

风电场运行对局地边界层气象因素影响

吴正人¹, 路婷婷¹, 刘 梅², 王松岭¹, 李 非¹

(1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 保定 071003; 2. 华北电力大学经济管理学院, 保定 071003)

摘 要: 以5 MW 风力机组成的风电场为研究对象,采用湍流理论和大气流动特征,分析不同下垫面情况下风电场运行时局地边界层气象因素的变化过程,利用UDF函数编译风电场入口边界条件及不同的地表粗糙度,并利用风洞试验验证模型计算的正确性。研究表明,风电场的存在会减小边界层大气能量并增加湍流动能,具体结果表明:风电场下游风速减小,且风速随着地表粗糙度的增大逐渐降低,速度恢复率逐渐降低;湍动能随着地表粗糙度的增大空间非均匀分布特性更加明显;温度沿垂直方向略微降低,且随着地表粗糙度的增大影响程度加深;同时随着风电场装机规模的不断扩大,其影响范围及程度也增大。

关键词: 大气边界层; 表面粗糙度; 风力机; 下垫面; 数值模拟

中图分类号: X169

文献标志码: A

0 引 言

中国风电事业近年来发展势头强劲,风电场装机容量也逐年增加^[1]。风力发电在带来积极环境效应的同时,风电开发和运行对气候环境的潜在负面影响也逐渐成为关注的焦点^[2-4]。2016年西安交通大学发布21世纪自然科学和社会科学24项重大科学问题发布会上,何雅玲院士提出风能利用与局部气候变化为未来人类发展的重要科学问题。

风电场建立在不同地形(即下垫面)上时,对大气边界层所产生的影响也不尽相同,Paiva等^[5]研究应用RAMS模型来模拟风经过覆盖均匀植被和不均匀植被2种孤立山丘,模拟结果表明2种不同地形所产生的湍流模型、边界层稳定情况等都不相同。Murali等^[6]通过对处于平坦和复杂地形下的2个风电场进行模拟,研究表明在2种不同地形下风电场对周围环境的影响程度有较大不同,如复杂地形相比平坦地形增大了地表摩擦力,所以平坦地形下风力机尾流区速度恢复得比复杂地形下更快,周围环境受到的扰动作用较小,同时阐明使用何种数值模拟可提供可靠的相关信息。Castellani等^[7]采用3种不同的湍流模型对复杂地形下的风力机进行数值模拟,分析复杂地形下涡轮尾迹的

演化与相互作用,结果验证了采用数值方法对模拟复杂地形和风力机尾流互动的正确性。祖繁等^[8]利用WRF(weather research forecast)模式分别对沿海及山地条件下风电场风速进行高分辨数值模拟,结果表明沿海及山地条件下模拟与观测的误差特征各不相同,如模式静态数据未能显现沿海的小岛,且低估了山地测风塔所在的海拔,导致沿海平均模拟风速偏大,山地平均模拟风速偏小。Hancock等^[9]应用大涡模拟来研究近海和陆地2种不同位置处风电场运行的气候影响,结果表明风电场的位置不同对当地气候产生的影响不同,如近海处粗糙度较低,湍流的运动和发展比陆地更加充分,所以更利于尾流中风速的补充,从而使当地气候受到的影响较小。风电场选址时应首先分析当地风速,而风能空间的分布强烈受到下垫面的影响^[10-11],又考虑到风电场的气候效应,风电场布置在不同下垫面上,运行时会对边界层气象产生不同程度的影响,故下垫面的选取成为风场选址的另一重要因素^[11]。

本文采用Fluent对5 MW风力机组成的风电场进行数值模拟,针对粗糙度不同的4类下垫面分别对风电场进行模拟,分析不同下垫面情况下风电场的运行对下游风速、温度和湍动能的影响,对完善风电场的选址具有一定意义。

收稿日期: 2017-08-01

基金项目: 中央高校基本科研业务项目(2015MS114)

通信作者: 吴正人(1973—),男,博士、讲师,主要从事流体力学理论与应用方面的研究。zhengren_wu@163.com

1 数值计算方法和模型

1.1 雷诺时均N-S方程(RNAS)

在风工程研究领域中,经过大量数值算例验证,剪切应力输运适用于反压梯度流或分离流的计算,被广泛应用于大气边界层的计算,以张量形式表示的 SST 湍流模型的输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + S_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (3)$$

式中, ρ —— 流体密度; u_i —— 3 个方向的速度 ($i = 1, 2, 3$); u_j —— 3 个方向的速度 (与 u_i 进行区别) ($j = 1, 2, 3$); x_i, x_j —— 距离, i 和 j 都是取 1, 2, 3; p —— 压力; S_i —— 尺度应变率 ($i = 1, 2, 3$); k —— 湍流动能; ω —— 动能耗散速率; $\Gamma, \Gamma_k, \Gamma_\omega$ —— u_i 的有效扩散系数; \tilde{G}_k, G_ω —— k 和 ω 的产生项; Y_k, Y_ω —— k 和 ω 的耗散项; D_ω —— 交叉扩散项; S_k, S_ω —— 平均应变率张量模量。

1.2 几何模型和网格划分

本文针对 5 MW 风力机组成的风电场建立流场模型,风力机参数如表 1 所示^[12-14],风力机叶片进行三维建模(图 1a),风场设置为顺列布置 6 台风力机,横向间隔 520 m ($4d$),纵向间隔 650 m ($5d$),其中 d 代表风轮直径,130 m。将整体流场简化成长方体形状,具体长宽高为 2600 m × 1040 m × 500 m,风力机旋转面平行于 xy 面,流向沿 z 轴,风场模型如图 1b 所示。

表 1 NREL 5 MW 风力机叶轮及风况参数

Table 1 NREL 5 MW wind turbine impeller and wind condition parameters

参数	数值	参数	数值
风轮直径/m	130	轮毂直径/m	3
桨叶数量	3	风轮转速/ $r \cdot \min^{-1}$	12.1
风轮中心高度/m	90	翼型系列	NACA64
桨叶安装角/ $(^\circ)$	0	偏航角/ $(^\circ)$	0
风轮锥角/ $(^\circ)$	0	空气密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1.225
转轴倾角/ $(^\circ)$	0	—	—

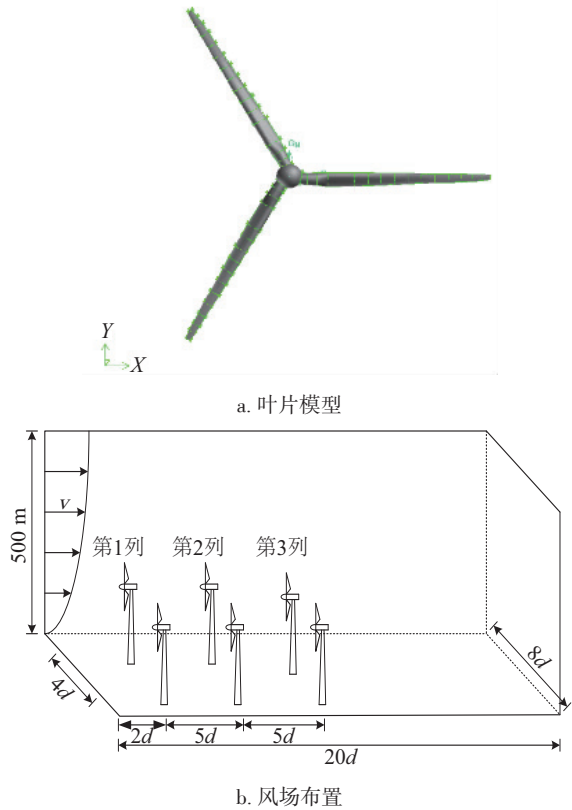


图 1 风力机叶片模型及风电场区域尺寸及布置

Fig. 1 Blade model of wind turbine and area size and layout of wind farm

对流场进行分区网格划分(图 1),将计算区域分为旋转区域和固定区域。对旋转区域采用四面体非结构化网格划分,风力机叶片及轮毂附近采用尺寸函数进行局部网格加密,固定区域采用结构化网格。网格总数分别为 803 万、874 万和 935 万,通过比较区域模型中心线上的速度变化曲线来验证网格无关性,选用 874 万的网格模型进行计算。

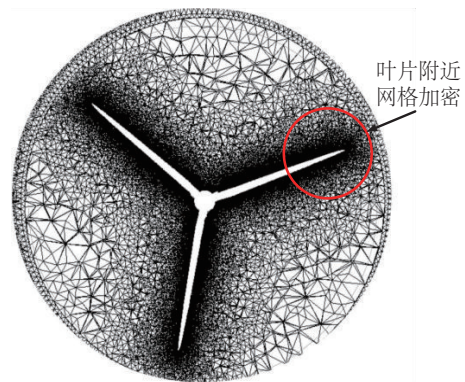


图 2 风力机叶轮处网格划分

Fig. 2 Meshing of wind turbine impeller

1.3 计算方程及边界条件

计算采用 $k-\omega$ 湍流模型, 对流项差分格式采用 2 阶迎风格式, 压力与速度的耦合采用 SIMPLEC 算法。

主要的边界条件如下:

1) 入口风速垂直分布

在近地大气边界层中, 平均风速与高度之间的关系一般可以利用垂直风轮廓的指数定律描述入口速度:

$$u(z) = u(z_r) \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (4)$$

式中, $u(\cdot)$ —— 风速; z 、 z_r —— 参考高度, 其中 $z_r = 10 \text{ m}$; α —— Hellmann 指数, α 取决于地表粗糙度和边界层热稳定度。

2) 入口大气湍动能和湍动耗散率:

$$k = \frac{2}{3} (\bar{u}l)^2 \quad (5)$$

$$\omega = \frac{k^{\frac{1}{2}}}{C_\mu^{\frac{1}{4}} l} \quad (6)$$

式中, \bar{u} —— 平均速度; l —— 湍流强度; C_μ —— 经验常数, $C_\mu = 0.09$; l —— 湍流长度尺度。

3) 入口温度分布

通过 UDF 入口设置日间不稳定层结, 入口温度在近地层中气温随高度 T 的分布^[15]情况:

$$dT/dz = -0.012 \quad (7)$$

4) 出口边界设置为自由出流, 底面设置为无滑移边界条件, 其他侧面设置为无滑移壁面的对称边界;

5) 风轮旋转区域选择旋转坐标系, 采用 MRF (multiple reference frame model) 模型, 设定风力机以额定转速稳定运行, 旋转区域之外的区域流场静止。

1.4 模拟方法验证

为验证数值模拟的正确性, 将风力机下游不同距离处的尾流区域速度剖面的模拟结果与已知的风洞实验结果进行对比^[16], 详见图 3。其中, U/U_{in} 代表流场风速与入口风速的比值。

通过对比分析可看出, 模拟结果与风洞试验结果的速度回复率曲线大致相似。

2 计算结果与分析

文中设置 4 类不同的下垫面, 如表 2 所示, 在 A~D 类下垫面的变化过程中, 地表的粗糙度指数也在不断的增大, 在地形变化的过程中, 分析风电场的运行对边界层气象的因素速度、温度和湍动能的影响。

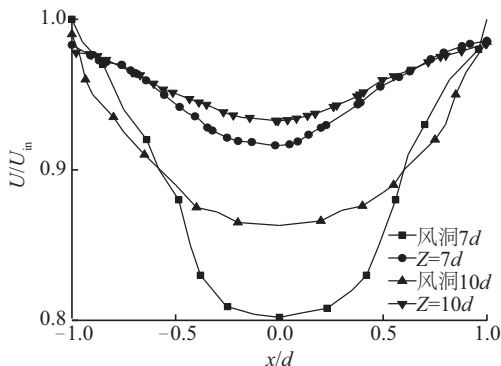


图3 数值模拟结果与风洞实验结果比较

Fig. 3 Numerical simulation results are compared with wind tunnel experiment results

表2 4类不同下垫面代表性地貌

Table 2 Four different underlying surfaces represent landforms

下垫面	代表性地貌
A类	近海海面、海岛、海岸、湖岸及沙漠地区
B类	田野、乡村、丛林、丘陵及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区
C类	中高层建筑较稀疏地区、低层建筑密集地区及平缓地和丘陵地
D类	有高层建筑密集的大城市市区、起伏较大的丘陵地

2.1 不同粗糙度条件下的速度变化

由于地球表面存在着各种各样的下垫面(地形地貌), 入口和风力机尾流区的速度分布也会随着下垫面条件的不同表现出不同的变化规律。图 4 显示风电场内的速度不同下垫面条件下的变化以及趋势, 可看出 A 类~D 类不同下垫面条件下的速度分布趋势基本相同。

沿地表垂直向上, 速度逐渐增加, 当高度到达风力机叶片底端到顶端范围内, 由于消耗风能叶片旋转扰动, 使得速度衰减, 超过风力机顶端叶片高度往上, 速度开始恢复。下垫面从 A 类~D 类变化中, 粗糙度也在增加, 速度也在逐渐降低, $z=10d$ 、 $z=15d$ 分别位于第 2 列、第 3 列风力机之后 3d 距离处, 对比图 4a、图 4b 可看出随着距离的增加, 同一高度处的速度值也在逐渐减小, 如在 100 m 高度处, B 类粗糙度下的速度值从 $z=10d$ 处的 7 m/s 逐渐减弱到 $z=15d$ 处的 6 m/s。但随着距离增加, 不同粗糙度下的速度曲线之间的间距在减小, 说明粗糙度对速度造成的影响在逐渐减小。

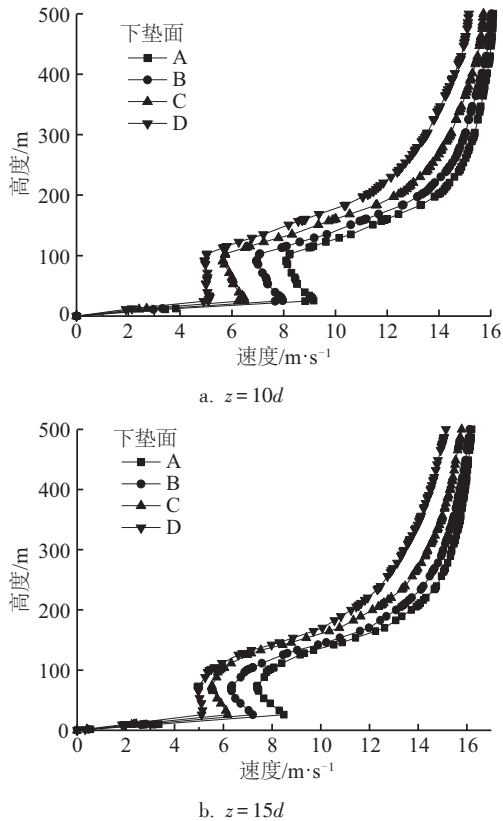


图4 风电场下游不同位置的速度沿高度分布

Fig. 4 Velocity distribution along downstream of wind farm varies along height

图4显示了轮毂高度处的速度沿流向的分布情况,可更清楚地看到流体流经风力机之后的变化趋势。入口风速廓线随着下垫面的变化相应有所差别。气流沿流向到达第1列风力机时,由于风力机的阻碍,风速在风力机之前有所减弱。到达叶轮处,速度回升,经过叶轮之后,速度在衰减中逐渐恢复,尚未完全恢复时到达第2列风力机,速度经历同样扰动。

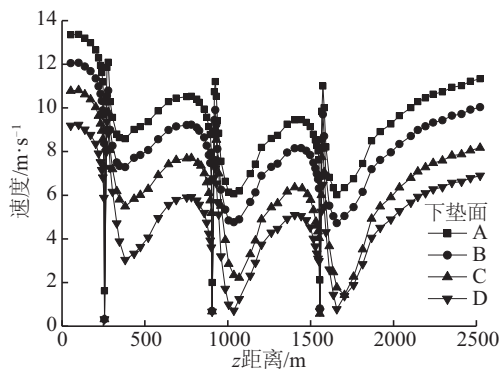


图5 轮毂高度处沿流向速度分布

Fig. 5 Velocity distribution along flow direction at hub height

2.2 不同下垫面条件下温度变化

模拟结算结果后,对风力机下游不同距离的温度和湍动能变化进行分析。图5表明了在不同下垫面条件下风电场内的温度变化。从地表沿垂直高度向上看,温度曲线逐渐降低,且低于入口处初始温度曲线。随着不同下垫面地表粗糙度的增加,温度曲线也在逐渐降低。对比图5a和图5b可看出随着距离增加,同一高度处的温度值在逐渐减小,例如在100 m高度处,D类下垫面粗糙度下的温度值从 $z=10d$ 处的303.7 K衰减到 $z=15d$ 处的303.2 K,衰减了0.5 K。随着距离增加,不同下垫面之间的温度曲线间距有所增大,可看出风力机运行导致温度衰减也有明显的叠加影响。

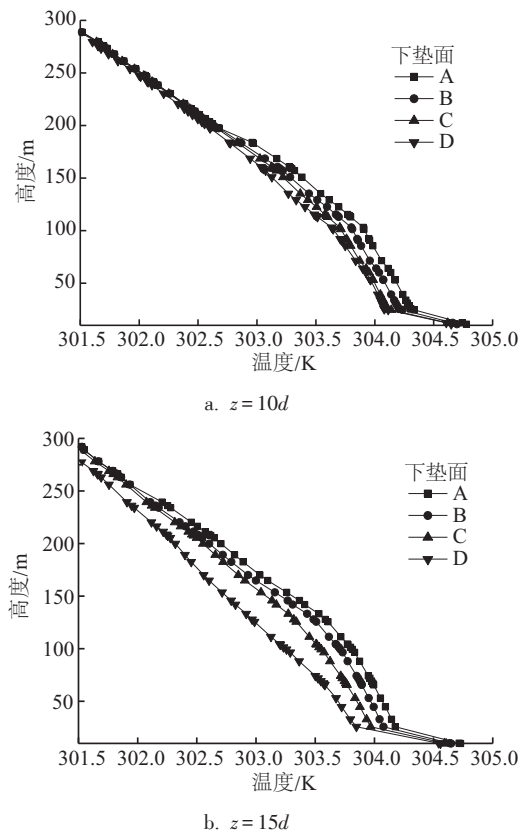


图6 风电场下游不同位置的温度沿高度分布

Fig. 6 Temperature distribution along downstream of wind farm varies along height

由于温度垂直递减率相对较小,在同一高度处,沿流向温度变化范围不大。为更清楚地区别不同下垫面对轮毂高度处温度的影响,对每类下垫面的温度曲线单独作图进行对比,如图6a~图6d所示。3列风力机分别位于入口下游2d(260 m)、7d(910 m)、12d(1560 m)位置处,可看出温度曲线发生转折的位置与每

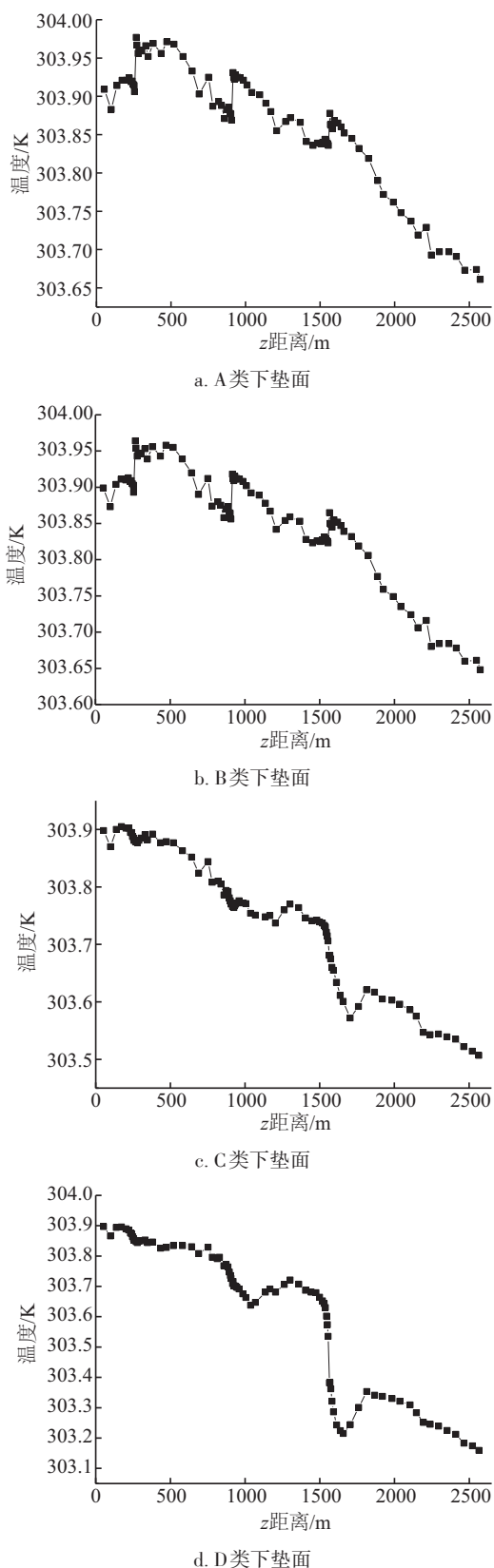


图7 轮毂高度处沿流向温度分布

Fig. 7 Temperature distribution along flow direction at height of wind turbine hub

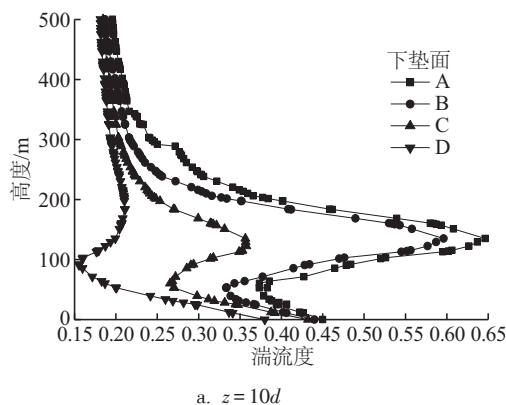
列风力机位置相对应,经过下游风力机之后温度有所减弱,远距离处更加明显。

不同下垫面地表粗糙度造成的温度变化范围不同,如图7所示,A类下垫面地表粗糙度下的温度范围在0.35 K之内(303.67~303.975 K),B类下垫面地表粗糙度下的温度范围在0.3 K之内(303.65~303.95 K),C类下垫面地表粗糙度下的温度范围在0.4 K之内(303.5~303.9 K),D类下垫面地表粗糙度的温度范围在0.8 K之内(303.1~303.9 K)。可看出随着粗糙度的增加,温度变化范围更大也更加剧烈。

2.3 不同下垫面条件下湍流度变化

湍流度是大气湍流流动的一个重要性质,也是气象学研究中的一个重要的参数。风力机的运行搅动了周围大气并产生湍流,会对风力机下游造成相应的影响,改变湍流度^[17]。图7表示风电场内下游不同位置,不同下垫面地表粗糙度条件下的湍流度变化。地面附近受到地表粗糙度的影响,湍流度较大,从地面沿垂直方向向上,湍流度曲线逐渐降低。当到达风力机范围高度时,由于风力机叶片运行的扰动,湍流度变化较大,越过风力机高度向上,湍流度回落,最终趋于平稳。

对比图7a和图7b,在风力机影响范围内可看出随着距离的增加,同一高度处的湍流度数值在逐渐增大,例如在B类下垫面粗糙度下的200 m高度处的湍流度在 $z=10d$ 处的值是0.22, $z=15d$ 处则增大到0.30。且在下游同一距离处,随着下垫面粗糙度的增加,图中湍流度曲线也在逐渐增大,在风力机高度处尤为明显。可看出下垫面地表粗糙度对流场内的湍流度影响随着粗糙度的增大而增大。从图8还可得出5 MW风力机影响高度达到约320 m,而1.3 MW单台风力机的影响高度仅为150 m^[18],可见随着风电场装机容量及叶片直径的增大,风力机在竖直方向上的影响越来越大。



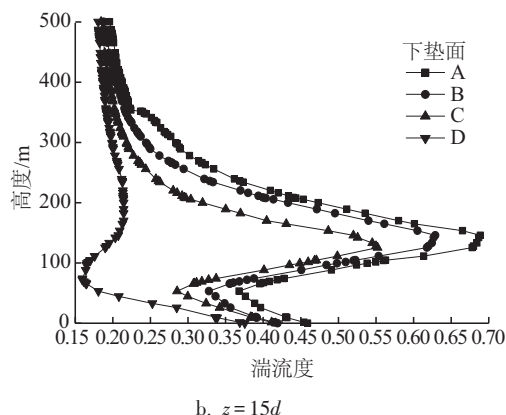


图8 风电场下游不同位置的湍流度沿高度分布

Fig. 8 Turbulence in different locations downstream of wind farm is distributed along height

图8为湍流度变化曲线,从中可更明显地看出湍流度沿流向的变化趋势。在无风力机的情况下,湍流度在流场内是处于一个相对较小的稳定值。而由于风力机的存在,气流沿流向在下游遇到风力机时,由于风力机的扰动,减弱的湍流度突然变大,然后在尚未衰减到第1列风力机之前的湍流度时又遇到第2列风力机,导致湍流度一直保持在一个相对较高的水平。从图9中可看出,不同下垫面粗糙度下的湍流度曲线类似,而且随着粗糙度越大,湍流度也在增加。

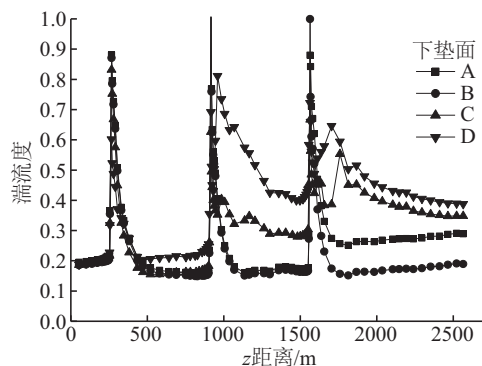


图9 轮毂高度处沿流向湍流度分布

Fig. 9 Distribution of turbulence along flow direction at height of wind turbine hub

3 结 论

风力机运行对低空风速、温度和湍流度的影响与下垫面地表粗糙程度密切相关:

1)针对不同的下垫面,速度的变化表现不同,随着地表粗糙度逐渐增大,风电场下游的风速逐渐降低,且速度恢复率逐渐降低。

2)湍流度作为气体湍流紊乱程度的度量标准,在

靠近风力机位置处,空气湍流紊乱程度比较剧烈,同时在远尾流处分布较均匀的湍流度受到近尾流处的湍流度分布的影响,随着下垫面地表粗糙度的增大而变得更加紊乱。风电场下游风力机受到上游影响,下游湍流度一直保持一个相对较高的水平,同时随着粗糙度的增大而增大。

3)下垫面地表粗糙度对温度的影响主要集中在风力机附近及以下区域,虽然温度曲线的变化规律基本相似,但地表粗糙度逐渐增加,影响程度越来越剧烈,随着下游距离的增加,粗糙度对大气温度的影响效应逐渐减弱。

风力机减慢了风速和改变了温度分布,造成低空湍流混乱加剧,但这种影响不仅仅局限于近地表低空范围内,随着风电场装机容量的增大影响范围会越来越大,所以在风电场的规划建设时期考虑风电场所引起的气候效应具有一定的实际意义。

[参考文献]

- [1] 翟云雷. 不同条件下风力机运行对局地大气结构的影响研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2017.
ZHAI Y L. Research of the influence of the wind turbine on the atmosphere structure under different conditions [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2017.
- [2] 吴正人, 翟云雷, 李非, 等. 多台风力机运行对近地边界层影响的模拟分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6171-6179.
WU Z R, ZHAI Y L, LI F, et al. Numerical study on the influence of multiple wind turbine operation on surface boundary layer [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6171-6179.
- [3] NA J-S, KOO E, MUÑOZ-ESPARZAB D, et al. Turbulent kinetics of a large wind farm and their impact in the neutral boundary layer [J]. Energy, 2016, 95: 79-90.
- [4] SHAMSODDIN S, PORTÉ-AGEL F. A large-eddy simulation study of vertical axis wind turbine wakes in the atmospheric boundary layer [J]. Energies, 2016, 9 (5): 366.
- [5] PAIVA L M S, BODSTEIN G C R, MENEZES W F, et al. Numerical simulation of atmospheric boundary layer flow over isolated and vegetated hills using RAMS [J]. Journal of wind engineering & industrial aerodynamics, 2009, 97(9-10): 439-454.
- [6] MURALI A, RAJAGOPALAN R G. Numerical

- simulation of multiple interacting wind turbines on a complex terrain[J]. *Journal of wind engineering & industrial aerodynamics*, 2017, 162: 57-72.
- [7] CASTELLANI F, ASTOLFI D, BURLANDO M, et al. Numerical modelling for wind farm operational assessment in complex terrain[J]. *Journal of wind engineering & industrial aerodynamics*, 2015, 147: 320-329.
- [8] 祖繁, 樊曙先, 王咏薇, 等. 复杂下垫面风电场风速数值模拟及误差特征[J]. *大气科学学报*, 2016, 39(5): 672-682.
- ZU F, FAN S X, WANG Y W, et al. Numerical simulation and error characteristics for wind speed on a wind farm over a complex underlying surface[J]. *Transactions of atmospheric sciences*, 2016, 39(5): 672-682.
- [9] HANCOCK P E, ZHANG S. A wind-tunnel simulation of the wake of a large wind turbine in a weakly unstable boundary layer[J]. *Boundary-layer meteorology*, 2015, 156(3): 395-413.
- [10] 许昌, 杨建川, 李辰奇, 等. 复杂地形风电场微观选址优化[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(31): 58-64.
- XU C, YANG J C, LI C Q, et al. Optimization of wind farm layout in complex terrain[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(31): 58-64.
- [11] 朱凤霞, 林浩. 浅谈 ASTER GDEM 和 MERRA 数据在山地风电场选址中的应用[J]. *风能*, 2015(11): 66-69.
- ZHU F X, LIN H. Application of ASTER GDEM and MERRA data in location of mountain wind farm[J]. *Wind energy*, 2015(11): 66-69.
- [12] 王琛. 非均匀下垫面大气边界层的观测和数值模拟研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- WANG C. Observation and numerical simulation of the atmospheric boundary layer of non-uniform underlying surface[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [13] 刘雄, 陈严, 叶枝全. 水平轴风力机气动性能计算模型[J]. *太阳能学报*, 2005, 26(6): 792-800.
- LIU X, CHEN Y, YE Z Q. Research on the aerodynamic performance prediction model for horizontal axis wind turbine[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2005, 26(6): 792-800.
- [14] JONKMAN J M, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5 MW reference wind turbine for offshore system development[R]. National Renewable Energy Laboratory Tech Rep, 2009.
- [15] 周绍毅, 焦明, 李强. 华银铝厂厂区边界层温度层结特征分析[J]. *气象研究与应用*, 2005, 26(4): 23-26.
- ZHOU S Y, JIAO M, LI Q. The characteristic analysis for the temperature level knot of boundary layer in Huayin aluminum factory district[J]. *Meteorological research and application*, 2005, 26(4): 23-26.
- [16] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- HE D X. Wind engineering and industrial aerodynamics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [17] 吴正人, 翟云雷, 刘维维, 等. 非均匀下垫面对风力机尾流影响的模拟研究[J]. *动力工程学报*, 2015, 35(12): 1006-1011.
- WU Z R, ZHAI Y L, LIU W W, et al. Effects of heterogeneous underlying surface on wake flow of wind turbines[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2015, 35(12): 1006-1011.
- [18] 王松岭, 靳超然, 刘梅, 等. 风力机运行对近地层风速及湍动能影响的研究[J]. *电力科学与工程*, 2015, 31(10): 70-73.
- WANG S L, JIN C R, LIU M. Numerical study on the influence of wind turbine on wind speed and turbulent kinetic energy in surface layer[J]. *Electric power science and engineering*, 2015, 31(10): 70-73.

INFLUENCE OF WIND FARM OPERATION ON METEOROLOGICAL FACTORS IN BOUNDARY LAYER

Wu Zhengren¹, Lu Tingting¹, Liu Mei², Wang Songling¹, Li Fei¹

(1. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Department of Economics and Management, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Taking the wind farm composed of 5 MW wind turbines as the object of study, the turbulence theory and the characteristics of atmospheric flow are used to analyze the change process of the meteorological factors of the wind current field and the ground boundary layer under different underlying surface conditions. Using UDF function to compile wind farm inlet boundary condition and different surface roughness. The correctness of model calculation is verified by wind tunnel test. The research shows that the wind farm, will reduce the energy and increase of atmospheric boundary layer turbulence kinetic energy, the results are as follows: the downstream wind farm wind speed decreases, and the surface roughness decreases, the speed of recovery rate decreased; the turbulent kinetic energy with surface roughness increase of spatial non-uniform distribution of temperature along the more obvious; the vertical direction decreased slightly, and with the influence of surface roughness increases and the deepening of. At the same time, as the wind farm installed scale continues to expand, the scope and extent of its impact also increased.

Keywords: atmospheric boundary layer; surface roughness; wind turbines; underlying surface; numerical simulation