

导流式翼缝对直线翼垂直轴风力机气动性能的影响

倪露露, 朱海天, 李 春, 缪维跑

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘 要:为减小流体从吸力面流至压力面的速度损失,基于小间距翼缝有助于减小气动损失的设计原理,针对 NACA0021 翼型,提出双侧导流式、内导流式和外导流式 3 种新型翼缝形式。通过数值模拟方法,分析不同翼缝对垂直轴风力机气动性能和流场结构的影响,并将其性能参数与原始翼型和非圆弧翼缝翼型进行对比。结果表明:内导流式翼缝风力机气动性能优于原始风力机,最佳尖速比减小 8.06%,改善了叶片周围和整机流场结构,增强了风力机运行稳定性;在低尖速比下,双侧导流式翼缝风力机气动性能较高,而高尖速比时气动性能低于原始风力机;下游区叶片迎风速度较低,外导流式翼缝对流动分离现象改善效果不明显,导致气动性能较差;非圆弧翼缝的间距过大使最大风能利用系数降低了 15.5%,不适用于直线翼垂直轴风力机。

关 键 词:翼缝;被动流动控制;动态失速;垂直轴风力机;数值模拟

中图分类号:TK83 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.07.021

[引用本文格式]倪露露,朱海天,李 春,等.导流式翼缝对直线翼垂直轴风力机气动性能的影响[J].热能动力工程,2021,36(7):129-136. NI Lu-lu, ZHU Hai-tian, LI Chun, et al. The effect of flow-deflecting gap on aerodynamic characteristics of straight-blade vertical axis wind turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(7):129-136.

The Effect of Flow-deflecting Gap on Aerodynamic Characteristics of Straight-blade Vertical Axis Wind Turbine

NI Lu-lu, ZHU Hai-tian, LI Chun, MIAO Wei-pao

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)

Abstract: Based on NACA0021 airfoil and the design principle of small spacing gaps helps to reduce aerodynamic loss, in order to reduce the velocity loss of fluid flowing from the suction surface to the pressure surface, three new types of flow-deflecting gaps were proposed: Two-Side Flow Deflecting Gap, Toward-Inside Flow Deflecting Gap and Toward-Outside Flow Deflecting Gap. The influences of different gaps on aerodynamic performance and flow field structure of Vertical Axis Wind Turbine were analyzed through numerical simulation. Then the aerodynamic parameters of three new types of airfoils were compared with those of clean airfoil and the airfoil with non-circular gap. The results show that the aerodynamic performance of the wind turbine with Toward-Inside Flow Deflecting Gap was better than the clean wind turbine and the optimal tip speed ratio decreased by 8.06%, which not only improved the flow field structure, but also improved the operation stability of the wind turbine. The aerodynamic performance of the wind turbine with Two-Side Flow Deflecting Gap was better than the clean wind turbine when the tip speed ratio was low, while the aerodynamic performance of the high tip speed ratio was worse than that of

收稿日期:2019-08-09;修订日期:2019-09-26

基金项目:国家自然科学基金(51676131);国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51811530315);上海“科技创新行动计划”地方院校能力建设项(19060502200)

Fund-supported Project: The National Natural Science Foundation of China(51676131); The National Natural Science Foundation Project of International(Regional) Cooperation and Exchange Program(51811530315); Shanghai University Science and Technology Innovation Action Plan Local University Capacity Building Project(19060502200)

作者简介:倪露露(1996-),女,山东济宁人,上海理工大学硕士研究生。

通讯作者:李 春(1963-),男,北京人,上海理工大学教授。

the clean wind turbine. Due to the flow separation phenomenon was not alleviated effectively, the improvement effect of the Toward-Outside Flow Deflecting Gap was not obvious, resulting in poor aerodynamic performance. The excessive space of non-circular gap reduced the maximum power coefficient by 15.5%, which was not applicable to straight-blade vertical axis wind turbine.

Key words: gap, passive flow control technique, dynamic stall, vertical axis wind turbine, numerical simulation

引 言

风力机作为利用风资源的重要装置之一,按风力机叶片旋转轴与地面的相对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]。较之 HAWT, VAWT 具有成本低、结构简单、无需偏航和噪声低等优点^[2-4]。但在运行过程中 VAWT 叶片攻角的大幅变化极易引发动态失速,不仅使叶片吸力面发生剧烈流动分离,导致气动性能下降,还会因气动载荷的大幅波动降低风力机使用寿命^[5-7]。VAWT 动态失速一般与翼型结构、雷诺数 Re 、叶片数量、弦长和叶尖速比等因素有关^[8-9]。

被动控制技术可改善 VAWT 的动态失速特性,且具有结构简单、成本低和无需外界能量输入等优点^[10]。襟翼因能有效抑制流动分离而受到广泛研究。现今主要研究的襟翼包括格尼襟翼、可变形尾缘襟翼、微型滑动襟翼以及分离式尾缘襟翼^[11]。分离式尾缘襟翼中襟翼与主体间的空隙称为翼缝,其几何特征显著影响被动控制效果,进而影响 VAWT 的气动性能^[12]。文献[7]提出一种导叶翼缝翼型,研究表明,导叶翼缝可大幅提高原始翼型的失速攻角,减缓动态失速及涡脱落现象,并增加升阻比。Liggett 等人^[13]对非圆弧形翼缝的研究表明,在大攻角下翼缝周围流体可穿过分离区起到抑制分离涡的效果,升阻比最大可提升 6%。文献[14-15]分析了襟翼相对长度和翼缝相对宽度对翼型气动性能的影响,结果表明,当翼缝相对位置为 $0.7c$ (c 为弦长),翼缝宽度为 $0.01c$ 时,翼型的气动性能较好。Shehata 等人^[16]研究了多节直翼缝对翼型气动性能的影响,结果表明,翼缝可改善失速特性并延缓流动分离,当 3 节直翼缝分别位于 $0.4c$ 、 $0.55c$ 和 $0.9c$

时,翼型的力矩系数最多可提升 51%。文献[17]研究了分离式尾缘襟翼翼缝对翼型气动性能的影响,结果表明,翼缝使得襟翼翼型在一定攻角范围内升阻比降低,缝隙越小对翼型的升阻力系数影响越小。Belamadi 等人^[18]研究了开槽式翼型的气动性能,发现开槽位置、开槽角度、开槽宽度及开槽几何形状均对翼型气动性能有显著影响,而当开槽位置处于流动分离点的上游时,开槽式翼型的升阻比均大于原始翼型,且开槽宽度和角度分别为 $2.5\%c$ 和 -60° 时升阻比系数更高。

上述研究多侧重于特定翼缝结构对翼型气动性能的影响,而不同翼缝形状对 VAWT 气动性能影响的研究相对较少。本文针对 NACA0021 翼型提出了三种导流式翼缝叶片,并与常见的非圆弧翼缝叶片进行对比,通过计算流体力学(Computational Fluid Dynamic, CFD)方法研究不同翼缝叶片对直线翼垂直轴风力机(Straight Blade Vertical Axis Wind Turbine, SB-VAWT)气动性能和流场结构的影响。

1 数值模拟

1.1 几何模型

为便于对比,所采用的 VAWT 模型参考文献[19],主要参数如表 1 所示。叶片翼型为 NACA0021。

表 1 VAWT 主要参数
Tab. 1 Main parameters of SB-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/m	0.515
叶片高度 H/mm	1 456.4

襟翼翼缝抑制动态失速的流动机理是诱导压力面流体相切于翼型表面流入吸力面,从而达到被动控制流动分离的效果^[17]。结合文献[14-15]中翼缝最佳位置和宽度,参考开槽式翼缝和弯曲翼缝,提出 3 种不同结构形式的导流式翼缝模型。3 种导流式翼缝模型和用于对比的两种模型如图 1 所示。TO-FDG 的设计目的为改善叶片位于下游区时吸力面流场结构, TI-FDG 为改善叶片位于上游区时吸力面流场结构, TS-FDG 可兼顾叶片旋转周期的气动性能。

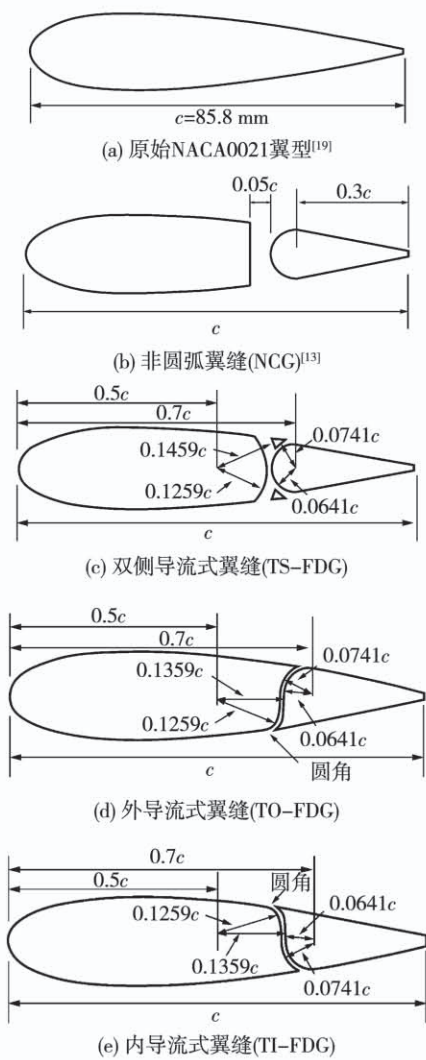


图 1 不同翼缝结构模型
Fig. 1 Different models of gap

1.2 计算域及边界条件

直线翼垂直轴风力机叶片为直线型,无扭曲和变截面,叶片高度与弦长之比(H/c)约为 17,可简化为二维模型进行分析。当 $H/c > 10$ 时,叶尖效应可

被忽略,二维与三维模型在风能利用系数和力矩系数上的误差小于 6%,此误差不影响结果^[20]。因此,采用二维模拟得到的结论具有可靠性和准确性。采用 CFD 方法进行对比分析,计算域及翼型的远场拓扑结构如图 2 所示,其尺寸参考文献[10]。计算域分为 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 和 Z_4 4 个子区域,各流域之间通过界面(虚线表示)进行数据传递。转轴附近 Z_1 为内流域,半径为 $0.5R$; Z_2 为主旋转域,以图中 O 为旋转中心,其旋转半径为 $1.5R$; Z_3 为叶片控制域; Z_4 为外流域。计算区域采用对称结构,速度进口 AB 距风力机旋转中心为 $30R$,线 AD 和 BC 距旋转中心 $30R$,出口边界距转轴中心为 $70R$ 。

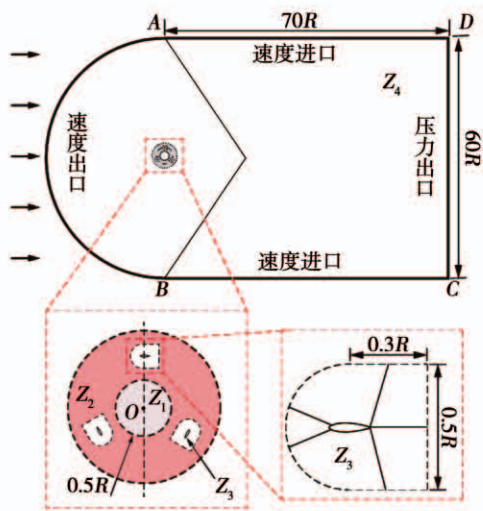


图 2 原始 VAWT 远场拓扑结构
Fig 2 Topology of Clean SB-VAWT

整体上下边界 AD 、 BC 以及前端 AB 均为速度进口,远端边界 CD 为压力出口,叶片表面为无滑移壁面。流体介质为空气,密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$,动力粘度 $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$,来流速度 $V_\infty = 9 \text{ m/s}$ 。

1.3 网格划分

原始 VAWT 的计算域网格划分及叶片附近局部放大如图 3 所示。全局计算网格数参考文献[10,21],最终为 48.8 万。其中, Z_2 区域为非结构网格,其余皆为结构网格。翼型表面及翼缝附近流动情况复杂,为精确描述流场变化以提高计算精度,对两者周围网格进行加密,翼型表面第一层网格节点高度对应的无量纲数 y^+ 值接近 1。不同翼缝翼型周围网格划分如图 4 所示。其中内导流式翼缝与

外导流式翼缝为水平对称结构,故只展示外导流式翼缝网格模型。

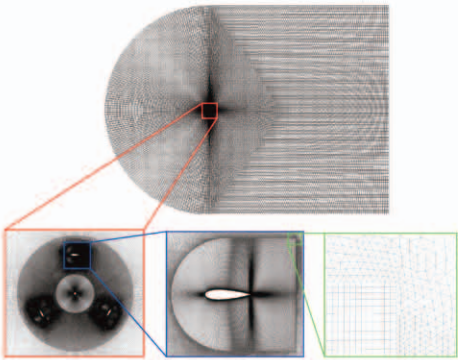


图3 原始 SB-VAWT 网格划分

Fig.3 Mesh distribution of Clean SB-VAWT

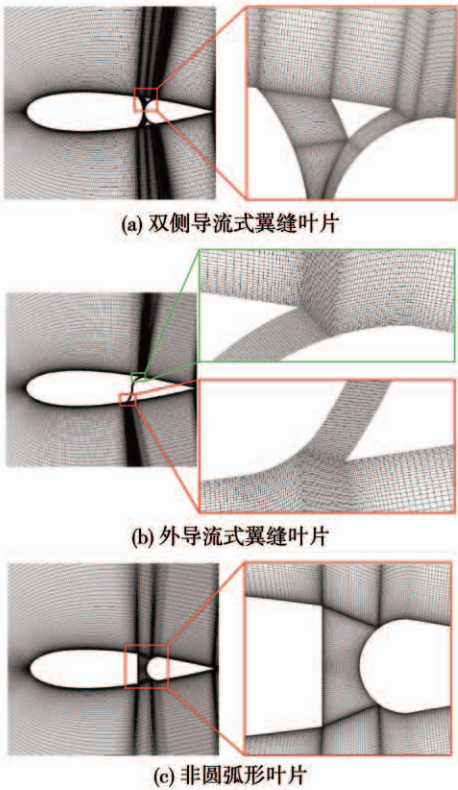


图4 翼缝网格划分

Fig.4 Mesh distributions of gaps

表2 为不同翼缝周围网格质量信息,壁面高度比保持在 1.06 ~ 1.08。在充分考虑模拟精度及时间成本的基础上,选取第 6 圈的结果进行分析。高尖速比下叶片的攻角范围变化较小,叶片相对不易发生深度失速,可以采用较大的时间步长提高收敛速度^[21]。当尖速比 $\lambda \leq 2.95$ 时,前 4 圈时间步长为 1° ,后 2 圈为 0.25° ,求解器为分离求解器。当 $\lambda \geq$

3.1 时间步长均采用 1° ,求解器为耦合求解器。每个时间步最大内部迭代数为 25 次。

表2 不同翼缝翼型周围网格质量

Tab.2 The mesh quality around airfoil with gap

翼型	网格数量	最大纵横比	最小正交质量	最大畸变率
原始叶片	63 688	30.40	0.844	0.361
TS-FDG	112 963	39.25	0.669	0.533
TO-FDG	99 237	35.47	0.752	0.459
TI-FDG	99 237	35.47	0.752	0.459
NCG	92 829	27.10	0.764	0.447

1.4 可靠性验证

为保证计算精度,需对网格数量进行无关性验证。翼型周围网格数是影响数值模拟精度的重要因素,故网格无关性验证主要针对翼型周围网格量。取 3 种翼型表面网格节点数,294,430 和 538,网格高度增长率和第一层网格高度均不变。保持相同的边界条件和计算方法,通过计算不同尖速比下翼型表面节点数与风能利用系数(C_p)的关系进行网格无关性验证。

$$\lambda = R\omega/V_\infty \tag{1}$$

$$C_p(\theta) = 2P/(\rho AV_\infty^3) \tag{2}$$

式中: ω —角速度,rad/s; V_∞ —来流速度,m/s; P —风力机输出功率,W; A —扫风面积,m²。

网格无关性验证结果如图 5 所示。当翼型表面网格节点数为 130 时,继续增加节点数,风能利用系数趋于稳定,由此可见该网格节点数可满足精度要求,最终采用的网格节点数为 430。

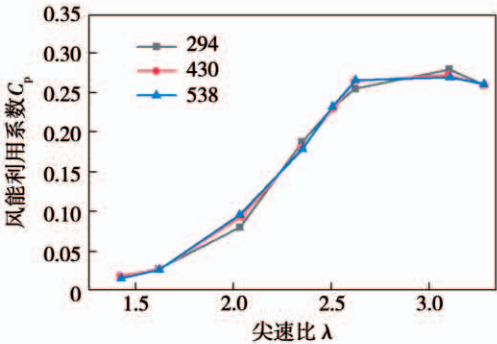


图5 风能利用系数变化曲线

Fig.5 Variation of power coefficient of SB-VAWT

SB-VAWT 叶片附近存在层流到湍流的过渡,故

相比于常用的 $SST\ k-\omega$ 湍流模型,考虑转捩特性的 $TSST\ k-\omega$ 可获得更贴近实际流动情况的计算结果^[22]。因此,将 $TSST\ k-\omega$ 模型及 $SST\ k-\omega$ 模型计算结果与实验值^[19]进行对比,以验证湍流模型的准确性,结果如图 6 所示。由图 6 可知,通过 $TSST\ k-\omega$ 湍流模型计算的 C_p 曲线与实验值趋势更加吻合,具有相对更高的模拟精度,故采用该湍流模型进行数值模拟计算。

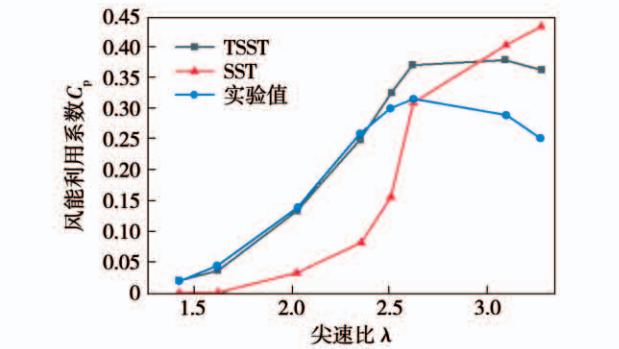


图 6 模拟值与实验值对比

Fig.6 Comparison of numerical values and experimental values

2 结果及分析

2.1 实度确定

实度 σ 是影响风力机气动性能的重要参数之一^[23],其计算式为:

$$\sigma = Nc/(2R) \tag{3}$$

在一定尖速比范围内,最佳尖速比随实度的增加而降低^[20]。但文献[19]的风力机未经过实度优化,导致其气动性能并非最优。因此,为选取最优气动性能的 SB-VAWT 进行翼缝结构设计,首先对该风力机进行实度优化分析。表 3 为不同实度的 SB-VAWT 具体参数,其分析结果如图 7 所示。

表 3 不同实度 SB-VAWT 具体参数

Tab.3 Different solidity parameters of SB-VAWT

叶片数 <i>N</i>	弦长 <i>c</i> /mm	实度 σ
3	68.64	0.2
3	85.8	0.25
3	102.96	0.3
4	85.8	0.33

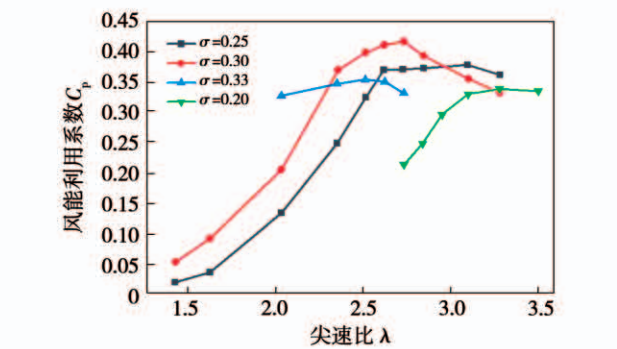


图 7 不同实度下风能利用系数的变化

Fig.7 Variation of power coefficient of SB-VAWT at different solidities

由图 7 可知,固定弦长为 85.8 mm,叶片数从 3 增至 4,风力机最大 C_p 从 0.378 降至 0.354;当固定叶片数为 3,弦长从 68.64 mm 增至 102.96 mm,最大 C_p 从 0.338 增至 0.414,最佳尖速比从 3.1 降至 2.73 时,最佳尖速比降低使叶片在更低的转速下获得最佳风能利用系数,提高风力机运行稳定性。由此可见,弦长为 102.96 mm,叶片数量为 3 的 SB-VAWT 具有更高的风能利用系数和运行稳定性。因此,将实度为 0.3 的风力机作为原始风力机,并在此基础上添加不同结构翼缝,比较翼缝对其气动性能和流场结构的影响。

2.2 气动特性

图 8 为 4 种不同结构翼缝 SB-VAWT 风能利用系数随尖速比的变化曲线。

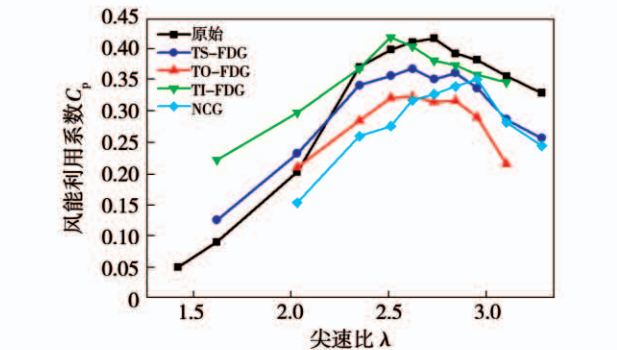


图 8 不同结构翼缝 SB-VAWTs 风能利用系数变化

Fig.8 Variation of power coefficient of SB-VAWT withgap

由图 8 可知,TS-FDG 在 $\lambda > 2.35$ 时风能利用系数比原始风力机高,在 $\lambda \leq 2.35$ 时低于原始风力

机。NCG 因翼缝间距过大造成气动性能较差,在 $\lambda > 2.0$ 时风能利用系数均低于原始风力机,且最佳风能利用系数较原始风力机降低了 15.5%。TO-FDG 叶片的气动性能较其他叶片最差,在尖速比为 2.62 时,最大风能利用系数仅为 0.322。

对于 TI-FDG,当 $\lambda \leq 2.51$ 时该翼缝模型具有更高的风能利用系数。在 $\lambda = 2.51$ 时,TI-FDG 最大风能利用系数可达 0.417,而原始风力机在 $\lambda = 2.73$ 时对应的最大风能利用系数 0.414。与原始风力机相比,TI-FDG 的气动性能较好且最佳叶尖速比降低,使风力机在相同的风速下降低转速,从而减小叶片的离心力以提高风力机的稳定性和安全性。因此,TI-FDG 较其他翼缝有更好的气动性能。

图 9 为原始风力机和不同翼缝风力机在各自最佳尖速比下单叶片切向力随方位角的变化。

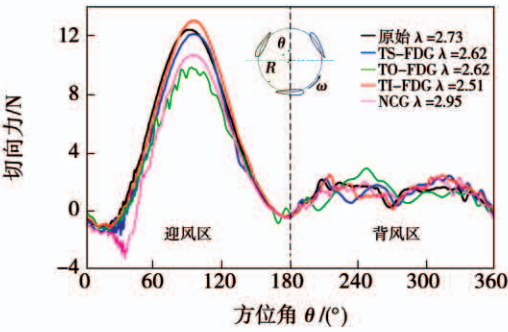


图 9 最佳尖速比下翼缝叶片切向力变化
Fig.9 Variation of tangential force of single blade with gap at the optimal tip speed ratio

由图 9 可知,原始风力机叶片在方位角为 92.58°时,最大切向力为 12.45 N。TI-FDG 在方位角为 96.48°时达到最大切向力为 13.02 N,较之原始风力机最大切向力提高 4.57%。NCG 和 TS-FDG 叶片切向力在方位角 30°~180°范围内低于原始风力机。TO-FDG 叶片切向力最低,最大切向力仅为 9.8 N,并且切向力波动较为明显,气动性能最差。

2.3 流场特性

为进一步分析翼缝对整体流场结构的影响,图 10 为各翼缝结构风力机在其最佳尖速比下与原始风力机涡结构对比,其中涡结构通过 Q 准则^[24]显示。

由图 10 可知,所有翼缝模型均改变了流场结构。TI-FDG 具有相对最好的控制效果,既改善了整

体涡结构,又提高了气动性能。与之相反,其余 3 种翼缝模型均在不同程度上加剧了流场结构的复杂性。虽然 TO-FDG 在下游区的尾迹涡结构得到明显改善(图 10(c)长方形区域),表现出了一定的流动控制效果,但该翼缝模型在上游区的涡尺度显著大于其他模型,导致总体性能较差。

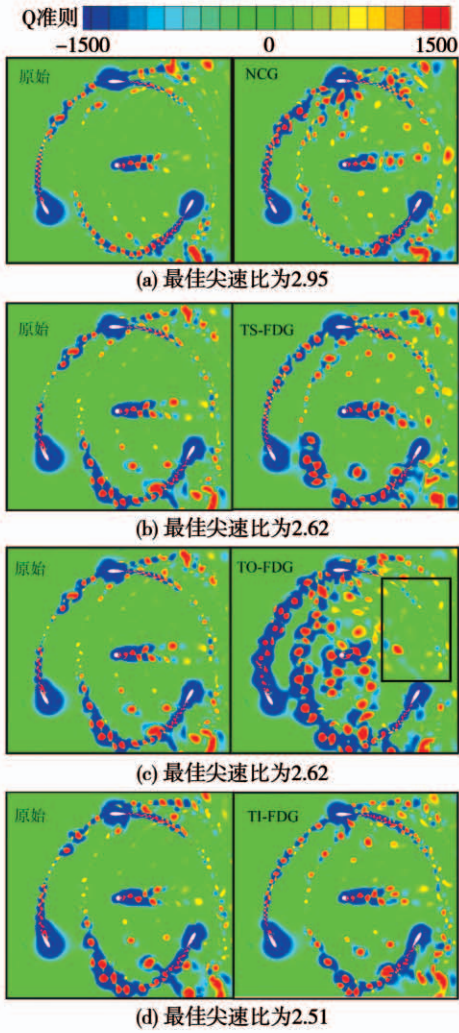


图 10 不同结构翼缝 SB-VAWT 流场结构
Fig.10 Vorticity field of SB-VAWT with gap

为深入分析 TI-FDG 叶片流动控制机理,取该模型和原始模型在 $\lambda = 2.51$ 时不同方位角下的速度云图和流线图,如图 11 所示。由于方位角 60°~120°是提供转矩的主要范围,故取 30°、90°和 120°3 种方位角进行分析。

由图 11(a)可知,原始翼型尾缘附近出现尺度较大的涡,而 TI-FDG 翼缝阻碍了大尺度涡的产生。由图 11(b)可知,原始翼型尾缘附近存在流向

的高速流体,这种高速流体通过流体粘性将尾缘附近流体拖至翼型表面,引起流体旋转,加剧了流场结构复杂性。然而,当存在翼缝结构时,该高速流体区域的范围被缩小。由图 11(c) 可知,原始翼型继续将高速流体发展至前缘,而翼缝进一步缩小翼型表面高速流体区域,改善了流场结构及动态失速现象。

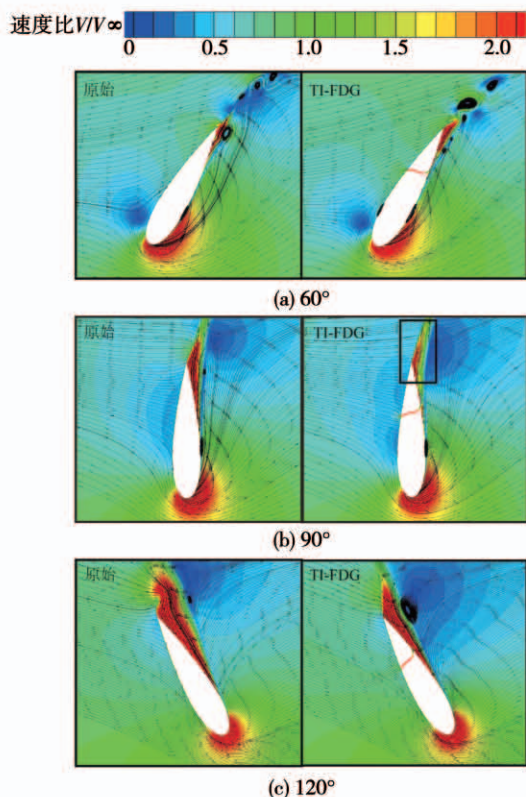


图 11 具有 TI-FDG 的 SB-VAWT 速度云图和流线图

Fig. 11 The velocity of SB-VAWT with TI-FDG at optimal tip speed ratio

3 结 论

(1) TI-FDG 较其他翼缝有更好的气动性能,在尖速比为 2.51 时,达到最大风能利用系数 0.417,其气动性能优于原始风力机,且最佳尖速比降低,提高了风力机的运行稳定性和安全性。

(2) TS-FDG 在低尖速比时气动性能高于原始风力机。NCG 和 TO-FDG 在 $\lambda > 2.0$ 时风能利用系数均低于原始风力机,气动性能相对较差,因此不适合应用于 SB-VAWT。

(3) TI-FDG 可改善流场结构及动态失速现象,具有一定工程实用价值。

参考文献:

- [1] TUMMALA A, VELAMATI R K, SINHA D K, et al. A review on small scale wind turbines[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56: 1351 – 1371.
- [2] ZHU H, HAO W, LI C, et al. Simulation on flow control strategy of synthetic jet in an vertical axis wind turbine[J]. Aerospace Science and Technology 2018, 77: 439 – 448.
- [3] TJIU W, MARNOTO T, MAT S, et al. Darrieus vertical axis wind turbine for power generation II: challenges in HAWT and the opportunity of multi-megawatt Darrieus VAWT development[J]. Renew Energy 2015, 75: 560 – 571.
- [4] LI Q S, SHU Z R, CHEN F B. Performance assessment of tall building-integrated wind turbines for power generation[J]. Applied Energy 2016, 165: 777 – 788.
- [5] 李 春, 叶 舟, 高 伟, 等. 现代大型风力机设计原理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2013.
LI Chun, YE Zhou, GAO Wei, et al. Modern large-scale wind turbine design principle[M] Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2013.
- [6] 袁全勇, 李 春, 杨 阳. 垂直轴风力机流场主动控制方法研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(1): 219 – 225.
YUAN Quan-yong, LI Chun, YANG Yang. Research on active flow control method for vertical axis wind turbine[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(1): 219 – 225.
- [7] 朱海天, 李 春, 郝文星, 等. 襟翼翼缝结构改进设计控制流动分离的数值研究[J]. 热能动力工程, 2018, 33(9): 120 – 125.
ZHU Hai-tian, LI Chun, HAO Wen-xing, et al. Numerical investigation on flap gap configuration modification to control flow separation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(9): 120 – 125.
- [8] WANG S, INGHAM D B, MA L, et al. Numerical investigation on dynamic stall of low Reynolds number flow around oscillating airfoils[J]. Computers and Fluids, 2010, 39(9): 1529 – 1541.
- [9] HAND B, KELLY G, CASHMAN A. Numerical simulation of a vertical axis wind turbine airfoil experiencing dynamic stall at high Reynolds numbers[J]. Computers and Fluids, 2017, 149: 12 – 30.
- [10] HAITIAN Z, WENXING H, CHUN L, et al. A critical study on passive flow control techniques for straight-blades vertical axis wind turbine[J]. Energy, 2018, 165: 12 – 25.
- [11] BARLAS T K, KUIK G A M V. Review of state of the art in smart rotor control research for wind turbines[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2010, 46(1): 1 – 27.
- [12] JOSE A, BAEDER J. Steady and Unsteady Aerodynamic Modeling of Trailing Edge Flaps with Overhang and Gap Using CFD and

- Lower Order Models[C]//Aiaa Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, 2009.
- [13] LIGGETT N, SMITH M J. The physics of modeling unsteady flaps with gaps[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, 38(3): 255–272.
- [14] 祖红亚, 李 春, 李润杰, 等. 襟翼相对长度对翼型气动性能的影响[J]. *动力工程学报*, 2015, 35(8): 666–673.
ZU Hong-ya, LI Chun, LI Run-jie, et al. Effect of relative flap length on aerodynamic performance of the airfoil[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2015, 35(8): 666–673.
- [15] 祖红亚, 李 春, 陆云凤, 等. 襟翼翼缝相对宽度对翼型气动性能影响研究[J]. *能源工程*, 2015, 3(3): 12–19.
ZU Hong-ya, LI Chun, LU Yun-feng, et al. Study on effect of relative width of flap slot on airfoil aerodynamic performance[J]. *Energy Engineering*, 2015, 3(3): 12–19.
- [16] SHEHATA A S, XIAO Q, SELIM M M, et al. Enhancement of performance of wave turbine during stall using passive flow control: first and second law analysis[J]. *Renewable Energy*, 2017, 113: 369–392.
- [17] 贾亚雷, 韩中合, 安 鹏, 等. 尾缘襟翼缝隙大小对风力机翼型气动性能的影响[J]. *空气动力学学报*, 2018, 36(1): 41–46.
JIA Ya-lei, HAN Zhong-he, AN Peng, et al. Influent of gap size of trailing-edge-flap on aerodynamic performance of wind turbine airfoil[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2018, 36(1): 41–46.
- [18] BELAMADI R, DJEMILI A, ILINCA A, et al. Aerodynamic performance analysis of slotted airfoils for application to wind turbine blades[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, 151: 79–99.
- [19] CASTELLI M R, ARDIZZON G, BATTISTI L, et al. Modeling strategy and numerical validation for a Darrieus vertical axis micro-wind turbine[C]//Proceedings of the ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and exposition, Vancouver, 2010.
- [20] REZAEIHA A, MONTAZERI, H, BLOCKEN, B. Towards optimal aerodynamic design of vertical axis wind turbines: Impact of solidity and number of blades[J]. *Energy*, 2018, 165: 1129–1148.
- [21] 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.
- [22] ARAB A, JAVADI M, ANBARSOOZ M, et al. A numerical study on the aerodynamic performance and the self-starting characteristic of a Darrieus wind turbine considering its moment of inertia[J]. *Renewable Energy*, 2017, 107: 298–311.
- [23] 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.
- [24] DUBIEF Y, DELCAYRE F. On coherent-vortex identification in turbulence[J]. *Journal of Turbulence*, 2000, 1(11): 1–22.

(王治红 编辑)