

后退襟翼垂直轴风力机气动性能影响研究

宋 晖¹, 叶 舟^{1,2}, 阮仁浩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:为减缓翼型尾缘处流动分离对垂直轴风力机气动性能的负面影响,在叶片尾缘处安装后退襟翼,根据不同的流动控制策略,使用CFD软件STAR CCM+对垂直轴风力机叶片进行二维数值模拟,研究不同工况下后退襟翼对垂直轴风力机风能利用率、叶片平均力矩以及流动特性的影响。结果表明:在最佳尖速比下,风能利用率显著提高,当尖速比为2.5时,风能利用率较原始风力机提高38.7%;采用后退襟翼的叶片具有更大的失速攻角,失速现象被延迟,并在较高攻角时才发生。

关键词:垂直轴风力机;流动控制;气动特性;后退襟翼

中图分类号:TK83 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.09.018

[引用本文格式] 宋 晖,叶 舟,阮仁浩,等.后退襟翼垂直轴风力机气动性能影响研究[J].热能动力工程,2024,39(9):155-161. SONG Hui, YE Zhou, RUAN Renhao, et al. Research on aerodynamic performance of a vertical axis wind turbine with active backward flaps at the tail edge[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(9): 155-161.

Research on Aerodynamic Performance of a Vertical Axis Wind Turbine with Active Backward Flaps at the Tail Edge

SONG Hui¹, YE Zhou^{1,2}, RUAN Renhao¹, 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 for Power Engineering, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: To relieve the negative impact of flow separation at trailing edge of flap on the aerodynamic performance of vertical axis wind turbine (VAWT), a backward flap was installed on the blade trailing edge. According to different flow control strategies, the aerodynamic performance of trailing edge was improved. A two-dimensional numerical simulation of VAWT blades was conducted using CFD software STAR CCM+, and the effects of backward flap on wind energy utilization rate, blade average torque and flow characteristics of VAWT under different working conditions were studied. The research results show that the wind energy utilization rate has been significantly improved at the optimal tip speed ratio. When the tip speed ratio is 2.5, the wind energy utilization rate is 38.7% higher than that of original wind turbine. In addition, the blades with backward flaps have a larger stall angle of attack, and stall phenomena are delayed and only occur at higher angles of attack.

Key words: vertical axis wind turbine (VAWT), flow control, aerodynamic characteristics, backward flap

收稿日期:2023-08-03; 修订日期:2023-09-05

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:宋 晖(1999-),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

太阳能、风能和地热能等能源因其清洁和可再生性而备受关注。风力机是最早用于风能转化的装备之一,由于风轮旋转轴方向不同,风力机分为垂直轴风力机 (Vertical Axis Wind Turbine, VAWT) 和水平轴风力机 (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT) 两种类型^[1-2]。因垂直轴风力机无法大规模发电,研究人员更加关注水平轴风力机^[3]。然而,垂直轴风力机却具备水平轴风力机不具备的优势,如无需偏航装置、结构简单等,且在高风速和湍流状态下,水平轴风力机的效率并不高,而垂直轴风力机可以更好地应对这些情况^[4-5]。这使得垂直轴风力机在未来的风能行业中展现出巨大的潜力^[6]。

在旋转过程中,垂直轴风力机相位角的变化会导致局部攻角改变并可能引发失速现象。流动分离在其中起到控制叶片气动特性的作用,导致垂直轴风力机发生动态失速^[7]。为改善垂直轴风力机的气动性能,研究者们关注于采用高效的流动控制技术^[8]。直叶片达里厄风力机由于其重量轻、结构简单、平衡性好等优点,受到了广泛关注,因此对直叶片风力机的流动控制进行研究已成为热点^[9]。控制技术主要分为两类:主动控制和被动控制。被动控制通过对翼形几何形状进行修改来实现预期的流动,例如在叶片中开设槽、增添结构等;主动控制则包括利用叶片表面的吹吸气或采用主动式格尼襟翼等方法。流动控制技术是提高垂直轴风力机气动性能的有效手段。

Zamani 等人^[10]研究多孔结构对叶片的控制效果,结果表明,多孔介质能够使流体附着在叶片上,抑制流动分离,从而提高风力机的自启动性能并增加年发电量。Bhavsar 等人^[11]在 DU-99-W-405 翼型上引入新的开缝设计,探究了原始翼型和开缝翼型在流动分离和失速现象方面的差异,结果表明,在相同攻角下,开缝翼型的升力系数提高了 68.8%,阻力系数降低了 36.9%。Zhang 等人^[12]研究了仿生翼型对 H 型垂直轴风力机的气动特性和流场的影响,结果表明,仿生翼型可以通过延迟叶片表面失速和促进层流向湍流转变来改善风力机的性能。在尖速比为 1.38 时,功率系数增加了 7.02%;在尖速比为 2.19 时,功率系数增加了 7.35%。Aboelegg 等

人^[13]设计了一种新型导叶翼型,相较于原始风力机,使用导叶翼型的风力机的最大输出功率增加了 26%。Huang 等人^[14]设计了一种变实度的达里厄型垂直轴风力机,并使用 CFD 的两种动态方法模拟不同阶段的 VAWT,结果表明,实度和转动惯量对自启动性能影响较大,实度增加,自启动性能也会增加,风力机实度偏小时具有更宽运行范围的叶尖速比。文献^[15]采用遗传算法结合高斯过程回归,在 H 型垂直轴风力机叶片的吸力面上采用最佳空腔,使得尖速比为 1.5 时风力机功率提高了 63.8%。

相较于 VAWT 叶片,飞机叶片设计更为复杂。Zhu 等人^[16]提出在飞机叶片后缘安装双缝襟翼可以提高升力系数。在此基础上,Hao 等人^[17]采用单缝襟翼,较原始翼型,最大升力提高 27%。基于此,本文提出单缝后退襟翼,该襟翼位于翼型的后缘,并提出不同的后退控制策略,进一步研究不同策略对垂直轴风力机的平均力矩、最大风能利用率以及周围流场的影响。

1 计算模型

1.1 原始 VAWT 几何模型

垂直轴风力机是一种将风能转换为机械能的装置^[18],其几何模型俯视图如图 1 所示,表 1 给出该风力机的基本参数。在假设来流风是均匀稳定的情况下,设定风速 V_∞ 为 9 m/s, θ 为叶片相位角, ω 为叶片运行中的角速度, O 为旋转轴。文献^[19]提出 H 型 VAWT 的叶片具有无扭转和变截面的特点。同时,若叶片展弦比超过 10,二维和三维模型在功率系数上的误差小于 6%,对模拟结果影响较小。由于 VAWT 模型的展弦比约为 17,因此采用二维模型进行模拟是可信的。

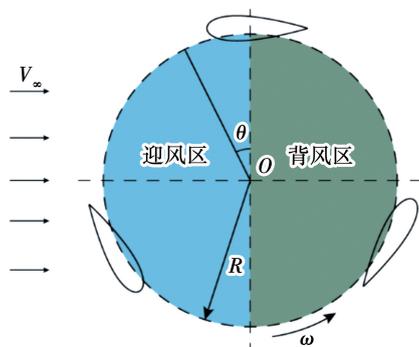


图 1 垂直轴风力机几何模型俯视图

Fig. 1 Top view of geometry model of vertical axis wind turbine

表1 垂直轴风力机几何参数

Tab.1 Geometric parameters of VAWT

参 数	数 值
叶片数 N	3
弦长 c/mm	85.8
实度	0.25
风轮半径 R/mm	515

表2 后退襟翼控制策略

Tab.2 Control strategy of backward flap

策 略	相位角/ $(^\circ)$	
	后退	收回
1	0 ~ 180	180 ~ 360
2	0 ~ 90	90 ~ 180
3	180 ~ 270	270 ~ 360

1.2 改进垂直轴风力机模型

改进后的后退襟翼垂直轴风力机几何模型俯视图如图2所示。叶片采用对称的NACA0021翼型,其构造方式参考文献[20],翼型的总弦长保持不变($c + c3$)。翼型为刚体,包括翼型弦长($c3 = 0.25c$)、顶部翼型距离($c1 = 0.9c$)和底部翼型距离($c2 = 0.75c$)。尾缘襟翼相对于前缘部分 $\Delta y = 2\text{ mm}$, $\Delta x = 0.5\text{ mm}$,运动曲线定义为半径 $r = 0.2c$ 的圆。

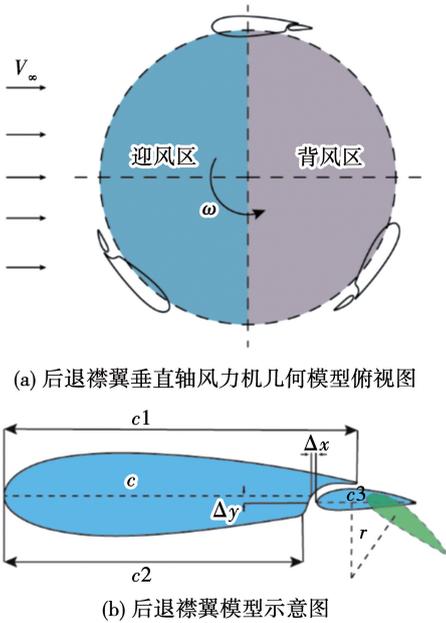


图2 后退襟翼垂直轴风力机俯视图及翼型几何模型

Fig.2 Top view of vertical axis wind turbine with backward flaps and geometry model of airfoil

1.3 主动式后退襟翼控制策略

根据图2所示的几何模型,提出3种不同的后退襟翼运动控制策略,如表2所示。策略1为后退襟翼在迎风区后退,背风区收回;策略2为在迎风区时,后退襟翼先后移再收回,而在背风区时,后退襟翼保持原始位置;策略3则与策略2相反,襟翼绕着圆心先以旋转的方式后退,收回时以旋转的方式向前移动。

2 网格划分和可靠性验证

2.1 计算域和网格划分

使用STAR-CCM+软件对不同控制策略模型的气动性能进行分析,为确保结果的准确性,需要适当划分计算域,如图3所示。计算域的尺寸用风轮直径 D 表示,垂直轴风力机距入口边界 $10D$,并距离出口 $20D$,以确保下游区域尾流能够充分发展。入口边界的宽度为 $10D$,上边界和下边界距离为 $8D$ 并设置为对称平面。主旋转域的直径为 $1.5D$ 。为了保证旋转域和外界的信息传递,将边界设置为交界面,实现交界面处的信息传递,同时将翼型表面设置为无滑移壁面。

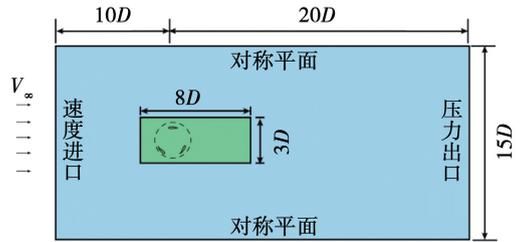


图3 计算域及边界条件

Fig.3 Calculation domain and boundary condition

多边形网格在众多网格中的优势在于收敛性能更好,在减少计算成本的同时也能确保精度准确^[21]。因此,网格划分使用多边形网格,并使用重叠网格技术实现襟翼主动控制效果^[22-23]。为了更好地捕捉壁面流动的信息,叶片表面为无滑移壁面,并将其第1层网格高度设定为 0.01 mm ,增长率为 1.05 ,总厚度为 2 mm ,保证无量纲数 y^+ 约等于 1 。计算域网格如图4所示。

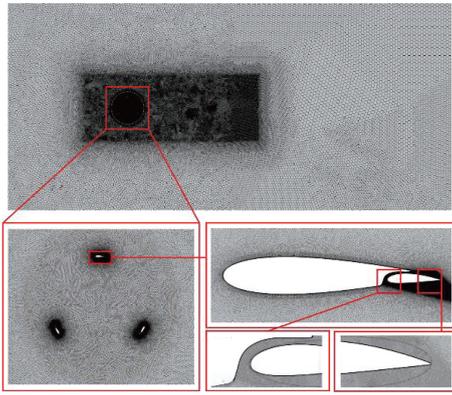


图 4 风轮计算域网格分布

Fig. 4 Grid distribution of calculation domain of wind turbine

2.2 计算方法

在近壁面处理方面, SST $k-\omega$ 湍流模型具有更高的精确性^[24]。相较于 $k-\omega$ 模型, SST $k-\omega$ 模型预测边界层中的湍流特性更为准确,特别是在近壁区域,因此使用 SST $k-\omega$ 湍流模型较为可靠。在压力-速度耦合方面,采用基于 SIMPLE 算法的方法,并对非定常雷诺平均 N-S 方程进行了二阶迎风离散化,以尽量减小数值扩散的影响。风力机的旋转共进行了 10 个周期,每个非定长时间步旋转 1° ,分析数据仅取最后一个周期进行计算。

2.3 网格无关性验证

风力机风能利用率 C_p 表示风力机运行时效率的高低:

$$C_p = \lambda M / (\rho V_\infty^2 R^2) \quad (1)$$

式中: ρ —空气密度, kg/m^3 ; M —风力机力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

叶尖速比 λ 指叶片尖端切向速度与来流风速的比值:

$$\lambda = \omega R / V_\infty \quad (2)$$

式中: V_∞ —来流风速, m/s ; ω —风轮旋转角速度, rad/s 。

为了确定最佳网格条件和最少的网格数量,需要进行网格独立性验证。使用 STAR 模拟软件进行不同网格的测试。取尖速比为 2.33,在不同数量的网格上进行数值模拟,并观察结果的变化情况,如图 5 所示。较粗糙的 18 万网格数所得到的结果已可以接受,当增加网格数到更精细的 24 万和 30 万时,得到的结果更加精确。

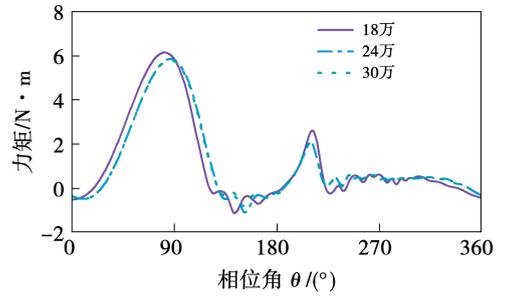


图 5 网格无关性验证

Fig. 5 Grid independence verification

由图 5 可知,当模拟网格数达到 18 万时,单叶片的力矩变化幅度较大;当网格数从 24 万增加到 30 万时,两者的力矩曲线相近。不同网格数下 VAWT 的风能利用率如表 3 所示。

表 3 不同网格数下 VAWT 风能利用率

Tab. 3 Utilization rate of VAWT wind energy under different grid numbers

网格数/万	风能利用率 C_p
18	0.265 6
24	0.307 7
30	0.308 5

由表 3 可知,网格数达到 18 万时,风能利用率相对较低;网格数从 18 万增加至 24 万时,风能利用率增加了 15.8%;网格数增加至 30 万时,风能利用率仅增加了 0.25%,已达到相对稳定的水平。因此,选择 24 万网格足以满足所需的计算精度要求。

在已经确定的网格数基础上,将风轮在不同尖速比下的功率系数与文献[25]中的实验值进行对比,结果如图 6 所示。

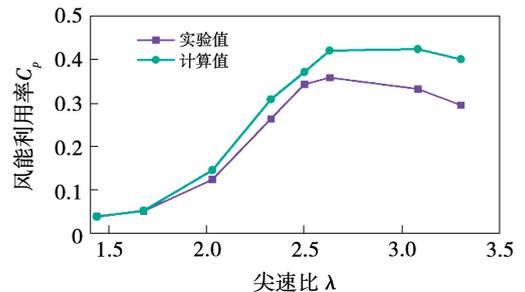


图 6 不同尖速比下风能利用率计算值与实验值对比

Fig. 6 Comparison of computational and experimental values of wind energy utilization rate at different tip speed ratios

由图6可知,计算结果与实验测量值之间存在一定误差。总体来说,计算结果相对于实验值偏高,两者的变化趋势大致相似,都呈现出先增大后减小的态势,此外,二者的峰值均在尖速比为2.63处出现。综上所述,本研究所采用的数值模拟方法中的网格方案、计算模型及边界条件选取合理。

3 结果分析

3.1 风能利用率

图7为不同控制策略下VAWT风能利用率随尖速比的变化。由图7可知,在低尖速比条件下,3种控制策略均可有效提高VAWT的风能利用率。然而,在尖速比高于2.8后,策略3的风能利用率提升效果开始快速下降,并低于原始风力机。通过分析可知,当尖速比为2.03时,策略1~策略3对风力机风能利用率的改善均有成效,分别为0.2705, 0.2511和0.1579,较原始风力机分别提升了216%,194%和85%。当尖速比超过2.63时,各控制策略的提升效果逐渐减弱。施加主动控制策略可使风力机的最佳尖速比从2.63降低至2.5,从而减小叶片的受力,整机功率输出更加稳定。从对比结果来看,策略1对风力机风能利用率的提升效果最为明显。在尖速比为2.5以下时,策略1使风力机功率系数达到0.514,较原始风轮提高了38.7%。

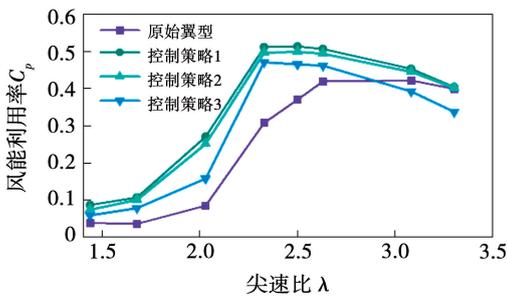


图7 不同控制策略风能利用率随尖速比的变化

Fig.7 Change of wind energy utilization rate with tip speed ratio under different control strategies

3.2 整机平均力矩

为进一步说明3种策略对风力机平均力矩的影响,选取3种尖速比下的平均力矩变化曲线,如图8所示。

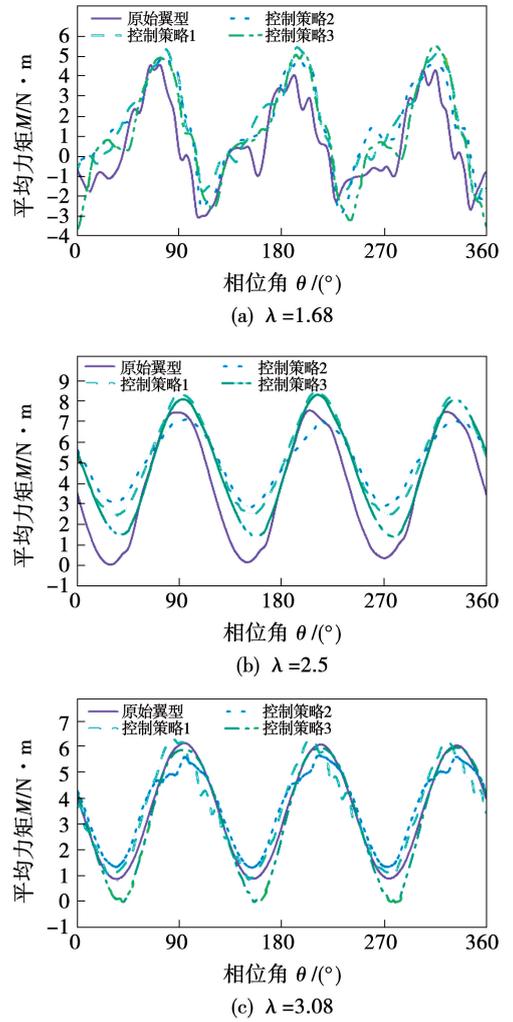


图8 不同控制策略在不同叶尖速比下整机平均力矩变化

Fig.8 Average torque variations of the whole machine at different tip speed ratios under different control strategies

由图8可知,在尖速比为1.68时,通过施加主动控制策略,整机平均力矩均有所增加,相较于原始风力机分别增加了196%(策略1),176%(策略2)和116%(策略3),有效提高了低风速下风力机的输出功率。在尖速比为2.5时,平均力矩变化曲线更加平稳,3种控制策略下VAWT平均力矩较原始风力机均大幅提高;在相位角较大变化范围内,3种控制策略下的平均力矩均高于原始风力机,特别是在相位角0°~60°范围内,原始风力机的平均力矩因动态失速而减少较多;在相位角80°~120°范围内,控制策略1的平均力矩高于其他策略。当尖速

比为 3.08 时,虽然各控制策略对风力机风能利用率的提升效果减弱,但瞬时力矩的最小值和最大值明显增加。

控制策略 1、策略 2 与策略 3 对于 1.68 和 2.5 尖速比下垂直轴风力机的影响并不完全相同。采用策略 1 和策略 2 时,在低、中等尖速比下都能提高整体性能。然而,对于策略 3,并非总能实现性能提升,特别是在尖速比为 3.08 时,使用策略 3,部分相位角下的整机平均力矩低于原始风力机。

3.3 涡量分析

由前面的分析可知,在策略 1 下风力机风能利用率的提升效果最显著,图 9 给出了尖速比为 2.5 时,采用控制策略 1 和原始风力机叶片在不同襟翼旋转角度 φ 及不同相位角下涡量分布情况。当相位角分别为 30° 和 60° 时,翼型尚未发生动态失速,周围气流能较好地附着于叶片表面。当相位角达到 90° 时,采用策略 1 的翼型尾涡强度较低,相比之下,原始翼型的尾涡强度更高。随着风力机持续旋转,翼型攻角开始超过失速攻角,翼型发生动态失速现象,导致叶片表面出现不同程度的分离涡,从翼型前缘涡结构往复性脱离表面,导致风轮气动性能降低。由图 9 可知,采用策略 1 翼型下边界层涡量厚度明显降低,叶片表面动量损失减少,且粘性作用增强,使流体在失速攻角下仍能附着在翼型表面,从而延缓了流动分离,减少因动态失速引发的气动性能下降的问题。

为了研究后退襟翼滑动距离对改善 VAWT 风能利用率的情况,选取策略 1 进行模拟,襟翼最大旋转角度分别为 $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 和 25° ,其风能利用率如表 4 所示。

由表 4 可知,在尖速比为 1.44 时使用后退襟翼后风能利用率显著提升。在尖速比为 1.68 ~ 2.33 范围内,后退襟翼旋转角度为 15° 时,风能利用率始终高于其他情况,并且在尖速比为 2.33 时达到最大值 0.517。在尖速比为 2.5 ~ 2.63 范围内,旋转角度为 20° 时风能利用率略高于其他情况。与原始风力机相比,4 种旋转角度都能够提高风能利用率,旋转角度 15° 和 20° 时的性能提升最为显著。

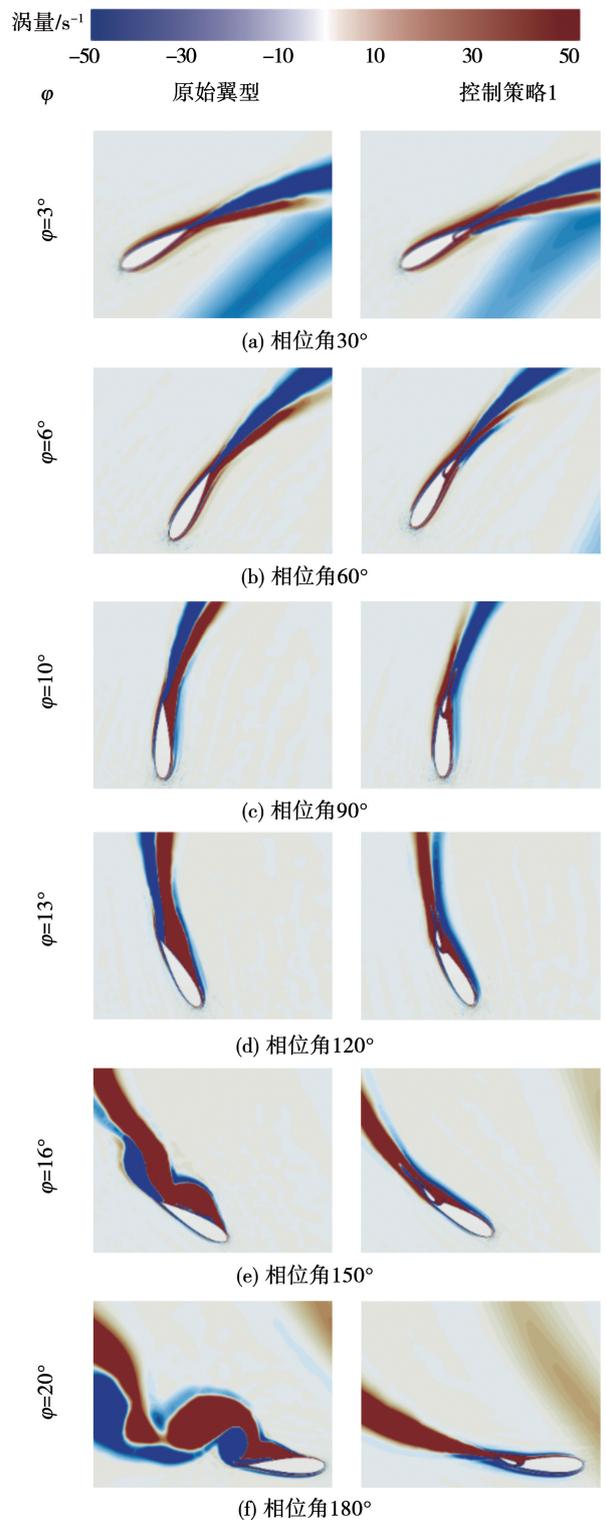


图 9 不同相位角下原始襟翼与策略 1 后退襟翼涡量云图对比

Fig. 9 Comparison of vorticity contours of original flap and backward flap of strategy 1 at different phase angles

表4 不同尖速比及后退襟翼旋转角度下

VAWT 风能利用率

Tab.4 Wind energy utilization rate of VAWT at backward flap rotating angles at different tip speed ratios

λ	后退襟翼绕圆心旋转角度/($^{\circ}$)				原始
	10	15	20	25	
1.44	0.091	0.092	0.087	0.049	0.039
1.68	0.118	0.122	0.108	0.064	0.036
2.03	0.369	0.359	0.271	0.168	0.085
2.33	0.507	0.517	0.512	0.485	0.308
2.50	0.507	0.511	0.514	0.472	0.370
2.63	0.496	0.502	0.507	0.451	0.419
3.08	0.435	0.448	0.433	0.324	0.423
3.30	0.409	0.415	0.389	0.259	0.399

4 结 论

(1) 3种控制策略皆能有效提高垂直轴风力风能利用率。当叶尖速比为2.03时,采用策略1的后退襟翼垂直轴风力机比原始风力机功率系数提高了216%;当叶尖速比逐渐增大时,3种策略的控制效果也在逐渐减弱,但3种策略将风轮最佳尖速比从2.63减小至2.5,使得风力机在运行过程中更加稳定。

(2) 主动式后退襟翼可以改善流场特性,避免叶片上小涡汇聚成大涡,从而减少失速涡脱落造成的损失。

(3) 与后退襟翼控制策略2和策略3相比,策略1在迎风区和背风区均能推迟流动分离,有效延缓了叶片的动态失速现象,且能较好地控制风力机的尾迹效应。

参考文献:

[1] 李 春,叶 舟,高 伟,等.现代陆海风力机计算与仿真[M].上海:上海科学技术出版社,2012.
LI Chun, YE Zhou, GAO Wei, et al. Computation and simulation of modern land-sea wind turbine[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2012.

[2] ROLIN V F C, PORTE-AGEL F. Experimental investigation of vertical-axis wind-turbine wakes in boundary layer flow[J]. Renewable Energy, 2018, 118: 1 - 13.

[3] BHUTTA M M A, HAYAT N, FAROOQ A U, et al. Vertical axis wind turbine - A review of various configurations and design techniques[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4): 1926 - 1939.

[4] CHAICHANA T, CHAITEP S. Wind power potential and characteristic analysis of Chiang Mai, Thailand[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24: 1475 - 1479.

[5] 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.

[6] WANG Z, WANG Y, ZHUANG M. Improvement of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines with leading-edge serrations and helical blades using CFD and Taguchi method[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 177: 107 - 121.

[7] REZAEIHA A, MONTAZERI H, BLOCKEN B. Active flow control for power enhancement of vertical axis wind turbines; Leading-edge slot suction[J]. Energy, 2019, 189: 116131.

[8] SUN J J, SUN X J, HUANG D G. Aerodynamics of vertical-axis wind turbine with boundary layer suction - Effects of suction momentum[J]. Energy, 2020, 209: 118446.

[9] WANG Z Y, ZHUANG M. Leading-edge serrations for performance improvement on a vertical-axis wind turbine at low tip-speed-ratios[J]. Applied Energy, 2017, 208: 1184 - 1197.

[10] ZAMANI M, SANGTARASH A, MAGHREBI M J. Numerical study of porous media effect on the blade surface of vertical axis wind turbine for enhancement of aerodynamic performance[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 245: 114598.

[11] BHAVSAR H, ROY S, NIYAS H. Aerodynamic performance enhancement of the DU99W405 airfoil for horizontal axis wind turbines using slotted airfoil configuration [J]. Energy, 2023, 263: 125666.

[12] ZHANG Y F, GUO Z P, ZHU X Y, et al. Investigation of aerodynamic forces and flow field of an H-type vertical axis wind turbine based on bionic airfoil[J]. Energy, 2022, 242: 122999.

[13] 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.

[14] HUANG H L, LUO J B, LI G. Study on the optimal design of vertical axis wind turbine with novel variable solidity type for self-starting capability and aerodynamic performance [J]. Energy, 2023, 271: 127031.

[15] JAVAID M T, SAJJAD U, UL HASSAN S S, et al. Power enhancement of vertical axis wind turbine using optimum trapped vortex cavity[J]. Energy, 2023, 278: 127808.

[16] ZHU H T, HAO W X, LI C, et al. Effect of flow-deflecting-gap blade on aerodynamic characteristic of vertical axis wind turbines [J]. Renewable Energy, 2020, 158(10): 370 - 387.

[17] HAO W X, LI C. Performance improvement of adaptive flap on flow separation control and its effect on VAWT [J]. Energy, 2020, 213(12): 118809.

[18] RACITI CASTELLI M, 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, 2010, 44441: 409 - 418.