

文章编号: 1673-5196(2022)01-0045-08

高海拔单台大型风力机外场实验

王 骥¹, 杨从新^{*2}, 王 印², 张根豪², 巫发明^{1,2}, 丁佰岑³

(1. 中车株洲电力机车研究所有限公司风电事业部, 湖南 株洲 412000; 2. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 3. 兰州长信电力设备有限责任公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了提高高海拔地区大型风力机的性能, 以 3.3 MW 水平轴风力机为研究对象, 通过外场实验的方法, 利用机舱式激光雷达测量风力机的入流, 同时, 利用地面风廓线雷达测量风力机的尾流。首先将一天中激光雷达测得的入流风速和风向与机舱上的风速风向计数据对比, 并提取一段时间内机舱雷达测得的入流风速进行分析; 其次, 把尾流风向与入流风向、尾流速度廓线与入流速度廓线作对比。结果表明: 激光雷达测得入流风速与机舱风速风向计数据有较强的相关性, 机舱雷达对风偏差总体水平较风速风向计对风偏差略小, 且入流风速会随着距风轮的距离减小而不断衰减; 尾流主风向分布与入流主风向一致; 随着下游测点距风轮位置的增加, 尾流速度亏损恢复也越来越快。

关键词: 风力机; 实验; 遥感技术

中图分类号: TK83 **文献标志码:** A

Single large wind turbine field experiment at high altitude

WANG Dian¹, YANG Cong-xin², WANG Yin², ZHANG Gen-hao²
WU Fa-ming^{1,2}, DING Bai-cen³

(1. Wind Power Division, Zhuzhou Electric Locomotive Research Institute Co., Zhuzhou 412000, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 3. Lanzhou Changxin Power Equipment Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to improve the performance of large-scale wind turbines in high-altitude areas, the 3.3 MW horizontal-axis wind turbine is taken as the research object. The inflow of wind turbines is measured by the Nacelle-type Lidar measures through the field experiment method. At the same time, the wind turbine wake is measured by the ground wind profile Lidar. Firstly, the inflow wind speed and wind direction measured by the Lidar in one day are compared with the wind speed and wind direction meter data on the nacelle, and the inflow wind speed measured by the Nacelle-type Lidar is extracted for a period of time. Secondly, the wake wind direction is compared with the inflow wind direction, the wake velocity profile and the inflow velocity profile. The results show that the inflow velocity measured by the Lidar has a strong correlation with the nacelle anemometer. The overall level of the wind deviation of the nacelle is slightly smaller than that of the anemometer, and the inflow wind speed will decrease with the distance from the rotor. The main wind direction distribution of the wake is consistent with the main wind direction of the inflow. With the increase of the position of the downstream measuring point from the wind wheel, the recovery of wake velocity loss is getting faster and faster.

Key words: wind turbine; experiment; remote sensing technology

随着我国风电事业的快速发展, 风场建设已从平原向海上以及高原迈进。由于高原气压低, 空气稀薄等特点, 给风力机的安全平稳运行带来巨大挑战,

所以关于低风速、高海拔地区风力机运行情况的探讨成为风电行业的热点问题之一。随着国内各地方风电竞价序幕的拉开, 风电场的精准性和精细化设计需求日益凸显, 而且平价时代、更大容量的机型、更严格的资源控制都对风力机性能提出了更高的要求。由于风场风力机入流与尾流的动态变化会直接影响风力机的性能, 所以对风力机入流与尾流的动

收稿日期: 2020-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(12062012)

通讯作者: 杨从新(1964-), 男, 陕西兴平人, 博士, 教授, 博导。

Email: ycxwind@163.com

态变化深入了解,会给风力机的运行控制以及性能提升提供可观的效果。

随着风电技术和相关行业的快速发展,人们认识到一般用于风力机运行过程中风力监测和机器控制的传统机舱风速风向计(如杯形风速计和风向标)会受到风轮叶片尾迹的影响,阻碍了对入流风速的准确测量^[1]。因此,对光探测和测距等替代方法的开发越来越广泛,比如激光雷达与声雷达的使用。用机舱激光雷达可以在入流测量的同时不受风轮尾流的影响。此外,风力机内部控制器可以在风力到达风轮之前被激活,通过减少偏航偏差潜在地增加功率捕获。激光雷达很早就被用于气象研究,用来测量大气边界层中的速度分布^[2-3],随着技术改进,雷达应用越来越广泛。故本文选择 2 台激光雷达同时对风力机的入流和尾流情况测量,尾流测量选择大气边界层测量中常用的地面风廓线雷达,机舱雷达选择 ZephIR DM 激光雷达。

基于激光雷达测风的实用性和可靠性,国外对激光雷达在风力机的研究中利用较早。2007 年 Smith 等^[4]就利用激光雷达对风场中风速进行测量,实现风力机的优化控制。Machefaux 等^[5]利用激光雷达和数值模拟的方法研究了单台风力机的尾流特性。2011 年 Rhodes 等利用激光雷达对 Iowa 风场中的一台风力机下游 3 倍风轮直径处的风速与湍流廓线进行测量。2010 年德国在不来梅港首次利用激光雷达对 5 MW 风力机实行远距离测量,测量范围最远可达 3 km。近几年雷达的应用越来越受关注。Bodini 等^[6]在麻萨诸塞州海岸利用激光雷达对海上风力机尾流进行测量,评估不同季节的海上风资源状况。Torres Garcia 等^[7]利用激光雷达对 2 台风力机尾流进行 7 个月的测量,了解在风向变化的情况下风力机尾流的相互作用。

在国内利用激光雷达进行外场实验也逐渐兴起。张岩等^[8]对陆上与机载激光类在复杂地形下功率曲线预测的准确性方面作了对比,发现陆上激光雷达功率预测更准确。王晓宇等^[9]利用激光雷达对机舱测风仪的测量精度进行研究,并得出测风仪风速风向偏差随风速变化的关系。马东等^[10]利用激光雷达测风力机入流来矫正偏航误差。尹嘉萍等^[11]利用激光雷达对复杂风场的尾迹与海气边界层风场进行了观测,着重分析了风力机的尾流特性。

然而,目前国内外对大型兆瓦级风力机入流尾流同时进行测量的实验研究还鲜少开展,特别是高原地区。故本文针对高原地区进行外场实地测量,研究风力机入流、尾流特性,了解风力机周围流场的流

动机理,提高风电场功率输出,验证激光雷达测风的有效性,以便为工程实践提供指导,为国内风场实验提供参考。

1 外场实验

1.1 实验地点与实验机组

本文涉及到的外场实验地点在中国青海省海西州某风电场。风场地处柴达木盆地中南部格尔木河冲积平原上,南邻昆仑山脉,海拔 2 867 m,地势平坦。数据显示,盛行风向为西风,常年干旱少雨,年平均空气密度约为 0.925 kg/m³。

实验机组为大型三叶片水平轴高原低风速型风力机,主要参数如表 1 所列。实验机组处于风场中靠近风场边缘侧,风力机前后间距约 1 300 m,左右间距约 400 m。

表 1 3.3 MW 风力机主要参数
Tab. 1 Main parameters of 3.3 MW wind turbine

| 参数 | 数值 |
|-----------------------------|-------|
| 额定功率 P_r /kW | 3 600 |
| 风轮直径 D /m | 146 |
| 轮毂中心高 z_{hub} /m | 100 |
| 风轮仰角 $\theta_T/(^\circ)$ | 5 |
| 额定风速 $U_0/(m \cdot s^{-1})$ | 10.5 |
| 额定转速 $n/(r \cdot min^{-1})$ | 10.71 |

1.2 实验设备与方案

1.2.1 实验用激光雷达

实验所用激光雷达分别为 ZephIR DM 机舱式激光雷达和 Molas B300 地面风廓线雷达测尾流,参数如表 2 和表 3 所列。2 种雷达测风原理均为激光相干多普勒原理。相干测风激光雷达利用单频窄线宽激光器发射激光脉冲,与大气中的气溶胶粒子发生相互作用后产生带有多普勒频移的回波信号,通过望远镜系统收集大气回波信号并与本征激光信号相干拍频,完成多普勒频移信息提取,通过矢量风速反演技术获得大气三维风场信息。

表 2 ZephIR DM 雷达性能参数
Tab. 2 Main parameter of ZephIR DM

| 参数 | 数值 |
|--------|----------------|
| 测量范围 | 10~700 m |
| 测量层数 | 10 |
| 采样频率 | 50 Hz |
| 风速精度 | <0.5 m/s |
| 风向精度 | <0.5° |
| 测量风速范围 | 0.5~70 m/s |
| 扫略角范围 | 30° |
| 国际标准 | IEC 61400-12-1 |

表 3 Molas B300 雷达性能参数
Tab. 3 Main parameter of Molas B300

| 参数 | 数值 |
|--------|----------|
| 测量层数 | 12 |
| 采样频率 | 1 Hz |
| 风速精度 | 0.1 m/s |
| 风向精度 | 1° |
| 测量风速范围 | 0~75 m/s |
| 扫掠角范围 | 28° |
| 测量原理光束 | 脉冲相干多普勒 |

1.2.2 机舱雷达反演原理

图 1a 为风力机坐标系与机舱雷达坐标系关系图,各参数含义如下: (x, y, z) 与地理空间坐标系一致,其坐标原点在雷达窗口上, x 轴是水平方向, z 轴是垂直方向, x 轴的正方向与风力机朝向相反; (x', y', z') 与激光雷达的三维坐标系一致; Φ 为激光雷达扫掠相位角, 相位角为 0° 时表示扫略光线在 $x'-z'$ 平面; θ_c 为扫略锥角的一半, 通常取 15° ; θ_r 为雷达坐标系相对于地理空间坐标系的滚转角, 图示位置为正值; θ_i 为雷达坐标系相对于地理空间坐标系的倾角, 图示位置为正值. 激光雷达实测风速 v_{los} 与风矢量 $\{u, v, w\}$ 间的关系表示为

$$v_{\text{los}} = w(\cos \theta_i \cos \Phi \sin \theta_c + \cos \theta_c \sin \theta_i) + u(\cos \theta_c \cos \theta_i - \cos \Phi \sin \theta_c \sin \theta_i) - v \sin \theta_c \sin \Phi$$

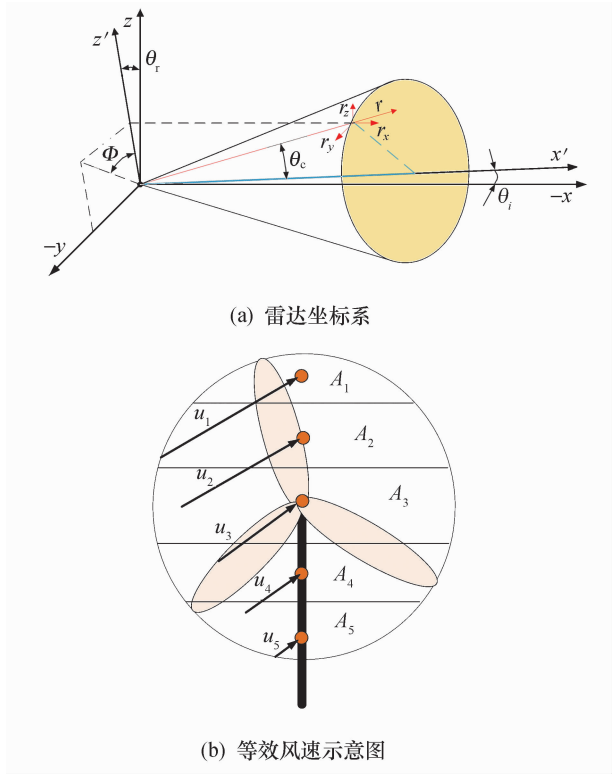


图 1 雷达反演原理
Fig. 1 Lidar inversion principle

机舱式激光雷达通常将扫掠区域分为 5 个面积不同的部分 $A_1 \sim A_5$, 用于衡量区域中心的风速, 以便确定等效风速, 如图 1b 所示. 根据 5 个部分的风速 $(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$ 分布数据进行拟合并确定风切变指数. 对于 5 个部分风速和等效风速的计算, 文献[12]中有详细描述.

1.2.3 地面雷达反演原理

在地面风廓线雷达测量中, 假设风场和大气状态在同一高度上分布均匀, 利用 VAD(velocity azimuth display) 技术, 即一种将风廓线信息拟合到风速信息的方法, 通过在固定倾角下不断改变扫描方位得到风速信息.

地面雷达坐标系如图 2 所示. 地面雷达的 x 正方向指向为正东方, 以雷达镜面激光发射点为原点, 激光发射仰角为 α , 且在半径为 R 的范围内绕旋转中心 z 轴旋转. 假设雷达接收一个全部扫略圆周的反馈, 来自于与 x 轴正方向呈 θ 角的水平风速一起运动的胶体沉降速度 v_f , 则可得雷达探测到随方位角变化的径向速度为

$$v_R(\beta) = v_h(\beta) \cos(\beta - \theta) \cos \alpha + v_f(\beta) \sin \alpha = v_x(\beta) \cos \beta \cos \alpha + v_y(\beta) \sin \beta \cos \alpha + v_f(\beta) \sin \alpha$$

式中: v_R 是随方位角 β 变化的函数, 相对激光雷达是正向的; v_f 向下是正向的; v_x, v_y 是速度分量.

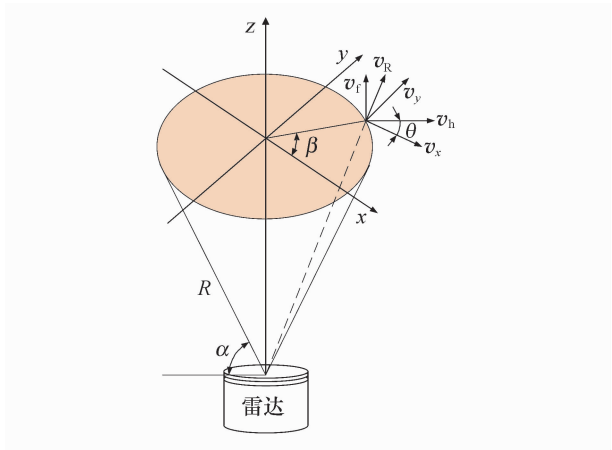


图 2 地面雷达坐标系
Fig. 2 Ground Lidar coordinate system

根据得到的径向风速, 用 LM 最小二乘法拟合余弦函数最终得到反演三维风场.

1.3 外场实验的不确定因素

利用激光雷达对外场风力机进行风速测量时, 要想获得理想的实验结果必须考虑环境条件对测量的影响. 对于激光雷达测风装置, 通常会受地形因素和天气因素(雨、雾、沙暴等)的影响, 因此测量数据时应保证地形平坦、天气良好.

利用激光雷达探测风速,其自身的角度也对探测结果产生影响,因此在激光雷达探测入流和尾流时,一定要保持雷达的水平,对机舱雷达还要考虑其稳定性.有研究显示,地面风廓线雷达倾角在 3° 内对风速和风向测量结果的影响很小,当大于 4° 以后对风速和风向的测量均有较大影响^[13].

1.4 外场探测方向

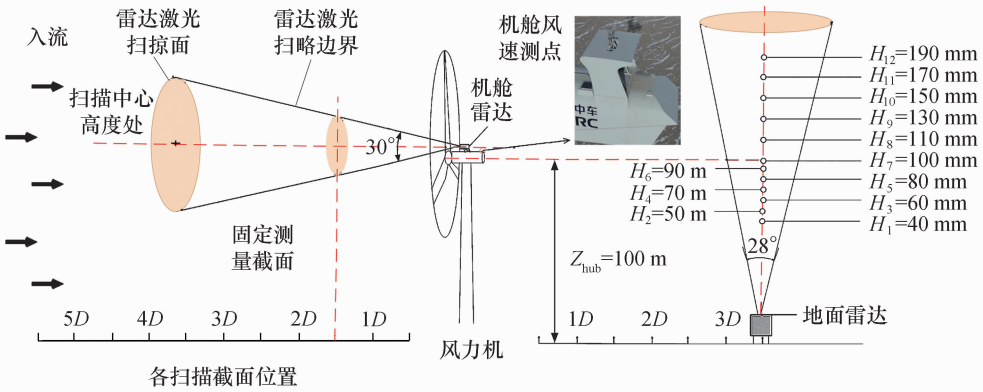
具体的实验方案示意图如图 3 所示.前馈测风雷达监测风轮前 10 个位置 $0.5D$ 、 $1D$ 、 $1.5D$ 、 $2D$ 、 $2.5D$ 、 $3D$ 、 $3.5D$ 、 $4D$ 、 $4.5D$ 、 $5D$ 处的截面风速信息,且成功将激光雷达数据并入 SCADA 系统,实现

数据同步记录.尾流测点分别位于风轮下游距风轮 $1D$ 、 $1.5D$ 、 $2D$ 、 $2.5D$ 、 $3D$ 、 $3.5D$ 处,垂直高度采样点为 40 、 50 、 60 、 70 、 80 、 90 、 100 、 110 、 130 、 150 、 170 、 190 m 处.

风力机的功率波动和载荷的动态行为均由大气边界层内的湍流引起,因此,本文选择风速风向相对稳定、功率输出较为平稳的时间段数据进行处理分析.实验时, 100 m 轮毂高度处的温度为 -4° ,空气湿度为 37% ,气候条件近中性大气.提取 SCADA 数据和激光雷达所测各测点风速数据进行分析,数据采样频率为 1 Hz .



(a) 外场实验实物图



(b) 外场实验示意图

图 3 实验方案示意图

Fig. 3 Experimental scheme diagram

2 数据分析结果

2.1 雷达测量准确性分析

图 4 为某一天激光雷达数据与机舱风速风向计数据的 10 min 风速统计值相关性.激光雷达数据采样点为风轮正前方 $2.5D$ 轮毂高度处,机舱上的风速风向计安装位置为风力机尾部的散热系统上方,约高于轮毂上方 $3\sim 4\text{ m}$.因为在同一时刻,机舱式激光雷达所测空间与机舱风速风向计所测的是不同的,故有必要考虑风速传播时间的延迟.为了减小传播时间的影响,选取测量位置距离风轮较近的测点 ($2.5D$) 风速进行对比.此采样距离也符合 IEC 标准

的推荐值.

图 4a 为激光雷达测得风速与机舱风速风向计的时程数据.可以看出,一天中 2 组数据变化趋势呈高度相关.从图 4b 中可以看出,2 个位置处的风速关系呈线性分布,但总体上机舱风速风向计所测速度略高于机舱雷达所测的.主要原因是当入流吹到风轮前方时,阻塞作用使得在轮毂后方出现流动加速现象^[14];另外,在入流数据采样点处,受风轮诱导影响,风速略低.由于雷达测量风速结果与机舱风速风向计测量结果相近,故通过激光雷达前馈测风可以提前发现来流的异常风速和湍流,控制风力机提前动作,提高发电量,降低安全隐患.

图 5 为激光雷达所测风轮前 2.5D 风向与机舱风速风向计所测风向的对比。可以看出,机舱风速风向计所测风向主要分布在 $-20^{\circ}\sim 0^{\circ}$ 之间,线性拟合值趋于 -10° ;而激光雷达所测风向主要分布在 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 之间,线性拟合值趋于 0° 。由于机舱风速风向计处于风轮后方,风轮旋转会使尾流风向有一

定角度偏转,测量结果与文献[9]中的相似,所以本文利用激光雷达对风向的测量具有一定准确性。

图 6 为采样 2 h 内入流与尾流的风向玫瑰图。可以看出,入流与尾流的风向吻合良好,确保了尾流所测数据的准确性。虽然入流风向在小范围内出现了偏转,但对尾流风向的影响较小。

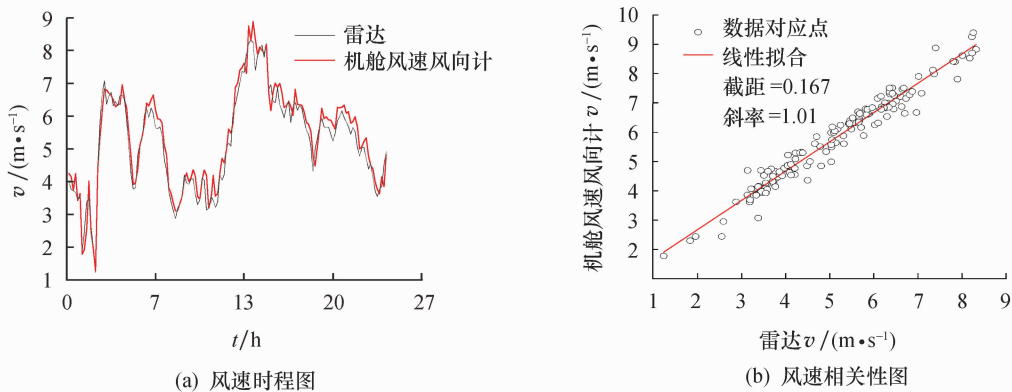


图 4 机舱雷达与风速风向计的数据相关性

Fig. 4 Data correlation between Nacelle-Lidar and anemometer

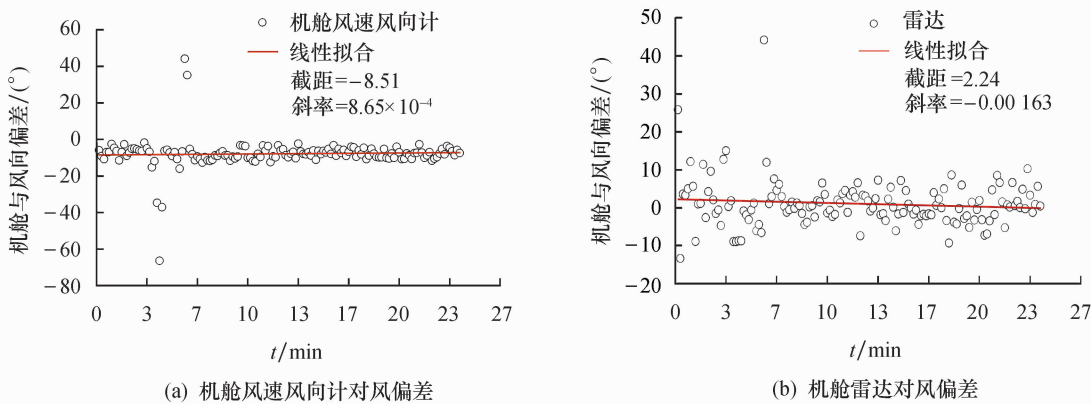


图 5 机舱雷达与风速风向计的对风偏差

Fig. 5 Wind deviation measured by Nacelle-Lidar and anemometer

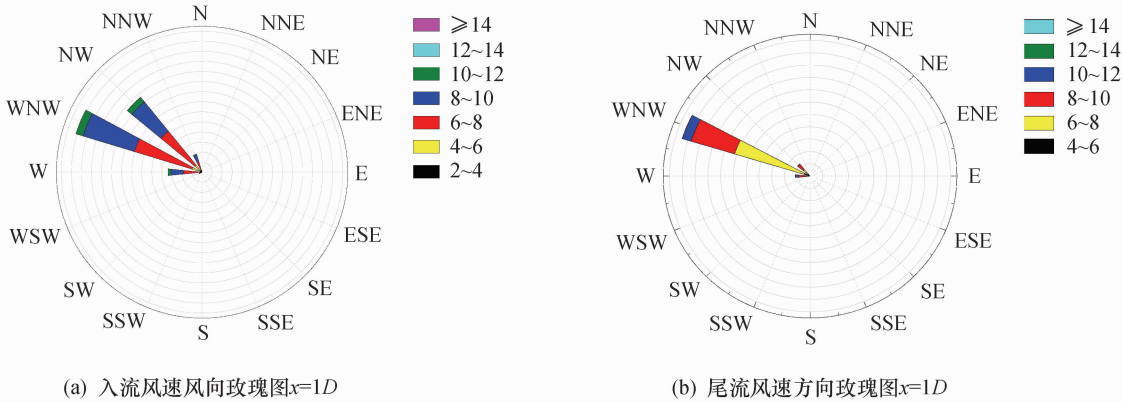


图 6 入流与尾流风向对比

Fig. 6 Wind direction inflow and wake

图 7 为采样时间内激光雷达滚转角和摆振角随时间的变化图。从图 7a 可以看出,仅采样的前 10 min 与后 10 min 出现短时的风力减弱现象,其余大部分时间风速比较平稳。从图 7b 可以看出,风轮对风较好,数据基本都在 1° 范围内波动,满足 IEC 标准推荐的 2.5% 偏差范围,故可保证测量数据的准确性。

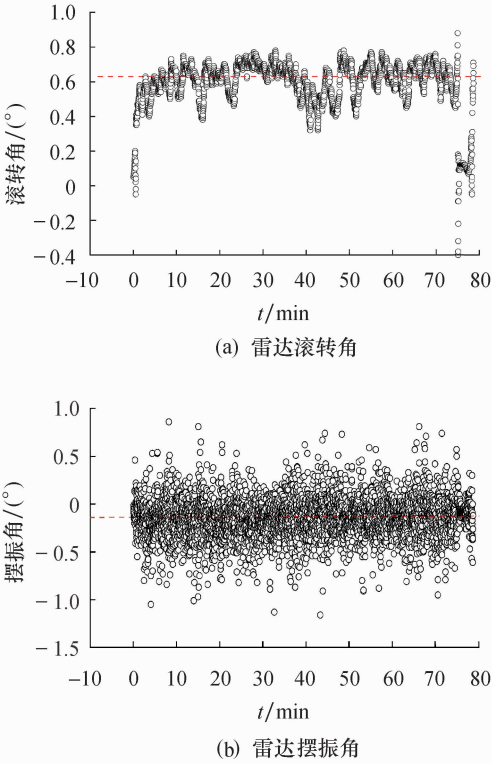


图 7 采样时间内的雷达滚转和摆振状态
Fig. 7 Lidar roll and till state during sampling time

2.2 雷达测得风轮前入流特性

2.2.1 风速分布

图 8 为轮毂高度处风力机前 5D 内各雷达监测面的连续 80 min 采样风速数据。 $t_1 \sim t_8$ 表示 8 个 10 min 平均风速段, x 表示测点与风轮间的距离, v_{hub} 表示轮毂中心高度处风速。自 t_1 至 t_8 ,在风轮前 0.5D~1D 处均出现明显的风速下降现象,且风轮前 1D 处与 5D 处入流相比,各时间段风速平均下降约 3%,此结果与文献[14]中的较吻合。出现风速衰减的主要原因可由经典的制动盘理论解释,即风轮相当于一个圆盘,在吸收能量后风速降低,但速度突变是不可能的,压力却可以,故气流在接近风轮时将动能不断转化为压力势能,以风轮前后压差推动制动盘做功,从而入流速度在风轮前不断降低。

2.2.2 湍流度分布

从图 9a 可以看出,在不同高度 h (测点距离地

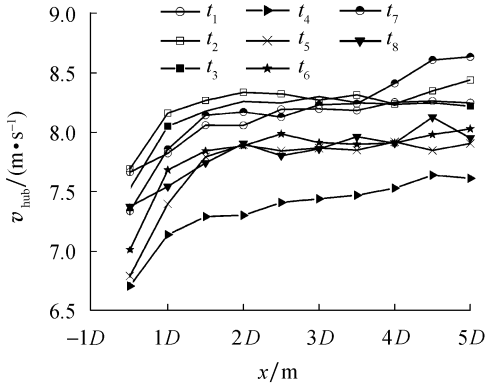


图 8 轮毂高度处风轮前各测点风速分布
Fig. 8 Each measuring point's velocity distribution at the height of hub

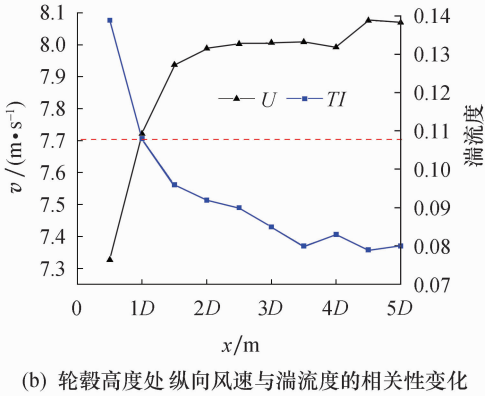
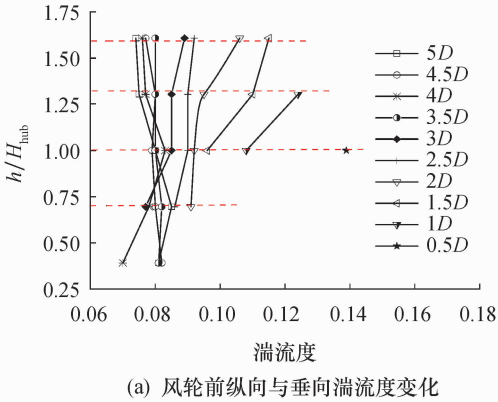


图 9 风轮前不同位置处的湍流度
Fig. 9 Turbulence intensity and velocity at different positions in front of the rotor

面的垂直高度),随着测点与风轮位置间的距离减小,湍流度(TI)呈不断上升的趋势,越接近风轮处,湍流度增加得越明显,且湍流度首先出现明显增加的位置是风轮前 2D 的上侧叶尖垂直高度处。从图 9b 可以看出,轮毂中心处的湍流度从 9.5% (1.5D) 增加到 14% (0.5D),增加了近 1.5 倍。因此,风轮运行空间的湍流情况不只依赖于来流,自身的旋转对运行环境的影响也不可忽略。从图 9b 还可

以看出,风速的变化趋势与湍流度的截然相反,自风轮前 $0.5D$ 至 $1.5D$ 之间,风速与湍流度几乎呈线性变化.

2.2.3 尾流风廓线雷达所测速度亏损

图 10 为采样时间内入流与尾流不同位置处的 10 min 风速分布. 其中,尾流是地面雷达所测,以尾流不同位置高度处的风速相对值给出;入流是通过机舱式激光雷达测得,并以幂率的方式给出:

$$\frac{U}{U_{hub}}=\left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{\alpha}$$

式中: α 为风切变指数; z 为垂直高度; U 为入流速度; U_{hub} 为轮毂高度处风速; z_{hub} 为轮毂中心处高度.

从图 10 可以看出,尾流速度的亏损面积随着风轮后下游位置的增加不断减小. 轮毂高度处的速度亏损率如表 4 所列. 可以看出,尾流 $3D$ 处的速度亏损率约为 $2D$ 处的 $3/5$,尾流 $3.5D$ 处的速度亏率为 $3D$ 处的 $1/2$,即随着下游位置的增加速度亏损恢复也越来越快,在文献[15]的研究结果中可以看到相似的现象.

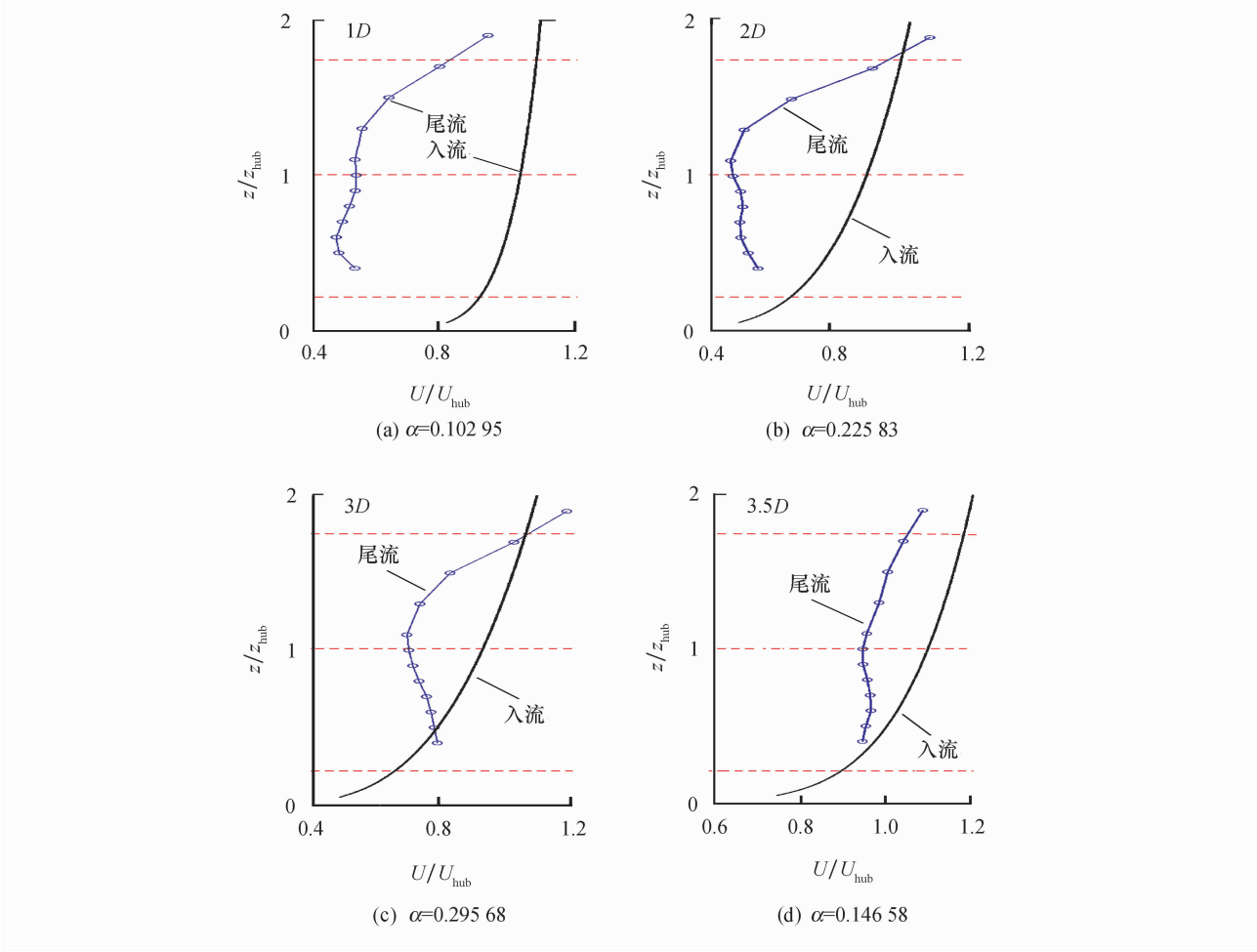


图 10 尾流速度亏损
Fig. 10 Velocity defect in wake

表 4 尾流不同位置处的速度亏损率

| 速度亏损率 | 1D | 2D | 3D | 3.5D |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| $(U_{hub}-U)/U_{hub}$ | 0.594 | 0.516 | 0.303 | 0.153 |

3 结论

本文针对高原地区大型水平轴风力机开展外场实验研究,对利用激光雷达进行风力机外场测量实验提出了有效的实验方案. 实验结果与讨论证明了

激光雷达探测技术的可行性和可靠性,总结了相关工程应用经验,得到如下结论:

- 1) 在高原外场环境下,利用激光雷达测量风力机入流和尾流的风速具有较强的实用性,应用中需尽量保持雷达的稳定.
- 2) 激光雷达所测入流风速与机舱风速风向计所测风速有很强的相关性,从二者的机舱对风偏差结果可知,机舱雷达测量的风向偏差较小.
- 3) 测量结果表明,利用 2 台激光雷达同时测量

风力机入流与尾流的方法简单实用可靠,在风力机的外场实验和优化控制方面具有一定潜力,可进一步应用于提高风力机性能的研究中.

参考文献:

[1] KAWABATA H, KIKUSHIMA Y, KOGAKI T. Wind profile and power performance measurements using a nine-beam nacelle lidar [J]. American Journal of Mechanical Engineering, 2018, 6(2): 75-82.

[2] COLLIS R T H. Lidar-A new atmospheric probe [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1966, 92(392): 220-230.

[3] ANSMANN A, RIEBESELL M, WEITKAMP C. Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar [J]. Optics Letters, 1990, 15(13): 746-748.

[4] SMITH D A, HARRIS M. Wind turbine control having a Lidar wind speed measurement apparatus: US7281891 [P]. 2007-10-16.

[5] MACHEFAUX E, LARSEN G C, TROLDBORG N, *et al.* Single wake meandering, advection and expansion-An analysis using an adapted pulsed lidar and CFD LES-ACL simulations [C]//European Wind Energy Conference and Exhibition 2013. Vienna; European Wind Energy Association, 2013.

[6] BODINI N, LUNDQUIST J K, KIRINCICH A. U. S. east coast lidar measurements show offshore wind turbines will encounter very low atmospheric turbulence [J]. Geophysical Re-

search Letters, 2019, 46(10): 5582-5591.

[7] TORRES GARCIA E, AUBRUN S, COUPIAC O, *et al.* Statistical characteristics of interacting wind turbine wakes from a 7-month lidar measurement campaign [J]. Renewable energy, 2019, 130: 1-11.

[8] 张 岩, 王冬冬. 激光雷达测风系统在风电机组功率曲线测试中的应用研究 [J]. 太阳能学报, 2017, 38(6): 1489-1494.

[9] 王晓宇. 风力机尾流对测风仪数据精度的影响研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2018.

[10] 马 东. 激光雷达测风仪在风电机组偏航误差测试中的应用研究 [J]. 应用能源技术, 2015(11): 5-7.

[11] 尹嘉萍. 风机尾流场与海气边界层风场的多普勒激光雷达观测研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015

[12] VAN SARK W G J H M, VAN DER VELDE H C, COELINGH J P, *et al.* Do we really need rotor equivalent wind speed [J]. Wind Energy, 2019, 22(6): 745-763.

[13] HAN X C, DOU P L, XUE Y Y. Study on the influence of attitude angle on Lidar wind measurement results [C]//2017 3rd International Conference on Energy, Environment and Materials Science. [S. l.]: IOP, 2017.

[14] BOT E T G. Flow analysis with nacelle-mounted Lidar [M]. Netherlands; Energy research Centre of the Netherlands, 2016.

[15] HEISEL M, HONG J R, GUALA M. The spectral signature of wind turbine wake meandering: A wind tunnel and field-scale study [J]. Wind Energy, 2018, 21(9): 715-731.