

漂浮式激光雷达海上测风可靠性及影响因素研究

王浩^{1,2}, 易侃^{1,2}, 杜梦蛟², 薛洋洋¹, 顾晨³, 王彩霞⁴, 禹智斌⁵, 张秀芝⁶

(1. 中国三峡新能源(集团)股份有限公司, 北京 101149; 2. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 100038; 3. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434; 4. 青岛华航环境科技有限责任公司, 山东 青岛 266041; 5. 哈尔滨工业大学(深圳), 广东 深圳 518055; 6. 国家气候中心, 北京 100081)

摘 要: 基于漂浮式激光雷达与海上固定式测风塔同期的测风数据对比, 分析了漂浮式激光雷达海上测风的可靠性和潜在的误差来源。结果表明: 在对比观测期间, 漂浮式激光雷达在 150 m 及以下各个测量高度层的数据获取完整率均超过 98%。在 100 m 以下各测量高度层, 漂浮式激光雷达观测的 10 min 平均风速、极大风速和平均风向与固定式测风塔测量结果基本一致, 可决系数均超过 0.98, 平均相对偏差均在 7% 以内, 其中, 10 min 平均风速和风向的平均绝对偏差分别在 0.5 m/s 和 5° 以内。漂浮式激光雷达湍流强度的测量偏差较为明显, 主要集中在风速为 3 m/s 以下的低风速区, 平均绝对偏差在 0.012~0.014 之间。进一步研究表明, 在降雨期间漂浮式激光雷达的测量精度可能会受到一定影响, 而对测量高度、中高风速段不同风速大小和波浪高度等要素的影响并不明显。

关键词: 漂浮式激光雷达; 可靠性; 影响因素; 偏差

中图分类号: P714⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)05-0070-14

1 引言

风能作为一种纯净无污染的绿色能源, 是我国能源结构的重要组成部分。我国地域辽阔, 风能资源丰富, 风电产业在近十几年来迅速发展。相比于陆上风电, 海上风电具有储量大、利用效率高、不占用土地以及环境友好等特点, 有望成为未来风电产业的主力军^[1-3]。在海上风电开发过程中, 风资源评估是风电场选址的第一步, 风资源评估的准确性对于保障风电场开发运行的经济效益至关重要^[4]。目前, 在风电场开发海域内建造固定式测风塔是收集海上气象要素资料 and 开展风资源评估的常规手段^[5-6], 但海上测风塔的建造存在手续繁琐、造价高和施工难度大等问题^[7], 且随着海上风电由浅海向深海的发展, 海上测风塔的建设成本和技术难度势必会进一步增加^[8]。

随着气象数值模拟及数据融合技术的不断发展成熟, 利用气象再分析资料开展风资源评估的可靠性逐步提升^[9-10]。越来越多的海上风电项目开始尝试采用气象再分析资料来弥补测风塔的不足。与此同时, 以漂浮式激光雷达为代表的海上新型测风设备也日益受到关注。漂浮式激光雷达是将测风激光雷达置于海上漂浮式平台上, 以此进行指定区域的风电场风资源观测^[11]。相较海上固定式测风塔, 漂浮式激光雷达具有测量参数丰富、探测范围大、建造及运营维护成本低^[12]、安装布放速度快、投运周期短和使用灵活性高等优势^[13]。2005年, 测风激光雷达开始被应用于海上风电场的风资源评估。2009年, 世界上第一台漂浮式激光雷达测风装置完成组装并进行了相关测试和验证^[11]。此后, 多个欧美国家的企业和科研机构陆续推出海上测风激光雷达漂浮式装置的解决方案。

收稿日期: 2021-10-27; 修回日期: 2021-12-24。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1408004); 中国长江三峡集团有限公司科研项目(WWKY-2019-0223); 广东省基础与应用基础研究基金(2020B1515120056)。

作者简介: 王浩(1995-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事风资源评估方面研究。E-mail: wfsg312374@126.com

通讯作者: 易侃(1992-), 男, 工程师, 博士, 主要从事新能源气象科技研究。E-mail: yi_kan@ctg.com.cn

我国海上风电不断发展,尤其从近岸逐步向较深海域发展,亟需漂浮式激光雷达用于海上风资源评估的测风工作。值得注意的是,由于海浪和海风引起的漂浮式平台复杂的摇摆和运动,容易造成测风激光雷达激光光束的指向发生快速变化,从而产生风场测量误差^[14]。此外有研究表明,雨滴会影响测风激光雷达的多普勒风谱,雨滴落在激光雷达接收镜上会引起波前畸变^[15],因此,降雨也可能会影响激光雷达的测量精度^[16-17]。在实际工程应用中,有必要开展适合我国海域的漂浮式激光雷达的对比验证研究,评估漂浮式激光雷达在我国海域进行风资源评估的准确性及适用性。本研究通过在广东省阳江海域某海上风电开发场址内布放一台搭载有多普勒测风激光雷达设备的漂浮式观测平台,与场内一座海上固定式测风塔进行连续3 M的对比观测,旨在验证漂浮式激光雷达测量数据的可靠性,为其后续在海上风电领域的研究、优化和应用推广提供相应的科学依据。

2 设备介绍及数据处理方法

2.1 观测设备介绍

本研究所用的漂浮式激光雷达主要由浮标平台、系泊系统、供电系统、数据采集系统、姿态测量设备以及测风激光雷达系统、波浪传感器等气象水文观测传感器组成(见图1)。各组件的具体型号见表1,测风激光雷达的基本参数见表2。测风激光雷达设置风速和风向的测量高度分别为50 m、70 m、80 m、90 m、100 m、120 m、150 m和300 m。

固定式测风塔的主要观测设备有风速计、风向

标、温度计、湿度计、雨量计以及固定式声学测波设备,具体型号见表1。图2为本研究中的测风塔实物及设备安装示意图。为保证观测质量,避免气流畸变造成的影响,我们分别在20 m、50 m、70 m、80 m、90 m和100 m高度处155°和335°方向上加装支臂并对称安装两套风速计。在50 m和100 m高度处风速计的安装支臂最外侧再对称安装两套风向标(见图2b)。在20 m高度处各安装两套温度、湿度和气压传感器。由于安装在测风塔155°方向上的部分仪器损坏,本次对比测试仅使用测风塔335°方向各高度层支架上安装的仪器测量结果。

2.2 观测设备数据要素

本次对比测试地点为广东省阳江海域某海上风电开发场址内,漂浮式激光雷达与测风塔直线距离为351 m。同步观测的时间段为2021年1月24日—4月20日。研究期间共收集到12 528条数据,观测要素包括漂浮式激光雷达和测风塔的10 min平均风速(以下简称平均风速)、10 min极大风速(以下简称极大风速)、10 min风速标准差(以下简称风速标准差)、和10 min平均风向(以下简称平均风向)等风场要素,以及漂浮式平台的气温、降雨量、平均波高、最大波高、1/10波高和平均周期等要素,数据采集频率为10 min。此外,本研究还收集到2021年1月23日—2月21日安装在固定式测风塔底部支架的座底式声学测波设备的494条观测数据,包括平均波高、最大波高、1/10波高和平均周期等水文要素测量值,数据采集频率为60 min。

本次对比测试中,用于统计测风数据完整性的风场要素主要为50 m、70 m、80 m、90 m、100 m、



图1 漂浮式激光雷达实物图

Fig.1 Pictures of the floating lidar system

表1 漂浮式激光雷达及测风塔主要搭载设备型号

Tab.1 The type of equipment installed on the floating lidar system and meteorological mast

设备名称	设备组成	设备品牌	设备型号
漂浮式激光雷达	激光雷达测风系统	青岛华航环境科技有限责任公司	WindPrint V300 分体式激光雷达
	北斗(风数据)	上海复控华龙微系统技术有限公司	FHL6163
	风传感器	R.M.YOUNG	05106
	方位传感器	PNI	TCM2.5
	波浪传感器	山东省科学院海洋仪器仪表研究所	SBY1-1
	剖面海流计	阔龙	400K
	表层温盐传感器	YSI	600LS
	自动气象站	苏州斯威高科信息技术有限公司	SW600
	北斗(水文数据)	北京星桥恒远导航科技股份有限公司	SN2P110YX
	船舶自动识别系统	成都帝欣科技有限公司	DX-AIS-01
测风塔	风速计	THIES	First Class
	风向标	THIES	First Class
	固定式声学测波设备	Nortek	AWAC
	温度计	NRG	110S
	湿度计	NRG	BP-20
	气压计	NRG	RH-5
	雨量计	Campbell	TE525MM
	三维风速仪	Gill	WindMasterPro

120 m、150 m 和 300 m 高度处的平均风速和风向测量值,用于分析测量准确性和偏差影响因素的风场要素数据主要包括漂浮式激光雷达和测风塔 50 m、70 m、80 m、90 m 和 100 m 高度处的平均风速、极大风速、风速标准差测量值以及 50 m 和 100 m 高度处的平均风向测量值;此外,用于分析漂浮式激光雷达测风影响因素的数据还包括漂浮式激光雷达和座底式声学测波设备测量的平均波高和降雨量记录值等。

2.3 数据预处理方案

参照《海上风电场工程风能资源测量及海洋水文观测规范》(NB/T 31029—2019)和《风电场工程风能资源测量和评估技术规定》(NB/T 31147—2018),按照以下步骤对平均风速和平均风向数据进行检验。

(1)范围检验。对于平均风速在 0~40 m/s 内以及平均风向在 0~360°内的数据暂判定为合理值,超过上述范围的直接判定为异常值。

(2)合理性检验。对于暂判定为合理值的数据

继续按表 3 所列的合理性检验标准进行判定。符合检验标准的数据判定为合理值,不符合检验标准的相邻高度的数据均标记为异常值。

(3)塔影效应检验^[18]。计算漂浮式激光雷达与固定式测风塔各时间点对应的风速偏差,并绘制风速偏差随风向的分布图。当测风设备处于塔身下风向,即风向可能会对塔身产生潜在影响时,若风速偏差显著大于其他风向段,则认为该风向段内的观测数据受塔影效应影响明显,在分析时予以剔除。

2.4 评价指标

(1)湍流强度。湍流强度用来表示瞬时风速偏离平均风速的程度,是评价气流稳定程度的重要指标^[19],计算公式为:

$$I = \frac{S}{v} \quad (1)$$

式中: v 为平均风速,单位:m/s; S 为风速标准差。

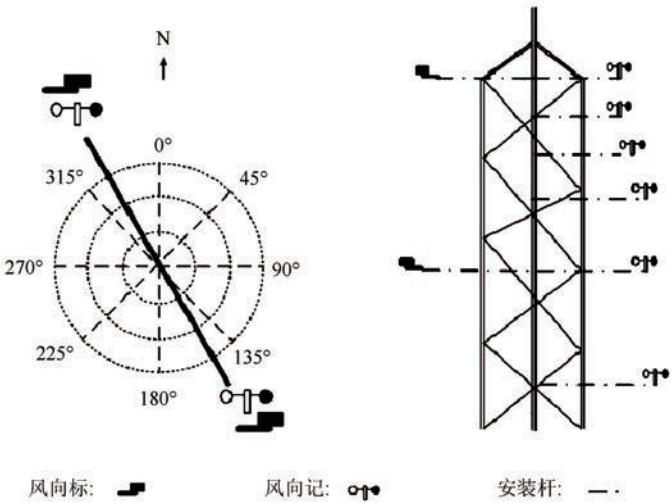
(2)线性回归。利用线性回归算法来拟合漂浮

表2 激光雷达基本性能参数
Tab.2 List of the lidar performance parameters

指标项	WindPrint V300分体式	备注
激光波长/nm	1 550	人眼安全不可见
脉冲宽度/ ns	100~400	可按需定制
单脉冲能量/ μ J	≥ 10	
数据更新速率/Hz	1~10(径向)	可软件设置
风速测量范围/(m/s)	0~75	指径向风速
风速测量精度/(m/s)	$< \pm 0.1$	指径向风速
探测距离/m	10~300	
距离分辨率	1 m 起可配置,最多可同时测 24 层(径向)	
扫描伺服精度	$\pm 0.1^\circ$	
数据产品	水平风速、垂直风速、风向、径向风速、PPI/RHI/CAPPI、后散射强度、当地温度、气压、相对湿度	可按需定制及增减
重量/kg	28.5(电气箱 14,光学箱 14.5)	
数据存储	1T 固态硬盘(内置),可存储 12 M 以上	
平均功耗/W	常温下 ≤ 40 ,制冷风扇启动时 ≤ 50	视外部温度环境浮动
电气箱体积/ mm^3	$288 \times 350 \times 126(\text{L} \times \text{W} \times \text{H})$	
光学箱体积/ mm^3	$224 \times 186 \times 335(\text{L} \times \text{W} \times \text{H})$	
工作环境	工作温度: $-40 \sim 60^\circ\text{C}$,相对湿度: $0 \sim 100\%$,海拔: $\leq 4\,000\text{ m}$	
环境保护	IP68	
通讯方式	以太网、无线网络、接口通讯	
激光人眼安全等级	Class 1M	



a. 测风塔实物图



b. 测风塔设备安装示意图

图2 测风塔实物(a)及测风塔设备安装示意图(b)

Fig.2 The meteorological mast (a) and its structure diagram (b)

式激光雷达与测风塔测量值,回归方程为:

$$F_i = ax_{l,i} + b \quad (2)$$

式中: $x_{l,i}$ 和 f_i 分别为漂浮式激光雷达测量值及对应回归方程预测值。选用系数(coefficient, a)、截距(intercept, b)和决定系数(coefficient of determination, R^2)来评价回归方程拟合效果,计算公式如下:

$$a = \frac{N \sum_{i=1}^N x_{l,i} x_{t,i} - \sum_{i=1}^N x_{l,i} \sum_{i=1}^N x_{t,i}}{N \sum_{i=1}^N x_{l,i}^2 - (\sum_{i=1}^N x_{l,i})^2} \quad (3)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{t,i} - ax_{l,i})}{N} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_{t,i} - f_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_{t,i} - \bar{x}_t)^2} \quad (5)$$

式中: $x_{l,i}$ 和 \bar{x}_t 分别为测风塔测量值及其均值; N 为总样本量。

(3) 选用平均绝对误差(Mean Absolute Error,

MAE)和平均相对误差(Mean Relative Error, MRE)来评价漂浮式激光雷达的测量精度,计算公式分别为:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |x_{l,i} - x_{t,i}|}{N} \quad (6)$$

$$MRE = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N |x_{l,i} - x_{t,i}|}{x_{t,i}} \quad (7)$$

式中: $x_{l,i}$ 和 $x_{t,i}$ 分别为漂浮式激光雷达和测风塔测量值; N 为总样本量。

3 漂浮式激光雷达测风可靠性分析

为保证分析结果的可靠性,本研究利用上述数据预处理方法,对测风塔的测量数据进行预处理,对于不合理的数据进行剔除,结果见表3。在此基础上,我们对测风塔测量结果进行塔影效应分析。从图3可以看出,漂浮式激光雷达与固定式测风塔的风速偏差(雷达测值-测风塔测值)在 $140^\circ \sim 190^\circ$

表3 测风塔数据合理性检验

Tab.3 Rationality test of the meteorological mast results

合理范围	异常次数/总次数	比例/%
$0 \leq \text{平均风速} \leq 40 \text{ m/s}$	0/12 528	0
$0 \leq \text{平均风向} \leq 360^\circ$	0/12 528	0
100 m/90 m 高度平均风速差值 $<1 \text{ m/s}$	54/12 528	0.43
90 m/80 m 高度平均风速差值 $<1 \text{ m/s}$	83/12 528	0.66
80 m/70 m 高度平均风速差值 $<1 \text{ m/s}$	53/12 528	0.42
70 m/50 m 高度平均风速差值 $<2 \text{ m/s}$	8/12 528	0.06
100 m/50 m 高度平均风向差值 $<22.5^\circ$	223/12 528	1.78

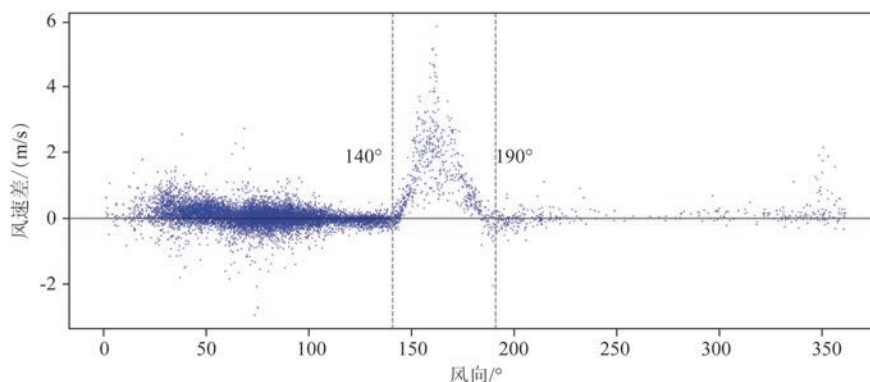


图3 漂浮式激光雷达与固定式测风塔风速测量偏差随不同风向的分布情况图

Fig.3 Distributions of wind speed deviations with different wind direction between the floating lidar system and meteorological mast

风向范围内异常显著。考虑到本研究所用的测风塔风速计布置在 335° 方向上(见图2b),来自相对方向的自由来流受塔架的干扰,导致测量结果出现较大的偏差。因此,可判定 $140^{\circ}\sim 190^{\circ}$ 为受塔影效应影响显著的风向范围,因此我们在后续分析中对这部分数据予以剔除。经数据预处理后的数据总量为11 319条。

3.1 漂浮式激光雷达测风数据完整性

表4为漂浮式激光雷达从各观测高度获取的测风数据完整率。在整个对比测试周期内,漂浮式激光雷达获取的150 m以内各个观测高度的测风数据的完整率均在98%以上,数据完整率随观测高度增

加而降低,300 m测量高度处的数据完整率下降显著。考虑到当前海上风机的轮毂高度普遍在150 m以内,因此漂浮式激光雷达观测数据的完整率总体满足当前风资源评估的应用需求。

3.2 漂浮式激光雷达测风准确性

本研究对比了各观测高度下漂浮式激光雷达与固定式测风塔测量结果的差异。结果表明,激光雷达观测的平均风向、平均风速和极大风速的测量值相对于测风塔观测值的MRE均在7%以内,平均风速和风向的MAE分别在0.5 m/s和 5° 以内,表明漂浮式激光雷达与固定式测风塔的测风精度基本一致。图4为100 m高度的漂浮式激光雷达与测风塔平均

表4 漂浮式激光雷达测风数据完整率

Tab.4 The integrity of the floating lidar system results

数据类别	测量高度/m							
	50	70	80	90	100	120	150	300
实测数据量	12 496	12 490	12 485	12 480	12 409	12 382	12 303	11 262
应测数据量	12 528	12 528	12 528	12 528	12 528	12 528	12 528	12 528
1月完整率/%	99.83	99.83	99.83	99.74	99.05	98.61	97.48	94.88
2月完整率/%	99.65	99.65	99.65	99.63	98.83	98.74	98.51	92.86
3月完整率/%	99.78	99.78	99.78	99.78	99.73	99.73	99.17	88.37
4月完整率/%	99.79	99.58	99.41	99.31	98.30	97.67	96.56	86.11
总完整率/%	99.74	99.7	99.66	99.62	99.05	98.83	98.2	89.89

注:统计时段为2021年1月24日—4月20日,其中1月和4月均为非完整月。

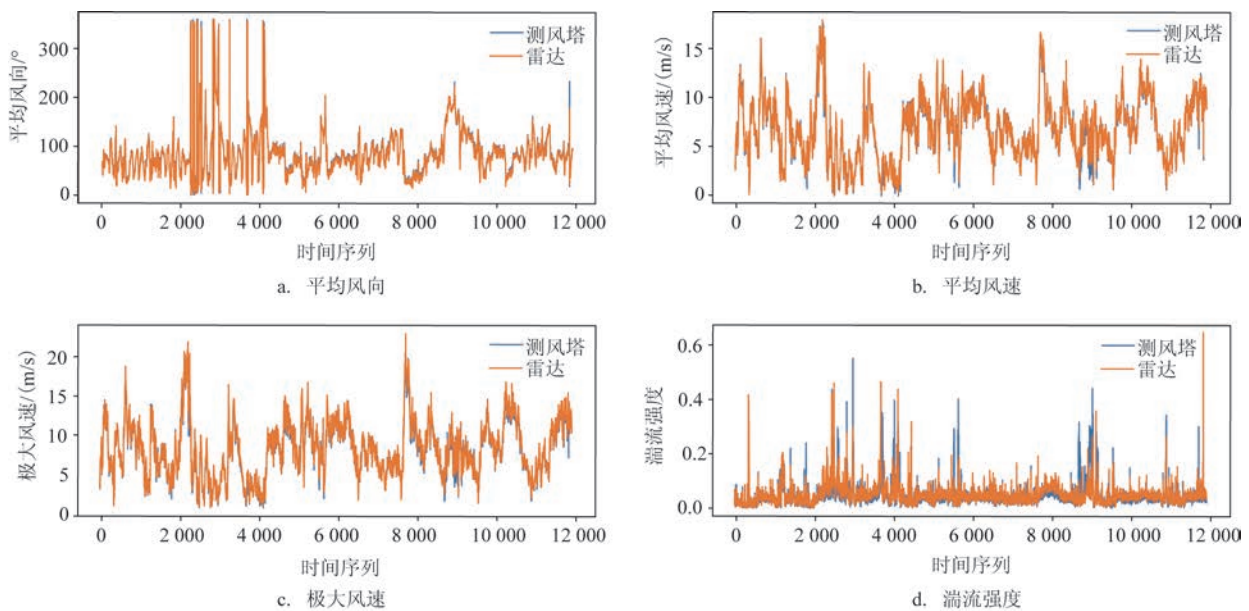


图4 100 m高度处漂浮式激光雷达与测风塔测量结果对比的时间序列图

Fig.4 The comparative analysis of measurement results between the floating lidar system and meteorological mast at 100 m height

风向(见图4a)、平均风速(见图4b)、极大风速(见图4c)和湍流强度(见图4d)的同步观测时序图。从图中可以看到,漂浮式激光雷达风速和风向的测量值与测风塔测量值具有较高的一致性,即使在风速为极值或风速和风向发生快速转变时,漂浮式激光雷达也具有很好的观测能力。漂浮式激光雷达测量的湍流强度与测风塔结果的整体趋势基本一致,但在湍流

强度较大时部分测量结果存在一定的偏差(见图4d)。

本研究对各高度处漂浮式激光雷达与测风塔的测风数据进行相关性分析。表5为各高度处测风数据的线性回归计算结果,图5a—c为100 m高度处测风数据的相关性分析图。

(1)平均风速相关性

各观测高度处漂浮式激光雷达与测风塔平均风

表5 漂浮式激光雷达与测风塔测风相关性分析

Tab.5 Correlation analysis between the floating lidar system and meteorological mast

高度/m	平均风速			极大风速			湍流强度			平均风向		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
50	1.002	-0.04	0.987	1.023	-0.011	0.985	1.009	0.008	0.61	1.001	-4.26	0.994
70	1.016	-0.04	0.99	1.027	-0.016	0.985	0.982	0.006	0.602	—	—	—
80	1.012	-0.037	0.99	1.026	-0.03	0.985	0.993	0.007	0.616	—	—	—
90	1.008	-0.025	0.991	1.027	-0.038	0.984	1.024	0.006	0.633	—	—	—
100	1.013	-0.042	0.992	1.033	-0.075	0.985	1.024	0.006	0.658	1.007	-3.25	0.995

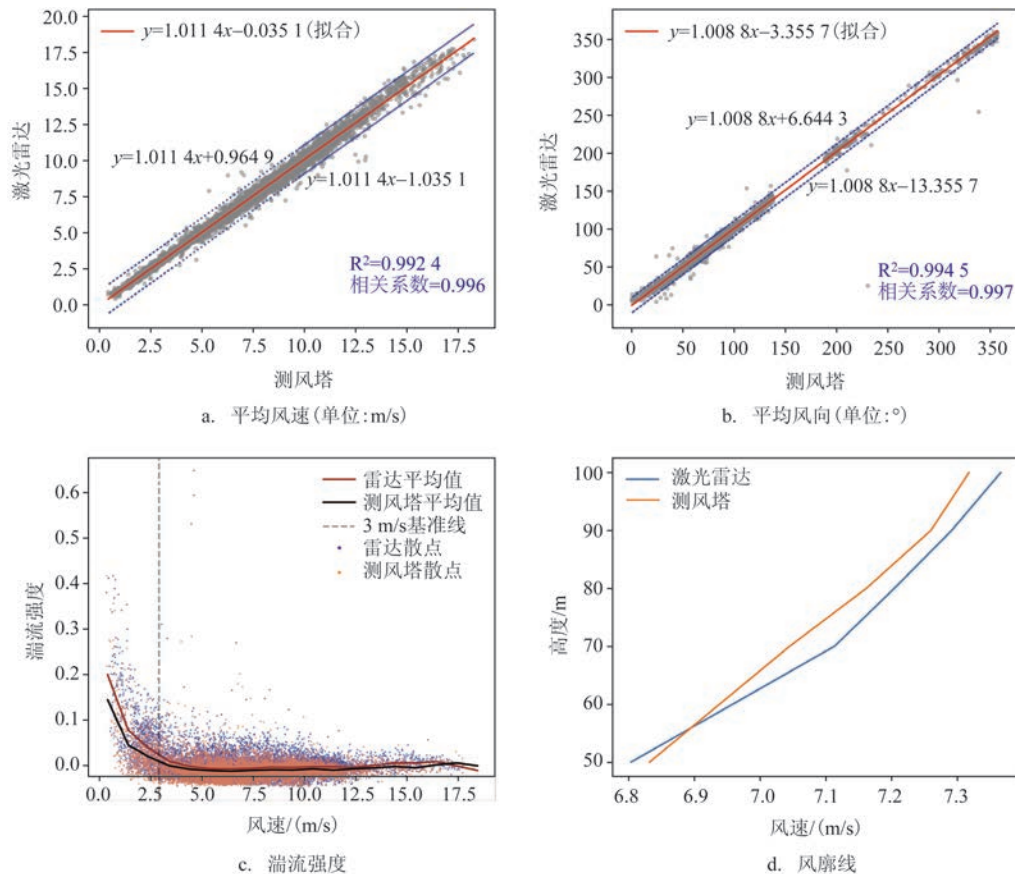


图5 100 m高度处漂浮式激光雷达与测风塔相关性分析图

Fig.5 Correlations of the measurement results between the floating lidar system and meteorological mast at 100m height

速测量值的相关性强,且偏移量很小,均在0.05 m/s以下。回归方程拟合效果好, R^2 均超过了0.98。图5a为100 m高度处平均风速相关性图,从图中可以看到,大部分数据均在回归方程预测结果一定的偏差范围内。图5d为利用100 m内各观测高度平均风速均值绘制的风廓线对比图。从图中可以看出,50 m高度处测风塔的风速测量值略高于激光雷达,60 m以上高度处测风塔的风速测量值略低于激光雷达。

(2)平均风向相关性

漂浮式激光雷达与测风塔的平均风向在50 m和100 m高度处同样表现出很好的相关性,相关系数均接近1,偏移量在4°左右。回归方程拟合效果好, R^2 均超过了0.99。图5b为100 m高度处平均风向相关性图,从图中可以看出,回归方程的预测偏差基本在 $\pm 10^\circ$ 内。

(3)湍流强度相关性

漂浮式激光雷达湍流强度测量的拟合效果相对较差,各对比高度上的 R^2 均在0.6~0.65之间,MAE均在0.012~0.014内。通过分析发现,低风速区(3 m/s以下)漂浮式激光雷达测得的湍流强度平均值高于测风塔,而在中高风速区两者测得的湍流强度差别不明显(见图5c)。进一步计算发现,各观测高度下低风速区湍流强度测量值的MAE均在0.035~0.039之间,中高风速区湍流强度测量值的MAE均在0.011~0.012之间。

综合上述分析结果可知,漂浮式激光雷达在平均风速、平均风向和极大风速的测量方面准确性高,但对于湍流强度的测量还有进一步提升的空间。值得注意的是,低风速区漂浮式激光雷达的湍流强度测量值比测风塔大,而在中高风速区二者的测量差异并不明显。

4 漂浮式激光雷达测风偏差影响因素及特性

4.1 环境要素对漂浮式激光雷达测风的影响

4.1.1 降雨

降雨会影响多普勒激光雷达的测量精度^[15]。我国海域特别是东南沿海多降雨天气,因此有必要评估降雨条件下漂浮式激光雷达的测量精度。在对比测试周期内共有251条降雨记录数据,利用这些数据进行偏差分析,结果见表6。从表中可以看出,除湍流强度外,降雨条件下漂浮式激光雷达在各观测高度的平均风速、平均风向以及极大风速测量偏差均有不同程度的增大,表明降雨在一定程度上会影响漂浮式激光雷达的测量精度。由于有降雨时的测风数据样本量较小,因此还需要收集更多的观测数据进行更全面的分析。

4.1.2 波浪

除降雨外,波浪引起漂浮式平台复杂的摇摆和运动也可能会影响漂浮式激光雷达的性能^[14]。为此,我们利用对比测试周期内收集到的平均波高数据,分析研究波浪对漂浮式激光雷达性能的影响。由于测风塔收集到的平均波高数据较少,因此我们在分析时采用漂浮式平台获取的平均波高数据。图6中蓝线和黄线分别为漂浮式平台和座底式声学测波设备获取的平均波高同步观测时序图。从图中可以看到,漂浮式平台测得的平均波高数据存在明显的系统偏差。经测试,以漂浮式平台和座底式声学测波设备获取的平均波高数据分别作为自变量和因变量,利用线性回归算法进行拟合,可以较好地修正前者数据中存在的系统偏差。图6中绿线为修正

表6 降雨对测量偏差的影响分析

Tab.6 Analysis of the effect of rainfall on measurement bias

高度/m	平均风速 MRE/%		极大风速 MRE/%		湍流强度 MRE/%		平均风向 MRE/%	
	降雨	非降雨	降雨	非降雨	降雨	非降雨	降雨	非降雨
50	4	3.5	6.6	4.6	23.5	27	11.1	6.9
70	4.3	3.2	6.8	4.5	25.1	25.9	—	—
80	4.3	3	7	4.3	28.1	26.7	—	—
90	4.3	2.8	6.9	4.2	30.1	27.1	—	—
100	4.3	2.7	7.1	4.2	29.8	27.2	10	4.7

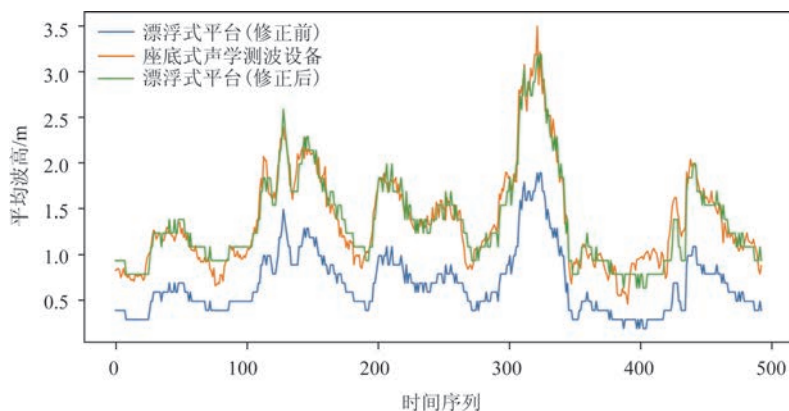


图6 漂浮式平台和座底式声学测波设备获取的平均波高同步观测时序图

Fig.6 The time series of mean wave height measured by seabed-based acoustic wave gauge and floating lidar system

后的漂浮式平台的平均波高数据,经计算,修正后平均波高的MRE为9.67%,而修正前的MRE为51.45%,测量偏差有明显改善,可用于进一步的分析研究。

剔除有降雨记录的数据后,进一步计算100 m高度处漂浮式激光雷达在不同平均波高下测得的平均风速、极大风速和湍流强度的MAE和MRE,结果见图7。图7a、7c和7e分别为100 m高度漂浮式激光雷达测得的平均风速、极大风速和湍流强度的MAE关于平均波高和测风塔平均风速的散点图,图7b、7d和7f为对应的MRE关于平均波高及测风塔平均风速的散点图,散点颜色代表各观测记录对应的测风塔平均风速大小,颜色越浅代表风速越高(最大风速为18.29 m/s,最小风速为0.45 m/s)。从图中可以看到,漂浮式激光雷达的测量偏差与平均波高之间并无明显的相关关系,相同风速条件下不同平均波高处测量偏差的分布无明显差异,说明波浪对漂浮式激光雷达的测量精度无明显影响。值得注意的是,图7b和7d显示低风速区平均风速和极大风速测量值的MRE较高,图7e和7f显示低风速区湍流强度测量值的MRE和MAE均较高,说明风速可能对漂浮式激光雷达的测量精度(特别是湍流强度)存在影响,其原因还需进一步分析。

4.2 漂浮式激光雷达测风误差特性

表7为不同测量高度处漂浮式激光雷达测量结果的偏差分析。从表中可以看到,100 m观测高度以内随着测量高度的增加,漂浮式激光雷达的平均风速、极大风速、平均风向的MRE及MAE均略有降

低,但基本可以忽略。此外,分析结果表明漂浮式激光雷达湍流强度的测量结果基本不受测量高度的影响。综合上述分析可知,漂浮式激光雷达的测风性能基本不受测量高度的影响。

鉴于风力发电的实际需求及4.1节的分析结果,我们剔除有降雨记录的数据后对测风塔获取的平均风速进行区间划分,并进一步分析不同风速条件下漂浮式激光雷达的测量精度。由于16 m/s及以上风速区间的样本总量较少,分析结果不具有代表性,因此在本研究中只分析15 m/s以内风速段的结果。

图8a—c分别记录了各观测高度处漂浮式激光雷达在不同风速区间平均风速、极大风速和湍流强度测量值的MAE和MRE折线图。从图中可以看出,不同高度下平均风速和极大风速测量值的MAE均随风速的增加而增大,MRE均随风速的增加而减小,MAE的变化范围分别为0.1~0.6 m/s和0.2~1 m/s。通过具体分析后发现,漂浮式激光雷达测得的平均风速和极大风速在12 m/s以内的MAE变化均不大,但由于3 m/s以内低风速区的风速测量值较低,从而导致其MRE偏大;同样,虽然12 m/s以上的高风速区的MAE偏大,但由于风速测量值较大,从而导致实际MRE较低。此外,不同高度下湍流强度测量值的MAE和MRE均随风速的增加而减小,特别是3 m/s以内的低风速区的MAE和MRE均较大。综上分析可知,漂浮式激光雷达湍流强度的测量受风速的影响较大,主要表现为低风速区湍流强度测量偏差较大,而平均风速和极大风速的测量受风速

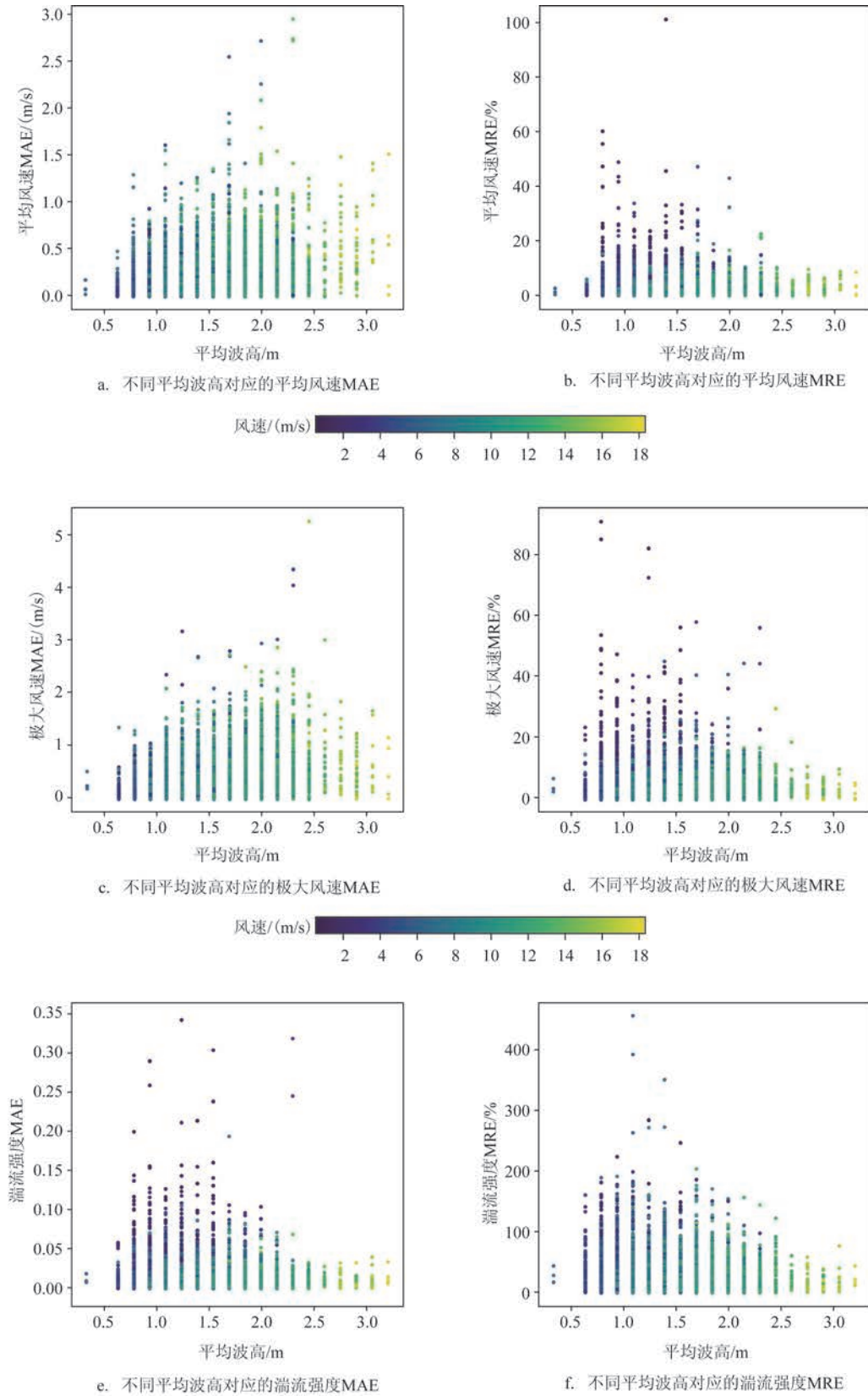


图7 100 m高度处不同风速及波浪条件的测量偏差分布图

Fig.7 Distributions of deviations from different wind speed and wave conditions at 100 m height

表 7 漂浮式激光雷达与固定式测风塔在不同高度下的测风数据偏差

高度/m	平均风速		极大风速		湍流强度	
	MAE/(m/s)	MRE/%	MAE/(m/s)	MRE/%	MAE	MRE/%
50	0.227	3.5	0.331	4.6	0.014	27
70	0.218	3.2	0.331	4.5	0.014	25.9
80	0.203	3	0.323	4.3	0.013	26.7
90	0.194	2.8	0.322	4.2	0.013	27.1
100	0.189	2.7	0.328	4.2	0.013	27.2

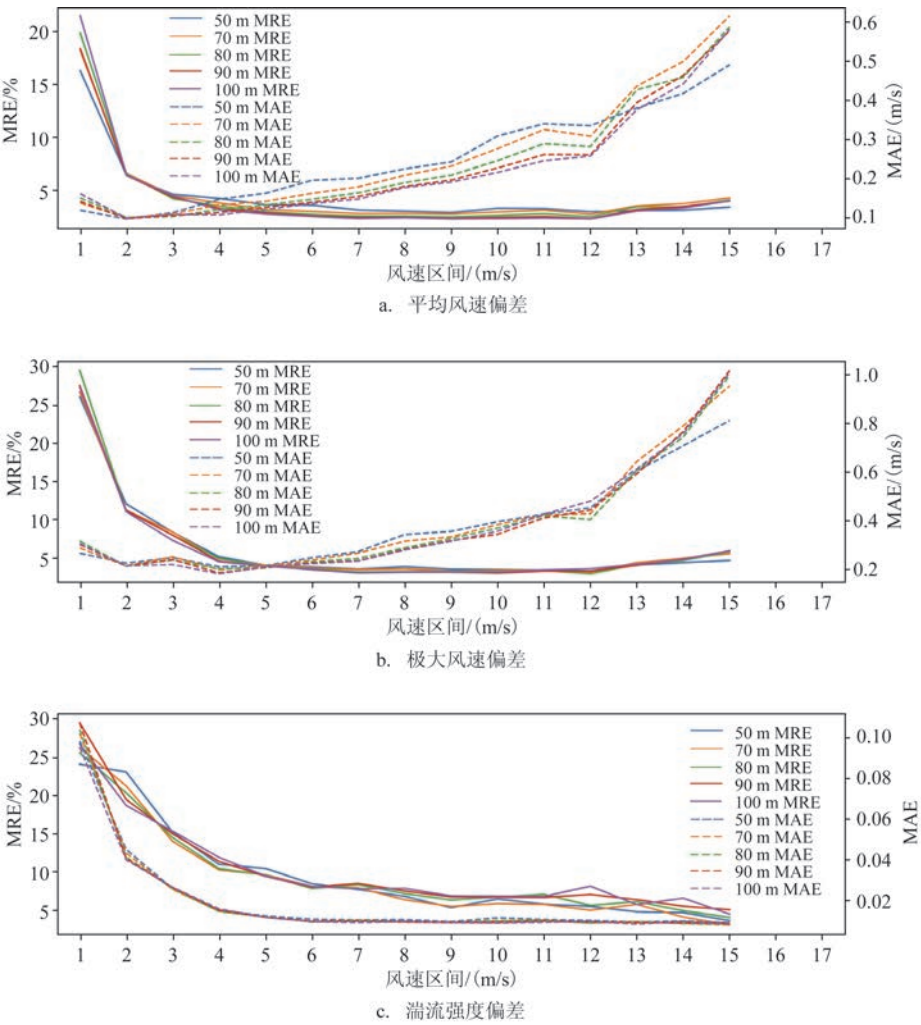


图 8 各高度不同风速区间内平均风速、极大风速和湍流强度的偏差分布

Fig.8 Distributions of mean wind speed ,maximum wind speed and turbulence intensity measurement deviations in different wind speed intervals at different heights

的影响较小。测总数据量的 5% 左右,分析结果在一定程度上可能无法准确反映测风激光雷达在高风速段的观测

由于风速超过 12 m/s 的区间的观测数据仅占观

偏差特性,后续需要收集更多的观测数据进行验证。

5 总结与讨论

本文利用广东省阳江海域某海上风电场址内固定式测风塔的同期观测数据,对漂浮式激光雷达在海上测风的可靠性进行了系统地检验评估,并在此基础上分析了漂浮式激光雷达海上测风的主要误差特性。结论如下:

(1)漂浮式激光雷达测量的风场数据完整率随观测高度的增加略有下降,但150 m以内均超过98%。平均风速、平均风向和极大风速的测量结果与测风塔基本一致,各测量高度平均相对偏差均在7%以内,平均风速和平均风向的平均绝对偏差分别在0.5 m/s和5°以内, R^2 均超过0.98;湍流强度测量偏差在低风速区相对较大,各测量高度处平均绝对偏差在0.012~0.014之间。综合来看,漂浮式激光雷达的风场测量结果相对准确可靠,可满足当前海上风能资源评估要求。

(2)影响漂浮式激光雷达测量精度的主要环境因素是降水,而波浪和测量高度对漂浮式激光雷达测量精度的影响较小。

(3)与固定式测风塔相比,漂浮式激光雷达的风测量偏差主要集中在3 m/s以下低风速段,主要表现为低风速区激光雷达测得的湍流强度显著高于测风塔测量结果,这可能与测风塔本身在低风速区的测量精度有关。

本文的研究结果在一定程度上证明了漂浮式激光雷达在海上风能资源测量中的性能相对准确和可靠,可满足当前风资源评估的要求,但本文的分析研究还存在一些不足。例如,由于12 m/s以上高风速区的测量样本量较少,后续需要针对漂浮式激光雷达在高风速段的偏差特性开展进一步分析;在分析降水对漂浮式激光雷达的影响时也受到降水时间段数据量较少的限制,未来需要收集更多的降水观测数据进行更全面的测量误差分析;需要进一步考虑不同影响因素之间的联合效应对测量误差的影响。

值得注意的是,本研究主要是针对漂浮式激光雷达与固定式测风塔的测量结果比较,由于测风塔

的测量精度本身存在一定误差,因此,两种设备在3 m/s以下低风速段的对比结果偏差并不能完全归因于激光雷达的测量精度偏差。考虑到海上风能资源评估主要关注的是能带来发电效益的风速段测量结果,因此3 m/s以下低风速段的测量偏差对风能资源评估结果的影响较小。

综上所述,通过与海上固定式测风塔的对比,漂浮式激光雷达对主要风能资源测量要素的观测精度基本满足海上风电的应用需求。针对本研究存在的不足,后续将进一步收集数据、改进研究方法并补充测风塔可靠性检验,以提升研究结果的可靠性和准确性,为漂浮式激光雷达的提升优化提供科学依据。

参考文献:

- [1] 徐晖. “十四五”进入新能源高质量发展新阶段[J]. 电器工业, 2021(3): 1.
XU H. 'The 14th Five-Year Plan' steps into a new stage for high-quality development of new energies[J]. China Electrical Equipment Industry, 2021(3): 1.
- [2] 易侃, 张子良, 张皓, 等. 海上风能资源评估数值模拟技术现状及发展趋势[J]. 分布式能源, 2021, 6(1): 1-6.
YI K, ZHANG Z L, ZHANG H, et al. Technical status and development trends of numerical modeling for offshore wind resource assessment[J]. Distributed Energy, 2021, 6(1): 1-6.
- [3] 王秀强. 朝阳之晖, 与时并明——2020年中国风电行业回顾与展望[J]. 能源, 2021(2): 60-65.
WANG X Q. The rising sun shining with time—review and prospect of China's wind power industry in 2020[J]. Energy, 2021 (2): 60-65.
- [4] 张德. 风能资源数值模拟及其在中国风能资源评估中的应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
ZHANG D. Study on wind energy numerical simulation and its application to wind energy resources assessment in China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.
- [5] 李正泉, 宋丽莉, 马浩, 等. 海上风能资源观测与评估研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(8): 800-810.
LI Z Q, SONG L L, MA H, et al. Review of methodologies for offshore wind resource observation and assessment[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(8): 800-810.
- [6] COURTNEY M S, HASAGER C B. Remote sensing technologies for measuring offshore wind[M]//NG C, RAN L. Offshore Wind Farms: Technologies, Design and Operation. Amsterdam: Elsevier, 2016: 59-82.
- [7] 王强, 王通, 路继宁. Fraunhofer漂浮式雷达与固定式测风塔测试阶段结果对比[J]. 海岸工程, 2020, 39(2): 130-141.

- WANG Q, WANG T, LU J N. Comparison of the data measured by Fraunhofer IWES buoy and fixed wind tower in testing stage[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(2): 130-141.
- [8] 崔东岭, 摆念宗. 海上风电与陆上风电差异性分析(上)[J]. 风能, 2019(5): 74-76.
- CUI D L, BAI N Z. Study on the diversity between offshore and onshore wind power (Part I)[J]. Wind Energy, 2019(5): 74-76.
- [9] 孙稚权, 项杰, 管玉平. 基于ERA-interim资料中国近海风能资源时空分布[J]. 海洋预报, 2016, 33(3): 50-56.
- SUN Z Q, XIANG J, GUAN Y P. Wind energy in the offshore areas of China based on ERA-interim reanalysis data[J]. Marine Forecasts, 2016, 33(3): 50-56.
- [10] 高成志, 郑崇伟, 陈璇. 基于CCMP风场的中国近海风能资源的长期变化分析[J]. 海洋预报, 2017, 34(5): 27-35.
- GAO C Z, ZHENG C W, CHEN X. Long-term trend analysis of wind energy resource in the China Sea and adjacent waters based on the CCMP wind data[J]. Marine Forecasts, 2017, 34(5): 27-35.
- [11] 黄小祥, 陶英佳, 官明开. 海上风电漂浮式激光雷达测风发展研究[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(10): 57-58.
- HUANG X X, TAO Y J, GUAN M K. Study on the development of the wind measurement using floating lidar in offshore wind power[J]. China Water Transport, 2019, 19(10): 57-58.
- [12] HSUAN C Y, TASI Y S, KE J H, et al. Validation and measurements of floating LiDAR for nearshore wind resource assessment application[J]. Energy Procedia, 2014, 61: 1699-1702.
- [13] 薛洋洋. 新型组合式FLiDAR浮标设计及运动响应研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
- XUE Y Y. Concept design and investigation on motion performance of an Innovative triple-hull-combined FLiDAR buoy [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017.
- [14] GOTTSCHALL J, GRIBBEN B, STEIN D, et al. Floating lidar as an advanced offshore wind speed measurement technique: current technology status and gap analysis in regard to full maturity[J]. WIREs Energy and Environment, 2017, 6(5): e250.
- [15] 魏天问, 夏海云. 基于相干多普勒激光雷达的风雨同时探测[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(S2): 208-212.
- WEI T W, XIA H Y. Simultaneous wind and rainfall detection using coherent Doppler lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(S2): 208-212.
- [16] WEI T W, XIA H Y, HU J J, et al. Simultaneous wind and rainfall detection by power spectrum analysis using a VAD scanning coherent Doppler lidar[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 31235-31245.
- [17] AITKEN M L, RHODES M E, LUNDQUIST J K. Performance of a wind-profiling lidar in the region of wind turbine rotor disks[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2012, 29(3): 347-355.
- [18] 温斌荣, 魏莎, 魏克湘, 等. 风切变和塔影效应对风力机输出功率的影响[J]. 机械工程学报, 2018, 54(10): 124-132.
- WEN B R, WEI S, WEI K X, et al. Influences of wind shear and tower shadow on the power output of wind turbine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(10): 124-132.
- [19] 王乔乔, 张秀芝, 王尚昆. Windcube激光雷达与测风塔测风结果对比[J]. 气象科技, 2013, 41(1): 20-26.
- WANG Q Q, ZHANG X Z, WANG S K. Comparison between Windcube laser radar and wind tower data[J]. Meteorological Science and Technology, 2013, 41(1): 20-26.

Study on the reliability and influencing factors using floating lidar systems for offshore wind measurement

WANG Hao^{1,2}, YI Kan^{1,2}, DU Mengjiao², XUE Yangyang¹, GU Chen³, WANG Caixia⁴,
YU Zhibin⁵, ZHANG Xiuzhi⁶

(1. China Three Gorges Renewables (Group) Co., Ltd, Beijing 101149, China; 2. Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 100083, China; 3. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China; 4. Qingdao Huahang Seaglet Environmental Technology Ltd. Qingdao 266041, China; 5. Harbin Institute of Technology, Nanshan District, Shenzhen 518055, China; 6. National Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Using the simultaneous wind measurement results from the floating lidar systems (FLS) and offshore meteorological mast, this paper analyzes the reliability and potential error sources of the FLS for offshore wind measurement. The results show that, during the observation period for comparison, the integrity rate of the measured data of the FLS exceeds 98% at each measurement height under 150m. The FLS measured mean wind

speed, maximum wind speed and mean wind direction at different measurement heights under 100m are basically consistent with those measured by the meteorological mast with the correlation coefficient R^2 over 0.98 and the mean relative errors (MREs) less than 7%. The MAE of mean wind speed and wind direction are less than 0.5 m/s and 3° , respectively. The MAE of turbulence intensity measured by FLS is relatively large, which is mainly concentrated in the low wind speed region below 3m/s with the MAE between 0.012 and 0.014. The deviations between them is mainly periods. Further study shows that the accuracy of the FLS is potentially affected during the raining time, while the influences of measurement height, different wind speed with medium and high magnitude and wave height are insignificant.

Key words: floating lidar systems; reliability; influencing factors; deviation