文章编号:1001-2060(2025)05-0166-11

# 基于不同布局的大型垂直轴风力机气动性能研究

谢龙君1,黄浩达1,岳敏楠1,李 春1,2

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院,上海 200093; 2. 上海非碳基能源转换与利用研究院,上海 200031)

摘 要:为研究大型垂直轴风力机不同布局方式下气动性能变化情况。以三叶片 H型 VAWT 为研究对象,采用数 值模拟方法研究了两台相同型号 VAWT 在三维风场中交错、并联及串联 3 种布局下的风场布局影响因素、转矩系 数及流场特性。结果表明:交错布局中的 3 种布局影响因素对 VAWT 气动性能的影响程度由高到低依次为:来流 与两风轮轴心连线夹角、风轮间距、风轮旋转方向,通过正交优化所得的最优交错布局气动性能增益低于风轮间距 为 1.5D 的并联布局;并联布局中两台 VAWT 转矩均有提升,交错布局中侧后方 VAWT 转矩系数提升更显著,而串 联布局中下游 VAWT 几乎不产生有效转矩且会削弱上游 VAWT 气动性能;当交错布局的风轮间距和来流与风轮 连线夹角过小时,两风轮尾迹会出现重叠;在串联布局尾迹中段速度大幅降低,但末端尾迹速度恢复反而更快。

关键 词:垂直轴风力机;风场布局;计算流体动力学;气动性能;优化

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.05.019

[引用本文格式]谢龙君,黄浩达,岳敏楠,等. 基于不同布局的大型垂直轴风力机气动性能研究[J]. 热能动力工程,2025,40(5): 166 – 176. XIE Longjun, HUANG Haoda, YUE Minnan, et al. Study on aerodynamic performance of large vertical axis wind turbine based on different layouts[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2025,40(5):166 – 176.

# Study on Aerodynamic Performance of Large Vertical Axis Wind Turbine based on Different Layouts

XIE Longjun<sup>1</sup>, HUANG Haoda<sup>1</sup>, YUE Minnan<sup>1</sup>, LI Chun<sup>1.2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093;
2. Shanghai Institute of Non-carbon Energy Conversion and Utilization, Shanghai, China, Post Code: 200031)

Abstract: To investigate the aerodynamic performance variations of large vertical axis wind turbines (VAWTs) under different layout configurations, this study focuses on a three-bladed H-type VAWT. U-sing numerical simulation methods, the effects of wind farm layout factors, torque coefficients, and flow field characteristics were studied for two identical VAWTs arranged in staggered, parallel, and tandem configurations in a three-dimensional wind field. The results show that among the three layout factors in the staggered arrangement, the influence on VAWT aerodynamic performance from highest to lowest is: the angle between the incoming flow and the axis connecting the two wind turbine centers, the spacing between wind turbines, and the turbine rotation direction. The optimal staggered layout obtained through orthogonal optimization provides less aerodynamic performance gain than that of parallel layout with a turbine spacing of 1.5D. In the parallel layout, both two VAWTs experience increased torque, while in the staggered layout, the torque coefficient of the rear side VAWT increases more significantly. In the tandem

收稿日期:2024-10-05; 修订日期:2024-12-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52476212,52106262,52376204);上海市Ⅳ类高峰学科-能源科学与技术-上海非碳基能源转换与利用研 究院建设项目

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (52476212, 52106262, 52376204); Acknowledges the Non-carbon Energy Conversion and Utilization Institute under the Shanghai Class IV Peak Disciplinary Development Program

layout, the downstream VAWT generates almost no effective torque and even degrades the aerodynamic performance of the upstream VAWT. When the spacing between wind turbines and the angle between the incoming flow and the turbine axis in the staggered layout are too small, the wakes of the two wind turbines overlap. In the tandem layout, the velocity in the middle section of the wake decreases significantly, but the wake recovery at the end occurs more rapidly.

Key words: vertical axis wind turbine (VAWT), wind farm layout, computational fluid dynamics (CFD), aerodynamic performance, optimization

## 引 言

风能作为一种可再生能源,其因清洁、无污染和资源丰富等优点,日益受到重视。截至2024年初, 全球风电总装机容量达到1023GW,过去一年间风 电新增装机达117GW,占总装机容量的11%<sup>[1]</sup>。

目前,水平轴风力机(Horizontal Axis Wind Turbines,HAWTs)仍为风力发电设备的主流形 式<sup>[2]</sup>,但随着大型化发展HAWTs要承受更大的空气 动力载荷,叶片材料承载需求与安装运维成本大幅增 加<sup>[3-4]</sup>。较之于HAWTs,垂直轴风力机(Vertical Axis Wind Turbines,VAWT)因具有无需对风、结构简单、 制造成本低、易于维护安装以及风场功率密度高等 优势成为风能利用选择的新方式<sup>[5-6]</sup>。相关研究表 明,VAWT 在风场布局中相较 HAWTs 具有更高的 功率密度,因此,通过更紧密的优化排布,VAWT 可 在有限占地面积下实现更高的功率输出,从而提升 商业化风场集群运行效率和空间利用率,降低度电 成本<sup>[7-8]</sup>。

VAWT 风场布局已逐渐成为领域内研究热点。 Yutaka 等人<sup>[9-10]</sup>通过数值模拟方法研究两台 VAWT 的流场特性,结果表明:布局过于紧密时,风 轮间气流受阻难以有效流经 VAWT 间缝隙,VAWT 阻力系数均增加,导致输出功率下降;平行布局的 VAWT 叶片在间隙区顺风旋转较逆风旋转产生更高 的平均功率,在串联布局中反向旋转比同向旋转的 尾流恢复更快。Brownstein 等人<sup>[11]</sup>通过风洞实验研 究了风向、风轮间距对双 VAWT 风能利用率的影 响,结果发现:下游 VAWT 在来流与风轮连线夹角 大于 30°时,风能利用率可以通过上游 VAWT 周围 的流体加速效应得到提高,随风轮间距增大而降低。 Shaheen 等人<sup>[12]</sup>针对两台达里厄型 VAWT 并联和 交错布局优化进行数值研究,研究发现:并联布局中 相同风轮间距下风轮沿风轮间隙顺风旋转具有更高 功率系数,而当两台 VAWT 交错布局来流与风轮中 心连线为 60°夹角、间距为 0.5D 时,风轮沿风轮间隙 顺风旋转时功率系数最大提升达 0.41。文献[13]研 究表明,两台 VAWT 间诱导流体方向与来流一致 时,垂向流动间剪切力减小,湍流及能量耗散水平降 低,风能利用率提高<sup>[13]</sup>。刘美娜<sup>[14]</sup>通过大涡模拟 对并联布局下风轮直径为 3 m 的两台 VAWT 风场 功率影响因素以及性能优化进行了研究结果发现: 功率系数影响程度由高到低依次为桨距角、风轮间 距、径高比、实度和旋转方向;优化后风力机功率系 数相较于单台提高 13.72%。

上述关于 VAWT 风场布局的研究主要集中于 小型 VAWT。目前国内外鲜见关于大型 VAWT 布 局的研究。然而,大型 VAWT 叶片边界层分离及尾 涡发展相较小型 VAWT 存在显著差异,通过小型 VAWT 风场布局气动研究结果不足以评估大型 VAWT 风场布局。因此,开展大型 VAWT 风场布局 研究并验证其有效性尤为必要。此外,还应针对影 响大型 VAWT 风场布局的轮间距、来流角度和旋转 方向等关键因素开展综合对比与优化,以更全面地 研究不同布局方式的适用场景。基于此,本研究基 于 CFD 软件 STAR-CCM + 针对大型三叶片 H 型 VAWT 开展数值模拟,研究两台相同 VAWT 在交 错、并联及串联布局下气动性能提升效果,研究有望 为大型 VAWT 风场布局优化提供理论参考与实现 途径。

#### 1 数值模拟研究

#### 1.1 几何模型及气动参数

文献[15-16]的研究表明,VAWT 叶片数量直接影响瞬时转矩的波动导致功率输出不稳定,叶片

数量的增加可提高 VAWT 的自启动能力。因此,本研究以文献[17]提出的 5 MW 固定式双叶片 H 型 VAWT 为参考,将叶片数量由基础样机的两叶增加 至三叶,VAWT 风轮尺寸比原型更小,叶片翼型为 DU-06-W-200,所建立的 VAWT 几何模型如图 1 所 示。图中 S1~S6 为支撑杆翼型截面,VAWT 具体几 何参数如表 1 所示。翼型具体截面参数如图 2 所示, 横纵坐标系采用弦长归一化处理,坐标轴分别表示 *x/c*和*y/c*(*x*,*y* 为局部坐标系坐标,*c*为弦长),支撑 杆截面中心点距风轮旋转轴心的径向距离定义为*r*。



图 1 VAWT 几何模型 Fig. 1 Geometric model of VAWT

Tab. 1 Parameters of VAWT mode
--------------------------------

参 数	数 值
叶片弦长 c/m	3.512
叶片高度 H/m	70.25
叶片数量 N	3
风轮半径 R/m	36.76
叶片桨距角 β/(°)	2
额定转速 ω/r·min <sup>-1</sup>	6.81

功率系数 *C<sub>p</sub>* 是衡量 VAWT 效率的重要参数, 定义为风力机实际输出的机械能与风力机扫过的空 气中所含的风能之比:

 $C_{p} = 2P/(\rho A V_{\infty}^{3}) \tag{1}$ 

式中:P—输出功率,W;A—扫风面积, $m^2$ ; $\rho$ —空气 密度, $kg/m^3$ ; $V_{\infty}$ —来流速度, $m/s_{\circ}$ 



Fig. 2 Airfoil parameters of different cross sections of support rod

尖速比(Tip Speed Ratio, TSR)是 VAWT 重要的 设计参数,定义为叶片旋转线速度与来流风速之比:

 $TSR = \omega_r R / V_{\infty}$  (2)

式中: $\omega_r$ —风轮旋转角速度,rad/s。

力矩系数  $C_{\text{M}}$  是表征风轮从来流风能中获取力 矩的能力, 也是衡量 VAWT 风能利用率的重要参 数, 如式(3) 所示:

 $C_{\rm M} = 2M(\theta) / (\rho A R V_{\infty}^2) \tag{3}$ 

式中: $M(\theta)$ —相位角 $\theta$ 时的力矩, $N \cdot m_{\circ}$ 

# 1.2 湍流模型及计算方法

涉及湍流的数值模拟方法主要包括:直接数值模 拟<sup>[18]</sup>(Direct Numerical Simulation, DNS)、大涡模 拟<sup>[19]</sup>(Large Eddy Simulation, LES)及雷诺时均纳维 – 斯托克斯<sup>[20]</sup>(Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS)模拟。对于大多数工程应用而言,直接采用 DNS或LES进行高精度模拟的计算成本较高,且计 算时长远超基于 RANS的湍流模型。基于 RANS模 拟方法的剪切应力传输(Shear-Stress Transport, SST) $k - \omega$ 湍流模型在计算效率和精度方面已被证 明适用于 VAWT 的空气动力学性能计算<sup>[21]</sup>。SST  $k - \omega$ 模型通过考虑壁面距离影响的混合函数实现 了在远离壁面区域与 $k - \varepsilon$ 模型一致<sup>[22]</sup>,而在靠近 壁面区则维持 $k - \omega$ 模型的特性,有效地克服了 $k - \omega$ 模型处理进口边界和自由流方面的主要限制<sup>[23]</sup>。 因此,本研究采用 SST *k* - ω 湍流模型来模拟 VAWT 的边界层流动及尾流发展,同时利用压力 - 速度耦 合算法来解决压力与速度场耦合问题,并采用二阶 迎风格式对对流项进行离散化,以提升模拟精度。

#### 1.3 计算域及网格划分

基于上述 VAWT 几何模型,针对两台相同几何 参数的 VAWT 进行风场布局研究,其计算域和边界 条件如图 3 所示。图中 VAWT1 与 VAWT2 间距为 L,来流与风轮轴心连线夹角 $\beta$ 。本研究与文献[24] 采用相同的 VAWT 模型,在最佳尖速比 TSR = 3.28 下运行。通过将叶片与支撑杆旋转 180°实现两台 VAWT 同向和逆向旋转,而支撑杆和塔架的几何参 数不变。VAWT1 转速为 $\omega_1$ ,VAWT2 的转速为 $\omega_2$ , 均设定为 6.81 r/min。计算域的进口条件为速度进 口,来流速度  $V_{\infty}$  = 8 m/s;出口设置为压力出口,压 力p = 0 Pa,其余边界条件为对称平面。



图 3 VAWT 风场布局计算域及边界条件 Fig. 3 Calculation domain and boundary conditions of wind farm layout of VAWT

采用 STAR-CCM + 中切割体网格生成器 (Trimmed Cell Mesher, TCM)将整个风场计算域划 分为正交六面体网格, 如图4所示。



图 4 VAWT 风场布局计算域网格分布 Fig. 4 Grid distribution in calculation domain of wind farm layout of VAWT

通过重叠网格技术实现两台 VAWT 所在区域 的风轮旋转,重叠域网格尺寸与背景域中加密区 域保持一致以确保数值稳定与收敛,同时对 VAWT 叶片尾迹区域进一步加密以精确捕捉复杂尾流。 叶片壁面边界层网格数为 8 层,第一层网格高度 为 1 × 10<sup>-3</sup> m,叶片表面  $y^+$ 值约为 240,最终计算 域网格总数约9 868 160,其中背景域约为 3 127 304,两旋转域网格数量约 6 740 856。此外,为兼顾 数值模型的收敛以及避免计算资源的浪费,设定数 值模型的时间步长  $\Delta t = 0.02$  s,每个时间步迭代次 数为 20 次。

# 1.4 风场布局参数优化

对于两台相邻的 VAWT,根据每台 VAWT 的旋 转方向、来流与两风轮轴心连线夹角  $\beta$  以及两台 VAWT 之间的间距 *L*,可分为 3 种布局方式,如图 5 所示。当0° < $\beta$  <90°或90° < $\beta$  <180°时,图 5(a)为 交错布局;当  $\beta$  = 90°时,图 5(b)为并联布局;当  $\beta$  = 0°时,图 5(c)为串联布局。



图 5 两台 VAWT 相对于风向的不同布局方式 Fig. 5 Different layouts of two VAWTs relative to the wind direction

采用正交试验设计方法<sup>[25]</sup>以高效且系统地评 估关键参数组合对交错布局风场性能的影响。当  $\beta = 90°$ 时为并联布局,文献[26-27]中研究表明风 轮反向向下旋转时 VAWT 输出功率提升最大,在  $\beta = 0°$ 时,下游 VAWT 完全在上游 VAWT 的尾迹之 中,风轮旋转方向对串联布局 VAWT 的输出功率影 响可以忽略。因此,为减少不必要的试验次数节约 计算资源,正交试验只针对 0° < $\beta$  < 90°的交错布 局,串联和并联布局以 1.5D 为初始间距,0.5D 为 增量调整,分别独立设置模拟实验。对于 0° < $\beta$  < 90°的交错布局考虑风轮间距(因素 A)、来流与两 风轮轴心连线夹角(因素 B)、以及风轮的旋转方向 (因素 C),每个因素设置 3 个不同的水平。为提高 风场效率并避免由于风轮间距过小而形成的流场钝 体效应,风轮间初始间距同样设定为 1.5D,并以 0.5D 为增量进行调整,研究间距变化对气动性能影 响。文献[28]中针对小型 VAWT 研究得出,因素 B 最佳值约为 60°,因此选取 45°,60°和 75°夹角作为 试验对象以考虑最佳值可能存在的波动。因素 C 分为 3 种情况:同向旋转、反向向下(VAWT 叶片沿 着风轮间隙顺风旋转)和反向向上(VAWT 叶片沿 着两风轮间隙逆风旋转)。上述因素可构建出三因 素三水平的正交试验 L<sub>0</sub>(3<sup>4</sup>),如表 2 所示。

表2 正交试验设计参数

Tab. 2 Orthogonal experimental design parameters

-t∕ T		因素	
小千	A(间距)	B(夹角)	C(转向)
1	1.5D	45°	同向旋转
2	2.0D	60°	反向向下
3	2.5D	75°	反向向上

为评估 VAWT 交错布局的气动性能增益程度, 引入性能因子<sup>[28]</sup> *Ω* 评估多台风力机相较于单台风 力机运行时的增益效果,性能因子 *Ω* 越大风场布局 中单台 VAWT 的平均输出功率越大,定义如式(4) 所示:

$$\Omega = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_{P_i}}{n \cdot C_{P_{int}}}$$
(4)

式中: $C_{P_i}$ 一交错布局中每台 VAWT 的功率系数;  $C_{P_{iso}}$ 一单台 VAWT 独立运行的功率系数;n—布局中的 VAWT 数量。

#### 2 可靠性验证

#### 2.1 湍流模型验证

文献[29] 通过风洞实验对具有相同扫风面积的H型与  $\Phi$ 型 VAWT 进行不同运行工况下风力机的功率系数的研究。该研究提供了非常完备的VAWT 几何模型和实验测量数据,为数值验证提供依据。基于此,模拟将完全按照风洞实验场景,建立相对应的数值模型,以验证采用 SST  $k - \omega$  湍流模型的可靠性。VAWT 风洞实验数值模型如图 6 所示。



图 6 VAWT 风洞实验数值模型 Fig.6 Wind tunnel experimental numerical model of VAWT

通过 SST *k* - ω 湍流模型对上述 VAWT 风洞实 验开展数值模拟,得出 VAWT 在不同尖速比下的功 率系数,并将模拟结果与实验值以及文献[30]数值 模拟结果进行对比,功率系数随尖速比变化曲线如 图 7 所示。



with tip speed ratio

由图 7 可知,SST  $k - \omega$  湍流模型在 TSR = 3.5 时与实验值趋势吻合良好,相较于文献[30],本研 究的验证结果偏差更小。文献[30]中将模型简化 为二维,既忽略了 VAWT 塔架与支架对流场的影 响,也未考虑叶尖涡对整体气动性能的影响,从而导 致  $C_p$  较本文更大的偏差。综上,本研究通过采用 SST  $k - \omega$ 湍流模型对大型三维 VAWT 不同风场布 局的气动性能开展研究更接近真实情况,具有较高 的可靠性。

#### 2.2 网格无关性验证

采用3种不同数量的网格方案展开网格无关性 验证,选取尖速比为3.28作为验证标准。3种不同 方案的网格如表3所示。

#### 表 3 不同方案下的 VAWT 功率系数对比

Tab. 3 Comparison of VAWT power coefficients

```
under different grid sizes
```

会 粉	方 案			
参 蚁	M1	M2	M3	
网格尺寸/m	1.8	0.9	0.45	
总网格数	12 568 432	14 675 846	16 693 136	
$C_p$	0.303 1	0.312 8	0.314 9	

由表3可知,采用 M2 网格方案较 M3 方案的  $C_p$  计算值仅减小0.67%,此时进一步细化网格数量 对结果的影响不大,为节约计算资源且满足计算精 度要求,后续研究计算域采用 M2 网格方案。

### 3 结果分析

#### 3.1 VAWT 布局影响因素及优化

通过对 0° < $\beta$  < 90°时影响交错布局 VAWT 功 率系数的因素在不同水平下的实验结果进行极差分 析,可快速识别出对实验结果有显著影响的因素。9 种不同实验方案得到的性能因子  $\Omega$  如表 4 所示,其 中  $K_i$ (*i*=1,2,3)代表同列中,具有 *i* 水平的实验方 案结果平均值, $R(\mu)$ 代表同列中最大与最小 $K_i$ 值的 差值, $\mu$  为不同的因素(A/B/C)。

表4 正交试验设计结果

Tab. 4 Design results of orthogonal experiment

方案及分析量	А	В	С	Ω
方案1	1	1	1	1.026
方案2	1	2	2	1.044
方案 3	1	3	3	1.048
方案4	2	2	3	1.034
方案 5	2	1	2	1.032
方案6	2	3	1	1.044
方案 7	3	2	1	1.033
方案 8	3	3	2	1.036
方案9	3	1	3	1.029
$K_1$	1.039 3	1.029 0	1.034 3	-
<i>K</i> <sub>2</sub>	1.036 7	1.037 0	1.037 3	-
<i>K</i> <sub>3</sub>	1.032 7	1.042 7	1.037 0	-
$R(\mu)$	0.006 7	0.013 7	0.003 0	-

注:表中"-"为没有数值。

由表4可知,因素B(来流与两风轮轴心连线夹 角)具有最大R(μ)值,表明两风轮之间的夹角β对 交错布局运行效率影响最大,影响程度由强到弱为: R(B)>R(A)>R(C)。各因素水平与指标K<sub>i</sub>关系 如图8所示。





由图 8 可知,当风轮间距越小且夹角越大时,交 错式布局 VAWT 性能越好,虽不同 VAWT 旋转方向 对结果影响相对较小,但正交试验结果表明,反向向 下旋转方案效果最为理想。因此,确定最优布局参 数组合为 A1B3C2。风轮间距设定为 1.5D、来流与 两风轮轴心连线夹角为 75°及两台 VAWT 采取反向 向下旋转。此布局组合方案相较于两台 VAWT 独 立运行,对风场的增益效果最为显著。由表4 可知, 所得最佳交错布局方案并未在出现在正交设计试验 中,因此需对最佳方案进行性能计算以验证试验 结果。

图 9 为并联、串联及最优布局 VAWT 性能因子 对比。



Fig. 9 Comparison of VAWT performance arranged in parallel, tandem and optimal layouts

由图 9 可知,最优布局方案得到的性能影响因 子为 1.050,高于 9 种正交试验布局方案,表明本研 究正交设计试验具备合理性。对于并联排布,性能 因子随风轮间距增大而减小。当风轮间距为1.5D 时,并联排布优于交错布局,此时性能因子为 1.053;而当风轮间距大于1.5D时,通过对比图9与 表4结果可知,最优交错布局性能因子占优。对于 串联布局,不同风轮间距的布局方案得到的性能因 子均小于1,表明串联布局会导致整体风场性能 下降。

#### 3.2 转矩分析

通过上述极差分析对比可知,不同的排布方式 对 VAWT 的风能利用系数有着较大的影响。为了 进一步分析内在机理,将对并联、最优交错以及串联 布局下 VAWT 风轮力矩系数进行分析,并且与相同 工况下单台 VAWT 的风轮力矩系数对比。图 10 是 并联、最优交错以及串联布局的 VAWT 在单个周期 内的转矩系数曲线。其中 0°~180°为迎风区, 180°~360°为背风区。





and optimal layouts

图 10(a)~(c)为不同间距下的并联布局转矩 系数曲线,由图可知并联布局的转矩系数波动总体 上与单台布置时一致,但并联布置转矩系数曲线的 波峰与波谷均要高于单台布置,并随着并联布局间 距的增加转矩系数波峰波谷值逐渐向单台布置时靠 近,这说明风轮间距一定时并联布局 VAWT 的流场 对彼此功率系数提升有促进作用,随着风轮间距增加 VAWT 功率提升也随之减弱,直到与单台布置的 VAWT 相同。

图 10(d)是正交试验分析并计算得出的最优交 错布局转矩系数曲线。由图可知, VAWT2 的波峰 与波谷值明显高于 VAWT1, VAWT1 转矩与单台较 为接近。这是因为,位于 VAWT1 的侧后方的 VAWT2 因 VAWT1 产生的加速流场提升了气动性 能,而 VAWT2 的流场对其侧前方的 VAWT1 的影响 相对较弱。

图 10(e)~(g)为3种串联布局转矩系数曲线 图。由图可知,在串联布局时 VAWT2 几乎不产生 有效转矩,且 VAWT1 转矩系数峰值要低于单台布 置的 VAWT。随着串联布局间距的增加 VAWT1 的 转矩系数曲线逐渐与单台布置时趋向一致。可见, 处于 VAWT1 尾迹区的 VAWT2 无法输出有效功率, 并对 VAWT1 的功率输出产生负面影响,但随风轮 之间距离增大这种负面影响逐渐减小。

#### 3.3 流场分析

为进一步分析不同风场布局下大型 VAWT 的 气动特性,对串联、并联以及交错布局下 VAWT 速 度云图展开分析。为直观表明 VAWT 在流场中的 旋转方向,定义逆时针旋转为正(+),顺时针旋转 为负(-)。

图 11 为不同风轮间距下的并联布局,风轮的旋转方向均为反向向下。由图可知,两台 VAWT 尾迹之间局部流场的速度高于来流,促进了尾迹的发展,随着风轮间距的不断增大,加速气流会引发更多的能量耗散以及加速流场在 VAWT 侧后方的作用会对彼此的影响逐渐减弱,使得 VAWT 的功率输出的提升幅度逐渐下降。如图 11(a)所示,当并联间距过小时尾迹末端开始出现重叠现象。



(a) 并联1.5 D





正交试验方案的9种交错布局速度云图如图 12 所示,其中图12(a)~12(c)风轮间距为1.5D,β 分别为45°,60°,75°。图12(d)~12(f)风轮间距为 2.0D,β分别为60°,45°,75°。图12(g)~图12(i) 风轮间距为2.5D,β分别为60°,75°,45°。图12(j) 为最优交错布局速度云图。





(i) 方案9



图 12 交错布局速度云图 Fig. 12 Velocity contours of staggered layout

由表4正交试验方案结果得出9种交错布局的 性能因子均大于1.表明交错布局中加速流场有效 提升了 VAWT 的输出功率。由图 12 可知,在交错 布局中 VAWT2 处于 VAWT1 的侧后方的加速流场 之中,使得 VAWT2 产生更大的输出功率。当风轮 间距一定时性能因子会随着来流与两风轮轴心连线 夹角的增大而增大,这个过程两 VAWT 沿来流方向 上的垂直距离也在不断增大,尾迹之间流体通道发 展阻力减弱,从而使 VAWT 尾流的发展更有利于功 率提升。可见,在合理的交错布局参数范围内,当风 轮间距一定时来流与两风轮轴心连线夹角越大, VAWT 性能因子越高。当两风轮沿着来流方向的垂 直距离过小时,VAWT 的尾迹之间会发生不同程度 的接触。此外,风轮的旋转产生尾迹偏斜也对尾迹 接触起到一定的诱导作用。图 12(i)为正交试验设 计得出的最优交错布局,可观察到 VAWT2 处于 VAWT1 的侧后方的加速流场中,尾迹之间的流体通 道较为顺畅,未发生明显的早期接触,仅在尾迹末端 出现轻微接触。该布局使得 VAWT 的输出功率显 著提升。

图 13 为串联布置 VAWT 速度云图。区别于并 联和交错的尾迹,串联布置两台 VAWT 尾迹高度重 叠,下游 VAWT 转动会对尾迹整体发展情况带来较 大影响,因此,为深入揭示串联布置尾迹特征,将在 其尾迹 9D、10D 及 11D 处设置与来流垂直的截面,以 观察不同距离的串联布置尾迹恢复程度,并引入相同 工况下单台布置的 VAWT 作为对比参考。

通过观察图 13(a)~图 13(c)不同间距下的串 联布局,可知 VAWT2 完全淹没在 VAWT1 的尾迹之 中,来流经过 VAWT1 后,其尾迹速度大幅降低,而 在流过 VAWT2 后尾迹速度再次被削弱,使串联布 局尾迹中段速度比单台布置更低,在串联布局尾迹 末端的9D、10D以及11D截面处,可以观察到3组 串联布置尾迹末端速度相较于单台布置的尾迹有 不同程度的恢复,其中串联间距为1.5D的相较于 其他间距布置,1.5D的尾迹恢复程度更加明显。 上述现象的主要原因是下游的垂直轴风力机风轮 旋转对上游垂直轴风力机的尾迹中引入了更多的 扰动,使得尾迹中的湍流强度增加,增加了串联布 局尾迹中低速区域与外界的能量交换,促进尾迹更 快恢复。





图 13 串联布局速度云图 Fig. 13 Velocity contours of tandem layout

# 4 结 论

为优化集群式大型 VAWT 气动性能,通过计算 流体动力学方法,分析了并联、交错以及串联布局下 大型 VAWT 的气动性能,通过正交试验方法优化得 出交错布局下大型 VAWT 最佳布局参数,分析了不 同布局下大型 VAWT 的转矩系数以及速度云图。 主要结论如下:

(1)交错布局中来流与两风轮轴心连线夹角对风能利用率的影响最大,风轮间距其次,风轮的旋转方向影响最弱,优化所得的最优交错布局性能因子达到1.050。

(2)并联布置转矩系数提升程度较为一致,在 最优交错布局中 VAWT2 转矩提升比 VAWT1 更显 著;串联布置时下游 VAWT 几乎不产生有效转矩, 上游 VAWT 转矩也会受到负面影响。

(3) 串联布局尾迹中部流速相较于单台布置的 尾迹速度更低,但末端尾迹流速恢复反而更快;交错 布局中 VAWT1 侧后方产生的加速流场以及风轮尾 迹之间的间距是 VAWT2 输出功率提升的重要因 素,风轮间距以及交错角度较小时尾迹会出明显的 重叠。

# 参考文献:

- [1] Global Wind Energy Council. Global wind report 2023 [R]. Brussels: GWEC, 2024.
- [2] BAGALKOT N, JOSE J, KEPRATE A. Chapter 2-Key components of the horizontal axis wind turbine [J]. Multiphysics of Wind Turbines in Extreme Loading Conditions, 2024:17 – 31.
- [3] CAI C, YANG Y, JIA Y, et al. Aerodynamic load evaluation of

leading edge and trailing edge windward states of large-scale wind turbine blade under parked condition [J]. Applied Energy, 2023, 350:121744.

- [4] 杨敬言,阮梓纹,杨 秀,等. 陆上风电碳足迹动态变化的国际 比较研究[J]. 中国工程科学,2024,26(4):1-13.
   YANG Jingyan, RUAN Ziwen, YANG Xiu, et al. International comparative study on dynamic change of onshore wind power carbon footprint[J]. Strategic Study of CAE,2024,26(4):1-13.
- [5] HOWELLR R, QIN N, EDWARDS J, et al. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine[J]. Renewable Energy, 2010, 35(2):412-422.
- [6] 马 宁. 垂直轴风力机的气动特性与翼型优化研究[D]. 上海:上海交通大学,2020.

MA Ning. A study on the aerodynamic characteristics and airfoil optimization of the vertical axis wind turbine [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2020.

- [7] SHAHEEN M, ABDALLAH S. Development of efficient vertical axis wind turbine clustered farms [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 63:237 – 244.
- [8] CAZZARO D, BEDON G, PISINGER D. Vertical axis wind turbine layout optimization [J]. Energies, 2023, 16(6):2697.
- [9] YUTAKA H, YOSHIFUMI J, SHU Y, et al. Numerical simulation on tandem layout of two vertical axis wind turbines[C]//Proceedings of the 2019 Annual General Meeting: JSME, 2019.
- [10] YUTAKA H, YOSHIFUMI J, OKINAGA T, et al. Numerical analysis of the dynamic interaction between two closely spaced vertical-axis wind turbines[J]. Energies, 2021, 14(8):2286.
- [11] BROWNSTEIN I D, WEI N J, DABIRI J O. Aerodynamically interacting vertical-axis wind turbines: Performance enhancement and three-dimensional flow[J]. Energies, 2019, 12(14):2724.
- [12] SHAHEEN M, ABDALLAH S. Efficient clusters and patterned farms for Darrieus wind turbines[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2017, 19:125 - 135.
- [13] XU Z, CHEN J, LI C, et al. Research on the adaptability of dynamic pitch control strategies on H-type VAWT close-range arrays by simulation study[J]. Renewable Energy, 2023, 218:119231.
- [14] 刘美娜.双垂直轴风力发电机气动性能优化研究[D]. 深圳:
   哈尔滨工业大学,2021.
   LIU Meina. Investigation into the optimization of the aerodynamic

performance of twin vertical axis wind turbines [D]. Shenzhen: Harbin Institute of Technology,2021.

- [15] BEDON G, PAULSEN U S, MADSEN H A, et al. Computational assessment of the DeepWind aerodynamic performance with different blade and airfoil configurations [J]. Applied Energy, 2017, 185:1100-1108.
- [16] HAND B, KELLY G, CASHMAN A. Aerodynamic design and performance parameters of a lift-type vertical axis wind turbine: A comprehensive review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2021, 139:110699.

- [17] HAND B P. Aerodynamic design and analysis of a large-scale stall-regulated H-type vertical axis wind turbine for an offshore floating installation [D]. Ireland: Cork Institute of Technology, 2018.
- [18] YOUNGS D L. Rayleigh-Taylor mixing: Direct numerical simulation and implicit large eddy simulation [J]. Physica Scripta, 2017,92(7):074006.
- [19] CHUNG D, PULLIN D I. Direct numerical simulation and largeeddy simulation of stationary buoyancy-driven turbulence [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 643:279 - 308.
- [20] XIAO M J, ZHANG Y S, TIAN B L. Unified prediction of reshocked Richtmyer-Meshkov mixing with K-L model[J]. Physics of Fluids, 2020, 32(3):032107.
- [21] 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.
- [22] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence [M]. London: Academic Press, 1972.
- [23] WILCOX D C. Turbulence modeling for CFD[M]. California: DCW Industries, 1998.
- [24] LIU Q S, BASHIR M, IGLESIAS G, et al. Investigation of aerohydro-elastic-mooring behavior of a H-type floating vertical axis wind turbine using coupled CFD-FEM method[J]. Applied Energy, 2024, 372:123816.
- [25] 邓志民,陈 林,崔亦华,等. 试验设计与数据分析[M]. 广州:华南理工大学出版社,2016.
   DENG Zhimin, CHEN Lin, CUI Yihua, et al. Experimental design and data analysis [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press,2016.
- [26] SHIGETOMI A, MURAI Y, TASAKA Y, et al. Interactive flow field around two savonius turbines[J]. Renewable Energy, 2011, 36(2):536-545.
- [27] DABIRI J O. Potential Order-of-Magnitude enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2011, 3(4):73-87.
- [28] HANSEN J T, MAHAK M, TZANAKIS I. Numerical modelling and optimization of vertical axis wind turbine pairs: A scale up approach[J]. Renewable Energy, 2021, 171:1371 – 1381.
- [29] BATTIST L, PERSICO G, DOSSENA V, et al. Experimental benchmark data for H-shaped and troposkien VAWT architectures
   [J]. Renewable Energy, 2018, 125:425 - 444.
- [30] LUIS S L, SEBASTIAN I L. Optimum power generation assessment in an H-Darrieus vertical axis wind turbine via exergy destruction minimization[J]. Energy Conversion and Management, 2021,243;114312.

(姜雪梅 编辑)