

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023101723121984

文章编号:1674-599X(2023)06-0083-10

引用格式:陈银伟,王旋,马行川,等.某上跨铁路桥梁涡振特性及气动优化试验研究[J].交通科学与工程,2023,39(6):83-92.

Citation: CHEN Yinwei, WANG Xuan, MA Xingchuan, et al. Study on vortex-induced vibration performance and aerodynamic optimization test of an overpass railway bridge[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(6): 83-92.

某上跨铁路桥梁涡振特性及气动优化试验研究

陈银伟¹,王旋¹,马行川¹,徐开铎¹,任达程²

(1. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430071; 2. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:针对某上跨铁路桥梁进行风洞试验,探讨该桥梁带防抛墙主梁断面的涡振性能。相比带防抛网的主梁断面,该断面同样存在明显的涡振现象,且涡振性能更加恶劣。为抑制涡振,设置导流板、移动检修车轨道、封闭防撞栏杆、全封闭和有透风率的上中央稳定板及抑流板等气动优化措施对桥梁涡振特性的影响。研究表明:上中央稳定板和向内倾斜的抑流板为有效的抑振措施。对于上中央稳定板,随着高度增加,抑振效果增强;随着透风率的增加,抑振效果下降。当抑流板宽度和上中央稳定板高度数值均较大时,其组合效果优于单一措施的效果。研究结果可为同类型桥梁的抗风设计提供借鉴。

关键词:上跨铁路桥梁;风洞试验;涡振;抑振;气动优化措施

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

Study on vortex-induced vibration performance and aerodynamic optimization test of an overpass railway bridge

CHEN Yinwei¹, WANG Xuan¹, MA Xingchuan¹, XU Kaiduo¹, REN Dacheng²

(1. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430071, China;

2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Wind tunnel tests are carried out on an overpass railway bridge to investigate the vortex-induced vibration (VIV) performance of the main beam section with anti-throwing wall. The test results show that compared with the main beam section with anti-throwing net, the VIV phenomenon is obvious as well for this section. Moreover, the VIV performance is worse. In order to suppress the VIV, several aerodynamic optimization measures are discussed, including setting the flow guide plate, moving the track of the repair car, sealing the anti-collision railings, setting the upper central stability plate with whole sealing or air permeability, setting the flow suppression plate and so on. It is found that the upper central stability plate and the flow suppression plate with inward tilt are effective measures for the suppression of VIV. As for the upper central stability plate, the suppression effect becomes better for larger height. In addition, the effect is worse under the increase of the air permeability. When the width of the flow suppression plate and the height of the upper central stability plate are larger simultaneously, the effect of their combination is prior to that of either of them. The

收稿日期:2022-10-17

基金项目:国家自然科学基金(51908074);湖南省教育厅科学研究项目(20C0055);长沙理工大学土木工程优势特色重点学科创新性项目(18ZDXK16)

作者简介:陈银伟(1984—),男,中铁大桥勘测设计院集团有限公司高级工程师。E-mail:28816350@qq.com

results can provide reference for wind-resistant design of this kind of bridge.

Key words: overpass railway bridge; wind tunnel test; vortex-induced vibration; vibration suppression; aerodynamic optimization measure

随着交通基础设施建设的不断推进,铁路和公路交叉出现的频率越来越高。在现有铁路上涌现了大量的上跨铁路桥梁。为确保铁路列车行车安全,该类桥梁需要增设防抛网或防护墙等防护措施^[1]。造成相较于其他类型桥梁,这些防护措施会导致该类桥梁断面透风率变低,气动性能恶化,不利于抗风。

在常规风速下,桥梁结构容易出现涡振现象^[2-7]。针对桥梁的涡振及其控制,许多学者开展了大量研究。当前抑制主梁涡振的方法主要分为机械措施和气动措施两类^[8]。相比机械措施,气动措施能从根本上消除风振诱因,方式更为可靠,且控制成本更小^[9],是大多数桥梁优先选择的抑振措施^[10]。针对钢混结合梁断面,张天翼等^[11]发现,封闭防撞栏杆可以在一定程度上减弱断面的涡振现象,其与三角形风嘴组合后,能更好地抑制涡振。李浩^[12]发现,设置下稳定板与栏杆抑流板的组合措施能有效抑制结合梁的涡振。针对流线型钢箱梁,郭增伟等^[13]剖析了桥梁竖弯涡振机理和抑流板的有效抑振机理。李春光等^[14]以太洪长江大桥为例,研究表明:检修道栏杆是涡振首要敏感构件,设置抑流板和减小风嘴角度能有效降低涡振幅度。李浩弘等^[15]发现,增加人行道护栏透风率和移动检修车轨道可降低竖弯及扭转涡振响应振幅。对于分离式钢箱梁,王骑等^[16]研究了导流板对主梁涡振

性能的影响,发现其在不同风攻角的情况下均能有效抑制桥梁涡振现象。方根深等^[17]发现,抑流板措施可以有效抑制涡振。程怡等^[18]研究了中央稳定板对主梁涡振性能的影响,试验结果表明:中央稳定板能明显降低竖向涡振的振幅。尽管目前有多种气动优化措施用于改善桥梁涡振性能,但是对于不同断面形式的桥梁,其效果存在差异。针对断面较为钝化的上跨铁路桥梁,仍有必要通过风洞试验探讨其涡振性能及气动优化措施。因此,本研究拟以某上跨铁路桥梁为研究对象,进行主梁节段模型风洞试验研究。探讨带防抛网和防抛墙断面的主梁涡振性能。并针对带防抛墙的主梁断面,研究设置导流板、移动检修车轨道、封闭防撞栏杆、设置全封闭和有透风率的上中央稳定板以及抑流板等不同气动措施对主梁涡振性能的影响。以期为同类桥型的抗风设计提供参考。

1 工程背景

该上跨铁路桥梁位于四川省达州市,主桥采用(105+310+105)m双塔单索面不对称斜拉桥,主跨长310 m,桥梁总长700 m。主塔设计为纵向“人”字型,高86 m,由下、中、上塔柱和塔冠四部分组成,如图1所示。

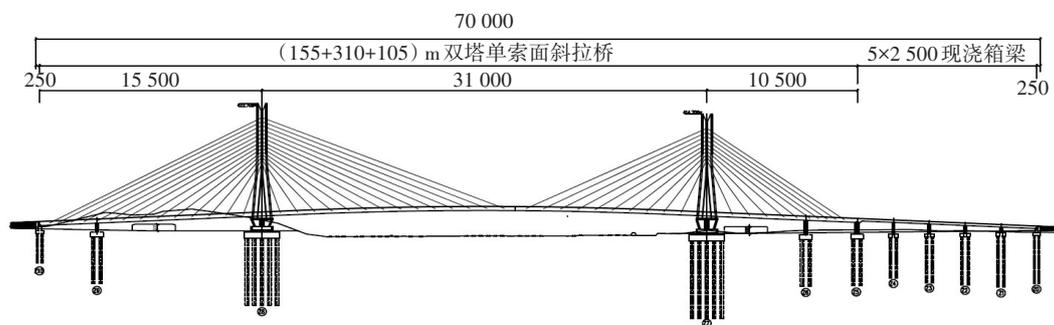


图1 桥梁总体立面(单位:cm)

Fig. 1 General elevation of bridge(unit:cm)

主桥加劲梁采用钢混结合梁,横断面全宽35 m,设置双向2.0%人字坡,混凝土桥面板采用C60混凝土。

钢箱梁中心高2.743 m,底板宽16.0 m,底板两边6.0 m宽度范围设置变高,两侧高度1.1 m。翼缘

板宽 3.5 m,端部梁高 0.28 m。初步设计时,主跨的主梁断面如图 2 所示。出于铁路列车行车安全考虑,后续设计中将主梁端部设置的 1.6 m 高防抛网修改

为 1.1 m 高防抛墙,修改后主跨主梁截面如图 3 所示。钢板墙和防抛墙可能会对结构的抗风性能产生不利影响,因此,针对该桥梁进行风洞试验研究。

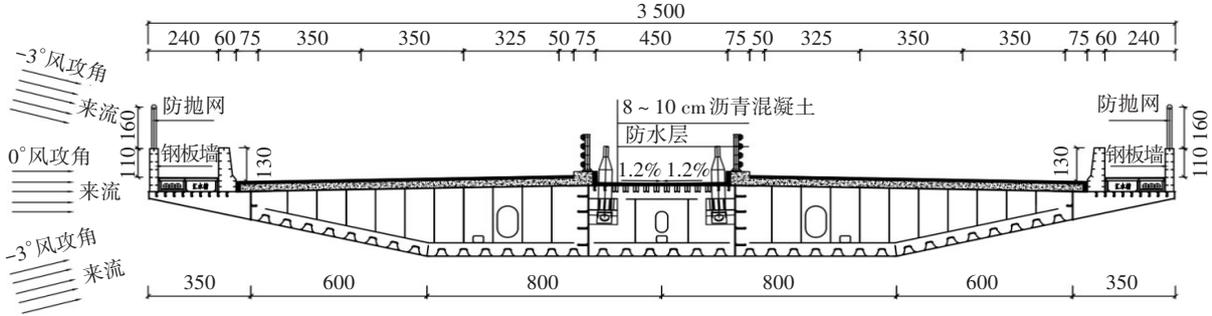


图 2 修改断面前主跨主梁截面(单位:cm)

Fig. 2 Main beam section diagram of the main span before modification (unit :cm)

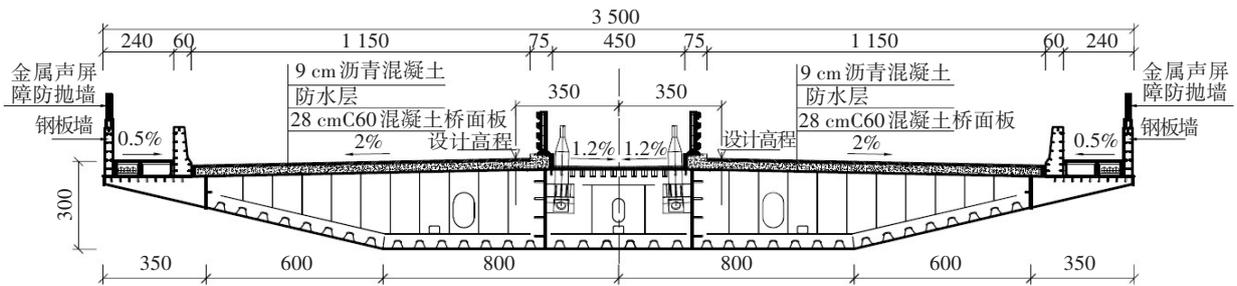


图 3 修改断面后主跨主梁截面(单位:cm)

Fig. 3 Main beam section diagram of the main span after modification (unit :cm)

基于有限元软件对该桥梁结构进行建模并进行动力特性分析,得到该桥梁一阶竖弯和一阶扭转的频率见表 1。由表 1 可知,断面修改前、后频率变化不大。对于防抛墙断面,主梁一阶竖弯和一阶扭转频率分别为 0.447 Hz 和 0.712 Hz, 扭转比为 1.593。

表 1 桥梁主要振动模式

Table 1 Main vibration modes of Bridges

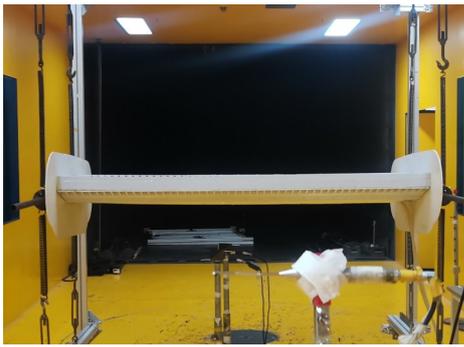
	振动频率/Hz		差异/%
	防抛网断面	防抛墙断面	
一阶竖弯	0.445	0.447	0.45
一阶扭转	0.703	0.712	1.28

2 风洞试验概况

该桥的节段模型风洞试验在长沙理工大学风洞实验室高速段开展。试验段长 21 m,宽 4 m,高 3 m,可调风速为 0~45 m/s。节段模型采用 1:50 的缩尺比,图 4 为风洞试验中的主梁节段模型。



(a) 修改前的主梁节段模型



(b) 修改后的主梁节段模型

图4 修改前后的主梁节段模型

Fig. 4 Main beam segment model before and after modification

根据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)^[19],结合桥址区的地形地貌特点,推算出桥面高度处主梁设计基准风速 V_d 为 33.08 m/s。同时,根据该设计规范,不同断面下成桥状态主梁竖向涡振及扭转涡振允许振幅见表2。

表2 桥梁允许振幅

Table 2 Allowable bridge amplitude

断面类型	竖向/m	扭转/(°)
防抛网断面	0.089 9	0.185
防抛墙断面	0.089 5	0.183

基于节段模型风洞试验,将对桥梁涡振性能进行研究。针对防抛墙断面,成桥状态涡振试验主要参数见表3。出于安全考虑,竖弯和扭转阻尼比取0.7%。在 -3° 、 0° 和 $+3^\circ$ 风攻角下,桥梁断面修改前、后主梁位移随风速的变化分别如图5~6所示。

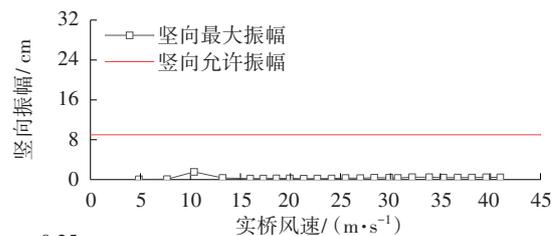
表3 成桥状态涡振试验主要参数

Table 3 Main parameters of vortex-induced vibration test under completion stage of the bridge

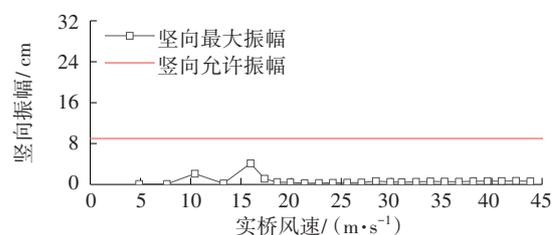
参数名称	实桥值	相似比	模型值
质量 m / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	53 324.1	$\lambda_m=1:50^2$	21.33
质量惯矩 J_m / ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)	4 554 980	$\lambda_j=1:50^4$	0.73

表3 (续)

参数名称	实桥值	相似比	模型值
正对称竖弯 f_h / Hz	0.447	17.479:1	7.813
风速 U_h / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	-	$\lambda_{v_h}=1:2.861$	-
正对称扭转 f_t / Hz	0.712	17.145:1	12.207
风速 U_t / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	-	$\lambda_{v_t}=1:2.916$	-
竖向阻尼比 ξ_h / %	-	$\lambda_{\xi}=1$	0.7
扭转阻尼比 ξ_t / %	-	$\lambda_{\xi}=1$	0.7



(a) -3° 风攻角



(b) 0° 风攻角

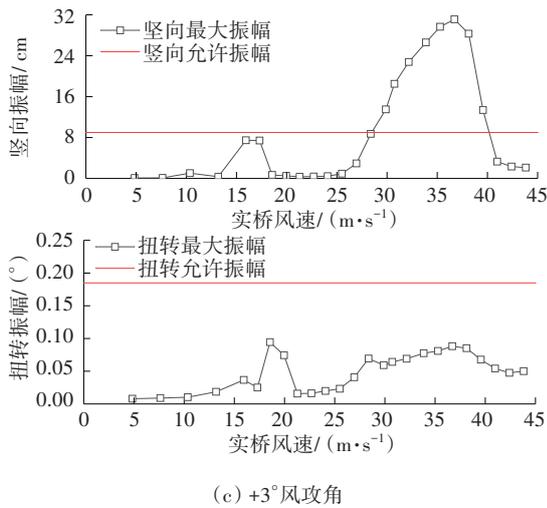


图5 防抛网断面不同风攻角下主梁位移随风速的变化

Fig. 5 Variation of main beam displacement with wind speed at different wind attack angles for section with anti-throwing nets

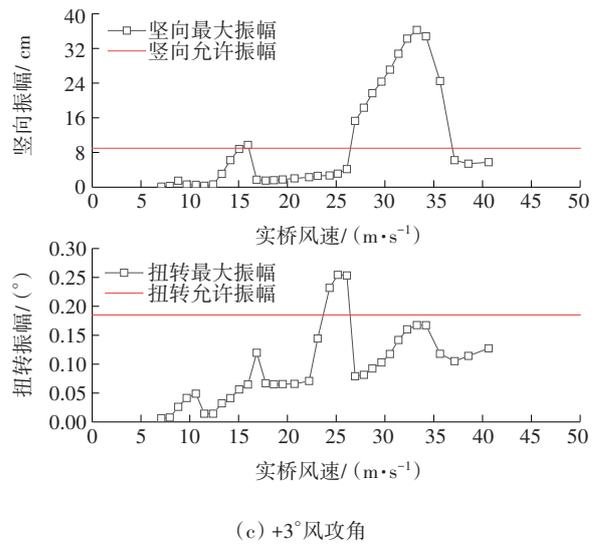
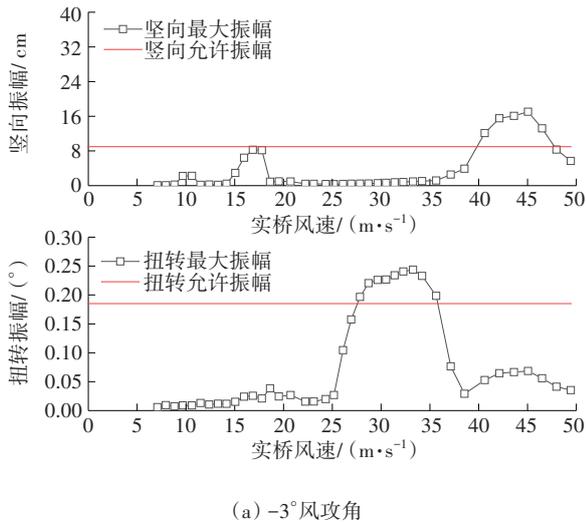
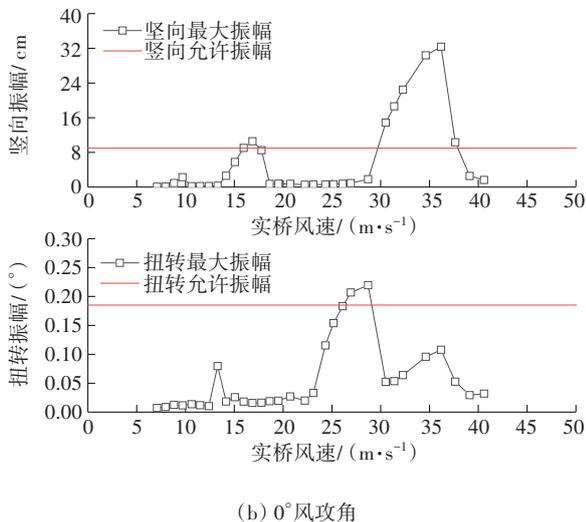


图6 防抛墙断面不同风攻角下主梁位移随风速的变化

Fig. 6 Variation of main beam displacement with wind speed at different wind attack angles for section with anti-throwing wall



(a) -3°风攻角



(b) 0°风攻角

从图5~6可以看出,桥梁断面修改前、后主梁均有比较明显的涡振现象,+3°风攻角下竖向涡振振幅均明显超过规范允许值。将防抛网换成防抛墙后,涡振进一步恶化,此时,3个风攻角下的竖向和扭转涡振振幅均超过规范允许值。因此,对于该上跨铁路桥梁,采用透风率更低的防抛墙,涡振现象更加明显。对于防抛网断面的涡振情况,已在文献[20]中进行了探讨,后续主要针对防抛墙断面情况开展气动优化措施研究。

3 涡振抑制措施研究

从图6可以看出,修改断面后+3°风攻角同样为最不利工况。因此,后续针对最不利的+3°风攻角情况,开展涡振抑制措施研究。有效的气动措施,在0°和-3°风攻角情况下,涡振振幅也得到了有效抑制。限于篇幅,本研究仅讨论+3°风攻角情况。

考虑到桥梁断面的构造特点并借鉴已有研究成果^[21],接下来将探讨多种气动措施的影响,具体见表4。各抑振措施工况的最大竖向和扭转振幅如图7所示。

表4 不同抑振措施汇总(+3°风攻角)

Table 4 Summary of different vibration suppression measures (+3° wind attack angle)

序号	气动措施	序号	气动措施
1	1.00 m 导流板	15	透风率30%的5.00 m上中央稳定板
2	外移检修车轨道	16	向外倾斜45°的0.75 m抑流板
3	内移检修车轨道	17	向外倾斜45°的1.00 m抑流板
4	防撞栏杆上部封闭	18	向内倾斜45°的0.50 m抑流板
5	防撞栏杆全封闭	19	向内倾斜45°的0.75 m抑流板
6	2.50 m上中央稳定板	20	向内倾斜45°的1.00 m抑流板
7	3.75 m上中央稳定板	21	向内倾斜45°的0.50 m抑流板+透风率10%的4.50 m上中央稳定板
8	4.00 m上中央稳定板	22	向内倾斜45°的1.00 m抑流板+透风率10%的4.50 m上中央稳定板
9	5.25 m上中央稳定板	23	向内倾斜45°的0.75 m抑流板+透风率10%的3.50 m上中央稳定板
10	透风率10%的2.50 m上中央稳定板	24	向内倾斜45°的1.00 m抑流板+透风率10%的3.50 m上中央稳定板
11	透风率10%的3.50 m上中央稳定板	25	向内倾斜45°的1.00 m抑流板+2.50 m上中央稳定板
12	透风率10%的4.50 m上中央稳定板	26	向内倾斜45°的1.00 m抑流板+3.00 m上中央稳定板
13	透风率30%的3.00 m上中央稳定板	27	向内倾斜45°的1.00 m抑流板+3.50 m上中央稳定板
14	透风率30%的3.80 m上中央稳定板		

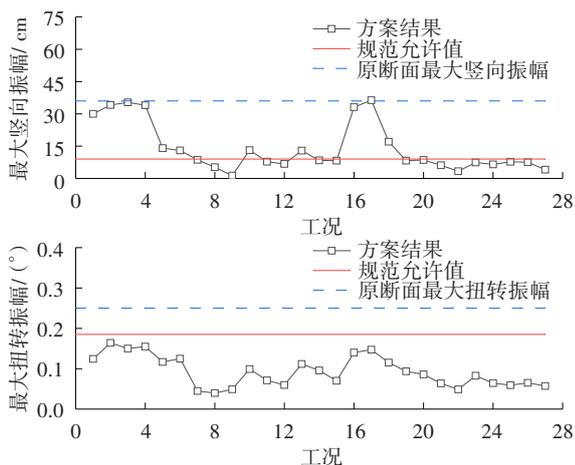


图7 不同气动措施下的断面最大竖向和扭转振幅

Fig. 7 Maximum vertical and torsional amplitudes of bridge section under various aerodynamic optimization measures

从图7可以看出,添加不同气动措施后,扭转涡振的最大振幅均满足规范要求,表明扭转涡振性能得到改善。

对于竖向涡振情况,分析消防导流板、移动检修车轨道、封闭防撞栏杆、上中央稳定板、有透风率的上中央稳定板、防抛墙处设置抑流板和组合措施等不同气动措施的影响。

1) 导流板。

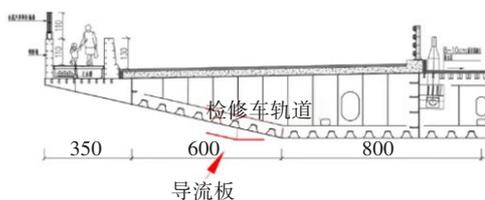


图8 气动措施1(单位:cm)

Fig. 8 Aerodynamic optimization measure 1(unit:cm)

导流板能帮助引导主梁底部的流场,改变结构表面的旋涡,从而达到抑制涡振的效果。从图7可以看出,设置1.00 m导流板时,主梁竖向振幅没有改善,为规范允许值的3.35倍。因此,导流板在引导底部流场之后,对竖向涡振没有明显的抑制效果。

2) 移动检修车轨道。

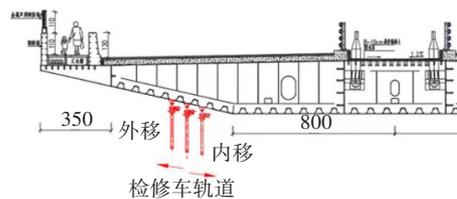


图9 气动措施2-3(单位:cm)

Fig. 9 Aerodynamic optimization measures 2-3(unit:cm)

移动检修车轨道会影响主梁底部的流场形式,改变旋涡脱落的位置,从而起到抑制涡振的作用。从图7可以看出,外移和内移检修车轨道后,竖向位移幅值没有明显变化,分别为规范允许值的3.81和3.95倍。因此,移动检修车轨道改变底部旋涡脱落位置,同样无法有效抑制竖向涡振。

3) 封闭防撞栏杆。

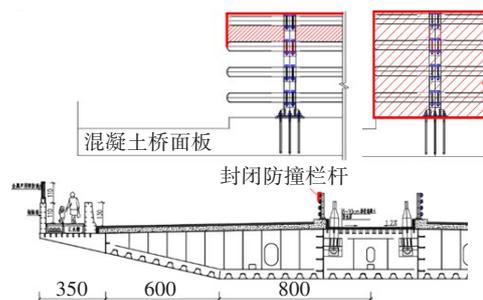


图10 气动措施4-5(单位:cm)

Fig. 10 Aerodynamic optimization measures 4-5(unit:cm)

防撞栏杆会影响上表面来流的分离,改变上下表面的压力脉动情况。封闭防撞栏杆能扰乱主梁上部来流的分离,从而降低压力脉动强度,实现抑振的目的。根据试验结果,在防撞栏杆上部封闭情况下,竖向涡振最大振幅没有明显变化。防撞护栏全封闭时,竖向涡振最大振幅为 14.0 cm,相比原断面,涡振性能有一定的改善。然而,该幅值仍为规范允许值的 1.57 倍,没有实现对涡振的有效抑制。

4) 上中央稳定板。

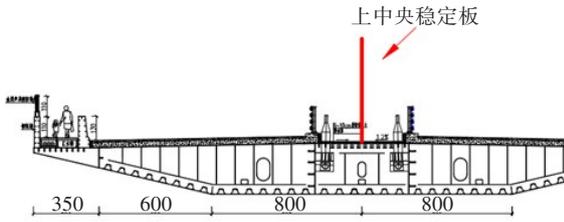


图 11 气动措施 6-9(单位:cm)

Fig. 11 Aerodynamic optimization measures 6-9(unit:cm)

上中央稳定板可以改变背风侧梁上、下表面的压强场,从而影响竖向涡振的振幅。根据试验结果,上中央稳定板有良好的抑振效果,随着其高度增加,涡振幅度进一步下降。当高度为 3.75 m 时,竖向振幅略小于规范允许值。高度在 4.00 m 以上时,竖向振幅远小于规范允许值,涡振得到有效抑制。

5) 有透风率的上中央稳定板。

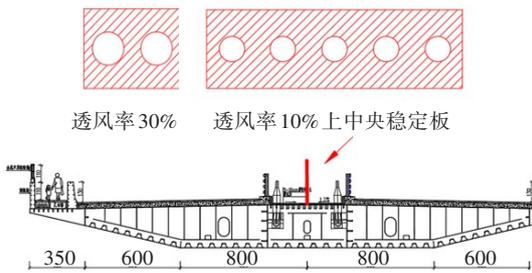


图 12 气动措施 10-15(单位:cm)

Fig. 12 Aerodynamic optimization measures 10-15(unit:cm)

考虑到全封闭的上中央稳定板会给行车带来压抑感,因此探讨有一定透风率上中央稳定板的抑振效果,其形式相对美观,且成本更低。

根据试验结果,相比没有透风率的情况,涡振振幅增加,即增加稳定板透风率会导致抑振效果变差。类似地,稳定板越高,抑振效果越好。当上中央稳定板透风率为 10%、高度为 4.50 m 时,竖向涡振振幅满足要求,但仍有一定程度的涡振。当透风率

增加到 30%、高度为 5.00 m 时,竖向涡振在规范允许值附近。因此,当上中央稳定板存在透风率时,抑振能力下降,可以将涡振幅度控制在规范允许范围内,但难以完全抑制涡振的发生。

6) 防抛墙处设置抑流板。

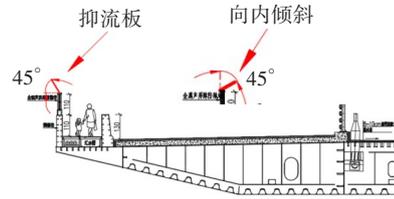


图 13 气动措施 16-20(单位:cm)

Fig. 13 Aerodynamic optimization measures 16-20(unit:cm)

抑流板措施可以减弱桥梁中下游位置压力脉动的分布强度和作用时序的相关性,从而达到抑制涡振的效果^[13]。此外,设置抑流板还能改变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,改变下方气流移动路径^[22]。根据试验结果,向外设置的抑流板没有明显的抑振效果;当抑流板向内设置时,抑振效果与其长度有关。当长度为 0.50 m 时,抑振效果有限;而长度分别为 0.75 m 和 1.00 m 时,竖向涡振振幅均略小于规范允许值。因此,设置向内倾斜的抑流板有一定的抑振效果,但不如上中央稳定板的抑振效果明显。

7) 组合措施:抑流板+上中央稳定板。

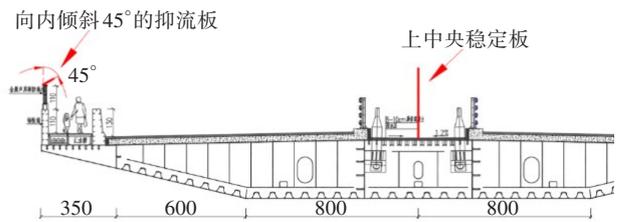


图 14 气动措施 21-27(单位:cm)

Fig. 14 Aerodynamic optimization measures 21-27(unit:cm)

考虑抑流板+上中央稳定板,上中央稳定板和抑流板较为有效,因此,将两种措施进行组合,测试其抑振效果。对比工况 24 和工况 27 可以发现,当稳定板存在透风率时,组合措施的抑振效果下降。总体而言,当抑流板宽度和上中央稳定板高度较小时,相比上中央稳定板的单一措施,抑振效果没有明显改进。当两者的值均较大时,组合措施抑振效果优于任一单独措施。其中,工况 22 和工况 27 在

组合措施下,扭转位移幅值远小于规范允许值,竖向位移幅值分别为规范允许值的37%和46%。

在这些气动措施中,导流板和移动检修车轨道主要改变主梁下部流场;封闭防撞护栏、上中央稳定板和抑流板则重点调整主梁上部流场。根据试验结果,改变主梁上部流场的气动措施较为有效。其中,上中央稳定板和向内倾斜的抑流板可以使得竖向和扭转振幅小于规范允许值,且前者更为有效。在上中央稳定板高度和抑流板宽度较大的情况下,组合措施优于单一措施的效果。根据带防抛网断面的主梁节段模型风洞试验^[20],设置向外倾斜的抑流板和改变检修车轨道位置是较有效的抑振措施,其主要改变的分别为主梁上部和下部流场。桥梁断面设置防抛墙后上部透风率的改变显著影响了桥梁涡振特性,使得上部流场成为引发涡振的关键因素,是促使有效抑振的形式。

4 结论

以某上跨铁路主桥为工程背景,基于节段模型风洞试验,开展了带防抛墙断面的主梁涡振性能及抑振措施研究。得到结论:

1) 桥梁断面形式对涡振性能的影响明显。对于该上跨铁路桥梁,降低断面透风率,涡振幅度增加,涡振性能进一步恶化。

2) 上中央稳定板为该桥梁的有效抑振措施,抑振效果随高度增加而上升,当高度达到4.00 m以上时,能够实现有效抑振。当上中央稳定板存在透风率时,抑振能力下降,难以有效抑制涡振。

3) 向内倾斜的抑流板能够改善桥梁涡振性能,当抑流板宽度增加至75 cm以上时,效果更佳。然而,添加抑流板后,竖向涡振振幅仅略小于规范值,抑振效果不如上中央稳定板的。

4) 考虑上中央稳定板和抑流板的组合措施,当稳定板高度和抑流板宽度较小时,抑振效果与稳定板的单一措施的接近。当稳定板高度和抑流板宽度较大时,优于单一措施的效果。

5) 针对带防抛墙主梁断面,有效抑振措施集中在改变主梁上部流场,与带防抛网的情况存在差异,表明上部流场为引发桥梁涡振的关键因素。

参考文献(References):

- [1] 李吉林, 孙宗磊, 刘洪占. 公路上跨高速铁路桥梁防护措施方案探讨[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(5): 52-56. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2013.05.011.
LI Jilin, SUN Zonglei, LIU Hongzhan. Research on protective measures for highway bridge crossing high-speed railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(5): 52-56. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2013.05.011.
- [2] LARSEN A. Aerodynamic aspects of the final design of the 1624 m suspension bridge across the Great Belt [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 48(2/3): 261-285. DOI: 10.1016/0167-6105(93)90141-A.
- [3] GE Y J, ZOU X J, YANG Y X. Aerodynamic stabilization of central stabilizers for box girder suspension bridges [J]. Wind and Structures an International Journal, 2009, 12(4): 285-298. DOI: 10.12989/was.2009.12.4.285.
- [4] LI H, LAIMA S J, ZHANG Q Q, et al. Field monitoring and validation of vortex-induced vibrations of a long-span suspension bridge [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 124: 54-67. DOI: 10.1016/j.jweia.2013.11.006.
- [5] 颜宇光, 杨咏昕, 周锐. 开口断面主梁斜拉桥的涡激共振控制试验研究[J]. 中国科技论文, 2015, 10(7): 760-764, 787.
YAN Yuguang, YANG Yongxin, ZHOU Rui. Experimental study on vortex-induced vibration control measure for cable-stayed bridge with open sections [J]. China Sciencepaper, 2015, 10(7): 760-764, 787.
- [6] 李欢, 何旭辉, 王汉封, 等. π 型断面超高斜拉桥涡振减振措施风洞试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(7): 62-68. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.07.010.
LI Huan, HE Xuhui, WANG Hanfeng, et al. Wind tunnel tests for vortex-induced vibration control measures of a super high cable-stayed bridge with π -cross section [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(7): 62-68. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.07.010.
- [7] 汪志雄, 张志田, 郗凯, 等. π 型开口截面斜拉桥弯扭耦合涡激共振及气动减振措施研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(1): 52-57, 94.
WANG Z X, ZHANG Z T, QIE K, et al. Bending-

- torsion coupled vortex induced resonance of π -type open section cable stayed bridge and aerodynamic vibration reduction measures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(1): 52-57, 94.
- [8] 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(自然科学版)*, 2020, 60(1): 57-65. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2019.26.049.
- LI Mingshui, SUN Yanguo, LIAO Haili, et al. Vortex-induced vibration of steel box girder with large projecting slab and its mitigation countermeasures for Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2020, 60(1): 57-65. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2019.26.049.
- [9] 赵林, 葛耀君, 郭增伟, 等. 大跨度缆索承重桥梁风振控制回顾与思考: 主梁被动控制效果与主动控制策略[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(12): 91-100. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2015.12.013.
- ZHAO Lin, GE Yaojun, GUO Zengwei, et al. Reconsideration of wind-induced vibration mitigation of long-span cable supported bridges: effects of passive control and strategy of active control [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(12): 91-100. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2015.12.013.
- [10] 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, 32(10): 34-48. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.10.003.
- ZHAO Lin, LI Ke, WANG Changjiang, et al. Review on passive aerodynamic countermeasures on main girders aiming at wind-induced stabilities of long-span bridges [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(10): 34-48. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.10.003.
- [11] 张天翼, 孙延国, 李明水, 等. 宽幅双箱叠合梁涡振性能及抑振措施试验研究[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(10): 107-114, 168. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.10.010.
- ZHANG Tianyi, SUN Yanguo, LI Mingshui, et al. Experimental study on vortex-induced vibration performance and aerodynamic countermeasures for a wide-width double-box composite beam [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(10): 107-114, 168. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.10.010.
- [12] 李浩. 钝体截面铁路混合梁斜拉桥涡振性能研究[J]. *铁道学院*, 2021, 43(1): 149-153.
- LI Hao. Study on vortex-induced vibration performance of hybrid girder railway cable-stayed bridge with blunt section [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2021, 43(1): 149-153.
- [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, 31(7): 89-94, 117. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2012.07.023.
- GUO Zengwei, ZHAO Lin, GE Yaojun, et al. Mechanism analysis for vortex-induced vibration reduction of a flat streamlined steel box-shaped girder with airflow-suppressing board based on statistical property of surface pressure [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(7): 89-94, 117. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2012.07.023.
- [14] 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, 47(1): 35-40. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2017.01.007.
- LI Chunguang, ZHANG Ji, FAN Yongbo, et al. Study of aerodynamic optimization measures for vortex-induced vibration performance of wide streamlined steel box girder [J]. *Bridge Construction*, 2017, 47(1): 35-40. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2017.01.007.
- [15] 李浩弘, 吴波, 张亮亮, 等. 基于风洞试验及大涡模拟的宽体扁箱梁涡振特性研究与优化[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(增刊1): 29-35. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.S1.005.
- LI Haohong, WU Bo, ZHANG Liangliang, et al. Investigation and optimization on VIV performances of wide flat box girders based on wind tunnel tests and large eddy simulations [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(sup1): 29-35. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.S1.005.
- [16] 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(中册). 北京, 2009: 172-176.
- WANG Qi, LI Mingshui. Wind tunnel test study on vortex induced vibration characteristics of separated steel box girders of Jiashao Bridge [C]//Proceedings of the 14th National Conference on Structural Wind

- Engineering (Volume II) Beijing, 2009: 172-176.
- [17] 方根深, 杨詠昕, 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, 50(3): 74-82. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2017.03.009.
FANG Genshen, YANG Yongxin, GE Yaojun, et al. Vortex-induced vibration performance and aerodynamic countermeasures of semi-open separated twin-box deck [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(3): 74-82. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2017.03.009.
- [18] 程怡, 周锐, 杨詠昕, 等. 中央稳定板对分体箱梁桥梁的涡振控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 617-626. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2019.05.004.
CHENG Yi, ZHOU Rui, YANG Yongxin, et al. Vortex-induced vibration control for twin box girder bridges with vertical central stabilizers [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(5): 617-626. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2019.05.004.
- [19] 同济大学. 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
Tongji University. Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [20] 龙俊贤, 李前名, 任达程, 等. 上跨铁路桥梁主梁涡振性能及抑振措施研究[J]. 中外公路, 2021, 41(2): 148-153. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.029.
LONG Junxian, LI Qianming, REN Dacheng, et al. Study on vortex vibration performance and vibration suppression measures of the main girder uncrossing a railway bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(2): 148-153. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.029.
- [21] 葛耀君, 赵林, 许坤. 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, 32(10): 1-18. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.10.001.
GE Yaojun, ZHAO Lin, XU Kun. Review and reflection on vortex-induced vibration of main girders of long-span bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(10): 1-18. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.10.001.
- [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, 33(1): 1-11. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2020.01.001.
HU Chuanxin, ZHAO Lin, ZHOU Zhiyong, et al. Suppressing mechanism of spoilers on vortex-induced vibrations around a streamlined closed-box girder based on characteristics of aerodynamics forces and flow field [J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(1): 1-11. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2020.01.001.
- (责任编辑: 欧兆虎; 校对: 李脉; 英文编辑: 刘至真)

(上接第65页)

- efficient Concrete. Amsterdam: Elsevier, 2019: 387-410. DOI: 10.1016/b978-0-08-102676-2.00018-9.
- [27] MAŁEK M, JACKOWSKI M, ŁASICA W, et al. Characteristics of recycled polypropylene fibers as an addition to concrete fabrication based on Portland cement [J]. Materials, 2020, 13(8): 1827. DOI: 10.3390/ma13081827.
- [28] 韦小碧, 顾佩, 柳志军, 等. 纤维水泥稳定碎石室内拌和工艺试验研究[J]. 公路, 2017, 62(11): 19-24.
WEI Xiaobi, GU Pei, LIU Zhijun, et al. Experimental study on mixing process of fiber cement stabilized macadam[J]. Highway, 2017, 62(11): 19-24.
- [29] CHAUHAN V, KÄRKI T, VARIS J. Review of natural fiber-reinforced engineering plastic composites, their applications in the transportation sector and processing techniques [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2022, 35(8): 1169-1209. DOI: 10.1177/0892705719889095.
- [30] DA SILVA T R, DE AZEVEDO A R G, CECCHIN D, et al. Application of plastic wastes in construction materials: a review using the concept of life-cycle assessment in the context of recent research for future perspectives[J]. Materials, 2021, 14(13): 3549. DOI: 10.3390/ma14133549.
- (责任编辑: 罗容; 校对: 李脉; 英文编辑: 杜雪明)