

基于CFD的二维垂直轴风力机性能计算

刘 陈, 运洪禄, 吕续舰

(南京理工大学能源与动力工程学院, 南京 210094)

摘 要: 采用计算流体力学方法(CFD)针对垂直轴风力发电机,开展简化的二维绕流特性研究。首先,基于开放型转子和增强型转子,研究网格节点数和壁面 y^+ 、计算时间步长和湍流模型等的变化对计算结果的影响,对计算模型和方法进行确认。随后,计算分析增强型垂直轴风力机与开放型垂直轴风力机的特性。结果表明,与开放性垂直轴风力发电机相比,增强型垂直轴风力发电机的功率系数和转矩系数有明显增加,且达到最大值的位置向叶尖速比增大的方向移动。然后对增强型垂直轴风力机发电机在不同来流风速下进行计算,发现增强型垂直轴风力发电机的转子转矩随来流风速增加,而转矩系数和功率系数与来流风速无关。最后,针对定子叶片在不同的方向开展计算研究。结果表明,定子叶片在不同方向时,增强型垂直轴风力机的转子转矩不同,且转矩到达峰值的位置也不同;在当前3个方向角中,叶片处于 0° 方向角时风力机具有最高的转矩系数,即具有最佳的功率系数。

关键词: 风力机; 计算流体力学; 叶尖速比; 开放型转子; 增强型转子

中图分类号: TK83

文献标志码: A

0 引 言

因为技术水平等方面的制约,人们起初认为垂直轴风力机的叶尖速比 λ (叶尖处的线速度和来流风速之比)永远都小于1,风能利用率也比水平轴风力发电机低^[1]。之前是按叶素动量理论来设计垂直轴风力发电机的叶片^[2],但来流风吹过垂直轴风力机的流动属于严重分离的非定常流动,这种严重分离的非定常流动不适用于用叶素理论进行分析研究,无法准确预测垂直轴风力机的气动特性,这也是垂直轴风力机在之前一直得不到发展的一个重要原因^[3]。随着计算流体力学的快速发展,通过实践证明,人们逐渐认识到仅限于阻力型垂直轴风力机的叶尖速比不能大于1。而对于升力型或升阻复合型^[4]垂直轴风力机的叶尖速比可达到6,且其风能利用率也有可能高于水平轴风力机^[5]。

垂直轴风力机和水平轴风力机相比还是有很大优势,比如良好的受风多向性、稳定的受力特性,以及更易实现直接驱动,发电机可安装在底部,安装和维护很方便等^[6]。每年的平均风速风能资源图通常低估了阵风地区实际风能潜力^[7-8],因此风力发电机组的扩建与安装逐渐从农村和偏远地区转移到了城市建筑环境中。

近年来建筑环境中的小型风力发电机组的发展主要集中在水平轴风力发电机组上,但有研究表明,相比而言垂直轴风力发电机组更适合应用在城市地区^[9],且中小型垂直轴风力机对于风能的利用得到快速发展^[10]。建筑环境中存在的低风速和高湍流制约了垂直轴风力发电机组的研究进展,所以就有一些研究人员开始探索增强设备应用在垂直轴风力机上,以适应建筑环境中常见的低风速和高湍流。例如唐静^[11]研究圆台型聚风罩对垂直轴风力机起动性与输出功率的影响。Pope等^[12]提出并分析一个全方位的垂直轴风力发电机,并且针对建筑环境而设计,但功率系数较低,只有约0.12。Takao等^[13]提出并研究一个定向的导叶排,以增加直叶片垂直轴风力机的性能,关注点在导流叶片的几何形状上,当角度为 45° 时功率系数比开放型转子高1.8倍。为研究此类增强型垂直轴风力机功率系数较低问题以及导流叶片的安装角对功率输出的影响,本文针对一种常见的垂直轴风力机,采用计算流体力学方法研究了增强型和开放型风力机的特性差异,同时分析增强型风力机的定子(导流叶片)方向和来流速度等因素对风力机性能的影响,试图为垂直轴风力机的设计应用提供有价值的参考。

收稿日期: 2019-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(51609115); 中央高校基本科研业务费专项资金(30918012201)

通信作者: 吕续舰(1984—),男,博士、副教授,主要从事计算流体力学和实验流体力学方面的研究。xjlyu@njut.edu.cn

1 计算模型

转子的三维模型由3个叶片和每个叶片上的2个支撑臂连接到中心轴组成。对于转子叶片和支撑臂,采用对称的NACA0018翼型,其主要特征参数由表1列出,垂直和水平叶片的桨距角被设定为零度^[14]。为简化研究,本文针对垂直轴风力机(VAWT)的一个二维模型开展计算。

表1 转子的性质

Table 1 Properties of rotor

NACA0018	弦长 c/mm	厚度 t/mm	跨度 s/mm	数量 N
转子叶片	490	88.2	2600	3
支持手臂	250	45.0	1800	6

所谓的增强型转子就是在原本开放型转子周围增加全向定子,对来流风向起到导流的作用。如图1所示,图1a为增强型转子,图1b为开放型转子。

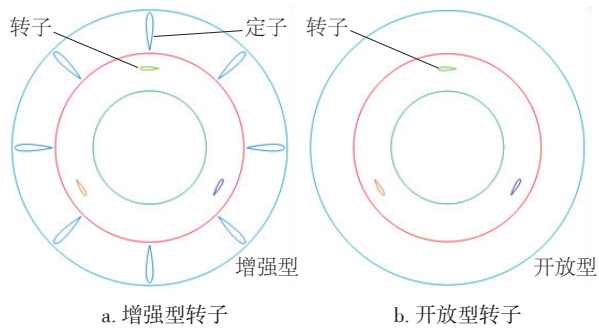


图1 增强型和开放型垂直轴风力机

Fig. 1 Sketch for vertical axis augmented and open wind turbine

增强型转子的定子由8个垂直叶片和2个锥形表面组成。定子叶片集中转子附近的来流风,而锥形表面的外边缘则促使上方和下方的湍流混合,降低定子内部的背压,增加风力发电机的功率输出。定子叶片的翼型也是NACA0018,定子叶片的几何特性列于表2中。

表2 定子的性质

Table 2 Properties of stator

NACA0018	弦长 c/mm	厚度 t/mm	展长 s/mm	数量 N
定子叶片	1000	180	2600/3600	8

注:展长为8个定子叶片所在圆环区域的内径和外径。

1.1 计算域和网格划分

二维流域由1个带圆孔的固定矩形外域和1个适应孔径的圆形内域2个不同的域组成。固定的矩

形外域被认定为计算外域,圆形内域被确定为开放型垂直轴风力机的转子域和增强型垂直轴风力机的定子-转子域^[15]。

图2展示了计算外域中采用的主要尺寸和边界条件。定义转子直径 $D_r = 4000 \text{ mm}$ 为转子叶片弦线到垂直轴风力机轴线距离。计算域的宽度设置为转子直径的6倍,入口边界条件被设定为10倍转子直径,因为入口条件距离转子较近可能导致计算的偏差;出口边界条件被设定为顺风向14倍转子直径,以便检测风力机运行期间的尾流形成。入口边界在计算域左侧,定义湍流强度为10%,以模拟风力机在建筑环境中的运行情况。出口边界定义在计算域右侧,相对压力为0 Pa,它代表一个开放性的条件。为减小边界效应,计算域顶部和底部均采用对称边界条件。

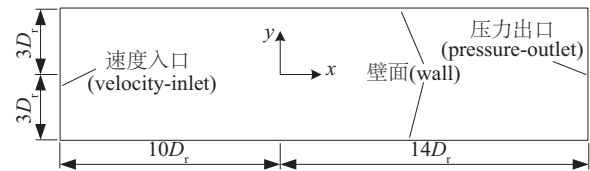


图2 计算外域和边界条件

Fig. 2 Computation domain and boundary conditions
(D_r = rotor diameter)

在计算域圆孔与转子域(或定子-转子域)之间采用界面边界条件,以保证流体的连续性和较快的收敛性。转子域被分成2个不同的子区域:转子叶片周围的圆环形子区域和转子内的圆形子区域,对这2个子域施加角速度 ω 。这2个子域分别位于计算域的圆形孔中,中心轴穿过中心。这2个子域使用非结构化网格进行网格划分,因为它们可遵循复杂的几何形状。

类似的,对于定子域也采用非结构网格,这样很容易实现和转子域的匹配,所有定子叶片都考虑了壁面边界条件。图3是增强型转子边界条件及网格示例,增强型转子的全向定子叶片可转动,其中 α 表示定子叶片的方向为 30° 。

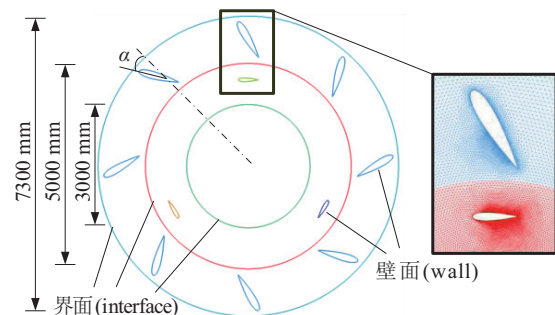


图3 边界条件及局部网格示意图

Fig. 3 Boundary conditions and detailed grids around blade

1.2 计算模型的确认

为确认当前计算模型的合理性,分别对开放型垂直轴风力机和增强型垂直轴风力机的计算网格进行独立性分析。首先对开放型垂直轴风力机的网格依赖性进行分析,考虑来流风速 $U_{\infty} = 6 \text{ m/s}$ 、叶尖速比 $\lambda = 3.00$, 研究 10 万、19 万和 62 万这 3 种不同的网格数量对一个旋转周期内 (360°) 单位长度单个叶片转矩 T 的影响。如图 4 所示,可看出,当计算网格由 10 万调整 19 万时,转矩 T 的变化比较显著,而当网格由 19 万调整为 62 万时,转矩 T 随网格的增加无显著变化。同时,表 3 列出了采用六核 Intel E5-2630 (2.3 Hz) 工作站对 3 套不同计算网格开展计算时所需的机时。显然,计算消耗的机时与计算网格数量密切相关。根据上面的分析,网格数量为 19 万和 62 万的网格得到的风力机完整旋转 360° 时转矩有较好的一致性,即 19 万网格时计算结果已基本收敛,考虑计算耗费机时的成本,后续开放性转子的计算均采用 19 万的网格。

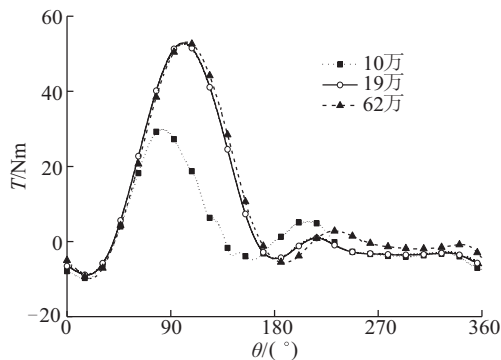


图 4 开放型转子的网格依赖性研究

Fig. 4 Mesh dependence study on open rotor

表 3 网格数量及计算时间

Table 3 Number of elements and simulation time

网格数量	10 万	19 万	62 万
计算时间/min	874	1169	2222

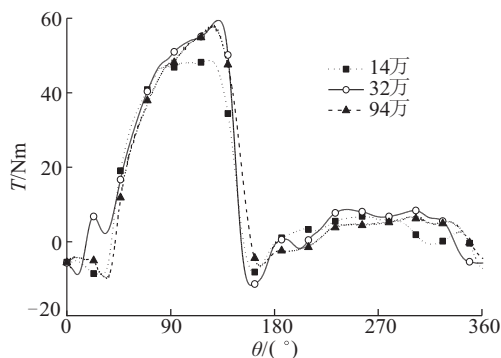


图 5 增强型转子的网格依赖性研究

Fig. 5 Mesh dependence study on augmented rotor

表 4 网格数量及计算时间

Table 4 Number of elements and simulation time

网格数量	14 万	32 万	94 万
计算时间/min	811	1707	3652

类似的,对开放型垂直轴风力机,考虑计算工况 $U_{\infty} = 6 \text{ m/s}$ 和 $\lambda = 3.00$, 同样研究 3 套不同网格 (14 万、32 万和 94 万) 时转矩的变化。图 5 所示为增强型转子完整旋转一个周期过程中单位长度单个叶片转矩 T 的变化。可看出,当计算域网格由 14 万增至 32 万时,转矩 T 变化较大,而当网格数量为 32 万增至 94 万时,计算得到的转矩非常接近。表 4 列出了增强型垂直轴风力机网格依赖性研究中的 3 套计算网格及对应计算所消耗的机时。可认为,当前的 32 万网格数即为增强型风力机的计算网格收敛点,后续增强型垂直轴风力机的研究均选取当前的 32 万网格数进行计算。

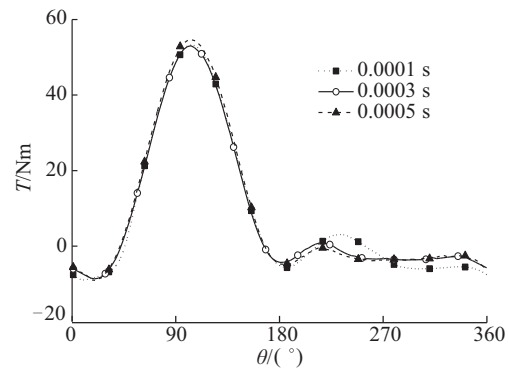


图 6 开放型转子的时间依赖性研究

Fig. 6 Time dependence study on open rotor

为在最终结果中实现良好的收敛性,需要合理选择用于计算的时间步长^[16]。以开放型垂直轴风力机为例,分别考虑计算时间步长为 $dt = 0.0001 \text{ s}$, $dt = 0.0003 \text{ s}$ 和 $dt = 0.0005 \text{ s}$, 得到对应风力机旋转一圈的转矩变化曲线如图 6 所示。可看出,3 个时间步长对应的转矩计算结果总体趋势具有较好的一致性,且在峰值处差异较小。但在 $80^\circ \sim 150^\circ$ 范围内,当时间步长由 0.0005 s 减小至 0.0003 s 时,计算结果求和差异为 4.41% ; 当时间步长进一步由 0.0003 s 减小至 0.0001 s 时,计算结果求和差异为 0.97% 。由于计算步长越小,计算机时耗费越高,所以选择 0.0003 s 的时间步长用于后续计算研究。

考虑标准 $k-\omega$ 模型、标准 $k-\omega$ 模型和 SST 模型 3 种不同的 RANS 湍流模型。图 7 所示为不同湍流模型下,计算得到开放型风力机完整旋转 360° 时的转矩变化曲线。可发现,在这 3 种湍流模型中,标准 $k-\omega$ 模型和 SST 模型计算得到的结果曲线较为接近,与标准 $k-\omega$

模型的计算结果曲线在峰值处差异较明显。已有研究表明, SST 模型在不利的压力梯度和分离流动中表现良好^[17]。SST 模型的原理是 2 种不同的湍流模型的组合, 即边界层内部采用 $k-\omega$ 模型和自由流中的采用 $k-\epsilon$ 模型。一般认为, SST 模型能够比标准 $k-\omega$ 模型和标准 $k-\epsilon$ 模型更详细的模拟在低叶尖速比下动态失速期间发生的漩涡。所以, 本文后续计算研究均采用 SST 模型。

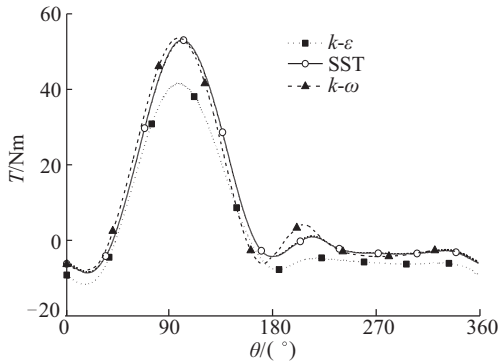


图7 开放型转子的湍流模型研究

Fig. 7 Turbulence model study on open rotor

2 计算结果及讨论

计算研究和讨论分 3 个部分展开。首先, 考虑在 $U_\infty = 6 \text{ m/s}$ 时不同的叶尖速比下, 将开放型垂直轴风力机与增强型垂直轴风力机相比。其次, 针对不同来流速度 U_∞ 下 (6、8、10 和 12 m/s), 叶尖速比变化对增强型垂直轴风力机性能的影响。最后, 保证转子倾斜角为 0° , 研究定子叶片的取向对增强型风力机性能的影响。

计算中主要考虑平均转矩系数和平均功率系数与叶尖速比的关系。平均转矩系数 $C_{t,ave}$ 和平均功率系数 $C_{p,ave}$ 由式(1)和式(2)给出:

$$C_{t,ave} = \frac{T_{ave}}{0.5\rho A_s R_s U_\infty^2} \quad (1)$$

$$C_{p,ave} = \frac{P_{ave}}{0.5\rho A_s U_\infty^3} \quad (2)$$

由于当前计算研究是考虑二维问题, 所以在 Z 轴方向长度一般取单位长度 1 m, 而定子直径 D_s 为 5.8 m, 因此可取 A_s 为 5.8 m^2 。转子半径 R_r 取值为 2.0 m。 ρ 为空气密度, 取值 1.225 kg/m^3 。

叶尖速比 λ 为:

$$\lambda = \frac{\omega R_r}{U_\infty} \quad (3)$$

式中, ω ——转子转速, rad/s。

2.1 开放型转子和增强型转子比较

通过比较分析增强型垂直轴风力机与开放型垂直轴风力机的输出功率, 可判断增强装置(定子)是否有助于风力机功率的输出。取 $U_\infty = 6 \text{ m/s}$, 并考虑 11 个不同的叶尖速比 λ 。对于增强型垂直轴风力机, 定子叶片固定在 0° 处。如图 8 所示, 在流场充分发展之前, 转矩随风力机旋转呈现典型的波动特征。

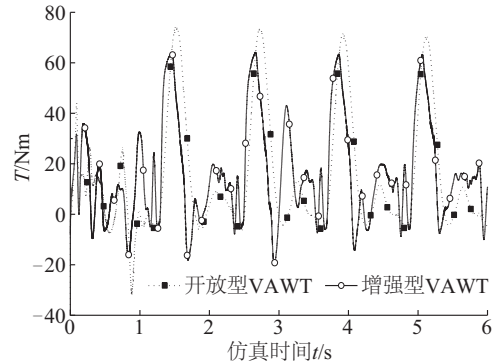


图8 开放型和增强型 VAWT 的转矩随时间变化曲线

Fig. 8 Torque of open and augmented VAWT versus time

图 9 展示了对于开放型和增强型垂直轴风力机的平均转矩系数 $C_{t,ave}$ 随叶尖速比 λ 的变化曲线。增强型和开放型垂直轴风力机的转矩系数变化趋势相同, 均是先增加到一个峰值然后近似线性减小。当 $\lambda < 1.60$ 时, 开放型风力机的转矩系数较大, 而当 $\lambda > 1.60$ 时, 增强型风力机的转矩系数显著高于开放型。其中, 增强型风力机的转矩在 $\lambda = 2.00$ 时达到最大值 0.348, 开放型转子在 $\lambda = 1.50$ 有最大转矩值 0.281。总体来看, 增强型风力机的最大转矩系数比开放型风力机高, 并且达到最大值的位置向叶尖速比增大的方向移动。

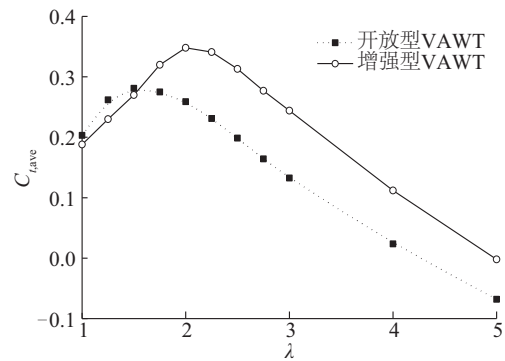


图9 平均转矩系数 $C_{t,ave}$ 与叶尖速比 λ 的关系曲线

Fig. 9 Average torque coefficient $C_{t,ave}$ versus λ

图 10 所示为开放型和增强型垂直轴风力机的功率系数 $C_{p,ave}$ 随叶尖速比 λ 的变化曲线。与转矩系数变化

趋势类似,当 $\lambda < 1.60$ 时,开放型风力机的功率系数略高于增强型;而当 $\lambda > 1.60$ 时,增强型风力机的功率系数显著高于开放型。对于开放型风力机, $\lambda = 2.25$ 时功率系数达到最大值 0.358。而对于增强型垂直轴风力机(实线),在 $\lambda = 2.50$ 时功率系数才达到最大值 0.529,且最大值是开放型转子的 1.48 倍。Chong 等^[17]的研究中也证实了全向导流叶片会提高垂直轴风力机的功率输出。

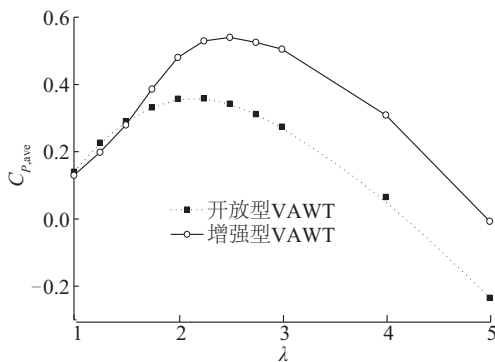


图 10 平均功率系数 $C_{p,ave}$ 与叶尖速比 λ 的关系曲线

Fig. 10 Average power coefficient $C_{p,ave}$ versus λ

2.2 不同来流风速下增强型转子性能计算

针对不同来流速度 U_∞ 下(6、8、10 和 12 m/s),研究叶尖速比变化对增强型垂直轴风力机性能的影响,对于每个速度 U_∞ 都考虑 10 个不同的叶尖速比 λ 。分析每单位叶片长度 3 个转子叶片的平均总转矩 T_{ave} ,平均功率系数 $C_{p,ave}$ 和平均转矩系数 $C_{t,ave}$ 的变化情况。

图 11 所示为不同 U_∞ 下,单位叶片长度 T_{ave} 随 λ 的变化曲线。从图 11 中看出,4 条曲线的变化趋势相同,均是先增加到一个峰值然后近似线性减小,并且 4 条曲

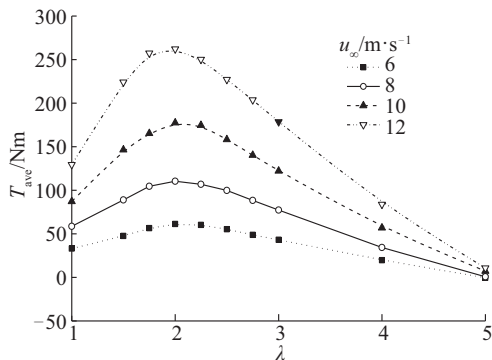


图 11 不同来流风速下增强型转子单位叶片长度转矩平均总转矩 T_{ave} 与叶尖速比 λ 的关系曲线

Fig. 11 Torque of per unit blade length versus λ for augmented rotor at different wind speeds

线均在 λ 为 2.00 时取得最大值。从图中得出单位叶片长度 T_{ave} 随着 U_∞ 的增加而增加,在 12 m/s 时 T_{ave} 的峰值是在 6 m/s 时 T_{ave} 的峰值的 4.270 倍。

图 12 展示了 4 个不同 U_∞ 下, $C_{t,ave}$ 与 λ 的关系。从图 12 中看出,随着 λ 的增加,4 条曲线均是先增加到一个峰值之后再近似线性减小,且均在 λ 为 2.00 时达到最大值。图中 4 条曲线之间的差异较小,可认为平均转矩系数与来流风速无关。图 13 给出了在 4 个不同 U_∞ 下,增强型垂直轴风力机的 $C_{p,ave}$ 与 λ 的关系。从整体来看, $C_{p,ave}$ 与来流风速无关,随着 λ 的增加都遵循相同的趋势。并且不同 U_∞ 下的 4 条曲线均在 λ 为 2.50 时达到最大值,约为 0.557。

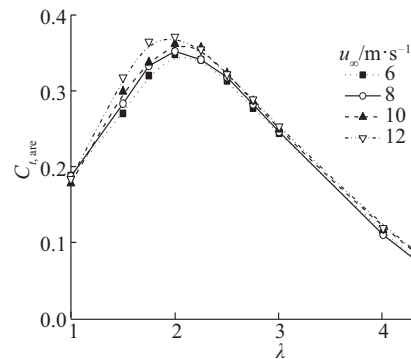


图 12 不同来流风速下增强型转子平均转矩系数 $C_{t,ave}$ 与叶尖速比 λ 的关系曲线

Fig. 12 Average torque coefficient $C_{t,ave}$ versus λ for augmented rotor at different wind speeds

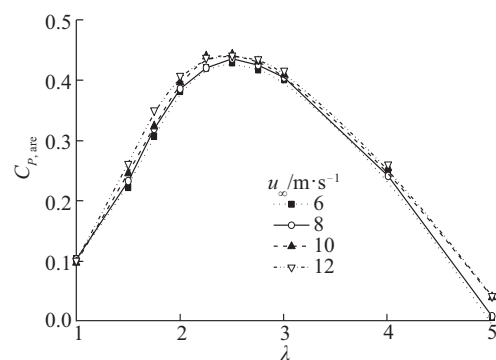


图 13 不同来流风速下增强型转子平均功率系数 $C_{p,ave}$ 与叶尖速比 λ 的关系曲线

Fig. 13 Average power coefficient $C_{p,ave}$ versus λ for augmented rotor at different wind speeds

2.3 定子叶片方向对垂直轴风力机性能的影响

考虑转子倾斜角为 0° ,研究定子叶片的取向对增强型风力机性能的影响。来流风速 U_∞ 和叶尖速比 λ 分

别设定为 6 m/s 和 2.00, 分别取定子叶片方向角为 -30° 、 0° 和 30° , 研究瞬时转矩的变化情况。

图 14 所示为定子叶片方向角分别为 -30° 、 0° 和 30° 时, 风力机旋转一周过程中转矩的波动情况。其中的 3 个峰值分别对应 3 个夹角为 120° 的转子叶片所处的位置。当定子叶片方向角为 -30° 时, 每单位叶片长度的转矩 T_{ave} (图 14a 实线) 约为 40 Nm, 总转矩仅在 270° 附近的一个小区域内为负。当定子叶片在 0° 时, 单位叶片长度转矩 (图 14b 实线) 比定子叶片

在 -30° 时的转矩大, 约为 60 Nm, 且转矩始终为正。当定子叶片方向角为 30° 时, 定子叶片每单位叶片长度的转矩约为 50 Nm (图 14c 实线), 在 150° 附近的小区域内总转矩为负值。

通过以上分析可知, 定子叶片在不同方向时, 转子叶片的转矩不同。在定子叶片在 -30° 和 30° 时存在小区域, 转子叶片的转矩为负值, 使得转子在一些方位角不能自启动。另外观察到, 在 3 种情况下总转矩曲线均存在 3 个峰值, 对应 3 个转子叶片, 但相对于定子叶片在 0° 时转矩达到峰值的位置, 定子叶片在 -30° 和 30° 时转矩达到峰值的位置分别向前或向后进行了相位移动。叶片处于 3 个不同方向角时, 0° 时具有最高的转矩系数, 即具有最佳的功率系数。

3 结 论

本文通过 CFD 方法对二维垂直轴风力机开展了计算研究, 得到以下主要结论:

- 1) 网格分辨率和计算时间步长的确认、湍流模型的比较分析结果说明, 当前计算模型能够满足本文二维垂直轴风力机的计算研究需要。
- 2) 增强型垂直轴风力机的平均转矩系数和平均功率系数与开放型垂直轴风力机计算结果相比达到最大值的位置向叶尖速比增大的方向移动。
- 3) 增强型垂直轴风力机的转子转矩随着来流风速的增加而增加。增强型垂直轴风力机的平均功率系数和平均转矩系数与来流风速无关。
- 4) 当定子叶片处于不同方向时, 增强型垂直轴风力机的转子转矩不一样, 同时转矩达到峰值的位置也不一样; 在当前 3 个方向角中, 叶片处于 0° 时风力机具有最高的转矩系数, 即具有最佳的功率系数。

[参考文献]

- [1] 张富昌. 几种新式立轴风力机设计方案[J]. 新能源, 1998, 20(9): 20-23.
ZHANG F C. Several new design schemes for vertical axis wind machine[J]. New energy, 1998, 20(9): 20-23.
- [2] 赵继华. 旋流式立轴风力机运行原理及特性[J]. 可再生能源, 2002(4): 32-33.
ZHAO J H. Operation principle and characteristics of swirl vertical axis wind turbines[J]. Renewable energy, 2002(4): 32-33.
- [3] 骆玲. 并网风电场对电网稳定性影响的数字仿真基础研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.

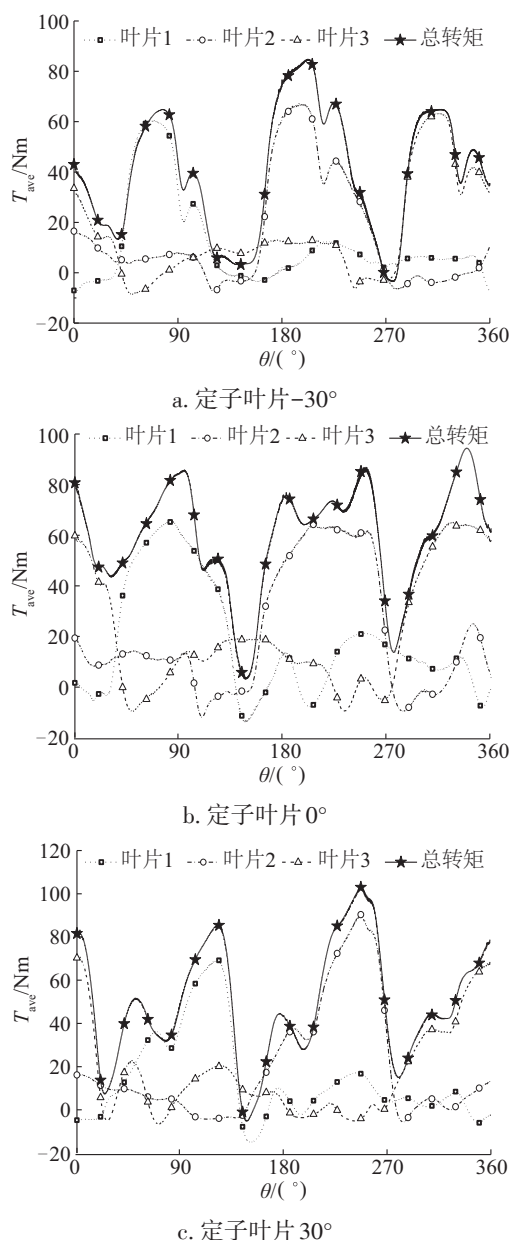


图 14 定子叶片方向角为 -30° 、 0° 、 30° 时风力机旋转一周的转矩

Fig. 14 Torque on VAWT at -30° , 0° , 30° stator-blade orientation for a single revolution

- LUO L. Basic research on digital simulation of the influence of grid-connected wind field on power grid stability [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [4] 冯放, 李岩, 赵守阳, 等. 具有升阻复合启动结构垂直轴风力机气动特性数值模拟[J]. 太阳能学报, 2018, 39(4): 1052-1059.
- FENG F, LI Y, ZHAO S Y, et al. Numerical simulation of aerodynamic characteristics of VAWT with lift-drag starter[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2018, 39(4): 1052-1059.
- [5] 张国铭. 论建造兆瓦级垂直轴式风力发电机组的合理性[J]. 水利电力施工机械, 1995, 17(4): 32-36.
- ZHANG G M. The rationality of constructing megawatt vertical axial wind turbines [J]. *Water conservancy and electric power construction machinery*, 1995, 17(4): 32-36.
- [6] 莫晓聃, 李涛. 垂直轴风力机概述及发展优势剖析[J]. 节能技术, 2010(5): 450-453.
- MO X D, LI T. Types and development advantages of vertical axis wind turbine[J]. *Energy conservation technology*, 2010(5): 450-453.
- [7] NGUYEN L, METZGER M. Enhanced energy capture by a vertical axis wind turbine during gusty winds in an urban/suburban environment[J]. *Journal of renewable and sustainable energy*, 2015, 7(5): 53118.
- [8] ISHUGAH T F, LI Y, WANG R Z, et al. Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: a review[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2014, 37: 613-626.
- [9] WONG K H, CHONG W T, SUKIMAN N L, et al. Performance enhancements on vertical axis wind turbines using flow augmentation systems: A review[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017, 73: 904-921.
- [10] 冯放, 李岩, 陈立新, 等. 组合型垂直轴风力机气动特性的模拟计算与实验研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(5): 855-860.
- FENG F, LI Y, CHEN L X, et al. A simulation and experimental research on aerodynamic characteristics of combined type vertical axis wind turbine[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2014, 35(5): 855-860.
- [11] 唐静. 圆台型聚风罩对垂直轴风力机起动性与输出功率影响研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- TANG J. Research on effect of frustum-shaped wind collector equipment on starting performance and output power of vertical axis wind turbine [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.
- [12] POPE K, RODRIGUES V, DOYLE R, et al. Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine [J]. *Renew energy*, 2010, 35: 1043-1051.
- [13] TAKAO M, KUMA H, MAEDA T, et al. A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row-effect of guide vane geometry on the performance [J]. *Journal of thermal science*, 2009, 18: 54-57.
- [14] NOBILE R, VAHDATI M, BARLOW J F, et al. Unsteady flow simulation of a vertical axis augmented wind turbine: A two-dimensional study [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2014, 125: 168-179.
- [15] QIN N, HOWELL R, DURRANI N, et al. Unsteady flow simulation and dynamic stall behaviour of vertical axis wind turbine blades [J]. *Wind engineering*, 2011, 35(4): 511-527.
- [16] Nobile R, Vahdati M, Barlow J F, et al. Dynamic stall for a vertical axis wind turbine in a two-dimensional study [C]// *World Renewable Energy Congress*, 8-13 May, 2011, Linköping, Sweden: 4225-4232.
- [17] CHONG W T, FAZLIZAN A, POH S C, et al. The design, simulation and testing of an urban vertical axis wind turbine with the omni-direction-guide-vane [J]. *Applied energy*, 2013, 112: 601-609.

CFD BASED STUDY ON TWO-DIMENSION VERTICAL AXIS WIND TURBINES

Liu Chen, Yun Honglu, Lyu Xujian

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In this paper, vertical axis wind turbines are investigated with Computation Fluid Dynamics method, with a simplified two-dimension model being applied to uncover flow characteristics around the turbines. Firstly, four factors, including node number and wall $y+$, time step and turbulent model, are taken into account to verify the CFD frameworks for present turbines with open rotor and augmented rotor respectively. Subsequently, the frameworks are applied to study the performance for the two kind of vertical axis wind turbines. It is found that power coefficient and torque coefficient of the augmented vertical axis wind turbine are significantly increased, compared with that of the open vertical axis wind turbine; and the point at which the coefficients reach the maximum value moves in a direction where the tip speed ratio increases. Then the augmented vertical axis wind turbine is studied at different wind speeds, and it is found that the rotor torque of the augmented vertical axis wind turbine increases with the wind speed, while the torque coefficient and power coefficient are independent of the incoming wind speed. Finally, stator blade orientations for augmented vertical axis wind turbine are investigated. It is found that the rotor torque of the augmented vertical axis wind turbine changes when the stator blades are at different pitch angle, and the position where the torque reaches the peak for three different pitch angle changes as well. Moreover, it is concluded that the torque coefficient of vertical axis wind turbines is highest, that is the wind turbine achieves the maximum power coefficient, when the stator blade is at a pitch angle of 0° .

Keywords: wind turbines; CFD; tip speed ratio; open rotor; augmented rotor