

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2023.05.008

考虑叶片结构变形的错列式两风机 尾流干扰效应研究

郑建才, 赵伟文, 万德成*

(上海交通大学 船海计算水动力学研究中心(CMHL) 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240,
E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn)

摘要: 随着风力机技术日益成熟, 叶片逐渐向大型化和柔性化发展。同时, 不同布置形式下风力机之间会产生复杂的尾流干扰效应, 因此考虑多风机叶片气动-弹性耦合的尾流干扰效应成为了重要课题。该文采用自主研发求解器 FEWF-SJTU, 基于欧拉-伯努利梁理论和致动线模型, 进行了湍流入流条件下错列式两风机气动-弹性耦合尾流效应大涡模拟研究。结果表明: 随着错列间距的增大, 下游风机在挥舞方向上的变形量逐渐增大, 而摆振和扭转方向上的变形量逐渐减小; 考虑叶片结构变形对推力的影响作用相对较大, 但是随着错列间距的增大, 下游风机气动功率的增长率大于气动推力; 叶片结构变形主要影响远尾流区的尾流速度和尾涡结构, 且随着错列间距的增大, 风力机之间的干扰效应相对减小。

关键词: 弹性致动线模型; 气动-弹性耦合; 风机布置; 尾流干扰效应

中图分类号: U662.3

文献标志码: A

Study on Wake Effect of Two Staggered Wind Turbines Considering Blade Structural Deformation

Zheng Jiancai, Zhao Weiwen, Wan Decheng*

(Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the development of wind turbine technology, the blades are becoming larger and more flexible. Meanwhile, there are complex wake interference effects between wind turbines under different arrangements. Therefore, it has become an important topic with considering the coupling aeroelastic performance of blades of multi-wind turbines. Based on the Euler-Bernoulli beam theory and actuator line model, the wake effect of two staggered arrangements of wind turbines is carried out with large eddy simulation when the coupling aeroelastic is taken into consideration under turbulent inflow conditions by using the independently developed solver FEWF-SJTU. The results show that with the increase of staggered spacing, the deformation increases gradually in the flap-wise, while the deformation decreases in the edge-wise and torsion-wise direction for the downstream wind turbine. Besides, the influence of blade structural deformations on the thrust is relatively larger. However, with the increase of staggered distance, the growth rate of aerodynamic power is greater than that of aerodynamic thrust in the downstream wind turbine. Finally, it is considered that the deformation of the blade structure mainly affects the wake velocity and vortex structure in the far wake region, and the interference effect between wind turbines decreases with the increase of staggered spacing.

Key words: Elastic actuator line model; Coupling aero-elastic performance; Layout of wind turbines; Wake interference effect

收稿日期: 2023-04-30 **修改稿收到日期:** 2023-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(52131102)和国家重点研发计划项目(2019YFB1704200)

作者简介: 郑建才(1994—), 男, 博士。

0 引言

随着风力机大型化的趋势,风轮直径逐渐增大,使得风机叶片柔性化更加显著。考虑到叶片结构变形后会进一步影响风力机的气动性能,因此有必要进行风力机气动-弹性耦合效应的研究,探究叶片结构变形对风力机气动性能以及尾流场的影响。国内外很多学者基于不同研究方法考虑风力机叶片变形气动性能的影响研究。Li等^[1]基于几何精确梁理论和叶素动量理论(Blade Element Momentum, BEM)建立了风力机气动-弹性耦合模型,探究了不同周期性非定常入流条件下柔性叶片气动性能和气动弹性的响应特征。Ma等^[2]通过结合致动线模型(Actuator Line Method, ALM)和有限元方法(Finite Element Model, FEM)中的非线性梁理论,开发了ALFBM的求解器,并基于该求解器探究了单风机在不同风速下的气动-弹性耦合特性,结果发现未考虑叶片结构变形的数值模拟会低估风力机在远尾流区尾流和尾涡的恢复速度。Chen等^[3]建立了由自由尾迹升力面模型和几何精确梁理论组成的气动弹性耦合模型,研究了风力机在剪切和偏航入流条件下的气动弹性响应特征。黄扬等^[4-5]基于欧拉-伯努利梁理论结合非稳态致动线模型以及计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法中的两相流求解器naoe-FOAM-SJTU,进行了浮式风机气动-水动-气弹性耦合性能模拟,结果表明:考虑叶片结构变形不仅会影响浮式风机的气动载荷,还会导致增大浮式支撑平台的纵向运动响应。此外,通过结合不同流体和结构计算方法,还形成了其他类型的气动-弹性模型,主要包括CFD-FEM^[6], BEM-FEM^[7], CFD-EBM (Equivalent Beam Model, EBM)^[8-9]等。Lamei等^[10]对浮式风机气动力、水动力以及结构运动和弹性响应的现有方法进行了总结,并指出流体-结构弹性耦合研究的重要性。

实际工程中进行风电场输出功率以及尾流特性研究时,上下游风机之间还存在着复杂的尾流干扰效应,因此有必要考虑不同风力机布置形式的影响。Troldborg等^[11]采用LES方法,基于致动线模型研究了两风机之间的尾流相互作用,发现两者的尾

流存在着明显的尾流叠加现象。Wei等^[12]采用大涡模拟结合致动线模型的方法,基于主动偏航控制理论研究了不同偏航角工况下风力机的气动载荷和尾迹特性,发现尽管上游风机功率相对降低,但主动偏航控制能增加多风力机串列布置的总发电量。Miao等^[13]利用商用CFD软件对大气边界层条件下的风电场进行了数值模拟,并考虑不同偏航角对下游风机的尾流干扰效应。Veisi等^[14]研究了正旋和反旋两种构型下的风力机的绕流特性,并进行了正反旋的串列式两风机尾流干扰效应研究。Zheng等^[15]采用大涡模拟方法,通过致动线模型结合欧拉-伯努利梁理论的方法,考虑了叶片变形对串列式两风机性能的影响,并深入探究了三代涡识别方法在单风机和多风机三维尾涡结构捕捉的适用性。

尽管在单风机气动-弹性耦合和多风机尾流干扰方面已经进行了大量的研究,但是在多台风力机气动-弹性耦合方面,考虑叶片变形的多风机尾流干扰现象目前依然存在耦合机制不明确和干扰机理不清晰等问题。基于此,本文采用大涡模拟,基于欧拉-伯努利梁理论和致动线模型方法,形成自主开发的考虑风力机叶片变形的弹性致动线模型。深入探究湍流入流条件下错列式两风机气动-弹性耦合的尾流干扰特性,重点分析考虑叶片结构变形对风力机气动性能和结构动态响应的影响,并讨论错列式两风机的尾流速度和尾涡结构之间的干扰效应。

1 数值方法

本文基于欧拉-伯努利梁理论结合致动线模型的方法,进行风力机气动-弹性耦合性能研究。致动线模型由Sørensen等^[16]提出,其基本思想与经典的叶素动量理论相似,将风力机叶片沿展向微分成若干叶素,但每个叶素使用含有升阻力特性的致动点代替。因此致动线模型是一种使用带有体积力的致动线代替风力机叶片的方法,不需要进行边界层的求解,能够在节约计算资源的同时实现风电场尾流干扰特性的数值模拟。

在致动线模型中,若已知叶片气动升阻力系数以及局部攻角对应的相对入流速度 U_{rel} ,则可求解得到该致动点处的体积力

$$\mathbf{f} = \frac{1}{2} \rho c \mathbf{U}_{\text{rel}}^2 (C_l \mathbf{e}_l + C_d \mathbf{e}_d) \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; c 为致动点处的物理弦长; C_l 、 C_d 、 \mathbf{e}_l 和 \mathbf{e}_d 分别翼型的升力和阻力系数及相应方向上的单位向量。

为了避免流场插值计算中出现数值振荡而产生较大误差, 采用三维高斯函数 η_ε 进行体积力 \mathbf{f} 光顺, 即 $f_\varepsilon = \mathbf{f} \otimes \eta_\varepsilon$ 再将光顺后的体积力 f_ε 分布到致动点附近网格中。采用大涡模拟方法, 将光顺后的体积力作为N-S方程右端的源项添加到控制方程中

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}}{\partial t} + (\tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{u}} = \\ -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \tilde{\mathbf{u}} - \nabla \cdot \tau_{\text{SGS}} + f_\varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$

式中: “ \sim ” 符号表示空间过滤; $\tilde{\mathbf{u}}$ 为流场速度; \tilde{p} 为流场压力; ν 为运动黏度; $\tau_{\text{SGS}} = \mathbf{u}\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{u}}\tilde{\mathbf{u}}$ 为亚格子应力, 采用Smagorinsky亚格子模型进行求解。

在进行风力机叶片结构变形求解时, 将细长叶片简化为一个三维圆柱形梁。针对风力机叶片截面非均匀、质量和刚度沿径向不均匀等特性, 将整体质量矩阵 $[\mathbf{M}]$ 、阻尼矩阵 $[\mathbf{C}]$ 和刚度矩阵 $[\mathbf{K}]$ 在三个变形方向上分别表示。 $[\mathbf{F}]$ 为作用在梁单元上的荷载矢量, 包括气动力、重力和离心力三个部分。根据受力平衡方程可求得叶片结构在挥舞、摆振和扭转三个方向的形变量

$$[\mathbf{M}][\ddot{\mathbf{x}}] + [\mathbf{C}_x][\dot{\mathbf{x}}] + [\mathbf{K}_x][\mathbf{x}] = [\mathbf{F}_x] \quad (3a)$$

$$[\mathbf{M}][\ddot{\mathbf{y}}] + [\mathbf{C}_y][\dot{\mathbf{y}}] + [\mathbf{K}_y][\mathbf{y}] = [\mathbf{F}_y] \quad (3b)$$

$$[\mathbf{M}][\ddot{\boldsymbol{\theta}}] + [\mathbf{C}_\theta][\dot{\boldsymbol{\theta}}] + [\mathbf{K}_\theta][\boldsymbol{\theta}] = [\mathbf{F}_\theta] \quad (3c)$$

式中: $[\mathbf{x}]$ 、 $[\mathbf{y}]$ 和 $[\boldsymbol{\theta}]$ 分别为弹性梁单元在挥舞、摆振和扭转方向上的变形。此时, 距离轮毂中心半径 r 处致动点的速度矢量关系表示为图1, 可求得相对入流速度

$$\mathbf{U}_{\text{rel}} = \mathbf{U}_{\text{in}} + \mathbf{U}_{\text{B}} + \mathbf{U}_{\text{s}} \quad (4)$$

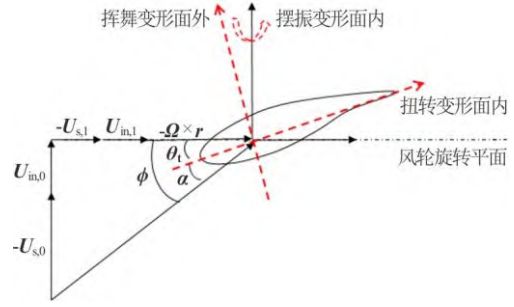


图1(网上彩图) 速度矢量图
Fig.1 (Color online) Velocity vector diagram

式中: \mathbf{U}_{in} 、 \mathbf{U}_{B} 和 \mathbf{U}_{s} 分别为入流风速、转子旋转速度和结构变形诱导速度。

本文基于弹性致动线模型(Elastic Actuator Line Method, EALM), 形成了一种能够进行风力机气动-弹性耦合性能计算的求解器, 其中: 气动性能采用致动线模型进行数值模拟, 并通过 $t-\Delta t$ 时刻的气动载荷求解得到该时刻的结构速度和位置; 结构变形模块基于欧拉-伯努利梁理论进行求解, 并通过 t 时刻的结构变形计算该时刻的气动攻角和体积力。叶片气动-弹性耦合计算流程如图2。

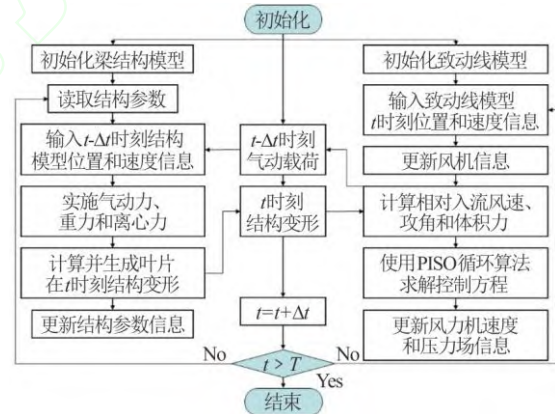


图2(网上彩图) 风力机气动-弹性耦合流程图
Fig.2 (Color online) Flow chart of aeroelastic interaction of wind turbine

2 数值模型

本文采用美国国家能源实验室^[17]提出的NREL_5 MW风力机模型, 其几何参数如图3。

在计算工况方面, 入流风为湍流风, 由平均风速成分以及湍流成分两部分共同组成, 其中湍流成分在时间和空间上呈现强烈的非线性随机脉动特性。入流风的湍流强度 I_T 为

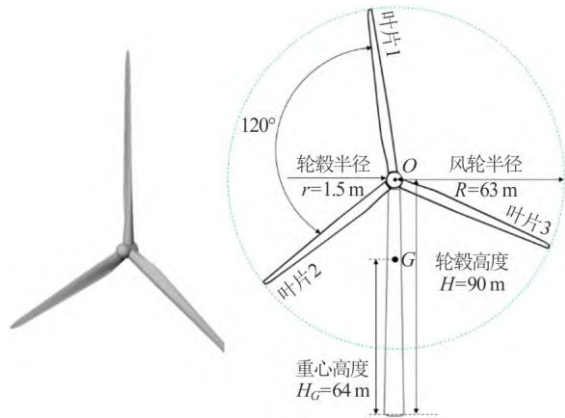


图3(网上彩图) 风力机几何参数

Fig.3 (Color online) Geometrical parameters of the wind turbine

$$I_T = \frac{\sigma}{\bar{u}} \quad (5)$$

式中： σ 为湍流风速的标准差； \bar{u} 为风轮高度处平均风速，本文取NREL_5 MW风力机的额定风速 $\bar{u}=11.4 \text{ m/s}$ 作为入流风速。

为了研究错列布置条件下未考虑叶片结构变形(ALM)和考虑叶片结构变形(EALM)对风机气动性能以及尾流干扰效应的综合影响，算例设置如表1。保持入流风速和湍流强度一致，仅改变上下游风机的错列布置间距。

表1 算例设置
Table 1 Cases setting

算例编号	横向错列间距(R)	计算方法	湍流风速标准差 σ
1	0.0	ALM	[0.2, 0.16, 0.16]
2	0.0	EALM	[0.2, 0.16, 0.16]
3	0.5	ALM	[0.2, 0.16, 0.16]
4	0.5	EALM	[0.2, 0.16, 0.16]
5	1.0	ALM	[0.2, 0.16, 0.16]
6	1.0	EALM	[0.2, 0.16, 0.16]

计算域设置参考文献[15]，上游风机距离出口边界 $2D$ ，两风机之间的纵向间距为 $5D$ ，横向错列间距分别设置为 $0R$ 、 $0.5R$ 和 $1.0R$ ，错列间距为 $0.5R$ 时计算域如图4，网格划分如图5。入口设置为湍流入流条件，出口为出口边界条件，顶部设置为可滑动边界条件，底部考虑地面效应的影响，设置为壁面边界条件。

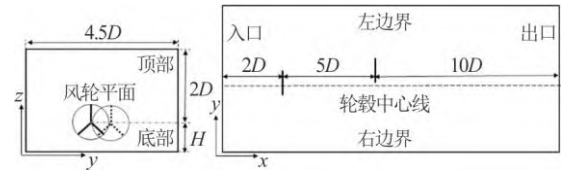
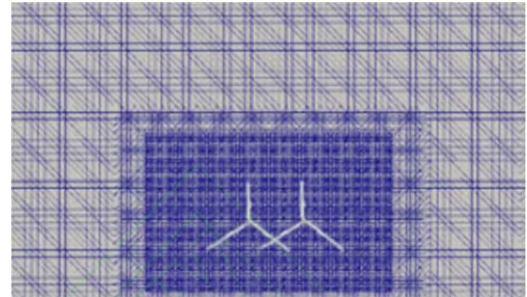


图4 计算域设置

Fig.4 Computational domain setting



(a) 横截面



(b) 纵截面

图5(网上彩图) 网格划分

Fig.5 (Color online) Grid diagram of the domain

3 结果与讨论

3.1 叶片弹性变形

基于欧拉-伯努利梁理论进行错列式两风机叶片弹性变形研究。由于在相同工况时，不同错列间距时上游风力机的结构变形量基本一致(未受到风机尾流的干扰作用)，因此仅绘制上游风力机叶片在挥舞、摆振和扭转三个方向上的结构变形，见图6。

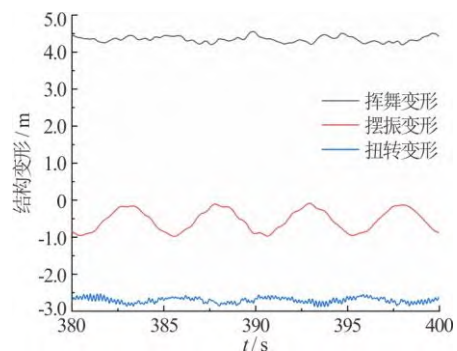


图6(网上彩图) 上游风力机叶片结构变形

Fig.6 (Color online) Structure deformations of upstream wind turbine blade

湍流入流条件下风力机叶片沿流向的挥舞平均变形量约为 4.346 m ，约为风轮半径的 6.898% ，最

大挥舞变形位移为4.553 m, 约为风轮半径的7.227%。相对于叶片挥舞变形, 叶片摆振变形量相对较小, 最大摆振变形位移为-0.978 m, 约为风轮半径的1.552%。这是由于在额定风速入流条件下, 未考虑偏航的风力机最大受力方向沿流向方向, 因此叶片挥舞变形较大而摆振变形较小。风力机叶片平均扭转变形角仅为-2.704°, 这是由于在额定风速下叶片并未过载, 因此并未出现显著的扭转变形。

由于下游风力机在不同错列间距下受到上游风力机尾流干扰的影响作用不同, 因此风力机的结构变形量也不同, 分别绘制叶片在挥舞、摆振和扭转三个方向上的结构变形如图7。

一方面, 对比上游风机的变形量结果, 下游风机的叶片变形在挥舞和摆振方向上相对减小, 尤其是两风机串列布置时(算例2)。然而当上下游风机错

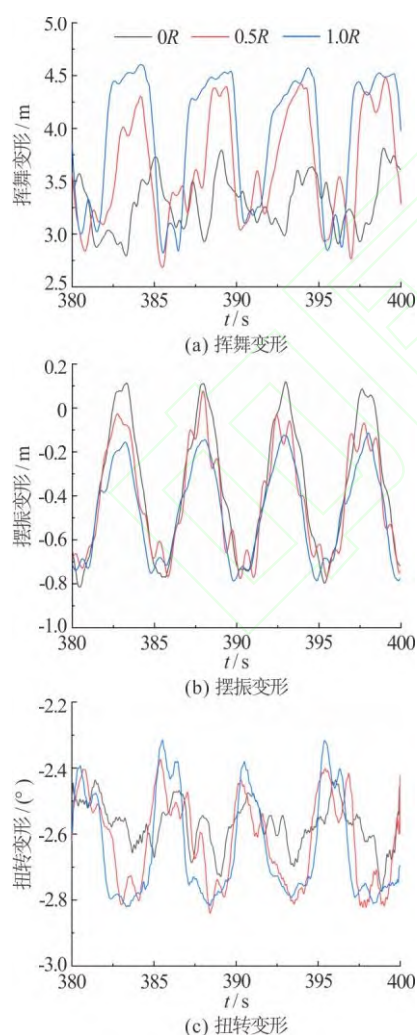


图7(网上彩图) 下游风力机叶片结构变形
Fig.7 (Color online) Structure deformations of downstream wind turbine blade

列布置时(算例4和算例6), 叶片的扭转变形量却相对增大。这是由于下游风机受到上游风机的尾流干扰作用后, 入流风速减小, 下游风机叶片在流向和周向的变形量均相对减小。而当两风力机错列布置时, 下游风机叶片受到显著的非对称载荷, 扭转变形量相对增大。

另一方面, 对比下游风机在三个方向上的变形结果, 发现随着错列间距的增大, 挥舞和扭转方向上的变形量相应增大。相对串列布置而言, 错列间距为 $0.5R$ 和 $1.0R$ 时挥舞方向上的最大值分别增大17.45%和17.63%, 扭转方向上的变形量分别增大2.53%和1.70%。当两风机存在错列间距时, 下游叶尖位置受到上游风机尾流干扰的效果更加显著, 因此叶片位置处的挥舞和扭转变形量均相对增大。然而摆振方向上的最大变形量相差不大, 三者的最大摆振位移均在0.8 m附近。此外, 随着错列间距的增大, 挥舞和扭转变形的振荡幅度逐渐加剧, 而摆振变形振荡幅度逐渐减小。

3.2 气动性能

当考虑风力机叶片结构弹性时, 挥舞变形会使风轮直径相对减小, 而摆振和扭转会使叶片的攻角相对减小, 均会影响风力机的气动性能。为了分析叶片结构变形对错列布置的风力机气动性能影响, 分别给出气动功率和气动推力的平均值, 如图8所示。

首先, 对比上游风机的气动结果可知: 考虑叶片结构变形时, 气动功率和推力分别相对减小了5.23%和10.77%; 对比下游风机的气动性能, 当错列间距分别为 $0R$ 、 $0.5R$ 和 $1.0R$ 时, 考虑叶片结构变形气动功率分别减小了3.30%、1.46%和3.60%, 而气动推力分别减小了13.09%、11.05%和10.18%。考虑叶片结构变形对推力的影响作用相对较大。

其次, 对比不同错列间距下、考虑叶片结构变形时的气动功率和推力平均值可知: 随着错列间距的增大, 气动功率和推力均相应增大。这是由于上游风机对下游风机的尾流干扰作用逐渐减小, 因此气动性能逐渐提升, 但气动功率的增长率大于气动推力。

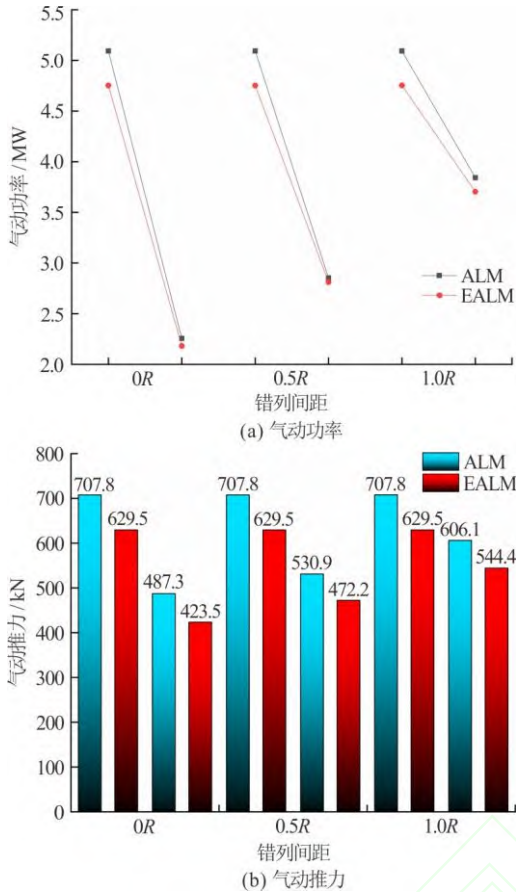


图8 (网上彩图) 气动性能

Fig.8 (Color online) Aerodynamic performance

3.3 尾流场特性

考虑到叶片结构变形在影响风力机气动性能的同时,还会对风力机的尾流场产生一定的作用,绘制了三种错列间距下考虑和未考虑叶片结构变形的瞬时尾流速度场,结果如图9所示。

考虑叶片结构变形主要对以下两个方面有影响:

①尾流速度损失。对于上游风力机而言,相同入流条件下风力机的尾流损失相对较小。对于下游风机的尾流速度场而言,考虑叶片结构变形时尾流速度增大更加明显,且尾流速度恢复更快,在图中表现为风轮后方的尾流速度场整体颜色相对较浅,远尾流区域颜色相对更浅。②尾流振荡。这是由于湍流风在时间和空间上具有脉动性,影响了风轮后方尾流速度的发展和演化,造成了平均尾流速度出现振荡的现象。在相同入流条件下,考虑叶片结构变形时,风轮后方远尾流区域处尾流速度表现出更加显著的波动和弯曲现象。

此外,在两风机不同错列布置形式下,随着错列间距的增大,尾流速度损失逐渐减小,尾流振荡

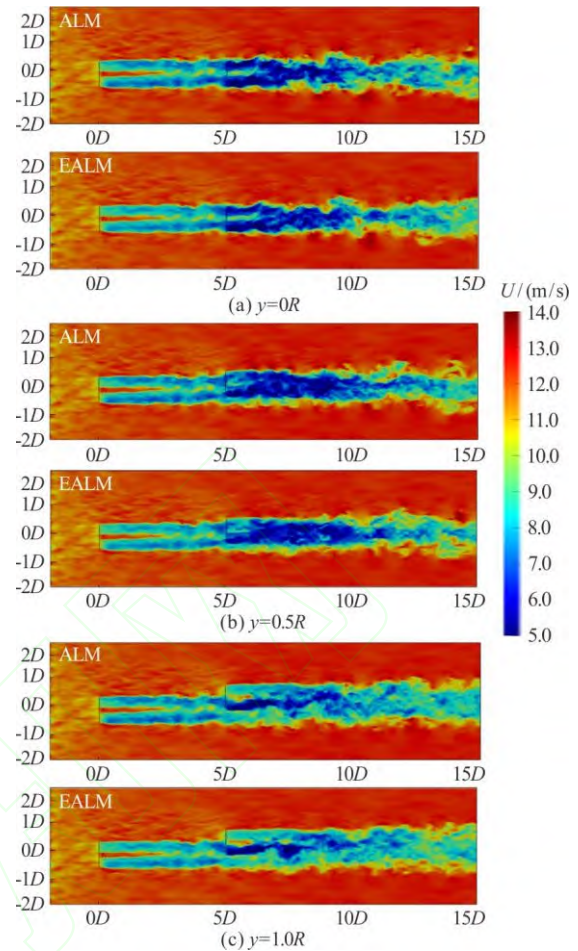


图9 (网上彩图) 尾流速度场

Fig.9 (Color online) Velocity field of wake flow

现象也逐渐减弱。这是由于错列间距增大时,风机之间的尾流干扰效应减小,因此尾流速度逐渐增大。

为了进一步分析相同入流条件下,考虑叶片结构变形对风力机尾流结构的影响作用,采用第二代涡识别方法 Q 准则,取涡量等值面 $Q=0.01$,并采用速度染色。三维尾流结构如图10。

首先,对比不同错列间距下的尾流结构,随着风机错列的间距增大,下游风机受到上游风机风轮后方的尾流干扰效应逐渐减小,图中表现为受上游风机尾流干扰形成的涡结构在下游风机风轮盘面位置处相对较小。其次,对比相同入流工况和布置形式时的尾流结构可知,当考虑风力机叶片的结构变形时,风力机远尾流区域处的涡量减小,因此上下游风机之间的尾流干扰也相应减小,在图中表现为距离上游风机风轮盘面 $2D$ 区域外的尾流结构较为稀疏,且与下游风机相互干扰后的涡量也相应较小。

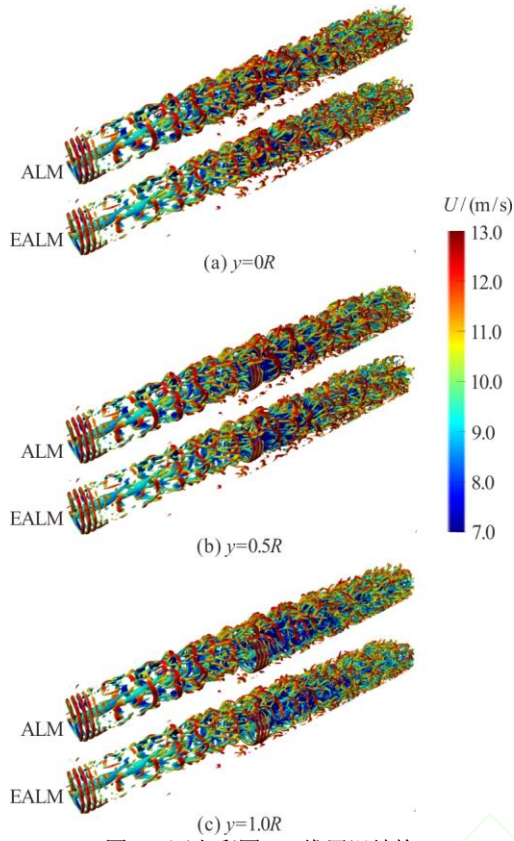


图 10 (网上彩图) 三维尾涡结构

Fig.10 (Color online) Three-dimensional vortex structure of wake flow

由于湍流风的脉动性, 风力机旋转运动过程中产生的尾涡结构难以区分, 这使得考虑叶片变形对风力机尾涡结构的演化效果难以辨认。为了更加清晰地分析考虑叶片变形对风力机尾涡结构的影响, 同时考虑湍流入流条件下的小涡结构, 本文采用Liu等^[18-19]和王义乾等^[20]提出的第三代涡识别方法Liutex, 截取上游风机风轮盘面位置处的涡量如图11所示。

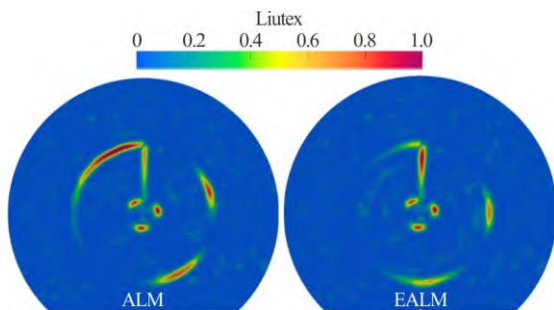


图 11 (网上彩图) 上游风机风轮盘面位置处涡量
Fig.11 (Color online) Vortex structure of wake flow

由图11可知, 当考虑风力机叶片结构变形时, 风轮盘面叶尖位置处并没有形成明显的叶尖涡结

构, 这是由于叶片挥舞变形使得叶尖涡位置后移, 从而未能在风轮盘面位置观察到明显的叶尖涡。

下游风机风轮盘面位置处的涡量如图12所示。由图可知, 考虑风机叶片变形使得上游风力机在下游风机盘面处的涡量减小。这说明考虑叶片变形使得风机之间的尾流干扰效应减小。与此同时, 在风轮盘面位置处还捕捉到由于风的湍流效应形式的小涡结构, 这些小涡与风力机叶尖涡和叶根涡之间存在着一定的干扰作用, 这也说明湍流入流条件下, 下游风机风轮盘面位置处尾涡结构更加紊乱。

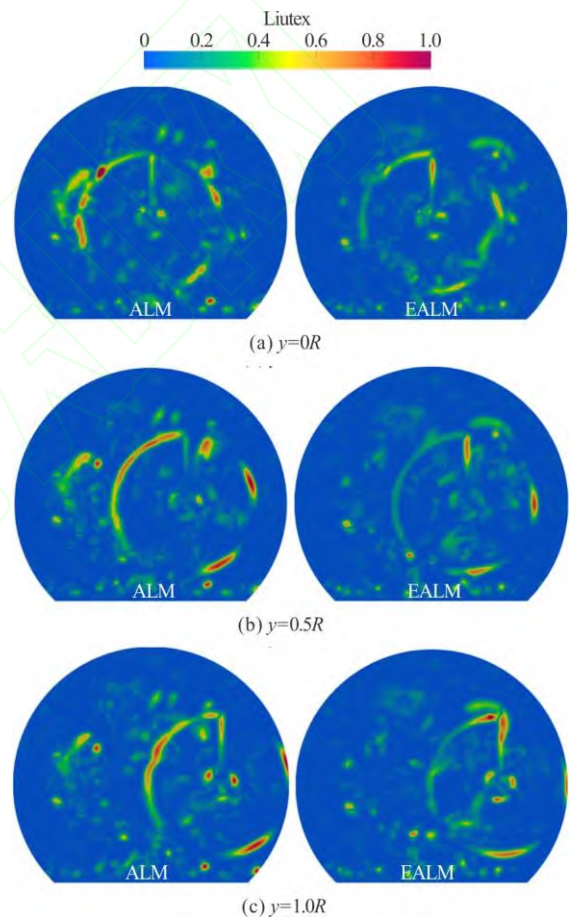


图 12 (网上彩图) 下游风机风轮盘面位置处涡量
Fig.12 (Color online) Vortex structure of wake flow

4 结 论

本文基于大涡模拟方法, 采用致动线模型结合欧拉-伯努利梁理论, 实现了考虑多风机叶片结构变形的错列式两风机数值模拟。本文重点研究了湍流入流条件下风力机气动-弹性耦合效应的影响, 并探讨了不同错列间距下风力机的尾流干扰效应。研究结果表明:

(1) 湍流入流条件下, 上游风力机叶片沿流向的挥舞最大变形量约为风轮的7.227%, 摆振最大变形量风轮半径的1.552%。下游风机在挥舞、摆振和扭转方向上的变形量均小于上游风机。此外, 随着错列间距的增大, 下游风机在挥舞和扭转方向上的变形量逐渐增大, 振荡幅度也逐渐加剧。

(2) 考虑叶片结构变形时, 不论上游风机还是下游风机, 对气动推力的影响均大于气动功率。且随着错列间距的增大, 气动功率和推力均相应增大, 但气动功率的增长率大于气动推力。

(3) 考虑风机叶片变形时, 远尾流区域处尾流速度相对较大, 尾涡结构较为稀疏, 且在下游风机风轮盘面位置处的尾涡干扰较小, 即上游风力机对下游风力机的尾流干扰效应相应减小。

参 考 文 献:

- [1] Li Z, Wen B, Dong X, et al. Aerodynamic and aeroelastic characteristics of flexible wind turbine blades under periodic unsteady inflows [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 197: 104057.
- [2] Ma Z, Zeng P, Lei L P. Analysis of the coupled aeroelastic wake behavior of wind turbine [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2019, 84: 466-484.
- [3] Chen J, Shen X, Zhu X, et al. Influence of wake asymmetry on wind turbine blade aerodynamic and aeroelastic performance in shear/yawed wind [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2018, 10(5): 053309.
- [4] Huang Y, Wan D C, Hu C. Numerical analysis of aero-hydrodynamic responses of floating offshore wind turbine considering blade deformation [C]. *The Thirty-first (2021) International Ocean and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, 2021.
- [5] 黄扬, 赵伟文, 万德成. 浮式风机气动-水动-气弹性耦合响应数值模拟 [J]. *海洋工程*, 2022, 40(4): 88-101.
- [6] Mo W, Li D, Wang X, et al. Aeroelastic coupling analysis of the flexible blade of a wind turbine [J]. *Energy*, 2015, 89: 1001-1009.
- [7] Sayed M, Lutz T, Krämer E, et al. Aeroelastic analysis of 10 MW wind turbine using CFD-CSD explicit FSI-coupling approach [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2019, 87: 354-377.
- [8] Rafiee R, Tahani M, Moradi M. Simulation of aeroelastic behavior in a composite wind turbine blade [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, 151: 60-69.
- [9] Rafiee R, Moradi M, Khanpour M. The influence of material properties on the aeroelastic behavior of a composite wind turbine blade [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2016, 8(6): 063305.
- [10] Lamei A, Hayatdavoodi S, Wang C, et al. On motion analysis and elastic response of floating offshore wind turbines [J]. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 2020, 6(1): 71-90.
- [11] 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.
- [12] Wei D, Wang N, Wan D, et al. Parametric study of the effectiveness of active yaw control based on large eddy simulation [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 271: 113751.
- [13] Miao W, Li C, Yang J, et al. Numerical investigation of the yawed wake and its effects on the downstream wind turbine [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2016, 8(3): 033303.
- [14] Veisi A A, Mayam S, Hossein M. Effects of blade rotation direction in the wake region of two in-line turbines using large eddy simulation [J]. *Applied Energy*, 2017, 197: 375-392.
- [15] Zheng J C, Wang N C, Wan D C, et al., Numerical investigations of coupled aeroelastic performance of wind turbines by elastic actuator line model [J]. *Applied Energy*, 2023, 330: 120361.
- [16] Sørensen J N, Shen W Z. Numerical modeling of wind turbine wakes [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2002, 124(2): 393-399.
- [17] Jonkman J, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development [R]. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., 2009.
- [18] Liu C, Gao Y, Tian S, et al. Rortex-A new vortex vector definition and vorticity tensor and vector decompositions [J]. *Physics of Fluids*, 2018, 30: 035103.
- [19] Liu C, Gao Y, Dong X, et al. Third generation of vortex identification methods: Omega and Liutex/Rortex based systems [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2019, 31(2): 205-223.
- [20] 王义乾, 桂南. 第三代涡识别方法及其应用综述 [J]. *水动力学研究与进展 A辑*, 2019, 34(4): 413-429.