

基于重叠网格法分析塔架对于风机气动性能的影响

程萍, 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

摘要: 随着计算机技术和数值模拟方法的迅速发展, 计算流体力学方法 (CFD) 成为对浮式风机进行分析研究的重要途径。naoe-FOAM-os-SJTU 是基于开源工具箱 OpenFOAM 结合重叠网格技术开发的面向船舶与海洋工程的 CFD 数值求解器。本文应用 naoe-FOAM-os-SJTU 求解器对塔架对于风机气动性能的影响进行数值分析。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。对带塔架 NREL-5MW 风机进行气动力数值模拟和分析, 数值计算得到风机和塔架所受推力与扭矩的历时曲线, 同时得到风机不同截面的压力分布, 以及尾流场的信息。将得到的数值解与无塔架的数值模拟得到的数据结果进行对比分析, 最终分析塔架对于风机气动性能的影响。

关键词: 海上浮式风机; 重叠网格; naoe-FOAM-os-SJTU 求解器; NREL-5MW 风机

1 引言

面对全球能源危机的爆发与日益增长的能源需求之间的矛盾, 新能源的开发成为全球学者关注的焦点。风能以其清洁, 可再生, 资源广袤等优点成为最具应用前景的新能源。与陆上风能相比, 海上风能更加丰富, 视觉与噪声污染更小, 因此近年来得到了迅速地发展。相对于陆上风机而言, 海上风机所受的环境载荷更加复杂, 尤其是海上浮式风机。气动性能的研究对于整个浮式风机系统的分析研究有着十分重要的意义。

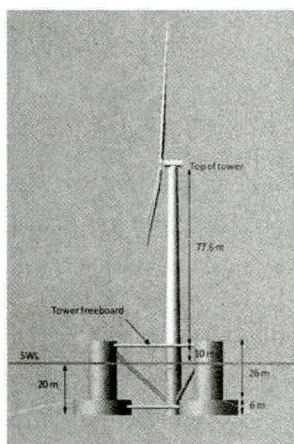
在风机的气动性能分析中, 塔架对于风机气动性能的影响是不可忽视的。很多国内外学者采用不同的方法对这个问题进行了深入研究。Duque 等^[1]首先对水平轴下风向风力机 (NASA-Ames Phase II) 周围流域的非定常气动性能进行模拟。其研究中选用了重叠网格方法来处理转子与塔架之间的相互运动。但是得到的叶片与塔架相互作用效果并不明显。

为了模拟水平轴风力机的塔影效应, Wang 等^[2]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。李德源等^[3]对海上浮式风力机塔架在风与波浪联合作用下的动力响应进行了数值模拟。丁勇钢^[4]根据叶素动量理论提出了忽略叶片展向流动的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。周胡等^[5]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。

在研究风力机与塔架相互作用问题中, 重叠网格技术也受到了很多学者的青睐^[6-8]。naoe-FOAM-os-SJTU 是基于开源工具箱 OpenFOAM^[9]结合重叠网格技术开发的面向船舶与海洋工程的 CFD 数值求解器。本文将选用 naoe-FOAM-os-SJTU 求解器对带塔架 NREL5-MW 风力机^[10]的气动性能进行数值模拟。

2 模型和网格

本文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^[10]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。为了满足计算的需要, 需要选择较大的计算域。如图 1 和图 2 所示为本文所选计算模型示意图以及网格和计算域的示意图。



(a) OC4 Phase II 浮式风机整体示意图



(b) 风机叶片-塔架模型示意图

图 1 模型示意图

使用重叠网格方法时将计算模型的每个部件单独划分网格, 然后再嵌入到背景网格中, 此时网格之间会有重叠部分。然后经过挖洞等预处理将计算域外的网格排除, 并在相互重叠的网格之间建立插值关系以进行数据的交流。在本文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 中自带的 blockMesh 分别建立包含叶片、塔架的计算域, 之后用 OpenFOAM 自带的 snappyHexMesh 对两部分

计算域分别进行相应的网格划分和网格加密处理；同时用 ICEM 和 snappyHexMesh 划分得到整个计算域的背景网格；将前两部分网格嵌入到背景网格中，再通过挖洞等预处理消除背景网格以及其它重叠区域中的流体域以外的网格，进而在重叠网格之间建立起插值关系。这样，这三部分之间就通过插值关系建立了信息交换的桥梁。最终计算网格如图 2 所示。

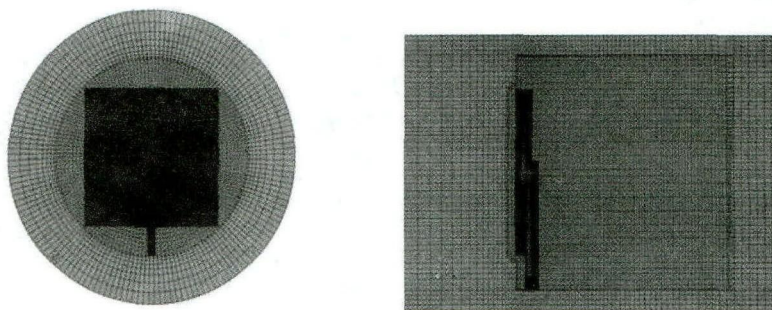


图 2 网格结构示意图

值得注意的是，由于风机相对于塔架是运动的，因此风机部分的三维模型与塔架部分三维模型之间必须要有一定的间隙，同时两组网格之间一定要有重叠部分，这样才能进行信息交流。

3 数值方法

本文数值求解方程为不可压的 N-S 方程，因此控制方程作如下表示：

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

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j U_i) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (2)$$

为了求解上面的控制方程，这里引入 $k-\omega$ SST 湍流模型^[11]。其中的湍动能 k 和湍流耗散率 ω 满足下面的定义：

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

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

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。

4 结果分析

本文选取 NREL-5MW 风机设计额定风速 11.4m/s 作为计算工况，此时风力机的转速为

12.1r/min。为了得到相对稳定的受力情况，计算时间取风机旋转周期的 2.5 倍。通过计算得到了该风速下风力机所受推力和扭矩的历时曲线，并将该结果与不考虑塔架时计算得到的结果进行对比分析。

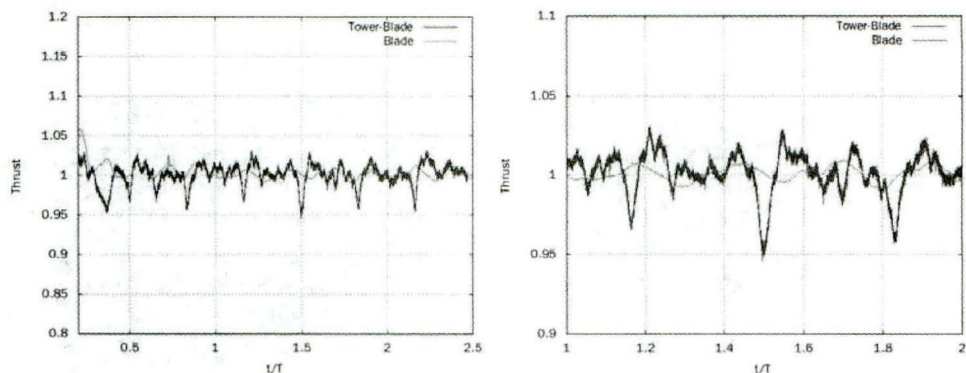


图 3 风机所受推力历时曲线

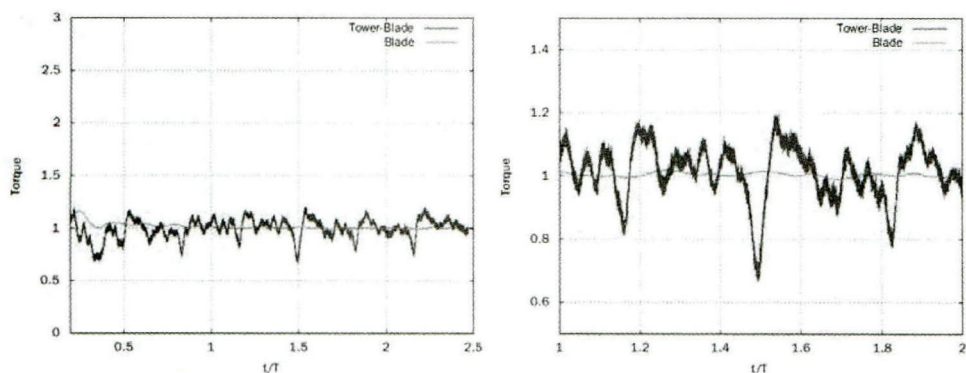


图 4 风机所受扭矩历时曲线

图 3 和图 4 中的曲线分别是风机所受推力和扭矩的历时曲线图。其中横坐标 t/T 为时间与风机旋转周期的比值，图 3 中纵坐标 Thrust 为计算所得推力与其平均值之比，图 4 中纵坐标 Torque 则是计算所得扭矩与其平均值之间的比值。图中绿色曲线是不带塔架的计算结果，而红色曲线则是带塔架的计算结果。从左侧的曲线来看，风机在塔架的影响下受到的推力和扭矩出现明显波动。为了更明显地显示其变化规律，将左侧曲线中抽出一个周期进行放大分析，如图 3 和图 4 右图所示。通过右侧的局部放大图可以看出，在一个周期中无论是推力还是扭矩都会出现三个极小值，这三个极小值分别出现在 $t/T=1.17, 1.5, 1.83$ 附近，经过分析可知，这三个时间点恰好是风机旋转至其中一个叶片与塔架在风速方向上重合的时间。由于此时对于包含塔架的风机而言，迎风面积变小，因此风机此时受到的推力和扭矩都会减小。

图 5 是风机尾流场的涡结构示意图，左侧为不带塔架情况下的尾涡结构示意图，右侧是本文中带塔架的算例计算得到的尾涡结构示意图。对比这两个算例的尾涡结构可以发现，

塔架的存在使得尾涡场更加不规律，尾涡结构不稳定。由于该风机塔架在风机的尾流场区域内，尾流在经过塔架时出现严重的断裂耗散，以致整体尾涡耗散明显。



图5 尾涡结构示意图

5 结论

选取 NREL-5MW 风机设计额定风速 11.4m/s 作为计算工况，通过计算得到推力和扭矩的历时曲线，并与不考虑塔架时计算得到的结果进行对比分析。结果显示塔架的存在致使风机所受推力和扭矩出现明显波动，并在风机旋转至其中一个叶片与塔架在风速方向上重合时，由于风机整体迎风面积较小，推力和扭矩出现极小值。通过带塔架算例与不带塔架算例的尾涡结构对比显示，塔架的存在使得风机尾涡出现明显断裂耗散。

致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目 (Grant Nos 51379125, 51490675, 11432009, 51411130131), 长江学者奖励计划 (Grant No. 2014099), 上海高校特聘教授 (东方学者) 岗位跟踪计划 (Grant No. 2013022), 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (Grant No. 2013CB036103), 工信部高技术船舶科研项目的资助。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] 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.
- [3] 李德源, 刘胜祥, 张湘伟. 海上风力机塔架在风波联合作用下的动力响应数值分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 46-52.
- [4] 丁勇钢. 水平轴风力机塔影效应的数值模拟研究 [D][D]. 中国科学院研究生院 (工程热物理研究所), 2009.

- [5] 周胡, 万德成. 下风向风力机塔影效应的非定常数值模拟 [C][C]//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 (上册). 2013.
- [6] Zahle F, Sørensen N N. Overset grid flow simulation on a modern wind turbine[J]. AIAA Paper, 2008, 6727: 2008.
- [7] Zahle F, Sørensen N N, Johansen J. Wind turbine rotor - tower interaction using an incompressible overset grid method[J]. Wind Energy, 2009, 12(6): 594-619.
- [8] 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.
- [9] Jasak H, Jemcov A, Tukovic Z. OpenFOAM: A C++ library for complex physics simulations[C]//International workshop on coupled methods in numerical dynamics. 2007, 1000: 1-20.
- [10] 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.
- [11] Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA journal, 1994, 32(8): 1598-1605.

Analysis of wind turbine blade-tower interaction using overset grid method

CHENG Ping, WAN De-cheng*

(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)

*Corresponding author, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

Abstract: With the rapid development of computer technology and numerical simulation method, computational fluid dynamics (CFD) method has become an important way to solve the floating wind turbine problems. The naoe-FOAM-os-SJTU solver, based on OpenFOAM and overset grid technology, is developed for ship and ocean engineering problems. In this paper, the aerodynamic performance of the NREL-5MW Baseline wind turbine is simulated, the naoe-FOAM-os-SJTU solver with overset grid method is employed, the blade-tower interaction is analyzed. And the time series of the unsteady torque and thrust of the blade-tower system are obtained, together with the detailed information of the wake flow field. With careful analysis of the numerical results, proper discussions and conclusions are made upon the blade-tower interaction.

Key words: floating wind turbine; overset grid; naoe-FOAM-os-SJTU; NREL-5MW Baseline wind turbine