

塔影效应对风机气动性能影响分析

程萍, 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: dcwan@sjtu.edu.cn

摘要: 塔影效应是影响风机气动性能的关键因素之一, 本研究就风机塔架对浮式风机非稳态气动性能的影响进行分析研究。应用 naoe-FOAM-os-SJTU 求解器对含塔架风机的气动性能进行数值模拟分析。模型网格采用重叠网格技术进行处理, 计算模型选用美国国家可再生能源实验室的大型风机 NREL-5MW 风机。通过数值计算可以分别得到风机和塔架所受气动推力的历时曲线, 同时得到精细的流场分布信息。通过改变塔架到叶片之间的距离, 分析塔影效应随塔架与叶片距离增大而减弱的作用规律。通过分析不同截面位置流场压力分布, 充分理解塔影效应的作用机理。

关键词: 塔影效应; naoe-FOAM-os-SJTU 求解器; 非稳态气动性能

1 引言

随着工业的发展, 对能源的需求与日俱增, 同时全球能源危机和环境污染问题日益严重, 因此新能源的开发成为全球学者关注的焦点。风能作为一种资源广袤的清洁可再生能源成为最具有应用前景的新能源之一。近年来海上风力发电产业得到了迅猛发展。在风机结构中, 塔架是连接风轮转子与下部基座的重要结构, 然而塔架的存在, 会对流动产生一定的阻滞作用, 产生塔影效应。塔影效应不仅会造成叶片气动载荷的震荡, 对塔架自身受力也有明显的影响, 这也是造成叶片与塔架结构疲劳的一个重要因素。深入研究塔影效应的作用规律及作用机理, 对风机结构设计有重要的指导意义。

塔影效应不仅对下风向型风力机的气动载荷有较大影响, 对于上风向型风力机的影响也是不可忽视的。很多国内外学者采用不同的方法对这个问题进行了深入研究。Duque^[1]等基于重叠网格技术对水平轴下风向型风力机 (NASA-Ames Phase II) 周围流场的非定常气动性能进行模拟, 但是得到的叶片与塔架相互作用效果并不明显。丁勇钢^[2]根据叶素动量理论提出了忽略叶片段展向流动的一种简化模型用来研究风机的塔影效应, 并利用该

简化模型讨论了叶片与塔架之间的距离对塔影效果的影响。为了模拟水平轴风力机的塔影效应，Wang 等^[3]建立了一个高精度的模型，通过这个模型有效地模拟了叶片旋转至与塔架重合时产生的明显脉冲。程萍等^[4]基于 OpenFOAM 结合重叠网格技术对 NREL-5MW 上风向型风力机做了气动力数值模拟，初步探讨了塔影效应对该风力机气动性能的影响。周胡^[5]等利用开源 CFD 软件包 OpenFOAM 对 NREL Phase VI 带塔架模型进行了数值模拟，采用滑移网格技术来处理叶片旋转问题，分析得出了该风力机的塔影效应对风机气动力影响。

重叠网格技术在处理多级物体相互独立运动的问题上有着突出的优势，因此在研究风力机塔影问题中，很多学者的青睐^[6-7]选择运用重叠网格技术来处理叶片旋转问题。naoe-FOAM-os-SJTU^[8]是由上海交通大学万德成教授领导的团队开发的面向船舶与海洋工程的 CFD 数值求解器，该求解器的开发基于开源工具箱 OpenFOAM 同时结合了重叠网格技术。本研究将选用 naoe-FOAM-os-SJTU 求解器对带塔架 NREL5-MW 风力机^[9]的气动性能进行数值模拟，分别得到了风机与塔架受到的气动推力，以及流场分布信息。塔架与风轮之间的距离对塔影效应有较为明显的影响，本研究通过改变塔架与风机间距，分析塔影效应随塔架与叶片间距的变化规律。

2 数值方法

2.1 控制方程

本研究通过数值方法求解基于雷诺平均（RANS）的不可压的 N-S 方程，基本控制方程为：

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (4)$$

其中， ρ 为流体密度； U_i 流体速度； p 为压力； ν 为流体的黏性系数。

2.2 湍流模型

由于 RANS 方程本身是不封闭的，因此为了求解上面的控制方程，引入 $k-\omega$ SST 湍流模型^[10]。其中的湍动能 k 和湍流耗散率 ω 满足下面的定义：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - Y_k + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (6)$$

其中, Γ_k 和 Γ_ω 为扩散系数, G_k 和 G_ω 为湍流产生项, Y_k 和 Y_ω 为湍流耗散项, D_ω 为扩散项, S_k 和 S_ω 为源项。

2.3 重叠网格技术

本研究利用重叠网格技术来处理旋转叶片与固定塔架之间的相对运动问题。重叠网格技术允许多套相互独立的网格之间产生无约束的相对位移, 动态问题具有极强的处理能力。利用重叠网格技术时, 将物体的每个部件单独划分网格, 然后再嵌入到另一套背景网格当中。不同网格间会有重叠的部分, 经过挖洞等预处理将计算域以外的网格排除。剩余的网格在重叠区域通过建立插值关系来实现多套网格之间流场信息的交换, 从而达到整体求解的效果。这种插值关系的建立是通过由 SUGGAR 程序计算而得的 DCI 数据来实现的。求解 DCI 的过程可分为四步: ①挖洞过程, 即将计算域之外的网格标记为洞单元, 并排除在计算之外; ②搜索贡献单元, 为插值边界单元提供插值信息; ③求解插值系数(权重系数), 即每一组插值边界单元和贡献单元的插值权重系数, 并根据式(7)进行插值; ④优化重叠区域, 即寻找匹配最佳的贡献单元和插值边界单元组合, 提高插值精度。图 1 所示为重叠网格的示意图。

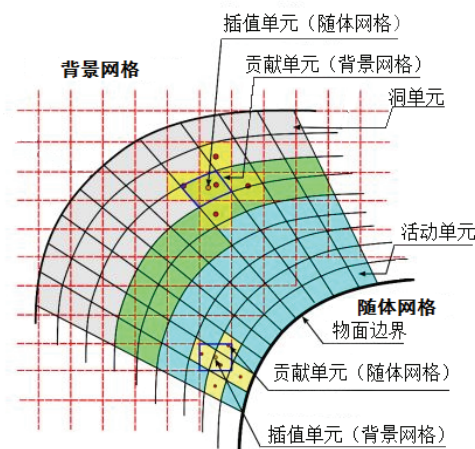


图 1 重叠网格示意图

$$\varphi_I = \sum_{i=1}^n \omega_i \times \varphi_i \quad (7)$$

其中, φ 表示任意流场信息, 如速度、压力等; ω_i 是第 i 个贡献单元的插值系数(权重系数); φ_i 是第 i 个贡献单元的流场信息值; φ_I 是插值边界单元的对应值。此外所有插值系数均需无因次化, 并满足条件:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (8)$$

3 模型与网格

3.1 几何模型

选取的计算模型是由美国国家能源局提出的 OC4 项目中的标准模型 NREL 5-MW 风机^[9]。NREL 5 MW 风机为 3 叶片上风向型风力机，该风机尺寸较大，叶片直径为 126m，塔架顶端距离水平面的距离为 87.6m，具体参数见表 1。如图 2 所示为本研究所选计算模型示意图。

表 1 NREL 5MW 基准风机相关参数

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
额定风速	3m/s, 11.4m/s, 25m/s
额定转速	6.9rpm, 12.1rpm

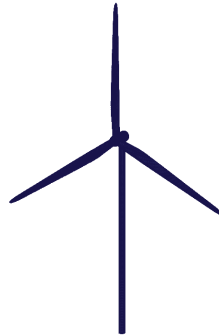


图 2 模型示意图

3.2 网格结构

使用重叠网格技术处理旋转叶片与固定塔架之间的相对运动问题，对叶片和塔架分别独划分网格，然后再嵌入到背景网格中。在本研究中首先利用商用软件 CATIA 对风机叶片（包括转子和桨毂）、塔架进行三维建模，然后利用 OpenFOAM 中的 blockMesh 网格划分

模块分别建立包含叶片、塔架的子计算域，之后用 OpenFOAM 的 snappyHexMesh 对两部分子计算域分别进行局部网格加密和边界层铺设处理；同时用 blockMesh 划分得到整个计算域的背景网格；将前叶片和塔架对应的两套网格嵌入到背景网格中，再通过挖洞等预处理清除流体域以外的网格，进而在三套网格之间建立起插值关系。整个计算域网格如图 3 所示。

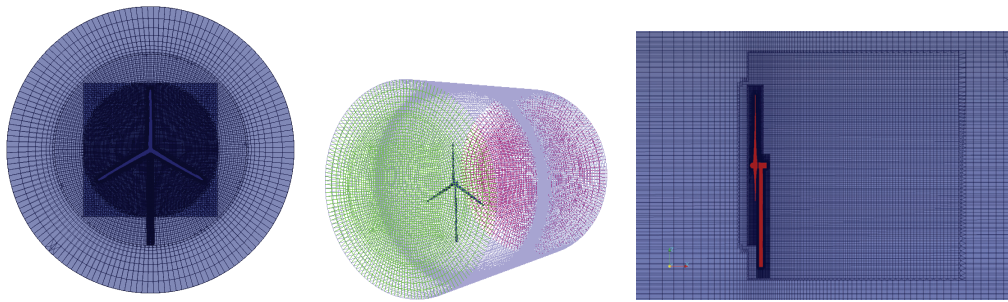


图 3 网格结构示意图

计算域为高 $8R$ 、半径 $2R$ 的圆柱区域 ($R=63\text{m}$ 为风机旋转半径)。考虑到计算效率及精度的需要，对于风机叶片附近，塔架附近的网格进行了局部加密处理。同时为了捕捉尾流场信息，对尾流场区域也进行了网格加密。

4 计算结果与分析

为了研究塔架与叶片间距对塔影效应的影响，首先对带塔架的 NREL-5MW 风机进行气动力模拟，在此基础上改变塔架与叶片间距，分别将原来的 5m 间距扩大到 6m 和 7m ，通过数值模拟，分别得到相应的气动力载荷数据。本研究所有数值模拟都在该风机对应的额定风速和转子的额定转速下展开。如图 4 和图 5 所示分别为不同间距下风机和塔架的气动推力时历变化曲线，图示 5D、6D、7D 分别对应塔架与叶片间距为 5m 、 6m 、 7m 的计算结果。通过图中曲线可以看出，由于塔架的影响，风机的气动推力随着时间存在严重的周期性脉动现象，并且这个震荡周期恰好等于风轮旋转周期的 $1/3$ 。对比图中三条曲线，当塔架与叶片距离增大时，叶片气动载荷变化幅值明显下降，但是变化趋势逐渐减弱。

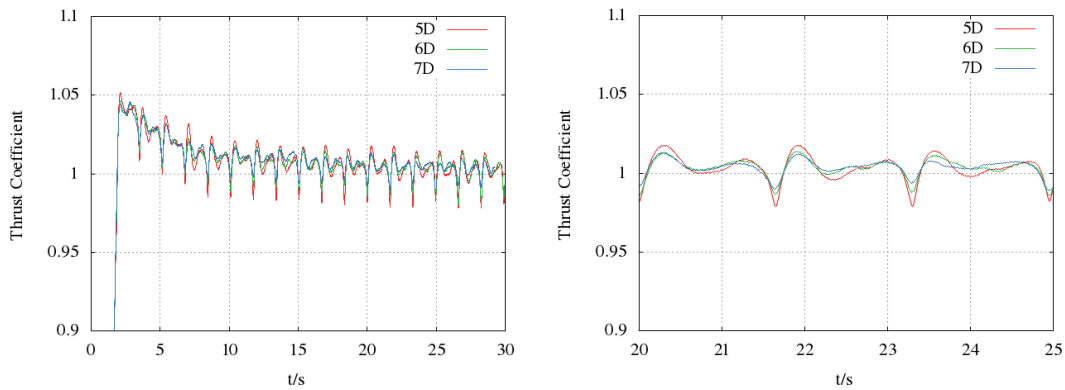


图4 风机气动推力时历变化曲线 (右图为一个旋转周期内的局部放大图)

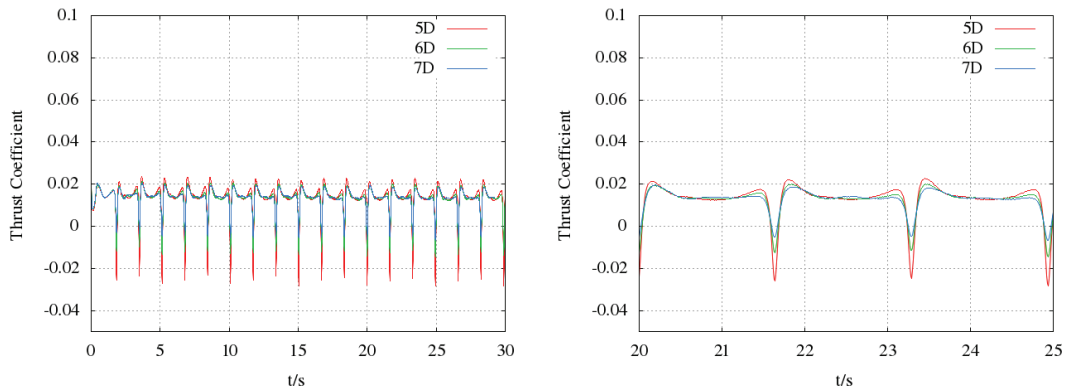


图5 塔架所受气动推力时历变化曲线 (右图为一个旋转周期内的局部放大图)

在三种不同间距的计算工况下提取推力变化曲线中的一个极小值点对应时刻 t 的叶片与塔架周围的流场压力分布云图, 如图 6 所示, 推力极小值发生在某一个叶片旋转至与塔架重合的时刻, 即某一叶片正好处于塔架的正上游, 该风机为三叶片风机, 因此风机气动推力的变化周期为风机旋转周期的三分之一。当某一叶片转至塔架正上游时, 塔架恰好处于叶片尾流的低压区域, 图 7 给出了无叶片干扰时塔架在相同来流作用下的周围流场压力分布情况, 如图所示, 由于塔架对来流的阻滞作用, 使得塔架前端出现一个相对高压区, 且距离越远, 压力梯度越小, 但这个压力变化与叶片周围压力变化相比较小。当处于塔架前端的高压区时, 叶片前端与后端的压力都会有一定升高, 而前端压力升高要比后端小, 因此叶片的前后压力差减小。叶片气动推力是通过叶片表面进行压力积分得到, 因此气动推力在叶片旋转至塔架上游的高压区时明显发生突降。同理, 此时塔架处于叶片尾流的低压区域, 塔架周围压力减小, 而越靠近叶片压力减小幅度越大, 因此塔架前缘高压区压力比后缘低压区有更明显的减小, 从而使得塔架上的推力明显减小, 图 5 所示的塔架推力减幅达到 300%。对比图 6 中给出的三个不同间距工况下的压力分布, 三种情况下, 叶片均出于塔架上游的高压区, 塔架也处于叶片下游的低压区, 而由于这个压力变化随着距离增

加而减小，因此塔架与叶片的距离越小，其相互影响作用也就越显著。

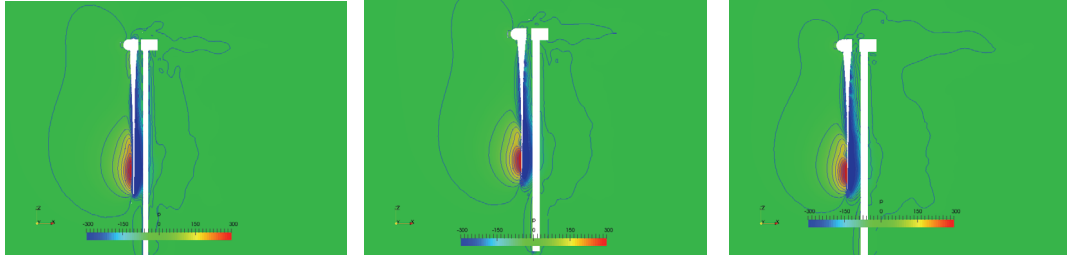


图 6 叶片处于塔架上游时叶片与塔架周围流场压力分布云图（间距分别为 5m、6m、7m）

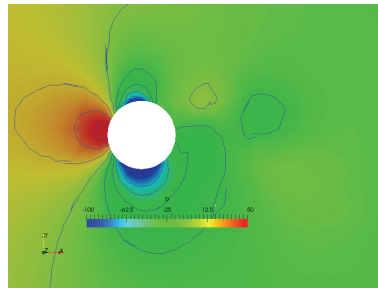
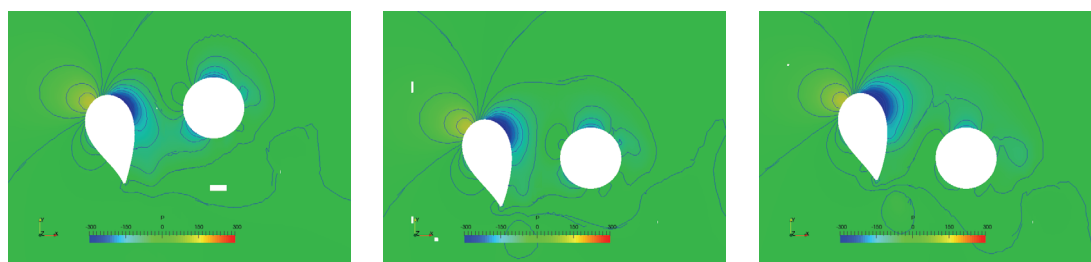
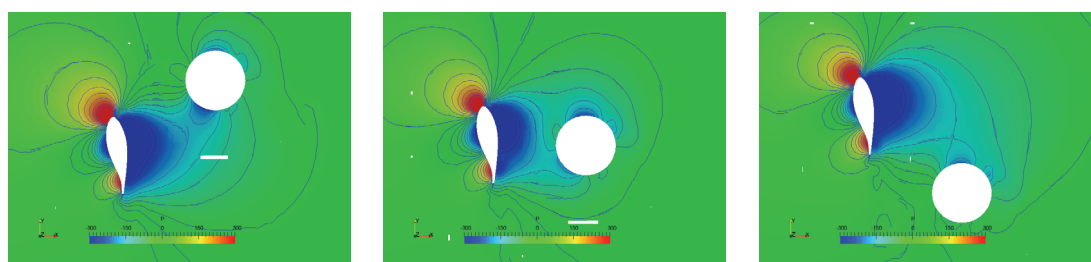


图 7 未受叶片干扰时塔架周围流场压力分布云图

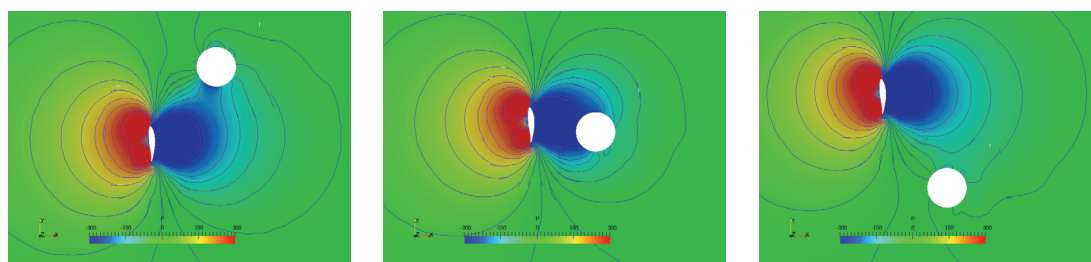
在图 6 中观察到叶片尾流场的低压作用区域沿叶展方向明显增大至接近叶梢位置减小，图 8 给出了沿叶展方向分布的 4 个截面的叶片与塔架相互作用的流场压力分布云图，图中给出了叶片旋转至塔架上游时刻 t 以及 $t-0.1s$ 和 $t+0.1s$ 三个时刻的压力分布情况进行对比。图中 r 代表截面位置对应的旋转半径， R 为风机叶片的最大旋转半径（ $R=63m$ ）。如图所示，沿叶展方向，叶片尾流低压区的负压值逐渐增大，而低压作用区域则呈现出先增大后减小的规律。这是由于叶片绕固定轴旋转，旋转线速度沿叶展方向线性增大，因此叶片后缘的负压沿叶展明显增加，而叶片截面翼型尺度在接近叶梢处逐渐减小至零，因此其作用区域在接近叶梢处缩小。在 $r/R=0.8$ 的位置，叶片位于塔架正上游时，塔架已完全处于叶片的一个超低压作用区域，此时塔架的前后压差十分明显。由于塔架没有旋转运动，其前后压差相比于叶片要低得多，但是如图 8(a)所示，在线速度较低的截面处，可以观察到由于塔架前端高压区的影响，叶片表面的压力分布在三个时刻发生了明显的变化，这种影响分布于整个叶片，尽管沿叶展方向压差变大使得该影响不明显。



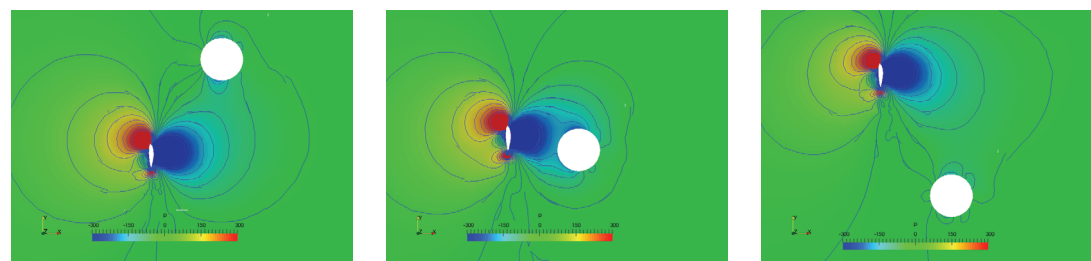
(a) $r/R = 0.16$



(b) $r/R = 0.48$



(c) $r/R = 0.8$



(d) $r/R = 0.96$

图8 不同叶片截面在不同时刻压力分布云图（从左至右分别对应 $t-0.1s$, t , $t+0.1s$ 三个时刻）

5 结论

通过对不同叶片-塔架间距的带塔架 NREL-5MW 风机模型进行气动力数值模拟, 得到不同模型的气动载荷时历曲线以及流场信息。由于风机叶片的后端流场为低压区, 而塔架的前端为其高压区, 当叶片旋转至塔架的正上游时, 叶片的后端低压区与塔架的前端高压区互相重合、互相干扰, 使得叶片与塔架表面的压力分布均发生变化, 因此叶片和塔架的气动推力在此刻均发生显著下降, 塔架气动推力降幅更是达到了 300%, 因此对于本研究采用的三叶片模型在每个旋转周期内出现三次周期性的推力脉动。沿叶片展向, 风机叶片旋转线速度增加, 尾流场负压区逐渐增大后由于翼型截面尺寸变化而减小, 对塔架表面的压力分布影响也呈现出先增强、后变弱的规律。通过增加塔架与叶片的间距, 得到下风向型风力机塔影效应随叶片-塔架间距的变化规律。受到叶片尾流低压作用区域的影响, 当间距增加时, 塔影效应变弱, 而这种弱化效果趋于不明显。

致谢

本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 Duque E P N, VAN Dam C P, BRODEUR R R, et al. Navier-Stokes analysis of time-dependent flows about wind turbines[C]//Proc. 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, San Francisco, FEDSM99-7814. 1999.
- 2 丁勇钢. 水平轴风力机塔影效应的数值模拟研究 [D]. 中国科学院研究生院 (工程热物理研究所), 2009.
- 3 WANG T, COTON F N. A high resolution tower shadow model for downwind wind turbines[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(10): 873-892.
- 4 程萍, 万德成. 基于重叠网格法分析塔架对于风机气动性能的影响[C]// 全国水动力学研讨会. 2015.
- 5 ZHOU Hu and WAN Decheng. Numerical Investigations on the aerodynamic performance of wind turbine: downwind versus upwind configuration[J]. Journal of Marine Science and Application, 2015, 14(1): 61-68
- 6 ZAHLE F, SORENSEN N N, Johansen J. Wind turbine rotor - tower interaction using an incompressible overset grid method [J]. Wind Energy, 2009, 12(6): 594-619.

- 7 LI Y, PAIK K J, XING T, et al. Dynamic overset CFD simulations of wind turbine aerodynamics[J]. Renewable Energy, 2012, 37(1): 285-298.
- 8 SHEN Zhi-rong, WAN De-cheng. Manual of CFD solver naoe-FOAM-os-SJTU with overset techniques for ship and ocean engineering flows[R]. Technical Report No. 2015SR012974. Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- 9 BUTTERFIELD S, MUSIAL W, SCOTT G. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development [M]. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- 10 MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA journal, 1994, 32(8): 1598-1605.

Tower shadow effect on aerodynamic performance of a wind turbine

CHENG Ping, HUANG Yang, WAN De-cheng *

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

*Corresponding author: dcwan@sjtu.edu.cn

Abstract: Tower shadow effect has great influence on the aerodynamic performance of the wind turbine. Unsteady aerodynamic simulations of a wind turbine are conducted with CFD in this paper. The OpenFOAM based solver naoe-FOAM-os-SJTU is employed for the aerodynamic simulation. The structure model of NREL-5MW baseline wind turbine is established, and the overset grid technique is adopted. With the numerical simulation, the aerodynamic thrusts on turbine blades and tower are obtained, and detailed flow information near the turbine blades and tower is available. By changing the distance between tower and rotor, the influence of the rotor-tower distance on the tower shadow effect is studied.

Key words: tower shadow effect; naoe-FOAM-os-SJTU; unsteady aerodynamic performance