

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).

不同强风天气系统风特性的个例分析*

陈雯超¹ 刘爱君¹ 宋丽莉² 王丙兰²

1 广东省气象防灾技术服务中心, 广州 510080

2 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081

提 要: 利用广东省东莞市的 80 m 气象塔在台风莫拉菲、强对流和强冷空气期间的观测数据, 分析不同强风天气系统近地面边界层的平均风和脉动风特性参数。研究发现:(1)1 号强对流的风速变化最为剧烈, 风速的 10 min 升幅可分别达台风和强冷空气大风的 1.8 和 3.7 倍。强对流的 10 min 平均风向变幅也最剧烈, 可达到 $120^\circ \cdot (10 \text{ min})^{-1}$ 。(2)台风强风廓线的幂指数值为 0.177, 要大于建筑结构荷载规范(GB 5009—2012)给出的 B 类下垫面 0.15 的参考值, 而强对流的幂指数值接近规范给出的 A 类下垫面的参考值 0.12, 强冷空气的幂指数值则仅为 0.10。(3)1 号强对流强风平均湍流强度分别是台风和强冷空气大风平均湍流强度的 1.4~2.1 和 1.7~2.0 倍。(4)台风和强对流的风攻角在 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 范围内, 强冷空气大风的攻角在 0° 附近变动。(5)强风影响期间湍流空间积分尺度均有增大的现象, 台风强风经过时, 水平(纵向和横向)湍流空间积分尺度明显增大了一个量级。(6)台风强风的湍流功率谱不满足在惯性子区湍流能谱密度的 $-5/3$ 次方与频率成正比的规律和各向同性假设。台风强风的湍流能谱值要显著高于强对流和强冷空气, 其中, 在桥梁敏感频段台风的平均湍流能谱值约为强对流和强冷空气的 3 倍。

关键词: 台风, 强对流, 强冷空气, 风特性

中图分类号: P412, P425

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.02.010

Case Study of Wind Characteristics of Different Strong Wind Systems

CHEN Wenchao¹ LIU Aijun¹ SONG Lili² WANG Binglan²

1 Guangdong Meteorology Disaster Prevention Technology Service Center, Guangzhou 510080

2 CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081

Abstract: Using the wind data observed from the 80 m meteorological tower in Dongguan of Guangdong Province during the passes of Typhoon Molave, severe convection and severe cold air, the mean wind and fluctuating wind characteristics of different strong wind weather systems in the near-surface boundary layer are analyzed. The results show that: (1) the wind speed variation of the severe convection No. 1 is most dramatic and the 10 min mean wind speed amplitude of severe convection can go up to 1.8 times and 3.7 times as much as that of typhoon and severe cold air. The 10 min mean wind direction amplitude can be $120^\circ \cdot (10 \text{ min})^{-1}$. (2) The power law exponent of typhoon strong wind profile is 0.177 which is larger than 0.15 that is recommended as the power law exponent of exposure class B in Chinese National Code (GB 5009—2012). The power law exponent of severe convection is near 0.12 which is recommended as the exposure class A in the code and the power law exponent of severe cold air is only 0.10. (3) The 10 min average turbulence intensity of No. 1 severe convection can go up to 1.4—2.1 times and 1.7—2.0 times as much as that of typhoon and severe cold air. (4) The attack angles of typhoon and severe convection change between $-3^\circ \sim 3^\circ$ while the attack angle of severe cold air changes near 0° . (5) The turbulence integral length scales increase due

* 广东省气象局科学技术研究项目(2015B32)、科技部科技基础性工作专项(2013FY112400)和国家自然科学基金青年基金项目(41305007)共同资助

2017 年 8 月 24 日收稿; 2018 年 9 月 30 日收修定稿

第一作者:陈雯超,从事气候可行性论证和风特性研究. Email:wenchao678@163.com

to the impact of strong wind processes. The horizontal (longitudinal and transverse) turbulence integral length scales of typhoon can obviously increase by an order of magnitude. (6) The typhoon strong wind spectra does not satisfy the $-5/3$ law and the isotropy assumption. The power spectral density (PSD) value of typhoon is significantly larger than that of severe convection and severe cold air. The PSD value of typhoon is about 3 times as large as that of severe convection and severe cold air.

Key words: typhoon, severe convection, severe cold air, wind characteristics

引 言

随着高耸和大跨等风敏感建筑物、构筑物的不断出现,边界层强风特性也越来越成为风工程界关注的热点(郭冬艳等,2011;黄林宏等,2016;廖菲等,2017;唐明晖等,2017;周福等,2017),风廓线、湍流强度、湍流积分尺度和湍流功率谱等反映强风特性的参数也在工程设计中起着关键的作用(Cao et al, 2009; Wang et al, 2011; 钱燕珍等,2013)。台风、强对流大风和冷空气大风由于生成机理不一样,因此其风特性也会有差别。现场测风是研究近地层风特性的最直接可靠的手段,近年来,我国在近地层风特性研究方面取得了一些重要研究成果。宋丽莉等(2005;2006)和 Song et al(2010;2012;2016)采用强风型超声测风仪对登陆广东的多个台风个例进行观测,对比分析了这几个台风的中心区域和其外围风况的平均风廓线和脉动风参数等特征,发现台风过程的中心强风区和外围风况的风廓线和湍流特征差异显著,并建立了粗糙长度与风廓线幂指数的数学模型;庞加斌等(2002)根据在上海观测的“派比安”台风实测风速资料得到了台风的水平风速功率谱和垂直风速功率谱,并对实测水平脉动风谱和垂直脉动风谱进行了曲线拟合。赵小平等(2016)基于强台风海鸥登陆期间的近地层测风资料,对台风过程不同位置的风廓线和湍流特征参数进行了细致的对比分析,但没有进一步考虑台风经过前后下垫面差异的影响。班欣等(2012)基于连云港沿海气象站的观测资料,分析了强冷空气、强对流和台风的湍流强度分布规律和特点,发现不同的大气层结稳定性和下垫面均会对湍流强度产生影响。

本文基于广东省珠江口的气象观测塔的测风数据,分析台风、强对流天气和强冷空气条件下,工程抗风最为关注的近地层的强风特性,以期工程抗风设计提供参考。

1 观测塔与强风过程描述

1.1 沙田塔描述与观测设置

沙田塔是位于中国广东省东莞市的一个气象测风塔(22.853°N、113.574°E,塔基海拔高度 8 m)。该塔位于江边,珠江入海口处,西面邻江,下垫面平坦,以耕地为主,周围地面长有稀疏杂草和低矮树木(图 1)。气象塔在 10、20、40、60、80 m 高度层安装有美国 Renewable NRG Systems 公司的 NRG-#40c 型杯式风速计和 #200p 型风向传感器,风速数据采集的时间步长为 1 s,测量范围为 $1\sim 96\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,仪器记录每 10 min 的平均风速、最大阵风(3 s)风速和 1 s 风速相对 10 min 平均风速的标准差,风向记录每 10 min 平均风向,仪器安装之前均在标准风洞中进行统一标定。在 75 m 高度层安装 Wind-Master Pro 型三维超声风速仪,该仪器最大风速量程为 $65\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,采用 10 Hz 的采样频率,每 0.1 s 记录 u 、 v 、 w 三维方向的瞬时风速值、虚温和判别码。在观测期间,沙田塔测得了多次强风过程,包括台风莫拉菲、强对流强风和冷空气大风。

1.2 台风莫拉菲

台风莫拉菲于 2009 年 7 月 19 日 00:50 在深圳市大鹏半岛(南澳镇)沿海地区登陆,登陆时中心最低气压为 965 hPa,中心附近最大风力为 13 级,达到 $38\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。“莫拉菲”在深圳市登陆后持续向西北偏西方向移动,强度逐渐减弱,先后穿过东莞、佛山、广州和肇庆等市。19 日 05:30 左右,“莫拉菲”减弱为热带风暴,从沙田塔西南面约 12 km 处经过。图 2 为台风路径图及观测塔距离台风中心的相对位置。在 19 日的 00—04 时,沙田塔测得的台风风向在 $321^\circ\sim 344^\circ$ 变化,为离岸风。随后风向随顺时针变化,直至 06 时开始,风向开始稳定在 $157^\circ\sim 175^\circ$,为向岸风。

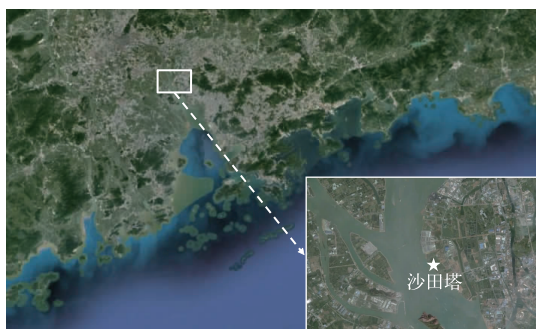


图 1 沙田塔地理位置图

Fig. 1 Geographic location of Shatian Tower



图 2 台风莫拉菲路径图及观测塔
距离台风中心的位置

Fig. 2 Path of Typhoon Molave and observation
tower location relative to the typhoon center

1.3 强对流天气

本文选取了沙田塔测得的两次强对流天气的观测资料进行研究。

1.3.1 1号强对流过程

2009年8月23日,沙田塔观测到短时风速、风向剧烈变化的强对流飑线过程,该过程持续约1h。图3给出沙田塔东南面约3.3km处自动气象站在23日13时至24日01时观测到的10min平均风速、10min平均风向和气温、气压时程曲线。由图3可见,在19时前后有强对流过程影响,自动气象站19时测得10min平均风速为 $9.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,比18时的10min平均风速增加 $8.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,对应的10min平均风向也发生显著变化;同时,气温急速降低,18时的气温为 $33.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,19时气温降至 $26.7\text{ }^{\circ}\text{C}$;气压则从18时的 1001.2 hPa 增加到19时的 1002.9 hPa ;该站在19—20时还测得 9.7 mm 的累积雨量。此次强对流过程简称为1号强对流。

1.3.2 2号强对流过程

2009年7月11日,沙田塔观测到持续约半小时的风速、风向剧烈变化的强对流飑线过程。由于该次强对流影响范围小,周边自动站未测得相关气象现象。下文将给出此次过程沙田塔的10min平均风速、10min平均风向并进行分析。此次强对流过程简称为2号强对流过程。

1.4 强冷空气

2008年12月21—23日一次强冷空气过程影响沙田现场测风区域,出现大风降温天气,此次强冷空气具有南下速度快、风力大的特点。图4给出沙

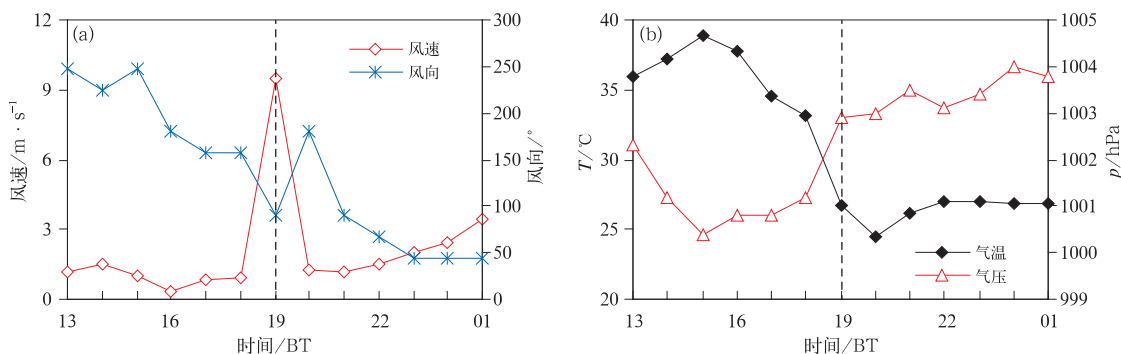


图 3 2009年8月23日1号强对流过程的(a)10 min 平均风速和
风向,(b)气温和气压
(虚线表示强对经过时刻)

Fig. 3 Variations of meteorological elements in convection process No. 1 on 23 August 2009
(a) 10 min wind speed and wind direction, (b) temperature and air pressure
(vertical dotted line: the time with severe convection)

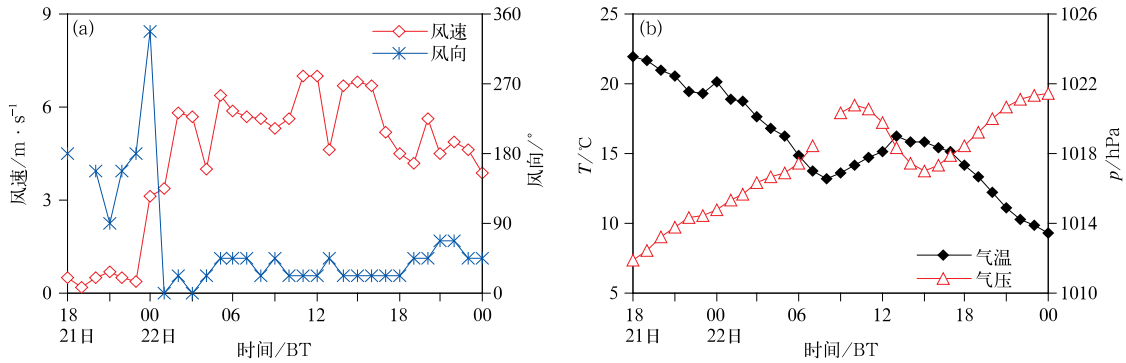


图 4 同图 3, 但为 2008 年 12 月 21—23 日强冷空气过程

Fig. 4 Same as Fig. 4, but for severe cold air process from 21 to 23 December 2008

田塔东南面约 3.3 km 处的自动气象站在 21 日 18 时至 23 日 00 时观测到的 10 min 平均风速、10 min 平均风向和气温、气压时程曲线。由图 4 中可见, 22 日 00 时开始, 10 min 平均风速显著增加, 风向转为偏北风, 22 日 11 时测得 10 min 平均风速最大值 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 气温呈显著下降趋势, 在 22 日 00—11 时, 气温从 20.1°C 降为 14.7°C , 随后继续下降; 气压则显著增加。

1.5 强风数据分析说明

台风、2 号强对流和强冷空气过程均有杯式测风仪和超声测风仪的观测记录, 1 号强对流过程仅有杯式测风仪的观测记录, 超声风速仪数据缺测。因此, 文中风速、风向、风廓线、湍流强度的对比是基于四个强风过程的杯式测风仪数据进行的分析; 而基于超声数据的风攻角、湍流空间积分尺度和湍流功率谱分析则针对台风、2 号强对流和强冷空气过程进行。

2 平均风特性

2.1 风速、风向

图 5 给出沙田塔 80 m 测得的台风、强对流和冷空气过程的强风 10 min 平均风速、10 min 平均风向随时间的变化。从图 5a 可见, 台风莫拉菲过程 10 min 平均风速呈显著的“M”型双峰分布, 双峰之间最低 10 min 平均风速为 $9.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 8 级强风的 10 min 平均风向持续转变 208° , 根据 Song et al (2016) 的台风强风代表性判别标准可知, 沙田塔测

得的强风过程采集到了包括台风眼区风、眼壁和外围强风的完整台风风况数据。台风过程中 80 m 高度层测得最大 10 min 平均风速为 $25.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 3 s 阵风风速为 $31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 图 5b 和 5c 显示受强对流影响, 10 min 平均风速有显著的增加, 1 号强对流过程的 80 m 的 10 min 平均风速在 18:30—19:00 从 $5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $25.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 对应 3 s 阵风风速为 $32.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 2 号强对流的 80 m 的 10 min 平均风速在 01:00—01:20 从 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $13.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 对应 3 s 阵风风速为 $18.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 同时伴随着风向的显著突变; 图 5d 显示强冷空气过程中, 80 m 的 10 min 平均风速从 01:20 开始缓慢增大, 在 09:20 测得最大的 10 min 平均风速 ($12.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 对应 3 s 阵风风速为 $14.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风向以东北偏北风为主。台风、1 号强对流、2 号强对流和强冷空气过程风速的 10 min 升幅最大值分别是 5.4 、 9.6 、 5.9 和 $2.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。1 号强对流过程的风速变化最为剧烈, 风速的 10 min 升幅可分别达台风和强冷空气大风的 1.8 和 3.7 倍。

计算各强风过程的 10 min 平均风向时间变率 (指后一个 10 min 平均风向和前一个的差值), 当差值为正时表示风向顺时针偏转, 为负时表示风向逆时针偏转。结果显示, 台风过程的最大 10 min 平均风向时间变率为 $28^\circ \cdot (10 \text{ min})^{-1}$, 伴随着 10 min 平均风速从 $25.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $21.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 强对流强风出现时风向显著突变, 1 号和 2 号强对流过程的最大 10 min 平均风向时间变率分别为 109 和 $120^\circ \cdot (10 \text{ min})^{-1}$, 均在风速急剧回落后出现; 强冷空气过程的最大 10 min 平均风向时间变率为 $14^\circ \cdot (10 \text{ min})^{-1}$ 。

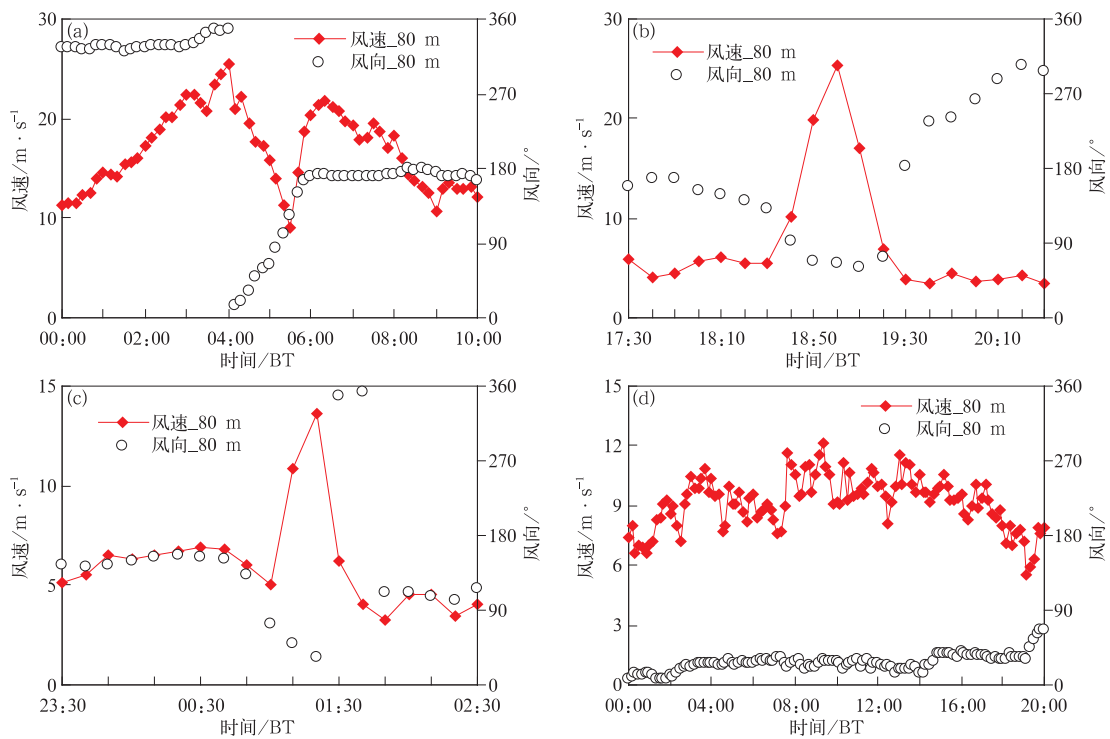


图 5 强风过程 10 min 平均风速和风向随时间的变化

(a)台风过程,(b)1号强对流过程,(c)2号强对流过程,(d)冷空气过程

Fig. 5 Variations of 10 min wind speed and wind direction with time in strong wind processes

(a) typhoon process, (b) severe convection process No. 1, (c) severe convection process No. 2, (d) severe cold air

2.2 强风样本的选取

图 6 给出了各个强风过程来风方位角的范围示意图。由图 6 可见,台风过程的强风主要来自 $326^{\circ} \sim 24^{\circ}$ 和 $170^{\circ} \sim 174^{\circ}$ 方位角,1 号强对流和 2 号强对流分别来自 $63^{\circ} \sim 73^{\circ}$ 和 $35^{\circ} \sim 53^{\circ}$ 方位角,强冷空气则来自 $19^{\circ} \sim 36^{\circ}$ 方位角。台风北面来风和强对流、冷空气的来风下垫面状况较一致,基本为平坦的城郊下垫面,以大片平坦耕地为主,而台风南面来风下垫面陆地面积较少,以江河水道下垫面为主。由于下垫面对风特性有显著的影响,为了减小不同强风来向下垫面的差异,在下文给出的测风参数对比中,台风强风样本只选取与强对流和冷空气来风下垫面状况较为一致的台风北面来风,且 60 m 高度的 10 min 平均风速达到 9 级及以上 ($\geq 20.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的强风作对比分析,选取的时段为 02:50—04:20。强对流的强风样本选自风速显著增大的时段,1 号强对流的强风样本时段为 18:50—19:10,2 号强对流的强风样本时段为 01:10—01:20;强冷空气过程

的强风样本选取 60 m 高度的 10 min 平均风速增加到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 并在附近波动的最大风时段,冷空气强风样本时段为 07:40—14:00。GB 50009—2012(中华人民共和国住房和城乡建设部,2012)将下垫面类

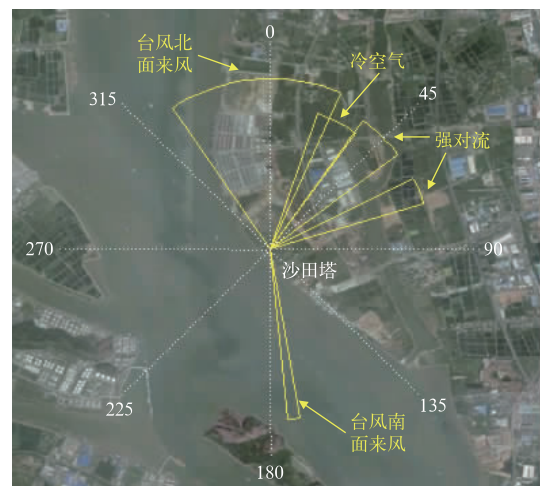


图 6 各强风过程来风方位角范围示意图

Fig. 6 Wind azimuth range of strong wind processes

型分为 4 类,各类下垫面描述如下:A 类指近海海面和海岛、海岸、湖岸及沙漠地区;B 类指田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的乡镇;C 类指有密集建筑群的城市市区;D 类指有密集建筑群且房屋较高的城市市区。上述所选的沙田塔测得的强风样本的来风下垫面基本属于 B 类下垫面。

2.3 风廓线

风廓线用以描述风随高度的变化情况,在此指风速随高度的变化形态。近地边界层中风速的垂直分布特征与大气层结、下垫面粗糙度和天气系统特性等有关。工程应用中常以幂指数或对数率来量化拟合描述风廓线,目前,国内外大部分相关规范(中华人民共和国住房和城乡建设部,2012; Hong Kong Building Department, 2004; Architectural

Institute of Japan, 2004; American Society of Civil Engineers, 2006)推荐幂指数形式,表达式如下:

$$u = u_1 \left(\frac{z}{z_1}\right)^\alpha \quad (1)$$

式中, u 为 z 高度处的风速, u_1 为 z_1 高度处的风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), α 为该高度层内的风速廓线指数。

图 7 给出各强风过程的每 10 min 平均风廓线的变化图(其中由于冷空气时间较长,每 20 min 间隔给出 10 min 平均风廓线),横坐标表示该风廓线测得的时间。结合图 5 可见,台风过程中 03—04 时左右的台风眼壁强风以及 1 号强对流过程的 19 时左右、2 号强对流过程的 01:20 左右的强风经过沙田塔时,风廓线的形态均有显著变化,10 min 平均风速随高度的增加非常显著,而冷空气强风经过时,风廓线的变化不明显。

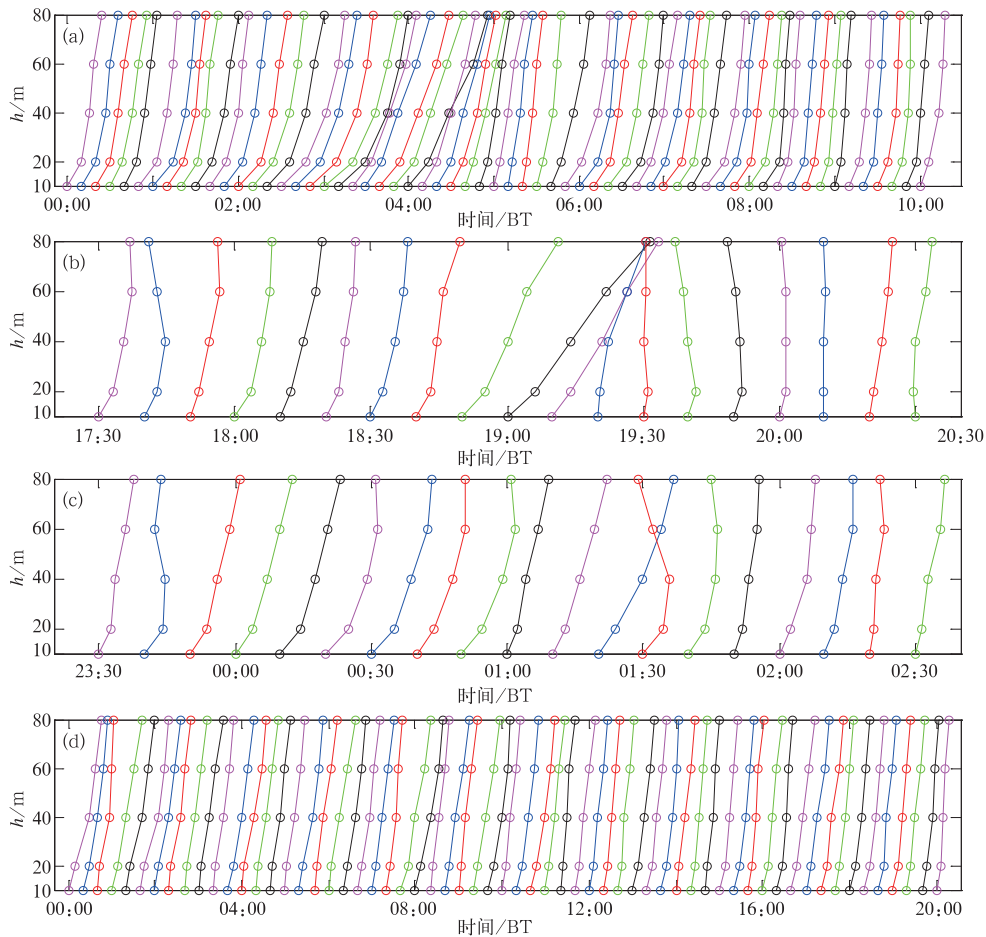


图 7 各强风过程 10 min 风廓线随时间的变化

(a) 台风过程, (b) 1 号强对流过程, (c) 2 号强对流过程, (d) 强冷空气过程

Fig. 7 Variations of 10 min mean wind speed profiles during strong wind processes

(a) typhoon process, (b) severe convection process No. 1,

(c) severe convection process No. 2, (d) severe cold air

根据式(1),计算各强风过程的平均风廓线(过程中的10 min 风廓线的平均值)和最大的10 min 风廓线的幂指数值。图8给出各强风过程的最大10 min 风廓线及其幂指数拟合线。结果显示,强冷空气过程的风廓线幂指数值(α 值)最小,平均风廓线和最大的10 min 风廓线的 α 值分别为0.102和0.112;1号强对流过程的平均风廓线和最大的10 min 风廓线的 α 值分别为0.121和0.122;2号强对流过程的平均风廓线和最大的10 min 风廓线的 α 值分别为0.125和0.135;台风强风的平均风廓线和最大的10 min 风廓线的 α 值分别为0.177和0.183。可见,在强冷空气和强对流过程中,风速随高度增加而增加的速度没有在台风条件下风速的增长速度快。台风强风平均风廓线的 α 值分别是强对流强风平均风廓线和冷空气大风平均风廓线的 α 值的1.4和1.7倍(表略)。GB 50009—2012(中华人民共和国住房和城乡建设部,2012)中给出A、B、C、D类的风廓线幂的 α 取值为0.12、0.15、0.22和0.30。可见,沙田塔B类下垫面下的台风强风廓线的 α 值要大于规范给出的0.15的参考值,而强对流的 α 值接近规范给出的A类下垫面的参考值0.12,而强冷空气的 α 值则更小。

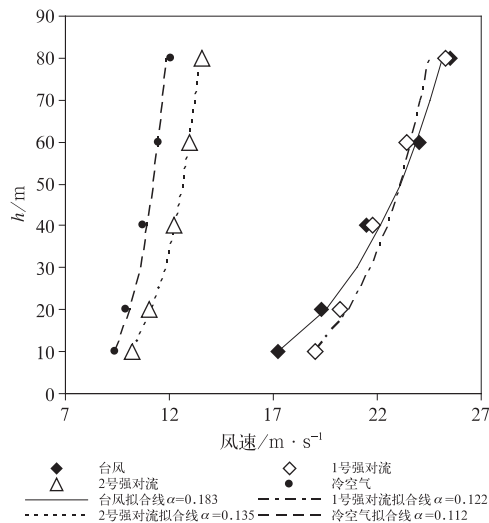


图8 强风过程的最大10 min 风廓线及其幂指数拟合线

Fig.8 Maximum 10 min wind profiles and fitting curves of the strong wind processes

3 脉动风特性

3.1 湍流强度

湍流强度反映了风的脉动强度,是确定结构脉动风荷载的关键参数,定义湍流强度为10 min时段的脉动风速标准差与水平平均风速的比值(盛裴轩等,2003)。本文的湍流强度(I)是基于杯式测风仪的1 s 风速记录的标准差(σ ,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)相对10 min 平均风速(U ,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的比值计算所得结果。

$$I = \frac{\sigma}{U} \quad (2)$$

图9给出强风过程的80 m 湍流强度与10 min 平均风速随时间的变化。由图9可见,在台风中心前后的强风区都有显著湍流强度增大的现象,尤其是04:00—04:20,台风强风叠加陆地的影响,湍流强度显著增大,台风中心经过后的台风强风区由于下垫面是江河水面为主,湍流强度增大幅度明显较小;强对流期间湍流强度在最大的10 min 平均风速出现(19:00和01:20)前后都有显著的增大,主要是风速的骤然升降造成;而强冷空气的湍流强度变化不明显。台风、1号强对流、2号强对流和强冷空气期间测得的80 m 高度层的最大的10 min 平均风速分别为25.5、25.3、13.6和12.1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大风时刻对应的80 m 高度测得的湍流强度分别为0.094、0.146、0.199和0.091。表1给出了各天气系统强风时段的湍流强度平均值,从表中可见,1号强对流天气下的强风湍流强度平均值分别是台风和强冷空气强风湍流强度平均值的1.4~2.1和1.7~2.0倍。在短时强对流过程中,风的组织结构可能较大尺度的强台风的涡旋结构更为紊乱,并且由于同样具有较大的风速,因而强对流对结构起着不容忽视的破坏作用。

基于三维超声观测数据,计算不同天气系统的强风在纵向、横向、竖向方面的湍流强度比值($I_u : I_v : I_w$)。该比值有较大差异,75 m 高度层台风强风的 $I_u : I_v : I_w = 1 : 0.84 : 0.51$,2号强对流过程大风的 $I_u : I_v : I_w = 1 : 0.78 : 0.45$,冷空气过程大风的 $I_u : I_v : I_w = 1 : 0.93 : 0.61$,与《公路桥梁抗风设计指南》(项海帆等,1996)中给出的1 : 0.88 : 0.5有差异。

表 1 强风过程各高度层的平均湍流强度

Table 1 Average turbulence intensities of different heights in strong wind processes

风况类型	测量高度/m				
	10	20	40	60	80
台风	0.179	0.159	0.135	0.118	0.107
强对流 1	0.257	0.260	0.258	0.244	0.226
强对流 2	0.265	0.256	0.238	0.219	0.209
强冷空气	0.155	0.147	0.133	0.120	0.115

3.2 风攻角

风攻角指风的来流方向与水平面的夹角。风攻角对结构物特别是柔性结构物的影响比较突出,其长期作用会加速或加重结构的疲劳损坏。强风时,风攻角的改变可能对结构造成突然损伤甚至破坏。风攻角主要由不均匀地形致使气流强迫抬升或下沉而产生,另外,不同的天气系统,尤其是涡旋结构的(如热带气旋、龙卷风等)强烈天气系统也可以导致风攻角的变化。在桥梁动力抗风设计中,应考虑高速时风的平均攻角,根据《公路桥梁抗风设计指南》(项海帆等,1996),一般推荐采用 $\pm 3^\circ$,平静海面和开阔平坦地形大约为 0° 。风攻角的计算公式如下:

$$\tan\theta = \frac{W}{U} \quad (3)$$

式中, θ 为风攻角(单位: $^\circ$), W 为垂直风风速平均值(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), U 为主风向风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

图 10 给出强风过程的 10 min 平均风速和风攻角随时间的变化。由图 10 可见,由于台风中心经过前后来风从离岸风转为向岸风,离岸强风攻角在 $-1.4^\circ \sim 0.1^\circ$ 变化,而受地形抬升影响,台风中心经过后风攻角显著增加。但仍在 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 范围内。冷空气大风的风攻角在 0° 附近变动。而 2 号强对流影响前,风攻角有显著增加的现象,测得最大风攻角为 4° ,但此时的 10 min 平均风速仅为 $4.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风速急速增大时,风攻角仍在 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 以内。

3.3 湍流空间积分尺度

湍流空间积分尺度是表征湍流大小的物理量。由于结构风荷载对湍流尺度特性的敏感性,湍流积分长度通常是一项重要的风特性指标。湍流空间积分尺度的大小决定了脉动风对结构的影响范围。与纵向脉动速度有关的涡旋的纵向、横向和垂直方向

的平均尺寸用 L_u^x 、 L_u^y 和 L_u^z 表示,在数学上可定义 L_u^x 为:

$$L_u^x = \frac{1}{\sigma_u^2} \int_0^\infty R_{u_1 u_2}(x) dx \quad (4)$$

式中, $R_{u_1 u_2}(x)$ 是两个不同空间位置上的纵向脉动速度 $u_1 = u(x_1, y_1, z_1, t)$ 和 $u_2 = u(x_1 + x, y_1, z_1, t)$ 的互协方差函数, t 为时间, σ_u^2 为脉动速度 u 的方差,同样的定义也适用于 L_u^y 和 L_u^z 。假设气流以 U 的速度迁移,则脉动速度 $u(x_1, t + \tau)$ 可以定义为 $u(x_1, -x, \tau)$, $x = Ut$,即 Taylor 假设,那么式(4)可以改写为:

$$L_u^x = \frac{U}{\sigma_u^2} \int_0^\infty R_u(\tau) d\tau \quad (5)$$

式中, $R_u(\tau)$ 是脉动量 $u(x_1, t)$ 的自相关函数, $R_u(\tau) = E[u(t)u(t + \tau)]$,一般积分上限取到 $R_u(\tau) = 0.05\sigma_u^2$ 。基于测风塔上的采样频率为 10 Hz 的三维超声测风数据,计算纵向、横向和垂直方向脉动风速的平均空间尺度,下文分别用 L_u 、 L_v 、 L_w 表示(单位:m)。

图 11 给出强风过程的 10 min 平均风速和湍流空间积分尺度随时间的变化。当台风强风经过时,水平(纵向和横向)湍流空间积分尺度明显增大了—个量级,由几十米变为几百米,但垂直方向没有明显变化,台风强风的平均三维湍流空间积分尺度分别为 318、111、37 m。2 号强对流过程在风速显著增加时,三维方向的湍流空间积分尺度均有增大的现象,平均三维湍流空间积分尺度分别为 238、108、68 m。强冷空气大风经过观测塔时,三维方向的湍流空间积分尺度也有增大的现象,平均三维湍流空间积分尺度分别为 115、81、40 m。

3.4 湍流功率谱

大气中某个空间点的脉动风速是由许多不同尺度的涡在该点形成的各种频率的脉动叠加组合而成

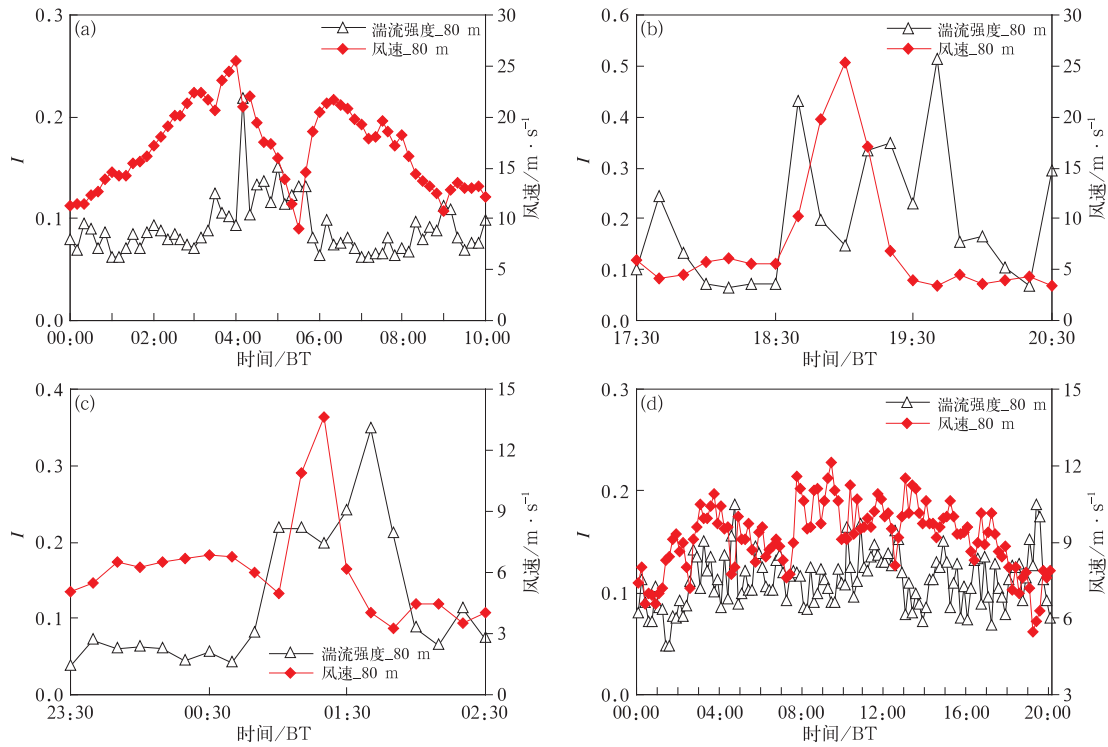


图 9 同图 5, 但为强风过程湍流强度与 10 min 平均风速

Fig. 9 Same as Fig. 5, but for turbulence intensity and 10 min wind speed

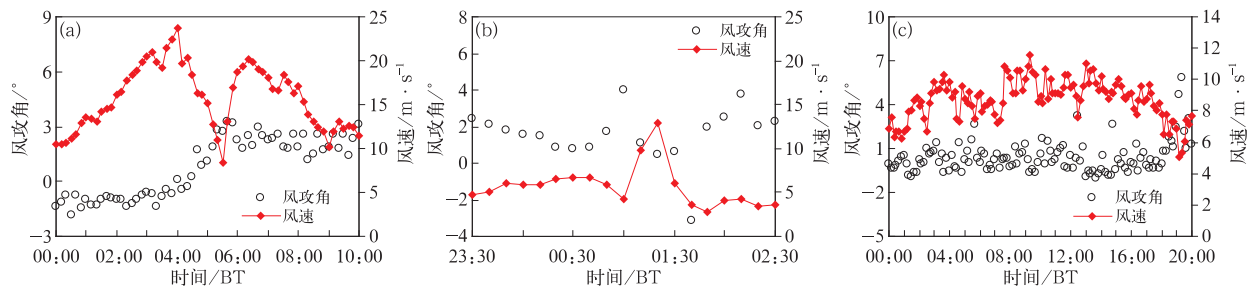


图 10 强风过程 75 m 高度层风攻角与 10 min 平均风速随时间的变化

(a) 台风过程, (b) 2 号强对流的, (c) 强冷空气过程

Fig. 10 Variations of attack angle and 10 min mean wind speed at the height of 75 m

with time during strong wind processes

(a) typhoon process, (b) severe convection process No. 2, (c) severe cold air

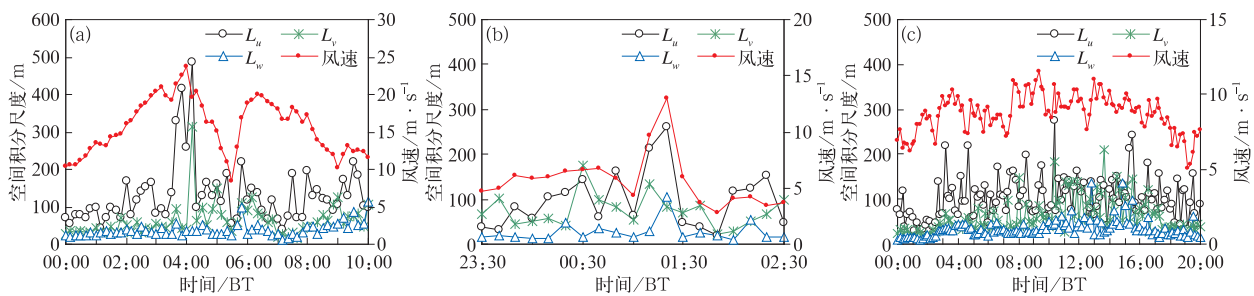


图 11 同图 10, 但为湍流空间积分尺度与 10 min 平均风速

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for turbulence integral length scale and 10 min mean wind speed

的。所以,湍流的脉动动能可以被认为是各种频率的涡的贡献。脉动功率谱是湍流脉动能在各个频率上的分布,用来描述湍流中不同尺度的涡的湍流脉动动能的贡献。湍流功率谱函数 $S_i (i = u, v, w)$ 能够准确地描述脉动风的特性,它们在频域上的全积分等于脉动风对应方向上的湍流动能,即

$$\int_0^\infty S_i(n)dn = \sigma_i^2 \quad (6)$$

式中, $i = u, v, w$ (单位: $m \cdot s^{-1}$); n 为频率(单位: Hz), S_i 在频域上的分布可以描述湍流动能在不同尺度水平上的比例(单位: $m^2 \cdot s^{-2}$)。功率谱函数采用傅里叶变换计算得到。以随机信号 $x(t)$ 为例,取有限时段子样本 $x_k(t) (0 \leq t \leq T)$, 定义

$$S_x(f, T, k) = \frac{1}{T} X_k^*(f, T) X_k(f, T) \quad (7)$$

式中, $X_k(f, T) = \int_0^T x_k(t) e^{-i2\pi ft} dt$, $X_k(f, T)$ 表示 $x_k(t)$ 的有限傅里叶变换, $X_k^*(f, T)$ 为 $X_k(f, T)$ 的共轭, T 为有限长度时间。

图 12 给出各强风时刻 10 min 样本的湍流功率谱图。拟合 1~4 Hz 频率的区间,分析惯性子区(图

中拟合区域)的湍流谱特征,可以发现,台风强风的湍流功率谱样本不满足在惯性子区湍流能谱密度的 $-5/3$ 次方与频率成正比的规律和各向同性假设,而 2 号强对流和强冷空气大风样本则基本符合 $-5/3$ 律和各向同性假设。表 2 给出强风样本在 3 个频段内三维方向的平均湍流能谱密度。由表 2 可见,台风强风的湍流能谱值要显著高于强对流和强冷空气过程,其中,在桥梁敏感频段台风的平均湍流能谱值约为强对流和强冷空气的 3 倍。

4 结 论

基于广东省东莞市的沙田气象塔在台风莫拉菲、强对流和强冷空气期间的观测数据,分析不同强风天气系统的近地边界层的平均风和脉动风特性参数的差异,主要表现如下:

(1) 台风、1 号强对流、2 号强对流和强冷空气过程中风速的 10 min 升幅最大值分别是 5.4、9.6、5.9 和 2.6 $m \cdot s^{-1}$ 。1 号强对流的风速变化最为剧烈,风速的 10 min 升幅分别可达台风和冷空气大风

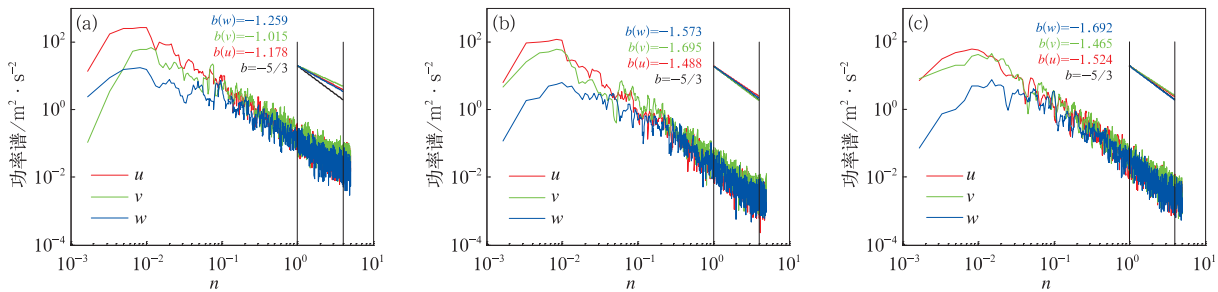


图 12 强风 75 m 高度层过程湍流功率谱图

(a)台风,(b)2 号强对流,(c)强冷空气

[$b(u)$ 、 $b(v)$ 、 $b(w)$ 分别表示纵向、横向和竖向湍流功率谱在惯性子区的线性拟合斜率值]

Fig. 12 Spectra of strong wind processes at the height of 75 m

(a) typhoon process, (b) severe convection process No. 2, (c) severe cold air

[$b(u)$ 、 $b(v)$ 、 $b(w)$ separately indicate the slopes of linear fittings of longitudinal,

lateral and vertical spectra in inertial sub-area]

表 2 强风过程 75 m 高度层三维方向平均湍流能谱值(单位: $m^2 \cdot s^{-1}$)

Table 2 Average power spectral density at the height of 75 m during strong wind processes (unit: $m^2 \cdot s^{-1}$)

风况类型	低频含能区(0.001~0.1 Hz)			桥梁结构敏感区(0.1~0.5 Hz)			惯性子区(1~4 Hz)		
	S_u	S_v	S_w	S_u	S_v	S_w	S_u	S_v	S_w
台风	42.787	14.471	5.022	1.441	1.580	0.813	0.063	0.085	0.050
2 号强对流	14.879	8.713	1.904	0.309	0.511	0.247	0.009	0.012	0.007
冷空气	11.462	10.395	2.723	0.497	0.520	0.303	0.010	0.014	0.010

的1.8和3.7倍。台风过程的最大10 min平均风向时间变率为 $28^{\circ} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$;1号和2号强对流过程的最大10 min平均风向时间变率分别为 109 和 $120^{\circ} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$;强冷空气过程的最大10 min平均风向时间变率为 $14^{\circ} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$ 。

(2) 台风强风平均风廓线幂指数值分别是强对流强风平均风廓线和强冷空气大风平均风廓线的幂指数值的1.4和1.7倍。沙田塔测得的台风强风廓线的幂指数值要大于规范给出的B类下垫面风廓线0.15的幂指数参考值,而强对流的幂指数值接近规范给出的A类下垫面的参考值0.12,强冷空气的幂指数值则更小。

(3) 台风、1号强对流、2号强对流和强冷空气期间测得的80 m高度层的最大的10 min平均风速对应的湍流强度分别为0.094、0.146、0.199和0.091。综合10~80 m高度的观测值,1号强对流天气下的强风湍流强度平均值分别是台风和强冷空气强风湍流强度平均值的1.4~2.1和1.7~2.0倍。

(4) 台风和强对流的风攻角基本在公路桥梁抗风设计指南建议的 $-3^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 范围内。强冷空气大风的风攻角变幅较小,在 0° 附近变动。

(5) 台风、强对流和强冷空气大风影响期间湍流空间积分尺度均有增大的现象,尤其是当台风强风经过时,水平(纵向和横向)湍流空间积分尺度明显增大了—个量级。

(6) 台风强风的湍流功率谱样本不满足在惯性子区湍流能谱密度的一 $5/3$ 次方与频率成正比的规律和各向同性假设。台风强风的湍流能谱值要显著高于强对流和强冷空气,其中,在桥梁敏感频段(0.1~0.5 Hz)台风的平均湍流能谱值约为强对流和强冷空气的3倍。

参考文献

班欣,冯还岭,祁欣,等,2012.连云港沿海近地层湍流强度特征[J].气象科技,40(2):285-292. Ban X, Feng H L, Qi X, et al, 2012. Analysis of surface layer turbulence intensity along Lianyungang coastland[J]. Meteor Sci Technol, 40(2): 285-292 (in Chinese).

郭冬艳,姜涛,陈有龙,等,2011.琼州海峡沿岸大风分布规律及影响系统分析[J].气象,37(11):1372-1379. Guo D Y, Jiang T, Chen Y L, et al, 2011. Analysis on distribution pattern of high wind events in Qiongzhou Strait coastal zones and its westerly systems [J]. Meteor Mon, 37(11): 1372-1379 (in Chinese).

黄林宏,宋丽莉,李刚,等,2016. IEC的风机选型参数估算方法在中

国的适用性研究[J].气象,42(12):1522-1530. Huang L H, Song L L, Li G, et al, 2016. Applicability of estimation methods of IEC WTGS selecting parameters in China[J]. Meteor Mon, 42(12): 1522-1530 (in Chinese).

廖菲,邓华,李旭,2017.基于风廓线雷达的广东登陆台风边界层高度特征研究[J].大气科学,41(5):949-959. Liao F, Deng H, Li X, 2017. A study on boundary layer height characteristics of landing typhoons by wind profilers in Guangdong Province[J]. Chinese J Atmos Sci, 41(5): 949-959 (in Chinese).

庞加斌,林志兴,葛耀君,2002.浦东地区近地强风特性观测研究[J].流体力学实验与测量,16(3):32-39. Pang J B, Lin Z X, Ge Y J, 2002. Field measurements of strong wind characteristics near ground in Pudong District[J]. Experim Measurment Fluid Mech, 16(3): 32-39 (in Chinese).

钱燕珍,高拴柱,黄思源,等,2013.强台风海葵登陆前后强度变化的观测分析[J].气象,39(10):1265-1274. Qian Y Z, Gao S Z, Huang S Y, et al, 2013. Analysis on intensity variation of Haikui before and after its landing[J]. Meteor Mon, 39(10): 1265-1274 (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:225. Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al, 2003. Atmospheric Physics[M]. Beijing: Peking University Press: 225 (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 Sinica, 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 Energiæ Solaris Sin, 27(9): 961-965 (in Chinese).

唐明晖,姚秀萍,王强,等,2017.不同强度台风相伴随的内陆台前飑线对比分析[J].气象,43(8):912-923. Tang M H, Yao X P, Wang Q, et al, 2017. Contrastive analysis of inland Pre-TC squall line accompanied by typhoons with different intensities[J]. Meteor Mon, 43(8): 912-923 (in Chinese).

项海帆,林志兴,鲍卫刚,等,1996.公路桥梁抗风设计指南[M].北京:人民交通出版社:15. Xiang H F, Lin Z X, Bao W G, et al, 1996. Guidelines for Wind Resistance Design of Highway and Bridges[M]. Beijing: China Communications Press: 15 (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).

中华人民共和国住房和城乡建设部,2012.建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社:220-221. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2012. GB 50009—2012 Load Code for the De-

- sign of Building Structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press;220-221(in Chinese).
- 周福,蒋璐璐,涂小萍,等,2017.浙江省几种灾害性大风近地面阵风系数特征[J].应用气象学报,28(1):119-128. Zhou F, Jiang L L, Tu X P, et al,2017. Near-surface gust factor characteristics in several disastrous winds over Zhejiang Porvince[J]. J Appl Meteor Sci,28(1):119-128(in Chinese).
- Architectural Institute of Japan,2004. Recommendations for Loads on Buildings: AIJ-RLB-2004[S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan;6-10-6-11.
- American Society of Civil Engineers,2006. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures: ASCE/SEI 7-05 [S]. Reston,VA:ASCE;251.
- Hong Kong Building Department,2004. Code of Practice on Wind Effects in Hong Kong[S]. Hong Kong: Building Department; 19.
- 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.
- 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 Aerod,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.
- Wang B L, Hu F, Cheng X L,2011. Wind gust and turbulence statistics of typhoons in South China[J]. Acta Meteor Sinica,25(1): 113-127.