

分流导叶垂直轴风力机气动性能研究

朱致远¹,叶舟^{1,2},欧华浩¹,李春^{1,2}

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;
2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘要:为提高垂直轴风力机气动性能,提出一种随相位角变化而改变相对夹角的分流导叶结构。以NACA0021为基础翼型,采用计算流体力学方法对分流导叶作用下垂直轴风力机风能利用系数、单叶片瞬时转矩、压力系数及速度场进行数值分析。结果表明:静态和动态分流导叶均可提高垂直轴风力机气动性能,且动态分流导叶提升效果更为显著;相较于静态分流导叶,动态分流导叶垂直轴风力机在尖速比为2.33时风能利用系数最高可提升23%,在尖速比为2.03时静态分流导叶垂直轴风力机较原始垂直轴风力机风能利用系数提高37%;分流导叶也可使最佳尖速比前移,稳定叶片转矩波动,提升垂直轴风力机的运行稳定性。

关键词:垂直轴风力机;主动控制;分流导叶;尖速比;气动性能

中图分类号:TK83 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.03.021

[引用本文格式]朱致远,叶舟,欧华浩,等.分流导叶垂直轴风力机气动性能研究[J].热能动力工程,2024,39(3):166-172.
ZHU Zhi-yuan, YE Zhou, OU Hua-hao, et al. Study on aerodynamic performance of vertical axis wind turbine with shunt guide vane [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(3): 166-172.

Study on Aerodynamic Performance of Vertical Axis Wind Turbine with Shunt Guide Vane

ZHU Zhi-yuan¹, YE Zhou^{1,2}, OU Hua-hao¹, LI Chun^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093;
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: To improve the aerodynamic performance of vertical axis wind turbine (VAWT), a shunt guide vane (SGV) structure with varying relative included angle was proposed. Using NACA0021 as the base airfoil, the wind energy utilization rate, single blade instantaneous torque, pressure coefficient and velocity field of VAWT under the action of shunt guide vane were numerically analyzed by computational fluid dynamics (CFD) method. The results show that both static and dynamic shunt guide vanes can improve the aerodynamic performance of VAWT, and the dynamic shunt guide vane can improve the aerodynamic performance more significantly; compared with static shunt guide vane, the wind energy utilization coefficient of VAWT with dynamic shunt guide vane can increase by 23% when the tip speed ratio (TSR) is 2.33. When the tip speed ratio is 2.03, the wind energy utilization coefficient of VAWT with static shunt guide vane is 37% higher than that of original VAWT; the shunt guide vane can make the optimal tip ratio move forward, stabilize blade torque fluctuation, and improve the operation stability of VAWT.

Key words: vertical axis wind turbine (VAWT), active control, shunt guide vane (SGV), tip speed ratio (TSR), aerodynamic performance

收稿日期:2023-02-14; 修订日期:2023-03-07

基金项目:国家自然科学基金(51976131, 51676131);上海“科技创新行动计划”地方院校能力建设项目(19060502200)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51976131, 51676131); Shanghai University Science and Technology Innovation Action Plan Local University Capacity Building Project(19060502200)

作者简介:朱致远(1998-),男,上海理工大学硕士研究生。

通信作者:叶舟(1973-),男,上海理工大学副教授。

引言

风力机根据转轴位置可分为水平轴风力机(Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT)和垂直轴风力机(Vertical Axis Wind Turbine, VAWT)^[1]。垂直轴风力机因具有较为简单的结构,噪声低且成本小而受到大量关注。但在运行过程中其叶片攻角会发生周期性变化,当叶片攻角过大时,其表面会产生流动分离,降低叶片气动性能,导致风能利用率大幅下降^[2]。

因此,采用流动控制技术减弱流动分离与动态失速对于增加 VAWT 气动效率、提高自启动性能及减少风力机载荷波动极为重要^[3]。为提高 VAWT 气动性能,国内外学者采用不同流动控制方法对 VAWT 开展研究。文献[4]通过风洞实验研究前缘微小平板对 NACA0015 翼型气动性能的影响,结果显示,微小平板距翼型前缘点正上方 $0.07c$ (c 为翼型弦长)时,抑制翼型流动分离效果最优,且可使失速攻角推迟了 19° ,在大攻角下仍可保持较好的气动性能。文献[5-6]采用数值模拟方法对 S809 翼型前缘附加微小翼型进行气动噪声特性研究,结果显示,复合翼型对抑制翼型吸力面流动分离具有良好效果,可使临界失速攻角从 16° 增加至 22° ,同时具有良好降噪作用,较原始翼型噪声总声压级最大可减少 7.23%。文献[7]将微小圆柱附加到 NACA0012 翼型前缘,并对其几何参数进行研究发现,翼型表面和微圆柱距离对升阻力系数具有较大影响,当两者间距为 $0.015c$ 时达到最佳控制效果,当间距大于 $0.02c$ 时控制效果开始减弱。文献[8]对前缘微小圆柱垂直轴风力机进行数值模拟研究,结果表明:叶片前缘设置微小圆柱可大幅度提高 VAWT 气动性能,在叶尖速比(Tip Speed Ratio, TSR)为 1.10 时风能利用系数可提高 9%。文献[9]研究导叶几何参数对 NACA0018 翼型的作用效果,结果发现,导叶设置在翼型中部时可获得最佳升阻比,且相对叶片表面旋转角度导叶对 VAWT 气动性能存在显著影响。

综上,通过在翼型附近添加小翼、圆柱等辅助装置对垂直轴风力机气动效率的提高具有积极作用,但对这些附加辅助装置进行主动控制方面还需要更

多的研究。因垂直轴风力机叶片攻角不断变化,附加辅助装置在不同相位角下对应的最佳几何参数也不尽相同,为此提出一种分流导叶(Shunt Guide Vane, SGV)主动控制策略,使其在不同相位角下旋转至目标角度,基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamic, CFD)方法探究其对 VAWT 气动性能的影响,分析分流导叶对 VAWT 性能提升的作用机理。

1 计算模型

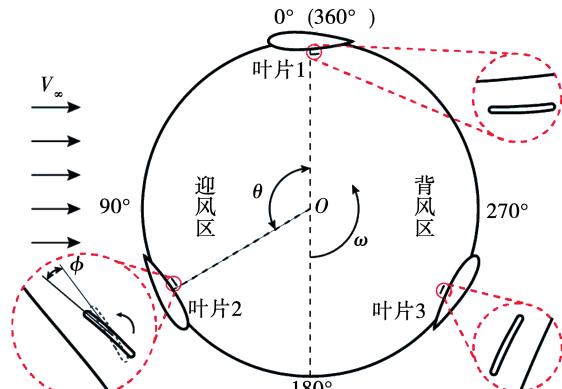
1.1 几何模型

将 NACA0021 作为参考翼型,按照文献[10]中的风洞实验来设置垂直轴风力机的几何参数,在表 1 给出其详细数据。图 1 为分流导叶翼型垂直轴风力机几何模型。

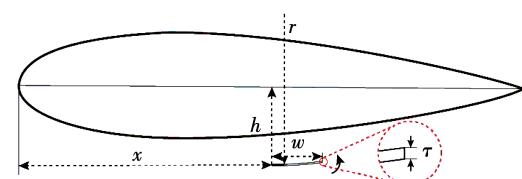
表 1 垂直轴风力机几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of VAWT

参 数	数 值
翼型弦长 c/mm	85.8
叶片数	3
旋转半径 R/mm	515
实度	0.25



(a) 分流导叶翼型垂直轴风力机



(b) 分流导叶结构尺寸参数

图 1 分流导叶翼型垂直轴风力机几何模型

Fig. 1 Geometric model of VAWT with shunt guide vane

分流导叶由水平部分和圆弧部分组成,且两部分在导叶 1/4 处相切。图中: x 为分流导叶距翼型前缘顶点水平距离,取 $0.5c$; h 为导叶距翼型弦线的垂直距离,取 $0.15c$; w 为导叶长度,取 $0.1c$; τ 为分流导叶厚度与翼型厚度之比,取 0.0135 ; ϕ 为分流导叶与翼型表面的相对旋转角度,逆时针旋转取正,顺时针旋转取负; r 为圆弧部分对应半径,取 $0.75c$ 。

风能利用系数 C_p 与力矩系数 C_M 是评价 VAWT 气动性能的关键因素,其定义^[11]为:

$$C_p = 2P/(\rho AV_\infty^3) \quad (1)$$

$$C_M = 2M/(\rho ARV_\infty^2) \quad (2)$$

式中: P —功率,W; M —力矩,N·m; ρ —密度,kg/m³; A —扫风面积,m²; V_∞ —来流风速,m/s。

叶尖速比 λ 为叶片尖端线速度与风速之比,其定义^[12]为:

$$\lambda = R\omega/V_\infty \quad (3)$$

式中: ω —角速度,rad/s; R —旋转半径,m。

1.2 计算域与网格分布

计算域与边界条件如图 2 所示。其中, Z_1 为旋转域, Z_2 为加密域, Z_3 为外流域。为保证各区域间信息交流的准确性, Z_1 , Z_2 设为交界面,空气密度为 1.184 kg/m^3 ,动力粘度为 $1.855 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 。 AD 为速度进口,距旋转中心 $20R$,来流速度为 9 m/s ; BC 为压力出口,距旋转中心 $60R$; AB , CD 为对称平面,距旋转中心 $20R$ 。

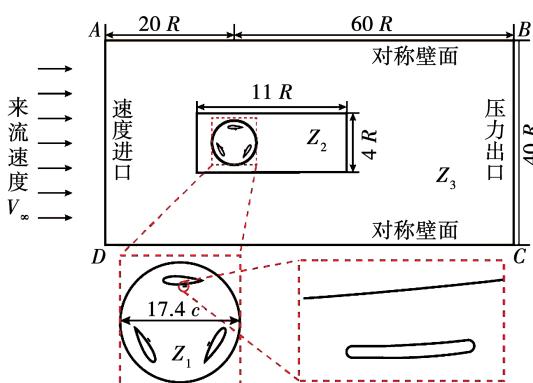


图 2 计算域及边界条件

Fig. 2 Computational domain and boundary condition

采用二维多边形网格^[13]对 Z_1 , Z_2 及 Z_3 区域进行划分。壁面首层网格高度为 $1 \times 10^{-5} \text{ m}$,以满足 $y^+ \approx 1$ 。分流导叶区域采用重叠网格技术以实现分

流导叶主动旋转,如图 3 所示。

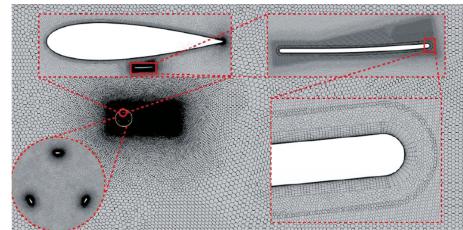


图 3 旋转域、加密域及外流域网格分布

Fig. 3 Grid distribution in rotation domain, encryption domain and outer flow domain

1.3 端流模型及计算方法

采用 Star-CCM+ 进行数值模拟,使用有限元体积法对 N-S 方程进行离散,压力速度耦合采用 SIMPLE 算法,控制方程各项采用二阶迎风格式,使用 SST $k-\omega$ 模型进行求解^[14,15]。

1.4 分流导叶运动控制策略

垂直轴风力机在运行过程中,叶片攻角在不断变化,在不同相位角下分流导叶所对应最佳旋转角度亦不相同。为此提出一种主动式分流导叶运动策略,分析其对垂直轴风力机风能利用系数的提升效果。图 4 为主动式分流导叶运动控制策略, ω_{SGV} 为分流导叶旋转角速度,定义为:

$$\omega_{SGV} = 36\phi/T \quad (4)$$

$$T = 2\pi/\omega \quad (5)$$

式中: T —旋转周期,s。

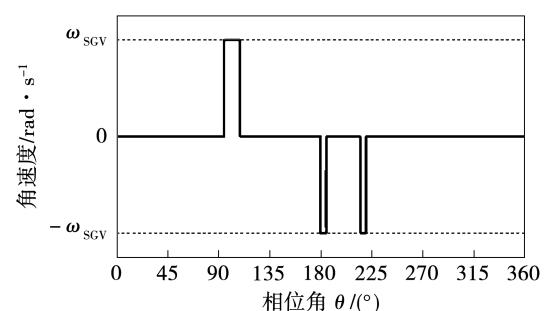


图 4 主动式分流导叶运动控制策略

Fig. 4 Motion control strategy of active shunt guide vane

由图 4 可知,相位角 θ 在 $95^\circ \sim 105^\circ$ 范围内 SGV 以角速度 ω_{SGV} 旋转; θ 在 $180^\circ \sim 185^\circ$ 及 $\theta = 215^\circ \sim 220^\circ$ 范围内 SGV 以角速度 $-\omega_{SGV}$ 旋转; 在其余相位角时 SGV 均保持静止。

2 可靠性验证

2.1 网格数量验证

选取3种方案进行网格无关性验证,网格数量分别为14.0万、20.7万和29.8万,在尖速比为2.63工况下进行计算。3种方案下叶片转矩如图5所示。

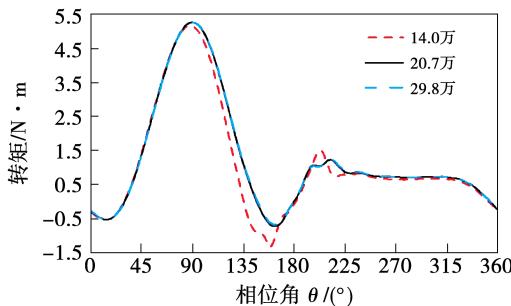


图5 网格数量无关性验证

Fig. 5 Grid number independence verification

由图5可知,当网格数量为14.0万时,其单叶片转矩与其他方案相差较大,且负转矩峰值较大;当网格数量为20.7万及29.8万时,其单叶片转矩几乎完全相同。对比不同方案下垂直轴风力机的风能利用系数,如表2所示。

表2 3种方案下风能利用系数

Tab. 2 Wind energy utilization coefficients in three schemes

方案	网格数量	风能利用系数
1	140 349	0.334 268 6
2	207 166	0.380 159 8
3	298 164	0.382 305 6

由表2可知,网格数量为14.0万时,风能利用系数较低;当网格数量由14.0万增至20.7万时,风能利用系数变化13.7%;而网格数量从20.7万增至29.8万时,风能利用系数仅变化0.6%。因此,选用第2套网格方案既可满足计算精度,又可缩短计算时长。

2.2 模拟可靠性

对以上方案进行可靠性验证,比较不同尖速比工况下风能利用系数的计算值与实验值,如图6所示。

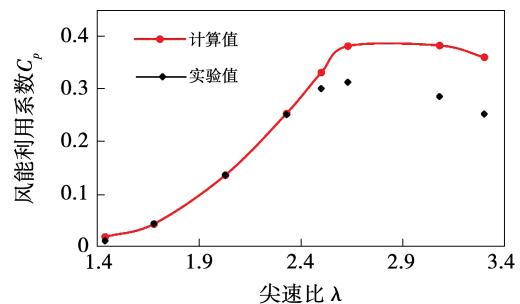


图6 不同尖速比工况风能利用系数计算值与实验值对比

Fig. 6 Comparison of calculated and experimental values of wind energy utilization coefficients under different tip speed ratios

由图6可知,在尖速比较小时风能利用系数的计算值和实验值基本相同,尖速比增大时计算值稍高于实验值,这是由于二维计算模型未考虑主轴、塔架等结构引起的流动损失和叶尖损失^[16]。但总体而言,整体曲线变化比较吻合,因此本文的网格划分和计算模型是合理且可靠的。

3 结果分析

3.1 气动特性分析

图7为原始、静态分流导叶(Passive Shunt Guide Vane, PSGV)和动态分流导叶(Active Shunt Guide Vane, ASGV)垂直轴风力机风能利用系数随尖速比的变化曲线。

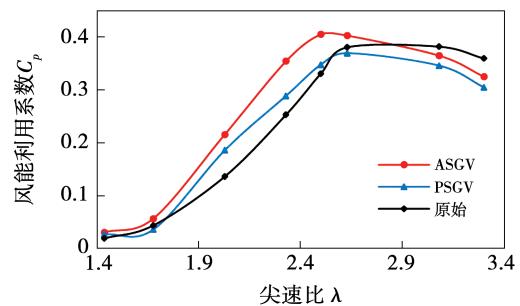


图7 3种方案垂直轴风力机风能利用系数随尖速比的变化

Fig. 7 Variation of wind energy utilization coefficient of VAWT with tip speed ratio in three schemes

由图 7 可知, 垂直轴风力机风能利用系数可通过 PSGV 提高, 而 ASGV 可使垂直轴风力机气动性能得到进一步提升。静态分流导叶垂直轴风力机在尖速比为 2.03, 2.33 及 2.50 时, 其风能利用系数分别为 0.19, 0.29 及 0.35, 较原始风力机风能利用系数(0.14, 0.25 和 0.33)分别提高 37%, 14% 和 5%。随尖速比增大, PSGV 提升效果逐步减弱。当尖速比大于 2.63 时, 静态分流导叶垂直轴风力机风能利用系数低于原始风力机, 这是由于高尖速比下叶片理论攻角较小, 而 SGV 的存在则扰乱了原始边界层附着流动, 导致风能利用系数降低。当尖速比为 3.08 及 3.30 时, 静态分流导叶垂直轴风力机风能利用系数较原始翼型降低 9% 和 15%。

对 SGV 施加主动控制后, 在不同尖速比下动态分流导叶垂直轴风力机风能利用系数均高于静态分流导叶垂直轴风力机。在尖速比为 2.33 时, 动态分流导叶垂直轴风力机风能利用系数(0.35)较静态分流导叶垂直轴风力机风能利用系数(0.29)提升最大, 为 23%; 尖速比为 2.03 和 2.50 时, 动态分流导叶垂直轴风力机风能利用系数分别为 0.22 和 0.40, 较静态分流导叶垂直轴风力机分别提升了 16% 和 17%; 尖速比大于 3.08 时, ASGV 和 PSGV 对原始边界层流动有一定程度扰动, 较 PSGV, ASGV 扰动效果弱。ASGV 让 VAWT 最佳尖速比前移至 2.50, 可使 VAWT 在更低转速下获得更好的气动性能, 提高运行时的稳定性与自启动性能。

为分析单叶片受力情况, 在 4 种不同尖速比下, 对 ASGV, PSGV 及原始翼型垂直轴风力机单叶片瞬时力矩进行对比, 如图 8 所示。由图 8 可知, 不同叶尖速比工况下, ASGV 和 PSGV 均使垂直轴风力机力矩得到提升, 且 ASGV 提升效果更好, 使垂直轴风力机最大力矩也有所增加。在 2.03 尖速比下, 原始翼型力矩在相位角 225°附近后开始剧烈波动, 附加 SGV 后不仅使得稳定性增强, 还使其力矩增大。当尖速比为 2.33, 2.50 和 2.63 时, 动态分流导叶垂直轴风力机叶片平均力矩(1.29, 1.39 和 1.31)较静态分流导叶垂直轴风力机叶片平均力矩(1.06, 1.19 和 1.18)分别提升了 21%, 17% 和 10%。随着尖速比增大, 3 种翼型垂直轴风力机叶片瞬时力矩差距逐渐减小, SGV 对垂直轴风力机力矩提升效果开始减弱。

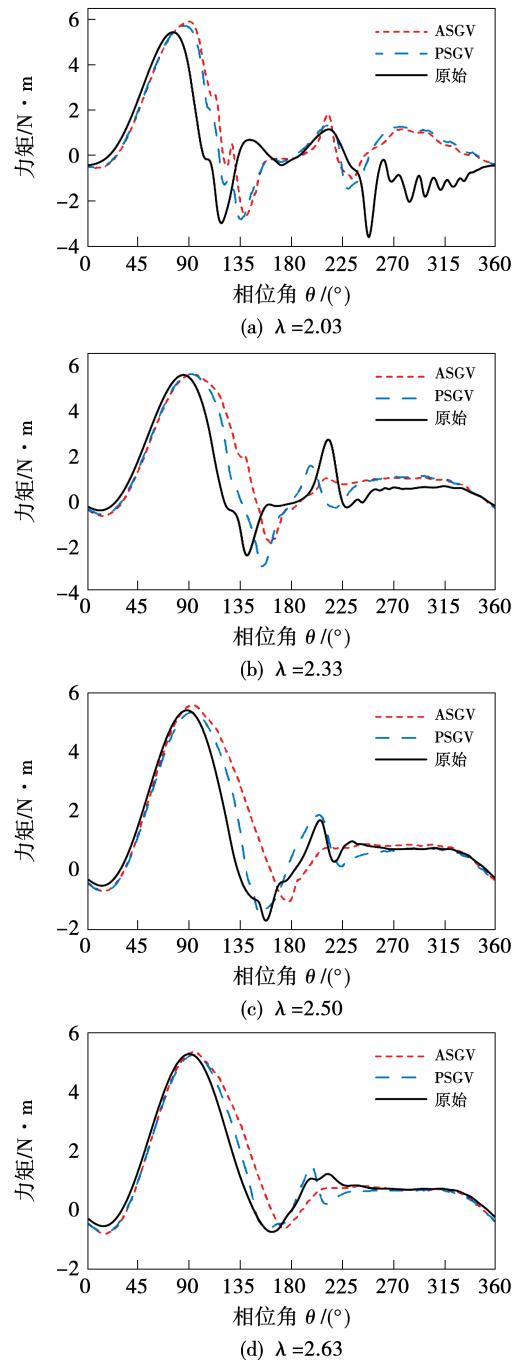


图 8 3 种方案单叶片瞬时力矩随叶尖速比的变化
Fig. 8 Variation of single blade instantaneous torque varying with tip speed ratio in three schemes

3.2 压力系数分析

图 9 为尖速比为 2.50、相位角为 100°, 130°, 160° 和 190° 时, 动态分流导叶垂直轴风力机与静态分流导叶垂直轴风力机单叶片表面压力系数沿弦长(x/c)的分布。由图 9 可知, 动态分流导叶垂直轴风力机和静态分流导叶垂直轴风力机在不同方位角下叶片压力系数存在较大变化。在 $\theta = 100^\circ$ 时动态分流导叶垂直轴风力机较静态分流导叶垂直轴风力机

压力面压力和吸力面压力系数差值略有增大,且使得压力系数峰值提升。在 $\theta = 130^\circ$ 时 ASGV 进一步增大翼型表面压差,在吸力面 $[0.6c, 0.8c]$ 处压力系数波动增大。在 $\theta = 160^\circ$ 时 PSGV 翼型压力面出现较大波动,ASGV 使得压力面波动消失,并在显著增大翼型两侧压差、提高稳定性的同时也对翼型的气动性能带来积极作用。 $\theta = 190^\circ$ 时 ASGV 翼型两侧压差低于 PSGV 翼型两侧压差。但总体而言,ASGV 对叶片两侧压差的提升作用更为明显。

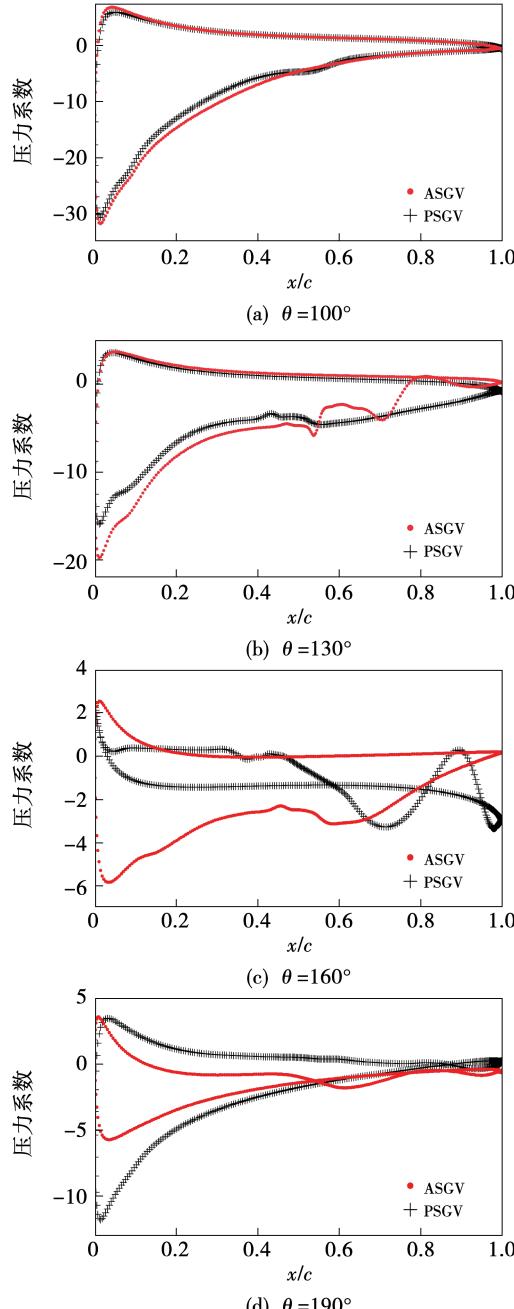


图 9 不同相位角下叶片压力系数沿弦长的分布
Fig. 9 Variation of blade pressure coefficient with chord length under variable phase angles

3.3 流场特性分析

为进一步说明 SGV 作用机理,取尖速比 2.50 时原始翼型、ASGV 翼型和 PSGV 翼型相对速度场及流线分布进行对比,因叶片主要在迎风区获取风能,故选择相位角为 $100^\circ, 130^\circ, 160^\circ$ 和 190° 。其相对速度及流线分布如图 10 所示。

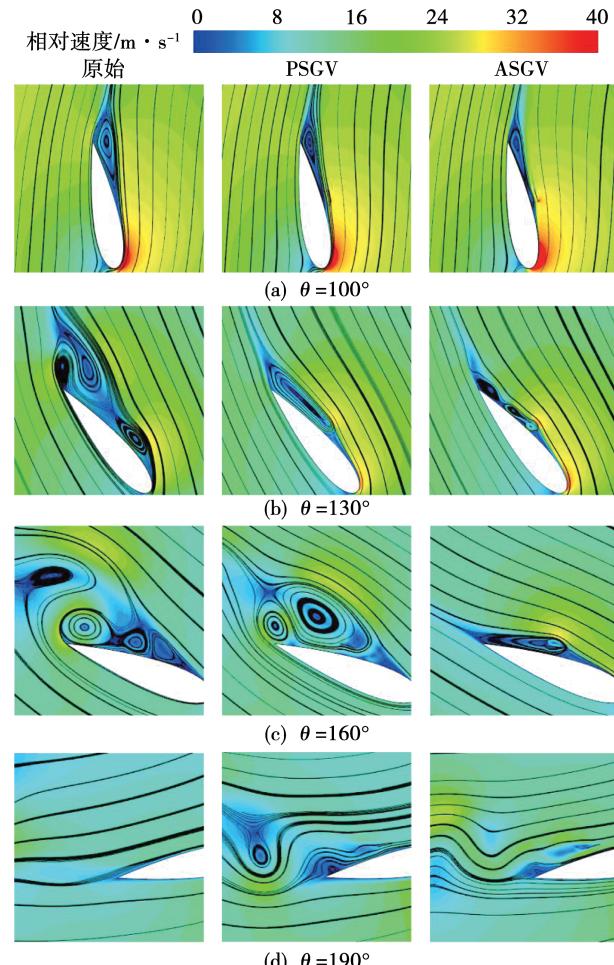


图 10 不同相位角下叶片速度场及流线分布
Fig. 10 Blade velocity field and streamline distribution under different phase angles

由图 10 可知,在 $100^\circ \sim 160^\circ$ 之间原始翼型攻角逐渐增大,失速程度不断加深,翼型表面出现大量分离涡,且涡尺度逐步扩大,流动分离点移至翼型前缘,致使翼型出现深度失速,风力机气动性能急剧下降;加装 SGV 后可使流体在经过导叶与翼型表面之间时获得加速,有利于流体在翼型表面的重新附着,减少大涡的形成与发展,大幅度减弱翼面流动分离;ASGV 相对翼面旋转角度与 PSGV 不同,可进一步加速流体,减少流动分离,使得风力机气动性能大幅

度提升。在 $\theta = 190^\circ$ 时, 因叶片攻角较小, 其表面未发生明显流动分离, 而加装 SGV 在一定程度上扰动翼面流体附着流动, 使尾缘部分产生部分分离涡, 相较 PGSV, AGSV 扰动效果减弱。

4 结 论

(1) 垂直轴风力机风能利用系数可通过 SGV 结构得到有效提高, 且可通过主动控制使其得到进一步的优化。

(2) 流体经过 SGV 和翼型表面之间时获得加速, 大幅度减弱流动分离, 延迟动态失速, 相较于静态分流导叶垂直轴风力机, 动态分流导叶垂直轴风力机在尖速比为 2.33 时可使风能利用系数提升 23%。在尖速比为 2.03 时, 静态分流导叶垂直轴风力机相比原始垂直轴风力机风能利用系数可提高 37%。

(3) ASGV 可使最佳尖速比降至 2.50, 有效提升垂直轴风力机运行时的稳定性。当尖速比大于 2.50 时, SGV 对翼型附近流场控制效果开始减弱。

参考文献:

- [1] FRANCHINA N, PERSICO G, SAVINI M. 2D-3D computations of a vertical axis wind turbine flow field: Modeling issues and physical interpretations [J]. Renewable Energy, 2019, 136:1170–1189.
- [2] 李根, 缪维跑, 李春, 等. 凹槽-襟翼对翼型动态失速特性影响研究 [J]. 热能动力工程, 2022, 37(3):151–159.
LI Gen, MIAO Wei-pao, LI Chun, et al. Effect of trailing edge dimple-flap on dynamic stall characteristics of airfoil [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3):151–159.
- [3] 罗帅, 缪维跑, 李春, 等. 基于定常吸气的垂直轴风力机流动控制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21):7078–7087.
LUO Shuai, MIAO Wei-pao, LI Chun, et al. Research on flow control of vertical axis wind turbine based on steady suction [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21):7078–7087.
- [4] 司马浩, 童慧, 吴兆春, 等. 前缘微小平板对翼型气动性能影响的实验研究 [J]. 热能动力工程, 2019, 34(11):116–122.
SI MA-hao, TONG Hui, WU Zhao-chun, et al. Experimental study on the effect of small plate near the leading edge on aerodynamic performance of airfoil [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(11):116–122.
- [5] ZAKI A, ABDELRAHMAN M A, AYAD S S, et al. Effects of leading edge slat on the aerodynamic performance of low Reynolds number horizontal axis wind turbine [J]. Energy, 2022, 239:122338. 1–122338. 11.
- [6] 徐学昊, 叶舟, 韩彦军, 等. 前缘小翼对翼型气动及噪声特性影响 [J]. 热能动力工程, 2021, 36(1):127–135.
XU Xue-hao, YE Zhou, HAN Yan-jun, et al. Influence of leading edge winglet on aerodynamic and noise characteristics of airfoil [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(1):127–135.
- [7] LUO D, HUANG D, SUN X. Passive flow control of a stalled airfoil using a microcylinder [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 170:256–273.
- [8] 陈珺, 孙晓晶, 黄典贵. 一种叶片前缘前带微圆柱的垂直轴风力机 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36(1):75–78.
CHEN Jun, SUN Xiao-jing, HUANG Dian-gui. A new type of vertical-axis wind turbine equipped with the blades having micro-cylinders installed in front of their leading-edges [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(1):75–78.
- [9] ABOELEZZ A, GHALI H, ELBAYOMI G, et al. A novel VAWT passive flow control numerical and experimental investigations: guided vane airfoil wind turbine [J]. Ocean Engineering, 2022, 257:111704. 1–111704. 15.
- [10] CASTELLI M R, ARDIZZON G, BATTISTI L, et al. Modeling strategy and numerical validation for a Darrieus vertical axis micro-wind turbine [C]//ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vancouver, CA, 2010.
- [11] 朱海天, 郝文星, 李春, 等. 叶片实度对建筑增强型垂直轴风力机气动性能的影响 [J]. 热能动力工程, 2018, 33(7):114–121.
ZHU Hai-tian, HAO Wen-xing, LI Chun, et al. Impact of solidity on aerodynamic performance of building augmented vertical axis wind turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(7):114–121.
- [12] 朱海天, 郝文星, 李春, 等. 风向对建筑增强型垂直轴风力机气动性能的影响 [J]. 动力工程学报, 2018, 38(6):493–500, 512.
ZHU Hai-tian, HAO Wen-xing, LI Chun, et al. Effects of wind direction on aerodynamic performance of building augmented vertical axis wind turbine [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(6):493–500, 512.
- [13] 邱静, 王国志, 李玉辉. 基于 STAR-CCM+ 的简单流体模型 CFD 研究 [J]. 液压气动与密封, 2010, 30(10):8–10.
QIU Jing, WANG Guo-zhi, LI Yu-hui. A simple fluid model for CFD research based on STAR-CCM+ [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2010, 30(10):8–10.
- [14] BALDUZZI F, BIANCHINI A, MALECI R, et al. Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines [J]. Renewable Energy, 2016, 85:419–435.
- [15] GHARALI K, JOHNSON D A. Numerical modeling of an S809 airfoil under dynamic stall, erosion and high reduced frequencies [J]. Applied Energy, 2012, 93:45–52.
- [16] 王培麟, 刘青松, 缪维跑, 等. 尾缘非定常射流襟翼对垂直轴风力机气动特性影响研究 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(9):242–250.
WANG Pei-lin, LIU Qing-song, MIAO Wei-pao, et al. Research on effect of trailing edge jet flap on aerodynamic characteristics of vertical axis wind turbine [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(9):242–250.

(丛敏 编辑)