

基于浸入边界法的海上风电双向流固耦合 数值模拟方法

吴荣辉¹, 刘冬², 郁冶³, 牟凯龙⁴, 赵兰浩^{4*}

(1. 浙江省新能源投资集团股份有限公司, 浙江省 杭州市 310016; 2. 浙江浙能国电投嵊泗海上风力发电有限公司, 浙江省 舟山市 316000; 3. 国家电投集团浙江新能源有限公司, 浙江省 杭州市 310016; 4. 河海大学水利水电学院, 江苏省 南京市 210098)

Two-Way Fluid-Structure Interaction Numerical Simulation Method for Offshore Wind Power Based on Immersed Boundary Method

WU Ronghui¹, LIU Dong², YU Ye³, MU Kailong⁴, ZHAO Lanhao^{4*}

(1. Zhejiang Provincial New Energy Investment Group Co., Ltd., Hangzhou 310016, Zhejiang Province, China; 2. Zhejiang Zheneng Guodiantou Shengsi Offshore Wind Power Generation Co., Ltd., Zhoushan 316000, Zhejiang Province, China; 3. State Power Investment Group Zhejiang New Energy Co., Ltd., Hangzhou 310016, Zhejiang Province, China; 4. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu Province, China)

摘要: 为研究海上风电机组在运行过程中的流场特性及流固耦合动力响应, 引入海上风电机组整机系统一体化分析理念, 提出基于浸入边界法的海上风电双向流固耦合运行过程模拟方法。其中, 采用浸入边界法模拟了风机旋转引起的静动干涉问题, 基于交错迭代法构建了适用于风电机组“风机-塔架-基础”一体化研究的双向流固耦合数值模拟方法。该方法能够真实反映海上风电机组的流固耦合效应, 准确求解其动力响应。所采用的浸入边界法无需更新网格运动, 能够高效求解风电机组叶片旋转引起的静动干涉问题。最后, 将该方法应用于工程实践, 模拟了某海上风电工程双向流固耦合运行全过程。

关键词: 海上风电; 双向流固耦合; 浸入边界法; 数值模拟

ABSTRACT: In order to study the flow field characteristics and dynamic fluid-structure interaction response of offshore wind turbine during operation process, the concept of integrated analysis of offshore wind power project was introduced and the simulation method for the integrated fluid-structure interaction operation process of offshore wind power was established based on the immersed boundary method. The stator-rotor interaction caused by the rotation of the fan

was simulated by the immersed boundary method. With the alternating iteration method, a two-way fluid-structure interaction numerical method for the integrated research of offshore wind turbines “fan-tower-foundation” was presented. With the proposed method, the fluid-solid interaction effect of offshore wind turbine can be truly reflected and its dynamic response can be accurately solved. The immersed boundary method can effectively solve the stator-rotor interaction caused by fan rotation without updating the grid motion. Finally, the integrated fluid-structure interaction operation process of an offshore wind power project was simulated.

KEY WORDS: offshore wind power; two-way fluid-structure interaction; immersed boundary method; numerical simulation

0 引言

能源危机与环境问题在当代社会发展过程中愈来愈突出。风能作为最具发展潜力和应用前景的清洁、可再生的新能源, 近年来引起了全球的广泛关注, 利用风力发电逐渐成为新能源开发的重点研究对象^[1-4]。相比于陆上风电场, 海上风电场具有风能资源丰富、空间大等显著优势^[5-7]。随着“3060目标”的提出, 海上风电将在可再生能源发电领域中占据更加重要的地位。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52009034)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52009034).

在我国海上风电工程设计实践中,一般采用分布迭代设计方法^[9],机组和基础的设计通常由整机供应商及设计院分别承担,针对各自负责的结构进行迭代设计。由于双方责任主体分离,可能出现结构设计重量偏大、设计载荷过于保守等问题,也未考虑多荷载耦合作用,无法对真实运行条件下的海上风电机组整机系统进行合理的安全评价。国外海上风电行业起步较早,设计理念相对先进,业界广泛运用的风机仿真运行软件主要有FAST和Bladed两款软件。二者均是将叶片视为刚性体,采用叶素动量理论^[9]进行风机叶片气动力性能分析。但海上风电呈现大型化发展趋势,随着风电机组容量以及尺寸的增大,常规的叶片刚性体假设所引起的气动计算及结构计算误差越来越大,因此必须考虑风载条件下结构流固耦合效应的影响。

目前,关于风电机组流固耦合效应的研究成果主要是针对风机叶片部分,采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)进行叶片气动力性能分析。国外研究成果相对较多,Wiegard等^[10]研发了一款流固耦合求解器,采用CFD和有限元法(finite element method, FEM)分析了风电机组的运动及结构响应;Santo等^[11]采用壳单元模拟叶片,研究了复合材料叶片的流固耦合响应规律;Dose等^[12]采用OpenFOAM研究了叶片变形对风电机组气动性能的影响;Ageze等^[13]模拟了NREL 5 MW风力机的运行过程,研究了单向流固耦合和双向流固耦合条件下风机结构动力响应的区别。

国内关于风电机组流固耦合效应的研究虽然起步较晚,但也取得了一些成果。喻涛涛等^[14]采用Ansys Workbench平台研究了叶片变形对风电机组输出功率的影响;李媛等^[15]采用商用CFD、计算结构动力学(computational structural dynamics, CSD)软件,模拟了考虑风切变时额定风速作用下的风电机组全三维流固耦合运行过程,分析了风剪切对结构响应和流场分布的影响规律;胡丹梅等^[16]采用FLUENT软件和ANSYS软件中的Transient模块对风电机组叶片进行了流固耦合计算分析,结果发现,叶片流固耦合作用使叶片气动攻角、扭矩增大。目前,国内对于风电机组流

固耦合的研究基本上都是采用商业软件完成的,并且未考虑塔架和基础的结构响应对风机运行过程的影响。

在分析风电机组气动力性能时,如何处理流场中风电机组叶片旋转引起的静动干涉问题是模拟风电机组运行过程流场变化的一大难题。对于静动干涉问题,一般将计算域划分为静止域与旋转域,采用多重参考系法或者滑移网格法求解。但多重参考系法网格保持静止,通过坐标系转动实现旋转运动,本质上是一种定常算法,与实际现象不符。而滑移网格法尽管能通过网格转动真实描述风机旋转运动对流场的影响,但每个时间步必须重新构建非协调面之间的插值关系,更新网格拓扑关系以及系数矩阵,计算效率较低。本文采用浸入边界法来处理这一问题。浸入边界法采用笛卡尔网格离散流场,通过在控制方程中引入额外的体力项来解析流场的边界作用,网格无需运动,能高效处理包含移动边界的流动问题。

基于浸入边界法,本文提出了一种同时考虑风机-塔架-基础的海上风电一体化流固耦合运行全过程数值模拟方法。以有限元法为基本框架,在各静止与旋转部间引入交互界面,采用浸入边界法模拟流场中风电机组叶片旋转的静动干扰,基于交错迭代法构建风电机组与流体相互作用的流固耦合力学模型,建立适用于风电机组“风机-塔架-基础”一体化研究的双向流固耦合数值模拟方案。最后,将该方法应用于某海上风电工程,模拟了其整个运行过程。

1 数值方法

1.1 浸入边界法

本文采用浸入边界法来处理叶片旋转引起的静动干涉问题。流场控制方程为N-S方程,包括连续性方程和动量方程:

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

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{f}_b + \mathbf{f} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为速度; t 为时间; ρ 为密度; $\boldsymbol{\tau}$ 为黏性应力张量; p 为压力; $\mathbf{f}_b$ 为体力项; $\mathbf{f}$ 为附加体力项。其中,附加体力项采用一种能够同时满足连续性

方程和无滑边界条件的隐式迭代格式求解^[17]。

根据特征线分裂(characteristic-based split, CBS)算法^[18]将式(2)沿特征线展开：

$$\Delta \mathbf{u} = -\Delta t [\nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) - \nabla \cdot \frac{\boldsymbol{\tau}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla p^{n+1} - \mathbf{f}_b] + \frac{\Delta t^2}{2} \mathbf{u} \cdot \nabla [\nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) + \frac{1}{\rho} \nabla p^{n+1} - \mathbf{f}_b] + \mathbf{f}^{n+1} \Delta t \quad (3)$$

式中 n 为时间步。

为方便表示，引入如下4个变量：

$$\mathbf{K}^n = -\Delta t [\nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) - \nabla \cdot \frac{\boldsymbol{\tau}}{\rho}] + \frac{\Delta t^2}{2} \mathbf{u} \cdot \nabla [\nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u})] \quad (4)$$

$$\mathbf{R}^{n+1} = -\Delta t \left(\frac{1}{\rho} \nabla p^{n+1} - \mathbf{f}_b \right) + \frac{\Delta t^2}{2} \mathbf{u} \cdot \nabla \left(\frac{1}{\rho} \nabla p^{n+1} - \mathbf{f}_b \right) \quad (5)$$

$$\Delta \mathbf{u}^* = \mathbf{K}^n + \mathbf{f}^{n+1} \Delta t \quad (6)$$

$$\Delta \mathbf{u}^{**} = \mathbf{R}^{n+1} \quad (7)$$

背景网格与浸入边界点之前的信息传递通过插值算子 $I[\psi(\mathbf{x})]$ 和分布算子 $D[\Psi(\mathbf{X}_i)]$ 完成。其中，插值函数与文献[19]中的一致， $\psi(\mathbf{x})$ 表示定义在笛卡尔网格节点 $\mathbf{x}$ 上的物理量， $\Psi(\mathbf{X}_i)$ 表示定义在浸入边界点 $\mathbf{X}_i$ 上的物理量。

根据浸入边界点上的无滑边界条件 $\mathbf{V}^{n+1} = \mathbf{U}^{n+1}$ ，可得

$$I(\mathbf{f}^{n+1} \Delta t) = \mathbf{V}^{n+1} - I(\mathbf{u}^n + \mathbf{K}^n + \mathbf{R}^{n+1}) \quad (8)$$

在式(8)两端施加分布算子，可得背景网格节点上的附加体力项为

$$\mathbf{f}^{n+1} \Delta t = D[\mathbf{V}^{n+1} - I(\mathbf{u}^n + \mathbf{K}^n + \mathbf{R}^{n+1})] \quad (9)$$

包含浸入边界点的 N-S 方程迭代求解格式如下。

1) 计算中间速度场。

$$\mathbf{u}^{n*,K} = \mathbf{u}^n + \mathbf{K}^n \quad (10)$$

2) 令 $k=1$ ，根据式(10)计算附加体力项。

取初值 $\mathbf{f}^{n+1,k,0} = 0$ ， $\Delta \mathbf{u}^{*,0} = \mathbf{R}^n$ ， $i=1$ ，则循环迭代式如下：

$$\Delta \mathbf{f}^{n+1,k,i-1} \Delta t = D[\mathbf{V}^{n+1} - I(\mathbf{u}^{n*,K} + \Delta \mathbf{u}^{*,k-1} + \mathbf{f}^{n+1,k,i-1} \Delta t)] \quad (11)$$

$$\mathbf{f}^{n+1,k,i} \Delta t = \mathbf{f}^{n+1,k} \Delta t + \Delta \mathbf{f}^{n+1,k,i-1} \Delta t \quad (12)$$

若 $\|\mathbf{V}^{n+1} - I(\mathbf{u}^{n*,K} + \Delta \mathbf{u}^{*,k} + \mathbf{f}^{n+1,k,i} \Delta t)\| \leq \varepsilon$ ，则进行步骤3)，令 $\mathbf{f}^{n+1,k} = \mathbf{f}^{n+1,k,i}$ ，其中 ε 为给定的容

差， $\|\cdot\|$ 表示一种范数；若不满足收敛条件，则令 $i=i+1$ ，重复步骤2)。

3) 计算压力增加量 $\Delta p^{n,k}$ 。根据连续性方程 $\nabla \cdot \mathbf{u}^{n+1,k} = 0$ ，可得

$$\nabla \cdot \mathbf{R}^{n+1,k} = -\nabla \cdot (\mathbf{u}^n + \mathbf{K}^n + \mathbf{f}^{n+1,k} \Delta t) \quad (13)$$

4) 计算速度增量的校正量。

$$\Delta \mathbf{u}^{*,k} = \mathbf{R}^{n+1,k} \quad (14)$$

如果 $\|\Delta \mathbf{u}^{*,k} - \Delta \mathbf{u}^{*,k-1}\| \leq \varepsilon$ ，令 $\mathbf{f}^{n+1} = \mathbf{f}^{n+1,k}$ ， $\mathbf{R}^{n+1} = \mathbf{R}^{n+1,k}$ ；否则，令 $k=k+1$ ，重复步骤2) — 4)。

5) 更新压力值 p^{n+1} 和速度值 $\mathbf{u}^{n+1}$ 。

$$p^{n+1} = p^n + \Delta p^{n,k} \quad (15)$$

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^n + \mathbf{K}^n + \mathbf{R}^{n+1} + \mathbf{f}^{n+1} \Delta t \quad (16)$$

1.2 守恒式 level set 方法

level set 通过定义符号距离函数 ϕ 隐式捕捉界面，符号距离函数的对流过程满足 Hamilton-Jacobi 方程：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (17)$$

由于 level set 函数在计算过程中可能丧失符号距离特性，需要进行重新初始化过程以保持该特性：

$$\frac{\partial \phi}{\partial \varsigma} = S(\phi^n)(1 - |\nabla \phi|) \quad (18)$$

式中 ς 为虚拟时间。

但 level set 方法无法保证质量守恒，其对流过程和重新初始化过程会引起严重的质量损失，造成误差，因此本文采用了守恒式 level set 方法。相较于原始的 level set 方法，守恒式 level set 方法采用的是双曲正切函数作为标记函数：

$$H(\phi) = 0.5[1 + \tanh(\phi/2\varepsilon_H)] \quad (19)$$

式中 ε_H 为界面宽度。守恒式 level set 方法的对流方程为

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla H = 0 \quad (20)$$

重新初始化过程可表示为

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} + \nabla \cdot [H(1-H)\mathbf{n}'] = \nabla \cdot [\varepsilon(\nabla H \cdot \mathbf{n}')\mathbf{n}'] \quad (21)$$

式中 $\mathbf{n}'$ 为界面法向。

本文采用 CBS 算法求解守恒式 level set 方法的对流过程和重新初始化过程，以精确地捕捉自由面。

1.3 结构运动方程

风电机组结构的运动采用有限单元法求解，其控制方程为

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = F \tag{22}$$

式中： M 、 C 和 K 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵； $\ddot{\delta}$ 、 $\dot{\delta}$ 和 δ 分别为系统的节点加速度、速度和位移向量； F 为系统的节点荷载向量，包含流体在流固耦合面上对固体结构的作用荷载。

1.4 流固耦合求解格式

为了反映流体和风机的强耦合，建立了双向流固耦合迭代求解方案。为方便起见，离散后耦合系统方程组可表示如下：

$$(\Delta u, \Delta p) = R_F(u^n, p^n, \delta^{n+1}) \tag{23}$$

$$\Delta \delta = R_S(\delta^n, u^{n+1}, p^{n+1}) \tag{24}$$

式中 R_F 、 R_S 分别表示流体、固体控制方程离散后的右端项。第 $n+1$ 时间步第 k 次迭代的 $u^{n+1,k}$ 、 $p^{n+1,k}$ 、 $\delta^{n+1,k}$ 迭代计算过程如下：

1) 将第 $n+1$ 时间步第 $k-1$ 次迭代固体的运动和变形作为当前第 $n+1$ 时间步第 k 次迭代的已知条件，解除流体和固体之间的耦合关系，由第 n 时间步的速度 u^n 和压力 p^n ，求解出第 $n+1$ 时间步第 k 次迭代流体的速度 $u^{n+1,k}$ 和压力 $p^{n+1,k}$ 。

2) 根据 $u^{n+1,k}$ 、 $p^{n+1,k}$ 求解流体作用在固体上的力，在此基础上，可以求出第 $n+1$ 时间步第 k 次迭代固体的运动和变形。

3) 根据 $\|\Delta \zeta^{n,k} - \Delta \zeta^{n,k-1}\| < \varepsilon_\zeta$ 进行收敛性判断，其中 ζ 可取为变量 Δu 、 Δp 和 $\Delta \delta$ 。若满足收敛性条件，则退出迭代，进行下一个时间步的计算；否则，重复上述迭代过程直至收敛。

2 计算模型及计算条件

2.1 流固耦合整体模型

基于自主开发的计算程序，对某海上风电工程的一体化流固耦合运行过程进行模拟。其中，流固耦合整体模型如图 1 所示。

2.2 固体模型及计算条件

本工程风机为上风向三叶轮风机，风机直径 D_f 为 178 m，额定转速为 10.8 r/min，轮毂高度为 111.23 m。支撑结构采用多桩式基础，桩基空间

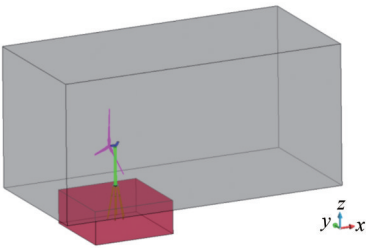


图 1 整体模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of integrated model

斜率为 1:5，桩基上部嵌入混凝土承台，承台上部与塔筒通过预应力螺栓连接。地基尺寸取为 200.0 m×200.0 m×80.8 m，固体模型如图 2 所示。其中，塔筒和桩基采用四边形板单元离散，其他结构采用六面体实体单元离散，共计 4.3 万个单元、5.1 万个节点。

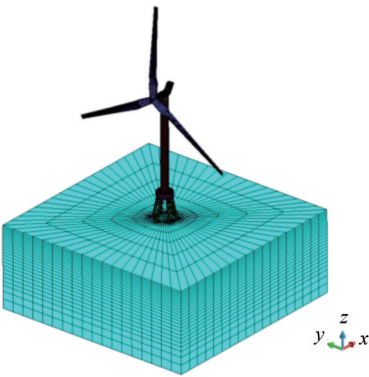


图 2 固体模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of solid model

表 1 为固体模型材料参数。在计算时，地基底面设置为三向位移约束，地基侧面设置为法向位移约束，地基以上的风机机组外轮廓为流固耦合面，受到来自流场的流固耦合荷载作用。

表 1 固体模型材料参数

Tab. 1 Material characteristics of solid model

参数	地基	混凝土承台(C40)	桩基 Q345	塔筒 Q355NC	叶片
材料密度/(kg/m ³)	2 000.0	2 450.0	8 242.5	8 242.5	1 950.0
泊松比	0.150	0.167	0.280	0.280	0.250
弹性模量/GPa	20.0	33.5	210.0	210.0	90.0

2.3 流体模型及计算条件

由于采用浸入边界法模拟风机旋转会引起静动干涉问题，因此流体域采用笛卡尔网格离散。为保障流体模型内流场的充分发展，避免有限宽

度的模型边界对风机周边流态造成较大影响，流体模型计算域选取风机塔筒上、下游各约 D_f 、 $3D_f$ 范围，风机两侧各约 D_f 范围。图3为流体模型，其中，计算域总长为710 m，宽度为344 m，高度为344 m，网格共计约74万个单元、76万个节点。固体边界采用浸入边界点离散表示，浸入边界点由计算程序根据固体模型几何信息自动生成。

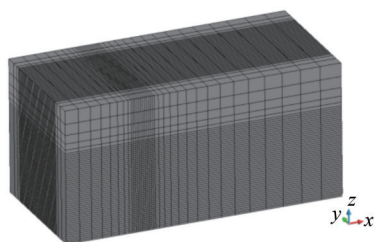


图3 流体模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fluid model

流体材料为空气，密度为 1.225 kg/m^3 ，动力黏度为 $0.000 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。边界条件如图4所示，上游来流为均匀风，上下游进出口给定已知速度，即额定风速为 10 m/s 。侧面为滑移边界，底部边界及浸入边界点边界为无滑固壁，顶部边界采用刚盖假定，即保证法向速度和法向速度梯度为0。其中，浸入边界点组成的边界为流固耦合边界，在计算中根据固体运动信息施加边界条件，并向固体传递流固耦合荷载。此外，初始静水面高程为 -2.89 m ，地基高程为 -11.4 m ，上游来流为均匀水流，与风场类似，上下游均设定为速度边界条件，给定速度为 2 m/s 。

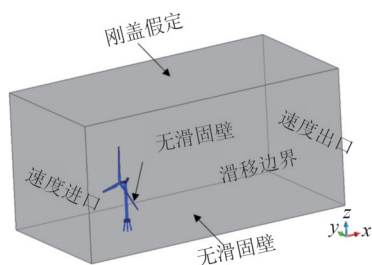


图4 边界条件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of boundary conditions

3 计算结果分析

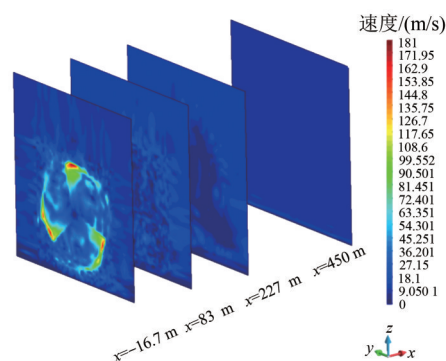
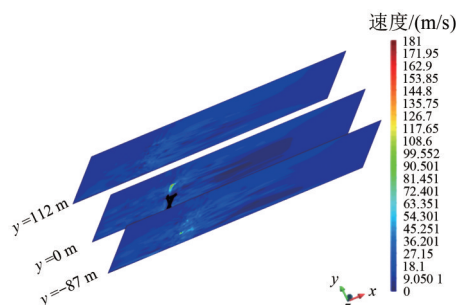
对该海上风电整体系统的流固耦合运行全过程进行模拟，计算总时长为34 s，风机叶片在0~

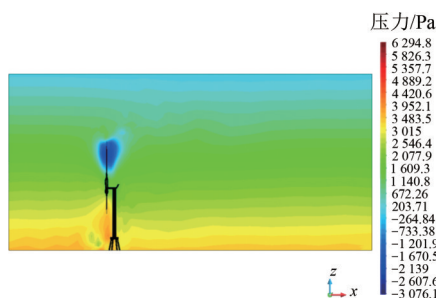
1 s缓慢加速至额定转速，在1~34 s风机以额定转速 10.8 r/min 运行约6个周期。

3.1 流场结果分析

为研究风机周围流场分布特性，选取了不同的截面。如图5所示，给出了 $x=-16.7, 83, 227, 450 \text{ m}$ 处截面速度分布云图。由图5可知，叶尖处流速最大，为 181 m/s 。受叶片旋转运动的影响，在叶片上下缘产生与风机叶片扫掠路径一致的扇形高流速区，而在各扇叶片之间存在扇形的低流速区域。此外，在风机下游也存在一定区域的低流速区，但随着与风机距离的增大，低流速区逐渐消失。图6为 y 向不同截面速度云图，可以看出，在 $y=0 \text{ m}$ 截面下游存在明显的低流速区，而在 $y=-87 \text{ m}$ 和 $y=112 \text{ m}$ 截面，由于与风机距离较大，其下游的低流速区并不明显。

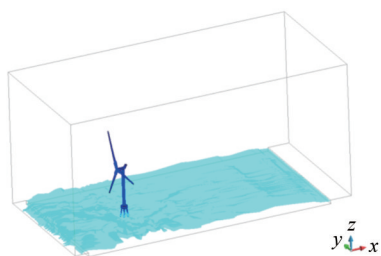
图7为 $y=0 \text{ m}$ 截面处压力云图，可以看出，风机附近的流场压强分布方式整体与静水压强的分布相似，各高程位置的压强与距水面的深度基本成正比例关系。当风机叶片运动到截面位置时，

图5 $t=34 \text{ s}$ 时 x 向不同截面速度云图Fig. 5 Velocity contour of different cross sections in x direction at $t=34 \text{ s}$ 图6 $t=34 \text{ s}$ 时 y 向不同截面速度云图Fig. 6 Velocity contour of different cross sections in y direction at $t=34 \text{ s}$

图7 $t=34$ s时 $y=0$ m截面压力云图Fig. 7 Pressure contour of $y=0$ m cross section at $t=34$ s

局部压强会有明显的压差。此外,风机叶片背风面的流体压强明显低于叶片迎风面压强,这是因为风机附近的气流方向在叶片的旋转挤压作用下发生了改变,从而实现了能量的转换,即叶片的迎风面为压力面,而背风面为吸力面。

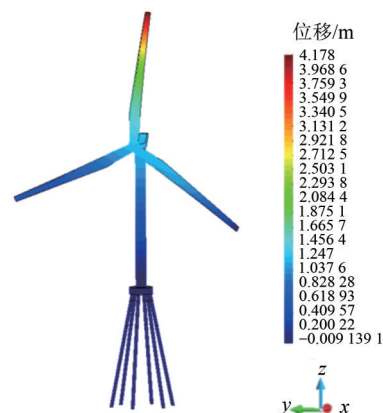
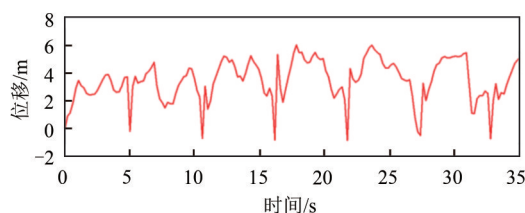
图8为整个计算区域内的自由表面形态,可以看出,自由表面在上游均匀来流的作用下,整体较平缓,但在桩基处存在一定的波动。由于水较浅,并且上游流速较小,因此水荷载对于风电机组整体结构的动力响应影响较小。

图8 $t=34$ s时自由表面形态Fig. 8 Profiles of free surface at $t=34$ s

3.2 结构响应分析

图9为 $t=34$ s时风电机组、塔筒以及支撑结构的 x 向位移响应。可以看出,风电机组在上游来流作用下整体偏向下游,叶尖处 x 向位移最大,由叶尖向轮毂处逐渐减小。此外,塔筒顶部位移约为1.5 m,而塔筒处位移会影响风机叶片的结构响应,因此,一体化分析可以更加准确地反映海上风电机组整机系统的结构响应特性。由于桩基嵌入地基内部,在土体的作用下,桩基位移相较于叶片及塔筒部分较小,约为0.3 m。

为进一步分析位移响应,给出了叶尖处 x 向位移随时间变化曲线,如图10所示。可以看出,当风机达到额定转速逐渐稳定后,叶尖处 x 向位

图9 $t=34$ s时海上风电整机 x 向位移Fig. 9 x -direction displacement of offshore wind turbine at $t=34$ s图10 叶尖 x 向位移随时间变化曲线Fig. 10 x -direction displacement curve of blade tip with time

移在流固耦合脉动荷载的作用下呈现周期性变化,变化周期约为6 s,与风机叶片运动周期一致。其中,叶尖处 x 向位移最大值为6.04 m。

图11为风机叶片迎风面第一主应力云图。可以看出,叶片迎风面第一主应力均为正值,以受拉为主;主拉应力最大值出现在叶片中部前缘位置,沿叶片径向向两端逐渐减小;此外,叶片前缘的第一主应力始终大于后缘位置。图12为风机叶片迎风面第三主应力云图,可以看出,其与第一主应力分布规律类似,叶片背风面第三主应力均为负值,以受压为主;主压应力最大值出现在叶片中部后缘位置;叶片后缘的第三主应力始终大于前缘位置。

图13、14分别为塔筒和桩基处的应力分布云图,采用米塞斯应力来表示塔筒和桩基的受力状态。从图13可以看出,塔筒在上部与机组交界处以及下部与承台交界处均存在应力集中现象,这主要是由结构截面突变引起的;此外,在上游来流作用下,塔筒下游面的应力明显大于上游面的应力。

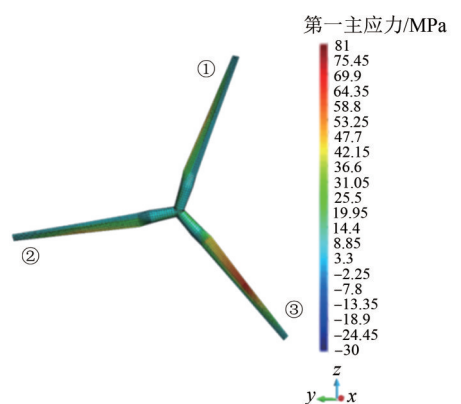
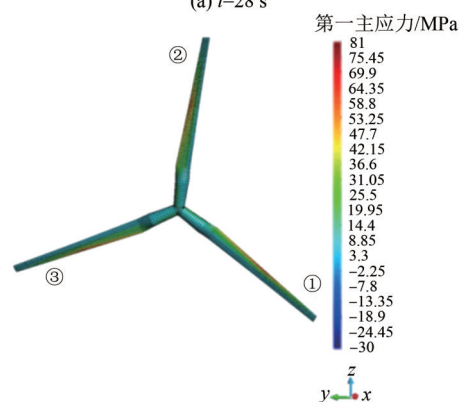
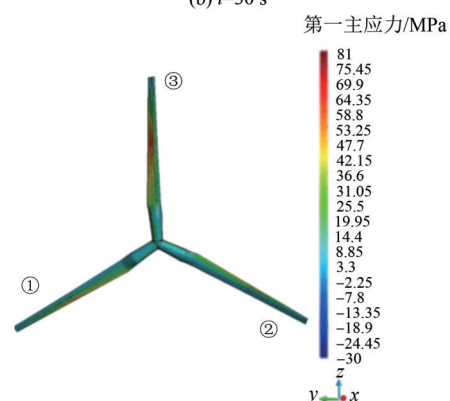
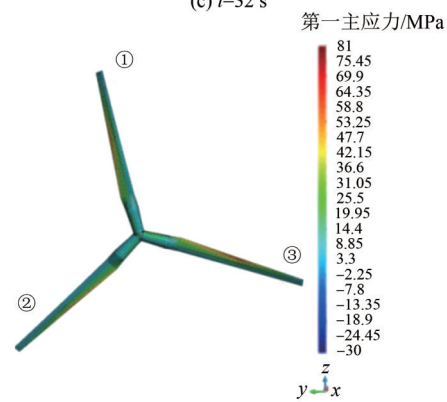
(a) $t=28$ s(b) $t=30$ s(c) $t=32$ s(d) $t=34$ s

图11 风机叶片迎风面第一主应力云图

Fig. 11 Contour diagram of the first principal stress on windward side of fan blade

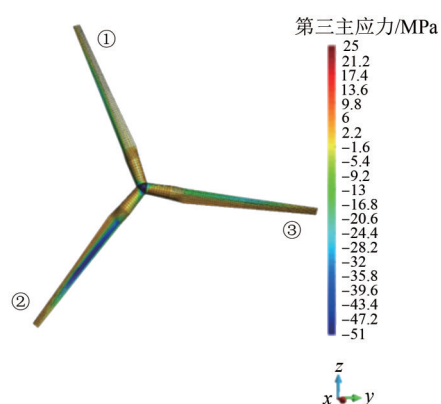
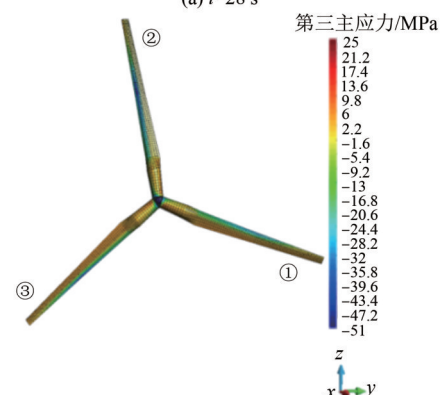
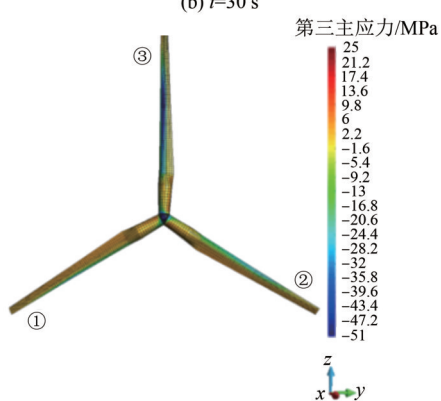
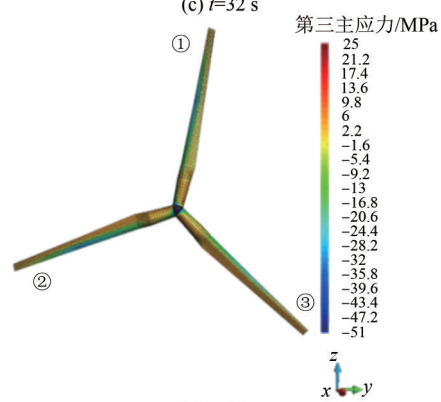
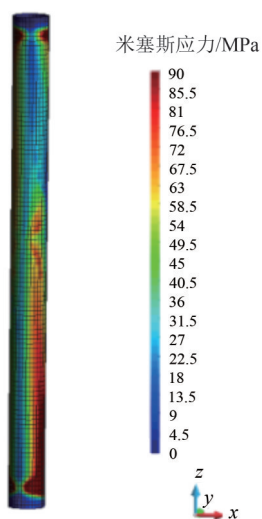
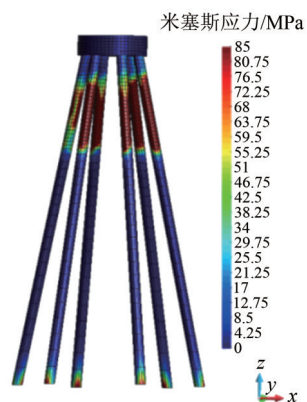
(a) $t=28$ s(b) $t=30$ s(c) $t=32$ s(d) $t=34$ s

图12 风机叶片迎风面第三主应力云图

Fig. 12 Contour diagram of the third principal stress on windward side of fan blade

图13 $t=34$ s时塔筒米塞斯应力云图Fig. 13 Mises stress contour of tower at $t=34$ s图14 $t=34$ s时桩基米塞斯应力云图Fig. 14 Mises stress contour of pile foundation at $t=34$ s

从图14可以看出,桩基部分的应力分布规律较明显,应力较大的区域集中在承台以下及地基以上的部分,这主要是由此处结构受力面较小引起的。

4 结论

引入了海上风电机组一体化流固耦合分析理念,采用浸入边界法模拟风机旋转引起的静动干涉问题,基于交错迭代法构建了适用于风电机组“风机-塔架-基础”一体化研究的双向流固耦合数值模拟方法。最后,模拟了某海上风电工程的运行全过程,模拟结果表明:

1) 风机旋转是引起流场变化的最主要因素。叶尖处流速最大,在叶片上下缘产生与风机叶片扫掠路径一致的扇形高流速区,而在各扇叶片之间存

在扇形的低流速区域。此外,在叶片下游存在明显的低流速区,随着与叶片距离的增大,低流速区逐渐消失。

2) 流场压力近乎于静压分布,风机叶片背风面的流体压强低于叶片迎风面压强。

3) 叶片在来流作用下位移整体偏向下游,叶尖处位移最大,呈现周期性变化,变化周期与风机叶片运动周期一致。

4) 叶片迎风面以受拉为主,背风面以受压为主;叶片前缘主拉应力较大,而后缘位置主压应力较大。

参考文献

- [1] 苏向敬, 山衍浩, 周汶鑫, 等. 基于GRU和注意力机制的海上风机齿轮箱状态监测[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 141-149.
SU X J, SHAN Y H, ZHOU W X, et al. GRU and attention mechanism-based condition monitoring of an offshore wind turbine gearbox[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 141-149.
- [2] 朱维群, 王倩. 碳中和目标下的化石能源利用新技术路线开发[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 3-7.
ZHU W Q, WANG Q. Development of new technological routes for fossil energy utilization under the goal of carbon neutral[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 3-7.
- [3] 姜红丽, 刘羽茜, 冯一铭, 等. 碳达峰、碳中和背景下“十四五”时期发电技术趋势分析[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 54-64.
JIANG H L, LIU Y X, FENG Y M, et al. Analysis of power generation technology trend in 14th Five-Year Plan under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 54-64.
- [4] 查雨欣, 林健, 张树龙, 等. 基于转子动能的直驱式风电系统RoCoF下垂控制策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(4): 21-26.
ZHA Y X, LIN J, ZHANG S L, et al. RoCoF droop control strategy for direct-drive wind power system based on rotor kinetic energy[J]. Smart Power, 2022, 50(4): 21-26.
- [5] 孙瑞娟, 梁军, 王克文, 等. 海上风电集电系统研究综述[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 105-115.
SUN R J, LIANG J, WANG K W, et al. Overview of offshore wind power collection system[J]. Electric

- Power Construction, 2021, 42(6): 105-115.
- [6] 王秀丽, 赵勃扬, 郑伊俊, 等. 海上风力发电及送出技术与就地制氢的发展概述[J]. 浙江电力, 2021, 40(10): 3-12.
WANG X L, ZHAO B Y, ZHENG Y J, et al. A general survey of offshore wind power generation and transmission technologies and local hydrogen production [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10): 3-12.
- [7] 冯子木, 孙国强, 滕德红, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越研究综述[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 75-85.
FENG Z M, SUN G Q, TENG D H, et al. Reviews of LVRT technology for D-PMSG[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 75-85.
- [8] 周映鸣, 李晓勇, 陈晓庆. 海上风机支撑结构整体优化设计[J]. 南方能源建设, 2019, 6(4): 86-92.
ZHOU Y M, LI X Y, CHEN X Q. Integrated design optimization of offshore support structure[J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(4): 86-92.
- [9] LEDOUX J, RIFFO S, SALOMON J. Analysis of the blade element momentum theory[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2021, 81(6): 2596-2621.
- [10] WIEGARD B, RADTKE L, KÖNIG M, et al. Simulation of the fluid-structure interaction of a floating wind turbine[J]. Ships and Offshore Structures, 2019, 14(1): 207-218.
- [11] SANTO G, PEETERS M, VAN PAEPEGEM W, et al. Dynamic load and stress analysis of a large horizontal axis wind turbine using full scale fluid-structure interaction simulation[J]. Renewable Energy, 2019, 140: 212-226.
- [12] DOSE B, RAHIMI H, HERRÁEZ I, et al. Fluid-structure coupled computations of the NREL 5 MW wind turbine by means of CFD[J]. Renewable Energy, 2018, 129: 591-605.
- [13] AGEZE M B, HU Y, WU H. Comparative study on uni-and bi-directional fluid structure coupling of wind turbine blades[J]. Energies, 2017, 10(10): 1499.
- [14] 喻涛涛, 张立茹, 王雪丽. 基于流固耦合的风力机叶片变形研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(9): 1381-1385.
YU T T, ZHANG L R, WANG X L. Research on the deformation of wind turbine blade using fluid-solid coupling method[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(9): 1381-1385.
- [15] 李媛, 康顺, 王建录, 等. 2.5 MW 风力机叶片流固耦合数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(1): 71-74.
LI Y, KANG S, WANG J L, et al. Numerical simulation of fluid-structure coupling of 2.5 MW wind turbine blades[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(1): 71-74.
- [16] 胡丹梅, 张志超, 孙凯, 等. 风力机叶片流固耦合计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(17): 98-104.
HU D M, ZHANG Z C, SUN K, et al. Computational analysis of wind turbine blades based on fluid-structure interaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(17): 98-104.
- [17] MAO J, ZHAO L, LIU X, et al. An iterative divergence-free immersed boundary method in the finite element framework for moving bodies[J]. Computers & Fluids, 2020, 208: 104630.
- [18] CHORIN A J. A numerical method for solving incompressible viscous flow problems[J]. Journal of Computational Physics, 1997, 135(2): 118-125.
- [19] PESKIN C S. The immersed boundary method[J]. Acta Numerica, 2002, 11: 479-517.

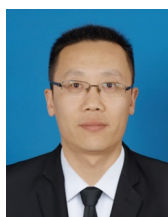
收稿日期: 2022-01-21。

作者简介:



吴荣辉

吴荣辉(1963), 男, 高级工程师, 研究方向为新能源技术与应用, 41863966@qq.com;



赵兰浩

赵兰浩(1980), 男, 博士, 教授, 研究方向为流固耦合问题数值模拟和水工结构抗震分析, 本文通信作者, zhaolanhao@hhu.edu.cn。

(责任编辑 尚彩娟)