

风浪异向下漂浮式风电场平台动态响应研究

何鸿圣¹, 李蜀军¹, 岳敏楠¹, 李 春^{1,2}

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘 要:为研究风浪异向下海上漂浮式风电场平台运动响应,建立基于 ITI Energy Barge 平台的漂浮式风力机及共用系泊的二阶阵列漂浮式风电场模型,运用水动力学软件 AQWA 与风力机仿真软件 OpenFAST 分别对水动与气动载荷进行计算,分析了风浪异向下二阶阵列漂浮式风电场 Barge 平台时频响应特性。结果表明:频域内,Barge 平台响应主要集中在低频区域,波浪方向对纵摇和纵荡响应影响较大,对垂荡响应影响较小;时域内,纵摇和艏摇自由度背风侧平台响应幅值明显大于迎风侧平台;风电场各平台在横荡、横摇上的响应幅度随波浪入射角度的增大而增大,纵荡和垂荡自由度则几乎不受影响。

关 键 词:风浪异向;漂浮式风电场;叶素动量理论;辐射/绕射理论;运动响应

中图分类号:TM614 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.08.021

[引用本文格式]何鸿圣,李蜀军,岳敏楠,等. 风浪异向下漂浮式风电场平台动态响应研究[J]. 热能动力工程,2022,37(8):166-174. HE Hong-sheng, LI Shu-jun, YUE Min-nan, et al. Research on dynamic response of floating wind farm platform under wind-wave misalignment[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(8): 166-174.

Research on Dynamic Response of Floating Wind Farm Platform under Wind-wave Misalignment

HE Hong-sheng¹, LI Shu-jun¹, YUE Min-nan¹, LI Chun^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093;
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: In order to study the motion response of offshore floating wind farm platform under wind-wave misalignment, a floating wind turbine based on ITI Energy Barge platform and a second-order array floating wind farm model with shared mooring were established. The hydrodynamic and aerodynamic loads were calculated by using hydrodynamic software AQWA and wind turbine simulation software OpenFAST respectively, and the time-frequency response characteristics of the Barge platform of the second-order array floating wind farm were analyzed under wind-wave misalignment. The results show that in the frequency domain, the response of the Barge platform is mainly concentrated in the low-frequency area, and the wave direction has great influence on the pitching and surging responses, but has little influence on the heaving response. In the time domain, the response amplitudes of the leeward platform is significantly greater than that of the windward platform in the degree of freedom of pitching and yawing. The response amplitudes of each wind farm platform on swaying and rolling increase with the increase of wave incidence angle, while the degrees of freedom of surging and heaving are almost unaffected.

Key words: wind-wave misalignment, floating wind farm, blade element momentum theory, radiation/dif-

收稿日期:2021-09-01; 修订日期:2022-01-09

基金项目:国家自然科学基金(51976131, 52006148, 52106262);上海市“科技创新行动计划”地方院校能力建设项目(19060502200)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51976131, 52006148, 52106262); Shanghai University Science and Technology Innovation Action Plan Local University Capacity Building Project(19060502200)

作者简介:何鸿圣(1998-),男,湖南岳阳人,上海理工大学硕士研究生。

通讯作者:李 春(1963-),男,北京人,上海理工大学教授。

fraction theory,motion response

引 言

与近海浅水区域地质条件不同,随着水深增加,远海区域风电场若仍采用固定式基础将导致成本大幅增加。因此,远海风电通常以漂浮式平台作为海上风力机承载基础^[1]。由于底部基础不固定,漂浮式风力机在风浪载荷作用下极易产生摇荡响应,致使风力机始终处于受力不平衡的非线性运动状态,而风力机与承载平台的运动稳定性,是其安全运行的必要保证^[2]。因此,对复杂海况下漂浮式风力机动态响应进行研究具有工程实际意义。

现阶段,国内外学者针对漂浮式风力机动态响应已开展大量研究。Ye 等人^[3]基于 Spar 平台建立 5 MW 漂浮式风力机模型,对其在风、浪、流同向入射下的动态响应进行了研究。Liu 等人^[4]提出一种共用系泊的 3×3 阵列 Barge 平台漂浮式风电场,研究极限海况下漂浮式风电场平台六自由度响应,并将模拟结果与单 Barge 平台进行比较,其海况设置为风、浪、流同向入射。Riefolo 等人^[5]通过风力机仿真软件 FAST,研究了风浪异向对 Spar 平台漂浮式风力机系泊张力的影响。文献[6]通过风力机设计软件 SAMCEF,分别以 3 种不同浮式基础建立漂浮式风力机模型,研究水深、风浪载荷及波浪入射角度对 3 种漂浮式风力机运动响应的影响。文献[7]基于单点系泊系统具有的“风标效应”,提出一种新型漂浮式风力机,研究其在风浪载荷异向下的动态响应。文献[8]研究了风、浪入射角度不一致时漂浮式风力机平台结构的响应特性,并对各入射角度下的计算结果进行对比分析。

关于风浪入射下漂浮式风力机动态响应的研究尚存一定不足:一方面,对于漂浮式风力机动态响应的研究多侧重于单个漂浮式平台,仅个别文献考虑了多平台构成的漂浮式风电场;另一方面,在已有的多平台阵列漂浮式风电场研究当中,海况条件均为风、浪同向入射,尚未对风浪载荷异向入射进行研究。深远海风力机在役环境复杂,深海波浪以涌浪为主,波浪与来流风入射方向多存在较大差异^[9-10]。

鉴于此,本文基于美国国家可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory,NREL)开发的 5 MW 风力机,建立 Barge 平台漂浮式风力机整机模型,并采用固定悬链线与链接悬链线将 4 台相互间隔 8*D*(*D* 为风轮直径)的漂浮式风力机组成二阶阵列式漂浮式风电场,进而对不同波浪入射角度下风电场平台的动态响应进行研究。

1 研究对象

研究对象为基于 Barge 平台与 NREL 5 MW 漂浮式风力机所构成的漂浮式风电场。风力机与平台主要参数如表 1 与表 2^[11]所示。漂浮式风电场如图 1 所示。

表 1 NREL 5 MW 风力机参数
Tab. 1 Parameters of NREL 5 MW wind turbine

参数	数值
功率/MW	5
叶片数	3
风轮直径/m	126
额定转速/r·min ⁻¹	12.1
切入风速/m·s ⁻¹	3
额定风速/m·s ⁻¹	11.4
切出风速/m·s ⁻¹	25
轮毂直径/m	3
塔架高度/m	87.6
风轮质量/kg	1.1×10 ⁵
塔架质量/kg	3.5×10 ⁵
机舱质量/kg	2.4×10 ⁵

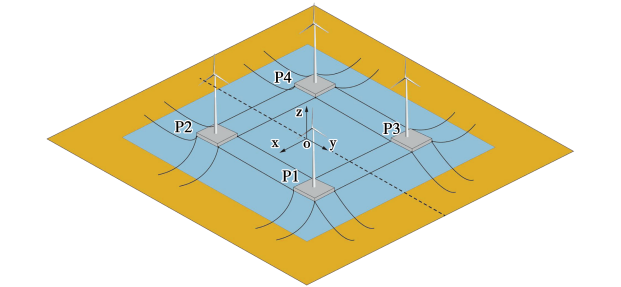


图 1 二阶漂浮式风电场
Fig. 1 Second-order floating wind farm

表 2 Barge 平台参数
Tab.2 Parameters of Barge platform

参数	数值
尺寸/m	40
吃水深度/m	4
排水体积/m ³	6 000
质心位置/m	-0.28
缆索长度/m	966.2
缆索直径/m	0.08
平台质量/kg	5.45×10^6
横摇转动惯量/kg · m ²	7.27×10^8
纵摇转动惯量/kg · m ²	7.27×10^8
艏摇转动惯量/kg · m ²	1.45×10^9
缆索拉伸刚度/N	5.89×10^8
导缆孔深度/m	4
单位长缆索质量/kg · m ⁻¹	130.4
导缆孔至平台中心线间距/m	28.3

风力机运行过程中可通过偏航控制使风轮平面正对来流风,故风浪异向研究主要侧重于波浪方向的改变。为研究不同波浪方向对漂浮式风电场平台动态响应的影响,湍流风保持为 0°方向入射(正对风轮平面),不规则波入射方向则由 0°(逆 x 向),间隔 15°,增加至 90°(逆 y 向),共 7 个风浪入射方向,如图 2 所示。

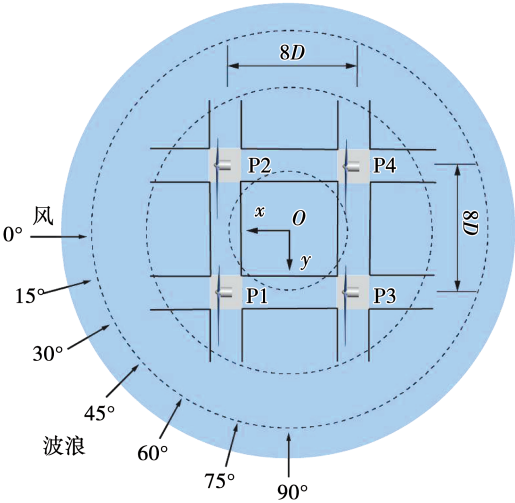


图 2 风浪入射示意图

Fig.2 Diagram of wind and wave incidence

2 环境载荷

2.1 湍流风场与气动载荷

漂浮式风力机在环境载荷作用下产生的六自由度运动易造成风轮位置的改变。为保证风轮始终位于湍流风场,以轮毂中心为参考点,基于 Kaimal 湍流风谱,通过 TurbSim^[12]生成风速 11.4 m/s、覆盖区域 170 m(水平方向) × 170 m(垂直方向)的湍流风场。风力机轮毂高度处风速分布如图 3 所示。

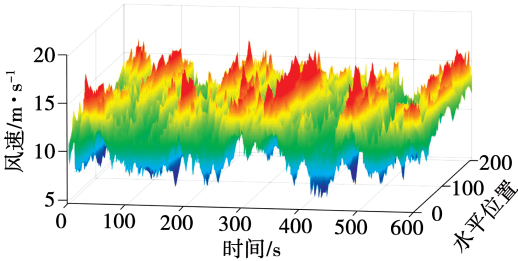


图 3 轮毂高度处风速分布

Fig.3 Wind speed distribution at the hub height

风载荷的求解基于叶素动量理论,风轮处相对速度、风轮推力及扭矩分别为^[13]:

$$V_r = \sqrt{U_r^2 (1 - a)^2 + \omega^2 r^2 (1 + b)^2} \tag{1}$$

$$F_b = \int_{R_H}^R 0.5 \rho_a V_r^2 (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) k B c d r \tag{2}$$

$$Q_b = \int_{R_H}^R 0.5 \rho_a V_r^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) k B c d r \tag{3}$$

式中: V_r —叶片单元的气流相对速度; U_r —来流风速; a —轴向诱导因子; b —切向诱导因子; F_b —风轮所受轴向推力; Q_b —作用于风轮上的扭矩; ρ_a —空气密度; C_L —升力系数; k —叶片端部尾流修正系数; C_D —阻力系数; φ —入流角; R_H —轮毂半径; R —风轮半径; B —叶片数目; c —弦长; r —叶片单元的展向半径。

2.2 不规则波与波浪载荷

漂浮式风力机运行期间始终承受复杂多变的波浪载荷,对波浪载荷建模常采用波浪谱方法。选用 P-M 谱模拟不规则波,有义波高 5 m,谱峰周期 17 s, P-M 谱为^[14]:

$$S(\omega) = 0.3125 H_s^2 \omega_p^4 \omega_w^{-5} e^{-1.25 \omega_p^4 \omega_w^{-4}} \tag{4}$$

式中: H_s —有义波高; ω_p —谱峰频率; ω_w —频率。

海洋工程中对波浪载荷的求解常采用 Morison 方程和辐射/绕射理论。Morison 方程认为结构物尺寸对入射波影响可以忽略,不考虑绕射效应。而本文涉及的 Barge 平台属大尺寸结构,其存在对波浪场有较大影响,故本文中波浪载荷的求解采用辐射/绕射理论^[15]。假设海水为不可压缩、无旋、无粘的理想流体,流场中总速度势 Φ 可表示为:

$$\Phi = \Phi_I + \Phi_D + \Phi_R \quad (5)$$

式中: Φ_I —入射势; Φ_D —绕射势; Φ_R —辐射势。

总速度势在波浪场中满足拉普拉斯方程及对应边界条件:

$$\begin{cases} \partial^2 \Phi / \partial x^2 + \partial^2 \Phi / \partial y^2 + \partial^2 \Phi / \partial z^2 = 0 \\ \partial \Phi / \partial s = \partial \eta / \partial t + (\partial \eta / \partial x) \cdot (\partial \Phi / \partial x) + \\ \quad (\partial \eta / \partial y) \cdot (\partial \Phi / \partial y) \\ \partial \Phi / \partial t + 0.5 (\nabla \Phi)^2 + p_w / \rho_w + g s = 0 \\ \partial \Phi / \partial z |_{z=h} = 0 \\ \partial \Phi / \partial \vec{n} = 0 \quad \Phi_R = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: g —重力加速度; t —时间; h —海深; p_w —海面压力; $\vec{n}$ —湿表面外法线方向向量; η —自由液面方程; ρ_w —海水密度; s —自由面。

浮体表面水动压力 p_d 、波浪力 F_w 以及波浪力矩 M_w 分别为:

$$p = -\rho_w \partial \Phi / \partial t \quad (7)$$

$$F_w = \iint_{S_B} -p \vec{n} dS_B \quad (8)$$

$$M_w = \iint_{S_B} -p (\vec{r} \times \vec{n}) dS_B \quad (9)$$

式中: S_B —浮体湿表面; $\vec{r}$ —浮体表面切向量。

3 运动方程与响应自由度

漂浮式风力机平台在役环境下的运动方程为:

$$[\mathbf{M}(s) + \mathbf{M}(a) + \mathbf{M}_{WT}] \ddot{\mathbf{x}} + [\mathbf{C}(s) + \mathbf{C}_{WT}] \dot{\mathbf{x}} + [\mathbf{K}(s) + \mathbf{K}_{WT} + \mathbf{K}_m] \mathbf{x} = \mathbf{F}(x) \quad (10)$$

式中: $\mathbf{M}(s)$ —平台结构质量矩阵; $\mathbf{M}(a)$ —附加质量矩阵; $\mathbf{M}_{WT}$ —风力机质量矩阵; $\mathbf{C}(s)$ —平台结构阻尼矩阵; $\mathbf{C}_{WT}$ —风力机阻尼矩阵; $\mathbf{K}(s)$ —平台结构刚度矩阵; $\mathbf{K}_{WT}$ —风力机刚度矩阵; $\mathbf{K}_m$ —系泊系统刚度矩阵; $\mathbf{F}(x)$ —作用在浮体上的波浪力; $\ddot{\mathbf{x}}, \dot{\mathbf{x}}$ 及 $\mathbf{x}$ —浮体加速度、速度及位置矢量。

环境载荷作用下漂浮式风力机将产生沿 x 轴、 y 轴和 z 轴的平动(纵荡、横荡及垂荡)和绕对应轴的转动(横摇、纵摇及艏摇),如图 4 所示。

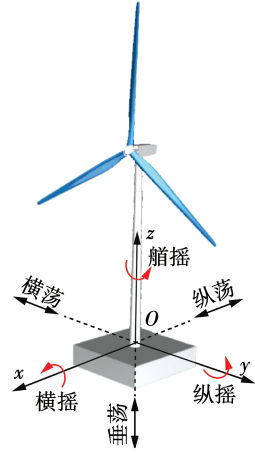


图 4 平台六自由度运动

Fig. 4 Movements of platform in six degrees of freedom

4 结果与分析

4.1 频域水动力分析

4.1.1 波浪激振力

波浪激振力是风力机平台在波浪作用下的主要载荷,由绕射力与 F-K 力组成。前者是绕射波浪场产生的动态压力场沿平台平均湿表面的积分,后者由未受扰动的入射波浪场产生的动态压力场沿平台平均湿表面的积分得到。不同波浪入射角度下,单位波高波浪作用时,漂浮式风力机 Barge 平台波浪激振力关于频率变化的幅频特性曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,Barge 平台纵荡、纵摇自由度上波浪激振力/力矩均随入射波浪频率的增加先增大后减小,二者均存在峰值。而垂荡自由度上,Barge 平台波浪激振力随波浪频率的增加逐渐减小。纵荡自由度上,Barge 平台波浪激振力峰值出现在 0.72 rad/s 附近;纵摇自由度上,波浪激振力矩峰值频率约为 0.66 rad/s。随着波浪入射角度的改变,Barge 平台波浪激振力/力矩也发生变化,纵荡波浪激振力与纵摇波浪激振力矩变化最为显著,而垂荡自由度上波浪激振力则几乎不受波浪入射方向的影响。随

着波浪入射角的增大,纵荡与纵摇波浪激振力/力矩均随之逐渐减小。纵荡自由度上,当波浪入射角超过 45° 时,纵荡波浪激振力幅频特性曲线上出现第 2 处峰值,峰值频率介于 $1.5 \sim 2.0 \text{ rad/s}$ 之间。与之类似,当波浪入射角增至 60° 时,纵摇波浪激振力幅频特性曲线也出现第 2 处峰值,其频率约为 1.5 rad/s 。

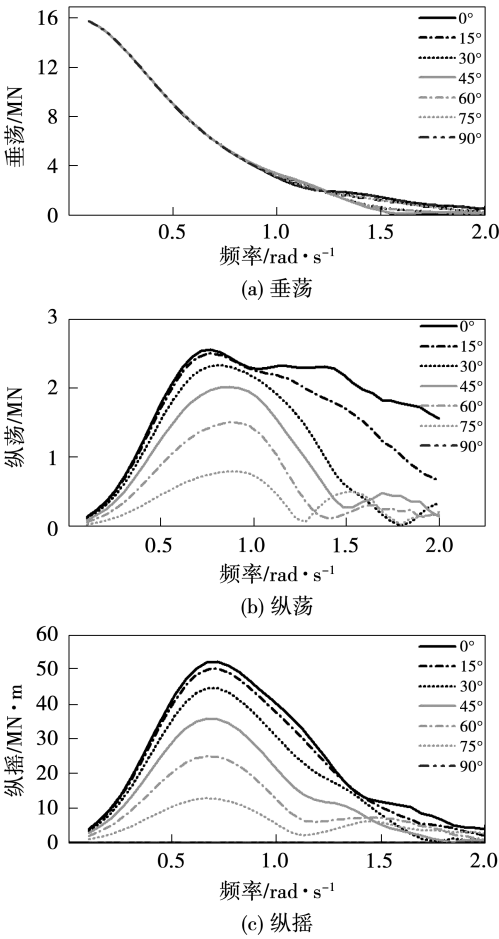


图 5 波浪激振力
Fig.5 Wave exciting force

4.1.2 RAO 频域运动响应

幅值响应算子 (Response Amplitude Operator, RAO) 是波浪波幅到平台各位置参数的传递函数,反映单位波幅作用下平台各自由度运动响应大小^[16]。漂浮式风力机 Barge 平台在不同入射角单位波幅波浪作用下的频域响应如图 6 所示。

由图 6 可知,Barge 平台频域响应均集中于 2.0 rad/s 以下低频区域。垂荡自由度上,Barge 平台频域响应对波浪入射频率变化的敏感程度与入射频率

大小有关,当入射频率低于 0.75 rad/s 时,随着频率的增大垂荡响应几乎保持不变,始终维持在 1.0 m 左右;当频率高于 0.75 rad/s 时,垂荡响应随频率的增大迅速减小最终趋近于零。纵荡自由度上,随着波浪入射频率的增加,频域响应先减小后增大,当入射频率超过 1.25 rad/s 时再度减小直至趋近于零。纵摇自由度上,频域响应随着入射频率的增加先增大后减小,峰值频率为 1.0 rad/s 。随着波浪入射角的改变,Barge 平台在三自由度上频域响应也发生变化。其中,纵荡与纵摇自由度上频域响应变化较为显著,而垂荡响应对波浪入射角的改变并不敏感,随着波浪入射角的增加,纵荡与纵摇自由度上频域响应均明显减小,而垂荡自由度上响应情况则与波浪 0° 入射时的结果相近。这主要是由于垂荡波浪激振力受波浪入射角度改变影响较小。

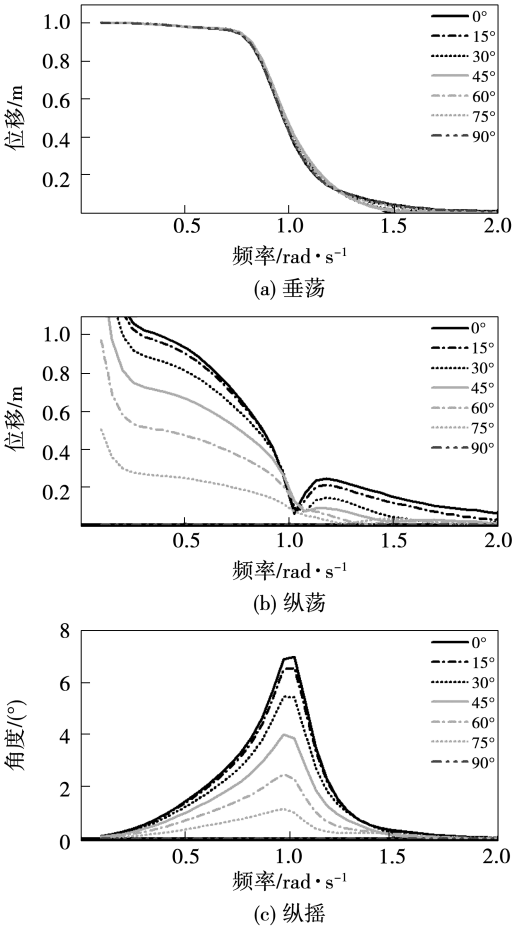


图 6 频域 RAO
Fig.6 RAO in frequency-domain

4.2 时域分析

4.2.1 横荡与纵荡

风浪均从 0°入射时,风电场各平台横荡与纵荡时域响应如图 7 所示。由图可知,横荡上各平台波动幅度基本相当,且 x 轴一侧的 P1,P3 平台与其另一侧的 P2,P4 平台运动方向恰好相反。而纵荡上迎风侧 P1,P2 平台波动幅值与平均位移均小于背风侧 P3,P4 平台。考虑波浪入射角变化对平台横荡、纵荡上运动响应的影响,风电场各平台在不同波浪入射角下横荡、纵荡波动幅值与标准差如表 3 与表 4 所示。

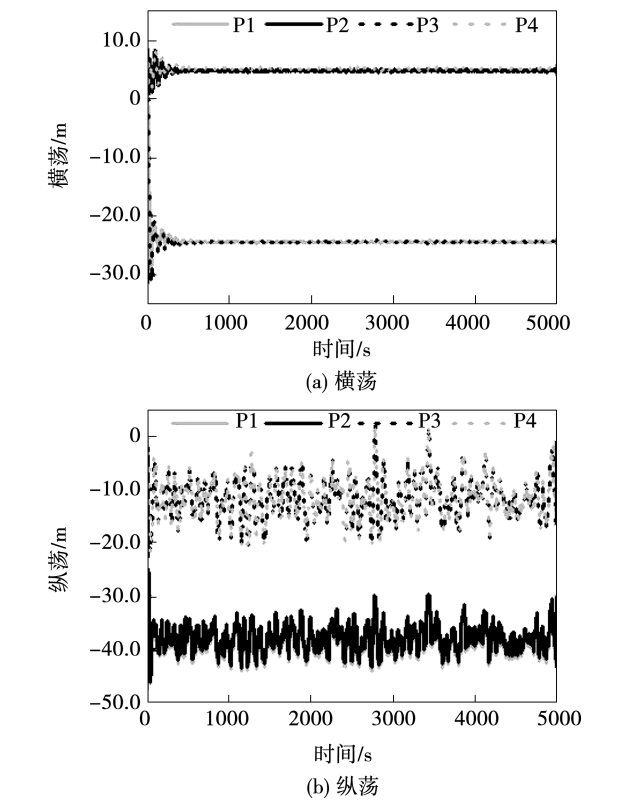


图 7 横荡与纵荡

Fig.7 Time-domain response of swaying and surging

由表 3 与表 4 可知,横荡自由度上,各平台波动幅值与标准差基本相同,随着波浪入射角的增加各平台波动幅值与标准差呈现逐渐增大趋势。0°入射时,各平台横荡波动幅值约为 7.30 m,而 90°入射时波动幅值增至 8.85 m,增大了 21%。纵荡自由度上,各平台波动幅值与标准差则几乎不受波浪载荷

方向改变的影响,在各波浪入射角下几乎均保持不变,且背风侧 P3,P4 平台波动幅度与标准差始终大于迎风侧 P1,P2 平台。

表 3 不同波浪入射角下横荡统计

Tab.3 Swaying statistics under different wave incidence angles

角度/(°)	横荡波动幅值/m				横荡标准差/m			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
0	7.83	7.06	7.37	6.94	0.55	0.60	0.76	0.64
15	8.08	7.24	7.42	7.67	0.59	0.62	0.79	0.71
30	8.13	7.55	7.57	7.87	0.69	0.67	0.88	0.74
45	8.36	7.86	8.08	8.01	0.80	0.88	0.98	0.87
60	8.36	8.21	8.22	8.41	0.88	0.91	1.03	0.89
75	8.39	8.94	8.42	8.52	0.94	0.96	1.12	1.11
90	8.54	9.20	8.87	8.77	0.96	0.97	1.15	1.13

表 4 不同波浪入射角下纵荡统计

Tab.4 Surging statistics under different wave incidence angles

角度/(°)	纵荡波动幅值/m				纵荡标准差/m			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
0	12.26	12.95	18.39	18.90	2.23	2.25	3.62	3.68
15	12.20	13.58	18.86	18.11	2.22	2.27	3.61	3.72
30	12.08	13.36	18.94	18.53	2.20	2.23	3.70	3.68
45	12.37	13.84	18.02	18.00	2.19	2.23	3.70	3.74
60	12.43	13.62	18.35	18.36	2.14	2.21	3.66	3.75
75	12.27	13.76	17.92	17.98	2.10	2.17	3.65	3.78
90	12.38	13.09	18.73	17.88	2.11	2.15	3.71	3.75

4.2.2 横摇与纵摇

考虑风浪从 0°同向入射,风电场各平台横摇与纵摇时域响应如图 8 所示。由图可知,横摇上各平台波动幅度基本持平,且 x 轴两侧平台运动方向恰好相反。纵摇上各平台波动幅度基本相当,且迎风侧 P1,P2 平台与背风侧 P3,P4 平台运动方向相反。考虑波浪方向对风电场中各平台横摇与纵摇运动响应的影响,各平台在不同波浪入射角下横摇、纵摇波动幅度与标准差如表 5 与表 6 所示。

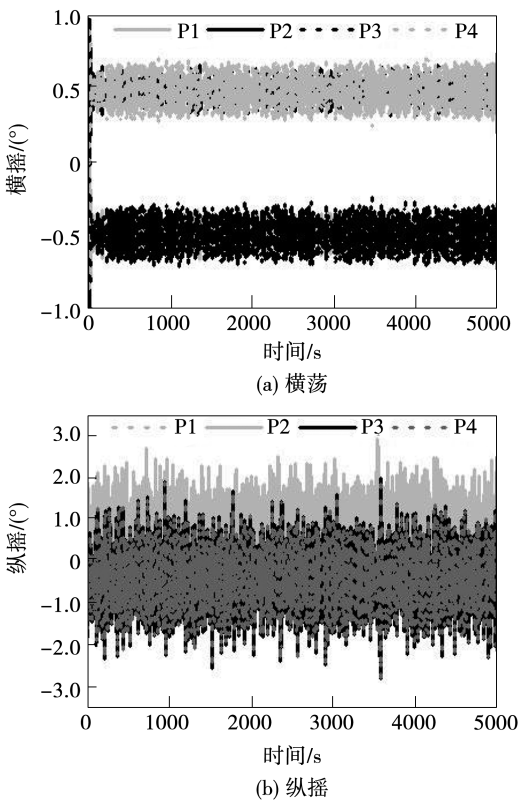


图 8 横摇与纵摇

Fig. 8 Time-domain response of rolling and pitching

表 5 不同波浪入射角下横摇统计

Tab.5 Rolling statistics under different wave incidence angles

角度/(°)	横摇波动幅度/(°)				横摇标准差/(°)			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
0	0.82	0.91	0.81	0.89	0.07	0.07	0.06	0.06
15	1.11	0.94	0.99	0.89	0.17	0.16	0.17	0.15
30	1.98	1.78	1.96	1.82	0.32	0.31	0.33	0.30
45	2.57	2.50	2.53	2.59	0.41	0.44	0.43	0.43
60	3.06	2.95	3.06	3.08	0.59	0.52	0.57	0.54
75	3.47	3.45	3.55	3.41	0.61	0.63	0.65	0.61
90	3.88	3.82	3.91	3.80	0.63	0.65	0.67	0.66

由表 5 与表 6 可知,横摇与纵摇自由度上风电场中各平台的波动幅度与标准差基本相当。横摇波动幅度与标准差随波浪入射角的增大而增大,而纵摇波动幅度与标准差随波浪入射角的增大而减小。波浪 0°入射时,4 平台横摇与纵摇波动幅度分别为 0.86°和 4.20°,90°入射时横摇与纵摇波动幅度分别为 3.85°和 0.96°,前者增大 4.48 倍而后者减小 4.38倍。

表 6 不同波浪入射角下纵摇统计

Tab.6 Pitching statistics under different wave incidence angles

角度/(°)	纵摇波动幅度/(°)				纵摇标准差/(°)			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
0	3.98	3.98	4.41	4.41	0.64	0.64	0.68	0.69
15	4.03	3.95	3.77	3.80	0.67	0.69	0.66	0.64
30	3.57	3.22	3.29	3.24	0.60	0.58	0.54	0.57
45	2.65	2.51	2.65	2.71	0.43	0.44	0.46	0.46
60	2.15	2.03	2.11	1.97	0.35	0.35	0.34	0.34
75	1.31	1.36	1.33	1.21	0.21	0.21	0.20	0.19
90	1.05	1.04	0.92	0.82	0.15	0.14	0.14	0.13

4.2.3 垂荡与艏摇

风浪 0°入射下,风电场各平台垂荡与艏摇时域响应如图 9 所示。由图可知,垂荡上各平台波动幅值基本一致。艏摇上背风侧 P3,P4 平台波动幅度略大于迎风侧 P1,P2 平台,且 x 轴上侧的 P2,P4 平台与下侧 P1,P3 平台运动方向相反。考虑波浪方向对风电场各平台垂荡与艏摇运动的影响,4 个平台在不同波浪入射角下垂荡、艏摇波动幅值与标准差如表 7 与表 8 所示。

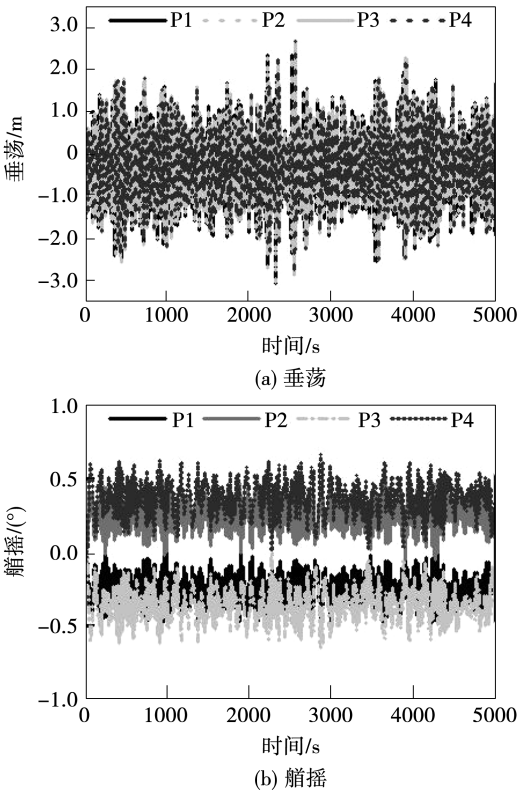


图 9 垂荡与艏摇

Fig. 9 Time-domain response of heaving and yawing

表 7 不同波浪入射角下垂荡统计

Tab. 7 Heave statistics under different wave incidence angles

角度/(°)	垂荡波动幅值/m				垂荡标准差/m			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
0	4.48	4.48	4.37	4.38	0.73	0.73	0.74	0.74
15	4.54	4.50	4.46	4.30	0.73	0.73	0.73	0.72
30	4.51	4.33	4.32	4.71	0.74	0.74	0.73	0.73
45	4.42	4.09	4.08	4.53	0.73	0.73	0.73	0.75
60	4.58	4.31	4.30	4.75	0.74	0.73	0.74	0.73
75	4.53	4.48	4.57	4.30	0.73	0.73	0.73	0.72
90	4.47	4.34	4.47	4.36	0.73	0.74	0.73	0.74

表 8 不同波浪入射角下艏摇统计

Tab. 8 Yaw statistics under different wave incidence angles

角度/(°)	艏摇波动幅度/(°)				艏摇标准差/(°)			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
0	0.64	0.65	1.08	0.97	0.06	0.08	0.12	0.1
15	0.68	0.70	1.11	0.94	0.07	0.10	0.13	0.12
30	0.66	0.88	1.20	0.99	0.08	0.11	0.13	0.12
45	0.63	0.68	1.21	1.00	0.08	0.09	0.13	0.11
60	0.80	0.72	1.28	1.02	0.11	0.11	0.15	0.12
75	0.72	0.70	1.17	1.1	0.09	0.10	0.13	0.13
90	0.66	0.65	1.10	0.95	0.09	0.11	0.14	0.11

由表 7 与表 8 可知,垂荡自由度上风电场中各平台的波动幅值与标准差基本相当且均不受波浪方向影响。艏摇自由度上,各平台波动幅度与标准差随波浪入射角的增大虽未表现出明显的增大或减小趋势,但风电场中背风侧 P3,P4 平台波动幅度与标准差始终大于迎风侧 P1,P2 平台。

5 结 论

基于 ITI Energy Barge 平台,通过共用系泊方式建立二阶阵列漂浮式风电场,基于辐射/绕射理论,结合有限元方法,对不同波浪入射方向下漂浮式风电场中各平台六自由度运动响应进行研究,得出结论:

- (1) Barge 平台一阶波浪激振力与频域 RAO 均集中于 1.5 rad/s 以下低频区域。
- (2) 纵荡与纵摇频域响应随波浪入射角度的增

大而减小,垂荡频域响应受波浪入射方向影响较小。

(3) 横荡、垂荡、横摇及纵摇四自由度上,风电场内各平台的响应幅度基本相同。纵荡与艏摇自由度上,风电场中背风侧 P3,P4 平台响应幅度明显大于迎风侧 P1,P2 平台。

(4) 各平台横荡、横摇响应均随波浪入射角度的增大而增大,纵摇响应则随之减小,纵荡与垂荡几乎不受波浪入射方向影响。

参考文献:

[1] 王 博,丁勤卫,李 春,等.普通海况下驳船式平台漂浮式风电场平台动态响应研究[J]. 机械工程学报,2021,57(6): 171-183.

WANG Bo, DING Qin-wei, LI Chun, et al. Dynamic response of floating wind farm platform based on barge platform under common sea conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(6):171-183.

[2] 丁勤卫. 风波耦合作用下漂浮式风力机平台动态响应及稳定性控制研究[D]. 上海:上海理工大学,2019.

DING Qin-wei. Research on dynamic response of floating wind turbine platform under the coupling effect of wind, wave and its stability improvement[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2019.

[3] YE Kan, JI Jin-chen. Current, wave, wind and interaction induced dynamic response of a 5 MW spar-type offshore direct-drive wind turbine[J]. Engineering Structures, 2019, 178:395-409.

[4] LIU Qing-song, MIAO Wei-pao, YUE Min-nan, et al. Dynamic response of offshore wind turbine on 3×3 barge array floating platform under extreme sea conditions[J]. China Ocean Engineering, 2021, 35(2):186-200.

[5] RIEFOLO L, JESUS F D, GARCIA R G, et al. Wind/ wave misalignment effects on mooring line tensions for a spar buoy wind turbine[C]//ASME International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2018.

[6] 陶 凯. 深水浮式风力机的动力响应[D]. 镇江:江苏科技大学,2014.

TAO Kai. Dynamic response of offshore floating wind turbines[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2014.

[7] 曲晓奇,唐友刚,李 焱,等. 风浪异向时单点系泊浮式风力机运动性能分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(8): 1328-1336.

QU Xiao-qi, TANG You-gang, LI Yan, et al. Motion performance a-

analysis of a floating offshore wind turbine with single-point mooring system under misaligned wind and wave condition[J]. Journal of Harbin Engineering University,2018,39(8):1328-1336.

[8] 周 伟,叶 舟,宋建业,等. 风浪入射角对漂浮式风力机动态响应影响研究[J]. 热能动力工程,2018,33(9):93-100.

ZHOU Wei, YE Zhou, SONG Jian-ye, et al. Dynamic response of floating wind turbine with wind and wave incident angle[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2018,33(9):93-100.

[9] 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 monopoles[J]. Wind Engineering,2011,35(5):561-574.

[10] BACHYNSKI E E, KVITTEM M I, LUAN Chen-yu, et al. Wind-wave misalignment effects on floating wind turbines: motions and tower load effects[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering,2014,136(4):041902.

[11] JONKMAN J, MATHA D. Quantitative comparison of the responses of three floating platforms[J]. Australian Historical Studies, 2010,32(3):351-355.

[12] JONKMAN B J, BUHL M L. TurbSim user's guide[R]. Colorado; National Renewable Energy Laboratory,2005.

[13] MORIARTY P J, HANSEN A C. Aerodyn Theory Manual[R]. Colorado; National Renewable Energy Laboratory,2010.

[14] 王树青,梁丙臣. 海洋工程波浪力学[M]. 青岛:中国海洋大学出版社,2013.

WANG Shu-qing, LIANG Bing-chen. Wave mechanics for ocean engineering[M]. Qingdao:China Ocean University Press,2013.

[15] 张金平,段艳丽,刘学虎. 海洋平台波浪载荷计算方法的分析和建议[J]. 石油矿场机械,2006,35(3):10-14.

ZHANG Jin-ping, DUAN Yan-li, LIU Xue-hu. The analysis and proposal of computation methods of wave loads acting on offshore platform[J]. Oil Field Equipment,2006,35(3):10-14.

[16] 李文魁,张 博,田蔚风,等. 一种波浪中的船舶动力定位运动建模方法研究[J]. 仪器仪表学报,2007,28(6):1051-1054.

LI Wen-kui, ZHANG Bo, TIAN Wei-feng, et al. Method of ship motion modeling with dynamic positioning in waves[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2007,28(6):1051-1054.

(丛 敏 编辑)