

文章编号: 0254-0096(2020)03-0001-07

# 复杂地形下风力机尾流数值模拟研究和 激光雷达实验对比

刘鑫, 闫姝, 郭雨桐, 史绍平, 陈新明, 穆延非

(中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

**摘要:** 以CFD数值计算和实验相结合的方法,对处于中国西南某多山地区陆上风电场的尾流特性进行研究,验证不同数值方法在复杂地形的适用性。首先采用2台激光雷达,测量目标风力机一个月内的自由来流风速和尾流廓线,在地形上坡加速效应下,不同大气稳定度下目标风力机的自由来流风速廓线均呈负梯度。然后分别采用经典致动盘和改进致动盘法,模拟目标风力机在主风向下的尾流发展。不同于只有风速与压降关系的经典致动盘法,改进致动盘法更考虑了叶片几何和气动参数(尺寸信息、攻角、桨距角、升阻力系数等)。通过与后置激光雷达尾流测试结果对比,这2种基于CFD技术的数值模拟方法,计算网格相同,计算时间相当,且均能较好地模拟因为复杂地形而引起的尾流偏转;其中改进致动盘的尾流形状与激光雷达相似,速度亏损也更接近激光雷达结果。因此,改进致动盘法更适用于复杂地形条件下风场模拟,较好平衡了计算的效率与精度。

**关键词:** 风电场; 复杂地形; 尾流模拟; 改进致动盘法; 激光雷达

**中图分类号:** O325/TK79

**文献标志码:** A

## 0 引言

在风电场中,风力机之间的相互气动干涉通常称为尾流效应。尾流效应对于风电场的设计、机位的选择、风力机的控制均具有重要意义。深刻理解尾流干涉激励、提高尾流效应的预测精度和效率,能够极大提高风电场设计和风力机选址的质量。目前,尾流的预测,从仿真模拟复杂程度来看,主要有工程尾流模型、涡方法、致动方法、风力机直接物理建模数值模拟等多种方法。然而,工业界(主要指设计院等相关风电场设计单位)仍然习惯于、短期内并将继续采用一系列工程尾流模型来评估单个或多个风力机后方的风速衰减和风力机的功率产出<sup>[1]</sup>。工程模型(例如常见的Jensen和Frandsen模型),都是通过简化流场的动量和质量守恒方程,从而得到形式简单、变量较少的解析解。在所有尾流预测模型中,工程模型需求的计算时间最少,而且对平坦地形风电场的总体发电量预测取得了较好的实践经验,数值与实际结果较为吻合。

因此,学术界目前在尾流模型上的研究工作主要集中于寻找一种既可简化叶片建模、又可最大限度保留叶片气动特性的方法,其中,最为常用的即为致动方

法(通常细分为致动盘法(AD)<sup>[2-3]</sup>、致动线法(AL)<sup>[4-5]</sup>以及致动面法(AS)<sup>[6-8]</sup>)。致动方法也是基于CFD数值模拟,因此具备较强的环境适应能力(例如复杂山地地形)和较高精度的复杂流动模拟能力。不同于叶片直接建模,致动方法在NS或LES求解器中,不单独建立叶片翼型部分的几何模型,而是从已有实验数据中向网格节点引入叶片攻角、相对流动速度与升力系数 $C_l$ 和阻力系数 $C_d$ 的关系,进而计算叶片对空气作用的体积力。同直接叶片模拟方法相比,致动方法有以下2个优点:1)减少了网格节点数量,无需对复杂的叶片三维形状和叶片表面边界层进行建模和求解;2)允许用体积力替代移动边界,可在避免使用动网格的情况下求解瞬态问题<sup>[6]</sup>。致动线法和致动面法将流动中的不定因素考虑在内,可模拟单个叶片旋转及其运动后的涡流。致动线法和致动面法能够预测尾流动态中的复杂细节,如失速流动和小涡流。从工程应用角度而言,与致动线法和致动面法相比,致动盘法更为高效,因为其可容忍更低的网格空间分辨率并求解风电场稳态流动的解<sup>[9]</sup>。其中,依据已有的叶片翼型截面数据,叶片载荷可被近似当成定值或通过叶素理论得到<sup>[10]</sup>。使用定值的方法是经典致动盘法,又称做Froude动量理论<sup>[11]</sup>,

收稿日期: 2017-08-22

基金项目: 中国华能集团公司总部科技项目(HNKJ16-H25)

通信作者: 刘鑫(1987—),男,博士、高级工程师,主要从事风力发电和水力发电技术相关方面的研究。xin-liu@foxmail.com

忽略单个叶片表面载荷的不均性分布特性,采用多孔介质压降模型。基于叶素理论的致动盘方法是由 Glauert<sup>[12]</sup>提出,也称为改进致动盘法,该方法将叶片各翼型截面的几何、气动性能当作输入参数。将数值模拟的结果与风洞测量的实验数据相比较,改进致动盘法以及致动线/致动面法与实测结果均较好吻合,而经典致动盘法则与实测结果有较大出入<sup>[13]</sup>。若考虑上述所有问题,改进致动盘法非常好地平衡了叶片物理元素的真实性、预测的精确性和计算的效率性。故而,改进致动盘法是一种适用于复杂地形的、能够优化风力机布置和预测发电功率的数值方法。

本文针对一个位于中国西南某多山地区的复杂地形风场,采用 CFD 方法,基于 RANS 求解器和  $k-\omega$  湍流模型开展一系列研究。风力机的模拟将采用改进致动盘法,将叶片数据(例如叶片物理信息、攻角、桨距角、转速)考虑在内,研究每个风力机的输出功率和其后的尾流发展变化规律。为了验证数值模拟结果,本研究在目标风力机前后布置 2 台激光雷达,分别测量来流风分布和尾流区风分布,并将基于 CFD 的改进致动盘法的数值结果、经典致动盘法的计算结果与激光雷达的实测结果进行比较。

## 1 数值建模

本研究采用 ANSYS Fluent 商业 CFD 数值模拟软件,通过求解 SST  $k-\omega$  湍流模型封闭的 RANS 方程实现。

### 1.1 风电场

该风电场位于中国西南部某多山地区,具有较高的地形复杂度,由中国华能集团开发运营。该风电场海拔差异较大,从山谷到山峰,高度差约 800 m,风场区域长 25 km,宽 25 km,由 4 个子风电场组成,总装机规模为  $4 \times 49.5$  MW。图 1 所示为此次测试风场,位于整体区域的西北部,海拔高度为 2400~2749 m。测试区域有 32 台风力机,额定功率 1.5 MW,额定风速 10.5 m/s。机组轮毂高度 65 m,叶轮直径 82 m。

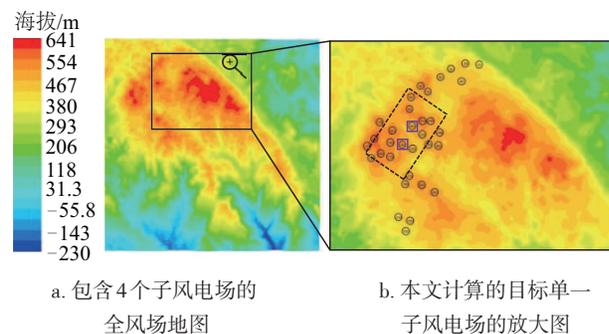


图 1 风电场风力机布局

Fig. 1 Test wind turbine locations in wind farm

### 1.2 经典致动盘法

经典致动盘法将风力机叶片简化为一个阻力恒定的多孔介质模型。叶片模拟过程中,由多孔介质取代扫略区域。此过程中,多孔介质被当做一个具有动量的源项,其对流场的作用为均匀分布的轴向力<sup>[10]</sup>。压降  $\Delta p$  通过推力系数  $C_T$  曲线计算,由风力机生产厂家给出。

经典致动盘法中,压降由式(1)计算得出<sup>[14]</sup>,

$$\Delta p = \frac{T}{A} = C_T \frac{1}{2} \rho u_\infty^2 \quad (1)$$

式中,  $T$  ——风力机受到的推力, N;  $A$  ——叶轮扫风面积,  $m^2$ ;  $\rho$  ——当地空气密度,  $kg/m^3$ ;  $u_\infty$  ——风力机前缘来流速度,  $m/s$ 。

轴向诱导因子  $a$  由式(2)定义:

$$a = \frac{u_\infty - u_1}{u_\infty}, \quad u_\infty = \frac{1}{1-a} u_1 \quad (2)$$

式中,  $u_1$  ——叶片轮毂处的速度。由贝茨理论,当假定一个固定的推力系数之后,轴向诱导因子按式(3)计算:

$$a = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{1 - C_T}) \quad (3)$$

综上,得出压降的表达式为:

$$\Delta p = C_T \frac{1}{2} \rho \left( \frac{1}{1-a} u_1 \right)^2 \quad (4)$$

### 1.3 改进致动盘法

风力机叶片还可通过改进致动盘法进行模拟,则需引入体积力<sup>[15-18]</sup>。改进致动盘法以二维的叶片截面翼型数据描述叶片的空气动力学性能。根据流速、叶片局部的攻角、对应的升力系数  $C_L$  和阻力系数  $C_D$ , 通过式(5)来计算叶片截面翼型受力  $f$ :

$$f = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c B (C_L e_L + C_D e_D) \quad (5)$$

式中,  $U_{rel}$  ——流场局部相对速度;  $c$  ——弦长;  $B$  ——叶片的数量;  $e_L$  和  $e_D$  ——升力和阻力方向上的单位矢量。

局部攻角由局部来流角和叶片的扭转角及桨距角决定。 $U_{rel}$  通过绝对速度在轴向和切向的合成得到:

$$U_{rel} = (U_{axial}, r\Omega - U_\theta) \quad (6)$$

式中,  $\Omega$  ——叶片的旋转速度。风力机转速由来流速度决定。

对圆盘上某一微元区域应用圆柱坐标  $dA = r dr d\theta$ , 在此区域上的载荷为:

$$f' = \frac{f dr}{r dr d\theta} \quad (7)$$

在 ANSYS-Fluent 计算  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向上升力和阻力的总和,通过 ANSYS Fluent 的用户定义函数(user defined function, UDF)中,由源项施加到流场计算域中去。

### 1.4 激光雷达布置

如图 2 所示,在目标 18#风力机的前后方、沿测试主风向,分别垂直放置一台地面式垂直型多普勒激光雷达。



图2 18#风力机2台雷达位置的卫星图

Fig. 2 Satellite view of two lidars on #18

和平坦地形风电场不同的是,复杂地形下风力机通常放置在局部区域的高点,因此,前置和后置激光雷达的安放海拔高程均低于 18#风力机。虽然前后雷达都测量了 100 m 高度,但两者的实际海拔却不相同。本次试验未进行场地标定和统一标高参考点,主要是因为研究目的在于对比激光雷达和 CFD 计算结果,两者对同一参考点的坐标、高程具有一一对应关系。其中前置雷达用以测量风力机前方 224 m 处自由来流的风速分布。后置雷达用于捕捉叶片后 330 m 处的尾流特性。激光雷达从 2015 年 6 月 5 日到 8 月 31 日以 1 Hz 的频率进行连续测量。前置雷达以 10 m 为间隔,测量沿地面高度 45~155 m 处,共计 12 个位置的测风数据。后置雷达同样以 10 m 为间隔,取 12 个测点,沿地面高度为 80~190 m。由于山脊线的坡度超过 10°,故而布置激光雷达的位置低于风力机基础的水平面。

### 1.5 计算设置和边界条件

本文研究对象为 18#风力机附近区域,形状为长 3 km,宽 2 km,高 20 km 的矩形区域,在图 1b 上以虚线标出。本文的主要目的是就复杂地形,引入尾流评估和改进致动盘法的应用,所以为减少计算时间和资源,在计算域内,选取 2 台风力机(18#和 20#,在图 1b 中以方框标出)进行研究。尽管计算域内还存在其他风力机,选取的 18#和 20#这 2 台机组已足以满足探索研究尾流效应的要求。地形网格和风力机的模型如图 3 所示。

对于 ANSYS-Fluent 中的压力和速度输入,采用速度入口边界条件;出口则采用压力出口边界条件;对于侧面和顶部,采用对称边界;对于底面,使用无滑动边界,



图3 计算网格

Fig. 3 Mesh domain

基于当地的森林植被情况,地表粗糙度设置为 0.2 m。大气稳定性模型(热力学模型)并未被考虑进 CFD 模拟中,近似于模拟稳定大气环境。风力机叶片的转动速度由叶片前来流速度决定,这一关系由风力机生产厂家给出。需要说明的是,鉴于地形的复杂性,直接确定实际的来流速度较为困难。本文采用以下办法:首先,从前置激光雷达采集到的海量数据中选取时长为 1 h,流动较为稳定的样本,得到 1 h 平均风速。然后,将该激光雷达位置处 100 m 高程的平均速度设为 CFD 计算的目标速度。假定入口边界输入风速适用对数规律,进行迭代,直到 CFD 计算域中相同位置高度下的计算风速和激光雷达的目标风速吻合,如图 4 所示。

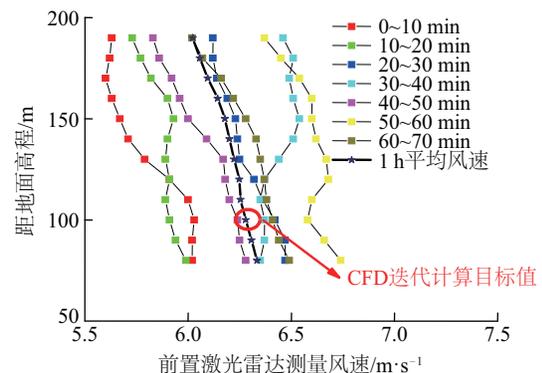


图4 选择参考风速

Fig. 4 Target iteration wind speed for inlet boundary

## 2 结果与分析

复杂地形和平坦地形最主要的区别之一在于,复杂地形中某处速度和压力分布主要取决于地形的变化条件。地形的高低起伏显著改变了风切变、湍流度、入流角和速度大小等一系列指标,而这些指标对风力机运行的稳定性有较大影响。由经典致动盘法和改进致动盘法得到的轮毂高度处速度分布如图 5 所示。可清晰看出风力机(致动盘)后的尾流,有别于平坦地形,复杂地形的尾流并非总呈一条直线。尾流的流动会随山体的

变化而改变。总体而言,尾流倾向于绕过山体而从两山之间流出。对于本方案例,2种方法得到的尾流轨迹是相同的,但改进后的方法会得到更长的尾流区域。这是由于改进致动盘法考虑了风力机叶片的转动因素,故而会增加流动的扰动性,导致需要更长的距离来恢复到原本流动状态。

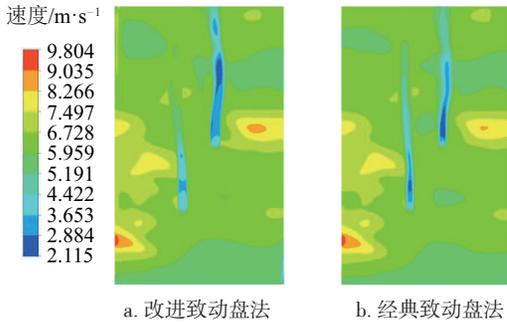


图5 风力机轮毂高度处速度分布

Fig. 5 Velocity distributions at elevation of turbine hub

另外,对于复杂地形的情况,风力机发电量的主要影响因素可能是地形,而非尾流干扰。一方面,大部分风力机都会沿主导风向布置在山顶附近迎风的一侧,每台风力机的高程和机后尾流几乎都有所差异。另一方面,由于尾流随地形变化,即使对于处在同一高程,沿主导风向前后布置的2台风力机,也可能出现前一台的尾流绕过后一台的情况。

图6所示为同一天内前后2台激光雷达的风玫瑰图,可看出,当风经过风力机叶片后,方向改变了约20°。基于CFD数值模拟结果则显示风的方向改变了约12°(如图7)。造成计算和测量间存在误差的可能原因是CFD中的地形模型不够精确,以至于遗漏了一些地表细节。即使如此,也反映出致动法尾流模拟的优势,因为传统CFD风资源评估软件如WindSim和WT均采用工程尾流模型,尾流是线性直线发展的,无法预测受地形扰动而产生的尾流偏转效应。

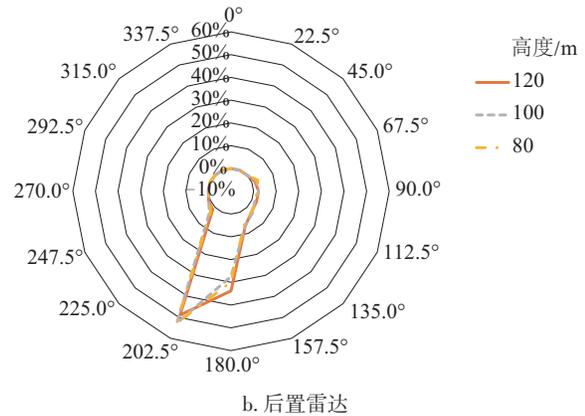


图6 风向频率风玫瑰图

Fig. 6 Rose diagrams of wind direction frequency

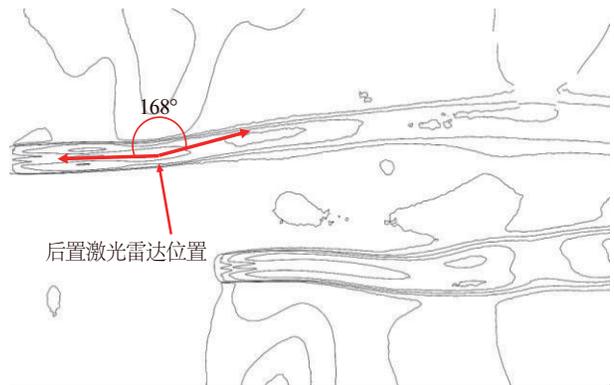
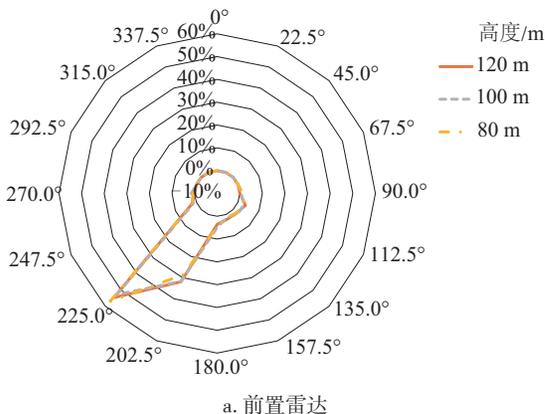


图7 后置激光雷达(18#)处尾流偏转角

Fig. 7 Wake deflection angle at rear lidar location for 18#

在比较CFD结果和实测的速度分布之前,本文需要指出的是,数值方法的边界条件要与实测环境完全相同是几乎不可能的。例如,在复杂地形中,由于多种因素(如山体、尾流、湍流、风速、大气稳定性)相互作用,很难完全模拟出大气环境的影响<sup>[19-20]</sup>。同时,即使在测量过程中,由于风有较大的湍流度,且激光雷达的结果是基于时间上累积平均的方法得到的,所以也不可能每次都得到相同的结果。正如之前图5所讨论的那样,测量结果是从一段相对稳定的流动中精心挑选的。这段时间的平均速度被设定为CFD入口边界条件设置的参考条件。激光雷达的结果显示,在3种不同的大气条件(对流不稳定态、中性平衡态、稳定态)下,自由流动和尾流的速度分布完全不同,如图8所示。在本文中,大气稳定性模型(热力学模型)并未被考虑进CFD模拟中。对于自由来流的速度分布而言,2种模拟方法得到的结果几乎相同,而且与实测结果吻合度较高(如图9a所示)。这种结果很好理解,因为致动盘对风力机前方的流动并无任何影响。改进致动盘法的模拟结果对叶片



后的速度衰减有轻微的过度估计,但速度分布规律与实测结果非常接近。形成对比的是,经典致动盘法的结果同实测有较大出入(如图 9b 所示)。

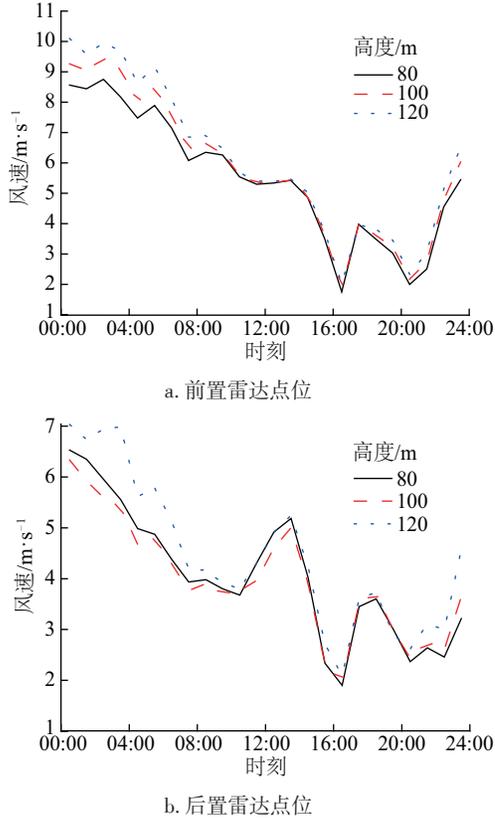


图8 一天内距地面不同高度风速变化规律  
Fig. 8 Wind speed variation in one day for different elevation

前置激光雷达处的速度分布呈现负梯度,与通常所认为的对数截面有所差异。造成这一现象的主要原因是激光雷达的位置和独特的地形特征引起,在本案中,前置激光雷达布置在山的迎风坡上,而地面对来流有较强的挤压加速作用,使得近地面的风速超过了边界层以外的风速。

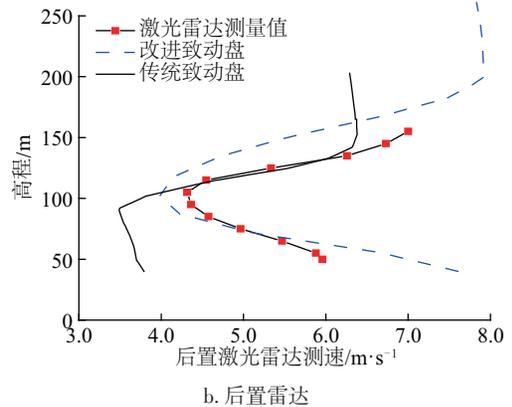
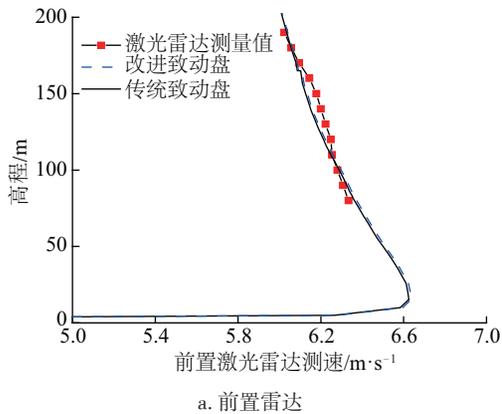


图9 CFD和雷达测量的速度特征比较  
Fig. 9 Comparison of velocity profiles between rear lidar and CFD simulation

### 3 结论

本文通过 CFD 数值模拟和激光雷达实测结合的方法,对中国西南某山区陆上风电场的风力机尾流特征进行数值和实验研究,对比经典致动盘模型和改进致动盘模型在复杂山地的适应性问题。

为了测量自由来流风速和尾流的廓线情况,在目标风力机 18#机组的前后分别放置 1 台激光雷达。激光雷达的结果显示,在 3 种不同的大气条件(对流不稳定态、中性平衡态、稳定态)下,自由流动和尾流的速度分布完全不同。但在地形上坡加速效应下,不同大气稳定度下目标风力机的自由来流风速廓线均呈负梯度。起伏变化的地形会改变尾流发展方向,总体而言,尾流倾向于绕过山体而从两山之间流出。

然后分别采用经典致动盘和改进致动盘法,模拟目标风力机在主风向下的尾流发展。两者采用同一套网格,不同于只有风速与压降关系的经典致动盘法,改进致动盘法更考虑了叶片几何和气动参数(尺寸信息、攻角、桨距角、升阻力系数等)。CFD 计算结果表明,两者的计算时间基本相同;这 2 种基于 CFD 的致动盘方法均可有效模拟因为地形变化所引起的尾流偏转现象。与经典的致动盘法方法相较,改进致动盘法在捕捉速度细节方面有更好的表现,且预测的速度亏损也更接近激光雷达的测量结果。

综上,改进致动盘模型能快速高效预测全风电场的空气动力学特性和尾流发展与偏转,在复杂地形条件下,比经典致动盘的表现更好。

#### [参考文献]

[1] ANDERSEN S J, SØRENSEN J N, IVANELL S, et al.

- Comparison of engineering wake models with CFD simulations[J]. *Journal of physics: conference series*, 2014, 524(1): 012161.
- [2] MAHMOODI E, JAFARI A, KEYHANI A. Wind turbine rotor simulation via CFD based actuator disc technique compared to detailed measurement[J]. *International journal of renewable energy development*, 2015, 4(3): 205-210.
- [3] SØRENSEN J N, SHEN W Z, MUNDUATE X. Analysis of wake states by a full-field actuator disc model [J]. *Wind energy*, 2015, 1(2): 73-88.
- [4] PORTEAGEL F, WU Y T, IUNGO V, et al. Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind farms [J]. *Journal of wind engineering & industrial aerodynamics*, 2011, 99(4): 154-168.
- [5] SHEN W Z, SØRENSEN J N, MIKKELSEN R. Tip loss correction for actuator/Navier-Stokes computations[J]. *Journal of solar energy engineering*, 2004, 127(2): 209-213.
- [6] SHEN W Z, ZHANG J H. The actuator surface model: a new Navier-Stokes based model for rotor computations [J]. *Journal of solar energy engineering*, 2009, 131(1): 284-289.
- [7] SHEN W Z, SØRENSEN J N, ZHANG J H. Actuator surface model for wind turbine flow computations [C]// *European Wind Energy Conference 2007*, Milan, Italy, 2007.
- [8] ZHANG J. Numerical modeling of vertical axis wind turbine (VAWT)[D]. Kongens Lyngby: Technical University of Denmark, 2004.
- [9] GOMES V M M G C, PALMA J M L M, LOPES A S. Improving actuator disk wake model[J]. *Journal of physics: conference series*, 2014, 524(1): 012170.
- [10] TZIMAS M, PROSPATHOPOULOS J. Wind turbine rotor simulation using the actuator disk and actuator line methods [J]. *Journal of physics: conference series*, 2016, 753(3): 032056.
- [11] FROUDE R E. On the part played in propulsion by differences of fluid pressure [R]. *Transactions of The Royal Institution Of Naval Architects* 30.
- [12] GLAUERT H. *Airplane propellers* [M]. Springer Berlin Heidelberg, 1935: 169-360.
- [13] NILSSON K, BRETON S P, SØRENSEN J N, et al. Airfoil data sensitivity analysis for actuator disc simulations used in wind turbine applications[J]. *Journal of physics: conference series*, 2014, 524(1): 012135.
- [14] CRASTO G, GRAVDAHL A R. CFD wake modeling using a porous disc [C]// *WindSim User Meeting*, Tønsberg, Norway, 2008.
- [15] MOZAFARI J, TEYMOUR A. Numerical investigation of marine hydrokinetic turbines: methodology development for single turbine and small array simulation, and application to flume and full-scale reference models[J]. *Software for computer control*, 2014, 52(1): 129-134.
- [16] NILSSON K, IVANELL S, HANSEN K S, et al. Large-eddy simulations of the Lillgrund wind farm [J]. *Wind energy*, 2014, 18(1): 449-467.
- [17] LAVARONI L, WATSON S J, COOK M J, et al. A comparison of actuator disc and BEM models in CFD simulations for the prediction of offshore wake losses [J]. *Journal of physics: conference series*, 2014, 524(1): 012148.
- [18] NILSSON K. Numerical computations of wind turbine wakes and wake interaction: optimization and control [D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2012.
- [19] CASTELLANI F, ASTOLFI D, TERZI L, et al. Analysing wind farm efficiency on complex terrains [J]. *Journal of physics: conference series*, 2014, 524(1): 012142.
- [20] WHARTON S, NEWMAN J F, QUALLEY G, et al. Measuring turbine inflow with vertically-profiling lidar in complex terrain [J]. *Journal of wind engineering & industrial aerodynamics*, 2015, 142: 217-231.

## CFD SIMULATION AND LIDAR EXPERIMENTAL STUDY ON WIND TURBINES IN COMPLEX TERRAIN

Liu Xin, Yan Shu, Guo Yutong, Shi Shaoping, Chen Xinming, Mu Yanfei

*(China Huaneng Clean Energy Research Institute, Beijing 102209, China)*

**Abstract:** In this paper, the flow characteristics of an onshore wind farm with complex terrains in Southwest China was investigated with numerical and experimental methods. The applicability of different numerical methods in complex terrain is verified. Two lidars are vertically set down before and after the wind turbine. The free inflow wind speed and wake profile of the target wind turbine in one month were measured. It shows that, the wind speed profiles of the free inflow of the target turbines are all negative gradients under the acceleration effect of the terrain uphill. An improved actuator disk method is used, combined with blade information (such as geographical characteristics, attack angle, pitch angle), to simulate the wake precisely. Compared with classic AD method, the improved one fits the actual measurement much better. The study shows that the improved AD method can perform well in most complex terrains, especially in modelling what the velocity field is like in a wake flow and how it is deflected by terrains. Moreover, it can be better balance between computational efficiency and accuracy.

**Keywords:** wind farm; complex terrain; wake simulation; improved actuator; lidar