

典型工况下 15 MW 半潜式风机耦合运动 响应变化规律研究

郑茗予^{1,2}, 左晶晶³, 王文华^{1,2}, 李昕^{1,2}

(1. 大连理工大学 海岸与海洋工程全国重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 建设工程学院 工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024;

3. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司 新能源工程设计院, 湖南 长沙 410014)

摘要: 为探究典型工况下大型半潜式风机耦合运动响应变化规律, 以 15 MW 半潜式风机为研究对象, 针对正常运行工况与极端停机工况, 采用势流理论及多体动力学等方法分析风浪夹角与二阶水动力对于半潜式风机耦合运动响应的影响, 揭示不同运动状态下浮式平台、塔筒、系泊系统的耦合机理。结果表明: 风浪夹角增大时纵荡、纵摇运动及塔基弯矩响应极值普遍减小、均值增大, 垂荡运动和系泊张力受浪向影响较小。同时, 二阶波浪力对机组动力响应影响显著, 极端停机工况下, 二阶差频力导致平台纵荡和纵摇运动均值增大, 并引起塔架大幅振动、系泊张力增加。

关键词: 漂浮式风机; 半潜式平台; 耦合分析; 二阶波浪力; 运动响应

中图分类号: TM614

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0023-09

Coupled Motion Response Characteristics of a 15 MW Semi-submersible Wind Turbine Under Typical Operating Conditions

ZHENG Mingyu^{1,2}, ZUO Jingjing³, WANG Wenhua^{1,2}, LI Xin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. Institute of Earthquake Engineering, School of Infrastructure Engineering, Dalian University
of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

3. Department of Renewable Energy Engineering, Power China Zhong Nan Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 410014, China)

Abstract: To investigate the variation rules of the coupled motion response of large semi-submersible wind turbines under typical working conditions, a 15 MW semi-submersible wind turbine was taken as the research object. Focusing on normal operating conditions and extreme shutdown conditions, methods such as potential flow theory and multi-body dynamics were employed to analyze the influence of wind-wave angles and second-order hydrodynamic forces on the motion response of wind turbines, and to reveal the coupling mechanisms among the floating platform, tower, and mooring system under different motion states. The results indicate that when the wind-wave angle increases, the extreme values of surge, pitch motions, and tower base bending moment responses generally decrease while the mean values increase. The heave motion and mooring tension are less affected by the wave direction. Meanwhile, second-order wave forces have a remarkable influence on the dynamic response of the wind turbine. Under extreme shutdown conditions, the second-order difference frequency forces lead to an increase in the mean values of surge and pitch motions of the platform, leading to large vibrations of the tower and an increase in mooring tension.

Keywords: floating offshore wind turbine; semi-submersible platform; coupled analysis; second-order wave force; dynamic responses

随着全球能源结构向低碳化转型,海上风电作为清洁能源的重要组成部分,其发展态势正从近海逐步向深远海拓展。为实现 2030 年全球风电累计装机 3 TW 的目标,海上风电年新增装机容量需从 2023 年的 117 GW 大幅提升至 320 GW,大型风电机组将成为主流机型。然而,随着风电机组逐步朝着大型化和离岸化的方向演进^[1],漂浮式风力机所面临的海洋环境愈发复杂,其运动响应特性直接影响发电效率和结构安全性,尤其是对于大兆瓦级风机,在波浪载荷的持续作用下,其动态行为更为复杂,亟需深入研究。传统固定式海上风力机的设计主要聚焦于风载荷,而漂浮式风力机不仅需要承受风载荷,还需额外应对波浪等环境载荷的耦合作用^[2],在这些耦合载荷中,风浪夹角和二阶波浪力影响尤为突出,波浪方向的变化会改变波浪对漂浮式风机的作用方向,从而影响平台的受力情况与运动响应;二阶波浪力在低频范围内可能引发漂浮平台的慢漂运动,这种慢漂运动会使系泊系统长期处于交变应力状态,导致系泊系统疲劳损伤,同时高频波浪力可能激发结构的弹性振动,影响风机气动性能,降低发电质量。

Lyu 等^[3]针对 5 MW Spar 式风电机组,对于 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间 13 种不同风浪夹角展开研究,通过快速傅里叶变换呈现了不同入射风浪方向下风电机组各自由度的时域和频域动态响应,研究发现风浪同向时,风机纵荡、纵摇和垂荡运动会出现三个峰值,当风向与浪向垂直时,横荡、横摇和偏航运动仅在波浪频率处出现一个峰值,表明这三种运动模式主要由波浪载荷激发。Ahn 等^[4]分析 10 MW 半潜式在不同风浪夹角下运动响应,研究发现夹角间隔设置不当会导致低估平台运动响应与载荷大小,载荷谱呈现非对称尖峰特性,凸显了风浪夹角分析对大型化、复杂化漂浮式风机设计的重要性。李嘉文^[5]建立 5 MW Spar 式风电机组气动-水动耦合模型,分析得到二阶波浪力对海上风机运动响应和系泊张力有明显影响。Bayati 等^[6]研究得到二阶和频与差频载荷可能会激发半潜式 5 MW 风电机组的固有频率,导致大振幅的振动,这会增加系泊系统的压力,引起结构疲劳损伤。Zhang 等^[7]通过对比三种半潜式风电机组在不同水深条件下的水动力性能,发现二阶波浪载荷会显著影响平台运动响应和系泊张力,其中完整 QTF 方法较 Newman 近似法能更准确地预测低频波浪力作用。Mei 等^[8]过 AQWA 与 OpenFAST 工具对漂浮式海上风电机组开展风浪耦合动力分析,

发现二阶波浪激励力可以显著激发平台纵荡运动,特别是在极端工况下,纵荡、垂荡及偏航运动响应被显著低估。Cao 等^[9]采用二次传递函数法研究 DTU 10 MW 半潜式风电机组在风浪联合作用下的二阶动态响应特性,分析了该方法在捕捉平台运动、系泊张力、塔顶剪力及发电功率等方面二阶响应的优越性,并深入探讨了风速、波高、谱峰周期和波向等环境参数对系统动态特性的影响。Bae 等^[10]针对 5 MW TLP 海上风电机组进行二阶和频波浪载荷效应研究,通过对比耦合与解耦分析方法,揭示了旋转叶片气动阻尼抑制俯仰共振、塔架柔性导致固有频率偏移、以及运行工况下二阶和频效应显著增强等耦合特性,强调海上漂浮式风电机组设计时需充分考虑气动-水动-结构-控制的复杂耦合作用。刘英芳等^[11]发现浮式风机基础在波浪中的非线性运动特性会显著影响其动力响应,如瞬时湿表面变化和高阶波浪载荷,但线性势流理论难以准确预测此类现象,尤其在低频运动和固有频率激励方面存在明显局限性。李浩然等^[12]通过 CFD 修正势流理论中的附加质量、阻尼及差频波力二次传递函数,揭示了半潜式浮式风机在非线性水动力作用下具有低频响应特性,这表明差频波力会显著放大不规则波条件下的低频运动与载荷。

本文以 15 MW 半潜漂浮式风力机为研究对象,基于势流理论与多体动力学方法,建立风浪耦合作用下的数值模型,重点通过频域与时域分析,探讨风浪夹角与二阶波浪力对平台运动响应、塔筒位移响应和系泊张力的影响规律。研究结果可为大兆瓦漂浮式风力机的水动力特性和动态载荷控制研究提供理论依据,对提升深远海风电的经济性与可靠性具有重要意义。

1 15 MW 半潜式风机基本参数及海洋环境条件

1.1 15 MW 半潜式风机基本参数

本文数值计算采用安装在半潜式平台上的 IEA 15 MW 风机模型为研究对象。IEA 15 MW 参考风机是目前国际能源署(IEA)推出的最具代表性的开源大兆瓦级风机基准模型,其设计参数已成为漂浮式风电领域的重要研究标准,其主要设计参数如表 1 所示。

针对百米级设计水深,本研究采用了图 1 所示的半潜式基础,该半潜式基础设计吃水为 25 m,主要包括三个边柱和三个垂荡立柱,垂荡立柱位于边

柱的下方,边柱之间通过圆形撑杆连接,下连梁连接边柱和垂荡立柱,15 MW 风电机组位于其中一个边柱上,半潜式风电机组基础主尺度参数如表2所示。

表1 IEA 15 MW 风机主要参数

额定功率 /MW	额定风速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	切出风速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	塔筒高度 /m	轮毂高度 /m	额定转子 转速/rpm
15	10.59	25	129.58	150	7.56

半潜式浮式基础的系泊系统由9条悬链线式系泊缆组成,每一侧都采用三根系泊线,分别连接半潜式浮式基础的导缆孔和100 m水深下的锚点,布置图如图2所示。系泊系统的详细参数列于表3中。

表2 半潜式基础关键设计参数

设计水深 /m	吃水 /m	排水体积 / m^3	重心高度 /m	平台质量 /t	横摇惯性矩 /($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	纵摇惯性矩 /($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	艏摇惯性矩 /($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
100	25	18220.9	-3.5050	18676.5	4.949×10^{10}	4.949×10^{10}	2.881×10^{10}

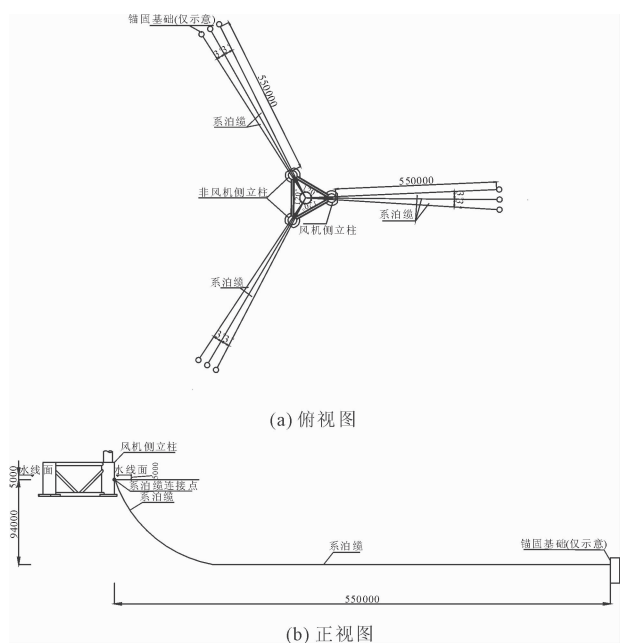


图2 半潜式浮式基础系泊系统布置图

表3 系泊系统主要参数

系泊直径 /m	根数	轴向刚度(EA) /N	最小破断强度(MBL) /kN	总长 /m
0.333	9	1.6138×10^9	18034	580

1.2 海洋环境条件

本研究所选用的风浪参数观测自我国的广东省南海海域,国内多个海上浮式风电机组项目均择该地区作为目标安装位置,选择此地区旨在本研究未来在我国南海地区的应用提供帮助。海域水位基准

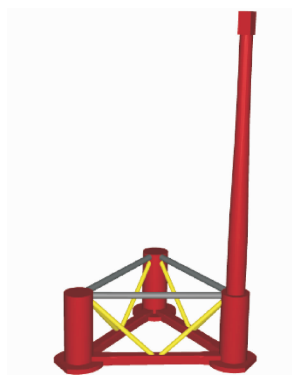


图1 半潜式浮式基础与塔筒模型

面年平均海平面位于1985国家高程基准面以下0.01 m,理论深度基准面位于1985国家高程基准面以下1.41 m。依据85高程,表4所示为海域工程水位参数表。海上风电机组设计时根据海域有义波高(H_s)与谱峰周期(T_p)的长期联合概率分布考虑波浪载荷,相关风浪参数列于工况表5中。

表4 海域工程水位参数表 单位:m

设计 高水位	设计 低水位	50年一遇 高水位	50年一遇 低水位	100年一遇 高潮位
1.26	-1.09	2.31	-2.23	2.48

2 15 MW 半潜式风机耦合数值模型建立

2.1 海上风机耦合分析计算理论

在波浪与风载荷共同作用下,浮式海上风机的动力响应分析需综合考虑势流理论、空气动力学及多体动力学耦合效应^[13]。其中波浪载荷通过频域势流理论求解,浮体时域运动响应则需重点关注其数值求解过程。因此,通过耦合风机空气动力学与水动力学模型^[14],可建立浮式海上风机系统的时域运动方程为:

$$\sum_{k=1}^6 \left((M_{ij} + A_{ij}) \dot{x}_j(t) + \int_{-\infty}^t \dot{x}_j(\tau) K_{ij}(t - \tau) d\tau + C_{ij} x_j(t) \right) = F_{\text{wave},j}(t) + F_{\text{moor},j}(t) + F_{\text{wind},j}(t) \quad (1)$$

式中: M_{ij} 为浮式风机的质量矩阵; A_{ij} 为浮式风机平

台在频域解下的附加质量矩阵; $K_{ij}(t - \tau)$ 为迟滞函数; C_{ij} 为浮式风机平台在频域解下的回复力矩阵^[15]; x_j 为浮式风机平台在自由度 j 下的位移; \dot{x} 为速度; $F_{\text{wave},j}(t)$ 为波浪激励载荷; $F_{\text{moor},j}(t)$ 为锚链系泊载荷; $F_{\text{wind},j}(t)$ 为空气动力载荷。

半潜式平台所受水动力载荷主要包括以下四个组成部分:一阶线性波浪激励力、二阶非线性波浪激励力、辐射波浪力、水静力以及粘性拖曳阻尼力^[16]。在时域分析中,一阶波浪激励力 $F_{\text{Wave}}^{(1)}(t)$ 的数学表达式可表述为:

$$F_{\text{wave}}^{(1)}(t) = \text{Re} \left[\sum_{k=1}^6 \tilde{\zeta}_m H^{(1)}(w_m) e^{i w_m t} \right] \quad (2)$$

式中: $H^{(1)}(w)$ 为一阶波浪激励力传递函数; $\tilde{\zeta}_m$ 为频率 w_m 时波高的复傅里叶分量。

二阶波浪激励力 $F_{\text{wave}}^{(2)}$ 的数学表达式可表述为:

$$F_{\text{wave}}^{(2)}(t) = \text{Re} \left[\sum_m \sum_n \tilde{\zeta}_m \tilde{\zeta}_n^* H_{mn}^{2+} e^{i(w_m + w_n)t} + \sum_m \sum_n \tilde{\zeta}_m \tilde{\zeta}_n^* H_{mn}^{2-} e^{i(w_m - w_n)t} \right] \quad (3)$$

式中: H_{mn}^{2+} 为二阶和频波浪激励力 QTFs; H_{mn}^{2-} 为二阶差频波浪激励力 QTFs; $\tilde{\zeta}_m$ 为频率 w_m 时波高的复傅里叶分量; $\tilde{\zeta}_n^*$ 为频率 w_n 时波高的复傅里叶分量的共轭。

对于低频二阶力的计算,常用的方法主要有两种:第一种是利用近场法或者中场法直接计算完整的 QTF 矩阵,然后根据不规则波时历计算低频二阶力,被称为全 QTF 法;另一种方法是根据规则波下计算得到的平均二阶力,使用近似的方法得到 QTF 矩阵,其中使用最广泛的是 Newman 近似。

本文主要基于近场法的压力积分法求解二阶波浪载荷,其计算公式如下:

$$F^{(2)}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \zeta_{ai}^{(1)} \zeta_{aj}^{(1)} P_{ij} \cos[(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)] + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \zeta_{ai}^{(1)} \zeta_{aj}^{(1)} Q_{ij} \cos[(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)] + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \zeta_{ai}^{(1)} \zeta_{aj}^{(1)} \bar{P}_{ij} \cos[(\omega_i + \omega_j)t + (\varepsilon_i + \varepsilon_j)] + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \zeta_{ai}^{(1)} \zeta_{aj}^{(1)} \bar{Q}_{ij} \cos[(\omega_i + \omega_j)t + (\varepsilon_i + \varepsilon_j)] \quad (4)$$

式中: ζ_a 为规则波波幅,其中 i 和 j 为规则波序列; ω 为规则波频率; ε 为规则波相位角; N 为规则波序列总数; P_{ij} 、 Q_{ij} 、 \bar{P}_{ij} 和 \bar{Q}_{ij} 为二阶波浪力传递函数 (Quadratic Transfer Functions, QTFs),其表达式为:

$$\begin{cases} P_{ij} = \int_{WL} \frac{1}{2} \rho g \zeta_{ri}^{(1)} \zeta_{rj}^{(1)} \cos(\varepsilon_{ri} - \varepsilon_{rj}) \bar{n} dl \\ Q_{ij} = \int_{WL} \frac{1}{2} \rho g \zeta_{ri}^{(1)} \zeta_{rj}^{(1)} \sin(\varepsilon_{ri} - \varepsilon_{rj}) \bar{n} dl \\ \bar{P}_{ij} = \int_{WL} \frac{1}{2} \rho g \zeta_{ri}^{(1)} \zeta_{rj}^{(1)} \cos(\varepsilon_{ri} + \varepsilon_{rj}) \bar{n} dl \\ \bar{Q}_{ij} = \int_{WL} \frac{1}{2} \rho g \zeta_{ri}^{(1)} \zeta_{rj}^{(1)} \sin(\varepsilon_{ri} + \varepsilon_{rj}) \bar{n} dl \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\zeta_{ri}^{(1)}$ 为相对波幅 i 分量对来波波幅的比例系数,其中 i 和 j 为规则波序列; ε_{ri} 为相对波幅 i 分量对来波波幅相应分量的相位差。

与采用近场法相比,Newman 近似能够极大地提高计算效率,但其完全忽略了二阶速度势的影响^[17],在某些情况下的正确性有待讨论,Newman 近似相关为:

$$T(\omega_i, \omega_j) \approx \frac{1}{2} [T(\omega_i, \omega_i) + T(\omega_j, \omega_j)] \quad (6)$$

式中: $T(\omega_i, \omega_j)$ 代表 QTF 矩阵中的对角元元素; $T(\omega_i, \omega_i)$ 、 $T(\omega_j, \omega_j)$ 代表 QTF 矩阵中的非对角元元素。

2.2 半潜浮式风电机组数值模型建立

本文对浮式风机采用多体动力学建模方法,将风电机组视为由叶片、轮毂、传动轴、机舱、塔架、浮式基础以及系泊系统所构成的复杂多体系统,建立了半潜式海上风机“气动-水动-控制-弹性”全耦合数值模型,模型基本结构与风浪方向示意图如图 3 所示。

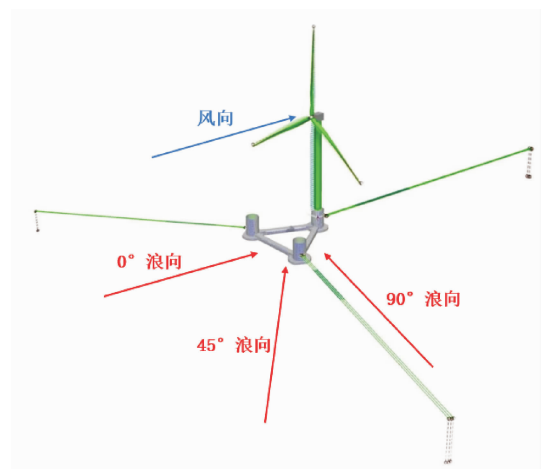


图 3 整体模型结构与风浪方向示意图

多体动力学建模时,发电机、机舱以及浮式基础考虑为刚体,塔架、叶片以及系泊缆考虑为柔性体。平台刚体模型的水动力载荷基于三维势流理论框架进行求解,并通过集中力等效原理施加于平台重心位置。悬链线式系泊缆结合集中质量法和有限元法

建立,其水动力载荷计算遵循莫里森方程理论体系。结构受到的主要荷载为风荷载和波浪荷载,并通过结构时域耦合动力响应分析方法,模拟了风机的动态响应特性。模型的边界条件由环境输入与模块间动态耦合共同定义,主要包括风荷载、波浪荷载、气动载荷以及系泊张力荷载,各荷载间通过位移、速度与力进行双向数据交换,实现了动态力平衡。

3 半潜浮式风电机组动力响应分析

3.1 计算工况

本文结合目标海域的海洋环境条件设计以下计算工况,其中,波浪谱采用 JONSWAP 谱,风为湍流

风,除 EC3—EC6 工况外,其余工况均为风浪同向。如表 5 所示,选取了典型运行工况 EC1 和停机工况 EC2。EC3、EC4 为运行状态下风电机组处于 45°、90°浪向下的情况,EC5、EC6 为停机状态下风电机组处于 45°、90°浪向下的情况。EC7—EC14 为不同水动力分量作用下的情况,包括仅一阶波浪力作用,分别采用 Newman 近似和全域差频 QTFs 计算的二阶差频波浪力作用、全域和频 QTFs 计算的二阶和频波浪力作用以及全域差频、和频 QTFs 计算的完整二阶波浪力作用。通过以上工况计算,对比分析了浪向和二阶波浪力对半潜浮式风电机组运动响应的影响。

表 5 计算工况

工况描述	工况	风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	有义波高/m	谱峰周期/s	风电机组状态	浪向	二阶波浪力
不同浪向对比	EC1	11.40	3.00	10.00	运行	0°浪向	无
	EC2	36.40	11.10	14.10	停机	0°浪向	无
	EC3	11.40	3.00	10.00	运行	45°浪向	无
	EC4	11.40	3.00	10.00	运行	90°浪向	无
	EC5	36.40	11.10	14.10	停机	45°浪向	无
	EC6	36.40	11.10	14.10	停机	90°浪向	无
二阶波浪力对比	EC7	11.40	3.00	10.00	运行	0°浪向	二阶差频力
	EC8	11.40	3.00	10.00	运行	0°浪向	二阶和频力
	EC9	11.40	3.00	10.00	运行	0°浪向	二阶差频、和频力
	EC10	11.40	3.00	10.00	运行	0°浪向	Newman 近似
	EC11	36.40	11.10	14.10	停机	0°浪向	二阶差频力
	EC12	36.40	11.10	14.10	停机	0°浪向	二阶和频力
	EC13	36.40	11.10	14.10	停机	0°浪向	二阶差频、和频力
	EC14	36.40	11.10	14.10	停机	0°浪向	Newman 近似

3.2 自由衰减测试

建立 15 MW 半潜式风电机组多体耦合模型后,为得到半潜浮式风机的固有频率,在某一自由度方向上施加一定的初始激励力或力矩,开展自由衰减测试,得到的风机沿纵荡、垂荡和纵摇方向的自由衰减曲线,纵荡、纵摇方向自由衰减曲线如图 4 所示。进一步开展频域分析得到了对应各自由度的半潜浮式风机固有周期,如表 6 所示。

3.3 浪向对半潜式风电机组响应影响

为评估平台的运动性能,本文除采用均值、标准差作为分析指标,还引入了 95% 分位值,该值表示所有瞬时运动响应数据中有 95% 的概率不会超过此数值,能有效剔除个别异常极大值的影响,更稳健地表征结构运动响应幅值。针对表 5 中 EC1—EC6 工况,对半潜式海上风机平台在 0°、45°以及 90°三种典型浪向工况下的运动响应特性展开对比分析,

统计运动响应统计值如图 5 所示。以正常运行工况下半潜式平台纵荡运动为例,当风、浪夹角为 45°和 90°时,相较于 0°方向,纵荡运动时程均值增大了 10%。与之相反,0°方向风、浪作用下纵荡时程响应 95% 分位值明显大于其他作用方向。此时,纵荡时程标准差对于波浪荷载作用方向的变化并不敏感。进一步对比可知,在停机工况下,除纵荡时程响应均值外,纵荡时程响应 95% 分位值和标准差均随风浪夹角的增大,呈现逐渐减小的变化规律。以纵荡时程响应 95% 分位值为例,相较于 0°方向,当风、浪夹角为 45°时,纵荡时程响应 95% 分位值减小了 53.6%;当风、浪夹角为 90°时,纵荡时程响应 95% 分位值减小了 72.5%。正常运行工况下,半潜式平台垂荡运动受波浪作用方向改变影响较小。纵摇运动响应随波浪作用方向变化整体规律与纵荡运动类似。

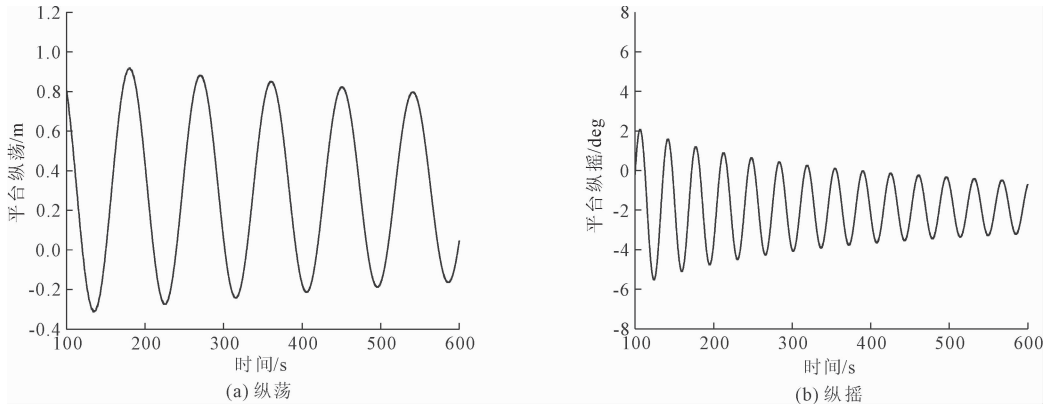


图 4 半潜式风电机组自由衰减时程

表 6 半潜式风电机组固有周期 单位:s

纵荡/横荡	垂荡	横摇/纵摇	一阶塔筒 FA
85.72	22.22	35.30	2.08

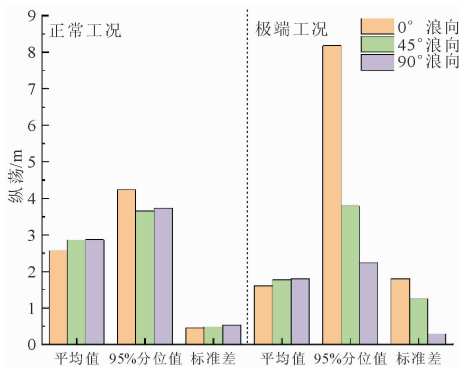


图 5 不同浪向作用下平台运动响应统计(纵荡)

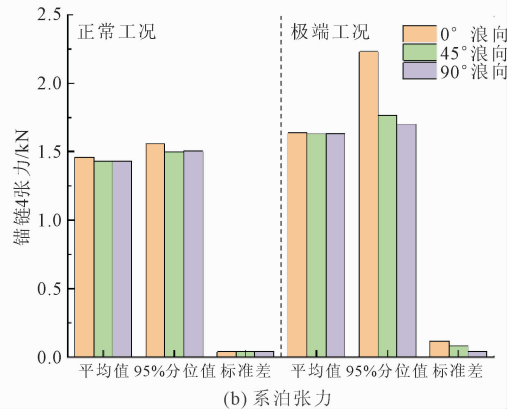
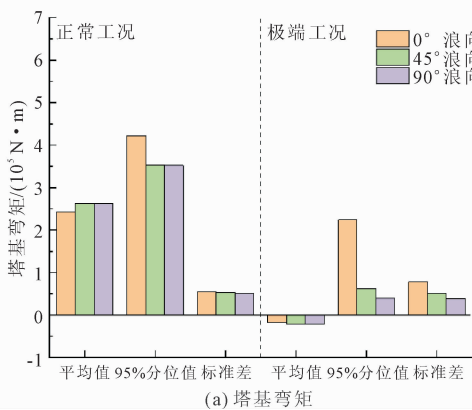


图 6 不同浪向作用下塔基弯矩、系泊张力响应统计

3.4 二阶波浪力对半潜式风电机组响应影响

为探究二阶波浪载荷对风机在运行工况 EC1 与停机工况 EC2 条件下运动响应的作用机制,针对表 5 中 EC7—EC14 工况,对 15 MW 半潜浮式风机开展时域全耦合响应计算,分别得到半潜式风机平台在运行工况与停机工况下的纵荡、垂荡及纵摇运

为探究半潜式海上风机在不同浪向工况下的结构响应特性,针对半潜式海上风机在 0° 、 45° 以及 90° 三种典型浪向下的塔基响应及迎风向系泊张力响应展开对比分析,统计塔基弯矩和系泊张力结果如图 6 所示。以正常运行工况下半潜式海上风机塔基弯矩为例,由图 6(a)可知,当风、浪夹角为 45° 和 90° 时,相较于 0° 方向,塔基弯矩均值增大了 8.4%。相反, 0° 方向风、浪作用下纵荡时程响应 95% 分位值高于其他作用方向,约高 16.4%。在停机工况下,浪向对塔基弯矩的影响更为显著。

以迎风向系泊为例,由图 6(b)可知,在运行工况下系泊张力时程均值和标准差对于波浪荷载作用方向的变化并不敏感,即不同波浪荷载作用方向下,系泊张力时程均值与标准差的变化幅度较小。

动响应时程曲线,如图 7、图 8 所示。从时程图可以看出,运行工况下,平台纵荡、纵摇位移呈现典型的低频漂移特性,这表明纵荡响应和纵摇响应受低频二阶波浪载荷影响显著,纵摇运动也为同样的规律,相比之下,垂荡振幅相对较小,且不同波浪荷载作用下运动响应差异不明显,表明垂荡运动对二阶波浪

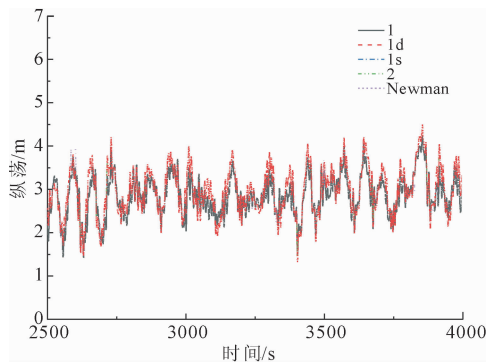


图 7 正常工况下平台运动响应时程图(纵荡)

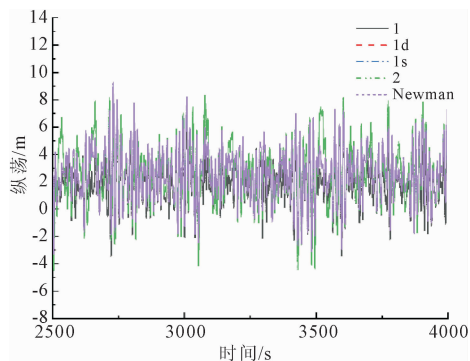


图 8 极端工况下平台运动响应时程图(纵荡)

载荷敏感性较低,其响应主要由一阶波浪力主导。极端工况下,平台遭受强烈的风浪载荷耦合作用,此

时平台的低频响应特性更加显著,尤其在纵荡和纵摇方向,平台表现出较大的位移与角度波动,这进一步证实二阶波浪载荷对平台运动稳定性具有不可忽视的重要影响。

将运行工况和停机工况下平台的运动响应统计值结果汇总于图 9。结合图 9 可知,二阶差频波浪力对平台运动响应具有显著影响,特别是在极端工况条件下,其作用效应不可忽略。这表明二阶差频波浪力对平台产生了持续的低频慢漂力,导致平台在平衡位置附近发生更大的偏移,导致整体运动幅度增大,但与此同时,高频波浪的瞬时冲击效应被削弱,导致响应极值降低。并且,在正常运行工况下,风载荷占据主导地位,但在停机工况下,风机实施顺桨停机策略,空气动力载荷显著降低,波浪载荷成为系统的主要控制载荷,此时具有较大有义波高的二阶差频波浪力与平台固有频率相近,引发显著的运动响应放大效应。此外,在正常工况下,采用 Newman 近似法计算二阶差频波浪力能够准确预测其对平台运动响应均值的影响;但在极端工况下,与基于全域二次传递函数(QTFs)的计算结果相比,Newman 近似法会系统性低估平台运动响应的均值及标准差。

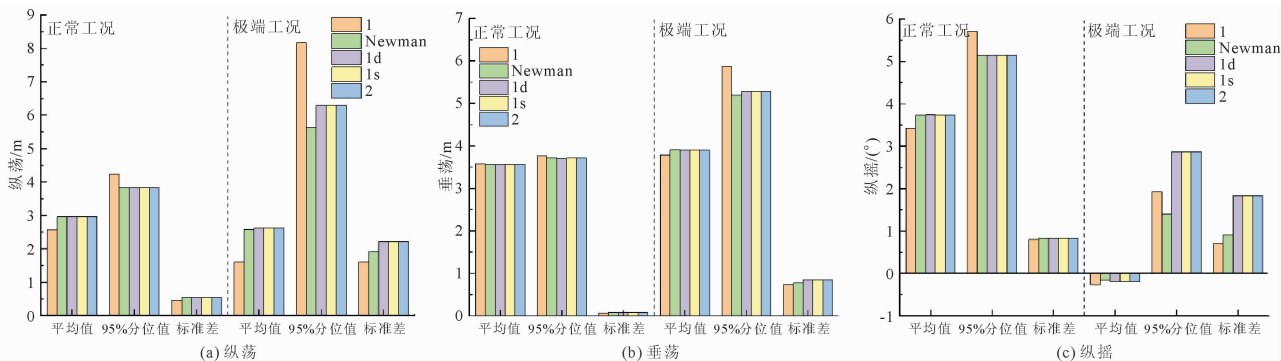


图 9 二阶波浪力下平台运动响应统计

在不同水动力分量作用下,半潜式浮式风电机组平台结构的动态响应功率谱密度(PSD)分布如图 10 所示。由功率谱密度图可知,平台在纵荡与纵摇方向的响应均呈现出典型的低频主导特征,响应主要集中在平台的固有频率附近,这充分体现出明显的二阶差频频率激励效应。结果表明,在仅考虑一阶波浪载荷与同时施加全域二阶和频波浪载荷的情况下,平台三自由度的响应谱曲线高度一致,说明和频二阶波浪分量对平台结构响应的影响可忽略不计。相比之下,当引入全域二阶差频波浪载荷后,平

台在低频范围内的激励响应幅值显著增强,且此时响应谱与包含完整二阶波浪载荷工况下的计算结果基本一致,验证了二阶差频波浪力在影响平台运动响应的诸多因素中占据主导地位。进一步分析发现,采用 Newman 近似方法会低估二阶波浪力激励响应的幅值。

针对运行工况与停机工况下,不同二阶水动力分量作用情况的塔基弯矩和逆风向系泊张力响应展开对比分析,相关统计结果由图 11 所示。由图 11(a)可知,运行工况下,二阶波浪力对塔基弯矩

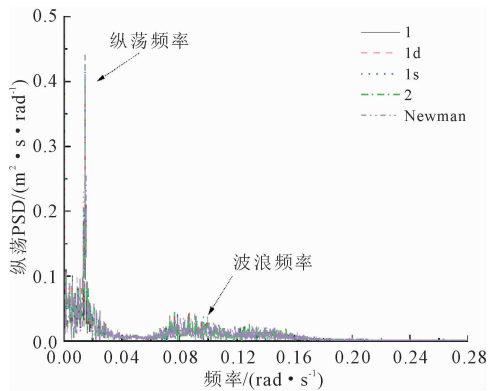


图 10 正常工况下平台运动响应功率谱密度图 (纵荡 PSD)

和系泊张力影响有限,然而在停机工况下,二阶差频与和频波浪力均对结构响应产生显著作用。尤其是在二阶和频波浪力作用下,塔基弯矩 95% 分位值比一阶波浪力单独作用时增大 182%, 停机工况下塔

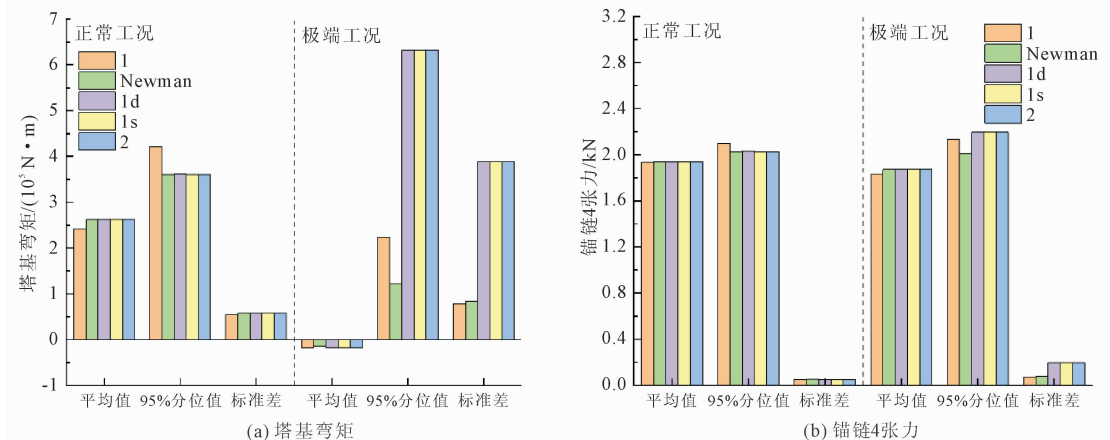


图 11 二阶波浪力下塔基弯矩、系泊张力响应统计

图 12 展示了运行工况下塔基弯矩与锚链张力响应的功率谱密度图。分析表明,塔基弯矩与系泊张力的动态响应主要包含三个典型的频域成分:一是低频激励响应,该响应由低频风载荷激发的平台纵荡与纵摇运动所诱导产生。在风的作用下,平台发生纵荡和纵摇运动,进而引发塔基和系泊系统产生低频的动态响应;二是波频响应,此响应主要由波浪载荷主导。波浪对浮式风电平台施加周期性的作用力,使得塔基弯矩和系泊张力产生与波浪频率相关的响应;三是高频响应,由塔架弹性振动及转子 3P 效应共同作用所引发。在运行工况下,二阶差频力与和频波浪力使低频激励响应和高频激励响应均呈现出一定程度的增强趋势。在停机工况条件下,由于气动载荷强度显著减弱,风频激励作用明显下降,结构响应主要由波浪载荷主导。此外,由于 15 MW 风电机组具有较重的转子和机舱质量以及超高

基弯矩较运行工况下提升 75%。由图 11(b)可知,在运行工况下,系泊张力统计值对于二阶波浪力分量的变化并不敏感,但在停机工况下,相较于仅一阶波浪力作用的情况,在二阶差频波浪力的影响下,系泊张力的标准差增大 171%,均值增加 2.33%。在运行工况条件下,分别运用 Newman 近似方法与全域差频 QTFs (二次传递函数)方法对二阶波浪力作用下的塔基弯矩以及系泊张力进行计算,结果表明,两种方法所得结果较为接近,即二者在正常工况下对相关参数的计算具有较好的一致性。但在停机工况下,采用 Newman 近似会低估二阶差频波浪力对塔基弯矩和系泊张力 95% 分位值与标准差的影响程度。这意味着在停机工况下,Newman 近似方法在准确评估二阶波浪力对关键结构参数影响方面存在局限性。

柔性塔架,在二阶差频波浪力作用下,平台纵摇运动表现出更强的低频耦合特性,显著增强了塔基弯矩在低频区段的响应幅值。与此同时,在频率接近塔架一阶固有频率时,引起塔架振动幅值的大幅提升,进一步放大了塔基弯矩与锚链张力的高频响应,对结构的安全性和稳定性构成潜在威胁。

4 结 论

(1) 浪向改变对半潜式海上风机平台运动响应及结构响应具有显著影响。在正常运行与停机工况下,纵荡、纵摇运动以及塔基弯矩表现出明显的敏感性。随着风浪夹角增大,响应极值普遍减小,而均值在部分工况下有所增大;垂荡运动和系泊张力受浪向变化影响小,但停机工况下呈现规律性变化。

(2) 二阶波浪力对 15 MW 半潜式风电机组的动力响应影响显著。尤其在极端停机工况下,二阶

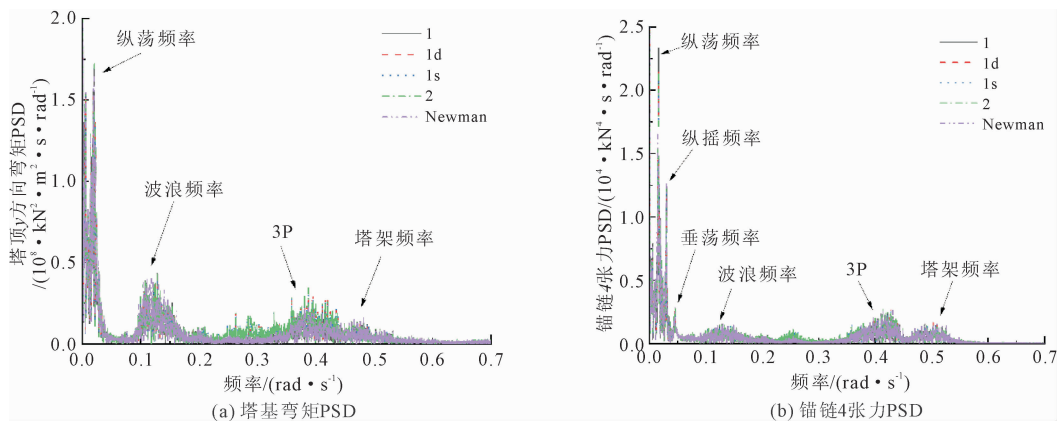


图12 正常工况下塔基弯矩、系泊张力响应功率谱密度

差频力会显著增大平台纵荡和纵摇运动的均值及低频漂移幅度,进而引发塔架在固有频率附近的大幅振动,导致系泊张力波动显著增加。相比之下,二阶和频波浪力的影响可忽略不计。此外,Newman近似法在正常运行工况下具有一定适用性,但在极端停机工况下存在明显局限性,会系统性低估平台运动、塔筒位移及系泊张力等关键响应。

(3) 本研究围绕15 MW半潜漂浮式风机展开,所得结论对实际工程具有多方面意义。在工程选址与布局方面,可依据目标海域浪向分布特征,规避浪向复杂多变地带,提升平台稳定性和安全性。对于已选址的项目,能结合浪向变化规律,科学调整平台与主导浪向的相对角度,使其在运行中处于相对有利的受力状态。在动力响应评估方面,需明确二阶波浪力对机组动力响应的影响,在工程设计和安全评估中充分考虑,提高结构安全性和可靠性。

参考文献:

[1] 温斌荣,田新亮,李占伟,等.大型漂浮式风电装备耦合动力学研究:历史、进展与挑战[J].力学进展,2022,52(4):731-808.

[2] 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.

[3] 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(5):954-963.

[4] Ahn H, Ha Y J, Cho S gil, et al. A numerical study on the performance evaluation of a semi-type floating offshore wind turbine system according to the direction of the incoming waves[J]. Energies, 2022,15(15):5485.

[5] 李嘉文.新型海上风机浮式基础设计与风机系统耦合动力分析[D].天津:天津大学,2015.

[6] Bayati I, Jonkman J, Robertson A, et al. The effects of

second-order hydrodynamics on a semisubmersible floating offshore wind turbine[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014,524(1):012094.

[7] Zhang Lixian, Shi Wei, Karimired M, et al. Second-order hydrodynamic effects on the response of three semisubmersible floating offshore wind turbines[J]. Ocean Engineering, 2020,207:107371.

[8] Mei Xuan, Xiong Min. Effects of second-order hydrodynamics on the dynamic responses and fatigue damage of a 15 MW floating offshore wind turbine[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021,9(11):1232.

[9] Cao Qun, Xiao Longfei, Guo Xiaoxian, et al. Second-order responses of a conceptual semi-submersible 10 MW wind turbine using full quadratic transfer functions[J]. Renewable Energy, 2020,153:653-668.

[10] Bae Y H, Kim M H. Rotor-floater-tether coupled dynamics including second-order sum-frequency wave loads for a mono-column-TLP-type FOWT (floating offshore wind turbine)[J]. Ocean Engineering, 2013,61:109-122.

[11] 刘英芳,黎国彦,李志雨,等.非线性波浪载荷对15 MW半潜型浮式风机基础运动响应的影响研究[J].海洋工程,2025,43(3):16-26.

[12] Li Haoran, Zheng Jinhan, Zhang Jisheng, et al. Effect of nonlinear hydrodynamics on global dynamic responses of a semi-submersible wind turbine[J]. Applied Ocean Research, 2025,158:104600.

[13] 高伟,杨阳,苗继春,等.二阶波浪力对15 MW漂浮式风力机动态响应影响研究[J].可再生能源,2023,41(3):333-338.

[14] 赵志新,李昕,施伟,等.超大型半潜浮式风力机动力特性分析[J].水力发电,2019,45(7):125-129.

[15] 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.

[16] 韩鑫.海上浮体二阶波浪力计算[D].武汉:武汉理工大学,2012.

[17] 欧绍武,付世晓.浮式结构物二阶波浪力求解方法比较研究[J].海洋工程,2017,35(4):100-109.