

不同高宽比并列双幅箱梁气动升力的干扰效应*

刘小兵^{1,2,3}, 姜会民³, 刘慧杰³, 路起凡³, 杨群^{1,2,3}

(1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室 石家庄, 050043)

(2. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心 石家庄, 050043)

(3. 石家庄铁道大学土木工程学院 石家庄, 050043)

摘要 为了给实际工程中并列双幅变截面箱梁的气动升力取值提供参考, 针对不同高宽比的双幅箱梁, 通过刚性模型测压风洞试验, 测试了多个不同风攻角和间距时双幅箱梁的升力系数, 并与单幅箱梁的升力系数进行了对比分析。引入干扰因子对下游箱梁的干扰效应进行定量表示。研究表明: 与单幅箱梁相比, 上游箱梁的气动升力变化不大, 下游箱梁的气动升力变化显著; 在大多数正向风攻角下, 下游箱梁气动升力的干扰效应表现为明显的减小效应; 在负向风攻角下, 气动干扰使下游箱梁承受向下的升力, 升力值随着风攻角的增大而增大, 随着间距和箱梁高宽比的减小而增大。

关键词 双线箱梁; 升力系数; 风洞试验; 高宽比; 间距; 风攻角

中图分类号 U441.2; TH138

引言

气动干扰问题是并列双箱梁桥抗风设计过程中必须重点考虑的关键问题之一。由于双箱梁之间的相互干扰, 其静风荷载、涡振特性、颤振稳定性及抖振性能明显不同于单幅箱梁。针对这一问题, 国内外学者进行了广泛研究。Park等^[1]通过一系列节段模型风洞试验, 分析了间距对双箱梁涡振特性的影响规律。Nunez等^[2]以一座上下斜交双桥面斜拉桥为对象, 试验研究了双桥面之间的气动干扰效应。Argentint等^[3]分析了气动干扰对并列双箱梁气动力和涡振特性的影响。文献[4-5]通过节段模型测力试验和弹簧悬挂节段模型测振试验, 研究了已有桥梁对新建桥梁的气动力、涡振特性和颤振稳定性的影响规律。刘志文等^[6]基于风洞试验分析了串列双幅典型断面的颤振稳定性随间距的变化规律。刘小兵等^[7]在均匀流场中数值计算了双幅矩形断面的气动力系数, 并与单幅矩形断面的气动力系数进行了对比分析。文献[8-9]对韩国珍岛桥并列双箱梁的涡激振动进行了现场实测分析。并列双箱梁气动干扰的部分研究成果已纳入规范^[10]。

目前, 并列双箱梁桥气动干扰的相关研究主要

是针对等截面双箱梁展开的。双幅变截面箱梁常用于跨越能力相对较小的连续刚构桥和连续梁桥的设计建造过程中, 近年来随着施工工艺的提升以及轻质高强材料的应用, 这类桥梁的跨度屡创新高, 其气动干扰问题也引起了学者的关注。曲慧等^[11]针对崇启大桥(变截面双箱梁桥), 通过风洞试验研究了并列双箱梁之间的气动干扰效应, 结果表明, 下游箱梁受到的气动力明显较上游箱小。刘玥^[12]以山店江大桥(变截面双箱梁桥)为对象进行了数值计算研究, 分析了间距对下游箱梁干扰效应的影响。苟国涛等^[13]针对三水河大桥(变截面双箱梁桥)跨中和支点断面进行了数值计算, 对双箱梁在不同间距下阻力系数的干扰效应进行了分析, 结果表明, 气动干扰效应随着间距的逐步增大逐渐减弱。刘小兵等^[14]通过对比不同高宽比单幅与双幅箱梁阻力系数的差异, 研究了干扰效应对双幅箱梁阻力系数的影响。

与双幅等截面箱梁相比, 双幅变截面箱梁气动力的干扰效应研究相对较少, 且侧重对阻力干扰效应的分析。由于这些研究大多针对实际工程, 双箱梁的间距变化不多。鉴于此, 笔者通过刚性模型测压试验, 获得了不同高宽比和不同间距下的双幅箱梁在不同风攻角下的升力系数, 与单箱梁进行对比,

* 国家自然科学基金资助项目(52078313, 52008273); 河北省自然科学基金资助项目(E2020210083); 河北省高等学校科学技术研究资助项目(ZD2019118); 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室自主课题资助项目(ZZ2020-14)

收稿日期: 2021-02-21; 修回日期: 2022-04-18

得到了升力系数干扰因子,用来分析双幅箱梁气动升力的干扰效应。

1 风洞试验简介

参考三店江大桥、三水河大桥和崇启大桥的几何参数。图1为双幅箱梁模型示意图。图中: $a\sim h$ 为箱梁角点; H 为箱梁的高度; B 为箱梁的宽度; D 为双箱梁的净间距。跨中位置箱梁的高宽比 H/B 在 $3/10$ 左右,支点位置箱梁的 H/B 在 $1/2\sim 1/1$ 范围内。双箱梁的净间距比 D/B 在 $0.04\sim 2.0$ 范围内,双箱梁模型的高宽比 H/B 取 $3/10, 2/5, 3/5$ 和 $4/5$,净间距比 D/B 取 $0.025\sim 3.0$ 范围内的12种。试验模型采用丙烯腈/丁二烯/苯乙烯共聚物板制作而成,上下游箱梁模型的几何外形一致。为了获得箱梁模型表面的压力信号,在各箱梁模型的中间位置沿周向布设一圈测压孔,4种高宽比试验模型的尺寸以及测压孔布置情况见文献[14]。

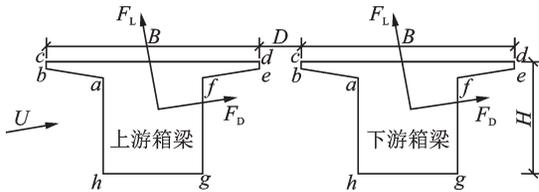


图1 双幅箱梁模型示意图

Fig.1 Diagram of twin box girders model

刚性模型测压试验在石家庄铁道大学风洞实验室低速试验段进行^[14],图2为风洞试验现场照片。首先,对单幅箱梁进行测试,试验分别在 6 m/s 和 10 m/s 2种不同的风速下进行。风攻角 α 以 2° 为步长,在 $-10^\circ\sim 10^\circ$ 范围内变化,以斜向上吹为正风攻角方向。结果发现,2种不同风速下的气动力系数吻合较好。当风速为 6 m/s 时,模型基本保持静止;当风速为 10 m/s 时,模型的中部发生了轻微晃动。考虑到模型的晃动可能会影响并列双箱梁的测试结果,不同间距下的双幅箱梁模型测试均在 6 m/s 的风速下进行。然后,以相同的试验条件对双幅箱梁模型进行了测试。

2 单幅箱梁的气动升力

定义箱梁的阻力系数 C_D 和升力系数 C_L 分别为

$$C_D = 2F_D / \rho U^2 H \quad (1)$$

$$C_L = 2F_L / \rho U^2 B \quad (2)$$

其中: U 和 ρ 分别为前方来流风速和空气密度; H 和



图2 试验现场照片

Fig.2 Test photos

B 分别为模型的高度和宽度; F_D 和 F_L 分别为风轴坐标系下模型单位长度上的阻力和升力,其方向如图1所示。

不同文献中钝体箱梁的阻力系数如表1所示。可以看到,本次试验 $H/B=3/10$ 的箱梁阻力系数为 1.13 ,与文献[15-16]中的 1.16 和 1.27 较为接近,说明本次试验具有一定的可靠性。

表1 不同文献中钝体箱梁的阻力系数

Tab.1 Drag coefficient of bluff box girders in different literatures

参数	本研究试验	文献[15]	文献[16]
高宽比	3/10	2.9/10	2.9/10
阻力系数	1.13	1.16	1.27

图3为单幅箱梁的升力系数。可以看出:当 H/B 为 $3/10, 2/5$ 和 $3/5$ 时,箱梁升力系数随 α 的增大先增后减。3个 H/B 箱梁的最大升力系数分别发生在 $\alpha=0^\circ, -4^\circ$ 和 -8° 时,对应的数值由小到大,分别为 $0.82, 0.86$ 和 1.01 。 $H/B=4/5$ 的箱梁其升力系数随 α 递减,最大升力系数发生在 $\alpha=0^\circ$ 时,其值为 1.06 。与正向 α 相比,负向 α 时升力系数随 H/B 变化更为显著。

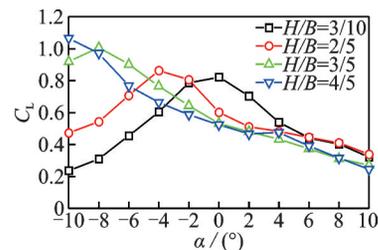


图3 单幅箱梁的升力系数

Fig.3 Lift coefficients of single box girder

图4为单幅箱梁的风压系数。以 $\alpha=-10^\circ, 0^\circ, 10^\circ$ 为例,通过箱梁表面的风压分布对其升力系数的变化规律进行研究。箱梁角点 $a\sim h$ 的具体位置见图1。由于 α 较小,箱梁的气动升力主要与斜腹板(a, b 和 e, f)、上表面(c, d)和下表面(g, h)的风压有关。

从图 4 可以看到:①当 $\alpha = -10^\circ$ 时,箱梁斜腹板及下表面的风压系数随着 H/B 变化不大,上表面的风压系数为负值,表明其受到向上的风吸力作用,随着 H/B 的增大,风吸力逐渐增大,导致模型的升力系数随着 H/B 的增大而显著增大;②当 $\alpha = 0^\circ$ 时,不同 H/B 箱梁斜腹板及下表面的风压大体接近,与其他 3 种 H/B 箱梁相比, $H/B = 3/10$ 的箱梁上表面负风压系数明显更大,其对应的升力系数更大;③当 $\alpha = 10^\circ$ 时,4 种不同 H/B 箱梁的上表面、下表面和斜腹板上的风压系数基本不随 H/B 的变化而改变,此时 H/B 对箱梁升力系数的影响有限。

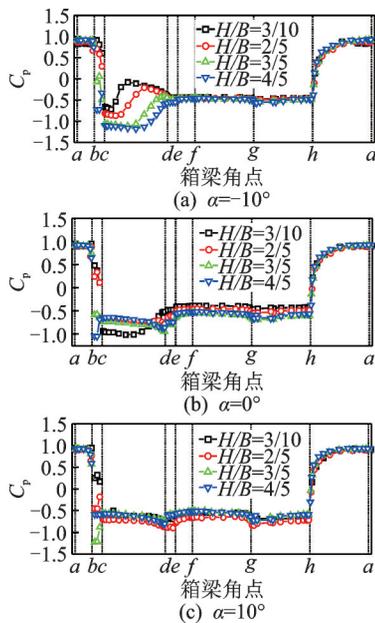


图 4 单幅箱梁的风压系数

图 5 为不同 H/B 单幅箱梁的脉动升力系数。可以看到:①当 $H/B = 3/10$ 和 $2/5$ 时,随着 α 由 -10° 增加到 10° ,脉动升力系数表现出了逐渐增大的规律,与负向 α 相比,正向 α 下脉动升力系数增大的更为迅速,同时 $H/B = 2/5$ 的单幅箱梁其脉动升力系数整体较 $H/B = 3/10$ 的单幅箱梁大;②当 $H/B = 3/5$ 和 $4/5$ 时,单幅箱梁的脉动升力系数均较小,且基本不随 α 的变化而变化。

升力系数时程经过傅里叶变换获得旋涡脱落频率,无量纲化得到箱梁的斯托罗哈数 St 为

$$St = fB/U \quad (3)$$

其中: f 为旋涡脱落频率。

图 6 为不同 H/B 单幅箱梁在 $\alpha = 10^\circ$ 时的傅里叶幅值谱图。可以发现:4 种 H/B 下的傅里叶幅值谱图均表现出了明显的峰值;当 $H/B = 3/10$ 和 $2/5$ 时,

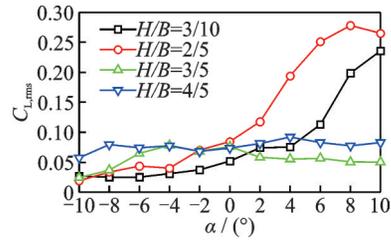


图 5 单幅箱梁的脉动升力系数

峰值更大,分别达到了 0.2 和 0.3 附近;而 $H/B = 3/5$ 和 $4/5$ 时,峰值相对较小,均在 0.02 左右,说明此时的旋涡脱落强度较弱,这也是脉动升力系数较小的原因。

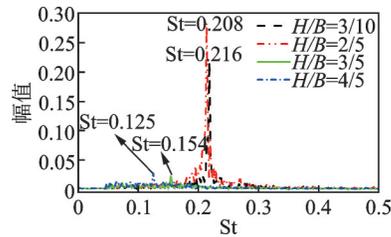


图 6 单幅箱梁的傅里叶幅值谱图($\alpha = 10^\circ$)

Fig.6 Fourier amplitude spectrum of single box girder ($\alpha = 10^\circ$)

图 7 为不同 H/B 单幅箱梁的斯托罗哈数。可以看到:负向 α 时, $H/B = 3/5$ 和 $4/5$ 的单幅箱梁没有出现明显的旋涡脱落频率,说明此时单幅箱梁尾流未表现出周期性的旋涡脱落;当 $H/B = 3/10$ 和 $2/5$ 时,箱梁出现了明显的旋涡脱落频率;随着 α 由 -10° 增加到 -2° ,2 种 H/B 的斯托罗哈数均呈现出了先逐渐增加、后趋于平缓的变化规律;同时发现, $H/B = 3/10$ 的单幅箱梁其斯托罗哈数整体较 $H/B = 2/5$ 的单幅箱梁大,其最大值达到了 0.45 左右。正向 α 下,4 种 H/B 的单幅箱梁均表现出了明显的旋涡脱落频率,斯托罗哈数基本不随 α 的变化而变化,其值稳定在某一数值附近, $H/B = 3/10$ 和 $2/5$ 的单幅箱梁约为 0.21, $H/B = 3/5$ 的单幅箱梁约为 0.16, $H/B = 4/5$ 的单幅箱梁约为 0.12。

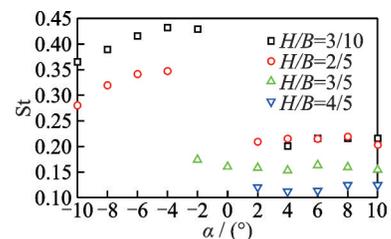


图 7 单幅箱梁的斯托罗哈数

Fig.7 Strouhal number of single box girder

3 双幅箱梁气动升力的干扰效应

3.1 升力系数

图8和图9分别为不同 D/B 时 $H/B=3/10$ 和 $4/5$ 的双幅箱梁升力系数。可以看到,双幅上游箱梁的升力系数呈现出了与单幅箱梁类似的变化规律,说明上游箱梁气动升力受到的干扰效应较为不明显。 $H/B=3/10$ 的上游箱梁其升力系数随 α 先增大后减小。 $H/B=4/5$ 的上游箱梁其升力系数随 α 逐渐减小。与 $D/B \leq 1.0$ 时相比,当 $D/B > 1.0$ 时,上游箱梁的升力系数更接近单幅箱梁的值,干扰效应更弱一些。

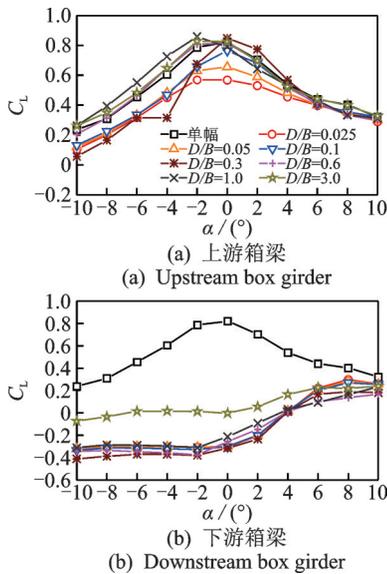


图8 $H/B=3/10$ 双幅箱梁的升力系数

Fig.8 Lift coefficient of twin box girders at $H/B=3/10$

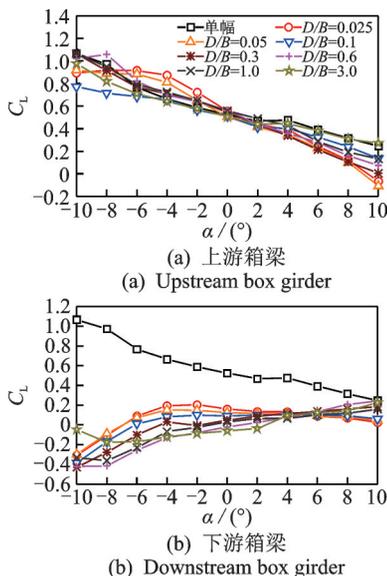


图9 $H/B=4/5$ 双幅箱梁的升力系数

Fig.9 Lift coefficient of twin box girders at $H/B=4/5$

双幅下游箱梁升力系数的变化规律与单幅箱梁差异明显。这种差异不仅体现在趋势上,也体现在具体数值上。以 $H/B=3/10$ 的下游箱梁为例进行说明,如图8(b)所示,下游箱梁的升力系数在 $\alpha=-10^\circ \sim -2^\circ$ 时表现为负值,且基本不随 α 的变化而变化;随着 α 由 -2° 变化到 4° ,负升力系数绝对值逐渐变小,并趋近0值;随着 α 由 4° 变化到 10° ,升力系数变为正值且略有增大,但即使当 $\alpha=10^\circ$ 时,仍小于单幅箱梁的升力系数。当 $D/B \leq 1.0$ 时,升力系数随间距的变化不大; $D/B > 1.0$ 时,升力系数逐步向单幅箱梁的升力系数靠近,但即使当 $D/B=3.0$ 时,二者的差异仍比较明显。

对比图8(b)和图9(b)发现,虽然数值有所差异,但不同 H/B 双幅下游箱梁升力系数的干扰规律具有一定的类似性。需要说明的是, $H/B=2/5, 3/5$ 双幅箱梁的升力系数气动干扰规律与 $H/B=3/10, 4/5$ 双幅箱梁的升力系数气动干扰规律类似,限于篇幅,不再进行展示。

3.2 升力系数干扰因子

气动干扰对双幅上游箱梁气动升力的影响较为不明显,这里仅针对下游箱梁的干扰效应进行定量分析。定义下游箱梁的干扰因子IF为双幅下游箱梁的升力系数与单幅箱梁的升力系数的比值。

图10为不同 H/B 的双幅下游箱梁干扰因子等值线图。将4种 H/B 下游箱梁的升力系数干扰因子进行对比发现:在大多数正向 α 下,干扰因子表现为正值且明显小于1,说明气动干扰表现为减小效应。随着 α 的减小,不同 D/B 的干扰因子整体呈现出逐渐减小的趋势。相同 α 时,干扰因子随 D/B 的增大变化不明显。相同 α 和 D/B 时,干扰因子随箱梁 H/B 的增大变化不是特别显著,说明下游箱梁升力系数的减小效应会随着 α 的减小变得越来越明显。这种减小效应对 D/B 和 H/B 的变化不是十分敏感。

在负向 α 下,干扰因子基本为负值,表明下游箱梁升力方向向下,与单幅箱梁的升力方向相反。随着负向 α 的增大,负干扰因子绝对值呈现出逐渐增大的变化规律,表明向下的升力随着负向 α 的增大而增大。相同 α 时,负干扰因子绝对值基本随着 D/B 的减小而增大,说明向下的升力随着 D/B 的减小而增大。将不同 H/B 箱梁的干扰因子进行对比可以发现,负干扰因子所在的区域随着 H/B 的减小有所扩大,其绝对值也有所增大。 $H/B=3/10$ 的箱梁在 $\alpha=-10^\circ$ 时,干扰因子甚至达到了 -1.6 。这说明向下的升力随着 H/B 的减小不断增大,甚至明显超

过单幅箱梁向上的升力值。

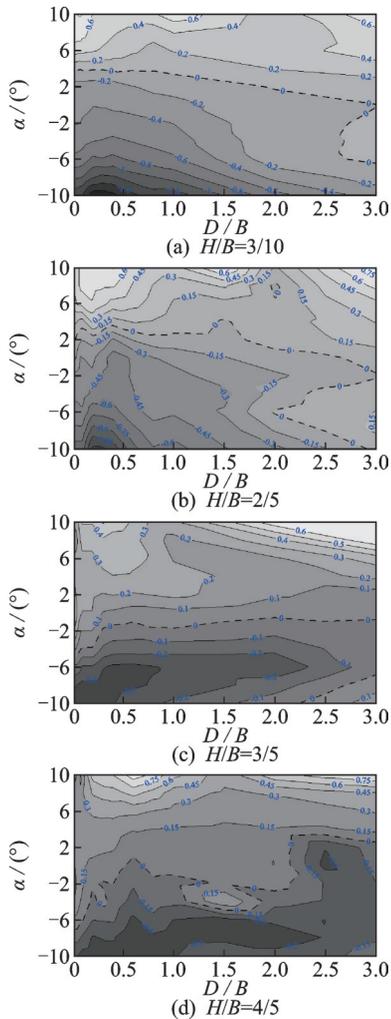


图 10 下游箱梁干扰因子等值线图

Fig.10 IF contour of downstream box girder

3.3 气动升力干扰效应的初步解释

为了对下游箱梁气动升力的干扰效应进行解释,图 11 为 $\alpha=-10^\circ$ 和 10° 时, $H/B=3/10$ 双幅下游箱梁的风压系数。与单幅箱梁类似,这里着重讨论对升力起主要作用的上表面、下表面和斜腹板上的风压系数变化情况。

$\alpha=10^\circ$ 时, $H/B=3/10$ 的下游箱梁表面风压系数变化最显著的位置为迎风侧斜腹板。在斜上向来流作用下,单幅箱梁迎风侧斜腹板受到风压作用。由于上游箱梁的存在,在相同 α 下,当 D/B 较小时,下游箱梁迎风侧斜腹板的风压系数为负值,表明其受到风吸作用,这是下游箱梁在正向 α 时气动升力表现为减小效应的主要原因。下游箱梁迎风侧斜腹板受到的风吸作用应该与两箱之间形成的旋涡有关。

与 $\alpha=10^\circ$ 类似,当 $\alpha=-10^\circ$ 时,下游箱梁迎风侧斜腹板在较小 D/B 时也承受风吸作用,与单幅箱梁迎风侧斜腹板承受的风压作用相反。此外,由于气流在前缘的分离,单幅箱梁上表面风压系数为负值,承受向上的风吸作用。由于上游箱梁的干扰,下游箱梁上表面的风压系数基本在 0 值附近。迎风侧斜腹板和上表面风压的以上改变是导致下游箱梁在负向风攻角时承受向下降力的主要原因。

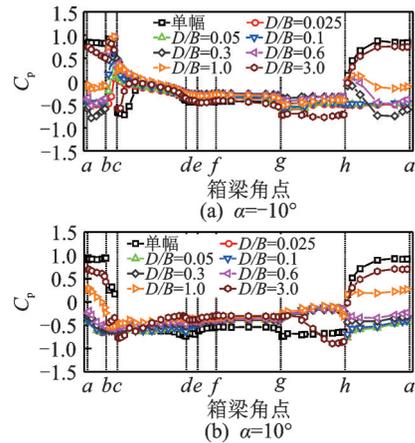


图 11 $H/B=3/10$ 双幅下游箱梁的风压系数

Fig.11 Wind pressure coefficient of downstream box girder at $H/B=3/10$

4 结 论

1) 双幅箱梁气动升力的干扰效应主要表现为对下游箱梁升力的影响。在大多数正向风攻角下,干扰效应对下游箱梁升力的影响表现为显著的减小效应。这种减小效应随风攻角的变小愈发显著,随箱梁高宽比的变化不明显。

2) 在负向风攻角下,与单幅箱梁相反,气动干扰使下游箱梁承受向下的升力,升力大小随风攻角的增大而增大,随间距和箱梁高宽比的减小而增大。下游箱梁在大负向风攻角时向下的升力甚至会明显超过单幅箱梁向上的升力,达到单幅箱梁向上升力的 1.6 倍,需引起设计人员的重视。

参 考 文 献

[1] PARK J, KIM S, KIM H. 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.

[2] NUNEZ G, LOREDO-SOUZA A, ROCHA M. et al. Aerodynamic behavior of a cable-stayed bridge section composed by inclined parallel decks[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 173:

- 156-170.
- [3] 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.
- [4] 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.
GUO Zhenshan, MENG Xiaoliang ZHOU Qi, et al. Aerodynamic interferences of an existed bridge on aerodynamic coefficients of an adjacent new bridge[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(9): 181-186. (in Chinese)
- [5] 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 Science)*, 2010, 38(5): 632-638. (in Chinese)
- [6] 刘志文, 吕建国, 刘小兵, 等. 串列双幅断面颤振稳定性气动干扰试验研究[J]. *振动工程学报*, 2016, 29(3): 403-409.
LIU Zhiwen, LYU Jianguo, LIU Xiaobing, et al. Experimental investigation of aerodynamic interference effects on flutter stability of cylinders in tandem arrangement[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2016, 29(3): 403-409. (in Chinese)
- [7] 刘小兵, 陈政清, 刘志文, 等. 均匀风场中串列双矩形断面气动力干扰的数值研究[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(12): 83-87.
LIU Xiaobing, CHEN Zhengqing, LIU Zhiwen, et al. Numerical study on interference of aerodynamic forces on two rectangular sections with tandem arrangement in uniform wind field[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(12): 83-87. (in Chinese)
- [8] SEO J, KIM H, PRAK 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.
- [9] KIM S, KIM H, 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.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T 3360-01—2018 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [11] 曲慧, 马如进, 陈艾荣. 分离式钝体钢箱梁静气动力节段风洞试验研究[J]. *结构工程师*, 2010, 26(3): 89-94.
QU Hui, MA Rujin, CHEN Airong. Study on static aerodynamic force of separate steel box-girder with bluff body via wind tunnel test of sectional model[J]. *Structural Engineers*, 2010, 26(3): 89-94. (in Chinese)
- [12] 刘玥. 连续刚构桥梁的气动性能数值模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [13] 苟国涛, 叶征伟, 项贻强, 等. 双幅并行连续刚构桥梁梁断面三分力系数干扰效应数值模拟[J]. *公路工程*, 2013, 38(2): 196-201.
GOU Guotao, YE Zhengwei, XIANG Yiqing, et al. Numerical study on static aerodynamic coefficients aerodynamic interference effects of the box girder section of continuous rigid frame bridge with close twin deck[J]. *Highway Engineering*, 2013, 38(2): 196-201. (in Chinese)
- [14] 刘小兵, 吴倩云, 路起凡, 等. 并列双幅变截面箱梁阻力系数的干扰效应研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(10): 148-153.
LIU Xiaobing, WU Qianyun, LU Qifan, et al. Study on interference effect on drag coefficient of twin parallel box girders with variable cross section[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(10): 148-153. (in Chinese)
- [15] 安里鹏, 李德建, 王元礼, 等. 基于CFD方法的高墩大跨箱梁桥静风力系数参数影响研究[J]. *应用力学学报*, 2016, 33(1): 143-149, 188.
AN Lipeng, LI Dejian, WANG Yuanli, et al. The CFD based research of the parameters impact for aerostatic coefficients of tall-piered long-spanned girder bridge [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2016, 33(1): 143-149, 188. (in Chinese)
- [16] 刘钥, 陈政清, 张志田. 箱梁断面静风力系数的CFD数值模拟[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(1): 133-137, 242.
LIU Yue, CHEN Zhengqing, ZHANG Zhitian. CFD numerical simulation for aerostatic coefficients of a box girder section [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(1): 133-137, 242. (in Chinese)



第一作者简介:刘小兵,男,1982年3月生,博士、副教授。主要研究方向为桥梁结构的风荷载与风致振动研究。曾发表《并列双箱梁的气动干扰效应对阻力系数的影响》(《中国公路学报》2017年第30卷第11期)等论文。
E-mail: x_b_liu@126.com