

# 基于直接测量法的塔式起重机损伤模态识别研究

张雪芹<sup>1</sup> 程 阳<sup>2</sup> 张皓翔<sup>3</sup> 陈显君<sup>1</sup> 丁翰林<sup>1</sup>

1. 重庆建筑科学研究院 重庆 400020

2. 重庆科技大学 重庆 401331

3. 伦敦城市大学 伦敦

**摘 要:** 塔式起重机(以下简称塔机)是建筑施工领域关键设备,进行损伤模态识别对塔机结构预防安全事故的发生尤为重要。然而,文献表明塔机在环境荷载作用下的模态参数在结构发生改变前后变化幅度较小,导致难以识别其模态参数。本文采用ANSYS有限元数值分析软件,建立塔机模型进行瞬态动力响应分析。接着,基于敏感性分析,筛选出能够更清晰反映损伤特征的瞬态动力响应参数。最后,研究了塔机结构在不同损伤程度和损伤位置时的频率与振型识别。结果表明:频率存在影响但频率变化率很小,很难对损伤进行判断;振型对损伤部位的效果是很明显的,且随着损伤程度的增加,识别效果越好。

**关键词:** 塔式起重机;损伤识别;有限元分析;数值计算

## 引言

在塔机损伤识别研究中,局部方法与全局方法为主要技术路线<sup>[1]</sup>。局部方法(如X射线、渗透检测等)可精准定位已知损伤区域<sup>[2]</sup>,但需预先知晓损伤位置且检测范围有限,难以直接应用于大型塔机结构,经济性与操作性较差。

全局方法适用于大型结构损伤识别,主要包括静力与动力检测。静力法通过刚度、位移等静态参数进行评估,蔡晶等<sup>[3]</sup>均基于静力测量数据进行损伤识别。然而,塔机结构庞大、构件复杂,静力检测实施困难,更适用于小型桁架。

本文基于模态频率与振型进行损伤识别。首先建立塔机整体有限元模型,通过多测点响应识别频率与振型。考虑到塔臂为薄弱部位,将其简化为等效悬臂梁,并引入变幅小车-塔耦合单元,模拟小车移动与吊重影响。在MATLAB中构建运动方程,通过车体响应提取模态参数。为进一步提高识别鲁棒性,采用归一化叠加曲率模

态差平均值实现悬臂梁损伤定位。

## 一、塔机有限元模型的建立

塔式起重机金属结构质量占塔机自重的70%,主要由塔身、平衡臂、起重臂、回转平台、底座、拉杆、塔帽、变幅小车等组成,金属结构承受塔机以及外荷载的作用,所以塔机的金属结构不仅设计合理,而且制造质量也要满足要求,塔身尤其重要,固定连接的塔身承受压、弯、扭转的作用,检测塔身的强度、刚度、稳定以及抗疲劳能力都很重要。本文对塔机进行损伤模拟分析,塔机起升幅度为60m。

在ANSYS有限元软件中,建立的有限元模型需要满足以下几个特性:(1)模型简单且能够反映塔机的动力学特性;(2)模型结构合理,为了建立更加合理的有限元模型,需要对模型进行相应的简化。

(1)若进行整机的实体建模,网格数量较多,计算很难进行求解,而采用一般的梁单元对杆件进行简化;

(2)回转平台的简化:回转支架是由多块钢板焊接组成,通过电机的回转作为动力源完成塔机的回转,相对与整体塔机而言,刚度大,几何尺寸小,质量集中,但是在有限元建模中,板的处理相较于梁杆单元复杂很多,因此,我们只需将回转支承简化为梁单元进行处理,并适当放大其弹性模量;

(3)结构连接的简化:标准节之间采用固结连接,平衡臂、平衡臂与回转塔身采用节点耦合处理,通过销

**基金项目:** 重庆住房和城乡建设委员会,重庆市建设科技计划项目(城科字2022第8-8号);重庆设计集团有限公司(2023-C4)

**作者简介:** 张雪芹(1968-)男,重庆长寿人,博士,正高级工程师,正高级经济师,研究方向:建筑科学技术研究、检测技术与结构鉴定,建筑与房地产管理、工程监理与造价咨询等。

轴相连接,可认为是起重臂起升平面内的固定铰支座,拉杆与平衡臂和起重臂也是通过销轴连接,也可以将它们之间的连接处理为固定铰支座。

### 1.单元类型及材料属性定义

本文所选单元即ANSYS单元库中单元的类型,简化如下:塔机结构各类主肢、上弦杆、下弦杆、斜腹杆、水平腹杆等均采用Beam188单元进行模拟,此单元不需要指定实常数,适合分析从细长到中等粗短的梁结构。Beam188是一种两节点的空间三维二次梁单元,每个节点可具备六至七个自由度。它特别适用于处理大角度转动以及线性和非线性大应变问题,能够提供精准的分析结果。Beam188只需要定义梁截面、弹性模量、密度和泊松比即可,且与单元坐标系无关平衡臂、在起重臂与塔帽连接的拉杆中,工作时主要承受拉力作用。因此,选用Link8单元进行模拟。Link8单元是一种二节点的杆件单元,每个节点包含三个自由度,这些自由度均对应于沿X、Y、Z三个方向的平动,主要模拟两端铰接的空间杆件。

Mass21单元作为集中质量单元,其单节点配置包含完整的六个自由度:三个平移自由度(沿X、Y、Z轴向)和三个旋转自由度(绕X、Y、Z轴向)。该单元允许独立定义各向质量参数及转动惯量,可精确模拟三维结构中的质量集中效应,质量单元需要与重力加速度配合才具有惯性载荷。

### 2.ANSYS模型的建立

使用相关命令定义几何参数、单元属性及点坐标,使用K命令建立关键点;试用L命令生成标准节线单元,然后将关键点通过LATT命令赋予到相应标准线单元中,对线单元使用LMESH进行划分,最后使用NUMMRG对节点自由度进行耦合。本文采用文献<sup>[4]</sup>提出的建模方法,以减小有限元模型与原型结构之间的计算误差。

### 3.瞬态分析关键参数的提取

在对塔机结构进行模态分析时,依据有限元分析的要求,仅需关注塔机结构体系的自重以及零位移约束条件,无需考虑外部荷载的影响。

根据结构动力学原理,塔式起重机作为多自由度振动体系,其动力响应主要受低阶模态主导。研究表明,高阶模态对系统响应的贡献度随阶次升高而降低。因此,在工程实践中,通过获取结构前六阶固有频率即可准确表征塔机的动态特性。本文采用ANSYS子空间迭代法进行模态计算,重点分析该结构前六阶振型及其对应频率,如表1所示:

表1 塔机模型的固有频率

阶次	阵型	固有频率 (Hz)
1	1	0.98479
2	2	1.1848
3	3	2.1206
4	4	2.3720
5	5	3.5183
6	6	3.5346

本文采用完全法进行瞬态分析,因为完全法不需要对自由度和阵型进行过多的考虑,不仅可以对各种类型的非线性特性进行分析而且更加高、快捷的计算得到响应值。瞬态动力学分析的运动方程为:

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{F(t)\} \quad (1)$$

式中,  $[M]$  为质量矩阵;  $[C]$  为阻尼矩阵;  $[K]$  为刚度矩阵;  $\{F(t)\}$  为载荷函数向量;  $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{u\}$  为结构结点的加速度向量、速度向量、位移向量。

#### (1) 计算积分时间步长

瞬态分析积分时间步长的选取对计算效率、计算的收敛性以及精度产生很大的影响,积分时间步长太大对高阶模态的响应产生影响,计算时间也将大大增加,为了避免在恢复模拟信号时出现失真的情况,采样的频率应该不小于模拟信号频谱中最高频率的两倍,即

$$\Delta \leq \frac{1}{2f_{\max}} \quad (2)$$

式中:  $f_s$  是采样的频率;  $f_{\max}$  是信号中最高的频率;  $\Delta$  是时间步长。

按照Shannon采样原理,为了可靠的防止频混,时间步长如下所示:

$$\Delta \leq \frac{1}{2.5f_{\max}} = \frac{1}{8.84} = 0.113 \quad (3)$$

为了数据的流畅性,选择  $\Delta = 0.05s$

#### (2) 计算阻尼

选择合适的阻尼可以减小结构的振动,增强其稳定性,ANSYS中有五类阻尼。本文选用的是Rayleigh阻尼, Rayleigh阻尼系数  $\alpha$ 、 $\beta$  可以根据相应的阻尼定义来求解,通常阻尼比  $\xi$  和  $\alpha$ 、 $\beta$  之间的关系如下:

$$[C] = \alpha * [M] + \beta * [K] \quad (4)$$

$$\xi = \frac{\alpha}{2w_i} + \frac{\beta w_i}{2} \quad (5)$$

式中:  $\xi$  为阻尼比;  $\alpha$  和  $\beta$  为阻尼系数。

确定阻尼比和频率范围  $w_i \sim w_j$  后,求解得到两个方程可得:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2w_2w_4}{w_2 + w_4} = \frac{4f_2f_4}{f_2 + f_4} \\ \beta = \frac{2w_2w_4}{w_2 + w_4} = \frac{\xi}{\pi(f_2 + f_4)} \end{cases} \quad (6)$$

为了减小计算误差,提取塔机中间频率,即第2、4阶频率带入到公式中,根据钢结构阻尼比的经验值范围,设定钢结构阻尼比为0.02<sup>[5]</sup>,代入上式的得到:

$$\begin{cases} \alpha = 0.0632 \\ \beta = 0.0017 \end{cases} \quad (7)$$

## 二、塔机模态参数识别

### 1. 频率损伤识别

本文仿真针对塔机起重臂中部发生不同程度损伤工况进行模拟,得到的塔机前7阶频率之后,对频率按照如下公式进行处理即:

$$\Delta w = (1 - \frac{w_i}{w_j}) \times 100\% \quad (8)$$

起重臂中部发生损伤时,对于塔机的第4、7阶频率存在影响但频率变化率很小,很难对损伤进行判断。

### 2. 振型损伤识别

利用降低弹性模量的方式来模拟结构损伤,改变151单元的弹性模量,选取五个研究工况。研究起重臂不

同方向上不同损伤状态下的振型,以此来分析振型对损伤位置的识别效果,如图1所示。

不同方向上的不同阶次的振型对损伤识别有着不同的效果,如图3(a)、(b)所示,振型对损伤部位的效果是很明显的,且随着损伤程度的增加,识别效果越好。但是研究发现除了图3(a)、(b)显示的结果外,其余阶次的振型并未能有效识别损伤位置。Y方向识别损伤的振型阶数较X方向多,本文只给出效果较好的一阶、四阶振型,如图3(c)、(d)所示,清晰的发现,Y方向不同程度的损伤振型有着微小的差异,并不能进行有效的损伤识别。所以在损伤检测的时,通过振型虽能识别不同位置的损伤,但是这要求我们要正确选择振动方向以及对应的模态阶数。

## 结论

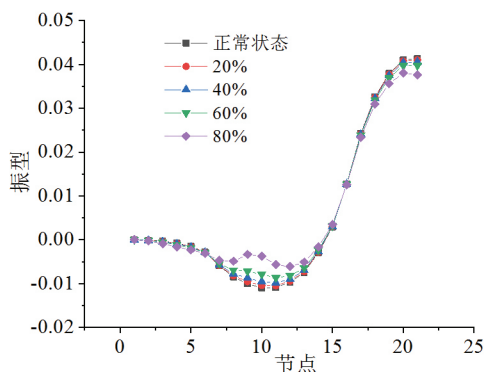
本文通过ANSYS有限元分析软件进行塔机结构在不同损伤状态下的模态识参数识别研究,采用beam 188梁单元进行塔机结构的有限元模型建立。基于不同位置发生损伤对塔机的频率与振型进行了识别。本文的主要结论如下:

(1) 损伤造成的塔机频率变化较小,不利于进行损伤判断。不同方向上不同阶次的振型对于起重臂损伤识别有着不同的影响,除X方向一阶振型以及Z方向四阶振型外,其余方向不同阶次的振型未能识别出损伤位置。

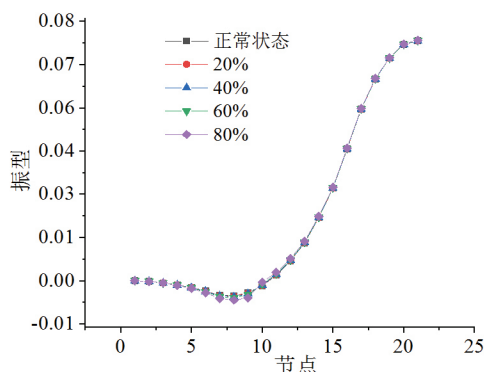
(2) 结构损伤不仅导致损伤点处模态振型异常,还会通过刚度耦合作用引起相邻节点振型的改变,这种现象将显著降低基于振型差异的损伤识别有效性。同时靠近起重臂端部的损伤会导致振型发生一定程度的突变。

## 参考文献

- [1]唐雅琦.基于小波与人工神经网络的结构损伤识别研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [2]陆毕云.华龙一号安全壳BIS-TMDI结构抗震性能试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2024.
- [3]蔡晶,吴智深,李兆霞.静力荷载作用下结构参数识别及状态评估的统计分析[J].工程力学,2004,21(6):76-83.
- [4]陈栋梁.基于模态分析的塔式起重机结构损伤研究[D].山西:太原科技大学,2012.
- [5]赵爽,晏致涛,李正良,钟永力.1000kV苏通大跨越输电塔线体系气弹模型的风洞试验研究[J].中国电机工程学报,2018,38(17):5257-5265+5323.



(a) X轴方向第一阶振型



(b) Y轴方向第一阶振型

图1 平衡臂损伤工况下不同方向下的振型图