

# 大坝条件下曲梁桥风振响应研究



黄枭雄<sup>1</sup>, 陈家豪<sup>1, 2,\*</sup>

<sup>1</sup>重庆科技学院建筑工程学院, 重庆 401331

<sup>2</sup>齐鲁理工学院土木工程学院, 山东济南 250200

**摘要:** 梁的线性曲线分布可能会对曲梁桥产生有利或比例的影响, 为明确曲率对桥梁的风振响应的影响规律, 本文结合风洞试验和数值模拟曲梁桥风振的研究。通过节段模型风洞试验获取曲梁桥风振响应, 利用 ICEM 软件建立大坝有限元模型并进行 CFD 数值计算, 通过对比数值计算结果和试验结果统计值验证有限元建模的准确性。然后分析 5 种曲率情况和 5 种风速工况对曲梁桥风振响应的影响规律, 最后分析同一曲率下, 大坝的存在对曲梁桥风振响应的影响规律。结果表明桥梁的位移平均值和均方根随着曲率的增大呈先增大后减小的趋势; 桥梁的位移最不利曲率为 0.0024; 随着曲率的增加, 桥梁高阶模态共振响应被激发出来, 且高阶模态共振频率的带宽逐步增大; 大坝的存在会使平均风速减小; 随着风速的增大, 桥梁的位移平均值和均方根均增大; 当曲梁桥曲率较小时, 大坝的存在会明显降低风荷载作用下曲梁桥的位移, 但当曲率增大到一定程度时, 这种趋势明显削弱。

**关键词:** 曲梁桥; 曲率; 风速; 数值模拟; 风振响应

**DOI:** [10.57237/j.cear.2023.02.002](https://doi.org/10.57237/j.cear.2023.02.002)

# Study of Wind Vibration Response of Curved Beam Bridge Under Dam Conditions

Xiaoxiong Huang<sup>1</sup>, Jiaohao Chen<sup>1, 2,\*</sup>

<sup>1</sup>School of Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China

<sup>2</sup>College of Civil Engineering, Qilu Institute of Technology, Jinan 250200, China

**Abstract:** The linear curve distribution of the beam may have favorable or proportional effects on the curved beam bridge. In order to clarify the effect law of curvature on the wind vibration response of the bridge, this paper combines wind tunnel tests and numerical simulations of wind vibration of curved beam bridge. The wind vibration response of curved girder bridge is obtained through segmental model wind tunnel test, finite element model of the dam is established and CFD numerical calculation is performed by ICEM software, and the accuracy of finite element modeling is verified by comparing the statistical values of numerical calculation results and test results. Then, we analyze the influence law of five curvature cases and five wind speed conditions on the wind vibration response of the curved girder bridge, finally, analyze the influence law of the presence of the dam on the wind vibration response of the curved beam bridge at the same curvature. The results show that the mean displacement and root mean square of the bridge tend to increase and then decrease with the increase of curvature; the most unfavorable curvature of the bridge displacement is 0.0024; with the increase of curvature, the higher order modal resonance response of the bridge is excited and the

基金项目: 重庆科技学院校企协同创新中心开放研究项目资助 (YKJCX2220624).

\*通信作者: 陈家豪, 790183431@qq.com

收稿日期: 2023-04-28; 接受日期: 2023-06-29; 在线出版日期: 2023-07-24

<http://www.cearesearch.org>

bandwidth of the higher order modal resonance frequency gradually increases; The presence of dams reduces the average wind speed; As the wind speed increases, the average displacement and root mean square of the bridge also increase; When the curvature of the curved girder bridge is small, the presence of the dam will significantly reduce the displacement of the curved girder bridge under wind load, but when the curvature increases to a certain degree, this tendency is significantly weakened.

**Keywords:** Curved Beam Bridge; Curvature; Wind Speed; Numerical Simulation; Wind-induced Vibration Response

## 1 引言

中国国土面积十分广阔，地势呈西高东低，由此造就了长江 6000 米的落差，为水力发电提供了便利，仅三峡大坝就可供全中国总用电量的 15%。同时类似于三峡大坝这类国家重大工程在近几年来也成为了旅游景点，为方便人们通行、游览和交通运输等，桥梁在这类特殊场景下起到了重要作用。

而曲梁桥比一般桥梁更为轻盈，且具有柔性大、质量轻、抗风性能好、设计更加美观的特点，风荷载为桥梁的主要控制荷载，常应用于山地环境下的人行景观桥。同时对于曲梁桥而言，和直梁桥不同的是，它每一部分会受到不同风向角的来流风荷载，使其难以进行整体分析。

对桥梁的风振响应研究。风洞试验研究是空气动力效应研究的一个重要内容，至今为止，节段模型和气动弹性模型的风洞试验仍然是深入研究各种复杂的流固耦合振动现象的有效手段[1-3]通过气弹模型的风洞试验对江海海峡大桥桥面的颤振稳定性进行研究，从试验中观察了桥面的位移响应和加速度响应，验证了该桥在施工和运营阶段的颤振稳定性较好[4-6]。同时数值模拟也是研究的一个重要内容，通过 CFD 计算分析，斜风作用下斜拉桥桥塔对来流风场具有明显干扰作用，且斜风荷载和桥塔耦合作用对桥梁的风振响应影响不能被忽略[7]。通过对双主梁情况下的曲梁桥进行了三维振型分析[8-10]，结果表明侧向刚度不如竖向刚度好。

对于大坝这类大型挡风结构而言，对于抗风性能的要求十分高。利用测量风洞的试验，得出了孔隙度、障道长度等对桥梁风障挡风性的影响规律，同时对桥梁风障的建模方法以及挡风性评估方法也开展了深入研究，研究结果显示多孔度对风障挡风性的影响很大[11]。提供了一个海上平台挡风墙高度的模式，可以根据封闭空间的通风要求的高度对挡风墙的高度进行迭代运算，从而实现了通风量数值模拟和运算[12]。为了

解决超长跨度海峡悬索桥的抗风稳定性问题，提出了一种双曲抛物面空间混合索系超长跨度悬索桥。研究表明，采用临时辅助抗风索可以从根本上解决特大跨径悬索桥的抗风稳定性问题[13]。

有限元模拟是研究桥梁抗振、损伤以及可靠性分析等方面的一种重要手段。通过有限元模拟，对盾构隧道侧穿越引起的桥梁桩基变形进行分析，了解桥梁桩基变形的原因并提出相应的解决方案，为城市隧道工程和桥梁工程的建设提供研究方向[14]。通过建立桥梁结构在最大双悬臂状态下的有限元模型，进行自振特性分析，并在风场中进行模拟，基于 Scanlan 准稳态表达式计算作用在桥梁上的抖振力，为桥梁施工阶段的风激振动安全性评价提供参考[15]。

本文以某曲率单边桥为例，开展风洞试验研究和数值分析研究。通过全桥气弹模型风洞试验获取桥梁的风振响应。建立大坝 CFD 有限元模型，结合风洞试验数据验证建模的准确性。然后设计 5 种桥梁曲率工况和 5 种风速工况，然后分析桥梁曲率和风速对坝后曲梁桥风振响应的影响规律。

## 2 曲梁桥模拟及大坝的有限元分析

### 2.1 节段模型测力试验

本次风洞试验在中国天津水运工程科学研究院 TK-400 直流风洞试验室中进行。风洞试验长 15.0 m，宽 4.4 m，高 2.5 m。风洞形式为直流吹出式，风机功率 400 kW，试验风速 0~30 m/s 连续可调。测振试验需满足刚性阶段模型外形相似、阻塞比小于 5% 以及刚度足够大的要求[16]，根据风洞试验室和案例桥梁尺寸，确定阶段模型的几何缩尺比为 1: 100，节段模型主要参数、制作好的节段模型以及本次试验所采用的风场详见 Zhao 等人[17]文章中的 Table 1、Figure 3 及 3.2

章节。位移幅值由测振试验确定, 试验共 29 个风速工况, 最小风速工况为 2.07 m/s, 最大风速工况为 12.10 m/s。

## 2.2 曲梁桥和大坝的有限元模型的建立

模型以中国汉中市某玻璃景观桥为分析案例, 由主梁、次梁和悬臂梁组成, 中心线在设计时考虑为一段圆弧 (如图 1 所示)。主梁的弧长和直线长度 L 分别为 118.98m 和 112.24m。如图 1 所示, 建立坐标系, 坐标原点为桥左端沿 Y 轴负方向与外圈梁跨中节点所在弧线的切线的交点, 横风向为沿 X 轴正向, 顺风向为沿 Y 轴正向, 重力加速度方向为沿 Z 轴负向。

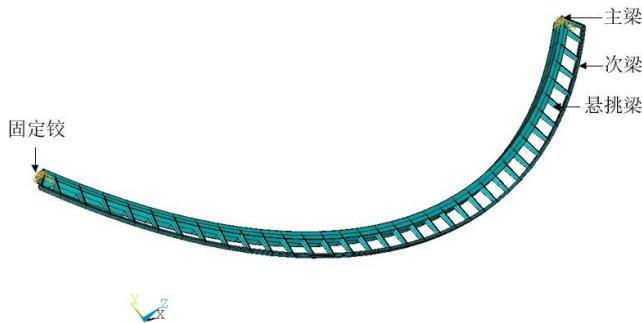


图 1 曲梁桥整体示意图

大坝对曲梁桥所在风场的影响复杂, 并且相关研究的文献资料有限, 难以借鉴。项目在 2.1 节中模拟好的 B 类地貌类别下, 通过大坝模型模拟流场边界条件, 在 2.1 节中风洞试验所测的风速保持一致, 评估大坝对风场特性的影响。在风向角 90°下, 选取风洞实验室在桥位高度处的来流风速为 3.46 m/s 时进行模拟。根据 2.1 节中风洞试验设计数据, 通过 ICEM 软件建立模型如图 2 所示。

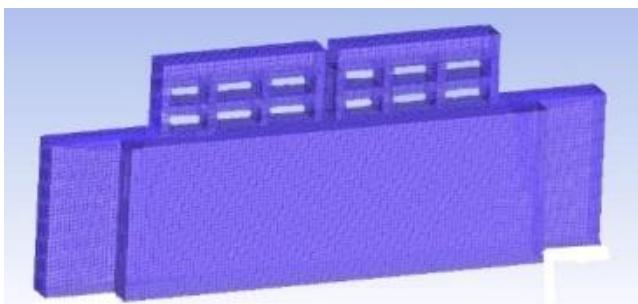


图 2 大坝模型网格

## 2.3 风场的模拟及特性验证

Davenport 提出的风速功率谱  $S_v(n)$  可按下式计算:

$$S_v(n) = \frac{4Kv_{10}^2 x^2}{n(1+x^2)^{4/3}} \quad (1)$$

$$x = \frac{1200n}{v_{10}}, n \geq 0 \quad (2)$$

式中,  $n$  为脉动风速频率,  $K$  为地面粗糙度系数, 对于平坦开阔的 B 类地貌取 0.005。

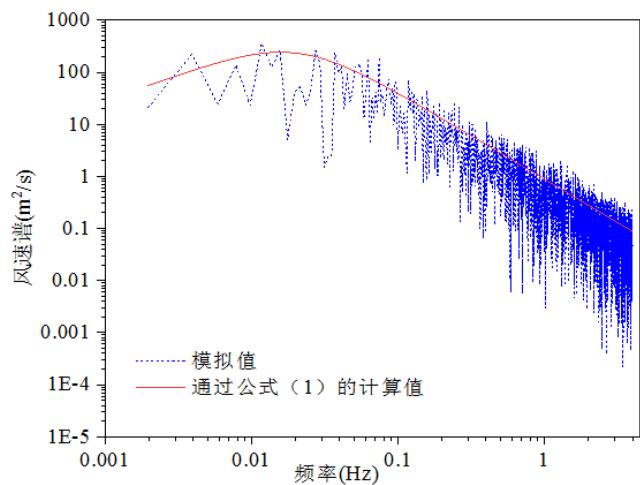


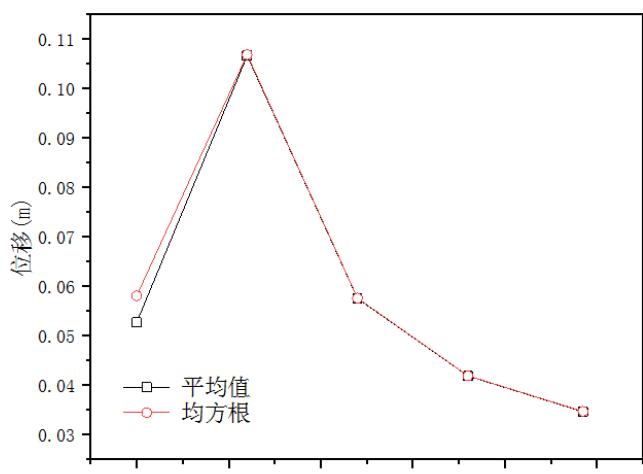
图 3 风速功率谱

将模拟跨中 90 m 高度处的风速绘制出功率谱与按式(1)和(2)处理的  $S_v(n)$  进行对比如图 2 所示。由图 3 可知, 风场模拟值与计算值吻合度较好。基于 2.1 节中 Zhao 等人得到的气动力系数和准定常假定, 表明桥梁施加的风荷载满足预期要求。

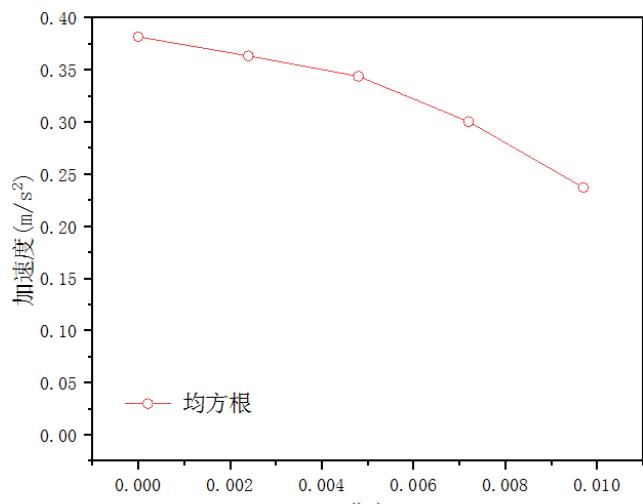
## 3 曲梁桥风振响应的有限元分析

### 3.1 曲率变化对曲梁桥风振响应的影响分析

将 Fluent 模拟计算得到的风速时程值按 1: 10 的风速相似比转化, 将转换后的值带入 2.1 节中的 Figure 1(a) 模型[17]中进行瞬态分析, 得出曲梁桥的风振位移、加速度的时程值, 选取 CBUSB 跨中节点处的计算结果进行分析, 结果如图 4 所示。



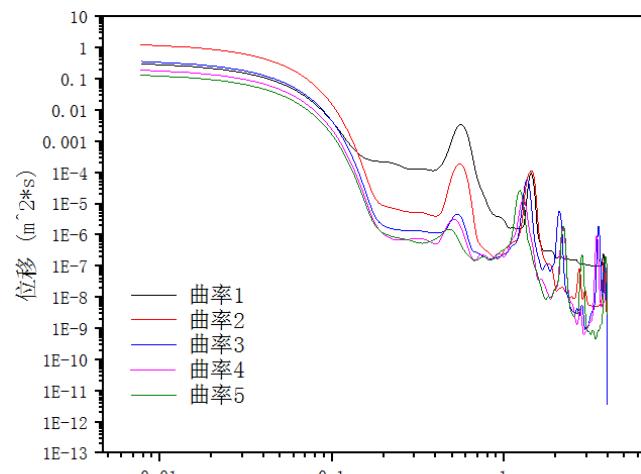
(a) 位移



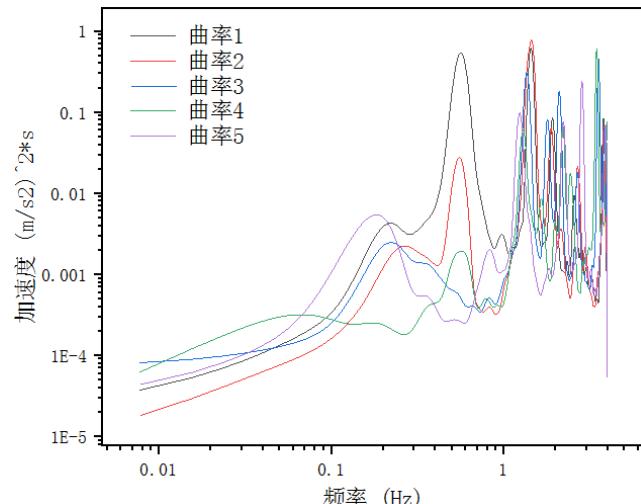
(b) 加速度

图 4 曲率对桥梁风振响应的统计分析

曲梁桥以平均风响应为主。由图 4(a)可知, 在风荷载作用下, 随着曲率的增大, 跨中位置处的顺风向位移响应平均值和均方根呈先增大后减小的趋势, 且当桥梁曲率为 0.0024 时, 桥梁位移响应平均值与均方根达到最大值 0.10688 和 0.10689, 表明随着桥梁峰值响应在曲率为 0.024 时发生, 此时为桥梁最不利曲率值, 设计时应当避免此类情况。同时当曲率达到 0.0024 后, 随着曲率的增大, 桥梁的位移响应平均值与均方根递减, 说明当曲率超过最不利曲率后, 曲率的增大有利于横桥向人行舒适度的提高。由图 4(b)可知, 随着曲率的增加, 加速响应的均方根下降。结合图 4(a)和 4(b), 说明在一定范围内, 增大桥梁曲率, 有利于提高行人的舒适度。



(a) 位移



(b) 加速度

图 5 曲率对桥梁风振响应的频谱分析

图 5 显示了桥梁的频谱分析。曲率 1-5 的一阶频率为 0.555, 0.547, 0.539, 0.508, 0.477 Hz, 如图 5(a)所示。随着曲率的增加, 曲梁桥的频率在降低, 这说明曲率增大使得共振响应的激发频率靠近了风的卓越频率带宽 0.006 Hz~0.037 Hz。随着曲率的增加, 桥梁高阶模态共振响应被激发出来, 且高阶模态共振频率的带宽逐步增大, 但高阶模态峰值比低阶模态峰值要小, 对于高风速下人行舒适度控制要考虑高频减振, 可采取宽频减振法。随着曲率的增加, 在 1~4 Hz 带宽范围内, 随着曲率增加, 共振加速度能量分布在 1~4 Hz 带宽范围内逐渐从稀疏变为密集, 如图 5(b)所示, 这可能会发生模态耦合振动现象。

### 3.2 风速变化对曲梁桥风振响应的影响分析

采用与 3.2 节一致的分析方法, 得到风速变化对曲梁桥风振响应的影响, 如图 6 所示。

由图 6(a)可知, 在风荷载的作用下, 随着风速的增大, 跨中位置处的顺风向位移响应平均值和均方根值呈增大的趋势, 桥梁振动也越大, 不稳定性越来越高。同时随着风速的增大, 两者的差值越来越大, 且均方根值明显大于平均值, 说明动力响应大于静力响应。由图 6(b)可知随着风速的增大, 加速度的均方根值增大。总体而言随着风速的增大, 桥梁的不稳定性越加明显, 行人舒适度越差。

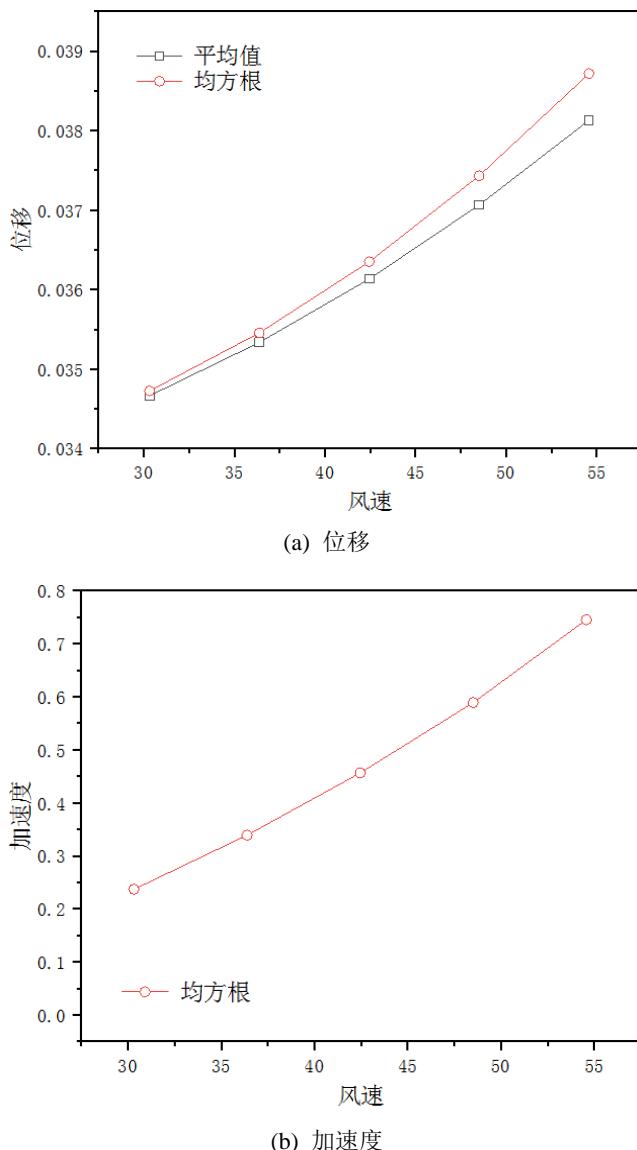


图 6 风速对桥梁风振响应的统计分析

### 3.3 大坝存在对曲梁桥风振响应的影响分析

采用与 3.2 节一致的分析方法, 得到在相同曲率下曲梁桥在无大坝情况下位移响应, 并与有大坝的情况进行对比, 如图 7 所示。

曲梁桥以平均风响应为主。由图 7(a)可知, 在风荷载作用下, 随着曲率的增大, 无大坝条件下曲梁桥跨中位置处的顺风向位移响应平均值和均方根呈先增大后减小的趋势, 且当桥梁曲率为 0.0024 时, 桥梁位移响应平均值与均方根达到最大值 0.10976 和 0.10998, 表面随着桥梁峰值响应在曲率为 0.024 时发生, 而在同一曲率下有大坝条件下桥梁位移响应平均值与均方根为 0.10688 和 0.10689, 明显小于无大坝条件下的曲梁桥跨中位置处的顺风向位移响应平均值和均方根。说明大坝的存在会降低桥梁最不利曲率值所对应的位移, 增加桥梁的稳定性。

同时对比有无大坝条件下曲梁桥跨中位置处的顺风向位移响应平均值和均方根, 可以明显发现当桥梁曲率相对较小时, 大坝的存在会明显降低风荷载下曲梁桥的位移, 但当曲率增大到一定程度时, 这种趋势明显削弱。

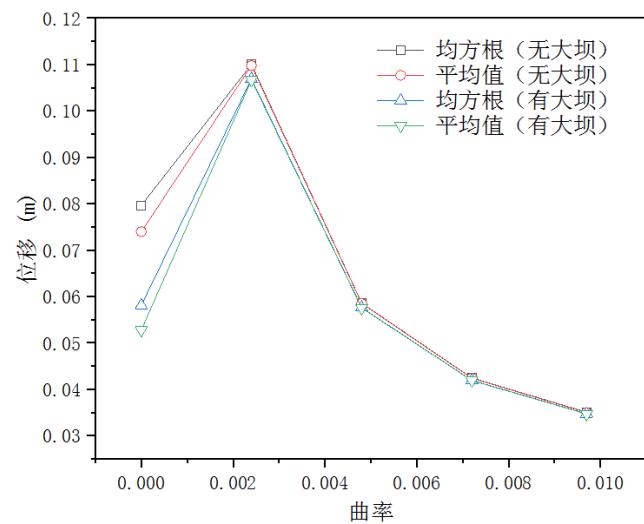


图 7 同一曲率下大坝存在对桥梁的位移分析

## 4 结论

本章以气弹模型风洞试验为参考, 建立有限元模型分析了桥梁曲率对曲梁桥风振响应的影响规律, 主要有以下结论:

- (1) 桥梁的位移平均值和均方根随着曲率的增大呈先增大后减小的趋势,在曲率为0.0024处,位移响应达到最大值,此时为曲梁桥的最不利曲率。当桥梁曲率超过0.0024(最不利曲率)后,位移响应下降趋势明显。随着曲率的增大,桥梁的加速度的均方根减小。表明一定范围内增大桥梁的曲率有利于提高行人的舒适度,且需注意的是虽然桥梁曲率越大,行人舒适度越好,但需考虑施工难度,施工成本等工程实际因素。
- (2) 随着曲率的增加,风荷载激发的共振能量在一定风速下减小,并激发高阶模态共振响应,这表明在高风速下,行人舒适性控制应考虑高频减振,可以采用宽带减振方法,共振加速度能量分布逐渐从稀疏变为稠密,这可能导致模态耦合振动。
- (3) 随着风速的增大,桥梁的位移平均值和均方根均增大,这表明在高风速下,桥梁振动越大,行人舒适度越差。且随着风速的增大,位移平均值和均方根差值变大,表明在高风速下,动力响应大于静力响应。
- (4) 大坝的存在,对曲梁桥跨中位置处的顺风向位移响应平均值和均方根的变化趋势不会产生影响,并拥有相同的最不利曲率。但当曲梁桥曲率较小时,大坝的存在会明显降低风荷载作用下曲梁桥的位移,但当曲率增大到一定程度时,这种趋势明显削弱。

## 参考文献

- [1] 晏致涛,李正良.菜园坝长江大桥气动弹性模型风洞试验及分析[J].桥梁建设,2006,000(004): 15-17.
- [2] 郭勇,孙炳楠,叶尹,等.大跨越输电塔线体系气弹模型风洞试验[J].浙江大学学报:工学版,2007,41(9): 5.
- [3] 李秋胜,陈凡.高层建筑气动弹性模型风洞试验研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2016,43(1): 9.
- [4] Z. S. Chen, Z. Cheng, W. Xu, et al. Wind tunnel measurements for flutter of a long-afterbody bridge deck [J]. Sensors, 2017, 17 (2): 335.
- [5] 谭彪,操金鑫,杨詠昕,等.大跨度平行双幅桥面颤振性能干扰效应[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(04): 490-497.
- [6] 郭俊杰.综合考虑行车安全及颤振性能的钢箱梁悬索桥风屏障优化研究[D].西南交通大学,2021.
- [7] 曾加东,李明水,张志田,等.斜风作用下桥塔对大跨度斜拉桥主梁静风荷载特性的影响[J].公路交通科技,2021,38(11): 52-58.
- [8] 曾攀,钟铁毅,闫贵平.大跨径斜拉一斜拉协作体系桥动力分析[J].计算力学学报,2002,19(4): 471-476.
- [9] 马晓昕,赵人达.大跨斜拉桥动力分析[J].四川建筑,2009,29(04): 110-113.
- [10] 张永健.斜拉式桁架桥仿真分析[D].西安:长安大学,2004.
- [11] 霍卿,许建林,梅元贵.高速铁路桥梁挡风屏遮蔽效应分析[J].空气动力学学报,2020,38(01): 73-81.
- [12] 曹杨,王红红,陈坤亮等.渤海海域海上平台挡风墙高度计算模型研究[J].天然气与石油,2022,40(01): 102-108.
- [13] 王国华,李兵,徐文平等.5000 m级海峡悬索桥抗风稳定性设计研究[J].交通科技,2022, No. 311 (02): 42-46.
- [14] 黄志增.基于有限元模拟的盾构隧道侧穿引起桥梁桩基础变形分析[J].西部交通科技,2022, No. 180 (07): 141-143.
- [15] 何源涛,王若宇,刘想.大跨宽幅桥梁施工阶段风致振动响应研究[J].四川水利,2022,43(06): 45-47+73.
- [16] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Wind Tunnel Test of Buildings and Structures; JGJ/T 338-2014; China Architecture and Building Press: Beijing, China, 2014.
- [17] S. Zhao, J. H. Chen, J. H. Yue, et al. Sectional Model Wind Tunnel Test and Research on the Wind-Induced Vibration Response of a Curved Beam Unilateral Stayed Bridge.