

【环境与能源 / Environment and Energy】

·地热等多态清洁能源融合开发专题，策划人：崔宏志·

基于田口法的串列双风力机气动性能优化

涂佳黄^{1,2}, 孟超仪¹, 陈云辉¹

1) 湘潭大学土木工程学院, 湖南湘潭 411105; 2) 佛山大学交通与土木建筑学院, 广东佛山 528225

摘要: 为探究不同风电场布局策略下尾流干扰效应及整体输出功率情况, 采用两台串列布置水平轴风力机, 通过FAST软件和计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法对单、双风力机气动性能进行对比分析, 验证本研究所提CFD仿真方法的准确性. 分析不同横向间距、塔架高差和偏航角情况下串列布置双风力机的整体发电功率, 针对不同因素对功率的影响, 基于田口优化设计方法, 对3个参数(横向间距、塔架高差和偏航角)在3个水平下构建 $L9(3^3)$ 田口正交表进行分析. 结果表明, 串列布置双风力机的整体输出性能随着横向间距和塔架高差的增大而增大, 随着偏航角的增加先增后减, 在偏航角为 20° 时出现最大值(7.60 MW), 影响总功率的主要参数为横向间距和塔架高差, 偏航角的影响最小, 优化后参数组合下的输出功率为10.34 MW, 较初始设计风力机总输出功率提高了64.65%. 研究结果可为风电场的布局优化提供参考.

关键词: 新能源发电; 串列双风力机; 尾流效应; 计算流体力学; 气动功率; 田口法

中图分类号: TK81

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2025.06670

Optimization of aerodynamic performance of tandem dual wind turbines based on the Taguchi method

TU Jiahuang^{1,2}, MENG Chaoyi¹, and CHEN Yunhui¹

1) College of Civil Engineering Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan Province, P. R. China

2) College of Transportation and Civil Engineering, Foshan University, Foshan 528225, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: In order to investigate the wake disturbance effects and overall output power under different wind farm layout strategies, two horizontally arranged tandem wind turbines are analyzed, and the aerodynamic performance of single and double wind turbines is compared and analyzed using FAST software and computational fluid dynamics (CFD) method, and the accuracy of the proposed CFD simulation method is verified. The overall power generation performance of the tandem dual wind turbines is then analyzed under different lateral spacings, tower height difference and yaw angle. Based on the influence of different factors on the power output, the Taguchi optimization design method is adopted, and a $L9(3^3)$ Taguchi orthogonal table is constructed with three parameters at three levels. The results show that the overall output performance of the tandem dual wind turbines increases with the larger lateral spacing and tower height difference, and first increases and then decreases with the increasing yaw angle, reaching the maximum value at a yaw angle of 20° , and the main factors affecting the total power are the lateral spacing and tower height difference, and the yaw angle has the least influence. The optimized parameter combination

Received: 2024-08-07; **Accepted:** 2025-01-01; **Online (CNKI):** 2025-05-16

Foundation: Natural Science Foundation of Hunan Province (2021JJ50027, 2022JJ50038); Scientific Research Project of Hunan Education Department (21A0103); Basic and Applied Basic Research Fund of Guangdong Province (2022A1515240077)

Corresponding author: Professor TU Jiahuang (tujiahuang1982@163.com)

Citation: TU Jiahuang, MENG Chaoyi, CHEN Yunhui. Optimization of aerodynamic performance of tandem dual wind turbines based on the Taguchi method [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2025, 42(6): 670-677. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<http://journal.szu.edu.cn>



increases the total output power by 64.65% compared with the initial design of wind turbine. This study provides a useful reference for optimizing wind farm layout design.

Key words: new energy power generation; tandem dual wind turbines; wake effect; computational fluid dynamics; pneumatic power; Taguchi method

风力机尾流干扰是指风力机旋转产生的气流在风向上形成的尾流,对相邻风力机的性能产生负面影响.风电场发电效率受到尾流效应的严重影响,尾流场中的功率损失可达到25%~40%^[1].如何优化风电场布局以有效的抑制尾流干扰,从而最大化风电机组的整体输出效能,提高风电场效率,具有重要的研究价值.

实验和数值模拟是风力机尾流研究的两种主要方式.在实验研究方面,国内外学者^[2-4]使用缩尺模型进行了部分探讨,但其时间及资源成本较大,且不如数值模拟方法灵活.在数值模拟方面,NING等^[5]采用致动线模型(actuator line model, ALM)和大涡模拟(large eddy simulation, LES)研究了不同大气稳定性条件下串列风机在不同纵向间距下的尾流场,发现尾流偏移导致下游湍流度增加,尾迹弯曲加剧载荷的波动.沈铨波等^[6]利用Bastankhah尾流模型对串列布置双风电机组进行尾流区风速模拟,发现增大垂向间距能够显著抑制尾流效应,上游风力机偏航20°左右更有利于串列双风机总发电功率的提升.LIU^[7]对垂向交错的相邻同容量风力机尾流特性和载荷情况分析发现,改变塔架高差在减少尾流相互干扰、改善下游风力机的风速恢复和功率输出方面具有明显优势.DINESH等^[8]采用数值模拟结合LES方法,研究了垂直轴风力机横向间距和旋转方向对性能的影响,结果表明,适当增加风力机横向间距和反向旋转方向能够显著减少尾流效应,提高风力机整体发电效率.

在众多优化技术中,田口法是最简单可行且涉及多因素的设计优化方法^[9].国内外学者已将田口法优化设计运用到风电场布局多目标优化中.RADHAKRISHNAN等^[10]基于田口法对反向旋转垂直轴风力发电机(contra-rotating vertical axis wind turbines, CR-VAWT)的4个关键设计参数进行计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)分析,研究发现,叶片高度对CR-VAWT的整体功率性能影响最大,而叶片数量的影响最小,并且在最佳叶尖速度比下功率特性提升了14%.KAUSHIK等^[11]利用传统的田口法及其扩展,对翼型类型、雷诺数、马赫数和迎角4个参数进行优化,得到相应功

率系数的最优值,发现对功率系数影响最大和最小的参数分别是雷诺数和马赫数.CHEN等^[12]使用田口法和修改后的加性模型对垂直轴风力机进行了功率性能的优化,得出风速、叶尖速比、攻角、机翼型式和叶片数量对功率性能的影响依次减小,最佳参数组合下最大平均功率系数为0.42.

上述研究均未涉及利用田口法对串列双风力机进行布局参数优化.为减少尾流效应,提高最大整体功率,本研究通过CFD数值模拟串列布置双风力机在不同布局控制下的尾流干扰及功率变化,选取横向间距、塔架高差和偏航角作为优化因子,结合田口法分析各因子对整体功率的影响,以得到最大功率的设计组合.

1 数值方法及模型验证

1.1 不可压缩N-S方程

当风速为5~25 m/s时,风力机能够正常作业,假定风场为不可压缩流场.不可压缩流体基本控制方程为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\nu} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{\nu}}{\partial t} + \boldsymbol{\nu} \cdot \nabla \boldsymbol{\nu} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + k \nabla^2 \boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{f} \quad (2)$$

其中, $\boldsymbol{\nu}$ 为速度向量; ρ 为流体密度; p 为压力; k 为动力黏度; $\boldsymbol{f}$ 为体积力.

本研究采用SST $k-\omega$ 湍流模型,综合 $k-\omega$ 模型的高精度与 $k-\varepsilon$ 模型的高鲁棒性,适用性广.

1.2 模型设定

两台风力机为串列布置,计算域沿着流向距离为19.00D(D为风力机风轮直径,本研究中 $D=126$ m),横向距离为4.00D,高为3.20D,入口处距离上游风力机为4.00D,两风力机流向间距为 Δx ,横向间距为 Δy ,塔架高差为 ΔH ,上流风力机相对于入流方向的夹角设定为 θ (偏向 y 轴正方向),如图1.

入口处边界条件设置为均匀的自由来流,其中入口风速为11.4 m/s,方向与两风力机塔架连线平行,两风力机均以额定转速12.10 r/min运转,且不

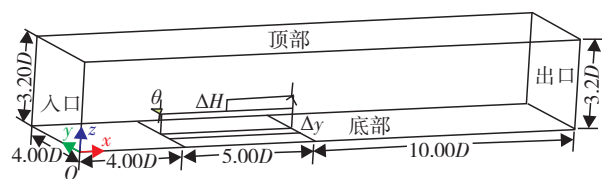


图1 计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the computation model.

考虑控制系统作用,即数值模拟中维持转速和桨距角不变,出口设置为相对大气压为0 Pa.底部为不可滑移边界条件,顶部和两侧使用对称性边界条件.

1.3 网格设定与独立性验证

计算域分为旋转区域和流体区域,旋转区域由旋转部件(圆柱体区域包括两个转子)和静止部件(风电场包括塔架和机舱)组成.旋转部件和静止部件的界面连接应用滑动网格技术,每个转子和叶片用独立的坐标系来进行旋转运动和力矩监测.

风电场横向剖面 and 纵向剖面网格如图2.考虑到风电场模拟的多尺度效应,对风力机尾流进行更精确和详细地模拟,对风力机尾流区域周围的网格进行多层次细化.以外围网格的尺寸作为基准,每个细化区域在3个空间维度上的节点数量均增加1倍,生成的网格全部由均匀的六面体网格构成.

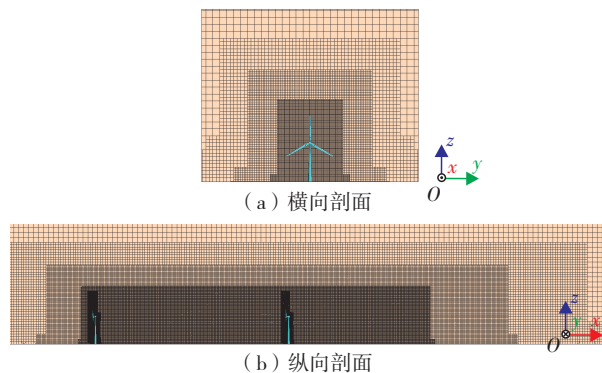


图2 计算域网格示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the computational domain mesh.

(a) Transverse profile and (b) longitudinal profile.

对 NREL 5 MW 风力机^[13]的功率进行网格无关性验证,流体域网格数为 78×10^5 ,通过增加单元总数,选取3种不同尺寸的旋转区域网格的计算结果,同时监测上游涡轮转子的转矩来排除网格差异的影响,Mesh1、Mesh2 和 Mesh3 网格旋转域数量由疏至密(表1).

由表1可见,在3种网格中,采用 Mesh2 和

表1 三种不同网格下风力机功率和推力数值对比

Table 1 Comparison of the thrust and power of wind turbine for three different meshes

网格类型	$10^{-5} \times$ 总网格数	$10^{-5} \times$ 旋转 域网格数	推力/kN	功率/MW
Mesh1	158	80	707	5.22
Mesh2	200	122	711	5.26
Mesh3	259	181	711	5.28

Mesh3 两种网格的推力相当,功率也仅相差0.40%,风力机尾流平均速度在3种不同网格下吻合良好.为了平衡计算资源和精度,网格单元总数为 200×10^5 ,其中,每个转子区域有 122×10^5 个网格单元,此时风力机气动功率输出稳定在5.26 MW 左右,误差在可接受范围内.此外,为了确保上游风力机的尾流有充足的时间发展,计算模拟时间跨度设定为上游风力机完整旋转40个周期,即200 s.同时,时间步长设定为转子旋转 5° 所需的时间,即68.87 ms,以满足本研究精确性的要求^[14].风力发电机的输出功率由转子的顺时针转矩估算,

$$P = \frac{2\pi w}{60} M \quad (5)$$

其中, M 为转子的转矩; w 为转子转速.

1.4 模型有效性验证

对切入风速为3.0 m/s 到额定风速为11.4 m/s 下风力机气动功率和推力变化进行多次稳态模拟,结果如图3,验证了功率曲线在额定风速下与NREL 官方结果^[13]和CFD 结果^[15]吻合较好,说明本研究能够有效解决风力机气动性能方面的问题.

本研究中两风力机流向间距取5.00D 符合规范标准^[16].采用CFD 方法对不同工况下串联双风机进行模拟,其中,上游风力机气动功率 $P_{\text{CFD}} = 5.26$ MW.用FAST 方法计算得到的上游风力机气动功率 $P_{\text{FAST}} = 5.13$ MW,两种方法所得结果之间的误差在允许范围内. A_0-A_4 、 B_1-B_4 和 C_1-C_4 工况下的下游风力机功率变化如表2所示.对比分析表2 发现,工况 A_0 、 A_1 、 B_1 和 C_1 的结果误差较大,这是因为CFD 方法中所有工况的风力机转速设定为额定转速12.10 r/min,非该风速下最佳转速,导致计算结果偏小.随着风速的增加,下游风速趋近额定风速,最佳转速趋近额定转速,功率误差逐渐变小,且在误差允许范围内.同时,从两种方法所得的结果能看出,随着 Δy 、 ΔH 和 θ 的变化,下游风力机功率变化趋势是一致的.

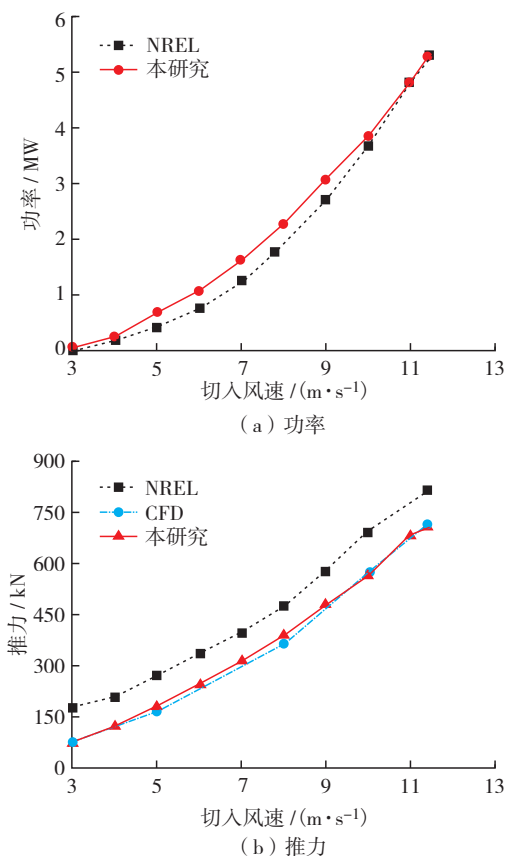


图3 不同切入风速下的风力机气动功率和推力变化

Fig. 3 Changes in aerodynamic (a) power and (b) thrust of wind turbines at different cut-in wind speed.

表2 不同工况下FAST和CFD方法计算得到的下游风力机功率

Table 2 Downstream wind turbine power calculated by FAST and CFD methods under different cases

工况	$\Delta y / \text{m}$	$\Delta H / \text{m}$	$\theta / (^{\circ})$	$P_{\text{FAST}} / \text{MW}$	$P_{\text{CFD}} / \text{MW}$	误差 / %
A ₀	0	0	0	1.86	1.02	45.19
A ₁	-0.125D	0	0	2.08	1.26	39.39
A ₂	-0.250D	0	0	2.38	2.14	10.16
A ₃	-0.375D	0	0	2.82	3.25	15.13
A ₄	-0.500D	0	0	3.33	3.76	13.05
B ₁	0	-0.15D	0	1.90	1.32	30.64
B ₂	0	-0.30D	0	2.14	2.22	3.69
B ₃	0	-0.45D	0	2.69	3.05	13.47
B ₄	0	-0.60D	0	3.44	3.78	9.82
C ₁	0	0.15D	10	2.15	1.81	15.77
C ₂	0	0.30D	20	2.75	2.78	0.98
C ₃	0	0.45D	30	3.67	3.43	6.51
C ₄	0	0.60D	40	4.35	4.15	4.64

2 双风力机气动性能分析

不同工况下, 上下游风力机平均气动功率、整体气动功率(P_{WT1} 、 P_{WT2} 和 $P_{\text{总}}$)和整体功率提升比(R)的情况见表3. 其中, 工况A₀、A₂、A₄、B₁、B₃、C₂和C₄下的串联双风力机流场速度云图如图4.

表3 不同工况下平均气动功率及整体功率提升比

Table 3 The average aerodynamic power and the overall power increase ratio under different cases

工况	$P_{\text{WT1}} / \text{MW}$	$P_{\text{WT2}} / \text{MW}$	$P_{\text{总}} / \text{MW}$	$R / \%$
A ₀	5.26	1.02	6.28	
A ₁	5.26	1.26	6.52	3.82
A ₂	5.26	2.14	7.40	17.83
A ₃	5.26	3.25	8.51	35.51
A ₄	5.26	3.76	9.02	43.63
B ₁	5.26	1.32	6.58	4.78
B ₂	5.26	2.22	7.48	19.11
B ₃	5.26	3.05	8.31	32.32
B ₄	5.26	3.78	9.04	43.95
B ₅	5.26	1.12	6.38	1.59
B ₆	5.26	1.95	7.21	14.81
B ₇	5.26	2.88	8.14	29.62
B ₈	5.26	3.73	8.99	43.15
C ₁	5.15	1.81	6.96	10.83
C ₂	4.82	2.78	7.60	21.02
C ₃	4.04	3.43	7.47	18.95
C ₄	3.20	4.15	7.35	17.04

对比工况A₀—A₄可知, $\Delta y = 0$ 时, 下游风力机气动功率仅1.02 MW, 当 Δy 增加至0.25D时, P_{WT2} 增加1倍以上, R 达到了17.83%, 下游风力机还处于上游风力机的尾流范围内, 下游风机较受到严重的尾流干扰作用, 其尾流速度显著降低. 进一步增大 Δy 至0.50D时, 下游风力机的气动功率几乎增加了3倍, R 提升至43.63%(表3). 由图4(a)-(c)可见, 随着 Δy 的增大, 下游风力机逐渐偏离上游风力机的尾流影响范围, 尾流相互叠加干扰区域面积减少, 尾流深度亏损的区域也减少, 与文献[8]结论一致, 随着 Δy 的增大, 能有效抑制尾流干扰的影响, 显著提高下游风力机气动功率, 双风力机整体气动功率随之提升.

对比A₀及B₁—B₈工况可知, 随着 ΔH 的增大, 上游风力机对下游风力机的尾流影响逐渐减弱. 当 $\Delta H = 0.15D$ 时, 双风力机整体功率仅提高1.59%,

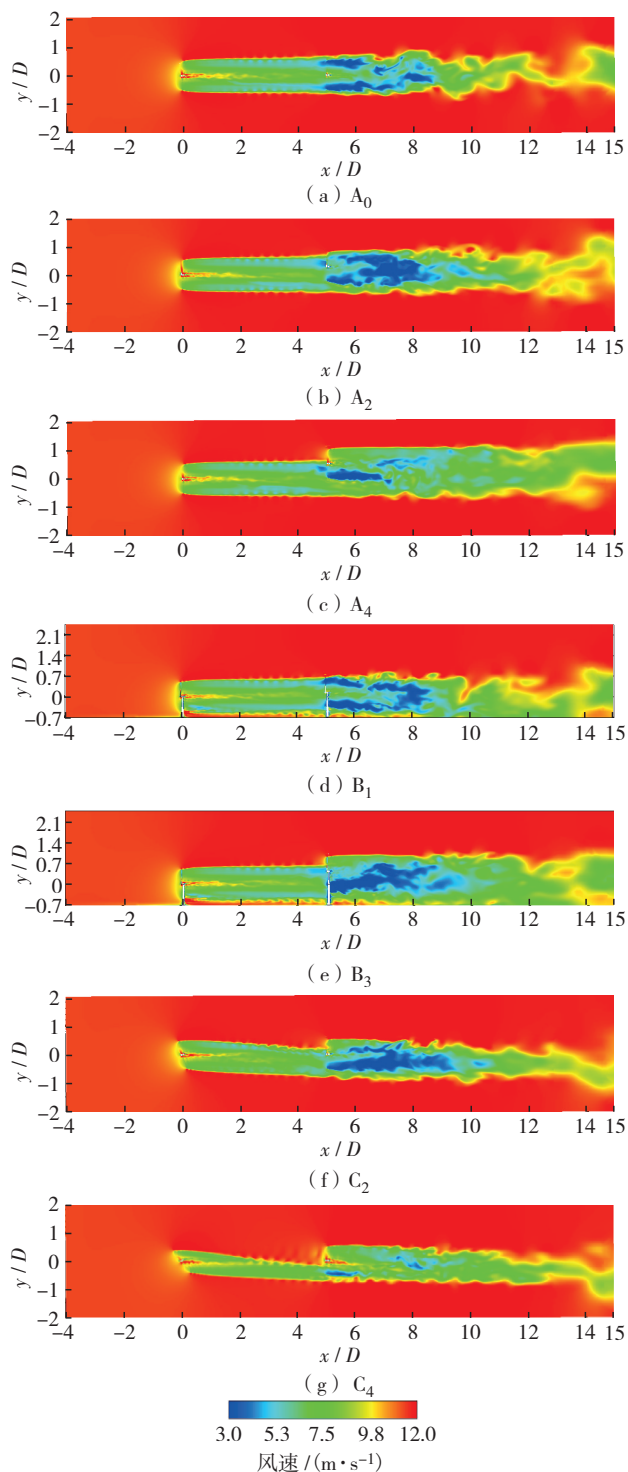


图4 不同工况下串联布置双风力机流场速度云图
Fig. 4 The velocity field diagram of two wind turbines arranged in series under different cases. (a) A_0 , (b) A_2 , (c) A_4 , (d) B_1 , (e) B_3 , (f) C_2 , and (g) C_4 .

而当 $\Delta H = -0.15D$ 时, 整体功率提高了 4.78%, 下游风力机基本仍处于上游风力机的尾流区域内, ΔH 增加至 $-0.30D$ 时整体功率提高到 19.11%, 比 $\Delta H = 0.30D$ 时高 4.30%, 说明塔架高度前低后高工

况比前高后低工况效果更好(表3). 由图4(c)和(d)可知, $\Delta H = -0.45D$ 时, 下游风力机未在上游风力机尾流区域的上部区域尾流速度回归正常, 解释了该工况整体气动功率显著提升的原因, 与文献[7]研究结果吻合. 可见, 塔架高差的增加对整体气动功率的提升效果显著.

对比图4(a)、(f)和(g)可知, 随着 θ 的增加, 上游风力机尾流会产生偏航, 尾流方向会不断向下偏离, 作用在下游风力机的尾流范围会不断减小, 上游风力机平均气动功率 P_{WT1} 逐渐衰减, 而 P_{WT2} 则显著增加. 当 $\theta = 40^\circ$ 时, 下游风力机只有不足一半的尾流区域在尾流范围内, 下游风力机的入流速度较快, 下游风力机气动功率显著提升, P_{WT2} 提升至额定功率的 78.90% 左右, 然而 θ 的增大使上游风力机的功率部分损失, P_{WT1} 仅为额定功率的 60.84%, 从而导致整体气动功率提升不明显. 整体功率随着 θ 增大呈先增后减的趋势. 当 $\theta = 20^\circ$ 时, $P_{总}$ 达到峰值, 约为 7.60 MW, $R = 21.02\%$ (表3), 与文献[6]结论一致. 通过适当调整 θ 的大小, 可以有效地减少风力机间的尾流干扰, 从而提高下游风电机发电效率, 但从表3中数据看出, 相比于 Δy 和 θ 对功率的增幅, 调整 θ 大小对 P 的提升效果差了 1 倍多.

3 实验设计及结果分析

田口法优化设计流程如图5. 在用田口法对串列布局双风力机进行总功率优化之前, 首先需要确

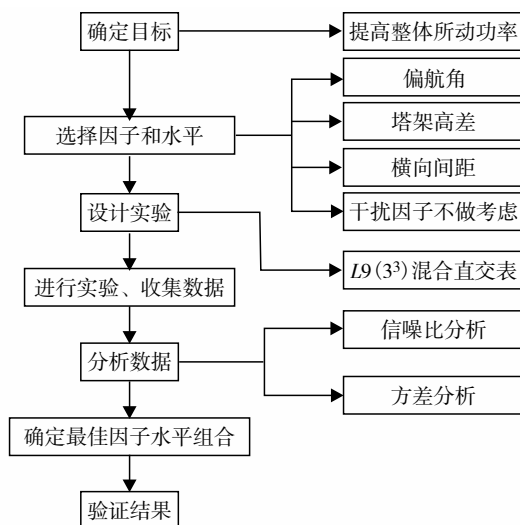


图5 田口法优化设计流程

Fig. 5 Flow diagram of Taguchi optimization design method.

定其优化因子,基于CFD模拟仿真结果,对3个重要参数 Δy 、 ΔH 和 θ 进行优化.由于优化因子水平数量较多,在选取优化因子水准值时,将上述3个重要参数各取3个水准值(表4).仿真计算中共3个优化因子,各选定3个水准值,因此选用 $L9(3^3)$ 的田口正交表(表5).

表4 优化因子及水准值

Table 4 Optimization factors and level values

因子水准	$\Delta y/m$	$\Delta H/m$	$\theta/(^\circ)$
水准1	0	0	0
水准2	0.25D	-0.30D	10
水准3	0.50D	-0.60D	20

表5 $L9(3^3)$ 田口正交表Table 5 $L9(3^3)$ Taguchi orthogonal table

工况	$\Delta y/m$	$\Delta H/m$	$\theta/(^\circ)$
1	0	0	0
2	0	-0.30D	10
3	0	-0.60D	20
4	0.25D	0	10
5	0.25D	-0.30D	20
6	0.25D	-0.60D	0
7	0.50D	0	20
8	0.50D	-0.30D	0
9	0.50D	-0.60D	10

选取优化因子及其水准值,确定田口正交表,完成正交表中的各实验组合.基于CFD模拟仿真结果进行信噪比分析和方差分析.

3.1 信噪比分析

信噪比(signal to noise ratio, SNR)分析^[17]是一种评估和优化系统性能的方法,广泛应用于各种领域,在田口法中,信噪比分析用来评估和优化实验设计,目的是找到使系统性能最优的因子水平组合.根据不同的优化目标,信噪比有望大、望小和望目3种常用形式.本研究目标为使串联双风力机整体气动功率最大化,故选取望大信噪比(S)进行计算.

$$S = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{P_i^2} \right) \quad (6)$$

其中, n 为实验次数; P_i 为第 i 次双风力机整体气动功率.

不同工况下双风力机的整体气动功率和信噪比如表6,对优化因子 Δy 、 ΔH 和 θ 在3个水准下的信噪比求均值,即 $\bar{S}(\Delta y)$ 、 $\bar{S}(\Delta H)$ 和 $\bar{S}(\theta)$ (表7).可

知工况9即横向间距为0.50D、塔架高差为-0.60D和偏航角为 10° 时,串联双风力机组整体输出功率最大,为10.34 MW,此时S值最大,为20.28 dB.

表6 不同工况下双风力机整体气动功率信噪比

Table 6 Changes in the signal to noise ratio of the overall aerodynamic power of the dual wind turbines under different cases

工况	$P_{\text{总}}/\text{MW}$	S/dB
1	6.28	15.96
2	7.18	17.12
3	8.76	18.84
4	7.87	17.92
5	8.87	18.96
6	9.35	19.42
7	9.92	19.92
8	9.09	19.16
9	10.34	20.28

表7 各不同优化因子下信噪比均值

Table 7 Changes in the mean of signal to noise ratio under different optimization factors dB

因子水准	Δy	ΔH	θ
水准1	51.92	53.80	54.54
水准2	56.30	55.24	55.32
水准3	59.36	58.54	57.72

为更直观地观察各优化因子在不同水准值时对串联双风力机整体气动功率的影响,根据表7获得信噪比随优化因子的变化如图6.由图6可见,各优化因子随着水准值的提高,信噪比均值越大即对风力机整体功率的提升效果更明显,其中, $\Delta y_1 \sim \Delta y_3$ 折线斜率最大,说明横向间距的调整对风力机整体功率改进最敏感; $\Delta \theta_1 \sim \Delta \theta_2$ 直线斜率最小,且 $\Delta \theta_1 \sim \Delta \theta_3$ 折线极值最小,说明偏航角敏感性最低,塔架高差敏感性居中.

3.2 方差分析

对实验结果进行方差分析,以确定串联双风力机哪些布局因子对整体气动功率有显著影响及每个因子对实验结果的响应程度.

$$\delta = \sum_{i=1}^N c(\bar{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (7)$$

$$\beta = N - 1 \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{\delta}{\beta} \quad (9)$$

$$F = \frac{\gamma_A}{\gamma_E} \quad (10)$$

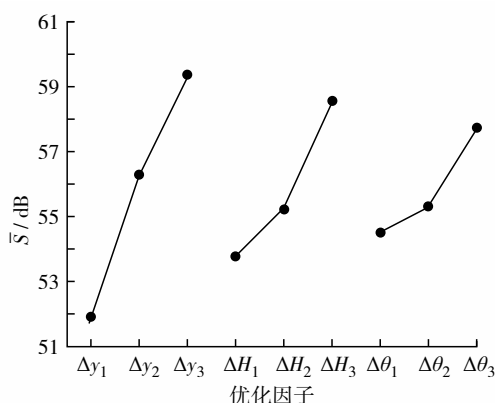


图6 信噪比随优化因子变化

Fig. 6 Variation of signal to noise ratio varies with the optimization factor.

其中, δ 、 β 和 γ 分别为平方和、自由度和均方和; N 为水准数; c 为每个水准重复次数; $\bar{Y}_i$ 为各水准下的均值; γ_A 和 γ_E 分别为各因子均方和误差均方; F 用于检验各因子对响应变量敏感性. F 值越大, 说明因子方差占主导地位, 影响程度越显著; F 值越小, 说明误差方差占主导地位, 影响程度越细微. 各优化因子在不同水准值时对串联双风力机整体气动功率的影响程度不同(图7), 从大到小依次为 Δy 、 ΔH 和 θ . 其中 Δy 的影响程度最大, 达到63.25%, θ 影响程度最小, 仅占10.86%, 与第2节单一策略下整体气动性能分析结果相吻合.

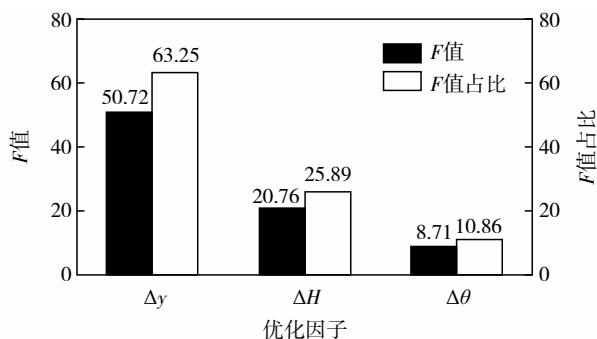


图7 各优化因子影响程度

Fig. 7 The degree of influence of each optimization factor with black for F value and white for F value proportion.

3.3 最佳组合的选取及验证

由计算结果可知, 当 Δy 、 ΔH 取第3水准值时, 下游风力机已到达额定气动功率, 因 θ 的调整对整体气动功率提升的影响较小, 且对上层风力机气动功率有抑制作用, 根据风力机整体气动功率越大越好的原则, 结合对仿真计算结果和田口法结果的分析, 上述3个优化因子的最佳选择分别为 Δy_3 、 ΔH_3

和 θ_2 , 该组合下输出功率为10.34 MW, 整体功率提升了64.65%. 同时, 该工况FAST计算的总功率为9.85 MW且达到最大值, 验证了最佳组合的可靠性.

为进一步验证最佳优化组合的功率, 增设两个工况进行对比, 如表8所示, 工况10与工况11的整体功率均小于最佳优化组合.

表8 不同工况下双风力机整体气动功率

Table 8 Comparison of the overall aerodynamic power of dual wind turbines under different cases

工况	$\Delta y / m$	$\Delta H / m$	$\theta / (^{\circ})$	P_{CFD} / MW	P_{FAST} / MW
10	0.50D	-0.60D	0	10.27	9.63
11	0.50D	-0.60D	20	9.93	9.48
最佳组合	0.50D	-0.60D	10	10.34	9.85

4 结 论

采用FAST和CFD方法验证了本文仿真结果的可靠性, 然后, 对串联布置双风力机在不同横向间距、塔架高差和偏航角下的气动功率及流场特性的影响进行了分析, 同时利用田口法对最佳设计组合进行了优化, 得到以下结论:

1) 增加横向间距可以有效抑制上游风力机尾流干扰作用, 显著提高风力机整体功率, 增加横向间距至0.25D, 下游风力机功率增大了1倍多; 横向间距为0.50D时, 下游风力机气动功率增大了接近3倍, 整体功率提升比43.63%.

2) 随着塔架高差增大, 下游风力机处于上游风力机尾流遮蔽区域减少, 尾流速度损失减少, 使得风力机整体功率显著提升, 且塔架高度前低后高工况比前高后低工况整体功率提升效果更好, 实际应用中更应考虑环境因素, 通过降低前排风力机塔架高度或增加后排风力机塔架高度提高风电场发电效率.

3) 随着上游风力机偏航角增大, 风力机尾流速度亏损变小, 而尾迹偏移变大, 使下游风力机气动功率越大, 下游风力机功率的提高能补偿上游风力机功率的损失, 使得整体功率有所提升. 风力机整体功率随着偏航角的增大呈先增后减的现象, 在风力机偏航角为20°时, 风力机整体功率达到峰值.

4) 风电场布局参数对风电场整体功率的影响程度从大到小依次为横向间距、塔架高差和偏航角, 通过田口法实验对风力机整体功率参数进行优

化选择后,得到最优组合为横向间距为 $0.50D$ 、塔架高差为 $-0.60D$ 、偏航角为 10° ,使串联双风力机整体气动功率得到最大化。

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ50027, 2022JJ50038);湖南省教育厅科学研究资助项目(21A0103);广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2022A1515240077)

作者简介:涂佳黄(tujiahuang1982@163.com),湘潭大学教授。研究方向:结构风工程。

引文:涂佳黄,孟超仪,陈云辉.基于田口法的串联双风力机气动性能优化[J].深圳大学学报理工版,2025,42(6):670-677.

参考文献 / References:

- [1] NYGAARD N G, CHRISTIAN NEWCOMBE A. Wake behind an offshore wind farm observed with dual-doppler radars [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1037(7): 072008.
- [2] CHAMORRO L P, ARNDT R E A, SOTIROPOULOS F. Turbulent flow properties around a staggered wind farm [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2011, 141(3): 349-367.
- [3] SCHREIBER J, NANOS E M, CAMPAGNOLO F, et al. Verification and validation of a wake model for the stochastic simulation of wind farms [J]. *Wind Energy Science*, 2017, 2(1): 299-312.
- [4] HU Y, YANG H, WU Y. Wind tunnel experimental study on the aerodynamic interactions between two wind turbines with different layouts [J]. *Energy*, 2020: 117439.
- [5] NING Xu, WAN Decheng. LES study of wake meandering in different atmospheric stabilities and its effects on wind turbine aerodynamics [J]. *Sustainability*, 2019, 11(24): 6939.
- [6] 沈铨波, 孙力云, 席义博, 等. 偏航对串联双风机发电功率影响研究[J]. *水力发电*, 2022, 48(2): 119-124.
SHEN Chengbo, SUN Liyun, XI Yibo, et al. Research on the influence of yaw on power generation of tandem dual wind turbines [J]. *Water Power*, 2022, 48(2): 119-124. (in Chinese)
- [7] LIU Yuanchuan. The effect of vertical arrangement on performance and wake characteristics of two tandem offshore wind turbines under various operating conditions [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 278: 116743.
- [8] DINESH K R G, MAYANK V, ASHOKE D. Performance analysis of vertical-axis wind turbine clusters: effect of inter-turbine spacing and turbine rotation [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(10): 105122.
- [9] TAGUCHI G. Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes [M]. s: l.: Quality Resources, 1986.
- [10] RADHAKRISHNAN J, SRIDHAR S, ZUBER M, et al. Design optimization of a contra-rotating VAWT: a comprehensive study using Taguchi method and CFD [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 298: 117766.
- [11] KAUSHIK V, SHANKAR N. Statistical analysis using Taguchi method for designing a robust wind turbine [J]. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2022, 100(3): 92-105.
- [12] CHEN W H, WANG Yuansheng, CHANG M H, et al. Operation parameter interaction and optimization of vertical axis wind turbine analyzed by Taguchi method with modified additive model and ANOVA [J]. *Energy Reports*, 2024, 11: 5189-5200.
- [13] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development [EB/OL]. (2009-02-01) [2023-10-10]. <https://www.osti.gov/biblio/947422>.
- [14] WEN Binrong, TIAN Xinliang, DONG Xingjian, et al. Influences of surge motion on the power and thrust characteristics of an offshore floating wind turbine [J]. *Energy*, 2017, 141: 2054-2068.
- [15] MICALLEF D, SANT T. Loading effects on floating offshore horizontal axis wind turbines in surge motion [J]. *Renewable Energy*, 2015, 83: 737-748.
- [16] CHOI N J, HYUN NAM S, HYUN JEONG J, et al. Numerical study on the horizontal axis turbines arrangement in a wind farm: effect of separation distance on the turbine aerodynamic power output [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 117: 11-17.
- [17] O'SHEA T J, ROY T, CORGAN J X. Machine learning-based signal-to-noise ratio estimation for wireless communication systems [C]// *IEEE International Conference on Communications*. [S. l.]: s. n., 2018: 1-6.

【中文责编:晨兮;英文责编:之聿】