0577-6619/2009/67(3)-0452-60 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

复杂山地近地层强风特性分析*

宋丽莉[1] 吴战平[2] 秦 鹏[3] 黄浩辉[3] 刘爱君[3] 植石群[3]
SONG Lili[1] WU Zhanping[2] QIN Peng[3] HUANG Haohui[3] LIU Aijun[3] ZHI Shiqun[3]

1. 中国气象局热带海洋气象研究所，广州，510080
2. 贵州省气候中心，贵阳，550002
3. 广东省气候中心，广州，510080
1. *Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology*, *CMA*, *Guangzhou* 510080, *China*
2. *Guizhou Climate Centre*, *Guiyang* 550002, *China*
3. *Guangdong Climate Centre*, *Guangzhou* 510080, *China*
2008-02-28 收稿，2008-08-01 改回.

Song Lili, Wu Zhanping, Qin Peng, Huang Haohui, Liu Aijun, Zhi Shiqun. 2009. An analysis of the characteristics of strong winds in the surface layer over a complex terrain. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(3): 452－460

Abstract Based on the gradient wind data and three dimensional ultrasonic wind data observed in the surface layer over a complex terrain in southwestern Guizhou Province, strong wind samples with local climatic characteristics were selected. By using the statistical and spectral analyses, the mean and pulsation characteristics of strong winds in the local complex terrain surface layer were analyzed. Under the impact of the local terrain (a northwest-southeast oriented deep gorge) the dominant wind direction and the direction of maximum wind speed are almost completely along the gorge. Even in the neutral atmospheric condition, the vertical wind profile is still totally inconsistent with the exponential distribution. The wind angle of attack is much larger than the recommended normal value, and due to the topographic effect, the difference between the attack angles of strong winds in different directions reaches up to 20°. Meanwhile, the main features of the pulsation wind field under strong wind conditions are: the turbulence intensity of strong winds in different directions are not the same; there is a significant difference between the ratio of turbulence intensity in the three dimensional directions and that given by the existing design specifications. Especially, the vertical turbulence intensity is significantly larger than the normal value, and the turbulence integral scale is much lager, i. e., 20%—60% larger in the longitudinal direction, or even three times larger in the transversal direction, and one order of magnitude larger in the vertical than that over a flat terrain. Within the frequency domain to which the bridge structure is sensitive, the turbulence spectrum densities in respective directions are significantly different, among which the maximum difference for different wind directions can be as large as eight times in the longitudinal, and six time in the transversal and the vertical directions, respectively. However, the turbulence spectrum densities in all directions are 1－2 orders of magnitude smaller than those in a typhoon centre.

Key words Strong wind characteristics, Complex terrain, Surface layer

摘 要 利用在贵州省西南部复杂山地上获取的近地层梯度风观测资料和三维超声测风仪观测资料，从中筛选出具有该地气候特征的强风样本，利用数量统计和谱分析等方法，计算分析了由于复杂地形影响而导致的局地低层强风的平均和脉动特征。平均风场主要表现在受当地主要特征地形(西北—东南走向的深切峡谷)影响，其全年的主导风向和最大风速出现的方向几乎完全转为沿峡谷走向，即使在符合中性大气层结条件下，风的垂直廓线也完全不满足幂指数分布，风攻角远远大于规范推荐的值，并且不同风向的强风攻角因地形影响其差异可达 20°；强风条件下脉动风场的主要特征是：不同风向强风的

* 资助课题：国家自然科学基金重点项目“登陆台风风场及其工程致灾研究”(90715031)和国家自然科学基金项目“登陆台风近地层风特性及致灾机理研究”(40775071)。
作者简介：宋丽莉，主要从事风工程和应用气候研究。llsong@grmc.gov.cn

湍流强度有所不同，在纵、横和垂直方向的湍流强度比值与现行设计规范给出的三维湍流强度比值有明显差异，其中垂直方向的湍流强度显著偏大是突出特征；湍流积分尺度偏大，其中纵向值偏大20%—60%，横向值在某些风向上可偏大3倍以上，垂直方向则普遍较平坦地形偏大一个量级左右；在桥梁结构较为敏感的频域范围内，各风向的湍流谱密度值有显著差异，其中不同风向在纵向上最大差值可达8倍，横向和垂直向可相差6倍，但无论哪个方向的湍流谱密度值均比台风中心要小1—2个量级。

关键词 强风特性，复杂山地，近地层

中图法分类号 P404 P425.1

1 引 言

近地层风状况特性涉及工程抗风、风能开发利用和污染物扩散，也是天气过程形成、发展、消亡的重要水汽、热量、动量输送的载体。由于强风条件下的大气边界层结构及特性和小风状况的特性具有明显差别，因而不同领域、不同用途所关注的风特性的关键因子也不尽相同。为了防灾抗风的需要，气象和工程领域的专家学者越来越重视强风边界层的研究，并取得了多项很有意义的研究成果(Losslein，1988；Maeda，et al，1988；李倩等，2004；Shiau，et al，2000；刘小红等，1995；庞加斌等，2002)，中国的相关规范也对工程抗风所涉及的参数计算提出了具体方法(中华人民共和国建设部，2006)，但由于实测资料的限制，多数研究成果和现行规范给出的参考公式和方法多适于均匀地形，对于复杂的山地风状况研究较少。本文在复杂山地设置了现场风状况观测的基础上，重点分析该种地形条件下，工程抗风所关注的近地层强风特性。

2 资料来源及说明

2.1 观测设置和环境描述

(1) 观测设置

为贵州西南部山区某跨峡谷大桥建设需要，在峡谷两端拟选桥位处，设置了两座(10 m和60 m高度)测风塔，其中10 m塔(B塔)设置了一套机械(杯)式测风仪器，60 m塔(A塔)按照梯度观测方式(观测层次为10、20、30、40、60 m)，设置了机械(杯)式测风仪器进行平均风场的梯度观测，数据采样频率为1 Hz；在30 m高度层(大约与桥面高度相当)设置了一台英国Gill公司生产的R3-50型超声风速仪，该仪器被广泛应用于结构风工程的风状况测量，仪器在输出数据的同时，能自动给出判别码，以识别观测数据的有效性。

该仪器使用环境温度－40°—60 ℃，水平方向风速量程为±45 m/s，测量精度＜±1%，其最大动态响应频率50 Hz，本观测以10 Hz采样频率进行三维瞬时风速数据采集。

(2) 观测环境描述

60 m梯度测风塔(A塔)位于桥位北侧海拔876 m的小山包上(图1)，其西北到东南侧为深达300多米的峡谷，峡谷呈西北—东南走向，观测塔东北至东侧有海拔超过900 m的山体，其北侧的山体略低于观测塔所在位置的海拔高度。测风塔周围为几十厘米高的低矮稀疏灌木；10 m塔(B塔)位于桥位南侧海拔864 m的小山上，测风塔周围也为低矮稀疏灌木。

2.2 参照气象站说明

与工程位置临近的长期气象站是晴隆县气象站，该站距工程位置约12 km，观测场海拔高度1552 m，风观测资料始于1961年，并具备与工程现场观测同期进行的逐时测风资料。

2.3 风速样本筛选

气象专业对风速的分级有明确的规定，即10 min平均风速≥17 m/s的风称为“大风”，但在日常生活、风力发电和工程抗风等其他领域“大风”的概念量度随影响对象而有所不同，通常泛指相对风速较大的状况，为了叙述的方便，在此将满足本文筛选条件的风通称为“强风”。

近地层风的微观结构(包括垂直变化、阵性和脉动特征等)在很大程度上左右着结构物的安全性设计和投资成本。大量观测事实证明，近地层强风和小风状况的微观结构十分不同，由于工程抗风主要关注强风状况，为了避免因为小风条件下的近地层风状况特性不同于强风而带来的混淆和误差，所以为工程抗风研究需要，应从观测数据中筛选强风样本(或过程)。

通常认为绝大多数强风过程为中性层结状态，

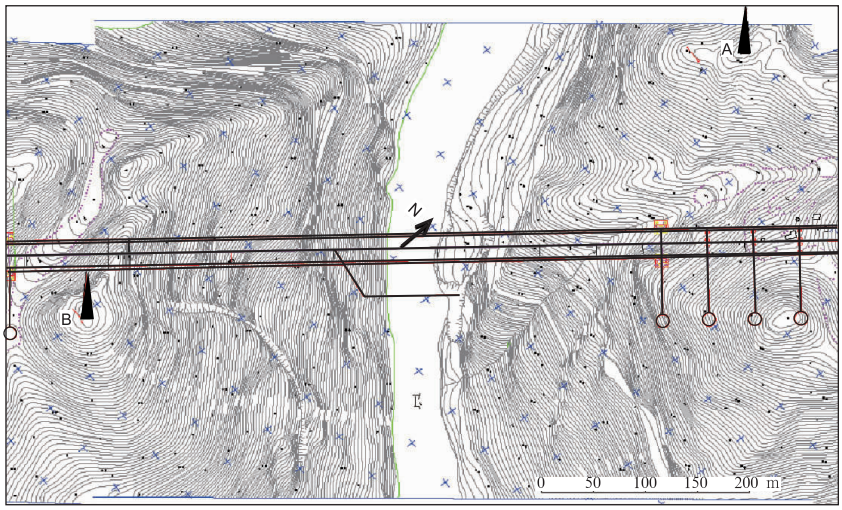

图 1 工程现场观测环境地形

Fig. 1 Topographic map of the project site

现行国家规范推荐的风廓线描述的指数或对数公式的适用条件也为中性大气层结,因而在此以中性层结作为强风样本筛选的基本条件。

从 Pasquill 大气边界层的稳定性分级标准(表1)中可以看出,大气稳定(E、F 类)和不稳定(A、B、C 类)时,其对应的风速均较小,而当 10 m 高平均风速>6 m/s 时,只有在强太阳辐射出现时,大气层结才为 C 类(弱不稳定)状态,其他情况均为中性层结,以此类推可以认为,当 10 m 高平均风速>6 m/s 时,近地层通常可以达到中性大气层结要求。综合考虑贵州本地的强风气候状况和现场观测资料特点,并要满足研究需要的样本长度,在此选定平均场观测的 A 塔 60 m 高平均风速≥9 m/s 作为强风分析样本。该高度层现场观测年度内(12 个月)平均风速≥9 m/s 的出现频率为 1.2%;由于脉动场观测的有效数据较少,为了满足研究需要的样本长度,在此选取 A 塔 30 m 高平均风速≥7 m/s 的个例作为本文的分析样本。该高度在观测年度内出现平均风速≥7 m/s 的频率为 3.4%。

表 1 大气边界层稳定性 Pasquill 法分级

Table 1 Stability of the atmospheric boundary layer classified by the Pasquill method

10 m 高度平均风速 (m/s)	白天太阳辐射收入 (W/m^2)				日落、日出后 1 h 内	夜晚,云量 (oktas)		
	强 (>600)	中 (300—600)	弱 (<300)	乌云		0—3	4—7	>8
<2	A	A—B	B	C	D	F	F	D
2—3	A—B	B	C	C	D	F	E	D
3—5	B	B—C	C	C	D	E	D	D
5—6	C	C—D	D	D	D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D	D	D	D

注:表中字符 A、B、C、D、E、F 分别代表大气层结强不稳定、不稳定、弱不稳定、中性、弱稳定、稳定等状态。

3 数据处理

依照《地面气象观测规范》(中国气象局,2003)对平均风场观测资料进行处理。

对脉动风场观测采用的三维超声测风仪取得的数据需要做无效和野点数据处理及脉动风样本数据提取。

3.1 无效和野点数据处理

为了判别和剔除由于降雨和其他原因(如因电源不稳定和其他不明原因)造成的可疑数据,本项目观测采用的超声风速仪具有自动判别由于降水影响而产生的无效数据的功能,在选取计算样本时,首先根据超声风速仪的数据判别码,剔除无效数据,然后采用文献(卞林根等,2001;陈红岩等,2000)中的方法判别数据中的其他野点,按照风工程分析的样本

长度规定,选取连续 10 min 观测数据为一个样本,并要求有效数据大于 98%,然后采用线性插值法对剔除的个别数据进行插补。

3.2 坐标旋转和脉动风速的提取

实测三维风速 $u(t)$,$v(t)$和 $w(t)$是超声风速仪坐标下 x、y、z 方向的 3 个实数序列(其中仪器的 x 方向指东,z 方向垂直于地面),为了进行统计分析,在某一时间间隔(10 min)内求取平均(时间平均),并进行必要的坐标旋转。合成的水平平均风速 U 和风向角 Φ(正北为 0°)由下列各式计算(Xu, et al, 2001;张宏升等,1998;Philippe, et al, 2003)

$$U = \sqrt{\overline{u(t)}^2 + \overline{v(t)}^2} \tag{1}$$

$$\alpha = \mathrm{tg}^{-1}(\overline{v(t)}/\overline{u(t)}) \tag{2}$$

$\Phi=270°-\alpha$,当$\overline{u(t)}>0$,$\overline{v(t)}>0$ 时,西南风向

$\Phi=90°-\alpha$,当$\overline{u(t)}<0$,$\overline{v(t)}<0$ 时,东北风向

$\Phi=\alpha+270°$,当$\overline{u(t)}>0$,$\overline{v(t)}<0$ 时,西北风向

$\Phi=\alpha+90°$,当$\overline{u(t)}<0$,$\overline{v(t)}>0$ 时,东南风向

垂直方向与仪器坐标 z 轴相同,因此垂直平均风速 W 为

$$W = \overline{w(t)} \tag{3}$$

将仪器坐标旋转 Φ 角,使仪器所测 u 与主风向一致。所得坐标 x、y、z 轴分别代表主风 $u(t)$、侧风 $v(t)$和垂直风向 $w(t)$(与仪器坐标相同),则$u(t)$、$v(t)$在 x、y 轴的投影 $u'(t)$即为纵向(主风向)脉动风速、$v'(t)$为横向(侧风向)脉动风速:

$$u'(t) = u(t)\cos\Phi + v(t)\sin\Phi - U \tag{4}$$

$$v'(t) = -u(t)\sin\Phi + v(t)\cos\Phi \tag{5}$$

垂直脉动风速 $w'(t)$由式(6)给出

$$w'(t) = w(t) - W \tag{6}$$

$u'(t)$、$v'(t)$、$w'(t)$即为本文脉动风分析的样本数据。

4 地形对平均风场的影响

山地地形对风场的影响机制比较复杂,一方面因接受的太阳辐射不均匀而导致的气流的局地上升和下沉,另一方面由于地形的起伏而改变了低层气流的方向和速度,对于工程抗风来说,主要关注较强风速时的风场特性变化。

4.1 地形对风向的影响

(1) 主导风向

晴隆气象站海拔高度 1552 m,可以较好地代表当地较大区域内的平均风状况。从该站的累年各风向频率(表 2 和图 2a)可以看出,当地冬季主导风向为北到东北风,春、夏、秋季均以南风为主;从各月主导风向分布(表 3)可以发现,当地一年中有 10 个月(3—12 月)的主导风向都为南风。而桥位观测点 B 塔以及 A 塔(具备风向观测的 10 m、30 m、60 m)观测年度的主导风向均为东南(SE)向,并且随着观测高度增高,主导风向(SE)更为稳定。从 A 塔 60 m 风向玫瑰图(图 2b)可以较形象地看出,其风向分布特征明显不同于当地长期气象站的风向特征:A 塔 60 m 高风向资料统计结果显示,一年中各个月的最多风向均为东南(SE)向(表3),而晴隆气象站除1、

表 2 晴隆气象站和现场测风点各风向频率

Table 2 Wind direction frequency at the Qinglong meteorological station and the wind measurement sites

站点		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
晴隆站		11	6	12	3	6	1	8	3	22	9	3	0	1	0	2	2
B塔		3	2	2	3	6	12	22	14	7	2	1	1	2	4	11	5
A塔	10 m	4	1	2	3	5	21	25	5	3	2	1	1	2	3	10	7
	30 m	4	1	1	3	4	17	30	6	2	1	1	1	1	2	10	8
	60 m	2	1	1	2	5	13	36	7	2	1	1	1	1	4	16	6

表 3 两站各月最多风向及频率

Table 3 Wind direction and frequency that happens the most at the two stations in each month

站点	项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年
A塔60 m高度层	最多风向	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE
	频率(%)	35	38	35	38	35	36	48	35	39	27	19	29	36
晴隆站	最多风向	NE	NE	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
	频率(%)	17	18	18	21	23	26	32	23	24	21	24	20	22

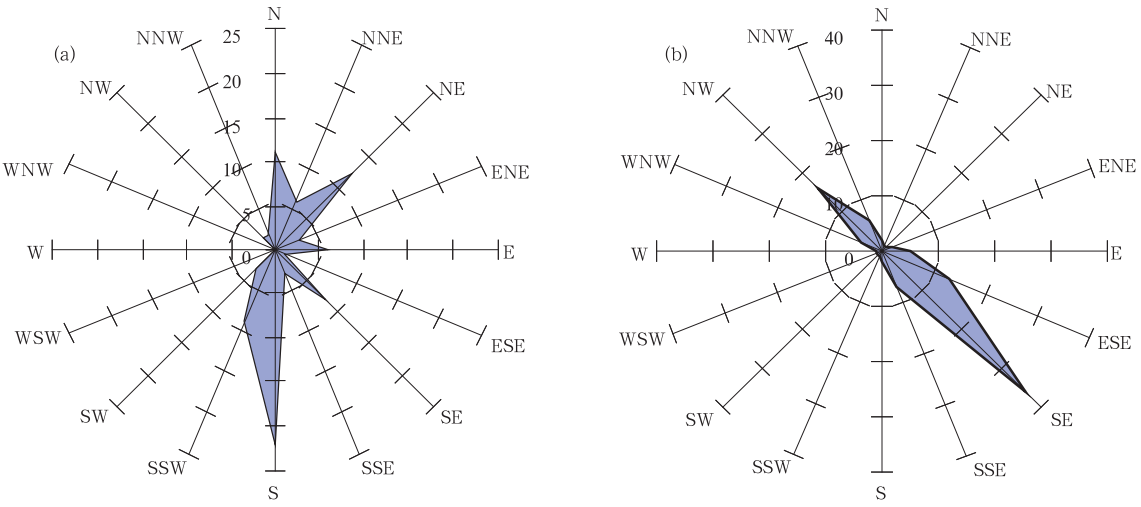

图 2 地形影响的主导风向

(长期气象站累年(a)和 A 塔 60 m 高度全年(b)风向玫瑰图)

Fig. 2 Dominant wind direction under the influence of terrain

(Multi-year mean wind rose at the meteorological station (a), Annual wind rose at tower A at 60 m height (b))

2 月主导风向为东北向外,其他 10 个月均为南风;统计结果还显示,A 塔 60 m 高风向分布在 ESE-SSE 扇面的风向频率为 47%,在 WNW-NNW 扇面的风向频率为 27%,即沿峡谷走向的风向频率达到 74%(图 2b)。可见,由于受东南—西北走向的峡谷地形影响,导致当地的南风在桥位测站多转为东南风,东北风多转成了西北风。

(2) 最大风速及风向

图 3 给出了当地长期气象站和工程位置最大风速风向分布特征,可以看出,长期气象站历年最大风速的风向主要分布在 S-SW 方向(图 3a),而 A 塔 60 m 工程位置一年观测期间强风(10 min 平均风速≥9 m/s)的风向更集中在 SE 方向,频率达 84%(图 3b)。

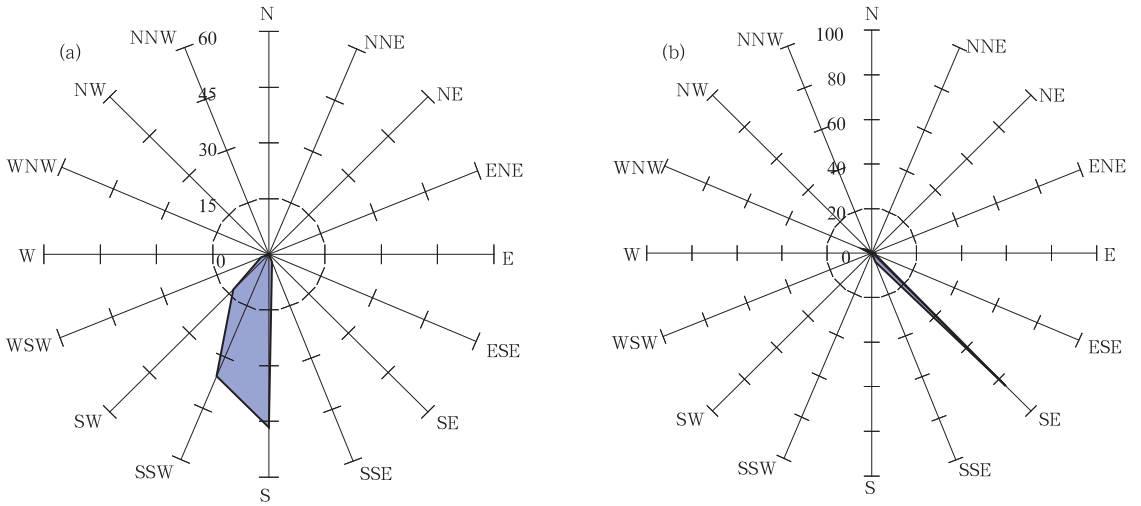

图 3 地形影响的最大风速风向分布

(a. 晴隆气象站历年最大风速风向,b. A 塔 60 m 高 10 min 风速≥9 m/s 时的各风向玫瑰图)

Fig. 3 The distribution of wind direction with the maximum wind speed under the influence of terrain

(Multi-year mean wind rose of maximum wind speed at the Qinglong meteorological station (a),
Wind rose with 10 min-average wind speed ≥9 m/s at tower A at 60 m height (b))

可见,影响本工程项目的局地近地层风场的主要地形特征是西北—东南走向的深切峡谷,它的存在完全改变局地低层风场,使之主导风向和最大风速的方向均发生了改变。

由于工程气象观测多为短期观测,很难测到本地历史极端大风,计算设计最大风速(概率风速)需要参考当地气象站长期观测资料,长期气象站一般可以代表当地区域内的平均状况,但如果工程所在地点的地形复杂,那么对工程而言,当地长期气象站观测的风向甚至最大风速的方向均不具备代表性,而应考虑通过工程位置的现场观测进行修正。

对桥梁等长跨结构物来说,一般当地历史最大风速出现的方向将成为该工程的最不利风向之一,垂直于桥梁中轴的风向为该工程另一个最不利风向,而本工程很可能遇到了将两种最不利风向因素合为一体。

4.2 地形对风速垂直分布的影响

根据《建筑结构设计规范》(GB50009-2001)(中华人民共和国建设部,2006)的推荐,近地层风速(剖面)垂直分布采用幂指数计算公式

$$u = u_1 \left(\frac{z}{z_1}\right)^{\alpha} \tag{7}$$

式中 u 为 z 高度处的风速,u_1 为 z_1 高度处的风速,α 为风速高度变化幂指数。该公式在大多数平缓地形的中性大气层结(强风)条件下是适用的,但在复杂山地,由于地形的强迫作用,近地层风速剖面变得十分复杂。图 4 是位于峡谷山地上的 60 m 高测风塔(A 塔)的测风实况,图中标出了在一年的观测期内,(强风天气)不同风向下,风速随高度的变化状况,可以看出,由于峡谷地形影响,无论处于何种风向,风速垂直廓线均不符合指数分布形式。在出现 SE、WSW、ENE 方向的强风时,最大风速竟出现在 10 m 处,60 m 高风速反而最小;在出现 NW、WNW、E、SSE 和 SE 方向的强风时,40 m(桥面高度附近)则成为较小风区。

将一年观测期内的所有强风个例平均后得到的

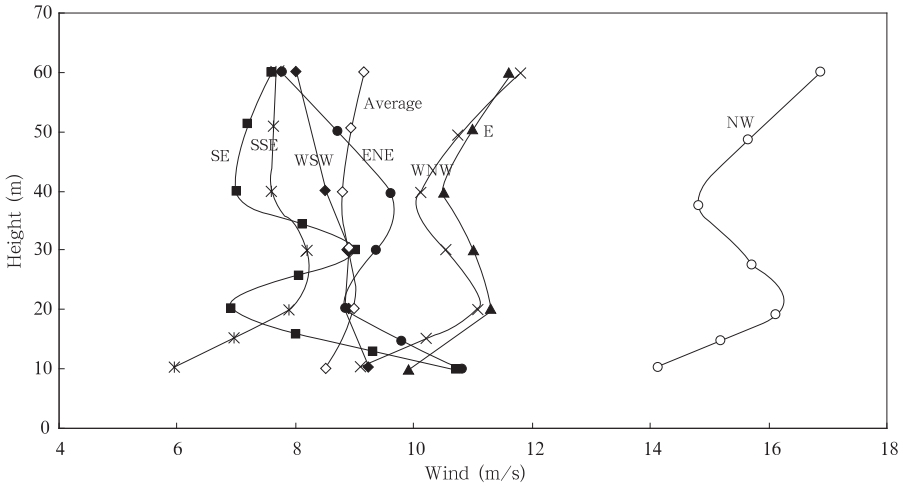

图 4 各风向垂直廓线分布

Fig. 4 Vertical profiles of winds at different directions

垂直廓线仍不符合指数分布形式。

4.3 风的攻角

风攻角指风的来流方向与水平面的夹角。风攻角对建筑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。项海帆等(1996)认为,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。实际上,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(宋丽莉,2006)。项海帆等(1996)提出,在桥梁动力抗风设计中,应考虑高风速时风的平均攻角,一般采用±3°,平静海面和开阔平坦地形大约为 0°,并且给出了攻角在 1°—5°时主梁升力系数的参考值。

本工程项目位于复杂山地中,实际观测到的风攻角远远大于 5°,并且在不同风向强风出现时,攻

角的变化幅度很大。图 5 显示东北偏东风时攻角接近 −10°,而西北偏北风时攻角超过了+10°,两者相差了 20°。

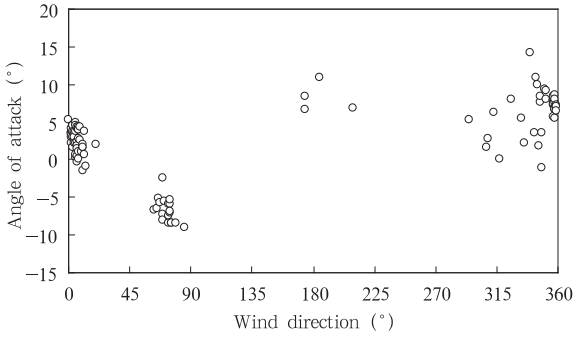

图 5 不同风向的攻角

Fig. 5 Angle of attack at different wind directions

5 地形对脉动风场的影响

山地地形对风场的强迫作用还表现在致使其脉动风特性的改变。根据设置于 A 塔 30 m 高度层(与桥面高度相当)的三维测风仪,分析强风(10 min 风速≥7 m/s)条件下,地形对脉动风场的影响。图 6 给出了一个典型的强风过程风速的实测个例,观测时间为 2006 年 4 月 5 日,采样时段长度为20 min,过程平均风速 10.8 m/s,过程极大阵风(0.1 s)风速 14.3 m/s。从图中可以看出,在山谷复杂地形条件下,湍流脉动风速具有复杂的时间变化过程,还可看出明显的强阵性风特征。

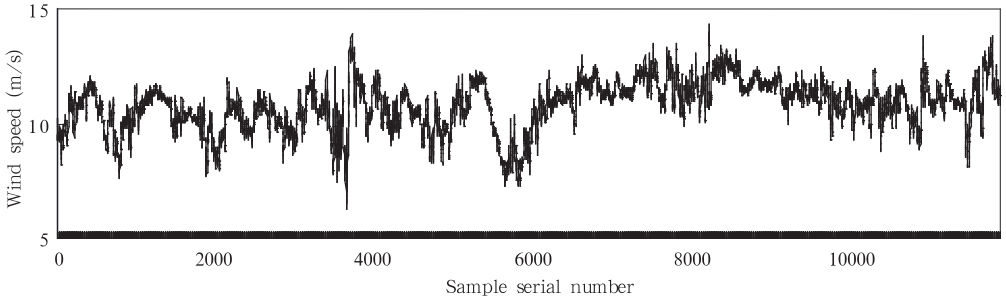

图 6 典型强风过程湍流脉动风速实测个例

Fig. 6 Turbulent wind speed measured during a typical strong wind process

5.1 湍流强度、湍流积分尺度

湍流强度、湍流积分尺度反映了风的脉动特征,是工程抗风研究设计中常用的表征脉动风的统计参量。

(1) 计算方法

湍流强度为某时距(工程计算取 10 min 数据样本;项海帆等,1996)的脉动风速标准方差与平均风速的比值。

$$I_i = \frac{\sigma_i}{U} \qquad (i = u, v, w) \tag{8}$$

其中 σ_i 表示脉动风速 $u'(t)$、$v'(t)$、$w'(t)$的标准差,σ_i^2 为脉动风速在 i 方向的方差。

湍流积分尺度:

利用 Taylor 假设自相关函数积分法(Flay, et al, 1984; Pang, et al, 2002),计算工程抗风关注的湍流积分长度,即

$$L_x = U\int_0^{\infty} R_x(\tau)\sigma_x^2 \mathrm{d}\tau \tag{9}$$

其中 L_x 为平稳随机信号 $x(t)$的湍流积分尺度,σ_x^2 为 $x(t)$的方差,$R_x(\tau)$为 $x(t)$的自相关函数,定义为

$$R_x(\tau) = E[x(t)x(t+\tau)] \tag{10}$$

(2) 计算结果

分析现场观测期间,不同方向的强风(10 min 风速≥7 m/s)产生的湍流强度出现不同程度的差异。表 4 显示,在观测期间出现的 5 类(不同方向)的强风个例中,在顺着峡谷方向的 NW 和 SSE 风向上,其湍流强度在三维(纵、横和垂直)方向均较小,各向湍流强度均以 N 风向较大,这与测点北部山岭起伏多变,而沿峡谷方向地形阻挡较小有关。

不同方向强风在纵向、横向和垂直方向的湍流强度比值 $I_u:I_v:I_w$ 也有较大差异(表 4),其中顺着峡谷方向的 NW、SSE 和 S 风向均明显偏离了项海帆等(1996)给出的 1:0.88:0.5,并且所有方向的 I_w 值均超过了 I_u 值的 50%,其中 SSE 风向高达 81%。

表 4 显示,该工程区域的湍流积分空间尺度也较大,纵向积分尺度较项海帆等(1996)给出的值偏

表 4 强风出现在不同方向时桥位区域的脉动风参数

Table 4 Turbulent wind parameters of the strong winds in different directions in the bridge area

水平风向	湍流强度				湍流积分尺度(m)		
	u	v	w	$I_u:I_v:I_w$	u	v	w
NE	0.2	0.17	0.13	1:0.85:0.65	129	84	40
N	0.25	0.21	0.18	1:0.84:0.72	125	53	32
NW	0.16	0.16	0.12	1:1:0.75	150	167	69
S	0.19	0.19	0.16	1:1:0.84	164	171	96
SSE	0.18	0.14	0.15	1:0.78:0.81	142	83	86

大 20%—60%,横向湍流尺度在 NW 和 S 方位偏大 3 倍以上,垂直方向则普遍较平坦地形偏大一个量级左右。

5.2 湍流功率谱密度

湍流功率谱密度函数 $S_i(i=u,v,w)$(Roland,1991)能够更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对应方向上的湍流动能,即 $\int_0^\infty S_i(n)\mathrm{d}n=\sigma_i^2(i=u,v,w;n$ 为频率),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。本文采用快速傅立叶变换的方法计算功率谱,并重点分析计算对大跨(悬吊)桥梁等结构较为敏感的(0.1—0.5 Hz)频域上,各风向下的湍流谱密度特征。

表 5 显示,该工程观测位置在 NW、S 风向的湍流谱密度值明显大于 N、NE、SSE 等风向,其偏大的特征在纵向和垂直方向同步出现。湍流谱密度值最大的 NW 风向(与峡谷走向一致)与最小的 NE 风向相比,其纵向谱密度值大了 7 倍,横向和垂直向均大了 5 倍。但无论哪个方向的湍流谱密度值均比台风中心小 1—2 个量级(宋丽莉,2005)。

表 5 桥梁等结构敏感的频域上各向湍流谱密度特征

Table 5 Turbulent spectral density characteristics in the three-dimensional directions within the frequency domain to which bridges and other structures are sensitive

风向	频率(0.1—0.5 Hz)		
	S_u	S_v	S_w
NE	0.137	0.171	0.193
N	0.279	0.317	0.280
NW	1.122	1.068	1.170
S	1.105	0.607	1.118
SSE	0.777	0.609	0.721
台风“派比安”中心经过时	25.164	10.524	4.855

6 结论与讨论

通过对复杂山地实地测风数据的计算分析,得出以下初步结果:

(1) 影响本工程项目局地风场的主要地形特征是西北—东南走向的深切峡谷,它的存在完全改变局地低层风场,使之主导风向和最大风速的方向均发生了改变,风速的垂直分布变得更为复杂,即使在中性大气层结(强风)条件下,风的垂直廓线也完全不满足幂指数分布形式。

(2) 复杂山地的风攻角可能远远大于 5°,不同风向的强风攻角变化幅度会很大,有的方向为正攻角、有的方向为负攻角,两个方向攻角差异可达 20°。

(3) 不同风向的湍流强度有明显差异,但顺着峡谷方向湍强却较小;不同方向的风在三维方向的湍流强度比值 $I_u:I_v:I_w$ 也有较大差异,并且不满足现行“设计指南”给出的比值。

(4) 湍流积分空间尺度均偏大,其中纵向值偏大 20%—60%,横向值在某些特殊的风向上可偏大 3 倍以上,垂直方向则普遍较平坦地形偏大一个量级左右。

(5) 对桥梁等结构较为敏感的(0.1—0.5 Hz)频域范围内,各方向的湍流谱密度值有显著差异,在纵向上,不同风向的值可相差 8 倍,横向和垂直向可相差 6 倍,但无论哪个方向的湍流谱密度值均比台风中心小 1—2 个量级。

需要指出的是,虽然 1 年的观测资料基本可以表明当地的一般强风特性,但短期观测往往难以“捕捉”到当地的小概率(或极端)强风过程,因此,拟建的大型工程还需要根据实地观测给出的分析结果,再结合相关风洞模拟试验,来确定和进一步验证某些特殊的设计参数;复杂地形近地层风廓线一般不符合幂指数或对数分布,对于本文实测分析的各种

“异形”廓线形态,还需要进一步研究,寻找出与之相符的数学模型(或模拟方案),以便能对复杂地形近地层的风廓线进行客观描述。

References

Bian Lingen, Lu Longhua, Cheng Yanjie, et al. 2001. Turbulent measurement over the southeastern Tibetan plateau. Quarterly J Appl Meteor (in Chinese), 12(1): 1-13

Chen Hongyan, Hu fei, Zeng Qingcun. 2000. Dealing with Imperfect Data to Improve Estimation Precision of Turbulence Flux. Clim Environ Res (in Chinese), 5(3): 304-311

China Meteorological Administration. 2003. Specifications for Surface Meteorological Observation (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 108-116

Flay R G J, Stevenson D C. 1984. Integral length scales in strong winds below 20 m. J Wind Engin Industrial Aerodynamics, 28: 21-30

Li Qian, Liu Huizhi, Hu Fei, et al. 2004. Characteristic of the urban boundary layer under strong wind condition in Beijing city. J Graduate School Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 21(1): 40-44

Liu Xiaohong, Hong Zhongxiang. 1995. A study of the structure of a strong wind event in the atmospheric boundary layer in Beijing area. Scientia Atmospherica Sinaica (in Chinese), 20: 223-228

Losslein H. 1988. The structure of turbulence during strong winds. J Wind Engin Industrial Aerodynamics, 28: 41-49

Maeda J, Makino M. 1988. Power spectra of longitudinal and lateral wind speed near the ground in strong winds. J Wind Engin Industrial Aerodynamics, 28: 31-40

Ministry of Construction, the People's Republic of China. 2006. Load Code for the Design of Building Structures GB50009-2001 (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 72-74

Pang J B, Ge Y J, Lu Y. 2002. Analysis methods for integral length of turbulence// Proceeding of the 2nd International Symposium on Advances in Wind and Structures. Techno-Press. Korea

Pang Jiabin, Lin Zhixing, Ge Yaojun. 2002. Field measurements of strong wind characteristics near ground in Pudong district. Experiments and Meastrements in Fluid Mechanics (in Chinese), 16(3): 32-39

Philippe Drobinski, Alain M Dabas, Christian Haeberli, et al. 2003. Statistical characterization of the flow structure in the Rhine valley. Bound Layer Meteor, 106: 483-505

Roland B. Stull. 1991. An Introduction to Boundary Layer Meteorology (in Chinese, translated by Yang Changxin). Beijing: China Meteorological Press, 334-338

Shiau Bao-shi. 2000. Velocity spectra and turbulence statistics at the northeastern coast of Taiwan under high-wind conditions. J Wind Engin Industrial Aerodynamics, 88: 139-151

Song Lili, Mao Huiqin, Zhi Shiqun, et al. 2005. Analysis on boundary layer turbulent features of landfalling typhoon. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 63(6): 915-921

Song Lili. 2006. The risk research of Typhoon destruction to the wind power development// Chinese wind power development forum thesis election (in Chinese). 104-112

Xiang Haifan, Lin Zhixing, Bao Weigang, et al. 1996. Wind-resistant Design Guidelines for Road and Bridge (in Chinese). Beijing: China Communications Press, 15-16

Xu Y L, Zhan S. 2001. Field measurements of Diwang tower during Typhoon York. J Wind Engin Industrial Aerodynamics, 89: 73-93

Zhang Hongsheng, Chen Jiayi. 1998. Correction of temperature measurement with sonic anemometer-thermometer. Scientia Atmospherica Sinaica (in Chinese), 22(1): 11-17

附中文参考文献

卞林根,陆龙骅,程彦杰等.2001.青藏高原南部昌都地区近地层湍流输送的观测研究.应用气象学报,12(1):1-13

陈红岩,胡非,曾庆存.2000.处理时间序列提高计算湍流通量的精度.气候与环境研究,5(3):304-311

李倩,刘辉志,胡非等.2004.大风天气下北京城市边界层阵风结构特征.中国科学院研究生院学报,21(1):40-44

刘小红,洪钟祥.1995.北京地区一次特大强风过程边界层结构的研究.大气科学,20:223-228

庞加斌,林志兴,葛耀君.2002.浦东地区近地强风特性观测研究.流体力学实验与测量,16(3):32-39

宋丽莉,毛慧琴,植石群等.2005.陆台风近地层湍流特征观测分析.气象学报,63(6):915-921

宋丽莉.2006.台风对风电开发的破坏风险研究//中国风能发展论坛论文选. 104-112

Roland B. Stull 著.杨长新等译.1991.边界层气象学导论.北京:气象出版社,334-338

项海帆,林志兴,鲍卫刚等.1996.公路桥梁抗风设计指南.北京:人民交通出版社,15-16

张宏升,陈家宜.1998.超声风温仪测温的误差订正.大气科学,22(1):11-17

中国气象局.2003.地面气象观测规范.北京:气象出版社,108-116

中华人民共和国建设部.2006.建筑结构荷载规范, GB50009-2001.北京:中国建筑工业出版社,72-74