文章编号：1001-4888(2022)03-0399-08

双幅钝体钢箱梁桥涡振性能气动优化风洞试验研究*

梁爱鸿，毛禹，李春光，韩艳
（长沙理工大学 土木工程学院，湖南长沙 410114）

摘要： 以某并列双幅钝体钢箱梁桥为工程背景，通过风洞试验研究双幅钢箱梁的涡振性能并提出合理的气动优化措施。采用 1∶40 比例节段模型风洞试验，测试了各攻角下主梁的涡激振动位移响应时程；在最不利攻角下，研究了双幅箱梁间距对主梁涡振性能的影响，并进一步在变化间距基础上改变栏杆封闭形式和透风率，测试其对涡振性能的影响。研究结果表明：双幅箱梁间距对涡振性能影响明显，且间距 1.5m 时涡振性能最优，但仍然高于规范限值；间距较小时，降低栏杆透风率，会延长双幅箱梁涡振风速区间，涡振振幅明显增大，箱梁断面气动稳定性降低。

关键词： 双幅钝体钢箱梁；涡振性能；风洞试验；间距；透风率
中图分类号： U448.12 **文献标识码：** A DOI：10.7520/1001-4888-21-098

0 引言

随着交通量的日益增长，为了满足快速增长的交通需求，双幅桥梁越来越受到青睐。尤其在沿海地区，大跨度双幅钢箱梁桥被越来越多地修建。同时由于跨度较大，钢箱结构趋于轻型化、低阻尼，大桥对风致振动愈发敏感。当风流经钝体的钢箱梁后，会在梁的下游一侧发生漩涡脱落，并对桥梁产生上下交替的作用力。随着风速增加，漩涡脱落的频率也增加，当脱落频率接近主梁的某阶自振频率时，将引起主梁结构的涡激共振现象。与单幅桥相比，由于平行双幅桥两桥面相距较近，使得流经上游桥面的气流对下游桥面产生复杂的气动干扰效应[1-3]，对大桥的涡振、颤振稳定性有着不可忽视的影响。涡激振动是在低风速下容易发生的一种风致振动现象，虽然不会出现如颤振那样的发散振动，但其发生的条件更容易形成，过大的振幅不仅影响行车的安全还会引起行人的恐慌，因此抑制涡激振动的发生或限制其振幅在规范限值内十分重要。

主梁间距对双幅桥的气动干扰效应有着最直接的影响，对间距的研究十分必要。关于间距对气动干扰效应影响的研究最早开始于并列及串列的圆(方)柱气动性能研究。Shiraishi 等[4]通过风洞试验对串列双矩形柱体、双圆柱体进行了研究，结果表明串列双矩形柱体扭转涡激振动响应对间距比十分敏感。Takeuchi 等[5]通过风洞试验对串列双幅矩形断面涡激振动气动响应进行了研究，结果表明串列双幅矩形断面气动干扰效应十分复杂，主要与双幅断面的间距比、单幅断面长细比、结构断面形状等有关。国内外学者对双幅流线型箱梁桥的气动干扰效应也做了大量研究，Honda 等[6]通过风洞试验研究了并列双幅连续梁桥的涡振性能，结果显示双幅及多幅间的气动干扰效应会影响桥梁的涡振最大振幅和风速锁定区间。陈政清等[7]通过并列双幅箱梁桥节段模型风洞试验发现双幅间的气动干扰效应会对大桥

* **收稿日期：** 2021-04-23；**修回日期：** 2021-05-28
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51978087，51822803)；湖南省自然科学基金项目(2020JJ14607)
通信作者： 李春光(1980－)，男，博士，副教授，主要从事桥梁及结构风工程研究。Email：mrlcg@126.com

的涡振性能产生不利影响,当间距比增大至 0.8 以上时,双幅间的气动干扰效应会明显减小;而不同断面间的气动干扰效应规律不一,需进一步进行研究。Kimura 等[8]通过风洞试验研究了双幅箱梁间距与梁宽的比值对双幅主梁间气动干扰效应的影响,结果表明双幅桥的间距比与桥梁的气动干扰效应有直接影响,即使净间距与梁宽比达到 8 时,双幅箱梁桥之间依旧存在不可忽略的气动干扰效应。谭彪等[9]通过对双边工字梁双幅桥进行风洞试验,研究其间距比对双幅桥的气动干扰效应,结果表明:与单幅桥相比,双幅桥因气动干扰效应的影响使得双幅桥涡振最大振幅增大,风速锁定区间变长;且由于气动干扰效应,使得上下游箱梁涡振存在一个相位差。刘志文等[10]研究了双幅箱梁桥的净间距以及不同阻尼比对双箱梁之间气动干扰效应的影响,发现双幅箱梁桥的净间距以及不同阻尼比对双箱梁涡振风速区间没有影响,但对其涡振幅值有明显影响;当上游桥梁断面振幅较大时,气动干扰对下游断面的涡振具有抑制作用;当上游断面振幅较小时,气动干扰对下游断面的涡激振动表现为促进作用;气动干扰效应随着双箱梁断面净间距的增加逐渐减弱。周奇等[11]通过全桥气弹模型风洞试验以及数值模拟的手段,对双幅斜拉桥的涡振特性进行了研究,结果表明气弹模型试验可以出现高阶涡振,且各阶涡振的斯托罗哈数保持一致;安装不同透风率的多孔板对桥有不同的减振效果。

综上所述,国内外学者对双幅流线型钢箱梁桥的涡振性能及气动干扰效应已有了深入的研究,但对于双幅钝体箱梁桥的气动干扰效应研究较少,并且钝体箱梁桥需采取的气动优化措施有待进一步研究。本文着重从箱梁的间距比以及栏杆透风率等措施入手,对双幅钝体箱梁桥的涡振特性及气动干扰效应进行研究,所得结果可为实际工程中类似的双幅钝体箱梁桥的抗风设计提供参考。

1 工程概况

以国内某三跨钝体钢箱梁连续梁桥为背景,桥址处于沿海开阔地形,基本设计风速较高,时有强台风来袭。桥型初拟方案采用(123+178+123)m 的三跨钢箱梁连续梁桥,如图 1 所示。该桥主梁为双幅单箱变截面钢箱梁,支点截面处主梁高度为 8.5m,跨中截面处主梁总宽为 26.5m,双幅间距为 0.5m,单幅宽为 13.0m,采用上层行车、下层行人的双层交通模式,如图 2 所示。该桥为变截面主梁,但是考虑到跨中主梁变化较小,在方案设计阶段仍采用常规的节段模型试验方案来测试并优化其气动性能。

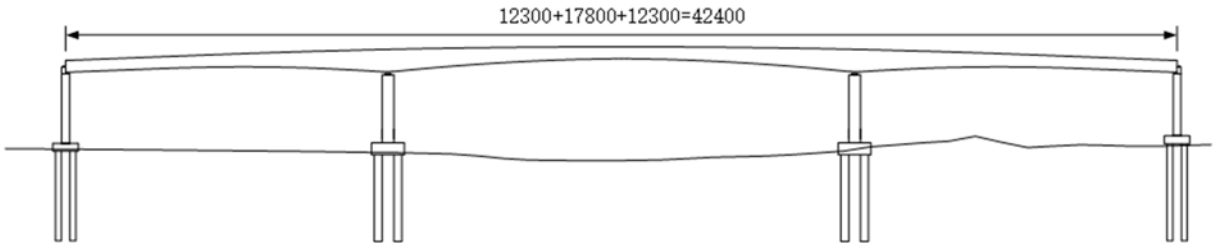


图 1 桥型布置图(单位:cm)

Fig. 1 General layout (unit: cm)

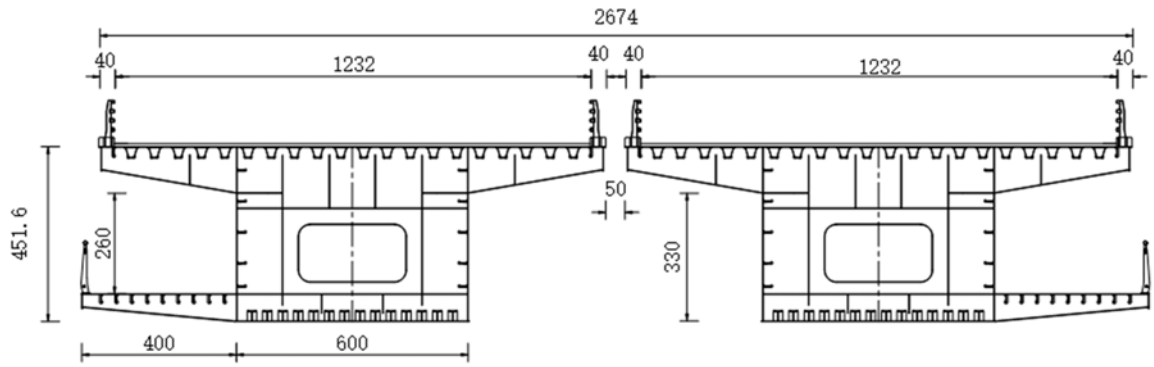


图 2 主梁标准横断图(单位:cm)

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

2　风洞试验布置

主梁节段模型风洞试验在长沙理工大学风工程试验研究中心边界层风洞中进行，如图 3 所示。风洞风速的调节和控制采用计算机终端集中控制的调速系统。该风洞的试验段截面尺寸为 4.0m(长)×3.0m(宽)×21.0m(高)，风速范围 0～45.0m/s，均匀流场紊流度小于 0.5%。



图 3　风洞试验节段模型

Fig. 3　Wind tunnel test segment model

为尽可能真实模拟主梁细部构件，同时考虑桥梁断面的雷诺数效应，主梁节段模型缩尺比选为 1∶40。为减少节段模型端部三维流动的影响，主梁模型长度取 $L=1.5$m，主梁宽度 $B=0.56$m，模型高度 $H=0.15$m，模型长宽比约为 2.68。模型芯梁采用两根不锈钢空心矩形管来提供全部刚度，外衣采用优质 PVC 制作，防撞栏和人行道栏杆采用 ABS 板雕刻而成，以保证其几何外形相似。模型两端用轻质木板作为端板，保证主梁断面附近气流的二元特性。节段模型主要试验参数见表 1。模型的悬挂采用传统的 8 根弹簧悬挂方式，形成弹性悬挂系统。双节段进行组合悬挂时，将上游节段模型端轴进行延伸处理，来满足质量惯性矩及模型自由振动，在梁底布置四个激光位移传感器。

表 1　模型试验参数

Tab. 1　Parameters of test model

断面参数	缩尺比	实桥值	模型值
主梁高 H/m	1/40	4.5	0.1125
单幅主梁宽 B/m	1/40	13	0.325
单位长度质量 m/(kg·m^{-1})	$1/40^2$	13788.4	13.2713
单位长度质量惯矩 I_m/(kg·m)	$1/40^4$	407805	0.2453
竖弯频率 f_v/Hz		0.6200	6.9
扭转频率 f_t/Hz		2.8587	10.312
竖弯阻尼比 ξ_v/%	1	0.3	0.29
扭转阻尼比 ξ_t/%	1	0.3	0.31

3　风洞试验结果分析

3.1　原设计断面涡振性能

因本文试验各攻角均未发生颤振，故文中对颤振不再赘述。涡激振动试验在均匀流场中进行，攻角测试范围为 0°、±3°，试验风速为 14～40m/s，各个攻角下均出现了竖向涡激共振现象，响应幅值超过规范允许值，且－3°攻角为涡激共振最不利攻角。图 4 为 0°、±3°攻角下竖弯涡振位移响应根方差随风速

的变化曲线。横坐标为折减风速 U/fB，U 为来流风速，f 为模型振动频率，B 为模型宽度。由图 4(a)可知，上游箱梁各攻角的涡振锁定风速范围为 7～11m/s，－3°攻角下的涡激振动幅值最大，达到了 0.0676m，超过规范限值 48.2%，且在此攻角下出现了两个涡振锁定风速区间。＋3°和 0°攻角涡振振幅未超过限值，均发生了涡激振动。由图 4(b)可知，下游箱梁起振风速与上游箱梁基本相同，下游箱梁各攻角下的涡振振幅都远大于上游箱梁，是因为上下游箱梁存在相互气动干扰效应影响，气流受到上游箱梁对下游箱梁的影响，使得下游箱梁涡振振幅增大，与上游箱梁相比，第二个涡振锁定区间的幅值增大，使整个涡振发生风速区间变大，桥梁涡振性能变差。

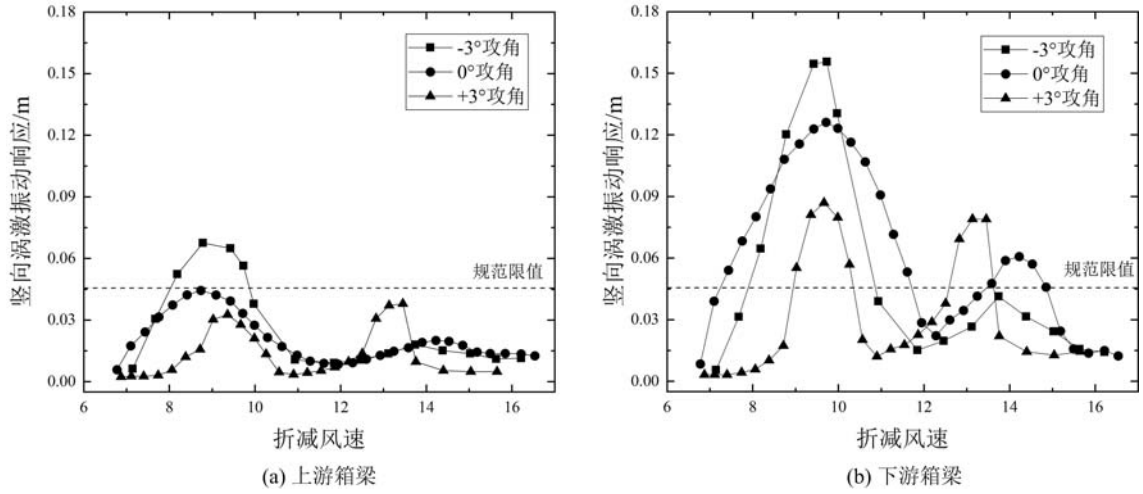


图 4 各攻角原断面涡振试验结果

Fig. 4 Vortex vibration test results of original sections at various angles of attack

3.2 涡振性能优化

依据 3.1 节原设计断面涡振试验结果，主梁断面在各个攻角范围内，涡振振幅均超过规范限值，因此需要采取一定的措施来改善大桥的涡振稳定性，保证大桥的气动安全。以往研究表明，上下游箱梁间距对桥的涡振性能影响明显，因此，选择最不利攻角－3°进行优化措施试验。

3.2.1 间距优化

平行双幅钢箱梁的涡振稳定性中，双幅间距是一种显著的影响因素，因此本文对不同间距的上下游箱梁涡振性能进行研究，将双幅箱梁间距从原设计的 0.5m，按 0.5m 的步长逐渐增加，并定义间距 1m 为工况 1，依次类推至工况 6 的 3.5m 间距。

试验结果如图 5 所示，从图中各个工况对比可知，上下游箱梁间距存在一个最优值，宽于或窄于这个值，其主梁断面，尤其下游箱梁断面涡振性能变差。在工况 1 时，双幅间距为 1m，上游箱梁涡振最大振幅与原断面相差不大，下游箱梁涡振最大振幅相比原断面降低了 18%，间距增大了 0.5m，但气动干扰效应呈减弱趋势，说明此间距提高了主梁的涡振性能。在工况 2 时，双幅间距为 1.5m，与原断面相比，上游箱梁涡振最大振幅同样相差不大，下游箱梁涡振最大振幅进一步降低，比原断面下游涡振最大振幅减小 58.6%，最大振幅 0.0723m，依旧超过了规范限值。改变为间距 2m 时，上下游箱梁涡振性能较原断面变差，上游箱梁影响效果明显，涡振最大幅值比原断面增大 59.2%，涡振最大振幅超出规范限值 136%，说明此间距下，气动干扰效应对上游箱梁作用显著，下游箱梁与原断面相差不大。改变为间距 2.5m 时，下游箱梁涡振振幅基本不变，上游箱梁涡振最大振幅进一步增大，涡振最大幅值比原断面增大 93.2%，涡振最大振幅超出规范限值 186.4%，而下游箱梁涡振振幅与原断面相差不大，说明在此间距下，气动干扰效应使得下游箱梁对上游箱梁的涡振性能变差。改变为间距 3m 时，上下游箱梁的涡振振幅比原断面都增大很多，上游箱梁涡振振幅超出规范限值 256.8%，下游箱梁涡振振幅超出规范限值383.1%，气动干扰效应影响明显。改变为间距 3.5m 时，与工况 5 的 3m 间距相比，下游箱梁涡振振幅增大，上游箱梁涡振振幅减小，但仍严重超出规范限值。

对比各个间距下上下游箱梁的竖向涡激振动响应，发现下游箱梁涡振振幅均超过了上游箱梁，也同

样出现了先增大后减小的趋势，这与以往并列双幅箱梁气动干扰效应的研究结果一致。试验结果表明，调整间距为 1.5m 时，上下游箱梁涡振振幅为所有工况下的最小值，即双幅间距 1.5m 为此主梁断面间距的最优值。

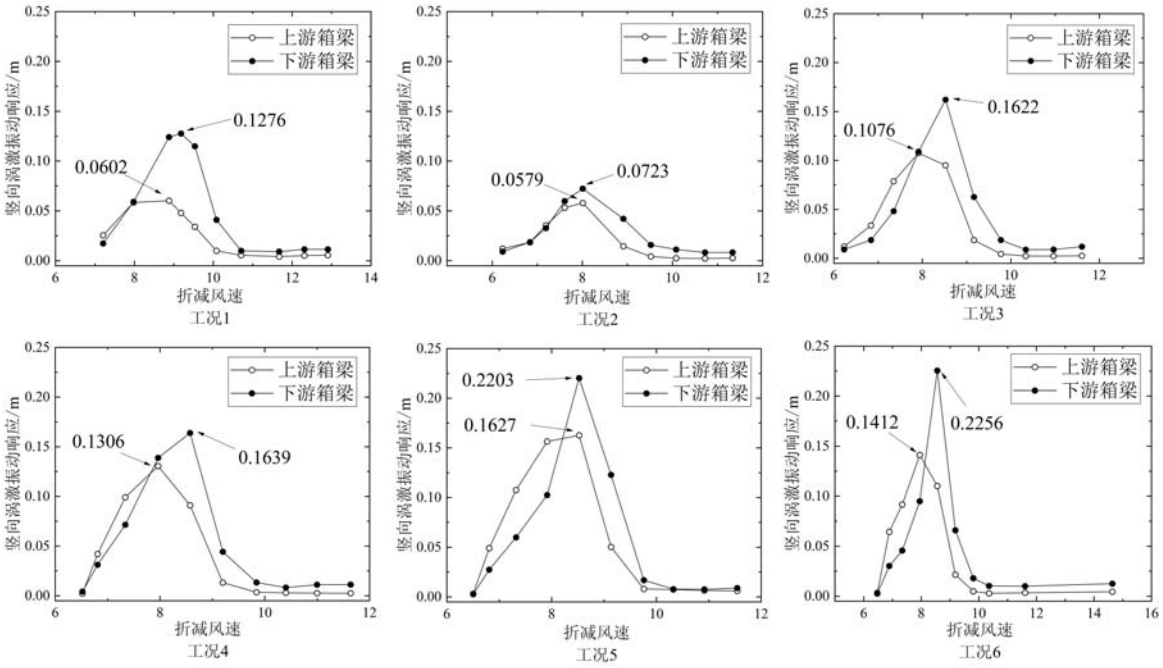


图 5　不同间距下主梁断面涡振试验结果

Fig. 5　Vortex vibration test results of main girder section under different spacing

3.2.2　间距优化下的组合措施

单纯调整间距的措施下，双幅间距为 1.5m 时是所有间距工况振幅的最小值，但涡振振幅仍超过了规范限值，在此间距下需进一步措施优化。鉴于栏杆透风率可以改变气流的分离点和再附点位置，因此在原断面间距 0.5m 及最优间距 1.5m 两种工况基础上，对改变栏杆透风率的措施进行涡振性能研究。组合气动措施的具体内容见表 2。

表 2　主梁断面各气动组合措施内容

Tab. 2　Content of pneumatic combination measures of main girder section

工况	组合措施
7	原桥＋栏杆上部封闭，透风率 33%
8	原桥＋栏杆间隔封闭，透风率 33%
9	原桥＋栏杆间隔封闭，透风率 17%
10	原桥＋栏杆全封闭
11	间距 1.5m＋栏杆上部封闭，透风率 33%
12	间距 1.5m＋栏杆间隔封闭，透风率 33%
13	间距 1.5m＋栏杆间隔封闭，透风率 17%
14	间距 1.5m＋栏杆全封闭

图 6 所示为组合措施下主梁断面涡振试验结果。如图 6(a)所示，在原桥基础上改变栏杆的透风率，上游箱梁在涡振锁定风速区间 6～11m/s 范围内，四种栏杆透风率的涡振振幅均有减小，说明栏杆的透风率对涡振性能有一定影响，但在此风速范围内只有工况 7 和工况 10 的涡振振幅略低于规范限值，在风速区间 12～18m/s 内，工况 10 的涡振振幅又超出了规范限值，出现了两个涡振锁定风速区间。如图 6(b)所示，原桥下游箱梁各个工况下均出现了两个涡振锁定风速区间，且栏杆全封闭情况下，第二

个风速锁定区间下的涡振振幅超出规范限值 150%,与不封闭栏杆相比增大了 1.5 倍,栏杆的全封闭对下游箱梁的涡振起到增强作用。第一个涡振锁定风速区间下各个工况的涡振振幅相差不大,但均大大超出规范限值,因此在原桥断面下改变透风率不能有效控制大桥的涡激振动,需要进一步优化。

如图 6(c)所示,在最优间距为 1.5m 情况下,改变栏杆透风率能有效地控制其涡激振动,各个工况的涡振振幅均低于规范限值,但工况 13 涡振最大振幅接近规范限值,不利于行车舒适性。对比各个栏杆透风率后,发现透风率越大,涡激振动响应位移值越大。如图 6(d)所示,所有工况的涡振振幅均低于规范限值,满足抗风要求。

栏杆的封闭对涡振性能的影响有很明显的作用,但封闭会影响行车的观景效果,同时导致主梁阻力系数增大,进而导致静风位移过大,因此栏杆的封闭应综合考虑进行气动优化,采用在间距 1.5m 基础上选择栏杆间隔封闭,透风率为 33%的方案,既能满足其涡振性能,又不会影响行车的观景效果。

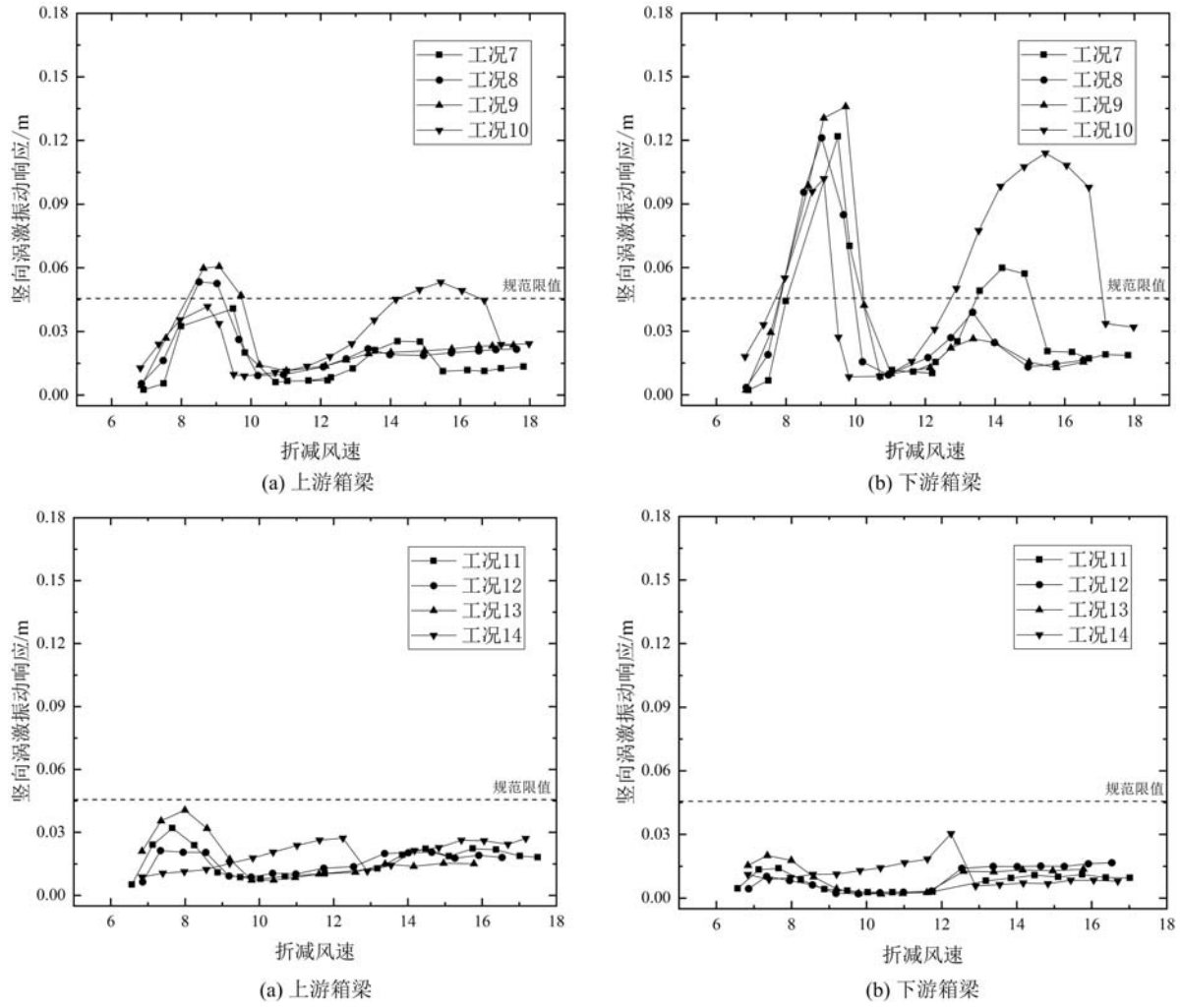


图 6 组合措施下主梁断面涡振试验结果

Fig. 6 Vortex vibration test results of main girder section under combined measures

3.2.3 气动措施下涡振性能验证

在最不利−3°攻角下进行气动优化措施,原设计断面最终选取间距为 1.5m、栏杆间隔封闭、透风率为 33%作为最优气动措施来进行各攻角的涡振试验。采取最优气动措施后,主梁节段模型在 0°、±3°攻角下的涡振试验结果如图 7 所示。由图可知,各攻角下主梁的涡振稳定性均能满足要求且具有充裕的安全余量,符合规范要求。

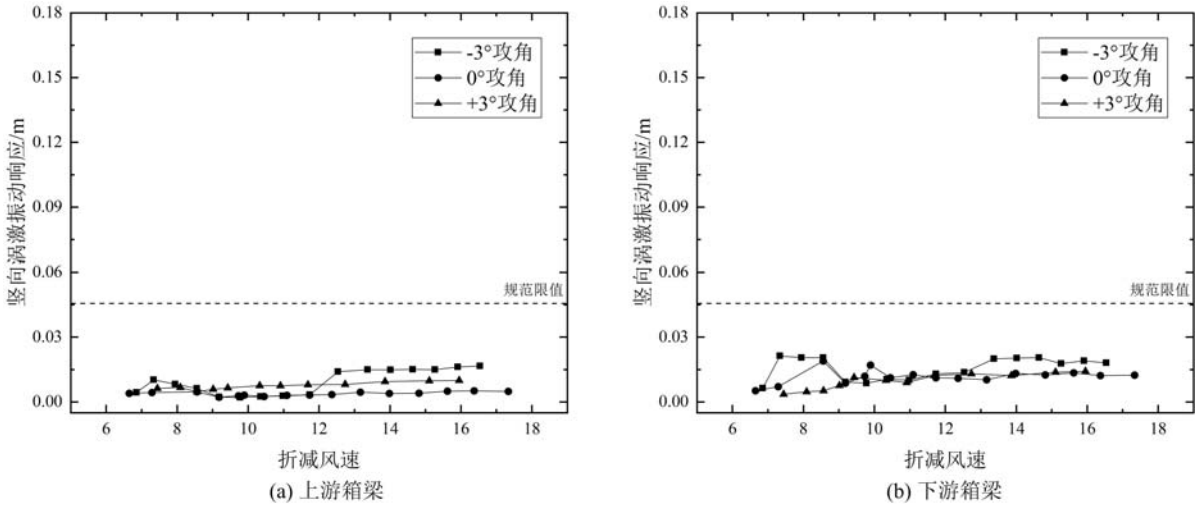


图 7　气动措施下涡振试验结果

Fig. 7　Vortex vibration test results under pneumatic measures

4　结论

通过节段模型涡振性能风洞试验对并列双幅箱梁桥的涡振稳定性及其气动优化进行研究，分析并列双幅箱梁间距和栏杆透风率下对主梁的气动优化效果，得出以下结论：

（1）改变双幅箱梁断面间距可以明显改变上下游箱梁的涡振稳定性，且间距存在一个最优值，本文断面的试验结果表明间距为 1.5m 时，上下游箱梁涡振振幅为最小。

（2）栏杆间隔封闭能明显改善主梁的涡振稳定性，但随着原设计断面栏杆封闭比例的增大，对主梁的气动优化作用变差。

（3）当间距过小时，双幅箱梁间气动干扰效应的影响，使得上下游箱梁会出现两个涡振锁定风速区间，对桥梁的稳定性产生不利后果。

参考文献：

[1] Kimura K, Shima K, Sano K, et al. Effects of separation distance on wind-induced response of parallel box girders [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2008, 96:954－962.

[2] 陈政清，牛华伟，刘志文. 平行双箱梁桥面颤振稳定性试验研究[J]. 振动与冲击，2006，25(6):54－58 (CHEN Zhengqing, NIU Huawei, LIU Zhiwen. Experimental study on flutter stability of parallel box-girder bridges [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(6):54－58 (in Chinese))

[3] 朱乐东，周奇，郭震山，等. 箱形双幅桥气动干扰效应对颤振和涡振的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2010，38(5):632－638 (ZHU Ledong, ZHOU Qi, GUO Zhenshan, et al. Aerodynamic interference effects on flutter and vortex-excited resonance of bridges with twin-separate parallel box decks [J]. Journal of Tongji University(Natural Sciences), 2010, 38(5):632－638 (in Chinese))

[4] Shiraishi N, Matsumoto M, Shirato H. On aerodynamic instabilities of tandem structures[J]. Elsevier, 1986, 23: 437－447.

[5] Takeuchi T, Matsumoto M. Aerodynamic response characteristics of rectangular cylinders in tandem arrangement [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41(1-3):565－575.

[6] Honda A, Shiraishi N, Matsumoto M, et al. Aerodynamic stability of Kansai International Airport access bridge [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 49(1-3):533－542.

[7] 陈政清，牛华伟，李春光. 并列双箱梁桥面风致涡激振动试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版)，2007，34(9):16 (CHEN Zhengqing, NIU Huawei, LI Chunguang. Experimental study on wind-induced vortex shedding of parallel box-girder bridge[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2007, 34(9):16－20 (in Chinese))

[8] Kimura K, Shima K, Sano K, et al. Effects of separation distance on wind-induced response of parallel box girders

[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2007, 96(6):954－962.

[9] 谭彪, 操金鑫, 杨咏昕, 等. 间距比对叠合梁双幅桥涡振性能的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(9):1264－1270 (TAN Biao, CAO Jinxin, YANG Yongxin, et al. Interference effect on flutter performance of long span bridges with parallel twin decks[J]. Journal of Tongji University(Natural Sciences), 2020, 48(9):1264－1270 (in Chinese))

[10] 刘志文, 陈政清, 栗小祜, 等. 串列双流线型断面涡激振动气动干扰试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(3):51－57 (LIU Zhiwen, CHEN Zhengqing, LI Xiaohu, et al. Aerodynamic interference test on vortex-induced vibration of two streamline cylinders in tandem[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(3):51－57 (in Chinese))

[11] 周奇, 朱乐东. 平行双幅斜拉桥涡振特性气弹模型试验研究[J]. 振动工程学报, 2013, 26(4):522－530 (ZHOU Qi, ZHU Ledong. Study on vortex-induced oscillation of parallel bridge with twin-decks via aeroelastic model test [J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(4):522－530 (in Chinese))

Wind tunnel test study on aerodynamic optimization of vortex induced vibration performance of double bluff body steel box girder bridge

LIANG Aaihong, MAO Yu, LI Chunguang, HAN Yan

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: Based on the engineering background of a parallel double bluff body steel box girder bridge, the vortex vibration performance of double bluff body steel box girder is studied through wind tunnel test, and the reasonable aerodynamic optimization measures are put forward. The vortex induced vibration (VIV) displacement response time histories of the main girder at different attack angles were measured by 1∶40 scale segmental model wind tunnel test. Moreover, under the most unfavorable angle of attack, the influence of the spacing between two box girders on the vortex vibration performance of the main girder is studied, and the influence of the railing closure form and ventilation rate on the vortex vibration performance is further tested on the basis of changing the spacing as well. The results show that the distance between two box girders has obvious influence on the vortex vibration performance, and the vortex vibration performance is the best when the distance is 1.5m, but it is still higher than the code limit. It is found that when the spacing is small, reducing the railing ventilation rate will increase the vortex vibration wind speed range of double-width box girder, and the amplitude of vortex vibration will increase, and the aerodynamic stability of box girder section will decrease.

Keywords: double bluff body steel box girder; vortex vibration performance; wind barrier; space; ventilation rate