山区桥梁桥址区风特性及抗风关键技术

李永乐, 喻济昇, 张明金*, 唐浩俊

西南交通大学桥梁工程系, 成都 610031

* E-mail: Zhang-Minjin@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2020-04-08; 接受日期: 2020-06-03; 网络版发表日期: 2020-10-27

四川省重点研发项目(编号: 2019YFG0001)、国家自然科学基金(批准号: 51708464)和中央高校基本科研业务费专项资金(编号: 2682019CX02)资助

摘要 山区地形复杂多变, 并且不同特征地形间存在相互的气动干扰, 使得山区复杂地形地貌桥址区的风场变得异常复杂, 这给山区大跨度桥梁抗风带来了巨大的挑战. 本文以典型山区桥址区为背景, 通过现场实测明确了山区桥址区风特性的特点, 从历史统计资料、数值风洞模拟、现场实测等方面讨论了山区桥梁设计风速标准确定方法, 分析了山区桥梁在非均匀来流和非平稳来流下的颤振性能, 并讨论了大风攻角下几种优化措施对结构颤振性能的影响. 研究表明, 山区风场异常复杂, 与常规平原地区相比有明显不同, 需要通过多种途径确定其复合风速标准; 山区非均匀、大风攻角和非平稳来流对桥梁的颤振性能影响明显.

关键词 山区桥址区, 风特性, 风速标准, 抗风性能, 颤振

1 引言

随着我国西部大开发进入到加速发展阶段, 在西部山区修建更多公路和铁路是未来的发展趋势. 未来必将穿越横断山脉, 穿越由邛崃山、大渡河、大雪山、雅砻江、沙鲁里山、金沙江、宁静山和云岭、澜沧江、他念他翁山、怒江、高黎贡山等一系列南北向平行的高大山脉和深大峡谷. 横断山脉的岭谷高差一般在1000~3000 m, 部分地区甚至高达5000 m以上, 多为典型的V字型、U字型深大峡谷. 仅川藏铁路为跨越深大峡谷就需要修建10余座特大跨度桥梁, 雅安至康定高速公路需在泸定县跨越大渡河峡谷等. 典型深大峡谷桥址区见图1.

西部山区同时受到季风气候和山地气候影响, 桥

址区风速通常较高, 并且受到复杂地形的影响, 其风特性更加复杂, 与平坦、开阔地区桥址区风特性差异明显, 目前有关复杂地形地貌区风特性的研究相对薄弱, 而风参数的不确定性是影响抗风研究精度的重要因素, 现有抗风规范中关于山区桥址区风特性的相关规定还未明确^[1]. 此外, 山区复杂地形地貌区风场通常具有非平稳、非均匀、大攻角、主导风向明确、高紊流度等特征, 这种特殊风场作用下, 对山区大跨度桥梁的抗风性能优化也提出了较大挑战.

2 山区风特性研究方法和手段

2.1 现场实测

现场实测是山区风特性研究的主要手段之一.

引用格式: 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. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 530–542

Li Y L, Yu J S, Zhang M J, et al. Wind characteristics of a bridge site and wind-resistance key technology in complex mountains (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 530–542, doi: 10.1360/SST-2020-0151

图 1 (网络版彩图)典型深峡谷桥址区(单位: m). (a) 雅康高速大渡河大桥桥址区峡谷地形; (b) 川藏铁路怒江大桥桥址区峡谷地形; (c) 雅康高速大渡河大桥; (d) 川藏铁路怒江大桥

Figure 1 (Color online) Bridge site in typical deep gorge (unit: m). (a) Topography of the Dadu river bridge site on Yakang Expressway; (b) topography of the Nujiang bridge site on Sichuan-Tibet Railway; (c) Dadu river bridge on Yakang Expressway; (d) Nujiang bridge on Sichuan-Tibet Railway.

Fenerci等人^[2]和Lystad等人^[3]基于Hardanger大桥处风速的长期监测数据研究了地形对平均风速和湍流强度的影响, 得出桥址区风场空间分布规律. Huang等人^[4]基于中国西部山区的实测数据, 研究了平均风速、平均温度、平均湿度的相关性, 得到了山区雷暴风和热发展风的风场特性, 研究结果表明山区雷暴风与平原地区相比没有显著差异. Yu等人^[5]、Zhang等人^[6]、Liao等人^[7]、Jing等人^[8]利用风速雷达、风速仪等获取了山区大跨度桥梁桥址区风速时程序列, 重点研究了紊流强度、功率谱、紊流积分尺度、竖向相关性等脉动风特性, 表明受地形峡谷影响的山区风场特性与常规地区明显不同. 张志田等人^[9]、张明金等人^[10]、朱乐东等人^[11]、庞加斌等人^[12]、金磊等人^[13]分别对江底河大桥、龙江大桥、坝陵河大桥、四渡河大桥、矮寨大桥的风特性进行了现场实测, 得到了较为系统的山区桥梁风观测资料. 张明金等人^[14]和李永乐等人^[15]以高海拔高温差深切峡谷区的大渡河大桥和龙江大桥为工程背景, 对大桥桥址区风特性进行了长时间系统的观测, 实测表明, 类似地区的大风可以分为两类, 一类是受大尺度气候环境影响, 另一类是受小尺度范围内热力驱动而产生日常大风. 刘志文等人^[16]、蔡向阳

等人^[17]、辛亚兵等人^[18]对复杂山区郴州赤石特大桥桥址区沿桥轴向的平均风特性和脉动风特性进行了现场实测, 得出沿桥轴向风样本的平均风速、平均风攻角、湍流强度、阵风因子、积分尺度等参数变化趋势基本一致的结论. 高亮等人^[19]通过现场实测对喇叭口地形、山谷单坡地形和河谷不规则地形风特性进行了研究, 得到了峡谷山口强风区的风场特性.

2.2 风洞试验

Yamaguchi等人^[20]对日本Shakotan Peninsula带悬崖地形特征的直径8 km地区(缩尺比1:2000)进行了地形模型风洞试验, 指出在复杂地形下, 风剖面不再以指数规律随高度变化. Weerasuriya等人^[21]通过改变地形模型的长宽比研究了具有理想几何形状的山丘引起的风向垂直变化, 并基于风洞试验结果提出了一种同时计算风向水平变化和竖直变化的模型. Yan等人^[22]通过缩尺比为1/2200的山区地形模型风洞试验, 研究了中国西藏自治区某桥址区局部风特性. Jing等人^[23]通过地形模型风洞试验, 研究了某山区河谷水位升高对桥位风场特性的影响. 胡朋等人^[24]基于理想流体圆柱绕流推导出山区峡谷桥址区地形模型边界过渡段的合

理形式. Hu等人^[25]、Li等人^[26]在西南交通大学III号风洞中进行了龙江大桥以及大渡河大桥的桥址区地形模型风洞试验. 试验表明桥址区的风攻角、风剖面等相关风参数较平原地区有较大差别, 同时发现目前已有的相关抗风规范某些指标在复杂地形地貌区桥梁上采用是偏于不安全的.

2.3 数值模拟

Uchida和Ohya^[27]采用大涡模拟的方法对 $9.5\text{ km} \times 5.0\text{ km}$ 范围内复杂地形区空气流动进行了数值模拟, 使用粗糙方块制造脉动风, 获得计算区域内平均风速与脉动风速情况. Chen等人^[28]以湘江大桥为研究背景对有无边界过渡段的山区地形模型的风特性进行了数值模拟和实验研究. Zhang等人^[29]探讨了不同来流情况下桥前山体对主梁平均风速、风攻角、风剖面以及风向角的影响, 揭示了有山体遮挡效应的复杂地形地貌区风场的空间分布特征. 李永乐等人^[30,31]采用数值模拟的方法分析了深切峡谷桥址区 $8.0\text{ km} \times 8.0\text{ km}$ 和 $15\text{ km} \times 15\text{ km}$ 区域范围内的风场特性, 根据风速沿高度方向的变化规律将风场沿高度方向分为峡谷层、峰峦层、中高空层, 并提出以包络线来表示平均风速与风攻角的对应关系, 同时也分析了当桥位紧邻高陡山体时主梁的气动特性, 探讨了桥址区的峡谷风效应. 沈炼等人^[32]、胡伟成等人^[33]采用大涡模拟的方法准确模拟了山区峡谷桥址区的风场及湍流特性. 吴联活等人^[34]以绿汁江大桥为例研究了复杂山区地形桥址区风场空间分布特性. 姜平等^[35]探讨了因复杂地形而导致的热力差异对山谷风环流形成的影响. 靖洪淼等人^[36]为了解决数值计算雷诺数与实际不符的难题, 提出了一种改进的山区峡谷桥址处风场特性的数值模拟方法, 高质量地模拟了山区峡谷桥址区风场特性.

3 山区桥梁桥址区风特性

以位于川藏交界复杂山区的某大桥桥址区为例, 对典型深大峡谷山区风特性进行分析.

3.1 风速大、非平稳性突出

以2013年1月上旬的一次大风降温过程为例(图2), 可以发现从1月1日中午开始至1月3日中午, 桥位处出现了一个明显的降温过程, 降温幅度达到了 13°C , 在

降温过程的开始阶段风速迅速增加, 10 min 平均风速在3个小时内从 3.0 增加到 26.7 m/s , 达到最大后风速开始降低, 但其 10 min 平均风速仍然在 10.0 m/s 以上. 表明类似川藏山区的风环境恶劣, 其风速并不比沿海地区小. 并且整个大风过程中, 其非平稳性突出.

此外, 西部山区常出现以天为周期的日常大风, 这类大风的 10 min 平均风速达到 10 m/s 以上. 图3为实测的日常大风波动规律, 从图中可以看出桥位处一天中风速波动明显, 在晚上零点至中午12:00期间风速较小, 中午12:00过后风速迅速增大, 下午16:00达到最大, 大风一直持续到晚上19:00以后才开始减小, 10 min 平均风速大于 10.0 m/s 的大风过程持续时间常常达到 7.0 h 以上. 这类高频的日常大风对桥梁的耐久性和舒适性提出了新的挑战, 同时对列车的运营安全也有较大影响.

3.2 风荷载空间分布非均匀

沿主梁纵向的风速变化如图4所示, 从图中可以看出, 主梁各个方向的风速沿纵向分布明显不均, 靠近东

图2 大风降温过程

Figure 2 Decreasing temperature process with strong wind.

图3 (网络版彩图)日常大风

Figure 3 (Color online) The daily strong wind.

面山体一侧主梁风速减小明显, 其中横桥向风速甚至出现了反向, 说明该桥受到桥前山体局部地形的遮挡效应明显. 由于受到了局部地形的影响, 主梁上风荷载分布极其不均匀, 严重不均匀的风荷载对大桥设计提出了新的挑战.

主梁跨中处风速沿高度的变化如图5所示, 与平原地区风速沿高度的变化呈指数率或对数率变化规律明显不同, 山区桥梁桥址区受局部地形的影响较大, 通常在桥面高度附近风速变化较为剧烈, 横桥向风速变化曲线甚至出现拐点, 并且三个方向的风速沿高度的变化规律差异也较大^[30].

3.3 风攻角大

风攻角计算公式为

$$\alpha = \arctan \left(\frac{U_w}{\sqrt{U_u^2 + U_v^2}} \right), \quad (1)$$

图4 沿主梁风速变化
Figure 4 Wind velocity along bridge deck.

图5 主梁跨中处风速沿高度的变化
Figure 5 Variation of velocity with elevation at mid-span.

其中 α 为风攻角, 单位为度($^{\circ}$); U_u , U_v , U_w 为三个方向的平均风速.

桥址区风攻角随高度的变化如图6所示, 从图中可以看出, 风攻角随高度的增加有所减小, 但风攻角整体上均较平原地区要大, 并且以负攻角为主. 大桥桥面高度处风攻角均值为 -4.5° , 与常规地区均值为 0° 相比差异较大.

3.4 主导风向明显

桥址区实测风向分布如图7所示, 由于受到河谷两岸山体的约束作用, 山区峡谷内的主导风向通常为沿河道方向. 而跨越峡谷的桥轴线常常垂直于河道, 根据峡谷走向特性, 通常会出现两个情况: (1) 桥址区峡谷整体顺直, 主导风向则刚好垂直于主梁, 而主导风向上风速通常较大; (2) 桥址区峡谷局部弯曲, 主导风向刚好和大桥成固定夹角, 形成大偏角的情况(图7). 整体来看, 山区主导风向明显, 对山区桥梁的设计和后期列车的运营均较为不利.

3.5 脉动风特性

紊流强度是计算时距内脉动风速的均方根和均值的比值, 计算公式为

$$I_i = \frac{\sigma_i}{U}, \quad i = u, v, w, \quad (2)$$

其中, I_i 为三个方向的稳流强度, u , v , w 分别代表纵向、横向和竖向的分量; σ_i 表示三个方向计算时距内脉动速度分量 $u(t)$, $v(t)$ 和 $w(t)$ 的均方根; U 为水平平均风速.

图8为紊流强度 I_u , I_v 和 I_w 随风向变化的结果, 当风速较小时, 紊流强度越大, 离散程度也越大. 一方面是因为风速较低时, 包括风速风向在内的来流特性更易于变化, 另一方面是因为低风速的样本比重非常大, 也间接增大了离散程度. 随着风速增大, 紊流强度也逐渐减小并稳定.

图9给出了某个风速样本的谱拟合结果, 从图中可以很明显地看到, 在低频部分各方向的经验谱与实测功率谱较为吻合, 但是随着频率的增大, 纵向Simu谱、横向Simu谱和竖向Pandfsky谱与实测功率谱都存在较大偏差. 与之相反, 在不同频段每个方向上的实测功率谱与Von Kármán谱拟合更好, 与《公路桥梁抗风设计规范》^[37]中推荐的风谱水平向采用Simiu谱, 竖向

图 6 (网络版彩图)风攻角随高度变化. (a) 风攻角; (b) 风攻角均值
Figure 6 (Color online) Variation of wind attack angle with elevation. (a) Wind attack angle; (b) average wind attack angle.

图 7 (网络版彩图)风向玫瑰图
Figure 7 (Color online) Rose diagram of wind direction.

采用Pandfsky谱明显不同.

紊流积分尺度如图10所示, 当来流风速较大时, 风向集中, 紊流积分尺度降低, 且紊流积分尺度的离散程度也减小.

4 设计风速标准确定

4.1 基于历史风速记录推算

位于偏远地区地形复杂的山区桥梁, 桥位处的局部风环境对桥梁的影响主要表现在局部地形对风速和

风向的影响. 复杂山区桥位处通常缺乏可靠的气象实测资料, 桥梁设计风速难以直接推算, 一般是通过桥梁所在地区气象台站等间接的风速资料来确定. 地区基本风速系百年一遇的年最大风速, 其重现期为一百年. 当风速记录样本数量达到一定规模后, 可根据其概率分布类型推算不同重现期的风速极值.

以大渡河大桥为例, 基于距此桥桥位最近的泸定县气象站的历史风速观测记录, 采用极值I型分布推算了地区基本风速, 不同重现期年最大风速计算公式为

$$\begin{cases} X_p = \bar{X}(1 + \psi C_V), \\ C_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i}{\bar{X}} - 1 \right)^2}{n-1}}, \end{cases} \quad (3)$$

其中, X_p 为不同重现期的年最大风速; $\bar{X}$ 为年最大风速长资料序列中的样本均值; ψ 为极值I型耿贝尔曲线的保证系数; C_V 为离差系数; X_i 为风速样本.

分别采用全序列风速数据(1961~2010年)和截断修正序列风速数据(1961~1995年)进行不同重现期的最大风速的推算, 不同重现期最大风速如表1所示.

4.2 区域地形CFD分析

复杂地形地貌区风场分布复杂, 桥位处局部风环境对桥梁风致振动的影响较大, 而现有规范仅适用于

图 8 (网络版彩图) 风向-紊流强度玫瑰图. (a) I_u ; (b) I_v ; (c) I_w

Figure 8 (Color online) Wind rose plots of turbulence intensities. (a) I_u ; (b) I_v ; (c) I_w .

图 9 (网络版彩图) 功率谱拟合结果. (a) u ; (b) v ; (c) w

Figure 9 (Color online) Wind power spectra. (a) u ; (b) v ; (c) w .

图 10 (网络版彩图) 紊流积分尺度. (a) L_{ux} ; (b) L_{vx} ; (c) L_{wx}

Figure 10 (Color online) Turbulence integral scales. (a) L_{ux} ; (b) L_{vx} ; (c) L_{wx} .

地貌相对规则且各向同性的风场条件。以计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)为基础的数值风洞方法具有可以直观显示流场、成本代价低、节约人力物力、可重复性好、不受试验中固有约束条件的影响等诸多优点, 因此可以采用CFD方法模拟山区

峡谷等复杂地形的三维风场, 从而推算桥梁的设计相关风速标准。

地形模型应尽可能包含桥位周边气象站所在区域, 一般不小于10 km, 以建立气象站风参数和桥位处风参数的相关性^[37]。来流按照风速剖面进行设置, 其

计算效率与网格数量、计算机效率密切相关。以某大桥为例,通过地形CFD分析,可以得到桥位处梯度风速与桥面高度处风速的比值,如表2所示。采用梯度风速法,可获得相应桥面高度处的设计风速与地区梯度风速的比值,根据梯度风速比可以最终确定大桥的设计风速标准。

4.3 桥址区地形模型风洞试验

对于复杂山区的风特性,《公路桥梁抗风设计规范》^[37]建议当桥梁结构对风致振动敏感时通过地形模拟试验和虚拟风洞试验等方法确定。为更真实地反映桥址区的风特性,地形模型应模拟桥梁所在区域的主要地形特征。然而受地形范围限制,复杂地形模型通常在离桥址区有限距离处被人为截断,地形模型边缘与风洞地板存在一定的高差,导致来流在模型边缘处出现流动分离、绕流旋涡等现象。为使边界层来流“平滑”地过渡到地形模型区域,通常设置合理的气流过渡段对风洞地板及模型边界进行平滑过渡。胡朋等人^[24]基于理想流体圆柱绕流推导出地形模型边界过渡段曲线,如下式:

$$y - \frac{a^2}{y} + \frac{a^2x^2}{y^3} - \frac{a^2x^4}{y^5} + \frac{a^2x^6}{y^7} - \frac{a^2x^8}{y^9} - m = 0, \quad (4)$$

表 1 年最大风速

Table 1 Annual maximum wind velocity

重现期 (年)	全序列 (50年)	截断修正序列 (35年)
10	16.6	17.5
20	18.9	19.4
30	20.2	20.5
50	21.7	21.8
100	23.9	23.6

表 2 梯度风速比值

Table 2 Wind velocity ratio

主梁高度处平均 风攻角 (°)	主梁横向平均 风速 (m/s)	与梯度风速比值
-9	22.5	0.45
-7	30	0.6
-5~1	37.5	0.75
3	31	0.62
5	24	0.48

其中 a 与 m 由下列方程组(5)确定,其中 h_0 为过渡段地形模型边界的地形高度, k_0 为过渡段地形模型的等效斜率:

$$\begin{cases} \frac{m + \sqrt{m^2 + 4a^2}}{2} - \frac{m + \sqrt{m^2 + 2.692a^2}}{2} = h_0, \\ 1.285 \left(\frac{\sqrt{m^2 + 4a^2} - \sqrt{m^2 + 2.692a^2}}{m + \sqrt{m^2 + 2.692a^2}} \right) = k_0. \end{cases} \quad (5)$$

目前关于地形模型边界过渡段的形式还不统一,国内外众多学者针对此问题进行了深入研究,目前比较常用的方法有:斜坡过渡段^[38]、维多辛斯基曲线^[39,40]、平方余弦曲线^[41]、双曲正切曲线^[42]、双三次曲线^[43,44]。

以某大桥为例,通过地形模型风洞试验,给出了不同风攻角情况下主梁跨中横桥向风速与高空梯度风速的比值关系,如表3所示。采用梯度风速法,可通过该比值推算出主梁高度处的设计风速。

4.4 复合风速标准

通过抗风规范、气象站数据、数值模拟、风洞试验、现场实测等多种手段,最终确定桥梁的风速设计标准。如图11所示,复杂山区桥梁的复合风速标准包含两个层面的含意:桥梁结构的不同组成部分(如主梁、桥塔)在同一来流状态下对应于不同的风速标准;不同来流状态下(如不同风攻角、不同风向角)桥梁结构的同一组成部分对应于不同的风速标准^[45]。相比于常规桥梁单一的风速标准,复合风速标准不仅考虑了桥梁不同组成部分的局部地表类型差异、基本风速差异、风速标准差异,而且考虑了桥梁同一组成部分在不同攻角来流情况下的差异、不同风向来流情况下的差异,在一定程度上反映了复杂山区风场的空间分布,

表 3 梯度风速比值

Table 3 Wind velocity ratio

主梁高度处平均风攻 角 (°)	主梁横向平均风速 (m/s)	与梯度风速比值
-9	5.18	0.54
-7	5.47	0.57
-5~-3	6.05	0.63
-1	6	0.62
1	5.86	0.61
3	5.28	0.55

图 11 复合风速标准示意图

Figure 11 The schematic diagram of integrated wind speed standard.

为山区大跨度桥梁抗风研究提供了有效的研究手段。

5 桥梁抗风关键技术

5.1 山区桥梁颤振分析方法

对位于山区峡谷内的大跨度桥梁而言, 来流沿桥跨方向往往不再均匀, 并且来流风速的平均值大多也随时间发生明显变化, 这种非均匀分布的来流风或者非平稳的来流风将会影响桥梁的颤振性能。

采用大型有限元ANSYS软件进行非均匀来流下桥梁的三维全模态颤振分析, 将主梁单位长度上受到的气动力转化为作用于主梁单元两端节点的集中荷载^[46]。采用ANSYS中与风速、频率有关的Matrix27单元模拟桥梁主梁受到的气动力, 对风速和频率进行搜索和迭代, 以实现双参数全模态颤振分析, 更真实地反映桥梁结构的颤振性能。三维全模态颤振分析方法得到的桥梁气弹系统运动方程为

$$M\ddot{X} + (C - C_{ac})\dot{X} + (K - K_{ac})X = 0, \quad (6)$$

其中, K_{ac} 和 C_{ac} 分别代表整体气动阻尼和气动刚度矩阵。

建立流固耦合模型来研究非平稳来流对桥梁颤振临界状态的影响。结构竖向和扭转方程分别如式(7)和(8)所示。

$$m[\ddot{h}(t) + 2\zeta_h w_h \dot{h}(t) + w_h^2 h(t)] = L(t), \quad (7)$$

$$I_m[\ddot{\alpha}(t) + 2\zeta_\alpha w_\alpha \dot{\alpha}(t) + w_\alpha^2 \alpha(t)] = M(t), \quad (8)$$

其中, m 为结构单位长度质量; I_m 为结构单位长度质量惯性矩; $L(t)$, $M(t)$ 为流场作用于结构的竖向荷载和对

结构扭心的扭矩; $\ddot{h}(t)$, $\dot{h}(t)$, $h(t)$ 分别表示 t 时刻结构竖向运动的加速度、速度以及位移; $\ddot{\alpha}(t)$, $\dot{\alpha}(t)$, $\alpha(t)$ 分别为 t 时刻的扭转加速度、扭转速度以及扭转位移; w_h 为竖向振动圆频率, w_α 为扭转振动圆频率; ζ_h , ζ_α 分别为竖向和扭转阻尼比。

5.2 山区桥梁颤振性能研究

5.2.1 非均匀、大攻角的影响

某桥复模态阻尼随风速的变化如图12所示, 随着风速的增加, 对称扭转复模态的阻尼比反对称扭转模态先由负变零, 使结构达到颤振临界状态。随着负攻角 α 绝对值的增加, 两个复模态阻尼变零对应的临界风速越来越低, 说明大风攻角来流不利于结构的颤振稳定性。

非均匀风攻角下桥梁的颤振临界风速如图13所示, 图中 α_S , α_B ($\alpha_B > \alpha_S = 0$) 为桥梁沿纵桥向分布的风攻角, ϕ 为 α_B 攻角区域长度与跨度的比值。从图中可以看出, 不论正对称扭转模态还是反对称扭转模态, 桥梁颤振临界风速均随着大风攻角区域长度的增加而逐渐降低, 这从侧面说明大风攻角来流不利于结构的颤振稳定性。风攻角的非均匀分布不会使桥梁的颤振临界风速超出 α_S 和 α_B 均匀分布时对应的颤振临界风速范围。这表明风攻角的非均匀分布对桥梁的颤振性能有着显著影响, 但相对于大风攻角均匀分布时所对应的颤振临界状态而言, 不会进一步降低桥梁颤振稳定性^[46]。

5.2.2 非均匀风速的影响

非均匀来流风速下桥梁颤振临界状态对应的平均风速如图14所示, 假设来流风速沿桥跨呈线性分布或

图 12 (网络版彩图)复模态阻尼随风速的变化

Figure 12 (Color online) Variation of the complex modal damping with wind speed.

图 13 非均匀风攻角下桥梁的颤振临界风速

Figure 13 Flutter critical wind speed under nonuniform wind attack angle.

图 14 非均匀来流风速下桥梁颤振临界状态对应的平均风速

Figure 14 Flutter critical mean wind speed under nonuniform approaching speed.

抛物线分布, 桥梁两端来流风速分别为 U_1 和 U_2 ($U_1 < U_2$), 其中 $\bar{U}_A$ 为整个跨度范围内的平均风速, $\bar{U}_M$ 为跨中

附近半跨范围内的平均风速. 从图中可以看出, 随着桥梁两端来流风速比值的减小, 桥梁颤振临界状态对应的平均风速逐渐减小; 平均风速降低幅度随着桥梁两端风速差值的增大而增大, 特别是当风速发生反向后, 其降低幅度尤为显著. 以上结果表明非均匀分布来流风速会降低桥梁的颤振稳定性.

5.2.3 波动平均风的影响

以理想平板为研究对象, 分析波动风持续时间对颤振的影响, 如图 15 所示. 假设以正弦函数的方式输入波动平均风, 其波动频率与平板结构的颤振临界频率相同, 波动风持续时间取 $1 \sim 4T$, 其中 T 为波动风的周期, 波动平均风出现的时间为第 5 s. 从图中可以看出, 在波动风出现之后, 平板结构的振幅有所增大, 而当波动风结束之后, 平板结构的振幅还将继续随风速的增大而增大. 波动风持续的时间越久, 对平板结构的颤振稳定性越不利. 一方面, 长时间存在的波动会迫使平板结构出现更大的振幅. 另一方面, 在波动风停止后, 过大的振幅可能驱使平板结构出现发散振动.

5.2.4 突变大风的影响

以理想平板为研究对象, 突变大风持续时间对颤振临界状态的影响如图 16 所示. 用二次函数来模拟平均风速的突然增大和减小, 突变大风持续时间取 $1 \sim 4T$, 其中 T 为结构振动的周期, 大风出现时间为第 5 s. 从图中可以看出, 在大风作用期间甚至大风结束后, 结构的振幅在不断增大, 说明大风的存在将激励结构的振动, 不利于结构的颤振稳定性. 大风持续时间越长, 结构振幅增大的速度越快.

图 15 (网络版彩图)波动平均风持续时间的影响

Figure 15 (Color online) Effects on fluctuating mean wind duration.

表 4 不同攻角下常见气动措施的效果

Table 4 Effect of common aerodynamic measures under wind attack angle

风攻角	小风攻角 (°)			大风攻角 (°)		
	0	2	4	6	8	10
理想平板	弯扭耦合颤振			扭转颤振		
中央开槽	临界风速随开槽宽度增大而增大			部分开槽宽度下, 颤振临界风速反而会降低		
上侧中央竖向稳定板	稳定板高度较小有利, 稳定板高度较大不利			临界风速随稳定板高度增大而增大		
下侧中央竖向稳定板	有利效果略弱于上中央稳定板			部分高度下颤振临界风速反而降低		
风嘴	能够明显增强截面的流线体性质			风嘴越扁越长, 对颤振稳定性的提高越明显

图 16 (网络版彩图)大风持续时间的影响
Figure 16 (Color online) Effects on strong wind duration.

5.3 山区桥梁抗风措施研究

中央开槽、中央稳定板和风嘴是常见的大跨度桥梁颤振优化的气动措施. 受局部地形影响, 复杂山区来流风攻角通常比平原或沿海地区更大. 因此, 有必要研究大攻角来流下这些常见措施对结构颤振性能的影响, 为山区桥梁抗风措施提供依据.

以宽高比为200的理想薄平板断面为研究对象, 采用数值模拟的方法研究了不同风攻角下常见措施对平板颤振性能的影响, 如表4所示. 与熟知的小风攻角气动措施不同, 大风攻角时中央开槽后截面气动干扰变强, 甚至会导致漩涡脱落出现, 下侧中央稳定板处于迎风侧会使截面钝体性质变强, 从而降低结构颤振稳

定性能. 由表可知, 提高结构颤振稳定性主要有两种思路: (1) 当风攻角较小时, 可通过增强截面流线体特性等方法, 使结构发生颤振时竖弯和扭转振动相互耦合, 提高颤振稳定性; (2) 当风攻角较大截面已经变为钝体特性时, 截面端部大漩涡的形成及其向背风侧的移动是扭转颤振的重要原因, 这时则需要通过设置合理的措施对颤振条件进行破坏或削弱, 从而提高大桥的颤振临界风速.

6 结论

- (1) 山区地形复杂, 山区桥梁桥址区风特性与常规平原地区有明显不同, 具有风速大、非平稳性突出、风荷载沿主梁纵向分布非均匀、大攻角、主导风向明显、紊流度大等特点.
- (2) 复合风速标准在一定程度上反映了复杂山区风场的空间分布, 山区桥梁设计风速标准宜采用复合风速标准.
- (3) 由于复杂风场中桥梁的颤振性能有明显改变, 在确定山区桥梁颤振临界风速时应考虑山区风场的特殊性.
- (4) 在山区风场中, 大桥的抗风优化需要结合桥址区特定风场环境展开, 在确定大桥抗风优化措施时, 应密切结合桥址区实测风场特性.

参考文献

1 Department of Engineering and Material Sciences, National Natural Science Foundation of China. Strategic Research on Natural Science Disciplines (Architecture Environmental and Civil Engineering II). Beijing: Science Press, 2006. 21–25 [国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 学科发展战略研究报告(建筑、环境与土木工程II). 北京: 科学出版社, 2006. 21–25]

2 Fenerci A, Øiseth O, Rønnquist A. Long-term monitoring of wind field characteristics and dynamic response of a long-span suspension bridge in

- complex terrain. *Eng Struct*, 2017, 147: 269–284
- 3 Lystad T M, Fenerci A, Øiseth O. Evaluation of mast measurements and wind tunnel terrain models to describe spatially variable wind field characteristics for long-span bridge design. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2018, 179: 558–573
- 4 Huang G, Jiang Y, Peng L, et al. Characteristics of intense winds in mountain area based on field measurement: Focusing on thunderstorm winds. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2019, 190: 166–182
- 5 Yu C, Li Y, Zhang M, et al. Wind characteristics along a bridge catwalk in a deep-cutting gorge from field measurements. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2019, 186: 94–104
- 6 Zhang J, Zhang M, Li Y, et al. Comparison of wind characteristics at different heights of deep-cut canyon based on field measurement. *Adv Struct Eng*, 2020, 23: 219–233
- 7 Liao H, Jing H, Ma C, et al. Field measurement study on turbulence field by wind tower and Windcube Lidar in mountain valley. *J Wind Eng Industrial Aerodyn*, 2020, 197: 104090
- 8 Jing H, Liao H, Ma C, et al. Field measurement study of wind characteristics at different measuring positions in a mountainous valley. *Exp Thermal Fluid Sci*, 2020, 112: 109991
- 9 Zhang Z T, Tan B H, Chen T L. Study on field measurement of wind properties near a canyon deep-cut to hilly land (in Chinese). *J Hunan Univ (Nat Sci)*, 2019, 46: 113–122 [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. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46: 113–122]
- 10 Zhang M J, Li Y L, Yu X Q, et al. Influence of wind sensor location on bridge tower on measurement results (in Chinese). *J Southwest Jiaotong Univ*, 2015, 50: 617–622 [张明金, 李永乐, 余显全, 等. 桥塔上传感器安装位置对测量结果的影响. 西南交通大学学报, 2015, 50: 617–622]
- 11 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 (in Chinese). *J Exper Fluid Mech*, 2011, 25: 15–21 [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. 实验流体力学, 2011, 25: 15–21]
- 12 Pang J B, Song J Z, Lin Z X. Field measurement analysis of wind turbulence characteristics of Sidu river valley bridge site (in Chinese). *China J Highw Transp*, 2010, 23: 42–47 [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. 中国公路学报, 2010, 23: 42–47]
- 13 Jin L, Wang X Y, Liao J H, et al. Wind monitoring system and data analysis for Aizhai suspension bridge (in Chinese). *J Hunan Inst Eng (Nat Sci Ed)*, 2011, 21: 65–67 [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. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2011, 21: 65–67]
- 14 Zhang M J, Li Y L, Tang H J, et al. Field measurement of wind characteristics at bridge site in deep gorge with high altitude and high temperature difference (in Chinese). *China J Highw Transp*, 2015, 28: 60–65 [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. 中国公路学报, 2015, 28: 60–65]
- 15 Li Y L, Zhang M J, Xu X Y, et al. Causes of daily strong wind on bridge site in deep gorge with high altitude and high temperature difference (in Chinese). *J Southwest Jiaotong Univ*, 2014, 49: 935–941 [李永乐, 张明金, 徐昕宇, 等. 高海拔高温差深切峡谷桥址区日常大风成因. 西南交通大学学报, 2014, 49: 935–941]
- 16 Liu Z W, Ding D, Jia Y G, et al. Field measurement of wind-induced vibration responses of a large cable-stayed bridge during construction stages in mountainous terrain (in Chinese). *J Hunan Univ (Nat Sci)*, 2017, 44: 16–22 [刘志文, 丁冬, 贾亚光, 等. 山区大跨斜拉桥悬臂施工期风振响应实测. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44: 16–22]
- 17 Cai X Y, Gong P, Xie P, et al. Field measurement of wind characteristics of Chishi bridge site with mountainous terrain (in Chinese). *Highw Eng*, 2017, 42: 1–5 [蔡向阳, 龚平, 谢鹏, 等. 赤石特大桥山区地形桥位风特性现场实测. 公路工程, 2017, 42: 1–5]
- 18 Xin Y B, Shao X D, Liu Z W, et al. Wind characteristics along axis bridge measured at multi-pylon cable-stayed bridge site with high piers (in Chinese). *J Hunan Univ (Nat Sci)*, 2016, 43: 103–111 [辛亚兵, 邵旭东, 刘志文, 等. 高墩多塔斜拉桥沿桥轴向风特性实测分析. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43: 103–111]
- 19 Gao L, Bai H, Liu J X, et al. Field measurement analysis of wind characteristics of the typical complex terrain conditions in the west area (in Chinese). *J Xi'an Univ Tech*, 2018, 34: 61–67 [高亮, 白桦, 刘健新, 等. 复杂地形条件下的西部强风特性实测分析. 西安理工大学学报, 2018, 34: 61–67]
- 20 Yamaguchi A, Ishihara T, Fujino Y. Experimental study of the wind flow in a coastal region of Japan. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2003, 91: 247–264
- 21 Weerasuriya A U, Hu Z Z, Li S W, et al. Wind direction field under the influence of topography, Part I: A descriptive model. *Wind Struct*, 2016, 22: 455–476

- 22 Yan L, Guo Z S, Zhu L D, et al. Wind tunnel study of wind structure at a mountainous bridge location. *Wind Struct*, 2016, 23: 191–209
- 23 Jing H, Liao H, Ma C, et al. Influence of elevated water levels on wind field characteristics at a bridge site. *Adv Struct Eng*, 2019, 22: 1783–1795
- 24 Hu P, Li Y L, Liao H L. Shape of boundary transition section for mountains-gorge bridge site terrain model (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2013, 31: 231–238 [胡朋, 李永乐, 廖海黎. 山区峡谷桥址区地形模型边界过渡段形式研究. *空气动力学学报*, 2013, 31: 231–238]
- 25 Hu P, Li Y, Huang G, et al. The appropriate shape of the boundary transition section for a mountain-gorge terrain model in a wind tunnel test. *Wind Struct*, 2015, 20: 15–36
- 26 Li Y, Xu X, Zhang M, et al. Wind tunnel test and numerical simulation of wind characteristics at a bridge site in mountainous terrain. *Adv Struct Eng*, 2017, 20: 1223–1231
- 27 Uchida T, Ohya Y. Large-eddy simulation of turbulent airflow over complex terrain. *J Wind Eng Ind AeroDyn*, 2003, 91: 219–229
- 28 Chen X, Liu Z, Wang X, et al. Experimental and numerical investigation of wind characteristics over mountainous valley bridge site considering improved boundary transition sections. *Appl Sci*, 2020, 10: 751
- 29 Zhang M J, Yu J S, Zhang J Y, et al. Study on the wind-field characteristics over a bridge site due to the shielding effects of mountains in a deep gorge via numerical simulation. *Adv Struct Eng*, 2019, 22: 3055–3065
- 30 Li Y L, Cai X T, Tang K, et al. Study of spatial distribution feature of wind fields over bridge site with a deep-cutting gorge using numerical simulation (in Chinese). *Chin Civil Eng J*, 2011, 44: 116–122 [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. *土木工程学报*, 2011, 44: 116–122]
- 31 Li Y L, Hu P, Cai X T, et al. Numerical simulation of wind characteristics above bridge site adjacent a high-steep mountain (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2011, 29: 770–776 [李永乐, 胡朋, 蔡宪棠, 等. 紧邻高陡山体桥址区风特性数值模拟研究. *空气动力学学报*, 2011, 29: 770–776]
- 32 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 (in Chinese). *J Hunan Univ (Nat Sci)*, 2016, 43: 16–24 [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. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43: 16–24]
- 33 Hu W C, Yang Q S, Zhang J. Les study of turbulent boundary layers over three-dimensional hills (in Chinese). *Eng Mech*, 2019, 36: 72–79 [胡伟成, 杨庆山, 张建. 湍流边界层中三维山丘地形风场大涡模拟. *工程力学*, 2019, 36: 72–79]
- 34 Wu L H, Zhang M J, Li Y L, et al. Numerical simulation of wind characteristics at bridge sites in complex mountainous terrains (in Chinese). *J Southwest Jiaotong Univ*, 2019, 54: 915–922 [吴联活, 张明金, 李永乐, 等. 复杂山区地形桥址区风特性的数值模拟. *西南交通大学学报*, 2019, 54: 915–922]
- 35 Jiang P, Liu X R, Zhu H N, et al. Idealized numerical simulation of local mountain-valley winds over complex topography (in Chinese). *Plateau Meteor*, 2019, 38: 1272–1282 [姜平, 刘晓冉, 朱浩楠, 等. 复杂地形下局地山谷风环流的理想数值模拟. *高原气象*, 2019, 38: 1272–1282]
- 36 Jing H M, Liao H L, Zhou Q, et al. A numerical simulation method for wind field characteristics of mountainous valley at bridge site (in Chinese). *J Vib Shock*, 2019, 38: 200–207 [靖洪淼, 廖海黎, 周强, 等. 一种山区峡谷桥址区风场特性数值模拟方法. *振动与冲击*, 2019, 38: 200–207]
- 37 Ministry of Transport of the PRC. Wind-resistant Design Specification for Highway Bridges (JTG/T 3360-01-2018) (in Chinese). Beijing: China Communications Press, 2018 [中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗风设计规范(JTG/T 3360-01-2018). 北京: 人民交通出版社, 2018]
- 38 Maurizi A, Palma J M L M, Castro F A. Numerical simulation of the atmospheric flow in a mountainous region of the North of Portugal. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 1998, 74–76: 219–228
- 39 Huang G, Cheng X, Peng L, et al. Aerodynamic shape of transition curve for truncated mountainous terrain model in wind field simulation. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2018, 178: 80–90
- 40 Liu Z W, Chen X Y, Chen Z Q. Optimization of transition sections around terrain model at mountain canyon bridge site (in Chinese). *China J Highw Transp*, 2019, 32: 266–278 [刘志文, 陈祥艳, 陈政清. 山区峡谷桥址地形模型过渡段优化. *中国公路学报*, 2019, 32: 266–278]
- 41 Diebold M, Higgins C, Fang J, et al. Flow over hills: A large-eddy simulation of the bolund case. *Bound-Layer Meteorol*, 2013, 148: 177–194
- 42 Jing H M, Liao H L, Ma C M, et al. A study on boundary transition of a terrain model for wind field characteristics measurement (in Chinese). *J Vib Shock*, 2020, 39: 178–185 [靖洪淼, 廖海黎, 马存明, 等. 风场特性测量的地形模型边界过渡形式研究. *振动与冲击*, 2020, 39: 178–185]
- 43 Wang S, Liu X K, Lu L S. Numerical analysis on contraction curve of low-speed blow down wind tunnel (in Chinese). *Mach Tool Hydraul*, 2012, 40: 100–104 [王帅, 刘小康, 陆龙生. 直流式低速风洞收缩段收缩曲线的仿真分析. *机床与液压*, 2012, 40: 100–104]
- 44 Wei D C, Jiao Y Y, Zhang T R, et al. Aerodynamic design of the mini low turbulence open-circuit tunnel (in Chinese). *J Binzhou Univ*, 2018, 34: 5–9 [魏德宸, 焦园圆, 张同任, 等. 微型低湍流度直流风洞的气动设计. *滨州学院学报*, 2018, 34: 5–9]

- 45 Li Y L, Tang K, Cai X T, et al. Integrated wind speed standard for long-span bridges over deep-cutting gorge (in Chinese). J Southwest Jiaotong Univ, 2010, 45: 167–173 [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. 西南交通大学学报, 2010, 45: 167–173]
- 46 Tang H J. Wind-induced vibration and aerodynamic measures of long-span suspension bridges with steel truss girder in complex mountainous canyon (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016 [唐浩俊. 复杂山区峡谷大跨度钢桁梁悬索桥风致振动及气动措施. 博士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2016]

Wind characteristics of a bridge site and wind-resistance key technology in complex mountains

LI YongLe, YU JiSheng, ZHANG MingJin & TANG HaoJun

Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

The random variability of mountainous area terrain and the mutual aerodynamic interference between different terrain features make the wind field in bridge sites extremely complicated, which results in considerable challenges to the wind resistance of large-span bridges. In this study, the wind characteristics of a bridge site in a typical mountainous area were determined by field measurements. The design reference wind speed was derived from historical statistics, numerical wind tunnel simulations, field measurements, etc. According to the wind characteristics of the mountainous area, the flutter performances of a bridge under non-uniform and non-stationary inflow were analyzed, and the effects of common aerodynamic measures on flutter stability were analyzed at large angles of attack. The results showed that the integrated wind speed standard in complex mountainous terrains can be derived in various ways, which is significantly different from a conventional plain area. The non-uniform, large angle of attack, and non-stationary inflow has a significant impact on the flutter performance of a bridge.

bridge site in mountain area, wind characteristics, wind speed standard, wind-resistance performance, flutter

doi: [10.1360/SST-2020-0151](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0151)