DOI:10.3969/j.issn.1673 - 4807.2017.05.010

浮式风机系统的气动 – 水动 – 锚泊系统耦合 数值分析

艾 勇^{1,2},万德成^{1,2}*

(1.上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院,海洋工程国家重点实验室,上海 200240)(2.高新船舶与深海开发装备协同创新中心,上海 200240)

摘 要:基于非稳态致动线模型求解三维 N - S 方程的方法,对 OC3 项目 Hywindspar 基础的浮式风机进行其气动 - 水动 - 锚泊系统的耦合动力数值分析. 计算分析分为两个部分:将上部风轮受到的气动推力简化为定常力(力矩),作用于平台;风 机叶片简化为致动线模型耦合到 CFD 求解器 naoe - FOAM - SJTU 中,进行浮式风机系统的耦合动力分析. 最后,对比分析 两种情况下浮式风机系统的气动以及水动力响应. 分析结果显示:相对于简化力模型,基于致动线方法的耦合分析模型可 以有效且准确模拟分析浮式风机系统的气动 - 水动力性能.

关键词: 浮式风机;非稳态致动线;气动 – 水动力性能;耦合效应 中图分类号:035 文献标志码:A 文章编号:1673 – 4807(2017)05 – 0612 – 08

Numerical analysis of the coupled aerodynamics-hydrodynamics-mooring system for afloating offshore wind turbine

AI Yong^{1,2}, WAN Decheng^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

Abstract: In this study, an unsteady actuator line model (UALM) coupled with a two-phase CFD solver is used to solve 3-D N-S equation to focus on the coupled dynamic response of an aerodynamics-hydrodynamics-mooring system for a floating offshore wind turbine named OC3-hywindSpar. The numerical analysis is divided into two parts: first, the aerodynamic loads from the upper rotor is simplified into aconstant thrust to be applied to the platform; second, the UALM model is embed into the CFD solver called naoeFoam-SJTU to obtain the fully coupled dynamic effects with wind and wave excitation. Comparisonof the results conducted by a simplified model and a fully coupled modelshows that the fully coupled model based on UALM can handle the interactive effects between the platform motion and aerodynamic loads more efficient and accurate.

Key words: floating offshore wind turbine, unsteady actuator line model, aero-hydrodynamics, couple effect

近年来,海上风能开发逐渐成为能源研究领域

的热点.由于海上的特殊环境条件,海上风机比陆

收稿日期: 2017-05-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51379125,51490675,11432009,51579145);长江学者奖励计划(T2014099);上海高校东方学者特 聘教授岗位跟踪计划(2013022);上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300);上海市船舶工程重点实验室基金资助项目 (K2015-11);工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)

作者简介: 艾勇(1992 -),男,硕士研究生

*通信作者:万德成(1967-),男,教授,研究方向为船舶与海洋工程水动力学与计算流体力学的基础理论及应用. E-mail:dcwan@sjtu.edu.cn

引文格式: 艾勇,万德成. 浮式风机系统的气动 - 水动 - 锚泊系统耦合数值分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2017,31(5):612 - 619. DOI:10.3969/j. issn. 1673 - 4807.2017.05.010.

上风机受到更加恶劣的环境载荷,特别是浮式风机 系统.相比于陆上风机或浅海固定式风机,由于平 台六自由度运动将使风机周围的流场变得高度不 稳定^[1].风机的气动载荷也会对浮式平台的水动 力响应以及锚泊系统产生比较大的影响.因此,如 何正确模拟浮式风机系统的气动 – 水动耦合是该 研究领域的难点之一.

由于复杂的海洋环境,设计海上风机是一项非 常具有挑战性的工作,特别是对于浮式风机.目前 虽然存在很多不同形式的浮式风机,但是需要研究 一种考虑风浪流联合作用下浮式风机的气动性能, 水动力性能以及锚泊动力响应的动力分析模型,以 此来分析评估不同支撑形式的浮式风机的技术.由 于问题本身的复杂度及大尺度实验数据的缺乏,准 确模拟海上风机气动力 - 平台水动力 - 系泊力之 间的动力耦合效应十分困难.目前所用的耦合分析 计算里,基本都是基于叶素动量理论来分析风机的 气动性能^[1]. 文献[2]使用结构化网格求解三维 N-S方程,使用 levelset 方法模拟自由液面和浸没边 界法模拟风机平台,将风载荷模拟为定常推力作用 于一个张力腿平台(tension leg platform, TLP)基础 的风机上,研究其非线性以及粘性效应. 文献[3] 考虑两种不同的 spar 形式浮式风机,使用一种简 化方法分析在风浪联合载荷作用下浮式风机动力 响应,在保证数值精度的同时提高计算效率.使用 一种动态链接库将气动载荷作为外部输入给 Simo -Riflex, 气动载荷简化为相对风速的函数, 并作为 一个集中力作用于风轮中心,忽略气动载荷在整个 平面的分布效应. 气动扭矩对横摇运动的贡献取决 于风的大小,其水动力性能则采用湿表面模型方法 和 Morison 公式计算. 文献[4]采用一种叶素动量 理论(blade element momentum, BEM) 与计算流体 动力学(computational fluid dynamics, CFD)相结合 方法对 spar 型和半潜型的浮式风机系统进行了气 动水动耦合分析,并对比分析了两种形式的水动力 性能. 文献 [5] 考虑在风浪联合作用下, 使用势流 分析程序 FAST 对 OC3Hywind 风机平台进行其运 动以及锚泊系统的动力响应时域分析,并通过 FFT 变换分析了其频域特性. 文献 [6] 采用混合波浪的 Morison 公式计算附体水动力,细长杆理论求解锚 泊系统,风机的空气动力分析采用 FAST 模块等方 法对某浮式浮式风机系统进行了水 - 气动力的全 耦合数值分析. 传统的 BEM 理论并不能准确地模 拟风轮与其尾流的相互作用效应,以及叶片背后的 湍流流动. Morison 公式对于细长结构物有比较好 的适用性,而当结构物尺度比较大时,Morison 假设 就不再使用^[7].因此,针对这一问题,需要准确、高 效的耦合分析模型.目前研究中,一些学者尝试使 用一种三维的全 CFD 模拟.文献[8]在重叠网格技 术基础上使用流固耦合动力分析方法对 OC4 项目 的 DeepCwind 半潜式浮式风机进行了气动 - 水动 全耦合分析,并将其计算结果与一般工程方法进行 了对比.文献[9]基于致动线模型使用 CFD 求解器 naoe - Foam - SJTU 对 OC4 项目的 DeepCwind 半潜 式浮式风机进行了气动 - 水动 - 锚链的耦合动力 分析,并与将风机简化为推力的计算结果比较.文 献[10]进行浮式风机系统的两相流全 CFD 模拟, 采用 Overset 技术来处理平台和风机叶片周围的网 格运动,使得网格量急剧增加.

1 数值方法

1.1 非稳态致动线模型

致动线模型^[11]对风机叶片进行离散化,无需 其解叶片表面边界层,无需使用动网格技术,从而 大大降低了网格量以及求解时间.模拟浮式风机尾 流场时,由于平台运动会使叶片与自己的尾流之间 产生强烈的相互作用,在每个叶片截面上表现为: 相对于原本的速度三角形,又增加了一个由平台运 动引起的速度矢量.因此,需对稳态问题的致动线 模型进行修改,使之可以求解由于平台六自由度运 动导致的非稳态问题.因此文中提出使用非稳态致 动线模型.图1为考虑了平台运动之后风机叶片翼 型的速度矢量图.



图 1 叶片翼型速度矢量 Fig. 1 Velocity vector ofblade's airfoil

整体速度矢量关系为:

$$\boldsymbol{U}_{\text{rel}} = \boldsymbol{U}_{\text{in}} + \boldsymbol{U}_{\text{rot}} + \boldsymbol{U}_{\text{motion}} \tag{1}$$

叶片截面处的相对速度为:

 $|\boldsymbol{U}_{rel}| = \sqrt{(\boldsymbol{U}_{int} - \boldsymbol{U}_{motion})^2 + (\boldsymbol{\Omega}_r - \boldsymbol{U}_{rot})^2} (2)$ 实角 \phi 计算为:

$$\phi = \arctan \frac{|\boldsymbol{U}_{\text{int}}| - |\boldsymbol{U}_{\text{motion}}|}{|\boldsymbol{\Omega}_{\text{r}}| - |\boldsymbol{U}_{\text{rot}}|}$$
(3)

而每个致动元处的攻角为: $\alpha = \phi - \theta_{twist} - \gamma$ (4) 式中:θ_{twist}为叶片局部扭角,γ为叶片局部桨距角, Ω为风轮旋转角速度.

在每一个计算时间步长里,对攻角修正之后, 再按照稳态致动线模型的数值方法插值求解每个 致动元处的体积力:

$$f = (L,D) = \frac{\rho |U_{\rm rel}|^2 c N_{\rm b}}{2r dr d\theta dz} (C_1 e_{\rm L} + C_{\rm d} e_{\rm D}) \qquad (5)$$

式中:c为每个致动点处叶片的物理弦长,N_b为叶 片个数,r为致动点处的半径,C₁、C_d分别为翼型升 力系数和阻力系数.

由式(5)计算得到的体积力并不能直接作用于 流场,否则会出现空间的数值振荡,因此对体积力进 行一个高斯光顺处理,所用的高斯光顺函数为:

$$f_{\varepsilon} = f \otimes \eta_{\varepsilon} \tag{6}$$

$$\eta_{\varepsilon}(d) = \frac{1}{\varepsilon^2 \pi^{3/2}} \exp\left[-\left(\frac{d_i}{\varepsilon}\right)^2\right]^2 \tag{7}$$

光顺后的体积力为:

$$f_{\varepsilon}(x,y,z,t) = \sum_{j=1}^{N} f_{i}(x_{j},y_{j},z_{j},t) \frac{1}{\varepsilon^{2} \pi^{3/2}} \exp\left[-\left(\frac{d_{i}}{\varepsilon}\right)^{2}\right]^{2} \quad (8)$$

最后将得到的体积力添加到 N-S 方程的右端的源项,即可求解风机非稳态流场.

文献[8,10]通过建立实体模型利用 overset 网 格技术进浮式风机气动 - 水动 - 锚泊系统进行整 体耦合模拟,属于一种全耦合分析模型.致动线模 型采用带体积力的致动线点对风机叶片进行离散, 无需模拟叶片边界层,使用较少的网格量可以达到 耦合分析精度,对于气动扭矩以及气动推力额模拟 可以达到很好的精度.因此,和使用 overset 进行浮 式风机整体耦合相比,其大大减少了网格量,节省 了计算时间,便于进行网格收敛性验证以及时步收 敛性验证.其次,致动线模型对于浮式风机上部风 机气动载荷的模拟有很好的精度,而气动推力是影 响浮式风机水动力以及锚泊系统性能的关键影响. 所以,综合比较来看,致动线模型在能比较好的计 算气动载荷的情况之下,能大大减少耦合网格量以 及计算时间,可以进行大量的快速的不同载荷工况 的浮式风机耦合计算分析.但致动线由于没有真实 叶片模型,不能进行叶片边界层的模拟,因此,相对 于全耦合来说,其无法精细地进行耦合流场的精细 化处理.

1.2 控制方程

基于 OpenFOAM 开发了用于求解船舶与海洋 工程水动力学问题的求解器 naoe - FOAM - SJ-TU^[12],采用 VOF 方法用于求解带自由面的两相流 问题.文中耦合问题即将非稳态致动线模型嵌入到 该求解器中,实现浮式风机的气动-水动-锚泊系 统的耦合动力分析.

修改后的控制方程为:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{U} = 0$$
 (9)
 $\frac{\partial \rho \boldsymbol{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(\boldsymbol{U} - \boldsymbol{U}_g))\boldsymbol{U} =$
 $- \nabla p_d - g \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \boldsymbol{U}) +$
 $(\nabla \boldsymbol{U}) \cdot \nabla \mu_{g} + f + f + f$ (10)

式中: $U 和 U_g$ 分别为流场速度和网格节点速度; $p_d = p - \rho g \cdot x$ 为流场动压力,等于总压力减去静水 压力; $g \cdot p$ 分别为重力加速度、流体密度; $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu_t)$,为等效动力粘性系数; f_σ 为表面张力,只有在 自由面处有影响,其余位置取值为零; f_s 为数值造 波中的消波源项,作用是减少波浪反射,该项仅对 于消波区有效; f_s 为代表叶片对流场影响的体积 力,由非定常致动器线模型(unsteady actuator line model, UALM) 给出.

1.3 六自由度运动

在 naoe - FOAM-SJTU 中, 六自由度运动的求 解采用两个坐标系: 一个是大地坐标系, 一个是固 结在船体上的随船坐标系. 运动方程在随船坐标系 下求解, 而力的计算则在大地坐标系下进行. 在每 个时间步, 由六自由度运动引起的某个致动点的速 度分量由下式更新:

 $U_{\text{motion}} = J(U_c + \omega_e \times (x_i - x_e))$ (11) 式中:J 为从随船坐标系向大地坐标系转换的转换 矩阵; $U_e \cdot \omega_e \cdot x_e$ 分别为旋转中心的速度、角速度和 位置坐标.

1.4 锚泊系统

锚泊系统的计算采用实验室基于 OpenFOAM 开发的 naoe - FOAM - ms 锚链求解计算分析模块. 使用分段外推法(图 2)进行浮式风机系统的气 动 - 水动 - 锚泊系统耦合模拟的锚链系统求解锚 链响应,并将该响应传递给支撑平台,实现锚链对 平台及上部风机的影响.



图 2 万权外推法计算小息 Fig. 2 Calculation sketch of PEM

分段外推法的平衡方程为: $T_{xi+1} - T_{xi} - F_i ds \cos \varphi_{i+1} - D_i ds \sin \varphi_{i+1} =$ $\rho g A \Delta z' \cos \varphi_{i-1}$ (12) $T_{zi+1} - T_{zi} - F_i ds \sin \varphi_{i+1} - D_i ds \cos \varphi_{i+1}$ $w_i dl = \rho g A \Delta z' \sin \varphi_{i-1}$

1.5 耦合分析流程

图 3 是利用非稳态致动线模型和 naoe -FOAM - SJTU 求解器进行浮式风机系统气动 - 水 动 - 锚泊系统耦合求解分析流程. 首先将初始状态 的气动载荷以及锚泊系统响应传递给支撑平台,求 解其六自由度运动方程和自由面方程,得到支撑平 台的水动力特性包括其六自由度运动响应;其次, 求解流场运动,得到流场运动信息,并分别传递给上 部的风机系统和下部的锚链系统,进行风机气动性 计算以及锚泊系统的响应计算,将其再次传递给平 台进行水动力性能计算分析. 通过上述计算流程,实 现浮式风机气动水动锚泊系统的耦合计算分析.



图 3 求解器的算法 Fig. 3 Solving strategy of coupled aero-hydro simulation

2 计算设定

2.1 计算模型

文中计算采用的 NREL - 5MW 风机^[13]是美国 国家能源部可再生能源实验室研发的一种风机类 型,其叶片翼型由 cylinder 系列,DU 系列以及 NA-CA64 系列组成.风机参数如表 1. OC3 项目中的 phaseIV^[14]平台即 Hywindspar 风机平台的参数如 表 2. 其锚泊系统参数如表 3. 图 4 为浮式风机系统 及锚泊布置图.

表 1 NREL – 5MW 风机相关参数 Table 1 Parameters of NREl – 5MW turbine				
参数	数值			
额定功率/MV	5			
转子朝向	上风型			
叶片数	3			
叶片、轮毂直径/m	126,3			
轮毂高度/m	90			
切入、额定、切出风速/(m・s ⁻¹)	3, 11.4, 25			
切入转速、额定转速/(r・m ⁻¹)	6.9,12.1			
悬挂、轴倾角、叶片安装角/(m,°,°)	5, -5, 2.5			

表 2 OC3 – Hywindspar 平台参数

 Table 2
 Parameters of OC3 – Hywindspar platform

参数	数值
平台吃水/m	120
平台总质量(压载、塔架、机舱、叶片)/10 ⁶ kg	8.07
平台重心/m	(0,0,-78)
横摇惯性矩/(10 ¹⁰ kg・m ²)	1.90
纵摇惯性矩/(10 ¹⁰ kg・m ²)	1.90
首摇惯性矩/(10 ¹⁰ kg・m ²)	1.93

表 3 OC3 – Hywindspar 平台锚泊系统参数 Table 3 Parameters of mooring system for OC3 – Hywindspar platform

参数	数值	
锚链数	3	
锚链之间夹角/(°)	120	
锚泊深度、半径/m	320, 853.87	
系泊深度、半径/m	70,5.2	
锚链长度、直径/m	902.2, 0.09	
锚链湿重∕(N・m ⁻¹)	698.094	
锚链等效拉伸刚度/(10 ⁸ •N)	3.84243	



图 4 平台模型以及锚泊系统布置 Fig. 4 Platform model and mooring system lay-out

2.2 计算工况

文中选取的环境载荷取自文献[14]所给定的 计算工况.选取深水规则波,其波高为6m,周期为 10 s,波长约为156 m. 文中质量和惯性矩的计算考虑整体系统,忽略了塔架和机舱对流场的影响. 耦合分析模型中选取风速为5 m/s,考虑风剪切的影响,风剪切模型选取为常用的指数模型. 简化力模型中,风机的气动力简化为气动推力,其推力值按照文献[12]所给定的 NREL – 5MW 风机的技术参数选取相应风速下气动推力值,并将推力值简化为作用于平台重心的水平力和力矩. 工况的详细信息如表 4.

表 4 计算工况设置 Table 4 Set up of computational conditions

算例	$ X V_{hub} / (\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	波浪(H,T)/ (m,s)	风机转速/ (r・m ⁻¹)	输出
简化力 模型	无	深水规则波: (6,10)	0	平台运动响 应,锚链力水 流场信息, 流场信息
耦合 模型	5 指数模型 风剪切	深水规则波 (6,10)	7.45	平台运动响 应,锚链力水 气两相流场, 气动载荷

2.3 计算域与边界条件

在耦合分析算例中,计算域的长度与宽度分别 为3个波长(图5中λ为波长)和2个波长,而在 气相域中考虑到风机尾流的膨胀效应设置为2个 波长,水域的设置深度为70%的实际水深(图5中 的 d 为实际水深),这个深度已经可以忽略水深对 平台性能的影响了.平台中心距离入口为1个波 长,出口处还设置了100 m 的消波区,避免波浪反 射对波面以及平台水动力性能的影响.而在简化力 分析算例中,由于不需要求求解实际的气相的气动 性能,考虑到平台的尺度及垂荡运动,设置其高度 为40 m.

在耦合分析算例中,为了能捕捉风机尾流 场,设置了一个比较大的加密区域,以保证获取 理想的波面.在网格布置上,耦合分析算例与简 化力分析算例基本一致,耦合算例的网格加密如 图 6.

两个算例数值模拟设置的边界条件基本相同:

(1)在入口边界处(inlet),因为涉及到造波, 所以速度条件采用波浪入口,压力条件则采用则是 Neumann边界条件,压力梯度为零.

(2)在出口边界处(outlet)速度条件采用OpenFOAM 提供的边界条件 inletOutlet,压力条件设定的 Dirichlet 边界条件.

(3) 在计算域的上下边界处(top,bottom),上 边界压力与速度条件采用的第一类边界条件,下边 界的速度压力条件采用的都是可滑移的边界条件, 因为计算网格仅仅只是到了水下 224 m,并未覆盖 到实际海底.

(4) 在计算域的左边边界处(sidewall1,sidewall2)边界条件定义为 symmetryPlane,其含义即垂直于边界的方向导数为零.

(5)模型物面处,采用的则是移动壁面的边界 条件.



3 结果与分析

3.1 气动载荷

文中计算了两种分析模型在相同的环境工况 下浮式风机系统的气动 – 水动 – 锚泊系统的耦合 动力响应.其中对于耦合模型,计算了其气动响应, 并将结果与简化力模型下的气动载荷进行比较,如 图7、8.

其中气动功率与推力公式为:

 $P_{A} = C_{p}0.5\rho U_{\infty}\pi R^{2}, T_{A} = C_{T}0.5\rho U_{\infty}\pi R^{2}$ (13) 式中: C_{p} 为气动功率系数, C_{T} 为气动推力系数, ρ 为空气密度, U_{∞} 为入流速度, R 为风轮半径.







图 8 气动推力响应 Fig. 8 Aerodynamic thrust response

依据图 7、8 分析可以知道:与文献[12]对比, 风浪联合作用下,浮式风机系统考虑了气动-水动 -耦合的情况下,其稳态气动载荷值有一个明显的 增益,呈现为一个周期性的振荡,而且振荡的小周 期为波浪周期.气动载荷的瞬态值相对稳态值十分 大,对浮式风机上部组块稳定性会有比较显著的影 响,对于风机叶片的疲劳也会造成一定的影响^[15]. 瞬态推力比稳态对于平台 – 锚泊系统的影响也是 十分显著^[16-17].

3.2 运动与系泊响应

图9给出了两种分析模型下,平台的六自由度 的运动响应.从致动线耦合模型结果与简化力模型 结果的比对可以看出:考虑了气动水动锚泊系统耦 合的情况下,在风浪联合作用下,平台的纵荡、横 荡、横摇和首摇响应都比简化力模型的结果要大. 由于在耦合情况下,气动载荷相对于标准值会有一 定的增加并且出现周期性振荡,气动推力明显大于 标准值,所以产生比较大的纵荡.在耦合模型中,有 一个气动扭矩作用于平台,因而产生比较明显的横 荡和横摇响应.同时,还捕捉到比较大的首摇运动, 而且首摇呈现一个明显的非线性运动. 这些在简化 力模型中没有明显捕捉到.对于纵摇,在简化力模 型模型中,将风轮受到的推力简化为作用于平台重 心集中力和力矩,反而高估了其响应.在两个模型 中平台的结构参数完全一致,所以,其垂荡响应差 异不明显^[20-21].



图 9 平台运动响应 Fig. 9 Motion response of platform

从锚泊系统的总张力响应结果(图 10)可以看 出来,锚泊系统的响应和平台的六自由度运动响应 是对应的.耦合模型下,平台的纵荡运动较大,因

此, 锚链1的张力也相应小一些, 而锚链2、3为了 限制平台这种大幅度运动, 其张力必然会增大.



图 10 锚链张力响应 Fig. 10 Tension response of mooring system

3.3 流场

对风机的尾流场进行分析,研究其尾涡结构.叶片的尾涡结构通常使用速度梯度的二阶不变量 Q 来表示,图中波面使用波高进行染色,图 11 为个波浪周期中的4 个不同时刻的尾涡结构 以及波面高度(*T_{wave}为波*浪周期).叶尖处产生了

并不是很清晰的螺旋状尾涡,相比之下叶根涡则 迅速破碎.实际上风机的叶尖涡与风机固定情形 下相比较也不稳定许多.且由于平台的纵荡和纵 摇运动较大,导致尾涡和尾流相互作用,从图 11 不同时刻点的尾涡结构图,可以看到十分明显的 尾涡变形.



图 11 风机尾流场及波面高程 Fig. 11 Wake field of wind turbine and elevation of wave surface

4 结论

采用基于非稳态致动线模型求解三维 N-S 方程的方法,对 OC3 项目的 HywindSpar 形式的浮 式风机进行其气动 - 水动 - 锚泊系统的耦合动 力数值分析,分为两个部分:(1)将上部风轮收 到的气动推力以及扭矩简化为定常力(力矩),作 用于平台;(2)风机叶片简化为致动线模型耦合 到本课题组开发的 CFD 求解器 naoe - Foam - SJ-TU中,进行浮式风机系统的耦合动力分析.最 后,对比分析两种情况下浮式风机系统的气动以 及水动力响应.可以发现,考虑了气动-水动-锚泊系统耦合作用的影响下,风机的气动载荷呈 现出明显的周期性振荡,而且振荡的局部周期与 波浪周期是一致的,属于一种典型的波频响应, 而且气动载荷的瞬态极值还是十分显著的,这对 风机本身以及平台的水动力性能都会有十分大 的影响.将风机推力简化为集中力和力矩作用在 平台重心的情况下,其平台的六自由度运动响应 预报基本都是偏小的:考虑耦合效应,平台的六 自由度运动明显增大.特别是纵荡和首摇运动,

而且首摇运动具有十分明显的非线性.综合分析 可知,耦合模型能比较准确模拟浮式风机的气动 -水动-锚泊系统之间的耦合动力响应.而且要 更加准确的预报浮式风机的气动性以及水动力 性能,必须使用考虑耦合效应,而不能简单的使 用一些类似于简化力模型的方法,其准确性是远 远不够的.但文中计算分析中没有考虑到风机塔 架以及机场的影响,在今后的进一步分析中,可 以将其考虑进去,得到更加完整准确的结果.

参考文献(References)

- [1] MATHA D, SCHLIPF M, PEREIRA R, et al. Challenges in simulation of aerodynamics, hydrodynamics, and mooring-line dynamics of floating offshore wind turbines [C]//The Twenty first International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, Maui, Hawaii, 2011.
- [2] NEMATBAKHSH A, OLINGER D J, TRYGGVASON
 G. A nonlinear computational model of floating wind turbines [J]. Journal of Fluids Engineering, 2013, 135 (12):121103(1-13).

- [3] KARIMIRAD M, MOAN T. A simplified method for coupled analysis of floating offshore wind turbines[J].
 Marine Structures, 2012, 27(1): 45 - 63. DOI:10. 1016/j. marstruc. 2012.03.003.
- [4] 李仲凯. 耦合 BEM 与 CFD 方法计算浮体式风机于规则波中运动之研究[D].台北:台湾大学,2014:1-108.
- [5] MA Y, HU ZQ, XIAO L F. Wind-wave induced dynamic response analysis for motions and mooring loads of a spar-type offshore floating wind turbine [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser B, 2015, 26(6): 865 874. DOI:10.1016/s1001-6058(14)60095-0.
- [6] 闫发锁,张成祥,杨慧,等. 浮式风机系统水-气动力耦合分析方法[J].上海交通大学学报,2014,48(4):570-575,582.

YAN Fasuo, ZHANG Chengxiang, YANG Hui, et al. Coupling hydrodynamic and aerodynamic computations of offshore floating wind turbines [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2014, 48(4): 570 – 575,582. (in Chinese)

- [7] JONKMAN J M. Dynamics of offshore floating wind turbines-model development and verification[J]. Wind Energy, 2009, 12(5): 459 - 492. DOI: 10.1002/ we. 347.
- [8] TRAN T T, KIM D H. Fully coupled aero-hydrodynamic analysis of a semi-submersible FOWT using a dynamic fluid body interaction approach [J]. Renewable Energy, 2016, 92: 244 - 261. DOI:10.1016/j. renene. 2016.02.021.
- [9] 李鹏飞,程萍,万德成.风与波浪联合作用下浮式 风机系统的耦合动力分析[C]//第二十七届全国水 动力学研讨会文集(下册),2015.
- [10] QUALLEN S,XING T, CARRICA P, et al. CFD simulationo fafloating off shorewind turbine system using a quasi-static crowfoot mooring-line model[C]//International Ocean & Polar Engineering Conference, 2013, 1:143 152
- [11] SØRENSEN J N, SHEN W Z. Numerical modeling of wind turbine wakes [J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(2): 393. DOI:10.1115/1.1471361.
- [12] SHEN Z, CAO H, YE H, et al. The manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe – FOAM – SJTU. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [13] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5 - MW reference wind turbine for offshore system development [J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2009.

- [14] Jason Jonkman W. Offshore code comparison collaboration (OC3) IEA wind task 23 offshore wind technology and deployment[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2010
- [15] 李鹏飞,万德成,刘建成.基于致动线模型的风力 机尾流场数值模拟[J].水动力学研究与进展, 2016,31(2):127-134.
 LI Pengfei, WAN Decheng, LIU Jiancheng. Numerical simulations of wake flows of wind turbine based on actuator line model [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, 31(2):127-134. (in Chinese)
- [16] CHENG Ping, WAN Decheng, HU Changhong. Unsteady aerodynamic simulations of floating offshore wind turbines with overset grid technology [C] // Proceedings of the Twenty – sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference Rhodes, Greece, 2016:391 – 398.
- [17] CHENG Ping, AI Yong, WAN Decheng. Unsteady aerodynamic simulations of floating offshore wind turbines with coupled periodic surge and pitch motions [C]//Proceedings of the 12th International Conference on Hydrodynamics (ICHD2016), Egmondaan Zee, The Netherlands, 2016.
- [18] 艾勇,程萍,万德成.平台纵摇运动对风机气动性影响的数值分析[C]//2016 年船舶力学学术会议文集,武汉,2016.
- [19] 程萍,万德成.基于重叠网格法数值分析塔架对风机气动性能的影响[J].水动力学研究与进展,2017,32(1):32-39
 CHENG Ping, WAN Decheng, Analysis of wind turbine blade-tower interaction using overset grid method [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2017,2017, 32(1):32-39. (in Chinese)
- [20] LI Pengfei, WAN Decheng, HU Changhong. Fully coupled dynamic response of a semi-submerged floating wind turbine system in wind and waves[C]//Proceedings of the Twenty – sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference Rhodes, Greece, 2016:273 – 281
- [21] CHENG Ping, AI Yong, WAN Decheng. Unsteady aerodynamic simulations of floating offshore wind turbines with coupled periodic surge and pitch motions [C]// Proceedings of the Second Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics, Wuxi, China, 2016:807-814.