

## 丘陵地区深切峡谷风特性现场实测研究

张志田<sup>†</sup>, 谭卜豪, 陈添乐

(湖南大学 风工程试验研究中心, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**根据测风塔和当地气象站数据,对江底河大桥桥址处深切峡谷的风场特性进行研究.基于数据统计分析得到桥址处风场的平均风速、风向、湍流强度、湍流积分尺度和湍流的功率谱密度函数.结果表明:该桥所在的深切峡谷地形对风向有锁定作用、对风速有加速作用、并且对各个风向下的湍流特性有明显的影晌;深切峡谷顺风向湍流强度与平均速度的关系用反比例型函数拟合,拟合效果良好且高风速下接近规范值;竖风向湍流强度明显高于规范推算值.顺风向实测风谱与 Kaimal 谱相差较大而与 von Karman 谱吻合较好;竖风向实测风谱明显大于 Panofsky 风谱而与 von Karman 谱比较接近.横风向实测风谱与 Panofsky 谱、von Karman 谱都比较接近.

**关键词:**深切峡谷;平均风速;湍流强度;湍流积分尺度;湍流的功率谱密度

**中图分类号:**P412.16;P425.2

**文献标志码:**A

## Study on Field Measurement of Wind Properties near a Canyon Deep-cut to Hilly Land

ZHANG Zhitian<sup>†</sup>, TAN Buhao, CHEN Tianle

(Wind Engineering Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Based on the data obtained from a tower and a local meteorological station, the wind properties at the Jiangdihe Bridge site, located at a deep-cut valley, were investigated. According to statistical data processing, the mean wind properties, wind directions, turbulence integral scales, as well as wind spectra were obtained. The results show that the deep canyon terrain in which the bridge is located plays roles in locking the wind direction and accelerating the wind speed, and shows obvious influence on the turbulence characteristics. The relationship between the turbulent intensity and mean wind speed was obtained by fitting with inverse example functions, resulting in good fitting effect and high wind speed close to the standard value. The vertical turbulence intensities are much higher than those values specified in the China wind-resistant design specification for highway bridges. The wind spectra from the measured wind are quite different from the Kaimal spectrum, but in good agreement with the von Karman spectrum. The wind spectra of the vertical wind fluctuations are obviously larger than the Panofsky wind spectrum, but close to the von Karman spectrum. The measured across-wind spectra are quite close to both the Panofsky spectrum and the von Karman spectrum.

**Key words:** deep-cut canyon; mean wind speed; turbulence intensity; turbulence integral scale; power spectrum density of turbulence

\* 收稿日期:2018-09-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578233), National Natural Science Foundation of China(51578233)

作者简介:张志田(1974—),男,湖南娄底人,湖南大学教授,工学博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: zhangzhitian999@126.com

随着我国经济以及高速公路网的发展,在西部多山地区将架设越来越多的跨峡谷大桥.为确保大桥在风荷载的作用下能够满足行车安全、舒适的要求,需要对山区峡谷地形的风特性进行细致的研究.张玥对禹门口黄河大桥西部谷口桥址处风场特性研究<sup>[1]</sup>得出:湍流强度随风速增大而减小;湍流积分尺度随风速增大而增大等结论.朱乐东等对坝陵河大桥桥址处深切峡谷风场进行研究<sup>[2-4]</sup>得出:峡谷地区湍流强度脉动风谱高于平原地区;峡谷风主要改变了风谱的低频成分;各个方向湍流强度关系与规范给出较为接近等结论.庞加斌等人对四渡河峡谷大桥桥位处的风谱特性研究<sup>[5]</sup>得到:水平向湍流积分尺度相对于平坦地貌减小等结论.李永乐等对龙江大桥桥址处风场特性研究<sup>[6]</sup>表明:峡谷对风速有5%~15%的加速效果.本文通过对江底河大桥桥址处深切峡谷风场特性的观测,分析风场的平均风速、风向、湍流强度、湍流积分尺度受峡谷地形影响的变化规律;基于 Kármán<sup>[7]</sup>、Kaimal<sup>[8]</sup>、Davenport<sup>[9]</sup>等人通过理论和经验推导出的风谱,分析峡谷风场的风谱特性.

### 1 工程概况

#### 1.1 峡谷地形特点

江底河大桥拟建于距云南省楚雄市永仁县西南 25 km 左右的深切峡谷中.如图 1、图 2 所示峡谷近似东西走向,南部海拔约 1 712 m,北部海拔大约 1 640 m,谷底海拔约为 1 393 m,测风塔位于峡谷北侧海拔约 1 610 m 的平台上.峡谷两岸的植被以低矮灌木为主,整体来看两岸属连绵起伏的丘陵地形.



图 1 测风塔位置

Fig.1 The location of the wind tower

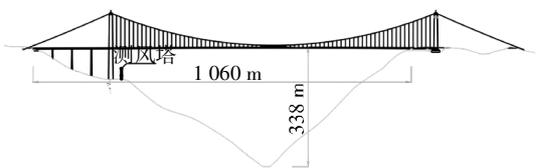


图 2 峡谷横断面图

Fig.2 Cross-sectional view of the canyon

#### 1.2 风观测方案

如图 3 所示采用 2 层风速仪进行观测,分别位于离地 10 m 高度及 30 m 高度处.其中 10 m 高度风观测层安装 2 台进口 Young05103 二维机械式风速仪,2 风速仪水平间距为 2.5 m,其连线走向为正南北方向(基本平行于桥轴线);30 m 高度风观测层安装 1 台进口 YOUNG81000 三维超声风速仪以及 1 台 Young05103 二维机械式风速仪,二者水平间距以及连线走向与 10 m 高度处相同(三维风速仪更靠近峡谷侧).4 台风速仪的采样频率均设置为 1.0 Hz.三维风速仪测试精度为 $\pm 0.05$  m/s,风速范围为 0~40 m/s,风向范围 0~360°,仰角范围 $\pm 60^\circ$ 内.二维风速仪测量风速精度为 $\pm 0.3$  m/s,测量范围为 0~100 m/s,风向精度及测量范围分别为 $\pm 3^\circ$ 与 0~360°.

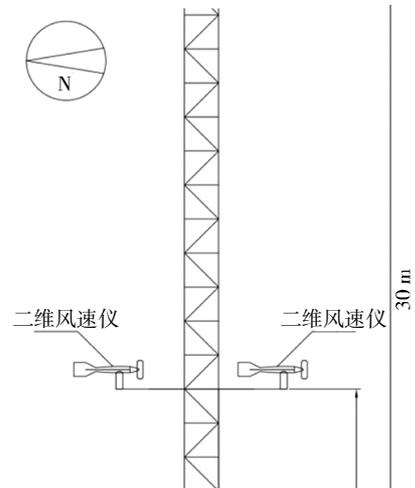


图 3 风速仪布置图

Fig.3 Anemometer layout

采用 CR1000 信号采集仪将风速信号转化为数字信号,再通过 485 模块即将 RS235 转化成 RS485 之后通过 GPRS 无线传输模块将风速数据远程传输到实验室专门用于采集数据的计算机中,完成数据的收集工作.三维风速仪采集数据正方向判定是正东风向、正北风向和正下方来流风向为正.由于风向与风速方向相反,所以定义正西、正南、正上为  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴正方向.

### 2 平均风特性

通过测风塔和永仁气象站的数据对比分析测风塔处平均风特性.对比数据为每小时内的十分钟时距平均风速的最大值(后文称其为小时最大平均风速).对比的时间范围包括 2017 年 4、5 月份.这

两个月是该地区一年中平均风速较大的两个月. 10 min 平均风速基于三维超声风速仪测量的数据. 用式(1)和式(2), 取风速样本数  $\Delta=600$ , 计算时间跨度为 600 s 的矩形滤波器对风速时程滤波后得到  $x, y, z$  3 个方向的 10 min 平均风速, 如下所示:

$$\bar{V}_x = \sum_{i=n}^{i=n+\Delta-1} V_x/n, \bar{V}_y = \sum_{i=n}^{i=n+\Delta-1} V_y/n, \bar{V}_z = \sum_{i=n}^{i=n+\Delta-1} V_z/n \quad (1)$$

$$\bar{V} = \sqrt{\bar{V}_x^2 + \bar{V}_y^2 + \bar{V}_z^2} \quad (2)$$

式中:  $V_x$  为瞬时风速在  $x$  轴方向分量;  $V_y$  为瞬时风速在  $y$  轴方向分量;  $V_z$  为瞬时风速在  $z$  轴方向分量;  $\bar{V}_x$  为  $x$  方向平均风速;  $\bar{V}_y$  为  $y$  方向上平均风速;  $\bar{V}_z$  为  $z$  方向上平均风速;  $\Delta$  为风速样本数;  $\bar{V}$  为平均风速.

### 2.1 峡谷对平均风向的影响

永仁气象站和测风塔实测的小时最大平均风速的对比风玫瑰图如图 4 所示. 永仁气象站按 16 风向给出风速数据. 三维风速仪现场采样数据将风速矢量按照式(3)求出风向角(由来流风向逆时针旋转到正北方向经过的角度) $\beta(0\sim 360^\circ)$ .

$$\beta_1 = \arcsin\left(\frac{\bar{V}_x}{\sqrt{\bar{V}_y^2 + \bar{V}_x^2}}\right) \frac{180}{\pi} \quad (3)$$

式中:  $\beta_1$  为  $-90^\circ\sim 90^\circ$  风向角; 如果  $\bar{V}_x > 0$  且  $\bar{V}_y > 0, \beta = \beta_1$ ; 如果  $\bar{V}_y < 0, \beta = 180 - \beta_1$ ; 如果  $\bar{V}_x < 0$  且  $\bar{V}_y > 0, \beta = 360 + \beta_1$ .

将计算出的风向角  $0\sim 360^\circ$  范围, 将其转化成 16 个方位表示(N~NNW).

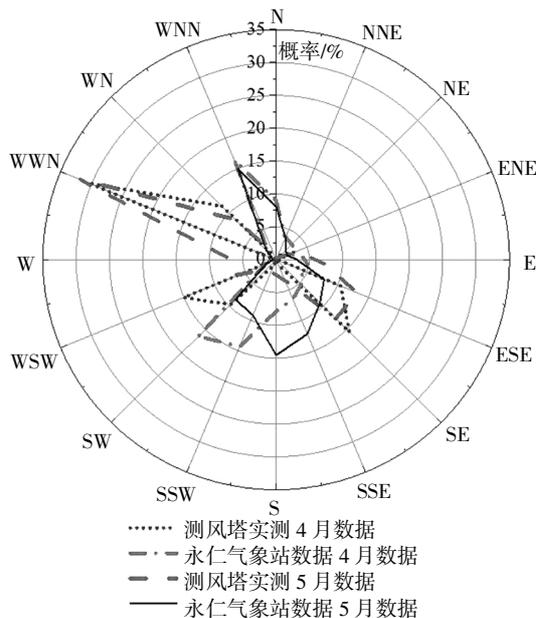


图 4 每小时最大平均风速风玫瑰图

如图 4 所示, 4 月份永仁气象站测得的概率最高的风向是西南(16.5%)、西南偏南(14.3%)和西北偏北(16.3%)。5 月份概率最高的风向为正南(14.5%)、东南偏南(12.2%)和西北偏北(14.9%)。4 月份风速仪测得的概率最高的风向是西北偏西(30.5%)、东南(15.5%)和西南偏西(15%)。5 月份概率最高的风向是西北偏西(32.3%)、东南偏东(13.2%)和东南(12.6%)。

通过以上数据得到, 峡谷对来流风有很强的锁定作用. 无论当地风向如何变化, 在深切峡谷处风向概率最高总是西北偏西、东南风向. 此风向与北侧峡谷走向基本接近.

### 2.2 峡谷对风速的影响

根据式(4)计算出永仁气象站与测风塔实测数据相关性系数为 0.55, 故两地风场具有中度相关性.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为相关性系数;  $x_i$  为永仁气象站 4、5 两月第  $i$  小时每小时最大平均风速;  $y_i$  为测风塔 4、5 月第  $i$  小时每小时最大平均风速;  $\bar{x}$  为永仁气象站 4、5 两月平均风速;  $\bar{y}$  为测风塔 4、5 两月平均风速.

永仁气象站 4、5 月份小时最大平均风速分别为 11.8 m/s、12.2 m/s. 测风塔 4、5 月份小时最大平均风速分别为 12.5 m/s、13.5 m/s. 由此可知: 相同月份下, 测风塔处小时最大平均风速都高于永仁气象站小时最大平均风速; 同一地点, 4 月份小时最大平均风速都小于 5 月份最大平均风速. 根据图 5 所示

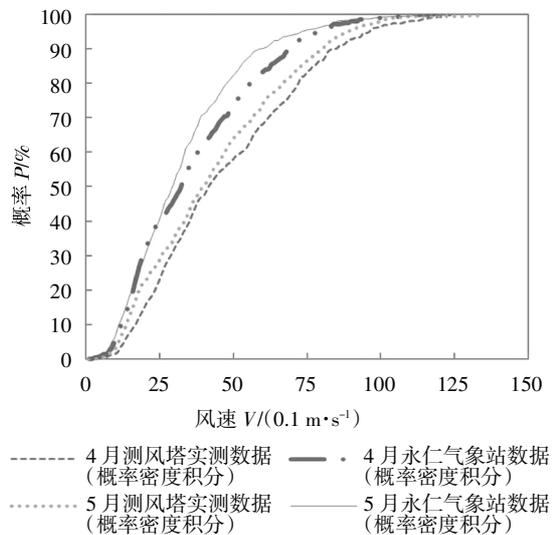


图 5 每小时最大平均风速分布函数曲线

Fig.5 Distribution function of mean wind speeds per hour

的风速累积分布函数曲线可知:相同月份,峡谷处出现高风速概率大于永仁处高风速概率;同一地点,4月份出现高风速的概率都大于5月份出现高风速的概率。

综上所述说明深切峡谷地形对风速有加速效果,同时也说明两地风场具有相关性,可以通过永仁气象站的数据推算峡谷处的风速大小<sup>[10]</sup>。

### 3 湍流风场特性

本节主要通过对湍流强度、湍流积分尺度和功率谱密度的研究来分析深切峡谷风场的湍流特性。

#### 3.1 深切峡谷风攻角特性

统计得到的一年内最大瞬时风速与对应风攻角分布图如图6所示。由图6可知,1月到5月10d最大瞬时风速在一年中最大在20 m/s以上,风攻角全年基本一致在-15°到15°之间。与平原区风攻角范围差距较大。

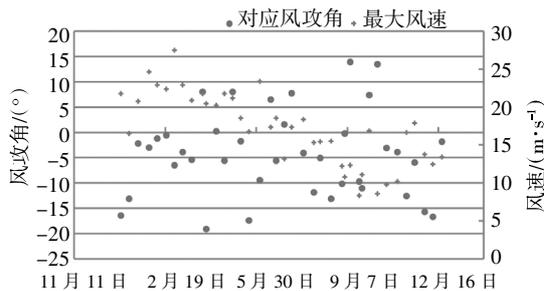


图6 一年内最大瞬时风速与对应风攻角图

Fig.6 Maximum wind speed and corresponding wind angle

#### 3.2 湍流度

实测风速时程是有明显非平稳特性的,但湍流度的计算是基于平稳随机过程的假定上的。鉴于此,如图7所示,取风速样本时要求1200 s风速时程内归一化风速一次函数拟合斜率不大于 $10^{-5}$ 。依此准则采集到192个样本。

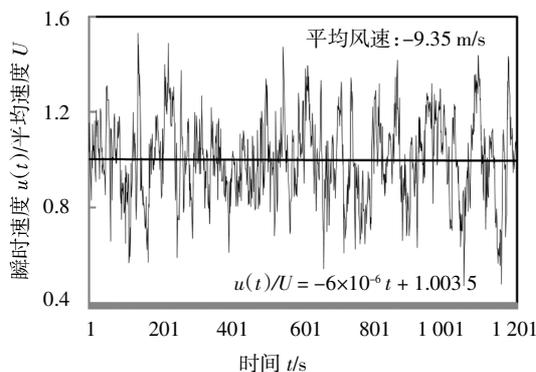


图7 风速样本时程曲线

Fig.7 Wind history samples

湍流强度分为顺风向、横风向和竖风向湍流强度,分别用 $I_u$ 、 $I_v$ 和 $I_w$ 表示。首先确定 $u$ 、 $v$ 、 $w$ 3个风速分量的方向,取平均风速 $U$ 所在方向为 $u$ 方向,即为 $x'$ 轴;取竖平面内与 $x'$ 轴垂直的方向为 $w$ 方向,即为 $z'$ 轴;按照右手坐标系定义出 $v$ 方向,即 $y'$ 轴。将实测 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 3个方向的风速矢量,通过坐标变换可以得到 $x'$ 、 $y'$ 、 $z'$ 方向上的风速分量。依此把风速矢量沿 $x'$ 轴分解成平均风速 $U$ 和顺风向脉动风速 $u(t)$ ,沿 $y'$ 轴分解成为横向脉动风速 $v(t)$ ,沿轴分解成为竖向脉动风速 $w(t)$ 。

根据式(1)(2),取 $\Delta = 1200$ 计算出各个方向平均风速 $\bar{V}_x$ 、 $\bar{V}_y$ 、 $\bar{V}_z$ 和合速度 $\bar{V}$ 。再根据式(3)计算出平均风向角 $\beta$ 。平均风攻角 $\alpha$ 通过式(5)计算

$$\alpha = \arctan\left(\frac{-\bar{V}_z}{\sqrt{\bar{V}_x^2 + \bar{V}_y^2}}\right) \quad (5)$$

通过式(6)~(8)计算出 $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$ 。

$$u(t) = \{V_x \cos[(\beta - 90)\frac{\pi}{180}] + V_y \cos(\beta \frac{\pi}{180}) \cos(\alpha \frac{\pi}{180}) + V_z \sin(\alpha \frac{\pi}{180}) - U \quad (6)$$

$$\omega(t) = -\{V_x \cos[(\beta - 90)\frac{\pi}{180}] + V_y \cos(\beta \frac{\pi}{180}) \sin(\alpha \frac{\pi}{180}) + V_z \cos(\alpha \frac{\pi}{180}) \quad (7)$$

$$v(t) = V_x \sin[(\beta - 90)\frac{\pi}{180}] + V_y \sin(\beta \frac{\pi}{180}) \quad (8)$$

根据式(9)计算顺风向、横风向和竖风向湍流强度 $I_u$ 、 $I_v$ 、 $I_w$ 。

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U}, I_v = \frac{\sigma_v}{U}, I_w = \frac{\sigma_w}{U} \quad (9)$$

式中: $\sigma_u$ 、 $\sigma_v$ 、 $\sigma_w$ 分别为各个方向的脉动风速标准差。

北侧峡谷大致走向为 $280^\circ \sim 310^\circ$ 和 $110^\circ \sim 140^\circ$ 。在192个样本中选取风速在2~4 m/s之间的样本,并从中取风向在WNW-WN(顺时针)之间的样本为第1组;在ES-ESE之间样本为第2组;在SSE-W之间的样本为第3组;在NNW-E之间的样本为第4组。其中1、2组代表顺峡谷方向;3、4组代表其他方向。表1为各组样本的湍流强度平均值。由表1可知:第1、2组各方向湍流强度都明显小于3、4组对应方向的湍流强度,这说明在顺峡谷方向的湍流强度明显小于其他方向的湍流强度;2、4组的竖风向与顺风向湍流强度比存在着较大的差异,说明竖风向与顺风向湍流强度比值受峡谷地形影响十分明显。

表 1 不同风向湍流强度平均值

**Tab.1 Turbulence intensities in different wind directions**

分组	$I_u$	$I_v$	$I_w$	$I_u/I_u$	$I_v/I_u$
第 1 组	0.197	0.125	0.182	0.634	0.924
第 2 组	0.198	0.171	0.183	0.864	0.924
第 3 组	0.330	0.189	0.272	0.573	0.824
第 4 组	0.294	0.238	0.292	0.810	0.993

图 8、图 9 和图 10 分别为顺峡谷方向来流的顺风向、横风向和竖风向湍流强度随样本平均风速变化散点图和曲线拟合。由图可知：各个方向上的湍流强度大小都有随平均风速增加而下降的趋势，并且湍流强度离散程度也是随着平均风速的增加而降低。这与朱乐东等<sup>[1-5]</sup>对禹门口黄河大桥、坝陵河大桥实地风观测分析结果类似。

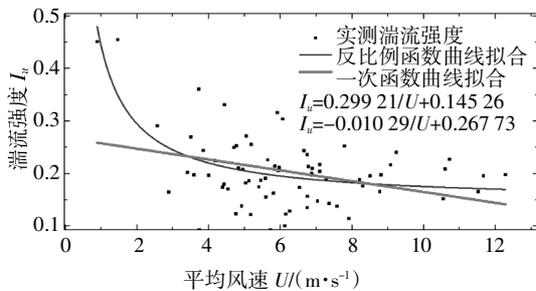


图 8 顺风向湍流强度与平均风速的关系

Fig.8 Along-wind turbulence intensity and mean wind speed

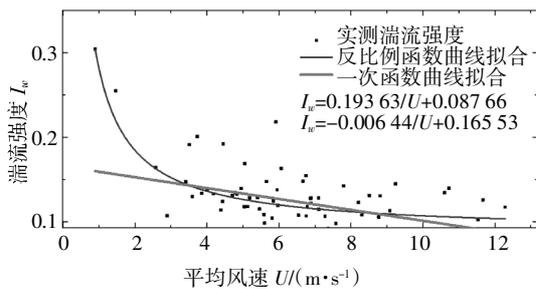


图 9 竖风向湍流强度与平均风速的关系

Fig.9 Vertical turbulence intensity and mean wind speed

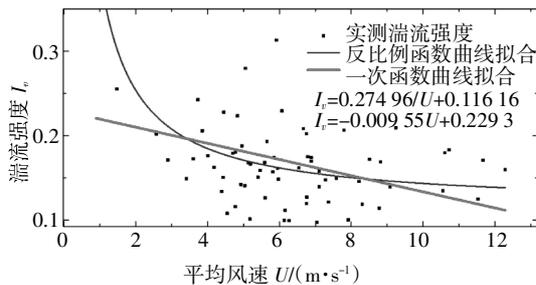


图 10 横风向湍流强度与平均风速的关系

Fig.10 Transverse turbulence intensity and mean wind speed

湍流强度规范给出的是定值。但由图 8~图 10 可知实际湍流强度是具有离散性和下降趋势的。由图 11 可知脉动风标准差与风速基本呈线性上升关系。由此认为存在一个影响脉动风标准差但与平均风速无关的外界因素  $b$  (例如白噪声等) 如式(10)所示。

$$\sigma = I_L U + b \tag{10}$$

式中： $I_L$  是不随风速改变的理想湍流强度； $b$  是不随风速改变的与其他影响脉动风场有关的函数。

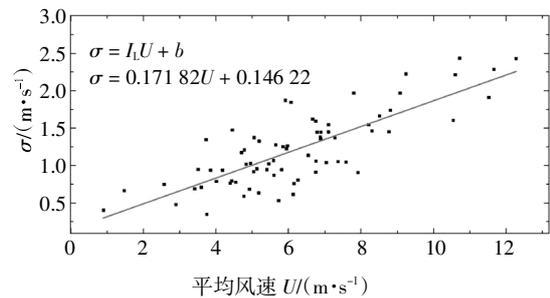


图 11 顺风向脉动风速标准差与风速关系

Fig.11 Standard deviation of along-wind and mean wind speed

式(9)和式(10)联立可得式(11)：

$$I = I_L + \frac{b}{U} \tag{11}$$

由式(11)和  $b$  的性质可得：由于外界因素不可控，所以每一个样本中的  $b$  值都是不同的，在低风速下  $b$  值对湍流强度影响大所以可以如实反映出湍流强度离散性大的情况；随着风速的增加  $b$  值对湍流强度的影响越来越小进而趋于稳定。

由于  $b$  值不确定性，只能通过样本按照式(11)形式拟合湍流强度曲线，如图 8~图 10 所示。由图可知：拟合的效果比一次函数拟合效果更好，并且高风速下湍流强度趋于平稳这一性质也与实际现象相符合；规范中给出的湍流强度值在高风速下才可与实测值进行对比。表 2 为拟合的反比例型函数分别在 8 m/s、10 m/s 风速下湍流强度计算结果。可以看出：当平均风速  $U$  由 8 m/s 增加到 10 m/s 时湍流强度减少 3%，并且达到了理想湍流强度的 82%~85%。图 12 为反比例型函数拟合湍流强度曲线与规范<sup>[11]</sup>曲线对比。可以看出：湍流强度在高风速下慢慢接近 II 类粗糙度对应湍流强度规范取值。II 类地形为平坦开阔地形与当地地形比较接近。所以，针对平原区的湍流强度规范值在深切峡谷地形中同样较为适用。

表 2 反比例函数拟合高风速下湍流强度值

Tab.2 Turbulence intensities at high wind speeds fitted by inverse ratio model function

方向	$U/(m \cdot s^{-1})$	$I$	$I_v$	$(I_v \cdot I^{-1})/\%$
顺风向	8	0.175	0.144	82.5
顺风向	10	0.169	0.144	85.5

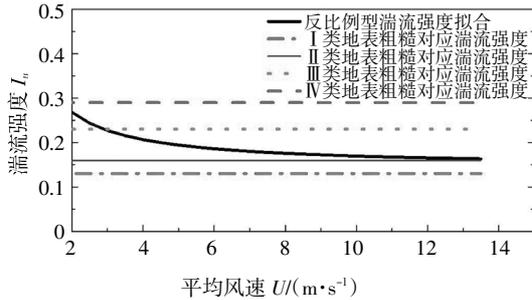


图 12 湍流强度拟合曲线与规范值关系

Fig.12 The fitting curve of turbulence intensity versus the code-values

由湍流强度均值比值(见表 3)可知: $I_v/I_u$  比规范要求略小 4%左右; $I_w/I_u$  结果实际值比规范值要大 15%左右;ESE、ES 风向  $I_w/I_u$  均值比 WNW、WN 风向要大。

根据以上现象可以认为湍流强度受地形影响较大:在顺峡谷风向,峡谷对顺风向不存在太多阻塞,所以顺风向湍流强度  $I_u$  结果与平原区得出的规范值基本相同;横风向受到北侧峡谷的一定阻塞,所以  $I_v$  相对减少,进而  $I_v/I_u$  比规范要求略小;竖风向由于峡谷具有一定深度,相比于平原地区竖向阻塞减小,所以  $I_w$  相对比较大,进而  $I_w/I_u$  比规范大。

表 3 高风速下顺峡谷不同方向湍流强度对比

Tab.3 Comparison of turbulence intensities at high wind speeds along the canyon

方向	$I_w/I_u$	$I_v/I_u$
ESE,ES 风向	0.748	0.845
WNW,WN 风向	0.627	0.839
规范	0.500	0.880

### 3.3 湍流积分尺度

空间某一点的脉动特性可以认为是平均风输

送的理想漩涡.湍流积分尺度是气流中湍流漩涡平均尺度的量度.对应于顺风向、横风向和竖风向脉动分量  $u, v, w$  的漩涡,每个漩涡又有 3 个方向的尺度,因此一共有 9 个湍流积分尺度,例如  $L_u^x, L_u^y, L_u^z$  分别代表了纵向脉动速度  $u$  有关的漩涡在  $x', y', z'$  3 个方向上的平均尺寸.应用平稳随机理论可以定义:顺风向漩涡在  $x'$  方向上的尺度如下:

$$L_u^x = \frac{1}{\sigma_u^2} \int_0^\infty R_{u,u_2}(x') dx' \quad (12)$$

式中: $R_{u,u_2}(x')$ 表示空间中任一点  $u_1(x_1', y_1', z_1', t)$ 与  $u_2(x_1' + x_1, y_1', z_1', t)$ 两点间脉动分量  $u$  的互相关函数,其中  $x_1$ 是两点在  $x'$ 方向的距离差。

但是,理论上需要已知空间上  $u$  方向所有点的风速时程才可以进行计算,这里引入 Taylor 假设<sup>[12]</sup>,如果湍流漩涡以平均风速  $U$  迁移,则脉动速度  $R_{u,u_2}(x')$ 可以通过式(13)转化为自相关函数  $R_u(\tau)$ .湍流积分尺度可转化为式(14).

$$u_2(x_1' + x', y_1', z_1', t) = U u_1(x_1', y_1', z_1', t - \frac{x'}{U}) = U u_1(x_1', y_1', z_1', t - \tau) \quad (13)$$

$$L_u^x = \frac{U}{\sigma_u^2} \int_0^\infty R_u(\tau) d\tau \quad (14)$$

式中: $\tau$ 为时间间隔。

风速时程样本为 1 200 个离散风速值,继而湍流积分尺度可转化为式(15)(16)来计算。

$$R_u(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} u(x', t)u(x', t + \tau) \quad (15)$$

$$L_u^x = \frac{U}{\sigma_u^2} \sum_{\tau=1}^{1200} R_u(\tau) \Delta\tau \quad (16)$$

式中: $N$ 为计算的  $u(t)u(t+\tau)$ 非零值的总个数; $\Delta\tau$ 为最小时间间隔为 1 s。

总共对 184 个样本计算了湍流积分尺度.图 13 为湍流积分尺度和速度之间的关系图,由图 13 可知湍流积分尺度随风速的增加而增加.图 14 是在 184 样本中选取平均风速大致相同(4~6 m/s)的样本时湍流积分尺度随风向分布图.从图 14 中可知,在相同风向,湍流积分尺度仍然有很大的离散性,分布范围大多在 250 m 范围内;不同风向,垂直于峡谷风向的湍流积分尺度普遍大于顺峡谷风向湍流积分尺度。

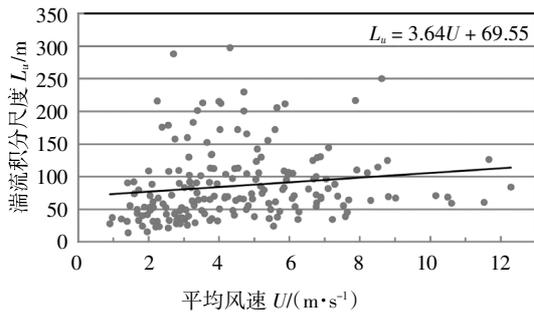


图 13 湍流积分尺度与风速的关系

Fig.13 Relationship between the turbulence integral scale and wind speed

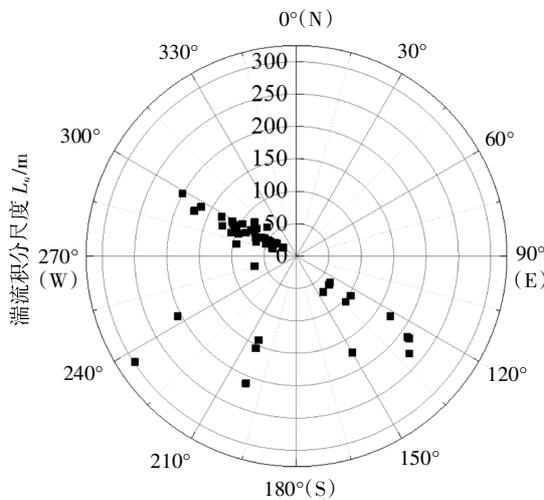


图 14 湍流积分尺度随风向变化

Fig.14 Turbulence integral scales and wind directions

### 3.4 湍流的功率谱密度

#### 3.4.1 顺风向功率谱密度

功率谱密度函数是平稳随机过程的主要数字特征,风速脉动分量的功率谱函数表示湍流中各频率成分所作贡献大小<sup>[13-14]</sup>.本文通过 AR 模型计算功率谱.

顺风向目标谱是桥梁规范采用的 Kaimal 谱,如式(17)所示<sup>[15]</sup>.根据之前计算结果联立式(17)(18)(19)可以计算出样本对应的 Kaimal 谱.

$$\frac{nS_{2\mu}(Z,n)}{(u^*)^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \quad (17)$$

$$f = \frac{nz}{U} \quad (18)$$

$$6(u^*)^2 = \sigma_u^2 \quad (19)$$

式中: $u^*$ (m/s)为流动剪切速度; $S_{2\mu}(Z,n)$ 为顺风向 Kaimal 谱( $m^2/s$ ); $n$ (Hz)为脉动风频率; $f$ 为莫宁坐标

系无量纲频率; $U$ 为平均风速.

为了与 Kaimal 谱对比,同时使用 von Karman 等通过理论和经验得到的风谱(式(20))作为目标谱.利用之前计算结果联立式(20)(21)计算出样本对应的 von Karman 谱.

$$\frac{nS_{2\mu}(Z,n)}{\sigma_u^2} = \frac{4f_1}{(1+70.8f_1^2)^{5/6}} \quad (20)$$

$$f_1 = \frac{nL_u^*}{U} \quad (21)$$

式中: $S_{2\mu}(Z,n)$ 为顺风向 von Karman 谱; $f_1$ 为 von Karman 谱无量纲频率; $L_u^*$ 表示  $x'$ 轴顺风向湍流积分尺度.

Kaimal 谱特点:只与高度、风速的均值及方差有关;没有实测数据时,可以将方差用地面粗糙度函数替代<sup>[16]</sup>. von Karman 谱特点:需要样本的高度、均值、方差和湍流积分尺度,没有实测数据时难以应用该风谱.但根据本文实测的湍流积分尺度、均值、方差可方便地应用 von Karman 谱.

图 15、图 16 分别是高、低风速下 Kaimal 谱与实测风谱拟合的结果.由图可知:无论从接近程度还是峰值大小实际风场与 Kaimal 谱拟合效果都不是很好.

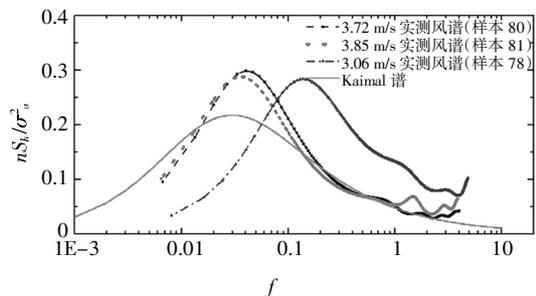


图 15 低风速下实测谱与 Kaimal 谱

Fig.15 Field spectra at low wind speeds versus Kaimal spectrum

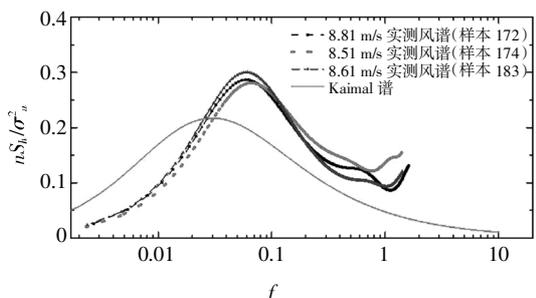


图 16 高风速下实测谱与 Kaimal 谱

Fig.16 Field spectra at high wind speeds versus Kaimal spectrum

图 17、图 18 表明高、低风速下 von Karman 谱与实测风谱拟合结果较好. 实测谱基本上在 von Karman 谱上下波动. 峰值基本接近, 拟合效果比 Kaimal 谱好.

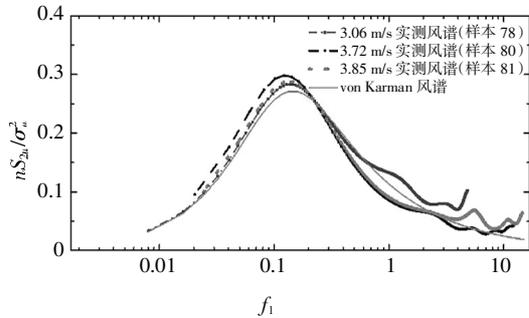


图 17 低风速下实测谱与 von Karman 谱  
Fig.17 Field spectra at low wind speeds versus von Karman spectrum

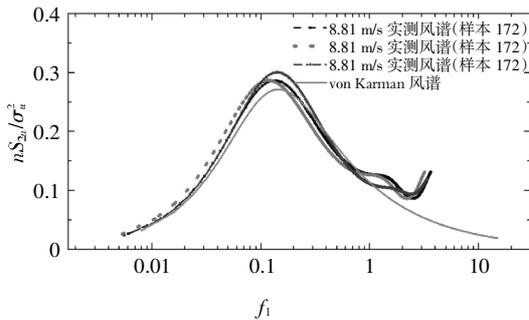


图 18 高风速下实测谱与 von Karman 谱  
Fig.18 Field spectra at high wind speeds versus von Karman spectrum

图 19、图 20、图 21 分别是低风速下风向在 270°、135°、45°左右的实测风谱与 von Karman 谱对比. 由图可知实测风谱与 von Karman 谱趋势和峰值都比较接近, 说明 von Karman 谱拟合各个方向风谱的效果都比较好.

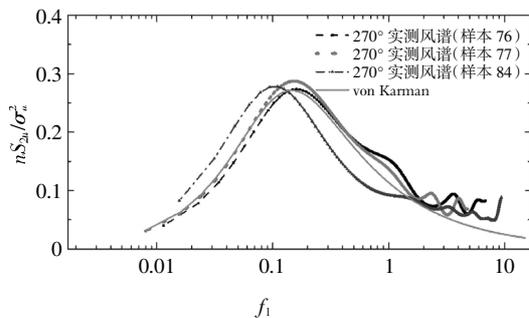


图 19 270°风向下功率谱密度  
Fig.19 Power spectra at 270° wind direction

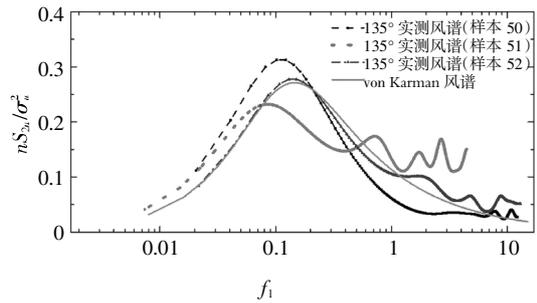


图 20 135°风向下功率谱密度  
Fig.20 Power spectra at 135° wind direction

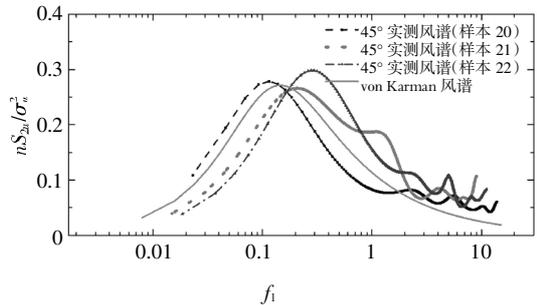


图 21 45°风向下功率谱密度  
Fig.21 Power spectra at 45° wind direction

### 3.4.2 横风向、竖风向风谱特性

我国公路桥梁抗风设计规范用 Panofsky 谱<sup>[17]</sup>拟合横风向、竖风向风谱如式(22)所示:

$$\frac{nS_{3w}(Z, n)}{\sigma_u^2} = \frac{f}{(1+4f)^2} \quad (22)$$

式中:  $S_{3w}(Z, n)$ 为横风向、竖风向 Panofsky 谱.

同时也用 von Karman 谱拟合进行对比, 如式(25)(26)所示:

$$L_v^{x'} = \frac{U}{\sigma_v^2} \int_0^\infty R_u(\tau) d\tau \quad (23)$$

$$L_w^{x'} = \frac{U}{\sigma_w^2} \int_0^\infty R_u(\tau) d\tau \quad (24)$$

$$\frac{nS_{2v}(Z, n)}{\sigma_v} = \frac{4f_v(1 + 755.2f_v^2)}{(1 + 283.2f_v^2)^{11/6}} \quad (25)$$

$$\frac{nS_{2w}(Z, n)}{\sigma_w} = \frac{4f_w(1 + 755.2f_w^2)}{(1 + 283.2f_w^2)^{11/6}} \quad (26)$$

$$f_v = \frac{nL_v^{x'}}{U} \quad (27)$$

$$f_w = \frac{nL_w^{x'}}{U} \quad (28)$$

式中:  $L_v^{x'}$ 、 $L_w^{x'}$ 分别表示在  $x'$ 轴横风向、竖风向湍流积

分尺度; $S_w(Z,n)$ 、 $S_{2w}(Z,n)$ 分别表示横风向、竖风向 von Karman 谱; $f_v$ 、 $f_w$ 分别表示 von Karman 谱横风向、竖风向归一化频率; $\sigma_v$ 、 $\sigma_w$ 分别表示横风向、竖风向脉动标准差。

图 22 是 Panofsky 风谱与实测高风速下横风向、竖风向风谱对比。由图 22 可知:实测横风向风谱在低频区域和 Panofsky 谱吻合较好,在高频区域明显高于 Panofsky 谱;竖风向风谱明显高于 Panofsky 谱。由图 23 可见:实测横风向、竖风向风谱在低频段与 von Karman 谱吻合很好,但在高频段存在一些偏高和离散<sup>[18]</sup>。

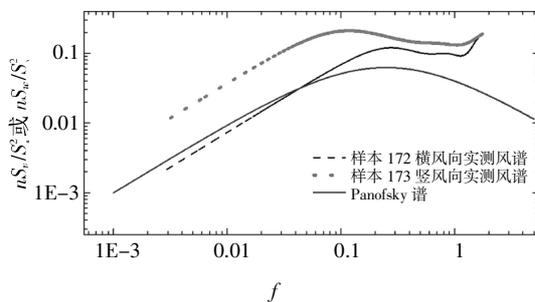


图 22 Panofsky 风谱与实测横风向、竖风向风谱对比

Fig.22 Comparison of transverse, vertical wind spectrum and Panofsky spectrum

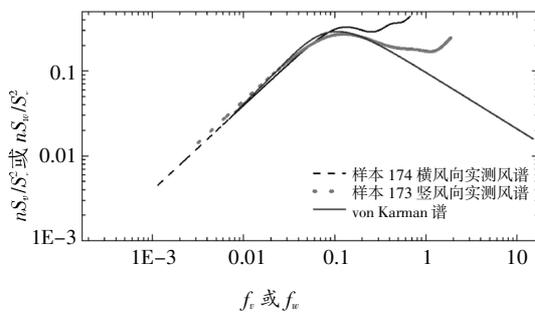


图 23 von Karman 风谱与实测横风向、竖风向风谱对比

Fig.23 Comparison of transverse, vertical wind spectrum and von Karman spectrum

## 4 结论

本文对江底河大桥近深切峡谷桥址处风观测数据进行收集、采样和分析,得出以下结论:

1)深切峡谷对风向有比较强的锁定作用;并且对风速有一定加速效果。尽管如此,峡谷风场与当地气象数据存在着明显的相关性。

2)深切峡谷中各个风向的湍流强度相差较大。

湍流强度随着风速变化使用反比例型函数拟合与实际结果吻合较好;在风速超过 8 m/s 时湍流强度基本稳定接近规范值的特性。

3)基于实测结果推测,在高风速、风向为顺峡谷方向时,峡谷在顺风向不存在太多阻塞,所以顺风向湍流强度  $I_u$  结果与平原区得出的规范值基本相同;横风向与顺风向湍流强度的比值  $I_v/I_u$  比规范要求小约 3%;竖向与顺风向湍流强度比值  $I_w/I_u$  比规范大 15%左右。

4)顺峡谷方向湍流积分尺度小于其他方向湍流积分尺度;湍流积分尺度大小随风速增大而增大。

5)高、低风速下实测风谱与 Kaimal 谱有很大的差别,而与 von Karman 谱吻合程度更好。

6)实测横风向风谱在低频区域和 Panofsky 谱吻合较好,在高频区域明显高于 Panofsky 谱;竖风向风谱明显高于 Panofsky 谱。实测横风向、竖风向风谱在低频段与 von Karman 谱吻合很好,但在高频段存在一些偏高和离散。

## 参考文献

- [1] 张珺. 西部山区谷口处桥位风特性观测与风环境数值模拟研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2009:64—93.  
ZHANG Y. Field investigation and wind-environment numerical simulation of bridge site in the western gap of valley areas[D]. Xi'an: Highway College, Chang'an University, 2009:64—93. (In Chinese)
- [2] 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(自然科学版), 2010,23(4):5—9.  
ZHU L D, WANG J Q, CHEN W, et al. Analysis of turbulent wind characteristics at the Balinghe Valley [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute(Natural Science), 2010,23(4):5—9. (In Chinese)
- [3] 朱乐东,任鹏杰,陈伟,等. 坝陵河大桥桥位深切峡谷风剖面实测研究[J]. 实验流体力学, 2011,25(4):15—21.  
ZHU L D, REN P J, CHEN W, et al. Investigation on wind profiles in the deep gorge at the Balinghe bridge site via field measurement [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011,25(4):15—21. (In Chinese)
- [4] 朱乐东,周成,陈伟,等. 坝陵河峡谷脉动风特性实测研究[J]. 山东建筑大学学报, 2011,26(1):27—34.  
ZHU L D, ZHOU C, CHEN W, et al. Analysis of turbulent wind characteristics at the Balinghe Valley [J]. Journal of Shandong

- Jianzhu University, 2011, 26(1):27—34. (In Chinese)
- [5] 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 J B, SONG J Z, LIN Z X. 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. (In Chinese)
- [6] 李永乐, 唐康, 蔡宪棠, 等. 深切峡谷区大跨度桥梁的复合风速标准[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(2):167—173.  
LI Y L, TANG K, CAI X T, *et al.* Integrated wind speed standard for long-span bridges over deep-cutting gorge [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(2):167—173. (In Chinese)
- [7] KÁRMÁN T V. Progress in the statistical theory of turbulence[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1948, 34(11):530—539.
- [8] KAIMAL J C, WYNGAARD J C, IZUMI Y, *et al.* Spectral characteristics of surface-layer turbulence[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1972, 98(417):563—589.
- [9] DAVENPORT A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 88(376):197—198.
- [10] 楼文娟, 刘萌萌, 李正昊, 等. 峡谷地形平均风速特性与加速效应[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7):8—15.  
LOU W J, LIU M M, LI Z H, *et al.* Research on mean wind speed characteristics and speed-up effect in canyon terrain[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43 (7):8—15. (In Chinese)
- [11] 中交公路规划设计院. 公路桥梁抗风设计规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 40—48.  
CCCC Highway Consultants Co Ltd. Wind-resistant design specification for highway bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2005:40—48. (In Chinese)
- [12] 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(自然科学版), 2002, 30(5):622—626.  
PANG J B, GE Y J, LU Y. Methods for analysis of turbulence integral length in atmospheric boundary-layer[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2002, 30(5):622—626. (In Chinese)
- [13] 储彬彬, 王琛, 漆德宁. AR模型功率谱估计的典型算法比较及MATLAB实现[J]. 中国新通信, 2008, 10(17):76—79.  
CHU B B, WANG C, QI D N. Contrast of the typical algorithms of psd estimation based on AR model and the simulation in MATLAB [J]. China New Telecommunications, 2008, 10(17):76—79. (In Chinese)
- [14] 胡广书. 数字信号处理: 理论与算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003:320—384.  
HU G S. Digital signal processing: Theory, design and implementation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 320—384. (In Chinese)
- [15] 埃米尔·希缪. 风对结构的作用: 风工程导论[M]. 上海: 同济大学出版社, 1992:24—50.  
EMIL Simiu. Wind effects on structures: fundamentals and applications to design[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1992: 24—50. (In Chinese)
- [16] 王修琼, 崔剑峰. Davenport谱中系数K的计算公式及其工程应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(7):849—852.  
WANG X Q, CUI J F. Formula of coefficient K in expression of Davenport spectrum and its engineering application [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2002, 30(7):849—852. (In Chinese)
- [17] PANOFKY H A, TENNEKES H, LENSCHOW D H, *et al.* The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1977, 11(3):355—361.
- [18] 沈炼, 韩艳, 蔡春声, 等. 山区峡谷桥址处风场实测与数值模拟研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7):16—24.  
SHEN L, HAN Y, CAI C S, *et al.* Experiment and numerical simulation for wind field of a long-span suspension bridge located in mountainous canyon [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(7):16—24. (In Chinese)