

# II 型叠合梁斜拉桥涡振性能及气动控制措施研究

钱国伟, 曹丰产, 葛耀君

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘 要:** 为研究 II 型开口截面主梁的涡振性能并提出合理性控制措施, 以某跨海叠合梁斜拉桥为研究对象, 进行一系列节段模型风洞试验。研究表明, II 型开口截面主梁在低风速下易发生涡激共振, 且该桥涡振现象在阻尼比  $< 1\%$  以下范围内均存在; 桥面防撞栏杆及检修道护栏采用圆截面形式有利于减小涡振振幅; 改尖角度风嘴能显著抑制涡激共振, 且风嘴角度越小控制效果越好; 桥梁断面底部双主肋转角处设置水平隔流板能有效减小甚至消除涡激振动, 在一定范围内增加板的悬挑宽度对控制效果有利。

**关键词:** II 型截面; 叠合梁斜拉桥; 涡振; 气动控制; 风洞试验

**中图分类号:** TH212; TH213.3

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.13465/j.cnki.jvs.2015.02.031

## Vortex-induced vibration performance of a cable-stayed bridge with II shaped composite deck and its aerodynamic control measures

QIAN Guo-wei, CAO Feng-chan, GE Yao-jun

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To study the vortex-induced vibration (VIV) and its control measures for the bridge with II shaped deck, the aerodynamic performance of a cross-sea cable-stayed bridge was investigated through section-model wind tunnel tests. The results show that the II shaped deck concerned suffers remarkable VIV at low wind velocity, which exists under the structural damping ratio of  $1\%$ . Crash barrier and maintenance way railings with cylinder shape are conducive to decrease VIV amplitude, both vertical and torsional. The VIV can be mitigated via sharpening wind fairings and the vibration mitigation effect is more significant with smaller wind fairing angle. The horizontal flow-isolating plate (HFIP), jutting out of the inner edge of the girder bottom plates, can mitigate and even eliminate the VIV effectively. Generally, within certain limits, the wider the HFIP, the better the mitigation effect.

**Key words:** II shaped deck; cable-stayed bridge with composite beam; vortex-induced vibration; aerodynamic control; wind tunnel test

涡激振动由气流绕经结构表面时产生的以某一固定时间间隔有规律脱落的旋涡引起, 是大跨度桥梁的主梁在低风速下较易出现的风致限幅振动。虽该种振动为限幅振动, 虽不会直接引起桥梁的动力失稳破坏, 但会降低桥上行车、行人的舒适性, 甚至可能导致桥梁不能正常使用<sup>[1-3]</sup>。II 形截面主梁因自重轻、施工吊装方便、受力性能优越等被广泛用于现代斜拉桥设计中。主要类型有双主肋混凝土板梁、型钢-混凝土叠合梁及半封闭式钢箱梁等; 但由于其敞开的钝体外形,

绕流旋涡脱落较全封闭箱梁更明显、更复杂, 使此类桥梁的涡激共振响应亦较显著。因此需采取一系列优化、控制措施改善断面的气动性能, 从而获得更广泛的应用。

涡振抑制措施可分为气动控制措施及机械阻尼措施。机械措施主要通过外加阻尼器提高结构阻尼, 达到降低、抑制风致振动目的, 但由于其对涡激力无直接抑制及在实际工程中维护困难而较少采用。而气动控制措施则利用风致振动对结构断面气动外形较敏感特点, 通过适当修改结构外形达到改善空气动力特性、减轻风致振动目的。在不能满足气动稳定性要求或出现不满足要求的涡振振幅时, 可在主梁上安装风嘴、导流板、抑流板等附加装置, 改变结构周围流场状态以改善空气动力性能, 避免或推迟旋涡脱落的发生, 达到抑振

基金项目: 科技部国家重点基础研究计划(973 计划)项目(2013CB036300);

国家自然科学基金重大研究计划集成项目(91215302)

收稿日期: 2014-05-07 修改稿收到日期: 2014-09-03

第一作者 钱国伟 男, 硕士生, 1990 年生

通信作者 葛耀君 男, 博士, 教授, 1958 年生

效果<sup>[4]</sup>。

针对大跨度桥梁Ⅱ形主梁的涡振问题,已有诸多研究。Wardlaw<sup>[5]</sup>对 Longs-Creek 大桥的Ⅱ形断面通过加设风嘴等控制措施研究减振效果;针对型钢-混凝土叠合梁Ⅱ形断面,Kubo 等<sup>[6]</sup>通过改变工字梁间距,研究其对涡振振幅及锁定区间影响;Irwin<sup>[7]</sup>介绍Ⅱ形断面底部竖向挡板的气动制涡效果;朱乐东等<sup>[8]</sup>通过节段模型风洞试验,研究多孔扰流板对半封闭窄箱梁涡振减振效果;张志田等<sup>[9]</sup>通过设计上、下稳定板达到抑制开口截面斜拉桥涡激振动目的;董锐等<sup>[10]</sup>利用风洞试验对斜拉桥Ⅱ型开口断面主梁进行气动选型。

本文以某跨海斜拉桥为背景,进行弹簧悬挂节段模型试验,研究不同阻尼比参数下Ⅱ型叠合梁涡激共振特性,对比分析栏杆形式及风嘴对涡振控制效果影响;提出新的用于Ⅱ型截面主梁涡振减振的水平隔流板气动措施,通过对不同宽度下涡振减振效果初步研究,可为同类型桥梁的抗风设计提供系统指导。

1 风洞试验

1.1 试验参数

刚体节段模型涡激共振试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 TJ-2 号风洞中进行。该风洞试验段宽 3.0 m、高 2.5 m、长 15 m,空风洞试验风速范围 1.0~68 m/s 连续可调。

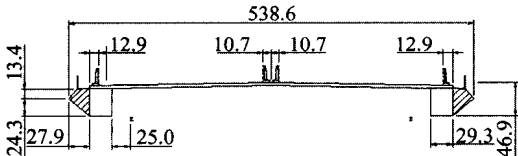


图1 原断面节段模型横截面图(单位:mm)

Fig. 1 Cross section of prototype deck model (U. mm)

据实桥主梁断面尺寸、风洞试验段尺寸及试验要求,选取节段模型几何相似比 $\lambda_L=1/70$ ,原断面模型横截面尺寸见图1。节段模型主要由金属框架、三夹板桥面组成,另用ABS塑料板模拟位于桥面的防撞栏、检修道护栏及位于主梁底部的检修车轨道,以保证外形几何相似性。模型通过内支架用8根弹簧悬挂于风洞内,见图2。各模态涡激共振为独立、单频。为方便试

验,模型的竖弯、扭转振动未调至完全相同频率比:15.07与14.91,对应风速比分别为 $\lambda_{HV}=1/4.65$ 及 $\lambda_{TV}=1/4.69$ ,具体设计参数见表1。

表1 节段模型主要试验参数  
Tab. 1 Parameters of sectional model test

断面参数	实桥值	相似比	模型值
主梁长度 $L/\text{m}$	121.8	1/70	1.74
等效质量 $M_{eq}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	46149	1/70 <sup>2</sup>	9.418
等效质量惯矩 $J_{eq}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{m}^{-1})$	5806400	1/70 <sup>4</sup>	0.24183
竖弯基频 $f_v/\text{Hz}$	0.408	15.07	6.15
扭转基频 $f_t/\text{Hz}$	0.788	14.91	11.75

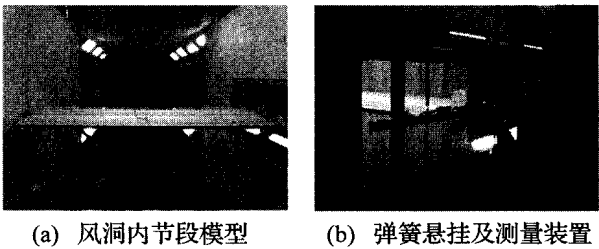


图2 风洞试验概况  
Fig. 2 Wind tunnel test

1.2 试验工况

节段模型涡激共振试验在 $-3^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $+3^\circ$ 三个风攻角均匀流场中进行。分别进行原断面在三种阻尼比下涡振试验,并设置三种栏杆形式、两种优化风嘴及水平隔流板对涡振加以抑制。主要研究内容及试验工况见表2。其中,阻尼比A、B、C的参数由低到高,通过调整悬挂节段模型弹簧的阻尼圈实现;三种栏杆形式为圆截面栏杆(YLG)、方截面防撞栏+圆截面检修道护栏(FFLG+YJLG)、方截面栏杆(FLG);三种风嘴为原断面风嘴“28上”、优化风嘴“43中”及“48中”;水平隔流板设置在Ⅱ型断面主梁底部内测;具体控制措施尺寸参数见图3、图4。

表2 主要研究内容与试验工况  
Tab. 2 Study contents and cases of wind tunnel test

试验项目	原断面涡振性能	栏杆比选	风嘴优化	水平隔流板抑振效果
阻尼比	阻尼比A、B、C	竖弯0.33%,扭转0.17%	竖弯0.33%,扭转0.17%	竖弯0.33%,扭转0.17%
栏杆形式	FLG	FLG、FFLG+YJLG、YLG	YLG	YLG
风嘴形式	28上	28上	28上、43中、48中	48中
水平隔流板宽度	无	15 mm	15 mm	0、10 mm、15 mm、20 mm

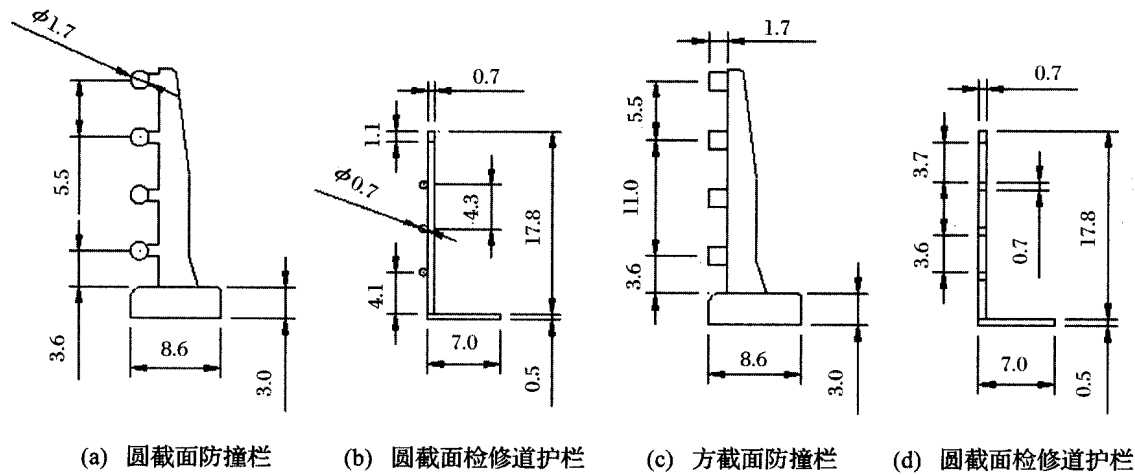


图3 栏杆外形及尺寸(单位:mm)  
Fig.3 The shape and size of railings (U. mm)

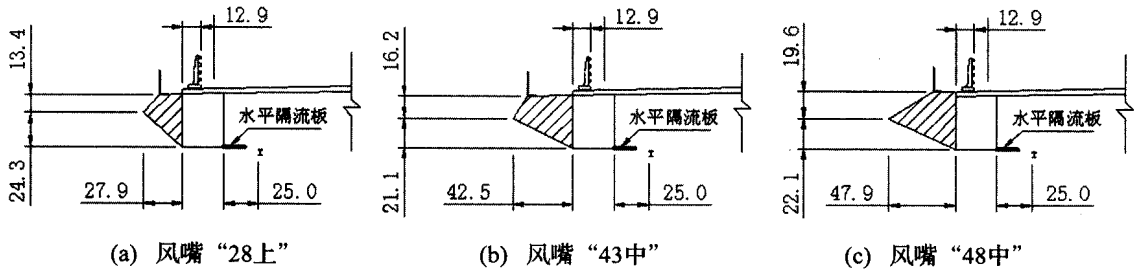


图4 风嘴外形及尺寸(单位:mm)  
Fig.4 The shape and size of fairing (U. mm)

2 原断面涡振性能

桥梁断面的涡振性能,主要考察其在设计基准风速范围内的涡振振幅及锁定风速区间。已有研究表明,涡激共振振幅及锁定风速区间对结构的阻尼参数均有一定敏感性。准确评价结构的阻尼比较困难,因此针对桥梁断面应进行规范允许阻尼比范围内不同大小参数下的涡激共振试验,从而实现较全面的涡振性能评价。

对原断面进行低阻尼比A(竖弯阻尼比0.58%,扭转阻尼比0.31%)的测试。将0°攻角下试验数据换算到实桥,所得主梁振动位移随实桥风速变化曲线见图5。主梁在阻尼比A下出现明显的竖弯与扭转涡激共振,其中竖弯涡振锁定区间为11.7~14.6 m/s,最大振幅0.083 m;扭转涡振锁定区间为25.6~39.4 m/s,最大振幅1.319°。由此可见,该桥Ⅱ型断面在低风速下较易发生涡激共振现象,且涡振振幅较大。

为探究结构振动阻尼变化对涡激共振特性影响,分别进行较高阻尼比B(竖弯阻尼比0.83%,扭转阻尼比0.51%)及阻尼比C(竖弯阻尼比1.6%,扭转阻尼比0.89%)状态试验。图5结果显示,增大结构阻尼至B、C后,主梁仍存在明显的涡激共振,随阻尼比增加,

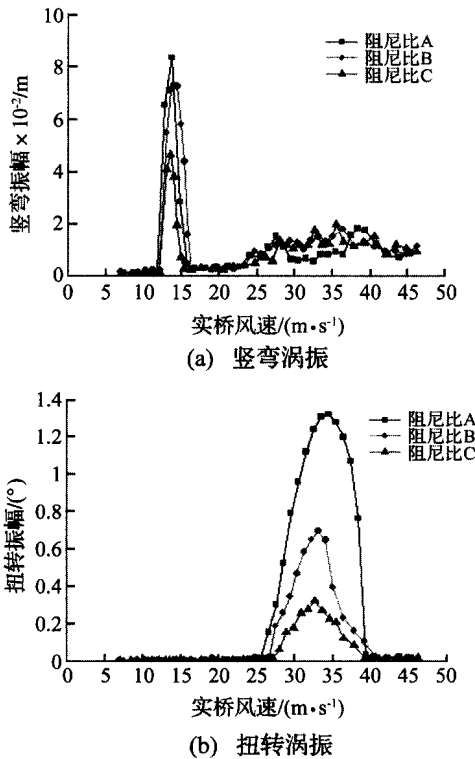


图5 0°攻角不同阻尼比下原断面涡振响应  
Fig.5 VIV responses of prototype deck with different damp ratio at the attack angle of 0°

竖弯涡振、扭转涡振的最大振幅均有一定减小,锁定风

速区间有减小趋势,但不明显。

因此,该桥的涡激共振现象在结构阻尼比1%范围内均存在,即使将阻尼比提高到规范允许值1%以上仍存在较明显的竖弯及扭转涡振。试图通过增加结构阻尼以实现抑振并不理想。

3 气动控制措施

针对原主梁断面出现的涡激振动现象,设计不同的气动控制措施方案,主要包括对栏杆形式比选、风嘴外形优化,并尝试在主梁底部设置不同宽度的水平隔流板以实现最佳控制效果。

3.1 栏杆形式比选

研究表明<sup>[3,11]</sup>,主梁涡振性能对附属装置如栏杆、防撞栏杆、检修车轨道等位置及形状非常敏感。Nagao等<sup>[12]</sup>研究结果表明,栏杆水平扶手形状及位置均会影响涡振响应;管青海等<sup>[13]</sup>通过风洞试验研究有无栏杆桥梁断面的涡激振动响应发现,栏杆对桥梁断面上下表面压力脉动均有影响。

针对本文原断面采用的方截面栏杆,设计另一种圆截面栏杆形式,将其配合“48中”风嘴及15 mm水平隔流板(HFIP)进行三组比选试验。其中,以涡振较明显的+3°工况为例,试验结果见图6。其中,采用FLG及FFLG+YJLG组合时均出现明显的竖弯及扭转涡振,

且前者振幅大于后者,而采用YLG时则无明显涡振现象。由此说明,YLG对抑制此断面的涡振效果显著。

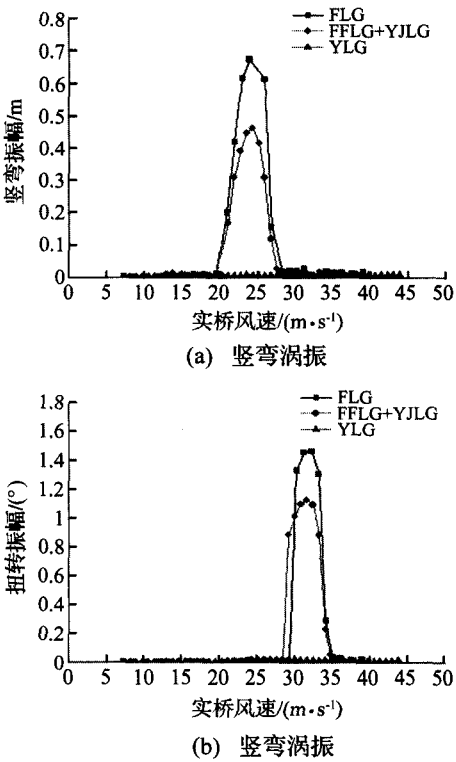


图6 +3°攻角不同栏杆形式下主梁涡振响应  
Fig. 6 VIV responses of bridge deck with different railings at the attack angle of +3°

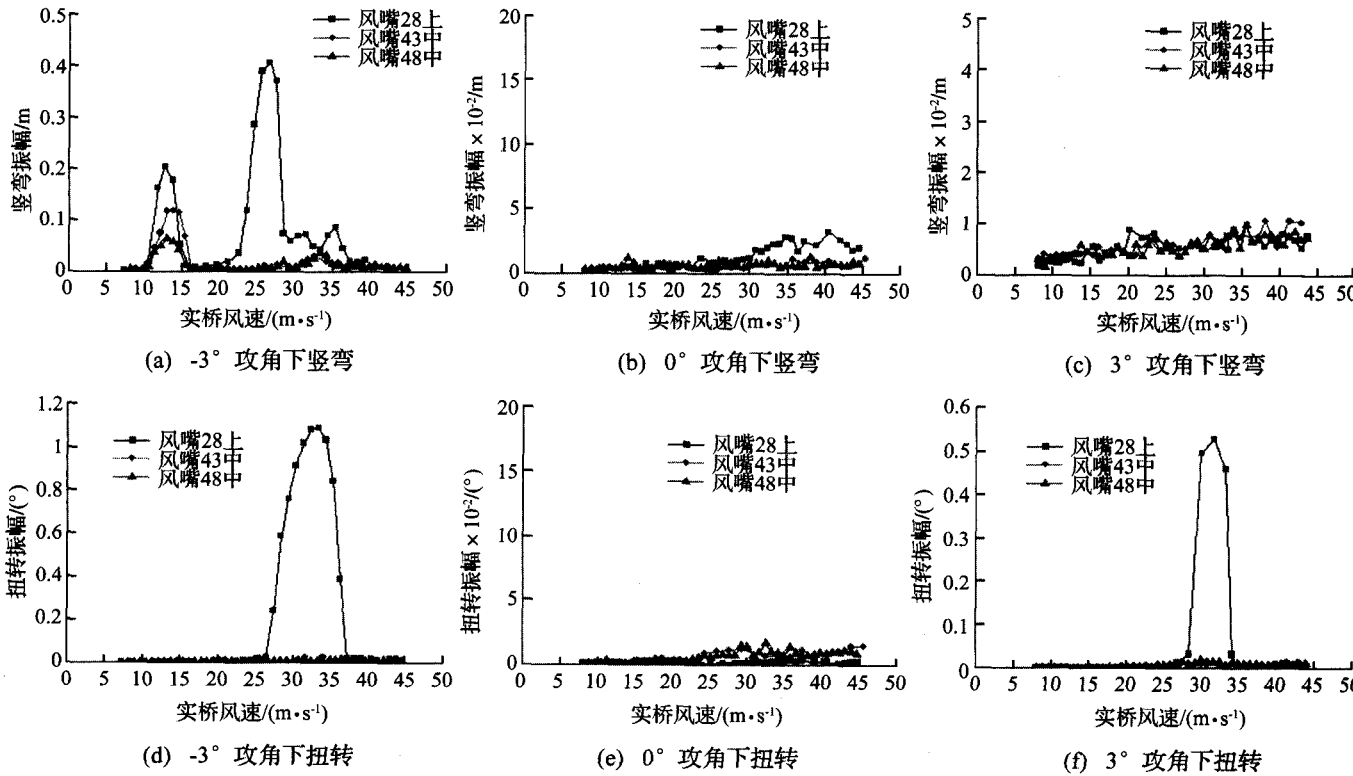


图7 不同风嘴形式下主梁涡振响应  
Fig. 7 VIV responses of bridge decks with different fairings



从空气动力学角度分析,来流风经过方截面栏杆更易产生较多、较大的局部漩涡脱落,逐渐演变成桥面上整体的漩涡脱落。圆截面栏杆较方截面栏杆的气动外形更具流线型,流动分离无前者明显,且前者使桥面整体透风率增大,能有效抑制桥面上部较大漩涡脱落。桥梁断面涡激振动主要由于桥梁断面上、下漩涡的交替脱落,因此桥梁断面上部漩涡脱落得到抑制后,桥梁断面整体的涡激力亦会减小。

### 3.2 风嘴外形优化

风嘴是目前应用最广的涡振气动控制措施之一,桥梁断面的涡振性能对外形同样具有一定敏感性。其中,孟晓亮等<sup>[14]</sup>针对封闭箱梁及半封闭箱梁,进行风嘴角度较尖、较钝两种状态下的风洞试验,发现改尖风嘴能有效降低此类断面的涡振振幅。

为研究风嘴外形对 II 型断面涡振控制效果影响,分别选取原断面的“28 上”风嘴及另外设计的两种优化改尖风嘴“43 中”及“48 中”,配合圆截面栏杆形式(YLG)与 15 mm 水平隔流板(HFIP)进行均匀流场下的涡激共振试验。每种风嘴均进行  $-3^\circ$ 、 $0^\circ$  及  $+3^\circ$  三种风攻角试验,将试验数据换算成实桥的涡振振幅随风速的变化曲线见图 7。分析图 7 中三组试验数据结果,见表 3。由表 3 看出,风嘴“28 上”断面分别在  $-3^\circ$  攻角下出现较大振幅的竖弯及扭转涡振,在  $+3^\circ$  攻角下出现明显扭转涡振;风嘴“43 中”及“48 中”断面仅在  $-3^\circ$  攻角下出现较小振幅的竖弯涡振,后者振幅小于前者,且锁定风速区间均较窄,而其它攻角下的扭转涡振及竖弯涡振均得到完全消除。

表 3 不同风嘴外形下涡振最大振幅及锁定风速区间

Tab. 3 Maximal VIV amplitudes and lock-in velocity ranges of bridge decks for different fairings

风嘴形式	攻角/ $^\circ$	涡振类型	最大涡振振幅	锁定区间/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
28 上	-3	竖弯	0.204 m	11.8 ~ 13.7
28 上	-3	竖弯	0.406 m	23.5 ~ 27.4
28 上	-3	扭转	1.085 $^\circ$	27.5 ~ 36.3
28 上	+3	扭转	0.528 $^\circ$	30.0 ~ 33.3
43 中	-3	竖弯	0.117 m	12.2 ~ 15.4
48 中	-3	竖弯	0.062 m	11.4 ~ 14.6

三组风嘴角度大小依次为“28 上” $>$ “43 中” $>$ “48 中”,由分析结果看出,风嘴角度越小涡振振幅越小,两者对涡振控制效果明显优于前者。因此优化的改尖风嘴能有效降低此类 II 型断面斜拉桥的涡振振幅,且角度越小控制效果越好。在主梁高度不变且风嘴安装位置相同情况下,风嘴角度越小消耗材料越多,因此实际工程中应在满足涡振限幅前提下选择最经济的风嘴形式。

### 3.3 水平隔流板抑振效果

从 II 型断面的气动外形特点看,叠合梁的主肋与桥面板连接处转角部位的旋涡脱落是引发桥梁涡激共振的主要原因。因此,本试验水平隔流板(HFIP)安装位置选在两个转角处,即 HFIP 在主肋与桥面板转角处水平向内侧悬挑,见图 8,从而打乱并削弱在该区域附近形成的旋涡或流经该区域的旋涡,实现对涡振抑制目的。

在主梁转角处设置不同宽度的 HFIP,其周围流体绕流方式也会有所不同,从而影响到其对涡振的控制效果。本文选取三种宽度的 HFIP,即 10 mm、15 mm、20 mm 及无板状态,配合“48 中”风嘴及圆截面栏杆(YLG)进行涡激共振试验。

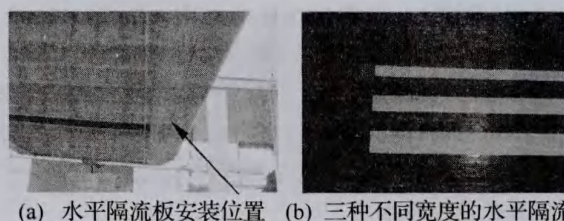


图 8 水平隔流板位置与尺寸

Fig. 8 The size and location of HFIP

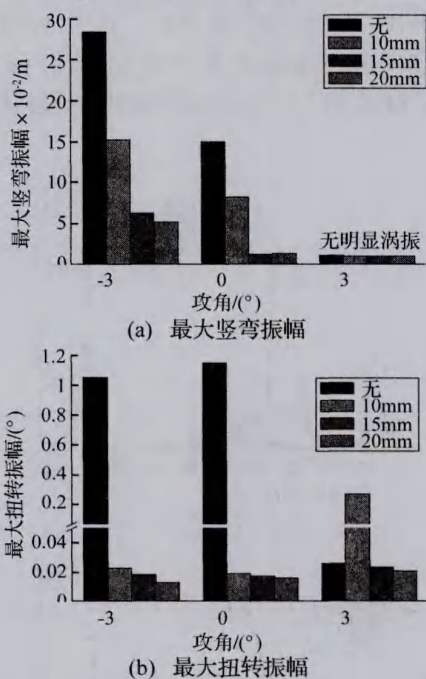


图 9 不同宽度水平隔流板涡振控制效果比较

Fig. 9 Comparison between VIV mitigation effects of HFIP with different width

据试验数据统计各级风速下节段模型的振幅响应值,并换算成实桥对应位移大小,获得各工况下采用不同宽度 HFIP 后主梁的最大振幅,见图 9。由图 9 看出,未采用 HFIP 控制措施时,在  $-3^\circ$  及  $0^\circ$  攻角下均出现振幅较大的竖弯及扭转涡振;采用 10 mm 宽度的 HFIP 后,  $-3^\circ$  及  $0^\circ$  攻角下仍出现明显竖弯涡振,同时  $+3^\circ$  工

况下出现振幅较大的扭转涡振,反而对涡振控制起到不利作用;设置 15 mm 及 20 mm 宽度的 HFIP 后,仅在  $-3^\circ$  攻角下出现未超限的小振幅竖弯涡振,各攻角下的涡振均得到较好抑制。对  $+3^\circ$  工况下 10 mm 板宽出现的不利结果,本文对其进行重复试验,排除试验误差及差错所致。因此,总体上随着板宽度的增加,HFIP 对涡振的控制效果越好。对本文的优化断面,15 mm 及 20 mm 宽度的水平隔流板对涡振的控制均起到明显效果,同时考虑工程造价和材料用量,15 mm 板宽优于 20 mm 板宽。

## 4 结 论

本文针对 II 型叠合梁斜拉桥,通过一系列节段模型测振风洞试验,研究原主梁断面在不同阻尼参数下的涡激共振性能;对比分析不同栏杆、风嘴及水平隔流板多种气动控制措施的涡振控制效果,结论如下:

(1) 原主梁断面在阻尼比  $< 1\%$  范围内均存在较明显的竖弯及扭转涡振,且振幅较大。

(2) 栏杆的不同形式使 II 型断面的气动外形发生显著变化,对其进行比选是实现气动控制的有力措施。其中,检修道护栏及防撞栏杆均采用圆截面的形式可显著提高该斜拉桥优化断面的涡振性能,而采用方截面栏杆则不利。

(3) 对 II 型开口截面斜拉桥,较尖角度的风嘴能在一定程度上改善主梁涡振性能,且角度越小效果越明显。比较本文原始断面风嘴与改尖的优化风嘴,得出该桥的最优风嘴形式为“48 中”。

(4) 在桥梁断面底部的双主肋转角处设置适当的水平隔流板能有效减小甚至消除涡激振动;水平隔流板的悬挑宽度对涡振抑振效果也有一定影响,板越宽对涡振的控制越有利。

(5) 鉴于涡振对气动外形的敏感性,应对每项有效的气动控制措施进行优化及参数化敏感性分析的相关研究。一般气动控制措施都是在基本断面设计好后增加的附属构件,必然会使得桥梁断面整体的造价增加,因此优化过程的同时也要综合权衡经济效益和结构使用性能。

(6) 综合本文试验研究结果,对该 II 型开口截面斜拉桥,涡激共振现象明显,建议采取气动控制措施,即桥面布置圆截面形式的检修道护栏及防撞栏杆,采用改尖角度的风嘴“48 中”,并在桥梁断面底部双主肋转角处设置宽度 15 mm (换算成实桥中宽度为 1050 mm) 的水平隔流板。

## 参 考 文 献

- [1] Simiu E, Scanlan R H. Wind effects on structures (3rd Edition) [M]. New York: Wiley, 1996.
- [2] 葛耀君. 大跨度悬索桥抗风 [M]. 北京: 人民交通出版

社, 2011.

- [3] 陈政清. 桥梁风工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 64 - 67.
- [4] 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, 29(10): 40 - 49.  
XU Fu-you, DING Wei, JIANG Feng, et al. Development and prospect of study on vortex-induced vibration of long-span bridges [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10): 40 - 49.
- [5] Wardlaw R L. Some approaches for improving the aerodynamic stability of bridge road decks [M]. Canada: National Research Council Press, 1972.
- [6] Kubo Y, Sadashima K, Yamaguchi E, et al. Improvement of aeroelastic instability of shallow  $\pi$  section [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(14): 1445 - 1457.
- [7] Irwin P A. Bluff body aerodynamics in wind engineering [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6): 701 - 712.
- [8] 朱乐东, 张海, 张宏杰. 多孔扰流板对半封闭窄箱梁涡振的减振效果 [J]. 实验流体力学, 2012, 26(3): 50 - 55.  
ZHU Le-dong, ZHANG Hai, ZHANG Hong-jie. Mitigation effect of multi-orifice flow-disturbing plate on vortex-induced resonance of narrow semi-closed box deck [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(3): 50 - 55.
- [9] 张志田, 卿前志, 肖玮, 等. 开口截面斜拉桥涡激共振风洞试验及减振措施研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2011, 38(7): 1 - 5.  
ZHANG Zhi-tian, QING Qian-zhi, XIAO Wei, et al. Vortex-induced vibration and control method for a cable-stayed bridge with open cross section [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2011, 38(7): 1 - 5.
- [10] 董锐, 杨詠昕, 葛耀君. 斜拉桥 II 型开口断面主梁气动选型风洞试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 10: 109 - 114.  
DONG Rui, YANG Yong-xin, GE Yao-jun. Wind tunnel test for aerodynamic selection of II shaped deck of cable-stayed bridge [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 10: 109 - 114.
- [11] 曹丰产, 葛耀君, 吴腾. 钢箱梁斜拉桥涡激共振及气动控制措施研究 [C]. // 第十三届全国结构风工程学术会议论文集 (中册) [A]. 大连: 人民交通出版社, 2007: 668 - 673.
- [12] Nagao F, Utsunomiya H, Yoshioka E, et al. Effects of hand rails on separated shear flow and vortex-induced oscillation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 71(69): 819 - 827.
- [13] 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, 33(3): 150 - 156.  
GUAN Qing-hai, LI Jia-wu, HU Zhao-tong, et al. Effects of railings on vortex-induced vibration of a bridge section [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(3): 150 - 156.
- [14] 孟晓亮, 郭震山, 丁泉顺, 等. 风嘴角度对封闭和半封闭箱梁涡振及颤振性能的影响 [J]. 工程力学, 2011, 28(S1): 184 - 188.  
MENG Xiao-liang, GUO Zhen-shan, DING Quan-shun, et al. Influence of wind fairing angle on vortex-induced vibrations and flutter performance of closed and semi-closed box decks [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(S1): 184 - 188.