

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.029

上跨铁路桥梁主梁涡振性能及抑振措施研究

龙俊贤¹, 李前名¹, 任达程², 罗颖^{2*}, 韩艳²

(1. 中铁武汉勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430074; 2. 长沙理工大学 土木工程学院)

摘要:该文基于四川省达州市金南大道西延线二期工程上跨铁路桥梁的主梁节段模型风洞试验,探讨了主梁涡振特性。结果表明:主梁断面存在明显的涡振现象。而后,研究了设置抑流板、移动检修车轨道、改变钢板墙外形和透风率等不同气动措施对主梁涡振性能的影响。根据研究结果,抑流板具有良好的抑振效果;适当改变检修车轨道位置能减少主梁的竖弯涡振,但是没有明显规律;改变钢板墙外形的抑振效果有限,提高钢板墙透风率能有效抑制涡振现象的发生。

关键词:上跨铁路桥梁;风洞试验;涡振;抑振措施;抑流板;检修车轨道;钢板墙

1 引言

涡振是桥梁结构在较低风速下容易发生的一种风致振动现象,为限幅振动,不像颤振那样存在失稳的危险。然而,由于其发生的频率高、风速低,不仅影响结构的疲劳和强度,而且会降低行车的舒适度甚至会影响到交通安全。如中国西堠门大桥、日本东京湾跨海大桥等桥梁均出现了明显的涡振现象,影响了桥梁的正常使用。因此研究桥梁结构的涡振性能并找到必要的抗风减振措施,把涡振的最大振幅限制在容许范围之内具有重要的工程意义。

目前,桥梁涡振的危害已经引起风工程界的高度重视,学者们针对涡振现象及其控制开展了大量研究。其中,风洞试验是一种模拟涡振过程流固耦合现象最为普遍的研究手段,也是一种预测结构涡振性能的手

段,包括节段模型试验和全桥气弹模型试验。Frandsen通过比较节段模型、全桥气弹模型、现场实测数据计算表明:全桥气弹模型涡振模拟结果在响应幅值和锁定风速范围方面都明显小于现场实测及节段模型;周帅等也指出,全桥气弹模型由于缩尺比小而导致模型断面误差大、制作复杂并且试验周期长;相对地,节段模型由于缩尺比较大,能更方便地研究桥梁断面的变化对涡振性能产生的影响,并且周期短、成本小。鉴于此,许多研究采用节段模型试验研究桥梁涡振特性。

当前抑制主梁涡振的方法主要有气动措施和机械措施两类。从空气动力学出发,采用气动措施能从根本上抑制或减弱涡振现象,具有较好的可靠性,为大量桥梁所采用。Nagao等研究了护栏类型与位置对桥梁涡振性能的影响;朱思宇等研究了检修车轨道位置和检修车轨道导流板设置、桥面防撞护栏类型、人行道防撞护栏类型以及阻尼比和攻角等对加劲梁涡振性能的

充传感器组成的监测系统实现了实时监测。工程竣工4年后监测显示沉降非常小。

参考文献:

[1] Bae, K. T., Cha, K. S., 等. 釜山巨济大桥沉箱基础注浆工程实例分析[C]. 韩国岩土工程学会年会, 2010.

[2] Dae Woo C. W. C Consulting Co. 灌浆砂浆的混合设计[S].

[3] Jeong, S. G., Jang. 混合设计釜山一大地的海上桥梁基础固定连接[C]. 韩国公民社会年会, 2005.

[4] 韩国混凝土协会. 韩国混凝土标准[S].

[5] 韩国土木工程师学会. 混凝土抗冲蚀剂质量标准[S].

收稿日期:2020-03-12

基金项目:国家自然科学基金优秀青年项目(编号:51822803), 国家自然科学基金资助项目(编号:51878080, 51978087), 国家自然科学基金青年项目(编号:51908074)

作者简介:龙俊贤,男,大学本科,高级工程师. E-mail:18605901@qq.com

* 通信作者:罗颖,男,博士,讲师. E-mail:luoying@csust.edu.cn

影响;李永乐等研究了改变检修车轨道位置和改变栏杆形式对主梁涡振性能的影响;崔欣等研究了改变栏杆透风率对主梁涡振性能的影响;李春光等研究了设置检修车、栏杆抑流板和改变风嘴角度对主梁涡振性能的影响;郭增伟等和方根深等研究了设置抑流板对主梁涡振性能的影响;廖海黎等研究了设置导流板对主梁涡振性能的影响。

对于桥梁断面而言,尽管已经提出了多种气动优化措施用于抑制涡振,但是各种措施抑振机理并不明确,缺乏普适性。同时,有的措施还会对动力稳定性产生不利影响。因此,就目前而言,桥梁涡振控制仍需要在风洞试验过程中不断摸索,反复尝试。

该文以四川省达州市金南大道西延线二期工程上跨铁路桥梁为研究背景,开展主梁节段模型风洞试验研究。首先,探讨现有主梁断面的涡振性能,然后研究设置抑流板、调整检修车轨道位置、改变钢板墙外形或透风率等气动措施对主梁涡振性能的影响。最后,对试验结果予以分析和总结。

2 工程背景

达州市金南大道西延线二期工程上跨铁路主桥,拟建线路地处达州市西外镇城区及城郊,桥梁东侧位于城区,紧邻火车站;桥梁西侧位于城郊,交通较方便,但周边无较高建筑,大多都是农用自留地、未经开采的荒地和山地,使桥址的风环境比较复杂。桥梁区位如图1所示。

主桥采用(105+310+155) m双塔单索面不对称斜拉桥,主塔设计为纵向“人”字形,高86 m,由下、中、上塔柱和塔冠4部分组成。大桥主跨310 m,西侧接桥台,东侧引桥采用(5×25 m)预应力混凝土现浇连续箱梁,桥梁总长700 m,如图2所示。主桥加劲梁采用钢混结合梁,横断面全宽35 m,钢箱梁中心高2.743 m,



图1 桥梁区位图

底板宽16 m,底板两边6 m宽度范围设置变高,两侧高度1.1 m。箱梁两侧设置3.5 m宽翼缘板,端部梁高0.28 m,主跨的标准横断面如图3所示。由于该桥梁是上跨铁路桥梁,为保证桥下行车安全,主梁断面两端设置了不透风的钢板墙,不利于结构的抗风。因此,针对主梁断面形式,有必要开展风洞试验研究。

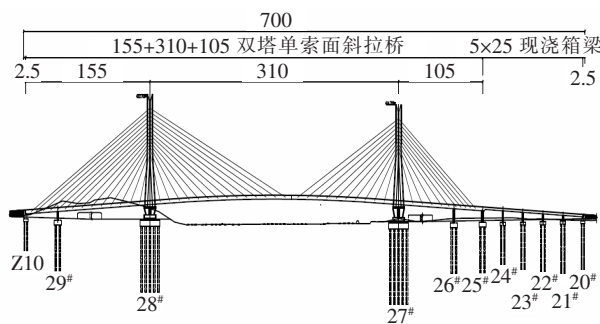


图2 桥梁总体立面图(单位:m)

3 风洞试验概况

该桥的风洞试验采用1:50的缩尺比。基于有限元软件进行建模,根据动力特性分析,桥梁主要模态如表1所示。

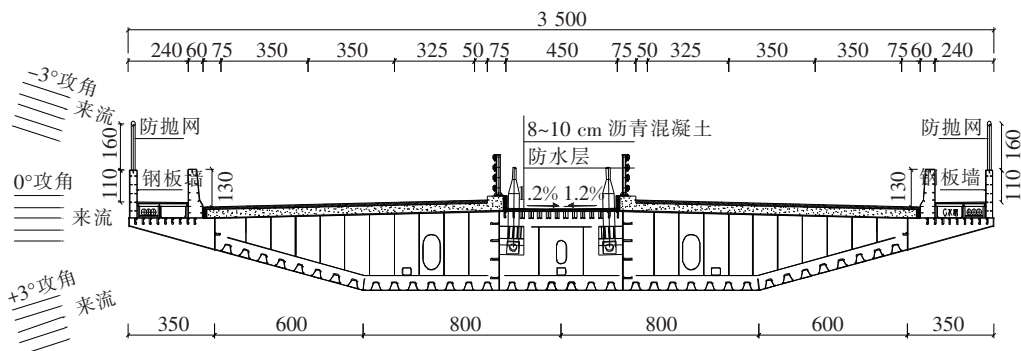


图3 桥梁主梁标准断面图(单位:cm)

根据 JTG/T 3360—01—2018《公路桥梁抗风设计规范》,结合桥址区的地形地貌特点,推算得出桥面高度处主梁设计基准风速 V_d 为 33.08 m/s。

基于节段模型风洞试验,将对上跨铁路桥梁主梁(钢结合梁,阻尼比不能超过 1%)断面的涡振性能进行研究,并根据试验结果考虑是否需要采取抑振措施。成桥状态涡振试验主要参数如表 2 所示。

根据 JTG/T 3360—01—2018《公路桥梁抗风设

计规范》第 8.2.9 条规定,竖向和扭转涡振的振幅应满足如下要求:

$$h_v<\gamma_v\frac{0.04}{f_v};\theta_t<\gamma_t\frac{4.56}{Bf_t}\tag{1}$$

式中: h_v 和 θ_t 分别为竖向涡振振幅(m)和扭转涡振振幅(°); γ_v 和 γ_t 为涡振分项系数,采用风洞试验时均取 1.0; f_v 和 f_t 分别为竖向和扭转振动频率(Hz); B 为主梁特征宽度。

表 1 桥梁主要模态

阶数	频率/Hz	振型特征	阶数	频率/Hz	振型特征
2	0.445	主梁 1 阶正对称竖弯	11	1.416	主梁 1 阶反对称扭转
5	0.703	主梁 1 阶正对称扭转+主梁侧弯	12	1.674	主梁 3 阶正对称竖弯
6	0.715	主梁 1 阶反对称竖弯	14	1.910	主梁 4 阶正对称竖弯
7	0.855	主梁侧弯	15	2.017	主梁 4 阶反对称竖弯
8	0.943	主梁 2 阶反对称竖弯	16	2.100	主梁 2 阶反对称扭转
9	1.074	主梁 2 阶正对称竖弯	18	2.196	主梁反对称侧弯
10	1.324	主梁 3 阶反对称竖弯	19	2.285	主梁 5 阶正对称竖弯

表 2 成桥状态涡振试验主要参数

项目	等效质量		频率				阻尼比	
	质量 $m/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)	质量惯矩 $J_m/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{m}^{-1}$)	正对称竖弯 f_h/Hz	风速 $U_h/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	正对称扭转 f_t/Hz	风速 $U_t/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	竖弯阻尼 比 $\xi_h/\%$	扭转阻尼 比 $\xi_t/\%$
实桥值	53 961.9	4 566 960.0	0.445	—	0.703	—	—	—
模型值	21.58	0.73	7.813	—	12.207	—	0.34	0.436
相似比	$\lambda_m=1:50^2$	$\lambda_J=1:50^4$	17.568	$\lambda_{vh}=1:2.846$	17.371	$\lambda_{vt}=1:2.878$	$\lambda_\xi=1$	$\lambda_\xi=1$

根据式(1),桥梁竖向和扭转涡振振幅允许值分别为 0.089 9 m 和 0.185°。考虑到风洞试验中的涡振并非是完全等幅的简谐振动,后续采用振动的均方差对涡振限值进行分析。根据简谐振动下振幅和均方差的关系,桥梁竖向和扭转位移均方差允许值分别为 0.063 6 m 和 0.131°。

根据该风洞试验数据,−3°、0°和+3°风攻角作用下,主梁断面的竖向位移和扭转位移均方根值随风速变化的曲线如图 4 所示。

由图 4 可以看到,虽然主梁断面在−3°攻角和 0°攻角时的涡振响应幅值均较小,但是在+3°攻角试验工况中竖向涡振响应幅值已明显超过规范允许值(0.063 6 m),因此需要采取抑制措施控制该主梁涡振。

4 主梁涡振抑制措施研究

由图 4 可知:随着风攻角由负向正变化,涡振现象逐渐加剧,+3°攻角工况涡振现象最为显著。考虑到+3°风攻角为最不利情况,后续将基于该风攻角开展涡振抑制措施分析。

如前所述,气动措施能从根本上抑制或减弱涡振现象。因此,考虑到桥梁断面的构造特点并借鉴已有研究成果,后续将考虑 3 种不同的气动抑振措施(设置抑流板、优化检修车轨道位置和优化钢板墙形式)来抑制涡振,具体工况汇总见表 3。

按表 3 工况进行风洞试验得到不同工况下的最大竖向振动位移和扭转均方根值,其结果如图 6、7 所示。

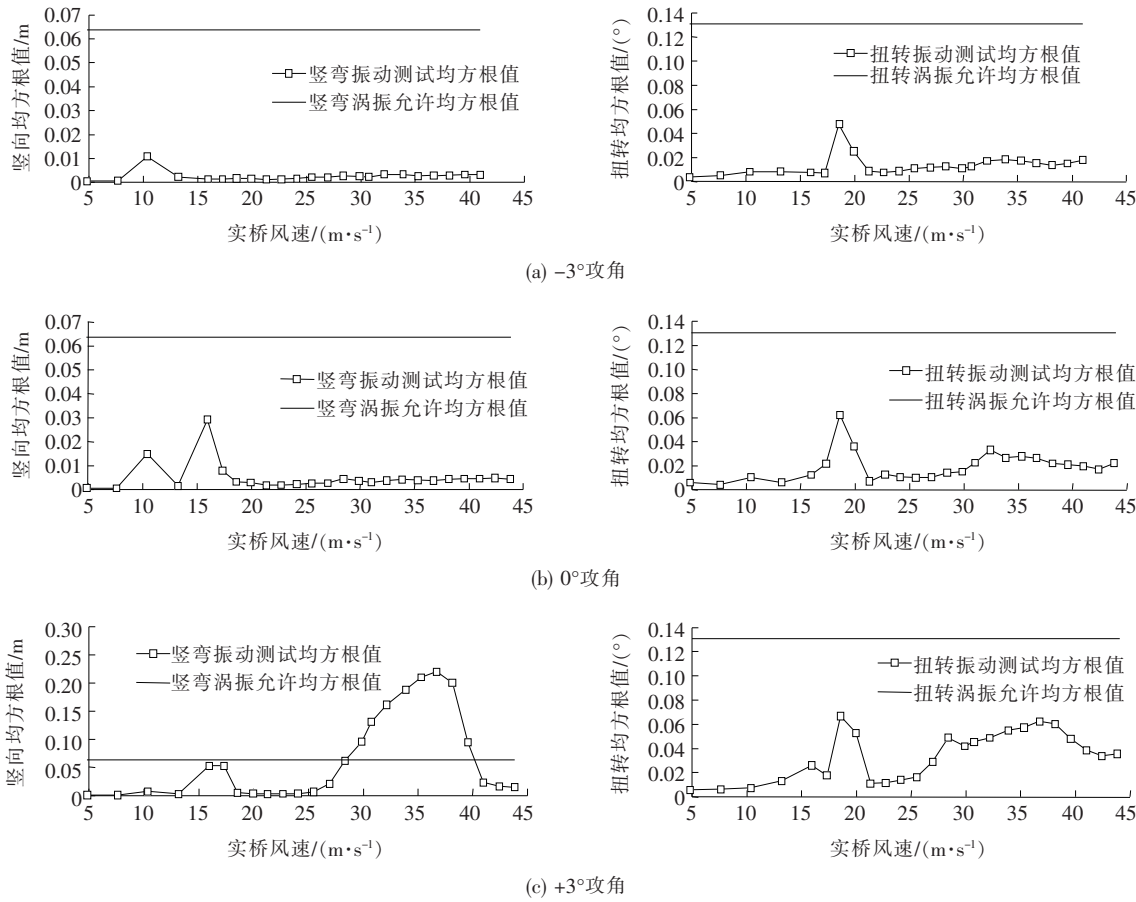


图 4 不同攻角下主梁振动位移均方根值随风速变化曲线

针对表 3 中的 3 种抑振措施分析如下:

(1) 设置抑流板

设置抑流板改变了断面上表面区域流场分布,使气流在抑流板后分离而产生连续的旋涡脱落,改变了下方气流移动路径而抑制了主导断面涡振的上表面主导涡,最终降低区域气动力和涡激力的相关性,进而无法激起整体结构涡振效应。

为考察设置抑流板对主梁涡振的影响,依次设置了 7 个工况(表 3 中工况 1~7)。

从图 6、7 可看出:抑流板宽度为 50 cm 时竖向涡振位移均方根超过了规范容许值,而宽度为 75 cm 和 1 m 时竖向涡振和扭转涡振位移均方根均较小,两种情况的结果差别不大。因此,适当增加抑流板宽度有利于涡振的抑制,而增加到一定宽度后,再增加抑流板宽度对涡振的影响不大。综合考虑安全性和经济性,75 cm 为抑流板的合理宽度,后续的角度影响也以该宽度为参考值。可以看到,随着抑流板与水平面倾斜角度逐渐增加,竖向涡振和扭转涡振位移均方根值没有明显变化。

综上所述,在一定范围内,抑流板宽度对涡振控制

具有明显影响,相比而言,抑流板的角度影响有限。因此,为了有效抑制涡振,可以适当增加抑流板宽度,并根据需要合理设置抑流板的角度。

表 3 工况汇总

抑振措施	工况	状态	示意图
设置抑流板	1	50 cm 水平 45°抑流板	图 5(a)
	2	75 cm 水平 45°抑流板	
	3	1 m 水平 45°抑流板	
	4	75 cm 水平 30°抑流板	
	5	75 cm 水平 60°抑流板	
	6	75 cm 水平 70°抑流板	
	7	75 cm 水平 80°抑流板	
优化检修车轨道位置	8	50 cm 水平 45°抑流板+检修车轨道内移 1.25 m(仍在腹板处)	图 5(b)
	9	50 cm 水平 45°抑流板+检修车轨道内移到腹板与底板交界处	
	10	50 cm 水平 45°抑流板+检修车轨道外移 1.5 m	

续表 3

抑振措施	工况	状态	示意图
优化钢板墙形式	11	钢板墙外设置边长为 1.25 m 的尖端	图 5(c)
	12	钢板墙外设置 $R=1.25$ m, 间距 1.25 m 的半圆形凸起	
	13	钢板墙外设置 $R=1$ m, 间距 2 m 的半圆形凸起	图 5(d)
	14	钢板墙外设置 $d=2.5$ m, 间距 1.5 m 的直角三角形凸起	
	15	钢板墙外设置 $d=2$ m, 间距 1 m 的直角三角形凸起	图 5(e)
	16	提高钢板墙透风率(换成防抛网)	图 5(f)

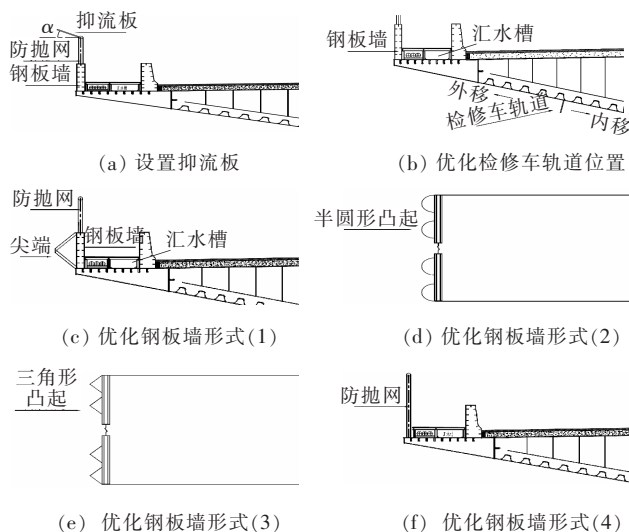


图 5 各工况示意图

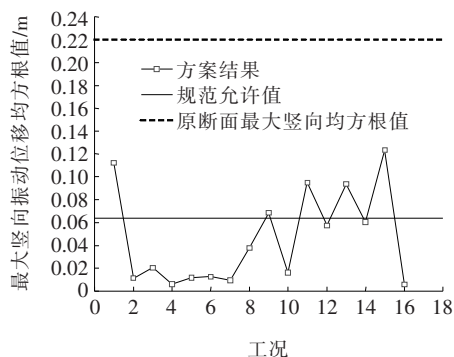


图 6 各工况最大竖向振动位移均方根图

(2) 优化检修车轨道位置

为考察检修车轨道位置对主梁涡振的影响, 一般情况, 在添加 50 cm 水平 45° 抑流板的情况下, 进行 4 种检修车轨道位置情况(工况 1、8~10)的对比。

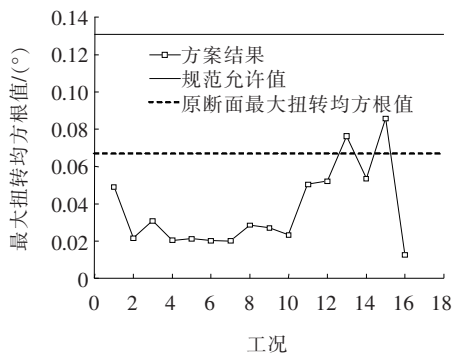


图 7 各工况最大扭转均方根图

由图 6、7 可知: 仅添加 50 cm 水平 45° 抑流板时(检修车轨道位置不做调整)竖向涡振位移均方根超过了规范容许值。在此基础上, 检修车轨道内移 1.25 m 和外移 1.5 m 时竖向涡振和扭转涡振位移均方根能降低到规范允许值以下。若检修车轨道内移至腹板与底板交界处时, 竖向涡振和扭转涡振振幅有一定程度降低, 不过竖向涡振振幅仍超过了规范允许值。

综上所述, 移动检修车能够适当减少涡振位移, 然而没有明显规律。考虑到上跨铁路桥梁对于桥下净空的要求, 该方法不便于应用。

(3) 优化钢板墙形式

桥面附属设施会使主梁上表面来流加剧分离, 从而改变桥梁上表面的压力脉动情况; 同时也会增大下表面压力脉动的幅值, 进而加大桥梁断面的涡激力(涡激力是尾流动力学性能的某种特殊体现), 使结构涡振加剧。由于该桥为上跨铁路桥梁, 主梁两端设置了钢板墙, 钢板墙之上设置了防抛网, 接下来附属设施调整主要针对钢板墙。

为了探讨钢板墙形式变化对桥梁涡振的影响, 依次设置了 6 个工况(工况 11~16)。

由图 6、7 可知: 提高钢板墙透风率(钢板墙换成防抛网)时的竖向涡振和扭转涡振位移均方根值大幅下降, 涡振现象得到有效抑制。

在钢板墙表面设置凸起, 可以扰乱气流, 从而可以达到抑制涡振的作用。通过几种不同形式的凸起设置, 可以看到相比原有的主梁断面, 竖向涡振幅度有所下降, 但仍然接近甚至超过了规范允许值, 而扭转涡振幅度变化不大。因此, 在钢板墙外设置凸起的方式作用有限, 无法有效地抑制涡振现象的发生。

综上所述, 将钢板墙替换成防抛网, 提高其透风率, 能够有效地降低涡振幅度。考虑到该桥为上跨铁路桥梁, 该措施可能危及桥下行车安全, 需谨慎采用。

5 结论

以达州市金南大道西延线二期工程上跨铁路主桥为工程背景,基于节段模型风洞试验,开展了主梁涡振性能及抑振措施研究。主要结论如下:

(1) 主梁涡振幅度随来流风攻角增大而逐渐加剧。

(2) 适当增加抑流板宽度有利于抑制涡振,抑流板与水平夹角的变化对涡振幅度影响并不明显。

(3) 改变检修车轨道位置能适当地减少主梁的涡振幅度,但是没有明显规律。

(4) 在钢板墙外设置凸起能够减少涡振幅度,但作用有限;将钢板墙替换成防抛网,提高钢板墙透风率,涡振现象能够得到有效抑制。

总体而言,考虑到该桥为上跨铁路桥梁,移动检修车轨道可能影响桥下净空,钢板墙替换成防抛网可能影响桥下行车安全,而设置抑流板为较为合理的有效涡振抑制措施。

参考文献:

- [1] LARSEN A. Aerodynamic Aspects of the Final Design of the 1 624 m Suspension Bridge Across the Great Belt [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1993, 48(2): 261—285.
- [2] LI H, LAIMA S, ZHANG Q, et al. Field Monitoring and Validation of Vortex—Induced Vibrations of a Long—Span Suspension Bridge [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2014, 124(7): 54—67.
- [3] GE Y J, ZOU X J, YANG Y X. Aerodynamic Stabilization of Central Stabilizers for Box Girder Suspension Bridges [J]. Wind and Structures, 2009, 12(4): 285—295.
- [4] FUJINO Y. Wind—Induced Vibration and Control of Trans—Tokyo Bay Crossing Bridge [J]. Journal of Structure and Engineering, 2002, 8: 1 012—1 025.
- [5] FRANDSEN J. Simultaneous Pressures and Accelerations Measured Full—Scale on the Great Belt East Suspension Bridge [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(1): 95—129.
- [6] 周帅, 陈政清, 华旭刚, 等. 大跨度桥梁高阶涡振幅值对比风洞试验研究 [J]. 振动与冲击, 2017(18).
- [7] 李明水, 孙延国, 廖海黎, 等. 港珠澳大桥大挑臂钢箱梁涡激振动特性及抑振措施 [J]. 清华大学学报, 2020(1).
- [8] Nagao F, Utsunomiya H, Yoshioka E, et al. Effects of Handrails on Separated Shear Flow and Vortex—Induced Oscillation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 69: 819—827.
- [9] 朱思宇, 李永乐, 申俊昕, 等. 大攻角来流作用下扁平钢箱梁涡振性能风洞试验优化研究 [J]. 土木工程学报, 2015(2).
- [10] 李永乐, 侯光阳, 向活跃, 等. 大跨度悬索桥钢箱主梁涡振性能优化风洞试验研究 [J]. 空气动力学学报, 2011(6).
- [11] 崔欣, 王慧贤, 管青海, 等. 栏杆透风率对主梁涡振特性影响的风洞试验 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018(3).
- [12] 李春光, 张记, 樊永波, 等. 宽幅流线型钢箱梁涡振性能气动优化措施研究 [J]. 桥梁建设, 2017(1).
- [13] 郭增伟, 赵林, 葛耀君, 等. 基于桥梁断面压力分布统计特性的抑流板抑制涡振机理研究 [J]. 振动与冲击, 2012(7).
- [14] 方根深, 杨咏昕, 葛耀君, 等. 半开口分离双箱梁涡振性能及其气动控制措施研究 [J]. 土木工程学报, 2017(3).
- [15] 廖海黎, 王骑, 李明水. 嘉绍大桥分体式钢箱梁涡激振动特性风洞试验研究 [C]. 第十四届全国结构风工程学术会议论文集, 2009.
- [16] 许福友, 丁威, 姜峰, 等. 大跨度桥梁涡激振动研究进展与展望 [J]. 振动与冲击, 2010(10).
- [17] 刘健新. 桥梁对风反应中的涡激振动及制振 [J]. 中国公路学报, 1995(2).
- [18] 许福友, 林志兴, 李永宁, 等. 气动措施抑制桥梁涡振机理研究 [J]. 振动与冲击, 2010(1).
- [19] 杨咏昕, 周锐, 葛耀君, 等. 大跨度分体箱梁桥梁涡振性能及其控制 [J]. 土木工程学报, 2014(12).
- [20] 葛耀君, 赵林, 许坤, 等. 大跨桥梁主梁涡激振动研究进展与思考 [J]. 中国公路学报, 2019(10).
- [21] 赵林, 李珂, 王昌将, 等. 大跨桥梁主梁风致稳定性被动气动控制措施综述 [J]. 中国公路学报, 2019(10).
- [22] 胡传新, 赵林, 周志勇, 等. 流线型闭口箱梁抑流板抑制涡振机理研究 [J]. 振动工程学报, 2020(1).
- [23] CHOMAZ J M. Global Instabilities in Spatially Developing Flows: Non—Normality and Nonlinearity [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2005, 37: 357—392.
- [24] MATHELIN L, LANGRE E. Vortex—Induced Vibrations and Waves under Shear Flow with a Wake Oscillator Model [J]. European Journal of Mechanics—B/Fluids, 2005, 24(4): 478—490.
- [25] 管青海, 李加武, 胡兆同, 等. 栏杆对典型桥梁断面涡激振动的影响研究 [J]. 振动与冲击, 2014(3).