

10 MW 大型单桩式海上风机桩土作用研究

曾雨欣^{1,2}, 施伟^{1,2,✉}, 张礼贤², 周映鸣³

- (1. 大连理工大学 深海工程研究中心, 辽宁大连 116024;
2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024;
3. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: [目的]世界范围内已经建成的海上风场大部分位于浅水区域(水深<30 m), 主要以单桩等固定式基础为主。随着风电技术的不断成熟, 海上风电逐渐走向机组大型化趋势, 而单桩海上风机的基础直径也将随着机组大型化而增加。其所受到的环境载荷和土质条件要求也愈加严苛, 对于大直径单桩式海上风机的桩土相互作用的研究成为海上风电技术的关键技术问题之一。[方法]拟对浅水水域 10 MW 大型海上风机, 研究不同桩土模型对大型单桩海上风机的动力响应的影响。[结果]结果表明, 宏单元法考虑了非线性的刚度与塑性, 在特征频率附近的功率谱密度总和, 对比其他传统桩土模型时有很大的优势。[结论]所做研究对风机的整体安全运行具有深远的理论价值与工程应用前景。

关键词: 海上风机; 大直径单桩; 桩土作用模型; 桩土相互作用; 动力响应分析

中图分类号: TK89; P751

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)01-0001-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Pile-Soil Interaction of 10 MW Large Monopile Offshore Wind Turbine

ZENG Yuxin^{1,2}, SHI Wei^{1,2,✉}, ZHANG Lixian², ZHOU Yiming³

- (1. DeepWater Engineering Research Centre, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;
3. China Huaneng Group Clean Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: [Introduction] Most of the completed offshore wind farms in the world are located in shallow water (water depth < 30 m), mainly based on fixed foundations such as monopiles. With the increasingly mature wind power technology, offshore wind power gradually shifts towards the trend of large unit, and the foundation diameter of single-pile offshore wind turbines will also increase as the wind turbine become larger. The environmental loads and soil conditions are becoming more and more stringent. The study on pile-soil interaction of large-diameter monopile offshore wind turbines has become one of the key technical issues of offshore wind power technology. [Method] The impact of different pile-soil models on the dynamic response of large monopile offshore wind turbines in shallow water areas with 10 MW large offshore wind turbines was studied. [Result] The results show that the macro element method considers the nonlinear stiffness and plasticity, thus the sum of power spectral density near the characteristic frequency of the macro element method is large, which demonstrates the great advantages of the macro element method over other traditional pile-soil models. [Conclusion] The study of this paper has far-reaching theoretical value and engineering application prospects for the overall safe operation of wind turbine.

Key words: offshore wind turbine; large-diameter monopile; pile-soil interaction model; pile-soil interaction; dynamic response analysis

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-12-21 修回日期: 2022-12-29

基金项目: 中南院水能资源利用关键技术重点实验室开放基金“超大型单桩式海上风机桩土作用研究”(PKLHD202003); 国家自然科学基金面上项目“复杂海洋环境下大型漂浮式风机动力响应耦合机理分析与试验研究”(52071058); 国家自然科学基金重点项目“实现海上风电和渔场综合开发的新型结构动力特性及安全控制策略研究”(51939002)

0 引言

石化能源为主的能源结构是导致当今世界上雾霾等环境问题的主要原因。中国作为世界最大的能源消费国及二氧化碳排放国,亟须探索以“双碳”目标为导向的能源安全和结构优化的新路径^[1]。风力发电作为一种新型发电技术,得到了广泛运用,尤其是近些年随着新技术与新设备的运用,风力发电得到很大发展^[2]。除了在陆地上布置风机外,海上风机由于近海地区风力条件更强、更稳定而发展迅速。根据目前的数据,欧洲海岸已经建造大约 1 000 多个海上风机。按照目前的发展趋势,到 2030 年,全球海上风电总容量将达到 66.5 GW^[3]。开发和利用海上风能资源,对于治理大气雾霾、调整能源结构具有重要意义,是实现经济低碳、绿色、可持续发展的有效途径。

单桩基础凭借其加工制造简单、安装便捷、结构受力明确等优势,被广泛应用于近海风力发电工程项目中。通过分析大量海洋风力发电工程项目资料,国际上采用单桩基础的海上风电场占总量的 53% 左右,已建成海上风机基础 75% 为单桩基础。海上风机单桩基础均属于大直径桩,其直径一般大于 5 m,随着海上风电大型化发展,风电单机装电容量的增加,其直径甚至可达到 8 m 以上。近年来的相关研究表明对于海上风机单桩基础,其大直径效应不可忽略^[4]。

Matlock^[5]最早提出了软黏土的 p - y 曲线、Reese^[6]、Mevay^[7] 分别提出了硬粘土和砂土的 p - y 曲线,3 种经典 p - y 曲线已经被列入美国石油协会规范。Brown 等^[8]利用三维有限元模型分析了水平荷载作用下桩-土系统的响应规律。Kouda 等^[9-11]通过离心机试验研究了水平荷载作用下桩基础的承载特性。Damgaard 等^[12]使用半解析频域解决方案来评估桩土系统的动态阻抗函数,以校准集总质量模型集成到气动弹性多体代码中。他们为单桩基础使用了 3 种不同的模型:表观固定性模型、海床水平的固定支撑模型和耦合参数模型。该研究的作者得出结论,就海床层面的疲劳而言,桩土相互作用现象对于设计很重要。挪威船级社在其海上风机基础设计规范(DNVGL-ST-0126)中指出,传统 p - y 曲线仅用于细长的桩,其直径不超过 1 m,用于大直径单桩的 p - y

曲线需要进一步验证^[13]。目前,海上风机单桩基础桩土作用主要沿用传统设计方法,如 AF 法、 p - y 曲线法。近年来,挪威岩土工程学会(NGI)开发了一种新的单元模型,宏单元法(Macroelement^[14]),较好地解释了海上风机土壤与结构的相互作用。

综上所述,本文针对 10 MW 大型单桩风机,采用多种不同的桩土作用模型,考虑波浪、风和风机系统的相互作用,揭示 10 MW 大型海上单桩风机在风浪联合作用下的动力学耦合机理。研究发现宏单元法考虑了非线性的刚度与塑性,使得宏单元法在对比其他传统桩土模型时有很大的优势。

1 计算模型与理论

1.1 桩土作用模型

在本文中 4 种桩土模型将用来参与计算,这 4 种模型是 AF 法、 p - y 曲线法、刚性连接法与宏单元法。AF 法假设桩延伸到特定的深度,在海床上产生的侧向位移和旋转与真正的桩埋在土壤中相同^[15-16]。AF 法使用的模型用一个虚构的桩取代地基和土壤,桩固定在泥线以下的底部。公式(1)给出了在一个平面内弯曲的轴对称悬臂梁的二维刚度矩阵,忽略了竖向和扭转自由度。刚度矩阵基于欧拉-伯努利梁理论。

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{HH} & \mathbf{K}_{HR} \\ \mathbf{K}_{RH} & \mathbf{K}_{RR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI_{AF}}{L_{AF}^3} & -\frac{6EI_{AF}}{L_{AF}^2} \\ -\frac{6EI_{AF}}{L_{AF}^2} & \frac{4EI_{AF}}{L_{AF}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

L_{AF} —— 桩的长度(m);

EI_{AF} —— 桩截面的抗弯刚度($N \cdot m^2$)。

刚度矩阵包括水平刚度 \mathbf{K}_{HH} 、旋转刚度 \mathbf{K}_{RR} 以及水平自由度与旋转自由度之间的交叉耦合刚度 $\mathbf{K}_{HR}=\mathbf{K}_{RH}$,其中对角线强度系数(交叉耦合系数)相互匹配,这是单桩式海上风电中的常见做法。但是,必须认识到,如果不匹配非对角线系数,海底的平移和旋转位移就不能精确地再现。除此之外,Løken 等^[17]开发了一种新的方法来改进传统的 AF 模型。所提出的方法可以考虑刚度矩阵的所有项。

Winckler^[18]在研究海上油气相关结构时提出了一种方法,即用弹性梁取代桩,用一组独立弹簧取代土。这些弹簧分布在单桩嵌入的底部。经过了这段

时期的发展,它现在被称为 p - y 曲线法。实际使用的 p - y 曲线为 API^[19] 推荐的曲线,API 推荐的砂土中桩的 p - y 曲线如下:

$$p = Ap_u \tanh\left(\frac{kz}{Ap_u}y\right) \quad (2)$$

式中:

p_u ——泥面线以下 z 深度处的极限水平阻力 ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$);

k ——最初的地基反力系数随深度的增加速率 ($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$);

A ——静荷载或循环外荷载条件下的经验系数;

Y —— z 深度处的横向位移(m)。

本文参考 NGI^[20] 的相关规定,采用一系列 p - y 曲线来表征下部单桩在横向荷载下的相对位移。沿着单桩向下方向,每隔 0.75 m 有 61 条 p - y 曲线。每条 p - y 曲线由 22 对点来定义。重要的是,每单位长度桩的横向土阻力是与单位长度桩的横向位移相对应的。桩的横向土阻力 p 与桩横向位移 y 之间存在对应关系,桩横向位移 y 随桩长呈非线性变化。

Bazeos^[21] 和 Lavassas 等人^[22] 采用刚性连接法,在他们的研究中,上部单桩风机模型是由塔筒的梁单元和上部风机的集中质量建模的。在这个模型中,完全忽略基础和周围的土壤,桩与海底刚性连接。

宏单元法出自 REDWIN 项目^[14] 中,它是在多面塑性框架内制定的具有随动硬化的弹塑性模型^[23]。它将桩和周围土壤简化为一组线性和非线性荷载-位移关系,在海床面的 6 个自由度中,将桩和结构的其余部分分开。它可以表示在实验测试和现场观察到的非线性滞回荷载-位移响应,包括水平荷载和弯矩之间的耦合响应。该模型已被证明与土壤和单桩的有限元分析结果、大型桩试验结果以及安装在北海的海上风机的全尺寸现场测量结果一致^[24]。

1.2 上部风机

为了更好地研究土壤与结构的相互作用,本文对上部风机进行了简化。仅对支撑结构进行建模,并使用集中质量和惯性矩表示转子机舱组件(Rotor-Nacelle Assembly)。为了更好地建立模型和相关结果的输出,坐标系的建立如图 1 所示。转子机舱组件采用集中质量点进行建模,质量点的质量和转动惯量如表 1 所示,其采用的是国际能源署(IEA)开发设计的 10 MW 风机。

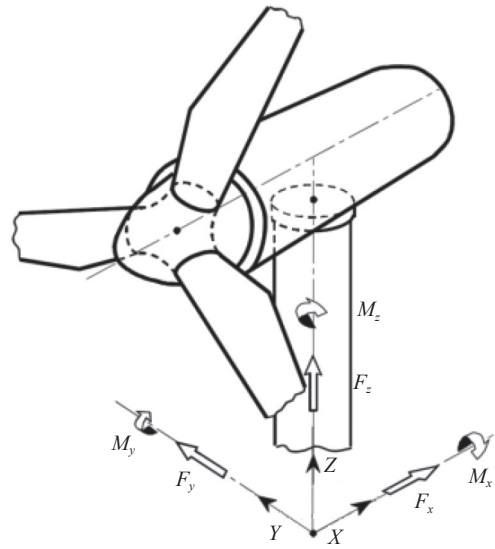


图 1 坐标系选取

Fig. 1 Selection of coordinate system

表 1 转子机舱组件参数

Tab. 1 Parameters of rotor-nacelle assembly

参数	数值	描述
质量/t	839.741	—
CM_x/m	-5.8	质心与塔顶的相对位置
CM_y/m	0	
CM_z/m	3.19	
$I_{xx}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1.84×10^8	质心处的惯性矩
$I_{yy}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	9.61×10^7	
$I_{zz}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1.06×10^8	
$I_{xy}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2) = I_{yx}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0	质心处的惯性积
$I_{xz}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2) = I_{zx}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	-7.11	
$I_{yz}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2) = I_{zy}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0	

1.3 塔筒和单桩

本文中使用的塔筒采用的是海上 DTU 10 MW 风机中的塔筒。图 2 显示了塔筒和单桩的示意图和高度信息。对于塔筒和单桩,两者的材料特性相同,其中杨氏模量(E)为 210 GPa,剪切模量(G)为 80.8 GPa,密度(ρ)为 $8\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。塔顶直径为 5.5 m,壁厚为 30 mm,塔基直径为 8.3 m,壁厚 70 mm。塔顶部到塔基的距离为 105.63 m。单桩从塔基底部到海床的总长度为 40 m,壁厚为 110 mm。结构部分水深为 30 m。对于 AF 模型,建模期间需要在海床底部延伸一段。延伸部分的外径与单桩的外径相同。其刚度矩阵基于欧拉-伯努利梁理论(见公式 1)。表 2 总结了 AF 方法的参数和海床等效刚度。

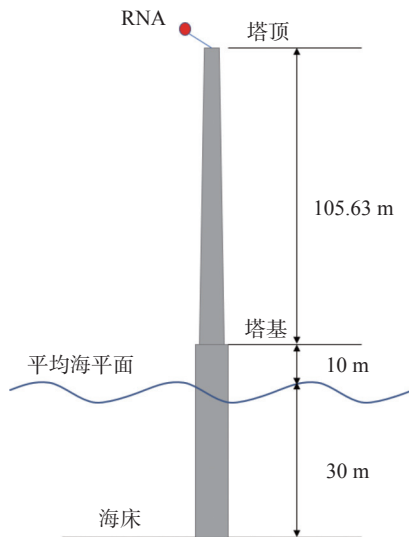


图 2 塔筒与单桩示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tower and monopile

表 2 AF 模型延伸部分信息

Tab. 2 AF model extension information

参数	等效刚度矩阵
$L=19.60\text{ m}$	$K_{HH} = 6.34 \times 10^9\text{ N/m}$
$E=130.93 \times 10^9\text{ (N}\cdot\text{m}^{-2})$	$K_{HR} = -6.21 \times 10^9\text{ N/rad}$
$\varphi_{\text{ext}}=9\text{ m}$	$K_{RH} = -6.21 \times 10^9\text{ N/m}$
$\varphi_{\text{int}}=8.78\text{ m}$	$K_{RR} = 8.11 \times 10^9\text{ Nm/rad}$

1.4 桩土模型的建立

本文使用了 SACS 与 OpenFAST 两种软件,其中 AF 法, p - y 曲线法刚性连接法 (Rigid) 通过在

SACS 软件中进行建模,宏单元法 (REDWIN) 在 OpenFAST 中进行建模。SACS 是一个集成的有限元结构分析套件,专门为海上结构 (包括石油平台和海上风力) 的设计、制造、安装、操作和维护提供服务。在这项工作中,利用 SACS 中的 Extract Mode Shapes 模块,可以获得每个桩-土模型的特征频率和模态。利用 Module Time History Wave, Wind and Force 模块,得到了各种桩-土模型在风和波条件下的响应。此模块采用了模态叠加方法,通过在软件中对结构施加不同荷载,可以得到结构在关键节点位置的响应。OpenFAST 也是由各个模块组成,比如有 Aerodyn、Subdyn 和 InflowWind、Beamdyn 等等模块。通过对各个模块进行使用,即可得出相应的结果。图 3 显示了 4 种桩土模型的示意图。为了重点验证桩土模型与上部单桩风机的相互作用行为,本文对上部风力机进行了简化,仅对支撑结构进行建模,并使用集中质量点和转动惯量来表示转子机舱组件 (RNA)。在模型中,各节点信息及单桩位置如图 4、表 3 所示。

2 工况选取

本文重点验证桩土模型与上部单桩风机的相互作用行为,表 4 列出了本文中模拟的工况,其中包括静态分析、模态分析、单独风、单独浪和风浪联合条件下的模拟。需要注意的是,涉及风的荷载情况 (即单独风和风浪联合) 的响应仅用于验证目的,且在使用的模型中缺乏气动阻尼,故不能被代表实际

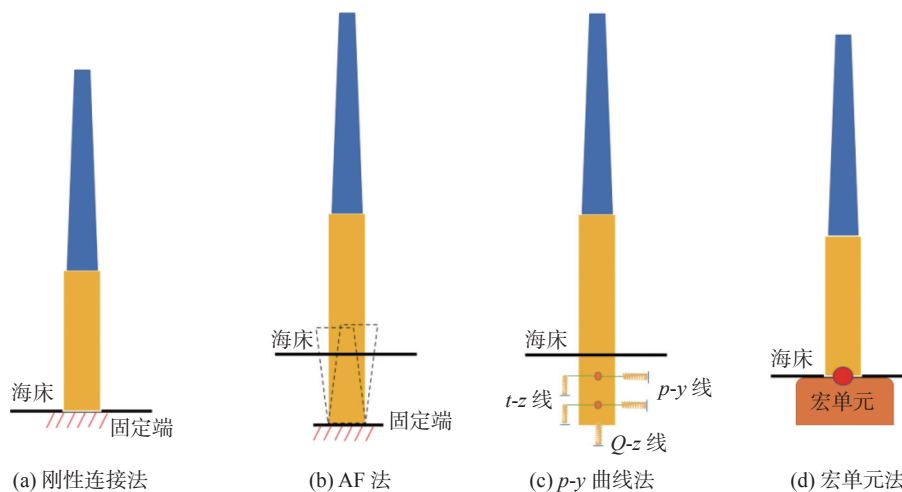


图 3 桩土模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pile-soil model

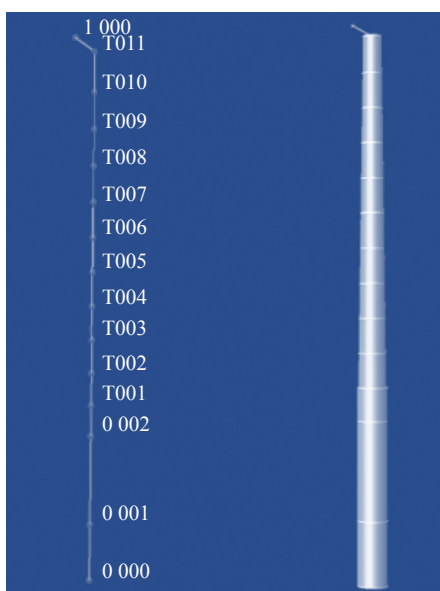


图 4 节点信息示意图

Fig. 4 Schematic diagram of node information

表 3 节点信息
Tab. 3 Node information

节点	坐标/m	外径/m	壁厚/mm
1 000 (RNA)	(-5.8,0,148.82)	-	-
T011 (塔顶)	(0,0,145.63)	5.50	30
T010	(0,0,134.55)	5.79	30
T009	(0,0,124.04)	6.07	35
T008	(0,0,113.54)	6.35	45
T007	(0,0,103.03)	6.63	50
T006	(0,0,92.53)	6.91	55
T005	(0,0,82.02)	7.19	60
T004	(0,0,71.52)	7.46	60
T003	(0,0,61.01)	7.74	65
T002	(0,0,50.51)	8.02	70
T001 (塔基)	(0,0,40.00)	8.30	70
0 002 (水面)	(0,0,30.00)	9.00	110
0 001 (海床)	(0,0,0)	9.00	110

运行条件下的风机。在第 3 节中,将对表 4 所示的研究内容进行分析,来对比各个桩土模型的特点。

表 4 工况定义表

Tab. 4 Definition of working conditions

研究类型	工况	风况	海况
静态分析	LC1	无风	无波浪
模态分析	LC2	无风	无波浪
单独风	LC3	$V_{hub} = 9.06 \text{ m/s}$	无波浪
单独浪	LC4	无风	$H_s = 1.25 \text{ m}, T_p = 5.5 \text{ s}$
风浪联合	LC5	$V_{hub} = 9.06 \text{ m/s}$	$H_s = 1.25 \text{ m}, T_p = 5.5 \text{ s}$

3 结果与讨论

3.1 静态分析

LC1 是静态分析,其各种桩土模型是仅以重力加速度作为唯一的外部荷载。通过这种方式来保证结构模型的正确性,并且对特定位置处的偏转和位移进行比较,也可以得到各种模型之间的关系。图 5 显示了在仅限重力条件下沿 x 轴(前后方向)的塔顶水平位移,这种位移是由于单桩式风机偏心结构引起的,这受到结构整体刚度的影响。从图 5 中可以看到刚性连接法在重力条件下的水平位移是最小的,这是由于刚性连接法在海床位置处是完全固定的,这对于整个塔筒-单桩模型在运动时有非常大的限制。其次 AF 法的水平位移排在第二低,这是由于 AF 法属于线性方法,这使得其塔顶水平位移比非线性的 $p-y$ 曲线法得到的水平位移略低。在图中我们看到宏单元法 (REDWIN) 得出的结果是 4 个模型中

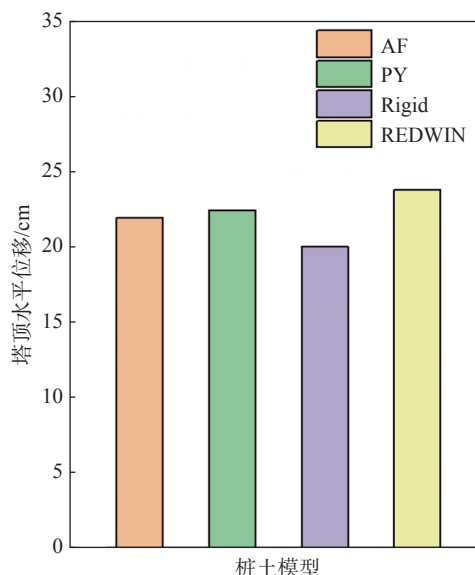


图 5 塔顶水平位移

Fig. 5 Horizontal displacement of tower top

最大的,这是因为此模型考虑了非线性的刚度与塑性,这使得宏单元法得出的塔顶水平位移最大。

3.2 模态分析

模态分析是通过结构系统的特征频率,阵型等来对桩土模型进行一个对比。表 5 显示了 4 种模型得到的在前后方向(Fore-Aft)与两侧方向(Side-Side)的基频。从表中可以得到,刚性连接法的特征频率与其他 3 种模型相比具有一定的差距,这与海床位置处的限制有很大关系。同时可以看到 AF 法, p - y 曲线法和宏单元法得出的一阶频率差距不大,有着很好的一致性,宏单元法得到的一阶频率最高。而对于二阶频率来说,其得到的结果不如一阶频率一样有着较好的相似性,这与各种模型在海床位置处的限制方式有很大关系。

图 6 显示了在前后方向和两侧方向上 4 种桩土模型的阵型对比,其位移进行了归一化处理,有利于更加直接的来进行模型之间的对比。从图中可以看到,一阶阵型中最大的位移在塔顶位置处,4 种桩土

表 5 4 种模型特征频率对比

Tab. 5 Characteristic frequency comparison of the four models

桩土模型	1 st Fore-Aft	1 st Side-Side	2 nd Fore-Aft	2 nd Side-Side
AF法	0.251	0.252	1.175	1.193
p - y 曲线法	0.245	0.246	1.020	1.052
Rigid	0.276	0.278	1.364	1.450
REDWIN	0.253	0.254	1.222	1.187

模型表现出了一致性。对于二阶阵型,最大位移则是出现在约整个结构高度的三分之二高度处,在这种情况下,刚性连接法得出的结果在下部产生的偏转位移较小,而在塔顶位置处 AF 法与 p - y 曲线法有着最大的偏转位移。

3.3 单独风模拟

在分析了 4 种桩土模型的静态荷载情况和特征频率后,本节将对单独风情况下的桩土模型结果进行分析。如第 1 节所述,上部风机被简化成了一个

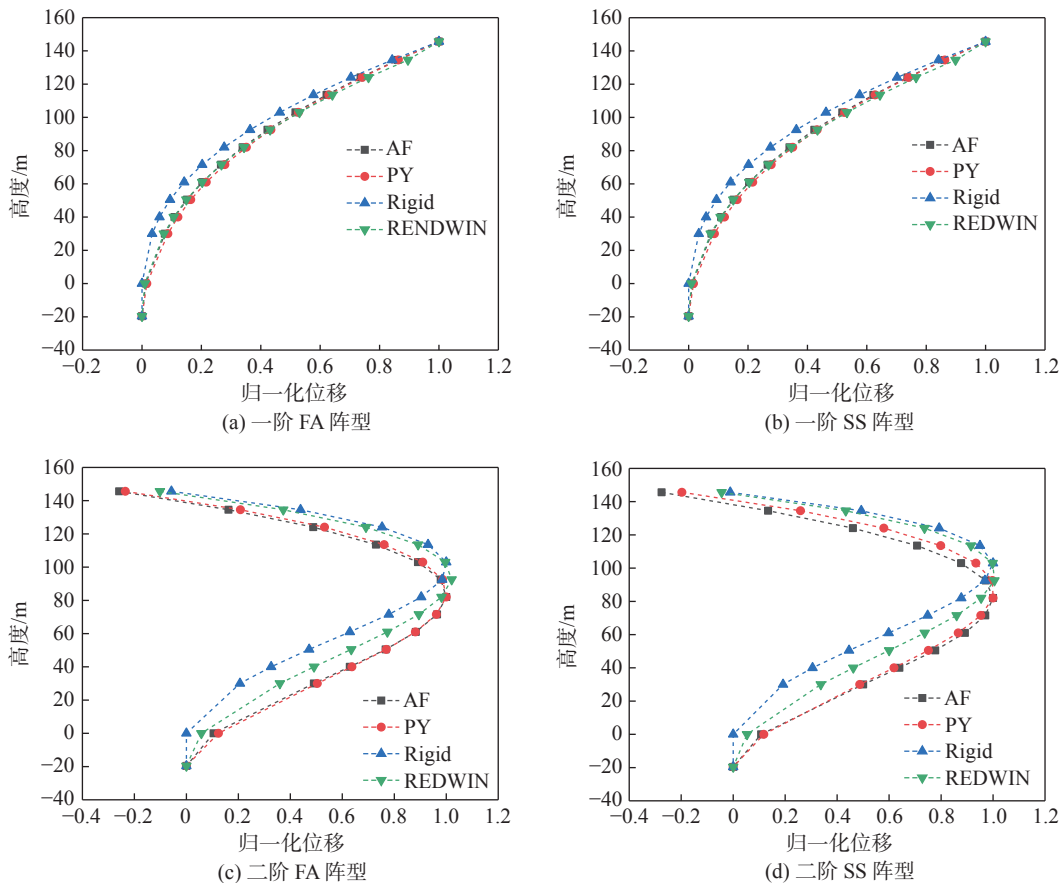


图 6 4 种模型阵型对比

Fig. 6 Comparison of four model formations

集中质量点,故在本节和接下来的风浪联合工况下将作用在塔顶处的风推力作为外力对整个模型进行一个加载。图 7 塔顶在水平方向(沿 x 方向)的加速度时域图,从图中可以看到,4 种桩土模型具有一定的一致性,同时刚性连接法与宏单元法在幅值上比其他两种模型稍大。图 8 是塔顶在水平方向的加速度 PSD 图,其主要的激励频率和特征频率在图中有所显示(红色垂线中间部分为一阶 FA 频率范围,蓝色垂线中间部分为二阶 FA 频率范围,虚线为 3 倍转子频率 $3P$)。从图中可以看到,除了结构自身存在的特征频率之外, $3P$ 成为了对塔顶加速度影响的主要激励因素。图 9 对比了不同桩土模型塔顶水平加速度功率谱密度在特定频域区间内的总和,一个是 0.2 Hz 到 0.3 Hz 这个频率区间,另一个是 1.0 Hz 到 1.5 Hz 这个频率区间,考虑到在 PSD 图中 4 个桩土模型在两个范围内具有不小的响应,故可以认为是一阶 FA 频率和二阶 FA 频率的激励效果。从图中可以看到,刚性连接法虽然在一阶 FA 频率附近的总和与其他三种模型较为接近,但是在二阶 FA 频率附近的总和却较低。宏单元法比 AF 法与 p - y 曲线法在一阶 FA 频率附近的总和大,这是因为宏单元法考虑了非线性的刚度与塑性。从图中可以看到一阶 FA 频率中的幅值要比二阶 FA 频率中的要大的多,这在整个运动中占主要作用。

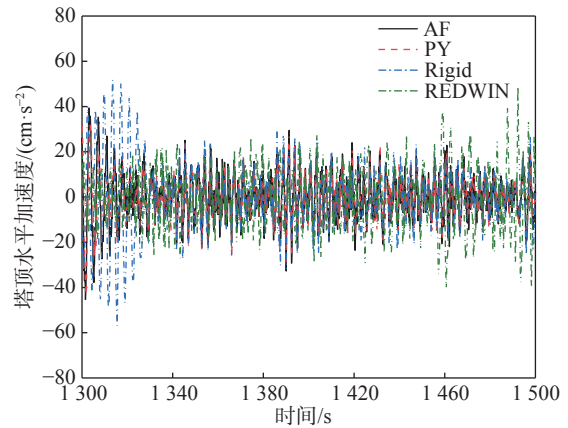


图 7 塔顶水平加速度时域图

Fig. 7 Time domain diagram of horizontal acceleration of the tower top

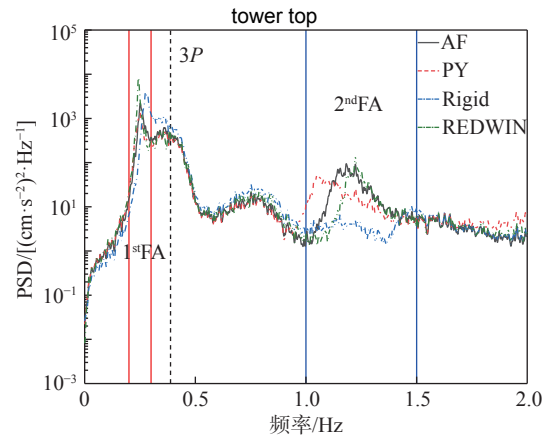


图 8 塔顶水平加速度 PSD 图

Fig. 8 PSD diagram of horizontal acceleration of the tower top

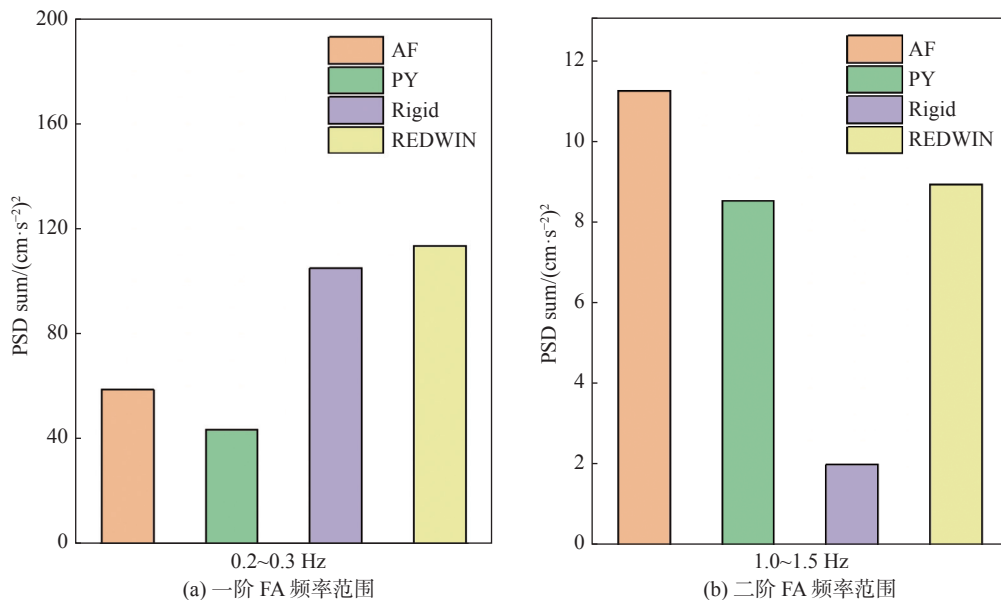


图 9 塔顶加速度功率谱密度在特定频域区间内的总和

Fig. 9 The sum of the acceleration power spectral density of the tower top in a specific frequency domain

图 10 显示了海床倾覆力矩(沿 FA 方向)时域图, 图 11 显示了海床倾覆力矩 PSD 图, 其得到的结果与塔顶加速度的情况类似。其主要的区别是在 0 Hz 时 PSD 中显示的值不为 0, 这是 4 种桩土模型在受到风荷载时弯矩的平均值, 这主要是作用在结构上的风推力导致的。图 12 同样对特征频率范围内的功率谱密度进行统计, 得到的结果仍然是宏单元法的值最大, 这与前面的结论相似。

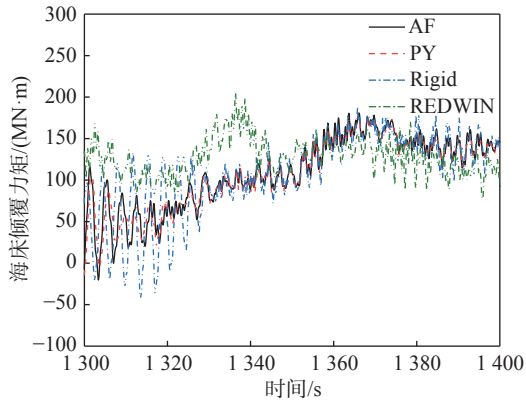


图 10 海床倾覆力矩时域图

Fig. 10 Time domain diagram of sea-bed overturning moment

3.4 单独浪模拟

LC4 不规则波浪的模拟, 其有义波高为 1.25 m, 波浪周期为 5.5 s。在模拟过程中, 拖曳力系数 C_D, C_M 分别取为 1 和 2。由于波浪的峰值频率 ($1/T_p$) 落在

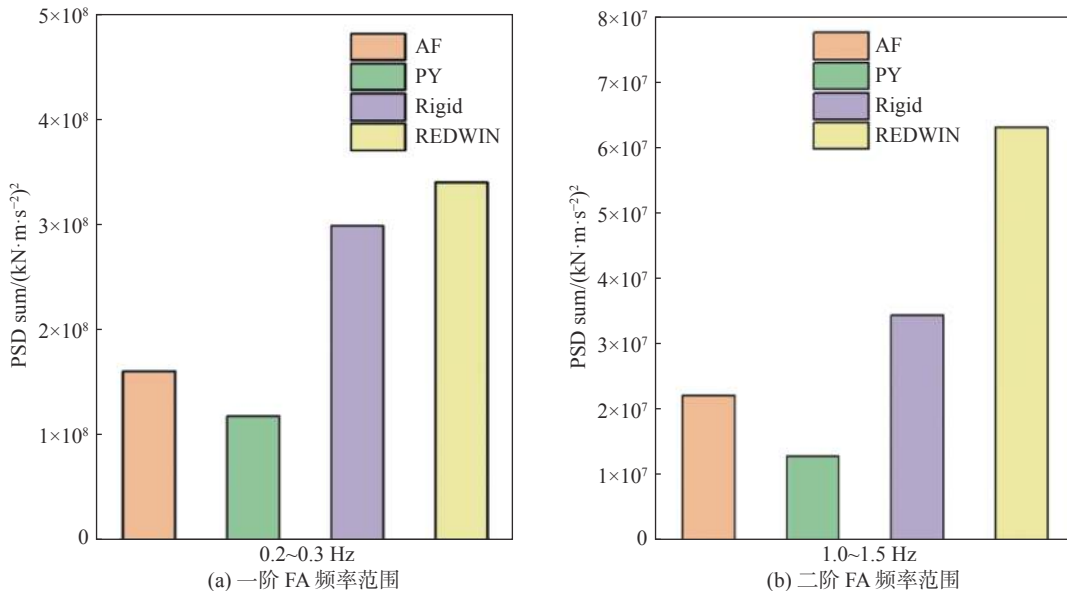


图 12 海床倾覆力矩功率谱密度在特定频域区间内的总和

Fig. 12 The sum of the power spectral density of sea-bed overturning moment in a specific frequency domain

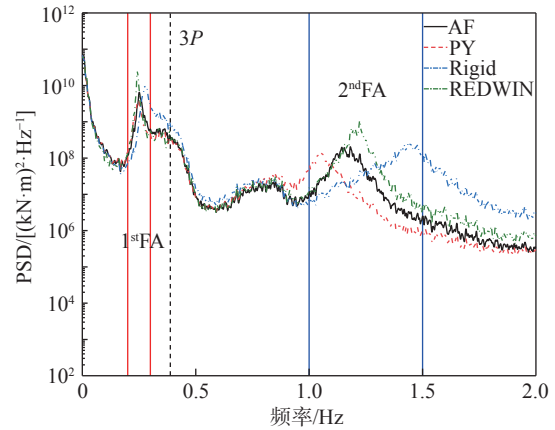


图 11 海床倾覆力矩 PSD 图

Fig. 11 PSD diagram of sea-bed overturning moment

一阶 FA 频率范围内, 故在此波浪条件下, 我们只考虑 0 到 0.5 Hz 之间内的响应。图 13、图 14 显示了塔顶在水平方向(沿 x 方向)和海床倾覆力矩(沿 FA 方向)的加速度 PSD 图。从图中可以看到, 刚性连接法在一阶 FA 频率范围内有着最小的响应, 这可能是与其他 3 种桩土模型相比, 其自身的频率较高。图 15 同样对比了不同桩土模型塔顶水平加速度, 海床倾覆弯矩功率谱密度在特定频域区间内的总和 (0.2~0.3 Hz)。从图中可以看到刚性连接法的总和值是最小的, 远远小于 AF 法与 p - y 曲线法, 同时宏单元法得到的结果是最大, 这个可能是到宏单元法

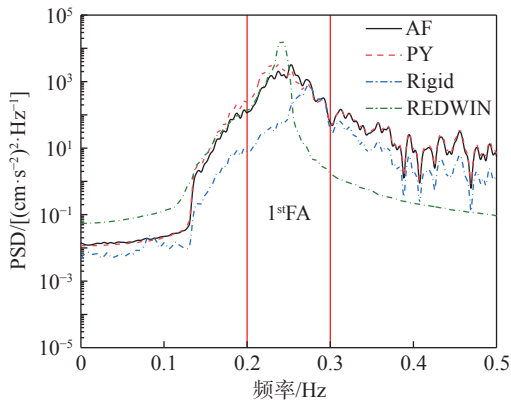


图 13 塔顶水平加速度 PSD 图

Fig. 13 PSD diagram of horizontal acceleration of the tower top

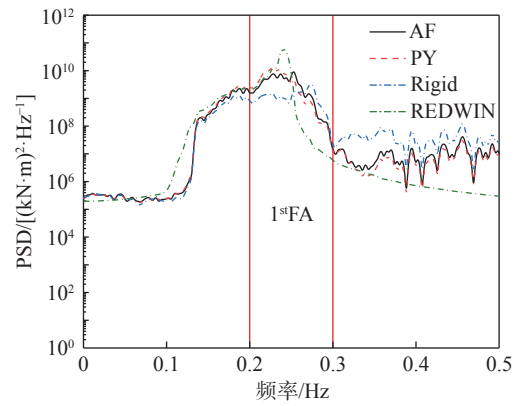
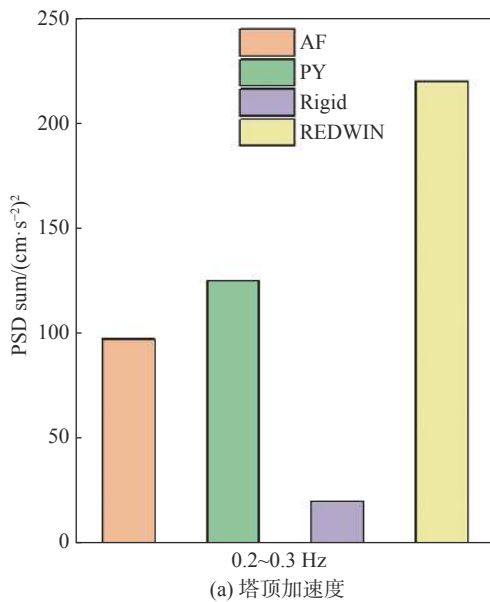
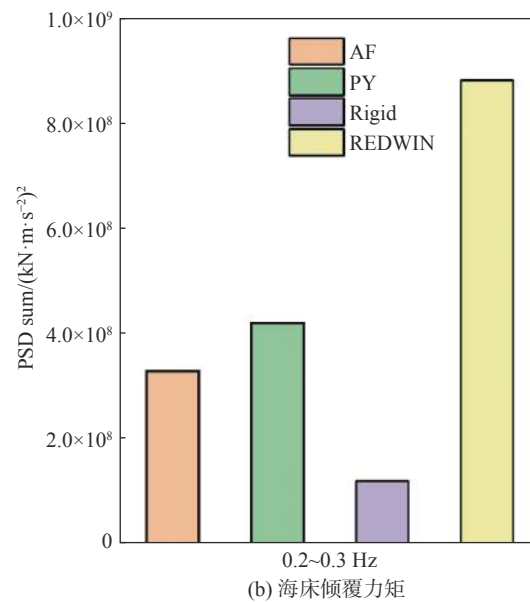


图 14 海床倾覆力矩 PSD 图

Fig. 14 PSD diagram of sea-bed overturning moment



(a) 塔顶加速度



(b) 海床倾覆力矩

图 15 功率谱密度在特定频域区间内的总和

Fig. 15 The sum of the power spectral density in a specific frequency domain

在海床位置荷载限制方式有关。

3.5 风浪联合模拟

风浪联合模拟结合了 LC3 工况中的单独风条件和 LC4 工况中的单独浪条件。图 16 显示了塔顶加速度沿 x 轴的 PSD 图, 图 17 是相应的 PSD 之和, 它可以与前面单独风条件下的情况进行比较。对比可以发现, 两者之间的主要差别是, 风浪联合作用下一阶 FA 频率处的响应会增大, 这是由于波浪叠加作用产生的影响。同时宏单元法二阶 FA 频率会有一些轻微程度的偏移, 这可能是由于波浪作用条件下水面变化引起的。图 18 显示了海床倾覆力矩 PSD

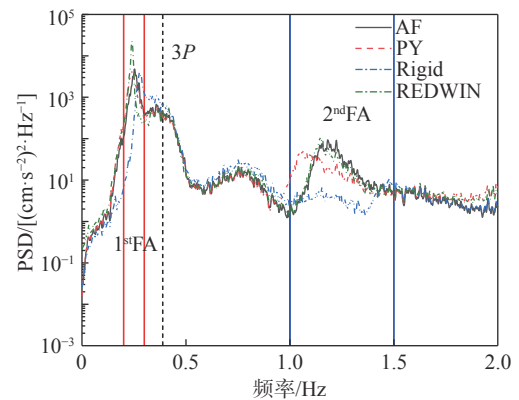
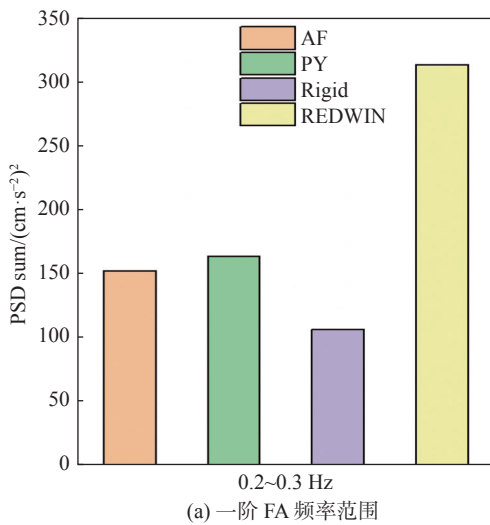
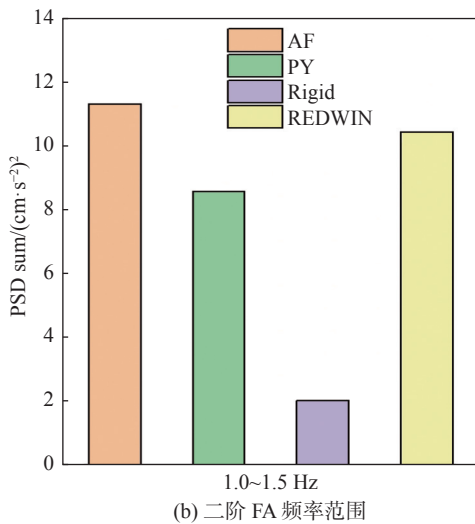


图 16 塔顶水平加速度 PSD 图

Fig. 16 PSD diagram of horizontal acceleration of the tower top



(a) 一阶 FA 频率范围



(b) 二阶 FA 频率范围

图 17 塔顶加速度功率谱密度在特定频段区间的总和
Fig. 17 Sum of the acceleration power spectral density of the tower top in a specific frequency domain

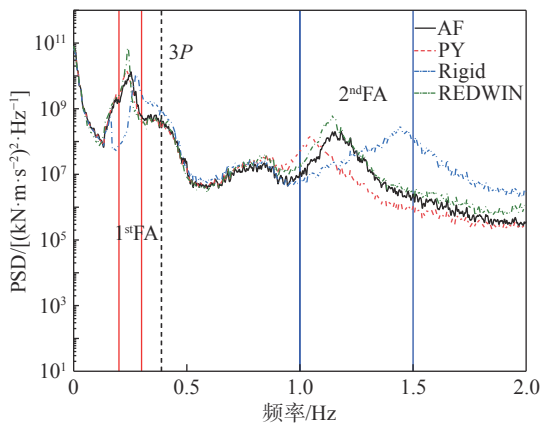
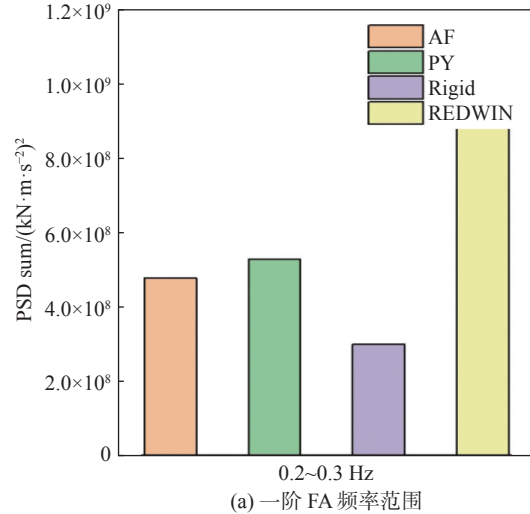


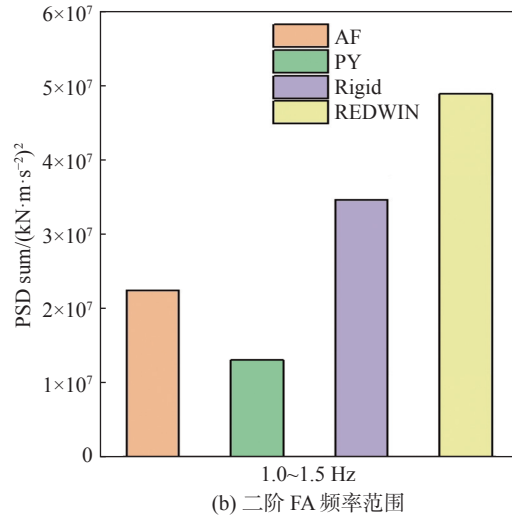
图 18 海床倾覆力矩 PSD 图

Fig. 18 PSD diagram of sea-bed overturning moment

图, 图 19 是相关的 PSD 总和。和前面单独风, 单独浪得到的结果类似, 宏单元法在一阶 FA 频率和二阶 FA 频率附近的响应最大。



(a) 一阶 FA 频率范围



(b) 二阶 FA 频率范围

图 19 海床倾覆力矩功率谱密度在特定频段区间的总和
Fig. 19 The sum of the power spectral density of sea-bed overturning moment in a specific frequency domain

4 结论

在本研究中, 4 种不同的桩土模型用于 10 MW 大型单桩风机的比较研究。本文采用 SACS 与 OpenFAST 软件进行建模, 并对上部风机进行了简化。通过在单独风、单独浪和风浪联合条件下输出典型位置的信息, 得出以下结论:

1) 刚性连接法在重力条件下的水平位移是最小的, 这是由于刚性连接法在海床位置处是完全固定

的。AF 法的水平位移排在第二低,这是由于 AF 法属于线性方法,这使得其塔顶水平位移比非线性的 p - y 曲线法得到的水平位移略低。宏单元法 (REDWIN) 得出的结果是 4 个模型中最大的,这是因为此模型考虑了非线性的刚度与塑性,这使得宏单元法得出的塔顶水平位移最大。

2) 刚性连接法的特征频率与其他 3 种模型相比具有一定的差距,这与海床位置处的限制有很大关系。同时可以看到 AF 法, p - y 曲线法和宏单元法得出的一阶频率差距不大,有着很好的一致性。而对于二阶频率来说,其得到的结果不如一阶频率一样有着较好的相似性,这与各种模型在海床位置处的限制方式有很大关系。

3) 宏单元法比 AF 法与 p - y 曲线法在特征频率附近的功率谱密度总和大,这是因为宏单元法考虑了非线性的刚度与塑性,这表明了宏单元法在对比其他传统桩土模型时有很大的优势。同时一阶 FA 频率中的幅值要比二阶 FA 频率中的要大的多,这在整个运动中占主要作用。

参考文献:

- [1] 黄晟,王静宇,郭沛,等.碳中和目标下能源结构优化的近期策略与远期展望 [J]. *化工进展*, 2022, 41(11): 5695-5708. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1209](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1209).
HUANG S, WANG J Y, GUO P, et al. Short-term strategy and long-term prospect of energy structure optimization under carbon neutrality target [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(11): 5695-5708. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1209](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1209).
- [2] 覃盛琼,程朗,何占启,等.风力发电系统研究与应用前景综述 [J]. *机械设计*, 2021, 38(8): 1-8. DOI: [10.13841/j.cnki.jxsj.2021.08.001](https://doi.org/10.13841/j.cnki.jxsj.2021.08.001).
QIN S Q, CHENG L, HE Z Q, et al. Review of research and application on the wind power-generation system [J]. *Journal of Machine Design*, 2021, 38(8): 1-8. DOI: [10.13841/j.cnki.jxsj.2021.08.001](https://doi.org/10.13841/j.cnki.jxsj.2021.08.001).
- [3] SÁNCHEZ S, LÓPEZ-GUTIÉRREZ J S, NEGRO V, et al. Foundations in offshore wind farms: evolution, characteristics and range of use. Analysis of main dimensional parameters in monopile foundations [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7(12): 441. DOI: [10.3390/jmse7120441](https://doi.org/10.3390/jmse7120441).
- [4] 孙永鑫.近海风机超大直径单桩水平承载特性试验与数值分析 [D].杭州:浙江大学,2016.
SUN Y X. Experimental and numerical studies on a laterally loaded monopile foundation of offshore wind turbine [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [5] MATLOCK H. Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay [C]//American Society of Civil Engineers. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, April 21-23, 1970. Houston: American Society of Civil Engineers, 1970. DOI: [10.4043/1204-MS](https://doi.org/10.4043/1204-MS).
- [6] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Field testing and analysis of laterally loaded piles on stiff clay [C]//American Society of Civil Engineers. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 4-7, 1975. Houston: American Society of Civil Engineers, 1975. DOI: [10.4043/2312-MS](https://doi.org/10.4043/2312-MS).
- [7] MCVAY M C, NIRLAULA L. Development of p - y curves for large diameter piles/drilled shafts in limestone for fbpier [R]. Gainesville: University of Florida, 2004.
- [8] BROWN D A, SHIE C F. Three dimensional finite element model of laterally loaded piles [J]. *Computers and Geotechnics*, 1990, 10(1): 59-79. DOI: [10.1016/0266-352X\(90\)90008-J](https://doi.org/10.1016/0266-352X(90)90008-J).
- [9] KOUUDA M, OKAMOTO M, TAKEMURA J, et al. Direct measurement of p - y relationships of piles in sand [C]//Japanese Geotech Soc. Proceedings of International Conference on Centrifuge 98, Tokyo, Japan, 1998. Tokyo: A A Balkema Publishers, 1998: 551-556.
- [10] 朱斌,熊根,刘晋超,等.砂土中大直径单桩水平受荷离心模型试验 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(10): 1807-1815.
ZHU B, XIONG G, LIU J C, et al. Centrifuge modelling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(10): 1807-1815.
- [11] 王富强,荣冰,张嘎,等.水平循环荷载下风电机组基础离心模型试验研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(7): 1926-1930. DOI: [10.16285/j.rsm.2011.07.042](https://doi.org/10.16285/j.rsm.2011.07.042).
WANG F Q, RONG B, ZHANG G, et al. Centrifugal model test of pile foundation for wind power unit under cyclic lateral loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(7): 1926-1930. DOI: [10.16285/j.rsm.2011.07.042](https://doi.org/10.16285/j.rsm.2011.07.042).
- [12] DAMGAARD M, ZANIA V, ANDERSEN L V, et al. Effects of soil-structure interaction on real time dynamic response of offshore wind turbines on monopiles [J]. *Engineering Structures*, 2014, 75: 388-401. DOI: [10.1016/j.engstruct.2014.06.006](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.006).
- [13] DNVGL. Support structures for wind turbines: DNV-ST-0126 [S]. Oslo: DNV GL, 2018.
- [14] SKAU K S, PAGE A M, KAYNIA A M, et al. REDWIN-reducing cost in offshore wind by integrated structural and geotechnical design [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1104: 012029. DOI: [10.1088/1742-6596/1104/1/012029](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1104/1/012029).

- [15] ABHINAV K A, SAHA N. Dynamic analysis of monopile supported offshore wind turbines [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2017, 170(5): 428-444. DOI: 10.1680/jgeen.16.00022.
- [16] VELARDE J, VANEM E, KRAMHØFT C, et al. Probabilistic analysis of offshore wind turbines under extreme resonant response: application of environmental contour method [J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 93: 101947. DOI: 10.1016/j.apor.2019.101947.
- [17] LØKEN I B, KAYNIA A M. Effect of foundation type and modelling on dynamic response and fatigue of offshore wind turbines [J]. *Wind Energy*, 2019, 22(12): 1667-1683. DOI: 10.1002/we.2394.
- [18] WINKLER E. Die lehre von elastizitat und festigkeit [M]. Prague: Dominicus, 1867.
- [19] American Petroleum Institute (API). Petroleum and natural gas industries-specific requirements for offshore structures: part 4-geotechnical and foundation design considerations: ISO 19901-4: 2016 [S]. New York: American Petroleum Institute, 2016.
- [20] BERGUA R, ROBERTSON A, JONKMAN J, et al. OC6 phase II: Integration and verification of a new soil-structure interaction model for offshore wind design [J]. *Wind Energy*, 2022, 25(5): 793-810. DOI: 10.1002/we.2698.
- [21] BAZEOS N, HATZIGEORGIU 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. DOI: 10.1016/S0141-0296(02)00021-4.
- [22] 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. DOI: 10.1016/S0141-0296(03)00059-2.
- [23] PAGE A M, GRIMSTAD G, EIKSUND G R, et al. A macro-element model for multidirectional cyclic lateral loading of monopiles in clay [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 106: 314-326. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.11.007.
- [24] PAGE A M, NAESS V, DE VAAL J B, et al. Impact of foundation modelling in offshore wind turbines: comparison between simulations and field data [J]. *Marine Structures*, 2019, 64: 379-400. DOI: 10.1016/j.marstruc.2018.11.010.

作者简介:



曾雨欣

曾雨欣 (第一作者)

1999-, 男, 湖南湘潭人, 硕士, 港口航道与近海工程专业, 主要从事海上风电相关工作(e-mail)zyx102616@163.com。



施伟

施伟 (通信作者)

1983-, 男, 陕西延安人, 特聘研究员、博士、博导, 主要研究方向为复杂海洋环境条件下海上风力发电机全耦合仿真系统分析、浮动式风力发电机的设计与分析等(e-mail)weishi@dlut.edu.cn。

张礼贤

1993-, 男, 山东潍坊人, 博士, 港口航道与近海工程专业, 主要从事海上风电与海洋平台结构设计等相关工作(e-mail)2248742388@mail.dlut.edu.cn。

周昞鸣

1985-, 男, 江苏常州人, 博士, 高级工程师, 海上风电技术高级项目经理, 主要从事海上风电荷载计算及一体化设计(e-mail)zhou19851014@hotmail.com。

项目简介:

项目名称 超大型单桩式海上风机桩土作用研究 (PKLHD202003)

承担单位 中南院水能资源利用关键技术重点实验室, 大连理工大学深海工程研究中心

项目概述 本项目通过建立 10 MW 大型单桩风浪联合作用下的耦合数值模型, 探究不同环境荷载条件下, 10 MW 级大型单桩风机的动力特性; 基于现有的桩土作用计算方法, 建立 10 MW 大型单桩风机桩土作用分析模块, 比较不同桩土作用分析模型对基支撑结构动力响应的影响。

主要创新点 (1) 建立大型单桩的高阶非线性水动力模型, 考虑非线性波浪荷载对单桩支撑结构的动力响应影响; (2) 建立大直径单桩风机基础-地基土-风电结构体系全耦合动力相互作用分析的有效分析方法, 使用大直径单桩风机基础与桩土相互作用模型, 是本项目工作的一个难点和特色之处; (3) 建立考虑风浪联合作用下 10 MW 单桩式海上风机在不同桩土作用模型对结构的动力响应及单桩基础整体结构稳定性的影响。

(编辑 李辉)