

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202002037

# 板桁结合加劲梁悬索桥颤振稳定措施试验研究\*

彭伟<sup>1</sup>, 杨雄伟<sup>2</sup>

(1. 四川公路桥梁建设集团有限公司勘察设计分公司, 四川 成都 610041;  
2. 西南交通大学风工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:** 为了研究板桁结合加劲梁悬索桥的颤振稳定性, 以国内某大跨悬索桥为背景, 通过节段模型风洞试验分别研究了上、下中央稳定板以及水平稳定板的制振效果, 并考察了阻尼比对主梁颤振临界风速的影响, 最后对比研究了原设计方案和安装上中央稳定板的板桁结合加劲梁的三分力系数。研究表明: 上中央稳定板可以有效抑制板桁结合加劲梁颤振, 且颤振临界风速增长率随稳定板高度的增加呈非线性变化; 安装于桥面下方的下中央稳定板不能改善主梁的颤振性能, 但安装于下平联处的下中央稳定板可以在一定程度上提高主梁的颤振临界风速; 安装于桥面板边缘处的水平稳定板会恶化主梁的颤振稳定性; 将上、下中央稳定板联合使用时主梁可以取得更好的颤振性能。阻尼比对以扭转颤振为主的板桁结合加劲梁具有显著影响; 安装与栏杆等高的上中央稳定板在小攻角范围内对主梁三分力系数的影响很小。

**关键词:** 桥梁工程; 颤振稳定性; 风洞试验; 板桁结合加劲梁; 制振措施

**中图分类号:** U441.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0200-08

## Experimental Study on the Flutter Stability Countermeasures of a Suspension Bridge with a Stiffened Plate-truss Composite Girder

PENG Wei<sup>1</sup>, YANG Xiongwei<sup>2</sup>

(1. Survey and Design Branch of Sichuan Highway and Bridge Construction Group Co. LTD, Chengdu 610041, China; 2. Sichuan Key Lab of Wind Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to study the flutter stability of a suspension bridge with a plate-truss composite stiffened girder, a long-span suspension bridge built in China was taken as the background, and the flutter mitigation effects of upper and lower central stabilizers and horizontal stabilizer were studied, respectively, through the section model wind tunnel test. Then, the effect of the damping ratio on the flutter critical wind speed of the main girder was investigated. Finally, the three-component aerostatic force coefficients of the plate-truss stiffened girder were compared between the original design and the girder with the upper central stabilizer. The results show that the upper central stabilizer can effectively suppress the flutter of the plate-truss stiffened girder, and the growth rate of the critical wind speed varies nonlinearly with the increase of the height of the stabilizer; the lower central stabilizer installed under the bridge deck cannot improve the flutter performance of the main girder, but when it installed at the

\* 收稿日期: 2020-02-25; 修回日期: 2020-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878580)资助

作者简介: 彭伟(1980—), 男, 硕士研究生。主要从事结构风工程方面的研究。E-mail: 118189@qq.com

通讯作者: 杨雄伟(1992—), 男, 博士研究生。主要从事结构风工程方面的研究。E-mail: yxw\_swjtu@126.com

lower lateral combination of the girder can increase the flutter critical wind speed to some extent. The flutter stability of the main girder is deteriorated by the horizontal stabilizer installed at the upper edge of the deck; the main girder can achieve better flutter performance when the upper and lower central stabilization plates are used together. Damping ratio has an obvious effect on the flutter of the plate-truss stiffened girder with the main feature of torsional vibration, and the installation of upper central stabilizer with the same height as the railings has little effect on the three-component aerostatic force coefficients of the girder at small angles of attack.

**Keywords:** bridge engineering; flutter stability; wind tunnel test; stiffened plate-truss composite girder; vibration countermeasure

## 引言

由于钢桁梁抗扭刚度大,便于安装和运输,且可以设计成双层桥面结构型式,以满足更大的交通量需求,近年来在我国大跨度桥梁设计中应用广泛。随着跨度的提高,大跨度悬索桥变得轻柔,自振频率较低,阻尼比小,因此其对风的作用十分敏感。颤振作为一种危险的风致振动,会造成大跨度桥梁的损毁,因此主梁的颤振稳定性是大跨度悬索桥设计中考虑的重要因素,必须使主梁的颤振临界风速高于桥梁的颤振检验风速<sup>[1]</sup>。

气动措施和机械措施常用于提高桥梁的颤振稳定性。气动措施可以从根源上抑制主梁的振动,且具有成本低、易实现的特点,因而得到了广泛的应用。提高颤振稳定性常用的附加气动措施有:中央稳定板、水平稳定板、中央开槽、导流板和优化栏杆等<sup>[2-4]</sup>。针对如何使用气动措施改善桥梁颤振稳定性,国内外许多学者开展了一系列研究:王凯等<sup>[5-7]</sup>研究了板桁分离加劲梁颤振临界风速受翼板、封闭中央开槽、上下中央稳定板的影响;H. T. Xu等<sup>[8]</sup>通过使用双层气动翼板来改善板桁分离加劲梁的颤振稳定性;刘庆宽等<sup>[9]</sup>通过节段模型风洞实验研究了单中央稳定板、双中央稳定板、导流板等制振措施对小宽高比板桁分离加劲梁颤振特性的影响;Y. L. Li等<sup>[10]</sup>通过节段模型风洞试验研究了双层桁架梁的颤振特性,并考察了不同制振措施在安装于上层桥面和下层桥面情况下的制振效果;H. J. Tang等<sup>[11]</sup>通过节段模型风洞试验对板桁分离加劲梁在大攻角工况的颤振特性进行了优化研究,并对有效制振措施进行了数值模拟,从而揭示了中央稳定板的制振机理;陈政清等<sup>[12]</sup>通过能量原理研究了上中央稳定板抑制板桁分离加劲梁颤振的作用机

制;欧阳克俭等<sup>[13]</sup>通过流迹显示和数值模拟发现:因中央稳定板的存在致使一对旋涡形成于上下桥面板中央区域,进而提升了竖向自由度在桁架梁颤振发生时的参与程度,因此桁架梁颤振时的竖弯和扭转耦合程度得到加强,颤振的频率变小,最终实现了桁架梁颤振临界风速值变大的目标。

目前关于钢桁梁悬索桥颤振稳定性的研究大多针对板桁分离式加劲梁,而关于板桁结合式加劲梁颤振的稳定性研究较少<sup>[10,14]</sup>。相比于板桁分离式加劲梁,板桁结合式加劲梁更节约材料,省去了大量的支座,造价更低,因此优势明显。由于桁架与桥面板之间不存在缝隙,因此气动性能和传统的板桁分离式加劲梁存在较大差异,以往的颤振稳定措施可能不能直接应用于板桁结合式加劲梁上。

为了研究板桁结合式加劲梁悬索桥的颤振性能,本文通过节段模型风洞试验,考察了板桁结合加劲梁颤振稳定性受上下中央稳定板及水平稳定板的影响,研究结果可为类似类型大跨度悬索桥的抗风设计提供参考。

## 1 工程概况及设计风参数

本文研究对象为我国西南山区一座主跨跨径为1 200 m的钢桁梁悬索桥,桥型布置如图1所示。桥塔为H型混凝土桥塔,主梁采用板桁结合式加劲梁,宽度27 m,高度7 m,加劲梁立面如图2所示。

由于该桥主桥跨度较大、桥塔较高,为缆索承载柔性结构体系,因此该结构对风荷载作用较为敏感;另一方面,桥位所在地区气象条件较为复杂,具有阵风强烈、湍流强度高等典型山区风特性,因此为保证该桥的安全性,必须使该桥主梁的颤振性能满足设计要求。根据相关气象资料,采用Gumbel Type I极值概率分布函数理论<sup>[15-16]</sup>,计算得到该桥

位处的基本风速为 24.2 m/s,同时根据《公路桥梁抗风设计规范》<sup>[17]</sup>查得该桥位地区的最大风速和百年风速,计算出该桥位处的基本风速为 24.7 m/s,本文偏安全取规范建议值。考虑到山区峡谷的影响,桥面高度处的设计基准风速取为 27.2 m/s。对于该桥的颤振检验风速,根据《公路桥梁抗风设计规范》<sup>[17]</sup>计算为 42.8 m/s。



图1 桥型布置图

Fig.1 General layout of the bridge

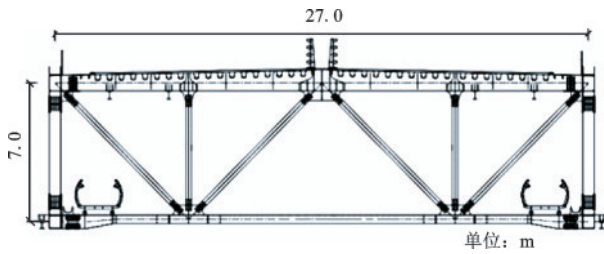


图2 板桁结合加劲梁立面图

Fig.2 Cross-section of the plate-truss composite girder

## 2 节段模型颤振稳定性试验

板桁结合加劲梁节段模型颤振试验在西南交大1号风洞第二试验段的均匀流场中进行,试验中通过直接测量主梁节段模型在不同风攻角条件下发生的颤振临界风速,并与大桥的颤振检验风速相比较,初步评估该桥的颤振稳定性。图3为安装在风洞中的节段模型,该节段模型成桥态的设计参数见表1。根据风速比可将试验测得的节段模型颤振临界风速换算至实桥,进而得到该板桁结合加劲梁在不同攻角下的颤振临界风速值,见表2。

由表2可见:大桥颤振临界风速在 $-3^\circ$ 和 $0^\circ$ 攻角下高于颤振检验风速值,满足设计要求;但当风攻角为 $+3^\circ$ 时,该板桁结合加劲梁的颤振临界风速远低于颤振检验风速。此外,在三种不同风攻角下,该板桁结合加劲梁均表现为单自由度扭转颤振。故该板桁结合加劲梁的原设计方案不能满足颤振稳定性要求,需要对其进行气动优化,提出有效的颤振制振措施。

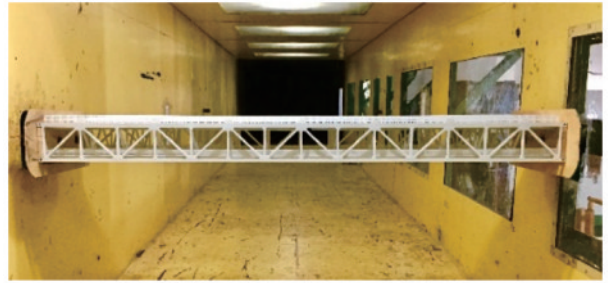


图3 安装于风洞中的节段模型

Fig.3 Section model installed in the wind tunnel

表1 颤振试验节段模型设计参数

Table 1 Design parameters of section model in flutter tests

设计参数		单位	实桥值	模型值
几何参数	长度	m	—	2.095
	宽度	m	27.0	0.536
	高度	m	7.0	0.014
质量参数	等效质量	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$	22 005	8.662
	等效质量惯矩	$\text{kg}\cdot\text{m}$	3 916 792	0.607
频率参数	竖弯频率	Hz	0.151	2.507
	扭转频率	Hz	0.293	5.103
阻尼参数	竖弯阻尼比	%	—	0.366
	扭转阻尼比	%	—	0.386

表2 成桥态主梁的颤振临界风速

Table 2 Critical flutter wind speed of the main girder in service state

风攻角/ $^\circ$	颤振临界风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	颤振检验风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	安全评价
$-3$	63.0	—	安全
0	52.0	42.8	安全
$+3$	35.5	—	不安全

## 3 颤振稳定性优化试验

为了提高板桁结合加劲梁的颤振临界风速,改善其颤振稳定性,针对最不利 $+3^\circ$ 风攻角工况,通过在主梁上安装不同高度(宽度)的上中央稳定板、下中央稳定板以及水平稳定板来对该板桁结合加劲梁进行颤振性能优化,试图找到经济合理的颤振性能优化方案。

以往研究结果表明<sup>[12-13]</sup>:上中央稳定板能够很好地抑制桁架梁颤振,使主梁的气动负阻尼减小并使颤振发生时的竖弯和扭转耦合程度提高,且减小

颤振频率,因此在桁架梁上应用广泛,如我国湖南省的矮寨大桥<sup>[1]</sup>和贵州省的清水河大桥<sup>[13]</sup>均使用上中央稳定板来抑制桁架梁颤振,提高大桥的抗风稳定性。为了研究上中央稳定板对板桁结合加劲梁颤振稳定性的影响,在桥面中央安装了5种不同高度的上中央稳定板,如图4所示。

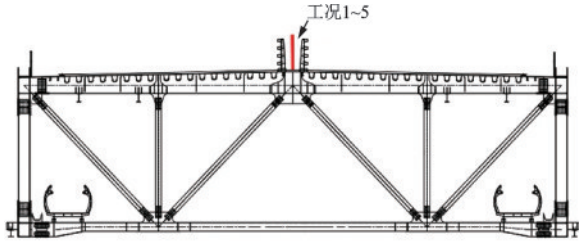


图4 工况1~5上中央稳定板安装示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the installation of upper central stabilizer in cases 1~5

表3列出了工况1~5主梁颤振临界风速结果,其中 $h_1$ 表示上中央稳定板高度。为了直观比较不同规格上中央稳定板的制振效果,表中还给出了不同工况对应的主梁颤振临界风速增长率,其定义如下:

$$\beta = (U_{cr} - U_0) / U_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中, $U_{cr}$ 为设置抑振措施后的颤振临界风速; $U_0$ 为原设计方案的颤振临界风速,即35.5 m/s。

图5给出了主梁的颤振临界风速增长率 $\beta$ 随稳定板高度的变化曲线。由表3和图5可知:安装上中央稳定板可以在不同程度上提高该板桁结合加劲梁的颤振临界风速值,当上中央稳定板由1.4 m增加到2.1 m时,主梁颤振临界风速增长率由11.5%提高到41.4%,即上中央稳定板高度越高,其制振效果越好。此外,由图5还可发现,随着稳定板高度的增加,主梁颤振临界风速增长率成非线性变化,当上中央稳定板高度超过1.8 m后,对应的颤振临界风速增长率的增加速率变快。相关研究认为<sup>[12]</sup>,中央稳定板改变了耦合气动阻尼的性质和发展规律,主要体现在气动导数 $A_2^*$ 降低了气动负阻,从而抑制系统运动的发散。然而,过高的上中央稳定板可能会导致主梁的阻力系数变大,顺风向抖振响应过高。因此,对于中央稳定板的选取,还要兼顾其对桥梁整体抗风性能等的影响。

桁架梁常用的颤振气动措施还有下中央稳定板,如明石海峡大桥使用了下中央稳定板来改善大桥的颤振稳定性<sup>[9]</sup>。如图6所示在桥面下方通长安装1.8 m高的下中央稳定板。测试结果表明:工况6

表3 设置上中央稳定板后主梁的颤振临界风速

Table 3 Critical flutter wind speed of the main girder after setting the upper central stabilizer

工况	$h_1/m$	$U_{cr}/(m \cdot s^{-1})$	$\beta/\%$
1	1.40	39.6	11.5
2	1.50	40.3	13.5
3	1.65	40.8	14.9
4	1.80	42.0	18.3
5	2.10	50.2	41.4

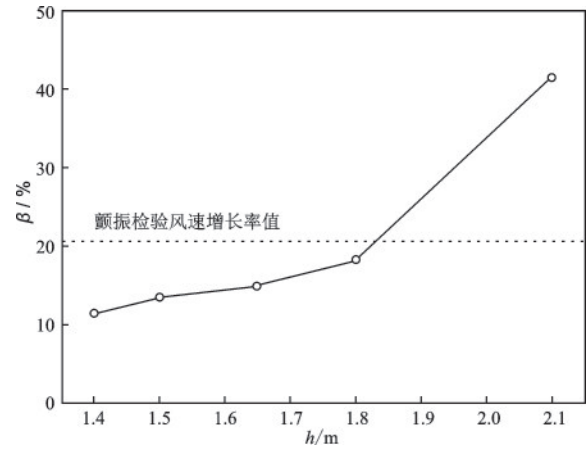


图5 颤振临界风速增长率随上中央稳定板高度变化曲线

Fig. 5 Variations in the growth rate of flutter critical wind speed with the height of the upper central stabilizer

对应的主梁颤振临界风速为35.5 m/s,与原始断面相同,即在桥面下方通长安装1.8 m高的下中央稳定板不能改善该板桁结合加劲梁的颤振稳定性。

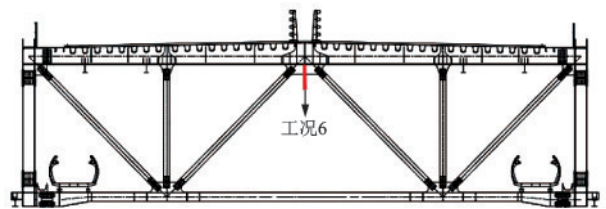


图6 工况6下中央稳定板安装示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the installation of the lower central stabilizer in case 6

根据以往研究结果<sup>[11]</sup>,在不同位置处安装相同的制振措施会取得不同的制振效果。在工况7~11中将下中央稳定板安装于下平联上,如图7所示。工况7~11主梁颤振临界风速结果见表4,其中 $h_2$ 表示下中央稳定板的高度。图8给出了工况7~11主梁颤振临界风速增长率随下中央稳定板高度变化的曲线。由表4和图8结果可知:随着下中央稳定

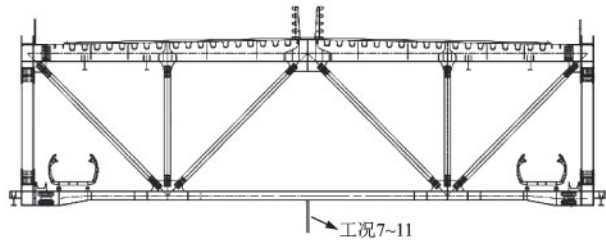


图7 工况7~11下中央稳定板安装示意图

Fig.7 Schematic diagram of the installation of the lower central stabilizer in cases 7~11

表4 设置下中央稳定板后主梁的颤振临界风速

Table 4 Critical flutter wind speed of main girder after setting the lower central stabilizer

工况	$h_2/m$	$U_{cr}/(m \cdot s^{-1})$	$\beta/\%$
7	1.40	36.2	2.0
8	1.50	37.4	5.4
9	1.65	37.8	6.5
10	1.80	38.1	7.3
11	2.10	38.1	7.3

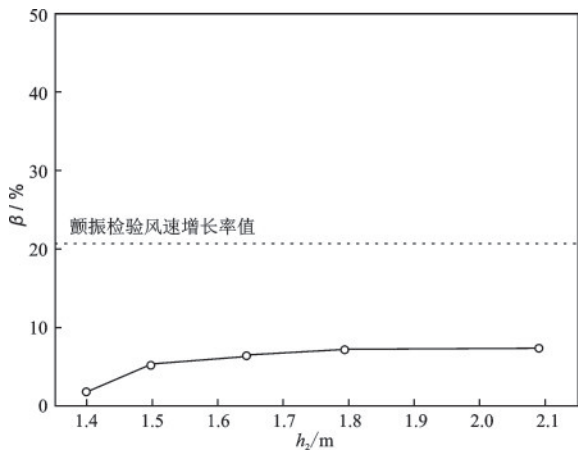


图8 颤振临界风速增长率随下中央稳定板高度变化曲线  
Fig.8 Variations in the growth rate of flutter critical wind speed with the height of the lower central stabilizer

板高度的增加,颤振临界风速增长率缓慢提高,即将下中央稳定板安装于板桁结合加劲梁的下平联上可以起到一定的颤振抑振作用;当下中央稳定板高度增加到1.8 m后,其颤振临界风速增长率保持不变,表明下中央稳定板对主梁的颤振临界风速提高有限,不能满足主梁颤振稳定性要求。此外,对比工况6和工况10的结果可以发现,下中央稳定板的安装位置对该制振措施的制振效果具有明显的影响,将下中央稳定板安装于板桁结合加劲梁下平联处的抑振效果明显优于将其安装于桥面板底部。

水平翼板可以使来流提前发生分离,在某些情况下可以很好地抑制桁架梁颤振,例如我国贵州坝陵河大桥应用了双层水平翼板来改善大桥的颤振稳定性<sup>[7]</sup>。在主梁桥面板两侧边缘处对称设置宽度为1.5 m的水平翼板,如图9所示。颤振测试结果表明:工况12对应的主梁颤振临界风速仅为34.5 m/s,对应的颤振临界风速增长率为-2.8%。这说明水平翼板不但不能提高该板桁结合加劲梁的颤振临界风速,甚至会产生不利影响。

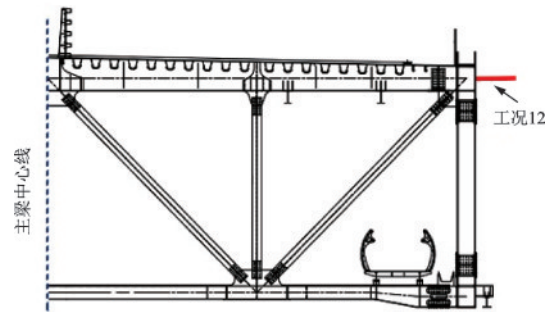


图9 工况12水平翼板安装示意图

Fig.9 Schematic diagram of the installation of horizontal flaps in case 12

以往研究结果表明<sup>[18]</sup>,将有效的颤振制振措施联合使用后,其制振效果明显优于单一制振措施。由之前的颤振结果可知,安装于桥面上的上中央稳定板和安装于下平联处的下中央稳定板可以有效改善该板桁结合加劲梁的颤振稳定性,因此本文将以上两种制振措施联合使用,研究其制振效果,如图10所示。其中下中央稳定板高度为1.8 m,上中央稳定板高度由1.4 m增加到2.1 m。颤振测试结果见表5,图11给出了工况13~16主梁颤振临界风速增长率随上中央稳定板高度变化的曲线。由表5和图11结果可知:相比于单独使用上中央稳定板或下中央稳定板,将上、下中央稳定板联合使用后,该板桁结合加劲梁可以取得更好的颤振稳定性,且上

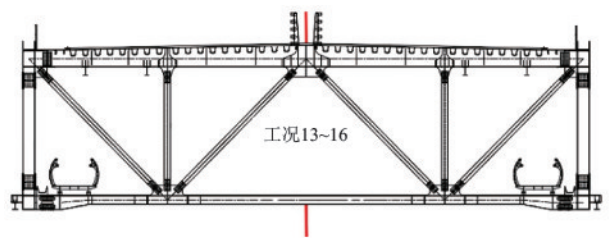


图10 工况13~16上、下中央稳定板安装示意图

Fig.10 Schematic diagram of the installation of upper and lower central stabilizers in cases 13~16

表5 联合设置上、下中央稳定板后主梁的颤振临界风速

Table 5 Critical flutter wind speed of main girder after setting the upper and lower central stabilizers in combination

工况	$h_1/m$	$h_2/m$	$U_{cr}/(m\cdot s^{-1})$	$\beta$
7	1.40	1.80	41.2	16.1%
8	1.50	1.80	41.4	16.6%
9	1.65	1.80	42.5	19.7%
10	1.80	1.80	43.7	23.1%
11	2.10	1.80	44.2	24.5%

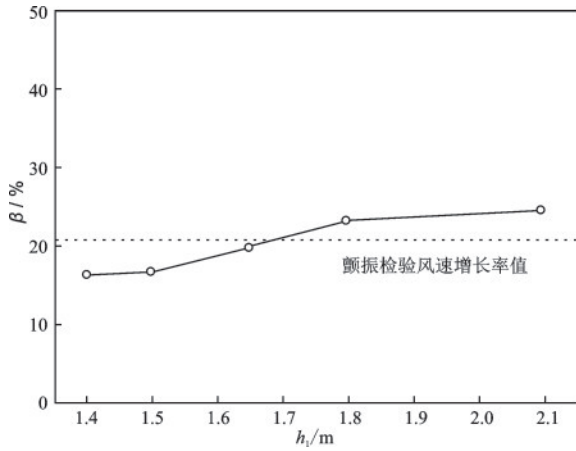


图11 工况13~16颤振临界风速增长率随上中央稳定板高度变化曲线

Fig.11 Variations in the growth rate of flutter critical wind speed with the height of the upper central stabilizer in cases 13~16

中央稳定板高度的增加会使颤振临界风速增长率相应增加,当上中央稳定板高度为1.65 m时,主梁的颤振临界风速已接近颤振检验风速值。

系统阻尼比对节段模型颤振临界风速具有显著影响<sup>[19]</sup>,特别是该板桁结合加劲梁节段模型颤振形态为单自由度扭转颤振,其颤振特性可能对阻尼比较为敏感。为了研究阻尼比对该板桁结合加劲梁颤振临界风速的影响,测试了工况2(即安装1.5 m高)上中央稳定板节段模型在不同风攻角下的颤振特性,结果见表6。由表6可知,当阻尼比由0.386%提高到0.458%时,+3°风攻角下主梁颤振临界风速提高至43.7 m/s,提高幅度达8.4%,超过颤振检验风速值42.8 m/s,满足颤振设计要求。此外,值得说明的是:对于节段模型,主梁发生颤振时其气动力的空间相关性较强;对于实际桥梁,当其发生颤振时气动力的空间相关性较节段模型弱,相应的颤振临界风速要高于节段模型的颤振临界

风速值。因此,综合以上颤振试验优化结果:选定工况2即在桥面上安装1.5 m(与栏杆等高)的上中央稳定板作为最优气动优化方案,以此来改善该板桁结合加劲梁的颤振稳定性。

表6 阻尼比对工况2主梁颤振临界风速的影响

Table 6 Effect of damping ratio on critical flutter wind speed of the main girder in case 2

阻尼比/%	$U_{cr}/(m\cdot s^{-1})$		
	$\alpha = -3^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = +3^\circ$
0.386	> 67.1	> 67.1	40.3
0.458	> 67.1	> 67.1	43.7

如上所述,在桥面上安装上中央稳定板可能对主梁的气动特性产生一定影响。为了考察工况2中1.5 m高上中央稳定板对该板桁结合加劲梁三分力系数的影响,图12给出了原始断面和安装1.5 m高上中央稳定板后主梁的三分力结果,图中 $C_D$ 、 $C_L$ 、 $C_M$ 分别表示板桁结合加劲梁原始断面的阻力系数、升力系数和升力矩系数; $C'_D$ 、 $C'_L$ 、 $C'_M$ 分别表示工况2加劲梁断面的阻力系数、升力系数和升力矩系数。三分力分别按下式定义:

$$C_D(\alpha) = F_D(\alpha) / (0.5\rho U^2 HL) \quad (2)$$

$$C_L(\alpha) = F_L(\alpha) / (0.5\rho U^2 BL) \quad (3)$$

$$C_M(\alpha) = F_M(\alpha) / (0.5\rho U^2 B^2 L) \quad (4)$$

式中, $\alpha$ 为风攻角; $0.5\rho U^2$ 为气流动压;节段模型的高度、宽度和长度依次用 $H$ 、 $B$ 、 $L$ 表示。

结果发现,两种主梁断面三分力系数在 $-5^\circ \sim$

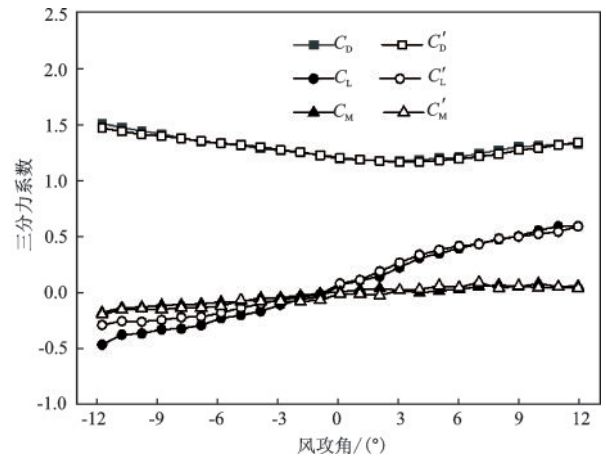


图12 板桁结合加劲梁原始断面和工况2三分力系数

Fig.12 Three-component static coefficients of the stiffened plate-truss composite girder in original design and case 2

+5°攻角范围内差别很小,说明在板桁结合加劲梁上安装 1.5 m 高的上中央稳定板对三分力系数影响有限。

## 4 结 论

(1)不同风攻角下,板桁结合加劲梁均表现为单自由度扭转颤振,且+3°风攻角对应的颤振临界风速远低于大桥的颤振检验风速,需要对其进行气动优化,提出有效的制振措施。

(2)安装于桥面上的上中央稳定板可以显著提高主梁的颤振临界风速,且颤振临界风速增长率随着上中央稳定板高度的增加呈非线性变化。

(3)下中央稳定板的安装位置对其制振效果具有显著影响,当其安装于桥面下方时不能改善主梁的颤振性能,但当其安装于下平联处时可以在一定程度上提高主梁的颤振临界风速。

(4)安装于桥面板边缘处的水平稳定板可降低主梁的颤振临界风速,使板桁结合加劲梁的颤振稳定性发生恶化;相比于单独使用上中央稳定板和下中央稳定板,将上、下中央稳定板联合使用后,该板桁结合加劲梁可以取得更好的颤振稳定性。

(5)节段模型阻尼比对以扭转颤振为主的板桁结合加劲梁具有显著影响;相比于原始断面,安装与栏杆等高的上中央稳定板在小攻角范围内主梁三分力系数的影响很小。

## 参考文献:

- [1] 熊龙, 廖海黎, 李明水, 等. 马普托桥颤振稳定性的风洞试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(2): 321-326.  
Xiong L, Liao H L, Li M S, et al. Wind tunnel test study on flutter stability of Maputo bridge [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(2): 321-326. (in Chinese)
- [2] 李春光, 张志田, 陈政清, 等. 桁架加劲梁悬索桥气动稳定措施试验研究 [J]. 振动与冲击, 2008, 27(9): 40-43.  
Li C G, Zhang Z T, Chen Z Q, et al. Experimental study on the aerodynamic stability measure of a suspension bridge with truss stiffening girder [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(9): 40-43. (in Chinese)
- [3] 白桦, 李宇, 李加武, 等. 钢桁架悬索桥颤振稳定性研究 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(4): 90-95.  
Bai H, Li Y, Li J W, et al. Flutter stability of a steel truss girder suspension bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(4): 90-95. (in Chinese)
- [4] Miyata T, Yamaguchi K. Aerodynamics of wind effects on the Akashi Kaikyo Bridge [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 48(2): 287-315.
- [5] 王凯, 廖海黎, 刘君. 山区峡谷大跨钢桁梁桥抗风特性试验研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(19): 169-174.  
Wang K, Liao H L, Liu J. The wind resistance test research of long-span steel truss bridges built across the gorge of mountainous areas [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(19): 169-174. (in Chinese)
- [6] 王凯, 廖海黎, 李明水. 基于风洞试验的大跨度钢桁梁悬索桥颤振性能研究 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(15): 175-180.  
Wang K, Liao H L, Li M S. Flutter performances of a long-span suspension bridge with steel trusses based on wind tunnel testing [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(15): 175-180. (in Chinese)
- [7] Wang K, Liao H L, Li M S. Flutter suppression of long-span suspension bridge with truss girder [J]. Wind and Structures, 2016, 23(5): 405-420.
- [8] Xu H T, Liao H L, He Y, et al. Wind tunnel test of aerodynamic optimization measures for flutter stability of super long-span bridge with truss girder [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 5(2): 49-54.
- [9] 刘庆宽, 盛永青, 马文勇, 等. 小宽高比钢桁架悬索桥颤振稳定气动措施的试验研究 [J]. 实验流体力学, 2012, 26(3): 26-31.  
Liu Q K, Sheng Y Q, Ma W Y, et al. Experimental study on aerodynamic measures for flutter stability of suspension bridge with small aspect ratio steel truss girder [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(3): 26-31. (in Chinese)
- [10] Li Y L, Tang H J, Wu B, et al. Flutter performance optimization of steel truss girder with double-decks by wind tunnel tests [J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(6): 906-917.
- [11] Tang H J, Li Y L, Wang Y F, et al. Aerodynamic optimization for flutter performance of steel truss stiffening girder at large angles of attack [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 168:

- 260-270.
- [12] 陈政清, 欧阳克俭, 牛华伟, 等. 中央稳定板提高桁架梁悬索桥颤振稳定性的气动机理 [J]. 中国公路学报, 2009, 22(6): 53-59.
- Chen Z Q, Ouyang K J, Niu H W, et al. Aerodynamic mechanism of improvement of flutter stability of truss-girder suspension bridge using central stabilizer [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(6): 53-59. (in Chinese)
- [13] 欧阳克俭, 陈政清. 中央稳定板提高颤振稳定性性能的细观作用机理 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(1): 11-16.
- Ouyang K J, Chen Z Q. Micro-mechanism of a central stabilizer for improving a bridge's flutter stability [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(1): 11-16. (in Chinese)
- [14] 徐爱军, 王凯, 李明水, 等. 板-桁组合式钢桁梁悬索桥颤振稳定性选型研究 [J]. 实验流体力学, 2015, 29(4): 52-57.
- Xu A J, Wang K, Li M S, et al. Flutter stability selection study of a long-span steel truss suspension bridge with a combined deck plate [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2015, 29(4): 52-57. (in Chinese)
- [15] 于舰涵, 李明水, 廖海黎. 山区地形对桥位风场影响的数值模拟 [J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(4): 654-662.
- Yu J H, Li M S, Liao H L. Numerical simulation of effect of mountainous topography on wind field at bridge site [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(4): 654-662. (in Chinese)
- [16] 王凯, 廖海黎, 李明水, 等. 山区峡谷桥梁设计基准风速的确定方法 [J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(1): 29-35.
- Wang K, Liao H L, Li M S. Determination method for basic design wind speed of mountainous-valley bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 48(1): 29-35. (in Chinese)
- [17] 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, 2018.
- [18] 李明, 孙延国, 李明水. 大跨度钢桁梁悬索桥颤振稳定措施试验研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(13): 182-189.
- Li M, Sun Y G, Li M S. Tests for flutter stability measures of a long-span suspension bridge with steel truss girders [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(13): 182-189. (in Chinese)
- [19] Li M, Sun Y, Jing H M, et al. Vortex-induced vibration optimization of a wide streamline box girder by wind tunnel test [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(12): 5143-5153.

(本文责编: 赵霞)