

基于大涡模拟的山区桥址风场及其对桥梁 抖振响应的影响

胡朋¹, 陈婉婷¹, 韩艳^{1†}, 陈飞¹, 丁少凌^{1,2}

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘 要:为研究位于复杂山区地形的桥址区风场特性及其对大跨度桥梁抖振响应的影响,以山区某斜拉桥为工程背景,采用大涡模拟方法获取桥址区足量监测点的脉动风场特性;分别以传统谐波合成法模拟的脉动风场、规范建议的C类脉动风场与大涡模拟方法计算得到的脉动风场计算桥梁的抖振力,并对三者进行了抖振响应对比分析;研究了桥址区非均匀风场特性对桥梁抖振响应的影响.研究表明:位于山区地形的大跨度桥梁的平均风速、风攻角以及紊流强度等特性沿桥跨呈现明显的非均匀性,紊流强度比、脉动风速谱以及相干函数均与规范建议值不同,反映了规范建议值在复杂山区风场中的适用性有限.采用谐波合成法模拟脉动风场得到的抖振响应相比大涡模拟方法同步监测所得到的脉动风场下抖振响应偏不安全,采用规范建议谱模拟风场所得的抖振响应相较于大涡模拟方法所得的抖振响应在竖向位移结果上偏不安全,但侧向位移和扭转位移结果上却偏于保守.非均匀风速对主梁竖向、侧向及扭转抖振响应影响较大,而非均匀风攻角对主梁扭转响应也有一定影响.非均匀风速来流下,跨中竖向和侧向抖振响应谱明显高于均匀风速来流的,而跨中扭转抖振响应谱与均匀风速来流相比差距并不明显.

关键词:复杂山区;大跨度桥梁;大涡模拟;非均匀风场;抖振响应

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

Wind Characteristics at Bridge Site in Mountains Area Based on Large Eddy Simulation and Their Effects on Bridge Buffeting Response

HU Peng¹, CHEN Wanting¹, HAN Yan^{1†}, CHEN Fei¹, DING Shaoling^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. China Communications Second Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: To study the wind characteristics at a bridge site in the complex mountainous terrain and their effect on the buffeting response of a long-span bridge, a cable-stayed bridge in a mountainous area was considered as the engineering background. Firstly, the fluctuating wind field characteristics at the bridge site with enough monitoring

* 收稿日期:2024-02-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178451, 52478495), National Natural Science Foundation of China(52178451, 52478495); 湖南省自然科学基金资助项目(2024JJ2002), Natural Science Foundation of Hunan Province(2024JJ2002); 长沙理工大学研究生科研创新项目(CXCLY2022038), Changsha University of Science & Technology Postgraduate Scientific Research Innovation Project(CXCLY2022038)

作者简介:胡朋(1985—),男,湖北武穴人,长沙理工大学教授,博士生导师,工学博士

† 通信联系人, E-mail: ce_hanyan@163.com

points were obtained by the large eddy simulation method. Then, the buffeting forces of the bridge were calculated by the fluctuating wind field via the traditional harmonic synthesis method, the type C suggested in the specification, and the large eddy simulation method, and their buffeting responses were compared and analyzed. Furthermore, the effects of non-uniform wind field characteristics at the bridge site on the buffeting response of the bridge were investigated. The results show that the mean wind speeds, wind attack angles, turbulence intensities, etc., of the long-span bridge in the mountainous terrain, show obvious non-uniformity along the bridge span, and the turbulence intensity ratio, fluctuating wind speed spectra, and coherence function are different from the recommended values in the specification, reflecting the limited applicability of the recommended values in the specification in complex mountainous wind fields. The buffeting response obtained by the fluctuating wind field simulated with the harmonic synthesis method is less safe than that obtained by the fluctuating wind field synchronously monitored by the large eddy simulation method. The buffeting response obtained by the fluctuating wind field simulated by the spectrum suggested in the specification is unsafe in the vertical displacement but conservative in the lateral displacement and torsional displacement compared to the results obtained by the large eddy simulation method. The non-uniform wind speed has significant influences on the vertical, lateral, and torsional buffeting responses of the main beam, and the non-uniform wind attack angles can also affect the torsional response of the main beam. The vertical and lateral buffeting response spectra at the mid-span point under the non-uniform wind speed are obviously higher than those under the uniform wind speed, while the differences of torsional buffeting response spectra at the mid-span point between the non-uniform wind speed and the uniform wind speed are not distinct.

Key words: complex mountainous area; long-span bridge; large eddy simulation; non-uniform wind field; buffeting response

随着西部大开发的加速推进,我国建立了一大批大跨度桥梁以助西部地区的经济发展^[1-3].然而西部地区的地形复杂多样,高低起伏较大,桥位地形风特性局部特征明显,分布复杂^[4-6],而我国现行的桥梁抗风规范^[7]大多针对较为平坦的地形地貌,难以准确确定复杂山区桥址的风场特性.同时,大跨度桥梁等柔性结构对紊流较为敏感,研究表明,大跨度桥梁在任意风速下均可发生抖振^[8-10].虽然抖振不会使桥梁产生发散性的灾难破坏,但过大的抖振响应会缩短部分构件的使用年限,甚至引起结构局部疲劳破坏.因此,针对复杂山区桥址区风场特性以及大跨度桥梁的抖振响应开展研究对山区桥梁抗风设计尤为重要.

目前针对山区桥址风场特性进行研究主要包括现场实测、风洞试验和数值模拟方法.张明金等^[11]以大渡河大桥为工程背景进行了现场实测研究,结果表明,桥址区阵风系数和风攻角均比相关规范中常规平坦地区要大.Song等^[12]通过现场实测和风洞试验研究了Y型山谷风场特性以及桥址区风速和紊流

强度分布,结果表明复杂地形下风向变化显著,来流受到的阻挡和狭管效应对风场减速和加速有显著影响,同时紊流特性对局部地形较为敏感.Xu等^[13]采用风洞试验方法模拟了位于山区的某大桥风场特性,发现风速沿桥跨分布不均匀,且平均风攻角大于规范建议值.Yan等^[14]通过对1/200比例的山地地形模型进行风洞试验,观察到桥址区风特性因风向和测点位置不同而变化.现场实测方法虽然能直观反映桥址区的风场特性,但现场实测耗时长、成本高,而风洞试验中的模型受空间限制,导致缩尺比较小,对于复杂地形难以全面反映桥址区局部风场特征^[15-16].

鉴于现场实测和风洞试验手段的局限性,目前众多学者采用CFD数值模拟方法模拟山区地形风场.祝志文等^[17]采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型得到峡谷地貌上的气流运动和桥址区风场数据,结果表明,风速沿桥跨分布不均匀,并建议风洞试验风攻角取值为 $\pm 5^\circ$,而设计风速取跨中风速值.楼文娟等^[18]采用Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型分析了简化峡谷山脉的风特

性,结果表明,典型峡谷地形中近地面风速空间分布呈现显著的非均匀性.吴联活等^[19]以绿叶江大桥为工程背景,采用 SST $k-\varepsilon$ 湍流模型研究了山区地形中不同桥位处风场的空间分布特性,发现各桥位处的风剖面以及主梁上横桥向风速差异明显.靖洪森等^[20]采用 SST $k-\omega$ 湍流模型模拟了山区峡谷桥址区风场特性,模拟结果显示,主梁上的横桥向风速沿桥跨变化较大.需要注意的是,目前采用数值模拟方法模拟山区风场多采用雷诺平均模型(RANS),很少采用大涡模拟(LES)方法.LES方法是介于RANS和直接数值模拟方法之间的一种湍流模拟方法,其基本思想是采用滤波函数将大尺度涡与小尺度涡分离,通过瞬时 $N-S$ 方程直接求解大尺度涡,并利用现有模型建立小尺度涡与大尺度涡的关系,因此可以较准确得到风场的时均量和紊流特性.Yang等^[21]采用实测和LES方法对峡谷隧道-桥梁区域的风场特征进行研究,发现隧道入口附近存在加速效应,且越靠近隧道入口,加速效应越显著.Han等^[22]采用LES方法对山区局部风环境进行计算,研究发现,计算的风速和风攻角沿桥跨分布不均匀,且风剖面和风速谱与规范建议值存在较大差异.以上数值模拟研究表明,山区风场特性非常复杂,桥址区风特性空间分布不均匀,但针对非均匀风场特性对桥梁抖振响应的影响却并未涉及.

桥梁抖振是由紊流场中脉动风荷载引起的强迫振动,各种风场特性参数对其均有影响,目前已有众多学者研究了山区风特性对大跨度桥梁抖振响应的影响.赵博文^[23]对某山区高墩刚构桥所在区域的风环境进行了模拟,并基于谐波合成法实现了脉动风场的模拟,在此基础上对桥梁抖振进行了时域分析.张剑锋等^[24]采用谐波合成法模拟了桥位各主要典型测点的脉动风速,并对山区大跨度钢桁梁悬索桥主桥结构的抖振响应进行了计算分析,得到了设计基准风速下主梁的风荷载极值.Cheynet等^[25]根据现场实测数据分析了地形对风场的影响,并采用频域方法计算桥梁的抖振响应,与实测响应进行对比,结果表明,大风偏角以及非平稳风会对两者造成差异.王俊等^[26]采用风洞试验并结合谐波合成法生成了桥位处的脉动风速,计算并分析了简化U形峡谷中大跨度悬索桥的抖振响应,结果表明,规范建议的均匀风速模型会高估桥梁关键位置的抖振响应.Shen等^[27]

基于喇叭形地形的风洞试验,建立了考虑主梁沿桥跨平均风速和脉动风特性变化的抖振响应计算理论.需要说明的是,利用现场实测和风洞试验获取桥址区脉动风场数据时,由于成本和安装空间所限,难以沿桥跨方向布置足够数量的监测点,从而也难以全面、准确地获取沿桥跨方向的风场数据.一方面,由于抖振响应与紊流特性密切相关,脉动风速的获取对桥梁抖振响应的分析至关重要;另一方面,现有桥址区脉动风速数据的获取多根据少量监测点的风速时程,拟合出目标功率谱密度函数以及相干函数,然后通过谐波合成法获得沿主梁足量的脉动风速时程^[28-30].然而,上述将少量监测点的风速时程扩展为大量主梁节点的脉动风速时程,在扩展过程中引入了诸如平均风速、脉动风速谱以及相干函数等沿桥跨均匀分布等经验假设,难以与主梁所受的脉动风速时程一致.更为重要的是,当桥梁处于复杂山区地形时,由于桥址区具有非均匀风速、非均匀风攻角以及非均匀脉动风场等特性,上述扩展方法无法重现沿主梁各节点的实际风速时程,这进一步导致桥梁的抖振响应难以准确计算.

针对上述问题,为准确得到复杂山区地形桥址区非均匀风场特性并对桥梁的抖振响应进行评估,本研究以山区某大跨度斜拉桥为工程背景,采用LES方法模拟复杂山区桥址区的风场特性.通过沿桥梁轴向建立足够多的监测点对风速进行同步监测,得到桥梁每个节点处的脉动风速时程.在此基础上,分析桥址区沿主梁的非均匀风速与非均匀风攻角、非均匀脉动风速谱以及空间相关性等特性,对比LES方法计算的脉动风场与传统谐波合成法、规范建议谱模拟的脉动风场下桥梁的抖振响应,并分析非均匀风场对桥梁抖振响应的影响.

1 工程概况

以西部山区某多塔斜拉桥为工程背景,桥梁长度为(58.5+116+3×340+116+58.5)m,桥面高程754 m,跨中距离地面43 m.该桥所处地形条件复杂,山峦起伏,桥梁所跨河道较为平直,河道西侧入口较宽,河道东侧入口有一突起山脉.桥位四周多数山峰海拔高达2 000 m,桥梁所在河道以南的山体高度变化较为平缓,靠北一侧山体高耸陡峭,地势复杂多变,图1所示即为该桥梁走向以及周围地貌示意.

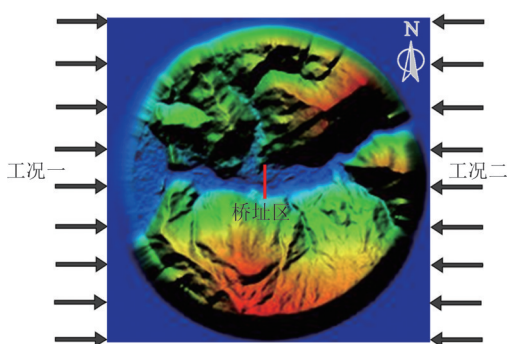


图1 桥位地形图(含过渡段)

Fig.1 Terrain around the bridge site
(including the transition section)

2 CFD数值模拟

2.1 模型建立及网格划分

首先,通过 Global Mapper 获得精度为 15 m 的地形高程数据,截取以桥轴线中心为圆心、直径为 12 km 的地形为研究对象.为减少截断地形边界处因高差过大而产生气流分离和绕流,在边界处设置 1 km 宽的过渡段.其次,将已有地形图的三维曲面数据点信息导入 MATLAB 中,根据过渡段曲线公式设置相关参数^[31],得到含过渡段的三维地形高程数据点,如图 1 所示.进一步地,将含过渡段的地形点阵导入 Gambit 中,创建桥址周围复杂山区地形的三维模型.为完成桥址区地形建模,以桥梁中心为计算域中心,计算域整体布置为 16 km×16 km×4 km,如图 2 所示.

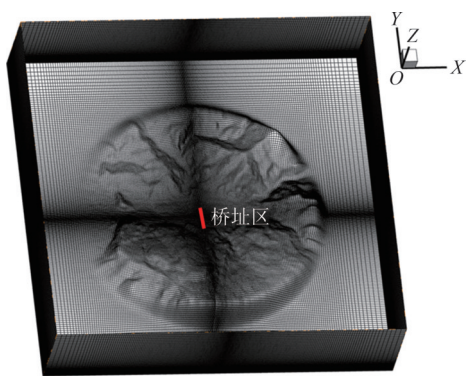


图2 计算域及网格划分

Fig.2 Computational domain and the mesh

由于山区地形较为复杂,为了减小非结构化网格的离散误差,确保数值模拟结果的准确性,本文采用质量较高、均匀性好、计算过程收敛迅速的六面体网格进行整个计算域的结构化网格划分.为了保证

数值模拟结果的准确性,近地面区域进行网格局部加密,竖直方向第一层网格高度为 4.5 m,且竖直方向的网格延伸率小于 1.2.考虑到本文主要研究桥址区周围的风场特性,在划分水平方向的网格时,以桥位为中心,对桥梁周围网格进行加密,水平方向网格间距从 20 m 逐渐延伸至 110 m,网格划分细节如图 2 所示,最终划分的计算域网格总数为 507 万.

2.2 边界条件与计算设置

实际工程中,影响大跨度桥梁安全的主要是横桥向来流.因此,计算中共设置沿横桥向方向的 2 个来流工况,如图 1 所示,分别设西、东两侧为速度入口以实现不同来流方向的切换,来流速度设置为 10 m/s 的均匀流.计算域底部为壁面边界,计算域顶部及侧面为压力出口.相比于以往研究中采用的 RANS 模型,LES 方法可以得到流体瞬时运动的脉动量,同时又能保证计算精度^[32-33].因此,本文采用 LES 方法和 WALE 亚格子模型,采用 SIMPLEC 算法对离散方程组进行求解,同时对流项的求解采用有界中心差分格式,而瞬态项的求解选择二阶隐式格式.计算时,LES 时间步长为 0.001 s,残差收敛精度设为 10^{-6} .

2.3 风速监测点设置

考虑到后续桥梁抖振响应计算的需要,研究中在桥梁上设置足量监测点.其中,沿大桥的桥轴线方向设置 118 个监测点,1 号监测点位于桥轴线中心,59 号监测点位于桥梁北端,监测点间距约 12 m.风剖面监测点分别布置在四个桥塔处,各桥塔处沿高度方向的监测点间距约为 9 m,由塔底延伸至塔顶.图 3 展示了桥梁北侧风速监测点布置,风速监测点布置呈南北对称.

2.4 数值模拟结果

2.4.1 平均风速和风攻角沿主梁分布

桥梁抗风设计中比较关心横桥向风速,且桥址区的主导风向也接近于横桥向方向,故本研究选取沿横桥向的两个风向作为来流风向,并针对两个来流方向,绘制主梁高度处的横桥向风速云图如图 4 所示.由图可知,工况一下,虽然河道入口由宽变窄,来流在此处加速,但在此之后到桥址区之前所经河道由窄变宽,来流风速减缓,且部分气流分散到河道的分支,造成桥址区风速降低.工况二下,来流首先经过狭窄的支流河道进入桥梁所在的主河道,由于受两侧山体的挤压,在此过程中风速有一定的加速效应,导致工况二来流时河道内风速整体提高,大于工况一下的桥址区风速.

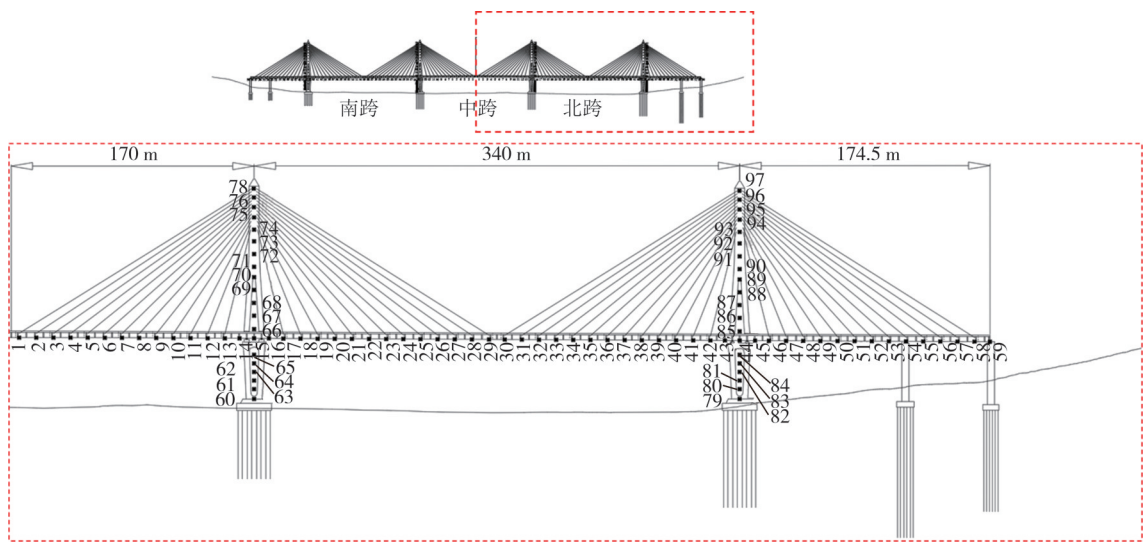


图3 桥梁北侧风速监测点位置示意

Fig.3 Schematic diagram of monitoring points on the north side of the bridge

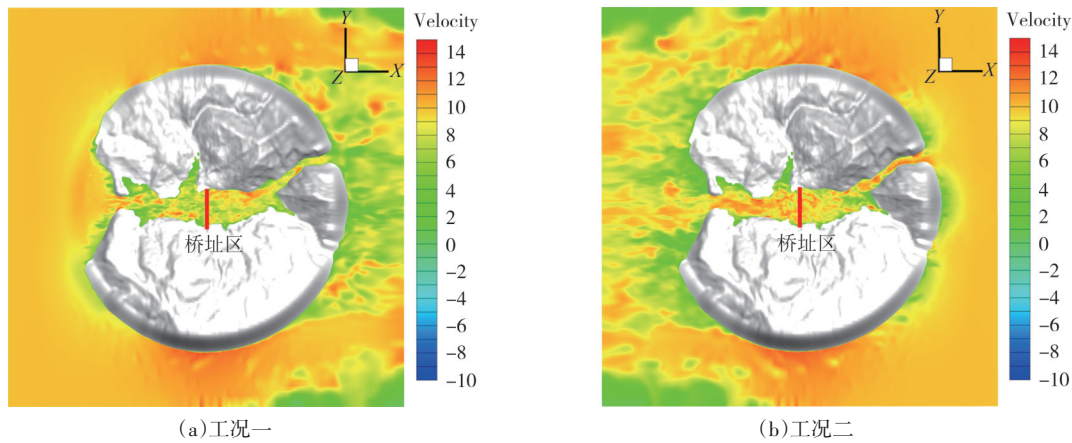


图4 桥面高度处风速云图

Fig.4 Wind speed contours at the height of the bridge deck

图5为不同工况下沿桥轴线各监测点的横桥向、顺桥向以及竖向风速变化曲线,由图可知,不同方向的来流下,桥址区风速分布存在很大差异.此外,受桥址区两侧山体的影响,沿桥轴线三个方向的风速分布都呈现明显的非均匀性.具体地,工况一来流下主梁高度处横桥向风速在跨中处较小,从跨中到桥梁两端风速先增大后减小.工况二来流下主梁高度处横桥向风速在跨中处较大,从跨中到桥梁两端风速逐渐减小,且工况二来流下的横桥向风速要明显大于工况一来流.不同工况来流下,顺桥向风速沿桥跨变化趋势相似,风速绝对值总体沿桥跨从南到北(图中坐标值较小方向为南、较大方向为北,下同)先减小后增大;而竖向风速沿桥跨方向变化趋势呈近似抛物线型但方向相反.

桥址区风攻角沿主梁分布如图6所示,由图可知,由于受周围复杂地形的影响,风攻角沿主梁方向

变化范围大,呈现显著的非均匀性.具体地,靠峡谷两侧的风攻角较大,尤其是靠近北面山体一侧,两个来流方向下的风攻角绝对值均超过 10° .分析原因,这主要是由于桥梁南侧附近地势变化较为平缓,桥梁北侧附近的山体较陡峭,地势起伏大,气流流经此处时受地形影响显著,最终导致桥梁南侧附近的风攻角较小,而北侧附近的风攻角较大.此外,不同工况来流下沿桥跨向风攻角也有明显差异,从变化趋势上看,工况一与工况二来流下的风攻角沿桥跨方向变化趋势具有近似反对称现象,工况一以负风攻角为主,工况二以正风攻角为主.从数值上看,工况一来流下,风攻角变化范围为 $-12.4^{\circ}\sim 2.1^{\circ}$,而工况二来流下的风攻角变化范围为 $-0.4^{\circ}\sim 10.9^{\circ}$.在三主跨范围内,两来流方向下的风攻角整体范围在 $-3.0^{\circ}\sim 4.5^{\circ}$,但相较于规范中平坦地形的值该值还是偏大的.

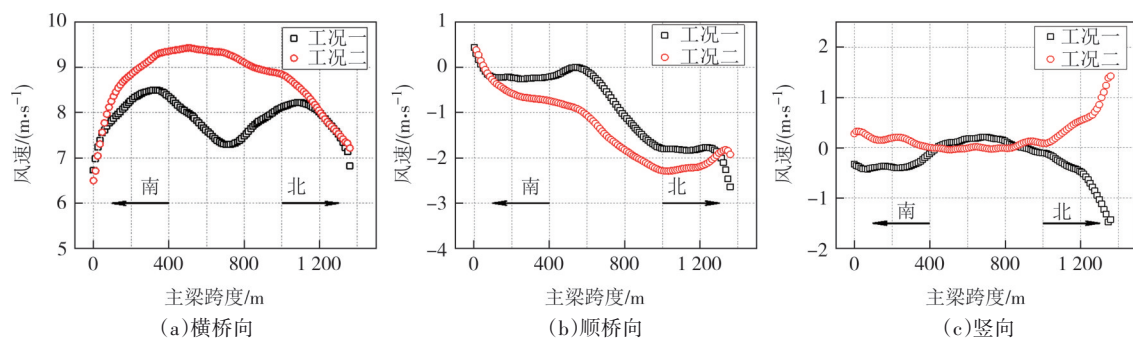


图5 沿主梁风速变化

Fig.5 Wind speeds varying along the bridge deck

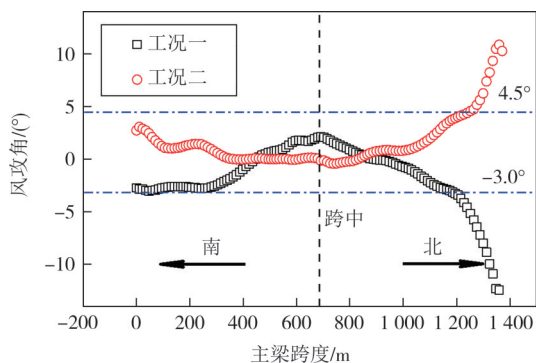


图6 沿主梁风攻角变化

Fig.6 Wind attack angles varying along the bridge deck

2.4.2 风剖面分布

山区地形对桥址区风剖面有很大影响,我国桥梁抗风规范采用的是指数律形式.为了研究桥址区风剖面的分布规律,沿各桥塔布置一定数量的风速监测点,不同来流下各桥塔位置处的横桥向风速变化情况及用指数拟合的结果如图7所示.由图可知,横桥向风速随离地高度的增加而增大,主要是因为

低空受地形摩阻作用较大,但随着高度的增加,山谷变得相对开阔,地形的影响逐渐减弱.此外,风剖面沿桥跨变化明显,图7(b)(c)展示了靠近主跨跨中两桥塔的风剖面,风速范围在7 m/s到10 m/s之间,用指数律拟合结果较好.图7(a)(d)分别为靠近南、北山体的两桥塔风剖面,受附近山体影响,风速变化范围较大,用指数律拟合效果不佳,幂指数 α 在0.15到0.20之间,其值在规范规定的B、C类地表类型之间.同时注意到,各来流方向的风速受到复杂地形的影响,导致相同位置不同来流方向下的风剖面存在很大差异.如图7中,南边塔、南中塔以及北中塔处的横桥向风速在工况二来流下明显大于工况一,而北边塔处两种工况来流下风剖面接近.此现象与图5(a)所示沿桥跨横桥向风速分布规律相符,由图5可知,在北边塔(跨度为1 210 m位置)以南,工况二横桥向风速明显大于工况一;在北边塔以北,两种工况的横桥向风速则较接近.

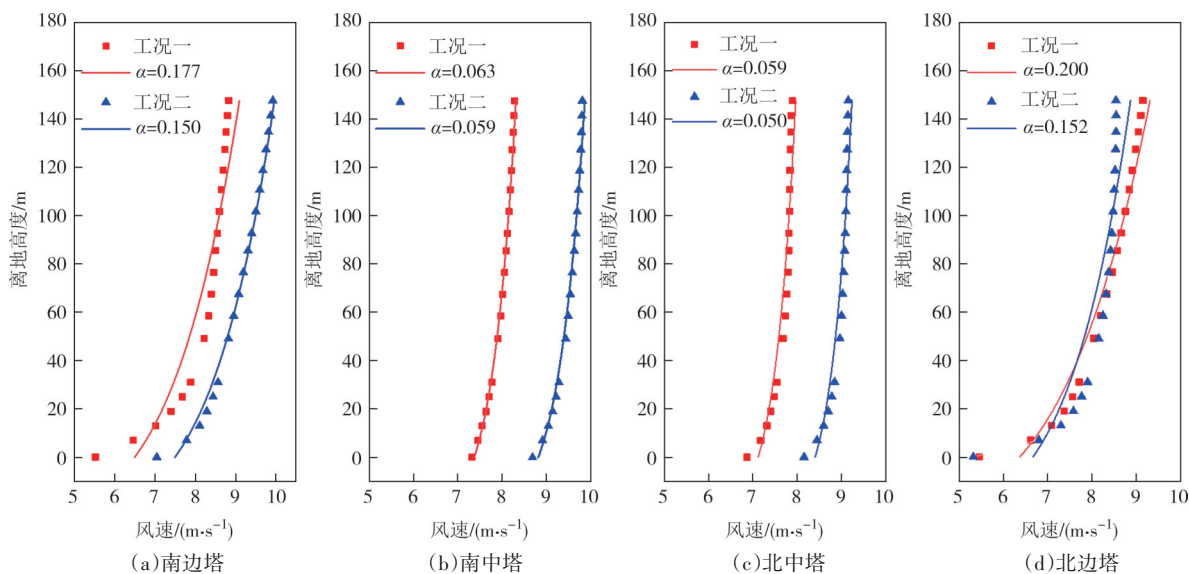


图7 桥塔位置处横桥向风剖面

Fig.7 Profiles of transverse wind speed at tower positions

2.4.3 紊流强度

紊流强度反映风的脉动强度,不同来流方向下顺风向紊流强度(I_u)、横风向紊流强度(I_v)和竖向紊流强度(I_w)沿桥轴线的变化情况如图8所示.由图可知,沿桥跨方向的紊流强度值整体波动范围较大,非均匀特性明显,靠近桥梁两端的 I_u 和 I_v 相对于跨中更高, I_w 相对于跨中则较低. I_u 和 I_v 沿桥跨方向变化幅度高达100%,其中 I_u 的变化范围基本在0.12~0.25之间.此外,还计算了不同方向上每个测点处的紊流强度比值,如图9所示.由图可知,在不同来流下多数测点的紊流强度比值与规范建议值($I_u:I_v:I_w=1:0.88:0.5$)不同.具体地,工况一和工况二来流下,多数测点的 I_w/I_u 值均大于规范建议值,这是因为来流经过高低起伏的山体,对竖向脉动风速分量干扰较大,导致竖向紊流强度也增大.在工况二来流下,主梁南半侧的 I_v/I_u 值与规范建议值比较吻合,而北侧 I_v/I_u 与规范建议值差异较大,这也是由于北侧的整体地形相对于南侧地形要更复杂.

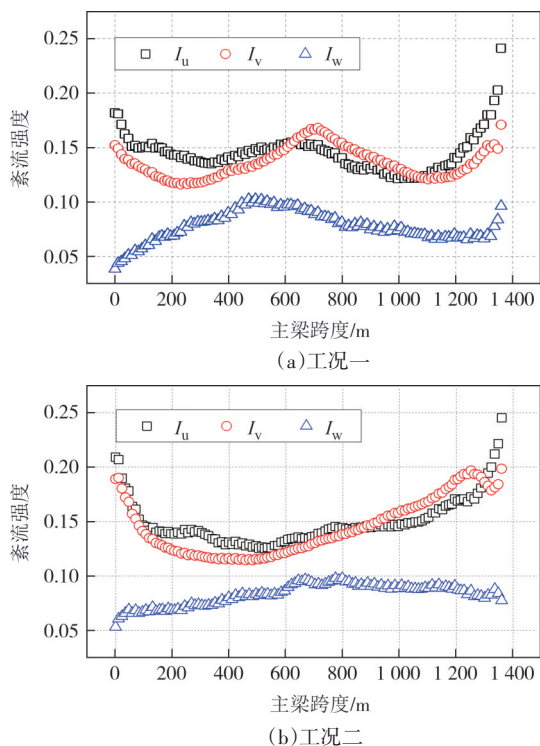


图8 紊流强度沿桥轴向分布

Fig.8 Distributions of turbulence intensity along the bridge axis

2.4.4 脉动风速功率谱

脉动风速功率谱密度函数表征紊流能量在不同频域下的分布状况,目前我国规范^[7]推荐采用Kaimal谱和Panofsky谱,高度 Z 处平均风速 U 的顺风向脉动风速谱和竖向脉动风速谱分别表示如下:

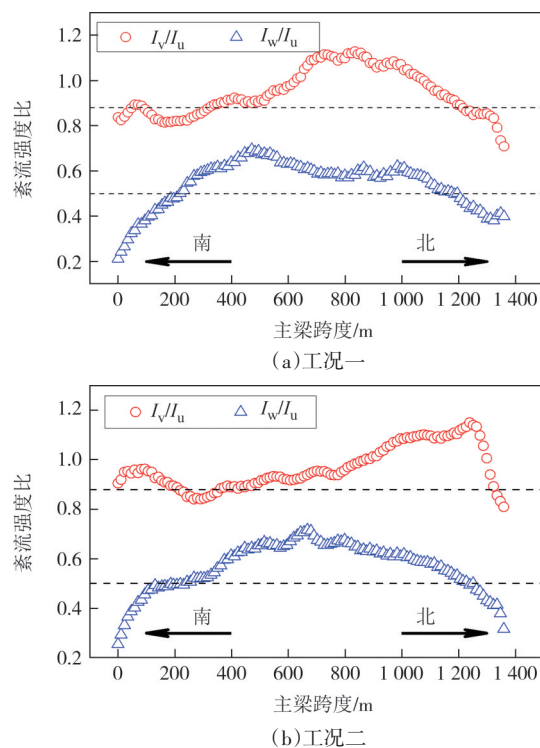


图9 紊流强度比值沿桥轴向分布

Fig.9 Distributions of turbulence intensity ratios along the bridge axis

$$\frac{nS_u(n)}{(u^*)^2} = \frac{200f}{(1 + 50f)^{5/3}} \quad (1)$$

$$\frac{nS_w(n)}{(u^*)^2} = \frac{6f}{(1 + 4f)^2} \quad (2)$$

式中: $S_u(n)$ 、 $S_w(n)$ 分别表示顺风向、竖向脉动风速谱密度函数; n 表示风的脉动频率; $f = n \cdot Z/U$ 为相似律坐标; u^* 表示气流摩阻速度.

由前文工况一和工况二横桥向风速及风剖面对比结果可知,工况二为较不利工况,因此下文将以工况二为例开展进一步研究.本文采用LES方法可以较准确地得到桥址区的脉动风速时程,然后根据脉动风速时程数据可得到工况二来流下沿桥跨不同位置处的顺风向及竖向脉动风速谱(简称计算谱),如图10所示.由图可知,沿桥跨不同位置处的脉动风速谱变化显著.对比计算谱与Kaimal谱可知,除高频处由于网格尺寸过滤因素,使计算谱有一定衰减外,其余频段的计算谱与Kaimal谱吻合较好,这主要是由于来流方向与河道走向相同,途经地形较为平缓,顺风向脉动风速谱的能量传递与耗散受周围山体地形的影响较弱.而竖向脉动风速对地形起伏较为敏感,受复杂山区高低起伏地形的影响,其风速谱采用Panofsky谱描述效果相对较差.由此可知,规范的推荐谱并不完全适用于复杂山区地形.

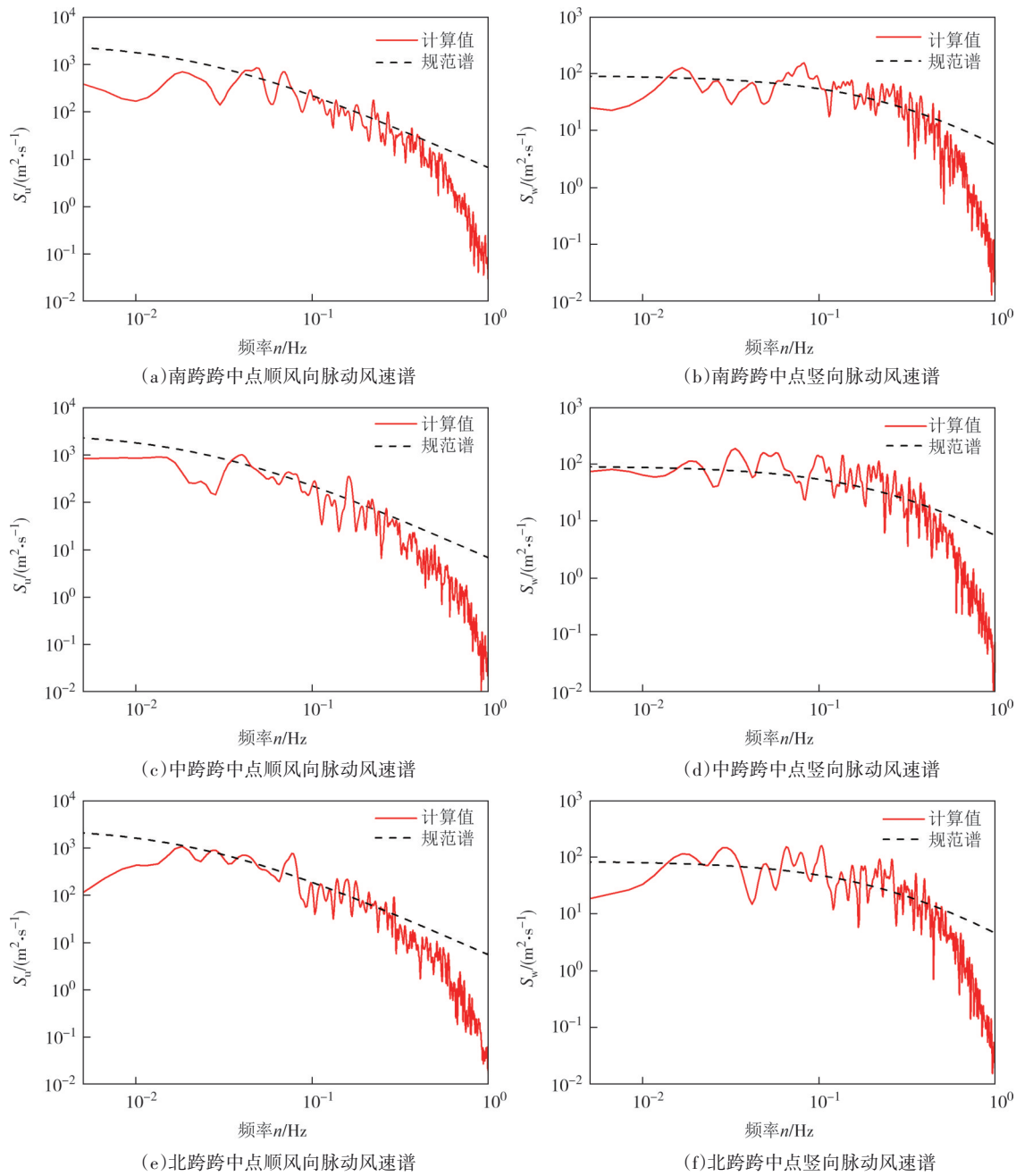


图10 工况二来流下主梁高度处脉动风速谱

Fig.10 Fluctuating wind speed spectra at the height of the bridge deck under the case 2

2.4.5 脉动风速空间相关性

桥梁抗风研究中通常用相干函数来描述脉动风速的空间相关性,脉动风速相干函数由式(3)计算:

$$\text{Coh}_{ij} = \frac{|S_{ij}(n)|}{\sqrt{S_{ii}(n)S_{jj}(n)}} \quad (3)$$

式中: Coh_{ij} 为*i,j*两测点脉动风速相干函数; $S_{ij}(n)$ 为*i,j*两测点脉动风速互谱; $S_{ii}(n)$ 、 $S_{jj}(n)$ 分别为*i,j*两测点脉动风速自谱; n 为频率。

我国《公路桥梁抗风设计指南》中采用Davenport

相干函数经验公式^[8]:

$$\text{Coh}(\Delta, n) = \exp\left(-C_y \frac{n \cdot \Delta}{U_0}\right) \quad (4)$$

式中: n 为频率; Δ 为空间两点的距离; U_0 为空间两点的平均风速; C_y 为衰减系数,取值范围建议为7~20。

为分析沿主梁的脉动风速空间相关性,通过获取沿主梁各监测点的脉动风速时程,将其代入式(3)计算得到相干函数,并分别采用式(4)、式(5)拟合。由于主梁跨中附近桥梁风致振动比较显著,因此对

距离跨中 ± 165 m范围内的脉动风速时程进行空间相关性分析,如图11所示.由图可知,当风场中两点距离较近时,脉动风速的空间相关性较强,此时采用式(4)的Davenport相干函数拟合效果较好.随着两点距离增大,衰减系数 C_y 逐渐增大,与建议值相差也较大,此时用Davenport相干函数拟合效果较

差.由图可知,当频率为0时,相干函数不为1,因此将Davenport相干函数修改为式(5)^[34-35]:

$$\text{Coh}(n) = K \cdot \exp\left(-C \cdot \frac{n \cdot \Delta}{U_0}\right) \quad (5)$$

式中: U_0 为风场中两点的风速平均值; Δ 为两点之间的距离.

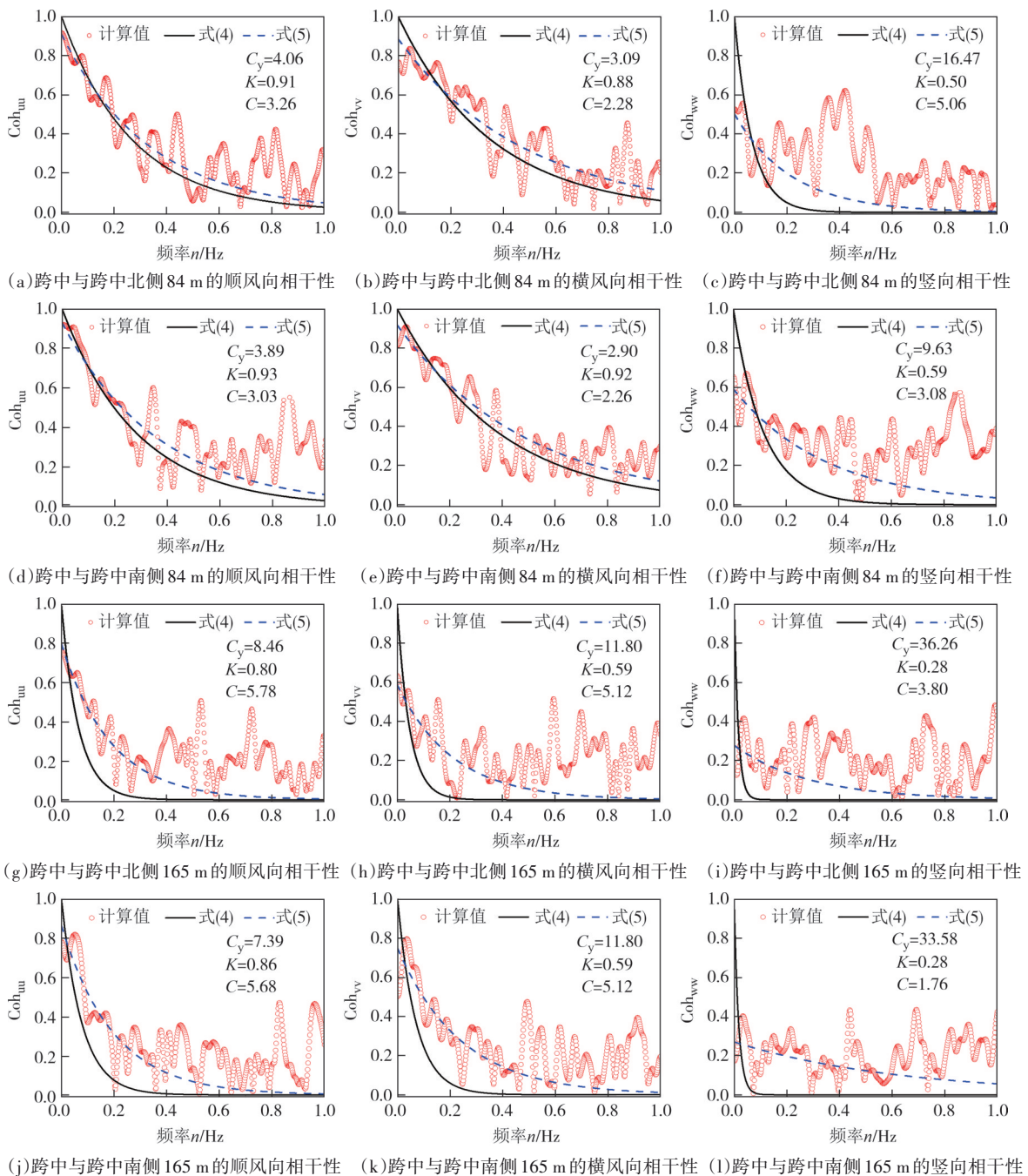


图11 不同测点脉动风速的相干性

Fig.11 Coherence of fluctuating wind speed between different monitoring points

图11给出了采用式(4)和式(5)两种拟合公式的对比曲线.由图可知,用式(5)拟合效果更好,说明式(5)更适合描述该组测点的相关性.尤其当两测点

距离较远时,采用Davenport相干函数来描述两点竖向脉动风速空间相关性的偏差较大.在式(5)中,参数 K 表示频率接近0时两点的相干程度,衰减系数 C

决定高频时的相干程度.对于不同测点组, u 、 v 方向上拟合参数 K 值比较接近,其值明显大于 w 方向的,这一结果表明两个测点在水平方向脉动风速空间相关性明显高于竖向的.尤其是当两测点相距较远(如 165 m)时,竖向脉动风速相干函数接近于 0,如图 11(i)(1)所示.产生此种现象的原因是,来流主要沿水平方向发展,竖向风速分量比较小,且受山体高度起伏较大的影响,竖向脉动风速分量相对于水平方向更易受到干扰.此外,从图 11 中可看出,距跨中相同的距离时,沿桥跨北侧的各方向脉动风速空间相关性与南侧有明显差异,尤其是在竖向,这也反映出桥址区复杂地形对脉动风速相干函数的影响较为复杂.

3 桥梁抖振响应分析

3.1 桥梁有限元模型建立

采用大型通用有限元分析软件 ANSYS 建立桥梁动力计算模型,主要由主梁、桥塔、桥墩、拉索等构成.主梁采用 Beam4 梁单元模拟;桥塔、桥墩采用 Beam188 单元模拟;斜拉索采用杆单元 Link10 模拟,初始拉力通过输入单元初应变实现,大小为其设计值;恒载质量采用质量单元 Mass21 模拟.主梁采用“单脊梁+鱼骨”模型,全桥共有 755 个节点,1 093 个单元.定义 X 轴为横桥向, Y 轴为竖向, Z 轴为顺桥向.全桥有限元模型及主要振型频率如图 12 和表 1 所示.

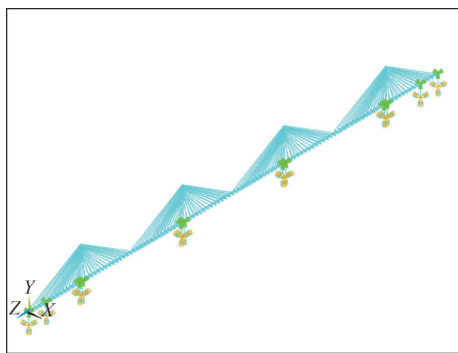


图 12 桥梁有限元模型

Fig.12 Finite element model of the bridge

3.2 主梁抖振力计算

传统数值仿真分析方法在计算桥梁抖振时,通常将桥址区风场视为均匀风场,即将跨中处的平均风速、平均风攻角和脉动风速谱等参数视为全桥分

表 1 桥梁主要自振频率

Tab. 1 Main natural frequencies of the bridge

模态阶次	频率/ Hz	振型描述
1	0.285 5	主梁一阶对称竖弯
2	0.411 3	主梁一阶反对称竖弯
3	0.481 0	纵飘+主梁二阶反对称竖弯
4	0.536 5	主梁二阶对称竖弯
5	0.551 2	主梁一阶对称扭转
6	0.600 1	主梁一阶反对称扭转
7	0.616 7	主梁一阶对称侧弯
8	0.648 4	主梁二阶对称扭转
9	0.668 7	主梁三阶反对称竖弯
10	0.729 4	主梁三阶对称竖弯

析的基本参数.当桥梁处于平坦均匀场地时,传统数值仿真分析方法是可行的.然而,当桥梁处于山区峡谷复杂地形时,传统数值仿真方法由于忽略了桥址风场的非均匀性,从而对桥梁抖振响应精度产生影响^[22-23].为此,为对比传统数值仿真分析方法的精度,本文将通过上文 LES 方法计算的桥址区脉动风场与传统数值仿真分析方法合成的脉动风场作为风荷载输入,分别计算出桥梁的抖振响应并进行对比.传统数值仿真分析方法首先获取桥梁跨中处的风速、风攻角、目标脉动风速谱等参数;其次,将以上参数视为基本参数,根据均匀风场以及相干函数等假设,通过谐波合成法模拟得到主梁各节点的脉动风速时程;进一步,根据抖振准定常理论,将模拟的脉动风速时程转换为主梁上的抖振力时程,并计算抖振响应.而本文的方法则是首先在桥梁上设置足量的风速监测点,如图 3 所示;然后采用 LES 方法直接计算得到各点的脉动风速时程,并代入抖振力公式中计算抖振力时程,而不引入额外的风特性经验假设,最后计算桥梁的抖振响应.根据准定常理论,主梁单位长度引起的抖振力可表示为:

$$\begin{aligned}
 D_b(t) &= \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[2C_D(\alpha) \frac{u(t)}{U} + C'_D(\alpha) \frac{w(t)}{U} \right], \\
 L_b(t) &= \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[2C_L(\alpha) \frac{u(t)}{U} + (C'_L(\alpha) + C_D(\alpha)) \frac{w(t)}{U} \right], \\
 M_b(t) &= \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[2C_M(\alpha) \frac{u(t)}{U} + C'_M(\alpha) \frac{w(t)}{U} \right] \quad (6)
 \end{aligned}$$

式中: ρ 为空气密度; U 为来流平均风速; $C_D(\alpha)$ 、 $C_L(\alpha)$ 、 $C_M(\alpha)$ 分别为攻角为 α 时主梁断面的阻力系数、升力系数和力矩系数; B 为构件截面沿主流方向的尺寸.

通过节段模型试验获得主梁三分力系数如图 13 所示。

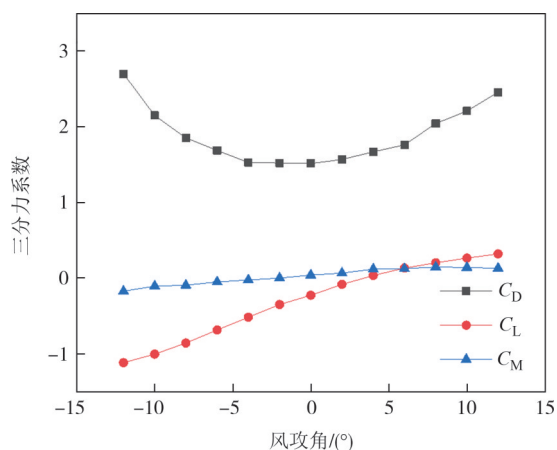


图 13 主梁三分力系数

Fig.13 Three-component coefficients of the main beam

3.3 抖振响应对比分析

3.3.1 不同来流方向下桥梁抖振响应

由 2.4 节分析可知,受山区复杂地形的影响,不同方向的来流所形成的桥址区风场特性有明显差距.为了研究来流方向对桥梁抖振响应的影响,选择不同来流方向下的风速时程计算抖振力并对比分析

抖振响应.首先,将 LES 方法计算得到的不同工况下脉动风速时程换算到实桥中^[36];其次,将脉动风速时程代入到式(6)中,即可得到主梁上各点的抖振力时程;进一步,利用 ANSYS 软件将抖振力时程施加到主梁节点上,计算并获取桥梁的抖振响应结果.

图 14 给出了不同来流方向下主梁上各点的抖振竖向位移、侧向位移和扭转位移的均方根值.由图可知,工况二来流下竖向位移、侧向位移和扭转位移 RMS 值总体上大于工况一的.这主要是由于工况二的横桥向风速明显大于工况一,如图 5(a)所示.此外,不同来流方向下沿桥跨的抖振响应变化趋势也有明显差异,如工况二来流下竖向位移和扭转位移 RMS 值总体上以跨中为中心呈对称趋势,侧向位移沿跨向则呈现北跨小于南跨、中跨的趋势;而工况一来流下竖向和侧向位移呈对称趋势,扭转位移并没有呈现对称趋势.此外,工况二来流下,在中跨的跨中处扭转位移最大,而工况一最大扭转位移出现在南跨的跨中点附近.出现上述现象主要与主梁横桥向风速沿桥跨的分布有关,结合图 5(a)可知,两种工况下扭转位移出现峰值的位置与其横桥向风速出现峰值的位置基本一致.

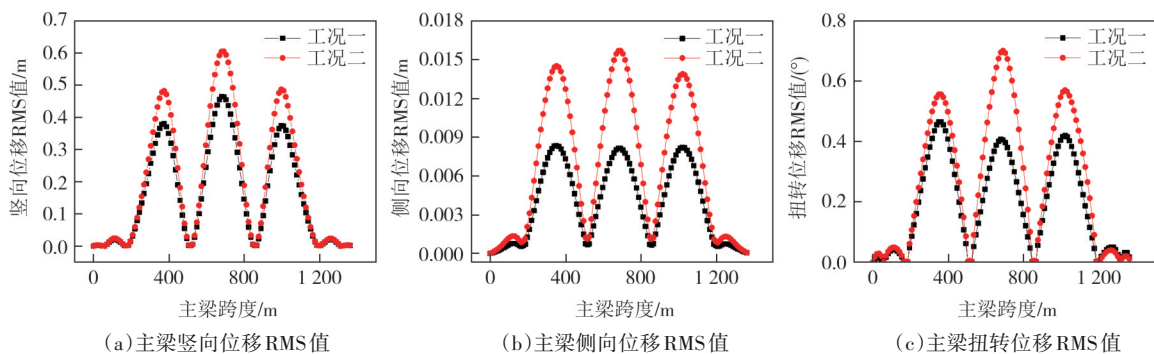


图 14 不同来流方向下主梁位移 RMS 值

Fig.14 RMS values of displacement of the main beam under different incoming wind directions

3.3.2 LES 方法计算风场与传统谐波合成法、规范建议谱模拟风场下桥梁抖振响应对比

由 3.3.1 节可知,工况二来流下主梁的抖振响应总体大于工况一的,因此工况二为较不利工况.为此,以工况二为例计算了 LES 方法下桥梁的抖振响应.进一步,为对比传统谐波合成法模拟的脉动风场、规范建议的 C 类脉动风场以及 LES 方法计算的脉动风场分别对主梁抖振响应的影响,图 15 给出了以上三种风场下主梁的抖振响应.其中,谐波合成法模拟的脉动风场与规范建议的 C 类脉动风场分别以工况二跨中点脉动风速谱、C 类风场规范建议脉动

风速谱作为目标谱模拟脉动风场,而跨中处风速、风攻角等风参数均与 LES 方法计算的结果一致.由图可知,在谐波合成法风场下,主梁的竖向位移、侧向位移以及扭转位移 RMS 值均小于基于 LES 方法的计算结果.具体地,对于竖向位移,沿桥跨 RMS 值前者峰值比后者峰值小 57%;对于侧向位移,前者峰值比后者峰值小 62%;对于扭转位移,前者峰值则比后者小 24%.在规范建议谱风场下,沿桥跨竖向位移 RMS 值小于 LES 方法的计算结果,而侧向位移和扭转位移则明显大于 LES 方法的计算结果.具体地,对于竖向位移,沿桥跨 RMS 值前者峰值比后者峰值小 37%;

对于侧向位移,前者峰值比后者峰值大 85%;对于扭转位移,前者峰值则比后者大 161%. 分析原因,由 2.4.4 节 LES 方法计算风谱与规范建议风谱的对比及表 2 可知,跨中处顺风向(即横桥向)规范建议谱的能量、紊流强度均高于 LES 方法,而主要频率下竖向脉动风速谱能量、紊流强度小于 LES 方法,造成跨中

点横桥向脉动风速大于 LES 方法,竖向脉动风速小于 LES 方法,结合三分力系数分布,最终可得规范建议谱风场跨中点 L_b 小于 LES 方法计算的结果,但 D_b 、 M_b 大于 LES 方法计算的结果. 而谐波合成法模拟的脉动风场下桥梁的抖振响应与 LES 方法计算结果的差异,将在下文中说明.

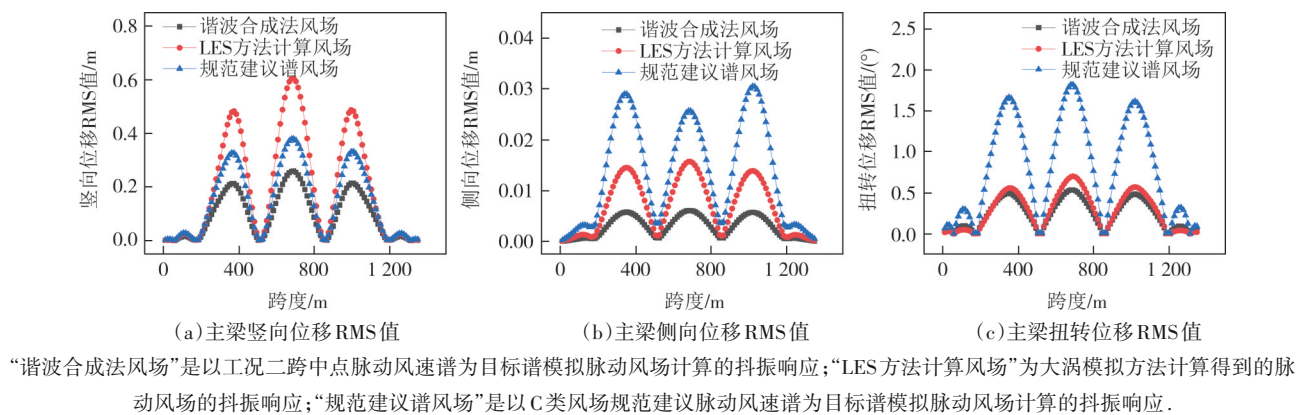


Fig. 15 RMS values of displacement of the main beam under different fluctuating wind fields

表 2 不同脉动风场下风参数对比

Tab. 2 Comparison of wind parameters under different fluctuating wind fields

风场	风速	风攻角	脉动风速谱	跨中紊流强度	
				I_u	I_w
谐波合成法风场	工况二跨中风速(55.69 m/s)	工况二跨中风攻角(-0.15°)	工况二跨中脉动风速谱	0.145 0	0.092 8
LES方法计算风场	工况二沿桥跨风速	工况二沿桥跨风攻角	工况二沿桥跨脉动风速谱		
规范建议谱风场	工况二跨中风速(55.69 m/s)	工况二跨中风攻角(-0.15°)	C类风场规范建议谱	0.174 9	0.089 0

此外,三种脉动风场的抖振响应 RMS 值沿跨向变化趋势不同.在规范建议谱风场和谐波合成法风场下,三个方向的沿桥跨抖振响应 RMS 值均以跨中为中心呈对称趋势.然而在 LES 方法计算的脉动风场下,侧向抖振响应的 RMS 值沿桥跨不是呈对称趋势,其北跨值相较于南跨值和中跨值偏低.三种脉动风场下跨中各方向抖振位移时程极大值如表 3 所示.由表 3 可知,在谐波合成法风场和规范建议谱风场下,三个方向的跨中抖振响应极大值与 LES 方法计算的脉动风场下跨中抖振响应的差异明显.结合图 15 和表 3 可知,采用规范建议谱风场所得的抖振响应相较于 LES 方法所得的抖振响应在竖向位移结果上偏不安全,但侧向和扭转位移结果上却偏于保守.采用谐波合成法风场所获取的抖振响应相较于 LES 方法所得的抖振响应在结果上偏不安全.

3.3.3 非均匀风场特性对抖振响应的影响

由 3.3.2 节可知,在谐波合成法风场和规范建议

表 3 主梁跨中点位移时程极大值对比

Tab. 3 Comparison of the maximum values in the time history of displacement response at the mid-span point of the main beam

对比项	竖向位移/m	侧向位移/m	扭转位移/($^\circ$)
谐波合成法风场	0.662	0.023	1.719
LES方法计算风场	1.814	0.066	2.693
规范建议谱风场	1.065	0.096	5.841

谱风场下,主梁三个方向的抖振响应与 LES 方法计算的脉动风场下抖振响应的差异明显,这是由于谐波合成法风场和规范建议谱风场不具备非均匀风速和非均匀风攻角等特性.为分析非均匀风场特性对桥梁抖振响应的影响,下面将分别考察非均匀风速非均匀风攻角、非均匀风速均匀风攻角、均匀风速均匀风攻角和均匀风速非均匀风攻角四种来流条件下的抖振响应,如图 16 所示.其中,非均匀风速和非均匀风攻角为 LES 方法计算的工况二下沿主梁方向的风速及风攻角分布,由于规范建议谱与 LES 方法计

算的跨中脉动风速谱或紊流强度差异明显,两者可比性不大,因此均匀风速和均匀风攻角工况选用的是上述谐波合成法风场模拟所得.

由图 16 可知,沿桥跨竖向和侧向位移在非均匀风速的两组来流下变化趋势较相似,在均匀风速的两组来流下变化趋势也较相似.从数值上分析,在非均匀风速非均匀风攻角和非均匀风速均匀风攻角来流下,沿桥跨的竖向位移和侧向位移明显大于均匀风速均匀风攻角和均匀风速非均匀风攻角的,说明非均匀风速对桥梁抖振竖向位移和侧向位移起主导作用.分析原因,在非均匀风速时,桥梁跨中附近竖

向紊流强度较均匀风速时偏大,而顺风向紊流强度接近,结合三分力系数和沿主梁跨中附近的风速分布可知,非均匀风速时跨中附近抖振力明显大于均匀风速时,这将造成非均匀风速时主梁的抖振响应要大于均匀风速的.与此同时,对于主梁竖向位移和侧向位移,非均匀风速非均匀风攻角与非均匀风速均匀风攻角来流下相差较小,均匀风速均匀角和均匀风速非均匀风攻角之间差距也较小,这反映出非均匀风攻角对主梁竖向抖振响应和侧向抖振响应影响较弱.由图 6 可知,这与非均匀风攻角时(即工况二时)跨中附近的风攻角变化范围较小有关.

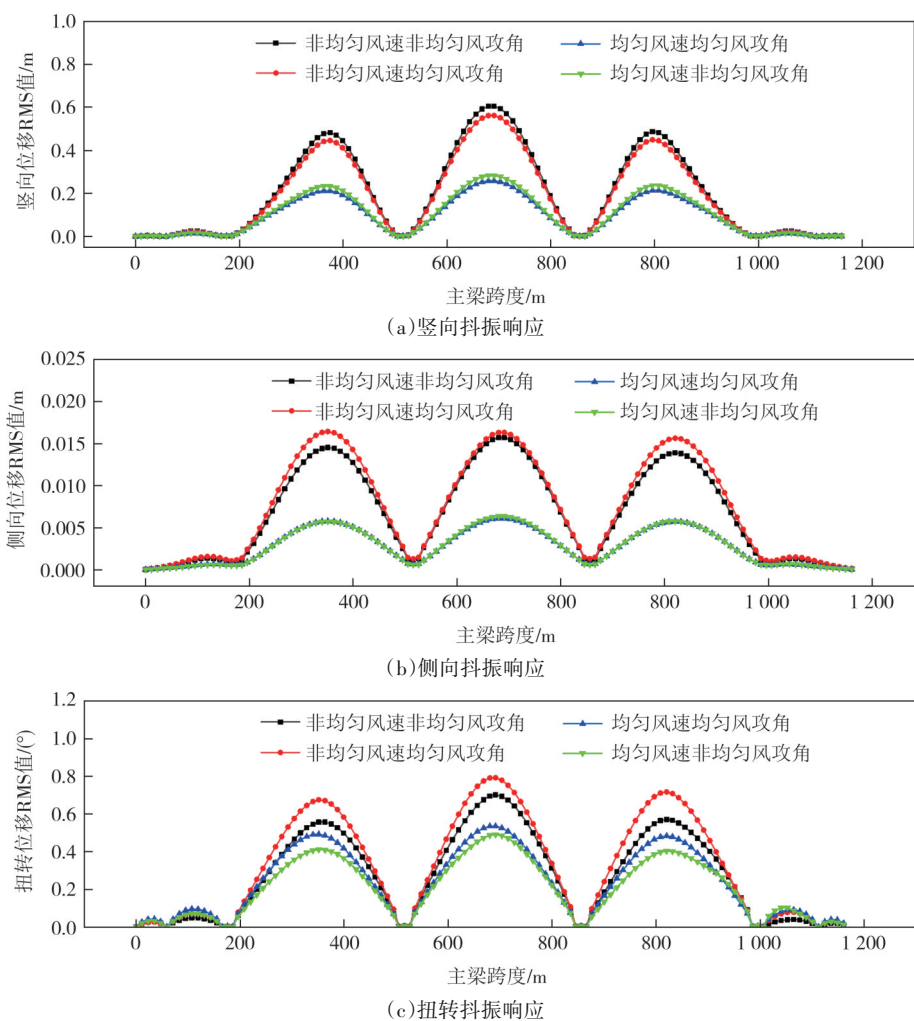


图 16 非均匀风场特性对主梁抖振响应的影响

Fig. 16 Effects of non-uniform wind field characteristics on the buffeting response of the main beam

进一步,由图 16(c)可知,四种来流下扭转变移沿桥跨变化趋势及数值差距并不大,这与竖向位移和侧向位移沿桥跨向的变化规律不同.从数值上看,主梁扭转位移从大到小依次为非均匀风速均匀风攻角、非均匀风速非均匀风攻角、均匀风速均匀风攻角和均匀风速非均匀风攻角.总体上,均匀风攻角来流

下的主梁扭转响应大于非均匀风攻角来流,这也是由于均匀风攻角来流时其风攻角选取的是工况二跨中处的风攻角,约为 -0.15° ,而非均匀风攻角来流时,其风攻角选取的是工况二来流下沿桥跨的风攻角分布.由图 6 可知,工况二来流下沿桥跨的绝大多数风攻角为正;而由图 13 可知,正攻角下的扭矩系数并

非是单调变化的,导致均匀风攻角下整体扭矩大于非均匀风攻角的,最终导致了均匀风攻角下引起的扭转抖振响应较大.结合图16(a)(b)可知,相较于桥梁竖向位移和侧向位移,非均匀风攻角对扭转响应的影响增强,但非均匀风速对其影响仍占主要因素.

为进一步对比以上四种来流情况下抖振响应之间的差异,选取跨中位置进行抖振响应谱分析,如图17所示.由图可知,主梁跨中竖向位移谱的前2个主频率分别对应该桥第1、4阶振型,与桥梁竖向的自振频率吻合良好;侧向位移谱峰值对应第7阶振型,即主梁一阶对称侧弯;扭转位移谱前2个主频率

分别对应第5、8阶振型,即主梁一阶对称扭转振型和二阶对称扭转振型.由此可见,跨中三个方向抖振位移谱峰值分别与各方向的第1阶自振频率对应,因此跨中竖向、侧向、扭转振动主要以各自的一阶振型贡献为主.对于竖向和侧向抖振位移谱,非均匀风速来流下的两组数据变化趋势相似,同时,均匀风速来流下的两组数据变化趋势也相似.在数值上,非均匀风速来流下,跨中竖向和侧向抖振位移谱明显高于均匀风速来流的,而跨中扭转响应谱与均匀来流相比差距则并不明显,此现象与图17描述的抖振响应沿桥轴线变化趋势基本一致,说明非均匀风速对跨中竖向位移和侧向位移谱的影响占主导因素.

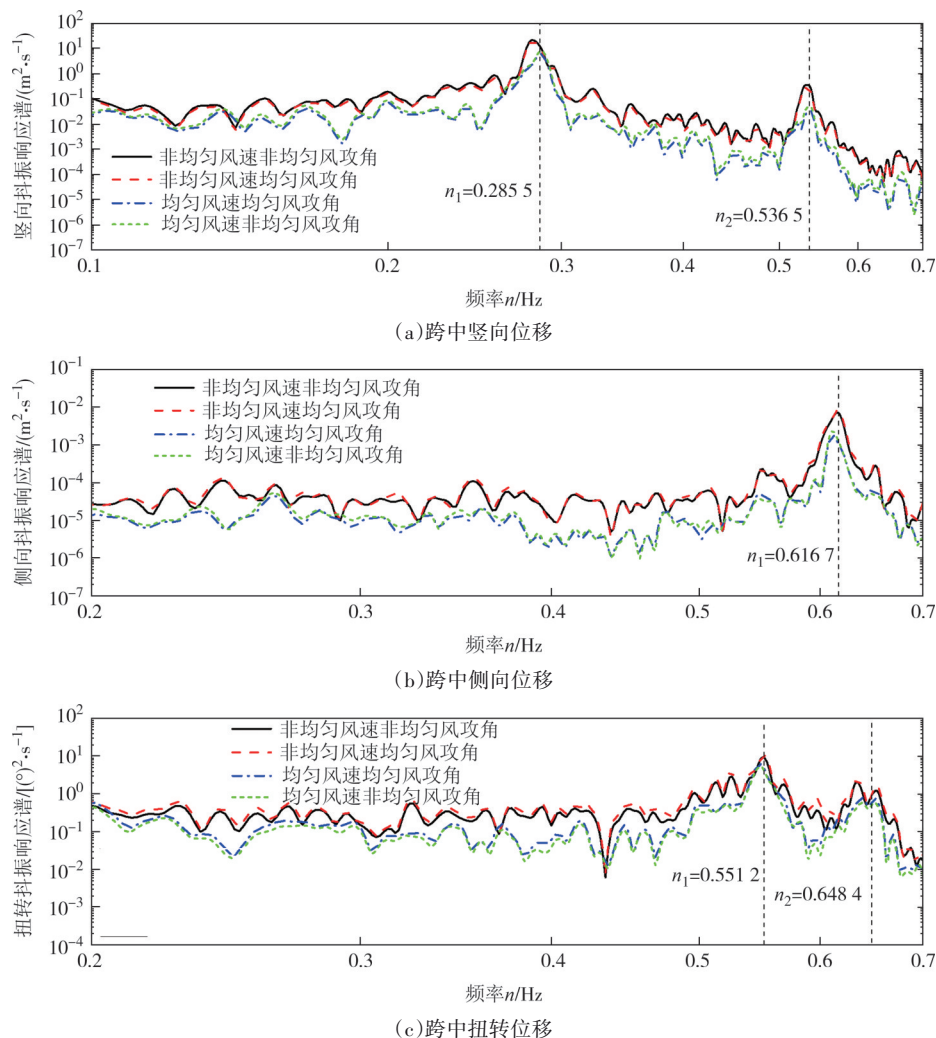


图17 主梁跨中点抖振响应谱

Fig. 17 Buffeting response spectra at the mid-span point of the main beam

4 结论

为研究复杂山区桥址风场特性及其对桥梁抖振

响应的影响,以位于山区某多塔斜拉桥为工程背景,采用LES方法模拟了桥址区风场沿桥跨的变化特性,并采用传统谐波合成法模拟风场、规范建议谱风场和LES方法计算的脉动风场计算了主梁的抖振响

应.主要得到如下结论:

1)复杂山区的桥址区风场非均匀特性明显,沿桥跨的平均风速、风攻角、紊流强度变化较大.在工况一和工况二来流下,风攻角沿桥跨变化趋势呈反对称状,工况一以负风攻角为主,工况二以正风攻角为主.工况二来流下,沿跨向横桥向风速和抖振响应总体大于工况一.

2)与平坦地形不同,由于受山体高低起伏地形的影响,桥址区紊流强度比、竖向脉动风速谱以及相关函数均与规范建议值不同,反映了规范建议值在复杂山区风场中的适用性有限.

3)通过三种风场下主梁抖振响应的对比研究发现,采用谐波合成法模拟脉动风场时,难以准确考虑桥址区的非均匀风场特性,使其计算的抖振响应相较于LES方法的计算结果偏于不安全,采用规范建议谱风场所得的抖振响应相较于LES方法所得的抖振响应在竖向位移结果上偏不安全,但侧向位移和扭转位移结果上却偏于保守.

4)通过对不同来流条件下主梁抖振响应分析可知,主梁的竖向、侧向和扭转响应的变化趋势主要受非均匀风速因素主导.与竖向位移和侧向位移不同,非均匀风攻角对扭转响应的影响增强.非均匀风速来流下,跨中竖向和侧向抖振响应谱明显高于均匀风速来流的,而跨中扭转响应谱与均匀风速来流相比差距不明显.

5)考虑实际桥梁来流情况,入口条件为具有风剖面的紊流将会得到更准确的桥址区风特性,在后续研究中,将分析入口紊流情况下复杂地形桥址区的风特性及桥梁抖振响应.

参考文献

- [1] HUANG G Q, JIANG Y, PENG L L, et al. Characteristics of intense winds in mountain area based on field measurement: focusing on thunderstorm winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 190: 166–182.
- [2] 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): 113–122. ZHANG Z T, TAN B H, CHEN T L. 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): 113–122. (in Chinese)
- [3] 张明金, 李永乐, 余显全, 等. 桥塔上风传感器安装位置对测量结果的影响[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(4): 617–622. ZHANG M J, LI Y L, YU X Q, et al. Influence of wind sensor location on bridge tower on measurement results [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(4): 617–622. (in Chinese)
- [4] YU C J, LI Y L, ZHANG M J, et al. Wind characteristics along a bridge catwalk in a deep-cutting gorge from field measurements [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 186: 94–104.
- [5] ZHANG J Y, ZHANG M J, LI Y L, et al. Comparison of wind characteristics at different heights of deep-cut canyon based on field measurement [J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(2): 219–233.
- [6] LIAO H L, JING H M, MA C M, et al. Field measurement study on turbulence field by wind tower and Windcube Lidar in mountain valley [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 197: 104090.
- [7] 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018. Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2018. (in Chinese)
- [8] SIMIU E, SCANLAN R H. Wind effects on structures: fundamentals and applications to design [M]. 3rd ed. New York: John Wiley, 1996.
- [9] HARIKRISHNA P, ANNADURAI A, GOMATHINAYAGAM S, et al. Full scale measurements of the structural response of a 50 m guyed mast under wind loading [J]. Engineering Structures, 2003, 25(7): 859–867.
- [10] ZHAO L, YAOJUN G E. Wind induced buffeting reliability of long-span cable-stayed bridge using stochastic finite element method [J]. Disaster Advances, 2013, 6(3): 32–40.
- [11] 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): 60–65. 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 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 60–65. (in Chinese)
- [12] SONG J L, LI J W, 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.
- [13] XU H T, HE Y, LIAO H L, et al. Experimental study of a wind field in a long-span bridge site located in mountainous valley terrain [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2013, 7(1): 44–50.
- [14] YAN L, GUO Z S, ZHU L D, et al. Wind tunnel study of wind structure at a mountainous bridge location [J]. Wind and Structures, 2016, 23(3): 191–209.
- [15] 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): 502–510. XU F Y, ZHOU J. Review on the characteristics of wind fields at bridge site in mountainous areas [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(3): 502–510. (in Chinese)
- [16] 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): 530–542.

- 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 [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2021, 51 (5): 530-542. (in Chinese)
- [17] 祝志文, 张士宁, 刘震卿, 等. 桥址峡谷地貌风场特性的CFD模拟[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(10): 13-17.
- ZHU Z W, ZHANG S N, LIU Z Q, et al. CFD simulation of wind field at bridge site on gorge terrain [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2011, 38 (10): 13-17. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 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[J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(5): 915-922.
- WU L H, ZHANG M J, LI Y L, et al. Numerical simulation of wind characteristics at bridge sites in complex mountainous terrains [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(5): 915-922. (in Chinese)
- [20] 靖洪森, 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[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(16): 200-207.
- JING H M, LIAO H L, ZHOU Q, et al. A numerical simulation method for wind field characteristics of mountainous valley at bridge site [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38 (16): 200-207. (in Chinese)
- [21] YANG W C, LIU Y K, DENG E, et al. Characteristics of wind field at tunnel-bridge area in steep valley: field measurement and LES study [J]. *Measurement*, 2022, 202: 111806.
- [22] HAN Y, SHEN L, XU G J, et al. Multiscale simulation of wind field on a long-span bridge site in mountainous area [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 177: 260-274.
- [23] 赵博文. 山区风环境数值模拟与高墩刚构桥风致抖振时域分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- ZHAO B W. Numerical simulation of wind environment in mountain regions and time domain wind-induced buffeting analysis for rigid frame bridge with high-piers [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese).
- [24] 张剑锋, 徐向东, 蓝先林, 等. 山区大跨径钢桁梁悬索桥静风稳定及抖振响应研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2023, 43(2): 247-258.
- ZHANG J F, XU X D, LAN X L, et al. Study of stable and shaking response in the mountainous area of large span steel truss suspension bridges [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2023, 43(2): 247-258. (in Chinese)
- [25] CHEYNET E, JAKOBSEN J B, SNÆBJÖRNSSON J. Buffeting response of a suspension bridge in complex terrain [J]. *Engineering Structures*, 2016, 128: 474-487.
- [26] 王俊, 李加武, 王峰, 等. 简化U形峡谷风速分布及其对悬索桥抖振响应的影响[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2023, 53(6): 1658-1668.
- WANG J, LI J W, WANG F, et al. Wind speed distribution in simplified U-shaped valley and its effect on buffeting response of long-span suspension bridge [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(6): 1658-1668. (in Chinese)
- [27] SHEN Z F, LI J W, LI R, 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.
- [28] 苏益, 李明水, 杨阳, 等. 山区单悬臂廊桥结构抖振响应及等效风荷载[J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(1): 121-128.
- SU Y, LI M S, YANG Y, et al. Buffeting response and equivalent wind load of single cantilever corridor bridge in mountainous areas [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(1): 121-128. (in Chinese)
- [29] 张亮亮, 刘会, 杨转运, 等. 重庆大宁河特大桥成桥状态抖振响应分析[J]. *实验流体力学*, 2010, 24(5): 42-46.
- ZHANG L L, LIU H, YANG Z Y, et al. Full bridge buffeting response analysis of Chongqing Daning River Bridge [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2010, 24 (5): 42-46. (in Chinese)
- [30] 龙晓鸿, 李黎, 胡亮. 四渡河悬索桥抖振响应时域分析[J]. *工程力学*, 2010, 27(增刊1): 113-117.
- LONG X H, LI L, HU L. Time domain analysis of buffeting responses of Sidu River Suspension Bridge [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(Sup.1): 113-117. (in Chinese)
- [31] HU P, HAN Y, XU G J, et al. Numerical simulation of wind fields at the bridge site in mountain-gorge terrain considering an updated curved boundary transition section [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 31(3): 04018008.
- [32] 刘志文, 陈以荣, 辛亚兵, 等. 基于边界层风洞的下击暴流稳态风场特性数值模拟[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(7): 10-20.
- LIU Z W, CHEN Y R, XIN Y B, et al. Numerical simulation on steady wind field characteristics of downburst based on atmosphere boundary layer wind tunnel [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2020, 47 (7): 10-20. (in Chinese)
- [33] 张宏达, 韩省思, 刘太秋, 等. 基于超大涡模拟的燃烧室气动性能仿真研究进展[J]. *航空发动机*, 2023, 49(4): 68-79.
- ZHANG H D, HAN X S, LIU T Q, et al. Progress of combustor aerodynamic performance simulation based on very large eddy simulation [J]. *Aeroengine*, 2023, 49(4): 68-79. (in Chinese)
- [34] HUI M C H, LARSEN A, XIANG H F. Wind turbulence characteristics study at the stonecutters bridge site: part II: wind power spectra, integral length scales and coherences [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(1): 48-59.
- [35] 胡朋. 深切峡谷桥址区风特性风洞试验及CFD研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- HU P. Study on wind characteristics at bridge site in a deep-cutting gorge by wind tunnel test and CFD method [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [36] SHEHATA A Y, EL DAMATY A A, SAVORY E. Finite element modeling of transmission line under downburst wind loading [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2005, 42(1): 71-89.