

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.05.012

不同倾斜角叶尖小翼水平轴风力机气动性能

蔡新^{1,2,3}, 林世发¹, 胡莉¹, 郭兴文^{1,2,3}

(1. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 211100; 2. 沿海开发与保护协同创新中心, 江苏 南京 210098;
3. 江苏省风电机组结构工程研究中心, 江苏 南京 211100)

摘要: 为研究不同倾斜角的叶尖小翼对叶片气动性能的影响, 设计了 5 种不同倾斜角的叶尖小翼, 并采用结构化网格技术与 CFD 数值计算方法对比分析其气动性能。研究表明: 与原始风力机相比, 5 种不同小翼对风力机输出功率及风能利用率均明显提升, 最大输出功率增长 16.73%, 风能利用率增长 4.41%; 倾斜角较大的叶尖小翼能更多地增大叶片的上、下翼面压差, 且翼根弯矩更小; 大倾斜角小翼能明显改善叶尖绕流, 打散叶尖拽拖强涡量, 降低叶尖能耗损失。
关键词: 水平轴风力机; 叶尖小翼; 小翼倾斜角; 气动性能; CFD 数值计算
中图分类号: TK83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2020)05-0460-07

Aerodynamic performance of horizontal axis wind turbine with different inclination angles of tip winglet

CAI Xin^{1,2,3}, LIN Shifa¹, HU Li¹, GUO Xingwen^{1,2,3}

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. Cooperate Innovation Center for Coastal Development and Protection, Nanjing 210098, China;
3. Jiangsu Wind Turbine Structural Engineering Research Center, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to reveal the influence of different inclination angles of tip winglets on the efficiency of horizontal axis wind turbine blades, five kinds of tip winglets with different inclination angles were designed. The aerodynamic performance of tip winglets with different inclination angles was analyzed by the structured grid technique and the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Thereafter, the results by analyzing and comparing their aerodynamic performance show that the output power and rotor power coefficient of five kinds of wind turbines are all significantly improved with winglet, and the maximum output power increases by 16.73%, while the rotor power coefficient increases by 4.41%. Winglets with larger inclination angle can more increase pressure difference between the upper and lower airfoil section of the blade and the bend moment of the root of winglet is smaller. Besides, winglets with large inclination angle can significantly improve the tip flow around the blade, break up the strong vorticity dragged at the tip of blade, and reduce the loss of energy at the blade tip.
Key words: horizontal axis wind turbine; blade tip winglet; winglet inclination angle; aerodynamic performance; CFD numerical simulation

风能因储量巨大、分布广泛且利用简单等优势备受瞩目, 应用前景广阔^[1]。但相较于水电、火电等传统电力形式, 风力发电成本较高。为了降低风力机单位电量成本, 提升风力机发电效率, 一种在航空中广泛应用的增功装置叶尖小翼被引进到风电领域中^[2]。日本的 Shimizu 等^[3]开发了几种不同形式的叶尖小翼, 并进行相关试验研究, 发现小翼能使叶片吸力面与压力面压差增大, 不同尖速比下小翼均能较好地改善风力机

基金项目: 江苏高校首批 2011 计划 (苏政办发[2013]56 号); 中央高校基本科研业务费专项 (2018B48614)
作者简介: 蔡新 (1964—), 男, 教授, 博士, 主要从事风力机降本增效关键技术及应用研究。E-mail: xcail@hhu.edu.cn
引用本文: 蔡新, 林世发, 胡莉, 等. 不同倾斜角叶尖小翼水平轴风力机气动性能[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 460-466.
CAI Xin, LIN Shifa, HU Li, et al. Aerodynamic performance on horizontal axis wind turbine with different inclination angles of tip winglet[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(5): 460-466.

的气动性能。内蒙古工业大学汪建文等^[4]利用 FLUENT 流体软件分别对加 V 型平板和 S 型平板的风力机进行数值模拟,研究其动力放大特性,揭示小翼对风力机的动力放大原理,为小翼的安装模拟计算提供了依据,并对 V 型小翼进行优化,有效改善了风力机的气动特性,使风力机功率明显增大。文献[5-7]研究了不同形式叶尖小翼对风力机气动性能的影响。许波峰等^[8]采用自由涡尾迹(FVW)方法与遗传算法对分裂式叶尖小翼进行优化设计,并与试验结果进行对比,证明了 FVW 方法计算叶片气动性能的可靠性,优化得到的风力机叶片比原始叶片风能利用系数提高近 30%。刘钊^[9]通过风洞试验模拟了叶尖小翼对水平轴风力机尾迹的影响,发现添加小翼后尾迹处的流场速度更加接近来流风速。吴柏慧等^[10]分别阐述了涡流发生器、格尼襟翼、叶尖小翼、开缝翼型、仿生结节及沟槽被动流动控制技术的工作原理、控制效果、参数设置、优化设计及应用等情况,展望了其技术应用的的发展趋势。

综上,以往研究大都基于不同形式叶尖小翼,并没有针对某种小翼的结构参数进行深入研究,本文重点针对叶尖小翼的关键参数——倾斜角,结合六面体结构化网格,运用 ANSYS CFX 软件,对不同倾斜角的叶尖小翼水平轴风力机气动性能进行系统研究。

1 模型建立

选取某三叶片小型水平轴风力机为研究对象,以 NACA 4412 为风力机叶片气动设计翼型,额定功率为 5 kW,额定风速为 7 m/s,风轮直径为 9.6 m。建立几何模型如图 1 所示。

叶尖小翼翼型选用 NACA 4412,小翼长 240 mm,翼根弦长 195 mm,翼尖弦长 97.5 mm,其结构见图 2。不改变叶尖小翼长度,设计倾斜角分别为 15°、30°、45°、60°和 75°的 5 种不同倾斜角的叶尖小翼,加装到选用的水平轴风力机叶尖。

未加小翼的原风力机额定叶尖速比为 7.7,对应的转速为 107.231 r/min,选取其附近的叶尖速比作为计算工况,对应旋转域转速工况设定如下:工况 1 转速 90.519 r/min,工况 2 转速 97.482 r/min,工况 3 转速 104.445 r/min,工况 4 转速 107.231 r/min,工况 5 转速 111.409 r/min。

2 数值分析

2.1 计算域及网格划分

图 3(a)是叶尖小翼水平轴风力机气动性能计算域,是长、宽、高分别为 100 m、50 m 和 30 m 的长方体^[11-12]。计算域由静止域和旋转域组成,旋转域是一个能将风轮完全包裹在内的圆柱体,因为叶尖小翼不同,5 种不同倾斜角叶尖小翼风力机流场旋转域尺寸稍有不同,45°倾斜角叶尖小翼风力机周围网格见图 3(b),叶片边界层网格见图 3(c)。第一层网格高度计算公式为

$$\Delta y = L y^+ \sqrt{80} Re^{-13/14}$$

(1)

式中: L ——特征长度; y^+ ——壁面无量纲量距离,取值为 1; Re ——雷诺数。

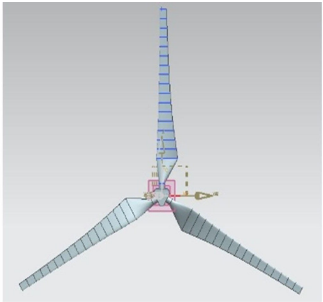


图 1 水平轴风力机模型
Fig.1 Simplified model of horizontal axis wind turbine

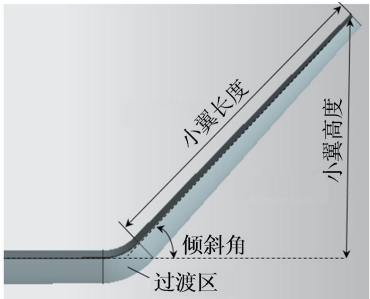


图 2 叶尖小翼结构
Fig.2 Structure chart of blade tip winglet

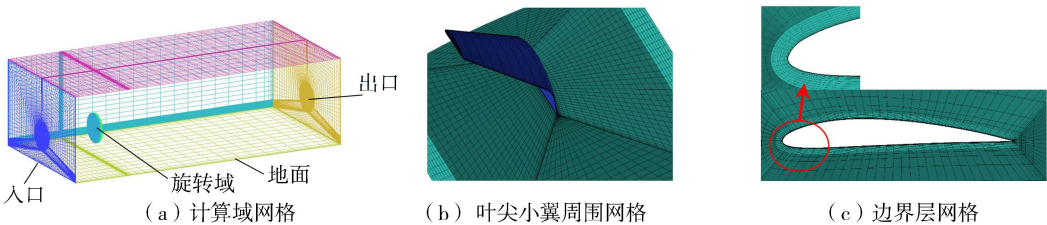


图 3 网格模型
Fig.3 Model of grids

2.2 控制方程与湍流模型

基于不可压缩的连续方程和雷诺平均的 N-S 方程,计算不同倾斜角叶尖小翼风力机气动性能,方程可表述为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

(2)

$$\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \times \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{f}$$

(3)

式中: ρ ——流体密度; t ——时间; $\mathbf{V}$ ——速度矢量; p ——表面压力; $\boldsymbol{\tau}$ ——表面应力矢量; $\mathbf{f}$ ——单位质量体积力矢量。

本文模型对边界层要求高精度地模拟,湍流模型采用 Shear-Stress Transport (SST) 模型,SST 模型能准确地预测湍流的开始,且具有良好的稳定性及收敛性。

2.3 边界条件

5 种不同倾斜角叶尖小翼水平轴风力机计算域边界条件设置见图 3(a)。风力机上游对应的矩形平面设定为 Inlet 边界条件,入口来流风速设定为原始风力机设计额定风速 7 m/s,湍流强度为 5%;风力机下游对应的矩形平面设定为 Outlet 边界条件,选择平均静压强,相对压强为 0 Pa;计算域顶部平面及左右两侧平面设定为 Symmetry 边界条件;叶片表面、轮毂表面边界条件设定为 Wall 边界,绝热无滑移,为模拟地面,计算域底部矩形同样设定为 Wall 边界^[13-17]。

静止域与旋转域之间 Interface 交界面数据传递采用 General Connection 方式,网格连接方式为 GGI,该连接方式提供一种守恒和隐式方法,能很好地解决本文旋转域旋转时与静止域交界面网格不对应问题。

3 计算结果与分析

对 5 种不同倾斜角小翼风力机流场旋转域按所设计的 5 个转速工况设定进行稳态计算,稳态计算结果作为瞬态计算初始值。瞬态计算总时间由仿真中风力机达到稳定状态的时间决定,设定为风力机旋转 5 圈所用时间,风轮旋转 5°所用时间设为时间步长^[18-22]。通过增加叶片径向、周向以及风力机上下游流场域网格密度,建立 4 种不同网格数量的模型,网格数量以 20% 增加。计算结果对比可知,转矩输出最大相差 1.88%,推力输出最大相差 0.91%,不超过最大误差 2%。

3.1 风能利用率及输出功率

图 4 显示原始风轮与 5 种加装不同倾斜角小翼风力机在 5 种工况下风能利用率随转矩变化情况,可见加装叶尖小翼后风力机风能利用率明显提升,叶尖小翼不同倾斜角对风力机气动性能影响差异较大。小翼倾斜角越大,风力机风能利用率越高,但随着风轮转速增加迅速下降,且倾角越大,最大风能利用率工况对应的转速越小。由于小倾角小翼对风轮附近流场的影响较小,倾斜角较小的叶尖小翼风力机基本能和原始风力机保持较接近的变化趋势。原始风力机最大风能利用率为 39.945%,5 种小翼风力机(Winglet15°、Winglet30°、Winglet45°、Winglet60°、Winglet75°)最大风能利用率依次为 41.308%、41.018%、42.395%、43.881% 和 44.355%。

5 种小翼长度相同、倾角不同,即扫风面积不同,故有必要对比风力机输出功率。图 5 是原始风力机与 5 种小翼风力机输出功率随转速变化情况。由图 5 可见,较低转速下,输出功率随着倾斜角增加而先下降、后上升;转速增加,大倾斜角风力机输出功率开始以较快速度减小;在高转速下,输出功率随着倾斜角增加而先下降、后上升,然后再下降。可能是受翼型攻角和动态失速的影响,转速增大时,小翼攻角增大,叶片气动性能由于动态失速的影响,导致输出功率下降。并且倾斜角越大,小翼攻角增加越快,受动态失速影响越大,输出功率下降越快,所以输出功率呈现先下降、后上升,然后再下降的趋势。原始风力机与小翼风力机输出功率依次为

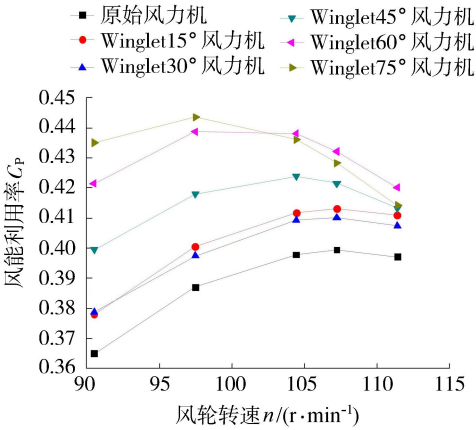


图 4 风能利用率随转速变化曲线

Fig.4 Changes of rotor power coefficient with rotating speed

5 876.052 W、6 752.626 W、6 641.692 W、6 761.541 W、6 859.071 W和 6 771.657 W,其中 Winglet60°对风机输出功率提升最多,约 16.73%。

3.2 转矩与推力

提取 Winglet45°和 Winglet60°小翼风力机工况 2 下旋转 5 圈在不同旋转角度下输出转矩的值,与原始风力机比较(图 6),风力机旋转 5 圈共旋转的角度为 1 800°。由图 6 可知,风力机均在旋转 2 圈后开始趋于稳定且 3 种风力机均在相同位置处出现输出转矩波峰值和波谷值,达到稳定之前输出转矩曲线类似正弦曲线,在任何时候叶尖小翼风力机转矩输出均大于原始风力机。图 7 是风力机在各个工况下的顺风向推力曲线。由图 7 可见增加小翼后风力机顺风向推力均增大,且比较接近线性增长,顺风向推力是风轮迎风面与背风面上压力差作用的结果,主要与风力机扫风面积有关,Winglet15°风力机扫风面积最大,高转速下顺风向推力也最大,而 Winglet65°和 Winglet75°风力机在高转速下顺风向推力最小。在低转速工况下,大倾斜角叶尖小翼风力机有较明显的优势,在输出较大功率的同时,受到的推力也相对较小,有利于风力机平稳有效地运行。

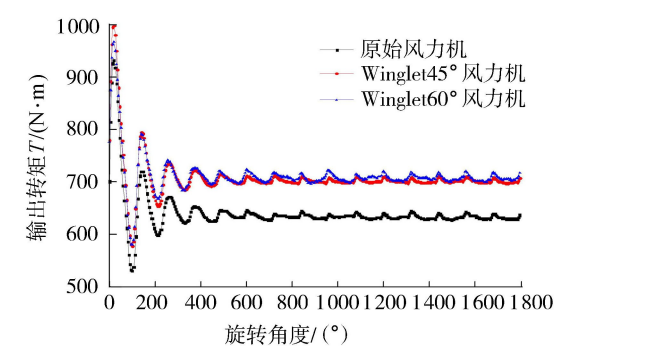


图 6 输出转矩曲线
Fig. 6 Output torque curve

3.3 叶片表面压强

为研究不同倾斜角对叶片表面压强分布的影响,提取风力机叶片展向方向 $r=3.6\text{ m}$ 、 $r=4.5\text{ m}$ 、 $r=4.7\text{ m}$ 和 $r=4.8\text{ m}$ 位置横截面处表面压强分布。提取工况 3 下原始风力机、Winglet15°风力机和 Winglet45°风力机在此 4 个截面处,上、下翼面的压强分布,见图 8。由图 8 可见前缘处压强差大,尾缘压强差明显减小,故前缘段为翼型主要功率输出部分。与原始叶片对比,距离叶尖较远截面处 3 种风力机翼面压强分布曲线几乎完全重合,而在靠近叶尖处,小翼风力机叶片压强差大于原始叶片,说明叶尖小翼主要对叶尖处压强分布有明显影响。

选取工况 1 时,Winglet15°、Winglet45°、Winglet60°和 Winglet75°的 4 种不同倾角小翼风力机叶片 4 个靠近叶尖截面处翼面压强分布情况见图 9,可以看出,小翼倾斜角越大,同截面处下翼面压强越大,上翼面基本无变化,直至最靠近小翼翼型截面处,上翼面压强发生明显变化,且小倾斜角小翼叶片上翼面压强明显更小。由于小倾斜角小翼在叶片展向方向更长,相同截面处小倾斜角叶片离叶尖更远,受到叶尖涡的干扰更小。如图 9(d),小倾斜角小翼叶片上翼面压强低于大倾斜角,而在下翼面,一直都是大倾斜角小翼叶片压强最大。故在较低转速下,大倾斜角小翼风力机气动性能较高。

3.4 翼根弯矩

由于单向叶尖小翼向外弯折即倾斜角的存在,而叶尖小翼上、下翼面存在压力差,叶尖小翼翼根处会出现弯矩。根据计算结果可知翼根弯矩与风轮转速几乎呈线性关系,随着转速增加而增大,且相同工况下叶尖小翼倾斜角越大时翼根弯矩越小。5 种不同倾斜角叶尖小翼风力机最大翼根弯矩分别为 176.037 N·m、149.603 N·m、119.033 N·m、84.110 N·m 和 51.822 N·m。

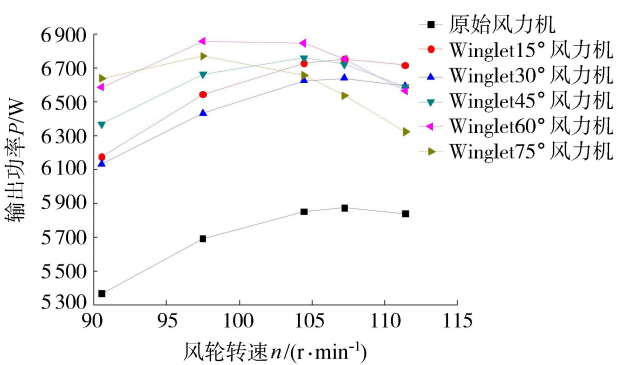


图 5 输出功率随转速变化曲线
Fig. 5 Changes of output power with rotating speed

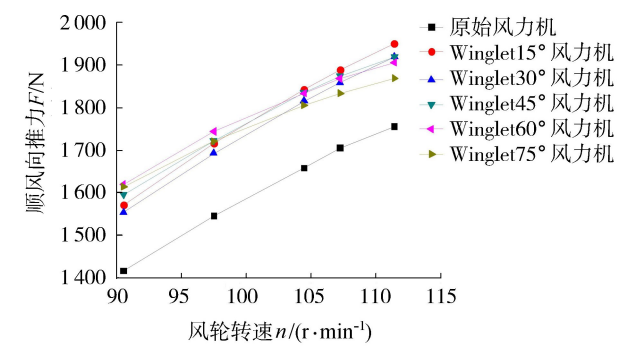


图 7 顺风向推力随转速变化曲线
Fig. 7 Changes of downwind thrust with rotating speed

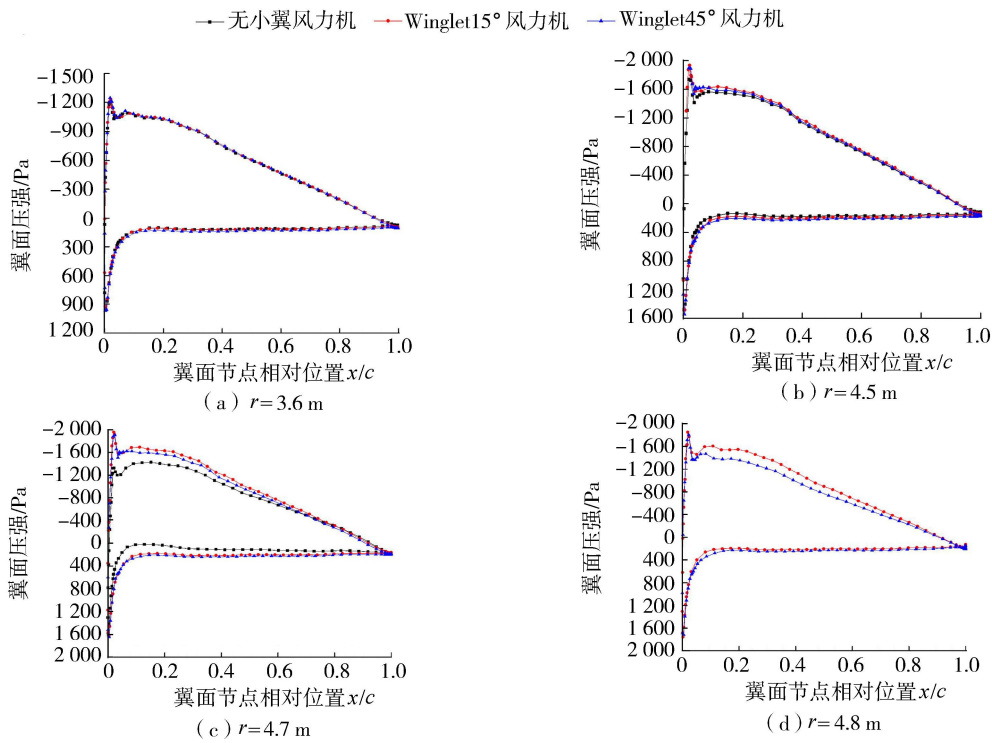


图8 工况3不同截面处翼面压强分布

Fig.8 Pressure distribution of airfoil surface at different sections of Case 3

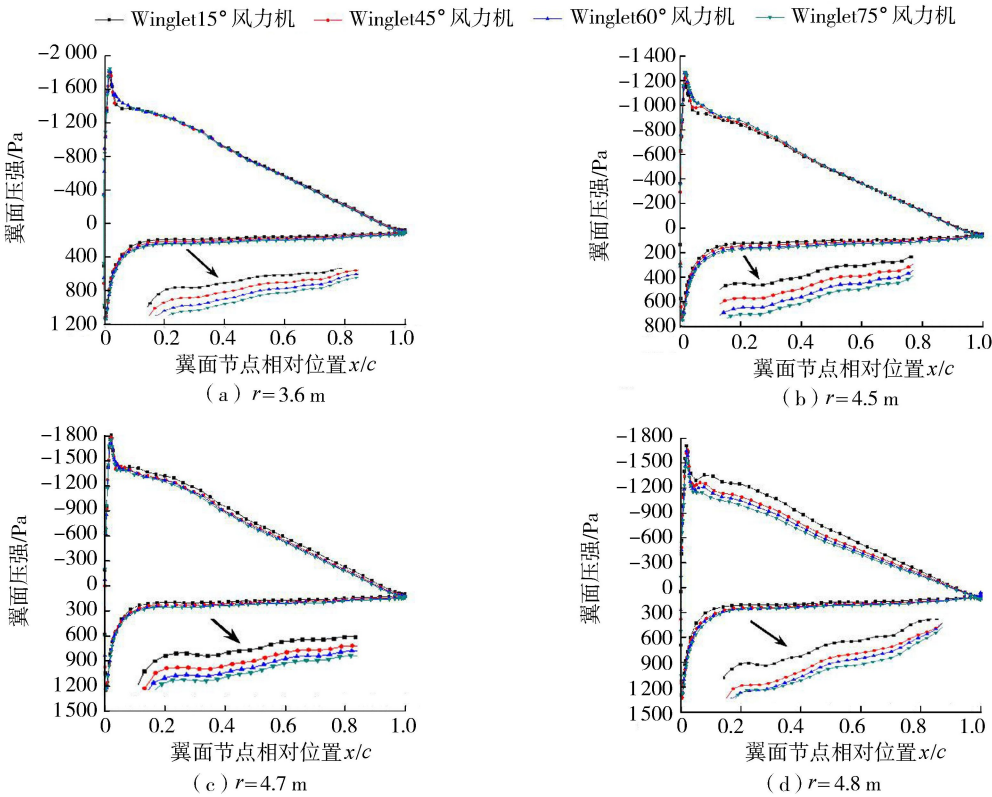


图9 工况1不同截面处翼面压强分布

Fig.9 Pressure distribution of airfoil surface at different sections of Case 1

3.5 流场特性

提取倾斜角分别为15°、45°、60°和75°的叶尖小翼风力机工况2沿叶片1展向方向 $y=4.7\text{ m}$ 处叶片周围流场速度分布云图见图10。由图10可见:风力机叶片前缘处空气流体速度较大,到尾缘后速度明显减

小;叶片在旋转过程中形成的尾流随着风速方向向下游移动,形成相对于远离叶片区流场,叶片周围尤其下游区域产生了明显的气流速度减小区域。不同倾斜角叶尖小翼叶片周围流场速度分布有较大差异,从Winglet15°风力机到Winglet75°风力机小翼前方低速区面积逐渐减小,随着小翼倾斜角的变大,流经风轮叶尖区域空气流体流速有所提高,说明较大倾斜角叶尖小翼对叶尖涡的抑制作用更加明显,尾流是叶尖涡从叶尖处剥落向风向下游旋转移动形成,叶尖涡被削弱,尾流也会得到改善,有利于风力机叶片风能的吸收,改善风力机周围流场。叶尖小翼不仅对叶尖涡,对风力机尾流也有较好的改善,尤其是大倾斜角叶尖小翼,尾流也会反过来影响风轮对风能的吸收。

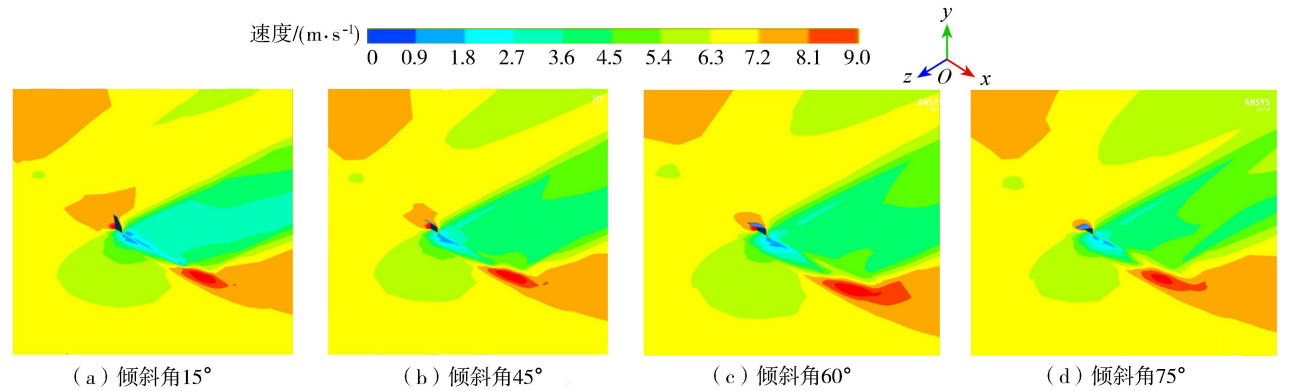


图 10 风力机周围流场速度分布云图

Fig. 10 Velocity distribution of flow field around the wind turbine

图 11 是 15°、30°、60°和 75°倾斜角叶尖小翼风力机在各自风能利用率最高工况下旋转域内平行于风轮旋转平面沿旋转中心截图的风力机周围流场涡量分布。由图 11 可见,不同倾斜角叶尖小翼风力机相邻叶片之间涡量分布没有变化,而叶尖尾缘部分涡量分布变化较大,60°和 75°大倾斜角叶尖小翼风力机叶尖涡量分布比 15°和 30°倾斜角风力机弱,15°小翼叶尖尾缘是明显的一个强涡量分布区,而 30°和 60°小翼尾缘处涡量有所减少并被打散成 2 个小涡量分布区,75°叶尖小翼尾缘涡量分布明显变弱。可见倾斜角的变化对叶尖小翼改善风力机叶尖周围流场影响较大,倾斜角越大,越有利于降低风力机叶片上流体的三维效应。而 60°倾斜角小翼风力机最大功率输出却大于 75°叶尖小翼,故倾斜角增大,整个叶片展向方向长度减少,扫风面积也减少,捕捉风能的面积也相应下降。

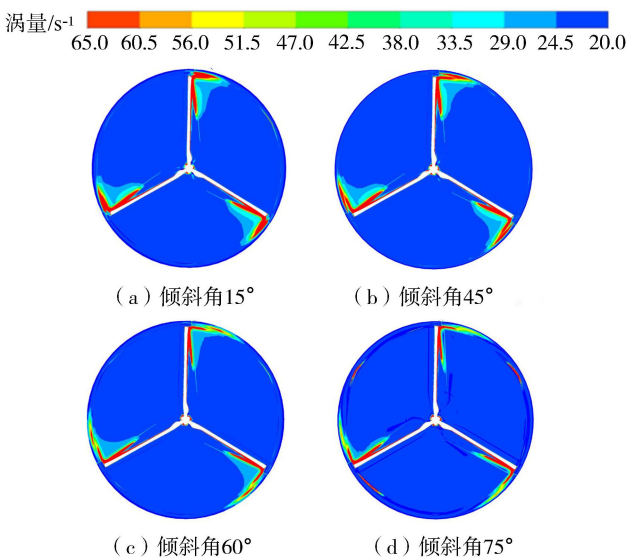


图 11 风力机周围流场涡量分布对比

Fig. 11 Vorticity distribution of flow field around the wind turbine

4 结 论

- a. 相对于原始无小翼风力机,5 种不同倾斜角叶尖小翼风力机输出功率和风能利用率都有显著增长。小翼倾斜角越大,风力机风能利用率越高,但随着风轮转速增加迅速下降,倾斜角较小的叶尖小翼风力机基本能和原始风力机保持较接近的变化趋势,其中Winglet60°对风力机输出功率提升最多,约 16.73%。
- b. 增加小翼后风力机顺风向推力均增大,顺风向推力主要与风力机扫风面积有关。在低转速工况下,大倾斜角叶尖小翼风力机在输出较大功率的同时,受到的推力也相对较小。
- c. 叶尖小翼对风力机叶片上翼面压强差影响主要集中在叶尖处,且前缘段为翼型主要功率输出部分。大倾斜角小翼更能提升叶片下翼面的压强,增大压强差。
- d. 不同倾斜角叶尖小翼对叶尖处周围流场的影响也不同,大倾斜角叶尖小翼对叶尖涡的抑制作用明显强于小倾斜角叶尖小翼,能将叶尖处的强涡量打散成 2 个较弱的涡量,降低叶尖能量损失。

参考文献:

- [1] 蔡新, 潘盼, 朱杰, 等. 风力发电叶片[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [2] 张楠, 李春, 王东华, 等. 尾缘襟翼对风力机翼型气动特性影响研究[J]. 能源研究与信息, 2018, 34(3): 125-126. (ZHANG Nan, LI Chun, WANG Donghua, et al. Influence of trailing edge flap on the aerodynamic performance of wind turbine airfoil[J]. Energy Research and Information, 2018, 34(3): 125-126. (in Chinese))
- [3] SHIMIZU Y, ISMAILI E, KAMADA Y, et al. Power augmentation of a HAWT by Mie-type tip vanes, considering wind tunnel flow visualisation, blade-aspect ratios and Reynolds number[J]. Wind Engineering, 2003, 27(3): 183-194.
- [4] 汪建文, 全建军, 吴克启, 等. 风力机叶尖加小翼动力放大特性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(1): 46-48. (WANG Jianwen, QUAN Jianjun, WU Keqi, et al. Experimental research of a horizontal axis wind turbine with a tip vane[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(1): 46-48. (in Chinese))
- [5] 王晓宇, 廖伟丽, 赵鹏, 等. L型叶尖小翼对风力机性能影响的研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(1): 242-248. (WANG Xiaoyu, LIAO Weili, ZHAO Peng, et al. Study on the impact of L-shaped tip winglet on wind turbine performance[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2020, 41(1): 242-248. (in Chinese))
- [6] 胡丹梅, 吴志祥, 张开华, 等. 不同小翼对风力机气动性能影响的数值分析[J]. 动力工程学报, 2019, 39(6): 486-491. (HU Danmei, WU Zhixiang, ZHANG Kaihua, et al. Numerical analysis on the aerodynamic characteristics of a wind turbine with different winglets[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(6): 486-491. (in Chinese))
- [7] 陶维翔. 叶尖小翼对风力机气动性能的影响分析[J]. 分布式能源, 2019, 4(2): 47-52. (TAO Weixiang. Effect of tip winglet on aerodynamic performance of wind turbine [J]. Distributed Energy, 2019, 4(2): 47-52. (in Chinese))
- [8] 许波峰, 王同光, 张震宇, 等. 基于自由涡尾迹和遗传算法的叶尖小翼气动优化设计[J]. 空气动力学学报, 2012, 31(1): 133-135. (XU Bofeng, WANG Tongguang, ZHANG Zhenyu, et al. Aerodynamic optimal design of winglet based on free vortex wake method and genetic algorithm[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 31(1): 133-135. (in Chinese))
- [9] 刘钊. 叶尖小翼对水平轴风力机尾迹恢复的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2018.
- [10] 吴柏慧, 李春, 朱海天, 等. 风力机叶片被动流动控制技术进展[J]. 热能动力工程, 2019, 34(9): 24-40. (WU Baihui, LI Chun, ZHU Haitian, et al. Research progress of passive flow control technology for wind turbine blade[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(9): 24-40. (in Chinese))
- [11] ZHANG Xu, LIU Hailong, WANG Gege, et al. Aerodynamic performance of blunt trailing-edge airfoil considering roughness sensitivity position[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(8): 82-89.
- [12] GOSWAMI R, SINGHAL S, KUMAR V. Design and simulation of a low speed wind tunnel with analysis of wind effects on an airfoil (CFD)[M]. New Delhi: Springer, 2017.
- [13] CAI Xin, GU Rongrong, PAN Pan, et al. Unsteady aerodynamics simulation of a full-scale horizontal axis wind turbine using CFD methodology[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 112: 146-156.
- [14] HAO Wenxing, LI Chun, YE Zhou, et al. Study of active control for wind turbine airfoil performance based on deformable trailing edge flap[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(5): 1339-1345.
- [15] 陈恺. 基于叶尖小翼的大型风力机增功研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [16] KOCA K, GENÇ M S, ACIKEL H H, et al. Identification of flow phenomena over NACA 4412 wind turbine airfoil at low Reynolds numbers and role of laminar separation bubble on flow evolution[J]. Energy, 2018, 144: 750-764.
- [17] SVOBODA A, ROZEHNAL D. Modeling an unsteady flow over a pitching NACA 0012 airfoil Using CFD[C]//IEEE. 2017 International Conference on Military Technologies (ICMT). Brno: IEEE, 2017.
- [18] YANG Yang, LI Chun, ZHANG Wanfu, et al. Investigation on aerodynamics and active flow control of a vertical axis wind turbine with flapped airfoil[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(4): 1645-1655.
- [19] ARASTOPOUR H, COHAN A. CFD Simulation of the effect of rain on the performance of horizontal wind turbines[J]. AIChE Journal, 2017, 63(12): 5375-5383.
- [20] COOK J R, SMITH M J, THEPVONGS S, et al. Computational aeroelasticity of rotating wings with deformable airfoils[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2017, 62(3): 14-26.
- [21] 韩少冰, 郭彦超, 钟兢军. 叶尖小翼结合凹槽对压气机叶栅间隙流场的影响[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(6): 1268-1274. (HAN Shaobing, GUO Yanchao, ZHONG Jingjun. Influence of tip winglet combined with tip groove on the leakage flow of compressor cascade [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(6): 1268-1274. (in Chinese))
- [22] GAO Qiang, CAI Xin, GUO Xingwen, et al. Parameter sensitivities analysis for classical flutter speed of a horizontal axis wind turbine blade[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(7): 1746-1754.