

DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2014.04.009

# 不同叶片数的风力机绕流场的非定常流数值模拟\*

周胡<sup>1,2</sup>, 万德成<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240,  
Email: zhouhu@sjtu.edu.cn)  
(2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 310014)

**摘要:** 该文基于 OpenFOAM 自由软件包, 采用任意网格界面元方法 (Arbitrary Mesh Interface Method) 对两叶片和三叶片风力机风轮周围流场进行了非定常数值模拟和分析。计算采用非结构化网格和  $k-\omega$  SST 湍流模型, 分析了多种工况下两叶片和三叶片风力机风轮的气动性能的特点和差异, 并计算风力机的轴向推力、扭转力矩、叶片表面压力分布和尾涡等气动性能参数。该文计算得到的结果可为风力机叶片进行结构有限元分析时, 提供重要的风载荷数据, 为风力机叶片的设计、改型和研发工作提供详细技术参数。

**关键词:** 风力机; OpenFOAM; 气动性能; 非定常计算

**中图分类号:** O357

**文献标识码:** A

## Numerical simulation of the unsteady flow around wind turbines with different blades numbers

ZHOU Hu<sup>1,2</sup>, WAN De-Cheng<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture,  
Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)  
(2 Huadong Engineering Corporation, Hangzhou, 310014, China)

**Abstract:** The numerical simulation of the unsteady flow around wind turbines with different blades numbers are conducted with the Arbitrary Mesh Interface Method based on the free source OpenFOAM software. The turbulence model  $k-\omega$  SST and unstructured grid are chosen to analyze the difference between aerodynamics of two blades and three blades wind turbine under different wind conditions. Detailed numerical results of vortex structure, thrust, torque and pressure distribution of different wind turbine were presented. These results are important to the finite element analysis and the design and research of wind turbines with different blades numbers.

**Key words:** wind turbine; OpenFOAM, aerodynamics, unsteady computation

\* **收稿日期:** 2014-01-06(2014-03-25 修改稿)

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51379125, 51411130131, 11272120), 上海高校特聘教授岗位跟踪计划(2013022)和国家重点基础研究发展计划(2013CB036103)

**作者简介:** 周胡(1989-), 男, 江苏扬州人, 硕士研究生.

**通信作者:** 万德成, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

**Received:** January 6, 2014 (Revised March 25, 2014)

**Project supported by foundations:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51379125, 51411130131, 11272120), Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions of Higher Learning (2013022) and The National Key Basic Research Development Plan of China (2013CB036103)

**Biography:** ZHOU Hu (1989-), Male, Master Candidate.

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

## 引言

随着我国经济和工业的快速发展,已成为发展瓶颈的能源短缺、温室效应和环境保护等问题亟待解决。可再生能源的开发和利用是解决上述问题有效方法之一,在可再生能源中,风能发电技术日趋成熟,成本较低,应用前景广阔,同时,随着海上风能发展的兴起,风能的开发利用再一次吸引了全球学术界和工业界的目光。对于风力机而言,其空气动力学性能直接决定了风力机将风能转化为机械能的效率,还直接决定了作用在风力机零部件上的载荷情况,故而影响风力机的可靠性。所以准确预报风力机的空气动力学性能对于提高风力机的效率和寿命具有至关重要的意义。风轮的不同叶片数对风力机性能和载荷、风轮和传动系统的成本、风力机气动噪声及景观效果等都会产生重要影响。综合权衡不同叶片数风力机的利弊,目前陆上水平轴风力机发电机组的风轮叶片一般是两片或三片,其中三片占多数。但是对于海上风力机而言,两片从安装和运行成本等角度有着重要的优势。

随着计算机性能和计算流体力学方法的快速发展,国内外很多学者尝试使用数值仿真的手段来解决三维叶片的性能评估和空气动力载荷的预测分析。Sørensen 等<sup>[1]</sup>使用基于分块有限体积法(multiblock finite volume)的不可压 RANS 求解器 EllipSys3D,对美国可再生能源实验室(NREL) Phase VI 两叶片风轮的单个叶片在不同风速下的气动性能进行了计算。计算采用了  $k-\omega$  SST 湍流模型,结果发现当风速超过 13 m/s 后,扭矩与实验值有 20%左右的偏差;而压力分布等都有很好的结果。这也初步证明了 CFD 方法在计算风力机空气动力学性能上的优势。Duque 等<sup>[2]</sup>对 NREL Phase VI 两叶片风轮采用基于有限差分法重叠网格技术的可压 RANS 求解器 Overflow-D 进行求解。他们将数值结果与势流求解器 CAMRADII 结果以及实验数据进行了详细的对比,讨论了风力机的各项气动性能指标,如轴功率、轴向力和压力系数等,得出 RANS 求解器比势流求解器有更准确的结论。任年鑫等<sup>[3]</sup>基于三维 NS 方程和 RNG 湍流模型,采用滑移网格对 NREL 5 MW 三叶片海上风力机,对不同来流风速下风力机的性能和尾迹区风场特征进行了系统模拟。在风速小于 9 m/s 时,风力机输出功率与实验值较为接近,当风速较高时,两者存在一定偏差但变化趋势上非常一致,其获得的定量结果对海上风力机三维气动性能的评价有重要参考价值。祝贺<sup>[4]</sup>等通过计算流体动力学软件 Fluent,建立了考虑地形和风剪切效应影响的风电场数学

模型,结合用户自定义函数(user-defined function, UDF)技术对三叶片风轮在空气动力作用下的风轮表面压力、转速、力矩等气动参数进行了分析。周胡等<sup>[5]</sup>使用基于有限体积法的 CFD 开源平台 OpenFOAM 对 NREL Phase VI 两叶片风轮进行了数值计算,采用包括基于多参考系稳态 RANS 求解器 MRFSimpleFoam 和基于任意网格界面元法(AMI)的瞬态 RANS 求解器 PimpleDyMFoam 的计算,对计算得到叶片表面压力分布,叶片的推力、转矩、尾涡等气动数据与 NREL 实验进行了详细对比,高风速下扭矩与实验值存在偏差,但是其它参数整体上吻合较好,验证了 OpenFOAM 两种求解器数值模拟两叶片风轮三维流场的能力。目前国内外对风轮绕流场的数值分析都集中在单独研究两叶片或者单独研究三叶片,这其中又有很大一部分是使用单个叶片加周期性边界条件来代表整个风轮,目前很少有研究者从数值模拟的角度对不同叶片数风轮的空气动力学性能和近尾流区域流场特征进行深入对比研究。

本文使用基于 OpenFOAM 平台的瞬态不可压 RANS 求解器 pimpleDyMFoam 结合 AMI 滑移网格处理方法,对两叶片和三叶片风力机风轮在  $3^\circ$  桨距角,四个风速(5 m/s、10 m/s、15 m/s 和 25 m/s)下的风轮空气动力学性能和近尾流区域的流场特征进行了非定常数值模拟和分析。所得两叶片风力机风轮的气动力参数计算结果与 NREL Phase VI 实验值有良好的吻合,验证了该求解器求解风力机三维复杂流场的能力。随后参照两叶片风力机风轮对三叶片风轮进行建模计算,并将结果与两叶片风轮模型进行对比,探讨了当风力机风轮叶片几何外形相同的情况下,风轮叶片数对风力机气动性能、风力机载荷及风轮绕流场的影响。

## 1 数学模型与数值方法

OpenFOAM<sup>[6]</sup>(Open Source Field Operation and Manipulation,意为场的运算和操作的开源平台)是对连续介质力学问题进行数值计算的 C++ 自由软件包。OpenFOAM 的魅力在于使用者和开发者可以依照自己问题的求解流程来编写求解器,关注的重点是求解的过程,而不需要关心离散和求解的最底层知识。上海交通大学船舶与海洋工程系在 OpenFOAM 的开发和使用上已经开展了一些工作。例如查晶晶、曹洪建和万德成<sup>[7,8]</sup>基于 OpenFOAM 两相求解器 interDyMFoam,开发实现了数值水池造波和阻尼消波,并对圆柱波浪爬高进行了广泛深入研究。沈志荣和万德成<sup>[9]</sup>将六自由度运动模块植入 OpenFOAM,开发了 naoe-FOAM-SJTU 求解器,

实现了对船舶在波浪上运动的数值模拟。王强、周胡和万德成<sup>[5,10]</sup>基于 pimpleDyMFoam 求解器对风力机风轮的气动力性能预报,风力机叶片与支撑塔架相互作用的耦合流场进行了数值模拟。

本文采用 OpenFOAM-2.1.0 版本中瞬态不可压 RANS 求解器 pimpleDyMFoam,并结合任意网格界面元法 (AMI Method) 处理网格旋转运动。AMI 方法的原理与在 OpenFOAM 开发者版本中的通用网格界面元<sup>[11]</sup> (Generalized Grid Interface, GGI) 基本一致,但也存在一些细微区别。它的主要原理是通过带权重的差值实现网格相对运动时交界面两侧数据的交互。

由于风力机外流场风速较小,所以绕流场可以看成不可压。同时由于空气密度较小,忽略重力的影响。通过对连续性方程和动量方程时间平均,得到非定常流场的时均控制方程为:

$$\nabla \cdot \bar{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U}\bar{U}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\nu \nabla \bar{U}) + \overline{U'U'} \quad (2)$$

其中:  $\bar{U}$  和  $\bar{p}$  分别为时均速度矢量和压强,  $\nu$  为运动黏度系数,项  $\overline{U'U'}$  为雷诺应力张量,是一个未知量,从而导致控制方程的不封闭,引入湍流模型可以求解 (1) 和 (2)。

在风力机的数值模拟和分析中,  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport model) 双方程湍流模型<sup>[12,13]</sup>是一种非常常用的数学模拟,而且具有较为优秀的表现。本文也选用其作为本文的湍流模型。为了增加计算效率,本文采用壁面函数来模拟近壁面处湍流。

$k-\omega$  SST 模型是两方程的线性涡黏模型,基于涡黏假设,即雷诺应力与平均速度梯度通过动涡黏系数  $\nu_t$  构建一种简单的线性关系,在  $k-\omega$  SST 模型中,  $\nu_t$  可表述为

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (3)$$

其中:  $k$  为湍动能,  $\omega$  为耗散率,  $a_1$  为常数,  $\bar{S} = (\bar{U} + \bar{U}^T)/2$ , 物理意义是应变率张量。

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{\omega y^2} \right) \right]^2 \right\} \quad (4)$$

其中,  $y$  为到壁面的距离。  $k$  和  $\omega$  的值可通过求解相应的输运方程得到,由于输运方程的具体形式比

较复杂,在此不详细列出。

求解器 pimpleDyMFoam 采用 PIMPLE 算法<sup>[14]</sup> (PISO 和 SIMPLE 混合算法) 来对速度和压力解耦。在差分形式上,时间项采用一阶欧拉隐式格式,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。

## 2 计算模型与网格

两叶片风力机风轮模型根据美国国家新能源实验室 (National Renewable Energy Laboratory, NREL) phase VI 实验风力机报告<sup>[15]</sup>的相关参数并利用 Catia 建模软件构建而成。风轮由 2 个叶片组成,额定功率为 19.8 kw,采用失速控制(定桨距角)的功率控制方式,风轮半径为 5.029 m,叶片主体部分为 S809 翼型,攻角为  $3^\circ$ ,叶片的扭角随相对展长的变化关系如图 1 所示。三叶片风力机风轮的叶片按  $120^\circ$  呈轴对称分布,叶片的几何外形与两叶片模型一样,如图 2。

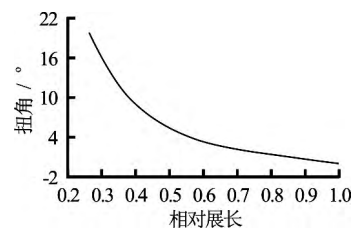


图 1 扭角与相对展长的关系  
Fig.1. Relationship of twist and relative span



图 2 两叶片和三叶片模型  
Fig.2. Two blades and three blades model

风力机的气动特性计算为非定常计算,由于风轮旋转效应,对风力机风轮需要进行特殊的空间网格划分。计算域径向远场为圆柱面,圆柱面的半径为 15 m,计算域进口在叶轮上游 5 m 处,出口在叶片下游 20 m 处,如图 3 所示。计算区域的大小选取主要参考其它相关作者的设置并考虑风力机气动力计算的网格要求及自身的计算能力。背景网格设计时中心区域尽可能保证网格单元接近六面体,整个六面体网格区域要能够覆盖风轮。在侧向,靠近风轮区域的  $\pm 0.8$  m 范围内,对网格进行了加密。其后 5 m 范围内为了捕捉尾涡也进行了加密。实际

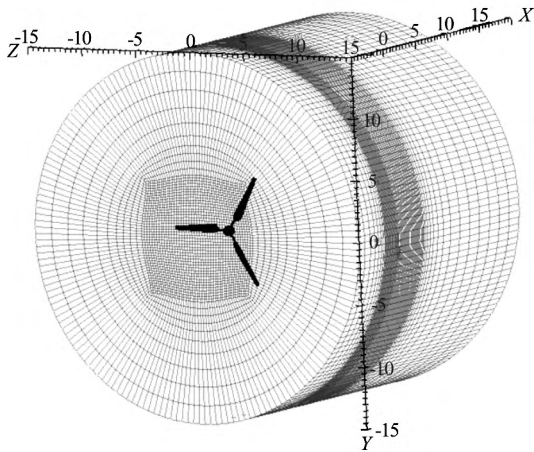


图3 风轮计算域  
Fig.3. Computational domain

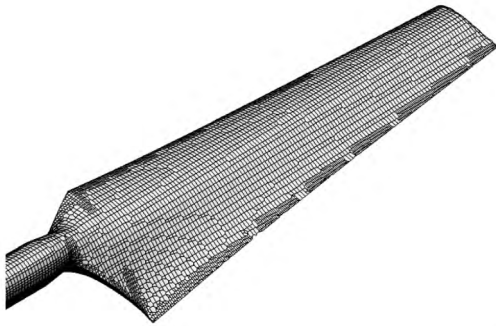


图4 叶片表面网格  
Fig.4. Blade surface mesh

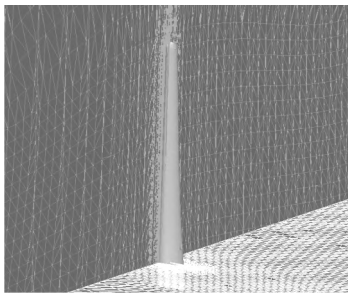


图5 风轮叶片截面网格(局部)  
Fig.5. Sectional mesh of blade(local)

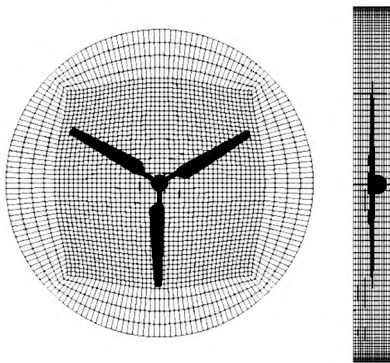


图6 AMI 交界面网格  
Fig.6. AMI sliding mesh

操作由 ICEM-CFD 绘制背景网格,为两个 O 型嵌套网格,内部 O 型网格用于保证滑移 AMI 交界面的网格质量。在此基础上使用 OpenFOAM 网格划分工具 snappyHexMesh 生成整套网格,模型表面采用 3 级加密,叶片的边缘用 4 级加密,两叶片风轮模型最终网格量为 40 万,三叶片风轮模型最终网格量为 46 万。两叶片风轮叶片表面及剖面网格如图 4 和图 5。最终网格的  $y^+$  在 50 万附近,基本可以满足计算的需要。模型建立完成后使用 OpenFOAM topoSet 网格操作工具等生成 AMI 交界面,生成的 AMI 区域如图 6 所示。两种模型的 AMI 区域半径都是 7.5 m,前后距风轮中心也均为 0.8 m。整个网格划分的策略、流程和方法的有效性已经经过验证<sup>[5,10]</sup>。

本文的计算主要针对 NREL Sequence S 系列实验,选取其中的 5 m/s、10 m/s、15 m/s 和 25 m/s 四个风速进行数值计算。各算例的初始参数设置参见表 1。

### 3 结果分析

#### 3.1 涡的分布

四个风速下反映风力机近尾流的流场特征的尾涡情况可以参见图 7,从后处理图像可以看出,风力机风轮尾部的伴流场非常复杂。该图由速度梯度张量第二不变量  $Q$  (the second invariant of the velocity gradient tensor)<sup>[16]</sup>等值面表达,并由速度值染色。由于  $Q$  值和速度值相关,为了更加清晰显示涡的形态,对于不同速度采用不同的  $Q$  值。从图中可以看到,不管是两叶片还是三叶片风轮,在 5 m/s 和 10 m/s 的风速下,叶片附近流体大多还是附着流动,而且从 5 m/s 到 10 m/s 叶片随边附近的涡有加强现象。同时,这两个风速下,我们可以观察到稳定的叶尖涡,特别是在 5 m/s 的时候更为明显。此外由于叶片的根部截面从 S809 翼型迅速转化到圆形,变化剧烈,故这部分区域也观察到了十分明显的涡。对于由过渡引起的涡来说,三叶片风轮较两叶片风轮完整。此外我们也可以注意到所有尾涡大约在风轮后约一个叶片长度距离后迅速地消散,这和之前本文对风力机后面约一个叶片长度区域内的网格加密有关。故需要观察到更长距离的尾涡变化,需要对风力机后面的网格做更大范围的加密,这当然也会大大增加计算量。在 10 m/s 和 15 m/s 时,两叶片风轮和三叶片风轮的表面的涡的形态是存在一定差异的,这种区别的原因可能是叶片与叶片间相互作用的差异引起的,也可能是由于两者网格质量的差异引起。总之,由于尾涡的呈现与叶片周围网格的质量密切相关,如果想要得到更为准确

表 1 实验各工况参数  
Table 1. Parameters of different experimental Conditions

实验编号	风速 (m/s)	空气密度 (kg/m <sup>3</sup> )	运动黏度 (m <sup>2</sup> /s)	转速 (rpm)	桨距角 (°)
S0500000	5	1.243	$1.424 \times 10^{-5}$	72	3
S1000000	10	1.246	$1.423 \times 10^{-5}$	72	3
S1500000	15	1.224	$1.450 \times 10^{-5}$	72	3
S2500001	25	1.220	$1.454 \times 10^{-5}$	72	3

的判断,还需要对不同雷诺数下的网格进一步的处理。此外,两种风轮在 15 m/s 和 25 m/s 风速下,叶尖涡和叶片其他区域产生的流动分离之间有十分明显的相互作用,这在 15 m/s 的图中非常明显。这种相互作用会导致叶尖涡破碎,从图中我们也可以明显看到在高风速下叶尖涡的长度有明显缩短。此外,在 25 m/s 的图中,我们还可以观察到一些奇怪的呈对称分布的斑状的涡。进一步观察发现,这些斑状的涡位于 AMI 交界面上,本文认为这是由于 AMI 交界面旋转时出现的细小间隙导致的。

### 3.2 横风向尾迹区域风速

应用已经验证的求解器 pimpleDyMFoam 结合 AMI 网格处理技术对两叶片和三叶片风轮在 5 m/s 风速下的尾迹区域的特征进行分析研究,主要的数值结果如图 8 和图 9 所示。

图 8 给出了 2.5 s 时两叶片模型顺风向距风轮 4 m、8 m、12 m、16 m 和 20 m 处与地面垂直轴向直径上的风速的对比曲线。在  $X = 4$  m、8 m 和 12 m 处尾迹区域的风速分布都较为接近,下降到的最低风速是来流风速的 76% 左右,而且主要受影响的区域集中在风轮横风向的  $[-5$  m, 5 m] 区域,当  $X = 16$  m 时,尾迹区域的风速已基本接近来流风速,  $X = 20$  m 时,尾迹区域的风速完全恢复为来流风速。在此需要说明的是,尾迹区域风速的快速恢复与网格逐渐变疏有很大关系,本文为了节省网格,风轮尾部的区域网格较疏。

图 9 给出了 2.5 s 时三叶片模型顺风向距风轮 4 m、8 m、12 m、16 m 和 20 m 处与地面垂直轴向直径上的风速的对比曲线。与两叶片模型规律基本一致,在  $X = 4$  m 和  $X = 8$  m 处尾迹区的风速分布基本一致,但是最低风速下降到来流风速的 63% 左右,而且在横风向的中心处三叶片风轮的风速相对两叶片有急剧下降。三叶片风轮在  $X = 16$  m 时风速就出现了部分恢复,恢复到来流风速的 79% 左右,这一点与两叶片也是不一样的。最后当  $X = 16$  m、20 m 时,与两叶片模型类似,风速也恢复到了来流风速,风速快速恢复的原因与两叶片相似。

同时从图 8 和图 9 中还可以看出,尾迹区域的风速变化曲线小部分区域存在不对称性,特别是

$X = 4$  m 处,可能是由于距离风轮较近,风轮较强的三维旋转效应及复杂流场引起的。通过对尾迹区域风速特征的分析,可以为风力机整体优化布局提供参考意见。

### 3.3 风轮的推力、转矩和脉动载荷

图 10 和图 11 分别是两叶片和三叶片推力、扭矩对比的柱状图。从两叶片和三叶片风轮推力对比柱状图可以看出,三叶片风轮的推力基本上比两叶片风轮的推力提高了 50%,风轮的推力与叶片的数目基本呈线性比例关系。但是扭矩的对比情况却跟推力不一样,在 5 m/s 风速时,三叶片风轮扭矩比两叶片大 70.3%,然而到 10 m/s 时三叶片风轮扭矩相对两叶片风轮扭矩的增幅却下降到了 40%,可能跟叶片失速等流动分离现象相关,风轮的扭矩跟风轮叶片的数目不存在简单的线性比例关系。

风力机风轮的叶片数对风力机载荷也有重要影响。从图中可以清楚的看出,图 12 和图 13 分别是 5 m/s 和 10 m/s 风速下两叶片和三叶片风轮旋转一周推力变化对比曲线。为了方便对比两叶片和三叶片风轮脉动载荷的大小,在作图时将两叶片和三叶片风轮的平均推力值放在同一垂直高度上,并且两个 Y 轴采用同一刻度。从两图中可以看出,整体上两叶片风轮的脉动载荷要比三叶片脉动载荷大,这一现象在 10 m/s 风速下更为明显。风轮叶片数对风力机载荷的影响主要表现在,当风轮直径和风轮旋转速度相同时,对于刚性轮毂来说,作用在两叶片风轮的脉动载荷要大于三叶片风轮。因此,一般两叶片风轮设计时,常常采用翘板式轮毂,以降低叶片根部的挥舞弯曲力矩。数值模拟的结果与理论分析<sup>[17]</sup>的结果完全一致,也间接证明了所采用的模拟方法的有效性。

### 3.4 不同叶片数风轮叶片压力系数对比

通过将两叶片和三叶片风轮叶片各个截面压力分布情况进行对比可以进一步探讨风力机空气动力性能的细节。相较之前,这将更加具有挑战性,也更能反映出问题的本质,因为压力值是针对某一个特定的点而言的。实验的压力值是由叶片在上半个半圆区域扫过时平均得到的,这样可以除去塔架

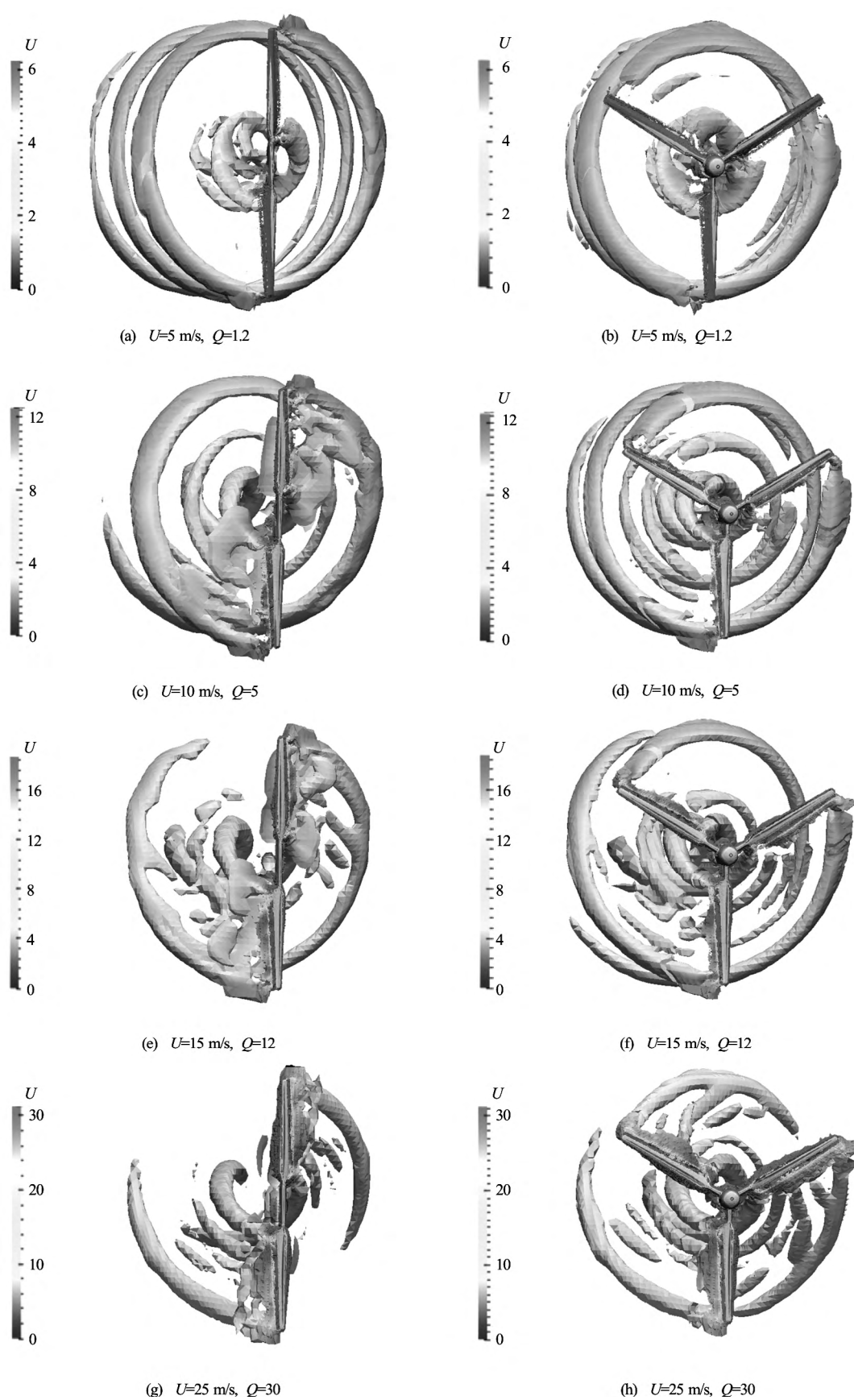


图 7 不同风速下两叶片和三叶片风轮尾涡比较

Fig.7. Comparison of wake vortices between two blades and three blades wind turbine

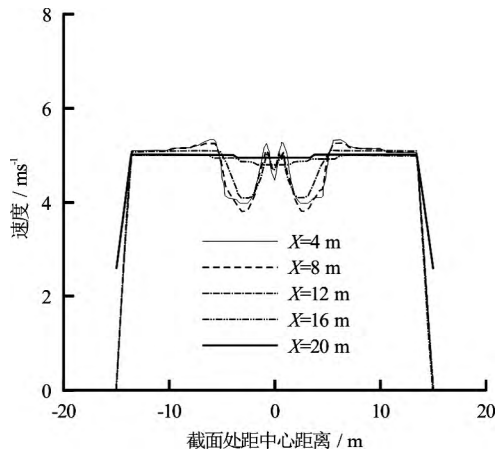


图 8 5 m/s 顺风向两叶片风轮尾迹区域风速曲线  
Fig.8. Velocity of downstream wake region of two blades wind turbine at 5 m/s

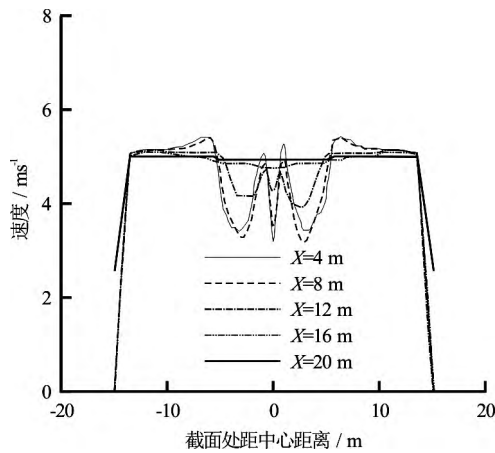


图 9 5 m/s 顺风向三叶片风轮尾迹区域风速曲线  
Fig.9. Velocity of downstream wake region of three blades wind turbine at 5 m/s

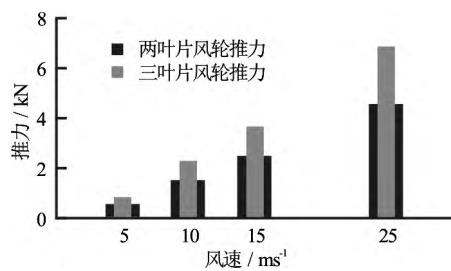


图 10 两叶片和三叶片风轮推力对比柱状图  
Fig.10. Comparison of thrust of different rotors

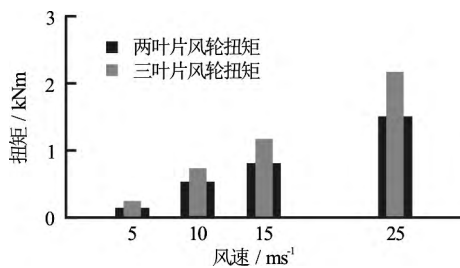


图 11 两叶片和三叶片风轮扭矩对比柱状图  
Fig.11. Comparison of torque of different rotors

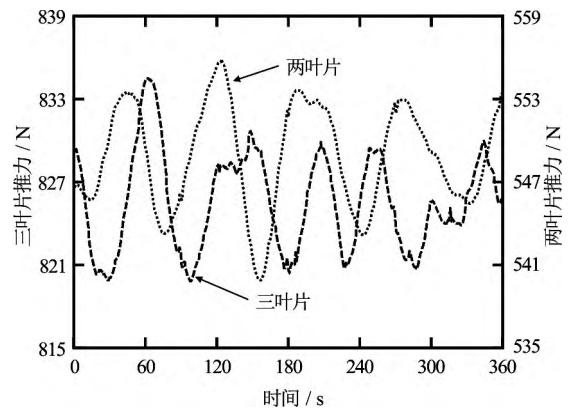


图 12 5 m/s 时两叶片和三叶片风轮旋转一周推力变化曲线  
Fig.12. Time history of thrust of two blades and three blades wind turbine at 5 m/s

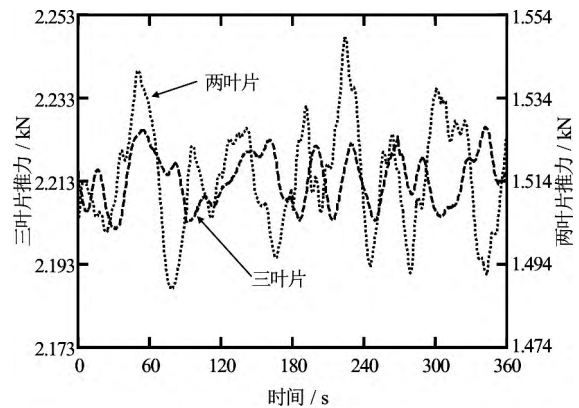


图 13 10 m/s 时两叶片和三叶片风轮旋转一周推力变化曲线  
Fig.13. Time history of thrust of two blades and three blades wind turbine at 10 m/s

对于两叶片风轮压力分布的影响。但是本文在实际操作时，由于后处理的限制，只选取了 2.5 s 时（即风力机正好旋转 3 圈时）叶片的压力情况做截面研究。本文中用到的压力系数定义如下：

$$C_p = \frac{P_0 - P_\infty}{0.5\rho[U^2 + (\omega r)^2]} \tag{5}$$

其中： $P_0$  为叶片表面附近的压力值； $P_\infty$  为无穷远处的压力值，本文中取 0； $U$  代表风速； $\omega$  代表风轮角速度； $r$  代表截面距转动中心的距离。

从图 14 可以看出，两叶片风轮的叶片各个截面的压力系数分布在 5 m/s 时与实验值都非常吻合。而在 10 m/s 的风速下，靠近叶片根部的两个截面与实验值吻合得较好，但是靠近叶片尾部的另外三个截面压力系数的计算值远未达到实验值的高度。观察这些图可以发现，偏差比较大的区域位于叶片吸力面（suction side）靠近导边的位置，但是叶片导边处的压力面（pressure side）的压力系数值与实验值较接近。叶片吸力面导边位置计算值的平

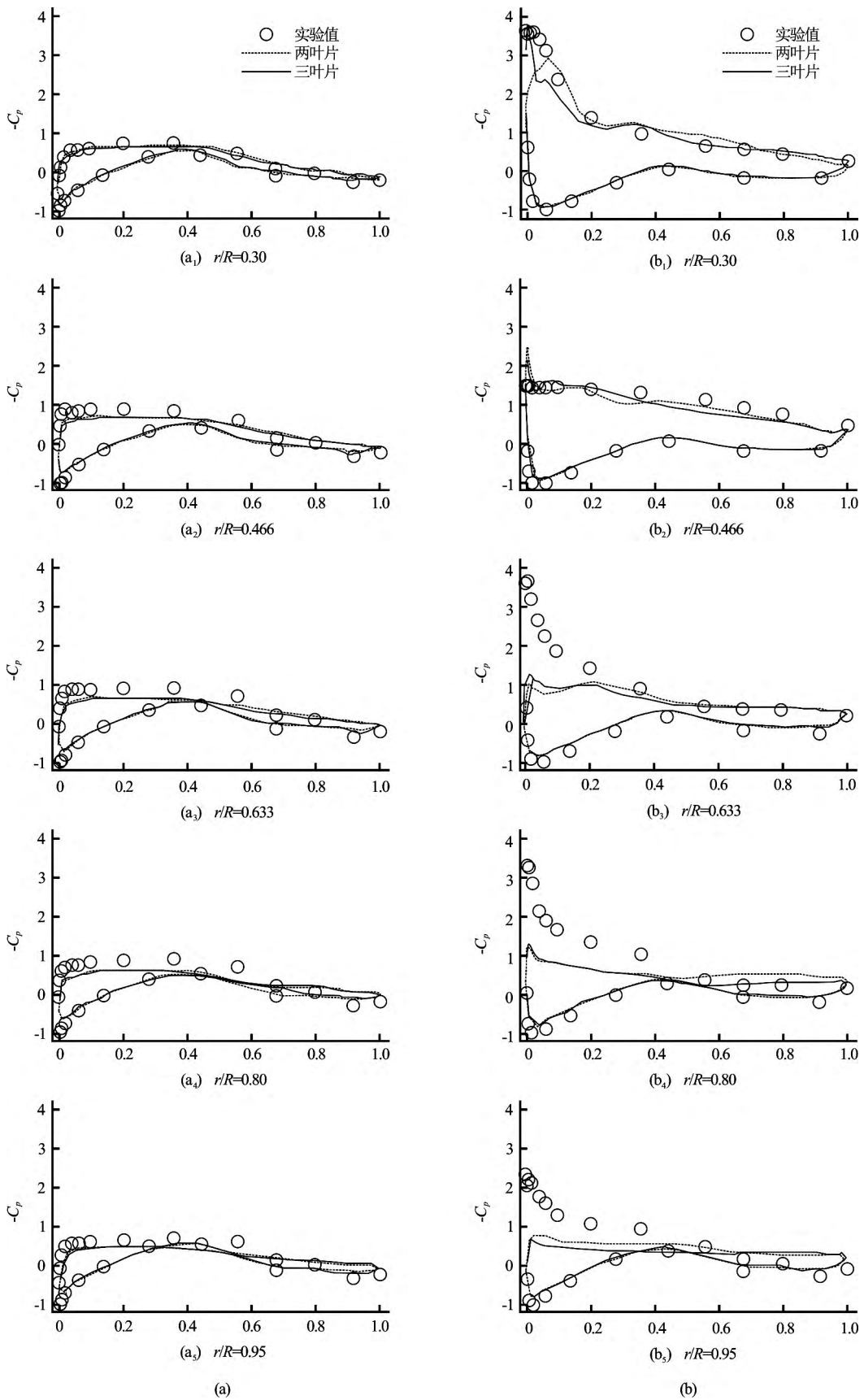


图 14 5 m/s (左) 和 10 m/s (右) 两叶片和三叶片风轮叶片各截面压力系数分布曲线  
 Fig.14. Pressure coefficient distribution for 5 m/s (left) and 10 m/s (right) at five sections



缓特性佐证了之前预测扭矩的偏小。此外,与本文采用同一网格,但是选用基于多参考系求解器 MRFSimpleFoam 对本算例进行计算的结果也没有捕获到导边处的压力峰值<sup>[5]</sup>,本文作者推测可能是叶片导边处的网格较稀疏所致。

再来观察两叶片风轮和三叶片风轮各个截面压力系数分布的差异特性。在 5 m/s 风速下,除了  $r/R=0.8$  截面压力面中部有明显差异,其它各个截面的压力系数分布两种风轮之间基本上都没有显著的区别,而且从上面的推力值的对比图中也可以看出,三叶片风轮的推力值大约为两叶片风轮的 1.5 倍,扭矩约为两叶片风轮的 1.7 倍。可以得出结论,在低风速下时,三叶片风轮旋转过程中,由于转动较慢,前一个叶片所产生的伴流场在后一个叶片到来之前就已经恢复,所以对后一个叶片基本上没有影响。而在 10 m/s 风速下,对比两种风轮的压力系数分布图可以看出,两者叶片吸力面差异较大,而压力面基本吻合,叶片的吸力面对叶片数更加敏感,即叶片经过前一个叶片所产生的伴流场时,吸力面更易受到影响。

## 4 结论

本文使用基于 OpenFOAM 平台的不可压 RANS 求解器 pimpleDyMfoam,以及结合 AMI 运动网格处理方法对 NREL phase VI 两叶片风力机风轮和重新构造的叶片几何外形相同的三叶片风轮在  $3^\circ$  桨距角,四个风速下(5 m/s、10 m/s、15 m/s 和 25 m/s)的三维流场和空气动力性能进行了数值计算。本文从不同叶片数风轮的尾涡分布,横风向尾迹区域风速,风轮的推力、转矩,脉动载荷以及不同叶片数风轮叶片压力系数分布等气动力参数对比着手,就叶片数的不同对风力机风轮流场和空气动力性能的影响进行了分析。通过计算分析,本文得出如下结论:

(1) pimpleDyMfoam 求解器结合 AMI 运动网格处理方式能够有效求解三维风力机的流场和空气动力性能。为未来进一步求解更加复杂的风力机流场奠定了坚实基础。湍流模型结合壁面函数的方式可以有效模拟壁面处的流动,具有较强的分离捕捉能力。结合合适的壁面函数后,该方法可以大大减少计算量。

(2) 从两种风轮伴流场的尾涡分布可以粗略看出,两叶片风轮与三叶片风轮叶片间的相互作用存在一定差异,需要引起注意的是叶片周围网格质量直接决定了尾涡的呈现的准确性,所以本文的计算网格还有待进一步精细化处理。

(3) 风轮的推力与叶片数目基本呈线性关系,

三叶片风轮的推力是两叶片风轮的推力 1.5 倍左右。但是扭矩跟叶片数目的关系显得相对杂乱无章。同时,当风轮叶片几何形状和风轮旋转速度相同时,作用在两叶片风轮的脉动载荷要大于三叶片风轮,所以在一般两叶片风轮设计时,需要对轮毂进行设计以降低叶片根部的挥舞弯曲力矩。

(4) 在低风速时,不同风轮叶片压力系数基本吻合。但是在高风速下,叶片的吸力面对风轮的叶片数目十分敏感,叶片的压力面在不同的叶片数目下仍非常吻合。所以在风力机整体设计时,不同叶片数目的风轮与塔架之间的间隙距离要分别充分考虑。

## 致谢

本文工作还得到了美国船级社(中国)有限公司(ABS, China)研究基金,工信部高技术船舶科研项目 and 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] SØRENSEN N N, MICHELSEN J, SCHRECK S. 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.
- [2] DUQUE E P, BURKLUND M D, JOHNSON W. Navier-Stokes and comprehensive analysis performance predictions of the NREL phase VI experiment[R]. DTIC Document, 2003.
- [3] 任年鑫, 欧进萍. 大型海上风力机尾迹区域风场分析[J]. 计算力学学报, 2012, 29(3): 327-332.  
REN Nian-xin, OU Jin-ping. Numerical analysis for the wake zone of large offshore wind turbine[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(3): 327-332.
- [4] 祝贺, 徐建源, 滕云, 等. 风力机风轮气动性能三维流场数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(17): 85-90.  
ZHU He, XU Jian-yuan, TENG Yun, et al. 3D flow field numerical aerodynamic performance test of wind turbine rotor[J]. Journal of the CSEE, 2010, 30(17): 85-90.
- [5] 周胡, 王强, 万德成. 风力机叶片三维扰流场的数值模拟[C]. 第十一届全国水动力学学术会议暨第二十

- 四届全国水动力学研讨会并周培源教授诞辰 110 周年纪念大会, 江苏无锡, 2012: 627-636.
- ZHOU Hu, WANG Qiang, WAN De-cheng. Numerical simulations of the 3D viscous flows around wind turbine blade[C]. Proceeding of the 11th National Congress on Hydrodynamics & 24th National Conference on Hydrodynamics and Commemoration of 110th Anniversary of Zhou Pei-yuan's Birth, Wuxi, Jiangsu, China, 2012: 627-636.
- [6] JASAK H, JEMCOV A, TUKOVIC Z. Openfoam: A C++ library for complex physics simulations[C]. International Workshop on coupled methods in numerical dynamics, Dubrovnik, Croatia, 2007: 1-20.
- [7] CAO Hong-jian, CHA Jing-jing, WAN De-cheng. Numerical simulation of wave run-up around a vertical cylinder[C]. Proceeding of the 21st (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference, Hawaii, USA, 2011: 726-732.
- [8] 查晶晶, 万德成. 用 OpenFOAM 实现数值水池造波和消波[J]. 海洋工程, 2011, 29(3): 1-12.
- CHA Jing-jing, WAN De-cheng. Numerical wave generation and absorption based on OpenFOAM[J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(3): 1-12.
- [9] SHEN Zhi-rong, WAN De-cheng. RANS computations of added resistance and motions of a ship in head waves[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2013, 23(4): 263-271.
- [10] 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.
- [11] BEAUDOIN M, JASAK H. Development of a generalized grid interface for turbomachinery simulations with OpenFOAM[C]. Open Source CFD International Conference, Berlin, Germany, 2008: 1-11.
- [12] MENTER F R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2009, 23(4): 305-316.
- [13] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 2012, 32(8): 1598-1605.
- [14] JASAK H. Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows[D]. Imperial College London, University of London, London, 1996.
- [15] HAND M M, SIMMS D A, FINGERSH L J, et al. Unsteady aerodynamics experiment phase VI: Wind tunnel test configurations and available data campaigns[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2011.
- [16] HUNT J, WRAY A, MOIN P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows[R]. Center for Turbulence Research Report CTR-S88, USA, 1988.
- [17] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- HE De-xin. Wind engineering and industrial aerodynamics[M]. Beijing, China: National Defence Industry Press, 2006.