

王丕光,刘晶波,赵密.运行状态下海上单桩风机系统自振频率分析[J].地震工程学报,2021,43(3):704-709.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.704
WANG Piguang, LIU Jingbo, ZHAO Mi. Effect of Operating State on the Natural Frequency of an Offshore Wind Turbine Founded on Monopiles[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(3): 704-709. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.704

运行状态下海上单桩风机系统自振频率分析

王丕光^{1,2}, 刘晶波¹, 赵 密²

(1. 清华大学 土木系, 北京 100084; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘要: 系统自振频率限制是海上风机结构设计中的一个关键因素。运行状态下风机动力荷载会引起基础的水平侧移,较大的水平侧移会导致基础刚度的降低,进一步影响风机系统的自振频率。该文基于有限元软件 ABAQUS 平台,建立单桩式海上风机结构系统的自振频率数值模型,并讨论运行状态下基础水平侧移对大直径海上风机系统自振频率的影响。模型中考虑了塔筒的变截面特性;桩-土相互作用通过 p - y 曲线方法模拟;桩和塔采用梁单元模拟;通过 Pushover 分析汇总出水平侧移引起的桩顶水平刚度。研究表明:桩基侧向位移会降低风机结构体系的自振频率;桩基侧向位移对基频的影响较小,对高阶频率的影响显著;大直径海上风机的频率计算中可忽略风机运行状态对体系自振频率的影响。

关键词: 海上风机;单桩基础;自振频率;桩-土相互作用

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)03-0704-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.704

Effect of Operating State on the Natural Frequency of an Offshore Wind Turbine Founded on Monopiles

WANG Piguang^{1,2}, LIU Jingbo¹, ZHAO Mi²

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Restriction of system frequency is one of the key points in the design of offshore wind turbines. The dynamic loads of operating offshore wind turbines can cause the horizontal displacement of the monopile foundation, which will decrease the stiffness of the pile-soil system, so that the natural frequency of the offshore wind turbine system will be further influenced. Based on the software platform ABAQUS, a numerical model is developed to analyze the system natural frequencies of offshore wind turbines supported on monopiles. Effect of the horizontal displacement of the foundation in the operating state on the natural frequencies of the offshore wind turbine system is further investigated. The numerical model considers the variation of the cross-sectional geometry of the wind turbine tower; the pile-soil interaction is simulated by a p - y curve method. The tower and monopile are modeled using beam element, and the pushover analysis is used to

收稿日期: 2018-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878384, 51421005, 51678015)

第一作者简介: 王丕光(1985-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事近海工程结构抗震方面的工作。E-mail: wangpiguang1985@126.com。

obtain the equivalent springs providing the foundation response at the pile-cap level. Results indicated that the lateral displacement of the monopile will reduce the natural frequency of the system. It has little effect on fundamental frequency, but has a significant effect on higher frequencies. In general, the influence of the operating state of the wind turbine on the natural frequency of the wind turbine system can be neglected.

Keywords: offshore wind turbine; monopile foundation; natural frequency; pile-soil interaction

0 引言

近年来,随着传统能源的日益匮乏和环境条件的不断恶化,可再生能源的开发与利用已成为各国研究发展的重点,而海上风能作为绿色可再生能源是现在的研究热点之一。与陆上风能相比,海上风能具有风速高、有效发电时间长和不占用陆地资源等优势^[1]。我国海岸线漫长,具有丰富的海上风电资源,一批海上风电场已经建成或正在建设中^[2]。

单桩基础结构形式简单,受力明确,设计及施工方便,在国内外已建成的海上风电场所占比例达 70%^[3]。大直径单桩基础为开口钢管桩,刚度大、抗弯性能好,主要适用于水深小于 25 m 的海域;直径通常为 4~6 m,埋深一般为 20~40 m,长径比(嵌固深度与外径比)一般不超过 8,属于刚性短桩^[4]。近年来,国内外学者对海上风电单桩基础的水平承载特性^[5-9]和风、波浪和地震作用下海上单桩风机结构的动力响应^[10-17]进行了广泛的研究。

海上风机设计时应考虑荷载激励频率与结构自振频率的关系,保证系统自振频率避开荷载激励频率。目前国内外多采用柔-刚设计模式进行风机系统的结构与基础设计^[1],即系统基频在 1P(发电机的转动频率)和 3P(叶片的扫掠频率)之间。目前,国内外学者对海上风机系统的频率进行相关的研究^[18-24]。Bhattacharya 和 Adhikari^[18]以及 Andersen 等^[19]将风机基础简化为水平和旋转两自由度的弹簧,建立了风机系统的自振频率求解方程。Prendergast 等^[21]研究了冲刷对海上风机系统自振频率的影响。Arany 等^[23]将风机基础简化为三弹簧模型,即水平、旋转和耦合弹簧,并提出了海上风机系统自振频率的解析模型。阳春宝等^[25]建立了近海单桩基础风机系统自振频率求解数值计算方法,并进行了系统频率偏移因素分析。

海上风机在运营期间会承受上风、浪的荷载,风浪荷载会引起风机系统的水平侧移;随着水平侧移的增大,风机基础的刚度会降低,从而导致系统频率的偏移;风机系统基频降低过大可能会造成风机系

统频率与风机运行荷载频率接近,从而造成风机结构反应过大。因此很有必要讨论桩基水平侧移对风机系统自振频率的影响。已有的研究表明^[17,26],相比于浪、荷载和塔筒风荷载,风机运行状态下产生的风荷载对风机体系动力反应的贡献占大多数。本文基于有限元软件 ABAQUS 平台,建立了沙土中单桩式海上风机结构系统的自振频率分析模型,并讨论了运行状态下风机基础水平侧移对大直径海上单桩式风机系统自振频率的影响。

1 单桩式海上风机数值模型

单桩式海上风机结构的分析模型如图 1 所列。本文将塔筒和单桩离散为弹性梁柱单元,风机叶片、吊篮和轮毂简化为塔顶的集中质量,整个模型在有限元软件 ABAQUS 中实现。以下将详细介绍变截面塔筒的简化模型、桩-水相互作用模型和桩-土相互作用模型。

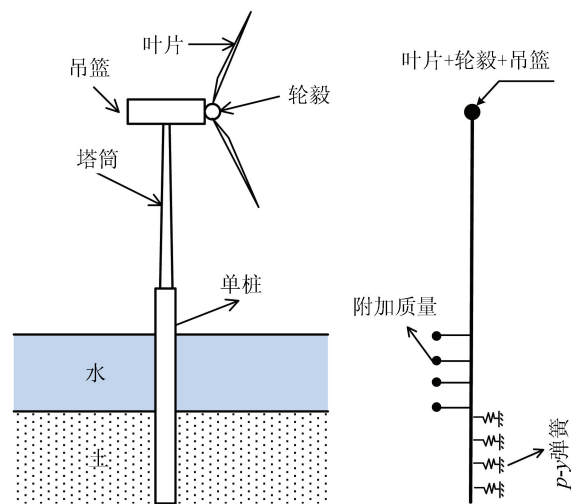


图 1 单桩式海上风机结构

Fig.1 A monopile offshore wind turbine system

1.1 塔筒简化模型

基于分段思想,将塔筒简化分为相互连接的若干段的组合,当段数足够多时,每一段都看作为等截面梁。为竖向一致截面的柱体。第 i 段梁的等效刚度和等效线密度可表示为^[27]:

$$EI_i = \frac{1}{l_i} \int_{z_{i+1}}^{z_i} EI(z) dz \quad (1)$$

$$\rho A_i = \frac{1}{l_i} \int_{z_{i+1}}^{z_i} \rho A(z) dz \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量; ρ 为密度; A 为截面面积; I 为截面惯性矩。

1.2 桩-水相互作用

地震作用下,柱体与周围水体之间是一个复杂的动力相互作用问题。水体的存在不仅会改变结构的动力特性,还会对结构产生附加动水压力。该动水压力可以等效为结构周围水体的质量与结构加速度的乘积,这些水的质量称为附加质量。空心柱体外域和内域水体的附加质量为^[28]:

$$m_o = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{16\rho_w ah (-1)^{j-1} K_1(\lambda a)}{\pi(2j-1)^2 [K_0(\lambda a) + K_2(\lambda a)]} \cos(\lambda z) \quad (3)$$

$$m_i = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{16\rho_w bh (-1)^{j-1} I_1(\lambda b)}{\pi(2j-1)^2 [I_0(\lambda b) + I_2(\lambda b)]} \cos(\lambda z) \quad (4)$$

$$p_{st} = \gamma_0 z \left[\frac{K_o z \tan\varphi \sin\beta}{\tan(\beta - \varphi) \cos\alpha} + \frac{\tan\beta}{\tan(\beta - \varphi)} (D + z \tan\beta \tan\alpha) + K_o z \tan\beta (\tan\varphi \sin\beta - \tan\alpha - K_a D) \right] \quad (5)$$

$$p_{sd} = K_a D \gamma_0 z (\tan^8 \beta - 1) + K_o D \gamma_0 z \tan\varphi \tan^4 \beta \quad (6)$$

式中: γ_0 为土体的有效重度,本文中取为 10 kN/m^3 ; z 为土体深度; D 表示桩径; $\alpha = \varphi/2$, $\beta = 45^\circ + \varphi/2$, $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$, φ 为内摩擦角; $K_o = 0.4$ 。

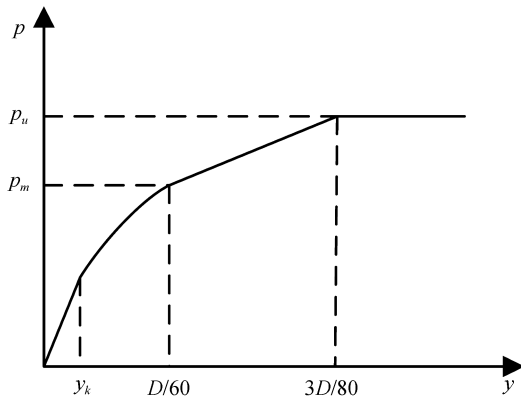


图2 沙土 p - y 曲线

Fig.2 p - y curve of sand

极限承载力为 $p_u = A_s p_s$ 和 $y = D/60$ 对应的土体抗力为 $p_m = B_s p_s$, 其中 A_s 和 B_s 为深度相关的无量纲系数; 初始直线段部分为 $p = k_s z y$, k_s 表示初始地基模量系数; 抛物线部分为 $y_k = (C/kz)^{n/n-1}$, 相应的 p - y 曲线为:

式中: m_o 和 m_i 分别表示外域和内域水体的单位高度附加质量, a 和 b 分别表示空心圆柱的外半径和内半径, h 表示水深, $\lambda = (j - 0.5)/h$, ρ_w 表示水体的密度, I_n 和 K_n 分别表示第一类和第二类修正的 n 阶贝塞尔函数。

1.3 桩-土相互作用

研究桩-土相互作用问题时,一般将地基沿桩深度方向离散为一系列弹簧,而桩被简化为梁柱单元,当土体变形较大时,可以采用 p - y 曲线理论进行研究。该方法考虑土体的非线性, p 和 y 分别表示土体某深度处土体的反力和桩基的位移,而 p - y 曲线用来描述两者的关系。目前, p - y 曲线方法已经广泛应用于地震工程及近海工程中,并被许多国家或地区的规范所采用。

本文桩-土相互作用采用 Reese 等^[29] 提出的沙土 p - y 曲线。如图 2 所示,沙土 p - y 曲线由一段抛物线和三段直线组成。土体极限承载力 p_s 取公式 (5) 和 (6) 计算得到的较小值,即

$$p = C y^{1/n}, C = \frac{p_m}{y_m^{1/n}}, n = \frac{p_m}{m y_m}, m = \frac{p_u - p_m}{y_u - y_m} \quad (7)$$

本文中 p - y 曲线通过 ABAQUS 中的非线性弹簧单元实现。

1.4 风机运行状态模拟

本文分析中将风机系统分两部分考虑,即将海床表面以上部分和桩-土相互作用部分分别建模。风机运行状态下水平荷载会引起土体的侧向位移,因此分析中首先在桩-土模型顶端施加侧向位移进行 pushover 分析以模拟风机运行状态,从而可以计算得到不同侧向位移下桩顶的力-位移曲线。

海床表面以上部分的底端水平向采用线性弹簧单元,其余方向固定约束,其中海床表面土体不同侧向位移状态下的等效弹簧系数通过上一步 pushover 分析获得的力-位移曲线计算得到,即等效弹簧系数等于力 (F) 除以相应的位移 (u_0)。

2 数值算例

本文以一 5MW 单桩式海上风机为研究对象,风机的相关参数由文献[16]和[30]获得。具体参数为:轮毂中心到海平面的高度为 100 m,塔筒高度 87.6 m,水深 20 m,塔筒材料密度为 8500 kg/m^3 ,桩体材料密度为 7850 kg/m^3 ,弹性模量为 210 GPa,

剪切模量为 80.8 GPa,吊篮的质量为 2 40 t,转子(叶片+轮毂)的质量为 110 t。

塔顶和塔底的直径分别为 3.87 m 和 6 m,塔底和塔底的厚度分别为 0.019 m 和 0.027 m;桩的直径为 6 m,厚度为 0.06 m。表 1 为风机水平面以上部分自振频率本文模型与文献[29]计算结果的比较,可以看出两者误差不超过 5%。

表 1 NREL 5MW 风机自振频率

模式	[29]/Hz	本文	误差/%
1	0.324	0.322	-0.62
2	0.312	0.322	3.21
3	2.9	2.834	-2.28
4	2.936	2.834	-3.47

图 3 为桩基入土深度(h_s)不同时桩-土体系的力-位移曲线,由图中可以看出:极限承载力随入土深度的增加呈现先增加后减小的趋势。图 4 为沙土

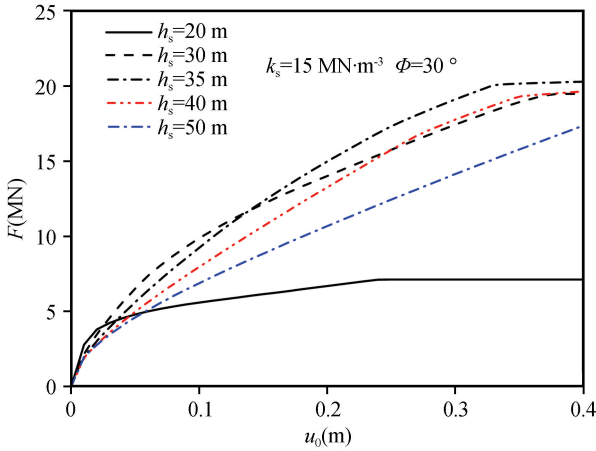


图 3 桩基入土深度不同时桩-土体系的力-位移曲线
Fig.3 The force-displacement curve of the pile-soil system for different pile depth in soil

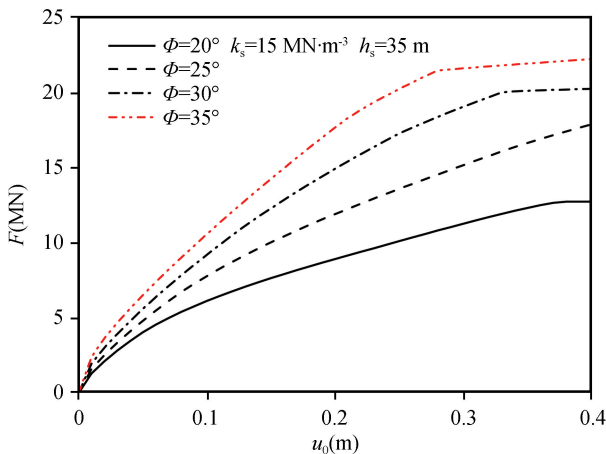


图 4 摩擦角不同时桩-土体系的力-位移曲线
Fig.4 The force-displacement curve of the pile-soil system for different friction angle

内摩擦角不同时桩-土体系的力-位移曲线,由图中可以看出:承载力随内摩擦角的增加而增加。

图 5 为初始地基模量系数不同时桩-土体系的等效弹簧系数(k)随海床表面侧向位移的变化。由图中可以看出,等效弹簧系数随侧向位移的增加而减小,当加载位移较大时($u_0 > 0.03$ m)初始地基模量系数对等效弹簧系数的影响可忽略。

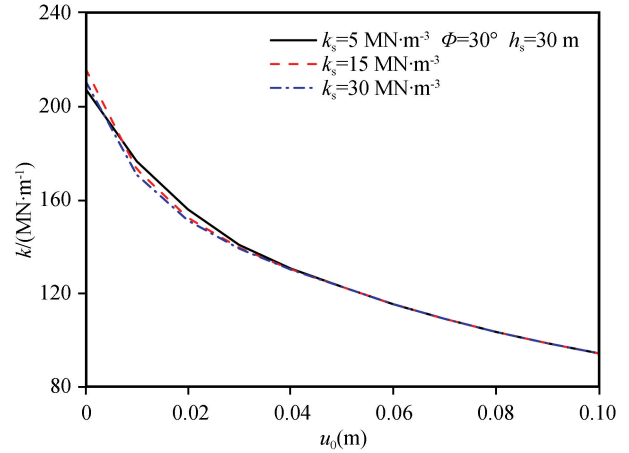


图 5 初始地基模量系数不同时桩-土体系的等效弹簧系数

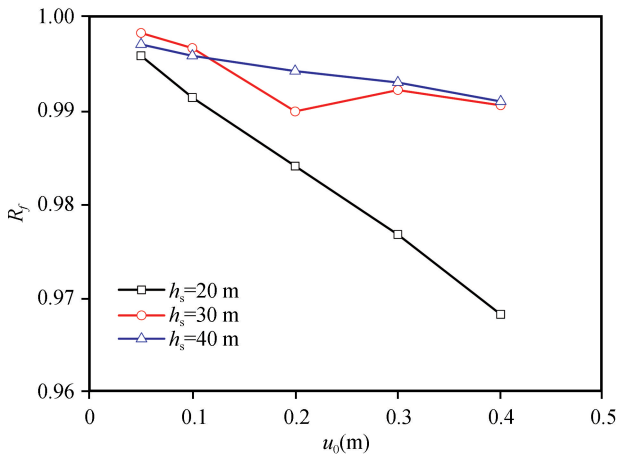
Fig.5 The equivalent spring coefficient of the pile-soil system for different initial foundation modulus coefficient

定义参数 R_f 表示运行状态对风机结构体系自振频率的影响, R_f 定义为侧向位移 u_0 时的自振频率与无侧向位移时自振频率的比值。对图 6 为桩基不同入土深度时系数不同时一阶和二阶频率 R_f 随侧向位移 u_0 的变化。由图中可以看出,随着侧向位移的增大,风机结构体系的自振频率逐渐减小;当桩基入土深度较小($h_s = 20$ m)时,侧向位移 u_0 对自振频率的影响更明显;侧向位移 u_0 对一阶频率的影响较小,对二阶频率的影响显著。图 7 为二阶频率 R_f 随沙土摩擦角的变化,可以看出:侧向位移 u_0 相同时, R_f 随内摩擦角的增加而增大。

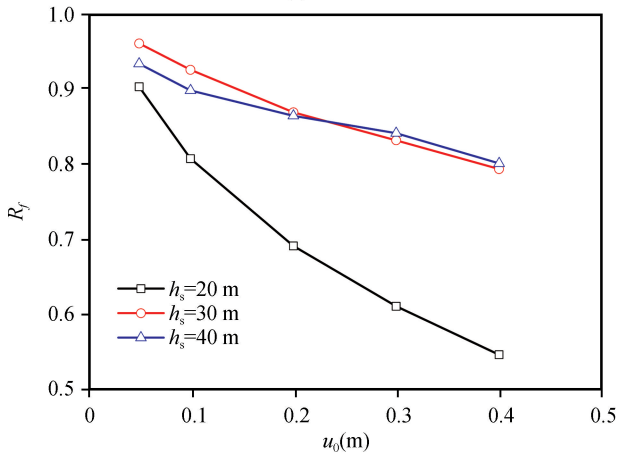
3 结论

本文基于数值方法讨论了大直径海上风机运行状态下体系的自振频率变化,风机运行状态通过海床表面桩基的侧向位移表示。计算结果表明:

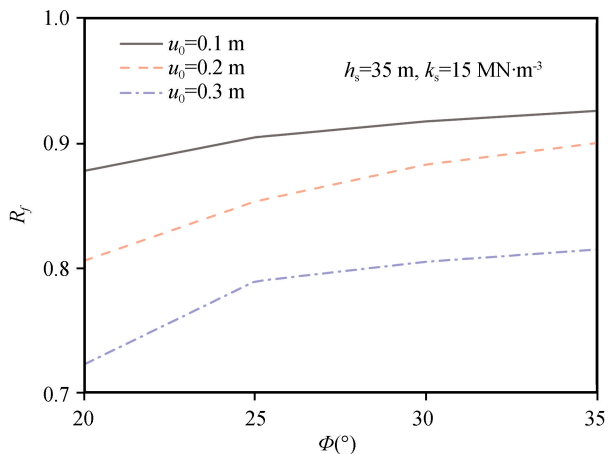
- (1) 桩-土体系的等效弹簧系数随侧向位移的增加而逐渐减小;桩基侧向位移会降低风机结构体系的自振频率。
- (2) 桩基侧向位移对基频的影响较小,对高阶频率的影响显著;桩基入土深度较小时,桩基侧向位



(a) 一阶频率



(b) 二阶频率

图6 桩基入土深度不同时 R_f 随 u_0 的变化Fig.6 R_f varied with u_0 for different pile depth in soil图7 u_0 不同时二阶频率 R_f 随 φ 的变化Fig.7 Second-order frequency R_f varied with φ for different u_0

移对自振频率的影响更明显；桩基侧向位移对自振频率的影响随沙土内摩擦角的增大而减小。

(3) 总体来讲,在大直径海上风机的频率计算

中可忽略风机运行状态对体系自振频率的影响。

参考文献(References)

- [1] 王伟,杨敏.海上风电机组地基基础设计理论与工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
WANG Wei, YANG Min. Design theory and applications of offshore wind turbine foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.
- [2] 周济福,林毅峰.海上风电工程结构与地基的关键力学问题[J].中国科学(物理学 力学 天文学),2013,43(12):1589-1601.
ZHOU Jifu, LIN Yifeng. Essential mechanics issues of offshore wind power systems[J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2013, 43(12): 1589-1601.
- [3] ARAPOGIANNI A, Genach A B. Deep water—the next step for offshore wind energy[M]. Brussels: European Wind Energy Association (EWEA), 2013.
- [4] 李卫超,杨敏,朱碧堂.砂土中刚性短桩的 p-y 模型案例研究[J].岩土力学,2015,36(10):2989-2995.
LI Weichao, YANG Min, ZHU Bitang. Case study of p-y model for short rigid pile in sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2989-2995.
- [5] 漆文刚,高福平.冲刷对海上风力机单桩基础水平承载特性的影响[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2016,46(12):83-92.
QI Wengang, GAO Fuping. Effects of scour on horizontal bearing behavior of monopile foundations for offshore wind turbines[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2016, 46(12): 83-92.
- [6] 俞剑,黄茂松,张陈蓉.黏土中两种不同直径单桩水平循环加载模型试验与分析[J].岩土力学,2016,37(4):973-980.
YU Jian, HUANG Maosong, ZHANG Chenrong. Model tests and analysis of single piles with two different diameters subjected to cyclic lateral loadings in clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 973-980.
- [7] ACHMUS M, KUO Y S, ABDEL-RAHMAN K. Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(5): 725-735.
- [8] DEPINA I, HUE LE T M, EIKSUND G, et al. Behavior of cyclically loaded monopile foundations for offshore wind turbines in heterogeneous sands[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 65: 266-277.
- [9] AHMED S S, HAWLADER B. Numerical analysis of large-diameter monopiles in dense sand supporting offshore wind turbines[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(5): 04016018.
- [10] LOMBARDI D, BHATTACHARYA S, MUIR WOOD D. Dynamic soil-structure interaction of monopile supported wind turbines in cohesive soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 49: 165-180.

- [11] BISOI S, HALDAR S. Dynamic analysis of offshore wind turbine in clay considering soil-monopile-tower interaction[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 63: 19-35.
- [12] FEYZOLLAHZADEH M, MAHMOODI M J, YADAVAR-NIKRAVESH S M, et al. Wind load response of offshore wind turbine towers with fixed monopile platform[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, 158: 122-138.
- [13] ZHENG X Y, LI H B, RONG W D, et al. Joint earthquake and wave action on the monopile wind turbine foundation: an experimental study[J]. *Marine Structures*, 2015, 44: 125-141.
- [14] KIM D H, LEE S G, LEE I K. Seismic fragility analysis of 5 mw offshore wind turbine[J]. *Renewable Energy*, 2014, 65: 250-256.
- [15] ZUO H R, BI K M, HAO H. Using multiple tuned mass dampers to control offshore wind turbine vibrations under multiple hazards[J]. *Engineering Structures*, 2017, 141: 303-315.
- [16] ZUO H R, BI K M, HAO H. Dynamic analyses of operating offshore wind turbines including soil-structure interaction[J]. *Engineering Structures*, 2018, 157: 42-62.
- [17] WANG P G, ZHAO M, DU X L, et al. Wind, wave and earthquake responses of offshore wind turbine on monopile foundation in clay[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 113: 47-57.
- [18] BHATTACHARYA S, ADHIKARI S. Experimental validation of soil-structure interaction of offshore wind turbines[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(5-6): 805-816.
- [19] ANDERSEN L V, VAHDATIRAD M J, SICHANI M T, et al. Natural frequencies of wind turbines on monopile foundations in clayey soils—A probabilistic approach[J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 43: 1-11.
- [20] ZANIA V. Natural vibration frequency and damping of slender structures founded on monopiles[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 59: 8-20.
- [21] PRENDERGAST L J, GAVIN K, DOHERTY P. An investigation into the effect of scour on the natural frequency of an offshore wind turbine[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 101: 1-11.
- [22] YI J H, KIM S B, YOON G L, et al. Natural frequency of bottom-fixed offshore wind turbines considering pile-soil-interaction with material uncertainties and scouring depth[J]. *Wind and Structures*, 2015, 21(6): 625-639.
- [23] ARANY L, BHATTACHARYA S, ADHIKARI S, et al. An analytical model to predict the natural frequency of offshore wind turbines on three-spring flexible foundations using two different beam models[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, 74: 40-45.
- [24] DARVISHI-ALAMOUTI S, BAHAAARI M R, MORADI M. Natural frequency of offshore wind turbines on rigid and flexible monopiles in cohesionless soils with linear stiffness distribution[J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 68: 91-102.
- [25] 杨春宝, 王睿, 张健民. 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 Chunbao, WANG Rui, ZHANG Jianmin. Numerical method for calculating system fundamental frequencies of offshore wind turbines with monopile foundations[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(4): 219-225.
- [26] 刘超, 曹威, 张健民. 海上风电结构地基土动应力变化规律研究[J]. *地震工程学报*, 2014, 36(2): 220-227.
LIU Chao, CAO Wei, ZHANG Jianmin. Numerical study on stress change within the foundation of offshore wind generators[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2014, 36(2): 220-227.
- [27] 崔灿, 蒋晗, 李映辉. 变截面梁横向振动特性半解析法[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(14): 85-88.
CUI Can, JIANG Han, LI Yinghui. Semi-analytical method for calculating vibration characteristics of variable cross-section beam[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(14): 85-88.
- [28] GOYAL A, CHOPRA A K. Simplified evaluation of added hydrodynamic mass for intake towers[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1989, 115(7): 1393-1412.
- [29] REESE LC, COX WR, KOOP FD. Analysis of laterally loaded piles in sand[C]//Proc., VI Annual Offshore Technology Conf., American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineering, 1974, Houston, 473-485.
- [30] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development[R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2009.