

Fraunhofer 漂浮式雷达与固定式测风塔 测试阶段结果对比

王 强¹, 王 通¹, 路继宁²

(1. 长江三峡集团福建能源投资有限公司, 福建 福州 350003;

2. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200093)

摘 要:为了验证国内首批漂浮式雷达测风装置的相关性和可靠性,了解设备测风精度的真实水平,在福清兴化湾样机试验风场区域通过漂浮式雷达测风装置与岛屿固定式测风塔同步测风。利用 3 个月的实际测风数据,对比分析岛屿固定式测风塔测风数据和漂浮式雷达测风装置在 10,70,90 和 110 m 四个高程的风速和风向数据,验证 2 种设备测风数据的完整性、合理性和相关性,最终论证漂浮式雷达测风装置在风速和风向方面的可靠性。对比结果表明:漂浮式雷达测风装置数据合理,完整率达到 90% 以上,相关系数超过 0.95,漂浮式雷达测风装置各高度风速、风向均满足风资源评估的要求。

关键词:漂浮式雷达;测风装置;测风塔;测风;对比

中图分类号:X16

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2020)02-0130-12

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2020.02.008

引用格式:WANG Q, WANG T, LU J N. Comparison of the data measured by Fraunhofer IWES buoys and fixed wind tower in testing stage[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(2): 130-141. 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.

风能在全球电力系统中的重要性日益提高,逐渐成为世界各国普遍重视的可再生能源。预计 2050 年,全球总发电量的 35% 将来自风能^[1]。在风力发电中,因海上风电所在区域风资源条件好,靠近负荷中心,越来越受到人们的关注,日益成为我国电力能源结构的重要组成部分。

在开发海上风电过程中,需要详细的风资源数据作为技术支撑,传统的固定式测风塔受到手续繁琐、造价昂贵、施工窗口期短等因素制约,而漂浮式雷达测风装置因其投放灵活、造价成本低越来越受到业界的关注。

从 2009 年开始,漂浮式雷达测风装置在欧洲国家陆续投入使用,提供了新的测风解决方案,目前欧洲有 WindSentinel^[2], SEAWATCH^[3], LiDAR Wind Buoy^[4] 等 8 种浮标系统类型。此次运用的是德国 Fraunhofer IWES 设计的 LiDAR Wind Buoy 浮标系统,在德国梅尔风电场已有使用记录,状况良好。国内雷达测风在陆上已有成熟运用,但之前尚未有海上漂浮式雷达使用的先例。2018 年,中国长江三峡集团有限公司福建分公司购买了 2 台德国弗劳恩霍夫风能及能源系统技术研究院(Fraunhofer IWES)开发设计的漂浮式雷达测风装置。虽然这套设备在欧洲北海的海上风电场中投运多年,但中国尚属首次使用,测风数据的可靠性能否保证,需要进一步验证。

本研究以福清兴化湾样机试验风场作为实验地点,对漂浮式雷达测风装置与岛屿固定式测风塔就风速和风向进行了同步比对分析。

收稿日期:2019-10-23

作者简介:王 强(1966-),男,高级工程师,硕士,主要从事海上风电方面研究. E-mail: wang_qiang@ctg.com.cn

(李 燕 编辑)

1 研究区域概况

1.1 研究区域位置

此次漂浮式雷达测风装置与固定式测风塔比对区域设置在福清兴化湾样机试验风场三塔屿附近。福清兴化湾样机试验风场位于福建省福清市江阴半岛东南侧和牛头尾西北侧,具体位置示意图 1。

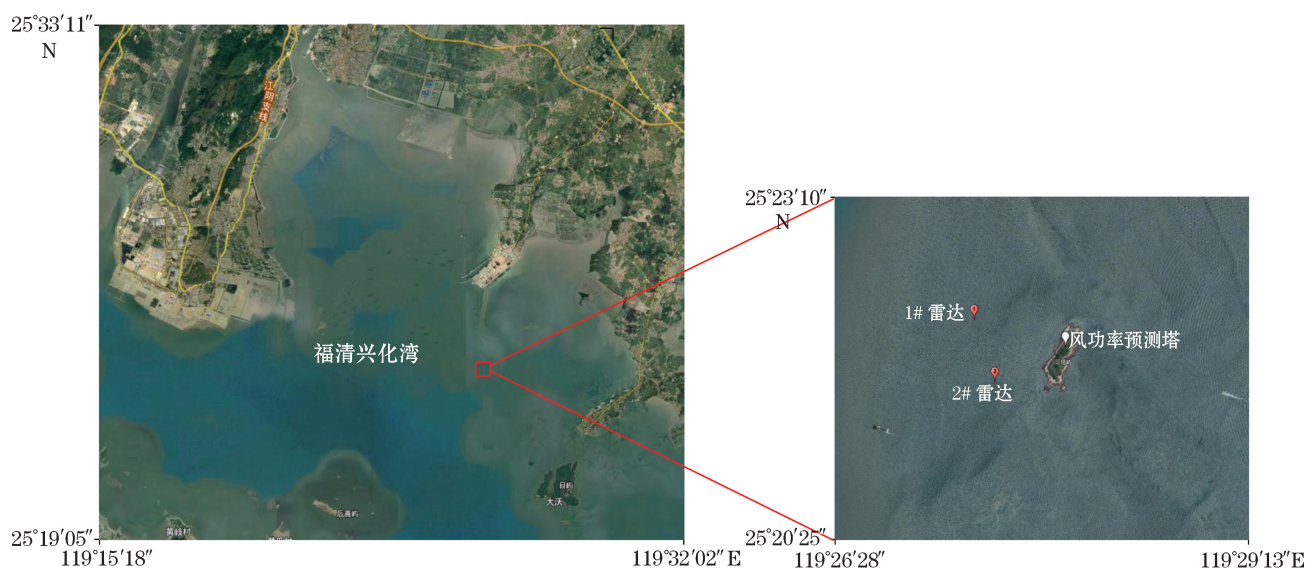


图 1 漂浮式雷达与实体测风塔位置关系图

Fig.1 Relations between the Fraunhofer IWES Buoys and the location of wind tower

1.2 研究区域风资源情况

福建省位于台湾海峡西岸,冬季盛行东北风,夏季盛行西南风,盛行风向频率冬季高于夏季^[5]。热带气旋在西北太平洋地区频发,平均每年影响或登陆福建的台风达 7 个^[6]。

福清兴化湾样机试验风场装机 77.4 MW,场址中心距岸线约 3.0 km,平均水深 4.8 m,总面积约 33.2 km²。根据风电场内所立测风塔测风资料,场址 90 m 高度风速为 8.2 m/s,风功率密度为 548.4 W/m²,风功率密度等级为 5 级,场址区域风能资源丰富。

风电场离海平面 90 m 高度代表年风向主要集中在 NNE、NE,占全部风向的 78.64%,风能主要集中在 NNE、NE,占全部风能的 89.57%以上,区域风向玫瑰图见图 2。

1.3 测试比对时间

此次漂浮式雷达测风装置与固定式测风塔测试比对时间为 2018-03-25—07-11。期间 2018 年 8 号台风玛莉亚在附近登陆,我们也一并对台风期间所测的风资源进行了分析比对。

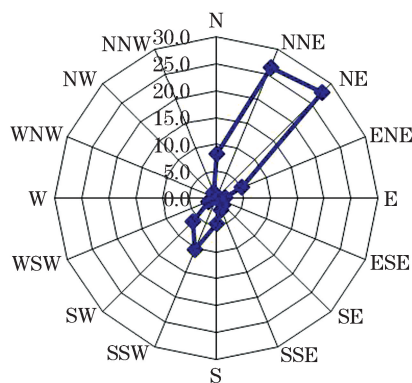


图 2 测风塔区域风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、风向频率玫瑰图

Fig.2 Rose diagram of wind speed and wind direction frequency in wind tower area

2 漂浮式雷达测风装置参数

Fraunhofer 漂浮式雷达测风装置能够测量周边 0~200 m 以内的风资源数据。此设备目前已被广泛应用于在德国北海、丹麦西海岸以及苏格兰东海岸区域的海上风电场中。设备主体使用航标灯结构,完全密封设计,稳定性好。Fraunhofer 漂浮式雷达测风装置搭配了多样化的供电方案和充足的电能储备,能够保障设备持续运行。该装置能够在不同气候条件和水深的海域布置,灵活度高。表 1 为 Fraunhofer 漂浮式雷达测风装置的基本性能。

图 3 为雷达测风装置示意图。设备组成包括激光雷达、风力发电机(主供电系统)、太阳能板(辅供电系统)、航标灯、GPS、气象站、GSM 天线、雷达信号反射器、蓄电池以及各类传感器。

表 1 Fraunhofer 漂浮式雷达测风装置性能

Table 1 Performances of the Fraunhofer IWES Buoy

要素	参数
高度/m	8.1
直径/m	2.55
重量/t	4.9(不含锚及锚链)
电力供应	风机、光伏和柴油机
可设高度层数	12
适用水深/m	≥ 15
数据采样周期/s	0.7
测量范围/m	0~250
温度范围/℃	-30~45



图 3 雷达测风装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of Fraunhofer IWES buoys

3 测试方法

根据《风电场风能资源评估方法》^[7],通过对数据完整性、合理性、相关性分析,研究雨、雾、台风、浪、流等复杂环境对雷达测风数据的影响,并对比分析研究传统机械式测风数据和漂浮式雷达测风数据,从而验证漂浮式雷达测风数据的可靠性。以下为测试方法的 3 个路径:

- 1)对收集到的 2 台雷达测风装置数据进行完整性、合理性和相关性验证。
- 2)对岛屿固定测风塔同期数据进行完整性、合理性和相关性验证。
- 3)通过对漂浮式雷达测风装置与固定测风塔同期验证数据对比,分析和研究不同高度逐时风速、风向相关性。

4 测试结果

4.1 完整性

从 10,70,90 和 110 m 共 4 个高度比对风速和风向数据(其中漂浮式雷达测风装置加上自身雷达离海面

高度,最低的测风高度为 13 m,故漂浮式雷达测风装置 13 m 高程测风数据与固定式测风塔的 10 m 高程测风数据进行比对)。经统计,固定式测风塔数据完整率为 96.6%,两台漂浮式雷达测风装置的数据完整性也均达到 93%以上(表 2),符合文献[7]中关于测风有效数据完整率应达到 90%的要求。

表 2 测风设备观测完整率表

Table 2 Data integrity rate of the Fraunhofer IWES Buoys and the wind tower

测 站	总测次/次	缺测次数/次	数据完整率/%
雷达 1	14 844	797	94.6
雷达 2	14 844	1 024	93.1
固定塔	14 844	510	96.6

4.2 合理性

根据文献[7],选取风速、风向、平均风速变化、平均风速差值和平均风向差值五个维度,对各测风设备测试时段内的测风数据进行合理性验证,具体见表 3。总体来说,本阶段固定式测风塔和两台漂浮式雷达测风装置的测风数据均满足合理性检验的要求。固定式测风塔在 110 m 高度风速数据不合理数略多,但漂浮式雷达测风装置数据在该高度数据正常,满足风能资源评估要求。

表 3 测风数据合理性统计表

Table 3 Statistics of wind data rationality

主要参数合理参考值	实体塔			雷达 1			雷达 2		
	不合理数	总测次数	不合格比例	不合理数	总测次数	不合格比例	不合理数	总测次数	不合格比例
$0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\leq 110,70,50,10\text{ m}$ 高度风速 $\leq 40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	0	14 334	0	0	14 047	0	0	13 820	0
$0^{\circ}\leq 110,70,50,10\text{ m}$ 高度风向 $\leq 360^{\circ}$	0	14 334	0	0	14 047	0	0	13 820	0
平均风速变化(110 m) $< 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	10	14 334	0.07	0	14 047	0	0	13 820	0
平均风速变化(70 m) $< 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	4	14 334	0.03	0	14 047	0	0	13 820	0
平均风速变化(50 m) $< 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	3	14 334	0.02	0	14 047	0	98	13 820	0.71
平均风速变化(10 m) $< 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	3	14 334	0.02	0	14 047	0	88	13 820	0.64
90 m-110 m 高度平均风速差值 $< 2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	2017	14 334	14.07	16	14 047	0.11	0	13 820	0
70 m-110 m 高度平均风速差值 $< 4.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	1745	14 334	12.17	10	14 047	0.07	0	13 820	0
70 m-90 m 高度平均风速差值 $< 2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	1	14 334	0.01	5	14 047	0.04	0	13 820	0
10 m-70 m 高度平均风速差值 $< 6.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	3	14 334	0.02	1	14 047	0.01	35	13 820	0.25
90 m-110 m 高度平均风向差值 $< 22.5^{\circ}$	715	14 334	4.99	191	14 047	1.36	0	13 820	0
70 m-90 m 高度平均风向差值 $< 22.5^{\circ}$	132	14 334	0.92	21	14 047	0.15	0	13 820	0
10 m-70 m 高度平均风向差值 $< 45.0^{\circ}$	309	14 334	2.16	135	14 047	0.96	0	13 820	0

4.3 相关性

去除各测风设备不合理数据后,分别对各测风设备不同高度的实测风速数据进行相关性分析。固定式测风塔在不同高度风速具有良好的相关性,且整体各个通道测风数据准确度较高,数据可靠。其中 10 m 高度与其他高度的风速相关性略低。初步分析,主要是三塔屿的地表粗糙度对 10 m 高度的风速造成了一定影响。具体分析结果见表 4 和图 4。

表 4 固定式测风塔不同高度风速相关系数

Table 4 Correlation coefficient of the wind speeds measured with fixed wind tower at different altitudes

高 度	110 m	90 m	70 m	10 m
110 m	1			
90 m	0.992 0	1		
70 m	0.985 2	0.997 1	1	
10 m	0.921 2	0.943 5	0.965 6	1

注:空白表示数据省略

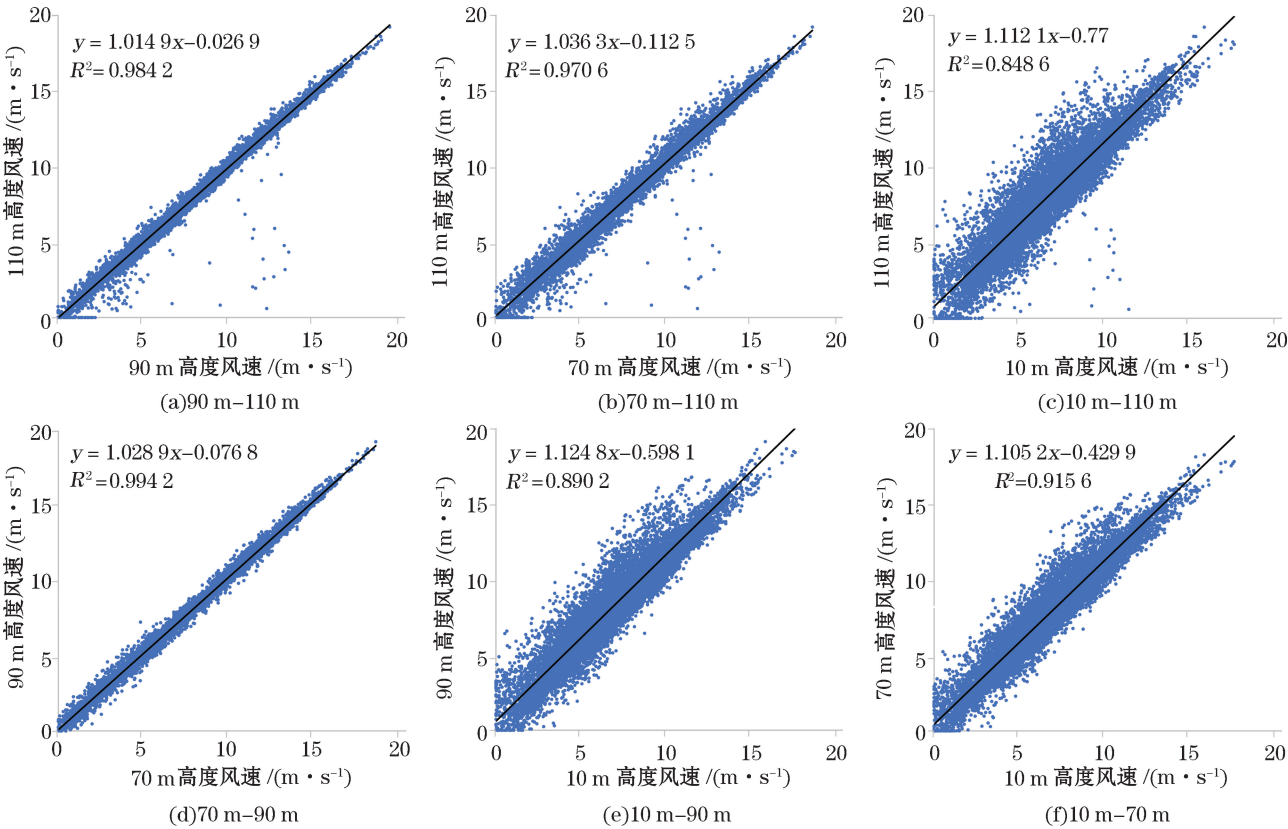


图 4 固定式测风塔不同高度风速相关性

Fig.4 Correlation between the wind speeds measured with fixed wind tower at different altitudes

漂浮式雷达测风装置 1# 不同高度风速具有良好的相关性,各个通道测风数据准确度较高,数据可靠。与固定式测风塔一样,13 m 高度与其他高度的相关性略低。分析结果见表 5 和图 5。

表 5 漂浮式雷达 1 不同高度风速相关性分析表

Table 5 Correlation analysis of the wind speeds measured with Buoy 1# at different altitudes

高 度	110 m	90 m	70 m	10 m
110 m	1			
90 m	0.996 7	1		
70 m	0.988 5	0.996 4	1	
13 m	0.934 6	0.949 0	0.963 6	1

注:空白表示数据省略

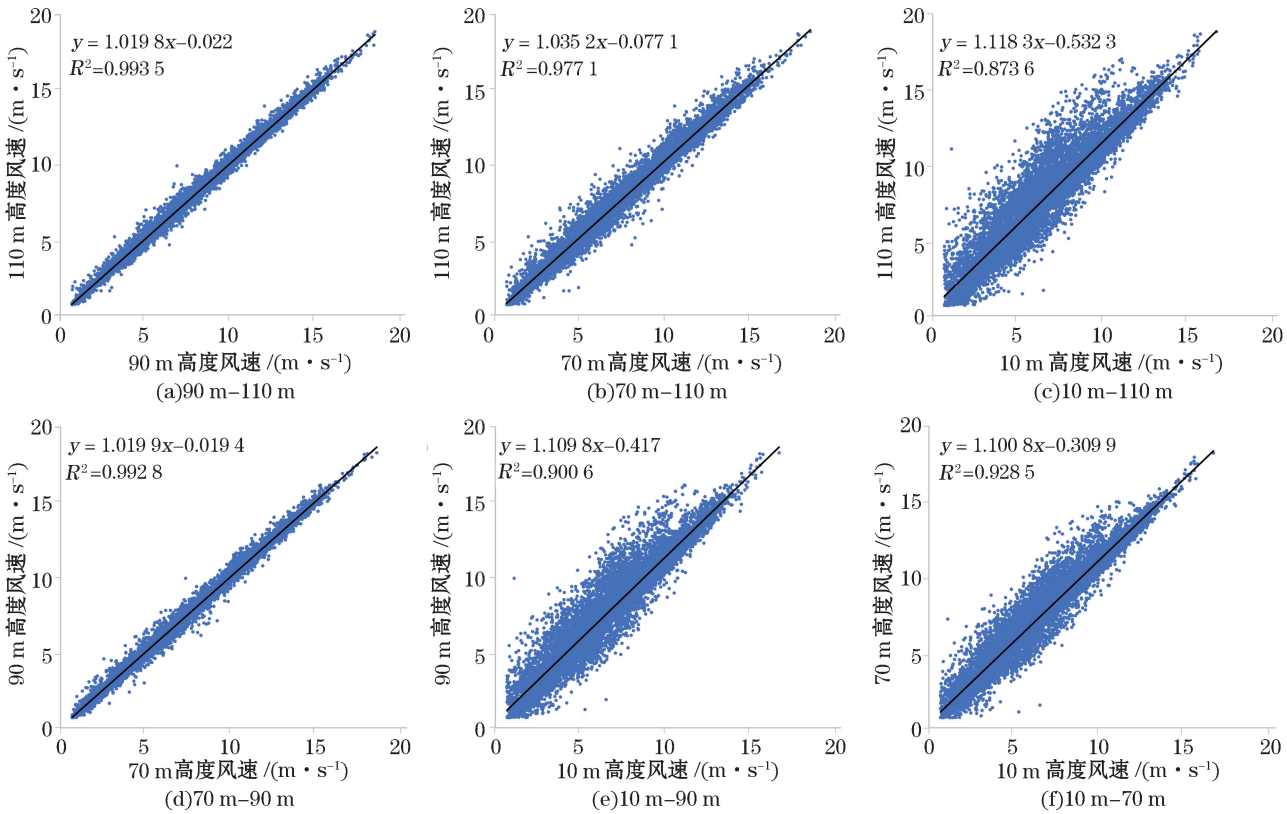


图 5 漂浮式雷达 1 不同高度风速相关性

Fig.5 Correlation between the wind speeds measured with Buoy 1# at different altitudes

漂浮式雷达测风装置 2# 不同高度风速具有良好的相关性,各个通道测风数据准确度较高,数据可靠。与其他测风设备的表现一致,13 m 高度与其他高度风速相关性略低。分析结果见表 6 和图 6。

表 6 漂浮式雷达 2 不同高度风速相关系数

Table 6 Correlation coefficient of the wind speeds measured with Buoy 2# at different altitudes

高 度	110 m	90 m	70 m	10 m
110 m	1			
90 m	0.997 3	1		
70 m	0.990 0	0.996 8	1	
13 m	0.935 7	0.950 7	0.963 6	1

注:空白表示数据省略

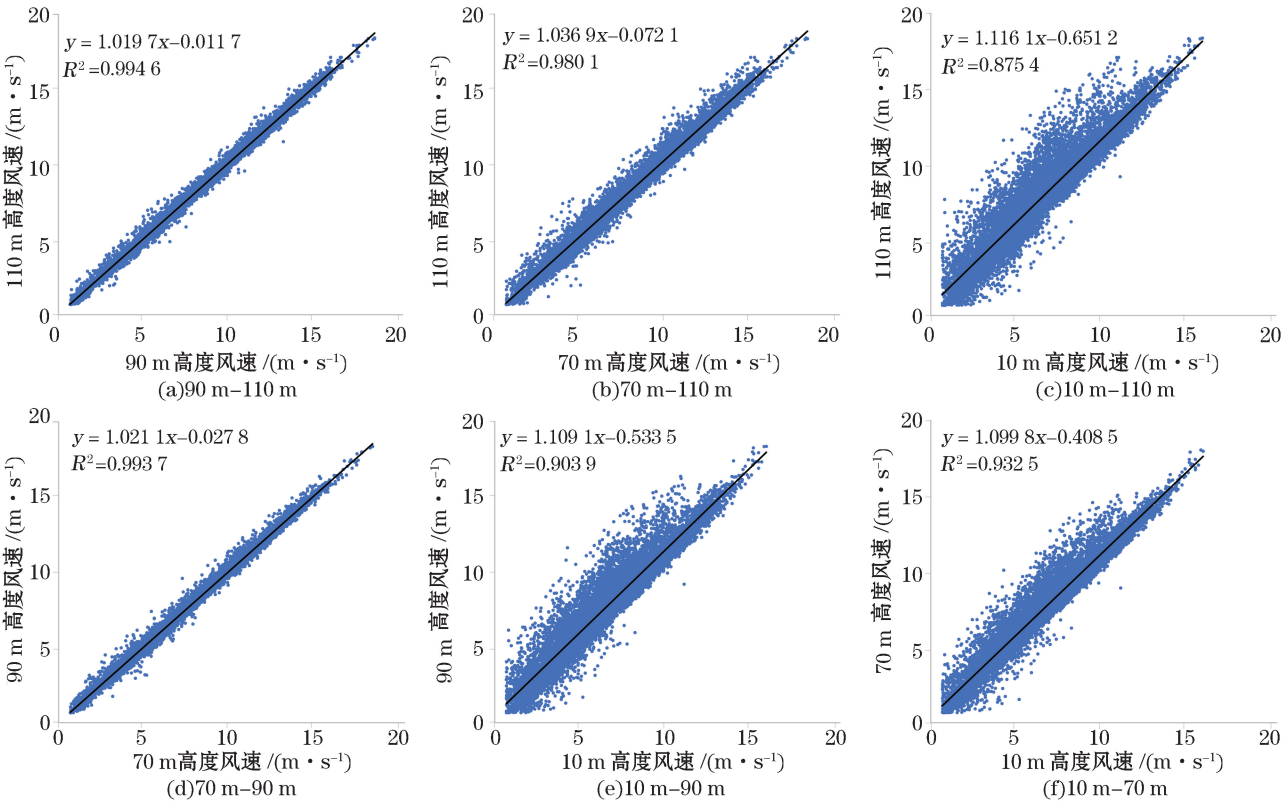


图 6 漂浮式雷达 2 不同高度风速相关性

Fig.6 Correlation between the wind speeds measured with Buoy 2# at different altitudes

通过对比各测风设备自身不同高度相关性情况,可知除 10/13 m 高度外,其他高度的风速相关性均在 0.99 左右,说明测试处高空的风速相关性表现出色,但低空风速受地表粗糙度影响较大。通过各测风设备之间相同高度的相关性情况比较,可以得出 3 个测风设备的相关性较高,超过 0.95(表 7)。

表 7 测试时段 3 个测风设备相同高度风速相关系数

Table 7 Correlation coefficient of the wind speeds measured with three devices at different altitudes

测风设备	高 度/m											
	10/13			70			90			110		
	固定塔	雷达 1	雷达 2	固定塔	雷达 1	雷达 2	固定塔	雷达 1	雷达 2	固定塔	雷达 1	雷达 2
固定塔	1			1			1			1		
雷达 1	0.967	1		0.962	1		0.961	1		0.956	1	
雷达 2	0.969	0.987	1	0.979	0.977	1	0.979	0.974	1	0.974	0.974	1

注:空白表示数据省略

4.4 风速情况

图 7~图 10 为不同高度的 10 min 平均风速过程图,其中灰色线为固定式测风塔(风功率预测塔)所测风速,红色线为漂浮式雷达测风装置 1# 所测风速,蓝色线为漂浮式雷达测风装置 2# 所测风速。通过各测风设备在测试时段所测的风速情况分析,各设备所测的 10 min 平均风速在不同高度的趋势一致,相对偏差较小,其中漂浮式雷达测风装置 1# 所测的 10 min 平均风速数据存在个别时段偏低的情况,主要集中在 05-13—20 和 06-24—07-08 两个时间段。

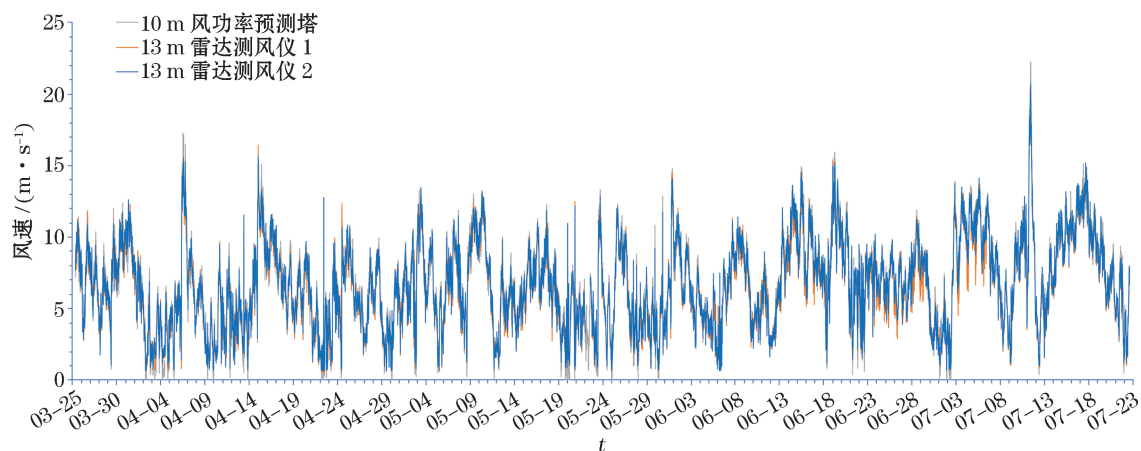


图 7 10 和 13 m 高度 10 min 平均风速过程曲线图

Fig.7 10 minutes averaged wind speeds measured at an altitude of 10 and 13 m

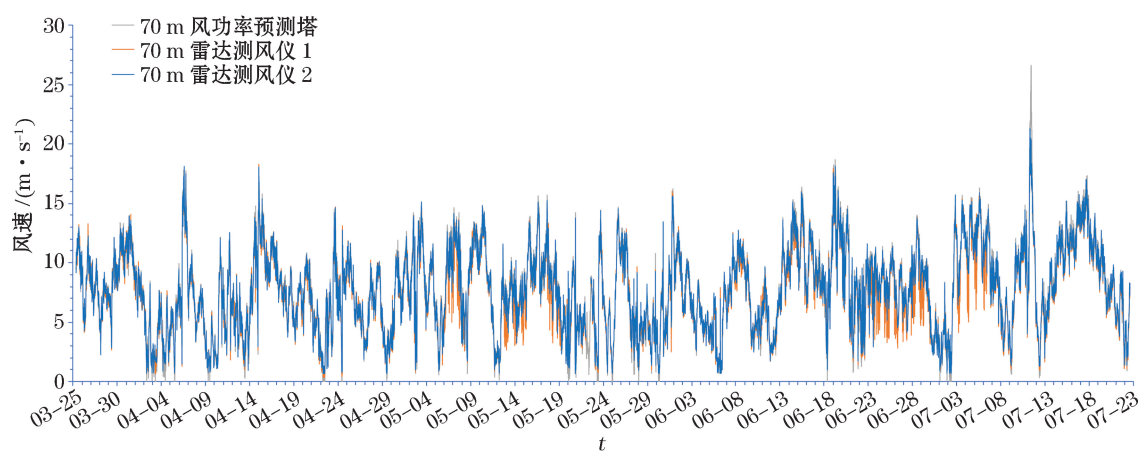


图 8 70 m 高度 10 min 平均风速过程曲线图

Fig.8 10 minutes averaged wind speed measured at an altitude of 70 m

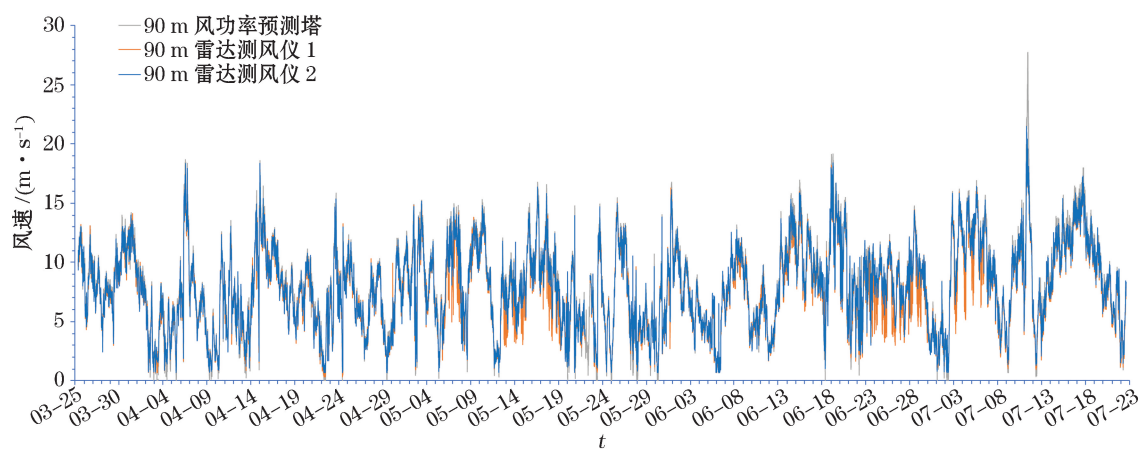


图 9 90 m 高度 10 min 平均风速过程曲线图

Fig.9 10 minutes averaged wind speed measured at an altitude of 90 m

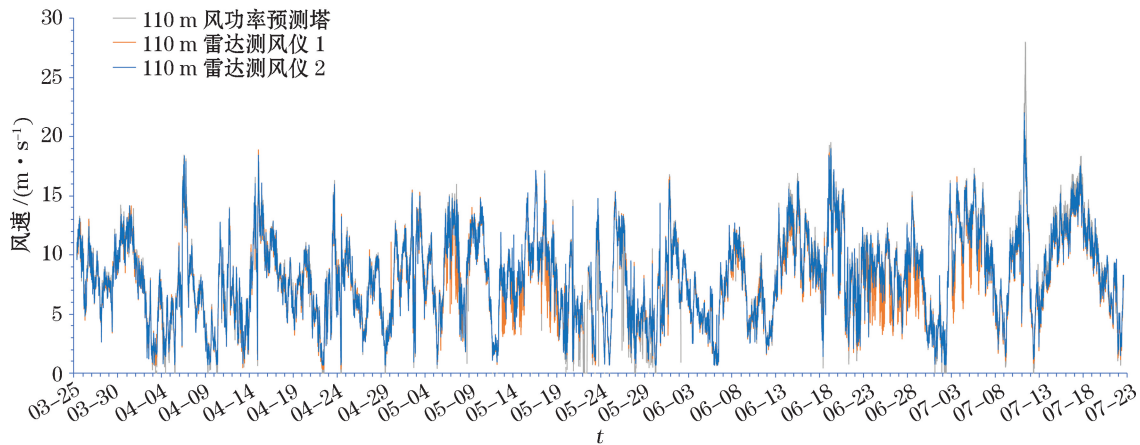
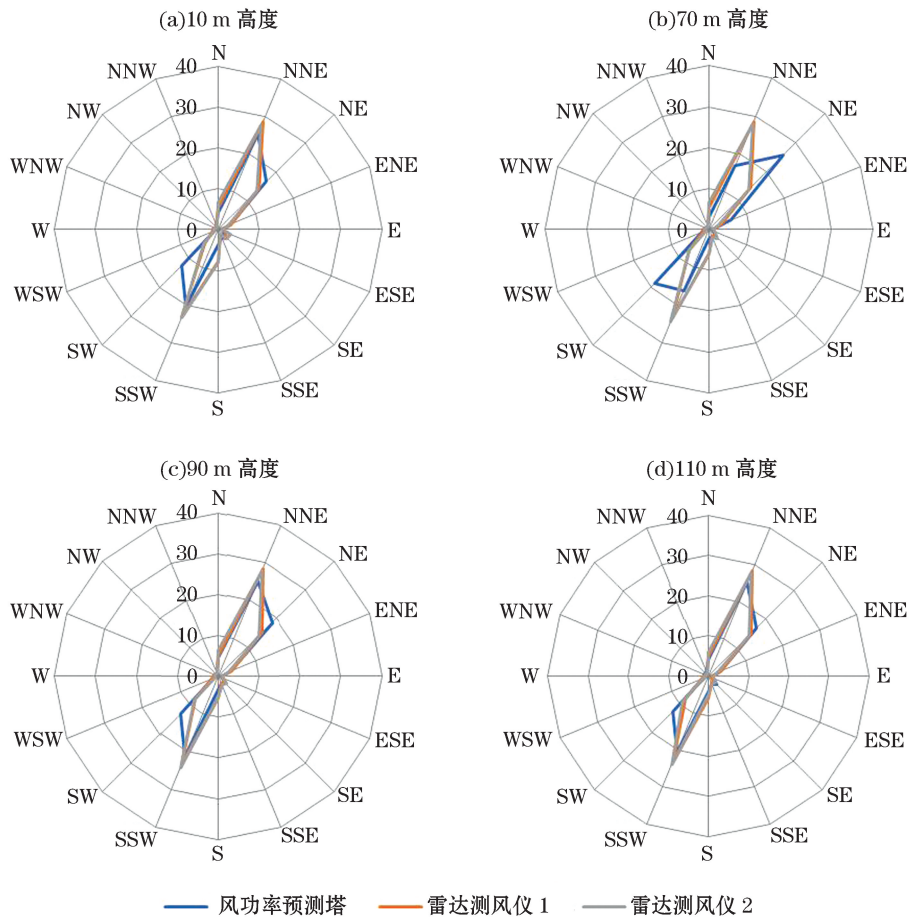


图 10 110 m 高度 10 min 平均风速过程曲线图

Fig.10 10 minutes averaged wind speed measured at an altitude of 110 m

4.5 风向情况

对各测风装置不同高度风向数据进行统计,各高度的风向一致性较好(图 11),特别注意固定式测风塔 70 m 高度与其他高度似乎存在一定差别,结合风向时序分析认为风向数据集中在 NNE~NE 扇区过渡段,70 m 统计差异是扇区划分方式导致,符合实际。

图 11 不同高度风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)风向玫瑰图Fig.11 Rose diagrams of wind speed ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and wind direction frequency at different altitudes

4.6 台风影响

在设备测试期间,经历了 2018 年 8 号台风“玛莉亚”。2018-07-04T20:00,第 8 号台风“玛莉亚”在美国关岛以东洋面生成;07-08T05:00,台风“玛莉亚”以超强台风级出现在台湾省宜兰县东偏南方约 1 930 km 的西北太平洋洋面上;07-11T09:00,台风“玛莉亚”在福建连江黄岐半岛登陆(与测试地点直线距离约 100 km),登陆时中心附近最大风力有十四级(42 m/s),中心最低气压 960 hPa。综合考虑台风中心与测风设备距离以及台风强度变化对测风设备测风的影响,绘制台风生命周期过程中实测风向、风速、湍流与台风中心与测风设备距离以及台风强度时序图进行分析。

台风期间(07-04T20:00—07-11T09:00)各设备实测风速、风向、湍流强度变化趋势基本一致。随着台风中心至场址距离的减小,测风设备受到十级台风风圈的影响,实测风速变化较剧烈,但漂浮式雷达测风装置测到的风速峰值比岛屿固定式测风塔测到的峰值小(图 12);在台风接近测风设备的过程中,测风设备实测风向受台风影响出现明显变化,之后逐渐变化到受台风影响前的波动区间,测风设备实测风向受台风影响出现明显变化(图 13);当风向出现突变时,漂浮式雷达测风装置湍流强度较稳定,固定式测风塔湍流强度在短时间内变化较大(图 14)。

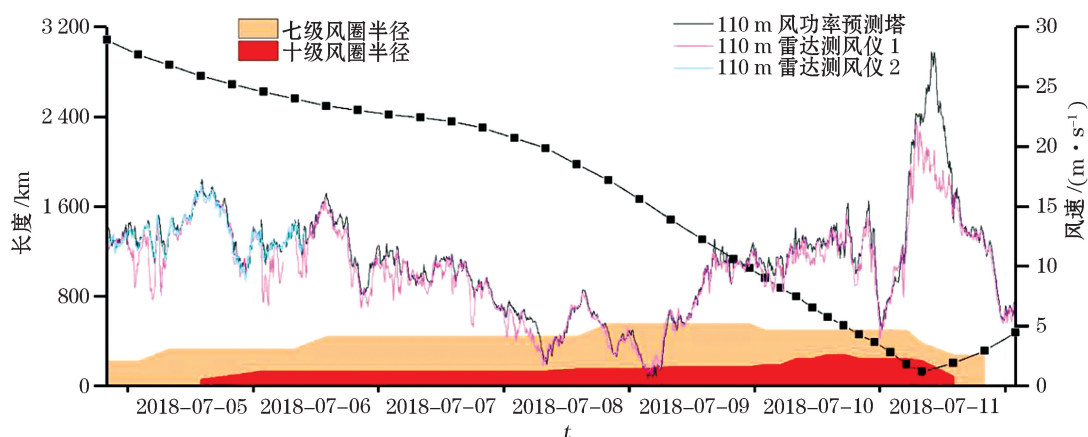


图 12 台风期间风速对比

Fig.12 Comparison of wind speeds measured with different devices during typhoon

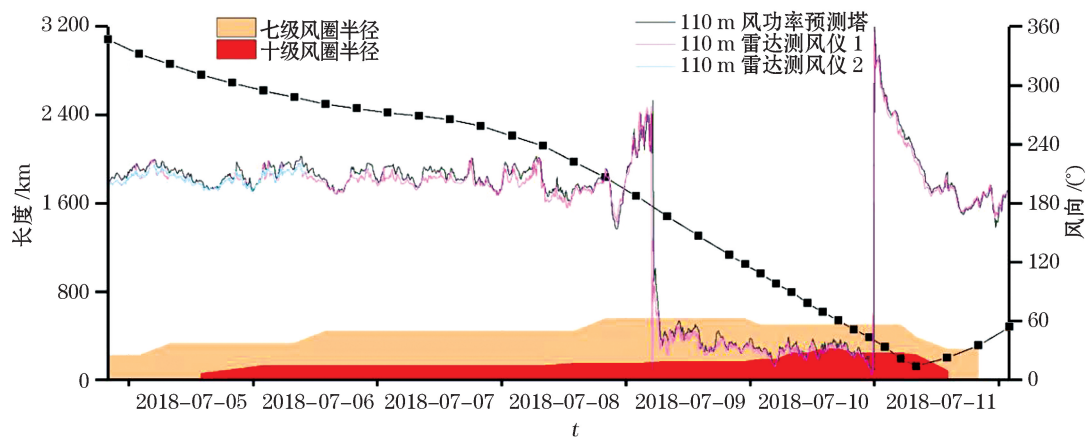


图 13 台风期间风向对比

Fig.13 Comparison of wind directions measured with different devices during typhoon

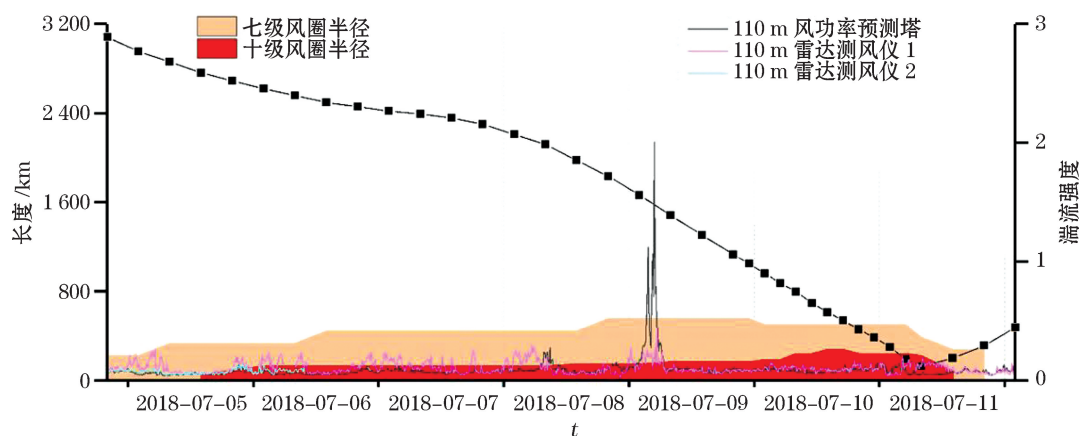


图 14 台风期间湍流强度对比

Fig.14 Turbulence intensity measured with different devices during typhoon

5 结 语

为了验证漂浮式雷达测风装置的性能,通过与岛屿固定式测风塔在测风数据的完整性、合理性、相关性进行比对,确认了漂浮式雷达测风装置所测风资源数据的可靠性。具体结论如下:

- 1) 漂浮式雷达测风装置数据完整率超过 90%,漂浮式雷达测风装置自身不同高度风速具有良好的相关性,与固定式测风塔在相同高度的风速相关系数范围为 0.96~0.98,相关性高;
- 2) 各测风设备各高度实测风速情况基本一致,测风数据过程线基本吻合,风向一致性较高;
- 3) 漂浮式雷达测风装置在 2018 年 8 号台风“玛莉亚”影响期间正常测风,比较准确地记录了台风对风电场区域的环境影响,但所测风速峰值比固定式测风塔较小。

参考文献 (References):

- [1] FRANCESCO L C. Global energy transformation: a roadmap to 2050[M/OL]. [2020-03-12] Abu Dhabi: IRENA, 2019. <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>.
- [2] AXYS Technologies Inc. FLiDAR WindSentinel[EB/OL]. [2020-02-23] Vancouver: AXYS Technologies Inc, 2014. https://axystechnologies.com/products/flidar-windsentinel/?open_cat=9.
- [3] FUGRO International Group. SEAWATCH Wind Lidar Buoy[EB/OL]. [2020-02-23] Beijing: FUGRO International Group, 2019. <https://www.fugro.com/about-fugro/our-expertise/technology/seawatch-metoccean-buoys-and-sensors>.
- [4] FRAUNHOFER IWES. LiDAR Wind Buoy[EB/OL]. [2020-2-23] Bremerhaven: Fraunhofer IWES, 2018. <https://www.iwes.fraunhofer.de/en/press---media/bsh-and-fraunhofer-iwes-launch-a-mobile-measuring-buoy.html>.
- [5] GUO T T, GAO W X, et al. Analysis of climatic characteristics of Taiwan strait[J]. Marine Forecasts, 2010, 27(1): 53-58. 郭婷婷, 高文洋, 等. 台湾海峡气候特点分析[J]. 海洋预报, 2010, 27(1): 53-58.
- [6] CHEN X, LIN B R. Study on typhoon disaster and reduction countermeasures in Fujian province[J]. Journal of Catastrophology, 1998, 13(3): 56-61. 陈香, 林炳荣. 福建省台风灾害及减灾对策研究[J]. 灾害学, 1998, 13(3): 56-61.
- [7] National Technical Committee 20 on Energy Fundamentals and Management of Standardization Administration of China. Methodology of wind energy resource assessment for wind farm: Wind measurement data processing: GB/T 18710-2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002. 全国能源基础与管理标准化技术委员会. 风电场风能资源评估方法: 测风数据处理: GB/T 18710-2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

Comparison of the Data Measured by Fraunhofer IWES Buoy and Fixed Wind Tower in Testing Stage

WANG Qiang¹, WANG Tong¹, LU Ji-ning²

(1. *China Three Gorges Fujian Energy Investment Company*, Fuzhou 350003, China;

2. *Shanghai Investigation Design and Research Institute*, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to verify the reliability and correlation of the first Fraunhofer IWES Buoys in China and to know their real level of wind-measuring accuracy, wind data are synchronously measured by using Fraunhofer IWES Buoys and Wind Tower fixed on an nearby island in the wind-testing field in the Fuqing Xinghua Bay. By using the wind data measured in three months, wind speed and direction collected by the Fraunhofer IWES Buoys and the fixed wind tower at an altitude of 10, 70, 90 and 110 m respectively are compared and analyzed. The completeness, reliability and correlation of the wind data measured by the two types of facilities are thus verified and the reliability of wind speed and direction of the Fraunhofer IWES buoys is finally demonstrated. It can be concluded that the wind data from the Fraunhofer IWES buoys are reasonable, with a data integrity being above 90% and a correlation coefficient being higher than 0.95, indicating that both the wind speed and the wind direction measured with the Fraunhofer IWES Buoys at targeted altitudes can meet the requirements of wind resource assessment.

Key words: Fraunhofer IWES buoys; wind tower; wind measurement; comparison

Received: October 23, 2019