

尖速比对垂直轴风力机变桨控制影响研究

徐涛¹, 李春^{1,2}, 缪维跑^{1,2}, 张强¹

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海非碳基能源转换与利用研究院, 上海 200240)

摘要:为使垂直轴风力机变桨控制实现在大尖速比范围内的主动变桨,以NACA 0018翼型三叶片垂直轴风力机为例,利用CFD方法通过变桨系数实现在较大尖速比范围内的叶片变桨,并对比了变桨前后垂直轴风力机气动及流场特性差异。结果表明:变桨控制在各尖速比下均可有效提升叶片气动效率,最佳变桨系数随尖速比上升而增加;低尖速比下应减小叶片攻角以改善流动分离,而在高尖速比下应增大叶片攻角以提升叶片气动效率、缩短尾迹长度;变桨后整机气动效率在尖速比为1.25和4.25时分别提高83.86%和10.53%。

关键词:垂直轴风力机;变桨控制;尖速比;气动性能;计算流体动力学

中图分类号:TK83

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.11.013

[引用本文格式]徐涛,李春,缪维跑,等.尖速比对垂直轴风力机变桨控制影响研究[J].热能动力工程,2025,40(11):110-118. XU Tao, LI Chun, MIAO Weipao, et al. Research on the influence of tip speed ratio on variable pitch control of vertical axis wind turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(11): 110-118.

Research on the Influence of Tip Speed Ratio on Variable Pitch Control of Vertical Axis Wind Turbine

XU Tao¹, LI Chun^{1,2}, MIAO Weipao^{1,2}, ZHANG Qiang¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093;
2. Shanghai Institute of Non-carbon-based Energy Conversion and Utilization, Shanghai, China, Post Code: 200240)

Abstract: To achieve active pitch control for vertical axis wind turbines (VAWT) within a wide range of tip speed ratios, taking a three-bladed VAWT with NACA 0018 airfoils as an example, the computational fluid dynamic (CFD) method was utilized to implement blade pitch control through a pitch coefficient across a broad range of tip speed ratios. The differences in aerodynamic and flow field characteristics of the VAWT before and after variable pitch controls were compared. The results show that variable pitch control can effectively enhance blade aerodynamic efficiency at each tip speed ratio, with the optimal pitch coefficient increasing as the tip speed ratio rises. At low tip speed ratios, the blade angle of attack should be reduced to mitigate flow separation, while at high tip speed ratios, the blade angle of attack should be increased to improve blade aerodynamic efficiency and shorten wake length. After variable pitch control, the overall aerodynamic efficiency of the VAWT increases by 83.86% and 10.53% at tip speed ratios of 1.25 and 4.25, respectively.

Key words: vertical axis wind turbine (VAWT), variable pitch control, tip speed ratio, aerodynamic performance, computational fluid dynamics

收稿日期:2025-04-02; 修订日期:2025-05-16

基金项目:国家重点研发计划资助(2024YFA1012501);国家自然科学基金(52376204,52476212)

Fund-supported Project: National Key R&D Program of China (2024YFA1012501); National Natural Science Foundation of China (52376204, 52476212)

作者简介:徐涛(2000-),男,上海理工大学硕士研究生。

引 言

风力发电是目前世界上发展最快的可再生能源发电技术之一,其装机容量逐年快速增长^[1-2]。作为重要风力发电设备,垂直轴风力机(Vertical Axis Wind Turbines, VAWT)因结构简单、无需对风、安装维护成本低等优点受到广泛关注^[3-4],但其风能利用率较低,约为 23%~29%,较低的风能利用率已成为限制 VAWT 发展的重要原因之一^[5]。

现阶段针对 VAWT 叶片的优化主要从改善叶片结构、叶片主动控制及添加辅助装置等方面入手^[6-7]。研究发现,叶片主动控制具有较高可靠度及有效性,其中叶片主动变桨控制作为一种常见的叶片主动控制方式得以广泛应用。主动变桨控制根据变桨机构工作方式不同可分为统一变桨控制与独立变桨控制,前者采用单一变桨执行器驱动所有叶片同步调整桨距角,后者为每个叶片配置独立执行器,独立控制各叶片桨距角变化^[8]。独立变桨控制因具有较高的风能利用率并可降低叶片疲劳载荷,延长风力机使用寿命,成为现有热点研究方向^[9]。VAWT 的主动独立变桨控制通过叶片俯仰机构改变叶片攻角以提升 VAWT 启动性能和功率系数,效果得到广泛验证^[10],但如何获取叶片最佳俯仰角函数仍为主要难点。现阶段众多学者为获取叶片最佳俯仰角函数进行了诸多研究,Xu 等人^[11]基于双致动盘多流管模型获得了最佳叶片俯仰角,以此提出了一种新型叶片变桨函数,并通过风洞实验证明了该变桨函数在中、低尖速比 λ 下的有效性。Le 等人^[12]采用与遗传算法优化器耦合的缩比 VAWT 模型进行实验,获得了设计及非设计工况下的两组最优变桨距曲线,发现相较于原始风力机,在两种工况下变桨后的 VAWT 功率系数均提升了 3 倍。Zhang 等人^[13]研究了变桨控制对 NACA0018 翼型 VAWT 气动性能的影响,发现变桨后 VAWT 功率系数最大提升可达 146%。Jain 等人^[14]研究了不同尖速比下 VAWT 最佳变桨幅度,结果表明,尖速比小于 0.5 时应采用大变桨幅度,而尖速比大于 2 时则应采用小变桨幅度以提升整机气动效率。Xu 等人^[15]基于混合双盘多流管模型获得最优叶片俯仰角,构造了

VAWT 变桨俯仰函数,并发现该变桨函数在尖速比小于 2.2 时可使 VAWT 功率系数提升 78%。张立军等人^[16]拟合了尖速比为 2 时 VAWT 桨距角与方位角间的关系,并通过风洞实验证明变桨距 VAWT 具有更好的启动性能,发电效率提升 7.86%。吴祥辉等人^[17]基于叶素动量理论对叶片进行分析,得出了尖速比小于 1 时 VAWT 变桨规律,结果表明,自动变桨控制方案可有效提高风力机启动性能及气动效率。

上述针对 VAWT 变桨控制的研究均表明,变桨控制是一种有效提升 VAWT 气动效率、增强启动性能的方式,但现有主动变桨控制的研究大多针对中、低尖速比下 VAWT 气动效率的提升,较少涉及高尖速比下的变桨特性研究。不同尖速比下风力机叶片攻角差异较大,故有必要开展高尖速比下 VAWT 主动变桨控制的研究,使主动变桨控制既适用于低尖速比也适用于高尖速比。为此,本文基于变桨系数实现 VAWT 在不同尖速比下的变桨,研究了高尖速比范围下 VAWT 的变桨控制,以确定 VAWT 在不同尖速比下的最佳变桨方案。

1 数值模拟

1.1 几何参数与气动参数

以三叶片 H 型 VAWT 为研究对象,叶片采用 NACA 0018 翼型,其几何、运行参数如表 1 所示。

表 1 VAWT 几何参数与运行参数

Tab. 1 Geometrical and operational parameters of VAWT

参 数	数 值
风轮半径 R/m	0.4~1.6
叶片数目 N	3
来流风速 $U_\infty/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$8(\lambda=1.25)$ 、 $12(\lambda=4.25)$
尖速比 λ	1.25~4.25
弦长 c/m	0.2~0.4

图 1 为 VAWT 叶片受力的矢量关系,其中 θ 为叶片相位角, β 为变桨后攻角, α_p 为俯仰角, α 为未变桨时的攻角, U_∞ 为无穷远处来流风速, U 为来流风速,不考虑来流风速损失 $U=U_\infty$, V 为叶片切向速度, W 为叶片相对速度, T 为叶片扭矩, N 为叶片法向力, F_l 为叶片升力, F_d 为叶片阻力。

VAWT 旋转扭矩来源于流体流经翼型表面产生的

升力分量,增加翼型升力和减小阻力可提升 VAWT 气动效率。翼型升力 F_l 及 F_d 阻力定义为^[18]:

$$F_l = 1/2 C_l \rho W^2 c \quad (1)$$

$$F_d = 1/2 C_d \rho W^2 c \quad (2)$$

式中: C_l —升力系数; C_d —阻力系数; ρ —空气密度, kg/m^3 ; c —叶片弦长, m 。

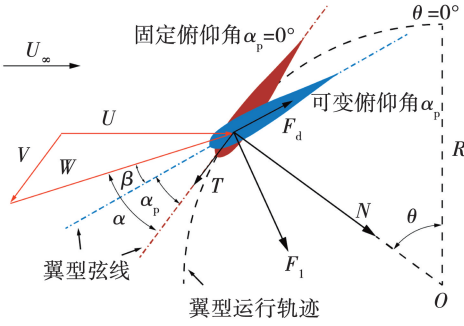


图1 VAWT 叶片受力的矢量关系

Fig. 1 Force vector relationship on VAWT blade

根据 VAWT 风轮旋转过程中叶片速度三角形与力矢量的关系,叶片俯仰变化后的扭矩 T 可表示为:

$$T = R(F_l \sin(\alpha - \alpha_p) - F_d \cos(\alpha - \alpha_p)) \quad (3)$$

转矩系数 C_T 与风能利用率 C_p 是反映 VAWT 气动性能的重要指标,定义如下^[19]:

$$C_T = M / (0.5 \rho U_\infty^2 S R) \quad (4)$$

$$C_p = M \cdot \omega / (0.5 \rho U_\infty^3 S) \quad (5)$$

式中: M —平均转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; S —扫风面积, m^2 ; ω —风轮旋转角速度, rad/s 。

1.2 网格划分与计算方法

计算域流场边界条件与网格划分如图2所示。其中, D 为风轮直径, Z_1 为远场域, Z_2 为尾迹加密区域, Z_3 为风轮旋转区域, Z_4 为叶片变桨区域, Z_2 与 Z_3 之间通过交界面进行数据传递, Z_3 与 Z_4 之间由重叠网格交界面进行数据传递,计算域上游边界 ab 采用速度进口,下游边界 dc 采用压力出口, ad 及 bc 为滑移壁面。

基于 STAR-CCM+ 构建多面体网格,在叶片变桨区域与风轮旋转区域之间创建重叠网格以实现叶片的俯仰运动。为捕捉边界层流动,近壁第1层网格高度设为 $1.5 \times 10^{-2} \text{ mm}$,使壁面 y^+ 值小于1^[20]。

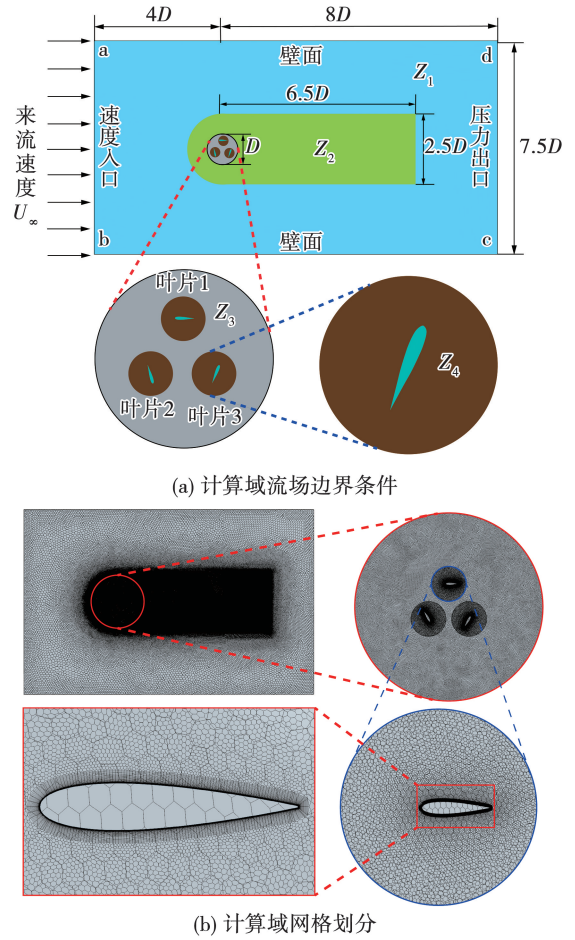


图2 计算域流场边界条件与网格划分

Fig. 2 Boundary conditions and grid division of flow field in computational domain

研究发现,相较 $k-\omega$ 湍流模型, SST $k-\omega$ 湍流模型能更准确预测流动分离,可更好地捕捉 H 型 VAWT 叶片的边界层流动状态^[21],故本文选用 SST $k-\omega$ 湍流模型求解。因入流速度低于当地声速,故将流动视为不可压缩流动,并通过 STAR-CCM+ 软件求解 URANS 方程,基于 SIMPLE 算法进行速度和压力方程耦合求解。

1.3 变桨控制策略

尖速比 λ 作为风力机运行工况的重要参数,其定义为叶尖切向速度与来流风速的比值^[22]:

$$\lambda = R\omega / U_\infty \quad (6)$$

VAWT 旋转过程中叶片理论攻角与 λ 密切相关,叶片理论攻角 $f(\theta)$ ^[10] 可表示为:

$$f(\theta) = \arctan\left(\frac{\sin\theta}{\cos\theta + \lambda}\right) \quad (7)$$

叶片理论攻角随 λ 的变化而改变, λ 为 1.25 时攻角变化范围为 $-53.1^\circ \sim 53.1^\circ$,而 λ 为 4.25 时攻

角仅在 $-13.6^{\circ} \sim 13.6^{\circ}$ 间变化。可见,在低 λ 下应减小叶片攻角以控制流动分离,而在高 λ 下应增大攻角以提高气动性能^[23]。为此,本文依据 VAWT 叶片攻角变化规律,实现不同 λ 下变桨。

假定风轮旋转角速度为 ω ,故叶片相位角可表示为:

$$\theta = \omega \cdot t$$

(8)

式中: t —物理时间,s。

为实现叶片俯仰角的连续变化,将叶片原始攻角乘以比例系数作为叶片俯仰变化函数。俯仰变化函数如下:

$$\alpha_p = A \cdot f(\theta)$$

(9)

式中: A —变桨系数,其变化范围为 $-1 < A < 1$ 。

因此,变桨后叶片理论攻角函数为:

$$\beta = (1 + A) \cdot f(\theta)$$

(10)

对式(9)求导以获得叶片俯仰角随时间的变化速率,表达式为:

$$\omega' = A \cdot \frac{\omega(1 + \lambda \cos(\omega \cdot t))}{1 + 2\lambda \cos(\omega \cdot t) + \lambda^2}$$

(11)

式中: ω' —叶片俯仰角速度,rad/s。

通过改变变桨系数 A 即可控制叶片俯仰,此控制方式的优点为:当 λ 不变时,不同相位角下桨距角比例变化,攻角较大时变桨幅度较大,攻角小时变桨幅度小;在不同 λ 下,改变变桨系数 A 的正负即可实现攻角增大或减少,无需更多的变量。

在 VAWT 旋转过程中叶片俯仰变化如图 3 所示。

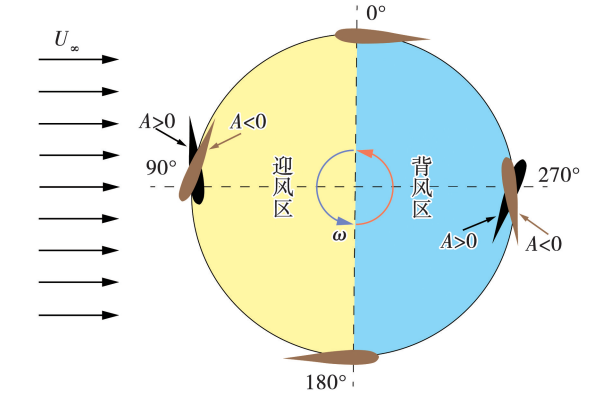


图 3 叶片俯仰示意图
Fig. 3 Blade pitching diagram

λ 为 1.25 和 4.25 时,不同变桨系数叶片理论攻角变化如图 4 所示,图 4(a)中 $A < 0$,其为减小叶片攻角,图 4(b)中 $A > 0$,其为增大叶片攻角,而当

$A = 0$ 时叶片未变桨。

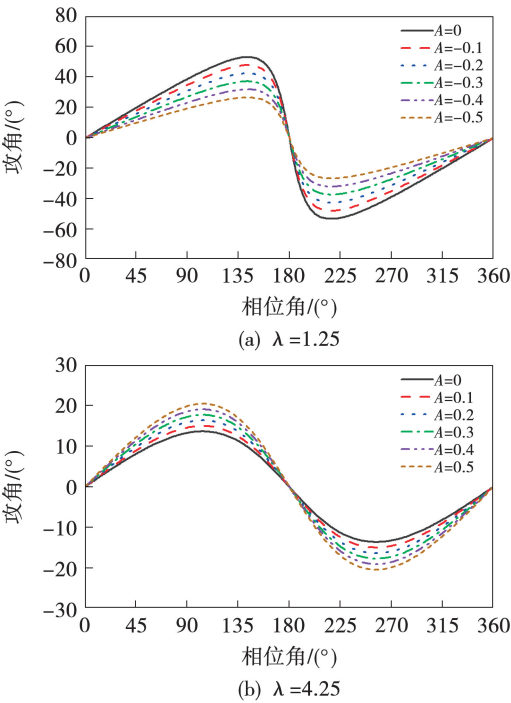


图 4 变桨控制后叶片理论攻角的变化
Fig. 4 Changes in theoretical angle of attack of blade after variable pitch control

2 可靠性验证

2.1 网格无关性验证

选择无俯仰控制的 VAWT 进行网格无关性验证,此时 λ 恒为 1.25,来流风速为 8 m/s,风轮半径 R 为 0.4 m,叶片弦长 c 为 0.2 m,不同网格数量对应风能利用率如图 5 所示。

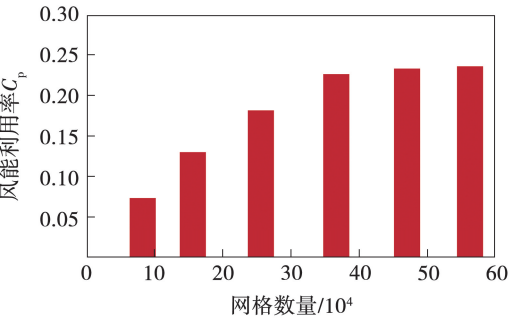


图 5 网格无关性验证
Fig. 5 Grid independence verification

由图 5 可知,网格数量较少时 C_p 波动较大,随着网格数量的增加 C_p 趋于稳定。当网格数量为 36.6 万时,与 47 万和 56.2 万网格数模型误差均在 3% 以内,而较大的网格数量将导致计算成本大幅增

加,故考虑计算精度并兼顾计算成本,后续研究均以 36.6 万的网格数量进行建模。

2.2 时间步长确定

通过对时间步长进行验证,以削弱时间步长对计算结果影响。验证对象为 $\lambda = 1.25$ 、风轮半径 $R = 0.4\text{ m}$ 、叶片弦长 $c = 0.2\text{ m}$,未施加变桨的 VAWT。时间步长分别为 $\Delta t_1 = 2\pi/1\,440\omega$, $\Delta t_2 = 2\pi/720\omega$ 和 $\Delta t_3 = 2\pi/360\omega$,3 种时间步长下的风能利用率,如表 2 所示。

表 2 不同时间步长下风能利用率

Tab.2 Wind energy utilization rates under different time steps

时间步长/s	相位角增量 $\Delta\theta/(\text{^\circ})$	风能利用率 C_p
Δt_1	0.25	0.219
Δt_2	0.5	0.226
Δt_3	1	0.258

由表 2 可知,时间步长显著影响 C_p ,当时间步长为 Δt_3 时,较大时间步长对应的 C_p 明显偏大; Δt_1 与 Δt_2 相比,对应 C_p 误差小于 5%,但较小时间步长将显著增加计算时长,故考虑计算精度并兼顾计算成本,后续计算时间步长均取 Δt_2 ,其对应相位角增量为 0.5° 。

2.3 实验值验证

对比风轮半径 $R = 0.4\text{ m}$ 、弦长 $c = 0.2\text{ m}$ 的本文数值模型的模拟值与文献[24]中的实验值,以验证数值模型的可靠性。不同尖速比下模拟值与实验值风能利用率如图 6 所示。

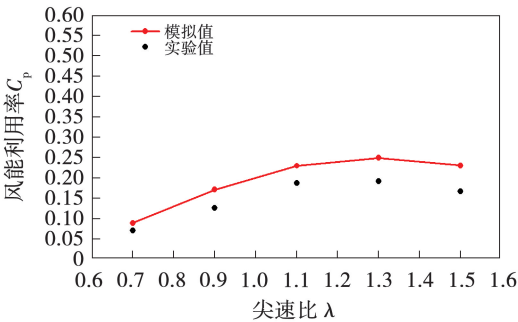


图 6 不同尖速比下风能利用率模拟值与实验值对比

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

由图 6 可知,本文数值模型模拟值与实验值整体趋势相同,且尖速比较小时,模拟值与实验值具有较高的吻合度。模拟值较之实验值偏大的原因是二

维模拟忽略了叶片端部效应、三维旋转效应及支撑结构对 VAWT 气动性能的影响,但本文二维模型已获 C_p 主要变化趋势,且本文主要研究不同尖速比下 VAWT 气动特性差异,故本文数值的模拟结果已具有较高可信度。

3 结果与分析

3.1 整机气动特性

尖速比为 1.25 和 4.25 时研究低、高尖速比下变桨控制对整机 C_p 的影响,如图 7 所示。

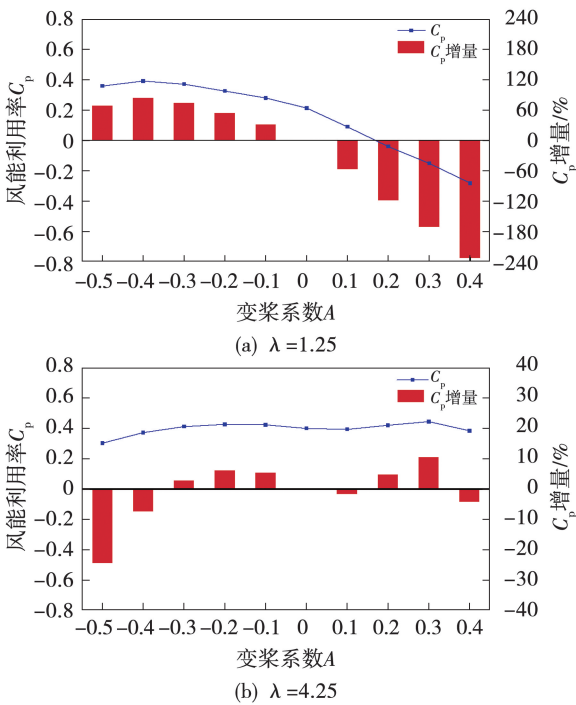


图 7 不同变桨系数下 VAWT 风能利用率

Fig.7 Wind energy utilization rates of VAWT under different pitch coefficients

由图 7 可知,基于变桨系数的变桨方式对整机 C_p 提升显著。低尖速比时,不同变桨系数对 C_p 影响差异显著,且当变桨系数为正时,整机 C_p 大幅降低。由低尖速比时最佳变桨系数为 -0.4 可知,当尖速比为 1.25 时减小 40% 的叶片原始攻角对 VAWT 气动效率提升效果最佳,整机 C_p 由 0.212 升至 0.390,增幅达 83.86%。高尖速比时整机风能利用曲线与低尖速比时差异显著,其整体变化幅度较之低尖速比显著降低,可见高尖速比时变桨对 VAWT 气动性能影响显著降低,但当变桨系数为 0.3 时,比例变桨使整机 C_p 由 0.401 提升至 0.444,增量仍可达 10.53%。上述可知比例变桨在低、高

尖速比下均可有效提升整机 C_p 。

3.2 单叶片气动及流场特性

对比低、高尖速比下 VAWT 最佳变桨系数差异可知,VAWT 最佳变桨系数随尖速比增大而增大。由此可见,低尖速比下采用负变桨系数减小叶片攻角,高尖速比时应采用正变桨系数增大叶片攻角,使整机气动效率在各尖速比下均得以提升。

图 8 为尖速比为 1.25 和 4.25 时未变桨 ($A = 0$) 及最佳变桨控制 ($\lambda = 1.25$ 时 $A = -0.4$, $\lambda = 4.25$ 时 $A = 0.3$) 后叶片表面涡量分布,因 VAWT 的不同叶片在同一相位角下的攻角相同,故取叶片 1 即可代表不同叶片,后续分析均基于叶片 1 进行。

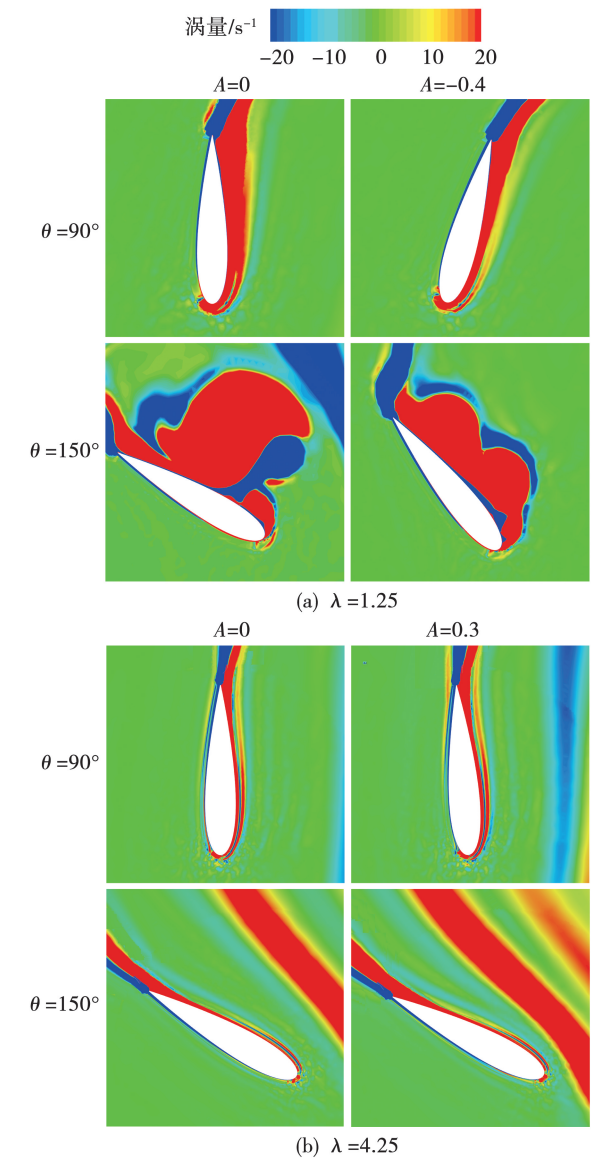


图 8 叶片 1 在未变桨及变桨控制下表面涡量分布
Fig. 8 Vortex distributions on the surface of blade I under original and variable pitch controls

由图 8 可知,尖速比 λ 为 1.25 时,较之原始叶片,变桨后叶片表面涡量显著减少。90°相位角下,变桨后叶片前缘流动分离得以有效延缓抑制,150°相位角下变桨控制则显著降低了叶片表面分离涡尺度,由此可见,变桨控制在低尖速比下可显著改善叶片表面流动状态,提升气动效率。而当尖速比为 4.25 时,变桨前后 VAWT 叶片表面涡量分布无明显变化,均未存在显著流动分离,可见高尖速比下变桨未明显改善叶片表面流动状态。

具体分析背风区叶片表面压力分布,图 9 为叶片 1 在未变桨及变桨控制下 270°及 330°相位角时压力分布。

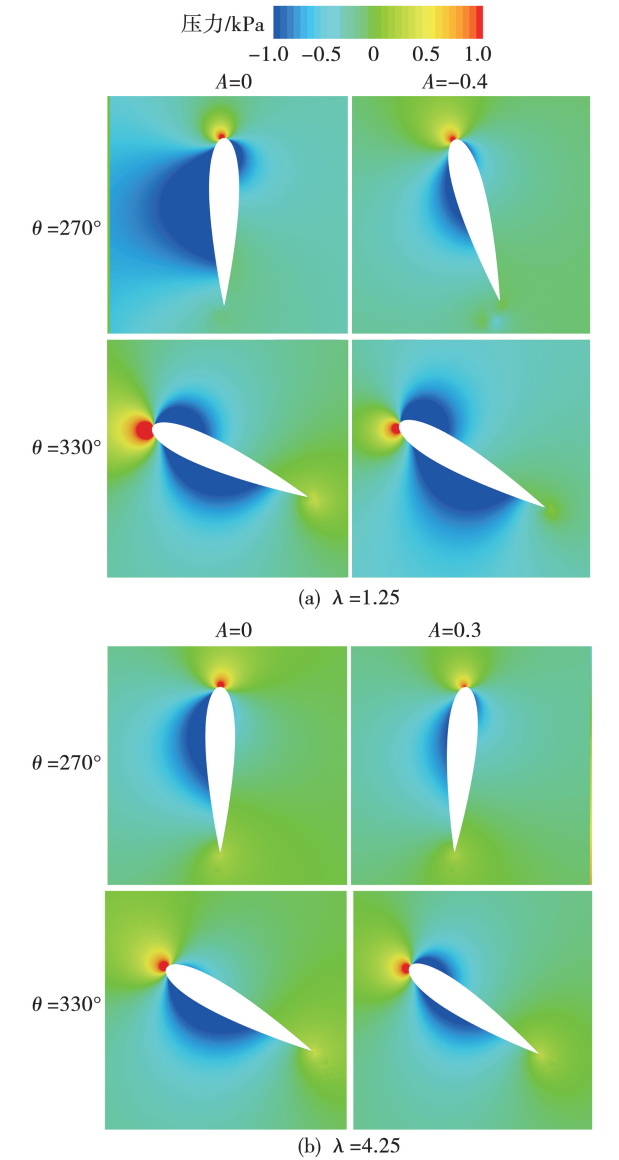


图 9 叶片 1 在未变桨及变桨控制下表面压力分布
Fig. 9 Pressure distributions on the surface of blade I under original and variable pitch controls

由图 9 可知,低尖速比时变桨前后叶片表面压力分布变化较之高尖速比明显偏小,变桨后叶片上、下表面压力分布与未变桨叶片基本一致,而高尖速比下变桨后叶片前缘上表面较之未变桨叶片均出现了低压区域。

因原始 VAWT 背风区叶片下表面压力始终小于上表面,故在 VAWT 背风区叶片始终做负功,而在高尖速比下变桨后叶片前缘上表面压力较之下表

面更低,其吸力面、压力面发生交替转换,可使变桨后叶片前缘做正功,显著提升叶片整体气动效率。由此可见,高尖速比下采用正变桨系数增大叶片攻角可改善背风区叶片表面压力分布,提升 VAWT 背风区风能利用率。

分析低、高尖速比下叶片表面气动载荷分布情况,图 10 为不同相位角单叶片表面压力系数沿弦长分布。

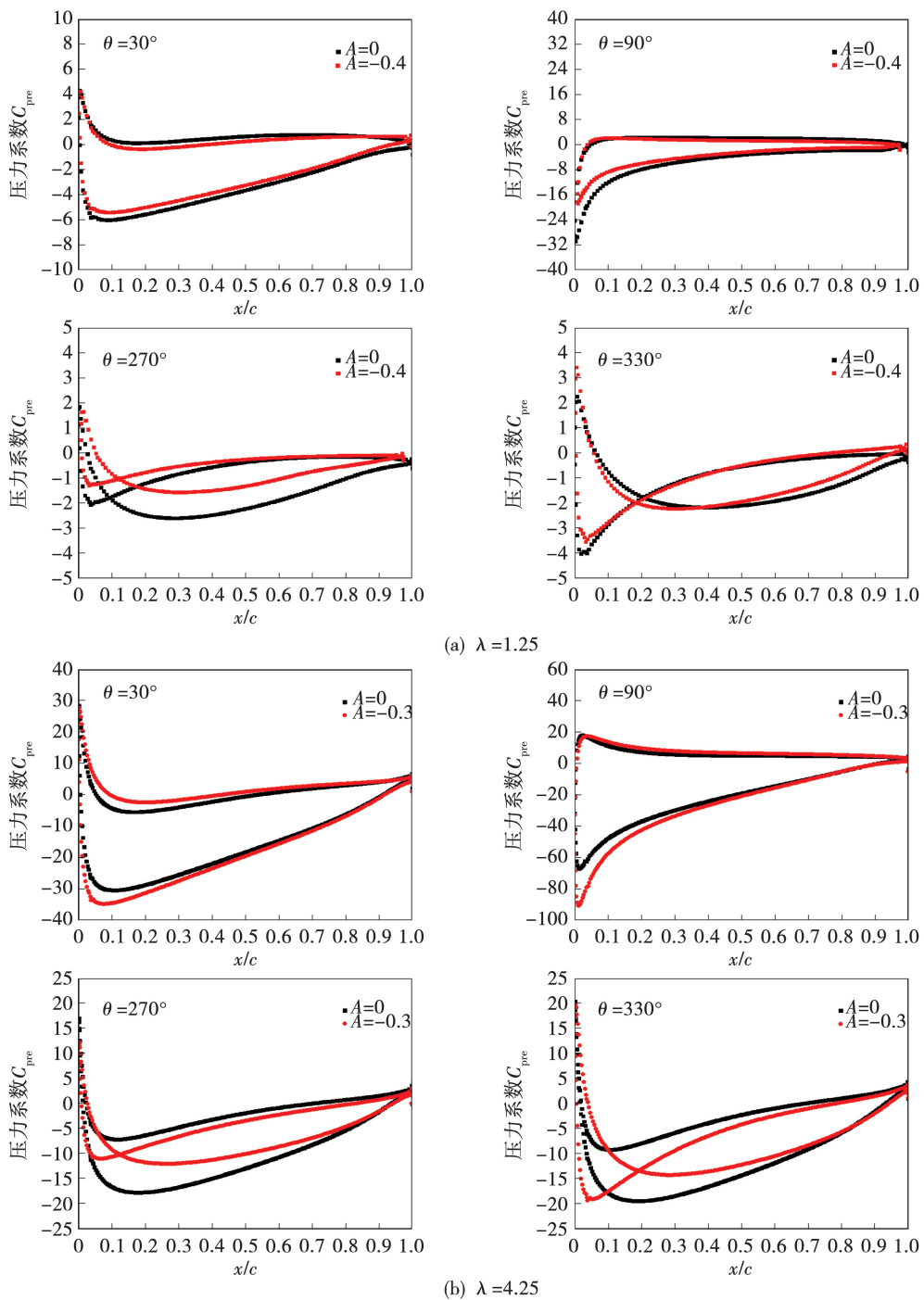


图 10 不同相位角单叶片表面压力系数沿弦长分布

Fig. 10 Distributions of pressure coefficient along chord length on single blade surface at different phase angles

由图 10 可知,低尖速比下变桨前后叶片表面压力系数随弦长分布未发生明显变化,仅在压差数值上略有减小,但此时叶片表面流动分离也得以极大改善,故低尖速比时尽管叶片表面压差减小但整体气动性能仍有显著提升。

高尖速比时,迎风区叶片变桨后表面压力系数随弦长分布情况与未变桨时基本一致,但当叶片处于背风区时,变桨后叶片表面吸力面与压力面发生了交替转换。因在背风区未变桨叶片始终做负功,而吸压力面交替变化后可使叶片表面部分做正功,显著改善了背风区叶片气动特性。

为进一步展现比例变桨控制对 VAWT 气动特性改善的特点,对比不同尖速比下一个运行周期内最佳变桨系数作用下叶片 1 转矩系数与未变桨叶片转矩系数,如图 11 所示。

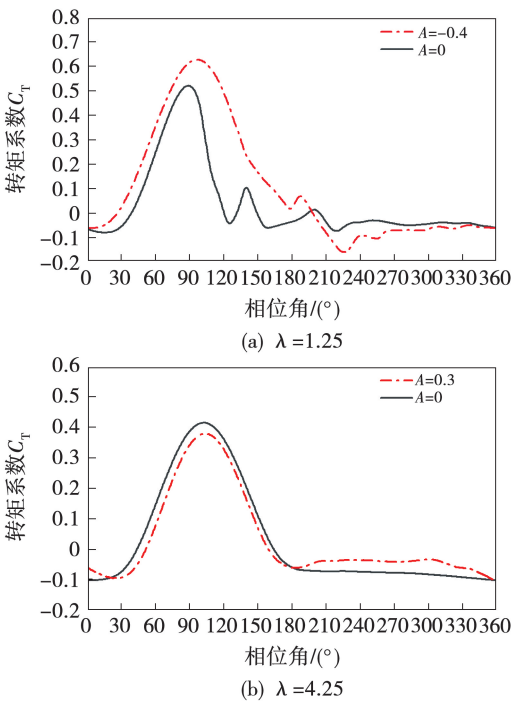


图 11 不同尖速比未变桨及最佳变桨控制下叶片转矩系数
Fig. 11 Torque coefficients of blade at different tip speed ratios under original and optimal variable pitch controls

由图 11 可知,不同尖速比下最佳变桨系数对 VAWT 叶片转矩系数影响差异显著。低尖速比时,负变桨系数可显著改善迎风区叶片转矩系数,但背风区转矩系数有所降低。高尖速比时,正变桨系数可改善背风区叶片气动特性,但降低了迎风区叶片气动特性。可见,不同尖速比下比例变桨改善

VAWT 气动特性方式显著不同:低尖速比时,负变桨系数提高了 VAWT 迎风区气动效率;高尖速比时,正变桨系数改善了 VAWT 背风区气动特性。

3.3 整机流场特性

分析变桨控制对高尖速比下的 VAWT 流场变化影响,并以风轮直径 D 衡量流场尺寸,如图 12 所示。

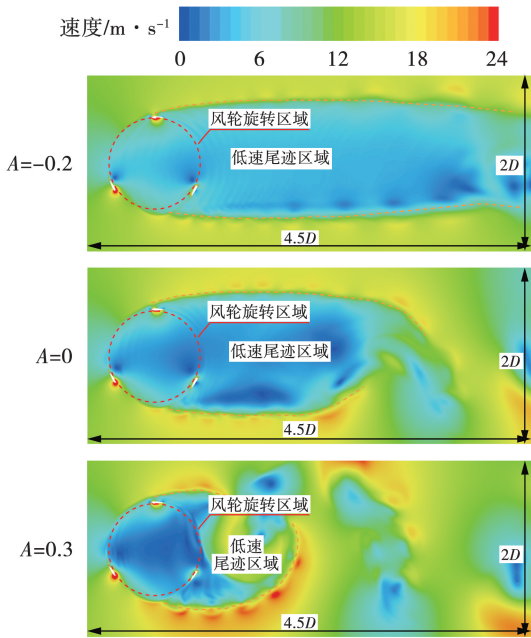


图 12 不同变桨系数下的 VAWT 流场变化
Fig. 12 Change in VAWT flow field under different pitch coefficients

由图 12 可知,不同变桨系数下 VAWT 尾迹差异显著。当变桨系数为 -0.2 时,变桨后 VAWT 尾迹长度较之原始 VAWT 显著增加,且其风轮旋转区域风速较之原始 VAWT 更高,可见此时入流风中仍有较高能量未被捕获。当变桨系数为 0.3 时,变桨后 VAWT 尾迹长度较之原始 VAWT 明显缩短,风轮旋转区域风速也显著降低,VAWT 可更好地捕获入流风中能量。由此可见高尖速比下减小叶片攻角将不利于 VAWT 尾迹恢复,且降低了 VAWT 风能利用率,增大叶片攻角则可以加速尾迹区域外侧高速流体与低速尾迹区域流体掺混,进而提升尾流流速,缩短尾迹长度,并提升 VAWT 风能利用率。

4 结 论

(1) 比例变桨控制策略在高尖速比范围内均可有效提升 VAWT 气动效率, $\lambda = 1.25$ 时,变桨后

VAWT 整机转矩系数最大提升 83.86% , $\lambda = 4.25$ 时达 10.53%。

(2) VAWT 最佳变桨系数随尖速比的上升而增加。低 λ 下应采用负变桨系数以改善 VAWT 气动特性,而高 λ 则应采用正变桨系数。

(3) 低尖速比下减小叶片攻角可有效改善叶片表面流动分离,减少分离涡的产生,提升迎风区叶片转矩系数。

(4) 高尖速比下增大叶片攻角显著改善了叶片翼型前缘压力分布,可有效提升背风区叶片气动效率,并缩短 VAWT 尾迹长度。

参考文献:

[1] 姚兴佳,宋 俊. 风力发电机组原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2020.
YAO Xingjia, SONG Jun. Principle and application of wind turbines[M]. Beijing:China Machine Press,2020.

[2] Global Wind Energy Council. Global wind report 2024[R]. Brussels:GWEC,2024.

[3] 俞洪静,岳敏楠,李 春,等. 气动双弹片对垂直轴风力机气动性能影响研究[J]. 太阳能学报,2025,46(1):25-33.
YU Hongjing, YUE Minnan, LI Chun, et al. Study on influence of aerodynamic double flaps on aerodynamic performance of vertical axis wind turbine[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2025,46(1):25-33.

[4] YAO J, WANG J L, YUAN W B, et al. Analysis on the influence of turbulence model changes to aerodynamic performance of vertical axis wind turbine[J]. Procedia Engineering,2012,31:274-281.

[5] 宋 俊. 风力机空气动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2019.
SONG Jun. The aerodynamic of wind turbine[M]. Beijing:China Machine Press,2019.

[6] 李 岩,郑玉芳,赵守阳,等. 直线翼垂直轴风力机气动特性研究综述[J]. 空气动力学学报,2017,35(3):368-382,398.
LI Yan, ZHENG Yufang, ZHAO Shouyang, et al. A review on aerodynamic characteristics of straight-bladed vertical axis wind turbine[J]. Acta Aerodynamica Sinica,2017,35(3):368-382,398.

[7] SHEN Z, GONG S G, ZUO Z J, et al. Darrieus vertical-axis wind turbine performance enhancement approach and optimized design: A review[J]. Ocean Energy,2024,311:1-14.

[8] 梁军红. H 型垂直轴风力发电机变桨距自抗扰控制研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2023.
LIANG Junhong. Research on variable pitch auto disturbance rejection control of H vertical axis wind turbine[D]. Lanzhou:Lanzhou University of Technology,2023.

[9] 张立军,马东辰,胡阔亮,等. H 型垂直轴风力机变桨机理研究进展[J]. 中南大学学报,2019,50(10):2572-2585.

ZHANG Lijun, MA Dongchen, HU Kouliang, et al. Research advances in pitching mechanism of Htype vertical axis wind turbine [J]. Journal of Central South University, 2019, 50 (10): 2572-2585.

[10] 张 强,缪维跑,刘青松,等. 垂直轴风力机变桨控制策略及气动性能影响研究 [J]. 太阳能学报, 2022, 43 (10): 296-303.
ZHANG Qiang, MIAO Weipao, LI Qingsong, et al. Research on pitch control strategy and aerodynamic performance of vertical axis wind turbine [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2022,43(10):296-303.

[11] XU Y L, PENG Y X, ZHAN S. Optimal blade pitch function and control device for high-solidity straight-bladed vertical axis wind turbines[J]. Applied Energy,2019,242:1613-1625.

[12] LE Fouest S, MULLENNERS K. Optimal blade pitch control for enhanced vertical-axis wind turbine performance[J]. Nature Communications,2024,15(1):2770.

[13] ZHANG Q, BASIR M, MIAO W P, et al. Aerodynamic analysis of a novel pitch control strategy and parameter combination for vertical axis wind turbines [J]. Renewable Energy, 2023, 216:119089.

[14] JAIN P, ABHISHEK A. Performance prediction and fundamental understanding of small scale vertical axis wind turbine with variable amplitude blade pitching[J]. Renewable Energy,2016,97:97-113.

[15] XU Y L, PENG Y X, ZHAN S. Optimal blade pitch function and control device for high-solidity straight-bladed vertical axis wind turbines[J]. Applied Energy,2019,242:1613-1625.

[16] 张立军,马东辰,赵昕辉,等. 小型 H 型垂直轴风力机变桨机构的优化设计与试验 [J]. 西安交通大学学报,2018,52(3):132-138.
ZHANG Lijun, MA Dongchen, ZHAO Xinhui. Optimal design of pitch mechanism for H-type vertical axis wind turbine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2018,52(3):132-138.

[17] 吴祥辉,刘立群,赵晓博,等. H 型垂直轴风力发电机变桨控制策略研究 [J]. 太原科技大学学报,2015,36(6):441-445.
WU Xianghui, LIU Liquan, ZHAO Xiaobo, et al. Research on variable-pitch control strategy for H-type vertical axis of wind turbine[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology,2015,36(6):441-445.

[18] 向 斌,缪维跑,李 春,等. 垂直轴风力机群组中叶片实度对风场气动特性的影响 [J]. 热能动力工程,2020,35(11):135-142.
XIANG Bin, MIAO Weipao, LI Chun, et al. Effect of blade solidity on wind field aerodynamic characteristics in vertical axis wind turbine group[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020,35(11):135-142.