

# 小型水平轴风力机叶轮流场的数值模拟

## Numerical Simulation of Small Horizontal-Axis Wind Turbine Rotor

西北工业大学翼型、叶栅空气动力国防科技重点实验室 王静静 赵旭 叶忱

**[摘要]** 应用基于 Betz 理论的工程算法设计了 600W 和 2kW 的水平轴风力机, 并采用 CFD 软件 Fluent 对风力机叶轮的流场进行了数值模拟, 得到的风力机功率与风洞试验结果吻合良好, 说明 LES 湍流模型和自适应网格在小型水平轴风力机的数值模拟中的精确度较高。数值模拟同时显示了风力机流场的压力分布, 对叶片的流动分离进行了分析讨论。

**关键词:** 小型 水平轴风力机 叶轮 大涡模拟 自适应网格

**[ABSTRACT]** A 600W and 2kW horizontal axial wind turbine are designed based on the engineering algorithm Betz. The numerical simulation of flow filed for wind turbine rotor is made by using Fluent. The calculated wind turbine power compares well with the experimental data, and the influences of LES and adaptive mesh on numerical simulation results are also studied. The results of pressure distribution and separation flow-field around the blade section are simulated.

**Keywords:** Small size Horizontal-axis wind turbine Rotor Numerical simulation Adaptive mesh

风力机是将自然界的风能转换成机械能并获得电能的装置。水平轴风力机风轮气动性能对整个风力机的运行特性和使用寿命起决定作用, 因此对风力机气动性能的预测至关重要。对于大型风力机的气动性能已经有了大量的数值与风洞试验模拟<sup>[1-2]</sup>, 而小型水平轴风力机由于其雷诺数量级为 10<sup>5</sup>, 属于层流和湍流的过渡区, 流动特性及其复杂, 国内外研究尚少。利用数值模拟手段, 可以获取叶片的气动性能, 而且成本要远低于风洞试验。本文以实际风力机为研究对象, 探索适合小型水平轴风力机的数值模拟方法及其相关设置。

### 1 基于 Betz 理论的叶片设计

在 Betz 基本理论的基础上, 文献 [3] 通过实践总结出了一套设计风力机的经验公式, 可以为从事风力机、风力发电机的设计者提供设计的依据。具体设计过程为: (1) 根据风力机的有效功率, 求出风轮扫掠面积和风轮直径; (2) 选定风力机叶片数; (3) 根据叶尖速比, 计算风轮转速; (4) 选定叶片剖面翼型, 计算叶片不同半

径处的叶片弦长, 公式如下:

风轮叶片扫掠面积  $S$ :

$$S = \frac{N_e}{KC_a C_t v^3 \eta} \quad (1)$$

风轮转速  $n$ :

$$n = \frac{60\lambda v}{2\pi R} \quad (2)$$

叶片不同半径  $r_i$  处的叶片弦长  $L_i$ :

$$L_i = \frac{r_i C_c}{C_l k} \quad (3)$$

式中,  $N_e$  为风力机有效功率,  $K$  为单位换算系数,  $C_a$  和  $C_t$  分别为空气高度和湿度密度修正系数,  $v$  和  $R$  分别为风速和风轮半径,  $\eta$  和  $k$  分别为风力机全效率和叶片数,  $C_c$  和  $C_l$  分别为叶片形状参数和升力系数。

应某公司实际需求, 本文设计了 600W 和 2kW 的风力机。600W 风力机的风速为 10m/s, 模型参数为: 叶片数 3, 叶尖速比 6, 风轮直径 1.8929m, 转速 605r/min, 选择 NACA4412 翼型。雷诺数范围为  $7.30 \times 10^4 \sim 1.83 \times 10^5$ 。2kW 风力机的风速为 11.3m/s, 模型参数为: 叶片数 3, 叶尖速比 6, 风轮直径 2.8771m, 转速 405.066r/min, 选择 NACA4412 翼型。雷诺数范围为  $1.14 \times 10^5 \sim 3.12 \times 10^5$ 。叶片截面参数见表 1。

表1 截面几何参数

截面 (相对)	600W 安装角 / (°)	600W 弦长 / m	2kW 安装角 / (°)	2kW 弦长 / m
1.00	-2.0700	0.0423	-2.0700	0.0643
0.91	-1.4701	0.0473	-1.4701	0.0719
0.81	-0.6702	0.0532	-0.6702	0.0809
0.72	0.2299	0.0568	0.2299	0.0863
0.63	1.5301	0.0600	1.5301	0.0912
0.54	3.2299	0.0674	3.2299	0.1025
0.45	5.2297	0.0739	5.2297	0.1123
0.36	8.2299	0.0870	8.2299	0.1323
0.27	13.2304	0.1047	13.2304	0.1591
0.18	19.7299	0.1183	19.7299	0.1798
0.09	23.7302	0.0934	23.7302	0.1420

由于流动区域有层流也有湍流, 而 Fluent 提供的模型均不能准确模拟, 为寻找一种较准确的数值模型, 对 Fluent 提供的 S-A、k-epsilon、k-omega、Reynolds Stress、DES、LES 模型进行计算(表 2), 发现 LES 精度较高。

表2 不同湍流模型功率计算结果

设计功率/W	S-A	k-epsilon	k-omega	Reynolds Stress	DES	LES
600	131.44	47.55	65.48	148.14	372.47	393.69

## 2 风洞试验

在出口直径为 1.5m, 来流风速为 0~36m/s 的开式风洞中(见图 1 左)对 600W 风力机进行了试验验证, 模型为木质模型, 测量其电功率, 通过风速仪测量来流风速, 德国申克公司生产的 IN085 电涡流位移传感器测量转速。图 2 为试验测量得到的速度-功率曲线图。



图1 风洞试验

Fig.1 Wind tunnel test

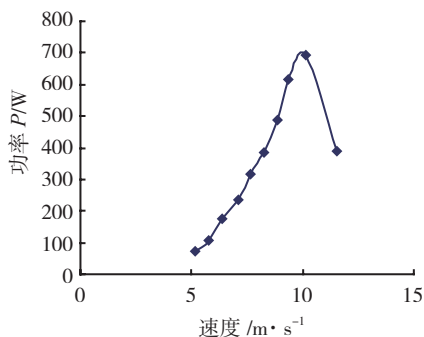


图2 速度-功率曲线图

Fig2 Speed-power curve

由于时间限制, 本文只在设计点处进行了数值模拟, 通过与试验值的对比, 来验证其准确性。

## 3 数值模拟

### 3.1 大涡模拟流动控制方程

对湍流的大涡模拟是将流场中大尺度的涡直接求解, 用亚格子模型模拟小尺度的涡。通过滤波实现对流场中不同尺度涡的分离<sup>[4]</sup>。求解三维、瞬态、不可压缩流动的 N-S 方程, 空间滤波后的控制方程为<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^r}{\partial x_j} \quad (5)$$

式中,  $\rho$  和  $\nu$  分别为密度和运动学黏性,  $t$  表示时间演化,  $U_i$  是  $x_i$  方向速度的可解尺度分量,  $P$  是压力,  $\tau_{ij}^r$  是隐式滤波产生的亚格子尺度湍流关联项, 用基于 Smagorinsky 涡黏模式的动态亚格子尺度模型进行模化,  $F_i$  是  $x_i$  方向的体积力项, 不考虑此项。

基于有限体积法在非结构化同位网格上数值求解控制方程, 对流项用二阶中心差分进行离散, 扩散项中的梯度用最小平方法计算, 时间推进项的离散用三阶全隐式格式, 压力和速度通过 SIMPLE 算法进行耦合。

### 3.2 计算网格与边界条件

本文研究的工况是正向来流, 考虑到风力机叶轮的结构, 计算域形状为圆柱形。设计风力机为三叶片, 根据对称性, 只需模拟单叶片的流动情况。首先利用建模软件 GAMBIT 作为建模工具生成风力机单叶片模型。从风力机叶片各个截面翼型的原始二维数据构造叶片截面翼型的样条曲线, 将各截面按所设计安装角绕翼型重心旋转, 得到风力机叶片各截面的二维外形, 然后利用 net surface 生成桨叶的上、下表面(图 3)。

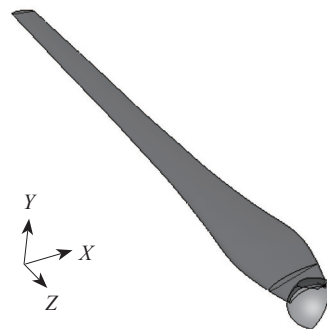


图3 风力机单叶片三维立体模型

Fig.3 3D model of single wind turbine blade

采用非结构网格(以 2kW 为例), 网格总数约 130 万, 在叶片壁面附近由于速度梯度变化较大, 因此网格适当加密。将计算域分为内外两部分<sup>[6-7]</sup>, 外部区域的前端距旋转面 3R, 后端距旋转面 7R, 圆柱半径为 5R, 内域为圆饼状区域, 包围叶片和轮毂, 计算中外域静止, 内域旋转, 计算域划分见图 4。将进口边界定义为速度入口条件, 假设其为未受扰动的自由来流; 下游边界定义为压力出口, 给出平均静压; 圆柱面定义为 wall, 矩形区域为周期性边界条件; 叶片和轮毂表面定义为无滑移绝热固壁边界条件。

由于叶片扭曲, 划分边界层工作量很大, 本试验尝试将自适应网格技术应用于风力机流场的数值模拟。自适应网格法是 20 世纪 80 年代兴起的通过求解椭

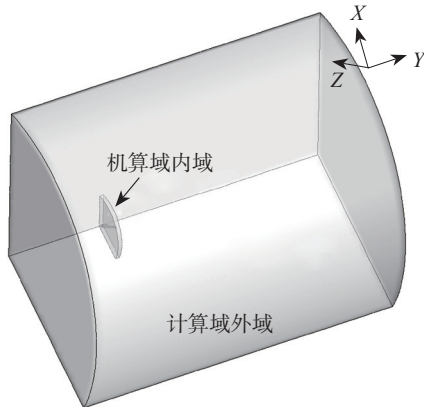


图4 风力机计算域划分  
Fig.4 Division of wind turbine flow-field

圆型方程的边值问题来数值生成网格的一种新方法。它首先由 Dietachmayer 等<sup>[8]</sup>引入气象模式中。之后 Fiedler 等<sup>[9]</sup>提出了一种能在保证一定精度的前提下,快速生成自适应网格的方案。刘卓等<sup>[10]</sup>将该技术用于计算南海月平均流。Fluent 提供的自适应方法有边界自适应、梯度自适应、等值自适应、区域自适应等,本文对叶片表面 5mm 内应用了基于垂直距离的边界自适应。自适应后网格数增加了将近 20 万。图 5 为叶片流向和展向截面自适应前后的局部放大图。

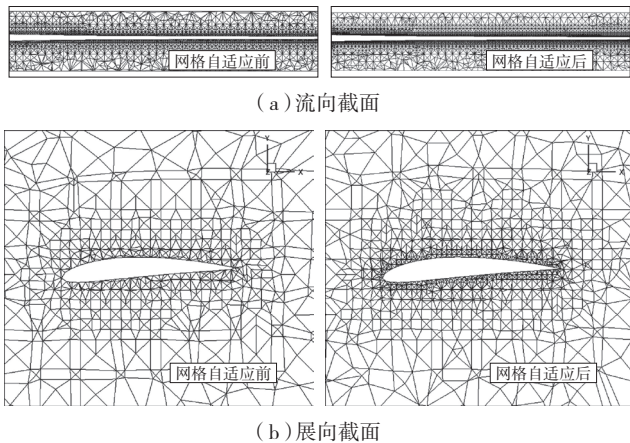


图 5 叶片局部自适应网格前后对比  
Fig.5 Comparison of grid of local blade before and after adaptation

### 3.3 计算结果及讨论

对于 600W 的风力机,选用 LES 湍流模型对风力机进行数值模拟,风速 10m/s,来流方向和旋转方向均为 Y 轴正向,转速 605r/min,分别使用单精度和双精度计算。2kW 风力机的设置与 600W 相同,风速为 11.3m/s,转速 450r/min。表 3 为功率计算结果,可以看出双精度提高了计算精度;采用自适应网格后和双精度后,600W 风力

表3 功率计算结果对比 W

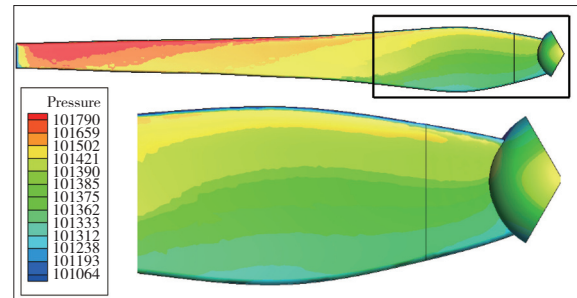
理论设计	数值模拟 (自适应前)	数值模拟(自适应后)		试验结果
		单精度	双精度	
600	393.69	433.17	462.25	636.31
2000	1385.37	1422.26	1464.64	无

机的数值模拟误差由 34.39% 降低到了 22.96%,并与实验值吻合良好;2kW 风力机的数值模拟误差由 30.73% 降低到了 26.77%,采用自适应网格后,计算量是原来的 1.5 倍,然而大幅提高了数值模拟精度。

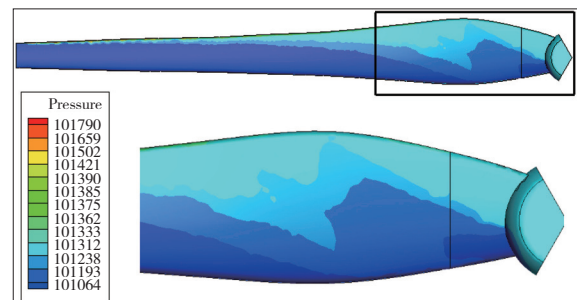
数值模拟误差产生原因主要由于:小型风力机的流场介于层流和湍流之间,无论采用层流或者湍流模型都不准确;由于风力机叶片扭曲,边界层网格的划分比较复杂,边界层网格构造困难;在自适应网格的使用中,只针对壁面附近进行自适应调整,网格的整体质量仍待进一步改进;风洞实验本身也存在系统测量误差;实际风力机表面存在粗糙度,数值模拟认为是绝对光滑的。

### 3.4 气动性能

风力机在不同的工况点其气动性能是不一样的,本文以 2kW 风力机在设计点的流动情况为例,分析其气动性能。图 6 为叶片的压力分布,迎风面压力大于背风面压力,压力相对较高区域除了在叶片前缘驻点附近之外主要位于相对叶展 30% 以上的部分,可知主要做功区域位于叶展 30% 以上的部分。图 7 为叶展方向不同半径处叶片截面的压力分布图。从图中可见,气流以正攻角流过叶片,在翼型压力面前缘附近,存在较大



(a) 叶片迎风面



(b) 叶片背风面

图6 叶片压力分布

Fig.6 Blade pressure distribution

的压力梯度,而在吸力面压力变化比较平缓。沿叶根至叶尖,叶片截面迎风面压力值不断增加,背风面压力值不断减小,叶片截面所受压差不断增加,使得叶片功率增大,在该设计工况下叶片具有良好的气动性能。

图8给出了叶片不同截面的流线图,可以看出,流动全部为附着流,流动状态良好,没有发生失速现象,没有出现失速涡。

数值模拟得到的流场云图及流线图,均与理论分析及实际流场相符,具有一定得实际利用价值,可以反过来指导理论设计。

#### 4 结论

本文应某公司实际需求,设计了两款风力机。并对所设计的600W风力机进行了数值模拟,计算结果与实验值吻合良好,用同样的方法模拟2kW风力机,进一步验证了数值模拟的精度。表明在小型水平轴风力机的设计研究中,采用LES湍流模型和自适应网格的数值模拟技术是切实可行的。以2kW风力机为例,进行了流场的分析研究,可以反过来指导理论设计。

#### 5 展望

(1)对多个工况进行数值模拟,画出功率曲线图,与试验值进行对比。

(2)对设计的风力机进行优化,使其在较大的风速范围内综合效率最高。

(3)对自适应网格做进一步研究。

#### 参考文献

- [1] Nilay U, Long L N. 3-D Time-Accurate CFD Simulations of Wind Turbine Rotor Flow Fields. AIAA 2006-394.
- [2] 关鹏,翁培奋. 不同湍流模型对水平轴风力机三维粘性气流特性的影响. 太阳能学报, 2010(1):86-90.
- [3] 苏绍禹. 风力发电机设计与运行维护. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [4] Sagaut P. Large Eddy Simulation. 3rd ed. Berlin: Springer, 2005.
- [5] Niceno B. An unstructured parallel algorithm for large eddy and conjugate heat transfer simulations[D]. Delft University of Technology, 2001.
- [6] 张庆麟. 风力机叶片三维气动性能的数值研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.

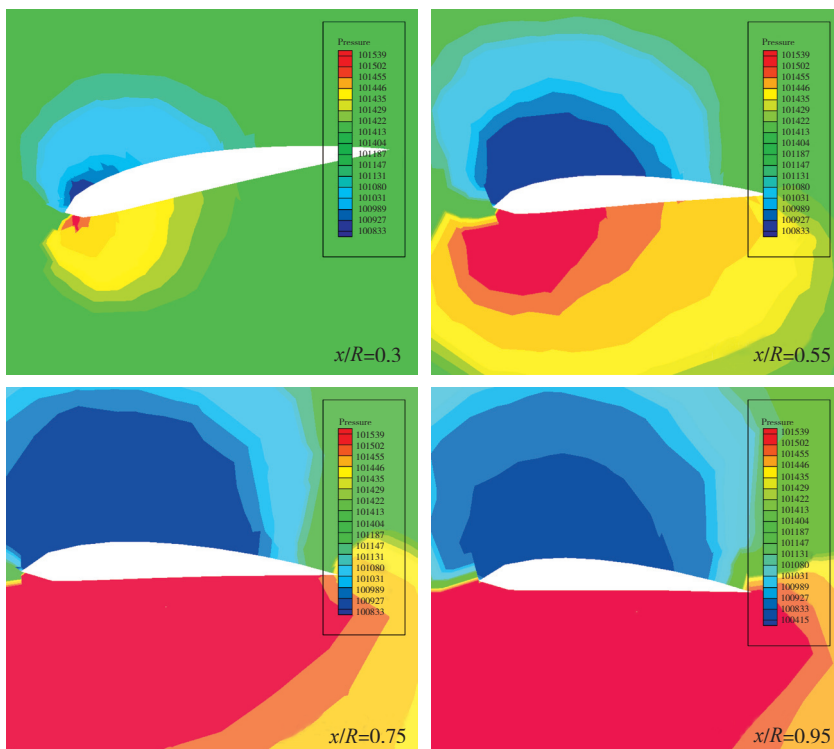


图7 叶展方向不同截面处的压力分布

Fig.7 Pressure distribution of different section along blade

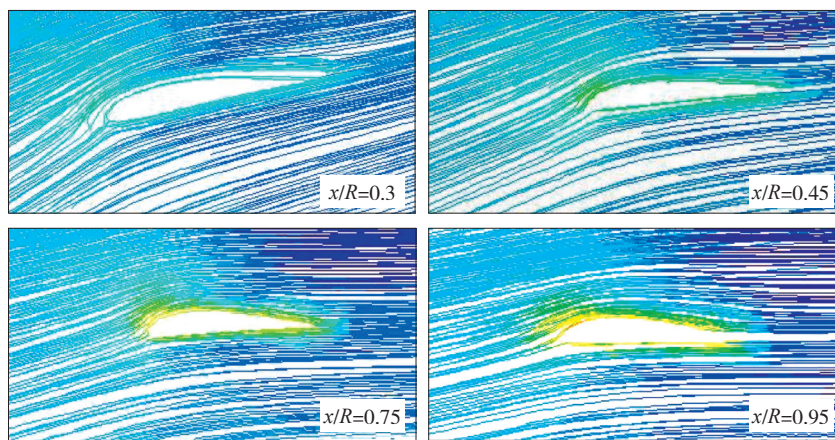


图8 叶展方向不同截面处的流线图

Fig.8 Streamlines of different section along blade

[7] 李常. 小型风力机设计及风轮气动性能的数值研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.

[8] Dietachmayer G S, Droegemier K K. On the applications of continuous dynamic grid adaption techniques to meteorological modeling, Part I : Basic formulation and accuraxcy. Mon Wea Rev, 1992, 120(10): 1675-1706.

[9] Fiedler B H, Trapp R J. A fast dynamic grid adaption scheme for meteorological flows. Mon Wea Rev, 1993, 121(10): 2879-2888.

[10] 刘卓, 曾庆存. 自适应网格在大气海洋问题中的初步应用. 大气科学, 1994, 18(6):641-648.

(责编 小城)