

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2024.03.007

风电场复杂尾流场的快速仿真模拟

崔 腾¹, 徐 顺², 万德成^{2*}

(1. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011;
2. 上海交通大学 船舶计算水动力学研究中心(CMHL) 船舶海洋与建筑工程学院,
上海 200240, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn)

摘 要: 该文基于自主开发的风电场尾流快速模拟软件 WinFm-SJTU, 结合 Park 尾流模型和能量守恒叠加模型, 对风电场尾流流动进行了模拟仿真。结果表明, 与 CFD 数值模拟结果相比, WinFm-SJTU 能较好预测串列三风机的功率总和以及首台和第二台风机的功率, 但对于较小流向间距下的第三台风机功率预报误差较大。为此, 考虑到尾流叠加区域内更高的湍流强度引起的速度恢复更快, 并基于改进后的能量守恒尾流叠加模型, 对包含 35 台风机的大型风电场进行了仿真模拟, 结果表明, WinFm-SJTU 能够较好预测不同列向风机中各台风机的尾流损失及功率, 风电场总功率误差仅 1.02%。以上计算结果表明, WinFm-SJTU 软件能够快速准确地模拟风电场尾流流动。

关 键 词: WinFm-SJTU 软件; 大型风电场; 尾流快速预报; 尾流效应

中图分类号: TK81

文献标志码: A

Fast Simulations of Complex Wake Flows around Wind Farm

Cui Teng¹, Xu Shun², Wan Decheng^{2*}

(1. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China;
2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Computational Marine Hydrodynamic Lab (CMHL),
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The simulations of wind farm wake flow are performed based on self-developed software WinFm-SJTU. The Park wake model and energy conservation superposition model are used. Compared to results simulated by CFD method, power of three tandem wind turbines, as well as power of first and second wind turbines is well predicted by WinFm-SJTU, whereas power of third turbine under smaller spacing shows a discrepancy. Therefore, for simulation of wind farm with 35 wind turbines, the energy conservation superposition model is modified to account for faster velocity recovery induced by stronger turbulence intensity in wake superposition region. The wake loss of each wind turbine in a column predicted by WinFm-SJTU, as well as power of various columns in windfarm show a good agreement with those of CFD method, and the difference of total power of wind farm is only 1.02%. It is demonstrated that WinFm-SJTU can quickly and accurately predict the wake flow in wind farm.

Key words: WinFm-SJTU; Large wind farm; Fast wake prediction; Wake effect

0 引 言

风力发电作为一种清洁能源, 因具有存储量大及可再生等特点而广受关注。其基本原理是提取空气中的动能, 转换为风机叶片动能, 进而驱动电机发电。当入流风经过上游风机转子盘面时, 上游风机的尾流速度明显降低, 湍流度增加。下游风机处于上游风机的尾流时, 会产生尾流效应, 降低下游

风机的功率输出, 增加下游风机的疲劳载荷。目前, 为降低运行成本, 提高风能利用率, 风机大多以大型化、集群化的方式存在。下游风机处于上游风机的尾流叠加区域, 会产生更加明显的尾流效应, 其运行条件将进一步恶化, 大幅度降低大型风电场的整体功率输出。

在风电场尾流效应研究方面, 常用的研究方法包括实验测量、数值模拟及解析尾流模型等。Sun 等^[1]采用雷达对复杂地形风电场中两种不同布置形式的风力机组进行了现场实测, 发现风机尾流区域存在较大的速度亏损。Su 等^[2]基于风洞试验, 研究

收稿日期: 2023-08-23 **修改稿收到日期:** 2024-01-26

基金项目: 国家自然科学基金(52131102)

作者简介: 崔腾(1978-), 男, 高级工程师。

了不同纵向和横向布置形式下,垂直轴风机的功率输出。杨从新等^[3]采用大涡模拟,基于致动线模型对大气边界层入流下8台风力机进行了数值模拟,对风机间的相互干扰进行了分析,发现首排两风机的功率明显高于其他风机的功率。Joulin等^[4]结合中尺度大气模型和致动线模型开发了一种新的仿真工具,基于大涡模拟对Horns Rev I风电场进行数值模拟,结果表明,该工具可重现风电场尾流的螺旋云图,能较好地模拟风电场的尾流效应及其与大气边界层的相互作用。白鹤鸣等^[5]采用自主开发风电场尾流快速模拟软件WinFm-SJTU,考虑不同轮毂高度的影响,对比分析了4种典型尾流模型在大型风电场功率预报中的适用性。

尽管实验测量及数值模拟方法能够准确预测风电场的尾流效应,但在需要进行大量重复计算的应用场景,例如风电场的布局优化和偏航控制优化中,尾流模型展现出了无可比拟的优势:具有极高的计算效率,并能够在满足工程精度的要求下,快速模拟风电场尾流流动。刘晴晴等^[6]采用轮毂高度布局优化策略,建立了轮毂高度与风电场年发电量之间的关系,仿真结果表明,随着入流风向向下前后风机轮毂高度差值的不断增加,风电场的年发电量也在不断增加,验证了轮毂高度布局优化策略的有效性。Taylor等^[7]基于Larsen尾流模型及平方和尾流叠加模型,并结合粒子群优化算法,进行了大型海上风电场的布局优化,优化结果表明其比基于经验布局方案的风电场年发电量高出7.55%。宁旭等^[8]基于尾流模型研究了风场的偏航控制优化,仿真结果表明:偏航控制优化在入流风向与风场行或列布置方向相近时效果明显,但在风机布置间距较大或湍流强度较高时效果有限。

无论是风电场布局优化,还是风电场偏航控制优化,都是以风电场的仿真结果为基准前提。因此,在满足工程精度要求下,如何快速模拟风电场的尾流流动变得至关重要。本文基于课题组自主开发的风电场尾流快速模拟软件WinFm-SJTU,结合Park解析尾流模型及能量守恒尾流叠加模型,对不同间距下纵向布置串列三风机及含35台风机的风电场进行仿真模拟,并将计算结果与CFD数值模拟结果进行对比,以验证WinFm-SJTU的准确性与有效性。

1 数值方法

1.1 Park尾流模型

Park尾流模型最早由Jensen^[9]提出,Katic等^[10]结合一维动量定理对该模型进行修正,形成了目前广泛使用的Park尾流模型(又名Jensen尾流模型)。该模型假设风机盘面处的尾流半径为转子半径,风机盘面后尾流半径随尾流距离而线性增加,扩张程度与地面粗糙度有关。尾流区域截面速度呈现均匀分布,如图1所示,可由式(1)计算。

$$U = U_{\infty} \left[1 - \left(1 - \sqrt{1 - C_T} \right) \left(\frac{R}{R_w} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中: U 为风机尾流截面速度; U_{∞} 为来流速度; C_T 为推力系数; R 为转子半径; R_w 为尾流半径, $R_w = R + kx$; x 为坐标位置; k 为尾流膨胀系数, $k = 0.5 / \ln(z/z_0)$, z 为风机轮毂高度, z_0 为地表粗糙度。另外,在图1中, U_1 为风轮处的尾流速度; U_w 为坐标位置 x 处的尾流速度。在工程实际中,陆地情况 k 值一般取0.075,海面情况 k 值一般取0.04~0.05。

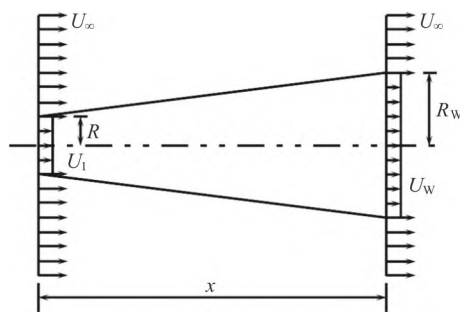


图1 Park尾流模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of Park wake model

1.2 尾流叠加模型

当考虑多个风机尾流的叠加效应时,需采用尾流叠加模型。本文采用能量守恒尾流叠加模型,其基本思想是基于能量守恒的观点推导出处于风机尾流叠加区域的流场速度,风机尾流和外部大气之间的能量交换未被考虑。尾流叠加区域的流场速度可由式(2)计算。

$$u_{\infty}^2 - u_i^2 = \sum_j^N u_j^2 - u_{ji}^2 \quad (2)$$

式中： u_{∞} 为来流风速； u_i 为处于上游风机尾流叠加区域*i*目标风机的入流风速； N 为目标风机处上游风机的总数； u_j 为上游第*j*台风机的入流风速； u_{ji} 为处于上游第*j*台风机尾流中的第*i*台目标风机的入流风速，其可由尾流解析模型计算得到。

图2为尾流叠加模型示意图。处于上游两台风机尾流叠加区域的第三台风机可被分解为分别处于第一台风机及第二台风机的尾流当中，对应入流速度为 u_{13} 和 u_{23} ，可根据解析尾流模型求得。 L_{13} 和 L_{23} 分别对应首台风机至第二台与第三台风机的流向距离。而后，基于尾流叠加模型中的叠加方式，即可得到处于上游风机尾流叠加区域的下游风机的入流速度。

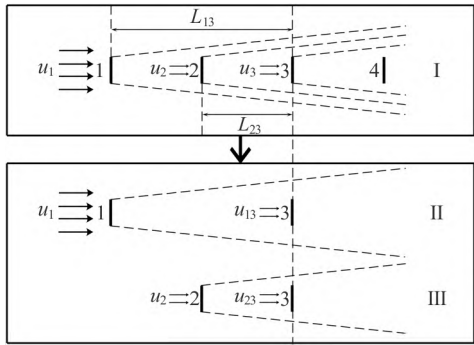


图2 尾流叠加模型示意图
Fig.2 Schematic diagram of wake superposition model

1.3 WinFm-SJTU软件

WinFm-SJTU是一款由本研究团队基于Python自主开发，用于快速模拟风电场尾流流动的软件。其基本结构如图3所示，主要分为三个部分：前处理、流场计算及后处理。前处理的主要功能包括读取风机位置、气动参数以及入流风参数，并根据测风塔或风资源谱数据得到风电场入流风速、风向及其概率分布。流场计算的主要功能包括基于尾流模型和尾流叠加模型，考虑风电场中多风机间的尾流干扰，计算风电场的尾流流动及风机的功率推力等。后处理模块则是对计算结果进行可视化输出处理。

2 算例设置

2.1 NREL 5 MW风机

本文计算模型采用美国国家能源可再生实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)

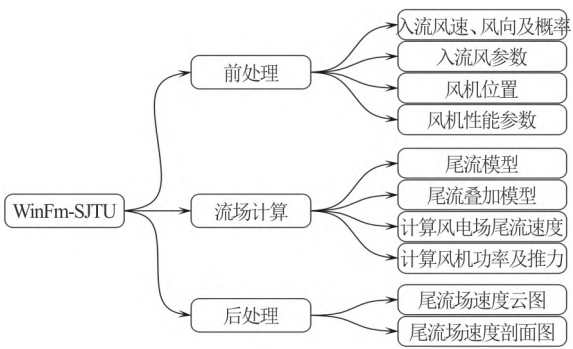


图3 WinFm-SJTU 基本结构图
Fig.3 Basic framework of WinFm-SJTU

开发的5 MW风机^[11]。该风机为一种传统的迎风变速变桨控制的三叶片风力机，额定风速为11.4 m/s，额定发电功率为5 MW，风机主要参数见表1。

表 1 NREL 5 MW 风机主要参数
Table 1 Main parameters of NREL 5 MW wind turbine

风机参数	值	单位
额定功率	5	MW
叶片朝向	上风向	—
叶片数量	3	—
转子直径 <i>D</i>	126	m
切入风速, 切出风速, 额定风速	3.0, 25.0, 11.4	m/s
切入转速, 额定转速	6.9, 12.1	r/min

2.2 风机布局

本文共计算了两类风机布置算例：一类为3台风机串列布置，另一类为由35台风机组成的大型风电场。图4为风机具体布局示意图，其中：3台风机串列布置考虑了不同纵向间距(5*D*和7*D*)的影响，入流风速为11.4 m/s，风向为270°；大型风电场的纵向间距为4.3*D*，横向间距为3.3*D*，入流风速为11.4 m/s，风向为240°。采用WinFm-SJTU分别模拟3台风机和35台风机的尾流流动，每个算例计算耗时约为1 s。

本课题组在风机数值模拟方向具有一定基础，CFD数值模拟结果的准确性已充分验证^[12-15]。因此，后续采用本课题组CFD数值模拟数据验证WinFm-SJTU数据的可靠性。

3 结果分析

3.1 串列三风机

图5为串列三风机的尾流损失对比，基于首台风机的功率进行了归一化处理：首台风机不处于尾流当中，因此其尾流损失为0；对于第二台风机，

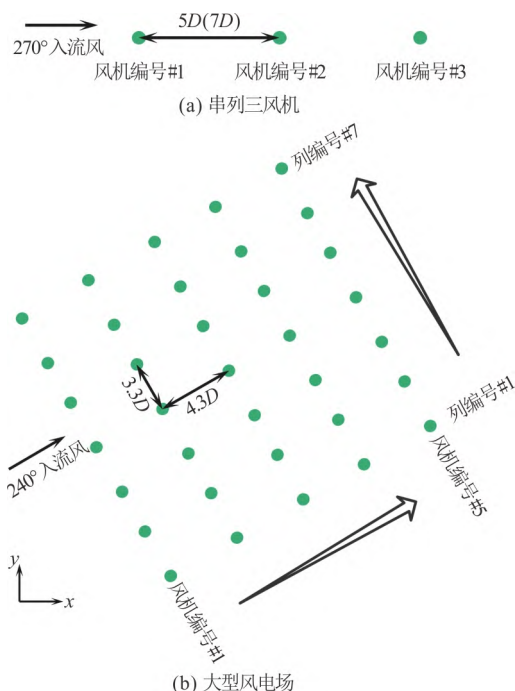


图4(网上彩图) 风机布局示意图
Fig.4 (Color online) Layout of wind turbines

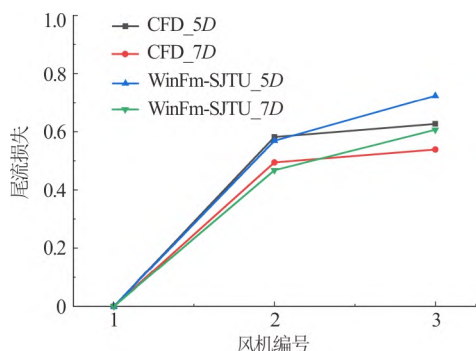


图5(网上彩图) 串联三风机尾流损失对比图
Fig.5 (Color online) Comparison of wake loss for tandem three wind turbines

纵向间距无论为 $5D$ 或 $7D$ ，WinFm-SJTU计算得到的损失均与CFD模拟的结果相接近；但对于第三台风机而言，WinFm-SJTU预测出的尾流损失偏高。有学者指出^[16]：上游风机尾流叠加区域具有更高的湍流强度，会引起尾流速度的更快恢复，而传统能量守恒尾流叠加模型未考虑这一特性，会导致其预测出的尾流损失偏大。

表2为串联三风机功率对比表。对于首台风机：CFD计算得到的转子功率为 5.067 MW ，略小于转子额定功率，这是由于CFD数值模拟是基于真实大气下的复杂入流，其轮毂高度处的风速会在 11.4 m/s 附近波动；WinFm-SJTU基于 11.4 m/s 的均匀入流计算得到的转子功率为额定功率。第二台风机未处于

表2 串联三风机功率对比

Table 2 Power comparison of tandem three wind turbines			
风机编号	流向间距 $5D$ 时的功率/MW		误差/%
	CFD	WinFm-SJTU	
1	5.067	5.301	4.62
2	2.116	2.284	7.94
3	1.892	1.464	22.62
总和	9.075	9.049	0.29
风机编号	流向间距 $7D$ 时的功率/MW		误差/%
	CFD	WinFm-SJTU	
1	5.067	5.301	4.62
2	2.559	2.822	10.28
3	2.338	2.081	10.99
总和	9.964	10.204	2.41

上游风机的尾流叠加区域，可单独由Park尾流模型计算得到，相比于流向间距为 $7D$ 时， $5D$ 时的功率误差更低。对于处于上游风机尾流叠加区域的第三台风机：由于能量守恒尾流叠加模型未考虑与外界大气之间的能量输运，导致WinFm-SJTU预测的功率结果偏差较大，但相比于流向间距为 $5D$ 时， $7D$ 时的误差偏小，原因在于较大的流向间距会导致尾流速度在一定程度上有所恢复。

图6显示了串联三风机流向间距为 $5D$ 时，轮毂高度平面的时均速度 u 云图。由于Park尾流模型采用尾流线性膨胀假设，因此串联三风机的尾流宽度随着流向距离的增加而线性增加。由CFD方法预测的风机尾流宽度也近似符合线性膨胀的特点，这表明WinFm-SJTU预测的风机尾流与CFD具有一致性。类似地，图7显示了串联三风机流向间距为 $7D$ 时，轮毂高度平面的时均速度云图。由图中可知，与流向间距为 $5D$ 时相比，此时尾流速度损失的情况得到了有效改善。

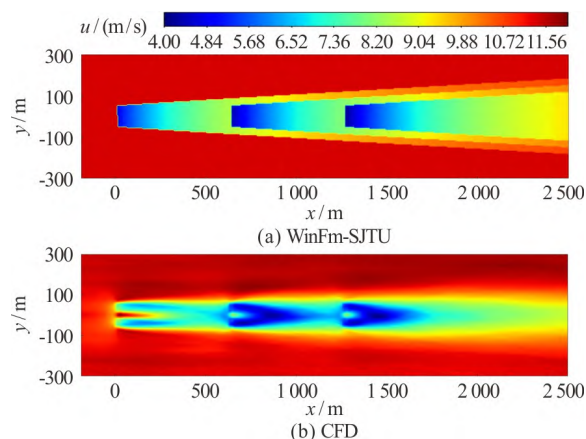


图6(网上彩图) 流向间距 $5D$ 时轮毂高度平面时均速度云图
Fig.6 (Color online) Time-averaged velocity contours in hub level plane with stream wise spacing of $5D$

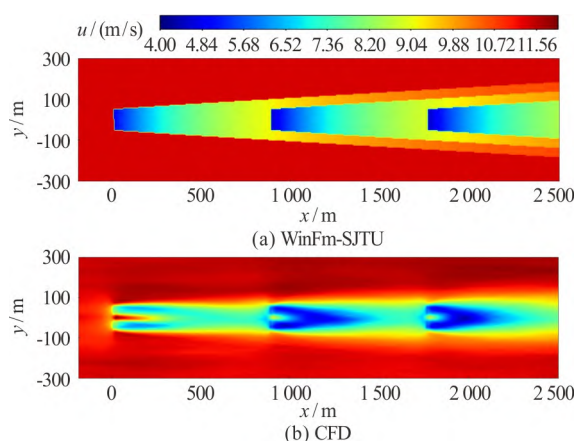


图7 (网上彩图) 流向间距 $7D$ 时轮毂高度平面时均速度云图
Fig.7 (Color online) Time-averaged velocity contours in hub level plane with stream wise spacing of $7D$

3.2 大型风电场

由上文分析可知, 由于传统能量守恒尾流叠加模型未考虑尾流叠加区域更高湍流强度引起的更快尾流速度恢复, 其尾流叠加区域风机的预测结果误差较大。因此, 本节引入一个随流向距离变化的修正系数^[17], 以考虑尾流叠加区域的更高尾流强度。

图8显示了大型风电场中某一系列风机的尾流损失, 并基于首台风机的功率进行了归一化处理。由Park尾流模型单独预测的第二台风机的尾流损失较CFD结果非常接近, 这与上节Park尾流模型预测精度随流向间距减小而提高的结论相一致。对于处于尾流叠加区域的第三台风机, WinFm-SJTU预测的尾流损失偏低, 这可能是因为修正系数略微过度修正, 但改进后的尾流叠加模型预测结果总体上与CFD模拟结果相一致。

表3显示了大型风电场中不同列风机的功率对比。由于CFD数值模拟基于真实的大气复杂入流,

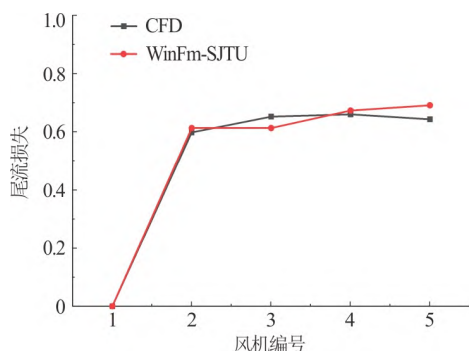


图8 (网上彩图) 风电场列向风机尾流损失对比图
Fig.8 (Color online) Comparison of wake loss for one column in wind farm

表3 大型风电场功率对比
Table 3 Power comparison of wind farm

列编号	功率/MW		误差/%
	CFD	WinFm-SJTU	
1	12.623	12.781	1.25
2	12.842	12.756	0.67
3	12.735	12.729	0.05
4	12.162	12.722	4.60
5	13.088	12.731	2.73
6	13.664	12.754	6.66
7	13.055	12.772	2.18
总和	90.169	89.245	1.02

流场中存在比较大的湍流相干结构, 这导致不同列向的风机功率有些许不同; WinFm-SJTU基于均匀入流, 不同列向风机的功率变化不大。整体来看, WinFm-SJTU对不同列向风机的功率预测与CFD数值模拟结果十分接近, 最大功率误差仅6.66%, 在风电场总功率方面, 两者的预测结果基本一致。

图9显示了大型风电场轮毂高度平面的时均速度云图。由于CFD方法采用了真实的复杂大气入流, 不同列向风机间的尾流具有略微的差异。总体而言, 考虑尾流叠加区域更高湍流强度引起的更快尾流速度恢复时, WinFm-SJTU预测的风电场尾流与CFD的预报结果吻合良好。

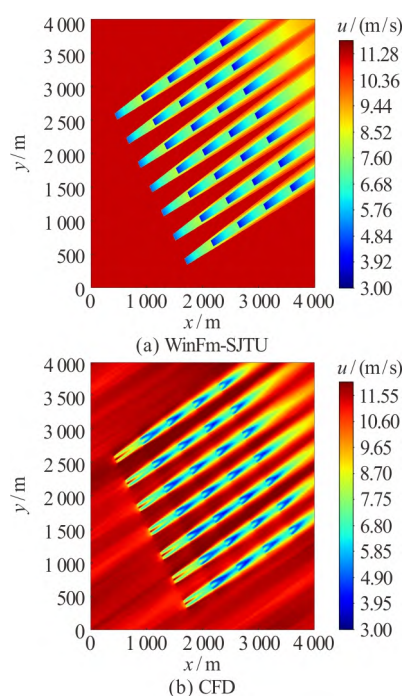


图9 (网上彩图) 风电场轮毂高度平面时均速度云图
Fig.9 (Color online) Time-averaged velocity contours of wind farm in hub level plane

4 结 论

本文基于自主开发的WinFm-SJTU风电场尾流流动快速模拟软件,结合Park尾流模型及能量守恒尾流叠加模型,对不同间距布置下的串列三风机及包含35台风机的大型风电场进行了模拟仿真,并与CFD数值模拟结果进行对比,得出以下主要结论:

(1) WinFm-SJTU能够在满足工程精度的要求下,快速模拟串列三风机与大型风电场的尾流流动。

(2) 串列三风机不同流向间距的对比结果表明, Park尾流模型在预测较小流向间距的风机尾流损失时具有较高精度,且该结论在更小流向间距下的风电场尾流结果中得到了进一步验证。

(3) 对于处于上游风机尾流重叠区域的风机而言,传统能量守恒尾流叠加模型在流向间距较小时误差较大。因此,在流向间距更小的大型风电场尾流流动中,需引入修正系数以在一定程度上考虑风机尾流与外部环境之间的能量输运。在此基础上,基于WinFm-SJTU预测的不同列向风机功率与CFD数值模拟结果的最大误差不超过6.66%,且其在风电场总功率上与CFD模拟结果基本一致。

参 考 文 献:

- [1] Sun H, Gao X, Yang H. Experimental study on wind speeds in a complex-terrain wind farm and analysis of wake effects [J]. *Applied Energy*, 2020, 272: 115215.
- [2] Su H, Meng H, Qu T, et al. Wind tunnel experiment on the influence of array configuration on the power performance of vertical axis wind turbines [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 241: 114299.
- [3] 杨从新, 何攀, 张旭耀, 等. 风电场中多台风力机的数值模拟 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(2): 49-55.
- [4] Joulin P A, Mayol M L, Masson V, et al. The actuator line method in the meteorological LES model meso-NH to analyze the horns rev 1 wind farm photo case [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 7: 350.
- [5] 白鹤鸣, 王尼娜, 万德成. 基于不同解析尾流模型的海上风电场数值模拟 [J]. *中国造船*, 2020, 61(S2): 186-198.
- [6] 刘晴晴, 王华君, 何昌国, 等. 基于尾流效应的低风速地区风电场布局优化方法 [J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(1): 34-39.
- [7] Taylor P, Yue H, Campos-Gaona D, et al. Turbine layout optimisation for large-scale offshore wind farms-a grid-based method [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2021, 15(16): 3806-3822.
- [8] 宁旭, 曹留帅, 万德成. 基于尾流模型的风场偏航控制优化研究 [J]. *海洋工程*, 2020, 38(5): 80-90.
- [9] Jensen N O. A note on wind generator interaction [M]. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, 1983.
- [10] Katic I, Højstrup J, Jensen N O. A simple model for cluster efficiency [C]. *European Wind Energy Association Conference and Exhibition*, Rome, Italy, 1986.
- [11] Jonkman J, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development [R]. Golden, USA: National Renewable Energy Lab, 2009.
- [12] 段鑫泽, 程萍, 万德成. 带偏航角串列式两风机复杂尾流场数值模拟 [J]. *海洋工程*, 2019, 37(2): 50-58.
- [13] 李鹏飞, 万德成, 刘建成. 基于致动线模型的风力机尾流场数值模拟 [J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2016, 31(2): 127-134.
- [14] Huang Y, Wan D. Investigation of interference effects between wind turbine and spar-type floating platform under combined wind-wave excitation [J]. *Sustainability*, 2020, 12(1): 246-275.
- [15] Ning X, Wan D. LES Study of wake meandering in different atmospheric stabilities and its effects on wind turbine aerodynamics [J]. *Sustainability*, 2019, 11(24): 6939.
- [16] Shao Z, Wu Y, Li L, et al. Multiple wind turbine wakes modeling considering the faster wake recovery in overlapped wakes [J]. *Energies*, 2019, 12(4): 680-693.
- [17] Chen X, Xu S, Wan D. An advanced energy balance wake superposition model considering faster wake recovery [C]. *The 31st International Ocean and Polar Engineering Conference*, Online, Virtual, 2021.