

基于三点法的垂直轴风力机动态失速特性研究

武婧艺, 石磊, 竺晓程

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 针对垂直轴风力机固有的非定常流动特性, 以及在小尖速比下的动态失速问题, 基于三点法对垂直轴风力机流场进行数值模拟, 分析在尖速比为 3.35, 2.65, 2.25 和 1.85 时, 垂直轴风力机不同周向位置处的有效攻角以及升、阻力系数等气动参数, 并与名义攻角、多流管法获得的有效攻角进行对比。结果表明: 垂直轴风力机在旋转过程中, 叶片载荷呈周期性变化; 三点法能够成功提取叶片在不同周向方位下计及诱导速度的有效攻角; 动态失速开始的相位角在 $80^\circ \sim 105^\circ$ 之间, 尖速比减小会导致失速提前、有效攻角和升力系数增大、阻力系数增加且升阻比减小; 在小尖速比 $\lambda = 1.85$ 时, 叶片表面在较近周向方位处发生流动分离, 形成大尺度的旋涡结构, 有效攻角曲线在 120° 附近有凸起; 在下游时叶片受到上游尾流脱落涡的影响, 叶片升、阻力系数表现出更复杂的迟滞效应, 气动系数迟滞环所包含的范围更大。

关键词: 垂直轴风力机; 动态失速; 有效攻角; 三点法

中图分类号: TK83 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.01.015

[引用本文格式] 武婧艺, 石磊, 竺晓程. 基于三点法的垂直轴风力机动态失速特性研究[J]. 热能动力工程, 2025, 40(1): 121-131. WU Jingyi, SHI Lei, ZHU Xiaocheng. Study on dynamic stall characteristics of vertical axis wind turbines based on 3-points method[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(1): 121-131.

Study on Dynamic Stall Characteristics of Vertical Axis Wind Turbines based on 3-Points Method

WU Jingyi, SHI Lei, ZHU Xiaocheng

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240)

Abstract: Aiming at the inherent unsteady flow characteristics of vertical axis wind turbine (VAWT) and the problem of dynamic stall at small tip speed ratio, the flow field of VAWT was numerically simulated based on 3-points method, and the aerodynamic parameters such as effective angle of attack, lift and drag coefficients at different circumferential positions of VAWT at tip speed ratios of 3.35, 2.65, 2.25 and 1.85 were analyzed, and compared with the effective angles of attack obtained by nominal angle of attack and by multiple streamtube theory. The results show that the blade load changes periodically during the rotation of VAWT. The 3-points method can successfully extract the effective angle of attack of blades in different circumferential directions. The phase angle of dynamic stall onset is between 80° and 105° . With the decrease of tip speed ratio, the stall is advanced, the effective angle of attack and lift coefficient increase, the drag coefficient increases and the lift-drag ratio decreases. When the small tip speed ratio λ is 1.85, the flow separation will occur on the blade surface in the nearest circumferential direction, forming a large-scale vortex structure, and the effective angle of attack curve will be convex around 120° ; the blade will be affected by the shedding vortex of the upstream wake at the downstream, the lift and drag coefficients of the blade show more complex hysteresis effects, and the range of the aerodynamic coefficient hysteresis loop is larger.

Key words: vertical axis wind turbine (VAWT), dynamic stall, effective angle of attack, 3-points method

引 言

风能是一种储量丰富、无污染的清洁能源^[1]。风力机是风能利用的主要装置之一^[2],根据转轴与来流方向的不同可分为水平轴风力机(HAWT)和垂直轴风力机(VAWT)。与传统的水平轴风力机相比,垂直轴风力机对风向不敏感,因此无需配套偏航机构^[3]。垂直轴风力机的运动部件少、安装方便,旋转速度低、气动噪声小,其发电机通常安装于地面,便于维护^[4]。然而,垂直轴风力机叶片在旋转过程中固有的非定常特性会导致其气动效率降低,叶片攻角(AOA)随周向位置的不同呈周期性变化,易引发叶片动态失速。动态失速不仅会导致叶片负载波动加剧,破坏垂直轴风力机结构的完整性,还会因叶片攻角和相对速度同时发生变化而引发流动分离涡的产生、脱落和发展^[5],使得垂直轴风力机尾流区流动更加复杂^[6-7]。

在动态失速情况下,升力、阻力与攻角之间的关系相较于静态失速表现出明显的迟滞现象,在叶片表面出现大尺度涡结构^[8]。对此,国内外学者从理论、实验以及数值模拟等方面开展研究,分析垂直轴风力机的动态失速特性。在理论研究方面,Strickland^[9]提出双流管模型,分析垂直轴风力机的气动特性,但未考虑动态失速的影响。Paraschivoiu^[10]改进了双盘多流管法,将动态失速的影响考虑其中,对Darrieus型垂直轴风力机的气动性能进行了较为准确的预测。冯国英等人^[11]采用升力线自由涡尾迹模型耦合Leishman-Beddoes(LB)动态失速模型,对不同直径和实度的H型垂直轴风力机的气动性能进行了预测。

关于垂直轴风力机的实验研究,大多集中在叶片尺度或垂直轴风力机尾迹空气动力学上,当垂直轴风力机旋转时,叶片可能会受到动态失速以及叶片-尾迹相互作用的影响。文献[12]通过高分辨率的粒子图像测速(PIV)实验对不同叶尖速比下的垂直轴风力机气动参数进行测量,并结合数值模拟

结果分析垂直轴风力机动态失速特性。文献[13]采用名义攻角分析了不同雷诺数和尖速比对叶片涡脱落演变的影响。Keisar等人^[14]通过改变弦半径比和翼型厚度等几何参数对垂直轴风力机进行风洞实验,结果表明叶片上产生的尾部动态失速涡早于传统的前缘涡,进而使得叶片获得失速后动态升力。

在数值模拟研究方面,Li等人^[15]采用标准 $k-\varepsilon$ 模型和SST $k-\omega$ 湍流模型进行数值模拟,分析了直叶垂直轴风力机叶片表面非定常流动引起的失速现象并与实验数据进行了对比。Rezaeiha等人^[16]采用尺度自适应模拟(SAS)方法,分析了垂直轴风力机叶片发生非定常流动分离和动态失速的复杂流动结构。Ibrahim等人^[17]采用二维非定常雷诺平均Navier-Stokes(URANS)方法分析了主动边界层控制技术,结果表明在低叶尖速比工况下采用吸腔翼型的垂直轴风力机比采用原叶片的风力机的功率系数更高。刘青松等人^[18]基于SST $k-\omega$ IDDES(Improved Delayed Detached Eddy Simulation)湍流模型数值模拟研究了吹吸联合射流抑制垂直轴风力机动态失速的效果,发现主动流动控制方法可减小风力机负转矩,有利于提升中低叶尖速比工况下垂直轴风力机功率系数。Dave等人^[19]采用大涡模拟方法对3种尖速比下垂直轴风力机的流动特点进行了数值模拟研究,通过改变角速度实现速度峰值与扭矩峰值对齐,提高了垂直轴风力机功率。

以上研究主要分析了垂直轴风力机叶片的非定常气动特性以及复杂的尾流结构,在不同周向方位下来流与叶片的攻角多采用名义攻角,没有给出有效攻角,缺乏流场和气动力的直接联系。本文针对垂直轴风力机固有的非定常流动特性以及存在的动态失速问题,对垂直轴风力机的流场进行数值模拟,通过三点法确定叶片不同周向方位处的有效攻角,并与名义攻角及多流管法获得的有效攻角进行对比,结合不同尖速比下垂直轴风力机叶片在不同周向位置的升、阻力系数等气动数据,深入研究垂直轴风力机叶片的动态失速特征。

1 研究对象

1.1 几何参数

本文参考文献[20]的风洞实验模型设置了所研究的垂直轴风力机几何参数,如表 1 所示,叶片均为 NACA 0021 翼型,安装角为 0°。

表 1 垂直轴风力机几何参数

Tab.1 Geometric parameters of VAWT

几何参数	数值
风轮直径 D/mm	1 030
叶片高度 H/mm	1 456.4
叶片数 N	3
叶片弦长 c/mm	85.8
支撑杆位置	0.5c
实度 σ	0.25

1.2 气动参数

叶尖速比 λ 对垂直轴风力机气动性能影响较大,定义为:

$$\lambda = \frac{\omega r}{V_\infty} \quad (1)$$

式中: V_∞ —自由流速度; ω —旋转角速度; r —风轮平面半径。

升力系数 C_l 和阻力系数 C_d 可用于量化叶片的气动性能,分别定义为:

$$C_l = \frac{F_L}{1/2\rho W^2 Hc} \quad (2)$$

$$C_d = \frac{F_D}{1/2\rho W^2 Hc} \quad (3)$$

式中: ρ —空气密度; F_L —升力; F_D —阻力; W —相对速度。

功率系数 C_p 是衡量风力机性能的重要参数,定义为:

$$C_p = \frac{Q\omega}{1/2\rho DHV_\infty^3} \quad (4)$$

式中: Q —转矩。

图 1 为垂直轴风力机风轮平面划分为双盘面多流管模型示意图^[21],图中, θ 为垂直轴风力机运行时的相位角,选择初始位置 $\theta = 0^\circ$,称 $0^\circ < \theta < 180^\circ$ 为垂直轴风力机上游区域, $180^\circ < \theta < 360^\circ$ 为垂直轴风力机下游区域。 $V_{\infty i}$ 为当地自由流速度, A_0 、 A_1 和 A_2 分别为不同位置处致动盘的扫掠面积, a 和 a' 分别为上游、下游轴向速度诱导因子, V 和 V' 分别为上

游、下游诱导速度, V_e 为诱导平衡速度, V'' 为流体经过风轮平面后速度。

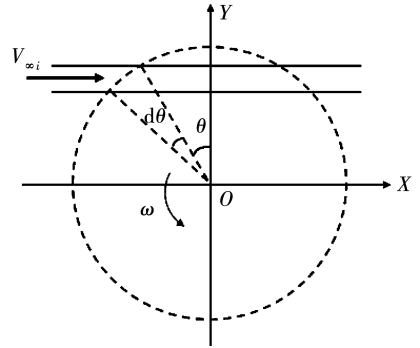
流体经过该流管的速度变化如下:

$$V = a V_{\infty i} \quad (5)$$

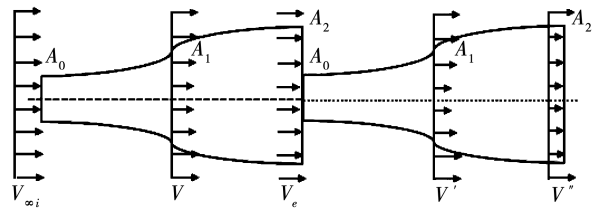
$$V_e = (2a - 1) V_{\infty i} \quad (6)$$

$$V' = a' V_e = a'(2a - 1) V_{\infty i} \quad (7)$$

$$V'' = (2a' - 1)(2a - 1) V_{\infty i} \quad (8)$$



(a) 流管划分风轮扫掠区



(b) 双盘面多流管模型示意图

图 1 垂直轴风力机双盘面多流管划分示意图^[21]

Fig.1 Schematic diagrams of dividing double-disk multiple streamtubes of VAWT^[21]

不同周向位置的叶片受力分析如图 2 所示, α 和 α' 分别为上、下游局部攻角, W_{up} 和 W_{down} 分别为上、下游当地相对速度, F_n 为法向力, F_t 为切向力,从图 2 中可以发现,叶片的局部攻角和气动力随着周向位置的变化,呈现周期性变化。

根据速度三角形,不同相位角下叶片名义攻角的定义为:

$$\alpha_{nom} = \tan^{-1} \left(\frac{\sin\theta}{\lambda + \cos\theta} \right) \quad (9)$$

通过多流管法计算有效攻角的计算式为:

$$\alpha_{DMS} = \tan^{-1} \left(\frac{\sin\theta}{\frac{\omega r}{V} + \cos\theta} \right) \quad (10)$$

其中,速度 V 考虑了轴向诱导速度,忽略了周向诱导速度的影响。

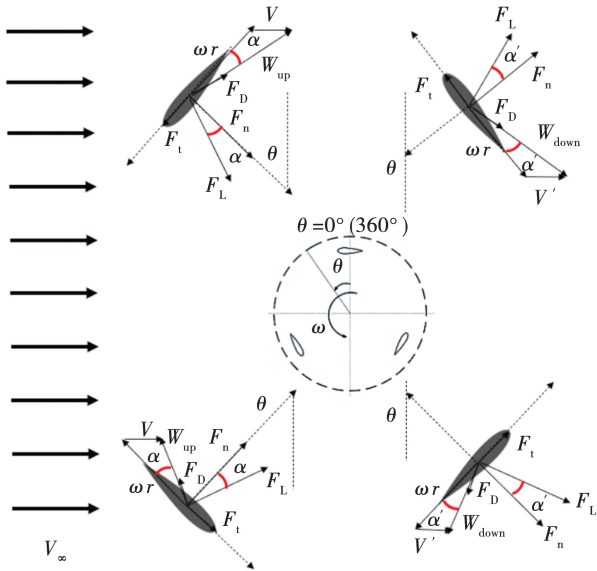


图2 垂直轴风力机叶片不同方位下受力分析示意图
Fig. 2 Schematic diagram of force analysis of VAWT blades in different orientations

2 研究方法

2.1 数值模拟方法

本文在对垂直轴风力机建模时,简化了主轴和支撑杆,只考虑叶片部分,进行二维数值模拟研究。计算域包括外部的静止域和内部的旋转域,边界条件设置如图3所示。

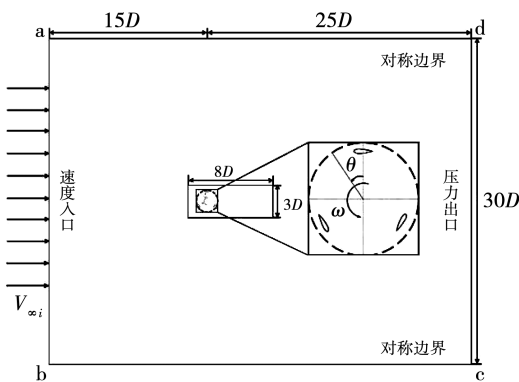


图3 计算域和边界条件设置

Fig. 3 Computational domain and boundary condition setting

基于 ANSYS ICEM 商业软件,采用结构体与非结构体结合的混合网格技术对计算域进行网格划分,网格划分细节如图4所示。旋转域内的叶片表面处为结构化网格,对边界层内部网格进行加密处理,调整第一层网格尺寸保证 $y^+ \approx 1$,并且法向膨胀

率不超过 1.2。网格无关性验证部分可参考文献 [22],充分考虑计算效率以及计算精度,选取 28 万网格数进行后续数值模拟研究。

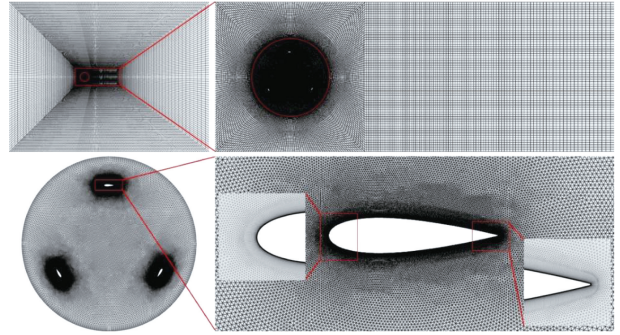


图4 计算域网格细节

Fig. 4 Mesh detail of computational domain

数值模拟的求解器选用 ANSYS CFX 商业软件,采用 SST $k - \omega$ 湍流模型,设置时间步长为垂直轴风力机旋转 0.5° 所对应的时间,旋转一周总计 720 个时间步长,待非定常数值计算稳定后,采用第 15 个旋转周期下的流场数据进行分析。本文数值模拟的计算工况设置为 $V_{\infty i} = 9 \text{ m/s}$ 的均匀来流,通过改变垂直轴风力机的旋转角速度得到 4 个不同的尖速比,分别为 3.35, 2.65, 2.25 和 1.85。

2.2 有效攻角提取方法

有效攻角是定量研究垂直轴风力机动态失速行为的重要参数之一^[23]。在数值模拟结果分析中,主要采用三点法^[24]、线平均法^[25]和轨迹法^[26]获得叶片的有效攻角,其中三点法易于实现且准确性高^[27-28]。

图5为三点法采样位置示意图,在叶片的两侧各取 3 个点,分别位于沿弦向距离前缘的 $0.25c$ 、 $0.5c$ 和 $0.75c$ 处,沿法线方向与叶片弦线的距离均为 $1c$ 。

采用三点法提取有效攻角的步骤为:

步骤 1:提取叶片两侧的三对点 $(P1, P4)$ 、 $(P2, P5)$ 和 $(P3, P6)$ 的速度,计算获得平均速度矢量 V_{ave} 。

步骤 2:将获得的平均速度矢量 V_{ave} 沿着叶片运动轨迹法向 n 、切向 t 分解,得到法向分速度 V_n 和切向分速度 V_t ,相对叶片弦线角度,确定有效攻角:

$$\alpha_e = \tan^{-1} \left(-\frac{V_n}{\omega r + V_t} \right) \quad (11)$$

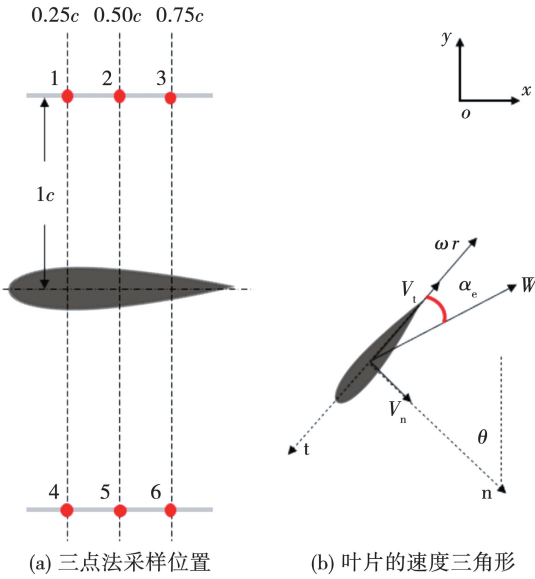


图 5 三点法提取有效攻角示意图

Fig.5 Schematic diagrams of effective angles of attack extracted by 3-points method

3 计算结果分析

3.1 垂直轴风力机功率系数曲线

图 6 为垂直轴风力机在不同尖速比下通过数值模拟和多流管法^[21]获得的功率系数 C_p , 并与文献^[20]的实验结果及文献^[29]的数值模拟结果进行对比。

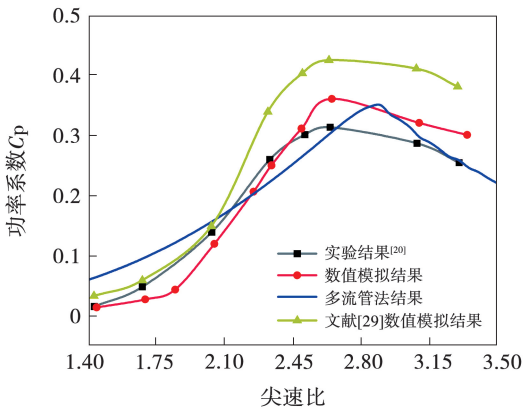


图 6 不同方法下功率系数与尖速比的关系

Fig.6 Relation of power coefficient and tip speed ratio by different methods

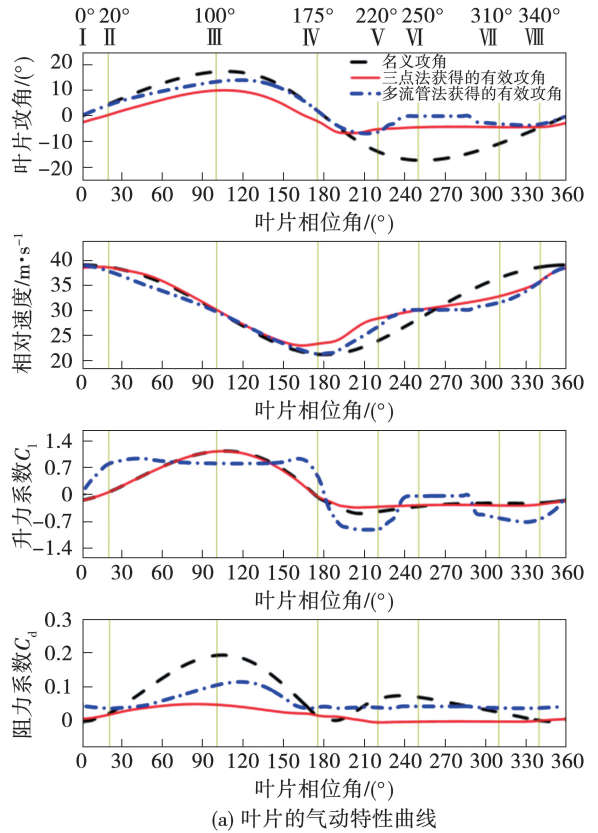
考虑到垂直轴风力机的二维模型忽略了塔架与支撑杆,本文数值模拟结果与实验结果相比,总体变化趋势基本保持一致,并且捕捉到了最佳尖速比 2.65,计算结果具有可信性。

3.2 不同尖速比下叶片气动性能

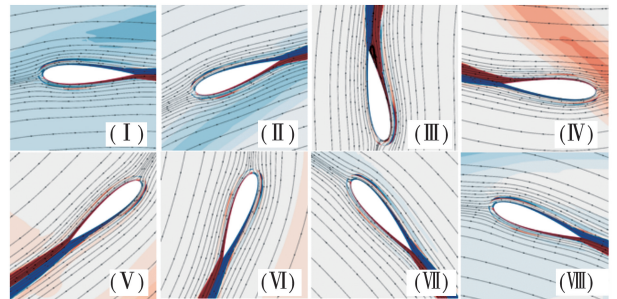
基于不同尖速比 3.35, 2.65, 2.25 和 1.85 下垂

直轴风力机的数值模拟结果,运用三点法确定叶片在各周向方位的有效攻角和升、阻力系数,结合流场分析垂直轴风力机叶片的动态失速特征。

尖速比为 3.35 时,在垂直轴风力机叶片一个运动周期内,采用三点法计算得到的有效攻角、相对速度、升力系数和阻力系数及对应叶片周围流线、涡量分布如图 7 所示,并相应给出了名义攻角、多流管法获得的有效攻角。



(a) 叶片的气动特性曲线



(b) 叶片周围流线、涡量分布

图 7 气动特性曲线及对应叶片周围流线、涡量分布 ($\lambda = 3.35$)

Fig.7 Aerodynamic characteristic curves of blade as well as streamlines and vorticity distributions around blade ($\lambda = 3.35$)

从图7中可以发现,当尖速比为3.35时,通过三点法和多流管法得到的有效攻角和相对速度基本一致,但与名义攻角存在显著差异,特别是下游区域,主要原因是名义攻角没有考虑诱导速度的影响。而多流管法在计算气动数据时,采用Viterma Extrapolation翼型气动性能外推模块得到叶片在360°攻角范围内的升、阻力系数,这与数值模拟所采用的方法有所不同,故导致两者计算得到的升、阻力系数存在一定差异。

在大尖速比为3.35时,叶片附近的流动基本为附着流动,单个叶片攻角的变化规律大致呈正弦趋势,变化范围在0°~20°之间。选取具有代表性的8个阶段进行详细分析。在初始阶段I~II时,叶片前缘和尾缘处为高压区,流体流动基本附着在叶片上,未出现分离。在阶段III时,叶片尾缘局部出现了流动分离,但大部分流体仍较好地贴合在叶片表面。在阶段IV后,叶片周围压力分布开始与初始位置的压力分布相似。在垂直轴风力机下游的流动中,对于阶段V~VIII,虽然下游区域的攻角和升、阻力系数受到上游叶片尾流的影响,但有效攻角较小,也未观察到明显的流动分离现象。图8分别给出了部分方位处单个叶片周围的压力分布和对应风轮平面上的涡量分布。

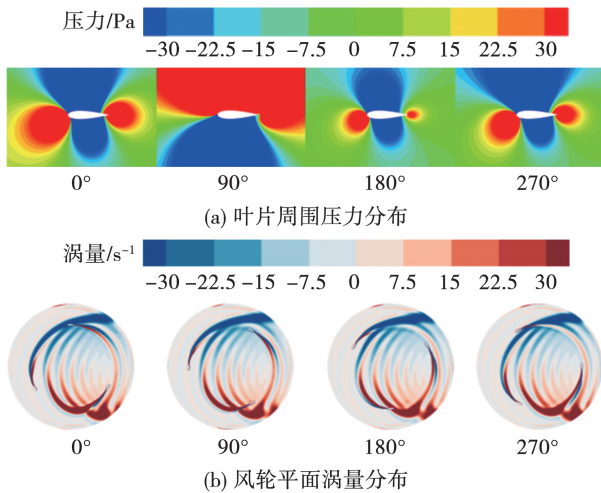
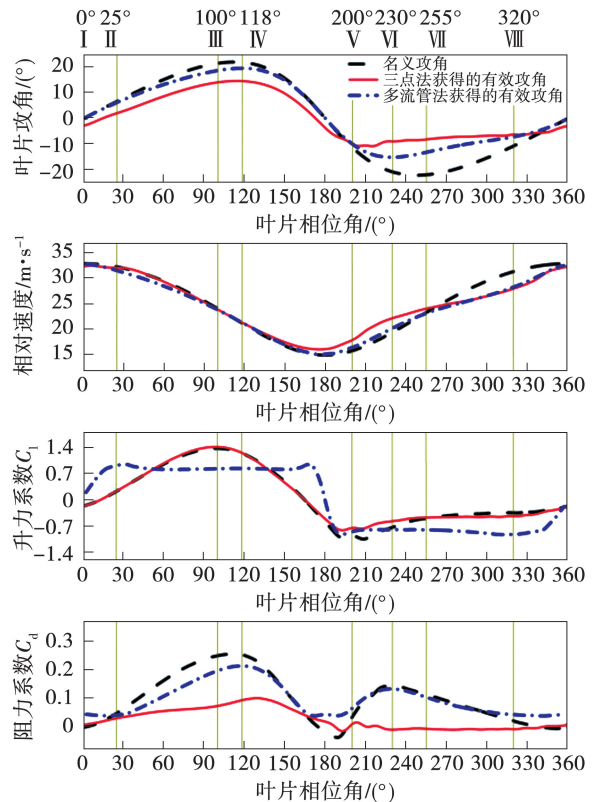


图8 叶片周围压力、涡量分布($\lambda = 3.35$)

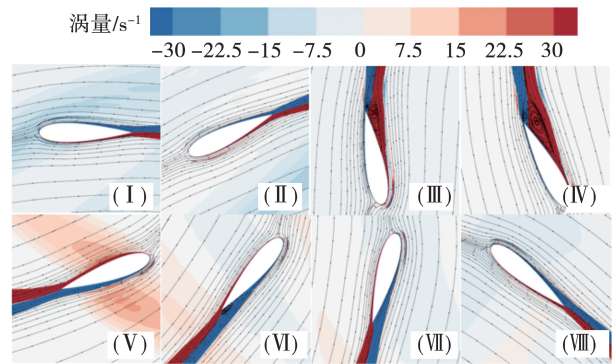
Fig.8 Pressure and vorticity distributions around blade ($\lambda = 3.35$)

图9为尖速比为2.65时垂直轴风力机叶片在一个运动周期内,采用三点法计算得到的有效攻角、

相对速度、升/阻力系数以及流线、涡量分布。



(a) 叶片的气动特性曲线



(b) 叶片周围流线、涡量分布

图9 叶片的气动特性曲线及对应叶片周围流线、涡量分布($\lambda = 2.65$)

Fig.9 Aerodynamic characteristic curves of blade as well as streamlines and vorticity distributions around blade ($\lambda = 2.65$)

由图9可以发现,基于三点法和多流管法计算得到的有效攻角和相对速度,分别与名义攻角及其对应的相对速度相比,整体变化趋势基本吻合。但在阶段III~IV中,叶片尾缘出现两个方向相反的分流涡,呈现轻度失速状态。结合图10看,在下游阶段,叶片切割上游尾迹脱落涡,但由于尾流强度较

弱,对攻角和升、阻力系数没有产生明显的影响。

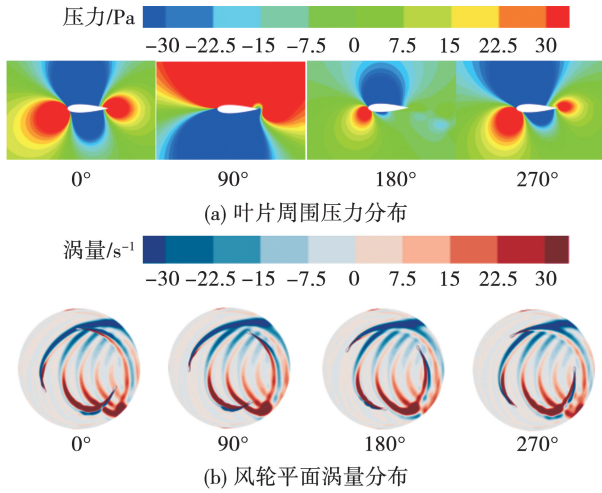
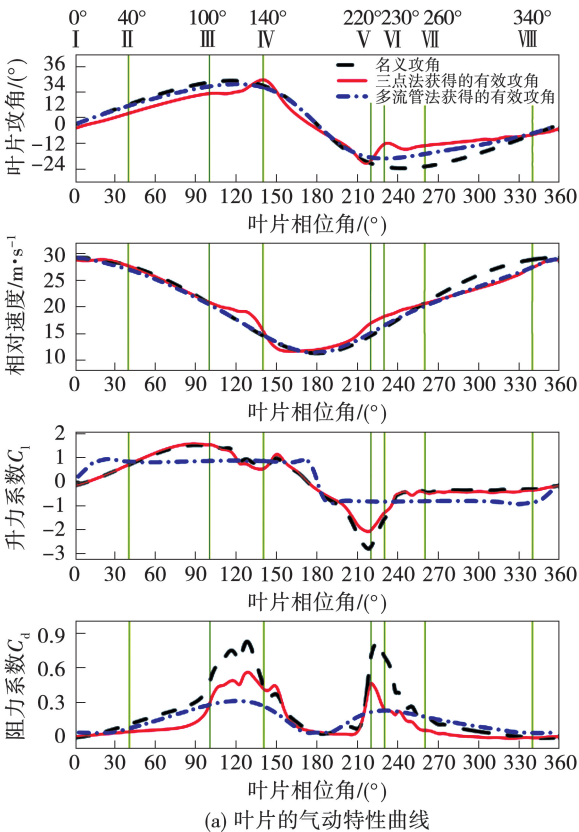


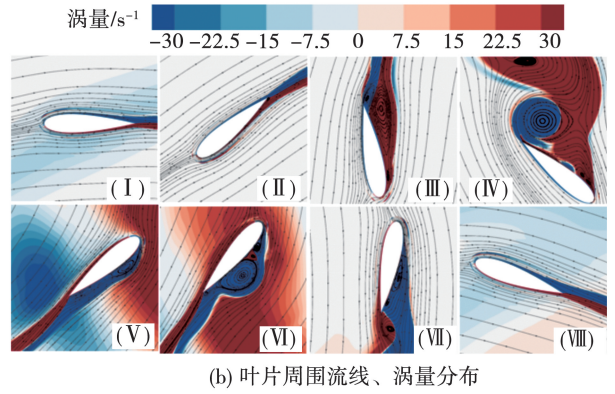
图 10 叶片周围压力、涡量分布 ($\lambda = 2.65$)

Fig. 10 Pressure and vorticity distributions around blade ($\lambda = 2.65$)

图 11 给出了尖速比为 2.25 时垂直轴风力机叶片在一个运动周期内,采用三点法计算得到的有效攻角、相对速度、升/阻力系数以及流线、涡量分布。



(a) 叶片的气动特性曲线



(b) 叶片周围流线、涡量分布

图 11 叶片的气动特性曲线及对应叶片周围流线、涡量分布 ($\lambda = 2.25$)

Fig. 11 Aerodynamic characteristic curves of blade as well as streamlines and vorticity distributions around blade ($\lambda = 2.25$)

当尖速比为 2.25 时,叶片表面存在明显的流动分离及涡脱落现象,表现出明显的失速特征。在 $\theta = 0^\circ \sim 100^\circ$ 时,随着相位角的增大,有效攻角逐渐增大。在阶段 III 中,叶片内侧面靠近尾缘处出现两个方向相反的涡,阻力开始变大,有效攻角继续增大到 20° 左右,而相对速度逐渐减小。在阶段 IV 中,三点法计算得到的有效攻角曲线与多流管的计算结果曲线相比有一个凸起,原因是叶片在此阶段发生了显著的流动分离,伴随着涡从尾缘脱落的现象,导致阻力明显增大。而多流管方法采用了准静态气动参数,没有考虑涡的动态特性,这也是二者计算结果存在差异的主要原因。从图 12 中可知,在阶段 V ~ VI 附近叶片穿过上游脱落涡的过程中,叶片表面开始出现流动分离,有效攻角变化显著,导致升、阻力系数剧烈波动。在阶段 VII 中,流动分离现象有所缓解,随着流动的发展,在阶段 VIII 中,流动基本重新附着在叶片上。

图 13 给出尖速比为 1.85 时垂直轴风力机叶片在一个运动周期内,采用三点法计算得到的有效攻角、相对速度、升/阻力系数以及流线、涡量分布。

结合图 14,与尖速比为 2.25 的情况相比,尖速比为 1.85 时流场中的涡系结构表现得更为复杂,攻角变化的幅值更大,相对速度整体减小,且在该尖速比下,通过三点法和多流管两种方法计算得到的升、阻力系数差异更为显著。

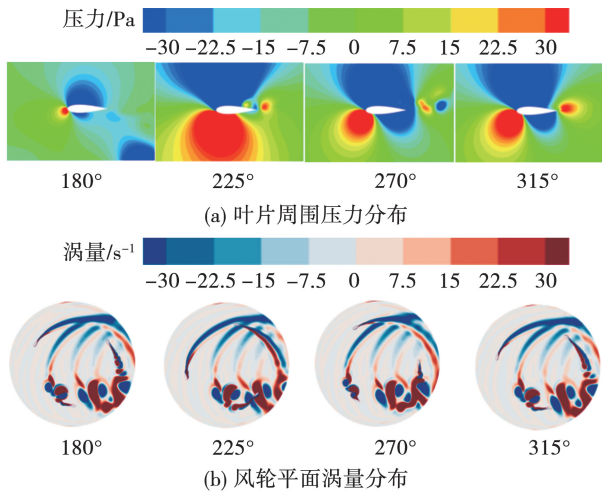
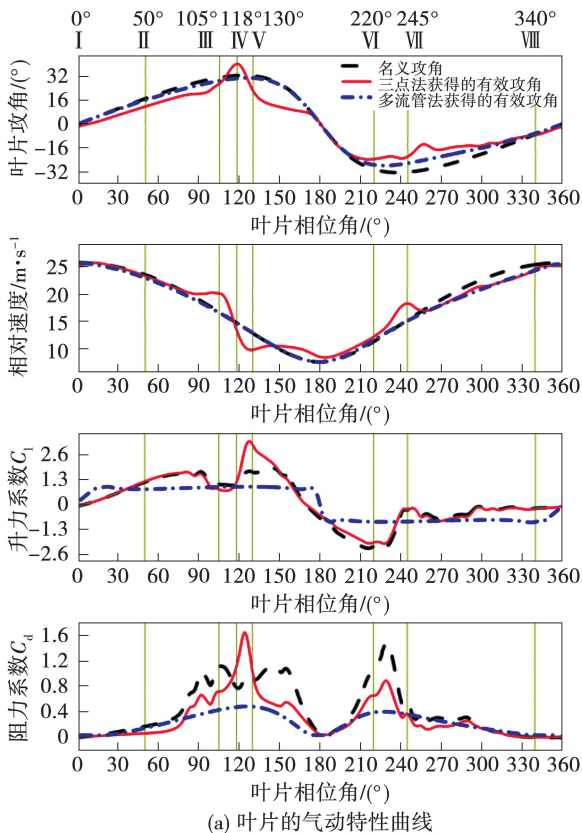


图 12 尖速比为 2.25 时叶片周围压力、涡量分布
Fig. 12 Pressure and vorticity distributions around blade at $\lambda = 2.25$

由图 13 可知,在阶段 III ~ V 中,叶片表面发生了显著的流动分离,出现了大尺度的涡脱落现象,攻角变化剧烈,涡旋中心向叶片前缘移动,阻力增大,但受脱落涡诱导速度的影响,升力增加。而在阶段 IV ~ V 中,部分相位角处的阻力系数甚至超过了 1.5。在阶段 VI ~ VII 中,叶片表面又产生新的涡,且此时叶片穿过上游的脱落涡,导致阻力系数存在较大的起伏变化。



(a) 叶片的气动特性曲线

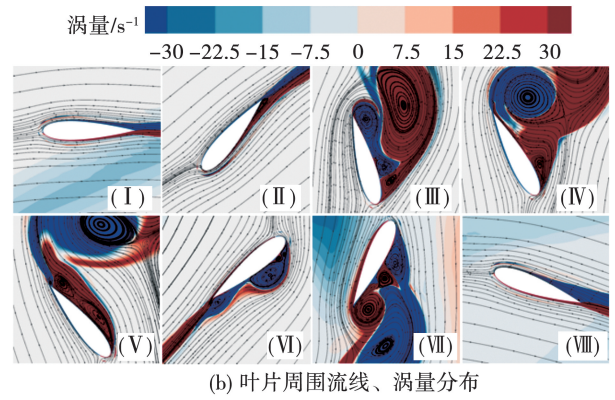


图 13 叶片的气动特性曲线及对应叶片周围
 流线、涡量分布 ($\lambda = 1.85$)

Fig. 13 Aerodynamic characteristic curves of blade as well as streamlines and vorticity distributions around blade ($\lambda = 1.85$)

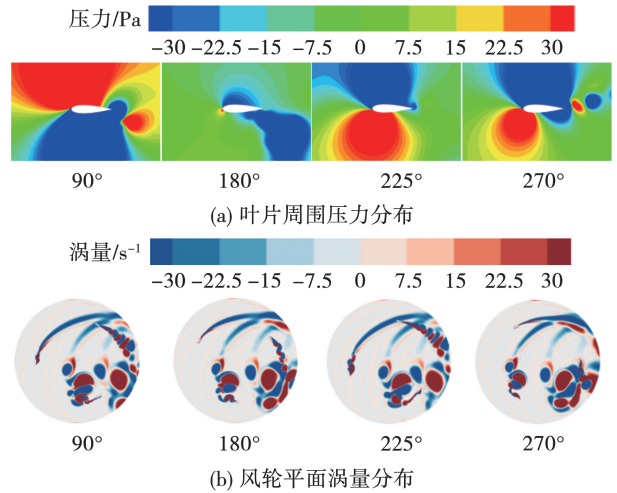


图 14 尖速比为 1.85 时叶片的气动特性曲线及叶片
 周围压力、涡量分布

Fig. 14 Aerodynamic characteristic curves of blade as well as pressure and vorticity distributions around blade at $\lambda = 1.85$

为了更好地对比不同尖速比下垂直轴风力机的气动性能,以升力系数下降作为动态失速的起始位置,分析叶片周围流动分离情况对攻角等气动参数的影响。表 2 给出了垂直轴风力机叶片开始出现动态失速时的相位角 θ_{DS} 、有效攻角 α_{DS} ,以及此方位对应的升力系数 $C_{l,DS}$ 、阻力系数 $C_{d,DS}$ 和升阻比 $C_{l,DS}/C_{d,DS}$ 。

从表 2 中可以发现,动态失速开始的相位角位于 θ_{DS} 为 $80^\circ \sim 105^\circ$ 之间,随着尖速比的减少,失速行

为显著提前,且失速时对应的有效攻角增大,叶片周围流动分离现象显著,受脱落涡诱导速度的影响,对应的升力系数也有所增加。此外,动态失速开始时的阻力系数随着尖速比的减小明显增加,而升阻比显著降低。

表 2 不同尖速比下动态失速开始的主要参数

Tab.2 Main parameters representing the onset of dynamic stall at different tip speed ratios

尖速比	$\theta_{DS}/(^{\circ})$	$\alpha_{DS}/(^{\circ})$	$C_{l,DS}$	$C_{d,DS}$	$C_{l,DS}/C_{d,DS}$
3.35	105.0	9.990	1.125	0.045	25.0
2.65	99.0	14.150	1.401	0.070	20.0
2.25	88.0	17.010	1.569	0.120	13.1
1.85	80.5	19.588	1.707	0.368	4.6

3.3 气动力系数迟滞闭环

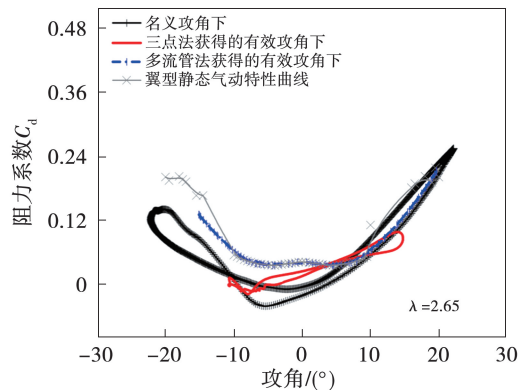
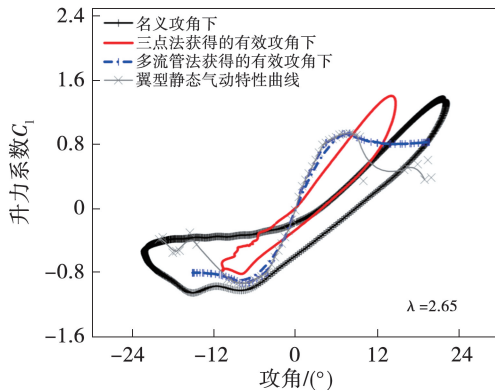
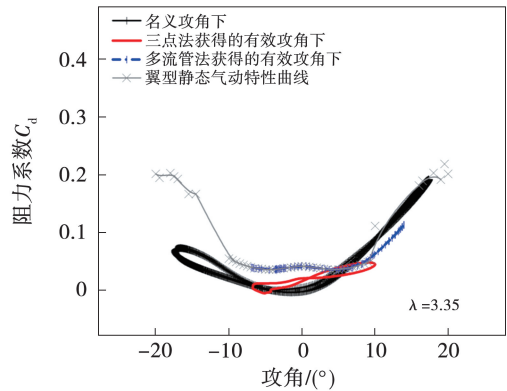
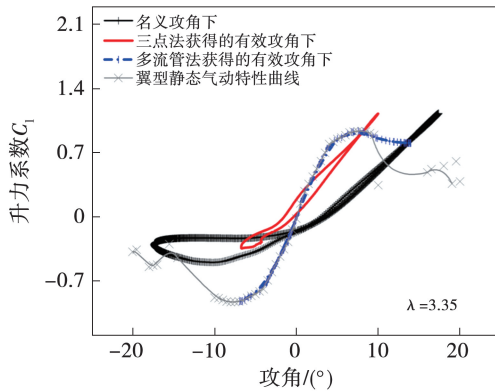
为了进一步描述垂直轴风力机的动态失速特征,图 15 给出了不同尖速比下单个叶片运动一个周期的升力系数-攻角和阻力系数-攻角曲线。其中实线为采用三点法计算得到的结果,竖直线为名义攻角计算值,点划线为多流管法计算值,叉号线为翼

型静态气动性能曲线。

采用多流管法的计算结果曲线与翼型静态气动性能曲线相比,二者在小攻角处基本一致。然而,三点法计算得到的升力系数-攻角和阻力系数-攻角曲线存在明显的滞后,反映了叶片动态失速时气动参数的迟滞效应。

在三点法的计算结果中,当攻角超过静态失速攻角时,随着攻角的增加,升力系数仍不断增大,且远高于静态条件下所允许的最大升力系数。另外,尖速比的大小会对叶片非线性气动载荷产生显著影响,尖速比越小,升、阻力系数与攻角变化的相位差和迟滞现象就越显著,关系也更复杂,迟滞环所包含的范围也越大。

由于名义攻角没有考虑诱导速度的影响,因此,尖速比不同时名义攻角下叶片的气动特性曲线与三点法获得的结果存在差异。在大尖速比 $\lambda = 3.35$ 下,由于流动分离区域较小,曲线形态略有接近。但在 $\lambda = 1.85$ 下出现了深度失速,叶片表面出现了大尺度的涡脱落现象,曲线形状存在明显差异。



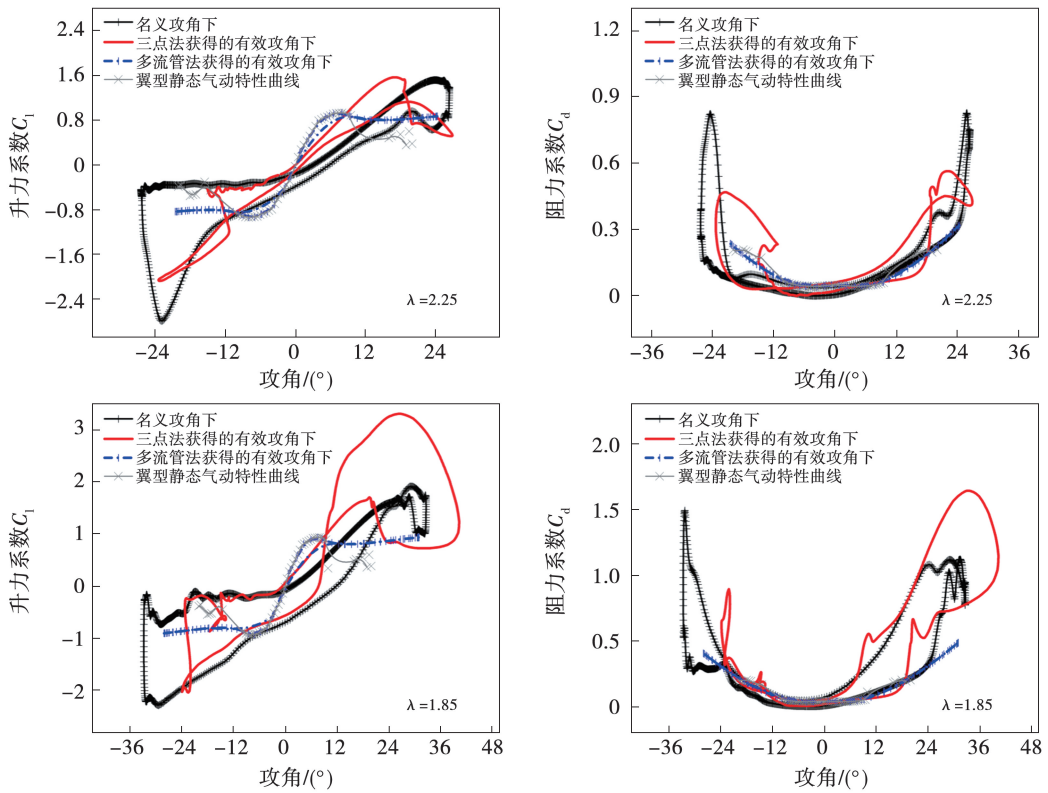


图 15 不同尖速比下单个叶片运动一个周期的升力系数 - 攻角和阻力系数 - 攻角曲线

Fig. 15 Curves of lift coefficient vs. angle of attack and drag coefficient vs. angle of attack of single blade moving for one cycle at different tip speed ratios

4 结论

(1) 随着尖速比减小,叶片表面脱落涡产生的非定常气动力对叶片气动性能影响增大,垂直轴风力机叶片表面发生失速的相位角不断提前,且对应的有效攻角增大,能达到的最大升力系数也随之增大。

(2) 采用三点法计算得到的有效攻角发生突变的相位角处,流动分离现象显著。随着尖速比的减小,叶片攻角变化幅值大幅增加,相对速度整体减小,升、阻力系数波动更为剧烈,升、阻力系数与攻角关系曲线的迟滞环所包含的范围也增大。在尖速比为 1.85 时,叶片表面压力变化更为复杂,叶片尾缘涡脱落现象更为剧烈,上游尾迹脱落涡对下游叶片产生明显干扰。采用三点法计算得到的有效攻角曲线在上游叶片相位角为 120° 附近和下游处有明显的凸起。

(3) 相较于名义攻角和多流管法获得的有效攻角,三点法考虑了涡系诱导速度的影响,以及上游尾流对下游叶片运动的干扰。在研究垂直轴风力机的

动态失速特性时,采用有效攻角进行分析可为建立适用的动态失速模型提供有效参考。

参考文献:

[1] 王仲颖. 中国战略性新兴产业研究与发展: 风能[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
WANG Zhongying. R&D of China's strategic new industries: Wind energy[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2013.

[2] 张志英, 赵萍, 李银凤. 风能与风力发电技术(第2版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
ZHANG Zhiying, ZHAO Ping, LI Yin Feng. Wind energy and wind power generation technology (second edition) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.

[3] 帕拉斯基沃尤. 垂直轴风力机原理与设计[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2013.
PARASCHIVOIU I. Wind turbine design with emphasis on Darrieus concept [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2013.

[4] STROM B, BRUNTON S L, POLAGYE B. Intracycle angular velocity control of cross-flow turbines[J]. Nature Energy, 2017, 2: 17103.

[5] 倪露露. 垂直轴风力机组气动特性研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2021.
NI Lulu. Study on aerodynamic performance characteristics of verti-

- cal axis wind turbine in array configurations [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2021.
- [6] ARAYA D B, DABIRI J O. Vertical axis wind turbine in a falling soap film [J]. *Physics of Fluids*, 2015, 27(9): 091108.
- [7] BARSKY D A, POSA A, RAHROMOSTAQIM M, et al. Experimental and computational wake characterization of a vertical axis wind turbine [C]//32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Atlanta, GA, 2014.
- [8] 张松, 莫亦寒, 张声雨, 等. 垂直轴风力机翼型动态气动特性研究 [J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(7): 1377 - 1382.
ZHANG Song, MO Yihan, ZHANG Shengyu, et al. Study on unsteady aerodynamic characteristics of airfoils of Darrieus wind turbine [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(7): 1377 - 1382.
- [9] STRIEKLAND J H. Darrieus turbine: A performance prediction model using multiple streamtubes [R]. No. SAND-75-0431, Albuquerque, N. Mex. (USA); Sandia Labs, 1975.
- [10] PARASCHIVOIU I. Aerodynamic loads and performance of the Darrieus rotor [J]. *Journal of Energy*, 1981, 6(6): 406 - 412.
- [11] 冯国英, 张守斌. 考虑动态失速与风轮支架损失的 H 型垂直轴风力机自由尾迹模型构建 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(6): 169 - 175.
FENG Guoying, ZHANG Shoubin. Free vortex wake model for H-shaped vertical axis wind turbines considering dynamic stall effect and struts loss [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(6): 169 - 175.
- [12] BUCHNER A J, LOHRY M W, MARTINELLI L, et al. Dynamic stall in vertical axis wind turbines; Comparing experiments and computations [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 146: 163 - 171.
- [13] BUCHNER A J, SORIA J, HONNERY D, et al. Dynamic stall in vertical axis wind turbines; Scaling and topological considerations [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 841: 746 - 766.
- [14] KEISAR D, ARAVA I, GREENBLATT D. Dynamic-stall-driven vertical axis wind turbine; An experimental parametric study [J]. *Applied Energy*, 2024, 365: 123199.
- [15] LI Q A, MAEDA T, KAMADA Y, et al. Study on stall behavior of a straight-bladed vertical axis wind turbine with numerical and experimental investigations [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 164: 1 - 12.
- [16] REZAEIHA A, MONTAZERI H, BLOCKEN B. CFD analysis of dynamic stall on vertical axis wind turbines using scale-adaptive simulation (SAS); Comparison against URANS and hybrid RANS/LES [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 196: 1282 - 1298.
- [17] IBRAHIM A A, ELBAZ A M R, MELANI P F, et al. Power augmentation of Darrieus wind turbine blades using trapped vortex cavity [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2022, 223: 104949.
- [18] 刘青松, 缪维跑, 罗帅, 等. 吹吸联合射流对垂直轴风力机气动特性的影响研究 [J]. *动力工程学报*, 2023, 43(8): 1022 - 1029.
- LIU Qingsong, MIAO Weipao, LUO Shuai, et al. Aerodynamic performance investigation of vertical axis wind turbines with the synergistic effect of blowing and suction [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2023, 43(8): 1022 - 1029.
- [19] DAVE M, FRANCK J A. Analysis of dynamic stall development on a cross-flow turbine blade [J]. *Physical Review Fluids*, 2023, 8(7): 074702.
- [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 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vancouver, Canada, 2010.
- [21] PARASEHIVOIU I. Double-multiple streamtube model for studying vertical-axis wind turbines [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1988, 4(4): 370 - 377.
- [22] 田甜, 孙翀, 竺晓程, 等. 垂直轴风力机尾迹的时空特性 [J]. *动力工程学报*, 2023, 43(3): 341 - 348, 371.
TIAN Tian, SUN Chong, ZHU Xiaocheng, et al. The spatial-temporal evolution of vertical axis wind turbines wake [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2023, 43(3): 341 - 348, 371.
- [23] MELANI P F, BALDUZZI F, BRANDETTI L, et al. An experimental and numerical analysis of the dynamic variation of the angle of attack in a vertical-axis wind turbine [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1618(5): 052064.
- [24] JOST E, KLEIN L, LEIPPRAND H, et al. Extracting the angle of attack on rotor blades from CFD simulations [J]. *Wind Energy*, 2018, 21(10): 807 - 822.
- [25] ZILIC DE ARCOS F, VOGEL C R, WILLDEN R H J. Extracting angles of attack from blade-resolved rotor CFD simulations [J]. *Wind Energy*, 2020, 23(9): 1868 - 1885.
- [26] ZHONG W, SHEN W Z, WANG T G, et al. A new method of determination of the angle of attack on rotating wind turbine blades [J]. *Energies*, 2019, 12(20): 4012.
- [27] RAHIMI H, HARTVELT M, PEINKE J, et al. Investigation of the current yaw engineering models for simulation of wind turbines in BEM and comparison with CFD and experiment [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 753(2): 022016.
- [28] BIANCHINI A, BALDUZZI F, FERRARA G, et al. A critical analysis on low-order simulation models for Darrieus VAWTs; How much do they pertain to the real flow? [C]//ASME Turbo Expo 2018; Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Oslo, Norway, 2018.
- [29] 李根, 缪维跑, 李春, 等. 垂直轴风力机气动特性与涡脱落模态分析 [J]. *太阳能学报*, 2023, 44(2): 41 - 51.
LI Gen, MIAO Weipao, LI Chun, et al. Aerodynamic characteristics and vortex shedding modal analysis of vertical axis wind turbine [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(2): 41 - 51.