能够较为准确地定位结构损伤，但对结构边界处损伤的反映略显不足，可能会产生误判。

2) 若能够同时获取结构损伤前后的曲率模态，采用曲率模态差法能够很好地定位结构损伤，且比曲率模态法对结构损伤更为敏感。

3) 对于多点不同程度损伤，曲率模态小波系数峰值和曲率模态差突变量会随着结构损伤程度的增加而变大，因而可用于初步判断结构损伤程度的大小。

然而本文也存在一些不足，比如只通过数值仿真验证了基于曲率模态和小波变换损伤识别方法的有效性，该方法能否在实际工程中应用还有待下一步研究。

参考文献：

- [1] 孙熙平, 王元战, 赵炳皓. 环境激励下高桩码头模态参数识别及损伤诊断[J]. 海洋工程, 2013, 31(5): 62-68.
- [2] 王禹迟, 王元战, 龙俞辰, 等. 梁板式高桩码头结构整体可靠度计算方法[J]. 海洋工程, 2015, 33(1): 58-65.
- [3] 张迅, 王平, 邢建春, 等. 高桩码头结构健康监测传感器优化布置[J]. 水运工程, 2013(12): 80-84.
- [4] 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.
- [5] 孙增寿, 韩建刚, 任伟新. 基于曲率模态和小波变换的结构损伤位置识别[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(4): 44-49.
- [6] 杨志明, 朱瑞虎, 陈橙. 高桩码头结构损伤动力特性研究[C]//第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下册). 北京: 海洋出版社, 2013: 1 021-1 025.
- [7] 张晋, 彭华, 游春华. 基于叠加曲率模态改变率的梁结构损伤诊断[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 272-276.
- [8] 黄成, 罗韧, 韩晓健. 曲率模态方法对系杆拱桥的损伤识别[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2015, 37(1): 88-93.
- [9] 彭华, 游春华, 孟勇. 模态曲率差法对梁结构的损伤诊断[J]. 工程力学, 2006, 23(7): 49-53.
- [10] 丁科. 曲率模态小波分析在桥梁损伤检测中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(5): 131-135.
- [11] 范梦, 张丽梅. 基于曲率模态差和小波变换的网架损伤识别[J]. 河北科技大学学报, 2014, 35(4): 384-391.
- [12] 李治学, 白先梅. 基于小波变换的码头结构损伤预警试验研究[J]. 水运工程, 2010(8): 52-56.

(本文编辑 武亚庆)

编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动，他们建立伪网站，利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明，从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址：www.sygc.com.cn，敬请广大读者和作者周知并相互转告。