

DOI: 10.19666/j.rlfid.202210232

基于动态尾流蜿蜒模型的风力机疲劳损伤评估

穆延非¹, 王强^{1,2}, 罗坤^{1,2}, 樊建人^{1,2}, 邱旭³, 刘鑫³, 闫姝³

(1. 浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

2. 浙江省清洁能源与碳中和重点实验室, 浙江 杭州 310027;

3. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

[摘要] 风电场尾流效应是影响下游风力机载荷的主要因素。选用美国可再生能源实验室(NREL)最新开源的多物理场耦合仿真软件工具——FAST.Farm, 以某海上风电场为研究对象, 量化评估了风电场前排、中间和后排风力机的尾流效应、载荷及疲劳损伤特征。结果表明: 沿流动方向, 风电场内部呈现出风速依次降低, 湍流强度依次增加的流动特征; 随着来流风速提高, 前排、中间、后排风力机的疲劳损伤增大; 在较高来流风速条件下, 中间位置风力机叶根处和塔基处的疲劳损伤成倍增加, 且增加幅度明显高于前排和后排风力机, 即疲劳损伤最严重的风力机位于风电场中间区域。建议风电前期开发及后期运维工作中, 需要重点关注场区中间位置风力机的结构强度。

[关键词] FAST.Farm; 动态尾流蜿蜒模型; 风力机; 雨流计数法; 疲劳损伤

[引用本文格式] 穆延非, 王强, 罗坤, 等. 基于动态尾流蜿蜒模型的风力机疲劳损伤评估[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 39-48. MU Yanfei, WANG Qiang, LUO Kun, et al. Fatigue damage assessment of wind turbine based on dynamic wake meandering model[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 39-48.

Fatigue damage assessment of wind turbine based on dynamic wake meandering model

MU Yanfei¹, WANG Qiang^{1,2}, LUO Kun^{1,2}, FAN Jianren^{1,2}, QIU Xu³, LIU Xin³, YAN Shu³

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Key Laboratory of Clean Energy and Carbon Neutrality, Hangzhou 310027, China;

3. Huaneng Clean Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: The wake effect of wind farm is the main factor affecting the performance of wind turbines in the downstream wind farm. The wake effect, load characteristics and fatigue damage of wind turbines in front, middle and rear of an offshore wind farm were quantitatively assessed by FAST.Farm, which is the latest opensource multi-physical field coupling simulation software tool of National Renewable Energy Laboratory (NREL). The results show that, the wind speed decreases and the turbulence intensity increases in turn in the wind farm along the flow direction. The fatigue damage of front-row, middle-row and back-row wind turbines increases with the inflow wind speed. Especially, under the condition of high inflow wind speed, the fatigue damage of the middle-row wind turbines at the blade root and the tower base increases exponentially, and the increase range is obviously higher than that of the front and back row wind turbine. It suggests that the structural strength of wind turbines in the central area should be improved to some extent in wind power pre-development and post-operation and maintenance work.

Key words: FAST.Farm; dynamic wake meandering model; wind turbine; rain flow counting method; fatigue damage

风力机运行过程会在其下游形成“低风速、高湍流”的尾流效应, 风速降低是由于来流环境风的动能

被上游风力机提取, 湍流强度增加是上游风力机叶轮旋转的扰动和与环境风混合的结果。风电场内下

收稿日期: 2022-10-05 网络首发日期: 2022-12-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52206218); 中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ19-H16)

Supported by: Youth Science Foundation Project of National Natural Science Foundation of China(52206218); Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd.(HNKJ19-H16)

第一作者简介: 穆延非(1986), 男, 博士研究生, 主要研究方向为海上风电场群规划优化和机组整体结构设计技术, muyanfei@126.com.

通信作者简介: 罗坤(1977), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为能源与环境工程领域复杂多相流动和反应的理论与数值研究, zjulk@zju.edu.cn.

游尾流区平均风速降低导致下游风力机发电量减少,同时湍流强度增大引起疲劳载荷增加,从而缩短风力机的寿命^[1-2]。因此,准确地预测风力机尾流特征对精准评估发电量及疲劳载荷具有重要意义。

如同自然界中的旗帜迎风飘扬、树枝随风摇曳现象一样,风力机的尾流效应也具有动态变化的特点,即呈现出低频、大尺度的横向或垂直摆动的蜿蜒特征,也称为尾流蜿蜒(wake meandering)^[3-5]。该现象早在 20 世纪 80 年代就已被关注,至今仍不断地提出新的模型来描述风电场中风力机的尾迹蜿蜒运动。在早期阶段,研究人员提出了一些用于工程计算的稳态尾流模型,如 Jensen、Gaussian、Frandsen 和 Curl 等模型^[6-8]。这些工程尾流模型提供了风力机尾流效应的简单和快速的预测手段,在风电工程领域应用广泛。然而,工程尾流模型属于稳态模型,并不能准确地描述风力机的蜿蜒尾流特征^[9-13]。

关于风力机尾流蜿蜒产生的物理机制,存在 2 种不同解释:1) 剪切层失稳理论;2) 来流大尺度涡理论^[14]。剪切层失稳理论认为,来流环境风掠过风力机时,引起的周期性侧向涡脱落导致了尾迹大尺度的横向摆动,与卡门涡街现象类似^[15-17]。而来流大尺度涡理论认为,尾迹蜿蜒源自大气中大尺度湍流的运动,促使风力机的尾流被裹挟,进而发生蜿蜒流动现象^[18-19]。近年来,基于计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)大涡模拟(large eddy simulation, LES)的风力机尾流效应研究发展迅速^[20-23]。该方法通过非常精细的网格捕捉风力机叶片上的边界层流动以及涡结构特征来模拟尾流演变,能够模拟出风力机尾流的蜿蜒特征。然而,该方法依赖于非常精细的网格来捕捉边界层及翼型几何特征,计算成本极大。因此,LES 仅适用于风力机蜿蜒尾流机理的研究。

风力机运行过程持续不断地受到风载荷及旋转叶轮的激励,叶根和塔基在长期交变应力作用下,当实际循环次数达到疲劳破坏时,将导致叶片和支撑结构损坏,甚至发生倒塔事故^[12-13]。风电场内不同位置(前排、中间、后排)风力机的平均风速和湍流强度差异较大,且风速损失、湍流强度对风力机疲劳性能有较大影响。此外,风力机的数据采集与监视控制系统(SCADA)运行的时间分辨率为数秒,而环境风载荷波动激励的时间分辨率为 0.01 s。因此,对风电场尾流区内风力机疲劳损伤的准确评估是风能领域研究的难点。

基于此,本文利用美国可再生能源实验室(national renewable energy laboratory, NREL)最新开发的多物理场耦合仿真软件 FAST.Farm,以江苏省海域某大型海上风电场为研究对象,探究风电场不同位置风力机的尾流蜿蜒特征,并且对叶根和塔基处的等效应力及疲劳损伤进行量化评估。

1 FAST.Farm 软件

1.1 软件框架

FAST.Farm 是一款集成了单机侧(风力机载荷评估、控制优化以及发电量计算)与风电场侧(尾流计算和尾流控制)于一体的多物理场耦合仿真软件。该软件使用风力机气动载荷分析软件 OpenFAST^[20-23]来求解每台风力机的气动-水动-伺服控制-弹性(aero-hydro-servo-elastic dynamics)等结构动力学特征,并通过动态蜿蜒尾流模型(DWM)计算各个风力机的尾流特征。

该软件由 4 个子模块组成:1) 超级控制器模块(super controller, SC)可采用 FLORIS 软件提供的控制策略,通过执行对风电场内所有风力机的偏航控制,实现对风电场群的控制;2) 风力机动力学模块(open fast, OF)用于计算单台风力机的载荷;3) 尾流动力学(wake dynamics, WD)模块用于计算单台风力机的动态尾流特征,即动态尾流蜿蜒的计算;4) 环境风和阵列效应(ambient wind & array effects, AWAE)用于处理环境风和风力机尾迹的叠加融合问题。4 个子模块通过驱动模块实现耦合连接,驱动模块读取子模块的输入参数,并检查参数的有效性,初始化模块将输出结果写入文件,最后在模拟结束时释放内存,从而实现整个时域过程向前求解计算。FAST.Farm 软件框架如图 1 所示^[24]。

FAST.Farm 软件的优势在于能够捕捉风力机动态尾流蜿蜒特征。动态尾流蜿蜒过程如图 2 所示^[24-25]。

1.2 尾流动力学模块

尾流动力学模块(WD)主要包含 3 个模型,分别为尾流的平流、偏转和蜿蜒模型、近尾流区修正模型和尾流亏损演变模型。其中,尾流的平流、偏转和蜿蜒模型用于确定蜿蜒尾流的中心和方向。该模型通过识别风场内不同尺度的湍流涡,即采用低通滤波函数将风力机入流风大尺度湍流涡(大于 2D, D 为叶轮直径)和小尺度湍流涡分离开。大尺度湍流涡直接影响风力机尾流蜿蜒,小尺度湍流涡

则影响风力机尾流的亏损演变。风力机尾流中心位置受到大尺度湍流涡曳力的作用，在每个计算时间

步，对风力机尾流的位置进行 1 次轨迹计算，从而形成尾流平面每个时间步的示踪位置。

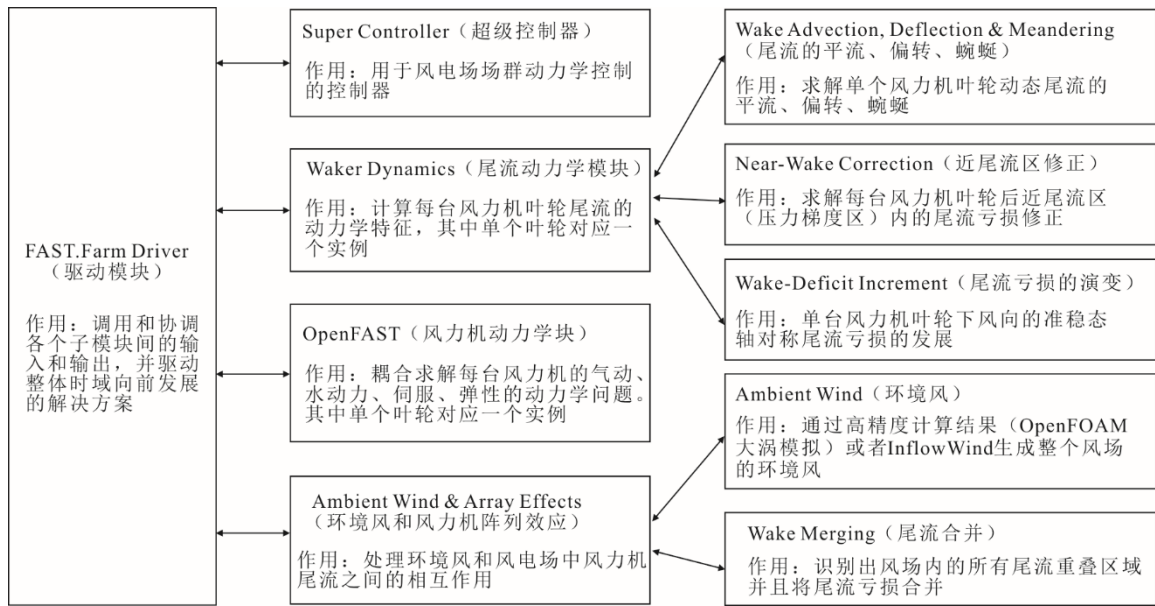


图 1 FAST.Farm 软件框架

Fig.1 The framework of the FAST.Farm software

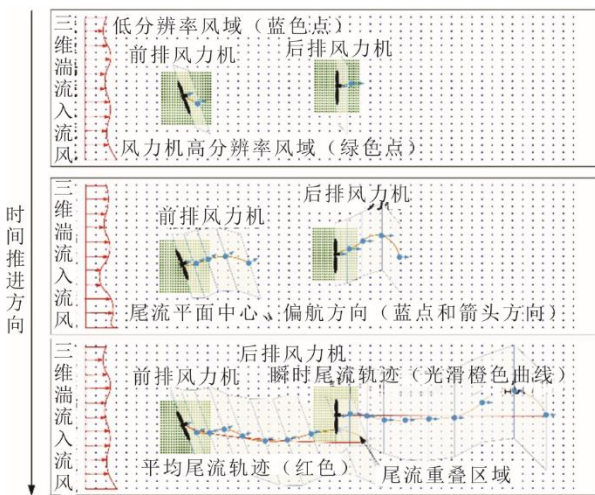


图 2 动态尾流蜿蜒过程

Fig.2 The dynamic wake meandering process

该滤波函数的时间离散差分格式为^[24-26]:

$$x_{n_p}^d [n+1] = x_{n_p}^d [n]\alpha + u^d [n](1-\alpha) \text{ for } n_p=0 \quad (1)$$

$$\alpha = e^{-2\pi\Delta t f_c} \quad (2)$$

$$f_c = \frac{U}{2D} \quad (3)$$

式中： $x_{n_p}^d [n+1]$ 为经过滤波后获得的叶轮平面位置的离散时间状态参数； $x_{n_p}^d [n]$ 为输入参数 u^d 的离散时间状态参数，输入参数 u^d 由 OF 模块和 AWAE 模块提供； α 为低通时间过滤参数，其值介于 0（最低过滤）和 1（最大过滤）之间； f_c 为截

止频率； U 为入流风速。

由图 2 可见，将三维湍流环境风数据插值到低分辨率风域（蓝色点）和高分辨率风域（绿色点）上。环境风或尾流风在经过风力机叶轮平面后，随时间推进过程中，将产生数个尾流平面，即风力机下游区域平行于风力机叶轮平面的蓝色截面。尾流平面的中心位置和方向由滤波函数计算确定，即图 2 中瞬时尾流轨迹（光滑的橙色曲线）。

另外，小尺度湍流涡影响风力机尾流的亏损演变，是由尾流亏损演变模型实现的。通过求解轴对称坐标系下稳态雷诺平均 Navier-Stokes 方程，得到风力机下游的尾流亏损演变过程^[24]：

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_r \frac{\partial V_x}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_T \frac{\partial V_x}{\partial r}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r) = 0 \quad (5)$$

式中： V_x 和 V_r 分别是轴对称坐标系的轴向速度和径向速度； v_T 为黏度系数（ V_x 和 V_r 的函数）。图 2 中尾流平面组成的一系列四边形内的流场由式(4)和式(5)求得，从而确定了蜿蜒尾流区域的边界。另外，尾流偏转模型通过对尾流中心位置的线性偏斜扩展，实现了偏航状态下风力机尾流的模拟，即平均尾流轨迹线（图 2 红线）。

近尾流区修正模型是为了提高远尾流区的计算精度，考虑了叶轮下游区域风速下降和压力梯度

区内的尾迹径向膨胀,并将其作为尾流亏损演变模型的入口边界条件。风力机尾流重叠区域通过空间内重叠的尾流体积来识别,在轴向上的尾流亏损基于根平方和 (root sum square, RSS) 方法计算,而在径向上的尾流亏损直接由矢量和叠加求解。

2 算例与分析

2.1 研究对象

以我国江苏省某海上风电场为研究对象,风电场布局如图 3 所示。风电场位于经度(东西)方向距离为 660~1 220 m,纬度(南北)方向距离为 1 180~1 540 m。研究采用了参考机型 NREL5MW^[27],该机型特征参数见表 1。

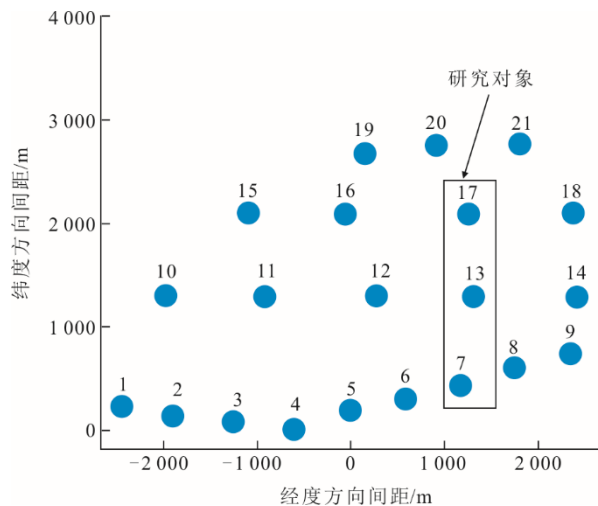


图 3 风电场及风力机点位

Fig.3 The wind farm layout and turbine locations

表 1 NREL-5MW 风力机机型参数
Tab.1 Parameters of the NREL-5MW wind turbine

项目	数值
单机容量/MW	5.0
叶轮直径/m	126
轮毂高度/m	90
转速范围/(r·m ⁻¹)	6.9~12.1
功率调节	变速变桨距
额定功率/MW	5
切入风速/(m·s ⁻¹)	3
额定功率风速/(m·s ⁻¹)	11.4
切出风速/(m·s ⁻¹)	25

为了便于与模拟结果进行对比,选取正南风向 10 min 运行数据,该时间段内前排风力机的平均风速约 8.3 m/s,湍流强度约为 0.1。采用 Turbsim 模块生成环境入流风数据,根据泰勒的冻结假设^[26]生成统计意义的三维湍流风。设置与运行数据保持一致的入流风速、风向和湍流强度条

件作为模拟的入流风条件。

2.2 风电场尾流蜿蜒特性

为了证明相比于传统尾流模型 FAST.Farm 软件中 DWM 模型具有捕捉风力机尾流蜿蜒的独特优势,进行尾流模拟试验。风电场尾流特征模拟结果如图 4 所示。采用 NERL 开发的 FLORIS 软件,基于常规稳态风力机尾流模型计算了该风电场的尾流特征,即尾流笔直,仅能呈现出风速衰减,而不能获得尾流蜿蜒特征(图 4a)。基于 FAST.Farm 软件获得的 90 m 高度水平截面模拟结果(图 4b)显示:在由 Turbsim 模块生成的三维湍流风场的作用下,风电场内每台风力机的尾迹均呈现出明显的蜿蜒特征。风力机尾迹被视为风场中大尺度湍流结构的被动示踪,其向下游移动的同时也伴随横向及纵向的移动。

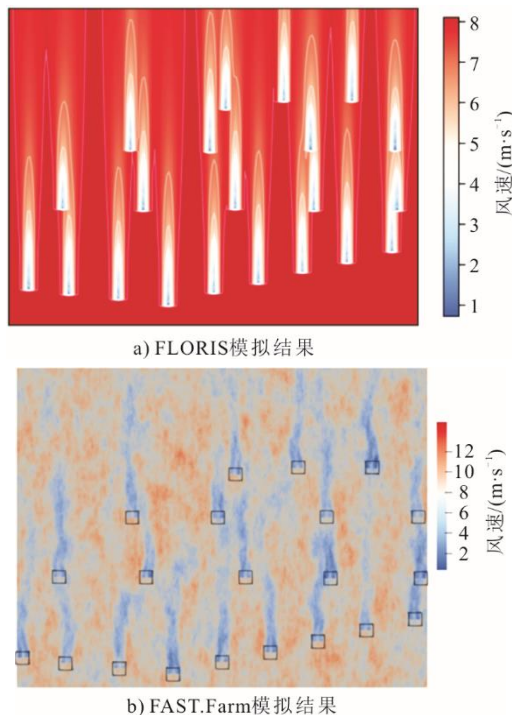


图 4 90 m 高度水平截面风电场尾流特征

Fig.4 The wake features of the wind farm at 90 m altitude

为了明显地比较出前排、中间和后排风力机受蜿蜒尾流效应影响的情况,选取图 3 中前排 7 号、中间 13 号和后排 17 号 3 台风力机。从图 5 中也可以看出这 3 台风力机依次顺风排列。前排 7 号、中间 13 号和后排 17 号风力机运行数据和模拟结果的状态散点如图 5 所示。由图 5 可以明显看出,前排、中间、后排风力机的风速和发电功率依次降低,风速和发电量均受到了风力机尾流效应的影响。

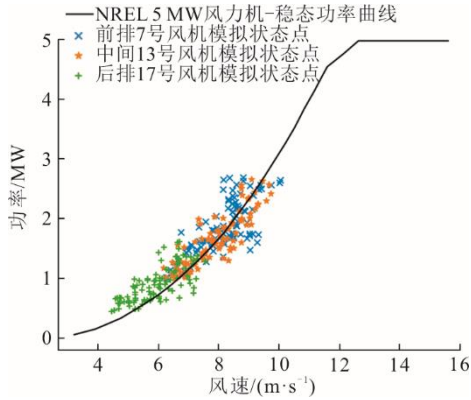


图5 风力机稳态功率曲线和运行状态点
Fig.5 The steady state power curve of the wind turbine and the status points

为验证模型计算的准确性，将模拟结果与运行数据进行对比。由于风力机运行数据的 SCADA 系统记录机舱风速仪风速的时间间隔为 5 s，而 FAST.Farm 模拟数据输出的时间间隔为 0.01 s，则

无法直接进行同频时程数据比较，故而采用统计量对比。对风速分别做平均和统计湍流强度处理：

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \tag{6}$$

$$I = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \tag{7}$$

式中： v_i 为瞬时值； \bar{v} 为统计平均值； I 为统计的湍流强度。

风速统计结果详见表 2。由表 2 可以看出，前排 7 号、中间 13 号和后排 17 号风力机的轮毂处的平均风速模拟结果依次降低，风速湍流强度依次增大，与运行数据的变化趋势相符，相对偏差均小于 ±10%。可以认为模拟的风速流以及湍流强度结果真实可信，并且可以详细地反映出风力机动态尾流蜿蜒特征。因此，可为后续风力机载荷和疲劳特性分析提供可靠的数据基础。

表 2 风速统计结果
Tab.2 Statistics result of wind speed

项目	前排 7 号风机			中间 13 号风机			后排 17 号风机		
	运行数据	模拟结果	相对偏差/%	运行数据	模拟结果	相对偏差/%	运行数据	模拟结果	相对偏差/%
平均风速/(m·s ⁻¹)	8.298	8.281	0.21	7.842	7.911	-0.87	6.056	6.296	-3.96
湍流强度	0.105	0.105	0	0.128	0.128	0.39	0.152	0.141	7.80

2.3 等效应力计算

风力机在运行过程中，风作用在叶轮上引起的总推力可分为 2 个分量，即垂直于叶轮面（轴向）分量和在旋转平面内（切向）分量，二者分别导致

叶根部位受到挥舞力矩和摆振力矩。同时，叶片变桨在叶根部位产生扭转力矩。这 3 种力矩均可以通过 OpenFAST 模块输出。图 6 为叶根挥舞力矩、叶根摆振力矩和叶根扭转力矩的时程图。

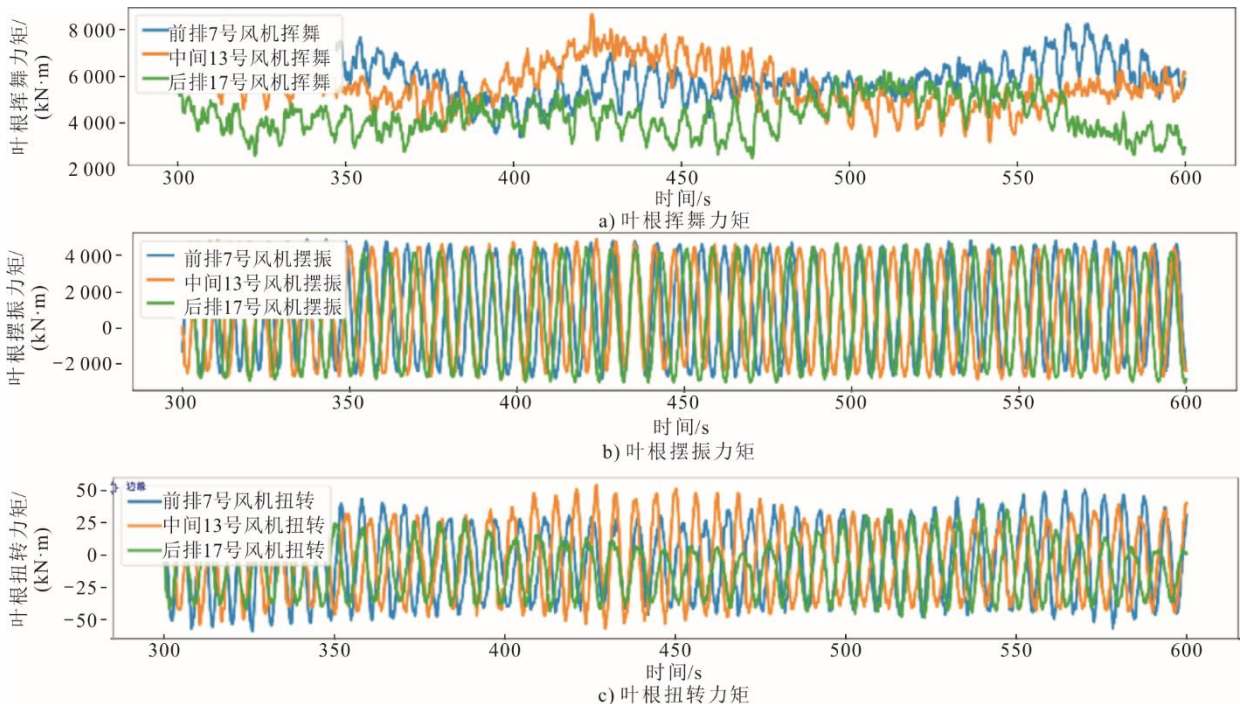


图 6 叶根的力矩时程图
Fig.6 Moment time history diagram of blade root

由图6可见：叶根的挥舞力矩与湍流风场的变化趋势一致，具有较强的随机性；由于受到重力的影响，摆振力矩表现出明显的正弦函数变化规律；叶根扭转力矩变化呈现出湍流随机性和正弦函数变化的综合特征。

根据叶根位置的力矩载荷可计算出叶根截面的等效应力：

$$\sigma_0 = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{W_n} \quad (8)$$

$$\tau_0 = \frac{M_z}{W_p} \quad (9)$$

$$W_n = \frac{\pi D^3}{32} \left(1 - \left(\frac{D-2t}{D} \right)^4 \right) \quad (10)$$

$$W_p = \frac{W_n}{2} \quad (11)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + 3\tau_0^2} \quad (12)$$

式中： M_x 为叶根挥舞力矩； M_y 为叶根摆振力矩； W_n 为抗弯截面系数； W_p 为扭转截面系数；叶根直径 $D=3.5\text{ m}$ ；叶片厚度 $t=0.025\text{ m}$ 。图7展示了叶根截面的等效应力 σ 的时程图。

同样，可利用FAST模块输出塔筒底部（塔基直径6 m，厚度0.06 m）3个方向的力矩，分别为侧向力矩、前后力矩和扭转力矩，具体如图8所示；也可获得塔基的等效应力如图9所示。进一步，通过概率密度函数来统计比较前排、中间和后排风机的等效应力集中程度，结果如图10所示。由图8—图10可以看出，前排7号风机、中间13号风机、后排17号风机的叶根和塔基应力依次减小，与各自受到的平均风速大小变化一致。

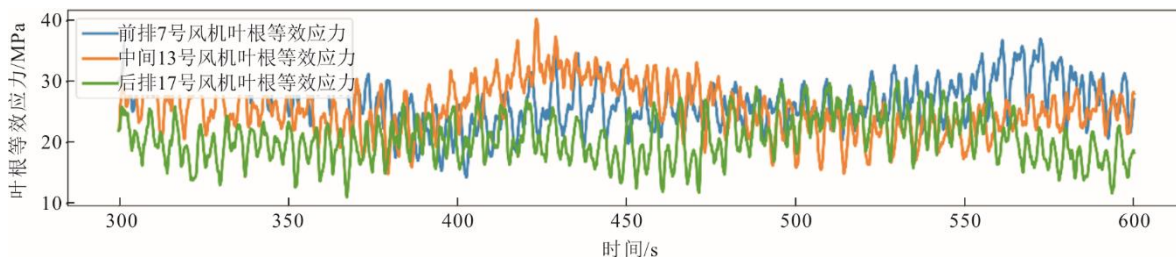


图7 叶根截面的等效应力时程图

Fig.7 Equivalent stress time history diagram of blade root section

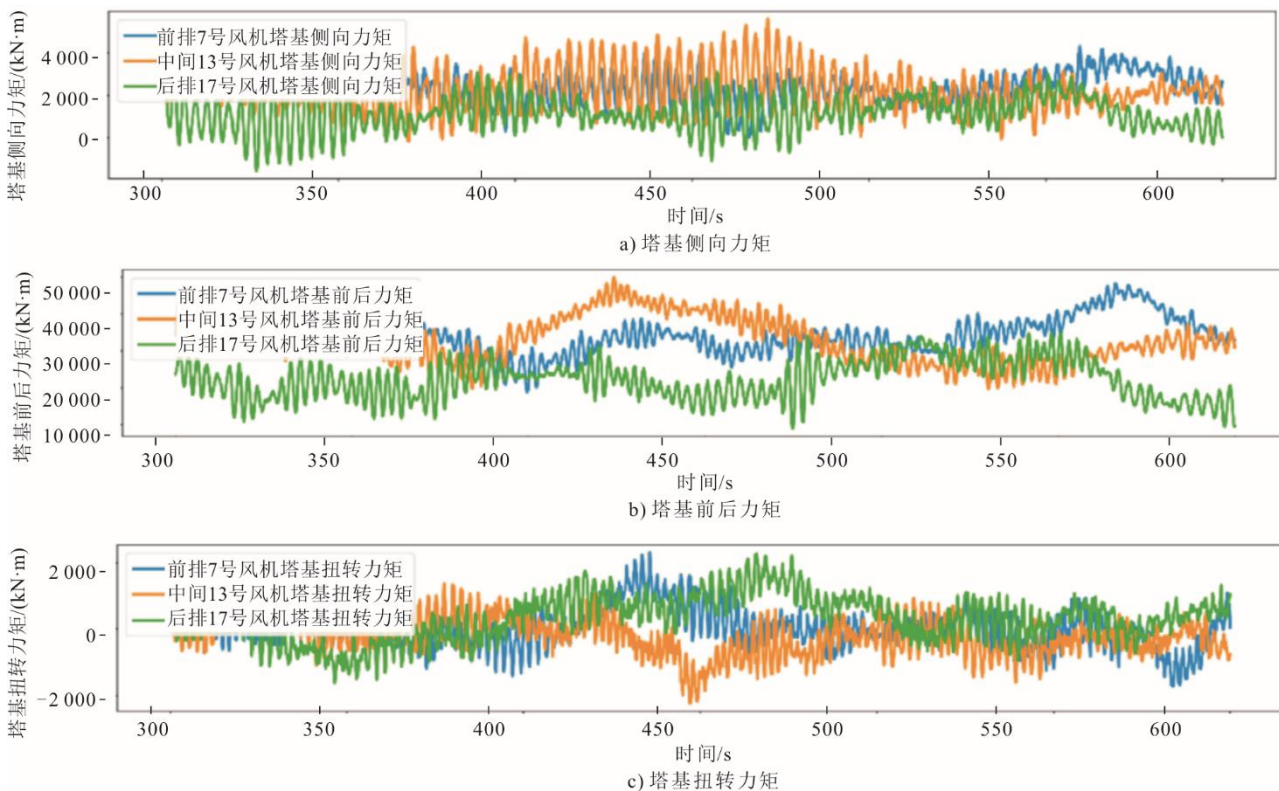


图8 塔基的力矩时程图

Fig.8 Moment time history diagram of blade root

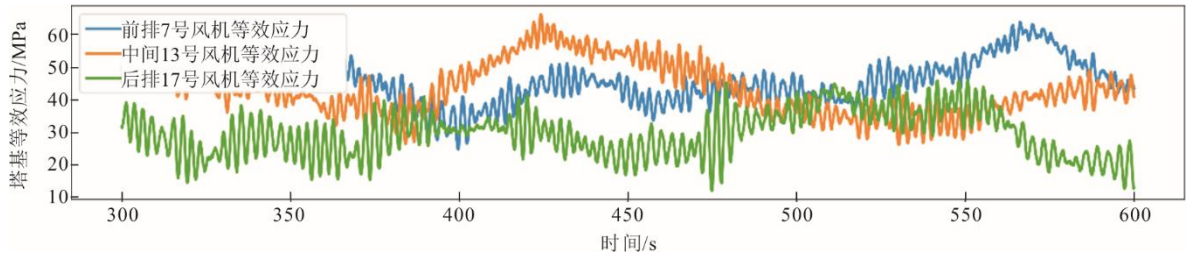


图9 塔基截面的等效应力时程图

Fig.9 Equivalent stress time history diagram of tower base section

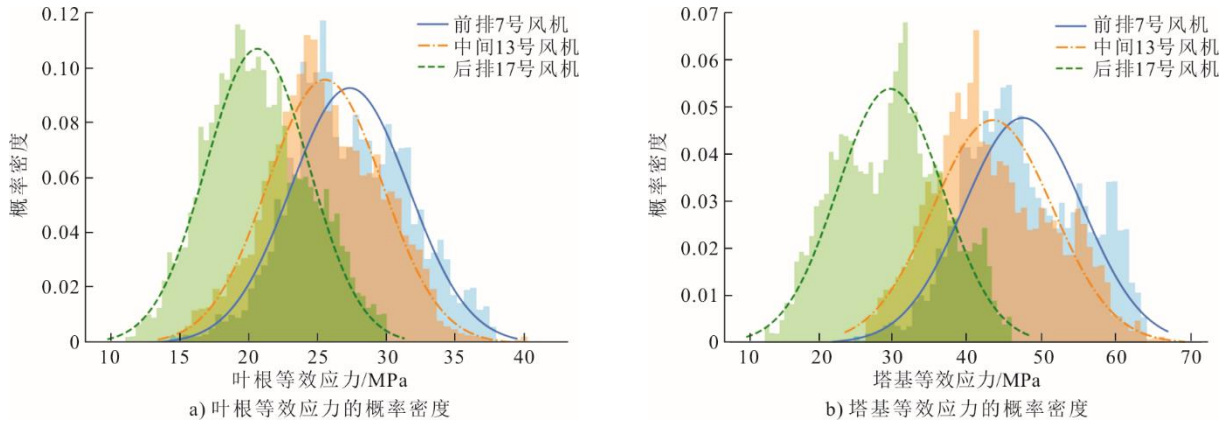


图10 叶根和塔基的等效应力的概率密度统计

Fig.10 Probability density statistics of equivalent stress of the blade root and tower base

2.4 疲劳特性分析

由于风力机荷载的随机性和动态性，疲劳损伤不能仅通过应力大小来判断，需要采用雨流计数法和 Palmgren-Miner 线性累积准则来评价^[28-29]。雨流计数法（又称塔顶法）是基于材料的应力应变行为，通过随机载荷的时程函数进行简化计数得到应力谱，从而反映出材料的损伤记忆特性^[30]。通过叶根和塔基的应力时程曲线进行雨流计数法统计，得到不同应力循环幅值下对应的循环次数。图 11 展示了叶根和塔基的应力谱。Palmgren-Miner 线性疲劳累积损伤理论是指在随机循环载荷的作用下，假定

各个应力之间相互独立，疲劳损伤可以线性累加，而当累积损伤达到某一数值时，构件就发生疲劳破坏，一般累计损伤临界值接近于 1。图 12 为叶片和塔筒材料的 $S-N$ 曲线^[30-31]。由图 12 可获得不同应力幅值 $\Delta\sigma_i$ 达到疲劳破坏时允许的循环次数 N_i ，即图中每个横坐标值对应 1 个循环次数。因此，根据 Palmgren-Miner 线性疲劳累积损伤理论，累计的疲劳损伤表达式为：

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \tag{13}$$

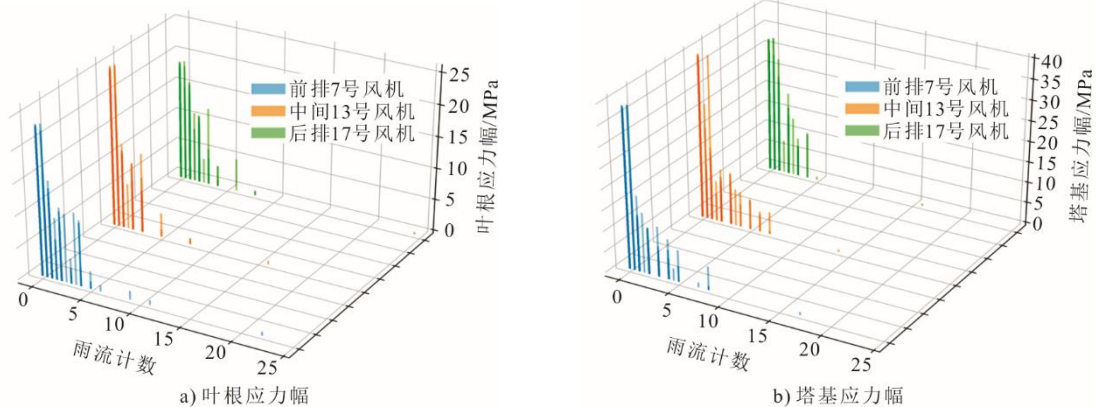


图11 叶根和塔基的应力谱

Fig.11 Stress spectrum of the blade root and tower base

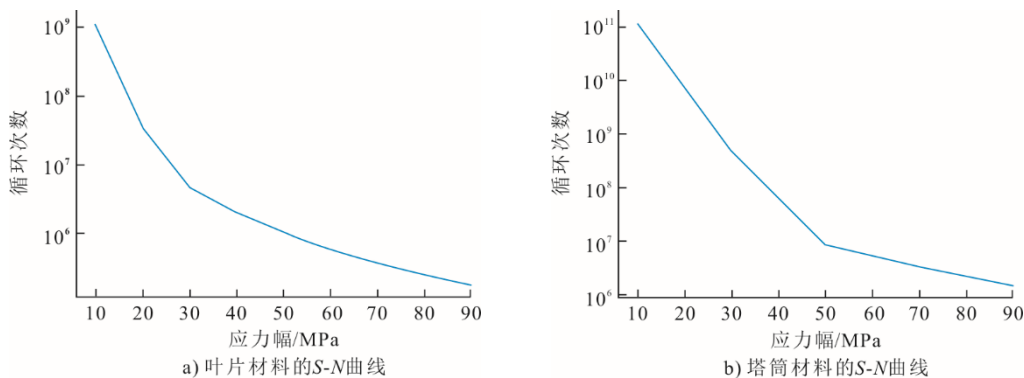


图 12 叶根和塔基的 S-N 曲线
Fig.12 S-N curve of the blade root and tower base

根据式(13)，结合叶根和塔基的应力谱以及相应的 S-N 曲线，可计算出 300 s 内的累计疲劳损伤。图 13 为 6、7、8、9 m/s 平均风速条件下叶根的疲劳损伤。其中，湍流强度固定为 0.1。由图 13 可以看出：随着风速的提高，前排、中间、后排风力机的叶根疲劳损伤随着来流风速的增加而增加；在高来流风速条件下，中间位置风力机叶根处的疲劳损伤成倍增加，且增加幅度明显高于前排和后排风力机。

图 14 为 6、7、8、9 m/s 平均风速下塔基处的疲劳损伤。

由图 14 同样可见，随着风速的提高，塔基处的疲劳损伤随着来流风速的增加而增加。但与叶根不同，塔基处疲劳损伤呈现了不同变化规律，高来流风速条件下，中间和后排风力机塔基处的疲劳损伤均迅速增加，中间位置风力机的疲劳损伤在 9 m/s 来流条件下超过后排风力机。

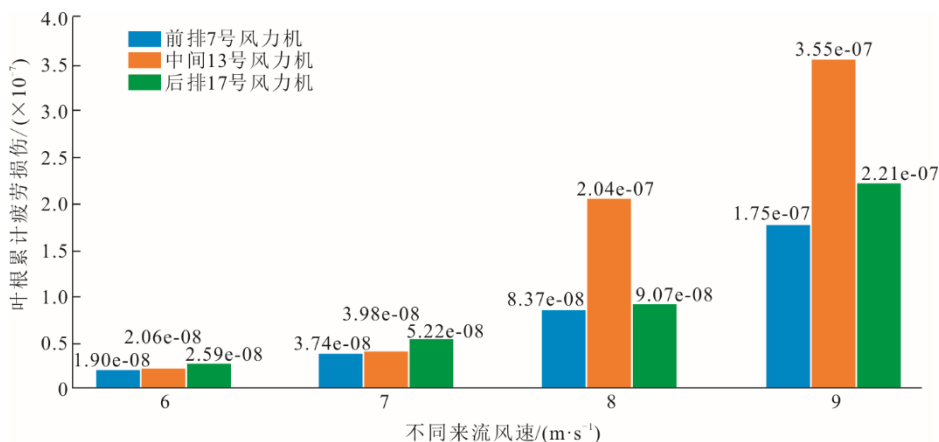


图 13 叶根疲劳损伤
Fig.13 The cumulative fatigue damage of blade roots

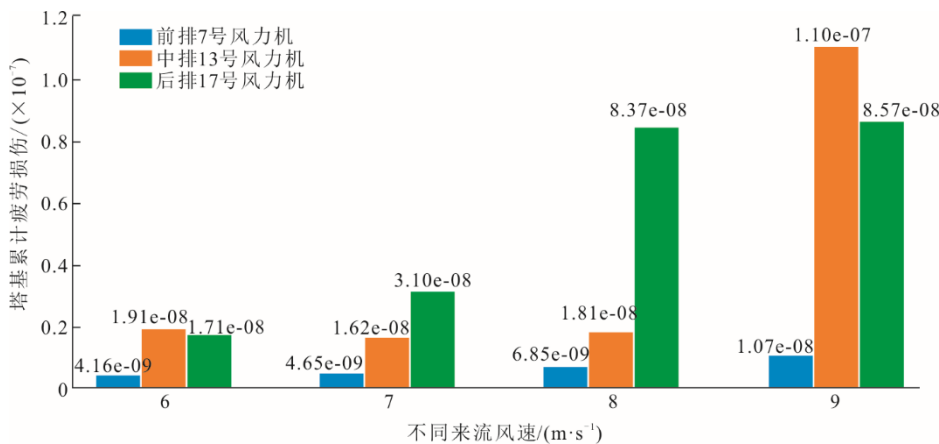


图 14 塔基疲劳损伤
Fig.14 The cumulative fatigue damage of tower bases

以上疲劳损伤的变化规律表明:风速和湍流强度均会影响风力机叶根和塔基的疲劳损伤,尤其在高速(≥ 7.5 m/s)条件下,风力机尾流效应引起湍流强度的增大,将导致疲劳损伤成倍增大;位于中间区域的风力机疲劳损伤最为严重;此外,通过对比每台风力机叶根处和塔基处的总疲劳损伤发现,叶根处的疲劳载荷远大于塔基处。

需要说明的是,本文中的计算结果是在相对平稳且风向固定环境风速条件下计算所得,未考虑其他变风向以及较大风速启停机、高速偏航、紧急停机、高风速抖振等事件对疲劳损伤的影响。

3 结 论

尾流对于下游风力机运行性能与稳定性的影响非常重要。本文借助 FAST.Farm 软件揭示尾流场中的湍流特征,并对风场中不同位置的风力机疲劳特性进行了预测。

1) 动态尾流蜿蜒模型通过低通滤波函数获取风力机的动态尾流蜿蜒特征,进一步基于流体力学雷诺平均 NS 方程(RANS)求解尾流的亏损演变。计算结果能够较好地呈现出风力机的尾流蜿蜒特征,前排、中间和后排风力机轮毂处的平均风速依次降低,湍流强度依次增大,与运行数据相比相对偏差在 $-10\% \sim 10\%$ 间。

2) 风速增大会对风力机叶根和塔基的疲劳损伤造成显著的影响,特别在高速(≥ 7.5 m/s)条件下,风力机尾流效应引起湍流强度增大,将导致风力机的疲劳损伤成倍增加,且叶根处的疲劳损伤远大于塔基处。

3) 海上风电场中,中间区域的风力机疲劳损伤最为严重,其次为后排风力机,而前排风力机的疲劳损伤最小。因此,风电开发利用过程应重点关注场区中间位置风力机的结构强度。

[参 考 文 献]

- [1] LISSAMAN P B S. Energy effectiveness of arbitrary arrays of wind turbines[J]. *Journal of Energy*, 2012(6): 323-328.
- [2] AINSLIE J F. Development of an eddy viscosity model for wind turbine wakes[C]. 7th BWEA Wind Energy Conference, Oxford, UK, 1985.
- [3] 李翌斌,董国丹,秦建华,等.浮式风力机运动形式对尾迹大尺度运动的影响[J]. *空气动力学学报*, 2022, 40(4): 231-239.
LI Zhaobin, DONG Guodan, QIN Jianhua, et al. Coherent flow structures in the wake of floating wind turbines induced by motions in different degrees of freedom[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2022, 40(4): 231-239.
- [4] YANG X, SOTIROPOULOS F. A review on the meandering of wind turbine wakes[J]. *Energies*, 2019, 12(24): 4276.
- [5] 王同光,田琳琳,钟伟,等.风能利用中的空气动力学研究进展 II:入流和尾流特性[J]. *空气动力学学报*, 2022, 40(4): 22-50.
WANG Tongguang, TIAN Linlin, ZHONG Wei, et al. Aerodynamic research progress in wind energy II: Inflow and wake characteristics[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2022, 40(4): 22-50.
- [6] JENSEN N O. A note on wind generator interaction[M]. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, 1983: 10-17.
- [7] MBASTANKHAH M, PORTÉ-AGEL F. A new analytical model for wind-turbine wakes[J]. *Renewable Energy*, 2014, 70: 116-123.
- [8] MARTÍNEZ-TOSSAS L A, ANNONI J, FLEMING P A, et al. The aerodynamics of the curled wake: a simplified model in view of flow control[J]. *Wind Energy Science*, 2019, 4(1): 127-138.
- [9] 侯亚丽,汪建文,王强,等.基于大涡模拟的风力机尾流湍流特征的研究[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(8): 1818-1824.
HOU Yali, WANG Jianwen, WANG Qiang, et al. Study on wake turbulence characteristic of wind turbine base on large eddy simulation[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2015, 36(8): 1818-1824.
- [10] 钱耀如,王同光,张震宇.基于大涡模拟方法的风力机气动性能和尾流干扰研究[J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2016, 46(12): 124704.
QIAN Yaoru, WANG Tongguang, ZHANG Zhenyu. Large-eddy simulation of aerodynamic performance and wake characteristics of two inline wind turbines[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2016, 46(12): 124704.
- [11] BRETON S P, SUMNER J, SØRENSEN J N, et al. A survey of modelling methods for high-fidelity wind farm simulations using large eddy simulation[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2017, 375(2091): 20160097.
- [12] LIU X, LIANG S, LI G, et al. An improved dynamic stall model and its effect on wind turbine fatigue load prediction[J]. *Renewable Energy*, 2020, 156: 117-130.
- [13] 赵艳,潘嘉宁,王振宇,等.风力机启停机过程中的共振特性分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(3): 82-89.
ZHAO Yan, PAN Jianing, WANG Zhenyu, et al. Resonance analysis of wind turbine during startup and shutdown process[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(3): 82-89.
- [14] REINWARDT I, SCHILLING L, DALHOFF P, et al. Dynamic wake meandering model calibration using nacelle-mounted lidar systems[J]. *Wind Energy Science*, 2020, 5(2): 775-792.
- [15] MEDICI D, ALFREDSSON P H. Measurements on a wind turbine wake: 3D effects and bluff body vortex shedding[J]. *Wind Energy*, 2006, 9(3): 219-236.
- [16] GUPTA V, WAN M. Low-order modelling of wake meandering behind turbines[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 877: 534-560.
- [17] MAO X, SØRENSEN J N. Far-wake meandering induced by atmospheric eddies in flow past a wind turbine[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 846: 190-209.

- [18] LARSEN G C, MADSEN H A, THOMSEN K, et al. Wake meandering: a pragmatic approach[J]. *Wind Energy*, 2008, 11(4): 377-395.
- [19] LARSEN T J, MADSEN H A, LARSEN G C, et al. Validation of the dynamic wake meander model for loads and power production in the Egmond aan Zee wind farm[J]. *Wind Energy*, 2013, 16(4): 605-624.
- [20] JONKMAN J M, ANNONI J, HAYMAN G, et al. Development of FAST.Farm: a new multi-physics engineering tool for wind-farm design and analysis[C]//35th Wind Energy Symposium. 2017: 0454.
- [21] SHALER K, JONKMAN J, HAMILTON N. Effects of inflow spatiotemporal discretization on wake meandering and turbine structural response using FAST.Farm[J]. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2019, 1256(1): 012023.
- [22] REINWARDT I, GERKE N, DALHOFF P, et al. Validation of wind turbine wake models with focus on the dynamic wake meandering model[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2018, 1037: 072028.
- [23] KECK R E, MARE M D, CHURCHFIELD M J, et al. Two improvements to the dynamic wake meandering model: including the effects of atmospheric shear on wake turbulence and incorporating turbulence build-up in a row of wind turbines[J]. *Wind Energy*, 2015, 18(1): 111-132.
- [24] HAO Y J. Wind farm wake modeling and analysis of wake impacts in a wind farm[D]. The United States of America: University of Massachusetts Amherst, 2016: 42-51.
- [25] DOUBRAWA P, ANNONI J, JONKMAN J, et al. Optimization-based calibration of FAST.Farm parameters against SOWFA[J]. *Contract*, 2018, 303: 275-300.
- [26] 王康. 不同尺度湍流的泰勒“冻结”假设适用性实验验证方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021: 9-11.
WANG Kang. Study on the experimental verification for the applicability of Taylor's "Freezing" hypothesis for different scale turbulence[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021: 9-11.
- [27] ZANON A, DE GENNARO M, KÜHNELT H. Wind energy harnessing of the NREL 5 MW reference wind turbine in icing conditions under different operational strategies[J]. *Renewable Energy*, 2018, 115: 760-772.
- [28] 赖踊卿. 软黏土地基海上风机大直径单桩水平受荷特性与分析模型[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 211-214.
LAI Yongqing. Modelling of lateral behaviour of large-diameter monopiles supporting offshore wind turbines in soft clay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 211-214.
- [29] 黄赫. 风荷载模拟与风力机叶片疲劳寿命可靠性分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2020: 61-63.
HUANG He. Wind load simulation and reliability analysis of wind turbine blade fatigue life[D]. Shenyang: Northeastern University, 2020: 61-63.
- [30] 赵琴. 考虑风速风向联合概率分布的风力机叶片疲劳寿命研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021: 90-105.
ZHAO Qin. Study on fatigue life of wind turbine blades considering joint probability distribution of wind speed and direction[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2021: 90-105.
- [31] 李德源, 叶枝全, 陈严, 等. 风力机叶片载荷谱及疲劳寿命分析[J]. *工程力学*, 2004(6): 118-123.
LI Deyuan, YE Zhiqian, CHEN Yan, et al. Load spectrum and fatigue life analysis of the blade of horizontal axis wind turbine[J]. *Engineering Mechanics*, 2004(6): 118-123.

(责任编辑 杨嘉蕾)