

引用格式: 蔡彦枫, 李晓宇. 面向空中风力发电系统的高空风场观测 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(1): 1-9. CAI Yanfeng, LI Xiaoyu. High-altitude wind field observation of airborne wind energy system [J]. Southern energy construction, 2024, 11(1): 1-9. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.01.

# 面向空中风力发电系统的高空风场观测

蔡彦枫<sup>1,2,✉</sup>, 李晓宇<sup>3</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

2. 广东科诺勘测工程有限公司, 广东 广州 510663;

3. 中国电力工程顾问集团有限公司, 北京 100120)

**摘要:** [目的] 文章旨在研究空中风力发电系统 (Airborne Wind Energy System, AWES) 的测风需求及设备选型。[方法] 以某空中风力发电示范工程为依托, 开展测风激光雷达与风廓线雷达的对比观测试验, 并对数据获取率、垂直廓线特征和时间变化特征进行分析。[结果] 结果显示: 在 3 km 高度范围内, 测风激光雷达的数据获取率随高度递减至不足 0.4, 风廓线雷达的数据获取率则维持在 0.98 以上, 具有更好的观测适应性; 两种测风设备的风速、风向垂直廓线以及逐日、多日波动特征均具有一致性, 并且能被再分析资料和高空气象站同期探空资料所验证。测风激光雷达观测结果的中位数、极差、标准差等统计特征与再分析资料更接近, 相关性更好; 风廓线雷达观测结果的极差和标准差整体偏大, 测风精度不及测风激光雷达。[结论] 文章研究表明, 应根据项目所在地的气候状况, 在空中风力发电站工程的不同设计阶段合理选择测风设备, 科学设置测风方式。

**关键词:** 空中风力发电; 测风激光雷达; 风廓线雷达; 数据获取率; 测风精度

中图分类号: TK89; P412.25

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)01-0001-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.01

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

## High-Altitude Wind Field Observation of Airborne Wind Energy System

CAI Yanfeng<sup>1,2,✉</sup>, LI Xiaoyu<sup>3</sup>

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. Guangdong Kenuo Surveying Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

3. China Power Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100120, China)

**Abstract:** [Introduction] This work aims to select the optimal wind-measurement instrument to satisfy observational requirements of Airborne Wind Energy System (AWES). [Method] Observation campaign between wind lidar and wind profiler radar was carried out on an AWES demonstration project location. Data acquisition rate, vertical profile characteristics and temporal variation characteristics of both instruments were compared and analyzed. [Result] The results show that the data acquisition rate of wind lidar decreases to less than 0.4 with altitude rising to 3 km, while the wind profiler radar can maintain above 0.98, revealing better observational adaptability. The vertical profiles of wind speed and direction, as well as the day-by-day and multi-day fluctuation characteristics are consistent in both instruments and can be verified by the reanalysis data and the contemporaneous radiosonde data of high-altitude meteorological stations. Statistical indicators like median, extreme deviation and standard deviation of the wind lidar observations are closer to and better correlated with the reanalysis data, while extreme deviation and standard deviation of the wind profiler radar observations are larger overall. Therefore, the wind-measurement accuracy of wind profiler radar is not as good as that of wind lidar. [Conclusion] This work suggests that wind-measurement instrument should be reasonably selected and wind measurement schemes should be scientifically set up at different stages of AWES power plant project according to the climatic conditions of the project location.

**Key words:** airborne wind energy; wind lidar; wind profiler radar; data acquisition rate; wind-measurement accuracy

收稿日期: 2023-01-03 修回日期: 2023-03-12

基金项目: 国家重点研发计划项目“大型伞梯式陆基高空风力发电关键技术及装备”(2023YFB4203400); 中国能源建设股份有限公司重大科技项目“25 MW 级高空风能发电技术与装备研究”(CEEC-KJZX-03)

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

近年来,国际上出现了 1 种新型风力发电形式——空中风力发电系统(Airborne Wind Energy System, AWES)<sup>[1]</sup>。AWES 系统采用系留型飞行器,飞行或悬浮于空中捕获风能并转化为电能,突破了现有风力发电机组的塔架高度限制,可以开发 300 m 高度以上乃至整个大气边界层的风能资源<sup>[2-3]</sup>,并且具有占地面积小、噪声污染小、风能储量大等特点,从而引起了广泛关注。目前,全球已有超过 50 家研发公司与数十个研究机构从事相关研究工作<sup>[4-6]</sup>,形成了系留风筝式、系留滑翔机式、系留浮空器式 3 种技术路线,并衍生出多型样机<sup>[7-9]</sup>;另外国内外均出现了空中风力发电示范项目。

对于空中风力发电站工程而言,无论采用何种形式的 AWES 系统,在前期规划和可行性研究阶段均需要对项目所在地的高空风资源进行观测与评估;在后期调试与投运阶段则需要对运行高度范围内的高空风场进行连续监测,以确保系留型飞行器的安全。因此,开展面向 AWES 系统的测风设备选型研究十分必要。现有的高空风场观测手段主要有:测风雷达(无线电探空,利用探空气球作为示踪物)、系留汽艇搭载螺旋桨式测风仪、测风激光雷达、风廓线雷达等,而具备不间断连续观测能力的主要设备为最后两种遥测设备。其中,测风激光雷达已应用于国内外的高空风资源观测和评估中<sup>[10-11]</sup>,研究结果显示其数据获取率随着高度升高而降低,雨、雾、云等天气条件会限制激光的探测距离与能力。风廓线雷达在国内外气象领域广泛应用,在监测中小尺度天气系统中发挥了重要作用,研究结果显示其数据获取率基本不受天气条件影响,测风精度则会随着降水强度不同而发生变化<sup>[12-14]</sup>。

目前,国内尚未出现针对 AWES 系统运行高度范围的测风设备选型研究成果,因此,本文以中国能源建设集团参与建设运营的国内某空中风力发电站示范工程为研究对象,针对该项目中 AWES 系统获批的运行高度范围(3 km 以下),开展测风激光雷达

与风廓线雷达的对比观测试验,分析不同测风设备的数据获取率、垂直廓线特征和时间变化特征,并对今后空中风力发电站工程全生命周期内的测风设备选型提出建议。

## 1 测风设备与观测设置

### 1.1 测风设备

测风激光雷达的生产厂家为青岛某公司,采用脉冲相干多普勒激光雷达体制(Coherent Doppler Lidar, CDL),具体型号为 Wind3D 6000,激光波长 1.55  $\mu\text{m}$ ,最大探测距离 6 km。风廓线雷达来自广州某公司,采用相控阵天线与固态全相参体制,具体型号为 RH-A 3000,工作频率 L 波段,最大探测高度 5 km。两种测风设备的详细技术参数如表 1 所示。

表 1 测风设备技术参数对比表

Tab. 1 Comparison of technical information about wind lidar and wind profiler radar

指标	激光测风雷达	风廓线雷达
型号	Wind3D 6000	RH-A 3000
工作波长/频率	1.55 $\mu\text{m}$ (红外线)	1 290±5 MHz(微波)
探测距离	45 ~ 6 000 m	100~5 000 m
测量范围	风速: 0 ~ 75 m/s 风向: 0 ~ 360°	风速: 0 ~ 60 m/s 风向: 0 ~ 360°
测量精度	风速: 0.1 m/s 风向: $\leq 3^\circ$	风速: 1.5 m/s 风向: $\leq 10^\circ$
供电/功耗	220 V/50 Hz <200 W(常温)	380/220 V、50 Hz $\leq 4$ kW
工作环境	温度: -40 ~ 60 $^\circ\text{C}$ 相对湿度: $\leq 100\%$	温度: -40 ~ 50 $^\circ\text{C}$ 相对湿度: $\leq 100\%$

### 1.2 观测设置

如图 1 所示,两种测风设备并排布置在项目现场的空地处,四周空旷无遮挡。对比观测时段为 2022 年 6 月 27 日 0 时~7 月 27 日 0 时,测风设备均由互联网授时,不间断连续观测。两种测风设备均采用五波束扫描方式,分别沿东、南、西、北以及垂直等 5 个方向依次发射倾斜的探测波束并接收回波,根据返回信号的多普勒频移形成径向速度结果。其

中,测风激光雷达的波束倾斜角(与垂直方向的夹角)为 $21.27^\circ$ ,得到 $0.17\sim 6.00$  km高度范围内共102个垂直分层的径向速度,垂直分辨率约55 m。风廓线雷达的波束倾斜角为 $15^\circ$ ,得到 $0.1\sim 4.9$  km高度范围内共54个垂直分层的径向速度,垂直分辨率为50 m(低、中模式)和100 m(高模式)。

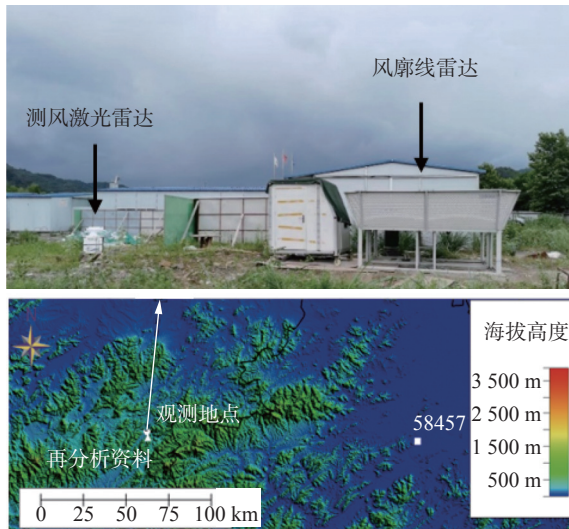


图1 观测地点及对比验证资料示意图

Fig. 1 Schematic diagram of observation location and validation data

## 2 数据处理方法与验证资料

### 2.1 数据处理方法

两种测风设备均在其信号处理软件中内置了DBS风场反演方法<sup>[15]</sup>,将各个垂直分层的五波束径向速度反演为相同高度上的水平风速 $V$ 、风向 $D$ 和垂直速度 $W$ ,并形成时间序列 $V(t)$ 、 $D(t)$ 、 $W(t)$ 输出;其中,测风激光雷达输出逐次扫描的反演结果,风廓线雷达输出每5 min平均的反演结果。本文进一步采用算术平均法,将 $V(t)$ 和 $D(t)$ 处理为10 min平均结果和1 h平均结果,分别用于测风设备之间对比,以及测风设备与再分析资料之间对比。风向在进行算术平均时考虑“过零”修正<sup>[16]</sup>。

在进行两种测风设备的全高度层风速廓线形态对比,以及相同高度层的时间变化特征对比时,水平风速均进行无量纲化处理,得到无量纲风速廓线 $V'(z)$ 和无量纲风速时间序列 $V'(t)$ 。

$V'(z)$  定义为:

$$V'(z) = \frac{V(z)}{V_{1.500}} \quad (1)$$

式中:

$V(z)$ ——测风设备在任意垂直层 $z$ 上的水平风速(m/s);

$V_{1.500}$ ——距离大气边界层顶特征高度(1 500 m)最近的垂直层上水平风速(m/s)。

$V'(t)$  定义为:

$$V'(t) = \frac{V(t)}{V_{\text{mean}}} \quad (2)$$

式中:

$V(t)$ ——某一高度层上任意平均时段 $t$ 内的水平风速(m/s);

$V_{\text{mean}}$ ——相同高度层全时段平均的水平风速(m/s)。

### 2.2 对比统计参数

对两种测风设备在相同高度层的无量纲风速时间序列 $V'(t)$ 与风向时间序列 $D(t)$ 进行统计,得到中位数、极差、标准差、峰值个数、相关系数等一系列统计参数,开展时间变化特征对比分析。其中,峰值个数的定义如下:把时间序列看作一维数组,每个时次的观测结果看作数组中的一个样本,峰值个数看作一维数组中的局部最大值个数,即数值大于其左、右相邻样本的样本个数。相关系数则包括两种测风设备之间的相关系数,以及两种测风设备分别与2.3节所述的同期ERA5再分析资料之间的相关系数。

### 2.3 验证资料

如图1所示,距离观测地点最近的高空气象站站号为58457,收集观测期间内该站的无线电探空资料对两种测风设备的全高度层风速廓线和风向廓线形态进行验证。验证资料具体包括每日08时与20时的风速和风向记录,高度层为地面层、1 000 hPa、925 hPa、850 hPa和700 hPa;本文所用高空气象站资料均来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)的公开资料。

为了弥补高空气象站定时观测资料的不足,利用能够提供逐时全气象要素结果的中尺度再分析资料,对两种测风设备的风速和风向时间变化特征进行验证。本文所利用的再分析资料来自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的ERA5再分析数据集,该数据集经过实测资料的广泛验证,能够提供全球范围内逐小时、空中不同气压层的风、温、压、湿结果,空间分



分辨率  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 在国外被用作区域高空风资源分析研究的基础资料<sup>[17-20]</sup>。本文选择观测期间内 ERA5 再分析资料距离观测地点最近格点 (118.75°E, 30.25°N), 1 000 hPa、975 hPa、950 hPa、925 hPa、900 hPa、875 hPa、850 hPa、825 hPa、800 hPa、775 hPa、750 hPa 和 700 hPa 共 12 个气压层的风速、风向序列。

另外, 为了分析测风设备探测距离随天气状况的变化情况, 同步收集观测期间内中央气象台 (<http://www.nmc.cn>) 每日发布的地面天气图、850 hPa 高空天气图。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 数据获取率

数据获取率定义为剔除缺测数据后的有效数据与全部观测数据之比。根据雷达测风原理, 测风激光雷达或风廓线雷达在获取径向速度结果时, 还同步记录回波的信噪比。两种测风设备均有预设的信噪比阈值, 当测量的信噪比低于阈值时, 径向速度结果被认为无效, 则输出文件中记为缺测。实际测量中, 回波强度可能随着探测距离与天气情况的差异出现下降, 导致信噪比低于阈值, 则数据获取率通常小于 1。根据本次观测试验的测风设备各自预设的信噪比阈值, 全时段数据获取率对比如图 2 所示。

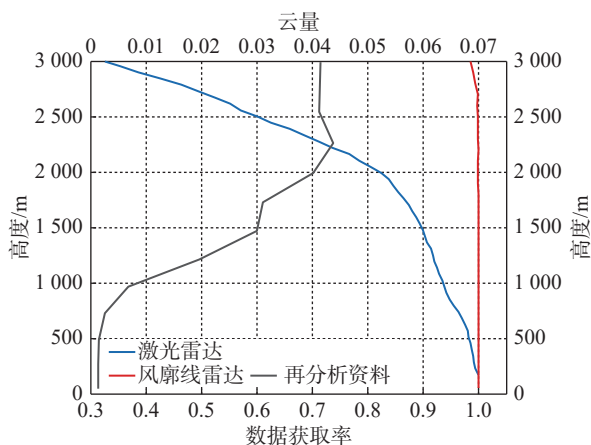


图 2 平均数据获取率对比

Fig. 2 Comparison of average data acquisition rates in the whole observation period

由图 2 可知, 当从地面升至 1 500 m 高度时, 蓝线所示的测风激光雷达数据获取率从 0.98 逐步递减至 0.9; 与参考文献 [6] 的同类型雷达 (最大探测距离 4 km) 相比, 本文所用测风激光雷达在大气边界层

范围内的数据获取率有一定幅度提升。可能原因在于激光光源功率更大, 随着激光脉冲能量的提升, 返回信号抗衰减性能更优, 最大探测距离提升至 6 km; 并且随着信号检测技术的改进, 相同探测距离内可以取得更高的数据获取率。而在大气边界层之上, 数据获取率迅速下降, 到达 3 000 m 高度时, 数据获取率已不足 0.4, 其成因与云和气溶胶的形成、分布有关。一方面, 随着高度上升, 气温下降, 水汽饱和凝结, 具备成云条件, 灰线所示的平均云量 (ERA5 再分析资料) 开始增多; 随着探测距离增大, 测风激光雷达回波途经云层时, 能量衰减剧增, 信噪比下降明显。另一方面, 测风激光雷达主要依赖空气中气溶胶粒子对激光波束的后向散射形成返回回波, 因此, 探测能力通常与气溶胶浓度呈现反相关关系; 由于气溶胶粒子集中在大气边界层, 在大气边界层顶之上的自由大气, 气溶胶浓度急剧降低, 则测风激光雷达向更高高度的探测能力受到天然限制。值得注意的是, 红线所示的风廓线雷达数据获取率在全高度层均维持在 0.98 以上, 其背后的物理机制在于风廓线雷达采用的电磁波对云或降水具有一定的穿透能力, 既能在晴空条件下获取大气湍流散射回波, 又能在多云或降水天气下获取云和降水粒子的散射回波, 从而维持高信噪比和稳定的数据获取率。

进一步, 选择 7 月 4 日至 7 月 7 日的一次天气过程进行两种测风设备的数据获取率差异分析。首先分析该时段内的天气形势, 如图 3(a) 所示, 2203 号热带气旋“暹芭”登陆后其残余势力继续深入湖南、湖北境内, 而 2204 号热带气旋“艾莉”即将登陆和影响日本; 因此蓝线所示的海平面气压场出现两个低压中心, 一个结构松散, 影响我国中华和华东大部分地区并逐渐缓慢北抬, 对应“暹芭”的残余环流; 另一个结构紧密, 即将横穿日本本岛, 覆盖范围较小, 对应“艾莉”的台风中心。如图 3(b) 所示, 接近 1 500 m 高度的 850 hPa 等压面上, “暹芭”残余环流外围出现了紫色所示的 6 级以上西南大风, 不断引导海上暖湿气流北上。

该时段内两种测风设备的观测结果如图 4 所示, 测风激光雷达在此期间因天气影响出现了多个时段的数据空缺: 7 月 4 日~5 日, 观测地点受“暹芭”残余环流的低压系统外围影响, 出现短时雷雨, 降雨结束后出现轻雾, 因此造成测风激光雷达出现全高度

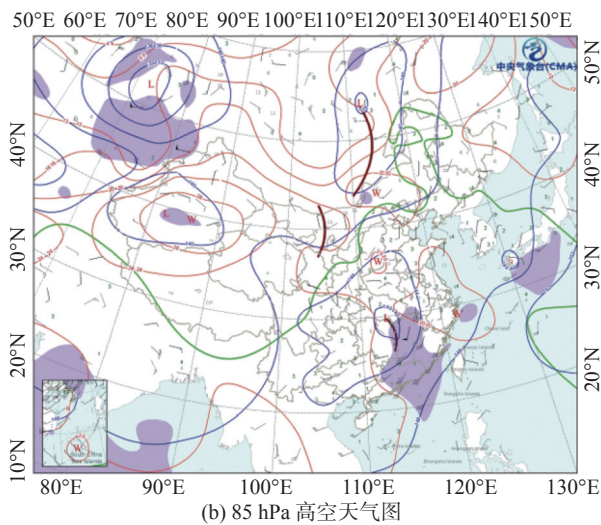
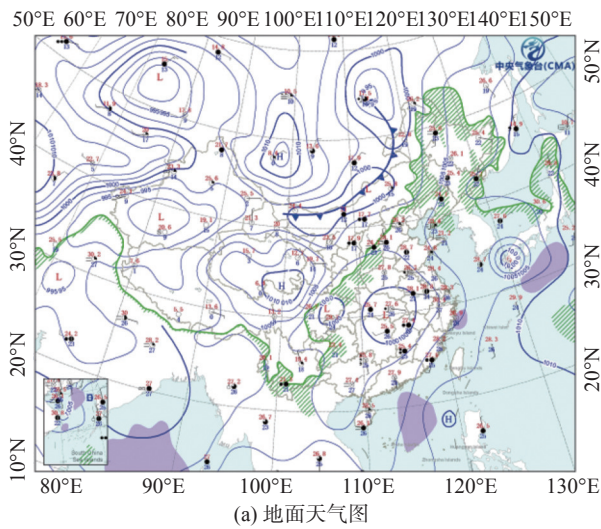


图 3 2022 年 7 月 4 日~7 日一次天气过程的天气形势

Fig. 3 Synoptic charts for weather process from July 4 to July 7 of 2022

范围内的缺测; 7 月 6 日~7 日, 随着低压中心北抬, 高空的西南大风区覆盖观测地点, 天气转为多云, 则 1 km 以上的高空出现缺测。而风廓线雷达则完整地记录了随着地面低压中心和高空西南大风区的移动, 高空风动量下传, 使得边界层内风速先增大后减小, 地面到 3 km 高度的风向由南风偏转为西南风的风场转变全过程。总的来看, 风廓线雷达对各类天气条件的适应性更好。

### 3.2 垂直廓线特征

对两种测风设备在全观测时段内平均的风速、风向垂直廓线进行对比, 如图 5 所示。由图可知, 就无量纲风速廓线而言, 两种测风设备在全高度层均呈现基本一致的统计结果, 大气边界层内风速随高

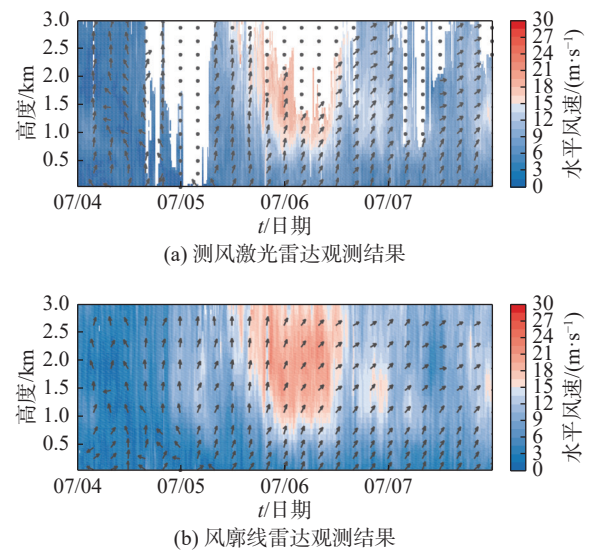


图 4 2022 年 7 月 4 日~7 日数据获取情况对比

Fig. 4 Data acquisition comparison between wind lidar and wind profiler radar from July 4 to July 7 of 2022

度上升而增大; 大气边界层上风速随高度上升先增大后减小, 出现类似低空急流的形态。上述廓线形态被再分析资料所再现, 另外高空气象站同期的风速廓线统计结果在大气边界层内与两种测风设备基本重合, 验证了雷达反演风速的有效性。在 2 000 m 高度以上, 高空气象站与两种测风设备的  $V(z)$  形态出现偏离; 1 000 m 高度以下, 再分析资料的  $V(z)$  形态也逐渐出现偏离, 可能原因在于本次收集的高空气象站资料在大气边界层上只有 700 hPa 一层, 对 1 500~3 000 m 高度范围内的风速廓线形态描述不够精细; 加之本次观测地点位于皖南山区,  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的再分析资料对区域内小尺度地形的刻画不够准确, 导致再分析资料中的低层风速偏小。

另外, 就风向随高度的变化而言, 将两种测风设备的风向结果按照每  $10^\circ$  扇区进行出现频率统计, 取频率最高的风速扇区进行比较。如图 5 所示, 随高度升高, 两种测风设备均出现主导风向轻微偏转的现象: 1 000 m 以下的低空主要为  $220^\circ$  偏西南风, 1 000~1 500 m 逐渐右偏, 大气边界层之上基本稳定  $240^\circ \sim 250^\circ$  偏西风, 高空风向比低空风向大致右偏了  $20^\circ$ ; 上述特征与高空气象站、再分析资料吻合, 从而验证了雷达反演风向的有效性。另外, 500~2 500 m 高度范围内的相同高度上, 两种测风设备之间, 以及测风设备与高空气象站、再分析资料之间的风向偏差普遍小于  $20^\circ$ , 与已有研究成果基本一致。

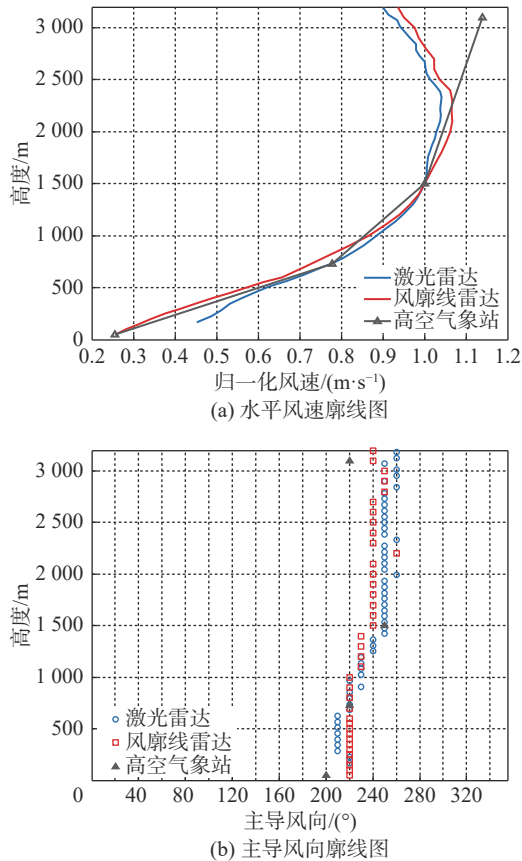


图 5 垂直廓线特征对比

Fig. 5 Vertical profile comparison between wind lidar and wind profiler radar

### 3.3 时间变化特征

以 1 500 m 高度为例,对两种测风设备的风速、风向时间变化特征进行对比,如图 6 所示。由图可知,两种测风设备呈现基本一致的逐日、多日波动特征和整体变化趋势,并且与再分析资料相吻合。观测期间因天气系统生消、移动引起的风速、风向突变时段在不同设备的观测结果以及再分析资料中均能相互印证。值得注意的是,在某些时段内,风廓线雷达反演结果出现持续振荡的形态,可能与大气湍流活动以及本文所用风廓线雷达的信号处理算法有关。其他高度层的对比结果相似。

进一步,对测风激光雷达和风廓线雷达结果取 1 h 平均后,与再分析资料结果一同统计一维时间序列的相关统计参数,取 500 m、1 000 m、1 500 m、2 000 m、2 500 m 和 3 000 m 作为特征高度,统计结果如表 2 和表 3 所示。就风速而言,以中位数、极差、标准差、相关系数对比,在 1 000 ~ 2 500 m 高度之间,测风激

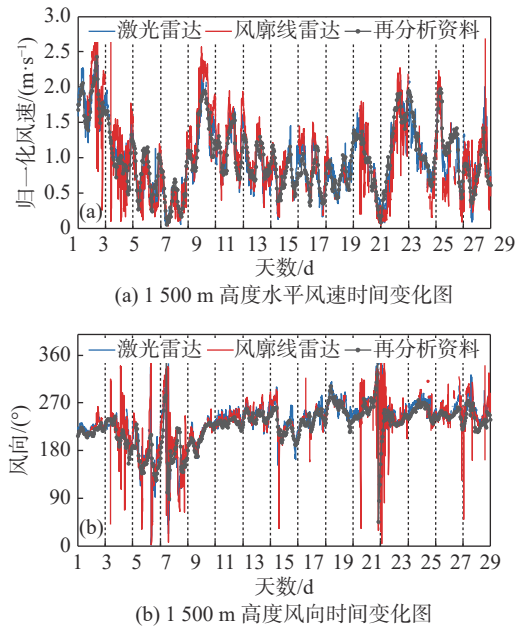


图 6 时间变化特征对比

Fig. 6 Temporal variation comparison between wind lidar and wind profiler radar

光雷达的统计特征与再分析资料更接近,中位数、极差、标准差之间的一致性更高,并且与再分析资料之间的相关性更好。风廓线雷达的差距主要表现为极差和标准差等两个指标整体偏大,这源于图 6 所示的持续振荡现象,同时也造成时间序列中的峰值个数偏多,反映出本次风廓线雷达反演风速结果中可能包含了更高频的信号或者噪声,使用前需要进行滤波,观测稳定性不及测风激光雷达。但两种测风设备之间相关系数维持在 0.84 以上,具有较高的同步性。在其他高度上,两种测风设备之间的偏差有所增大,相关系数下降,原因在于 500 m 低空时风廓线雷达观测受到近地面较旺盛湍流的影响,回波信号中包含更多干扰,导致反演结果可能偏离真实值。而 3 000 m 高空时测风激光雷达观测获取率降低,用于对比的样本数显著减少,导致统计指标可能出现偏差。就风向而言,同样表现为测风激光雷达的统计特征与再分析资料更接近,但两种测风设备之间,以及与再分析资料之间的相关系数不及风速。

### 3.4 讨论

综上所述,测风激光雷达与风廓线雷达各有优势与不足。测风激光雷达测风精度较高,在晴空时段可以获得 3 km 高度范围内的完整观测结果;但微米波长的激光能量容易受到大气中的云滴、雨滴衰



表 2 风速统计指标对比

Tab. 2 Comparison of statistical indicators of wind speed

高度/m	500			1 000			1 500			2 000			2 500			3 000		
时间 序列	测风激 光雷达	风廓线再分析 雷达	再分析 资料	测风激 光雷达	风廓线再分析 雷达	再分析 资料	测风激 光雷达	风廓线再分析 雷达	再分析 资料	测风激 光雷达	风廓线再分析 雷达	再分析 资料	测风激 光雷达	风廓线再分析 雷达	再分析 资料	测风激 光雷达	风廓线再分析 雷达	再分析 资料
中位数	1.00	0.94	0.94	0.93	0.92	0.92	0.93	0.95	0.94	0.94	0.96	0.93	0.97	0.99	0.95	1.02	0.97	0.95
极差	2.64	2.73	2.98	2.58	2.74	2.12	2.42	2.75	2.38	2.32	2.56	2.25	2.30	2.39	2.29	2.24	2.66	2.21
标准差	0.42	0.55	0.48	0.49	0.56	0.43	0.49	0.56	0.45	0.47	0.54	0.46	0.46	0.51	0.44	0.45	0.49	0.43
峰值个 数/个	166	145	134	149	124	127	137	127	109	127	143	106	104	141	103	46	147	103
相关 系数*	0.752	0.691/ 0.509		0.902	0.838/ 0.787		0.916	0.899/ 0.833		0.908	0.921/ 0.863		0.848	0.919/ 0.831		0.801	0.907/ 0.796	

注: “\*” 第一个数值表示测风激光雷达与风廓线雷达之间的相关系数; “/” 前后分别表示测风激光雷达与再分析资料, 风廓线雷达与再分析资料之间的相关系数。

表 3 风向统计指标对比

Tab. 3 Comparison of statistical indicators of wind direction

高度/m	500			1 000			1 500			2 000			2 500			3 000		
时间 序列	测风激 光雷达	风廓线再分析 雷达	再分析 资料	测风激 光雷达	风廓线再分析 雷达	再分析 资料	测风激 光雷达	风廓线再分析 雷达	再分析 资料	测风激 光雷达	风廓线再分析 雷达	再分析 资料	测风激 光雷达	风廓线再分析 雷达	再分析 资料	激光 雷达	风廓线再分析 雷达	再分析 资料
标准差	0.32	0.35	0.43	0.30	0.35	0.39	0.28	0.32	0.33	0.27	0.31	0.31	0.27	0.30	0.29	0.25	0.32	0.29
峰值个 数/个	194	159	137	159	133	129	146	127	114	132	137	117	98	135	114	54	151	114
相关 系数*	0.496	0.394/ 0.315		0.737	0.706/ 0.686		0.794	0.696/ 0.666		0.836	0.771/ 0.760		0.793	0.894/ 0.794		0.794	0.876/ 0.775	

注: “\*” 第一个数值表示激光雷达与风廓线雷达之间的相关系数; “/” 前后分别表示激光雷达与再分析资料, 风廓线雷达与再分析资料之间的相关系数。

减, 因此, 对天气变化较为敏感, 数据获取率随着观测高度的升高出现下降趋势。风廓线雷达的分米波长穿透性更强, 对各类天气条件的适应性更好, 最大探测高度持续稳定在 3 km 甚至更高, 但风廓线雷达在低空观测时包含更多干扰, 测风精度不及测风激光雷达。因此, 在空中风力发电站工程的前期规划和可行性研究阶段, 可以根据工程地点的气候状况, 在干旱、半干旱地区以测风激光雷达为主要测风设备开展周年的高空风资源调查, 充分发挥测风激光雷达晴空观测优势, 获取现场较为精确的测风资料; 在湿润、多雨地区则以风廓线雷达为主, 在观测之前用测风激光雷达对风廓线雷达进行标定, 控制风廓线雷达的测风精度。在后期调试和投运阶段, 可以以风廓线雷达为主, 或者风廓线雷达与测风激光雷达联合观测, 确保 AWES 系统在空中运行期间实时

获得全高度范围内的风速、风向廓线, 以更好地支持空地协同控制与恶劣天气下的紧急回收。

另一方面, AWES 技术对测风设备的测风精度和数据获取率均有较高要求, 红外线或微波等单一电磁波段的测风设备难以兼顾全部的测风需求。在下一步的研究中可以选择兼顾测风准确性与雨雾穿透性的毫米波开发新型测风雷达; 也可以考虑研制多电磁波段的新观测设备, 在同一设备中整合不同波段的优势, 避免不同设备之间的系统性偏差及额外的采购、运维成本。

#### 4 结论

近年来, 高空风力发电技术已经成为国内外工程实践以及科学研究的热点。2023 年, 国家重点研发计划项目“大型伞梯式陆基高空风力发电关键技

术及装备”立项,将推动我国千米级高空风能发电原创技术策源地建设和产业发展。本文以某高空风能发电示范工程为研究对象,针对该项目中 AWES 系统获批的运行高度范围(3 km 以下),开展测风激光雷达与风廓线雷达的对比观测试验,分析不同设备的数据获取率、垂直廓线特征和时间变化特征,取得如下结论:

1)大气边界层内,测风激光雷达全时段内的平均数据获取率随高度升高逐步递减至 0.9,在大气边界层之上,数据获取率迅速下降,到达 3 000 m 高度时已不足 0.4;风廓线雷达在全高度层的平均数据获取率均维持在 0.98 以上,具有更好的观测适应性。

2)测风激光雷达和风廓线雷达在全观测时段内平均的风速、风向垂直廓线具有一致性,均表现为大气边界层内风速随高度上升而增大,大气边界层上风速随高度上升先增大后减小,出现低空急流形态;1 000 m 以下的低空主要为 220°偏西南风,1 000 ~ 1 500 m 逐渐右偏,大气边界层之上基本稳定 240°~250°偏西风,高空风向比低空风向大致右偏了 20°;上述廓线形态被再分析资料和高空气象站同期探空资料所验证。

3)测风激光雷达和风廓线雷达的反演结果呈现基本一致的逐日、多日波动特征和整体变化趋势,在 1 000~2 500 m 高度之间,测风激光雷达的统计特征与再分析资料更接近,中位数、极差、标准差之间的一致性更高,并且与再分析资料之间的相关性更好;风廓线雷达的极差和标准差等两个指标整体偏大;500 m 低空时风廓线雷达观测受到近地面较旺盛湍流的影响,回波信号中包含更多干扰,导致反演结果可能偏离真实值,测风精度不及测风激光雷达。

4)在高空风能电站工程的不同阶段,应根据项目所在地的气候状况与具体的观测需求,合理选择测风设备,科学设置测风方式。

#### 参考文献:

- [1] CHERUBINI A, PAPINI A, VERTECHY R, et al. Airborne wind energy systems: a review of the technologies [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2015, 51: 1461-1476. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.053.
- [2] SCHMEHL R. Airborne wind energy: advances in technology development and research [M]. Singapore: Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-981-10-1947-0.
- [3] ARCHER C L, CALDEIRA K. Global assessment of high-altitude wind power [J]. *Energies*, 2009, 2(2): 307-319. DOI: 10.3390/en20200307.
- [4] CANALE M, FAGIANO L, MILANESE M. KiteGen: a revolution in wind energy generation [J]. *Energy*, 2009, 34(3): 355-361. DOI: 10.1016/j.energy.2008.10.003.
- [5] KOLAR J W, FRIEDLI T, KRISMER F, et al. Conceptualization and multiobjective optimization of the electric system of an airborne wind turbine [J]. *IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics*, 2013, 1(2): 73-103. DOI: 10.1109/JESTPE.2013.2269672.
- [6] SAEED M, KIM M H. Aerodynamic performance analysis of an airborne wind turbine system with NREL phase IV rotor [J]. *Energy conversion and management*, 2017, 134: 278-289. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.12.021.
- [7] WIJNJA J, SCHMEHL R, DE BREUKER R, et al. Aeroelastic analysis of a large airborne wind turbine [J]. *Journal of guidance, control, and dynamics*, 2018, 41(11): 2374-2385. DOI: 10.2514/1.G001663.
- [8] 韩爽,刘杉. 高空风力发电关键技术、现状及发展趋势 [J/OL]. 分布式能源, 1-9 [2024-01-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1427.tk.20231206.1329.002.html>.  
HAN S, LIU S. Key technologies, current status and development trends of high-altitude wind power generation [J/OL]. *Distributed energy*, 1-9 [2024-01-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1427.tk.20231206.1329.002.html>.
- [9] WEBER J, MARQUIS M, COOPERMAN A, et al. Airborne wind energy [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2021.
- [10] SOMMERFELD M, CRAWFORD C, MONAHAN A, et al. LiDAR-based characterization of mid-altitude wind conditions for airborne wind energy systems [J]. *Wind energy*, 2019, 22(8): 1101-1120. DOI: 10.1002/we.2343.
- [11] SOMMERFELD M, DÖRENKÄMPER M, STEINFELD G, et al. Improving mesoscale wind speed forecasts using lidar-based observation nudging for airborne wind energy systems [J]. *Wind energy science*, 2019, 4(4): 563-580. DOI: 10.5194/wes-4-563-2019.
- [12] 王大鹏,孙强,刘俊,等. 风廓线雷达数据误差分析评估 [J]. *气象水文海洋仪器*, 2021, 38(3): 5-8. DOI: 10.19441/j.cnki.issn1006-009x.2021.03.002.  
WANG D P, SUN Q, LIU J, et al. Analysis and evaluation for data error of wind profile radar [J]. *Meteorological, hydrological and marine instruments*, 2021, 38(3): 5-8. DOI: 10.19441/j.cnki.issn1006-009x.2021.03.002.
- [13] 康雪,许晨,李愉. 用L波段探空测风雷达评估风廓线雷达测风准确性 [J]. *成都信息工程大学学报*, 2021, 36(3): 293-299. DOI: 10.16836/j.cnki.jcuit.2021.03.009.  
KANG X, XU C, LI Y. Accuracy estimation of wind profile radar by L-band radar [J]. *Journal of Chengdu University of*



- Information Technology, 2021, 36(3): 293-299. DOI: 10.16836/j.cnki.jcuit.2021.03.009.
- [14] 方桃妮, 黄艳, 叶妍婷, 等. 边界层风廓线雷达资料在浙中强对流天气中的应用 [J]. 气象科技, 2022, 50(3): 369-379. DOI: 10.19517/j.1671-6345.20210006.
- FANG T N, HUANG Y, YE Y T, et al. Application of boundary wind profile radar to severe convective weather forecast in central Zhejiang [J]. Meteorological science and technology, 2022, 50(3): 369-379. DOI: 10.19517/j.1671-6345.20210006.
- [15] 吴俊杰, 方璘王昊, 张中锋, 等. 面向机场的多普勒激光雷达风场反演技术研究 [J]. 航空计算技术, 2020, 50(6): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1671-654X.2020.06.001.
- WU J J, FANG L W H, ZHANG Z F, et al. Research on airport-oriented doppler lidar wind field inversion technology [J]. Aeronautical computing technique, 2020, 50(6): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1671-654X.2020.06.001.
- [16] 吕明华, 闫江雨, 姚仁太, 等. 风向的统计方法研究 [J]. 气象与环境学报, 2012, 28(3): 83-89. DOI: 10.3969/j.issn.1673-503X.2012.03.015.
- LÜ M H, YAN J Y, YAO R T, et al. Study on the statistical method of wind direction [J]. Journal of meteorology and environment, 2012, 28(3): 83-89. DOI: 10.3969/j.issn.1673-503X.2012.03.015.
- [17] LUNNEY E, BAN M, DUIC N, et al. A state-of-the-art review and feasibility analysis of high altitude wind power in northern Ireland [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2017, 68(2): 899-911. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.014.
- [18] BECHTLE P, SCHELBERGEN M, SCHMEHL R, et al. Airborne wind energy resource analysis [J]. Renewable energy, 2019, 141: 1103-1116. DOI: 10.1016/j.renene.2019.03.118.
- [19] SCHELBERGEN M, KALVERLA P C, SCHMEHL R, et al. Clustering wind profile shapes to estimate airborne wind energy production [J]. Wind energy science, 2020, 5(3): 1097-1120. DOI: 10.5194/wes-5-1097-2020.
- [20] ONEA F, MANOLACHE A I, GANEA D. Assessment of the black sea high-altitude wind energy [J]. Journal of marine science and engineering, 2022, 10(10): 1463. DOI: 10.3390/jmse10101463.

#### 作者简介:



蔡彦枫

#### 李晓宇

1991-, 女, 高级工程师, 清华大学动力工程专业博士, 主要从事

蔡彦枫 (第一作者, 通信作者)

1986-, 男, 高级工程师, 南京大学大气物理学与大气环境专业硕士, 主要从事高空风能资源分析、评估与预测以及风能捕获装置空气动力学研究工作(e-mail)caiyanfeng@gedi.com.cn。

高空风力发电设备寿命与安全研究工作(e-mail)xyli@cpecc.net。

#### 项目简介:

**项目名称** 大型伞梯式陆基高空风力发电关键技术及装备 (2023YFB4203400)

**承担单位** 中国电力工程顾问集团有限公司、西北工业大学、重庆交通大学、清华大学、华北电力大学、中国能源建设集团有限公司、中国科学院工程热物理研究所、上海中路(集团)有限公司、中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司

**项目概述** 大力开发和利用以风能为代表的新能源电力, 是我国确保国家能源安全和实现双碳目标的必然选择。21 世纪以来, 风力发电在我国得到了跨越式发展, 有力支撑了我国能源结构的转型发展。目前, 我国陆上风电、海上风电装机均居全球首位, 预计到 2030 年, 风电在我国电源装机中的占比将超过 21%。相较于海陆风能, 高空风能具有功率密度大、风向风能平稳等优势, 近年来已得到了国内外研究机构和企业广泛关注, 大规模开发利用潜力较大。根据风能捕获与机电能量转化方式的不同, 高空风电分为陆基和空基两种方式。考虑到装备重量等因素约束, 陆基高空风力发电在大型化量产上具有一定优势。目前, 国内外已完成的空基高空风电最大功率为 600 kW, 而我团队前期研发的伞梯式陆基高空风电机组, 已在安徽绩溪实现了单机 2.4 MW 的工程示范。瞄准机组未来的大型化、规模化发展, 伞梯式高空风电在实际运行过程仍暴露出风能高效捕获难、空地能量高效转换难、长时稳定控制难等诸多难题。亟需探明伞梯式陆基高空风力发电关键技术中的核心原理, 提出具有先进性的系统设计方案。瞄准高空风资源的开发利用, 突破高效风能捕获、高效能量传输、长时稳定协调控制等一系列技术难题, 建立大型伞梯式陆基高空风力发电理论体系, 提出全自主知识产权的大功率、高效、高可靠高空风力发电一体化解决方案, 研制 10 MW 样机并实现应用验证, 形成高空风力发电行业标准, 填补国内高空风力发电技术空白, 推动我国高空风力发电产业化发展。

**主要创新点** 本项目拟解决两项关键科学问题: (1)伞梯复杂流固耦合动力学机制与高效风能捕获机理; (2)高空风力发电系统的能量传递、耗散、转化机理及协同调控机制。拟攻克五项关键技术: (1)考虑高空风环境与柔性伞流-固耦合效应的高精度数值模拟方法及气动布局优化技术; (2)多变向载荷随向响应及重载分汇流高效高可靠传输技术; (3)强非恒定环境下发电组件全过程动态耦合仿真和全系统协同设计技术; (4)适应长时稳定高效运行的伞梯系统多目标优化控制技术; (5)大型伞梯式陆基高空风力发电装备一体化集成技术。

(编辑 孙舒)