

海上浮式风力机叶片气动性能的数值模拟

赵文超, 万德成*

摘要: 本文采用滑移网格的方法, 基于 OpenFOAM 的瞬态求解器 pimpleDyMFoam 对 OC4 中的大型海上浮式风力机 NREL 5MW 叶片的气动性能进行了数值模拟。分别计算了不同风速 (5m/s、8m/s 和 11m/s) 下风力机叶片的推力和扭矩, 求得了叶片表面的极限流线分布, 以及叶片表面不同截面处的压力系数分布。将计算的结果与 NREL 的结果进行了对比分析, 研究了不同风速下浮式风力机的受力及尾流场变化情况, 为今后大型海上风力机的设计与优化提供参考。

关键词: 浮式风力机; NREL 5MW; OC4; 数值模拟; OpenFOAM

1 引言

风能是一种绿色清洁的可再生能源, 具有广阔的应用前景。相对于陆上风能来说, 海上风力资源十分丰富, 海上风电具有高风速、低风切变, 湍流度小, 风场开阔风力稳定, 噪音标准限制小, 允许单机容量更大, 节约土地资源等优势^[1-2]。我国拥有海岸线 3.2 万 km, 其中大陆海岸线有 1.8 万 km, 岛屿海岸线有 1.4 万 km, 仅近海可开发和利用的风能储量就大约有 7.25 亿 kw。因此开发和利用海上风能, 发展海上风电是今后研究的热点。研究海上浮式风力机, 准确预测浮式风力机的气动性能也因而显得非常重要。

目前已经有很多学者对海上浮式风力机的概念设计、气动性能等进行了大量研究。1991 年, 英国开展了浮式风机项目研究, 并开发了一种 Spar 型的海上浮式风机 FLOAT^[3]。挪威的 Hydro Oil & Energy 公司设计了 Spar 浮式风力机 Hywind^[4], 是世界上第一个 MW 级的浮式风力机, 并且 2009 年 9 月在挪威海域安装了一台 2.3MW 的样机。任年鑫等概念性地提出了一种新型张力腿-锚链接合式系泊系统的浮式风力机平台形式^[5]。叶小嵘等采用叶素动量理论及 PID 控制技术研究了平台运动响应浮式风力机气动性能的影响^[6]。Tran 等通过非非常的 BEM 方法和 CFD 方法对 5 MW 风力机的结构和气动载荷进行了对比分析, 研究了载荷不同成分的影响^[7]。刘强等对 5 MW 大型风力机的气动特性也进行了计算, 揭示了大型变速变桨风力机的功率特性和载荷特性^[8]。还有学者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^[9]。

本文针对国际能源署 (International Energy Agency, IEA) 的 Offshore Code Comparison Collaboration Continuation (OC4) 项目中的 NREL 5MW 大型海上浮式风力机, 基于开源计算平台 OpenFOAM, 采用滑移网格的方法计算了风力机叶片的气动性能, 并计算了叶片后的尾流场结构。本文工作为大型海上浮式风力机的数值模拟和细致流场研究奠定了基础, 也为今后海上风力机叶片的设计和 optimization 提供了参考。

2 计算模型及网格

国际能源署 (IEA) 的 OC4 项目是一个浮式标准模型, 用来对不同国家组织和机构计算海上浮式风力机的方法和结果进行对比验证^[10]。OC4 中所使用的风力机为美国国家可再生能源实验室 (NREL) 的 5 MW 风力机^[11]。该风力机尺寸很大, 叶片直径有 126m, 做实验对成本、空间要求高, 因此选用 CFD 方法对该风力机的叶片气动性能进行数值模拟。

计算模型采用 CATIA 建模。网格首先通过 ANSYS ICEM-CFD 生成背景网格, 再通过 OpenFOAM 中的 snappyHexMesh 生成叶片表面附近的六面体网格。最终的网格总数约为 400 万。计算域及网格见图 1 和图 2 所示。

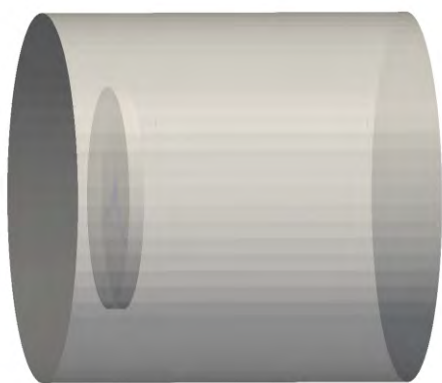


图1 整体计算域



图2 滑移区域网格

选择风速为 5m/s、8m/s、11m/s 时三种计算工况。这 3 种工况均在额定风速以下, 桨距角为 0° , 动力黏性系数为 $1.464 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$, 空气密度 $1.225 \text{kg}/\text{m}^3$ 。旋转速度也各不相同。具体参数如表 1 所示。

表 1 计算工况

风速/ (m/s)	转速/ (r/min)
5	7.39
8	9.16
11	11.89

3 数值方法

3.1 控制方程

本文所采用的控制方程为雷诺平均的 N-S (RANS) 方程, 具体方程如下:

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial u_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

式中, $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力项, 本文选用 SST $k-\omega$ 湍流模型来计算雷诺应力项。

3.2 滑移网格方法

采用滑移网格的方法来处理叶片网格的旋转。具体方法是将计算域分为两个子域。包围叶片区域的网格随叶片一起运动并与叶片保持相对静止, 而另外一个区域则网格保持静止不动, 两个区域的流场信息通过滑移界面处带权重的插值来实现^[12]。滑移网格方法相对动网格方法来说, 只需要处理局部区域网格的整体运动和交界面的插值, 不涉及网格的变形和重生, 节省了计算时间和计算机的内存空间, 因此被广泛应用在处理旋转运动的工程计算中。

3.3 离散格式和边界条件

本文计算基于流体力学开源平台 OpenFOAM 的不可压瞬态求解器 pimpleDyMFOAM。控制方程的离散采用有限体积法, 时间项采用 Euler 格式, 对流项采用二阶迎风格式, 扩散项采用修正的高斯线性格式。文中使用 PIMPLE 算法 (PISO 和 SIMPLE 结合的算法) 来求解压力与速度的耦合, 该算法具体过程参考文献^[13]。边界条件采用速度入口, 出口假定流动充分发展。叶片表面采用滑移边界条件。

4 计算结果及分析

4.1 风力机推力和扭矩

由于本文计算的是瞬态结果, 要考虑滑移面网格的整体运动, 时间步长不能太大, 因而计算时间较长。文中取稳定后一个周期内的平均值作为风力机的推力和扭矩。

通过本文的数值模拟, 计算得到了风力机的推力和扭矩。并将计算结果与美国国家可再生能源实验室 NREL 的数值结果进行了对比 (图 3)。

从图 3 中对比来看, 推力和扭矩的变化趋势是一致的。其中推力相对来说, 和 NREL 计算结果较吻合。扭矩计算结果在 5m/s 时基本一样, 8m/s 和 11m/s 时要低于 NREL 计算结果。

由于滑移区域对网格质量要求很高,因此在这一区域需要较密的网格。NREL 5MW 叶片本身尺度很大,而且受计算资源的限制,导致本文网格相对其他人来说还比较疏,这可能是扭矩计算结果偏低的原因之一。

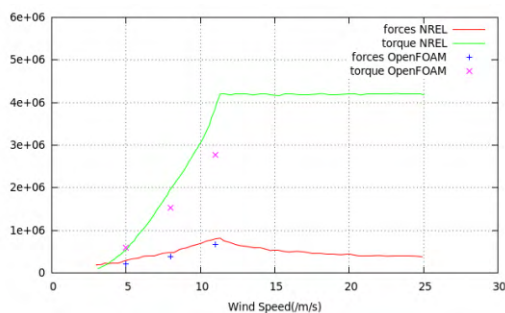


图3 推力和扭矩对比

4.2 极限流线

对于风力机黏性流场来说,叶片表面附近在高风速下可能存在着流动的附着和分离。为了分析这种流动分离情况,本文采用无限接近叶片表面位置处的流线即极限流线来展示。周胡证明了叶片表面的摩擦力线与极限流线重合。因此通过摩擦力线画出了极限流线,图4和图5为叶片表面压力面和吸力面的极限流线。



图4 叶片压力面的极限流线

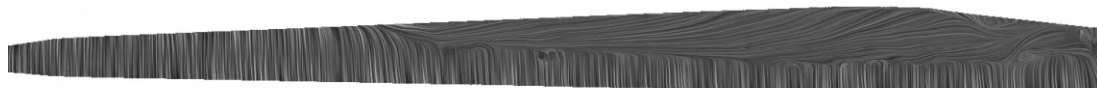


图5 叶片吸力面的极限流线

从图4和图5可以看出,叶片压力面流动基本为附着流动,但是叶片吸力面却明显不同。叶片吸力面随边处的流线发生了剧烈变化,在部分区域可以看到明显的流动分离。靠近叶根处流体沿着叶根向叶尖流动,而在叶尖处流动从导边到随边未分离。随着风速增大,流动分离区域将进一步加大,直至整个叶片表面都发生流动分离。

4.3 压力系数分布

推力和扭矩一般是通过叶片表面压力分布积分得到的。为了进一步研究叶片的受力情况,分析叶片上受力最大的区域,本文取了不同的截面来计算压力系数的分布情况。由于

没有实验值作对比，因此只能用来进行定性分析。本文所使用的压力系数定义为：

$$C_p = \frac{P_0 - P_\infty}{0.5\rho[U^2 + (\omega r)^2]} \quad (3)$$

其中 P_0 为叶片表面附近压力， P_∞ 为无穷远处压力，取为 0； U 表示风速； ω 为旋转角速度。不同截面压力系数分布如下图 6 所示。

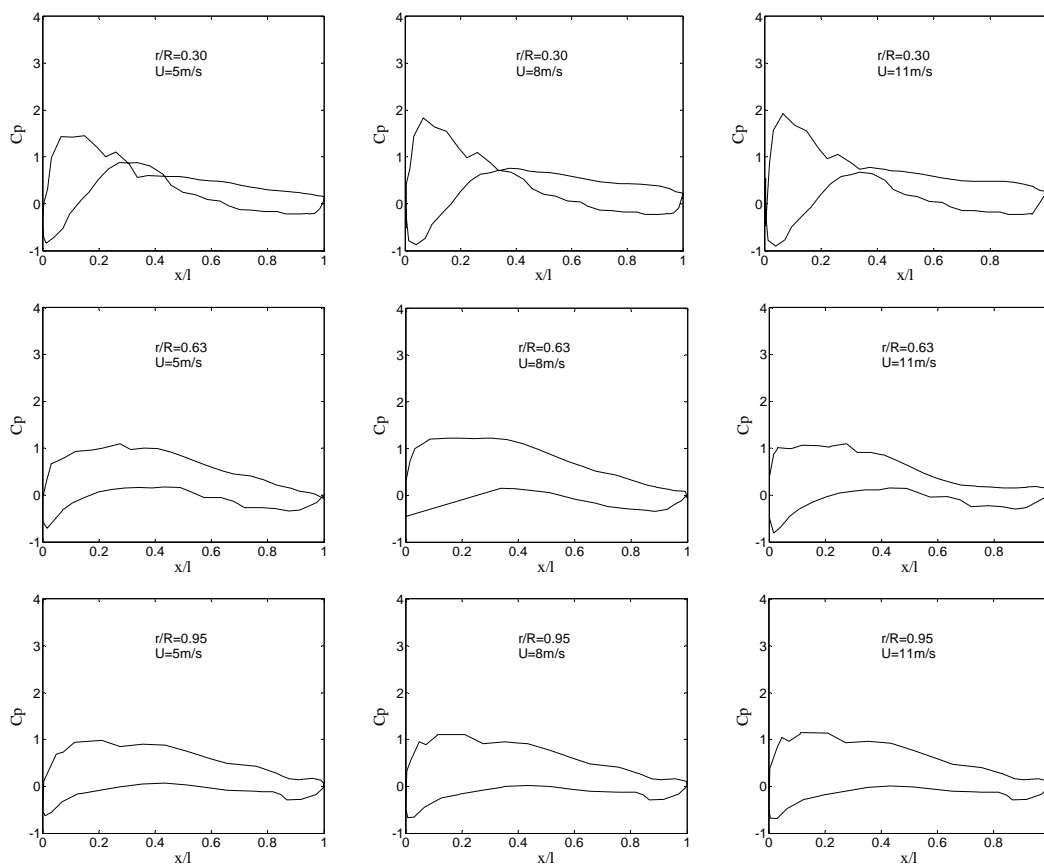


图 6 三个截面在不同风速下的压力系数分布

如图 6 所示，分别是 r/R 为 0.30、0.63、0.95 时叶片表面的压力系数分布。从图中可以看出，叶根处所受的压力较大，叶尖处要小一些。因此，对风力机叶片进行设计时，应考虑加强叶根处结构强度。本文的工作是对压力分布的初步分析，计算结果有待以后进一步验证。

5. 结论

本文采用滑移网格的方法计算了大型海上浮式风力机叶片的气动性能。求解器是 OpenFOAM 中的不可压瞬态求解器 `pimpleDyMFoam`。所选用的计算模型为 OC4 中的风力

机 NREL 5MW 叶片。分别计算风速为 5m/s、8m/s 和 11m/s 时风力机叶片上的推力和扭矩，并和 NREL 计算的结果进行了对比，结果表明在本文网格数量的情形下该计算结果精度还是可以接受的。将来如果有充足的计算资源，使用更密的网格，计算结果精度有望进一步提高。与此同时，画出了叶片表面的极限流线，分析了叶片表面吸力面靠近叶根处存在流动分离现象。最后，对 3 个不同截面上的压力分布进行了简单分析，指出了叶片上压力分布较大的区域。本文的工作只是一个初步研究，但为今后进一步研究大型海上浮式风力机奠定了一些基础。

致谢

本工作得到国家自然科学基金项目 (Grant No. 11072154, 51379125, 11272120), 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, 法国船级社 (ABS) 中国有限公司, 以及上海交通大学高性能计算中心 (HPC) 的资助。在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 宋础, 刘汉中. 海上风力发电场开发现状及趋势[J]. 电力勘测设计, 2006, (2): 55-58.
- 2 朱仁传, 缪国平, 范菊, 等. 海上浮式风力机及其动力学问题[J]. 应用数学和力学, 2013, 34(10): 1110-1118.
- 3 Tong K C, Quarton D C, Standing R. FLOAT-a floating offshore wind turbine system wind energy conversion Proceeding of the BWEA Wind Energy Conference, 1993: 407-13
- 4 Stiesdal H. Hywind: The world's first floating MW-scale wind turbine[J]. Wind directions, Dec, 2009.
- 5 任年鑫, 马哲, 欧进萍. 新型海上浮式风力机概念设计[J]. 太阳能学报, 2012, (10): 1710-1714.
- 6 叶小嵘, 张亮, 吴海涛, 等. 平台运动对海上浮式风机的气动性能影响研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, (03): 123-126.
- 7 Tran T T, Ryu G J, Kim Y H, et al. CFD-based design load analysis of 5MW offshore wind turbine[J]. 2012, 533-545.
- 8 刘强, 杨科, 黄宸武, 等. 5MW 大型风力机气动特性计算及分析[J]. 工程热物理学报, 2012, (07): 1155-1159.
- 9 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.
- 10 Robertson A, Jonkman J, Musial W, et al. Offshore Code Comparison Collaboration, Continuation: Phase II Results of a Floating Semisubmersible Wind System[J]. 2013.
- 11 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 Colorado, 2009.
- 12 周胡, 万德成. 下风向风力机塔影效应的非定常数值模拟[A]. In 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)[C], 2013.
- 13 Jasak H. Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows. PhD thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine. 1996.

Numerical simulation of aerodynamic characteristics of floating offshore wind turbine

ZHAO Wen-chao, WAN De-cheng

Abstract: Using sliding mesh method, the aerodynamic performances of large-scale floating offshore wind turbine blades NREL 5MW of OC4 are simulated based on the transient solver pimpleDyMFoam in open-source software OpenFOAM. Different wind speeds (5m/s, 8m/s and 11m/s) are calculated. The thrust and torque of blades are obtained to show the forces of blades. The limiting streamline of the blade surface and the pressure coefficient distribution in different cross-section are also used to clarify the detailed flow field information. The calculated results are compared with NREL results to study the forces and flow structure in different wind speeds, which hope to provide a reference for future large-scale offshore wind turbine design and optimization.

Key words: Floating Offshore Wind Turbine; NREL 5MW; OC4; Numerical Simulation; OpenFOAM.