

长周期海域地震作用下近海单桩式风机 结构响应与荷载预测分析

杨庆超, 柏晓东, 高永新, 孔凡

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 230009 合肥)

摘 要:海上风机结构向高柔化、深水化发展, 海域地震动存在着显著的长周期成分, 将对风机结构安全形成巨大威胁。为了探索海域长周期地震动作用下海上风机的结构动力响应特性, 本研究以美国可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)开发的 5 MW 单桩固定式风力发电机作为研究对象, 首先基于 K-NET 数据库并结合海域地震动长周期成分特性指标 β_1 将海域地震动进行分类; 随后运用 OpenFAST 开源软件, 考虑湍流风-地震联合作用时正常运行、停放风机和紧急停机 3 种工况, 提取并分析了风力机的塔体运动响应和塔体地震荷载, 重点关注了海域地震动长周期成分效应的影响; 最后, 基于已有荷载预测模型, 并根据海域地震动长周期特性影响效应, 提出了一种精度更高的塔身极端荷载预估模型。结果表明: 海域长周期地震动作用下风机的塔体运动响应和塔体地震荷载都远大于常规地震动作用下的结果; 当地震强度较小时, 气动作用使结构响应增大, 当地震强度较大时, 气动作用中的阻尼效应使塔架的结构响应降低; 考虑地震动长周期效应提出的荷载预估模型能用于更精确的海域地震动作用下塔架极端荷载计算。

关键词:海域长周期地震动; OpenFAST 软件; 近海单桩风机; 结构动力响应; 气动阻尼

中图分类号: O35; TK83 **文献标志码:** A **DOI:** 10. 11776/j. issn. 1000-4939. 2026. 01. 017

文章编号: 1000-4939(2026)01-0182-10 **CSTR:** 32414. 14. cjam. issn. 1000-4939. 2026. 01. 017

Structural response and load prediction analysis of offshore monopile wind turbine under long-period offshore earthquake actions

YANG Qingchao, BAI Xiaodong, GAO Yongxin, KONG Fan

(College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, 230009 Hefei, China)

Abstract: The offshore wind turbine structures are becoming more flexible and extend to deeper waters. At the same time, historic data show that offshore earthquake contains abundant long period components, which poses great challenges to the dynamic safety of monopile offshore wind turbines. This study focuses on a 5 MW monopile fixed offshore wind turbine developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL) of the United States and mainly investigates the long-period seismic motion effect on structure

收稿日期: 2023-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51809084); 中央高校基本科研业务费资助项目(No. JZ2022HGTB0237)

通信作者: 柏晓东, 副研究员。E-mail: baixd@hfut.edu.cn

引用格式: 杨庆超, 柏晓东, 高永新, 等. 长周期海域地震作用下近海单桩式风机结构响应与荷载预测分析[J]. 应用力学学报, 2026, 43(1): 182-191.

YANG Qingchao, BAI Xiaodong, GAO Yongxin, et al. Structural response and load prediction analysis of offshore monopile wind turbine under long-period offshore earthquake actions[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2026, 43(1): 182-191.

dynamic response characteristics of large offshore wind turbines. First, the seismic motions in the K-NET database recorded in offshore stations are selected and classified using a characteristic index β_1 describing their long-period component feature. Then, under the combined action of turbulent wind and seismic motions, the OpenFAST open-source software is utilized to examine three operational conditions, i. e., regular operation, parked status, and emergency shutdown. The dynamic responses and tower loads are extracted and analyzed, and the emphasis is put on the effect of the long-period-component feature of the seismic motions. Finally, a more precise extreme load prediction model considering the long-period-component feature for the tower is suggested based on existing models. The results demonstrate that the movement and seismic loads of the wind turbine are much greater under long-period seismic motions in offshore locations than normal seismic actions. The aerodynamic effect increases the dynamic responses when seismic intensity is low. However, the aerodynamic effect, mainly the aerodynamic damping, lessens the dynamic responses when the seismic intensity is high. The extreme loads on offshore wind turbine towers under the long-period offshore seismic motions can be more precisely calculated using the proposed prediction model in this work.

Key words: long-period offshore earthquake; OpenFAST software; offshore monopile wind turbine; structural dynamic response; aerodynamic damping

风能的无污染性与可再生性使风力发电成为新能源领域最具开发条件和发展前景的发电方式之一。海上风电开发具有风场湍流程度低、风速较大且持时长、环境影响较小等优势。根据全球风能理事会的统计数据^[1],截至2022年底,全球海上风电累计装机容量达57.6 GW,为历史最高纪录。其中我国海上风电装机总量为25.6 GW,新增6.8 GW。我国沿海风电场海域处于环太平洋地带,地震烈度较高,地震类别较多,历史上黄海、渤海和东南海域多次发生7级以上地震^[2-3],造成了巨大的经济损失。

海域地震动受到复杂海床土层构造、海水、震源和震中距等因素影响,在水平和垂直分量上均存在明显的长周期成分^[4-5],频谱特性上呈现峰值向长周期方向移动的现象^[6-7],如图1所示,风机的主频设计区(图中绿色区间)与地震动长周期成分之间存在着相互靠近的不利趋势。

关于风机结构安全在地震荷载下的影响,国内外诸多学者开展了相关研究。季亮等^[8]使用ANSYS计算一台5 MW风机的结构响应,同时考虑了8度的地震设防烈度,并与国际电工委员会IEC标准和日本规范进行了比较。戴靠山等^[9]采用有限元方法研究了NREL 5 MW风机在多种地震作用下的塔顶位移最大值响应,并探讨了塔架损伤级别和PGA(peak ground acceleration)之间的数学关联。ISHIAHRA等^[10]采用半经验式评估了地震激励下400 kW和2.0 MW

两种风机的结构安全性。HACIEFENDIOĞLU^[11]基于有限元模型,计算了地震时近海风机塔架的结构响应。目前国内外海上风机地震荷载作用动力分析主要依据陆上结构抗震设计规范与设计理论开展,以上方法对近海区域长周期地震作用大型单桩式风机结构分析的有效性有待进一步科学论证。近海区域地震动记录有限,开展近海区域长周期地震动特性研究是评估长周期地震作用大型固定式海上风机抗震性能评估的关键问题。

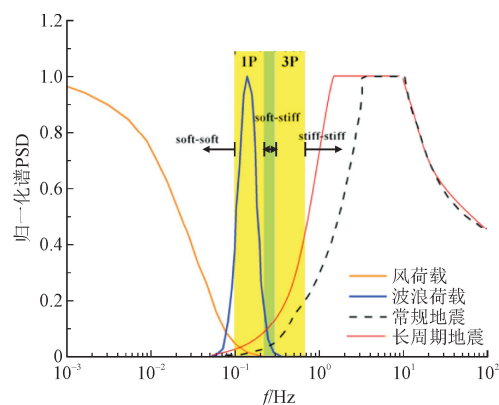


图1 风机结构海洋环境荷载频谱^[6-7]

Fig. 1 A schematic illustration of spectral distribution of complex environmental load for offshore wind turbine^[6-7]

针对以上问题,本研究以标准NREL 5 MW风机为模型,基于K-NET地震台网记录并筛选、建立长周期海域地震库、在多体动力学开源软件OpenFAST的计算框架内,并针对当前相关国际设计标准对地震作用下的结构极限荷载规定不够完善等问题,开

展风-地震耦合作用下海上大型风机动力响应分析,研究荷载要素的贡献及耦合机理,探索海域长周期地震动作用对结构响应特征的影响机理,进一步提出地震荷载预估模型,为风力机结构抗震设计提供理论基础。

1 研究对象和荷载情况

1.1 研究对象和数值方法简介

本研究以美国可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)开发的 5 MW(额定功率)风力发电机为研究对象。该风机为 3 叶片水平风力发电机,轮毂高度 87.6 m、风轮半径为 63 m,下部结构为直径 6 m,壁厚 0.06 m 的单桩,其基本信息如表 1 所示,更多相关参数详见文献[12]。

表 1 NREL 5.0 MW 风力机主要结构参数

Tab. 1 Main structural parameters of NREL 5.0 MW wind turbine

参数/单位	数值	参数/单位	数值
额定功率/MW	5.0	轮毂质量/kg	56 780
额定风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	11.4	叶片质量/kg	17 740
额定转速/ s^{-1}	13	转子质量/kg	111 000
风轮半径/m	63.0	机舱质量/kg	240 000
轮毂直径/m	3.0	塔架质量/kg	347 460
塔架高度/m	87.6		

本研究基于多体动力学的 OpenFAST 开源软件,是由 NREL 开发的一种气动-水动-伺服-弹性耦合结构动力响应时域分析工具^[13]。针对 OpenFAST 无地震分析功能这一问题,ASAREH 等^[14]在 NREL 的支持下在 OpenFAST 框架的基础上增加了地震动输入 Seismic 模块,其作用原理是将风力机泥面基础平台与土地之间的耦合作用简化为具有刚度 K 和阻尼 C 的弹簧振子,OpenFAST 各模块逻辑关系如图 2 所示。刚度 K 、阻尼 C 和地震荷载 F 表达式为

$$K = m\omega_{\text{act}}^2 \quad (1)$$

$$C = 2m\omega_{\text{act}}\zeta \quad (2)$$

$$F = K(u_{\text{target}} - x_{\text{tpf}}) + C(\dot{u}_{\text{target}} - \dot{x}_{\text{tpf}}) \quad (3)$$

式中: m 为风力机整机质量; ω_{act} 为震动输入模拟制动器角频率,取风机最高自振频率的 10 倍; ζ 弹簧振子阻尼比; u_{target} 和 $\dot{u}_{\text{target}}$ 为基础平台处地震动输入的目标位移、速度,由地震加速度记录得到; x_{tpf} 和 $\dot{x}_{\text{tpf}}$ 为结构平台处实际位移、速度。

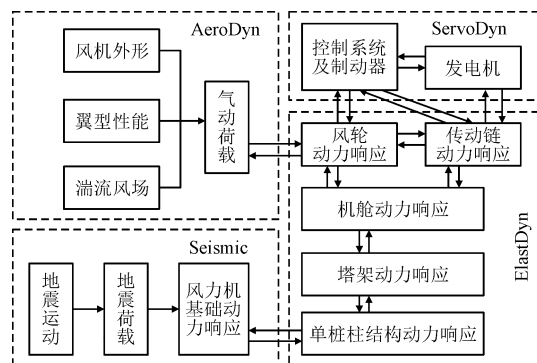


图 2 OpenFAST 软件计算模块逻辑关系

Fig. 2 Configuration of OpenFAST computational modules

1.2 风荷载导入

风机所处风场为全域三维湍流风场,由 NREL 开发的 Turbsim^[15] 开源程序生成,定义湍流风谱为 IEC Kaimal 谱,轮毂高度处的平均风速为风机额定风速 11.4 m/s,湍流度按照 IEC 规范取 A 类即 19.8%,风场尺寸为 160 m×160 m。三维全域不同时刻湍流风场如图 3 所示。

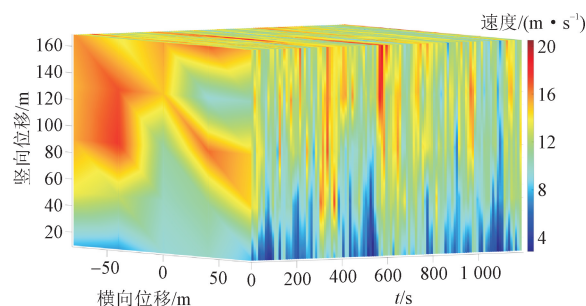


图 3 三维全域湍流风场示意图

Fig. 3 3-D velocity distribution of turbulent wind parallel to rotating plane in time domain

数值计算中,基于广义动态尾流模型(generalized dynamic-wake, GDW) 计算出诱导速度场,随后基于叶素动量理论(blade element momentum, BEM) 计算每段叶素上的气动升力、气动阻力和俯仰力矩,延展积分得到总的气动力并作用到风机结构中。

1.3 海域地震动选取与荷载输入

本研究关注水平地震的作用,海域地震动数据库为截至 2022 年 4 月的日本 K-NET-台网的 6 个台站记录,经过相应的地震动处理(基线校正、反应谱分析等)后,沿用了李雪红等^[7]提出的长周期地震动筛选方法,即利用 2~10 s 周期内地震动放大系数 β 谱的平方加权平均值 β_1 来表征地震动的长周期成分的显著程度。

$$\beta_l = \frac{\sum T_i^2 \left(\frac{S_a(T_i)}{A_{PGA}} \right)}{\sum T_i^2} \quad (4)$$

式中: β_l 为地震放大系数 β 谱的加权平均值; T_i 为阻尼比取 5% 时加速度反应谱等距离散周期, T_i 的取值范围 $[2, 10]$; $S_a(T_i)$ 为对应的加速的谱值; A_{PGA}

为峰值加速度。

由此,将 $\beta_l > 0.4$ 的 14 组地震动划归为长周期地震动, $\beta_l < 0.2$ 的 23 组地震动划归为短周期地震动 (或常规地震动), $0.2 \leq \beta_l \leq 0.4$ 的 27 组地震动划归为中长周期地震动。表 2 给出了长周期地震动基本信息。

表 2 所选海域长周期地震动 ($\beta_l > 0.4$) 数据统计信息
Tab. 2 Information of selected long-period offshore earthquake data ($\beta_l > 0.4$)

编号	地震名	方向	震级	$A_{PGA}/(10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$	震源深度/km	β_l	持续时间/s
01	KNG2011103111451	NS	6.8	14.756	11	0.543	360
02	KNG2011103111451	EW	6.8	18.003	11	0.469	360
03	KNG2021103111451	NS	6.8	10.499	11	0.449	360
04	KNG2021103111451	EW	6.8	13.990	11	0.548	360
05	KNG2031103111451	NS	6.8	10.199	11	0.726	360
06	KNG2031103111451	EW	6.8	9.001	11	0.583	360
07	KNG2031103111515	NS	7.7	26.606	43	0.606	360
08	KNG2041103111515	NS	7.7	21.960	43	0.633	360
09	KNG2041103111515	EW	7.7	23.428	43	0.438	360
10	KNG2041103111446	NS	9.0	59.817	24	0.557	360
11	KNG2051103111515	NS	6.8	10.357	11	0.876	360
12	KNG2051103111515	EW	6.8	16.676	11	0.596	360
13	KNG2051103111451	NS	7.7	36.154	43	0.469	360
14	KNG2051103111451	EW	7.7	40.626	43	0.597	360

为了探究海域长周期地震动与常规地震动作用下风机的响应差异,基于 3 类地震动的地震放大系数 β 谱的平均值曲线,分别筛选出离平均值曲线最近的 14 条常规地震动和

中长周期地震动的地震放大系数 β 谱曲线,并将其 β 值曲线对应的地震动作为所选输入地震动。图 4 为筛选出的 14 组 3 类地震动的地震放大系数 β 谱曲线及其地震放大系数 β 谱的平均值曲线图。

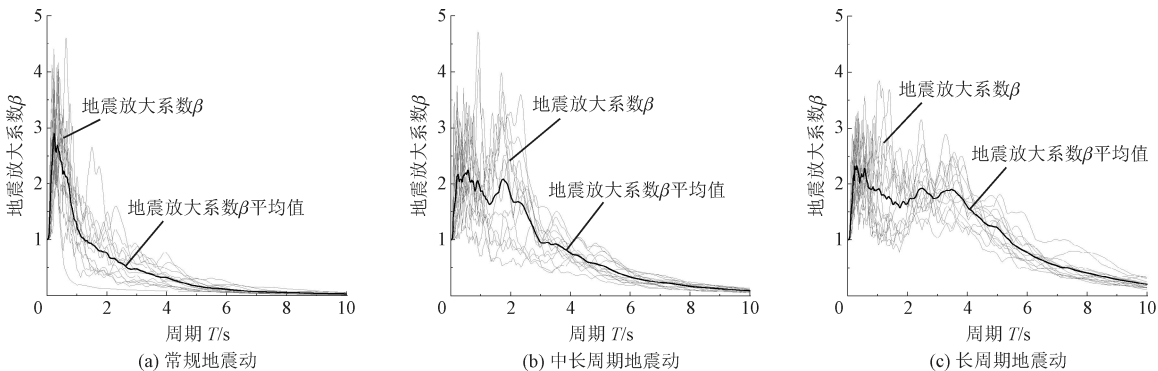


图 4 3 类地震动的地震放大系数 β 及其平均值

Fig. 4 Seismic amplification coefficient β for three types of ground motions and their mean values

对每一组水平地震动,对合地震动进行归一化处理,在此基础上根据需要再进行 A_{PGA} 缩放,图 5 为地震动合加速度为 1 m/s^2 的水平地震动时

程图。
风荷载和地震荷载作用如图 6 所示, x 轴为来风方向, y 轴为横风向, z 轴为沿着塔架垂直方向。

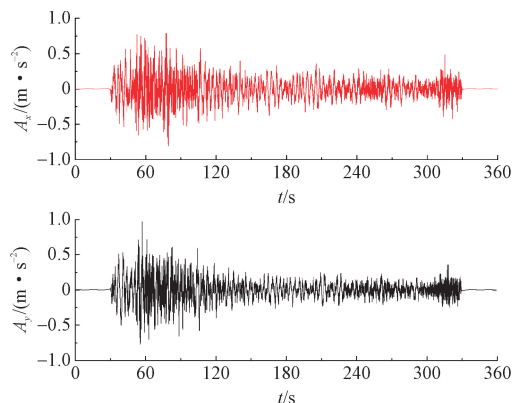


图5 A_{PGA} 为 1 m/s^2 的地震动时域变化
(KNG2011103111451)

Fig. 5 Time histories of horizontal components of seismic record (KNG2011103111451, $A_{PGA} = 1 \text{ m/s}^2$)

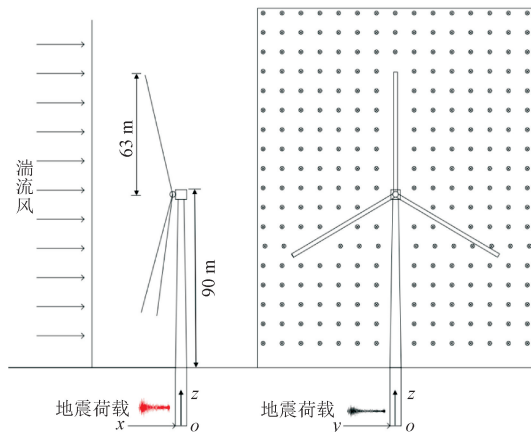


图6 NREL 5 MW 单桩海上风机风、地震作用示意图
Fig. 6 NREL 5 MW monopile offshore wind turbine under wind and seismic load

2 工况设置

为了更好地了解海域长周期地震动对风机的作用效应,对风机考虑正常运行、停放风机和紧急停机3种运行状态。对于正常运行工况,地震发生时发电机依旧发电;对于停放风机,发电机为关闭状态,风轮转速和发电机高速轴转速为0,且控制风机叶片处于顺桨状态;荷载作用下当轮毂处振动加速度大于 2 m/s^2 时,触发紧急停机操作,关闭发电机,调整叶片桨距角直到叶片顺桨。

考虑3类地震动作用,地震加速度峰值变化范围为 $0 \sim 1.2 \text{ m/s}^2$,其荷载工况如表3所示。对于所有工况,数值模拟时间步长为 0.005 s ,前 400 s 为风机正常运行,以减少风机启动和湍流风作用所引起的瞬态响应, 400 s 时输入地震动激励,总仿真时长

为 1200 s 。

风-地震激励作用下,结构阻尼沿用 ASAREH 等^[16]研究成果,即考虑气动阻尼作用,认为在正常运行工况时风机结构阻尼宜采用 5% ,在停放风机和紧急停机工况时是则取 1% 。

表3 荷载工况分组

Tab. 3 Load cases arrangement

地震动类型	选取数量/组	$A_{PGA}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	风机状态
常规地震动	14	$0 \sim 12$ (每隔 0.1 m/s^2)	正常运行、停放风 机、紧急停机。
中长周期地震动	14		
长周期地震动	14		

3 结果和分析

基于 OpenFAST,对 NREL 5 MW 风机进行表1工况的仿真,对其进行动力响应分析和荷载预估模型研究。

3.1 风机响应最大值

图7首先以地震动合 A_{PGA} 为 150 m/s^2 为例,给出了3类地震动作用下风机的塔顶位移响应时程图。在来风向上,停机发生前,紧急停机与正常运行时程曲线一致,发生停机后,风机制动顺桨,气动荷载变化,气动阻尼变小,其时程曲线与停放风机接近一致。在横风向上,风机塔顶位移时程受风机运行状态影响不大,正常运行、停放风机和紧急停机其三者的时程曲线接近一致;说明在不受气动荷载作用时,风机的运行状态对风机地震作用下横风向动力响应影响很小。

为定量分析地震强度与风机塔顶响应最大值之间的关系,通过求取每 0.1 m/s^2 地震强度下风机的塔顶位移响应时程中来风向和横风向位移均方根的最大值,得到了不同工况下不同地震动作用下风机的位移响应最大值 $D_{\max}$ 随 A_{PGA} 的变化规律,如图8所示。

从图8中可以发现,正常运行工况下,对于常规地震动作用,可以观察到在 $0 \sim 0.15g$ 其位移最大值趋于水平,随后此斜率逐渐增大且趋于定值,但其斜率仍小于停放风机工况,且在 $0.36g$ 附近其两者相交。而在海域长周期地震动作用下时,可以观察到在 $0 \sim 0.04g$,其位移最大值趋于水平,随后此斜率逐

渐增大而后不变,但其斜率仍小于停放风机工况,且在 $0.10g$ 附近其两者相交。在地震强度较小时, $D_{\max}$ 趋于水平,此时风荷载作为主要输入荷载且恒定,地震荷载影响很小;而地震强度较大时,正常运行工况的增长斜率小于停放风机工况,说明叶片转

动和湍流风相互作用明显,使得结构阻尼水平较高从而减小对强地震作用产生的动力响应。

停放风机工况下,由于叶片处于顺桨状态,受到的风荷载作用很小,塔顶最大位移仅受地震荷载影响,故其以地震动强度 A_{PGA} 呈线性关系。

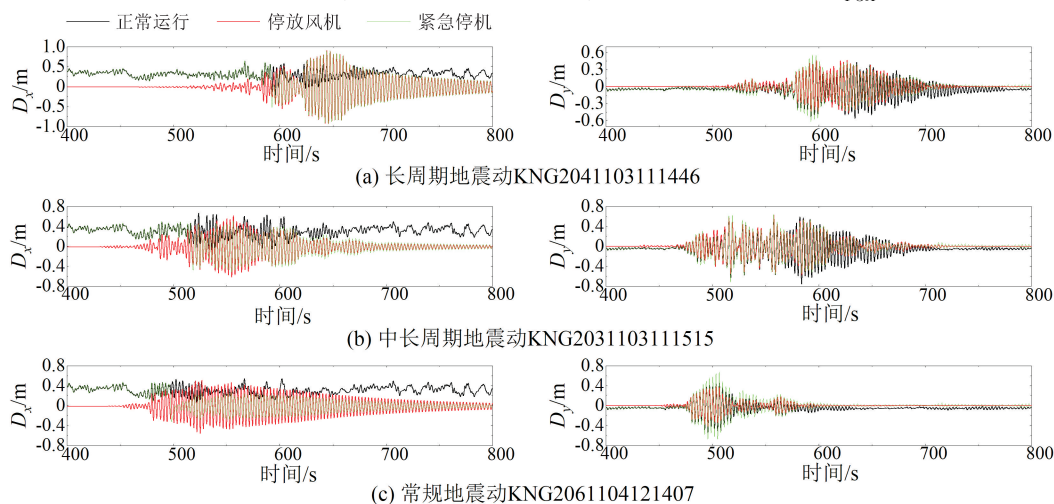


图7 不同地震动下不同工况塔顶位移时程图

Fig. 7 Time histories of tower top displacement with different working conditions under different ground motion

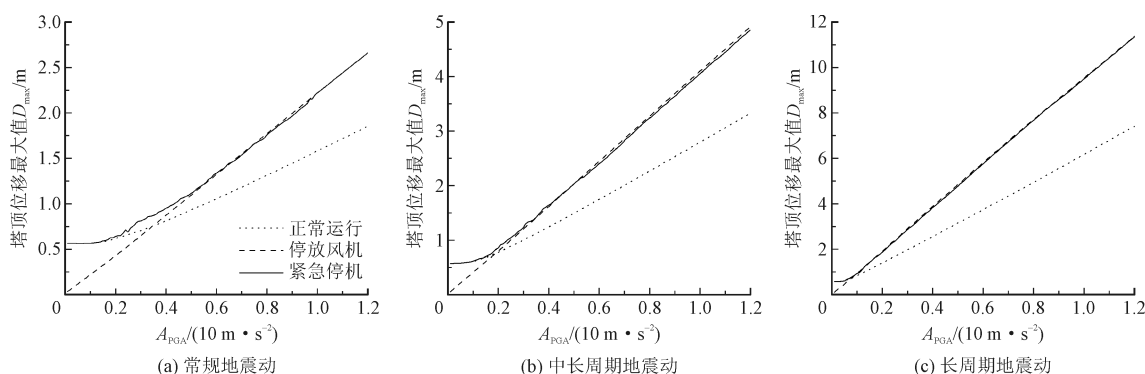


图8 塔顶最大位移随 A_{PGA} 变化规律

Fig. 8 Variation of the maximum displacement of the tower tip with A_{PGA}

紧急停机工况下,当 A_{PGA} 较小时,其塔顶位移最大值 $D_{\max}$ 与正常运行一致,随着 A_{PGA} 的增大,紧急停机操作触发,其 $D_{\max}$ 开始大于正常运行时的 $D_{\max}$,且逐渐与停放风机一致。且触发停机工况时,常规地震动为 1.5 m/s^2 的地震动强度,而长周期地震动为 0.5 m/s^2 的地震动强度。在地震强度较小时,该工况下 $D_{\max}$ 大于正常运行工况下,是由于触发停机时,风机变桨开始,气动阻尼下降,导致风机结构振动更剧烈,塔顶位移响应增大。所有对于地震来临时风机的运行状态,正常运行是最有利的,尤其遇到长周期地震动作用时。

在相同的 A_{PGA} 下,长周期地震动下正常运行的

$D_{\max}$ 与紧急停机的 $D_{\max}$ 差距最大,常规地震动作用下其 $D_{\max}$ 差距最小,这是因为长周期作用下结构运动较大因而湍流风-叶片相对运动增加,此时气动阻尼效应明显;从而导致对风机结构运动响应的抑制作用大。同时比较停放风机工况的直线斜率,发现在常规地震动作用下其值为 2.17,海域长周期地震动作用下其斜率为 9.29,其斜率大小直接反映了风机对地震荷载的响应水平,故长周期地震动所引起的风机塔顶最大运动响应约为常规地震动的 4.28 倍。长周期地震作用时风机的响应与其余两类地震动相比较而言尤为强烈,因此在风机的抗震设计方面考虑海域地震动长周期特性影响。

为了更进一步探究地震动长周期特性对结构运

动响应的影响,引入 HALL^[17] 的研究讨论,即塔顶最大位移与风机结构一阶自振频率和地震动 A_{PGA} 之间存在着如下近似关系。

$$D_{\max} = k \cdot \frac{A_{PGA}}{\omega^2} = k \cdot \frac{A_{PGA}}{(2\pi f)^2} \quad (5)$$

式中: f 为 5 MW 风机自振频率,取 0.33 Hz; 若以 k_1 、 k_2 、 k_3 分别代表常规地震动、中长周期地震动、长周期海域地震动作用下塔顶位移运动效应系数,则由图 8 可得 $k_1 = 0.95$, $k_2 = 1.75$, $k_3 = 4.06$ 。

通过塔顶运动效应系数 k 可以预估塔顶最大加速度 $A_{\max}$, 即

$$A_{\max} = k \cdot A_{PGA} \quad (6)$$

由图 9 可得 $k_1 = 0.95$, $k_2 = 1.73$, $k_3 = 3.91$ 。与式(5)得出得 k 值相比较,差异较小,说明风力机塔顶运动效应系数 k 能有效的预估地震激励下风机的塔顶响应特性,也能评价长周期海域地震动对风机的动力响应。考虑到地震动对风机的直接影响,式(5)中 $D_{\max}$ 的和式(6)中的 $A_{\max}$ 均为停机状态下的响应最大值。其中图 9 反映的是不同工况下不同地震动作用下风机塔顶加速度响应最大值 $A_{\max}$ (为来风向和横风向加速度平方和开平方根最大值的平均值)随 A_{PGA} 的变化规律。

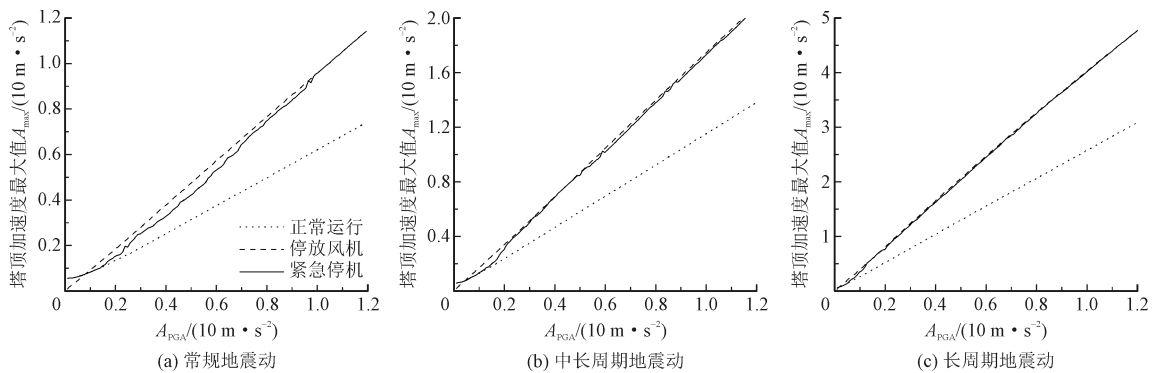


图9 塔顶最大加速度随 A_{PGA} 变化规律

Fig. 9 Variation of the maximum acceleration of the tower tip with A_{PGA}

3.2 塔架荷载预估模型

对于地震荷载下的高耸水平轴风力发电,塔架弯矩荷载为结构设计验算的主导荷载形式。近年来,针对塔架极端弯矩荷载已发展出多种预测模型。如对于高度 h 处塔架极限弯矩荷载,IEC 给出的经验预估式为^[18]

$$M_{IEC} = (H_t - h) \cdot m_{eff} \cdot a_{PGA} \quad (7)$$

式中: M_{IEC} 为在常规地震动下 IEC 标准定义的极限弯矩; 风机有效质量 m_{eff} 即风轮质量、机舱质量和 1/2 塔架质量的和; H_t 为塔架总高度; a_{PGA} 为地震最大加速度。

德国劳埃德船级社 (GL) 提出了一个类似表达式^[19]。停机条件下的塔架弯矩极限用于表示指南中的地震荷载。GL 提出的地震作用极端弯矩荷载预测如下所示

$$M_{GL} = M_{parked} + M_{Aero} \quad (8)$$

式中: M_{parked} 为地震激励下停放风机工况时计算出的塔架弯矩最大值; M_{Aero} 为不考虑地震荷载的情况下,用 OpenFAST 计算得到的湍流风单独作用的塔

架弯矩最大值。

在上述规范建议的基础上,PROWELL^[20] 采用平方和开平方根 (SRSS) 方法提出了以下表达式来估计塔架弯矩预测。

$$M_{SRSS} = \sqrt{M_{IEC}^2 + M_{Aero}^2} \quad (9)$$

YANG 等^[21] 考虑到 IEC 并未涉及风机系统受地震的响应水平,基于上一节中给出的响应系数 k 和风机所受气动荷载,提出了一种改进表达式,即

$$M_Y = \sqrt{(k \cdot M_{IEC})^2 + M_{Aero}^2} \quad (10)$$

考虑到不同海域地震动分组对于得地震动响应系数 k 不同,本研究在 YANG 等^[21] 和 IEC 方法基础上提出了改进表达式,即

$$M = k \cdot M_{IEC} \quad (11)$$

在图 10 中,对不同 A_{PGA} 强度下的塔架最大弯矩预估结果进行比较。对于正常运行工况,与紧急停机工况相比,塔架极限的弯矩值较小。在塔基处,与运行条件下的值相比,紧急停机的极端荷载增大,且随着 A_{PGA} 的增大,其增大幅度亦随之增大。且随着塔架高度的增加,最大弯矩的变化几乎趋于线性,

这主要由于 OpenFAST 计算框架主要基于线性小变形假设。对于所有 A_{PGA} , 德国劳埃德船级社提出的

线性组合高估了塔架的极限弯矩,表明该线性组合方法不能准确估计塔架弯矩最大值。

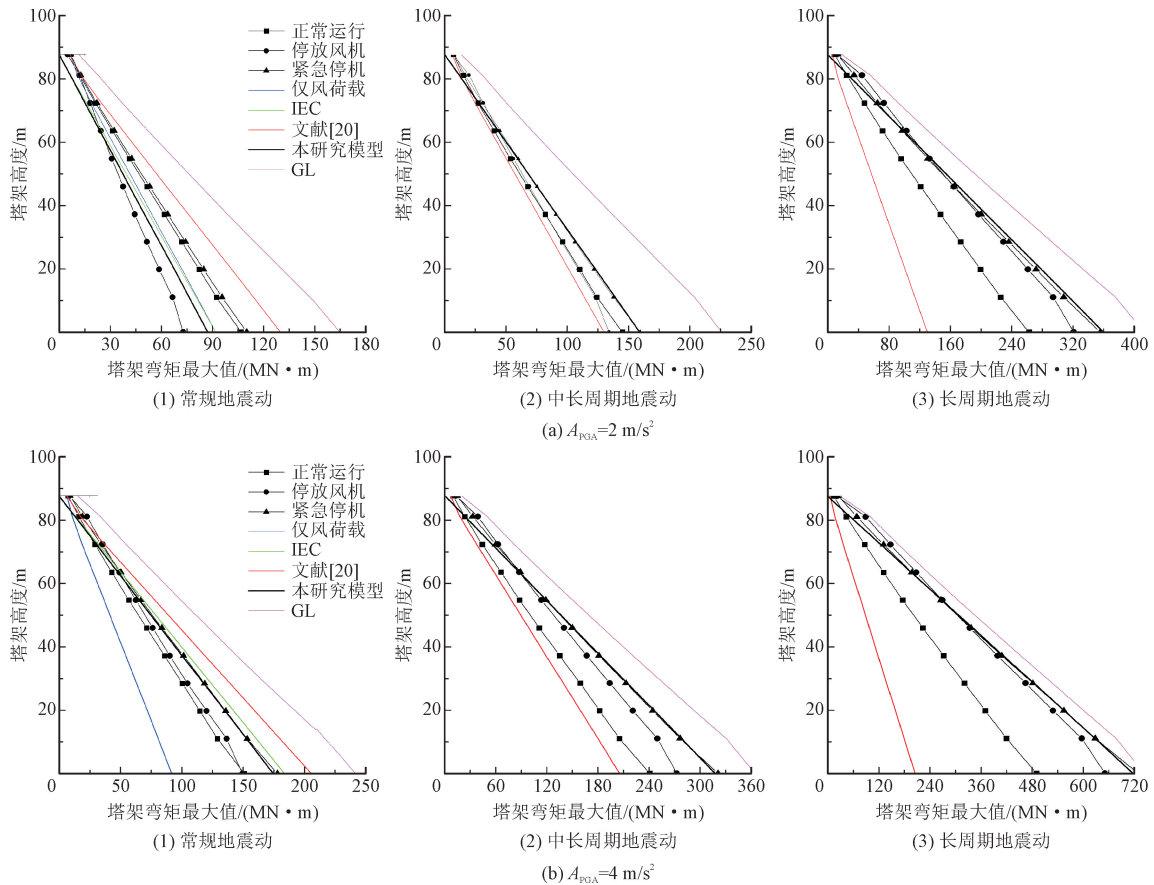


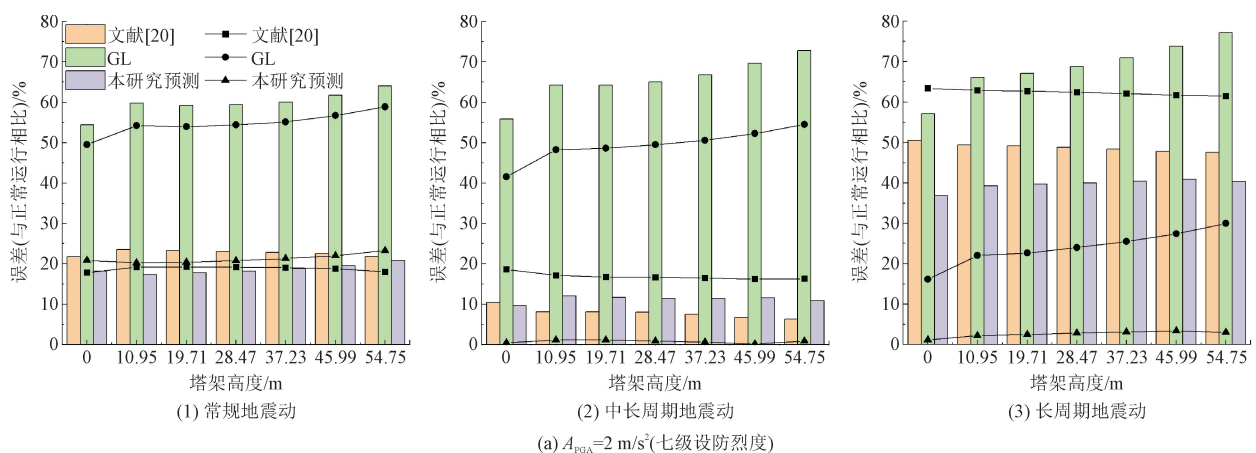
图 10 不同地震下塔架弯矩最大值及各模型预估值

Fig. 10 Maximum tower bending moment and its prediction with different models

IEC 标准和 Prowell 模型在常规地震动时预测了较为准确的结果,但其并不能做到预测中长周期地震动和海域长周期地震动下的塔架极限弯矩。基于式(11)的预测和数值分析差异明显小于其他模型,对于长周期地震动作用响应的预估更为精确。

图 11 给出了不同设防烈度下,不同预估表达式预测数值 x 与模拟数值 x^* 结果之间的误差值, ε_r 定义如下

$$\varepsilon_r = \frac{|x - x^*|}{x^*} \quad (12)$$



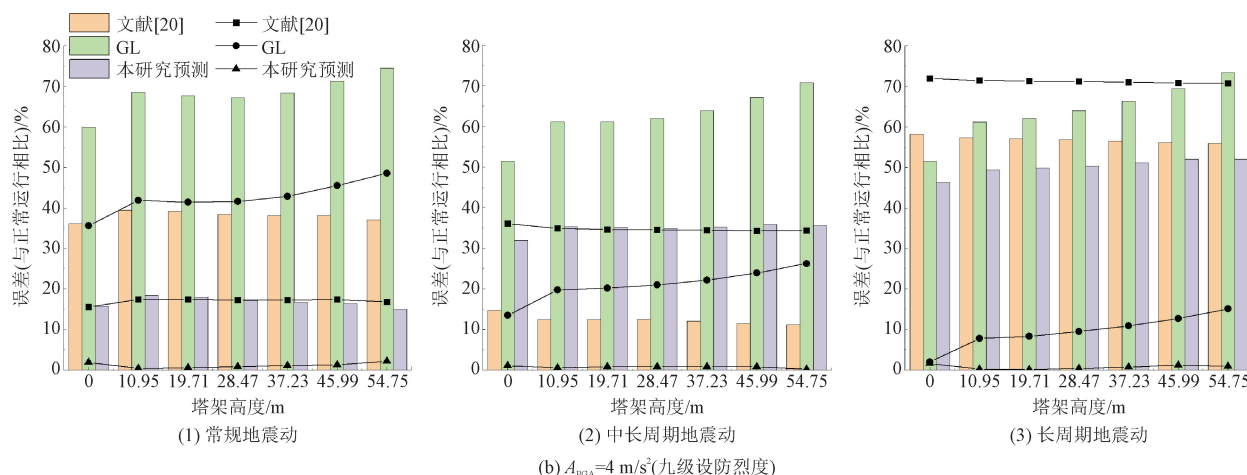


图 11 塔架最大弯矩在不同预估模型下的误差值

Fig. 11 Error analysis of the maximum tower bending moments with different prediction models

图中显示了紧急停机工况(柱状图)和正常运行工况(点线图)下不同高度处的塔架弯矩极限的相对误差,对于所有 A_{PGA} 和地震动而言,式(11)预测误差均为最小,尤其是对于长周期海域地震动的紧急停机其误差为 1% 左右。对于正常运行,基本误差均大于紧急停机,这是由于塔架弯矩最大值发生在紧急停机,正常运行状态下,气动阻尼的存在耗散地震产生的能量,造成弯矩最大值偏小。

4 结 论

本研究通过对 NREL 5 MW 风机进行数值计算,考虑海域地震动按长周期特性分类、地震强度、湍流风联合作用、风机运行状态,探索海域地震动长周期特性对风机动力响应影响,得到以下结论。

1) 在停放风机工况,塔顶的位移和加速度响应均随着 A_{PGA} 的增加而线性增加,且长周期地震动所引起的风机塔顶最大运动响应平均值约为常规地震动的 4.28 倍。

2) 风机正常运行状态下,地震强度较小时,气动作用增大了的结构响应;在地震强度较大时,气动作用则降低风机运行时的结构响应,这归因于叶片转动和湍流风相互作用明显,使得结构阻尼水平较高从而减小强地震作用产生的动力响应。

3) 风-地震作用下风机紧急停机时,并不能有效降低风机响应值,当海域长周期地震发生时,风机最佳状态为保持正常运行。

4) 在相同的 A_{PGA} 时,风力机在长周期海域地震动的运动响应远大于常规地震动。由于地震动的随机性、模糊性和不确定性,近海大型风机在进行抗震

分析时必须考虑海域地震动长周期特性影响。

5) 考虑海域地震动长周期效应,提出了一种改进风机塔架地震动作用极限荷载预估表达式,基于耦合作用分析的数值结果比较和误差分析,结果表明该表达式能为海域地震动作用下风力机抗震设计提供荷载计算依据。

参考文献:

- [1] GWE C. Global wind report 2023 [EB/OL]. (2023-03-27) [2025-05-07]. https://www.connaissancedesenergies.org/sites/connaissancedesenergies.org/files/pdf-actualites/GWR-2023_interactive_v2_compressed.pdf.
- [2] 彭艳菊,吕悦军,徐杰,等.渤海地区地震危险性特征及对工程抗震设防的启示[J].地球物理学进展,2012,27(1):18-28. PENG Yanju, LÜ Yuejun, XU Jie, et al. Seismic risk zoning in Bohai and its inspiration to engineering earthquake resistance [J]. Progress in geophysics, 2012, 27(1): 18-28 (in Chinese).
- [3] 谢卓娟,李山有,吕悦军,等.中国海域及邻区统一地震目录及其完整性分析[J].地震地质,2020,42(4):993-1019. XIE Zhuojuan, LI Shanyou, LÜ Yuejun, et al. Unified earthquake catalog for China's seas and adjacent regions and its completeness analysis [J]. Seismology and geology, 2020, 42(4): 993-1019 (in Chinese).
- [4] DIAO H Q, HU J J, XIE L L. Effect of seawater on incident plane P and SV waves at ocean bottom and engineering characteristics of offshore ground motion records off the coast of southern California, USA [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2014, 13(2): 181-194.
- [5] NAKAMURA T, TAKENAKA H, OKAMOTO T, et al. Long-period ocean-bottom motions in the source areas of large subduction earthquakes [J]. Scientific reports, 2015, 5: 16648.
- [6] ARANY L, BHATTACHARYA S, MACDONALD J H G, et al. Closed form solution of eigen frequency of monopile supported offshore wind turbines in deeper waters incorporating stiffness of sub-

- structure and SSI[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2016, 83:18-32.
- [7] 李雪红,王文科,吴迪,等.长周期地震动的特性分析及界定方法研究[J]. 振动工程学报,2014,27(5):685-692.
- LI Xuehong, WANG Wenke, WU Di, et al. The bounded method and characteristics analysis for long-period ground motions[J]. Journal of vibration engineering, 2014, 27(5):685-692 (in Chinese).
- [8] 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 Xiaoqin, et al. Applicability of existing seismic calculation methods for wind turbines on a 5 MW wind turbine[J]. Acta energiae solaris Sinica, 2014, 35(11):2300-2305 (in Chinese).
- [9] 戴靠山,易立达,刘瑶,等.某风电塔结构基于性能的抗震分析[J]. 结构工程师,2015,31(5):96-102.
- DAI Kaoshan, YI Lida, LIU Yao, et al. Performance-based seismic design of a wind turbine tower[J]. Structural engineers, 2015, 31(5):96-102 (in Chinese).
- [10] ISHIHARA T, SARWAR M W. Numerical and theoretical study on seismic response of wind turbines[C]//European Wind Energy Conference and Exhibition. [S. l.]:[s. n.], 2008:1-5.
- [11] 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.
- [12] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development[EB/OL]. (2009-02) [2023-05-12]. <https://docs.nrel.gov/docs/fy09osti/38060.pdf>.
- [13] JONKMAN J M, BUHL M L Jr. FAST user's guide[EB/OL]. [2005-08]. <https://docs.nrel.gov/docs/fy06osti/38230.pdf>.
- [14] ASAREH M A, PROWELL I. Seismic loading for FAST[EB/OL]. (2011-08) [2023-05-12]. <https://docs.nrel.gov/docs/fy12osti/53872.pdf>.
- [15] JONKMAN B J, BUHL M L Jr. TurbSim user's guide[EB/OL]. (2006-09) [2023-05-12]. <https://docs.nrel.gov/docs/fy06osti/39797.pdf>.
- [16] ASAREH M A, PROWELL I, VOLZ J, et al. A computational platform for considering the effects of aerodynamic and seismic load combination for utility scale horizontal axis wind turbines[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2016, 15(1):91-102.
- [17] HALL W J. Dynamics of structures-theory and applications to earthquake engineering[J]. Earthquake spectra, 1996, 12(3):635-636.
- [18] IEC. Wind turbines-part 1: design requirements; IEC 61400-1 Ed 3[S]. Geneva: IEC, 2005.
- [19] GL. Guidelines for the certification of wind turbines[Z]. Hamburg: GL, 2003.
- [20] PROWELL I. An experimental and numerical study of wind turbine seismic behavior[D]. San Diego: University of California, San Diego, 2011.
- [21] YANG Y, YE K H, LI C, et al. Dynamic behavior of wind turbines influenced by aerodynamic damping and earthquake intensity[J]. Wind energy, 2018, 21(5):303-319.

(编辑 张璐)