

基于3D扫描雷达实测数据的海上风电场尾流特性研究

刘树洁^{1,2}, 崔冬林^{3*}, 沙伟³, 王尼娜^{1,2}, 陈秋阳³

(1. 浙江省深远海风电技术研究重点实验室, 浙江省 杭州市 311122;

2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江省 杭州市 311122;

3. 新疆金风科技股份有限公司, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐市 830001)

Research on Wake Characteristics of Offshore Wind Farms Based on 3D Scanning Lidar Data

LIU Shujie^{1,2}, CUI Donglin^{3*}, SHA Wei³, WANG Nina^{1,2}, CHEN Qiuyang³

(1. Key Laboratory of Far-shore Wind Power Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 311122, Zhejiang Province, China;

2. POWERCHINA Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, Zhejiang Province, China;

3. Xinjiang Goldwind Science & Technology Co., Ltd., Urumqi 830001, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

Abstract: In order to obtain optimal layout of offshore wind farms to reduce wake loss, the wake observation experiment was carried out in an offshore wind farm in Jiangsu, and the 3D-Lidar was used to measure the wake-flow data. The wake characteristics such as wake length, wake width and wake depth under three wake conditions of independent wake, half wake and full wake were studied. The results show that, the wake length is about 11D~12D (D is the rotor diameter) and the influence of wake is weakened under the independent wake condition; in the near wake region, the wind speed attenuation under the full wake condition is significantly higher than that under independent and half wake conditions; but in the far wake region, the changing trend of the three wake conditions is the same, and the wake width is about 3D, showing “double Gaussian” or “concave” distribution, and the difference is related to the distance between adjacent wind turbines; under the three kinds of wake conditions, the wake depth in the near wake region where the wake velocity loss is obvious is larger than that in the far wake region.

Keywords: offshore wind farm; scanning lidar; wake characteristics; wake conditions

摘要: 为有效优化实际业务中海上风电场的机组排布方案设计, 降低尾流电量损失, 在江苏某海上实际运行风电场采用3D扫描雷达进行实地尾流观测实验, 分析独立尾流、半尾流和全尾流三种工况下机组的尾流长度、尾流宽度及尾流深度等尾流特性。研究表明, 独立尾流工况下机组尾流下游方向11D~12D (D为叶轮直径) 距离处风速变化趋平, 尾流

影响减弱, 机组尾流影响长度在11D左右; 近尾流区内, 全尾流工况机组的风速衰减较独立尾流和半尾流工况机组明显增大, 远尾流区三种工况变化趋势一致, 尾流宽度均在3D左右, 呈“双高斯”或“凹型”分布特征。二者的差异性主要与相邻机组间距的不同相关。三种尾流工况下, 近尾流区的尾流深度明显较远尾流区大, 尾流速度亏损明显。

关键词: 海上风电场; 扫描雷达; 尾流特性; 尾流工况

0 引言

随着全球范围内风电开发利用技术的不断进步, 中国海上风电规模越来越大。而在“平价”市场条件下, 海上风电开发面临着严峻挑战, 发电量是影响风电场经济收益的重要指标之一。海上风能资源分布较均匀, 风电机组的排布在空间上一般呈现较为规则的几何形态^[1-2], 多台、多排风机尾流相互叠加影响、风速恢复缓慢, 导致尾流损失加重。目前对风电机组或风电场尾流的研究大致分为三类: 尾流模型、数值模拟和基于实测实验的研究。其中, 尾流模型和数值模拟研究比较成熟, 普遍应用于风场的发电量评估工作中。在海上风电场尾流研究方面, 1982年Rise实验室提出了Jensen (也称为Park) 模型^[3], 它是基于贝茨极限理论和质量守恒定律的一维线性尾流模型, 能较好地模拟平坦地形的尾流情况, 是目前风能资源评估软件WASP中使用的尾流模型; 杨祥生等^[4]基于Park模型尾流区线性膨胀假设和径向风速呈高斯分布假设, 提出了一种新型工程尾流Park-Gauss模型, 并对不同尾

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U19B2044, U1865102, 61836011)。

National Natural Science Foundation of China (U19B2044, U1865102, 61836011).

流模型进行了对比研究。行业内基于激光雷达设备的实测尾流研究大多集中在陆上风电场。例如, 温建民等^[5]采用2台地面式雷达测试不同来流风速机组下的风向尾流区, 绘制机组尾流区不同距离处的风剖面, 分析了不同来流风速下机组尾流区的风速恢复速率等; 季明彬等^[6]基于激光雷达测风数据分析了复杂地形下, 风机在不同尾流工况下的尾流宽度、尾流深度及速度衰减等尾流特性; 高晓霞等^[7]基于激光雷达扫描数据研究了湍流强度影响下的风机尾流特性。对于海上风电场, Krishnamurthy等^[8]通过扫描型激光雷达对海上风电机组尾流进行探测, 根据尾流中心风速和自由流场风速数据计算了风速损失率; 刘清媛等^[9]利用激光雷达在某海上风电场开展全天候风场观测实验, 提出了单-双高斯模型拟合改进算法, 分析了目标机组的尾流特性; 刘沙等^[10]以华南某海上风电场为例, 利用激光雷达实测风数据对SCADA数据进行传递函数修正, 开展基于Park模型的尾流模拟与验证研究。上述研究表明, Park模型能较好地模拟近海风电场尾流损失并进行电量评估, 模型参数选择需根据项目实际情况进行敏感性测算。

由于外部环境限制等因素, 国内海上大型风电场尾流相关的观测实验研究还相对较少。本文将基于激光扫描雷达实测数据开展海上大型风电场的尾流特性研究, 用于指导海上风电场的风电机组优化排布及降低尾流电量损失等工作。

1 实验说明

1.1 实验风电场概况

选取江苏大丰某海上风电场作为实验观测场地, 基于扫描雷达展开风电场全场的尾流观测及分析工作。该风电场距离海岸线35~45 km, 共部署了42台WTGS130-2.5 MW机组, 轮毂高度为85 m; 如图1所示, 机组南北、东西向呈规则排布, lin1和lin4机组排布间距为 $4.1D \times 10D$ (D 为叶轮直径), lin2和lin3机组排布间距为 $5.2D \times 13D$ 。

1.2 雷达观测方案

1) 设备部署。

采用2台激光雷达设备, 其中地面式激光雷达(WINDCUBE)用于观测垂直高度上的风速、风向, 3D扫描雷达(wind3D 10K)用于观测整个风电场水平面的风速、风向参数, 其主要技术指标如表1所示。

综合考虑设备测量距离、精度、风向、安装平台和经济性等因素, 2台设备均部署在风电场升压站上, 升压站处于风电场北区的西南方向, 距离B31风机约580 m (4.6D), 具体相对位置见图1。

表 1 3D激光雷达设备主要技术指标
Table 1 Technical specifications of 3D-lidar

技术指标	数值
径向探测范围/m	60~12 000
径向距离分辨率/m	15、30、60、150
激光波长/nm	1550 (人眼不可见且人眼安全)
脉冲宽度/ns	200~800
脉冲能量/ μ J	≥ 250
数据刷新率/Hz	1~10 (可软件设置)
径向测速范围/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	-37.5~+37.5
风速精度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	≤ 0.1
风向精度/ $(^\circ)$	< 3
伺服扫描范围/ $(^\circ)$	水平方向: 0~360, 垂直方向: -90~+270
伺服精度/ $(^\circ)$	0.1

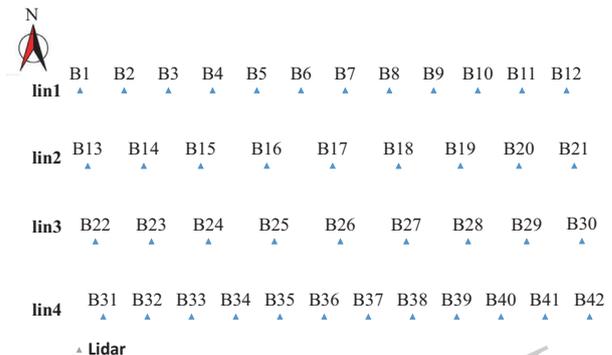


图 1 风电场风电机组排布及雷达相对位置示意图

Fig. 1 The location map of wind turbine generator systems (WTGS) and lidar

2) 观测方案。

观测时段为2021年10月12日至2021年10月28日。

观测数据包括地面雷达垂直高度观测采样记录的12层高度(离海平面高度如下: 70 m、75 m、85 m、100 m、110 m、120 m、140 m、160 m、190 m、210 m、230 m、260 m)的10 min平均风速、风向等参数。

扫描雷达采用三层PPI扫描模式, 扫描方位角范围为 $350^\circ \sim 90^\circ$, 可覆盖风电场大部分机组位置; 三层俯仰角分别为 0.5° 、 1.5° 和 2.5° , 径向分辨率为30 m; 采用 $1^\circ/\text{s}$ 的扫描速度, 300 s左右可完成一次三层扫面(见图2)。该扫描模式下可获取全场轮毂高度85 m处的风速、风向时间序列网格点数据。

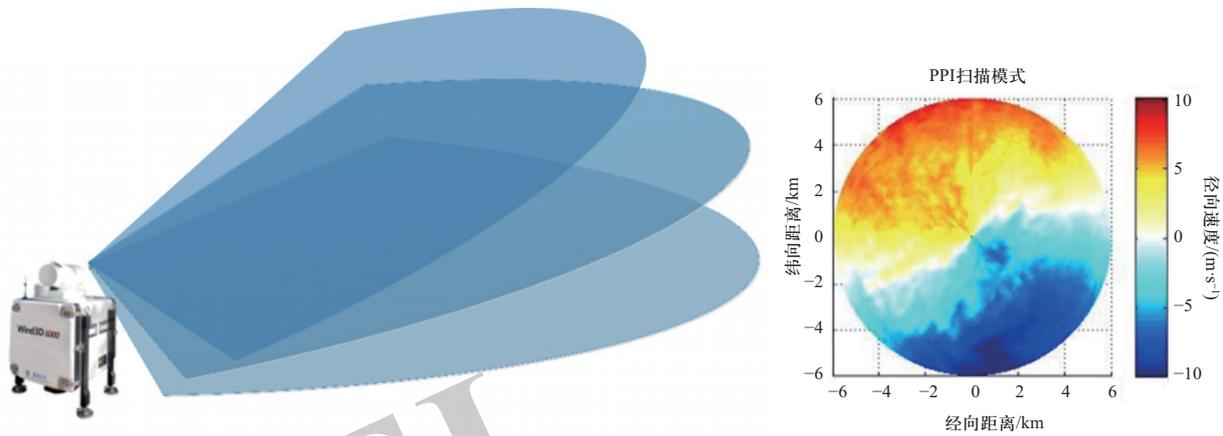


图2 3D扫描雷达PPI扫描模式与风场反演示例
Fig. 2 Example of 3D-lidar PPI scanning mode and wind retrieval

1.3 其他数据

机组SCADA运行数据：采集参考风电场同期观测时段各风电机组实时监控系统记录的10 min平均数据，包括风速、网侧有功功率、发电量及其他状态信息数据等，剔除机组故障、异常、停机、限电等异常状态数据。

2 数据分析与结果

2.1 分析方法

1) 代表性说明。

根据地面式激光雷达同期10 min平均风速、风向及气象参数等观测数据，实验观测时段内平均空气密度约为 1.221 kg/m^3 ，接近于年平均空气密度 1.225 kg/m^3 ；轮毂高度85 m处的实测风速频率分布见图3，风速分布区间为0~12 m/s；风电机组轮毂高度处风向频率分布见图4，风向主要集中在东北扇区。影响风电场尾流的因素很多，除了机组排布间距、周边相邻风电场影响等因素外，其他如气象因素（大气稳定度差异性、气象环境的季节性变化等）、风机自身设计、风场机组偏航控制差异等也会带来影响，本文基于观测时段内机组尾流特性展开的分析仅代表该区域风电场范围内的情况。

2) 尾流有效数据提取。

来流风向与雷达扫描方位夹角的大小会影响数据的有效性和准确度，大气气溶胶和天气状态会影响雷达观测的有效距离。根据扫描雷达实测数据发现，来流风向在主风向扇区（NNE）范围内的有效数据完整率较高，故提取该扇区条件下目标机组尾流下游区

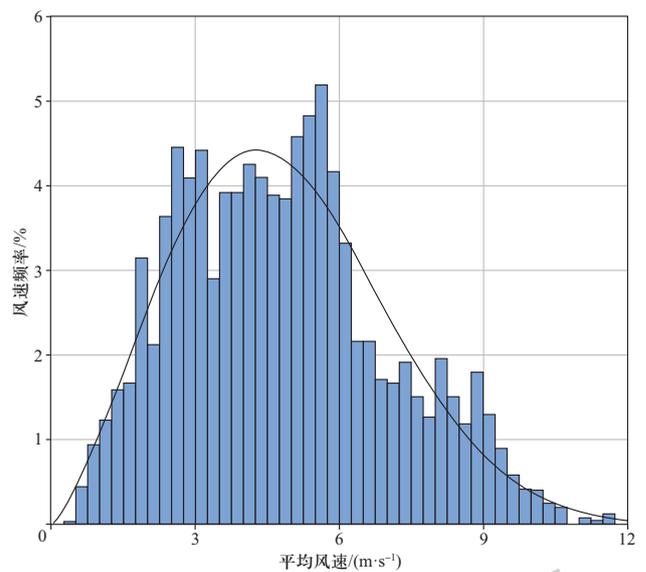


图3 风速频率分布图
Fig. 3 Wind speed frequency

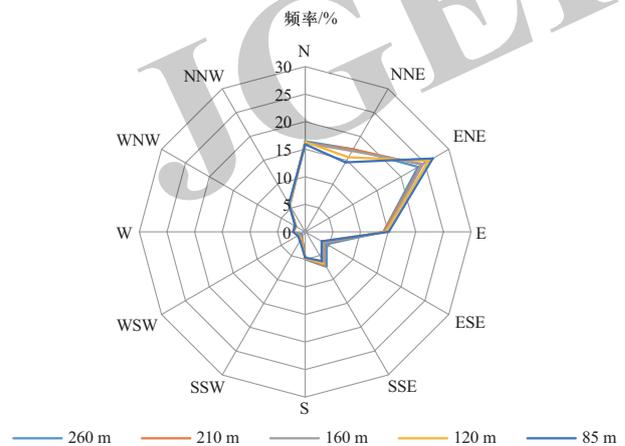


图4 风向玫瑰图
Fig. 4 Wind direction rose map

(包括沿尾流中心线方向轴向及叶轮径向不同距离点处)的风速数据进行尾流特性分析。

在NNE扇区条件下, 扫描雷达实测的风电场某时刻的风速、风向分布图谱见图5。

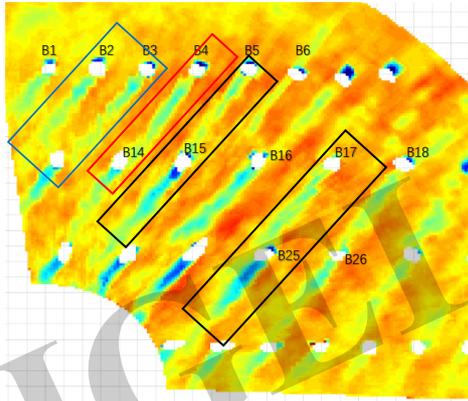


图 5 扫描雷达实测风速分布图谱

Fig. 5 Map of wind speed and direction distribution measured by 3D-lidar

3) 尾流工况分类。

在NNE扇区条件下, 目标机组上、下风向受相邻风机影响的范围和程度不同。本文分为独立尾流、半尾流、全尾流三种尾流工况展开分析。

定义如下: ①独立尾流工况代表目标机组上风向无其他机组或障碍物阻挡; ②半尾流工况代表目标机组处于上风向机组尾流外围区, 即上游机组部分尾流覆盖下游机组; ③全尾流工况代表目标机组处于上风向机组尾流中心区, 即上游机组尾流全覆盖下游机组。

根据风电场的实际排布情况和地面雷达实测风向(见图6), 选取可代表不同尾流工况下的目标机组, 如表2所示。

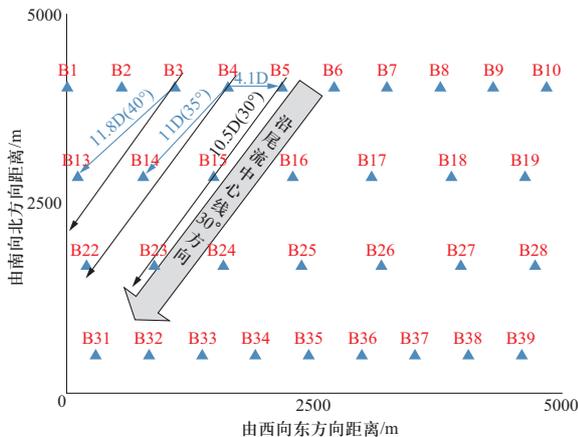


图 6 NNE扇区条件下风电机组间距示意图

Fig. 6 The WTGS layout with distances in rotor diameters (D) under NNE direction

表 2 代表不同尾流工况下的目标机组

Table 2 Target units under different wake conditions

风向扇区	NNE (30°±15°)	说明
独立尾流	B3、B4、B5	上风向无机组或障碍物
半尾流	B14、B22	处于上风向机组B4尾流外围区, 相距约11D
全尾流	B15、B23	处于上风向机组B5尾流中心区, 相距约10.5D

4) 归一化处理。

将来流风速作为参考基准风速 V_0 , 将各目标机组叶轮后沿尾流中心线方向不同距离处的风速定义为 V_i , V_i/V_0 为叶轮后风速相对于来流风速的比值。

5) 机舱湍流强度代表值。

相关研究表明, 根据机舱风速数据计算的湍流强度值不能代表实况湍流的绝对值大小, 但对于机组间相对值的对比分析具有很重要的意义^[11-12]。

根据IEC 61400-1-2005标准^[13], 机舱湍流强度代表值 $T_{IN,WS} = T_{lav} + 1.28\sigma_{N,WS}$, 其中 T_{lav} 为机舱平均湍流强度, $\sigma_{N,WS}$ 为机舱湍流标准偏差, 且 $T_{lav} = \sigma_{N,WS}/V_{N,WS}$, 其中 $V_{N,WS}$ 为机舱风速。

2.2 机组尾流特性分析

2.2.1 机组尾流下游影响长度

由于海上风电场地表粗糙度小、湍流强度弱, 风机的尾流影响距离较陆地更长, 风电机组排布间距是影响尾流电量损失的关键因素之一。基于扫描雷达实测的机组尾流下游风速衰减特点, 提取相关指标为后续风场优化排布设计提供参考依据。

为分析风速大小对尾流扰动的影响, 提取NNE (30°±15°) 风向条件下, 目标机组轮毂高度处尾流下游方向沿尾流中心线每间隔1D距离处的风速, 统计每间隔1 m/s风速区间尾流下游随距离增加的实测风速分布, 见图7。该风电场机组额定风速为10 m/s, 4~8 m/s风速对应的 C_t 值在0.797 4~0.755 3之间, 其中 C_t 代表风电机组的推力系数。

目标机组B3上、下游方向均无机组或障碍物遮挡, 属于独立尾流工况(如图6所示)。可见不同风速段条件下, 风速变化趋势基本一致, 即机组叶轮后4D及以内距离风速变化幅度最大, 叶轮后11D~12D左右距离风速变化趋于平缓, 12D以上距离风速基本无变化, 如图7(a)所示。

目标机组B4尾流下游方向11D距离处的B14机组

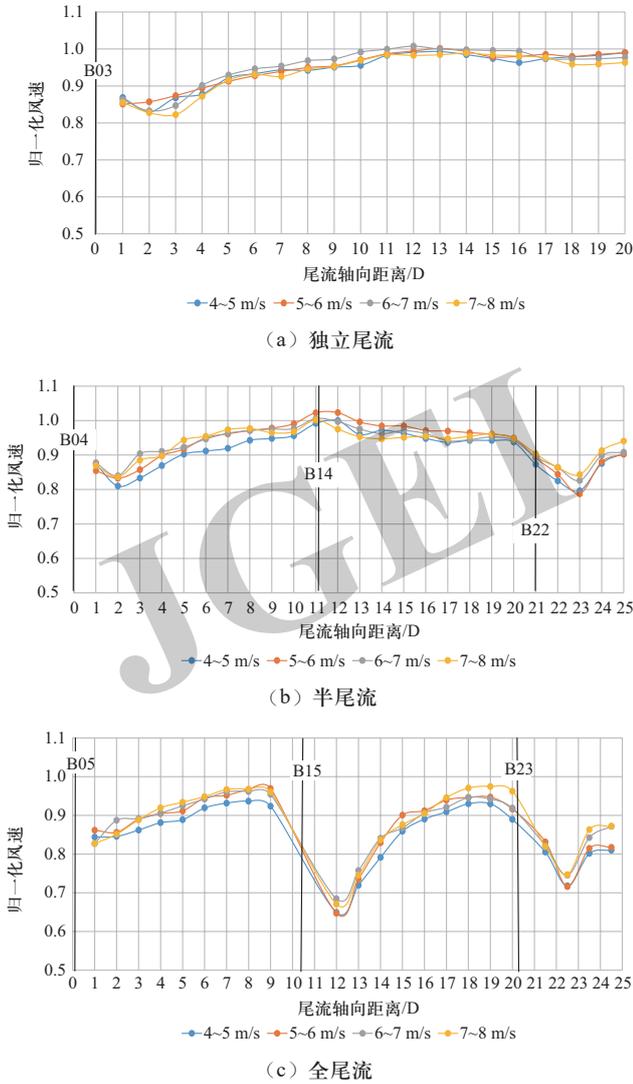


图7 不同尾流工况下机组尾流下游方向风速分布

Fig. 7 Wind speed distribution of downstream direction of wake under different wake conditions

处于非尾流中心区，属于半尾流工况（如图6所示）。上风向B4机组叶轮后11D及以内距离风速变化与独立尾流工况的B3机组一致，11D以上距离风速呈一定的下降趋势，可能与处于B14机组尾流扰动外围区有关，如图7（b）所示。

目标机组B5尾流下游方向10.5D距离处的B15机组处于尾流正中心区，属于全尾流工况。上风向B5机组叶轮后9D及以内距离风速随距离的变化特征与其他尾流工况基本一致；下风向B15风机尾流下游方向2D~4D距离内的风速衰减较上风向B5风机大，4D及以内距离风速变化幅度明显，之后逐渐恢复；直至尾流下游方向的B23机组处，风速又明显衰减，之后逐渐恢复，如图7（c）所示。

对比独立尾流工况机组B3和全尾流工况机组B15，

4D及以内距离B15尾流下游的风速衰减较B3明显，4D以上距离二者差异不大；对比各目标机组机舱代表湍流强度（如图8所示），发现相比上风向独立尾流工况机组，处于下风向的机组机舱代表湍流强度均明显增大，说明尾流区内尾流扰动造成了湍流强度的增加；全尾流工况机组B15、B23较半尾流工况机组B14、B22的增加幅度更大，说明全尾流工况下机组受上风向机组尾流扰动的影响程度更大，导致湍流更大。

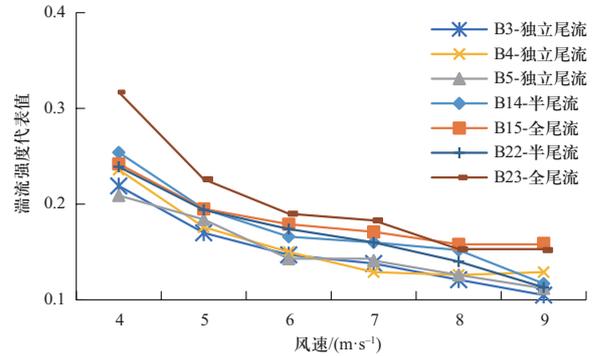


图8 目标机组机舱代表湍流强度各风速段分布示意图

Fig. 8 The variation of turbulence intensity of WTGS at each wind speed range

2.2.2 尾流宽度和尾流深度

参考高晓霞等^[7]的研究，将尾流宽度定义为速度亏损区域的径向长度，尾流深度为速度亏损区域中最高和最低速度的差值。图9表示的是B4机组尾流下游2D距离处轮毂高度叶轮中心左、右侧径向距离每间隔0.5D处的风速分布。

统计扇区NNE条件下，目标机组尾流下游方向不同距离处叶轮径向距离（叶轮左、右侧5D距离）轮毂高度的风速分布（如图10所示）。其中，3D代表近尾流区，6D和9D代表远尾流区。

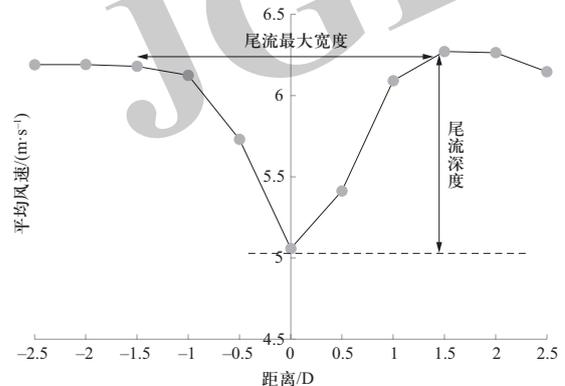


图9 尾流宽度与尾流深度的定义

Fig. 9 Definitions of wake width and wake depth

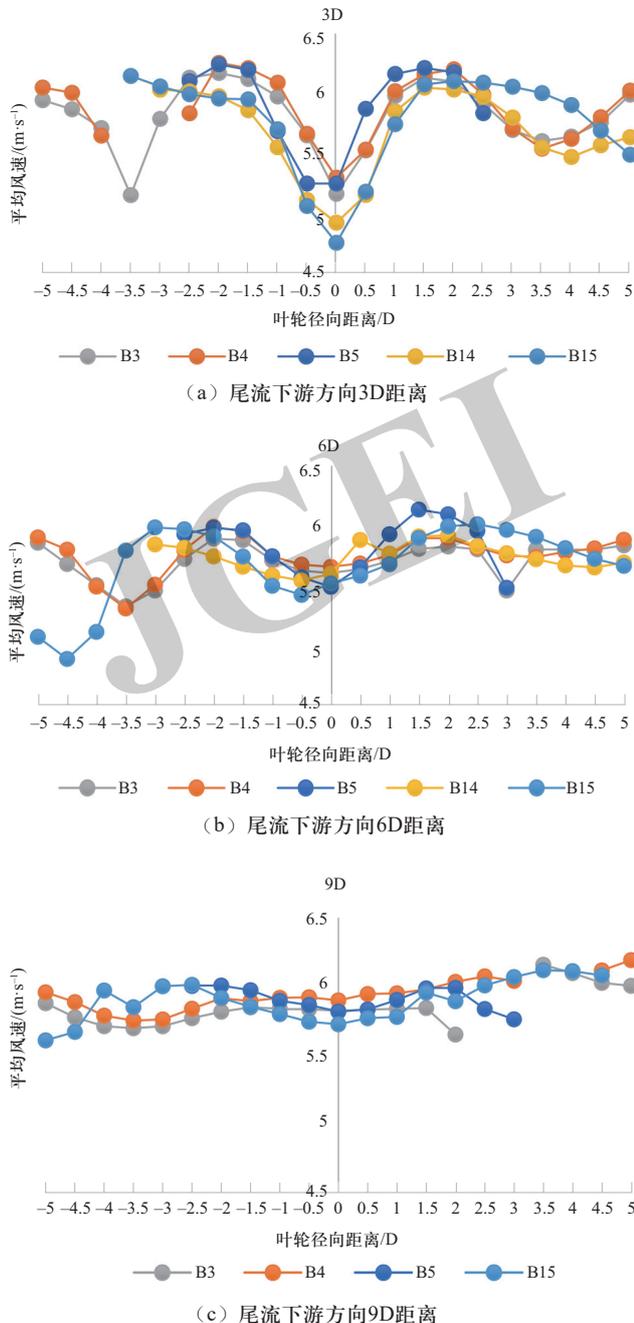


图 10 尾流下游方向不同距离处叶轮径向距离风速分布
Fig. 10 Wind speed distribution with radial distance of WTGS at different downwind distance of wake

径向距离方向相邻机组间距的大小会产生不同程度的影响, 考虑这一因素, 各目标机组相邻机组最小间距如下: 独立尾流工况的B2、B3两台机组, 相邻机组东西向间距为4.12D; 半尾流工况的上、下风向B4、B14机组, 其相邻机组东西向间距分别为4.12D、5.3D; 全尾流工况的B5、B15机组, 上风向B5机组的相邻机组东西向间距为4.12D, 下风向B15机组的相邻机组东西向间距分别为5.3D、6.15D。

对比近尾流区和远尾流区, 随着尾流下游距离的增加, 叶轮径向距离风速变化幅度逐渐趋平。近尾流区叶轮径向距离方向风速变化幅度较大, 如图10(a)所示。

近尾流区的叶轮径向距离风速亏损明显, 叶轮左、右侧风速呈“双高斯”或“凹型”分布, 1.5D处为峰值, 即尾流宽度3D左右, 如图10(a)所示。远尾流区6D距离处, 叶轮径向距离风速亏损趋势与近尾流区一致, 但亏损幅度明显降低。这与真实风电场试验测量的径向尾流风速呈多项式或高斯分布的研究结论^[14]一致。

近尾流区, 半尾流工况B14机组和独立尾流工况B3、B4、B5机组的风速均从最低逐渐增大, 至1.5D或2D处达到峰值, 之后风速下降, 至3.5D后又逐渐增大, 变化趋势一致。全尾流工况B15机组的风速从最低逐渐增大至1.5D或2D处达到峰值, 之后风速变化趋平, 4.5D距离处风速开始呈下降趋势。以上两者差异与相邻机组的间距不同有关。

尾流深度可以反映风速衰减幅度的大小, 近尾流区的尾流深度明显较远尾流区大, 速度亏损明显。近尾流区内, 半尾流和全尾流工况下B14、B15机组的尾流深度较独立尾流工况下B3、B4、B5机组的尾流深度大; 而在远尾流区, 不同尾流工况的尾流深度相近, 即尾流速度亏损程度相差不大。

2.2.3 SCADA实际运行对比分析

选取风电场同期SCADA实际运行数据, 统计风电机组实际正常运行状态(剔除机组故障、异常、停机、限电等异常状态数据)下, 尾流下游方向不同距离处机组的实际尾流电量损失分布特点, 并与扫描雷达实测的尾流分布特点进行对比分析。选取6~7 m/s风速段, 不同扇区条件下对应的上、下风向机组的间距及发电百分比统计表如表3所示。同时选取独立尾流工况下B3机组叶轮前后不同距离处的扫描雷达实测风速序列, 基于设计功率曲线进行发电量估算, 两者对比情况见图11。

基于SCADA实际运行数据统计的尾流下游不同距离处的尾流电量损失分布特点与扫描雷达实测的尾流损失电量的变化趋势一致。6~7 m/s风速段条件下, 9D左右间距处是明显的拐点, 9D及以上距离电量变化趋平, 尾流电量损失在10%左右。而近尾流区如4D距离处尾流电量损失较大, 达到40%。4D~9D距离段缺少实际运行数据支撑, 暂不对比分析。以上机组的实际发电量统计已排除风资源自身差异因素。

表3 尾流下游方向不同距离处机组实际发电百分比

Table 3 The normalized power generation of WTGS at different downwind distance of wake

距离	机组	发电百分比 /%	扇区区间 / (°)	平均风速 / (m·s ⁻¹)
4D	B11、B12	60.9	75~105	6.75
5D	B20、B21	66.8	75~105	6.72
9.2D	B4、B15	90.5	345~15	6.86
10D	B12、B20	90.1	15~45	6.73
10.5D	B5、B15	90.4	15~45	6.74
11.9D	B25、B33	93.4	25~55	6.71
13.4D	B21、B28	91.8	30~60	6.73
14.8D	B30、B39	88.3	35~65	6.77
18.1D	B21、B27	91.3	45~75	6.9
19.8D	B8、B15	84.8	45~75	6.89
23.6D	B21、B26	87.2	50~80	6.9

(说明: ①选取的对应扇区上、下风向机组代表独立尾流工况, 无其他机组影响; ②为便于对比, 发电量均做归一化处理。)

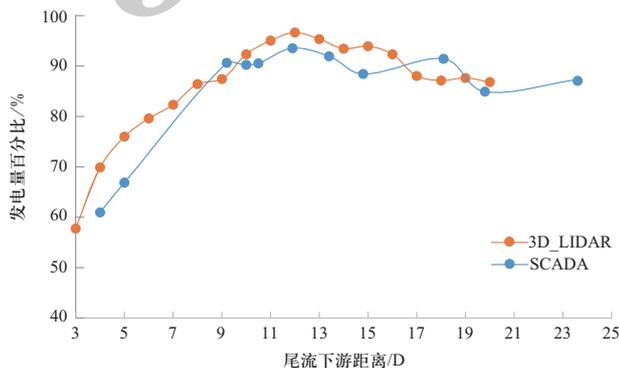


图11 尾流下游方向不同距离处机组发电百分比

Fig. 11 The normalized power generation of WTGS at different downwind distance of wake

由于海上风电场下垫面粗糙度小, 自由流状态下湍流强度小且分布均匀, 而风电场建成后风电机组运行带来的局地湍流强度变化也是尾流扰动的一种反映。基于SCADA实际运行数据, 选取6~7 m/s风速段, 分别统计目标机组B4、B15在不同扇区方向条件下的机舱代表湍流强度。如图12所示, 部分扇区受上风向不同距离处风机的影响, B4机组4个扇区(90°、150°、215°、270°)处于上风向机组尾流中心区内, B15机组6个扇区(0°、30°、90°、210°、270°、345°)处于上风向机组尾流中心区内, 具体间距及机组编号见图12。

上风向相邻机组距离越近, 湍流强度增加越大。如90°扇区B15机组(4.1D间距)的机舱代表湍流强度最大约为0.21, 而210°扇区B15机组(11D间距)的机舱代表湍流强度约为0.16。

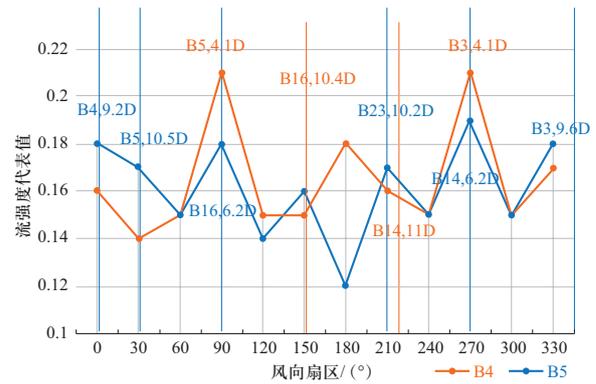


图12 不同扇区目标机组机舱代表湍流强度统计

Fig. 12 Turbulence intensity of WTGS under different wind directions

上风向无机组影响的机组, 湍流强度明显小于处于尾流区内的机组。如30°扇区B15机组(10.5D间距)的湍流强度约为0.17, 明显较自由流风况下B4机组的湍流强度(0.14)大。

以上分析说明风电场机组运行过程中局地湍流强度的变化是机组尾流扰动的一种反映, 而湍流强度的增大势必会影响风电机组的实际出力, 造成电量损失。这也验证了本文基于扫描雷达实测尾流开展尾流特性分析工作的可行性和参考性。

3 结论

基于扫描雷达实测的江苏某海上风电场数据, 对比分析实际运行风电场独立尾流、半尾流、全尾流三种尾流工况下的尾流特性, 结论如下。

1) 海上风电场尾流影响长度指标对于风电场机组的优化排布具有指导意义。该风场独立尾流工况下机组尾流下游方向11D~12D距离处的风速变化趋平, 尾流影响减弱, 该结果与SCADA实际运行统计结果一致。因此建议在主风能风向高度集中的区域, 风电机组沿主风能风向排布的间距至少在11D以上。

2) 全尾流工况下, 机组尾流下游方向4D距离范围内的近尾流区内, 风速衰减幅度明显较独立尾流和半尾流工况大; 三种尾流工况下, 远尾流区的风速变化趋势基本一致。

3) 尾流宽度可表征叶轮径向距离相邻风机间相互影响的气流扰动情况。三种尾流工况下, 近尾流区3D距离内, 尾流宽度均在3D左右, 2D以内距离风速亏损明显; 远尾流区风速亏损的变化随距离的增大逐渐趋平。故建议相邻机组的最小间距在3D以上, 最小不低于2D, 从而避免相邻机组尾流扰动造成湍流增大而

影响机组安全。

4) 尾流下游方向不同距离处的尾流深度变化可以表征风速衰减幅度的大小。三种尾流工况下, 近尾流区的尾流深度明显较远尾流区大, 速度亏损明显; 而在远尾流区, 不同尾流工况的尾流深度相近, 即尾流速度亏损程度相差不大。

5) 基于SCADA实际运行数据的尾流电量损失、机组机舱湍流强度的变化与实测尾流特性的对比分析, 发现实际运行数据统计的尾流下游不同距离处的尾流电量损失分布特点与扫描雷达实测的尾流损失电量的变化趋势一致, 风电机组运行过程中尾流扰动带来了局地湍流强度的变化。同时验证了本文基于扫描雷达实测尾流开展尾流特性分析工作的可行性和参考性, 说明基于SCADA运行数据开展尾流分析评估工作的可行性。

本文基于扫描雷达实测的海上运行风电场尾流工况所开展的尾流特性分析, 对于实际应用业务中风电场的优化排布设计、降低尾流电量损失等具有指导作用。由于影响风电场尾流的因素很多, 本文基于观测时段内机组尾流特性展开的分析探讨仅代表该区域风电场范围内的情况, 具有一定局限性; 另外, 本文缺少基于实际实验数据对理论尾流模型的对比研究, 后续将针对不同区域、不同单机容量、不同工况条件开展更多的实验观测, 并结合运行数据对尾流理论模型进行验证与修正, 进一步优化和提升海上风电场的设计和评估技术。

参考文献

- [1] ASTARIZ S. Enhancing wave energy competitiveness through co-located wind and wave energy farms, a review on the shadow effect[J]. *Energies*, 2015, 8(7): 7344-7366.
- [2] HASAGER C, VINCENT P, BADGER J, et al. Using satellite SAR to characterize the wind flow around offshore wind farms[J]. *Energies*, 2015, 8(6): 5413-5439.
- [3] JENSEN N. A note on wind generator interaction [R]. Technical Report from the Risø National Laboratory (Risø-M-2411), 1983.
- [4] 杨祥生, 赵宁, 田琳琳, 等. 基于Park-Gauss模型的风场尾流数值模拟[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(9): 2224-2229.
YANG Xiangsheng, ZHAO Ning, TIAN Linlin, et al. Wake numerical simulation of wind farm based on the park-Gauss model[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(9): 2224-2229(in Chinese).
- [5] 温建民, 张新旺, 陈锋, 等. 基于风电场实测的风机尾流特征分析[J]. *机械工程与自动化*, 2021(1): 3-6.
WEN Jianmin, ZHANG Xinwang, CHEN Feng, et al. Analysis of wind turbine wake characteristics based on wind farm field measurement[J]. *Mechanical Engineering & Automation*,

2021(1): 3-6(in Chinese).

- [6] 季明彬, 高晓霞. 基于激光雷达测风数据的复杂地形下风机尾流特性研究[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(2): 416-423.
JI Mingbin, GAO Xiaoxia. Research on wake characteristics of wind turbine in complex terrain based on lidar data[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(2): 416-423(in Chinese).
- [7] 高晓霞, 王腾渊, 赵飞, 等. 基于激光雷达扫描数据的湍流强度影响下风机尾流特性研究[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(12): 3645-3650.
GAO Xiaoxia, WANG Tengyuan, ZHAO Fei, et al. Study on influence of turbulence intensity on wind turbine wake characteristics using lidars scanning data[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(12): 3645-3650(in Chinese).
- [8] KRISHNAMURTHY R, REUDER J, SVARDAL B, et al. Offshore wind turbine wake characteristics using scanning Doppler lidar[J]. *Energy Procedia*, 2017, 137: 428-442.
- [9] 刘清媛, 吴松华, 张凯临, 等. 基于单-双高斯模型拟合合法的测风激光雷达海上风电机组尾流特征分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2021, 16(1): 44-57.
LIU Qingyuan, WU Songhua, ZHANG Kailin, et al. Offshore wind turbine wake characteristics analysis using single-double Gaussian model based on wind lidar measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2021, 16(1): 44-57(in Chinese).
- [10] 刘沙, 王中权, 蔡彦枫. 海上风电场运行期尾流损失分析[J]. *南方能源建设*, 2019, 6(1): 66-70.
LIU Sha, WANG Zhongquan, CAI Yanfeng. Wake loss analysis of offshore wind farm in operation[J]. *Southern Energy Construction*, 2019, 6(1): 66-70(in Chinese).
- [11] MITTELMEIER N, ALLIN J, BLODAU T, et al. An analysis of offshore wind farm SCADA measurements to identify key parameters influencing the magnitude of wake effects[J]. *Wind Energy Science*, 2017, 2(2): 477-490.
- [12] 崔冬林, 刘晓亚, 胡威, 等. 运行风电场内局地湍流变化分析方法及其影响探讨[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(9): 2589-2596.
CUI Donglin, LIU Xiaoya, HU Wei, et al. Analysis method and influence discussion of local turbulence in wind farm[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2017, 38(9): 2589-2596(in Chinese).
- [13] International Electrical Commission. IEC 61400-1: Wind turbines-part1: design requirements[S]. IEC, 2005.
- [14] BARTHELMIE R J, LARSEN G C, FRANDBSEN S T, et al. Comparison of wake model simulations with offshore wind turbine wake profiles measured by sodar[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2006, 23(7): 888-901.

收稿日期: 2021-12-06; 修回日期: 2022-03-11。



刘树洁

作者简介:

刘树洁(1991), 女, 工程师, 研究方向为风力发电技术、风能资源评估等, E-mail: liu_sj@hdec.com。

崔冬林(1985), 女, 主任工程师, 研究方向风能资源评估、风电场后评估等。通信作者, E-mail: cuidl03@163.com。

(责任编辑 张宇 翁宇威)