文章编号:1674-2974(2016)11-0103-09

高墩多塔斜拉桥沿桥轴向风特性实测分析*

辛亚兵[1,2],邵旭东[1],刘志文[1†],贾亚光[3],丁 冬[1]
(1. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室,湖南 长沙 410082;2. 现代投资股份有限公司,湖南 长沙 410004;3. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司,河南 郑州 450052)

摘 要:为研究山区地形高墩多塔斜拉桥沿桥轴向风特性变化情况,在桥面沿桥轴向安装两个三维风速仪和两个二维风速仪,利用小波法提取实测非平稳风时变平均风速,对沿桥轴向风样本进行平均风特性和紊流风特性分析.结果表明:沿桥轴向4个测点平均风速、平均风向角变化趋势基本保持一致;沿桥轴向湍流强度、阵风因子、积分尺度等紊流参数变化趋势基本保持一致,顺风向湍流强度均值较规范推荐值偏高;沿桥轴向实测风样本顺风向功率谱密度在低频段较Simiu谱值偏低,在高频段顺风向功率谱密度与Simiu谱吻合较好;竖风向功率谱密度在低频段较Panofsky谱值偏低;在高频段竖风向功率谱密度与Panofsky谱吻合较差.

关键词:山区地形;小波分析;非平稳风速模型;时变平均风速;现场实测
中图分类号:U448.27 **文献标识码**:A

Wind Characteristics along Axis Bridge Measured at Multi-pylon Cable-stayed Bridge Site with High Piers

XIN Ya-bing[1,2], SHAO Xu-dong[1], LIU Zhi-wen[1†], JIA Ya-guang[3], DING Dong[1]
(1. Hunan Province Key Laboratory for Wind Engineering and Bridge Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China; 2. Xiandai Investment Company Limited, Changsha, Hunan 410004, China; 3. Henan Povincial Cmmunications Panning & Dsign Istitute Co Ltd, Zhengzhou, Henan 450052, China)

Abstract: In order to study the wind characteristics along bridge axis at multi-pylon cable-stayed bridge site with high piers in mountainous terrain, two three-dimensional anemometers and two two-dimensional anemometers were installed on the bridge deck. The time-varying mean wind speeds of the non-stationary winds were obtained by wavelet analysis method. The mean wind and turbulence characteristics measured along the bridge axis were analyzed. The results demonstrate that the mean wind speeds and wind direction changed in the same trend along the bridge axis. The turbulence characteristics measured along the bridge axis, such as turbulence intensities, gust factors, and integral scales also changed in the same trend. Meanwhile, the mean longitudinal turbulence intensities were higher than the values recommended by wind resistant design specification for highway bridges, while the values of longitudinal turbulent wind spectrum measured along the bridge axis were lower than the specification spectrum at low frequencies and close to the specification spectrum at high frequencies. The values of vertical turbulent wind spectrum measured a-

* **收稿日期**:2015-12-22
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478180), National Natural Science Foundation of China(51478180)
作者简介:辛亚兵(1980—),男,湖北安陆人,湖南大学博士研究生,工程师
† 通讯联系人,E-mail:zhiwenliu@hnu.edu.cn

long the bridge axis were lower than the specification spectrum at low frequencies and not close well to the specification spectrum at high frequencies.

Key words: mountainous terrain; wavelet analysis; non-stationary wind speed model; time varying mean wind speed; field measurement

随着中国国家中西部高速公路、铁路建设加速,出现了越来越多的山区高墩大跨桥梁,典型例子有贵州巴陵河大桥(悬索桥,主跨 1 088 m,桥面至谷底水面 370 m)、北盘江大桥(钢管混凝土拱桥,主跨 236 m,桥面至谷底水面 405 m)、湖北四渡河大桥(悬索桥,主跨 900 m,桥面至谷底 560 m)、湖南矮寨特大桥(悬索桥,主跨 1 176 m,桥面至谷底 355 m)、赤石特大桥(多塔斜拉桥,主跨 380 m,桥面至谷底 185.7 m)等.高墩大跨桥梁施工期结构自振频率低,对风作用敏感,因此在施工期抗风安全研究显得十分重要.山区地形桥位风特性复杂,具有紊流度大、风攻角大、风速和风向分布复杂等特点[1-2],因此山区高墩大跨桥梁桥位风特性应进行深入研究.

现场实测是风特性研究的主要方法之一.国外现场风实测研究相对较早,加拿大、英国、挪威、美国、日本等国家都开展了长期现场风观测工作,建立了风特性基础资料数据库[3-6].随着结构风工程研究的推进,逐渐对桥梁桥位风特性开展了一些实测研究工作[7-8].国内在结构风观测方面,李秋胜[9-10]等进行了相关研究.国内大跨度桥梁风观测主要集中在 2010 年以后,目前沿海地区大跨度桥梁台风观测取得一定成果[11-13],这些风观测均在桥面或桥塔安装单个风速仪追踪台风风速数据,从而研究桥址区台风特性及分布规律.在山区地形高墩大跨桥梁风实测方面,张玥等[14]在山西禹门口黄河桥桥位处设置 3 处观测塔进行风观测,研究表明山区强风对成桥状态稳定不利.朱乐东等[15]在坝陵河大桥桥址设置 1 座风速观测塔,通过实测数据和附近气象站观测数据分析了桥址设计基准风速.庞加斌等[16]在四渡河峡谷大桥桥塔位置设置观测塔,并在观测塔沿高度安装 4 个风速仪进行现场风观测,研究表明山区地形湍流特性较平原地区明显不同.金磊等[17]针对矮寨大桥桥位地形设计一套悬索吊挂观测系统,通过对实测数据分析研究桥址处峡谷风特性.综上所述,大部分桥梁风观测设置单个风速仪或沿桥墩不同高速设置多个风速仪进行风观测,很少在桥面沿桥轴线设置多个风速仪进行实测分析.近年来有学者开始关注山区非平稳风特性研究,如黄国庆等[18]对云南普立大桥桥位实测非平稳强风样本确定时变平均风并估计脉动风谱,分析了桥梁静风响应和抖振响应,研究结果表明非平稳强风采用传统分析方法会低估桥梁静风响应,采用规范风谱计算抖振响应偏于不安全.为研究在建的赤石特大桥风特性,在该桥上建立风观测系统,并对实测非平稳风特性进行分析,为进一步开展复杂地形高墩大跨桥梁风致响应研究提供基础数据.

1 风观测系统简介

1.1 工程背景

赤石特大桥是主跨为 165 m+3×380 m+165 m 的四塔五跨预应力混凝土双索面斜拉桥,主塔为双曲线索塔"小蛮腰"设计,位于峡谷中间 6 号索塔、7 号索塔高度大,分别为 274.13 m 和 286.63 m;各塔均布置 23 对索,最高主塔桥面至承台顶高 185.7 m.图 1 为赤石特大桥施工照片.桥址为山区峡谷地形,峡谷呈东北-西南走向,桥位北方为谷口,南方为开阔口,东西两边为陡峭山体,最大相对高差约 210 m.根据气象资料该地区受季风影响,瞬时风力达 8 级以上的大风每年发生 2~3 次.



图 1 赤石特大桥施工照片
Fig. 1 Chishi Bridge under construction

1.2 风观测系统

赤石特大桥风观测系统由风速仪、数据采集系统、数据传输系统、数据储存和处理终端组成.图 2 为赤石特大桥风速仪布置情况.在位于峡谷中间 6,7 号主塔塔顶分别布置一个二维风速仪,风速仪距

离塔顶面高度为 3 m.在 6,7 号主塔两侧桥面分别布置一个三维风速仪和一个二维超声风速仪,可实测到沿桥轴向 4 个测点(按测点 6－1,测点 6－3,测点 7－1,测点 7－3 的顺序,以下均采用此顺序)的风速、风向,风速仪距离桥面高度为 6 m,桥面风速仪随施工进度调整监测点位置.二维风速仪采用美国 Young05103 型风速仪,采样频率为 1 Hz,风向角规定为:0°方向对应的是北风(即风从正北吹向正南);风偏角以顺时针方向旋转为正(范围为 0°～360°).三维超声风速仪采用美国 Young81000 型风速仪,采样频率为 10 Hz,风向角规定为:0°方向对应的风向为北风(即风从正北吹向正南);风偏角以顺时针方向旋转为正(范围为 0°～360°).数据采集系统采用美国 Campbell 公司的 CR1000 数据采集仪,并安装无线数据传输模块,采用专用的 IP 地址通过 GPRS 实现无线传输.图 3 所示为赤石大桥风观测远程数据采集软件界面.

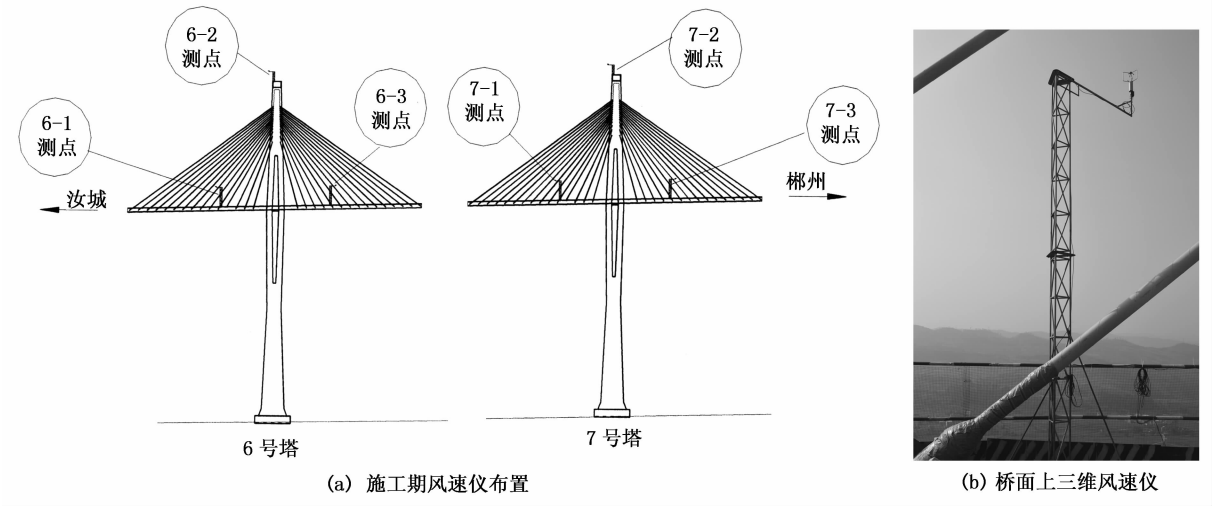


图 2　赤石特大桥风速仪布置
Fig. 2　Layout of anemometers of Chishi bridge

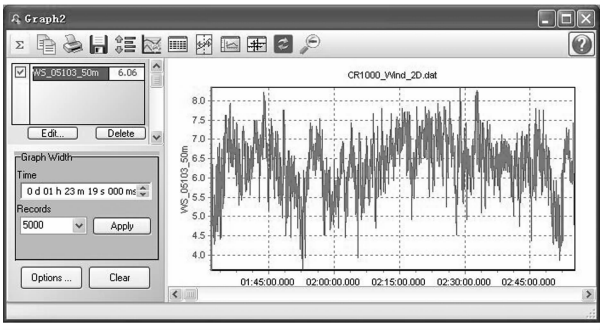


图 3　赤石特大桥远程数据采集软件界面
Fig. 3　Wind data acquisition GUI of wind measurement system for Chishi bridge

2　非平稳风速模型

非平稳风速时程 $U(t)$ 可以分解为一个确定性时变平均风速和平稳随机脉动风速即非平稳风速模型,其表达式[19]为:

$$U(t) = \overline{U}(t) + u(t) \tag{1}$$

其中 $\overline{U}(t)$ 为时变平均风速,$u(t)$ 为零均值脉动风速.本文实测风样本脉动风速暂按高斯处理.对于平稳风时程 $U(t)$ 可以分解为常值平均风速和平稳随机的脉动分量的平稳风速模型,具体表达式为将式(1)中时变平均风速 $\overline{U}(t)$ 变成常值平均风速 $\overline{U}$ 即可.本文把基于小波变换的非平稳风速模型简称为非平稳风速模型.对于非平稳风速模型,如何提取风速样本时变平均风速是研究的关键.综合文献[21－22]研究成果,采用一阶正交离散小波法提取实测非平稳风速时变平均风速.

非平稳时间序列检验方法通常分为图形检验和统计量检验.图形检验是通过图形趋势直观进行判断,分为时间序列趋势图检验和自相关函数图检验.统计量检验通过计算统计量进行统计判断,更为准确和重要,分为 DF(Dickey Fuller)法和 ADF(Augment Dickey Fuller)法.本文因侧重于沿桥轴向风特性分析,故未对风样本非平稳统计量检验展开深入分析.

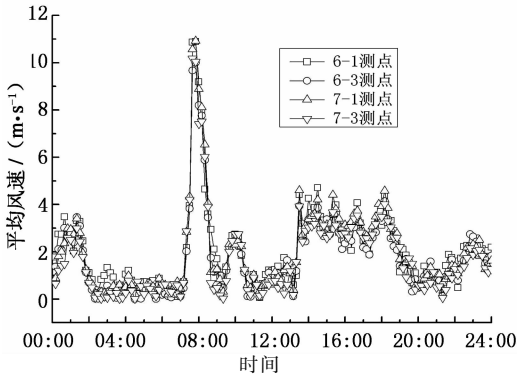
3 沿桥轴向平均风特性分析

3.1 平均风速

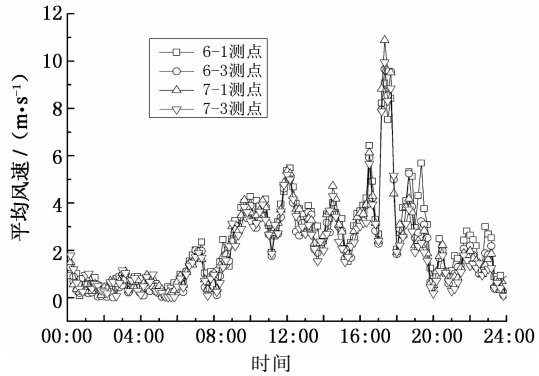
目前对赤石特大桥已进行了近二年多的现场实测,在大量实测数据的基础上,获得 2013 年 5 月～2014 年 12 月期间共 17 d 的非平稳风样本.选取典型两天风样本进行分析:2014 年 7 月 3 日风速样本和 2014 年 7 月 12 日风速样本.采用平稳风速模型计算 10 min 平均风速,计算结果见图 4.由图 4(a)可以得到,沿桥轴向 4 个测点平均风速时程变化趋势基本保持一致,7 月 3 日 07:00－08:00 时段(以下简称样本 1)平均风速变化幅度非常显著,表现为突变性;沿桥轴向 4 个测点最大 10 min 平均风速分别为:10.899 m/s,9.998 m/s,10.920 m/s 和 10.177 m/s.由图 4(b)可以得到,沿桥轴向 4 个测点平均风速时程变化趋势基本保持一致,7 月 12 日 17:00－18:00 时段(以下简称样本 2)平均风速变化幅度非常显著,表现为突变性;沿桥轴向 4 个测点最大 10 min 平均风速分别为:9.076 m/s,9.657 m/s,10.881 m/s 和 9.951 m/s.

平稳时间序列在图形上往往表现出一种围绕其均值不断波动的过程;非平稳序列往往表现出在不同时间段具有不同均值,如持续上升或持续下降.由图 4 可知,样本 1,2 平均风速变化较为显著,采用图形检验方法可直观判定为非平稳风.

选用提取小波变换精度较高的 Daubechies(DB)10 小波函数提取非平稳风样本时变平均风速,图 5 为样本 1 和样本 2 沿桥轴向 4 个测点时变平均风速计算结果.由图 5(a)可以得到样本 1 沿桥轴向 4 个测点时变平均风速变化趋势基本保持一致,沿桥轴向 4 个测点最大时变平均风速分别为:12.938 m/s,10.778 m/s,11.667 m/s 和 10.950 m/s.6－3 测点、7－1 测点、7－3 测点最大时变平均风速较 6－1 测点分别提高－16.7%,－9.8%和－15.4%;4 个测点最大时变平均风速较 10 min 平均风速最大值分别提高 18.7%,7.8%,6.8%和 7.6%.由图 5(b)可以得到样本 2 沿桥轴向 4 个测点时变平均风速变化趋势基本保持一致,沿桥轴向 4 个测点最大时变平均风速分别为:11.011 m/s,10.320 m/s,11.589 m/s,10.435 m/s.6－3 测点、7－1 测点、7－3 测点最大时变平均风速较 6－1 测点分别提高－16.7%,5.2%,－5.2%;4 个测点最大时变平均风速较 10 min 平均风速最大值分别提高－6.3%,6.9%,6.5%,4.9%.



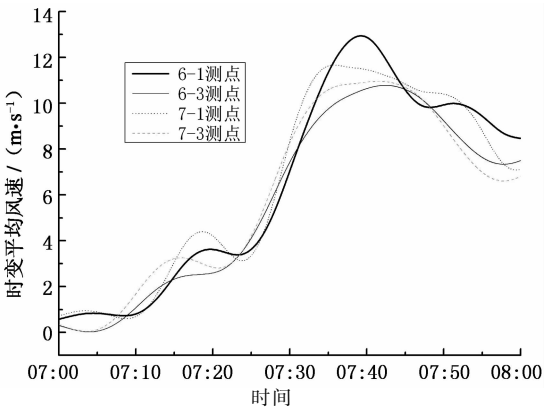
(a)2014 年 7 月 3 日



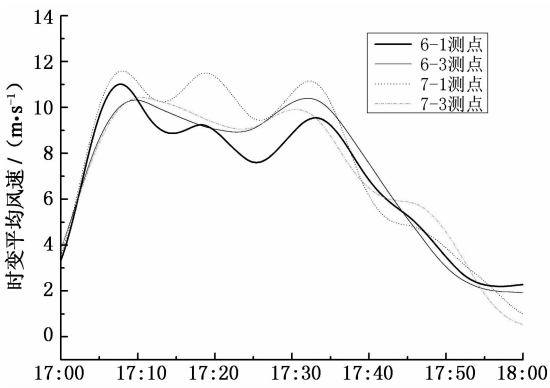
(b)2014 年 7 月 12 日

图 4 典型非平稳风样本 10 min 平均风速

Fig. 4 10 min mean wind speeds of typical non-stationary samples



(a)样本 1



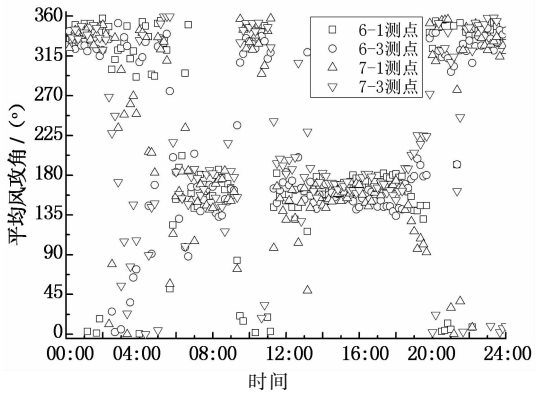
(b) 样本 2

图 5 时变平均风速计算结果

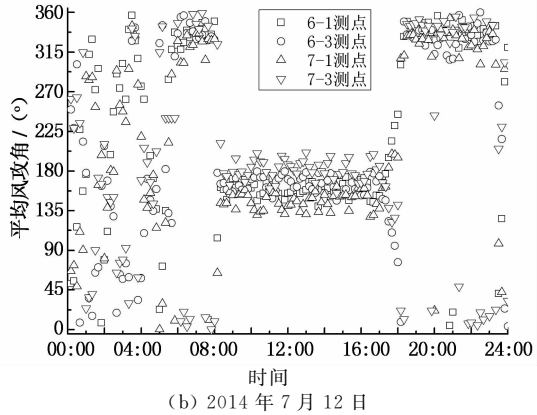
Fig. 5 Values of time-varying mean wind speeds

3.2　平均风向角

仅考虑风速非平稳性,风向角和风攻角按平稳处理.图 6 所示为典型非平稳风样本沿桥轴向 4 个测点平均风向角时程.由图 6(a)为 2014 年 7 月 3 日沿桥轴向 4 个测点平均风向角时程,从图中可以看出平均风速较大风速多出现在 S、SSE 两个方向且在 07:00 和 09:00 两个时刻附近风向角变化幅度较大;图 6(b)表示 2014 年 7 月 12 日平均风向角时程,从图中可以看出平均风速较大的风速多出现在 S、SSE 两个方向,在 18:00 附近风向角变化幅度较大.



(a)2014 年 7 月 3 日



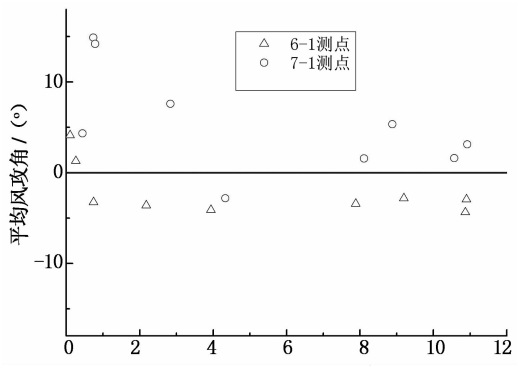
(b) 2014 年 7 月 12 日

图 6　典型非平稳风样本平均风向角

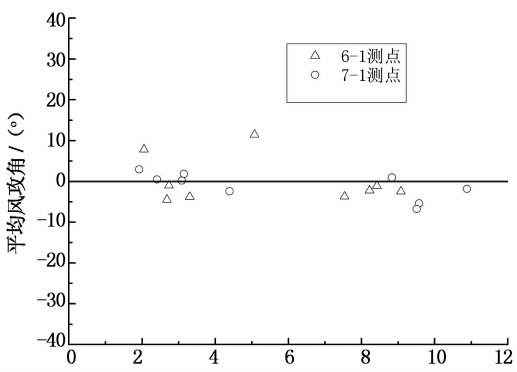
Fig. 6　10 min mean wind direction of typical non-stationary samples

3.3　平均风攻角

图 7 所示为样本 1 和样本 2 沿桥轴向 6－1 测点、7－1 测点平均风攻角时程.从图 7(a)可得到样本 1 在沿桥轴向 6－1 测点、7－1 测点平均风攻角变化趋势没有一致性,风攻角大部分在－5°～5°范围内波动;6－1 测点 10 min 平均风速达到最大值为 10.899 m/s 时,风攻角为－2.9°;7－1 测点 10 min 平均风速达到最大值为 10.920 m/s 时,风攻角为3.1°.从图 7(b)可以得到样本 2 在沿桥轴向 6－1 测点、7－1 测点平均风攻角变化趋势没有一致性,平均风攻角大部分在－5°～5°范围内波动;6－1 测点 10 min 平均风速达到最大值为 9.076 m/s 时,风攻角为－2.5°;7－1 测点 10 min 平均风速达到最大值为 10.881 m/s 时,风攻角为－1.8°.



(a)样本 1



(b) 样本 2

图 7　非平稳风样本平均风攻角

Fig. 7　10 min mean wind angle of attack of non-stationary samples

4　沿桥轴向脉动风特性分析

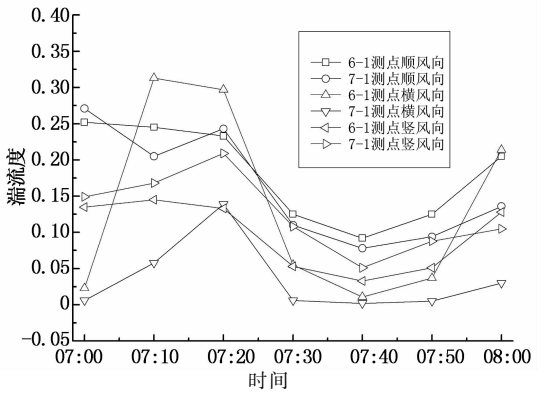
4.1　湍流强度

非平稳风速模型湍流强度为时距 T(本文取 T = 10 min)内脉动速度根方差 $\sigma_{u,t}$ 时变平均风速均值 $\overline{U}_{1/T}(t)$ 的比值,可表示为:

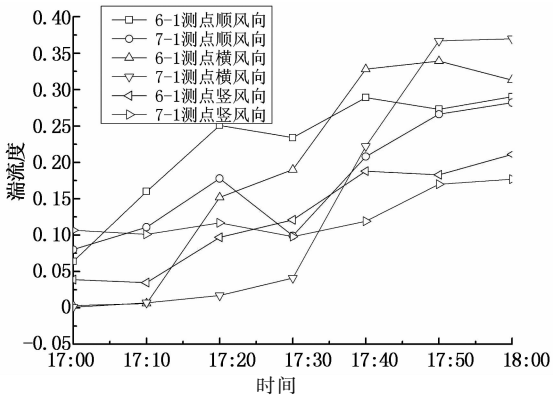
$$I_u = \frac{\sigma_{u,T}}{\overline{U}_{1/T}(t)} \tag{2}$$

采用非平稳模型计算了样本 1 和样本 2 沿桥轴向两个三维风速仪测点 6－1 和测点 7－1 的湍流强度,如图 8 所示.由图 8 可知样本 1 和样本 2 沿桥轴向测点 6－1、测点 7－1 分别在顺风向、横风向和竖风向湍流强度变化趋势基本保持一致.表 1 为样本 1 和样本 2 湍流强度均值.样本 1 沿桥轴向测点 7－1 在顺风向、横风向和竖风向湍流强度分别较 6－1 测点提高－11.0%,－74.3%和 28.9%;样本 2 沿桥轴向测点 7－1 在顺风向、横风向和竖风向湍流强

度分别较 6－1 测点提高 21.5%，－23.2% 和 2.4%.赤石特大桥按 C 类地表取值，规范[21]建议在 150～200 m 高度，顺风向湍流强度 $I_u = 0.15$，样本 1 沿桥轴向测点 6－1、测点 7－1 顺风向湍流强度均值分别超出规范建议值的 21.3%，8.0%；样本 2 沿桥轴向测点 6－1、测点 7－1 顺风向湍流强度均值分别超出规范建议值的 48.7%，16.7%.



(a)样本 1



(b)样本 2

图 8 湍流强度

Fig. 8 Turbulence intensities

表 1 样本 1 和样本 2 湍流强度均值

Tab. 1 The mean turbulence intensities of Sample1 and Sample2

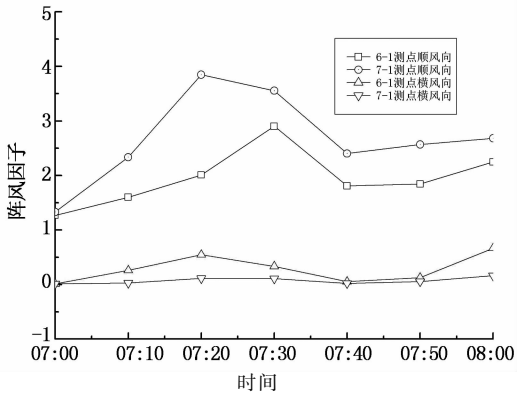
样本	风向	湍流强度均值	
		6－1	7－1
样本 1	顺风向	0.182	0.162
	横风向	0.136	0.035
	竖风向	0.097	0.125
样本 2	顺风向	0.223	0.175
	横风向	0.190	0.146
	竖风向	0.124	0.127

4.2 阵风因子

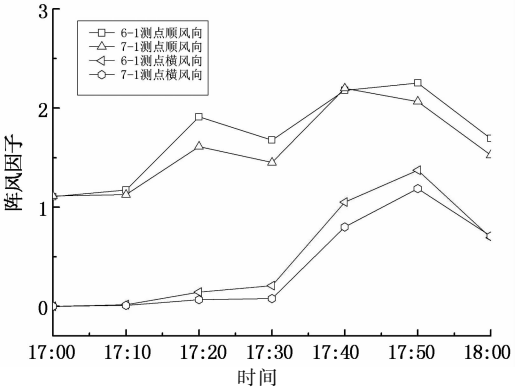
非平稳风速模型阵风因子为时距 T(取 $T = 10$ min)内阵风持续期 t(取 $t = 3$ s)内脉动风速根方差的最大值与时距 T 的时变平均风速均值之比，可表示为：

$$G(t) = 1 + \frac{\max(\sigma_{u,t}(t))}{\overline{U}_{1/T}(t)} \tag{3}$$

采用非平稳模型计算了样本 1 和样本 2 沿桥轴向测点 6－1、测点 7－1 的阵风因子，如图 9 所示.由图 9 可知样本 1 和样本 2 沿桥轴向测点 6－1、测点 7－1 分别在顺风向、横风向的阵风因子变化趋势基本保持一致.表 2 给出了样本 1 和样本 2 沿桥轴向测点 6－1、测点 7－1 的阵风因子均值.样本 1 沿桥轴向测点 7－1 在顺风向、横风向的阵风因子分别较 6－1 测点提高 36.9%，－75.2%；样本 2 沿桥轴向测点 7－1 在顺风向、横风向的阵风因子分别较 6－1 测点提高－12.9%，－18.3%.



(a)样本 1



(b)样本 2

图 9 阵风因子

Fig. 9 Gust factors

表 2 样本 1 和样本 2 阵风因子均值

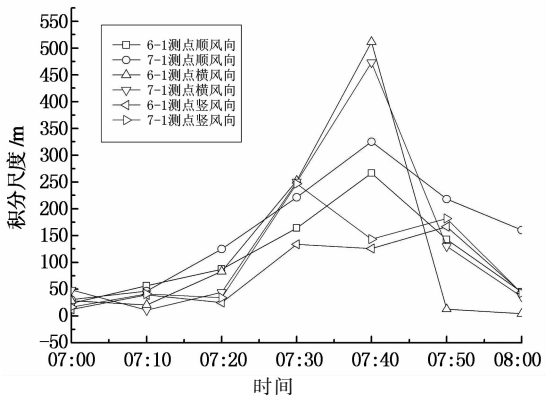
Tab. 2 The mean gust factors of Sample1 and Sample2

样本	风向	阵风因子均值	
		6－1 测点	7－1 测点
样本 1	顺风向	1.954	2.675
	横风向	0.286	0.071
样本 2	顺风向	1.714	1.585
	横风向	0.498	0.407

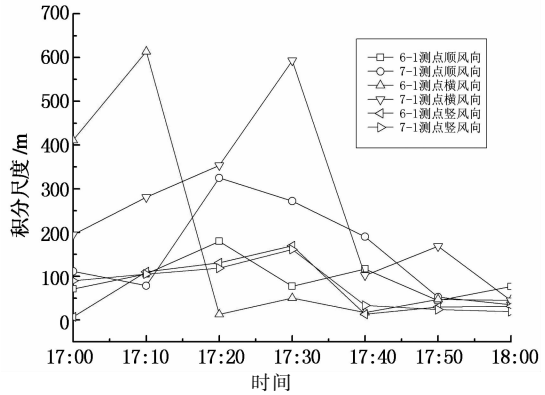
4.3 积分尺度

采用非平稳模型计算了样本 1 和样本 2 沿桥轴向测点 6－1、测点 7－1 的积分尺度，如图 10 所示.

由图 10 可知样本 1 和样本 2 沿桥轴向测点 6－1、测点 7－1 分别在顺风向、横风向和竖风向的积分尺度变化趋势基本保持一致. 表 3 给出了样本 1 和样本 2 沿桥轴向测点 6－1、测点 7－1 的积分尺度均值. 样本 1 沿桥轴向测点 7－1 在顺风向、横风向和竖风向的积分尺度分别较 6－1 测点提高 43.4%，8.8%，22.8%；样本 2 沿桥轴向测点 7－1 在顺风向、横风向和竖风向的积分尺度分别较 6－1 测点提高58.7%，45.1%，12.1%.



(a)样本 1



(b)样本 2

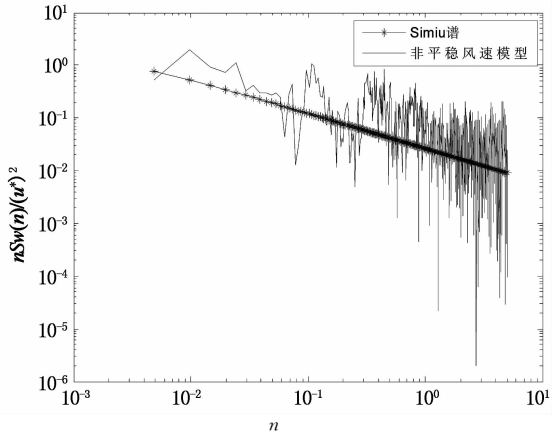
图 10　积分尺度
Fig. 10　Integral scales

表 3　样本 1 和样本 2 积分尺度均值
Tab. 3　The mean integral scales of Sample1 and Sample2

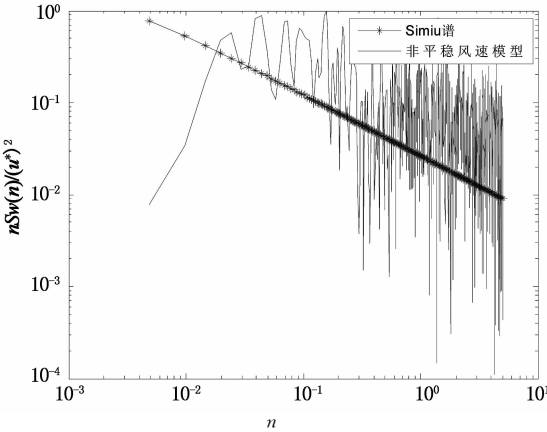
样本	风向	积分尺度均值/m	
		6－1 测点	7－1 测点
样本 1	顺风向	112.2	160.9
	横风向	130.3	141.8
	竖风向	78.0	100.8
样本 2	顺风向	95.8	152.0
	横风向	171.1	248.2
	竖风向	70.2	78.7

4.4　功率谱密度函数

以样本 1 沿桥轴向测点 6－1、测点 7－1 功率谱密度函数为例，图 11 为样本 1 沿桥轴向测点 6－1、测点 7－1 的顺风向功率谱密度，并与规范[21]推荐 Simiu 谱对比. 从图 11 可知，测点 6－1、测点 7－1 的顺风向功率谱密度在低频段较 Simiu 谱值偏低；在高频段顺风向功率谱密度与 Simiu 谱吻合较好. 图 12 给出了样本 1 沿桥轴向测点 6－1、测点 7－1 的竖风向功率谱密度，并与规范[21]推荐 Panofsky 谱对比. 从图 12 可知，测点 6－1、测点 7－1 的竖风向功率谱密度在低频段较 Panofsky 谱值偏低；在高频段竖风向功率谱密度与 Panofsky 谱吻合较差.

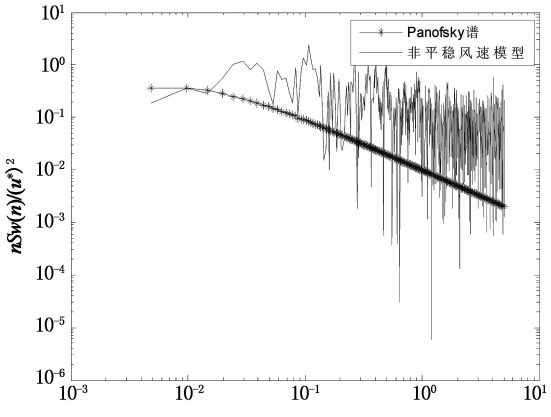


(a)测点 6－1

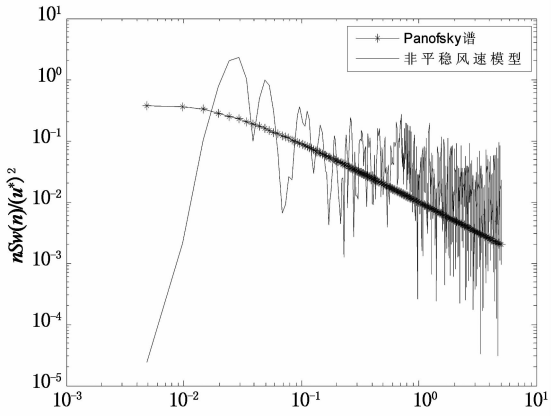


(b)测点 7－1

图 11　样本 1 顺风向脉动风功率谱
Fig. 11　Fluctuating wind power spectrum along wind direction for Sample1



(a)测点 6－1



(b)测点 7－1

图 12 样本 1 竖风向脉动风功率谱

Fig. 12 The vertical fluctuating wind power spectrum for Sample1

5 结 论

采用小波法提取非平稳风速样本时变平均风速,分析沿桥轴向平均风特性和紊流风特性,得到如下结论:

1)沿桥轴向 4 个测点的平均风速变化趋势基本保持一致;样本 1 沿桥轴向 4 个测点的最大时变平均风速较 10 min 的平均风速最大值分别提高 18.7%,7.8%,6.8%和 7.6%;样本 2 沿桥轴向 4 个测点的最大时变平均风速较 10 min 的平均风速最大值分别提高 21.3%,6.9%,6.5%和 4.9%.

2)沿桥轴向风样本湍流强度、阵风因子、积分尺度等紊流参数变化趋势基本保持一致.实测样本顺风向湍流强度较规范推荐值偏高.

3)沿桥轴向实测风速样本顺风向功率谱密度在低频段较 Simiu 谱值偏低;在高频段顺风向功率谱密度与 Simiu 谱吻合较好.竖风向功率谱密度在低频段较 Panofsky 谱值偏低;在高频段竖风向功率谱密度与 Panofsky 谱吻合较差.

需要指出的是,在观测期间中出现突变风且平均风速达到 10 m/s 强风(工程规定强风风速为10.8～13.8 m/s)的样本数有限,下一步还要对更多的强风样本进行分析.文中非平稳风样本突变性与山区雷暴风特征相似[18－22],下一步将进行深入研究.

参考文献

[1] 陈政清,李春光,张志田,等.山区峡谷地带大跨桥梁风场特性试验[J].实验流体力学,2008,22(3):54－59.
CHEN Zheng-qing, LI Chun-guang, ZHANG Zhi-tian, *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): 54－59. (In Chinese)

[2] 丁冬,刘志文,贾亚光,等.复杂地形大跨桥梁施工期风振响应实测[C]//第三届全国风工程研究生论坛论文集.武汉,2015:429－430.
DING Dong, LIU Zhi-wen, JIA Ya-guang, *et al*. Found of wind-induced response of long-span bridge in construction at the complex terrain[C]// The Third National Forum on Wind Engineering for Graduate Students. Wuhan, 2015: 429－430. (In Chinese)

[3] MOUZAKIS F, MORFIADAKIS E, DELLAPORTASET P. Fatigue loading parameter identification of a wind turbine operation in complex terrain [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 82: 69－88.

[4] YUKIO Tamura, KENICHI Suda, ATSUSHI Sasaki, *et al*. Simultaneous measurements of wind speed profiles at two sites using doppler sodars[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89: 325－335.

[5] ALTAII K, FARRUGIA R N. Wind characteristic on the caribbean island of puerto rico[J]. Renewable Energy, 2003, 28: 1701－1710.

[6] LANE S E, BARLOW J F, WOOD C R. An assessment of a three-beam doppler lidar wind profiling method for use in urban areas[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 119: 53－59.

[7] LAROSE G L, ZASSO A, MELELLI S, *et al*. Field measurements of the wind-induced response of a 254m high free-standing bridge pylon[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74/76: 891－902.

[8] MIYATA T, YAMADA H, KATSUCHI H, *et al*. Full-scale measurement of Akashi-Kaikyo bridge during typhoon [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, (12/15): 1517－1527.

[9] 郅伦海,李秋胜,胡非.城市地区近地强风特性实测研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2009,36(2):8－12.

ZHI Lun-hai, LI Qiu-sheng, HU Fei. Field measurements of strong wind characteristics near ground in urban area[J]. Journal of Hunan University:Natural Sciences,2009,36(2): 8－12. (In Chinese)

[10] 李秋胜,胡尚瑜,戴益民,等.低矮房屋屋面实测峰值风压分析[J].湖南大学学报:自然科学版,2010,37(6):11－16.
LI Qiu-sheng, HU Shang-yu, DAI Yi-min, *et al*. Analysis of the field measured suction peak pressure coefficients on the flat roof of a Low-rise building[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences,2010,37(6):11－16. (In Chinese)

[11] 刘明,廖海黎,李明水,等.西侯门大桥桥址处风场特性研究[J].铁道建筑,2010(5):18－21.
LIU Ming, LIAO Hai-li, LI Ming-shui, *et al*. The study of wind characteristic at Xihoumen bridge site[J]. Railway Engineering, 2010(5):18－21. (In Chinese)

[12] 周广东,丁幼亮,黄瑞新,等.基于润扬大桥南塔顶长期监测数据风场特性分析[J].工程力学,2012,29(7):93－101.
ZHOU Guang-dong, DING You-liang, HUANG Rui-xin, *et al*. The wind characteristic analysis of RunYang bridge based on south tower top long term monitoring date[J]. Engineering Mechanics,2012,29(7):93－101. (In Chinese)

[13] 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 Wen-ping, JIAO Chang-ke, *et al*. Field measurements on typhoon of Fung Wong at Sutong bridge[J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(1): 36－40. (In Chinese)

[14] 张玥,胡兆同,刘健新,等.西部山区地形的斜拉桥风场特性研究[J].武汉理工大学学报,2008,30(12):154－159.
ZHANG Yue, HU Zhao-tong, LIU Jian-xin, *et al*. Research on characteristics of wind field of cable-stayed bridges in the western mountainous areas[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2008,30(12):154－159. (In Chinese)

[15] 朱乐东,王继全,陈伟,等.坝陵河大桥桥位风速观测及设计基准风速的计算[J].石家庄铁道大学学报,2010,23(4):5－9.
ZHU Le-dong, WANG Ji-quan, CHEN Wei, *et al*. Calculation of design standard wind speed based on wind observation of Baling river bridge[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University, 2010,23(4):5－9. (In Chinese)

[16] 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 Jia-bin, SONG Jin-zhong, LIN Zhi-xing. Field measurement of wind turbulence of characteristic of Sidu river valley bridge site[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010,23(3):42－47. (In Chinese)

[17] 金磊,王修勇,廖建宏,等. 矮寨悬索桥桥址风环境观测系统及数据分析[J].湖南工程学院学报,2011,21(3):65－67.
JIN Lei, WANG Xiu-yong, LIAO Jian-hong, *et al*. Wind monitoring system and data analysis for Aizhai suspension bridge [J]. Journal of Hunan Institute of Engineering, 2011,21(3): 65－67. (In Chinese)

[18] 黄国庆,苏延文,彭留留,等.山区风作用下大跨悬索桥响应分析[J].西南交通大学学报,2015,50(4):610－616.
HUANG Guo-qing, SU Yan-wen, PENG Liu-liu, *et al*. Response analysis of long-span suspension bridge under mountainous winds[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015,50(4):610－616. (In Chinese)

[19] XU Y L, CHEN J. Characterizing non-stationary wind speed using empirical mode decomposition[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130:912－920.

[20] 申建红,李春祥,李锦华.基于小波变换和 EMD 提取非平稳风速中的时变均值[J].振动与冲击,2008,27(12):126－130.
SHEN Jian-hong, LI Chun-xiang, LI Jin-hua. Extracting time-varying mean of the non-stationary wind speeds based on wavelet transform and EMD[J]. Journal of Vibration and Shock,2008,27(12):126－130. (In Chinese)

[21] JTG/T D60－01－2004 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004: 46－47.
JTG/T D60－01－2004 Wind-resistant design specifications for highway bridges [S]. Beijing: China Communications Press, 2004:46－47. (In Chinese)

[22] 杜牧云,肖艳娇,吴涛.多普勒天气雷达下击暴流图像识别[J].气象科技,2015,43(3):368－372.
DU Mu-yun, XUAO Yan-jiao, WU Tao. Identification of downbursts based on WSR-88D doppler weather radar images [J]. Meteorological Science and Technology, 2015,43(3):368－372. (In Chinese)