

# 基于FAST的近海单桩风机地震响应分析

徐亚洲,段静,张祖祯,毛荟楠

(西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

**摘要:**为研究近海单桩风机塔架地震动力响应特性,以FAST v7软件为基础自编程开发地震分析模块,形成风机地震动力学耦合仿真平台S-FAST,并采用ABAQUS和Seismic软件验证其有效性。基于扩充的S-FAST平台,计算NREL 5 MW近海单桩风机塔架在湍流风、非规则波浪和地震作用下的动力响应。结果表明:地震是塔顶振动的控制荷载,风浪荷载可有效抑制塔顶振动;塔基面内弯矩主要由地震荷载引起,风浪荷载主要影响塔基面外弯矩;风浪荷载引起的塔基面外弯矩占风、波浪和地震耦合作用工况的69%;风浪荷载和地震荷载之间存在非线性耦合关系,结构设计时应采用全耦合的方法进行结构响应计算。

**关键词:**FAST;近海单桩风机;地震分析模块;结构动力响应

中图分类号:TK83 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.09.020

[引用本文格式]徐亚洲,段静,张祖祯,等.基于FAST的近海单桩风机地震响应分析[J].热能动力工程,2022,37(9):161-169. XU Ya-zhou, DUAN Jing, ZHANG Zu-zhen, et al. Seismic response analysis of monopile offshore wind turbine based on FAST[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(9):161-169.

## Seismic Response Analysis of Monopile Offshore Wind Turbine based on FAST

XU Ya-zhou, DUAN Jing, ZHANG Zu-zhen, MAO Hui-nan

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, China, Post Code: 710055)

**Abstract:** In order to study the seismic dynamic response characteristics of monopile offshore wind turbine tower, the seismic analysis module was developed by self-programming based on FAST v7 to form the wind turbine seismic dynamic coupling simulation platform S-FAST, and its effectiveness was verified by ABAQUS and Seismic softwares. Based on the extended S-FAST platform, the dynamic response of NREL 5 MW monopile offshore wind turbine tower under the actions of turbulent wind, irregular wave and earthquake was calculated. The results show that earthquake is the control load of tower top vibration, and wind wave load can effectively suppress tower top vibration. The in-plane bending moment of the tower base is mainly caused by seismic load, and wind wave load mainly affect the out-of-plane bending moment of the tower base. The calculation example shows that the out-of-plane bending moment of the tower base caused by wind wave load accounts for 69% of the coupled wind, wave and earthquake condition. There is a nonlinear coupling relationship between wind wave load and seismic load. The full coupling method should be used for structural response calculation in structural design.

**Key words:** FAST, monopile offshore wind turbine, seismic analysis module, structural dynamic response

收稿日期:2021-09-18; 修订日期:2021-11-09

基金项目:国家自然科学基金(51578444);陕西省教育厅重点科学研究计划项目(20JY032)

**Fund-supported Project:** National Natural Science Foundation of China(51578444); Key Scientific Research Project of Shaanxi Provincial Department of Education(20JY032)

作者简介:徐亚洲(1978-),男,陕西榆林人,西安建筑科技大学教授。

通讯作者:段静(1996-),男,四川广安人,西安建筑科技大学硕士研究生。

## 引言

为获得更高的发电功率,海上单桩风机高度已突破百米,这种高耸结构常年受到风浪荷载作用,地震发生时支撑结构存在安全隐患<sup>[1]</sup>。因此,开展近海风机塔架地震动力响应分析对结构安全评估具有重要意义。

关于风机塔架抗震研究,国内外学者做了大量工作。早期研究倾向于将风轮和机舱简化为集中质量<sup>[2-3]</sup>,但 Patil 等人<sup>[4]</sup>发现,简化的建模方法对塔架高阶模态振型影响较大,地震诱发高阶模态将导致计算结果出现偏差。认识到整体建模的重要性,戴靠山等人<sup>[5]</sup>采用 ABAQUS 软件建立某 1.5 MW 风机精细化模型,探讨了风机塔筒在极端动荷载作用下的破坏规律。徐亚洲等人<sup>[6]</sup>开展某 2 MW 风机缩尺振动台试验,分析了近断层地震动速度脉冲对风机塔架的影响。

上述研究多数仅考虑了地震荷载,随着风机大型化,气动力对兆瓦级风机的影响已不可忽略<sup>[7]</sup>。为考虑气动力的影响,Smith 和 Asareh 等人<sup>[8-9]</sup>将风荷载以推力时程加载到塔顶,对风和地震联合作用下的风机开展了研究。Prowell 和 Asareh 等人<sup>[10-11]</sup>基于开源软件 FAST 开发了地震分析软件 Seismic,比较了 5 MW 风机在 3 种典型运行方式下的负载情况。杨阳等人<sup>[12]</sup>采用 Wolf 方法建立土-结构耦合模型,分析了湍流风和地震联合作用对风机动态响应的影响。

对于近海单桩风机,闫阳天等人<sup>[13]</sup>研究了 10 MW 风机在湍流风和地震作用下的动态响应。Mo 等人<sup>[14]</sup>采用 OpenSees 软件研究了地震动方向效应对 5 MW 近海单桩风机动力响应的影响。Yang 等人<sup>[15]</sup>在 FAST 软件基础上采用模态加速度法开发了地震分析框架 SAF 软件,研究发现,风浪荷载对结构地震响应有显著影响。

本文基于 FAST v7<sup>[16]</sup>采用新的思路推导和开发地震分析模块,搭建气动-水动-地震-伺服-弹性耦合仿真平台 S-FAST,设置 3 个工况对比分析 NREL 5 MW 近海单桩风机塔架在风、波浪和地震作用下的耦合动态响应特性。

## 1 风机地震动力学耦合仿真平台搭建

### 1.1 FAST 仿真软件介绍

FAST(Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence)是一种气动-水动-伺服-弹性耦合非线性时域仿真软件,它将空气动力学模型、海上结构流体动力学模型、控制和电气系统动力学模型以及结构动力学模型结合在一起,用于模拟两叶片或三叶片水平轴风机的耦合动态响应。该软件由美国可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)开发并维护,因其具有较高的计算精度且代码开源,被国内外研究学者广泛使用。

### 1.2 多体动力学模型

FAST 使用 Kane 方法建立风机系统动力学方程,对于具有 24 个自由度的三叶片风机系统,其动力学方程为:

$$F_r + F_r^* = 0 (r = 1, 2, \dots, 24) \quad (1)$$

式中:  $F_r$ —风机系统所受的广义主动力;  $F_r^*$ —广义惯性力。

具有质量的部件所受广义惯性力的和构成了动力学方程中的广义惯性力项  $F_r^*$ , 即:

$$F_r^* = F_r^*|_X + F_r^*|_T + F_r^*|_N + F_r^*|_H + F_r^*|_B \quad (2)$$

式中:  $F_r^*|_X$ ,  $F_r^*|_T$ ,  $F_r^*|_N$ ,  $F_r^*|_H$  和  $F_r^*|_B$ —基础平台、塔架、机舱、轮毂和叶片产生的广义惯性力。

所有作用在风机系统上的力产生的广义主动力构成了动力学方程中的广义主动力项  $F_r$ , 其表达式为:

$$F_r = F_r|_{Aero} + F_r|_{Hydro} + F_r|_{Grav} + F_r|_{others} \quad (3)$$

式中:  $F_r|_{Aero}$ ,  $F_r|_{Hydro}$ ,  $F_r|_{Grav}$  和  $F_r|_{others}$ —气动力、水动力、重力和其他力产生的广义主动力。其他力主要包括柔性结构的弹性恢复力、风机系统的阻尼力、偏航和变桨系统的弹簧阻尼力以及发电机的扭矩等。

当计算出所有的广义主动力和广义惯性力,将式(2)和(3)代入式(1)中即可建立起风机系统动力学方程。FAST 采用四阶 Runge-Kutta 法和四阶 Adams-Bashforth 预测-校正方法对上述动力学方程进行时间推进求解。

### 1.3 地震分析模块的开发

目前,FAST发布的版本无法直接进行近海单桩风机在湍流风、非规则波浪和地震激励下的耦合仿真计算。针对这一问题,将地震荷载以等效地震力的形式施加在风机结构上,来实现在FAST v7中添加地震分析功能。

对于传统的三叶片水平轴风机系统,等效地震力产生的广义主动力  $F_r |_{\text{Seismic}}$  主要由以下几部分组成:

$$F_r |_{\text{seismic}} = F_r |_{\text{seisX}} + F_r |_{\text{seisT}} + F_r |_{\text{seisN}} + F_r |_{\text{seisH}} + F_r |_{\text{seisB}} \quad (r = 1, 2, \dots, 24) \quad (4)$$

式中:  $F_r |_{\text{seisX}}$ ,  $F_r |_{\text{seisT}}$ ,  $F_r |_{\text{seisN}}$ ,  $F_r |_{\text{seisH}}$  和  $F_r |_{\text{seisB}}$  作用在风机系统基础平台、塔架、机舱、轮毂和叶片上的等效地震力产生的广义主动力,其具体计算公式为:

$$F_r |_{\text{seisX}} = {}^E \mathbf{v}_r^Y \cdot (-m^X \mathbf{a}_{eq}) \quad (5)$$

$$F_r |_{\text{seisT}} = -\int_0^H \boldsymbol{\mu}^T(h) {}^E \mathbf{v}_r^T(h) \mathbf{a}_{eq} dh \quad (6)$$

$$F_r |_{\text{seisN}} = {}^E \mathbf{v}_r^U \cdot (-m^N \mathbf{a}_{eq}) \quad (7)$$

$$F_r |_{\text{seisH}} = {}^E \mathbf{v}_r^C \cdot (-m^H \mathbf{a}_{eq}) \quad (8)$$

$$F_r |_{\text{seisB}} = -\sum_{i=1}^3 \int_0^R \boldsymbol{\mu}^{B_i}(r) {}^E \mathbf{v}_r^{S_i}(r) \mathbf{a}_{eq} dr \quad (9)$$

式中:  ${}^E \mathbf{v}_r^Y$ ,  ${}^E \mathbf{v}_r^U$  和  ${}^E \mathbf{v}_r^C$  基础平台、机舱和轮毂质量中心在惯性系  $E$  中第  $r$  偏线速度矢量;  ${}^E \mathbf{v}_r^T(h)$  和  ${}^E \mathbf{v}_r^{S_i}(r)$  塔架和第  $i$  个叶片质量点在惯性系  $E$  中第  $r$  偏线速度矢量;  $m^X$ ,  $m^N$  和  $m^H$  基础平台、机舱和轮毂质量;  $\boldsymbol{\mu}^T(h)$  和  $\boldsymbol{\mu}^{B_i}(r)$  塔架和叶片的线性质量密度;  $\mathbf{a}_{eq}$  惯性系  $E$  中的地震加速度矢量。

基于上述推导的公式,通过修改和扩充FAST源代码将式(4)代入式(1)中与气动力和水动力等产生的广义主动力项耦合,形成可同时考虑风、波浪和地震作用的风机地震动力学耦合仿真平台 S-FAST。S-FAST 各模块逻辑关系如图1所示。

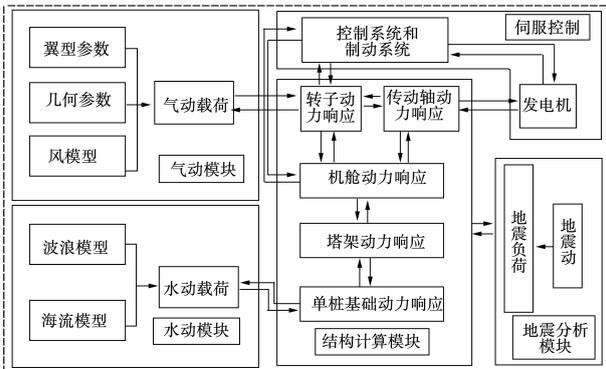


图1 S-FAST示意图

Fig. 1 Schematic diagram of S-FAST

## 2 S-FAST 有效性验证

以 NREL 5 MW 基准风机<sup>[17]</sup>为验证机型,选择 Asareh 和 Prowell 开发的地震分析软件 Seismic<sup>[10]</sup>和有限元软件 ABAQUS 来验证 S-FAST 的计算精度和可靠性。首先,采用 S-FAST, Seismic 和 ABAQUS 分别计算风机在停机状态下受到地震激励时塔架的动力响应。选取 1940 年 El Centro 波作为输入,仿真时长取 500 s,在 400 s 时加入地震动。3 种软件计算得到的塔架纵向时域响应如图 2 所示。

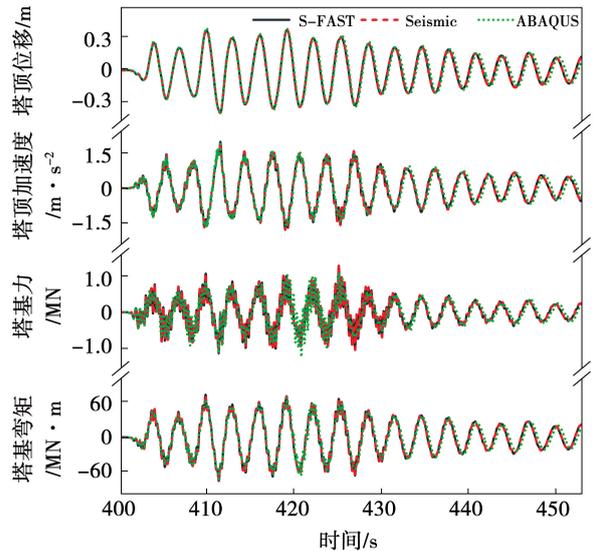


图2 停机状态风机时域响应对比

Fig. 2 Time-domain response comparison of wind turbine in the shut down state

从图中可知,S-FAST 计算的塔顶位移、塔顶加速度、塔基剪力和塔基弯矩与其余两个软件特别是 Seismic 计算结果吻合较好。因为建模和计算方法上存在差异,S-FAST 计算的塔基剪力和 ABAQUS 存在些许差异,峰值响应相对误差为 4.52%。初步分析可知,S-FAST 地震分析模块具有较高的计算精度和可靠性。

为进一步验证 S-FAST 仿真平台地震分析模块的有效性,采用 S-FAST 与 Seismic 分别计算风机在正常运行状态下遭受地震激励时塔架的动力响应。S-FAST 与 Seismic 均通过叶素动量理论和广义动态尾迹理论计算风轮气动力并考虑风-震耦合效应,然而 ABAQUS 无法直接考虑风-震耦合效应,该工况不采用此软件进行对比。正常运行状态风机同时

受到平均风速为 11.4 m/s 的湍流风场和 El Centro 地震波作用, 仿真时长取 500 s, 400 s 时加入地震动。图 3 为两种软件计算得到的风机塔架纵向时域响应。

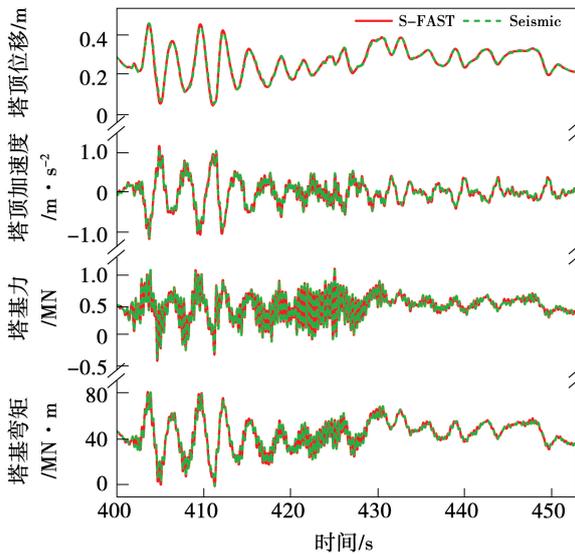


图 3 正常运行状态风机时域响应对比

Fig. 3 Time-domain response comparison of wind turbine in the normal operation state

从图中可知, 风机在受到湍流风和地震动共同作用时, S-FAST 与 Seismic 的计算结果基本吻合。S-FAST 计算的塔顶位移、塔顶加速度、塔基剪力和塔基弯矩峰值与 Seismic 的相对误差分别为 0.17%, 4.39%, 1.87% 和 0.47%。上述分析证实了 S-FAST 地震分析模块在风-震耦合作用下也具有较高的计算精度和可靠性。

图 4 对比了正常运行状态风机不同高度处响应峰值。可以看出 S-FAST 计算的最大位移和最大弯矩与 Seismic 计算结果基本重合。最大剪力在 0 ~ 30 m 塔架高度范围内存在略微差异, 相对误差在 2% 以内。最大加速度在 1/2 ~ 2/3 塔架高度范围内存在些许差异, 相对误差在 4% 以内。结果表明, S-FAST 沿塔架高度方向也具有较高的计算精度和可靠性。

值得注意的是, Seismic 是利用弹簧阻尼振子来模拟地震引起的基底运动, 并将其集成到 FAST 中, 针对不同的风机, 弹簧阻尼振子参数需要重新计算并定义。相较之下, 本文开发地震分析模块的方法避免了这一问题, 更具有通用性。另外, 相比于

ABAQUS, S-FAST 计算效率更高, 且可同时考虑多物理场耦合仿真, 计算结果更精确。

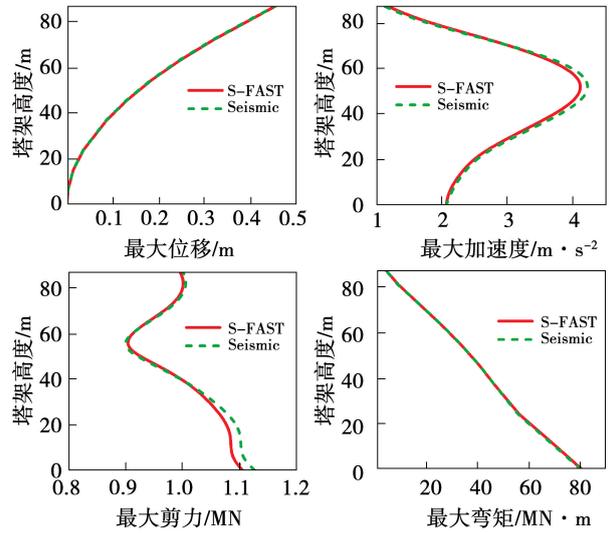


图 4 正常运行状态风机不同高度处响应峰值对比  
Fig. 4 Comparison of response peaks of wind turbine at different heights in the normal operation state

### 3 研究对象和载荷工况

#### 3.1 风机模型

以 NREL 5 MW 基准风机为基础, Jason 等人<sup>[18]</sup>在 OC3 (Offshore Code Comparison Collaboration) 项目中, 提出了适用于水深 20 m 的近海单桩风机模型, 如图 5 所示。单桩基础总长 30 m, 水下 20 m, 水上 10 m, 直径和厚度分别为 6 和 0.06 m。风机具体参数见文献[17]。

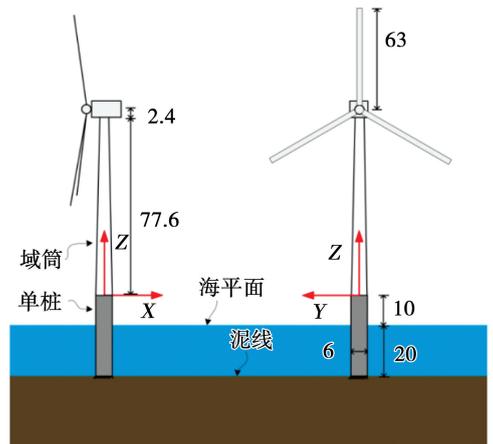


图 5 NREL 5 MW 近海单桩风机示意图 (m)  
Fig. 5 Schematic diagram of NREL 5 MW monopile offshore wind turbine (m)

在 OC3 项目中,来自美国、英国和丹麦等国家的高校和研究机构采用多种仿真软件对 FAST 中 5 MW 近海单桩风机建模的准确性做了评估,近年来该模型被众多学者作为学术研究对象。本文选择 OC3 项目第一阶段的 5 MW 近海单桩风机为研究对象开展后续工作。

### 3.2 载荷工况设置

设置 3 个标准载荷工况用于后续研究分析,如表 1 所示。工况 LC1 下风、波浪和地震耦合作用,风机处于正常运行状态;工况 LC2 下仅风浪作用,不考虑地震荷载,风机处于正常运行状态;工况 LC3 仅地震作用,不考虑风浪荷载,风机处于停机状态。波浪伴随着风出现,二者视为整体事件,且沿塔架纵向作用,地震与风浪视为独立事件。

表 1 风机动力分析载荷工况

Tab. 1 Load cases of wind turbine dynamic analysis

工况编号	风	波浪	地震	运行状态
LC1	参与	参与	参与	运行
LC2	参与	参与	不参与	运行
LC3	不参与	不参与	参与	停机

其中,轮毂高度处平均风速为 11.4 m/s 的湍流风场采用 TurbSim<sup>[19]</sup> 生成,其三维全域湍流风场如图 6 所示。有效波高为 1.63 m,谱峰周期为 5.84 s 的非规则波浪模型基于 JONSWAP 波浪谱和 Airy 波浪理论生成,其静水面波高时程和水下 1 m 处水质点速度和加速度如图 7 所示。地震动采用 1940 年 El Centro 波,两水平分量时程曲线如图 8 所示。

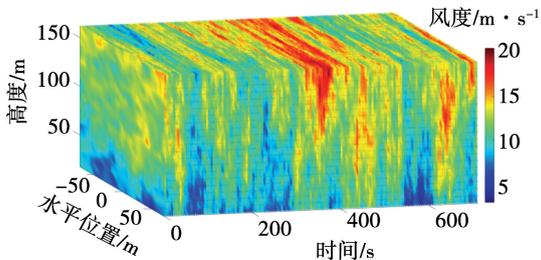


图 6 三维全域湍流风场示意图

Fig. 6 Schematic diagram of three-dimensional full-field turbulent wind farm

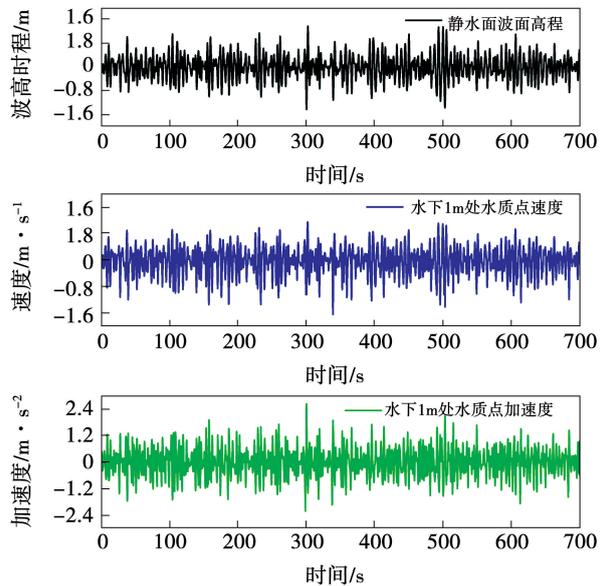


图 7 非规则波浪部分时域数据

Fig. 7 Partial time domain data of irregular wave

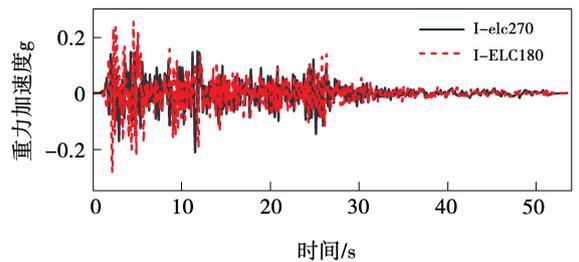


图 8 地震动加速度时程曲线

Fig. 8 Time history curve of seismic dynamic acceleration

## 4 结果与分析

采用 S-FAST 对上述 3 种工况进行仿真计算,各工况仿真时长取 600 s,时间步长取 0.005,400 s 时加入地震动。地震沿风机纵向(X 方向)和侧向(Y 方向)双向输入,纵向地震加速度按 8 度罕遇调幅至 0.4 g,纵向地震动与侧向地震动幅值比例取 1:0.85。

### 4.1 塔顶位移分析

图 9 为风机塔顶位移时程曲线,从图中可以看出,仅风浪作用工况(LC2)塔顶纵向位移波动较小,变化范围为 0.23 ~ 0.6 m,变化幅度为 0.37 m,侧向位移几乎没有变化。地震参与工况(LC1 和 LC3)塔顶纵向和侧向位移均发生了较大波动,其中仅地震

作用工况 (LC3) 塔顶纵向和侧向位移变化范围分别为  $-0.47 \sim 0.5 \text{ m}$  和  $-0.24 \sim 0.26 \text{ m}$ , 变化幅度为  $0.97$  和  $0.5 \text{ m}$ ; 风、波浪和地震耦合作用工况 (LC1) 塔顶纵向和侧向位移变化范围分别为  $0 \sim 0.8 \text{ m}$  和  $-0.31 \sim 0.2 \text{ m}$ , 变化幅度为  $0.8$  和  $0.51 \text{ m}$ 。由此可见, 地震激励是引起塔顶振动的主要荷载, 其作用远大于风浪荷载。

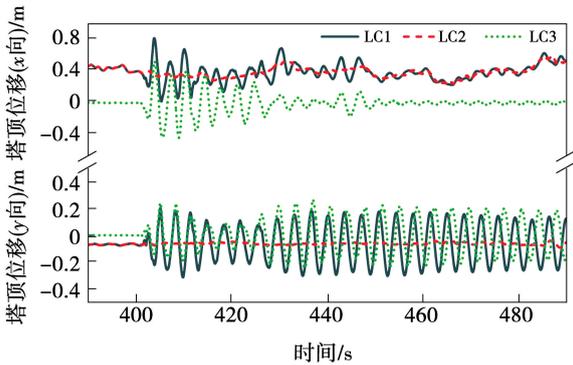


图 9 塔顶位移时程曲线

Fig. 9 Time history curve of tower top displacement

对于风、波浪和地震耦合作用工况, 地震发生时 ( $>400 \text{ s}$ ) 塔顶纵向和侧向位移迅速增大并持续振荡, 地震结束后 ( $>453 \text{ s}$ ) 均呈现衰减趋势, 纵向位移因风浪荷载的影响衰减较快, 侧向位移衰减较慢。此外, 风、波浪和地震耦合作用工况塔顶纵向位移变化幅度相较于仅地震作用工况减小了  $18\%$ , 侧向位移变化幅度比较接近。出现上述现象的主要原因是气动阻尼和水动阻尼耗散了部分地震动能量从而减小了塔顶振动, 并且阻尼呈不对称分布, 其对塔顶纵向影响较大。

图 10 为塔顶位移幅值谱, 图中  $1^{\text{st}}\text{FA}$  和  $1^{\text{st}}\text{SS}$  分别表示塔架纵向和侧向一阶模态。从图中可知, 地震参与工况塔顶纵向和侧向两个位移幅值在塔架一阶固有频率处存在明显峰值, 而仅风浪作用工况无峰值, 这主要是地震引起结构振动造成的差异, 这也进一步说明了地震是引起塔顶振动的控制荷载。对比两个地震参与工况可知, 工况 LC1 塔顶纵向位移在塔架一阶固有频率处的幅值小于工况 LC3, 塔顶侧向位移幅值比较接近。这一结果说明, 风浪荷载对塔顶振动确实有抑制作用, 且主要影响塔顶纵向

振动。

另外需要注意的是, 风浪参与工况 (LC1 和 LC2) 在  $0 \text{ Hz}$  处塔顶纵向位移存在较大幅值, 且大于其一阶固有频率处的幅值, 远大于侧向位移在此处的幅值。这主要由湍流风中平均风分量引起, 平均风会使塔顶纵向产生较大的偏移, 对侧向偏移的影响较小, 从图 9 时程曲线能观察到这一现象。

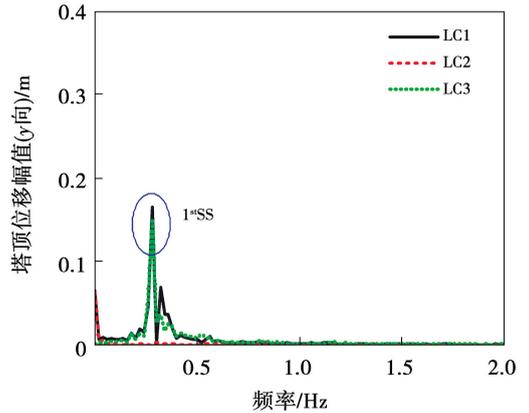
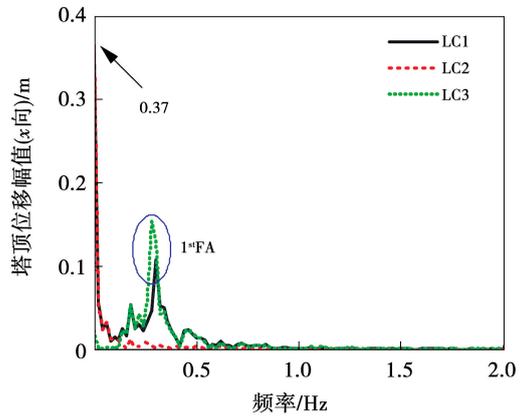


图 10 塔顶位移幅值谱

Fig. 10 Displacement amplitude spectrum at the top of the tower

#### 4.2 塔基弯矩分析

图 11 给出了塔基 (泥线处) 弯矩时程曲线仅风浪作用工况面外弯矩和面内弯矩最大值分别为  $94$  和  $11 \text{ MN} \cdot \text{m}$ , 平均值为  $60$  和  $2 \text{ MN} \cdot \text{m}$ 。对比发现, 风浪荷载主要影响塔基面外弯矩, 对面内弯矩影响较小。对于塔基面内弯矩, 地震参与工况 LC1 和 LC3 的最大值分别为  $65$  和  $61 \text{ MN} \cdot \text{m}$ , 远大于仅风浪作用工况, 可见地震激励是塔基面内弯矩的控制荷载。对于塔基面外弯矩, 3 种工况的幅值分别为

136,94 和 142.6 MN · m,风浪荷载引起的塔基面外弯矩占风、波浪和地震耦合作用工况的 69%。这一结果表明,风浪荷载对塔基面外弯矩的贡献不可忽略,不考虑气动载荷的简化分析方法已不再适用于大型风机。

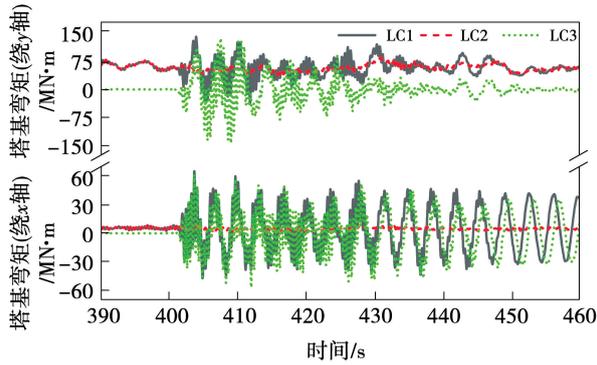


图 11 塔基弯矩时程曲线

Fig. 11 Time history curve of bending moment at the base of the tower

图 12 给出了塔基弯矩幅值谱。仅风浪作用工况下,面外弯矩在 0 Hz 处的幅值为 55 MN · m,远大于面内弯矩在此处的幅值,这是由平均风分量引起,平均风会使塔基产生较大的面外弯矩,对面内弯矩贡献较小。风、波浪和地震耦合作用工况面外弯矩在 0 Hz 处的幅值大于塔架一阶、二阶模态固有频率处的幅值,说明风荷载是面外弯矩的主要贡献者,其影响因素大于结构低阶模态振动的影响。对比两地震工况发现,工况 LC1 面外弯矩在塔架一阶、二阶频率处的幅值小于工况 LC3,面内弯矩幅值相差不大。这是因为风浪荷载抑制了结构纵向振动,从而降低了塔架一阶、二阶模态振型对塔基面外弯矩的贡献;风浪荷载对面内弯矩的影响较小,地震激励是其控制荷载。

仅地震作用工况塔基面外弯矩在叶片一阶挥舞模态固有频率处存在峰值,这是因为整体风机模型的模态振型是耦合的,叶片一阶挥舞模态振型通常伴随着塔架纵向弯曲振型,塔架纵向弯曲振型不占该模态主导地位,但其也会对塔基弯矩有所贡献。这也表明在进行结构响应计算时应采用整体模型计算分析,以使计算结果更加准确。

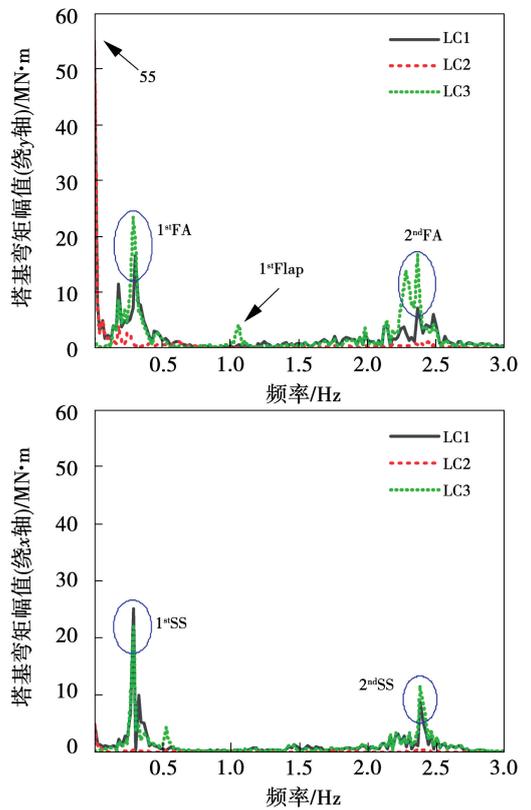


图 12 塔基弯矩幅值谱

Fig. 12 Bending moment amplitude spectrum at the base of the tower

### 4.3 塔架响应分析

图 13 给出了沿塔架高度分布的最大位移、加速度、剪力和弯矩。3 种工况下塔架最大位移随高度逐渐增大,在风机顶部达到最大;最大加速度随高度先增大后减小,在塔架高度 50 m 左右达到最大;最大剪力随高度整体上呈现减小趋势,地震参与工况从塔架 50 m 左右发生转折沿塔架高度逐渐增加;最大弯矩沿塔架高度逐渐减小,仅风浪工况下呈线性变化。

对比工况 LC1 和 LC2 发现,地震激励明显增大了结构响应,塔顶位移、塔顶加速度、塔基剪力和塔基弯矩分别增大了 38% ,383% ,66% 和 48%。对比地震参与工况 LC1 和 LC3 发现,风浪荷载对塔架地震响应存在不同程度的影响,其使塔顶位移增大了 60% ,塔顶加速减小了 20% ,塔基剪力减小了 23% ,塔基弯矩减小了 4%。以上分析表明,风浪荷载和地震荷载都是影响塔架动力响应的关键性因素,在

进行海上单桩风机结构计算时,应同时考虑三者的影响。

另外对比工况 LC1 和 LC2 + LC3 发现,单独考虑风浪荷载和地震荷载并进行线性叠加将过高估计结构的动力响应,塔顶位移、塔顶加速度、塔基剪力和塔基弯矩分别高估 35% ,45% ,91% 和 71% 。这一结果说明,风浪荷载和地震荷载之间存在非线性耦合关系,结构响应计算时应采用全耦合的分析方法,以充分考虑风、波浪和地震之间的耦合响应。这也进一步体现了开发气动 - 水动 - 地震 - 伺服 - 弹性耦合仿真平台 S-FAST 的必要性。

### 5 结 论

基于 FAST v7 开发了气动 - 水动 - 地震 - 伺服 - 弹性耦合仿真平台 S-FAST,并通过 ABAQUS 和 Seismic 验证了其有效性,得出结论:

(1) 地震激励是引起塔顶振动的控制荷载,其作用远大于风浪荷载。风浪荷载可耗散部分地震输入能量从而减小塔顶振动,其对塔顶纵向影响较大,对侧向影响较小。

(2) 塔基面内弯矩主要由地震荷载引起,风浪荷载影响较小。风浪荷载主要影响塔基面外弯矩,对于本文算例,风浪荷载引起的塔基面外弯矩占风、波浪和地震耦合作用工况的 69% 。

(3) 风浪荷载和地震荷载都是影响塔架动力响应的关键因素,结构设计时应同时考虑 3 种荷载的影响。风浪荷载和地震荷载之间存在非线性耦合关系,单独考虑并线性叠加将过高估计结构的响应,应采用全耦合的方式进行结构响应计算。

### 参考文献:

[1] KATSANOS E I, THÖNS S, GEORGAKIS C T. Wind turbines and seismic hazard: a state-of-the-art review [J]. Wind Energy, 2016, 19(11): 2113 - 2133.

[2] 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.

[3] 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.

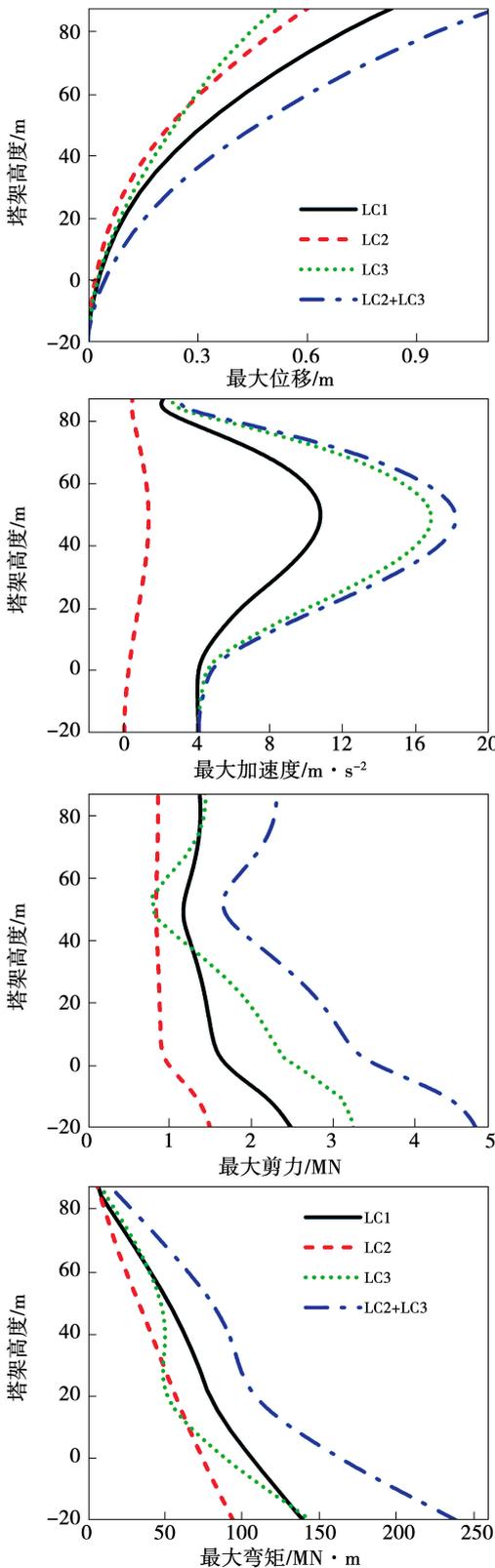


图 13 沿塔架高度峰值响应分布

Fig. 13 Peak response distribution along the height of the tower

- [4] PATIL A, JUNG S, KWON O S. Structural performance of a parked wind turbine tower subjected to strong ground motions [J]. *Engineering Structures*, 2016, 120:92 - 102.
- [5] 戴靠山, 赵志, 毛振西. 风力发电塔筒极端动力荷载作用下破坏的对比研究 [J]. *振动与冲击*, 2019, 38(15):252 - 257.  
DAI Kao-shan, ZHAO Zhi, MAO Zhen-xi. Failure of a wind turbine tower under extreme dynamic loads [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(15):252 - 257.
- [6] REN Q, XU Y, ZHANG H, et al. Shaking table test on seismic responses of a wind turbine tower subjected to pulse-type near-field ground motions [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 142:106557.
- [7] VALAMANESH V, MYERS A T. Aerodynamic damping and seismic response of horizontal axis wind turbine towers [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 140(11):04014090.
- [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] ASAREH M A, SCHONBERG W, VOLZ J. Fragility analysis of a 5 MW NREL wind turbine considering aero-elastic and seismic interaction using finite element method [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2016, 120:57 - 67.
- [10] ASAREH M A, PROWELL I. Seismic loading for FAST: May 2011-August 2011 [R]. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2012.
- [11] PROWELL I, ELGAMAL A, UANG C, et al. Estimation of seismic load demand for a wind turbine in the time domain [R]. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2010.
- [12] 杨阳, 李春, 袁全勇. 大型风力机地震动力响应研究 [J]. *热能动力工程*, 2017, 32(5):105 - 110, 140 - 141.
- YANG Yang, LI Chun, YUAN Quan-yong. Research on dynamic response of large-scale wind turbine on seismic condition [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2017, 32(5):105 - 110, 140 - 141.
- [13] 闫阳天, 许子非, 李春, 等. 地震及湍流风联合作用下的大型海上风力机结构动力学响应 [J]. *热能动力工程*, 2019, 34(9):132 - 140.  
YAN Yang-tian, XU Zi-fei, LI Chun, et al. Structure dynamic response of large offshore wind turbine under combined action of earthquake and turbulent wind [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2019, 34(9):132 - 140.
- [14] MO R, CAO R, LIU M, et al. Effect of ground motion directionality on seismic dynamic responses of monopile offshore wind turbines [J]. *Renewable Energy*, 2021, 175:179 - 199.
- [15] YANG Y, LI C, BASHIR M, et al. Investigation on the sensitivity of flexible foundation models of an offshore wind turbine under earthquake loadings [J]. *Engineering Structures*, 2019, 183:756 - 769.
- [16] JONKMAN J M, BUHL JR M L. Fast user's guide - updated august 2005 [R]. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2005.
- [17] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5 MW reference wind turbine for offshore system development [R]. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2009.
- [18] JONKMAN J, MUSIAL W. Offshore code comparison collaboration (OC3) for IEA wind task 23 offshore wind technology and deployment [R]. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2010.
- [19] JONKMAN B J. TurbSim user's guide: version 1.50 [R]. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2009.

(姜雪梅 编辑)