

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.039

引用格式:李加武,曹晟阁,罗爽,等. L 型导流板对钢箱梁涡振的影响及机理[J]. 重庆大学学报, 2026,49(5): 94-106.



L 型导流板对钢箱梁涡振的影响及机理

李加武¹, 曹晟阁¹, 罗爽², 杨鑫³

(1. 长安大学公路学院, 西安 710064; 2. 成都清正公路工程试验检测有限公司, 成都 610041;

3. 中交路桥建设有限公司, 北京 100000)

摘要:为研究 L 型导流板对钢箱梁涡振特性的影响, 设计了 20 种试验工况, 并开展 +5° 风攻角下的节段模型测振风洞试验, 分析了水平板宽度与竖板高度在不同几何参数条件下的涡振响应规律。同时, 基于 CFD 的方法进行数值模拟, 结合 Ω 识别法提取涡结构, 揭示其对涡振演化机制的影响。结果表明, 水平板越宽, 对竖弯涡振的抑制效果越显著, 涡振区间向高风速区平移; 竖板高度对扭转涡振影响显著, 其高度增加易诱发高风速区的扭转涡振; 水平板加宽减小了带状涡宽度, 从而优化流场, 竖板增高催生并扩大了涡团, 使流场趋于复杂; 当附属构件的涡与主梁周边涡的结构量级相当时, 才能发挥抑制振动作用。

关键词:导流板; 涡激振动; 风洞试验; 钢箱梁; CFD

中图分类号: U441.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2026)05-094-13

Influence of L-shaped flow deflectors on vortex-induced vibration of steel box girders and underlying mechanisms

LI Jiawu¹, CAO Shengge¹, LUO Shuang², YANG Xin³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China; 2. Chengdu Qingzheng Highway Engineering Test and Detection CO, LTD., Chengdu 610041, P. R. China; 3. Road & Bridge International CO, LTD., Beijing 100000, P. R. China)

Abstract: To study the influence of L-shaped flow deflectors on the vortex-induced vibration (VIV) characteristics of steel box girders, a series of 20 test cases was designed. A sectional model wind tunnel test was carried out under a +5° wind attack angle to analyze the VIV response patterns associated with variations in horizontal plate width and vertical plate height. In parallel, computational fluid dynamics (CFD) simulations were performed, and the vortex structures were extracted using the Ω vortex identification method to reveal the underlying VIV evolution mechanism. The results show that increasing the horizontal plate width significantly enhances the suppression of vertical bending VIV, while shifting the VIV lock-in region toward higher wind speeds. In contrast, the vertical plate height strongly influences torsional VIV; larger heights tend to induce torsional vibration in the

收稿日期: 2025-11-03 网络出版日期: 2025-11-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978077)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51978077).

作者简介: 李加武(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事桥梁风洞研究, (E-mail)ljw@gl.chd.edu.cn。

high wind speed regime. Flow field analysis shows that widening the horizontal plate reduces the spanwise extent of vortex structures, thereby improving flow uniformity. Conversely, increasing the vertical plate height promotes the formation and development of vortex clusters, leading to a more complex flow field. Effective vibration mitigation is achieved only when the vortices generated by the attached components are of a comparable scale to those shed from the main girder, enabling interference with the dominant vortex-shedding process.

Keywords: flow deflector; vortex-induced vibration; wind tunnel test; steel box girder; CFD

近年来,随着桥梁跨径的增大,结构向着轻柔化发展,桥梁结构的风致振动问题愈加突出。当气流绕经桥梁结构时,会在其两侧形成交替脱落的旋涡,导致表面压力分布发生周期性变化,当旋涡脱落频率与桥梁的固有频率接近,就会引发桥梁结构的涡激振动^[1]。进而引发频率锁定、稳定分支等气动非线性现象^[2],如2020年虎门大桥发生的显著涡激振动现象^[3-4]。

在众多抑振措施中,主要有结构措施与气动措施^[5-6]。在结构措施方面,Dai等^[7]和Xu等^[8]通过在主梁上设置TMD进行涡振控制。相比之下,气动措施兼具经济与实用特性。张宏杰等^[9]发现通过在带风嘴的钢箱梁加装悬臂水平分离板,可以提高水平颤振临界风速。康福军等^[10]在风洞试验中,通过调整某一钢箱梁两侧导流板的角度,发现能够在部分工况下有效缓解涡振问题。自塞文桥建成后,以钢箱梁为设计方案的大跨桥梁通常在主梁两端设置导流板,使断面更趋近流线型,提高桥梁的抗风性能^[11]。

针对L型导流板对桥梁涡振性能的影响,已有较多研究。Li等^[12]提出对于典型钢箱梁截面,设置尖边风攻角、安装L形导流板等可抑制涡激振动。吴明远等^[13]研究主跨1 098 m的龙门大桥时,提出了新型的L型“紊流制振”导流板。研究发现,与传统的Y型导流板相比,这种新型导流板能够显著提升该大跨径悬索桥在各种攻角下的颤振临界风速,有效增强了桥梁的抗风稳定性。王峰等^[14]聚焦L型导流板的竖板在不同高度与倾角下对II型断面涡振性能的影响,发现导流板和主纵梁之间形成的回流区,改变了顶端的分离涡脱模式,L型导流板的抑振效果主要在迎风侧体现。王路等^[15]以闭口钢箱梁为研究对象,发现在其两端设置L型导流板后涡振性能的变化规律。在正攻角的工况下,L型导流板尺寸的大小对扭转涡振的抑制起关键作用,尺寸越大抑制效果越明显。肖天宝^[16]针对分离式双箱梁展开研究,发现L型导流板对其扭转涡振具有明显的抑制作用,其中水平板占主导。当水平板的尺寸固定,竖板长度越大,箱梁的涡振性能提升越大。

综上所述,对于分离式双箱梁和无附属设施的单幅钢箱梁,L型导流板对其涡振响应的研究较为充分。对于带栏杆的单幅钢箱梁研究较少,文中将深入研究L型导流板对其涡振特性的影响及机理,为实际工程提供参考。

1 涡振特性

1.1 试验概况

为分析L型导流板钢箱梁的涡振特性,在+5°攻角,开展节段模型测振实验。主梁模型几何缩尺比为1:60,竖弯阻尼比为2.8‰,扭转阻尼比为2.6‰,模型如图1所示。

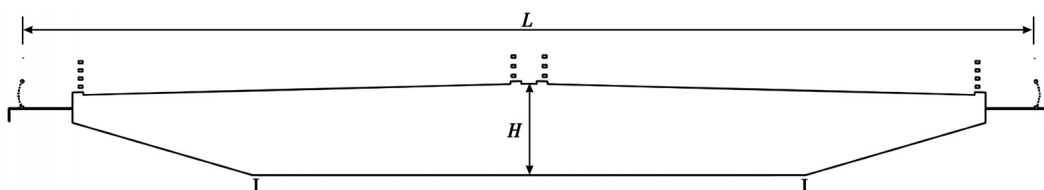


图1 主梁模型

Fig. 1 Main girder model

1.2 参数定义

图2为L型导流板示意图,对相关参数无量纲化:

$$\text{竖弯折减风速 } V_{rs} = V/(f_s \cdot L), \quad (1)$$

$$\text{扭转折减风速 } V_{rm} = V/(f_n \cdot L), \quad (2)$$

$$\text{无量纲化的水平板宽度 } A = a/L, \quad (3)$$

$$\text{无量纲化的竖板长度 } B = b/H, \quad (4)$$

$$\text{无量纲化的竖向振幅 } S = s/H, \quad (5)$$

式中: f_s 为模型竖弯频率(1.47 Hz); f_n 为模型扭转频率(3.42 Hz); V 为试验风速; L 为模型梁宽($L=670$ mm); H 为模型梁高($H=68$ mm); a 为模型水平板长度; b 为模型竖板长度; s 为实测竖向振幅。

水平板无量纲尺寸 A 分别取为 0.06、0.07、0.08、0.09、0.10,竖板无量纲尺寸 B 分别取为 0、0.1、0.2、0.3,正交组合后共有 20 种工况。

1.3 竖弯涡振

1.3.1 水平板的影响

各折减风速下的竖弯幅值如图3所示。固定竖板高度为0.3,发现水平板宽为0.06时,振幅最大;当宽度为0.07时,出现急剧下降,水平板宽度达到0.09后,涡振消失。由图可知,涡振幅值随水平板增加而降低,当水平板超过0.09后,竖弯涡振消失。随着水平板宽度增加,竖弯涡振幅值减小,将使竖弯涡振区间向高风速区平移。

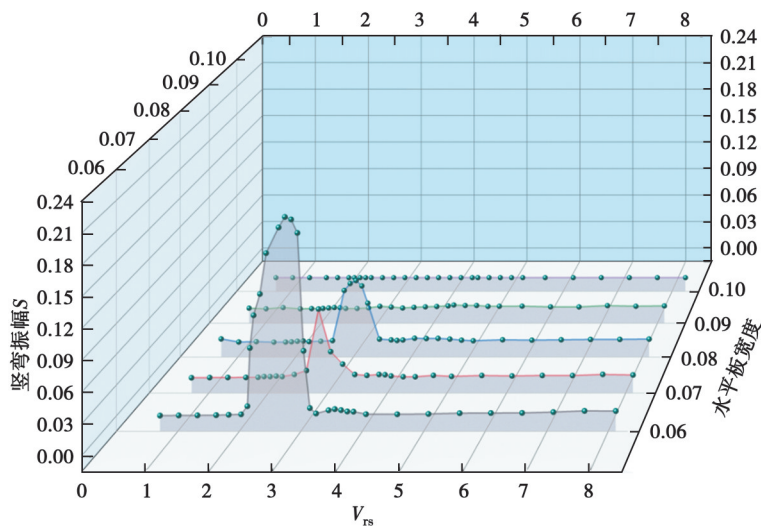


图3 水平板对竖弯响应影响

Fig. 3 Influence of the horizontal plate on the vertical bending response

1.3.2 竖板的影响

各折减风速下的竖弯响应如图4所示。固定水平板宽度为0.07,竖板高0.1时,涡振峰值最大,而增加竖板高度到0.2甚至0.3,只是振幅略有降低。

对竖弯涡振而言,竖板高度存在1个临界值,试验断面的临界高度为0.1,该值处的涡振峰值最大。改变竖板高度对竖弯峰值影响不显著。

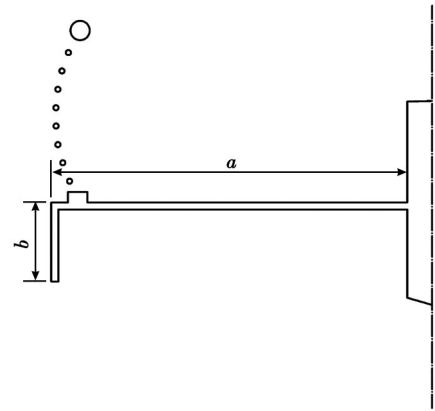


图2 L型导流板的尺寸

Fig. 2 Dimensions of the L-shaped flow deflector

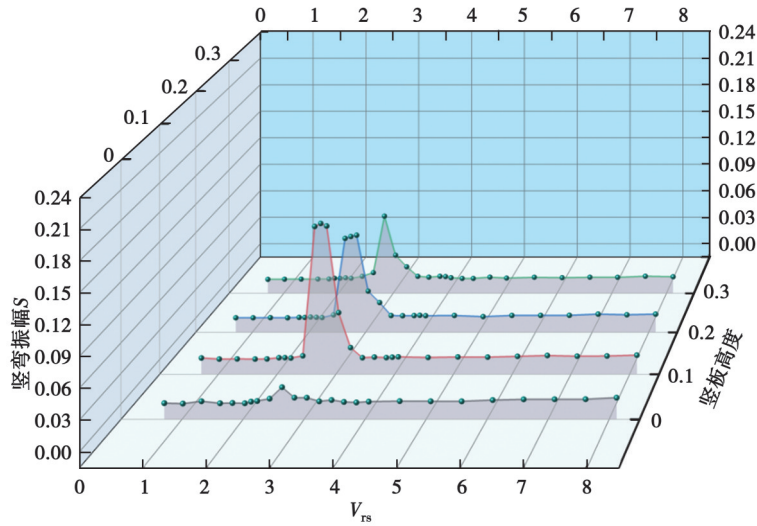


图 4 竖板对竖弯响应影响

Fig. 4 Influence of the vertical plate on the vertical bending response

1.4 扭转涡振

1.4.1 水平板的影响

各折减风速下的扭转响应如图 5 所示。固定竖板高度为 0.3,可见所有宽度的水平板都出现了 2 个扭转涡振区间。低风速扭转涡振的峰值振幅与水平板宽度成正相关,低风速和高风速的扭转区间均随着水平板宽度增加而不同程度向高风速平移。

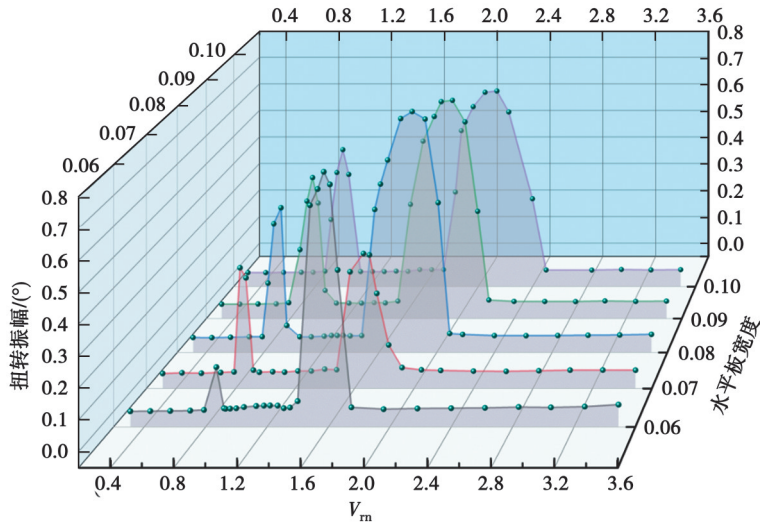


图 5 水平板对扭转响应影响

Fig. 5 Influence of the horizontal plate on the torsional response

1.4.2 竖板的影响

各折减风速下的扭转响应如图 6 所示。固定水平板宽度为 0.09,当竖板高为 0 和 0.1 时,仅在低风速条件下出现扭转涡振。当高度增至 0.2 后,低风速下的扭转幅值增大,幅度达到 0.4°~0.5°。并且高风速扭转涡振出现,部分幅值甚至达到 0.7°。高风速区间在 $V_m=1.7$ 附近,约为低风速区间的 2 倍。

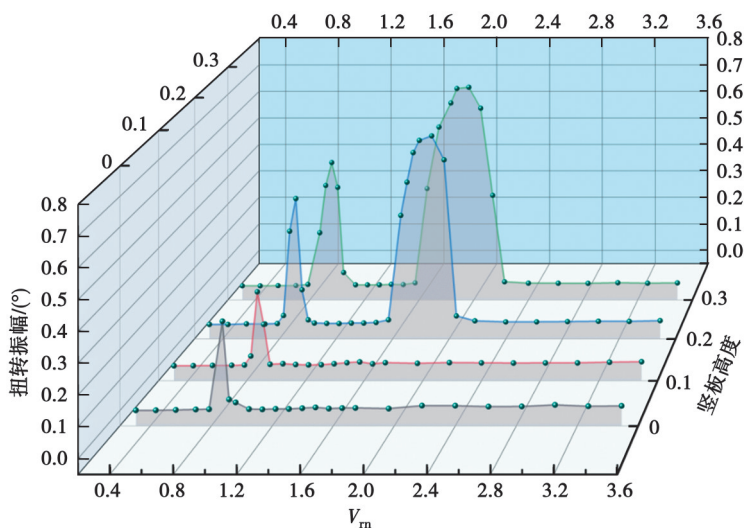


图6 竖板对扭转响应影响

Fig. 6 Influence of the vertical plate on the torsional response

对扭转涡振而言,固定竖板为0.3,水平板尺寸越大,涡振区间向高风速区平移越显著。固定水平板为0.09,竖板尺寸越大,越不利于涡振抑制。

2 涡振机理探索

由于风洞试验存在一定局限性,对于断面绕流特性难以深入剖析。因此,后续选用 SST $k-\omega$ 湍流模型进行数值模拟。与风洞试验结果相结合,从不同工况下的流场特征分析涡振响应的变化规律,进而深入研究桥梁抗风性能。

2.1 数值模型

首先,建立数值模型,主梁及细部构造尺寸与模型尺寸保持一致,将计算域划分为网格加密区、网格扩散区和网格松散区,如图7所示。在前处理时,设置边界层网格,计算域整体的网格以及细部网格划分如图8所示。文中采用十层边界层矩形网格,对于附属构件,设置第一层网格厚度 $\Delta=0.01$ mm,主梁网格厚度 $\Delta=0.02$ mm,其余边界层网格厚度以1.1的扩散率增长,取时间步长0.001 s。

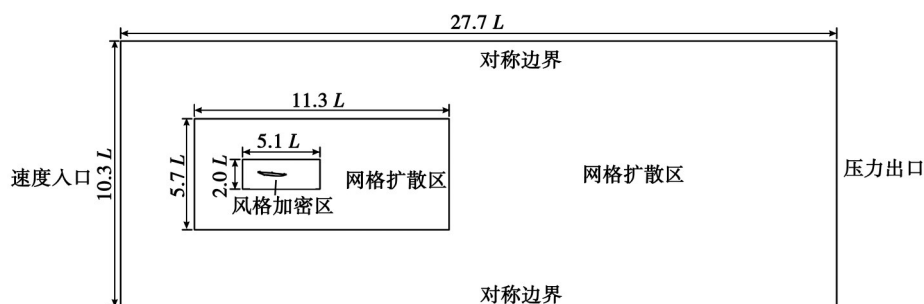


图7 计算域尺寸图

Fig. 7 The computational domain size

模拟时,只计算水平板和竖板长度差异最大的工况,取水平板为0.06,竖板为0.3,风攻角为 $+5^\circ$ 。后续计算与风洞试验一致,均采用无量纲的折减风速与竖弯振幅。

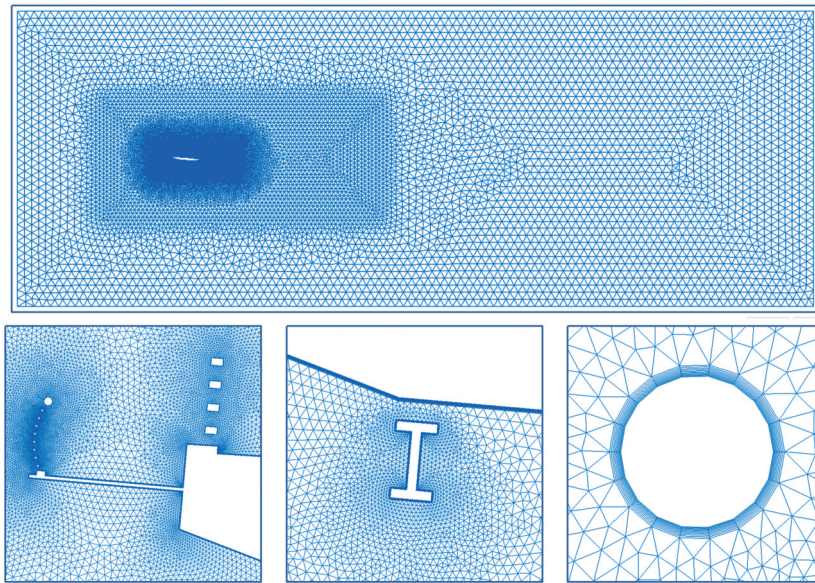


图 8 计算网格

Fig. 8 Computational grid

2.2 模型校核

对比水平板宽 0.06, 竖板高 0.3 时的竖弯响应和扭转响应, 结果如图 9 所示。可以看出, 数值模拟与风洞试验结果反映出的规律一致。

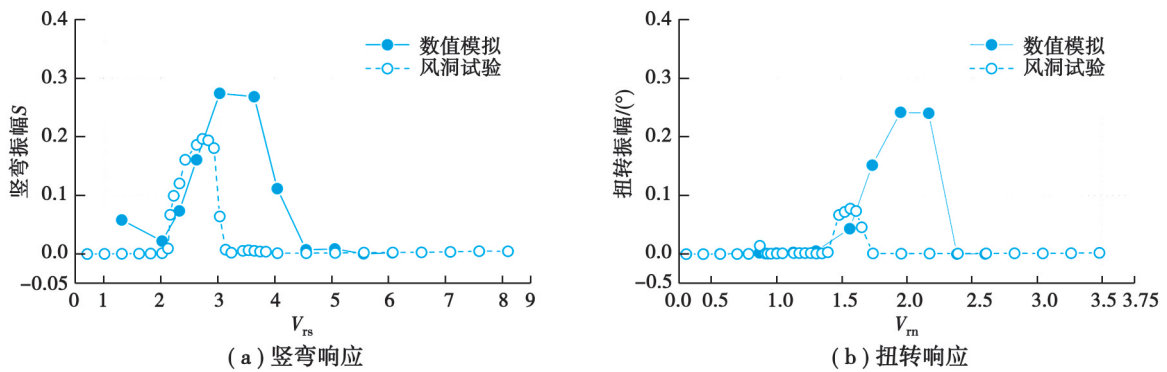


图 9 数值计算校核

Fig. 9 Numerical calculation verification

2.3 静态流场

为研究非耦合状态下 L 型导流板对周边流场的影响, 将模型固定, 探讨涡量等流场参数变化规律。在 Fluent 中, 特征尺寸采用梁宽 670 mm, 风速分别为 1.3、2.0、2.3、2.6、3.0、3.6、4.5 m/s。

2.3.1 水平板的影响

1) 对涡结构的影响

对比水平板宽 0.06 与 0.09 时的流场细部涡结构, 如图 10 所示。由图可知, 当来流经过检修道栏杆上侧扶手后绕过了护栏, 在主梁上端形成了带状涡, 随着水平板长度增大, 整体变得更加细长。由于带状涡 BV_1 位于主梁上方且分布较广, 其宽度增大更易引发涡脱。

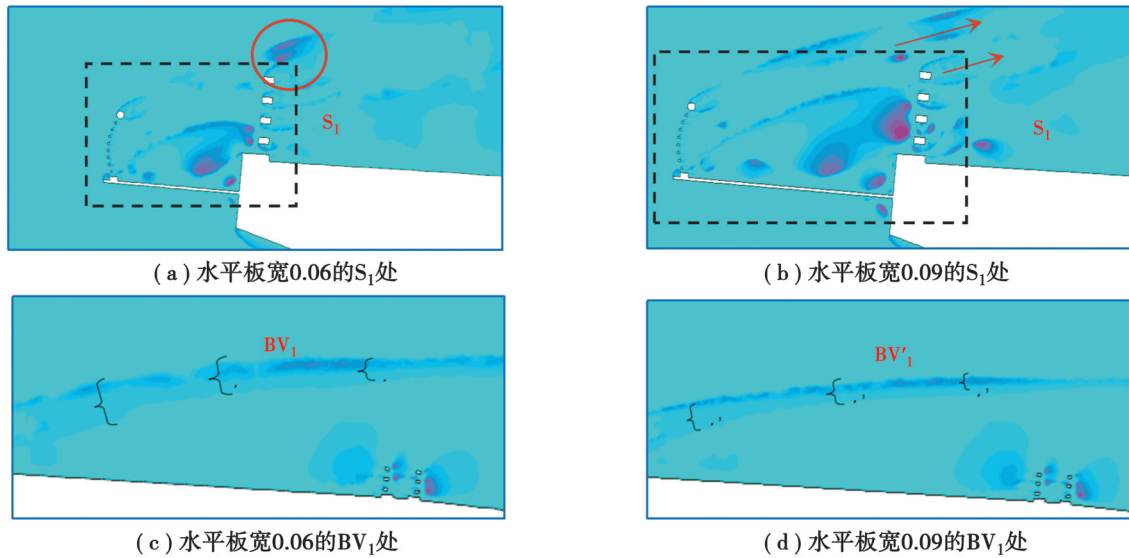
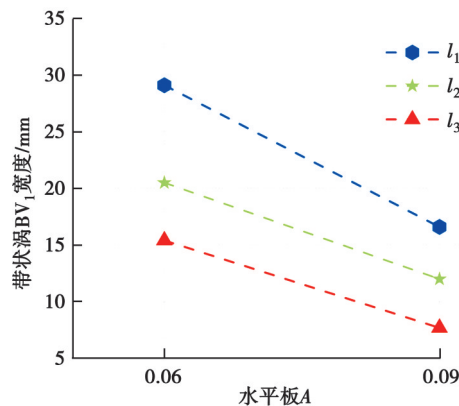


图10 水平板宽度对涡结构影响

Fig. 10 Influence of the horizontal plate width on the vortex structure

2)对涡量的影响

如图10(c)和(d)所示,在顶板上方带状涡 BV_1 的宽度从左至右分别记为 l_1 、 l_2 、 l_3 ,当水平板宽0.06时,可以看出带状涡宽度靠近断面逐渐减小,水平板增大到0.09后,相同位置的带状涡 BV_1 宽度约减小了50%,变化规律如图11所示。水平板增大,带状涡宽度减小,减弱了对主梁的作用,不易产生涡脱,进而提高桥梁竖弯稳定性。

图11 带状涡 BV_1 宽度随水平板 A 变化Fig. 11 Width variation of the zonal vortex BV_1 with horizontal plate A changes

2.3.2 竖板的影响

1)对涡结构的影响

竖板高为0与0.3时的流场细部涡结构,如图12所示。在 Ω 识别法中^[17],当涡团区域 $\Omega > 0.5$ 时,便可称为涡;若 $\Omega > 0.75$,则称为强涡。如图12(b)所示,可以看出在竖板内侧形成了2个强涡团 V_1 和 V_2 。其中,涡团 V_1 靠近竖板内侧。由于竖板的存在,正攻角的来流顺着竖板下方移动且流速下降,涡团 V_2 与其相互耦合后形成涡脱,整体强度较低。

2)对涡量的影响

如图12(c)和(d)所示,强涡 V_3 的面积为 153.7 mm^2 ,水平板下游处的涡团 V_3 与 V'_3 相比,涡团面积增幅为1.4倍;竖板外侧出现了新增涡团 V_4 ,其面积为 66.9 mm^2 ;检修道栏杆外侧的原有涡团 V_5 面积为 76.4 mm^2 ,增加竖板后 V'_5 尺寸增幅约2.3倍。具体强涡的变化规律如图13所示,由图可知,增加竖板后,不仅原有涡团尺

寸增加,还出现了3个新增涡团。

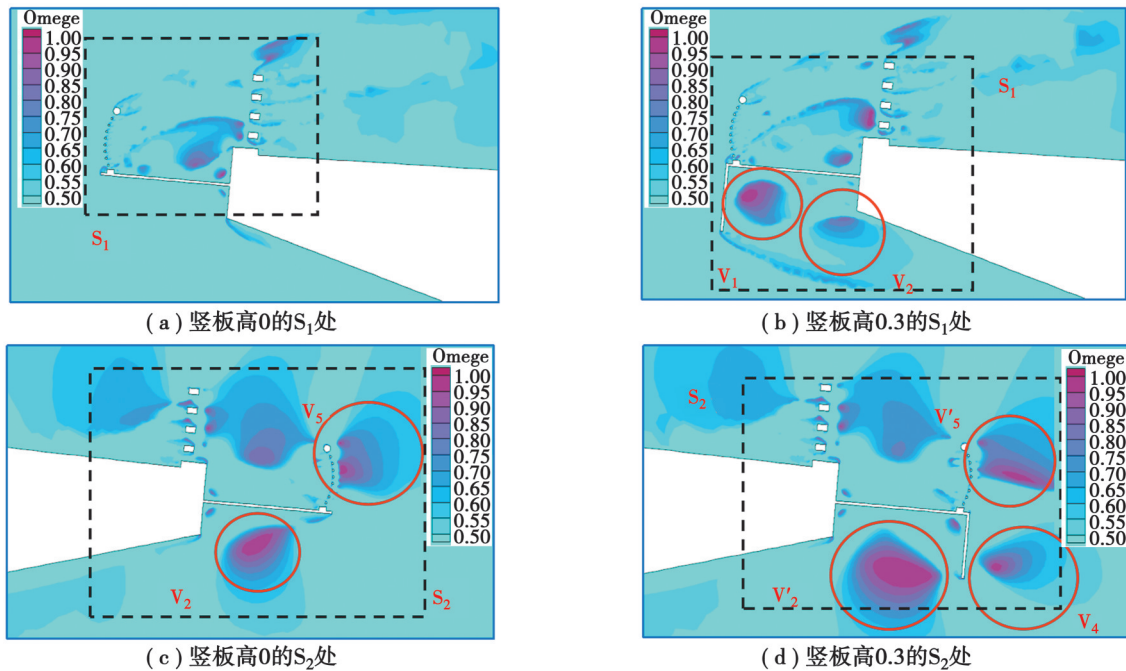


图 12 竖板高度对涡结构影响

Fig. 12 Influence of the vertical plate height on the vortex structure

主梁端部的涡团强度高且波动大,易对主梁产生较大力矩。竖板变高后,涡团尺寸增大且数量变多,端部受到的涡作用出现周期性变化,当作用频率与固有频率相近时,易发生扭转涡振。

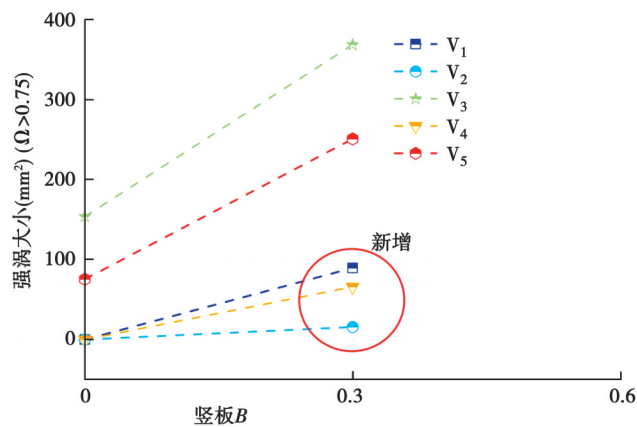


图 13 S₁、S₂处强涡随竖板 B 变化

Fig. 13 Variation of strong vortices at S₁ and S₂ with changes in vertical plate B

2.4 动态流场

2.4.1 涡量场

1) 水平板的影响

图 14 为水平板对涡结构影响。在 $nT+T/4$ 时刻,当水平板宽 0.06 时,结构上侧的涡受到压缩,与防撞护栏产生的涡相互耦合;在 $nT+3T/4$ 时刻,上侧的涡被拉伸,甚至越过了防撞护栏。随着水平板长度增加,在整个周期内,检修道栏杆处的涡团都不会对防撞护栏造成影响。

可以发现,断面尾流处均出现较大的涡脱,且与振动大小或形态无关。涡脱主要是由于静态模拟中带状涡 BV_1 和 BV_2 随着主梁的振动而摆动,进而结构振动时在迎风侧栏杆和下游检修车轨道的分离点处先后形成。当主梁竖向振动时,上下分离点产生的涡团较扁平,且脱落频率低,桥面涡团强度始终较高。

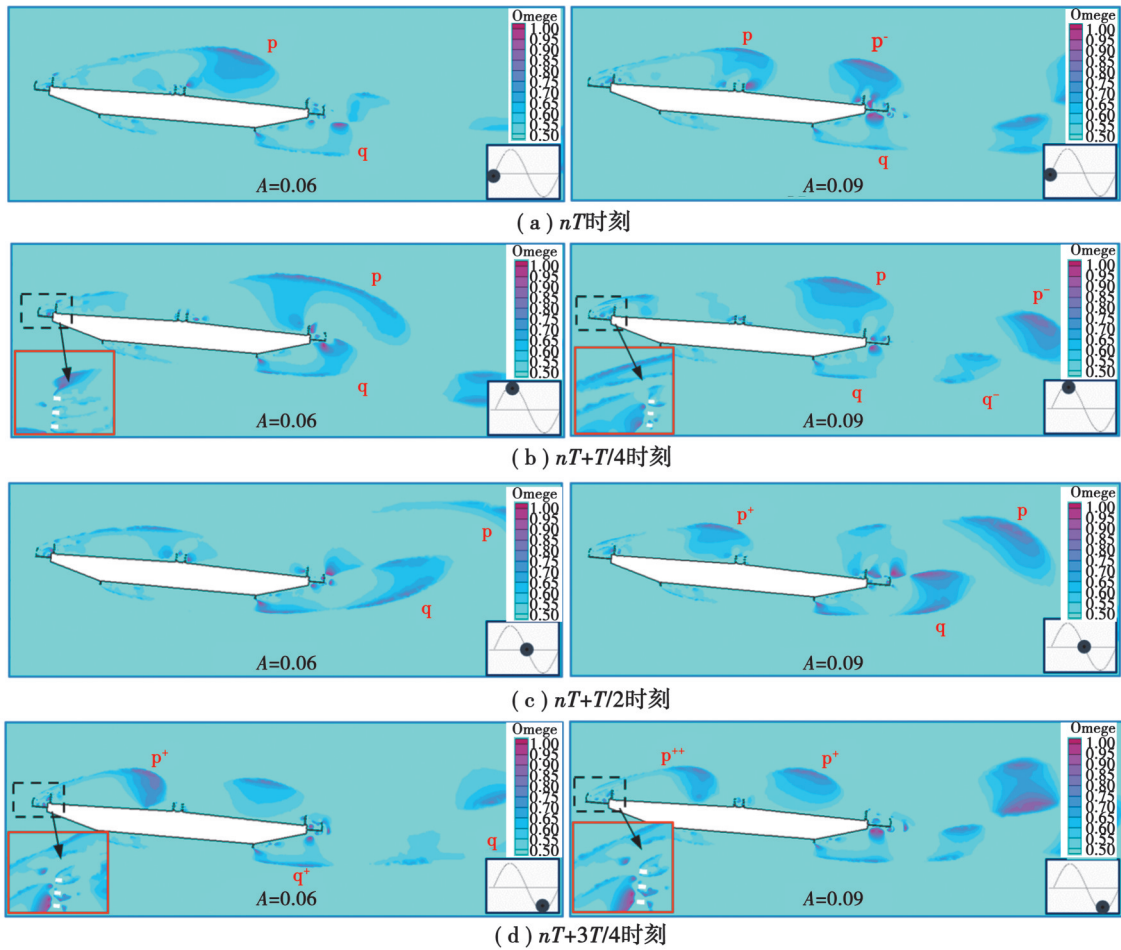


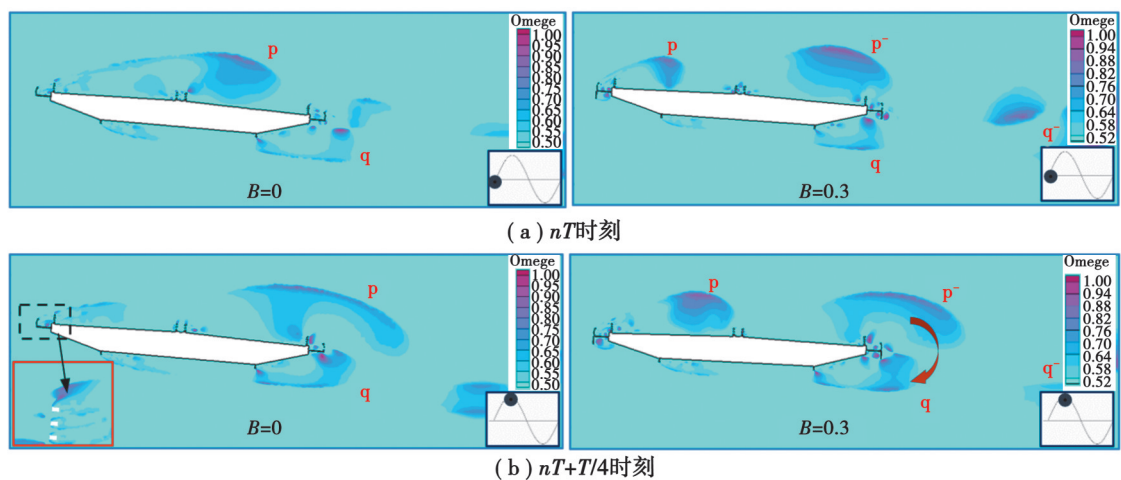
图 14 不同水平板涡结构图

Fig. 14 Vortex structure of different horizontal plates

2) 竖板的影响

图 15 为竖板对涡结构的影响。当竖板长度增加,可以看出涡团 p 和涡团 q 同时产生,但存在相位差,在一个周期内,涡团 p 沿桥面逐渐向涡团 q 移动,而涡团 q 在下游斜腹板处尺寸逐渐增大,最终与上一周期的涡团 p-相遇脱落。

在 nT 时刻,桥面涡团 p、p-与 q、q-作用抵消;在 $nT+T/4$ 时刻,涡团产生顺时针扭矩,此时上侧涡团 p-起主要作用;在 $nT+3T/4$ 时刻,下侧涡团起主要作用,产生逆时针扭矩。在整个周期,由于结构的扭转,竖板内侧



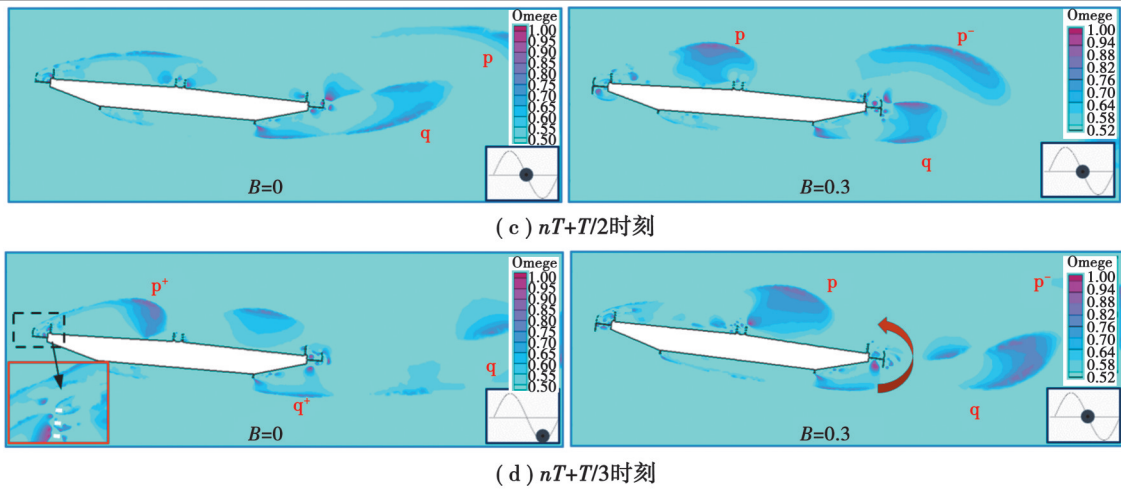


图 15 不同竖板涡结构图

Fig. 15 Vortex structure of different vertical plates

涡团强度不断变化,但其尺寸较小,并不会出现脱落。说明附属构件的涡的强度尺寸与主梁周边涡的结构量级相当时,才能发挥抑制振动作用。

2.4.1 流线图

1) 水平板的影响

图 16 为不同水平板的瞬时流线图分布。

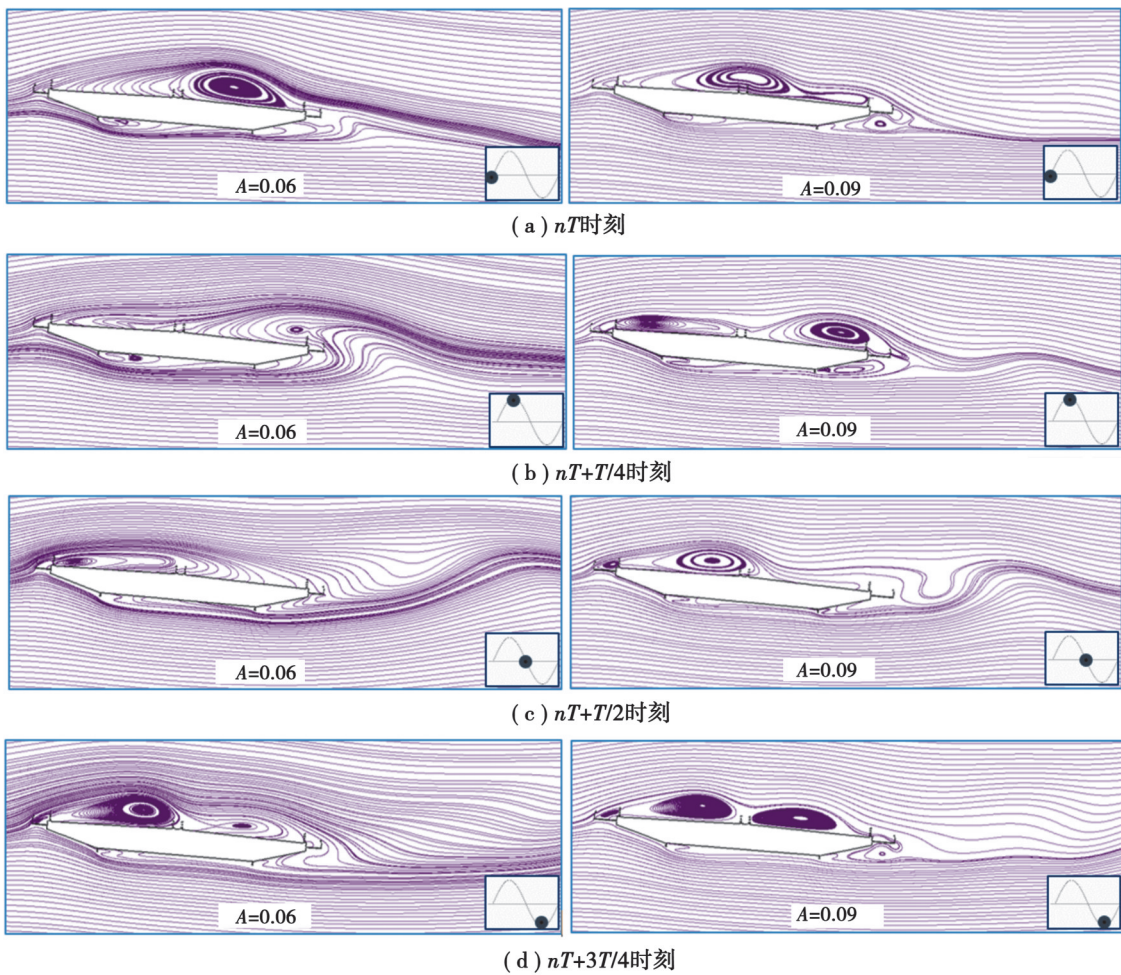


图 16 不同水平板流线图

Fig. 16 Streamline of different horizontal plates

在 nT 时刻,断面附近均形成了旋涡,但长水平板下对应的旋涡相对较小,对旋涡的约束效果更强,使旋涡尺度受到抑制。在 $nT+3T/4$ 与 $nT+T/2$ 时刻,水平板宽 0.06 时,旋涡有明显发展且流线的紊乱程度增加,随着水平板变宽,可以看出,其整体流线分布更有序,对维持流场稳定性有积极作用。在 $nT+3T/4$ 时刻,水平板宽 0.06 时,出现了新的旋涡结构且流线较紊乱;水平板宽 0.09 时,虽也有新的旋涡生成,但整体流线分布相对规则,说明长水平板对抑制复杂旋涡生成、优化流场结构效果显著。

2) 竖板的影响

图 17 为不同竖板的瞬时流线图分布。

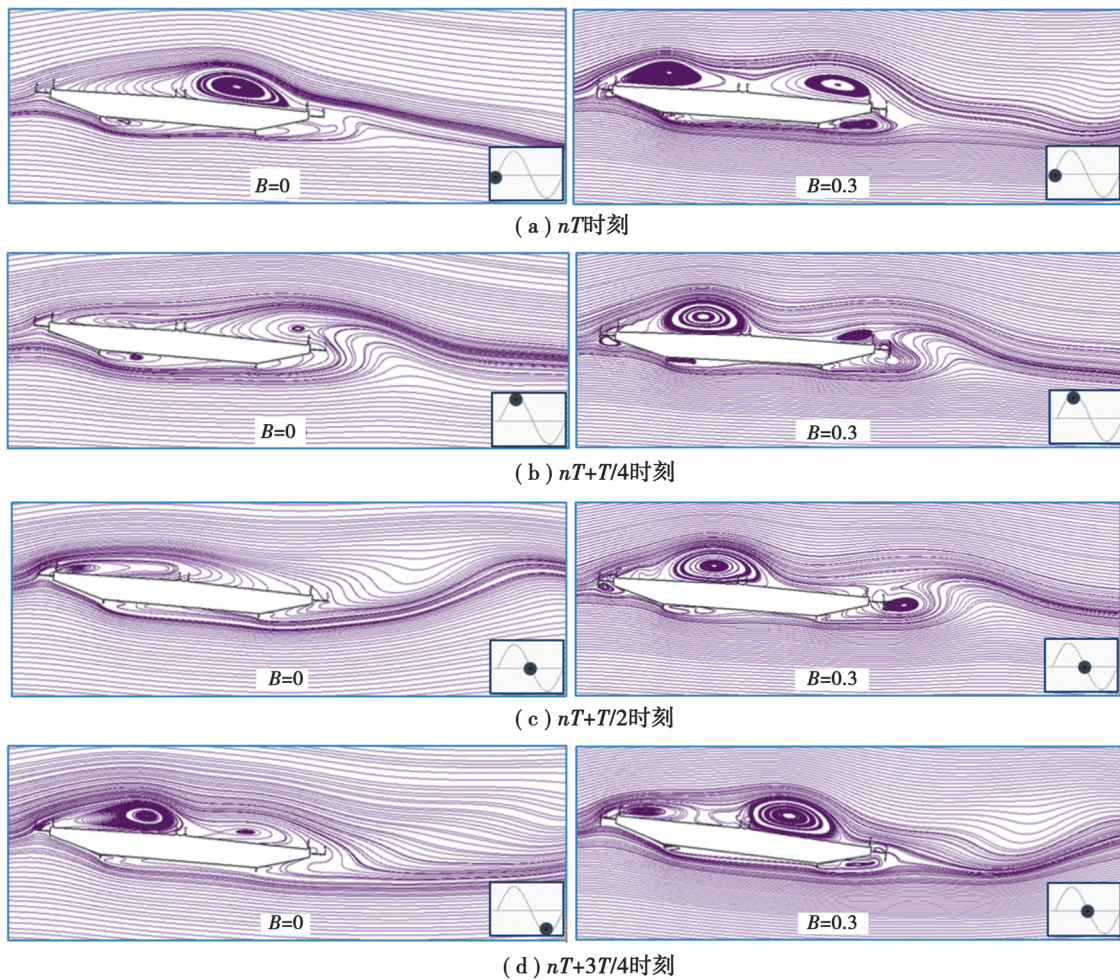


图 17 不同竖板流线图

Fig. 17 Streamline of different vertical plates

在 nT 时刻,无竖板时,断面附近形成 1 个较为明显的旋涡;当竖板高为 0.3,在主梁上游出现了新的旋涡。在 $nT+T/4$ 时刻,旋涡有所发展,流线的紊乱程度增加。对比无竖板情况,可以看出,竖板产生的旋涡与断面的主旋涡相互作用,整体对主旋涡的发展有一定的抑制趋势。在 $nT+3T/4$ 时刻,竖板附近的旋涡结构依然存在,且与主旋涡相互影响,流场也较为复杂,相比无竖板情况,其旋涡发展和流线紊乱程度相对可控,说明竖板的存在引发了额外的扰动,在一定程度上遏制了主旋涡的过度发展。

3 结论

文中结合风洞试验和数值模拟,研究了不同尺寸的 L 型导流板钢箱梁涡振特性规律及机理,主要结论如下。

1)水平板宽度主导竖弯涡振抑制,水平板越宽,抑制竖弯涡振的效果越显著。当水平板宽度从0.06增至0.09后,竖弯涡振基本消失,且涡振区间向高风速区平移。其机理为加宽水平板减小了主梁上表面带状涡 BV_1 的宽度,优化了主梁上方的流场结构,使其不易涡脱。

2)竖板高度对扭转涡振影响显著,且存在“最不利高度”。当竖板高度增加到0.2及以上时,不仅增大了低风速区的扭转幅值,还在高风速区诱发了新的扭转涡振。机理上,竖板的增高催生了 V_1 、 V_2 等新涡团,并使原有强涡 V_3 、 V_5 尺寸显著增大,导致端部受到的周期性力矩增大。

3)附属构件产生的特征紊流可能会抑制风致振动,但如果与主要构件产生的涡的强度、尺寸相差太大,其抑制涡振的作用很弱。

参考文献

- [1] 张伟伟, 豆子皓, 李新涛, 等. 桥梁若干流致振动与卡门涡街[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(3): 405-412.
Zhang W W, Dou Z H, Li X T, et al. Various flow-induced vibrations of bridges and von Kármán vortex street[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(3): 405-412. (in Chinese)
- [2] 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 L, Li K, Wang C J, 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. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] 颜大椿. 湍流、风工程和虎门大桥的风振[J]. 力学与实践, 2020, 42(4): 523-525.
Yan D C. Turbulence, wind engineering and wind vibration of Humen Bridge[J]. Mechanics in Engineering, 2020, 42(4): 523-525. (in Chinese)
- [5] 吴志勤, 何超. 大跨度桥梁抗风措施研究[J]. 城市道桥与防洪, 2015(11): 65-69, 14.
Wu Z Q, He C. Study of anti-wind measures for long-span bridge[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2015(11): 65-69, 14. (in Chinese)
- [6] 刘健新. 桥梁对风反应中的涡激振动及制振[J]. 中国公路学报, 1995(2): 74-79.
Liu J X. Vortex-induced vibration and its control in responses of bridge to wind[J]. China Journal of Highway and Transport, 1995(2): 74-79. (in Chinese)
- [7] Dai J, Xu Z D, Yin X J, et al. Parameters design of TMD mitigating vortex-induced vibration of the Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge deep-water nonnavigable bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(8): 06019005.
- [8] Xu K, Bi K M, Han Q, et al. Using tuned mass damper inerter to mitigate vortex-induced vibration of long-span bridges: Analytical study[J]. Engineering Structures, 2019, 182: 101-111.
- [9] 张宏杰, 朱乐东. 箱形主梁悬臂水平分离板的颤振控制效果与机理[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(11): 1569-1574, 1640.
Zhang H J, Zhu L D. Control effect and mechanism of cantilever horizontal splitting plates on flutter performance of a box deck [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(11): 1569-1574, 1640. (in Chinese)
- [10] 康福军, 郭峰, 王俊, 等. 风嘴对流线形钢箱梁涡振性能影响试验和CFD研究[J]. 结构工程师, 2023, 39(1): 141-147.
Kang F J, Guo F, Wang J, et al. Wind fairing effect on vortex-induced vibration of streamline steel box deck by wind tunnel test and CFD[J]. Structural Engineers, 2023, 39(1): 141-147. (in Chinese)
- [11] 孟晓亮, 郭震山, 丁泉顺, 等. 风嘴角度对封闭和半封闭箱梁涡振及颤振性能的影响[J]. 工程力学, 2011, 28(S1): 184-188, 194.
Meng X L, Guo Z S, Ding Q S, et al. Influence of wind fairing angle on vortex-induced vibrations and flutter performances of closed and semi-closed box decks[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(S1): 184-188, 194. (in Chinese)
- [12] Li J W, Yang S C, Hao J M, et al. Advances and applications of wind engineering in exceptional terrain[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2024, 11(6): 1023-1209.

- [13] 吴明远, 廉向东, 张伟, 等. 四千米级悬索桥新型结构体系研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(7): 204-211.
Wu M Y, Lian X D, Zhang W, et al. New structure system for 4 000 m class suspension bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(7): 204-211. (in Chinese)
- [14] 王峰, 郑晓东, 董小强, 等. 倒L型导流板对II型断面斜拉桥涡振的抑振效果研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(12): 1652-1659.
Wang F, Zheng X D, Dong X Q, et al. Study on VIV suppression effect of inverted L-shaped deflectors on cable-stayed bridge with II type cross-section[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2021, 44(12): 1652-1659. (in Chinese)
- [15] 王路. 倒L型导流板对闭口钢箱梁涡振特性的影响[D]. 西安: 长安大学, 2022.
Wang L. Influence of inverted L-shaped deflector on vortex-induced vibration characteristics of closed steel box girders[D]. Xi'an: Changan University, 2022. (in Chinese)
- [16] 肖天宝. 两种新型气动措施对分离式双箱梁涡振特性的影响[D]. 西安: 长安大学, 2022.
Xiao T B. Influence of two new aerodynamic measures on vortex vibration characteristics of twin-box girder[D]. Xi'an: Changan University, 2022. (in Chinese)
- [17] 刘超群. Liutex-涡定义和第三代涡识别方法[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(3): 413-431, 478.
Liu C Q. Liutex-third generation of vortex definition and identification methods[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(3): 413-431, 478. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)