

水平轴风力机尾流的自相似性与流场特性研究

张旭耀, 杨从新, 郜志腾, 罗颂

(兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃省 兰州市 730050)

Self-similarity and Flow Field Characteristics of Horizontal Axis Wind Turbine Wakes

ZHANG Xuyao, YANG Congxin, GAO Zhiteng, LUO Song

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu Province, China)

ABSTRACT: In order to elucidate the wake characteristics of horizontal axis wind turbine operating in uniform inflow, by using the shear stress transport turbulence model, a rotor of 33kW two-blade horizontal axis wind turbine was simulated through solving the Reynolds time-averaged Navier-Stokes equations at different tip speed ratio. The results show that, in addition to the edge of the wake region, axial velocity deficit begin to remain the Gaussian self-similarity at a certain distance of downstream, and the greater the tip speed ratio is, the easier axial velocity deficit reach self-similarity state at downstream of wind turbine. Meanwhile, with the increase of the tip speed ratio, the wake expansion effect is more obvious and the tip vortices and root vortices break down early with the process of vortices propagate downstream. Within the range of two rotor diameters downstream of the turbine, the vorticity strength of tip vortices and root vortices decrease gradually with the increase of the distance from the wind turbine rotor, but the size of the vortex core is increasing. At the same axial position of wake region, the vorticity strength of tip vortex is always greater than that of the root vortex.

KEY WORDS: wind turbine; wake; self-similarity; flow field characteristics

摘要: 为阐明均匀来流条件下水平轴风力机的尾流特性, 采用剪切应力输运($k-\omega$ SST)湍流模型, 通过求解雷诺时均的N-S方程, 在不同叶尖速比(λ)下对某33kW两叶片水平轴风力机风轮的尾流流场进行了数值模拟。结果表明, 除了尾流边缘的区域, 在风力机下游一定距离处轴向速度亏损开始满足高斯自相似性, 叶尖速比越大, 在下游离风轮越近的位置越容易达到自相似的状态; 同时, 随着叶尖速比的增大, 尾流区膨胀效应越明显, 叶尖涡和叶根涡向下游移动的过程

中更早的发生破坏; 在风轮下游 $2D$ 的范围内叶尖涡和叶根涡的涡量强度随离风轮下游距离的增加逐渐减小, 涡核面积逐渐增大; 在尾流区同一轴向位置, 叶尖涡的涡量强度始终大于叶根涡的涡量强度。

关键词: 风力机; 尾流; 自相似性; 流场特性

0 引言

风力机运行时会产生尾流并向下游发展, 风力机的尾流效应会对下游风力机的发电功率和疲劳载荷产生影响, 进而影响整个风电场的发电效率。因此, 对单台风力机尾流特性的研究有助于分析上游风力机对下游风力机的影响规律, 从而减小风力机尾流的相互影响作用, 提高发电效率。文献[1-3]通过风洞实验, 结合PIV等手段研究了风力机的尾流结构以及流场特性, 得到的结果为风力机的数值模拟提供了一定的参考, 但由于实验条件的限制, 实验以很小的风力机模型作为研究对象, 仅研究了近尾流区域的流动特性。沈翔等^[4]基于风力机尾流实验结果, 建立了可以预测风力机远尾流区速度分布的工程模型。许昌等^[5]提出了一种基于改进致动盘和拓展 $k-\varepsilon$ 湍流模型的风力机尾流计算方法, 改进后的计算方法具有更高的预测精度, 提出的计算模型可为风电机组的性能预测和风电场的微观选址提供技术支持。周文平等^[6]采用基于Weissinger-L升力面模型和时间推进自由尾涡模型的涡尾迹方法研究了不同来流条件下风力机的尾流结构和气动性能。通过CFD方法可以获得全部流场信息, 可作为研究尾流场的一种方法^[7]。近年来计算机水平的发展也为CFD流场计算提供了有利条件。祝贺等^[8]基于CFD方法研究了风力机风轮气动性能, 结果表明, 数值模拟和现场实测得到的风轮气动动

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2014CB046201); 国家自然科学基金项目(11262011, 51566011)。

National Basic Research Development Program of China (973 Program) (2014CB046201); National Natural Science Foundation of China (11262011, 51566011)。

态特性随时间的变化趋势具有相似性。侯亚丽等^[9]采用大涡模拟的方法，比较了有、无风切变两种来流条件下风力机尾流区轴向速度、湍流度以及尾涡结构的变化特性，计算中没有考虑叶尖速比的影响。Medici D 等^[10]采用实验方法研究了风力机尾流的蜿蜒特性，结果表明叶尖速比对尾流的蜿蜒特性有明显影响。Bastankhah M 等^[11]通过风洞实验研究了运行在边界层中的风力机的尾流特性，结果表明，风力机近尾流区受叶尖速比和尾流旋转效应的明显影响。

自相似性常用在剪切流的研究中，满足自相似性意味着尾流场中的某个变量在充分发展的区域达到稳定的状态，其轮廓线的形状不随下游位置发生变化。文献[12]通过实验研究得出自由剪切流在下游某一位置后会变得自相似。文献[13]通过数值模拟研究了混合层流动的自相似性，结果表明，扩散速度法的计算结果与实验结果吻合，能准确地反映混合层流动的自相似性。风力机尾流区和自由流之间的流速不同，使得风力机下游存在明显的剪切层，剪切层内各种不同尺度的旋涡向下游发展和破坏导致剪切层不断发生变化^[14]。因此，风力机下游存在类似剪切流的流动状态。

鉴于此，本文通过 CFD 方法，在确认数值计算方法正确性的基础上，在不同叶尖速比下，对水平轴风力机风轮进行全三维数值模拟，分析其尾流区轴向速度变化的自相似性以及流场特性的变化规律。

1 几何模型介绍

计算几何模型采用 NREL Phase VI 风力机风轮和某 33kW 水平轴风力机风轮，其中 NREL Phase VI 风力机风轮用来验证数值计算方法的正确性，在此基础上以 33kW 水平轴风力机风轮为例研究尾流区轴向速度变化以及涡量分布规律，风轮具体的几何参数见表 1。33kW 水平轴风力机风轮的几何模型如图 1 所示。

表 1 风轮几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of rotor

风轮几何参数	某 33kW 风轮	NRELPhaseVI
风轮直径/m	14.8	10.058
风轮锥角/(°)	0	0
翼型分布	NACA44XX	S809
叶片个数	2	2



图 1 风轮几何模型

Fig. 1 Rotor geometry model

2 数学模型

2.1 计算方法

数值计算求解基于雷诺时均的三维不可压 N-S 方程，方程的离散均采用二阶迎风格式，压力和速度的耦合采用 SIMPLEC 算法，选用 $k-\omega$ SST 湍流模型^[15]。用张量形式表示的不可压缩的连续性方程和雷诺时均的 N-S 方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{f} \tag{2}$$

式中： ρ 为空气密度； t 为时间； \mathbf{v} 为速度矢量； p 为表面压力； $\boldsymbol{\tau}$ 表面应力矢量； \mathbf{f} 为单位质量体积力矢量。

2.2 网格划分及边界条件

以 33kW 水平轴风力机风轮为例介绍边界条件的设置。整个计算域如图 2 所示，其中包括圆柱形的旋转域和矩形的静止域，图中 D 为风轮直径。采用六面体网格对整个计算域进行网格划分，在风轮周围进行网格加密，局部网格如图 3 所示。计算域入口设为速度入口，来流湍流强度为 10%，出口设为压力出口，静压设置为 0Pa，风轮表面为无滑移壁面，风轮逆时针旋转(从风轮上游看)。33kW 风力机的计算工况如表 2 所示。

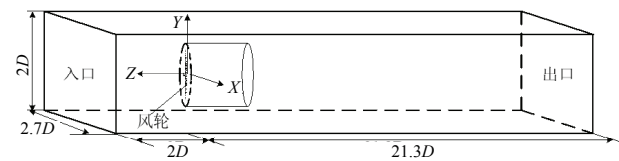


图 2 计算区域

Fig. 2 Computational domain

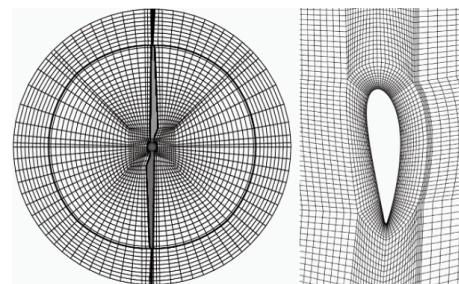


图 3 部分计算域的网格分布

Fig. 3 Mesh configurations of the computational domain

表2 33kW 风力机的计算工况

Tab. 2 Calculation conditions of 33kW wind turbine			
来流风速 W_∞ /(m/s)	叶尖速比 λ	来流风速 W_∞ /(m/s)	叶尖速比 λ
11	5.99	5	12.86
8	8.12	3	15.00

3 数值计算方法确认

为确认数值计算方法的正确性，以具有实验数据的 NREL Phase VI 风力机风轮作为研究对象，采用上述数值计算方法，在 0° 偏航角，来流风速为 7m/s，风轮转速为 72r/min 时对其进行数值模拟，图 4 为叶片不同截面位置表面压力系数的数值计算

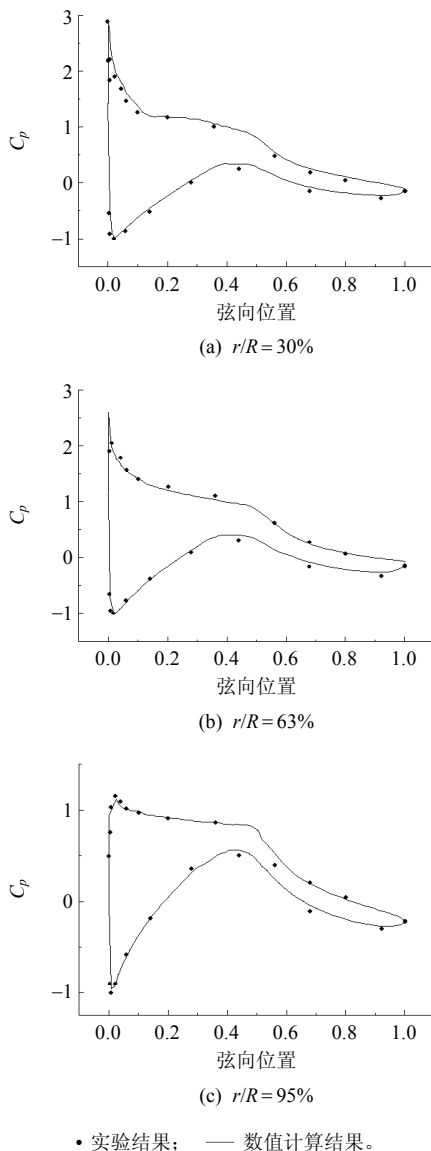


图4 NREL Phase VI 风力机叶片展向截面处表面压力系数的数值结果与实验结果的比较

Fig. 4 Pressure coefficient distribution of NREL Phase VI at the spanwise locations by numerical results and experimental results

结果与实验测量结果的对比。由图可知，两者出现较好的吻合，结果与文献[16]中的比较结果相似，说明文中采用的数值计算方法能较好地预测叶片表面压力的分布规律。由于风力机的尾流特性与流动方向的动量变化有密切关系，动量的改变将导致风力机叶片表面压力发生变化^[17]。因此，叶片表面压力的变化与尾流特性有密切的关系，对叶片表面压力的准确预测可以为后续尾流场的分析提供必要基础。综上所述，文中采用的数值计算方法可以用来研究风力机的尾流特性。

4 尾流区轴向速度分布

由于风力机风轮的能量转化效应，空气经过风轮后其速度会发生变化。图 5 为不同叶尖速比下，过旋转轴的垂直面(YZ 平面)内轴向速度云图，可以观察到，风力机尾流区和自由流之间存在很明显的分界线，即尾流区与自由流交界处存在较大的风速梯度。在尾流区域，风轮后轮毂中心线处的轴向速度较大，在叶尖附近的径向区域，流体的轴向速度

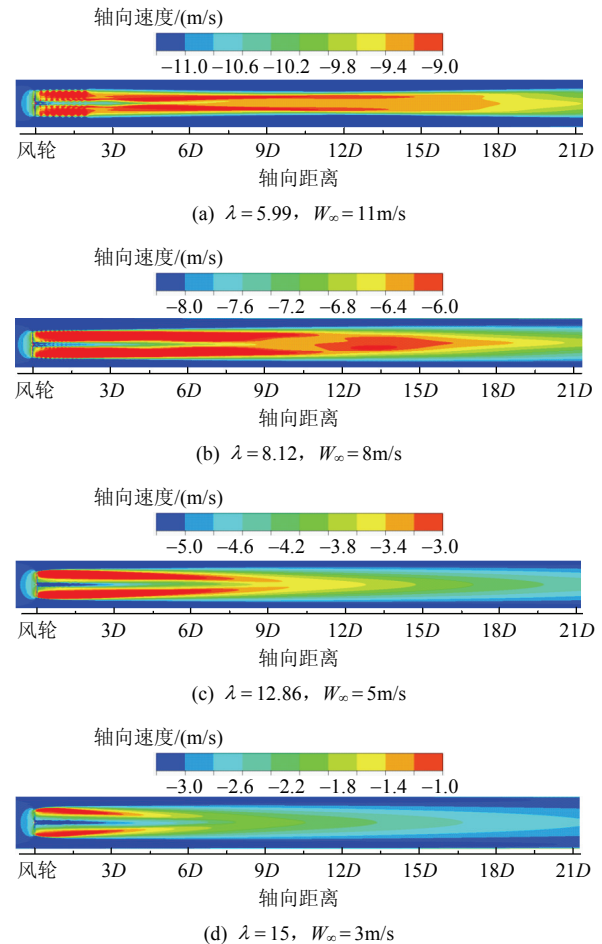


图5 轴向速度云图

Fig. 5 Contours of axial velocity

较小，因此，尾流区轴向速度沿径向存在速度梯度，随着离风轮下游距离的增加，尾流区轴向速度逐渐趋于均匀。比较图 5 可知，叶尖速比越大，轴向速度越容易趋于均匀；同时，由于湍流的扩散效应增强，尾流的膨胀效应越明显。

尾流效应主要以流动方向的风速损失为特征^[4]。上游风力机尾流形成的风剪切会对下游风力机产生影响。为比较不同叶尖速比下风力机尾流区轴向速度的变化规律，用无量纲量 W/W_∞ 表示轴向速度的变化， W 为尾流区轴向速度， W_∞ 为无穷远来流速度，图 6 为不同叶尖速比下，风力机下游不同位置处(从 $1D$ 到 $21D$ ，间隔 $2D$)轴向速度的变化规律。由图可知，在尾流区同一轴向位置，由于叶片不同截面处翼型的安放角和旋转线速度不同，轴向速度沿风轮径向位置发生不同的变化。在下游离风轮较近的区域，轴向速度沿径向的变化呈现“M”形分

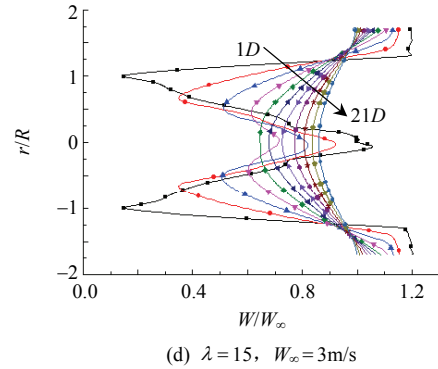


图 6 轴向速度变化沿风轮径向位置的分布
Fig. 6 Radial profiles of axial velocity variation

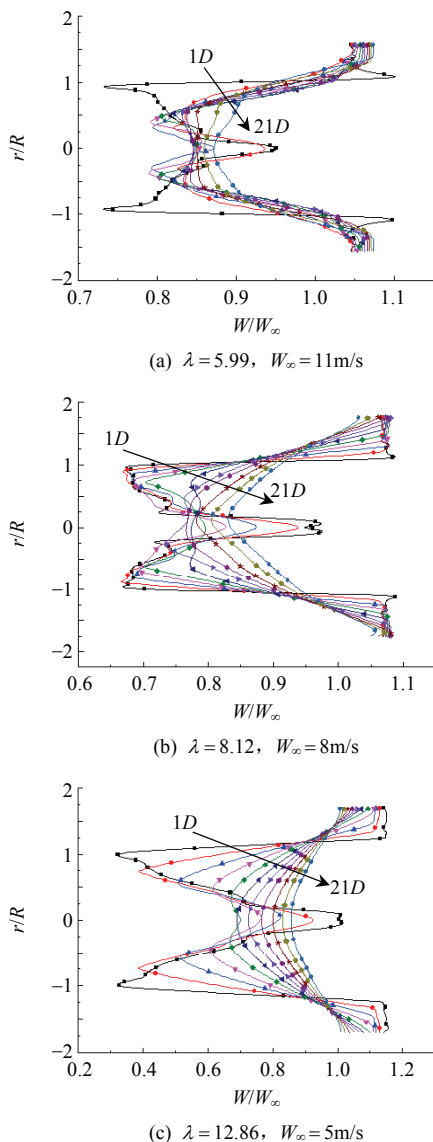
布，随着下游距离的增加，这一变化逐渐变为“钟”形分布，即在近尾流区轴向速度亏损在叶尖附近位置存在最大值，在轮毂中心位置，轴向速度亏损最小。随着离风轮下游距离的增加，轴向速度亏损最大值的径向位置逐渐向叶根方向移动且轴向速度亏损逐渐减小，而轮毂中心线处的轴向速度亏损先逐渐增大，然后逐渐减小，这一变化使得在尾流区轴向速度分布逐渐趋于均匀，轴向速度亏损变为“钟”形分布。由图 6(a)可知，在尾流区 $1D$ 轴向位置，在叶尖位置，轴向速度变化存在很大的梯度，结合轴向速度云图可知，此位置刚好是叶尖涡脱落所经过的位置，因此，轴向速度变化存在很大的梯度。从图 6 也可以看出，叶尖涡的诱导效应使得叶尖附近主流区的轴向速度产生增益，越靠近风轮，叶尖涡的诱导效应越强，轴向速度增益越明显。这一结果与文献[18]的实验结果一致。

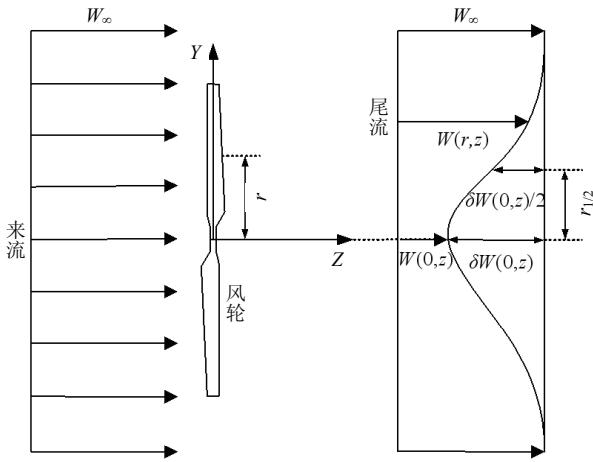
对比图 6 可知，在近尾流区同一轴向位置，随着叶尖速比的增大，尾流区轴向速度亏损程度逐渐增大。在下游 $21D$ 的位置，仍然存在速度亏损，当 $\lambda=15$ 时，轮毂中心线处的速度亏损值为 14.1%。

5 自相似性

由上节的研究可知，风力机尾流区轴向速度沿径向方向存在速度梯度，在离风轮较远的区域出现近似混合层流动的速度分布规律，但由于叶尖涡和叶根涡的影响，风力机尾流区的流动比简单的混合层流动要更加复杂。

由图 6 可知，随着叶尖速比的增大，在下游离风轮越近的位置，轴向速度变化越容易接近钟形分布，在尾流区某一轴向位置后速度变化廓线形状变得相似，为研究风力机尾流轴向速度亏损的自相似性，如图 7 定义流场速度变化参数及坐标系位置。





W_∞ —无穷远来流速度; $W(r,z)$ —尾流速度; $\delta W(0,z)$ —尾流中心的速度亏损; r —离轮毂中心的径向距离; $r_{1/2}$ —尾流半宽。

图7 流动结构和坐标系示意图

Fig. 7 Schematic of the flow configuration and the coordinate system

定义无量纲的轴向速度亏损形状函数为

$$f(\xi) = \frac{\delta W(r,z)}{\delta W(0,z)} \quad (3)$$

式中 $\delta W(r,z) = W_\infty - W(r,z)$ 为轴向速度亏损。

$$\xi(r,z) = \frac{r}{r_{1/2}} \quad (4)$$

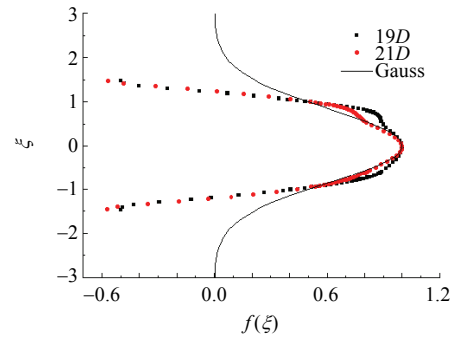
式中: r 为离轮毂中心的径向距离; $r_{1/2}$ 为尾流半宽, 具体定义为

$$W(r_{1/2}, z) = W_\infty - \frac{1}{2} \delta W(0, z) \quad (5)$$

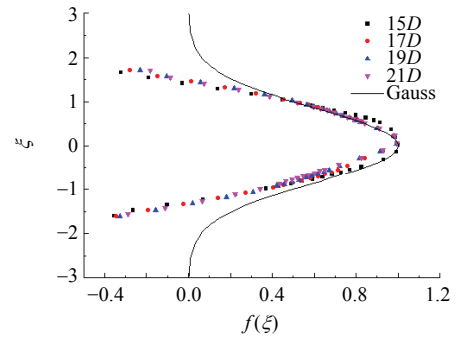
基于均匀湍流黏性假设得出尾流轴向速度自相似轮廓线为高斯分布函数^[12]:

$$f(\xi) = \exp(-\xi^2 \ln 2) \quad (6)$$

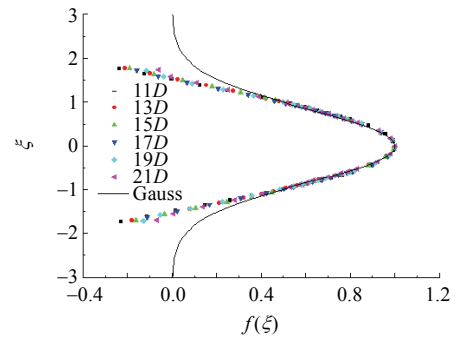
图8为不同叶尖速比下, 风力机下游不同位置处无量纲的轴向速度亏损形状函数曲线和高斯分布曲线的比较结果, 由图可知, 下游不同位置处的轴向速度亏损曲线基本重合, 说明尾流区轴向速度亏损满足自相似性。当 $-1 \leq \xi \leq 1$ 时, 轴向速度亏损曲线与高斯曲线基本重合。由于叶尖涡脱落引起的尾流边缘剪切效应增强, 越接近尾流边缘, 高斯分布曲线与轴向速度亏损曲线之间的差异越大。比较图8可知, 叶尖速比越大, 在下游离风轮越近的位置越容易达到自相似的状态, 这是由于叶尖速比越大, 在离风轮较近的位置湍流开始发生黏性耗散所导致的。



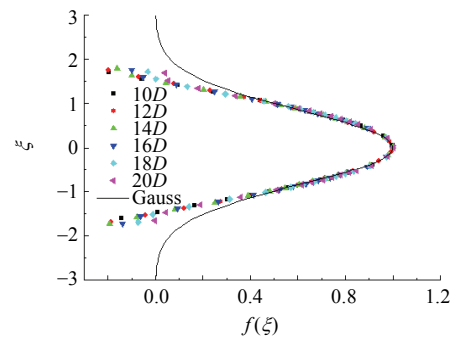
(a) $\lambda = 5.99, W_\infty = 11\text{m/s}$



(b) $\lambda = 8.12, W_\infty = 8\text{m/s}$



(c) $\lambda = 12.86, W_\infty = 5\text{m/s}$



(d) $\lambda = 15, W_\infty = 3\text{m/s}$

图8 轴向速度亏损自相似曲线

Fig. 8 Self-similarity curves of the axial velocity deficit

6 尾流区涡量分布

图9为不同叶尖速比下, 在风轮下游 $2D$ 的区域内, 过旋转轴的垂直平面(YZ 平面)内的涡量云图。由图可知, 在叶尖和叶根位置处存在明显的涡量集中区域, 这是由叶片脱落的螺旋状的叶尖涡和

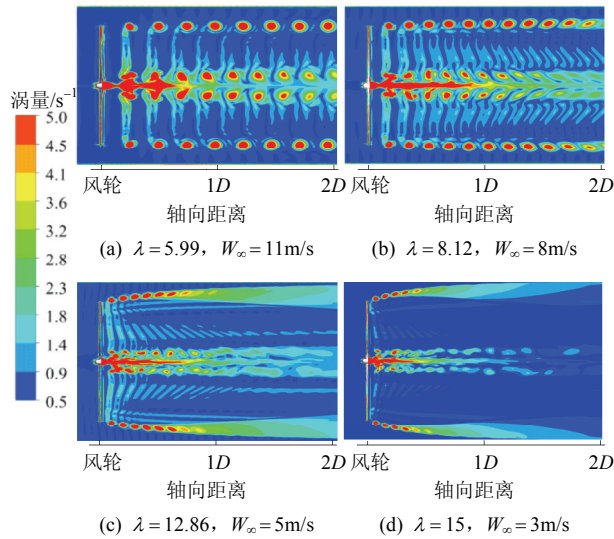


图 9 YZ 平面内涡量云图
Fig. 9 Contours of vorticity in YZ plane

叶根涡所造成的。由图 9(a)、(b)可知，当叶尖速比为 5.99、8.12 时，在风轮下游 2D 的区域内可以观察到相对稳定的叶尖涡和叶根涡。当叶尖速比增大到 12.86、15 时，大约在风轮下游 0.9D 和 0.6D 的位置，叶尖涡开始变得不稳定，逐渐发生破坏，叶根涡比叶尖涡更早发生破坏。从图 9(c)、(d)还可以观察到叶尖涡和叶根涡沿径向均有向外迁移的趋势。

为分析叶尖涡和叶根涡的位置及其涡量分布规律，本文用涡量最大值的位置表示旋涡的相对位置。图 10 为不同叶尖速比下，从涡量云图中得到的叶尖涡沿径向和轴向位置的分布规律，由图可知，当叶尖速比为 5.99 时，叶尖涡的径向位置几乎不随下游位置发生变化，随着叶尖速比的增大，叶尖涡沿径向向外迁移的距离逐渐增大。由于叶尖速比为 12.86、15 时，叶尖涡和叶根涡在离风轮下游不远处已变得不稳定，从云图很难识别涡量最大值的位置，因此，图 10 中只给出了能从涡量云图中明显识别涡核所在的位置。单个叶片旋转过程中螺旋状的叶尖涡的轴向距离为螺距 p ^[19]。因此，对两叶片风轮，涡量云图中相邻旋涡之间的轴向距离为 $0.5p$ 。图 11 为螺旋状叶尖涡的螺距随叶尖速比的变化趋势。可以看出，螺距 p 随着叶尖速比的增大而减小。这是因为叶尖涡以尾流区轴向速度向下游移动，叶尖速比越大，轴向速度亏损程度越大，尾流区轴向速度较小，叶尖涡的螺距也较小。随着叶尖速比的增大，由于叶尖涡的移动速度和螺距变小，不同叶片脱落的螺旋状的旋涡之间的干扰增强，旋涡更容易发生破坏和耗散。

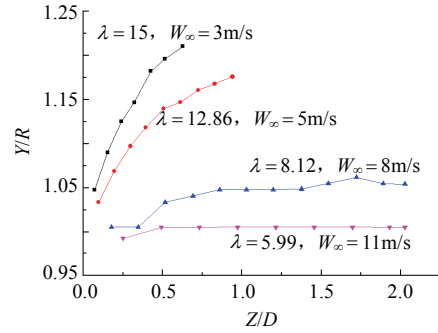


图 10 叶尖涡的径向位置随风轮下游距离的变化
Fig. 10 The variation of radial position of tip vortex with the downstream distance from the rotor

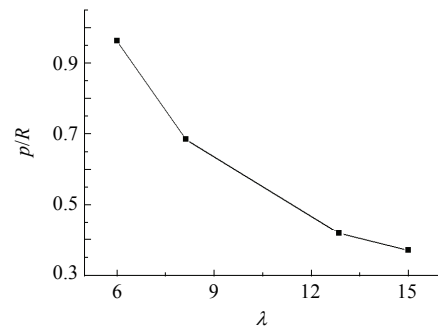
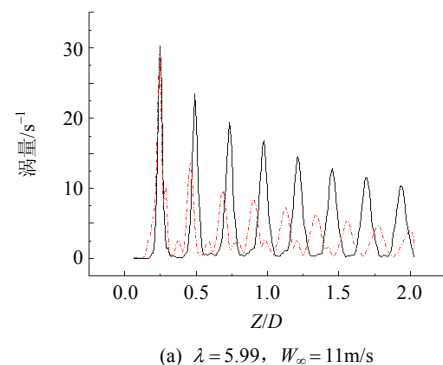


图 11 叶尖涡的螺距随叶尖速比的变化
Fig. 11 The variation of the pitch of tip vortex with the tip speed ratio

图 12 为垂直平面(YZ 平面)内，叶尖涡和叶根涡脱落的路径上涡量的变化趋势。由图可知，在叶尖涡和叶根涡脱落经过的位置，涡量的大小出现了明显的峰值，由于尾流区湍流扩散及旋涡之间的干扰作用，随着离风轮下游位置的增加，峰值逐渐变小，涡量强度减弱。结合图 9 的涡量云图可知，叶尖内侧范围不断有新的涡量被卷入，这与文献[20]的实验结果类似，随着下游距离的增加，卷入效应减弱，因此涡量也随之减小。从图 12 还可以看出，尾流的耗散使得叶尖涡核直径随下游位置的增大在逐渐增大；在下游同一轴向位置，叶尖涡的涡量始终要比叶跟涡的涡量大。



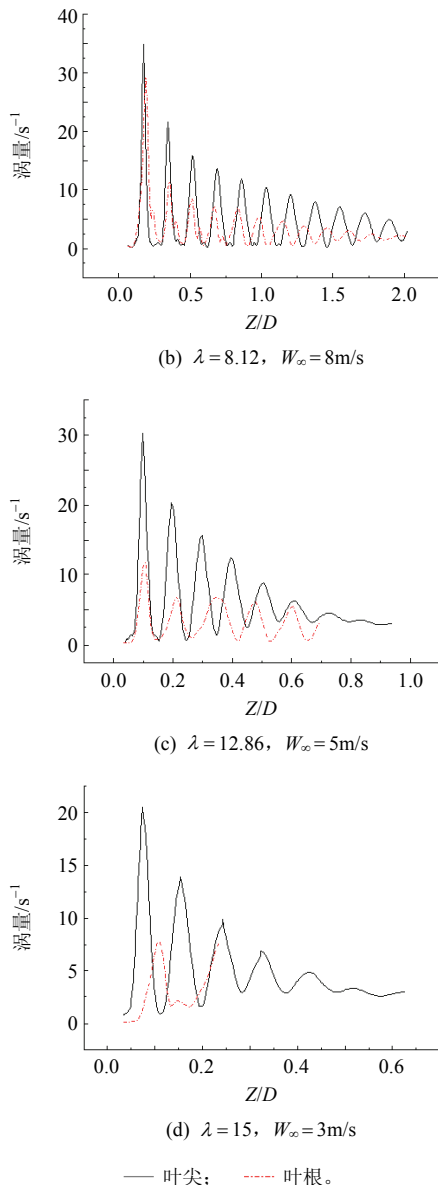


图12 涡量随风轮下游位置的变化
Fig. 12 The variation of the vorticity with the downstream distance from the rotor

7 结论

1) 风力机尾流区速度亏损曲线随下游位置在发生变化, 轮毂中心线处的轴向速度亏损随下游位置的增加先逐渐增大, 然后逐渐减小。在风轮下游 $21D$ 的位置, 轴向速度仍然存在亏损, 轮毂中心线处的速度亏损最大, 当 $\lambda = 15$ 时, 轮毂中心线的速度亏损大约为 14.1%。

2) 风力机尾流区剪切层的速度型随下游位置在发生变化, 在下游一定位置处, 轴向速度亏损开始满足自相似性, 并且, 除了尾流边缘的区域, 亏损曲线近似高斯分布。叶尖速比越大, 在下游离风轮越近的位置越容易达到自相似的状态。充分了解

不同叶尖速比下尾流区轴向速度的变化规律可以为风力机尾流模型的建立和完善提供参考。

3) 随着叶尖速比的增大, 尾流的膨胀效应越明显, 叶尖涡形成的螺旋线的螺距逐渐减小, 叶尖涡和叶根涡在向下游移动的过程中更早的发生破坏; 在风轮下游 $2D$ 的范围内叶尖涡和叶根涡的涡量强度随下游距离的增加逐渐减小, 涡核面积逐渐增大; 尾流区同一轴向位置, 叶尖涡的涡量强度始终大于叶根涡的涡量强度。

致谢

甘肃省计算中心为本文提供了计算资源, 在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] Hu Hui, Yang Zifeng, Sarkar P. Dynamic wind loads and wake characteristics of a wind turbine model in an atmospheric boundary layer wind[J]. Experiments in Fluids, 2012, 52(5): 1277-1294.
- [2] Zhang Wei, Markfort C D, Porté-Agel F. Near-wake flow structure downwind of a wind turbine in a turbulent boundary layer[J]. Experiments in Fluids, 2011, 52(5): 1219-1235.
- [3] Zhang Wei, Markfort C D, Porté-Agel F. Wind-turbine wakes in a convective boundary layer: a wind-tunnel study[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2013, 146(2): 161-179.
- [4] 沈翔, 王同光, 钟伟. 风力机远尾流速度型建模[J]. 太阳能学报, 2014, 35(3): 469-474.
Shen Xiang, Wang Tongguang, Zhong Wei. Modelling of the velocity profile of wind turbine far wake[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(3): 469-474(in Chinese).
- [5] 许昌, 韩星星, 王欣, 等. 基于改进致动盘和拓展 $k-\varepsilon$ 湍流模型的风力机尾流数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1954-1961.
Xu Chang, Han Xingxing, Wang Xin, et al. Study of wind turbine wake modeling based on a modified actuator disk model and extended $k-\varepsilon$ turbulence model[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1954-1961(in Chinese).
- [6] 周文平, 唐胜利, 吕红. 风剪切和动态来流对水平轴风力机尾迹和气动性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(14): 122-127.
Zhou Wenping, Tang Shengli, Lü Hong. Effect of transient wind shear and dynamic inflow on the wake structure and performance of horizontal axis wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(14): 122-127(in Chinese).
- [7] 朱翀, 王同光, 钟伟. 风力机尾流流场的数值分析和尾

- 流边界建模[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(5): 688-692.
- Zhu Chong, Wang Tongguang, Zhong Wei. Numerical analysis and wake boundary modeling of wind turbine flow fields[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(5): 688-692(in Chinese).
- [8] 祝贺, 徐建源, 滕云, 等. 风力机风轮气动性能三维流场数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(17): 85-90. Zhu He, Xu Jianyuan, Teng Yun, et al. 3D flow field numerical aerodynamic performance test of wind turbine rotor[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(17): 85-90(in Chinese).
- [9] 侯亚丽, 汪建文, 王强, 等. 风切变对风力机尾流湍流特征影响的研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 149-155. Hou Yali, Wang Jianwen, Wang Qiang, et al. Effect of wind shear on the wake turbulence characteristics of the wind turbine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(16): 149-155(in Chinese).
- [10] Medici D, Alfredsson P H. Measurements behind model wind turbines: further evidence of wake meandering[J]. Wind Energy, 2008, 11(2): 211-217.
- [11] Bastankhah M, Porté-Agel F. A wind-tunnel investigation of wind-turbine wakes in different yawed and loading conditions[C]//EGU General Assembly 2015. Vienna, Austria: EGU, 2015: 49-56.
- [12] Pope S B. Turbulent flows[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 96-168.
- [13] 王赫阳, 张会强, 王希麟, 等. 混合层流动的数值模拟[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1999, 39(6): 106-109. Wang Heyang, Zhang Huiqiang, Wang Xilin, et al. Numerical simulation of mixing layer flow[J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 1999, 39(6): 106-109(in Chinese).
- [14] 田琳琳. 风力机尾流数值模拟及风电场机组布局优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014. Tian Linlin. Numerical simulation of wind turbine wakes and the study of wind farm layout optimization[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014(in Chinese).
- [15] 徐浩然, 杨华, 刘超, 等. 不同湍流模型对 MEXICO 风力机气动性能预测精度的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(35): 95-101. Xu Haoran, Yang Hua, Liu Chao, et al. Research on the effect of different turbulence models on the aerodynamic performance prediction accuracy of MEXICO wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(35): 95-101(in Chinese).
- [16] 陈晓明, 康顺. 偏航和风切变下风力机气动特性的研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(5): 1105-1111. Chen Xiaoming, Kang Shun. Research on wind turbine aerodynamic characteristics under yaw and shear[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2015, 36(5): 1105-1111(in Chinese).
- [17] Mo J O, Choudhry A, Arjomandi M, et al. Large eddy simulation of the wind turbine wake characteristics in the numerical wind tunnel model[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 112: 11-24.
- [18] 张立茹, 汪建文, 刘冬冬, 等. 水平轴风力机风轮子午面流场结构的实验研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(3): 323-330. Zhang Liru, Wang Jianwen, Liu Dongdong, et al. Experimental investigation on flow field around meridional plane of horizontal-axis wind turbine[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(3): 323-330(in Chinese).
- [19] Whale J, Anderson C G, Bareiss R, et al. An experimental and numerical study of the vortex structure in the wake of a wind turbine[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 84(1): 1-21.
- [20] 肖京平, 武杰, 陈立, 等. 风力机叶尖涡尾迹结构 PIV 测量研究[J]. 应用数学和力学, 2011, 32(6): 683-692. Xiao Jingping, Wu Jie, Chen Li, et al. PIV measurements of tip vortex wake structure of a wind turbine[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2011, 32(6): 683-692(in Chinese).



张旭耀

收稿日期: 2017-11-15。

作者简介:

张旭耀(1989), 男, 博士研究生, 主要研究方向为风力机空气动力学, zxy0932@163.com;

杨从新(1964), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械的设计与研究, ycxwind@163.com。

(责任编辑 王庆霞)

Self-similarity and Flow Field Characteristics of Horizontal Axis Wind Turbine Wakes

ZHANG Xuyao, YANG Congxin, GAO Zhiteng, LUO Song
(Lanzhou University of Technology)

KEY WORDS: wind turbine; wake; self-similarity; flow field characteristics

When the wind turbine is running, it will produce wake and move to downstream. The wake effect of the wind turbine can affect the power generation and fatigue load of the downstream wind turbine, thus affecting the power generation of the global wind farm. The investigation of the wake characteristics of a single wind turbine, therefore, can help to analyze the influence of the upstream wind turbine on the downstream wind turbine, so as to improve the global wind farm power production.

In order to elucidate the wake characteristics of horizontal axis wind turbine operating in uniform inflow, the computation fluid dynamics (CFD) method was performed to study the axial velocity variation and vorticity distribution of the wake region. By using the shear stress transport turbulence model, a rotor of 33kW two-blade horizontal axis wind turbine was simulated through solving the Reynolds time-averaged Navier-Stokes equations at different tip speed ratio after confirming the validity of the numerical method by comparing the experimental pressure coefficient of NREL Phase VI.

The self-similarity is commonly used in the study of shear flow, satisfying self-similarity means that a variable in the wake field reaches a stable state in the fully developed region, and its shape does not change with the downstream position. Fig. 1 shows the self-

similarity curves of the axial velocity deficit at different tip speed ratio. The results show that, in addition to the edge of the wake region, axial velocity deficit begin to remain the Gaussian self-similarity at a certain distance of downstream. At the edge of the wake region, since the enhanced shear effect caused by the tip vortex shedding, the closer to the wake edge, the greater the difference between the Gauss distribution curve and the axial velocity deficit curve. Fig. 1 also shows that, the greater the tip speed ratio is, the easier the axial velocity deficit reaches self-similarity state at downstream of wind turbine. This is because the viscous dissipation increases in the near position of the wind turbine with the increase of the tip speed ratio.

Fig. 2 shows the vorticity contour at different tip speed ratio in the vertical plane (YZ plane) of 2D downstream region of the wind turbine. The result shows that, with the increase of the tip speed ratio, the wake expansion effect is more obvious and the tip vortices and root vortices break down early with the process of vortices propagate downstream. Within the range of two rotor diameters downstream of the turbine, the vorticity strength of tip vortices and root vortices decrease gradually with the increase of the distance from the wind turbine rotor, but the size of the vortex core is increasing. At the same axial position of wake region, the vorticity strength of tip vortex is always greater than that of the root vortex.

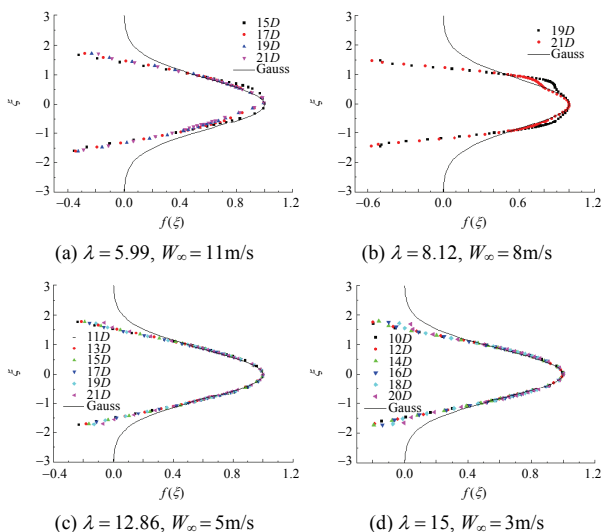


Fig. 1 Self-similarity curves of the axial velocity deficit

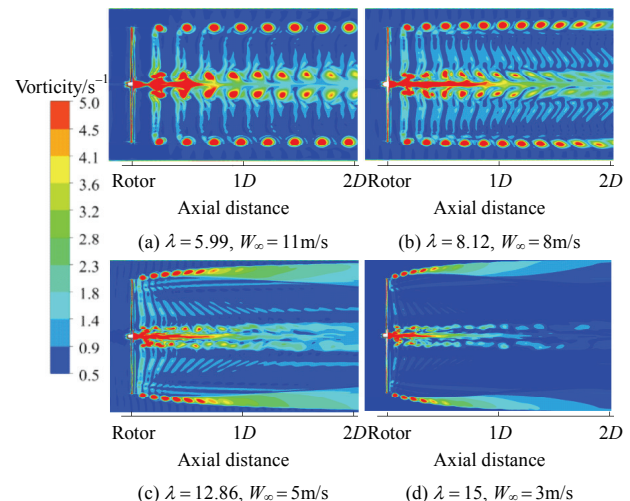


Fig. 2 Contours of vorticity in YZ plane