

基于 ABAQUS 地震激励下风力机结构损伤分析

闫阳天¹, 岳敏楠¹, 李 春¹, 杨 阳²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. Department of Maritime and Mechanical Engineering, Liverpool John Moores University, Liverpool, Byrom Street, L3 3AF, UK)

摘 要:高耸的风力机塔架结构属于典型的顶部附有大集中质量的细长柔性体的力学结构, 相比传统建筑结构差异性较大, 极易受到地震载荷影响。基于有限元分析软件 ABAQUS 建立风力机塔架、基础平台和土体模型, 通过 FAST 导出风轮非定常推力, 作用在塔顶机舱, 土体底部施加地震加速度时间序列, 进行风力机结构模态分析、稳定性分析和动力学响应分析。研究表明: 塔架主要的运动形式为摇摆运动和弯曲振动; 塔架一阶固有频率为 0.290 Hz, 大于风轮的额定旋转频率 0.202 Hz, 因此叶片旋转不会引起风力机塔架发生共振; 风载荷作用下, 塔架发生横向屈曲, 屈曲位置位于塔架底部且随模态阶数增大而逐渐向上发展, 屈曲因子较大; 地震载荷作用下, 塔架发生纵向屈曲, 屈曲位置同样位于塔架底部且随模态阶数增大而逐渐向上发展, 较风载荷发生屈曲区域相对更大, 屈曲因子相对较小。

关 键 词:风力机; 地震; 有限元; 动力学响应; 屈曲

中图分类号: TK83 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2020.02.035

[引用本文格式] 闫阳天, 岳敏楠, 李 春, 等. 基于 ABAQUS 地震激励下风力机结构损伤分析[J]. 热能动力工程, 2020, 35(2): 244-253. YAN Yang-tian, YUE Min-nan, LI Chun, et al. Structural damage analysis of wind turbine based on ABAQUS earthquake excitation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(2): 244-253.

Structural Damage Analysis of Wind Turbine based on ABAQUS Earthquake Excitation

YAN Yang-tian¹, YUE Min-nan¹, LI Chun¹, YANG Yang²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093; 2. Department of Maritime and Mechanical Engineering, Liverpool John Moores University, Liverpool, Byrom Street, L3 3AF, UK)

Abstract: The tower structure of towering wind turbine is a typical mechanical structure with a slender flexible body with a large concentrated mass at the top. Compared with traditional building structures, it is highly susceptible to seismic loads. Based on the finite element analysis software ABAQUS, models for the wind turbine tower, foundation platform and soil are established. Through FAST, the unsteady thrust of wind turbine is derived, acting on the nacelle on the top of the tower, and the seismic acceleration time series is applied on the bottom of the soil to conduct the modal analysis, stability analysis and dynamic response analysis of wind turbine structure. The following conclusions are drawn: the main motion forms of the tower are rocking motion and bending vibration. The first-order natural frequency of the tower is 0.290 Hz, which is greater than the rated rotational frequency of the wind turbine of 0.202 Hz. The rotation of

收稿日期: 2019-02-22; 修订日期: 2019-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(51676131); 国际(地区)合作与交流项目(51811530315); 上海市“科技创新行动计划”地方院校能力建设项目(19060502200)

Fund-supported Project: The National Natural Science Foundation of China(51676131); The National Natural Science Foundation Project of International (Regional) Cooperation and Exchange Program(51811530315); Shanghai University Science and Technology Innovation Action Plan Local University Capacity Building Project(19060502200)

作者简介: 闫阳天(1994-), 男, 河南许昌人, 上海理工大学硕士研究生, E-mail: yanyangtian_1220@163.com.

通讯作者: 李春(1963-), 男, 北京人, 上海理工大学教授.

the blade does not cause the wind turbine tower to resonate. Under the wind load, the tower undergoes lateral buckling, and the buckling position is located at the bottom of the tower and gradually develops upward with the increase of the modal order, with relatively large buckling factor. Under the action of seismic load, the longitudinal buckling of the tower occurs, and the buckling position is also located at the bottom of the tower and gradually develops upward as the modal order increases. The buckling zone is relatively larger than the wind load, and the buckling factor is relatively small.

Key words: wind turbine, seismic, finite element, dynamic response, buckling

引言

风能作为人类社会最有前景的替代能源之一,其开发利用越来越受到世界各国和地区的重视^[1-2]。我国风能资源丰富的东南沿海区域处于环太平洋地震带,安装于该区域的风力机必然遭受地震的冲击。因此,研究地震载荷对风力机结构动力学响应的影响十分必要。

目前,风力机结构动力学和运动学的方法主要包括有限元法、多体系统和模态分析法。

有限元法(Finite Element Method, FEM)可用于时域仿真,但风力机的结构均进行了一定程度的简化。Bazeo 等人^[3]基于有限元法建立 450 kW 风力机模型,对塔架的振型、地震作用下法兰连接处和门洞附近应力进行分析,但忽视了风轮、机舱及气动载荷对结构动力响应的影响。Lavassas 等人^[4]通过对风力机系统输入地震、重力和风载荷,简化风轮机舱为集中质量点,气动载荷简化为塔架上的推力,对塔架结构进行强度校核和设计计算。基于 MSC. Marc 软件, Ahlstrom^[5]通过梁单元建立风力机塔架有限元模型,模拟极端环境下风力机塔架和叶片的破坏,并与某 180 kW 和某 2 MW 风力机的测试数据展开对比分析。Witcher^[6]通过风力机商业软件 GH Bladed,模拟 2 MW 风力机钢筒塔架在风-震联合作用下的动力学响应。Hacıfendioglu^[7]建立如文献^[6]类似的简化模型,基于土-构耦合效应(Soil-Structure Interaction, SSI)分析 3 MW 海上风力机结构地震动力学响应规律。Smith 等人^[8]将风力机叶片模型简化为管状结构、非定常气动载荷简化为风轮时程推力,基于地震有限元软件 OpenSees 研究不同兆瓦级风力机在风-震联合作用下结构应力分布情况。

模态法基于塔架固有频率、模态振型及结构外形,根据当地环境设计地震反应谱计算地震载荷^[9]。但存在难以克服的局限性:忽略了气动阻尼和高阶模态影响,导致计算结果保守;无法获得结构动力学响应的时域演化特性和结构局部损伤特性。

多体系统建模方法则考虑了系统中柔性构件的弹性变形,适用于由刚体和柔性体组成的复杂刚柔混合系统的力学模型^[10-11]。通过引入“超级单元”模型将其风力机离散为由若干个运动副、弹簧和阻尼器连接的多刚体系统^[12-15]。然而,多体系统建模只能反映结构整体运动特性,无法获取结构局部应力变化,也不能反映地震条件下结构复杂的非线性动力学响应和塑性损伤特征。

2013 年, Case Western Reserve University (CW-RU)对近海风力机进行了振动台实验,发现在地震激励下,风力机塔架易出现侧向位移、旋转和结构沉降^[16]。2014 年,同济大学将一台 96.52 m 的样机按 1/13 的比例进行缩小,模型高度为 7.42 m,利用白噪声试验分析出前两阶模态。通过改变风轮转速来改变其气动阻尼特性,发现气动阻尼随风轮转速增大而增大^[17]。

对于复杂环境下风电结构地震响应的实验研究尚未见报道,以上研究仅侧重某一载荷进行分析,无法获得多载荷下的塔架响应、能量转换和耗散机理。此外,上述风力机结构地震动力学响应研究均未揭示地震和风载荷对风力机结构的损伤,且忽视了地震对土体和基础的影响。

为此,本文以 NERL 5 MW 风力机^[18]为研究对象,基于有限元软件 ABAQUS^[19-20]建立风力机塔架、基础平台和土体模型,定义本构模型参数,通过 FAST 作为前处理输出气动载荷,进行塔架结构的模态分析、屈曲稳定性分析和结构动力学响应分析,揭

示地震载荷下结构的损伤特性,以期为风力机的结构安全设计提供理论参考。

1 有限元建模

1.1 模型建立与网格划分

以 NREL 5 MW 风力机为研究对象,具体参数见表 1 所示。

表 1 NREL 5 MW 风力机主要参数

参 数	数 值
额定功率/MW	5
额定风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	11.4
额定转速/rpm	12.1
风轮直径/m	126
轮毂直径/m	3
塔架高度/m	87.6
轮毂质量/kg	56 780
叶片质量/kg	17 740
机舱质量/kg	240 000
塔架质量/kg	347 460

1.1.1 塔架结构简化与材料、单元选择

NREL 5 MW 风力机塔架结构主要几何参数有:塔底最大直径 6 m,壁厚 0.027 m;塔顶最大直径 3.87 m,壁厚 0.019 m。塔架本构采用线弹性模型^[21],材料采用 Q345 钢,力学性能为:密度 8 500 kg/m^3 ,杨氏模量 210 GPa,泊松比为 0.3,屈服应力为 380 MPa。网格采用 C3D8R 六面体,C 代表实体单元,3D 表示三维,8 指该单元具有的节点数目,C 表示这个单元是缩减积分单元,该单元适用于扭曲大变形问题,可凭借较小的成本得到较好的结果。

通过三维建模软件 UG 进行塔架结构建模,基于 ABAQUS 进行网格划分,生成六面体三维单元网格,节点数目 8 448,网格单元数量 4 200。塔架模型,如图 1 所示。

1.1.2 基础平台建模与材料、单元选择

基础选用 C30 混凝土圆柱平台,平台直径为 19 m,厚度为 6 m,采用混凝土塑性损伤本构模型(Concrete Damaged Plasticity)^[22],材料具体参数如表 2 所示。



图 1 塔架模型
Fig. 1 Tower mode

表 2 C30 材料参数

参 数	数 值
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 400
弹性模量/MPa	26 480
泊松比	0.167
膨胀角/($^{\circ}$)	38
偏心率	0.1
不变应力比	0.666 67
粘聚系数	0.000 05
双轴极限抗压强度/单轴极限抗压强度	1.16

C30 混凝土材料塑性应力-应变关系如图 2 所示。进行基础平台几何模型建立与网格划分,生成六面体三维单元网格,节点数目 2 410,网格单元数量 1 974。基础平台模型如图 3 所示。

1.1.3 土体建模与材料、单元选择

为消除土体边界条件对模拟结果的影响,土体半径取 10 倍基础,即 95 m,厚度取 50 m,模拟无限大土体^[23-24]。土体本构选用 Mohr-Coulomb 本构模型^[25],模型参数如表 3 所示。

表 3 土体本构参数

参 数	数 值
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1 500
弹性模量/MPa	60
泊松比	0.35
摩擦角/($^{\circ}$)	22.5
膨胀角/($^{\circ}$)	18
内聚力/MPa	29.14

进行土体几何模型建立与网格划分,生成六面

体三维单元网格,节点数目 10 142,网格单元数量 8 956。基础平台模型如图 4 所示。

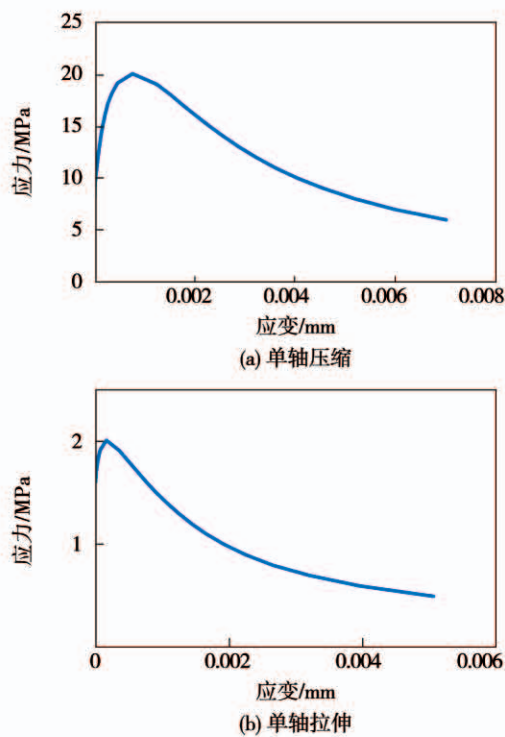


图 2 单轴压缩、拉伸应力-应变曲线

Fig.2 Uniaxial compression,tensile stress-strain curve

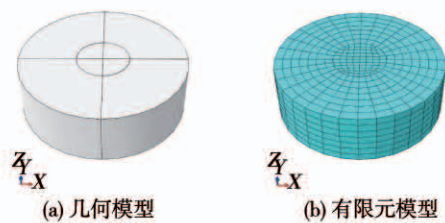


图 3 基础平台模型

Fig.3 Basic platform model

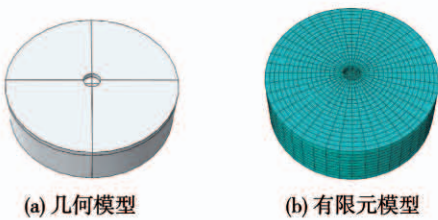


图 4 土体模型
Fig.4 Soil model

1.2 边界条件设置及载荷添加

1.2.1 接触设置

在 ABAQUS/CAE Assembly 模块进行塔架、基础和地基 3 个部件的组装,塔架底部平面与基础平台上表面设置 Tie 接触,平台与土体间的接触采用接触对(Contact pair),分为两种:法向接触采用硬接触(Hard),切向接触采用粗糙摩擦(Rough),摩擦系数(Friction Coeff)取 0.8。整机组装模型如图 5 所示。

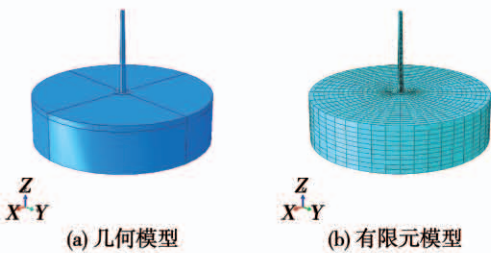


图 5 整机组装模型
Fig.5 Machine assembly model

1.2.2 载荷及边界

由 NREL 5 MW 设计参数可知机舱、轮毂及叶片的质心位置及转动惯量^[18],如表 4 所示。

表 4 塔顶集中质量点的参数

Tab.4 Parameters of the mass point at the top of the tower

质量/kg	距塔顶中心相对位置/m		转动惯量/kg·m ²				
	x	z	xx	yy	zz	xy	xz
3.5×10 ⁵	-0.413 77	1.966 98	4.370×10 ⁷	2.353×10 ⁷	2.542×10 ⁷	0	1.169×10 ⁶

对集中质量点与塔顶表面施加耦合接触(coupling),使两者保持相同的自由度,定义塔架轮毂高度处的风速为额定风速,即 11.4 m/s,通过 FAST 计算风轮推力,作用在塔顶的集中质量点,风轮推力时

程曲线如图 6 所示。
地震的发生一般从震源以横波和纵波的形式传递至地表,因此在土体底部施加载荷。加速度时程曲线和土体底部载荷的施加如图 7 所示。

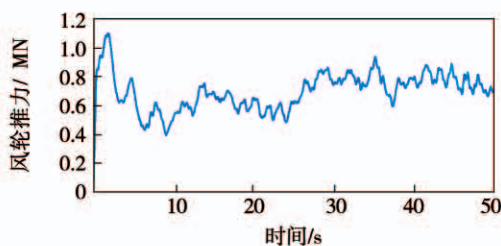
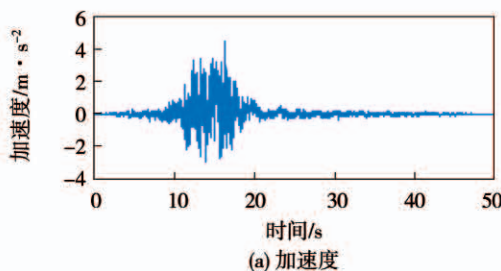
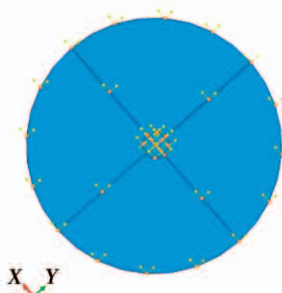


图6 风轮推力时程曲线

Fig.6 Wind wheel thrust time history curve



(a) 加速度



(b) 载荷

图7 加速度时程曲线和施加土体底部载荷

Fig.7 Acceleration time history curve and bottom load applied to the soil

2 结果分析

2.1 模态分析

模态是结构系统的固有振动特性,结构系统的自由振动可以被分解为 N 个正交的单自由度振动,即结构系统的 N 阶模态。每一阶模态对应的参数有固有频率、阻尼比和模态振型,这些模态参数可以由计算或试验分析取得,计算或试验分析的过程称为模态分析。通过有限元计算方法分析结构模态,称为计算模态分析;基于试验通过参数识别方法处理系统输入和输出信号以获取结构模态参数,这一过程称为试验模态分析。结构的振动模态是结构固有的、整体的振动特性,通过结构的模态分析,可以获取结构在某一频段内各阶模态的振动特性,从而

预测结构在内部、外部激励或环境载荷下的振动响应,为结构设计和故障诊断提供理论基础和技术方法。

2.1.1 模态分析理论和方法

由牛顿力学可知,物体的动力学方程为:

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

式中: $[M]$ —质量矩阵; $[C]$ —阻尼矩阵; $[K]$ —刚度矩阵; $\{\ddot{x}\}$ —加速度向量, m/s^2 ; $\{\dot{x}\}$ —速度向量, m/s ; $\{x\}$ —位移向量, m ; $\{F(t)\}$ —变载荷向量, N 。

模态分析假定 $F(t) = 0$, 阻尼矩阵一般忽略不计, 所以模态分析的运动方程为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (2)$$

由结构力学与振动理论可知,结构自由振动为简谐运动,即位移 x 为:

$$x = X \cos(\omega_i t - \psi) \quad (3)$$

代入式(2):

$$[K] - \omega_i^2 [M]\{x\} = \{0\} \quad (4)$$

式中: ω_i —角频率。

结构振动自然频率为 $f = \omega_i / 2\pi$, 每一个角频率 ω_i 对应的向量 $\{x\}_i$ 为振动频率 $f = \omega_i / 2\pi$ 对应的振型。

ABAQUS 较为常见的模态分析的方法有: Lanczos、Subspace 和 AMS (Automatic Multi-level Substructuring)。

2.1.2 塔架模态分析

采用 Lanczos 方法进行塔架结构的模态分析, 进行模态分析计算时, 应考虑塔顶上部结构(风轮、轮毂和机舱等)对风力机塔架的影响, 拟采用集中质量点的方法模拟上部结构对塔架振型和振动频率的影响。

基于 ABAQUS 模态分析模块计算得风力机塔架前 4 阶的固有振动频率与振型如表 5 和图 8 所示, 并与 FAST 前两阶计算结果进行对比, 验证了模型的准确性和计算精度。

由图 8 模态振型可以看出, 风力机塔架 1 阶振型为不同方向的摆动; 2 阶和 3 阶振型为不同方向的弯曲振动; 第 4 阶前后方向振型为 1 阶弯曲振动, 侧向发生了扭转振动。由结构振动理论可知, 风力机塔架结构振动能量主要集中低阶频率, 即塔架振

动主要以摆动和弯曲振动为主。

表 5 风力机塔架前 4 阶固有频率
Tab.5 First four orders of natural frequencies of Wind turbine tower

阶数		本文	FAST
1	x	0.290	0.32
	y	0.293	0.31
2	x	1.859	2.035
	y	2.041	2.439
3	x	4.375	3.968
	y	4.536	3.968
4	x	9.501	10.882
	y	10.161	10.882

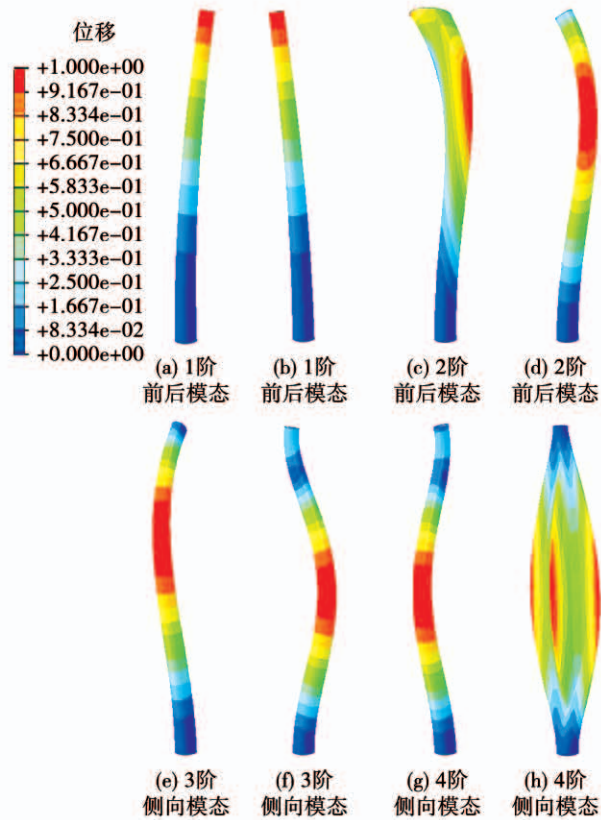


图 8 塔架前 4 阶模态振型

Fig.8 4th order mode shape of the tower

在塔架结构设计中通常会考虑塔架振动频率与风轮旋转频率的差值,避免发生共振,影响结构安全和平稳运行。NREL 5 MW 风力机风轮额定转速为 12.1 r/min,最低转速 7.3 r/min,对应的单个叶片旋转频率变化范围为 0.122 ~0.202 Hz。三叶片旋转频率变化范围为:0.367 ~0.606 Hz。为避免共振影

响风力机运行安全,风力机叶片和塔架等主要运动部件的固有频率应避开单叶片和三叶片旋转频率变化范围,介于单叶片和三叶片之间的频率带一般被认为是塔架低阶模态固有频率的理想设计区间,即 0.202 ~0.367 Hz。由表 5 可知,塔架 1 阶固有频率为 0.290 Hz,介于理想设计区间内,因此风轮旋转不会引起风力机塔架发生共振,塔架结构是安全的。

基于开源软件 FAST 计算得风力机塔架 1 阶固有频率为 0.32 Hz,与 ABAQUS 计算结果相比存在偏差,这主要是因为有限元分析时没有考虑门洞和法兰连接的影响,且网格的划分对模态分析的结果也有影响,误差在可接受范围内,证明了模型建立的合理性。

2.2 塔架稳定性分析

受一定荷载作用的结构处于稳定的平衡状态,当荷载达到某一值后,若再给结构一个微小的载荷增量,结构的平衡位置将发生较大的偏离,结构由原平衡状态经过不稳定的平衡状态而达到一个新的稳定的平衡状态,这一过程就称为失稳或屈曲,相应的荷载称为临界荷载或屈曲荷载。屈曲分析主要用于研究结构在特定载荷下的稳定性以及确定结构失稳的临界载荷,屈曲分析包括:线性屈曲和非线性屈曲分析,线性屈曲又称为线弹性失稳分析或特征值屈曲分析。

线性屈曲基于小位移和小应变的线性理论,不考虑几何非线性影响,其平衡方程为:

$$([K_L] + \lambda[K_\sigma])\{x\} = \{0\}$$
 (5)

式中: $[K_L]$ —线性刚度矩阵; $[K_\sigma]$ —初应力刚度矩阵; $\{x\}$ —位移特征矢量; λ —特征值,即屈曲因子。

结构的线性稳定问题就是求解特征值的问题,求得的特征值和特征向量分别表示临界屈曲载荷和对应的屈曲模态。

塔架屈曲分析采用结构化网格对塔架模型进行划分,在塔架底部施加全约束,风载荷通过 FAST 输出风轮推力,作用于塔顶上方的集中质量点,得到塔架前 4 阶屈曲分析结果,如图 9 所示。

由图 9 可以发现,风载荷作用下塔架底部区域发生局部屈曲,不同阶数塔架屈曲形式基本一致,但随着阶数的提高,屈曲发生区域逐渐扩大,且向着塔

架中部区域发展。风载荷作用下塔架屈曲形式为横向,可能发生的破坏为横向断裂。

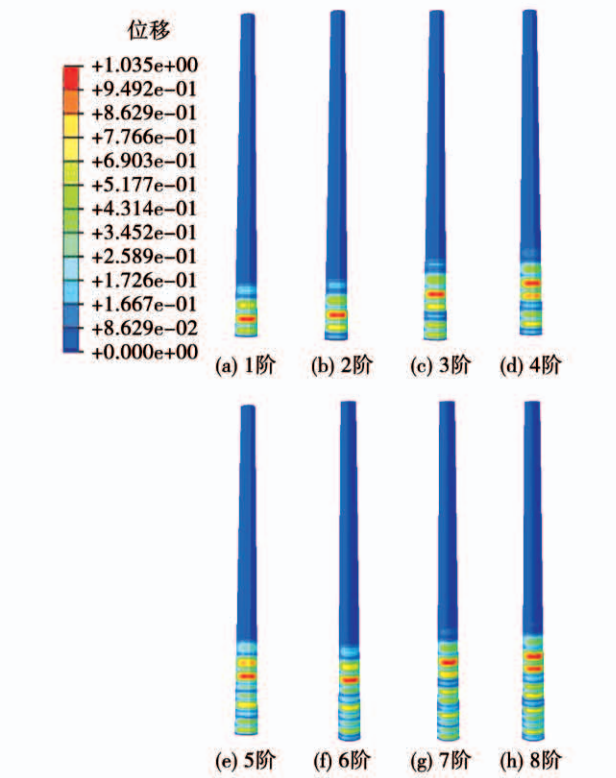


图 9 风载作用下塔架前 8 阶屈曲分析
Fig.9 Analysis of the first 8 orders of buckling of the tower under wind load

风载荷作用下,塔架各阶屈曲因子随阶数增加而增大,如表 6 所示。

对塔架底部施加全约束,并对塔底施加地震载荷,得到地震作用下塔架前四阶的屈曲分析结果,如图 10 所示。

表 6 风载荷作用下塔架前 8 阶屈曲因子
Tab.6 Buckling factors of first 8 orders of tower under wind load

阶数	屈曲因子
1 阶	19.674
2 阶	19.833
3 阶	20.583
4 阶	20.754
5 阶	21.407
6 阶	21.591
7 阶	22.203
8 阶	22.399

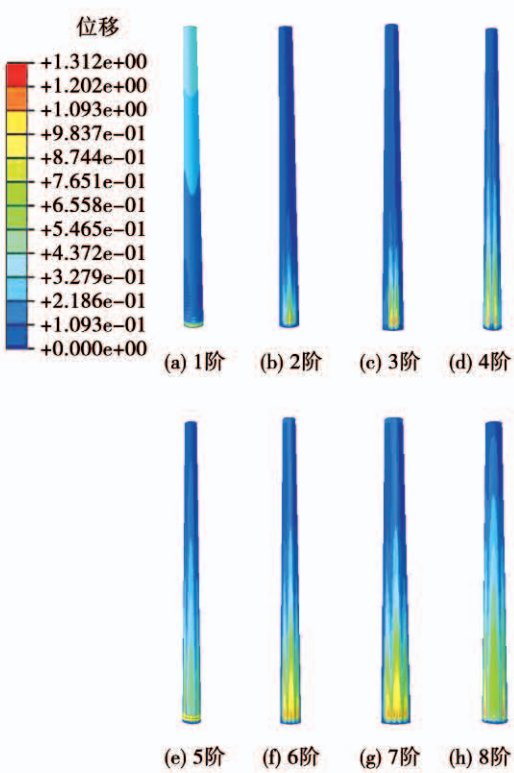


图 10 地震作用下塔架前 8 阶屈曲分析
Fig.10 Analysis of the first 8 orders of buckling of the tower under earthquake

由图 10 所示,地震载荷激励下塔架 1 阶屈曲发生在塔底和塔架中上部区域,随着阶数增大,塔架发生屈曲区域由塔架底部逐渐向中部延伸,屈曲发生面积逐渐增大。与风载荷作用下的屈曲形式不同,地震载荷作用下的塔架屈曲沿纵向发展。

地震载荷作用下,塔架各阶屈曲因子随阶数增加而增大,如表 7 所示。

表 7 地震载荷作用下塔架前 8 阶屈曲因子
Tab.7 The first 8 orders of buckling factors of the tower under earthquake loading

阶数	屈曲因子
1 阶	1.894
2 阶	1.970
3 阶	1.977
4 阶	2.782
5 阶	2.803
6 阶	3.007
7 阶	3.477
8 阶	3.611

综上,不同载荷作用下塔架屈曲形式、屈曲位置和屈曲因子不同。风载荷作用下,塔架发生横向屈曲,屈曲位置位于塔架底部且随阶数增大而逐渐向上发展,屈曲因子较大;地震载荷作用下,塔架发生纵向屈曲,屈曲位置同样位于塔架底部且随阶数增大而逐渐向上发展,较风载荷发生屈曲区域相对更大,屈曲因子相对较小,但均大于 1。即塔架安全满足稳定性要求,且随阶数增加塔架越发稳定。

2.3 塔架动力响应分析

塔架在地震和风载联合作用下塔架的加速度响应云图如图 11 所示。

由图 11 塔架加速度响应云图可以看出,塔架整体加速度响应随时间先增大后减小,在 40 s 左右达到最大值;塔架加速度响应值随高度增加而增大,在塔顶处达到最大值。

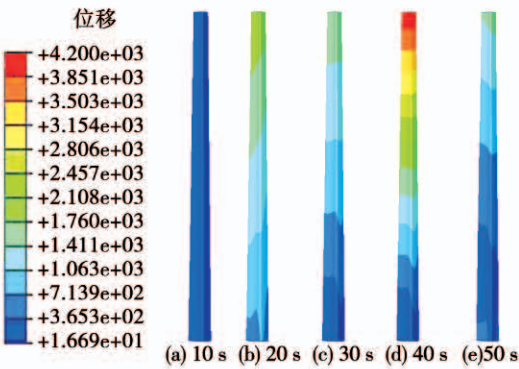


图 11 塔架加速度响应云图
Fig. 11 Contour of tower acceleration response

在上部结构自身重力、运动挤压以及地震载荷作用下基础平台与土体的接触处会出现一定的应力集中,如图 12 所示。

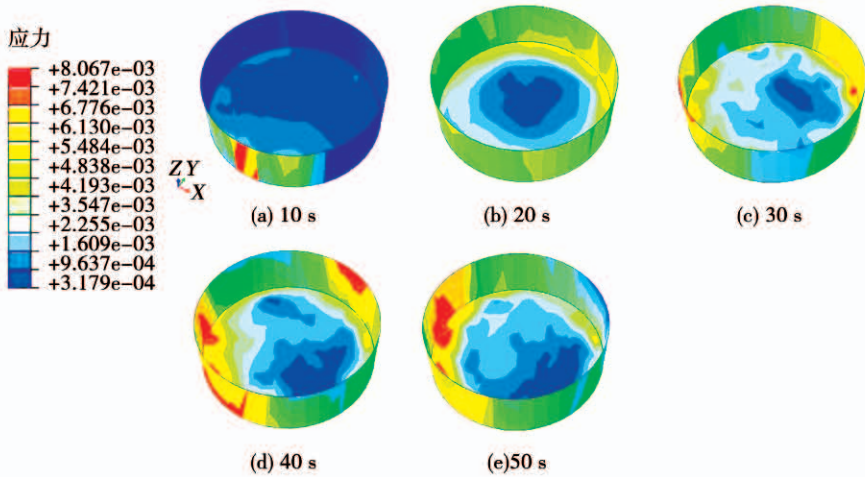


图 12 土体与基础平台接触处的应力云图
Fig. 12 Stress contour of the contact between the soil and the foundation platform

3 结 论

基于有限元分析软件 ABAQUS 建立风力机塔架、基础平台和土体模型,通过 FAST 导出风轮非定常推力,作用在塔顶机舱,土体底部施加地震加速度时间序列,进行风力机结构模态分析、稳定性分析和动力学响应分析,主要得出以下结论:

- (1) 塔架主要的运动形式为摇摆运动和弯曲振动;塔架一阶固有频率为 0.290 Hz,大于风轮的额定旋转频率 0.202 Hz,因此叶片旋转不会引起风力机塔架发生共振。
- (2) 不同载荷作用下塔架屈曲形式、屈曲位置

和屈曲因子不同。风载荷作用下,塔架发生横向屈曲,屈曲位置位于塔架底部且随阶数增大而逐渐向上发展,屈曲因子较大;地震载荷作用下,塔架发生纵向屈曲,屈曲位置同样位于塔架底部且随阶数增大而逐渐向上发展,较风载荷发生屈曲区域相对更大,屈曲因子相对较小。

- (3) 塔架整体加速度响应随时间先增大后减小,在 40 s 左右达到最大值,且加速度响应值随高度增加而增大,在塔顶处达到最大值;塔架因地震作用下土体和平台的偏移而产生整体的位移;基础平台与土体接触处出现了较为明显的应力集中。

参考文献:

- [1] 杨 阳,李 春,张万福,等.气动阻尼及地震强度对风力机动力学特性影响研究[J].工程热物理学报,2017(12): 2588-2594.
YANG Yang, LI Chun, ZHANG Wan-fu, et al. Research on the impact of aerodynamic damping and earthquake intensity for the dynamic behavior of wind turbine[J]. Journal of engineering thermophysics, 2017(12): 2588-2594.
- [2] 刘中胜,李 春,杨 阳,等.基于土基-结构耦合作用的风力机塔架地震时频特性分析[J].热能动力工程,2018,33(2): 129-136.
LIU Zhong-sheng, LI Chun, YANG Yang, et al. Analysis of the seismic time-frequency characteristic of the derrick of a wind turbine under a soil-foundation-structure coupled action[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(2): 129-136.
- [3] BAZEOS N, HATZIGEORGIOU G D, HONDROS I D, et al. Static, seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower[J]. Engineering Structures, 2002, 24(8): 1015-1025.
- [4] LAVASSAS I, NIKOLAIDIS G, ZERVAS P, et al. Analysis and design of the prototype of a steel 1-MW wind turbine tower[J]. Engineering structures, 2003, 25(8): 1097-1106.
- [5] AHLSTROM A. Aeroelastic simulation of wind turbine dynamics [D]. Royal Institute of Technology, Sweden, 2005.
- [6] WITCHER D. Seismic analysis of wind turbines in the time domain [J]. Wind Energy, 2005: 81-91.
- [7] HACIEFENDIOĞLU K. Stochastic seismic response analysis of offshore wind turbine including fluid-structure-soil interaction [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2012, 21(12): 867-878.
- [8] SMITH V, MAHMOUD H. Multihazard assessment of wind turbine towers under simultaneous application of wind, operation, and seismic loads [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(6): 04016043.
- [9] 季 亮,祝 磊,叶翔翔.风力发电机组塔架底部地震剪力、弯矩计算方法研究[J].土木工程学报,2013,46(S1):298-303.
JI Liang, ZHU Lei, YE Zhen-xiang. Seismic calculation methods of base shear and moment for wind turbines [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S1): 298-303.
- [10] 季 亮,祝 磊,姚小芹,等.现有风力发电机组地震作用计算方法对5 MW风力发电机组的适用性研究[J].太阳能学报,2014,35(11):2300-2305.
JI Liang, ZHU Lei, YAO Xiao-qin, et al. Applicability of existing seismic calculation methods for wind turbines on a 5 MW wind turbine [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2014, 35(11): 2300-2305.
- [11] ISHIHARA T, SARWAR M W. Numerical and theoretical study on seismic response of wind turbines [C]. European Wind Energy Conference and Exhibition. Brussels: 2008.
- [12] DAI K S, HUANG Y C, GONG C Q, et al. Rapid seismic analysis methodology for in-service wind turbine towers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 14(3): 539-548.
- [13] JIN Xin, LI Lang, JU Wen-bin, et al. Multibody modeling of varying complexity for dynamic analysis of large-scale wind turbines [J]. Renewable Energy, 2016(90): 336-351.
- [14] LI Y, CASTRO A M, SINOKROTT, et al. Coupled multi-body dynamics and CFD for wind turbine simulation including explicit wind turbulence [J]. Renewable Energy, 2015(76): 338-361.
- [15] 李德源,莫文威,严修红,等.基于多体模型的水平轴风力机气弹耦合分析[J].机械工程学报,2014,50(12): 140-150.
LI De-yuan, MO Wen-wei, YAN Xiu-hong, et al. Aeroelastic analysis of horizontal axis wind turbine based on multi-body model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(12): 140-150.
- [16] 周传捷,李德源,赵世林.风力机柔性叶片的混合多体模型研究[J].太阳能学报,2010,31(8):1011-1017.
ZHOU Chuan-jie, LI De-yuan, ZHAO Shi-lin. Research for the hybrid multiply systems model of the flexible blade of horizontal axis wind turbines [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2010, 31(8): 1011-1017.
- [17] Ebrahimi A, Movahhedi M. Power improvement of NREL 5-MW wind turbine using multi-DBD plasma actuators [J]. Energy Conversion and Management, 2017(146): 96-106.
- [18] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5 MW reference wind turbine for offshore system development [R]. National Renewable Energy Laboratory, 2009, NREL/TP 500-38060. Passon P. Memorandum: derivation and description of the soil-pile-interaction models [J]. IEA-Annex XXIII Sub-task, 2006, 2.
- [19] 齐 威. ABAQUS6.14 超级学习手册 [M]. 北京:人民邮电出版社,2016.
QI Wei. ABAQUS6.14 Super learning manual [M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2016.
- [20] 潘萍萍.大型风力机塔架动响应特性及失效机理研究 [D]. 沈阳:沈阳工业大学,2013.
PAN Ping-ping. Study on the dynamic characteristic and failure mechanism of the large-scale wind turbine tower [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [21] 费 康,张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用 [M]. 北京:

中国水利水电出版社,2013.

FEI Kang,ZHANG Jian-wei. Application of ABAQUS in geotechnical engineering [M]. Beijing: China Water and Power Press,2013.

[22] 黄景琦. 岩体隧道非线性地震响应分析[D]. 北京:北京工业大学,2015.

HUANG Jing-qi. Nonlinear seismic response analysis of rock mass tunnel[D]. Beijing:Beijing University of Technology,2015.

[23] 刘梅梅,杨 敏. 风力机基础环与混凝土间相互作用研究[J]. 太阳能学报,2017,38(7):1973 – 1978.

LIU Mei-mei,YANG Min. Interaction between foundation ring and concrete of wind turbine[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2017,38(7):1973 – 1978.

[24] 张灵熙,蔡 新,潘 盼,等. 海上风力机大直径单桩数值模拟对比分析[J]. 三峡大学学报,2015,37(2):51 – 54.

ZHANG Ling-xin,CAI Xin,PAN Pan,et al. Numerical simulation comparative analysis of large diameter pile for offshore wind turbine[J]. Journal of China Three Gorges University,2015,37(2):51 – 54.

[25] 费 康,彭 劼. ABAQUS 岩土工程实例详解[M]. 北京:人民邮电出版社,2017.

FEI Kang,PENG Jie. Detailed examples of ABAQUS geotechnical engineering[M]. Beijing:The People’s Posts and Telecommunications Press,2017.

(金圣迪 编辑)

(上接第 229 页)

[6] PAIS M,TILTON D,CHOW L,et al. High-heat-flux, Low-super-heat Evaporative Spray Cooling[C]. 27th AIAA Aerospace Sciences Meeting,2013.

[7] CUI Q,CHANDRA S,MCCAHAN S. The effect of dissolving salts in water sprays used for quenching a hot surface: Part 2—spray cooling [J]. Heat Transfer—Trans ASME125, 2003, 125: 333 – 338.

[8] ABDALRAHMAN K H M,SABARIMAN,SPECHT E. Influence of salt mixture on the heat transfer during spray cooling of hot metals [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2014,78(7): 76 – 83.

[9] SASAKI K,SUGITANI Y,KAWASAKI M. Heat transfer in spray cooling on hot surface[J]. Tetsu- to- Hagane,2010,65(90):90 – 96.

[10] ZHANG Y,PANG L P,XIE Y Q,et al. Experimental investigation of spray cooling heat transfer on straight fin surface under acceleration conditions[J]. Experimental Heat Transfer,2015,28(6): 564 – 579.

[11] GAO X,LI R. Effects of nozzle positioning on single-phase spray cooling[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2017, 115:1247 – 1257.

[12] RYBICKI J R,MUDAWAR I. Single-phase and two-phase cooling characteristics of upward-facing and downward-facing sprays[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2006,49(1): 5 – 16.

[13] SILK E A,KIM J,KIGER K. Spray cooling of enhanced surfaces: Impact of structured surface geometry and spray axis inclination [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2006,49(25):4910 – 4920.

[14] WENDELSTORF J,SPITZER K H,WENDELSTORF R. Spray water cooling heat transfer at high temperatures and liquid mass fluxes[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2008, 51(19/20):4902 – 4910.

[15] LIANG G T,MUDAWAR I. REVIEW OF SPRAY COOLING-PART 2: HIGH TEMPERATURE BOILING REGIMES and quenching applications[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2017,115:1206 – 1222.

[16] PENG Can,XU Xiang-hua,LIANG Xin-gang. Experimental study on temperature variation patterns and deterioration of spray cooling with R21[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2018,121:1159 – 1167.

(丛 敏 编辑)