

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230710004

# 基于监测数据和拟静力方法的海上风机地震动力响应分析\*

杜鹏<sup>1</sup>, 杨阳<sup>2</sup>, 成伟<sup>1</sup>, 李明<sup>1</sup>, 许广威<sup>1</sup>, 沈盼盼<sup>3</sup>

(1. 三峡新能源盐城大丰有限公司, 江苏盐城 224000; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 3. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335)

**摘要:** 海上风机服役环境恶劣, 我国大量海上风电项目紧邻东南沿海地震带和环太平洋地震带, 地震活动频繁, 严重威胁海上风机安全。我国近海地质条件复杂, 既有深厚覆盖层软弱土海床, 同时存在大范围浅覆盖层地质区域, 属于抗震不利工程地质条件, 海上风机的地震响应是工程及学术界研究的热点。依托国内某风电场项目, 利用地震激励下单桩基础风机监测数据和拟静力分析对海上风机地震动力响应进行了分析。首先利用数据驱动的随机子空间方法(Data-SSI)识别风机的频率、阻尼和振型; 然后分析了风机不同测点加速度响应、频谱特性, 同时采用小波变换, 分析各测点响应的时频变化; 最后采用拟静力计算方法, 分析上部结构惯性力作用下, 塔筒和单桩基础的响应情况, 计算了上部结构惯性力作用下风机塔筒和基础的响应情况。结果表明, 风机塔筒部分的最大加速度出现在塔筒中部, 地震作用下风机体系的高阶模态可能更加显著; 时频谱结果表明地震作用下, 风机振动并非以一阶振型为主, 风机顶端的频率变化比较复杂; 风机水平变形及塔筒应力满足规范要求。分析结果可为评估海上风机安全提供参考, 具有工程应用意义。

**关键词:** 海上风机; 单桩基础; 地震响应; 拟静力计算

**中图分类号:** TV34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0560-08

## Seismic Dynamic Response Analysis of Offshore Wind Turbines Based on Monitoring Data and Quasi-static Calculation

DU Peng<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>2</sup>, CHENG Wei<sup>1</sup>, LI Ming<sup>1</sup>, XU Guangwei<sup>1</sup>, SHEN Panpan<sup>3</sup>

(1. Three Gorges Renewables Yancheng Dafeng Co., Ltd, Yancheng 224000, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

**Abstract:** Offshore wind turbines operate in harsh environments, with a significant number of projects in China situated near the Southeast coastal seismic zone and the Circum-Pacific seismic belt, where seismic activity is frequent, posing serious threats to offshore wind turbines safety. The geological conditions in China's nearshore areas are complex, characterized by both thick soft soil seabed, and extensive shallow geological regions with unfavorable seismic resistance conditions. The seismic response of offshore wind turbines (OWTs) is a hot topic in both engineering and academic research. In this pa-

\* 收稿日期: 2023-07-10; 修回日期: 2023-09-07

基金项目: 上海勘测设计研究院有限公司科研项目(2022FD(83)-010)资助

作者简介: 杜鹏(1983—), 男, 工程师。主要从风电场运维研究。E-mail: 279213639@qq.com

通信作者: 成伟(1993—), 男, 硕士。主要从事风机监测研究。E-mail: 13430371965@163.com

per, leveraging data from a domestic wind farm project, seismic response of OWTs were analyzed utilizing monitoring data from single-pile foundation turbines under seismic excitation and quasi-static analysis. Firstly, the Data-driven Stochastic Subspace Identification (Data-SSI) method was used to identify the frequency, damping, and mode shapes of the OWTs. Subsequently, the acceleration response and spectral characteristics at different measurement points were analyzed, and the time-frequency variations of the response at each measurement point were analyzed using wavelet transform method. Finally, employing the quasi-static calculation method, the responses of the tower and single-pile foundation under the action of inertial forces of the upper structure were analyzed and calculated. The results showed that the peak acceleration occurred at the middle of the turbine tower, and under seismic action, higher-order modes of the turbine system may be more significant. The time-frequency spectrum results showed that the turbine vibration was not predominantly governed by the first-order mode under seismic action, and the frequency variation at the top of the turbine was very complicated. The horizontal deformation of the turbine and stress in the tower met the regulatory requirements. The analysis results provide a reference for evaluating the safety of OWTs, and have engineering application significance.

**Keywords:** offshore wind turbines; single-pile foundation; seismic response; quasi-static calculation

## 0 引言

自2010年我国首座海上风电场—东海大桥风电场投产运营以来,海上风电行业发展迅猛,截至2021年底,我国海上风电累计装机容量已超过英国,成为世界最大的海上风电市场。我国大量海上风电项目紧邻东南沿海地震带和环太平洋地震带,地震活动频繁。单桩基础由大直径钢管组成,由于其结构简单、施工方便等原因,是使用最广泛的基础型式。海上单桩基础风机高大且体型细长,是典型的抗震不利结构。海上风机服役期内将承受风、浪、流等环境荷载的长期作用<sup>[1]</sup>,并面临冲刷侵蚀威胁,在遭遇地震等多重灾害作用下可能会产生机组故障、结构损毁等事故,不仅会对风电场运营产生巨额经济损失,更有可能影响区域电力的持续稳定供给,造成严重的不良社会影响<sup>[2-3]</sup>。因此,有必要对海上风机的振动特性与响应进行实时监测和分析,从而为海上风电场运行管理提供技术支持和保障。

海上风机存在共振威胁,若风机固有频率与所受荷载的频率相同或者相近,风机结构的振动会显著增大,为了海上风机安全运行,需要避免共振现象的发生,风电领域科研和设计人员开展了风机振动特性相关的研究<sup>[4-6]</sup>。杨春宝等<sup>[7]</sup>分析了海床地基土参数变化导致的海上风机在服役期间的系统自振频率的偏移问题,分析结果表明系统自振频率对

地基弹性模量、海床高度变化及桩径敏感性较强,对地基土阻尼的敏感性较弱。董霄峰等<sup>[8]</sup>以海上风机样机为研究对象,利用现场监测数据,分析了整体风机结构在停机、正常运行和开机及台风工况下的响应情况,研究发现叶轮转速变化对风机结构振动影响较大。有学者采用随机子空间方法(SSI)对风机模态参数进行识别<sup>[9-11]</sup>。赵艳等<sup>[12]</sup>基于随机子空间算法,利用三种不同的加权算法对风机环境激励下监测数据进行模态分析,并将分析结果与有限元计算结果进行对比。王中平<sup>[13]</sup>基于现场实测振动信号数据,开展了海上风机模态参数识别及动力响应分析,但是假设风机系统为线性系统,没有考虑系统非线性成分,对非稳态激励下的系统非线性振动特性尚需进一步研究。海上风机结构的非线性及激励的非线性,模态参数是时变的,传统的模态识别方法难以体现时变特性,因此有学者采用能计算时变模态参数的小波变换方法对风机进行振动特性和损伤分析<sup>[14]</sup>,但是目前海上风机结构健康监测中采用小波变换方法进行模态参数识别较少,需要进一步研究。另外,我国近海地质条件复杂,既有深厚覆盖层软弱土海床,同时存在大范围浅覆盖层地质区域,属于抗震不利工程地质条件<sup>[15]</sup>。海上风机的地震响应是工程及学术界研究的热点。

本文根据国内某风电场实际地震激励下监测数据对风机振动特性进行了分析,由于地震相关海域距离陆地约50 km,仅震中西侧有地震台站分布,台站的方位角覆盖不佳,这对此次地震的相关测定

工作造成了一定的障碍,因而,未能获取到海上风电场附近的地震波记录<sup>[16-17]</sup>。时程分析法是进行结构动力响应计算常用的方法之一,需要输入地震波激励,可以获得结构每一个时刻的响应情况,但是风电场无地震波数据,无法采用该方法计算其地震响应。一些学者采用拟静力分析法计算结构地震响应,即将地震作用简化为惯性力施加到结构<sup>[18]</sup>,该方法所需的上部结构加速度可以通过监测数据获取,故后续采用拟静力法分析上部结构惯性力作用下,塔筒和单桩基础的响应情况,旨在为海上风电场风机振动特性分析和安全评估提供参考,具有重要工程应用意义。

## 1 基于监测数据的模态参数识别

利用国内某风电场一台 3.3 MW 单桩风机在地震作用下的监测数据,采用数据驱动的随机子空间(Data-SSI)模态参数识别方法,对风机模态参数(频率、阻尼和振型)进行分析。

### 1.1 Data-SSI模态参数识别方法

Data-SSI 模态参数识别方法<sup>[19]</sup>将结构响应数据排列得到 Hankel 矩阵,然后把“将来”向“过去”输出投影,得到投影矩阵。通过引入卡尔曼滤波序列,建立投影矩阵与卡尔曼滤波序列的关系式。进而基于最小二乘法计算系统矩阵和输出矩阵。最后,通过对系统矩阵进行特征值分解,由系统矩阵的特征值和特征向量得到结构模态参数。具体步骤如下:

#### (1) Hankel 矩阵的建立

利用结构响应数据构造 Hankel 矩阵:

$$Y_{O/2i-1} = \frac{Y_p}{Y_f} = \begin{pmatrix} Y_{O/i-1} \\ Y_{i/2i-1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $Y_p$ 为“过去”信息; $Y_f$ 为“将来”信息。

#### (2) 投影矩阵的计算

对 Hankel 矩阵进行 QR 分解:

$$Y_{O/2i-1} = RQ^T = \begin{pmatrix} R_{11} & 0 \\ R_{21} & R_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, $Q$ 为正交矩阵; $R$ 为下三角矩阵。

把“将来”向“过去”输出投影,得到投影矩阵:

$$O_i = Y_f/Y_p = Y_f Y_p^T (Y_p Y_p^T)^+ Y_p = R_{21} Q_1^T \quad (3)$$

#### (3) 系统矩阵

将投影矩阵  $O_i$  分解为扩展可观测矩阵  $\Gamma_i$  和卡

尔曼滤波状态序列  $\hat{X}_i$  的乘积:

$$O_i = \Gamma_i \hat{X}_i \quad (4)$$

同时,对投影矩阵  $O_i$  矩阵进行奇异值分解:

$$O_i = USV^T = (U_1 \ U_2) \begin{pmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2=0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{pmatrix} = U_1 S_1 V_1^T \quad (5)$$

式中, $O_i$  矩阵的秩即为系统的阶次, $\Gamma_i$  和  $\hat{X}_i$  可表示为:

$$\begin{aligned} \Gamma_i &= U_1 S_1^{1/2} \\ \hat{X}_i &= \Gamma_i^+ O_i \end{aligned} \quad (6)$$

基于扩展可观测矩阵  $\Gamma_i$  和卡尔曼滤波状态序列  $\hat{X}_i$ , 计算得到离散时间状态空间模型中的状态矩阵  $A$  和输出矩阵  $C$ , 进而得到系统模态参数。

### 1.2 基于 Data-SSI 的风机模态参数识别

依托项目风机所布置加速度计方案如图 1 所示,在 11 m 标高处布置了两个加速度计,30、60、100 m 标高处分别布置一个加速度计。加速度计均为双向加速度计,本文分析所采用的数据均为单向的振动信息。

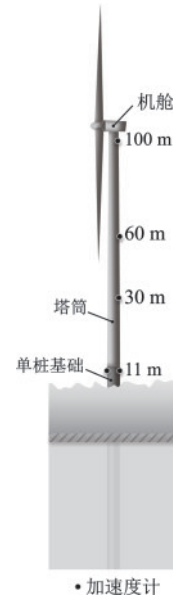


图1 风机振动监测布置示意

Fig.1 Schematic diagram of vibration monitoring setup for on OWT

由于监测系统采集到的数据发生了基线偏移,对监测数据首先采用最小二乘法拟合进行了去趋势项处理;然后采用数字信号处理中常用的巴特沃斯(Butterworth)方法进行了滤波处理;最后,采用处理后的 100、60、35、11 m 加速度时程数据利用 Data-SSI 方法识别风机的频率和阻尼,风机的前三

阶频率和阻尼信息见表1,风机结构的振型如图2所示。

表1 频率和阻尼比

阶数	频率/Hz	阻尼比/%
一阶	0.29	0.25
二阶	1.58	9.51
三阶	2.10	1.17

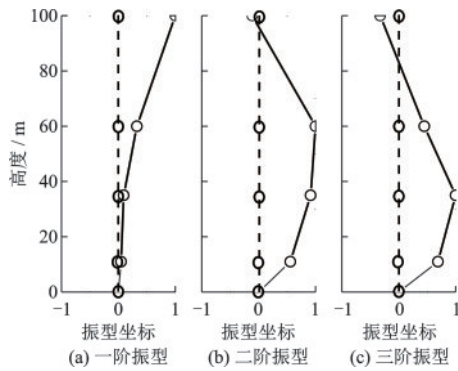


图2 振型识别结果

Fig.2 Model shapes identification results

## 2 海上风机振动响应分析与结果

利用单桩风机11、30、60、100 m标高处加速度计监测到的加速度数据,对海上风机振动响应进行分析,包括测点加速度响应、频谱特性、传递函数和时频响应。

### 2.1 测点加速度响应

风机各测点加速度计采样频率为50 Hz,截取地震波峰值前后共80 s加速度数据,各测点加速度时程曲线如图3所示。

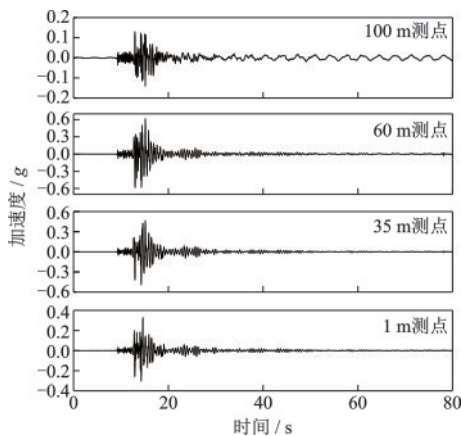


图3 加速度时程曲线

Fig.3 Time-history accelerations

取每一个测点加速度时程曲线峰值绘制沿塔筒高度加速度最大值曲线,取峰值附近10个值的平均值为峰值,如图4所示。随着测点高度的增加,风机振动响应均有不同程度的放大。振动响应最大值出现在60 m监测高度处,并非最大高度处,该现象可能是由于地震作用下风机的振动以一阶振型和二阶振型的耦合振动为主。此外,地震结束后,机头处出现明显的自由振动衰减阶段。

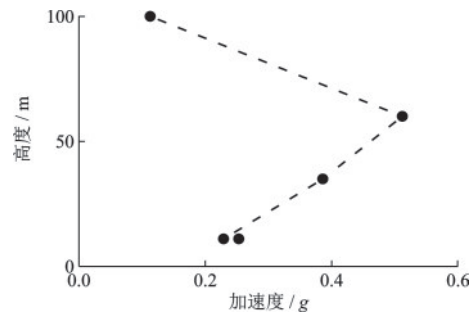


图4 加速度峰值曲线

Fig.4 Peak acceleration curves

### 2.2 频谱特性

傅里叶幅值谱可以有效反映振动响应的频率成分,风机各高度处加速度响应的傅里叶幅值谱如图5所示,塔筒顶部幅值谱的峰值出现在一阶频率附近,随着高度下降,二阶频率成分逐渐显现。

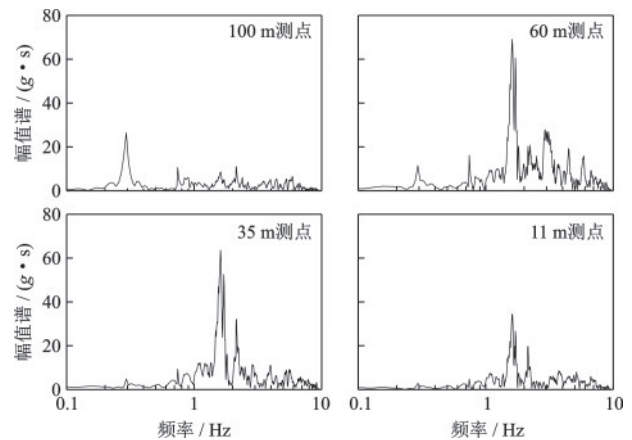


图5 傅里叶幅值谱曲线

Fig.5 Fourier amplitude spectrum curves

频率响应函数表征了测试系统对给定频率下的稳态输出与输入的关系,具体是指输出、输入幅值之比与输入频率的函数关系,反映了系统的固有特征,以11 m处的实测加速度响应作为输入,各测点对应的频响函数如图6所示,其中塔筒顶端100 m测点响应的峰值与一阶模态接近,60 m测点和35 m



测点响应的峰值与二阶和三阶模态接近。

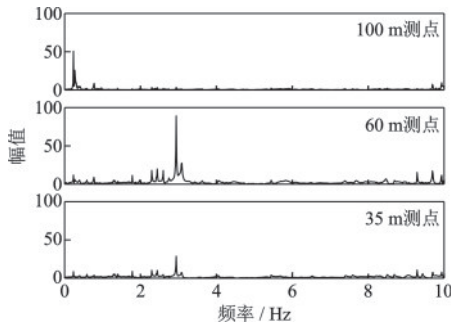


图6 传递函数

Fig.6 Transfer functions

### 2.3 基于小波变换时频谱分析

傅里叶幅值谱难以反应振动频率成分的实时变化,因此,采用小波变换<sup>[20-21]</sup>,分析各测点响应的时频变化,如图7所示。实时显现了各频率成分的变化规律。可以发现,地震作用下,风机振动并非以一阶振型为主,此外,风机顶端的频率变化更为复杂。

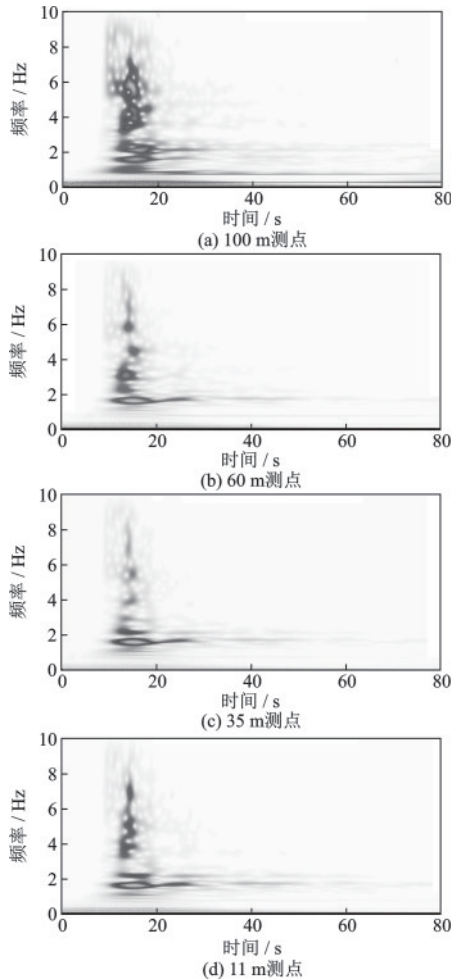


图7 风机时频谱

Fig.7 Time-frequency spectrums of OWT

## 3 地震作用下拟静力分析与结果

由于地震发生时无法获得风电场实际地震波数据,采用有限元软件进行了拟静力计算,塔筒顶部施加荷载为监测到的实际加速度,以获得上部结构惯性力作用下塔筒和基础的响应情况。

### 3.1 模型建立

根据风机的设计资料和地勘情况,采用有限元软件建立风机桩土结构一体化有限元模型<sup>[22]</sup>,如图8所示。

主要部分尺寸见表2。单元类型为C3D8R实体单元,材料参数信息见表2,表中土体是按照从土

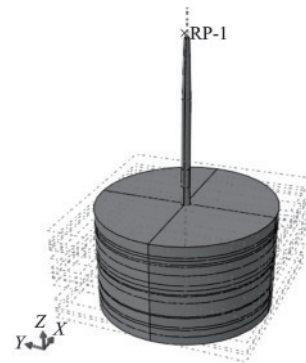


图8 有限元模型

Fig.8 FEM model

表2 塔筒、单桩和土参数信息

Table 2 Tower, monopile and soil properties

分类	$\rho$	$E$	$\gamma$	$C$	$\Phi$
塔筒、单桩	7 850	206 000	0.2	/	/
淤泥质粉质粘土夹粉土	1 870	48.9	0.25	24.2	12.4
粉土	1 910	137.0	0.3	—	32.4
粉质粘土	1 970	63.2	0.25	31.3	15.6
粉砂夹粉土	1 950	157.9	0.3	—	33.2
夹粉质粘土夹粉土	1 810	37.3	0.25	18.5	10.8
粉土夹粉质粘土	1 850	141.1	0.3	—	29.3
夹粉质粘土夹粉土	1 810	37.3	0.25	18.5	10.8
粉质粘土	1 990	107.0	0.25	53	17.7
粉砂	1 990	209.1	0.3	—	32.8
夹粉质粘土夹粉砂	1 900	59.6	0.25	29.5	14.7
粉砂	1 990	209.1	0.3	—	32.8
粉砂	1 990	231.6	0.3	—	32.9
粉质粘土	1 960	91.5	0.25	45.3	18.4
粉质粘土夹粉土	1 900	56.5	0.25	—	13.7
粉砂	1 960	243.9	0.3	—	33.5

注: $\rho$ 是密度,单位 $\text{kg/m}^3$ ;  $E$ 是弹性模量,单位MPa; $\gamma$ 是泊松比; $C$ 是粘聚力,单位kPa; $\Phi$ 是内摩擦角,单位( $^\circ$ )

表到土底顺序排列。模型共有节点数 219 876,单元数 207 216,模型网格划分如图 9 所示。

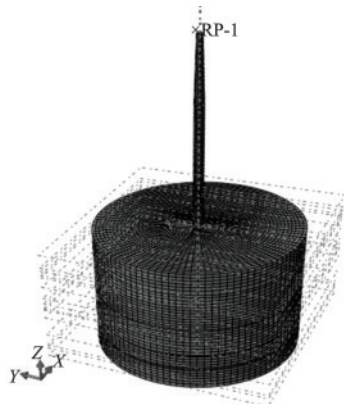


图 9 有限元模型网格划分  
Fig.9 Meshing of FEM model

### 3.2 计算结果分析

计算采用显式计算,首先进行地应力平衡;其次,桩、塔筒、机舱和叶片质量施加;最后施加水平地震力荷载并计算。计算结果表明,荷载施加方向倾斜最大值位于塔筒顶端为 0.252 m,如图 10 所示。Mises 应力计算结果如图 11 所示,最大值出现在与塔筒顶端部分为 37.36 MPa,未达到钢材屈服强度,塔筒和风机桩基础处于弹性状态。另外,根据 DNV 规范对海上风机变形控制要求,桩基水平变形控制标准为:计算泥面处的水平位移不超过  $L/500$  ( $L$  为桩体入土深度);计算泥面处的桩体转角不超过  $0.25^\circ$ ,即  $4.36\%$  弧度。计算结果表明桩基泥面处水

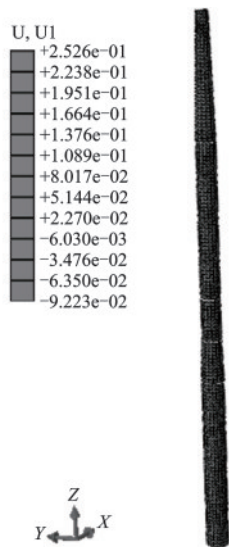


图 10 倾斜计算结果  
Fig.10 Inclination calculation results

平位移为 0.053 6 m,泥面转角为  $2.5\%$  弧度,水平变形均满足规范要求。

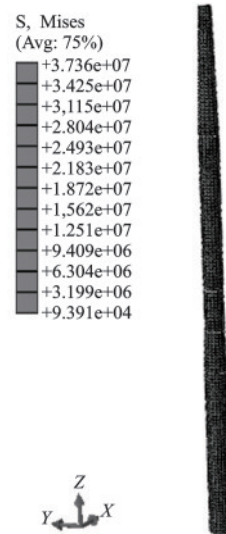


图 11 应力计算结果  
Fig.11 Stress calculation results

## 4 结 论

利用地震激励下单桩基础风机监测数据和拟静力方法对海上风机频率、阻尼、振型和地震动力响应等进行分析,得到主要结论如下:

(1) 风机塔筒部分的最大加速度出现在塔筒中部的某点,表明在地震作用下风机体系的高阶模式可能更加显著;时频谱结果表明地震作用下,风机振动并非以一阶振型为主,风机顶端的频率变化比较复杂。

(2) 拟静力计算结果表明依托风电场风机水平变形满足规范要求,塔筒和风机桩基础应力均未超过钢材的屈服应力,塔筒和风机桩基础处于弹性状态。

(3) 海上风电机组通常运行环境恶劣,气候复杂多变,严重影响海上风电机组的服役安全,因此,面对海上风电机组的复杂运行环境,建议建立完善的环境荷载监测体系。另外,目前我国海上风电场周围地震台站稀少,地震活动比较频繁,建议在风机基础泥面处布置加速度传感器,并完善海上风电场地震监测实验站布置。

### 参考文献:

[1] 张小玲,刘建秀,杜修力,等. 风浪流共同作用下海上

- 风电基础与海床的动力响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(4): 658-668.
- Zhang X L, Liu J X, Du X L, et al. Dynamic response analysis of offshore wind power foundation and seabed under the combined wind, wave and current loadings [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4): 658-668. (in Chinese)
- [2] 孔德森,刘一,邓美旭,等. 非均质土中海上风电单桩基础动力响应特性[J]. 工程科学学报, 2021, 43(5): 710-719.
- Kong D S, Liu Y, Deng M X, et al. Dynamic response characteristics of an offshore, wind-power monopile foundation in heterogeneous soil[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(5): 710-719. (in Chinese)
- [3] 孟安康,于倩祥,周胡,等. 基于多源数据的海上风机结构响应特征分析[J]. 中国海洋平台, 2022, 37(4): 43-48,59.
- Meng A K, Yu Q X, Zhou H, et al. Structural response characteristics analysis of offshore wind turbine based on multi-source data [J]. China Offshore Platform, 2022, 37(4): 43-48,59. (in Chinese)
- [4] 余云燕,孔嘉乐. 单桩基础海上风机横向自振频率求解及参数敏感性分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(10): 82-91,164.
- Yu Y Y, Kong J L. Solution of transverse natural frequency and parameter sensitivity analysis of offshore fan with single pile foundation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(10): 82-91,164. (in Chinese)
- [5] 龚敏,朱涛,陈守祥,等. 超长期循环荷载作用下海上风机大直径单桩动力特性演变规律研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(1): 259-266.
- Gong M, Zhu T, Chen S X, et al. Evolution of dynamic characteristics of large diameter monopile of offshore wind turbine under ultra-long term cyclic load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(1): 259-266. (in Chinese)
- [6] 张陈蓉,田抒平,张纪蒙. 砂土中大直径单桩风机动力响应模型试验[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增2): 16-19.
- Zhang C R, Tian S P, Zhang J M. Model tests on large-diameter monopile-supported offshore wind turbine in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(Sup2): 16-19. (in Chinese)
- [7] 杨春宝,王睿,张建民. 单桩基础型近海风机系统自振频率实用计算方法[J]. 工程力学, 2018, 35(4): 219-225.
- Yang C B, Wang R, Zhang J M. Numerical method for calculating system fundamental frequencies of offshore wind turbines with monopile foundations[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(4): 219-225. (in Chinese)
- [8] 董霄峰,练继建,王海军. 海上风机结构振动监测试验与特性分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(2): 191-199.
- Dong X F, Lian J J, Wang H J. Monitoring experiment and characteristic analysis of structural vibration of offshore wind turbine [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(2): 191-199. (in Chinese)
- [9] 喻旭明,罗金平,齐聪山,等. 随机子空间法在海上风电结构模态参数识别中的应用[J]. 青岛理工大学学报, 2018, 39(3): 30-36.
- Yu X M, Luo J P, Qi C S, et al. Application of stochastic subspace identification for modal parameter identification of offshore wind turbines[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2018, 39(3): 30-36. (in Chinese)
- [10] Zhou L, Li Y, Liu F S, et al. Investigation of dynamic characteristics of a monopile wind turbine based on sea test [J]. Ocean Engineering, 2019, 189: 106308.
- [11] 姜贞强,邹彩云,王胜利,等. 海上风电单桩基础动力特性识别及现场测试[J]. 太阳能学报, 2020, 41(7): 321-326.
- Jiang Z Q, Yu C Y, Wang S L, et al. Dynamic characteristics identification of monopile offshore wind turbine and field tests[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(7): 321-326. (in Chinese)
- [12] 赵艳,郑卫锋,王新武,等. 环境激励下风机结构模态识别算法的对比[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(4): 64-68,92.
- Zhao Y, Zheng W F, Wang X W, et al. Comparison of modal identification algorithms for a wind turbine under ambient excitation [J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(4): 64-68,92. (in Chinese)
- [13] 王中平. 海上风电结构模态参数识别及极端振动响应的推算[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- Wang Z P. Modal parameter identification and projections of extreme vibration response on offshore wind power structure [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [14] 王盟,翁顺,余兴胜,等. 基于时变模态振型小波变换的结构损伤识别方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 10-19.
- Wang M, Weng S, Yu X S, et al. Structural damage identification based on time-varying modal mode shape of wavelet transformation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(16): 10-19. (in Chinese)
- [15] 缪涵,王彦臻,方怡,等. 海湾深厚海床场地二维非线性远场强地震反应特征[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(4): 637-649.
- Miao H, Wang Y Z, Fang Y, et al. 2D nonlinear site response characteristics of a cross-bay deep seabed sub-

- jected to far-field strong earthquakes[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(4): 637-649. (in Chinese)
- [16] 周文杰,雷蕾,周健,等. 2021年11月17日江苏大丰海域Ms5.0地震震源深度对比分析[J]. 地震科学进展, 2022, 52(8): 361-366.  
Zhou W J, Lei L, Zhou J, et al. Comparative analysis of focal depth of Ms5.0 earthquake in Dafeng sea area of Jiangsu Province on November 17, 2021[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2022, 52(8): 361-366. (in Chinese)
- [17] Xu M, Au F T K, Wang S, et al. Dynamic response analysis of a real-world operating offshore wind turbine under earthquake excitations [J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 112791.
- [18] 宋二祥,武思宇,刘华北. 刚性桩复合地基地震反应的拟静力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1723-1728.  
Song E X, Wu S Y, Liu H B. Quasi-static calculation method for seismic response of rigid pile composite foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(11): 1723-1728. (in Chinese)
- [19] Neu E, Janser F, Khatibi A A, et al. Fully automated operational modal analysis using multi-stage clustering [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 84: 308-323.
- [20] 王建忠. 小波理论及其在物理和工程中的应用[J]. 数学进展, 1992(3): 289-316.  
Wang J Z. Wavelet theory and its applications to physics and engineering[J]. Advances in Mathematics (China), 1992(3): 289-316. (in Chinese)
- [21] 罗光坤,张令弥. 基于Morlet小波变换的模态参数识别研究[J]. 振动与冲击, 2007(7): 135-138, 187.  
Luo G K, Zhang L M. Study on identification of modal parameters based on Morlet wavelet transformation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007(7): 135-138, 187. (in Chinese)
- [22] 白久林,李晨辉,龚彦安,等. 风-浪-流-RNA运行耦合作用下近海风电结构动态响应分析[J]. 土木工程学报, 2022, 55(9): 42-53.  
Bai J L, Li C H, Gong Y A, et al. Dynamic response analysis of offshore wind turbine under the coupling effects of wind, wave, current and RNA operation [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(9): 42-53. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)



(上接第 550 页)

- Diao Y T, Ma H Y, Yu H F, et al. Strength of coral concrete aggregate - net slurry interface zone [J]. Journal of Construction Materials, 2021, 24(3): 516-524. (in Chinese)
- [7] 陈宇良,刘志华,叶培欢,等. 高温后珊瑚海水海砂混凝土直剪力学性能及损伤演化[J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 4128-4138.  
Chen Y L, Liu Z H, Ye P H, et al. Direct shear mechanical properties and damage evolution of high-temperature post-coral seawater marine sand concrete [J]. Journal of Composites, 2023, 40(7): 4128-4138. (in Chinese)
- [8] 周春恒,王君义,王新堂,等. 高温作用后 GFRP 筋与海水珊瑚混凝土粘结性能试验研究[J]. 复合材料学报, 2023, 40(4): 2224-2239.  
Zhou C H, Wang J Y, Wang X T, et al. Experimental study on the bonding performance of GFRP bars with seawater coral concrete after high temperature action [J/OL]. Journal of Composites, 2023, 40(4): 2224-2239. (in Chinese)
- [9] Vafaei D, Ma X, Hassanli R, et al. Microstructural and mechanical properties of fiber-reinforced seawater sea-sand concrete under elevated temperatures [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 50: 104140.
- [10] Guo J B, Yu H F, Ma H Y. Damage and deterioration characteristics of basic magnesium sulfate cement-coral aggregate concrete exposed to elevated temperature [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 137: 106275.
- [11] 李忠友,刘元雪,姚志华. 普通硅酸盐混凝土高温性能劣化分析模型[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(2): 229-235.  
Li Z Y, Liu Y X, Yao Z H. Analytical model for high-temperature performance deterioration of ordinary silicate concrete [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(2): 229-235. (in Chinese)
- [12] 轻集料及其试验方法,第2部分:轻集料试验方法: GB/T 17431.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [13] 轻骨料混凝土应用技术标准: JGJ/T12—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [14] 珊瑚骨料混凝土应用技术规程: T/CECS 694—2020, [S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [15] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019, [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.