

# 不同支撑平台的浮式风机系统

## 耦合数值分析

段鑫泽, 黄扬, 万德成\*

(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 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

\*通信作者 Email: [dcwan@sjtu.edu.cn](mailto:dcwan@sjtu.edu.cn)

### 摘要

本文采用基于非稳态致动线模型求解三维 N-S 方程的方法, 结合两相流 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 分别对 OC3 的 Spar 形式和 OC4 的 semi-submersible 浮式风机系统进行气动-水动-锚泊系统的耦合数值分析。通过对不同形式支撑平台的浮式风机系统进行数值模拟, 得到其在风浪联合作用下的耦合动力响应特性, 并对比分析在相同环境载荷下, 风力机的非稳态气动特性、平台的六自由度运动响应以及锚泊系统响应等信息。同时, 对复杂的尾流场进行可视化处理。结果显示: 平台的六自由度运动中, 纵荡和纵摇运动对风机的气动性能影响较大; 在相同环境载荷下, semi-submersible 平台的运动响应幅值要低于 Spar 平台。

**关键词:** 浮式风机; 非稳态致动线; 气动-水动力性能; 耦合效应

## 0 引言

由于传统化石能源的枯竭以及环境污染、全球变暖等问题日益严重, 人们亟需开发新型清洁能源<sup>[1]</sup>。风能作为一种清洁可再生能源, 因其储量大、分布广、无污染等特点, 成为近十年来能源开发领域的研究热点。随着风能开发技术迅猛发展, 风力发电机作为一种风电转换设备, 无论数量还是发电功率都在迅速增大, 风力机也从陆上固定式风机向深海大型浮式风机发展。与固定式风机相比, 浮式风机会受到复杂风浪流载荷的作用, 受支撑平台六自由度运动的影响, 风机周围的流场会发生剧烈的变化。因此, 其风机的气动性能复杂程度远远超出了陆地和离岸固定式风机流场<sup>[2]</sup>, 如何正确模拟浮式风机系统的气动-水动耦合效应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而言, 浮式平台作为风力机的支撑平台, 其水动力性能对浮式风机系统的整体稳定性和安全性具有十分重要的影响, 因此浮式平台的选择显得尤为重要。在现有的浮式平台中, Spar、TLP 和 semi-submersible 是最受关注、可行性最高的三种方案<sup>[3]</sup>。关于浮式风机耦合动力特性, 一些学者对此进行了相关研究。J.M.Jonkman 和 D.Matha<sup>[4]</sup>考虑在风浪联合作用下, 选取了不同的工况, 基于 FAST 模块对三种风机 TLP、Spar 和 barge 平台类型进行了其气动、水动以及锚泊系统的耦合分析, 对比不同平台类型的载荷和稳定性情况。结果表明, barge 平台类型所受的整体载荷和疲劳问题都显著高于 Spar 和 TLP 平台, 而 Spar 和 TLP 平台的载荷差别不明显。李仲凯和郭真祥<sup>[5]</sup>采用一种叶素动量理论(BEM)与 CFD 结合的混合方法对 Spar 型和半潜型的浮式风机系统进行了气动-水动-锚泊系统耦合分析。风机气动性能由 BEM 理论进行计算分析, 并与 NREL-5MW 风机标准功率值进行相互对比验证, 同时对比分析了两种支撑平台形式的水动力性能。

考虑到基于叶素动量理论在浮式风机耦合分析的局限性, 为了更加准确探明浮式风机整体耦合机理,

需要更完善的耦合分析模型。Tran 等<sup>[6]</sup>假设浮式风机总体结构为刚体，来流风速和叶片转速为常量，忽略风剪切作用，基于重叠网格技术运用动态流固耦合方法对 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。艾勇等<sup>[7]</sup>以 OC3 项目中的 HywindSpar 形式的浮式风机系统为研究对象，采用非稳态致动线模型<sup>[8]</sup>（Unsteady Actuator Line Model, UALM）来模拟风力机，并将 UALM 嵌入到自主开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 中，对浮式风机系统进行了气动-水动-锚泊系统耦合分析，并与将风载荷简化为推力的简化模型进行对比。

本文主要针对 OC3 项目中的 Spar 形式和 OC4 项目的 semi-submersible 形式的浮式风机系统进行了气动-水动-锚泊系统的耦合动力分析。采用非稳态致动线模型对风机叶片进行气动性能模拟，改变不同支撑平台模型，进而在相同环境载荷下对不同平台类型的浮式风机系统进行耦合数值模拟，得到其在风浪联合作用下的气动-水动耦合动力特性，对比其风力机的非稳态气动特性、平台的六自由度运动响应以及锚泊系统响应等信息，为浮式风机支撑平台的选型与设计提供参考建议。

## 1 数值方法

### 1.1 非稳态致动线模型

致动线模型利用虚拟的、承受体积力的线代替风机叶片，无需求解叶片表面边界层，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。在致动线模型中，叶片沿径向被离散为一系列的致动点，通过计算在致动点上的流场作用力，再利用正则化核函数将这些力反作用于流场<sup>[9]</sup>。相对于陆上和固定式风机，浮式风机基础产生明显的六自由度运动，相比于致动线模型，非稳态致动线模型考虑了由于平台运动所导致的致动点处的附加速度。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，如图 1 所示。

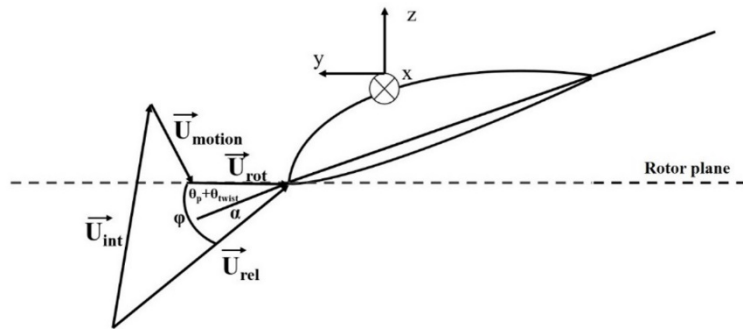


图 1 叶片翼型速度矢量

此时，整体速度矢量关系为：

$$\overline{U}_{rel} = \overline{U}_{in} + \overline{U}_{rot} + \overline{U}_{motion} \quad (1)$$

其中， $\overline{U}_{in}$  为来流风速， $\overline{U}_{rot}$  为叶片旋转引起致动点处的线速度， $\overline{U}_{motion}$  为平台运动引起的额外速度矢量。这时，入流角  $\phi$  计算为：

$$\phi = \arctan\left(\frac{|U_{rel,z}|}{|U_{rel,y}|}\right) \quad (2)$$

而每个致动元处的攻角为：

$$\alpha = \phi - \theta_{twist} - \gamma \quad (3)$$

其中， $\theta_{twist}$  为叶片局部扭角， $\gamma$  为叶片局部桨距角。

在确定相对速度和攻角之后，再按照致动线模型的数值方法插值求解每个致动元处的体积力：

$$f = (L, D) = \frac{\rho U_{rel}^2 c N_b}{2r dr d\theta dz} (C_l \bar{e}_L + C_d \bar{e}_D) \quad (4)$$

其中,  $c$  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,  $C_l$ ,  $C_d$  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, 否则在计算过程中会出现数值振荡, 因此需要对体积力进行一个高斯光顺处理, 所用的光顺函数为:

$$f_\varepsilon = f \otimes \eta_\varepsilon, \eta_\varepsilon(d) = \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{3/2}} \exp\left[-\left(\frac{d_i}{\varepsilon}\right)^2\right] \quad (5)$$

光顺后的体积力为:

$$f_\varepsilon(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^N f_j(x_j, y_j, z_j, t) \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{3/2}} \exp\left[-\left(\frac{d_i}{\varepsilon}\right)^2\right] \quad (6)$$

最后将得到的体积力加入到 N-S 方程的右端的源项, 即可求解风机非稳态流场。

## 1.2 平台六自由度运动求解

在平台的六自由度运动求解中, 需要在两套坐标系中进行相互转换。在大地坐标下, 计算平台的受力情况, 在随体坐标下, 计算平台的运动情况。坐标系系统如图 2 所示。由于平台运动而使风力机叶片某一致动点处增加的速度矢量可以通过下式计算得到:

$$U_{motion,i} = [J](U_c + \omega_c \times (x_i - x_c)) \quad (7)$$

式中,  $[J]$  是从随体坐标系向大地坐标系转换的转换矩阵;  $U_c$ 、 $\omega_c$ 、 $x_c$  分别是旋转中心的线速度、角速度和位置坐标;  $x_i$  是编号为  $i$  的致动单元处的位置坐标。

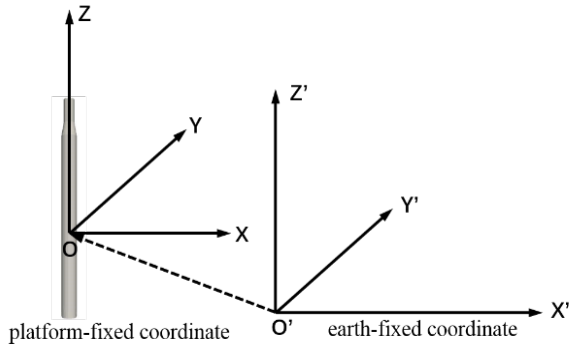


图 2 坐标系系统

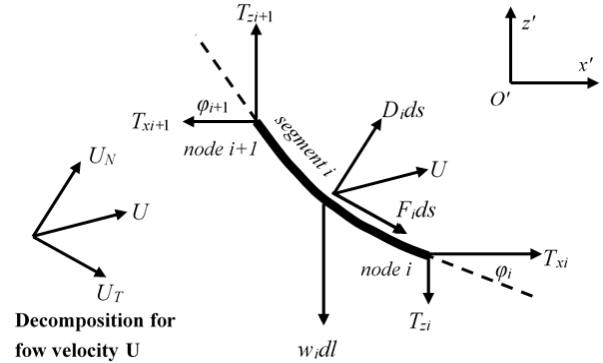


图 3 系泊单元受力分析示意图

## 1.3 系泊系统求解

分段外推法是求解系泊系统的常用方法, 该方法将锚链线均匀分成若干段, 分别对每一段锚链进行受力分析 (如图 3 所示), 进而得到锚链的受力平衡方程。通过求解该方程, 即可求解每段锚链的受力情况。

水平方向上的受力平衡方程:

$$T_{xi+1} - T_{xi} - F_i ds \cos \varphi_{i+1} - D_i ds \sin \varphi_{i+1} = \rho g A \Delta z' \cos \varphi_{i+1} \quad (8)$$

垂直方向上的受力平衡方程:

$$T_{zi+1} - T_{zi} - F_i ds \sin \varphi_{i+1} + D_i ds \cos \varphi_{i+1} - w dl = \rho g A \Delta z' \sin \varphi_{i+1} \quad (9)$$

式中,  $\rho$  为流体密度,  $g$  为重力加速度,  $A$  为系泊缆绳的截面积,  $\Delta z'$  为两端点的垂向距离, 等式的右端项表示缆绳单元两端的流体压力修正项。再结合一定的边界条件, 进一步通过迭代计算求解整条系泊缆绳, 得到系泊缆绳的张力。

## 1.4 耦合分析

本文采用 UALM 来模拟风力机，并通过将 UALM 嵌入到自主开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 中，实现对浮式风机系统风机-平台-锚链的全耦合动力计算分析。

控制方程为：

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(U - U_g))U = -\nabla p_d - g \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) + (\nabla U) \nabla \mu_{eff} + f_\sigma + f_s + f_e \quad (11)$$

式中： $U$  表示速度场； $U_g$  表示网格节点的速度； $p_d = p - \rho g \cdot x$  表示流场动压力； $\rho$  表示空气和水两项流体的混合密度； $g$  表示重力加速度； $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu_t)$  表示有效动力粘性系数。 $f_\sigma$  是两相流模型中的表面张力项，仅在自由表面处起作用； $f_s$  是数值造波中的消波源项，减少波浪反射，仅在消波区起作用； $f_e$  是由 UALM 计算得到的体积力，代表叶片对流场的作用。

浮式风机系统的耦合动力计算分析流程如图 5 所示。

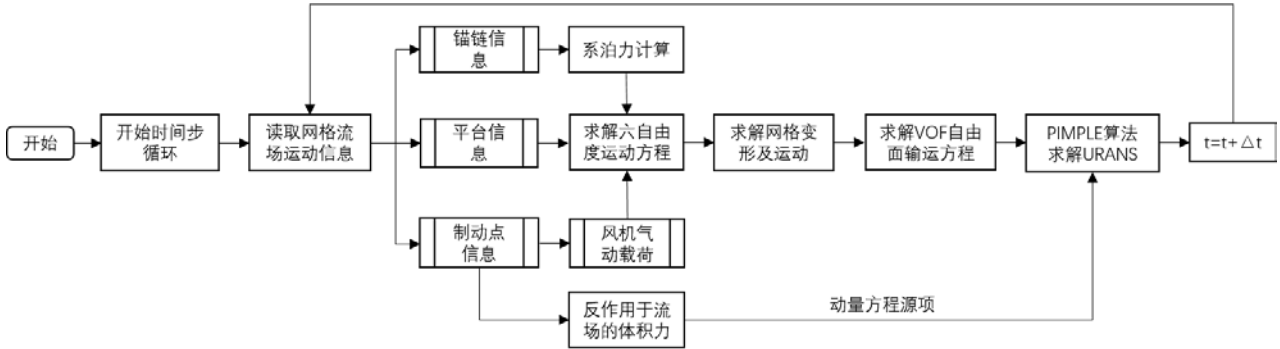


图 5 浮式风机系统耦合分析计算流程图

## 2 计算设定

### 2.1 计算模型

本文选用的两种浮式风机系统均由以下三部分组成：NREL-5MW 风机<sup>[10]</sup>、浮式平台、锚泊系统。风力机的主要参数如表 1 所示。OC3 的 Spar 风机<sup>[11]</sup>平台和 OC4 的 semi-submersible 平台<sup>[12]</sup>的参数如表 2 所示。两种平台的锚泊系统参数如表 3 所示。

表 1 NREL-5MW 风机相关参数

名称	参数
额定功率	5MW
转子朝向	上风型
叶片数	3
叶片/轮毂直径	126m, 3m
轮毂高度	90m
切入、额定、切出风速	3m/s, 11.4m/s, 25m/s
切入转速、额定转速	6.9rpm, 12.1rpm

表 2 不同平台类型参数

平台类型	Spar	Semi-submersible
平台吃水	120m	20m
平台总质量	$8.07 \times 10^6 \text{ kg}$	$1.402 \times 10^7 \text{ kg}$
平台重心	(0, 0, -78.0013m)	(0, 0, -10.26m)
横摇惯性矩	$1.90 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$1.08 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
纵摇惯性矩	$1.90 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$1.08 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
首摇惯性矩	$1.93 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$1.23 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

表 3 平台锚泊系统参数

平台类型	Spar	Semi-submersible
锚链数	3	3
锚链之间夹角	$120^\circ$	$120^\circ$
锚泊深度, 半径	320m, 853.87m	200m, 837.6m
系泊深度, 半径	70m, 5.2m	14m, 10.87m
锚链长度, 直径	902.2m, 0.09m	835.5m, 0.0766m
锚链密度	77.71kg/m	113.35kg/m
锚链等效拉伸刚度	384,243,000N	753,468,60N

## 2.2 计算工况

本文选择深水规则波作为入射波浪, 波高为 4m, 波浪周期为 10s, 波长  $\lambda$  约为 156m。注意到 NERL-5MW 风机叶片的直径较大, 垂直风剪切会对风机气动性能产生一定的影响。根据大气边界层内湍流运动的速度分布规律, 风剪切效应可利用对数律或者指数律描述。本文采用指数律分布描述风剪切效应。取风剪切指数为 0.143, 则高度  $Z$  处的风速为:

$$V(z) = V_{hub} \left( \frac{z}{z_{hub}} \right)^{0.143} \quad (12)$$

式中,  $V(z)$  为高度为  $z$  处的风速,  $V_{hub}$  为轮毂中心处的风速, 取  $V_{hub} = 11.4 \text{ m/s}$ ,  $z_{hub}$  为轮毂高度, 此处为  $z_{hub} = 90 \text{ m}$ 。

## 2.3 计算域和边界条件

本文对比了不同平台类型的影响, 两种算例采用相同设置的计算域和边界条件。计算域的长度为 3 倍波长, 宽度为 2 倍波长。考虑到风力机尾流的膨胀效应, 气相域的高度为 2 倍波长, 水域的深度为 70% 的平台设计水深(图 6 中  $d$  表示平台设计水深, 其中 semi-submersible 平台的设计水深  $d = 200 \text{ m}$ , Spar 平台的设计水深  $d = 320 \text{ m}$ )。两种类型平台均设置在位于计算域的中心距离入口边界 1 倍波长的位置, 并将计算域出口位置的前 100m 为消波区, 以避免波浪反射对平台的运动性能产生影响。计算域的整体设置如图 6 所示。同时参考 Jonkman<sup>[11][12]</sup>所给定的计算工况, 给定了 Spar 平台和 semi-submersible 平台的锚泊系统的布置情况, 如图 7 所示。

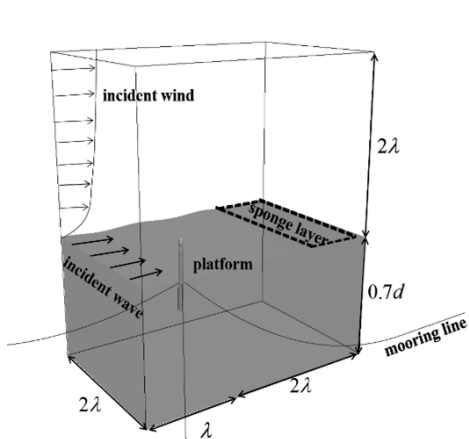
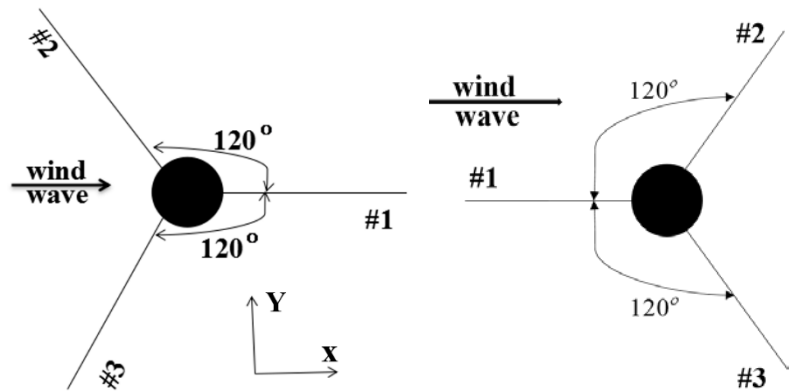


图6 计算域的整体设置



(a) Spar 平台系泊线布置

(b) 半潜平台系泊线布置

图7 系泊缆绳布置图

计算域的边界条件设置如下：

- (1)入口边界：速度条件采用波浪入口条件，压力条件则采用 Neumann 边界条件，即垂直于边界的压力梯度为零。
- (2)出口边界：速度条件边界条件 inletOutlet，压力条件设定为 Dirichlet 边界条件。
- (3)上下边界：上边界压力与速度条件均采用 Dirichlet 边界条件，下边界的速度压力条件均采用可滑移边界条件。
- (4)左右边界：边界条件定义为 symmetryPlane，即垂直于边界的方向导数为零。
- (5)物面边界：采用移动壁面的边界条件。

### 3 结果分析

本文分别对 2 种不同类型支撑平台的浮式风机进行耦合动力计算，关注不同类型平台的运动响应特征以及系泊系统的动态响应，对波浪和气动载荷联合作用下不同形式平台的运动响应和系泊锚链张力进行对比分析。同时探讨不同平台的运动响应对风机气动性能的影响。

#### 3.1 平台运动及系泊响应

在考虑浮式风机气动水动系泊系统耦合作用时，风力机会产生的气动载荷会传递到平台上，使得平台受到风力机气动载荷的影响，同时平台还受到系泊张力的作用。图 8 给出相同风浪条件下、两种不同类型浮式支撑平台的六自由度运动响应随时间的变化曲线。可以发现，两种平台都产生一定的纵摇运动，且纵摇振荡周期与波浪周期一致。考虑气动载荷作用对平台上的影响，Spar 平台的纵荡幅值要远高于 semi-submersible 平台，这与两者的系泊系统的作用相关，Spar 平台的锚链长度远大于它的系泊半径，在外载荷作用下，会有一定的缓冲距离。同时，在耦合模型中，存在一个气动扭矩作用于平台上，因此两种平台都存在小幅值的横摇和首摇运动，由于平台的参数可知，Spar 平台的首摇惯性矩相对于 semi-submersible 平台相差约两个量级，Spar 平台的首摇幅值比较大且约在 2 度左右波动，这个首摇角的存在，气动载荷会产生水平分量，这也进一步解释 Spar 平台存在一个幅值较大的横荡运动。总体而言，semi-submersible 平台整体的运动幅值要低于 Spar 平台，在相同的环境载荷下，semi-submersible 平台的水动力性能要高于 Spar 平台。

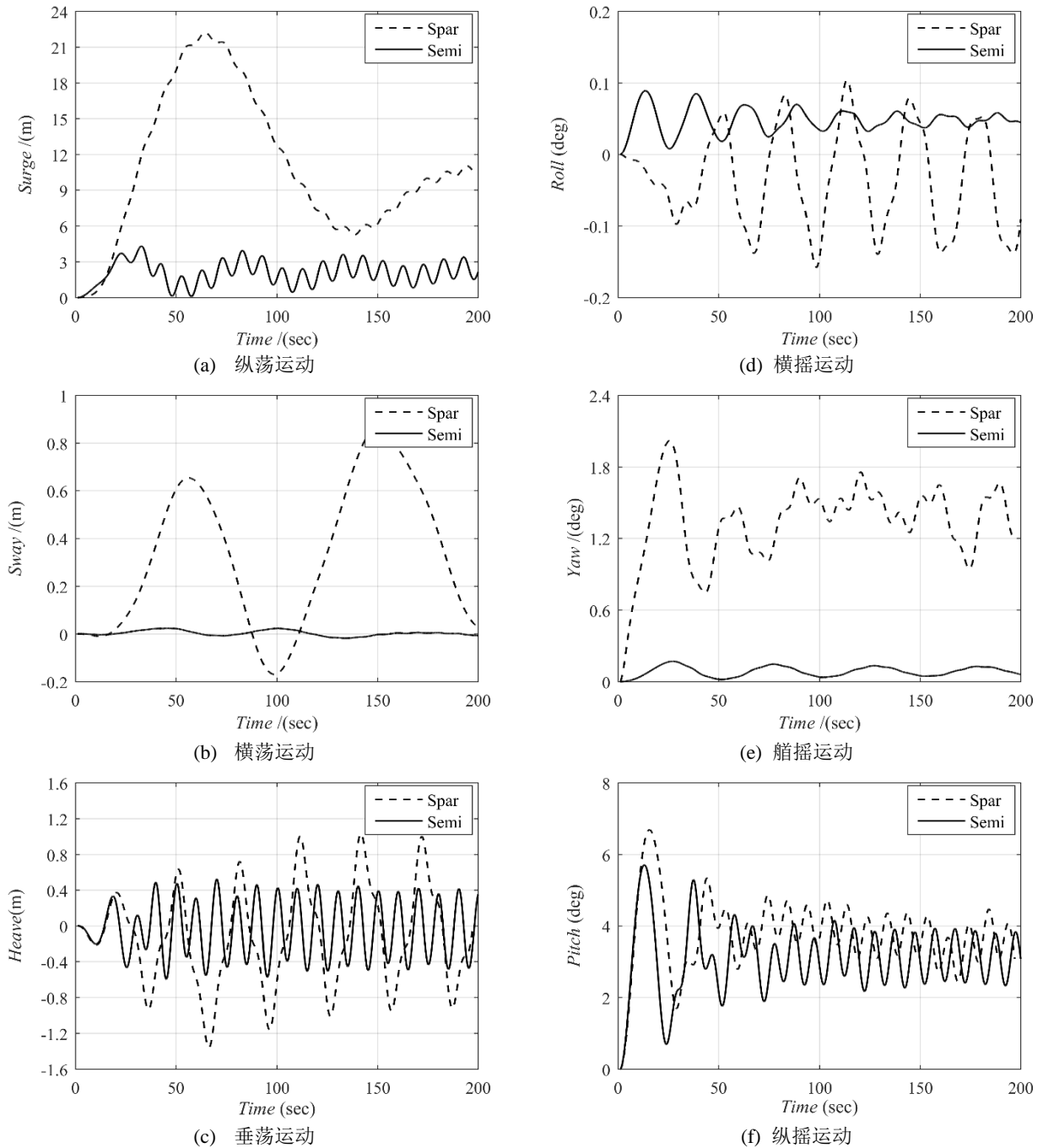
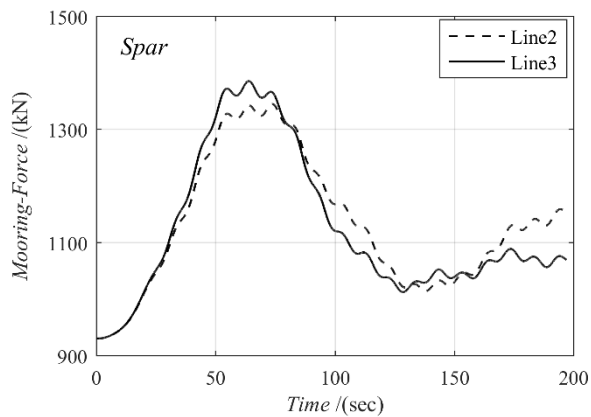
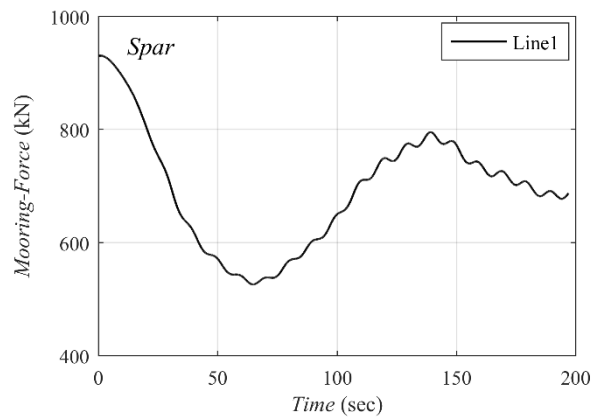


图 8 平台运动响应

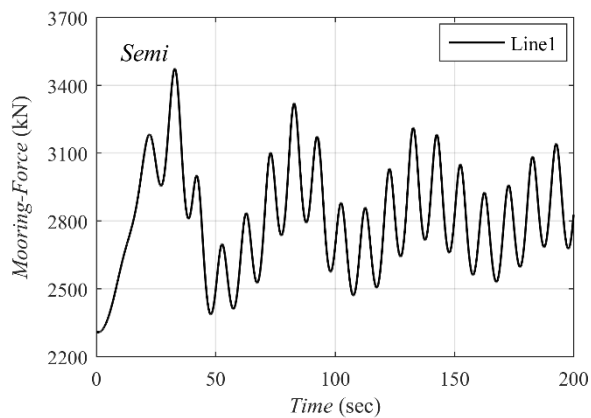
锚泊系统主要用于限制平台的运动，维持平台的稳定性，保证浮式风机能够正常进行作业，提高平台的安全性能。不同平台的系泊锚链的总张力随时间的变化曲线如图 9 所示。本文中两种类型的系泊锚链均沿着 X 轴对称布置，所以系泊系统中有两条锚链的总张力的变化趋势一致，特别是 semi-submersible 平台，两条曲线几乎重合，而 Spar 平台由于小幅值的首摇运动，两条曲线稍微存在偏差。对比数值结果可知，系泊缆绳的张力变化趋势与平台的纵荡运动趋势相似，平台的纵荡运动主要影响平台锚链的总张力。根据两种平台类型的系泊系统参数，semi-submersible 平台的锚链相对于 Spar 张力更大，所以半潜平台系泊张力对平台纵荡运动的变化更加敏感。图示中可以看出，semi-submersible 平台的系泊张力是 Spar 平台的三倍左右，这对 semi-submersible 平台的系泊系统提出较高的要求。同时，由于 Spar 平台的锚链系统留有一定的躺底长度，在风浪载荷作用下，Spar 平台会产生较大幅值和周期的纵荡运动。



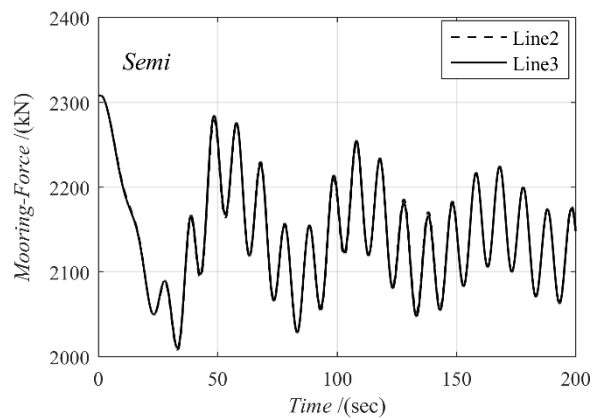
(a) Spar 平台左侧锚链张力



(b) Spar 平台右侧锚链张力



(c) semi-submersible 平台左侧锚链张力

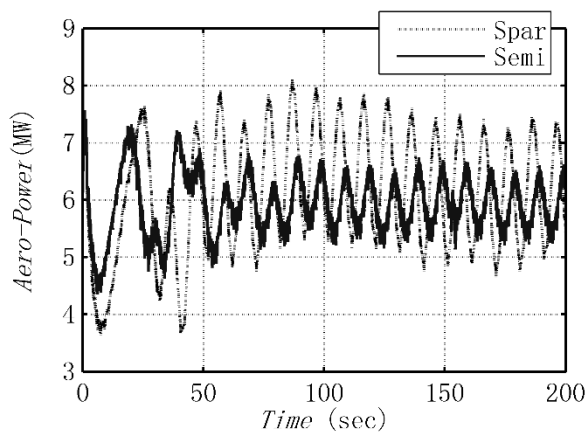


(d) semi-submersible 平台右侧锚链张力

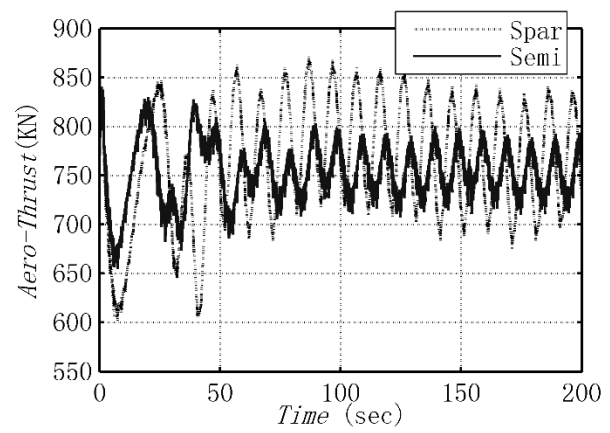
图9 锚链张力

### 3.2 气动性能

本文选取 NREL-5MW 风力机，计算了两种分析模型在相同环境载荷时的耦合动力特性。利用非稳态致动线模型(UALM)模拟风机叶片，忽略了机舱和塔架的影响，得到风力机瞬时的气动功率和推力曲线，如图 10 所示。对比文献<sup>[10]</sup>中风力机的设计标准值，考虑风机整体系统耦合，在风浪的联合作用下，其气动载荷有明显的增益，且呈现处一定周期的振荡，表明在浮式风机系统中，为了保证输出的稳定性必须采用一定控制装置。



(a) 气动功率响应



(b) 气动推力响应

图10 风机气动特性曲线

在先前的研究中表明，浮式风机平台的纵荡和纵摇运动对风机的气动特性影响最为显著<sup>[13]</sup>。对比图片



可知，风机的瞬时气动特性曲线的呈现周期性振荡，振荡的小周期和平台的纵摇周期一致，同时气功特性曲线也呈现一个由平台纵荡运动引起的大周期振荡，这在 Spar 平台的特性曲线上显示的更加明显。同时也可以看出，semi-submersible 平台的运动幅值小，稳定性较好，其风机气动特性也更加稳定。

### 3.3 风机尾流场

浮式风机受到平台六自由度运动的影响，导致风机叶片周围的流场与风机叶片的相互作用更加复杂，增大尾流场的不稳定性。本文对风速在经过风机叶片的变化情况，从横向(Y轴)和垂向(Z轴)两个方向进行对比分析，如图 10 所示。本文采用指数律分布描述风剪切效应，可以在 Z 轴的流场速度图中看出。而且两种模型都存在尾涡膨胀现象，且在 Z 轴方向上更加明显，可能受到平台纵摇运动和风剪切的影响。同时由于忽略机舱和塔架的影响，在刚经过风机转子中间时风速会存在一个较高值。

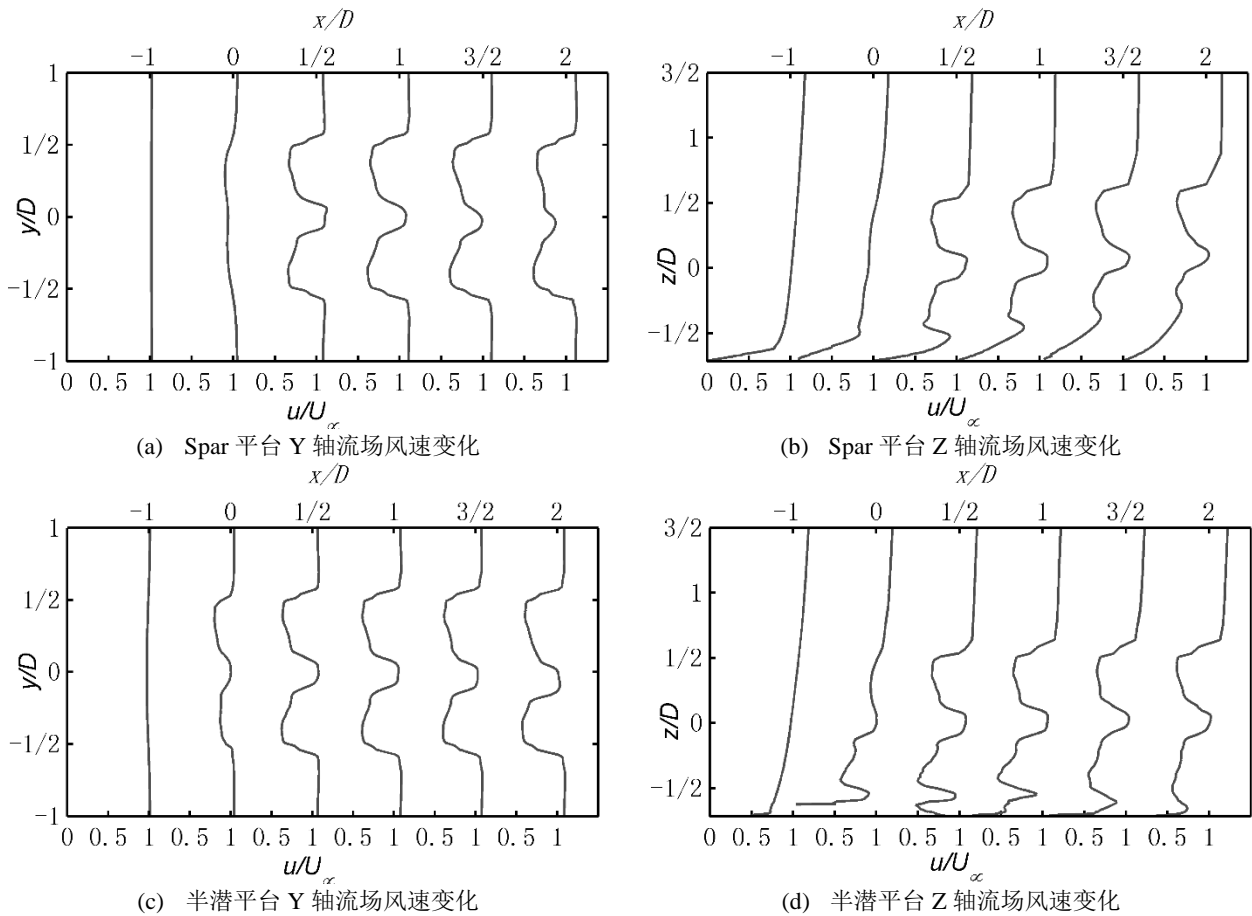


图 10 流场风速变化曲线

同时本文研究了风机的尾涡结构，如图 11 所示。尾涡结构通过速度梯度的二阶不变量 Q 来表示，并使用风速进行染色，波面使用波高进行染色。通过对比可以开，Spar 平台风机的螺旋状尾涡迅速破碎消失，而 semi-submersible 平台的尾涡也随时间向后方膨胀、破碎，显示十分紊乱。这表明在风浪联合作用下，相对于风机固定或者平台在单自由度稳定运动的情况<sup>[13][14]</sup>，风机的尾涡结构十分不稳定，尤其平台的不规则的纵摇和纵荡，特别是 Spar 平台较大幅值的纵荡运动，导致风机尾涡迅速消失。同时也可以看出，风机尾涡由于风剪切的作用，沿着 Z 轴风速的变化，引起风机尾涡存在一个明显的倾斜，这也与流场风速变化曲线有较好的对应。

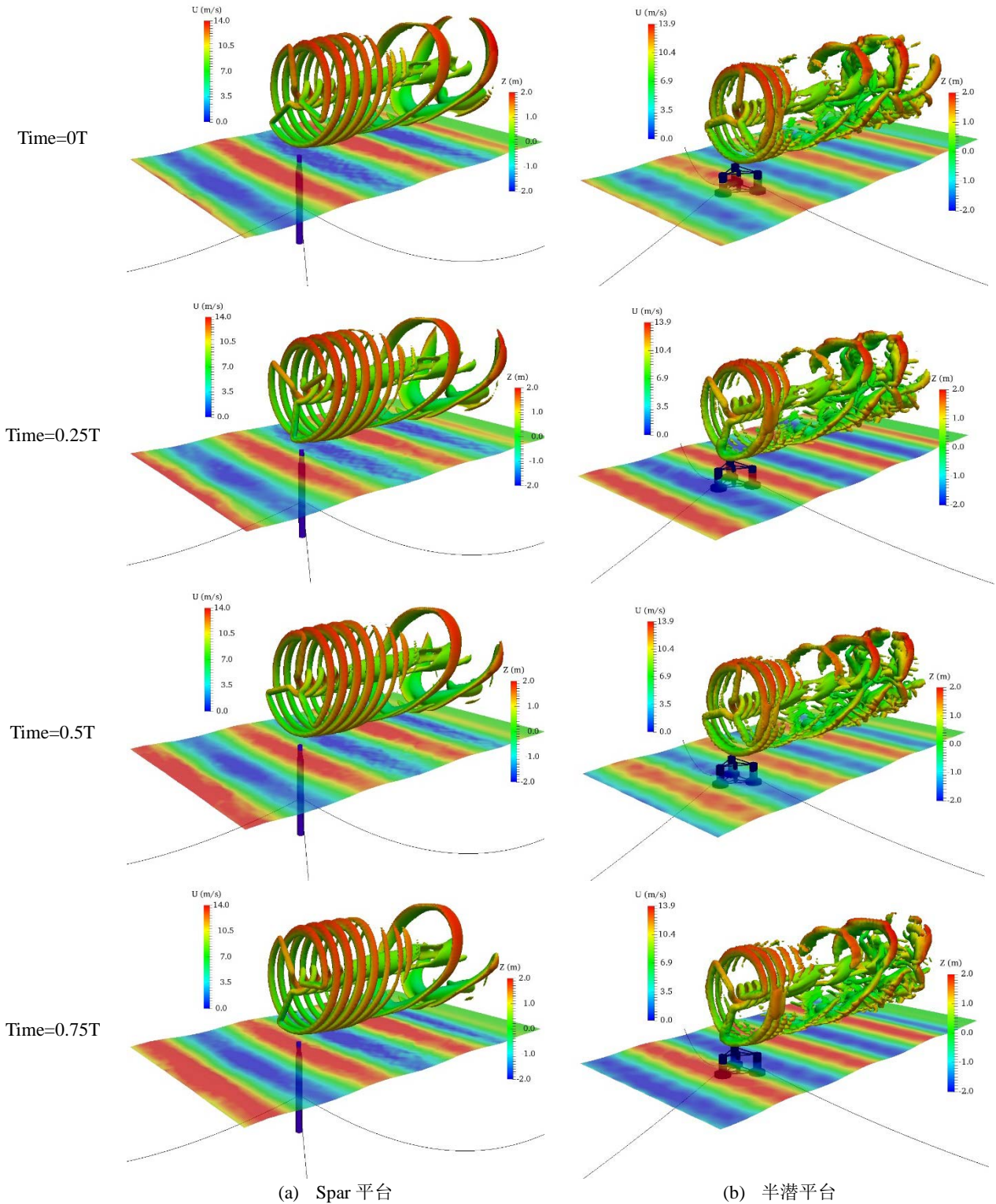


图 11 浮式风机尾涡结构图

## 4 结语

本文分别对 OC3 项目中的 Spar 形式和 OC4 项目的 semi-submersible 的浮式风机系统为研究对象，采用非稳态致动线模型来模拟风力叶片，对浮式风机进行气动-水动-锚泊系统耦合动力计算分析，得到了平台六自由度运动响应，系泊系统的张力以及风力机的非稳态气动特性。通过对比平台的六自由度运动响应曲线与风机的瞬时气动特性，发现平台的纵荡和纵摇运动幅值最大，严重影响风机的气动性能。平台周期

性纵摇运动会引起风机的气动特性曲线以相同的周期振荡，同时气动特性曲线也呈现由平台纵荡运动引起的大周期振荡。由于不同平台的参数和系泊系统的特征，在相同的环境载荷作用时，Spar 平台的运动幅值要高于 semi-submersible 平台，这对于风机稳定输出十分不利；然而 semi-submersible 平台的锚泊力几乎是 Spar 平台的三倍左右，这对 semi-submersible 平台的系泊链的选取和强度都提出更高的要求，以确保整个风机系统的安全性。本文还观察到 Spar 平台还产生了幅值接近  $2^\circ$  的艏摇运动，会导致气动载荷产生一个水平分量，引起平台产生小幅值的横荡运动，这可能与风机气动扭矩以及平台、锚泊系统的设置有关，关于这一现象的原因还有待进一步的研究分析。另外，通过对风机尾流场的分析，可以清晰地观察到风机的尾涡膨胀现象，同时在风剪切的作用下，风机尾涡呈现出明显的倾斜。本文使用 UALM 简化模型来模拟风力机，忽略了机舱和塔架对风力机气动性能的影响，在对流场风速分析时会产生明显误差，为得到更加精准完整的数值分析结果，今后可以采用考虑机舱和塔架影响的模型。

## 致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目(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项目(K2015-11)，以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09) 的资助。在此一并表示衷心感谢。

## 参考文献

- [1] MORATO A, SRIRAMULA S, KRISHNAN N, and NICHOLS J. Ultimate loads and response analysis of a monopile supported offshore wind turbine using fully coupled simulation[J]. *Renewable Energy*, 2017 101, 126–143.
- [2] SEBASTIAN T, LACKNER M. Characterization of the unsteady aerodynamics of offshore floating wind turbines [J]. *WindEnergy*, 2013, 16(3) : 339-352.
- [3] MATHA D, SCHLIPF M, PEREIRA R & JONKMAN J. 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, 2011.
- [4] JONKMAN J, MATHA D. Dynamics of offshore floating wind turbines—analysis of three concepts[J]. *Wind Energy*, 2011, 14(4): 557–569.
- [5] 李仲凯. 耦合 BEM 與 CFD 方法計算浮體式風機於規則波中運動之研究[J]. 臺灣大學工程科學及海洋工程學研究所學位論文, 2014: 1-108.
- [6] 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.
- [7] 艾勇, 程萍, 万德成. 浮式风机系统的气动-水动-锚泊系统耦合的数值分析[M], 第四届全国船舶与海洋工程 CFD 专题研讨会论文集, 镇江, 2016 年 10 月 28-30 日: 19-30.
- [8] LI P, CHENG P, WAN D C, and XIAO Q. Numerical Simulations of Wake Flows of Floating Offshore Wind Turbines by Unsteady Actuator Line Model[J], 2015: 26–28.
- [9] SORENSEN J N, and SHEN W Z. Numerical Modeling of Wind Turbine Wakes[J]. *Journal of Fluid Engineering*, 124(June 2002), 393–399.
- [10] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, and SCOTT G. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2009.
- [11] JONKMAN J, MUSIAL W. Offshore Code Comparison Collaboration (OC3) for IEA Wind Task 23 Offshore Wind Technology and Deployment[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2010.
- [12] ROBERTSON A, JONKMAN J, MASCIOLA M, et al. Definition of the Semisubmersible Floating System for Phase II of OC4[J]. Scitech Connect Definition of the Floating System for Phase IV of OC3, 2014.
- [13] 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 A 辑*, 2016, 31(2): 127-134.  
LI P F, WAN D C, LIU J C. 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)
- [14] 艾勇, 程萍, 万德成. 平台纵摇运动对风机气动性能影响的数值分析[M], 2016 年船舶力学学术会议文集, 2016 年 7 月 21-22 日, 武汉.  
AI Y, CHENG P, WAN D C. Numerical Study of Aerodynamic Interference Effect for A Floating Offshore Wind Turbine Experiencing Platform pitching Motion[C]. The Conference of Ship Mechanics in 2016. July 21-22, 2016, Wuhan.(in Chinese)

# Numerical Analysis of the Floating Offshore Wind Turbines with Different Supporting Platform

DUAN Xinze, HUANG Yang, WAN Decheng

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

## Abstract

In this paper, the coupled dynamic response of an aerodynamics-hydrodynamics-mooring system for the both floating offshore wind turbine named OC3-HywindSpar and OC4-semi-submersible are studied focus on an unsteady actuator line model (UALM) coupled with a two-phase CFD solver is applied to solve 3-D N-S equation. Through the numerical simulation of the floating wind turbine system, the predicted results of the aerodynamic performances, platform dynamic responses, and mooring line tensions for the floating offshore wind turbine with different supporting platform in the same environmental load are compared. In addition, multi-phase unsteady flow fields with complex inference effects are numerically visualized. The results show that the surge and pitch motion of the six DOF motion of the platform have greater influence on the aerodynamic performance of the wind turbine. The amplitude of the motion responses of the semi-submersible platform is lower than that of the Spar platform with the same environmental load.

**Key words:** floating offshore wind turbine; unsteady actuator line models; aero-hydrodynamics; couple effects

## 作者简介

段鑫泽 男, 1994 年生, 硕士。主要从事海上风机的气动-水动耦合方面的研究工作。

黄 扬 男, 1994 年生, 博士。主要从事风机组合性能模拟及气动-水动-锚链耦合的研究工作。

万德成 男, 1967 年生, 教授, 博士生导师。主要从事船舶与海洋工程水动力学与计算流体力学方向的研究工作。