

# 有限分析钢管和格式塔架的地震响应

孙凯琦, 高春彦

内蒙古科技大学, 内蒙古 包头

收稿日期: 2023年1月1日; 录用日期: 2023年1月21日; 发布日期: 2023年1月31日

## 摘要

目的: 旨在研究为工程应用设计提供参数的钢管砼格构式塔架的模态分析及地震响应分析。方法: 应用有限元软件ABAQUS, 通过对材料非线性和几何非线性的合理考虑, 利用ABAQUS建立塔架有限元模型, 选择地震波, 包括钢管与核心混凝土相互作用的影响, 地震响应分析, 易损性分析等, 探究相关参数对地震响应的影响。模型塔架通过ABAQUS非线性有限元软件进行有限元分析, 得到塔架各杆件受力分布规律和节点区, 从而得到最大荷载时塔架系统截面最薄弱的位置。

## 关键词

钢管混凝土格构式塔架, 有限元, 地震波, 地震响应分析

# Finite Analysis of Seismic Response of Steel Tube and Lattice Tower

Kaiqi Sun, Chunyan Gao

Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia

Received: Jan. 1<sup>st</sup>, 2023; accepted: Jan. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Jan. 31<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

**Objective:** The purpose of this paper is to study the modal analysis and seismic response analysis of concrete filled steel tubular lattice tower, which can provide reference for engineering application design. **Methods:** The finite element software ABAQUS was used to establish the finite element model of the tower and select the seismic wave, including the influence of the interaction between steel pipe and core concrete, seismic response analysis, vulnerability analysis, etc. to explore the influence of relevant parameters on seismic response. The finite element analysis of the model tower is carried out through ABAQUS nonlinear finite element software to obtain the force distribution law and node area of each member of the tower, so as to obtain the weakest position of the

tower system section under the maximum load.

## Keywords

Concrete Filled Steel Tubular Lattice Tower, Finite Element, Seismic Wave, Seismic Response Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

国土蕴藏量巨大的中国风能资源是一个极为富集的国家。随着全球能源危机和环境问题的加剧,促进了风能资源的开发和发展,因此,开发利用风资源亟不可待。

陈阳[1]研究风力发电机塔架受风-地震耦合作用,测定塔架构造的动力性能,分析塔架的薄弱位置。目前国外已有 Lee [2]等通过 Arclength 方法对屈曲模式和风速进行了非线性屈曲响应的预测 P.E. Uysetal 等所研究的风力塔架是由一个略带圆锥形环肋的焊接钢壳完成,对塔架地震有着重要作用。吴德俊等[3]对塔架进行优化设计,对有限元进行模拟分析。余俊伟等[4]对静力性能分析多屋顶式风力发电机塔架设置振动等式。张群辉[5]在试验研究的基础上,开展了贯通式风力发电塔架抗震性能、有限元分析等方面的研究。王海军[6]等采用钢管混凝土格构式风电机组塔架经济性与钢锥筒式风电机组塔架经济性比较的钢管混凝土格构式风电机组塔架经济性,采用钟善桐教授钢管混凝土统一理论,简化桁架计算方法。胡浩等[7]以试验加有限元的方法推导了主要研究对象为新型空间塔架支管梁柱受力性能的塔架节点承载力计算公式。刘新喜、邓宗伟等[8]利用 AR 法模拟模态分析和风振响应时程分析脉动风作用于风塔有限元模型,结果表明随着台风作用的增大,钢筋混凝土塔架的位移呈线性发展趋势,其余各类型塔架随风强度呈非线性行为,同时对不同塔架的风载响应程度差异进行了研究,发现了不同类型塔架的风动作用,并对不同类型塔架的风动作用。游溢、晏致涛等[9]个设计试验部件在不同湍流强度情况下,以苏州某大跨度输电塔结构为原型进行的风洞试验表明,风压最大、风压最小时出现在什么位置,是影响三力系数的重要因素之一。在对 110 千伏塔架模型进行有限元有效性验证的基础上,余传运、张建润[10]对该输电塔架在地震作用下的动力特性进行了分析,认为该输电塔架地震响应主要是 I 级响应(I 级响应)。

目前对风力发电机塔架的研究多集中于风对结构影响的结果,对地震的影响研究相对较少,但对塔架寿命影响较大的是地震响应分析,而参考国外研究成果较多的风力发电机塔架的抗震设计与我国的实际情况并不完全吻合,因此,我国对研究风力发电机塔架寿命影响较大的是有关参数的讨论,并对其进行相关参数的分析,因此,对于研究风力发电机塔架寿命影响较大的钢管混凝土格构式塔架的地震响应有重要的理论意义和实用价值。

## 2. 计算模型

计算模型为 2 MW 钢管混凝土格构式风力发电机塔架,该塔架高 60 m,柱肢采用  $\phi 560 \times 16$  的圆钢管,腹杆采用  $\phi 180 \times 10$  的圆钢管,材质均为 Q345,柱肢内部核心混凝土为 C40。塔架模型如图 1 所示。

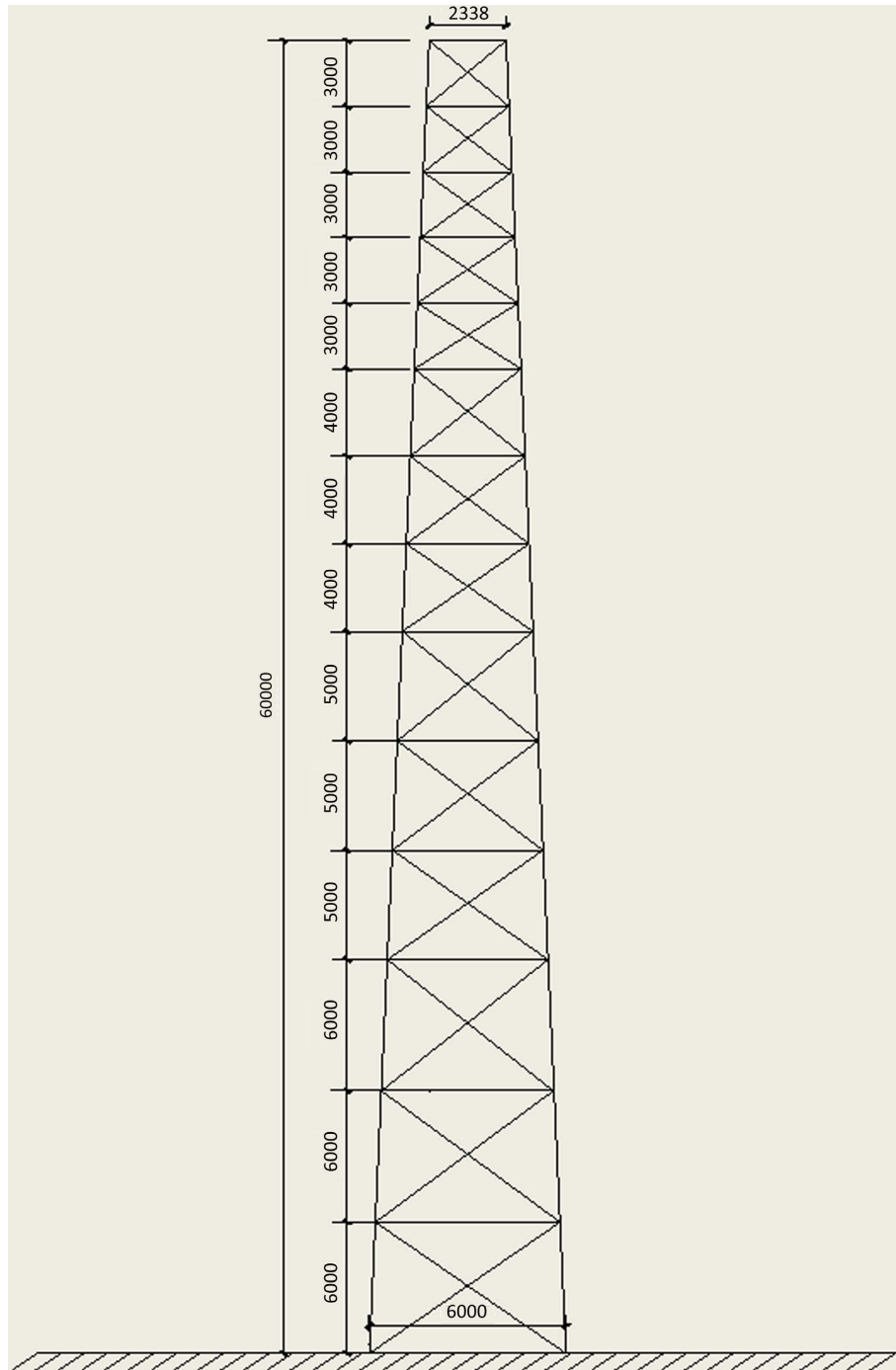


Figure 1. Wind turbine model  
图 1. 风力发电机模型

网格被划分为六面体, 钢管使用 S4R 单元, 而 C3D8R 单元则被用于核心混凝土中。由 136 根腹杆和 3 根柱肢组成的钢管砼格构式风力发电机塔架模型。网格划分详见图 2。塔顶截面形心处在建模时建立一个虚拟的加载点, 通过这个加载点施加的力和力矩通过这一动作传递到塔架上, 与三个柱体之间有耦合的约束。由韩林海提出的混凝土本构号模型——钢管约束混凝土滞回本构, 是韩林海[11]提出的混凝土本构模型, 其中钢质采用了考虑包兴格效应的钢质本构号模型。

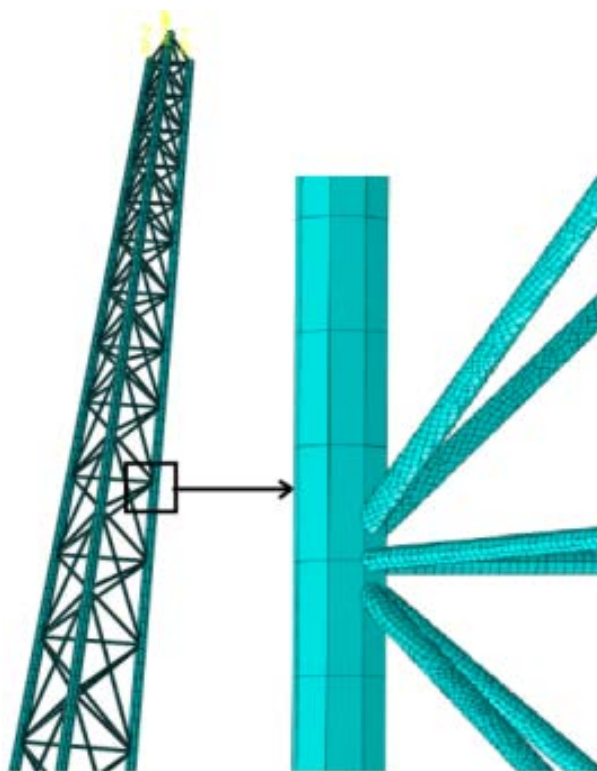
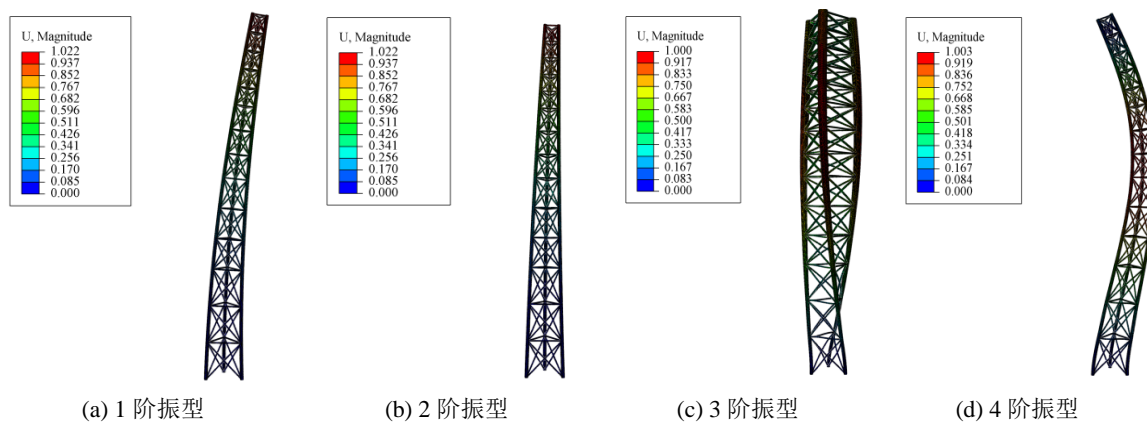


Figure 2. Limited drawing of tower grid steel lattice wind turbine concrete filled steel tubular steel lattice

图 2. 塔架网架钢格构式风力发电机有限图钢管混凝土塔架网架钢格构式

### 3. 模态分析

塔架的一阶频率与叶轮旋转的频率比较接近, 在相等的频率下比较容易产生共振, 从而引起结构坍塌; 但塔架的高阶频率远大于结构一阶, 且不会产生共振现象, 因此只需在一阶频率下进行结构的模式化分析, 塔架的高阶频率比结构一阶频率高得多。文中的风扇叶轮转速最低为 9 r/min, 最高为 15 r/min。我国《风力发电机塔架国家标准》第六条规定: 塔架一阶固有频率为 0.176 hz~0.3 hz~0.99 hz 两个区间。根据测算, 钢管混凝土格构式风力发电机塔架的五阶振型, 其有效质量符合规定的是 90.08% > 90%, 因此分析采用的是六阶振型。塔架振型图如图 3 所示, 表 1 所示为塔架的原有频率。



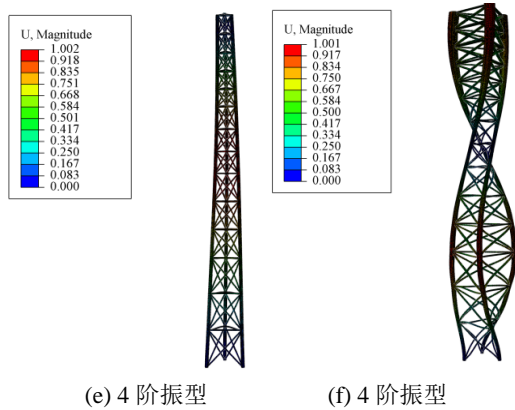


Figure 3. Steel pipe and fan tower model

图 3. 钢制管材及风机塔架模型

Table 1. Natural frequency steel pipe of formatted wind power tower

表 1. 采用格式化风力发电塔的固有频率钢管

模态阶数	频率(Hz)	周期(s)
1	1.13281	0.88276
2	1.14085	0.87654
3	3.2385	0.30878
4	4.9768	0.20093
5	4.9898	0.20041
6	5.6984	0.17549

由表 1 可知, 钢管混凝土格构式风力发电机塔架的固有频率均大于塔架叶轮频率, 因而不会出现与叶轮共振的现象, 故塔架叶轮与塔架叶轮的频率均大于塔架叶轮的频率, 故分析塔架叶轮与塔架叶轮之间的地震响应情况。

## 4. 塔架的地震响应分析

### 4.1. 地震波的选择

《建筑抗震设计规(GB/T50011-2016)》参考采用 ISMOSINGNAL 软件拟合的模拟人工波 14 (GB50011-2016)、中国地震动参数区划图(GB18306-2015)、加速度时程曲线等 3 个波, 如图 4 所示。

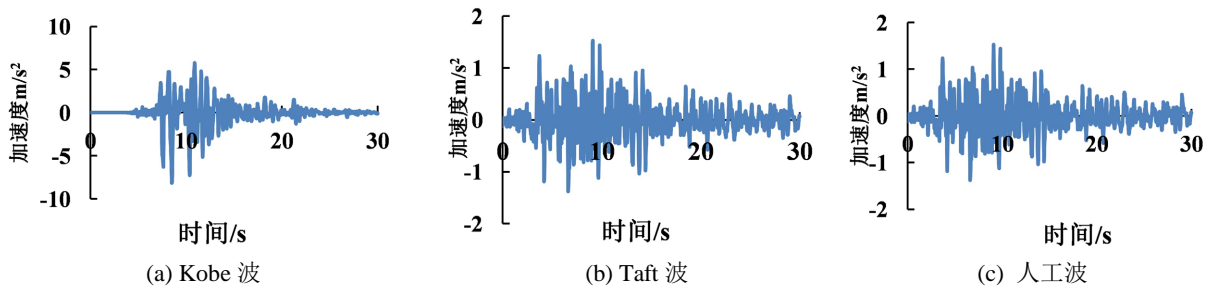


Figure 4. Acceleration curve of Kobe wave, Taft wave and artificial wave

图 4. Kobe 波、Taft 波和人工波的加速度曲线

## 4.2. 地震响应分析

本文采用时程分析法,应用有限元软件,在观测风力发电机塔架在地震作用下结构发生变化的同时,对风机塔架进行3种地震波下的地震响应时程分析,其峰值加速度分别为0.1 g、0.2 g和0.3 g。

## 4.3. 风力发电机塔架加速度响应

风力发电机塔架在 Taft 波、Kobe 波和人工波作用下塔顶加速度响应分别如图 5~7 所示:

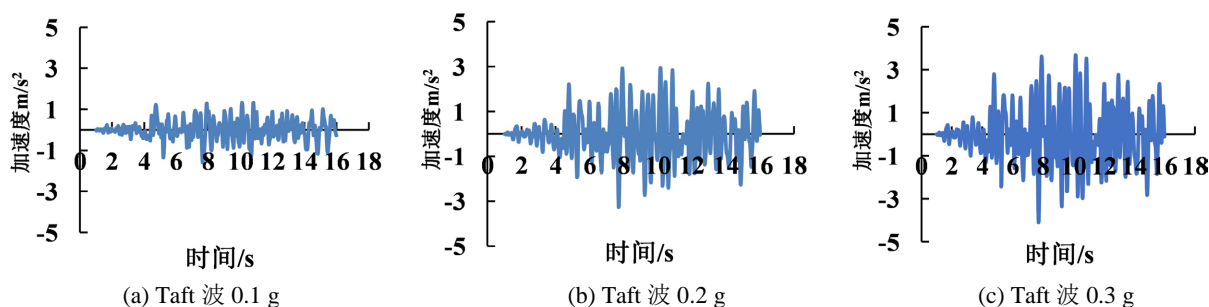


Figure 5. Acceleration response of wind turbine tower top excited by Taft wave

图 5. Taft 波激励作用下风力发电机塔架塔顶加速度响应

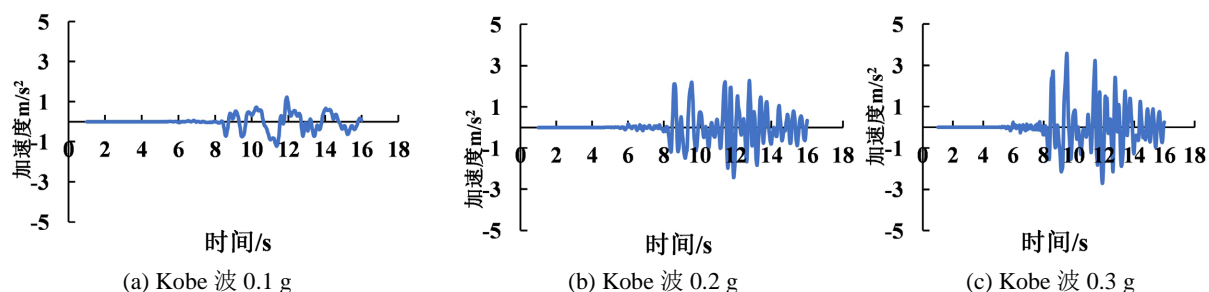


Figure 6. Acceleration response of wind turbine tower top under Kobe wave excitation

图 6. Kobe 波激励作用下风力发电机塔架塔顶加速度响应

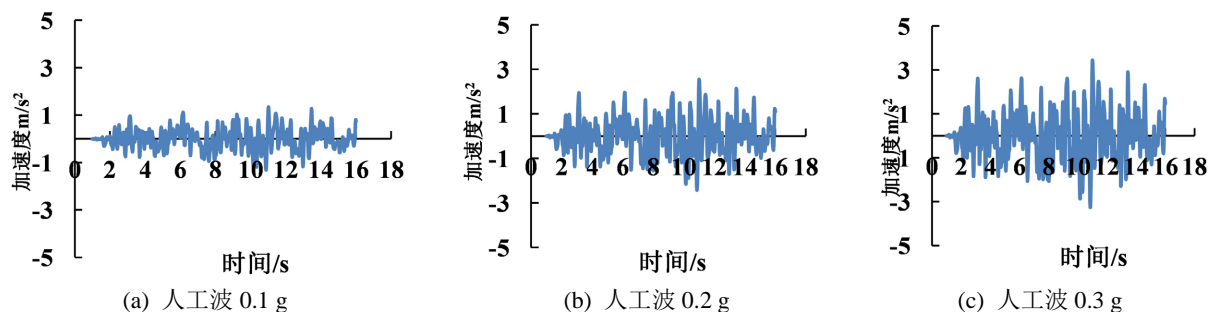


Figure 7. Acceleration response of wind turbine tower top under artificial wave excitation

图 7. 人工波激励作用下风力发电机塔架塔顶加速度响应

由图 5~7 知风力发电机塔架在 Taft 波、Kobe 波和人工波作用下,塔顶加速度峰值曲线的走向大致相同,只是塔顶加速度峰值不同和出现加速度峰值的时间不同。

由图 5 可知, Taft 波随着峰值加速度的增加,塔顶加速度峰值增大。

由图 6 可知, Kobe 波在前 6 s 几乎没有震动变化,这是由于 Kobe 波本身前 6 s 震动比较微弱,因此塔顶加速度响应几乎为 0,这说明只有地震波达到一定的强度后才能引起塔架顶部的加速度响应。6~8 s



时由于地震波本身幅值较小, 而塔架刚度较大, 故反映到塔架顶端加速度响应比较微弱。

由图 7 可知, 人工波相比 Kobe 波和 Taft 波, 对塔架产生的加速度响应更加显著, 整体加速度峰值较大时间相对其它两条波要长。塔顶加速度峰值比 Taft 波和 Kobe 波作用下要大, 塔顶加速度响应也更加剧烈。

**Table 2.** Acceleration response of tower top of concrete filled steel tubular lattice wind turbine

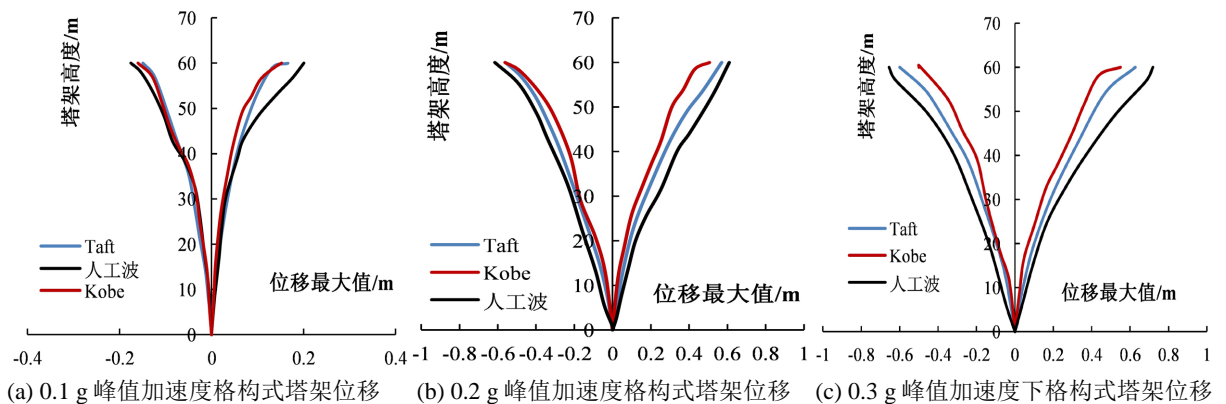
**表 2.** 钢管混凝土格构式风力发电机塔架塔顶加速度响应

地震波名称	峰值加速度(g)	格构式塔顶加速度峰值(m/s <sup>2</sup> )	增大系数
Taft	0.1	1.32	1.35
	0.15	2.02	1.37
	0.2	2.94	1.50
	0.3	3.68	1.25
Kobe	0.1	1.22	1.24
	0.15	1.76	1.69
	0.2	2.26	1.64
人工波	0.1	1.12	1.14
	0.15	1.98	1.35
	0.2	2.55	1.30
	0.3	3.45	1.17

由表 2 可知 Taft 波、Kobe 波和人工波对钢管混凝土风力发电机塔架塔顶加速度峰值相对于地面峰值加速度的增大系数都呈现增大现象。随着设防烈度增大, 塔架顶部峰值加速度在地震波的激励下逐渐增大, 8 度设防烈度下的塔架顶部增大系数比 7 度设防烈度下的塔架顶部增大系数增大约 23%, 随着设防烈度增加, 塔架顶部峰值加速度增加比较迅速, 即随着地震强度增加, 塔顶响应峰值加速度增加呈现出非线性增长, 也是塔架容易破坏的原因。

#### 4.4. 风力发电机塔架位移响应

观察图 8 可知, 钢管混凝土格构式风力发电机塔架随高度增加位移也不断增大, 在塔顶处位移达到



**Figure 8.** Height displacement of steel tube concrete lattice wind turbine tower

**图 8.** 钢管混凝土格构式风力发电机塔架沿高度位移

最大值。在同种波型下, 随着峰值加速度增加, 塔架的位移增大。在同峰值加速度下塔架的顶部位移在 Kobe 波作用下最小, 在 Taft 波作用下居中, 在人工波作用下最大, 这是由于地震波能量越大, 塔架发生变形也越大。

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2016)可知, 塔架在 0.1 g、0.2 g 下塔顶位移没有超过限值, 证明格构式塔架可以抵御峰值加速度为 0.1 g、0.2 g 地震; 在 0.3 g 峰值加速度地震下, 钢管混凝土格构式风力发电机塔架塔顶位移已经超过位移限值, 表明钢管格构式混凝土塔架在 0.3 g 峰值加速度地震下已经出现损伤, 因此塔架不能抵抗 0.3 g 峰值加速度的地震。

#### 4.5. 塔架的破坏模式

钢管混凝土格构式风力发电机塔架破坏模式如图 9 所示:

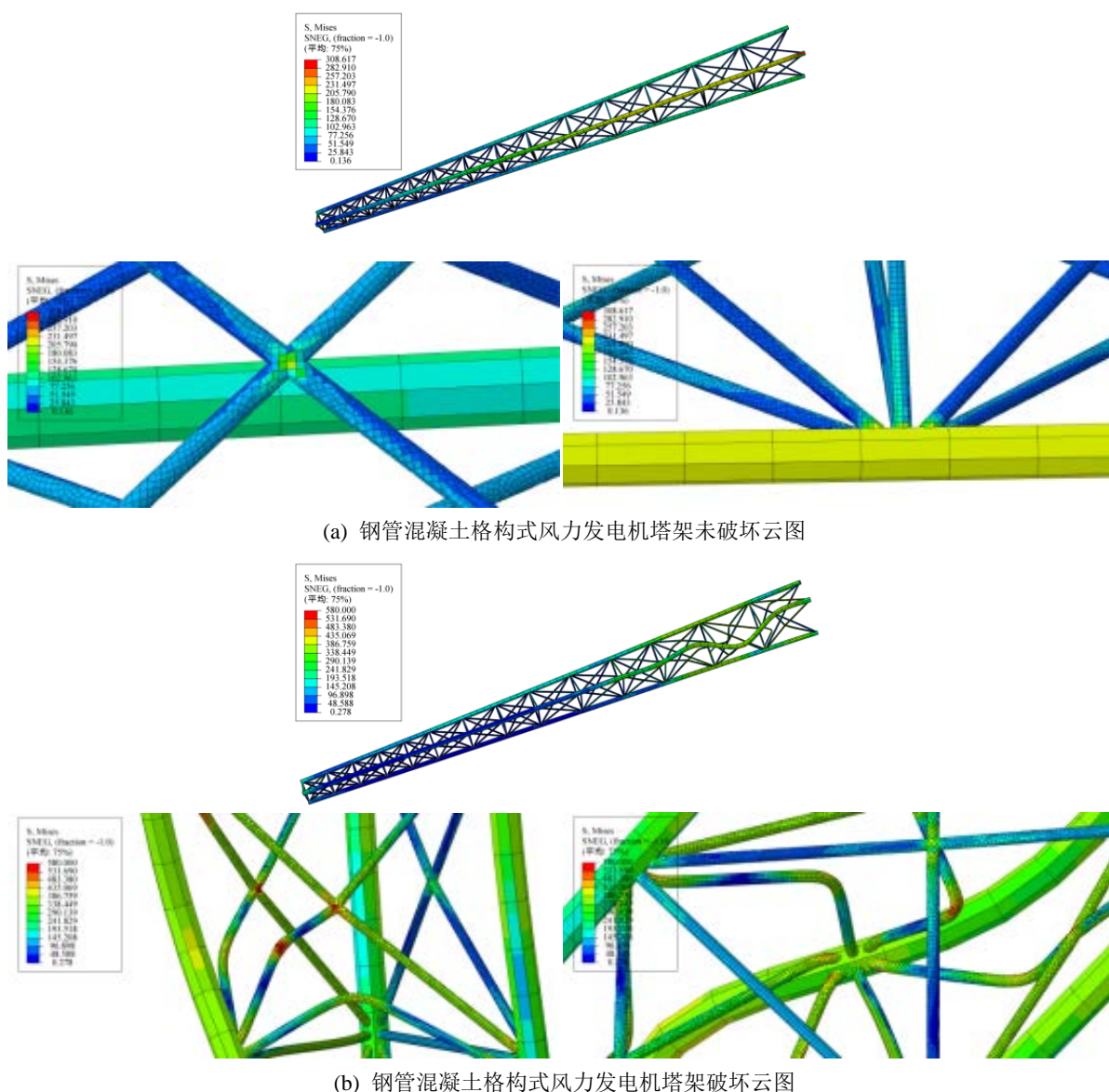


Figure 9. Failure mode of concrete filled steel tubular lattice wind turbine tower

图 9. 钢管混凝土格构式风力发电机塔架破坏模式



由图 9(a)、图 9(b)所示, 柱足随峰值加速度增大而严重变形, 腹杆在底部交叉处受力也随之增大, 腹杆也随之变形, 变形逐渐明显, 因此塔基是一个较弱的位置。

### 4.6. 塔架地震易损性分析

结构的易损性是通过有限的软件计算出来的, 再通过增量动力分析法(IDA)计算出钢管混凝土格构式塔架的易损性曲线, 通过数据模型计算出来。

#### 4.6.1. 地震波的选择

通过傅里叶变换, 将所选地震波曲线转化为如图 10 所示的反应频谱。

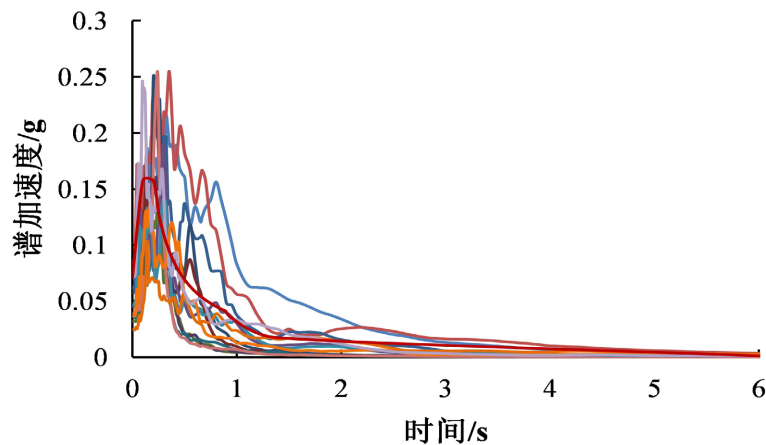
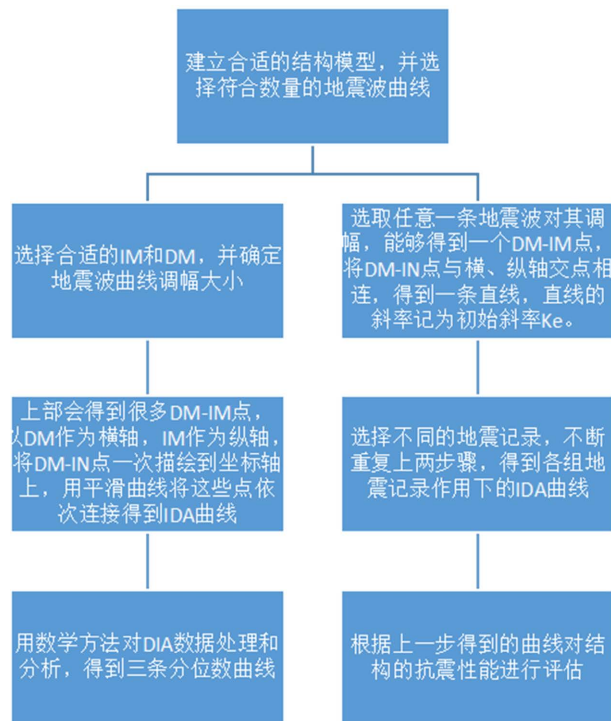


Figure 10. Seismic response spectrum curve  
图 10. 地震反应谱曲线

#### 4.6.2. IDA 的方法流程



### 4.6.3. IDA 结果

结构模型的 IDA 曲线簇可以利用 Origin 软件处理数据, 通过一系列的计算和调整, 得到 16%、50% 和 84% 的三条分位数曲线, 如图 11 所示, 利用分位数回归法处理 IDA 的分析结果。

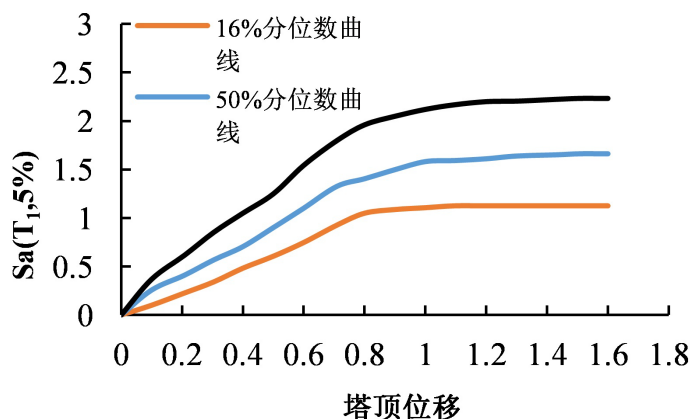


Figure 11. Split curve steel structure concrete wind turbine tower  
图 11. 分位曲线钢结构混凝土风电机组塔

由图 11 可知, IDA 曲线的初始斜率都较大, 随着塔顶位移的增大, 斜率减小, 最终趋近于零。50% 分位数曲线表示结构在各地震动作用下结构响应的平均反应水平, 另外两条分位数曲线可以衡量 IDA 的离散程度, 84% 分位数曲线代表原 IDA 曲线簇中有 84% 的数据小于此曲线上的数据, 较小的数据都位于此曲线的下方; 同样的, 有 16% 的原 IDA 数据比该曲线上的数据小, 较大的数据都位于此曲线的上方。

### 4.6.4. 地震易损性分析

对钢管混凝土风力发电机塔架的 IDA 结果进行线性回归, 建立结构损伤指标的概率需求函数。

### 4.6.5. 地震需求概率模型的建立

假定 IM 和 DM 之间服从指数分布, 则 IM 和 DM 的满足下列关系:

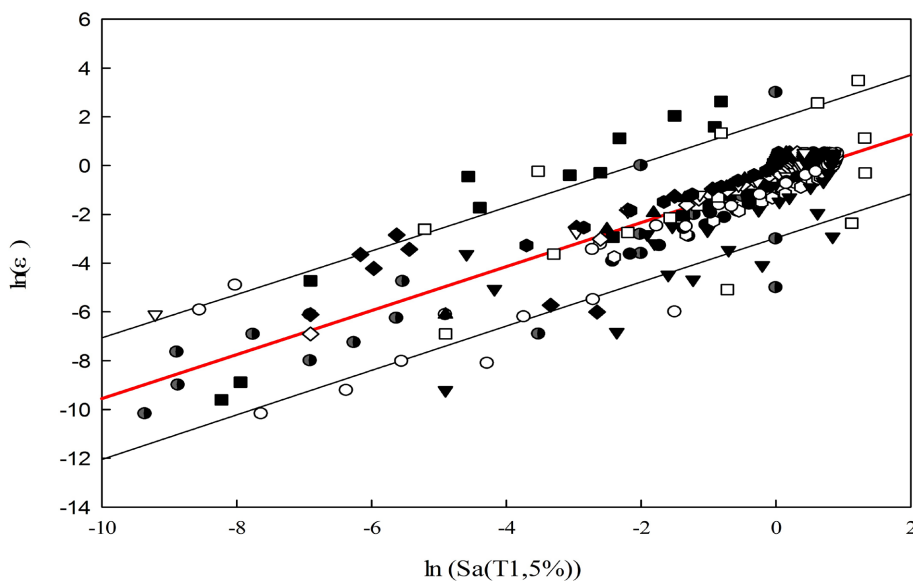


Figure 12. Regression curve of steel tube concrete lattice wind turbine tower  
图 12. 钢管混凝土格构式风力发电机塔架回归曲线

$$\ln(\text{DM}) = \ln(\alpha n + \beta \ln(\text{IM})) \quad (4.1)$$

式(4.1)中的  $\alpha$  和  $\beta$  通过对 IDA 数据进行统计回归得到, 采用 SigmaPlot 软件并选取 95% 的置信度进行回归分析, 可得出各模型的地震需求概率模型, 如图 12 所示。

大部分数据点都落在拟合曲线两边, 这表明整体回归比较准确, 拟合公式为:

$$\ln(\sigma) = -0.4436 + 0.9845 \ln(s_a(T_a, 5\%)) \quad (4.2)$$

#### 4.6.6. 地震易损性曲线

计算所得的 IO、CP 和 GI 三个状态所对应的地震易损性计算模型如下:

$$\text{IO: } P_f = \Phi[2.464 \ln(S_a(T_1, 5\%)) + 1.327];$$

$$\text{CP: } P_f = \Phi[2.464 \ln(S_a(T_1, 5\%)) + 0.238];$$

$$\text{GI: } P_f = \Phi[2.464 \ln(S_a(T_1, 5\%)) - 2.142].$$

相应的易损性结构曲线如图 13 所示:

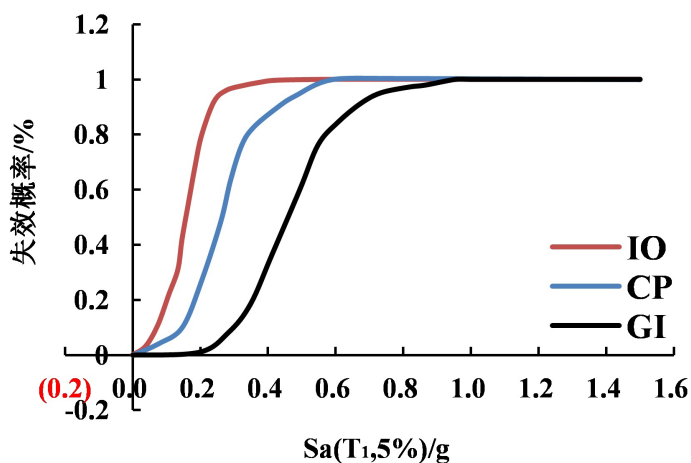


Figure 13. Seismic fragility curve

图 13. 地震易损性曲线

由图 13 可知,  $S_a(T_1, 5\%)$  处于 0~0.6 g 时, IO 失效概率 > CP 失效概率 > GI 失效概率, 这主要是因为地震前期, 塔架刚度较大, 抵抗地震作用能力强。

IO (立即使用)与防止倒塌(CP)和防止倒塌(CP)与整体失稳(GI)之间面积都比较大, 这表明塔架损坏程度的概率随着峰值加速度增大, 上升比较缓慢, 表明钢管混凝土格构式风力发电机塔架有较好的抗震性能。在  $S_a(T_1, 5\%)$  为 0.1 g 时, 超越 IO (立即使用) 概率为 79.9%、超越防止倒塌(CP) 概率为 6.4%、超越整体失稳(GI) 概率为 0%, 表明塔架在地震作用力比较小情况下, 塔架能够很大程度上不发生损坏; 在  $S_a(T_1, 5\%)$  为 0.15 g 时, 超越 IO (立即使用) 概率为 57%、超越防止倒塌(CP) 概率为 10%、超越整体失稳(GI) 概率为 1%, 表明结构在中地震作用下大概率可以修复; 在  $S_a(T_1, 5\%)$  为 0.2 g 时, 超越 IO (立即使用) 概率为 2.3%、超越防止倒塌(CP) 概率为 27.2%、超越整体失稳(GI) 概率为 1.9%, 表明结构在中地震作用下大概率可以修复; 在  $S_a(T_1, 5\%)$  为 0.3 g 时, 超越 IO (立即使用) 概率为 0%、超越防止倒塌(CP) 概率为 69.9%、超越整体失稳(GI) 概率为 10.6%, 这表明在大地震下塔架倒塌概率相对较低。这表明钢管混凝土格构式风力发电机塔架能够满足规范上的三水准设防目标: 小震不坏, 中震可修, 大震不倒。

## 5. 结论

1) 分别采用 ABAQUS 模态分析和钢管混凝土格构式风力发电机塔架地震响应分析这两种方法进行分析有关参数在地震响应分析中的作用。

2) 钢管砼格构式风力发电机塔架的固有频率都比塔架的叶轮频率要高, 所以它和叶轮之间不会产生共振的现象。

3) 只有当地震波达到一定强度时, 塔顶才会有加速反应, 而且刚度越大, 塔顶的加速反应越小。

4) 随着高度的增加, 钢管混凝土格构式风力发电机塔架不断位移; 在同种波型下, 塔架的位移会随着峰值加速度的提高而增大。

## 参考文献

- [1] 陈阳. 地震作用下风电塔筒结构动力响应分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2012.
- [2] Lee, K.-S. and Bang, H.-J. (2012) A Study on the Prediction of Lateral Buckling Load for Wind Turbine Tower Structures. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, **13**, 1829-1836. <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0240-y>
- [3] 吴德俊. 大型风力发电机塔架构件局部屈曲强度及稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [4] 余俊伟. 屋顶水平轴风力机塔架的静动力性能分析[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [5] 张群辉. 钢管混凝土格构式三肢柱风力发电机塔架的受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014.
- [6] 王海军, 孔祥宇. 钢管混凝土格构式风力机塔架的设计[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(3): 253-259.
- [7] 胡浩. 钢管格构式塔架多支管空间节点受力性能及承载力研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [8] 刘新喜, 邓宗伟, 高乾丰. 基于时域法的不同塔架风力机抗台风分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(11): 81-87.
- [9] 游溢, 晏致涛, 陈俊帆, 等. 圆钢管格构式塔架气动力的数值模拟[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(7): 54-60.
- [10] 余传运, 张建润. 输电塔线体系动力特性及风振响应分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 116-124.
- [11] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2007.