

NREL5MW 风机的气动性能和流场特征研究

孔荷林, 范菊, 王立志, 朱仁传

(上海交通大学高新船舶与深海开发装备协同创新中心 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海, 200240, Email: helinK@sjtu.edu.cn)

摘要: 本研究采用数值模拟的方法求解 RANS 方程, 分别利用 MRFs 多重参考系和滑移网格, 基于 STAR-CCM+软件的隐式求解器对大型海上浮式风机 NREL 5MW 的风轮模型和带塔架模型进行了数值模拟。首先计算无塔架时额定工况下风机的气动性能参数并与 NREL 实验论文结果^[6]对比, 验证网格和计算模型的可靠性, 随后计算了带塔架模型额定工况下叶片受到的推力和扭矩及塔架升阻力变化曲线, 并与无塔架情况对比, 结合极值时刻流场的速度、压力分布详细分析了塔架与风轮的相互影响及载荷突变的原因。最后分析了距离桨毂中心平面不同距离的截面速度场, 分析了塔影效应沿竖直方向的分布规律及风轮对流场的偏转作用。为今后的模型试验和海上风力发电机结构优化提供了一定的参考。

关键词: 数值模拟; NREL5MW; 塔影效应; 流场偏转

1 前言

自工业革命以来, 石油和煤炭加速消耗的趋势越来越显著, 化石燃料的过度使用导致全球气温迅速攀升, 大力发展清洁能源的利用技术也成为现代社会的必然需求。由于海上风能储量丰富且较之陆地风能有风速高, 风切变小且风力稳定的突出优势, 国内外许多学者对海上风力发电机的基础类型、环境载荷动力响应、叶片设计、气动性能等方面进行多方面研究。Suzuki 等首先结合他们的设计经验提出了海上风力发机 TLP 浮式基础的概念设计^[1]; Liang Z 设计半潜式海上风机浮式基础并对该平台的稳性进行了计算和探讨^[2]; 李成良等使用有限元方法对 750KW 的风机叶片进行了结构动力学和静力学分析, 并对叶片的结构做了进一步优化^[3]; 左薇等忽略风轮仰角和锥角及塔架影响对 NREL 5MW 风机进行数值模拟, 讨论了风力机叶片展向的压力分布和速度分布规律^[4]; 王杨等则将叶轮和塔架分别简化为二维的平板和圆柱, 针对 DTU10MW RWT 型风力发电机的塔影效应进行了简化模型试验, 分析了不同平板位置下圆柱表面的受力情况^[5]; 本文基于 NREL5MW 标准风力机模型, 采用 CFD 方法模拟了定常风速下风轮叶片和塔架的受力情况, 分析了塔架与风轮之

间的相互影响以及尾流的偏转情况，并对不同位置的流场的速度剖面和压力剖面进行分析，探究了塔影效应沿垂直方向的分布规律和叶轮偏转效应在流场的具体表现。

2 风机建模

本文选取目前研究领域中的应用相对广泛的 NREL 5MW 风力机作为研究对象，该风机为典型的三叶片上风向型变速为桨风力发电机，参考美国可再生能源实验室（NREL）发布的风机剖面翼型数据及其它必要参数（表 1），对机舱外形的细节做了一定程度的简化，在 CATIA 软件中建立相应的风机转子和轮毂模型如图 1 所示，相应的翼型剖面如图 2 所示。

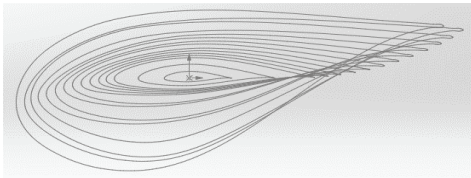


图 2 NRE 5MW 风机翼型剖面

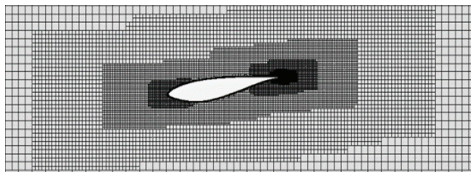


图 3c 叶片附近网格细节



图 1 NREL 5MW 风机模型

表 1 NREL5MW 模型风机及其塔架主要参数^[6]

项目	参数	项目	参数
额定功率	5MW	轮毂直径	3m
风机叶片、类型	3、上风向	轮毂高度	90m
叶片展向长度	62.9m	悬垂长度	5m
切入、切出风速	3m/s、25m/s	重心高度	38m
额定工况	11.4m/s;12.1r/min	塔底、塔顶直径	6m、3.9m

3 控制方程

用雷诺平均的方法对不可压 NS 方程进行时间平均得到以下控制方程：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad i=1,2,3 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right] - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \quad i, j=1,2,3 \quad (2)$$

ρ : 空气密度取 1.225 kg/m^3 ; μ : 动力黏度取 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$; \bar{u}_i : i 方向速度时均项; u_i' : i 方向速度脉动项; \bar{p} : 流场平均压力; $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ 为雷诺应力项。选择 $SST k-\omega$ 模型封闭上述控制方程:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \omega \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (4)$$

k 、 ω 为湍动能和湍流耗散率; Γ_k 、 Γ_ω 为湍流扩散系数; G_k 、 G_ω 为湍流产生项; Y_k 、 Y_ω 为湍流耗散项; S_k 、 S_ω 为源项; D_ω 为横向耗散导数;

4 网格划分与计算域设置

本文采用非结构化网格进行计算, 首先使用单独的风轮模型在标准工况下的计算结果验证网格的可靠性和 CFD 方法的可行性。在 STARCCM+ 软件中设置合适的计算域, 整体网格剖面和细节如图 3a.3b.3c 所示。全文均采用实尺模型计算, 采用笛卡尔坐标系描述空间方位, 坐标原点为桨毂中心, 顺风向为 Y 轴正向, 竖直向上为 Z 轴正向, 右手定则确定 X 轴正向。采用的背景网格尺寸为 2m, 采用尺寸稍大于风轮扫略体积的圆柱体区域作为滑移区, 对此区域网格相应加密。叶片表面网格基础尺寸为 0.1m, 最小尺寸为 0.01m, 塔架网格尺寸与叶轮一致, 物面边界网格层数为 12 层, 总厚度设为 0.08m。

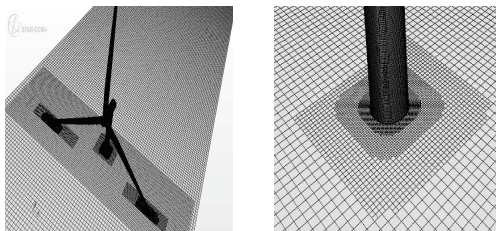


图 3a 整体网格剖面 图 3b 塔架附近网格细节

使用 MRF (Multiple Reference Frame) 法为非定常的计算提供初始流场, 非定常计算采用滑移网格法 (Sliding Mesh Approach), 在旋转区域和外部流场之间设置滑移界面, 在叶片转动时整个旋转区域的网格整体跟随叶片一起转动, 流场各个物理信息通过交界面传递。非定常计算的时间步长设为叶片旋转 2° 所需的时间。

图 4a 和图 4b 分别为风速 11.4m/s , 转速 12.1r/min 的额定工况下风轮推力与转矩的时历曲线。从图中可以看出 7.5s 之后风轮的推力和转矩的计算结果基本收敛, 推力结果的波动极差仅为 0.25%, 而转矩的波动极差仅为 0.2%, 该工况下 NREL 设计的推力值为 800000N , 输出功率为 5.3MW ^[7], 本文算得推力均值为 778000N , 误差为 -2.75% , 转矩均值为 $5.0 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}$, 将转矩换算成输出功率 6.3MW , 误差为 18.9% 。通常将 20% 视为可接受的误差范围。在此误差范围内网格的可靠性的 CFD 方法的可行性得到验证。

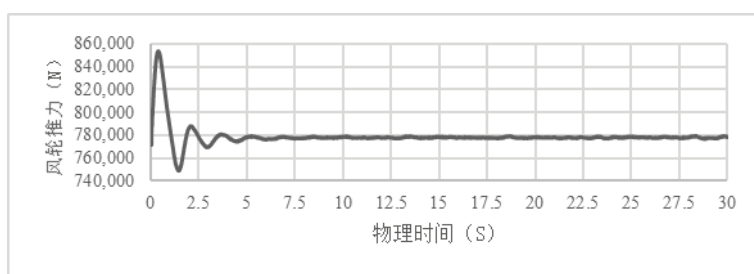


图 4a 额定工况下风轮推力—时间曲线

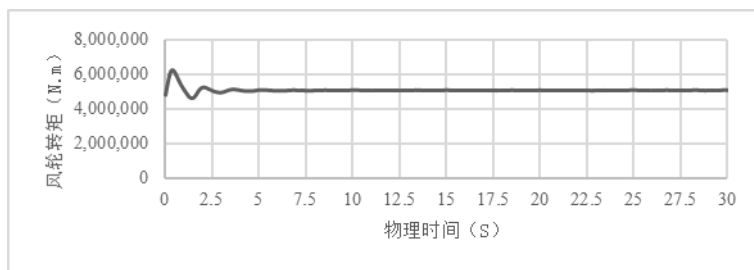


图 4b 额定工况下风轮转矩—时间曲线

5 数值结果与分析

图 5a~5b 分别为额定工况时塔架影响下的风轮推力和转矩随时间的变化情况。与无塔架情况相比, 可以明显观察到 5s 之后推力与转矩均发生了周期性波动, 推力的波动幅值约为 1.1%, 转矩的波动幅值约为 2.3%; 5~30s 之间出现 15 个波谷, 推力和转矩到达波谷的时间一致且数值增减波动趋势大体相同。12.1r/min 的转速下, 风轮在 25s 内转动 5 圈回到原来位置, 3 个叶轮依次经过塔架共计 15 次, 恰好与 15 个波谷对应。由此可见, 风轮转动的周期与波谷的产生周期存在一个倍数关系, 这个倍数正好是风轮叶片数。单独考查时刻 7.5s, 此时每个叶片转动 544.5° , 将初始位置叶片展向与 Z 轴正向重合的位置定义为 0

相位，顺时针为转动正向，且规定相位角范围为 $0^\circ - 360^\circ$ ，则可知 7.5s 时刻叶片转动相位为 184.5° ，即叶片位于塔架正前方区域。此时到达推力和转矩极小值，说明塔架对来流的阻挡作用不可忽视，它的存在使风轮叶片每一次经过它推力和转矩都有明显下降，由此带来输出功率的不稳定性和叶片结构的疲劳损伤，工程上应给予足够重视。

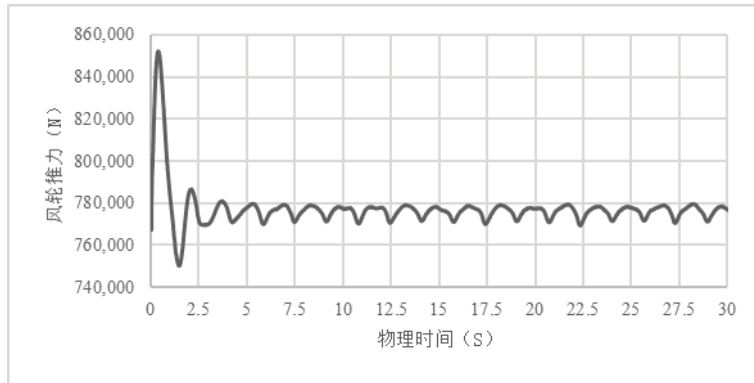


图 5a 塔架影响下风轮推力—时间曲线（额定工况）

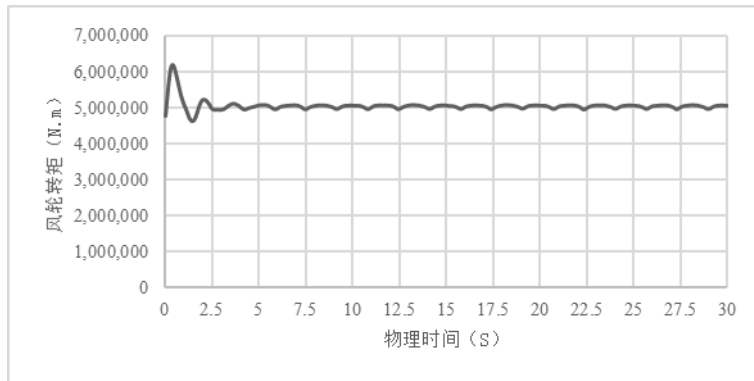


图 5b 塔架影响下风轮转矩—时间曲线（额定工况）

图 6a~6b 为额定工况下塔架 X 方向和 Y 方向的受力随时间的变化曲线。机翼理论中又称此 Y 方向的受力为阻力，X 方向的受力则为升力。观察图 6a~6b 可知同样是在 7.5s 时刻，风轮叶片运动到塔架正前方时，塔架的升力大小和方向均发生了突变，阻力出现显著下降，幅度高达 66.7%，且每一次塔架受力极小值时刻均与图 5a~5b 中风轮推力与转矩极小值时刻吻合。这说明风轮叶片运动到塔架正前方，受到塔架阻碍的同时，也对经过塔架的来流造成了不可忽视的影响。与经典的圆柱绕流模型相比，二者相同之处在于升阻力曲线极值点附近的波动都是由于物面的脱涡引起，不同之处在于绕流圆柱的升力曲线是一条振荡曲线且正负向振幅基本对称，而风轮转动影响下的塔架升力曲线正负向的振幅明显不对称且 X 正向受力较大，这是由于风轮的旋转作用导致流场出现了一定程度偏转，从而引起的塔架 X 方向两侧受力不均，建议对结构进行相应加强。这种流场的偏转在图 9 中可

以很清晰地观察到。图 7a~7b 为叶片转动到塔架正前方时的速度和压力纵剖图，图 8a~8c 为单独塔架模型在流场中的压力纵横剖面 and 速度纵剖面，通过对比可以观察到竖直方向越靠近叶片尖端，塔架尾流的速度损失越小，且相对于单独塔架模型而言，带风轮模型的塔架尾流区速度梯度明显减小，进一步说明风轮对塔架来流的阻挡作用显著，且越接近 XOY 平面阻挡作用越强；与此同时，塔架也造成风轮尾流的破碎，详见图 7c。正负压力分别分布在风机叶片迎风面和背风面，最大压力值出现在距桨毂中心约 0.7R 处，塔架前端原有的正压区已经叶片背风面的负压融合抵消，且叶片影响下塔架后端的压力梯度大大减小。

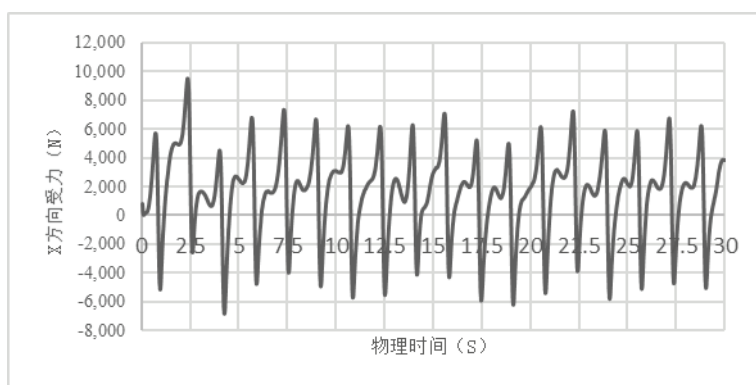


图 6a 风轮影响下塔架升力—时间曲线（额定工况）

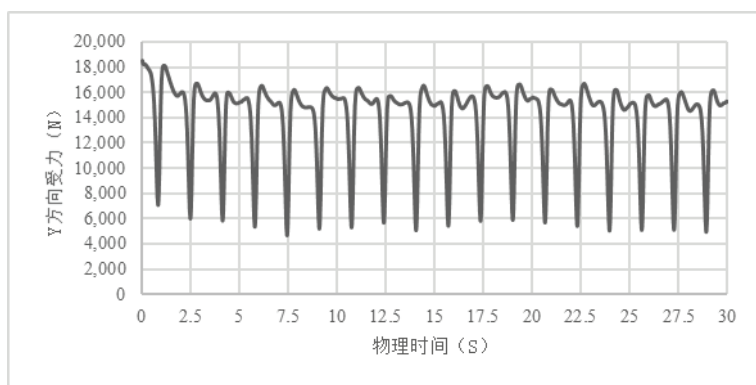


图 6a 风轮影响下塔架阻力—时间曲线（额定工况）

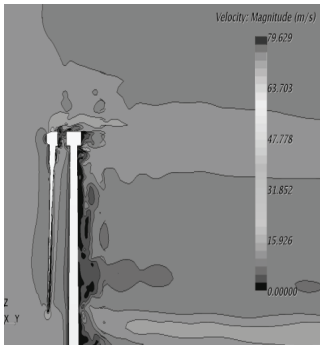


图 7a 叶片-塔架速度纵剖图

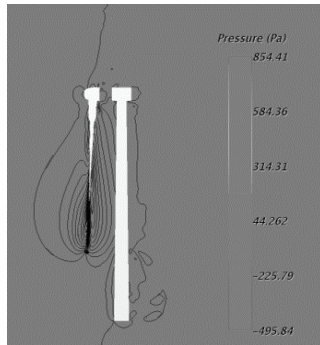


图 7b 叶片-塔架压力纵剖图

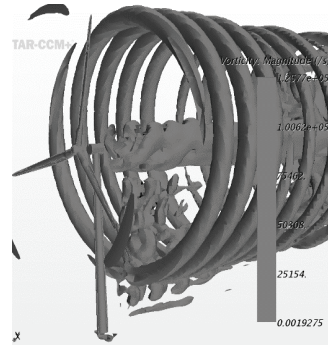


图 7c 叶片-塔架涡量图

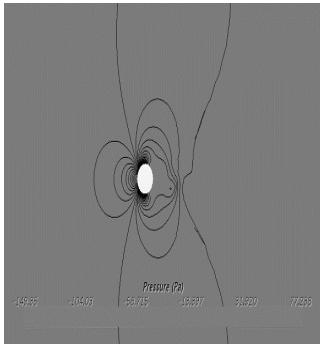


图 8a 塔架压力横剖图

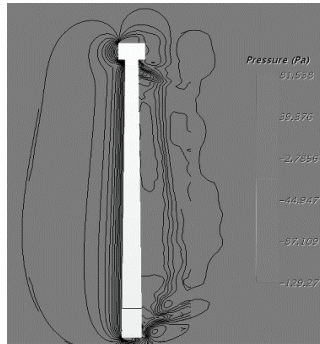


图 8b 塔架压力纵剖图

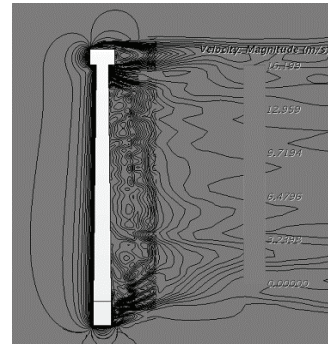


图 8c 叶架速度纵剖图

图 9a~9c 分别为不同时刻距离桨毂平面 (xoy 平面) $0.2R$, $0.5R$, $0.8R$ 的速度截面, R 为风轮叶片长度。每一幅剖面图中翼型头部速度均大于尾部速度, 说明气流经翼面后动能减少, 能量转化为风力发电机的机械能。三种截面处塔架后方的速度场均有一定程度的向右偏转, 但整体来看 $0.8R$ 截面处偏转程度最弱, $0.5R$ 截面处次之, $0.2R$ 截面处的偏转程度最强, 由此可以得出, 顺时针转动的风轮使塔架后方尾流发生整体向右的不对称偏转, 且越接近 xoy 平面, 这种偏转作用越明显。造成这种现象的原因有二, 第一是由于锥角和仰角的存在, 越远离桨毂中心的平面, 其叶片剖面与塔架距离越远, 而叶片与塔架之间的相互影响随着距离的增大而减小^[8]。第二是离 xoy 平面越近, 同一时刻下叶片和塔架作用越密集。例如塔架附近相同尺寸的视图窗口, 在 $0.2R$ 截面处可以观察到 2 个叶片剖面, 而 $0.5R$ 与 $0.8R$ 截面处却只可以观察到单个叶片剖面, 这意味着同一时刻, $0.2R$ 截面处的塔架受到附近两个叶片剖面带来的流场干扰, 而 $0.5R$ 和 $0.8R$ 处只受到单个叶片剖面带来的干扰。观察翼型与塔架的相互作用, 一开始时, 翼型周围的速度场与塔架周围速度场相互独立, 随着叶片的顺时针转动, 各剖面翼型向左移动并且与塔架距离越来越近, 翼型头部最外层速度等值线与塔架右侧速度等值线开始融合, 直至运动到塔架正前方, 翼型头部速度与塔架速度完全融合, 只保留各自物面边界附近的速度, 此时尾部速度的最外层等值线也开始与塔架融合。翼型继续向左移动, 头部与塔架速度场开始剥离, 而翼型尾部与塔

架速度等值线完全融合，只保留各自物面附近的速度。随着叶片继续转动，翼型尾部速度也开始脱离塔架，在 $0.5R$ 与 $0.8R$ 截面处可以观察到速度场恢复稳定，而在 $0.2R$ 截面处，下一个叶片的翼型已经到达，并开始接近塔架剖面的速度场，开始新一轮的融合与剥离。

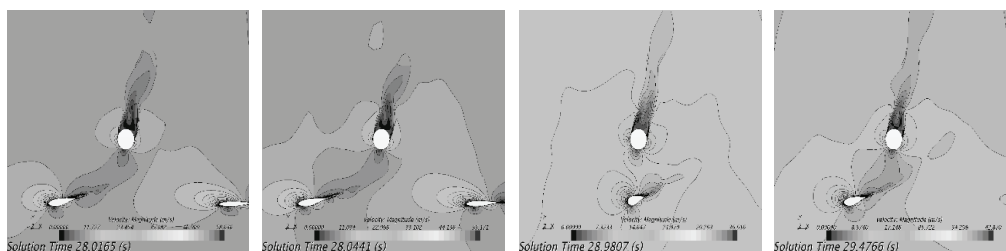


图 9a 不同时刻 $0.2R$ 截面处速度场变化

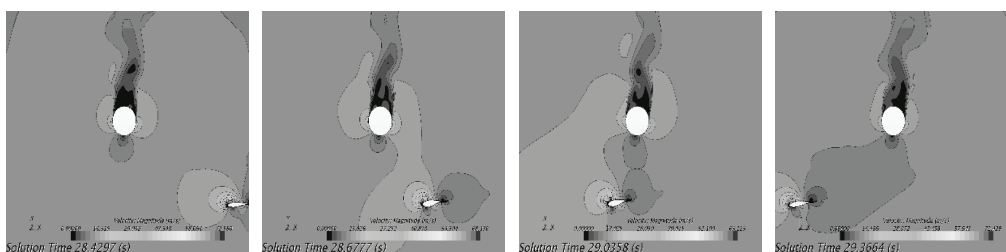


图 9b 不同时刻 $0.5R$ 截面处速度场变化

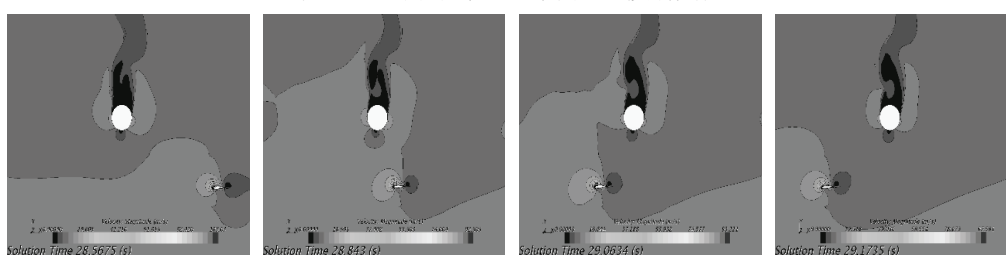


图 9c 不同时刻 $0.8R$ 截面处速度场变化

6 结论

本文通过对 NREL 5MW 风力发电机的数值模拟，得到风轮与塔架相互影响下的风机推力和转矩曲线、塔架的升阻力曲线，和风轮偏转作用下的速度场和压力场，通过一系列分析，得到以下结论。

(1) 通过与 NREL 实验文献[8]的结果相比误差在可接受范围，说明 CFD 方法及本文的网格划分对风力机的载荷预测有一定的可行性与可靠性。

(2) 风轮的推力和转矩曲线及塔架的升阻力曲线均在叶片运动到塔架正前方时出现周期性大幅突降，产生极值。对于三叶片风机，突降周期是叶轮转动周期的 $1/3$ ，对于 N 叶

片风机，应是叶轮转动周期的 $1/N$ 。

(3) 风轮的叶片运动到塔架正前方时，塔架与叶片之间的相互影响作用由叶根到叶梢逐渐变弱，表现为速度场之间的融合越来越弱，由此推之压力场之间的相互影响也随之减弱，两结构的各部分独立性渐增。

(4) 顺时针转动的风力机，其流场整体向右偏转，且风轮旋转效应沿竖直方向的分布规律为越靠近桨毂中心平面，流场偏转越明显。

(5) 由于风轮的旋转作用，塔架升力曲线出现不对称振荡，说明塔架结构左右两边周期性受力不均，建议对塔架进行相应加强。

参 考 文 献

- 1 Suzuki,H. and Sato,A, 2007. Load on turbine blade induced by motion of floating platform and design requirement for the platform. Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2007-29500.
- 2 Liang Z, Huijing D. Numerical analysis on stability of the semi-submersible platform of floating wind turbines[J]. Applied Science and Technology,2011.
- 3 李成良, 陈淳. 风力机叶片的结构分析与铺层优化设计[J]. 玻璃钢/复合材料,2009,6: 50—53.
- 4 左薇, 李惠民, 芮晓明, 王晓东等. NREL 5MW 风力机气动特性的数值模拟研究[J]. 太阳能学报, 2018,39(9):2446-2452.
- 5 王扬, 李学敏, Dimitris Mathioulakis. 塔影效应简化模型试验[J]. 河南科技大学学报, 2016,37(4):26-33.
- 6 Jonkman J M, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development[M]. National Renewable Energy Laboratory Golden, CO, 2009.
- 7 吴俊. 海上浮式风力机气动性能的数值模拟[D]. 上海交通大学, 2016.
- 8 程萍, 黄扬, 万德成. 塔影影响下风机气动尾流场性能的计算分析[J]. 水动力学研究与进展, 2018,33(5):545-551.

A study of the aerodynamic performance and flow-field characteristics of NREL 5MW wind turbine

KONG He-lin, FAN Ju, WANG Li-zhi, ZHU Ren-chuan

(Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, National Key Laboratory of ocean engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240. Email: helinK@sjtu.edu.cn)

Abstract: This paper aims to study the aerodynamic performances and the flow-field characteristics of NREL 5MW wind turbine with and without a wind turbine tower. Numerical

simulation approach is used to solve RANS equations of the field. Meanwhile, with the adoption of MRFs and sliding mesh method in STAR-CCM+, which is a common software in numerical simulation, we firstly verified the reliability of the calculation rotor-model and the mesh scheme employed by comparing the results with NREL Report. Then with the addition of the tower, forces on the rotor blades and tower were being monitored correspondingly, during which the velocity field and pressure distribution of different sections were captured and analyzed. This paper discovered the regularity of the vertical distribution of tower shadow effect and the flow-field deflection caused by the rotation of the wind turbine rotor, thus provides some references for further experiment and optimum structural design.

Key words: Numerical simulation; NREL 5MW; Tower shadow effect; Flow-field deflection