

风力机气动-结构仿真平台构建与计算

王渊博¹, 李 春², 缪维跑¹, 邓允河³

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093;
3. 雅图新能源科技有限公司, 广东 深圳 518026)

摘 要:为在研究大型风力机气动性能的同时考虑其结构动力学特性,基于开源计算流体力学软件 OpenFOAM 及气动-水动-伺服-控制软件 FAST,并结合致动线方法(Actuator Line Method, ALM)实现风力机叶轮周围流场信息与结构响应间的数据交换,最终完成风力机气动-结构仿真平台 FASTFOAM 构建。通过该平台计算了风场中两台串列布置 5 MW 风力机的气动性能及结构动力学特性。结果表明:FASTFOAM 平台能够快速计算出风力机的功率输出、结构响应及流场信息;风力机尾迹在发展过程中可持续与周围流场进行能量交换而使其速度亏损得以弥补;下游风力机受上游风力机尾迹影响严重,输出功率只有上游风力机的 21.05%,且结构动力学响应与上游风力机不同;上游风力机和下游风力机叶轮的主要刺激频率分别为 0.16 和 0.15 Hz。

关 键 词:风力机;气动;结构;OpenFOAM;FAST

中图分类号:TK83 文献标识码:B DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2020.02.034

[引用本文格式]王渊博,李 春,缪维跑,等.风力机气动-结构仿真平台构建与计算[J].热能动力工程,2020,35(2):236-243.
WANG Yuan-bo, LI Chun, MIAO Wei-pao, et al. Construction and calculation of aerodynamic-structural simulation platform for wind turbines[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(2): 236-243.

Construction and Calculation of Aerodynamic-Structural Simulation Platform for Wind Turbines

WANG Yuan-bo¹, LI Chun², MIAO Wei-pao¹, DENG Yun-he³

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093; 2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai, China, Post Code: 200093; 3. Yatu New Energy Technology Co., Ltd, Shenzhen, China, Post Code: 518026)

Abstract: In order to study the aerodynamic performance of large wind turbines and consider their structural dynamic characteristics simultaneously, the open source computational fluid dynamics software OpenFOAM and aerodynamics-hydrodynamics-servo-control software FAST, along with actuator line method (ALM), were combined to realize the exchange of data between flow field information around the rotor and its structural response. Finally, the construction of wind turbine aerodynamic-structural simulation platform in FASTFOAM was completed. The aerodynamic performance and structural dynamic characteristics of two 5 MW wind turbines arranged in tandem in the wind farm were calculated by this platform. The results show that the FASTFOAM platform can quickly simulate the output power, structure dynamic responses and flow field information of wind turbines. Wind turbine wake can sustainably exchange energy with the surrounding flow field during its development process to compensate for its speed deficit. The

收稿日期:2019-02-27; 修订日期:2019-04-03

基金项目:国家自然科学基金(51676131);国际(地区)合作与交流项目(51811530315);上海市“科技创新行动计划”地方院校能力建设项目(19060502200);上海市科学技术委员会项目(13DZ2260900)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (51676131), International (Regional) Cooperation and Communication Project (51811530315), Capacity Building Project of Local Institutions of Shanghai "Action Plan for Scientific and Technological Innovation" (19060502200); Project of Shanghai Science and Technology Commission (13DZ2260900)

作者简介:王渊博(1991-),男,陕西澄城人,上海理工大学博士研究生, E-mail: shlgwyb@163.com.

downstream wind turbine is influenced seriously by the wake of the upstream one, and its output power only accounts for 21.05% of the upstream wind turbine and its structural dynamic characteristics are different from the upstream one. The main stimulation frequency of the upstream and downstream wind turbine rotors is 0.16 Hz and 0.15 Hz, respectively.

Key words: wind turbine, aerodynamics, structure, OpenFOAM, FAST

引 言

近年来,风能在能源供给中发挥着越来越重要的作用^[1-3],截止 2018 年底,全球风电装机容量已达 591 GW^[4]。风电装机规模持续扩张的同时,现代风力机尺寸也在不断增大,加之实际风场面积巨大且场地复杂等客观因素,通过实验方法研究大型风力机已不现实,数值模拟自然成为最佳选择^[5-6]。因此,构建一款计算精度高且功能全面的风力机数值模拟平台显得尤为紧迫。

对于风力机的数值模拟,国内外相关学者已进行了很多研究。Naderi 等人^[7]利用改进致动盘模型并结合计算流体力学方法对风场总输出功率及风力机尾迹进行模拟,所得结果对实际风场的优化具有一定参考价值。Cortina 等人^[8]通过研究不同大气边界条件时风力机在各桨距角下的输出功率,最终得到多种环境条件所对应的风力机最佳桨距角。文献^[9]对台风条件下风力机叶轮单个旋转周期内不同停机位置进行了三维非定常数值模拟,结果表明风轮的停机位置会对尾迹发展、塔架绕流及塔架压力系数产生显著影响。Clemens 等人^[10]提出了一种新型海上风力机疲劳计算方法,并证明了该方法的有效性与实用性。文献^[11]研究了地震条件下小型风力机的动力学响应,发现塔架不同高度处的最大弯矩与高度之间的关系随地震强度的增大逐渐由线性转变为非线性。Gesualdo 等人^[12]提出一种非线性动力学模型并编程求解了塔架刚塑性响应,所提模型具有耗费计算机资源少且能准确模拟结构弹性性能的特点。以上研究均仅计算了风力机的气动或者结构,但若只优化气动,结构一旦破坏风力机将无法正常运行;若只注重结构,风力机的气动效率将无法保证。因此,单一地考虑风力机某一方面并不可取。

针对上述问题,以美国国家可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)开发

的 5 MW 风力机为数值实验对象,利用 ALM,对 OpenFOAM 中的标准求解器 buoyantBoussinesqPimpleFoam 进行修改并通过静态链接库的方式与 FAST 连接,构建了气动-结构平台 FASTFOAM,该平台可在模拟风力机气动性能的同时计算风力机结构动力学特性,以保证大型风力机在安全运行的前提下输出更大功率,此对实际风场中风力机提高输出功率及稳定运行具有一定的指导意义。

1 致动线方法

对于风力机整机气动特性数值模拟,致动线方法相较于传统计算流体力学方法有着前处理简单、耗时间短以及占用计算资源少等优势,同时模拟结果也能达到传统计算流体力学方法的精度。

1.1 核心方程

致动线方法将风力机叶片简化为一根直线,并在致动线上布置一定数量的分布点。分布点通过读取流场信息及翼型升阻力系数表可计算叶片受力并通过 N-S 方程源项的形式影响流场状态^[13]:

$$\frac{DV}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 V + f \quad (1)$$

式中: V —速度矢量; ρ —密度; t —时间; P —应力张量; ν —运动粘度; 源项 f —体积力,表征叶片给流场的反作用力。

1.2 体积力

根据牛顿第三运动定律,可利用叶片受到流场的作用力求得叶片对流场的反作用力,即体积力。因 ALM 中并没有实体壁面,需借助其它模型计算流场给叶片的作用力以达到与实体叶片同样效果,以叶素动量理论作为附加模型:

$$F_\tau = \frac{1}{2} \rho W^2 \cdot c \cdot C_\tau \cdot \tau \quad (2)$$

$$F_n = \frac{1}{2} \rho W^2 \cdot c \cdot C_n \cdot n \quad (3)$$

$$F^s = F_\tau + F_n \quad (4)$$

式中: F_τ —翼展单位长度所受切向力; F_n —翼展

单位长度所受法向力; ρ —流体密度; W —翼型的相对速度; c —翼型弦长; C_r —切向力系数; τ —切向单位向量; C_n —法向力系数; n —法向单位向量; F^s —翼展单位长度所受合力。

翼展单位长度叶片给流场的体积力 F^f 为:

$$F^f = -F^s \quad (5)$$

叶片反作用于流场的体积力需投射至致动线附近的计算区域,该过程称为体积力光滑,如图 1 所示,其中体积力光滑方式对数值模拟的结果影响极大:投射范围较小时,数值计算将产生严重震荡,甚至难以收敛;投射范围过大时,投射区域网格所得体积力的数值过小,流场状态改变微弱,尤其是叶根涡和叶尖涡将被过分抹平,此与真实情况不符^[14-15]。

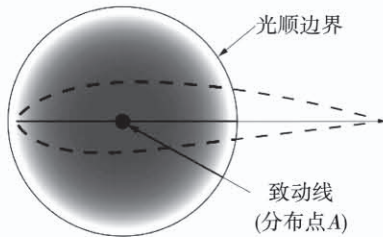


图 1 体积力光滑示意图

Fig. 1 Schematic of body forces distribution

为解决上述问题,将体积力以三维高斯分布的形式向流场光滑^[16-17]:

$$f(r) = 1/(\varepsilon^3 \pi^{3/2}) \cdot e^{-(r/\varepsilon)^2} \quad (6)$$

式中: r —体积力中心至投射点的距离; ε —光滑因子,控制体积力光滑的集中程度。

2 多体动力学模型

FAST 中的多体动力学模型基于 Kane 方法建立,将风力机视作具有 N 个自由度的刚柔体结构系统,其中刚体结构有平台、轮毂和机舱等;柔性体有叶片、塔架及传动轴等。

对于风力机整机动力学,当确定了各部件的偏角速度和偏速度以及广义惯性力 F_r^* 和广义主动力 F_r 后,便可得其动力学方程^[18-19]。

$$F_r^* + F_r = 0 (r = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

广义主动力由各部件的重力、气动力和弹性力组成:

$$F_r = \sum F_r|_g + \sum F_r|_a + \sum F_r|_e (r = 1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

式中: $\sum F_r|_g$ —各部件重力总和; $\sum F_r|_a$ —各部件气动力总和; $\sum F_r|_e$ —各部件弹性力总和。

对应广义惯性力 F_r^* 的表达式为:

$$F_r^* = \sum_{i=1}^w {}^E v_r^{N_i} \cdot (-m^{N_i} a^{N_i}) + {}^E \omega_r^{N_i} \cdot (-{}^E H^{N_i}) (r = 1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

式中: w —风力机的部件数; ${}^E v_r^{N_i}$ —第 N_i 个部件于坐标系 E 的偏速度; m^{N_i} —第 N_i 个部件的广义质量; a^{N_i} —第 N_i 个部件于坐标系 E 的加速度; ${}^E \omega_r^{N_i}$ —第 N_i 个部件于坐标系 E 的偏角速度; ${}^E H^{N_i}$ —第 N_i 个部件于坐标系 E 的惯性力矩。

将式(8)和式(9)代入式(7)可得风力机系统的动力学方程^[20-21]:

$$\begin{bmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & \dots & C_{1,N} \\ C_{2,1} & C_{2,2} & \dots & C_{2,N} \\ \vdots & \vdots & C_{r,s} & \vdots \\ C_{N,1} & C_{N,2} & \dots & C_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \vdots \\ \ddot{q}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_1(\dot{q}_1, q_1, t) \\ -f_2(\dot{q}_2, q_2, t) \\ \vdots \\ -f_N(\dot{q}_N, q_N, t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[C(q, t)] \{\ddot{q}\} + \{f(\dot{q}, q, t)\} = \{0\} \quad (11)$$

式中: $\{\ddot{q}\}$ —系统的加速度向量; $[C(q, t)]$ —系统的加速度系数矩阵; $\{f(\dot{q}, q, t)\}$ —系统的位移和速度相关向量。

3 气动-结构平台 FASTFOAM

OpenFOAM 是一款基于 C++ 语言编写的开源计算流体力学软件,自带种类丰富的求解器、辅助工具和动态链接库,可实现商业软件无法实现的功能。OpenFOAM 最大的特点是可根据具体问题,通过修改相关源代码及调用动态链接库实现/满足用户定制开发特定求解器,此过程也利于对流体力学及各种数值方法求解概念的深入理解。FAST 是专用于求解风力机结构动力学响应的 CAE 仿真软件,主要包含三大部分:气动模块 (AeroDyn)、弹性模块 (ElastoDyn) 及伺服控制模块 (ServoDyn)。

通过耦合 OpenFOAM 与 FAST,并结合 ALM 构建气动-结构平台 FASTFOAM。在一个时间步内,该平台首先由 OpenFOAM 计算风场流动,然后通过 ALM 读取风轮各叶片位置及附近流场信息以计算叶片升阻力并将其传递给 FSAT,FAST 调用 Elasto-

Dyn 模块计算叶片结构动力学响应,同时 ALM 将体积力投射至风轮周围流域,最后更新叶片位置及风场流动变量以进入下一个时间步,软件间关系及主要流程如图 2 所示。

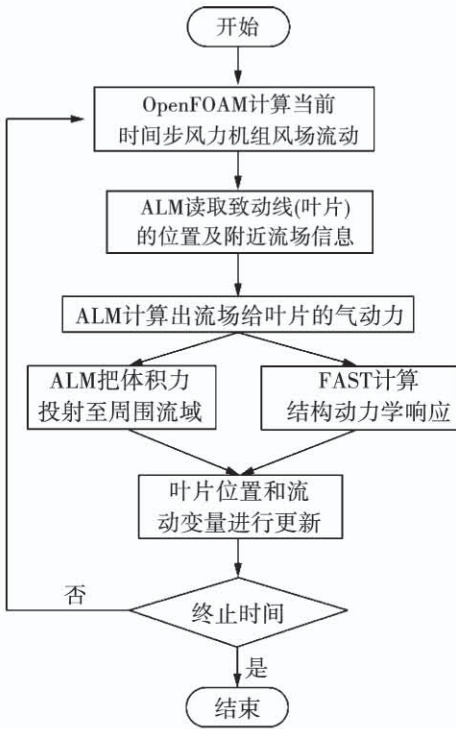


图 2 FASTFOAM 流程图

Fig. 2 Flow chart of the FASTFOAM

4 研究对象与模拟参数

4.1 计算对象

计算对象选为 NREL 所设计的 5 MW 风力机^[22],其主要参数如表 1 所示。

表 1 NREL 5 MW 风力机主要参数

Tab. 1 Main specifications of the NREL 5 MW wind turbine

参数	数值
额定功率/MW	5.0
额定转速/ $r \cdot \min^{-1}$	12.1
额定风速/ $m \cdot s^{-1}$	11.4
风轮直径/m	126.0
轮毂直径/m	3
风轮锥角/ $^{\circ}$	2.5
风轮仰角/ $^{\circ}$	5.0
轮毂高度/m	90.0

4.2 计算域及参数设置

以 D 表示风轮直径,在 $20D \times 6D \times 6D$ 的风场中串列布置两台 NREL 5 MW 风力机 WT1 和 WT2,如图 3 所示,其中 WT1 距入口 $3D$ 、距 WT2 为 $7D$,WT2 距出口为 $10D$ 。

Sarmast^[23]深入研究了 ALM 在特定光顺因子下网格尺度对 ALM 计算结果的影响:当分布因子确定后,优化网格能促使计算结果收敛并提高模拟准确度,因此对计算域中风力机所在的水平区域网格进行加密,如图 4 所示,加密区的网格尺度为 $3.94 m \times 3.94 m \times 3.94 m$,完全符合风场这种大尺度计算域数值模拟对网格精度的要求^[24]。

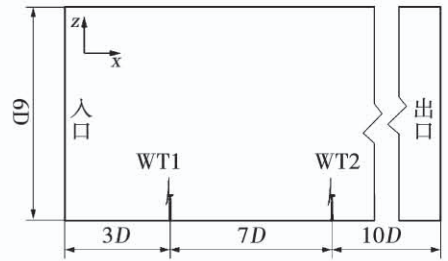


图 3 风场中风力机的布置

Fig. 3 Layout of wind turbines in the wind farm



图 4 风场的网格划分

Fig. 4 Mesh generation of the wind farm

计算域的边界条件类型如图 5 所示。进口设为速度入口,方向垂直于进口平面,同时考虑风剪切,即速度从地面垂直向上采用对数律分布,轮毂处速度为 $9.0 m/s$;出口设为零梯度压力出口、标准大气压;地面和顶面设为滑移边界条件;剩下的两个侧面设为周期性边界条件,即计算域一个侧面上的网格节点与另一侧面网格节点完全对应,某一周期性边界外“镜像单元”的流场信息由紧邻另一侧周期性边界计算域内的单元提供。

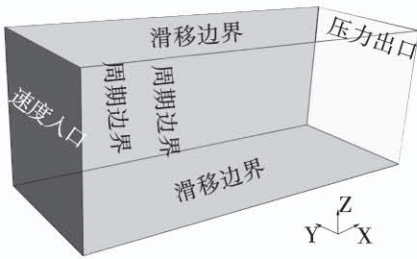


图 5 计算域的边界条件类型

Fig. 5 Boundary condition types of the computed field

5 结果分析

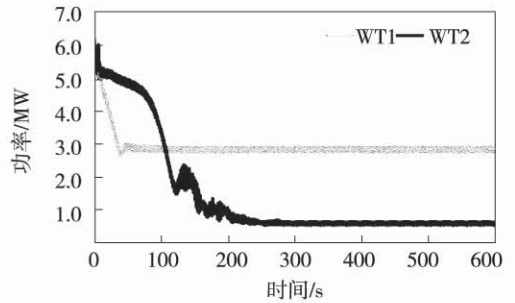
FASTFOAM 平台在每个时间步输出风力机的功率,剪切风从入口发展到出口约需 280 s,之后再计算 320 s 以观察平台的可靠性。由于使用 ALM 计算气动力,因此不必对风力机叶片进行三维建模,从而无需为捕捉叶片表面边界层流动而划分大密度复杂网格,最终减小了计算资源的消耗,极大缩短了数值模拟时间。

图 6 为风场中各风力机的输出功率,其中图 6(a)为随数值模拟时间两台风力机输出功率的变化趋势,图 6(b)为两台风力机的最终输出功率。因为来流风速为 9 m/s,所以来流风到达第一台风力机的时间为 42 s,接触第二台风力机需要 140 s,发展至出口大约耗时 280 s,因此图 6(a)的变化趋势正确。之后再继续计算到 600 s,风力机输出功率及各种结构动力学响应均基于最后 320 s 的模拟数据。此外,从图 6(b)能够看出,WT1 的最终输出功率为 2.82 MW,WT2 的最终输出功率为 0.59 MW,可见 WT2 的输出功率远小于 WT1。

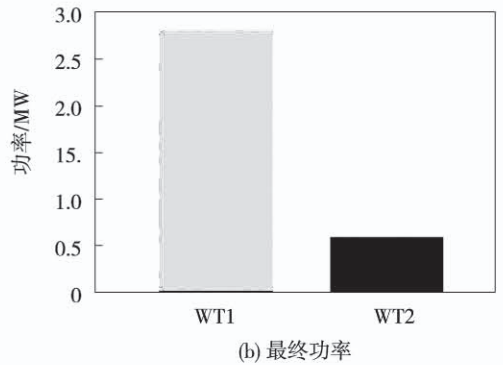
图 7 是风场下游风力机后方距其 3 倍和 6 倍风轮直径处的竖直截面速度云图。可以看出,3D 处尾迹的速度亏损较为严重,而 6D 处的尾迹已经基本恢复,此是由于尾迹的湍流度较大,在其发展过程中不断与周围流场进行能量交换,从而弥补了速度亏损。而周围流场的能量减少,则通过算例的速度入口进行持续补充以保证计算域的能量守恒。正是由于尾迹的这一特征,风场中风力机间的距离通常设为 7D,如此既可减小上游风力机尾迹对下游风力机的影响,又可节省风场土地资源。

图 8 为风场中过风力机轮毂处的水平截面速度云图。可以看出,入流风经过风力机叶轮后速度大

幅下降,是由于风轮吸收了入流风的能量并转换为机械能,从而造成尾迹速度小、湍流度大的情况,这将导致下游风力机性能严重下降。



(a) 输出功率随模拟时间的变化



(b) 最终功率

图 6 风场中各风力机的输出功率

Fig. 6 The output power of wind turbines in the wind farm

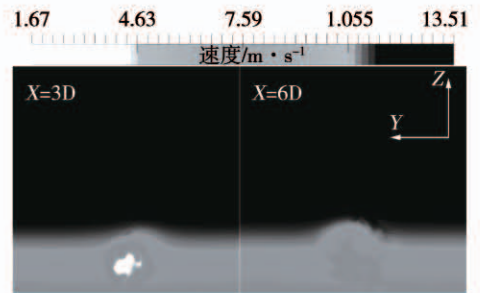


图 7 WT2 后 3D 和 6D 处竖直截面速度云图

Fig. 7 The velocity clouds of vertical cross-sections of 3D and 6D after the WT2



图 8 轮毂高度处水平截面速度云图

Fig. 8 The velocity contour of horizontal cross-section in the height of the hub

图 9 为 NREL 5 MW 风力机的设计风速 - 功率图^[25],结合图 8 和图 6(b)可以看出,风场中两台风力机的输出功率与设计参数吻合较好。

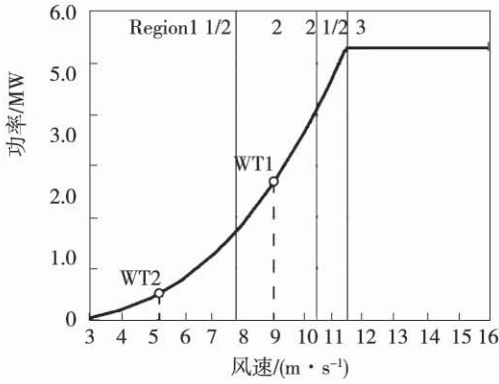
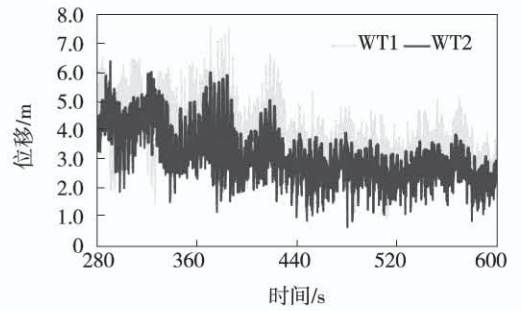


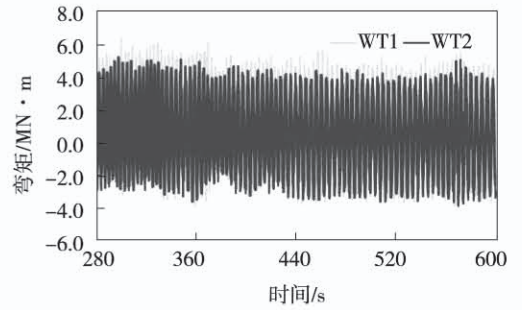
图 9 NREL 5 MW 风力机风速 - 功率图

Fig. 9 The curve of the wind velocity VS output power for NREL 5 MW wind turbine

图 10 为两台风力机的结构动力学响应时域图,可以看出,WT1 的叶尖挥舞位移大于 WT2,这是因为挥舞方向为 X 方向,即风的来流方向,WT2 处于 WT1 的尾迹中,X 方向的入流风速要小于 WT1 的入流风速,最终导致 WT2 的叶尖位移在 X 方向小于 WT1;WT1 的叶根弯矩大于 WT2,原因与叶尖位移相同。



(a) 叶尖挥舞位移



(b) 叶根挥舞弯矩

图 10 风力机动态响应时域图

Fig. 10 Dynamic responses in time of wind turbines

图 11 为风力机叶尖摆振位移时域图,WT2 的叶尖摆振稍大于 WT1,这是由于摆振在 X 垂直方向,WT2 的入流风是 WT1 的尾迹,其湍流度较大,导致 WT2 的叶片摆振比 WT1 稍强烈。另外,与图 10(a)相比摆振位移响应比挥舞位移响应小一个数量级。

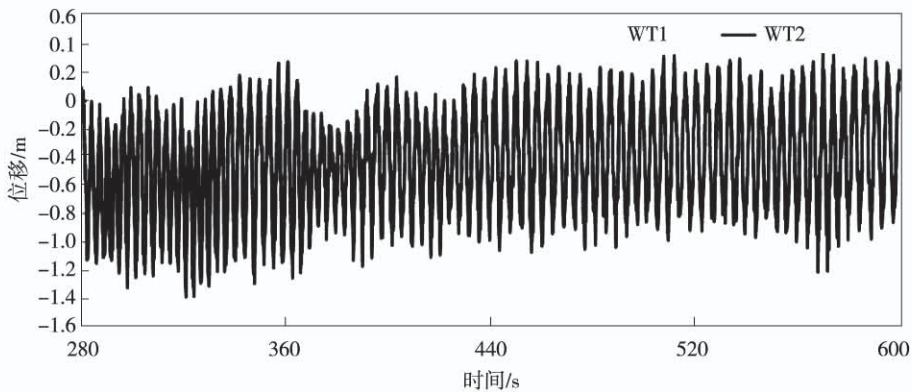


图 11 叶尖摆振位移动态响应时域图

Fig. 11 Dynamic responses in time of the of blade tip edgewise displacements

图 12 为叶根弯矩的频域响应,WT1 的弯矩响应频段为 0.14 ~ 0.22 Hz 及 1.13 ~ 1.16 Hz,其中 0.16 Hz 处出现了较为明显的峰值,主要刺激频段为

低频段;WT2 的弯矩响应频段为 0.13 ~ 0.21 Hz 和 1.14 ~ 1.17 Hz,其中 0.15 Hz 处出现了较为明显的峰值,主要刺激频段也为低频段。频域结果分析表

明,WT1 叶轮载荷的主要刺激频率为 0.16 Hz;WT2 叶轮载荷的主要刺激频率为 0.15 Hz。因此,在风力机制造过程中应特别注意使其叶轮的固有频率避开 0.15 或 0.16 Hz,以免发生共振而毁坏风轮结构。

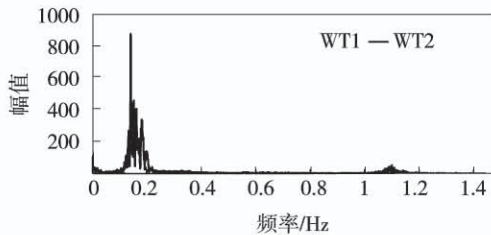


图 12 叶根挥舞弯矩频域响应

Fig. 12 Frequency responses of the blade root flap-wise moment

6 结 论

基于开源软件 OpenFOAM、FAST 并结合 ALM 构造出大型风力机气动 - 结构耦合平台 FAST-FOAM,主要得出结论:

(1) FASTFOAM 平台能够快速准确计算出风力机的功率输出、结构动态响应及周围流场信息。

(2) 尾迹速度低且湍流度大,对风力机功率输出及结构动力学响应影响严重;风力机尾迹在发展过程中可持续与周围非尾迹区域的流体进行能量交换而使速度亏损得以弥补。

(3) WT1 和 WT2 的结构动力学时域响应相差较大,频域响应差别较小,叶轮主要刺激频率分别为 0.16 和 0.15 Hz。

参考文献:

[1] 刘宇航,丁勤卫,李春,等.基于仿生学的风力机塔架结构设计及其力学性能分析[J].热能动力工程,2018,33(8):129-134.
LIU Yu-hang,DING Qin-wei,LI Chun,et al. Design of wind turbine tower structure based on bionics and its mechanical performance analysis[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2018,33(8):129-134.

[2] NAVARRETE E C,PEREAM T,CORREA J C J,et al. Expert control systems implemented in a pitch control of wind turbine: A review[J]. IEEE Access,2019(7):13241-13259.

[3] 周伟,叶舟,李春,等.基于LES方法的气动弹片对风力机翼型空气动力特性影响研究[J].热能动力工程,2019,34

(5):127-135.

ZHOU Wei, YE Zhou, LI Chun, et al. Influence of flap on the characteristics of airfoil based on LES method[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(5): 127-135.

- [4] GWEC. Global wind report 2018[R]. Brussels: Global Wind Energy Council, 2019.
- [5] WANG Y, MIAO W, DING Q, et al. Numerical investigations on control strategies of wake deviation for large wind turbines in an offshore wind farm[J]. Ocean Engineering, 2019, 173: 794-801.
- [6] 王渊博,李春,缪维跑,等.基于致动线方法的风力机尾迹控制策略研究[J].太阳能学报,2018,39(11):234-241.
WANG Yuan-bo, LI Chun, MIAO Wei-pao, et al. Research of control strategies for wind turbines wake based on ALM[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(11): 234-241.
- [7] NADERI S, PARVANEHMASIHA S, TORABI F. Modeling of horizontal axis wind turbine wakes in Horns Rev offshore wind farm using an improved actuator disc model coupled with computational fluid dynamic[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 171: 953-968.
- [8] CORTINA G, SHARMA V, CALAF M. Investigation of the incoming wind vector for improved wind turbine yaw-adjustment under different atmospheric and wind farm conditions[J]. Renewable Energy, 2017, 101: 376-386.
- [9] 柯世堂,徐璐.考虑中尺度台风效应的大型风力机体系气动性能分析[J].东南大学学报(自然科学版),2019,49(2):340-347.
KE Shi-tang, XU Lu. Analysis on aerodynamic performance of large wind turbine system considering mesoscale typhoon effect[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(2): 340-347.
- [10] CLEMENS H, WEIJTJENS W, GEBHARDT C G, et al. Validation of improved sampling concepts for offshore wind turbine fatigue design[J]. Energies, 2019, 12(603): 1-20.
- [11] 邹锦华,杨阳,李春,等.地震强度对小型风力机动力学响应影响研究[J].热能动力工程,2018,33(1):96-104.
ZOU Jin-hua, YANG Yang, LI Chun, et al. Study of the influence of the seismic intensity on the dynamic response of a small-sized wind turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(1): 96-104.
- [12] GESUALDO A, IANNUZZO A, PENTA F, et al. Nonlinear dynamics of a wind turbine tower[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2019(3): 1-9.
- [13] APSLEY D D, STALLARD T, STANSBY P K. Actuator-line CFD modelling of tidal-stream turbines in arrays[J]. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 2018, 4(4): 259-271.
- [14] 刘强.漂浮式风力机动态响应及气动特性研究[D].北京:

- 中国科学院大学,2014.
- LIU Qiang. Dynamic Response and aerodynamic characteristics of floating wind turbines[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences,2014.
- [15] MARTÍNEZ T L A, CHURCHFIELD M J, YILMAZ A E, et al. Comparison of four large-eddy simulation research codes and effects of model coefficient and inflow turbulence in actuator-line-based wind turbine modeling[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*,2018,10(3): 1-14.
- [16] BABA A M H, DONG P. Validation of the actuator line method for simulating flow through a horizontal axis tidal stream turbine by comparison with measurements[J]. *Renewable Energy*,2017, 113: 420-427.
- [17] DESKOS G, PIGGOTT M D. Mesh-adaptive simulations of horizontal-axis turbine arrays using the actuator line method[J]. *Wind Energy*,2017,21(12): 1266-1281.
- [18] 刘延柱,潘振宽,戈新生. 多体系统动力学(第2版)[M]. 北京:高等教育出版社,2014.
- LIU Yan-zhu, PAN Zhen-kuan, GE Xin-sheng. Dynamics of multi-body system (second edition)[M]. Beijing: Higher Education Press,2014.
- [19] 刘中胜,杨阳,李春,等. 考虑SSI效应的风力机塔架地震动力响应时频特性分析[J]. *动力工程学报*,2018,38(7): 587-593.
- LIU Zhong-sheng, YANG Yang, LI Chun, et al. Analysis on dynamic seismic response of a wind turbine tower in time-frequency domain considering SSI effects[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*,2018,38(7): 587-593.
- [20] YANG Y, YE K, LI C, et al. Dynamic behavior of wind turbines influenced by aerodynamic damping and earthquake intensity[J]. *Wind Energy*,2018,21(1): 1-17.
- [21] 邹锦华,杨阳,李春,等. 地震强度对小型风力机动力学响应影响研究[J]. *热能动力工程*,2018,33(1):96-104.
- ZOU Jin-hua, YANG Yang, LI Chun, et al. Study of the influence of the seismic intensity on the dynamic response of a small-sized wind turbine[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*,2018,33(1): 96-104.
- [22] 王渊博,李春,缪维跑,等. 基于全风场功率输出的风力机控制策略研究. *中国电机工程学报*,2017,37(15): 4437-4445.
- WANG Yuan-bo, LI Chun, MIAO Wei-pao, et al. Research on the control strategies of the wind turbine based on the total output powers of the global wind farm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017,37(15): 4437-4445.
- [23] SARMAST S, SEGALINI A, MIKKELSEN R F, et al. Comparison of the near-wake between actuator-line simulations and a simplified vortex model of a horizontal-axis wind turbine[J]. *Wind Energy*,2015,94(6): 2249-2254.
- [24] FLEMING P, GEBRAAD P M O, SANG L, et al. Simulation comparison of wake mitigation control strategies for a two-turbine case[J]. *Wind Energy*,2014,18(2): 1-7.
- [25] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5 MW reference wind turbine for offshore system development [R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory,2009.

(金圣迪 编辑)