

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2016.02.001

基于致动线模型的风力机尾流场数值模拟*

李鹏飞¹, 万德成¹, 刘建成²

(1. 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: pengfei8215@126.com;
2. 招商局重工(江苏), 海门 226116)

摘要: 本文基于致动线模型求解三维 Navier-Stokes 方程的方法, 对 NTNU 的“Blind Test 1”风力机尾流场进行了数值模拟。该方法避免了求解实际叶片的表面边界层, 无需使用动网格, 从而大大降低了网格量和计算时间, 非常适用于尾流场的模拟。该文所有计算均基于 OpenFOAM 自定义的求解器 ALMpisoFoam。推力和功率的计算值与实验值吻合得很好, 验证了求解器的正确性。3 个典型叶尖速比下的轴向诱导因子、湍动能和尾涡结构等也在文中进行了简要分析。

关键词: 致动线模型; 风力机; 尾流场; 湍动能

中图分类号: O357

文献标识码: A

Numerical simulations of wake flows of wind turbine based on actuator line model

LI Peng-fei¹, WAN De-cheng¹, LIU Jian-cheng²

(1. 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;
2. China Merchants Heavy Industry (Jiangsu), Haimen 226116)

Abstract: This paper uses the “Blind test 1” experiment in NTNU as the set-up for the numerical simulations, and the actuator line code to model the wind turbine. The actuator line method avoids fully resolving the blade geometry and using the moving mesh technique. So this method reduces significantly the amount of grids and computational time, and it is very suitable for the simulation of the turbine wakes. All simulations are based on ALMpisoFoam, a solver developed on OpenFOAM. The calculation values of thrust and power agree well with the experiment data. Some detailed results in three typical tip speed ratios such as the axial induced factor, turbulent energy and wake structure are also presented in this paper.

Key words: actuator line model; wind turbine; wake flow; turbulent kinetic energy

* **收稿日期:** 2015-06-25(2016-02-28 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 11432009, 51579145, 11272120)、工信部数值水池创新专项课题(201623)、长江学者奖励计划(T2014099)、上海高校特聘教授岗位跟踪计划(2013022)和海洋工程国家重点实验室课题(GKZD010065)

作者简介: 李鹏飞(1991-), 男, 湖北天门人, 硕士研究生。

通信作者: 万德成, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

Received: June 25, 2015 (**Revised** February 28, 2016)

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51379125, 51490675, 11432009, 51579145, 11272120), Innovative Special Project of Numerical Tank of Ministry of Industry and Information Technology of China (201623), the Chang Jiang Scholars Program (T2014099), the Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions of Higher Learning (2013022) and the Foundation of State Key Laboratory of Ocean Engineering (GKZD010065)

Biography: LI Peng-fei (1991-), Male, Master Candidate.

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

引言

随着化石能源的枯竭及气候变化的日益严重,各国政府急切地寻找可再生的清洁替代能源。风能作为一种最有潜力的可再生能源之一,成为近十年来该领域的研究热点。得益于机翼设计理论、材料科学、发电及控制技术等的飞速发展,目前十五年寿命的陆上风电场的成本已于火力发电相当。风力机气动性能及尾流场的准确预测对风电场的前期经济性评估十分重要。

2000 年 NREL (美国国家可再生能源实验室)组织的 Phase VI 实验表明经典的叶素-动量理论精度较低,且不同学者由于采用了不同的经验修正给出的结果差异很大^[1]。这说明叶素-动量理论对精确的翼型数据及合适的修正模型的依赖性很强。同时,有众多学者对 Phase VI 实验风力机进行了数值模拟研究。Sørensen 等^[2]基于 EllipSys3D 使用 $k-\omega$ SST 湍流模型求解 RANS 对 Phase VI 风力机气动性能进行了数值模拟;上海交通大学的万德成教授课题组^[3-12]基于开源平台 OpenFOAM 对风力机三维绕流场进行了详细的数值模拟和对比研究;Yuwei 等^[13]使用 DES 方法结合动态重叠网格技术对风力机气动性能进行了模拟;Sezer-Uzol 等^[14]基于 PUMA2 求解器对 Phase VI 叶片进行了无黏模拟及三维 LES 模拟。以上数值模拟风力机的研究表明:基于 RANS 的数值模拟不能准确预测风力机的后失速性能,在高雷诺数下,需要进行分离涡模拟(DES)或大涡模拟(LES)才能获得令人满意的结果。但 DES/LES 需要 10^7 以上量级的网格数量,所需耗费的计算机时是难以承受的。尽管数值求解 3D Navier-Stokes 方程的前景一片光明,但由于计算机性能在短时间内还不能得到很大提升,这就给简化的、混合方法的发展提供了空间^[6]。

最早由 Sørensen 将致动盘方法(ADM)引入风力机尾流的研究中^[15]。所谓致动盘就是将真实的叶片用具有相同掠扫面积的简单圆盘来代替,并且假设流动是轴对称的,将 BEM 中的动量理论用求解 Euler 或 Navier-Stokes 方程来替代。由于使用了轴对称假定,所以该方法是二维的。2002 年, Sørensen 和 Shen 抛弃轴对称假定,提出了全三维的致动线(ALM)方法。该方法将每个叶片用所谓的致动线来代替,叶片对流场的作用力简化为沿着致动线分布的体积力。他们分析了一台 3 叶片 500 kW 的风力机,结果显示与测量的功率特性曲线吻合很好^[16]。目前许多关于致动线方法的研究都是将致动线模型与 RANS 相结合(见参考文献[17-19])。Porté-Agel 等^[20]将 ALM 与 LES 结合对大型风电场

进行了数值模拟。NREL 的研究人员基于开源程序包 OpenFOAM 开发了一个 ALM 的 C++ 类, OpenFOAM 中的任意求解器都能通过简单的修改包含该类对象,它能与 RANS/LES 相结合,并能用于整个风电场的模拟^[21,22]。

本文利用基于 OpenFOAM 自定义的求解器 ALMpisFoam 对一台 NTNU 实验风力机进行了致动线数值模拟,并仔细分析了叶尖速比 $\lambda=3, 6, 10$ 时的尾流场的轴向诱导因子、湍动能等流场信息,与实验结果进行了对比分析,之前的研究很少关注轴向诱导因子和湍动能,这是本文的一大特色。同时,本文也探讨分析了风机在不同运行状态下尾流场的发展以及尾涡的形成和破碎机理。

1 数值方法

1.1 致动线模型

致动线的概念最早由 Sørensen 和 Shen 引入,它是一种全三维的瞬态气动模型。致动线模型最初应用于无量-速度变量的 NS 方程,后来 Mikkelsen 为了与 EllipSys3D 求解器相结合,将其重新应用于原始变量(压力-速度)的 NS 方程。致动线模型的基本思想是将旋转的叶片用虚拟的、承受体积力的线来代替,因此不要求解叶片表面边界层,也不需要动用网格技术,简单的结构化网格即能满足要求,大大降低了计算时间。在致动线模型中,叶片沿径向分割为若干叶素,每个叶素受到的升力、阻力由计算下式计算:

$$L = \frac{1}{2} C_l(\alpha) \rho U_{rel}^2 c dr \quad (1)$$

$$D = \frac{1}{2} C_d(\alpha) \rho U_{rel}^2 c dr \quad (2)$$

式中: $C_l(\alpha)$ 和 $C_d(\alpha)$ 是升力和阻力系数, α 是当地攻角, ρ 是密度, U_{rel} 是相对与叶片的空气流速, c 是当地弦长, dr 是叶素宽度。为了计算当地相对速度大小,需要考虑旋转的叶片的局部速度矢量关系,如图 1 所示。从图 1 所示的叶片截面上的速度三角形中,可以计算得到相对速度大小为

$$U_{rel} = \sqrt{U_z^2 + (\Omega r - U_\theta)^2} \quad (3)$$

式中: Ω 是旋转角速度, U_z 和 U_θ 分别是轴向和切向速度。从速度三角形可以求得 U_{rel} 和旋转平面之间的入流角 ϕ 。由几何关系 $\alpha = \phi - \theta$ 可以得到攻角

α 。确定了相对速度和攻角后, 就可以由下式计算单位长度叶素的升力、阻力值

$$f = (L, D) = \frac{1}{2} \rho U_{\text{rel}}^2 c(C_l e_L + C_d e_D) \quad (4)$$

每个致动元产生的力作为一系列离散的点力不能直接作用于流场, 以避免在数值计算中产生奇异性。Sørensen 和 Shen 采用如下的高斯权函数来将致动力反作用于计算域

$$\eta_\varepsilon(d) = \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{3/2}} \exp\left[-\left(\frac{d}{\varepsilon}\right)^2\right] \quad (5)$$

于是, 流场中 (x, y, z) 处的体积力由下式计算:

$$f_\varepsilon(x, y, z, t) = f \otimes \eta_\varepsilon = \sum_{j=1}^N f(x_j, y_j, z_j, t) \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{3/2}} \exp\left[-\left(\frac{d_j}{\varepsilon}\right)^2\right] \quad (6)$$

式中: (x_i, y_i, z_i) 是第 i 个致动点, d_i 是点 (x, y, z) 与点 (x_i, y_i, z_i) 之间的距离。 ε 称为高斯光滑参数。为了保证数值稳定性, 本文中取 $\varepsilon \approx 2\Delta x$ (Δx 为叶片附近网格单元的长度)。 Troldborg^[19]指出, $2\Delta x$ 是防止在应用空间中心差分格式时速度场出现数值振荡的最小值。

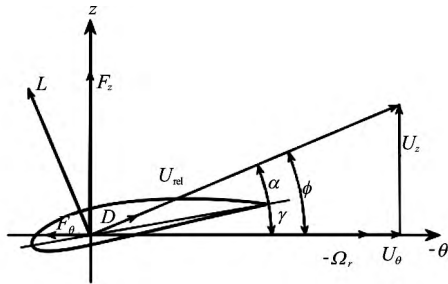


图1 叶片截面上速度矢量图
Fig.1 Velocity triangle on a local blade section

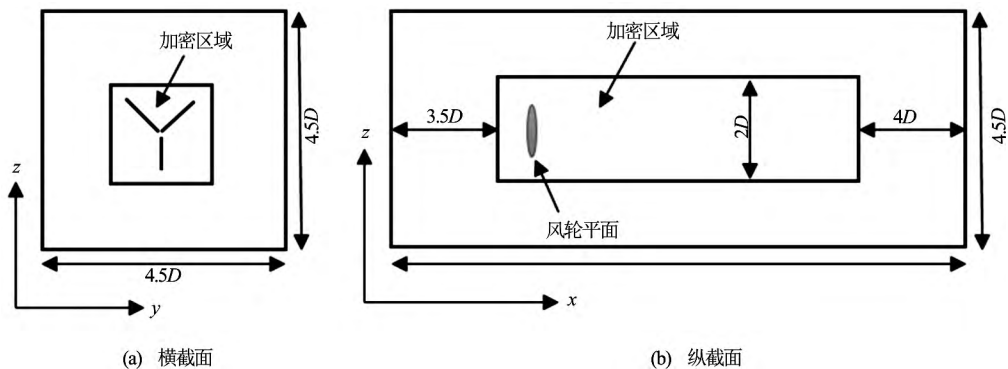


图2 计算域示意图
Fig.2 Computational domain

1.2 控制方程

本文数值模拟基于 OpenFOAM 中自定义的求解器 ALM-pisoFoam, 该求解器的基本控制方程如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{U} + f_\varepsilon \quad (8)$$

式中: \mathbf{U} 是速度, ρ 是流体密度, ν 是运动黏性系数, f_ε 为体积力。OpenFOAM 采用有限体积法离散控制方程, ALM-pisoFoam 采用 PISO (pressure-implicit split-operator) 算法求解动量方程, 该算法是非稳态的瞬态求解算法。差分格式上, 时间项采用一阶向前差分, 对流项采用二阶中心差分, 扩散项采用显示非正交修正的二阶格式。控制方程的求解采用 RANS 搭配 $k-\omega$ SST 湍流模型。

2 计算设定

2.1 计算域和边界条件

2011 年, NOWITECH/NORCOWE 组织了一次盲比实验 “Blind Test 1”, 旨在对比研究现有方法的精确度。实验是在挪威科技大学 (NTNU) 的风洞中进行的, 本文的计算模型即为该实验风力机。该风力机为三叶片式, 叶片长度为 0.447 m, 实验中来流速度 $U_\infty = 10$ m/s 为恒定值, 通过改变转速以改变叶尖速比 λ 。本文选取了 $\lambda = 2, 3, 3.5, 4.6, 5.1, 6, 7.1, 7.6, 8.6, 9.2$ 和 10 共 11 个运行状态进行计算, 并仔细分析了 $\lambda = 3, 6$ 和 10 这三个有代表性的运行状态, 且与实验进行了比较。

计算域的宽度和高度都是 $4.5D$, 长度方向为 $13D$ (如图 2 所示, D 为叶片直径)。致动线的旋

转点位于平面中心，距离入口处 4 D。为了求解致动线附近的大压力梯度并较好地保持尾流中的流动结构，一个高密度的等间距网格区域分布在致动线附近并延伸至远尾流场。该区域的宽高为 2 D，是考虑到螺旋状尾涡在黏性作用下的膨胀。

本文在数值计算中采用了如下边界条件：

(1) 入口边界处，应用 Dirichlet 速度条件和 Neumann 压力条件，速度为恒定值 $U_\infty = (10, 0, 0)$ ，压力梯度为 0。

(2) 出口边界处，设置为 Dirichlet 压力条件(压力等于大气压)和 Neumann 速度条件，即 $\frac{\partial U_x}{\partial x} =$

$$\frac{\partial U_y}{\partial y} = \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0$$

(3) 四周的上下边界采用 OpenFOAM 中定义的物质面滑移边界 slip 条件，左右采用 symmetry plane 边界(即垂直于边界的方向导数为零)。

2.2 时间步长

对于非稳态黏性流动的控制方程属于椭圆型，需要满足 CFL 条件才能保证数值解收敛，即

$$\frac{U \Delta t}{\Delta x} \leq 1 \tag{9}$$

该式的物理意义是流动在一个 Δt 内向前推进的距离小于一个网格间距。但是在本算例中，还需要考虑叶片的旋转速度。也就是需要保证叶片每个时间步最多转过一个网格间距 Δy ，即

$$\Delta t \leq \frac{\Delta y}{U_{rot,tip}} \tag{10}$$

式中： $U_{rot,tip}$ 为叶尖处的周向速度， Δy 为叶尖处风机旋转平面内的最小网格尺度。

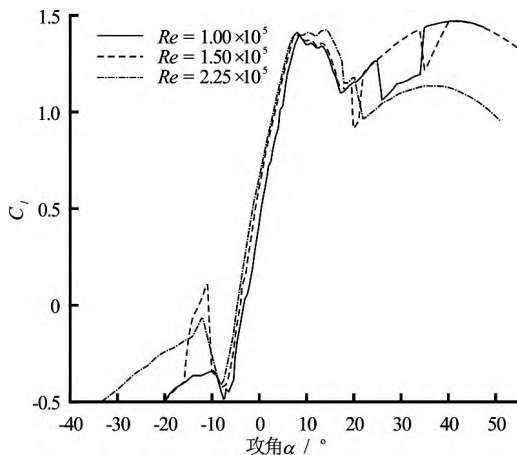


图 3 升力系数 C_l 随 Re 和攻角 α 的变化
Fig.3 Lift coefficient as a function of Re and α : $C_l(\alpha, Re)$

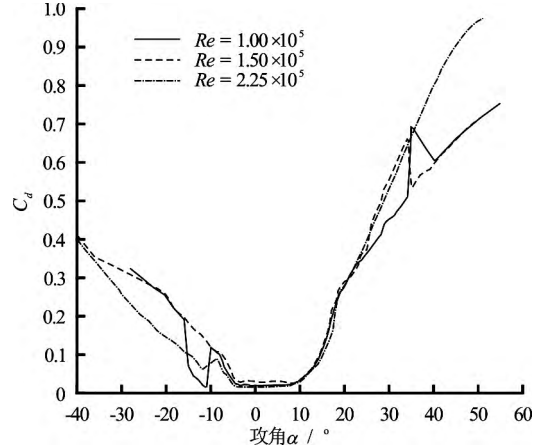


图 4 阻力系数 C_d 随 Re 和攻角 α 的变化
Fig.4 Drag coefficient as a function of Re and α : $C_d(\alpha, Re)$

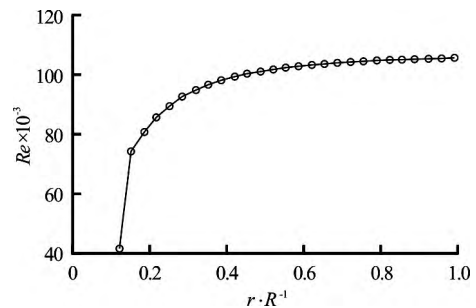


图 5 沿叶片径向的雷诺数估计 (除以 1000)
Fig.5 Reynolds numbers along radial blade positions

本算例中， $\Delta x = 0.0105$ m， $\Delta y = 0.014$ m，当 $\lambda = 6$ 时，式 (9) 要求 $\Delta t \leq 0.001$ s，而式 (10) 要求 $\Delta t \leq 2.3 \times 10^{-4}$ s，因此为了保证计算收敛，必须使 $\Delta t \leq 2.3 \times 10^{-4}$ s。本算例中取 $\Delta t = 2.0 \times 10^{-4}$ s。

2.3 气动数据

致动线模型需要叶片所用翼型的气动数据作为输入。本文使用著名开源程序 XFLR5 来计算翼型气动数据。 C_l 、 C_d 与雷诺数 Re 和攻角 α 相关。图 3 和图 4 分别是 C_l 、 C_d 在 $Re = 100\ 000$ 、 $150\ 000$ 和 $225\ 000$ 时随攻角 α 的变化。从图中可以看到，当攻角 α 在 $-10^\circ - 20^\circ$ 之间时， C_l 随 Re 的变化很小，因此可以认为 C_l 只是攻角 α 的函数。某个致动点处的当地雷诺数定义如下

$$Re = \frac{U_{blade} c}{\nu} \tag{11}$$

式中： c 是弦长， ν 是空气的运动黏度， U_{blade} 是当地速度，可由下式近似决定

$$U_{blade} = \sqrt{U_{axial}^2 + (\omega r)^2} \tag{12}$$

式中: U_{axial} 是轴向速度, 近似等于来流速度, ω 是转速, r 是半径。当该风力机处于最佳叶尖速比 $\lambda=6$ 时, 沿叶片径向的雷诺数如图 5 所示。从图中可以看出, 叶片大部分截面处的雷诺数接近于 100000, 因此当叶尖速比 $\lambda=6$, 应该使用 $Re=1.0 \times 10^5$ 时的气动数据。其他叶尖速比(定义: $\lambda = \frac{\omega R}{U_{\infty}}$, R 为叶片半径, U_{∞} 为来流速度)时, 也应做类似分析, 以确保使用合适的气动数据。

3 结果与分析

3.1 推力和功率

本文计算了叶尖速比为 2-10 的 11 个风轮运行工况, 计算得到的功率系数 C_p 和推力系数 C_T 与实验值进行对比(见图 6 和图 7), C_p 和 C_T 分别由下式定义

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho U_{\infty}^3 \pi R^2}, \quad C_T = \frac{T}{0.5\rho U_{\infty}^2 \pi R^2} \quad (13)$$

式中: $P=Q \cdot \omega$ 是风轮捕获的风功率, Q 为扭矩, ω 为转速, T 为推力。数值模拟结果与实验值符合的很好, 功率系数的最大相对误差不超过 8.9%, 推力系数的最大相对误差不超过 10.1%。从图 6 中可以看出, $\lambda=6$ 是最佳叶尖速比。当 λ 小于 6 时, 相对于实验值, 数值模拟得到的 C_p 值(或扭矩)偏低; 而当 λ 大于 6 时, 数值模拟得到的 C_p 值偏大($\lambda=7.6$ 除外)。有趣的是, 在所有计算的叶尖速比下, 推力的预测值均低于实验值。在较低的叶尖速比下, 扭矩和推力与实验值的误差都很小, 而当 $\lambda > 8$ 时, 扭矩和推力的预测值与实验值的偏差较大。这表明, 在较高的叶尖速比下, 准确预测风力机的气动性能十分具有挑战性。

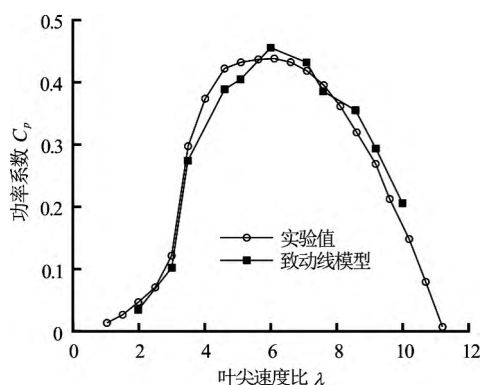


图 6 功率系数 C_p

Fig.6 Comparison of the power coefficients

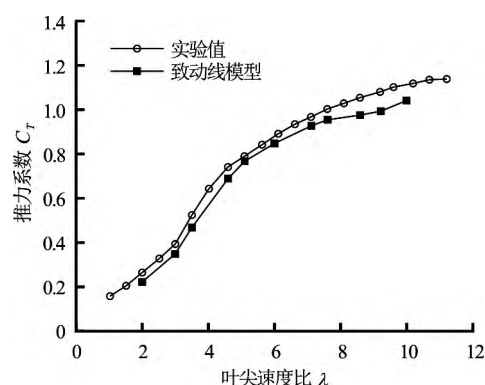


图 7 推力系数 C_T

Fig.7 Comparison of the thrust coefficients

3.2 尾流场分析

本文给出了三个代表性的叶尖速比下, NTNU 实验风力机的近尾流和远尾流的一些基本特性。图 8 显示了时间平均的轴向诱导因子沿叶片径向的分布规律。轴向诱导因子 a 的定义如下

$$a = 1 - \frac{U_x}{U_{\infty}} \quad (14)$$

式中: U_x 为风轮后方 x 方向风速, U_{∞} 为来流风速。轴向诱导因子越大表明速度降低越大、局部负载越大。在 $\lambda=10$ 的算例中, 从叶根到叶尖, 叶片局部负载显著增大, 这种现象在 BEM 方法中通常捕捉不到。对于 NTNU 风力机的最佳运行状态 $\lambda=6$, 轴向诱导因子的分布沿径向比较一致, 在叶片中部附近只有很小的增长。当 $\lambda=3$ 时, 轴向诱导因子有一个明显的峰值出现在 $r/R=0.22$ 处。对于这三种典型的运行状态, 轴向诱导因子在 $r/R=0.92$ 处均有一个突增, 并朝叶尖迅速减小。

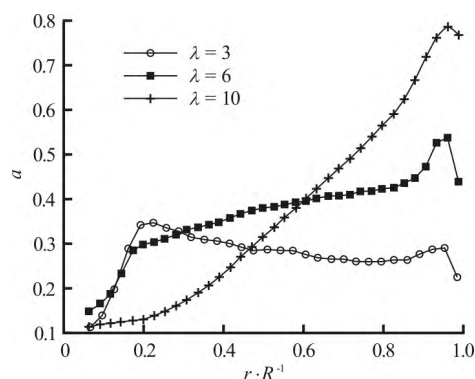


图 8 轴向诱导因子 a 的径向分布

Fig.8 The radial distribution of axial inductive factors

风轮尾流的特点可通过涡量等值面来表现, 如图 9(a) - 图 9(c)。尾涡图显示, 当 $\lambda=3$, 叶尖和叶根处都产生了清晰且稳定的螺旋状尾涡; 当 $\lambda=6$ 时, 可以看到尾涡略微膨胀, 大约在下游一

倍直径处，叶尖涡迅速耗散；当 $\lambda=10$ 时，大约在下流一倍半径处，叶尖涡迅速破碎，而且由于此时泄涡频率很大，尾涡的螺旋状结构已经难以识别。

轮后，速度降低很小；对于 $\lambda=6$ ，来流经过风轮后，速度降低较大且沿叶片展向较为均匀，特别是叶尖处的速度降低很大；对于 $\lambda=10$ ，可以看到从

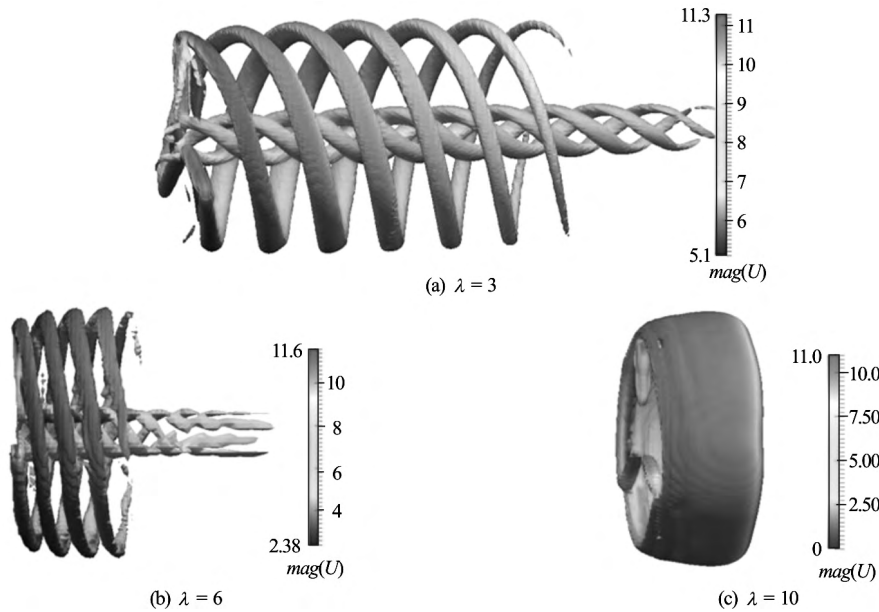


图 9 使用速度梯度的二阶张量 Q 的等值面表现的尾涡图

Fig.9 Wake visualization by second invariant of velocity gradient, Q

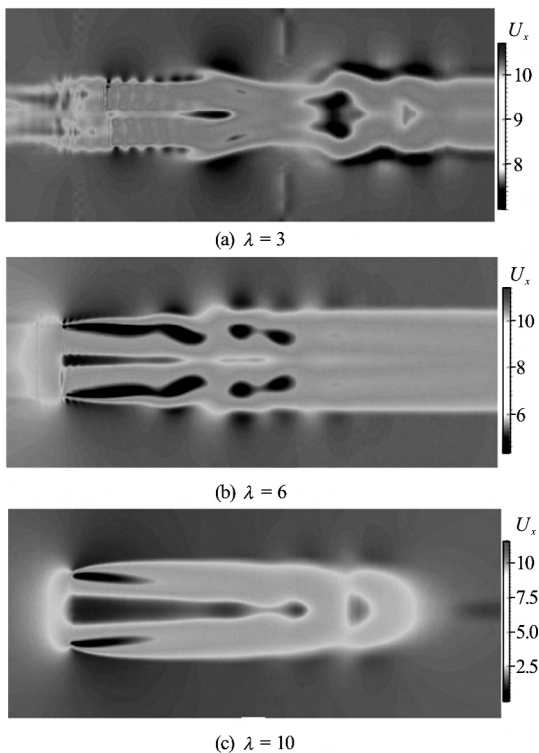


图 10 尾流中的 x 方向的速度剖面 ($z=0$)

Fig.10 Velocity contour of x -direction in wake flow ($z=0$)

三种运行状态下，沿流向方向的速度剖面如图 10 所示。从图中可以看出，这三种典型运行状态的速度剖面有很大不同。对于 $\lambda=3$ ，来流经过风

叶根到叶尖，速度逐渐降低，靠近叶尖部分出现了逆向速度，表明发生了严重的流动分离，风力机处于失速运行状态。

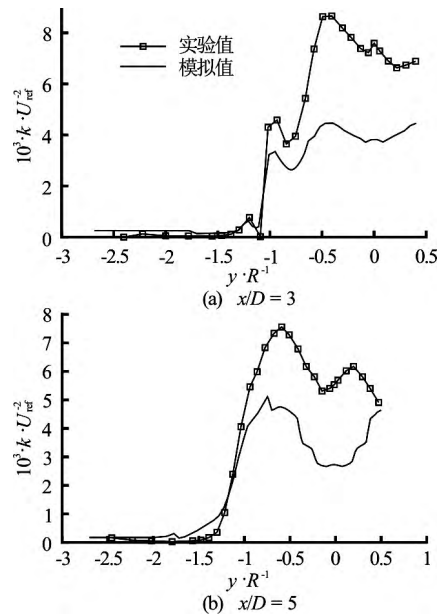
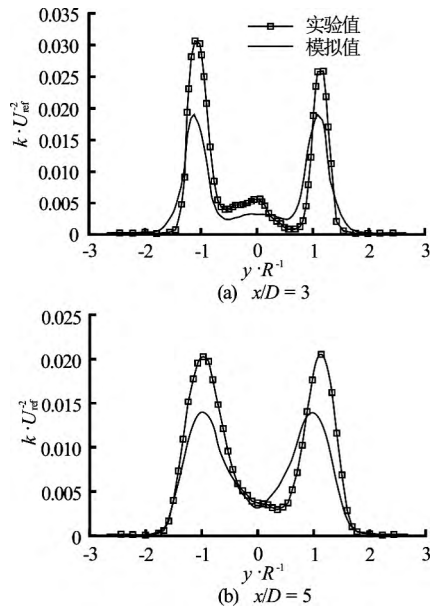
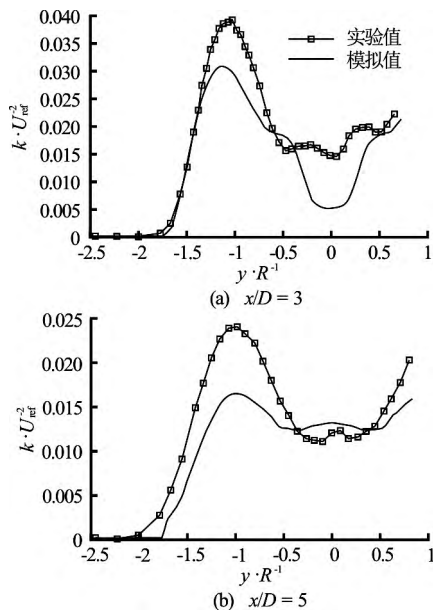


图 11 $\lambda=3$ 时湍动能与实验值的对比

Fig.11 $\lambda=3$, Turbulent kinetic energy compared with the experimental values

图 11—图 13 给出了远尾流中，时间平均的湍动能的模拟结果（沿 y 轴）。湍动能用来流速度做了无量纲化。三种典型运行状态下，模拟结果的变

图 12 $\lambda = 6$ 时湍动能与实验值的对比Fig.12 $\lambda = 6$, Turbulent kinetic energy compared with the experimental values图 13 $\lambda = 10$ 时湍动能与实验值的对比Fig.13 $\lambda = 10$, Turbulent kinetic energy compared with the experimental values

化趋势都与实验值相似。对于 $\lambda = 3$, 在 $0.5R$ 处有一个较大的湍流峰值, 而对于 $\lambda = 6$ 或 10 , 湍流峰值都出现在叶尖附近。实验值显示风轮尾后方的湍流是非对称的, 而模拟结果是完全对称的。这可能是因为致动线模型中没有考虑风力机塔架的缘故。风轮中心附近, 湍动能曲线出现一个波谷, 模拟结果与实验值的误差很大。在远离风轮中心处, 模拟结果与实验值符合较好。这是由于计算代码中没有考虑轮毂, 流动无阻碍地通过风轮中心。而实验中轮毂会阻挡风通过风轮中心, 并在风轮中心的尾后

方产生显著的速度损失和湍流。其他研究者给出的结果 (见文献[23,24]) 也和实验显示出了很大的差异性, 实验的组织者 Krogstad 在总结盲比结果时指出了这一差异, 这表明准确模拟尾流场的湍流结构目前仍十分具有挑战性。

4 结论

本文基于致动线模型结合 Navier-Stokes 方程对 NTNU 实验风力机进行了数值模拟, 并详细分析了 3 个不同叶尖速比下的尾流场特点。这 3 个不同的叶尖速比代表了 3 种典型运行状态, 其尾流特点有很大差异, 其他方法很难捕捉到这些特点。本文对推力和功率的预测与实验结果吻合较好, 对轴向诱导因子的模拟结果也与空气动力学理论分析一致。对于轻载转子 ($\lambda = 3$), 尾流几乎在整个叶片下游保持稳定, 随着叶尖速比的增大, 叶尖涡和叶根涡越来越不稳定, 并越快地在下游破碎。这表明这种不稳定性是尾流的动态变化本身所固有的。而在 $\lambda = 6$ 时, 叶片负荷比较均匀, 叶根和叶尖都呈现稳定的螺旋状尾涡结构。除了对尾流发展的一些思考, 本文也揭示了一些湍动能变化的特征。致动线模型能够较为准确地模拟远离风轮中心处 (大于 $0.5R$) 的尾流场, 更为精确的尾流场模拟, 需要在致动线模型中考虑机舱和塔架的影响。其他研究者如 Nodeland^[25]也得出了相似的结论。以后可考虑对机舱和塔架进行类似致动线模型的体积力建模, 以提高风机尾流场模拟的精度。

参 考 文 献:

- [1] JONKMAN J M. Modeling of the UAE wind turbine for refinement of FAST_AD[M]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2003.
- [2] SØRENSEN N N, MICHELSEN J A. Schreck Navier-Stokes predictions of the NREL phase VI rotor in the NASA ames 80 ft×120 ft wind tunnel[J]. Wind Energy, 2002, 5(2-3): 151-169.
- [3] ZHOU H, WAN D C. 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.
- [4] 周胡, 赵文超, 万德成. 非均匀风影响下风力机三维气动黏性流场的数值模拟[J]. 海洋工程, 2015, 33(1): 90-99.
ZHOU Hu, ZHAO Wen-chao, WAN De-cheng. Numeri-

- cal simulation of 3D viscous flow field of wind turbine under nonuniform wind[J]. *China Ocean Engineering*, 2015, 33(1): 90-99.
- [5] ZHOU H, CAO H J, WAN D C. Numerical predictions of wave impacts on the supporting structures of Shanghai Donghai-Bridge offshore wind turbines[C]. *Proceedings of the Twenty-third (2013) International Offshore and Polar Engineering*, Anchorage, Alaska, USA, 2013, 216-224.
- [6] ZHAO W C, WAN D C. 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, 294-301.
- [7] ZHAO W C, CHENG P, WAN D C. Numerical computation of aerodynamic performances of NREL Offshore 5-MW baseline wind turbine[C]. *The Proceedings of the Eleventh (2014) Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium (PACOMS-2014)*, Shanghai, China, 2014, 13-18.
- [8] ZHAO W C, WAN D C. Numerical study of interactions between phase II of OC4 wind turbine and its Semi-Submersible floating support system[J]. *Journal of Ocean and Wind Energy*, 2015, 2(1): 45-53.
- [9] CHENG P, WAN D C. Hydrodynamic analysis of the semi-submersible floating wind system for phase II of OC4[C]. *Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference*, Kona, Big Island, Hawaii, USA, 2015, 346-353.
- [10] LI P F, CHENG P, WAN D C, et al. Numerical simulations of wake flows of floating offshore wind turbines by unsteady actuator line model[C]. *Proceedings of the 9th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics (IWSH2015)*, Glasgow, UK, 2015.
- [11] 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.
- [12] 赵文超, 万德成. 海上浮式风力机叶片气动性能的数值模拟[J]. *水动力学研究与进展*, A辑, 2014, 29(6): 663-669.
ZHAO Wen-chao, WAN De-cheng. Numerical simulation of aerodynamic characteristics of floating offshore wind turbine blades[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2014, 29(6): 663-669.
- [13] 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.
- [14] SEZER-UZOL N, LONG L N. 3-D time-accurate CFD simulations of wind turbine rotor flow fields[J]. *AIAA Paper*, 2006, 394: 33-55.
- [15] MIKKELSEN R. Actuator disc methods applied to wind turbines[D]. *Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark*, 2003.
- [16] SØRENSEN J N, SHEN W Z, MUNDUATE X. Analysis of wake states by a full-field actuator disc model[J]. *Wind Energy*, 1998, 1(2): 73-88.
- [17] SØRENSEN J N, SHEN W Z. Numerical modeling of wind turbine wakes[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2002, 124(2): 393-399.
- [18] TROLDBORG N, SØRENSEN J N, MIKKELSEN R. Actuator line simulation of wake of wind turbine operating in turbulent inflow[C]. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2007, 75(1): 1-16.
- [19] TROLDBORG N, SØRENSEN J N, MIKKELSEN R F. Actuator line modeling of wind turbine wakes[D]. *Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark*, 2008.
- [20] LU H, PORTÉ-AGEL F. Large-eddy simulation of a very large wind farm in a stable atmospheric boundary layer[J]. *Physics of Fluids (1994-Present)*, 2011, 23(6): 1-20.
- [21] CHURCHFIELD M J, LEE S, MICHALAKES J, et al. A numerical study of the effects of atmospheric and wake turbulence on wind turbine dynamics[J]. *Journal of Turbulence*, 2012(13): 1-32.
- [22] CHURCHFIELD M J, LEE S, MORIARTY P J, et al. A large-eddy simulation of wind-plant aerodynamics[J]. *AIAA Paper*, 2012(2012-0537): 1-19.
- [23] KROGSTAD P Å, LUND J A. An experimental and numerical study of the performance of a model turbine[J]. *Wind Energy*, 2012, 15(3): 443-457.
- [24] KROGSTAD P Å, ERIKSEN P E. "Blind test" calculations of the performance and wake development for a model wind turbine[J]. *Renewable Energy*, 2013, 50: 325-333.
- [25] NODELAND A M I. Wake Modelling using an actuator disk model in openFOAM[D]. *Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norwegian*, 2013.