

王力东,李子强,沈永杰,等. 双幅 II 形梁斜拉桥涡振性能气动优化试验及机理[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2025, 45(4): 129-140.  
WANG Li-dong, LI Zi-qiang, SHEN Yong-jie, et al. Aerodynamic optimization test and mechanism of vortex-induced vibration properties for two parallel II-shaped girder cable-stayed bridge[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2025, 45(4): 129-140.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2025.04.011

# 双幅 II 形梁斜拉桥涡振性能气动优化试验及机理

王力东<sup>1,2</sup>, 李子强<sup>1</sup>, 沈永杰<sup>1</sup>, 胡朋<sup>1,2</sup>, 王雷<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 桥梁工程安全控制教育部重点实验室 长沙理工大学, 湖南长沙 410114; 3. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东广州 510507)

**摘要:**以某双幅大跨度 II 形梁斜拉桥为工程背景,通过 1:25 比例节段模型风洞试验研究了既有桥梁(旧桥)及其邻近新建桥梁(新桥)之间的气动干扰效应,测试了单独新桥、单独旧桥以及双幅桥在 $-3^\circ$ 风攻角下的主梁涡振响应;针对双幅桥试验中新桥竖向涡振超规范限值和旧桥扭转振动显著的问题,采用封闭人行道栏杆,设置导流板、抑流板和下稳定板 4 种气动措施以及组合措施优化了主梁断面涡振性能;通过计算流体动力学(CFD)数值模拟给出了新、旧桥原设计方案和施加抑振措施后主梁断面附近流场分布,揭示了气动优化试验中的抑振机理。研究表明:单独新桥主梁断面涡振显著且最大振幅超过规范限值,单独旧桥主梁无明显涡振现象;双幅桥试验中,当新桥在来流上游时,新桥对旧桥产生了不利的气动干扰,使新、旧桥均出现显著的涡振现象,当旧桥在来流上游时,由于旧桥本身涡振性能较好且对新桥有遮挡效应,新、旧桥主梁均未发生涡振;单一措施对新桥主梁涡振抑制效果有限,对新桥采用 2 道高 2.2 m 下稳定板+外侧防撞护栏抑流板的组合措施能有效将新、旧桥的涡振控制在规范限值的 20% 以内;组合措施破坏了新桥梁底和桥面栏杆处规律性旋涡脱落的形成,改善了新、旧桥主梁附近的流场分布,极大提高了双幅桥的涡振性能。

**关键词:**桥梁工程;II 形梁斜拉桥;双幅桥;涡振性能;抑振措施;风洞试验

中图分类号:U441.3 文献标志码:A 文章编号:1671-8879(2025)04-0129-12

## Aerodynamic optimization test and mechanism of vortex-induced vibration properties for two parallel II-shaped girder cable-stayed bridge

WANG Li-dong<sup>1,2</sup>, LI Zi-qiang<sup>1</sup>, SHEN Yong-jie<sup>1</sup>, HU Peng<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 2. Key Laboratory of Safety Control of Bridge Engineering of Ministry of Education, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 3. Guangdong Communication Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510507, Guangdong, China)

**Abstract:** Based on the engineering background of a two parallel long-span II-shaped girder cable-stayed bridge, the 1:25 scale segmental model wind tunnel tests were conducted to investigate the aerodynamic interference effects between an existing bridge (old bridge) and its adjacent

收稿日期:2025-02-10

基金项目:国家自然科学基金项目(52208459);湖南省教育厅科学研究项目(23B0312);

桥梁工程安全控制教育部重点实验室开放基金项目(22KB02);长沙理工大学研究生科研创新项目(CSLGXC23149)

作者简介:王力东(1990-),男,湖南郴州人,副教授,博士研究生导师,E-mail:wangld@csust.edu.cn.

newly constructed bridge (new bridge). The vortex-induced vibration (VIV) responses of main girders of the new bridge, old bridge, and the two parallel bridge were tested under a wind attack angle of  $-3^\circ$ . Addressing the issues of the vertical VIV amplitude exceeding the code limit for the new bridge and the significant torsional vibration for the old bridge during the two parallel bridge tests, four aerodynamic measures, including enclosing pedestrian railings, installing guide vanes, flow suppression plates and lower stabilizing plates, as well as their combinations, were employed to optimize the VIV properties of main girders. The computational fluid dynamics (CFD) numerical simulations were utilized to analyze the flow field distributions around the main girder sections for both the original and modified schemes of the new and old bridges. The vibration suppression mechanisms during the aerodynamic optimization test were revealed. The research results indicate that the new bridge exhibits significant VIV with the maximum amplitudes exceeding the code requirements, while the old bridge shows negligible VIV phenomena. During the two parallel bridge tests, when the new bridge is at the upstream of the airflow, adverse aerodynamic interference occurs from the new bridge to the old bridge, causing noticeable VIV in both structures. When the old bridge is at the upstream of the airflow, its inherent satisfactory VIV properties combined with shielding effects on the new bridge prevent VIV occurrence in both girders. Single aerodynamic measures provide limited VIV suppression for the new bridge, whereas a combined solution of two 2.2 m-high lower stabilizing plates combined with flow suppression plates on the outer anti-collision guardrail effectively controls VIV amplitudes within 20% of the code limits for both bridges. The combination measure disrupts the formation of regular vortex shedding patterns near the girder bottom and bridge deck railings, improves the flow field distributions around main girders of both the new and old bridges, and significantly enhances the VIV properties of the two parallel bridge. 3 tabs, 18 figs, 30 refs.

**Key words:** bridge engineering;  $\Pi$ -shaped girder cable-stayed bridge; two parallel bridge; vortex-induced vibration property; vibration suppression measure; wind tunnel test

## 0 引言

近年来,随着中国交通量日益增长及道路选线需求,在原桥址相邻处建设新桥梁的工程案例愈来愈多,原桥与新建桥彼此构成平行双幅桥,各自承担单向的交通量,如宁波涌江公路特大桥<sup>[1]</sup>。由于平行双幅桥梁的主梁间距较近,上下游桥间存在不可忽视的气动干扰效应,加剧了风致桥梁气动响应<sup>[2-7]</sup>。

针对双幅桥梁涡振,目前已有部分学者开展了相关研究。陈政清等<sup>[8]</sup>在箱梁桥风致涡振研究中发现,双幅桥之间存在的气动干扰会对主梁涡振产生不利影响,这种气动干扰影响会随着双幅桥面间净距的增加而减弱,且涡振对桥梁断面形式很敏感。朱乐东等<sup>[9]</sup>通过风洞试验研究了在不同风攻角下双幅桥间的气动干扰效应对主梁涡振性能的影响,结果表明与单幅桥相比,双幅桥中下游桥涡振振幅显著增大,且不同风攻角下气动干扰作用由弱到强分

别为 $-3^\circ$ 、 $0^\circ$ 和 $+3^\circ$ 。Seo等<sup>[10]</sup>结合风洞试验与实桥测量研究了双幅斜拉桥的涡振性能,结果表明下游桥主梁在气动干扰作用下涡振性能明显下降,且无法在传统气动措施作用下得到有效控制。刘志文等<sup>[11]</sup>通过风洞试验探究了双幅桥主梁三分力系数在气动干扰效应下的变化规律,结果表明:上游桥主梁的阻力系数与单幅桥相比略有降低;当双幅桥之间净距较小时,下游桥主梁的阻力系数存在明显的遮挡效应。谭彪等<sup>[12]</sup>基于节段模型风洞试验研究了叠合梁双幅桥在不同间距下的气动干扰效应,结果表明双幅桥在不利间距比下主梁涡振幅值及锁定区间均显著大于单幅桥。周奇等<sup>[13]</sup>结合气弹模型试验与数值模拟,开展了双幅桥涡振性能研究,结果表明:气弹模型试验中会发生高阶涡振;安装不同透风率的多孔板对双幅桥涡振有不同的抑制效果。刘小兵等<sup>[14]</sup>通过节段模型测压试验探究了在不同间距下气动干扰效应对双幅箱梁桥升力系数的影响,结果表明与单幅桥相比,双幅箱梁桥的气动干扰

效应主要表现为下游箱梁升力明显减小。郭震山等<sup>[15]</sup>通过节段模型测力试验研究了既有桥梁对邻近新建桥梁的气动干扰效应,并利用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)手段从流场的角度定性解释了产生干扰现象的机理。Alvarez等<sup>[16]</sup>结合风洞试验和数值模拟研究了双箱梁断面的平均和脉动压力系数分布。

综合以上研究可以看出,关于大跨度双幅桥的涡振性能及其气动干扰效应,国内外学者已经取得了一定的成果<sup>[8-19]</sup>,但有关Ⅱ形梁断面双幅桥涡振及其气动干扰方面的研究还有待深入。Ⅱ形梁断面具有材料和受力性能等方面的优势<sup>[20]</sup>,但其气动性能相对较差。目前,针对大跨度桥梁涡振问题主要采用气动控制措施改善绕流场<sup>[21-28]</sup>。故本文以双幅Ⅱ形梁斜拉桥为工程背景,进行了弹簧悬挂节段模型试验,着重研究了双幅桥气动干扰对其涡振性能的影响及其气动优化措施,并通过CFD模拟了桥梁断面附近流场分布,分析涡振产生机理,以期双幅Ⅱ形梁斜拉桥的抗风设计提供参考。

## 1 工程背景

依托某大跨度双幅Ⅱ形梁斜拉桥工程项目,该工程拟在既有大桥下游(南侧)分离增建一座新桥。既有大桥主桥(旧桥)结构形式为独塔双索面斜拉桥与预应力T型刚构联合体系,引桥上构为T梁先简支后连续,桥跨布置为60 m T型刚构+2×283 m (60 m T型刚构+223 m 斜拉桥)+60 m T型刚构;主桥斜拉段采用Ⅱ形混凝土主梁,主梁宽为29.8 m,高为2.0 m,人字形横坡坡度为1.5%。分离增建大桥主桥(新桥)采用独塔双索面组合梁斜拉桥与连续组合梁的协作体系,桥跨布置为85+283+283+85=736 m;主桥斜拉段采用双边工字钢加混凝土桥面板的Ⅱ形钢-混凝土组合梁,主梁宽为23.75 m,高为2.5 m。新、旧桥主梁断面分别如图1、2所示。新、旧桥桥面净距为17 m,新桥桥面比旧桥桥面高1.76 m。

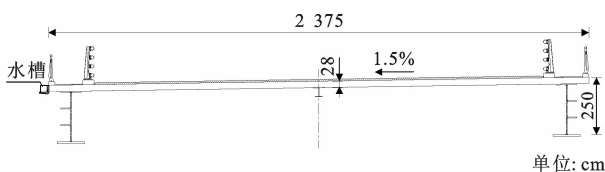


图1 新桥主梁断面

Fig. 1 Main girder profile of new bridge

大桥主跨跨中处桥面设计高程距离水面高度约

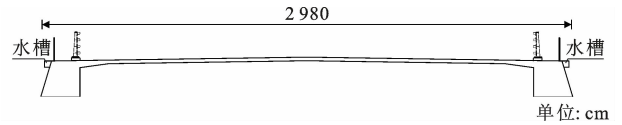


图2 旧桥主梁断面

Fig. 2 Main girder profile of old bridge

22 m,桥址区地表粗糙度为B类,结合气象记录和CFD分析数据,推算出该大桥桥址区基本风速为28 m/s(桥面设计高度的基本风速为34.1 m/s)。新桥成桥状态主梁竖向及扭转涡振允许振幅均方根分别为0.110 m和0.295°;旧桥主梁竖向及扭转涡振允许振幅均方根分别为0.108 m和0.236°。

## 2 节段模型及试验布置

### 2.1 模型制作

为了尽可能准确地模拟桥梁断面的构造细节,综合考虑模型几何外形、材料性质和风洞宽度等各种因素,最终决定采用1:25的缩尺比进行节段模型试验。

为了保证主梁节段模型流场的二维特性,新、旧桥主梁模型长度均取2.84 m。其中,新桥模型主梁宽度为0.95 m,高度为0.1 m;旧桥模型主梁宽度为1.192 m,高度为0.08 m。为了同时保证模型刚度和相似的几何外形,主梁节段模型骨架由不锈钢框架制作,外衣采用高品质PVC材料制造。主梁上附属设施如防撞护栏、人行道栏杆、检修车轨道、排水槽等采用ABS板制作,其中防撞护栏与人行道栏杆精细化模拟了形状和透风率。模型两端设置了轻质PVC端板,以降低端部三维流动模型的影响。新、旧桥主梁节段模型主要试验参数分别如表1、2所示。

表1 新桥节段模型主要试验参数

Table 1 Main test parameters of new bridge segment model

参数	实桥取值	相似比	模型取值	相对误差/%
长度/m	71.00	1:25	2.84	0
宽度/m	23.75	1:25	0.95	0
每延米等效质量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )	38 577.20	1:25 <sup>2</sup>	61.74	0.03
每延米等效质量惯性矩/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ )	3 315 520.00	1:25 <sup>4</sup>	8.49	
竖弯频率/Hz	0.256 4	6.48	1.670 0	0.6
扭转频率/Hz	0.459 8	6.48	2.990 0	0.3
风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )		1:3.86		
竖弯阻尼比/%			0.9	
扭转阻尼比/%			0.8	

表 2 旧桥节段模型主要试验参数

Table 2 Main test parameters of old bridge segment model

参数	实桥值	相似比	模型值	相对误差/%
长度/m	71.00	1:25	2.84	0
宽度/m	29.800	1:25	1.192	0
每延米等效质量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )	56 070.30	1:25 <sup>2</sup>	89.73	0.02
每延米等效质量惯性矩/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ )	6 411 740.00	1:25 <sup>4</sup>	16.41	
竖弯频率/Hz	0.261 9	6.48	1.700 0	0.22
扭转频率/Hz	0.458 1	6.48	2.970 0	0.1
风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )		1:3.86		
竖弯阻尼比/%			1.9	
扭转阻尼比/%			1.8	

### 2.2 风洞试验布置

节段模型涡振试验在长沙理工大学风洞实验室低速试验段中进行,试验段横断面尺寸为  $10.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m} \times 21.0 \text{ m}$ ,风速稳定范围为  $1 \sim 18 \text{ m/s}$ ,均匀流场紊流度小于  $0.5\%$ 。新、旧桥节段模型各通过 8 根弹簧连接固定在刚性支架上,实现双幅桥自由振动悬挂系统。通过有限元软件 ANSYS 计算得到实桥的动力特性参数。为了模拟实桥的真实情况,通过选择合适的弹簧刚度使 2 个模型风速比保持一致,在每个模型的下方两端各布置 2 个激光位移计(2 个模型共计 4 个),以实现同步测试新、旧桥主梁断面的振动位移响应时程信号,经 A/D 转换后,由计算机采集数据,并实时监控,采样频率设置为  $200 \text{ Hz}$ ,采样时间为  $40 \text{ s}$ 。

为了监测记录来流风速、湍流度等参数信息,在模型上游侧主梁高度处设置了 TFI Cobra 眼镜蛇风速仪。每一工况试验完成后将记录数据导出,采用专门编写的 MATLAB 程序进行处理,得到主梁断面的风致振动试验结果。节段模型风洞试验布置如图 3 所示。

## 3 原设计主梁断面涡振性能

### 3.1 新、旧桥单幅桥涡振试验

为了探明新、旧桥之间的气动干扰效应,首先对 2 种不同  $\Pi$  形主梁断面的新、旧桥进行单独的涡振试验,试验在均匀流场中进行。图 4 为单幅新桥与单幅旧桥在  $-3^\circ$  风攻角下的涡振响应随风速变化,可知:在单幅新桥试验中,新桥主梁在  $-3^\circ$  风攻角下均出现了显著的竖向涡振,涡振风速锁定区间为  $7.5 \sim 11.0 \text{ m/s}$ ,最大竖向涡振均方根为规范限值的



图 3 节段模型风洞试验布置

Fig. 3 Layout of wind tunnel test for segment models

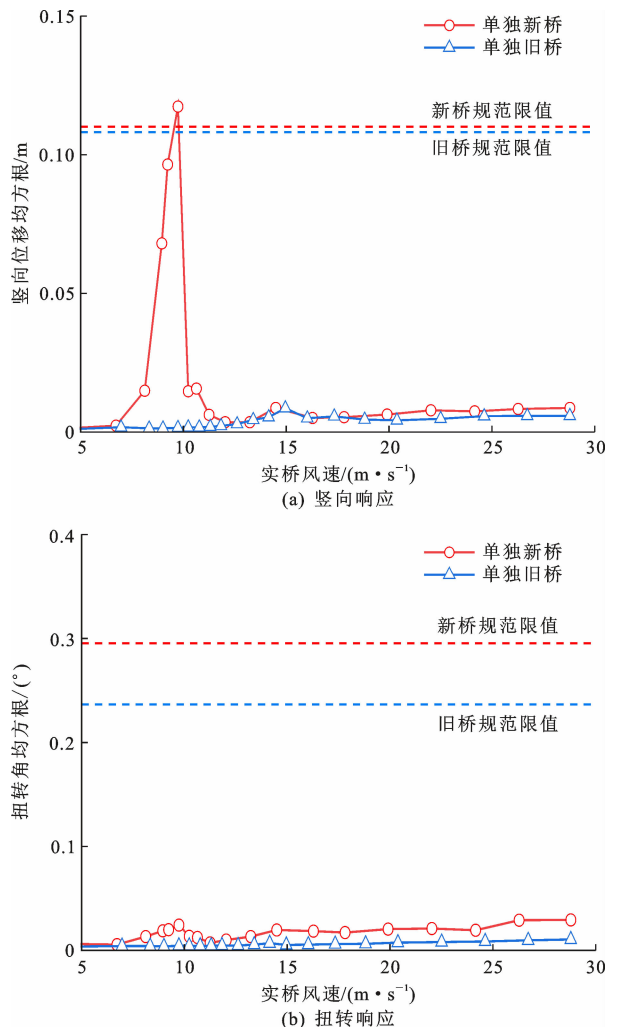


图 4 新、旧桥涡振性能

Fig. 4 Vortex-induced vibration properties of new and old bridges 1.07 倍,表明新桥涡振性能较差;在单幅旧桥试验中,旧桥主梁未出现竖向或扭转涡振,说明旧桥涡振性能良好。

### 3.2 双幅桥涡振试验

新、旧桥原设计方案主梁断面涡振试验在均匀流场中进行,通过新、旧桥模型的悬挂高度和间距来模拟双幅桥实际的桥面高差(新桥高于旧桥 1.76 m)与净距(17 m),其中桥面高差考虑桥面横坡。风攻角测试角度为  $-3^\circ$ ,来流方向分为新桥在来流上游和旧桥在来流上游 2 种。

首先,考虑旧桥在来流上游。图 5 给出了新桥主梁在  $-3^\circ$  风攻角下新、旧桥竖向和扭转位移均方根随风速变化,可知:当旧桥在来流上游时,新桥和旧桥均未出现竖向或扭转涡振,说明在该来流方向下,新桥和旧桥的涡振性能均良好。

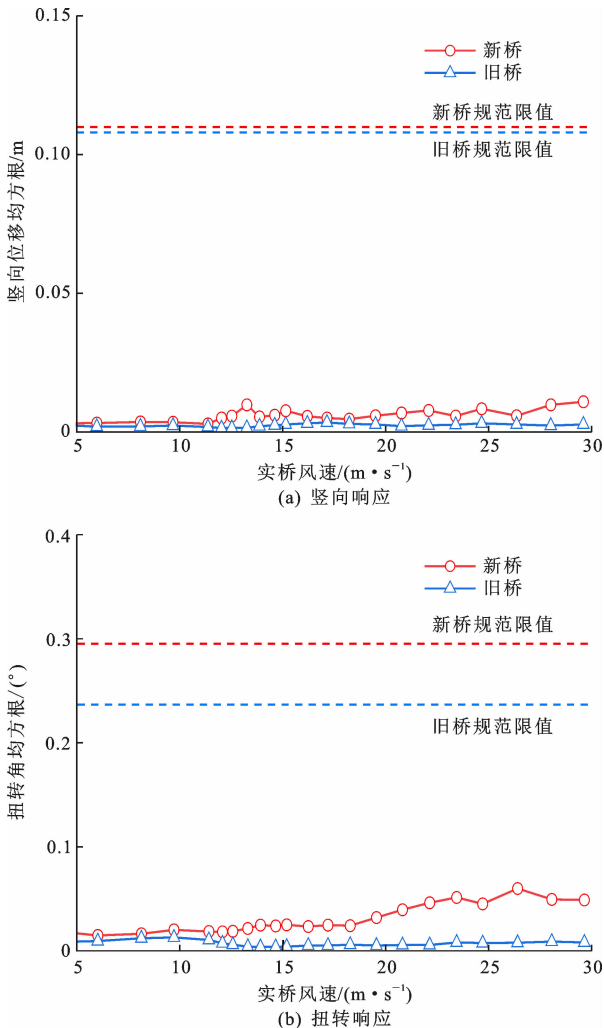


图 5 旧桥位于来流上游时新、旧桥的涡振性能

Fig. 5 Vortex-induced vibration properties of new and old bridges when old bridge is at upstream of airflow

图 6 给出了新桥和旧桥主梁在  $-3^\circ$  风攻角下的竖向和扭转位移均方根随风速变化,可知:新桥主梁在  $-3^\circ$  风攻角下出现了明显的竖向涡振,最大涡振响应均方根为规范限值的 1.1 倍,涡振锁定区间为

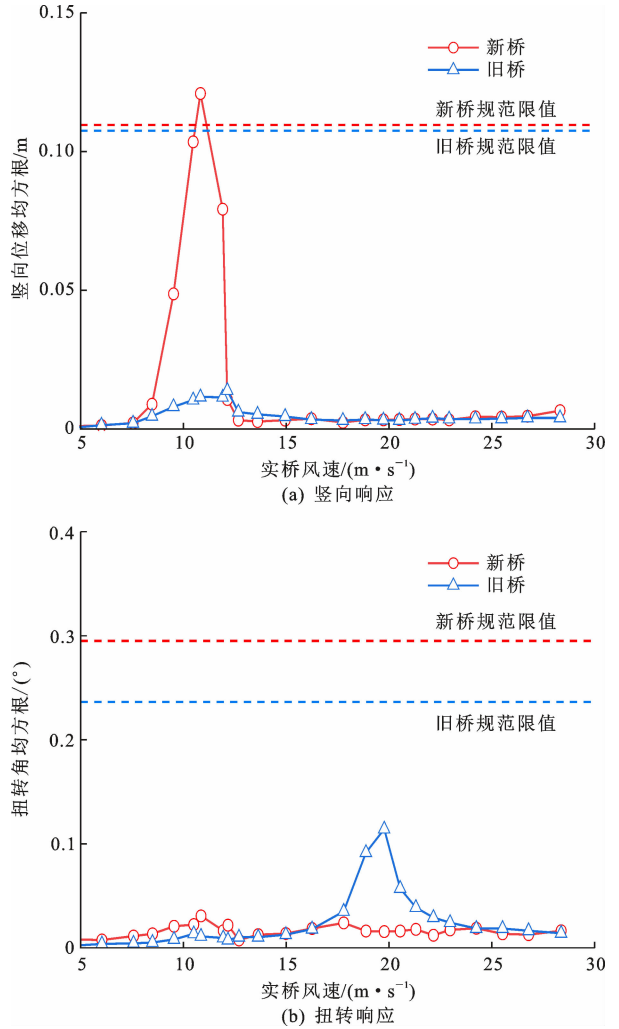


图 6 新桥在来流上游时新、旧桥的涡振性能

Fig. 6 Vortex-induced vibration properties of new and old bridges when new bridge is at upstream of airflow

8.0~12.5 m/s,在该风速区间下旧桥出现了轻微竖向涡振,但远小于规范限值;旧桥主梁在 17.5~22.5 m/s 的风速区间内出现了明显了扭转涡振,最大扭转响应均方根为规范限值的 48%。

### 3.3 双幅桥气动干扰

对比单幅桥试验与双幅桥试验可知,当新桥在来流上游时,双幅桥下新桥的最大涡振响应均方根略高于单幅新桥,且涡振锁定区间有所增大,由单幅新桥的 7.5~11.0 m/s 变为 8.0~12.5 m/s。受上游新桥气动干扰的影响,旧桥由单幅桥试验中的无明显涡振转变为具有明显的扭转涡振。当旧桥在来流上游时,新桥由单幅桥试验中竖向涡振超规范限值转变为只有轻微的竖向涡振;旧桥在该来流方向下同单幅旧桥试验结果相近,涡振性能良好。

新桥在来流下游时的涡振性能显著优于其在来流上游时,这是由于混凝土梁旧桥在上游时,其气动外形

不会产生引起旧桥涡振的旋涡脱落,且旧桥在上游时对新桥产生遮挡效应<sup>[11]</sup>,使旧桥产生的尾流流经新桥主梁断面时很难在新桥上形成规律性的旋涡脱落,故旧桥在来流上游时,新、旧桥均未出现明显的涡振现象。旧桥在来流下游时的涡振性能显著劣于其在上游时,这是由于钢-混凝土组合梁的新桥在上游时本身会产生引起涡振发生的规律性旋涡脱落,而该旋涡脱落在下流旧桥上发生再附着现象,对旧桥涡振性能造成了不利影响。

## 4 涡振性能优化

考虑到当新桥在来流上游时,新、旧桥主梁在常遇风速下发生了明显涡振,因此,需采用合理的措施来提高主梁的抗风稳定性。目前,采用气动措施来提高桥梁的涡振性能具有良好的可靠性,也是桥梁抗风设计中常用的一种方法。本文借鉴已有关于此类主梁断面涡振抑制的研究成果,综合测试了封闭人行道栏杆、导流板、防撞护栏抑流板和下稳定板 4 类单一及组合抑振措施方案。针对新桥在来流上游时新、旧桥均存在明显涡振,试验过程中选取新桥在来流上游这一来流方向,开展气动措施对主梁涡振性能的影响研究,试验工况见表 3。

表 3 气动措施试验工况

Table 3 Test conditions of aerodynamic measures

工况	措施	状态描述	风攻角/ (°)
1	封闭人行 道栏杆	全封闭	-3
2		封闭上部 60 cm	-3
3		封闭上部 35 cm	-3
4	防撞护栏 抑流板	宽 25 cm, 斜 75°	-3
5	导流板	高 1.9 m	-3
6	下稳定板	1 道, 高 1.9 m	-3
7		2 道, 高 1.9 m	
8		3 道, 高 1.9 m	
9		2 道, 高 2.2 m	
10		2 道, 高 2.5 m	
11	组合措施	2 道高 2.2 m 下稳定板+外侧 防撞护栏抑流板	0、±3

### 4.1 封闭人行道栏杆

人行道栏杆的透风率将对来流的分离与再附着产生较大影响<sup>[23]</sup>,因此,本节对人行道栏杆进行不同程度封闭,探究该气动优化措施对主梁涡振性能的影响。由图 7 涡振响应随风速变化曲线可知:全封闭人行道栏杆后新桥主梁竖向涡振振幅减小约

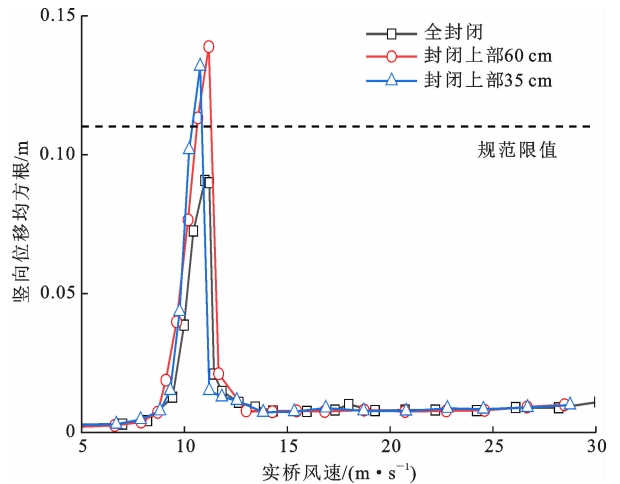


图 7 封闭人行道栏杆后新桥的竖向响应

Fig. 7 Vertical responses of new bridge after closing pedestrian railings

25%,但仍然接近规范限值;封闭人行道栏杆上部 35 和 60 cm 后反而略微增大了涡振幅值,对抑制主梁涡振不利。由此可见,封闭人行道栏杆对 II 形断面双幅桥涡振性能并无显著抑制效果。

### 4.2 防撞护栏抑流板

防撞护栏抑流板可以改变主梁的气动外形<sup>[24]</sup>,破坏涡旋流动路径,改善上表面流场分布,提高主梁的抗风性能。为此,试验中在新桥外侧(远离旧桥侧)防撞护栏顶部设置了宽度为 25 cm 的抑流板,抑流板的倾斜角度为 75°,如图 8 所示。图 9 给出了新桥主梁外侧防撞护栏上加装抑流板后的竖向响应随风速变化曲线,可知:与新桥原断面结果相比,设置抑流板后新桥竖向涡振风速锁定区间略微推后,但最大竖向响应均方根没有明显降低,无法有效将新桥竖向涡振控制在规范限值范围内。

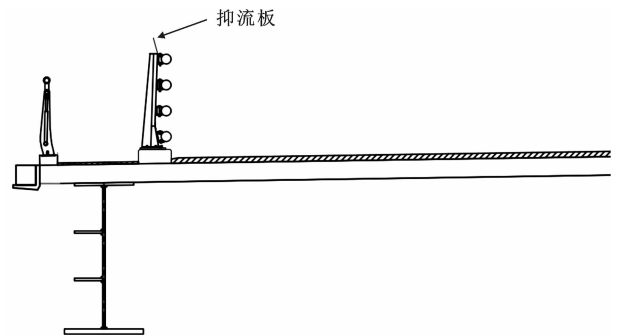


图 8 防撞护栏抑流板布置

Fig. 8 Layout of flow suppression plates on anti-collision guardrail

### 4.3 导流板

II 形钢-混凝土组合梁气动外形的特点是容易

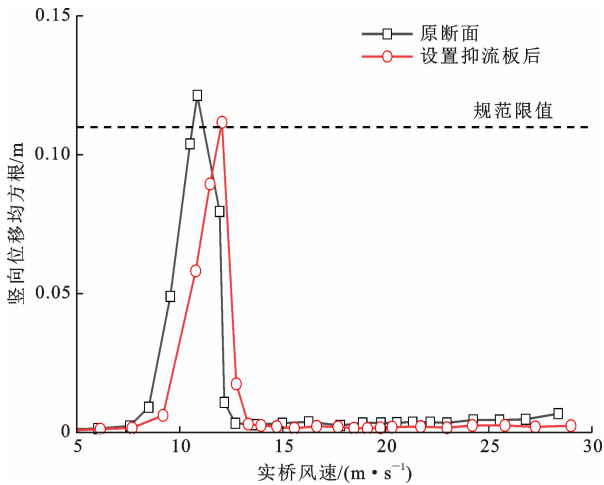


图 9 设置防撞护栏抑流板后新桥的竖向响应

Fig. 9 Vertical responses of new bridge after installing flow suppression plates on anti-collision guardrails

在主纵梁和桥面板转角处发生漩涡脱落,从而引起主梁涡振<sup>[25]</sup>。为了减弱此类区域规律性的漩涡脱落,在主纵梁外侧和桥面板底部边缘设置竖向导流板,导流板高度为 1.9 m,沿纵桥向连续布置,如图 10 所示。图 11 为对应的新桥主梁竖向涡振响应随风速变化曲线,可知:设置导流板后新桥最大竖向涡振响应均方根有所降低,但总体上未能有效改善新桥主梁的涡振性能。

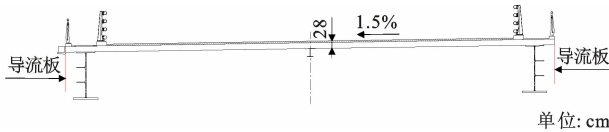


图 10 导流板示意

Fig. 10 Schematic of guide vanes

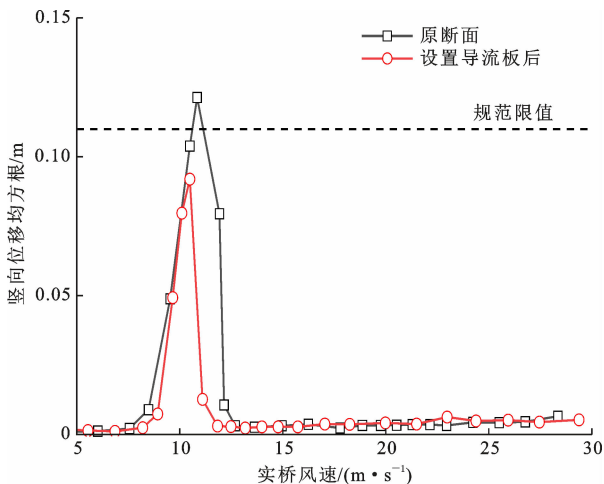


图 11 设置导流板后新桥竖向响应

Fig. 11 Vertical responses of new bridge after installing guide vanes

#### 4.4 下稳定板

在主梁底部设置下稳定板能在一定程度上干扰

迎风来流在梁底产生规律性的漩涡脱落<sup>[29-30]</sup>,从而抑制桥梁涡振。试验考虑在主梁底部布置 1 道二分点下稳定板、2 道三分点下稳定板和 3 道四分点下稳定板 3 种情况,如图 12 所示,其中 2 道下稳定板考虑 3 种高度,分别为 1.9、2.2、2.5 m。图 13 对比了新桥主梁底部设置 1~3 道高 1.9 m 下稳定板后新桥的涡振性能,可以看出:1 道下稳定板对主梁涡振抑制效果十分有限,2 道和 3 道下稳定板能使新桥主梁的涡振性能有所提升,分别使最大竖向响应均方根降低 36% 和 40%;在下稳定板数量相同的情况下,下稳定板高度越高,对新桥主梁竖向涡振的控制效果越好。然而,不同数量和高度的下稳定板虽然可以在一定程度上改善新桥主梁的竖向涡振性能,但难以完全抑制涡振。

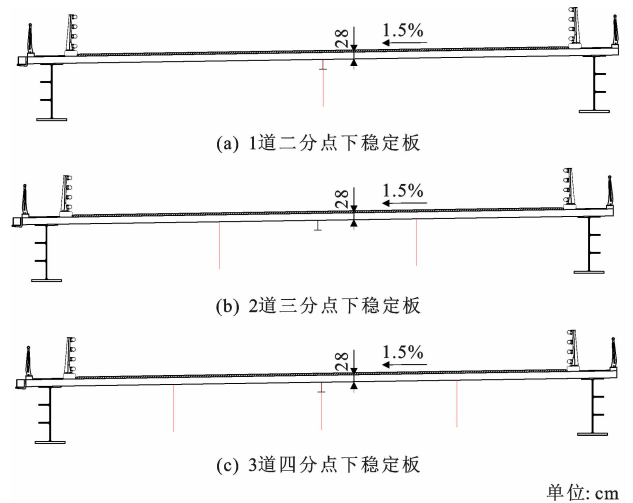


图 12 下稳定板示意

Fig. 12 Schematic of lower stabilizing plates

#### 4.5 组合措施

通过上述研究可知,单一气动措施对主梁涡振性能的控制效果有限,因此,本文采用 2 道高 2.2 m 下稳定板+外侧防撞护栏抑流板的组合措施,并在最不利来流方向(新桥在来流上游)下的 3 个典型风攻角(0°、±3°)下验证该组合措施对新、旧桥主梁涡振的抑制效果。组合措施下下稳定板按三分点布置,抑流板设置在新桥外侧防撞护栏顶部,宽度为 25 cm,倾斜角为 75°,图 14 为组合措施示意。

图 15 为组合措施下新桥在来流上游时新、旧桥主梁竖向和扭转涡振响应随风速变化曲线,可知:新、旧桥主梁竖向和扭转涡振响应均方根均小于规范限值的 20%,充分说明了在该组合气动措施下,新、旧桥主梁的涡振性能得到大幅提升,能有效抑制桥梁涡振。

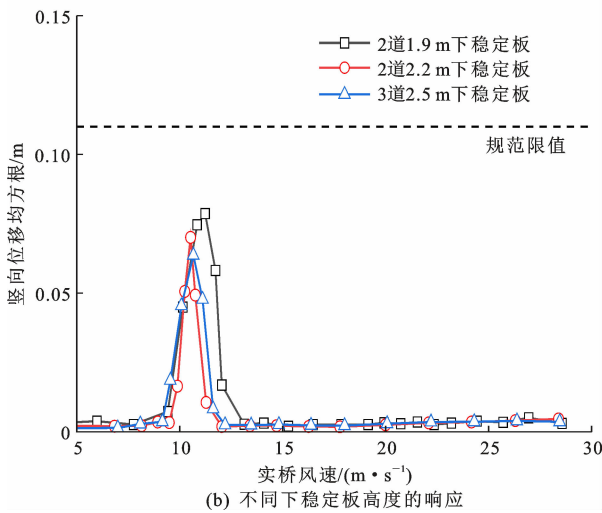
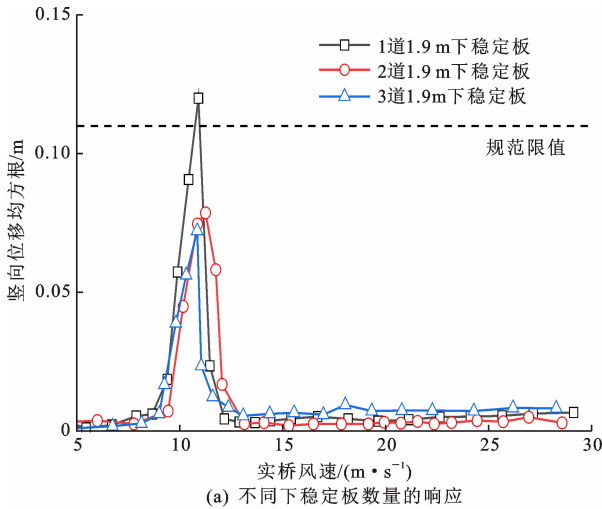


图 13 设置下稳定板后新桥竖向响应

Fig. 13 Vertical responses of new bridge after setting lower stabilizing plates

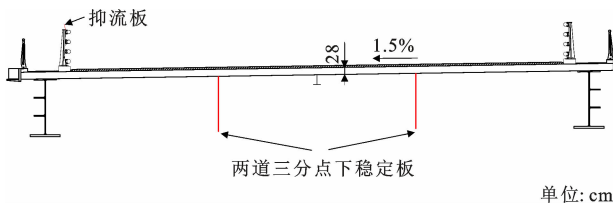


图 14 组合措施示意

Fig. 14 Schematic of combination measure

#### 4.6 CFD 数值模拟

为了探究组合措施抑制新、旧桥主梁涡振的机理,采用 CFD 数值模拟方法分析该措施下新、旧桥断面的流场特征。数值模拟中新、旧桥主梁采用 1:25 缩尺比,考虑人行道栏杆、防撞护栏和水槽等附属设施。桥梁断面周围网格采用刚性域+动网格域+静网格域进行分块处理,其中刚性域宽度为 0.45 m,计算域宽度和长度分别取 9、30 m,计算域及网格如图 16 所示。刚性域内桥梁断面边界层采

用结构化网格,网格增长率为 1.1,近壁面网格量纲一高度  $Y^+$  趋近于 1,其他部分采用非结构化网格。刚性域内网格的运动方式通过用户自定义函数给定,动网格域采用弹簧光滑和网格重构的方法进行网格更新,静网格域固定不动,并采用结构化网格划分。断面的阻塞率小于 3%,满足规范要求。

为研究组合措施对新桥竖向涡振的抑制机理,采用 CFD 数值模拟方法得到了 11 m/s 风速下采用组合措施前后新、旧桥断面涡量,如图 17 所示,可知:未采取措施时,该来流风下新桥双边主梁底均存在明显的漩涡脱落现象,使得新桥主梁上、下表面产生压力差,该压力差形成的涡激力是诱发新桥主梁竖向涡振的主要原因;当新桥底部设置 2 道高 2.2 m 下稳定板后,避免了来流在新桥两侧主梁底部产生规律性漩涡脱落,同时在外侧防撞护栏抑流板共同作用下,新、旧桥主梁上、下表面气流更加平滑,表面压力差减小,从而抑制了主梁涡振。

图 18 给出了 20 m/s 来流风速下采取组合措施前后新、旧桥主梁断面涡量,可以看出:该风速下新桥主梁上、下表面气流相对平稳,均无明显漩涡产生,但在新桥尾流干扰下,气流在旧桥桥面人行道栏杆和防撞护栏处分离,进而演化生成 2 个大型漩涡,该漩涡脱落时对旧桥主梁断面产生气动力,进而导致旧桥发生扭转涡振;在新桥外侧防撞护栏抑流板的作用下,新桥上表面流场得到了明显改善,破坏了新桥尾流在旧桥上表面漩涡脱落的形成,从而降低了旧桥主梁气动力,抑制了旧桥主梁扭转涡振。

## 5 结 语

(1)在双幅桥涡振试验中,当新桥在来流上游时,在  $-3^\circ$  风攻角下,新桥主梁竖向涡振超过规范限值,旧桥由单幅桥时的无明显涡振转变为出现显著扭转涡振,充分说明旧桥受新桥尾流干扰作用,涡振性能下降;当旧桥在来流上游时,新桥由于旧桥的遮挡效应<sup>[11]</sup>,由单幅桥时的竖向涡振超过规范限值转变为无明显涡振,新、旧桥的涡振性能均良好。

(2)单一气动措施对新桥主梁竖向涡振抑制效果有限,其中人行道栏杆全封闭对新桥主梁竖向涡振的抑制效果优于封闭上部 60、35 cm。新桥主梁竖向涡振幅值随下稳定板数量和高度的增加而减小,但减小幅度有限。

(3)在新桥上采取 2 道高 2.2 m 下稳定板+外侧防撞护栏抑流板的组合措施,优化了新桥主梁气

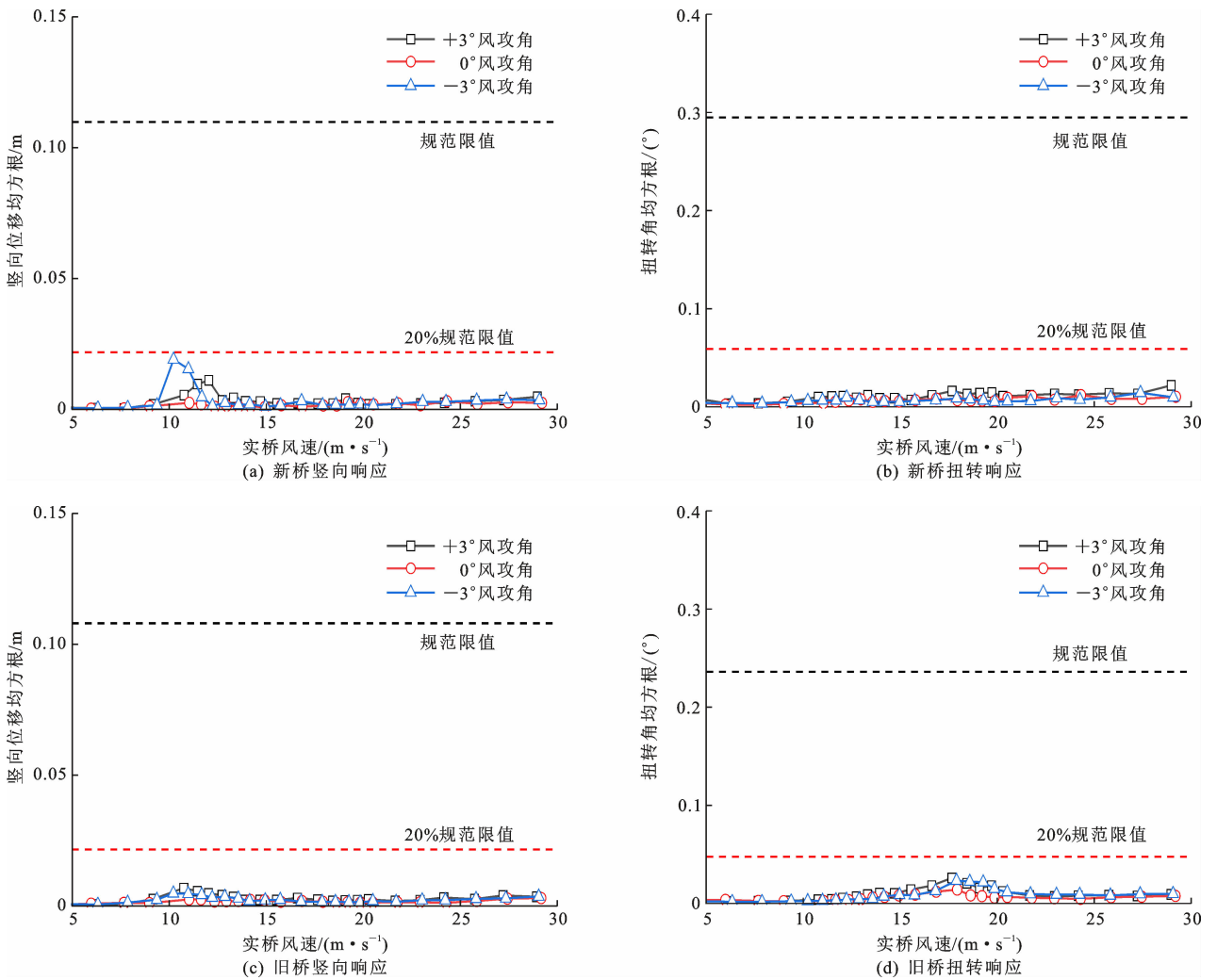


图 15 组合措施作用下新、旧桥涡振性能

Fig. 15 Vortex-induced vibration properties of new and old bridges under combined measure

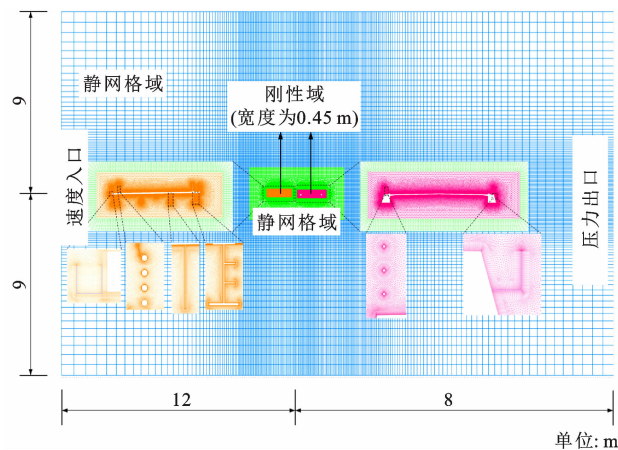


图 16 计算域网格

Fig. 16 Computational domain grids

动外形的同时也改善了旧桥主梁的流场分布,使新、旧桥主梁涡振性能得到大幅提升。新桥在来流上游的 3 个风攻角下,新、旧桥最大竖向和扭转涡振响应

均方根均控制在规范限值的 20% 以内。

(4)由 CFD 数值模拟得到的新、旧桥断面流场分布可知,新桥双边主梁底转角处均有明显漩涡脱落,这是新桥发生竖向涡振的主要原因;新桥漩涡脱落在旧桥桥面上再附着是使旧桥发生扭转涡振的主要原因。对新桥采取组合措施后极大地改善了新、旧桥主梁附近的流场分布,有利于提高主梁涡振性能。

(5)风洞试验和数值模拟表明,在上游 II 形断面主梁梁底设置下稳定板并在主梁上表面设置防撞护栏抑流板,能有效破坏上、下游主梁附近旋涡的形成,涡振抑制效果良好,该组合措施对改善该类型桥梁表面气流分布和减小主梁上、下表面压力差具有参考意义。

(6)后续拟进一步探讨桥间距比对双幅 II 形主梁涡振的影响。

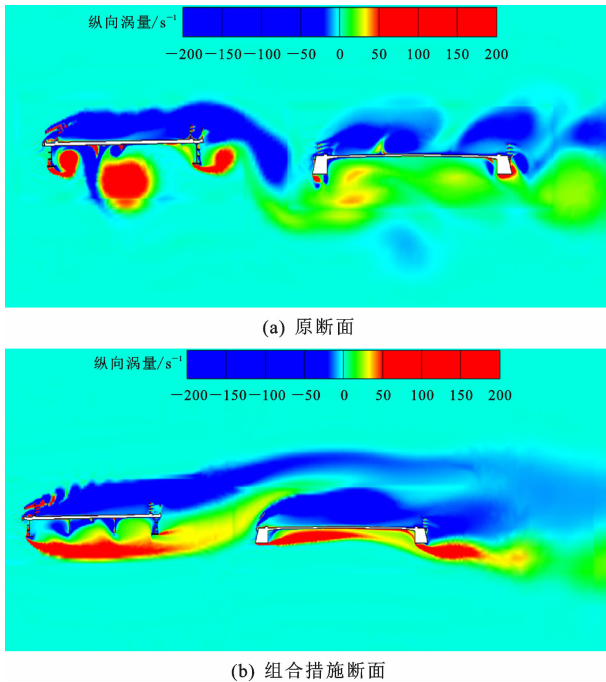


图 17 11 m/s 风速下主梁涡量

Fig. 17 Vortexes of main girder at wind speed of 11 m/s

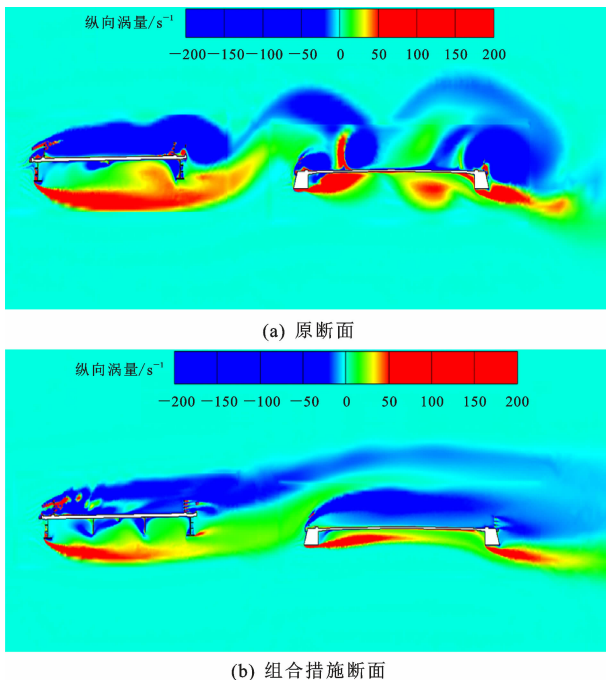


图 18 20 m/s 风速下主梁涡量

Fig. 18 Vortexes of main girder at wind speed of 20 m/s

## 参考文献:

## References:

[1] 周锐, 杨咏昕, 葛耀君, 等. 平行双幅桥梁的颤振控制试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(12): 126-132.  
ZHOU Rui, YANG Yong-xin, GE Yao-jun, et al. Tests for flutter control of a twin-separate bridge[J].

Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(12): 126-132.

[2] 陈政清, 牛华伟, 刘志文. 双幅桥面桥梁主梁气动干扰效应研究[J]. 桥梁建设, 2007, 37(6): 9-12.

CHEN Zheng-qing, NIU Hua-wei, LIU Zhi-wen. Study of aerodynamic interference effect on main girders of twin-deck bridges[J]. Bridge Construction, 2007, 37(6): 9-12.

[3] KIM S J, KIM H K, CALMER R, 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: 143-154.

[4] LI W L, PATRUNO L, NIU H W, et al. Experimental and numerical study on the aerodynamic admittance of twin-box bridge decks in sinusoidal gusts and continuous turbulence [J]. Journal of Bridge Engineering, 2023, 28(11): 04023078.

[5] LIU L L, ZOU Y F, HE X H, et al. Experimental investigation on vortex-induced vibration of a long-span rail-cum-road bridge with twin separated parallel decks[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 228: 105086.

[6] 秦浩, 廖海黎, 李明水. 大跨度双幅连续钢箱梁桥涡激振动特性风洞试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(14): 206-210.

QIN Hao, LIAO Hai-li, LI Ming-shui. Vortex induced vibration performance of long span continuous steel twin box beam bridge based on wind tunnel test [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(14): 206-210.

[7] 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, 2007, 96(6/7): 954-962.

[8] 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): 16-20.

CHEN Zheng-qing, NIU Hua-wei, LI Chun-guang. Experimental study on wind-induced vortex shedding of parallel box-girder bridge[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2007, 34(9): 16-20.

[9] 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 Le-dong, ZHOU Qi, GUO Zhen-shan, 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): 632-638.
- [10] SEO J, KIM H, 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: 7-20.
- [11] 刘志文,陈政清,刘高,等.双幅桥面桥梁三分力系数气动干扰效应试验研究[J].*湖南大学学报(自然科学版)*,2008,35(1):16-20.  
LIU Zhi-wen, CHEN Zheng-qing, LIU Gao, et al. Experimental study of aerodynamic interference effects on aerostatic coefficients of twin decks bridges [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2008, 35(1): 16-20.
- [12] 谭彪,操金鑫,檀小辉,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 Jin-xin, TAN Xiao-hui, et al. Effect of gap distance ratio on vortex-induced vibration performance for bridge with twin composite girders [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(9): 1264-1270.
- [13] 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 Le-dong. 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.
- [14] 刘小兵,姜会民,刘慧杰,等.不同高宽比并列双幅箱梁气动升力的干扰效应[J].*振动、测试与诊断*,2023, 43(1):103-108, 200.  
LIU Xiao-bing, JIANG Hui-min, LIU Hui-jie, et al. Interference effect on aerodynamic lift of twin parallel box girders with different aspect ratios [J]. *Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*, 2023, 43(1): 103-108, 200.
- [15] 郭震山,孟晓亮,周奇,等.既有桥梁对邻近新建桥梁三分力系数的气动干扰效应[J].*工程力学*,2010, 27(9):181-186,200.  
GOU Zhen-shan, MENG Xiao-liang, ZHOU Qi, et al. Aerodynamic interference effects of an existed bridge on aerodynamic coefficients of an adjacent new bridge [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(9): 181-186, 200.
- [16] ÁLVAREZ A, NIETO F, KWORK K, et al. Aerodynamic performance of twin-box decks: a parametric study on gap width effects based on validated 2D URANS simulations [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 182: 202-221.
- [17] PARK J, KIM S, KIM H K. Effect of gap distance on vortex-induced vibration in two parallel cable-stayed bridges [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 162: 35-44.
- [18] 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: 330-341.
- [19] 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: 276-282.
- [20] 杨博闻,张玉平,杨晔.辅助墩设置对大跨PK断面混合-组合梁斜拉桥受力性能的影响[J].*长沙理工大学学报(自然科学版)*,2025,22(1):111-121.  
YANG Bo-wen, ZHANG Yu-ping, YANG Ye. Influence of auxiliary pier setting on mechanical performance of long-span cable-stayed bridge with hybrid and composite girders incorporating PK section [J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2025, 22(1): 111-121.
- [21] ZHAO L, WU F Y, HAN T S, et al. Aerodynamic force distribution and vortex drifting pattern around a double-slotted box girder under vertical vortex-induced vibration [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2023, 241: 105548.
- [22] 刘小兵,李少杰,陈帅,等.大间距并列双钝体箱梁气动干扰效应试验研究[J].*世界桥梁*,2018,46(2): 35-40.  
LIU Xiao-bing, LI Shao-jie, CHEN Shuai, et al. Experimental study of aerodynamic interference effects of twin parallel bluff box girders with large intervals [J]. *World Bridges*, 2018, 46(2): 35-40.
- [23] 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.  
GUAN Qing-hai, LI Jia-wu, HU Zhao-tong, et al. Effects of railings on vortex-induced vibration of a bridge deck section [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(3): 150-156.
- [24] 李春光,黄静文,张记,等.边主梁叠合梁涡振性能气动优化措施风洞试验研究[J].*振动与冲击*,2018,

- 37(17):86-92.
- LI Chun-guang, HUANG Jing-wen, ZHANG Ji, et al. Aerodynamic optimization measures for VIV performances of a side girder composite beam based on wind tunnel tests[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(17): 86-92.
- [25] 雷 伟,王 骑,廖海黎,等. 梁侧导流板对  $\pi$  型叠合梁断面涡振性能影响及抑振机理研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(14): 48-55.
- LEI Wei, WANG Qi, LIAO Hai-li, et al. Influence of guide plates on the side of the edge girder on the VIV performance of the  $\pi$ -shaped composite deck section and its vibration suppression mechanism[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(14): 48-55.
- [26] 钱国伟,曹丰产,葛耀君. II 型叠合梁斜拉桥涡振性能及气动控制措施研究[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(2): 176-181.
- QIAN Guo-wei, CAO Feng-chan, GE Yao-jun. Vortex-induced vibration performance of a cable-stayed bridge with II shaped composite deck and its aerodynamic control measures [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(2): 176-181.
- [27] BRUNO L, KHRIS S. The validity of 2D numerical simulations of vortical structures around a bridge deck[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2003, 37(7/8): 795-828.
- [28] 汪志雄,张志田,郗 凯,等.  $\pi$  型开口截面斜拉桥弯扭耦合涡激共振及气动减振措施研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(1): 52-57, 94.
- WANG Zhi-xiong, ZHANG Zhi-tian, QIE Kai, et al. Bending-torsion coupled vortex induced resonance of  $\pi$ -type open section cable stayed bridge and aerodynamic vibration reduction measures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(1): 52-57, 94.
- [29] 董国朝,许育升,韩 艳,等.  $\pi$  型加劲梁软颤振特性及下稳定板的影响研究[J]. *振动工程学报*, 2022, 35(6): 1395-1403.
- DONG Guo-chao, XU Yu-sheng, HAN Yan, et al. Soft flutter performance of  $\pi$ -shaped girder and the influence of lower stabilizers[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2022, 35(6): 1395-1403.
- [30] 刘志文,肖 晗,王 雷,等. II 型钢-混凝土结合梁断面涡激振动及气动控制措施[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(3): 68-78.
- LIU Zhi-wen, XIAO Han, WANG Lei, et al. Vortex-induced vibration of a II-shaped steel-concrete composite girder and its aerodynamic countermeasures[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2022, 49(3): 68-78.