

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.01.010

复杂地形条件下的西部强风特性实测分析

高亮¹, 白桦², 刘健新², 张玥³

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;

3. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对复杂地形条件下风特性参数稀缺的问题,通过选择典型地形条件下的三处强风区进行风特性实测研究,得到峡谷山口区特殊的风场特性。平均风特性:①风向与峡谷走向一致;②风速、风向与季节变化有明显关系;③风攻角在 $\pm 5^\circ$ 间;④风剖面指数随风速而增大。脉动风特性:①紊流强度均值都小于《规范》中相应的推荐值,表明紊流强度在强风条件下的值小于一般气象条件下的值;②紊流强度均值在三维方向的分布与《规范》建议值差别较大;③与《规范》推荐值相比,塔高70 m处积分尺度实测值较大;④各测风塔沿高度方向的紊流功率谱相差不大,且随高度增加脉动频率增大。此外二维与三维测风仪观测结果(除风向角外)规律一致,但三维仪较二维仪所测极值风速明显偏大。

关键词: 现场实测; 新疆强风; 风参数; 典型复杂地形

中图分类号: U448; TU312.1; TU973.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2018)01-0061-07

Field measurement analysis of wind characteristics of the typical complex terrain conditions in the west area

GAO Liang¹, BAI Hua², LIU Jianxin², ZHANG Yue³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

3. Highway Institute, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: This paper deals with the scarcity of wind characteristic parameters in complex terrain. Through the wind field measurement of the three typical complex terrains in Xinjiang, the special wind field characteristics of the west mountain canyon area are obtained. The average wind characteristics include: (1) Wind direction consistent with the strike of the valley. (2) Wind speed that has an obvious relationship with seasonal change. (3) Wind attack angles between plus or minus 5 degrees. (4) Wind profile with larger profile index with the greater wind speed. Pulsating wind characteristics include: (1) The turbulence intensity value under the condition of strong wind that is less than that of the general weather conditions. (2) Between $I_U:I_V:I_W=1:0.5:0.2$ with "specification", suggesting $I_U:I_V:I_W=1:0.88:0.50$, with the difference being obvious. (3) Compared with the specification recommended value, $L_U=131\text{ m}>120\text{ m}$, $L_V=86\text{ m}>60\text{ m}$. (4) The power spectrum of turbulent flow was similar along the height direction of the wind tower, with the pulse frequency increasing with height and two-dimensional anemometer and ultrasonic anemometer observation results basically identical, but the extreme wind speed obtained from the ultrasonic anemometer is significantly larger than that by the two-dimensional anemometer.

Key words: field measurements; inland strong wind; wind characteristics; complex terrain

随着国家“一带一路”建设的实施以及国家新能源项目的开发与建设,西部地区的工程建设开始大力发展,其中不乏对风荷载敏感的大跨、高耸结构,

这类结构在设计时的风荷载取值也越来越受到重视。例如:大型风电工程中有关工程选址;高压输电线及其塔架、风机及其塔架的抗风措施;光伏工程中

收稿日期: 2016-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90915001);陕西省教育厅专项科研计划资助项目(17JK0567);西安理工大学科学研究计划资助项目(2015CX017);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2013JQ7031);中央高校基本科研业务费资助项目(3108211511070)

作者简介: 高亮,女,博士,讲师,研究方向为工程结构抗风及制振。E-mail:156820773@qq.com

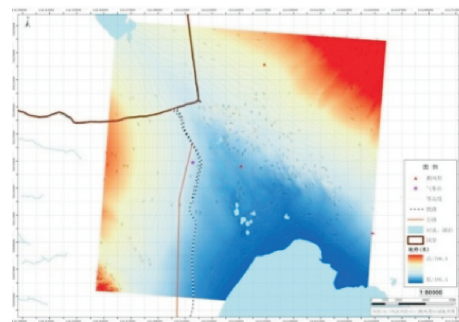
光伏板的抗风性能等。而对风环境影响明显的西部地形复杂、多样,同时对西部地区强风的系统研究开展较晚,现有风特性资料极少,难以满足工程需求,故复杂地形条件下强风特性的准确描述问题亟待解决。而获取风参数最方便、高效率的途径是现场实测。

国外实测工作开展较早,如加拿大的 Davenport,早在 20 世纪 60 年代就率先提出了风速剖面指数函数模型、地表粗糙度概念以及经典的 Davenport 谱,Duchene-Marullaz^[1]后来提出的紊流强度随高度递减的规律,阵风因子、紊流积分尺度和风速功率谱等参数也都是建立在大量的实测基础之上的,各发达国家陆续进行了长期的风特性实测工作,对其规范中风参数的取值逐渐明了,为风工程的基础研究工作奠定了基础。国内风特性实测研究开始的较晚,先期经验主要积累于气象学和大气学方向,Bao-Shi Shiau 等^[2]的实测对象是台湾沿海地区的强风,全涌、宋丽莉等^[3-4]的研究对象是台风。20 世纪以来风特性的实测研究在结构风工程中越来越多受到重视,尤其是在大跨径桥梁风场特性的研究中。项海帆^[5]通过对昂船洲大桥桥址区风场的现场实测与风洞试验,研究了跨海大桥的桥址区的风场特性,陈政清^[6]、李永乐^[7]通过风洞试验与数值模拟研究了深切峡谷桥址区风特性的空间分布特性,庞加斌^[8]通过现场实测对 U 形山谷桥址区的脉动风特性进行了研究,刘健新^[9-10]针对喇叭口地形和新疆典型山口、山谷区进行了风特性研究。目前,针对峡谷、山口等地区的风场分布特性研究还很不充分,远没有达到指导工程结构抗风设计的定量描述,仍需开展大量细致的研究。本文选择新疆典型强风区,以其强风特性为研究对象,通过开展特种风观测研究,归纳西部峡谷山口区特殊的风场特性。

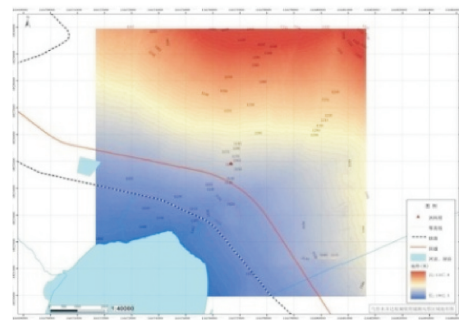
1 现场实测概况

1.1 风观测塔的选址及仪器架设

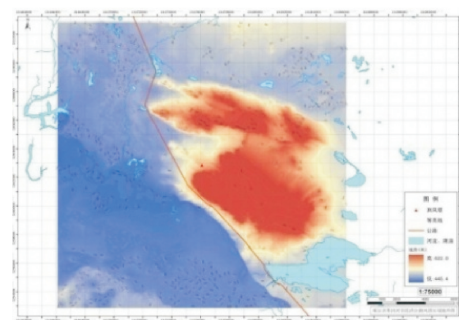
新疆是我国内陆强风最为盛行的地区,根据强风分布、地形特点及风观测塔的建塔情况,选择属于大风日数全疆之冠的阿拉山口地区、全疆第二的达坂城地区以及位于冷空气入疆通道的额尔齐斯河谷区域。其中,三处测站所在区域方圆 20 km 的地形特点为:阿拉山口—喇叭口地形、达坂城(柴窝堡)—山谷单坡地形、额尔齐斯河谷(托洪台)—河谷不规则地形,具体地形见图 1,从范围更大的地形图可见阿拉山口和柴窝堡均处于高山宽谷的谷底,地形类 U 形。



(a) 阿拉山口地形(20 km×20 km)



(b) 柴窝堡地形(10 km×10 km)



(c) 托洪台地形(20 km×20 km)

图 1 三个风观测塔所在的典型复杂地形
Fig. 1 Three typical complex topographies of strong wind area

为研究风特性沿高度方向的分布特点,分别建立了 100 m 高的 2 个测风塔和 70 m 高的 1 个测风塔,并且从 10 m 高度起至 70 m 高度每隔 20 m 安装一组风观测仪器,其中风观测仪器选用的是 CAWS1000-GWS 风观测系统,EL15-2D 风向传感器,EL15-1A 风速传感器,WindMasterPro 型三维超声风速风向传感器,具体风观测塔及仪器架设见表 1。此外在基站内设置有保障风观测数据采集、记录系统正常运行的无线接收装置、不间断工作计算机和不间断电源等装置。

1.2 风观测数据分析方法

实测数据的具体测试及分析方法见表 2,三维测风仪相比二维测风仪所测风参数更多,如风攻角和竖向脉动风参数。具体分析步骤为:①强风数据筛选,②分析风速、风向角、风攻角及风剖面等平均风参数,③选择持续时间较长、风向稳定的大风样本

分析紊流强度、阵风因子、紊流积分尺度和风速功率谱等脉动风参数。

表 1 风观测塔架设情况

Tab. 1 The data acquisition instrument and erection situation of representative measuring-points

强风区	风观测塔	塔高/m	经度	纬度	海拔高度/m	风速仪安装高度/m	风向仪安装高度/m
阿拉山口	阿拉山口	100	82°36′43.2″	45°10′57.9″	263	10、30、50、70、100	10、50、70、100
达坂城	柴窝堡	100	87°56′55.9″	43°33′21.9″	1 153	10、30、50、70、100	10、50、70、100
额尔齐斯河河谷	托洪台	70	86°40′49.9″	47°51′33.9″	519	10、30、50、70	10、50、70

表 2 现场实测风参数及其分析方法

Tab. 2 The wind characteristic parameters of field measurements and its processing methods

风参数	分析方法	数据来源
强风风速 风向角、 风攻角	矢量分解法。由于风观测仪器不同,具体计算公式会发生相应的变化,对二维超声测风仪来说无风攻角计算之说。	各观测站日最大 10 min 平均风速所对应的 10 min 风速时程(对应 2009 年 10 月至 2011 年 9 月两全年实测数据,其中强风数据按 10 m 高度处 10 min 平均风速 ≥ 10.8 m/s,30 m 高度和 50 m 高度处 10 min 平均风速 ≥ 11.5 m/s,70 m 及 100 m 高度处 10 min 平均风速 ≥ 12 m/s 的标准进行筛选)
紊流强度和 阵风因子	$I = \frac{U_r}{U_{\max}^D} \times 100\%$, $K = \frac{U_{\max}}{U_{\max}^D}$, U_r 为 10 min 平均最大风速的均方根值, $U_{\max}^D$ 为日最大 10 min 平均风速, $U_{\max}$ 为对应时段 3 s 平均最大风速。	
积分尺度	按照 Taylor 假设,并由自相关函数替代互相关函数。	
功率谱	$\int_0^\infty S_i(n)dn = \sigma_i^2$, 为水平纵、横向和竖向; n 为频率。	
风剖面	采用指数模型进行最小二乘法拟合。	风观测塔同时刻的强风数据中各高度日最大 10 min 平均风速

2 风特性参数分析

2.1 平均风速、风向和风攻角

风速的最大值由 10 min 滑动平均风速统计所

得,极大值由瞬时风速统计所得。观测期三处测风塔各高度月最大风速和极大风速分布见图 2,对应的风向角见图 3,柴窝堡测风塔 70 m 高度对应的风向角见图 4。

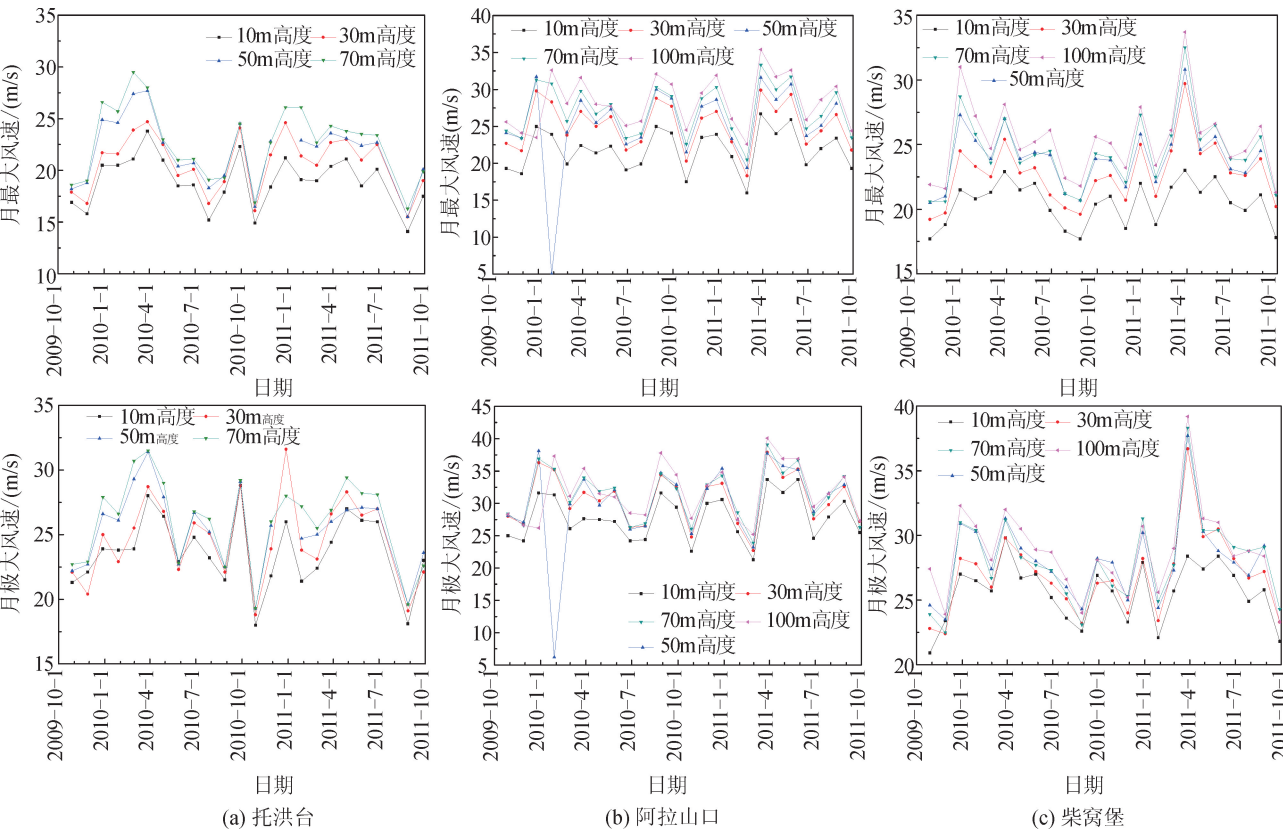


图 2 各风观测塔月最大风速、极大风速
Fig. 2 The monthly maximum (extreme) wind speed of every measuring point

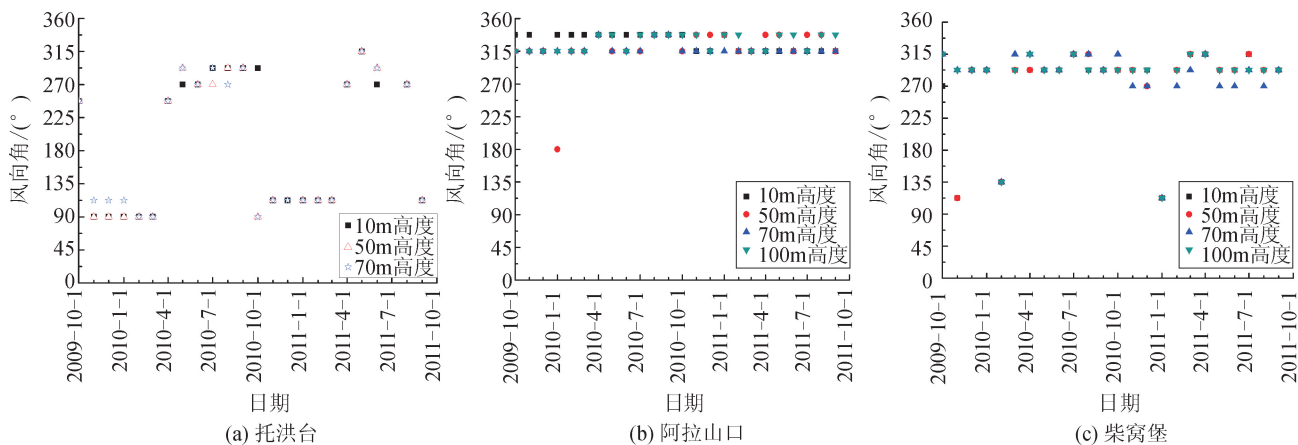


图 3 各风观测塔月最大风速对应风向角
Fig. 3 The monthly wind rise of every measuring point

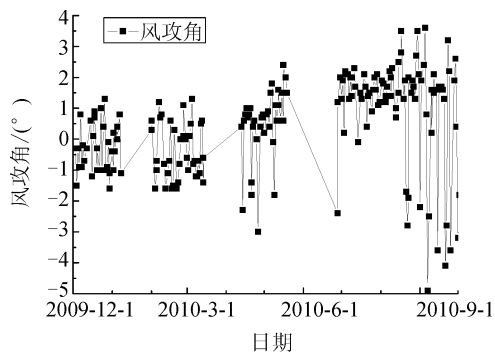


图 4 柴窝堡测风塔 70 m 高处日最大风速对应风攻角
Fig. 4 The wind attack angle of Chaiwobu measuring point at 70 m height

分析图 2~4 可见各强风区具有如下平均风特性:①各塔各高度处风速最大值和极大值都在 3 月出现(图 2 中,阿拉山口测风塔 50 m 高处 2010 年 1 月数据失真,源于仪器故障),托洪台风向以东风为主,阿拉山口和柴窝堡风向均以西北风为主,表明风速与季节有关。②风向沿高度方向基本不变,且其变化与季节有关。③柴窝堡风观测塔风攻角均在 $\pm 5^\circ$ 间,且大部分强风时段风攻角在 $\pm 3^\circ$ 间,正攻角最大值为 3.6° ,负攻角最大值为 -4.8° 。

对三维测风仪与普通二维测风仪在 2009 年 12 月~2010 年 9 月时间段的实测结果进行了对比,见图 5。

由图 5 可见:①两种仪器所测极大风速发生时刻一致(均在 2010 年 3 月份);②三维测风仪较普通二维测风仪所测极大风速大 104%(2009 年 12 月),所测最大风速相差不大(2010 年 3 月);③三维测风仪所测各月(除 2010 年 2 月外)风向角均为西北偏北风,二维测风仪所测各月风向角变化显著;④二维测风仪与三维测风仪观测结果(除风向角外)规律一

致,但三维测风仪所测极值显著大于二维测风仪。

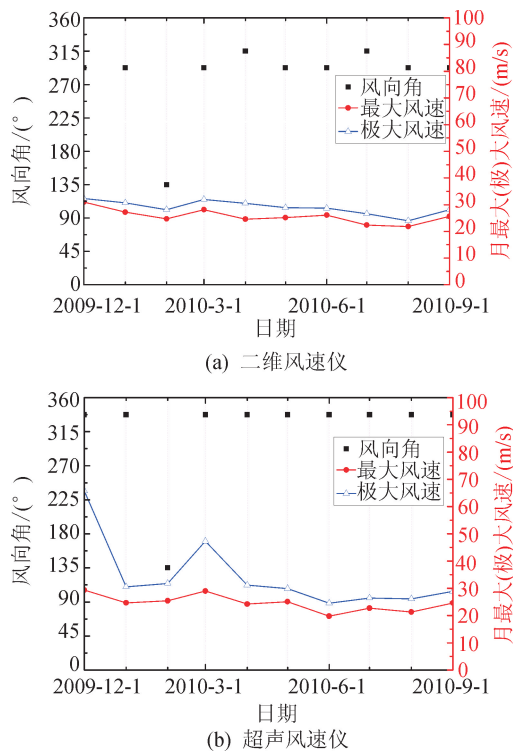


图 5 柴窝堡测风塔 70 m 高处风速及其对应风向角
Fig. 5 The wind direction and its corresponding wind speed of Chaiwobu measuring point at 70 m height

2.2 风速剖面指数 α

选用最小二乘法对风速剖面进行指数拟合,分别选取平均风速(日最大平均风速的平均值)、最大风速(观测期间最大平均风速)、月最大平均风速进行拟合,见图 6~7。由图 6 可见,由最大风速拟合得到的指数 α 较大,特别是柴窝堡处指数 $\alpha=0.17$,表明风速剖面指数 α 随风速增大而明显增大;由图 7 可见,由实测月平均风速拟合得托洪台处 α 分散在 0.047~0.169 区间,平均值为 0.091;在阿拉山

口处 α 分散在 0.092 ~ 0.149 区间,平均值为 0.120;柴窝堡处 α 分散在 0.058 ~ 0.173 区间,平均值为 0.092。最大值均出现在风速较大的二、三月份,对比图 2 可知,指数 α 最大值对应风速均较大,指数 α 最小值对应风速多数亦较小,进一步说明:风速剖面指数 α 随风速增大而增大。

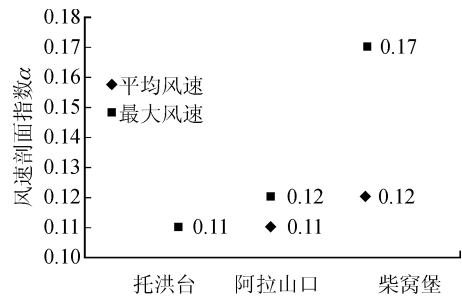


图 6 观测期间风剖面指数
Fig. 6 Wind velocity profile of every measuring point

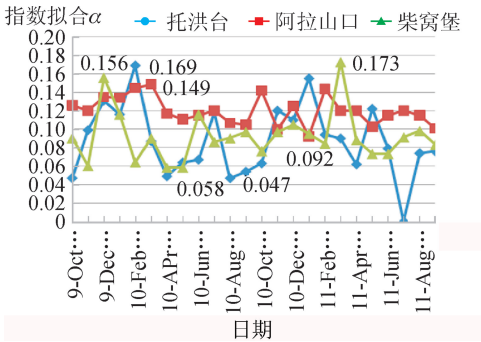


图 7 月最大平均风速对应风剖面指数
Fig. 7 The monthly maximum wind speed corresponding to the velocity profile of every measuring point

2.3 紊流强度及阵风因子

各风观测塔各高度处的紊流强度和阵风因子统计结果见表 3,柴窝堡测风塔塔高 70 m 处三维测风仪所测紊流强度和阵风因子统计结果见表 4。

表 3 紊流强度和阵风因子统计
Tab. 3 Turbulence intensity and gust factor of every measuring point

测站	测点 高度/m	样本数	平均 风速/(m/s)	紊流度/%				阵风因子			
				Mean	Rms	Max	Min	Mean	Rms	Max	Min
托洪台	10	335	14.85	8.3	0.3	24.9	3.2	1.20	0.08	1.64	1.07
	30	340	16.00	6.7	0.3	33.3	1.1	1.16	0.08	1.71	1.03
	50	335	16.70	6.8	0.3	33.7	1.5	1.16	0.07	1.70	1.03
	70	355	17.60	6.2	0.3	32.5	1.2	1.14	0.07	1.61	1.02
柴窝堡	10	481	14.79	11.1	0.2	25.9	7.5	1.26	0.06	1.61	1.16
	30	488	16.10	9.3	0.2	19.6	4.5	1.21	0.05	1.52	1.09
	50	495	16.80	8.5	0.2	21.3	3.8	1.18	0.05	1.47	1.09
	70	497	17.20	7.8	0.2	18.9	2.1	1.16	0.05	1.48	1.06
	100	494	17.90	6.0	0.2	17.9	1.2	1.12	0.06	1.54	1.03
阿拉山口	10	258	16.16	9.4	0.2	18.7	6.2	1.21	0.06	1.59	1.12
	30	276	18.15	7.2	0.2	14.9	1.6	1.16	0.06	1.53	1.04
	50	282	18.30	5.8	0.2	13.4	1.2	1.13	0.05	1.37	1.02
	70	283	19.20	5.0	0.2	12.1	0.9	1.11	0.06	1.30	1.02
	100	276	20.14	4.3	0.2	10.9	0.9	1.10	0.05	1.29	1.02

表 4 柴窝堡处紊流特性
Tab. 4 Turbulence intensity of Chaiwopu measuring point

紊流特性	Mean	Rms	Max	Min
$I_U/\%$	1.3	0.5	2.8	0.1
$I_V/\%$	0.7	0.5	2.3	0.0
$I_W/\%$	0.3	0.5	1.4	0.0
阵风因子	1.1	0.1	1.5	1.0

注:三维测风仪 2009 年 12 月~2010 年 9 月。

分析表 3 中各高度处的紊流特性可见:①各测风塔各高度处的紊流强度均值均比《规范》^[12]给出的建议值小,阵风因子均值也均比《指南》值小。②托洪台、阿拉山口、柴窝堡各塔塔高 70 m 处紊流强

度相比塔高 10 m 处分别降低 25%、30%、47%,且有紊流强度和阵风因子随平均风速增大而减小的趋势。③实测值较小表明紊流强度在强风条件下的值小于常规气象条件下的值。从大气稳定度的角度解释为:平均风速增大,大气稳定性增强,脉动性减小。

由表 4 可见:①紊流强度均值 $I_U:I_V:I_W=1:0.5:0.2$,与《规范》建议的 $I_U:I_V:I_W=1:0.88:0.50$,差异显著;阵风因子均值 1.1,最大值 1.5 与《规范》1.34 基本一致;②对比表 3 中二维测风仪所测相同高度处的值,三维测风仪所测紊流强度较小很多,阵风因子相差不大,故在后续研究中应慎重

选择仪器。

2.4 紊流积分尺度

由柴窝堡测风塔塔高70 m处实测典型强风时段风速时程统计得到相应的紊流积分尺度平均值,见图8(图中横坐标为样本序列)。

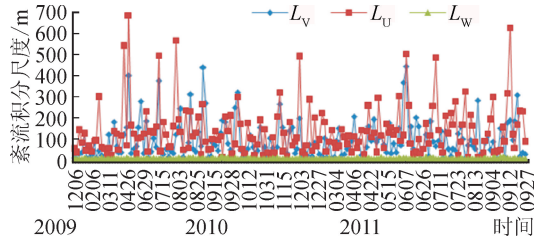


图8 柴窝堡测风塔70 m高处典型强风时段的平均紊流积分尺度

Fig. 8 Turbulence integral scale of Chaiwopu measuring point at 70 m height

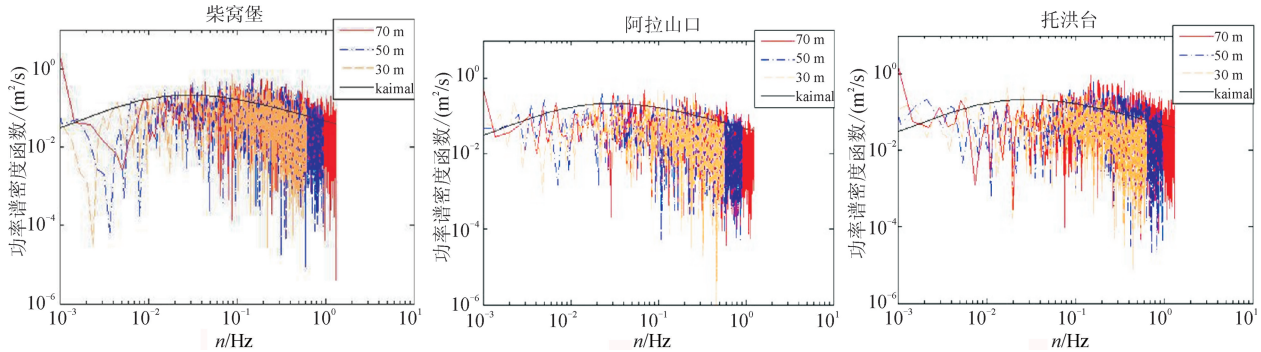


图9 各测风塔各高度处典型强风时段(1h)紊流功率谱

Fig. 9 Turbulence power spectra of every measuring point at every height

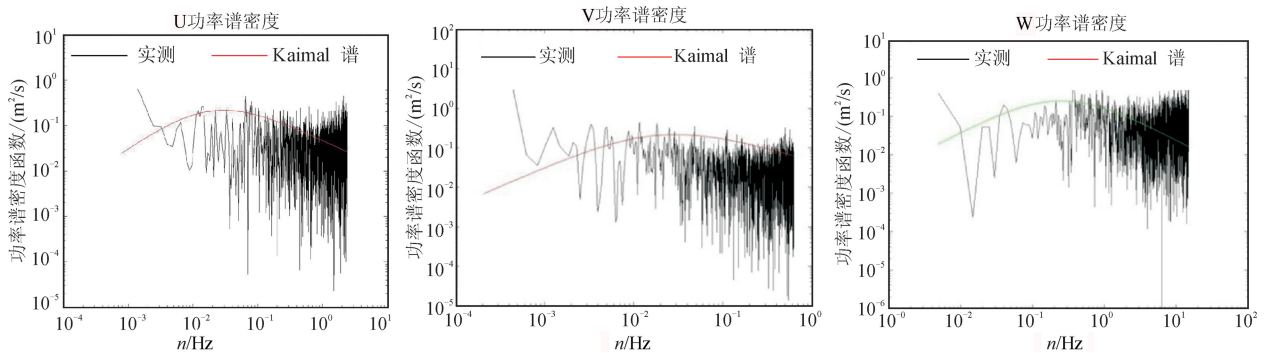


图10 柴窝堡测风塔塔高70 m处典型强风时段(2010年2月25日)紊流功率谱

Fig. 10 Turbulence power spectra of Chaiwopu measuring point at 70 m height

由图9可见:①各测风塔沿高度方向的紊流功率谱相差不大,且随高度增加脉动频率增大;②各塔实测紊流功率谱整体趋势与《规范》谱一致,但整体小于《规范》谱;③整体脉动频率较低,除70 m高度以下区域脉动风频率均不在工程结构关心的惯性子区范围内。

另外,对柴窝堡测风塔70 m高度处三维测风仪所测数据进行了紊流功率谱特性分析,限于篇幅

由图8可见,① $L_{U,max} = 682.123 \text{ m}$, $L_{U,min} = 8.219 \text{ m}$, $L_{U,mean} = 131.280 \text{ m}$; $L_{V,max} = 435.072 \text{ m}$, $L_{V,min} = 0.457 \text{ m}$, $L_{V,mean} = 85.700 \text{ m}$; $L_{W,max} = 6.469 \text{ m}$, $L_{W,min} = 0.061 \text{ m}$, $L_{W,mean} = 1.383 \text{ m}$;可见各分量数值非常分散。② $L_U = 131 \text{ m} > 120 \text{ m}$, $L_V = 86 \text{ m} > 60 \text{ m}$,可见塔高70 m处实测值较《规范》建议值大。③《规范》积分尺度建议取值未区分地表类型,对于复杂地形区的紊流积分尺度取值尚属空白。

2.5 紊流功率谱

选取各测风塔典型强风时段的实测数据,统计分析其风速功率谱,其中强风时段分别为:柴窝堡—2010-03-12 18:00:00~18:59:59,阿拉山口—2010-08-23 17:30:00~18:30:59,托洪台—2010-03-20 07:32:46~08:32:45,见图9~10。

所限,仅给出2010-02-25的紊流功率谱图形,如图10所示,分析发现① S_U 、 S_V 和 S_W 与《规范》建议的Simiu理论谱、Panofsky理论谱较为一致,且紊流能量主要集中在高频段;②冬季、夏季强风的差别还需深入分析。

3 结论

通过在新疆三处典型地形区设立特种风观测

塔,对两整年的实测数据进行分析,探讨相应地形区的风参数,总结强风特性如下。

1) 平均风特性

① 风速随高度的增加而增加,风向则保持基本不变;阿拉山口和柴窝堡的风向与峡谷走向一致;此外,风速、风向与季节变化关系明显。

② 风攻角(柴窝堡风观测塔)均在 $\pm 5^\circ$ 间,大部分时段集中在 $\pm 3^\circ$ 间,建议U形山谷风攻角范围取 $\pm 5^\circ$ 。

③ 风剖面指数 α 随风速增大而增大。

2) 紊流强度及阵风因子

① 各区域紊流强度均值都小于《规范》给出的建议值,阵风因子均值都小于《指南》给出的建议值,表明紊流强度在强风条件下的值小于一般气象条件下的值。

② 紊流强度和阵风因子随风速增大而减小。

③ 紊流强度均值 $I_U : I_V : I_W = 1 : 0.5 : 0.2$, 与《规范》建议的 $I_U : I_V : I_W = 1 : 0.88 : 0.50$, 差异显著,阵风因子均值 1.1、最大值 1.5 均与《规范》建议值 1.34 差异不大。

3) 紊流积分尺度及功率谱

① 对比《规范》建议值,塔高 70 m 处实测 $L_U = 131 \text{ m} > 120 \text{ m}$, $L_V = 86 \text{ m} > 60 \text{ m}$, 且《规范》积分尺度建议取值未区分地表类型。

② 各测风塔沿高度方向的紊流功率谱相差不大,且随高度增加脉动频率增大。

③ 各塔实测紊流功率谱整体趋势与《规范》谱一致,但整体脉动频率较低,小于《规范》谱,且 70 m 高度以下区域脉动风频率均不在工程结构关心的惯性子区范围内。

参考文献:

- [1] DUCHENE-MARULLAZ P. Full-scale measurement of the structure and strong winds [R]. Construction Industry Research & Information Association (CIRIA Report), No. 76, 1978.
- [2] SHIAU B S, CHEN Y B. In situ measurement of strong wind velocity spectra and wind characteristics at Keelung coastal area of Taiwan [J]. Atmospheric Research, 2001, 57(3): 171-185.
- [3] 安毅, 全涌, 顾明. 上海陆家嘴地区近 500 m 高空台风“梅花”脉动风幅值特性研究 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(7): 21-27.
AN Yi, QUAN Yong, GU Ming. Turbulence characteristic analysis of typhoon ‘Muifa’ near 500 m above ground in Lujiazui district of Shanghai [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7): 21-27.
- [4] 肖仪清, 李利孝, 宋丽莉, 等. 基于近海海面观测的台风黑格比风特性研究 [J]. 空气动力学学报, 2012, 30(3): 380-387.
XIAO Yiqing, LI Lixiao, SONG Lili, et al. Study on wind characteristics of typhoon Hagupit based on off-shore sea surface measurements [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(3): 380-387.
- [5] HUI M C H, LARSEN A, XIANG H F. Wind turbulence characteristics study at the Stonecutters Bridge site: Part I—Mean wind and turbulence intensities [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(1): 22-36.
- [6] 陈政清, 李春光, 张志田, 等. 山区峡谷地带大跨度桥梁风场特性实验 [J]. 实验流体力学, 2008, 22(3): 54-67
CHEN Zhengqing, LI Chunguang, ZHANG Zhitian, et al. Model test study of wind field characteristics of long-span bridge site in mountainous valley terrain [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2008, 22(3): 54-67
- [7] 李永乐, 蔡宪棠, 唐康, 等. 深切峡谷桥址区风场空间分布特性的数值模拟研究 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 116-122.
LI Yongle, CAI Xiantang, TANG Kang, et al. Study of spatial distribution feature of wind fields over bridge site with a deep-cutting gorge using numerical simulation [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(2): 116-122.
- [8] 庞加斌, 宋锦忠, 林志兴. 四渡河峡谷大桥桥位风的湍流特性实测分析 [J]. 中国公路学报, 2010, 23(3): 42-47.
PANG Jiabin, SONG Jinzhong, LIN Zhixing. Field measurement analysis of wind turbulence characteristics of sidu river valley bridge site [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(3): 42-47.
- [9] 张玥, 胡兆同, 刘健新. 西部山区斜拉桥风特性观测及数值仿真 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(5): 44-49.
ZHANG Yue, HU Zhaotong, LIU Jianxin. Wind characteristics observation and numerical simulation of cable-stayed bridge site in Chinese western valley areas [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2011, 31(5): 44-49.
- [10] 高亮. 内陆强风特性的现场实测与模拟 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
GAO Liang. Simulation and field measurement of the characters of strong wind in inner land of china [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [11] 中交公路规划设计院. 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T D60-01-2004 [S]. 北京: 中华人民共和国交通部, 2004.

(责任编辑 王绪迪)