

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2024.06.011

不同运动自由度对浮式风机气动性能影响研究

李 敏¹, 王金光², 赵伟文¹, 万德成^{1*}

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 船海计算水动力学研究中心(CMHL), 上海 200240, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn;
2. 中南勘测设计研究院有限公司, 长沙 410027)

摘 要: 随着海上风电产业的快速发展, 海上风机的发展方向逐渐趋于大型化。同时, 海上环境复杂多变, 剧烈的风浪流耦合条件会对风机气动性能产生较大影响, 使得大型浮式风机气动性能的研究尤为重要。该文以某款 17 MW 浮式风机为研究对象, 基于课题组自主开发求解器 FEWT-SJTU 数值研究了风浪联合作用下浮式风机的气动性能, 对比分析了不同平台运动自由度对气动性能的影响。研究结果表明: 风机气动性能受纵荡运动和纵摇运动影响严重, 除纵荡、纵摇外的其他 4 个自由度运动可有效减弱叶根切向弯矩的波动幅度; 纵荡运动和纵摇运动影响气动性能的本质区别导致单纵荡条件和其他条件的气动功率和气动推力输出在相位上存在差异。该文为大型浮式风机的设计与开发提供了关键技术支撑。

关 键 词: 浮式风机; 气动性能; 计算流体力学; FEWT-SJTU

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

Impact of Different Degrees of Freedom on Aerodynamic Performance of Floating Wind Turbines

Li Min¹, Wang Jinguang², Zhao Weiwen¹, Wan Decheng^{1*}

(1. Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410027, China)

Abstract: With the rapid development of the offshore wind power industry, offshore wind turbines are gradually being developed on a larger scale. However, the offshore environment is characterized by complexity and variability, and the significant impact of intense wind wave and current coupling conditions on wind turbine aerodynamic performance underscores the importance of research in this area, especially for large-scale floating wind turbines. In this study, a 17 MW floating wind turbine is investigated, and its aerodynamic performance under the combined effects of wind and waves is numerically analyzed using the FEWT-SJTU solver developed by the research group. Furthermore, a comparative analysis is conducted to examine the influence of different degrees of freedom in platform motion on aerodynamic performance. The analysis results indicate that the aerodynamic performance of the wind turbine is significantly affected by surge and pitch motions. Besides surge and pitch, the other four degrees of freedom can effectively reduce the amplitude of fluctuations in the blade root tangential bending moment. The fundamental differences in the impact of surge and pitch on aerodynamic performance led to phase differences in aerodynamic power and thrust output between single surge conditions and other conditions. This study provides crucial technical support for the design and development of large-scale floating wind turbines.

Key words: Floating wind turbine; Aerodynamic performance; Computational fluid dynamics; FEWT-SJTU

0 引 言

随着现代社会的飞速发展, 新能源替代化石能源的趋势日益明显, 其中海上风电技术的发展尤为

迅猛^[1]。由于深海环境复杂多变, 海上浮式风机会在深海中遭受剧烈运动, 这不仅会影响到风机的结构安全性, 还会直接影响到风机的气动载荷。风、海浪和海流等动力学因素会导致平台运动, 这种运动会直接影响到风机的稳定性和效率。浮式风机的系泊系统承受风力机在运行过程中产生的动态载荷, 而风机的运动响应、气动性能和系泊系统之间

收稿日期: 2024-09-07 修改稿收到日期: 2024-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(52131102)

作者简介: 李敏(2002—), 女, 博士研究生。

会形成复杂的相互干扰效应^[2]。解耦复杂的自由度, 是理解和优化浮式风机设计与操作的关键挑战之一。只有深入分析和理解这些相互作用, 才能制定出有效的设计和操作策略, 以确保浮式风机在恶劣海洋环境下的可靠性和经济性。

大型风力机气动性能的数值计算方法主要有: 叶素动量理论方法、涡尾迹方法和计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法^[3]。叶素动量理论的主要优点在于计算效率高、易于实现且适合实时和大规模应用, 但该方法忽略了流动的三维效应, 主要适用于二维模型, 且对非定常流动的处理能力较差。涡尾迹方法能够较好地处理三维流动效应, 适用于低中等复杂度的流动条件, 但在非定常流动的处理上存在局限, 且在处理较大模型时计算成本较高。CFD方法可提供高度精确的气动性能计算, 能够模拟复杂的气动现象, 提供全面的流场信息。但该方法的计算成本高, 建模和数据处理过程复杂, 需要较高的计算资源和专业知识。CFD方法可结合叶素理论, 用致动线替代真实的风力机叶片, 避免求解叶片表面边界层, 可在有效减少对计算资源需求的同时具有较高的计算精度, 被广泛应用于预报风力机的气动性能^[4]。

在模拟大范围风浪条件和全尺度风机模型时, CFD方法对计算资源的需求较高, 现有的研究往往采用简化模型, 在给定平台运动的基础上探究平台运动对浮式风机非稳态气动响应的影响。De Vaal等^[5]采用了改进的致动盘模型对浮式风机的非稳态气动响应进行预报, 探究了不同频率和幅值的周期性平台纵荡运动对风机气动载荷的影响。Cheng等^[6]基于OpenFOAM开源软件对周期性纵荡和纵摇运动下NREL 5 MW风机的非稳态气动性能进行分析, 探究了平台运动幅度对风机气动载荷的影响, 并分析了塔影效应的影响。李鹏飞等^[7]基于非稳态致动线模型对风机在不同纵荡和纵摇运动幅值及频率下的非稳态气动性能进行了计算分析。Tran等^[8]采用CFD方法和叶素动量理论研究了平台纵荡运动不同振荡频率和幅度的影响, 对比分析了不同运动条件下, 浮式风机的非稳态气动性能, 展示了应用数值方法之间的潜在区别。Fang等^[9]使用风洞实验和CFD方法研究了正弦形式的纵摇和纵荡运动条

件下1:50模型尺度的NREL 5 MW风机气动载荷和尾涡特性。Zhang等^[10]采用CFD方法计算分析了周期性纵摇和纵荡运动下的IEA 15 MW风力机气动特性, 结果表明: 纵荡和纵摇运动会发电显著不稳定。Lee等^[11]采用非线性涡格法和涡粒子法耦合, 对NREL 5 MW风机的6个自由度分别施加正弦形式的平台运动, 探究了不同自由度对风机气动载荷和尾涡演化的影响。刘杨等^[12]采用STAR-CCM和重叠网格技术分析了NREL 5 MW风机模型在纵荡、纵摇及两者叠加情况下对风机气动载荷影响。Guo等^[13]研究了平台纵摇和纵荡运动在不同频率下耦合初始相位差对浮式风机气动特性的影响, 发现频率相同的纵摇和纵荡运动耦合时对风机气动性能影响最大。Cai等^[14]采用CFD方法建立了风机模型, 探究纵荡、纵摇运动以及两者耦合条件下风机的气动性能, 揭示了在纵摇纵荡耦合运动下风机气动特性的显著变化。Huang等^[15]采用自研的FOWT-UALM-SJTU软件, 对Spar型浮式风机在规则波和均匀风作用下的耦合动力响应特性进行模拟分析。Alkhabbaz等^[16]采用重叠网格技术和CFD方法, 探究了风浪条件下, 放开纵荡自由度的浮式风机与平台固定的浮式风机的气动性能和尾流特征。国内外学者基于给定平台运动形式已进行了大量研究, 但目前通过放开不同自由度解耦运动形式的研究较少, 且大都集中在NREL 5 MW风机方面, 而大型风机的研究相对较少。

本文基于上海交通大学CMHL研究中心FEWT-SJTU求解器, 针对某17 MW大型浮式风机进行气动性能预报, 对在风浪条件下, 放开不同自由度的浮式风机气动性能展开研究, 详细介绍CFD数值计算方法、分析浮式风机气动性能的计算工况与计算模型, 分析风浪影响下, 不同自由度条件对浮式风机气动性能的影响。

1 数值方法

本文基于开源软件OpenFOAM, 采用自主开发的气动-水动-系泊一体化分析求解器FEWT-SJTU进行CFD数值模拟。气动模块采用非稳态致动线模型求解, 水动力计算模块来源于自主开发的求解器naoe-FOAM-SJTU, 可求解平台六自由度运动, 系泊模块基于分段外推法对锚链求解。

1.1 控制方程

为了求解非定常不可压黏性流体,采用的控制方程为不可压的两相Navier-Stokes方程求解,即

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} \cdot \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U}) + \mathbf{f}_\sigma + \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_\varepsilon \quad (2)$$

式中: $\mathbf{U}$ 为速度场; ρ 为液体或者气体的密度; t 为时间; p_d 为流体动压力,等于总压力减去静水压力; $\mathbf{g}$ 为重力加速度向量; $\mathbf{x}$ 为流体位置; μ_{eff} 为有效动力黏度, $\mu_{\text{eff}} = \rho(\nu + \nu_t)$, 其中 ν 和 ν_t 为运动黏度和湍流涡黏度,后者由湍流模型求解而得; $\mathbf{f}_\sigma$ 为表面张力的源项,仅在气液交界面产生作用; $\mathbf{f}_s$ 为消波源项,仅在消波区内起作用; $\mathbf{f}_\varepsilon$ 为风机的体积力源项,由风机叶的气动力投影到流场产生。湍流模型使用剪切应力输运(shear stress transport, SST) k - ω 模型^[17],即

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}k) = \tilde{G} - \beta^* k \omega + \nabla \cdot [(\nu + \alpha_k \nu_t) \nabla k] \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\omega) = \gamma S^2 - \beta \omega^2 + \nabla \cdot [(\nu + \alpha_\omega \nu_t) \nabla \omega] + (1 - F_1) CD_{k\omega} \quad (4)$$

式中: k 为湍流动能; ω 为湍流动能耗散率; $\tilde{G}$ 为由平均速度梯度产生的湍流动能; β 为模型常数,通常取0.075; β^* 为模型常数,通常取0.09; α_k 和 α_ω 为湍流Prandtl数; γ 为模型常数,通常取5/9; S 为湍流剪切应力; F_1 为混合函数,在近壁面处采用标准 k - ω 模型,在远壁面采用 k - ε 模型; C 为模型常数,通常取0.65; $D_{k\omega}$ 为湍流频散项。

1.2 非稳态致动线模型

与固定式风机相比,浮式风机会产生更为复杂的六自由度运动,使叶片附近的流场产生巨大变化,在每个叶片截面上,非稳态致动线模型的速度

矢量由平台运动引起的速度矢量、入流风引起的速度矢量和叶片旋转引起的速度矢量叠加而成。

致动点气动力 $\mathbf{f}$ 可表示为

$$\mathbf{f} = (\mathbf{L}, \mathbf{D}) = \rho \mathbf{U}_{\text{rel}}^2 c N_b (C_L \mathbf{e}_L + C_D \mathbf{e}_D) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{L}$ 和 $\mathbf{D}$ 为翼型界面上的升力和阻力; $\mathbf{U}_{\text{rel}}$ 为叶片截面处的相对风速,如图1所示,图中 $\mathbf{U}_{\text{motion}}$ 为平台运动附加速度, $\mathbf{U}_{\text{int}}$ 为来流风速, $\mathbf{U}_{\text{rot}}$ 为叶片旋转引起的致动线速度; c 为翼型截面的弦长; N_b 为单台风机叶片个数; C_L 和 C_D 为升力系数和阻力系数; $\mathbf{e}_L$ 和 $\mathbf{e}_D$ 为随体坐标下 x 和 y 方向的单位矢量。

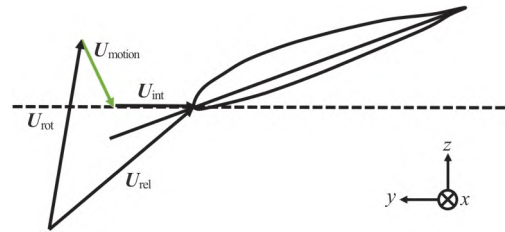


图1(网上彩图) 叶片翼型速度示意图
Fig.1 (Color online) Induced velocity vector diagram of the airfoil

1.3 风机-平台-系泊一体化耦合流程

风机、浮式平台与系泊系统之间的耦合作用是通过力、位移和速度的传递实现的。基于非稳态致动线模型计算气动载荷时,需要考虑平台运动导致的风机叶片位置和入流风速的变化。在求解浮式平台六自由度运动响应方程时,需要考虑风机气动载荷对其的影响。同时,在系泊系统求解时,浮式平台运动响应会提供系泊位置信息,系泊张力也会参与到浮式平台六自由度运动求解。图2展示了浮式平台和系泊系统的水动性能与风机气动性能之间的耦合计算思路。

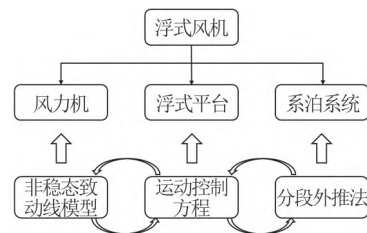


图2 风机-平台-系泊一体化耦合流程
Fig.2 Coupling effects between the wind turbine, floating platform, and mooring system

1.4 数值造波消波

本文采用速度入口输入式造波^[18], 通过在固定入口边界上设置随时间变化的波面和水质点速度实现造波。波面方程 $\eta(t)$ 可表达为

$$\eta(t) = A \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_0 - \omega_0 t + \delta) \quad (6)$$

式中: A 为波幅; $\mathbf{k}$ 为波数; $\mathbf{x}_0$ 为网格点位置; ω_0 为波浪频率; δ 为初始相位角。

在计算域出口处设置海绵层(Sponge Layer), 以避免波浪到达计算域出口时产生反射, 对平台黏性流场和运动的计算产生干扰。这通过在动量方程中添加源项实现, 即

$$\mathbf{f}_s = \rho \alpha_s \left(\frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_s}{L_s} \right)^2 (\mathbf{U} - \mathbf{U}_{\text{ref}}) \quad (7)$$

式中: α_s 为无因次化的黏性系数; $\mathbf{x}$ 为消波区内流体位置; $\mathbf{x}_s$ 为消波区起始位置; L_s 为消波区长度。

2 计算设置

2.1 浮式风机模型

风机模型由浮式平台、系泊缆和风机3部分组成。平台为三立柱浮式平台, 立柱直径为14.5 m, 立柱高度为37 m, 立柱中心距为80 m, 平台总重量为21 826 000 kg, 平台吃水为25 m。系泊系统由6根系泊缆构成, 每根立柱连接2根夹角为10°系泊缆, 锚泊半径为600 m, 导缆孔位于水下5 m, 设计水深为200 m。风机为17 MW风机, 包含3个风机叶片, 风轮盘面直径为252 m, 额定风速为11.4 m/s, 轮毂高度为150 m, 额定转速为7.5 r/min。

2.2 计算域和网格划分

浮式风机一体化性能预报的计算域如图3所示, 计算域选为六面体, 其长、宽和高分别为1 050 m、460 m和480 m。气相计算域高度为380 m, 液相计算域高度为100 m, 浮式风机距离计算域入口为150 m, 左右两侧对称布置。

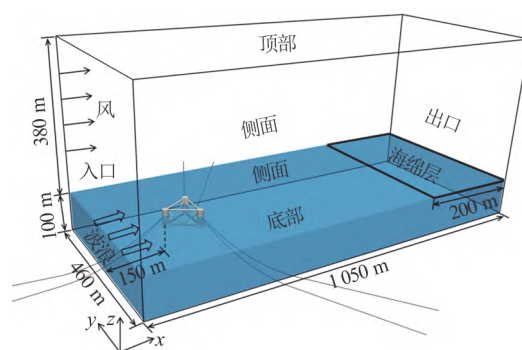


图3 (网上彩图) 数值模拟计算域
Fig.3 (Color online) Numerical computational domain

图4给出了三立柱浮式风机XOY平面和YOZ平面的网格划分示意图。对支撑平台、自由面、风机附近和尾流区域进行了网格的局部加密, 总体网格数量为912万。

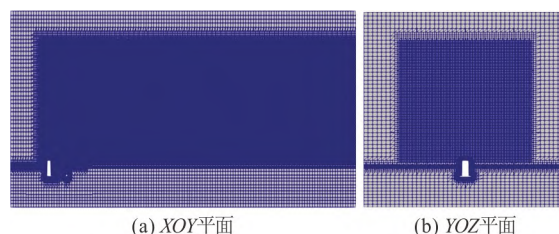


图4 (网上彩图) 数值计算网格
Fig.4 (Color online) Numerical calculation grids

2.3 边界条件和工况设定

计算域的入口边界条件为风浪速度入口, 出口为自由流出。同时, 为了避免波浪反射的影响, 在出口前方200 m范围内设置消波区。左右两侧为对称边界, 计算域顶部为滑移边界, 底部为壁面无滑移边界。

入流风选择8 m/s均匀风, 入射波选择规则波条件, 入射波波高5 m, 周期10 s。模拟时间为500 s, 步长为0.01 s。本文选取的平台运动自由度为: 单纵荡条件、单纵摇条件、纵荡-纵摇耦合条件以及六自由度耦合条件。

3 结果分析

3.1 气动性能

图5展示了风浪条件影响下, 浮式风机的气动载荷系数随时间的变化情况。受平台运动响应影响, 浮式风机的气动功率和推力均呈现出显著的周期性波动特征, 变化周期与波浪周期相近, 约10 s。

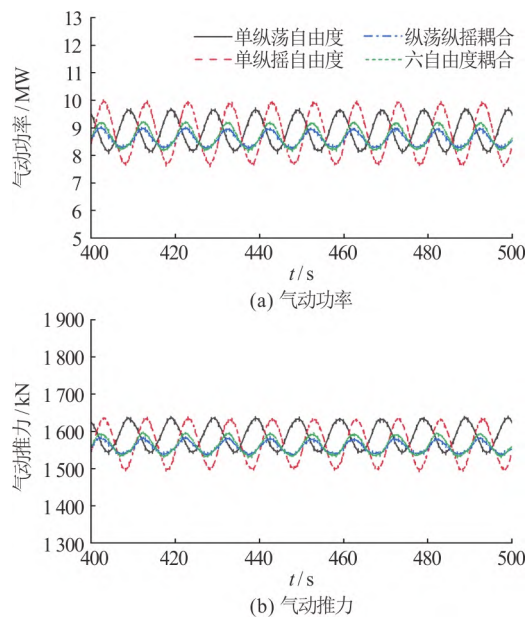


图 5 (网上彩图) 浮式风机气动载荷时历曲线
Fig.5 (Color online) Time history curve of aerodynamic loads

与其他工况相比，单纵荡自由度条件下的浮式风机气动功率和气动推力有明显的相位差。纵荡自由度和纵摇自由度对风机叶片的气动载荷响应方式不同：纵荡运动通常会导致风机整体位置前后移动，从而改变叶片受风流的进入角度，影响叶片的升力和阻力变化；纵摇运动主要影响风机叶片的旋转角度，进而影响叶片的扭矩和力矩。纵荡和纵摇运动的本质差异，可能导致对气动性能的影响具有不同的动态响应特征和相位延迟。这种延迟会导致纵荡和纵摇自由度的功率输出在相位上存在差异。

在风浪条件影响下，400~500 s单纵荡条件、单纵摇条件、纵荡-纵摇耦合以及六自由度耦合条件下，浮式风机气动功率的平均值分别为8.94 MW、8.82 MW、8.66 MW及8.68 MW，气动推力系数的平均值分别为1 592.4 kN、1 567.8 kN、1 561.2 kN及1 562.8 kN。不同运动自由度下，浮式风机的气动功率系数的变化幅度分别约为其平均值的17.8%、28.3%、9.2%及11.5%，气动推力系数的波动幅值分别约为其平均值的5.0%、8.8%、3.2%及3.8%。对比结果如表1所示，单纵摇条件下，气动载荷波动幅值变化更为剧烈，相较而言，气动推力受平台运动响应的影响较小。气动功率的剧烈波动不利于风力发电的平稳性，同时周期性变化的气动推力会加剧风力机塔架与浮式支撑平台连接处的疲劳损伤。

表 1 不同平台运动自由度气动性能对比
Table 1 Comparison of aerodynamic performance with different degrees of freedom

参数	工况			
	单纵荡自由度	单纵摇自由度	纵荡-纵摇耦合	六自由度耦合
气动功率均值/MW	8.94	8.82	8.66	8.68
气动功率幅值/均值/%	17.8	28.3	9.2	11.5
气动推力均值/kN	1 592.4	1 567.8	1 561.2	1 562.8
气动推力幅值/均值/%	5.0	8.8	3.2	3.8

3.2 叶根弯矩

对于浮式风机的非稳态气动响应，不仅需要关注整体气动性能，还需要关注叶根弯矩等局部载荷特性。由图6可以看出，叶根轴向弯矩和切向弯矩在模拟时间200 s，即功率和推力稳定后，出现明显的非线性特性。在风浪复合作用环境中，叶片受力情况涉及非线性效应，叶片的运动模态与外部环境的周期性变化产生共振或失稳现象，导致叶根弯矩的不稳定性。

图6展示了风浪联合作用下，浮式风机叶根弯矩的时历曲线。由图中可以看出：风力机的叶根轴向弯矩和叶根切向弯矩均呈现出大幅周期性波动的特点，变化周期与波浪周期接近，这主要是波浪载荷引起的平台运动响应导致的。不同运动自由度下的叶根弯矩变化周期不同：纵摇纵荡耦合条件下变化周期最小，六自由度耦合条件次之，单纵荡自由度条件下变化周期最大。

单纵荡条件、单纵摇条件、纵荡-纵摇耦合及六自由度耦合条件下，400~500 s内浮式风机的叶根轴向弯矩的平均值分别为43 597 kN·m、43 500 kN·m、43 173 kN·m及43 208 kN·m，而叶根切向弯矩的平均值分别为4 959 kN·m、4 930 kN·m、4 804 kN·m及4 818 kN·m。单纵荡条件下，叶根轴向弯矩和叶根切向弯矩均值最大，表明纵摇运动可有效减弱纵荡运动产生的叶根弯矩。不同运动自由度下，叶根轴向弯矩的变化幅度分别约为其平均值的18.5%、35.1%、31.3%及30.3%；叶根切向弯矩的波动幅值分别约为其平均值的11.5%、47.1%、41.9%及26.7%。由此可知，除纵荡-纵摇耦合外，其他运动自由度可有效减弱叶根切向弯矩的波动幅度，对比结果如表2所示。大幅度周期性变化的叶根弯矩会对叶片及塔架与平台连接处的疲劳寿命产生不利影响。

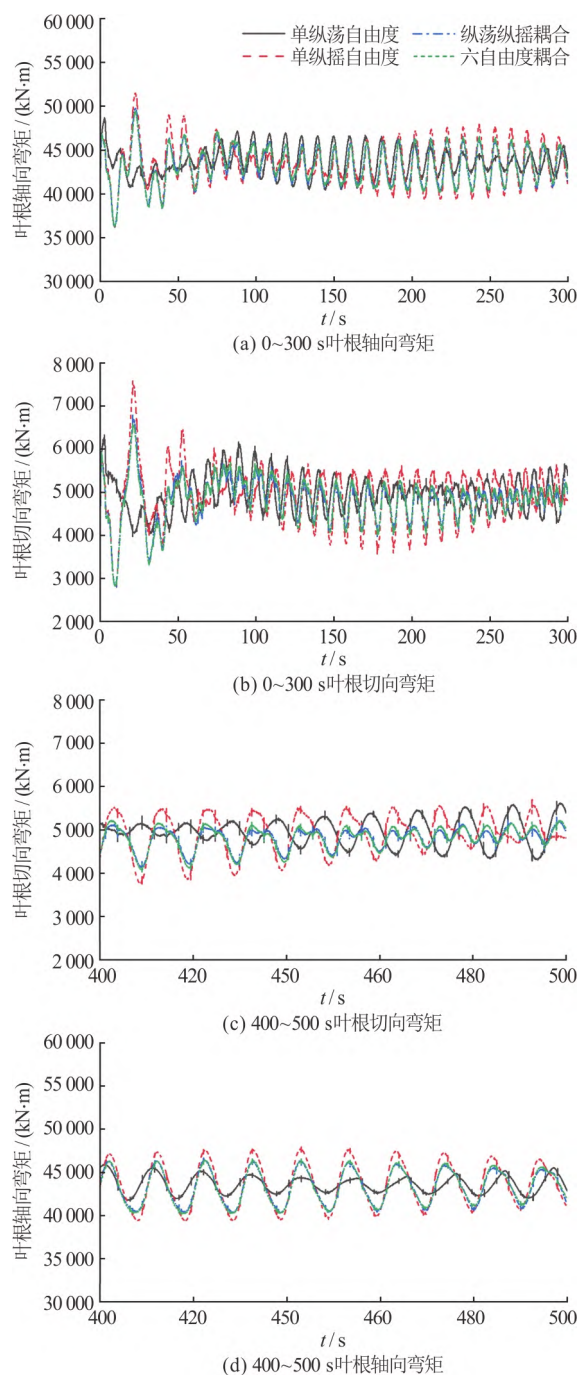


图 6 (网上彩图) 浮式风机叶根弯矩时历曲线

Fig.6 (Color online) Time history curve of the blade root bending moment

表 2 不同平台运动自由度叶根弯矩对比

Table 2 Comparison of blade root bending moments for different degrees of freedom

参数	工况			
	单纵荡 自由度	单纵摇 自由度	纵荡-纵摇 耦合	六自由度 耦合
轴向弯矩均值/(kN·m)	43 597	43 500	43 173	43 208
轴向弯矩幅值/均值/%	18.5	35.1	31.3	30.3
切向弯矩均值/(kN·m)	4 959	4 930	4 804	4 818
切向弯矩幅值/均值/%	11.5	47.1	41.9	26.7

3.3 叶片气动攻角

平台运动响应主要通过改变风力机的相对入流风速及局部攻角来影响风力机的气动载荷。图7显示了不同运动自由度下, 风力机叶片的局部攻角 α 的时空分布云图。由图中可以看出: 叶片气动攻角在时间上呈现出较明显的周期性大幅度波动, 单纵摇自由度条件下, 风机叶片气动攻角波动更为剧烈; α 的变化会引起叶片升阻力系数的改变, 进而导致风力机气动载荷的大幅波动, 这与图5中气动推力曲线变化相一致。

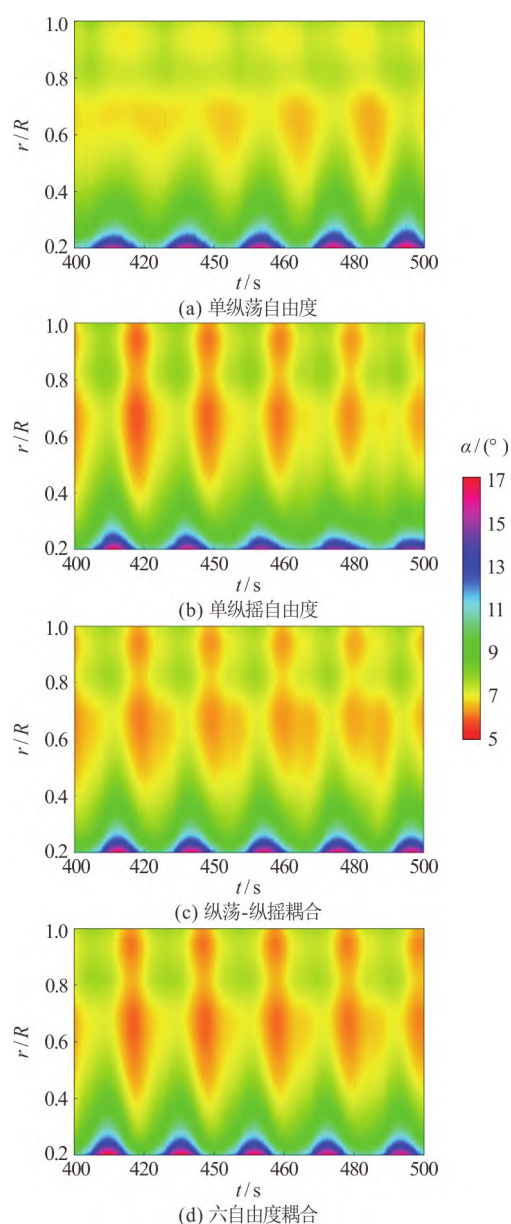


图 7 (网上彩图) 叶片局部攻角的时空分布云图

Fig.7 (Color online) Temporal and spatial distribution of the local attack angle

3.4 尾涡发展

图8展示了 $t=400$ s时,风浪作用下,浮式风机的尾涡云图,涡结构基于 Q 准则提取,图中为 $Q=0.008$ 的尾涡。相比于单纵荡自由度条件,单纵摇条件下,因为浮式风机产生横向摆动,叶尖涡和叶根涡的脱落位置略有提前。纵荡-纵摇耦合条件和六自由度条件下,叶片在纵向和横向上都有运动,这种运动的耦合会导致更复杂的气流扰动。同时有多个方向的运动影响气流,叶尖涡和叶根涡变得更加复杂,脱落位置更靠前。纵荡-纵摇耦合条件下的叶尖涡和叶根涡发展与六自由度耦合条件下的几乎一致,相比于纵荡-纵摇耦合条件,六自由度耦合条件下,会产生更为明显的叶尖涡脱落和溃散。不同工况下的叶尖涡和叶根涡的行为差异反映了气流扰动和叶片运动的复杂性。

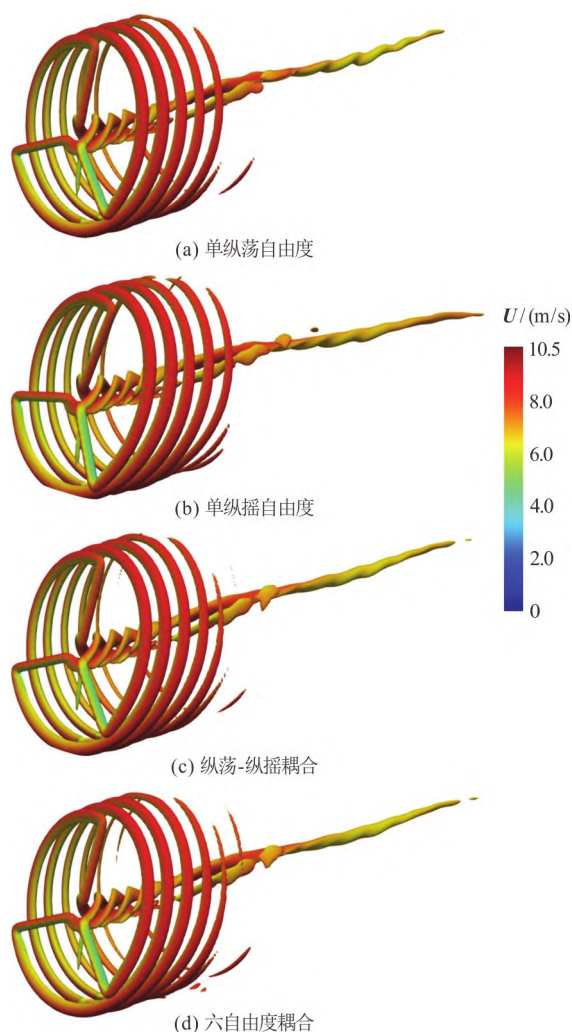


图8 (网上彩图) 不同工况尾涡结构
Fig.8 (Color online) Development of the vortex structure

4 结论

本文基于上海交通大学CMHL研究中心自主开发的求解器FEWT-SJTU,针对17 MW大型浮式风机,对风浪联合作用下放开不同自由度的风机气动性能进行分析,得出如下主要结论:

(1) 对比了400~500 s各气动性能参数平均值和波动值。单纵摇条件下,风机气动性能参数波动最大,其中叶根切向弯矩变化幅度为其平均值的47.1%。纵荡-纵摇耦合条件和六自由度耦合条件下,各气动性能均值差距很小。风机气动性能主要受纵荡和纵摇运动影响,但除纵荡纵摇之外的其他4个自由度运动可有效减弱叶根切向弯矩的波动幅度。

(2) 纵荡运动通过改变叶片受风流的进入角度影响叶片的升力和阻力变化,纵摇运动通过改变风机叶片的旋转角度影响叶片的扭矩和力矩。2种运动的本质差异会导致单纵荡条件和其他条件的气动功率和气动推力输出在相位上存在差异。

(3) 在功率和推力稳定之后,叶根弯矩出现明显的非线性特性。在风浪联合作用条件下,叶片受力情况涉及非线性效应,叶片的运动模态与外部环境的周期性变化产生共振或失稳现象,导致叶根弯矩不稳定。

(4) 在单纵荡和单纵摇条件下,涡流行为较为简单和稳定。纵荡-纵摇耦合条件和六自由度条件下,叶片在纵向和横向上的耦合运动会产生复杂的气流扰动,叶尖涡和叶根涡的形成变得更加复杂,脱落位置更靠前。

参考文献:

- [1] Huang Y, Zhao W, Wan D. Wake interaction between two spar-type floating offshore wind turbines under different layouts [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(9): 097102.
- [2] Wei D, Wang N, Wan D. Modelling yawed wind turbine wakes: Extension of a Gaussian-based wake model [J]. *Energies*, 2021, 14(15): 4494.
- [3] 于双瑞. Spar型海上浮式风机气动性能的数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [4] Huang Y, Zhuang Y, Wan D. Hydrodynamic study and performance analysis of the OC4-DeepCwind platform by CFD method [J]. *International Journal of Computational Methods*, 2021, 18(4): 2050020.

- [5] De Vaal J B, Hansen M O L, Moan T. Effect of wind turbine surge motion on rotor thrust and induced velocity [J]. *Wind Energy*, 2014, 17(1): 105-121.
- [6] Cheng P, Huang Y, Wan D C. A numerical model for fully coupled aero-hydrodynamic analysis of floating offshore wind turbine [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 173: 183-196.
- [7] 李鹏飞, 万德成, 刘建成. 基于致动线模型的风机尾流场数值模拟 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2016, 31(2): 127-134.
- [8] Tran T T, Kim D H. A CFD study into the influence of unsteady aerodynamic interference on wind turbine surge motion [J]. *Renewable Energy*, 2016, 90: 204-228.
- [9] Fang Y, Duan L, Han Z, et al. Numerical analysis of aerodynamic performance of a floating offshore wind turbine under pitch motion [J]. *Energy*, 2020, 192: 116621.
- [10] Zhang Y, Song Y, Shen C, et al. Aerodynamic and structural analysis for blades of a 15MW floating offshore wind turbine [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 287: 115785.
- [11] Lee H, Lee D J. Effects of platform motions on aerodynamic performance and unsteady wake evolution of a floating offshore wind turbine [J]. *Renewable Energy*, 2019, 143: 9-23.
- [12] 刘杨, 罗子帆, 陆彬彬, 等. 周期运动下海上浮式风机的气动性能数值模拟研究 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2024, 39(2): 1-10.
- [13] Guo Y, Wang X, Mei Y, et al. Effect of coupled platform pitch-surge motions on the aerodynamic characters of a horizontal floating offshore wind turbine [J]. *Renewable Energy*, 2022, 196: 278-297.
- [14] Cai Y, Li X, Leng S, et al. Effect of combined surge and pitch motion on the aerodynamic performance of floating offshore wind turbine [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 306: 118061.
- [15] Huang Y, Cheng P, Wan D C. Numerical analysis of a floating offshore wind turbine by coupled aero-hydrodynamic simulation [J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2019, 18(1): 82-92.
- [16] Alkhabbaz A, Hamza H, Daabo A M, et al. The aero-hydrodynamic interference impact on the NREL 5-MW floating wind turbine experiencing surge motion [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 295: 116970.
- [17] Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [18] 曹洪建. 海洋工程粘性数值波浪水池开发及应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2016.