

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.05.012

廊架对人行刚构桥涡振性能的影响

李永志¹,董世杰²,王佳豪²,吴川逸晖¹,吴潮彬¹,殷东朔²

(1. 深圳市前海建设投资控股集团有限公司,广东 深圳 518000; 2. 长安大学公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为研究装饰廊架对桥梁涡振性能的影响,以某带有空间廊架的景观人行桥为工程实例,制作了小、中、大 3 种廊架尺寸的主梁节段模型,通过节段模型风洞试验,分析廊架对主梁涡振性能的影响;为考虑实桥空间廊架造型尺寸变化对全桥气动特性的影响,通过全桥气弹模型风洞试验,分析均匀流场和紊流场中主梁跨中和 1/4 跨处的位移响应。结果表明:装饰廊架会明显改变主梁的涡振性能,小廊架和中廊架状态涡振性能较无廊架状态差,而大廊架状态涡振性能明显优于无廊架状态,大廊架状态除在个别工况出现小幅度涡振外,其他工况均无涡振出现;随着廊架尺寸的增大,主梁涡振性能得到改善;主梁迎风侧不同时,涡振响应会有较大差异,迎风侧宽与迎风侧窄相比,无廊架、小廊架和中廊架最大振幅分别减小 49.72%、27.57% 和 23.21%;全桥气弹模型在均匀流场和紊流场试验中均未出现明显的涡振现象,因此安装装饰廊架的桥梁涡振性能明显优于不安装廊架状态。

关键词:人行桥;廊架;涡振性能;节段模型;气弹模型

中图分类号:U441.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2023)05-0087-10

Effect of corridor frame on vortex-induced vibration performance of pedestrian rigid frame bridge

LI Yongzhi¹, DONG Shijie², WANG Jiahao², WUCHUAN Yihui¹, WU Chaobin¹, YIN Dongshuo²

(1. Shenzhen Qianhai Development Investment Holding Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;

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

Abstract: To study the influence of corridor frame on the vortex-induced vibration performance of bridge, by taking a footbridge with corridor frame as the engineering example, the rigid segment model with three different corridor frame size was made, and the wind tunnel test of corresponding segment model was carried out to analyze the influence of corridor frame on the vortex-induced vibration performance of girder. In order to consider the effect of space frame size variation on the aerodynamic characteristics of the whole bridge, the displacement response of girder at the span and 1/4 span in the uniform and turbulent flow field was analyzed through the wind tunnel test for the aeroelastic model of whole bridge. It revealed that: Corridor frame significantly changes the vortex-induced vibration performance of the bridge, and there is a large amplitude of vortex-induced vibration in the non-corridor frame state. Vortex-induced vibration performance of the small corridor frame and middle corridor frame is worse than that of non-corridor frame, while vortex-induced vibration performance of large corridor frame is better than that of non-corridor frame. Compared with the three different states, the vortex-induced vibration performance improves with the increase of corridor frame size, and except for the small-amplitude vortex-induced vibration in some operating conditions, there is no vortex-induced vibration in other operating conditions for the state of large corridor frame. If the upwind side of beam is different, the vortex-induced vibration response can be different. The maximum amplitude of the non-corridor frame, small corridor frame and middle corridor frame at the wide windward side is reduced by 49.72%, 27.57%, and 23.21%, compared with those at the narrow windward side, respectively. Combined with the fact that there is no vortex-induced vibration under the uniform and turbulent flow field in the aeroelastic test of the whole bridge, the space corridor frame

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51978077);国家重点研发计划项目(2021YFB1600300);陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目(2022JQ-507);重庆市在渝院士牵头创新引导专项(2022YSZX-JSX0003CSTB)

作者简介:李永志(1980—),男,高级工程师,硕士,主要从事园区及公共空间建设。E-mail:34673967@qq.com

引用本文:李永志,董世杰,王佳豪,等.廊架对人行刚构桥涡振性能的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):87-96.

LI Yongzhi, DONG Shijie, WANG Jiahao, et al. Effect of corridor frame on vortex-induced vibration performance of pedestrian rigid frame bridge[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(5): 87-96.

overall improves the vortex-induced vibration performance of the bridge.

Key words: footbridge; corridor frame; vortex-induced vibration performance; segmental model; aeroelastic model

随着城市化进程的加速发展,城市中造型各异的人行桥越来越多地出现在人们的视野中,不仅给人们带来更加舒适便利的体验,而且也美化了城市的形象。近几年,城市桥梁的设计理念不断更新,桥梁从过去的注重功能逐步转向追求技术与艺术创新。为了达到期望的美学效果,一些体量较大的装饰结构被应用到景观人行桥的设计中,例如栏杆、廊亭、桥头堡等^[1]。其中,廊架是我国古典园林中常见的一种结构,应用到人行桥的造型上,可以为人们提供休息的场所,并使结构空间层次丰富多变,审美独具趣味^[2]。但人行桥奇特造型会给结构抗风增加不确定因素。钢结构桥梁结构阻尼小,自振频率低,导致其对风的作用更加敏感,对于一些跨径相对较小的桥梁,也可能发生风致振动。

国内外研究者对人行桥的风致振动问题已有一定的研究,人行桥的风致振动问题主要有颤振、涡振、抖振及静风稳定问题。颤振具有发散性,一旦发生会直接导致结构损毁,Taylor 等^[3]通过数值模拟对某人行桥的静气动力特性和颤振特性进行了研究,发现组成栏杆的倾斜平板数量和倾角对主梁的静气动特性和颤振性能影响较大,并指出一种满足桥梁颤振稳定性要求的带有少量小倾角平板的栏杆方案。白桦等^[4]以某主跨为 278 m 的人行悬索桥为研究对象,研究了单联中央扣、降低矢跨比、加密桥面栏杆、增设 45°抗风缆等措施对该人行悬索桥抗风性能的影响。桂龙辉等^[5]以某悬挑环形玻璃廊桥为研究对象,建立了针对该类桥梁三维风效应的全气动弹性模型研究方法,并指出该方法有助于结构的抗风优化设计。涡振具有自限幅特性,一般不会导致结构直接破坏,但会导致结构疲劳并影响行车舒适性,Cammelli 等^[6]以一跨径为 115 m 带有封闭风屏障的人行桥为研究对象进行了风洞试验,发现该桥存在明显的涡振-驰振耦合现象,当风屏障具有 50% 的开孔率时可以有效抑制振动。Bartoli 等^[7]对一人行斜拉桥进行了主梁节段模型和桥塔模型风洞试验,发现主梁存在涡振,但可以通过阻尼器进行抑制,同时还研究了主梁风屏障孔隙率对涡振的影响。陈以荣等^[8]采用 CFD 数值模拟和风洞试验相结合的方法对某钢桁架曲线人行桥的桥面风环境和抗风性能进行了研究,发现桁架内文化墙对钢桁架下侧桥面行人风环境影响较大,并发现适当增大桥梁的结构阻尼能够有效抑制该桥的涡振。抖振是由风荷载中的脉动成分引起,许福友等^[9]通过全桥气弹模型风洞试验,研究了某单跨 105 m 的人行悬索桥的涡振、抖振和颤振性能,并探讨了抖振位移峰值因子合理的取值范围。苏益等^[10]以某单悬臂观景廊桥为背景,研究了位于山区风环境下的悬挑式人行桥梁抖振响应及风荷载特性,发现山体地形对结构三分力系数及抖振响应影响较大。唐剑明等^[11]以主跨为 460 m 的人行桥为对象,研究了自激力与结构阻尼对抖振响应的影响,计算了桥梁在不同湍流强度下的振动响应,对比了中央扣与抗风缆对桥梁的减振效果。静风失稳是指在风荷载的静力作用下导致结构失稳,吴长青等^[12]以某新建人行悬索桥为研究对象,研究了抗风缆对人行悬索桥动力特性和静风稳定性的影响,结果表明,设置抗风缆可以提高人行悬索桥各关键振型的频率,并且可以显著增强人行悬索桥的静风稳定性能。Li 等^[13]以某人行悬索桥为研究对象,研究了不同行人密度和行人排列对人行桥的静气动力系数和静风响应的影响,结果表明,行人密度的增加及较大阻风面积的行人排列对静风响应有不利影响。刘小兵等^[14]以国内一座拟建的异形景观桥为工程背景,通过全桥刚性模型测压风洞试验,研究了变截面曲线主梁和变截面倾斜桥塔的气动力特性。Tadeu 等^[15]对葡萄牙的主跨为 516 m 的人行悬索桥的风荷载效应进行了三维数值模拟和风洞试验,通过对比 3 种不同尾流尺寸的流场域,确定了合适的流场尺寸,计算了主梁的静气动力系数,并通过风洞试验验证了结果的准确性。

综上所述,以往对人行桥风致振动的研究多集中于索张拉体系整体的颤振和静风稳定问题,而附属的景观装饰结构对人行桥抗风性能的影响研究较少。廊架不同于车行桥的附属栏杆、风障等,其空间尺寸和质量占主梁的比重较大,会显著增加桥梁整体的阻风面积、改变结构的自振频率。相对于利用数值模拟(CFD)研究结构气动力效应^[16-17],风洞试验仍是更主要且可靠的研究手段。本文针对某待建的景观人行桥,拟通过节段模型和全桥气弹模型风洞试验研究装饰廊架对人行桥涡振性能的影响规律,以期能为人行桥的造型选择提供抗风设计参考。

1 工程实例概况

某拟建的公园景观人行桥是一座桥跨布置为 20 m+75 m+20 m=120 m 的曲线梁斜腿刚构桥,曲线段位于

跨中,平面圆曲线半径 $R=22.5\text{ m}$,曲线长 39.27 m 。标准主梁截面为非对称闭口钢箱梁,高 1 m ,宽 5.24 m 。中跨主梁段沿曲线内侧布置有空间变化的 L 形景观装饰廊架,最高处廊架约为 4.225 m ,最大悬挑长度约 5.175 m ,在有廊架一侧另设有提供休息的座椅。人行桥效果图、立面图、平面图、主梁标准断面图及廊架立面图如图 1 所示。

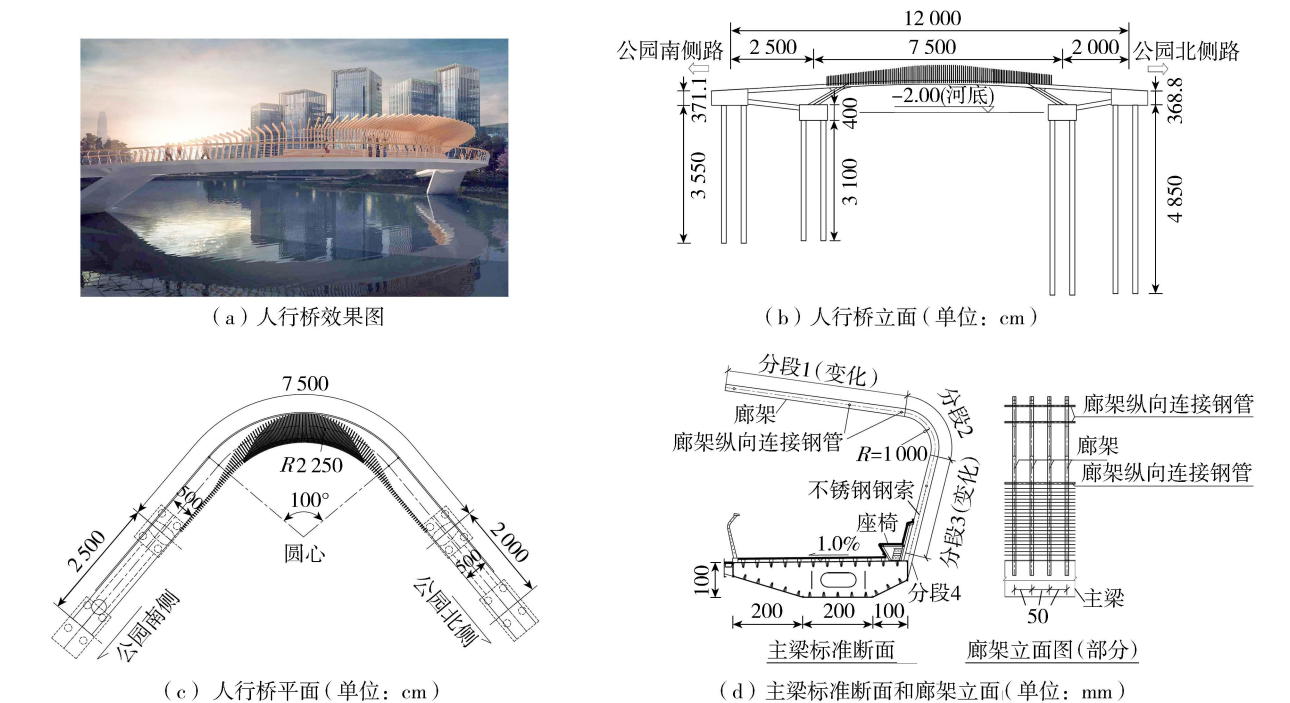


图 1 某拟建人行桥

Fig. 1 A pedestrian bridge

2 动力特性分析

2.1 有限元建模

采用通用有限元分析软件 ANSYS 建立三维有限元模型,考虑到主梁为闭口箱型截面,且主梁宽度较小,翘曲、畸变等影响可以忽略,因此优先采用单主梁模型模拟,同时单主梁模型也便于施加桥面铺装、栏杆、廊架等二期荷载。主梁和墩台使用 beam4 单元模拟,考虑到斜腿的空间布置,用 beam188 单元模拟可方便调整单元局部坐标系。装饰廊架、栏杆、桥面铺装等附属结构,通常只考虑其质量及质量惯性矩对桥梁整体动力特性的影响,在建模中装饰廊架、栏杆、桥面铺装等附属结构换算质量及质量惯性矩后使用 mass21 单元模拟,有限元模型如图 2 所示。

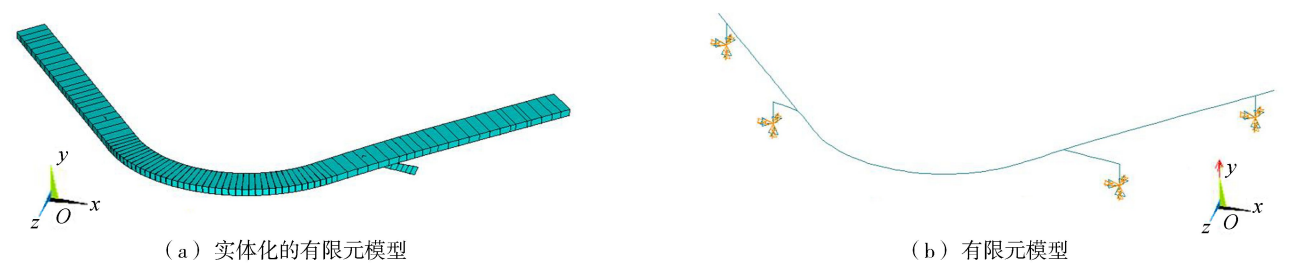


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

2.2 动力特性计算

为更加清楚地观察各阶振型的特点,在不改变结构动力特性的前提下,在主梁单元各节点上增加了无质量的刚臂单元,成桥状态重点关心的振型计算结果见表 1。

表 1 成桥状态动力特性

Table 1 Dynamic characteristics of completed bridge

振型阶次	频率/Hz	竖向等效质量/(t/m)	扭转等效质量/(t·m ² /m)	振型描述	振型形状
1	1.528	4.490		一阶正对称竖弯	
2	4.197	4.946		一阶反对称竖弯	
7	9.168		28.700	一阶正对称扭转	
14	17.845		48.830	一阶反对称扭转	

3 节段模型风洞试验

3.1 考虑小、中、大 3 种廊架尺寸的节段模型

主梁节段模型试验在长安大学风洞试验室 CA-1 大气边界层风洞中进行,试验段尺寸为 3 m(宽)×2.5 m(高)×15 m(长),风速 0~53.0 m/s 连续可调。试验模型几何缩尺比为 1:12,主梁长 1.2 m,宽 0.44 m,长宽比为 2.73,风洞阻塞率为 3.7%,长宽比和阻塞率均满足《桥梁风洞试验指南》^[18]要求。为了满足节段模型对刚度和质量的要求,节段模型的骨架由钢管拼接成,主梁外衣和座椅采用轻质木板制作,装饰廊架采用有机玻璃制作,栏杆采用 ABS 塑料制作,节段模型主要设计参数见表 2、误差见表 3。

表 2 节段模型设计参数

Table 2 Design parameters of segment model

状态	参数类型	单位质量/(kg/m)	单位质量惯矩/(kg·m ² /m)	竖弯基频/Hz	扭转基频/Hz	竖弯阻尼比/%	扭转阻尼比/%
施工状态	实桥值	2094	14490	2.237	17.974		
	模型设计值	14.542	0.699	8.801	21.569	0.30	0.30
	模型实测值	15.129		8.800	21.500	0.22	0.25
成桥状态	实桥值	4490	28700	1.528	9.168		
	模型设计值	31.181	1.384	6.323	17.497	0.30	0.30
	模型实测值	31.175		6.347	17.578	0.20	0.23

考虑到实桥廊架高度、悬臂长度沿走向的空间变化,成桥状态的模型试验选取小、中、大 3 种廊架尺寸的典型断面。廊架分为 4 段,分段 1、3、4 为直线段,分段 2 为曲线转折段(图 1)。廊架分段 1~4 长度:小廊架 0.279、0.259、1.289、0.2 m;中廊架 1.998、0.789、2.715、0.2 m;大廊架 5.175、1.679、2.885、0.2 m(图 3)。该桥主梁断面的非对称性会严重影响不同来流风向下主梁的涡振性能^[19],此外廊架结构也具有不对称性,因此试验中对不同来流方向分别研究。风洞试验工况设计中将主梁高度较小侧迎风定义为迎风侧窄工况,将主梁高度较大侧迎风定义为迎风侧宽工况(图 4),试验的 24 个工况见表 4。

表 3 节段模型参数设计值与实测值误差

Table 3 Error between design parameter and measured parameters in the segment model

参数	误差/%	
	施工状态	成桥状态
单位质量	4.04	-0.02
竖弯基频	-0.01	0.38
扭转基频	-0.32	0.46

注:施工状态和成桥状态的误差限值均为 5%。

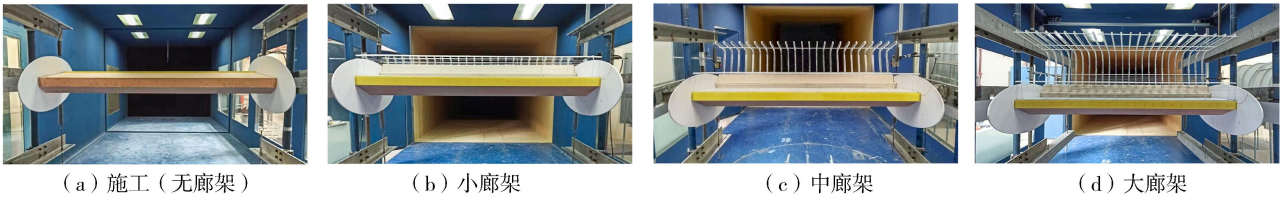


图 3 不同廊架的节段模型

Fig. 3 Segment model with different corridor frames

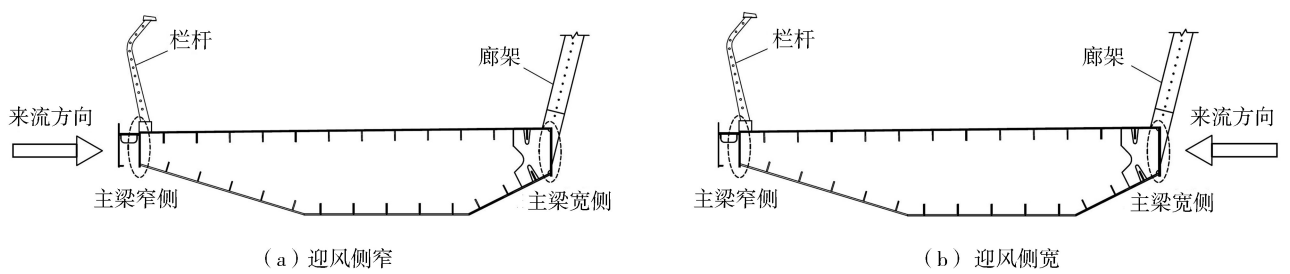


图 4 迎风侧窄、迎风侧宽工况示意图

Fig.4 Schematic maps of test conditions with narrow upwind side and wide windward side

表 4 节段模型风洞试验工况

Table 4 Wind tunnel test conditions for segment models						
状态	廊架类型	来流方向	风攻角/(°)	流场类型	竖弯风速比	扭转风速比
施工状态	无廊架	迎风侧窄	-3、0、+3	均匀流场	1 : 3.05	1 : 10
	无廊架	迎风侧宽	-3、0、+3	均匀流场	1 : 3.05	1 : 10
	小廊架	迎风侧窄	-3、0、+3	均匀流场	1 : 2.9	1 : 6.3
	小廊架	迎风侧宽	-3、0、+3	均匀流场	1 : 2.9	1 : 6.3
成桥状态	中廊架	迎风侧窄	-3、0、+3	均匀流场	1 : 2.9	1 : 6.3
	中廊架	迎风侧宽	-3、0、+3	均匀流场	1 : 2.9	1 : 6.3
	大廊架	迎风侧窄	-3、0、+3	均匀流场	1 : 2.9	1 : 10.5
	大廊架	迎风侧宽	-3、0、+3	均匀流场	1 : 2.9	1 : 10.5

3.2 廊架对节段模型涡振的影响

因该桥扭转频率很高,扭转涡振锁定风速很高,同时实测中也未出现扭转涡振^[20],因此不考虑扭转涡振,只讨论竖弯涡振。

由图 5 可知,迎风侧窄工况下 3 个风攻角均出现了涡振:①-3°风攻角下,3 种廊架状态均出现了涡振,风速区均集中在 14 ~ 16 m/s,其中小廊架状态振幅最大,在风速为 14.79 m/s 时达到竖向振幅峰值(26.95 mm)。中廊架状态和大廊架状态的最大竖向振幅次之,分别为 17.95 mm 和 10.03 mm。无廊架状态仅在风速为 9.76 m/s 时出现最大振幅为 2.84 mm 的微小幅度振动。②0°风攻角下,3 种廊架状态均有涡振出现,中廊架振幅最大,为 21.51 mm,小廊架状态次之为 16.82 mm。大廊架和无廊架状态的振幅最大值均小于 5 mm。小廊架和中廊架状态涡振区间基本一致,大廊架状态涡振区间相较-3°风攻角略往后移。③+3°风攻角下,无廊架状态出现双涡振区间,在风速区 18 ~ 25 m/s 内出现最大振幅 17.96 mm。小廊架和中廊架状态出现小幅度涡振,振幅最大值均小于 6 mm,大廊架状态未出现涡振。综上,对于有廊架成桥状态负风攻角和 0°风攻角更不利,对于无廊架状态,正风攻角更为不利。在迎风侧窄工况下,无廊架最大振幅为 17.96 mm,小廊架和中廊架最大振幅较无廊架分别增大 50.06% 和 19.71%,大廊架最大振幅较无廊架减小 42.15%,主梁涡振性能随着廊架尺寸的增大而变好。

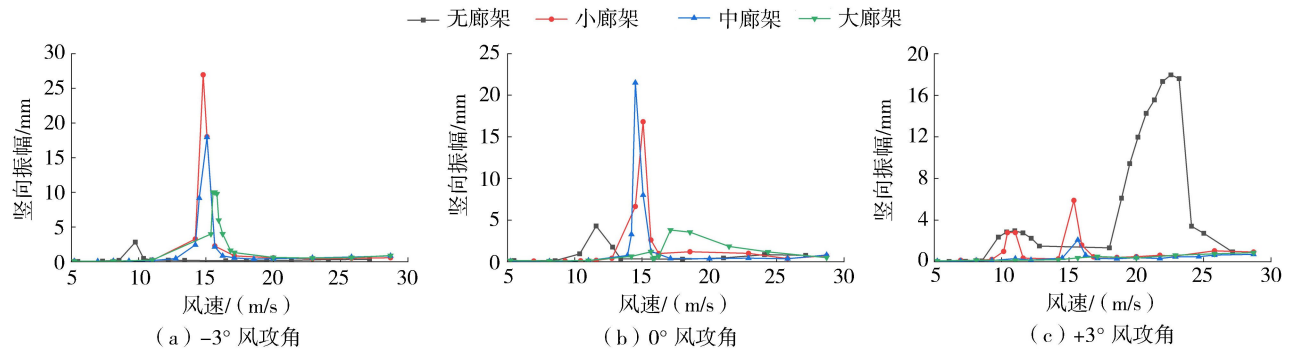


图 5 迎风侧窄涡振响应

Fig.5 Vortex-induced vibration response when windward side is narrow

由图 6 可知,迎风侧宽工况下 3 个风攻角均出现了涡振:①-3°风攻角下,小廊架和中廊架状态出现了涡振,风速区间均在 13 ~ 20 m/s,其中小廊架竖向振幅最大,最大值为 19.52 mm,中廊架竖向振幅最大值为

16.51 mm。无廊架和大廊架状态均未发生涡振。② 0° 风攻角下,小廊架状态涡振振幅最大,最大值为 8.21 mm,其余工况均无明显涡振。③ $+3^{\circ}$ 风攻角下,除大廊架状态未出现涡振,其他工况均出现了涡振,其中无廊架和小廊架状态均有明显涡振,无廊架状态出现了双涡振区间,风速区分别为 10 ~ 12 m/s 和 21 ~ 27 m/s,在风速为 25.01 m/s 时,达到最大振幅 9.03 mm。综上,对于有廊架成桥负风攻角和 0° 风攻角更不利,对于无廊架状态,正风攻角更为不利。在迎风侧宽工况下,无廊架最大振幅为 9.03 mm,小廊架和中廊架最大振幅较无廊架分别增大 116.17% 和 82.83%,大廊架未出现涡振,同样表现出廊架尺寸越大,主梁涡振性能越好。

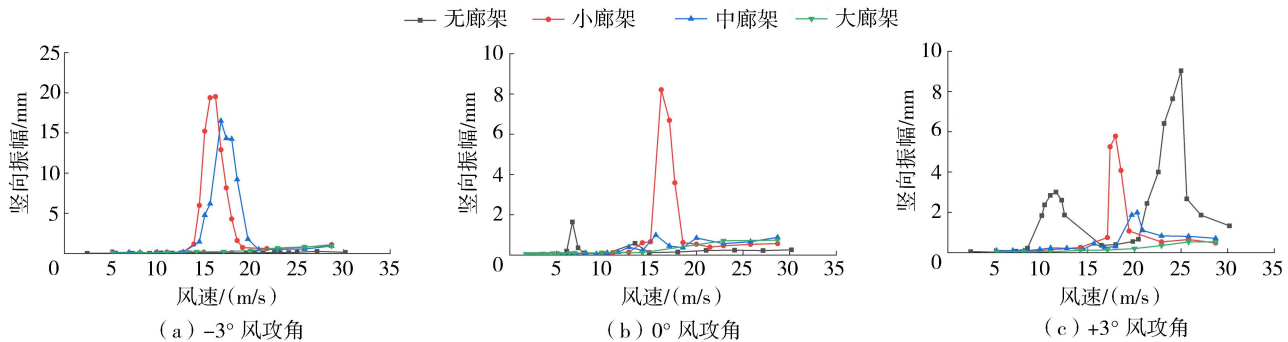


图 6 迎风侧宽涡振响应

Fig. 6 Vortex-induced vibration response when windward side is wide

由图 7 可知,不同廊架工况下,迎风侧宽各风攻角的振幅最大值均小于迎风侧窄,其中 0° 风攻角和 -3° 风攻角减小幅度尤为明显,迎风侧宽较迎风侧窄,无廊架、小廊架和中廊架最大振幅分别减小 49.72%、27.57% 和 23.21%,大廊架状态在迎风侧宽时没有出现涡振,可见迎风侧窄工况更加不利。装饰廊架的安装会显著改变桥梁整体的涡振性能,综合 3 个风攻角的试验结果,小廊架和中廊架状态涡振性能较无廊架差,大廊架涡振性能明显优于无廊架状态。对比 3 种有廊架状态,除迎风侧窄 0° 风攻角外,其他风攻角下均有一致的规律,随着廊架的尺寸的增大,主梁涡振不断改善,甚至在迎风侧窄大廊架状态时不会出现涡振现象。

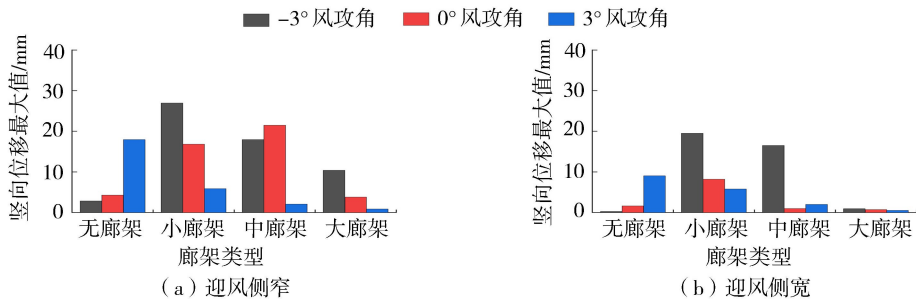


图 7 竖向位移最大值随不同廊架的变化

Fig. 7 Variation of maximum vertical displacement with different corridor frames

4 全桥气弹模型风洞试验

对于造型复杂、空间多变的桥梁,仅从节段模型风洞试验无法准确反映全桥的气动力特性^[21]。该人行桥主梁为等截面,但廊架空间尺寸却沿轴线变化,节段模型试验具有一定局限性,并且不同截面节段模型结果也存在差异。因此,为了考虑桥梁结构的三维特性,进一步探究装饰廊架对桥梁整体涡振性能的影响,有必要进行全桥气弹模型风洞试验。

4.1 全桥气弹模型设计

全桥气弹模型试验同样在长安大学风洞试验室 CA-1 大气边界层风洞中进行,考虑到风洞实验室试验段的尺寸,几何缩尺比为 1 : 50,此时模型长约 1.9 m。全桥气弹模型设计除了满足几何相似外,还要满足运动和动力相似,但对于刚度不受重力影响的结构则可放弃满足弗劳德数相似准则^[18],因此该桥可以根据实际试验条件,自主选择试验风速比。在全桥气弹模型设计中,主要模拟了主梁的质量和刚度,以及桥梁整体的几何外形和边界条件。选用铝合金材料制作芯梁,主梁外衣和其他装饰结构分别由有机玻璃和 ABS 塑料制成,主梁外衣和芯梁如图 8 所示,全桥气弹模型参数见表 5。

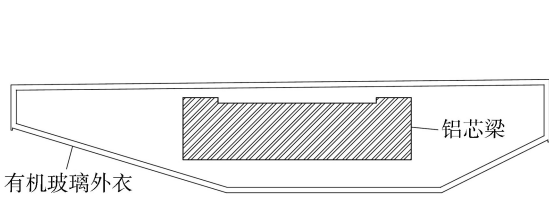


图 8 气弹模型主梁外衣和芯梁

Fig.8 Coat and core beam of girder in
aeroelastic model

模型在风洞试验段安装完成后,应先进行模态测试和调整,采用锤击法测试模型模态是否与原型相似。由于试验模型目标频率较高,为保证准确性,在试验中使用位移计和更加灵敏的加速度计测量目标模态,位移计和加速度计的布置见图 9,其中加速度计 1、2 和位移计 6、7 分别用于测量跨中竖向加速度和位移,加速度计 3、4 和位移计 9 分别用于测量 1/4 跨竖向加速度和位移,位移计 7 和位移计 8 用于测量跨中和 1/4 跨的横向位移。考虑到模型的扭转目标频率已接近 200 Hz,其相应模态的风振响应可以忽略不计,最终只保留主梁一阶正对称竖弯和一阶反对称竖弯满足试验要求。表 6 为频率和阻尼的调试结果,限于激振方法和测试条件的不足,主梁一阶反对称竖弯模态对应阻尼比超过了试验要求,但考虑到该模态目标频率较高,发生该模态振动的可能性较小,该模态条件可适当放松。

表 6 频率和阻尼比调试结果

Table 6 Calibration of frequency and damping ratio						
振型阶次	实桥频率/Hz	振型特征	模型目标值/Hz	实测值/Hz	误差/%	阻尼比/%
1	1.528	主梁一阶正对称竖弯	31.833	32.715	2.77	0.049
2	4.197	主梁一阶反对称竖弯	87.438	90.947	4.01	0.094

4.2 试验布置及工况

全桥气弹模型试验根据 JTG/T 3360-01—2018《公路桥梁抗风设计规范》规定,应分别在均匀流场和大气边界层紊流场中进行,由于桥址处的地表类型为 B 类,地表粗糙度系数取 0.12。桥面处紊流强度目标值为 0.16,试验中用尖塔和粗糙元组合的方式模拟紊流风场,尖塔高 2.0 m,底边长 0.30 m,下游分流板底边为 0.30 m,端板由矩形(0.32 m×1.23 m)和梯形板(上底 0.17 m,高 0.32 m,下底 0.32 m)拼合而成,尖塔间距 1.0 m,共 2 块;小粗糙元高 0.06 m、宽 0.08 m、厚 0.04 m,分 8 行排列;大粗糙元高 0.10 m、宽 0.10 m、厚 0.10 m,分 5 行排列。图 10(a)为放置在风洞中的气弹模型,图 10(b)为试验模拟的风剖面,图 10(c)为紊流度剖面,其中风剖面和紊流度剖面竖坐标高度已换算到实桥对应高度。通过节段模型试验可以得到主梁窄侧迎风较主梁宽侧迎风更为不利,因此,选择主梁窄侧迎风作为全桥气弹试验工况。试验分别在均匀流场和紊流场中

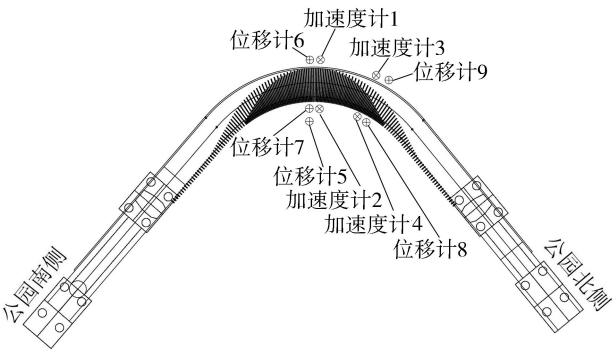
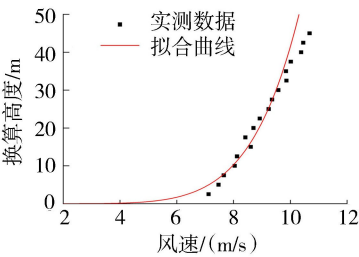


图 9 测试仪器布置平面示意图

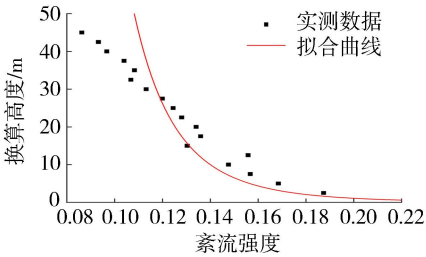
Fig.9 Schematic map of test instrument layout



(a) 紊流场中的气弹模型



(b) 模拟风剖面



(c) 模拟紊流度剖面

图 10 大气边界层风场模拟

Fig.10 Wind field simulation of atmospheric boundary layer

进行,试验风速 1~12.5 m/s,其中 1~5 m/s 间隔 0.2 m/s,5~12.5 m/s 间隔 0.5 m/s,试验风速比为 2.4。选取成桥状态-3°、0°、+3°风攻角分别在均匀流场和紊流场中进行涡振试验,共 6 个试验工况,风攻角的变化由模型底部木板的俯仰提供。

4.3 全桥气弹试验结果

为了防止模型在过高风速下毁坏,试验最大风速换算到实桥后不大于 30 m/s,该风速在实际环境中也很难出现。下面将均匀流场和紊流场各个风攻角在实桥风速为 30.0 m/s 时的换算到实桥的位移响应均方根汇总到表 7。由表 7 可知,主梁跨中竖向位移均方根最大值出现在紊流场+3°风攻角时,为 20.2 mm,其余工况均小于 10 mm,跨中横向位移均方根均小于 8 mm,1/4 跨竖向和横向位移均方根最大值分别为 5.7 mm 和 3.9 mm。对于可能出现的一阶涡振,振幅最大值将出现在跨中位置,涡振试验主要关心的主梁跨中竖向位移均值、均方根值、极值随风速变化的曲线如图 11、图 12 所示,其中正负号代表位移方向,正向上负向下。由图 11 和图 12 可知,均匀流场+3°风攻角位移响应均方根略有突变,但在试验中并未出现明显涡振,主要原因为低风速下风速不稳定且位移过小出现测量误差,其余各工况位移响应均方根均随风速增加而稳定地增大,没有在某个风速区间位移突增,且数量值也很小,故可说明在均匀流场和紊流场各个风攻角下均未出现明显的涡振现象,结合节段模型试验中大廊架状态对主梁涡振有明显的抑制作用,可得到空间装饰廊架显著改善了主梁的涡振性能,抑制了涡振发生的结论。

表 7 成桥状态下在风速 30.0 m/s 时位移响应均方根值

Table 7 RMS value of displacement response of completed bridge at wind speed of 30.0 m/s

流场类型	风攻角/(°)	竖向位移均方根/mm		横向位移均方根/mm	
		主梁跨中	主梁 1/4 跨	主梁跨中	主梁 1/4 跨
均匀流场	-3	4.1	2.6	0.8	2.5
	0	9.2	2.8	3.6	0.4
	+3	3.5	5.7	7.4	2.7
紊流场	-3	6.5	3.5	3.4	1.2
	0	8.8	3.0	5.1	1.4
	+3	20.2	4.4	1.0	3.9

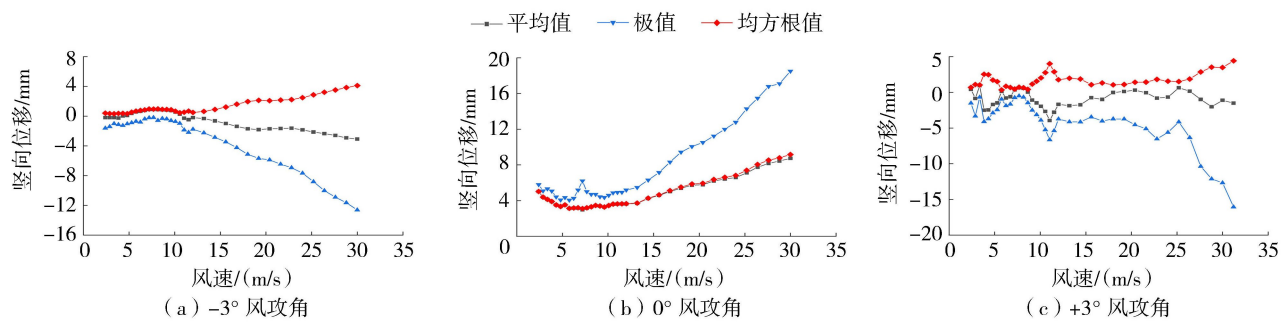


图 11 均匀流场在实桥风速 30.0 m/s 时跨中竖向位移响应

Fig. 11 Vertical displacement response of real bridge in uniform flow field at speed of 30.0 m/s

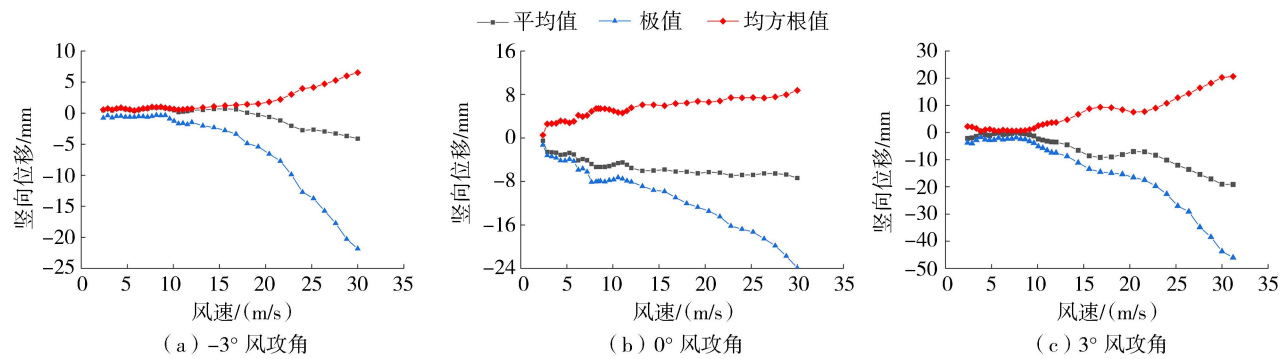


图 12 紊流场在实桥风速 30.0 m/s 时跨中竖向位移响应

Fig. 12 Vertical displacement response of real bridge in turbulent flow field at speed of 30.0 m/s

5 结 论

- a. 装饰廊架会显著改变桥梁的涡振性能,小廊架和中廊架状态涡振性能较无廊架状态差,大廊架涡振性能明显优于无廊架状态。在迎风侧窄工况下,无廊架最大振幅为 17.96 mm,小廊架和中廊架最大振幅较无廊架分别增大 50.06% 和 19.71%,大廊架最大振幅较无廊架减小 42.15%;在迎风侧宽工况下,无廊架最大振幅为 9.03 mm,小廊架和中廊架最大振幅较无廊架分别增大 116.17% 和 82.83%,大廊架未出现涡振。对于 3 种廊架状态,随着廊架尺寸的增大,主梁涡振性能不断改善。
- b. 在不同侧迎风下,主梁涡振响应有较大差异,迎风侧宽较迎风侧窄,无廊架、小廊架和中廊架最大振幅分别减小 49.72%、27.57% 和 23.21%,大廊架状态在迎风侧宽时没有出现涡振,因此对于此类非对称主梁截面,不论裸梁断面还是有廊架断面,主梁窄侧迎风更为不利。
- c. 风攻角的改变会使不同廊架状态的涡振性能发生反转,在迎风侧窄和迎风侧宽工况下,均有同样规律,0°攻角和-3°攻角无廊架状态振幅微小,小廊架和中廊架状态振幅较大,+3°攻角无廊架状态振幅突然增大,超过 3 种廊架状态,而有廊架状态振幅减小。
- d. 全桥气弹模型在均匀流场和紊流场试验中均未发生明显的涡振现象,风振位移较小,考虑空间变化廊架整体的影响后,安装空间装饰廊架后桥梁的涡振性能明显优于不安装廊架状态。

参考文献:

[1] 曹菲. 城市景观桥梁创新设计研究[D]. 南京:东南大学,2015.

[2] 丁文韬. 长沙城市绿地中廊架景观调查分析研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2014.

[3] TAYLOR I J,VEZZA M,SALISBURY I. Numerical investigation of the effects of pedestrian barriers on aeroelastic stability of a proposed footbridge[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics,2008,96(12):2418-2437.

[4] 白桦,李德锋,李宇,等. 人行悬索桥抗风性能改善措施研究[J]. 公路,2012(12):1-6. (BAI Hua,LI Defeng,LI Yu,et al. A study on improving measures for wind-resistance stability of pedestrian suspension bridge[J]. Highway,2012(12):1-6. (in Chinese))

[5] 桂龙辉,谢霁明,林颖孜,等. 悬挑环形廊桥的气动弹性模型试验[J]. 浙江大学学报(工学版),2017,51(11):2121-2129. (GUI Longhui,XIE Jiming,LIN Yingzi,et al. Aeroelastic model study of cantilever skywalk bridge[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2017,51(11):2121-2129. (in Chinese))

[6] CAMELLI S,BAGNARA A,NAVARRO J G. VIV-galloping interaction of the deck of a footbridge with solid parapets[J]. Procedia Engineering,2017,199:1290-1295.

[7] BARTOLI G,GIOFFRE M,MANNINI C,et al. Wind tunnel tests and full-scale measurements on a cable-stayed footbridge[C]// Proceedings of Footbridge 2017 Berlin. Berlin:Massivbau,Technische University Berlin,2017.

[8] 陈以荣,曹张,刘志文,等. 钢桁架人行桥行人风环境及抗风性能研究[J]. 振动与冲击,2019,38(16):274-280. (CHEN Yirong,CAO Zhang,LIU Zhiwen,et al. A study on pedestrian level wind environment and wind-resistance performances of a steel truss footbridge[J]. Journal of Vibration and Shock,2019,38(16):274-280. (in Chinese))

[9] 许福友,谭岩斌,张哲,等. 某人行景观悬索桥抗风性能试验研究[J]. 振动与冲击,2009,28(7):143-146. (XU Fuyou,TAN Yanbin,ZHANG Zhe,et al. Wind-resistant performance of one landscape suspension footbridge[J]. Journal of Vibration and Shock,2009,28(7):143-146. (in Chinese))

[10] 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 Yi,LI Mingshui,YANG Yang,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))

[11] 唐剑明,谢旭. 横风作用下大跨度人行悬索桥振动使用性研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2021,55(10):1903-1911. (TANG Jianming,XIE Xu. Investigation on vibration serviceability of long-span suspension footbridge under crosswind[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science),2021,55(10):1903-1911. (in Chinese))

[12] 吴长青,张志田,吴肖波. 抗风缆对人行悬索桥动力特性和静风稳定性的影响[J]. 桥梁建设,2017,47(3):77-82. (WU Changqing,ZHANG Zhitian,WU Xiaobo. Influence of wind cables on dynamic properties and aerostatic stability of pedestrian suspension bridges[J]. Bridge Construction,2017,47(3):77-82. (in Chinese))

[13] LI Y,CHEN Z,DONG S J,et al. Study on the effects of pedestrians on the aerostatic response of a long-span pedestrian suspension bridge[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2021,25(10):3866-3878.

[14] 刘小兵,姜会民,赵煜程,等. 基于全桥刚性模型测压试验的异形景观桥气动力特性研究[J]. 振动与冲击,2021,40(24):

144-153. (LIU Xiaobing,JIANG Huimin,ZHAO Yucheng,et al. A study on aerodynamic force characteristic of a special-shaped landscape bridge based on a rigid model pressure measurement test of an overall bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021,40(24):144-153. (in Chinese))

[15] TADEU A,DA SILVA F M,RAMEZANI B,et al. Experimental and numerical evaluation of the wind load on the 516 Arouca pedestrian suspension bridge[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2022,220:104837.

[16] 廖绍凯,张研,陈达. 基于 S-A 模型的覆冰输电线绕流数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):1-8. (LIAO Shaokai,ZHANG Yan,CHEN Da. Numerical analysis of flow past iced conductor based on the S-A model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(1):1-8. (in Chinese))

[17] 蔡新,林世发,胡莉,等. 不同倾斜角叶尖小翼水平轴风力机气动性能[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):460-466. (CAI Xin,LIN Shifa,HU Li,et al. Aerodynamic performance of horizontal axis wind turbine with different inclination angles of tip winglet[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(5):460-466. (in Chinese))

[18] 葛耀君. 桥梁风洞试验指南[M]. 北京:人民交通出版社,2018.

[19] 李明,孙延国,李明水,等. 非对称 II 型梁和流线型箱梁气动性能风洞试验研究[J]. 振动与冲击,2019,38(8):54-60. (LI Ming,SUN Yanguo,LI Mingshui,et al. A study on the aerodynamic characteristics of an asymmetric II shaped girder and an asymmetric streamlined box girder via a wind tunnel test[J]. Journal of Vibration and Shock,2019,38(8):54-60. (in Chinese))

[20] FUJINO Y,YOSHIDA Y. Wind-induced vibration and control of trans-tokyo bay crossing bridge[J]. Journal of Structural Engineering,2002,128(8):1012-1025.

[21] 李加武,宋特,林立华,等. 变截面连续钢箱梁桥静气动性能研究[J]. 公路交通科技,2020,37(4):88-95. (LI Jiawu,SONG Te,LIN Lihua,et al. Study on aerodynamic performance of a continuous steel box girder bridge with variable sections[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2020,37(4):88-95. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-22 编辑:刘晓艳)

(上接第 45 页)

[23] NAMAN S M,ROSENFELD J S,NEUSWANGER J R,et al. Comparing correlative and bioenergetics-based habitat suitability models for drift-feeding fishes[J]. Freshwater Biology,2019,64(8):1613-1626.

[24] NESTLER J M,MILHOUS R T,PAYNE T R,et al. History and review of the habitat suitability criteria curve in applied aquatic ecology:review of habitat suitability criteria in aquatic ecology[J]. River Research Applications,2019,35(5):1155-1180.

[25] 班璇,郭舟,熊兴基,等. 长江中游典型河段底栖动物的物理栖息地模型构建与应用[J]. 水利学报,2020,51(8):936-946. (BAN Xuan,GUO Zhou,XIONG Xingji,et al. Applying physical model of zoobenthos in typical reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(8):936-946. (in Chinese))

[26] ROSENFELD J S,NAMAN S M. Identifying and mitigating systematic biases in fish habitat simulation modeling:implications for estimating minimum instream flows[J]. River Research and Applications,2021,37(6):869-879.

[27] 易雨君,张尚弘. 水生生物栖息地模拟方法及模型综述[J]. 中国科学:技术科学,2019,49(4):363-377. (YI Yujun,ZHANG Shanghong. Review of aquatic species habitat simulation method and modelling[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2019,49(4):363-377. (in Chinese))

[28] 毛劲乔,戴会超. 重大水利水电工程对重要水生生物的影响与调控[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(3):240-245. (MAO Jinqiao,DAI Huichao. Effects of large water conservancy and hydropower projects on major aquatic species and regulation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2016,44(3):240-245. (in Chinese))

[29] 张辉,曾晨军,李婷,等. 基于四大家鱼产卵需求的汉江中下游生态流量研究[J]. 水生态学杂志,2022,43(3):1-8. (ZHANG Hui,ZENG Chenjun,LI Ting,et al. Ecological flow in the mid-lower Hanjiang River based on spawning demands of the four major Chinese craps[J]. Journal of Hydroecology,2022,43(3):1-8. (in Chinese))

[30] 张先炳,胡亚萍,杨威,等. 水温对淡水温水性鱼类生命活动的影响[J]. 水生态学杂志,2021,42(4):117-122. (ZHANG Xianbing,HU Yaping,YANG Wei,et al. Effect of water temperature on the life activities of temperate freshwater fish[J]. Journal of Hydroecology,2021,42(4):117-122. (in Chinese))

[31] 胡莲,姚金忠,杨志,等. 三峡库区支流小江回水区鱼类早期资源状况[J]. 水生态学杂志,2022,43(4):78-84. (HU Lian,YAO Jinzhong,YANG Zhi,et al. Status of early stage fish resources in the backwater area of Xiaojiang River in Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Hydroecology,2022,43(4):78-84. (in Chinese))

[32] 何文祥,胡丹心,许锐杰,等. 流溪河鱼类群落对环境因子的响应及关键标识种的筛查[J]. 生物资源,2022,44(3):223-235. (HE Wenxiang,HU Danxin,XU Ruijie,et al. Response of fish community to water environmental factors and screening of key biomarker species in Liusha River[J]. Biotic Resources,2022,44(3):223-235. (in Chinese))

(收稿日期:2022-09-09 编辑:刘晓艳)