

DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2014.06.005

海上浮式风力机叶片气动性能的数值模拟*

赵文超, 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, Email: zhaowenchaosjtu@163.com)

摘要: 该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 (5 m/s、8 m/s 和 11 m/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、尾涡分布以及叶片表面不同截面处的压力系数分布。并将计算的结果与 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, 可为今后大型海上风力机的设计与优化提供相关参考。

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

中图分类号: O357

文献标识码: A

Numerical simulation of aerodynamic characteristics of floating offshore wind turbine blades

ZHAO Wen-chao, 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)

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. At the different wind speeds (5 m/s, 8 m/s and 11 m/s), thrust and torque of blades are calculated. The limiting streamline distribution of blade surface, wake vortex and pressure coefficient distribution in different cross sections 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; 5MW; OC4; numerical simulation; OpenFOAM

* 收稿日期: 2014-07-25(2014-11-03 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379125、51411130131 和 11432009), 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2013CB036103)和上海高校特聘教授岗位跟踪计划(2013022)

作者简介: 赵文超(1987 -), 男, 湖北天门人, 硕士研究生.

通信作者: 万德成, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

Received: July 25, 2014 (**Revised** November 3, 2014)

Project supported by foundations: Supported by the Nation Natural Science Foundation of China (51379125, 51411130131, 11432009), the Major State Basic Research Development Plan of China (973 Program, 2013CB036103) and Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions of Higher Learning (2013022)

Biography: ZHAO Wen-chao (1987-), Male, Master Candidate.

Corresponding author: WAN De-cheng, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

引言

随着经济的快速发展和传统能源的日益减少,人们将目光投向了新能源的开发和利用。风能作为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、允许单机容量更大和节约土地资源等优势^[1,2]。并且我国拥有 3.2×10^4 km 海岸线,其中大陆海岸线有 1.8×10^4 km,岛屿海岸线有 1.4×10^4 km,仅近海可开发和利用的风能储量就大约有 7.25×10^8 kw。因此,开发和利用海上风能,发展海上风电是未来研究的热点。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、气动性能等方面进行了大量研究。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,并且于 2009 年 9 月在挪威海域安装了一台 2.3 MW 的样机。任年鑫等^[5]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。叶小嵘等^[6]采用叶素动量理论及 PID 控制技术研究了平台运动应对浮式风力机气动性能的影响。Tran 等^[7]通过非定常的 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。刘强等^[8]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。李德源等^[9]用有限元分析方法对海上风力机圆筒形塔架在随机风载荷与波浪载荷联合作用下的动力响应进行了数值模拟,为海上风力机的气弹性、振动、疲劳寿命等提供了实用的分析方法。周胡等^[10]采用 OpenFOAM 研究了不同叶片数风力机绕流场的非定常数值模拟,对比了叶片数目的影响。

本文针对国际能源署 (international energy agency, IEA) 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进行了非定常数值模拟,计算了风力机叶片的空气动力性能,并分析了叶片表面的极限流线、尾涡结构以及叶片不同截面处的压力分布。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。

1 计算模型及网格

为了研究海上浮式风力机,国际能源署 (IEA) 的 OC4 项目提出了一个浮式标准模型,用来对不同国家的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^[11]。其中,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 大型风力机^[12]。该风力机尺寸很大,叶片直径为 126 m。由于做实验对成本、空间要求较高,因此选用 CFD 的方法来对该风力机叶片的气动性能进行数值模拟。目前,上海交通大学万德成教授团队针对 OC4 项目已经开展了一些工作^[13,14]。

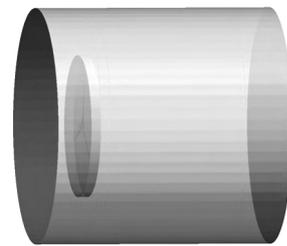


图 1 整体计算域

Fig.1. Whole computational domain

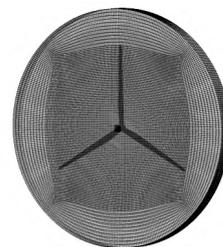


图 2 滑移区域网格

Fig.2. The grid of sliding area

本文采用的模型即为 NREL 5MW 海上浮式风力机叶片。该风力机叶片模型采用 CATIA 软件建立三维实尺度模型。整体网格的生成分为两步,首先通过 ANSYS ICEM-CFD 生成背景网格,然后再用 OpenFOAM 中的 snappyHexMesh 工具生成叶片表面附近的六面体网格,最终得到的网格总数约为 400 万。圆柱形计算域入口取在叶片上游 60 m 处,出口取在叶片下游 180 m 处。整体计算域及滑移区域的网格如图 1 和图 2 所示。

本文选择了风速为 5 m/s、8 m/s 和 11 m/s 时三种计算工况。这三种工况均在额定风速 (11.4 m/s) 以下,其中桨距角为 0° ,动力粘性系数为 1.464×10^{-5} m²/s,空气密度 1.225 kg/m³。不同风速下旋转速度各不相同,计算工况的具体参数如表 1 所示。

表 1 计算工况
Table 1. The Calculation Conditions

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

2 数值方法

2.1 控制方程

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

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

式中: u_i 、 u_j 为速度的平均值, u'_i 、 u'_j 为速度的脉动值, $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力项, 表示湍流的影响。本文采用 SST $k-\omega$ 湍流模型^[15] 计算雷诺应力项, 并采用壁面函数来模拟近壁面处的湍流情况。

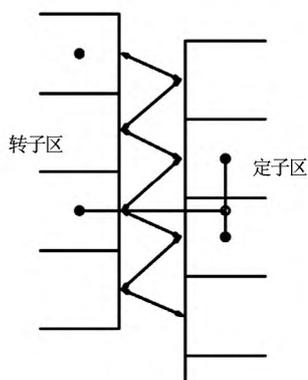


图 3 滑动网格的交界面
Fig.3. Interface of sliding mesh

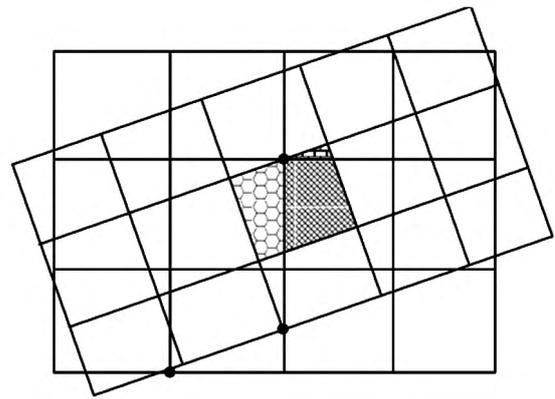


图 4 重叠区域
Fig.4. Overlapping area

2.2 滑移网格方法

目前, 处理叶片旋转最常用的两种方法是多重参考系法^[16]和滑移网格法^[17]。由于多重参考系法只能得到定常的结果, 无法处理非定常的情形, 因此本文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交界面处带权重的插值来实现, 其中权重通过静止面与动面的重叠区域所占的比重来确定^[18], 如图 3 和图 4 所示。滑移网格方法不同于动网格方法, 相对动网格方法来说, 其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, 因此被广泛应用于处理旋转运动的工程计算中。

2.3 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。在离散格式上, 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。

计算域的边界条件中入口和圆柱四周采用速度入口, 出口假定流动充分发展, 采用自由出流条件。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, 该算法具体过程可见文献^[19]。

3 计算结果及分析

3.1 风力机推力和扭矩

本文的数值模拟可以得到风力机叶片旋转运

动的瞬态结果。考虑滑移面网格的整体运动, 计算时间步长不能太大。为节约计算时间, 并且为了得到收敛稳定后的计算结果, 选取旋转的第三个周期内的平均值作为风力机平均的推力和扭矩。

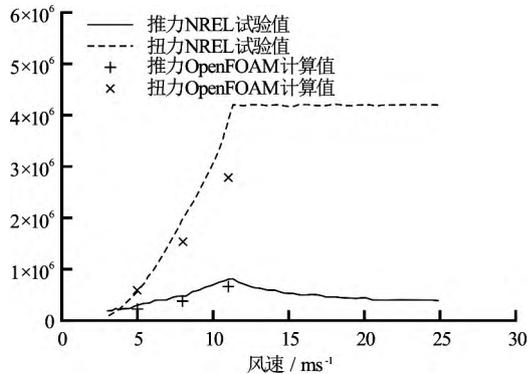


图 5 推力和扭矩对比图

Fig.5. Comparison of thrust and torque



图 6 叶片压力面的极限流线

Fig.6. Limiting streamline on the pressure side

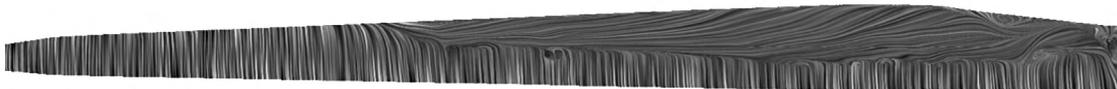


图 7 叶片吸力面的极限流线

Fig.7. Limiting streamline on the suction side

通过本文的数值计算, 计算得到了风力机的推力和扭矩。并将该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, 如图 5 所示。从图中可看出, 推力和扭矩的变化趋势是一致的。相对而言, 本文得出的推力的数值和 NREL 计算结果较吻合。扭矩计算结果在风速为 5 m/s 时基本一样, 当风速为 8 m/s 和 11 m/s 时, 则要低于 NREL 计算结果, 计算精度有待进一步提高。本文分析认为计算结果的准确性与滑移区域网格的质量和疏密程度有关。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。由于 NREL 5MW 风力机叶片本身尺度很大, 而且受计算资源的限制, 滑移区域网格相对来说还比较稀疏, 这可能是扭矩计算结果偏低的原因之一。整体上来说, 采用本文滑移网格的方法来计算大型海上浮式风力机的气动特性是可行的。这为今后进一步研究海上风力机提供了有效的工具和有用的参考, 有利于促进海上风力机的研究和发展。

3.2 极限流线

对于风力机粘性流场来说, 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, 可以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^[20]在理论上证明了叶片表面的摩擦力线与极限流线重合。因此, 本文通过摩擦力线画出了极限流线, 图 6 和图 7 为风速为 11 m/s 时, 叶片表面压力面和吸力面的极限流线。

从图 6 和图 7 中可以看出, 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。这两张图形象地表明叶片表面的流动分离现象首先出现在叶片吸力面靠近叶根处的地方, 并逐步朝叶尖处发展和扩大。叶片表面的流动分离会造成风力机失速, 使得叶片背面尾端出现涡流区, 流动阻力增大, 影响

风力机的发电效率。因此, 应尽量避免或推迟流动分离现象的发生, 合理地设计风力机叶片。

3.3 尾涡分布

为了进一步分析叶片后的尾流场, 本文采用观察尾涡的方式来看泄流的情况和流场分布的情况。尾涡结构采用速度梯度张量第二不变量 Q (the Second Invariant of the Velocity Gradient Tensor) 的等值面来表达, 并用速度值来染色。本文选取了两个速度 (5 m/s 和 11 m/s) 在稳定后处于同一位置时的尾涡分布图来进行对比, 如图 8 所示。从图中可以看出, 低风速 5 m/s 和高风速 11 m/s 的尾涡结构存在明显差异。当风速为 5 m/s 低风速时, 尾涡还比较稳定, 叶根涡和叶尖涡相互之间的作用并不明显; 随着风速的增大, 当风速为 11 m/s 时, 叶根涡结构已出现相互影响, 叶片根部的尾涡变得紊乱, 表明叶片根部附近出现了流动分离现象, 这与极限流线所看到的结果基本一致, 在靠近叶根处有部分流体发生了流动分离。叶尖涡还比较稳定, 没有出现分离。因此可以预测, 随着风速的进一步增大, 流动分离会进一步扩大, 尾涡结构将不再保持稳

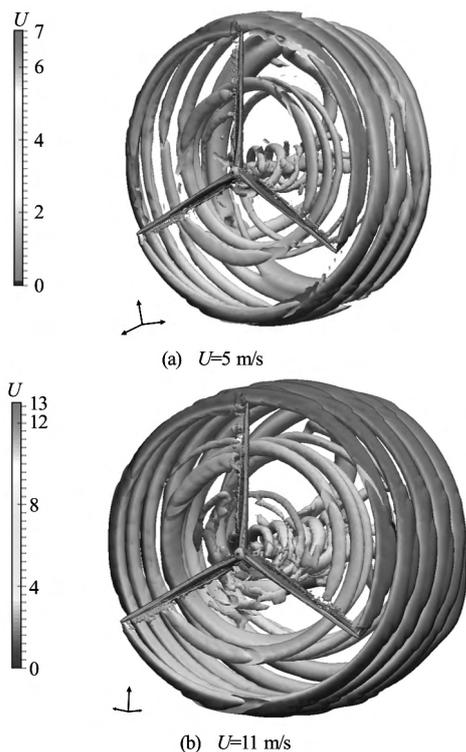


图 8 不同速度下尾涡图对比
Fig.8. Comparison of wake vortex between different wind speeds

定, 叶根涡与叶尖涡会出现更加显著的相互作用, 高风速下叶尖涡也将会发生破碎。本文受叶片后面加密区域长度的限制, 只能观察到部分尾涡。如要观察更长区域的尾涡变化, 应加长风力机叶片后的加密区域。

3.4 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, 选取了不同的截面($r/R = 0.30, 0.63, 0.95$)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

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

式中: 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; r 表示不同截面的位置距旋转中心的距离。

不同截面压力系数分布如图 9 所示, 分别是叶片截面 r/R 为 0.30、0.63 和 0.95 时表面的压力系数分布图。从图中可以看出, 叶根处压力最大值要明

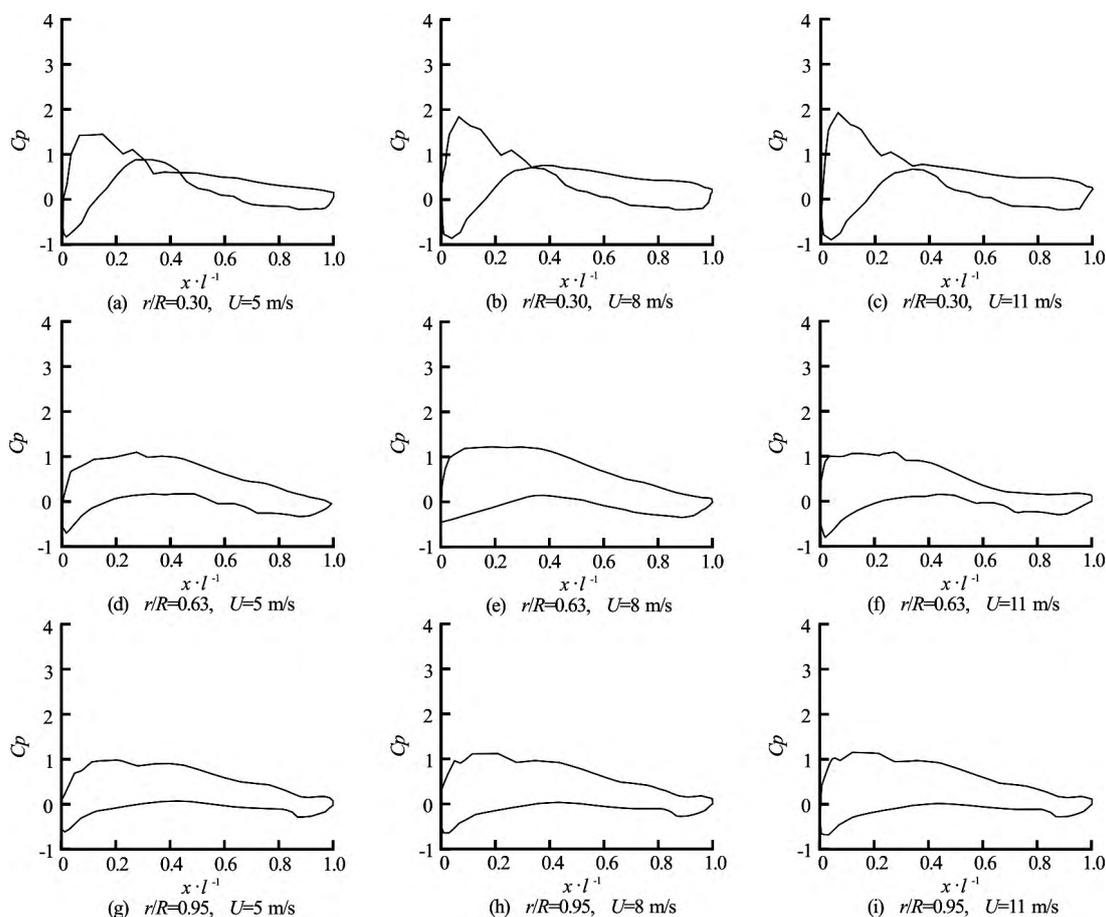


图 9 三个截面在不同风速下的压力系数分布
Fig.9. Pressure coefficient distributions for different wind speeds at three cross sections

显大于叶尖处压力,并且导边所受的压力较大,随边处压力要小一些。因此,对风力机叶片进行设计时,应特别考虑加强叶根处导边的结构强度。从速度对比情况来看,同一个截面下叶片不同速度处的压力系数分布变化趋势基本一致。这表明在本文所取速度和条件下,速度对叶片压力系数分布趋势影响还不明显。随着速度进一步增大,压力系数分布有可能发生变化。由于目前还没有实验结果进行对比验证,只能对叶片表面的压力分布做一些定性分析,但这也可以为叶片设计和优化提供一些直观感受。本文对叶片表面压力分布进行了初步分析,这对于叶片的强度设计和材料的合理使用具有重要的参考价值,有待进一步深入研究。

4 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。采用的求解器是 OpenFOAM 中的不可压瞬态求解器 pimpleDyMFoam。所选用的计算模型为 OC4 中的 NREL 5MW 风力机叶片。本文分别计算风速为 5 m/s、8 m/s 和 11 m/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,结果表明该计算结果的精度良好。与此同时,本文画出了叶片表面的极限流线和尾涡分布,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,对三个不同截面不同速度下的压力系数分布进行了简单分析,指出了叶片上压力分布较大的区域。通过本文的计算分析,可以得到如下结论:

(1) 采用滑移网格的方法可以用来求解大型海上浮式风力机的空气动力性能和复杂的尾流场信息,这为未来大力发展海上风电,进行海上风力机研究提供了一个有效的工具,为以后模拟更加复杂的海上风力机流场打下了基础;

(2) 通过叶片表面的极限流线和尾涡分布,可以看出叶片附近的流动分离最先出现在叶片吸力面靠近叶根处,并逐步朝叶尖处扩展,而且发生分离时叶根处尾涡也变得紊乱,容易出现风力机失速现象。因此叶片设计时应尽量避免或推迟出现流动分离,这对于叶片优化设计具有参考意义;

(3) 叶片表面不同截面处的压力系数分布表明叶片上压力最大区域位于叶根的导边处,随边处的压力较小。因此设计叶片时,应加大叶片导边这一区域的强度,合理的利用材料,节约成本。

致谢

本文工作得到了工信部高技术船舶科研项目、

美国船级社 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(2):55-58.
SONG Chu, LIU Han-zhong. The development and trend of wind power plant at sea[J]. Electric Power Survey and Design, 2006, 2(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.
ZHU Ren-chuan, MIAO Guo-ping, FAN Ju, et al. Off-shore floating wind turbines and related dynamic problems[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2013, 34(10): 1110-1118.
- [3] TONG K C, QUARTON D C, STANDING R. FLOAT-a floating offshore wind turbine system wind energy conversion[C]. Wind Energy Conversion, Proceeding of the 1993 BWEA Wind Energy Conference, York, UK, 1993: 407-413.
- [4] STIESDAL H. Hywind: The world's first floating MW-scale wind turbine[J]. Wind Directions, 2009: 52-53.
- [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,2012,33(10):1710-1714.
REN Nian-xin, MA Zhe, OU Jin-ping. A new conceptual design for offshore floating wind turbine[J]. Acta Energeticae Solari Sinica, 2012, 33(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,2012,40(3):123-126.
YE Xiao-rong, ZHANG Liang, WU Hai-tao, et al. Influence of platform motion response on aerodynamic performance of floating offshore wind turbine[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(3): 123-126.
- [7] TRAN T T, RYU G J, KIM Y H, et al. CFD-based design load analysis of 5 MW offshore wind turbine[C]. 9th International Conference On Mathematic Problems In Engineering, Aerospace And Sciences: ICNPAA 2012, AIP Publishing, 2012, 1493(1): 533-545.
- [8] 刘强,杨科,黄宸武,等.5 MW 大型风力机气动特性计算及分析[J].工程热物理学报,2012,33(7):1155-1159.
LIU Qiang, YANG Ke, HUANG Cheng-wu, et al. Simulation and analysis of the aerodynamic characteristics of a 5 MW wind turbine[J]. Journal of Engineering

- Thermophysics, 2012, 33(7): 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.
LI De-yuan, LIU Sheng-xiang, ZHANG Xiang-wei. Dynamic response numerical analysis of the offshore wind turbine tower under combined action of wind and wave[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(12): 46-52.
- [10] 周胡, 万德成. 不同叶片数的风力机绕流场的非定常流数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2014, 29(4): 444-453.
ZHOU Hu, WAN De-cheng. Numerical simulation of the unsteady flow around wind turbines with different blades numbers[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(4): 444-453.
- [11] ROBERTSON A, JONKMAN J, MUSIAL W, et al. Off-shore code comparison collaboration, continuation: Phase II results of a floating semisubmersible wind system[J]. EWEA Offshore, Frankfurt, Germany, 2013.
- [12] JONKMAN J M, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for off-shore system development[D]. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA, 2009.
- [13] ZHAO Wen-chao, WAN Decheng, Wind turbine impacts on its semi-submersible floating supporting system for phase II of OC4[C]. Proceedings of the Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference, Busan, Korea, 2014.
- [14] ZHAO Wen-chao, CHENG Ping, WAN De-cheng. Numerical computation of aerodynamic performances of NREL offshore 5-MW baseline wind turbine[C]. The Proceedings of the Eleventh (2014) Pacific/Asia Off-shore Mechanics Symposium (PACOMS-2014), Shanghai, China, 2014.
- [15] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [16] WANG Qiang, ZHOU Hu, WAN De-cheng. Numerical simulation of wind turbine blade-tower interaction[J]. Journal of Marine Science and Application, 2012, 11(3): 321-327.
- [17] 张凌新, 胡龙兵, 邵雪明. 滑移网格下泵内流场的非定常流计算[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2013, 28(1): 10-16.
ZHANG Ling-xin, HU Long-bing, SHAO Xue-ming. Computation of unsteady flow fields in a pump using sliding mesh method[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(1): 10-16.
- [18] 周胡, 万德成. 下风向风力机塔影效应的非定常数值模拟[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, 舟山, 浙江, 中国, 2013.
ZHOU Hu, WAN De-cheng. Unsteady numerical simulation of tower shadow of downwind wind turbine[C]. The 25th National Conference on Hydrodynamics & Proceeding of the 12th National Congress on Hydrodynamics, Zhoushan, Zhejiang, China, 2013.
- [19] JASAK H. Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows[D]. London, UK: Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, 1996.
- [20] 周胡. 海上风力机气动和水动流场数值模拟[D]. 上海, 中国: 上海交通大学, 2014.
ZHOU Hu. Numerical simulation of aerodynamic and hydrodynamic flow fields around offshore wind turbine[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2014.