

风能利用系数最优小型 H 型垂直轴风力机叶片模拟

郭兴文¹, 刘颖波¹, 邱勇²

1. 河海大学工程力学系, 南京 210098
2. 江苏神马电力股份有限公司, 江苏南通 226500

摘要 采用移动网格技术, 选用 SST(剪切力传输) $k-\omega$ 湍流模型, 建立了 1kW 功率的 H 型垂直轴风力机风轮外流场 CFD 模型, 研究了不同叶片翼型、不同弦长和翼尾加装 Gurney 襟翼对风力机风能利用系数的影响。结果表明, 300mm 弦长的 NACA 0018 翼型较为适合 H 型垂直轴风力机; 在尖速比为 2.5—3.5 时, H 型垂直轴风力机的工作效率较高; 尖速比为 2.8 时, 高度为 1% 弦长的 Gurney 襟翼翼型能够提高风能利用系数 3%。

关键词 H 型垂直轴风力机; CFD 模型; 翼型; 弦长; Gurney 襟翼; 风能利用系数

中图分类号 TK83

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.h1.001

Blade Simulation of Small H-Vertical Axis Wind Turbine Based on Optimal Wind Power Coefficient

GUO Xingwen¹, LIU Yingbo¹, QIU Yong²

1. Department of Engineering Mechanics, Hohai University, Nanjing 210098, China
2. Jiangsu Shenma Electric Power Co. Ltd., Nantong 226500, Jiangsu Province, China

Abstract A two-dimensional CFD model of the external flow-field for a 1kW H-vertical axis wind turbine is established by using the software of Fluent. The sliding mesh technique and the SST $k-\omega$ turbulent model are adopted. The model is intended to study the impact of different lengths of chord and different shapes of airfoil on the wind power coefficient for the H-vertical axis wind turbine. By fixing the Gurney flap of different heights on the tail of blade, the efficiency improvement of wind power coefficient is studied, and the curve of wind power coefficient for the H-vertical axis wind turbine with the tip-speed under different situations is derived. The results show that the blade of NACA 0018 with the chord length of 300mm is relatively suitable for an H-vertical axis wind turbine. The H-vertical axis wind turbine works more effectively at a tip-speed ratio from 2.5 to 3.5. The wind power coefficient of H-vertical axis wind turbine is able to be increased 3% by using the Gurney flap with flap height equaled to 1% of chord length and tip-speed ratio of 2.8.

Keywords H-vertical axis wind turbine; CFD model; airfoils; length of chord; Gurney flap; power coefficient

0 引言

垂直轴风力机在低风速时发电量较大, 运行时噪音小, 对生态环境的影响较小, 因而在中小型风力机中应用较为广泛。垂直轴风力机的发电效率主要取决于风轮的气动特性。对垂直轴风力机风轮气动特性的研究方法主要有模型法、风洞试验和数值模拟。模型法在低、高尖速比时可能出现不收敛的情况; 风洞试验成本较高、周期长, 且受试验条件影响较

大; 而基于 CFD (Computational Fluid Dynamics)^[1] 技术的数值模拟近年来得到快速发展, 已能快速准确地模拟垂直轴风力机风轮的外部流场。

近年来, 诸多学者从不同角度研究了垂直轴风力机风轮的气动特性。杨从新等^[2]采用滑移网格技术, 选用 SST(剪切力传输) $k-\omega$ 湍流模型对直叶片垂直轴风力机进行非定常模拟数值, 得到较好的风轮外流场分布规律。廖书学等^[3]采用数值

收稿日期: 2012-07-30; 修回日期: 2012-09-11

作者简介: 郭兴文, 副教授, 研究方向为结构模拟仿真, 电子邮箱: xingwenguo@163.com

模拟方法研究了不同翼型风轮的气动特性,得出在同一翼型中存在一最佳翼型厚度。郑云等^[4]研究了不同叶片弦长对 H 型垂直轴风力机风轮气动性能的影响。徐璋等^[5]研究了不同形式,高度为 2%弦长的襟翼对垂直轴风力机风能利用系数的影响。以上研究均是对不同规格风力机叶片的单方面进行分析,对同一风力机叶片气动性能的综合评价较少。鉴于此,本文以风力机风能利用系数最大为目标,建立功率为 1kW 的 H 型垂直轴风力机 2D 风轮外流场模型,采用 Fluent 软件分别研究不同翼型、不同弦长叶片对风能利用系数的影响,并在此基础上讨论不同高度 Gurney 襟翼^[6-7]对风能利用系数的提升效果。

1 数值计算理论

流体力学的控制方程包括质量守恒方程、动量方程和能量方程。垂直轴风力机流场为低速流动下风轮周围的非定常流场,一般可将空气考虑为常温下不可压缩流体,且不用考虑传热影响,因此无须求解能量守恒方程。当流动是湍流时,需要解附加的运输方程。

1.1 控制方程

质量守恒方程

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

动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial p}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) \quad (2)$$

其中, $u_i, u_j (i, j=1, 2)$ 为各时均速度分量; $u_i', u_j' (i, j=1, 2)$ 为各脉动速度分量; $x_i, x_j (i, j=1, 2)$ 为各坐标分量; p 为流体时均压力; μ 为流体动力黏度; ρ 为流体密度。

1.2 湍流模型

若分别以 Φ_1, Φ_2, Φ_3 表示 $k-\omega$ ^[8]模型、 $k-\varepsilon$ ^[9]和 SST 湍流模型中的函数关系,则 SST 湍流模型可表示为

$$\Phi_3 = F_1 \Phi_1 + (1 - F_1) \Phi_2 \quad (3)$$

$$F_1 = \tanh(\arg^4)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} \omega^2} \right]$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \nabla \omega, 1.0 \times 10^{-10} \right)$$

其中, y 为到最近壁面的距离; ν 为运动黏度; k 为湍流动能; ω 为湍流频率。

在模型中,为获得正确的输运特性,定义涡黏系数为

$$\mu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)} \quad (4)$$

其中, S 为张力常量; $F_2 = \tanh(\arg_2^2)$, $\arg_2 = \max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right)$ 。

以上各式所需常数为 $\beta' = 0.09, \alpha_1 = 5/9, \sigma_{\omega 2} = 0.8$ 。

SST $k-\omega$ 湍流模型综合了 $k-\omega$ 模型近壁模拟和 $k-\varepsilon$ 模型外部区域计算的优点,不仅能对各种来流进行准确预测,

还能在各种压力梯度下精确模拟分离现象。

2 风力机 CFD 建模和计算

2.1 模型简化

对于某 1kW 三叶片 H 型垂直轴风力机,风轮半径为 1.2m,风轮高度为 2.4m,风轮中连杆、转轴等构件对风轮周围的流场影响不大,在建模过程中可略去。对于 H 型垂直轴风力机,可以对垂直于叶片的一个平面进行二维模拟^[9]。与 3D 模型相比,2D 模型忽略了叶片两端的损失,但其计算结果仍能较好地反映风轮的气动规律,且能大大节省计算时间。因此,本文采用 2D 模型进行计算,图 1 为简化后的 2D 模型示意图。

简化后的 2D 模型参数:风轮半径 1200mm,高度 2400mm,叶片个数 3,叶片安装角 5°,计算翼型选择为较为适合垂直轴风力机的航空对称翼型 NACA 0009,0012,0015,0018,叶片弦长选择 200,250,300,350,400mm,翼尾加装 Gurney 襟翼的高度选择 0.5%,1%,1.5%,2%,2.5%弦长。

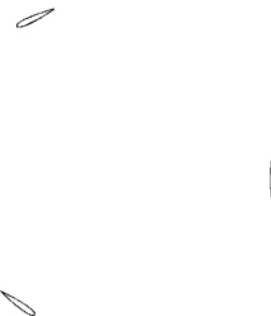


图 1 简化后的 2D 模型示意图

Fig. 1 Simplified scheme of 2D model

2.2 计算域和网格划分

对于无界流问题,计算域大小的选取和网格划分的质量直接影响计算的准确性和计算效率。以不同计算域下得到的叶片扭矩系数的平均误差和最大误差值为指标,判定计算域的影响。如果大小计算域的扭矩系数的平均值误差小于 1%,并且最大值误差小于 3%,则认为可用较小的计算域替代较大的计算域^[10]。经过多次计算比较,选取矩形计算域长 18000mm,宽 12000mm,分为静止域和旋转域两部分。旋转域是以风轮中心为圆心,半径 1800mm 的圆。图 2 为风力机计算域示意图。

分别对静止域和旋转域划分网格。静止域的网格划分比较简单;旋转域包含叶片,结构相对比较复杂。本文采用多块网格技术生成了高质量、结构化网格。图 3 为旋转域网格示意图。这种方法获得的网格既满足了叶片附近网格细化的要求,又合理地利用了计算的资源,提高了计算的效率和精确度。计算域的网格总数在 60000 左右,根据叶片翼型、弦长的不同和加装 Gurney 襟翼的影响,网格总数稍有不同。

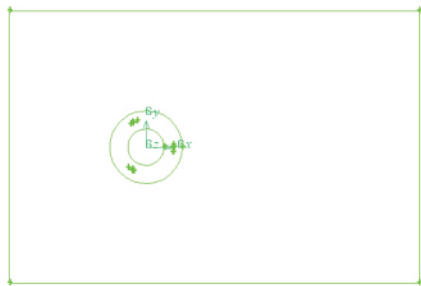


图2 风轮计算域示意图

Fig. 2 Scheme of computational domain of wind turbine

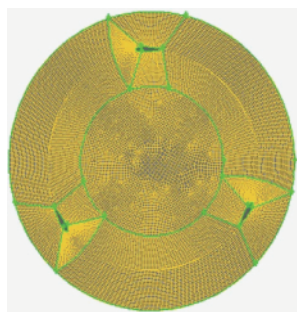


图3 旋转域网格示意图

Fig. 3 Scheme of rotational domain grid

2.3 计算条件设定

对于H型垂直轴风力机,边界条件设定:入口边界采用速度边界,位于计算域左侧,方向垂直于入口边界;出口边界采用压力出口,给定压力为0,位于计算域右侧;将叶片壁面设置为滑移壁面,运动方式为旋转;滑移面采用滑移网格技术,将静止域和旋转域的交界面设置为 interface。

对风轮外流场进行瞬态计算,选用 SST $k-\omega$ 湍流模型,速度与压力耦合采用 Simple 算法求解,动量项、湍动能项和湍动能耗散率项均采用二阶迎风差分格式离散。给定风速为 12m/s ,设定风轮转速分别为 $15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50\text{rad/s}$ 。设定计算时间步为 720 步,单步迭代 60 次。

3 计算结果分析

H型垂直轴风力机的工作效率主要取决于风轮对风的捕捉能力,即风能利用系数。风能利用系数 C_p 表示风力机从自然中吸取的能量,有

$$C_p = \frac{2M\omega_1}{\rho_1 A v^3} \quad (5)$$

其中, A 为扫风面积; M 为风机扭矩; ρ_1 为空气密度; v 为来流风速; ω_1 为风轮旋转角速度。

尖速比反映风力机运行速度的快慢,用叶片的叶尖线速度与来流风速之比 λ 表示,即

$$\lambda = \frac{\omega_1 R}{v} \quad (6)$$

其中, R 为安装半径。

3.1 12m/s 风速下风力机叶片的最佳弦长

选取 NACA 0018 翼型作为研究对象,得到 5 种不同弦长叶片的风能利用系数随尖速比变化曲线,如图 4 所示,其变化规律与文献[3]相符。从图 4 可知,当尖速比小于 2.5 时,各弦长叶片的风能利用系数均呈增长趋势,在同一尖速比下,弦长越长,风能利用系数越大;当尖速比达到 2.5—3.5 时,250mm 弦长以上的叶片均达到较大的风能利用系数,其中,300mm 弦长的叶片在尖速比为 3.5 时达到最大风能利用系数 (0.26);当尖速比大于 3.5 时,随着叶片弦长的增加,风能利用系数反而变小。

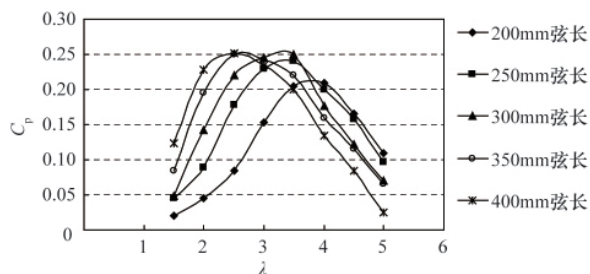


图4 不同弦长叶片的风能利用系数随尖速比变化曲线

Fig. 4 Wind power coefficient curves with the different lengths of blades chord changed with tip-speed ratio

3.2 12m/s 风速下风力机叶片的最佳翼型

根据以上结果,选取弦长为 300mm,得到 4 种不同翼型叶片的风能利用系数随尖速比变化曲线(图 5)。可以看出,当尖速比小于 2.5 时,各翼型的风能利用系数均呈增长趋势,叶片厚度越大,风能利用系数越高;当尖速比达到 2.5—3.5 时,各翼型均达到较大的风能利用系数,其中 NACA 0018 翼型在尖速比为 3.5 时达到最大风能利用系数 (0.26);当尖速比大于 3.5 时,各翼型的风能利用系数均呈下降趋势。4 种翼型中, NACA 0015 和 NACA 0018 翼型气动特性较好;而 NACA 0009 翼型风能利用系数较低,不适合作为本文的研究翼型。

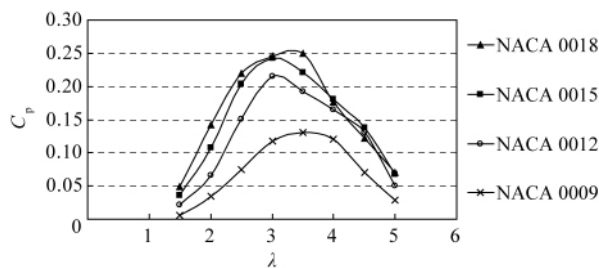


图5 不同翼型叶片的风能利用系数随尖速比变化曲线

Fig. 5 Wind power coefficient curves with different airfoils changed with tip-speed ratio

3.3 Gurney 襟翼对风力机效率的影响

综上所述,选取 300mm 弦长 NACA 0018 翼型,并在其尾部加装 Gurney 襟翼,得到叶片原型及 5 种不同高度 Gurney

襟翼叶片的风能利用系数随尖速比变化曲线(图6)。可以看出,当尖速比小于2.5时,加装 Gurney 襟翼翼型的风能利用效率均呈增长趋势,且均比原翼型高;当尖速比达到2.5—3.0时,加装高度小于1.5%弦长的 Gurney 襟翼翼型效率提升效果比较明显,特别是当尖速比为2.8时,加装高度1%弦长的 Gurney 襟翼翼型和原型相比,提升了3%的风能利用系数;当尖速比大于3.0时,随着襟翼高度的增加,叶片的风能利用系数反而越低,而翼型原型具有更好的气动特性。

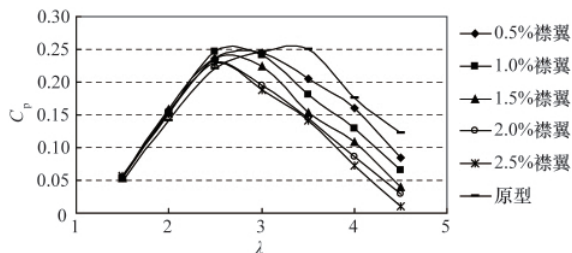


图6 叶片原型及不同高度 Gurney 襟翼叶片的风能利用系数随尖速比变化曲线

Fig. 6 Wind power coefficient curves for original and blades with different heights of Gurney flap changed with tip-speed ratio

4 结论

H型垂直轴风力机的工作效率主要取决于风轮的风能利用系数。本文通过建立风力机风轮的2D模型进行研究,得出以下结论。

(1) 根据风能利用系数曲线,选用300mm弦长的NACA 0018翼型的叶片较为适合本文研究的H型垂直轴风力机。在尖速比为2.5—3.5时,H型垂直轴风力机的工作效率较高。

(2) 叶尾加装 Gurney 襟翼能够提高风力机的风能利用系数,特别是当尖速比为2.8时,加装高度1%弦长的 Gurney 襟翼翼型比原型提升了3%的风能利用系数。但在尖速比较高时,原翼型的效果更好。因此,在实际设计中,在保证成本的前提下,可以添加 Gurney 襟翼收起装置,以保证风力机在高尖速比下更好地工作。

参考文献 (References)

- [1] 王富君. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Wang Fujun. Analysis of computational fluid dynamics—The principle and application of CFD softwares[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [2] 杨从新, 巫发明, 张玉良. 基于滑移网格的垂直轴风力机非定常数值模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 98-102.
Yang Congxin, Wu Faming, Zhang Yuliang. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 98-102.
- [3] 廖书学, 李春, 聂佳斌, 等. 不同翼型对垂直轴风力机性能的影响[J]. 机械设计与研究, 2011, 27(3): 108-111.
Liao Shuxue, Li Chun, Nie Jiabin, et al. Machine Design & Research, 2011, 27(3): 108-111.
- [4] 郑云, 吴鸿斌, 杜堂正, 等. 基于叶片弦长的小型 H 型垂直轴风机气动性能分析[J]. 机械设计与制造, 2009(5): 190-192.
Zheng Yun, Wu Hongbin, Du Tangzheng, et al. Machinery Design & Manufacture, 2009(5): 190-192.
- [5] 徐璋, 王茜, 皇甫凯林, 等. 襟翼对垂直轴风力机性能影响的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2011, 31(9): 716-719.
Xu Zhang, Wang Qian, Hungfu Kailin, et al. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(9): 716-719.
- [6] 苏明军, 李文华. 风力机二维翼型 Gurney 襟翼增升的数值模拟 [J]. 可再生能源, 2007, 25(2): 60-62.
Su Mingjun, Li wenhua. Renewable Energy Resources, 2007, 25(2): 60-62.
- [7] Liebeck R H. Design of subsonic airfoils for high lift [J]. Journal of Aircraft, 1978, 15(9): 547-561.
- [8] 吴军, 谷正气, 钟志华. SST 湍流模型在汽车绕流仿真中的应用 [J]. 汽车工程, 2003, 25(4): 345-351.
Wu Jun, Gu Zhengqi, Zhong Zhihua. Automotive Engineering, 2003, 25(4): 345-351.
- [9] Jiang Z, Doi Y, Zhang S. Numerical investigation on the flow and power of small-sized multi-bladed straight Darrieus wind turbine[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2007, 8(9): 1414-1421.
- [10] 邱勇. 垂直轴风力机气动性和结构性分析[D]. 南京: 河海大学, 2012.
Qiu Yong. Aerodynamic and structural analysis for the vertical axis wind turbines[D]. Nanjing: Hohai University, 2012.
- [11] 巫发明, 王立鹏, 杨从新, 等. 基于遗传算法的直叶片垂直轴风力机风轮优化设计[J]. 西华大学学报, 2009, 28(5): 36-39.
Wu Faming, Wang Lipeng, Yang Congxin, et al. Journal of Xihua University, 2009, 28(5): 36-39. (责任编辑 安莹, 吴晓丽)