DOI:10.11918/202502028

不同来流下山区桥址处风特性分析

孙 喆,王 峰,邹卓易,李 森,李加武

(长安大学 公路学院,西安 710064)

摘 要:为探究山区复杂地形、入口流场对桥址风速特性的影响,并提高峡谷地区设计风速的推算精度,以山区桥梁桥址区为研究对象开展地形模型风洞试验。选取直径5 km桥址区实际地形制作缩尺比为1∶1 000的地形模型,采用三维脉动风速测量仪对不同风向角下多个高度测点进行采集和分析。研究发现:喇叭口形入河口地区来流时,桥址处风速较大且桥梁展向测点风特性一致性好;紊流场能够削弱地形导致的加速效应和遮挡效应;均匀流场在河道来流时有更大的地形修正系数,山岭区相反;不同风向角下,均匀流场和紊流场下跨中测点的起伏均较大,难以用单一模型准确描述。不同流场下风切变指数随风向角变化趋势相同。采用自上而下进行峡谷地区桥面风速推算方法,提出约束剖面顶点的约束最小二乘法拟合峡谷地区风切变指数,发现约束最小二乘法的决定系数与最小二乘法相近,证明拟合结果有效。提出用去低高度数据拟合得到的指数推算峡谷地区桥面设计基准风速,对比发现这种方法可以提高推算设计基准风速的有效性,且对使用单一指数模型分析不同风向角下桥址风速分析有利。

关键词:桥梁工程;风场特性;风洞试验;山区地形;局部边界层

中图分类号:U442 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)07-0120-15

Analysis of wind characteristics at mountain bridge sites under different inflow conditions

Sun Zhe, Wang Feng, Zou Zhuoyi, Li Sen, Li Jiawu

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: This paper investigates the wind speed characteristics of bridges located in complex mountainous terrain. Wind tunnel tests were conducted using a terrain model of the bridge site, created based on a 5 km diameter area and scaled at 1∶1 000. A three-dimensional pulsating anemometer was employed to collect and analyze wind speed data at various heights under different wind directions. The study found that when wind flows from the trumpet-shaped estuary, wind speed at the bridge site is relatively high, and wind characteristics along the bridge alignment are well correlated. Turbulent flow fields can mitigate terrain-induced acceleration and shielding effects. Uniform flow fields exhibit higher topographic correction coefficients during river inflow, whereas the opposite is observed in mountainous regions. At varying wind direction angles, significant fluctuations occur at mid-span measurement points in both uniform and turbulent flow fields, making it difficult to describe them using a single model. The variation trend of the wind profile index under different flow conditions aligns with that of the wind direction angle. A top-down approach was adopted to calculate wind speed on the bridge deck in the canyon area. A constrained least squares method was proposed to fit the wind profile index at the vertices of the constrained section in the canyon area. The determination coefficient of the constrained least squares method was found to be similar to that of the traditional least squares method, validating the fitting results. It is proposed to use the index derived from low-height data fitting to calculate the design reference wind speed for the bridge deck in canyon areas. Comparative analysis shows that this method enhances the accuracy of design reference wind speed estimation and facilitates wind speed analysis at the bridge site across various wind directions using a unified index model.

Keywords: bridge engineering; wind field characteristics; wind tunnel test; mountainous terrain; local boundary layer

中国山地、丘陵和高原等复杂地形约占国土总面积的2/3。随着“一带一路”倡议和中西部交通基础设施建设不断推进,位于高山峡谷等地区的大跨度桥梁日益增多。山区风环境具有局部边界层效应

收稿日期:2025-02-19;**录用日期**:2025-05-13;**网络首发日期**:2025-08-12
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250812.1705.008
基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2600600);国家自然科学基金(51978077)
作者简介:孙 喆(2000—),男,博士研究生;王 峰(1983—),男,教授,博士生导师;李加武(1972—),男,教授,博士生导师
通信作者:王 峰,wf@chd.edu.cn

复杂、来流非均匀、大攻角及高紊流度等特点[1-2]，其地表粗糙度也与平原地区存在显著差异。大跨径桥梁结构刚度较小、对风作用敏感，主梁易发生颤振、涡激振动等气动弹性现象[3-5]。风场参数又直接影响桥梁抗风设计，因此，系统研究山区复杂地形下的风场特性具有重要工程意义。

山区风场特性的研究方法主要包括现场实测、风洞试验等。现场实测能够直接获取桥址风参数。已有研究表明，山区风速垂直分布往往不符合传统指数律，风切变指数与风速、风向密切相关[6]；峡谷桥梁沿桥轴线的风速分布具有明显非均匀性，不同位置的地形修正系数存在差异[7]；高风速条件下，竖向风紊流强度还可能明显高于规范推算值[8]。综合现场实测、风洞试验和数值模拟的研究进一步发现，山区桥址平均风攻角可能超出现行规范规定范围，大攻角会显著降低桥梁颤振安全性[9-10]。风洞试验能够获得桥址不同位置的相对风速关系，较为系统地揭示复杂地形对风场的影响，是山区桥梁抗风研究的重要手段[11]。研究表明，现有规范难以准确描述山地背风区的平均风速剖面[12]；峡谷风剖面具有明显的风向依赖性，仅在风向与河谷走向一致时接近幂指数分布，且河谷内部及邻近边坡区域的紊流度较大[13]。由此可见，山区风参数具有较强的不确定性，采用统一的风剖面或规范建议值可能难以反映实际桥址风环境[14-15]。

近年来，研究重点逐渐转向非均匀流、大攻角和高紊流度的形成机理。研究发现，深切峡谷下部风速主要受两侧坡度影响，上部风速则同时受到峡谷整体地形和来流方向的控制；来流方向与河道方向夹角越大，风剖面的离散性越明显[16]。上游山体的遮蔽与干扰还会改变气流的分离、再附着和加速过程，从而影响山顶、山脚及桥址区域的风速分布[17]。此外，桥塔和局部山体会产生显著的地形加速效应，现行国内外规范对山地风速影响范围和修正系数的规定仍存在差异[18-20]。

综上，复杂地形风场研究具有较强的桥址针对性，现有简化模型和规范方法通用性不足，难以全面反映山区桥梁的实际风环境。为保障山区大跨径桥梁的抗风安全，本文以某山区大跨径斜拉桥为对象，通过地形模型风洞试验研究桥址风场特性。现行规范通常依据附近平坦地区风场数据推算梯度风速和桥址基准风速，但受地形加速及局部环流影响，桥面实际风速可能与推算结果显著不同，使设计结果偏于危险或过度保守。因此，本文拟提出更适用于峡谷地形的风速修正方法。同时，针对规范采用 B 类风剖面作为入口条件可能无法反映峡谷真实来流的问题，比较均匀流与紊流场下桥址风特性的差异，探讨更符合实际来流条件的风洞试验方法，以提高风场参数评估及桥梁抗风设计的可靠性。

1　风洞试验设置及工况

风洞试验模型依据《公路桥梁抗风设计规范》JTG/T 3360-01—2018（以下简称规范）要求，根据实际地形情况最终选取如图 1 以桥跨中点为中心，直径为 5 km 的地形进行风洞试验。试验在长安大学 CA-3 的大气边界层风洞中进行，该风洞是一座直流型风洞，试验段尺寸为 15 m × 15.2 m × 2 m。地形模型采用泡沫塑料板分层叠加而成，每层的形状根据等高线切割成型，周边采用斜坡板模拟地形的渐变。地形模型几何缩尺比为 1∶1 000，总直径 6.2 m（含斜坡过渡段 1.2 m），放置在水平转盘上，通过转盘驱动机构实现风向角变化。

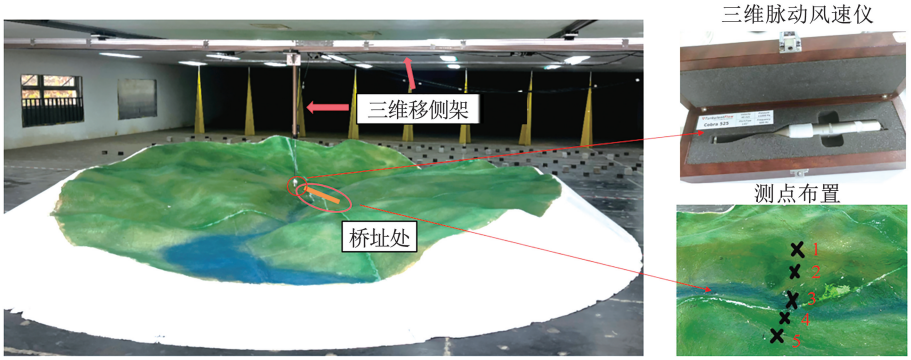


图 1　桥址地形模型（紊流场）

Fig. 1　Bridge site topographic model

定义沿桥梁展向东测为 90°，顺时针旋转风向角增加。分别对典型河道来流（180°）及典型山岭来流（90°）的桥址上游地形计算侧投影面积，得到阻塞率 S_{model}/S_{tunnel} 分别为 6.7% 和 8%。测点工况

布置如图 2 所示,采样仪器为三维脉动风速测量仪,试验采样频率 850 Hz,采样周期 30 s。试验时将脉动风速仪安装在三维移测架上进行采样,移测架精度经校核后位置移动误差不超过 0.003 mm。试验流场选取依据规范的 B 类紊流场和与之对比的均匀流场。均匀流场及紊流场尖劈前来流风 v_{ref} 经皮托管测量为 8 m/s。紊流场风剖面及紊流度结果如图 3 所示。风向角工况布置为紊流场间隔每 15°一个工况,均匀流场每 30°一个工况,各测点如图 2 所示设置 20 个高度进行采样。

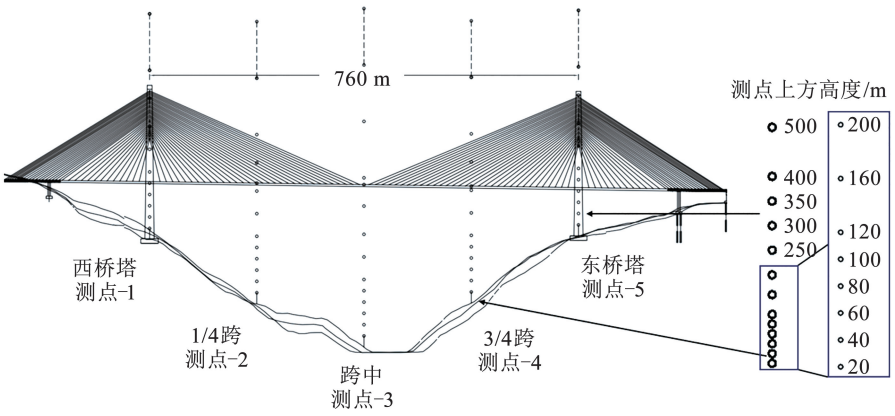


图 2 某斜拉桥桥址的测点布置(紊流场)

Fig. 2 Cable-stayed bridge site survey point layout

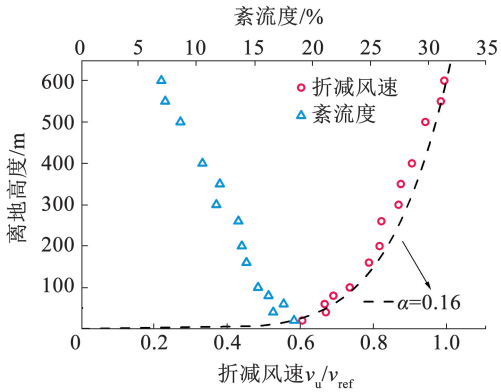


图 3 试验紊流风剖面及紊流度

Fig. 3 Turbulent wind profiles and turbulence intensity from experimental data

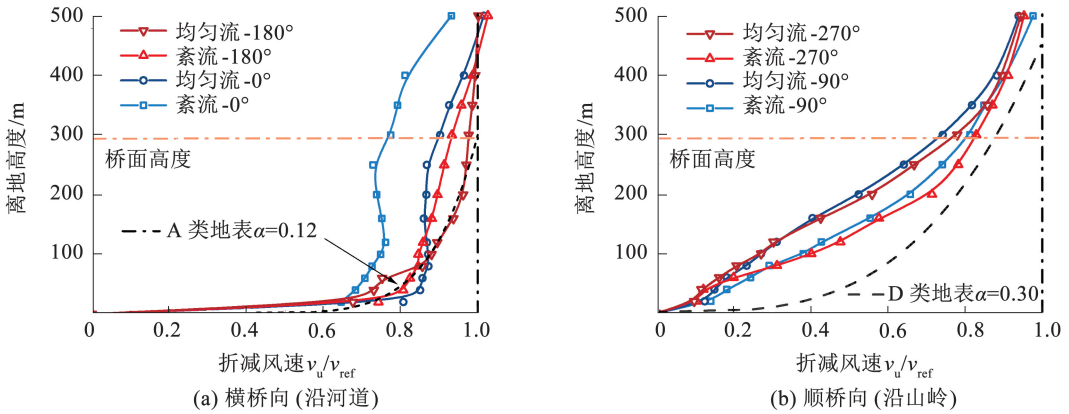
2 不同流场桥址区风参数特性

2.1 跨中测点风剖面

中国规范中采用了指数律经验公式表示风速沿高度的分布:

$$U(z) = U_{10}\left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha} \tag{1}$$

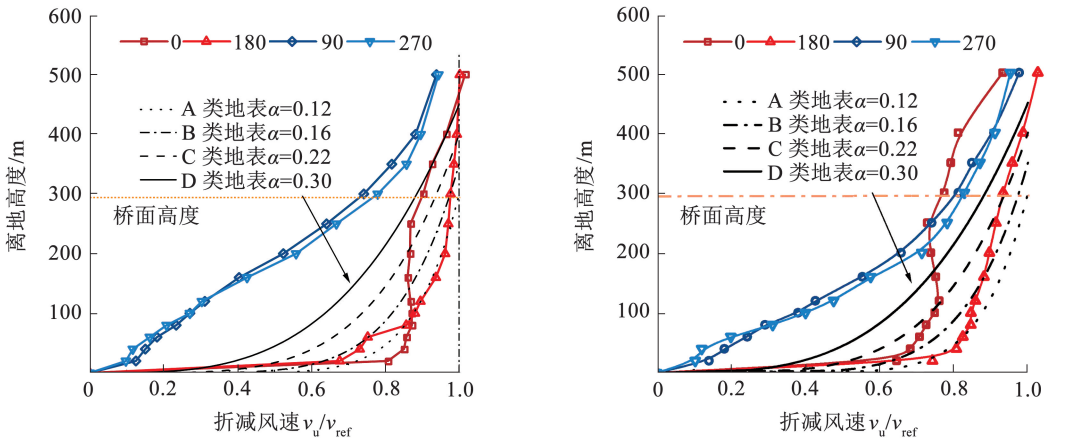
现行规范中不同地表类别(A、B、C、D)下的风速剖面及相应梯度风高度与试验结果对比得到图 5 结果。可以看出规范中定义的风场类别及梯度风高度并不能准确描述复杂地形环境下风速随高度变化的实际情况。在试验中,将风速结果除以来流风速进行归一化处理得到折减风速。在紊流条件下,山岭侧的来流风剖面显示较高的相似性。与均匀流场相比,紊流场下的折减风速略高,说明来流在经过山岭时,风洞试验采用紊流场得到的风速结果更为安全。由此推测,由于山岭区实测风切变指数一般大于 B 类地表指数,因此在风洞试验时 B 类风场来流下桥跨中点处风剖面较实际峡谷环境更保守。当来流沿着河道时,呈现与山岭来流相反的结果,在上游来流为均匀流的情况下,风剖面的增长速率明显快于紊流场,说明当上游地表粗糙度较小使来流接近均匀流时,使用规范推荐紊流场来模拟风参数可能会增加潜在的风险。如图 4(a)所示,当来流方向沿着河道时,河道加速效应导致其风速相较其他风向角工况更大,在均匀流场中桥址上游几乎没有遮挡的 180°工况下,实测风速剖面形状接近 A 类地貌;紊流场结果与均匀流相似,但边界层的厚度增大。因此在与本文相似的喇叭形入河口地区进行桥面风速设计或风荷载参数计算时,如果统一采用 C 类或 D 类风场,所得到的风剖面是偏危险的;在上游有高峰遮挡影响的 0°均匀流工况下,风剖面 20 ~ 100 m 高度风速已超过了 A 类地貌推荐的风剖面结果。来流风场的紊流程度对风剖面结果影响显著,紊流场会将均匀流场下得到的接近 A 类剖面直接削弱至 B 类甚至 C 类,这将直接影响桥面基准风速的设计,对于喇叭口地形的峡谷地区跨河大桥,地形外的风场指数对桥址处分析同样重要。当来流方向沿山岭时,紊流场产生的效果恰恰相反,如图 4(b)和图 5所示在 90°和 270°工况下紊流场对复杂地形中跨中风剖面有促进效果、会增大得到的风速结果。



(a) 横桥向 (沿河道)　　(b) 顺桥向 (沿山岭)

图 4　不同流场下沿河道、山岭来流跨中风剖面

Fig. 4　Wind profiles at mid-span under various incoming flow conditions along river and mountain



(a) 均匀流　　(b) 紊流

图 5　跨中测点风速剖面

Fig. 5　Wind speed profile at mid-span measurement points

2.2　均匀流、紊流场指数拟合及结果对比

Davenport 等[21]研究提出近地层风速可由指数率确定，其表达式为

$$\frac{U}{U_r}=\left(\frac{z}{z_r}\right)^{\alpha} \tag{2}$$

式中：U 为 z 高度处的风速，U_r 为 z_r 高度处的风速，α 为风速高度变化幂指数。常用于指数率拟合的方法有对数变换法，最小二乘法等。

对式(2)可作变换并等号两边取对数，即得

$$\ln\frac{U}{U_r}=\alpha\left(\frac{z}{z_r}\right) \tag{3}$$

令

$$y=\ln\frac{U}{U_r},\ x=\ln\frac{z}{z_r} \tag{4}$$

则得到线性方程 $y=\alpha x$。将实测的资料序列代入式(3)，得到序列 $y_1,y_2,\cdots,y_n$；$x_1,x_2,\cdots,x_n$，用最小二乘法拟合回归系数，得到指数 α 的计算公式：

$$\alpha=\sum\bar{x}_i\bar{y}_i/\sum x_i^2 \tag{5}$$

通过这种转化，可利用线性回归的方法高效求解风切变指数。获得风切变指数 α 后，便可依据幂律公式反推得到拟合风剖面曲线。对数变换法的一个重要特点是，由于其基于特定的幂律公式进行变换和拟合，所得到的风剖面必然会经过参考点(U_r，z_r)。在实际拟合时，可以将大气边界层高度处的风速和高度作为参考点。当在进行山区桥面风速推算时，需要从大气边界层高度向桥面高度推测风速，对数变换法能够保证在大气边界层高度处的风速模拟准确。

最小二乘法是一种经典的优化算法，其核心思想是通过最小化观测数据与模型预测值之间误差的平方和，来获取最适合于拟合数据的模型参数。通常采用迭代算法来求解，本文使用 Levenberg-Marquardt(L-M)算法进行拟合，该方法时是一种专门针对非线性最小二乘问题的高效迭代算法。将实测的高度数据和风速数据输入到拟合函数中，算法通过不断迭代调整参数，逐步减小模型预测风速与实际风速之间的误差平方和。当误差平方和收敛到预设的精度要求时，迭代停止，此时得到的参数即为最小二乘法确定的最优参数，利用这些参数可计算出拟合的风速值，完成风剖面的拟合。

相较于对数变换法，最小二乘法直接对非线性

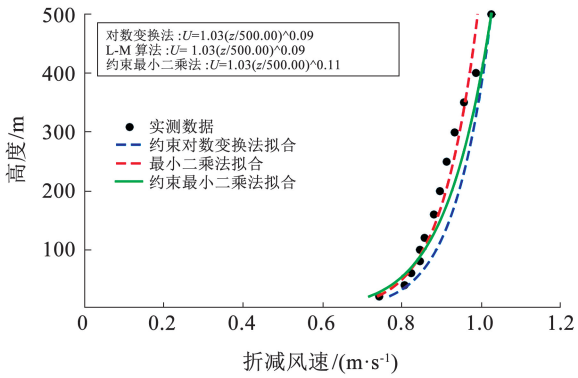
函数进行拟合，无需进行对数变换等预处理步骤，能够更全面、准确地考虑数据的非线性特征。由于最小二乘法最小化所有数据点的残差平方和，其在整体拟合优度上可能更好。在复杂地形或风速变化规律较为复杂的情况下，往往能提供更精确的风剖面拟合结果。

本文采用决定系数对指数拟合结果的效果进行量化：

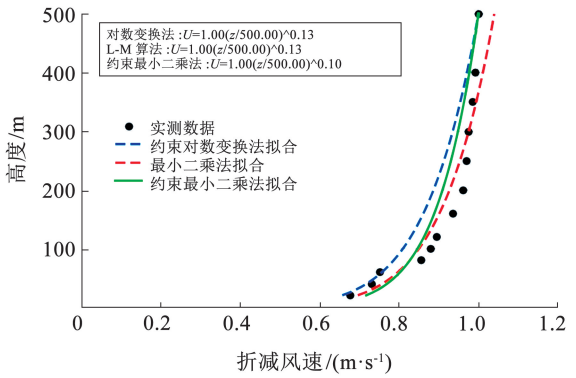
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \tag{6}$$

式中：y_i 表示第 i 个观测值，$\hat{y}_i$ 表示基于模型预测的第 i 个值，$\bar{y}$ 表示所有观测值的平均值，n 表示观测值的数量。

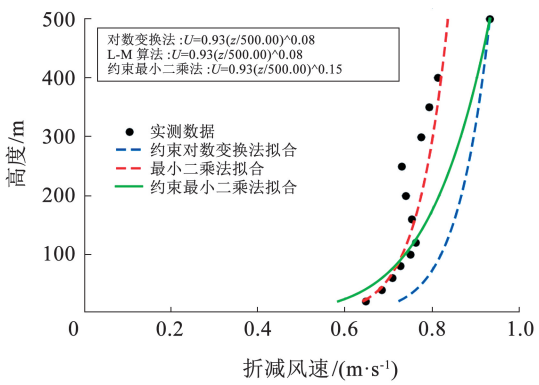
本文认为 500 m 高度为梯度风（大气边界层）高度，采用不同方法对风剖面结果进行拟合，拟合结果如图 6 所示，可以看出：最小二乘法拟合结果的决定系数均高于其他算法，拟合准确度最优，因此其结果更适合用于描述风剖面，但由于其只考虑残差平方和最小，梯度风高度对应的风速不是梯度风速，因此无法推广到桥面风速推算；相对来说，对数变换法得到的梯度风高度对应的风速是梯度风速，但拟合精度较差，也不适用于桥面风速推算。



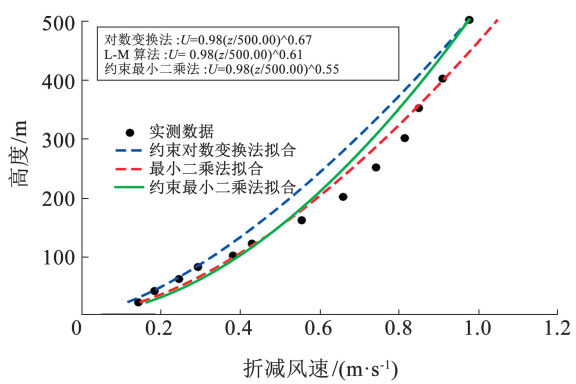
(a) 紊流场180°风向角拟合



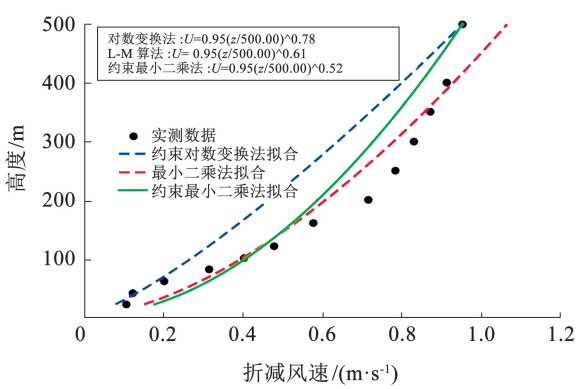
(b) 均匀流场180°风向角拟合



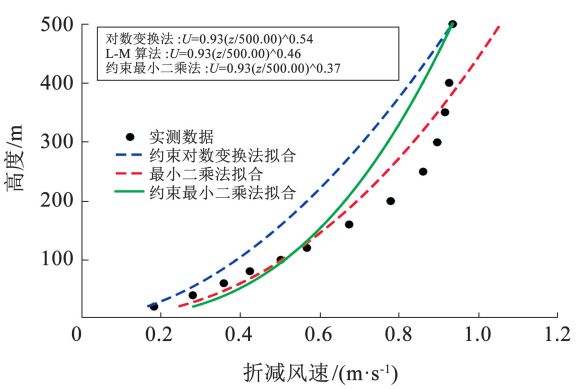
(c) 紊流场90°风向角拟合



(d) 均匀流场90°风向角拟合



(e) 紊流场270°风向角拟合



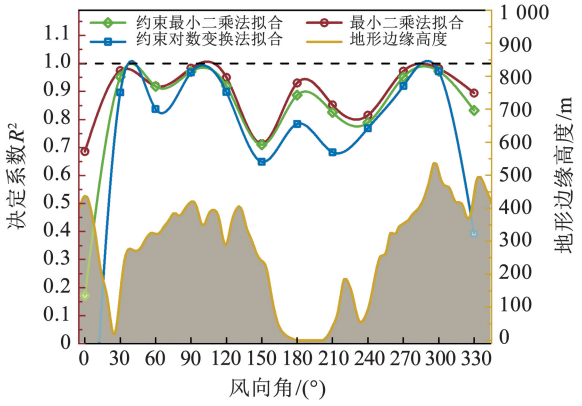
(f) 均匀流场270°风向角拟合

图 6　跨中测点在不同来流下风剖面及拟合结果

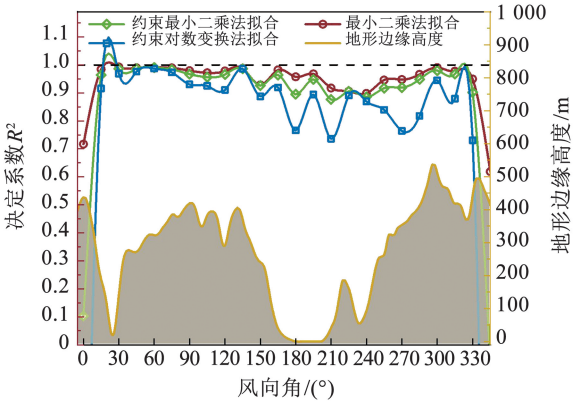
Fig. 6　Wind profiles at mid-span measurement points under various incoming flow and fitting results

因此参考对数变换法的优势，在原最小二乘法基础上提出约束最小二乘法用于桥面风速推算，旨在通过限制梯度风高度处的风速为梯度风速，使得拟合结果不仅能够最小化残差平方和，还能满足实际问题的数学约束。由图 7 可以看出，约束最小二乘法拟合的决定系数与最小二乘法相差不大，因此可以证明该方法适用于峡谷地区风切变指数模拟。

图 7 展示了跨中测点在不同来流下决定系数结果，结合图 6、7 结果分析：紊流场下风剖面结果拟合较好，均匀流场下拟合决定系数结果随风向角起伏较为明显；在河道与峡谷地形的相交位置及高峰遮挡弯曲河道位置处，拟合精度均较差，说明当风向角在地形交界处时，风剖面形状更不规则，与幂指数率模型差别较大，这可能是河道加速效应（狭管效应）导致的；均匀流场下决定系数起伏较紊流场大，说明均匀流下地形对风剖面的影响更为明显；约束最小二乘法得到的风剖面结果与最小二乘法相差不大，说明采用约束最小二乘法拟合得到的风切变指数来描述风剖面是合理的。



(a) 跨中测点均匀流场下决定系数R^2

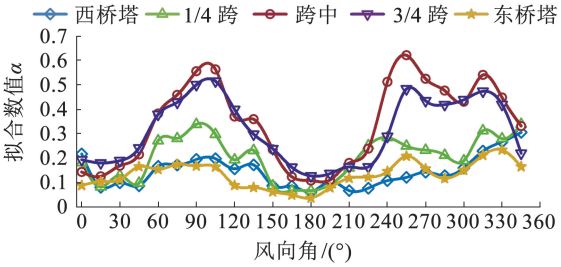


(b) 跨中测点紊流场下决定系数 R^2

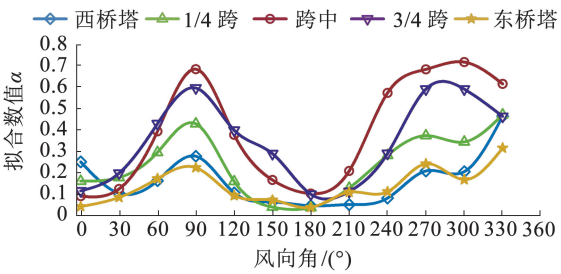
图 7　跨中测点在不同来流下决定系数 R^2

Fig. 7　Coefficients of determination (R^2) for mid-span measurement points under different incoming flow

图 8 展示了不同来流风场下约束最小二乘法得到的风切变指数结果。



(a) 各测点紊流场下局部边界层指数拟合结果



(b) 各测点均匀流场下局部边界层指数拟合结果

图 8　各测点局部边界层指数拟合结果

Fig. 8　Local boundary layer index fitting results at various measurement points

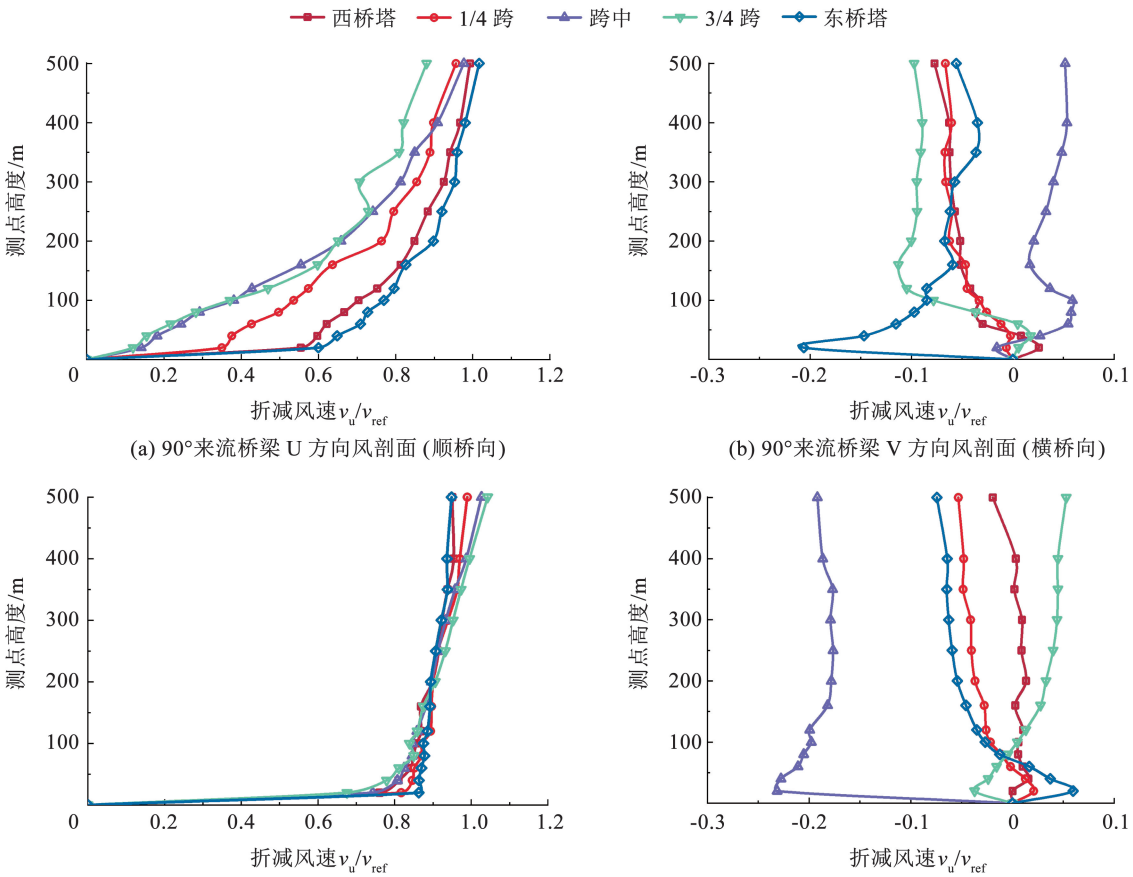
由图 8 可知：不同流场下跨中及四分点随风向角变化拟合指数起伏均较大，这说明不同位置的边界层特性差异较大，很难用统一的指数关系来描述；各测点在紊流场下的拟合指数约为 0.1 ~ 0.6，而在均匀流场下最大值达到 0.71；在靠近坡顶的桥塔侧点处，拟合指数约为 0.1 ~ 0.2，说明流场在山侧的坡上相对稳定，边界层畸变较小；来流沿河道方向时，受河道加速效应和上游低粗糙度的影响，风剖面拟合指数较小，说明在上游有较长河道的情况下，使用 A、B 类风场模拟桥址处风速特性更合适，因此需要进行风速修正；在来流经过复杂的峡谷地形时，展向各测点处的风剖面拟合指数差值较大，桥梁跨中位置受地形影响最大，起伏最明显。

2.3　桥址展向测点风剖面及功率谱对比

由于峡谷地区风参数的非均匀性，桥址各处的风特性并不相同，顺桥向、横桥向风参数对山区桥梁展向风特性设计和研究都是非常重要的，故需要对桥址不同位置进行风特性分析。本节对比了两种流场下 U 和 V 方向的功率谱和风剖面，旨在对 U 形峡谷延桥梁展向风特性进行探究。

图 9 选取了该地形河道上游来流（180°）及与河道垂直的山岭上游来流（90°）进行风剖面及功率谱分析，发现不同上游地形来流风向下横桥向风剖面有显著区别：山岭来流情况下顺桥向、横桥向的风剖面差异性均大于河道来流，说明当来流风上游为山岭时，沿桥梁各个方向的不一致性更加明显，在设计时需注意沿顺桥向、横桥向的不一致性；河道来流

时各测点呈现较好的一致性,但顺桥向跨中测点风速出现显著突出,这是沿河道流向的侧风引起的,在四分点处该影响则削弱很多,体现出峡谷地形跨越沟谷桥梁受河道影响导致的展向不一致性。



(a) 90°来流桥梁 U 方向风剖面 (顺桥向)　(b) 90°来流桥梁 V 方向风剖面 (横桥向)

(c) 180°来流桥梁 U 方向风剖面 (横桥向)　(d) 180°来流桥梁 V 方向风剖面 (顺桥向)

图 9　河道和山岭来流风剖面

Fig. 9　Wind profiles under river and mountain incoming flow conditions

如图 10 所示,沿桥梁展向的各个测点迎风方向在低频区呈现高度一致性,功率谱密度值为 10^2 量级,表明大尺度紊流结构具有较强的空间相关性。高频区域均呈现 -5/3 次方律衰减特征,河道来流风与规范 kaimal 风谱拟合较好,而山岭来流高频区风功率谱大于规范风谱。侧风向功率谱密度值整体较低,约为 $10^0 \sim 10^1$ 量级,中频区域呈现复杂的波动特征。对比 90°山岭来流,180°河道来流各测点间在中高频区域表现出能量显著差异,且低频致中频下降更快。中高频能量自桥塔两侧向跨中逐渐减少,反映了两侧山岭地形对紊流能量级串的调制作用。山岭来流时功率谱各级能量高于自河道来流的能量,且紊流能量分布相对均匀。

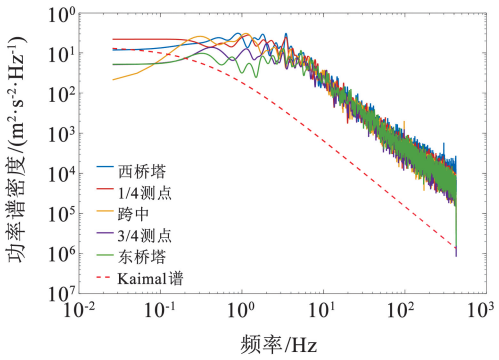
2.4　竖向风速分量及紊流度对比

前文针对桥址顺桥向和横桥向进行了分析,在山区地形中,竖向风的影响往往是容易被忽视的。在研究竖向风时,为了避免计算风攻角受其他方向低水平风速导致竖向风变化趋势的失真,本节采用竖向风速分量对竖向风进行分析。牛华伟等[22]探讨了山丘风场竖向风速分量与紊流度变化特性,发现部分工况下竖向风速分量值与参考来流风速的比值达到 50% 以上,在峡谷地区竖向风造成的影响不可忽视。文中紊流度计算方法为

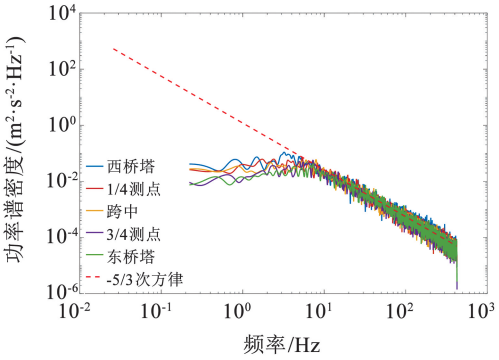
$$I_i = \sigma_i / U \tag{7}$$

式中 σ_i 风别表示脉动风速 u'、v'、w'的均方根。

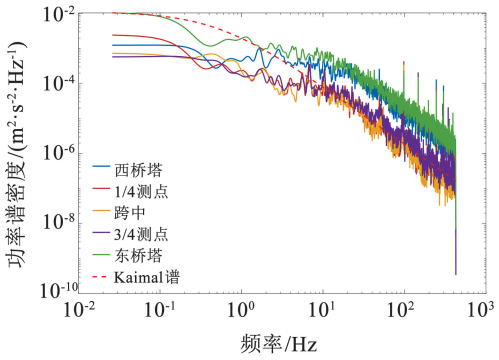
采用竖向风速分量值比实测合成风速的比值 V_u/V_{uvw}进行归一化处理,垂直地面向上为正。竖向风速分量及紊流度随高度变化如图 11 所示。紊流场下竖向风对比均匀流场有“倾斜”现象,说明紊流场对竖向风有贡献作用。紊流场下紊流度显著高与均匀流场,山岭方向来流的紊流度明显高于河道侧来流,但紊流度减缓趋势相同。自桥面高度向下竖向风受地形影响的影响显著,随着高度增加趋势趋于一致;当风向角为受上游高峰影响的 330°时,竖向风引发的紊流度非常大,显示出地形对风场紊流度的作用程度超过了之前推测的局部边界层高度范围,且竖向风速分量常超过 30% 。因此在复杂地貌条件下设计桥梁时,如果来流上游有高地形时需考虑其引起的大紊流度及竖向风效应。在各风向角来流时,桥梁跨中位置的竖向风方向均为负值,其中,来流风沿河道时竖向风速分量较小,而经过山岭时则可能出现较大突变。在地势落差较大的河道转折处,竖向风增大同时紊流度加剧;相反,从低地势河道进入峡谷的来流风带来的紊流度和竖向风效应较小。



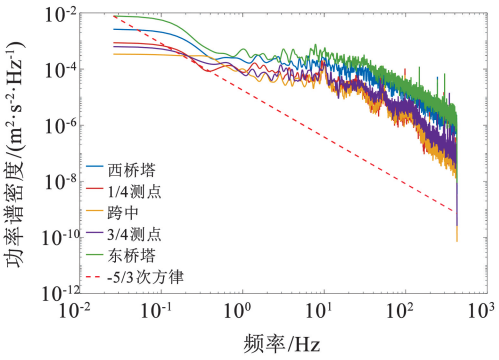
(a) U 方向脉动风速 90°来流功率谱密度 (顺桥向)



(b) V 方向脉动风速 90°来流功率谱密度 (顺桥向)



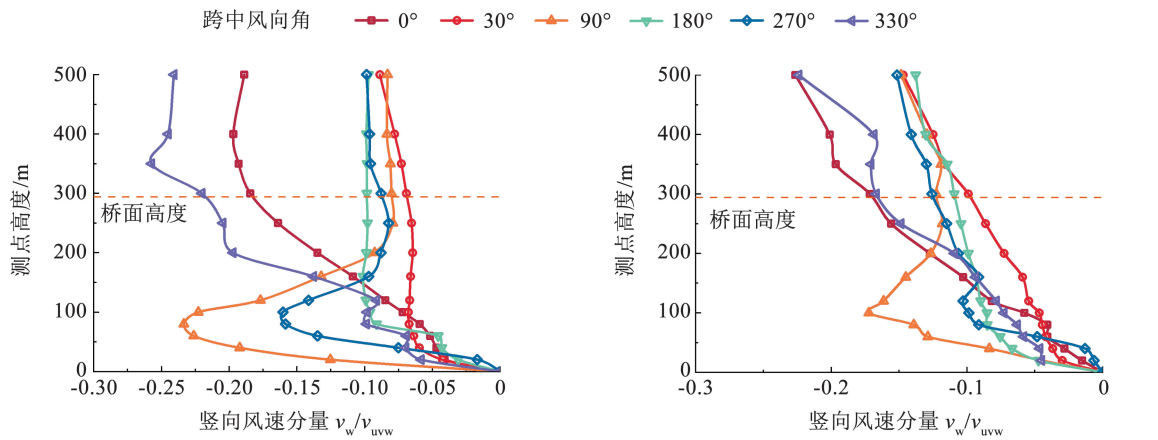
(c) U 方向脉动风速180°来流功率谱密度 (横桥向)



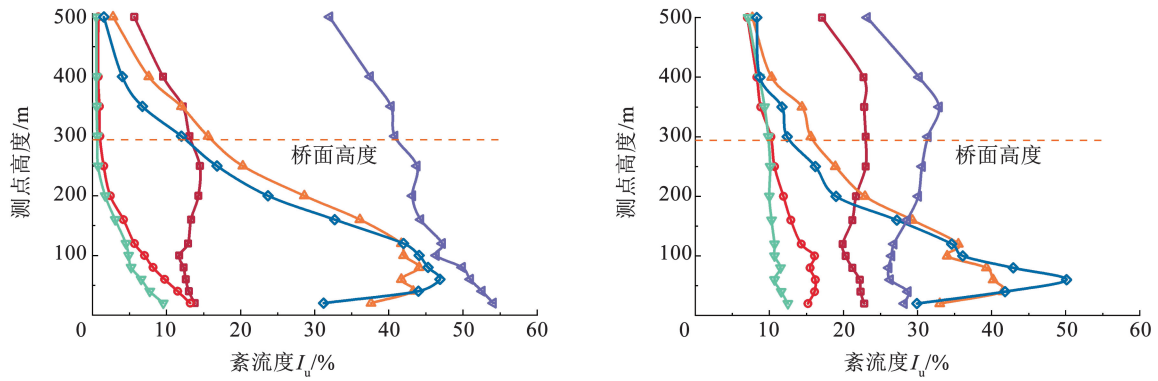
(d) V 方向脉动风速180°来流功率谱密度 (横桥向)

图 10　顺桥向、横桥向测点功率谱密度

Fig. 10　Power spectral density at measurement points along and across the bridge



(a) 均匀流场下竖向风速分量随高度变化　　(b) 紊流场下竖向风速分量随高度变化



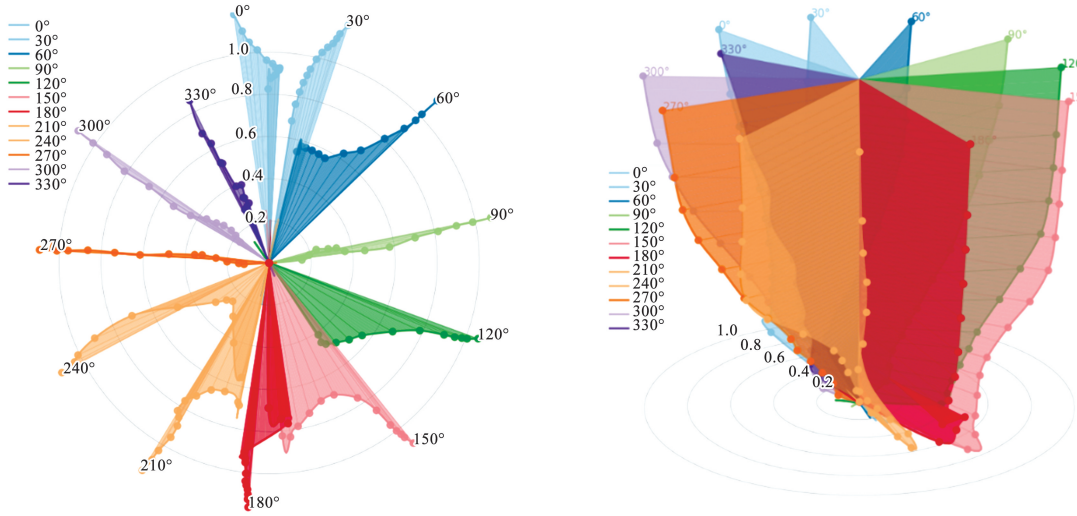
(c) 均匀流场下紊流度随高度变化　　(d) 紊流场下紊流度随高度变化

图 11　不同流场下竖向风速分量及紊流度随高度变化

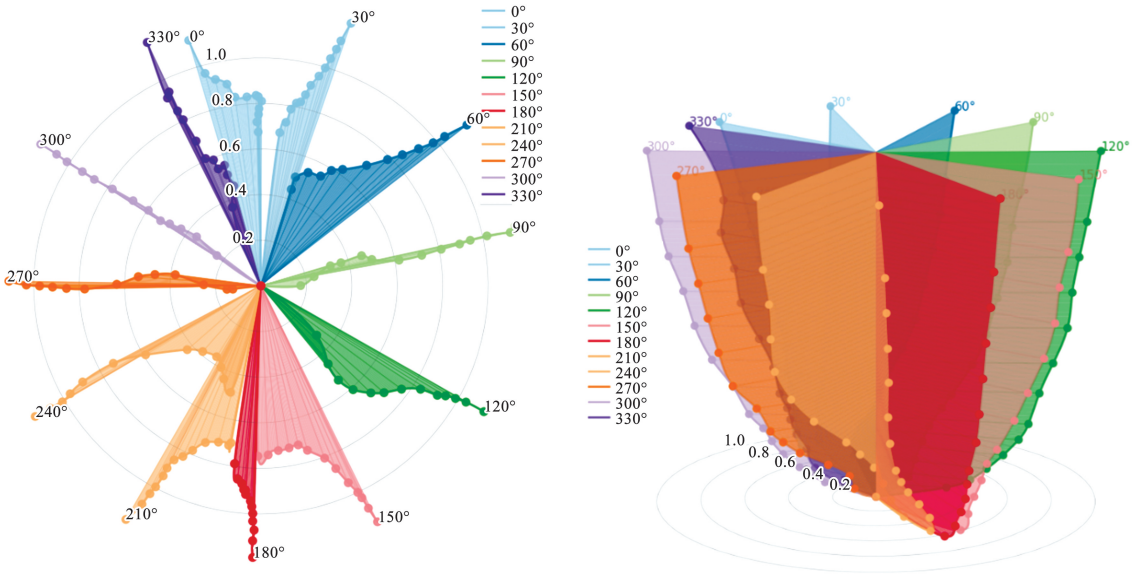
Fig. 11　Vertical wind velocity components and turbulence intensity profiles under different flow conditions

2.5　平均风速风向随高度变化趋势

山区特征使得在不同风向角下风速风向随高度变化呈现出不均匀性，直接影响到桥梁结构风荷载的大小和方向，进而影响其稳定性和耐久性，图 12 为不同来流风场下跨中测点同时考虑风速风向因素的风剖面图，可以看出均匀流场和紊流场下风剖面具有较强共性：在风向角靠近河道入口时，风剖面在 *xoy* 平面投影面积较大，说明此处风剖面受到强烈的地形导向作用，而风向角为沿山岭来流时，投影面积较小，说明风向受地形影响较小；在靠近河流低洼地带，来流风剖面在沿河道或与河道夹角较小的方向上出现扭曲，风向趋向于与河道共线；由于两侧山脊对风的遮挡作用，各测点投影面积较河道来流更小，顺桥向的风速随高度增长缓慢，沿河道方向的风速则相对较大，体现出河道对风速的显著加速效应。均匀流场和紊流场下风剖面也有一定的差异性：均匀流场下较低高度处的风速畸变现象明显，而紊流场削弱了这一畸变程度，进一步说明了紊流场能够削弱地形对风剖面的影响。



(a) 跨中测点不同来流风向下风剖面 (均匀流)



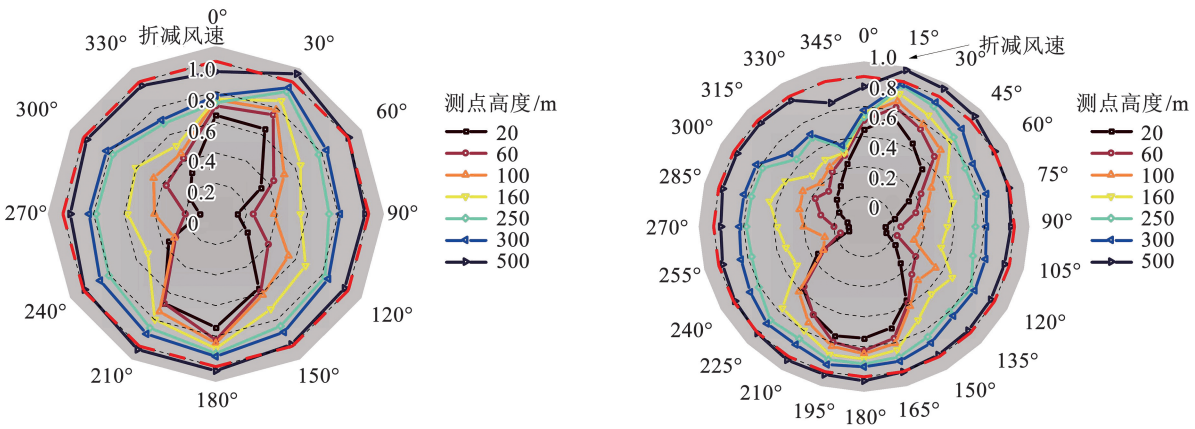
(b) 跨中测点不同来流风向下风剖面 (紊流)

图 12　跨中测点不同来流风向下风剖面

Fig. 12　Different incoming wind profiles at mid-span measurement points

图 13 为剔除风向因素后，部分高度下仅考虑水平顺风向风速随高度的变化情况。可以看出风速在同一高度的不同角度下存在显著差异，跨中测点的较低高度处尤为明显：在沿河谷方向的来流区域，20 m高度处的风速分布由于山体遮挡呈现出“8”字形特征，当高度达到桥面高度后，风场基本发育完

全，各风向角的风速趋于一致；而在垂直于河谷方向的来流区域，由于地形遮挡，风速明显减弱，特别是在受 300°至 0°风向角影响的区域内，由于临近窄河道口和高峰遮挡效应的共同作用，风剖面呈现出凹陷的形状。



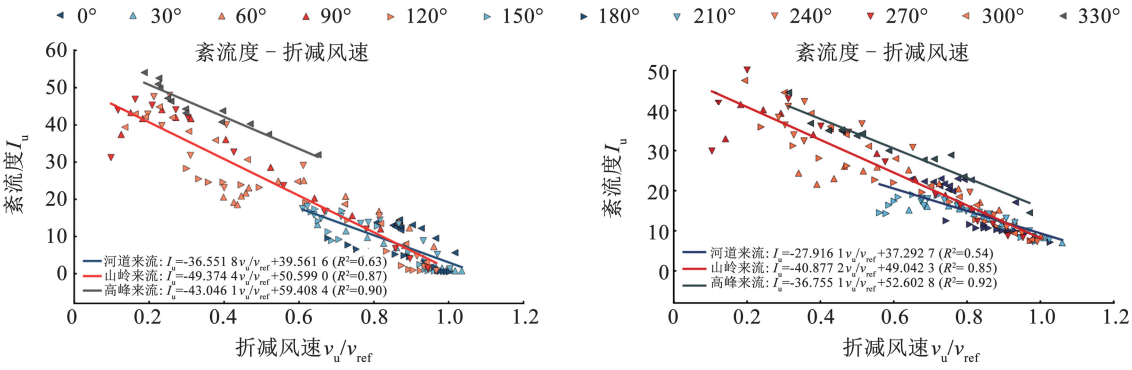
(a) 跨中测点不同高度风玫瑰图（均匀流）　　(b) 跨中测点不同高度风玫瑰图（紊流）

图 13　跨中测点不同高度风玫瑰图

Fig. 13　Wind rose diagrams at various heights at mid-span measurement points

2.6　不同来流风向下紊流度、风压随折减风速变化关

山区桥址区风特性与平原地区存在明显不同，高低起伏的地形在桥址区产生的影响并不相同。上述研究发现，河道来流与山岭来流在桥址处产生的风特性有显著差异性。由图 14 可知，折减风速整体与紊流度呈线性负相关关系。均匀流场下，河道来流由于地表摩阻力较小，整体风速较大。山岭侧来流风速分布更广，但除 330°来流工况，其他工况在进行风速与紊流的线性回归分析时，基本可以采用一个线性函数对数据进行拟合。在上游有高峰影响的 330°来流工况，在进行线性回归分析时表现为线性，但与整体拟合结果差异较明显，同样的风速下较其他数据呈现更大的紊流度，在进行脉动风特性分析时需要着重考虑。而当风场变为紊流场时，高峰来流的离群现象近乎消散了，说明紊流场下的高地形对桥址区的影响被削弱了，说明均匀流场下，部分地形对桥址区的影响会更显著，以此推测均匀流场下地形风洞试验也具有十分重要的意义。

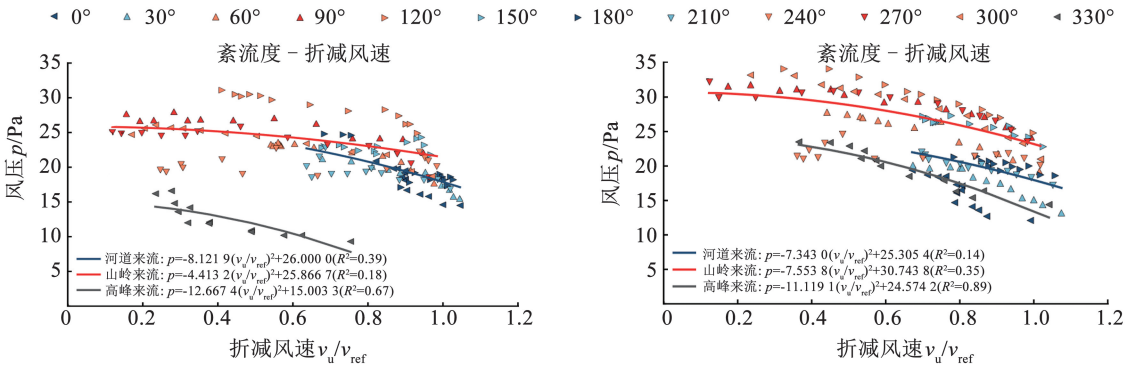


(a) 均匀流场折减风速与紊流度关系　　(b) 紊流场折减风速与紊流度关系

图 14　折减风速与紊流度关系

Fig. 14　Relationship between reduced wind speed and turbulence intensity

由于在均匀流场下风速与紊流度在高峰来流时呈现特殊离群现象，需要深入研究风速与风压的关系，依据伯努利方程，风压与风速的二次方成正比，因此选用 $y = ax^2 + b$ 形式的数学模型拟合，结果如图 15 所示：大部分工况均匀流场和紊流场下拟合结果具有较强共性，在受到上游高峰影响的 330 度来流工况下，表现出离群特征；河道来流区域仍然主要位于高风速区间，在进行统一的多项式拟合分析时，由于不同风向角下的风速与风压间的关系并不呈现单一函数关系，单个线性模型无法准确地描述其变化规律。此外，紊流场对高峰遮挡河道来流的离群现象削弱明显，说明了上游来流风场紊流特性的准确模拟对桥址风特性的分析是必要的。



(a) 不同来流下折减风速与风压关系　　(b) 折减风速与风压变化随角度递进关系

图 15　折减风速与风压关系

Fig. 15　Relationship between reduced wind speed and wind pressure

3　桥面高度风速推算及地形修正系数

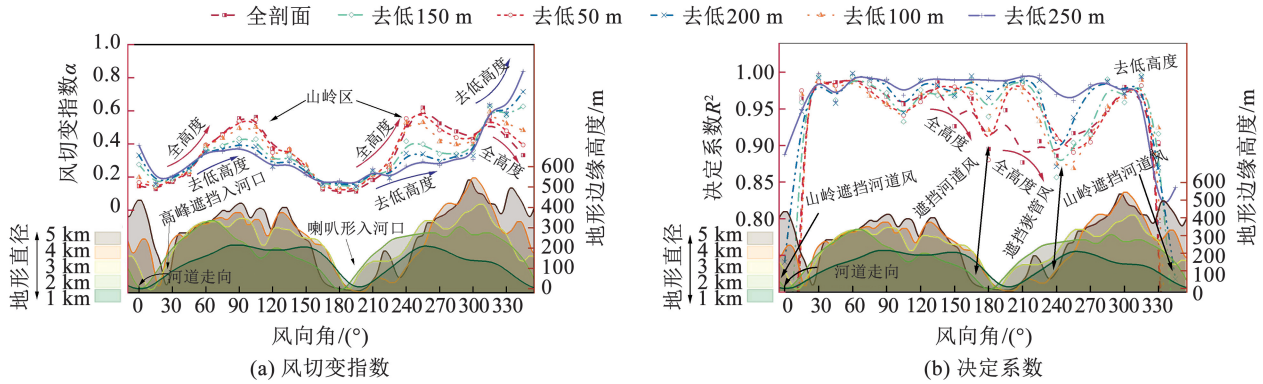
3.1　桥址跨中测点指数拟合结果修正

现行规范在没有实测数据时，采用推算桥面基准风速的方法是：根据邻近气象站等观测位置处得到的基准风速，依据地表类别推算至大气边界层（梯度风高度）风速，再依据桥址区地表类别由大气边界层风速结果推算桥位处基准风速。

本文 2.2 节进行了不同来流下桥跨中点受地形模型影响的指数率计算，发现采用约束最小二乘法对桥址处进行指数拟合的结果是可信的，鉴于规范推荐采用 B 类紊流场进行计算，且紊流场下随风向角变化的工况更多、指数率样本更连续，因此本节仅采用紊流场数据对桥跨中点风速推算进行分析。依据图 8 结果来看，跨中测点指数随风向角变化剧烈，且部分风向角下数值较大，对其他山区地形的风速推测参考价值十分有限，因此本节继续深入研究通过约束最小二乘法拟合指数结果对推算山区桥面高度设计基准风速的有效性和适用性。

从现有研究及本文试验模型测得的风剖面结果中，可以发现山峰遮挡会导致峡谷地区测点存在反“c”形或“s”形风剖面，这种现象会降低山区地形指数拟合的精确度，尤其是在风剖面底部，风速变化较大，对拟合结果影响显著。但山区桥梁跨中桥面较高，因此底部风场受地形影响变化明显且并不具有参考价值。综上，推算跨中桥面处的风速时可以忽略下方一定高度的测点。

本文跨中测点距水面高度约 294 m，图 16 对比了去低位置 0 ~ 250 m（间隔 50 m）与全高度拟合的风切变指数及决定系数结果。可以发现：去低高度处测点对风切变指数影响显著，去除部分低高度测点影响后，山岭区风切变指数起伏显著减小，决定系数明显提升，说明去除低高度测点高度数据可以更加有效拟合山区桥面高度风速结果；不论近处山体遮挡河道、狭管风（如 165°、240°风向角）还是远处高山遮挡河道风（如 0°、345°风向角），均发生了低高度对风剖面影响较大、风剖面拟合困难的现象，将几种情况分别分析如图 17 ~ 19 所示。



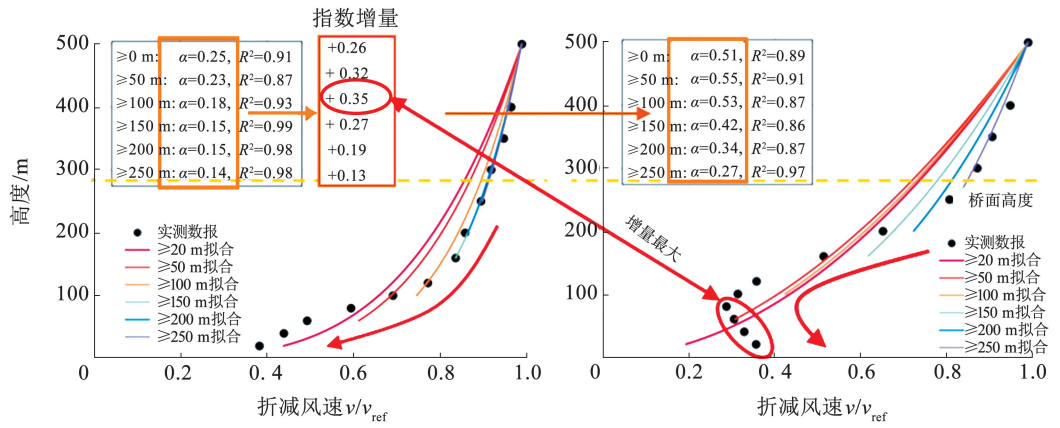
(a) 风切变指数　　(b) 决定系数

图 16　不同去低高度下风切变指数及决定系数

Fig. 16　Wind shear index and coefficient of determination at different low altitudes

图 17 为遮挡狭管风对指数的影响对比图，可以看出：240°风向角在上游 5 km 位置受到收缩山岭地形的狭管风流，流经至 3 km 位置时受到约 300 m 高度山峰遮挡，显著增大了风切变指数，同时底部高度

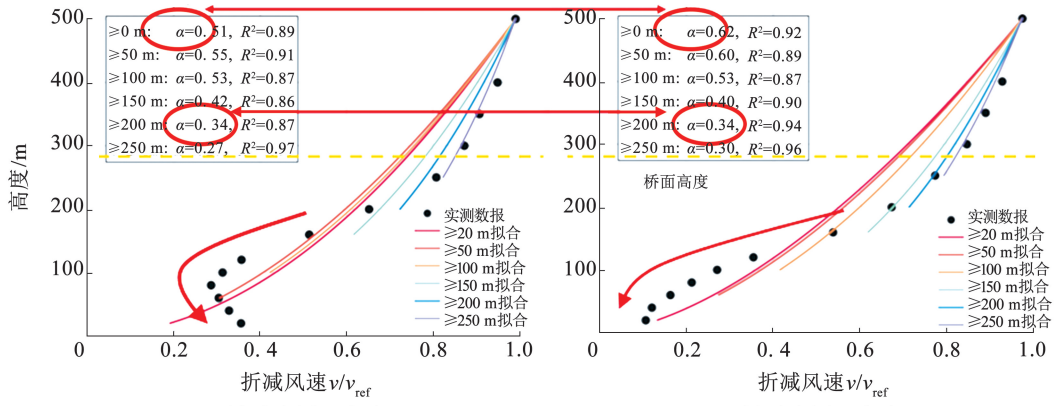
处风剖面呈现反“c”形，去低高度拟合的风切变指数为 0.27，若按全高度风切变指数拟合的 0.51 来确定桥面高度处风速，会得到较小的桥面风速、增加抗风设计的安全隐患；全高度风切变指数从 225°到 240°时自 0.25 提升至 0.51，差值为 0.25，去低 250 m高度风切变指数结果差值降为 0.13，二者均有较高的拟合精度。



(a) 风向角225°　　(b) 风向角240°

图 17　遮挡狭管风对指数的影响(风向角 225°与 240°)

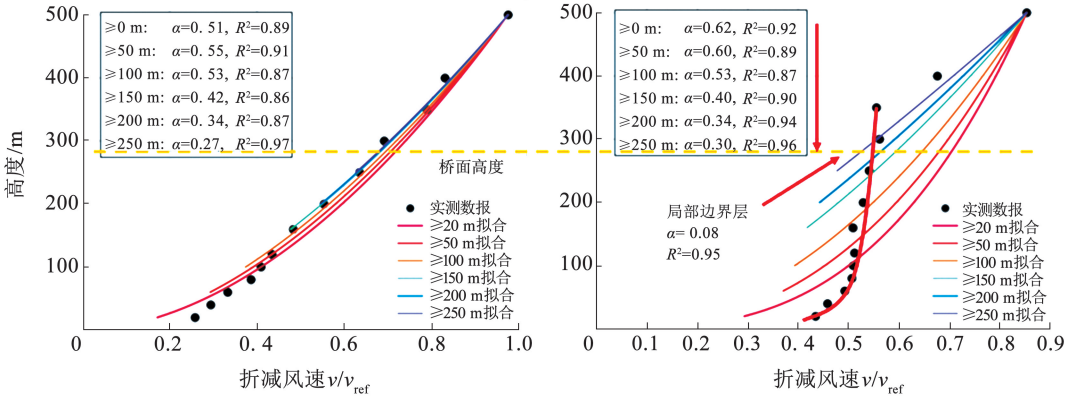
Fig. 17　The influence of shielding and venturi wind on the index (wind direction of 225° and 240°)



(a) 风剖面-测点3 角度240°　　(b) 风剖面-测点3 角度255°

图 18　底部高度测点对指数的影响(风向角 240°与 255°)

Fig. 18　The influence of points at the base height on the index (wind direction of 240° and 255°)



(a) 风剖面-测点3 角度315°　　(b) 风剖面-测点3 角度345°

图 19　高山岭遮挡河道对指数的影响(风向角 315°与 345°)

Fig. 19　The influence of mountain ridge shielding on the river channel on the index (wind direction of 315° and 345°)

图 18 为底部高度测点对指数的影响对比，由图 18可知：255 度工况下，底部剖面的反“c”形明显减弱，而 100 m 以上各测点风速基本相同、拟合指数相近，说明小宽度的山体造成的狭管风会显著增加较低位置的风速拟合结果，这种影响受近距离遮挡效应更多的在 100 m 及以下高度显现；两种风向角

工况都存在去低数据越多指数越小的情况，在去低 200 m 高度时二者指数相同达到 0.34，而去低250 m 高度指数分别为 0.27 和 0.30，接近规范推荐 D 类地貌结果，因此同样存在根据全高度风切变指数来计算，所得到的桥面风速会偏小，从而增加抗风设计的安全隐患的问题。

如图 19(b)所示 345°工况，是本文试验模型受地形影响最剧烈的风向角。该处上游被高峰遮挡的河道为曲线形、从地形 30°风向附近逐渐弯曲过渡到 0°，因此风剖面在低高度处存在较明显的河道加速现象；该处上游 5 km 位置受到约 500 m 高度山峰显著遮挡，因此其风剖面在 500 m 以下都出现了山体遮挡效应导致的风速折减。综上遮挡效应和河道加速效应同时存在导致 345°及邻近 15°测点工况存在十分复杂的风剖面结果，350 m 及以下高度测点数据呈现出 A 类地表相似的指数率，拟合发现其拟合指数约为 0.08，R^2 = 0.95，决定系数低、风切变指数拟合困难。

从桥面基准风速有效推算的角度分析，采用较小的风切变指数来推测基准风速是偏安全的，但会造成更大的建设成本。桥面高度较低时，采用地形遮挡折减系数结合具有河道特性的低指数风剖面来拟合，才能获得较好的剖面指数结果。但地形遮挡折减系数的取值、河道加速效果的程度因地形而异，难以统一量化。目前山区桥址的风观测数据较少，为了能得出一个兼顾安全和经济风切变指数，对建设在峡谷地区的大跨桥梁进行地形风环境实测、风洞试验或虚拟风洞试验是很有必要的。

此外，本节研究也说明地形范围选取对风洞试验是很重要的，河道截断位置不当会导致忽视高峰对河道风参数的显著影响，这对峡谷地区桥梁抗风设计是不利的。依据本文地形模型试验结果提出以下建议：当进行有弯曲河道穿越、且需要对弯曲河道进行截断的峡谷地区地形模型试验时，需要保证在各风向角下的侧视图中，试验模型的山岭均可有效遮挡住桥梁展向河道。

综上所述，本节得到新的风切变指数推荐结果如图 20 所示，由图 20 可知：除喇叭形入河口处测点指数较小外，多数测点采用 C 类地貌计算是较为合适的。用去低高度进行推算的方法解决了前述研究中存在的山岭区风切变指数过大、河道区指数过小的问题，使不同风向角下结果更均衡、波动更小。

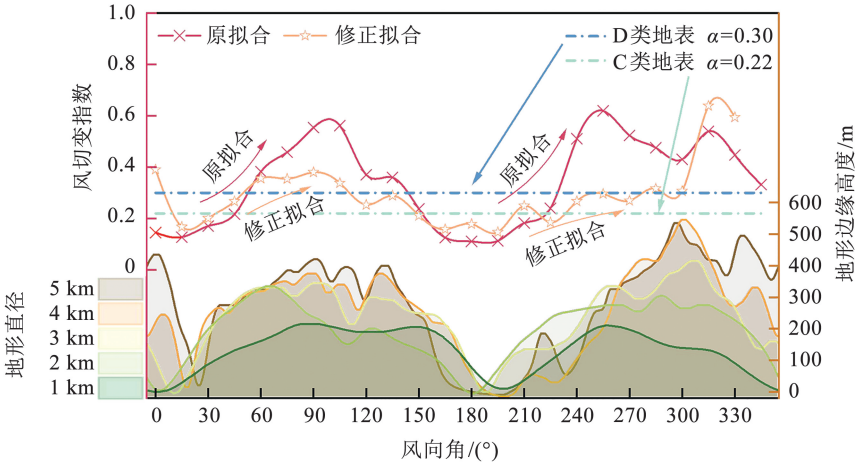


图 20 桥面风速推算时风切变指数矫正结果

Fig. 20 Wind shear index correction results when estimating wind speed at the bridge deck level

3.2 地形修正系数及对比

地形修正系数用来表征地形扰动下局部风速与基本风速的调整关系，有学者[23-24]将地形加速效应的系数定义为测点位置风速与流场参考风速之比：

$$c_u = \frac{v}{v_0} \tag{8}$$

式中：v 为测点风速，v_0 为参考流场风速。

选取试验来流风速作为参考流场风速，利用实测风速数据来计算各个测点考虑高峰影响的地形修正系数，表 1 和表 2 分别为不同风场下桥面高度处的地形修正系数。可以看出：均匀流场在河道来流时得到的地形修正系数较紊流场大，在受到山岭影响时相反，可以认为均匀流场会放大地形导致的加速效应和遮挡效应；对于风向为 0°和 180°沿河道方向的来流，上游为较为平直的河道来流(180°)时，各测点的地形修正系数相对较高，0°来流时受上游河道弯曲影响，自西桥塔向东桥塔修正系数逐渐增加，说明在弯曲河道影响下，桥梁展向风速显著不一致；对于风向为 90°和 270°垂直于河道方向的来流，桥梁跨中测点的地形修正系数均较低，桥塔处梁与山体间的高差较小、修正系数较大，此外，两侧山坡对风速造成了显著的遮挡效应，导致实际风速与参考流场风速的比例有所减小。

表 1　紊流场桥址处地形修正系数

Tab. 1　Terrain correction coefficients at the bridge site under turbulent flow conditions

测点位置	不同风向角的修正系数				
	0°	30°	90°	180°	270°
西桥塔	0.68	0.92	0.93	0.93	0.95
1/4 跨	0.68	0.96	0.86	0.94	0.88
跨中	0.77	0.95	0.81	0.93	0.83
3/4 跨	0.88	0.88	0.71	0.95	0.81
东桥塔	1.01	1.00	0.95	0.92	0.93

表 2　均匀流场桥址处地形修正系数

Tab. 2　Terrain correction coefficients at the bridge site under uniform flow conditions

测点位置	不同风向角的修正系数				
	0°	30°	90°	180°	270°
西桥塔	0.75	0.95	0.68	0.99	0.84
1/4 跨	0.81	0.95	0.67	0.99	0.82
跨中	0.92	0.96	0.70	0.99	0.79
3/4 跨	0.99	0.96	0.74	0.98	0.77
东桥塔	1.01	0.95	0.76	0.97	0.74

综上所述，山区桥址区处的风速受地形显著影响，且这种影响随风向变化而变化，尤其是在与河道走向平行、垂直及高峰附近的风向下，地形修正系数的波动尤为明显，试验结果证实了地形修正系数沿桥梁展向存在差异性。

表 3 对比了约束最小数二乘法与规范方法计算（$\alpha=0.22$）得到的桥面设计基准风速（抗风风险系数 k_f 为 $R1$），正差值表示选取结果偏保守，负差值表示选取结果偏危险。可以发现：河道来流风时，得到的结果偏危险，其他风向角下按规范方法计算均能得到偏安全的结果，说明在没有观测数据做支撑时，由于河道加速效应，在河道来流的风向角下需要选取偏低的指数，被迫得到更保守的设计基准风速，导致成本增加。综上所示，峡谷地区风观测可以依概率学对设计基准风速进行调整，从而在一定程度上减少抗风设计所需的成本。

表 3　紊流场下地形模型桥面高度风速推算结果

Tab. 3　Bridge deck-height wind speed estimates under turbulent flow in a terrain-based model

风向角/(°)	修正风切变指数结果 α	修正指数推算基准风速结果 v_u/v_{ref}	C 类风场基准风速结果 v_u/v_{ref}	风洞试验地形修正系数 v_u/v_{ref}	修正指数推算差值/%	C 类风场推算差值/%
0	0.39	0.81	0.90	0.77	4.94	14.73
15	0.17	0.91	0.90	0.98	−7.69	−8.53
30	0.20	0.90	0.90	0.96	−6.67	−6.31
45	0.27	0.87	0.90	0.92	−5.75	−1.88
60	0.36	0.83	0.90	0.84	−1.20	6.98
75	0.35	0.83	0.90	0.84	−1.20	6.98
90	0.38	0.82	0.90	0.81	1.22	10.30
105	0.34	0.84	0.90	0.84	0	6.98
120	0.25	0.87	0.90	0.85	2.30	5.87
135	0.29	0.86	0.90	0.84	2.33	6.98
150	0.21	0.89	0.90	0.89	0	1.44
165	0.16	0.92	0.90	0.93	−1.09	−2.99
180	0.18	0.91	0.90	0.93	−2.20	−2.99
195	0.15	0.92	0.90	0.95	−3.26	−5.20
210	0.25	0.88	0.90	0.91	−3.41	−0.78
225	0.18	0.91	0.90	0.91	0	−0.78
240	0.27	0.87	0.90	0.87	0	3.65
255	0.30	0.85	0.90	0.85	0	5.87
270	0.27	0.87	0.90	0.83	4.60	8.08
285	0.32	0.85	0.90	0.83	2.35	8.08
300	0.31	0.85	0.90	0.83	2.35	8.08
315	0.64	0.71	0.90	0.69	2.82	23.59
330	0.59	0.73	0.90	0.71	2.74	21.37
345	0.84	0.64	0.90	0.56	12.50	37.98

4　结　论

本文以某大跨斜拉桥桥址区风环境为研究对象，通过地形风洞试验，探讨了不同来流风下峡谷地形对桥址区风场特性的影响和桥面设计基准风速推算方法。

1）均匀流场与紊流场对比分析表明：紊流场能够削弱地形导致的加速效应和遮挡效应；均匀流场在河道来流时有更大的地形修正系数，山岭区相反；不同流场下风切变指数随风向角变化趋势相同。

2）提出采用约束最小二乘法拟合峡谷地区风切变指数，发现约束最小二乘法的决定系数与最小二乘法相近，证明拟合结果有效。发现不同风向角下，均匀流场和紊流场下跨中测点的起伏均较大，难

以用单一模型准确描述。

3)提出用去低高度数据拟合得到的指数推算峡谷地区桥面设计基准风速,对比发现这种方法可以提高推算设计基准风速的有效性,且对使用单一指数模型分析不同风向角下桥址风速分析有利。

4)研究发现仅采用规范推荐的计算方法(α = 0.22)在大部分风向角工况下能得到偏安全的结果,但会显著增加工程成本,因此峡谷地区风观测可以依概率学对设计基准风速进行调整,从而在一定程度上减少抗风设计所需的成本。

参考文献

[1] Mattuella J M L, Loredo-Souza A M, Oliveira M G K, et al. Wind tunnel experimental analysis of a complex terrain micrositing[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54: 110

[2] 张明金, 李永乐, 唐浩俊, 等. 高海拔高温差深切峡谷桥址区风特性现场实测[J]. 中国公路学报, 2015, 28(3): 60
Zhang Mingjing, Li Yongle, Tang Haojun, et al. Field measurement of wind characteristics at bridge site in deep gorge with high altitude and high temperature difference[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 60

[3] Shen Zhengfeng, Li Jiawu, Li Rui, et al. Nonuniform wind characteristics and buffeting response of a composite cable-stayed bridge in a trumpet-shaped mountain pass[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 217: 104730

[4]《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 1

[5] Hu Peng, Han Yan, Cai C S, et al. Wind characteristics and flutter performance of a long-span suspension bridge located in a deep-cutting gorge[J]. Engineering Structures, 2021, 233: 111841

[6] 邹云峰, 康星辉, 周帅, 等. 高海拔深切峡谷桥址风场特性实测研究[J]. 工程力学, 2023, 40(5): 69
Zou Yunfeng, Kang Xinghui, Zhou Shuai, et al. Field measurement study on wind characteristics at bridge site in deep gorge with high altitude[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(5): 69

[7] 罗颖, 黄国庆, 陈宝珍, 等. 基于短期实测数据的普立大桥设计风速推算[J]. 工程力学, 2018, 35(7): 74
Luo Ying, Huang Guoqing, Chen Baozhen, et al. Design wind speed estimation for puli bridge based on short-term measured data[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(7): 74

[8] 张志田, 谭卜豪, 陈添乐. 丘陵地区深切峡谷风特性现场实测研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(7): 113
Zhang Zhitian, Tan Buhao, Chen Tianle. Study on field measurement of wind properties near a canyon deep-cut to hilly land[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(7): 113

[9] 白洪涛, 张志田. 山区桥梁设计风参数实测方法及与规范结果对比研究[J]. 桥梁建设, 2023, 53(3): 56
Bai Hongtao, Zhang Zhitian. Wind parameters measurement method for design of bridges in mountainous area and comparison with code-recommended values[J]. Bridge Construction, 2023, 53(3): 56

[10] 李永乐, 喻济昇, 张明金, 等. 山区桥梁桥址区风特性及抗风关键技术[J]. 中国科学:技术科学, 2021, 51(5): 530
Li Yongle, Yu Jisheng, Zhang Mingjin, et al. Wind characteristics of a bridge site and wind-resistance key technology in complex mountains[J]. Scientia Sinica Technologica, 2021, 51(5): 530

[11] 许福友, 周晶. 山区桥址风场特性研究综述[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(3): 502
Xu Fuyou, Zhou Jing. Review on the characteristics of wind fields at bridge sitein mountainous areas[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(3): 502

[12] Yu Jianhan, Tang Jia, Li Mingshui, et al. Experimental study of the impact of upstream mountain terrain and urban exposure on approaching wind characteristics[J]. Building and Environment, 2024, 248: 111071

[13] 白桦, 李加武, 刘健新. 西部河谷地区三水河桥址风场特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(14): 74
Bai Hua, Li Jiawu, Liu Jianxin. Experimental study on wind field characteristics of sanshui river bridge site located in west valley region[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(14): 74

[14] 王峰, 何晗欣, 白桦, 等. 峡谷地区桥位处风参数特性[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 351
Wang Feng, He Hanxin, Bai Hua, et al. Wind parameter characteristics of a bridge located in the gorge area[J]. Journal of Nanjing Tech Unversity(Natural Science Edition), 2020, 42(3): 351

[15] Song Jialing, Li Jiawu, Flay R G J. Field measurements and wind tunnel investigation of wind characteristics at a bridge site in a Y-shaped valley[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 202: 104199

[16] Li Yongle, Yu Jisheng, Zhang Mingjin, et al. Wind characteristics of a bridge site and wind-resistance key technology in complex mountains[J]. Scientia Sinica Technologica, 2020, 51: 1

[17] Chen Fubin, Wang Weijia, Gu Ziqi, et al. Investigation of hilly terrain wind characteristics considering the interference effect[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 241: 105543

[18] 吴风英, 崔巍, 赵林, 等. 深切峡谷地貌桥面行车高度风环境现场实测研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(6): 71
Wu Fengying, Cui Wei, Zhao Lin, et al. Field measurements of wind microclimate for vehicle levels on a bridge deck in a complex deep canyon terrain[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(6): 71

[19] 胡伟成, 杨庆山, 张建. 多国规范山地风速地形修正系数对比研究[J]. 工程力学, 201, 35(10): 203
Hu Weicheng, Yang Qingshan, Zhang Jian. Comparative study on wind topographic factor of hilly terrain by different codes and standards[J]. Engineering Mechanics, 201, 35(10): 203

[20] Song Jialing, Li Jiawu, Flay R G J, et al. Validation and application of pressure-driven RANS approach for wind parameter predictions in mountainous terrain[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 7(2): 1

[21] Davenport A G, Agnew R, Harris R I, et al. The application of statistical concepts to the wind loading of structures[J]. Proceedings Institution of Civil Engineers London, 1961, 19(4):449

[22] 牛华伟, 陈伟昆, 赵永胜, 等. 不同坡度单体山丘风速地形修正系数与越山风效应风洞试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(11): 73
Niu Huawei, Chen Weikun, Zhao Yongsheng, et al. Study on topographic factor of single hill with different slope and effect of wind flow over hill by wind tunnel test[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2018, 45(11): 73

[23] 庞加斌, 宋锦忠, 林志兴. 山区峡谷桥梁抗风设计风速的确定方法[J]. 中国公路学报, 2008, 21(5): 39
Pang Jiabing, Song Jinzhong, Lin Zhixing. Determination method for wind-resistant design wind speed of mountainous-valley bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(5): 39

[24] 于舰涵, 李明水, 李少鹏, 等. 考虑风速风向联合分布和地形效应的山区桥梁设计风速确定[J]. 中国公路学报, 2018, 31(8): 122
Yu Jianhan, Li Mingshui, Li Shaopeng, et al. Influence of joint distribution of wind speed and direction and topographic effect on design wind speed of bridges in mountainous area[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(8): 122