上风向水平轴风力机塔影效应数值模拟

孟龙, 何炎平, 赵永生*, 郭子伟, 吴俊

上海交通大学, 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240

*联系人, E-mail: yongsheng@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2016-06-16; 接受日期: 2016-08-30; 网络出版日期: 2016-10-21

国家重点基础研究发展计划资助项目(编号: 2014CB046200)

摘要 风力机塔架和叶片之间的相互作用是影响风力机气动性能的主要因素之一, 本文以美国国家可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)的5 MW风力机为研究对象, 使用雷诺平均纳维-斯托克斯(Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS)方程和剪切应力输运(Shear-Stress Transport, SST) $k-\omega$ 湍流模型, 采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法对三叶片上风向水平轴风力机开展了塔影效应的分析研究. 为了得到更加精确的模拟结果, 在模拟计算之前开展了网格无关性验证以及模型验证. 模拟过程中使用了两种模型: 带有塔架的风力机模型以及没有塔架的风轮模型, 通过对两种模型的模拟研究得到了塔影效应对风力机气动特性的影响. 同时, 本文也开展了基于动量叶素理论的方法对塔影效应的研究, 并且比较了这两种研究方法. 结果表明: 上风向水平轴风力机的塔影效应是非常明显的; 塔影效应的存在使风力机气动荷载出现突变, 对风力机叶片和塔架都会产生不利影响; 塔影效应的存在对风力机气动荷载的平均值影响较小, 使风轮的平均推力值下降0.46%、平均功率值下降0.87%. 本文为进一步研究塔影效应对风力机气动特性的影响提供了一些参考.

关键词 上风向风力机, 塔影效应, 气动荷载, 数值模拟

PACS: 47.27.Vf, 47.85.Gj, 51.10.+y

1 引言

近年来随着风力发电领域的不断发展, 风力机气动特性的研究也逐渐成为众多学者研究的焦点. 在风力机结构组成中, 风轮和塔架是主要的组成部分, 塔架对来流具有一定的阻挡作用, 使塔架上游与下游处的空气流速都会降低, 从而会影响到风力机的气动性能, 这种由于塔架的阻碍作用而对风力机的气动特性

产生影响的效应称为塔影效应^[1]. 目前, 对于下风向型风力机塔影效应的研究文献较多^[2], 而上风向型风力机同样存在塔影效应的问题, 并且上风向型风力机是普遍使用的风力机类型. 近年来, 众多学者采用多种方法对上风向水平轴风力机的塔影效应展开了研究. Kim等人^[3]使用非定常涡格的方法对上风向水平轴风力机的塔影效应进行了研究, 研究结果表明: 塔架直径的大小对塔影效应的影响大于塔架和叶片之间的

引用格式: 孟龙, 何炎平, 赵永生, 等. 上风向水平轴风力机塔影效应数值模拟. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 124705
Meng L, He Y P, Zhao Y S, et al. Numerical simulation of tower shadow effect of upwind horizontal axis wind turbine (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 124705, doi: 10.1360/SSPMA2016-00299

间隙影响; 叶根部分受塔架影响较大. Sean等人^[4]使用CFD方法研究了浮式海上风力机塔影效应的影响, 对塔架和叶片之间的间隙对塔影效应的影响也进行了深入研究, 得出了与Kim一样的结论. Lin等人^[5]使用CFD方法从二维的角度研究了塔影效应对风力机的影响, 结果表明: 叶片在通过塔架前面时, 速度场被严重扭曲, 简单的势流理论不能很好地预测塔影效应的影响. Guo^[6]使用动量叶素理论研究了塔影效应, 结果指出塔影效应会导致风力机的输出功率出现周期性的波动, 其影响远大于风切变对输出功率的影响. Pedersen等人^[7]使用蒙特卡洛方法展开了研究, 研究指出塔影效应对叶片的疲劳损坏产生很大影响, 将三脚架式塔架代替单桩式塔架会降低叶片的疲劳损坏. Sintra等人^[8]使用Matlab/Simulink软件进行了塔影效应的研究, 指出在进行塔影效应的模拟过程中, 风速的模拟是非常关键的. 范忠瑶等人^[9]采用NUMECA商用软件FINETM/Turbo对上风向型风力机DF90的三维风轮叶片和塔架模型进行非定常数值模拟, 主要研究了由于塔影效应而导致的叶片受力波动情况, 并没有深入研究风轮功率的变化情况以及载荷的平均值变化情况. 本文采用CFD方法和动量叶素理论两种方法对塔影效应开展了研究, 并对这两种研究方法的差异进行了分析.

2 数值模型

2.1 控制方程

本文中CFD方法被用来研究风力机的塔影效应, 连续性方程以及动量方程是其控制方程, 如下式所示:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j}. \quad (2)$$

参考坐标系采用右手坐标系, 如图1所示. FAST软件模拟塔影效应的风速表达式^[10]如下式所示:

$$V(x, y) = V_h + v_1(x, y), \quad (3)$$

$$v_1(x, y) = V_0 a^2 \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2}, \quad (4)$$

式中, V_0 为空间平均风速, V_h 为轮毂高度处的风速, a

为塔架的半径, x 为桨叶微元到塔架轴线的 x 方向上的距离, y 为桨叶微元到塔架轴线的 y 方向上的距离, $v_1(x, y)$ 为塔影效应对风速施加的变化扰动.

2.2 湍流模型

进行模拟计算时, 湍流模型的选择是非常重要的. 雷诺应力湍流模型(Reynolds Stress Turbulence Model)适合应用于复杂流体, 但是其精度不高^[11]. $k-\varepsilon$ 湍流模型可以很好地模拟远离黏性边界层区域的流动, $k-\omega$ 湍流模型适合模拟边界层处的流动. 剪切应力输运(Shear-Stress Transport, SST) $k-\omega$ 湍流模型结合了 $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 两种湍流模型的优势, 因此在风力机气动荷载模拟中被广泛采用^[12,13].

基于密度修正的SST $k-\omega$ 湍流模型的动态黏度表达式^[14]如下式所示:

$$\begin{aligned} \mu_T &= \frac{f(\rho_m)k}{\omega} \cdot \frac{1}{\max\left(\frac{1}{c_\mu a^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right)} \\ &= \frac{\left[\rho_v + \left(\frac{\rho_m - \rho_v}{\rho_l - \rho_v}\right)^n (\rho_l - \rho_v)\right]k}{\max\left(\frac{1}{c_\mu a^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right)\omega}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$f(\rho_m) = \rho_v + \left(\frac{\rho_m - \rho_v}{\rho_l - \rho_v}\right)^n (\rho_l - \rho_v), \quad (6)$$

SST $k-\omega$ 湍流模型的输运方程如下式所示:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (I_k) \frac{\partial(k)}{\partial x_j} + \bar{G}_k - Y_k + S_k, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} (I_\omega) \frac{\partial(\omega)}{\partial x_j} + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega. \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 计算模型

本文使用的风力机为NREL 5 MW风力机, 风力机叶片以及整体几何模型如图1所示, 风力机叶片采用了多种翼型, 所采用叶片的各个截面的详细信息可参考文献^[15,16]. 本文所使用的坐标系为右手坐标系. 风吹向 y 轴的正方向, x 轴在水平面处与 y 轴垂直, z 轴垂直向上. 风力机的基本参数如表1所示.

表 1 风力机的基本参数

Table 1 Parameters of wind turbine

项目	参数	项目	参数
额定功率	5 MW	叶片直径	126 m
叶片数量	3	额定风速	11.4 m/s
风力机方向	上风向	额定转速	12.1 rpm
风轮仰角和锥角	5°, 2.5°	塔架顶部距离水平面的高度	87.6 m
轮毂直径	3 m	塔架底部直径	6 m
轮毂高度	90 m	塔架顶部直径	3.87 m

图 1 (网络版彩图)NREL 5 MW 风力机叶片及整体模型
Figure 1 (Color online) NREL 5 MW wind turbine blade and whole model.

STAR-CCM+软件进行塔影效应模拟计算时, 计算域的大小为1000 m (长)×600 m (宽)×370 m (高), 分为外域和旋转域. 外域的上游边界设置为速度进口, 下游边界设置成压力出口, 静压力为海平面压力, 外域四周的边界为对称边界. 采用刚体运动技术(Rigid Body Motion, RBM)模拟旋转域, 旋转域和外域之间生成边界网格以此进行信息传递. 以风力机风轮旋转平面的圆心为基准点, 速度进口边界距离基准点为2.5倍的风轮直径, 压力出口边界距离基准点为5.5倍的风轮直径. 为了能够更加精确地研究塔影效应, 需要对计算域进行加密处理, 从图2中可以清楚地看出加密情况, 叶片和塔架的表面设置12层边界层, 总厚度为0.02 m, 增长率设置为1.2, 网格数量为604万. 在非稳态模拟过程中, 时间步长设置为风轮旋转1°所需要的时间, 取为0.02 s, 最大迭代步数为25, 模拟时长100 s.

图 2 (网络版彩图)计算域以及计算网格. (a) 计算域; (b) 计算网格

Figure 2 (Color online) Calculation regions and grids. (a) Calculation regions; (b) calculation grids.

3 计算结果及分析

本小节首先采用STAR-CCM+软件进行模拟计算, 然后进行了FAST软件和STAR-CCM+软件的对比模拟研究.

图3展示了风力机模型中叶片和塔架的截面压力云图, 图3(a)为叶片刚刚进入塔影区未达到最低点时的气动特性, 可以看出此种情况下塔架的气动荷载是不对称的, 塔架所受到的压力在叶片侧较小, 这是由于塔架前方叶片的阻挡作用造成的. 图3(b)为叶片运行至最低点时的情况, 叶片处于塔架的正前方, 此时塔架的气动荷载呈对称分布. 图3(c)为叶片刚刚离开最低点, 此时塔架的受力是不对称的.

图4展示了风力机模型中塔架的压力云图, 此时的工况为叶片运行至塔架的正前方. 图4(a)为塔架背风侧的荷载分布, 图4(b)为塔架迎风侧的压力云图, 从图中可以看出叶片的阻挡作用是很显著的, 在塔架底部, 由于没有叶片的阻挡, 使塔架受力较大, 在塔架的中部, 由于叶片的旋转作用, 使流速较大, 根据伯努利方程可知, 塔架中部压力较低, 在轮毂处由于较低的风轮转速, 使塔架顶端压力较大. 图4(c)和(d)为塔架两

图3 (网络版彩图)风力机模型中叶片和塔架的截面压力云图. (a) 叶片运行至最低点之前; (b) 叶片运行至最低点; (c) 叶片运行超过最低点

Figure 3 (Color online) Pressure scalar figure of tower and blade section in the wind turbine model. (a) Before running to the lowest point; (b) running to the lowest point; (c) after running to the lowest point.

侧的压力云图, 由于叶片处于塔架的正前方, 塔架两侧的压力呈现对称式的分布.

在叶片运行至最下端时, 即运行至塔架正前方时, 得到图5所示的压力和速度云图. 从图中可以看出, 由于塔架的阻挡作用, 使叶尖外侧压力增大, 叶片和塔架之间压力降低; 塔架对上游和下游的风场都产生了较大的影响.

图6展示了叶片在y方向的受力以及风轮的推力. 图6(a)为监控的一个叶片受力情况图, 在没有塔架影响的情况下, 由于风轮锥角、仰角的存在以及不同位置处叶片的旋转线速度的不同, 使单个叶片所受到的y方向的力呈现出按正弦曲线变化的规律. 在风力机模

图4 (网络版彩图)风力机模型中塔架压力云图. (a) 塔架背风面; (b) 塔架迎风面; (c) 塔架左侧; (d) 塔架右侧

Figure 4 (Color online) Pressure scalar figure of tower in the wind turbine model. (a) Tower leeward side; (b) tower windward side; (c) tower left side; (d) tower right side.

图5 (网络版彩图)塔影区压力和速度云图. (a) 压力云图; (b) 速度云图

Figure 5 (Color online) Pressure and speed scalar in the region of tower shadow effect. (a) Pressure scalar; (b) speed scalar.

型中, 由于塔架的存在, 改变了叶片前方的流场, 使叶片进入塔影区时出现了力的突变, 这种力的突变就是

图6 (网络版彩图)叶片受力及风轮推力图. (a) 一个叶片的受力; (b) 风轮推力

Figure 6 (Color online) Force of one blade and rotor thrust under two different models. (a) Force of only one blade; (b) rotor thrust.

塔影效应的表现, 在叶片运行时, 这种载荷突变周期性出现. 从载荷的大小方面进行研究, 可以得出塔影效应对载荷的平均值影响较小的结论. 风力机模型模拟得出的y方向受力大小的平均值为217.57 kN, 风轮模型得出的结果为218.93 kN, 风力机模型的结果与风轮模型相比小0.62%. 图6(b)为风轮的推力情况, 在风力机模型中, 整个风轮中含有三个叶片, 在风轮的一个运行周期内, 出现了三次气动荷载的突变, 风轮推力平均值为651.38 kN. 在风轮模型中, 三个叶片的受力都呈现出正弦规律的变化, 三个正弦曲线的叠加使风轮模型中的风轮推力保持不变, 风轮的推力值为654.38 kN, 风力机模型的结果与风轮模型相比小0.46%. 由于塔影效应的存在, 单个叶片在通过塔架时, 气动荷载出现了下降现象, 这与文献[17]中的结论是一致的.

图7展示的是风轮的功率值. 图7(a)为STAR-CCM+中对两种模型进行的功率模拟研究, 风力机模型得到的风轮功率的平均值为4938.56 kW, 风轮模型得到的功率平均值为4981.76 kW, 风力机模型的结果与风轮模型相比小0.87%. 但是, 在风力机模型中, 塔影效应现象是非常明显的, 并且在非塔影区功率出现了略微下降的现象, 这是由于风轮锥角和仰角的存在造成的. 图7(b)为STAR-CCM+和FAST软件对风力机模型展开的功率比较研究, FAST软件模拟得出的风轮功率平均值为5132.45 kW, STAR-CCM+模拟的风轮平均功率为5087.99 kW, FAST的结果比STAR-CCM+得出的结果大0.87%.

CFD方法模拟出的风速与FAST软件计算得出的风速如图8所示, 从图中可以看出, 两者风速存在一定的差异. FAST软件模拟风速采用的是方程(3)和(4), 模

图7 (网络版彩图)风轮功率. (a) 两种模型下的风轮功率; (b) STAR-CCM+和FAST风轮功率对比

Figure 7 (Color online) Rotor power. (a) Rotor power of two models; (b) power comparison between SATR-CCM+ and FAST.

图8 (网络版彩图) FAST和STAR-CCM+得出的风速对比图
Figure 8 (Color online) Wind speed comparison between FAST and STAR-CCM+.

拟结果显示塔影区域较小且变化剧烈. 塔影内的速度在CFD方法中是直接计算获得, 从图中比较可知, CFD

方法模拟出的风速更接近实际情况.

FAST软件模拟的结果和STAR-CCM+软件模拟的结果虽然存在一定的差异, 但是两者的塔影效应趋势是一致的.

4 结论

本文以5 MW NREL风力机为研究对象, 采用了STAR-CCM+软件以及FAST软件进行模拟, 主要研究了叶片和塔架之间的相互影响, 模拟结果表明: (1) 上风向水平轴风力机的塔影效应显著; (2) 塔影效应的存在对气动荷载平均值的影响较小, 风力机模型与风轮模型的结果相比误差小于1%; (3) 尽管塔影效应对平均气动荷载影响不大, 但对于瞬时压力特性有显著影响, 在一个风轮旋转周期内有3个脉冲从而导致叶片和塔架振动, 影响叶片和塔架的疲劳寿命; (4) 不同软件模拟得出的塔影效应趋势是一致的.

参考文献

- Kong Y G, Wang J, Gu H, et al. Dynamics modeling of wind speed based on wind shear and tower shadow for wind turbine (in Chinese). *Acta Energaie Solaris Sin*, 2011, 32: 1237–1244 [孔屹刚, 王杰, 顾浩, 等. 基于风剪切和塔影效应的风力机风速动态建模. *太阳能学报*, 2011, 32: 1237–1244]
- Zhou H, Wan D C. Unsteady numerical simulation of tower shadow of downwind wind turbine (in Chinese), In: *Proceedings of the 25th National Conference on Hydrodynamics and 12th National Conference on Water Dynamics Hydrodynamics*. Beijing: Ocean Press, 2013 [周胡, 万德成. 下风向风力机塔影效应的非定常数值模拟. 第二十五届全国水动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议文集. 北京: 海洋出版社, 2013]
- Kim H, Lee S, Lee S. Influence of blade-tower interaction in upwind-type horizontal axis wind turbines on aerodynamics. *J Mech Sci Tech*, 2011, 25: 1351–1360
- Sean Q, Tao X. An investigation of the blade tower interaction of floating offshore wind turbine. In: *Proceedings of International Ocean and Polar Engineering Conference Kona*. Hawaii: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2015
- Lin S Y, Shieh T H. Study of aerodynamical interference for a wind turbine. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 2010, 37: 1044–1047
- Guo P. Influence analysis of wind shear and tower shadow on load and power based on blade element theory. In: *Proceedings of Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. Mianyang: IEEE, 2011. 2809–2812
- Pedersen R R, Nielsen S R K, Thoft-Christensen P. Stochastic analysis of the influence of tower shadow on fatigue life of wind turbine blade. *Struct Safety*, 2012, 35: 63–71
- Sintra H, Mendes V M F, Melício R. Modeling and simulation of wind shear and tower shadow on wind turbines. *Procedia Tech*, 2014, 17: 471–477
- Fan Z Y, Kang S, Zhao P. Numerical simulations of upwind wind turbine tower shadow effects (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2012, 10: 1707–1710 [范忠瑶, 康顺, 赵萍. 上风向风力机塔影效应的数值模拟研究. *工程热物理学报*, 2012, 10: 1707–1710]
- Bossanyi E A. *Bladed for Windows User Manual*. Bristol: Garrad Hassan and Partners Limited, 2005
- Cabezón D, Migoya E, Crespo A. Comparison of turbulence models for the computational fluid dynamics simulation of wind turbine wakes in the atmospheric boundary layer. *Wind Energy*, 2011, 14: 909–921
- Li Y, Paik K J, Xing T, et al. Dynamic overset CFD simulations of wind turbine aerodynamics. *Renewable Energy*, 2012, 37: 285–298
- Zhao W, Cheng P, Wan D. Numerical computation of aerodynamic performances of NREL offshore 5-MW baseline wind turbine. In: *Proceedings of the Eleventh ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*. Shanghai: ISOPE, 2014

- 14 Zhang D S, Pan D Z, Wang H Y, et al. Numerical prediction of cavitating flow around a hydrofoil using pans and improved shear stress transport k -omega model. *Therm Sci*, 2015, 19: 1211–1216
- 15 Du W K. Design and Analysis of A Model Wind Turbine Blade for Wave Basin Test of Floating Wind Turbines (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014 [杜炜康. 浮式海上风力机试验模型叶片优化设计与性能研究. 博士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2014]
- 16 Jonkman J M, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development. Technical Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory Golden, 2009. NREL/TP-500-38060
- 17 Hsu M C, Bazilevs Y. Fluid-structure interaction modeling of wind turbines: Simulating the full machine. *Comput Mech*, 2012, 50: 821–833

Numerical simulation of tower shadow effect of upwind horizontal axis wind turbine

MENG Long, HE YanPing, ZHAO YongSheng*, GUO ZiWei & WU Jun

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

The tower-blade interaction is one of key reasons that would seriously affect the wind turbine aerodynamic performance. Simulation of tower shadow effect for a three-bladed, upwind offshore wind turbine using STAR-CCM+ software is researched. The model of national renewable energy laboratory (NREL) 5 MW baseline wind turbine is used in this simulation by computational fluid dynamics (CFD) method. Based on the reynolds averaged navier-stokes (RANS) equations and the shear-stress transport (SST) k - ω turbulence model, aerodynamic simulations for NREL 5 MW turbine have been studied. Model validation and grid-independence verification are conducted in order to have more accurate results. The aerodynamic simulations of wind turbine model with tower and rotor model without tower are carried out separately. The impacts of tower shadow effect on aerodynamic performance are obtained by comparison of two models. The method of blade element momentum (BEM) is also used to study tower shadow effect, and two research methods are compared. Simulation results demonstrate that the tower shadow effect is remarkable. Mutation caused by tower shadow effect of aerodynamic performance is emerged and it will cause some adverse results for blades and tower. Impact of tower shadow effect on average value of wind turbine aerodynamic load is not significant. As is shown by simulation results, average thrust of wind turbine is declined by 0.46% and average power is declined by 0.87%. This paper could also provide some references for further research about the influence of tower shadow effect on aerodynamic performance.

upwind wind turbine, tower shadow effect, aerodynamic load, numerical simulation

PACS: 47.27.Vf, 47.85.Gj, 51.10.+y

doi: [10.1360/SSPMA2016-00299](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00299)