

风浪流不共线对半潜式风机平台水动力性能的影响研究

贺金龙, 焦波

山东交通学院 船舶与港口工程学院, 山东 威海 264209

摘 要 : 海上浮式风机是在风、浪、流的共同影响下运行的, 这些载荷往往作用于不同的方向。现有研究通常只考虑风浪流共线情况, 为此本文旨在研究风浪流不共线对浮式风机平台动态响应的影响。以 OC4-DeepCwind 半潜式平台为研究对象, 首先将模拟结果与 FAST 结果进行了对比分析, 验证了数值模型的正确性; 然后讨论了风浪流单个环境载荷与另外两个载荷呈 0° 、 30° 、 60° 和 90° 夹角时浮式风机平台的动态响应的变化。结果表明: 风浪流共线时的纵荡运动响应最大; 风浪流不共线对平台纵荡运动响应的影响较大, 对垂荡运动响应的影响很小; 风向角变化对平台运动的影响大于浪向角和流向角。

关 键 词 : 风浪流不共线; 海上浮式风机; 半潜式平台; 动态响应

Effects of Wind-Wave-Current misalignment on the Hydrodynamic Performance of Semi-submersible Platform for Wind Turbine

He Jinlong, Jiao Bo

Naval Architecture And Port Engineering College, Shandong Jiaotong University, Weihai, Shandong 264209

Abstract : Floating offshore wind turbines (FOWTs) operate under the combined influence of wind, wave, and current, which often act from different directions on FOWTs. However, the existing studies typically consider wind-wave-current alignment conditions. This paper aims to investigate the effects of wind-wave-current misalignment on the dynamic response of floating wind turbine platforms. For the OC4-DeepCwind semi-submersible platform, the simulation results were first compared with those from FAST to validate the accuracy of the numerical model. Then, the the dynamic response were studied under various scenarios where the single load of wind, wave, and current form angles of 0° , 30° , 60° , and 90° with two other loads. The results indicate that the surge response is the largest when the wind, wave, and current are misalignment; the misalignment condition has a significant impact on the surge response but a minimal impact on the heave response; and the wind direction angle has a greater influence on platform motion than the wave and current direction angles.

Keywords : wind-wave-current misalignment; floating offshore wind turbines; semi-submersible platform; dynamic response

引言

随着全球对可再生能源需求的不断增长以及对碳排放的关注日益加深, 改善能源结构是有效应对能源和环境挑战的重要途径。海上风电作为一种清洁、可再生的能源形式, 受到了越来越多国家和地区的重视和广泛应用。海上风能资源比陆上丰富得多, 因为海上风更强劲、更稳定。此外, 还可以减少视觉和噪声的干扰^[1]。因此各国的研究人员和工程师都在关注能够在深远海运行的漂浮式海上风机的研究^[2]。

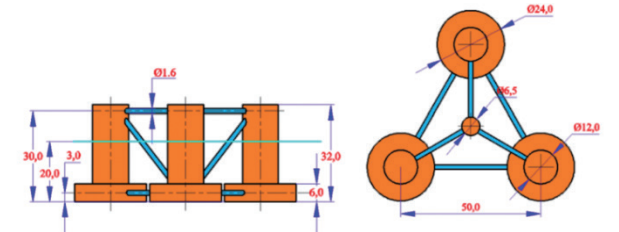
浮式风机系统在真实海洋环境中, 会受到风浪流等载荷的共同作用。值得注意的是, 这些载荷通常是从不同方向作用的^[3]。风浪的不共线会对浮式支撑平台的运动响应和风机的输出功率产生重大影响。许多学者对此进行了广泛研究。Le 等^[4]分析了极端条件下风浪不共线的影响, 随着风浪夹角的增大, 最大纵荡值减少 61.8%, 最大横荡值增加 215.4%。Lyu 等^[5]发现 OC-3 Hywind 平台不同自由度的最大位移取决于来风和波浪方向。在时域分析中, 各自由度下的最大位移 (或转角) 依赖于入射风和波浪的角度: 当入射风浪共线时, 最大位移出现在纵摇方向; 当风浪垂直时, 最大位移 (或转角) 则出现在其他五种自由度运动中。李修赫等^[6]研究发现风浪不共线对平台的纵荡和横荡运动平衡位置有显著影响。Jia 等^[7]研究表明风浪出现夹角情况下, 两根系泊缆失效会导致浮式风机平台大幅漂移, 并增加相邻系泊缆的张力。Fitzgerald 等^[8]的研究表明风浪不共线对浮式风机横向运动响应的幅度有显著影响。在相同的风浪载荷条件下, 当风浪不共线时, 风机位移可增加 400% 以上。Cao 等^[9]提出了一种新的立柱支撑海上风力机有限元模型, 进一步研究了风浪不共线对平台运动响应的影响, 得出 90° 的风浪夹角是最不利的情况。

风浪的不共线对浮式风机系统的疲劳载荷和发电功率等也有重大影响。Barj等^[10]的研究表明,仅考虑风浪共线的情况会低估立柱式风机塔底的侧向疲劳损伤,因此建议在设计立柱式风机塔架时,需要考虑风浪不共线的情况。Yoshida等^[11]研究了风浪不共线作用下平台疲劳荷载的变化,发现纵向弯矩是疲劳荷载的主要影响因素。Niranjan等^[12]研究极端环境条件下的风浪夹角,表明当风浪0°入射时,浮式风机出现最大载荷。Li等^[13]研究发现风浪错位对发电功率影响较小,但对风机的运动和结构载荷影响较大。Van等^[14]采用了非线性不规则波浪,研究发现垂直于风向的波浪增加了疲劳损伤积累。基于以上研究可知风浪不共线会显著减少浮式风机的疲劳寿命,因此在设计阶段需要考虑此项因素。

然而现有的研究主要集中在风浪载荷不共线引起的平台运动响应和载荷,没有考虑流的影响。作者在公开发表的文献中,尚未发现有研究来分析风浪流载荷不共线共同作用下平台运动响应特性的影响。因此,本文以OC4-DeepCwind半潜式浮式风机平台为研究对象,利用ANSYS-AQWA软件,研究风浪流载荷不共线工况下的平台运动响应,从而为平台设计和运营提供可靠的技术支持。

一、浮式风机主要参数

OC4-5MW海上浮式风机系统由上部的风机、塔架、浮式支撑平台和系泊系统组成。由美国国家可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory)开发的5WM风机搭载在OC4-DeepCwind半潜式平台^[15]上,整个系统通过系泊系统定位在海床上。OC4-DeepCWind半潜式平台由三个主偏移舱、一个中间立柱和支撑杆件组成,如图1所示。整个浮式风机系统布置在水深200m的海上。系泊系统由三条悬链线组成,各悬链线之间的角度为120°,系泊线连接在浮动平台上的导缆孔和位于海底的锚点之间。系泊系统增加了浮式平台的刚度,减少了平台的运动。平台及系泊系统参数分别如表1,表2所示。



> 图1 OC4-DeepCWind半潜式平台^[15]

表1 OC4平台主要参数^[15]

参数	数值
吃水深度 /m	20
水面上高度 /m	10
浮筒直径 /m	12
浮筒间距 /m	50
浮筒高度 /m	26
压水筒高度 /m	6
压水筒直径 /m	24
中间立柱直径 /m	6.5
横撑和斜撑直径 /m	1.6
基础质量 /kg	1.3473×10^7

表2 系泊系统主要特性^[15]

参数	数值
锚固点水深 /m	200
导缆孔水深 /m	14

参数	数值
中心线至锚固点距离 /m	837.6
中心点至导缆孔距离 /m	40.87
锚链长度 /m	835.5
锚链直径 /m	0.0776
锚链湿重 /(kg/m)	108.6
等效张拉刚度 /N	7.536×10^8
拖曳力系数	1.0

二、环境载荷

浮式风机系统在复杂的海洋环境中会受到多种载荷的共同作用,这些载荷主要来源于风、浪、流等因素。为了更有效地进行数值分析和计算,我们在此研究中主要聚焦于风、浪、流这三种主要载荷的影响。

(一) 风载荷

风载荷是浮式风机面临的关键载荷之一,它直接影响风机的旋转载矩和整个结构的稳定性。根据中国船级社海上移动平台入级规范2023,作用在构件上的风力 F 应按照下式计算:

$$F = C_h \cdot C_s \cdot S \cdot P \tag{1}$$

式中: C_h 为受风杆件的高度系数; C_s 为受风杆件形状系数; S 为受风杆件正投影面积; P 为风压。风压 P 应按照下式计算:

$$P = 0.613v^2 \tag{2}$$

式中: v 为风速。

(二) 波浪载荷

浪载荷对浮式风机也具有显著影响,海浪的冲击和振动对结构的动态响应至关重要。本文研究的浮式风机平台属于大尺度构件,其直径 D 与波长 L 的比值大于0.2,用势流理论和三维辐射/绕射理论确定了作用在平台上的水动力。速度势函数由拉普拉斯方程解得到。考虑速度势,流体流场总的速度势可以写成如下形式:

$$\phi(x, y, z, t) = \phi_I(x, y, z, t) + \phi_D(x, y, z, t) + \phi_R(x, y, z, t) \tag{3}$$

式中: f_I 为入射波速度势; f_D 为绕射波速度势; f_R 为辐射波速度势。

各速度势满足拉普拉斯方程和边界条件。其中流场的速度势 $f(x,y,z,t)$ 满足：

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

(三) 流载荷

海水的流动会对浮式风机产生拖曳和侧向力，进而影响其位置稳定性。本文水深为200m，作用在平台水下部分的流载荷 f 为：

$$f = \frac{1}{2} \rho_w C_D A v^2 \quad (5)$$

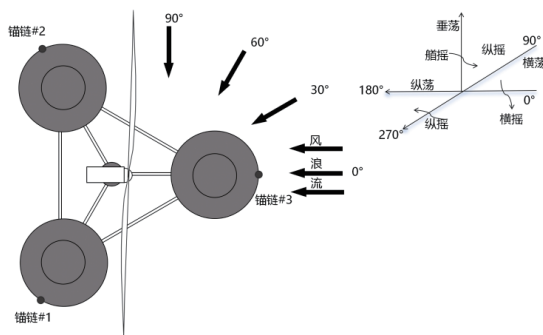
式中： ρ_w 为海水密度； C_D 拖曳力系数； v 为海流流速； A 为构件与流速垂直平面上的投影面积。

(四) 工况设置

本文选取我国南海一年一遇的极端海况，具体参数见表3，采用NPD风谱模拟风速变化，选取JONSWAP波谱模拟波浪变化。本文设置了四种不同入射夹角，分别为 0° 、 30° 、 60° 和 90° 。风浪流入射夹角的变化示意图如图2，表4为具体工况设置。

表3 环境条件

参数	数值
风速/(m/s)	36.3
有义波高/m	7.3
波浪周期/s	11.3
流速/(m/s)	1.13
谱峰因子	3.3



> 图2 风浪流夹角示意图

通过这种设置，使风浪流载荷之间呈现不同的夹角，从而研究这些夹角变化对浮式风机的影响。其中，工况1为风浪流共线，均设置为 0° 入射，这种设置模拟了最简单的共线情况；工况2、3、4为浪流同向，风向改变；工况5、6、7位风流同向，浪向改变；工况8、9、10为风浪同向，流向改变。

表4 工况设置

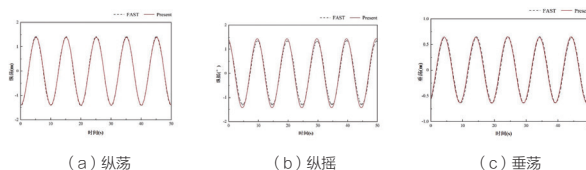
工况编号	风角度/ $(^\circ)$	浪角度/ $(^\circ)$	流角度/ $(^\circ)$
1	0	0	0
2/3/4	30/60/90	0	0
5/6/7	0	30/60/90	0
8/9/10	0	0	30/60/90

三、平台运动响应分析

本文基于势流理论，利用ANSYS-AQWA软件对半潜式浮式风机平台在不同风浪流角度下进行水动力分析。仿真的总运行时间为2000s，时间步长设定为0.1s。平台的运动从纵荡、纵摇和垂荡响应进行分析。

(一) 模拟方法验证

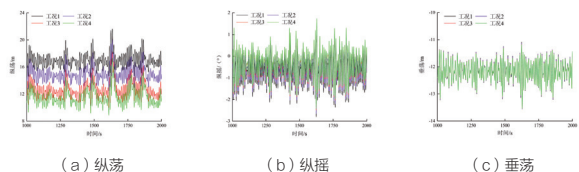
为了验证数值模型的准确性，将模拟计算结果与FAST的结果^[16]进行对比分析，结果如图3所示。从图中可以看出平台纵荡和垂荡运动的数值模拟结果与FAST结果十分吻合。纵摇运动的振幅略高于FAST结果，误差范围约为5%。总体而言，平台的时域运动响应分布与FAST结果较为吻合。



> 图3 数值模拟结果和FAST结果比较分析图

(二) 风和浪流夹角对平台运动响应特性的影响

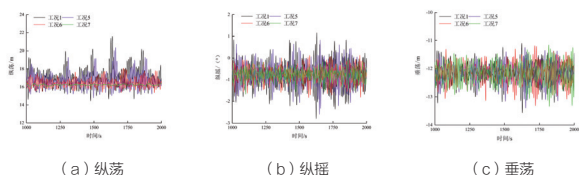
由图4可知，工况1、2、3、4风向角增大对平台的纵荡运动响应影响较明显，对纵摇运动影响较小，垂荡运动基本没有受到风与浪流夹角的影响。风浪流共线时的纵荡运动位置达最大，振荡范围变化达7.15m。风向角从 0° 到 90° 平台纵荡运动变化明显，纵荡最大值分别减小了1.55m、3.38m、4.27m。随风向角增大，纵荡、纵摇运动响应位置逐渐减小。



> 图4 风变工况下平台运动响应分析图

(三) 浪和流风夹角对平台运动响应特性的影响

本节研究了风流同向，不同角度的浪作用下平台的运动响应。由图5可知，工况1、5、6、7浪向角增大对平台的纵荡运动响应相比于风向角变化的影响较小，对纵摇运动有一定的影响，对垂荡运动的影响不是很明显。随浪向角度的增大，纵荡、纵摇运动响应位置减小，垂荡运动响应位置变化不明显。浪向角从 0° 到 90° 纵荡最大值分别减小了1.26m、3.51m和5.18m，振荡范围变化达6.76m。浪向角从 0° 到 90° 纵摇运动最大值分别减小了 0.32° 、 1.03° 和 1.15° 。



> 图5 浪变工况下平台运动响应分析图

(四) 流和风浪角对风机平台运动响应特性的影响

本节研究了风浪同向，不同角度的流作用下平台的运动响

应。风浪共线且沿 x 轴正方向 0° 入射。由图6可知, 工况 1、8、9、10 流与风浪夹角增大对平台的纵荡运动影响较大, 对纵摇和垂荡影响不明显。流与风浪夹角从 0° 到 90° 纵荡运动位置变化明显, 最大值分别减小了 1.01m、3.56m 和 4.32m。

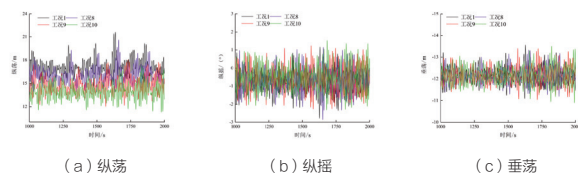


图6 流变工况下平台运动响应分析图

四、结论

本文以 OC4-DeepCwind 半潜式浮式风机平台为研究对象,

利用 ANSYS-AQWA 软件建立浮式风机系统模型。选取我国南海极端海况进行时域分析, 首先将计算结果与 FAST 进行了比较, 验证了数值模型的准确性; 其次研究了在风浪流联合作用下, 单个环境载荷变化 0° 、 30° 、 60° 和 90° 对浮式风机平台的运动响应的影响, 得出的结论如下:

(1) 风向角增大对平台的纵荡运动响应影响较明显, 对纵摇运动影响较小, 垂荡运动基本没有受到风与浪流夹角的影响。

(2) 浪向角增大对平台的纵荡运动响应相比于风向角变化的影响较小, 对纵摇运动有一定的影响, 对垂荡运动的影响不是很明显。

(3) 流与风浪夹角增大对平台的纵荡运动影响较大, 对纵摇和垂荡影响不明显。风浪流共线时的纵荡运动位置最大。

参考文献

- [1] XU S, XUE Y J, ZHAO W W, et al. A Review of High-Fidelity Computational Fluid Dynamics for Floating Offshore Wind Turbines [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(10): 1357.
- [2] EDWARDS E C, HOLCOMBE A, BROWN S, et al. Trends in floating offshore wind platforms: A review of early-stage devices [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2024, 193: 114271.
- [3] FISCHER T, RAINEY P, BOSSANYI E, et al. Study on control concepts suitable for mitigation of loads from misaligned wind and waves on offshore wind turbines supported on monopiles [J]. 2011, 35(5): 561-573.
- [4] LE C H, ZHANG J, DING H Y, et al. Preliminary Design of a Submerged Support Structure for Floating Wind Turbines [J]. Journal of Ocean University of China, 2020, 19(6): 1265-1282.
- [5] LYU G, ZHANG H, LI J. Effects of incident wind/wave directions on dynamic response of a SPAR-type floating offshore wind turbine system [J]. Acta Mechanica Sinica, 2019, 35: 954-963.
- [6] 李修赫, 朱才朝, 谭建军, 等. 风浪不共线对浮式风机基础动态特性影响研究 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(13): 230-237.
- [7] JIA W Z, YUE M N, MIAO W P, et al. Dynamic analysis of a 5 MW Barge-type FOWT with two-mooring failure of wind-wave misalignment scenarios [J]. Ocean Engineering, 2023, 285: 115456.
- [8] FITZGERALD B, MCAULIFFE J, BAISTHAKUR S, et al. Enhancing the reliability of floating offshore wind turbine towers subjected to misaligned wind-wave loading using tuned mass damper inerters (TMDIs) [J]. Renewable Energy, 2023, 211: 522-538.
- [9] CAO G W, CHEN Z X, WANG C L, et al. Dynamic responses of offshore wind turbine considering soil nonlinearity and wind-wave load combinations [J]. Ocean Engineering, 2020, 217: 108155.
- [10] BARJ L, JONKMAN J M, ROBERTSON A, et al. Wind/wave misalignment in the loads analysis of a floating offshore wind turbine [C] // Proceedings of 32nd ASME wind energy symposium. USA, 2014.
- [11] YOSHIDA S, UTSUNOMIA T. Effects of Wave- Wind Directional Misalignment on Dynamic Characteristics and Fatigue Loads of Spar- type Floating Offshore Downwind Turbine [C] // Proceedings of Japan society of Mechanical Engineering (JSME) Fluids Engineering Conference. Japan, 2010.
- [12] NIRANJAN R, RAMISSETTI S B. Insights from detailed numerical investigation of 15 MW offshore semi-submersible wind turbine using aero-hydro-servo-elastic code [J]. Ocean Engineering, 2022, 251: 111024.
- [13] LI X, ZHU C, FAN Z, et al. Effects of the yaw error and the wind-wave misalignment on the dynamic characteristics of the floating offshore wind turbine [J]. Ocean Engineering, 2020, 199: 106960.
- [14] VAN DER MEULEN M B, ASHURI T, VAN BUSSEL G J, et al. Influence of nonlinear irregular waves on the fatigue loads of an offshore wind turbine [C] // Proceedings of The science of making torque from wind. Germany, 2012.
- [15] ROBERTSON A, JONKMAN J, MASCIOLA M, et al. Definition of the semisubmersible floating system for phase II of OC4 [R]: National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2014.
- [16] ROBERTSON A, JONKMAN J, Vorpahl F, et al. Offshore code comparison collaboration continuation within IEA wind task 30: Phase II results regarding a floating semisubmersible wind system [C] // Proceedings of The International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. USA, 2014.