

# Modal Analysis and Its Application in Tower Crane Structure Damage

Shengchun Wang<sup>1</sup>, Shijun Song<sup>1</sup>, Jiyong Wang<sup>1,2</sup>, Mingxiao Dong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong

<sup>2</sup>Foryou Company, Jinan Shandong

Email: scwang\_0807@163.com

Received: Jan. 17<sup>th</sup>, 2018; accepted: Feb. 1<sup>st</sup>, 2018; published: Feb. 7<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Structural health diagnosis and damage identification have become an important research topic in the field of tower cranes. A complete dynamic model of the tower crane is set up by the finite element software ANSYS. Then structures before and after damage are both simulated. The simulation results show that frequencies and modes of vibration are not sensitive to structural damage. At last, the diagnosis method of analyzing the rate of change between vibrational modes is presented. The feasibility of this method is proven by numerical simulation. This method not only diagnoses status of structure but also determines the positions of damage.

## Keywords

Tower Crane, Structural Damage, Modal Analysis

---

# 模态分析在塔机结构损伤中的应用研究

王胜春<sup>1</sup>, 宋世军<sup>1</sup>, 王积永<sup>1,2</sup>, 董明晓<sup>1</sup>

<sup>1</sup>山东建筑大学, 机电工程学院, 山东 济南

<sup>2</sup>山东富友有限公司, 山东 济南

Email: scwang\_0807@163.com

收稿日期: 2018年1月17日; 录用日期: 2018年2月1日; 发布日期: 2018年2月7日

---

## 摘要

结构健康诊断和损伤识别已经成为塔式起重机领域重要的研究课题, 本文首先建立了完整的塔机动态分析有限元模型, 进行了结构损伤前后的数值模拟和结果分析, 结果表明, 塔机各阶固有频率反映塔机的

整体状态,它对局部结构的损伤不敏感,塔机振型的变化也不能很好地反映局部结构的损伤状态。提出了利用振型的变化率进行损伤诊断的方法,研究结果表明该方法不仅能很好地反映局部结构的损伤状态,而且还能准确定位损伤结构的位置,是对塔机的结构健康诊断的一种新研究思路。

## 关键词

塔式起重机, 结构损伤, 模态分析

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

塔式起重机作为高层建筑中不可或缺的施工机械,是一种风险大、事故率高的机械设备。金属结构作为塔机的主要骨架,决定着塔机的工作可靠性和安全性。在塔机事故原因中,近一半的事故是由于金属结构损伤破坏引起的。

损伤一般会降低结构的刚度,增大阻尼,改变振动频率和振动模态,引起结构单元边界条件的变化,所以很多研究者利用各种振动参数作为特征量试图对结构的损伤进行有效检测[1] [2] [3]。

然而由于结构的各种振动参数对损伤各有其敏感性,加上塔式起重机属于大型复杂结构,振动模态识别技术在塔式起重机结构损伤诊断中的研究还鲜有报导,本文通过对一塔式起重机进行数值模拟,研究了损伤前后其振动模态参数的变化,分析了频率、振型等对结构损伤的敏感性,提出了利用振型变化率对损伤判别以及损伤位置的定位方法。

## 2. 有限元模型

用有限元法建立塔机整机模型,然后进行系统动力分析,可以计算出塔机结构的固有频率、振型及动力响应等参数。有限元法计算格式规范统一,计算精度高,已成为大型复杂结构动力分析计算的主要手段。

现以山东富友有限公司的5510塔机为例,塔机这种大型复杂结构难以进行结构损伤实验,本文进行数值模拟,该塔机总体高度50.9 m,塔帽部分高6.4 m,吊臂总长54.8 m,平衡臂总长11.6 m。各主要结构部分杆件的参数介绍如下:

- 1) 塔身标准节主弦用外径133 mm、臂厚8 mm的方形钢管;斜腹杆用 $\phi 76 \times 5$ 的钢管;直腹杆用 $\phi 50 \times 5$ 的钢管。
- 2) 吊臂上弦用外径86 mm、臂厚7 mm的方形钢管;下弦用外径87 mm、臂厚8 mm的方形钢管杆(靠近臂根处的5个臂节);下弦杆用外径81 mm、臂厚6 mm的方形钢管(靠近臂端部的5个臂节)。腹杆因类型较多,不同臂节截面尺寸不同,依据设计图纸尺寸分别定义截面类型(在此不再赘述)。
- 3) 塔帽弦杆用 $90 \times 90 \times 8$ 的角钢对焊;腹杆用 $\phi 60 \times 5$ 的钢管。
- 4) 平衡重及起升机构等附加部件简化为质量单元,平衡臂主要用槽钢(28a)。
- 5) 拉杆是 $\phi 40$  mm钢。

选用空间梁单元,可以承受拉压、弯曲和扭转载荷。用节点耦合的方法模拟销轴连接,以此完成平衡臂与塔身、吊臂与塔身连接,塔身与塔顶部分固结在一起,吊臂和平衡臂的拉杆用杆单元。由于回转支承结构相对塔机整体结构而言刚度较大、尺寸较小、质量集中,当对塔机分析整体结构时,可以将回

转支承部分采用梁单元进行等效。

各部分杆件的材料属性为弹性模量 210 GPa、泊松比 0.3、密度 7800 kg/m<sup>3</sup>。

整机的有限元模型建立完成后如图 1 所示。

结构损伤位置用第 8 个标准节和第 14 个标准节的最下端的一个主肢，用减小接触面积来模拟螺栓的松动，即主肢对应高度为 17.5 m 和 32.5 m 处均有一处螺栓松动。

### 3. 损伤检测分析

#### 3.1. 模态频率分析

由振动理论可知，对于一个多自由度振动系统而言，低阶固有频率对系统的动力响应贡献较大，而高阶固有频率影响较小，所以对多自由度系统只要提取其低阶固有频率就能很好地反映系统的动力特性。因此本文在此提取了该塔机的前 5 阶模态，损伤前后模态频率以及频率的变化见表 1。

从表 1 可见，塔机结构损伤前后频率的变化都较小，变化量最大值为 0.00217 Hz。可见结构的局部损伤对频率的变化并不敏感。

Hearn 及 Agbalian 等利用频率变化平方比对简单结构的破损诊断取得了有益的成果[4]，在此本文也分析了该塔机损伤前后频率平方的相对变化，从表 1 可见，频率平方的相对变化最大值也仅为 0.0097，可见该参数对结构局部的损伤也不敏感，因此利用模态频率对塔机结构的损伤进行检测，检测效果是非常不明显的。

#### 3.2. 模态振型分析

本文又分别提取了完好状态和损伤状态的前 5 阶模态振型，由于塔机整体单元数众多，而损伤位置仅在塔身部分，因此，仅提取了塔身上对应损伤主肢所在列的节点的振型，利用 matlab 编程，对比显示损伤前后塔身振型的变化，各阶振型的对比图见图 2(a)~图 2(e)。

从塔身的 5 阶振型对比图可见，塔身结构的局部损伤对振型的影响也不大，从振型的变化无法判断结构的状态，更谈不上对损伤位置的判断。

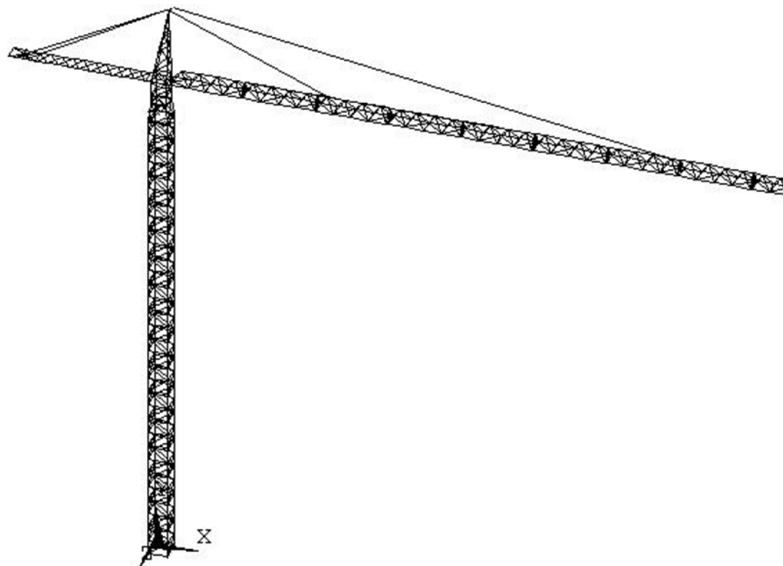


Figure 1. Structural model of tower crane  
图 1. 塔机有限元结构模型

### 3.3. 振型的变化率分析

将塔身的模态振型根据公式(1)作进一步的分析。

$$\Delta\phi_{i,j} = \frac{\phi_{gi,j} - \phi_{di,j}}{\phi_{gi,j}} \quad (1)$$

式中,  $\phi_{gi,j}$ ——代表结构完好状态第  $j$  个节点的第  $i$  阶振型值

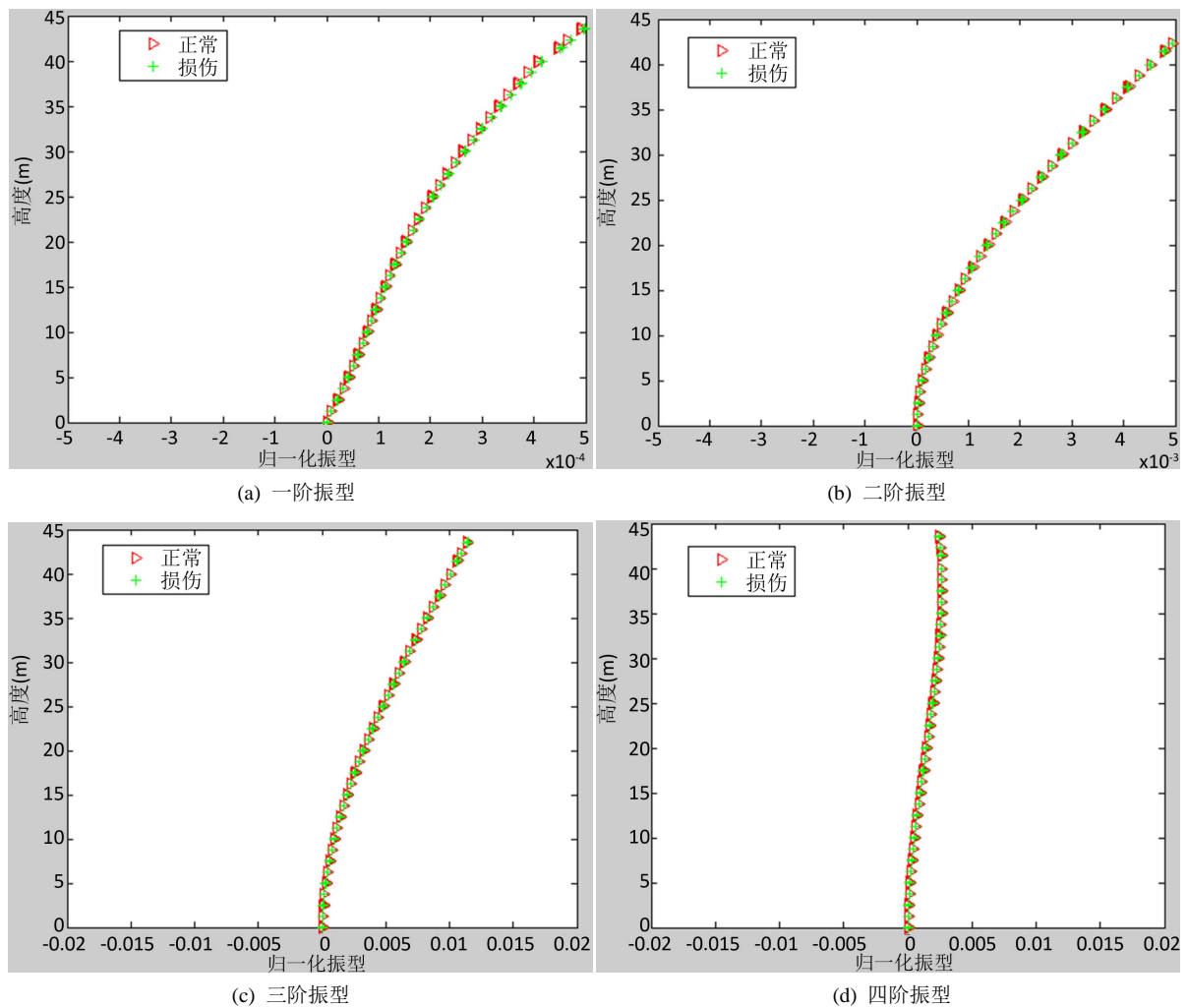
$\phi_{di,j}$ ——代表结构损伤状态第  $j$  个节点的第  $i$  阶振型值

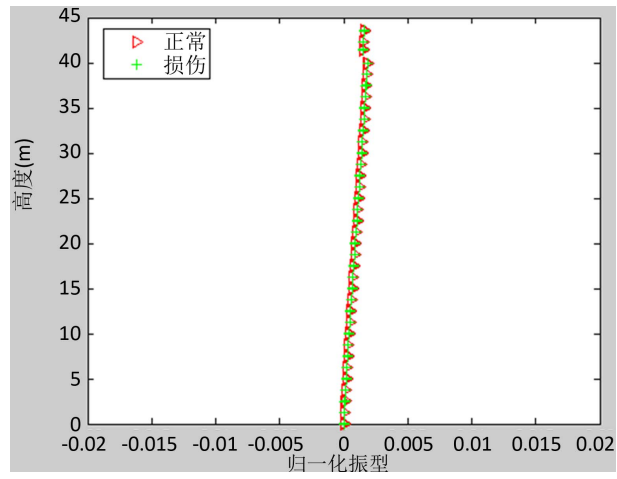
$\Delta\phi_{i,j}$ ——第  $j$  个节点第  $i$  阶振型的变化率

**Table 1.** Comparison of modal frequency before and after damage

**表 1.** 损伤前后模态频率对比

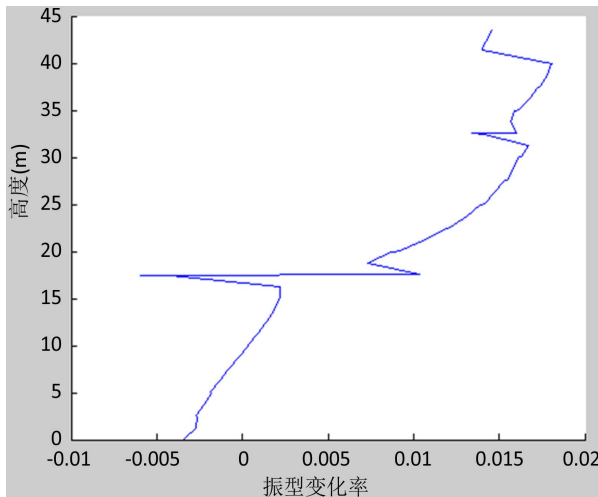
模态阶数	完好状态固有频率(Hz)	损伤状态固有频率(Hz)	频率的变化	频率平方的相对变化
1	0.15370	0.15343	0.00027	0.0035
2	0.24577	0.24458	0.00119	0.0097
3	0.53605	0.53388	0.00217	0.0081
4	0.62761	0.62686	0.00075	0.0024
5	1.5682	1.5679	0.0003	0.00038



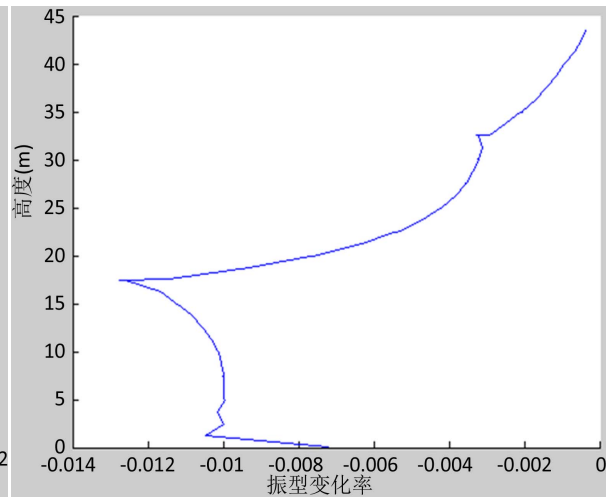


(e) 五阶振型

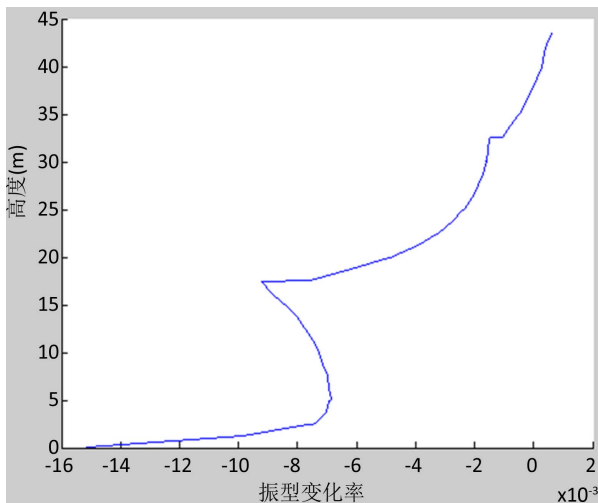
Figure 2. Contrast of modes of vibration  
图 2. 各阶振型对比



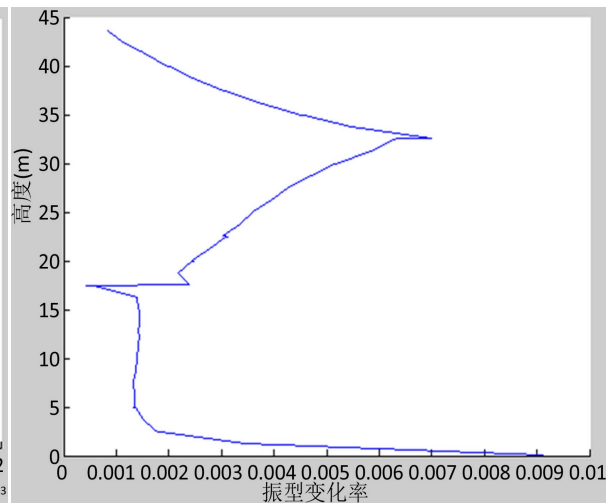
(a) 一阶振型变化率



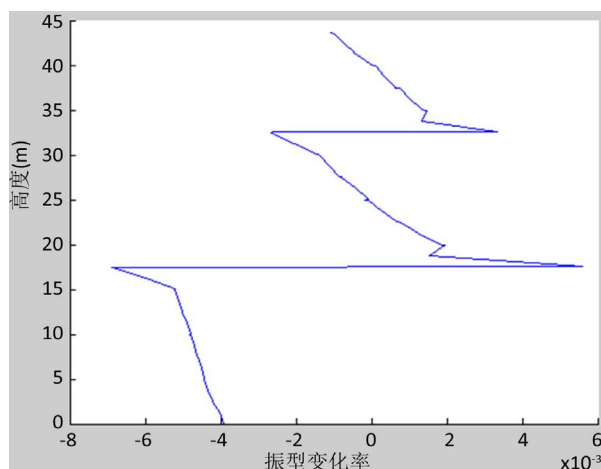
(b) 二阶振型变化率



(c) 三阶振型变化率



(d) 四阶振型变化率



(e) 五阶振型

**Figure 3.** Contrast of modes of vibration**图 3.** 各阶振型对比

结构损伤后各阶振型的变化率分别见图 3(a)~图 3(e)。

分析图 3 可见, 结构没有损伤的地方模态振型的变化曲线是光滑的, 而对应塔身高度 17.5 m、32.5 m 处结构损伤的模拟, 在图 3(a)~图 3(e)中都可见, 两处损伤部位五阶模态的变化率曲线上均有非常明显的突变点, 因此, 用这种方法来判断结构的损伤不仅是可行的, 而且这种方法还可以在判断结构状态的同时, 能准确地将损伤位置很好地反映出来。

#### 4. 结论

塔式起重机结构损伤识别及健康检测是一个非常迫切的问题, 但目前尚处在基础理论研究阶段, 本文探讨了利用有限元程序 ANSYS 对塔式起重机结构损伤的判断方法, 首先建立塔式起重机结构损伤前后的模型, 然后研究了各模态参数对结构损伤的敏感性, 研究结论如下:

- 1) 塔机各阶固有频率反映塔机的整体状态, 它对局部结构的损伤不敏感, 其变化不能很好地反映结构状态情况。
- 2) 塔机振型的变化也不能很好地反映局部结构的损伤状态。
- 3) 塔机振型的变化率不仅能很好地反映局部结构的损伤状态, 而且还能很好的定位损伤结构的位置。

该方法可以为塔机等大型钢结构的健康状况诊断提供一条有效途径。

#### 基金项目

国家自然科学基金(No. 51475277)资助项目。

#### 参考文献 (References)

- [1] 曹晖, Michael I. Friswell. 基于模态柔度曲率的损伤检测方法[J]. 工程力学, 2006, 23(4): 33-38.
- [2] 周云, 蒋运忠, 易伟建, 谢利民, 贾凡丁. 基于模态柔度理论的结构损伤诊断试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(5): 36-44.
- [3] 冯坤, 杨永春, 郑轶. 基于轴向模态应变能比法的三维桁架结构损伤定位方法[J]. 振动与冲击, 2013, 32(12): 169-173.
- [4] Hearn, G. and Testa, R.B. (1991) Modal Analysis for Damage Detection in Structures. *Journal of Structural Engineering*, **117**, 3042-3063. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:10\(3042\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:10(3042))

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2167-6631，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[met@hanspub.org](mailto:met@hanspub.org)