

引用格式: 张瑞, 张平, 高志康. 大容量浮式风机基础水动力响应及其应力特征数值模拟分析 [J]. 南方能源建设, xxxx, x(): 1-10. ZHANG Rui, ZHANG Ping, GAO Zhikang. Numerical simulation analysis of hydrodynamic response and stress characteristics of large-capacity floating wind turbine foundations [J]. Southern energy construction, xxxx, x(): 1-10. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-417.

大容量浮式风机基础水动力响应 及其应力特征数值模拟分析

张瑞^{1,✉}, 张平², 高志康²

(1. 烟台哈尔滨工程大学研究院, 山东 烟台 264000;

2. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250031)

摘要: [目的] 随着海上风电向深远海发展, 半潜式浮式风机平台因其能高效利用深远海风能而备受关注。文章旨在分析 10 MW 半潜式平台的水动力响应与结构强度, 验证其复杂海况下的稳定性与安全性。[方法] 基于三维势流理论, 利用 ANSYS/AQWA 软件建立半潜式风机的数值模型。通过频域分析计算平台的附加质量和幅值响应算子; 结合时域分析, 模拟自存工况下风、浪、流多向联合作用下的平台运动响应与锚链张力。采用随机性设计波法, 参照 ABS 规范对平台进行整体结构强度分析。[结果] 频域分析显示, 平台垂荡、横摇和纵摇固有周期远离主要波浪周期, RAO 峰值分别为 1.315 m/m、2.78°/m 和 2.73°/m, 优于传统平台。时域分析表明, 垂荡、横摇和纵摇极值分别为 4.17 m、3.123°和 5.404°。锚链最大张力安全系数为 1.89, 断缆后剩余锚链安全系数为 1.33。结构分析中, HBM 工况下最大应力为 240.852 MPa, 低于许用值 319 MPa。[结论] 新型半潜式平台水动力性能优异, 研究成果为深远海浮式风机平台优化与工程应用提供了参考。

关键词: 大兆瓦级风机; 浮式半潜式基础; 水动力分析; 系泊动力响应; 整体结构响应

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-417

文章编号: 2095-8676(2025)

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-417

中图分类号:



论文二维码

Numerical Simulation Analysis of Hydrodynamic Response and Stress Characteristics of Large-Capacity Floating Wind Turbine Foundations

ZHANG Rui^{1,✉}, ZHANG Ping², GAO Zhikang²

(1. Yantai Research Institute, Harbin Engineering University, Yantai, Shandong 264000, China;

2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong 250031, China)

Abstract: [Objective] With the development of offshore wind power towards deeper waters, semi-submersible floating wind turbine platforms have garnered significant attention for their ability to efficiently harness wind energy in deep-sea environments. This study aims to analyze the hydrodynamic response and structural strength of a 10 MW semi-submersible platform, verifying its stability and safety under complex marine conditions. [Methods] Based on three-dimensional potential flow theory, a numerical model of the semi-submersible wind turbine was established by using ANSYS/AQWA software. Frequency-domain analysis was employed to calculate the platform's added mass and response amplitude operators (RAOs). Combined with time-domain analysis, the platform's motion response and mooring line tension under multi-directional combined effects of wind, wave, and current in survival conditions were simulated. A stochastic design wave method, aligned with ABS guidelines, was adopted to conduct a comprehensive structural strength analysis of the platform. [Results] Frequency-domain analysis reveals that the platform's natural periods of heave, roll, and pitch are well-separated from dominant wave periods, with RAO peaks of 1.315 m/m, 2.78°/m, and 2.73°/m, respectively, outperforming traditional platforms.

Time-domain analysis indicates extreme heave, roll, and pitch values of 4.17 m, 3.123°, and 5.404°, respectively. The maximum mooring line tension yields a safety factor of 1.89, while the remaining lines after cable rupture maintain a safety factor of 1.33. Structural analysis under the HBM condition shows a maximum stress of 240.852 MPa, below the allowable limit of 319 MPa. **[Conclusion]** The novel semi-submersible platform demonstrates excellent hydrodynamic performance. The research findings provide a reference for optimizing and applying floating wind turbine platforms in deep-sea engineering.

Key words: Megawatt-class wind turbines; floating semi-submersible foundation; hydrodynamic analysis; mooring dynamic response; overall structural response

2095-8676 © 2025 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

随着全球能源结构向低碳化转型,海上风电凭借其资源丰富、开发潜力大等优势,成为可再生能源发展的核心方向之一。近年来,在“十四五”规划推动下,中国海上风电逐步从近岸浅水区向深远海拓展^[1,2]。深远海风能资源稳定且开发限制较少^[3],但水深增加使得固定式基础经济性显著下降,漂浮式风机平台因其适应性广、可规模化部署等特性,成为突破技术瓶颈的关键路径^[4,5]。然而,深远海环境复杂多变,平台需承受极端风浪流耦合载荷,其水动力性能与结构强度的协同优化仍是当前研究的难点。

国内外学者针对半潜式浮式风机平台已开展了系列研究。施伟等^[6]基于 OO-Star 半潜式基础,验证了其在常规海况下的运动响应与锚链张力安全性,但未涉及极端工况下的断锚效应;陈嘉豪等^[7]针对广东深水区提出了混凝土半潜平台设计方案,但其垂荡 RAO 峰值为 2.5 m/m,横摇 RAO 峰值为 3°/m 仍存在优化空间;李帅等^[8]通过缩减立柱直径实现平台减重 5.85%,但未系统评估结构强度变化。国外方面,OC4-DeepCwind 平台^[9]与 Braceless 半潜式基础^[10]揭示了二阶波浪力与几何构型对水动力性能的影响,但多聚焦于单一载荷作用,缺乏多向环境耦合分析。在结构强度领域,金超等^[11]采用比例因子设计法提出对应浮式支撑结构设计方案,并对其进行强度分析,赵萌等^[12]发现浮箱宽度与 Von-Mises 应力呈负相关,Dong 等^[13]指出外柱底部框架设计对 OC4 平台强度至关重要,但现有研究多采用简化模型,未能结合随机性设计波法进行精细化评估。

尽管已有成果显著,仍存在以下局限:传统半潜式平台垂荡与横纵摇运动幅值较高,难以满足大兆瓦风机对稳定性的严苛要求;锚泊系统在断锚工况

下的冗余度与安全性缺乏定量分析;结构强度评估多依赖特征波法,未充分体现长期海况的随机性与累积效应。针对上述问题,本文以 10 MW 新型半潜式浮式风机基础为研究对象,通过改进 OO-Star 平台设计,结合三维势流理论与随机性设计波法,开展多维度研究:(1)通过频域及时域耦合分析,揭示平台在风浪流多向联合作用下的运动特性与锚链动力响应;(2)基于 ABS 规范建立精细化有限元模型,量化极端工况下的结构应力分布,以期对深远海浮式风机平台的工程化设计提供参考。

1 研究基础

1.1 计算理论基础

1.1.1 运动方程

对系统进行频域分析,可以快速预测系统在特定频率波浪中的运动响应。根据势流理论,对于六自由度刚性浮体在水中的频域运动方程为^[14-16]:

$$\sum_{i=1}^6 \{M\ddot{p} + B\dot{p} + Kp\} = F_w \quad (1)$$

式中:

- M ——质量矩阵;
- B ——阻尼系数矩阵;
- K ——回复力系数矩阵;
- p ——运动响应;
- F_w ——波浪激励力。

浮式风机的时域运动响应方程描述了其在动态环境中的运动规律,是浮式风机数值模拟分析的关键,其运动方程为^[12]:

$$a\ddot{p} + \int_0^t K(t-\tau)\dot{p}d\tau + cp = F_{\text{wave}} + F_{\text{wind}} + F_{\text{current}} + F_{\text{moor}} \quad (2)$$

式中:

a ——质量矩阵;
 K ——延迟函数矩阵;
 t, τ ——时间变量;
 $F_{\text{wave}}、F_{\text{wind}}、F_{\text{current}}、F_{\text{moor}}$ ——波浪载荷、风载荷、流载荷以及系泊力。

1.1.2 随机性设计波法

根据给定的波陡,生成一系列短期海况可以选择适当的波浪谱来描述海面的波动特性。结合载荷控制参数的反应幅值(RAO)曲线,可以通过以下公式来计算该载荷参数的响应谱^[16-17]:

$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 S_w(\omega) \tag{3}$$

式中: $S_R(\omega)$ 为载荷参数响应谱; $S_w(\omega)$ 为波浪谱。

波浪载荷响应的最大值为^[17-18]:

$$R_{\max} = \sqrt{2 \ln N} \sqrt{m_0} \tag{4}$$

式中:

$m_0 = \int_0^\infty S_R(\omega) d\omega$ 为响应谱零阶矩; $N = D/T_R$ 循环次数; D 为波浪持续时间(一般取 3 h); T_R 为平均响应跨零周期, $T_R = 2\pi \sqrt{m_0/m_2}$ 。

设计波波幅由短期海况预报的最大值与该载荷响应比值得到^[13]:

$$A_D = (R_{\max}/RAO_{\max}) \cdot LF \tag{5}$$

式中:

A_D 为设计波波幅; $R_{\max}$ 为短期海况最大响应值; $RAO_{\max}$ 波浪载荷传递函数幅值; LF 为载荷参数,在 1.1 ~ 1.3 之间取值,本文取 1.2。设计波的频率、浪向和相位角由 RAO 最大值决定。

1.2 模型参数

本设计在 OO-Star 的基础上进行改进,为提高基础的水动力性能,将 3 个边浮筒修改为倾斜浮筒,并加长了侧立柱和中立柱之间的距离。^[19-20]示意图如图 1 所示,半潜式基础具体参数见表 1,基础上部采用 DTU10MW 风机。

1.3 系泊系统参数

本研究中半潜式风机基础的系泊形式为 3×3,共 9 根锚链构成。3 组系泊缆以浮式基础的垂直轴为基准,每组缆绳之间间隔 120°进行设置,系泊缆与边浮筒顶部进行连接,图 2 为系泊布置示意图。锚链具体参数见表 2。

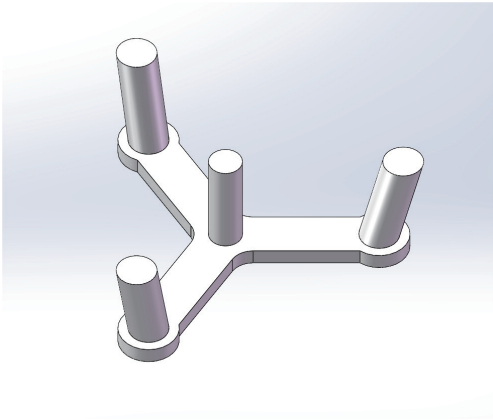


图 1 斜浮筒半潜式风机基础模型
Fig. 1 Inclined pontoon semi-submersible wind turbine foundation model

表 1 半潜式风机基础参数表

Tab. 1 Semi-submersible wind turbine foundation parameters

参数	数值	参数	数值
基础总质量/(kg)	—	垂荡箱宽度/(m)	14
中立柱高度/(m)	30	垂荡箱高度/(m)	5
中立柱直径/(m)	10	立柱浮筒距离/(m)	45
浮筒高度/(m)	30	吃水深度/(m)	19
浮筒直径/(m)	12	压载仓高度/(m)	9.8
浮筒倾斜角度/(°)	76.87	排水量/(kg)	—

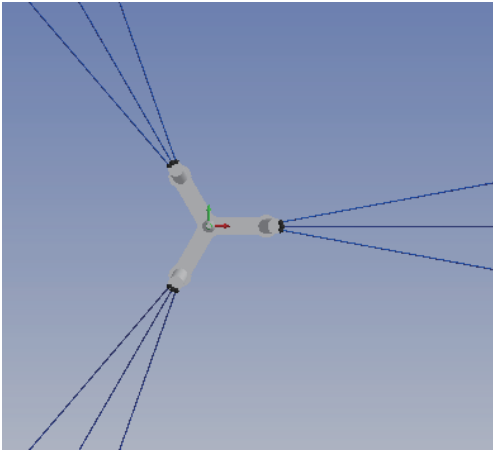


图 2 系泊布置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the mooring system arrangement

表 2 系泊缆详细参数表

Tab. 2 Detailed parameters of mooring lines

锚链长度/m	锚链直径/m	锚链线质量密度/(kg·m ⁻¹)	轴向拉伸刚度/MN	破断载荷/MN
770	0.13	289.6275	1 320	12.6

2 水动力性能分析

2.1 频域水动力分析

本文利用三维势流理论与面元法对半潜式平台在单一波浪作用且无系泊条件下进行了水动力分析。本平台为对称结构,研究中选取波浪方向为 $0^\circ \sim 180^\circ$,波浪间隔为 15° ,对不同波浪方向下的平台进行了整体水动力分析,得到了幅值响应算子(RAO)和附加质量。

2.1.1 幅值响应算子

图3为半潜式平台的幅值响应算子(RAO)

针对计算得到的幅值响应算子(RAO)结果进行分析可以揭示平台在不同运动自由度上的动态特性及其对波浪频率和方向的响应规律。由RAO曲线可知,垂荡、横摇和纵摇运动的RAO曲线呈现出单峰,峰值分别出现在23 s、26 s、26 s,且其最大运动幅值分别为1.315 m/m、 $2.78^\circ/\text{m}$ 、 $2.73^\circ/\text{m}$,垂荡、横

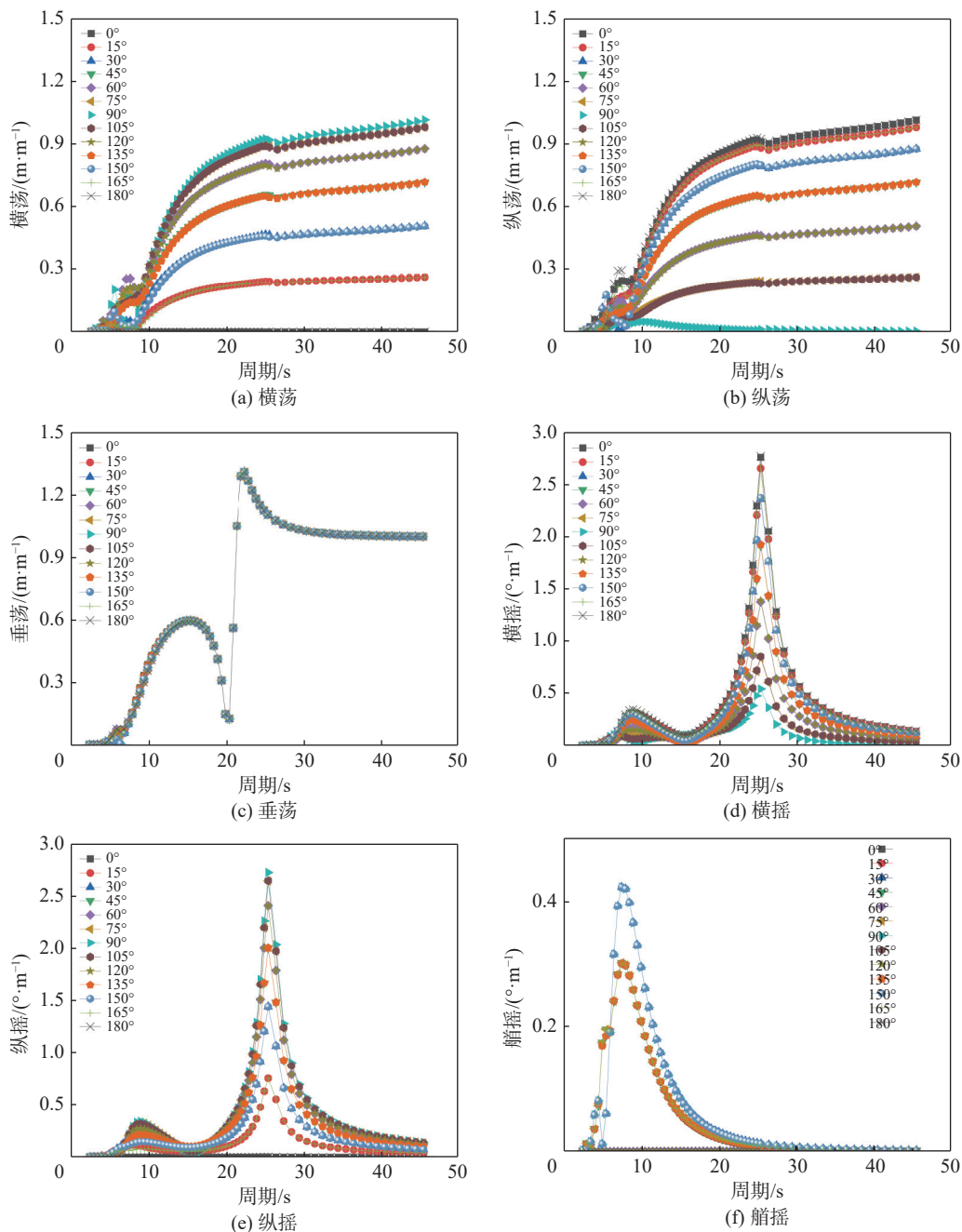


图3 幅值响应算子

Fig. 3 Response amplitude operators (RAOs)

摇和纵摇运动固有周期均远离主要的波浪周期。均小于 OO-Star 型台的垂荡和横纵摇运动幅值分别为 2.5 m/m 和 $3^\circ/\text{m}^5$, 本模型平台运动性能更好。

进一步分析不同波浪方向对 RAO 的影响发现, 平台在各波浪方向下的六自由度 RAO 曲线变化趋势基本保持一致, 但不同自由度的方向敏感性差异明显。垂荡运动的 RAO 在不同波浪方向下数值接近, 表明其受波浪传播方向影响较小。而横摇和纵摇运动的 RAO 幅值则表现出显著差异, 方向变化对其响应的影响尤为突出, 这与平台几何结构和惯性分布的非均匀性有关。

2.1.2 附加质量

附加质量依赖于浮体的几何形状、运动模式(平移、旋转)、流体特性以及环境条件, 本研究基础的六自由度附加质量如图 4 所示。

观察图 4 可知, 平台横(纵)荡、垂荡、横(纵)摇和艏摇附加质量曲线变化趋势相似。横(纵)荡附加质量峰值为 $1.18 \times 10^7 \text{ kg}$, 出现在周期 7.5 s 附近; 垂

荡附加质量峰值为 $3.41 \times 10^7 \text{ kg}$, 出现在周期 12.5 s 附近; 横(纵)摇附加质量峰值为 $2.32 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 出现在周期 9.5 s 附近; 艏摇附加质量峰值为 $3.81 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 出现在周期 8 s 附近。

2.2 时域水动力分析

2.2.1 海况情况

利用 AQWA 与 Openfast 进行联合仿真, 将 AQWA 计算的平台水动力结果导入 Openfast 中进行时域分析。波浪选用 JONSWAP 谱, 工作水深为 70 m, 在自存工况的条件下, 分析不同方向的风、浪、流共同作用下风机基础的运动响应情况。

在时域水动力分析中风、浪、流同向, 间隔角度为 30° , 每个环境工况选取 6 个随机种子数, 单个工况模拟 3 600 s, 各个工况下风机均未发生偏航变桨, 叶轮与风向垂直, 如表 3 所示。

2.2.2 总体运动响应分析

半潜式基础的部分水动力性能图如图 5—图 6 所示, 全部水动力数据结果如图 7 所示。

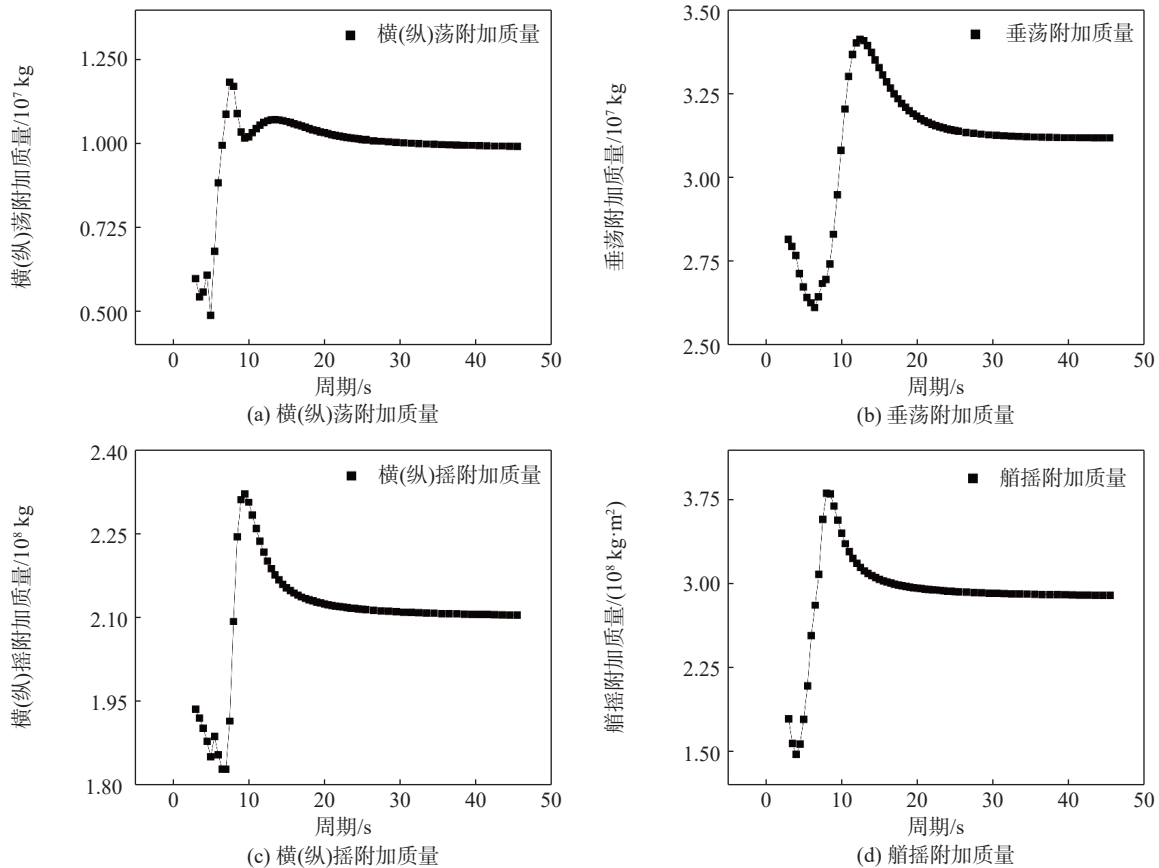


图 4 附加质量

Fig. 4 Added Mass

表 3 环境工况

Tab. 3 Environmental load cases

海况	波谱	有义波高/m	谱峰周期/s	表面流速/(m·s ⁻¹)	风谱	风速/(m·s ⁻¹)
自存工况	Jonswap	14.3	14.3	1.16	NPD	57.5

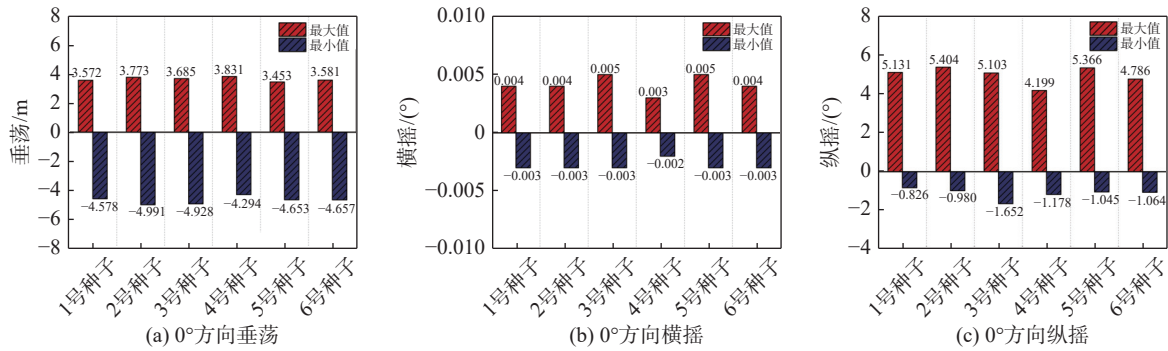


图 5 0°方向垂荡、横摇、纵摇极值

Fig. 5 Extreme values of heave, roll and pitch in the 0° direction

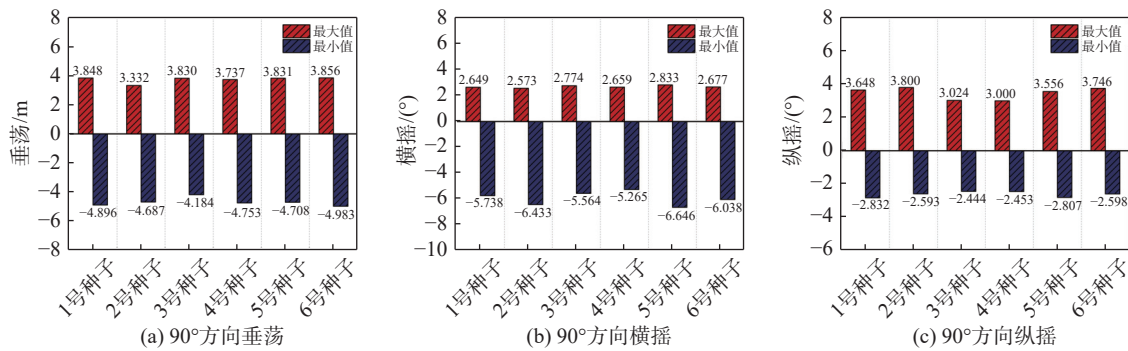


图 6 90°方向垂荡、横摇、纵摇极值

Fig. 6 Extreme values of heave, roll and pitch in the 90° direction

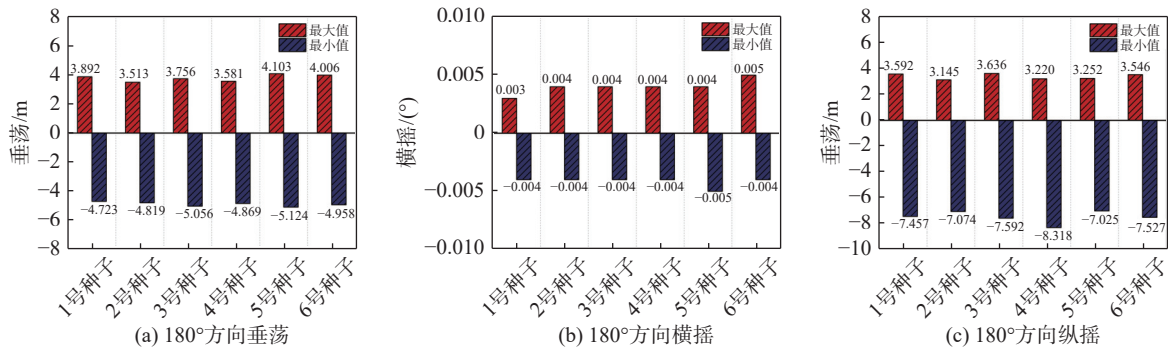


图 7 180°方向垂荡、横摇、纵摇极值

Fig. 7 Extreme values of heave, roll and pitch in the 180° direction

根据计算结果可知,当风浪流方向为 60°时,垂荡运动最大,为 4.17m;当风浪流方向为 120°时,垂荡运动最小,为-5.143m;且风浪流的方向对垂荡运

动影响较小。当风浪流方向为 30°时,横摇运动最大,为 3.85°;当风浪流方向为 90°时,横摇运动最小,为-6.646°;越接近 90°方向,横摇运动越剧烈。当风浪

流方向为 0°时,纵摇运动最大,为 5.404°;当风浪流方向为 180°时,纵摇运动最小,为-8.318°;越接近 0°与 180°,纵摇运动越剧烈,且 180°方向纵摇运动最显著,如表 4 所示。

各角度波浪作用下,半潜式基础均满足规范要求,即垂荡运动在 6m 之内,横摇和纵摇运动在 10°之内。

2.2.3 锚链张力分析

锚链作为浮动平台的主要系泊组件,其张力分布直接影响平台的稳定性和抗风浪能力。本研究对

自存工况下 9 条系泊缆的受力情况进行模拟计算,得到不同方向风浪流作用下系泊缆导缆孔处的最大张力如表 5 所示,单位为 N。

由表 5 可知,最大张力出现在风浪流 90°方向时 6 号锚链处,此时张力安全系数为 1.89,符合张力安全系数 1.67 的要求。

假设受张力最大的 6 号缆绳断裂,计算剩余系泊缆在不同方向风浪流作用下的最大张力如表 6 所示,单位为 N。

表 4 各方向垂荡、横摇、纵摇运动极值
Tab. 4 Extreme motion values of heave, roll, and pitch in various directions

角度/(°)	垂荡(m)		横摇(°)		纵摇(°)	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
0	3.831	-4.991	0.005	-0.003	5.404	-1.652
30	4.074	-4.925	3.850	-4.990	3.797	-1.905
60	4.170	-5.039	3.123	-6.562	3.801	-2.325
90	3.831	-4.896	2.833	-6.646	3.800	-2.832
120	3.906	-5.143	1.739	-4.672	1.035	-2.718
150	3.987	-5.065	1.643	-2.826	3.664	-6.000
180	4.103	-5.124	0.004	-0.005	3.636	-8.318

表 5 正常系泊工况下系泊缆最大张力
Tab. 5 Maximum tension of mooring lines under normal mooring conditions

锚链编号	kN						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
1	648 927	907 717	992 865	1 886 680	3 352 787	5 171 647	5 555 130
2	3 166 777	1 657 291	982 353	755 432	636 496	760 588	987 730
3	3 166 281	4 356 691	6 260 883	5 164 559	3 255 123	1 841 280	987 661
4	654 508	900 764	961 987	1 633 738	2 185 368	4 075 787	5 374 519
5	4 931 298	2 190 718	1 018 784	793 638	641 543	749 053	957 494
6	2 062 925	3 578 703	6 093 512	6 659 411	5 151 301	2 558 575	1 025 192
7	654 518	922 011	1 030 858	2 560 826	5 329 876	6 220 898	5 374 650
8	2 063 252	1 478 898	952 983	733 596	641 535	782 464	1 025 152
9	4 930 806	5 091 046	6 013 943	3 787 522	2 093 021	1 536 571	957 436
最大张力	4 930 806	5 091 046	6 260 883	6 659 411	5 329 876	6 220 898	5 555 130
安全系数	2.56	2.47	2.01	1.89	2.36	2.03	2.27

表 6 断缆工况下系泊缆最大张力
Tab. 6 Maximum tension of mooring lines under cable rupture conditions

方向	kN						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
锚链编号	9	9	3	3	3	7	7
最大张力	5 945 488	6 850 011	9 445 595	9 084 400	6 270 009	6 732 689	5 557 255
安全系数	2.12	1.84	1.33	1.39	2.01	1.87	2.27

由表 6 可知,最大张力出现在风浪流 60°方向时 3 号锚链处,此时张力安全系数为 1.33,符合张力安全系数 1.25 的要求。

3 结构响应分析

3.1 设计波参数

本文选取 ABS 规范规定的五种波浪载荷用于设计波的计算。设计波数据通过特征波高和对应周期表征,波陡度可作为衍生参数用于校核波浪稳定性,具体的设计波参数见表 7。经验证,所有计算得到的设计波最大波幅值均小于规范中规定的最大响应幅值的限值,因此满足设计要求。

浮体边界条件采用三点约束,即 3 个浮筒底部分别定义 XYZ 平动方向的约束点,XY 平动方向的约束点和 X 平动方向的约束点。

3.2 整体结构响应

按照计算出来的随机性设计波参数,对模型施加波浪载荷,通过 AQWA-WAVE 传递波浪载荷,在

表 7 设计波参数

Tab. 7 Design wave parameters

载荷控制参数	波浪方向	周期	相位	波高
VSF	90°	8.5s	-76.762°	6.12m
HSF	0°	8.0s	102.179°	6.40m
TM	135°	8.0s	152.918°	5.86m
VBM	90°	10.5s	28.998°	10.02m
HBM	180°	13.0s	-161.331°	11.84m

未施加风机载荷的条件下,其结果如表 8 所示。许用应力为 355 MPa / 1.11=319 MPa。

表 8 不同工况下最大应力值

Tab. 8 Maximum stress values under various load cases

工况	许用应力/MPa	最大等效应力/MPa
VSF	319	219.48
HSF	319	222.57
TM	319	223.60
VBM	319	224.00
HBM	319	240.85

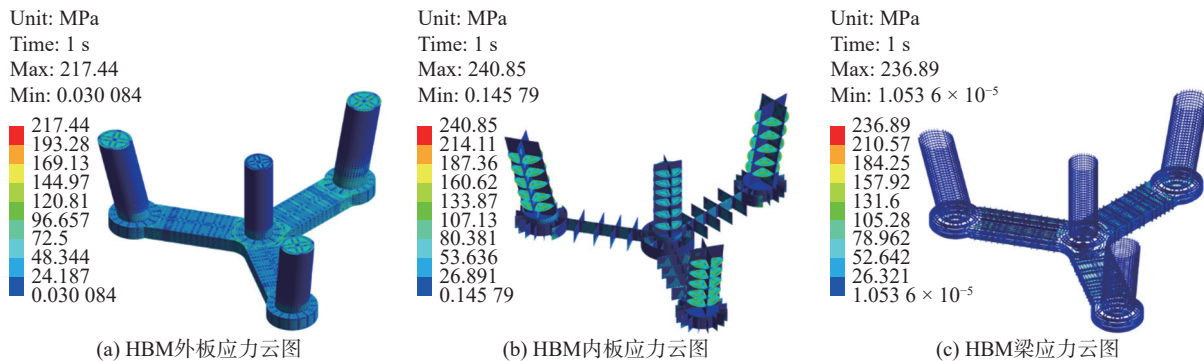


图 8 HBM 工况结构应力云图

Fig. 8 Structural stress contour plot under HBM condition

由计算结果可知,在工况 HBM 下,结构应力最大。壳单元模型最大应力为 240.852 MPa,梁单元模型最大应力为 236.89 MPa,符合要求。

4 结论

本文通过频域和时域水动力分析,研究了半潜式平台在不同海况下的水动力性能和结构响应。频域分析结果显示,平台的垂荡、横摇和纵摇运动的幅值响应算子(RAO)分别在 23 s、26 s、26 s 时达到最大值,最大响应幅值分别为 1.315 m/m、2.78°/m 和 2.73°/m,平台的固有周期远离主要波浪周期。在时

域分析中,平台的垂荡、横摇和纵摇响应在风浪流方向为 30°、60°和 0°时分别最大,分别为 4.17 m、3.123°和 5.404°。此外,锚链张力分析显示,在风浪流方向为 90°时,最大张力出现在 6 号锚链处,安全系数为 1.89,符合 1.67 的设计要求;若 6 号锚链断裂,最大张力出现在风浪流方向为 60°时,最大张力出现在 3 号锚链处,安全系数为 1.33,符合 1.25 的要求。结构应力分析表明,在工况 HBM 下,最大应力为 240.852 MPa,符合设计要求。总体而言,本文的分析结果验证了平台在复杂海况下的稳定性与安全性,为新型半潜式平台的设计提供了重要参考。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委, 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划 [R]. 北京: 国家发展改革委, 国家能源局, 2022.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The 14th five-year plan for modern energy system [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration, 2022.
- [2] 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.
- [3] 张佳丽, 李少彦. 海上风电产业现状及未来发展趋势展望 [J]. 风能, 2018(10): 46-52.
ZHANG J L, LI S Y. Current status and future trends of offshore wind power industry [J]. Wind energy, 2018(10): 46-52.
- [4] 米立军, 李达, 高巍. 深远海漂浮式风电技术发展现状与思考 [J]. 新型电力系统, 2023, 1(3): 211-220 DOI: 10.20121/j.2097-2784.ntps.230002.
MI L J, LI D, GAO W. Current status and thinking on deepsea floating wind power technology [J]. New type power systems, 2023, 1(3): 211-220. DOI: 10.20121/j.2097-2784.ntps.230002.
- [5] 佚名. 中国风电产业发展报告 (2023) [J]. 电气时代, 2023(5): 14-19.
Anonymous. China wind power industry development report (2023) [J]. Electric age, 2023(5): 14-19.
- [6] 施伟, 薛瑞宁, 侯晓彬, 等. 10 MW 级半潜漂浮式风机的动力响应 [J]. 船舶工程, 2021, 43(10): 1-9, 43. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2021.10.01.
SHI W, XUE R N, HOU X B, et al. Dynamic response on 10 MW semisubmersible floating offshore wind turbine [J]. Ship engineering, 2021, 43(10): 1-9, 43. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2021.10.01.
- [7] 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. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.03.
CHEN J H, GAO Y F, YIN Z W, 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.
- [8] 李帅, 任亚君, 郝军刚, 等. 基于水动力分析的 15 MW 级半潜式漂浮基础优化研究 [J]. 水力发电, 2023, 49(8): 99-107. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2023.08.017.
LI S, REN Y J, HAO J G, et al. Optimization of 15 MW semi-submersible floating foundation based on hydrodynamic analysis [J]. Water power, 2023, 49(8): 99-107. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2023.08.017.
- [9] ROBERTSON A, JONKMAN J, MASCIOLA M, et al. Definition of the semisubmersible floating system for phase II of OC4 [R]. National Renewable Energy Laboratory, 2014.
- [10] LUAN C Y. Design and analysis for a steel braceless semi-submersible hull for supporting a 5-MW horizontal axis wind turbine [D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2018.
- [11] 金超, 王炜. 深海大兆瓦级浮式海上风电结构强度分析 [J]. 中国海洋平台, 2022, 37(3): 1-7. DOI: 10.12226/j.issn.1001-4500.2022.03.20220301.
JIN C, WANG W. Strength analysis of deep-sea large-megawatt floating offshore wind power structure [J]. China offshore platform, 2022, 37(3): 1-7. DOI: 10.12226/j.issn.1001-4500.2022.03.20220301.
- [12] 赵萌, 赵志新, 张晓明, 等. 超大型半潜浮式风力机基础概念设计及性能研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(3): 179-186. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2023.03.026.
ZHAO M, ZHAO Z X, ZHANG X M, et al. Conceptual design and performance analysis of the foundation of a super large semi-submersible floating wind turbine [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2023, 21(3): 179-186. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2023.03.026.
- [13] DONG Y, ZHANG J, ZHONG S F, et al. Simplified strength assessment for preliminary structural design of floating offshore wind turbine semi-submersible platform [J]. Journal of marine science and engineering, 2024, 12(2): 259. DOI: 10.3390/jmse12020259.
- [14] 杨欣, 陈鹏飞, 范可, 等. 16 MW 级半潜海上浮式风机运动性能数值模拟 [J]. 船舶工程, 2024, 46(增刊 1): 41-47. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2024.S1.07.
YANG X, CHEN P F, FAN K, et al. Numerical simulation on motion performance based on 16 MW semi-submersible floating foundation [J]. Ship engineering, 2024, 46(Suppl.1): 41-47. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2024.S1.07.
- [15] 林琳, 陈明杨, 杨鹏, 等. 15 MW 级 Spar 漂浮式风电平台的设计方案及水动力性能研究 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(4): 71-81. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03533.
LIN L, CHEN M Y, YANG P, et al. Design and hydrodynamic performance of 15 MW spar-type floating offshore wind turbine platform [J]. Chinese journal of ship research, 2024, 19(4): 71-81. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03533.
- [16] 樊其祥, 许玉旺, 京昊琳, 等. 浮式风渔平台水动力和气动力响应特性 [J]. 中国海上油气, 2024, 36(3): 208-220. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2024.03.022.
FAN Q X, XU Y W, JING J L, et al. Hydrodynamic and aerodynamic response characteristics of floating wind-aquaculture platforms [J]. China offshore oil and gas, 2024, 36(3): 208-220. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2024.03.022.
- [17] 梁双令, 齐江辉, 章红雨, 等. 基于设计波法的海洋核动力平台波浪载荷计算 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41(7): 90-94. DOI: 10.

- 3404/j.issn.1672-7649.2019.07.017.
- LIANG S L, QI J H, ZHANG H Y, et al. Wave loads calculation of marine nuclear power platform based on design wave methods [J]. *Ship science and technology*, 2019, 41(7): 90-94. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2019.07.017.
- [18] 吉华宇, 刘俊, 周佳, 等. 半潜平台总体强度评估的谱分析法和设计波法对比 [J]. *海洋工程*, 2019, 37(1): 101-107, 154. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2019.01.012.
- JI H Y, LIU J, ZHOU J, et al. Comparison of spectral analysis and design wave method for global strength assessment of semi-submersible platform [J]. *The ocean engineering*, 2019, 37(1): 101-107, 154. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2019.01.012.
- [19] 宋兆波, 施伟, 张礼贤, 等. 大型半潜浮式风机平台设计及稳性研究 [J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2021, 51(11): 102-109. DOI: 10.16441/j.cnki.hdx.20200252.
- SONG Z B, SHI W, ZHANG L X, et al. Design and stability analysis of semisubmersible floating platform for large offshore wind turbines [J]. *Periodical of Ocean University of China Natural Science Edition*, 2021, 51(11): 102-109. DOI: 10.16441/j.cnki.hdx.20200252.
- [20] 潘伟宸, 刘健, 沈勇, 等. 基于 AQWA 的新型 10 MW 浮式平台运动响应分析 [J]. *舰船科学技术*, 2024, 46(7): 93-97. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2024.07.016.

PAN W C, LIU J, SHEN Y, et al. Dynamic characteristics of a new 10 MW floating platform based on AQWA [J]. *Ship science and technology*, 2024, 46(7): 93-97. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2024.07.016.

作者简介:



张瑞

张瑞 (通信作者)

2000-, 男, 硕士研究生在读, 主要从事海上固定式风力机和海上漂浮式风力机的研究工作(email)zhangrui271x@163.com。

张平

1984-, 高级工程师, 水利工程专业硕士研究生, 主要从事海洋结构物研究与设计工作(email)760938266@qq.com。

高志康

1994-, 工程师, 海洋工程专业硕士研究生, 主要从事海洋结构物研究与设计工作(email)zhikanggao94@163.com。

(责任编辑 孙舒)