

检修轨道对分体式钢箱梁涡激振动影响机理研究

孙洪鑫,胡磊,陈魏,黄文俊

(湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:检修轨道是桥梁安全运维的重要通道,对主梁涡激性能影响显著。为了研究检修轨道对分体式双箱梁涡激振动性能影响的机理,该文以某主跨658 m的双分体式钢箱梁斜拉桥为工程背景,结合节段模型风洞试验及二维流固耦合CFD数值模拟,研究了有、无检修轨道主梁断面竖向涡激性能,分析了检修轨道影响涡激性能的机理。结果表明:①有检修轨道的主梁断面发生大幅竖向涡振,而无检修轨道的主梁断面竖向涡振振幅减小40%以上,检修轨道对分体式双箱梁涡激性能影响显著;②有检修轨道主梁断面上、下表面发生周期性的旋涡脱落,导致主梁上、下表面出现较大的压力差而形成周期性的涡激力引起主梁发生大幅竖向涡振。去除检修轨道后,破坏了有检修轨道主梁断面上、下表面发生的周期性旋涡脱落模式,从而达到抑制主梁涡激振幅的效果。

关键词:斜拉桥;分体式钢箱梁;涡激振动;风洞试验;CFD数值模拟;检修轨道

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

Influence Mechanism of Maintenance Rails on Vortex-Induced Vibration of Twin Steel Box Girders

SUN Hongxin, HU Lei, CHEN Wei, HUANG Wenjun

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: Maintenance rails are an important passage for the safe operation and maintenance of bridges, significantly affecting the vortex-induced vibration (VIV) performance of main girders. A twin steel box girder cable-stayed bridge with the main span of 658 m was taken as the engineering background to investigate the influence mechanism of maintenance rails on the VIV performance of twin steel box girders. Combined with section model wind tunnel tests and two-dimensional fluid-structure interaction CFD numerical simulations, the vertical VIV performance of the main girder sections with and without maintenance rails was studied, and the mechanism of maintenance rails' influence on VIV performance was analyzed. The results show that large vertical VIV occurs in main girder sections with maintenance rails, while the vertical VIV amplitude of the sections without maintenance rails decreases by more than 40%, indicating that maintenance rails significantly influence the VIV performance of the twin steel box girders. Periodic vortex shedding occurs on the upper and lower surfaces of main girder sections with maintenance rails, which results in a large pressure difference between the upper and lower surfaces of main girders, thus generating periodic vortex-induced force and causing large-amplitude vertical VIV of main girders. After removing the maintenance rails, the periodic vortex shedding pattern on the upper and lower surfaces of main girder sections with maintenance rails is disrupted, thereby suppressing the VIV amplitude of main girders.

Keywords: cable-stayed bridge; twin steel box girder; vortex-induced vibration; wind tunnel test; CFD numerical simulation; maintenance rail

收稿日期:2024-05-30 修回日期:2025-07-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52078210);湖南省杰出青年科学基金资助项目(编号:2021JJ10003);湖南省教育厅优秀青年基金资助项目(编号:23B0494)

作者简介:孙洪鑫,男,博士,教授.E-mail:cehxsun@hnust.edu.cn

0 引言

分体式钢箱梁具有颤振性能好的特点,在大跨桥梁中广泛应用,如西堍门大桥^[1]、香港昂船洲大桥^[2]、嘉绍大桥^[3]等。但是,分体式钢箱梁的涡振性能差,如西堍门大桥长期健康监测结果表明^[1]:在常遇风速内,桥梁易发生竖弯模态涡激振动;昂船洲大桥在风洞试验中也观测到了不同振幅的涡振现象^[2]。涡激振动不仅会降低桥上车辆和行人的舒适性,还可能引起结构构件疲劳破坏,诱发结构局部或整体倒塌。大跨桥梁在运营阶段发生涡激振动将备受社会关注,如西堍门大桥^[1]、韩国 Yisunsin 大桥^[4]。因此,对分体式钢箱梁涡激振动性能及其抑制措施进行研究具有重要意义。

大跨桥梁的涡振性能对气动外形十分敏感,微小的气动外形改变可能导致涡振性能的显著变化。因此,气动措施成为大跨桥梁涡振抑制的重要措施,包括风嘴、隔流板、稳定板、导流板、抑流板、格栅、风障、裙板、检修轨道等^[3,5-19]。检修轨道是桥梁进行日常检查和维护的重要通道。众多学者研究了检修轨道对涡振性能的影响,黄林等^[15]研究发现当检修轨道与梁底板边缘在合适的距离时,可完全消除宽体扁平箱梁在各风攻角下的涡激振动;孟晓亮等^[16]研究了检修轨道位置对半封闭分离双箱桥梁断面涡振性能的影响,结果表明:改变检修轨道在主梁横断面上的位置可能会有效地改善桥梁涡振性能,无检修轨道可大幅减小涡振振幅;孙延国等^[17]为研究大跨度悬索桥涡激振动性能,对检修轨道位置进行了试验,发现去掉检修轨道会使涡激振动完全消失;孙洪鑫等^[18]研究了检修轨道位置、尺寸等因素对分体式钢箱梁涡振性能的影响;任蒙等^[19]研究发现,在主梁底板检修轨道内侧设置导流板,主梁涡振性能大幅提高;李春光等^[20]研究了检修轨道对带悬挑人行道流线形箱梁涡振性能的影响,发现合理设置检修轨道在底板的位置能提高主梁涡振性能。

随着计算机技术的迅速发展,CFD数值模拟在桥梁风工程中得到广泛应用。借助流场可视化手段分析主梁断面周围流场旋涡的演变来研究涡振机理已成为趋势^[21-23]。刘志文等^[24]研究了检修轨道位置对流线形钢箱梁涡振的影响机理,结果表明检修轨道内移能够抑制主梁断面背风侧发生周期性的旋涡脱落,从而减小主梁涡振振幅;檀忠旭等^[25]研究发现,开槽顶部水平隔流板能够阻碍开槽处的气体对

流,降低开槽内部及断面周围气流速度,增加旋涡移动和脱落难度,从而在一定程度上抑制分体式钢箱梁的涡振;黄林等^[26]研究了整流罩组合措施对II形叠合梁涡振的影响,发现该气动措施能够减小主梁表面周围旋涡脱落尺寸,进而达到抑制主梁涡振效果。

与此同时,一种无轨式桥梁检修车应运而生。该检修车行走装置无需铺设轨道,不仅能够节约轨道,而且能够减轻检查车及轨道整个检查系统的重量,从而降低桥梁负荷,减少运输成本。无轨式检修车的出现使得无检修轨道气动措施方案成为可能。鉴于此,本文以某大跨分体式钢箱梁斜拉桥为工程背景,通过有无检修轨道主梁节段模型风洞试验,开展检修轨道对主梁涡激振动性能的研究,分析无检修轨道主梁涡振抑振的机理。研究成果可为类似的分体式双箱梁涡激振动抑制提供参考。

1 工程背景

本文以某分体式钢箱梁斜拉桥为工程背景,该桥梁跨径布置为(70+70+70+658+100+70+70)m。主梁采用双分体式钢箱梁,箱梁高3.8m,含风嘴宽度51.85m,双箱中间间距为10.2m,中央开槽率为19.3%。钢箱梁由桥面顶板、底板、内腹板、外腹板、横隔板、风嘴、锚固构造等组成。两箱中间以钢横梁连接,斜拉索锚固于风嘴处的外纵腹板。钢横梁顶面横坡为0%,主箱顶面横坡为2%。两侧箱梁均布置四道护栏,由外及内分别为检修道护栏、人行道护栏、边护栏和中央护栏,将桥面分隔成三条通道,分别是斜拉索通道、人行-非机动车道和机动车道。边护栏和中央护栏外形相同。钢箱梁断面设计如图1所示。

2 涡振性能风洞试验

2.1 节段模型风洞试验

节段模型风洞试验于湖南科技大学风工程试验研究中心开展。根据实桥主梁断面尺寸和风洞试验条件,选取节段模型的几何缩尺比为1:60,设计和制作了主梁节段模型。节段模型长269cm,宽86.4cm,高6.3cm(不含栏杆),模型长宽比为 $L/B=3.1$ 。节段模型弹性悬挂风洞试验动力参数如表1所示。根据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3 360-01—2018)^[27],确定了一阶竖弯模态涡振振幅均方根限值为0.172m,二阶竖弯模态涡振振幅均方根限值为0.058m。悬挂于风洞试验室的节段模型如图2所示。

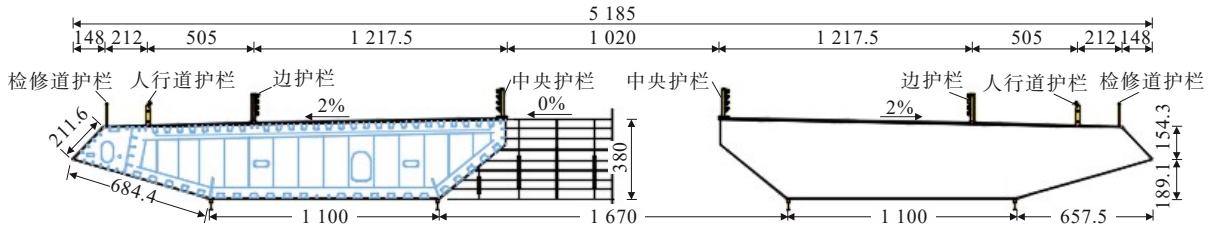


图1 分体式钢箱梁断面(单位:cm)

Figure 1 Twin steel box girder section(unit: cm)

表1 节段模型风洞试验参数

Table 1 Parameters of section model wind tunnel test

项目	主梁长度 L/m	主梁宽度 B/m	主梁高度 H/m	等效质量 $m_{eq}/(kg \cdot m^{-1})$	对称竖弯模态 f_h/Hz	竖弯阻尼比 $\zeta_h/\%$	风速比 $k/1$
实桥值	—	51.850	3.800	38 000	0.338	0.30	—
模型值	2.69	0.864	0.063	10.297	3.931	0.30	5.16

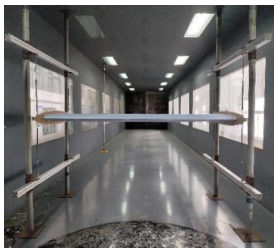


图2 置于风洞中的动力试验模型

Figure 2 Dynamic test model installed in wind tunnels

2.2 涡振性能

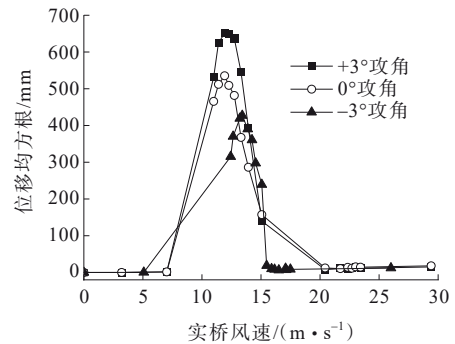
对原设计方案(有检修轨道)成桥状态主梁断面以及无检修轨道措施进行了3种风攻角工况(+3°、0°和-3°)的竖向涡激振动风洞试验,实测主梁竖向涡振特征如图3所示(试验数据均已换算成实桥)。

由图3风洞试验结果可知:

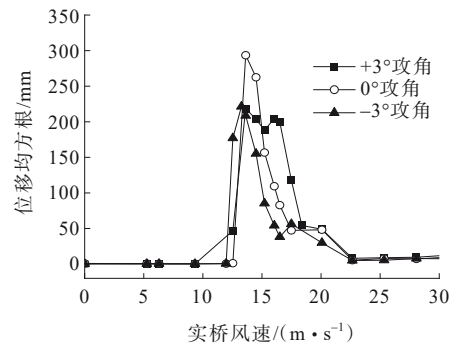
(1) 在3种风攻角工况中,均实测到有检修轨道断面大幅竖向涡激振动,在试验风攻角范围内,最大振幅风攻角为+3°,其竖向位移均方根达到0.65 m;第一阶竖弯模态涡振锁定风速区间为7.0~15.1 m/s,是极为常遇的风速。

(2) 在试验风攻角范围内,移除检修轨道能明显降低主梁竖向涡振振幅,竖向涡振振幅均减小40%以上。

由此可见,检修轨道对分体式钢箱梁涡振性能影响显著,检修轨道会诱发主梁大幅涡激振动,为探究检修轨道诱发大幅涡激振动的机理,采用CFD开展了流固耦合数值模拟计算,通过流场可视化揭示检修轨道诱发大幅涡激振动的原因。



(a) 有检修轨道主梁断面竖向涡振振幅



(b) 无检修轨道主梁断面竖向涡振振幅

图3 有、无检修轨道的主梁竖向涡振性能

Figure 3 Vertical VIV performance of main girders with and without maintenance rails

3 主梁涡振数值模拟

桥梁涡振本质上为流固耦合问题。本文基于Fluent软件平台,结合二次开发的UDF程序,建立了分体式双箱梁涡振数值模型,分析流程如图4所示。在流固耦合数值模拟时,主梁断面竖向涡激振动系统被简化为质量-弹簧-阻尼系统。首先进行主梁静止状态绕流模拟直至计算收敛,然后载入UDF程序包开始流固耦合模拟。在流固耦合计算的每个时间步内,基于Fluent求解器求解流动方程,并通过UDF提取每一个时间步作用于主梁的气动力。将该气动力代入质量-弹簧-阻尼系统的动力方程,并采用

Newmark- β 法求解主梁动力方程,确定主梁断面的运动状态。根据主梁新的位移和速度插值得到网格位移和速度,通过动网格技术,结合Fluent中的网格重划(Remeshing)与光顺(Smoothing)方法实现网格更新,得到新的流场域,然后进行下一步计算,直至响应稳定结束计算。

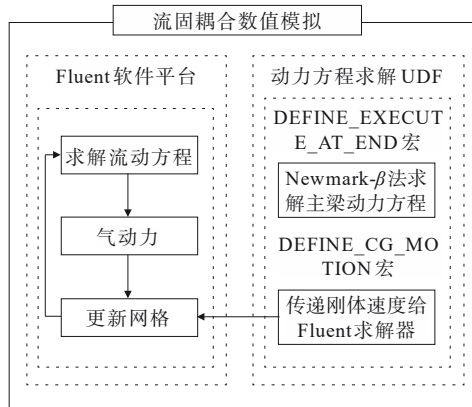


图4 流固耦合时域算法

Figure 4 Fluid-structure interaction time domain algorithm

本文CFD模拟以主梁成桥阶段断面+3°风攻角工况为对象,采用1:60的几何缩尺比。计算域及边界条件如图5所示,入口到主梁剪切中心距离为7.5B,下游出口到主梁剪切中心距离为12.5B,上、下边界到模型剪切中心距离均为5.5B。模型在计算域内的阻塞率为0.66%,满足低于3%的CFD模型阻塞率要求。计算域入口设为:速度入口边界,下游出口施加压力自由出口边界,上、下边界均设为对称边界,主梁表面为无滑移壁面边界。

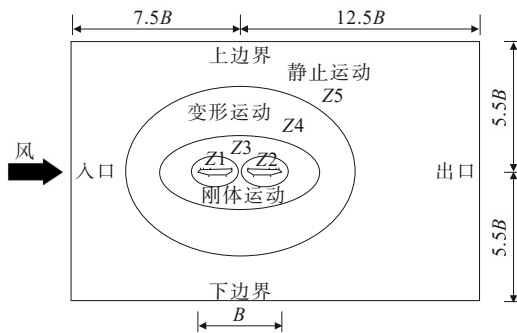


图5 计算域及边界条件

Figure 5 Computational domain and boundary conditions

为保证模型运动时的网格质量,计算域分为刚体运动网格区、变形网格区和静止网格区。其中刚体运动网格区由Z1、Z2、Z3三个区域组成,刚体运动区域随结构断面一起做刚体运动。为有效捕捉主梁

周围流场的非定常脉动,采用精细的结构化网格提高Z1和Z2区域的网格分辨率,Z3区域及附属设施附近区域均采用四边形非结构化网格。变形网格区(Z4区域)采用三角形非结构网格以适应结构运动时的网格变形,并通过网格重构和弹簧光顺的方法进行变形更新。为减少网格数量,远离主梁的静止网格区(Z5区域)采用较粗的网格。计算域网格总数为19.6万个,计算域整体网格划分如图6所示,主梁周围及附属设施网格划分如图7所示。

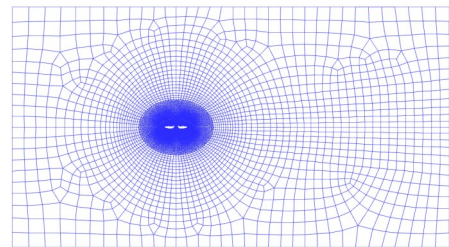
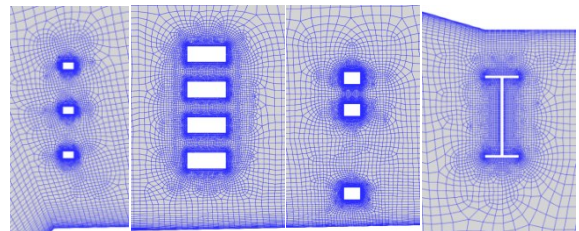
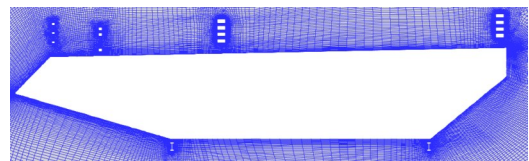


图6 计算域网格布置

Figure 6 Meshing of the computational domain



(a) 附属设施



(b) 主梁壁面

图7 局部网格划分

Figure 7 Local meshing

数值计算采用循序渐进的模拟方法,以平抑初始场计算导致的数值振荡。先采用非定常一阶k- ϵ 模型和标准的SIMPLE算法,当非定常迭代残差趋于稳定后,停止计算并改为k- ω SST模型,采用速度-压力解耦的SIMPLEC算法,压力方程采用二阶格式离散,动量方程、湍动能方程和湍流耗散率方程均采用QUICK格式。指定连续方程、速度场、k和 ω 的迭代收敛残差为 1×10^{-6} 。

网格尺寸和时间步长均对CFD数值模拟的结果影响较大,为保证数值模拟的高效性和准确性,需进

行网格尺寸和时间步长无关性检查。由于靠近主梁壁面区域的网格布置对计算结果影响较大,本文检验网格无关性选用的G1、G2、G3三套网格主要区别是Z1和Z2区域的网格布置,包括沿主梁断面轴向和法向网格的数量及首层网格的高度。G1、G2和G3沿法向均布置80个网格,沿主梁断面轴向分别布置620、732和968个网格,首层高度分别为 8×10^{-4} 、 8×10^{-4} 和 5×10^{-4} ,网格总数分别为80 223、128 169和182 078。基于上述三套网格分别开展静止绕流数值模拟,模拟雷诺数为 3.55×10^{-5} ,时间步长取0.000 1 s,各网格计算收敛得到的主梁气动三分力系数如表2所示。

表2 网格无关性检查计算结果

网格	升力系数 C_L	阻力系数 C_D	扭矩系数 C_M
G1	-0.068	0.809	-0.002
G2	-0.079	0.825	-0.001
G3	-0.073	0.824	-0.002

由表2对比模拟结果可知:G1网格模拟的 C_L 及 C_D 值较小,G3网格的网格分辨率明显高于G2,模拟得到的主梁气动三分力系数与G2网格的结果差别很小,说明此时模拟结果已与网格无关,综合考虑计算量与计算精度,本文选用G2网格开展后续模拟。图8为G2网格计算收敛时主梁表面 y^+ 值分布, y^+ 最大值为0.99,满足计算要求。为开展时间无关性检查,分别计算了0.000 5 s、0.000 2 s和0.000 1 s三种时间步长,计算结果如表3所示,当 $\Delta t \leq 0.000 2$ s时,模拟结果与计算时间步长无关,本文时间步长取0.000 2 s。

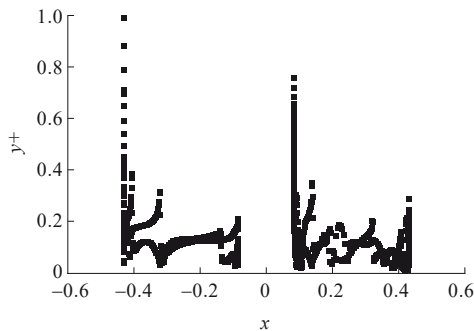


图8 主梁表面 y^+ 值分布

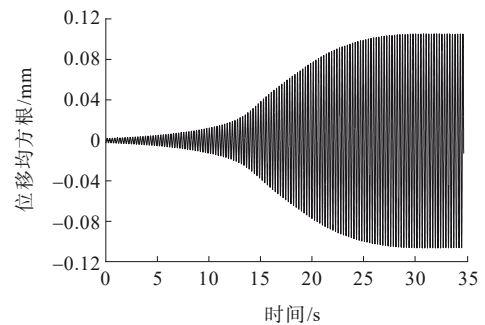
Figure 8 y^+ distribution on main girder surface

当折减风速为1.001时,主梁的竖向涡振振幅取得最大值,其位移时间曲线以及频谱分析结果如图9所示。由时间位移曲线可知,在涡振区间内振幅逐

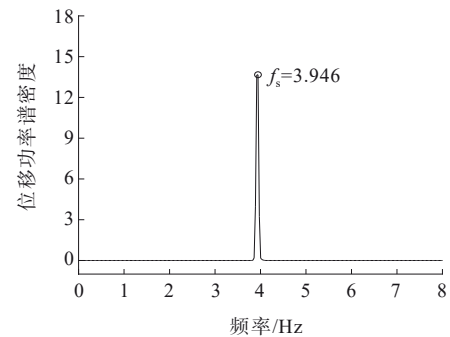
渐增大最终趋于稳定。由频谱分析可知,位移时程的卓越频率为3.946 Hz,与断面结构的固有频率3.93 Hz非常接近。

表3 时间无关性检查计算结果

时间步长 $\Delta t/s$	升力系数 C_L	阻力系数 C_D	扭矩系数 C_M
0.000 5	-0.080	0.802	-0.007
0.000 2	-0.075	0.825	-0.002
0.000 1	-0.073	0.824	-0.002



(a) 位移时间曲线



(b) 位移时间曲线功率谱分析

图9 折减风速 $V_r=1.001$ 下的位移时程曲线及频谱分析

Figure 9 Displacement time history curve and spectrum analysis under reduced wind speed $V_r=1.001$

4 检修轨道对涡振的影响机理

本文选取折减风速 $V_r=1.001$ 时,有检修轨道主梁断面在稳态振幅下的一个振动周期进行分析,具体研究了如图10所示的4个典型时刻。各时刻对应的主梁周围流场云图和流线分布如图11所示。对于上游箱梁,气流沿风嘴上斜腹板向上流动,并在检修道护栏和人行道护栏等位置处产生流动分离形成小尺度分离涡,这些小尺度分离涡沿箱梁上游区域向中部移动,逐渐融合发展成大尺度旋涡,并在主梁上表面形成负压区,该大尺度旋涡穿过防撞护栏后发生脱落。同时,由于检修轨道的存在,气流在箱梁底

板发生分离,形成另一个大尺度旋涡。该旋涡流经下游检修轨道后脱落。上、下表面的旋涡交替发生脱落,在两箱之间的间隙向后运动,直至与下游箱梁腹板碰撞再次发生分离,与下游箱梁顶板前缘防撞栏杆分离作用产生的旋涡融合,形成一个新的大尺度旋涡,沿着顶板向后运动并脱落。下游箱梁的底板由于检修轨道的分离作用也形成一个小尺度旋涡,沿着底板向后运动并发生了脱落。由此可见,原设计断面发生竖向涡振的原因是:主梁上下表面发生周期性旋涡脱落,产生较大的表面压力差,从而形成了周期性的涡激力。综上所述,气流分离与旋涡脱落模式对主梁涡振起决定性作用,而检修道护栏、人行道护栏、防撞护栏和检修轨道等附属设施对主梁表面的气流分离与旋涡脱落模式有较大影响。

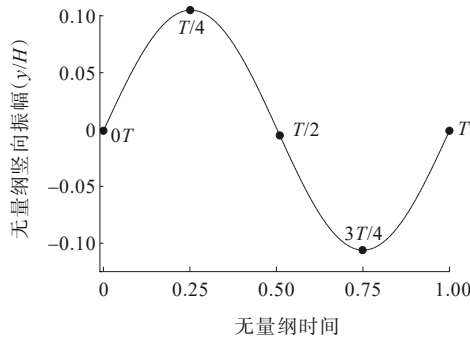


图10 稳态振幅下的一个振动周期

Figure 10 A vibration period at steady-state amplitude

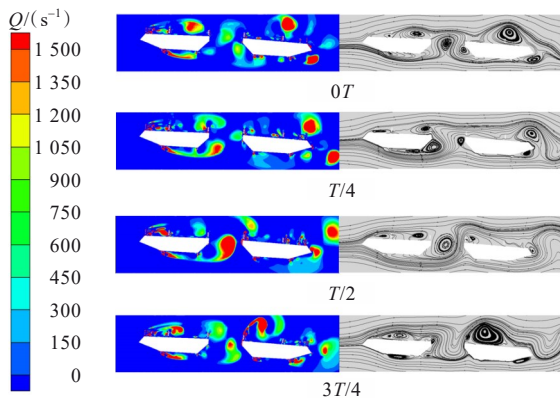


图11 有检修轨道主梁一个振动周期内涡量云图和流线图

Figure 11 Vorticity contour and streamlines of main girders with maintenance rails in a vibration period

图12为折减风速 $V_r=1.001$ 时,无检修轨道主梁断面在稳态振幅下一个振动周期内典型时刻涡量云图和流线分布图。对比图11和图12的涡量云图可知,无检修轨道主梁断面上表面的流动现象与有检修轨道主梁断面类似,气流在各护栏位置处发生分

离形成旋涡,并向下游不断漂移、融合形成大尺度旋涡,最后流经背风侧护栏发生脱离至尾流区。去除检修轨道后,主梁下表面仅在底板截面突变位置处涡量值较大,其他区域的涡量值均很小。另外,由流线图可知,上、下游箱梁的下表面仅在背风侧的尾流区发生了旋涡脱落,其他位置均未形成明显的旋涡与旋涡脱落现象。图13对比了有、无检修轨道主梁 $T/4$ 时刻底板局部流线。

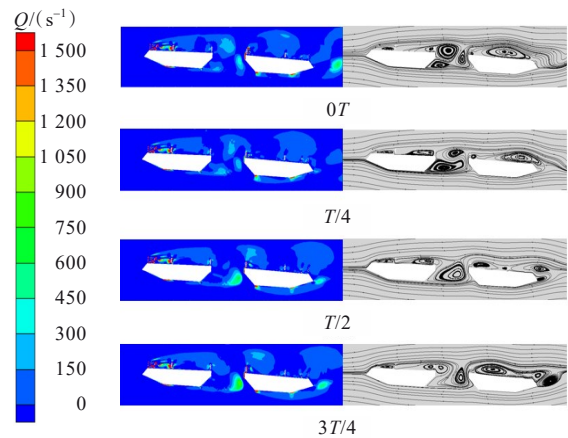


图12 无检修轨道主梁断面一个振动周期内涡量云图和流线图

Figure 12 Vorticity contour and streamlines of main girder sections without maintenance rails in a vibration period

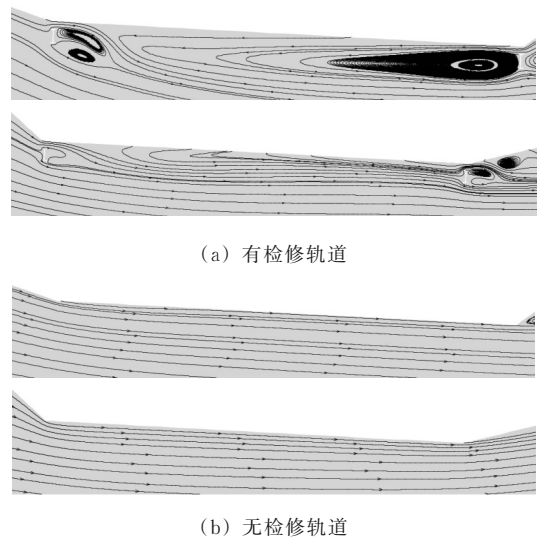


图13 有、无检修轨道的主梁局部 $T/4$ 时刻流线图对比

Figure 13 Streamline comparison of main girders with and without maintenance rails at $T/4$

由图13可知:去除检修轨道后,上游箱梁底板以及下游箱梁底板处均无明显的气流分离现象。综上所述,去除检修轨道后改变了主梁表面的旋涡脱落

模式,使主梁上、下表面的压力差减小,从而达到了抑制主梁涡振振幅的效果。

5 结论

通过对某双分体式斜拉桥主梁断面节段模型开展风洞试验及数值模拟,分别研究了有、无检修轨道成桥断面的竖弯涡振,得出以下主要结论:

(1) 有检修轨道断面会发生较大竖向振动,移除检修轨道能明显降低主梁竖向涡振振幅。

(2) 有检修轨道断面发生竖向涡振的机理是:主梁上、下表面发生周期性旋涡脱落,导致主梁上、下表面出现较大的压力差,从而形成周期性的涡激力引起涡激振动。

(3) 去除检修轨道后破坏了有检修轨道主梁断面上、下表面发生的周期性旋涡脱落模式,从而达到抑制主梁涡振振幅的效果。

本文研究了检修轨道对分体式钢箱梁涡激振动的影响机理,后续可开展稳定板、中央隔板等其他气动措施对分体式钢箱梁涡激振动影响机理的研究。

参考文献:

References:

- [1] LI H, LAIMA S J, OU J P, et al. Investigation of vortex-induced vibration of a suspension bridge with two separated steel box girders based on field measurements [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(6): 1894-1907.
- [2] LARSEN A, SAVAGE M, LAFRENIÈRE A, et al. 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.
- [3] 王骑, 林道锦, 廖海黎, 等. 分体式钢箱梁涡激振动特性及制振措施风洞试验研究 [J]. *公路*, 2013, 58(7): 294-299.
WANG Qi, LIN Daojin, LIAO Haili, et al. Wind tunnel test study on vortex-induced vibration characteristics and vibration control measures of split steel box girder [J]. *Highway*, 2013, 58(7): 294-299.
- [4] ZHAO L, CUI W, SHEN X M, et al. A fast on-site measure-analyze-suppress response to control vortex-induced-vibration of a long-span bridge [J]. *Structures*, 2022, 35: 192-201.
- [5] 曾旻, 刘汉云, 毛娜, 等. 山区 II 形梁斜拉桥涡振气动优化试验研究 [J]. *中外公路*, 2025, 45(3): 130-136.
ZENG Min, LIU Hanyun, MAO Na, et al. Study on aerodynamic optimization of II-shaped cable-stayed bridge with vortex-induced vibration in mountainous areas [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2025, 45(3): 130-136.
- [6] 葛耀君, 赵林, 许坤. 大跨桥梁主梁涡激振动研究进展与思考 [J]. *中国公路学报*, 2019, 32(10): 1-18.
GE Yaojun, ZHAO Lin, XU Kun. Review and reflection on vortex-induced vibration of main girders of long-span bridges [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(10): 1-18.
- [7] 黄林, 董佳慧, 王骑, 等. 导流板倾斜角度对 II 型叠合梁涡振性能的影响研究 [J]. *振动工程学报*, 2024, 37(1): 40-51.
HUANG Lin, DONG Jiahui, WANG Qi, et al. Influence of the guide vane inclination angle on the vortex-induced vibration performance of the II-shaped composite girder [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2024, 37(1): 40-51.
- [8] 胡传新, 官绪龙, 赵林, 等. 典型流线型箱梁扭转涡激气动力的简化涡模式与气动措施抑振机理 [J]. *振动工程学报*, 2025, 38(2): 302-309.
HU Chuanxin, GUAN Xulong, ZHAO Lin, et al. Simplified vortex modes of torsional vortex-excitation forces in a typical streamlined box girder and its suppression mechanism with aerodynamic countermeasures [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2025, 38(2): 302-309.
- [9] 胡传新, 周志勇, 姜保宋. 气动措施对双主跨斜拉桥静风稳定影响研究 [J]. *振动工程学报*, 2020, 33(2): 304-313.
HU Chuanxin, ZHOU Zhiyong, JIANG Baosong. Effects of aerodynamic measurements on aerostatic instability of a cable-stayed bridge with double main spans [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2020, 33(2): 304-313.
- [10] 赵林, 李珂, 王昌将, 等. 大跨桥梁主梁风致稳定性被动气动控制措施综述 [J]. *中国公路学报*, 2019, 32(10): 34-48.
ZHAO Lin, LI Ke, WANG Changjiang, et al. Review on passive aerodynamic countermeasures on main girders aiming at wind-induced stabilities of long-span bridges [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(10): 34-48.
- [11] 段青松, 马存明, 何知明, 等. 窄幅流线型箱梁竖向涡激振动性能研究 [J]. *桥梁建设*, 2025, 55(4): 101-107.
DUAN Qingsong, MA Cunming, HE Zhiming, et al. Research on vertical vortex-induced vibration performance of streamlined narrow box girders [J]. *Bridge Construction*, 2025, 55(4): 101-107.
- [12] 方根深, 杨詠昕, 葛耀君, 等. 半开口分离双箱梁涡振性能及其气动控制措施研究 [J]. *土木工程学报*, 2017, 50(3): 74-82.
FANG Genshen, YANG Yongxin, GE Yaojun, et al. Vortex-induced vibration performance and aerodynamic countermeasures of semi-open separated twin-box deck [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(3): 74-82.
- [13] 喻宝金, 乔张旺, 付丽. 风屏障对扁平箱梁气动稳定性的影响 [J]. *中外公路*, 2020, 40(2): 99-102.
YU Baojin, QIAO Zhangwang, FU Li. Influence of wind barrier on aerodynamic stability of flat box girder [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2020, 40(2): 99-102.
- [14] 刘叶, 韩艳, 胡朋, 等. 风屏障对平层公铁桥上列车气动特性影响的风洞试验研究 [J]. *振动工程学报*, 2022, 35(2): 284-296.
LIU Ye, HAN Yan, HU Peng, et al. Wind tunnel test studies on the influences of wind barrier on the aerodynamic

- characteristics of trains on a highway and railway same-story bridge[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2022, 35(2): 284-296.
- [15] 黄林,董佳慧,王骑,等.检修车轨道位置与导流板对扁平箱梁涡振的影响[J]. *西南交通大学学报*, 2023, 58(3): 535-545.
HUANG Lin, DONG Jiahui, WANG Qi, et al. Study on the influence of maintenance rail position and guide vane on vortex-induced vibration performance of wide flat steel box girder[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2023, 58(3): 535-545.
- [16] 孟晓亮,朱乐东,丁泉顺.检修车轨道位置对半封闭分离双箱桥梁断面涡振性能的影响[C]//北京:第十四届全国结构风工程学术会议论文集(中册), 2009.
Meng Xiaoliang, Zhu Ledong, Ding Quanshun. Influence of maintenance vehicle track position on vortex-induced vibration performance of semi-enclosed separate double-box girder bridge sections[C]// Beijing: Proceedings of the 14th National Conference on Wind Engineering (Volume II), 2009.
- [17] 孙延国,廖海黎,李明水.基于节段模型试验的悬索桥涡振抑振措施[J]. *西南交通大学学报*, 2012, 47(2): 218-223, 264.
SUN Yanguo, LIAO Haili, LI Mingshui. Mitigation measures of vortex-induced vibration of suspension bridge based on section model test[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2012, 47(2): 218-223, 264.
- [18] 孙洪鑫,黄文俊,温青,等.分体式钢箱梁竖向涡振检修轨道气动措施风洞试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(12): 4636-4644.
SUN Hongxin, HUANG Wenjun, WEN Qing, et al. Aerodynamic countermeasures of maintenance rail for vertical vortex-induced vibration of twin steel box girder based on wind tunnel test[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(12): 4636-4644.
- [19] 任蒙,易蓓,冯鹏程.莫桑比克马普托跨海大桥设计关键技术研究[J]. *中外公路*, 2020, 40(6): 114-119.
REN Meng, YI Bei, FENG Pengcheng. Research on key design techniques for Maputo cross-sea bridge in Mozambique[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2020, 40(6): 114-119.
- [20] 李春光,陈政清,韩阳.带悬挑人行道板流线型箱梁涡振性能研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(24): 19-25.
LI Chunguang, CHEN Zhengqing, HAN Yang. Vortex induced vibration performance of a streamlined box girder with a cantilevered walking slab[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(24): 19-25.
- [21] HU C X, ZHAO L, GE Y J. Mechanism of suppression of vortex-induced vibrations of a streamlined closed-box girder using additional small-scale components[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 189: 314-331.
- [22] 祝志文,石亚光,颜爽.带防撞栏杆扁平箱梁高阶模态涡激振动的CFD研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(10): 228-234, 277.
ZHU Zhiwen, SHI Yaguang, YAN Shuang. Investigation on vortex-induced high-mode vibrations of flat box girders with crash barriers based on CFD[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(10): 228-234, 277.
- [23] LAIMA S J, LI H, CHEN W L, et al. Effects of attachments on aerodynamic characteristics and vortex-induced vibration of twin-box girder[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2018, 77: 115-133.
- [24] 刘志文,江智俊,黎晓刚,等.流线型钢箱梁涡激振动机理与气动控制措施[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(11): 133-146.
LIU Zhiwen, JIANG Zhijun, LI Xiaogang, et al. Study on mechanism and aerodynamic control measures for vortex-induced vibration of a streamlined-box steel girder[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(11): 133-146.
- [25] 檀忠旭,郭国和,朱乐东,等.分体箱梁中央隔涡板涡激振动抑制机理研究[J]. *振动与冲击*, 2024, 43(6): 189-195, 215.
TAN Zhongxu, GUO Guohe, ZHU Ledong, et al. Mechanism of the vortex-induced vibration control for twin-box girders with central baffle plates[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(6): 189-195, 215.
- [26] 黄林,董佳慧,陈晨,等.整流罩组合措施外形对Π形叠合梁斜拉桥涡振性能的影响[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(1): 124-134.
HUANG Lin, DONG Jiahui, CHEN Chen, et al. Influence of the fairing combination measure shape on the vortex-induced vibration performance of a cable-stayed bridge with Π-shaped composite girder[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(1): 124-134.
- [27] 同济大学.公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01—2018[S].北京:人民交通出版社 2018.
Tongji University. Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.