

文章编号:1001-4888(2016)05-0607-10

基于节段模型试验的宽幅箱梁 涡振性能气动措施优化^{*}

樊永波¹, 李春光², 张记², 华旭刚³

(1. 贵州桥梁建设集团有限责任公司, 贵州贵阳 550001; 2. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南长沙 410114;

3. 湖南大学 风工程试验研究中心, 湖南长沙 410114)

摘要: 为了研究宽幅流线型箱梁断面的涡振性能,以某跨越长江的大跨悬索桥为背景,进行1:50节段模型风洞试验。分析了检修轨道、人行道栏杆等涡振敏感构件的影响,研究了改变人行道栏杆形式、附加斜腹板导流板以及风嘴分流板等气动措施的制振效果。研究表明,宽幅箱梁涡振性能随来流攻角增大而逐渐变差,且由于漩涡 Strouhal 数的变化易诱发多区间涡振,扭转涡振幅值随阻尼增加线性衰减显著。人行道栏杆是此类断面的涡振敏感构件,去掉栏杆踢脚石能明显改善涡振性能;斜腹板导流板对改善其涡振性能效果微弱;风嘴分流板具有显著的制振效果,不仅能有效地抑制主梁涡振的发生,且能提高颤振临界风速。

关键词: 涡激振动; 宽幅流线型箱梁; 节段模型; 气动措施

中图分类号: U442.5

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-120

0 引言

随着交通建设的发展,桥梁跨度的不断增长使得结构整体刚度及阻尼逐渐降低,对风的作用愈发敏感,风致振动成为大跨度柔性桥梁建设中的控制性因素。流线型箱梁因其良好的气动稳定性能被广泛应用于大跨度桥梁主梁选型。然而实际箱梁断面由于防撞栏、检修轨道等附属设施的存在,会对来流产生显著干扰,引起来流气流的分离,产生交替性脱落涡旋,从而极易引起主梁结构的涡激共振。例如巴西 Rio-Niteroi Bridge 使用过程中多次发生大振幅涡激共振现象^[1],丹麦 Great East Belt Bridge 引桥、英国的 Second Severn Bridge、日本的 Trans-Tokyo Bay Bridge 等世界知名大桥均发生过明显的涡振现象^[2-4]。由此可以看出不仅对于大跨度的柔性缆索支承桥梁,甚至刚度较大的连续钢梁桥,箱梁主梁均易引发涡激共振^[5]。虽然涡振自身具有有限幅的特点,不至引起类似美国 Tacoma 桥风毁的事故,但其起振风速区间为常遇低风速范围,较大的振动极易引起行人行车的恐慌,频发的振动也易造成结构的损伤。因此流线型箱梁涡振响应已成为大跨度桥梁设计中应重点关注和解决的问题。

实际工程中涡振的制振措施通常有机械措施和气动措施两大类。机械措施通常是在桥跨结构上安装耗能减振装置来控制涡振的发生,基本属于被动防御的补救措施,治标不治本。巴西 Rio-Niteroi Bridge、日本 Trans-Tokyo Bay Bridge、丹麦 Great East Belt Bridge 引桥等早期发生涡振的桥梁均采用 TMD 阻尼器作为涡振的控制手段^[1,2,4]。而气动措施则着眼于改变主梁断面的气动性能,通过附加一

^{*} 收稿日期: 2016-07-04; 修回日期: 2016-08-02

基金项目: 国家重点基础研究规划(973 计划)项目(2015CB057706);国家自然科学基金资助项目(51208067, 51278069, 51478049);湖南省重点学科创新项目(2013ZDXKC5)

通讯作者: 樊永波(1977—),男,本科,高工,主要从事公路、桥梁工程施工及管理。Email: 1164278564@qq.com

李春光(1980—),男,博士,讲师,主要从事工程结构风致振动研究。Email: mrlcg@126.com

些简单的气动措施抑制漩涡的规律性脱落,从根源上解决涡振的产生。常用的气动措施有改变风嘴角度、移动检修轨道位置、增设导流板、分流板、抑流板以及稳定板等措施^[6,7]。气动措施因其构造简单、效果显著,在桥梁抗风设计中得到广泛的采纳,也受到了研究者的广泛关注。

Larsen^[8]等采用导流板措施有效地抑制了 Storebalt 桥的涡振现象。孙延国等^[9],刘君等^[10]基于流线型箱梁节段模型试验,研究了检修轨道位置及其导流板对涡振的影响,结果显示检修轨道位置影响较弱,而轨道内侧导流板能有效地抑制其主梁断面的涡振响应。李永乐等^[11]、张建等^[12]对人行道栏杆、防撞栏、检修轨位置、风嘴分流板等措施进行了试验研究,发现人行道栏杆对涡振影响明显,扭转涡振对检修轨道位置较为敏感,风嘴分流板能显著抑制主梁竖向涡振,对扭转涡振不敏感。Nagao 等^[13],管青海等^[14,15]针对栏杆对涡振的影响进行了深入研究并探讨了其影响机理。当桥址处于山区、深谷等复杂地形时,风场来流攻角将超出规范规定的 $\pm 3^\circ$ 范围。杨阳等^[16,17]针对此种山区地形大攻角来流情况下主梁的涡振性能展开了试验研究。朱思宇等^[18]针对扁平箱梁大攻角下的制涡措施进行了优化试验。

从上述相关研究中不难看出,涡激共振对主梁构件及来流攻角的变化较为敏感,在一座桥上效果明显的气动抑振措施可能对另一座桥的效果微弱,因此需要有针对性地进行研究。本文借鉴已有研究成果,以某在建大跨度宽幅流线型箱梁悬索桥为依托,针对不同来流攻角情况下的宽幅流线型箱梁涡振性能,对栏杆、检修轨道、导流板、分流板等涡振敏感构件及措施进行了变参数研究,并确定出了主要影响构件及有效的气动优化措施。

1 工程背景

本文依托的背景工程为主跨 808m 的单跨跨长江悬索桥,主缆矢跨比 1:10,吊索间距 12m,主缆横向间距 26.7m,桥塔采用门式框架结构,塔柱为钢筋砼空心结构,塔基为承台桩基础,南岸锚碇为隧道式锚碇,北岸锚碇为埋置式重力锚碇,桥型布置如图 1 所示。该桥主梁加劲梁采用闭口流线型钢箱梁的断面形式,箱梁宽 37.5m,梁高 3m,高宽比达 12.5,图 2 为主梁的加劲梁断面布置图。桥址地形属丘陵与山地结合部,主桥横跨长江,而桥塔位于两岸的陡坡处,桥址区地形高差较大,总体上属于丘陵地带,周边地形的影响使得桥位风场来流攻角范围明显增大。

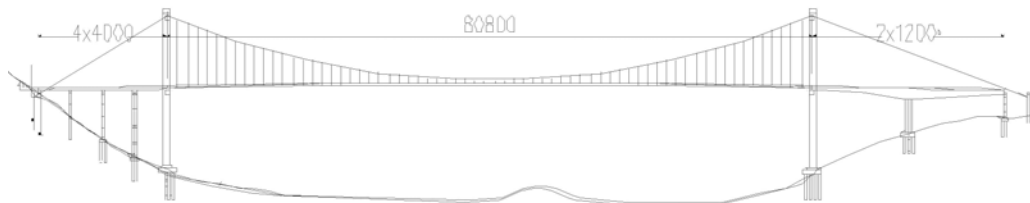


图 1 桥型布置图(单位:cm)

Fig. 1 The bridge layout (unit: cm)

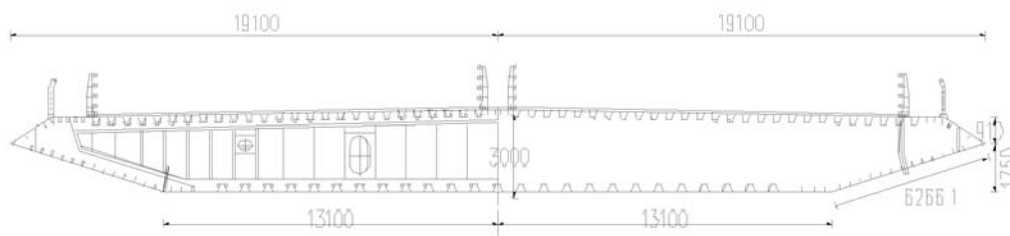


图 2 主梁断面图(单位:cm)

Fig. 2 Cross section of main girder (unit: cm)

采用通用有限元分析软件 ANSYS 建立了背景工程的三维有限元分析模型。主梁钢箱梁采用 BEAM4 空间梁单元模拟,主缆和吊索采用只受拉的 LINK10 单元模拟,桥塔采用 BEAM4 空间梁单元模拟。桥面铺装、防撞护栏、检修道栏杆、路缘石、过桥管道等二期恒载通过 MASS21 质量点单元模拟。

全桥主要动力特性分析结果如表 1 所示。

表 1 全桥主要振型及频率
Tab. 1 Structural natural frequencies and mode features

自振振型	一阶反对称竖弯	一阶对称竖弯	一阶对称扭转	一阶反对称扭转
频率(Hz)	0.1501	0.1816	0.3895	0.4477

2 风洞试验设置

风洞试验中主梁节段模型取常规缩尺比 $\lambda_L=1:50$ 。模型长 $L=1.54\text{m}$ ，主梁宽度 $B=0.75\text{m}$ ，高度 $H=0.06\text{m}$ ，模型长宽比约 2.05。主梁模型骨架采用不锈钢框架制作而成，外衣采用优质木材制作，以保证几何外形的相似。模型两端采用轻质遮阳板作为端板，以保证主梁断面附近气流的二元特性。主梁上的防撞护栏、人行道栏杆采用 ABS 板通过雕刻机精细制作，尽可能模拟防撞护栏的形状与透风率。

节段模型测振试验在湖南大学 HD-2 风洞高速试验段进行，该试验段截面尺寸为 3.0m (宽) $\times 2.5\text{m}$ (高) $\times 17\text{m}$ (长)，试验风速范围为 $0.5\sim 58\text{m/s}$ 。由于主梁涡振的起振风速较低，且风速区间较窄，需要采用较大的风速比才能准确地界定涡振风速区间，为此自由悬挂试验过程中选用刚度较大的弹簧，增大模型与实桥的频率比，从而获得较大的风速比 $1:1.93$ ，具体试验参数如表 2 所示。

表 2 节段模型试验参数表
Tab. 2 Test parameters of section model

参数名称		单位	实桥值	相似比	模型值
等效质量	质量 m	kg/m	28704	$\lambda_m=1:50^2$	11.48
	质量惯矩 J_m	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{m}$	5784830	$\lambda_J=1:50^4$	0.925
模态	一阶竖弯 f_h	Hz	0.1816	25.9	4.68
	风速比 m_h	m/s		$\lambda_v=1:1.93$	
	一阶扭转 f_t	Hz	0.3895	25.7	10.0
	风速比 m_t	m/s		$\lambda_v=1:1.93$	

测振试验工况均在均匀流场中进行，来流风速为 $0\sim 20\text{m/s}$ ，试验过程中初始风速步长设为 0.5m/s ，然后根据模型的响应情况局部加密来获得完整的涡振锁定区间。试验过程中采用德国米依(MCRO-EPSILON)公司 OptoNCDT 无接触激光位移计测量节段模型的风致响应，响应动态信号采用东华 5920 测试系统采集，采样频率 200Hz ，时长 60s 。4 只位移计对称布置于模型下方约 15cm 高度处，同步测量模型底部迎风上游及下游的响应信号，通过上下游时程信号相加做平均得到竖向响应时程，上下游信号相减并除以位移计间距即可获得扭转响应时程^[19]。由此可根据响应幅值大小判断涡振的起振风速区间。具体试验布置如图 3 所示。试验过程中首先在低阻尼状态测试了 $\pm 5^\circ$ 大攻角范围内的主梁涡振特性，进而在最不利攻角状态通过移除相关构件的方式确定该主梁断面的涡振敏感部位，从而展开有效的气动措施参数优化研究。

3 主梁涡振试验

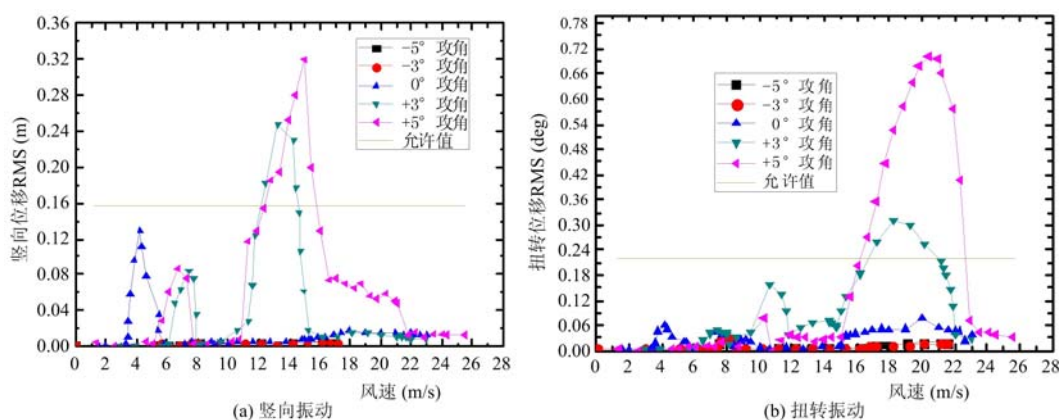
3.1 风攻角的影响

虽然背景工程为跨越长江的桥梁，但是考虑到桥址周边为丘陵地形，局部地形对桥址风场造成干扰，来流攻角将可能超出规范规定的 $\pm 3^\circ$ 常规值。因此试验过程中测试了原设计断面在 $\pm 5^\circ, \pm 3^\circ, 0^\circ$ 各攻角的涡振性能。为了使节段模型涡振响应更明显，便于观测分析，试验系统阻尼设定在了 0.002 的低阻尼水平。考虑到风洞试验过程中模型涡激振动虽然基本处于等幅状态，但是仍然会有波动，因此采用响应根方差统计值来代替实际响应幅值来判断涡振响应。图 4 所示为各攻角状态下换算至实桥后响应随风速变化曲线。从图中可以看出，负攻角状态节段模型均没有发生竖向及扭转涡激共振，究其原因桥



图 3 节段模型风洞试验布置图

Fig. 3 Setup of section model in wind tunnel

图 4 不同攻角工况下涡激振动响应($\xi_b=0.20\%$, $\xi_a=0.14\%$)Fig. 4 The responses of vortex induced vibration under different attack angles($\xi_b=0.20\%$, $\xi_a=0.14\%$)

面栏杆等附属设施构造复杂,负攻角状态来流流经栏杆等构件后被剧烈扰乱,难以形成稳定的涡脱。然而攻角由负转正过程中, 0° 、 $+3^\circ$ 、 $+5^\circ$ 均发生了明显的涡激共振,并且随攻角增大,涡振锁定区间增多,响应幅值显著增大。 0° 攻角时,节段模型在较低的风速 4m/s 左右发生了明显的竖向涡振,振幅未超过桥梁抗风设计规范允许值^[19],未发生扭转涡振。当攻角增大到 $+3^\circ$ 及 $+5^\circ$ 时,模型均发生了两次竖向涡振,较高风速时振幅达规范限值的 2.05 倍^[20],并且低风速锁定区间相比于 0° 攻角状态发生迁移,说明随攻角的改变,模型迎风面的改变使模型 Strouhal 数也随之变动。在较高的 $15\sim 23\text{m/s}$ 风速区间内模型发生了大幅值的扭转振动,幅值达到规范限值^[19]的 3.17 倍。由此可看出,原设计宽幅箱梁断面对涡振非常敏感。图 5 所示为两次竖向涡振的功率谱曲线,其涡振振动频率均为 4.60Hz ,考虑到试验中来流风速引起的气动刚度改变以及试验数据的误差影响,可以认为该频率与模型竖向试验频率 4.68Hz 一致。涡流脱落的 Strouhal 数计算公式为:

$$St = \frac{fD}{U} \quad (1)$$

其中, f 为涡振频率; D 为横风向特征尺寸; U 为来流风速。

低风速第一竖向涡振区间 St 为 0.119 ,高风速第二竖向涡振区间 St 为 0.067 ,两者比率约为 1.76 倍,可以认为是由两种不同的独立涡旋引起了不同的竖向涡振,这一结果与文献[15]中对双竖向涡振成因的分析结果一致。

3.2 阻尼的影响

由于阻尼是结构动力响应幅值的重要影响参数,为考察阻尼在模型涡振过程中与振动响应幅值及模态的关系,选取了最不利的 $+5^\circ$ 攻角进行变阻尼比较试验。试验过程中阻尼的改变通过在拉伸的悬

挂弹簧上缠绕电工胶带来改变自由悬挂系统的阻尼比。鉴于规范中对钢梁桥模态阻尼建议取值为 0.5%, 试验中分别测试了 0.21%, 0.30%, 0.45% 三种阻尼比工况, 图 6 所示为不同阻尼比下模型的涡振响应。从图中可以看出, 模型的竖向及扭转涡振锁定区间基本不变, 仅响应幅值随阻尼比的增大逐渐减小, 两者之间存在近似线性衰减的关系。但是扭转涡振响应的衰减速率相比竖向响应快得多, 阻尼比从 0.21% 增加到 0.45%, 竖向涡振最大幅值降低仅 11%, 而扭转涡振降幅达 30%, 由此可知扭转涡振对阻尼更加敏感, 增加阻尼能更有效地降低扭转涡振响应。

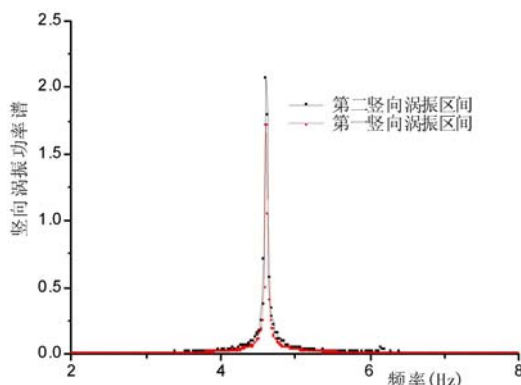


图 5 不同竖向涡振区间位移功率谱密度

Fig. 5 The power spectral of vertical vortex induced vibration

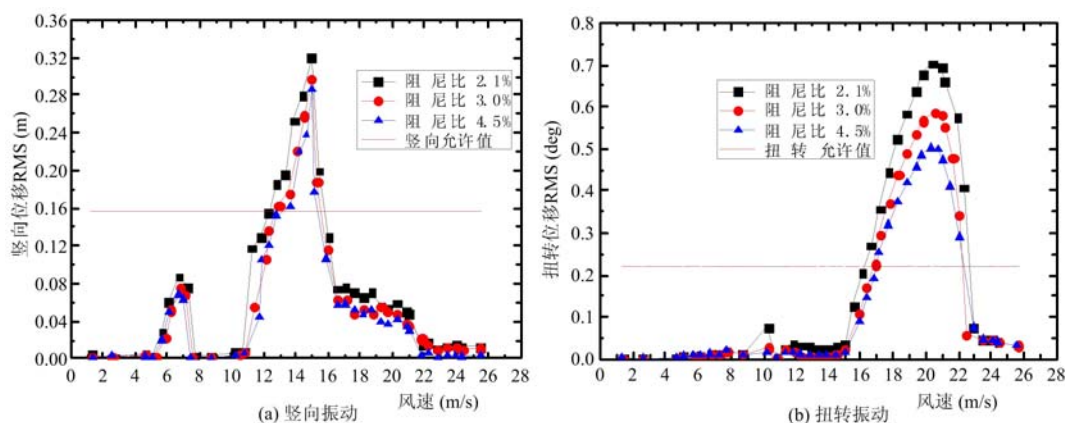


图 6 +5° 攻角不同阻尼比涡激振动响应

Fig. 6 The responses of vortex induced vibration with different damps under +5° attack angle

4 涡振气动措施优化

为了与实际情况相符, 保证气动措施制振效果的真实可靠, 在涡振气动措施优化过程中, 节段模型试验系统阻尼调整到正常水平 0.45%, 同时选取最不利的 +5° 攻角进行气动措施的优化研究。

4.1 检修轨道的影响

从已有的相关研究可知, 扁平箱梁断面的涡振响应对检修轨道较为敏感^[9-12], 但是对于具体的断面形状, 由于检修轨道、风嘴角度、梁宽、栏杆等因素的综合作用, 其影响程度将不尽相同。为此考虑极限状态, 将检修轨道去除, 考察此种状态下的模型涡振响应变化, 从而决定其优化措施。

图 7 所示为检修轨道移除前后模型涡振响应的对比图, 从中可以看到移除检修轨道后, 节段模型涡振响应有一定程度的降低, 降幅约 20% 左右, 但是竖向及扭转涡振最大幅值仍然显著超出规范允许值。由此可以推断, 检修轨道不是该断面涡振最敏感构件。针对检修轨道进行优化不能作为首选的涡振抑制措施, 只能作为补充措施。究其原因, 该背景工程检修轨道高度较低, 仅 0.25m, 并且紧贴梁体底部, 而箱梁风嘴斜腹板倾角大于 16°, 来流经风嘴斜腹板分离后形成较大漩涡, 相对较矮的检修轨道对涡脱的影响有限。

4.2 斜腹板导流板的影响

Larsen 等^[8]在研究箱梁风致响应时分析认为, 当风嘴斜腹板的倾角大于 16° 时, 来流气流将会在梁体下游产生规律的涡脱, 易诱发涡激振动。如果在斜腹板与底板转折点处布置导流板, 气流经导流板压缩冲出后可以击碎底板表面形成的漩涡从而抑制涡振的发生。考虑到背景工程箱梁斜腹板倾角已达到

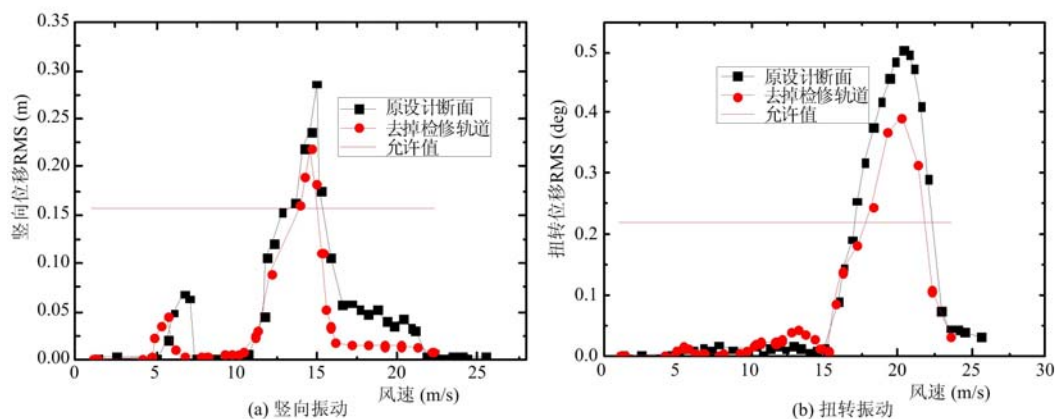


图 7 涡激振动响应

Fig. 7 The responses of vortex induced vibration

17°, 为此测试了斜腹板与底板转折处设置导流板的情况, 导流板的布置如图 8 所示, 涡振响应结果如图 9 所示。从图中可以看出设置斜腹板导流板对改善此类断面涡振性能效果较弱, 其主要原因在于检修轨道贴于梁底, 气流经导流板加速后又撞击在检修轨道上, 因此未起到导流板应有的作用。

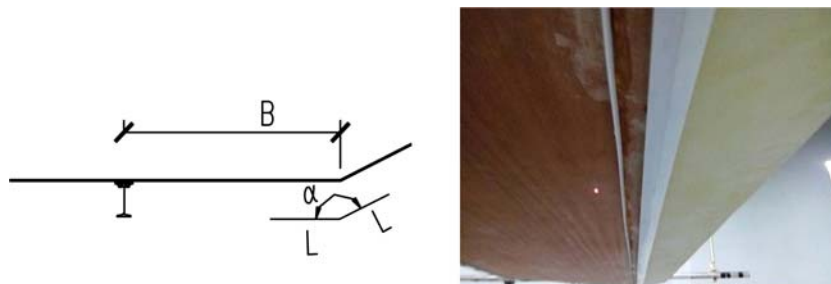
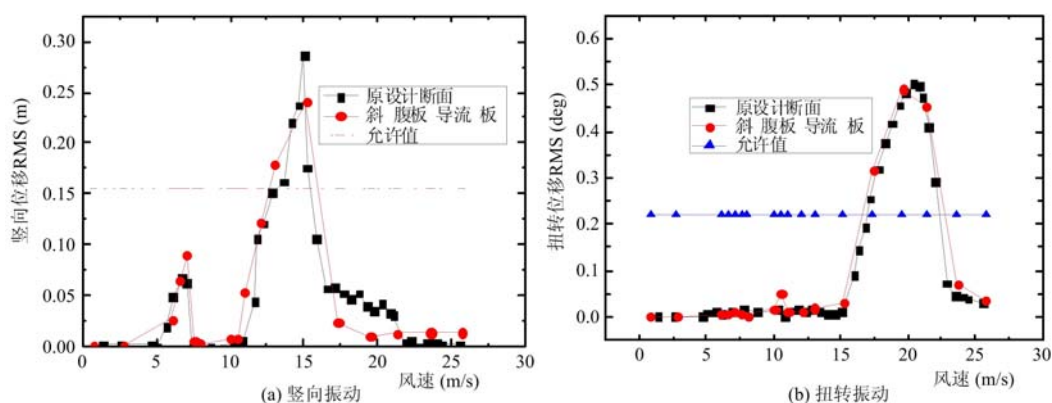
图 8 斜腹板导流板($B=2.0\text{m}$, $L=1.0\text{m}$, $\alpha=155^\circ$)Fig. 8 Layout of guide vane on the inclined web; $B=2.0\text{m}$, $L=1.0\text{m}$, $\alpha=155^\circ$ 

图 9 不同导流板工况涡激振动响应

Fig. 9 The responses of vortex induced vibration with different guide vane

4.3 人行道栏杆布置

对于流线型箱梁断面而言, 人行道栏杆无疑显著地影响了断面的流线性, 但此类构件是桥梁结构必须存在的部件, 因此只能对其进行优化来改善其涡振影响程度。为此, 试验过程中首先将人行道栏杆移除, 考虑极限状态下主梁断面的涡振性能变化, 进而通过改变其高度、透风率以及去掉栏杆踢脚石等措施进行优化, 人行道栏杆及防撞栏构造如图 10 所示, 具体优化措施试验工况见表 2。

图 11 所示为各工况下的涡振响应试验结果。从图中可以看出, 工况 1 去掉人行道栏杆, 模型涡振性能得到很大的改善, 竖向涡振最大振幅降低 62%, 已满足规范的限值要求, 扭转最大振幅降低 50%,

略大于规范限值。由此可以直观显示人行道栏杆是箱梁断面的涡振敏感因素。工况 2 人行道栏杆降低后,试验结果显示涡振响应幅值略有降低,效果不理想。由于人行道栏杆正处于风嘴与桥面相交转折点,也正是来流分离处,因此人行道栏杆高度的部分改变不能显著改变来流的分离与漩涡脱落。工况 3 在工况 2 基础上栏杆透风率由 52% 增大至 76%,由图示结果可知,改变栏杆透风率未能改善涡振性能。工况 4 去掉人行道栏杆踢脚石,从图中可以看出,相比于工况 2 和 3,去掉踢脚石较为明显地改善了模型的竖向及扭转的涡振性能,由此可以看出,由于栏杆所处的位置踢脚石对于来流的分离起到重要的影响,踢脚石明显加剧了来流的分离及漩涡脱落。

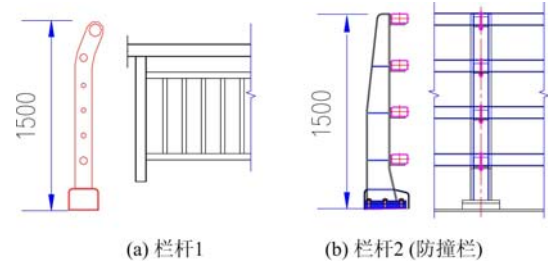


图 10 人行道栏杆及防撞栏构造图
Fig. 10 Scheme of pedestrian rail and crash barriers

表 2 人行道栏杆影响试验工况
Tab. 2 Test case of pedestrian railing

工况	措施
工况 1	去掉人行道栏杆
工况 2	人行道栏杆由 1.5m 降低至 1.2m
工况 3	采用透风率 76% 防撞栏替换透风率 52% 人行栏杆
工况 4	去掉 1.2m 人行道栏杆踢脚石

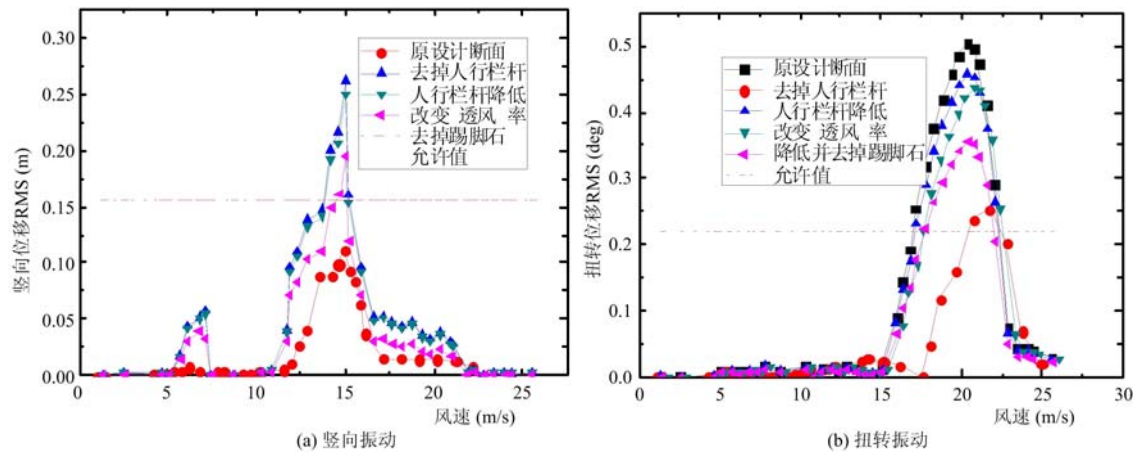


图 11 不同人行道栏杆布置下涡激振动响应
Fig. 11 The responses of vortex induced vibration at different type of pedestrian rail

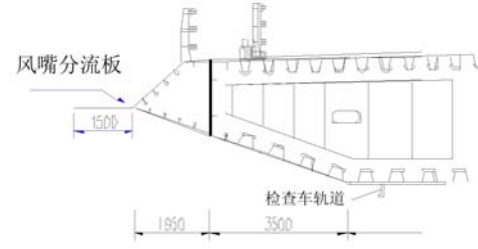


图 12 风嘴分流板布置示意图
Fig. 12 Theset up scheme of fairing guide vanes

4.4 风嘴分流板

由前述试验可知,虽然栏杆是模型的涡振敏感构件,但是由于它是实桥必需部件,只能进行形式优化,但单纯优化的效果难以满足规范的限值要求。因此需要更为有效的气动措施来改善断面涡振性能,为此尝试在风嘴部位施加水平分流板的措施,如图 12 所示。风嘴水平分流板相当于增加了箱梁断面的宽高比,使主梁外形更加流线,减小来流的分离。考虑到梁体较宽,分流板过小效果微弱,过大则在实际

工程中难以实用,因此综合考虑选取了 1.0m 和 1.5m 两种宽度的水平分流板措施。试验结果如图 13 所示,相比于原设计断面,安装风嘴分流板能有效地改善断面的涡振性能,尤其竖向涡振衰减迅速。1m 宽分流板工况时,竖向涡振区间从 2 个缩减为 1 个,且风速区间变窄,幅值降低约 43%;1.5m 宽分流板时,竖向涡振完全消失。而扭转涡振方面也得到了显著的改善,1.5m 宽分流板下扭转涡振最大幅值已经小于规范限值要求。同时由试验结果还发现,施加 1.5m 分流板后颤振临界风速提高 20%。由此可知,风嘴分流板不仅能显著改善宽幅箱梁的涡振性能,也对改善颤振稳定性能有着良好的效果。

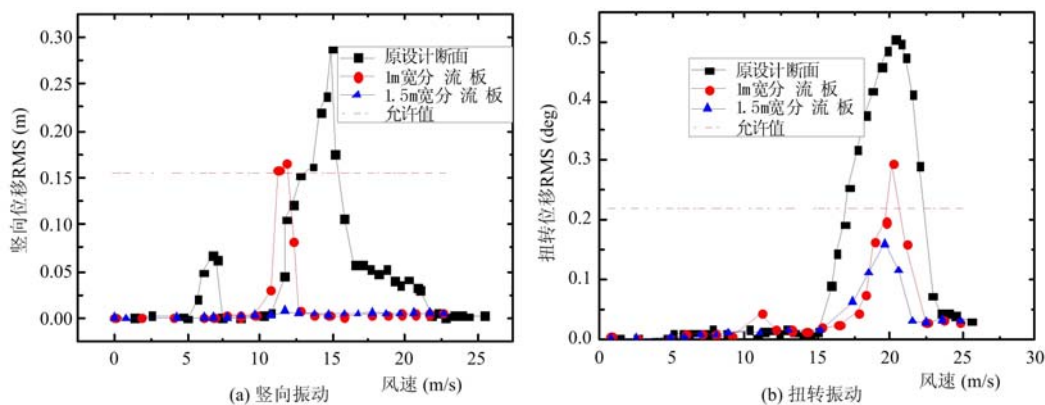


图 13 不同风嘴分流板工况涡激振动响应

Fig. 13 The responses of vortex induced vibration with different fairing guide vanes

5 结论

依托实际大跨度悬索桥工程的宽幅流线型主梁,进行了其涡振性能及气动措施优化试验,通过研究结果可以得到以下结论:

- (1) 此类宽幅流线型箱梁较易发生多起振风速区间的涡激共振,且其涡振性能随来流攻角由负变正逐渐变差。
- (2) 当风嘴斜腹板倾角较大时,梁底检修轨道对涡振的影响较弱,而桥面栏杆则是其涡振敏感构件。
- (3) 风嘴分流板对改善宽幅流线型箱梁涡振性能具有显著作用。

参考文献:

- [1] Battista R C, Pfeil M S. Reduction of vortex-induced oscillations of Rio-Niteroi Bridge by dynamic control devices [J]. Journal of Wind Engineering and Industry Aerodynamics, 2000, 84:273-288.
- [2] Frandsen J B. Simultaneous pressures and accelerations measured full-scale on the Great Belt East Suspension Bridge [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89:95-129.
- [3] Macdonald J H G, Irwin E A, Fletcher M S. Vortex-induced vibrations of the second severn crossing cable-stayed bridge full-scale and wind tunnel measurements [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 2002, 152(2):123-134.
- [4] Fujino Y Z, Yoshida Y. Wind induced vibration and control of Trans-Tokyo Bay Crossing Bridge [J]. Journal of Structural Engineering, 2002:1012-1025.
- [5] 秦浩, 廖海黎, 李明水. 大跨度双幅连续钢箱梁桥涡激振动特性风洞试验研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(14): 206-210 (QIN Hao, LIAO Haoli, LI Mingshui. Vortex induced vibration performance of long span continuous steel twin box beam bridge based on wind tunnel test [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(14):206-210 (in Chinese)).
- [6] 刘建新. 桥梁对风反应中的涡激振动及制振 [J]. 中国公路学报, 1995, 8(2):74-79 (LIN Jianxin. Vortex induced vibration and its control in responses of bridge to wind [J]. China Journal of Highway and Transport, 1995, 8(2):74-79 (in Chinese)).

- [7] Sarwar M W, Ishihara T. Numerical study on suppression of vortex-induced vibrations of box girder bridge section by aerodynamic countermeasures[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(12): 701—711.
- [8] Larsen A, Esdahl S, Andersen J E. Storebaelt suspension bridge vortex shedding excitation and mitigation by guide vans[J]. *Journal of Wind Engineering and Industry Aerodynamics*, 2000, 8:283—296.
- [9] 孙延国, 廖海黎, 李明水. 基于节段模型试验的悬索桥涡振抑制措施[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(2):218—223 (SUN Yanguo, LIAO Haili, LI Mingshui. Mitigation measurement of vortex-induced vibration of suspension bridge based on section model test[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2012, 47(2):218—223(in Chinese))
- [10] 刘君, 廖海黎, 万嘉伟 等. 检修车轨道导流板对流线型箱梁涡振的影响[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(5): 789—795 (LIU Jun, LIAO Haili, WAN Jiawei, et al. Effect of guide vane beside maintenance rail on vortex-induced vibration of streamlined box girder[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2015, 50(5):789—795 (in Chinese))
- [11] 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, 29(6):702—708 (LI Yongle, HOU Guangyang, XIANG Huoyue, et al. Optimization of the vortex induced vibration for steel box girder of long span suspension bridges by wind tunnel test[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2011, 29(6):702—708(in Chinese))
- [12] 张建, 郑史雄, 唐煜 等. 基于节段模型试验的悬索桥涡振性能优化研究[J]. 实验流体力学, 2015, 29(2):48—54 (ZHANG Jian, ZHENG Shixiong, TANG Yu, et al. Research on optimizing vortex-induced vibration performance for suspension bridge based on section model test[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29(2):48—54(in Chinese))
- [13] 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.
- [14] 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(3):150—156 (GUANG Qinghai, LI Jiawu, HU Zhaotong, et al. Effects of railings on vortex induced vibration of a bridge deck section[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 3(3):150—156(in Chinese))
- [15] 管青海, 李加武, 刘健新. 典型箱梁断面双竖向涡振区的成因分析[J]. 长安大学学报, 2013, 33(4):40—46 (GUAN Qinghai, LI Jiawu, LIU Jianxin. Investigation into formation of two lock-in districts of vertical vortex-induced vibration of a box bridge deck section[J]. *Journal of Changan University (Natural Science Edition)*, 2013, 33(4):40—46(in Chinese))
- [16] 杨阳, 张亮亮, 吴波 等. 大攻角及桥面粗糙度对扁平钢箱梁涡振性能的影响[J]. 土木建筑与环境工程学报, 2015, 37(6):32—38 (YANG Yang, ZHANG Liangliang, WU Bo, et al. Effects of large attack angle and deck roughness on flat steel box girder vortex-induced vibration[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2015, 37(6):32—38(in Chinese))
- [17] 杨阳, 张亮亮, 吴波 等. 宽体扁平钢箱梁气动力特性及涡振性能研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(10):70—75 (YANG Yang, ZHANG Liangliang, WU Bo, et al. Study of aerodynamic characteristics and vortex-induced vibration performance of wide flat steel box girder[J]. *Bridge Construction*, 2016, 46(10):70—75(in Chinese))
- [18] 朱思宇, 李永乐, 申俊听 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, 48(2):79—86 (ZHU Siyu, LI Yongle, SHEN Junxin, et al. Optimization of vortex-induced vibration of flat steel box girders at large attack angle by wind tunnel test[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(2): 79—86(in Chinese))
- [19] 张欣. 桥梁节段模型气弹振动的非线性判别方法研究[J]. 实验力学, 2010, 25(5):568—574 (ZHANG Xin. On the nonlinearity index for aeroelastic vibration of a bridge deck sectional model[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2010, 25(5):568—574(in Chinese))
- [20] JTG/TD 60-0—2004. 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004 (JTG/TD 60-0—2004. Wind-resistant design specification for bridges[S]. Beijing: Communications Press. 2004(in Chinese))

On the Aerodynamic Optimization Measures for Vortex-Induced Vibration Performance of Wide Box Girder based on Section Model Experiment

FAN Yong-bo¹, LI Chun-guang², ZHANG Ji², HUA Xu-gang³

(1. Guizhou Bridge Construction Group Co. Ltd, Guiyang 550001, China; 2. School of Civil Engineering & Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Wind Engineering Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to investigate the vortex-induced vibration (VIV) performance of wide streamline box girder, taking a large span suspension bridge across Yangtze River as background, wind tunnel experiment for 1:50 section model was carried out. In this paper, the influence of overhaul track, sidewalk guardrail and other vortex-induced vibration sensitive components was analyzed, and vibration suppression effect of aerodynamics optimization measures, such as changing the form of sidewalk guardrail, the additional oblique web guide plate and nozzle split plate was studied. Results show that the vortex-induced vibration performance of wide box girder is gradually become worse with the increase of flow attack angle; due to the change of vortex strouhal is easy to induce multi section vortex vibration, the linear attenuation of torsional vortex amplitude is more obvious with the increase of damping. Sidewalk guardrail is a vortex-induced vibration sensitive component for this type section, removing stone railing skirting can significantly improve the performance of vortex-induced vibration. The effect of oblique web guide plate on improving performance of vortex-induced vibration is weak. Nozzle split plate has obvious effect on vibration suppression. It can not only effectively suppress the occurrence of vortex-induced vibration on main beam, but also can raise the critical flutter wind speed.

Keywords: vortex-induced vibration; wide streamlined box girder; section model; aerodynamic measures