

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.08.008

流线型箱梁气动外形对桥梁 颤振和涡振的影响

王 骑, 廖海黎, 李明水, 马存明

(西南交通大学 风工程试验研究中心, 四川 成都 610031)

摘要: 以某流线型钢箱梁断面为例, 详细研究了主梁气动外形变化对桥梁颤振和涡振性能的影响。基于 1:50 节段模型风洞试验, 分别研究了箱梁的栏杆、检修车轨道、风嘴、导流板, 以及斜腹板对桥梁颤振及涡振性能的影响。研究表明, 栏杆和检修车轨道将弱化桥梁断面的气动性能, 而风嘴和导流板则对桥梁的颤振和涡振性能有利。值得提出的是, 在其他气动外形保持不变, 而斜腹板倾角变为 15° 时, 桥梁的颤振性能不仅获得了较大提升, 且涡振现象还可得到消除。此现象的初步机理为: 较小的斜腹板倾角可阻碍和延后流线型箱梁下风侧漩涡的形成和脱落, 从而显著削弱漩涡脱落对桥梁涡振和颤振的影响。详细的气动机理还有待深入研究。此点发现对于大跨度桥梁的抗风设计具有重大的参考价值和实际意义, 并已经成功应用于国内多座大跨度桥梁的气动外形设计中。

关键词: 桥梁工程; 流线型箱梁; 风洞试验; 气动外形影响

中图分类号: U441.3; U443.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2012) 08-0044-07

Influence of Aerodynamic Shape of Streamline Box Girder on Bridge Flutter and Vortex-induced Vibration

WANG Qi, LIAO Haili, LI Mingshui, MA Cunming

(Research Center of Wind Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: Taken a streamline box girder for example, the influence of aerodynamic shape on bridge flutter and vortex-induced vibration (VIV) was studied in detail. Through wind tunnel test of a 1:50 scale section model, the influences of railing, inspection rail, rostrum, guide wing and inclined web on the flutter and VIV were discussed respectively. The results indicate that railing and inspection rail could weaken the aerodynamic performance of bridge section, while rostrum and guide wing could be used to improve the flutter and VIV performance of bridge. Special indicating is that the increase of flutter wind speed and the vanishing of VIV were all satisfied under the same condition while the slope of inclined web was 15° . The brief mechanism of this phenomenon is that the lower inclined web could restrain and delay the formation and shedding of the vortex at the downwind of streamline box girder, thus could remarkably weaken the influence of vortex shedding on VIV and flutter of bridges. But the detailed aerodynamic mechanism will be studied profoundly in future. This development would be beneficial to the wind resistant design of the bridge, and has been applied successfully in the aerodynamic shape design of several long-span bridges in China.

Key words: bridge engineering; streamline box girder; wind tunnel test; aerodynamic shape influence

收稿日期: 2011-11-30

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目 (90815016)

作者简介: 王骑 (1980-), 男, 重庆江津人, 博士, 讲师. (wangchee_wind@swjtu.edu.cn)

0 引言

大跨度桥梁的颤振稳定性是方案成立与否的重要控制因素——设计中必须避免桥梁在检验风速下发生颤振失稳破坏。为了较好的处理这个问题,同时兼顾桥梁的造价与维护成本,自19世纪50年代末英国赛文桥开始,流线型钢箱梁断面出现在了大跨度桥梁的设计中,并逐渐占据了主要位置。对于不同的桥梁,尽管流线型钢箱梁的外形差别较小,但其气动稳定性却可能存在较大差异,其原因一般归结为诸如栏杆、检修车轨道等气动敏感构件的影响。Larsen^[1]在丹麦大贝尔特桥的风洞试验中,详细研究了栏杆、风嘴导流板及风嘴形式等气动构件对颤振临界风速的影响。Miyata^[2]综述了大跨度桥梁典型断面的气动力研究成果,探讨了不同主梁外形对颤振稳定性的影响。Luca^[3]研究了桥面上的气动构件对主梁气动力的影响。Wilde^[4]则研究了主动翼板控制系统在抑制颤振中的作用。Yang^[5]基于风洞试验结果和实际工程应用,综述了诸如中央稳定板等提高大跨度桥梁颤振临界风速的气动措施。基于桥梁风工程专业多年的研究与实践,自塔科马桥发生风毁事故以来,世界上再没有桥梁发生颤振风毁事故,但另外一种振动形式——涡激共振却为大跨度桥梁带来了不少麻烦。当桥梁断面的漩涡脱落频率接近桥梁结构的某一阶固有频率时,就会诱发桥梁发生较大振幅的共振。涡激共振就是这样一种形式的风致限幅振动。在有正式记录的桥梁涡激共振现象中,比较著名的如日本的东京湾航道桥^[6]、巴西的里奥-罗特洛伊桥,以及丹麦的大贝尔特东桥^[7]。在以上几座桥梁中,除了大贝尔特桥采用梁底导流板的气动辅助措施进行涡振的振动控制外^[7],其他两座桥梁均采用了体外阻尼器的减震方案^[6,8],额外增加了桥梁的造价。此外,对于现在开始应用在大跨度桥梁上的分体式钢箱梁,虽然拥有较好的空气动力稳定性,但其在常风速下易发生涡激共振。Larsen^[9]基于不同尺度的节段模型风洞试验,研究了香港昂船洲大桥的涡激振动性能,并对梁底导流板的抑振机理进行了讨论。Ge^[10]详细介绍了中国舟山西堠门大桥涡激振动的风洞试验研究成果,同时介绍了不同抑振措施对控制涡振振幅的作用。Diana^[11-13]研究了墨西拿海峡大桥的分体式双开槽断面,并指出该断面存在涡激共振现象。

综上所述,现代大跨度桥梁在抗风设计中,虽然是以满足颤振检验风速为首要设计目标,但对于

主梁涡激振动性能的设计也需要提升到重要的位置。随着新材料、新技术以及新工艺的进步,桥梁的跨度不断增大,其刚度降低,阻尼减小,对风的敏感程度也增加;同时,大跨度桥梁通常修建在宽阔的水面或海面上,以及纵深的峡谷中,其所遭受的风环境也更加恶劣和复杂,也更容易发生风致振动问题。因此,在未来的桥梁抗风设计中,颤振和涡振性能都是需要重点关注的对象。

为了详细研究流线型钢箱梁气动外形以及附属构件对桥梁颤振稳定性和涡振性能的影响,本文在南京长江第四大桥(主跨1418 m的3跨悬索桥,如图1所示)主梁气动外形优化风洞试验的基础上,系统研究了栏杆、检修车轨道、风嘴、导流板以及斜腹板倾角对颤振临界风速和涡激振动性能的影响。值得提出的是,将箱梁斜腹板倾角变为 15° 后,颤振临界风速获得了显著提升,且在大尺度涡激振动试验中也未观察到明显的涡激共振现象。此现象表明,当斜腹板倾角低于某个值后,能在提高颤振稳定性的同时,消除涡激共振。对于此点气动机理,作者基于2个发现和1个推论进行了初步的解释。目前,此发现也为其他大跨度桥梁的抗风设计提供了参考,如在四川泸州黄舣长江大桥和云南普利大桥的抗风设计中,钢箱梁斜腹板倾角为 16° ,对应的颤振临界风速和涡振性能均能同时得到满足。



图1 南京长江四桥主梁断面

Fig. 1 Section of the 4th Nanjing Yangtze River Bridge

1 箱梁附属构件的影响

1.1 人行道栏杆的影响

人行道栏杆透风率对颤振临界风速的影响已被广泛研究^[1-4],其结论为:颤振临界风速与栏杆的透风率成正比,透风率越大,风速越高。作者在进行本项研究时,除了对比栏杆的透风率外,还对栏杆的位置进行了对比,试验结果如表1所示,从中可以发现,透风率90%的栏杆确能显著提高主梁的颤振临界风速。但栏杆的位置对颤振临界风速的影响并不明显。文献[15]还对栏杆下方路缘石对颤振稳定性的影响进行了研究。此外,栏杆对于桥梁涡振性能的影响也有和颤振类似的结果,透风率小的栏杆会显著增加涡振振幅。因此,在实际设计中,

在满足构造和安全要求的前提下，尽可能提高栏杆的透风率。





1.2 检修车轨道的影响

梁底的检修车轨道多见于国内的钢箱梁，其多安装在斜腹板和底板交界的区域，而此区域又是梁底气流的分离点。文献 [5] 的研究成果表明检修车

梁设计时，检修车轨道应尽量远离梁底转角点，或增设轨道导流板，以削弱流动分离，降低涡振振幅。若轨道只能置于转角附近，那么从一般性的试验结果来看，轨道置于斜腹板上要优于置在底板位置。

表 1 栏杆对颤振风速的影响

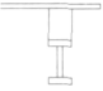
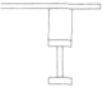
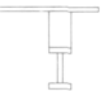
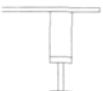
Tab. 1 Influence of railings on flutter wind speed

工况	透风率/ %	位置	颤振临界风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		
			-3°	0°	+3°
1	90	 原始位置	>74.6	73.0	61.3
2	60	 原始位置	>75.3	57.6	44.8
3	60	 向内 0.25 m	>74.8	58.6	42.4
4	60	 向内 0.5 m	>76.2	57.9	44.0

间隙对颤振临界风速有较大影响。对此，作者也研究了轨道间隙对颤振的影响。试验结果如表 2 所示，试验结果表明轨道间隙的改变对于增加桥梁的颤振稳定性意义不大。

表 2 检修车轨道间隙对颤振临界风速的影响

Tab. 2 Influence of rail gap on critical flutter wind speed

工况	与梁底 间隙/m		颤振临界风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		
			-3°	0°	+3°
原始设计	0.25		>79.0	73	61.3
垫高 50 mm	0.3		>81	>80	59.6
垫高 150 mm	0.4		>84	>82.5	58.1

此外，试验结果还表明，轨道位置的变化对颤振临界风速影响不大，但不同的轨道位置却对涡振性能产生了显著影响。不同轨道位置如图 2 所示，试验结果（如图 3 所示）表明，若轨道靠近梁底转角位置，主梁的涡振振幅会超过设计允许值；若将轨道安装在远离转角的位置，那么涡振振幅将显著减小；若保持原设计位置不变，但在轨道两侧安装导流板，那么涡振振幅也会显著减小。因此，在进行钢箱

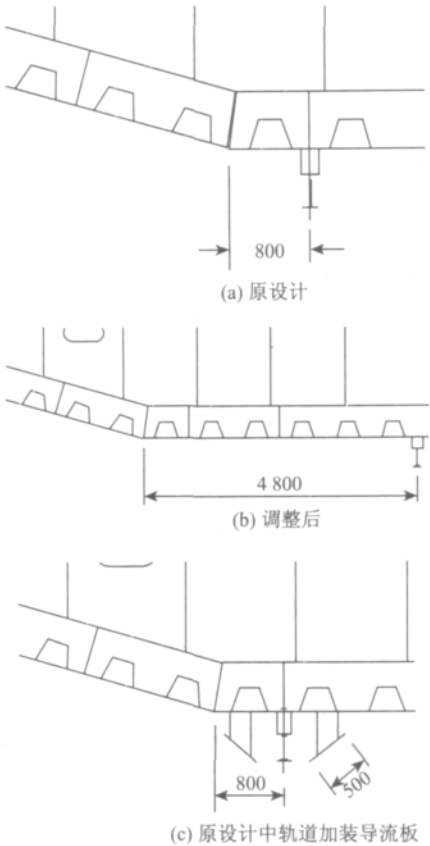


图 2 轨道位置（单位：mm）
Fig. 2 Positions of rail (unit: mm)

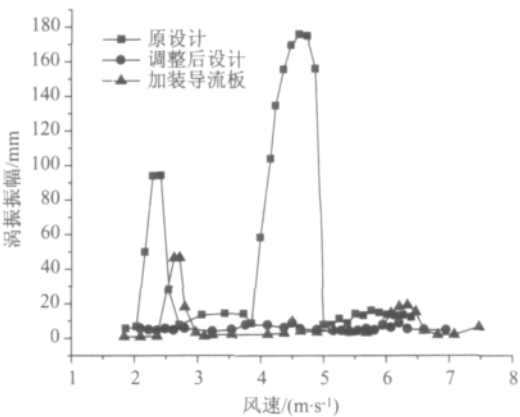


图 3 不同轨道位置对涡振振幅的影响
Fig. 3 Influence of rail position on VIV amplitude

1.3 风嘴导流板的影响

风嘴导流板的能让气流减少分离，使其更加平滑地通过主梁，从而达到增强结构气动稳定性的目的^[2-4,14]。但鉴于主梁设计的唯一性，风嘴导流板的最优方案需要借助大量的风洞试验来实现。对此，

作者在试验中设计了 9 种不同宽度和倾角的导流板来详细研究其对主梁颤振稳定性的影响。具体结果如表 3 所示, 从中可以得到以下结论: 较宽和正倾角 (上翘) 的导流板将有助于提高颤振临界风速。在抗风设计中, 若栏杆实际透风率较低, 可以考虑增设导流板的办法来显著提升颤振临界风速。但增设导流板后, 主梁的涡振性能可能变得不确定 (对不同断面形式的影响效应不同), 这需要通过风洞试验最终确定。此外, 增设导流板将增加结构设计的复杂性和工程造价。因此, 在最终的设计中, 增设导流板一般作为最后的可选方案来考虑。

表 3 导流板对颤振临界风速的影响

Tab. 3 Influence of guide wings on critical flutter wind speed

工况	导流板形式		颤振临界风速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	
	宽度 / cm	倾角 / ($^{\circ}$)	0°	3°
1	50	+15	52.2	44.9
2	50	0	51.47	41.98
3	50	-42	54.75	42.34
4	100	+15	54.96	52.05
5	100	0	52.78	50.23
6	100	-42	58.77	45.63
7	125	+15	60.23	63.88
8	125	0	56.94	55.48
9	125	-42	62.78	49.64








2 气动外形的影响

2.1 风嘴的影响

风嘴作为流线型箱梁防止气流分离的关键气动构件, 其宽度和锐度将显著影响主梁的颤振临界风速^[1-3]。为了系统研究风嘴的影响, 作者在试验中分别改变风嘴宽度和角度 (宽度从 1.9 m 变到 3.3 m, 夹角从 57° 变到 25°), 测试不同条件下的颤振临界风速, 所得结果如表 4 所示。从中可以得到如下结论: 颤振风速正比于风嘴的宽度和锐度, 即风嘴角度越小, 宽度越大, 颤振风速提升越显著。需要提出的是, 当风嘴宽度超过 3 m 后, 颤振风速开始降低, 如图 4 所示, 其可能的原因将在后文进行解释。风嘴对涡振的影响和颤振也类似, 钝而短的风嘴会弱化断面的涡振性能, 显著增加涡振振幅。此外, 若在风嘴上方设置诸如人行道板的非透风构件, 其实质是钝化了风嘴, 加剧了流动分离, 从而导致断面表现出较差的气动稳定性, 并引起较大的涡振振幅, 具体可参见文献 [16], 这在设计中需要予以避免。

表 4 风嘴对颤振临界风速的影响

Tab. 4 Influence of rostra on critical flutter wind speed

风嘴截面形式	风嘴宽度 / m	颤振临界风速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		
		$+3^{\circ}$	-3°	-3°
	1.9	51.5	> 69.6	> 70.6
	2.1	53.7	> 70.7	> 70.3
	2.3	54.6	> 71.2	> 70.5
	2.5	56.7	> 70.8	> 71.2
	2.7	58.6	> 71.5	> 75.2
	3.0	63.4	> 72.5	> 70.9
	3.3	59.3	> 71.3	> 72.8

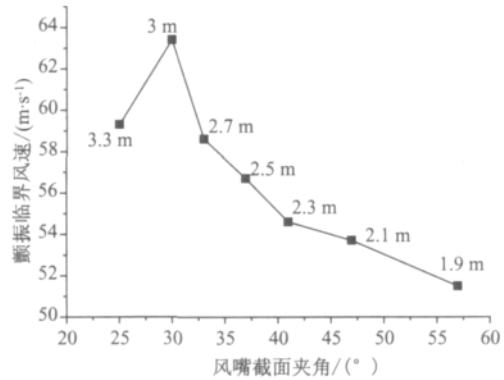


图 4 颤振临界风速随风嘴外形的变化曲线

Fig. 4 Critical flutter wind speed varying with rostrum

2.2 斜腹板倾角的影响

宽而锐的风嘴虽能显著提高颤振稳定性, 但在制造和安装上增加了不小的困难, 同时也增加了工程造价, 不利于在实桥设计中实施。由此, 作者又增加了变化斜腹板倾角的方案, 如图 5 所示。风洞试验结果表明, 当斜腹板倾角由原始设计的 21° 变为 18° 时, 颤振临界风速没有明显提升; 但当倾角由 18° 变为 15° 时, 颤振临界风速得到了大幅度提升, 由 58.6 m/s 提高到了 67.1 m/s (颤振检验风速为 60.8 m/s)。随后, 保持 15° 的倾角不变, 更换风嘴的宽度和角度, 得到的颤振临界风速如表 5 所示。

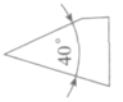


试验结果表明,随着风嘴宽度和锐度的增加,颤振临界风速反而有降低的趋势,此点结论也和原始斜腹板倾角下,颤振风速随风嘴宽度和锐度的增加而增加有所冲突。综合此2点结果,可以得出一个结论:风嘴宽度和锐度与斜腹板倾角为一种协调组合关系,在斜腹板倾角较大时(21°),风嘴相对宽而尖时的颤振稳定性最好,如2.1节结果;在斜腹板倾角降低到 15° 时,风嘴则需要变短和变钝,如2.2节结果。在此基础上,若再次考虑栏杆和检修车轨道对涡振的影响,可以获得图6的试验结果。图中表明,栏杆对涡振的影响相对较小;考虑轨道的影响,涡振振幅将显著增大,并超过规范允许值;若去掉梁底轨道,主梁的涡振现象几乎消失。由此表明,若不计入轨道的不利影响,或将轨道以导流板的方式进行屏蔽,那么在设计中将流线型箱梁斜腹板倾角定为 15° 时,桥梁的颤振和涡激性能是可以同时得到提升的。此时,2.4 m宽风嘴断面所对应的颤振临界风速是所有试验方案中最高的,并且工程造价和施工难度也较原始设计变化不大。



图5 斜腹板倾角示意图

Fig. 5 Schematic diagram of inclined web slope

表5 不同风嘴下的颤振风速(斜腹板倾角 15°)Tab. 5 Flutter wind speeds with different rostra (the slope of inclined web is 15°)

风嘴形式	风嘴宽度/m	颤振临界风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		
		$+3^\circ$	0°	-3°
	2.4	67.1	>71.3	>73.5
	2.6	62.0	>70.8	>72.7
	2.8	61.1	>71.5	>72.4

3 影响机理的讨论

对于栏杆、检修车轨道以及风嘴导流板这样的附属构件对桥梁颤振和涡振的影响机理,可以大致分为以下3点进行阐述。

(1) 人行道栏杆透风率的影响机理可以借助塔科马大桥糟糕的H型气动断面进行解释。由于人行

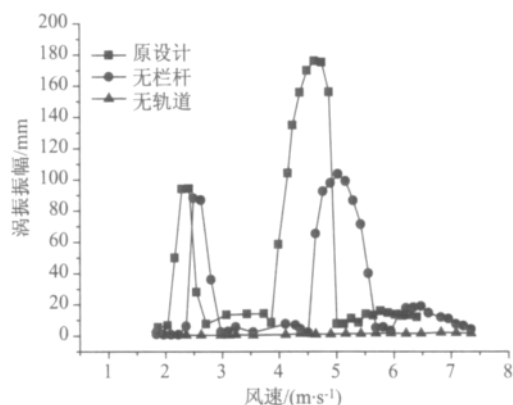


图6 不同气动构件对涡振的影响

Fig. 6 Influence of different aerodynamic components on VIV

道栏杆位于风嘴边缘,当其透风率较低时,可以将其比拟成H型断面的翼缘板,从而与钢箱梁一起形成“半H型”断面。当气流经过栏杆后即发生较大程度的分离,并在桥面上形成漂移漩涡,易引起主梁在低风速下的涡激共振,并导致高风速下的气动不稳定。同理,当人行道栏杆被积雪覆盖时^[1],栏杆下方有连续路缘石^[15]或人行道板^[16]时,对桥梁颤振和涡振的影响也是这样的机理。

(2) 检修车轨道的影响机理目前尚不完全明确,但作者在这里同样将其比拟为H形断面的翼缘板效应,即处于主梁底部转角处流动分离点附近的轨道在某种程度上也充当了H形断面翼缘板的作用,导致梁底形成不利于气动稳定的漩涡。颤振和涡振风洞试验的结果也表明,检修车轨道的位置以及与梁底的距离对桥梁的气动性能有显著影响,因此在设计时需要通过细致的风洞试验予以确定。

(3) 风嘴导流板的可使主梁断面的高宽比减小,在一定程度上使断面更加趋近于流线型,从而减少气流分离,提高颤振临界风速。但风嘴导流板对涡振的影响还需要开展研究。风嘴导流板在国内的珠江黄埔桥断面,以及西堠门大桥断面上都有应用。此外,增设风嘴导流板也会增加设计和施工的难度,并增加后期养护成本,因此一般情况下不建议采用。

风嘴提高颤振稳定性的机理,和风嘴导流板比较类似,但对于特定的钢箱梁断面,风嘴的宽度和锐度存在一个最优值,即风嘴并不是越宽越锐越好,此点在图4中已有明确的结论。此点机理可以通过钢箱梁外形的整体气动效应来解释:当风嘴宽度和锐度增加,断面向流线形靠拢的同时,也在某种程度上开始向钝体靠拢;当宽度和锐度超过最优值后,由于风嘴上缘角度逐渐减小,从而使得主梁断面开

始趋近于“倒梯形”的钝体断面, 导致断面气动稳定性迅速降低。由此, 作者建议在气动选型的风洞试验中根据此点特性对风嘴进行优化, 在不增加制造和施工难度的前提下最大程度地提升颤振稳定性。对于涡振的影响, 由于较钝的风嘴会引起较大的流动分离, 并会导致较显著的涡激共振, 因此设计中不宜采用较钝的风嘴。

对于斜腹板倾角在 15° 时颤振临界风速显著提升的机理, 目前还在进行较为深入细致的研究, 在后续将会初步讨论; 但斜腹板倾角对于涡振的影响机理却有了基于风洞试验结果的解释和支撑。丹麦桥梁空气动力学家 Allan Larsen 在文献 [18] 中引用大贝尔特桥主梁断面的涡激共振研究成果, 并公布了一个有趣的发现: 当钢箱梁的斜腹板倾角小于 16° 时, 桥梁的涡激共振现象将消失。在该论文中, 他将流线型箱梁断面与长直机翼进行类比, 并引用机翼在 16° 攻角时的失速现象^[17], 对这一现象进行了初步的解释: 箱梁斜腹板倾角小于 16° , 流动分离将显著降低, 同时在箱梁尾部也无足够的静风空间使气流产生逆压回流, 使得漩涡的生成受到抑制, 从而在很大程度上避免了涡激共振的发生。为了证实这一猜想, Larsen 在随后进行的验证性风洞试验中^[10], 选用不同斜腹板倾角的流线型箱梁断面 (图 7 所示) 研究了各自的涡振性能, 并采用 PIV (粒子速度成像) 流迹显示技术获得了主梁尾流区的实际流动图像。图 8 分别为斜腹板倾角为 27° 和 15° 条件下的流速分布情况, 从图 8 中可以看到明显的漩涡形成与脱落, 而图 9 中只能看到主梁后方的特征紊流, 而非成形的大漩涡。由此试验结果验证了 Larsen 本人当初的设想, 也验证了 15° 对于提升箱梁涡振性能的实际效果。Larsen 还在该论文中以智利和挪威的 2 座大跨度悬索桥为例, 其钢箱梁斜腹板倾角分别为 14.8° 和 15.8° , 在进行风洞试验时均未观察到明显的涡激共振现象。

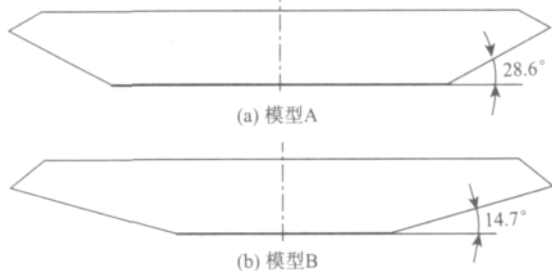


图 7 断面及斜腹板倾角

Fig. 7 Sections and inclined web slopes

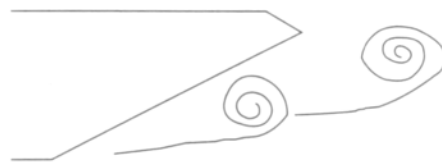


图 8 断面 A 尾流区的漩涡形成

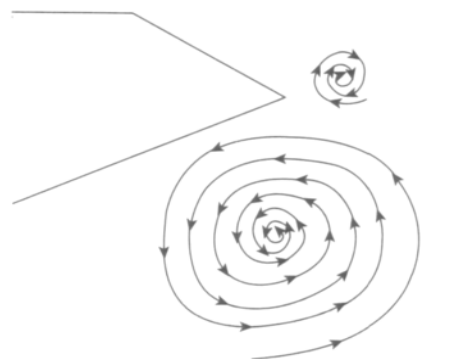
Fig. 8 Vortex formation in the near wake of section A



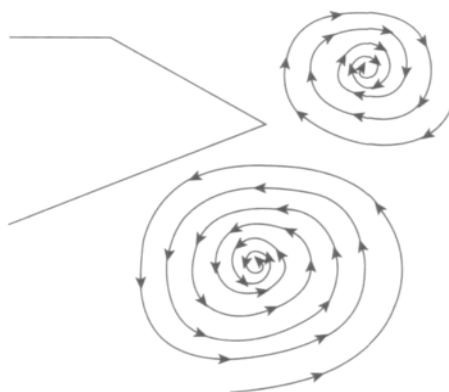
图 9 断面 B 尾流区的无成形漩涡形成

Fig. 9 Absence of vortex in the near wake of section B

鉴于以上对涡振的影响机理, 斜腹板倾角对颤振稳定性的影响机理可借助这样的发现进行初步解释。这个发现归属于同济大学风工程研究团队, 他们在 TJ-4 风洞中借助先进的 PIV 技术, 将桥梁颤振的流场变化机理公诸于世。张伟^[10]在进行流线型箱梁节段模型颤振试验中, 通过 PIV 技术记录下了模型在颤振临界状态时的流场运动情况, 并指出: 当风速低于颤振临界风速时, 箱梁尾部斜腹板区域只有一个大漩涡, 如图 10 (a) 所示; 而在颤



(a) 气动稳定状态时



(b) 颤振临界状态时

图 10 箱梁尾部的漩涡分布

Fig. 10 Vortex distribution in the near wake of boxgirder

振临界状态,斜腹板的上方会产生一个和下方同等大小的漩涡,如图10(b)所示。而正是在这样2个能量相当的漩涡共同作用下,桥梁发生了颤振现象。

结合以上发现,可以得出这样一个推理,用以解释本文优化试验中斜腹板倾角改变对颤振稳定性的增强作用。推理如下所述:当斜腹部倾角小于 16° 后,如同机翼在 16° 攻角以下(斜腹板的倾角可类比为机翼的攻角)不发生失速,流经主梁的气流也不易发生分离,除了使斜腹板下方漩涡不易形成外,还将斜腹板上方产生与下方对等能量漩涡的折减风速值显著提高,即推后了颤振漩涡的产生,从而提高了颤振临界风速。但此推理目前还需要通过先进的试验和测试手段进行验证,对应的工作正在推进当中。

4 结论

通过一系列的节段模型风洞试验研究,作者整理出以下结论,以供同行参考和借鉴。

(1) 低透风率(60%及以下)的人行道栏杆将弱化桥梁的颤振和涡振性能。

(2) 处于梁底转角位置的检修车轨道也会弱化桥梁的颤振和涡振性能,建议在轨道两边增设导流板,以对轨道的不利影响进行屏蔽。

(3) 增设风嘴导流板将有助于提高桥梁的颤振稳定性,但会增加桥梁的建设和维护造价。

(4) 风嘴的宽度和锐度对于特定的主梁断面有一个优化值,使得气动稳定性最好,较钝的风嘴对于桥梁的颤振和涡振性能都是不利的。

(5) 箱梁的斜腹板倾角低于 16° 时,桥梁的颤振临界风速将有显著提升,同时还能消除涡激共振现象。

此外,对于第(5)条结论提出的斜腹板倾角措施,除了应用在南京长江四桥的钢箱梁断面上,还成功应用到了四川泸州黄舫长江大桥和云南普利大桥的钢箱梁气动外形设计中,并正在推广到更多的大跨度桥梁的气动外形设计当中。

参考文献:

References:

- [1] 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
- [2] MIYATA T. Historical View of Long-span Bridge Aerodynamics [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91 (12/15): 1393-1410.
- [3] BRUNO L, MANCINI G. Importance of Deck Details in Bridge Aerodynamics [J]. Structural Engineering International, 2002, 12 (4): 289-294.
- [4] KRZYSZTOF W, OMENZETTER P, FUJINO Y. Suppression of Bridge Flutter by Active Deck-flaps Control System [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127 (1): 80-89.
- [5] YANG Yongxin, GE Yaojun. Some Practices on Aerodynamic Flutter Control for Long-span Cable Supported Bridges [C] // The 4th International Conference on AWAS08. Jeju, Korea [s. n.], 2008: 1474-1485.
- [6] FUJINO Y. Wind-induced Vibration and Control of Trans-Tokyo Bay Crossing Bridge [J]. Journal of Structural Engineering, 2002 (8): 1012-1025.
- [7] LARSEN A, ESDAHL S, ANDERSEN J E, et al. Storebælt Suspension Bridge-vortex Shedding Excitation and Mitigation by Guide Vanes [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 88 (2/3): 283-296.
- [8] BATTISTA R C, PFEIL M S. Active-passive Control of Vortex-induced Oscillations of Rio-Niterói Bridge [C] // Proceedings of the Third European Conference on Structural Dynamics. Florence, Italy. [s. n.], 1996: 561-567.
- [9] LARSEN A, SAVAGE M. Investigation of Vortex Response of a Twin Box Bridge Section at High and Low Reynolds Numbers [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96 (6/7): 934-944.
- [10] GE Yaojun, YANG Yongxin. VIV Sectional Model Testing and Field Measurement of Xihoumen Suspension Bridge with Twin Box Girder [C] // Proceedings of the 13th International Conference of Wind Engineering. Amsterdam [s. n.], 2011.
- [11] DIANA G, RESTA G, ZASSO A, et al. Forced Motion and Free Motion Aeroelastic Tests on a New Concept Dynamometric Section Model of the Messina Suspension Bridge [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92 (6): 441-462.
- [12] DIANA G, BELLOLI M, ROCCHI D. On the Vortex Shedding Forcing on Suspension Bridge Deck [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94 (5): 341-363.

(下转第70页)

- HU Jianhua, YE Meixin, HUANG Qiong. Experiment on Bearing Capacity of PBL Shear Connectors [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19 (6): 65-72.
- [5] 肖林, 李小珍, 卫星. PBL 剪力连接件静载力学性能推出试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2010, 31 (3): 15-21.
- XIAO Lin, LI Xiaozhen, WEI Xing. Research on the Static Load Mechanical Properties of PBL Shear Connectors' Push-out Test [J]. China Railway Science, 2010, 31 (3): 15-21.
- [6] 夏嵩, 赵灿晖, 张育智, 等. PBL 传剪器极限承载力的试验研究 [J]. 西南交通大学学报, 2009, 44 (2): 166-170.
- XIA Song, ZHAO Canhui, ZHANG Yuzhi, et al. Experimental Investigation on Ultimate Load-bearing Capacity of PBL Shear Connectors [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44 (2): 166-170.
- [7] 王振海, 赵灿晖, 李乔. PBL 剪力键荷载-滑移关系试验研究 [J]. 西南交通大学学报, 2011, 46 (4): 1-6.
- WANG Zhenhai, ZHAO Canhui, LI Qiao. Experimental Investigation on Load-slip Relationship of Perfobond Rib Shear Connectors [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46 (4): 1-6.
- [8] 王振海, 李乔, 赵灿晖. PBL 剪力键破坏形态及极限承载力试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31 (5): 517-521.
- WANG Zhenhai, LI Qiao, ZHAO Canhui. Experimental Investigation on Ultimate Bearing Capacity of Perfobond Rib Shear Connectors and Their Failure Modes [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31 (5): 517-521.
- [9] 张清华, 李乔, 卜一之. PBL 剪力连接件群传力机理研究 (I): 理论模型 [J]. 土木工程学报, 2011, 44 (4): 71-77.
- ZHANG Qinghua, LI Qiao, BU Yizhi. Load Transmission Mechanism of PBL Shear Connector Group (I): Theoretical Model [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44 (4): 71-77.
- [10] 张清华, 李乔, 卜一之. PBL 剪力连接件群传力机理研究 (II): 极限承载力 [J]. 土木工程学报, 2011, 44 (5): 101-108.
- ZHANG Qinghua, LI Qiao, BU Yizhi. Load Transmission Mechanism of PBL Shear Connector Group (II): Load Capacity [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44 (5): 101-108.
- [11] OGUEJIOFOR E C. Perfobond Rib Shear Connectors for Composite Beams [D]. Saskatchewan, Canada: University of Saskatchewan, 1994.
- [12] AHN J H, KIM S H, JEONG Y J. Shear Behaviour of Perfobond Rib Shear Connector under Static and Cyclic Loadings [J]. Magazine of Concrete Research, 2007, 60 (5): 347-357.
- [13] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系: 原理与应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- GUO Zhenhai. Theory and Application of Strength and Constitutive Equation of Concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- (上接第50页)
- [13] 宋锦忠, 林志兴, 徐建英. 桥梁抗风气动措施的研究及应用 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2002, 30 (5): 23-27.
- SONG Jinzhong, LIN Zhixing, XU Jianying. Research and Applianee of Aerodynamic Measures about Wind Resistance of Bridges [J]. Journal of Tongji University, 2002, 30 (5): 23-27.
- [14] 刘慈军, 郭震山, 朱乐东. 栏杆缘石构造对箱形主梁颤振稳定性的影响 [J]. 桥梁建设, 2008 (2): 20-23.
- LIU Cijun, GUO Zhenshan, ZHU Ledong. Influence of Railing Curbstone Structure on Flutter Stability of Box Main Girder [J]. Bridge Construction, 2008 (2): 20-23.
- [15] LI Mingshui, SUN Yanguo. Wind Tunnel Investigation on Vortex-induced Vibration for a Suspension Bridge by Section and Full Aeroelastic Modeling [C] // Proceedings of the 13th International Conference of Wind Engineering. Amsterdam [s. n.], 2011.
- [16] ABBOTT I H, VON DOENHOFF A E. Theory of Wing Sections [M]. New York: Dover Publications, 1958.
- [17] LARSEN A. Aerodynamic Stability and Vortex Shedding Excitation of Suspension Bridges [C] // The 4th International Conference on AWAS08. Jeju, Korea: [s. n.], 2008: 115-128.
- [18] LARSEN A, WALL A. Shaping of Bridge Box Girders to Avoid Vortex Shedding Response [C] // Proceeding of the 13th International Conference of Wind Engineering. Amsterdam [s. n.], 2011.
- [19] 张伟, 葛耀君. 导流板对大跨桥梁风振响应影响的流场机理 [J]. 中国公路学报, 2009, 22 (3): 52-57.
- ZHANG Wei, GE Yaojun. Flow Field Mechanism of Wind Induced Vibration Response of Large Span Bridge Influenced by Guide Vanes [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22 (3): 52-57.