

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.04.002

新疆地区陆上风电场风机尾流特征分析

于晓庆¹, 吴松华^{1,2}

(1 中国海洋大学海洋遥感研究所, 山东 青岛 266100;

2 青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 风机的尾流效应会导致风能的转化效率下降, 还会增加湍流引起的机械应力损伤, 降低风机的稳定性和服务寿命。为研究新疆地区陆上风电场风机尾流特征, 2015年11月于新疆地区陆上风电场使用脉冲相干多普勒激光雷达进行风场观测。通过分析得到新疆地区陆上风电场风机尾流特征, 主要包括风速损失率、尾流宽度、尾流长度及其平均结果, 最大风速损失率, 尾流长度随时间的变化趋势、与风速之间的关系等, 发现风速损失率、尾流宽度、尾流长度与背景风速、湍流强度有关。

关键词: 脉冲相干多普勒激光雷达; 风机; 尾流效应

中图分类号: TN958;P407

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)04-0250-09

Analysis of Characteristics of Onshore Turbine Wake in Xinjiang

YU Xiaqing¹, WU Songhua^{1,2}

(1 Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266100, China)

Abstract: The wind turbine wake can reduce the wind energy conversion efficiency, increase mechanical stress damage and reduce the life span of wind turbine. In order to study the characteristics of turbine wake in Xinjiang, China, the observation of wind based on pulse Doppler lidar was conducted in November 2015. The characteristics of wind turbine wake in Xinjiang were obtained, including the velocity deficit, wake width, wake length and average value of wake, variation of wake with time and relationship between wake and wind speed. The final results show that the velocity deficit, the wake width and the wake length are related to ambient wind velocity and wind turbulence intensity.

Key words: pulse coherent Doppler lidar; wind turbine; wake effect

1 引言

近几年来, 风力发电发展越来越迅速, 风力发电系统在发电系统中的比重也越来越大。风机的尾流效

基金项目: Supported by National Science Foundation of China(国家自然科学基金, 41471309)

作者简介: 于晓庆(1993-), 女, 山东威海人, 研究生, 主要从事基于相干多普勒激光雷达的风机尾流研究。

E-mail: yuxiaoqing1993413@163.com

导师简介: 吴松华(1976-), 男, 山西大同人, 教授, 主要从事大气激光雷达、多普勒测风激光雷达、海洋激光雷达和星载激光雷达方面的研究。 **E-mail:** wush@ouc.edu.cn

收稿日期: 2018-03-26; **修改日期:** 2018-05-11

应会使风机的发电效率降低, 增加湍流造成的机械应力损伤^[1], 测量风机尾流对优化风机布局、延长风机寿命、提高风机效率和提高风电场土地利用率有重要的意义。

在过去的三十年间, 风机下风处的尾流被广泛研究, Vermeer 等进行了理论和实验研究的全面综述, 通过使用各种技术进行风机尾流的研究^[2]。Vermeer 等于 2003 年, Porte-Agel 等于 2011 年, Churchfield 等于 2012 年采用风洞和计算机仿真对风机尾流进行了研究^[2-4], 这些结果的建立必须通过外场实验实现。测风塔^[5-6], 在下风处不同距离放置探空气球^[7]和遥感测量技术如声雷达和激光雷达^[8-10]被应用到风机尾流的探测中。通过对气象塔上的风和温度传感器测得数据的分析, Magnusso 和 Smedman 导出了风速损失率与风机引起的附加湍流之间的解析表达式^[11]。船载声雷达的观测结果与 Barthelmie 等建立的经验模型及其他模型进行了对比^[9]。

相干多普勒激光雷达可以用于探测风场、湍流及飞机的尾涡^[12-16]。Bingol 等于 2010 年, Trujillo 等于 2011 年利用连续波激光雷达研究风机尾流^[17-18], 在实验过程中, 激光雷达放置于机舱的后部, 激光雷达用于测量风机尾流的动态以及不同的湍流情况对于风机尾流的影响。对于连续波激光雷达, 观测的纵向尺寸随着焦距或距离的增加而迅速增加^[19]。脉冲激光雷达观测数据的纵向尺寸不受距离的影响, 通过与大气中气溶胶粒子的相互作用得到径向速度。因此, 脉冲相干多普勒激光雷达通过不同形式的扫描方式, 为尾流的探测提供了很多的可能性^[20]。

本文主要针对 2015 年 11 月 13~19 日新疆哈密地区风机尾流观测数据结果进行分析, 得出该地区风机尾流的特征, 包括风速损失率、尾流宽度及尾流长度等, 并对结果进行统计分析, 分析其平均结果, 随时间的变化以及与风速之间的关系。

2 观测系统及基本原理

相干多普勒激光雷达发射红外波段的脉冲激光到大气中, 尘粒和悬浮粒子等大气气溶胶粒子会对激光产生散射回波。由于多普勒效应, 散射的激光回波频率相对于发射激光频率会产生一个与气溶胶粒子速度相关的频移, 回波光信号经接收光学系统收集, 接收的信号光和本振光拍频可以得到差频信号, 即为多普勒频移, 通过多普勒频移信息可以得到物体的径向速度。

脉冲相干多普勒激光雷达系统采用全光纤小型化设计, 具有较高的接收灵敏度, 保证了系统能够在振动、温变环境下稳定工作, 保证其有较长的使用寿命。另外, 本系统还有过电压保护, 防水、防尘和防电磁干扰等功能。该系统具有高时空分辨率、高信噪比、高测量精度的特点, 已进行了风机尾流、海面风场、飞机尾涡等多种用途实验。

3 新疆某陆上风电场实验观测

脉冲相干多普勒激光雷达高时空分辨率、高信噪比、高测量精度的特点, 通过测量大气中气溶胶的多普勒频移信息得到风速信息。脉冲相干多普勒激光雷达的具体参数请见表 1。

表 1 脉冲相干多普勒激光雷达系统参数

Table 1 Parameters and specifications of coherent Doppler Lidar

Parameters	Specifications
Wavelength(μm)	1.5
Repetition rate(kHz)	10
Pulse energy(μJ)	150
Measurement range(m)	30 to 3000
Spatial resolution(m)	30
Scanner pointing accuracy($^\circ$)	0.1
Speed measurement uncertainty(m/s)	≤ 0.3
Scan speed($^\circ/\text{s}$)	1-55

中国海洋大学于 2015 年 11 月在新疆地区开展实验, 新疆地区风机轮毂高度距离平均海平面约为 75 m, 叶片直径 (D) 约为 100 m。本次实验激光雷达波束面与水平面成一定夹角, 从而探测距离湍流尾迹区内风场在某一高度处的水平剖面结构。采用位置平面显示 (Plane position indicator, PPI) 模式连续扫描, PPI 扫描模式为固定仰角改变方位角的扫描模式, 水平仰角设置为 1.3° , 连续探测湍流尾迹区不同高度处风场水平剖面结构, 由于激光雷达与风机轮毂高度有约为 70 m 的高度差, 不同仰角会对结果有影响。本次实验中激光雷达距离风机约为 1000

m, 仰角为 1.3° , 测量的是风机轮毂高度下方水平剖面, 由于尾流具有一定宽度, 可以保证扫描到尾流部位, 后续的统计分析也是基于同一仰角下的测量结果, 激光雷达扫描数据信息如表 2 所示。

表 2 激光雷达扫描数据

Table 2 Scan data detected by Lidar

扫描开始时间	2015-11-13 10:23
扫描结束时间	2015-11-19 23:59
扫描模式	PPI 模式
仰角	1.3°
距离分辨率 (m)	30
方位角	$120^\circ \sim 270^\circ$ $200^\circ \sim 270^\circ$

4 算 法

由于相干多普勒激光雷达所测为径向风速, 其与真实风速的关系为

$$u_{\text{LOS}}(y, r) = u_{\text{actual}} \cos(\theta - \varphi) = u_{\text{actual}} \left(\frac{\sqrt{r^2 - y^2}}{r} \cos \varphi + \frac{y}{r} \sin \varphi \right), \quad (1)$$

式中 r 为激光雷达与测量点距离, $u_{\text{LOS}}(y, r)$ 为径向风速, u_{actual} 为真实风速, φ 为风向, θ 为激光雷达的方位角, y 为直角坐标系中纵轴。

风机尾流符合单高斯或双高斯模型, 即

$$u_{\text{LOS}}(y, r) = \left\{ u_{\text{actual}} - a \exp \left[\frac{-(y - y_c)^2}{2s_w^2} \right] \right\} \left(\frac{\sqrt{r^2 - y^2}}{r} \cos \varphi + \frac{y}{r} \sin \varphi \right), \quad (2)$$

$$u_{\text{LOS}}(y, r) = \left\langle u_{\text{actual}} - a \left\{ \exp \left[\frac{-(y - y_l)^2}{2s_w^2} \right] + \exp \left[\frac{-(y - y_r)^2}{2s_w^2} \right] \right\} \right\rangle \left(\frac{\sqrt{r^2 - y^2}}{r} \cos \varphi + \frac{y}{r} \sin \varphi \right), \quad (3)$$

式中 y_c 对应尾流中心位置, s_w 为控制尾流宽度的参数, y_l 及 y_r 用于区分左右位置最小值, a 为高斯拟合参数, 通过拟合获得参数结果, 设置阈值 p 为 0.05, 即拟合方差大于 0.05 时, 去掉该次拟合结果。

本次数据分析目的在于得到尾流参数, 包括风速损失率、尾流长度、尾流宽度等。其中风速损失率为

$$V_D = \frac{u_{\text{ambient}} - u_{\text{wake}}}{u_{\text{ambient}}} \times 100\% = \frac{u - u_{\text{wake}}}{u} \times 100\%, \quad (4)$$

式中 u_{ambient} 、 u 为环境风场风速, u_{wake} 为风机尾流对应风速。

对于单高斯尾流来说, $u_{\text{wake}} = u - a$, 因此风速损失率可以表示为

$$V_D = \frac{u - (u - a)}{u} \times 100\% = \frac{a}{u} \times 100\% . \quad (5)$$

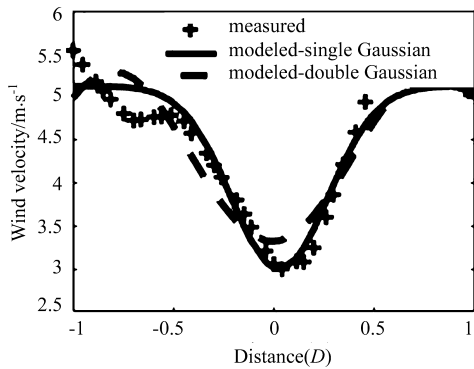


图 1 19:40:09 单高斯模型、双高斯型单次拟合结果

Fig.1 Single fit result of modeled-single Gaussian and modeled-double Gaussian at 19:40:09

另外, 单高斯模型尾流宽度定义为风速损失率廓线的 95% 置信区间, 可以表示为 $w = 4s_w$ 。另一方面, 对于双高斯模型, V_D 公式 (4) 中的 u_{wake} 为尾流模型对应的最小风速值, 尾流宽度可以表示为 $w = y_r - y_l + 4s_w$ 。尾流长度定义为风速损失率降为 10% 时对应长度, 如不存在, 将风速损失率最小值且与 10% 偏差小于 5 的位置定义为尾流长度。其中图 1 为 19:40:09 单次拟合结果, 单高斯模型拟合、双高斯模型标准方差分别为 0.1982、0.2896。

5 数据分析结果

根据对应算法, 得到个例结果如图 2、3 所示。测量时间分别为 2015 年 11 月 15 日 19:40、20:48, 从图中可以清晰看到尾流踪迹, 运用高斯拟合得到参考风速分别位于 5.0~8.0 m/s, 7.3~8.8 m/s 之间, 随着距离的增加, 参考风速整体上有一定上升趋势。尾流宽度随距离增加呈现增大趋势, 范围分别为: $0.6D \sim 3.1D$, $0.6D \sim 2.6D$, 但是由于与周围环境风场的融合, 所以没有呈现持续上升的结果, 即在部分位置有一定的下降, 如图 2(c) 中 $1.5D$ 距离处尾流宽度有所下降。尾流风速损失率随着距离增加逐渐减小, 最大风速损失率分别为 42%、40%, 尾流长度分别为 $15.5D$ 、 $16.5D$ 。

选取 2015 年 11 月 15 日、11 月 18 日、11 月 19 日三天的数据, 统计测量地点处风速风向情况如图 4 所示。从图中可以看出, 风速多集中于 1~5 m/s, 风向集中于东南方向。测量期间的平均风速为 3.4 m/s。

为分析尾流日变化特征, 选取 11 月 15 日、18 日、19 日三天数据, 数据均由 PPI 扫描获得, 仰角为 1.3° , 获取高度 20 m 处的水平风速、风向, 结果如图 5~7 所示。可以看出, 尾流长度存在一定的日变化特征, 其中 11 月 15 日尾流获取时间连续, 尾流较清晰, 趋势较明显, 图 5(a) 表明 11 月 15 日当天风速为 2~8 m/s, 最大风速损失率在 32.1%~77.6% 之间变化, 白天期间风速损失率较大, 尾流长度在 $1.5D \sim 22.5D$ 之间变化, 夜间尾流长度较大。图 5(b) 表明 11 月 18 日当天风速为 1~8 m/s, 最大风速损失率在 30.5%~74% 之间变化, 尾流长度在 $1.5D \sim 13D$ 之间变化, 图 5(c) 表明 11 月 19 日当天风速为 0.5~4.8 m/s, 最大风速损失率在 28.0%~67.7% 之间变化, 尾流长度在 $1D \sim 5.5D$ 之间变化, 由于 11 月 18 日、19 日数据结果不连续, 最大风速损失率、尾流长度没有呈现明显变化特征。

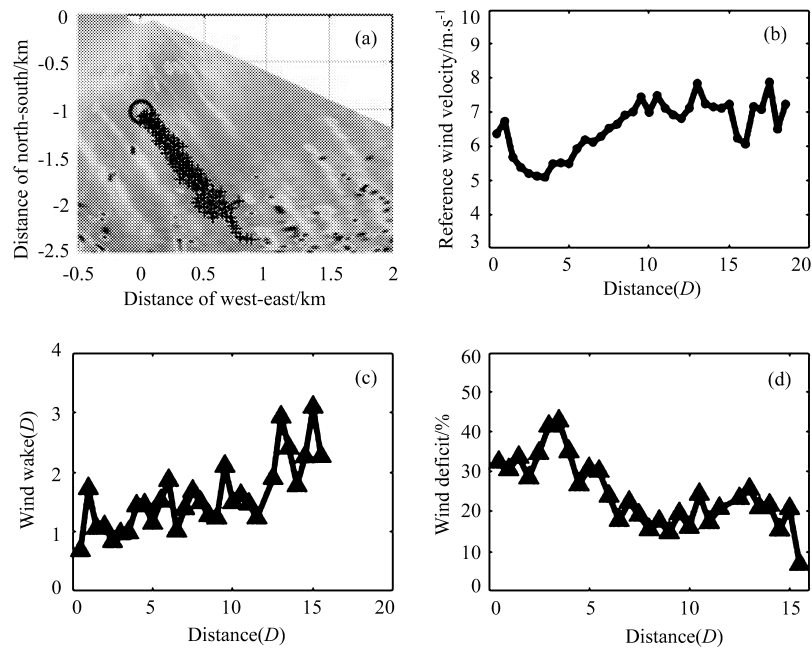


图 2 2015 年 11 月 15 日 19:40 的个例结果。(a) PPI 图; (b) 参考风速; (c) 尾流宽度; (d) 风速损失率

Fig.2 Results at 19:40 15 Nov 2015. (a) PPI scan mode; (b) ambient wind velocity; (c) wake width; (d) wind deficit

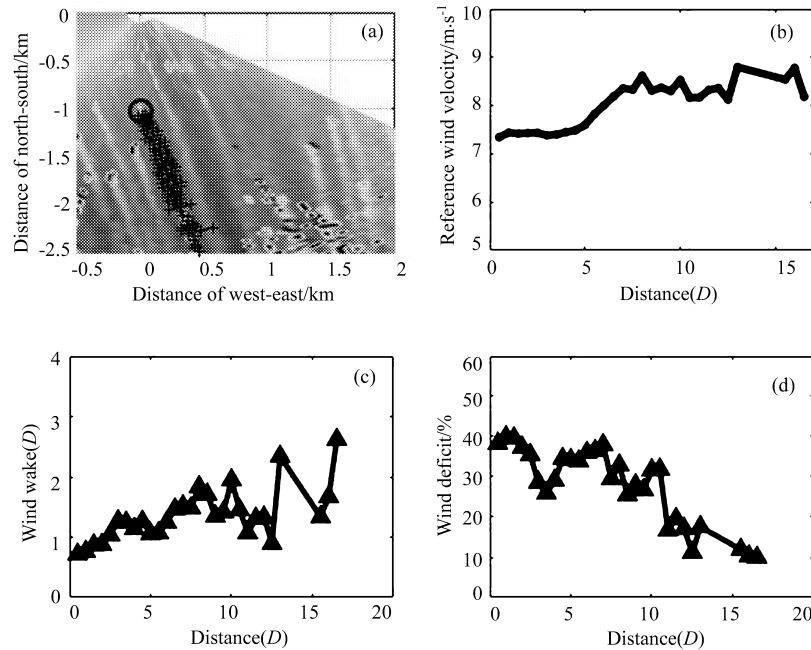


图 3 2015 年 11 月 15 日 20:48 的个例结果。(a) PPI 图; (b) 参考风速; (c) 尾流宽度; (d) 风速损失率

Fig.3 Results at 20:48 15 Nov 2015. (a) PPI scan mode; (b) ambient wind velocity; (c) wake width; (d) wind deficit

为分析风速损失率、尾流长度与风速关系以及尾流特征昼夜差别, 选取 2015 年 11 月 15 日测量数据进行统计分析, 如图 8、9 所示。在图中, 十字、圆圈分别代表白天及夜晚数据, 从图 8 中可以看出, 白天尾流风速损失率高于夜晚尾流风速损失率, 昼夜平均风速、平均最大风速损失率分别为 3.9 m/s, 6.4 m/s, 53.2%, 41.7%。从图 9 中可以看出, 昼夜平均风速及平均尾流长度分别为 3.9 m/s, 6.4 m/s, 6.1D, 12.7D,

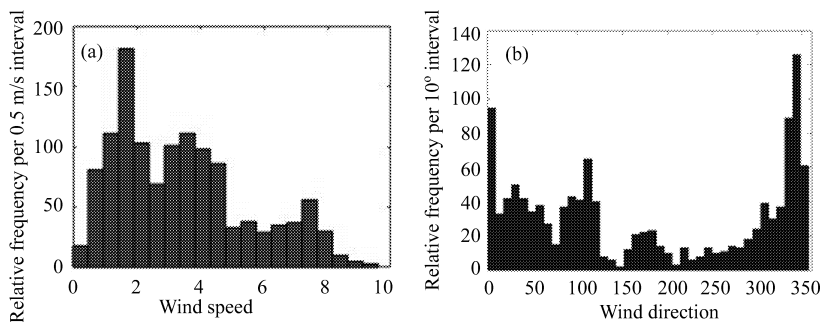


图 4 三天实验时间 (a) 风速、(b) 风向统计

Fig.4 Statics of (a) wind speed and (b) wind direction for three days

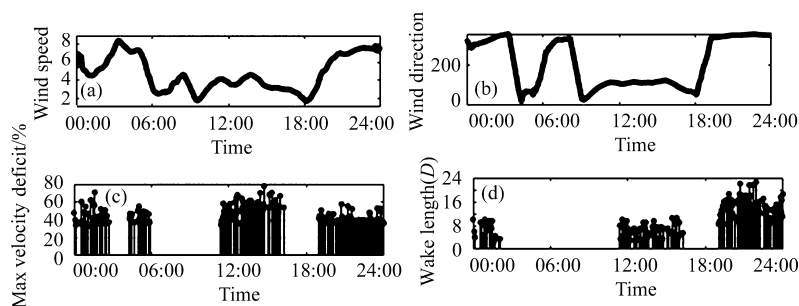


图 5 2015 年 11 月 15 日 (a) 风速; (b) 风向; (c) 风速损失率; (d) 尾流长度随时间变化趋势

Fig.5 Trend of (a) wind speed; (b) wind direction; (c) wind deficit; (d) wake length on 15 Nov., 2015

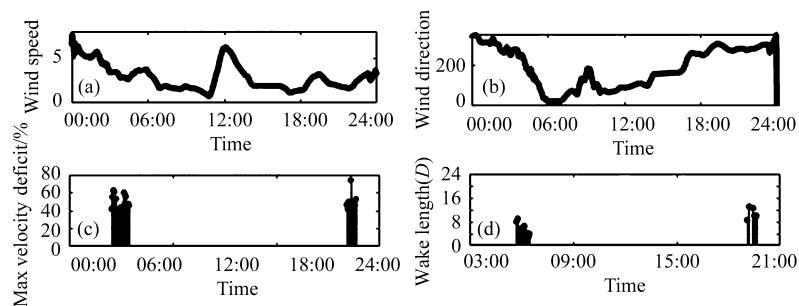


图 6 2015 年 11 月 18 日 (a) 风速; (b) 风向; (c) 风速损失率; (d) 尾流长度随时间变化趋势

Fig.6 The trend of (a) wind speed; (b) wind direction; (c)wind deficit; (d)wake length on 18 Nov., 2015

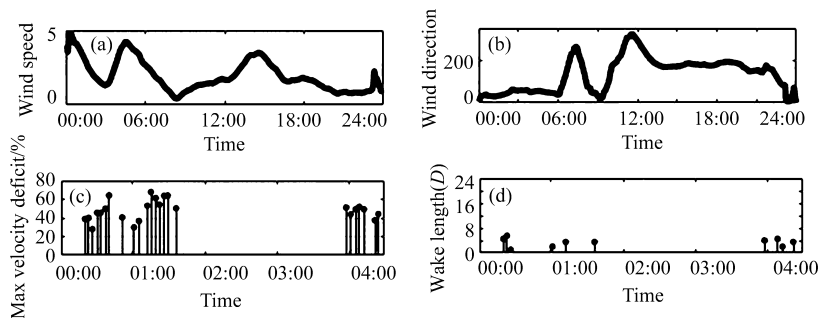


图 7 2015 年 11 月 19 日 (a) 风速; (b) 风向; (c) 风速损失率; (d) 尾流长度随时间变化趋势

Fig.7 The trend of (a) wind speed; (b) wind direction; (c) wind deficit; (d)wake length on 19 Nov 2015

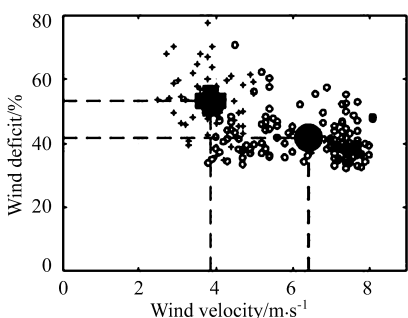


图 8 2015 年 11 月 15 日尾流风速损失率与风速之间关系

Fig.8 Relationship between wind deficit and wind velocity on 15 Nov., 2015

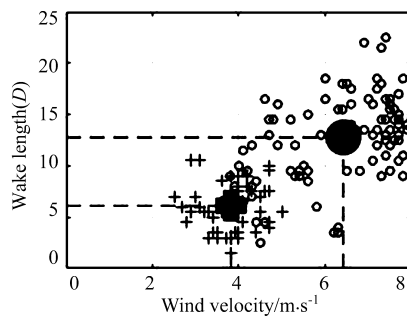


图 9 2015 年 11 月 15 日尾流长度与风速之间关系

Fig.9 Relationship between wake length and wind velocity on 15 Nov., 2015

夜晚期间尾流长度约为白天的 2 倍。

湍流强度 I 定义为水平风速标准偏差与平均水平风速的比值, 选取高度为 20 m, 时间为 11 月 15 日的湍流强度结果, 如图 10 所示。图中圆点对应不同时刻湍流强度, 实线代表 10 次扫描的平均值。从图中可以发现, 夜晚期间湍流强度较小, 大部分低于 0.2, 白天湍流强度较大, 除 10:00~12:00 外时刻大部分高于 0.2。

基于湍流强度大小, 分析风机尾流的风速损失率、尾流长度、尾流宽度与湍流强度的关系, 分析 15 日数据湍流强度位于 0~0.4 之间, 为在不同湍流强度情况下分析风速损失率, 所以选定中间值 0.2 划分湍流强度的大小。定义湍流强度大于 0.2 为高湍流, 小于 0.2 为低湍流, 选取 190 次扫描数据, 同样的, 为分析风速损失率、尾流长度、尾流宽度与背景风场的关系, 定义风速大于 5 m/s 为高风速, 小于 5 m/s 为低风速, 具体分析结果如图 11 所示, (a)~(f) 分别代表风速损失率、尾流宽度范围, 风速损失率、尾流宽度与背景风速、湍流强度关系, 其中阴影部分代表对应量的偏差。在图 (c)、(d)、(e)、(f) 中虚线

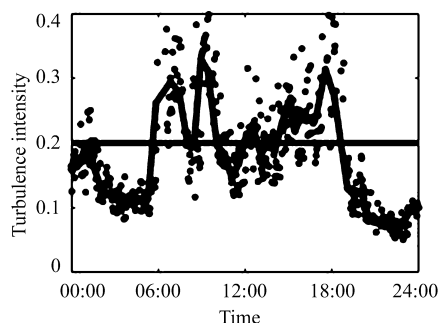


图 10 2015 年 11 月 15 日湍流强度随时间变化趋势

Fig.10 Trend of turbulence intensity on 15 Nov., 2015

分别代表高风速对应风速损失率、高湍流强度对应风速损失率、高风速对应尾流宽度、高湍流强度对应尾流宽度。从图 (c) 可以看出, 背景风速对于风速损失率有一定影响, 在近场尾流中较明显, 偏差大约为 10% 左右, 在下风处 $0.5D \sim 3D$ 距离处, 低背景风速引起较高风速损失率, 大于 $3D$ 距离后, 高背景风速引起较高风速损失率, 另外, 在低风速情况下, 风速损失率在 $7.5D$ 距离后基本保持 10% 恒定不变, 在高风速情况下, 尾流长度在 $16D$ 左右。同样的, 从图 (d) 中可以看出, 高湍流强度引起尾流风速损失率恢复较快, 在 $0 \sim 3D$ 距离处引起较大风速损失率。从图 (e) 中可以看出, 除在 $6.5D \sim 8.5D$ 距离区间, 低背景风速容易引起尾流扩散, 导致尾流宽度的增加, 在图 (f) 中, 除在 $5.5D \sim 6.5D$ 距离区间内, 高湍流强度会引起尾流宽度的增大。除此之外, 在低风速、高湍流强度情况下, 尾流宽度波动幅度较大。由此可以看出, 尾流的特性参数 (风速损失率、尾流宽度) 与背景风速、湍流强度有关。

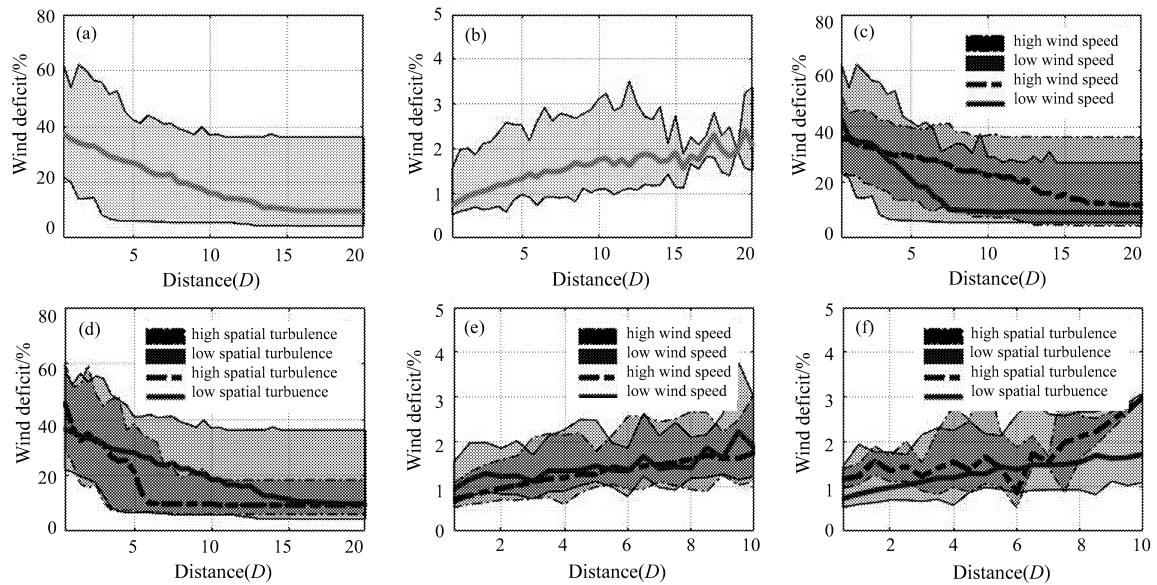


图 11 2015 年 11 月 15 日尾流风速损失率、尾流宽度与背景风速、湍流强度关系 (a) 为探测时间内风速损失率随距离的变化; (b) 为探测时间内尾流宽度随距离的变化; (c) 为不同背景风速下风速损失率随距离的变化; (d) 为不同湍流强度下风速损失率随距离的变化; (e) 为不同背景风速下尾流宽度随距离的变化; (f) 为不同湍流强度下尾流宽度随距离的变化

Fig.11 The relationship between wind deficit, wake length and ambient wind velocity and turbulence intensity.

(a)The variation of wind deficit with distance;(b)The variation of wake width with distance;(c)The variation of wind deficit with distance under different ambient wind velocity;(d)The variation of wind deficit with distance under different turbulence intensity;(e)The variation of wake width with distance under different ambient wind velocity;(f)The variation of wake width with distance under different turbulence intensity

6 结论

2015 年 11 月 13~19 日在新疆地区开展了基于脉冲相干多普勒激光雷达的风电场观测实验, 采用 PPI 扫描方式进行探测, 对新疆地区激光雷达数据进行分析, 得到以下结论:

1) 在 PPI 图中可以清晰看到风机尾流踪迹, 尾流踪迹沿风向延伸, 从个例中可以看到随着距离的增加风速损失率逐渐减小, 逐渐与环境风场相融合, 尾流宽度逐渐增加。

2) 对 11 月 15 日、18 日、19 日三天数据进行日变化分析, 11 月 15 日有效数据连续, 最大损失率在白天较大, 尾流长度在夜间较大, 初步分析可能与背景风速有关。18 日、19 日有效数据较少, 尾流特征参数没有呈现明显的日变化特征。

3) 统计数据量较多的 11 月 15 日的风速损失率、尾流长度数据结果, 初步得出 11 月 15 日, 白天尾流风速损失率高于夜晚尾流风速损失率, 夜晚期间尾流长度约为白天的 2 倍。

4) 分析尾流风速损失率、尾流宽度与背景风速、湍流强度之间关系, 得出背景风速对于风速损失率有一定影响, 在近场尾流中较明显, 在下风处 $0.5D \sim 3D$ 距离处, 低背景风速引起较高风速损失率, 大于 $3D$ 距离后, 高背景风速引起较高风速损失率, 高湍流强度引起尾流风速损失率恢复较快, 在 $0 \sim 3D$ 距离处引起较大风速损失率。低背景风速、高湍流强度容易引起尾流扩散, 导致尾流宽度的增加, 尾流宽度波动幅度较大。

参考文献 :

- [1] Crespo A, Hernández J, Frandsen S. Survey of modelling methods for wind turbine wakes and wind farms [J]. *Wind Energy*, 2015, **2**(1): 1-24.
- [2] Vermeer L J, Sørensen J N, Crespo A. Wind turbine wake aerodynamics [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2003, **39**(6): 467-510.
- [3] Porté-Agel F, Wu Y T, Lu H, *et al.* Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2011, **99**(4): 154-168.
- [4] 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**(14): 1-32.
- [5] Abkar M, Porté-Agel, Fernando. Influence of atmospheric stability on wind-turbine wakes: A large-eddy simulation study [J]. *Physics of Fluids*, 2015, **27**(3):035104.
- [6] Elliott D L, Barnard J C. Observations of wind turbine wakes and surface roughness effects on wind flow variability [J]. *Solar Energy*, 1990, **45**(5): 265-283.
- [7] Jacobs E W, Kelley N D, McKenna H E, *et al.* Wake Characteristics of the MOD2 Wind Turbine at Medicine Bow, Wyoming [C]. *Fourth ASME Wind Energy Symposium*, 1985.
- [8] Höglström U, Asimakopoulou D N, Kambezidis H, *et al.* 1987: A field study of the wake behind a 2 MW wind turbine [J]. *Atmospheric Environment*(1967), 1988, **22**(4): 803-820.
- [9] Barthelmie R J, Folkerts L, Ormel F T, *et al.* Offshore wind turbine wakes measured by sodar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, **20**(4): 466.
- [10] Rhodes M E, Lundquist J K. The effect of wind-turbine wakes on summertime US midwest atmospheric wind profiles as observed with ground-based Doppler lidar [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, **149**(1): 85-103.
- [11] Magnusson M, Smedman A S. A practical method to estimate wind turbine wake characteristics from turbine data and routine wind measurements [J]. *Wind Engineering*, 1996, **20**(2): 73-92.
- [12] Hall F F, Huffaker R M, Hardesty R M, *et al.* Wind measurement accuracy of the NOAA pulsed infrared Doppler lidar [J]. *Applied Optics*, 1984, **23**: 2503-2506.
- [13] Banakh V A, Bodaruev V V, Smalikho I N. Estimation of the turbulence energy dissipation rate from the pulsed Doppler lidar data [J]. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 1997, **10**: 957-965.
- [14] Rahm S, Smalikho I. Aircraft wake vortex measurement with airborne coherent Doppler lidar [J]. *Journal of Aircraft*, 2008, **45**(4): 1148-1155.
- [15] Pichugina Y L, Banta R M. Stable boundary layer depth from high-resolution measurements of the mean wind profile [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, **49**(1): 20-35.
- [16] O'Connor E J, Illingworth A J, Brooks I M, *et al.* A method for estimating the turbulent kinetic energy dissipation rate from a vertically pointing Doppler lidar, and independent evaluation from balloon-borne in situ measurements [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, **27**(10): 1652-1664.
- [17] Bingöl F, Mann J, Larsen G C. Light detection and ranging measurements of wake dynamics part I: one dimensional scanning [J]. *Wind Energy*, 2010, **13**(1): 51-61.
- [18] Trujillo J J, Bingöl F, Larsen G C, *et al.* Light detection and ranging measurements of wake dynamics. Part II: two-dimensional scanning [J]. *Wind Energy*, 2011, **14**(1): 61-75.
- [19] Sonnenschein C M, Horrigan F A. Signal-to-noise relationships for coaxial systems that heterodyne backscatter from the atmosphere [J]. *Applied Optics*, 1971, **10**(7): 1600-1604.
- [20] Käsler Y, Rahm S, Simmet R, *et al.* Wake measurements of a multi-mw wind turbine with coherent long-range pulsed Doppler wind lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, **27**(9): 1529-1532.