DOI: 10.3901/JME.2021.06.171

普通海况下驳船式平台 漂浮式风电场平台动态响应研究*

王 博¹ 丁勤卫¹ 李 春^{1,2} 岳敏楠¹

(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: 漂浮式风力机的稳定是其正常工作的基础。在深海环境中, 载荷复杂且不稳定, 受其影响漂浮式风力机将产生复杂的激励运动。建立基于 ITI Energy Barge 平台的 NREL 5 MW 漂浮式风力机整机模型, 提出 Barge 平台漂浮式风电场。通过高级程序语言编程求解气动载荷, 运用水动力学软件 AQWA, 采用辐射/绕射理论并结合有限元方法, 对海风、波浪载荷作用下漂浮式风电场平台的动态响应进行数值仿真。频域分析结果如下: Barge 平台在纵荡、垂荡和纵摇方向的响应主要集中在低频区域, 其中, 纵荡、垂荡响应随波浪频率增加逐渐减小, 而纵摇响应先增加后减小。时域分析结果如下: 漂浮式风电场平台运动轨迹关于风浪入射方向对称。较之于 Barge 平台, 与固定悬链线相连的第一列平台垂荡运动响应稍大, 但波动幅度差别可忽略不计; 其纵摇和机舱稳定性均得以增强; 横摇、艏摇运动幅值很小。研究表明所提漂浮式风电场平台具有良好的稳定性, 为进一步的研究工作奠定了基础。

关键词: Barge 平台; 漂浮式; 风电场; 稳定性; 动态响应

中图分类号: TK83

Dynamic Response of Floating Wind Farm Platform Based on Barge Platform under Common Sea Conditions

WANG Bo¹ DING Qinwei¹ LI Chun^{1,2} YUE Minnan¹

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

Abstract: The stability of the floating wind turbine is the most fundamental guarantee for its normal work. In the deep sea, the complexity and variability of the environment load inevitably lead to the complex dynamic response of the floating wind turbine. Whole model of floating wind turbine is established based on the ITI Energy Barge platform and the NREL 5 MW wind turbine, and a floating wind farm based on Barge platform is proposed. The advanced programming language is employed to accomplish the solution of aerodynamic load, and the numerical simulation hydrodynamic software AQWA based on the radiation / diffraction theory and the finite element is used to simulate the dynamic response of floating wind farm platform under the effect of wind and wave. Frequency domain analysis results: The surge, heave and pitch responses of the floating wind turbine Barge platform are mainly concentrated on the low-frequency region. The surge and heave responses show the trend of decrease with the increase of wave frequency, while the pitch response shows the trend of first increase and then decrease. Time domain analysis results: The motion track of the floating wind farm platform is symmetrical with respect to the incident direction of the wind and wave. Compared with the Barge platform, the heave motion of the first row platform connected with the fixed catenary in the floating wind farm is slightly larger, but the differences can be neglected. In addition, the pitch and cabin stability of floating wind farm platform are improved, and its intensity of the fluctuation of the platform in roll and yaw is very small. It is shown that the floating wind farm platform proposed has good stability, which lays a foundation for further research.

Key words: barge platform; floating; wind farm; stability; dynamic response

* 国家自然科学基金(51676131)、国家自然科学基金国际(地区)合作与交流(51811530315)和上海市“科技创新行动计划”地方院校能力建设(19060502200)资助项目。20200515 收到初稿, 20201026 收到修改稿

0 前言

随着我国工业化进程不断加快,能源需求日趋增长,传统化石能源已无法满足社会发展的需求^[1-2]。与其他可再生能源相比,风能因其储量大、分布广泛、技术成熟及商业化前景高等优点受到了各国广泛关注^[3-5]。较之陆上风能,海上风能资源丰富,且具有风速高、风向稳定、能量密度高、风切变小、湍流度低以及环境、生态和适宜大型化等优势,加之风力发电技术不断完善,海上风能具有极为广阔的应用前景^[6-8]。因此,“由陆向海、由浅向深、由固定基础向漂浮式平台”成为未来风电场建设的必然趋势^[9-10]。漂浮式平台是海上风力机系统获取风能的重要设备之一^[11],良好的水动力性能对风能的捕捉和漂浮式风力机的发电效率十分重要^[12-13]。

目前,国内外学者对漂浮式平台的研究主要集中于单柱式平台(Spar)、半潜式平台(Semi-submersible)以及张力腿平台(Tension leg platform, TLP),而对驳船式平台(Barge)的研究较少。其中,单柱式平台总长度过大,制造及安装较困难,且成本较高;半潜式平台浮箱尺度较大,水平方向所承受波浪力较大;张力腿平台易与波浪中高频成分发生共振,且张力筋腱造价相对较高^[14-16]。相较于上述三种漂浮式平台,驳船式平台具有较大的水线面面积,可提供足够的回复力矩,保证整个平台在多种环境载荷作用下的稳定;此外,该平台还具有结构简单、定位容易和成本较低等优点^[17],具有良好的应用和发展前景。

迄今,根据仅有的技术和经验,国内外学者对 Barge 平台的运动响应进行了一些研究。

WAYMAN^[18]运用水动力学软件 WAMIT 计算了多种海况下,风速和水深对 Barge 平台运动特性的影响;BAGBANC^[19]对 Barge 平台进行了研究,通过面元法分析了在风载荷、波浪载荷作用下平台六个自由度上的运动响应;JONKMAN^[20]研究了极限海况下 Barge 平台的水动力特性,并考虑了变桨控制对平台动态响应的影响;STEWART 等^[21]建立了基于 Barge 平台的漂浮式风力机模型,通过 FAST 对采用调频质量阻尼器(Tuned mass damper, TMD)控制的漂浮式风力机进行动态仿真分析;刘强^[22]研究了基于 Barge 平台的漂浮式风力机在不同风速和波浪条件下的气动特性和动态响应;贺尔铭等^[23]运用 FAST 程序与 AeroDyn、HydroDyn 子程序,分析

了 Barge 平台在不同工况下的水动力响应特性;陶凯^[24]研究了不同水深和不同风浪载荷对 Barge 平台运动响应特性的影响;黄致谦等^[25]建立了基于 Barge 平台的漂浮式风力机多体动力学模型,对比研究了环境载荷作用下,单个调谐质量阻尼器(Single tuned mass dampers, STMD)与多重调谐质量阻尼器(Multiple tuned mass dampers, MTMD)对漂浮式风力机稳定性的控制效果。

由此可见,目前对 Barge 平台的研究主要集中于两方面:一是动态响应特性,主要包括上部风力机子系统的气动特性和底部平台子系统的水动力特性,但通常将风载荷简化为定常推力,无法真实反映风力机运行时的载荷特性,造成漂浮式平台水动力特性求解的不精确;二是提高其稳定性,主要方法为对漂浮式风力机安装 TMD,但 TMD 质量块质量较大,增大了成本和安装难度。

国内李春教授等提出了基于 Spar 平台的漂浮式风电场^[26-27],研究对比了不同排列方式下漂浮式风电场平台的动态响应特性。但因平台阵列结构布局,在环境载荷作用下,受各平台运动影响,两侧平台势必处于受力不对称状态,产生较大运动,故平台的艏摇运动不可忽略。

本文首先建立了共用系泊系统的漂浮式风电场模型,通过 FORTRAN 编程计算考虑了平台运动影响的漂浮式风力机气动载荷,运用水动力学软件 AQWA 并结合有限元方法研究了风浪耦合作用下平台时域与频域动态响应。

1 研究对象

1.1 Barge 平台漂浮式风力机

研究对象为漂浮式风电场。风力机为 NREL 5 MW 风力机^[28],漂浮式平台为 ITI Energy Barge^[29]。风力机主要参数如表 1 所示,平台主要参数如表 2 所示。

表 1 NREL 5MW 风力机参数

参数	参数值	参数	参数值
功率/MW	5.0	塔架直径/m	3
叶片数目/片	3.0	塔架高度/m	90
风轮直径/m	126.0	风轮质量/kg	1.1×10^5
风轮转速/(r/min)	12.1	塔架质量/kg	3.5×10^5
叶尖速度/(m/s)	80.0	机舱质量/kg	2.4×10^5

表 2 ITI Energy Barge 平台参数

参数	参数值	参数	参数值
长×宽/(m×m)	40×40	系泊缆数目/根	8
吃水/m	4	导缆孔深度/锚深度/m	4/200
排水量/m ³	6×10 ³	导缆孔至平台中心线间距/m	28.28
平台总质量/kg	5.452×10 ⁶	锚至平台中心线间距/m	423.4
质心/m	-0.281 8	未张紧缆索长度/m	473.3
横摇惯量/(kg·m ²)	7.269×10 ⁸	缆索直径/m	0.080 9
纵摇惯量/(kg·m ²)	7.269×10 ⁸	缆索质量/(kg/m)	130.4
艏摇惯量/(kg·m ²)	1.454×10 ⁹	缆索拉伸刚度/MN	589

1.2 3×3 阵列漂浮式风电场

3×3 阵列漂浮式风电场风力机前后、左右间距均为 500 m。以 Barge 平台为基础的单平台漂浮式风力机及漂浮式风电场模型分别如图 1、2 所示。

图 1 漂浮式风力机模型

图 2 漂浮式风电场平台阵列(3×3)

漂浮式风电场平台阵列之间采用系泊连接，系泊系统由两部分组成：固定悬链线和链接悬链线，具体参数如表 3 所示，漂浮式风电场系泊系统如图 3 所示。

表 3 漂浮式风电场平台系泊系统参数

参数	链接悬链线	固定悬链线
质量/(kg/m)	180.00	250.00
等效截面积/m ²	0.01	0.08
最大张力/MN	7.50	7.50
轴向刚度/(MN/m)	589.00	589.00

图 3 漂浮式风电场系泊系统俯视图

根据漂浮式风电场平台阵列特点，系泊系统采用对称方式布置，图 4 为漂浮式风电场系泊系统水下示意图。

图 4 漂浮式风电场系泊系统水下示意图

2 环境载荷

2.1 风载荷

现阶段，获取风力机气动性能的方法有：涡尾迹方法、基于求解 N-S 方程的 CFD 方法及叶素动量理论^[30]。较之于涡尾迹方法和 CFD 方法，叶素动量理论虽具有一定局限性，但国内外学者已经发展了较为丰富的修正处理方法，且其模型简洁直观、计算快速，故气动载荷的求解采用叶素动量理论。其中，相对速度、作用在风轮上的推力和扭矩可按式(1)~(3)进行计算^[31]。

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

式中， V_r 为叶片单元的气流相对速度； U_r 为来流风速； a 为轴向诱导因子； a' 为切向诱导因子； r 为叶片单元的展向半径。

$$T = \int_{R_H}^R 0.5 \rho V_r^2 (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) B c dr \quad (2)$$

$$Q = \int_{R_H}^R 0.5 \rho V_r^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) B c dr \quad (3)$$

式中， T 为风轮所受轴向推力； Q 为作用于风轮上的扭矩； ρ 为空气密度； C_L 为升力系数； C_D 为阻力系数； φ 为入流角； R_H 为轮毂半径； R 为叶片半径； B 为叶片数目； c 为弦长。

为求解风轮扭矩和推力, 需要计算出轴向诱导因子和切向诱导因子。轴向诱导因子 a 、切向诱导因子 a' 可按式(7)和式(8)计算, a 、 a' 、 T 、 Q 求解流程如图 5 所示。

$$C_x = C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi \quad (4)$$

$$C_y = C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi \quad (5)$$

式中, C_x 为轴向气动力系数; C_y 为切向气动力系数。

$$\sigma_r = Nc / 2\pi\mu R \quad (6)$$

$$a(1-a)^{-1} = 0.25\sigma_r \sin^{-2} \phi (C_x - 0.25\sigma_r C_y^2 \sin^{-2} \phi) \quad (7)$$

$$a'(1+a')^{-1} = 0.25\sigma_r C_y \sin^{-1} \phi \cos^{-1} \phi \quad (8)$$

式中, σ_r 为叶片弦长实度。

图 5 气动载荷求解

2.2 波浪载荷

目前, 浮体波浪载荷的计算方法主要有两种: Morison 方程^[32]及其修正方法、基于辐射/绕射理论^[33]。Barge 平台属大尺寸结构, 其存在对入射波场的作用效果不可忽视, 绕射问题不能忽略, 故采用辐射/绕射理论。其假定为理想流体, 故将整个流域内的流体视为不可压、无旋、无黏, 范围为浮体湿表面、波浪自由表面和海底表面构成的半无限大空间^[34]。在波浪作用下流场中的速度势函数可按式(9)计算

$$\Phi = \Phi_i + \Phi_D + \sum_{j=1}^6 \Phi_R \quad (9)$$

式中, Φ_i 为入射势; Φ_D 为绕射势; Φ_R 为辐射势。

总的速度势 $\Phi(x, y, z)$ 在整个波浪场中满足拉普拉斯方程和对应的边界条件

$$\partial^2 \Phi / \partial x^2 + \partial^2 \Phi / \partial y^2 + \partial^2 \Phi / \partial z^2 = 0 \quad (10)$$

$$\partial \Phi / \partial z = 0 \quad (11)$$

$$g \partial \Phi / \partial z + \partial^2 \Phi / \partial t^2 = 0 \quad (12)$$

$$\partial \Phi / \partial z = \partial \eta / \partial t + (\partial \eta / \partial x) \cdot (\partial \Phi / \partial x) + (\partial \eta / \partial y) \cdot (\partial \Phi / \partial y) \quad (13)$$

$$\partial \Phi / \partial n = 0 \quad (14)$$

式中, g 为重力加速度; t 为时间节点; n 为垂直于结构边界的向外单位矢量。

3 控制方程及运动自由度

漂浮式风力机在环境载荷联合作用下, 其运动方程为

$$[M(s) + M(a) + M_{WT}] \ddot{x} + [C(s) + C_{WT}] \dot{x} + [K(s) + K_{WT} + K_m] x = F \quad (15)$$

式中, $M(s)$ 为平台结构质量矩阵; $M(a)$ 为附加质量矩阵; M_{WT} 为风力机质量矩阵; $C(s)$ 为平台结构阻尼矩阵; C_{WT} 为风力机阻尼矩阵; $K(s)$ 为平台结构刚度矩阵; K_{WT} 为风力机刚度矩阵; K_m 为系泊系统刚度矩阵; F 为作用在浮体上的波浪力; $\ddot{x}$ 、 $\dot{x}$ 和 x 分别表示浮体的加速度矢量、速度矢量和位置矢量。

风浪载荷作用下, Barge 平台在海上的运动包括: 沿纵荡(Surge)、横荡(Sway)及垂荡(Heave)方向的平动和沿横摇(Roll)、纵摇(Pitch)及艏摇(Yaw)方向的转动。平台六个自由度上的运动如图 6 所示。

图 6 平台六自由度运动

波浪载荷作用下, Barge 平台在六个自由度的运动响应可由幅值响应算子(Response amplitude operator, RAO)表示, 其为波浪激励到平台各位置参数的传递函数^[35], 即

$$RAO = \eta_i / \xi \quad (16)$$

式中, η_i 为平台第 i 个自由度的运动幅值; ξ 为某

一频率波浪高度的幅值。

4 海况参数

南海海域辽阔, 西沙、南沙和东沙诸岛蕴藏着丰富的风能资源, 加之海况条件较好及风电技术的日益成熟, 对南海海域风能的开发利用具有良好的前景^[36]。故本文选取南海 S4 海域普通海况^[37], 考虑风、浪同时同向入射, 入射角为 -180° , 风速为 11.4 m/s , 风谱采用 Kaimal 风谱, 波浪为基于 P-M 谱生成的不规则波, 有义波高为 3 m , 跨零周期为 7 s 。图 7 为轮毂高度处风速分布示意图, 图 8 为不规则波时程曲线。

图 7 轮毂高度处风速分布

图 8 不规则波时程曲线

5 准确性验证

5.1 气动载荷及准确性验证

为验证程序计算气动载荷的可靠性, 求解 NERL 5 MW 风力机在不同风速下的气动特性, 将计算结果与 FAST 软件计算值进行比较, 比较结果如图 9 所示。由图 9 可知, 随风速逐渐增加, 风轮推力先增大后减小, 在风速约为 11.4 m/s 时风轮推力达到最大值, 约为 780 kN 。本文计算程序与 FAST 计算结果存在一定误差, 但总体吻合度较好, 可验

证本文气动载荷求解程序的准确性。

图 9 风轮推力计算值对比

5.2 网格划分及水动力计算准确性验证

在环境载荷作用下, Barge 平台在海面上的运动包括一阶波浪力引起的高频运动和风、二阶波浪力以及海流引起的低频运动^[38]。其中, 二阶波浪力分为平均漂移力和慢漂力, 二者主要使 Barge 平台位置发生改变。为验证网格划分是否满足水动力计算精度需求, 通常采用 Haskind 关系进行校验。此外还可以通过对比近场法与远场法二阶波浪力的计算结果对模型网格精度进行判断: 近场法基于网格划分, 通过湿表面积分的方法求解二阶定常力; 远场法不依赖于面元, 通过动量定理求解二阶波浪力, 计算精度较高。当近场法与远场法计算结果趋势相同且相差不大时, 可以近似认为网格划分满足水动力计算需求^[39]。由于 AQWA 不存在 Haskind 关系验证, 故通过对比近场法、远场法求解的纵荡二阶平均漂移力计算结果来验证网格划分是否满足计算精度需求。基于 Barge 平台的漂浮式风力机网格离散如图 10 所示。

图 10 基于 Barge 平台的漂浮式风力机网格离散

水线面以上部分最大单元尺寸为 1.5 m , 水线面以下绕射单元进行加密, 最大单元尺寸为 1 m 。网格总数约为 $4\ 000$, 绕射单元约为 $2\ 000$ 。采用近场法、远场法求解 Barge 平台纵荡二阶平均漂移力,

如图 11 所示。由图 11 可知, 近场法、远场法求解纵荡二阶平均漂移力计算结果虽有差异, 但趋势大致相同, 故可近似认为网格划分满足水动力计算精度需求。

图 11 纵荡二阶平均漂移力

6 结果与分析

6.1 频域分析

海洋环境中, 漂浮式风力机沿坐标轴呈往复运动。图 12 为 Barge 平台幅值响应算子随波浪频率变化曲线图。

图 12 平台频域运动响应

由图 12 可知, 在波浪载荷作用下, Barge 平台在纵荡、垂荡以及纵摇方向上的 RAO 随频率变化发生改变, 且存在峰值频率。在纵荡方向上, 平台

动态响应随波浪频率增加逐渐减小, 最后趋向于零, 响应主要集中在低频区域($f < 1.00$ rad/s); 在垂荡方向上, 当 $0 < f \leq 0.75$ rad/s 时, RAO 随波浪频率增加几乎不变; 当 $0.75 < f \leq 1.50$ rad/s 时, RAO 随波浪频率增加逐渐减小; 当 $1.50 < f \leq 2.00$ rad/s 时, RAO 近似为零, 且随波浪频率改变几乎不发生变化; 在纵摇方向上, Barge 平台转动幅值随波浪频率增加先增大后减小, 最后趋向于零, 响应主要集中在 $0.50 \sim 1.50$ rad/s 的频率范围内, 峰值频率约为 1.00 rad/s, 产生峰值的原因是 Barge 平台与波浪发生共振所致。

6.2 时域分析

6.2.1 xOy 运动轨迹

在役状态下, 漂浮式平台将始终受到环境载荷的作用, 其最直观的动态响应是沿 x 轴、 y 轴和 z 轴的平动以及绕各轴的转动。图 13 为漂浮式风电场平台时域运动轨迹图。

由图 13 可知, 较之于漂浮式风电场平台, Barge 平台运动响应相对较小。对于 Barge 平台, 横荡方向几乎无运动响应, 而纵荡方向上响应幅值约为 50 m。这主要是因为系泊系统关于风浪入射方向(即 x 轴)对称, 沿 y 轴方向分布的系泊产生大小相等、方向相反的回弹力, 使 Barge 平台在 y 轴方向所受到的合力始终为 0 。对于漂浮式风电场平台, 第一, 横荡方向上, 位于中线处的平台 P_1 、 P_2 和 P_3 几乎无运动响应, 而两侧平台(P_4 、 P_5 、 P_6 和 P_7 、 P_8 、 P_9)则有一定的运动幅值。这主要是因为 P_1 、 P_2 和 P_3 系泊系统均为链接悬链线且关于 x 轴对称, 其 y 方向处于受力平衡状态, 故几乎无横荡运动。而位于两侧的平台, 其系泊系统由链接悬链线和固定悬链线两部分组成, 初始时刻平台系泊系统提供的回复力水平方向上的分量大小相等、方向相反, 处于受力平衡状态; 但在风浪载荷作用下, 平台偏离初始位置, 位移导致与其相连的悬链线发生运动, 固定悬链线的躺地长度随之改变, 其对平台产生的回复力大小处于动态变化状态; 系泊系统所提供的回复力水平方向上的分力与悬链线和平台之间的夹角有关, 链接悬链线虽自重保持不变, 但平台之间的相对运动会导致链接悬链线与平台水平方向上的夹角处于动态变化状态, 这将引起固定悬链线与链接悬链线提供水平方向上的分力大小不等, 产生横荡运动。第二, 横荡方向上, 平台 P_5 、 P_8 运动幅度约为 2 m, 平台 P_4 、 P_7 运动幅度约为 5 m, 平台 P_6 、 P_9 运动幅度约为 6 m。相对于风浪入射方向, 漂浮式风电场平台越靠近左侧固定悬链线, 其横荡运动幅值相对

越小, 越远离左侧固定悬链线, 其运动幅值越大。故由此可推测, 若采用 4×4 阵列排布方法建立漂浮式风电场, 第四列平台运动幅值将会更大。第三,

由图 13 可知, 平台 P_4 、 P_5 、 P_6 与平台 P_7 、 P_8 、 P_9 运动轨迹完全关于 x 轴对称, 这可能是因为漂浮式风电场对称布置引起受力对称造成的。

图 13 漂浮式风电场平台运动轨迹

6.2.2 纵荡运动响应

纵荡方向上, Barge 平台的运动响应由风载荷引起的低频运动和波浪载荷引起的波频运动组成。其中, 低频运动代表着平均平衡位置的漂移, 波频运动代表着平均平衡位置处的往复运动。图 13 虽可以看出漂浮式风电场平台的运动轨迹, 但却无法了解到其时域运动特性。为此, 本文分析了漂浮式风电场平台纵荡运动响应。由上述分析可知, 位于上下侧的平台运动轨迹关于 x 轴完全对称, 故仅分析中线处及下侧平台的时频域响应特性。纵荡响应时频特性曲线如图 14 所示。

由图 14 可得, 第一, 沿风浪入射方向, 漂浮式风电场平台纵荡方向上低频范围的运动响应随平台与迎风浪侧固定悬链线距离的增大逐渐加剧, 而对波频运动的影响不大。故漂浮式风电场平台纵荡运动响应主要集中在低频区域。由于系泊系统对漂浮式风电场平台运动响应的影响主要集中在低频处, 链接悬链线加剧了漂浮式风电场平台纵荡方向上的低频响应, 且越远离迎风浪侧, 链接悬链线越多, 其对漂浮式风电场平台纵荡方

向上低频区域运动响应的影响起到了叠加效果, 这是远离迎风浪侧平台低频区域运动响应逐渐加剧的原因, 也是其纵荡方向位移幅值越大的原因。第二, 对于平台纵荡响应平均波动平衡位置, 第二列平台 P_1 、 P_4 大于第三列平台 P_3 、 P_6 , 这可能是因为第二列平台的波频运动减小了第三列平台的运动响应。故由此可推测, 若采用 4×4 阵列排布方法建立漂浮式风电场, 第四列平台纵荡方向运动平均波动平衡位置比第三列更小。第三, 对于平台纵荡响应初始最大漂移位置和平均平衡位置, 位于中线处平台 P_1 、 P_2 和 P_3 略大于位于两侧的平台。这主要是因为位于两侧的平台, 其系泊系统提供的纵荡方向上的分力不仅由左侧固定悬链线提供, 还由上下两侧链接悬链线提供。而上下两侧悬链线所提供的纵荡方向上的分力传递到中线处平台需要经过上下两侧平台, 故中线处平台会产生相对于两侧平台更大的纵荡响应。因此, 当漂浮式风电场平台及其系泊系统对称布置时, 位于中线处的平台纵荡平均位置最大。若采用 4×4 阵列排布方法建立漂浮式风电场, 越靠近

中线处, 平台纵荡位移越大。为抑制中线附近平台纵荡运动响应, 可在原系泊系统的基础上, 对

其添加额外的固定悬链线, 以提高漂浮式风电场平台整体纵荡的稳定性。

图 14 漂浮式风电场平台纵荡响应时频特性曲线

6.2.3 垂荡、纵摇及机舱振动加速度

除纵荡、横荡响应外, 垂荡、纵摇方向上的运动响应对漂浮式风力机发电效率的影响亦不可忽略, 漂浮式风电场平台动态响应统计值如表 4 所示。此外, 机舱内部具有精密的传动系统, 机舱振动幅

度过大不仅直接降低风电机组的发电效率, 而且严重影响其使用寿命, 故研究漂浮式风电场平台机舱振动加速度是极其必要的。漂浮式风电场平台动态响应统计值如图 15 所示。

表 4 漂浮式风电场平台动态响应统计值

		Barge 平台	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉
垂荡/m	最大值	1.960	1.899	1.915	1.845	1.888	2.096	1.686	1.888	2.096	1.686
	最小值	-2.230	-2.019	-2.443	-2.010	-2.286	-2.539	-2.086	-2.286	-2.539	-2.086
纵摇/(°)	最大值	8.010	6.264	6.690	6.382	5.835	6.275	5.602	5.835	6.275	5.603
	最小值	-8.753	-7.309	-7.397	-7.021	-7.537	-7.556	-6.633	-7.537	-7.556	-6.637
机舱振动加速度/(m/s ²)	最大值	9.630	6.704	7.505	7.325	6.881	6.847	5.715	6.880	6.847	5.715
	最小值	-11.853	-10.190	-10.541	-9.163	-9.585	-9.378	-7.739	-9.585	-9.379	-7.740

图 15 漂浮式风电场平台动态响应统计值

由表 4 和图 15 可得, 第一, 在垂荡方向上, 对于 Barge 平台, 运动幅值约为 4.2 m; 对于漂浮式风电场平台, 第一列平台 P₂、P₅、P₈ 运动幅值约为 4.358 m、4.635 m、4.635 m, 略大于 Barge 平台, 但差别几乎可以忽略不计。第二列平台 P₁、P₄、P₇ 运动幅度约为 3.919 m、4.174 m、4.174 m, 略小于 Barge 平台。第三列平台 P₃、P₆、P₉ 运动幅度约为 3.855 m、3.772 m、3.772 m, 小于 Barge 平台。故在漂浮式风电场中, 越远离迎风浪侧固定悬链线, 平台垂荡运动幅值越小。由垂荡标准差可知, 虽然第一列平台 P₂、P₅、P₈ 和第二列平台 P₄、P₇ 略大于 Barge 平台, 但其之间的差值可以忽略不计, 加之其他平台标准差均小于 Barge 平台, 故漂浮式风电场平台在垂荡方向上的稳定性优于 Barge 平台。第二, 在纵摇方向上, 对于 Barge 平台, 运动幅值约为 16.80°。对于漂浮式风电场平台, 第一列平台最大运动幅值约为 14.10°, 第二列平台最大运动幅值约为 13.57°, 第三列平台最大运动幅值约为 13.40°。较之于 Barge 平台, 其稳定性分别提高了 16.07%、19.04%、20.24%。故与 Barge 平台相比, 漂浮式风电场平台在纵摇方向上的稳定性已得到极大提高, 且越远离迎风浪侧固定悬链线, 平台纵摇稳定性提升越大。第三, 对于机舱振动加速度波动幅度, Barge 平台最大约为 21.48 m/s², 漂浮式风电场平台最大约为 18.04 m/s²。较之于 Barge 平台, 漂浮式风电场平台机舱稳定性已经提高了 16.01%。由机舱振动加速度标准差可知, 漂浮式风电场平台第一列最大值为 2.43 m/s², 第二列最大值为 2.25 m/s², 第三列最大值为 2.15 m/s², 相较于 Barge 平台 2.71 m/s² 的标准差, 其分别下降了 10.33%、16.97%、20.66%。故较之于 Barge 平台, 漂浮式风电场平台机舱的稳定性已得到极大提高, 且越远离迎风浪侧固定悬链线,

平台机舱稳定性越好。

综上, 若采用 4×4 阵列排布方法建立漂浮式风电场, 第四列平台在垂荡、纵摇方向上的运动响应将小于第三列平台, 且其机舱的稳定性将更好。

6.2.4 横摇、艏摇运动响应

风浪载荷作用下, 漂浮式风电场位于两侧的平台由于沿 y 轴方向布置的系泊提供的水平分力无法始终保证大小相等、方向相反, 竖向分力无法保证大小时刻相等, 故产生了横荡和横摇运动, 此外, 两侧平台在纵荡方向上的回复力除了由沿 x 轴方向布置的系泊提供, 上下两侧系泊提供的回复力在 x 轴方向的水平分量亦提供了部分。因此, 平台上下两侧所产生的回复力无法时刻相等、所导致的扭转力矩无法时刻抵消, 故平台将产生艏摇运动。图 16 为漂浮式风电场平台横摇、艏摇时历曲线。

由图 16 可知, 第一, 在横摇和艏摇方向上, 位于中线处的平台 P₁、P₂、P₃ 运动响应始终为 0°, 这是因为平台 P₁、P₂、P₃ 在 y 轴方向上的系泊均为链接悬链线且关于中心线对称, 故平台在 y 轴方向上所受到的合力为 0, 因此其无运动响应; 位于上侧的平台 P₇、P₈、P₉ 与位于下侧的平台 P₄、P₅、P₆ 横摇、艏摇的时历曲线关于 x 轴对称, 这是因为上下两侧平台受力对称引起的。第二, 在横摇方向上, 平台 P₄、P₅、P₆ 动态响应在 0° 左右波动, 最大运动幅值分别约为 1.03°、1.05°、1.00°, 表现出了良好的稳定性, 且越远离迎风浪侧, 平台横摇波动幅度越小。第三, 在艏摇方向上, 位于两侧的平台最大波动幅度为 1.67°, 但艏摇波动平衡位置不在 0° 附近, 这是因为平台上下侧悬链线提供的回复力沿 x 轴方向上的分量大小不相等。以平台 P₅ 为例, 其艏摇波动平衡位置在 0° 以下, 这是因为平台上

侧链接悬链线沿 x 轴方向所产生的水平分力小于平台下侧固定悬链线所提供的水平方向上的分力。而

平台 P_4 、 P_6 艏摇波动平衡位置在 -0.75° 左右,这是由于平台的纵荡位移逐渐加剧了扭转力矩。

图 16 漂浮式风电场平台横摇、首摇时历曲线

综上,漂浮式风电场平台在横摇、艏摇方向上虽具有一定的动态响应,但其值甚小,可以忽略不计。故漂浮式风电场平台在横摇、艏摇方向上具有良好的稳定性。

6.3 系泊系统安全性分析

漂浮式平台的稳定是风力机平稳运行的基础,而系泊系统的安全是其稳定的根本保障。较之与 Barge 平台,漂浮式风电场平台系泊系统更为复杂。因此,验证漂浮式风电场平台系泊系统的安全可靠就显得尤为重要。由于风浪入射方向为 -180° ,故漂浮式风电场迎风浪侧系泊张力最大。对于固定悬链线,左侧系泊张力最大;对于链接悬链线,左右布置的系泊张力最大,上下布置的系泊张力较小。因为漂浮式风电场平台关于风浪入射方向对称布

置,故只对左侧固定悬链线 1 号、2 号、3 号和左右布置的链接悬链线 4 号、5 号、6 号、7 号、8 号、9 号进行分析。表 5 为漂浮式风电场系泊张力统计值,图 17 为漂浮式风电场系泊张力时历曲线。

表 5 漂浮式风电场系泊张力统计值

系泊编号	最大值/N	平均值/N	安全系数
1 号	2 446 358	1 302 957	3.07
2 号	2 262 299	1 263 494	3.32
3 号	2 301 457	1 260 701	3.26
4 号	1 396 958	874 744	5.37
5 号	1 265 672	844 883	5.93
6 号	1 287 157	844 858	5.83
7 号	876 589	626 237	8.56
8 号	830 147	620 652	9.03
9 号	825 264	620 674	9.09

图 17 漂浮式风电场系泊张力时历曲线

由表 5 和图 17 可知,第一,1 号、2 号、3 号系泊张力最大,4 号、5 号、6 号系泊张力次之,7 号、8 号、9 号系泊张力最小。故沿风浪入射方向,平台系泊张力逐渐减小。第二,位于中线处的悬链线(1 号、4 号、7 号)系泊张力均大于外侧,这是因

为中线处的平台 P_1 、 P_2 、 P_3 在纵荡方向上有较大的位移,使位于左侧的固定悬链线(1 号、2 号、3 号)躺地长度减小,造成系泊张力较大。第三,漂浮式风电场平台越远离迎风浪侧,悬链线系泊安全系数越大,系泊系统安全系数最小值虽为 3.07,但大于

2.50, 满足 CCS 对普通海况下系泊系统安全系数的最低要求, 故漂浮式风电场系泊系统安全可靠。

7 结论

本文建立了共用系泊系统的漂浮式风电场模型, 基于辐射/绕射理论并结合有限元法, 考虑风浪耦合作用研究了其在普通海况下的时频响应特性, 得出如下结论。

(1) Barge 平台频域动态响应主要集中在低频区域。其中, 纵摇响应峰值频率约为 1.00 rad/s。

(2) 漂浮式风电场中位于两侧的平台运动轨迹关于风浪入射方向(即 x 轴)对称。其中, 纵荡方向上的动态响应主要集中在低频区域。随着与迎风浪侧平台距离的增加, 漂浮式风电场平台在纵荡、垂荡以及纵摇方向上的动态响应逐渐减小, 且其机舱稳定性逐渐提高。较之于 Barge 平台, 漂浮式风电场平台 P_2 、 P_5 及 P_8 在垂荡方向上动态响应稍大, 但差值可以忽略不计, 且其纵摇方向上的稳定性最小提升了 16.10%, 机舱稳定性最小提升了 10.33%, 表现出良好的稳定性。

(3) 漂浮式风电场平台虽具有一定的横摇和艏摇运动, 但其最大运动幅值分别为 1.05° 、 1.67° , 可以忽略不计。

(4) 在系泊系统安全方面, 漂浮式风电场平台悬链线系泊张力安全系数均大于 CCS 对普通海况下系泊系统安全系数的最低要求。

参 考 文 献

- [1] CHENG Ping, HUANG Yang, WAN Decheng. A numerical model for fully coupled aero-hydrodynamic analysis of floating offshore wind turbine[J]. Ocean Engineering, 2019, 173: 183-196.
- [2] 贺尔铭, 熊波, 杨佳佳. 基于 TMD-HMD 的海上浮式风力机主被动综合振动控制[J]. 机械工程学报, 2020, 56(3): 73-79.
- HE Erming, XIONG Bo, YANG Jiajia. Study on active-passive integrated vibration control of offshore floating wind turbine based on TMD-HMD[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(3): 73-79.
- [3] JAHANGIRI V, SUN C. Integrated bi-directional vibration control and energy harvesting of monopile offshore wind turbines[J]. Ocean Engineering, 2019, 178: 260-269.
- [4] 张立军, 赵昕辉, 王早祥, 等. H 型垂直轴风力机实时高效攻角调节方法研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(10): 173-181.
- ZHANG Lijun, ZHAO Xinhui, WANG Hanxiang, et al. Study on the real time and efficient adjustment law for H-type vertical axis wind turbine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(10): 173-181.
- [5] NAM W, OH K Y, EPUREANU B I. Evolution of the dynamic response and its effects on the serviceability of offshore wind turbines with stochastic loads and soil degradation[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2019, 184: 151-163.
- [6] 许子非, 叶柯华, 李春, 等. 海冰作用下锥体结构对近海桩柱式风力机结构动态响应影响[J]. 振动与冲击, 2018, 37(22): 225-230, 254.
- XU Zifei, YE Kehua, LI Chun, et al. Influences of the cone structure of a monopile offshore wind turbine on its dynamic responses under ice loading condition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(22): 225-230, 254.
- [7] 杨阳, 李春, 张万福, 等. 抗震风力机结构设计载荷需求研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 204-211.
- YANG Yang, LI Chun, ZHANG Wanfu, et al. Research on loading demands of structure design for aseismatic wind turbines[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 204-211.
- [8] HOU Peng, HU Weihao, CHEN Cong, et al. Optimization of offshore wind farm layout in restricted zones[J]. Energy, 2016, 113: 487-496.
- [9] 穆安乐, 张广兴, 李迺璐, 等. 基于分布式襟翼风力机桨叶的模型预测振动控制[J]. 振动与冲击, 2018, 37(14): 79-85.
- MU Anle, ZHANG Guangxing, LI Nailu, et al. Model predictive flow control of wind turbine blades based on distributed flaps[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(14): 79-85.
- [10] LIU Lin, WANG Kai, VASSALOS D. Detecting wake performance of floating offshore wind turbine[J]. Ocean Engineering, 2018, 156: 263-276.
- [11] 黄致谦, 丁勤卫, 李春, 等. 新型漂浮式风力机半潜平台抑制摇荡运动设计研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7295-7303.
- HUANG Zhiqian, DING Qinwei, LI Chun, et al. Design and research on suppression swaying motion of the new semi-submersible platform of floating wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7295-7303.
- [12] HU Yinlong, WANG Jianing, CHEN M Z Q, et al. Load

- mitigation for a barge-type floating offshore wind turbine via inerter-based passive structural control[J]. *Engineering Structures*, 2018, 177: 198-209.
- [13] 金鑫, 钟翔, 何玉林, 等. 漂浮特性对风力发电机振动影响[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(15): 26-31.
- JIN Xin, ZHONG Xiang, HE Yulin, et al. Floating characteristics' impact on vibration of wind turbine[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(15): 26-31.
- [14] 王家星. 多柱 Spar 型浮式风机平台设计及其动力响应分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- WANG Jiaxing. Design and dynamic response analysis of multi-column Spar type floating wind turbine platform[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [15] 王宁. 海上浮式风力机平台总体性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- WANG Ning. Performance analysis of the offshore floating turbine foundation[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [16] 叶小嵘. 海上浮式风力机系统环境载荷及耦合运动性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- YE Xiaorong. Study on environmental loads and coupled motion response of floating offshore wind turbine system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [17] 葛沛. 海上浮式风力机平台选型与结构设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- GE Pei. Study on the structural design and selection of floating foundation of offshore wind turbine[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [18] WAYMAN E N. Coupled dynamics and economic analysis of floating wind turbine systems[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [19] BAGBANCİ H. Dynamic analysis of offshore floating wind turbines[D]. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2011.
- [20] JONKMAN J M. Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine[R]. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2007.
- [21] STEWART G, LACKNER M. Determining optimal tuned mass damper parameters for offshore wind turbines using a genetic algorithm[C]// 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, January 9-12, 2012, Nashville, Tennessee. Reston: AIAA, 2012: 1-22.
- [22] 刘强. 漂浮式风力机动态响应及气动特性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- LIU Qiang. Dynamic Response and aerodynamic characteristics of floating wind turbines[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [23] 贺尔铭, 张扬, 胡亚琪. 3 种典型海上浮式风力机动力学特性比较分析[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(12): 2874-2881.
- HE Erming, ZHANG Yang, HU Yaqi. Comparison and analysis of dynamic characteristics of three typical floating wind turbines[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2015, 36(12): 2874-2881.
- [24] 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.
- [25] 黄致谦, 周蕊, 丁勤卫, 等. 基于 MTMD 的 Barge 型漂浮式风力机稳定性控制研究[J]. *热能动力工程*, 2018, 33(6): 130-136.
- HUANG Zhiqian, ZHOU Rui, DING Qinwei, et al. Study of the control over the stability of a barge type floating wind turbine based on the multiple tuned mass dampers (MTMD)[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2018, 33(6): 130-136.
- [26] 丁勤卫, 李春, 叶柯华, 等. 浮式风力机多平台阵列的动态响应[J]. *动力工程学报*, 2017, 37(9): 744-750.
- DING Qinwei, LI Chun, YE Kehua, et al. Dynamic response of multi-platform array of floating wind turbine[J]. *Journal of Power Engineering*, 2017, 37(9): 744-750.
- [27] 丁勤卫, 李春, 叶柯华, 等. 风波浪对多平台阵列浮式风机 Spar 平台运动特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(21): 223-229.
- DING Qinwei, LI Chun, YE Kehua, et al. Effect of wind wave and current on motion characteristics of Spar platform of multi-platform array floating wind turbine[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2016, 32(21): 223-229.
- [28] JONKMAN J M. Dynamics of offshore floating wind turbines-model development and verification[J]. *Wind Energy*, 2009, 12(5): 459-492.
- [29] ROBERTSON A N, JONKMAN J M. Loads analysis of several offshore floating wind turbine concepts[C]// 21th International offshore and Polar Engineering Conference. International Society of offshore and Polar Engineers, Hawaii, 2011.
- [30] 王渊博, 李春, 缪维跑, 等. 基于全风场功率输出的风

- 力机控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4437-4445, 4585.
- WANG Yuanbo, LI Chun, MIAO Weipao, et al. Research on the control strategies of the wind turbine based on the total output powers of the global wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4437-4445, 4585.
- [31] MORIARTY P J, COLORADO G, CRAIG HANSEN A. AeroDyn theory manual[R]. Colorado : National Renewable Energy Laboratory, 2010.
- [32] MORISON J R, BRIEN M P, JOHNSON J W, et al. The force exerted by surface wave on piles[J]. Petroleum Transactions AIME , 1950 , 2(5) : 149-154.
- [33] 陶建华. 水波的数值模拟[M]. 天津: 天津大学出版社, 2005.
- TAO Jianhua. Numerical simulation of water waves[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2005.
- [34] 董艳秋. 深海采油平台波浪载荷及响应[M]. 天津: 天津大学出版社, 2005.
- DONG Yanqiu. Wave loads and response of the oil-extraction platform in deep ocean[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2005.
- [35] 黄致谦, 丁勤卫, 李春. 新型垂荡板对漂浮式风力机半潜式平台垂荡运动的抑制效果研究[J]. 动力工程学报, 2019, 39(5): 402-408.
- HUANG Zhiqian, DING Qinwei, LI Chun. Research on heave Motion inhibition for the semi-submersible platform of floating wind turbines with new heave plates[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(5): 402-408.
- [36] 湛玲. 南海海岛风资源评估及五十年一遇最大风速的风机选型[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
- CHEN Ling. Wind resource assessment and the extreme wind of 50-year turbine selection in South islands[D]. Changsha : Changsha University of Science and Technology, 2014.
- [37] 姚宇鑫. 新概念沙漏型 FDPSO 主浮体和系泊系统设计方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- YAO Yuxin. Design and analysis on mooring system of an innovative sandglass-type FDPSO[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [38] 贝尔纳·莫林. 海洋工程水动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- MORIN B. Hydrodynamique des structures offshore[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [39] 高巍. ANSYS AQWA 软件入门与提高[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- GAO Wei. Introduction and improvement of ANSYS AQWA software[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2018.
-
- 作者简介:** 王博, 男, 1996年出生。主要研究方向为漂浮式风力机动态响应及结构动力学响应。
E-mail: 980945466@qq.com
- 李春(通信作者), 男, 1963年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为动力机械及流体机械优化设计、风能利用。
E-mail: lichunusst@163.com