

# 基于多尾流模型的大型海上风电场扩容试验研究

蔡彦枫<sup>1,2,✉</sup>, 徐初琪<sup>3</sup>, 汤东升<sup>1</sup>, 王晴勤<sup>1</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

2. 广东科诺勘测工程有限公司, 广东 广州 510663;

3. 中国船舶重工集团厦门双瑞船舶涂料有限公司, 福建 厦门 361101)

**摘要:** [目的] 文章旨在研究大型海上风电场的最佳规划容量设置。[方法] 针对某1 GW容量的单个规划场址, 利用3种不同单机容量机型与3种海上风电场尾流模型, 结合海上风资源图谱开展同场址逐步扩容至2 GW的一系列数值试验, 并对全场发电量、尾流影响与边际效应进行分析。[结果] 结果显示, 随着机型的单机容量增大, 扩容过程中全场实际发电量增幅越高, 尾流损失增长越慢, 兼顾机组安全性与投入产出比的有效扩容区间越大; 但尾流模型选择可能影响有效扩容区间评估结果。[结论] 文章研究表明, 在满足现有有用海指标、风电机组安全性与工程经济性等多重约束下, 单个场址的最佳规划容量可以略高于现有基准值, 在今后海上风电千万千瓦级基地规划中, 应科学细分并合理设置单个场址的规划容量。

**关键词:** 海上风电场; 风电机组; 尾流损失; 规划容量; 扩容

中图分类号: TK89; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)04-0138-10

开放科学(资源服务)二维码:



## Experimental Research on Capacity Expansion of Large-Scale Offshore Wind Farm Under Multiple Wake Models

CAI Yanfeng<sup>1,2,✉</sup>, XU Chuqi<sup>3</sup>, TANG Dongsheng<sup>1</sup>, WANG Qingqin<sup>1</sup>

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. Guangdong Kenuo Surveying Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

3. Xiamen Sunrui Ship Coating Co., Ltd., China Shipbuilding Industry Corporation, Xiamen 361101, Fujian, China)

**Abstract:** [Introduction] This article aims to study the optimal planned capacity setting of large-scale offshore wind farm. [Method] A series of numerical experiments were conducted on a single planned site with a capacity of 1 GW using three models with different unit capacities and three offshore wind farm wake models, combined with an offshore wind resource atlas, to gradually expand it to 2 GW. Power generation, wake effects and marginal utility of the whole site were analyzed. [Result] The results show that employing the wind turbine with larger single-unit capacity, the higher gaining of the power generation and slower growth of wake loss appear during the capacity expansion. Meanwhile, the larger effective expansion range which taking into account the safety of the wind turbine and the marginal utility exists. However, evaluation of effective expansion range may be affected by wake model selection. [Conclusion] This article shows that the optimal planned capacity of a single offshore wind farm can be slightly higher than the existing benchmark when multiple constraints, such as utilization of sea area, wind turbine safety and economical efficiency are met. Individual site needs to be subdivided scientifically and the optimal planned capacity should be reasonably set in the future planning of offshore wind farm bases with capacities in the tens of millions of kilowatts.

**Key words:** offshore wind farm; wind turbine; wake loss; planned capacity; capacity expansion

2095-8676 © 2023 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/>).

收稿日期: 2023-01-03 修回日期: 2023-03-15

基金项目: 中国能建广东院科技项目“大规模海上风电场细分场址及容量控制指标研究”(EV06731W); 中国电力工程顾问集团有限公司科技项目“广东省海上风电海洋水文气象信息预报关键技术研究”(GSKJ2-W01-2021)

## 0 引言

在“碳达峰、碳中和”战略目标指引下,国内海上风电迎来了新一轮发展机遇。国家《“十四五”可再生能源发展规划》中明确提出,推动山东半岛、长三角、闽南、粤东、北部湾等千万千瓦级海上风电基地开发建设,推动一批百万千瓦级的重点项目集中连片开发。广东、广西、海南等地的省级海上风电规划中,深水区单个场址的规划容量都在百万千瓦甚至更高。可以预见,今后海上风电发展将呈现大容量、集中连片和深远海等新特点<sup>[1-3]</sup>。

随着海上风电场规模的扩大与离岸距离的增加,海上风电场的确权用海面积和风电场外缘边线包络海域面积同步增大,给自然资源主管部门在海上风电用海审批与管理上带来了新挑战<sup>[4]</sup>。2016年,原国家海洋局出台了国海规范[2016]6号文件,基于当时5~6 MW级别机组与浅水区场址提出了“单个海上风电场外缘边线包络海域面积原则上每100 MW控制在16 km<sup>2</sup>左右”这一指标。现阶段深远海风电机组的单机容量和单个风电场规划容量均已大幅提高,上述用海指标能否继续适用值得讨论。因此,有必要进行大型海上风电场址规划容量设置研究,探讨已有场址扩容的可行性,并进一步揭示最大限度集约节约用海、风电机组安全性与工程经济性等多重约束下的最佳规划容量范围。

目前,国内关于海上风电场规划容量设置的研究相对较少,所采用的方法主要为考虑风能资源、建设成本、运营方式、电网消纳等方面的约束条件<sup>[5-7]</sup>,构建多目标决策函数,求解优化问题的最优解<sup>[8-10]</sup>。但已有研究中的机组单机容量和规划面积均偏小,风电机组之间的尾流效应考虑得较为简单,与吉瓦级别的大型海上风电场实际情况存在差异。为此,本文以某大型海上风电规划场址为研究对象,利用10 MW级别以上的典型机型,结合风资源图谱、海上风电场尾流模型对同一场址逐步扩容情景下的发电效率、尾流损失与边际效应分析,并对今后大型海上风电场规划容量设置与风电基地场址细分工作提出建议。

## 1 资料与模型

### 1.1 研究场址与风资源

如图1所示,本文研究对象为某规划场址群中

的单个1 GW细分场址,离岸约60 km;场址形状为矩形,东西方向长约23.2 km,南北方向长约6.9 km,面积为160 km<sup>2</sup>。

由于场址覆盖范围较大,场内不同机位处的风资源存在空间分布差异,因此以往研究中用单个测风塔的风资源数据代表所有机位来计算全场发电量的做法存在缺陷。本文利用能够反映风资源实际空间分布差异的数据集——全球风能图谱(Global Wind Atlas, GWA)<sup>[11]</sup>作为风资源输入资料。GWA是丹麦理工大学与世界银行合作开发的全球250 m分辨率风资源数据库,提供全球陆地与距离海岸线200 km以内海面上10 m、50 m、100 m、150 m、200 m共5个高度层的风资源参数。本文采用GWA网站(<https://globalwindatlas.info/>)公开发布的v3.2版本数据,下载位于场址内,间隔3 km共计16个数据格点的风况参数(Weibull分布参数和每30°扇区的风向频率)进行后续的发电量计算,其中150 m高度的平均风速空间分布如图1所示。

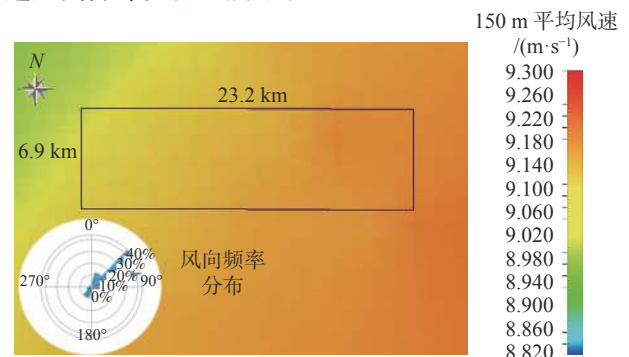


图1 研究场址与风资源数据示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wind farm site under research and wind resource atlas

### 1.2 机型资料与排布方案

如表1所示,本文选用设计等级相同,单位千瓦扫风面积相近且适合研究海域风资源条件的3种10 MW以上风电机组,进行后续1 GW基准容量逐步扩容至2 GW的机组排布与对比。

表1 对比机型概况

Tab. 1 Wind turbines information

机型	WTG1	WTG2	WTG3
单机容量/MW	11	12	16
设计等级	IEC S	IEC S	IEC S
叶轮直径/m	208	220	256
轮毂高度/m	130	140	150

其中,WTG1 机型共设 10 个规划容量情景,对应装机数目依次为 90、100、110、121、132、143、154、165、176、187 台;WTG2 机型共设 8 个规划容量情景,装机数目依次为 88、99、110、121、132、143、154、165 台;WTG3 机型共设 8 个规划容量情景,装机数目依次为 63、72、81、90、99、108、117、126 台。

采用实际工程微观选址中最常用的阵列排布法<sup>[12-13]</sup>,对表 1 所列的 WTG1~WTG3 机型不同规划容量情景,设计具体排布方案:根据规划台数,沿场址边界由南向北、由西向东按照近似相同的间距排布逐个机位,充分利用场址内部空间形成机组阵列,使得主导风向扇区(30°~60°)中前后机位的间距最大,降低尾流损失;并且相邻机位的最小间距控制在 3D(D 为叶轮直径)以上,确保机组安全运行。其中,WTG1 机型 90 台(990 MW)和 187 台(2.057 GW)两种规划容量情景下的布置方案对比如图 2 所示,其他方案图略。

### 1.3 尾流模型

相关研究表明,大型海上风电场尾流效应更为显著<sup>[14]</sup>,其对发电量计算的影响不容忽视。在本文中,利用 Park、Bastankhak、Fuga 共 3 种尾流模型进行不同排布方案的尾流影响分析与对比,相关说明如下:

#### 1) Park 模型

Park 模型(以下简称 P 模型)是描述平坦地形下的一维解析尾流模型<sup>[15]</sup>,同样适用于海上风电情形。其原理是假定风速为  $U_\infty$  的气流经过机组叶轮被吸收一部分能量后,在整个叶轮范围内形成均匀的尾流区(风速均降为  $U$ ),因此,属于一维模型。尾流区宽度随着向下风方向扩散距离而呈线性增加,风速衰减  $\delta_U$  逐渐恢复,表达式如下:

$$\delta_U(x) = \frac{U_\infty - U}{U_\infty} = (1 - \sqrt{1 - C_t}) \frac{D}{D + 2kx} \frac{A_{\text{overlap}}}{A_{\text{wtg}}} \quad (1)$$

式中:

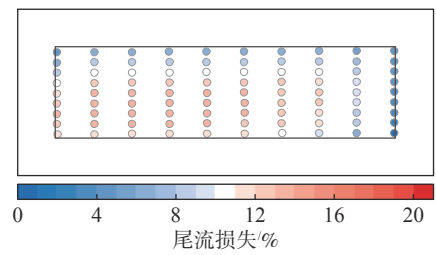
$C_t$  —— 机组推力系数;

$D$  —— 机组叶轮直径(m);

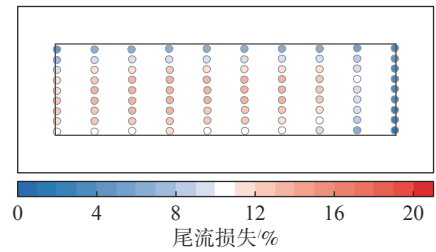
$k$  —— P 模型所定义的尾流扩展系数,根据广东海域已有研究成果<sup>[16]</sup>,本文中  $k$  取值为 0.044;

$x$  —— 尾流向下风方向的扩散距离(m);

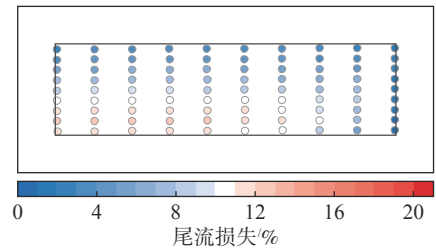
$A_{\text{overlap}}$  —— 速度衰减区与下游机组叶轮重叠面



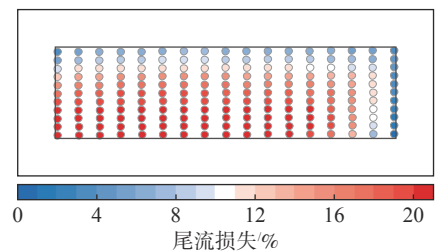
(a) WTG1 机型 990 MW 规划容量情景 (P 模型)



(b) WTG1 机型 990 MW 规划容量情景 (B 模型)



(c) WTG1 机型 990 MW 规划容量情景 (F 模型)



(d) WTG1 机型 2 057 MW 规划容量情景 (F 模型)

图 2 排布方案与尾流计算结果示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wind turbine layouts and wake calculation results

积( $\text{m}^2$ );

$A_{\text{wtg}}$  —— 下游机组叶轮面积( $\text{m}^2$ )。

#### 2) Bastankhak 模型

Bastankhak 模型(以下简称 B 模型)是基于正态分布,由动量守恒及质量守恒推导得到的新一代二维解析尾流模型,相关研究表明,正态分布比 P 模型中的均匀分布更符合尾流区内的风速衰减形态,与实测结果相比误差更小<sup>[17-19]</sup>。速度损失  $\delta_U$  表达式如下:

$$\delta_U(x,y) = 1 - \sqrt{1 - \frac{C_t}{8\left(\frac{k_x^*}{D} + 0.2\sqrt{\beta}\right)^2}} \times \exp\left[-(y/D)^2/2\left(\frac{k_x^*}{D} + 0.2\sqrt{\beta}\right)^2\right] \quad (2)$$

$$\beta = \frac{1 - \sqrt{1 - C_t}}{2\sqrt{1 - C_t}} \quad (3)$$

式中:

$y$  ——尾流区内沿轮毂中心向边缘扩展的距离(m);

$k^*$  ——B模型所定义的尾流扩展系数,在本文中参考已有研究成果<sup>[19]</sup>, $k^*$ 取值为0.018;

其余变量与P模型中的变量一致。

### 3) Fuga 模型

Fuga模型(以下简称F模型)是一种线性化的三维计算流体力学(CFD)模型,是丹麦Risø国家实验室开发WASP Fuga软件中的尾流计算模型,用于大型海上风电场在不同大气稳定度下的尾流效应快速计算。F模型的原理是基于平流、气压梯度力、湍流应力和机组叶轮对气流的阻力等效应下的定常不可压雷诺平均方程(RANS),并对RANS方程进行线性化和摄动展开,再利用快速傅里叶积分变换法求解线性方程的数值解<sup>[20]</sup>。

F模型的线性化方程如下:

$$u^0 \frac{\partial u^1}{\partial x} + w^1 \frac{\partial u^0}{\partial z} = -\frac{\partial p^1}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j} k u_{*z} \left( \frac{\partial u^1}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^1}{\partial x} \right) + f_1^1 \quad (4)$$

$$u^0 \frac{\partial v^1}{\partial x} = -\frac{\partial p^1}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x_j} k u_{*z} \left( \frac{\partial v^1}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j^1}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$u^0 \frac{\partial w^1}{\partial x} = -\frac{\partial p^1}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x_j} k u_{*z} \left( \frac{\partial w^1}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j^1}{\partial x} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial u^1}{\partial x} + \frac{\partial v^1}{\partial y} + \frac{\partial w^1}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

$$f_1^1 = -\frac{1}{2} C_t U_\infty^2 \delta(x - x_h) \Theta\left[\left(\frac{D}{2}\right)^2 - (y - y_h)^2 - (z - z_h)^2\right] \quad (8)$$

式中:

$u^n$ 、 $v^n$ 、 $w^n$  ——风矢量在三维笛卡尔坐标中 $x$ (顺风向)、 $y$ (横风向)、 $z$ (垂向)3个轴向上的摄动展开

(m/s),  $n=0$  和 1;

$p^1$  ——气压的一阶摄动展开(hPa);

$u_j^1$  ——风速分量在特定方向上的一阶摄

动展开(m/s),  $j=1, 2, 3$ ,  $u_1=u$ ,  $u_2=v$ ,  $u_3=w$ ;

$x_j$  ——三维笛卡尔坐标中的三个轴向,

$x_1=x$ ,  $x_2=y$ ,  $x_3=z$ ;

$\delta()$  ——狄拉克函数;

$\Theta()$  ——阶梯函数,负值取0,正值取1;

$x_h$ 、 $y_h$ 、 $z_h$  ——机组轮毂中心点坐标;

其余变量与P模型中的变量一致。

### 4) 尾流叠加方式

上述3种尾流模型中,多台机组的尾流叠加效应均采用速度衰减平方和形式:

$$\delta_U = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta U_i^2} \quad (9)$$

式中:

$\delta U_i$  ——第 $i$ 台机组产生的速度衰减(m/s);

$n$  ——尾流叠加计算中的机组总数(台)。

## 2 分析方法

### 2.1 发电量计算

设置一系列数值试验,依次进行WTG1~WTG3机型全部排布方案的发电量与尾流损失计算:(1)建立排布方案中各个机位的经纬度坐标与GWA数据格点的对应关系,在风电场发电量计算软件WASP v11.0中建立多个机组群(Turbine Stie Group)并关联各自风能图谱(Wind Atlas),导入对应的GWA数据格点文件(lib格式),再输入相应机型的功率曲线与推力系数文件(wtg格式),利用软件生成机组轮毂高度的风资源并得到P模型的试验结果(逐机位的发电量与尾流损失);(2)在WASP软件中生成并导出轮毂高度的风能图谱文件(wrg格式),结合(1)中的wtg文件与式(2)~式(3)分别计算排布方案逐机位、逐风向扇区的发电量与尾流损失,得到B模型的试验结果;(3)将WASP软件的计算模型文件(wwh格式)导入WASP Fuga v2.9.6.1软件中,设置大气稳定度为中性,进一步计算得到F模型的试验结果。

### 2.2 统计分析

对同一机型在不同规划容量情景下的全场总发电量与各机位平均尾流损失进行归一化,计算式

如下:

$$P'_i = P_i/P_1 \quad (10)$$

$$W'_i = W_i/W_1 \quad (11)$$

式中:

$P_i$  ——第  $i$  个规划容量情景中的总发电量 (MWh);

$P_1$  ——基准容量情景下的总发电量 (MWh);

$W_i$  ——第  $i$  个规划容量情景中的平均尾流损失 (%) ;

$W_1$  ——基准容量情景下的平均尾流损失 (%) 。

对  $P'_i$  和  $W'_i$  随规划容量的变动趋势进行一元线性回归拟合:

$$Y = aX + c \quad (12)$$

式中:

$Y$  —— $P'_i$  和  $W'_i$ ;

$X$  ——规划容量 (MW);

$a$  ——斜率拟合值;

$c$  ——截距拟合值。

进一步加入规划容量变动的经济性因素, 设置不同规划容量情景的边际效应参数  $E$ :

$$E_{i,j} = \frac{(P_{i,j} - P_{1,j})}{(X_{i,j} - X_{1,j})} / \frac{(P_{2,WTG1} - P_{1,WTG1})}{(X_{2,WTG1} - X_{1,WTG1})} \quad (13)$$

式中:

$i$  ——第  $i$  个容量情景,  $i=1, 2, \dots, N$ ;

$j$  ——第  $j$  种机型,  $j$  为 WTG1、WTG2、WTG3;

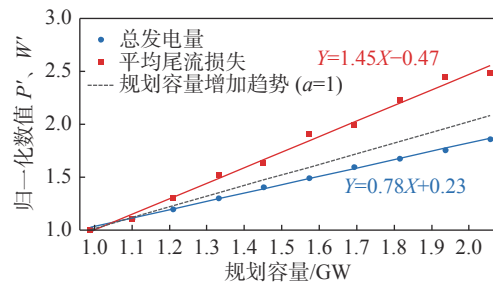
$N$  ——WTG1、WTG2、WTG3 中特定机型规划容量情景总数。

### 3 结果与讨论

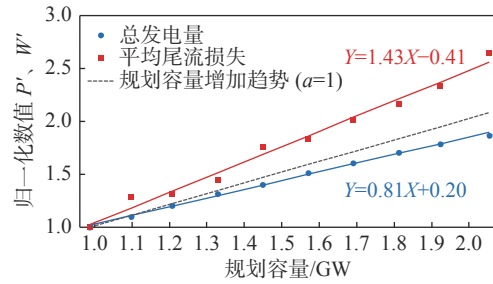
#### 3.1 发电效率

以 WTG1 机型为例, 分析不同规划容量情景下  $P'$ 、 $W'$  的具体变幅。如图 3 所示, 3 种尾流模型的试验结果均显示, 总发电量和平均尾流损失均随着规划容量的增加而增加, 但具体增幅差异显著。按照式(12)进行整体变化趋势拟合, 总发电量变化趋势拟合关系中的斜率  $a$  均小于 1 (3 种尾流模型试验  $a$  分别为 0.78、0.81、0.80); 而平均尾流损失变化趋势拟合关系中的斜率均大于 1 (3 种尾流模型试验  $a$  分别为 1.45、1.43、1.71), 说明尾流损失增幅要快于总发电量增幅。上述现象反映了大型海上风电尾流效

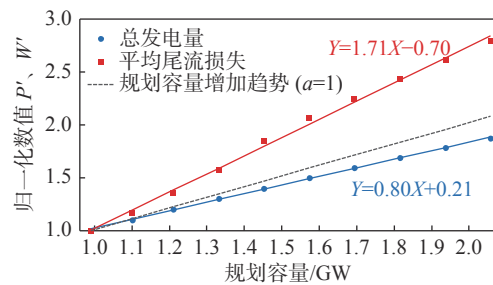
应对机组出力的直接影响, 即如图 2 所示, 在一定的海域面积内, 随着装机数目的增加, 出现了更多尾流区的相互叠加, 并且机位间距下降导致速度衰减难以充分恢复, 尾流损失增大。而在风资源不变的情况下, 下风向机位处的实际风速出现严重下降, 导致机组难以发挥正常的做功性能, 在宏观上表现为机组数目增加所带来的风能捕获增量被更为严重的尾流损失抵消, 最终导致实际发电量的增幅低于装机容量增幅。对于 WTG2 和 WTG3 机型的分析结果相近。



(a) P 模型试验结果



(b) B 模型试验结果



(c) F 模型试验结果

图 3 不同规划容量情景下的总发电量与平均尾流损失变化

Fig. 3 Changes in total power generation and mean wake loss in different planned capacity situations

进一步开展 3 种不同容量机型之间的对比, 如表 2 所示, WTG1、WTG2 和 WTG3 机型总发电量变化趋势的斜率  $a$  取 3 种尾流模型试验平均值, 分别为 0.797、0.803、0.833。可以发现, 随着机组单机容

量的增大, 发电量拟合关系中  $a$  值出现小幅上升的倾向, 原因在于采用更大单机容量机型, 相同规划容量情景下的装机数目更少, 排布方案中的机位间距更大, 更有利于尾流损失的恢复与控制。因此, 所得到的实际发电量增幅高于其他机型。说明在大型海上风电场容量设置中采用大容量机型, 具有发电效率上的天然优势。

### 3.2 尾流影响

值得注意的是, 表 2 中所示平均尾流损失拟合关系中的  $a$  值存在明显差异, F 模型、P 模型、B 模型对于 3 种机型的试验平均值分别为 1.477、1.303 和 1.743; 表现为 F 模型最大, P 模型次之, B 模型最小。

表 2 不同机型的总发电量与平均尾流损失变化拟合  
Tab. 2 Linear fitting of total power generation and mean wake loss changes of different wind turbines

方案	总发电量变化趋势拟合	平均尾流损失变化趋势拟合
WTG1-P模型	$Y=0.78X+0.23$	$Y=1.45X-0.47$
WTG1-B模型	$Y=0.81X+0.20$	$Y=1.43X-0.41$
WTG1-F模型	$Y=0.80X+0.21$	$Y=1.71X-0.70$
WTG2-P模型	$Y=0.77X+0.25$	$Y=1.52X-0.55$
WTG2-B模型	$Y=0.83X+0.17$	$Y=1.19X-0.13$
WTG2-F模型	$Y=0.81X+0.20$	$Y=1.67X-0.69$
WTG3-P模型	$Y=0.81X+0.20$	$Y=1.46X-0.48$
WTG3-B模型	$Y=0.83X+0.18$	$Y=1.29X-0.30$
WTG3-F模型	$Y=0.86X+0.15$	$Y=1.85X-0.86$

进一步进行逐机位的尾流分析, 以 WTG1 机型为例, 对不同规划容量情景下逐机位的尾流损失分布进行统计, 并用箱形图表示如图 4 所示。可以看到, 表示全体机位尾流从大到小排列前 25% 分位数的箱体上沿、表示后 25% 分位数的箱体下沿, 以及表示中位数的箱体内点状标记等一系列比平均值更具稳定性的统计特征值均随着规划容量增加而出现上升趋势, 印证了 3.1 节中相同场址内机组数目增多而导致更为严重尾流影响的分析结论。另外, 表示全体机位尾流中 99.7% 样本分布区间的箱体外上、下两条短线之间长度随着规划容量增加而变长, 说明最大、最小单机尾流之间的差异在扩大, 全体机位尾流分布的偏态进一步加剧, 出现了长尾效应。原

因在于阵列中位于上风向和场址边缘的少数机位可以一直维持着较高的发电效率(尾流损失低), 但场址内部和下风向的大部分机位受尾流影响出现较低发电效率(尾流损失高); 并且随着装机总数增加, 这部分高尾流损失机位数目增多, 最终导致了全体机位尾流分布的不平衡加剧。另一方面, 可以看到上述统计特征值的变幅在不同尾流模型中差异明显, 如 P 模型和 F 模型所形成的尾流分布偏度更大, F 模型中高尾流影响占比更大等, 原因在于不同尾流模型对单台机组尾流区以及多机组尾流相互影响的描述存在差异。

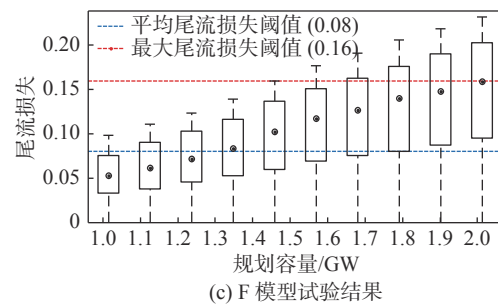
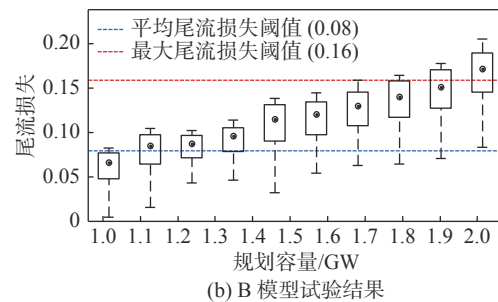
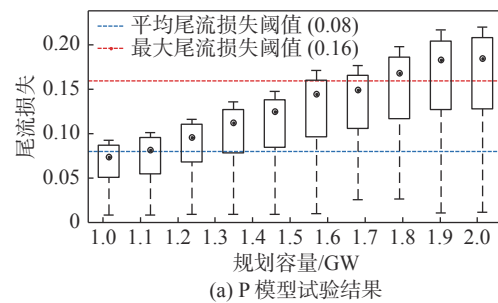


图 4 不同规划容量情景下的尾流分布变化

Fig. 4 Wake distribution changes in different planned capacity situations

除了导致机组发电效率下降, 尾流还会引发湍流强度以及机组疲劳载荷的增加, 从而影响机组的安全稳定运行, 为此需要在规划容量设置时考虑尾流损失的上限。《风电场微观选址技术规范》<sup>[21]</sup> 中建

议平均尾流损失 $<0.08$ ,在本文中全场平均尾流损失上限 $W_{mean}$ 设为 $0.08$ ;将 $2$ 倍 $W_{mean}$ 作为逐机位最大尾流损失上限 $W_{max}$ 。若考虑机组安全性约束,扩容引起的尾流损失增长不宜突破 $W_{mean}$ 和 $W_{max}$ 。由图4可知,不同尾流模型的试验结果均显示,本场址在基准容量之上可以适当扩容,但具体的扩容区间增幅受到 $W_{mean}$ 和 $W_{max}$ 的约束。WTG2、WTG3机位也显示出相似的分析结果,图略。进一步对比3种不同容量机型的潜在扩容区间,如表3所示,以 $W_{mean}$ 上限来看,WTG3机型的扩容区间比WTG1、WTG2机位多 $100$  MW;以 $W_{max}$ 上限来看,WTG3机型的扩容区间比WTG1、WTG2机位多 $100\sim 200$  MW。可以发现,随着机组单机容量增大,规划容量增幅出现小幅上升的倾向,相关形成机理已在3.1节进行了分析。

表3 尾流损失约束下的扩容区间对比

Tab. 3 Comparison of expansion range under wake loss constraint

方案	loss constraint		MW
	$W_{mean} \leq 0.08$ 的容量增幅	$W_{max} \leq 0.16$ 的容量增幅	
WTG1-P模型	100	500	
WTG1-B模型	100	600	
WTG1-F模型	200	500	
WTG2-P模型	100	400	
WTG2-B模型	100	500	
WTG2-F模型	200	400	
WTG3-P模型	200	600	
WTG3-B模型	200	700	
WTG3-F模型	400	700	

需要说明的是,由于国内关于大型海上风电场的研究尚在起步阶段,不同尾流模型在大型海上风电场的应用缺少验证,尚未有确切的评估结论,因此建议根据场址的风资源和水文气象条件,选择适合的尾流模型;或者采用多种尾流模型进行综合比较,避免应用单一模型所可能带来的扩容区间评估偏差。

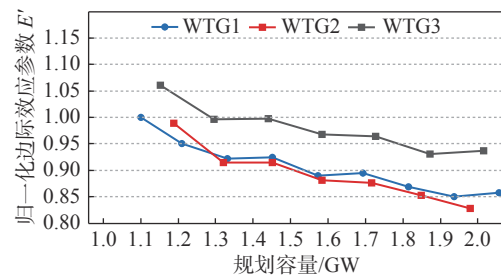
### 3.3 边际效应

随着装机数目和规划容量的增加,大型海上风电场工程的投资规模也发生变化,随之而来的投入产出比可能呈现与发电效益不同的变化趋势,为此

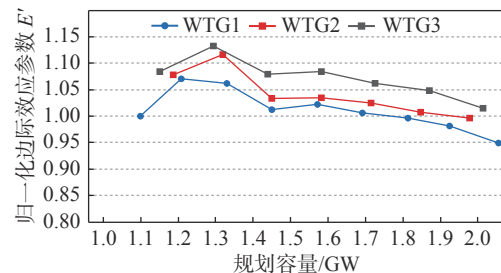
需要分析不同规划容量情景下的边际效应参数。

式(13)所定义的边际效应参数 $E$ ,实质是简化的投入产出比,即假定上网电价和单位千瓦投资均保持恒定,场址扩容带来的发电收益增量与建设规模扩大的投资增量之比,并且为了方便不同机型之间对比,进行了归一化处理。3种机型在不同规划容量情景下的边际效应参数 $E$ 变化趋势如图5所示。可以看到,在不同尾流模型下,随着规划容量的增加, $E$ 均出现下降趋势,其根本原因在于3.1节所分析的尾流损失导致发电量增量减少,从而导致边际效应参数中发电收益增幅不及工程投资增幅。但尾流模型的差异也影响了边际效应参数变化曲线的具体形态。

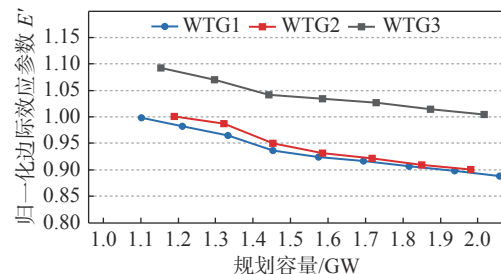
对比3种不同容量机型可以发现,WTG3机位的边际效应要显著优于其他机型,相同规划容量情景下,WTG3的边际效应参数 $E$ 要比WTG1、WTG2



(a) P模型试验结果



(b) B模型试验结果



(c) F模型试验结果

图5 不同规划容量情景下的边际效应参数变化

Fig. 5 Change of marginal utility parameters in different planned capacity situations

机型平均超出 0.063 ~ 0.081, 说明更大容量机型具有投入产出比评估上的潜在优势。因此, 在 3.2 节的潜在扩容区间中进一步引入边际效应判据, 当  $E > 1$ , 则认为规划容量扩容能够给原有工程带来高于某一预期的投入产出比, 具备一定的工程经济性; 反之, 则认为扩容无效。考虑机组安全性和工程经济性双重约束下的扩容区间称为有效容量增幅, 不同尾流模型试验结果的平均值显示: WTG1 ~ WTG3 机型取得的有效容量区间分别为 200 MW、300 MW 和 700 MW, 有效扩容区间随着机组单机容量增加而增加。

### 3.4 讨论

结合 3.1~3.3 节的分析可知, 本文所设置的试验结果显示, 在满足现有海上风电场外缘边线包络海域面积要求的基础上, 考虑发电效率、机组安全性与工程经济性等多重约束, 采用单机容量在 10 MW 以上机型进行开发时, 单个场址的最佳规划容量可以略高于现有基准值; 且机型的单机容量越大, 扩容区间出现同步增加的趋势, 对响应自然资源主管部门的最大限度集约节约用海要求亦有助益。值得注意的是, 本文仅限于单个场址情形, 未考虑千万千瓦基地内各个场址之间的相互影响, 发电收益与投资仅简单地假定为随容量线性增加, 与实际条件尚有差异。

大型海上风电场址规划容量分析与扩容区间的精确评估, 面临着诸多挑战。目前最为突出的是大型海上风电场的尾流评估方法与技术仍有较大不确定性, 对尾流损失的高估或者低估都将显著影响发电量计算以及连带的工程投资收益测算, 给规划容量的准确设置带来干扰。另一方面, 应用更大单机容量机型以及装机容量的提升, 有可能引起支撑结构、集电海缆、运输吊装等方面设计方案的调整甚至变更, 由此带来初期投资或后期运维费用的非线性增加也可能极大压缩有效扩容区间。

在下一步的研究中, 应发展相应的技术框架, 建立机组排布、尾流与发电量计算、集电线路拓扑设计、平准化度电成本计算等各个分析环节的数据与工具之间联系, 把单个场址的容量设置纳入十吉瓦基地的区域规划与场址细分工作中。充分利用海上风电机组大型化的技术红利, 挖掘规划场址存量资源, 通过优化提升场址规划装机容量, 协调海上风电

发展与集约节约用海要求, 更高质量地助力“双碳”目标实现。

## 4 结论

本文以某个 1 GW 典型场址为研究对象, 利用单机容量在 10 MW 以上的 3 种机型, 结合风资源图谱与多个海上风电场尾流模型, 进行了同场址规划容量从 1 GW 逐步扩容至 2 GW 的数值试验, 并分析了发电效益与边际效应, 取得如下结论:

1) 总发电量和平均尾流损失均随着规划容量的增加而增加, 但具体增幅差异显著。原因在于机组数目增加所带来的风能捕获增量被同时产生的更显著的尾流损失部分抵消; 在大型海上风电场容量设置中采用更大容量机型, 相同规划容量情景下的装机数目更少, 排布方案中的机位间距更大, 更有利于尾流损失的恢复与控制, 具有发电效率上的天然优势。

2) 在满足现有海上风电场外缘边线包络海域面积要求的基础上, 考虑发电效率、机组安全性与工程经济性等多重约束, 采用单机容量在 10 MW 以上机型进行开发时, 单个场址的最佳规划容量可以略高于现有基准值; 且机型的单机容量越大, 扩容区间出现同步增加的趋势, 更大容量机型具有投入产出比评估上的潜在优势。

3) 不同尾流模型对单台机组尾流区以及多机组尾流相互影响的描述存在差异, 尾流模型选择可能会影响容量设置的过程与最终结果, 应采用多种尾流模型进行综合比较, 避免应用单一模型所可能带来的扩容空间评估偏差。

### 参考文献:

- [1] 李志川, 胡鹏, 马佳星, 等. 中国海上风电发展现状分析及展望 [J]. *中国海上油气*, 2022, 34(5): 229-236. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2022.05.026.
- LI Z C, HU P, MA J X, et al. Analysis and prospect of offshore wind power development in China [J]. *China offshore oil and gas*, 2022, 34(5): 229-236. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2022.05.026.
- [2] 廖圣瑄, 陈可仁. 能源岛: 深远海域海上风电破局关键 [J]. *能源*, 2021(5): 46-49.
- LIAO S X, CHEN K R. Energy island: the key to breaking the



- offshore wind power situation in the deep sea [J]. *Energy*, 2021(5): 46-49.
- [3] 刘展志, 王诗超, 郝为瀚, 等. 大规模海上风电集中送出建设模式研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(1): 13-20. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.002).  
LIU Z Z, WANG S C, HAO W H, et al. Research on construction mode of large-scale offshore wind power centralized transmission [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(1): 13-20. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.002).
- [4] 邵先成, 王平. 自然资源框架下海上风电的管理困境及对策 [J]. *海洋开发与管理*, 2021, 38(9): 36-42. DOI: [10.20016/j.cnki.hykyfjgl.2021.09.006](https://doi.org/10.20016/j.cnki.hykyfjgl.2021.09.006).  
SHAO X C, WANG P. A study on dilemma of offshore wind power management under the framework of natural resources [J]. *Ocean development and management*, 2021, 38(9): 36-42. DOI: [10.20016/j.cnki.hykyfjgl.2021.09.006](https://doi.org/10.20016/j.cnki.hykyfjgl.2021.09.006).
- [5] 张旭, 罗先觉, 赵峥, 等. 以风电场效益最大为目标的风电装机容量优化 [J]. *电网技术*, 2012, 36(1): 237-240. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2012.01.042](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2012.01.042).  
ZHANG X, LUO X J, ZHAO Z, et al. Installed capacity optimization of wind turbine generators considering maximum economic benefit of wind farm [J]. *Power system technology*, 2012, 36(1): 237-240. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2012.01.042](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2012.01.042).
- [6] 江岳文, 陈晓榕. 基于D-U空间混合多属性决策的风电场装机容量优化 [J]. *电网技术*, 2019, 43(12): 4451-4460. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0136](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0136).  
JIANG Y W, CHEN X R. Optimization of installed capacity of wind farm with mixed multiple attribute decisions based on D-U space [J]. *Power system technology*, 2019, 43(12): 4451-4460. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0136](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0136).
- [7] 黄杨, 陈红坤, 回俊龙, 等. 考虑风电接纳能力约束的风机装机容量优化 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2015, 48(6): 842-847. DOI: [10.14188/j.1671-8844.2015-06-019](https://doi.org/10.14188/j.1671-8844.2015-06-019).  
HUANG Y, CHEN H K, HUI J L, et al. Wind power capacity optimization considering accommodation of wind power constraints [J]. *Engineering journal of Wuhan university*, 2015, 48(6): 842-847. DOI: [10.14188/j.1671-8844.2015-06-019](https://doi.org/10.14188/j.1671-8844.2015-06-019).
- [8] 姜欣, 陈红坤, 回俊龙, 等. 计及弃风的风电场最优装机容量 [J]. *电工技术学报*, 2016, 31(18): 160-168. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6753.2016.18.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6753.2016.18.020).  
JIANG X, CHEN H K, HUI J L, et al. Optimal installed capacity of wind farm considering wind power curtailment [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2016, 31(18): 160-168. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6753.2016.18.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6753.2016.18.020).
- [9] 江岳文, 张金辉. 考虑风电接纳水平及负荷增长的海上风电场多阶段规划 [J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(2): 85-91, 111. DOI: [10.16081/j.epae.202111018](https://doi.org/10.16081/j.epae.202111018).  
JIANG Y W, ZHANG J H. Multi-stage planning of offshore wind farm considering wind power accommodation level and load increase [J]. *Electric power automation equipment*, 2022, 42(2): 85-91, 111. DOI: [10.16081/j.epae.202111018](https://doi.org/10.16081/j.epae.202111018).
- [10] 张金辉, 江岳文. 考虑市场竞价与接纳的海上风电场装机容量及布局分层优化 [J]. *电网技术*, 2020, 44(10): 3837-3845. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2019.2441](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.2441).  
ZHANG J H, JIANG Y W. Hierarchical optimization of installed capacity and layout of offshore wind farm considering market bidding and acceptance [J]. *Power system technology*, 2020, 44(10): 3837-3845. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2019.2441](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.2441).
- [11] MORTENSEN N G, DAVIS N, BADGER J, et al. Global wind atlas: validation and uncertainty [R]. Denmark: Technical University of Denmark, 2017.
- [12] 中国电气工业协会. 海上风电场微观选址阶段发电量计算技术规范: T/CEEIA 561—2021 [S]. 北京: 科学技术文献出版社, 2022.  
China Electrical Industry Association. Technical specification for power generation calculation at micro-siting stage of offshore wind farms: T/CEEIA 561—2021 [S]. Beijing: Scientific and Technical Literature Press, 2022.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海上风力发电场设计标准: GB/T 51308—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of offshore wind farm: GB/T 51308—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [14] 崔冬林, 沙伟, 刘树洁, 等. 海上相邻风电场间的“尾流效应”实例分析 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(1): 21-28. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.003).  
CUI D L, SHA W, LIU S J, et al. Case study of "wake effect" of adjacent offshore wind farms [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(1): 21-28. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.003).
- [15] JENSEN N O. A note on wind generator interaction [R]. Denmark: Risø National Laboratory, 1983.

- [16] 刘沙, 王中权, 蔡彦枫. 海上风电场运行期尾流损失分析 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(1): 66-70. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.011](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.011).  
LIU S, WANG Z Q, CAI Y F. Wake loss analysis of offshore wind farm in operation [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(1): 66-70. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.011](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.011).
- [17] BASTANKHAH M, PORTÉ-AGEL F. A new analytical model for wind-turbine wakes [J]. *Renewable energy*, 2014, 70: 116-123. DOI: [10.1016/j.renene.2014.01.002](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.002).
- [18] 张晓东, 张梦雨, 白鹤. 基于高斯分布的风电场尾流效应计算模型 [J]. *华北电力大学学报*, 2017, 44(5): 99-103. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2691.2017.05.14](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2691.2017.05.14).  
ZHANG X D, ZHANG M Y, BAI H. Wind farm wake effect calculation model based on Gaussian distribution [J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2017, 44(5): 99-103. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2691.2017.05.14](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2691.2017.05.14).
- [19] 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(增刊2): 186-198. DOI: [10.3969/j.issn.1000-4882.2020.z2.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-4882.2020.z2.020).  
BAI H M, WANG N N, WAN D C. Numerical solutions of offshore wind farm based on different analytical wake models [J]. *Shipbuilding of China*, 2020, 61(Suppl. 2): 186-198. DOI: [10.3969/j.issn.1000-4882.2020.z2.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-4882.2020.z2.020).
- [20] 朱金阳, 黎波. Fuga模型原理浅析 [J]. *风力发电*, 2017(5): 27-31.  
ZHU J Y, LI B. Analysis of the principle of Fuga model [J]. *Wind power*, 2017(5): 27-31.
- [21] 国家能源局. 风电场工程微观选址技术规范: NB/T 10103—2018 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.  
National Energy Administration. Technical code for micro-siting of wind power projects: NB/T 10103—2018 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2019.

## 作者简介:



蔡彦枫

蔡彦枫 (第一作者, 通信作者)

1986-, 男, 高级工程师, 南京大学大气物理学与大气环境硕士, 主要从事海上风资源评估、台风影响论证及微观选址技术研究工作 (e-mail) caiyanfeng@gedi.com.cn。

## 徐初琪

1976-, 男, 高级工程师, 大学本科, 主要从事海洋钢材腐蚀评估及防护工作 (e-mail) xuchuqi@xmsunrui.com.cn。

## 汤东升

1961-, 男, 正高级工程师, 主要从事海上风电项目技术研究和审核工作 (e-mail) tangdongsheng@gedi.com.cn。

## 王晴勤

1982-, 男, 高级工程师, 华南理工大学工学硕士, 主要从事海上风电规划与总体设计工作 (e-mail) wangqingqin@gedi.com.cn。

## 项目简介:

项目名称 大规模海上风电场细分场址及容量控制指标研究 (EV06731W)

承担单位 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

项目概述 项目主要针对大规模海上风电场址细分影响因素与规划容量范围开展研究, 分析海上风电规划层级体系、单个细分场址控制性指标与用海原则, 用以支持各类型海上风电场址和风电基地规划及研究, 海上风电规划修编工作。

主要创新点 (1)初步提出海上风电规划的体系建议, 为规范海上风电规划提供理论支撑; (2)全面确定细分场址影响因素, 量化细分场址单位面积的容量指标; (3)提出定性及量化场址边界规划条件指标的具体控制标准, 对千万千瓦海上风电基地等大型规划作出具体的指标控制要求。

(编辑 孙舒)