



阵风工况下多台风力机尾流效应的非定常特性

曹九发 宋佺珉 王超群 朱卫军 柯世堂

Unsteady characteristics of wake effect for multiple wind turbines under gust wind condition

CAO Jiufa, SONG Quanmin, WANG Chaoqun, ZHU Weijun, KE Shitang

引用本文:

曹九发, 宋珉, 王超群, 等. 阵风工况下多台风力机尾流效应的非定常特性[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(4): 247–255. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2021.0309

CAO Jiufa, SONG Quanmin, WANG Chaoqun, et al. Unsteady characteristics of wake effect for multiple wind turbines under gust wind condition[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2022, 40(4): 247–255. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2021.0309

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0309>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

风力机叶片旋转平面内弯曲对动力学响应的影响

Dynamic response of the wind turbine blade bending in the rotational plane

空气动力学学报. 2017, 35(5): 659–664 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2016.0119>

低雷诺数翼型层流分离现象大涡模拟方法

Large eddy simulation method for the laminar separation phenomenon on low Reynolds number airfoils

空气动力学学报. 2019, 37(6): 915–923 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2018.0025>

台风过境全过程大型风力机风荷载特性

Wind loads characteristic of large wind turbine considering typhoon transit process

空气动力学学报. 2020, 38(5): 915–923 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2019.0108>

低雷诺数下吹吸气射流对NACA0012翼型气动性能的影响

The effect of blowing/suction jet on the aerodynamic performance of airfoil NACA0012 at low Reynolds number

空气动力学学报. 2020, 38(1): 58–65 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2018.0070>

不同飞行状态下机体耦合桨叶的阵风响应分析

Gust response analysis for helicopter rotors coupled with fuselage in different flights

空气动力学学报. 2018, 36(6): 1052–1060 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2018.0036>

自由端狭缝吸气控制三维方柱绕流

Flow control around a three dimensional square cylinder with free-end slot suction

空气动力学学报. 2020, 38(6): 1093–1101 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2018.0205>

地址: 四川省绵阳市二环路南段8号11信箱9分箱
电话: 0816-2463375
Email: kqdlxxb@163.com
网址: <http://kqdlxxb.xml-journal.net/>



关注微信公众号
获得更多资讯信息

文章编号: 0258-1825(2022)04-0247-09

阵风工况下多台风力机尾流效应的非定常特性

曹九发^{1,2,*}, 宋仨珉¹, 王超群¹, 朱卫军¹, 柯世堂³

(1. 扬州大学 电气与能源动力工程学院, 扬州 225127;

2. 丹麦科技大学 风能系, 丹麦 哥本哈根 灵比 2800;

3. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016)

摘要: 风力机实际运行中入流工况复杂, 风电场中多台风力机之间的尾流效应呈现高度非定常特性, 下游风力机的气动载荷亦会因此受到严重影响。本文开展了阵风工况下多台风力机尾流效应的非定常特性研究。首先, 建立了 LES 耦合致动线模型方法, 以 Nibe 风力机为算例验证了方法的可行性和准确性, 并研究了单台风力机尾流速度的发展规律; 然后, 以 NREL 5 MW 大型风力机为例, 开展了多台风力机在阵风工况下的数值模拟, 获得了非定常尾流效应和尾流干扰特性, 揭示了尾流中阵风涡系的发展演变规律; 最后, 分析总结了阵风工况下的风力机气动载荷特性。研究内容及结论对风电场布局和风力机载荷强度设计具有指导意义。

关键词: 风力机; 尾流效应; 阵风; 大涡模拟; 致动线

中图分类号: TM315 文献标识码: A doi: 10.7638/kqdlxxb-2021.0309

Unsteady characteristics of wake effect for multiple wind turbines under gust wind condition

CAO Jiufa^{1,2,*}, SONG Quanmin¹, WANG Chaoqun¹, ZHU Weijun¹, KE Shitang³

(1. Energy and Power Engineering, Yangzhou University College of Electrical, Yangzhou 225127, China;

2. Department of Wind Energy, Technical University of Denmark, Lyngby Copenhagen 2800, Denmark;

3. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The actual operating conditions of wind turbines are complex, which leads to strong unsteady characteristics between wind turbines in the wind farm, and causes unsteady aerodynamic load of the upstream and downstream wind turbines due to the unsteady wake effect. In this study, the unsteady characteristics for the wake effect of multiple wind turbines are investigated under the gust wind condition. Firstly, an unsteady wake simulation method is established by coupling the LES (large eddy simulation) and the actuator line model, and the feasibility and accuracy are verified using the Nibe wind turbine. Meanwhile, the development characteristics of a single wind turbine wake is unveiled. Then, taking the NREL 5 MW wind turbine as an example, numerical simulations are performed for multiple wind turbines under the gust wind condition. The characteristics of unsteady wake effects and the development mechanism of the wake vortex structures under the gust wind condition are discovered. Finally, aerodynamic load characteristics of the upstream and downstream wind turbines are analyzed and summarized under the gust wind condition. The present analyses and results are significant in guiding the wind farm layout and wind turbine design.

Keywords: wind turbine; wake effect; gust wind; large eddy simulation; actuator line

收稿日期: 2021-09-29; 修订日期: 2021-11-01; 录用日期: 2021-11-22; 网络出版时间: 2021-12-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51906210); 江苏省自然科学基金(BK20160476)

作者简介: 曹九发^{*}(1986-), 男, 福建人, 副教授, 研究方向: 风力机和风电场空气动力学, 气动噪声. E-mail: caojiufa98@163.com

引用格式: 曹九发, 宋仨珉, 王超群, 等. 阵风工况下多台风力机尾流效应的非定常特性[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(4): 247-255.

CAO J F, SONG Q M, WANG C Q, et al. Unsteady characteristics of wake effect for multiple wind turbines under gust wind condition[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(4): 247-255(in Chinese). doi: 10.7638/kqdlxxb-2021.0309

0 引言

风力机尾流影响是风电场的选址和布局设计中的一个重要考量因素。在风电场的整体布局中,一部分风力机不可避免地会处于上游风力机的尾迹中,由此带来的直接影响是位于尾迹中的风力机发电量降低,同时尾流效应带来的风切效应和湍流增强等因素增加了尾迹区风力机的疲劳载荷。丹麦某个海上风电场的测试研究中发现,由于尾流效应的影响,整个风电场的发电功率损失可达到总装机功率的10%~20%^[1]。风力机工作在非稳态的复杂来流环境中,其性能会受到较大影响,尤其是极端风况阵风(即风速在短时间内产生剧烈波动),会导致风力机气动载荷发生破坏性波动,影响风力机的运行安全和使用寿命。因此,研究风力机尾流特性及上下游风力机的载荷特性,着眼于提高发电效率、减少尾流对风力机性能的影响,对风电场高效健康运行具有十分重要的意义。

目前风力机尾流研究主要有实验研究和数值模拟研究。国内外很多学者^[2-4]对风力机尾流进行了PIV实验研究,得到了尾流流场数据,但是实验研究大多为缩比模型的风洞实验,而风力机尾流的场外实验,特别是针对多台风力机在复杂非稳态工况下的尾流干扰实验研究,成本较高,难度大。随着计算方法及设备性能的日益发展,CFD已经成为研究风力机尾流效应和尾流干扰的常用手段^[5-9]。近年来,致动理论耦合CFD方法成为风力机尾流数值模拟方法的热点^[10-12]。该耦合方法将风力机叶片的气动力作为体积力源项加载到流场中,然后通过求解N-S(Navier Stokes)方程来获得流场信息,这种方法相对于传统具有叶片物面网格的方法,可以大大提高数值计算效率。致动理论模型主要有致动盘(Actuator Disk, AD)、致动线(Actuator Line, AL)和致动面(Actuator Surface, AS)模型。丹麦科技大学的Sørensen^[13]在致动盘模型的基础上发展出了风力机尾流模拟的致动线模型,并采用自主研发的EllipSys3D求解器,对比了风力机在大气湍流和均匀来流下的尾流特性。Zhu等^[14]采用EllipSys3D求解器,研究了在叶片根部、风轮前方增加导流盘后风力机功率的变化。Shen等^[15]将致动线模型与N-S/LES(Large Eddy Simulation)耦合,然后基于MEXICO风力机实验数据,开展了风力机尾流数值模拟方法的改进研究。朱翀等^[16]以NH1500叶片为研究对象,采用RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)结合 $k-\omega$ SST湍流模型的方法,从叶片载荷分布和功率系数两个方面将致动线方

法、叶素动量理论、叶片物面网格方法进行了对比,同时分析了风力机尾流速度变化特性与气动载荷特性。Qian等^[17]采用ALM-LES方法,模拟了风力机尾流的高精度湍流流动结构及气动载荷。卞凤娇等^[18]基于OpenFOAM平台,对比了PISO求解的致动线模型和多重参考稳态求解的CFD实体模型,进而采用致动线模型数值研究了NREL 5 MW风力机在均匀来流中的尾流场特性。Nathan等^[19]比较了采用OpenFOAM和EllipSys3D求解器求解致动线模型的结果,并将其与NEW MEXICO实验数据进行对比,结果表明两者均能在近尾流处较好地吻合实验数据。周洋等^[20]比较了致动线方法中均匀分布和高斯分布两种不同的体积力分布方式,并分别采用这两种方式对Nibe A型风力机进行了数值模拟,得到了高斯分布方式更接近实验数据的结论。目前风力机尾流效应研究和尾流干扰研究主要是针对稳态工况开展的,本文则计划针对风电场非定常阵风入流工况,采用LES耦合致动线模型的方法,开展多台风机的尾流特性、尾流效应及风力机动态气动载荷的相关研究。

1 数值模型与方法

1.1 N-S/LES模型

数值模拟的控制方程采用三维不可压N-S方程。连续性方程为:

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

对于三维不可压缩牛顿流体,动量守恒方程为:

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

其中: $\mathbf{v}$ 为惯性坐标系下的速度矢量; t 为时间; ρ 为密度; p 为静压; $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量; S 为添加的体积力动量源项,本文主要是风力机叶片产生的气动力。

$\boldsymbol{\tau}$ 由下式给出:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left[(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{I} \right] \quad (3)$$

其中 μ 为分子黏性系数, $\mathbf{I}$ 为单位张量。

LES大涡模拟是求解瞬态流动的主要方法之一,它是在空间域上对瞬态Navier-Stokes方程进行滤波处理。滤波过程可将小于滤波器宽度或计算网格尺度的小尺度涡过滤出去,从而形成关于大尺度涡的控制方程。在LES方法中,通过使用滤波器函数,将每个变量都分成两部分——大尺度分量和小尺度分量。大尺度部分是滤波后的变量,是在LES模拟时

直接计算的部分;小尺度部分是需要通过模型来表示的。滤波处理后,瞬态状态下的 N-S 方程包含了如下新的应力项:

$$\tau_{ij} = \rho \overline{u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (4)$$

式中, τ_{ij} 被定义为亚格子尺度应力 (Sub-Grid-scale Stress, SGS), 体现了小尺度涡的运动对所求解的运动方程的影响。 τ_{ij} 是一个对称张量, 其包括 6 个独立的未知变量。对 τ_{ij} 进行不同的建模, 就可以得到不同的 SGS 模型。本文采用 Smagorinsky-Lilly 模型进行风力机尾流流场的 LES 数值模拟。整个风力机流场数值求解流程如图 1 所示。

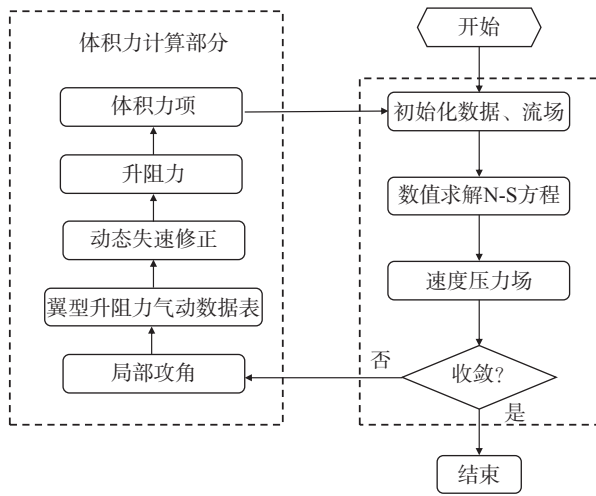


图 1 致动模型与 N-S 方程耦合计算流程图

Fig. 1 Flow chat of the actuator line model coupled with the N-S equations

1.2 致动线模型 AL

风力机的致动线模型是基于风力机的叶素动量理论延展出的等效风力机叶片模型^[15]。如图 2 所示, 将叶片分成一个个微元段(叶素), 根据当地的流场信息与已知的翼型性能数据、叶片外形数据, 可求得每个叶素上的气动力。图 2 最右边为某个叶素的截面图, x 为来流方向。

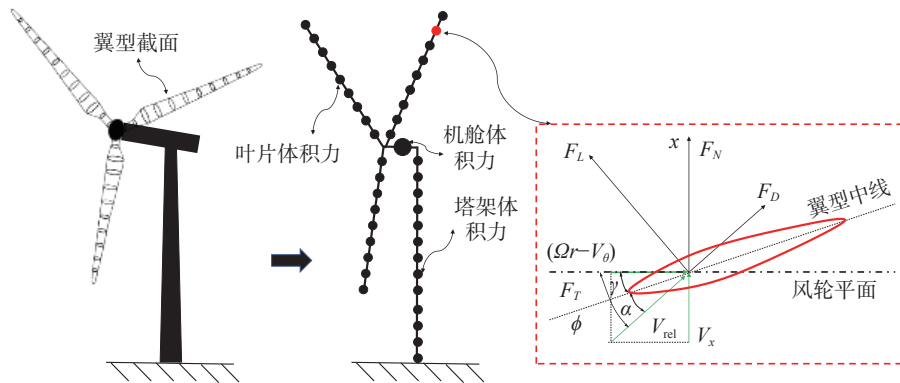


图 2 致动线模型示意图

Fig. 2 Schematic of the actuator line model

叶片翼型截面的当地速度^[15]为:

$$V_{rel} = \sqrt{V_x^2 + (\Omega r - V_\theta)^2} \quad (5)$$

其中, Ω 为风轮转动的角速度, r 为截面翼型到叶根的位置, V_x 和 V_θ 分别为翼型的轴向速度和切向速度。

翼型截面当地速度与风轮平面夹角为入流角,

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{V_x}{\Omega r - V_\theta} \right) \quad (6)$$

翼型截面的当地攻角为入流角减去桨距角 γ ,

$$\alpha = \phi - \gamma \quad (7)$$

确定了叶片翼型的当地速度与攻角后, 即可求出叶片单位展长的升力与阻力:

$$F_L = \frac{1}{2} n_b \rho V_{rel}^2 c C_L \quad (8)$$

$$F_D = \frac{1}{2} n_b \rho V_{rel}^2 c C_D \quad (9)$$

其中, n_b 为叶片数, C_L 和 C_D 分别为升力、阻力系数, c 为翼型弦长, ρ 为空气密度。

为了考虑机舱和塔架对风力机尾流流场的影响, 也可把机舱等效于体积力源项来模拟。机舱体积力计算公式为:

$$F_{nac} = -\frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 C_{D,nac} A_{nac} \quad (10)$$

其中: $C_{D,nac}$ 为机舱阻力系数(取值范围一般为 0.8~1.2), 本文取值 1.0; A_{nac} 为机舱的横截面积。

参考风力机叶片叶素理论方法, 可以把塔架同样分成一段段单个长度为 d_h 的微元。任意一段微元处的轴向阻力为:

$$f_{tower,dh} = -\frac{1}{2} \rho u^2 C_{D,tower} d_{tower} d_h \quad (11)$$

式中: $C_{D,tower}$ 为塔架阻力系数(取值范围一般在 0.8~

1.2), 本文取值 1.0; d_{lower} 为微元段塔架直径。

确定了所有体积力之后, 需要将计算出来的力光顺到叶素点周围的网格中去。为了防止求解时发生数值震荡, 本文采用三维高斯分布将体积力光顺过渡到周围的网格上:

$$f_{\varepsilon} = f_2 D \eta_{\varepsilon} \quad (12)$$

$$\eta_{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{\frac{3}{2}}} \exp \left[- \left(\frac{d_m}{\varepsilon} \right)^2 \right] \quad (13)$$

其中: d_m 为叶素点到网格型心的距离; ε 为高斯分布因子, 该参数取值与风轮旋转加密区网格单元尺寸 D_m 有关, 即 $\varepsilon = n D_m$, n 为倍数, 本文取 $n = 2$ 。

1.3 阵风

风况是结构完整性设计主要考虑的外部条件。从载荷和安全角度考虑, 风况可分为风力发电机组运行期间通常的正常风况以及按 1 年或 50 年重复周期确定的极端风况。极端风况包括由于风向和风速急速剧烈变化产生的峰值风速, 因此在设计时需要对其影响加以考虑。一般采用极端风况确定风力机的极端载荷。

对标准等级风力机组, 根据 IEC61400-1 风力发电设计要求规范, 轮毂高度处的重复周期为 N 年的阵风幅值关系式如下:

$$V_{\text{gust}, N} = \beta [\sigma_1 / (1 + 0.1 D_{\text{rotor}} / \Lambda_1)] \quad (14)$$

$$\sigma_1 = I_{15} (15 + a v_{\text{hub}}) / (a + 1) \quad (15)$$

式中: $I_{15} = 0.18$, $a = 2$, 为较高湍流强度类别; $I_{15} = 0.16$, $a = 3$, 为较低湍流强度类别。本文选取较高湍流类别。 Λ_1 为湍流尺度参数, 取值由下式给出:

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0.7 z_{\text{hub}}, & z_{\text{hub}} < 30 \text{ m} \\ 21 \text{ m}, & z_{\text{hub}} \geq 30 \text{ m} \end{cases} \quad (16)$$

其中: D_{rotor} 是风轮直径; $\beta = 4.8$, 对应 $N = 1$; $\beta = 6.4$, 对应 $N = 50$ 。

当重复周期为 N 年时, 由下列方程确定风速:

$$V_{z,t} = \begin{cases} V_z - V_t, & 0 \leq t \leq T \\ V_z, & t < 0 \text{ or } t > T \end{cases} \quad (17)$$

$$V_t = 0.37 V_{\text{gust}, N} \sin \left(\frac{3\pi t}{T} \right) \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \right] \quad (18)$$

式中: V_z 选用风切; $T = 10.5 \text{ s}$, 对应 $N = 1$; $T = 14.0 \text{ s}$, 对应 $N = 50$ 。本文选取 $T = 10.5 \text{ s}$ 。

图 3 为极端运行阵风示意图, 假设正常风速为 11.4 m/s (亦为本文作为边界条件的输入风况)。 a_g 点表示正常风速值的位置, b_g 、 d_g 点为阵风周期内风速最低的时间点位置, c_g 点为阵风周期内风速最高的时

间点位置, e_g 点表示阵风周期结束后风速回归到正常风速值的位置。

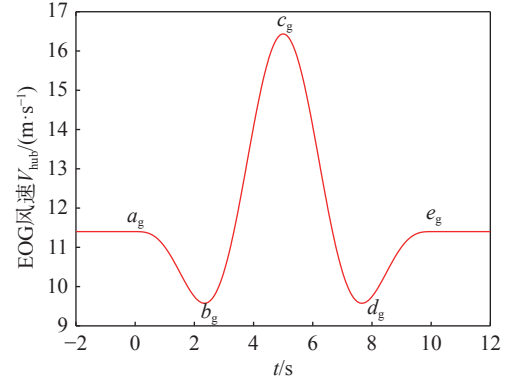


图 3 阵风示意图

Fig. 3 Schematic of the gust wind

2 结果与分析

2.1 算例验证

本文以丹麦 Nibe 风力机作为致动线模型数值模拟的验证算例。Nibe 风力机的主要参数见表 1, 具体的叶片、轮毂和塔架参数等见文献 [21]。

表 1 Nibe B 风力机主要参数信息表

Table 1 Key parameters of the Nibe B wind turbine

风轮直径	塔筒高度	额定转速	额定功率	叶片个数
40 m	45 m	34 r/min	630 kW	3

计算采用如图 4 所示的长方体计算域, 计算域的长、宽、高分别为 $24.5R$ 、 $6R$ 、 $6R$ 。对转子所在的区域进行局部加密, 加密范围为: x 方向, 风轮平面前后 $0.5R$; z 方向, 轮毂中心左右 $1.5R$; y 方向, 轮毂向上 $1.5R$ 。加密区以外的单元, 网格按照一定的比例向外延伸。风力机转子中心在 $(0, 45, 0)$ 位置。整个计算域总网格量为 430 万, 均采用六面体正交网格。

风力机的叶片被分为 20 段, 每一叶素段长度为

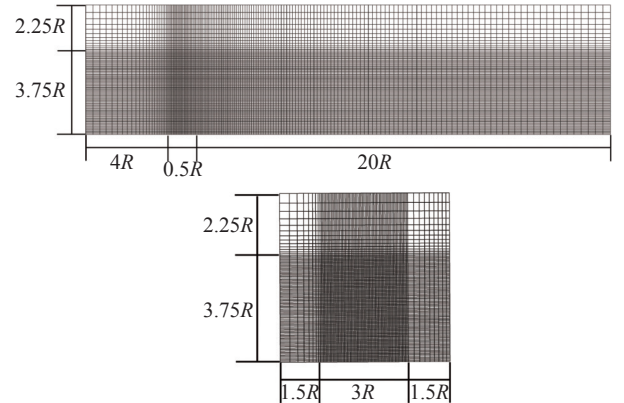


图 4 计算域网格示意图

Fig. 4 Schematic of the computational domain and grid

1 m, 恰好与加密区的网格单元尺寸相同。在计算时, 取三维高斯分布参数 $\varepsilon = 2$ m。Nibe 风力机位于丹麦北部沿海地区, 西侧为浅水区, 东侧为以矮草为主的平坦地形, 可认为来流风速不受地形影响。因此, 根据实验^[21]工况, 入口速度边界速度为 8.0~9.1 m/s 工况(本文选取 8.55 m/s), 湍流强度为 10%~15%(本文选取 10%), 其中入口风速考虑风剪切效应, 出口边界设置为压力出口, 下边界为物面, 上边界为滑移边界, 左右边界设置为滑移边界。对采用笛卡尔正交坐标系的致动线模型而言, 非定常数值计算的时间步长由风轮转速确定, 即单个时间步内叶尖旋转的距离不能大于所在区域的网格单元尺寸, $D_m: \omega r d_t \leq D_m$ 。在本算例中, 时间步长为 $d_t \leq 0.006$ s, 总共模拟 400 s, 尾流

风速由 200~400 s 数据取平均值得到。

图 5 为 Nibe 风力机在轴向上不同位置处的速度剖面图。通过与实验测量值对比, 可以看出: 风力机尾流速度在轴向位置上呈现出抛物线特性的变化趋势, 轮毂中间位置存在速度最低点; 随着轴向位置的增加, 风力机尾流速度不断恢复, 这是由于随着轴向距离增加, 周围大气向尾流中心不断进行能源补充, 使得速度逐渐向来流速度值恢复。从图中也可以看出, 本文的计算方法, 不仅近尾流区的速度计算结果有较好的准确度, 而且在比较重要的远尾区, 计算结果与实验值吻合较好。因此, 本文的非定常致动线模型耦合 LES 的风力机尾流数值计算方法, 具有较好的准确性和可行性。

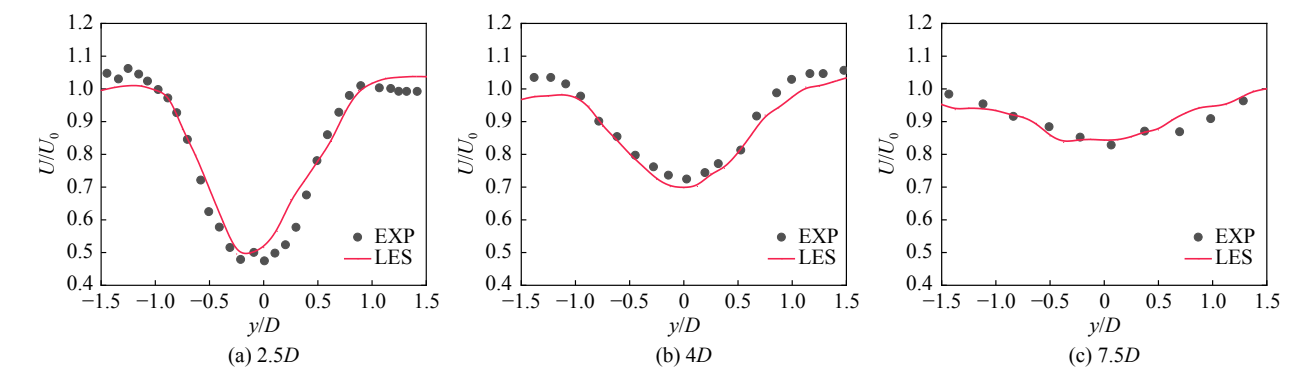


图 5 不同位置的风力机尾流的剖面速度对比图

Fig. 5 Velocity profile comparison at different locations of the wind turbine wake

2.2 NREL 5 MW 阵风工况数值计算

2.2.1 边界条件和计算域

NREL 5 MW 风力机主要参数见表 2, 具体的叶片和翼型数据可参阅文献 [22]。

表 2 NREL 5 MW 风力机主要参数信息表				
Table 2 Key parameters of the NREL 5 MW wind turbine				
风轮直径	塔筒高度	额定转速	额定功率	叶片数量
126 m	90 m	12.1 r/min	5 MW	3

图 6 为流场计算区域示意图。在长、宽、高分别为 17D、3D、3D 的长方体计算区域中串联布置 3 台水平轴 NREL 5 MW 风力机, 沿流向分别记为 WT-1 (第一台风力机)、WT-2(第二台风力机)、WT-3(第三台风力机)。网格在风力机附近区域进行加密, 加密区的长、宽、高分别为 0.5D、1.5D、1.5D, 加密区网格单元尺寸为 2.04 m。为了捕捉到涡系的细微结构, 在风力机尾流区采用全加密方式, 计算总网格量为 1100 万。风力机叶片、机舱和塔筒均用体积力源项表示, 其中叶片的分段数为 30, 塔筒的分段

数为 45。三台风力机中, WT-1 距离入口 2D, WT-3 距离出口 5D, 每台风力机之间的距离固定为 5D。

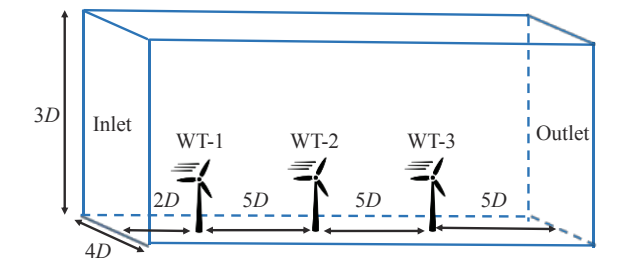


图 6 计算域示意图

Fig. 6 Schematic of the computational domain

2.2.2 非定常阵风计算工况

计算采用如图 3 所示的来流阵风工况, 正常平均风速为 11.4 m/s, 阵风周期为 10.5 s, 计算时间段分为两部分: 第一部分仿真时间 0~220 s, 参考风速为轮毂风速 11.4 m/s; 第二部分仿真时间 220~500 s, 入口边界条件为阵风条件。选取五个时间点所对应的纵向瞬时速度云图(图 7), 分别为: 阵风来流前 215 s、阵风遇到风轮的时刻 282.5 s(b_g 点)、阵风遇到风轮的时刻 285 s(c_g 点)、阵风遇到风轮的时刻 287.5 s(d_g 点)。

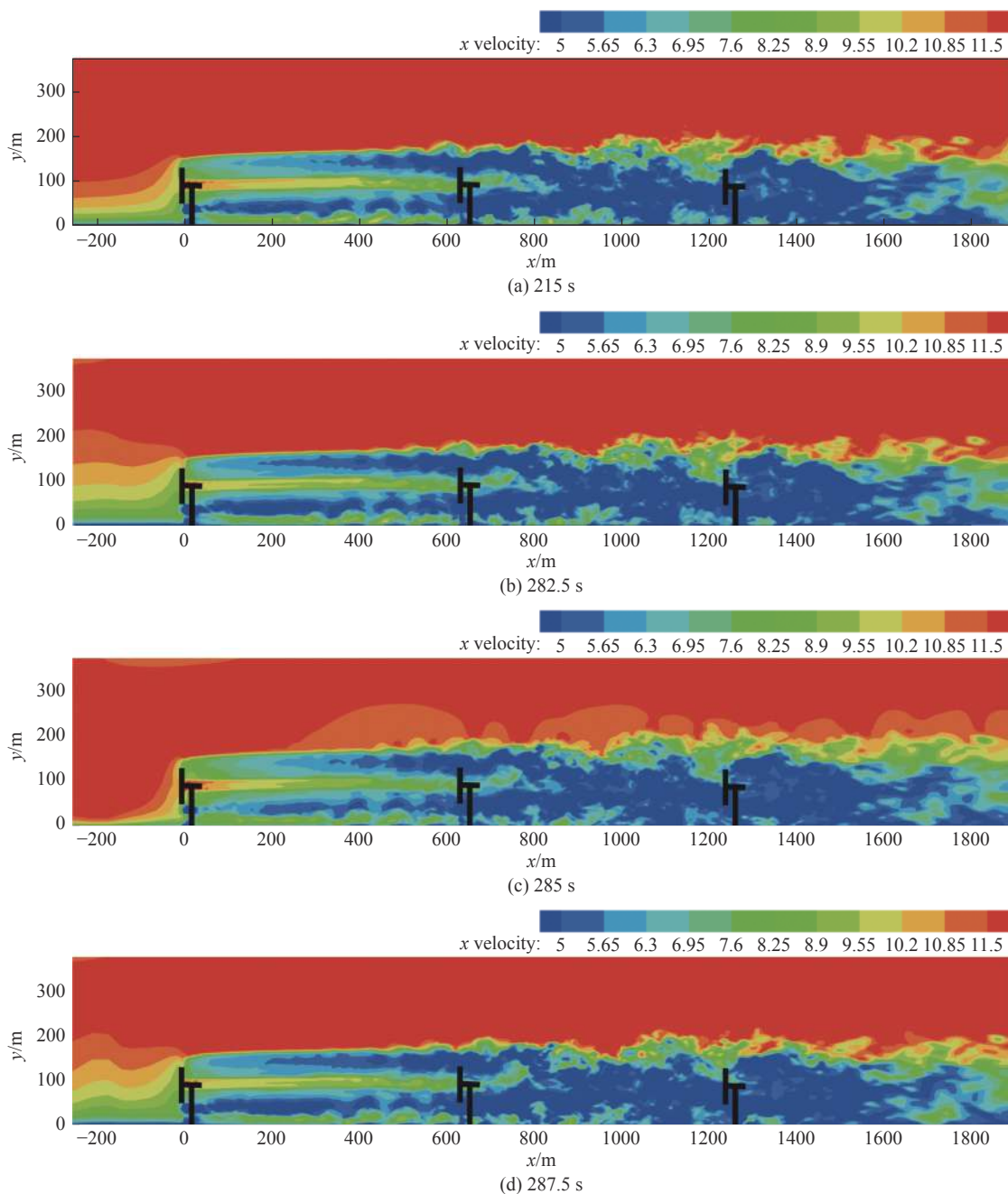


图7 不同阵风时刻的纵向中心处的速度截面云图

Fig. 7 Velocity contours in the slice along the longitudinal center at different time instances under the gust wind condition

从图7可以观察到,随着轴向位置增加,风力机尾流区也随之膨胀,并且风速呈现出时间和空间的瞬时变化的特性,尾流膨胀边界在向下游发展的过程中变得越来越不清晰。由于受到风剪切的影响,整个尾流区中在纵向上出现了靠近地面的流速小于轮毂以上的流速,尤其是在第一台到第二台风力机之间表现得更为明显。受下游风力机的影响,第一台风力机的尾流来不及恢复就再次发生流速的降低,从而整个尾流区只有最后的区域出现了流速的恢复现象。此外,对比不同时刻的阵风速度云图,可以发现,当阵风处于高点 c_g 时,尾流膨胀较正常来流

时更加明显。

图8为阵风经过时的尾流流场涡量云图,采用的是 Q 准则, Q 值取0.0005。图8(a)为三台风力机在没有阵风入流工况下的尾流涡系结构图,可以看出,叶尖涡卷起并逐渐向下游发展。近尾流的叶尖涡系结构明显。随着涡系的发展,出现了涡混合和涡破碎现象,特别是在第二台到第三台风力机位置,涡已经完全混合,并且随着尾流中的湍流强度的增加,尾流中的涡系受到风剪切的影响,导致上下涡倾斜往下游发展。随着时间的推移,阵风入流开始影响尾流涡系结构,图8(b)可见叶尖涡间距开始发生改变,图8(c)

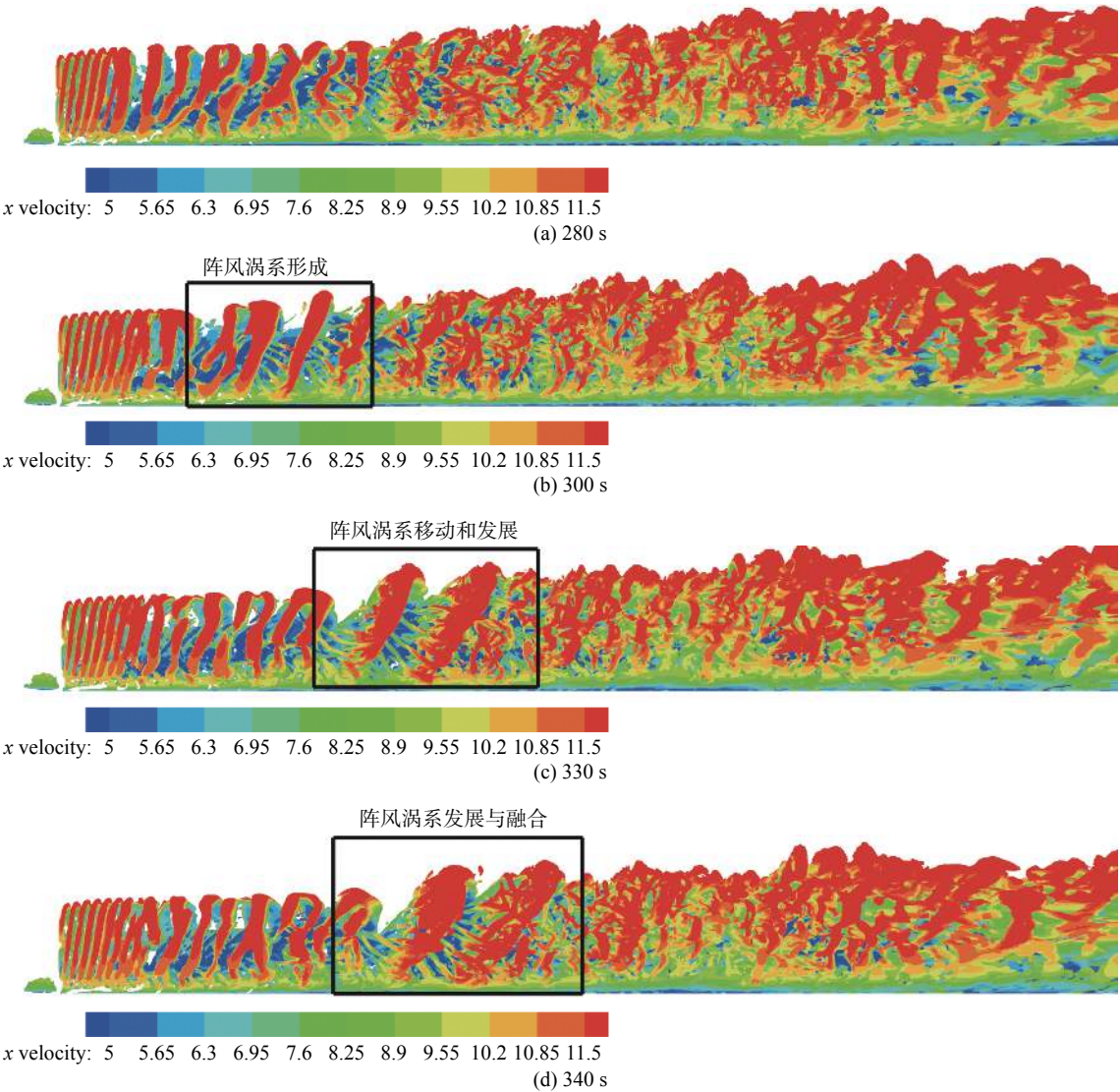


图 8 不同阵风时刻的由速度染色的涡等值面 ($Q=0.0005$)

Fig. 8 Vortex iso-surface ($Q=0.0005$) colored by the velocity at different time instances under the gust wind condition

中叶尖涡系开始变大并向下游移动,并且导致尾流区出现更大的膨胀;图 8(d)阵风涡系也同样发生了涡破碎和涡融合现象,同时产生尾流速度瞬时变化和湍流强度变化。对比图 8(a)可以发现,阵风涡系的叶尖涡核更大,并且叶尖涡之间的间距更宽。

图 9 是遭遇阵风之后三台风力机的输出功率及风轮推力对比图,数值模拟中假定风力机来不及变桨。由图可见,受阵风影响,功率及轴向推力较平稳周期的响应值出现了较大幅值的周期性波动,尤其是第一台风力机的功率及轴向推力曲线出现了明显的一个峰值和两个谷值。对于第二台风力机,由于上下游风力机之间存在尾流效应和尾流干扰,因此阵风入流后,第二台风力机气动载荷(功率和推力曲线)出现了两个比较明显的峰值突变,此时阵风的响应时间在第 335 s 左右,阵风响应结束时间大概在第 390 s,是

入流阵风周期的 5 倍左右,可见,阵风速度和尾流效应的耦合作用导致了第二台风力机的阵风气动载荷作用周期延长,同时曲线会出现两个峰值,这个结论对于评估风力机载荷性能具有重要参考意义。第三台风力机的输出功率相对于第二台出现了回升,这是因为,随着尾流的发展,尾流与外界的空气混合及能量交换加快,从而导致风速恢复速度变快。对比不同风力机的功率和推力时间曲线图,可看出,第三台风力机的气动载荷波动幅度较大,这是由于风力机尾流发展带来的湍流强度的增加,使得第三台风力机来流速度的湍流强度增加,同时当阵风传递到第三台风力机时,风力机对阵风的响应周期继续拉长。由表 3 可见,第三台风力机发电功率值回升,在有/无阵风的情况下,第一台风力机承受的推力载荷最大,第二台和第三台风力机的推力载荷值分别增加 9.1% 和 21%。

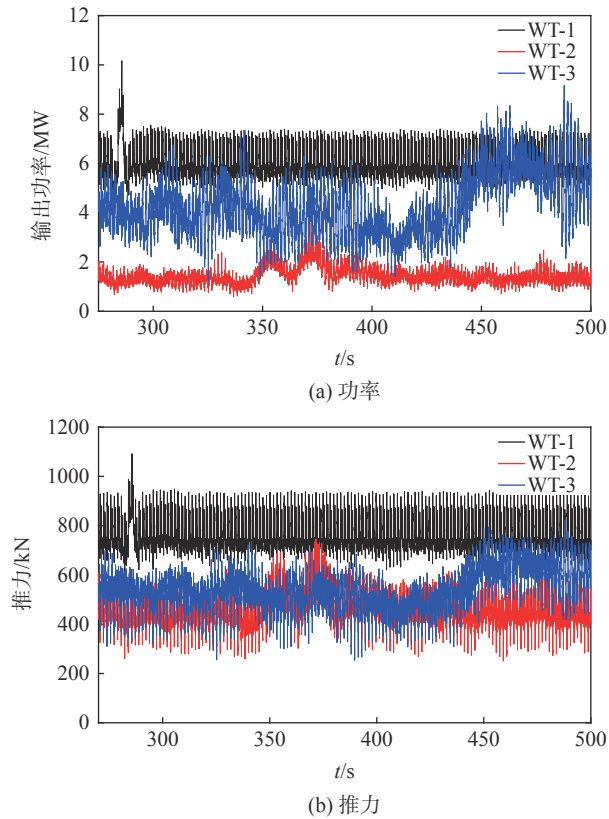


图 9 三台风力机输出功率和轴向推力对比图
Fig. 9 Comparison of the power and thrust of the three wind turbines

表 3 有无阵风功率和推力的 RMS 与 STD 标准方差
Table 3 RMS and STD values of the power and thrust under the gust and non-gust wind conditions

	参数	WT1	WT2	WT3
无阵风	功率RMS	5.96	1.31	3.95
	功率STD	0.4	0.2	0.9
	推力RMS	758.60	440.18	518.41
	推力STD	47	48	59
有阵风	功率RMS	6.24	1.69	5.64
	功率STD	1.1	0.4	1.0
	推力RMS	768.90	480.09	628.96
	推力STD	77	70	62

3 结 论

本文文建立了 LES 耦合致动线模型的方法,并加入非定常修正,考虑了风力机机舱、塔架和风剪切等因素影响,实现了风力机非定常工况的数值模拟仿真,开展了阵风入流工况下的多台风力机尾流的涡系结构演变规律和气动载荷变化规律研究。得到结论如下:

1) 基于 Nibe 风力机实验数据,验证了 LES 耦合致动线模型方法的可行性及有效性,模拟结果也表明,该方法在近尾流区和远尾流区都可以获得较好的

尾流速度计算结果。
2) 随着轴向位置的增加,风力机尾流区也随之膨胀,尾流速度出现先降低再恢复的发展特性,尾流区膨胀边界在向下游发展的过程中变得越来越不清晰。阵风使得尾流区会比正常来流时尾流膨胀得更加明显,即尾流周向直径变大。
3) 成功捕捉到了阵风涡系结构。阵风会导致叶尖涡的涡间距变大,并且在逐渐向下游发展的过程中叶尖涡核也变得更大,涡破碎和涡混合更易发生。
4) 阵风入流对第一台风力机的影响比较明显。而第二台风力机在尾流效应和阵风耦合的影响下,气动载荷曲线出现了两个峰值,下游阵风响应周期增加为入流阵风周期的 5 倍。虽然第一台风力机推力载荷最大,但是第二台和第三台风力机在阵风的影响下,推力载荷也分别增加了 9.1% 和 21%。
5) 本文研究内容及结论对风电场布局 and 风力机载荷强度设计具有指导意义。

参 考 文 献:

[1] BARTHELMIE R J, HANSEN K, FRANDSEN S T, et al. Modelling and measuring flow and wind turbine wakes in large wind farms offshore[J]. *Wind Energy*, 2009, 12(5): 431-444. doi:10.1002/we.348

[2] 肖京平, 陈立, 许波峰, 等. 1.5MW 风力机气动性能研究[J]. *空气动力学学报*, 2011, 29(4): 529-534. XIAO J P, CHEN L, XU B F, et al. Investigation on aerodynamic performance of a 1.5-MW wind turbine[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2011, 29(4): 529-534 (in Chinese). doi: 10.3969/j.issn.0258-1825.2011.04.023

[3] 东雪青, 刘钊, 汪建文, 等. 水平轴风力机尾迹流场掺混流动的实验研究[J]. *中国测试*, 2017, 43(9): 24-28. DONG X Q, LIU Z, WANG J W, et al. Experimental study on the blending flow of wake field of horizontal axis wind turbine[J]. *China Measurement & Test*, 2017, 43(9): 24-28 (in Chinese). doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2017.09.005

[4] DOU B Z, YANG Z P, GUALA M, et al. Comparison of different driving modes for the wind turbine wake in wind tunnels[J]. *Energies*, 2020, 13(8): 1915. doi: 10.3390/en13081915

[5] XU J. Wake interaction of NREL wind turbines using a Lattice Boltzmann method[J]. *Sustainable Energy*, 2016, 4(1): 1-6. http://pubs.sciepub.com/rse/4/1/1/rse-4-1-1.pdf doi: 10.12691/rse-4-1-1

[6] SARMA R, DWIGHT R P, VIRÉ A. Aeroelastic validation and Bayesian updating of a downwind wind turbine[J]. *Wind Energy*, 2020, 23(4): 864-883. doi: 10.1002/we.2448

[7] CAI X, GU R R, PAN P, et al. Unsteady aerodynamics simulation of a full-scale horizontal axis wind turbine using CFD methodology[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 112: 146-156. doi: 10.1016/j.enconman.2015.12.084

[8] LIU Y C, XIAO Q, INCECIK A, et al. Establishing a fully coupled CFD analysis tool for floating offshore wind turbines[J]. *Renewable Energy*, 2017, 112: 280-301.

- doi: [10.1016/j.renene.2017.04.052](https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.052)
- [9] LI L M, XU C, SHI C, et al. Investigation of wake characteristics of the MEXICO wind turbine using lattice Boltzmann method[J]. *Wind Energy*, 2021, 24(2): 116–132.
doi: [10.1002/we.2560](https://doi.org/10.1002/we.2560)
- [10] MARTÍNEZ-TOSSAS L A, CHURCHFIELD M J, LEONARDI S. Large eddy simulations of the flow past wind turbines: actuator line and disk modeling[J]. *Wind Energy*, 2015, 18(6): 1047–1060.
doi: [10.1002/we.1747](https://doi.org/10.1002/we.1747)
- [11] KIM T, OH S, YEE K. Improved actuator surface method for wind turbine application[J]. *Renewable Energy*, 2015, 76: 16–26.
doi: [10.1016/j.renene.2014.11.002](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.002)
- [12] CAO J F, ZHU W J, WANG T G, et al. Aerodynamic optimization of wind turbine rotor using CFD/AD method[J]. *Modern Physics Letters B*, 2018, 32(12n13): 1840053.
doi: [10.1142/s0217984918400535](https://doi.org/10.1142/s0217984918400535)
- [13] SØRENSEN J N, MIKKELSEN R F, HENNINGSON D S, et al. Simulation of wind turbine wakes using the actuator line technique[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 373(2035): 20140071.
doi: [10.1098/rsta.2014.0071](https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0071)
- [14] ZHU W J, SHEN W Z, SØRENSEN J N, et al. Verification of a novel innovative blade root design for wind turbines using a hybrid numerical method[J]. *Energy*, 2017, 141: 1661–1670.
doi: [10.1016/j.energy.2017.11.091](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.091)
- [15] SHEN W Z, ZHU W J, SØRENSEN J N. Actuator line/Navier-Stokes computations for the MEXICO rotor: comparison with detailed measurements[J]. *Wind Energy*, 2012, 15(5): 811–825.
doi: [10.1002/we.510](https://doi.org/10.1002/we.510)
- [16] 朱翀, 王同光, 钟伟. 基于致动线方法的风力机气动数值模拟[J]. *空气动力学学报*, 2014, 32(1): 85–91.
- ZHU C, WANG T G, ZHONG W. Numerical analysis of wind turbine aerodynamic performance based on actuator line method[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2014, 32(1): 85–91 (in Chinese).
doi: [10.7638/kqdlxxb-2012.0042](https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2012.0042)
- [17] QIAN Y R, WANG T G. Large-eddy simulation of wind turbine wake and aerodynamic performance with actuator line method[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 33(1): 26–36.
- [18] 卞凤娇, 徐宇, 王强, 等. 基于OpenFOAM的风力机致动线模型研究[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(1): 72–75.
BIAN F J, XU Y, WANG Q, et al. Numerical study of actuator line model of wind turbine based on OpenFOAM platform[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(1): 72–75 (in Chinese).
- [19] NATHAN J, MEYER FORSTING A R, TROLDORGBORG N, et al. Comparison of OpenFOAM and EllipSys3D actuator line methods with (NEW) MEXICO results[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2017, 854: 012033.
doi: [10.1088/1742-6596/854/1/012033](https://doi.org/10.1088/1742-6596/854/1/012033)
- [20] 周洋, 许昌, 韩星星, 等. 基于致动线模型的风力机尾流场数值研究[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(3): 177–181.
ZHOU Y, XU C, HAN X X, et al. Numerical study of wind turbine wake modeling based on actuator line model[J]. *Water Resources and Power*, 2017, 35(3): 177–181 (in Chinese).
- [21] TAYLOR G J, MILBORROW D J, MC INTOSH D N, et al. Wake measurements on the Nibe windmills[C]// GARRAD A, ed. *Proceedings of the 7th BWEA WindEnergy Conference*, Oxford, UK, 1985: 67–73.
- [22] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development[R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2009.
doi: [10.2172/947422](https://doi.org/10.2172/947422)

(本文责编: 王颖 英文编审: 杨强)