

单主缆悬索桥主梁涡振性能及抑制措施风洞试验研究

罗天 何乔竹

四川省公路规划勘察设计院有限公司

摘要:单主缆悬索桥,结构抗扭刚度较低,阻尼小,是风致敏感结构,容易发生涡激振动现象。过大振幅的涡激振动将影响结构的安全性和耐久性。为研究单主缆悬索桥主梁涡振性能及减振措施,以英华大桥为背景,通过一系列的1:50节段模性试验详细研究了各类气动措施对此类断面涡激振动性能的影响。试验结果表明:初期设计的原断面,在 0° 及 $+3^\circ$ 攻角下均会发生严重的涡激振动现象,通过设置导流板、气动翼板、调整风嘴外型或栏杆布置形式等八种不同的减振措施,均可不同程度的降低主梁的涡振振幅。综合考虑外观经济等因素,选取调整风嘴外型(小风嘴)方案为最终方案。所提出的各类涡激振动抑制措施有较好的工程应用价值,可为同类型桥梁抗风设计提供借鉴。

关键词:单主缆悬索桥;钢箱梁;风洞试验;涡激振动

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.07.027

引言

单主缆悬索桥在各类桥型中呈现造型优美的特点,因此多出现在国内外的市政桥中,单主缆悬索桥是指全桥只有一根主缆,而不像其他悬索桥有两根在左右布置的主缆,因此抗扭是单索面悬索桥的主要问题,工程上多利用增加桥梁宽度来增强其抗扭性能。但总体而言单主缆悬索桥整体抗扭刚度较低,主梁质量轻、阻尼小,是风致敏感结构,易发生涡激振动现象。

涡激振动是由于漩涡脱落引发的,在较低风速就能产生的一种限幅振动,而过大的涡激振动也会影响行车舒适性和结构的耐久性,甚至会引发结构或者节点的疲劳破坏^[2]。因而桥梁的涡振性能是缆索桥梁抗风设计需要面对的关键问题,国内外对钢箱梁的涡激振动性能和抑振措施进行了大量的研究^[3-5]。抑振措施的方式主要分为气动措施和机械措施,气动措施是指通过调整桥梁及附属结构气动外形来优化整个结构的气动布局,从而达到打散漩涡和改变涡脱频率的目的。而机械措施通常是指利用各类的阻尼器增大结构阻尼,通过增加结构阻尼来增大激发桥梁振动的力的阈值。李永乐^[6]、Nagao^[7]和管青海^[8]的研究指出,调整栏杆透风率和栏杆布置位置可减小涡振振幅,来流分离受栏杆影响而改变是主要原因。徐福友^[9]、郭增伟^[10]等人的研究表明,抑流板通过改变来流在主梁上的分离点和再附点来实现抑振功能。Larsen^[11]、李明水^[12]等人通过设置不同形式的风嘴,实现限制涡振振幅的目的。马存明^[13]等人通过在港珠澳大桥上设置阻尼器来控制涡振。日本东京大桥和巴西Rio Niteroi大桥也都设置阻尼器来控制涡振^[14-15]。目前在已建成桥梁中,为实现更高的可靠度,通常同时使用几种措施进行抑振^[12]。目前研究桥梁涡振性能及抑振措施主要采用:现场实测,风洞试验和数值模拟

(CFD)。其中现场实测最为准确,但时间和经济成本过高。数值模拟,通过算法的不断优化,准确率逐步提升。风洞试验可不断的调整结构外型,来流参数,其具有试验结果准确的特点,是桥梁涡振性能和抑振措施最常用的方法。

本文以南宁市英华大桥为工程背景展开涡激振动及其抑振措施研究,通过1:50节段模型试验确认原设计方案的涡振性能和特点,再通过改变桥梁和附属结构形状的方式优化桥梁气动布局,从而抑制涡振。本文共设置8种不同的气动措施,从中确认最终方案。并通过1:60全桥试验进行验证。研究结果可为其他同类型的大跨悬索桥结构抗风设计提供参考。

一、工程背景及实测项目概况

该桥为市政工程桥梁,主桥桥型采用单主缆悬索桥,跨度组合为45米+410米+45米,如图1。主梁为钢箱梁,宽38m,高3.5m,如图2(以跨中主梁为准)。

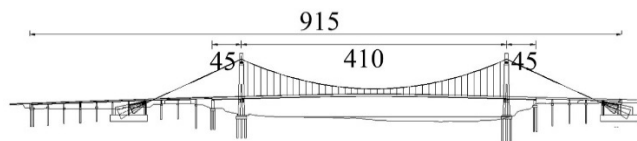


图1 主桥布置图(m)

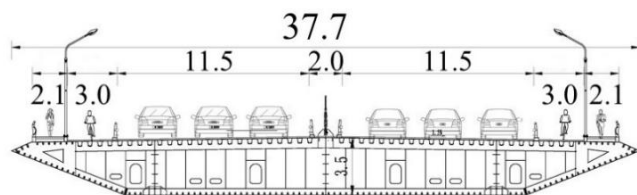


图2 跨中主梁断面(m)

二、节段模型涡振试验

节段模型风洞试验在XNJD-1风洞实验室中进行,XNJD-1风洞实验室地区四川省峨眉市西南交通大学校内,本次试验采用第二试验段,其尺寸为2.4m×2.0m。根据实验室条件(第二试验段截面尺寸)和风洞试验准则要求,节段模型缩尺比设置为1:50。节段模型主体采用木质框架,人行道、栏杆等采用ABS塑料板。模型尺寸为:2.095m(长)*0.76m(宽)*0.07m(高)。涡激振动试验在均匀流中进行,如图3。表1为节段模性试验的主要参数。而图4为桥梁气动外形细节图。



图3 安装在风洞中的节段模型

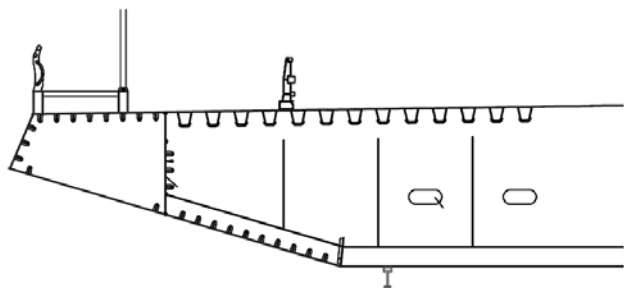


图4 模型设计细节图
表1 节段模型试验参数

参数	符号	缩尺比	实桥值	模型值
主梁高	H/m	1/50	3.5	0.070
主梁宽	B/m	1/50	38	0.76
质量	m / (kg/m)	1/50 ²	25060	10.47
质量惯矩	Im / (kg·m)	1/50 ⁴	2376221	1.023
竖弯频率	f _v /Hz	-	0.2887	3.59
扭转频率	f _a /Hz	-	0.6609	9.53

为了更加贴近真实的风场环境,本文在5种不同的风攻角下进行主梁节段模型的涡激振动试验,风攻角分别为 $\alpha=0^\circ$ 、 $+3^\circ$ 、 -3° 、 $+5^\circ$ 、 -5° ,试验仪器主要包括眼镜蛇风速仪和激光位移器,同时在节段模型风洞实验中阻尼也是关键的控制指标,试验利用设计不同刚度的弹簧和外置油缸进行阻尼调节,按照相关规范,本实验阻尼比取为0.3%。

图5是主梁节段模型涡振试验结果,从图中可以看出,在各攻角下主梁涡振性能不一,其中在 0° 、 $+3^\circ$ 及 $+5^\circ$ 攻角下主梁会发生较大振幅的涡激振动,特别是 0° 、 $+3^\circ$ 攻角下还出现了大幅度超过规范要求的振幅,因此需要进行抑振措施研究,以保证桥梁的行车舒适性和运营安全。

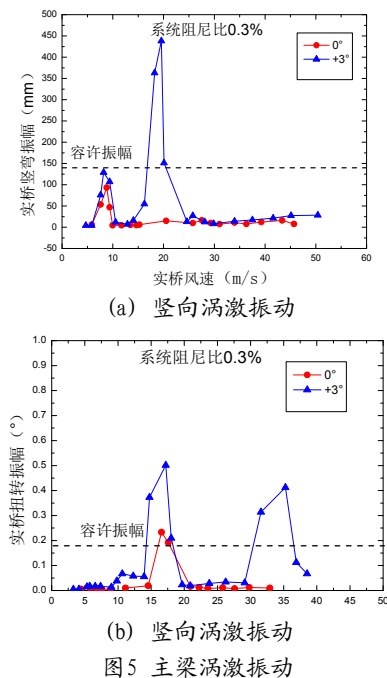


图5 主梁涡激振动

三、抑振措施研究

目前,抑制主梁涡激振动的方法主要采用气动措施和机械措施。而采用气动措施能在设计阶段从根本上控制主梁涡振,目前绝大多数桥梁是通过这种方式作为抑振措施的。本文参考相关研究成果^[9-13],考虑英华大桥结构特点设置了三类抑振措施:设置导流板、调整风嘴、调整栏杆,同时有各类型同时存在的复合方案。

(1) 设置导流板

通过设置导流板,改变流场流向,同时打破漩涡从而达到控制涡振的目的^[2]。在本文中,设计利用导流板、气动翼缘板等方式进行抑振研究,具体工况如表2:

表2 导流板抑振工况

方案	抑振措施	示意图
1	在导轨后面增加导流板	
2	增加导流板,在栏杆上增加气动翼缘板	
3	增加导流板后,人行道板外边缘改为斜边	

这三种优化方案的结果如图6所示(仅展示 $+3^\circ$ 结果),这三种优化方案均对主梁的涡振振幅有减弱的作用,其中方案三能基本满足容许范围。

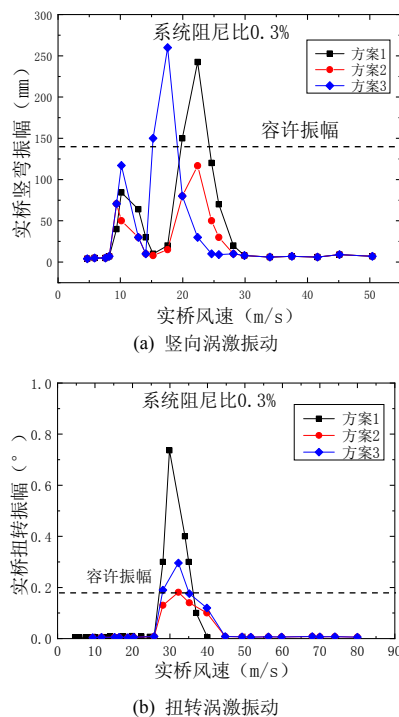


图6 $+3^\circ$ 主梁涡激振动

(2) 调整风嘴

在主梁两侧设置不同的风嘴和调整风嘴的外形是常见的风致振动抑振措施,该类措施已在多个桥梁工程中应用,本文设计了两种不同的风嘴,具体工况如表3:

表3: 风嘴抑振工况

方案	抑振措施	示意图
4	风嘴与人行道板齐平, 且风嘴更呈流线状(大风嘴)	
5	大风嘴, 且在导轨后面增加导流板	
6	调整尺寸, 让风嘴更呈流线状(小风嘴)	
7	小风嘴, 并在导轨后面增加导流板, 去掉人行道板	

这四种优化方案的结果如图7所示, 这三种优化方案均对主梁的涡振振幅有减弱的作用, 其中方案七在阻尼比3%的情况下能基本满足容许范围。

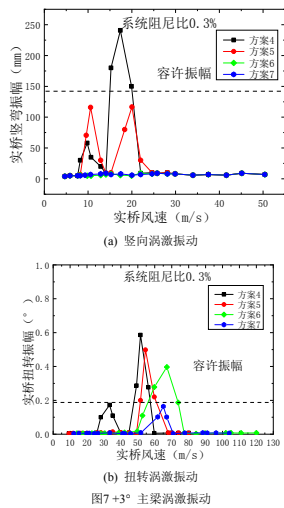


图7 +3° 主梁涡激振动

(3) 调整栏杆

栏杆也是影响涡激振动的主要构件之一, 调整栏杆的形状、透风率和布置方式是常见的风致振动抑振措施, 通过打破涡旋来干扰漩涡脱落的规律, 具体工况如表4。

表4 风嘴抑振工况

方案	示意图
1	
2	

(1) 原栏杆

(2) 人行栏杆2m(封闭)+6m(镂空)+2m(封闭)+6m(镂空)的形式布置

这一种优化方案的结果如图8所示, 这种优化方案对主梁的涡振现象有很强的抑制作用。

根据试验结果和外形、经济等因素综合考虑, 选择了方案6作为最终方案。方案6在阻尼比为5%时, 未出现超过规范要求的涡振振幅。

四、结论

以一大跨度单主缆悬索桥为工程背景, 通过1: 50的节段模型风洞试验, 研究了主梁的涡激振动性能, 并通过气

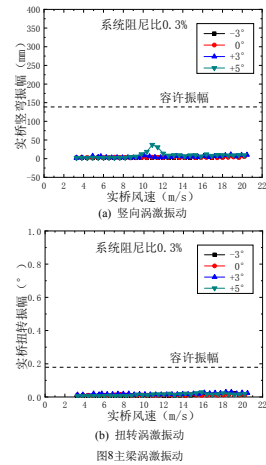


图8 主梁涡激振动

动措施进行了桥梁气动布局优化, 得到以下主要结论:

(1) 该桥主梁在较低风速下, 在+3° 及+5° 发生了明显的竖向和扭转涡激振动现象。需要采取抑振措施控制主梁的涡激振动。(2) 根据相关研究和英华大桥特点, 设置了3类8种不同的抑振措施。通过风洞试验研究表明, 改变导流板、气动翼板、风嘴、栏杆等桥梁附属设施的外形和布局在一定程度上均可提升主梁的涡振性能。(3) 抑振措施优化试验表明, 调整栏杆布局是控制主梁涡激振动的最优方案; 根据美观、经济等因素综合考虑选择小风嘴方案为最终方案。(4) 最后通过全桥气弹模型试验对所选方案进行了验证, 试验结果表明所选方案是合理的。

参考文献

[1] 林智敏, 刘振宇, 陈小平. 南宁英华大桥主桥设计[J]. 城市道桥与防洪, 2019 (08): 42-44+75+10.

[2] 张天翼, 孙延国, 李明水, 廖海黎. 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.

[3] 刘建新. 桥梁对风反应中涡激振动及制振[J]. 中国公路学报, 1995, 8 (2): 74-79.

[4] 张文明, 葛耀君, 杨詠昕, 等. 带挑臂箱梁涡振气动控制试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42 (12): 1948-1952.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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+249.

[8] 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.

[9] 李明水, 孙延国, 廖海黎, 孟凡超, 马存明. 港珠澳大桥的结构抗风性能[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60 (01): 57-65.

[10] 廖海黎, 马存明, 李明水, 孟凡超. 港珠澳大桥的结构抗风性能[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60 (01): 41-47.