

引用格式: 李胜, 葛文澎, 吴嘉诚, 等. 风力机组尾流模型适用性评价 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(1): 42-53. LI Sheng, GE Wenpeng, WU Jiacheng, et al. Applicability evaluation of wind turbine wake models [J]. Southern energy construction, 2024, 11(1): 42-53. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.05.

风力机组尾流模型适用性评价

李胜[✉], 葛文澎, 吴嘉诚, 曲春明, 孙睿

(明阳智慧能源集团股份有限公司, 广东 中山 528437)

摘要: [目的] 风力机组的尾流效应是风电场能量损失的重要因素, 研究机组尾流有利于优化机组排布, 提升风电场的经济性。[方法] 分别对 8 种常见尾流模型的尾流风速衰减、湍流强度预测情况进行对比研究。为确保评估的合理性, 基于风场测量数据及风洞实验数据进行定量分析, 对比数据范围限定于风机下游距离 3 倍到 10 倍风轮直径。[结果] 分析结果表明: 对于尾流风速预估, 二维模型较一维模型与实际尾流风速分布结构更契合, 其中 Jensen-Guass 有着更好的尾流宽度预测, 而 2D-k-Jensen 尾流中心风速预测精度更高且多工况适应性更强, 最大平均偏差及偏差标准差分别为 8.7%、5.5%, 均适用于机组尾流风速预估。一维模型中的 Jensen 模型尾流中心风速预估能力虽最好, 部分工况平均偏差低于 10%, 但 Park 模型在尾流风速水平分布预测上表现更佳, 案例 2 中预测性能与二维模型相当, 各工况平均偏差均低于 10%, 较前者更适合尾流速度预测。对于湍流强度的预测, Ishihara 模型在湍流结构的预测展现出明显优势, 平均偏差均低于 10%, 但尾流中心处湍流强度预测结果较差, 不利于下游机组位置处湍流强度的预测, 其余模型中 Frandsen、Jensen-Guass 在低环境湍流强度工况的预测相对较好, 但高环境湍流强度下两者存在相反趋势, Frandsen 模型预测精度更高, 适合机组湍流强度预估, 而 Jensen-Guass 的预估结果远大于实验值, 预测结果较不稳定。高上游风速下各模型尾流风速预估精度均有较大的提升, 环境湍流强度的提高对模型尾流风速和湍流强度预估精度有一定的促进作用, Jensen-Guass 模型除外。[结论] Jensen-Guass 和 2D-k-Jensen 模型尾流风速预测值与实测数据吻合较好, Frandsen 模型湍流强度预测性能更佳, 可作为海上风场机位排布优化及尾流控制分析的参考尾流模型。

关键词: 风力机组; 尾流模型; 风速衰减; 湍流强度; 实测数据; 对比研究

中图分类号: TK89

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)01-0042-12

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.05

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Applicability Evaluation of Wind Turbine Wake Models

LI Sheng[✉], GE Wenpeng, WU Jiacheng, QU Chunming, SUN Rui

(MingYang Smart Energy Group Corporation, Zhongshan 528437, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] The wake effect of wind turbines is an important cause of energy loss in wind farms. The wake study of wind turbines is beneficial to optimization of the turbine arrangement and improvement of the economic efficiency of wind farms. [Method] This paper presented a comparative study of the wake wind speed decay and turbulence intensity prediction of eight common wake models, respectively. To ensure the rationality of the evaluation, the quantitative analysis was carried out based on wind farm measurements and wind tunnel experimental data, and the range of comparison data was limited to 3 to 10 times the diameter downstream the turbine. [Result] The analysis results show that, for the prediction of wake wind speeds, the two-dimensional model fits the actual wake wind speed distribution structure better than the one-dimensional model, in which Jensen-Guass has better wake width prediction ability, while the 2D-k-Jensen wake center wind speed prediction has higher accuracy and adaptability to multiple conditions, with the maximum mean deviation and standard deviation of 8.7% and 5.5%, respectively, which are both applicable to the prediction of turbine wake wind speed. Jensen model has the best prediction ability of wake center wind speed in one-dimensional model, and the mean deviation of some

收稿日期: 2023-08-01 修回日期: 2023-08-25

基金项目: 国家重点研发计划重点专项“风力发电复杂风资源特性研究及其应用与验证”(2018YFB1501100)

conditions is less than 10%. While Park model is better in predicting the horizontal distribution of wake wind speed. In Case 2, the prediction performance is comparable to that of two-dimensional model, and the mean deviation of each condition is less than 10%, so it is more suitable for wake speed prediction than the former. For the prediction of turbulence intensity, the Ishihara model shows a clear advantage in the prediction of turbulent structure, with mean deviations below 10%, but the prediction of turbulence intensity at the center of the wake is poor, which is not conducive to the prediction of the turbulence intensity at locations downstream the turbine. Among the remaining models, Frandsen and Jensen-Guass models are relatively good at prediction of low ambient turbulence intensities. However, there is an opposite trend between the two for high ambient turbulence intensities: the Frandsen model has higher prediction accuracy and is suitable for turbine turbulence intensity prediction, whereas the prediction result of Jensen-Guass is much larger than the experimental value, and is unstable. The prediction accuracy of wake wind speed for all models is greatly improved at high upstream wind speeds, and the increase in ambient turbulence intensity contributes to the prediction accuracy of the wake wind speed and turbulence intensity for all models, except for the Jensen-Guass model. [Conclusion] The predicted values of wake wind speed for the Jensen-Guass model and the 2D- k -Jensen model coincides better with the measured data, while the prediction performance of the Frandsen model turbulence intensity is better, so they can be used as the reference wake models for the optimization of wind turbine placement and wake control analysis for offshore wind farms.

Key words: wind turbines; wake models; wind speed attenuation; turbulence intensity; measured data; comparison and research

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

由于全球能源储备的紧缺以及化石能源的污染问题,风能等清洁能源规模不断扩大,能源消费占比将逐渐提高,海上风场发展也呈现出大容量、集中化等特点^[1-2]。对于规模化海上风场,上游机组所产生的尾流势必会导致下游机组发电量有所下降,强湍流和附加的风剪切会影响下游机组的疲劳载荷、结构性能和使用寿命^[3]。因此详细了解机组尾流速度和湍流分布,进而优化设计海上风场机位排布成为当下的热门话题。

风场机组尾流计算主要有 3 种方式,基于实验数据拟合的半经验尾流模型^[4]、基于势流理论的制动盘或制动线模型^[5-6]、基于 N - S 方程的 CFD 模型^[7]。后两者虽计算结果精度更高,但因其所需的庞大计算资源,无法适应快节奏的风场项目工程需求,使得两者在实际工程中的运用受到极大限制。而半经验尾流模型因具备计算效率高,计算精度满足工程要求等优势而受到 WT、WASP 等风资源商业软件^[8]的青睐,且被广泛应用于风场前期规划设计中。半经验尾流模型最早由 Jensen^[4] 提出,后来由 Katic 等^[9]和 Frandsen 等^[10]进一步开发,该模型结构简单、计算效率高且通过数值实验^[11]证明了预测性能,但其帽型的风速分布并不符合实际机组尾流情况^[12]。数

值模拟^[13]和风洞测量^[14]均表明,尾流速度剖面近似于高斯曲线,杨祥生^[15]基于尾流风速高斯对称分布假设对 Park 模型^[9]进行修正,提出了二维尾流模型。至此以上模型均未考虑湍流的动态影响,但尾流湍流特性的分析式早在 1988 年便已出现,例如 Ainslie 等^[16]、Magnusso 等^[17]、Crespo 等^[18]、Frandsen 等^[19],因此一些学者在尾流风速预估中进一步考虑了尾流湍流的影响^[20-21]。Ishihara 等^[22]考虑高度方向的风速变化,进一步提出了三维尾流模型。对于尾流模型适用性研究方面,吴阳阳^[23]仅通过一组风洞实验数据研究了 3 种一维模型的优缺点,Campagnolo 等^[24]所研究的尾流模型参数均根据两组实验工况进行定制化寻优,无法较好得到模型多工况下适用性情况。

目前机组半经验尾流模型相关研究大多集中在单一尾流模型的提出和优化上,对于多个尾流模型的全面对比分析相关研究较少。本文对 8 个常见风力机组尾流模型进行了系统的研究,依托 3 组风场实测或风洞实验数据,着重分析了各模型尾流风速和湍流强度的预估情况,为海上风场机位排布优化及尾流控制分析的尾流模型选择提供参考。

1 尾流模型介绍

本文对几个尾流模型的尾流速度和湍流强度预测进行研究,各模型所具备的预测功能如表 1 所示。

表 1 模型预测功能汇总

Tab. 1 Summary of model prediction functions

模型	尾流速度	湍流强度
Jensen	√	×
Park	√	×
Frandsen	√	√
Crespo	×	√
2D-k-Jensen	√	√
Jensen-Gauss	√	√
Park-Gauss	√	×
Ishihara	√	√

注：“√”表明具备该预测功能；“×”表明不具备该预测功能。

1.1 Jensen 模型

Jensen^[4]尾流模型是一维(1D)尾流模型,利用两个公式来计算尾流半径区域及风速恢复情况,其尾流线性扩展、风速恢复率恒定,轮毂高度处尾流风速水平分布呈“帽形”,如图 1 所示,图中 x 、 y 分别为轮毂高度处下游方向和展向距离,经验公式如下:

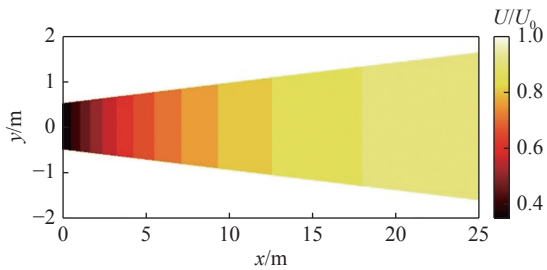


图 1 Jensen 尾流模型

Fig. 1 Jensen wake model

$$D_w = 2 \times (k \times x + r_0) \quad (1)$$

$$U = U_0 \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{r_0}{r_0 + k \times x} \right) \right] \quad (2)$$

式中:

D_w ——尾流直径(m);

k ——尾流膨胀系数;

x ——机组下游距离(m);

r_0 ——风力机叶轮半径(m);

U ——尾流速度(m/s);

U_0 ——环境风速(m/s)。

其中尾流膨胀系数 k 随风力机所在地形和气象条件的不同,其取值有所差别,文献[25]建议陆上应用取 0.075,海上应用取 0.04 或 0.05,而文献[26]基于相似性理论将尾流膨胀系数与湍流强度相关联,

尾流膨胀系数为:

$$k \approx 0.4 \times I \quad (3)$$

式中:

I ——轮毂高度处湍流强度。

1.2 Park 模型

Katic 等^[9]在 Jensen 模型基础上进一步提出了包括实际风机物理特性的 1D 模型, Katic 等人的尾流模型没有使用常见的高斯分布,而是假设尾流区域内的风速恒定。尾流风速计算公式:

$$U = U_0 - U_0 \times \frac{(1 - \sqrt{1 - C_T})}{\left(1 + \frac{2 \times k \times x}{D_0}\right)^2} \quad (4)$$

式中:

C_T ——推力系数;

D ——风力机叶轮直径(m)。

1.3 Frandsen 模型

Frandsen 等在 1996 年提出了关于尾流湍流强度预测的经验模型^[19],湍流强度值随下游距离恒定变化,并在 2006 年基于动量守恒方程,提出了 Storpark 分析模型(SAM)^[10],用于计算尾流直径和尾流风速值, SAM 也假设了“顶帽”形状的尾流发展,具体公式为:

$$I_{\text{wave}} = \sqrt{K_n \frac{C_T}{s^2} + I_0^2} \quad (5)$$

$$U = U_0 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 - 2 \frac{D_0^2}{D_w^2} C_T} \right) \quad (6)$$

$$\frac{D_w}{D} = (\beta^{K/2} + \alpha \times s)^{1/K} \quad (7)$$

$$\alpha = \beta^{K/2} \left[(1 + 2 \times \alpha_{(\text{noj})} \times s)^K - 1 \right] s^{-1} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \frac{1 + \sqrt{1 - C_T}}{\sqrt{1 - C_T}} \quad (9)$$

$$s = x/D \quad (10)$$

式中:

I_{wave} ——尾流湍流强度;

K_n ——模型参数,取 0.4;

I_0 ——环境湍流强度;

$\alpha_{(\text{noj})}$ ——控制尾流恢复的参数,取 0.05;

K ——控制尾流恢复的参数,取 3。

1.4 Crespo 模型

Crespo 和 Hernandez^[18]在 1996 年基于实验和数

值方法提出了湍流强度预测经验表达式, 该模型同样预测出恒定的湍流强度分布, 如下:

$$I_{\text{add}} = 0.73 \times a^{0.8325} \times I_0^{0.0325} \times (x/D)^{-0.32} \quad (11)$$

$$a = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 - C_T} \right) \quad (12)$$

$$I_{\text{wave}} = \sqrt{I_0^2 + I_{\text{add}}^2} \quad (13)$$

式中:

I_{add} —— 风力机组产生的附加湍流强度;

a —— 风力机组轴向诱导因子。

1.5 2D-k-Jensen 模型

Tian 等^[20] 在 Jensen 模型的基础上, 通过引入余弦形而非“顶帽”形的风速分布构建了一种新的二维(2D)尾流横截面风速预测模型, 如图 2 所示, 该模型采用一个可变的尾流膨胀系数综合考虑了环境湍流与附加湍流的共同作用, 尾流膨胀为非线性状态, 其尾流速度与湍流强度计算公式如下:

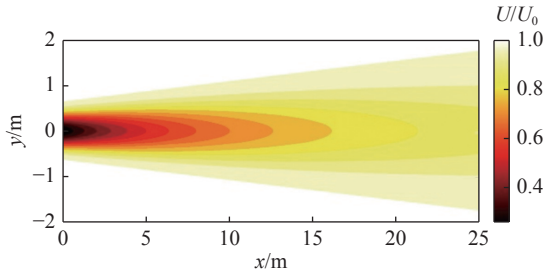


图 2 2D-k-Jensen 尾流模型

Fig. 2 2D-k-Jensen wake model

$$I_{\text{wave}} = K_n \times \frac{C_T}{x/D_0} + I_0 \quad (14)$$

$$k_{\text{wave}} = k \times \frac{I_{\text{wave}}}{I_0} \quad (15)$$

$$r_x = k_{\text{wave}} \times x + r_0 \quad (16)$$

$$r_1 = r_0 \times \sqrt{\frac{1-a}{1-2a}} \quad (17)$$

$$U^* = U_0 \left[1 - \frac{2 \times a}{\left(1 + \frac{k_{\text{wave}} \times x}{r_1} \right)^2} \right] \quad (18)$$

$$U = (U_0 - U^*) \times \cos\left(\frac{\pi}{r_x} \times r + \pi\right) + U^* \quad (19)$$

式中:

k_{wave} —— 综合考虑环境湍流和附加湍流后的尾

流膨胀系数;

r_x —— 下游 x 距离的尾流半径(m);

r_1 —— 刚经过风轮后的尾流半径(m);

r —— 距轮毂中心的 Y 向距离(m)。

1.6 Jensen-Gauss 模型

基于 Jensen 尾流模型和风机尾流柱段的高斯分布理论, Gao 等^[21] 开发了一个二维分析尾流模型。为考虑环境湍流和风力机产生的附加湍流的影响, 该模型与 2D-k-Jensen 模型进行了相似的处理, 尾流膨胀系数 k 用 k_{wave} 代替, 具体公式如下:

$$r_x = k_{\text{wave}} \times x + r_1 \quad (20)$$

$$I_{\text{wave}} = \left[K_n \times \frac{C_T}{\left(\frac{x}{D_0} \right)^{0.5}} + I_0^{0.5} \right]^2 \quad (21)$$

$$U^* = U_0 \left[1 - \frac{2 \times a}{\left(1 + \frac{k_{\text{wave}} \times x}{r_1} \right)^2} \right] \quad (22)$$

$$U = U_0 - (U_0 - U^*) \times \frac{5.16}{\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{r^2}{2 \times \left(\frac{r_x}{2.58} \right)^2}} \quad (23)$$

1.7 Park-Gauss 模型

杨祥生^[15] 基于 Park 模型尾流区线性膨胀假设、径向风速呈高斯分布提出了 Park-Gauss 尾流模型, 用于预测风力机尾流速度损失, 具体公式如下:

$$r_x = k \times x + r_1 \quad (24)$$

$$U^* = U_0 \left[1 - \frac{2 \times a}{\left(1 + \frac{k \times x}{r_1} \right)^2} \right] \quad (25)$$

$$U = U_0 + \frac{U_0 - U^*}{1 - \frac{26e}{35}} \times \left(e^{1 - \left(\frac{r}{r_x} \right)^2} - 1 \right) \quad (26)$$

1.8 Ishihara 模型

Ishihara 和 Qian^[22] 通过风力机组尾流大涡模拟数值分析研究, 提出了一种新的尾流模型, 该模型风速预测假设风机下游区域具有线性尾流衰减、自相似性和高斯轴对称性, 湍流强度水平分布预估出双高斯形, 计算式如下:

$$k^* = 0.11 \times C_T^{1.07} \times I_0^{0.2} \quad (27)$$

$$\varepsilon = 0.23 \times C_T^{-0.25} \times I_0^{0.17} \quad (28)$$

$$a = 0.93 \times C_T^{-0.75} \times I_0^{0.17} \quad (29)$$

$$b = 0.42 \times C_T^{0.6} \times I_0^{0.2} \quad (30)$$

$$c = 0.15 \times C_T^{-0.25} \times I_0^{-0.7} \quad (31)$$

$$d = 2.3 \times C_T^{-1.2}, e = 1.0 \times I_0^{0.1} \quad (32)$$

$$f = 0.7 \times C_T^{-3.2} \times I_0^{-0.45} \quad (33)$$

$$\frac{\sigma}{D} = k^* \times \frac{x}{D_0} + \varepsilon, r = \sqrt{y^2 + (z-H)^2} \quad (34)$$

$$\frac{U_h - U}{U_{h0}} = \frac{1}{[a + b \times \frac{x}{D_0} + c \times (1 + \frac{x}{D_0})^{-2}]^2} \times \exp\left(-\frac{r^2}{2 \times \sigma^2}\right) \quad (35)$$

$$k_1 = \begin{cases} \cos^2\left[\frac{\pi}{2} \times \left(\frac{r}{D_0} - 0.5\right)\right] \frac{r}{D_0} \leq 0.5 \\ 1 - \frac{r}{D_0} > 0.5 \end{cases} \quad (36)$$

$$k_2 = \begin{cases} \cos^2\left[\frac{\pi}{2} \times \left(\frac{r}{D_0} + 0.5\right)\right] \frac{r}{D_0} \leq 0.5 \\ 0 - \frac{r}{D_0} > 0.5 \end{cases} \quad (37)$$

$$\delta_z = \begin{cases} I_0 \times \sin^2\left(\pi \times \frac{H-z}{H}\right) z < H \\ 0 z \geq H \end{cases} \quad (38)$$

$$I_{add} = \frac{1}{d + e \times \frac{x}{D_0} + f \times \left(1 + \frac{x}{D_0}\right)^{-2}} \times \left\{ k_1 \times \exp\left(-\frac{(r-r_0)^2}{2 \times \sigma^2}\right) + k_2 \times \exp\left(-\frac{(r+r_0)^2}{2 \times \sigma^2}\right) \right\} - \delta_z \quad (39)$$

$$I_{wave} = \sqrt{I_0^2 + I_{add}^2} \quad (40)$$

式中:

- U_{h0} —— 轮毂高度的平均风速(m/s);
- U_h —— 某高度位置的环境风速(m/s);
- z —— 距风机底部垂直方向距离(m);
- σ —— 代表性尾流宽度(m);
- H —— 轮毂高度(m);
- k^*, ε —— 尾流宽度预测模型参数;
- a, b, c —— 风速预测模型参数;
- $k_1, k_2, d, e, f, \delta_z$ —— 湍流强度模型参数。

2 数据来源介绍

本文基于风场测量、风洞实验等 3 个不同的实测数据来论证各尾流模型的预测性能,其中尾流速

度的对比分析采用案例 1 和案例 2,湍流强度通过案例 2 和案例 3 进行研究。

2.1 案例 1: 某海域海上风场

该项目测试时间为 2020 年 4 月~6 月,测试期间风场主风向为东南偏东方向。以 1#机组为基准,主风向下无其他机组尾流影响,如图 3 所示。测试过程采用 1 台机舱式激光雷达与 1 台地面 3D 扫描式激光雷达开展尾流测试任务,机舱式激光雷达用于获取机舱风轮平面向来流风速及环境湍流强度,3D 扫描式激光雷达采用 PPI 扫描模式,测试风轮平面尾流场风速。案例 1 的测试数据基本情况如表 2 所示,风速预估尾流模型参数输入将基于该数据进行。

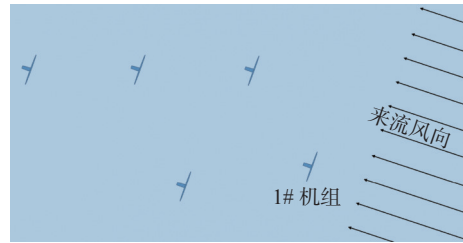


图 3 1#风力机组位置

Fig. 3 Location of wind turbine No. 1

表 2 案例 1 的输入参数

Tab. 2 Input parameters for case 1

参数	工况1	工况2
自由来流速度 U_0 (m·s ⁻¹)	5	11
轮毂高度 h /m	90	90
风力叶轮直径 D /m	112	112
推力系数 C_T	0.800	0.574
尾流膨胀系数 k	$0.4 \times I_0$	$0.4 \times I_0$
环境湍流强度 I_0	0.10	0.06

2.2 案例 2: 风洞实验情况

该数据为风洞实验数据,在米兰理工大学风洞实验室^[24],采用 G1 级比例风力机进行实验,模拟 2 种不同湍流强度的速度流入,分别为中等湍流强度($I_0=0.061$)和高等湍流强度($I_0=0.11$),如图 4 所示。其来流风速分别为 5.46 m/s、5.6 m/s。案例 2 的具体输入参数,如表 3 所示。

2.3 案例 3: 广东某海上风场

该风场为海上风电项目,位于广东省。测试设备包含机舱雷达、扫描雷达各一台,机舱雷达位于机

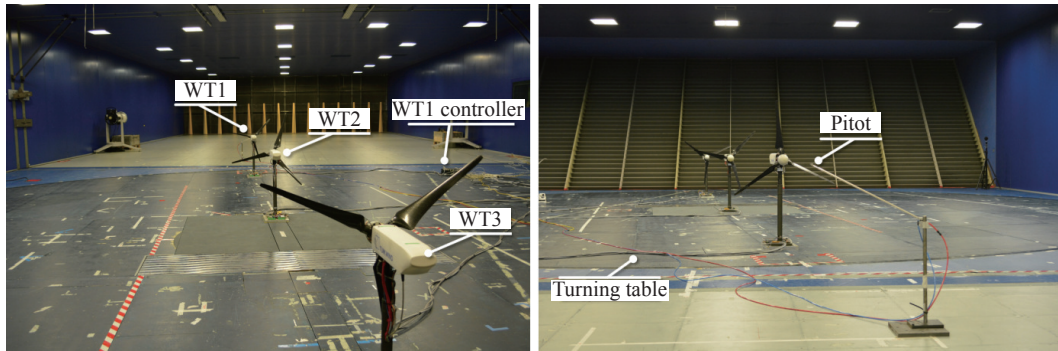


图 4 风洞实验

Fig. 4 Wind tunnel test

表 3 案例 2 的输入参数

Tab. 3 Input parameters for case 2

参数	数值
自由来流速度 $U_0/(m \cdot s^{-1})$	5.46/5.60
风力叶轮直径 D/m	1.1
推力系数 C_T	0.68/0.69/0.79
尾流膨胀系数 k	$0.4 \times I_0$
环境湍流强度 I_0	0.061/0.100

表 4 案例 3 的输入参数

Tab. 4 Input parameters for case 3

参数	数值
自由来流速度 $U_0/(m \cdot s^{-1})$	4~11
轮毂高度 h/m	108
风力叶轮直径 D/m	158
尾流膨胀系数 k	$0.4 \times I_0$

舱顶部向上游测量风场数据,用于得到环境风速及环境湍流强度。机组塔基 3D 雷达扫描模式为定向 LOS 模式,以连续采集海上风电机组下游 3D 距离轮毂高度处的风场数据,如图 5 所示,并计算其尾流湍流强度值。稳定观测时段为 2022 年 11 月~12 月,场内风速多分布于 4~11 m/s 区间,观测机组为主风向下一排机组,无机组尾流相互影响。案例 3 基本情况如表 4 所示,其中环境风速与推力系数及环境湍流强度的对应关系如图 6 所示,图中推力系数取机组当地空气密度下风速对应理论值。

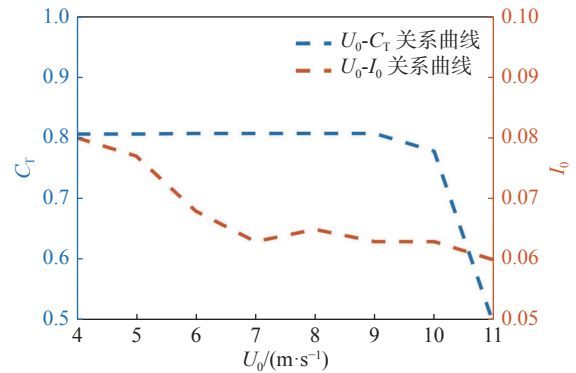


图 6 环境风速与推力系数及环境湍流强度的对应关系

Fig. 6 Correspondence of ambient wind speeds with thrust coefficient and ambient turbulence intensities

3 尾流模型对比分析

3.1 评定标准及范围

为精准评估各尾流模型预测性能,确保评估结

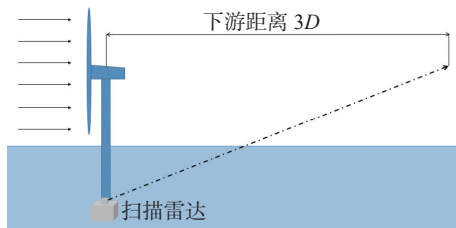


图 5 3D 扫描雷达定向 LOS 模式

Fig. 5 Directional LOS mode for 3D scanning radar

论的合理性,本文将以尾流模型输出的预测结果与对应实验结果的偏差^[27]、平均偏差及偏差标准差为评定因子,定量分析各尾流模型预测表现,考虑实际风场上下游机组距离一般处于 $[3D, 10D]$ 范围内,因此各模型的对比研究将在该范围内进行。偏差、平均偏差及偏差标准差的计算公式如下:

$$\delta (\%) = \frac{|U_{\text{model}} - U_{\text{exp}}|}{U_{\text{exp}}} \times 100\% \quad (41)$$

$$\bar{\delta} (\%) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \delta (\%)}{n} \quad (42)$$

$$\delta_{std} (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta (\%) - \bar{\delta} (\%))^2}}{n} \quad (43)$$

式中:

- δ —— 数据偏差;
- U_{model} —— 尾流模型预测速度(m/s);
- U_{exp} —— 相关实验探测的速度值(m/s);
- $\bar{\delta}$ —— 偏差平均值;
- n —— 偏差计算范围内的实验值数量;
- δ_{std} —— 偏差标准差。

3.2 尾流速度分析

为分析各尾流模型风速预测性能,采用案例 1 和案例 2 数据来计算预测值与实验值的偏差。案例 1 数据为海上风场,采用 2 种风速下(5 m/s、11 m/s)的尾流数据,分析环境风速变化下各模型的预测性能,如图 7~图 9 所示。大多数模型的预测偏差随下游距离的变化趋势大体一致且偏差波动较为稳定,图 7、图 8、图 9(b)也进一步量化表明了各模型除 Frandsen 和 Ishihara 在 5 m/s 风速工况以外,在下游区域 3D~

10D 均有着较为稳定的风速预测。对于上下游机组间距最可能出现范围(5D~7D),仅有 2D-k-Jensen 在两组风况下满足偏差低于 10%, Jensen、Jensen-Guass 和 Park-Guass 仅在 11 m/s 环境风速下能实现较好的预测精度。对比不同风速下各模型预估偏差的平均值与标准差来看,如图 9 所示,高风速工况下,各模型均能获得一个更优的尾流风速预测精度和适应性,即模型预估偏差的平均值与标准差更小。当环境风速为 5 m/s 时,仅 2D-k-Jensen 出现了较为精准的预测,平均偏差约 9%,而在 11 m/s 环境风速下, Jensen、2D-k-Jensen、Jensen-Guass 和 Park-Guass 均有着更优的预测情况,偏差平均值及标准差均低于 8%,其中 Jensen 为唯一的一维模型,这与文献 [27] 结论一致。

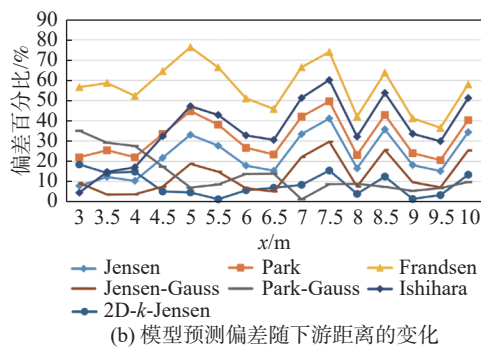
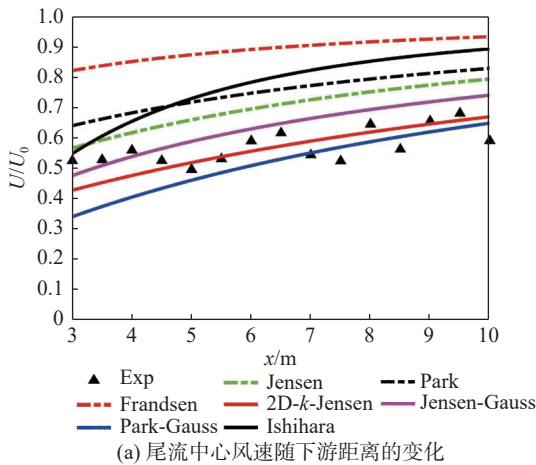


图 7 模型风速预估与实验对比, $U_0=5$ m/s(案例 1)

Fig. 7 Comparison of wind speed predictions from models with experimental values, $U_0=5$ m/s(case 1)

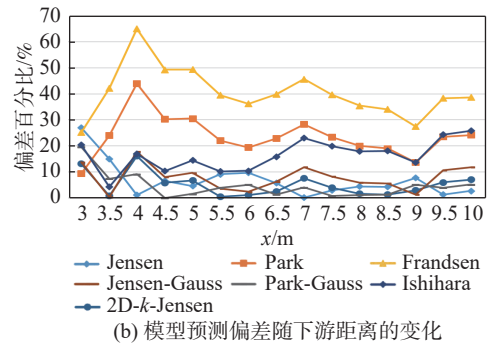
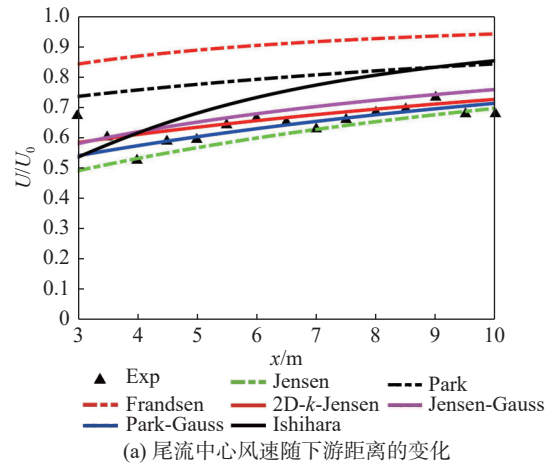


图 8 模型风速预估与实验对比, $U_0=11$ m/s(案例 1)

Fig. 8 Comparison of wind speed predictions from models with experimental values, $U_0=11$ m/s(case 1)

相较于案例 1 的研究重点在尾流中心风速的预估分析,案例 2 主要关注各预测模型在轮毂高度处水平面(XY 截面)的水平风速分布预测情况,实验值与模型预估值对比结果如图 10~图 12 所示。图 10、图 11 显示风机尾流水平分布呈高斯型,与二维尾流预估

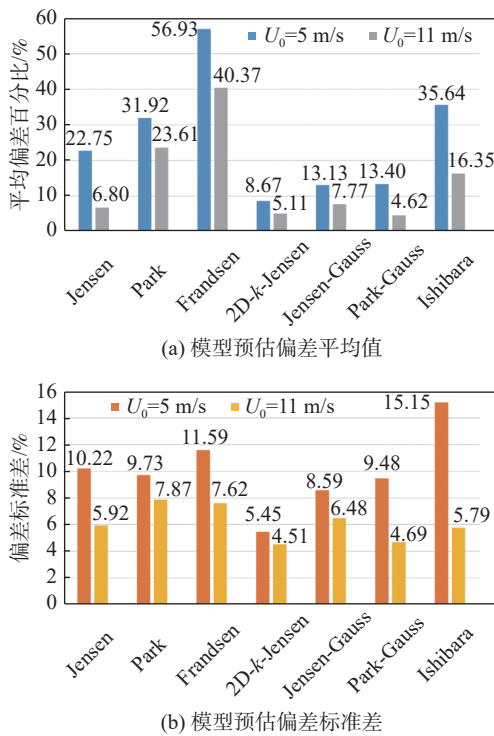


图 9 模型风速预估偏差的平均值与标准差(案例 1)

Fig. 9 Mean and standard deviation of wind speed prediction deviations from models(case 1)

模型形状更为契合。Ishihara 模型风速预测更高且尾流宽度更宽, 而 2D-k-Jensen、Park-Gauss 则反之, 相较之下 Jensen-Gauss 模型在各工况与实验值的贴合度更高。对于一维模型, 多组工况中 Jensen 模型对尾流中心的风速预测均优于 Park 和 Frandsen 等一维模型, 但因其恒定的下游尾流分布, 尾流中心风速预测最佳的 Jensen 模型在各工况下的预估平均偏差均高于 Park 模型, 如图 12 所示。结合各工况结果, Park、2D-k-Jensen、Jensen-Gauss 和 Ishihara 模型在各工况下均有着较优的预测性能, 平均偏差小于 9%。同时, 高环境湍流工况下, 各模型的预测性能均有略微提升。

结合两组案例数据分析结果来看, 针对不同的环境条件, 模型的风速预测性能有一定变化, 高上游风速工况下, 各模型预估精度及稳定性均有明显提升, 同时环境湍流强度的提升也对模型预测精度也有着略微的改善作用。二维尾流模型风速预估精度普遍优于一维尾流模型, Ishihara 较实验值预测出更快的尾流风速恢复, 不适用于机组尾流风速预估, 而 Jensen-Gauss、2D-k-Jensen、Park-Guas 则与实验结果

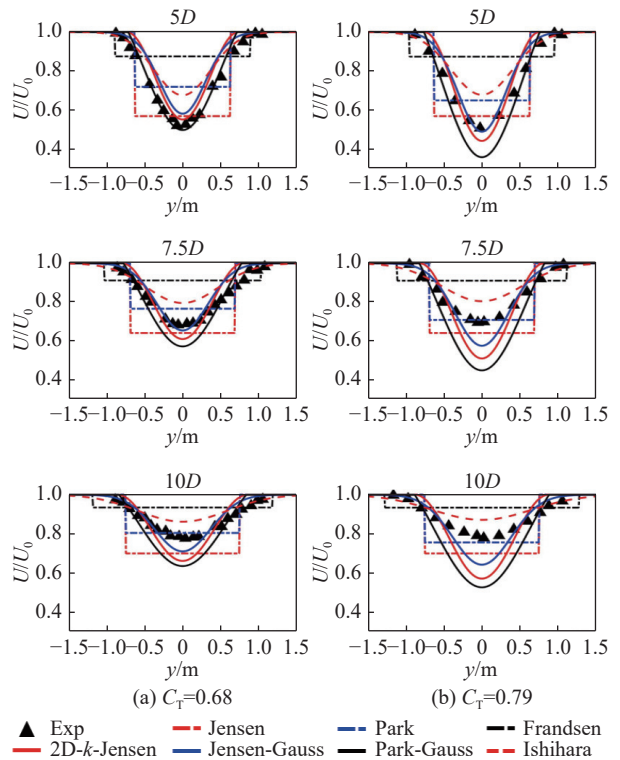


图 10 模型风速预估与实验对比, $U_0=5.6$ m/s, $I_0=0.061$ (案例 2)

Fig. 10 Comparison of wind speed predictions from models with experimental values, $U_0=5.6$ m/s, $I_0=0.061$ (case 2)

较为接近, 三者最大平均偏差分别为 13.4%、8.7%、13.1%, 其中前两者因其可变的尾流膨胀系数有着更优的预测特点, Jensen-Gauss 尾流宽度预测更佳, 而 2D-k-Jensen 尾流中心风速预测精度更高且多工况适应性更强, 最大偏差标准差低于 6%, 均适用于机组尾流风速损失的预估。一维尾流模型中, 虽 Jensen 模型尾流中心风速预估精度远优于 Park、Frandsen 模型, 但风速水平分布预测上略差于 Park 模型, 相较于前者, Park 模型更适用于机组尾流风速预测。

3.3 尾流湍流强度分析

利用案例 2 和案例 3 中机组尾流湍流强度相关数据评估各尾流模型的湍流强度预测性能及适用性。图 13~图 15 基于案例 2 数据展现了机组尾流不同下游距离湍流强度的水平分布对比情况。机组尾流湍流强度水平分布呈“双驼峰状”与 Ishihara 预测的双高斯形较为接近。对于低湍流强度时, 各模型预测结果均与实验值较为接近, 而 Jensen-Gauss 模型在高端流强度工况下预测出远大于实验的湍流强度结果, 平均偏差约 50%, 对环境湍流强度变化极为敏感。

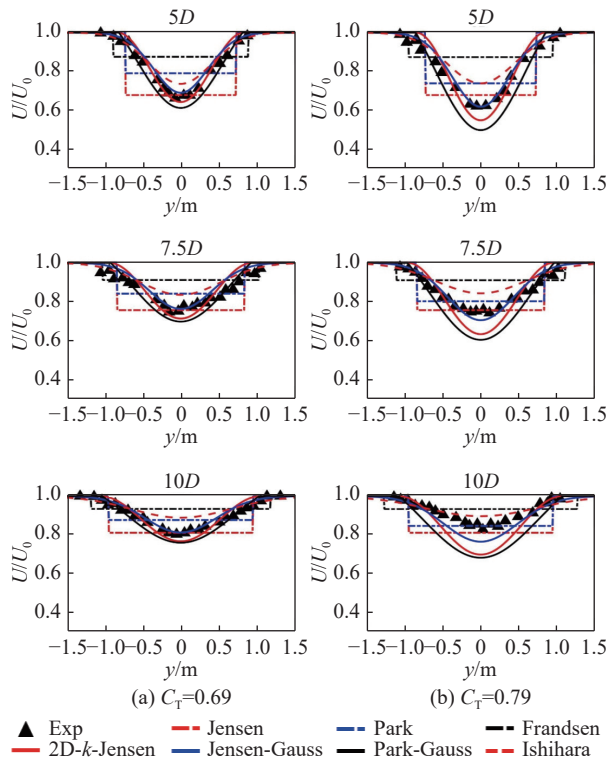


图 11 模型风速预估与实验对比, $U_0=5.46$ m/s, $I_0=0.11$ (案例 2)

Fig. 11 Comparison of wind speed predictions from models with experimental values, $U_0=5.46$ m/s, $I_0=0.11$ (case 2)

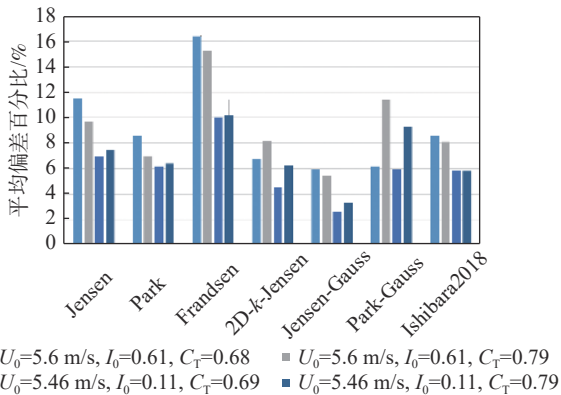


图 12 模型风速预估的平均偏差百分比(案例 2)

Fig. 12 Mean percentage deviation of wind speed predictions from models(case 2)

根据图 15 平均偏差结果显示,除 Jensen-Gauss 模型以外,其余模型高湍流强度工况预测结果均优于低湍流强度,其中 Frandsen 模型差异最为明显,而 Ishihara 模型则相反,两组工况预测精度接近,平均偏差均小于 10%。

案例 3 中的所有实验数据均为下游恒定距离

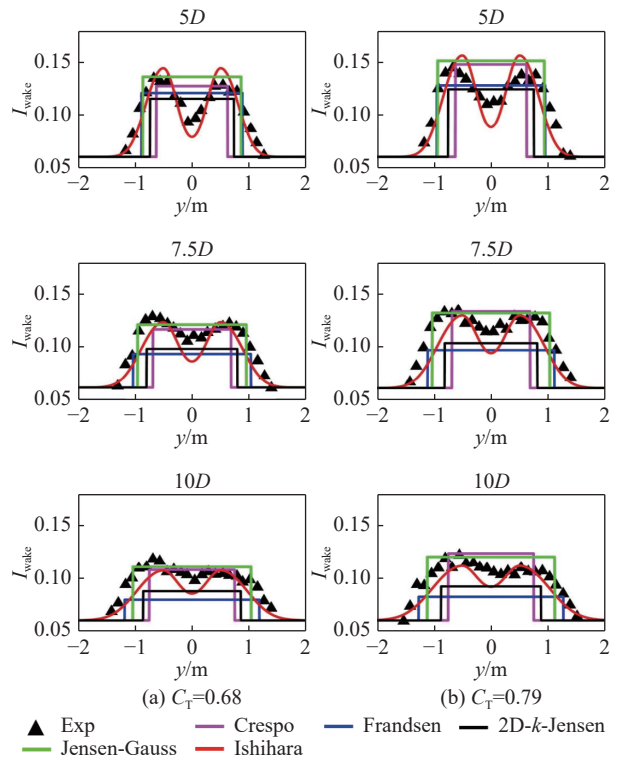


图 13 模型湍流强度预估与实验对比, $U_0=5.6$ m/s, $I_0=0.061$ (案例 2)

Fig. 13 Comparison of turbulence intensity predictions from models with experimental values, $U_0=5.6$ m/s, $I_0=0.061$ (case 2)

3D 处的湍流强度值,用于分析上游风速变化下模型预测的偏差情况。图 16 展示了各湍流强度预估模型与实验值的数值对比及相应偏差。除 Ishihara 以外的模型预测偏差相差不大, Ishihara 因其具有的双高斯形状,导致尾流中心湍流预测值远低于实验值。上游风速 6~10 m/s 范围,各模型预估数值均低于实验值情况,其中 Frandsen 预估相对最好,但在 7~9 m/s 范围的偏差仍超过 10%。上游风速为 11 m/s 时, Jensen-Gauss、2D-k-Jensen 有着约 5% 的较小预测偏差。根据不同上游风速各模型预测的平均偏差结果,如图 17 所示,仅 Frandsen 模型有着可接受的平均偏差值,约为 10%。

综合案例 2 和案例 3 湍流强度预测的分析情况,各尾流模型在机组尾流湍流强度预测的性能上也存在着明显的共性,即高湍流强度模型预估精度将有所提升, Jensen-Gauss 模型除外。 Jensen-Gauss 模型预测结果极不稳定,高环境湍流强度下预估出远高于实验值的结果,平均偏差约 50%。虽 Ishihara 模型

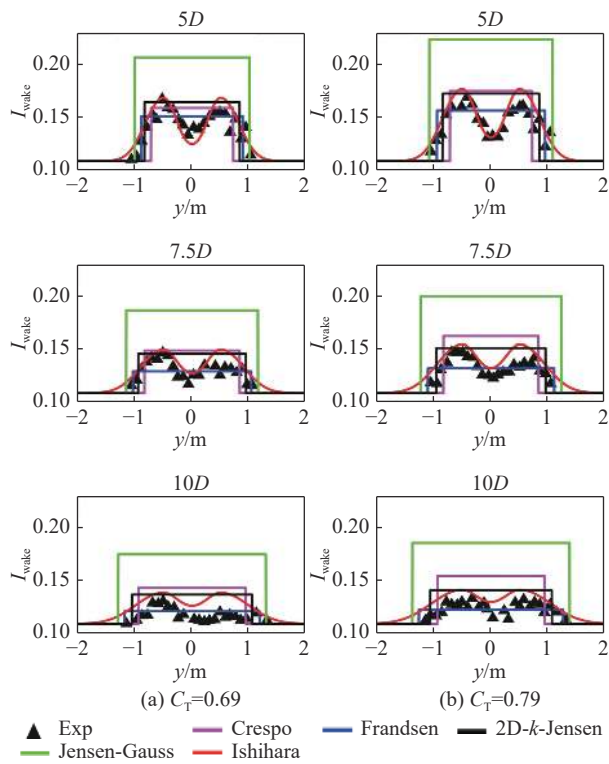


图 14 模型湍流强度预估与实验对比, $U_0=5.46$ m/s, $I_0=0.11$ (案例 2)

Fig. 14 Comparison of turbulence intensity predictions from models with experimental values, $U_0=5.46$ m/s, $I_0=0.11$ (case 2)

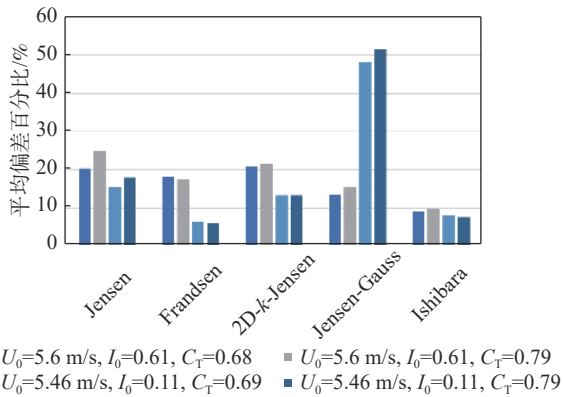


图 15 模型湍流强度预估的平均偏差百分比(案例 2)
Fig. 15 Mean percentage deviation of turbulence intensity predictions from models(case 2)

在湍流强度水平分布预测上展现出明显的优势, 预估平均偏差均低于 10%, 但其尾流中心处的湍流强度预测结果远低于实测值, 平均偏差约 60%, 不利于预估下游机组处湍流强度值。其余模型在两案例中的湍流强度预估平均偏差相差不多, 其中 Frandsen 模型预测精度及稳定性相对最好, 大多工况平均偏

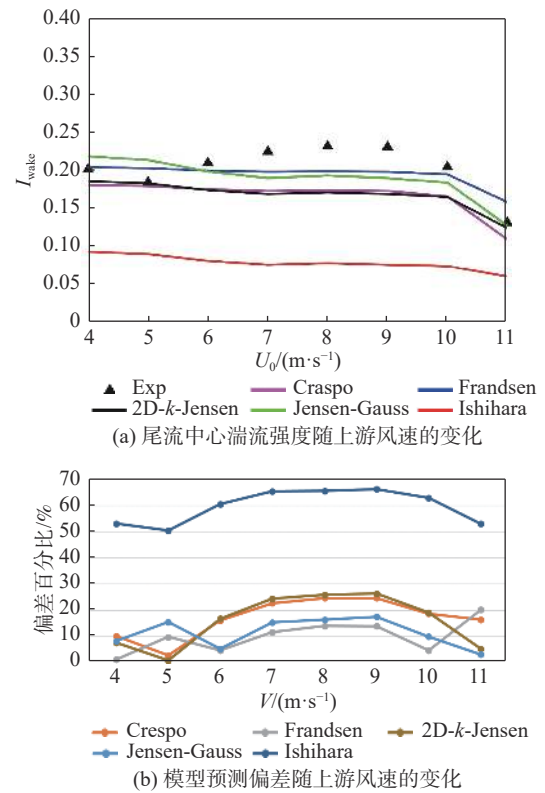


图 16 模型湍流强度预估与实验对比(案例 3)

Fig. 16 Comparison of turbulence intensity predictions from models with experimental values(case 3)

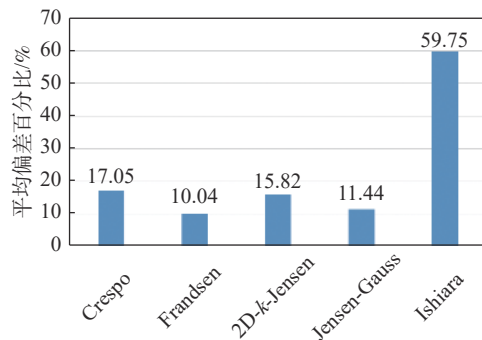


图 17 模型湍流强度预估的平均偏差百分比(案例 3)
Fig. 17 Mean percentage deviation of turbulence intensity predictions from models(case 3)

差低于 10%。

4 结论

本文对常见的 8 个机组尾流模型进行了系统的研究, 依托 3 组风场实测或风洞实验数据, 着重分析了各模型尾流风速和湍流强度的预估情况, 主要结论如下:

1) 尾流速度预测分析所考察的模型中, 尾流膨胀系数 k 可变的 Jensen-Guass 及 2D- k -Jensen 模型能较好地反应尾流速度分布情况, 风速预估结果与实测值吻合较好, 均适用于机组尾流风速损失的预估。WT/WASP 等商业软件常用的一维 Park 模型, 也展现出不错的预估性能。Ishihara 模型风速预估虽通过更多更复杂的参数进行构建, 但预测结果不太理想。

2) 对于湍流强度预测方面, Jensen-Guass 模型对环境湍流强度变化敏感, 预测结果极不稳定, Ishihara 模型无法精准预测下游机组位置处湍流强度, 需对尾流中心处湍流强度预测进行调整, 其余模型预测结果差异较小, Frandsen 模型预测精度及稳定性相对最好, 适用于机组尾流湍流强度预估。

本文基于单机组尾流研究各尾流模型预估性能, 可为海上风场机位排布优化及尾流控制分析的尾流模型选择做参考。后续将根据现有结果优化单尾流模型, 并结合多尾流叠加理论, 进一步讨论各模型针对整场尾流损失的预测表现。

参考文献:

- [1] 蔡彦枫, 徐初琪, 汤东升, 等. 基于多尾流模型的大型海上风电场扩容试验研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(4): 138-147. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.014.
CAI Y F, XU C Q, TANG D S, et al. Experimental research on capacity expansion of large-scale offshore wind farm under multiple wake models [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(4): 138-147. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.014.
- [2] 李铮, 郭小江, 申旭辉, 等. 我国海上风电发展关键技术综述 [J]. *发电技术*, 2022, 43(2): 186-197. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22028.
LI Z, GUO X J, SHEN X H, et al. Summary of technologies for the development of offshore wind power industry in China [J]. *Power generation technology*, 2022, 43(2): 186-197. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22028.
- [3] 宋翌蕾, 田琳琳, 赵宁. 风力机三维尾流模型的提出与校核 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(2): 129-135. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-0912.
SONG Y L, TIAN L L, ZHAO N. Proposal and validation of a new 3D wake model for wind turbine [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2021, 42(2): 129-135. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-0912.
- [4] JENSEN N O. A note on wind generator interaction [R]. Denmark: Risø National Laboratory, 1983.
- [5] WITHA B, STEINFELD G, HEINEMANN D, et al. Advanced turbine parameterizations in offshore LES wake simulations [C]//Anon. 6. International Symposium on Computational Wind Engineering. Hamburg, Germany, Junelo, 2014. [s. l.]: Witha B, 2014.
- [6] GOIT J P, MEYERS J. Optimal control of energy extraction in wind-farm boundary layers [J]. *Journal of fluid mechanics*, 2015, 768: 5-50. DOI: 10.1017/jfm.2015.70.
- [7] XIE S B, ARCHER C. Self-similarity and turbulence characteristics of wind turbine wakes via large-eddy simulation [J]. *Wind energy*, 2015, 18(10): 1815-1838. DOI: 10.1002/we.1792.
- [8] 吴迪, 刘怀西, 苗得胜. 尾流算法与风向变化对海上风机排布影响研究 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(2): 54-58. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.010.
WU D, LIU H X, MIAO D S. Research on offshore wind farm units layout considering the algorithm of wake model and the change of wind direction [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(2): 54-58. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.010.
- [9] KATIC I, HØJSTRUP J, JENSEN N O. A simple model for cluster efficiency [C]//Anon. European Wind Energy Association Conference and Exhibition, Rome, Italy, October 6-8, 1986. Rome: A. Raguzzi, 1987.
- [10] FRANDBSEN S, BARTHELMIE R, PRYOR S, et al. Analytical modelling of wind speed deficit in large offshore wind farms [J]. *Wind energy*, 2006, 9(1/2): 39-53. DOI: 10.1002/we.189.
- [11] PORTÉ-AGEL F, WU Y T, CHEN C H. A numerical study of the effects of wind direction on turbine wakes and power losses in a large wind farm [J]. *Energies*, 2013, 6(10): 5297-5313. DOI: 10.3390/en6105297.
- [12] CHAMORRO L P, PORTÉ-AGEL F. Effects of thermal stability and incoming boundary-layer flow characteristics on wind-turbine wakes: a wind-tunnel study [J]. *Boundary-layer meteorology*, 2010, 136(3): 515-533. DOI: 10.1007/s10546-010-9512-1.
- [13] XIE S B, ARCHER C L. A numerical study of wind-turbine wakes for three atmospheric stability conditions [J]. *Boundary-layer meteorology*, 2017, 165(1): 87-112. DOI: 10.1007/s10546-017-0259-9.
- [14] LI Q, MURATA J, ENDO M, et al. Experimental and numerical investigation of the effect of turbulent inflow on a horizontal axis wind turbine (part II: wake characteristics) [J]. *Energy*, 2016, 113: 1304-1315. DOI: 10.1016/j.energy.2016.08.018.
- [15] 杨祥生. 风力机尾流效应数值模拟研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
YANG X S. Study on the numerical simulation of wind turbine wakes effect [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [16] AINSLIE J F. Calculating the flowfield in the wake of wind turbines [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 1988, 27(1-3): 213-224. DOI: 10.1016/0167-6105

- (88)90037-2.
- [17] MAGNUSSON M. Near-wake behaviour of wind turbines [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 1999, 80(1/2): 147-167. DOI: [10.1016/S0167-6105\(98\)00125-1](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(98)00125-1).
- [18] CRESPO A, HERNÁNDEZ J. Turbulence characteristics in wind-turbine wakes [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 1996, 61(1): 71-85. DOI: [10.1016/0167-6105\(95\)00033-X](https://doi.org/10.1016/0167-6105(95)00033-X).
- [19] FRANDBSEN S. Measurements on and modelling of offshore wind farms [R]. Denmark: Forskningscenter Risoe, 1996.
- [20] TIAN L L, ZHU W J, SHEN W Z, et al. Development and validation of a new two-dimensional wake model for wind turbine wakes [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2015, 137: 90-99. DOI: [10.1016/j.jweia.2014.12.001](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.12.001).
- [21] GAO X X, YANG H X, LU L. Optimization of wind turbine layout position in a wind farm using a newly-developed two-dimensional wake model [J]. *Applied energy*, 2016, 174: 192-200. DOI: [10.1016/j.apenergy.2016.04.098](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.098).
- [22] ISHIHARA T, QIAN G W. A new Gaussian-based analytical wake model for wind turbines considering ambient turbulence intensities and thrust coefficient effects [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2018, 177: 275-292. DOI: [10.1016/j.jweia.2018.04.010](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.04.010).
- [23] 吴阳阳. 基于测风数据的经验尾流模型适用性分析研究 [J]. *浙江电力*, 2017, 36(11): 92-98. DOI: [10.19585/j.zjdl.201711017](https://doi.org/10.19585/j.zjdl.201711017).
WU Y Y. Applicability analysis of empirical wake model based on wind data [J]. *Zhejiang electric power*, 2017, 36(11): 92-98. DOI: [10.19585/j.zjdl.201711017](https://doi.org/10.19585/j.zjdl.201711017).
- [24] CAMPAGNOLO F, MOLDER A, SCHREIBER J, et al. Comparison of analytical wake models with wind tunnel data [J]. *Journal of physics: conference series*, 2019, 1256: 012006. DOI: [10.1088/1742-6596/1256/1/012006](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1256/1/012006).
- [25] BARTHELMIE R J, LARSEN G C, FRANDBSEN S T, et al. Comparison of wake model simulations with offshore wind turbine wake profiles measured by sodar [J]. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 2006, 23(7): 888-901. DOI: [10.1175/JTECH1886.1](https://doi.org/10.1175/JTECH1886.1).
- [26] GÖÇMEN T, LAAN P V D, RÉTHORÉ P E, et al. Wind turbine wake models developed at the technical university of Denmark: a review [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2016, 60: 752-769. DOI: [10.1016/j.rser.2016.01.113](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.113).
- [27] JEON S, KIM B, HUH J. Comparison and verification of wake models in an onshore wind farm considering single wake condition of the 2 MW wind turbine [J]. *Energy*, 2015, 93: 1769-1777. DOI: [10.1016/j.energy.2015.09.086](https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.086).

作者简介:



李胜

李胜 (第一作者, 通信作者)

1997-, 男, 四川眉山人, 工程师, 中国海洋大学建筑与土木工程硕士, 主要从事海上风电技术研究工作 (e-mail) lisheng03@mywind.com.cn。

葛文澎

1990-, 男, 计算流体力学工程师, 硕士, 从事风资源评估研究工作 (e-mail) gewenpeng@mywind.com.cn。

吴嘉诚

1991-, 男, 技术支持工程师, 硕士, 从事海上风电市场及前期设计研究工作 (e-mail) wujiacheng@mywind.com.cn。

曲春明

1995-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事风电机组流体仿真相关工作 (e-mail) quchunming@mywind.com.cn。

孙睿

1995-, 男, 工程师, 硕士, 主要研究领域为风电机组设计 (e-mail) wysunrui01@163.com。

(编辑 孙舒)