

文章编号: 1007-7294(2026)02-0235-13

南海岛礁风浪流条件下 Spar 型 浮式风机一体化分析

谈秋桐^{1,2}, 胡 超¹, 曲恒乐³, 马 勇^{1,4}

(1. 中山大学 海洋工程与技术学院, 广东 珠海 519082; 2. 招商局海洋装备研究院有限公司, 广东 深圳 518067; 3. 蓬莱巨涛海洋工程重工有限公司, 山东 烟台 264000; 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要: 本研究针对南海岛礁海域浮式风机的开发需求, 构建了基于风-浪联合概率模型与 Modelica 耦合仿真框架的浮式风机一体化仿真方法。以三沙市岛礁海域为研究对象, 通过历史气象数据重构了风浪联合概率分布模型, 并结合海流数据建立三沙市岛礁海域数据。基于 Modelica 平台开发了气动-水动-控制-结构-系泊全耦合数值模型, 研究了 Spar 型浮式风机在三沙市岛礁海域的耦合动力响应特性。结果表明: 在作业工况下, 平台纵摇角峰值为 4.74°, 小于 5°的设计阈值; 系泊系统最大张力安全系数均满足中国船级社规范要求; 额定工况下风机转速稳定在 11.98 rpm 接近额定值 12.1 rpm, 功率输出达 4.60 MW 接近额定功率 5 MW。研究验证了所提方法的工程适用性, 为南海岛礁浮式风机工程部署提供了仿真分析方法与科学决策依据。

关键词: 一体化分析; Modelica; 风浪联合分布; Spar 型浮式风机

中图分类号: U661.1 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2026.02.005

Integrated analysis of Spar-type floating wind turbine under wind, wave and current conditions in South China Sea islands and reefs

TAN Qiu-tong^{1,2}, HU Chao¹, QU Heng-le³, MA Yong^{1,4}

(1. School of Marine Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 2. China Merchants Marine and Offshore Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518067, China; 3. Penglai Jutal Offshore Engineering Heavy Industries Co., Ltd., Yantai 264000, China; 4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

Abstract: In this study, an integrated simulation method of floating wind turbines based on wind-wave joint probability model and Modelica coupling simulation framework is constructed for the development of renewable energy in the South China Sea islands and reefs. Taking the island and reef sea area of Sansha City as the research object, the joint probability distribution model of wind and wave is reconstructed by historical meteorological data, and the data of island and reef sea area of Sansha City are established by combining with ocean current data. Based on the Modelica platform, a fully coupled numerical model of aerodynamics-

收稿日期: 2025-06-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52071348; 52501369); 广东省风电联合基金重点基金(2023B1515250010); 中国博士后面上资助项目(2025M780276)

作者简介: 谈秋桐(1996-), 男, 博士研究生; 胡 超(1991-), 男, 博士, 通讯作者, E-mail: huch65@mail.sysu.edu.cn; 马 勇(1980-), 男, 博士, 教授, 通讯作者, E-mail: mayong3@mail.sysu.edu.cn。

hydrodynamics-control-structure-mooring is developed to study the coupled dynamic response characteristics of Spar-type floating wind turbine in the island reef area of Sansha City. The results show that the peak pitch angle of the platform is 4.74° ($<5^\circ$ design threshold) under working conditions. The maximum tension safety factor of mooring system meets the requirements of China Classification Society. Under rated conditions, the turbine speed is stable at 11.98 rpm (rated value 12.1 rpm), and the power output reaches 4.60 MW (rated power 5 MW). The research verifies the engineering applicability of the proposed method system, and provides an innovative technical evaluation framework and scientific decision-making basis for the deployment of floating wind power projects in the South China Sea islands.

Key words: integration analysis; Modelica; joint distribution of wind and wave; Spar-type floating wind turbine

0 引言

海洋覆盖了地球表面 70% 的区域,蕴藏着储量丰富的风能资源。海上风能相比于陆地风能具有风速高、风向稳、不占用土地等优势。然而,由于技术和经济上的限制,目前海上风力发电仅占全球可再生能源发电量的很小一部分,所以发展海上风电技术将在未来发挥重要作用。在海上风电技术中,浮式风机一体化仿真技术在风机的初步和详细设计中起着重要作用。

在海上浮式风机一体化仿真研究方面,由于频域计算在捕捉由气动载荷和控制系统引起的非线性动态特性方面存在缺陷,因此需要对浮式风机进行时域范围内的全耦合仿真分析^[1]。目前浮式风机一体化仿真软件主要可分为三个类别,分别是商业软件、开源软件和结合开源代码的拓展类软件:

(1)在商业软件方面,目前较为知名的浮式风机一体化仿真软件有 Bladed、HAWC2 和 Orcaflex 等。(2)在开源软件中,由美国可再生能源实验室 NREL 开发的 FAST 系统是目前普遍认可的一体化仿真软件。(3)开源拓展类是指在原有开源代码的基础上,编写对应的接口程序,与目前已知的商业软件进行对接,使其具备对浮式风机进行一体化耦合计算的功能。这类软件普遍采用 FAST 中的开源代码,例如 Matha 等^[2]将 FAST 中的气动模块 Aerodyn 和水动力模块 Hydrodyn 与多体仿真计算软件 SIMPACK 相结合对浮式风机进行时域运动仿真。Ormberg 等^[3-5]将 Simo-Reflex 求解器与 Aerodyn 进行耦合,使其成为可以进行包括风机塔筒和叶片弹性变形模拟的一体化仿真系统。Roddier 等^[6]整合了 TimeFloat-FAST 系统,并将其运用于 WindFloat 概念的一体化仿真中^[7]。Yang 等^[8]和 Zhang 等^[9]将 FAST 的部分模块进行改变并与水动力计算软件 AQWA 进行结合,拓展了对于不同平台概念的仿真应用,例如在平台上柔性连接浮体或波浪能装置。

除了以上所述三类传统的数值仿真方法外,基于 AI 的仿真方法和软件也相继面世,例如 Hu 等^[10]开发了一种基于 SADA 机器学习方法的浮式风机全耦合仿真系统,并对由 Chen 等^[11]开发的 DARwind 浮式风机一体化仿真系统进行深度学习,与实验结果进行对比,吻合较好。

然而,上述仿真软件普遍存在一些问题。(1)商业软件虽提供完整解决方案,但其封闭式架构导致三个显著缺陷:其一,核心算法不可见且无法修改,难以适配新型浮式结构创新需求;其二,系统间数据耦合依赖固定接口,制约多物理场深度交互分析;其三,软件扩展需依赖厂商定制开发,研究自主性受限。(2)对于 FAST 等开源工具及拓展类,其基于 Fortran 的面向过程开发模式导致代码复用率低、可维护性差,需要耗费大量的时间进行代码的研读并理清代码之间的调用和逻辑关系。(3)基于 AI 的仿真系统是一个黑盒系统,在进行新型风机的计算时,没有相应的学习目标,带来计算结果不稳定的风险。

为了解决以上问题,一些研究者^[12-16]正在尝试采用更为先进和开放的语言对浮式风机进行建模,其中 Modelica 语言以其独特的非因果建模方式和面向对象的编码方式,为研究者们提供一条高效的浮式风机一体化仿真路径。其优点如下:(1)利用 Modelica 语言构建模型时,等号两边变量调换位置和未调换是等效的,即所谓的“非因果关系”;而在其他的语言中,等号多作为单向赋值操作,即所谓“因果关

系”。在求解常微分方程时, Modelica 仅需要将方程列出, 并设定自变量初值, 求解器利用多种积分求解方法(如龙格库塔法、dassl 变步长法)会自动对时间进行离散并求解方程组。对研究者而言, 不需要建立数值迭代过程, 可以降低建模难度, 专注力学关系。(2)Modelica 融合可视化建模和层级化分类的特点, 可将力学关系用图形化方式表达。具体而言, 可直接通过拓扑图进行建模, 直观地理解各个模型之间的关系, 相对于代码流式建模, 拖拽建模可以自动生成对应的代码, 也简化了代码输入的过程。(3)Modelica 内置丰富的物理库, 其力学多体库可大幅简化浮式风机建模过程, 省去多体动力学中复杂的坐标转换代码, 显著提升开发效率。

本研究采用 Modelica 语言, 基于势流理论、叶素动量理论、悬链线方程和气动控制建立 Spar 型浮式风机一体化仿真预报模型。以中国南海西沙群岛三沙市周围海域为目标海域, 对 5 MW-Spar 浮式风机进行一体化分析, 为南海岛礁部署浮式风机提供参考。

1 计算模型与方法

1.1 模型结构

根据美国国家海洋和大气管理局(NOAA)数据, 我国西沙群岛周边海域水深最深处达到 2966 m, 但是由于岛屿周边有珊瑚礁形成礁盘, 导致其水深大都在 200 m 范围之内, 本文将平台安装在礁盘平台的边缘处, 水深范围为 250 m 至 400 m。

由于本项目中针对的目标海域水深与 Hywind-Spar 浮式风机平台设计水深(320 m)较为接近, 本研究中将 NREL OC3-Hywind Spar 型 5 MW 水平轴浮式风机为例进行研究。

该型浮式风机的基本形式如图 1 所示, 相关参数可见表 1~3。

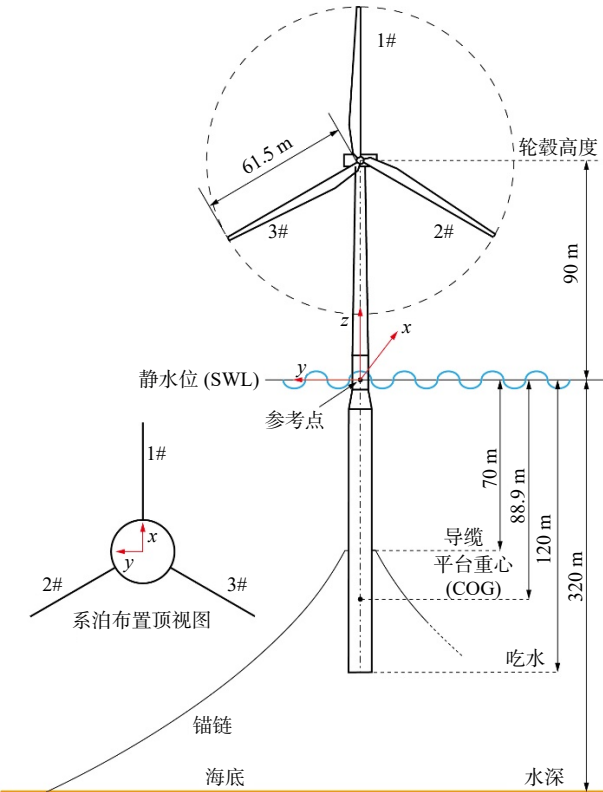


图 1 NREL OC3 Spar 5 MW 浮式风机基本参数
Fig.1 Basic parameters of NREL OC3-Hywind Spar
5 MW wind turbine

表 1 浮式平台结构主要参数
Tab.1 Properties of floating platform structure

参数	数值
水线下深度 (总吃水)	120 m
水线上平台高度	10 m
平台质量 (含压载)	7 466 330 kg
沿着平台中心线的水面下的重心位置	89.9155 m
关于重心的平台横摇转动惯量	4 229 230 000 kg·m ²
关于重心的平台纵摇转动惯量	4 229 230 000 kg·m ²
关于重心的平台艏摇转动惯量	164 230 00 kg·m ²

表 2 5MW NREL 风机主要参数
Tab.2 Parameters of 5MW NREL wind turbine

参数	数值
额定功率	5 MW
伺服控制	统一变桨距控制
切入/额定/切出风速	3/11.4/25 m/s
切入/额定转子转速	6.9/12.1 rpm
转子/轮毂半径	63/1.5 m
轮毂高度 (相对塔基)	80 m
塔架高度 (相对塔基)	77.6 m
塔架重心高度	33.4 m
机舱相对z轴的转动惯量	2.61×10 ⁶ kg·m ²
轮毂质量	5.68×10 ⁴ kg
轮毂转动惯量 (相对转轴)	1.16×10 ⁵ kg·m ²

表3 系泊主要参数
Tab.3 Properties of mooring

参数	数值	参数	数值
锚链数	3	锚链直径	0.09 m
相邻锚链夹角	120°	锚链等效质量密度	77.7066 kg·m ⁻¹
下锚深度	320 m	水中锚链等效重力	698.094 N·m ⁻¹
导缆孔深度	70 m	锚链等效拉伸刚度	384 243 000 kg·m ⁻¹
下锚距平台中心线距离	853.87 m	附加船摇弹性刚度	98 340 000 Nm·rad ⁻¹
未拉伸状态锚链长度	902.2 m		

1.2 浮体运动方程

假设浮体的六自由度运动为 $\xi(t)$,根据牛顿第二定理,可以得到浮体运动方程为

$$M_{kj}\ddot{\xi}_j = F_j \quad (1)$$

式中:下标 k, j 表示自由度(1=纵荡,2=横荡,3=垂荡,4=横摇,5=纵摇,6=艏摇), M_{kj} 为浮体的惯性矩阵, F_j 为载荷,其中包含了水动、气动、系泊等载荷,具体形式如下

$$F_j = F_j^{\text{Hydro}} + F^{\text{Wind}} + F^{\text{Mooring}} + F^{\text{Current}} \quad (2)$$

式中: F_j^{Hydro} 为水动力载荷, F^{Wind} 为气动载荷, F^{Mooring} 为系泊载荷, F^{Current} 为流载荷。

1.2.1 水动载荷计算

对 F_j^{Hydro} 进行进一步的分解,如下

$$F_j^{\text{Hydro}} = F_j^{\text{Static}} + F_j^{\text{Wave}} + F_j^{\text{Drag}} \quad (3)$$

式中: F_j^{Static} 为静水回复力,由浮态变化引起; F_j^{Wave} 为波浪力,由速度势变化引起的载荷; F_j^{Drag} 为黏性阻力,由于势流理论假设中忽略了黏性,为了弥补这部分载荷加入由莫里森公式计算得到的黏性阻尼力。

1.2.2 气动载荷计算与控制

本研究引入空气动力学模块 AeroDyn 来解决叶片和塔架的气动载荷问题。在 AeroDyn 中采用叶素动量理论计算气动载荷,并进行了气动修正。通过假设 1D 动量理论和 2D 叶素理论中的气动载荷相等,建立 BEM 理论,并通过 Brent's Method (诱导因子的迭代计算)进行求解,确定作用在每个叶素上的气动载荷,更详细内容见参考文献[17]。

控制器包括发电机转矩控制器和统一变桨距控制器。当风速小于额定风速时,采用发电机转矩控制器进行控制,以获得最大的风电增益。相比之下,当风速超过额定风速条件时,发电机转矩控制器不能再限制转速和气动转矩的继续增加。在这种情况下,将通过统一变桨距控制器对风机叶片的桨距角进行控制,以达到稳定气动载荷从而稳定发电机转速和功率的目标,避免发生功率过载的情况。

1.2.3 系泊载荷计算

本模型采用悬链线系泊方式。重力式悬链线系泊系统在海上大型浮式平台中多有应用,主要采用钢制锚链,一端连接浮体,另一端连接锚,利用锚链自身的重力产生的拉力来稳定浮体。由于锚链的密度远大于水且运动相对缓慢,所以在数值仿真中可以采用准静态的方法对其进行建模计算约束载荷。在数值模型中,仅考虑锚链伸长变形的影响,对于一些动态特性,如惯性力、阻尼力、弯矩等均忽略。

在建立系泊模型时,假设系泊线时刻处于静力平衡状态。缆绳张力与缆绳在导缆点处的位置在局部坐标系中的关系可以用下面的非线性方程组^[18]来表示

$$X_F = L - \frac{V_F}{\omega} + \frac{H_F}{\omega} \ln \left[\frac{V_F}{H_F} + \sqrt{1 + \left(\frac{V_F}{H_F} \right)^2} \right] + \frac{H_F L}{EA} + \frac{C_B \omega}{2EA} \left[- \left(L - \frac{V_F}{\omega} \right)^2 + \left(L - \frac{V_F}{\omega} - \frac{H_F}{C_B \omega} \right) \text{MAX} \left(L - \frac{V_F}{\omega} - \frac{H_F}{C_B \omega}, 0 \right) \right] \quad (4)$$

$$z_F = \frac{H_F}{\omega} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{V_F}{H_F} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{V_F - \omega L}{H_F} \right)^2} \right] + \frac{1}{EA} \left(V_F L - \frac{\omega L^2}{2} \right) \quad (5)$$

式中: X_F 和 Z_F 为局部坐标系中的领航点位置, ω 为单位长度流体中的表观重量, EA 为伸展刚度, C_B 为海底静摩擦阻力系数, L 为总无伸展长度。采用牛顿-拉夫逊迭代方法求解该非线性方程组。

1.2.4 流载荷计算

流载荷计算公式如下

$$F^{\text{Current}} = \frac{1}{2} C_D \rho_w V^2 A \quad (6)$$

式中: C_D 为曳力系数, ρ_w 为海水密度, V 为涉及海流流速, A 为构件在与流速垂直平面上的投影面积。Spar 平台的曳力系数 $C_D=0.6$ 。

1.3 浮式风机一体化分析模型

本研究将一体化分析模型分为 3 个主要模块, 即 Modelica 模块、Aerodyn 气动载荷模块、动态链接库(Dynamic Link Library, DLL)。除此之外, 在进行仿真之前需要通过 AQWA 或 WAMIT 等频域势流软件获得相应的水动力参数。系统构成结构及数据传输关系如图 2 所示, 图中主要展示了系统所涉及的浮式风机一体化分析的各种载荷。模型的准确性和可靠性验证详见文献[19]。

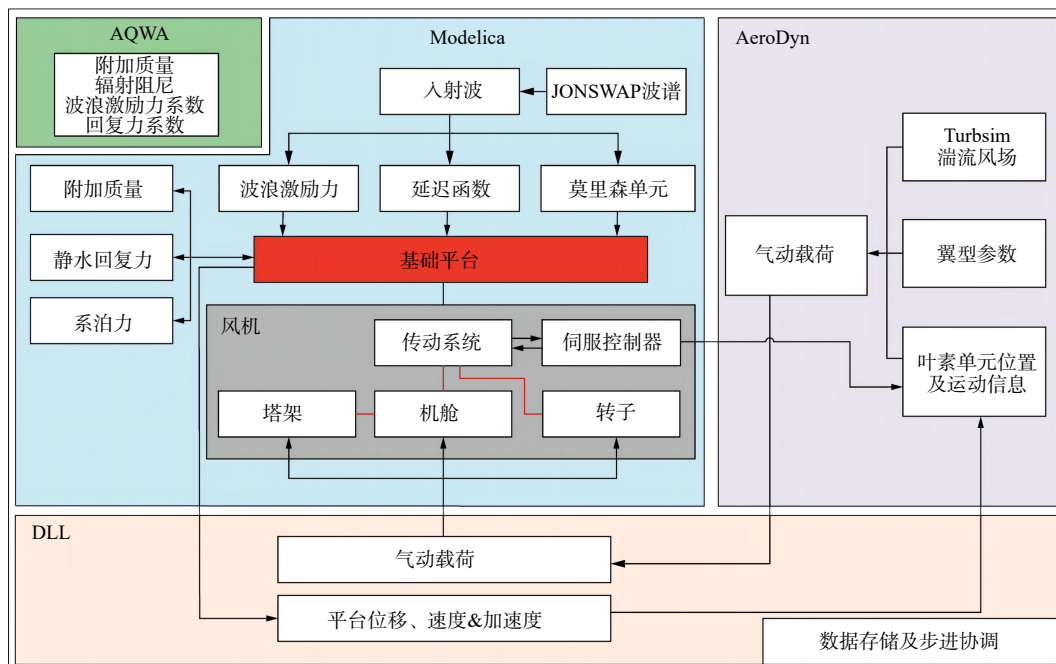


图 2 系统结构及数据传输关系示意图

Fig.2 Diagram of system structure and data transmission relationship

图 2 中模块的主要功能如下: Modelica 模块主要用于构建浮式风机各部件的多体动力学模型, 并且集成了水动力载荷计算模块, 是本系统用于对浮式风机进行动力学仿真的核心模块。Aerodyn 是美国可再生能源实验室(NREL)基于动量叶素理论开发的水平轴风机气动计算组件, 可以与一体化仿真软件 FAST 进行耦合, 也可以作为单独的模块计算气动载荷。本研究对 Aerodyn 气动仿真模块进行二次开发, 添加了与 OpenModelica 平台仿真过程中进行数据交换的功能, 叶片和塔架上节点的位置和速度由 Modelica 中搭建的多体模型提供。在完成一个时间步的迭代后, Aerodyn 会将气动载荷上传到由步进控制模块搭建的共享内存中以待 Modelica 模块进行下一时间步的计算。

2 风浪联合分布模型

2.1 风浪数据统计

本文以东经 112.3°, 北纬 17°(三沙市坐标)为风浪统计节点, 风浪数据在公共再处理数据库 ERA5-Interim^[20] 中获得, 其中包含了该坐标位置从 2011 年 1 月 1 日 0:00 至 2020 年 12 月 31 日 23:00 每小时的有义波高、平均波浪周期和 10 m 处的 10 分钟平均风速资料, 总共有 105 168 组数据点可供分析。由于该数据库提供的是平均波浪周期 T_1 , 需要将其转换为谱峰周期 T_p , 转换方法见 DNV 船级社规范^[21]。同时, 由于本研究中设计的风机轮毂高度为 90 m, 应采用式(6)对 10 m 高处风速进行转换, 以得到 90 m 高度处的平均风速。

$$U(z) = U_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (7)$$

式中: z 为海平面以上高度值, U_{10} 为 10 m 高度处平均风速, α 为粗糙度系数, 海面取 0.1。

2.2 风速、波高和波浪周期的联合分布

本文采用 Li 等^[22] 提出的风浪联合概率密度分布进行分析, 其中风浪联合概率密度函数可由下式表示

$$f_{U_w, H_s, T_p}(u_w, h_w, t_w) = f_{U_w}(u_w) \cdot f_{H_s|U_w}(h_w|u_w) \cdot f_{T_p|U_w, H_s}(t_w|u_w, h_w) \quad (8)$$

式中: u_w 为 10 分钟平均风速自变量, h_w 为有义波高自变量, t_w 为谱峰周期自变量, $f_{U_w}(u_w)$ 为 10 分钟平均风速的概率密度分布函数, $f_{H_s|U_w}(h_w|u_w)$ 为在给定风速条件下的有义波高概率密度分布函数, $f_{T_p|U_w, H_s}(t_w|u_w, h_w)$ 为给定风速和波高条件下的谱峰周期的概率密度函数。 U_w 表示轮毂高度处 10 分钟平均风速, H_s 表示波浪的有义波高, T_p 表示波浪的谱峰周期。

定义平均风速 U_w 的概率密度 $f_{U_w}(u)$ 由双参数 Weibull 分布近似拟合, 如式(9)所示

$$f_{U_w}(u_w) = \frac{\alpha_U}{\beta_U} \left(\frac{u_w}{\beta_U} \right)^{\alpha_U-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{u_w}{\beta_U} \right)^{\alpha_U} \right] \quad (9)$$

式中: α_U 为形状参数, β_U 为尺度参数, 可以采用最大似然法拟合, 本文研究海域拟合结果如图 3 所示。

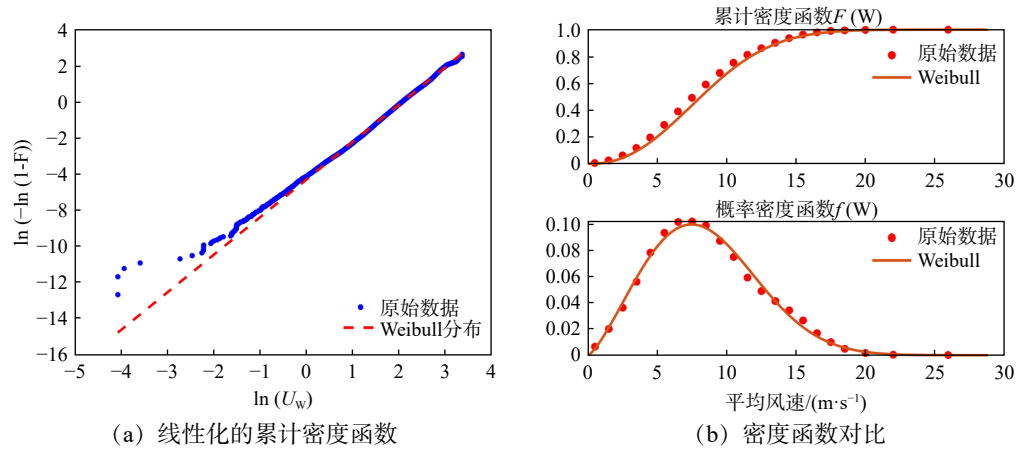


图3 风速 Weibull 分布拟合

Fig.3 Weibull distribution fitting of wind speed

在不同风速条件下同样采用双参数 Weibull 分布来确定波高的条件概率密度函数 $f_{H_s|U_w}(h_w|u_w)$, 其表达式为

$$f_{H_s|U_w}(h_w|u_w) = \frac{\alpha_{HC}}{\beta_{HC}} \left(\frac{h_w}{\beta_{HC}} \right)^{\alpha_{HC}-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{h_w}{\beta_{HC}} \right)^{\alpha_{HC}} \right] \quad (10)$$

式中: α_{HC} 为形状参数, β_{HC} 为尺度参数。当获得多组形状参数和尺度参数后, 对其进行非线性拟合, 如下所示

$$\alpha_{\text{HC}} = a_1 + a_2 \cdot u_w^{a_3} \quad (11)$$

$$\beta_{\text{HC}} = b_1 + b_2 \cdot u_w^{b_3} \quad (12)$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 和 b_3 分别为非线性拟合曲线的参数, 可通过最小二乘法获得。图 4 为采用拟合结果得到的平均值和标准差与原始数据对比的结果, 可以看到拟合后的结果与原始数据吻合较好。

以上完成了风和浪的概率密度函数的构建, 下面建立谱峰周期相对风速和有义波高的条件概率密度函数, 谱峰周期满足对数正态分布, 其概率密度函数如下式所示

$$f_{T_p|U_w, H_s}(t_w | u_w, h_w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln(T_p)}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t_w) - \mu_{\ln(T_p)}}{\sigma_{\ln(T_p)}}\right)^2\right] \quad (13)$$

其中,

$$\mu_{\ln(T_p)} = \ln\left(\frac{\mu_{T_p}}{\sqrt{1 + v_{T_p}^2}}\right) \quad (14)$$

$$\sigma_{\ln(T_p)}^2 = \ln(v_{T_p}^2 + 1) \quad (15)$$

$$v_{T_p} = \frac{\sigma_{T_p}}{\mu_{T_p}} \quad (16)$$

式中: μ_{T_p} 和 σ_{T_p} 为不同风浪条件下谱峰周期 T_p 的平均值和标准差, v_{T_p} 为协方差。

通过 Johannessen 提出的关于 T_p 正态分布的参数化表示方法, 可得

$$\mu_{T_p} = \bar{t}(u_w, h_w) = \bar{t}(h_w) \left(1 + \theta \left(\frac{u - \bar{u}(h_w)}{\bar{u}(h_w)}\right)^\gamma\right) \quad (17)$$

式中: θ 和 γ 为拟合系数, $\bar{t}(h)$ 和 $\bar{u}(h)$ 分别为给定 H_s 条件下的波浪周期期望值和平均风速, 通过非线性拟合方法来对波浪周期期望值和平均风速进行参数化处理, 如式(18)和式(19)所示

$$\bar{t}(h_w) = e_1 + e_2 \cdot h_w^{e_3} \quad (18)$$

$$\bar{u}(h_w) = f_1 + f_2 \cdot h_w^{f_3} \quad (19)$$

式中: e_1 、 e_2 、 e_3 、 f_1 、 f_2 和 f_3 分别是非线性拟合曲线的参数。在给定有义波高 H_s 后, 可确定 $\bar{t}(h_w)$ 和 $\bar{u}(h_w)$ 的值。为了能够更容易地确定 θ 和 γ 的值, 可将式(17)改写为如下形式

$$\frac{\bar{t}(u_w, h_w) - \bar{t}(h_w)}{\bar{t}(h_w)} = \theta \left(\frac{u - \bar{u}(h_w)}{\bar{u}(h_w)}\right)^\gamma \quad (20)$$

上式中左侧项为归一化的周期, $(u - \bar{u}(h_w))/\bar{u}(h_w)$ 为归一化的风速, 根据文献[22] 的描述, 归一化周期通常与归一化风速呈现线性关系, 所以一般情况下 γ 取值为 1, θ 则可以通过最小二乘法进行数据拟合获得。协方差 v_{T_p} 简化为关于有义波高的表达式, 如下式所示

$$v_{T_p}(h_w) = k_1 + k_2 \cdot \exp(h_w k_3) \quad (21)$$

上述内容已确定了联合概率密度函数的所有拟合参数, 由本文数据进行拟合得到的参数如表 4 所示, 可获得风浪联合分布结果。

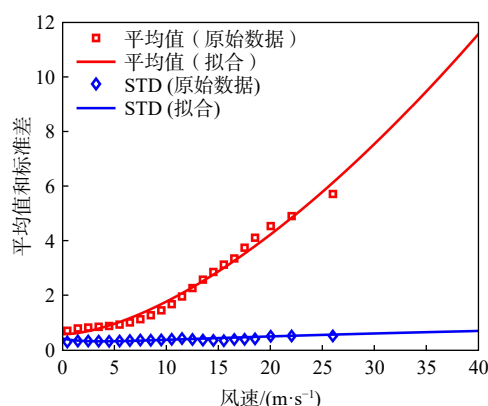


图4 有义波高 H_s 概率密度函数拟合后数据的平均值和标准差 STD 对比

Fig.4 Parameters fitting comparison of significant wave height H_s PDF

表4 风浪联合分布拟合参数

Tab.4 Fitting parameters of wind and wave joint distribution

拟合参数	数值	拟合参数	数值	拟合参数	数值
α_U	2.309	b_3	1.563	f_1	2.5
β_U	9.546	θ	-0.36	f_2	4.25
a_1	1.371	γ	1	f_3	0.90
a_2	0.281	e_1	8	k_1	-0.01
a_3	1.138	e_2	0.48	k_2	0.19
b_1	0.657	e_3	1.18	k_3	-0.32
b_2	0.035				

2.3 工况设定

由前文所述得到风浪联合分布后,通过罗森不拉特变换^[23]可以得到3个独立的标准高斯变量,分别反应了平均风速 U_w 的边缘变化、给定 U_w 条件下 H_s 的变换变化和给定 U_w 和 H_s 条件下的 T_p 边缘变化,所在重现周期的所有变量组合都位于一个半径为 r 的球面上。

$$\Theta(r) = 1 - \frac{1}{N_Y} \quad (22)$$

式中: $\Theta(r)$ 为标准正态分布函数, N_Y 表示 Y 年重现期内的海况总数量,将式(22)的球体坐标转换回对应的物理参数,得到对应的 U_w 、 H_s 和 T_p 的 Y 年重现期等高线表面。

根据《海上浮式风电平台指南》^[24] 中对于海上浮式风机平台的定位系泊系统的相关规定,考虑在重现期为 N 年的风,加上相对应的波浪和流的设计准则进行设计。

数据中 8 m/s 附近的风速出现的概率最大,因此取 8 m/s 作为正常风况的风速,而风机的额定风速为 11.4 m/s,所以作为额定工况进行分析。取 1 年重现期中有义波高 H_s 最大值所对应的谱峰周期 T_p 作为作业工况和额定工况的波浪条件,1 年重现期的风浪联合分布如图 5 所示,可得作业工况的有义波高和谱峰周期分别为 $H_s=2.59$ m, $T_p=10.2$ s; 额定工况的有义波高和谱峰周期为 $H_s=3.24$ m, $T_p=10.5$ s。

对于自存工况,《海上浮式风机平台指南》中取 1 年或 50 年重现期的风况、海况条件,由于 1 年重现期的最大边缘分布风速仅为 24.82 m/s, 小于《海上移动平台入级规范》^[25] 中规定的最小持续风速 25.8 m/s, 不符合规范要求,所以舍弃此工况。而 50 年重现期的最大边缘分布风速为 28.99 m/s, 满足该风速要求,所以本文选取 50 年重现期作为分析的依据。图 6 为 50 年重现期对应的风浪联合分布,可以看到在最大风速 28.99 m/s 的条件下,有义波高和谱峰周期分别为 $H_s=7.28$ m, $T_p=12.75$ s。表 5 展示了设计工况的相关参数。风选择湍流风,湍流模型为 Kaimal,湍流强度为 0.14。

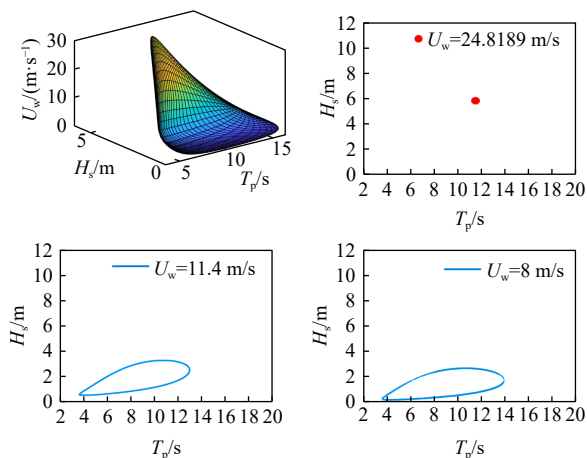


图5 1年重现期的风浪联合分布

Fig.5 Combined distribution of wind and wave in 1 year

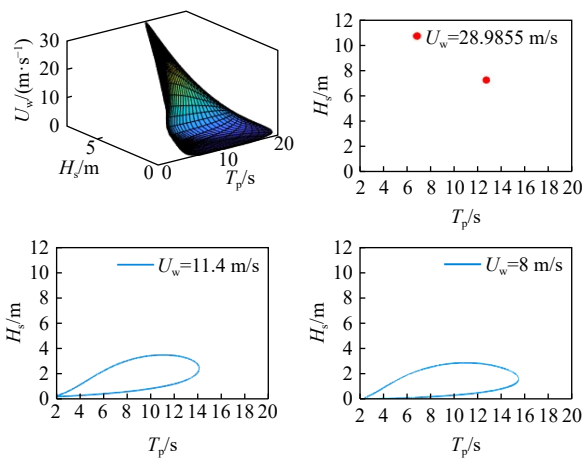


图6 50年重现期的风浪联合分布

Fig.6 Combined distribution of wind and wave in 50 year

表 5 设计工况参数
Tab.5 Parameters of design cases

工况名称	编号	风速 $U_w/(m\cdot s^{-1})$	有义波高 H_s/m	谱峰周期 T_p/s	流速 $/(m\cdot s^{-1})$
作业工况	LC1	8	2.59	10.2	0.62
额定工况	LC2	11.4	3.24	10.5	0.62
自存工况	LC3	28.99	7.28	12.75	0.89

由于缺少三沙市附近的流速相关数据,本文流速依据参考文献[26]选择南海 1 年重现期流速为 0.62 m/s, 50 年重现期流速为 0.89 m/s。风浪流始终沿 X 轴正方向作用于结构物。

3 结果分析与讨论

3.1 风机运动分析

图 7 为风机时域运动响应统计值,表 6 为风机时域运动响应统计值。可以看出,作业工况下的纵荡最大值为 26.08 m,自存工况下的纵荡最大值为 12.85 m。两种工况下的纵荡最大值相差较大,这是因为自存工况的风速已超过风机的切出风速,此时风力机处于刹车状态,并且叶片转向到受气动力最小的桨距角状态以避免过大的气动载荷使平台倒伏,而作业和额定工况下风机正常工作受到更大的推力作用。对于垂荡结果,自存工况下的结果明显大于作业工况和额定工况,说明垂荡自由度主要受到波浪的作用。在目标海域的作业工况下,纵摇最大值为 4.74°,满足常见的海上漂浮式风机在发电工况下的纵摇要求,即不大于 5°。

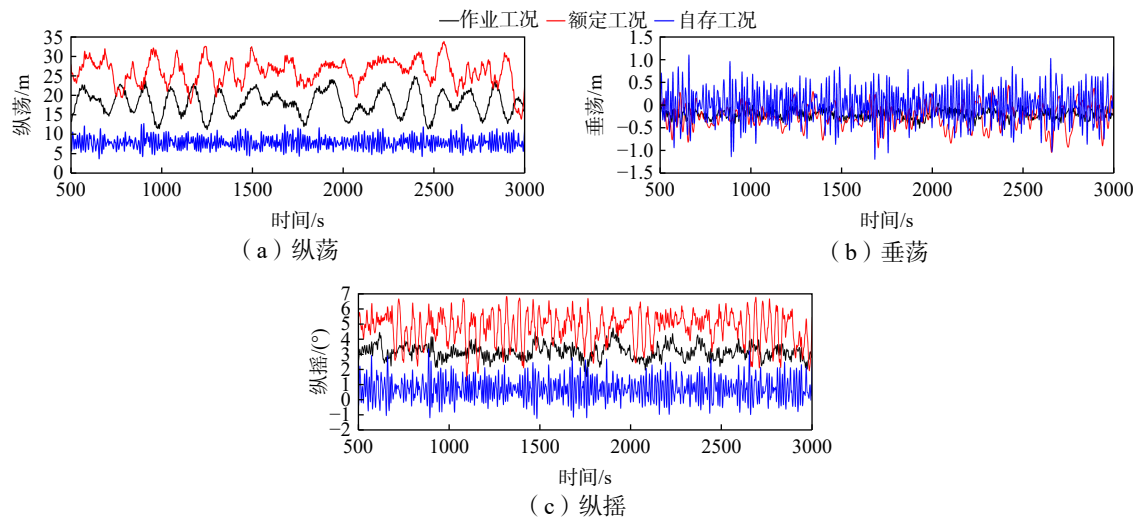


图 7 风机的时域运动响应
Fig.7 Time domain motion response of the FOWT

表 6 风机时域运动响应统计值

Tab.6 Time domain motion response statistics of the FOWT

工况	纵荡/m		垂荡/m		纵摇/°	
	最大值	均值	最大值	均值	最大值	均值
LC1	26.08	24.89	0.06	-0.22	4.74	3.16
LC2	33.75	26.08	0.43	-0.25	6.82	4.76
LC3	12.85	8.01	1.09	-0.013	3.36	0.73

3.2 风机系泊受力分析

本研究的风机系泊系统布置如图 8 所示。系泊系统的设计不仅要满足浮体所规定的回复力要求,

还需要满足对于锚链的强度要求。在作业工况和生存工况下,系泊设计能够保证浮体不发生倾覆,锚链不会断裂等情况。按照 CCS 的《海上移动平台入级规范》对锚链不同状态下的张力安全系数应不小于表 7 中的规定值,准静力分析法不适用于瞬态工况动力分析。

由于风机并不需要常驻的作业人员,因此运动响应只需要保证在作业工况和生存工况下系泊达到规定的安全系数即可。本文锚链采用 R4 级别标准,弹性极限张力为 6437 kN,破断张力为 8167 kN。

对系泊系统开展基于时域的动力安全评估。表 8 为系泊受力情况统计表。无论是在作

业工况下还是自存工况下,各锚链的安全系数均满足系泊系统安全系数要求。从表中可以看出,完整系泊系统处于作业工况和自存工况时,2 号张力最大,分别为 1329.167 kN 和 1057.611 kN。2 号和 3 号锚链张力大小相近,这是由于这两条锚链处于上游位置。自存工况下风机处于变桨停机状态,故其风载荷相对于作业工况下的明显减小,此时系泊力主要受波浪载荷的影响。对于破损和瞬态工况,考虑锚链失效下风机处于停机状态。对于破损工况,由于三根锚链的三点系泊,单锚失效引发平台偏移,导致剩余锚链悬链线躺底段长度增加,进而导致锚链的最大张力减小。对于瞬态工况,设定锚链在计算 1000 s 时失效,失效后剩余锚链张力减小,锚链的最大张力出现在锚链失效前。

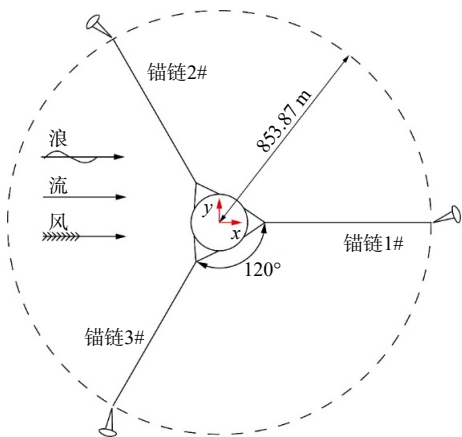


图 8 UNSPAR 的锚链布置图
Fig.8 Mooring arrangement of UNSPAR

表 7 系泊系统安全系数表
Tab.7 Safety factors of mooring system

设计工况	准静力分析		动力分析	
	平台远离其他结构物	平台邻近有其他结构物	平台远离其他结构物	平台邻近其他结构
完整作业工况	2.7	3.0	2.25	2.47
完整自存工况	2.0	2.2	1.67	1.84
破损作业工况	1.8	2.0	1.57	1.73
破损自存工况	1.43	2.00/1.57	1.25	1.37
瞬态作业工况	—	—	1.22	1.34
瞬态自存工况	—	—	1.05	1.16

表 8 系泊受力情况
Tab.8 Force of mooring cable

工况名称	失效锚链编号	系泊索编号	最大张力/kN	安全系数
完整作业工况	无	1	729.428	11.20
		2	1329.167	6.14
		3	1325.797	6.16
完整自存工况	无	1	795.653	10.26
		2	1057.611	7.72
		3	1057.601	7.72
破损作业工况	1	2	524.988	15.56
		3	543.042	15.04
	3	1	272.876	29.93
		2	520.356	15.70

续表 8				
工况名称	失效锚链编号	系泊索编号	最大张力/kN	安全系数
破损自存工况	1	2	550.496	14.84
		3	550.488	14.84
	3	1	274.979	29.70
		3	530.533	15.39
瞬态作业工况	1	2	1008.474	8.10
		3	1008.455	8.10
	3	1	781.008	10.46
		2	1008.474	8.10
瞬态自存工况	1	2	1076.346	7.59
		3	1076.349	7.59
	3	1	805.288	10.14
		2	1076.347	7.59

3.3 风机功率分析

图 9 和图 10 分别为风机转速时域曲线和功率时域曲线。作业工况下的转速和功率平均值分别为 9.26 rpm 和 1.96 MW。额定工况下转速和功率平均值分别为 11.98 rpm 和 4.60 MW,可以看出风轮控制系统很好地实现了风轮在不同设计风速下的转速和功率输出控制。额定工况下转速均值 11.98 rpm 接近额定转速(12.1 rpm),输出功率 4.60 MW 略小于额定功率 5 MW,主要是由于风机纵摇运动和湍流风的平均风速对风机输出功率的影响。

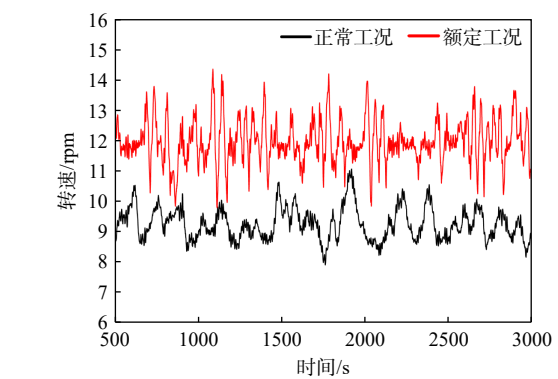


图 9 风机转速时域曲线

Fig.9 Time domain rotation response of the FOWT

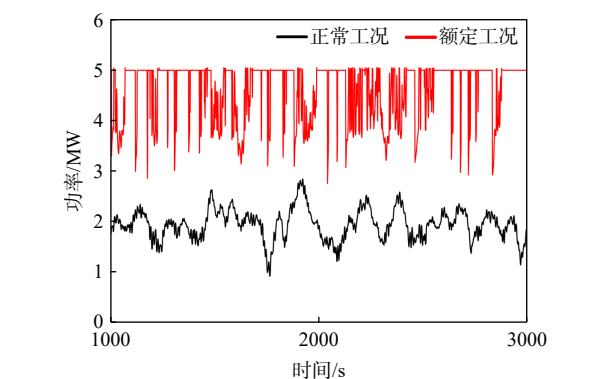


图 10 风机功率时域曲线

Fig.10 Time domain power response of the FOWT

4 结 论

本研究通过构建南海岛礁海域风-浪-流联合作用模型与 Modelica 耦合仿真框架,建立了适用于南海岛礁环境的浮式风机一体化仿真分析方法。以中国南海三沙市附近为目标海域,对 5 MW-Spar 型浮式风机进行一体化分析,得到如下主要结论:

- (1) 在浮式风机的一体化分析中,应当合理考虑风-浪联合作用。基于目标场址的长期风-浪观测数据建立风-浪联合概率分布模型,从而合理考虑风浪对浮式风机的作用。
- (2) 该型风机在目标海域作业工况和额定工况下的纵荡值相近,且都远大于自存工况下的纵荡值,这说明了风机推力对风机纵荡的影响。自存工况下的垂荡最大值均大于作业工况和额定工况,这说明了波浪对垂荡的影响。作业工况下的纵摇最大值为 4.75°,满足常见的海上漂浮式风机在正常工况下的

纵倾要求,即不大于 5° 。

(3) 在目标海域下的风机系泊系统均满足 CCS 的安全系数要求。自存工况下的系泊张力最大值为 1329.167 kN,远小于破断张力 8167 kN。

综上所述,该型风机方案布放在三沙市周围切实可行,可为未来三沙市周围海域部署浮式风机提供参考。本研究也验证了所提方法体系的工程适用性,为南海岛礁浮式风电工程部署提供了仿真分析框架。

参 考 文 献:

- [1] Cordle A, Jonkman J. State of the art in floating wind turbine design tools[C]//The 21st International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii, 2011.
- [2] Matha D, Schlipf M, Stuttgart U. Challenges in simulation of aerodynamics, hydrodynamics, and mooring-line dynamics of floating offshore wind turbines[C]//The 21st International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii: OnePetro, 2011.
- [3] Ormberg H, Bachynski E E. Global analysis of floating wind turbines: Code development, model sensitivity and benchmark study[C]//The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, 2012.
- [4] Luxcey N, Ormberg H, Passano E. Global analysis of a floating wind turbine using an aero-hydro-elastic numerical model: Part 2—benchmark study[C]//Volume 5: Ocean Space Utilization; Ocean Renewable Energy, Rotterdam, The Netherlands: ASMEDC, 2011.
- [5] Ormberg H, Passano E, Luxcey N. Global analysis of a floating wind turbine using an aero-hydro-elastic model: Part 1—code development and case study[C]//Volume 5: Ocean Space Utilization; Ocean Renewable Energy. Rotterdam, The Netherlands: ASMEDC, 2011.
- [6] Roddier D, Cermelli C, Aubault A, et al. WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2010, 2(3): 033104.
- [7] EDP. Wind Energy a new way to generate energy[EB/OL]. (2019)[2022-11-12]. <https://www.edp.com/en/edp-stories/offshore-wind>.
- [8] Yang Y, Bashir M, Michailides C, et al. Development and application of an aero-hydro-servo-elastic coupling framework for analysis of floating offshore wind turbines[J]. Renewable Energy, 2020, 161: 606–625.
- [9] Zhang D, Chen Z, Liu X, et al. A coupled numerical framework for hybrid floating offshore wind turbine and oscillating water column wave energy converters[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 267: 115933.
- [10] Chen P, Jia C, Ng C, et al. Application of SADA method on full-scale measurement data for dynamic responses prediction of Hywind floating wind turbines[J]. Ocean Engineering, 2021, 239: 109814.
- [11] Chen P, Ma J, Yang Q S. Coupled-dynamic response investigation of taut-wire mooring systems for deepwater semisubmersible platform[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2013, 39(1): 65–69.
- [12] Strobel M, Vorpahl F, Hillmann C, et al. The OnWind Modelica library for offshore wind turbines-implementation and first results[C]//The 8th International Modelica Conference, Technical Univeristy, Dresden, Germany, 2011.
- [13] Strach M, Vorpahl F, Hillmann C, et al. Modeling offshore wind turbine substructures using engineer design data-a newly Developed parametric approach[C]//The 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference: Vol. 1. Rhodes, Greece: ISOPE, 2012.
- [14] Brommundt M, Muskulus M, Strach M, et al. Experiences with object-oriented and equation based modeling of a floating support structure for wind turbines in Modelica[C]//Proceedings Title: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC), Berlin, Germany: IEEE, 2012: 1-12.
- [15] Leimeister M, Kolios A, Collu M. Development and verification of an aero-hydro-servo-elastic coupled model of dynamics for FOWT, based on the MoWiT library[J]. Energies, 2020, 13(8): 1974.
- [16] El Beshbichi O, Xing Y, Ong M C. An object-oriented method for fully coupled analysis of floating offshore wind turbines through mapping of aerodynamic coefficients[J]. Marine Structures, 2021, 78: 102979.

- [17] Jonkman JM, Hayman GJ, Jonkman BJ, Damiani RR, Murray RE. AeroDyn v15 user's guide and theory manual. *Renew Energy* 2015; 46.
- [18] Jonkman JM. Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine. Technical Report, (NREL/TP-500-41958): 2007, p. 921803. <http://dx.doi.org/10.2172/921803>, <http://www.osti.gov/servlets/purl/921803-yIIWm8/>.
- [19] Zhu Y, Hu C, Ma Y, et al. An equation-based method for fully coupled analyses of floating offshore wind turbine based on Modelica[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 277: 116653.
- [20] ERA5. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present[EB/OL]. [2023-10-23].
- [21] DNV. Recommended practice: Environmental conditions and environmental loads[Z]. Det Norske Veritas: Høvik, Oslo, Norway, 2021.
- [22] Li L, Gao Z, Moan T. Joint distribution of environmental condition at five european offshore sites for design of combined wind and wave energy devices[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2015, 137(3): 031901.
- [23] Madsen H O, Krenk S, Lind N C. *Methods of Structural Safety* [M]. 2nd ed. Dover Publications, 2006.
- [24] CCS. 海上浮式风机平台指南[S]. 中国, 2021.
CCS. Guidelines for floating offshore wind turbine[S]. China, 2021. (in Chinese)
- [25] CCS. 海上移动平台入级规范[S]. 中国, 2020.
CCS. Rules for classification of offshore mobile platform[S]. China, 2020. (in Chinese)
- [26] Tian Z, Shi W, Li X, et al. Numerical simulations of floating offshore wind turbines with shared mooring under current-only conditions[J]. *Renewable Energy*, 2025, 238: 121918.