文章编号:1674-7607(2026)02-0089-09 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.240768

不同维度下大型 VAWT 并联布置气动特性分析

谢龙君[1]， 黄浩达[1]， 岳敏楠[1]， 刘青松[1]， 缪维跑[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(VAWT)在不同并联布置间距时的功率提升情况，以及明确其在不同维度下尾迹流场的特性及差异，以大型三叶片 H 型 VAWT 为研究对象，通过计算流体动力学方法分析了不同维度下 VAWT 机组并联间距对其气动性能及流场特性的影响。结果表明：在相同布置间距下，二维与三维并联布置 VAWT 输出功率均有所提升，其中在间距 1.50 倍风轮直径时提升程度最大，但二维模拟所得功率提升程度显著大于三维；三维模拟时 VAWT 风轮内部流场特性较二维更复杂，单周期内叶片峰值产生小幅波动；此外，当并联布置间距过小时，VAWT 机组之间的流体加速通道现象会被削弱，功率提升程度下降，三维涡管可视化图显示尾迹中的涡更难以消散，尾迹恢复需要更长的距离。

关键词：垂直轴风力机；并联布置；计算流体动力学；数值模拟；维度
中图分类号：TK83 **文献标志码**：A **学科分类号**：480.60

Aerodynamic Performance Analysis of Large VAWT Parallel Arrangement in Different Dimensions

XIE Longjun[1]， *HUANG Haoda*[1]， *YUE Minnan*[1]， *LIU Qingsong*[1]，
MIAO Weipao[1]， *LI Chun*[1,2]
(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Institute of Non-carbon Energy Conversion and Utilization, Shanghai 200031, China)

Abstract: To investigate the power enhancement of large vertical axis wind turbines (VAWT) under different parallel arrangement spacings, and clarify the characteristics and differences of their wake flow fields across various dimensions, a large three-bladed H-type VAWT was selected as the research subject. The influence of paralleled spacing on the aerodynamic performance and flow field characteristics of VAWT units was analyzed through computational fluid dynamics methods in different dimensions. Results show that under the same arrangement spacing, both two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) parallel arrangements of VAWT exhibit an increase in output power, with the maximum enhancement observed at a spacing of 1.50 times of the rotor diameter. However, the power improvement obtained from two-dimensional simulations is significantly greater than that from three-dimensional simulations. The internal

收稿日期:2024-12-09 **修订日期**:2025-02-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(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
作者简介:谢龙君(2000—),男,河南信阳人,硕士研究生,研究方向为大型垂直轴风力机气动性能。
岳敏楠(通信作者),女,副教授,博导,E-mail:ymn@usst.edu.cn。

flow field characteristics of the VAWT rotor in three-dimensional simulations are more complex than those in two-dimensional simulations, with slight fluctuations in blade peak values during a single cycle. Furthermore, when the paralleled arrangement spacing is too small, the phenomenon of fluid acceleration channels between the units will be weakened, and the power increase will decrease. The three-dimensional visualization of the vortex tubes shows that the vortices in the wake are more difficult to dissipate, and the wake recovery requires a longer distance.

Key words: vertical axis wind turbine; parallel arrangement; CFD; numerical simulation; dimension

风能因其可再生和无污染的特点,在应对全球气候变化和能源危机中发挥着日益重要的作用[1-3]。截至 2024 年初,全球风电总装机容量达 1 023 GW,过去一年内新增装机容量达 117 GW,占总装机容量的 11%[4]。根据风轮轴与地面的相对位置,风力机可以分为水平轴风力机(HAWT)与垂直轴风力机(VAWT)[5]。目前,HAWT 在风电商业化的发展中占据着主导地位[6],然而,随着 HAWT 叶片及塔架的大型化发展,其所承受的疲劳载荷和自身重量显著增大,导致材料强度、刚性要求以及维护成本也不断增加[7-8]。相较于 HAWT,VAWT 因其结构简单、维护成本低、无需偏航系统以及抗疲劳载荷强等优势[9-10],在大型化以及更密集的集群布置方面具有更大的潜力[11]。

按来流方向定义,VAWT 布置主要分为并联、交错以及串联 3 种方式[12]。其中,并联布置下流场尾迹相互影响[13],可有效提高 VAWT 平均功率系数[14-15]。针对 VAWT 并联布置,国内外已有较多研究。刘美娜[16]通过大涡模拟方法对并联布置的 VAWT 机组开展了三维数值模拟,并研究了各设计参数对功率系数的影响,结果发现风轮旋转方向对功率系数的影响最大,当风轮叶片沿着 VAWT 间隙顺风旋转时,VAWT 功率系数可提升 13.72%。倪露露等[17]通过二维数值模拟研究了两台并联反向旋转的 VAWT 机组尾迹对中心正下方距离 3 倍风轮直径处单台 VAWT 的影响,结果显示并联 VAWT 机组之间的尾迹通道流速显著高于来流风速,有效提高了单台 VAWT 的输出功率。Yutaka 等[18]通过数值模拟方法研究两台 VAWT 并联排布的流场特性,结果表明当 VAWT 机组之间布置过于紧密时,风轮之间的流体流动受阻,从而导致 VAWT 的功率系数下降。Sahebzadeh 等[19]通过计算流体动力学(CFD)方法研究了二维下两台间距为 1.5 m、直径为 1 m 的 VAWT 风场特性,结果发现并联布置下 VAWT 远尾流区域仍然存在一定程度的相互作用。Yadav 等[20]通过二维数值模拟研究了并联排布下风轮直径为 1.03 m 的三叶片 H 型 VAWT 风轮间距对功率系数的影响,结果表明:当风轮间距小于转子直径时(转子之间交错反向向下旋转),且风轮间距为 98.75%直径时,性能最大可提升约 25%;当风轮间距大于风轮直径时,在风轮间距为 1.35 倍风轮直径时,VAWT 性能最大可提升 14%。

上述关于 VAWT 并联布置的研究主要集中于中小型设备,而今在 VAWT 大型化发展已经成为必然趋势的背景下[21],国内外针对大型 VAWT 并联布置的研究仍较为稀缺。由于动力相似的局限性,根据小型 VAWT 的气动性能难以有效评估大型 VAWT 的气动性能。此外,目前关于 VAWT 并联布置的数值模拟研究主要采用单一维度分析,由于二维和三维模拟在气动结果和尾流特征上存在的差异尚不明确,故有必要将二者结合进行综合分析。因此,本文通过 CFD 软件 STARCCM+对大型 VAWT 机组在不同并联布置间距下的气动性能及尾流特征展开研究,并对比分析了多维度下的气动性能和流场特性差异,为 VAWT 机组布局方式的高效评估提供理论参考。

1 数值与几何模型

1.1 几何模型

对三维下 VAWT 并联布置的气动性能进行研究,为了使模拟时 VAWT 的内部流场以及尾迹特性更接近于实验时的流场特征,故模拟时保留支撑杆和塔架结构,几何模型如图 1(其中 S1~S6 表示支撑杆不同截面)所示,采用 Liu 等[22]设计的大型 VAWT 模型,该几何模型在 Hand[23]设计的 5 MW 双叶片 H 型 VAWT 基础上改进而来。叶片翼型为 DU-06-W-200,表 1 为 VAWT 具体几何参数。支撑杆各截面数据如图 2 所示,其中横纵坐标系采用弦长归一化处理,坐标轴分别表示为 x/c 和 y/c,x、y 为局部坐标系坐标,c_i 为支撑杆某个截面处弦长),支撑杆截面中心点距风轮旋转轴心的径向距

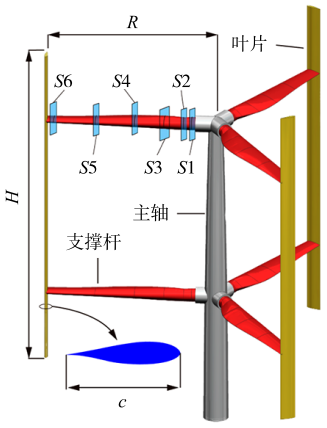


图 1　VAWT 几何模型

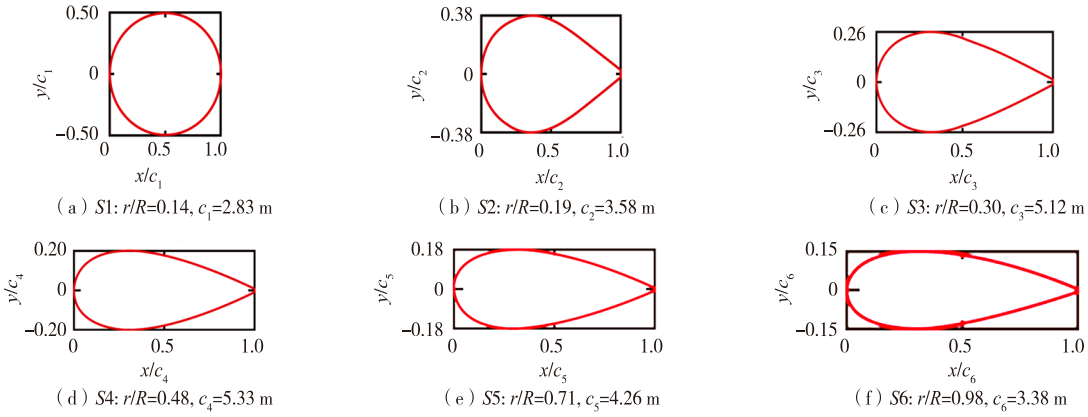
Fig. 1　VAWT geometric model

离定义为 r。并联排布下二维模拟的几何模型可视为取三维 VAWT 几何模型中部截面，并去除塔架截面。

表 1　VAWT 模型参数

Tab. 1　VAWT model parameters

参数	数值
叶片弦长 c/m	3.512
叶片高度 H/m	70.250
叶片数量 N	3
风轮半径 R/m	36.760
叶片桨距角 β/(°)	2
额定转速 ω/(r·min^{-1})	6.81



(a) $S1$: r/R=0.14, c_1=2.83 m　(b) $S2$: r/R=0.19, c_2=3.58 m　(c) $S3$: r/R=0.30, c_3=5.12 m

(d) $S4$: r/R=0.48, c_4=5.33 m　(e) $S5$: r/R=0.71, c_5=4.26 m　(f) $S6$: r/R=0.98, c_6=3.38 m

图 2　支撑杆不同截面翼型参数

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

1.2　VAWT 布置方式及气动参数

以 1.50D(其中 D 为风轮直径)的风轮间距为初始值，并以 0.50D 为增量增加到间距 2.50D，此外，为了验证风轮间距过小所带来的影响，额外增加风轮间距为 1.25D 的布置方案，最终风轮间距设定为 1.25D、1.50D、2.00D、2.50D，对这 4 组方案进行实验模拟。本文设定的 VAWT 旋转方向为风轮叶片沿着风轮间隙顺风旋转，以保证 VAWT 的功率系数提升达到最佳程度。为实现在相同风向下 VAWT 反向旋转，将 VAWT 原几何模型的叶片及上下支撑杆沿着支撑杆与塔架连接处交换位置，几何参数保持不变。

尖速比 λ 定义为叶片旋转线速度与来流风速之比，是 VAWT 重要的设计参数，其表达式如下：

$$\lambda=\omega_t R/V_\infty \tag{1}$$

式中：ω_t 为风轮旋转角速度，rad/s；V_∞ 为来流风速，m/s。

转矩系数 C_T 是表征风轮从来流风能中获取力矩的能力，是衡量 VAWT 风能利用率的重要参数，如式(2)所示：

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

式中：$M(\theta)$为相位角为 θ 时的力矩，N·m；ρ 为空气密度，kg/m^3；A 为风轮的迎风面积，m^2。

功率系数 C_p 是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，也是衡量 VAWT 效率的重要参数：

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

式中：P 为输出功率，W。

1.3　湍流模型

雷诺时均纳维-斯托克斯(RANS)模拟因其模拟精度高以及计算成本低等优势，已成为工程应用最广泛的模拟方法。而基于 RANS 模拟方法的剪切应力传输(SST)k-ω 湍流模型分别结合了 k-ω 模型在边界层内部和 k-ε 模型在边界层外部的计算优势[24]，计算效率和精度已被证明适用于 VAWT 的空气动力学性能计算[25]。因此，采用 SST k-ω 湍流模型分别模拟不同维度下 VAWT 并联布置的边界层流动及尾流发展，同时利用压力-速度耦合算法解

决压力与速度场的耦合问题，并采用二阶迎风格式离散化对流项，以提升模拟精度。

1.4 数值模型

基于上述 VAWT 几何模型及并联布置的方案，模拟设定二维与三维计算域及边界条件如图 3 所示，本研究中的 2 台 VAWT 均以恒定转速 $\omega=6.81$ r/min 反向旋转，其风轮中心间距定义为 L。二维与三维计算域的进口条件为速度进口，来流速度为 V_∞；出口条件设置为压力出口，压力 $p=0$ Pa，其余边界条件为对称平面。

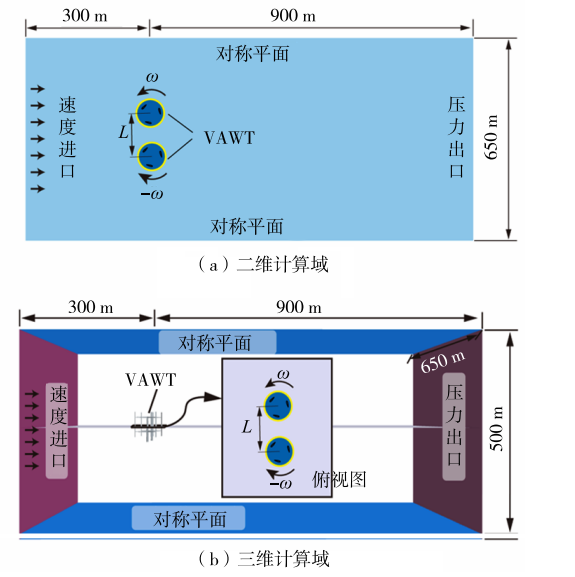


图 3 不同维度下 VAWT 并联布置计算域

Fig. 3 Computational domains of VAWT parallel arrangements in different dimensions

1.5 网格划分

VAWT 计算域网格划分如图 4 所示，其中二维网格采用多边形网格，以保证二维计算数值模型的收敛性与计算速度。VAWT 的旋转域采用重叠网格来实现 VAWT 旋转。在叶片表面棱柱层网格层数为 15，第一层网格厚度为 1×10^{-4} m，最终数值模型的网格数量为 198 139。为最大程度上保证与二维模拟的一致性，三维网格采用多面体网格生成器生成高质量多面体网格，如图 4(b)所示。VAWT 的旋转域同样采用重叠网格技术实现风轮旋转。为保证三维网格计算的准确性同时降低计算成本，单独对叶片尾迹加密以精确捕捉叶片尾部流动细节，叶片表面棱柱层网格层数为 8，第一层网格厚度为 0.001 m，叶片表面 Y^+ 值为 240，最终计算域网格总数约 9 868 160，其中背景域网格数量约为 3 127 304，两旋转域网格数量约 6 740 856。

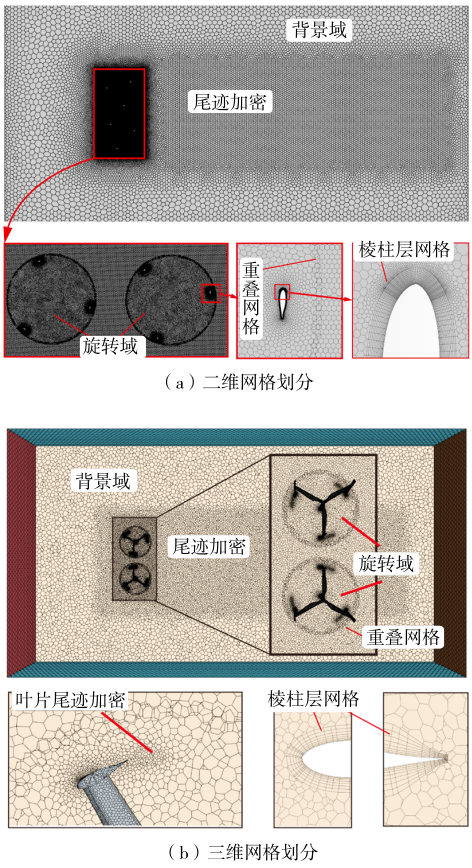


图 4 不同维度下 VAWT 并联布置网格划分

Fig. 4 Grid division of VAWT parallel arrangements in different dimensions

2 可靠性验证

2.1 网格无关性验证

分别采用 3 种方案 M1～M3 对二维与三维网格方案进行无关性验证，网格方案如表 2 所示。

表 2 二维与三维不同网格数量对功率系数的影响

Tab. 2 Effect of different grid numbers in 2D and 3D models on power coefficients

参数		M1	M2	M3
二维网格	数量	15.4 万	19.8 万	25.1 万
	C_p	0.313	0.336	0.335
三维网格	数量	871 万	986 万	1 121 万
	C_p	0.229	0.232	0.234

对于二维模拟，3 套网格数量分别为 15.4 万、19.8 万和 25.1 万，M2 较 M1 网格计算出的 C_p 增加了 7.3%，而 M3 较 M2 网格方案计算出的 C_p 差异为 0.29%。此时，可忽略网格数量对实验结果的影响。因此，为兼顾计算精度以及减少计算资源的浪费，二维网格方案最终选取 M2 网格方案。对于三维网格，3 套网格数量分别为 811 万、986 万和

1 121 万，由结果可知，M1 和 M2 以及 M2 和 M3 网格方案计算出的 C_p 的变化分别 1.31% 和 0.86%，上述验证结果表明 M2、M3 之间的网格差异对实验结果的影响可以忽略，为节约计算资源同时保证计算的准确性，三维数值模拟同样选取 M2 网格方案。

2.2　湍流模型验证

为确保所选湍流模型的可靠性，分别对 VAWT 二维与三维数值模型在不同尖速比下展开可靠性验证，所得功率系数与实验值[26]的对比结果如图 5 所示。

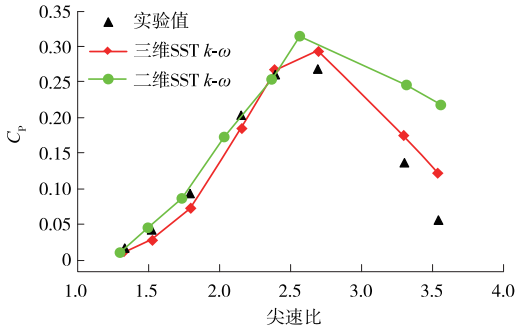


图 5　湍流模型可靠性验证

Fig. 5　Reliability verification of turbulence models

由图 5 可知，本文所建立的三维 VAWT 数值模型的 C_p-λ 曲线与实验值吻合程度较好，而二维计算结果在高尖速比下较实验值产生一定的偏差，主要是因为二维模型中无法考虑叶尖涡对气动性能的影响以及二维风轮流场中不存在塔架和支撑杆转动产生的扰动和阻力，造成高尖速比下二维 VAWT 的 C_p 略高于实验值。总体而言，本文数值模拟实验选取的 SST k-ω 湍流模型具有较高的可靠性。

3　结果与分析

3.1　功率系数

为了更直观地反映 VAWT 二维与三维并联布置数值模型实验得到的功率提升程度，现引入性能因子 Ω[27]，表示并联运行下 VAWT 相较于单台运行时平均输出功率增益，定义如下：

$$\Omega=\frac{\sum_{i=1}^{n}C_{p,i}}{n\cdot C_{p,iso}} \tag{4}$$

式中：$C_{p,i}$ 为并联布置中每台 VAWT 的功率系数；$C_{p,iso}$ 为单台 VAWT 独立运行的功率系数；n 为并联布置中的 VAWT 数量。

不同维度下 VAWT 并联布置的性能因子如图 6 所示。由图 6 可知，在相同间距下，二维并联布置 VAWT 的性能因子均大于三维并联布置。实验设定的 4 组风轮间距在不同维度下表现出一定的相似性，其中相较于单台运行的 VAWT，二维与三维的性能因子均在风轮间距为 1.50D 时达到最大提升值：二维的性能因子提升了 10.5%，三维的性能因子提升了 5.1%。随着风轮间距增大，性能因子逐渐减小，而风轮间距为 1.25D 时，性能因子低于风轮间距为 1.50D 时的情况。表明风轮间距过大或过小都会降低并联布置 VAWT 输出功率的提升效果。

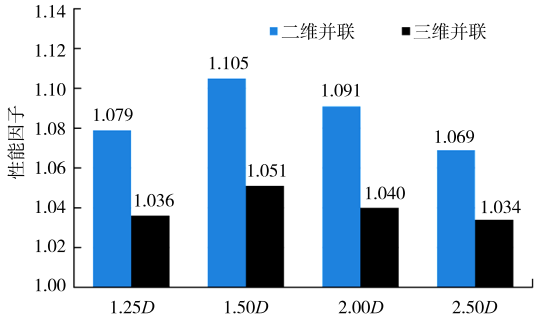


图 6　二维与三维 VAWT 并联布置性能因子

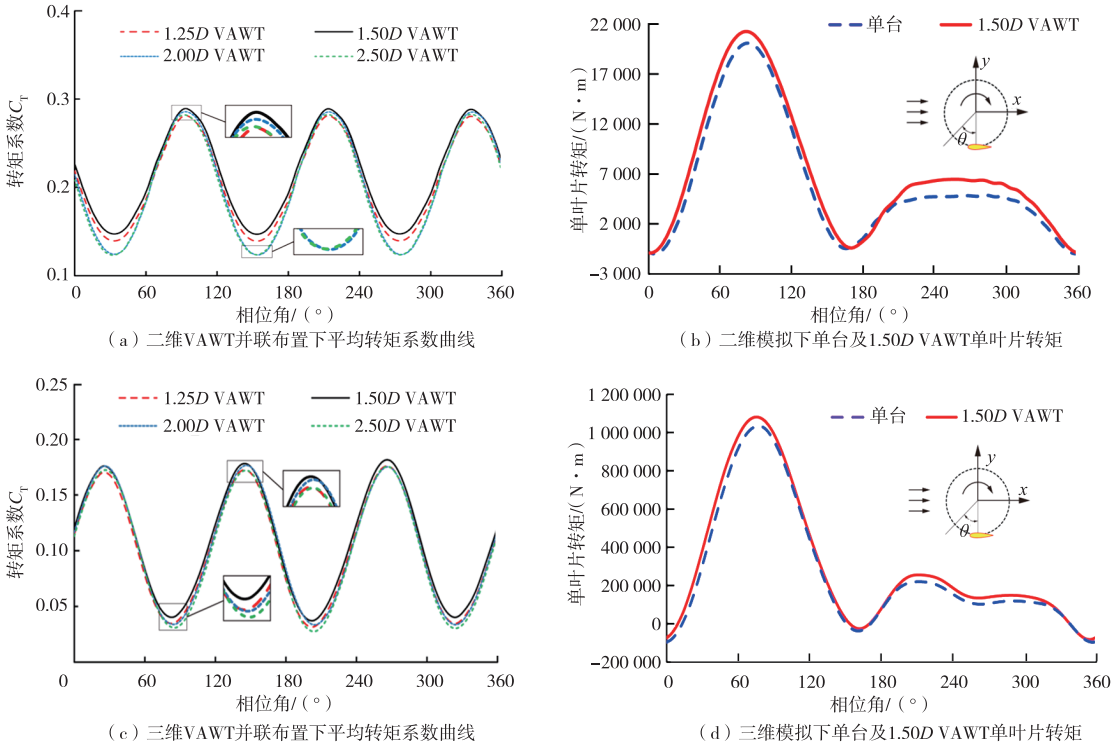
Fig. 6　Performance factors for 2D and 3D VAWT parallel arrangements

3.2　转矩系数

由上述对不同维度下 VAWT 并联布置输出功率的极差分析可知，VAWT 并联布置模拟在不同维度下的输出功率均有所提升，但结果存在着一些差异，为了进一步探究二维与三维 VAWT 气动性能的差异，对 4 组风轮间距在单个周期内的风轮转矩系数以及单叶片转矩进行分析，不同维度下风轮转矩系数以及单叶片转矩如图 7 所示。为了更加清晰地显现并联布置下 VAWT 单叶片在一个旋转周期内的转矩增加程度，选取输出功率提升最大、并联间距为 1.50D 的 VAWT 机组，将其单叶片转矩与单台布置时的 VAWT 叶片转矩进行对比分析。

图 7(a)为二维 VAWT 4 组不同并联间距在一个周期内的风轮转矩系数曲线，4 条曲线总体波动趋势相似，但波谷高度有所差异，风轮间距为 1.50D 的 VAWT 转矩波动明显高于其他 3 组，风轮间距为 2.00D、2.50D 的 VAWT 转矩系数曲线基本上保持一致，但在波峰时风轮间距为 2.00D 的转矩系数仍高于 2.50D，风轮间距为 1.25D 时波谷的转矩系数高于 2.00D 和 2.50D，但波峰的转矩系数是 4 组中最低的，上述现象与极差分析中 VAWT 性能提升情况基本一致。为进一步探究并联布置 VAWT 性能增益的机理，二维模拟下单台及 1.50D 并联的 VAWT 单叶片转矩如图 7(b)所示。由

图 7(b)可知:在迎风区(叶片旋转的前半周,即 0°～180°方位,直接面对来流风),1.50D 间距下并联布置的 VAWT 转矩整体高于单台机组;在背风区(叶片旋转的后半周,即＞180°～360°方位,处于风轮尾流影响中),该并联布置的转矩同样显著优于单台情况。这一现象表明,并联布置改变了流场结构,使得风轮内部的整体流速相较于单台布置时有所增加。有效缓解了该区域因尾流干扰导致的流速衰减和能量亏损,从而显著增大了单个叶片在背风区运行时的气动转矩。



(a) 二维VAWT并联布置下平均转矩系数曲线　(b) 二维模拟下单台及1.50D VAWT单叶片转矩

(c) 三维VAWT并联布置下平均转矩系数曲线　(d) 三维模拟下单台及1.50D VAWT单叶片转矩

图 7　不同维度下风轮转矩系数及单叶片转矩

Fig. 7　Wind turbine torque coefficients and torque of a single blade in different dimensions

三维 VAWT 并联布置的转矩系数如图 7(c)所示。相较于二维并联布置,不同间距下三维 VAWT 并联布置的转矩系数曲线之间的差异并没有二维显著,1.50D VAWT 的曲线总体在 1.25D、2.00D、2.50D 曲线之上,2.50D VAWT 的转矩系数曲线基本上是 4 组中最低水平。此外,图 7(c)中不同间距下三维 VAWT 的转矩系数曲线在一个周期中 3 个波峰与波谷的值存在小范围的波动,相较于二维 VAWT 并联布置的流场特性,三维并联布置的流场及叶片的气动载荷更复杂。图 7(d)对比了三维模拟下单台 VAWT 与 1.50D 并联 VAWT 的单叶片转矩,结果显示 1.50D 布置的转矩整体高于单台布置。

结合上述分析以及对比不同维度下转矩系数差异发现,二维并联布置的 VAWT 风轮转矩系数明显大于三维并联,且三维单叶片转矩受到塔架的影响在 270°时出现一次减弱波动,这是由于二维几何模型简化使风轮内部的流动阻力以及扰动减少。而在三维流场中塔架和支撑杆的作用下,风轮内部有着很强的涡流相互作用,能量耗散较大。

3.3　尾迹分析

为分析并联布置 VAWT 后方尾迹的速度分布,沿着来流方向分别在 1.0D、5.0D、9.0D 处设置速度检测点,其中三维的监测点取在叶片中部截面,得到的速度分布曲线如图 8 所示,其中 U/U_∞、Y/D 分别为尾迹速度与来流速度之比、Y 方向以直径为特征长度的归一化距离。

由图 8 可知,二维与三维 VAWT 并联布置的尾迹速度分布主要特征相似,但随着尾迹不断发展,到达 9.0D 时二维并联布置的尾迹速度恢复仍不明显,而三维布置的尾迹速度有明显恢复的趋势。由图 8 可知,在 1.25D 时并联布置的尾迹中间区域,速度随着尾迹的不断发展逐渐降低,加速流体通道现象因尾迹接触而减弱,随着并联间距的增加这一现象逐渐减弱,在并联间距为 1.50D 后这种现象几乎消失,加速流体通道流动不再受阻。此外,二维并联布置的尾迹曲线较为平滑,表现出较强的规律性,三维并联布置的尾迹速度分

布曲线有些波动且无规律性，三维并联布置在尾迹距离到达 9.0D 时出现较为明显的波动，反映了三维流场的复杂性。

二维 VAWT 4 组不同并联间距的速度场如图 9 所示。由图 9 观察到，来流经过定速旋转的 VAWT 后的流速显著降低，在并联布置的 VAWT 两侧以及两台 VAWT 尾迹之间均产生了较为明显的加速流场。由图 9(a)可以观察到，由于过紧的风轮间距，两台 VAWT 尾迹之间的加速流体通道现象明显减弱，并联间距为 1.50D 的尾迹并未出现明显的尾迹相交现象，随着间距不断增大，并联间距为 2.00D、2.50D 时尾迹不再相交。此外，通过观察发现 4 组不同间距并联布置的尾迹末端都有相互靠近的趋势。

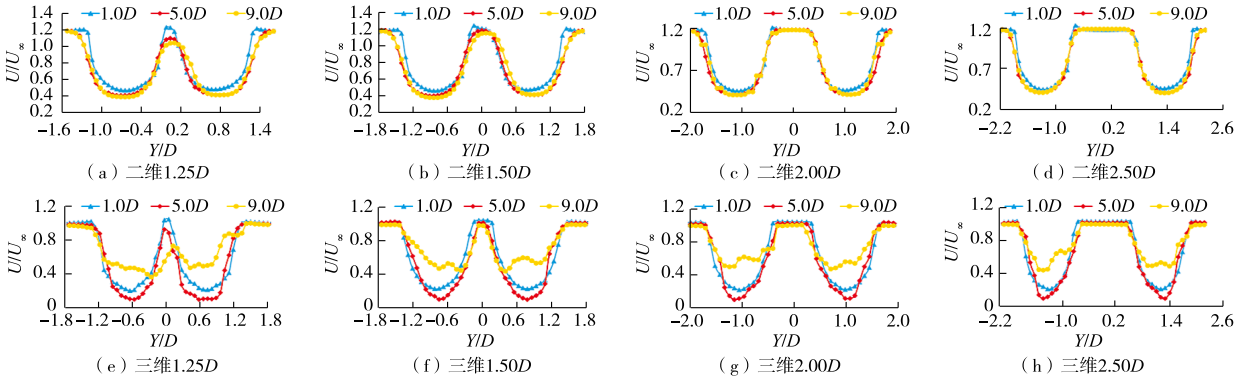


图 8　不同维度下 VAWT 并联布置尾迹速度对比

Fig. 8　Comparison of trajectory velocities of VAWT parallel arrangements in different dimensions

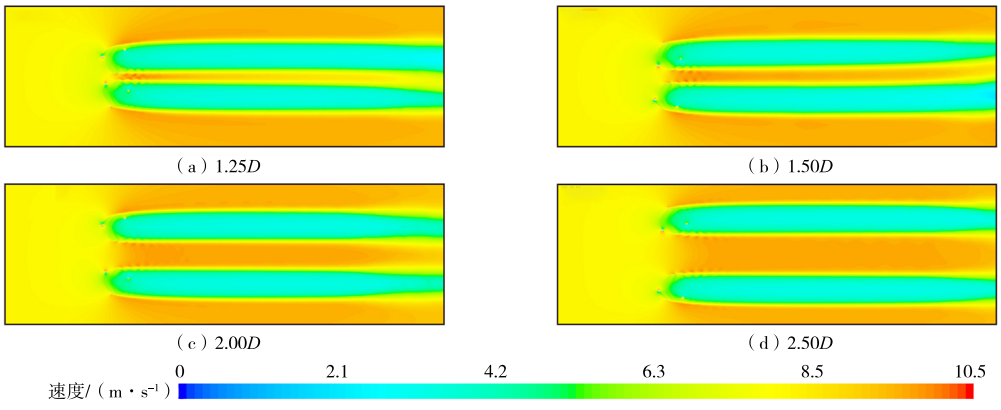


图 9　二维 VAWT 并联布置速度云图

Fig. 9　Velocity cloud for 2D VAWT parallel arrangement

对于三维 VAWT 并联布置的流场分析，分别展示了并联布置机组中一台 VAWT 垂直中部截面速度云图、并联布置机组水平中部截面速度云图以及基于 Q-准则生成的三维涡管的俯视图，如图 10 所示。首先，观察 4 组 VAWT 垂直中部截面速度云图可知，尾迹的轮廓从开端到中段相对较为稳定，而中段到尾迹末端的尾迹轮廓开始发生变化，表明尾迹后半段开始出现摆动，上述现象解释了图 8 中三维尾迹速度分布中 VAWT 尾迹在 9.0D 时出现明显波动的现象。

观察三维 VAWT 并联布置水平中部截面速度云图及涡管可视化图，来流在流过 VAWT 后的速度逐渐降低，在尾迹中部时速度达到最低值，随着尾迹的不断发展尾迹速度逐渐恢复。在 VAWT 旋转的过程中，涡管不断从叶片及塔架上脱落后向风轮后方发展。由图 10 可观察到，1.25D 并联布置的尾迹末端存在大量的涡结构，而在 2.50D 并联布置的尾迹末端，涡管几乎消失，随着并联间距的增大，尾迹中涡的消散速度更快，表明过小的并联布置间距时，尾迹中的涡更难以消散，尾迹恢复则需要更长的时间和距离。三维并联布置的流场中也存在加速流场以及两个 VAWT 尾迹之间的加速流体通道，但流体加速的程度没有二维流场显著，主要是由于数值模型的差异造成的。此外，在三维流场中也可以观察到尾迹相互接触现象，风轮间距越小，尾迹就会越早出现接触。

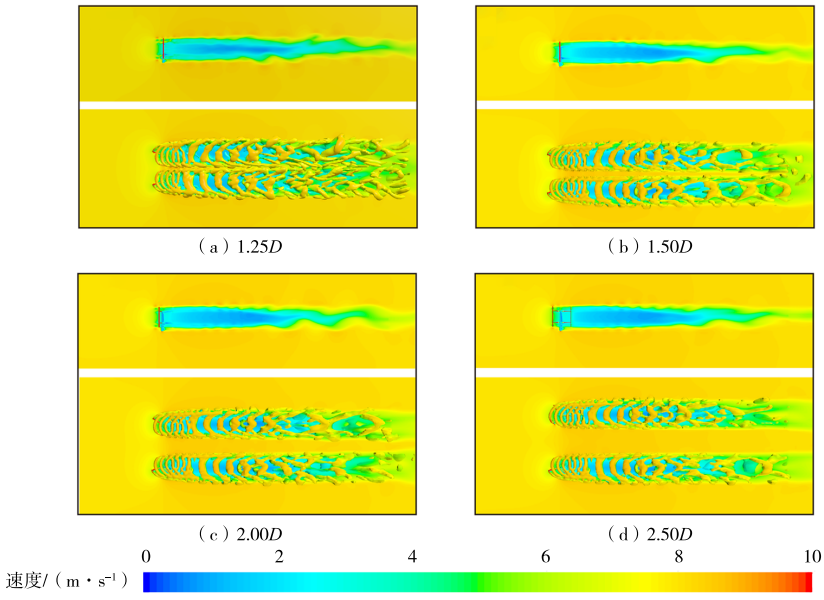


图 10 三维 VAWT 并联布置速度云图及三维涡管可视化

Fig. 10 Velocity cloud and vortex tube visualization for 3D VAWT parallel arrangement

4 结论

(1) 二维与三维并联布置的 VAWT 输出功率的提升总体上具有相似性,在间距 1.50D 时功率输出最大,过小或者过大的间距时功率输出提升都将降低。由于不同维度数值模型的差异,二维并联布置的 VAWT 输出功率提升程度显著大于三维。

(2) 相较于单台布置的 VAWT,并联布置 VAWT 叶片转矩在整个旋转周期均有所提升,三维并联布置的 VAWT 风轮转矩系数曲线相较于二维的 VAWT 存在更明显的波动,反映了三维流场的复杂性。

(3) 尾迹分析显示,当并联布置的间距过小时,二维与三维模拟尾迹都会出现重叠现象,且 VAWT 之间的流体加速通道现象会被削弱,导致 VAWT 并联布置时的输出功率提升程度下降。三维流场中的涡管可视化图表明,并联间距越小,尾迹中涡消散得越慢,尾迹越难以恢复。

参考文献:

[1] HOU Peng, HU Weihao, CHEN Cong, et al. Optimization of offshore wind farm layout in restricted zones[J]. Energy, 2016, 113: 487-496.

[2] BUONOMANO A, CALISE F, D'ACCADIA M D, et al. A hybrid renewable system based on wind and solar energy coupled with an electrical storage: dynamic simulation and economic assessment[J]. Energy, 2018, 155: 174-189.

[3] JUNG C, SANDER L, SCHINDLER D. Future global offshore wind energy under climate change and advanced wind turbine technology[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 321: 119075.

[4] GWEC. Global wind report 2023[R]. Brussels: GWEC, 2024.

[5] 伊恩·帕拉斯基沃尤. 垂直轴风力机原理与设计[M]. 李春, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 2013.

[6] PENG H Y, LIU H J, YANG J H. A review on the wake aerodynamics of H-rotor vertical axis wind turbines[J]. Energy, 2021, 232: 121003.

[7] HOWELL 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.

[8] VEERS P, DYKES K, LANTZ E, et al. Grand challenges in the science of wind energy[J]. Science, 2019, 366(6464): eaau2027.

[9] GALINOS C, LARSEN T J, MADSEN H A, et al. Vertical axis wind turbine design load cases investigation and comparison with horizontal axis wind turbine[J]. Energy Procedia, 2016, 94: 319-328.

[10] LIU Jing, LIN H, ZHANG Jun. Review on the technical perspectives and commercial viability of vertical axis wind turbines[J]. Ocean Engineering, 2019, 182: 608-626.

[11] ABDOLAHIFAR A, ZANJ A. Addressing VAWT aerodynamic challenges as the key to unlocking their potential in the wind energy sector[J]. Energies, 2024, 17(20): 5052.

[12] ZANFORLIN S, NISHINO T. Fluid dynamic mechanisms of enhanced power generation by closely spaced vertical axis wind turbines[J]. Renewable En-

ergy，2016，99：1213-1226.

[13] 田甜，孙翀，竺晓程，等. 垂直轴风力机尾迹的时空特性[J]. 动力工程学报，2023，43(3)：341-348，371.
TIAN Tian，SUN Chong，ZHU Xiaocheng，et al. The spatial-temporal evolution of the vertical axis wind turbines wake[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2023，43(3)：341-348，371.

[14] SHIGETOMI A，MURAI Y，TASAKA Y，et al. Interactive flow field around two Savonius turbines [J]. Renewable Energy，2011，36(2)：536-545.

[15] 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)：043104.

[16] 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，2019.

[17] 倪露露，缪维跑，李春，等. 基于格尼襟翼的多机组垂直轴风力机性能增效研究[J]. 动力工程学报，2021，41(5)：411-419.
NI Lulu，MIAO Weipao，LI Chun，et al. Research on performance enhancement of farms vertical axis wind turbine based on gurney flap[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2021，41(5)：411-419.

[18] YUTAKA H，YOSHIFUMI J，SHU Y，et al. Numerical simulation on tandem layout of two vertical axis wind turbines[C]//Proceedings of 2019 Annual General Meeting. Akita，Japan：JSME，2019，10.

[19] SAHEBZADEH S，REZAEIHA A，MONTAZERI H. Towards optimal layout design of vertical-axis wind-turbine farms：double rotor arrangements[J]. Energy Conversion and Management，2020，226：113527.

[20] YADAV S，VEERAVALLI S V，SINGH S N. Effect of rotor spacing，overlapping and non-overlapping，on the performance of a coupled counter-rotating twin-rotor VAWT using CFD[J]. Renewable Energy，2024，221：119811.

[21] HAND B，CASHMAN A. A review on the historical development of the lift-type vertical axis wind turbine：from onshore to offshore floating application [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments，2020，38：100646.

[22] LIU Q S，BASHIR M，IGLESIAS G，et al. Investigation of aero-hydro-elastic-mooring behavior of a H-type floating vertical axis wind turbine using coupled CFD-FEM method [J]. Applied Energy，2024，372：123816.

[23] 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]. Cork，Ireland：Cork Institute of Technology，2018.

[24] CHEN Jian，ZHANG Yu，XU Zhongyun，et al. Flow characteristics analysis and power comparison for two novel types of vertically staggered wind farms [J]. Energy，2023，263：126141.

[25] 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.

[26] BATTISTI L，PERSICO G，DOSSENA V，et al. Experimental benchmark data for H-shaped and troposkien VAWT architectures[J]. Renewable Energy，2018，125：425-444.

[27] 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.