

基于正交试验微圆柱垂直轴风力机气动性能研究

吴洪¹, 叶舟^{1,2}, 余豪¹

(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运行效率,在翼型附近布置随相位角变化而主动运动的微圆柱。以 NACA 0021 为基础翼型,采用正交试验方法对微圆柱的直径、移动距离及微圆柱中心距弦长距离 3 种参数进行优化组合。通过 CFD 数值模拟分析主动式微圆柱对垂直轴风力机的流动控制机理。结果表明:微圆柱移动距离是影响垂直轴风力机气动性能的主要因素,弦长 c 为基准,当微圆柱直径为 $0.03c$ 、移动距离为 $0.2c$ 及微圆柱中心距弦长为 $0.2c$ 时效果最佳;主动微圆柱在中低尖速比下作用效果更明显,能显著抑制流动分离现象,同时升高叶片转矩,进而提高垂直轴风力机气动性能。

关键词:垂直轴风力机;微圆柱;流动控制;气动性能

中图分类号:TK83

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.mdlgc.2024.12.018

[引用本文格式]吴洪,叶舟,余豪.基于正交试验微圆柱垂直轴风力机气动性能研究[J].热能动力工程,2024,39(12):159-167. WU Hong, YE Zhou, YU Hao. Study on aerodynamic performance of vertical axis wind turbine with micro-cylinder based on orthogonal test[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(12):159-167.

Study on Aerodynamic Performance of Vertical Axis Wind Turbine with Micro-cylinder based on Orthogonal Test

WU Hong¹, YE Zhou^{1,2}, YU Hao¹

(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: In order to improve the operating efficiency of vertical axis wind turbines (VAWT), micro-cylinders that move actively with the change of phase angle were arranged near the airfoil. NACA 0021 was used as the base airfoil, the orthogonal test method was used to optimize the combination of three parameters including the diameter, the moving distance and the distance from center to chord length of the active micro-cylinder. The flow control mechanism of the active micro-cylinder on the vertical axis wind turbine was analyzed by CFD numerical simulation. The results show that the moving distance of the micro-cylinder is the main factor affecting the aerodynamic performance of VAWT, taking the chord length c as the baseline, the better combination is $0.03c$ for the diameter of the micro-cylinder, $0.2c$ for the moving distance, and $0.2c$ for the distance from center to chord length of the micro-cylinder; the active micro-cylinder is more effective at the middle and low tip speed ratios, and it can inhibit the flow separation phenomenon significantly, and at the same time, it can increase the blade torque, which will further improve the aerodynamic performance of VAWT.

收稿日期:2023-09-22; 修订日期:2023-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51976131, 51676131); 上海“科技创新行动计划”地方院校能力建设资助项目(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:吴洪(1997-),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.

Key words: vertical axis wind turbine (VAWT), micro-cylinder, flow control, aerodynamic performance

引 言

不可再生能源储量匮乏及其使用导致的环境污染问题使可再生能源成为研究人员关注的热门课题,如风能、潮汐能与太阳能等,其中风力机是较有前途的发电设备之一^[1]。按风轮转轴与地面位置关系,风力机分为水平轴风力机(Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT)和垂直轴风力机(Vertical Axis Wind Turbine, VAWT)。HAWT 更早用于商业,位置上多在远离城区、风力较强、地势平坦的陆地或海上。而 VAWT 更适用于城市地区^[2]。VAWT 可以在地面附近安装,在低来流风速范围内运行,且不依赖于风向,与 HAWT 相比造价更便宜。VAWT 的特性使其在城市地区应用具有极大吸引力^[3-4]。VAWT 也有一定的缺点,例如在低尖速比下性能较低且难以提供足够扭矩进行自启动^[5-6]。为提高 VAWT 性能及效率并加快其商业化,需要进一步改进设计参数。许多研究者试图改变叶片结构以增加功率及改善风力机自启动性能。Castelli 等人^[7]研究表明,由于覆盖了更大方位角范围,螺旋叶片风力机比直叶片风力机拥有更高的自启动扭矩,但整体净功率显著下降。Tjiu 等人^[8]研究发现,螺旋叶片风力机在高尖速比下功率较低,导致整体性能下降,在尖速比为 5 时,其功率仅为直叶片风力机的 15%。Shukla 等人^[9]研究在不同对称翼型上应用格尼襟翼、凹槽及其组合,结果表明,当在 NACA 0021 翼型上应用格尼襟翼和凹槽的组合风力机的性能更好。Zhang 等人^[10]在翼型后缘加弹性板,该板延迟了失速,并降低了尾流脱落的涡的影响。

在流动控制研究中,一种流动控制方法是在风力机叶片周围增加微圆柱以提高其气动性能。Shi 等人^[11]在 10°~24°攻角下,对 S809 翼型附近添加一个振荡微圆柱并进行数值研究,发现与静态微圆柱和原翼型相比,振荡微圆柱能更好地提升总气动性能。Mostafa 等人^[12]采用响应面法对 S809 翼型周边微圆柱位置及直径进行优化研究,发现攻角在 0°~12°时升阻比增大,且在攻角为 6.65°时升阻比达到最大值,结果表明,在翼型前缘设置微圆柱效果

较好。Bakhumbsh 等人^[13]基于 NACA 0018 翼型,分析微圆柱位置和直径对风力机气动性能影响,得出微圆柱直径与弦长之比为 0.029 时平均功率系数较原始功率系数提高 9.5%,且微圆柱位于叶片前缘压力侧性能更佳。Luo 等人^[14]利用雷诺平均 N-S 方程(RANS)与延迟分离涡模拟(DDES)对 NACA 0012 翼型前缘附近是否添加微圆柱进行气动性能研究,发现两种方法得到的气动性能结果一致,微圆柱的加入延迟了失速,且使分离区域减小。

综上,在翼型附近布置微圆柱可有效改善 VAWT 的气动性能,但在对微圆柱的位置和主动控制方面仍需进一步研究。VAWT 在运行过程中,叶片攻角不断变化,使得微圆柱在不同相位角下的最佳位置不同,且上述微圆柱位置大多位于翼型前缘。为此本文在翼型尾缘布置微圆柱,并采用主动控制方案,使微圆柱在不同相位角作直线运动。为探究主动微圆柱直径、移动距离和微圆柱中心距弦长距离对 VAWT 风能利用率影响程度,通过正交试验法得出最佳参数,以进一步改善 VAWT 气动特性。

1 计算模型及方法

1.1 几何模型及气动参数

为了与文献[15]中的实验值进行对比,本文以 NACA 0021 为基础翼型,其 VAWT 具体几何参数如表 1 所示。

表 1 垂直轴风力机几何参数
Tab.1 Geometric parameters of VAWT

参 数	数 值
风轮直径 D/mm	1 030
叶片高度 H/mm	1 456.4
叶片数 N	3
弦长 c/mm	85.8
实度	0.25

图 1 为带微圆柱 VAWT 模型示意图,微圆柱位于翼型尾缘。其中, θ 为风力机叶片方位角, ω 为风力机旋转角速度, O 为旋转中心, V_∞ 为水平来流风速。 l 为微圆柱最大水平移动距离, h 为微圆柱中心距翼型弦线垂直距离, d 为微圆柱直径;微圆柱中心

距翼型后缘顶点的最小水平距离为 $0.1c$ 。微圆柱向右(朝尾缘顶点方向)移动为正,反之为负。

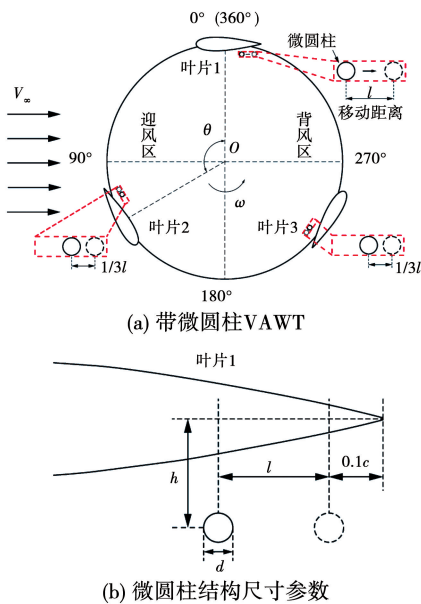


图 1 带微圆柱 VAWT 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of VAWT model with micro-cylinder

力矩系数 C_M 和风能利用系数 C_P 是衡量 VAWT 主要性能的参数^[16],表达式如下:

$$C_M = 2M/(\rho ARV_\infty^2) \tag{1}$$

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

式中: M —叶片平均转矩, $N \cdot m$; P —风力机功率, W ; ρ —空气密度, kg/m^3 ; A —风力机扫风面积, m^2 ; R —风力机旋转半径, m ; V_∞ —来流风速, m/s 。

叶尖速比 λ 是叶片叶尖线速度与来流风速的比值,其定义^[17]为:

$$\lambda = R\omega/V_\infty \tag{3}$$

式中: ω —风力机旋转角速度, rad/s 。

1.2 计算方法与网格划分

VAWT 计算域拓扑结构及边界条件如图 2 所示。将计算域分为 3 个子域, S_1 为外流域,长 $80R$,宽 $40R$; S_2 为加密区,长 $10R$,宽 $4R$; S_3 为旋转域,直径 $17.4c$ 。 S_1 与 S_3 交界面设为 Interface 用于传递信息。计算域边界 AB 设为速度进口,距旋转轴 $20R$,来流速度 V_∞ 为 9 m/s ;边界 CD 设为压力出口,距旋转轴 $60R$;对称壁面 BC 与 AD ,距旋转轴 $20R$ 。流体介质为空气,动力粘度为 $1.855 \times 10^{-5}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$,密度为 1.184 kg/m^3 。

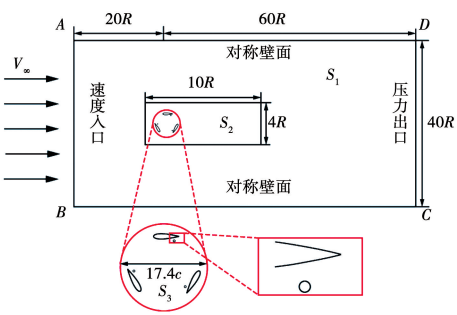


图 2 带微圆柱 VAWT 计算域与边界条件

Fig. 2 Computational domain and boundary condition for VAWT with micro-cylinder

基于有限元体积法,求解雷诺时均非定常不可压缩 $N-S$ 方程。压力速度耦合采用 SIMPLEC 算法,控制方程使用二阶迎风格式,时间离散为二阶隐式格式。由于来流风速较低,故将来流视为不可压缩流体。经文献[18]研究得出,对于研究垂直轴风力机气动性能的问题使用 SST $k-\omega$ 湍流模型所得结果与实验值 C_P 吻合度更好,因此选择此湍流模型进行数值模拟。

为了较为精准捕捉翼型表面边界层流动状况,需对翼型表面近壁面网格进行加密处理,并将网格首层高度设置为 $1 \times 10^{-5}\text{ m}$,以保证近壁面处无量纲 $y^+ \approx 1$ 。外流域和旋转域交界面网格尺寸保持一致,以保证计算结果收敛及数据传递的准确性。使用重叠网格技术实现微圆柱的直线运动,带微圆柱 VAWT 计算域网格划分如图 3 所示。

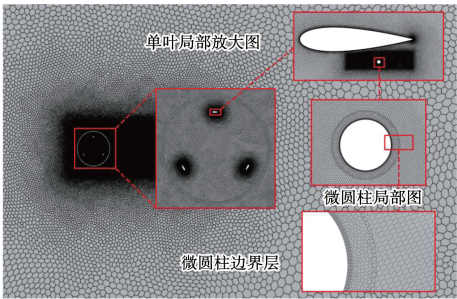


图 3 带微圆柱 VAWT 计算域网格划分

Fig. 3 Computational domain meshing of VAWT with micro-cylinder

1.3 微圆柱主动控制策略研究

为确定微圆柱控制策略,取叶尖速比 $\lambda = 2.50$,将原始与添加微圆柱后的 VAWT 单叶片转矩曲线进行对比,结果如图 4 所示。其中,将微圆柱中心距

翼型后缘顶点的最小水平距离定义为 $S_{\min}$,取值为 $0.1c$; 最大水平距离定义为 $S_{\max}$,取值为 $0.3c$ 。为了方便后续理解,将这两种状态下的 VAWT 分别命名为 $S_{\min}$ -MicroCylinder VAWT(简称 $S_{\min}$ -MC VAWT), $S_{\max}$ -MicroCylinder VAWT(简称 $S_{\max}$ -MC VAWT)。

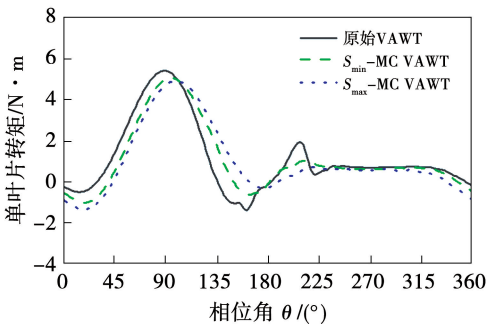


图 4 原始和微圆柱翼型单叶片转矩变化曲线

Fig. 4 Torque variation curve of a single blade with original and micro-cylinder airfoils

由图 4 可知,在相位角 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 与 $180^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 范围内, $S_{\min}$ -MC VAWT 单叶片转矩高于 $S_{\max}$ -MC VAWT。在相位角 $90^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 范围内, $S_{\max}$ -MC VAWT 单叶片转矩高于 $S_{\min}$ -MC VAWT。为此提出主动控制策略,在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 与 $180^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 范围内,微圆柱从 $S_{\max}$ 沿直线运动到 $S_{\min}$ 位置,在 $90^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 与 $270^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 范围内,微圆柱从 $S_{\min}$ 沿直线运动到 $S_{\max}$ 位置,以此完成一个周期运动。

图 5 为微圆柱运动速度随 VAWT 相位角变化的关系,即微圆柱主动控制策略,其中正值表示微圆柱向右(朝后缘顶点方向)移动,负值表示向左移动。

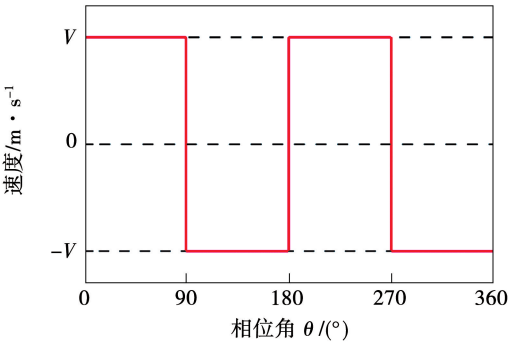


图 5 微圆柱主动控制策略

Fig. 5 Active control strategy for micro-cylinder

为了在仿真软件里对微圆柱的运动进行自定义将微圆柱的直线运动定义为:

$$\begin{cases} V = l/(T/4) \\ T = 2\pi/\omega \end{cases} \tag{4}$$

式中: T —叶片旋转一周所需时间,s; l —微圆柱移动距离,m。

1.4 网格无关性

为排除网格细密程度对模拟准确性影响,在尖速比为 2.63 时,对 14 万、22 万和 28 万网格时的 VAWT 进行无关性验证,不同网格数量下 VAWT 叶片总转矩随相位角变化关系如图 6 所示。由图 6 可知,网格数量 14 万与 22 万的转矩曲线差异较大,而网格数量 22 万与 28 万的转矩波动曲线接近重合。为了更直观地表达,将 3 种网格数量下 VAWT 风能利用系数进行对比,如表 3 所示。

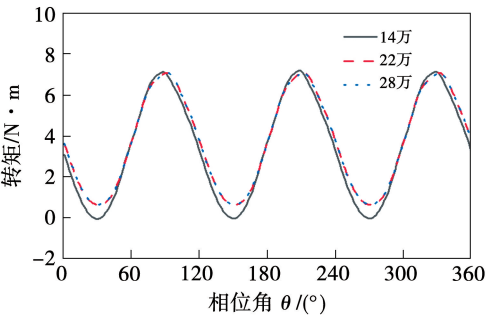


图 6 网格无关性验证

Fig. 6 Grid independence verification

表 3 网格数量及风能利用系数

Tab. 3 Number of grids and wind energy utilization coefficient

网格类型	网格数量/万	风能利用系数
1	14.6	0.359 1
2	22.6	0.387 6
3	28.2	0.389 4

由表 3 可知,网格数量从 14 万增至 22 万时,风能利用系数变化为 7.94%,而 22 万和 28 万网格之间风能利用系数变化仅为 0.46%。故选择 22 万网格作为基础进行后续计算,可保证精度、节省计算时间。

1.5 模拟可靠性验证

根据已验证网格,在不同尖速比下,对计算模型和文献[15]中的风能利用系数原始实验值进行比较,结果如图 7 所示。由图 7 可知,在 $\lambda < 2.33$ 时,实验值与计算值风能利用系数曲线贴合程度较好;当 $\lambda > 2.33$ 时,由于二维计算模拟忽略转轴、支撑臂及叶尖涡损等影响^[21],导致模拟值略高于实验数

据。但两者走势曲线一致,且最佳尖速比相同。综上所述可见,非定常条件下该数值模拟具有可靠性。

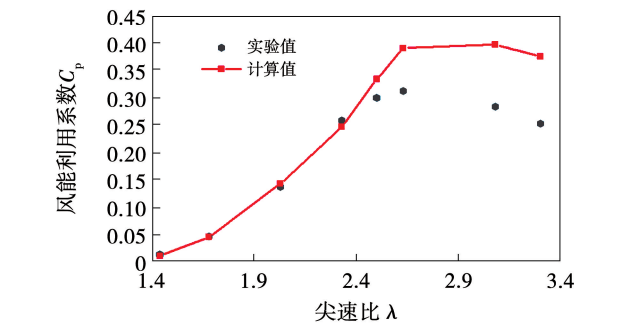


图 7 模拟值与实验数据对比

Fig. 7 Comparison of simulated and experimental data

2 微圆柱正交试验设计

主动式微圆柱 VAWT 结构参数主要包括微圆柱直径 d 、微圆柱最大水平移动距离 l 、微圆柱中心距翼型弦线垂直距离 h 等。鉴于影响因素众多且难以准确计算其数值影响,因此借助正交试验法来进行研究。正交试验法通过进行样本试验代替全面试验,并以极差分析来评估各因素对参考指标的作用效果,以此得出最佳的因素组合方案^[19]。现分别将 d 、 l 和 h 作为正交试验设计参数,具体取值如下:

- (1) 据文献[13]研究表明,较小的微圆柱直径对风力机的功率系数提升更大,故微圆柱直径 d 取 $0.02c$ 、 $0.025c$ 和 $0.03c$ 。
- (2) 由于叶片涡量主要形成于叶片尾部,因此为了扰乱涡量形成,让微圆柱在尾部运动, l 取 $0.4c$ 、 $0.3c$ 和 $0.2c$ 。
- (3) 刘青松等人^[20]对弹片式 VAWT 进行了研究,发现弹片效果较好,研究弹片长度为 $0.15c$ 时,微圆柱中心距翼型弦线垂直距离 h 取 $0.15c$ 、 $0.175c$ 和 $0.2c$ 。

综上,正交试验设计因素水平如表 2 所示。

表 2 正交试验设计因素及水平

水平	因素		
	d	l	h
1	$0.02c$	$0.4c$	$0.15c$
2	$0.025c$	$0.3c$	$0.175c$
3	$0.03c$	$0.2c$	$0.2c$

3 结果与分析

3.1 正交试验极差分析

为进行正交试验分析,在尖速比为 2.33 时,对 3 个变量和 3 个水平设计 $L_9(3^4)$ 正交表。 C_p 为考察指标, ΔC_p 为各因素水平下微圆柱 VAWT 较原始 VAWT 的 C_p 增加百分比,试验结果如表 4 所示。

表 4 正交试验结果

Tab.4 Orthogonal test result

序号	因素			C_p	ΔC_p
	d	l	h		
1	$0.02c$	$0.4c$	$0.15c$	0.372 7	0.509 7
2	$0.02c$	$0.3c$	$0.2c$	0.382 1	0.547 8
3	$0.02c$	$0.2c$	$0.175c$	0.382 2	0.548 3
4	$0.025c$	$0.4c$	$0.2c$	0.376 9	0.526 8
5	$0.025c$	$0.3c$	$0.175c$	0.376 1	0.523 5
6	$0.025c$	$0.2c$	$0.15c$	0.378 3	0.532 4
7	$0.03c$	$0.4c$	$0.175c$	0.370 2	0.499 6
8	$0.03c$	$0.3c$	$0.15c$	0.375 5	0.521 1
9	$0.03c$	$0.2c$	$0.2c$	0.383 9	0.555 1

由表 4 可知,在不同因素下,微圆柱对 VAWT 风能利用系数均有提升,且微圆柱 VAWT 风能利用系数最大为 0.383 9,较原始 VAWT 提高 55.51%。

为进一步分析各因素水平对考察指标的影响程度,表 5 进行了各指标极差分析。 K_1 、 K_2 、 K_3 分别为因素 d 、 l 和 h 对应的指标之和。当 $d = 0.02c$ 、 $l = 0.4c$ 、 $h = 0.15c$ 时风能利用系数之和定义为 K_1 ;当 $d = 0.025c$ 、 $l = 0.3c$ 、 $h = 0.175c$ 时风能利用系数之和定义为 K_2 ;当 $d = 0.03c$ 、 $l = 0.2c$ 、 $h = 0.2c$ 时风能利用系数之和定义为 K_3 。 $\bar{K}_1$ 、 $\bar{K}_2$ 和 $\bar{K}_3$ 表示因素 d 、 l 和 h 的算数平均值; R 为因素 d 、 l 和 h 的极差。

表 5 各指标极差分析

Tab.5 Extreme variance analysis of each index

指标	因素		
	d	l	h
K_1	1.137 0	1.119 8	1.126 5
K_2	1.131 3	1.133 7	1.128 5
K_3	1.130 2	1.145 0	1.143 5
$\bar{K}_1$	0.379 0	0.373 3	0.375 5
$\bar{K}_2$	0.377 1	0.377 9	0.376 2
$\bar{K}_3$	0.376 7	0.381 7	0.381 2
R	0.002 3	0.008 4	0.005 7

在正交试验设计中,对于参考指标的影响程度可以用极差来衡量,极差越大影响程度越大。由表 5 可得,因素 l 对参考指标影响较大,因素 h 次之,因素 d 最小。

为更直观地表达,将 d 、 l 和 h 的平均指标进行对比,即 d 、 l 和 h 的 $\bar{K}_1$ 、 $\bar{K}_2$ 和 $\bar{K}_3$,以 d 、 l 和 h 为水平横坐标,考察指标 C_p 为纵坐标,下标 1,2,3 为表 5 中 d 、 l 、 h 分别对应的 K_1 、 K_2 、 K_3 ,结果如图 8 所示。

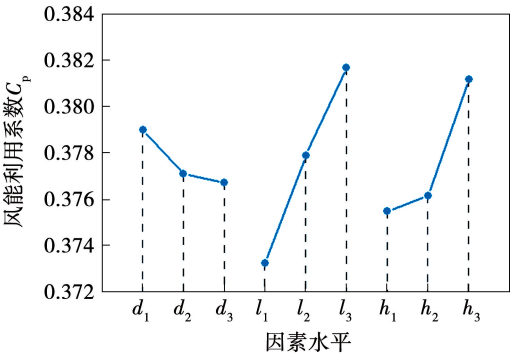


图 8 各因素水平 C_p 比较
Fig. 8 Comparison of factor levels C_p

从图 8 可得,在正交试验分析所研究参数范围内 $d_1l_3h_3$ 为最佳设计方案,而在正交试验结果表 4 中 $d_3l_3h_3$ 为最佳方案。为了将两者进行对比,对方案 $d_1l_3h_3$ 进行了试验,该方案下的 C_p 为 0.382 9,低于正交试验方案 $d_3l_3h_3$ 的 0.383 9。因此, $d_3l_3h_3$ 为最优方案。

3.2 最优方案结果分析

对最优方案下的主动控制微圆柱 VAWT 和原始 VAWT 风能利用系数进行分析。并加入 $S_{\min}$ -MC VAWT 和 $S_{\max}$ -MC VAWT 风能的利用系数进行对比分析,如图 9 所示。

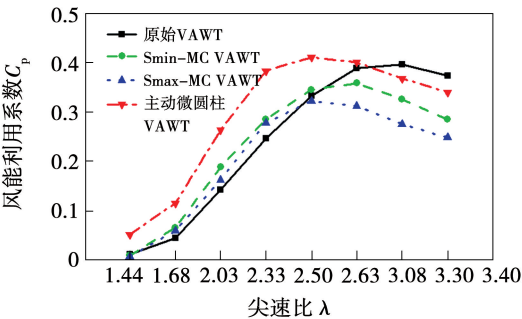


图 9 风能利用系数变化曲线
Fig. 9 Variation curve of wind energy utilization coefficient

由图 9 可知,在低尖速比范围内, $S_{\min}$ -MC VAWT、 $S_{\max}$ -MC VAWT、主动微圆柱 VAWT 的风能利用系数均有提升,且主动微圆柱 VAWT 的风能利用系数均高于 $S_{\min}$ -MC VAWT、 $S_{\max}$ -MC VAWT。对于 $S_{\min}$ -MC VAWT 和 $S_{\max}$ -MC VAWT,在尖速比小于 2.50 时,风能利用系数均高于原始 VAWT,且 $S_{\min}$ -MC VAWT 的风能利用系数始终大于 $S_{\max}$ -MC VAWT 的风能利用系数。然而 $S_{\min}$ -MC VAWT 和 $S_{\max}$ -MC VAWT 对于原始 VAWT 的风能利用系数提升效果并不显著,且在高尖速比下风能利用系数下降较快。当尖速比小于 2.33 时,主动微圆柱对 VAWT 的作用效果不断提高,当尖速比增至 2.33 时,风能利用系数为 38.39%,此时较原始 VAWT 风能利用系数最大提升 0.137 1;尖速比超过 2.33 时,叶片理论攻角减小,微圆柱提升效果开始减弱,尖速比为 2.50 时最大风能利用系数为 41.14%。随着尖速比继续增加,由于叶片攻角较小,微圆柱的存在加剧了流动分离,增加了翼型的阻力,使 VAWT 气动性能减小。

为分析微圆柱对 VAWT 的作用机理,比较不同尖速比下原始、固定距离的微圆柱和主动微圆柱的 VAWT 单叶片瞬时转矩,如图 10 所示。由图 10 可知,与原始 VAWT 相比,微圆柱有效提高 VAWT 单叶片转矩,且主动控制下效果更加显著。尖速比为 2.03 时,原始 VAWT 单叶片转矩在方位角为 120°和 240°附近出现剧烈波动,而主动微圆柱 VAWT 使转矩曲线稳定且提高了转矩值。尖速比为 2.33 时, $S_{\min}$ 与 $S_{\max}$ 的提升效果不明显,主动微圆柱 VAWT 单叶片平均转矩为 1.407 9,较原始 0.887 2 提高 58.69%。尖速比为 2.50 时,微圆柱 VAWT 与原始 VAWT 转矩差异开始减小,随着尖速比继续增加,微圆柱提升作用逐渐降低。

为进一步分析主动微圆柱的流动控制机理,在尖速比为 2.33 时对原始 VAWT 与主动微圆柱 VAWT 的瞬时涡量云图进行分析,不同相位角瞬时涡量云图如图 11 所示。由图 11 可得,相位角从 105°增至 120°,原始翼型流动分离点逐渐前移,到 120°时在前缘即发生分离,而主动微圆柱翼型使分离点延迟。当相位角位为 135°~150°时,原始翼型

产生大尺度分离涡,并逐渐发展为大范围脱落涡,流动分离现象明显。而主动微圆柱将大涡打散成多个小涡,并分布在翼型尾缘,使主动微圆柱翼型分离区内涡尺度明显减小,从而减小了原始翼型因深度失速引起的气动性能下降问题。

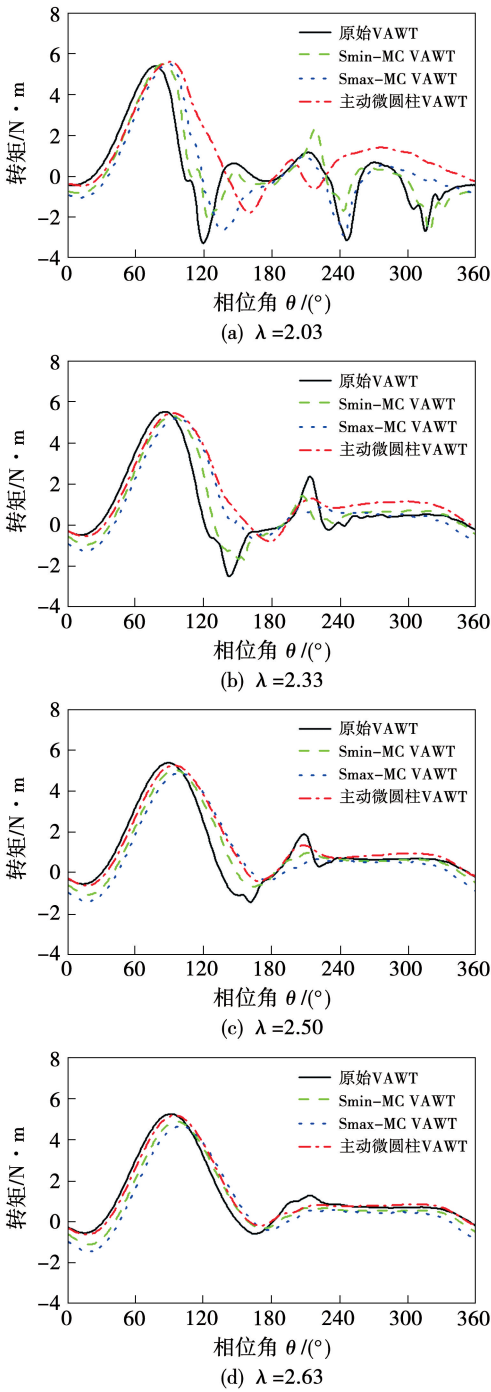


图 10 不同尖速比下单叶片瞬时转矩曲线
Fig. 10 Curves of instantaneous torque of a single blade at different tip speed ratios

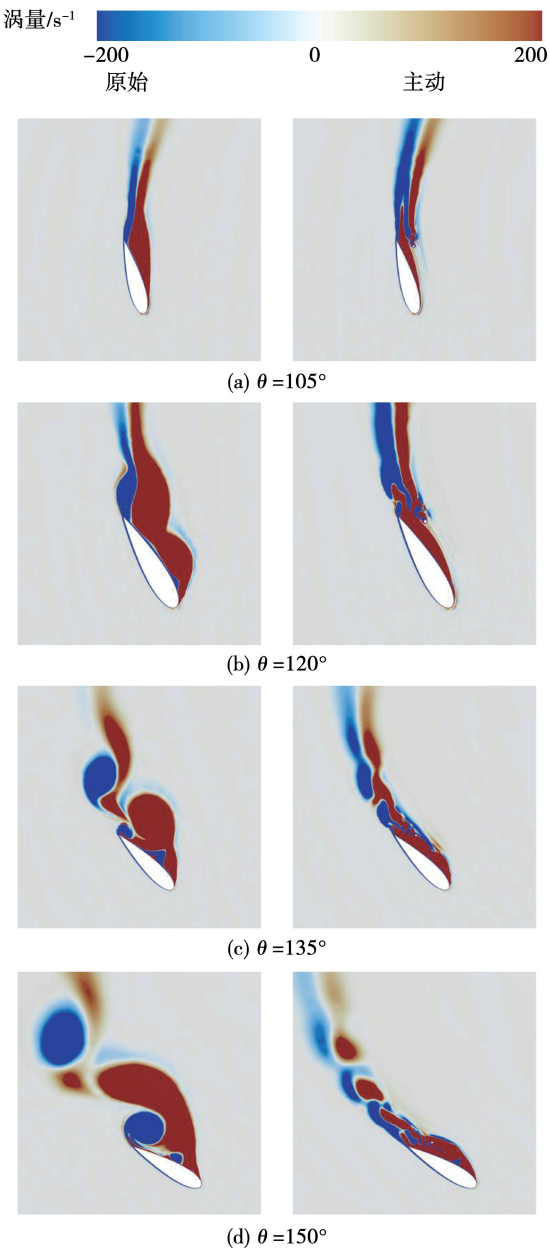


图 11 不同相位角瞬时涡量云图
Fig. 11 Instantaneous vorticity contours at different phase angles

图 12 为原始 VAWT 与主动微圆柱 VAWT 整机平均切向力随相位角变化关系。从图 12 可看出,不同尖速比下,在大部分相位角内主动微圆柱 VAWT 的切向力较原始 VAWT 均有不同程度提升。当尖速比为 2.03 时,主动微圆柱 VAWT 的切向力提升效果明显,相较于原始 VAWT,其平均切向力由 2.025 4 提高到 6.409 1,表明主动微圆柱 VAWT 所承受载荷加重,波动幅值增大;尖速比为 2.33 时,主动微圆柱 VAWT 切向力大幅增加,较原始 VAWT 从 5.230 9 提升到 8.110 1;尖速比为 2.50 时,主动微

圆柱 VAWT 切向力达到最大,提升效果开始减弱;尖速比为 2.63 时,两者平均切向力接近。

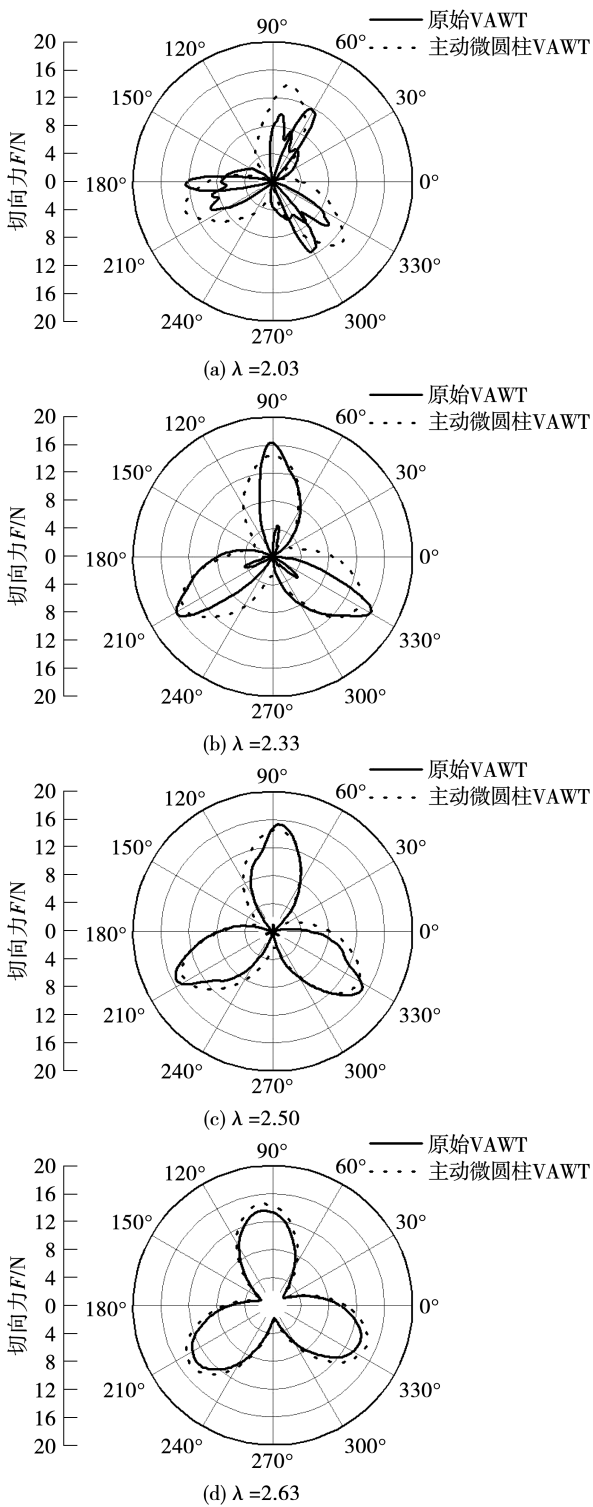


图 12 原始 VAWT 与主动微圆柱 VAWT 整机平均切向力随相位角变化曲线

Fig. 12 Variation curves of mean tangential force vs. phase angle for the whole machine of original VAWT and VAWT with active micro-cylinder

4 结 论

- (1) 微圆柱可有效提高 VAWT 风能利用系数,施加主动控制后,VAWT 气动性能得到明显增强。
- (2) 从正交设计结果来看,主动式微圆柱 3 个因素中, l 对 VAWT 考察指标 C_p 影响较大,其次为 h ,且较优组合为 $d=0.03c, l=0.2c, h=0.2c$ 。
- (3) 最优主动微圆柱可有效提高 VAWT 风能利用系数,且在低尖速比下作用效果更明显,尖速比为 1.44 时,风能利用系数较原始 VAWT 提高 3.67 倍;在尖速比为 2.50 时,达到最大风能利用系数 41.14%,较原始微圆柱 VAWT 提高 23.65%。
- (4) 最优主动微圆柱可抑制风力机转矩波动,提高转矩值;延迟分离涡的脱落点,减小涡尺度;在各尖速比下,对风力机切向力有不同程度提升。

参考文献:

[1] LEUNG D Y C, YANG Y. Wind energy development and its environmental impact: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(1): 1031 – 1039.

[2] 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.

[3] TJIU W, MARNOTOT, 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]. Renewable Energy, 2015, 75: 560 – 571.

[4] REZAEIHA A, MONTAZERI H, BLOCKEN B. Characterization of aerodynamic performance of vertical axis wind turbines; Impact of operational parameters[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 169: 45 – 77.

[5] BIANCHINI A, FERRARA G, FERRARI L. Design guidelines for H-Darrieus wind turbines; Optimization of the annual energy yield [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 690 – 707.

[6] TOTA-MACHARAJ K, RAMKISSOON R, MANOHAR K. Economical Darrieus straight bladed vertical axis wind turbine for renewable energy applications[J]. Journal of the Energy Institute, 2012, 85(3): 156 – 162.

[7] CASTELLI M R, BENINI E. Effect of blade inclination angle on a Darrieus wind turbine[J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 134(3): 031016.

[8] TJIU W, MARNOTO T, MAT S, et al. Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations[J]. Renewable Energy, 2015, 75: 50 – 67.

[9] SHUKLA V, KAVITI A K. Performance evaluation of profile modifications on straight-bladed vertical axis wind turbine by energy and Spalart Allmaras models[J]. Energy, 2017, 126: 766 – 795.

[10] ZHANG Z, QIAN J, LUO S, et al. Numerical study of the aerodynamic characteristics of a plunging rigid airfoil with elastic trailing-edge plate [C]//20th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference. 2011: 3062.

[11] SHI X, XU S, DING L, et al. Passive flow control of a stalled airfoil using an oscillating micro-cylinder[J]. Computers & Fluids, 2019, 178: 152 – 165.

[12] MOSTAFA W, ABDELSAMIE A, MOHARNED M, et al. Aerodynamic performance improvement using a micro-cylinder as a passive flow control around the S809 airfoil [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020, 973(1): 12 – 40.

[13] BAKHUMBSH S A, MOHAMED M H. Effect of micro-cylinder as a passive controller on the Darrieus wind turbine performance [J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 113 – 118.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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 Haitian, HAO Wenxing, 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.

[17] 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 Haitian, HAO Wenxing, LI Chun, et al. Effects of wind direction on aerodynamic performance of building augmented vertical axis wind turbines [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(6): 493 – 500, 512.

[18] BALDUZZI F, BIANCHINI A, MALECI R, et al. Critical issue in the CFD simulation of Darrieus wind turbines[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 419 – 435.

[19] 李志西, 杜双奎. 试验优化设计与统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

LI Zhixi, DU Shuangkui. Experimental optimization design and statistical analysis[M]. Beijing: Science Press, 2010.

[20] 刘青松, 缪维跑, 李 春, 等. 气动弹片对垂直轴风力机性能影响研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(6): 216 – 224.

LIU Qingsong, MIAO Weipao, LI Chun, et al. Investigation on the influence of aerodynamic flap on the performance of vertical axis wind turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(6): 216 – 224.

[21] 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 Peilin, LIU Qingsong, MIAO Weipao, et al. Research on effect of trailing edge jet flap on aerodynamic characteristics of vertical axis wind turbine [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2022, 43(9): 242 – 250.

(姜雪梅 编辑)