

DOI:10.11918/202012042

# 尾缘射流式垂直轴风力机气动特性数值分析

李东旭<sup>1</sup>, 李春<sup>1,2</sup>

(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(上海理工大学),上海 200093)

**摘要:**为抑制翼型表面流动分离并提高风力机叶片气动性能,将可靠性较高的吹气射流技术应用于垂直轴风力机叶片尾缘。采用数值模拟方法分析不同尾缘射流角度对垂直轴风力机风能利用系数、力矩系数及单叶压力与整机涡量的影响。模拟结果表明:在最佳尖速比(2.63)时,10°射流可以有效降低翼型尾缘脱落涡频率,有效控制叶片尾迹效应,整机效率及运行稳定性均优于0°尾缘射流式垂直轴风力机;在较低尖速比时,风力机单叶力矩峰值均集中在120°相位角,尾缘10°射流对整机力矩系数有显著提升效果;在较高尖速比时,单叶翼型压力面存在较大正压区,风能利用系数最大可提高11%左右,气动性能明显优于无射流垂直轴风力机。尾缘射流降低了风力机叶片所需承受的轴向载荷,提高了风力机输出功率。不同角度尾缘射流均能有效降低叶片表面流动损失进而延缓流动分离,数值结果为尾缘射流式垂直轴风力机的工程应用提供了部分参考价值。

**关键词:**垂直轴风力机;翼型;尾缘射流;气动性能;尖速比

中图分类号:TK83

文献标志码:A

文章编号:0367-6234(2022)01-0058-07

## Numerical analysis of aerodynamic characteristic for vertical axis wind turbine of trailing edge jet

LI Dongxu<sup>1</sup>, LI Chun<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering (University of Shanghai for Science and Technology), Shanghai 200093, China)

**Abstract:** To restrain the flow separation phenomenon on the airfoil surface and improve the aerodynamic performance of wind turbine blade, the blowing jet technology with high reliability is applied to the blade trailing edge of vertical axis wind turbines (VAWTs). The influence of different jet angles on the wind power coefficient, torque coefficient, single blade pressure and whole vorticity of the wind turbine was analyzed by numerical simulation. The results show that, when the optimum tip-speed ratio is 2.63, 10° jet can reduce the shedding vortex frequency effectively and control the wake effect of blade with a better efficiency and operation stability than 0° jet. When the tip-speed ratio is lower, the peak torque of single blade is concentrated on the 120° phase angle, and 10° jet has a noticeable effect on improving the torque coefficient of the whole machine. When the tip-speed ratio is higher, there is a large positive pressure area on the pressure surface of the single blade airfoil, the wind energy utilization coefficient increases by 11% at most, and the aerodynamic performance is superior to that of the non-jet VAWT. The wind turbine reduces the axial load that the blade needs to bear and improves the output power of the wind turbine through trailing edge jet on the whole. The trailing edge jet of different angles reduces the flow loss on the blade surface and delays the flow separation effectively, which is particularly important to enhance the market competitiveness of VAWTs.

**Keywords:** vertical axis wind turbine; airfoil; trailing edge jet; aerodynamic performance; tip speed ratio

世界能源结构变化使得水能、风能、太阳能、地热能和生物质能等可再生能源成为各国关注重点,其中风能是最具前景的新能源之一<sup>[1-3]</sup>。进入21

世纪,风电技术高速发展极大提高了风能使用率,由此迎来风能开发的新一轮热潮<sup>[4-6]</sup>。风力发电作为燃烧化石燃料的替代方式,不仅在运行过程中不产生任何温室气体,且几乎不占用耕地资源<sup>[7]</sup>。

风力机是将风能转换为电能的一种动力装置,其中垂直轴风力机(VAWTs, Vertical Axis Wind Turbines)旋转轴垂直于地面并具有以下优点:1)传动机构位于地面,易于运行及维修<sup>[8]</sup>;2)叶片重力

收稿日期:2020-12-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51976131,51676131)

作者简介:李东旭(1994—),男,硕士研究生;

李春(1963—),男,教授,博士生导师

通信作者:李春,lichun\_usst@163.com

载荷力矩恒定, 不易发生疲劳损伤<sup>[9]</sup>; 3) 适用于任何风向, 无需偏航装置<sup>[10]</sup>。尽管 VAWTs 存在诸多优点, 但因其自身固有特性导致叶片有效攻角不可避免地随运行方位角发生大幅变化, 致使翼型极易处于失速状态并发生流动分离现象。

流动控制是指针对叶片绕流气体进行人为控制, 最终使叶片达到所需技术要求<sup>[11]</sup>。射流技术因具有结构简单及控制方法多样性等优势, 逐渐被应用到风力机叶片的流动控制领域。Ciuryla 等<sup>[12]</sup>通过风洞实验研究机翼射流对流动分离的控制效果, 结果表明内侧副翼射流可将分离点向尾缘推迟并减小分离区域。Liu 等<sup>[13]</sup>和 Rimasauskiene 等<sup>[14]</sup>研究了不同种类及参数的激励器对射流频率影响, 得出所需不同频率下射流激励器相应的最佳输入功率。Bazdidi-Tehrani 等<sup>[15]</sup>通过数值模拟方法研究进口边界条件和射流速度的关系, 结果表明, 选用运动活塞和滑动膜片两种进口作动方式对射流速度峰值有显著提高作用。Montazer 等<sup>[16]</sup>基于 NACA0015 翼型, 在改进零质量射流装置结构后, 得出对射流孔合理优化可使翼型最大升阻比提高约 66% 的结论。Mcdonald 等<sup>[17]</sup>通过数值模拟发现, 合成射流不仅可使圆柱表面阻力系数减小, 而且能降低远场尾迹区湍流强度。Yen 等<sup>[18]</sup>通过实验研究, 分析了共流射流对水平轴风力机气动性能影响, 实验发现, 在低尖速比时采用间断性共流射流可有效提高风力机安全稳定性并减小叶尖损失。

射流技术已广泛应用于流动控制领域, 但针对垂直轴风力机的相关研究并不多, 且大多数研究仅基于静态翼型对升阻力进行分析。本文将尾缘射流技术应用至旋转状态下的垂直轴风力机中, 通过数值模拟方法比较不同射流角度对垂直轴风力机气动性能的影响, 并对流场控制效果等进行分析。

## 1 气动性能数值计算

### 1.1 VAWTs 主要气动参数

图 1 为垂直轴风力机翼型在不同方位角时的受力及速度三角形, 翼型攻角表示如下:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta} \right) \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为风力机相位角;  $\lambda$  为叶尖速比, 为风轮叶片尖端速度与来流风速之比, 表示为

$$\lambda = \frac{R\omega}{V_\infty} \quad (2)$$

式中:  $R$  为风力机旋转半径,  $\omega$  为旋转角速度,  $V_\infty$  为来流风速。

力矩系数  $C_m$  与风能利用率  $C_p$  也都是 VAWT 重

要的气动参数, 分别为

$$\begin{cases} C_m = 2T / (\rho AR V_\infty^2) \\ C_p = 2P / (\rho AR V_\infty^3) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $A$  为风力机扫风面积;  $P$  为输出功率;  $T$  为转矩;  $\rho$  为空气密度。

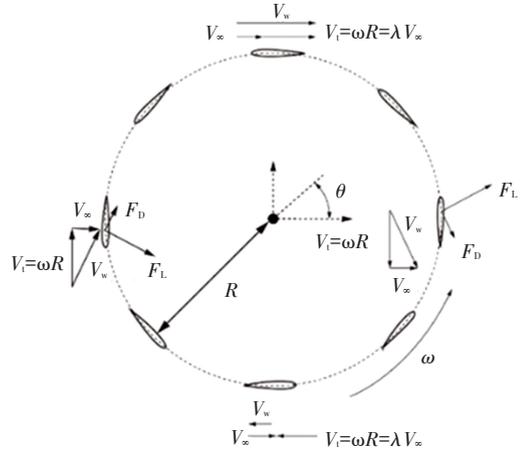


图 1 翼型受力及速度三角形

Fig.1 Airfoil force and velocity triangle

### 1.2 垂直轴风力机模型

H 型风力机是垂直轴风力机中的典型代表, 由于气动性能和结构优势等综合因素, 已成为达里厄升力型风力机的研究热点<sup>[19]</sup>。本文采用 H 型风力机作为研究对象, 其几何模型及参数如图 2 所示。为与实验结果<sup>[20]</sup>进行对比, 依据表 1 选取主要参数。

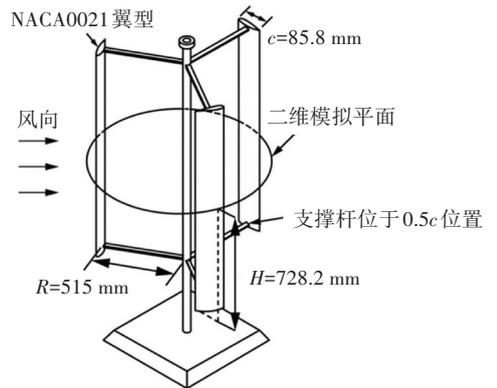


图 2 垂直轴风力机几何模型

Fig.2 Geometric model of VAWT

表 1 垂直轴风力机主要参数

Tab.1 Main parameters of VAWT

叶片数	弦长/m	叶高/m	功率/kW	风轮半径/m	转轴半径/m
3	0.085 8	0.728	222	0.515	0.010 0

### 1.3 尾缘射流方法及模型

吹气射流是一种射流强度可观、实用性较强且应用广泛的射流方法<sup>[21]</sup>。本文采用定常吹气实现风力机尾缘射流, 结构装置如图 3 所示。气体从叶

尖吸入透平式压缩机,由叶轮压缩后流入储气室再经管道从尾缘射流孔处射出。当风力机发生流动分离时,通过叶片表面压力传感器将信号传入压缩机的控制系统,进而结合管道特性调节压缩机功率,实现以 40 m/s 匀速吹气射流。由于所需气流具有连续稳定、流速较高且流量较小等特点,故选用透平式压缩机。装置中储气室不仅可以降低压缩空气中的水分,平稳管道压力,还可以存储一定量的临时气体以便在突发故障时做应急使用。

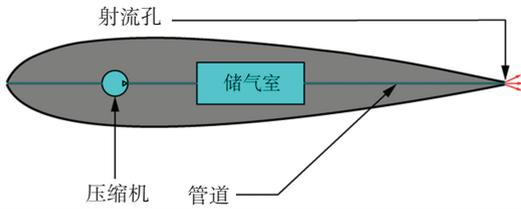


图 3 吹气射流装置

Fig.3 Device of blowing jet

图 4 为尾缘射流孔的局部放大图,射流孔中心距翼型尾缘水平距离为  $D(0.003c)$ ,射流孔径宽为  $L(0.002c)$ ,射流速度为  $v(40\text{ m/s})$ 。射流角度  $\varphi$  定义为翼型弦线与过尾缘中点且垂直于尾缘的直线夹角,由于尾缘边界几何参数的限制, $\varphi$  取  $-20^\circ$  到  $20^\circ$  之间,且定义射流吹向风轮内侧为负值,相反为正值。

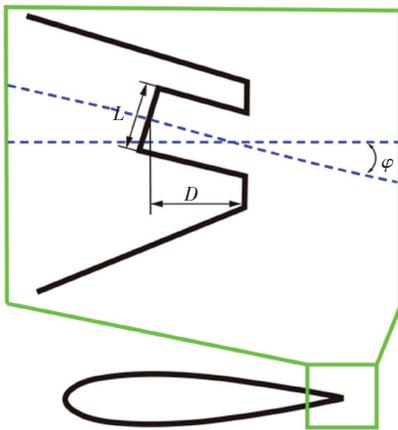


图 4 尾缘射流孔位置及参数

Fig.4 Position and parameters of trailing edge jet slot

### 1.4 计算域网格及计算方法

计算域拓扑结构如图 5 所示,流场计算域被划分为内流域、旋转域及外流域。其中,外流域由半径为  $10R$  的半圆形区域和长为  $20R$  的长方形区域组成,内流域和旋转域半径分别为  $0.58R$  与  $1.36R$ 。各计算域及翼型附近网格划分如图 6 所示。

将进口 AC 边界设置为速度入口,来流风速为 9 m/s;出口 BD 边界设置为压力出口,相对压力为 0 Pa;外流域 AB、CD 两边界设置为 wall;其余边界

条件为 interface。Transition-SST 湍流模型在工程需求中应用广泛,且可较为准确地反应宏观流动现象,故选择 Transition-SST 作为湍流计算方法。使用压力基求解器耦合求解动量方程与连续性方程,为节省计算资源,提高计算稳定性,采用 SIMPLE 算法,二阶迎风离散格式,收敛误差为  $10^{-6}$ 。

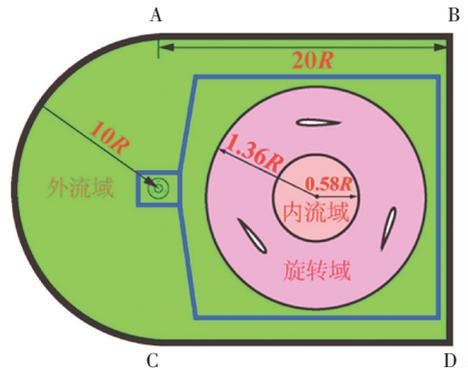


图 5 计算域拓扑结构

Fig.5 Topological structure of computational domain

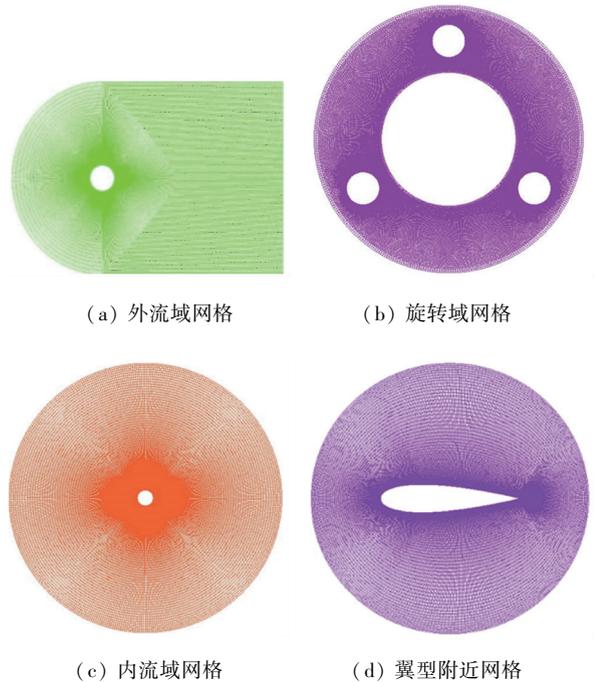


图 6 计算域网格划分

Fig.6 Mesh division of computational domain

### 1.5 湍流模型与网格无关性验证

如图 7 所示为不同湍流模型的实验对比验证。由图 7 可知,无论是在高尖速比还是低尖速比时,采用 Transition-SST 湍流模型均能较为准确地计算出所对应的风能利用系数 ( $C_p$ ),其中在  $\lambda = 3.1$  时,实验数据<sup>[20]</sup>与模拟值误差最小,为 0.49%,其他尖速比时误差最大不超过 5%。因此,本文针对尾缘射流式 VAWTs 采取的 Transition-SST 湍流模型合理且可信。

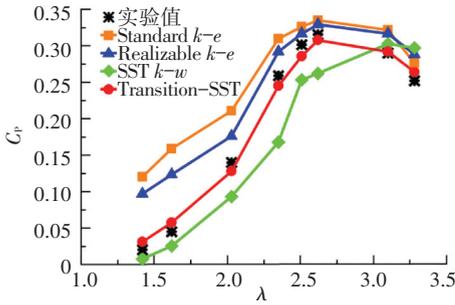


图 7 湍流模型验证

Fig.7 Verification of turbulence model

表 2 网格分布参数

Tab.2 Parameter of grid distribution

网格编号	总网格数	旋转域网格数	翼型附近网格数	风能利用系数	相对偏差/%
G1	180 811	116 450	425	0.284 3	-10.06
G2	321 648	199 516	880	0.292 1	-7.59
G3	400 799	271 554	1 150	0.312 7	-1.08
G4	604 327	488 625	1 750	0.315 4	-0.22
G5	1 850 616	1 019 681	3 460	0.316 1	0

## 2 计算结果与分析

图 8 为不同射流角度下风能利用系数曲线。由图 8 可知,无射流与有尾缘射流式垂直轴风力机  $C_p$  曲线变化趋势基本相同,且最佳尖速比均在 2.63 左右。在较小尖速比时(1.68 以下), $-20^\circ$ 射流角度对  $C_p$  的提升效果优于 $-10^\circ$ ;而随尖速比逐渐增加,射流角度为 $-10^\circ$ 的风力机  $C_p$  接近并超过 $-20^\circ$ 。因此,增加尾缘负射流角度对  $C_p$  的影响并不具有线性关系。除  $\lambda = 1.68, 3.30$  外, $10^\circ$ 射流风机的  $C_p$  优于 $20^\circ$ 射流风力机的  $C_p$ ,其他尖速比时, $10^\circ$ 和 $20^\circ$ 射流  $C_p$  基本接近,故增加尾缘正射流角度对  $C_p$  几乎没有影响。整体上,在尾缘射流角度为 $0^\circ$ 时的  $C_p$  明显低于其他射流角度的  $C_p$ ;随尖速比增加,不同射流角度在提升  $C_p$  能力方面都表现出积极效果,当达到最佳尖速比附近时, $0^\circ$ 射流对  $C_p$  提升效果可达 5%左右,其他射流角度提升作用更加明显可到 11%左右。在较高尖速比时(大于 2.63),虽然射流式垂直轴风力机  $C_p$  逐渐降低,但仍高于无射流情况。这说明尾缘射流通过对翼型吸力面边界层提供更多动能,增强叶片表面流体再附着能力,有效抑制流动分离,进而提升风力机气动性能。

图 9 为无射流与尾缘射流式垂直轴风力机整机力矩系数 ( $C_m$ ) 的变化曲线,所有曲线均呈现出周期性变化。由图 9(a)可知,在  $\lambda = 1.68$  时,无射流风力机的  $C_m$  峰值小于除  $0^\circ$ 射流外所有尾缘射流,且随射流角度的增加,  $C_m$  提升效果更为显著; $\lambda = 2.63$  时所有射流方式都对  $C_m$  有提升效果且在整个

表 2 给出了 5 种不同密度的计算域网格。由于本文主要针对翼型附近网格进行验证,且需要良好的网格过渡性,所以在翼型网格密度增大的同时旋转域网格数量也随之增多。选取并验证  $\lambda = 2.63$  时翼型周围网格数,由表 2 可知,当网格为  $G_3, G_4$  和  $G_5$  时,  $C_p$  的计算偏差很小,并且  $G_5$  总网格数量是  $G_4$  的 3 倍,而计算得到的  $C_p$  却十分接近,因此综合考虑计算精度与计算资源,选用  $G_4$  网格用于本文的模拟计算。

周期内均优于无射流情况,此时  $C_p$  基本可以提升 10% 左右,但射流角度为  $0^\circ$  时,平均力矩系数与其他角度相比提升较小,因此  $C_p$  在最佳尖速比附近提升效果仅为 5% 左右;图 9(c) 是  $\lambda = 3.3$  时不同射流角度的  $C_m$  曲线,在整个运行周期内, $0^\circ$  射流角度出现  $C_m$  最小值,  $-20^\circ$  射流出现最大值,但此时不同射流角度的风力机  $C_m$  变化范围基本一致。整体上在  $\lambda = 1.68$  时,  $C_m$  波动幅度较大,  $\lambda = 2.63, 3.30$  时,不同射流角度  $C_m$  波动幅度较小,但周期性表现上略有差异。在较低尖速比时,尾缘射流角度从  $-20^\circ$  增加至  $20^\circ$ ,除  $0^\circ$  射流外  $C_m$  均逐渐提高,其中  $10^\circ$  射流对  $C_m$  提升效果最好。在较高尖速比时,尾缘射流在射流角度从  $-20^\circ$  至  $20^\circ$ ,  $C_m$  基本没有变化,此过程  $C_m$  对射流角度的敏感程度较低,即尾缘射流对力矩系数影响较小。

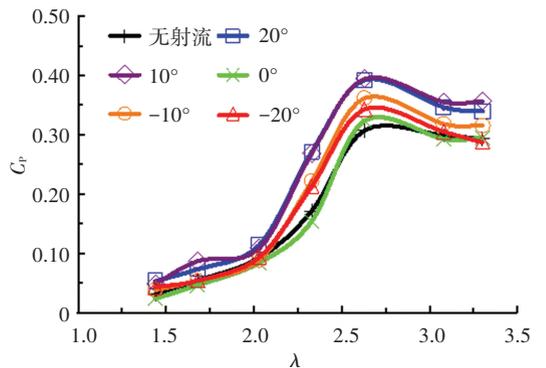


图 8 不同射流角度下的风能利用系数

Fig.8 Wind power coefficient with different angles of trailing edge jet

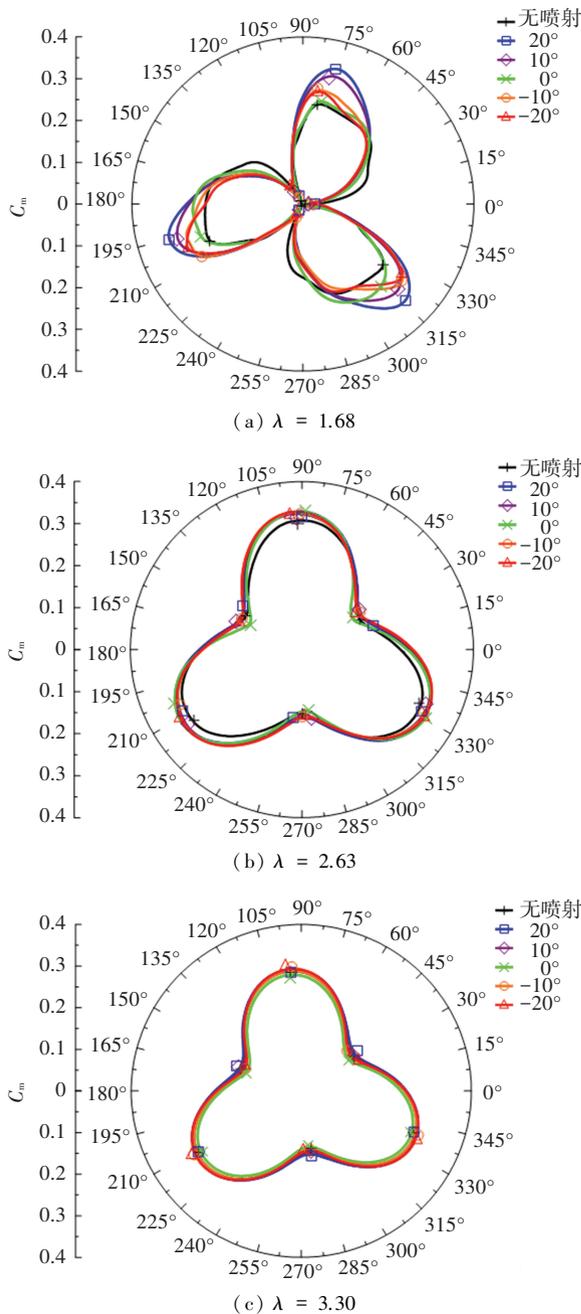


图 9 不同射流角度下的整机力矩系数

Fig.9 Whole torque coefficient with different angles of trailing edge jet

图 10 所示为垂直轴风力机运行稳定后不同尖速比时单叶力矩系数 ( $C'_m$ ) 的瞬时变化情况。由图 10 可知,在前半周期方位角由  $0^\circ$  至  $180^\circ$  的变化过程中,随尖速比增加,不同射流角度的风力机  $C'_m$  逐渐趋于一致,均先增大至峰值后逐渐降低到最小值。 $\lambda = 1.68$  时,方位角  $120^\circ$  之前尾缘射流均有效提高  $C'_m$ ,且在  $10^\circ$  射流角时最优。后半周期随着叶片运行方位角由  $180^\circ$  至  $360^\circ$  的过程中, $C'_m$  波动剧烈情况复杂。 $\lambda = 2.63, 3.30$  时,在后半周期,不同射流角度下  $C'_m$  曲线变化趋势与前半周期一致,但周期加倍且  $C'_m$  随尖速比增大有逐渐弱化的趋势。整体

上随尖速比增加,前半周期最大单叶力矩系数所对应的方位角从  $60^\circ$  推迟至  $120^\circ$  左右,后半周期风力机运行稳定, $C'_m$  在不同射流角度下曲线均趋于平缓,无较大范围波动。

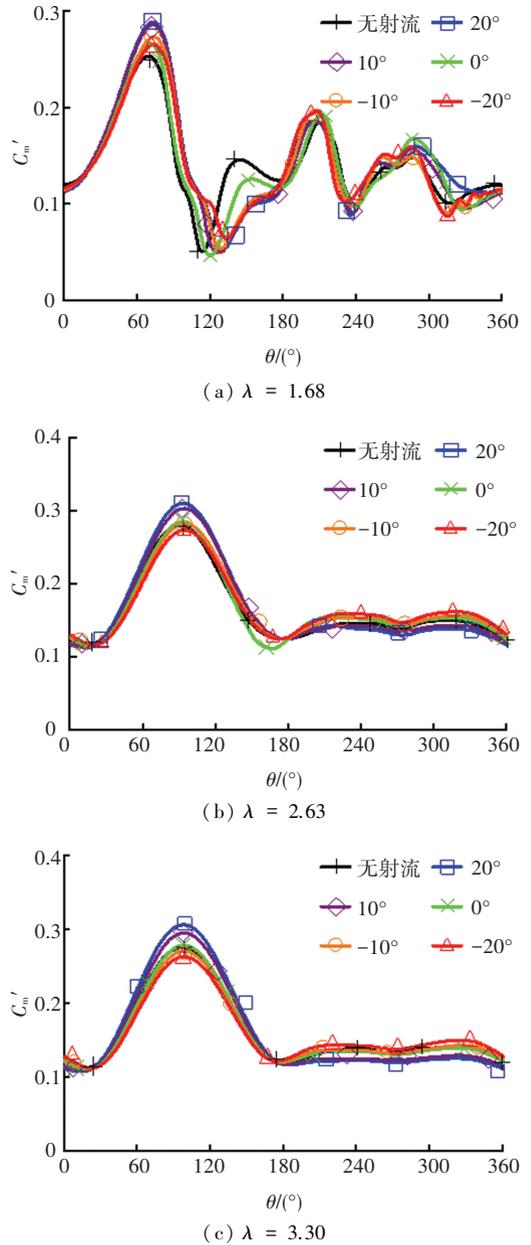


图 10 不同射流角度下的单叶力矩系数

Fig.10 Single blade torque coefficient with different angles of trailing edge jet

图 11 是  $\lambda = 2.63$  时,气动性能较优的  $10^\circ$  与  $-10^\circ$  尾缘射流式垂直轴风力机在不同方位角下的单叶压力云图。由于尾缘射流的存在,风力机翼型尾缘存在部分正压区,此时  $10^\circ$  射流式风力机压力面负压区比  $-10^\circ$  小,故与  $-10^\circ$  相比, $10^\circ$  射流式风力机具有更高的转矩,这与相应的图 10(b) 结果一致。随方位角增加, $10^\circ$  射流式风力机单叶翼型吸力面负压区比  $-10^\circ$  大,这也说明在前半周期任何方位角  $C'_m$  均高于  $-10^\circ$ 。但随方位角继续增加,到后半周期,

-10°射流翼型吸力面具有更大的负压范围,而 10°翼型压力面靠近尾缘处具有明显负压区,这在一定程度上会降低整个翼型转矩。因此,-10°射流相较于 10°会对叶片力矩有更大的提升作用,且此时风力机表现出更好的气动性能,这也是后半周期-10°尾缘射流式风力机  $C'_m$  偏大的原因。综上可知,风力机通过吹气射流对翼型进行流动控制不仅会增加边界层的能量和厚度,同时还会使叶片吸力面压力减少,压力面压力略微增大,单叶力矩系数从而得到提升,风力机气动性能得以改善。

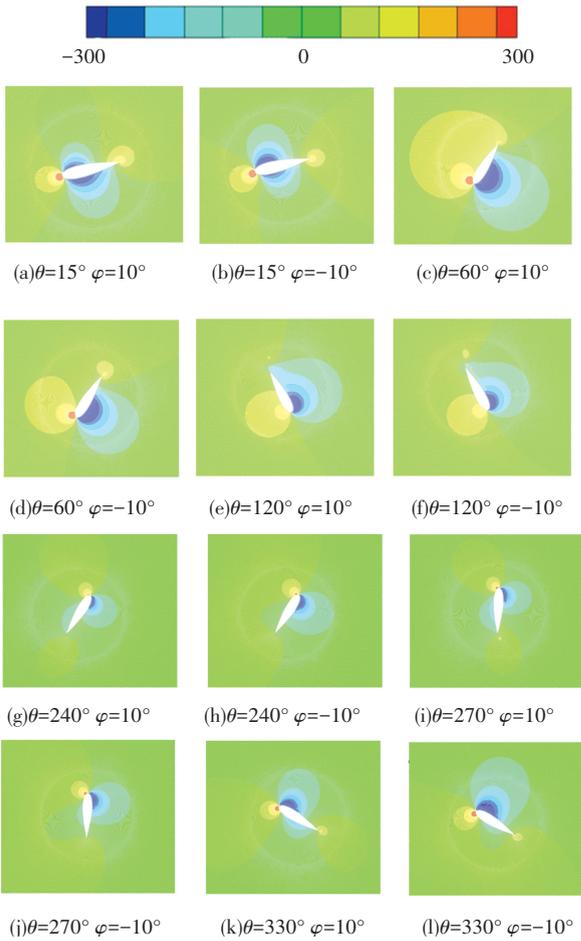


图 11 不同方位角时单叶压力云图

Fig.11 Single blade pressure contour of different azimuth angles

图 12 给出了  $\lambda = 2.63$  时,0°与 10°尾缘射流式垂直轴风力机叶片旋转一周内不同方位角的绕流场流动细节,并与无射流风力机进行对比分析。由图 12 可见,无射流风力机整机流场存在较大尺度的脱落涡,并且在多个相位角处都发生了旋涡从翼型吸力面直接产生并脱落的现象。由于垂直轴风力机动态尾迹效应,旋转过程中某一叶片会受到来自其他叶片尾流脱落涡或其他周期未耗散的尾涡干涉,这将导致流场中流动的非线性增强,气动载荷分布不均匀及转矩输出不稳定,进而使风力机气动性能、结构应力等受到严重影响。由图 12 还可观察到,0°与

10°射流对风力机整机气动性能均有改善效果,但流场结构及旋涡运动也存在明显差异。10°射流可有效减弱翼型尾流脱落涡强度,缩小涡结构,削弱同一周期内尾流对下游翼型的干涉影响,并使上一周期翼型拖曳尾涡耗散更迅速,故整机涡斑区也明显减小,作用效果优于 0°射流。通常叶片大范围流动分离会造成升阻比降低并致使风力机整体气动性能下降,此外还会导致非稳定的涡脱落,造成叶片卸载更为复杂。合理角度的尾缘射流不仅会延缓流动分离,还会对动态尾迹效应产生良好的控制作用,使脱落涡与叶片撞击频率和强度减小,进而提高风力机的整机效率及运行稳定性。

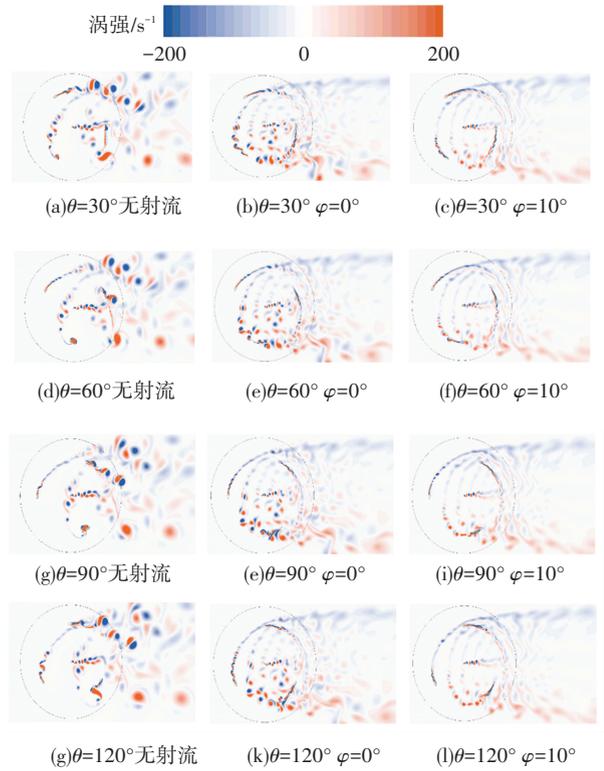


图 12 不同方位角时整机涡量云图

Fig.12 Whole vorticity contour of different azimuth angles

### 5 结 论

本文将 NACA0021 作为原始翼型,以原始翼型为基础在尾缘处添加射流装置构成尾缘射流式垂直轴风力机。通过数值模拟方法计算相关气动参数,并分析不同射流角度对风力机叶片附近流场影响,数值模拟结论如下:

1) 无射流与尾缘射流式垂直轴风力机风能利用系数变化趋势基本相同,最佳尖速比均在 2.63 左右。在较大尖速比时所有角度射流对风能利用系数均有提高作用,其中 10°射流式垂直轴风力机可提高约 11%,而 0°射流最低也提升 5%左右。

2) 在低尖速比时,10°射流角度对垂直轴风力

机整机力矩系数的提升效果较为明显,0°射流对力矩系数大小几乎没有影响;在较高尖速比时,整机力矩系数大小对射流角度敏感程度较低,射流角度仅在力矩系数周期性上略有影响;在最佳尖速比时,10°射流可有效减小涡核尺度与涡间距,对风力机尾迹控制效果优于0°射流。

3) 随尖速比逐渐增加,前半周期单叶力矩系数趋势逐渐趋于一致,均是先增至峰值后逐渐降低至最小值;后半周期在任何射流角度下单叶力矩曲线均比较平缓,无较大范围波动。当风力机处于最佳尖速比时,在前半周期10°射流式垂直轴风力机气动性能优于-10°的,而后半周期恰好相反。

## 参考文献

- [1] FTHENAKIS V, KIM H C. Land use and electricity generation: a life-cycle analysis[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(6/7): 1465. DOI: 10.1016/j.rser.2008.09.017
- [2] RYBERG D S, TULEMAT Z, STOLTEN D, et al. Uniformly constrained land eligibility for onshore European wind power[J]. *Renewable Energy*, 2020, 146: 921. DOI: 10.1016/j.renene.2019.06.127
- [3] 朱海天,郝文星,李春,等.建筑增强型垂直轴风力机气动特性数值研究[J].*哈尔滨工业大学学报*,2019,51(1):87  
ZHU Haitian, HAO Wenxing, LI Chun, et al. Numerical investigation on aerodynamic characteristic of building augmented vertical axis wind turbine[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(1): 87. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234
- [4] GOUDARZI N, ZHU W D. A review on the development of wind turbine generators across the world[J]. *International Journal of Dynamics and Control*, 2013, 1: 192. DOI: 10.1007/s40435-013-0016-y
- [5] KUNZ T H, ARNETT E B, ERICKSON W P, et al. Ecological impacts of wind energy development on bats: questions, research needs, and hypotheses[J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2007, 5(6): 315. DOI: 10.1890/1540-9295(2007)5[315:EIO-WED]2.0.CO
- [6] SAHIN A D. Progress and recent trends in wind energy[J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2004, 30(5): 501. DOI: 10.1016/j.peccs.2004.04.001
- [7] BLACK V. 20% wind energy penetration in the United States: a technical analysis of the energy resource[R]. Walnut Creek: Black & Veatch, 2007.
- [8] MANFRIDA G, TALLURI L. Smart pro-active pitch adjustment for VAWT blades: potential for performance improvement[J]. *Renewable Energy*, 2020, 152: 867. DOI: 10.1016/j.renene.2020.01.021
- [9] ARMSTRONG S, FIEDLER A, TULLIS S. Flow separation on a high Reynolds number, high solidity vertical axis wind turbine with straight and canted blades and canted blades with fences[J]. *Renewable Energy*, 2012, 41: 13. DOI: 10.1016/j.renene.2011.09.002
- [10] BEDON G, CASTELLI M R, BENINI E. Proposal for an innovative chord distribution in the Troposkien vertical axis wind turbine concept[J]. *Energy*, 2014, 66: 689. DOI: 10.1016/j.energy.2014.01.004
- [11] GLEZER A, AMITAY M. Synthetic jets[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2002, 34: 503. DOI: 10.1146/annurev.fluid.34.090501.094913
- [12] CIURYLA M, LIU Yong, FARNSWORTH J, et al. Flight control using synthetic jets on a Cessna 182 model[J]. *Journal of Aircraft*, 2007, 44(2): 642. DOI: 10.2514/1.24961
- [13] LIU Y S, TSAI Shuyao, WANG Chichuan. Effect of driven frequency on flow and heat transfer of an impinging synthetic air jet[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 75: 289. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.09.086
- [14] RIMASAUSKIENE R, MATEJKA M, OSTACHOWICZ W, et al. Experimental research of the synthetic jet generator designs based on actuation of diaphragm with piezoelectric actuator[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 50: 607. DOI: 10.1016/j.ymsp.2014.05.030
- [15] BAZDIDI-TEHRANI F, HATAMI M, ABOUATA A. Effects of inlet and outlet boundary conditions on the flow field of synthetic jets[J]. *Journal of Process Mechanical Engineering*, 2017, 231(2): 107. DOI: 10.1177/0954408915577338
- [16] MONTAZER E, MIRZAEI M, SALAMI E, et al. Optimization of a synthetic jet actuator for flow control around an airfoil[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 152: 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/152/1/012023
- [17] MCDONALD P, PERSOONS T. Numerical characterisation of active drag and lift control for a circular cylinder in cross-flow[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(11): 1166. DOI: 10.3390/app7111166
- [18] YEN J, AHMED N A. Enhancing vertical axis wind turbine by dynamic stall control using synthetic jets[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 114: 12. DOI: 10.1016/j.jweia.2012.12.015
- [19] BALDUZZI F, BIANCHINI A, MALECI R, et al. Blade design criteria to compensate the flow curvature effects in H-Darrieus wind turbines[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2015, 137(1): 011006. DOI: 10.1115/1.4028245
- [20] 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 & Exposition. Vancouver: American Society of Mechanical Engineers, 2010: 409. DOI: 10.1115/IMECE2010-39548
- [21] SASSON B, GREENBLATT D. Effect of leading-edge slot blowing on a vertical axis wind turbine[J]. *AIAA Journal*, 2011, 49: 1932. DOI: 10.2514/1.J050851

(编辑 杨波)