

H型垂直轴风力机远场尾流特性研究

苏万清

(天津工业大学 机械工程学院,天津 300387)

摘要:基于非定常 CFD 数值模拟方法,采用 FLUENT 软件对 H 型垂直轴风力机的流场进行模拟,并分析尖速比和叶片数对远场尾流特性的影响规律。结果表明:风轮在运转过程中的空气流动近似于圆柱绕流,绕流和旋转对尾流两侧风速具有增大作用,增大的风速不断汇入到尾流中,有助于尾流风速恢复;随着尖速比的增大或叶片数的增多,远场尾流形成卡门涡街,尾流风速呈周期性上下波动分布;在风电场中风力机组的排布应根据不同的尾流特性,采取不同的布置方案。

关键词:垂直轴风力机;非定常 CFD;尖速比;叶片数;尾流特性

中图分类号:TK83 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5322(2020)03-0010-07

H 型垂直轴风力机凭借其结构简单、运转不依赖于相对风向以及对湍流适应性好等优点,得到越来越多专家学者的关注^[1-2],在农牧区、海岛等偏远地区的中小型微并网发电系统中的应用也日益增多^[3]。在风电场中,上游风力机尾流风速的分布影响下游风力机的功率输出,进而影响风力机组的阵列分布和发电总量。因此,对 H 型垂直轴风力机进行远场尾流特性研究具有重要意义。

针对风力机尾流特性,Tescione 等^[4-5]分别通过实验和数值模拟对两叶片垂直轴风力机的尾流进行监测,发现了尾流不对称的现象,并且尾流速度在下游 2 倍风机直径内有一个逐渐减小的过程。Hezaveh 等^[6]利用 LES 数值方法对垂直轴风力机进行模拟,分析了在不同实度、高径比和尖速比下尾流长度和速度的变化趋势,得出尖速比越大,速度损失越大但尾流恢复所需长度越小的结论。蔡新等^[7]对乌普萨拉大学研制的垂直轴风力机进行数值模拟,研究风力机尾流特性,研究表明随着尾流位置不断远离风轮旋转中心,尾流风速变化梯度逐渐平稳。郭志平等^[8]分别采用风洞实验和 CFD 方法研究了三叶片垂直轴风力机流场风速分布,发现在风轮内部以及下游区域出现低速区。高强等^[9]设计一种叶片交叠布置垂

直轴风力机,利用 CFD 方法分析其流场风速分布,结果显示风轮尾流风速下降明显,并指出多风机布置时应避开低速区。

目前,针对垂直轴风力机远场尾流风速分布的研究较少,且均未给出较为明确的分布规律。本文利用非定常 CFD 方法对 H 型垂直轴风力机进行数值模拟,详细分析不同尖速比和叶片数下的远场尾流特性,并给出尾流风速分布规律。

1 CFD 数值模拟方法

由于 H 型垂直轴风力机的连接杆、塔架等对风轮流场影响较小,所以将风力机简化为只含叶片的风轮模型^[10-11]。

1.1 计算域及网格设置

计算域及边界条件设置如图 1 所示。计算域分为静域和动域,动域又分为旋转域和控制域。数值模拟计算时以入口条件为初始化条件,边界条件设置如下:风轮上游计算域边界为速度入口;风轮下游计算域边界为压力出口;静域与旋转域结合面、旋转域与控制域结合面均为交界面;叶片表面为固壁无滑移壁面;二维模型中,上下边界为对称面,三维模型中,上下、前后边界为对称面,二维计算域与三维俯视图所示相同。其中, D 为风

收稿日期:2020-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51805369)。

作者简介:苏万清(1991—),男,山东临沂人,硕士生,主要研究方向为风力机气动优化及尾流预测。

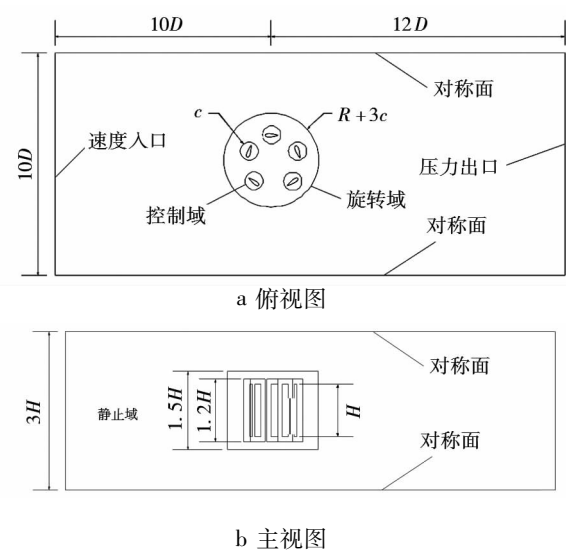


图1 计算域与边界条件设置示意图
Fig 1 Plan views of the computational domain and boundary conditions

轮直径, m ; H 为叶片长度, m ; R 为风轮半径, m ; c 为弦长, m 。

采用 CFD 前处理软件 GAMBIT 对计算域进行网格划分, 利用尺寸函数、叶片表面采用边界层的方式对网格进行加密处理。

1.2 实验验证

针对文献[12]中翼型为 NACA0021 的 3 叶片风洞实验模型建立二维和三维数值模型, 利用 FLUENT 软件计算不同尖速比下的平均功率系数并与实验数据对比分析, 如图 2 所示。其中直径 0.8 m, 弦长 0.2 m, 叶片长度 0.8 m, 风速 8 m/s, 尖速比 $\lambda = 0.9、1、1.1、1.2、1.4$ 。

由图 2 可知, 由于二维数值模型忽略了连接杆、塔架和沿叶片展向引起的能量损失, 在不同叶尖速比下平均功率系数模拟值较实验值偏高, 但其变化趋势吻合; 三维数值模型仅忽略了连接杆和塔架的影响, 数值模拟结果与实验数值略有误差, 但在合理范围内。因此, 验证了本文数值模拟方法的可行性。

2 远场尾流特性分析

H 型垂直轴风力机叶片的每一处截面都是相同的, 从而每一个截面上的风速基本相同。忽略叶尖涡的能量损失, 同时考虑节约计算资源, 将三维风轮模型简化为二维风轮模型^[13]。

2.1 不同尖速比下远场尾流特性分析

以垂直轴风力机二维模型为研究对象, 其基

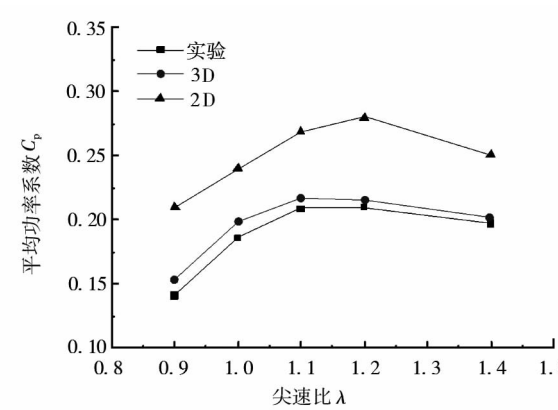


图2 平均功率系数模拟值与实验值对比图
Fig 2 Comparison of average power coefficients between the experiment and simulation

本参数如表 1 所示。采用 CFD 方法研究来流风速 7 m/s, 尖速比分别为 1.1、1.2、1.3 和 1.4 时的远场尾流风速大小及分布情况, 并通过不同尖速比下的尾流速度云图和不同尾流位置处的风速分布曲线对尾流特性进行分析。

表 1 H 型垂直轴风力机风轮基本参数 Table 1 The basic parameters of H-type vertical axis wind turbine	
基本参数	数值
空气密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.25
来流风速 $U_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	7
直径 D / m	1.300 2
叶片长度 H / m	1.195 8
翼型	NACA0021
弦长 c / m	0.172
叶片数量 B	5

不同尖速比下尾流速度云图如图 3 所示。由图 3 可知, 在旋转过程中不断有气流绕过风轮, 导致其两侧产生风速增大现象, 其中风轮下侧附近风速增加最大, 这是由于下侧叶片处于顺风区引起的。伴随着风能的捕获, 在距风轮较近的下游出现狭长的低风速区, 随着距离的增加风速逐渐恢复。从 $\lambda = 1.1$ 到 $\lambda = 1.3$, 低风速区长度逐渐增加, 3 个工况下尾流影响区域均呈线性扩散, 一直延伸到计算域边缘。当 $\lambda = 1.4$ 时, 风轮转速增加, 穿过风轮的气流大幅减少, 风速进一步降低, 尾流低速区的长度、宽度都有明显增加; 超过低速区之后的尾流出现卡门涡街现象, 形成周期性脱落、排列规则的双线旋涡, 此现象说明了随着尖速比的增加, H 型垂直轴风力机风轮在运转过程中的空气流动越来越接近于圆柱绕流。

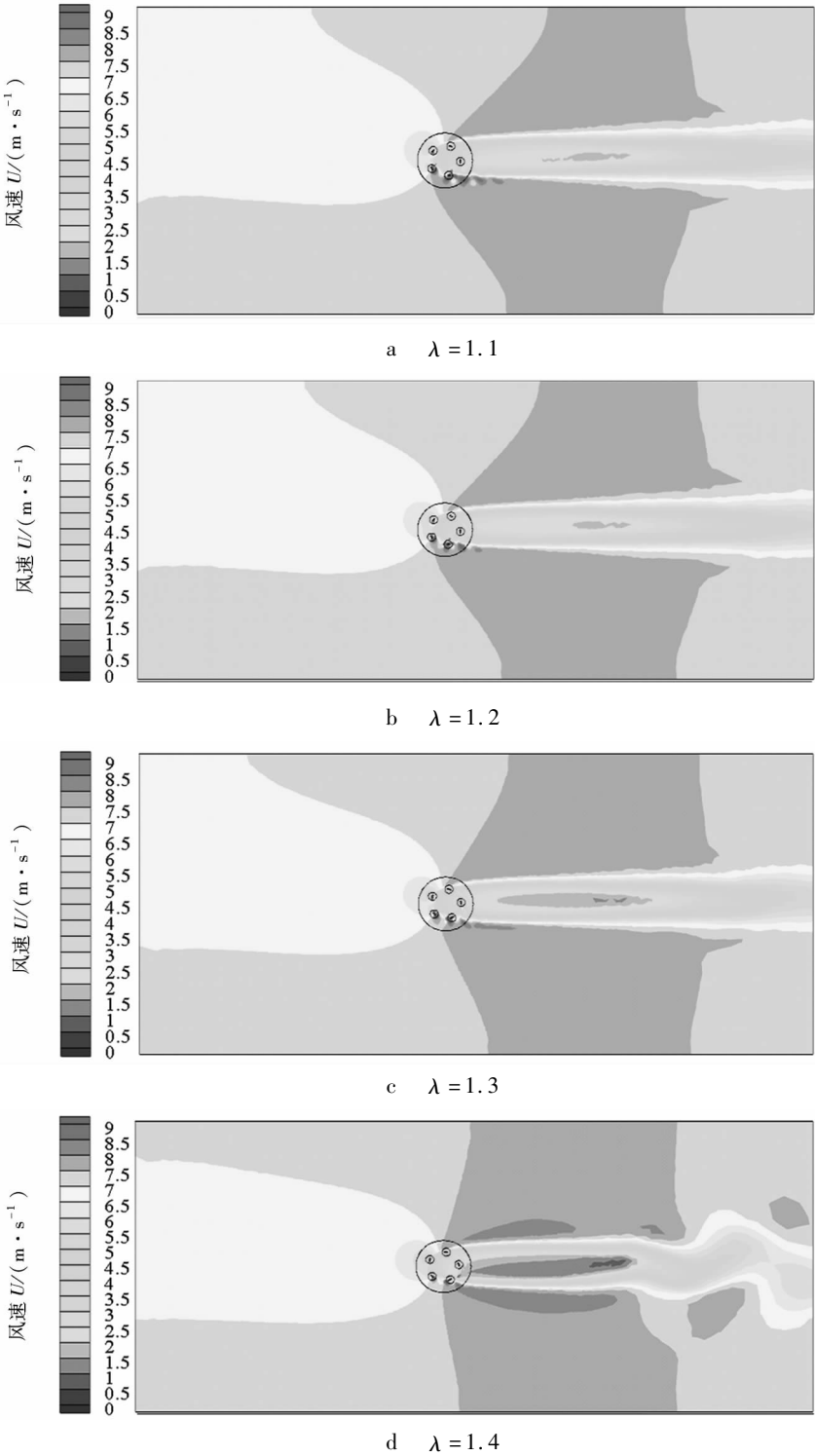


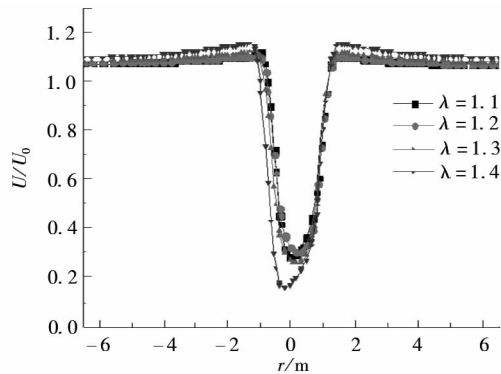
图 3 不同尖速比下尾流速度云图

Fig 3 Cloud chart of wake velocity whit different tip speed ratio

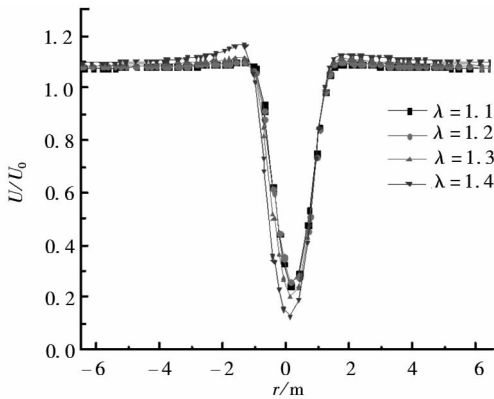
将不同尾流位置处的风速值 U 除以来流风速 U_0 之后得到相对速度分布曲线对比图如图 4 所示。对比分析 4 个尖速比下尾流位置 x 在 $3D$ 、 $5D$ 、 $7D$ 、 $10D$ 及 $12D$ 处的相对速度分布。当 $x = 3D$ 时,随着尖速比的增加尾流两侧的相对风速逐

渐增大,而低速区域的相对风速最小值逐渐减小。当 $x = 5D$ 时,变化规律基本与 $x = 3D$ 时相同,不同的是随着尾流的扩散,影响区域逐渐变宽。当 $x = 7D$ 时,尾流两侧的风速不再随着尖速比增大而增大,各尖速比下基本相同;尾流风速均有不同

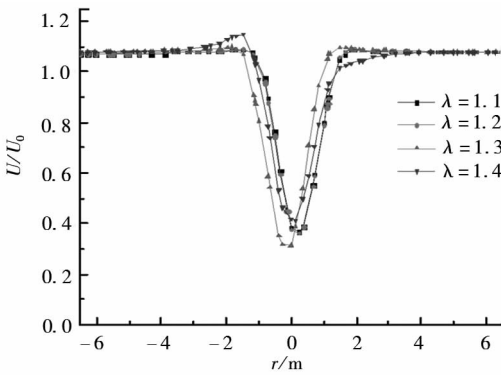
程度恢复, $\lambda = 1.1$ 和 $\lambda = 1.2$ 时风速分布基本一致,尾流中心风速恢复到来流风速的 35% 左右, $\lambda = 1.3$ 时尾流中心风速恢复到来流风速的 30% 左右,而 $\lambda = 1.4$ 时尾流中心风速恢复到来流风速的 40% 左右,明显超过其他 3 种工况。当 $x = 10D$ 时,尾流影响区域增大,尾流中心速度进一步恢复;尖速比从 1.1 ~ 1.3 风速分布曲线完全相同,以中心线对称分布; $\lambda = 1.4$ 时,尾流中心速度已恢复到来流风速的 80% 左右,但中心位置不再与中心线对齐,这是由卡门涡街现象引起的。当 $x = 12D$, $\lambda = 1.4$ 时,风速中心位置发展到中心线另一侧。



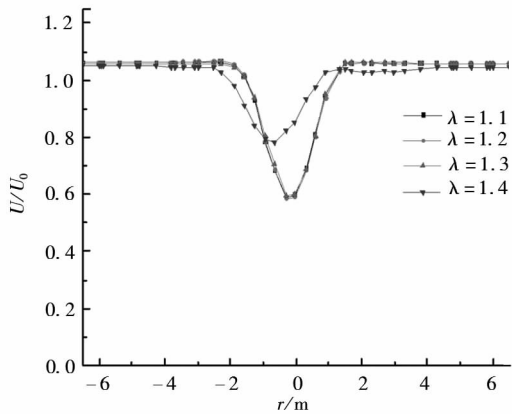
a $x = 3D$



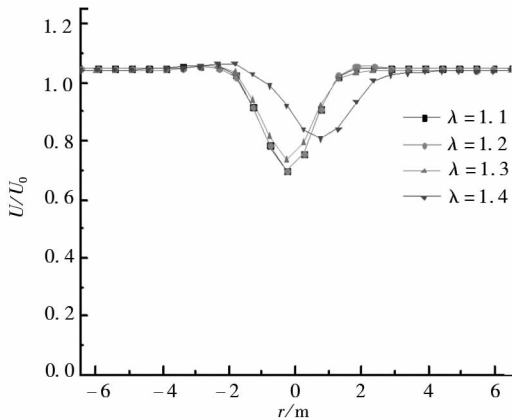
b $x = 5D$



c $x = 7D$



d $x = 10D$



e $x = 12D$

图4 各尖速比下不同尾流位置处相对风速分布曲线
Fig 4 Distribution curve of relative wind speed with different wake positions sunder different tip speed ratios

从以上分析可知,绕流和旋转对 H 型垂直轴风力机风轮两侧的尾流风速具有增大作用;随着尖速比的增加,尾流低速区域变长、变宽,尾流影响区域呈线性增加,且当尖速比 $\lambda = 1.4$ 时,尾流出现卡门涡街现象;由于风轮上下两侧气流不断流入尾流中,所以随着尾流位置不断远离风轮旋转中心,尾流中心风速逐渐恢复。

2.2 不同叶片数下远场尾流特性分析

实度是指叶片展开曲面面积与扫掠面积之比,是影响 H 型垂直轴风力机性能的关键参数之一^[14-15],其计算公式为:

$$\xi = \frac{BcH}{A} \tag{1}$$

式中: ξ 为实度; B 为叶片数; c 为弦长, m; H 为叶片长度, m; A 为风轮扫风面积, m^2 。

实度不同风力机性能不同,从而尾流风速分布也不相同。由公式(1)可知,当叶片翼型弦长和

风力机半径确定后,实度只与叶片数有关,因此本节研究叶片数对远场尾流特性的影响。针对表 1 所示风轮模型,除叶片数外其他参数保持不变,分

别建立叶片数为 3、4、5 的 CFD 计算模型,研究来流风速 7 m/s、尖速比 $\lambda = 1.4$ 工况下的尾流特性,尾流速度云图和风速分布曲线如图 5 和图 6 所示。

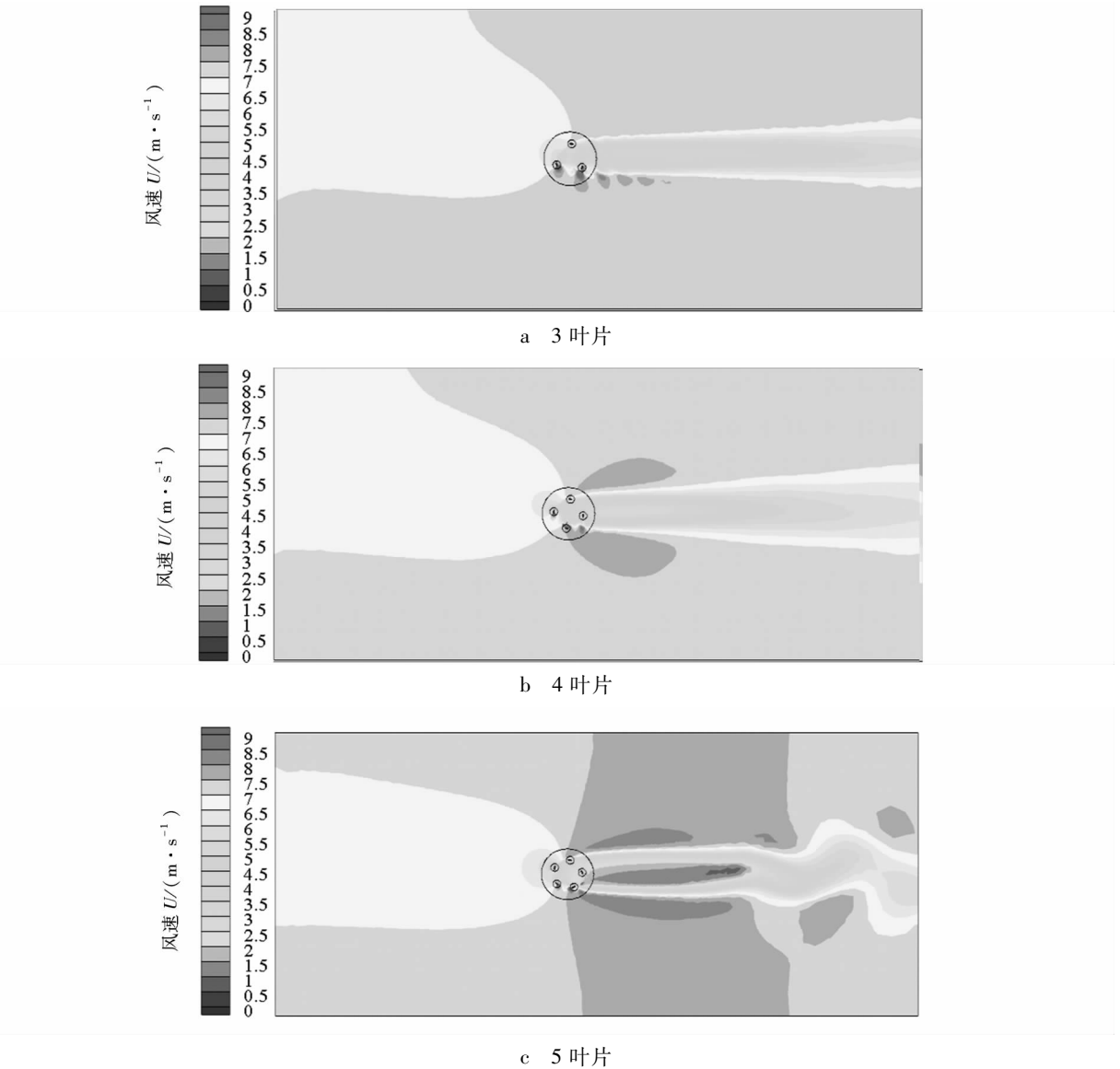
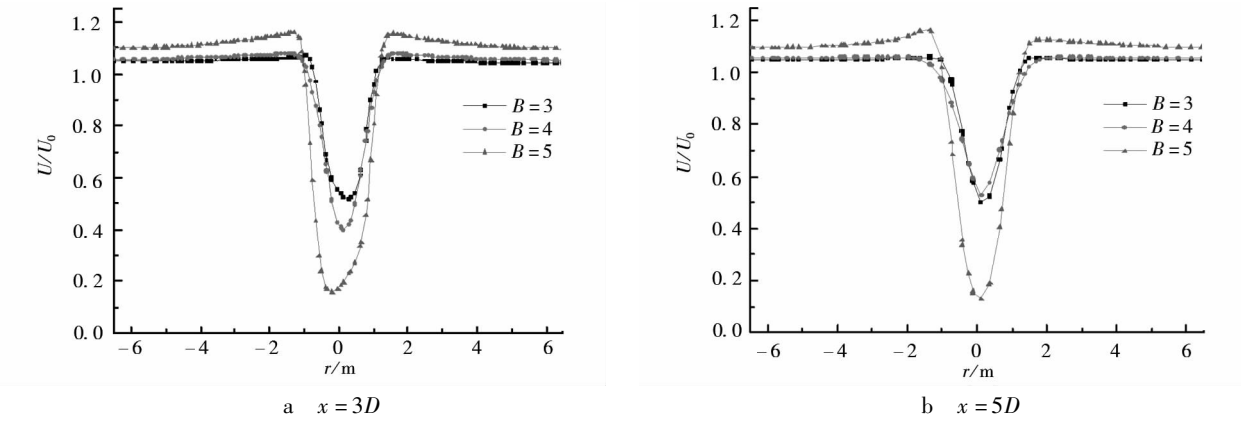


图 5 不同叶片数下尾流速度云图

Fig 5 Cloud chart of wake velocity with different number of blades



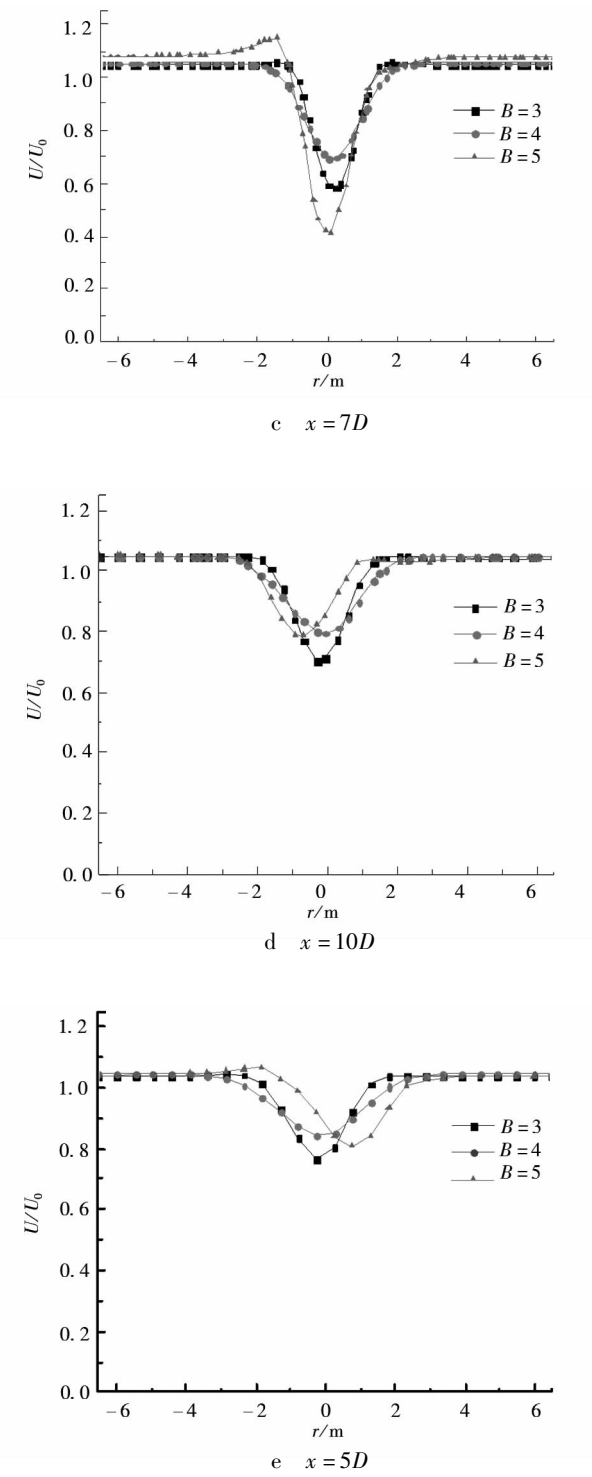


图6 不同叶片数下不同尾流位置处相对风速分布曲线
Fig 6 Distribution curve of relative wind speed with different wake positions under different number of blades

由图5可知,当叶片数为3时,由于叶片数较少,相同旋转周期内叶片切割流线次数相对较少,来流穿过风轮的风量较多,所以没有出现明显的低速区;当叶片数为4时,出现小范围的低速区,尾流影响区域增大;当叶片数为5时,尾流低速区内风速下降明显,影响区域变长、变宽,但尾流两侧风速增加明显,穿过低速区后出现周期性脱落的两排旋涡,即卡门涡街现象。

图6显示了不同叶片数下不同位置处相对风速分布曲线。当 $x=3D$ 时,随着叶片数的增加,尾流两侧风速逐渐增加,尾流低速区风速下降程度大,影响区域较宽;当 $x=5D$ 时,叶片数为4时尾流风速已恢复到叶片数为3时的状态,但叶片数为5的风轮尾流还处在低速区,未有明显变化;当 $x=7D$ 时,3个风轮尾流风速均有恢复,叶片数为4时已超过叶片数为3的情况,叶片数为5的风轮尾流也脱离低速区;由图6d、图6e可知,3个风轮尾流两侧风速已基本一致,尾流风速进一步恢复,5叶片风轮尾流中心位置出现周期性波动。

总的来说,当尖速比一定时随着叶片数的增加,实度增加,尾流低速区逐渐明显,风速逐渐降低;但伴随着低速区的出现,绕流风量增加,从而低速区尾流两侧的风速明显增加,绕流的风量汇入低速尾流有助于尾流风速的恢复;当叶片数增加至5时,尾流出现较长、较宽的低速尾流区,低速区过后出现卡门涡街现象。

3 结论

绕流和旋转对风轮尾流两侧风速具有增大作用,增大的风速不断地汇入尾流,有助于尾流风速恢复;随着尖速比增大或叶片数增多,叶片切割流线的次数增多,能量捕获增多,导致尾流低速区变长、变宽。当尖速比或叶片数增加到一定数值时,尾流出现卡门涡街现象,尾流速度不再呈线性扩散和对称分布,而是周期性上下波动,从而使尾流湍流强度增大,影响下游风力机的能量捕获;同时引起振动,若振动频率与风力机的固有频率相同或接近,则会导致设备损坏。因此,在风力机组排布中应根据不同的风力机及其运行状态,采取不同的布置方案。

参考文献:

- [1] KUMAR R, RAAHEMIFAR K, FUNG A S. A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018,89:281-291.
- [2] BATTISTI L, BENINI E, BRIGHENTI A, et al. Small wind turbine effectiveness in the urban environment[J]. Renewable Energy, 2018,129:102-113.
- [3] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Renewables 2019 global status report[R]. Paris: REN21, 2019: 118-145.
- [4] TESCIONE G, RAGNI D, HE C, et al. Near wake flow analysis of a vertical axis wind turbine by stereoscopic particle image velocimetry[J]. Renewable Energy, 2014,70:47-61.
- [5] TESCIONE G, SIMÃO FERREIRA C J, VAN BUSSEL G J W. Analysis of a free vortex wake model for the study of the rotor and near wake flow of a vertical axis wind turbine[J]. Renewable Energy, 2016,87:552-563.
- [6] HEZAVEH S H, BOU-ZEID E, LOHRY M W, et al. Simulation and wake analysis of a single vertical axis wind turbine[J]. Wind Energy, 2017,20(4):713-730.
- [7] 蔡新,潘盼,朱杰,等. 基于 CFD 技术的垂直轴风力机动态尾流特性研究[J]. 计算力学学报,2014,31(5):675-680.
- [8] 郭志平,李庆安,刘清龙,等. 三叶片直线翼垂直轴风力机非定常流场速度分析[J]. 机械工程学报,2015,51(22): 159-167.
- [9] 高强,蔡新,舒超,等. 叶片交叠布置垂直轴风力机气动性能研究[J]. 可再生能源,2015,33(9):1356-1361.
- [10] REZAEIHA A, KALKMAN I, MONTAZERI H, et al. Effect of the shaft on the aerodynamic performance of urban vertical axis wind turbines[J]. Energy Conversion and Management, 2017,149:616-630.
- [11] LEI H, ZHOU D, BAO Y, et al. Three-dimensional Improved Delayed Detached Eddy Simulation of a two-bladed vertical axis wind turbine[J]. Energy Conversion and Management, 2017,133:235-248.
- [12] ELKHOURY M, KIWATA T, AOUN E. Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015,139:111-123.
- [13] 郑云. 小型 H 型垂直轴风力发电机气动性能分析[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [14] 曲建俊,刘瑞姣,曲平,等. 叶片数与弦长对比对垂直轴风力机性能的影响[J]. 可再生能源,2017,35(5):734-739.
- [15] 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.

Study on Far-field Wake Characteristics of H-type Vertical Axis Wind Turbine

SU Wanqing

(School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Based on unsteady CFD numerical simulation method, the flow field of H-type vertical axis wind turbine is researched, the impact of tip speed ratio and blade number on far-field wake characteristics are analyzed. The results show that the airflow during the operation of the wind wheel is similar to cross-flow around a circular cylinder, and cross-flow and rotation have increased the wind speed on both sides of the wake. The increased wind speed continuously merges into the wake, which is conducive to the recovery of wake wind speed. With the increase of tip speed ratio or blade number, the Karman Vortex Street is appeared in the far-field wake, and the wake wind speed fluctuates periodically. The layouts of wind turbines in wind farm should adopt corresponding schemes based on different wake characteristics.

Keywords: vertical axis wind turbine; unsteady CFD; tip speed ratio; blade number; wake characteristics

(责任编辑:熊璐璐)