

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.01.008

内陆强风特性三种研究途径的对比分析

高亮¹, 崔欣², 白桦³, 刘健新³

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 河南 郑州 450045; 3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 针对西部强风区强风特性资料稀缺的问题, 结合三处典型强风地区, 通过现场实测、风洞试验和数值模拟三种途径, 从研究对象、研究手段、研究内容和研究精度等方面来分析强风区域的风特性, 总结三种途径存在的问题和各自具有的优势。结果表明: 强风特性研究的途径以现场实测为根本, 考虑到该方法的实施难度及经济性, 以风洞试验及数值模拟途径为辅。其中风洞试验相对来说是经济、高效的途径, 而数值模拟目前还处在逐步探索阶段, 其模拟的准确性还有待进一步提高。

关键词: 西部强风; 风特性; 现场实测; 风洞试验; 数值模拟

中图分类号: U448.27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2017)01-0041-05

Comparative analysis of the three ways used to study the characters of strong wind in inland China

GAO Liang¹, CUI Xin², BAI Hua³, LIU Jianxin³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: For lack of enough meteorological observing station in western area, especially at the bridge site, wind speeds, one of the key parameter in wind load computation should be obtained. There are three main approaches to obtain the parameters of wind in western area, which includes field measurement, wind tunnel test and numerical simulation. This paper is to analyze the wind characteristics of strong wind area by the three main approaches through the object of study, research methods, research contents and research precision, etc. The problems and the respective advantages are summarized with the three ways. By comparing the record by the three methods, these methods are evaluated. The results show that the strong wind characteristics research ways are based on the field measurement, considering the difficulty of the implementing and the economy of this method, with physical wind tunnel and numerical wind tunnel simulation as the complementary approaches. Including that physical wind tunnel simulation is relatively economic and effective, the numerical wind tunnel simulation is still in the exploratory stage, with the accuracy of the simulation remaining to be further improved.

Key words: west strong wind; wind characteristics; field measurements; wind tunnel test; CFD technology

随着西部大开发战略的实施, 以及国家新能源项目的开发与建设, 西部地区的强风也越来越受到关注。例如: 大型风电工程中有关工程选址, 风机和塔架的抗风特性, 西电东输项目中输电塔架和输电

线的抗风研究, 光伏工程中光伏板的抗风性能, 高耸、大跨结构的抗风性能等。然而西部地区强风不同于东南沿海强风, 受季风和地形地貌影响明显, 并且大风常常卷起沙石。同时, 对西部地区强风的系

收稿日期: 2016-03-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90915001); 西安市建设科技资助项目(SJW2014012); 西安理工大学博士科研启动基金资助项目(118211407); 西安理工大学科学研究计划资助项目(2015CX017)

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

统研究开展较晚,现有风特性资料极少,难以满足工程需求。因此,对西部地区的强风特性展开系统研究是一项极其紧迫且重要的任务。

以往对强风的研究均是针对具体工程而言,鲜有专门针对强风特性的研究^[1-5]。风工程研究的中心问题是结构的抗风设计,即评价在风的作用下结构的响应,然后通过减小风致内力,避免风致振动,提高结构的可靠性^[2]。研究者们借助理论分析、风洞试验和工程实测等措施进行了相关研究,并取得了一定的成果,使得结构风工程发展迅速。但是各种途径得出的结果差距比较大,主要原因为对风特性的认识不够充分。风荷载作为结构系统响应计算的输入,对其进行准确描述至关重要,然而,对风特性的准确描述和精确模拟至今没有公认的解决办法,所以有必要对强风特性的研究途径进行系统的梳理。

国内外研究人员围绕风特性的 7 个参数:平均风速、风向角、风攻角、风剖面指数、紊流强度、紊流积分尺度和紊流功率谱,采用现场实测、风洞试验和数值模拟三种途径,进行了大量有意义的研究工作^[6-9],初步得出最可靠的途径是现场实测,风洞试验相对来说是经济、高效的途径,而数值模拟目前还处在逐步探索阶段,其模拟的准确性还有待进一步提高^[10]。

本文通过现场实测、风洞试验和数值模拟三种途径,从研究对象、研究手段、研究内容和研究精度等方面来分析典型强风区域的风特性,总结三种途径存在的问题和具有的优势,得到一些具有普遍意义的结论。

1 现场实测

1.1 采集仪器及架设情况

针对西部强风区选择三处典型地形:喇叭口地形、单坡地形、不规则地形,建立风观测塔,如图 1 所示。其中阿拉山口测风塔的海拔高度为 263m,托洪台测风塔的海拔高度为 519m,柴窝堡测风塔的海拔高度为 1153m。

现场实测的数据采集仪器主要有风向仪、二维风速仪和三维超声风速仪,具体架设情况如图 2 所示。现场通过在各风观测塔竖向不同高度层架设风速仪,采集实测数据进行统计分析,拟合得到风剖面

函数。需要说明的是,本文的统计数据为 2009 年 10 月~2011 年 9 月两个完整年的数据。

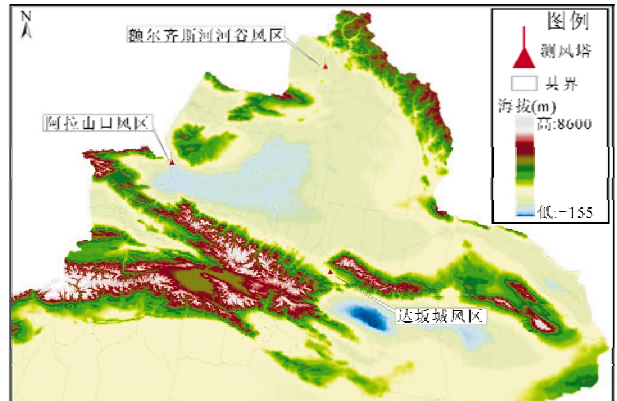


图 1 三个典型复杂地形风区位置示意图

Fig. 1 Three typical complex topographies of strong wind area

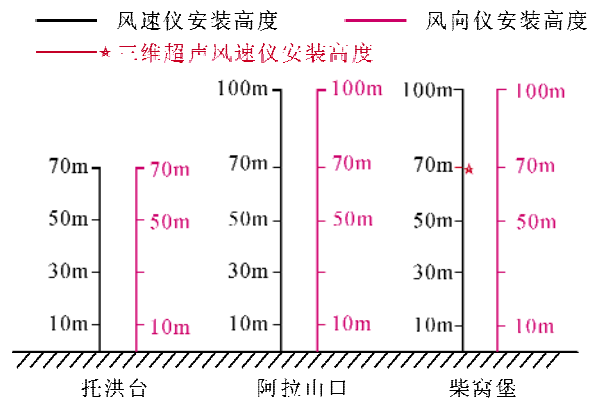


图 2 各塔实测数据采集仪器及架设情况

Fig. 2 Data acquisition instrument and erection situation of representative measuring-points

1.2 测试与分析

实测数据的具体测试及分析方法如表 1 所示。三维风速仪相比二维风速仪可以得到更多的风参数,例如风攻角和竖向的脉动风特性参数。

1.3 实测存在的问题

国内现有风观测数据大多来源于传统风速仪的采集,统计分析后主要得到的是平均风速参数,对于脉动风速相关参数则无法获得,故而实测数据严重匮乏;其次,现场实测实施过程中,存在观测塔架及仪器设备耗资大、耗时长,观测期易受自然灾害的影响及采集处理过程中管理困难等问题,导致实测的实施困难。

表1 现场实测风特性参数及其具体分析方法

Tab.1 Wind characteristic parameters and its processing methods for field measurements

风特性参数	数据来源	具体分析方法
强风风速		矢量分解法。涉及测站位置、地貌特点、测点高度、观测仪器、时距、采样频率等参数。若测点不符合规定标准条件,按张相庭《结构风压和风振计算》和《结构风工程》中的相应规定进行换算。
风向角和 风玫瑰图		由于风观测仪器不同,风向角的具体计算公式会发生相应的变化。
风攻角		对二维超声风速仪来说无风攻角计算。
紊流度和 阵风因子	各观测站日最大 10min 平均风速所对应的 10min 风速时程	紊流度 $\varepsilon = \frac{U_r}{U_{\max}^p} \times 100\%$, 阵风因子 $K = \frac{U_{\max}}{U_{\max}^p}$, U_r 为 10min 平均最大风速的均方根值, U_{\max} 为对每日最大风速(10min 平均)对应时间段的风速时程采用滑动平均(3s 平均)求出的最大风速值, U_{\max}^p 为每日 10min 平均最大风速。
积分尺度		根据 Taylor 假设,用自相关函数代替空间相关函数。
功率谱密度 函数		湍流功率谱密度函数为 S_i , 脉动风对应方向上的湍流能为 σ_i^2 , 两者关系为 $\int_0^\infty S_i(n) dn = \sigma_i^2$, $i = u, v, w$, 分别表示水平、竖向和横向; n 为频率。
风剖面	风观测塔同时刻的强风数据中各高度日最大 10min 平均风速	用指数率拟合。强风区特殊地貌的风剖面指数不一定和《桥梁抗风规范》中的风剖面指数取值一样,应由实测数据拟合,得到各特殊地形的风剖面指数。

2 风洞试验

2.1 物理风洞流场

风洞试验所采用的流场包括五类:均匀流场和《桥梁抗风规范》^[11](以下简称“规范”)中规定的四类紊流场。流场的模拟均满足风速剖面和紊流强度剖面两个参数,且在横风向的风参数是一致的,难以准确模拟实际大气层在横风向随地形和气象变化的随机特性,故具体模拟参数为:①均匀流场设置为平均风速不随高度变化,紊流强度小于 0.3%;②紊流场设置按“规范”中 A、B、C、D 四类风场的风速剖面及紊流强度剖面的具体参数要求进行;③来流风速统一取 10m/s。

试验目的为通过地形模型试验,分析五类流场经过地形模型后的风特性参数变化情况。试验中将地形模型处所测风场特性结果与来流风场特性结果进行对比,将差别最小,即对来流风场的改变最小,作为实际地形风场类型的判定依据。

2.2 地形模型

地形模型的制作中,模型缩尺比的选择至关重要,模型缩尺比的选择受到风洞试验断面尺寸的限制和模拟精度要求的影响,太大则只能模拟较小区域的地形,太小又不能有效的反映地形特点。项目中制作了普通模型和歪曲模型两种地形模型,普通模型缩尺比为 1:1000,歪曲模型(畸变模型)缩尺比选择为竖向 1:1000 和水平向 1:3000,主要是考虑既能有效反映地形特点,同时又能模拟更大区域的地

形。歪曲模型模拟区域为以实际风观测塔为中心,直径 7.5km 区域内的地形,普通模型为直径 2.5km 区域内的地形,采用歪曲模型模拟区域扩大了 3 倍。

试验结果显示,歪曲模型的模拟准确性较差,修正复杂,故不建议采用。

2.3 测试与分析

测试仪器:可以选用热线风速仪或皮托管直接测量风速,亦可以选择压力扫描阀测得压力后,通过换算而得到风速。本项目采用后者,且考虑到分析风速剖面函数需要各高度处的同步风速数据,项目中采用自制测压排管连接高频压力扫描阀装置,实现对风压的同步测量。

对试验测试所得风压时程,首先通过 MATLAB 编程转换为风速时程,然后采用与实测算法对应的方法分析各风特性参数。目前,测压排管装置只能对顺风向风压进行有效测试,而对横风向和竖风向风压数据的采集,还有待试验装置的进一步改进。

2.4 试验存在的问题

①小缩尺比风场的风洞试验没有成熟的经验指导,项目实施过程中,通过大量的尝试工作才得到目标风场,试凑过程中的经验规律值得总结,以期为后续试验的顺利开展提供帮助;②相应的地形模型的制作精度对风特性参数的影响明显,故而模型设计也需要在精度与经济性之间平衡;③同步测试装置的研发虽然在一定程度上达到了同步与高效的要求,但是还有水平横风向和竖风向风压时程无法测试的问题。

3 数值模拟

3.1 数值风洞流场

数值模拟的风场包含均匀流场与紊流场两类,其中紊流场包括“规范”规定的 A、B、C、D 类;数值模拟参数(平均风速、风剖面指数、紊流强度)及工况(风向角、测点)与风洞试验对应,且计算方法保持一致。

3.2 计算模型及网格划分

数值模拟中地形区域的选取与风洞试验相对应,建立以测风塔位置为中心,4 km×4 km 范围内地形的模型。建立普通模型两个,缩尺比分别为 1:1、1:1 000;歪曲模型竖向缩尺比为 1:1 000,水平向缩尺比 1:3 000。

模型网格采用分区域划分:①水平方向上,在地形范围内及地形边界过渡段的网格密集;远离地形区域,对其流场特性关注度降低,网格划分也以一定渐变率逐渐稀疏,以减少网格数量,继而缩短计算时间。②竖直方向上,由于受空气粘性作用,愈接近地面网格划分愈密,地面首层网格高度小于 3m。整个计算域内均采用六面体结构划分网格,以提高计算精度。对于不同地形与风场条件,各计算模型的总网格数量均在六百万左右。

3.3 测试与分析

为了与风洞试验结果进行对比,令数值模拟测试工况与风洞试验保持一致,测试主要得到顺风向风参数,即各测点平均风速和紊流强度两个参数。

3.4 模拟存在的问题

准确的进行数值模拟需要精确的地形模型、准确的边界条件与相匹配的流场参数。模型建立过程中:①实际地形的三维坐标值的精度需慎重选择;②壁面函数对粗糙高度的要求与空间离散的细化要求这一矛盾,在湍流强度大的风场里表现得尤为突出。

4 三种途径的差异分析

4.1 各途径所得风特性参数及差异来源分析

由现场实测、风洞试验、数值模拟三种途径均可以得到强风特性参数,但各种途径所得的强风特性参数不同,与“规范”中取值方法进行对比,结果如表 2 所示。对三种途径所得强风特性参数的差异来源进行分析,如表 3 所示,需要说明的是表中数据分析仅针对平均风速和紊流强度。

现场实测所得强风特性参数包含:平均风速、风向角、风攻角、风剖面指数、紊流强度、紊流积分尺度、紊流功率谱密度;风洞试验缺少对风向角和风攻角的模拟,原因为试验中研制的排管装置目前仅能

采集顺风向数据;数值模拟仅对平均风速、风剖面指数和紊流强度进行了模拟分析,因为目前对三维紊流流场的模拟技术还不够完善。

表 2 三种途径所得强风特性参数的对比

Tab. 2 Comparing the wind characteristic parameters get from the three methods

强风特性参数	现场实测	风洞试验	数值模拟	备注
平均风速	√	√	√	模拟尺度不同
风向角	√	—	—	需要实测
风攻角	√	—	—	须有三维测风仪
风剖面指数	√	√	√	模拟较易实现多点同步测量
紊流强度	√	√	√	来流条件不同
紊流积分尺度	√	√	—	风速时程不同
紊流功率谱密度	√	√	—	风速时程不同

表 3 三种途径的差异来源分析

Tab. 3 Main influencing factors by using the three methods

差异来源	研究途径		
	现场实测	风洞试验	数值模拟
流场尺度	与实际一致	小缩比尺	可变化
仪器设置	采用测风塔,水平向及竖向测点均有限;二维、三维测风仪采集内容不统一	采用竖向多点同步测量,测点布设方便;仅采集到水平顺风向的数据	
来流条件	实际流场,入口断面横风向有变化	风剖面按指数律模拟,横风向断面无变化	
所测风场	大气紊流场	模拟区域为大气紊流场	整个流场均一性设置
风速样本	实测风速时程经过 10min 平均风速大于 10.8m/s 的数据筛选,采样频率 10Hz	风压时程经转换得风速时程,采样频率 10Hz	无风速时程,样本值为计算收敛值
数据分析	10min 平均	采样时段平均	收敛值

“规范”中,对 6 个风特性参数(基本风速、风剖面函数、紊流强度、积分尺度、功率谱密度函数及风攻角)进行了取值说明,需要注意的是,“规范”中对风场的假定条件为各向同性,故无风向角说明。

对比三种途径的差异性来源可见:①三种途径均有优劣,想得到比较合理的风特性参数,需要三者的相互补充,仅通过其中任何一种途径都难以获得完备的风参数;②现场实测是获取风特性参数最根本的途径,至关重要。

4.2 分析数据结果

以托洪台风观测塔处主导风向(90°风向角)对应风

参数为例,分析三种途径各自得到的风参数,选取风洞试验和数值模拟与实测一致的测试点进行分析(见表4)。

表4 托洪台测风塔主导风向(90°风向角)的风参数
Tab.4 Wind parameters at the same point and direction by the three methods

途径	风剖面指数	紊流强度/%				
		10m	30m	50m	70m	100m
现场实测	0.11	8	7	6	6	—
风洞试验	0.12	9	10	8	7	5
数值模拟	0.13	6	6	6	5	3
规范	0.12	—	13	12	11	11

由数据分析结果可见:①经三种途径分析得到的主导风向对应的风剖面指数较为相近;对应的紊流强度均比规范值要小,其中数值模拟所得紊流强度最小。②风洞试验和数值模拟对风剖面指数和紊流强度的模拟精度较高,对其余风特性参数的模拟有待加强。③通过与规范的对比发现,规范值偏于保守。

5 结论

采用三种途径对西部三处典型地形区的强风特性进行对比分析,得出以下结论:

1) 现场实测的主要问题是测试设备的选择、安装的经济性和可操作性;长周期测试过程中数据的完整性和准确性及大量实测数据分析方法的统一性。其优势为风参数测试结果的准确性、全面性及真实性;

2) 风洞试验的主要问题是实现多点水平横风向和竖风向试验数据的同步采集及小缩尺比紊流风场的准确和高效模拟。相对现场实测来说,其优势在于测试时间短、费用低、可重复,且方便分析局部地形对风特性参数的影响;

3) 数值模拟的主要问题是模型边界条件的设置和紊流风场的模拟。主要优势在于流场可视;

4) 强风特性的研究应以现场实测为根本,通过风洞试验及数值模拟对其进行拓展。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

- [3] 刘健新,李加武.中国西部地区桥梁风工程研究[J].建筑科学与工程学报,2005,22(4):32-39.
LIU Jianxin, LI Jiawu. Study of wind project of bridge in western area of China [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 32-39.
- [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] 庞加斌,葛耀君,陆焯.大气边界层湍流积分尺度的分析方法[J].同济大学学报,2002,30(5):622-626.
PANG Jiabin, GE Yaojun, LU Ye. Methods for analysis of turbulence integral length in atmospheric boundary-layer [J]. Journal of Tongji University, 2002, 30(5): 622-626.
- [6] 安毅,全涌,顾明.上海陆家嘴地区近500m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 500m above ground in Lujiazui district of Shanghai [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7): 21-27.
- [7] 王浩,邓稳平,焦常科,等.苏通大桥凤凰台风现场实测分析[J].振动工程学报,2011,24(1):36-40.
WANG Hao, DENG Wenping, JIAO Changke, et al. Field measurements on typhoon Fung-Wong at the Sutong Bridge [J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(1): 36-40.
- [8] 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.
- [9] 李杏平,李爱群,王浩,等.基于长期监测数据的苏通大桥桥区风特性研究 [J].振动与冲击,2010,29(10):82-85.
LI Xingping, LI Aiqun, WANG Hao, et al. Wind characteristics of Sutong bridge based on long-term monitored data [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10): 82-85.
- [10] 高亮.内陆强风特性的现场实测与模拟研究[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 D60-2004)[S].北京:中华人民共和国交通部,2004.
(责任编辑 周 蓓)