

# 错列式双风机尾流干扰的数值模拟分析

段鑫泽, 程萍, 万德成\*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

通信作者: [dcwan@sjtu.edu.cn](mailto:dcwan@sjtu.edu.cn)

**摘要:** 在大型风电场中, 部分风机会受到其他风机的尾流干扰, 风机之间复杂的尾流干扰会对气动功率输出、尾流速度、湍流应力以及尾涡结构产生显著影响。准确描述多台风力机相互作用时的尾流特征成为提高风电场效率的关键问题。本研究将致动线模型与CFD方法相结合, 通过求解不可压缩的N-S方程, 实现对错列布置双风机进行模拟计算。并通过改变风机转速实现叶尖速比变化, 对3种不同叶尖速比下的下游风机系统进行数值模拟, 得到的数值结果与“Blind Test 3”实验以及其他模拟方法进行对比。数值对比结果表明, 本研究结果与实验结果吻合较好, 特别是对于上游风机的气动功率, 其误差不超过3%。另外与实验对比, 致动线模型对尾流特征的模拟存在误差, 但整体变化趋势一致。所以利用致动线模型, 可以近似模拟出錯列布置两风机的气动载荷以及风机尾迹的基本特征, 包括平均尾流速度和平均湍流应力的分布特征。

**关键词:** 风电场; 致动线模型; 尾流干扰效应; Blind Test 3; 叶尖速比

## 1 引言

风能作为一种最有潜力的可再生能源, 成为近10年来能源开发领域的研究热点, 特别是对于海上风能的快速推进, 建设大型风电场, 将成为利用海上风能的必然趋势<sup>[1]</sup>。因此, 风力机的空气动力特性的研究与开发显得越发迫切和重要, 因为风力机的空气动力特性不仅关系到风力机本身的功率输出和结构变形, 而且关系到风电场中不同风力机之间的相互作用, 从而影响整个风电场的发电量<sup>[2]</sup>。对于大型风电场, 为了追求最大的发电量和经济效益, 风机不可避免会受到其他风机的尾流影响, 在风机尾流作用下, 不仅会造成下游风机入流条件的恶化, 降低下游风机的发电效率, 而且会使风机受到更大的疲劳载荷, 增加维修和运营成本。特别是不同风机之间尾流的相互干扰, 将导致风机周围的流场发现剧烈变化, 可能存在一定的尾流扭曲、尾流变形、扩散等特殊现象, 准确描述多台风力机相互

作用时的尾流特征成为提高风电场效率的关键问题<sup>[3]</sup>。

针对风电场中多风机之间尾流相互干扰这一问题，国内外学者进行不同方法的探索研究。其中风力机尾流模型主要描述尾流影响范围及尾流区内任意位置处的风速。目前应用较为广泛的一维尾流模型是 Jensen 模型和 Park 模型。Park 尾流模型是 Katic<sup>[4]</sup>在 Jensen 模型基础上提出的，可以分析风电场中的尾流干扰，这一理论被应用于风能资源评估软件 WAsP 中，而且拥有可靠的精度。受到一维尾流模型的启发，大量其他的模型被研究出来，其维度也从一维拓展到了二维甚至三维<sup>[5]</sup>。相比一维线性尾流模型，二维尾流模型更精确，但运算复杂、效率低，常用于精确计算风电场发电量<sup>[6]</sup>。但这些尾迹模型的一个共同的缺点是它们不能捕获实际尾流的湍流特性。这可能会导致风电场的尾流干扰被低估，不能准确预测与叶片疲劳问题密切相关的气动载荷。

考虑到这个问题，一些学者尝试利用实验手段来进行风电场的尾流特性研究分析。其中，Khosravi 等<sup>[7]</sup>通过尺度比为 1:300 的模型实验，满足 Froude 准则，对比分析在平台有无纵荡运动时的风机性能，实验结果表明在平台纵荡激励下，风机的尾迹效应影响的距离更远。然而 Troldborg<sup>[8]</sup>指出，实验方法相对于全尺度模型，低雷诺数和尺度效应的缺陷是不可能避免的。利用实验方法研究实尺度风电场的尾流相互作用是不现实的，因为所需建设费用和时间成本都难以承受。利用 CFD 技术进行风场的模拟，可以很好地考虑湍流影响，不存在尺度效应，而且可以研究大雷诺数问题。基于 CFD 理论发展出来的三维尾流模型可以通过求解三维 Navier-Stokes 方程获得风力机后任意位置处的风速、压力和湍流强度等流场参数。但三维尾流模型需要建立风力机三维实体网格以及精确计算风力机的尾部流场，对计算硬件要求高、耗时长，所以很难从单台风力机推广到整个风电场。所以为了简化网格划分难度、提高计算速度，通过致动盘和致动线等模型建立三维 CFD 尾流模型被越来越多的学者所认可<sup>[9]</sup>。田等<sup>[10]</sup>结合致动盘理论和 CFD 方法，采用 FLUENT 软件对风电场内的 9 台风机尾流干扰情况进行了数值模拟，并研究不同偏航角对尾流干扰现象的影响。Troldborg 等<sup>[11-12]</sup>利用商业软件 EllipSys3D 求解非定常 Navier-Stokes 方程，结合致动线模型分析了两个风机的尾流相互干扰现象。计算结果表明，上游风机的尾流区存在强尾流影响区和弱尾流影响区。在强尾流影响区里，风机受到尾流的干扰影响大，其功率损失比较严重，当下游风机脱离了强尾流影响区时，风机输出功率会明显增大。Churchfield 等<sup>[13][14]</sup>采用 SOWFA 软件使用大涡模拟方法分析了风机的尾流干扰效应，并利用致动线模型代替实际风机，模拟分析 Lillgrund 风电场的 48 台风机，结果显示，该方法可以较准确模拟风电场中前 5 排风机的气动性能以及功率输出。

本研究采用课题组基于开源平台 OpenFOAM 自主开发的 FOWT-UALM-SJTU 求解器<sup>[15-16]</sup>中风电场求解模块 ALMWindFarmFoam<sup>[17]</sup>。ALMWindFarmFoam 求解模块通过致动线模型建立三维风机的尾流模型，利用体积力模拟风机叶片，将致动线模型与 CFD 相结合，对在下游风机处于 3 种不同叶尖速比下的错列式双风机系统进行数值模拟，得到的数值结果与“Blind Test 3”实验以及其他模拟方法进行对比，验证致动线模型在模拟错列式双风机的气动性能及尾流干扰的可靠性和准确性。

## 2 数值方法

### 2.1 致动线模型 (ALM)

致动线的概念最早由 Sørensen 和 Shen<sup>[18]</sup>引入, 抛弃轴对称假定, 是一种全三维的瞬态气动模型。致动线模型利用虚拟的、承受体积力的线代替风机叶片, 无需求解叶片表面边界层, 无需使用动网格技术, 从而大大降低了网格量以及求解时间。在致动线模型中, 叶片沿径向被离散为一系列的致动点, 通过计算在致动点上的流场作用力, 再利用正则化核函数将这些力反作用于流场<sup>[19]</sup>。其中的升力以及阻力计算为:

$$L = \frac{1}{2} C_l(\alpha) \rho U_{rel}^2 c dr \quad (1)$$

$$D = \frac{1}{2} C_d(\alpha) \rho U_{rel}^2 c dr \quad (2)$$

其中,  $C_l$  和  $C_d$  分别是升力和阻力系数,  $\alpha$  是当地攻角,  $U_{rel}$  是相对与叶片的空气流速,  $c$  是叶片弦长,  $dr$  是叶素宽度。为了计算相对速度大小, 我们需要考虑旋转的叶片的局部速度矢量关系, 如图 1。从图 1 所示的速度三角形中我们可以计算得到相对速度大小:

$$U_{rel} = \sqrt{U_z^2 + (\Omega r - U_\theta)^2} \quad (3)$$

其中,  $U_z$  和  $U_\theta$  分别代表轴向速度和切向速度,  $\Omega$  是风机叶片的旋转速度。此时每个致动点处的体积力可以由下式计算:

$$\vec{f} = (L, D) = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr (C_l \vec{e}_L + C_d \vec{e}_D) \quad (4)$$

每个致动元产生的力作为一系列离散的点力不能直接作用于流场, 必须进行光顺处理以避免产生错误的数值振荡。Sørensen 和 Shen 采用如下的高斯权函数来将致动力反作用于计算域:

$$\eta_\varepsilon(d) = \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{3/2}} \exp\left[-\left(\frac{d}{\varepsilon}\right)^2\right] \quad (5)$$

于是, 流场中  $(x, y, z)$  处的体积力为:

$$f_{s,i}(x, y, z, t) = f \otimes \eta_s = \sum_{j=1}^N f(x_j, y_j, z_j, t) \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{3/2}} \exp\left[-\left(\frac{d_i}{\varepsilon}\right)^2\right] \quad (6)$$

其中,  $(x_i, y_i, z_i)$  是第  $i$  个致动点,  $d_i$  是点  $(x, y, z)$  与点  $(x_i, y_i, z_i)$  之间的距离。  $\varepsilon$  称为高

斯光顺参数。 $\varepsilon$  数值越小, 体积力分布越集中。为了保证数值稳定性, 本文中取  $\varepsilon = 2\Delta x$  ( $\Delta x$  为叶片附近网格单元的长度)。最后将得到的体积力  $f_\varepsilon$  加入到 N-S 方程的右端源项, 进而求解风机非稳态流场。

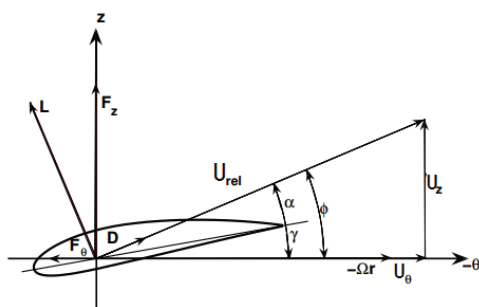


图 1 翼型截面速度矢量图<sup>[18]</sup>

## 2.2 控制方程

在数值模拟中, 采用的控制方程为 RANS 方程, 其基本表达式为:

$$\frac{\partial U}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) + \frac{1}{\rho} \bar{f}_\varepsilon \quad (8)$$

其中,  $U$  是流场速度,  $\rho$  是流体密度,  $p$  是流场压力,  $\nu$  是运动黏度,  $\bar{f}_\varepsilon$  是由致动线模型计算的体积力。为了求解上述方程, 必须使用一定的湍流模型才能使得方程封闭, 达到流场求解的目的。本研究使用  $k-\omega$  SST 湍流模型。

## 3 “Blind Test 3” 介绍

Blind Test 3 是由 NTNU 的研究团队于 2013 年 12 月在挪威组织进行模型风机的盲比实验<sup>[20]</sup>, 许多研究学者应邀对错列布置双模型风机的气动性能以及风机的尾流发展进行预测, 并将预测的数值结果与实验结果进行对比。通过盲比实验, 验证数值方法对大型风场的模拟, 从而进一步了解风机间的尾流相互作用现象以及详细研究近尾迹和远尾迹的尾流特征。实验风洞的主尺度为: 长 11.15m, 宽 2.72m, 高度为 1.8m。为尽量减小雷诺数不同的影响, 实验的来流风速应尽可能的放大, 但是过高的风速会造成风机叶片的旋转速度过快, 导致环境的温度过高同时造成实验设备的损伤, 所以实验设定的参考风速为 10m/s。该实验在风洞实验室的风洞入口处安装的一个大型的平面网格 (图 2)。当风经过网格到达上游风机的位置, 平均湍流度增加到约为 10%。

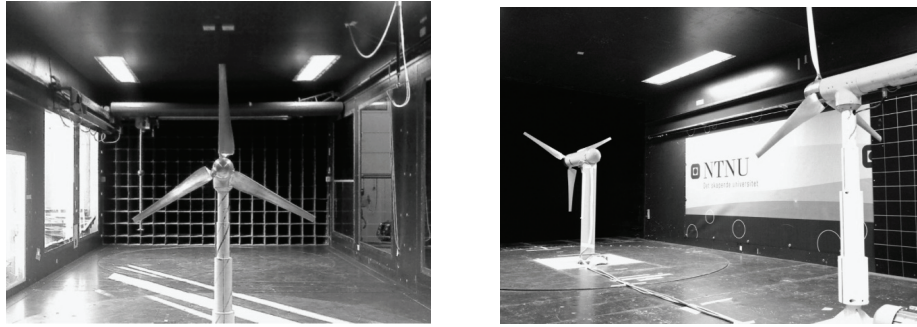


图2 “Blind Test 3” 风洞示意图

上下游风机选取相同的叶片翼型,均为 S826 翼型。但由于上下游风机驱动形式的区别,所以两风机有不同的轮毂尺寸,导致叶片直径略有区别,分别为 0.944 m 和 0.894m,但保证轮毂高度均为 0.817m,确保上下游风机的轮毂中心处于同一水平面。另外,下游风机与上游风机的纵向间距为 3 倍下游风机直径( $D=0.894\text{m}$ ),同时风机在横向错开 0.400m,具体尺寸布置如图 3 所示。实验选取上游风机的叶尖速比为 6,下游风机的叶尖速比设定为 3.5, 4.75 以及 8 三种情况进行详细对比。具体的风机参数见表 1。

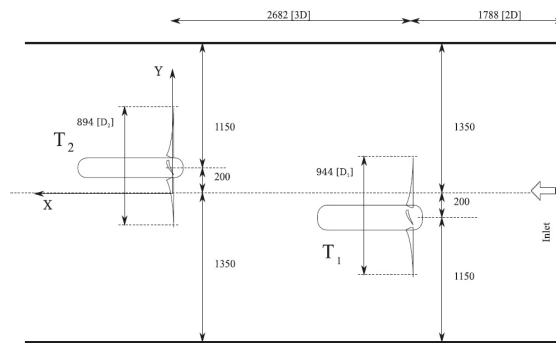


图3 风机布置尺寸平面

表 1 “Blind Test 3” 上下游风机参数

| 项目   | 上游风机    | 下游风机       |
|------|---------|------------|
| 翼型   | S826    | S826       |
| 风轮直径 | 0.944 m | 0.894      |
| 轮毂直径 | 0.13 m  | 0.08 m     |
| 塔架高度 | 0.817 m | 0.817 m    |
| 叶尖速比 | 6       | 3.5/4.75/8 |

## 4 计算设定

为与“Blind Test 3”实验进行对比，保证验证结果的可靠性和准确性。本文设定数值模拟的计算域与实验风洞的基本尺寸保持一致，同时风机采用相同的布置形式。入流风速为 10m/s，上游风机的叶尖速比(TSR)为 6，下游风机的叶尖速比分别为 3.5、4.75 和 8。本文采用改变下游风机叶片的旋转速度进而改变下游风机的叶尖速比，与实验方法保持一致。利用 XFOIL<sup>[21]</sup>工具计算得到实验所采用翼型的气动参数，作为致动线模型计算体积力所需的插值数据库，包含不同攻角下翼型的升力以及阻力系数。

采用致动线模型代替实物风机，仅需简单的结构化网格即可满足计算要求，但是为了求解致动线附近的较大压力梯度，并且更好捕捉风机的尾流特征，本文对背景网格进行细化处理，一共进行了三级网格细化。具体的网格形式（图 4）。选取最小网格尺度为旋转  $1^\circ$  叶尖移动距离的精细网格。此时，整个计算域的网格总量为 1440 万。另外具体的边界条件（表 2）。

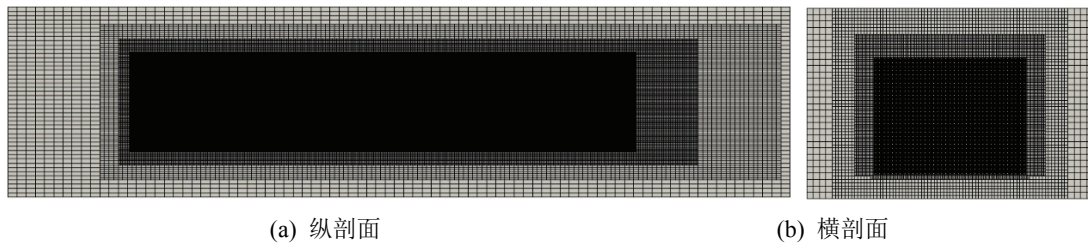


图 4 网格划分示意图

表 2 边界条件设置

| 边界名称 | 边界条件                  |
|------|-----------------------|
| 入口边界 | 自由来流边界条件，定常均匀风速 10m/s |
| 出口边界 | 相对大气压力为 0 Pa          |
| 左右边界 | 壁面边界条件                |
| 上部边界 | 壁面边界条件                |
| 下部边界 | 壁面边界条件                |

为确保上游风机尾流充分发展，设定计算模拟时间为上游风机完整旋转 60 圈所需要的时间，为 3s。由于模拟的是模型风机，在来流风速一定时，为保证风机的叶尖速比，风机的转速很高，尤其是当下游风机的叶尖速比为 8 时，为保证叶片每个时间步最多转过一个最小网格间距，计算得到时间步长为  $1e-4s$ 。

## 5 计算结果与分析

基于致动线模型，分别对在下游风机处于 3 种不同叶尖速比( $\lambda=3.5$ 、 $4.75$ 、 $8.0$ )下的错列式双风机系统进行数值模拟，得到的数值结果与“Blind Test 3”实验进行对比，验证致动线模型在模拟风场气动性能及尾流干扰现象的可靠性和准确性。数值验证主要对比气动功率以及风机尾迹的基本特征，包括平均尾流速度和平均湍流应力的分布特征。

### 5.1 气动功率

图 5 表示的下游风机处于不同叶尖速比时，上下游风机的气动载荷输出的时历曲线。由于在数值模拟开始时，风机由静止瞬时达到相应的转速，上下游风机都存在瞬时的气动载荷过大的现象。为避免初始瞬态载荷对气动功率输出的影响，并考虑风机尾流的充分发展，选取数值计算从 2~3s 的气动功率系数平均值。表 3 表示上下游风机的气动功率系数数值模拟和“Blind Test 3”实验的输出结果，以及数值模拟与实验值相比的相对误差。其中 WT1 代表上游风机，WT2 代表下游风机，气动功率系数定义为：

$$C_p = \frac{2P}{\rho U_{ref}^3 A} \quad (9)$$

其中， $A$  是风轮平面面积， $\rho$  为空气密度， $U_{ref}$  为轮毂中心高度处的参考速度。 $P$  为风机的气动功率。

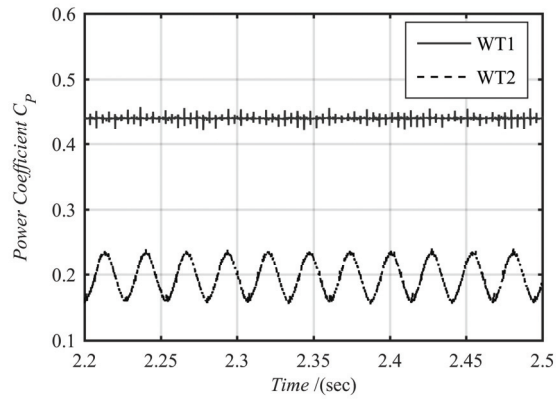
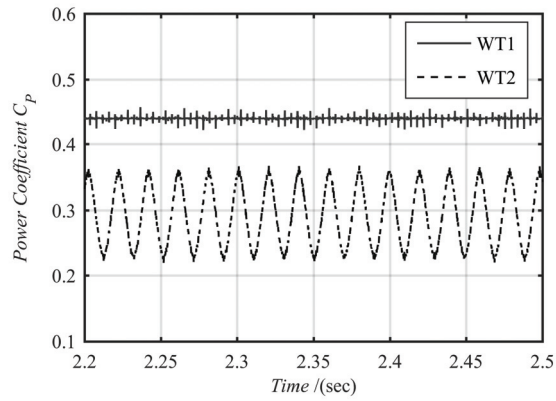
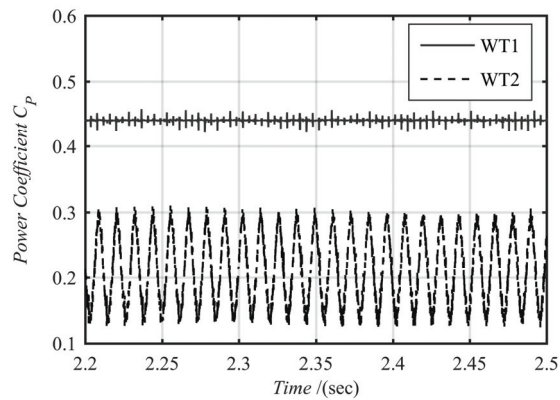
(a) 叶尖速比  $\lambda=3.5$ (b) 叶尖速比  $\lambda=4.75$ (c) 叶尖速比  $\lambda=8.0$ 

图 5 上下游风机的气动载荷输出时历曲线

从图 5 可以看出,当上游风机的叶尖速比保持不变时,下游风机处于不同叶尖速比时,对上游风机的气动功率输出影响很小,进一步说明,可以忽略下游风机的尾流对上游风机

气动载荷的影响。风机错列布置，当上游尾流充分发展时，下游风机部分受到上游风机尾流的影响，这不仅导致下游风机的气动功率输出减少，同时造成下游风机的气动功率产生明显的周期性振荡，振荡周期为三叶片风机旋转周期的  $1/3$ 。另外，随着风机的叶尖速比增大，风机气动功率的振荡幅值也随之增大。

通过对风机气动功率系数的数值对比，基于致动线模型模拟输出的上游风机的气动功率系数为 0.4402，实验结果为 0.4304，相对误差为 2.30%。入流条件的设定是均匀定常的来流风速，并通过改变参数设置，增大入流的平均湍流度。而实验结果是通过在风洞前设置平面网格，达到增大平均湍流度的目的，这将导致数值模拟结果与实验结果产生差别。

**表 3 上下游风机的气动功率系数以及“Blind Test 3”的实验结果总结表**

| 项目    | 风机  | 叶尖速比 $\lambda$ | 数值结果   | 实验结果   | 相对误差    |
|-------|-----|----------------|--------|--------|---------|
| $C_p$ | WT1 | $\lambda=6.0$  | 0.4402 | 0.4303 | +2.30%  |
|       | WT2 | $\lambda=3.5$  | 0.1970 | 0.2053 | -4.04%  |
|       | WT2 | $\lambda=4.75$ | 0.2915 | 0.2985 | -2.35%  |
|       | WT2 | $\lambda=8.0$  | 0.2135 | 0.1817 | +17.50% |

对于下游风机，在风机处于较低的叶尖速比时，与实验结果相对相对误差不超过 5%。但当下游风机的叶尖速比达到 8 时，风机叶片处于高速旋转，基于致动线模型的模拟结果与实验相比存在较大的相对误差，相对误差为 17.50%。通过对实验风洞以及数值模拟设置等方面的分析，分析造成下游风机的气动载荷预测尤其是叶尖速比较高时与实验相对误差较大的主要原因。首先，风机的气动性能对雷诺数的变化十分敏感，上游风机的尾流作用以及风机以不同的叶尖速比运转，这都将导致风机在不同的雷诺数条件下工作，而雷诺数对于风机的翼型数据，特别是升力和阻力系数有重大影响。本文参考实验设置参考速度为 10m/s，上游风机的最大局部雷诺数约为  $10^5$ ，利用 XFOIL 工具基于所给定的雷诺数计算确定上下游风机的翼型参数。而受到上游风机的尾流影响，下游风机的来流风速存在明显的降低，所以下游风机的叶尖局部雷诺数要明显低于上游风机的雷诺数。因此，上下游风机的雷诺数存在明显的差别。但是，利用致动线模型计算体积力时，叶片翼型的插值数据库固定不变，仅以某一固定的雷诺数计算得到的数据结果，导致致动线模型对于下游风机数值预报的存在较大误差，尤其是当下游风机处于较高的旋转速度。其次，利用致动线模型模拟风机叶片时，没有考虑到包括轮毂、机舱和塔架在内的完整的风机模型，所以在风机的转子中心存在较高的速度场。另外，机舱和塔架引起的尾流与风机尾流相互干扰，导致风机的尾流结构呈现出高度的不对称性，这与考虑完整风机模型的实验存在明显区别。这种区别会导致错误的估计尾流效应对于下游风机的影响，导致对下游风机气动载荷的预测存在较大的误差。

基于致动线模型，可以较好预测上游风机的气动功率输出，当下游风机处于较低的叶尖速比时，由于雷诺数效应，模型效应以及数值设定等原因，虽然与实验结果相比存在一定程度的相对误差，但总体的误差不超过 5%，在合理的范围之内。但当下游风机处于较高

的叶尖速比时，由于高速旋转的叶片对雷诺数的变化更为敏感，导致对风机气动载荷预测的误差进一步扩大。

## 5.2 尾流特性

图 6 至图 8 表示不同叶尖速比时，错列布置的两风机风电场在距离下游游风机 1 倍直径处和 3 倍直径处的尾流场数值预报结果，包括平均尾流速度以及平均的湍流应力。其中红色圆圈线为本文结合致动线和 RANS 模型(ADM-RANS)数值模拟结果，方形线代表“Blind Test 3”的实验结果(Experiment)，下三角曲线为致动盘模型的计算结果(ADM-RANS)，菱形线为滑移网格技术结合分离涡模拟(ASI-DES)，上三角曲线为精细化网格的大涡模拟(EllipSys3D-LES)数值结果。

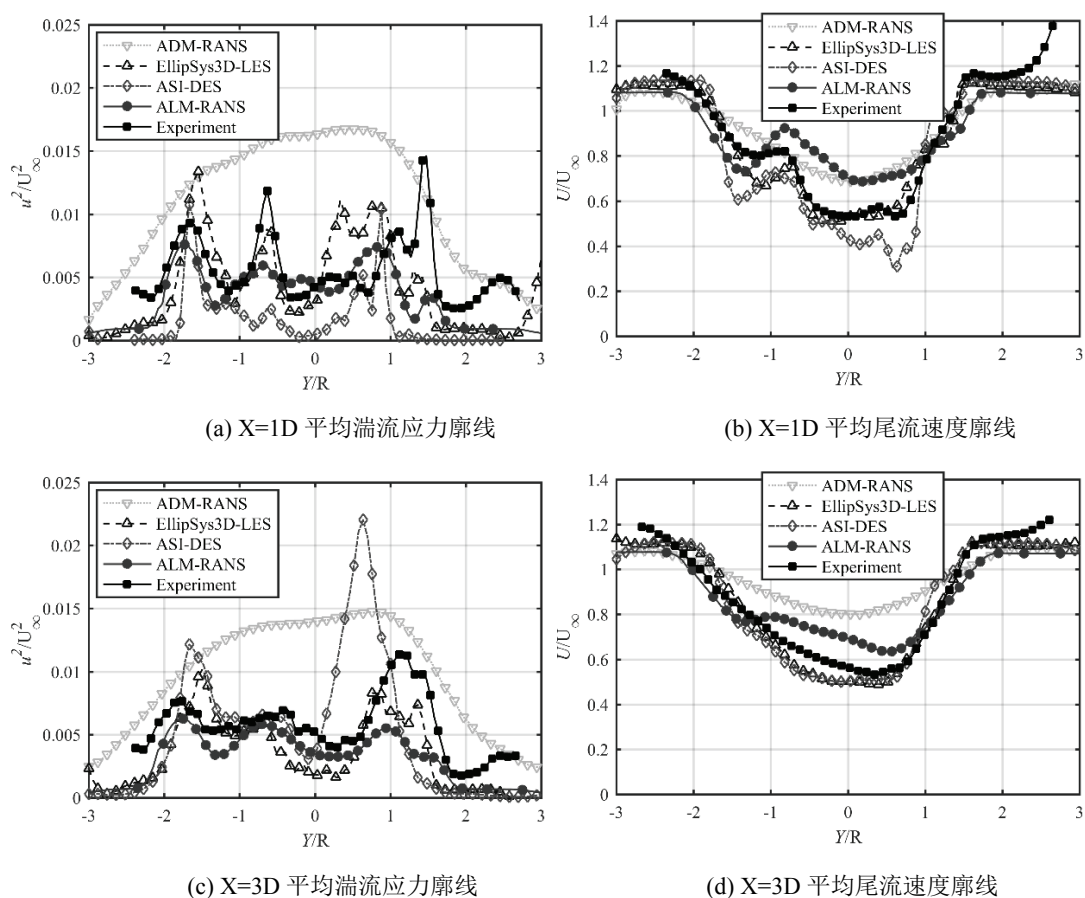


图 6 下游风机叶尖速比为 3.5 时的尾流数值预报结果

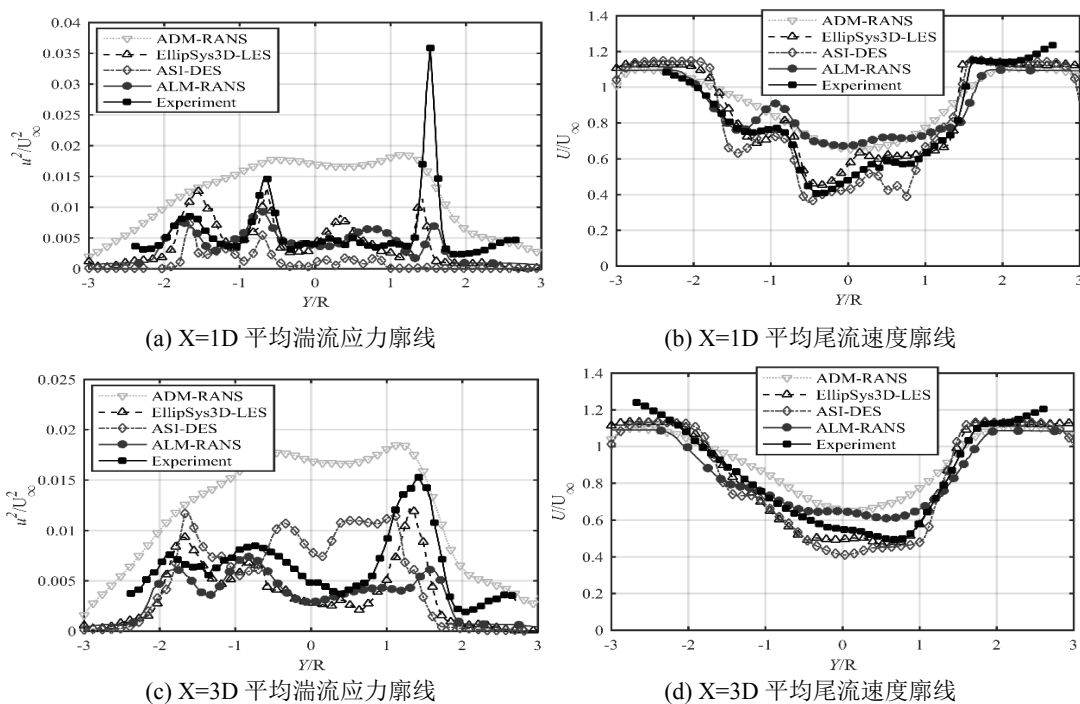


图 7 下游风机叶尖速比为 4.75 时的尾流数值预报结果

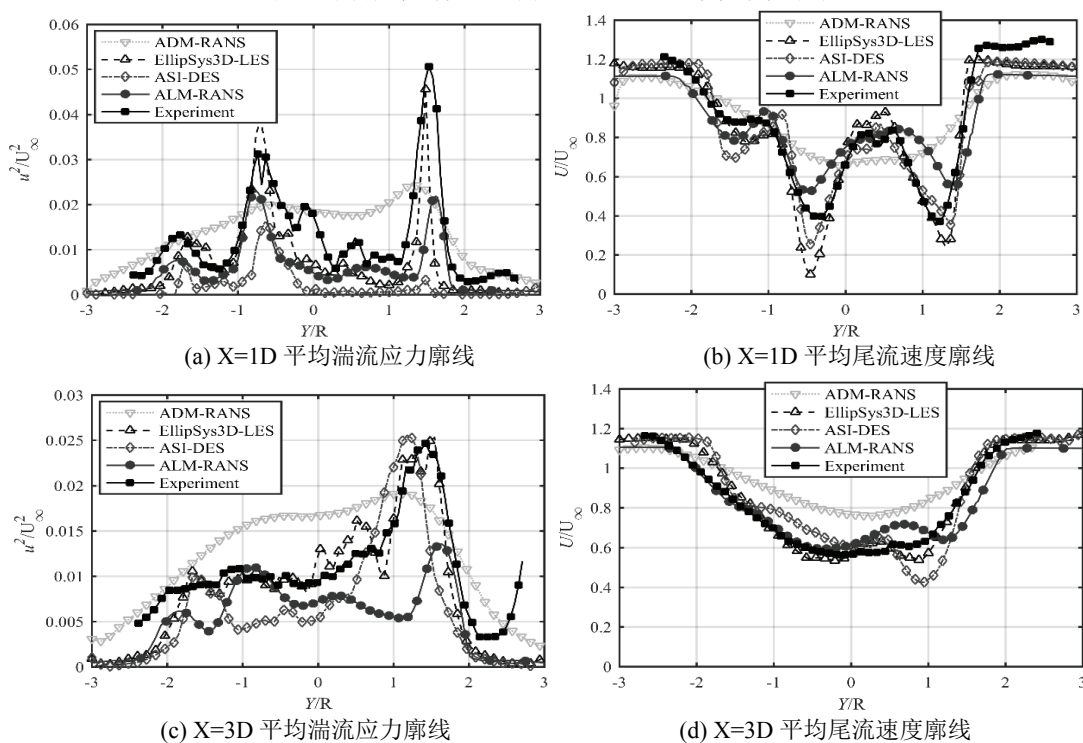


图 8 下游风机叶尖速比为 8.0 时的尾流数值预报结果

从图 6 至图 8 可知, 在平均尾流速度廓线的对比可知, 致动线模型较为准确地模拟风速经过风机的速度损失。由于致动线模型没有考虑到包括轮毂、机舱和塔架在内的完整的风机模型, 所以在近尾流( $X=1D$ )处, 横坐标  $Y=-R$  处存在明显的速度回升。随着尾流发展, 到  $X=3D$  处, 尾流速度发展更为均匀并开始出现速度回升, 同时机舱和塔架对尾流的影响逐渐降低, 致动线模型对速度损失的模拟更为精准。相比于考虑实物风机的数值模拟方法, 在近尾流区, 致动线模型由于缺少对机舱和塔架的模拟, 低估了风速的损失。基于三维的致动线(ADM)模型, 在风机高转速的情况时, 较为准确地模拟出, 由于风机叶片高速旋转导致的局部风速损失过大的现象, 相比于二维致动盘(ADM)模型, 模拟更为精准。另外, 数值模拟结果在边界处的速度与入口速度相比, 提升 10% 左右, 而实验结果得到的尾流外的速度值提高约为 20%, 实验中风洞存在显著的壁面阻塞效应, 这将导致实验结果与数值结果产生明显差别。

在平均湍流应力廓线的对比可知, 下游风机叶尖速比的增大, 风机尾流的平均湍流度随之增大, 尤其会导致峰值的明显增加, 同时随着尾流的发展, 尾流的平均湍流度会逐渐降低。基于致动线模型的数值模拟结果较好的捕捉风机尾流平均湍流应力的变化趋势, 而二维的致动盘模型对平均湍流应力的模拟会出现较为明显的误差。另外结合致动线和 RANS 模型(ALM-RANS)数值模拟结果较低的预报湍流应力, 特别是在峰值上。由于 RANS 方法采用两方程模型求解平均雷诺应力, 会低估平均湍流应力, 反而高估湍流耗散, 由于湍流应力的各向异性可能是导致这一问题的主要原因。另外, 致动线模型是利用致动点上分布体积力来代替实物风机叶片, 这也会导致对尾流湍流度的低估。

相对于实验以及其他数值方法对于风机尾流的预测结果, 使用致动线模型以及 RANS 方法模拟错列式的两风机尾流特征存在较大的差异, 但数值模拟结果在尾流宽度, 尾流形状以及尾流速度和湍流应力的变化趋势等特征的捕捉上与实验结果有着较好吻合。

### 5.3 尾流速度云图

图 9 为下游风机在不同叶尖速比( $\lambda=3.5, 4.75, 8.0$ )时, 风机尾流速度的变化云图。可以明显看出壁面效应导致风速在近壁面处的明显升高, 以及尾涡膨胀现象。

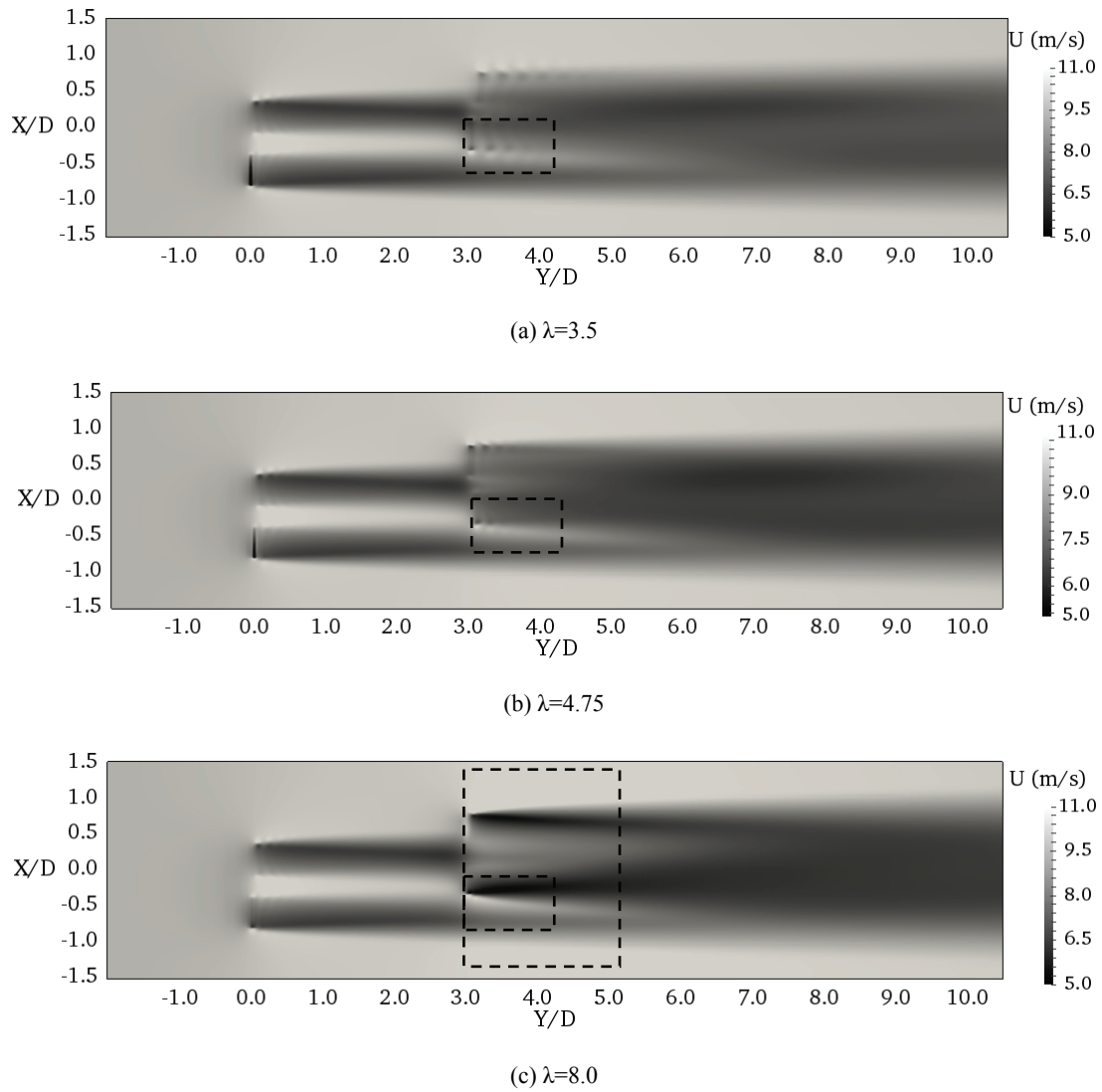


图9 风机尾流速度的变化云图

随着下游风机叶尖速比的增大，当风速经过下游风机时，风速损失逐渐增加。特别是在叶尖速比  $\lambda=8.0$  时，风速在下游风机叶片后方存在明显的局部损失增加。另外，由于致动线模型缺少对塔架和机舱的模拟，在叶片中心存在明显的高风速区，此高风速区经过下游风机后，仍会在下游风机叶片边缘存在较短的高速区，这很好对应平均尾流速度廓线对比的差别。

## 6 结论

基于 NTNU 实验室进行的“Blind Test 3”实验,对在下游风机处于 3 种不同叶尖速比下的错列式双风机系统进行数值模拟,对 FOWT-UALM-SJTU 中的风电场求解模块 ALMWindFarmFoam 进行数值模拟的可靠性以及精度的对比验证。通过对上下游风机的气动载荷结果与实验结果进行对比,结果表明,基于致动线模型可以较好预测上游风机的气动功率输出,当下游风机处于较低的叶尖速比时,由于雷诺数效应,模型效应以及数值设定等原因,虽然与实验结果相比存在一定程度的相对误差,但总体的误差不超过 5%。但当下游风机处于较高的叶尖速比时,由于高速旋转的叶片对雷诺数的变化更为敏感,导致对风机气动载荷预测的误差进一步扩大。数值结果可以满足对风机载荷的初步预报。相对于实验以及其他数值方法对于风机尾流特征的预测结果,使用致动线模型以及 RANS 方法模拟错列式的两风机尾流特征存在较大的差异,但数值模拟结果在尾流宽度,尾流形状以及尾流速度和湍流应力的变化趋势等特征的捕捉上与实验结果有着较好吻合,考虑三维的致动线模型在风机尾流特征细节的模拟中要明显优于二维的致动盘模型。

## 致谢

本工作获得国家自然科学基金项目(51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099),上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022),上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300),以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)资助。在此一并表示衷心感谢。

## 参考文献

- 1 谢治国, 胡化凯, 张逢. 建国以来我国可再生能源政策的发展. J. 中国软科学, 2005, 9:50-57.
- 2 Jeon S H, Cho Y U, Seo M W, et al. Dynamic response of floating substructure of spar-type offshore wind turbine with catenary mooring cables. J. Ocean Engineering, 2013, 72: 356-364.
- 3 王胜军, 张明明, 王强, 等. 新型风力机致动面模型研究. J. 工程热物理学报, 2013, 34(8): 1449-1452.
- 4 Katic I, Højstrup J, Jensen N O. A simple model for cluster efficiency[C]//European wind energy association conference and exhibition. 1986: 407-410.
- 5 Ainslie J F. Calculating the flowfield in the wake of wind turbines. J. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 27(1-3): 213-224.
- 6 Montavon C, Jones I P, Staples C, et al. Practical issues in the use of CFD for modelling wind farms[C]//Proc European Wind Energy Conference. 2009.

- 7 Hu H, Morteza Khosravi M, Sarkar P. An experimental investigation on the performance and the wake characteristics of a wind turbine subjected to surge motion[C]//33rd Wind Energy Symposium. 2015: 1207.
- 8 Troldborg N, Larsen G C, Madsen H A, et al. Numerical simulations of wake interaction between two wind turbines at various inflow conditions. J. Wind Energy, 2011, 14(7): 859-876.
- 9 Sanderse B, Pijl S P, Koren B. Review of computational fluid dynamics for wind turbine wake aerodynamics. J. Wind energy, 2011, 14(7): 799-819.
- 10 田琳琳, 赵宁, 钟伟. 风力机尾流相互干扰的数值模拟. J. 太阳能学报, 2012, 33(8): 1315-1320.
- 11 Troldborg N, Sørensen J N, Mikkelsen R. Actuator line simulation of wake of wind turbine operating in turbulent inflow[C]//Journal of physics: conference series. IOP Publishing, 2007, 75(1): 012063.
- 12 Troldborg N, Sørensen J N, Mikkelsen R F. Actuator line modeling of wind turbine wakes[D]. Technical University of Denmark, Department of Energy Engineering Institute for Energiteknik, 2008.
- 13 Churchfield M, Lee S, Moriarty P, et al. A large-eddy simulation of wind-plant aerodynamics[C]//50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2012: 537.
- 14 Churchfield M J, Lee S, Michalakes J, et al. A numerical study of the effects of atmospheric and wake turbulence on wind turbine dynamics. J. Journal of turbulence, 2012 (13): N14.
- 15 程萍, 万德成. 基于重叠网格法数值分析塔架对风机气动性能的影响. J. 水动力学研究与进展, 2017, 32(1): 32-39.
- 16 万德成, 程萍, 黄扬, 等. 海上浮式风机气动力-水动力耦合分析研究进展. J. 力学季刊, 2017, 38(3): 385-407.
- 17 Ai Y, Wan D, Hu C. Effects of Inter-Turbines Spacing on Aerodynamics for Wind Farms Based on Actuator Line Model[C]//The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2017.
- 18 Sørensen J N, Shen W Z. Numerical modeling of wind turbine wakes. J. Journal of fluids engineering, 2002, 124(2): 393-399.
- 19 Sørensen J N, Shen W Z. Computation of wind turbine wakes using combined Navier-Stokes/actuator-line Methodology[C]//1999 European Wind Energy Conference and Exhibition. 1999: 156-159.
- 20 Krogstad P Å, Sætran L, Adaramola M S. "Blind Test 3" calculations of the performance and wake development behind two in-line and offset model wind turbines. J. Journal of Fluids and Structures, 2015, 52: 65-80.
- 21 Drela M. XFOIL: An analysis and design system for low Reynolds number airfoils[M]//Low Reynolds number aerodynamics. Springer, Berlin, Heidelberg, 1989: 1-12.

## **Numerical validation of wake interaction between two offset model wind turbines based on actuator line model**

DUAN Xin-ze, CHENG Ping, WAN De-cheng \*

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering,  
Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration,  
Shanghai 200240, China, Email: [dcwan@sjtu.edu.cn](mailto:dcwan@sjtu.edu.cn))

**Abstract:** In large wind farms, some wind turbines are disturbed by the wake of other turbines. The wake interaction phenomenon among wind turbines has a great influence on aerodynamic power output, wind speed deficit turbulence stress and wake vortex structure, which indicates that more attention should be placed on the wake interaction for the optimal arrangement of wind farm. In this paper, the actuator line model combined with CFD technique will be applied to study the wake interaction between two offset wind turbines. By changing the rotational speed of the downstream wind turbine to change the tip speed ratio, the numerical simulations of the downstream wind turbine under 3 different tip speed ratios are conducted. The results obtained from the present simulations are compared to the data from the experiment “Blind Test 3” and other simulation models. From the comparison, the results from the present study show a good agreement with the experimental results especially for the aerodynamic loads prediction, whose error is not over 3% for the upstream wind turbine. Although the simulations for two offset wind turbines model exist some difference in wake prediction compared to the “Blind Test 3”, the overall change trend is consistent with the experiment. Based on the results, the actuator line model can simulation the aerodynamic loads of the two offset model wind turbines and basic features of the wake, including the distribution characteristics of the mean wake velocity and mean turbulent stress.

**Key words:** Wind farm; Actuator line model; Wake interaction; Blind Test 3; Tip speed ratio.