

# 基于损伤柔度曲率的塔式起重机塔身结构损伤识别研究

周奎, 刘怡然, 徐晨光

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:** 塔式起重机自身结构特征及其高空作业的属性导致其属于高危特种设备, 极易发生重大伤亡事故, 当塔机发生微小损伤时及时发现并检修是规避事故风险的基础和前提。以上海某大学新建项目工地上的 QTZ100 型塔式起重机为工程背景, 将损伤柔度曲率作为损伤指标, 通过构建有限元计算模型, 分析多种微小损伤情况下结构应力与模态参数变化规律, 与振型变化率作为损伤指标的分析结果作对比。研究表明, 损伤柔度曲率曲线在损伤处产生了明显突变, 可以识别出微小损伤发生的位置及损伤程度, 且抗噪性能较好。

**关键词:** 塔式起重机; 损伤检测; 柔度曲率; 数值模拟

中图分类号: TU 61 文献标志码: A

## Damage identification of tower crane structure based on flexibility curvature

ZHOU Kui, LIU Yiran, XU Chenguang

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

**Abstract:** Tower cranes belong to the high-risk special equipment due to their own structural characteristics and the attributes of high-altitude operation, and they are prone to heavy casualties. When tower cranes have minor damage, timely detection and maintenance are the basis and premise to avoid the risk of accidents. Based on the engineering background of QTZ100 tower crane on a new project site of a university in Shanghai, the damage compliance curvature was taken as the damage index. The finite element calculation model was built to analyze the variation of structural stress and modal parameters under various minor damage conditions, and compared with the analysis results using the change rate of vibration mode as the damage index. Results show that the damage compliance curvature curve produces obvious mutation at the damage point, through which the location and degree of minor damage can be identified with good anti-noise performance.

**Keywords:** tower crane; damage detection; flexibility curvature; numerical simulation

据住建部网站 2010~2019 年发布的事故通报数据统计报告可知, 我国共发生塔吊起重机伤害事故 541 起, 其中, 较大级以上事故 64 起, 占有较大事故数的 27.72%, 共造成 219 人死亡<sup>[1]</sup>。目前, 施工现场普遍使用安全监测系统来保障塔式起重机运行期间的安全, 通过监测和储存起吊重量、起重扭矩、旋转角度等相关数据, 当塔机超负荷或者起升过快等情况出现时发出警报, 但是, 该系统并不能监测塔机塔身结构的损伤。

基于振动的损伤检测技术起源于 20 世纪 70 年代对于海洋石油工业的应用研究<sup>[2]</sup>, 近年来国内外学者对此开展了大量研究。AL-Said<sup>[3]</sup>通过分析移动荷载下结构的频率特性, 可对起重机构件的裂纹进行定位和深度探测。杜彦良等<sup>[4]</sup>建立了门桥式起重机振动力学模型, 进行模态曲率差分析与损伤因子矩阵  $\mathbf{K}$  分析, 证明损伤因子矩阵  $\mathbf{K}$  能很好地反映损伤的大小。付芹等<sup>[5]</sup>将概率神经网络引入到塔式起重机的故障预报和诊断中。黄东亮<sup>[6]</sup>研究了无损检测技术在起重机设备结构疲劳损伤检测中的运用。Fang<sup>[7]</sup>等提出为塔机引入各种实时辅助系统, 为操作员提供负载、障碍物等关键信息, 从而提高安全性。

目前的各种损伤识别方法都是基于结构损伤达到较大程度时, 会具有较好的灵敏度。因此, 探索塔机结构产生微小损伤时能检测到损伤信息, 同时具有较高灵敏度的信号处理方法, 是目前结构损伤检测研究领域所面临的关键问题。

## 1 损伤识别方法

### 1.1 振型变化率

结构的模态振型可以显示结构的物理参数发生变化时的不同状态, 而且对结构损伤时的状态比较敏感。损伤前、后的振型变化值

$$\Delta\phi_i = \phi_i^* - \phi_i \quad (1)$$

式中:  $\phi_i^*$  是结构发生损伤之后的第  $i$  阶振型;  $\phi_i$  是结构无损状态下的第  $i$  阶振型。

振型变化率

$$\Delta\phi_i^* = \frac{\Delta\phi_i}{\phi_i} \times 100\% \quad (2)$$

### 1.2 损伤柔度曲率

目前, 国内外基于模态柔度主要的损伤识别方法需要结构损伤前、后的柔度矩阵, 但实际工

程检测中, 结构损伤前的柔度矩阵不容易得到。基于此, 本文利用一种仅基于结构损伤柔度曲率矩阵<sup>[8-9]</sup>的新方法, 由柔度曲率矩阵构建出相对损伤柔度曲率  $\varepsilon_{\text{AFCR}}$ , 具体计算步骤如下:

a. 对获取的结构柔度矩阵  $\mathbf{F}$  进行前后不等距的二阶中心差分, 得到损伤柔度曲率矩阵  $\mathbf{C}$ , 其元素  $C_{ij}$  为

$$C_{ij} = \frac{\{2l_{(i+1)j}[F_{(i+1)j} - F_{ij}] - 2l_{(i-1)j}[F_{ij} - F_{(i-1)j}]\}}{[l_{(i+1)j}l_{(i-1)j}l_{(i+1)(i-1)}]} \quad (3)$$

式中,  $l_{(i-1)j}$ ,  $l_{(i+1)j}$ ,  $l_{(i+1)(i-1)}$  分别是  $i-1$  和  $i$ ,  $i+1$  和  $i$ ,  $i+1$  和  $i-1$  之间的距离。

b. 将损伤柔度曲率矩阵  $\mathbf{C}$  减去其转置矩阵  $\mathbf{C}^T$  的绝对值, 得到了新的矩阵, 记为相对损伤柔度曲率矩阵  $\omega_{\text{FCR}}$ 。

$$\omega_{\text{FCR}} = |\mathbf{C} - \mathbf{C}^T| \quad (4)$$

c.  $\omega_{\text{FCR}}$  按行均值计算得到相对损伤柔度曲率  $\varepsilon_{\text{AFCR}}$ 。

$$\varepsilon_{\text{AFCR}}(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \omega_{\text{FCR}_j}(i) \quad (5)$$

式中,  $N$  为结构自由度。

### 1.3 噪声模拟

在施工现场对塔机进行动力信号采集, 必然会伴随大量的噪音污染。因此, 需在有限元模拟研究中考虑噪声对动力模态拾取结果产生的影响。将有限元模拟得到的模态参数(振型  $f_i$  和固有频率  $\omega_i$ )转化成包含随机噪声的模态参数<sup>[10-12]</sup>。

$$\omega'_i = \omega_i [1 + \eta \text{rand}(-1, 1)] \quad (6)$$

$$\phi'_i = \phi_i [1 + \beta \text{rand}(-1, 1)] + \gamma \text{rms}(f_i) \text{rand}(-1, 1) \quad (7)$$

式中:  $\eta$  为频率噪声水平;  $\beta, \gamma$  为振型噪声水平;  $\omega_i$  和  $\omega'_i$  分别为添加随机噪声前、后的第  $i$  阶频率值;  $\phi_i$  和  $\phi'_i$  分别为添加随机噪声前、后的第  $i$  阶振型值;  $\text{rand}(-1, 1)$  为  $-1$  和  $1$  之间均匀分布的随机数;  $\text{rms}(\phi_i)$  为  $\phi_i$  的均方根。

## 2 数值模拟

### 2.1 有限元模型建立

在不影响研究结果的前提下, 根据文献<sup>[13-16]</sup>中的基本原则, 对塔式起重机有限元模型进行了一些必要的简化。对无损状态下的起重机进行静

力分析,在完整状态下起重机的最大应力值约为85 MPa,小于Q345B的许用应力值170 MPa,满足规范设计要求。此外,在模拟中起重机的最大位移都发生在起重臂的臂尖,与实际情况相符,因此,此模型可用于塔身结构的损伤检测研究。

2.2 损伤工况设计

塔式起重机塔身为钢结构,塔身标准节杆件损伤多是由于腐蚀或者锈蚀导致,此类损伤对结构质量影响较小<sup>[17]</sup>。在模拟损伤时,假定损伤仅使损伤位置刚度下降。因此,本文通过相应杆件弹性模量 $E$ 的折减来模拟损伤<sup>[18-19]</sup>,研究损伤识别效果。塔机除杆件易产生损伤外,标准节间的连接螺栓产生松动或者脱落的情况也十分常见。因此,研究了3种不同损伤工况,如表1所示。将塔身主弦杆离散为32个单元,33个节点,各节点位置情况如图1所示。

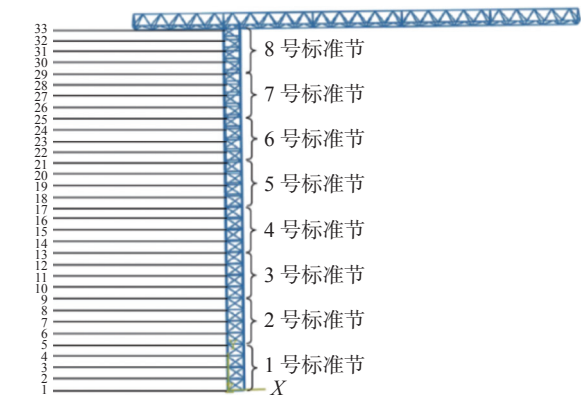


图1 各节点位置示意图  
Fig.1 Schematic diagram of each node position

表1 损伤工况  
Tab.1 Different damage conditions

| 损伤工况         | 损伤位置           | 损伤节点             | 损伤程度         |
|--------------|----------------|------------------|--------------|
| 工况1:<br>单处损伤 | 3号标准节主弦杆       | 9~13             | 5%, 10%, 20% |
| 工况2:<br>多处损伤 | 1, 3, 8号标准节主弦杆 | 1~5, 9~13, 29~33 | 5%, 20%      |
| 工况3:<br>螺栓损伤 | 3号与4号标准节之间     | 13               | -            |

2.3 模拟研究

如表1所示,通过将有限元模型中相应杆件的弹性模量 $E$ 依次降低5%, 10%, 20%来模拟对应的刚度减少。以工况1中3号标准节主弦杆受损20%的塔身结构为研究对象,对比其损伤前、后各阶振型变化率的识别效果。由图2可见,前三阶的振型变化率曲线在损伤发生处均产生了明显的突变,可以清晰地识别出塔身是否产生损

伤。鉴于此,本文仅列出三阶振型变化率进行分析研究。

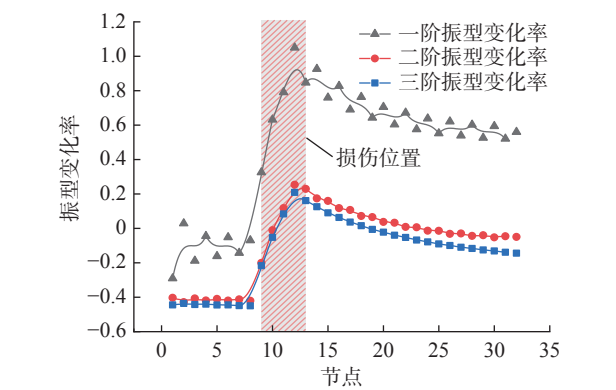


图2 振型变化率曲线  
Fig.2 Curve for the change rate of vibration mode

此外,本文引入2种随机噪声模拟噪声干扰:a.噪声较小:频率的噪声水平为1%,振型的噪声水平为1%;b.噪声较大:频率的噪声水平为3%,振型的噪声水平为5%。

2.3.1 单处损伤

对工况1进行模拟。在有噪声干扰情况下,仅研究了损伤程度为5%和20%这2种情况。以此为基础绘制柔度曲率矩阵曲线图,如图3所示。从图3中可以看出,无论有无噪声干扰,对于3种不同程度的损伤,振型变化率曲线和柔度曲率矩阵曲线均在损伤位置9~13节点段产生了明显的突变。振型变化率曲线在该位置陡增;柔度曲率矩阵曲线呈凸型,无损伤处曲线基本光滑。无噪声干扰时,振型变化率曲线几乎重合;损伤柔度曲率矩阵曲线除损伤位置外基本重合,损伤位置的曲线随着损伤程度的加大,曲线突变峰值增大。在有噪声干扰下,较小的随机噪声对振型变化率的干扰相对较小,噪声较大的情况下振型变化率曲线在未损伤处产生轻微的突变;损伤柔度曲率曲线基本无变化。

由此,在单处损伤情况下,振型变化率曲线仅可以无噪声或噪声较小的情况下判别损伤位置,较大的随机噪声对于振型变化率的干扰较大,损伤定位效果差。损伤柔度曲率曲线可以判别损伤位置及损伤程度,并且基本不受随机噪声的干扰。

2.3.2 多处损伤

对工况2进行模拟。以此为基础绘制柔度曲率矩阵曲线图,如图4所示。从图4中可以看

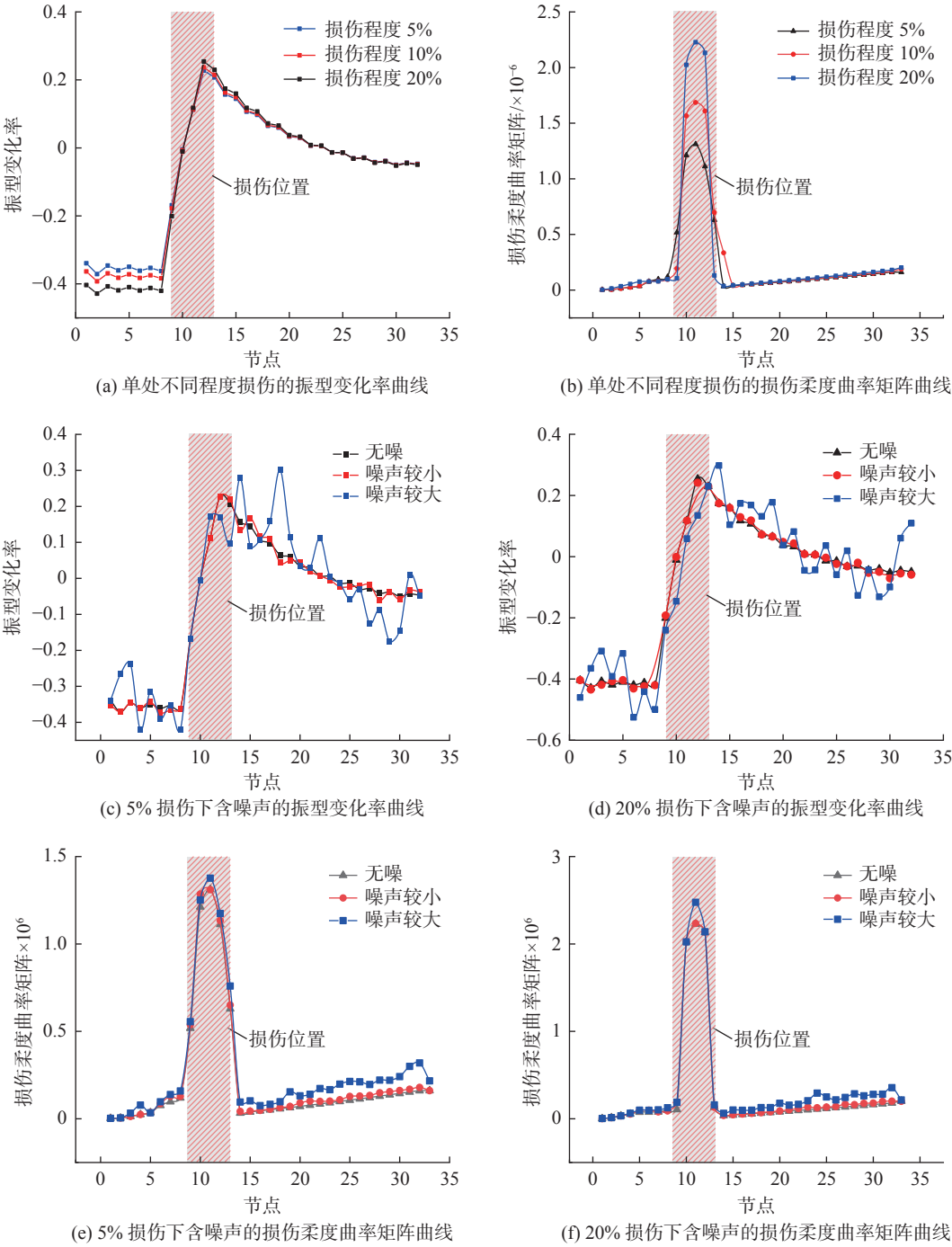


图 3 单处不同程度损伤无噪和含噪下的振型变化率曲线和损伤柔度曲率矩阵曲线

Fig.3 Curves for the change rate of vibration mode and the damage flexibility curvature matrix of a single point under different degrees of damage with and without noise

出，无论有无噪声干扰，损伤柔度曲率曲线均在 3 处损伤位置 1~5 节点段、9~13 节点段和 29~33 节点段产生了明显突变，且损伤程度越大，突变越明显，曲线呈凸型，其中，最高处的 8 号标准节突变最明显，最低处的 1 号标准节突变最不明显，无损伤处曲线基本光滑。振型变化率曲线在无噪声和较小噪声干扰下，在损伤位置处陡

增，但 1 号标准节处增幅不明显；在较大噪声干扰下，振型变化率曲线在多处产生了突变，且突变的程度差距不大。

由此，在多处损伤情况下，振型变化率的曲线图走势以及突变值大小相似，很难用于判定塔身结构损伤位置。损伤柔度曲率曲线可以判别损伤位置并判定多处损伤的损伤程度，并且基本不

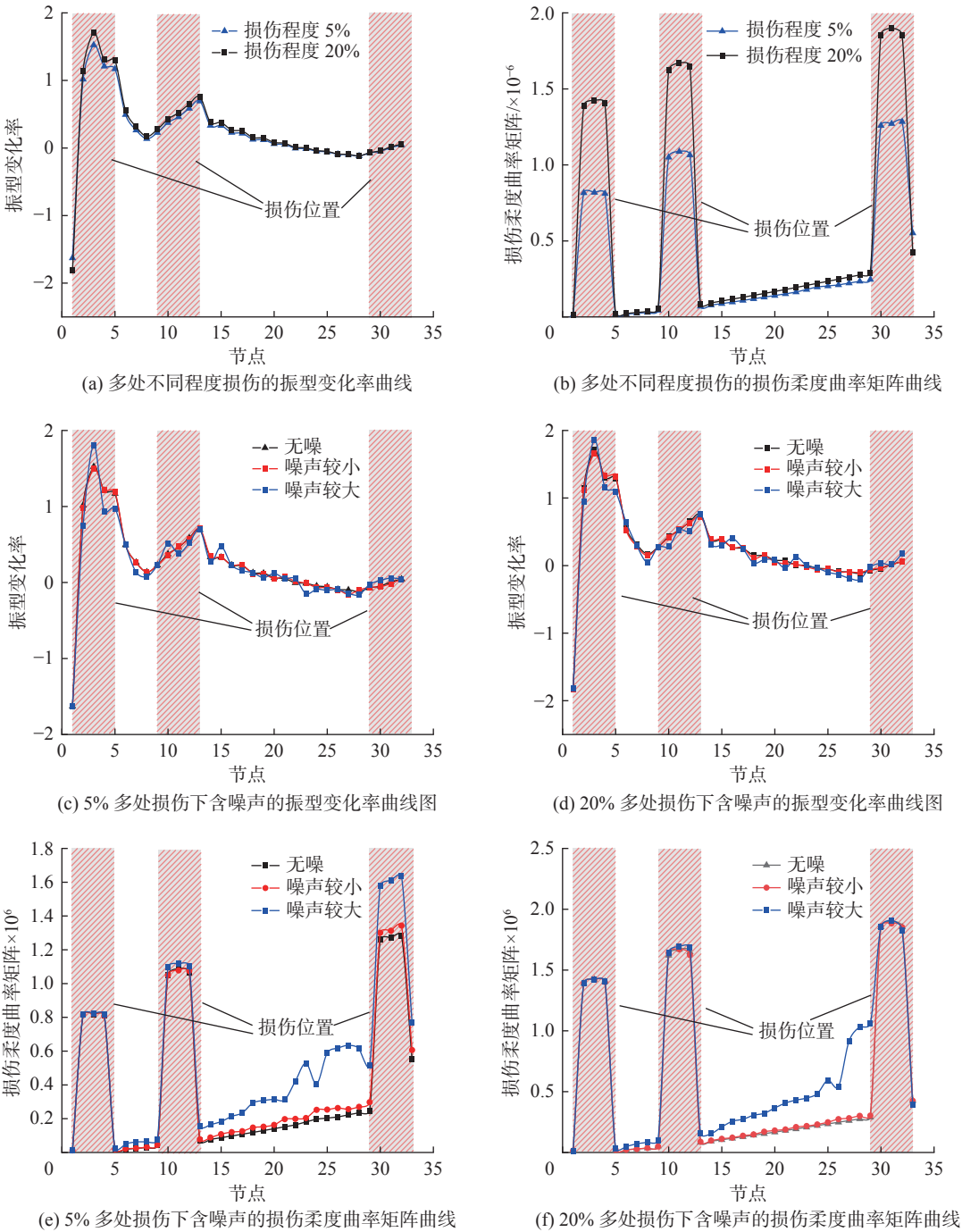


图 4 多处不同程度损伤无噪和含噪下的振型变化率曲线和损伤柔度曲率矩阵曲线

Fig.4 Curves for the change rate of vibration mode and the damage flexibility curvature matrix of multiple points under different degrees of damage with and without noise

受随机噪声的干扰。

2.3.3 螺栓损伤

对工况 3 进行模拟，将 3 号标准节和 4 号标准节中标准节架正方形截面 4 个角中 1 个角断开连接，以此来模拟标准节节点之间连接螺栓发生松动或者脱落的损伤情况。以此为基础绘制柔度曲

率矩阵曲线图，如图 5 所示。由图 5 可见，无论有无噪声干扰，在螺栓损伤位置处，振型变化率曲线和损伤柔度曲率曲线在损伤位置均有明显的突变，其余位置曲线光滑。

由此，振型变化率曲线和损伤柔度曲率曲线均可识别和定位塔身标准节连接螺栓损伤。

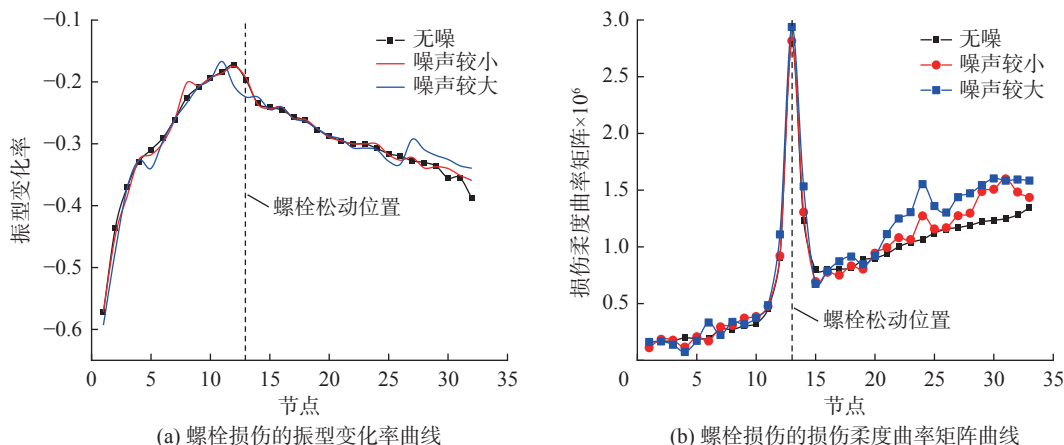


图5 螺栓损伤的振型变化率曲线和损伤柔度曲率矩阵曲线

Fig.5 Curves for the change rate of vibration mode and damage flexibility curvature matrix of bolt damage

### 3 结 论

a. 塔式起重机因其本身结构及工作环境的复杂性, 极易发生事故。在其发生微小损伤时就及时发现并检修对规避事故风险非常重要。有限元仿真为塔机损伤检测提供了一种新方法。

b. 相对损伤柔度曲率矩阵仅需要结构损伤后的柔度矩阵, 弥补了振型变化率的不足。

c. 基于振型变化率的损伤识别方法在多处损伤及噪声干扰下的识别效果较差。由柔度曲率矩阵构建出相对柔度曲率矩阵曲线可以有效识别单处损伤、多处损伤和螺栓损伤。并且能判定损伤程度。

d. 在随机噪声的影响下, 基于损伤柔度曲率矩阵的方法基本不受随机噪声的干扰, 抗噪性较优。

#### 参考文献:

- [1] 陈宝春, 陈建国, 黄素萍. 2007—2016 年我国在役塔吊安全事故统计分析[J]. 浙江建筑, 2018, 35(2): 32–36.
- [2] VANDIVER J K. Detection of structural failure on fixed platforms by measurement of dynamic response[J]. Journal of Petroleum Technology, 1977, 29(3): 305–310.
- [3] AL-SAID S M. Crack detection in stepped beam carrying slowly moving mass[J]. Journal of Vibration and Control, 2008, 14(12): 1903–1920.
- [4] 杜彦良, 段永彬, 孙宝臣. 基于曲率模态的门桥起重机损伤分析[J]. 中国工程机械学报, 2005, 3(4): 386–390.
- [5] 付芹, 谷立臣. PNN 在塔式起重机故障诊断中的应用[J]. 起重运输机械, 2010(3): 87–89.
- [6] 黄东亮. 起重机结构疲劳检测方法[J]. 科技创新导报, 2011(35): 69.
- [7] FANG Y H, CHO Y K. Effectiveness analysis from a cognitive perspective for a real-time safety assistance system for mobile crane lifting operations[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2016, 143(4): 05016025.

- [8] 周奎, 徐晨光, 严烨, 等. 基于损伤柔度曲率矩阵的人行天桥损伤识别研究[J]. 上海理工大学学报, 2019, 41(6): 577–583.
- [9] 周奎, 陈思宇, 陈妮娜, 等. 损伤钢筋混凝土 U 形梁的非线性动力特性识别研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2): 197–203.
- [10] 王柏生, 倪一清, 高赞明. 用概率神经网络进行结构损伤位置识别[J]. 振动工程学报, 2001, 14(1): 60–64.
- [11] REN W X, DE ROECK G. Structural damage identification using modal data. I: simulation verification[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(1): 87–95.
- [12] STUTZ L T, RANGEL I C S S, RANGEL L S, et al. Structural damage identification built on a response surface model and the flexibility matrix[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 434: 284–297.
- [13] 马灿, 刘树林, 温磊, 等. 基于 ABAQUS 的塔式起重机结构分析及试验验证[J]. 机械制造, 2017, 55(6): 86–88, 99.
- [14] 金玉萍. QTZ63 塔式起重机有限元分析[J]. 浙江工业大学学报, 2010, 38(3): 242–245.
- [15] 边晓伟, 杨东东, 张帆. 塔式起重机结构有限元设计计算[J]. 建筑机械, 2017(10): 54–57.
- [16] LEHNER P, KŘIVÝ V, KREJSA M, et al. Stochastic service life prediction of existing steel structure loaded by overhead cranes[J]. Procedia Structural Integrity, 2018, 13: 1539–1544.
- [17] CAWLEY P, ADAMS R D. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1979, 14(2): 49–57.
- [18] GUDMUNDSON P. The dynamic behaviour of slender structures with cross-sectional cracks[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1983, 31(4): 329–345.
- [19] 周奎, 徐宏文, 方早, 等. 基于柔度曲率曲线拟合的薄板结构损伤识别研究[J]. 上海理工大学学报, 2018, 40(3): 296–301.