

引用格式: 陈嘉豪, 高一帆, 尹梓炜, 等. 近海深水区混凝土半潜型浮式风机一体化计算与耦合动力特性分析 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 31-41. CHEN Jiahao, GAO Yifan, YIN Ziwei, et al. Integrated calculation and coupled dynamic analysis of a concrete semi-submersible floating wind turbine in offshore deep water area [J]. Southern energy construction, 2024, 11(2): 31-41. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.03.

近海深水区混凝土半潜型浮式风机一体化计算与耦合动力特性分析

陈嘉豪^{1,✉}, 高一帆¹, 尹梓炜², 郑灿², 曲晓奇³

(1. 中山大学海洋工程与技术学院与南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082;

2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

3. 中国船级社海洋工程技术中心, 天津 300457)

摘要: [目的] 文章旨在探索 10 MW 级半潜型浮式风机的一体化计算方法并分析其在 40~50 m 近海深水区的耦合动力响应特性。[方法] 以 10 MW 混凝土半潜型浮式风机为例, 构建一体化时域数值计算模型, 统计分析其额定发电和极端工况下的平台动力响应和系泊张力特征。[结果] 平台水平运动主要受波浪荷载、风荷载和系泊刚度特性的影响, 最大水平运动和系泊张力发生在生存工况, 垂向运动主要受波浪荷载影响, 摇摆运动的均值主要受风荷载影响, 上述浮式风机动力响应均满足设计指标。[结论] 一体化数值计算方法较好地考虑浮式风机耦合动力特性, 由于水深限制, 近海深水区的海上漂浮式风机对水平运动约束和系泊非线性问题的优化更为重要, 响应极值主要发生在极端工况, 上述结论为此类漂浮式海上风机基础结构的研究与设计工作提供了一定的参考。

关键词: 近海深水区; 海上浮式风机; 一体化; 系泊; 极端响应

中图分类号: TK89; TK81

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)02-0031-11

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.03

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Integrated Calculation and Coupled Dynamic Analysis of a Concrete Semi-Submersible Floating Wind Turbine in Offshore Deep Water Area

CHEN Jiahao^{1,✉}, GAO Yifan¹, YIN Ziwei², ZHENG Can², QU Xiaoqi³

(1. School of Ocean Engineering and Technology, Sun Yat-sen University & Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, Guangdong, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

3. Ocean Engineering Technology Center, China Classification Society, Tianjin 300457, China)

Abstract: [Introduction] The research aims to explore the integrated calculation method of a 10 MW semi-submersible floating wind turbine, and analyze its coupled dynamic response characteristics in 40~50 m offshore deep water areas. [Method] A 10 MW concrete semi-submersible floating wind turbine was taken as an example, and then numerical calculation was carried out by the integrated calculation method, and its coupled dynamic response under rated and survival conditions was statistically analyzed. [Result] The horizontal motion of the platform is mainly affected by the wave force, wind loading and mooring stiffness. The maximum value of motion and mooring tension occur in the survival condition, and the heave motion is mainly affected by the wave, but the mean value of

收稿日期: 2023-06-05 修回日期: 2023-06-21

基金项目: 2023 年度广东省基础与应用基础研究基金海上风电联合基金项目“基于气弹性-运动耦合的漂浮式风场尾流特性与优化研究”; 2024 年度广东省自然科学基金面上项目“单点系泊漂浮式风机风标效应与优化研究”; 三亚崖州湾科技管理局重大研发项目“漂浮式基础平台风机关键技术研究”(SKJC-2020-01-005); 中国电机工程学会青年人才托举工程项目“台风极端工况下的 15 MW 级漂浮式海上风机耦合动力特性及抗台设计”(CSEE-YESS-2022012)

the pitch/roll motion is mainly affected by the wind loading, all of which meet the design specification. [Conclusion] The integrated calculation method better considers the coupled dynamic behavior of floating wind turbines. Due to the limitation of water depth, the optimization of horizontal motion and mooring nonlinearity of offshore floating wind turbines is more important in offshore deep water areas, and the extreme response mainly occurs in survival conditions. The above conclusions provide an important reference for the research and design of the floating offshore wind turbines in offshore deep water area.

Key words: offshore deep water area; floating offshore wind turbines; integrated calculation method; mooring lines; extreme response
 2095-8676 © 2024 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/>).

0 引言

近十年来,随着全球能源向低碳能源转型,海上风电产业正蓬勃发展并形成规模化势头,中国在近年来也加速发展海上风电产业。截至 2022 年底,全球海上风电累计装机 64.3 GW,中国累计海上风电装机占比 49%,占据全球第一大的装机市场,并且

2022 年新增海上风电装机容量排名第一^[1]。中国东南沿海年平均风速分布如图 1 所示。中国南海海域辽阔,深远海海上风能资源丰富,年平均风速可达 9 m/s 以上,具有开发深远海风电的巨大潜力。其中,广东省 35~50 m 水深的近海深水区海上风电规划容量在当前规划总容量的占比超过 85%,而超过 50 m 水深海域的海上风电可开发容量更为巨大,深远海风电是广东省未来能源发展的重要方向^[2]。

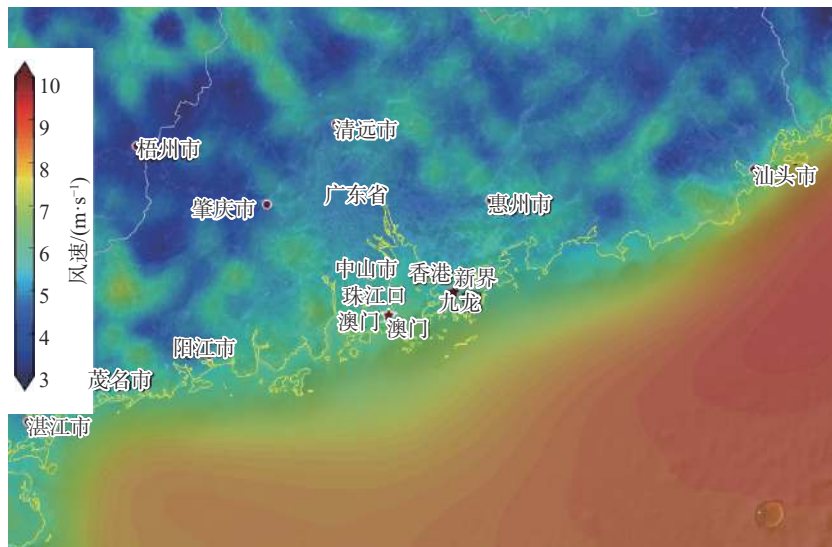


图 1 中国东南沿海年平均风速分布示意图

Fig. 1 Annual average wind speed distribution map in the southeast coast of China

海上风机基础形式如图 2 所示。受技术和工程经济性限制,海上风机支撑结构形式也必然伴随着水深而发生变化,从固定式的支撑结构演变为漂浮式的支撑结构^[3]。海上漂浮式风机极大地拓展了海上风电的应用范围,并且具有诸多的优势^[4],例如:机位部署更加灵活、可在岸上完成整体组装、海上施工安装更加方便、对海床生态环境友好、可完全拆解与迁移、更经济地搭载更大功率的风电机组等。

相比于固定式风机基础,漂浮式风机基础受力状态更加复杂,浮式基础作为顺应式结构,对波浪荷载敏感,运动幅度较大,气动荷载-结构-水动力-系泊-控制系统的耦合作用更加明显^[5],尤其对于大容量的风电机组,风机荷载导致的气动-运动耦合作用更加明显,解耦分离迭代的设计方法会给浮式风电设计造成较大的计算误差,尤其在目前缺乏规模化的浮式风电场建设经验情况下,荷载抗力系数和安全系

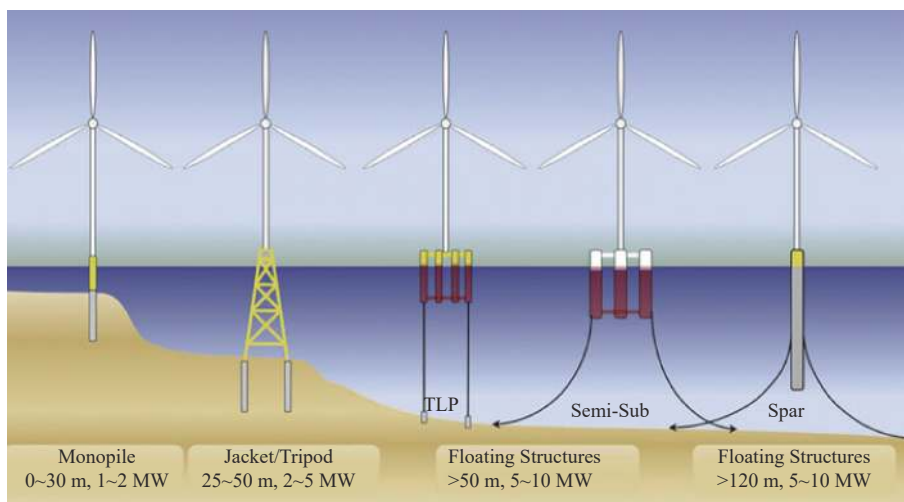


图 2 海上风机基础形式^[3]

Fig. 2 Foundation types of offshore wind turbines^[3]

数取值难以准确把握, 容易造成设计过于保守或偏激。因此, 需要采用一体化计算软件分析海上漂浮式风机系统耦合动力响应特性。

当前的海上漂浮式风机一体化时域计算软件可以大致划分为如下几类: 一类从传统的海洋工程水动力软件发展而来, 如 Sima^[6]、OrcaFlex^[7]、Deeplines^[8]、3DFLOAT^[9] 等; 一类从传统的固定式海上风机计算分析软件发展而来, 如 FAST^[10-11]、GH Bladed^[12]、HAWC2^[13] 等; 一类则来自于航空航天、车辆工程等多体机械软件仿真软件, 如 SIMPACK^[14]、MSC-

ADAMS^[15] 等。还有一些基于多个软件进行联合数值模拟, 如 AQWA-FAST^[16]。近些年, 部分学者针对浮式风机动力特点进行针对性的一体化软件开发, 如 DARwind^[17-18] 等。还有一些学者通过 CFD 技术对海上浮式风机进行数值计算^[19-20], 部分统计如表 1 所示。

文章结合广东近海深水区某海上风电场, 针对 10 MW 级的混凝土半潜式浮式风机开展一体化仿真计算, 并且研究其在发电工况和极端工况下的耦合动力响应特性, 以期揭示近海深水区大容量半潜型浮式风机的动力响应特性和关键设计因素。

表 1 海上漂浮式风机时域耦合计算程序统计表

Tab. 1 Statistical table of time-domain coupling calculation program for floating offshore wind turbines

名称	空气动力学	水动力学	结构动力学	系泊模型
FAST ^[10-11]	(BEM/GDW)+DS+FVM	PF+QD+(QTF)+MR+NA	T: Mod/MB P: Rigid	QS+FE+LM
Bladed ^[12]	(BEM/GDW)+DS	MR+(IP+IWL)	T: Mod/MB P: Rigid	QS
HAWC2 ^[13]	(BEM/GDW)+DS	MR	T: MB/FE P: MB/FE	FE
3Dfloat ^[9]	BEM+FDT	MR+(IWL)	T: FE P: FE	FE
Sima ^[6]	(BEM/GDW)+DS	PF+MR	T: FE P: FE	FE
DARwind ^[17-18]	BEM	PF+MR+OTF+IP+IWL+QD	T: Mod/MB P: Rigid	OS+LM

注: BEM—叶素动量理论; GDW—广义动态尾迹; DS—动态失速; FVM—自由涡; FDT—过滤后的动态推力; PF—势流理论; QD—二次拖曳力; OTF—二次传递函数; MR—Morison方程; NA—Newman近似; IP—瞬时位置; IWL—瞬时水位; T—风机; P—平台; Mod—模态; MB—多体动力学; FE—有限元; Q—准静态; LM—集中质量。

1 数值分析模型

1.1 分析对象

OO-Star^[21] 风力机浮式基础由挪威 Olav Olsen 公司研发,属于半潜型平台,其基础底部是一个“星”型浮筒结构,上面布置一个中央立柱,外围设置 3 个立柱结构,由预应力钢筋混凝土材料构成,具体结构形式如图 3 所示。文章采用 DTU 10 MW 的风力发电机组, RNA 总重为 676 t,额定功率为 10 MW,风机塔柱与 OO-Star 基础中央立柱连接,关于该风电机组和塔筒的详细数据可参考文献 [22]。上述的漂浮式风机整体吃水为 22 m,排水量 2.350 9E+04 m³,典型参数见表 2。

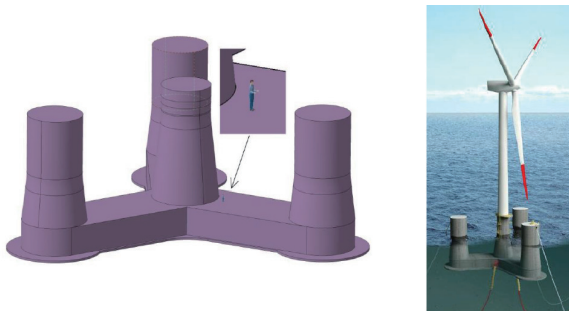


图 3 漂浮式风机基础结构视图^[22]

Fig. 3 Structure of the OO-Star floating offshore wind turbines^[22]

表 2 OO-Star 漂浮式风机平台参数^[22]

Tab. 2 Parameters of the OO-Star floating wind turbine^[22]

名称	数值
叶轮质量/t	230.72
机舱质量/t	446
塔柱质量/t	1 257
平台法兰顶距水面/m	11.0
基础质量(不含塔柱,系泊系统)/t	2.17E+04
重心高(相对水面)/m	-15.22
平台横摇惯性矩(含压载)/(kg·m ²)	9.43E+09
平台纵摇惯性矩(含压载)/(kg·m ²)	9.43E+09
平台首摇惯性矩(含压载)/(kg·m ²)	1.63E+010
设计吃水(含系泊)/m	22.0
总排水量/m ³	2.350 9E+04

针对广东 40 ~ 50 m 的近海深水区,基于“刚度相似”准则,根据原始 130 m 水深母型系泊^[21]设计出了适用于该近海深水区的浮式风力机系泊系统。

该浅水系泊系统设有 3 根锚链,每根锚链之间的夹角为 120°(如图 4 所示)。锚链直径为 137 mm,长度为 652 m。沿锚链长度方向距离导缆孔 60 m 处设置一个 50 t 配重块,然后在距离导缆孔 134 m 处,即锚链与海底的切点位置再增加一个 10 t 的配重,锚链破断张力为 1.6992E+07 N,如图 5 所示。原型 130 m 水深的锚链系泊刚度和针对 40 ~ 50 m 的近海深水区改造后的锚链系泊刚度在纵荡方向的对比如图 6 所示,表明水深变浅后,系泊刚度的非线性特性大大增强。在平台大范围偏移下,将产生较大的系泊张力,容易引起系泊破断风险^[23]。

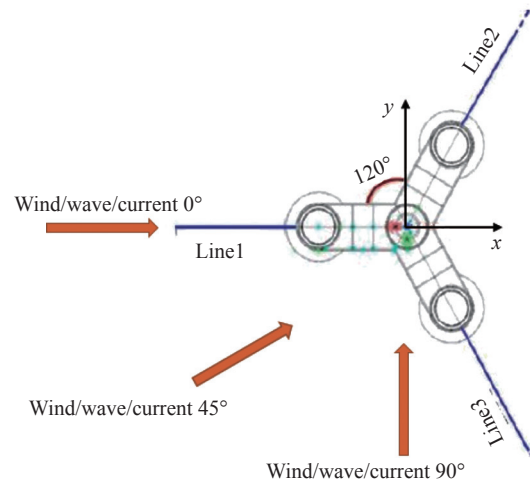


图 4 系泊系统布置图

Fig. 4 Layout of mooring lines

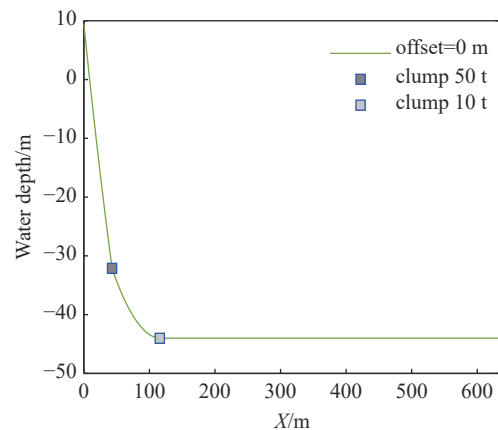


图 5 系泊系统配重图

Fig. 5 Arrangement of the counter weight in a line

1.2 一体化计算方法

为了更加准确地考虑漂浮式风机不同荷载和基础运动之间的耦合关系,文章采用一体化的海上漂浮式风机数值模型。一体化计算程序需要将风轮气

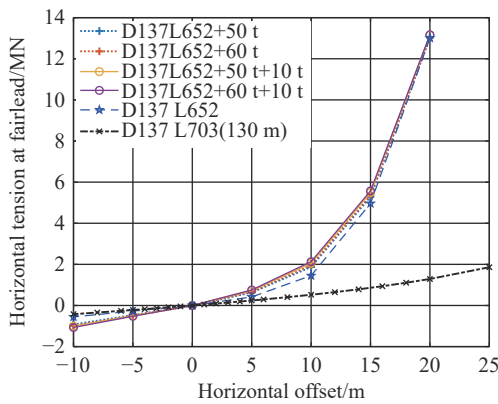


图 6 纵荡位移下的系泊刚度对比曲线

Fig. 6 Contrast curves of mooring stiffness in surge offset

动荷载、结构动态响应、基础平台受到的波浪和海流的水动力荷载、锚泊系统约束张力和控制系统作用力统一到一个数值模型中, 并且尽可能地在同一个动力学方程中同时求解各个自由度的信息, 从而尽可能地获得准确的计算结果。

本计算采用FAST(Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence)^[10] 软件进行上述的漂浮式风机一体化数值计算。该软件由美国可再生能源实验室(NREL)开发, 是一款包含空气动力学、水动力学、柔性多体动力学以及机电控制系统为一体的, 用于 2~3 桨叶水平轴风力发电机的载荷计算工具。软件综合了气动力模块、结构动力分析模块、水动力分析模块和控制器模块, 可以执行整个浮式风机的气动-水动力-伺服-弹性耦合的时域耦合数值分析, 软

件各个功能模块的计算逻辑如图 7 所示。该软件气动荷载的计算主要采用 BEM 方法或 GDW 方法, 水动力荷载采用势流方法求解大型结构体的水动力, 并辅助以 Morison 方程修正细长体水动力荷载, 结构动力学采用 Kane 动力学方程, 系泊模型包含悬链线、集中质量法和有限元模型等。

1.3 计算分析工况

结合广东省近海水深区某海上风电场水文气象数据, 该海域平均海平面为 44 m, 本研究数值模拟选取 2 种计算工况, 分别为额定作业工况(轮毂处 10 min 平均风速为 11.4 m/s)以及生存工况(50 年一遇, 轮毂处 10 min 平均风速为 56.2 m/s)。每种工况对应的环境参数如表 3 所示。针对每种工况分别选取 5 个随机种子, 模拟随机环境载荷, 每个随机种子下模拟 1 h, 针对每种工况分别选取了 3 种环境载荷入射方向分别为 0°、90°和 45°。波浪采用随机波由三参数 Jonswap 谱定义, 海流取为均匀流。

文章根据上述 10 MW 半潜型浮式风力机的相关参数建立浮式风力机数值模型。利用 SESAM 软件^[24] 建立浮式基础的有限元模型, 并求解浮式基础水动力系数, 计算结果作为 FAST 软件水动力模块的输入文件, 其气动计算、系泊计算、结构动力计算和风机控制算法均在 FAST 软件实现, 按照设定的环境工况, 进行数值模拟, 最后对计算结果进行统计分析, 计算流程如图 8 所示。

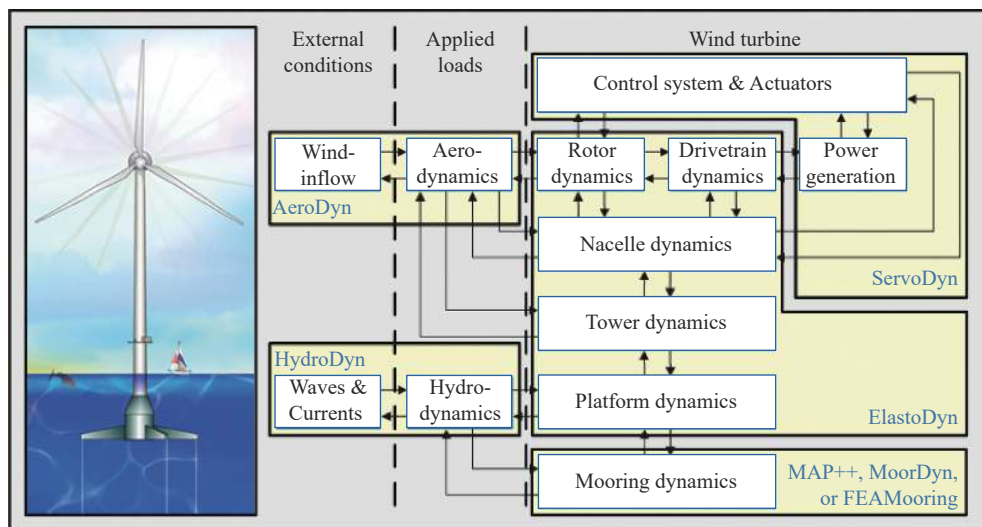


图 7 FAST 软件程序模块^[7]

Fig. 7 Modules of FAST software^[7]

表 3 计算工况及环境参数
Tab. 3 Load cases and environmental parameters

名称	编号	方向/(°)	风		浪		流	
			轮毂处风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	风切变指数	有义波高/m	谱峰周期/s	谱峰因子	流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
发电工况	DLC 1a	0	11.4	0.067	1.75	7.5	3.3	0.46
	DLC 1b	90	11.4	0.067	1.75	7.5	3.3	0.46
	DLC 1c	45	11.4	0.067	1.75	7.5	3.3	0.46
生存工况	DLC 3a	0	56.2	0.096	11.53	14.93	3.3	1.19
	DLC 3b	90	56.2	0.096	11.53	14.93	3.3	1.19
	DLC 3c	45	56.2	0.096	11.53	14.93	3.3	1.19

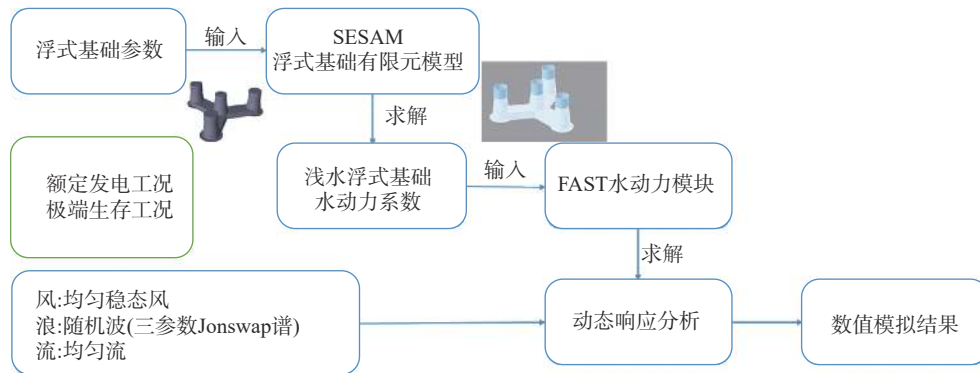


图 8 一体化计算流程

Fig. 8 Flow of integrated computing of floating wind turbines

2 计算结果讨论

2.1 额定发电工况

当漂浮式风机处于额定工况时,计算结果统计如图 9、图 10 和图 11 所示,当环境载荷入射方向为 0° 时,纵荡的均值、极值和标准差都是最大的,随着环境入射方向的改变,纵荡的响应值逐渐减小。在发电工况下纵荡运动的最大值为 6.933 m,纵荡运动的最大值小于水深的一半,满足设计要求,可以保证风力机正常发电;横荡运动的响应趋势与纵荡运动相反,当风机无偏航对风下,环境载荷入射方向为 45° 时,横荡响应均值最大, 0° 时横荡响应均值最小。横荡运动的最大值仅为 2.815 m。对比横荡运动的标准差可以发现,环境载荷为 90° 时横荡运动的标准差最大,这主要是因为浮式基础的动态响应主要受波浪载荷影响,当环境载荷入射方向为 90° 时,浮式基础受到的横向波浪载荷最大;垂荡运动均值在环境载荷入射方向为 0° 时最大,但是垂荡运动的标准差随着环境载荷方向的改变变化不大。由于浮式基础运动的均值主要由气动载荷决定,而其运动的标

准差主要由波浪载荷决定。因此可以发现,不同入射方向的波浪力对垂荡运动的影响几乎一致,但是不同方向的气动载荷差别较大。同时由于垂荡运动与纵荡运动之间的耦合作用,可以发现,当波浪载荷入射方向为 0° 时,垂荡运动的标准差最大。因此对于垂荡运动而言, 0° 环境载荷入射方向的响应最大。

从图 10 的计算结果可以看出,当风机无实时偏航对风下,横摇运动的响应较小,最大横摇仅有 0.567° ,出现在环境载荷入射方向为 45° 的工况。横摇运动的标准差变化趋势与横荡运动相同,即 0° 环境入射方向时最小, 90° 环境入射方向时最大,最大横摇标准差为 0.093° 。当环境载荷的入射方向为 0° 时,纵摇运动响应最大,整个模拟过程中纵摇运动的最大值 4.838° ,满足设计限定要求。随着环境方向的改变,纵摇运动的响应逐渐减小。当环境载荷入射方向为 45° 时,首摇运动的均值和极值都比较大,当环境载荷入射方向为 0° 时,首摇运动的均值和极值较小。从标准差的统计结果来看,当环境载荷入射方向为 90° 时,首摇运动的标准差最大, 0° 时最小,

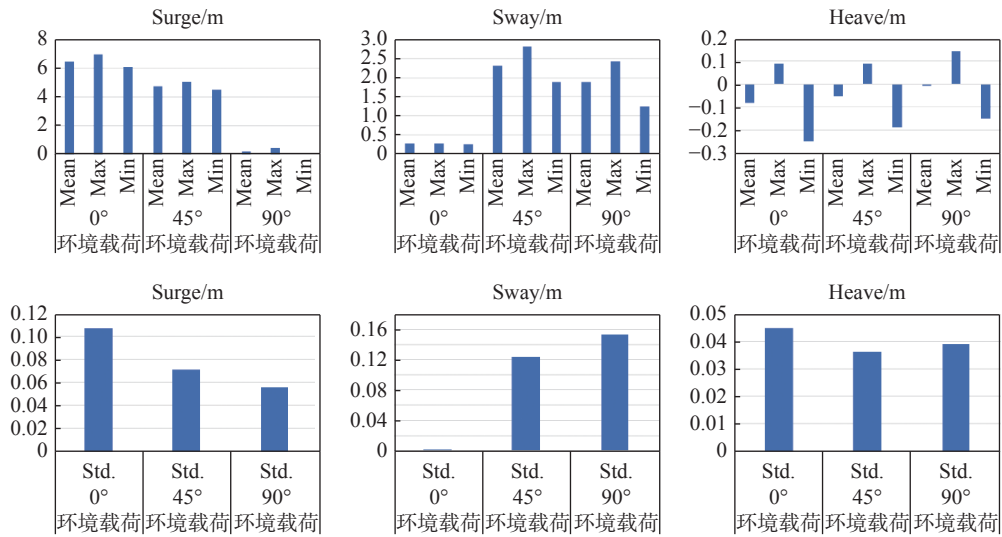


图 9 额定作业工况纵荡、横荡、垂荡响应统计结果

Fig. 9 Statistics of surge, sway, heave motion under the rated-condition

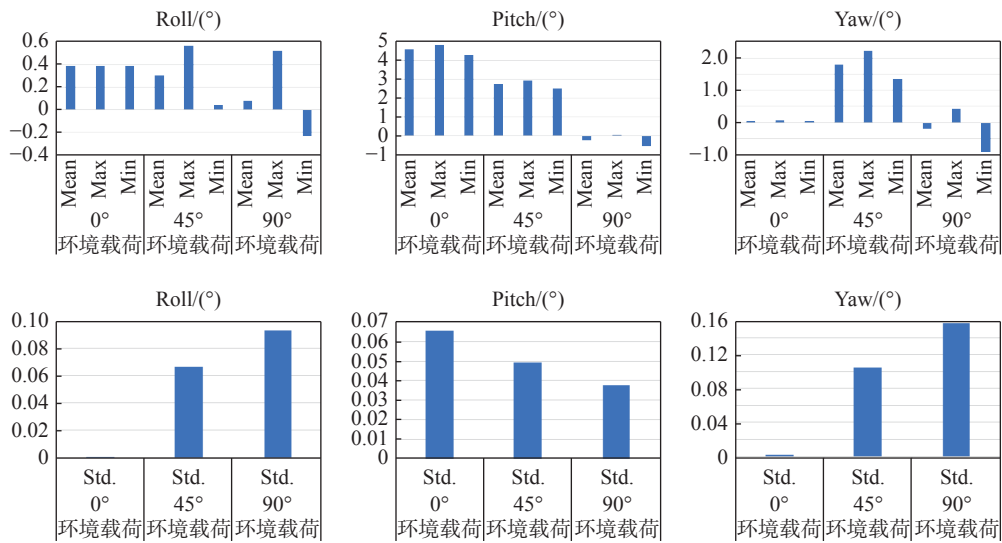


图 10 额定作业工况横摇、纵摇、首摇响应统计结果

Fig. 10 Statistics of roll, pitch, yaw motion under the rated-condition

这与横摇和横荡的响应相一致。

额定作业工况下的锚链的张力统计如图 11 所示,可以看出,锚链的最大张力为 2.669×10^6 N,出现在环境载荷入射方向为 0° 时的 1#锚链中。此时 1#锚链的张力要明显大于另外两根系泊锚链。当环境载荷入射方向为 45° 时,依旧是 1#锚链的张力最大,但是与 0° 工况相比,1#锚链的张力有所减小,2#和 3#锚链的张力有所增大。当环境载荷入射方向为 90° 时,3#锚链的张力要大于另外两根锚链,但是 3 根锚链张力都不是很大,此时锚链最大张力仅为

1.516×10^6 N,远小于锚链破断张力 1.699×10^7 N,满足规范要求。

2.2 极端生存工况

在生存工况下,风机顺桨停机,漂浮式风机主要受波浪荷载影响。如图 12 所示,纵荡运动的最大值为 15.960 m,出现在 0° 入射方向,纵荡运动的最大值小于水深的一半,满足设计要求。纵荡的均值和标准差都是在 0° 入射方向最大, 90° 入射方向最小;横荡运动的响应与纵荡运动相反, 0° 入射方向最小为 0.525 m, 45° 环境载荷条件下横荡运动的均值为

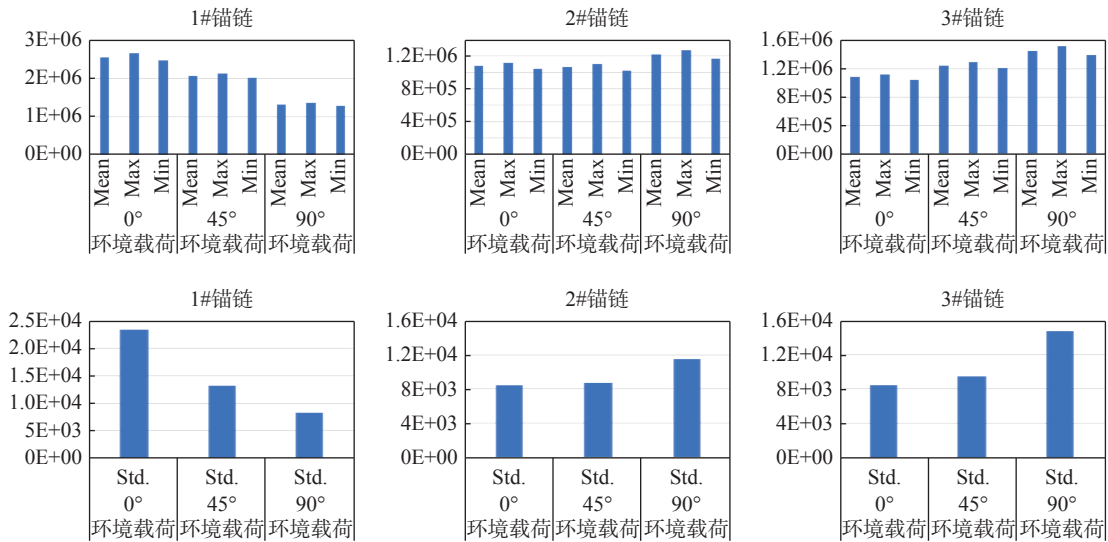


图 11 额定作业工况锚链张力响应统计结果

Fig. 11 Statistics of mooring-line tension under the rated-condition

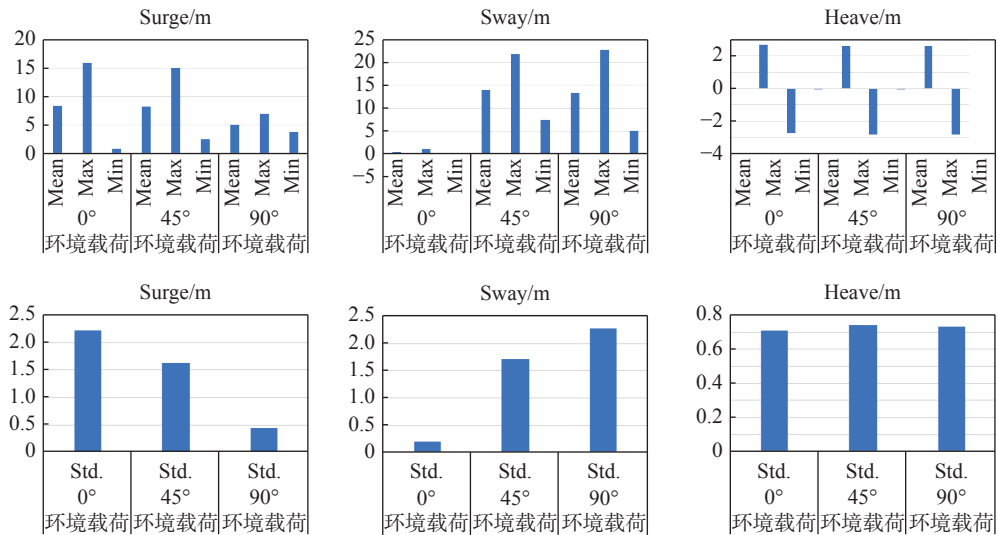


图 12 生存工况纵荡、横荡、垂荡响应统计结果

Fig. 12 Statistics of surge, sway, heave motion under the survival-condition

14.018 m, 最大值发生在 90°入射方向, 最大横荡运动为 22.81 m。横荡运动的标准差随着环境载荷方向的改变而增大, 90°入射方向最大标准差为 2.282 m; 垂荡运动的均值和标准差随着环境载荷方向的改变变化不大, 均小于 1 m。垂荡运动的最大值为 2.697 m, 最小值为-2.840 m, 分别出现在 0°和 45°入射方向。

图 13 表明横摇运动响应规律与横荡运动相似, 横摇运动的均值在 0°环境载荷下最大为-0.192°, 在 45°环境载荷下最小为-3.402°, 相比于额定发电工况和切出风速工况, 生存工况下的横摇运动幅度有所

增加。横摇运动的标准差在 0°时最小, 在 90°时最大, 最大横摇标准差为 0.834°。横摇运动的最大值和最小值均出现在环境载荷入射方向为 90°时, 最大值为 2.836°, 最小值为-5.447°; 纵摇运动的均值在 45°环境载荷作用下最小为-2.727°, 在 90°环境载荷作用下最大为-0.722°。纵摇运动的最大值和最小值均出现在 0°入射方向, 最大值为 2.748°, 最小值为-5.740°。生存工况下纵摇运动未超过 10°, 满足相关要求。纵摇运动的标准差随着环境载荷方向的改变而减小, 0°环境载荷方向最大; 与额定发电工况和切出风速

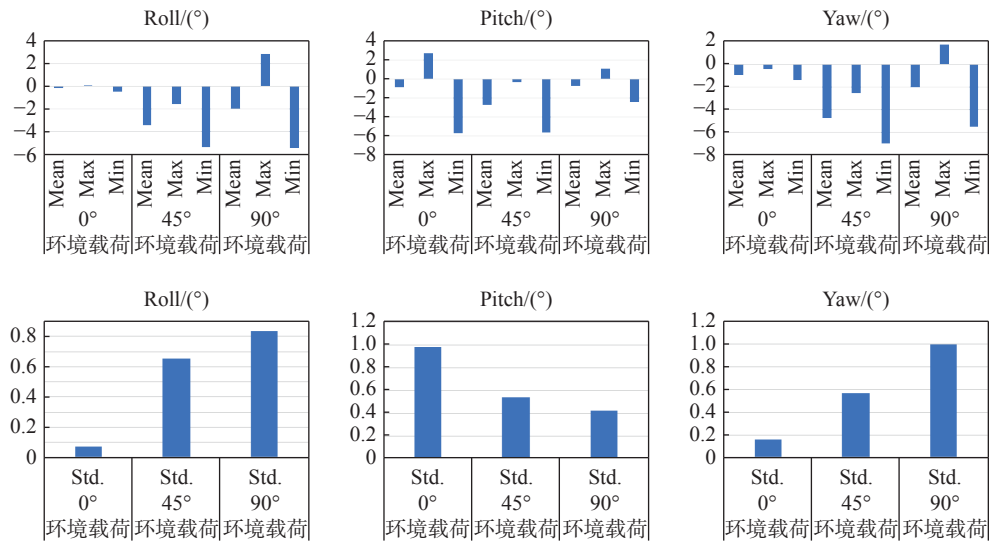


图 13 生存工况横摇、纵摇、首摇响应统计结果

Fig. 13 Statistics of roll, pitch, yaw motion under the survival-condition

工况相比, 45°和 90°环境载荷作用下的首摇运动响应明显增大。首摇运动在 0°入射方向下均值最大为 -0.982°, 在 45°入射方向均值最小为 -4.736°。首摇运动的最大值和最小值均出现在 90°环境载荷方向, 分别为 1.739°和 -5.493°。首摇运动的标准差随着环境方向的改变而增大, 最大首摇标准差出现在 90°环境载荷下为 0.996°。

根据锚链的张力统计结果图 14 看出, 生存工况下锚链的最大张力为 9.539E+06N, 出现在 90°环境载荷作用下的 3#锚链中。根据 DNV-OS-J301 规范^[25]

要求, 锚链的特征张力 ($T_d = T_{C,mean}\gamma_{mean} + T_{C,dyn}\gamma_{dyn}$, 其中 $\gamma_{mean} = 1.3$, $\gamma_{dyn} = 1.75$) 要求小于破断张力。根据文章计算结果可以计算得到 90°环境载荷条件下锚链的特征张力为 1.524E+07 N, 小于锚链破断张力 1.6992E+07 N, 满足规范要求。在生存工况下, 当环境载荷入射方向为 0°时, 1#锚链的张力均值、最大值以及标准差要明显大于另外两根锚链, 0°入射方向下锚链的最大张力为 7.876E+06 N, 这与额定工况的结果相一致; 随着环境载荷方向的改变, 3#锚链的张力均值和标准差增大, 1#锚链的张力均值和标准

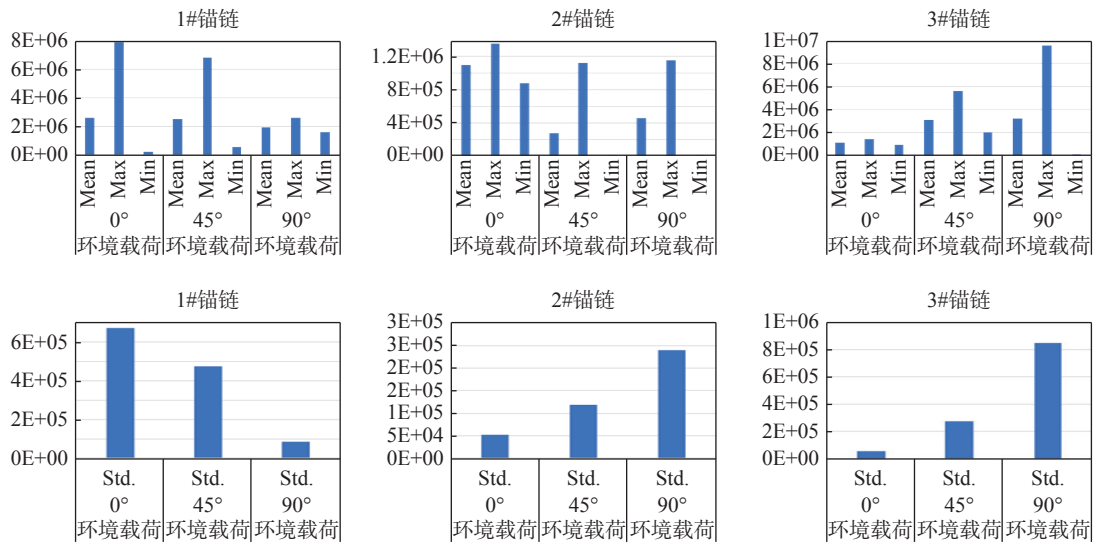


图 14 生存工况锚链张力响应统计结果

Fig. 14 Statistics of mooring-line tension under the survival-condition

差减小, 2#锚链的均值减小但是标准差增大。此时 3#锚链的均值最大为 $3.086\text{E}+06$ N。但是锚链的最大瞬时张力出现在 1#锚链中, 为 $6.798\text{E}+06$ N; 当环境载荷入射方向为 90° 时, 3#锚链的张力均值和标准差明显大于 1#和 2#锚链, 3#锚链的张力均值为 $3.222\text{E}+06$ N, 标准差为 $8.498\text{E}+05$ N。锚链张力的最大值出现在 3#锚链中, 为 $9.539\text{E}+06$ N, 这也是所有模拟工况中的张力最大值。

3 结论

本研究结合广东近海深水某实际海上风电项目的水文气象信息, 开展 10 MW 级混凝土半潜式浮式风机一体化计算与耦合动力特性分析, 采用一体化计算软件 FAST 分别选取额定发电工况和极端生存工况进行数值模拟, 数值模拟的结果进行统计和分析可以得到以下的结论:

1) 除了生存工况 90° 环境载荷入射方向的工况外, 在其他所有的计算工况下, 浮式基础的纵荡和横荡运动均小于水深的一半, 即 22 m。在极端生存工况 90° 环境载荷入射方向下, 纵荡的最大值为 6.981 m, 横荡的最大值为 22.810 m, 与水深一半十分接近, 未来需要进一步优化系泊系统, 提升该方向的系泊刚度。

2) 额定发电工况下纵摇运动的最大值为 4.838° , 横摇运动的最大值为 0.567° , 均小于 5° ; 生存工况下纵摇运动的最大幅值为 -5.740° , 横摇运动的最大幅值为 -5.447° , 其绝对值均小于 10° , 满足风电机组最大倾角的限制值要求。

3) 在所有计算工况中, 锚链的张力最大值为 $9.539\text{E}+06$ N, 出现在 90° 环境载荷作用下的 3#锚链中。根据 DNV-OS-J301 规范要求, 计算锚链的特征张力为 $1.524\text{E}+07$ N, 小于锚链破断张力, 满足规范要求。

通过文章的研究, 介绍了浮式风机的一体化数值计算方法, 分析了 10 MW 级半潜型浮式风机在我国近海水深区的动力响应特性, 验证了一体化计算方法以及设计的系泊系统的有效性, 为后续的工程设计和建设提供了技术参考。

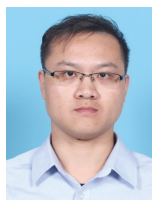
参考文献:

[1] Global Wind Energy Council. Global wind report 2023 [R]. Brussels, Belgium: Global Wind Energy Council, 2023.

- [2] 王诗超, 刘嘉畅, 刘展志, 等. 海上风电产业现状及未来发展分析 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(4): 103-112. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.010.
WANG S C, LIU J C, LIU Z Z, et al. Analysis of current situation and future development of offshore wind power industry [J]. Southern energy construction, 2023, 10(4): 103-112. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.010.
- [3] CRUZ J, ATCHESON M. Floating offshore wind energy: the next generation of wind energy [M]. Cham: Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-29398-1.
- [4] 陈嘉豪, 裴爱国, 马兆荣, 等. 海上漂浮式风机关键技术研究进展 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(1): 8-20. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.002.
CHEN J H, PEI A G, MA Z R, et al. A review of the key technologies for floating offshore wind turbines [J]. Southern energy construction, 2020, 7(1): 8-20. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.002.
- [5] CORDLE A, JONKMAN J. State of the art in floating wind turbine design tools [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2011.
- [6] NIELSEN F G, HANSON T D, SKAARE B. Integrated dynamic analysis of floating offshore wind turbines [C]//25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hamburg, Germany, June 4-9, 2006. Hamburg, Germany: ASME, 2006: 671-679. DOI: 10.1115/OMAE2006-92291.
- [7] THOMSEN J B, BERGUA R, JONKMAN J, et al. Modeling the TetraSpar floating offshore wind turbine foundation as a flexible structure in OrcaFlex and OpenFAST [J]. Energies, 2021, 14(23): 7866. DOI: 10.3390/en14237866.
- [8] BLONDEL F, BOISARD R, MILEKOVIC M, et al. Validation and comparison of aerodynamic modelling approaches for wind turbines [J]. Journal of physics:conference series, 2016, 753(2): 022029. DOI: 10.1088/1742-6596/753/2/022029.
- [9] MYHR A, HANSEN F E, MOELLER U, et al. A comparison of existing and conceptual designs for floating wind turbines [C]//Renewable Energy Research Conference 2010, July 6-August 6, 2010.
- [10] JONKMAN J M. Dynamics of offshore floating wind turbines—model development and verification [J]. Wind energy, 2009, 12(5): 459-492. DOI: 10.1002/we.347.
- [11] COULLING A J, GOUPEE A J, ROBERTSON A N, et al. Validation of a FAST semi-submersible floating wind turbine numerical model with DeepCwind test data [J]. Journal of renewable and sustainable energy, 2013, 5(2): 023116. DOI: 10.1063/1.4796197.
- [12] DNV. Wind turbine design software - Bladed [EB/OL]. [2023-06-05]. <https://www.dnv.com/services/wind-turbine-design-software-bladed-3775>.
- [13] LARSEN T J, HANSEN A M. How 2 HAWC2, the user's manual [R]. Roskilde, Denmark: Riso National Laboratory, 2007.
- [14] MATHA D, SCHLIPF M, CORDLE A, et al. Challenges in simulation of aerodynamics, hydrodynamics, and mooring-line dynamics of floating offshore wind turbines [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2011.
- [15] WITHEE J W. Fully coupled dynamic analysis of a floating wind turbine system [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [16] YAO Y S, NING D Z, DENG S J, et al. Hydrodynamic investigation on floating offshore wind turbine platform

- integrated with porous shell [J]. *Energies*, 2023, 16(11): 4376. DOI: [10.3390/en16114376](https://doi.org/10.3390/en16114376).
- [17] CHEN J H, HU Z Q, LIU G L, et al. Coupled aero-hydro-servo-elastic methods for floating wind turbines [J]. *Renewable energy*, 2019, 130: 139-153. DOI: [10.1016/j.renene.2018.06.060](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.060).
- [18] 陈嘉豪, 刘格梁, 胡志强. 海上浮式风机时域耦合程序原理及其验证 [J]. *上海交通大学学报*, 2019, 53(12): 1440-1449. DOI: [10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.12.006](https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.12.006).
CHEN J H, LIU G L, HU Z Q. Development and validation of a time-domain coupling simulation code for floating offshore wind turbines [J]. *Journal of Shanghai jiaotong university*, 2019, 53(12): 1440-1449. DOI: [10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.12.006](https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.12.006).
- [19] LI Y W, PAIK K J, XING T, et al. Dynamic overset CFD simulations of wind turbine aerodynamics [J]. *Renewable energy*, 2012, 37(1): 285-298. DOI: [10.1016/j.renene.2011.06.029](https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.029).
- [20] TRAN T, KIM D, SONG J. Computational fluid dynamic analysis of a floating offshore wind turbine experiencing platform pitching motion [J]. *Energies*, 2014, 7(8): 5011-5026. DOI: [10.3390/en7085011](https://doi.org/10.3390/en7085011).
- [21] PEGALAJAR-JURADO A, BREDMOSE H, BORG M, et al. State-of-the-art model for the LIFES50+ OO-Star wind floater semi 10MW floating wind turbine [J]. *Journal of physics: conference series*, 2018, 1104: 012024. DOI: [10.1088/1742-6596/1104/1/012024](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1104/1/012024).
- [22] BAK C, ZAHLE F, BITSCHKE R, et al. The DTU 10-MW reference wind turbine [R]. Fredericia, Denmark: DTU, 2013.
- [23] 李旭, 肖龙飞, 魏汉迪, 等. 系泊缆破断对半潜式平台水动力性能影响的试验研究 [J]. *海洋工程装备与技术*, 2023, 10(1): 48-56.
LI X, XIAO L F, WEI H D, et al. Experimental study on the influence of mooring line breaking on the hydrodynamic performance of semi-submersible platform [J]. *Ocean engineering equipment and technology*, 2023, 10(1): 48-56.
- [24] 张会良, 肖龙飞, 徐秀龙. 深水圆筒型钻井平台张紧式系泊系统设计 [J]. *海洋工程*, 2021, 39(6): 10-18. DOI: [10.16483/j.issn.1005-9865.2021.06.002](https://doi.org/10.16483/j.issn.1005-9865.2021.06.002).
ZHANG H L, XIAO L F, XU X L. Design of taut mooring system for a deep water cylindrical drilling platform [J]. *The ocean engineering*, 2021, 39(6): 10-18. DOI: [10.16483/j.issn.1005-9865.2021.06.002](https://doi.org/10.16483/j.issn.1005-9865.2021.06.002).
- [25] DNV. Standard for classification of wind turbine installation units: DNV—OS—J301 [S]. Oslo, Norway: DNV, 2011.

作者简介:



陈嘉豪 (第一作者, 通信作者)

1991-, 男, 高级工程师, 助理教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究领域包括: 海上漂浮式风机耦合动力理论、试验与数值开发, 海上风机基础设计优化, 风场尾流与优化(e-mail) lirainschen@163.com。

陈嘉豪

高一帆

2000-, 女, 船舶工程专业在读研究生, 主要从事海上风场尾流与优化研究工作(e-mail) ggloria_1@163.com。

尹梓炜

1993-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事水工结构研究及设计工作(e-mail) yinziwei@gedi.com.cn。

郑灿

1982-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事土建、水工、海工结构的工作(e-mail) zhengcan@gedi.com.cn。

曲晓奇

1992-, 女, 工程师, 船舶与海洋工程专业博士, 主要从事海上浮式风电动力响应研究工作(e-mail) quxiaoqi1234@126.com。

(编辑 叶筠英)