

黄浩辉,陈雯超,植石群,等,2021. 基于测风塔实测台风威马逊登陆过程的强风特性分析[J]. 气象,47(2):143-156. Huang H H, Chen W C, Zhi S Q, et al, 2021. Analysis on severe wind characteristics during Typhoon Rammasun landing process based on the observation at wind tower[J]. Meteor Mon, 47(2):143-156(in Chinese).

基于测风塔实测台风威马逊登陆过程的强风特性分析^{*}

黄浩辉¹ 陈雯超¹ 植石群¹ 王丙兰²

¹ 广东省气候中心, 广州 510080

² 华风气象传媒集团有限责任公司, 北京 100081

提 要: 利用广东省徐闻县西连镇 90 m 测风塔在 1409 号超强台风威马逊登陆期间获取的具备完整的台风代表性的观测数据以及处于台风外围的广东省茂名市博贺镇 100 m 测风塔的观测数据, 对台风威马逊的近地层强风特性进行了分析, 西连测风塔结果表明: 风速时程曲线呈明显的“M”型分布特征, 台风中心经过测风塔前后, 风向沿逆时针方向大幅偏转约 170°。风速随高度增加而增大, 风速廓线较好地符合对数和幂指数律; 台风过境前后, 各强风区的风速廓线幂指数和粗糙长度呈先减小后增大的特点; 粗糙陆地下垫面的风速廓线幂指数和粗糙长度较大。湍流强度和阵风系数在前外围强风区或后外围强风区较大, 在前眼壁强风区或后眼壁强风区较小, 湍流强度和阵风系数随高度增加而减小, 基本符合指数为负值的幂指数律; 粗糙下垫面对湍流强度和阵风系数有增大的作用。外围强风区和眼壁强风区的 10 min 风向变率变化较为平稳, 而在眼区变动较为剧烈, 在眼区, 当风速达到最低值或次低值时, 10 min 风向变率幅值达到最大值。博贺测风塔结果表明其总体上与西连测风塔台风前外围和前眼壁强风区的情形相似。

关键词: 测风塔, 台风威马逊, 近地层, 强风特性

中图分类号: P458, P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.02.002

Analysis on Severe Wind Characteristics During Typhoon Rammasun Landing Process Based on the Observation at Wind Tower

HUANG Haohui¹ CHEN Wenchao¹ ZHI Shiqun¹ WANG Binglan²

¹ Guangdong Climate Center, Guangzhou 510080

² Huafeng Meteorological Media Group, Beijing 100081

Abstract: Based on the representative observation data obtained by the 90 m wind tower in Xilian Town, Xuwen County, Guangdong Province during the landfall of No. 1409 Super Typhoon Rammasun, and the observation data of 100 m wind tower in Bohe Town, Maoming City, Guangdong Province, which is located in the periphery of the typhoon, the characteristics of the severe winds near surface layer are analyzed. The results of Xilian Tower show that time variations of the wind speed present clear “M” pattern. The wind direction counterclockwise deflects about 170° as the typhoon center passes through the tower. The wind speed increases with the increase of height, and the wind speed profile fits well with the laws of logarithm and power index. Wind shear index and roughness length decrease first and then gradually increase during the typhoon passing period. The wind shear index and roughness length on rough land underlying surface are large. The turbulence intensity and gust coefficient are larger in the front or back outer-vortex,

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1507802)和广东省促进经济高质量发展专项(GDOE[2019]A11)共同资助

2020 年 4 月 20 日收稿; 2020 年 8 月 19 日收修定稿

第一作者: 黄浩辉, 主要从事气候可行性论证和台风观测研究. E-mail: hhh@gd121.cn

but smaller in the front or back eye-wall. The turbulence intensity and gust coefficient decrease with the increase of height, which basically accords with the power law with negative exponent. The turbulence intensity and the gust coefficient are amplified under the influence of the rough underlying surface. The variation of the 10 min wind direction is more stable in the outer-vortex and eye-wall compared with that in wind eye in which it is rather intense. The maximum amplitude of the 10 min wind direction occurred when the wind speed reaches the minimum in the typhoon eye. The results of the Bohe Tower show that the situation is similar to that of the Xilian Tower when it is located in the front outer-vortex and the front eye-wall of the typhoon.

Key words: wind observation tower, Typhoon Rammasun, near-surface layer, severe wind characteristic

引 言

风灾是人类面临的主要自然灾害之一,其中又以台风灾害居首,西北太平洋是全球热带气旋发生频率最高的海域,中国又是全球登陆台风最多的国家(陈联寿等,2012)。每年约有 8 个台风登陆我国,台风引发的大风、暴雨和风暴潮具有严重的破坏力,可造成房屋尤其是沿海地区村镇建筑的倒塌损毁、构筑物的破坏、交通瘫痪、输电线路故障和电力基塔等基础设施损坏并由此常造成重大的经济损失和人员伤亡(陈海燕等,2018;杨绚等,2020)。台风的近地层风特性在台风不同位置 and 不同下垫面作用下会有不同的特征(端义宏等,2014;梁莉等,2018;郑焘等,2018),现代建筑结构的高度和水平跨度均越来越大,结构在不同位置的风环境也具有差异,在台风非均匀风场作用下,这种差异会更为明显,可能导致建筑结构发生振动甚至变形。现场实测是了解台风风场结构及其对结构致灾机理研究的重要手段,国内外对台风外场观测与分析已进行了大量的研究。Powell et al(2003)利用 GPS 探测仪测量了热带气旋下海洋边界层的风廓线。Cao et al(2009)利用位于 15 m 高度上同步测量的 9 台翼式风速计和 7 台超声风速计的观测数据对登陆日本的台风鸣蝉(2003)进行分析,探讨了台风湍流强度、相关系数、阵风因子和湍流谱。Ishizaki(1983)对登陆日本的多个强台风过程的风速和湍流参数等进行研究,发现其风况特性与其经过的下垫面粗糙度关系密切。Tamura et al(2007)研究发现风廓线幂指数值随着从海边到陆地距离的增加而增加,离陆风的幂指数值均大于离海风的幂指数值。Li et al(2015)对比了台风和飓风的风特性差异,并分析了粗糙长度和平均风速对湍流风特性的影响。宋丽莉等(2005;

2006)和 Song et al(2010;2012;2016)基于广东多个登陆台风的梯度观测数据,对比分析了台风中心区域和其外围风况的平均风和脉动风参数特征,发现了台风眼壁强风区和外围大风区风特性的显著差异,建立了风速廓线幂指数与粗糙长度的数学模型。赵小平等(2016)基于海南文昌市 90 m 测风塔分析了强台风海鸥的近地层风场时空特征,发现粗糙长度、风廓线幂指数、湍流强度、阵风系数与风速呈负相关关系。肖辉等(2017)分析了深圳 350 m 气象梯度塔在台风妮妲的观测资料,发现在台风前外围、前风圈、眼区的风廓线在 350 m 高度以下符合对数关系,而后风圈和后外围的风廓线仅在 150 m 以下遵循对数律。陈雯超等(2019)对比了台风莫拉非和强对流、强冷空气的近地层风特性,发现台风强风的幂指数值要大于建筑结构荷载规范给出的 B 类下垫面的参考值。1409 号台风威马逊是近年来登陆我国台风强度最大的超强台风之一,也有多位学者基于测风塔实测对其风特性进行了分析,王海龙等(2018)和程艳伟(2016)利用粤西风电场测风塔的观测数据,计算分析了台风威马逊的风速廓线幂指数、湍流强度、阵风系数和风向等的时程变化特征,但台风眼区没有直接经过这些测风塔,其测风数据均不具备完整的台风代表性。本文主要利用广东省徐闻县西连镇测风塔具备完整台风代表性的观测数据,研究台风威马逊不同位置的近地层强风特性,并结合下垫面分析台风强风叠加不同粗糙度下垫面时的风特性,以期沿海台风影响严重区域的抗风设计及相关研究提供参考依据。

1 数据说明

用于主要计算分析的测风数据来源于广东省徐

闻县西连镇的一座 90 m 高度测风塔,塔基海拔为 18 m,在 2014 年 7 月 18—19 日,超强台风威马逊登陆广东徐闻县期间,测风塔获取了较为完整的观测数据,测风塔位于“威马逊”前进路径左侧,距“威马逊”路径的最近距离约为 19 km(图 1)。西连测风塔位于北部湾沿海,下垫面开阔平坦,以农田为主,塔基附近有一片约 5 m 高的灌木林,北面较为稀疏,南面较为茂密,在测风塔 10、40、70、80、90 m 高度安装了美国 Renewable NRG Systems 公司的 NRG#40 型杯式风速传感器,最大风速量程为 $96 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在 10、70、90 m 高度安装了 NRG#200P 型风向传感器,风速记录为每 10 min 的平均风速、3 s 阵风风速最大值和风速标准差(由 1 s 采样数据计算得到),风向记录为每 10 min 的平均风向,测风仪器在安装前均经过标准风洞检定合格。台风威马逊登陆期间,除 90 m 风速数据在 2014 年 7 月 19 日 01:10 后因风速传感器损坏而造成数据缺失外,其余测风数据经合理范围、相关性、变化趋势检验等手段进行质量控制均没有发现异常,数据完整可靠。

用于辅助性对比分析的测风数据来源于广东省茂名市博贺镇一座 100 m 高度测风塔,“威马逊”登陆期间,该测风塔也获取了较为完整的观测数据,测风塔位于“威马逊”前进路径右侧,距“威马逊”路径的最近距离约为 155 km(图 1)。博贺测风塔位于离海岸约 4.5 km 的一座无人小岛——峙仔岛上,该小岛露出海面的部分长约 90 m、宽约 40 m,地面为沙石间或有稀疏的杂草,地势为东北—西南走向并逐渐向中间隆起,测风塔设置在小岛的最高点,塔基海拔为 10 m。该测风塔在 10、20、40、60、80、100 m 高度上安装了风速、风向传感器,型号与西连测风塔相同,“威马逊”登陆期间,除 100 m 观测数据因传感器损坏而造成数据缺失外,其余测风数据均完整可靠。

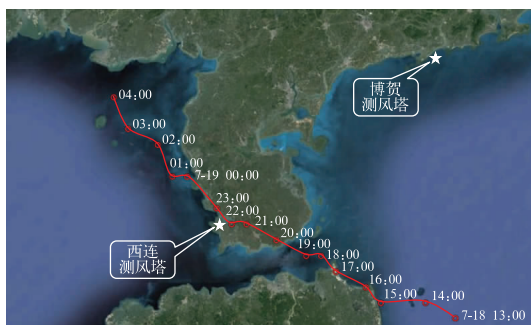


图1 西连测风塔和博贺测风塔位置

Fig. 1 Location of Xilan Tower and Bohe Tower

2 台风威马逊概况

台风威马逊于 2014 年 7 月 12 日在西北太平洋上生成,15 日 18:20 登陆菲律宾中部沿海,随后穿过菲律宾中部进入南海继续向西北方向移动,18 日 05 时在南海北部加强为超强台风,15:30 前后登陆海南省文昌市翁田镇,登陆时中心附近最大风速为 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (17 级,超强台风级),19:30 前后以同等强度再次在广东省徐闻县龙塘镇沿海登陆,19 日 07:10 前后在广西防城港光坡镇沿海第三次登陆,登陆时中心附近最大风速为 $48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (15 级,强台风级),20 日 04 时在云南省境内减弱为热带低压。

“威马逊”登陆时的中心附近最大风力和最低气压均达到或突破了有记录以来历史极值,“威马逊”在海南文昌和广东徐闻沿海登陆时中心附近最大风力均为 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (17 级),与 1973 年 9 月 14 日登陆海南琼海的 7314 号台风玛琪和 2006 年 8 月 10 日登陆浙江苍南的 0608 号台风桑美并列第一,“威马逊”登陆时中心气压为 910 hPa,低于“桑美”的 920 hPa 和“玛琪”的 925 hPa,为 1949 年以来登陆我国台风的中心气压最低值,因此可以认为“威马逊”为 1949 年以来登陆我国的最强台风。受“威马逊”影响,海南东北部、广东雷州半岛和广西沿海地区普遍出现 10~13 级平均风,阵风达 14~17 级,海南文昌七洲列岛记录到最大阵风风速高达 $72.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,海南海口、广东雷州半岛和广西沿海等局地 12 级以上瞬时大风持续 6~9 h。

3 近地层风速和风向时程变化特征

为了较为完整地了解台风威马逊近地层风速和风向随时间的变化特征,选取西连测风塔 2014 年 7 月 18 日 10 时至 19 日 10 时逐 10 min 的观测数据进行分析,图 2 是测风塔 10 min 平均风速和风向时程变化曲线,图中下部一组 5 条曲线是测风塔 10、40、70、80、90 m 高度的风速时程曲线(90 m 高度风速传感器在 19 日 01:10 损坏,其后风速数据缺失,此时台风中心已进入北部湾),图中上部一组 3 条曲线是测风塔 10、70、90 m 高度的风向时程曲线。

从图 2 看到,西连测风塔风速时程曲线呈明显

的“M”型分布特征,各层风速走势基本一致,各高度风速曲线由下至上有序排列,符合随高度增加,摩擦效应减弱,风速增大的一般规律,其中 10 m 风速曲线与 40 m 以上风速曲线距离较大,主要是因为其高度较低,受下垫面灌木林的摩擦作用影响较大。在“M”型的左侧端点,时间为 7 月 18 日 10 时,台风威马逊中心位于海南岛东面,距测风塔约 250 km,各层 10 min 平均风速在 $5.9 \sim 12.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,随着台风向西北方向移动,台风中心与测风塔的距离逐渐减少,测风塔各层风速逐渐变大,在 18 日 20:50 左右达到“M”型左侧的顶峰,此时台风中心距测风塔约 27 km,测风塔 10、40、70、80、90 m 高度的 10 min 平均风速峰值分别为 31.3、42.4、44.4、46.2 和 $47.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,3 s 阵风风速峰值分别为 47.1、56.2、55.5、57.2 和 $58.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,随后在“M”型的中部,风速首先有一个大幅下降的过程,在 22:10 左右达到“M”的底部,此时台风中心与测风塔距离最近,约为 19 km,10、40、70、80、90 m 高度的 10 min 平均风速谷值分别为 8.8、14.8、16.7、17.1 和 $16.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在 80 min 时间内,各层 10 min 平均风速降幅达到 $62\% \sim 72\%$,然后风速大幅上升,在 23:20 达到“M”型右侧的顶峰,此时台风中心距测风塔约 29 km,10、40、70、80、90 m 高度的 10 min 平均风速峰值分别为 21.6、36.1、41.7、42.7 和 $44.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,3 s 阵风风速峰值分别为 36.4、48.4、49.7、50.2 和 $50.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相对“M”型左侧峰值要低一些,在 70 min 时间内,测风塔各层 10 min 平均风速升幅达到 $145\% \sim 162\%$,随后台风继续向西北方向移动,于 19 日 01 时左右进入北部湾,并于 19 日 07:10

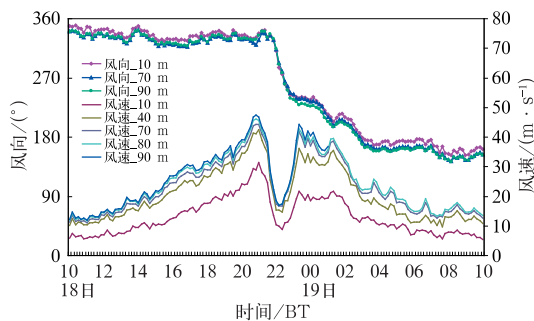


图 2 2014 年 7 月 18 日 10 时至 19 日 10 时
西连测风塔风速和风向时程变化曲线

Fig. 2 Time series of the wind speed and wind direction observed at Xilian Tower from 10:00 BT 18 to 10:00 BT 19 July 2014

左右在广西防城港光坡镇沿海第三次登陆,在“M”型的右侧端点,时间为 19 日 10:10,台风中心位于广西西南部,靠近云南省边界,距测风塔约 260 km,各层 10 min 平均风速在 $5.4 \sim 13.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从图 2 看到,西连测风塔 10、70、90 m 高度的风向时程曲线走势基本一致,各层风向差别较小,其中 70、90 m 高度风向曲线几乎重合,在台风中心经过测风塔前,从 7 月 18 日 10:00—21:50,各层风向基本在 330° 左右小幅波动,即一直保持在西北偏北风,从 18 日 22 时台风中心经过测风塔开始,测风塔各层风向有一个沿逆时针方向连续大幅偏转的过程,风向偏转方向与测风塔位于台风前进路径左侧相关,至 19 日 03:40 台风中心行进到测风塔西北面约 120 km 的北部湾时,各层风向转向幅度达到 170° 左右,即风向从西北偏北风沿逆时针方向大幅转向为东南偏南风,此后,测风塔各层风向维持在 160° 左右,即东南偏南风,直至台风中心进入广西境内。从图 2 还可以看到,在台风中心经过测风塔前,10 m 高度风向值较 70 m 高度大 7° 左右(沿顺时针方向偏转),从台风中心经过测风塔时开始至其后约 3.5 h 内,10 和 70 m 高度风向曲线几乎重合,即风向基本一致,此后,10 m 高度风向值又较 70 m 高度大 8° 左右(沿顺时针方向偏转)。

对同时段博贺测风塔的观测数据进行对比分析,图 3 是博贺测风塔 80 m 高度 10 min 平均风速和风向时程变化曲线,选择 80 m 高度观测数据进行分析是因为其受下垫面影响较小。

从图 3 看到,博贺测风塔风速时程曲线总体呈拱形,并没有出现明显的“M”型分布特征,10 min 平均风速峰值出现在 7 月 18 日 16 时,为 $29.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。风向时程曲线呈缓慢的单边上升形态,并没有

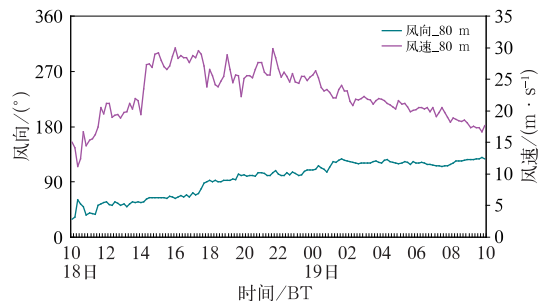


图 3 同图 2,但为博贺测风塔

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for Bohe Tower

出现大幅偏转的情况,风向从东北偏北风沿顺时针方向逐渐转变为东南风,与测风塔位于台风前进路径右侧相关。

4 测风数据代表性分析和台风强风样本划分

根据《台风涡旋测风数据判别规范》(GB/T 36745—2018)(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会,2018),同时满足以下3项判别指标的测风数据,可代表台风眼区、台风眼壁区和台风外围区的完整台风过程风况样本数据:(a)平均风速大于或等于 $17.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的样本数据风向连续变化超过 120° 方位角;(b)台风过程的风速时程曲线呈双峰分布;(c)双峰之间的底部平均风速小于 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。依据上述判别条件,对西连测风塔的观测数据进行代表性判别,从图2及具体观测数据看到,台风威马逊登陆期间西连测风塔8级以上强风(以受下垫面影响较小且数据完整的80 m高度10 min平均风速 $\geq 17.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为参考)的起止时段为7月18

日13:20至19日05:30,从前述分析看到,该时段内,测风塔各层风向沿逆时针方向连续变化约 170° 方位角,风速时程曲线呈明显的“M”型双峰分布特征,在双峰之间的底部,测风塔10 m高度10 min平均风速谷值为 $8.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,因此,可以认为,西连测风塔获取的“威马逊”观测数据包含了台风眼区、台风眼壁区和台风外围区的完整台风过程风况样本数据,能够代表台风特有的强风特性。

为进一步了解“威马逊”的近地层强风特性,主要对上述西连测风塔7月18日13:20至19日05:30的观测数据进行分析。

利用2014年7月18—19日广东省逐6 min的雷达回波图资料,根据其形态和强度、不同时刻西连测风塔所处台风位置(图4),结合台风涡旋结构特征,可将测风塔台风强风时段划分为5个区段(以80 m高度10 min平均风速时程曲线为参照,详见图5):(a)前外围强风区,18日13:20—19:00;(b)前眼壁强风区,18日19:01—21:42;(c)眼区,18日21:43—22:54;(d)后眼壁强风区,18日22:55至19日01:42;(e)后外围强风区,19日01:43—05:30。

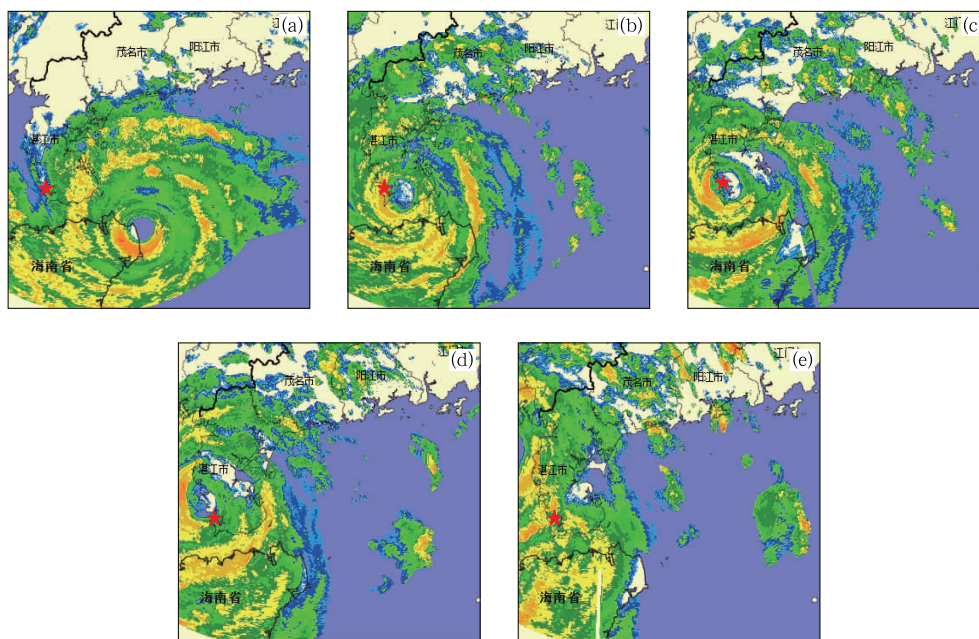


图4 2014年7月18日15:00(a),20:48(b),22:06(c),23:24(d)和19日04:00(e)典型时刻西连测风塔在台风雷达回波图位置
(a)前外围强风区,(b)前眼壁强风区,(c)眼区,(d)后眼壁强风区,(e)后外围强风区
(五角星为测风塔)

Fig. 4 Location of Xilian Tower on the radar echo map at typical typhoon moments at 15:00 BT 18 (a), 20:48 BT 18 (b), 22:06 BT 18 (c), 23:24 BT 18 (d) and 04:00 BT 19 (e) July 2014
(a) front outer-vortex, (b) front eye-wall, (c) wind eye, (d) back eye-wall, (e) back outer-vortex
(The star represents wind observation tower)

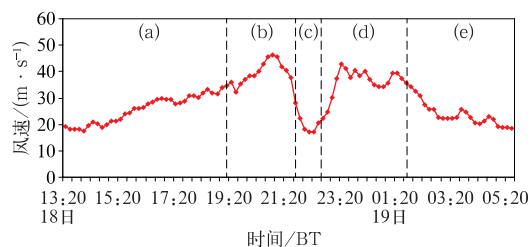


图 5 2014 年 7 月 18 日 13:20 至 19 日 05:20
西连测风塔台风强风区段划分

(a) 前外围强风区, (b) 前眼壁强风区, (c) 眼区,
(d) 后眼壁强风区, (e) 后外围强风区

Fig. 5 Different sections of the typhoon
severe wind zone at Xilian Tower

from 13:20 BT 18 to 05:20 BT 19 July 2014

(a) front outer-vortex, (b) front eye-wall,
(c) wind eye, (d) back eye-wall,
(e) back outer-vortex

选取各强风区段的台风典型影响时段以进行更有代表性的分析: (a) 18 日 14:50—15:10, 前外围强风区中前段, 风速大幅上升前; (b) 20:40—21:00, 前眼壁强风区风速峰值附近; (c) 18 日 22:00—22:20, 眼区风速谷值附近; (d) 18 日 23:10—23:30, 后眼壁强风区风速峰值附近; (e) 19 日 04:00—04:20, 后外围强风区中后段, 风速大幅下降后。

另外, 鉴于下垫面对风参数的重要影响作用, 根据西连测风塔的下垫面地形地貌和台风威马逊期间测风塔测得的风向范围, 将台风期间的来风分为三个扇区(图 6)进行分析。扇区 1、扇区 2 和扇区 3 的方位角范围分别为 $320^{\circ} \sim 349^{\circ}$ 、 $175^{\circ} \sim 319^{\circ}$ 和 $158^{\circ} \sim 174^{\circ}$ 。扇区 1 和扇区 3 的来风下垫面以海洋和陆

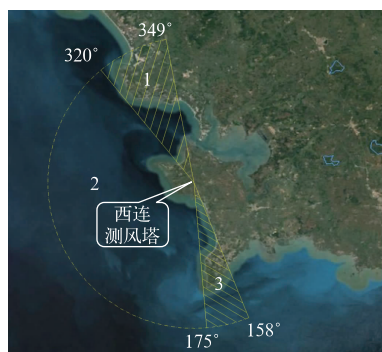


图 6 2014 年 7 月 18—19 日西连测风
塔台风期间来风下垫面分类

Fig. 6 Classification of underlying surface
at Xilian Tower during the typhoon
process in 18–19 July 2014

地为主, 扇区 2 的来风下垫面则以海洋为主。结合图 2 的风速和风向时程变化曲线可见, 在 7 月 18 日 13:20—22:00, 来风下垫面为扇区 1, 18 日 22:01 至 19 日 03:00, 来风下垫面为扇区 2, 19 日 03:01—05:30, 来风下垫面为扇区 3。

为进行对比分析, 同样选取博贺测风塔 7 月 18 日 13:20 至 19 日 05:30 的观测数据进行台风过程分析, 台风典型影响时段选取 18 日 15:50—16:10, 为台风过程风速峰值附近。从前述分析可以判断博贺测风塔明显处于“威马逊”外围区域, 由于其处于海岛, 整个台风过程来风下垫面均以海洋为主。

5 近地层强风特性分析

5.1 风速廓线特征

风速廓线是指风速随高度的变化曲线, 常用于不同高度风速的推算, 是建筑物设计需要考虑的重要因素。造成风速在近地层的垂直变化的原因有动力因素和热力因素, 前者主要来源于下垫面的摩擦效应, 即下垫面的粗糙度, 后者主要表现为与近地层大气稳定度的关系, 当大气层结为中性时, 近地层风速随高度变化近似服从对数函数和幂指数函数(王承煦和张源, 2003)。

风速随高度变化对数函数为:

$$u = u_1 \frac{\ln z - \ln z_0}{\ln z_1 - \ln z_0} \quad (1)$$

式中: u 为 z 高度处的风速, u_1 为 z_1 高度处的风速, z_0 为下垫面粗糙长度。

风速随高度变化幂指数函数为:

$$u = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^{\alpha} \quad (2)$$

式中: α 为风速廓线幂指数, 是表征下垫面粗糙程度的参数, 反映风速垂直切变的强弱, 其余变量同式(1)。

当具有两层以上风速观测数据时, z_0 和 α 值均可采用最小二乘法拟合得出, 当拟合风速廓线和实测风速廓线对应各高层风速的残差平方和达到最小时, 即可确定 z_0 和 α 值。

根据修订的帕斯奎尔(Pasquill)稳定度分级法(蒋维楣等, 2004), 当地面 10 m 高度处 10 min 平均风速 $\geq 6.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 大气层结为中性状态, 根据第 4 节的分析, 在西连测风塔 8 级以上强风时段, 10 m

高度处 10 min 平均风速最小值为 $8.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 因此, 可以判断西连测风塔强风时段大气层结均处于中性状态, 近地层风速廓线适合采用对数函数和幂指数函数进行拟合分析。

利用西连测风塔逐 10 min 平均风速观测数据, 先计算不同强风区段典型时段各高度层的平均风速, 再采用对数函数和幂指数函数进行风速廓线拟合。结果见表 1 和图 7。

从图 7 看到, 对数函数和幂指数函数对各个强风区段的风速廓线的拟合效果均较好, 从表 1 看到, 在各个强风区段, 对数函数拟合均方差小于或等于

$0.57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 幂指数函数拟合均方差小于或等于 $0.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 除后外围强风区外, 对数函数拟合均方差均小于幂指数函数拟合均方差, 因此, 总体上对数函数对强风风速廓线的拟合效果优于幂指数函数。前外围强风区、前眼壁强风区、眼区、后眼壁强风区、后外围强风区的风速廓线幂指数分别为 0.310、0.196、0.266、0.312、0.334, 粗糙长度分别为 1.163、0.186、0.716、1.199、1.382 m, 从前外围强风区到前眼壁强风区, 风速廓线幂指数和粗糙长度先是减少, 随后到眼区、后眼壁强风区和后外围强风区, 风速廓线幂指数和粗糙长度渐次增大, 在前眼壁

表 1 西连测风塔不同强风区段的风速廓线拟合

Table 1 Wind speed profile fitting at different severe wind sections at Xilian Tower

强风区段	前外围强风区	前眼壁强风区	眼区	后眼壁强风区	后外围强风区
风速廓线幂指数	0.310	0.196	0.266	0.312	0.334
粗糙长度/m	1.163	0.186	0.716	1.199	1.382
幂指数函数拟合均方差/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.40	0.81	0.38	0.71	0.12
对数函数拟合均方差/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.26	0.57	0.21	0.21	0.47

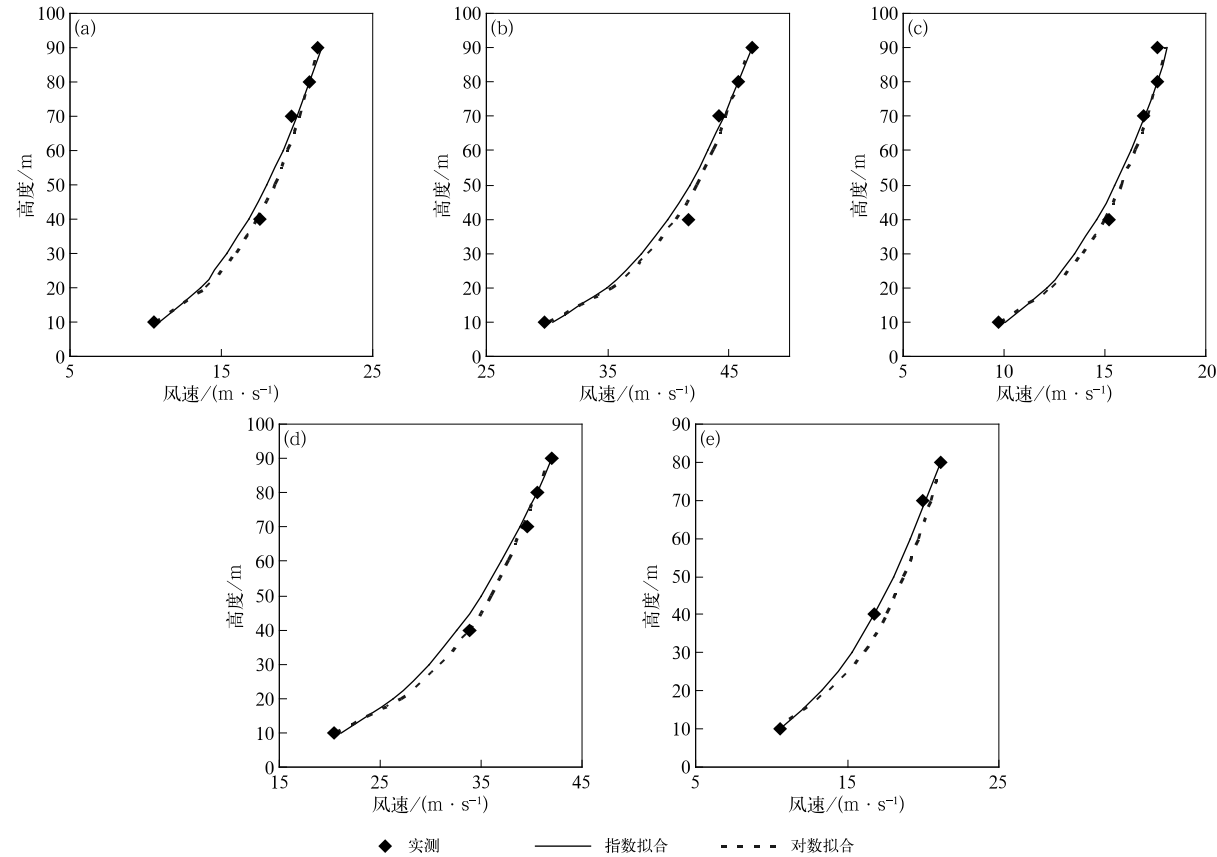


图 7 西连测风塔台风期间不同强风区段的风速廓线拟合

(a)前外围强风区,(b)前眼壁强风区,(c)眼区,(d)后眼壁强风区,(e)后外围强风区

Fig. 7 Wind speed profile fitting at different severe wind sections during the typhoon process at Xilian Tower

(a) front outer-vortex, (b) front eye-wall, (c) wind eye, (d) back eye-wall, (e) back outer-vortex

强风区,风速廓线幂指数和粗糙长度均为最小。

根据第 4 节的下垫面扇区的划分,分别计算扇区 1、2、3 的平均风廓线并进行幂指数拟合和对数拟合,结果在表 2 中给出。扇区 1 虽然近处和远处均有海岸陆地影响,但中间有一段相对宽广的水域,且测风塔北面是较为稀疏的灌木林,因此,扇区 1 的粗糙长度相对较小,对应的风切变指数也较小。而扇区 2 和扇区 3 均受近处陆地和测风塔南面较为茂密的灌木林影响,但由于扇区 2 远处为海洋下垫面,因此粗糙长度要小于扇区 3,风切变指数也小于扇区 3,扇区 3 同时受茂密树林和沿岸陆地影响,粗糙长度最大,对应的风切变指数也最大。从拟合均方差来看,粗糙程度相对较小的扇区 1 和扇区 2 的来风更符合对数律分布,扇区 3 的来风更符合幂指数分布。

表 2 西连测风塔不同下垫面扇区的风速廓线拟合

Table 2 Wind speed profile fitting at different underlying surface sectors at Xilian Tower			
来风区域	扇区 1	扇区 2	扇区 3
风切变指数	0.253	0.287	0.338
粗糙长度/m	0.582	0.929	1.393
幂指数函数拟合均方差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.59	0.87	0.31
对数函数拟合均方差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.35	0.39	0.73

同时分析了博贺测风塔台风典型影响时段的风速廓线特征,图 8 为其风速廓线拟合情况。可以看到,博贺测风塔风速廓线也基本符合幂指数律和对数律,风速廓线幂指数为 0.030,粗糙长度为 $1.0 \times 10^{-12} \text{ m}$,拟合均方差分别为 0.22 和 $0.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。风速廓线幂指数和粗糙长度相对于西连测风塔数值

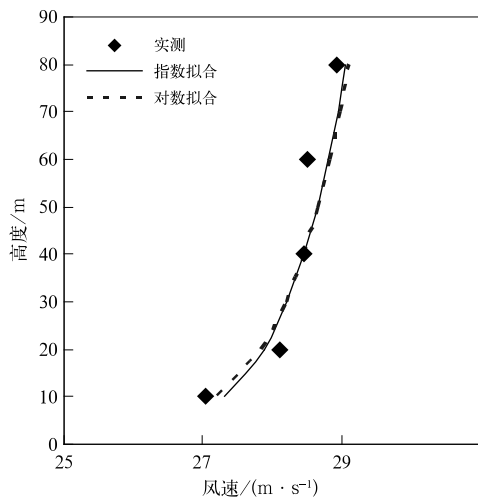


图 8 博贺测风塔风速廓线拟合

Fig. 8 Wind speed profile fitting at Bohe Tower

最小的前眼壁强风区,其值也小很多,原因主要为地形的差异,因为博贺测风塔处于小岛顶峰,气流在经过迎风坡时受到地形挤压,产生加速效应,导致测风塔低层风速增大,测风塔的风速垂直梯度变小。

5.2 湍流强度特征

湍流强度反映了风的脉动特征,是确定结构脉动风荷载的关键参数,对于风电场建设时风力发电机的选型及风电场的运行管理也是需要考虑的重要因素。湍流强度定义为风速标准差与水平风速模量的比值(盛裴轩等,2003),工程应用上通常采用 10 min 时距的风速标准差与水平平均风速的比值,计算公式为:

$$I = \frac{\sigma}{U} \quad (3)$$

式中: I 为湍流强度, σ 为 10 min 时距的风速标准差, U 为相应的 10 min 水平平均风速。

图 9 是台风强风过程西连测风塔湍流强度时程变化曲线。从图中看到,各高度湍流强度曲线由上至下有序排列,随高度增加,湍流强度减少,与摩擦效应随高度增加而减弱相关。其中 10 m 湍流强度与 40 m 以上湍流强度差距较大,主要是因为其高度较低,湍流强度受下垫面灌木林摩擦作用影响较大。从整个强风过程来看,在风速、风向大幅变化以及下垫面摩擦作用影响的复杂情况下,测风塔不同高度湍流强度变化的情况有所差别。在前外围强风区和前眼壁强风区,10 m 湍流强度随时间变化有明显减少的趋势,而 40 m 以上湍流强度变化较为平稳;随后在眼区,10 m 湍流强度明显增大,40 m 湍流强度也有所增大,但不如 10 m 明显,而 70 m 以上湍流强度有小幅度的减少趋势;然后在后眼壁强风区,10、40 m 湍流强度有小幅度的减少趋势,而 70 m 以上湍流强度变化较为平稳;最后在后外围强风区,10 m 湍流强度波动较大,但变化趋势不明显,而 40 m 以上湍流强度则有较为明显的增大趋势。

整个强风过程,西连测风塔 10、40、70、80 m 高度湍流强度最大值分别为 0.308、0.206、0.155、0.150,除 10 m 高度湍流强度最大值出现在前外围强风区外,40 m 高度以上湍流强度最大值均出现在后外围强风区,对应风速分别为 10.7、17.5、19.8、20.6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,相对而言,风速均不大;强风过程测风塔 10、40、70、80、90 m 高度的 10 min 平均风速最大值分别为 31.3、42.4、44.4、46.2 和 47.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,均出现在前眼壁强风区,对应湍流强度分别为 0.166、0.111、0.095、0.091 和 0.082,仅为最大值的 60%左右。

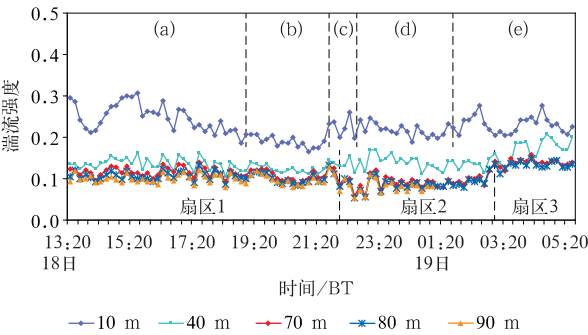


图 9 同图 5, 但为湍流强度时程变化
Fig. 9 Same as Fig. 5, but for time series of turbulence intensity

表 3 为西连测风塔不同强风区段典型时段的平均湍流强度,图 10 为其湍流强度廓线的幂指数拟合情况。

可以看到,湍流强度在前外围强风区或后外围强风区较大,在前眼壁强风区或后眼壁强风区较小。湍流强度随高度增加而减小,基本符合指数为负值的幂指数规律,眼区和后眼壁强风区拟合效果稍差,其余强风区段拟合效果较好。

表 4 给出西连测风塔各扇区的湍流强度平均值。从图 9 和表 4 来看,在 10 m 高度,由于受下垫面灌木林摩擦作用影响较大,且站点离海岸约有 1.8 km 远,近处周边均受陆地影响,因此不同扇区

表 3 西连测风塔不同强风区段的湍流强度
Table 3 Turbulence intensities at different severe wind sections at Xilian Tower

强风区段	前外围强风区	前眼壁强风区	眼区	后眼壁强风区	后外围强风区
10 m 湍流强度	0.291	0.177	0.228	0.224	0.242
40 m 湍流强度	0.147	0.115	0.138	0.153	0.163
70 m 湍流强度	0.124	0.093	0.095	0.099	0.145
80 m 湍流强度	0.109	0.089	0.091	0.091	0.139
90 m 湍流强度	0.101	0.086	0.086	0.085	—
幂指数	-0.472	-0.333	-0.446	-0.550	-0.266
幂指数拟合均方差	0.004	0.001	0.006	0.010	0.002

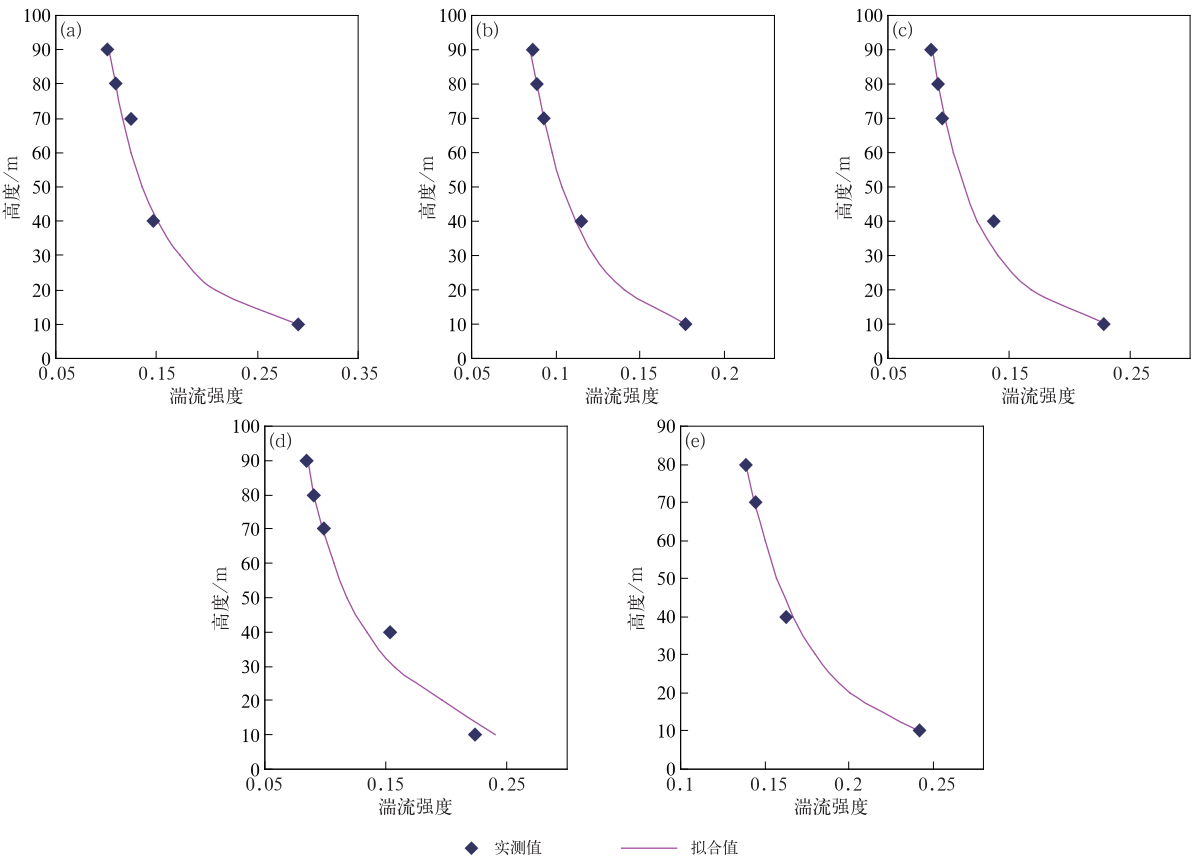


图 10 同图 7, 但为湍流强度
Fig. 10 Same as Fig. 7, but for turbulence intensity

的湍流强度差异相对较小。但在 70~90 m 高度, 来风能携带更远范围的下垫面信息, 图中可以看到下垫面陆地面积比例较多的扇区 1 和扇区 3 的湍流强度较大, 而以海洋下垫面为主的扇区 2 的湍流强度则相对较小, 此外, 来自下垫面最粗糙的扇区 3 的后外围强风的湍流强度要明显大于来自相对较光滑的扇区 1 的前外围强风的湍流强度。

表 4 西连测风塔不同下垫面扇区的湍流强度平均值

Table 4 Mean turbulence intensity at different underlying surface sectors at Xilian Tower			
测量高度/m	扇区 1	扇区 2	扇区 3
10	0.230	0.223	0.227
40	0.132	0.138	0.171
70	0.114	0.092	0.140
80	0.105	0.087	0.133
90	0.100	—	—

图 11 为台风强风过程博贺测风塔 80 m 高度湍流强度时程变化曲线。可以看到湍流强度主要在 0.06~0.11 波动, 变化较为平稳, 与西连测风塔 70 m 高度以上台风前外围和前眼壁强风区的湍流强度变化情况相似, 与来风下垫面状况较为相似有关。台风典型影响时段博贺测风塔的湍流强度也基本符合指数为负值的幂指数律, 幂指数为 -0.084, 拟合均方差为 0.002。

5.3 阵风系数特征

阵风系数也是表达风脉动特征的参数, 可以简单直观地表征风的阵性特点, 在缺乏阵风观测的情况下, 通常采用阵风系数由平均风速推算出阵风风速。WMO 给出阵风系数的定义为: 在时间间距为 T_0 的时间内持续时间为 τ 的最大阵风风速与时距为 T_0 的平均风速之比, 目前我国气象和风工程领

域一般取 T_0 为 10 min, 取 τ 为 3 s (陈雯超等, 2011)。其计算公式为:

$$G = \frac{U_{\max}}{U} \quad (4)$$

式中: G 为阵风系数, U_{\max} 为 3 s 时距的阵风风速最大值, U 为相应的 10 min 平均风速。

图 12 是台风强风过程西连测风塔阵风系数时程变化曲线。从图中看到, 各高度阵风系数曲线由上至下基本上有序排列, 随高度增加, 阵风系数减少, 同样与摩擦效应随高度增加而减弱相关。其中 10 m 阵风系数与 40 m 以上阵风系数差距较大, 波动也较大, 主要也是因为其高度较低, 阵风系数受下垫面灌木林摩擦作用影响较大。在前外围强风区和前眼壁强风区, 10 m 阵风系数有较为明显的减少趋势, 而 40 m 以上阵风系数变化相对较为平稳; 随后在眼区, 10 m 阵风系数明显增大, 40 m 阵风系数有小幅度的增大趋势, 而 70 m 以上阵风系数有小幅度的减少趋势; 然后在后眼壁强风区, 40 m 阵风系数有小幅度的减少趋势, 其他高度阵风系数变化较为平稳; 最后在后外围强风区, 10 m 阵风系数波动较大, 但变化趋势不明显, 而 40 m 以上阵风系数则有较为明显的增大趋势。

整个强风过程, 西连测风塔 10、40、70、80 m 高度阵风系数最大值分别为 1.954、1.668、1.474、1.422, 均出现在后外围强风区, 对应风速分别为 10.8、13.7、21.0、22.3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 相对而言, 风速均不大; 强风过程测风塔 10、40、70、80、90 m 高度的 10 min 平均风速最大值分别为 31.3、42.4、44.4、46.2 和 47.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 均出现在前眼壁强风区, 对应阵风系数分别为 1.505、1.325、1.207、1.232 和 1.206, 为最大值的 80% 左右。

表 5 为西连测风塔不同强风区段典型时段的平均阵风系数, 图 13 为阵风系数廓线的幂指数拟合情况。

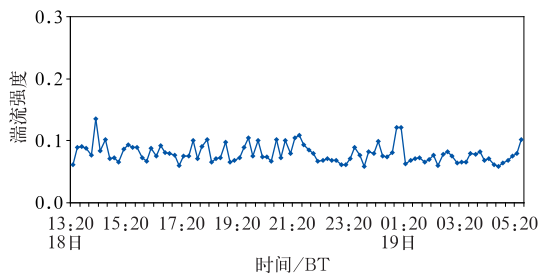


图 11 2014 年 7 月 18 日 13:20 至 19 日 05:20 博贺测风塔湍流强度时程变化

Fig. 11 Time series of turbulence intensity at Bohe Tower from 13:20 BT 18 to 05:20 BT 19 July 2014

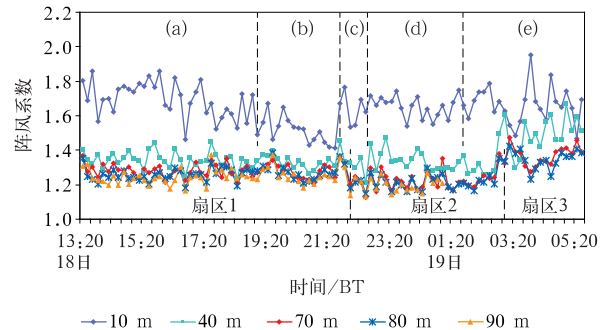


图 12 同图 5, 但为阵风系数时程变化

Fig. 12 Same as Fig. 5, but for time series of gust coefficient

可以看到,西连测风塔阵风系数在前外围强风区或后外围强风区较大,在前眼壁强风区或后眼壁强风区较小。阵风系数随高度增加而减小,基本符合指数为负值的幂指数规律,除前外围强风区和后眼壁强风区拟合效果稍差,其余强风区段拟合效果较好。

表 6 给出各扇区的阵风系数平均值。从图 12 和表 6 来看,在 10 m 高度,不同扇区的阵风系数差异相对较小,与其受陆地下垫面影响较大相关。随着高度的增加,尤其在 70~90 m 高度层,远处下垫面陆地面积比例较多的扇区 1 和扇区 3 的阵风系数

明显较大,而以海洋下垫面为主的扇区 2 的阵风系数则相对较小。另外,从 70~90 m 高度层看,来自下垫面最粗糙的扇区 3 的后外围强风的阵风系数也要明显大于来自相对较光滑的扇区 1 的前外围强风的阵风系数,来自远处陆地面积较多的扇区 1 的前眼壁强风的阵风系数也要大于来自海洋下垫面为主的扇区 2 的后眼壁强风区的阵风系数。

台风强风过程博贺测风塔 80 m 高度阵风系数时程变化曲线如图 14 所示。可以看到阵风系数主要在 1.2 左右波动,变化较为平稳,与西连测风塔 70 m 高度以上台风前外围和前眼壁强风区的阵风

表 5 西连测风塔不同强风区段的阵风系数

Table 5 Gust coefficients at different severe wind sections at Xilian Tower

强风区段	前外围强风区	前眼壁强风区	眼区	后眼壁强风区	后外围强风区
10 m 阵风系数	1.759	1.464	1.591	1.701	1.633
40 m 阵风系数	1.360	1.290	1.325	1.382	1.420
70 m 阵风系数	1.269	1.241	1.221	1.217	1.328
80 m 阵风系数	1.234	1.234	1.207	1.196	1.321
90 m 阵风系数	1.230	1.226	1.200	1.175	—
幂指数	-0.168	-0.081	-0.133	-0.172	-0.102
幂指数拟合均方差	0.016	0.008	0.006	0.016	0.006

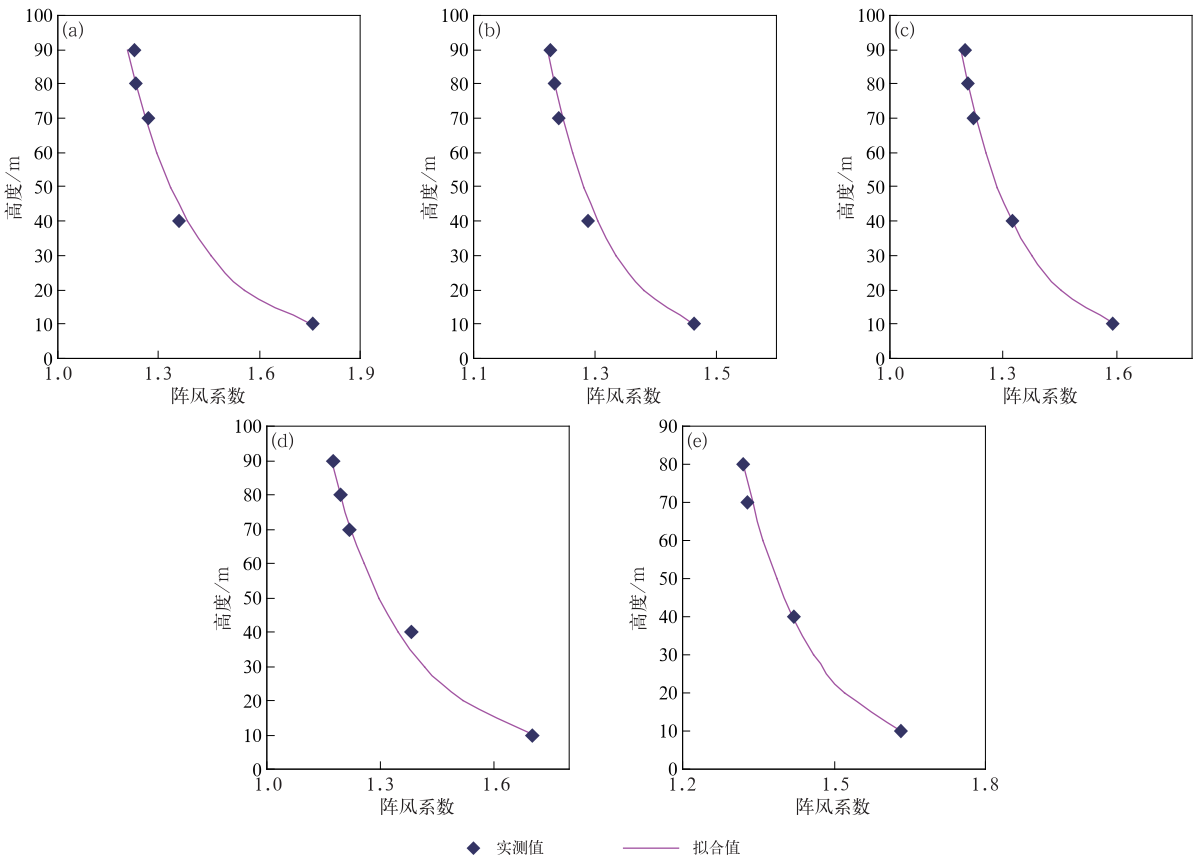


图 13 同图 7,但为阵风系数

Fig. 13 Same as Fig. 7, but for gust coefficient

表 6 西连测风塔不同下垫面扇区的阵风系数平均值
Table 6 Mean gust coefficient at different underlying surface sectors at Xilian Tower

测量高度/m	扇区 1	扇区 2	扇区 3
10	1.640	1.655	1.655
40	1.341	1.329	1.499
70	1.283	1.225	1.370
80	1.264	1.214	1.348
90	1.250	—	—

系数变化情况相似,同样与来风下垫面状况较为相似有关。台风典型影响时段博贺测风塔的阵风系数同样基本符合指数为负值的幂指数律,幂指数为 -0.016 ,拟合均方差为 0.004 。

5.4 风向短时变化特征

由于台风具有涡旋结构特征,台风过程除了风速的剧烈变化,风向也存在剧烈变化的情况,台风风向短时变化特征对于风电场等的设计、运行管理是一个需要考虑的重要因素。

定义 10 min 风向变率为后一个 10 min 风向角和前一个 10 min 风向角的差值的绝对值。

图 15 是台风强风过程西连测风塔代表低层(10 m)和高层(90 m)高度的 10 min 风向变率时程变化图。从图中看到,台风强风过程西连测风塔 10 和 90 m 的 10 min 风向变率较为接近,随时间变化走势基本一致,前外围强风区、前眼壁强风区、后眼壁强风区和后外围强风区的 10 min 风向变率变化较为平稳,基本在 10° 之内变动,而在眼区变动较为剧烈,在 7 月 18 日 22:10,10 和 90 m 的 10 min 风向变率分别为 25° 和 23° ,幅值达到最大值,此时,各层风速达到眼区的最低值或次低值。

对比分析了博贺测风塔 80 m 高度的 10 min 风向变率时程变化(图 16)。可以看到,台风过程博贺测风塔 10 min 风向变率变化较为平稳,基本在 10°

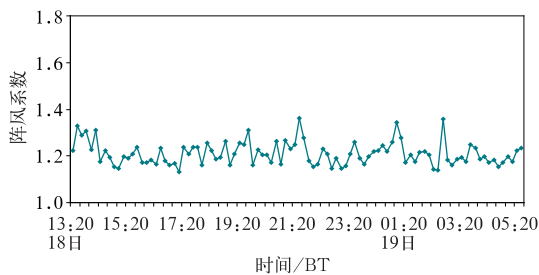


图 14 同图 11, 但为阵风系数

Fig. 14 Same as Fig. 11, but for gust coefficient

之内变动,没有出现剧烈变动的情况,与西连测风塔除眼区之外的强风区段的情形较为相似。

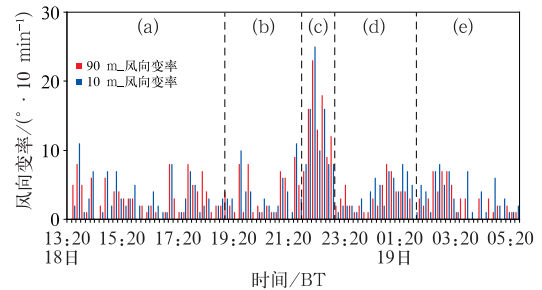


图 15 同图 5, 但为 10 min 风向变率时程变化
Fig. 15 Same as Fig. 5, but for time series of 10 min wind direction variability

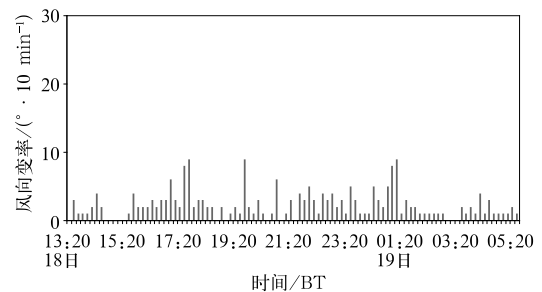


图 16 同图 11, 但为 10 min 风向变率
Fig. 16 Same as Fig. 11, but for 10 min wind direction variability

6 结 论

利用广东省徐闻县西连镇 90 m 测风塔在 1409 号超强台风威马逊登陆期间获取的具备完整的台风代表性的观测数据以及处于台风外围的广东省茂名市博贺镇 100 m 测风塔的观测数据,对台风威马逊不同位置以及不同下垫面的近地层强风特性进行了分析,西连测风塔观测数据分析结果表明:

(1)测风塔各高度风速时程曲线呈明显的“M”型分布特征,台风前眼壁强风区的风速峰值略大于后眼壁强风区。各层风向差别较小,走势基本一致,台风中心经过测风塔前后,各层风向沿逆时针方向大幅偏转约 170° 。

(2)风速随高度增加而增大,风速廓线较好地符合对数和幂指数律,总体上对数函数对风速廓线的拟合效果优于幂指数函数。从前外围强风区到前眼壁强风区,风速廓线幂指数和粗糙长度先是减少,随

后到眼区、后眼壁强风区和后外围强风区,风速廓线幂指数和粗糙长度渐次增大,在后外围强风区,风速廓线幂指数和粗糙长度最大,风速垂直切变最强,在前眼壁强风区,风速廓线幂指数和粗糙长度最小,风速垂直切变最弱。下垫面最粗糙的扇区3的风速廓线幂指数和粗糙长度最大。

(3)各层湍流强度和阵风系数在前外围强风区或后外围强风区较大,在前眼壁强风区或后眼壁强风区较小,湍流强度和阵风系数随高度增加而减小,基本符合指数为负值的幂指数律。粗糙的陆地下垫面会使湍流强度和阵风系数增大。

(4)各层10 min的风向变率较为接近,外围强风区和眼壁强风区的10 min风向变率变化较为平稳,而在眼区变动较为剧烈,在眼区,当风速达到最低值或次低值时,10 min风向变率幅值达到最大值。

博贺测风塔观测数据分析结果表明其总体上与西连测风塔台风前外围和前眼壁强风区的情形相似。

参考文献

- 陈海燕,雷小途,潘劲松,等,2018.气象灾害风险评估业务发展研究[J].气象科技进展,8(4):15-21. Chen H Y, Lei X T, Pan J S, et al, 2018. Research on the business development of meteorological disaster risk assessment[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(4):15-21(in Chinese).
- 陈联寿,端义宏,宋丽莉,等,2012.台风预报及其灾害[M].北京:气象出版社. Chen L S, Duan Y H, Song L L, et al, 2012. Typhoon Forecasting and Disasters[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 陈雯超,刘爱君,宋丽莉,等,2019.不同强风天气系统风特性的个例分析[J].气象,45(2):251-262. Chen W C, Liu A J, Song L L, et al, 2019. Case study of wind characteristics of different strong wind systems[J]. Meteor Mon, 45(2):251-262(in Chinese).
- 陈雯超,宋丽莉,植石群,等,2011.不同下垫面的热带气旋强风阵风系数研究[J].中国科学:技术科学,41(11):1449-1459. Chen W C, Song L L, Zhi S Q, et al, 2011. Analysis on gust factor of tropical cyclone strong wind over different underlying surfaces[J]. Sci China Tech Sci, 41(11):1449-1459(in Chinese).
- 程艳伟,2016.台风威马逊影响广东期间近地层风特性[J].资源节约与环保, (6):243-244. Cheng Y W, 2016. Characteristics of the near surface wind during the influence of Typhoon Rammasun on Guangdong Province[J]. Resour Econ Environ Prot, (6):243-244(in Chinese).
- 端义宏,陈联寿,梁建茵,等,2014.台风登陆前后异常变化的研究进展[J].气象学报,72(5):969-986. Duan Y H, Chen L S, Liang J Y, et al, 2014. Research progress in the unusual variations of typhoons before and after landfalling[J]. Acta Meteor Sin, 72(5):969-986(in Chinese).
- 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会,2018.台风涡旋测风数据判别规范:GB/T 36745—2018[S].北京:中国标准出版社:1-2. State Administration of Market Supervision, National Standardization Management Committee, 2018. Specification for typhoon cyclone observational wind data differentiating: GB/T 36745—2018[S]. Beijing: China Standards Press: 1-2(in Chinese).
- 蒋维楣,孙鉴宁,曹文俊,等,2004.空气污染气象学教程:第2版[M].北京:气象出版社:77-78. Jiang W M, Sun J N, Cao W J, et al, 2004. A Course in Air Pollution Meteorology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press: 77-78(in Chinese).
- 梁莉,崔晓鹏,王成鑫,等,2018.我国登陆热带气旋引起的大陆地面风场分布[J].大气科学,42(1):96-108. Liang L, Cui X P, Wang C X, et al, 2018. Characteristic distribution of surface winds associated with landfalling tropical cyclones in Mainland China[J]. Chin J Atmos Sci, 42(1):96-108(in Chinese).
- 盛裴轩,毛节泰,李建国,等,2003.大气物理学[M].北京:北京大学出版社:244-245. Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al, 2003. Atmospheric Physics[M]. Beijing: Peking University Press: 244-245(in Chinese).
- 宋丽莉,毛慧琴,黄浩辉,等,2005.登陆台风近地层湍流特征观测分析[J].气象学报,63(6):915-921. Song L L, Mao H Q, Huang H H, et al, 2005. Analysis on boundary layer turbulent features of landfalling typhoon[J]. Acta Meteor Sin, 63(6):915-921(in Chinese).
- 宋丽莉,毛慧琴,钱光明,等,2006.热带气旋对风力发电的影响分析[J].太阳能学报,27(9):961-965. Song L L, Mao H Q, Qian G M, et al, 2006. Analysis on the wind power by tropical cyclone[J]. Acta Energiae Sol Sin, 27(9):961-965(in Chinese).
- 王承熙,张源,2003.风力发电[M].北京:中国电力出版社:30-31. Wang C X, Zhang Y, 2003. Wind Power Generation[M]. Beijing: China Electric Power Press: 30-31(in Chinese).
- 王海龙,吴新桥,黄增浩,等,2018.超强台风威马逊登陆期间近地层风速变化特征分析[J].热带气象学报,34(3):297-304. Wang H L, Wu X Q, Huang Z H, et al, 2018. Study on the boundary layer wind variation characteristics of Super-Typhoon Rammasun during landing on Xuwen County[J]. J Trop Meteor, 34(3):297-304(in Chinese).
- 肖辉,万齐林,刘显通,等,2017.台风妮妲(1604)登陆期间近地层风特性分析[J].海洋气象学报,37(2):42-50. Xiao H, Wan Q L, Liu X T, et al, 2017. The analysis of the near-surface wind characteristics during the landfalling of Typhoon Nida (1604)[J]. J Mar Meteor, 37(2):42-50(in Chinese).
- 杨绚,张立生,杨琨,等,2020.台风大风低矮房屋易损性及智能网格预报的应用[J].气象,46(3):429-440. Yang X, Zhang L S, Yang K, et al, 2020. Typhoon vulnerability of typical low-rise buildings and application of intelligent grid forecast[J]. Meteor Mon, 46(3):429-440(in Chinese).
- 赵小平,朱晶晶,樊晶,等,2016.强台风海鸥登陆期间近地层风特性

- 分析[J], 气象, 42(4):415-423. Zhao X P, Zhu J J, Fan J, et al, 2016. Analysis on wind characteristics in surface layer during landfall of Typhoon Kalmaegi[J]. Meteor Mon, 42(4):415-423 (in Chinese).
- 郑焘, 李晴岚, 王兴宝, 等, 2018. 台风对深港局地风影响数值模拟及地形敏感性试验[J]. 气象, 44(3):361-371. Zheng T, Li Q L, Wang X B, et al, 2018. Numerical simulation of the local wind influence induced by tropical cyclones and topographic sensitivity tests in Shenzhen-Hong Kong Region[J]. Meteor Mon, 44(3):361-371(in Chinese).
- Cao S Y, Tamura Y, Kikuchi N, et al, 2009. Wind characteristics of a strong typhoon[J]. J Wind Eng Ind Aerod, 97(1):11-21.
- Ishizaki H, 1983. Wind profiles, turbulence intensities and gust factors for design in typhoon-prone regions[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 13(1/2/3):55-66.
- Li L X, Kareem A, Xiao Y Q, et al, 2015. A comparative study of field measurements of the turbulence characteristics of typhoon and hurricane winds[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 140:49-66.
- Powell M D, Vickery P J, Reinhold T A, 2003. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones[J]. Nature, 422(6929):279-283.
- Song L L, Chen W C, Wang B L, et al, 2016. Characteristics of wind profiles in the landfalling typhoon boundary layer[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 149:77-88.
- Song L L, Li Q S, Chen W C, et al, 2012. Wind characteristics of a strong typhoon in marine surface boundary layer [J]. Wind Struct, 15(1):1-15.
- Song L L, Pang J B, Jiang C L, et al, 2010. Field measurement and analysis of turbulence coherence for Typhoon Nuri at Macao Friendship Bridge[J]. Sci China Technol Sci, 53(10):2647-2657.
- Tamura Y, Iwatani Y, Hibi K, et al, 2007. Profiles of mean wind speeds and vertical turbulence intensities measured at seashore and two inland sites using Doppler sodars[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 95(6):411-427.