

# 基于鲸鱼优化算法的串列风力机 主动尾流控制策略

刘一格<sup>1</sup>, 赵振宙<sup>1\*</sup>, 马远卓<sup>1</sup>, 凌子焱<sup>1</sup>, 刘惠文<sup>2</sup>, 刘岩<sup>1</sup>, 罗乔<sup>3</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏省南京市 211100; 2. 河海大学海洋与近海工程研究院, 江苏省南通市 226004; 3. 南京工业职业技术大学江苏风力发电工程技术中心, 江苏省南京市 210023)

## Active Wake Control Strategy of Tandem Wind Turbines Based on Whale Optimization Algorithm

LIU Yige<sup>1</sup>, ZHAO Zhenzhou<sup>1\*</sup>, MA Yuanzhuo<sup>1</sup>, LING Ziyang<sup>1</sup>, LIU Huiwen<sup>2</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>, LUO Qiao<sup>3</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu Province, China; 2. Institute of Ocean and Offshore Engineering, Hohai University, Nantong 226004, Jiangsu Province, China; 3. Jiangsu Wind Power Engineering Technology Center, Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing 210023, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** Active wake control technology mitigates the adverse effects of upstream turbine wakes on downstream turbines by coordinating the operational status of each turbine in a wind farm, thereby enhancing the power generation. To explore the patterns of wake control, 10 wind turbines in tandem are taken as the research object. The Jensen wake model and square summation superposition model are used to calculate the wake velocity distribution, and whale optimization algorithm (WOA) is used as the optimization method for axial induction factor distribution whose results are compared with those of particle swarm optimization algorithm (PSO). The results show that the WOA performs better and converges faster than PSO, resulting in a 5.63% to 42.76% increase in the wind farm power output. The distribution pattern of axial induction factors and the optimization effect on wind farm output power are minimally affected by inflow wind speed but are significantly influenced by the number of turbines and their streamwise spacing.

**KEY WORDS:** wind turbine; active wake control; wake model; whale optimization algorithm

**摘要:** 主动尾流控制技术通过协调风电场中每台风力机的运行状态, 降低上游机组尾流对下游机组的负面影响, 进而提高整场发电功率。为探究尾流控制的规律, 以 10 台串

列排布的风力机为研究对象, 采用 Jensen 尾流模型与平方和叠加模型计算尾流速度分布, 通过鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)优化风力机的轴向诱导因子分布, 并与粒子群优化算法(particle swarm optimization algorithm, PSO)对比。研究结果显示: WOA 优化效果更好, 收敛速度更快, 使风电场输出功率提高了 5.63%~42.76%; 轴向诱导因子的分布规律和风电场输出功率的优化效果受入流风速影响较小, 受风力机的数量及流向间距影响较大。

**关键词:** 风力机; 主动尾流控制; 尾流模型; 鲸鱼优化算法

## 0 引言

风能是清洁发电的可再生能源, 越来越受重视, 风力机是利用风能发电的最主要方式<sup>[1-3]</sup>。风电场中、下游风力机受上游风力机尾流影响显著, 其疲劳载荷增加, 故障率增加, 使用寿命减少, 所接收的风能质量变差, 发电功率降低。风电场布局优化方法通过对风力机的位置进行调整, 以降低尾流影响, 但对于已经建成的风电场, 这种方法难以实现。而主动尾流控制(active wake control, AWC)技术对已建成的风场仍能有效改善其尾流影响, 提高整场发电效率。该技术通过偏航控制、变桨控制、扭矩控制、仰角控制以及锥角控制<sup>[4-6]</sup>调整风力机的运行状态, 实现对尾流分布状态的调整。

从尾流被控制后的状态来看, AWC 技术可分为轴向诱导因子控制(axial induction control, AIC)和尾流重定向控制(wake redirection control, WRC)

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51876054); 江苏风力发电工程技术中心开放基金(ZK22-03-01); 南通市科技项目(JC2021108)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51876054); Open Fund of Jiangsu Wind Power Engineering (ZK22-03-01); Science and Technology Project of Nantong City (JC2021108)。

两种方法<sup>[7]</sup>。AIC 方法通过改变风力机转矩和桨距角，控制尾流强度，改变尾流的速度亏损，使下游风力机获得更高的风能；WRC 方法采用偏航控制，使上游风力机的尾流区域尽量偏离下游风力机，降低尾流影响<sup>[8]</sup>。相比于 WRC 方法，AIC 方法的实现方式更灵活多变，无需考虑尾流中心的偏移，且能降低上游风力机的部分载荷。基于以上优势，AIC 方法在 AWC 领域得到充分应用。

众多学者对 AIC 方法展开了大量研究。Jason<sup>[9]</sup>等使用博弈论和不考虑风力机间气动相互作用的无模型算法，根据每台风力机的局部信息调整其自身的轴向诱导因子，对风电场输出功率进行了优化。Behnood 等<sup>[10]</sup>将单台风力机的转速和桨距角作为决策变量，以粒子群优化算法(particle swarm optimization algorithm, PSO)为优化算法，对由 16 台风力机组成的风电场进行了优化研究，结果表明，微降上游风力机的输出功率可提高风电场的输出功率。Bossanyi 和 Ruisi<sup>[11]</sup>开发了 LongSim 软件，针对 Sedini 风电场的 9 台风力机进行 AIC 方法的设计和测试，测试发现在部分风况下，每台风力机平均功率增加 1.7%~2.4%。Shen<sup>[12]</sup>采用 PARK 模型和基于能量守恒的尾流叠加模型，以 Horns-Rev 海上风电场为例，采用随机点法、PSO 和模式搜索算法对所建立模型进行优化，与单机最大功率点跟踪法进行了比较。测试结果表明，PSO 和模式搜索算法具有较好的性能，风电场输出功率增加了约 10%；其中 PSO 计算量较小，模式搜索算法优化结果更好。上述文献主要集中在 AIC 方法的合理性和优化效果的分析。然而，优化后风力机运行状态的分布规律和优化机理尚不清晰，需要深入探究。

本文基于改进 Jensen 尾流模型与平方和尾流叠加模型，建立考虑尾流影响的风电场输出功率模型；采用比 PSO 性能更优越的鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)对风电场尾流进行优化控制，并与 PSO 优化结果对比分析，揭示入流风速、串联风力机数量以及流向间距对风电场尾流控制与功率优化的影响规律。本文使用的算法基于 Python3.10.2 实现。

## 1 模型建立

### 1.1 改进 Jensen 尾流模型

工程尾流模型用于描述风力机尾流结构，分析风力机的尾流速度分布<sup>[13]</sup>。尾流模型预测时间较计

算流体力学大大缩短，在 AWC 中被广泛使用。目前，常用的尾流模型有以湍流喷射相似理论为基础的 Lissaman 尾流模型、基于地球自转拖拽定律和尾流非线性扩张的 Frandsen 模型<sup>[14]</sup>、基于质量守恒的 Jensen 模型<sup>[15]</sup>等。其中，Jensen 模型是常用的工程尾流模型，被广泛用于风资源评估软件中，如 WASP。Jensen 模型形式简单，易于编码，计算效率高，在平坦地形上具有一定精度<sup>[16]</sup>。

Jensen 模型是一维线性尾流模型(图 1)，其提出基于 3 个假设<sup>[15]</sup>：尾流初始直径数值大小等于风轮直径；尾流边界呈线性增长；在尾流区域的剖面上速度分布是均匀的。该模型假定  $U=1/3U_0$  (式中： $U$  是风轮后风速； $U_0$  为来流风速)，不能满足多数情况。故本文采用改进 Jensen 尾流模型<sup>[13]</sup>对风力机的尾流速度进行计算，其表达式为：

$$U_{\text{wake}} = U_0 \left[ 1 - \frac{\sqrt{1 - C_T}}{(r_{\text{wake}}/r_0)^2} \right] \quad (1)$$

$$r_{\text{wake}} = r_0 + k_w x \quad (2)$$

式中： $x$  为风力机下游的距离； $U_{\text{wake}}$  为尾流速度； $r_0$  为风轮半径； $r_{\text{wake}}$  为  $x$  位置处的尾流半径； $C_T$  为风力机推力系数； $k_w$  为尾流膨胀系数，根据经验选取，陆上风力机的  $k_w$  值一般取为 0.075，海上风力机一般取值为 0.05<sup>[17]</sup>。若风电场的地表粗糙度已知，可采用经验公式(3)进行计算<sup>[17]</sup>。

$$k_w = 0.5 / \ln(z/z_0) \quad (3)$$

式中： $z$  为风力机轮毂高度； $z_0$  为地表面粗糙度。

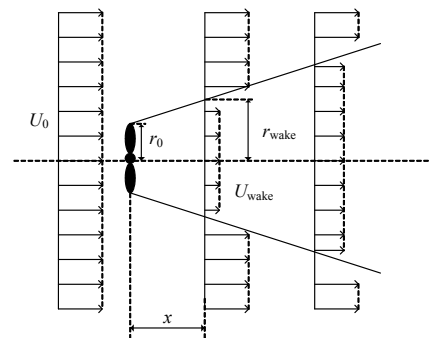


图 1 Jensen 尾流模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Jensen wake model

### 1.2 尾流叠加模型

在风电场中，风力机可能会受到上游多台风力机的尾流影响。尾流叠加模型可用来描述上游风力机尾流叠加效应。

当每台上游风力机在当前位置的尾流亏损值计算完毕，采用平方和叠加模型<sup>[17]</sup>将这些亏损值进行叠加，平方和叠加模型如式(4)所示。

$$\left(1 - \frac{U_i}{U_0}\right)^2 = \sum_{j=1}^{i-1} \left(1 - \frac{U_{ij}}{U_0}\right)^2 \quad (4)$$

式中： $i$ 是当前计算的风力机序号； $j$ 是上游的风力机序号，在顺风向上 $i$ 大于 $j$ ； $U_i$ 是第 $i$ 台风力机在多尾流影响下的入流风速； $U_j$ 是上游第 $j$ 台风力机的入流风速； $U_{ij}$ 是第 $j$ 台风力机在第 $i$ 台风力机处的尾流速度。需要注意的是，对于最上游的风力机而言，入流风速即环境风速， $U_j$ 等于 $U_0$ ，否则， $U_j$ 为第 $j$ 台风力机在尾流影响下的入流风速。

### 1.3 风电场输出功率模型

风电场输出功率计算方法如下：确定每台风力机在流向上的迎风顺序，根据迎风顺序和尾流模型计算每台风力机的入流风速和输出功率。

第 $i$ 台风力机的输出功率由式(5)计算：

$$P_i = \frac{1}{2} \rho S_i U_i^3 C_p \quad (5)$$

式中： $\rho$ 为空气密度； $S_i$ 为第 $i$ 台风力机的风轮面积； $C_p$ 为风能利用系数。

风电场输出功率 $P_{WF}$ 采用式(6)计算：

$$P_{WF} = \sum_{i=1}^N P_i \quad (6)$$

式中 $N$ 为风电场中风力机的数量。

### 1.4 优化变量选择及模型应用方法

轴向诱导因子 $a$ 是风轮处轴向诱导速度与风轮前来流速度之比，表示来流速度在风轮处的衰减率。由动量定理知， $a$ 、 $C_p$ 和 $C_T$ 满足以下关系：

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (7)$$

$$C_T = 4a(1-a) \quad (8)$$

确定轴向诱导因子后，可结合式(1)和(8)计算尾流速度分布，结合式(5)和(7)计算输出功率。

对式(7)求导，令导数为0，可得当 $a=1/3$ 时， $C_p$ 取最大值0.593，考虑到变量的实际物理意义，取 $a$ 的范围为0~0.33。由式(7)和(8)知，由 $a$ 可计算 $C_p$ 、 $C_T$ ，且当 $0 < a < 0.33$ ， $C_p$ 和 $C_T$ 均随 $a$ 单调递增，每个 $a$ 对应唯一的 $C_p$ 和 $C_T$ ，故 $a$ 的取值可以直接反映 $C_p$ 和 $C_T$ 的大小，如图2所示。综上，选择轴向诱导因子 $a$ 作为优化变量。

需要注意： $a$ 不是风力机系统可以直接控制的变量，优化得到的 $a$ ，需要通过调节风力机的转速和桨距角来间接实现。进一步地，风力机转速的变化体现为叶尖速比的变化。 $C_p$ 与叶尖速比 $\lambda$ ，桨距角 $\beta$ 的关系<sup>[18]</sup>如式(9)所示：

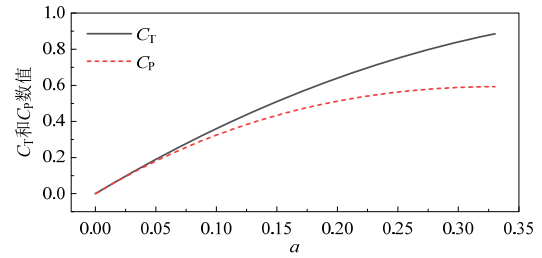


图2  $a$ 与 $C_p$ 、 $C_T$ 的关系

Fig. 2 The relation of  $a$  to  $C_p$  and  $C_T$

$$C_p = (0.44 - 0.167\beta) \cdot \sin\left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\lambda}\right] - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (9)$$

由式(9)知，可以由多个 $\lambda$ 和 $\beta$ 的组合实现指定的 $C_p$ 。在风力机实际控制时，考虑到机组的疲劳载荷以及控制的稳定性和快速性，优先对转速进行调节，若转速调节无法满足要求，再进行变桨调节。

## 2 优化算法

风电场输出功率模型是多参数耦合的非线性模型，使用常规优化方法难以获得较好的优化效果，因此使用群智能优化算法。

### 2.1 鲸鱼优化算法

WOA优化方法于2016年由Seyedali Mirjalili教授<sup>[19]</sup>提出。WOA是模拟鲸鱼群体包围、追捕猎物的群智能优化算法。该算法原理简单，易于编程实现，设置参数少，其求解精度和收敛速度优于PSO和引力搜索算法<sup>[20]</sup>。WOA算法假设鲸鱼捕捉的猎物为最优解，鲸鱼所在位置为潜在解。每次迭代时，通过随机数 $p$ 的取值和系数向量 $A$ 的模来决定每头鲸鱼的位置更新策略。随着迭代的进行，鲸鱼种群不断向最优解靠拢。

鲸鱼位置的更新公式<sup>[19]</sup>如下：

$$X(t+1) = \begin{cases} X^*(t) - A \cdot D, & p < 0.5 \\ D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X^*(t), & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

式中： $t$ 为迭代次数； $p$ 为[0, 1]之间的随机数，当 $p \geq 0.5$ 时，采用螺旋更新的方式，当 $p < 0.5$ 时用种群中其他鲸鱼的位置进行更新； $l$ 为[-1, 1]之间的随机数； $b$ 为限定对数螺旋形状的常数，一般直接取1即可； $X^*$ 为猎物位置； $D$ 和 $D'$ 可分别用式(11)和(12)计算：

$$D = |C \cdot X^*(t) - X(t)| \quad (11)$$

$$D' = |X^*(t) - X(t)| \quad (12)$$

式(10)中的 $A$ 和式(11)中的 $C$ 为系数向量，可由式(13)和(14)计算得：

$$A = 2a_c \cdot r_1 - a_c \quad (13)$$

$$C = 2 \cdot r_2 \quad (14)$$

式中： $r_1, r_2$ 为[0, 1]之间的随机向量； $a_c$ 为收敛因子，随着迭代次数增加，从 2 线性减小到 0，即：

$$a_c = 2 - (2t)/t_{\max} \quad (15)$$

式中  $t_{\max}$  为预设的最大迭代次数。

当  $p < 0.5$ 、 $|A| \geq 1$  时，随机选择种群中一头鲸鱼的位置进行更新：

$$X(t+1) = X_{\text{rand}}(t) - A \cdot D \quad (16)$$

此时，

$$D = |C \cdot X_{\text{rand}}(t) - X(t)| \quad (17)$$

式中  $X_{\text{rand}}$  为种群中随机选择的鲸鱼位置。当  $p < 0.5$ 、 $|A| < 1$  时，用历史最优鲸鱼的位置更新。

WOA 执行过程为：首先，随机生成指定数量的鲸鱼种群并计算每头鲸鱼对应的适应度值。然后，判断当前计算是否满足既定的迭代终止条件，若不满足则用上述计算方法对种群中每头鲸鱼的位置进行更新，并记录下本次更新中最优鲸鱼的位置，否则终止计算，种群中历史最优鲸鱼所对应的适应度值即本次优化结果。WOA 计算流程如图 3 所示。

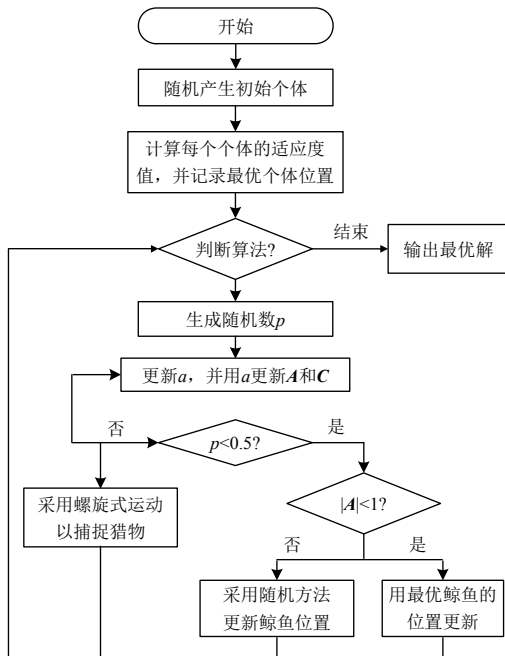


图 3 鲸鱼优化算法流程图

Fig. 3 WOA flow chart

## 2.2 算法性能对比

目前 AIC 使用的群智能算法多为 PSO。本节对比 PSO 和 WOA 两种算法，以风电场输出功率最大为优化目标，以轴向诱导因子为决策变量，在种群规模为 30，最大迭代次数为 1000，解空间范围为

0~0.33 的条件下进行优化计算。种群规模与最大迭代次数根据经验选取，若取值较小，无法确保获得预期的优化效果；若取值较大，则浪费计算资源。

丹麦 Horns Rev<sup>[21]</sup>风电场由 8 行 10 列(共 80 台)风力机组成，针对其中 10 台串联排布的 V80 风力机展开研究。V80 风力机由丹麦 Vestas 公司生产，风轮直径为 80 m，额定风速为 15 m/s，切入风速为 4 m/s，切出风速为 25 m/s，额定容量为 2 MW，轮毂高度为 70 m<sup>[10]</sup>。如图 4 所示，在 270°风向上，风力机间距为 7D，即 7 倍风轮直径，设置入流风速为 8.5 m/s。

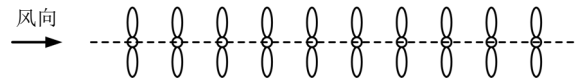


图 4 风力机排布示意图

Fig. 4 Layout diagram of wind turbines

两种优化算法计算结果的对比如图 5 所示，WOA 优化结果为 7.567 MW，PSO 优化结果为 7.548 MW。相比于 PSO 优化结果，WOA 优化结果提升了 0.252%。另外，从图 5 可以看出，迭代前期 WOA 的收敛速度快于 PSO。最后，由于求解的模型维数较高，参数耦合复杂，PSO 易陷入局部最优，大概率导致单次的优化结果较差，WOA 则可以克服该问题。因此，本文选用 WOA 来进行优化计算。

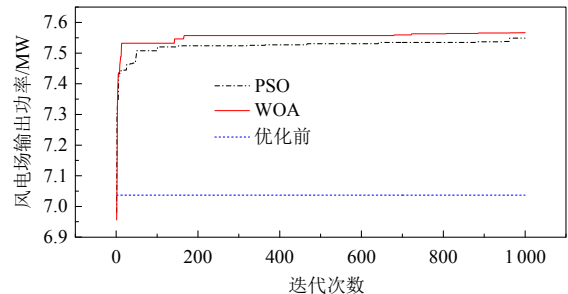


图 5 WOA 和 PSO 的收敛曲线对比

Fig. 5 Comparison of convergence curves of WOA and PSO

## 2.3 算法优化效果验证

采用 2.2 节所述的计算条件，在 0~0.33 范围内，随机生成 10000 组轴向诱导因子(每组有 10 个轴向诱导因子，对应 10 台风力机)，计算并统计每组轴向诱导因子所对应的风电场输出功率。对比 WOA 优化控制策略、最大功率点跟踪(maximum power point tracing, MPPT)控制策略( $a$  取 0.33)、随机轴向诱导因子控制策略下的风电场输出功率。结果如图 6 所示，WOA 优化控制策略最优，其次是 MPPT 控制策略，随机生成的控制策略表现最差。有极少部分随机生成控制策略下的输出功率大于 MPPT 控

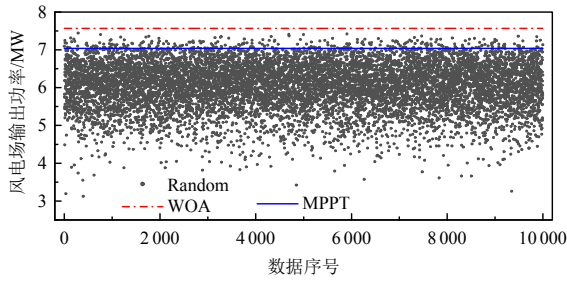


图6 WOA 优化效果验证

Fig. 6 WOA optimization effect verification

制策略结果，但全部劣于 WOA 优化结果。

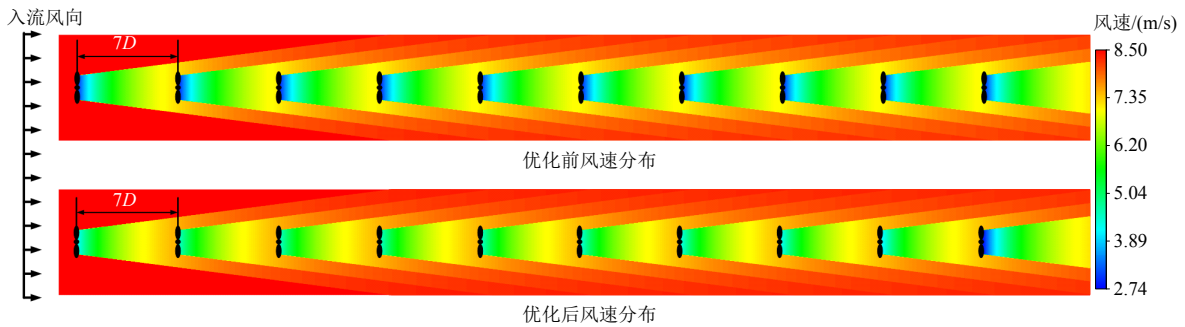


图7 优化前后的风电场轮毂高度处速度云图

Fig. 7 Velocity contour maps at hub height of the wind farm before and after optimization.

AIC 优化牺牲上游风力机的部分输出功率，改善下游风力机的尾流亏损。单台风力机优化前后的功率输出对比如图 8 所示，除第 1 台风力机的输出功率较优化前下降，其余风力机的输出功率均有提升。此外，如图 9 所示，经 AIC 优化后，风力机输

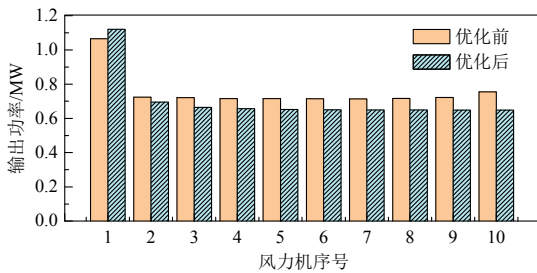


图8 优化前后单台风力机的输出功率对比图

Fig. 8 Output power comparison diagram of a single wind turbine before and after optimization

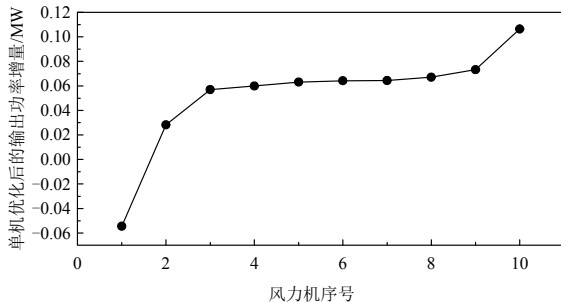


图9 单机优化后输出功率增量图

Fig. 9 Output power increment diagram of a single wind turbine after optimization

绘制优化前(MPPT 控制策略)的风电场速度云图及用 WOA 做 AIC 优化后的风电场速度云图，如图 7 所示。在优化前，风力机尾流区内风速较低，下游风力机的入流风速在尾流影响下只能达到 7.085~7.252 m/s，相比于 8.5 m/s 的环境入流风速亏损较大。因为最后一台风力机无需考虑其尾流对下游风力机的影响，可以保持在 MPPT 状态下运行，故优化后，最后一台风力机的尾流区仍存在明显的低风速区域。而其余风力机的尾流速度均得到改善，下游风力机的入流风速提高到 7.454~7.548 m/s。

输出功率的增量随风力机迎风顺序的增加而增加。

### 3 优化结果分析

一方面，风电场输出功率模型参数耦合较为复杂，单次的计算可能会陷入局部最优，导致优化效果很差。另一方面，WOA 在不同工况下的性能表现不同，导致最终的结果分析出现偏差。为解决以上问题，确保 AIC 优化后风力机运行状态规律的准确性，需对大量优化计算的结果进行统计分析。

#### 3.1 优化结果统计分析方法

观察大量 WOA 及 PSO 优化结果可知：当收敛代数越接近预设最大迭代次数，优化结果越好。故将单次计算的收敛效率作为权值，对计算结果取加权平均，来削弱算法早熟以及随机性的负面影响。对于第  $i$  台风力机，其轴向诱导因子取值为

$$a_i = \sum_{k=1}^M \frac{t_k}{t_{\max}} a_{i,k} \quad (18)$$

式中： $a_{i,k}$  为第  $i$  台风力机第  $k$  次计算的轴向诱导因子； $t_k$  为第  $k$  次计算的收敛代数； $M$  为计算总次数。

优化结果统计分析的过程为：1) 设定最大计算次数；2) 反复用 WOA 对风电场输出功率模型进行优化，每次优化计算结束后，记录本次计算结果并判断是否达到最大计算次数，若未达到，进行下

一次计算，否则终止计算。3) 整合所有计算数据并进行加权平均处理。

### 3.2 统计方法验证

设置最大计算次数为 1000 次，按 2.2 节设置的条件进行重复优化计算。每隔 25 次，用 3.1 节所述的统计方法对已获得的计算结果进行统计。

选择图 4 中沿风向第 5、6、7 台风力机，统计其轴向诱导因子如图 10 所示。当计算次数较少时，3 台风力机的轴向诱导因子取值均产生一定波动，直至计算次数达到 500 时，趋于稳定。另外，统计风电场输出功率如图 11 所示，当计算次数较少时，风电场输出功率有波动较大；随计算次数增加，输出功率逐渐稳定，直至计算次数达到 600 时，达到稳定状态。综上，对本研究所建立的模型以及统计方法，当计算次数大于等于 600 时，可得到稳定的规律。为确保计算结果的准确性，节省计算资源，3.3—3.5 节均设置最大计算次数为 600 次。

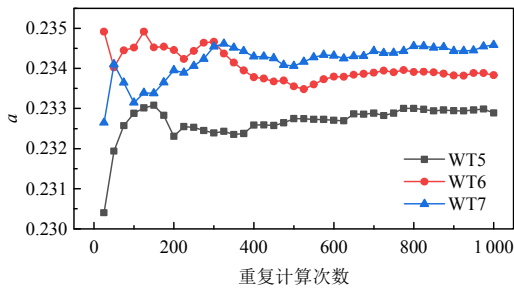


图 10 单机轴向诱导因子取值稳定性

Fig. 10 Stability of  $a$  for a single wind turbine

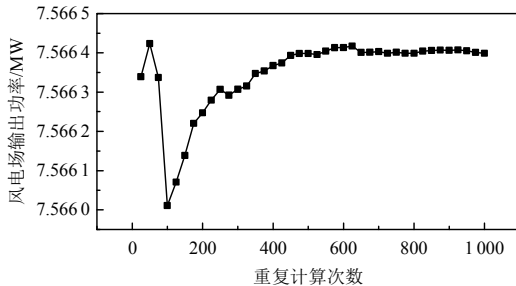


图 11 风电场输出功率稳定性

Fig. 11 Stability of power output of wind farm

### 3.3 入流风速的影响规律

风力机启动过程由先到后可分为定  $C_p$ 、定转速、定功率 3 个阶段，AWC 技术主要作用在定  $C_p$  阶段。分别设置入流风速为 4、6、8.5 m/s 进行优化计算，结果如图 12 所示。3 种风速下，优化后轴向诱导因子的分布高度相似，呈勺形分布。尽管风速变化对风力机的输出功率有很大影响，但对优化后轴向诱导因子的分布规律影响很小。

如表 1 所示，入流风速越大，风电场输出功率

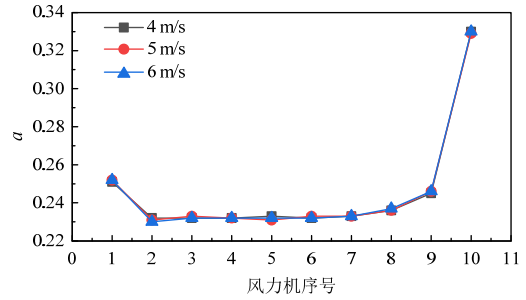


图 12 不同风速下的轴向诱导因子分布

Fig. 12 Distribution of  $a$  under different wind speeds

表 1 不同风速下的优化效果

Table 1 Optimization amplitude at different wind speeds

$U_0/(m/s)$	优化前	PSO 优化后	WOA 优化	WOA 优
	$P_{WF}/MW$	$P_{WF}/MW$	后 $P_{WF}/MW$	化幅度/%
4	0.733	0.788	0.789	7.526
6	2.475	2.661	2.661	7.524
8.5	7.037	7.566	7.566	7.524

越高，优化提高的绝对值越大，但 3 种入流风速下相对的优化幅度基本一致，略高于 7.52%。

由式(1)知，入流风流经不同运行状态下的风力机后，风速产生不同程度的折损。基于式(1)的 AIC 方法通过改变轴向诱导因子来调整每台风力机的运行状态，进而改变对应的风速折损。Jensen 模型没有建立入流风速与其折损程度的联系，故入流风速的改变对优化后轴向诱导因子的分布与风电场输出功率的优化幅度影响很小。

### 3.4 串联风力机数量的影响规律

依次设置风力机数量为 5~10 台进行优化计算，结果如图 13 所示，优化后轴向诱导因子的分布趋势无明显变化，第 1、2 和最后 1 台风力机的轴向诱导因子取值基本不发生变化。尽管 AIC 方法将首台风力机的输出功率略微降低以改善尾流损失，但首台风力机的风资源是最好的，从整场输出功率最大的角度来看，要在一定程度上保证首台风力机的充分出力。风力机的数量越靠近下游，其尾流带来

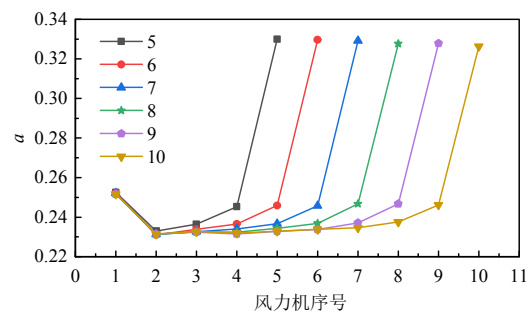


图 13 不同风力机数量下的轴向诱导因子分布

Fig. 13 Distribution of  $a$  under different number of wind turbines

的负面影响越小,可以适当提高其出力,在图中体现为从第2台风力机开始,轴向诱导因子逐渐提高,直至最后1台风力机的轴向诱导因子始终保持0.33,即保持MPPT状态。

在上述计算条件下,对比了不同风力机数量下的风电场输出功率优化效果,如表2所示。当串联风力机数量为5~10台时,对比优化前的风电场输出功率,优化后的风电场输出功率相对的提升幅度在5.63%~7.52%之间。随着风力机数量的增加,优化空间更大,优化效果更好。

表2 不同风力机数量下的优化效果

Table 2 Optimization at different number of wind turbines

风力机数量	优化前 $P_{WF}/MW$	PSO 优化后 $P_{WF}/MW$	WOA 优化后 $P_{WF}/MW$	WOA 优化幅度/%
5	3.789	4.002	4.002	5.627
6	4.440	4.716	4.716	6.217
7	5.090	5.429	5.429	6.665
8	5.739	6.141	6.142	7.013
9	6.388	6.854	6.854	7.295
10	7.037	7.566	7.566	7.524

### 3.5 串联风力机间距的影响规律

普遍认为风力机下游距离  $x$  在  $3D$  以内属于近尾流区,  $3D\sim 7D$  为远近尾流的过渡区,  $7D$  以外属于远尾流区。目前,风力机在主风向上布置的间距大致在  $3D\sim 7D$  之间。故依次设置串联风力机间距为  $3D\sim 7D$  进行优化计算,结果如图14所示。改变流向间距时,优化后轴向诱导因子在分布趋势上大致相同,但在取值上不同。随串联风力机流向间距的增加,风电场内的尾流具有充足的恢复条件,上下游风力机之间的气动作用减弱,风力机可以适当提高出力,在图中表现为:除最后1台风力机保持最大功率点运行,其余风力机的轴向诱导因子均增大0.02左右,若流向间距继续增大,直至尾流影响忽略不计时,每台风力机的轴向诱导因子可增至0.33(MPPT状态)。另外,在相同间距下,第2台至第9台之间的轴向诱导因子取值缓慢递增,如  $x=7D$  时,第2台至倒数第5台风力机的轴向诱导因子在0.231~0.238之间。

在上述条件下,对比不同流向间距下风电场输出功率的优化效果,如表3所示。当流向间距为  $3D\sim 5D$  之间时,风电场输出功率比优化前提高了7.52%~42.76%。流向间距的改变对优化效果产生明显影响。随流向间距增加,尾流的影响降低,风电

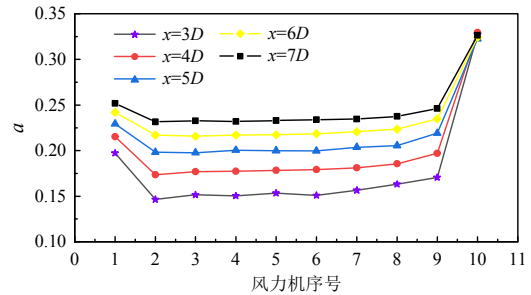


图14 不同流向间距下的轴向诱导因子分布

Fig. 14 Distribution of  $a$  under different stream distance

表3 不同流向间距下的优化效果

Table 3 Optimization at different stream distance

流向间距	优化前 $P_{WF}/MW$	PSO 优化后 $P_{WF}/MW$	WOA 优化后 $P_{WF}/MW$	WOA 优化幅度/%
3D	3.714	5.302	5.302	42.762
4D	4.787	5.999	6.000	25.340
5D	5.684	6.600	6.600	16.116
6D	6.425	7.119	7.119	10.798
7D	7.037	7.566	7.566	7.524

场输出功率的优化潜力降低,AIC的优化效果减弱。

采用3.1节的统计分析方法,对多次优化计算结果取加权平均值,弥补了PSO单次优化结果不可靠的缺陷,所以最终的PSO优化结果与WOA优化结果十分接近。从另一个角度来说,PSO优化结果验证了WOA优化结果的正确性和稳定性。

## 4 结论

1) WOA在AIC方法中能够发挥较好的优化效果。WOA可使风电场输出功率提高5.63%~42.76%,较AIC方法中常用的PSO,WOA的优化结果提升了0.252%,收敛速度更快,计算不易陷入早熟。

2) 当风速处于定  $C_p$  阶段时,风速对轴向诱导因子的分布影响较小。串联风力机数量的变化不会引起轴向诱导因子分布趋势的变化,除首尾风力机,其余位置风力机的轴向诱导因子取值根据其下游风力机数量进行一定程度的调整,下游风力机数量越少,轴向诱导因子取值越大。风力机间距对轴向诱导因子的取值影响非常显著,间距越大,轴向诱导因子取值越大。

3) 风电场输出功率的优化效果受风速改变影响较小,受风力机数量和间距影响较大。受风力机数量的影响,输出功率的优化效果在5.63%~7.52%之间,且随风力机数量的增加而增加。受间距的影响,输出功率的优化效果在7.52%~42.76%之间,且随流向间距的增加而减小。

## 参考文献

- [1] 江瑞芳, 赵振宙, 陈明, 等. 涡流发生器安装方式对风力机气动性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4639-4647.  
JIANG Ruifang, ZHAO Zhenzhou, CHEN Ming, et al. Influence of vortex generator installation methods on the aerodynamic performance of wind turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4639-4647(in Chinese).
- [2] 郑一丹, 刘惠文, 郑源, 等. 错列布局风电场尾流演变实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1463-1470.  
ZHENG Yidan, LIU Huiwen, ZHENG Yuan, et al. Experimental study on the wakes evolution of a staggered wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1463-1470(in Chinese).
- [3] 赵振宙, 曾冠毓, 王同光, 等. 基于转捩模型 Phase VI 风力机气动特性数值计算[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4739-4746, 4899.  
ZHAO Zhenzhou, ZENG Guanyu, WANG Tongguang, et al. Numerical simulation of aerodynamic characteristic of phase VI wind turbine based on transition model [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4739-4746, 4899(in Chinese).
- [4] MIAO Weipao, LI Chun, YANG Jun, et al. Numerical investigation of wake control strategies for maximizing the power generation of wind farm[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2016, 138(3): 034501.
- [5] NASH R, NOURI R, VASEL-BE-HAGH A. Wind turbine wake control strategies: a review and concept proposal[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 245: 114581.
- [6] BARTL J, SÆTRAN L. Experimental testing of axial induction based control strategies for wake control and wind farm optimization[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 753(3): 032035.
- [7] CHHOR J, MATSCHKE A, KIPKE V, et al. Operation and control strategies for wind energy conversion systems: review and simulation study[C]//Proceedings of the 2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies . Monte-Carlo: IEEE, 2019: 1-9.
- [8] JIMÉNEZ Á, CRESPO A, MIGOYA E. Application of a LES technique to characterize the wake deflection of a wind turbine in yaw[J]. Wind Energy, 2010, 13(6): 559-572.
- [9] MARDEN J R, RUBEN S D, PAO L Y. A model-free approach to wind farm control using game theoretic methods[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1207-1214.
- [10] BEHNOOD A, GHARAVI H, VAHIDI B, et al. Optimal output power of not properly designed wind farms, considering wake effects[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63: 44-50.
- [11] BOSSANYI E, RUISI R. Axial induction controller field test at Sedini wind farm[J]. Wind Energy Science, 2021, 6(2): 389-408.
- [12] SHEN Yu, XIAO Tannan, LV Qifeng, et al. Coordinated optimal control of active power of wind farms considering wake effect[J]. Energy Reports, 2022, 8 Suppl 1: 84-90.
- [13] 张晓东, 张镇. 半经验风力机尾流模型的研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(1): 101-105.  
ZHANG Xiaodong, ZHANG Zhen. Research of semi-empirical wind turbine wake models[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(1): 101-105(in Chinese).
- [14] FRANDSEN 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.
- [15] JENSEN N O. A note on wind generator interaction[M]. Roskilde: Risø National Laboratory, 1983.
- [16] VERMEER L J, SØRENSEN J N, CRESPO A. Wind turbine wake aerodynamics[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2003, 39(6-7): 467-510.
- [17] 田琳琳. 风力机尾流数值模拟及风电场机组布局优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.  
TIAN Linlin. Numerical simulation of wind turbine wakes and the study of wind farm layout optimization [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014(in Chinese).
- [18] YILMAZ A S, ÖZER Z. Pitch angle control in wind turbines above the rated wind speed by multi-layer perceptron and radial basis function neural networks [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(6): 9767-9775.
- [19] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.
- [20] 龙文, 蔡绍洪, 焦建军, 等. 求解大规模优化问题的改进鲸鱼优化算法[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(11): 2983-2994.  
LONG Wen, CAI Shaohong, JIAO Jianjun, et al. Improved whale optimization algorithm for large scale optimization problems[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2017, 37(11): 2983-2994(in Chinese).
- [21] VANLUVANEE D R. Investigation of observed and modeled wake effects at horns rev using WindPRO [D]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2006.



刘一格

在线出版日期: 2023-08-17。

收稿日期: 2022-09-23。

作者简介:

刘一格(1999), 男, 博士研究生, 研究方向为风电场尾流控制与优化, 39717854@qq.com;

\*通信作者: 赵振宙(1982), 男, 教授、博导, 主要从事风力机空气动力学、流动控制、尾流控制等方面的研究, joephy@163.com。

(编辑 胡琳琳, 张蕾)