

# 间距比对叠合梁双幅桥涡振性能的影响

谭彪<sup>1</sup>, 操金鑫<sup>1,2,3</sup>, 檀小辉<sup>1</sup>, 葛耀君<sup>1,2,3</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;

3. 同济大学桥梁结构抗风技术交通运输行业重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 以工程中常用的双边工字钢式叠合梁平行双幅桥为对象, 基于系列弹簧悬挂节段模型风洞试验, 研究了不同间距比下叠合梁平行双幅桥涡振(VIV)干扰效应, 并将上下游桥面涡振振幅、涡振风速锁定区间与单幅桥面进行了对比。结果表明: 双幅桥与单幅桥相比, 气动干扰效应使得双幅桥的最大涡振振幅和风速锁定区间都明显增加; 双幅桥的最不利间距比为2~4, 此时桥面最大涡振振幅最大且风速锁定区间更长; 上下游桥面的振动存在一个相位差, 受到折减风速、上游桥面振幅和间距比的共同影响。

**关键词:** 平行双幅桥; 叠合梁; 间距比; 涡振(VIV); 气动干扰  
**中图分类号:** TU997 **文献标志码:** A

## Effect of Gap Distance Ratio on Vortex-induced Vibration Performance for Bridge with Twin Composite Girders

TAN Biao<sup>1</sup>, CAO Jinxin<sup>1,2,3</sup>, TAN Xiaohui<sup>1</sup>, GE Yaojun<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Transport Industry of Wind Resistant Technology for Bridge Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on a series of sectional model wind tunnel tests, the effects of gap distance ratio on aerodynamic interference and vortex-induced vibration (VIV) performance of parallel twin-deck bridge were studied. The results show that the maximum amplitude of VIV and the lock-in wind speeds increase significantly compared with a single-deck bridge due to the aerodynamic interference effect; the most unfavorable range of gap distance ratio is 2~4, with the largest maximum amplitudes of VIV and a wider lock-in wind

speed range; there is a phase lag in the vibration of two decks, which is affected by reduced wind speed, the amplitude of upstream deck and gap distance ratio.

**Key words:** parallel twin-deck bridge; composite girder; gap distance ratio; vortex-induced vibration (VIV); aerodynamic interference

双幅桥指的是相互独立且彼此临近的两座桥或具有相互独立双幅桥面的单座桥。前者如 Tacoma Narrows Bridge, 在 1940 年因风灾毁坏之后, 于 1950 年重新建成, 到了 1990 年由于人口与经济的发展, 交通需求已经超过了原来的设计能力, 于是在原桥附近平行地修建了新桥, 新桥与旧桥各自只承担单向交通, 构成了平行双幅桥; 后者如宁波甬江公路特大桥, 桥面分离平行并同时建造。随着日益增长的交通流量需求, 或为了提高建设效率, 亦或是受通航孔道的限制, 双幅桥的应用日渐增多。相较于单幅桥, 双幅桥上下游桥面之间存在不可忽略的气动干扰效应, 其对双幅桥的静风力系数、涡振性能和颤振性能都有明显影响<sup>[1]</sup>。由于涡振往往在较低风速时发生, 因此平行双幅桥的涡振问题尤为突出。

早在 20 世纪 90 年代, Honda 等<sup>[2]</sup>通过三幅并列连续双箱梁桥的风洞试验发现, 平行多幅桥之间的气动干扰对桥梁的涡振振幅以及风速锁定区间都有显著影响。陈政清等<sup>[3]</sup>以佛山平胜大桥和青岛海湾红岛航道桥为背景, 发现气动干扰效应会对并列双箱梁双幅桥的涡振性能产生不利影响, 而当桥面间距与桥面宽度之比( $L/B$ )到达 0.8 以上时, 双幅桥之间的气动干扰效应明显减弱。同时指出, 涡振对桥

收稿日期: 2020-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(51878504, 51978527); 土木工程防灾国家重点实验室基金(SLDRCE19-A-04, SLDRCE19-B-01)

第一作者: 谭彪(1991—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁及结构风工程。E-mail: tanbiao@tongji.edu.cn

通信作者: 操金鑫(1984—), 男, 副教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁及结构风工程。

E-mail: jinxin@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

梁断面的具体形式很敏感,不同桥梁断面形式之间的气动干扰效应值得研究。刘志文等<sup>[4-5]</sup>进一步开展了串列双矩形断面和串列双流线型断面的涡振特性风洞试验研究,结果表明间距比对两种断面类型双幅桥的气动干扰效应影响略有不同。Kimura等<sup>[6]</sup>指出即使 $L/B$ 达到8以上,平行双箱梁桥面之间的气动干扰效应仍不可忽略。另一方面,朱乐东等<sup>[7-9]</sup>发现改变风嘴角度和增加风障等气动措施可以有效抑制双幅桥的涡振,这从侧面说明结构的涡振响应对气动外形非常敏感。此外, Kim等<sup>[10-13]</sup>观测到跨越鸣梁海峡的新旧珍岛大桥(Jindo Bridge)在风速 $9.0\sim 11.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时发生了涡振,这是第一次关于双幅桥涡振的实测记录。随后通过弹簧悬挂节段模型风洞试验重现了珍岛大桥的涡振现象,并进一步分析了间距比以及上下游桥面频率比等参数对双幅桥涡振性能的影响。

综上所述,桥梁结构的气动外形和双幅桥之间的间距比是影响双幅桥涡振特性的关键参数。然而,已有研究均是针对并列双箱梁展开的,这些结论

是否仍适用于并列叠合梁桥仍有待商榷。因此,以钢混叠合梁断面双幅桥为对象,通过开展系列弹簧悬挂节段模型风洞试验,并基于与单幅桥断面试验结果的对比,讨论了叠合梁断面平行双幅桥涡振气动干扰效应,着重研究了间距比对叠合梁断面平行双幅桥涡振特性的影响。

## 1 风洞试验

### 1.1 模型参数

选择工程中常见的双边工字钢式叠合梁断面进行研究,试验模型断面如图1所示。模型几何缩尺比 $\lambda_L=1:60$ ,单幅桥模型宽度 $B=530\text{ mm}$ ,模型高度 $D=49\text{ mm}$ ,模型总长 $1\,740\text{ mm}$ 。为了保证模型刚度,主纵梁和桥面板采用合金钢制作,横梁和加劲肋则采用工程塑料制作。试验模型如图2所示。在满足几何外形相似的基础上,保持弹性参数(频率比)、质量参数(质量和质量惯矩)、阻尼参数(阻尼比)相似。各参数取值如表1所示。

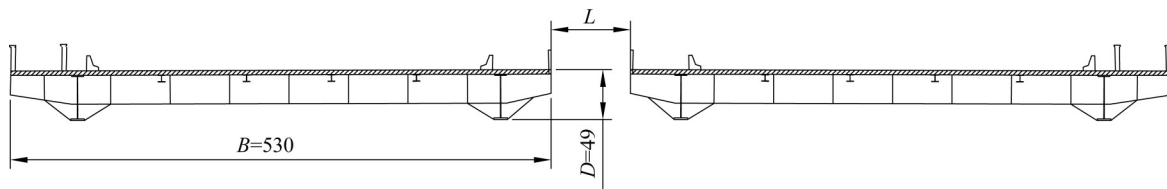


图1 模型断面(单位: mm)

Fig.1 Cross section of sectional model (unit: mm)



图2 平行双幅桥节段模型

Fig.2 Sectional model of twin-deck bridge

### 1.2 试验设置与工况

#### 1.2.1 试验流场

试验在同济大学TJ-2大气边界层风洞中开展,试验段尺寸为 $3.0\text{ m}$ (宽) $\times 2.5\text{ m}$ (高) $\times 15.0\text{ m}$ (长),速度不均匀性低于 $1.0\%$ 。试验流场均为均匀流场,紊流度小于 $0.46\%$ ,试验风速范围为 $0\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,风速间隔为 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,并在涡振区间内适当加密。

#### 1.2.2 试验工况

为了考察间距比对叠合梁双幅桥涡振的影响,定义如图1所示的主梁间距 $L$ 和主梁高度 $D$ 的比值 $L/D$ 为间距比,并开展了9种不同间距比 $L/D=1/3, 2/3, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10$ 的风洞试验。此外,作为对照,还开展了该叠合梁断面单幅桥的涡振性能风洞试验。事实上,单幅桥工况可以视为间距比为无穷大的双幅桥,即间距比 $L/D=\infty$ 。试验前,采

表1 模型主要参数

Tab.1 Main parameters of sectional model

参数名称	单位	相似比	模型值
几何尺度	长度	m	1:60
	宽度	m	1:60
	高度	m	1:60
等效质量	质量	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$	1:60 <sup>2</sup>
	质量惯矩	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{m}^{-1}$	1:60 <sup>4</sup>
频率	竖弯频率	Hz	13.5:1.0
竖弯阻尼比	上游主梁	%	1
	下游主梁	%	1
	单幅主梁	%	1

用自由振动法测试了零风速下各工况的振动频率和阻尼比。按双幅桥布置时,上、下游主梁的实测阻尼比分别为0.44%和0.53%;按单幅桥布置时,主梁的实测阻尼比为0.47%。由于各工况下均观测到明显的竖向涡振,而未发现扭转涡振,因此仅讨论竖向涡振。

### 1.2.3 测试设置

在进行双幅主梁风洞试验时,节段模型均分别由8根弹簧弹性悬挂在风洞内进行。试验中,结构振动响应采用HL-C235CE-W系列激光位移计测量,其测量范围为 $(350 \pm 200)$  mm,采集频率为300 Hz,采样时间为60 s;尾流涡脱落频率则采用眼镜蛇探头测量,采集频率为625 Hz,采样时间为60 s。激光位移计布置于模型吊臂两侧下方,可采集节段模型的竖向位移与扭转位移;眼镜蛇探头则分别布置在上下游主梁的尾流区,可采集上下游主梁的尾流时程,如图3所示。

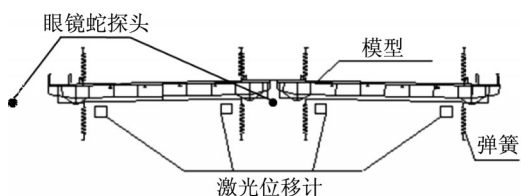


图3 测量系统安装示意图

Fig.3 Schematic diagram of measurement sensors

## 2 叠合梁断面双幅桥的涡振特性

在开展的10种不同间距比条件下的风洞试验中,均观测到了明显的竖弯涡振。图4给出了各间距比下双幅桥上下游桥面的涡振振幅随折减风速的变化曲线。图4中,横坐标表示折减风速 $U/Df_v$ (其中, $U$ 为试验风速, $D$ 为主梁高度, $f_v$ 为模型竖弯频率),纵坐标表示量纲一振幅均方根。由图4a~4c可见,当间距比较小小时,上游桥面的振动逐渐变得剧烈,而下游桥面则受到上游桥面的抑制,振幅较小;此时,双幅桥之间的间距还较小,气流流经上游桥面后的尾流由于下游桥面的存在尚未充分发展,下游桥面起到了隔涡板的作用。如图4d~4g所示,在间距比 $L/D=2\sim 5$ 时,随着间距比的增加,上游桥面的尾流得以发展,下游桥面受上游桥面尾流的驱使而振动,振幅显著增加;同时,上游桥面又受到下游桥面的干扰,振幅远大于单幅桥面的振幅。另一方面,气动干扰效应随着间距比的增大而减弱,上游桥面的振幅在 $L/D>3$ 之后有所降低,下游桥面受上游桥

面的抑制作用开始减弱;当 $L/D=5$ 时,上下游桥面的最大振幅基本接近。随着间距比的进一步增大( $L/D \geq 8$ ),气动干扰效应对双幅桥涡振的影响已经相对较弱,上下游桥面的涡振振幅-折减风速曲线比较接近;双幅桥最大振幅依然大于单幅桥,说明此时气动干扰效应仍有不利影响。值得注意的是,当间距比 $L/D=1/3\sim 3$ 时,下游桥面的涡振振幅-折减风速曲线均呈“M”形,在上游桥面的振动发展到一定程度时下游桥面的振幅反而开始降低。出现这种现象的原因或许是下游桥面的振动打散了上游桥面的尾流漩涡,导致下游桥面的涡激力减弱,进而导致振幅减小。

## 3 间距比对涡振参数的影响

### 3.1 最大涡振振幅及风速锁定区间

最大涡振振幅和风速锁定区间是考察桥梁结构涡振特性时最为关心的两个指标。因此,综合考察间距比对叠合梁断面双幅桥最大涡振振幅和风速锁定区间的影响,并将结果与Park等<sup>[13]</sup>针对箱梁断面双幅桥的结果进行了对比,如图5所示。从图5a可以看出,随着间距比增大,上下游桥面的最大涡振振幅都先增大后减小,并最终趋于单幅桥的最大涡振振幅。对于小间距比( $L/D < 1$ )工况,上下游桥面的最大涡振振幅都小于单幅桥面的最大涡振振幅,说明此时气动干扰效应有利于抑制双幅桥的涡振。当间距比 $L/D=3$ 时,最大涡振振幅达到单幅桥面最大涡振振幅的2.4倍,气动干扰效应对双幅桥涡振的影响最不利。当间距比足够大( $L/D \geq 8$ )时,气动干扰效应的影响显著降低,双幅桥的最大涡振振幅逐渐接近单幅桥。另一方面,对比叠合梁断面和箱梁断面双幅桥的结果可以发现,两种断面形式的双幅桥涡振性能受间距比的影响规律是相似的。显然,双幅桥的涡振性能受间距比的影响比受断面气动外形的影响更加显著。间距比的改变主要是改变了双幅桥之间的气动干扰效应,也就是说,气动干扰效应是影响双幅桥涡振性能的主要因素。值得注意的是,图5a中两种断面类型的最大涡振振幅是在不同阻尼比条件下测得的,因此最大涡振振幅的大小不具有可比性。从图5b可以看出,间距比对双幅桥涡振风速锁定区间也有一定影响,起振风速受间距比影响不大,而结束风速则略有起伏,在 $L/D=3$ 时风速锁定区间最长。



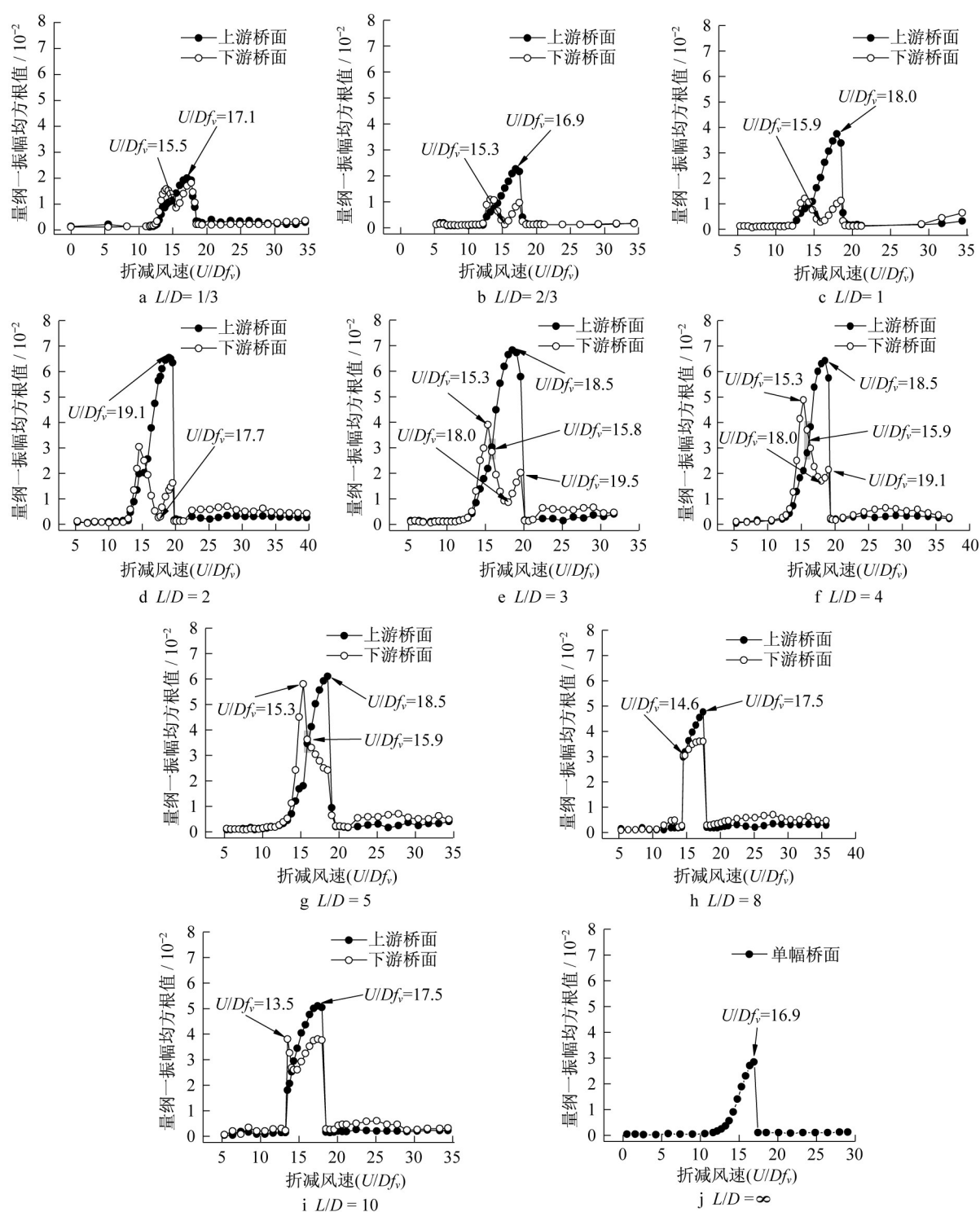


图4 各间距比下涡振振幅-折减风速曲线

Fig.4 Amplitude-velocity curves at different gap distance ratios

### 3.2 上下游桥面振动状态

对于平行双幅桥而言,上下游桥面是两幅独立的桥面,发生涡振时振动状态并非完全相同。Park等<sup>[12]</sup>发现,若上下游主梁的固有频率一致时,则双幅桥面的涡振风速锁定区间和振动频率都相同;若双幅主梁的固有频率不一致时,则双幅桥面的涡振风速锁定区间

有所变化,并且上下游主梁在发生涡振时都按照自身的固有频率振动。也就是说,上下游主梁的振动频率与自身的固有频率相同,同时也指出上下游主梁的振动之间存在一个相位差。Argentini等<sup>[1]</sup>更进一步地研究了上下游桥面振动相位差( $\Delta\phi$ ),发现 $\Delta\phi$ 与折减风速负相关。为了说明叠合梁双幅桥涡振时的振动状态,

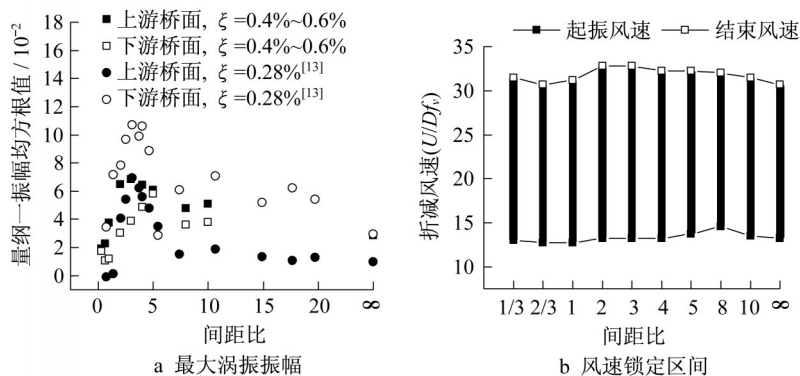
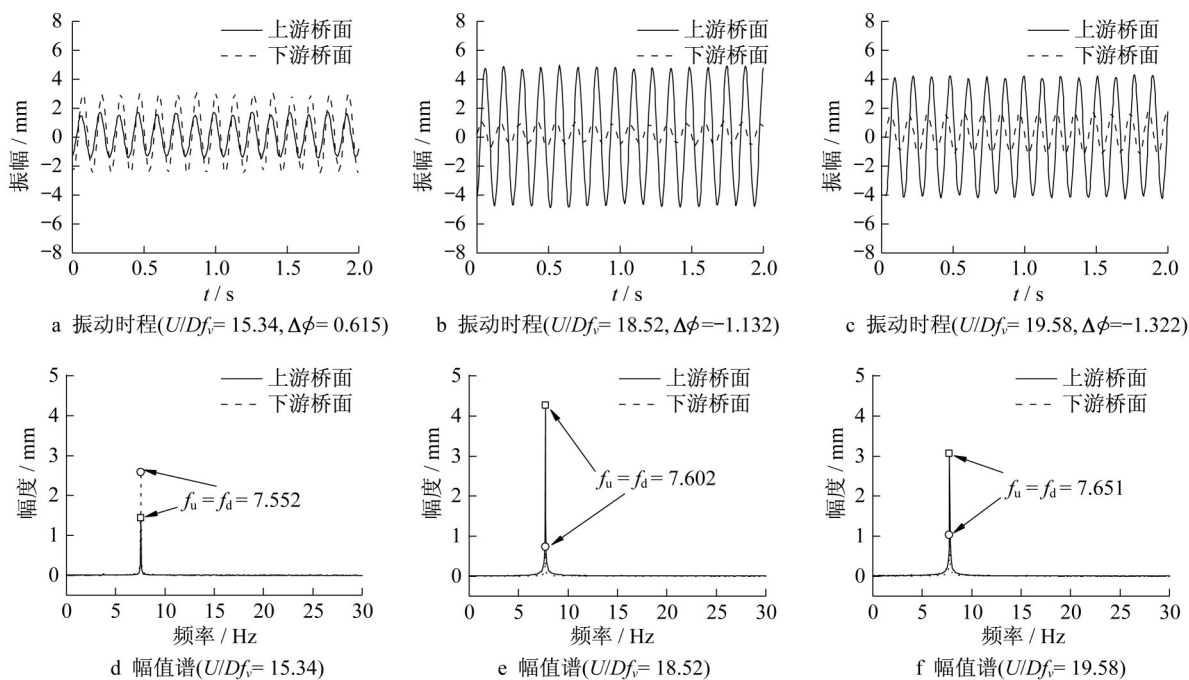


图5 最大涡振振幅及风速锁定区间随间距比变化

Fig.5 Maximum vortex-induced vibration amplitude and lock-in wind speed range at different gap distance ratios

以  $L/D=3$  工况为例,对上下游桥面分别达到振幅极值时的振动状态进行分析,对应的折减风速  $U/Df_v = 15.34, 18.52, 19.58$ 。图6为3种折减风速下上下游桥面振动稳定后的位移时程及对应的幅值谱,图中  $f_u$  和  $f_d$  分别表示上游和下游主梁振动频率。从图6可以看

出,上下游桥面的振动的确存在一个相位差,并且不同折减风速下相位差有所不同;振动信号的幅值谱表明上下游都以一个相同的频率振动,但由于气动刚度的影响,振动频率稍大于结构固有频率,并且随折减风速的增加振动频率略有提升。

图6 振动时程和幅值谱 ( $L/D=3$ )Fig.6 Vibration time histories and spectrum ( $L/D=3$ )

更进一步地,双幅桥面间的振动相位差与折减风速之间的关系,以及间距比的影响也值得关注。图7给出了不同间距比工况下  $\Delta\phi$  随折减风速的变化曲线。图7中,正相位差表示上游桥面振动时程的相位较下游桥面超前,负相位差则反之。整体来看,与 Argentini 等<sup>[1]</sup>的结论不同,各间距比下  $\Delta\phi$  都

呈现出随折减风速先增大后减小的趋势,而非单纯的负相关关系。从图4a~4d和图7a可知,当  $L/D=1/3 \sim 1$  时,  $\Delta\phi$  分别在折减风速为 17.1、16.9 和 18.0 处接近反相,此时上游桥面达到最大振幅;当  $L/D=2$  时,  $\Delta\phi$  则在折减风速为 17.7 处接近反相,此时下游桥面的振幅达到极小值。与此同时,当  $\Delta\phi$  达到极

值后,符号将发生改变,意味着驱动上下游桥面振动的涡激力发生改变。结合图4e~4g和图7b可知,当 $L/D=3\sim 5$ 时, $\Delta\phi$ 在折减风速为15.9处达到最大值,此时上下游桥面之间的振幅非常接近。从图7c

可以看出,当 $L/D=8,10$ 时,最大相位差分别出现在折减风速为15.3和16.4处。显然,间距比越小,相位差受上下游桥面振幅影响越明显,也就是受气动干扰效应影响更显著。

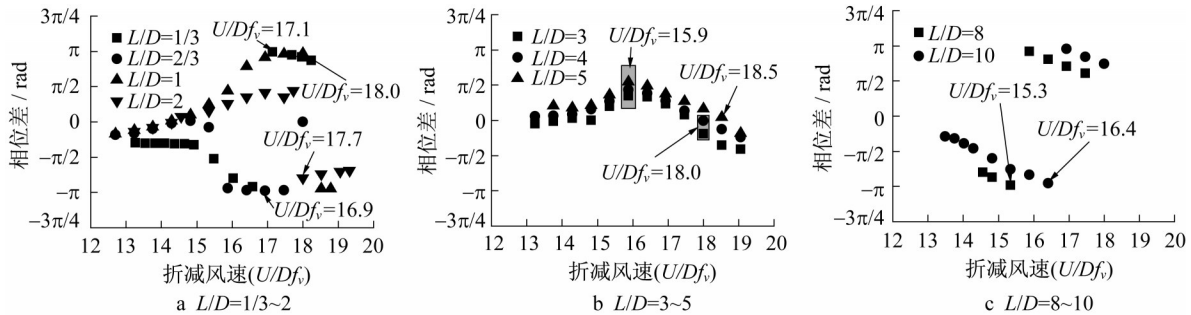


图7 振动相位差随折减风速变化

Fig.7 Phase lag versus reduced wind speed

### 3.3 斯托劳哈尔数

在第2节中已经提到,在进行节段模型涡振试验的同时,通过布置在上下游桥面尾流区的眼镜蛇探头测量了尾流涡脱落频率。当 $L/D<3$ 时,由于间距比较窄难以通过眼镜蛇探头测量到上游桥面的涡脱落频率; $L/D\geq 3$ 后上下游桥面的涡脱落频率随风速的变化规律大致相同,因此以 $L/D=3$ 为例分析上下游桥面的涡脱落频率随风速的变化情况,如图8所示。从图8可知,尾流涡脱落频率与风速之间基本成线性关系,当涡脱落频率与结构自身频率接近时出现了明显的稳定段,也就是涡振风速锁定区间。此外,上下游桥面的尾流涡脱落频率也基本相同,但下游桥面在更低的风速下就达到了稳定段,说明下游桥面先开始涡振进而带动上游桥面振动。

测得下游桥面的涡脱落频率后,斯托劳哈尔数 $Sr$ 可按下式计算:

$$Sr = \frac{N_v D}{U} \quad (1)$$

式中: $N_v$ 为下游桥面的尾流涡脱落频率; $D$ 为节段模型高度; $U$ 为来流风速。图9给出不同间距比工况下的 $Sr$ 。从图9可以看出,对于平行双幅桥而言,无论是闭口箱梁断面还是开口叠合梁断面, $Sr$ 随间距比的变化规律都呈先减小后增大的趋势,并且都在 $L/D=2\sim 4$ 时达到最小值,这意味着此间距比下涡振起振风速较大,与图5b的结论吻合。值得注意的是,虽然这个间距范围内发生涡振的概率相对较小,但是这个间距范围也正是双幅桥最大涡振振幅出现的区间,在设计时仍应尽量避免。此外,两种断面相似的规律也说明间距比对平行双幅桥的影响较结构

气动外形而言更加显著。

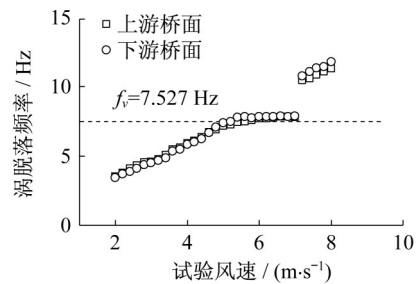


图8 上下游桥面尾流涡脱落频率

Fig.8 Vortex shedding frequency for upstream and downstream decks

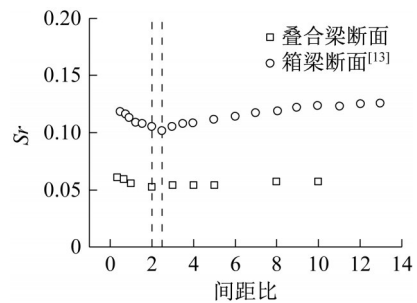


图9  $Sr$  随间距比变化

Fig.9 Variation of  $Sr$  with gap distance ratio

## 4 结论

(1)间距比是影响平行双幅桥涡振性能的关键参数,叠合梁断面的平行双幅桥最不利间距比 $L/D=2\sim 4$ ;此时,桥面最大涡振振幅最大且风速锁定区间更长;当 $L/D\geq 5$ 时双幅桥面之间的气动干扰效应开始减弱,但即使 $L/D\geq 10$ 气动干扰效应也不可忽略。

(2)平行双幅桥发生涡振时,受气动干扰效应影响,上下游桥面的振动存在一个相位差;相位差受到折减风速、上游桥面振幅和间距比的共同影响,间距比越小相位差受上游桥面振幅影响越大。

(3)当 $L/D=2\sim 4$ 时,叠合梁双幅桥的 $Sr$ 均较小,此时涡振起振风速相对较大。

## 作者贡献声明

谭彪:完成风洞试验设计并实施风洞试验,处理试验数据,撰写论文。

操金鑫:指导风洞试验全过程,包括试验设计和具体的风洞试验,指导论文写作。

檀小辉:协助风洞试验和核查试验数据及数据处理程序。

葛耀君:研究内容总体指导和学术把关。

## 参考文献:

- [1] ARGENTINI T, ROCCHI D, ZASSO A. Aerodynamic interference and vortex-induced vibrations on parallel bridges: the Ewijk Bridge during different stages of refurbishment [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 147: 276.
- [2] HONDA A, SHIRAIISHI N, MATSUMOTO M, *et al.* Aerodynamic stability of Kansai International Airport Access Bridge [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 33(1): 369.
- [3] 陈政清, 牛华为, 李春光. 并列双向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.
- [4] 刘志文, 栗小祜, 陈政清. 均匀流场串列双矩形断面涡激振动气动干扰试验[J]. *中国公路学报*, 2010, 23(5): 44.  
LIU Zhiwen, LI Xiaohu, CHEN Zhengqing. Experimental of aerodynamic interference on vortex-induced vibration of two rectangular cylinders in tandem in smooth flow field [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23(5): 44.
- [5] 刘志文, 栗小祜, 陈政清, 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.  
LIU Zhiwen, LI Xiaohu, CHEN Zhengqing, *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.
- [6] 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 and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(6/7): 954.
- [7] 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.  
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.
- [8] 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.  
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 Science*, 2010, 38(5): 632.
- [9] MENG Xiaoliang, ZHU Ledong, GUO Zhenshan. Aerodynamic interference effects and mitigation measures on vortex-induced vibrations of two adjacent cable-stayed bridges [J]. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 2011, 5(4): 510.
- [10] KIM S J, KIM H K, PARK J, *et al.* Operational field monitoring of interactive vortex-induced vibrations between two parallel cable-stayed bridges [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 123: 143.
- [11] SEO J W, KIM H K, PARK J, *et al.* Interference effect on vortex-induced vibration in a parallel twin cable-stayed bridge [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 116: 7.
- [12] PARK J, KIM H K. Effect of the relative differences in the natural frequencies of parallel cable-stayed bridges during interactive vortex-induced vibration [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 171: 330.
- [13] PARK J, KIM S J, KIM H K. Effect of gap distance on vortex-induced vibration in two parallel cable-stayed bridge [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 162: 35.