

双幅典型断面静力系数气动干扰试验研究

刘小兵¹, 杨 群²

(1. 石家庄铁道大学风工程研究中心, 河北, 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北, 石家庄 050043)

摘 要: 建立了双幅桥面静力系数气动干扰的定量分析方法, 定义干扰因子为双幅桥面的静力系数与单幅桥面的静力系数之比。基于测压风洞试验, 针对 3 种典型断面(矩形断面、 Π 形断面和流线形断面), 对双幅桥面桥梁静力系数气动干扰进行了研究。研究表明: 静力系数气动干扰主要表现为遮挡作用, 下游断面的阻力系数均值小于单幅断面结果。与流线形断面相比, 钝体断面(矩形断面和 Π 形断面)的遮挡作用更明显。

关键词: 气动干扰; 静力系数; 双幅典型断面; 风洞试验; 测压

中图分类号: TU311.3; U441.3 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.05.S069

EXPERIMENTAL STUDY ON AERODYNAMIC INTERFERENCE ON AEROSTATIC COEFFICIENTS OF TWIN REPRESENTATIVE SECTIONS

LIU Xiao-bing¹, YANG Qun²

(1. Wind Engineering Research Center, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: A quantitative analysis method of aerodynamic interferences on aerostatic coefficients of twin separated decks was developed. Interference factor (IF) was defined as the ratio of aerostatic coefficient of twin decks to that of single deck. Aerodynamic interferences on aerostatic coefficients of bridges with twin decks were studied using three representative sections (rectangular section, Π shaped section and streamlined section) through pressure-measured wind tunnel experiments. The experimental results show that aerodynamic interferences on aerostatic coefficients are mainly attributed to shielding effect. Mean value of drag coefficient of leeward section is smaller than that of single section. Compared with streamlined section, shielding effect on bluff sections (rectangular section and Π shaped section) is more significant.

Key words: aerodynamic interference; aerostatic coefficients; twin representative sections; wind tunnel test; pressure-measurement

近年来, 随着社会经济的蓬勃发展, 交通量日益增长。为了提高桥梁通行能力, 通常将主梁设计成彼此分离且相互平行的双幅桥面。双幅桥面桥梁主梁间距都不大, 上游桥面与下游桥面在来流风作用下相互影响, 其气动干扰所引起的静风荷载、涡振特性及颤振稳定性等与单幅桥面相比存在一定的差异^[1-6]。随着桥梁跨度的增大, 双幅桥面的气动干扰将不容忽视, 是这类桥梁抗风设计最为关键的问题之一。

静力系数是表征桥梁结构静风荷载的一组无量纲参数。它既是反映桥梁结构静风荷载的重要指标, 也是研究桥梁结构气动问题的基础。由于气动干扰的存在, 双幅桥面桥梁上下游两桥面的静力系数将不同于单幅桥面的静力系数。准确定量评价气动干扰对两分离桥面静力系数的影响, 对双幅桥面桥梁抗风研究具有重要意义。目前, 国内外已有一些学者通过风洞试验或数值模拟手段对双幅桥面静力系数的气动干扰效应进行了研究, 但这些研究

收稿日期: 2012-05-02; 修改日期: 2012-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(50608030)

通讯作者: 刘小兵(1982—), 男, 湖南人, 讲师, 博士, 从事桥梁抗风研究(E-mail: x_b_liu@126.com)。

作者简介: 杨 群(1981—), 女, 湖南人, 讲师, 硕士, 从事桥梁工程研究(E-mail: quny123@126.com)。

大多是针对特定的桥梁工程展开的^[7-10], 所得的干扰规律不具有普遍性。

本文基于节段模型测压风洞试验, 针对 3 种典型断面(矩形断面、II 形断面和流线形断面), 对双幅桥面的静力系数气动干扰进行了研究。

1 试验装置及试验工况

图 1 所示为 3 种双幅典型断面的尺寸。3 种典型断面节段模型均由有机玻璃制作, 长度均为 150cm。本文基于测压风洞试验进行静力系数测量。在每个模型中部沿周向布置一圈测压孔。3 种模型测压孔数目均为 62 个。由于断面尖嘴附近的流动参数变化较剧烈, 这些位置处测压孔予以加密。

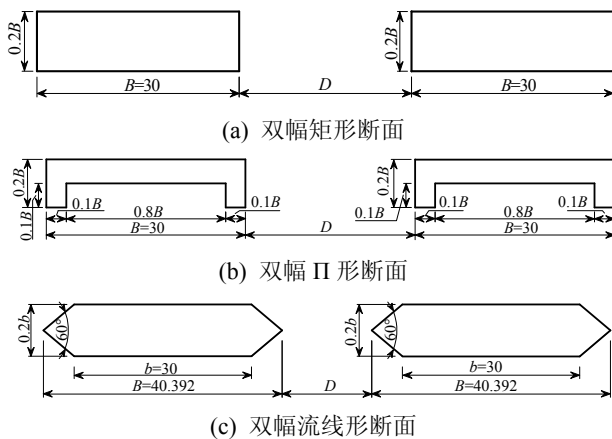


图 1 3 种典型断面的尺寸 /cm

Fig.1 Dimensions of three representative sections

试验在湖南大学 HD-2 风洞高速试验段进行。试验段宽 3m、高 2.5m、长 17m。风速调节和控制采用计算机终端集中控制的可控硅直流无级调速系统。空风洞试验风速范围在 0~60m/s 连续可调, 流场的不均匀性小于 1%, 顺风向紊流强度约为 1%, 接近均匀流场。试验装置如图 2 所示。主要由固定支架和活动支架组成。进行单幅模型试验时, 将模型与固定支架刚性固结。进行双幅模型干扰试验时, 上游模型与固定支架刚性固结, 下游模型与活动支架刚性固结。通过调节活动支架实现下游模型上下平动, 保证上下游模型处于同一高度位置。通过挪动活动支架实现下游模型前后平移, 从而比较方便地改变模型间距。上下游模型表面的测压孔通过测压管与置于模型中的电子压力扫描阀连结。电子压力扫描阀通过数据线与外部 PC 机相连。模型的阻力系数时程、升力系数时程和扭矩系数时程可以通过各测点的压力积分得到, 计算公式如下。

阻力系数时程:

$$C_D(t) = \frac{\sum_{i=1}^{62} p_i(t) L_i \sin(\alpha)}{0.5 \rho U^2 B} \quad (1)$$

升力系数时程:

$$C_L(t) = \frac{\sum_{i=1}^{62} p_i(t) L_i \cos(\alpha)}{0.5 \rho U^2 B} \quad (2)$$

其中: $p_i(t)$ 为各测点的压力瞬时值; L_i 为各测点所代表的长度; α 为各测点所在的边与水平面之间的夹角; B 为模型宽度; ρ 为空气密度; U 为模型前方来流风速。



(a) 单幅模型



(b) 双幅模型

图 2 风洞试验装置

Fig.2 Wind tunnel experiment set-up

试验工况如表 1 所示。先进行单幅模型试验, 后进行双幅模型试验。对双幅矩形断面和双幅 II 形断面, 选择了 D/B (其中: D 为两断面净间距, B 为单幅断面宽) 在 0.1~4 间的 7 个间距进行研究; 对双幅流线形断面, 选择了 D/B 在 0.1~3 间的 6 个间距进行研究。试验流场为均匀流场, 来流风攻角均为 0° 。为了避免模型局部振动, 提高试验结果精度, 矩形断面和 II 形断面来流风速均为 6m/s, 以断面宽度 B 为特征尺寸定义的雷诺数均为 1.2×10^5 ; 流线形断面来流风速为 8m/s, 以断面宽度 B 为特征尺寸定义的雷诺数为 2.15×10^5 。电子压力扫描阀的采样频率为 312Hz。

表 1 试验工况
Table 1 Experimental cases

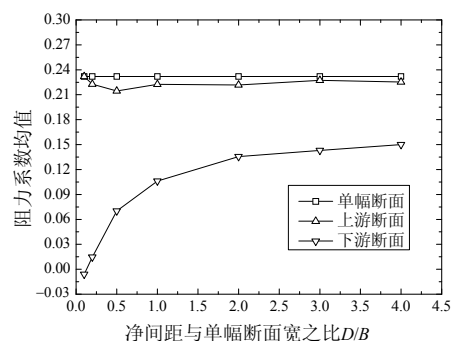
断面外形	试验状态	D/B
矩形断面	单幅	—
	双幅	0.1、0.2、0.5、1、2、3、4
Π 形断面	单幅	—
	双幅	0.1、0.2、0.5、1、2、3、4
流线形断面	单幅	—
	双幅	0.1、0.2、0.5、1、2、3

2 气动干扰试验结果

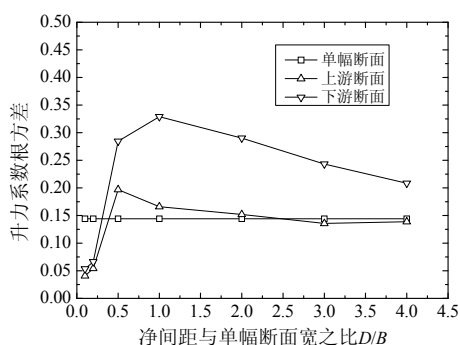
图 3 显示了双幅矩形断面静力系数随 D/B 变化曲线。限于篇幅,这里仅给出了双幅矩形断面的静力系数结果。为了表征气动干扰对静力系数的影响,本文定义如下干扰因子:

$$IF = \frac{\text{双幅上游(下游)桥面静力系数}}{\text{单幅桥面静力系数}} \quad (3)$$

由式(3)可知:干扰因子小于 1,表示气动干扰为减小效应;干扰因子大于 1,表示气动干扰为增大效应。



(a) 阻力系数均值



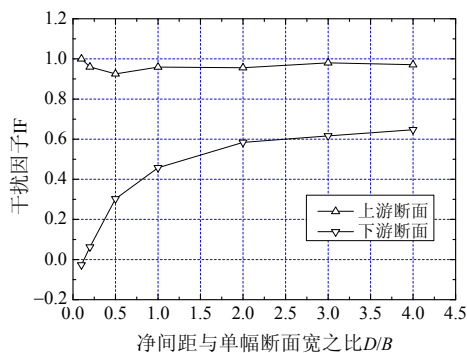
(b) 升力系数根方差

图 3 双幅矩形断面静力系数变化曲线

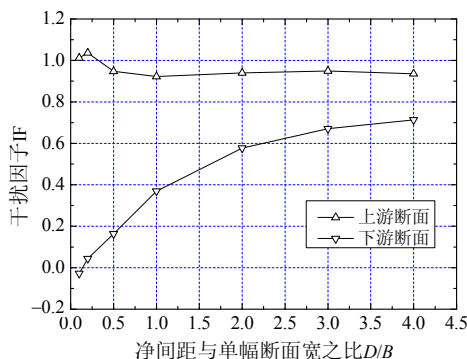
Fig.3 Variation curves of aerostatic coefficients of twin rectangular sections

图 4 和图 5 分别显示了 3 种双幅典型断面阻力系数均值干扰因子和升力系数根方差干扰因子随 D/B 变化曲线。从这 2 个图可以发现: 1) 上游钝体断面(矩形断面和 Π 形断面)的阻力系数均值干扰因

子接近 1; 下游钝体断面的阻力系数均值干扰因子明显小于 1, 间距越小, 干扰因子越小。这表明: 气动干扰对上游钝体断面阻力系数均值的影响较小; 对下游钝体断面阻力系数均值的影响较大, 且表现为减小效应, 间距越小, 影响越大。上下游流线形断面的阻力系数均值干扰因子在 $D/B < 0.5$ 时略小于 1; 在 $D/B > 0.5$ 时大体接近 1。这表明: 气动干扰对上下游流线形断面阻力系数均值在 $D/B < 0.5$ 时略有影响, 且表现为减小效应; 在 $D/B > 0.5$ 时影响可以忽略; 2) 上下游钝体断面的升力系数根方差干扰因子在 $D/B \leq 0.2$ 时明显小于 1, 随着间距的增大呈现出先增大后减小的变化规律。上游钝体断面的升力系数根方差干扰因子最大值略大于 1。下游钝体断面的升力系数根方差干扰因子最大值明显大于 1。这表明: 气动干扰在 $D/B \leq 0.2$ 时对上下游钝体断面的升力系数根方差有较大影响, 且表现为减小效应; 间距增大后, 对上游钝体断面的升力系数根方差影响较小, 对下游钝体断面的升力系数根方差影响较大, 且表现为增大效应。上游流线形断面的升力系数根方差干扰因子大体接近 1, 下游流线形断面的升力系数根方差干扰因子基本上大于 1。这表明: 气动干扰对上游流线形断面升力系数根方差的影响较小, 对下游流线形断面的升力系数根方差的影响较明显, 且表现为增大效应。



(a) 矩形断面



(b) Π 形断面

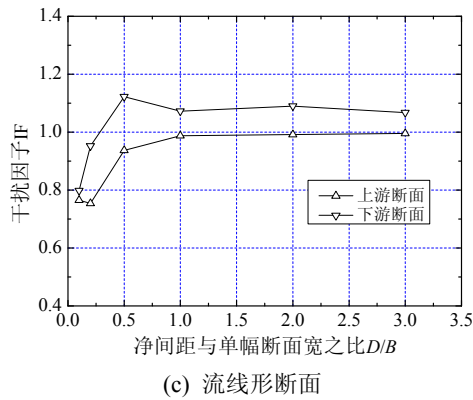


图4 双幅典型断面阻力系数均值干扰因子变化曲线

Fig.4 Variation curves of mean drag coefficient interference factor of twin representative sections

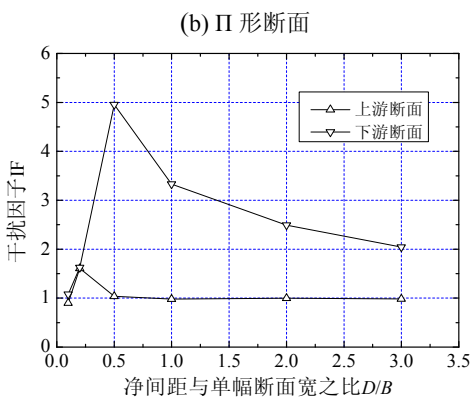
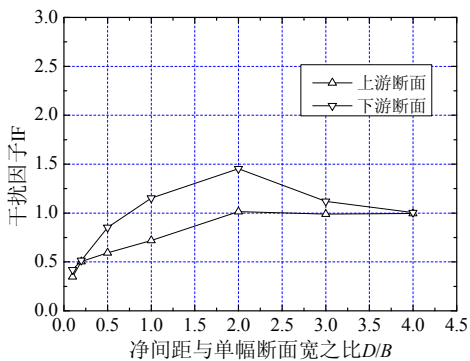
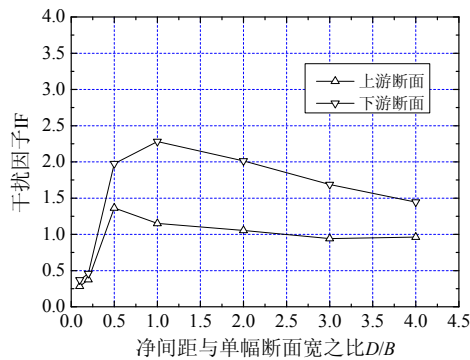


图5 双幅典型断面升力系数根方差干扰因子变化曲线

Fig.5 Variation curves of RMS lift coefficient interference factor of twin representative sections

3 气动干扰机理分析

静力风荷载是桥梁断面表面风压分布在宏观上的体现,因此,从微观角度看,气动干扰引起的双幅桥面静力系数变化源于上下游桥面风压分布的改变。基于此,本节以双幅矩形断面为例从风压分布角度对双幅典型断面静力系数的气动干扰机理进行分析。

图6和图7分别为单幅、双幅矩形断面表面风压系数均值分布。图6和图7中风速从左至右(下同),对双幅断面而言,上图为上游断面,下图为下游断面。可以发现:上游矩形断面风压均值分布与单幅矩形断面结果大体接近。下游矩形断面迎风侧风压均值明显小于单幅断面结果。随着间距的逐渐增大,下游矩形断面迎风侧风压均值逐步增大,但即使 $D/B=3$ 时仍只有单幅断面结果的一半左右。从图6和图7可以清楚地看到上游断面对下游断面的遮挡作用。遮挡作用使上游断面的尾流水平风速,亦即下游断面的实际来流水平风速减小,导致下游断面迎风侧表面风压均值减小,这是下游断面阻力系数均值比单幅断面结果小的根本原因。间距越小,遮挡越严重,故下游断面阻力系数均值减小幅度更大。

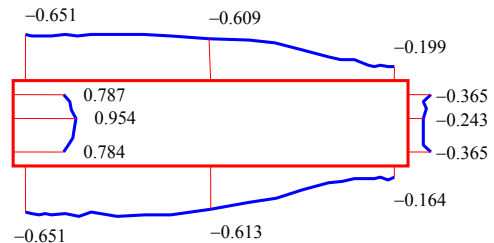
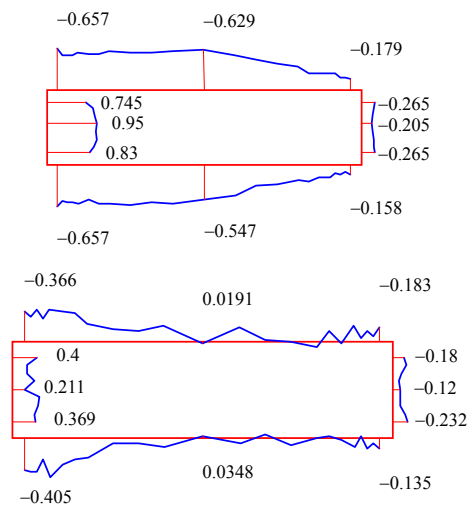


图6 单幅矩形断面风压均值分布

Fig.6 Mean pressure coefficient distribution of single rectangular section



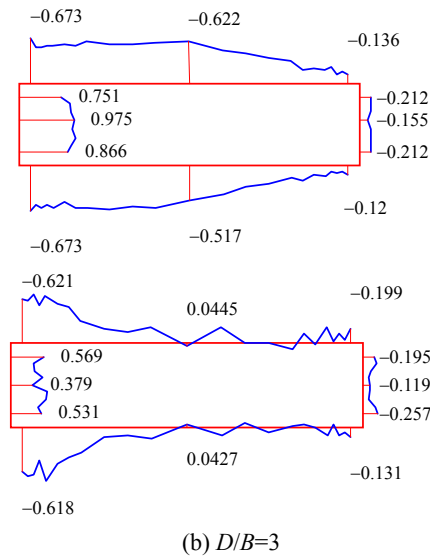


图 7 双幅矩形断面风压均值分布
Fig.7 Mean pressure coefficient distribution of twin rectangular sections

图 8 和图 9 显示了单幅、双幅矩形断面的风压系数根方差分布。可以看到: 1) 当 $D/B=0.2$ 时, 上游矩形断面背风侧的风压根方差小于单幅断面结果。这表明: 当 $D/B=0.2$ 时, 上游矩形断面的涡脱受到了明显的抑制, 下游矩形断面基本上浸没在上游矩形断面的剪切尾流层中。这是上下游矩形断面的升力系数根方差干扰因子在 $D/B \leq 0.2$ 时明显小于 1 的原因; 2) 当 $D/B=0.5$ 时, 上游矩形断面背风侧的风压根方差大于单幅断面结果, 下游矩形断面

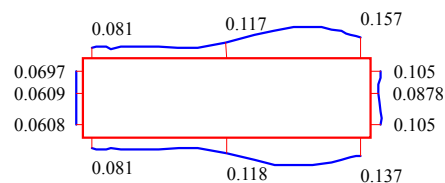
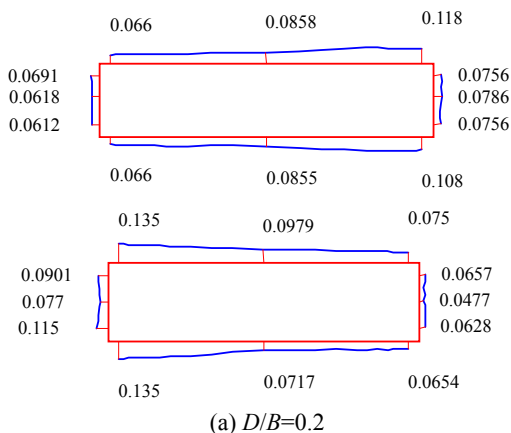
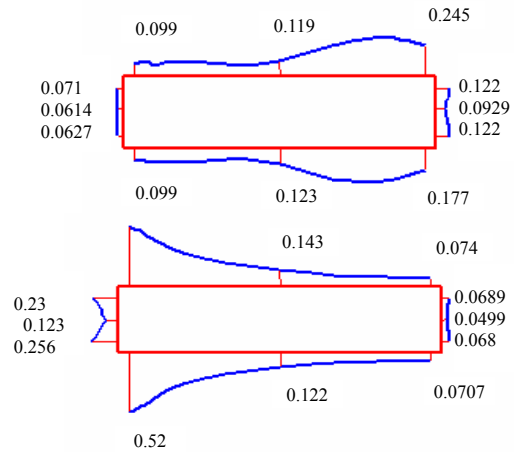


图 8 单幅矩形断面风压根方差分布
Fig.8 RMS pressure coefficient distribution of single rectangular section



(a) $D/B=0.2$



(b) $D/B=0.5$

图 9 双幅矩形断面风压根方差分布
Fig.9 RMS pressure coefficient distribution of twin rectangular sections

迎风侧的风压根方差明显大于单幅断面结果。这表明: 当 $D/B=0.5$ 时, 上游矩形断面的涡脱不仅没有受到抑制, 反而由于两断面之间的收缩流效应有所加强。上游矩形断面的尾流涡脱向下游移动并直接作用于下游矩形断面迎风侧前缘。这是上游矩形断面的升力系数根方差干扰因子略大于 1, 下游矩形断面的升力系数根方差干扰因子明显大于 1 的原因。

4 结论

本文通过风洞试验对双幅典型断面静力系数气动干扰进行了研究, 得到了以下几点结论:

(1) 建立了双幅桥面静力系数气动干扰的定量分析方法。定义干扰因子为双幅桥面的静力系数与单幅桥面的静力系数之比。干扰因子小于 1, 表示气动干扰为减小效应; 干扰因子大于 1, 表示气动干扰为增大效应。

(2) 上游钝体断面(矩形断面和 Π 形断面)的阻力系数均值干扰因子接近 1; 下游钝体断面的阻力系数均值干扰因子明显小于 1, 间距越小, 干扰因子越小。上下游流线形断面的阻力系数均值干扰因子在 $D/B < 0.5$ 时略小于 1, 在 $D/B > 0.5$ 时大体接近 1。

(3) 上下游钝体断面的升力系数根方差干扰因子在 $D/B \leq 0.2$ 时明显小于 1, 随着 D/B 的增大先增大后减小。上游钝体断面的升力系数根方差干扰因子最大值略大于 1; 下游钝体断面的升力系数根方差干扰因子最大值明显大于 1。上游流线形断面的升力系数根方差干扰因子大体接近 1; 下游流线形

断面的升力系数根方差干扰因子基本上大于 1。

参考文献:

- [1] Irwin R A, Stoyanoff S, Xie J, et al. Tacoma Narrows 50 years later-wind engineering investigations for parallel bridges [J]. *Bridge Structures: Assessment, Design and Construction*, 2005, 1(1): 3—17.
- [2] 刘志文, 刘小兵, 陈政清, 栗小祜. 均匀流场串列双 Π 形断面涡激振动气动干扰试验研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(12): 199—205.
Liu Zhiwen, Liu Xiaobing, Chen Zhengqing, Li Xiaohu. Experimental investigation of aerodynamic interference effects on VIV of two Π -shaped cylinders in tandem in smooth flow [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(12): 199—205. (in Chinese)
- [3] 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: 954—962.
- [4] Sarkar P P, Jones N P, Scanlan R H. Identification of aeroelastic parameters of flexible bridges [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1994, 120(8): 1718—1742.
- [5] 朱乐东, 周奇, 郭震山, 孟晓亮. 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*, 2010, 38(5): 632—638.
Zhu Ledong, Zhou Qi, Guo Zhenshan, Meng Xiaoliang. Aerodynamic interference effects on flutter and vortex-excited resonance of bridges with twin-separated parallel box decks [J]. *Journal of Tongji University*, 2010, 38(5): 632—638. (in Chinese)
- [6] Sockel H, Watzinger J. Vibrations of two circular cylinders due to wind-excited interference effects [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 74/75/76: 1029—1036.
- [7] 陈政清, 刘小兵, 刘志文. 双幅桥面桥梁三分力系数的气动干扰效应研究[J]. *工程力学*, 2008, 25(7): 87—93.
Chen Zhengqing, Liu Xiaobing, Liu Zhiwen. Study of aerodynamic interference effects on aerodynamic coefficients of twin-deck bridges [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(7): 87—93. (in Chinese)
- [8] 郭震山, 孟晓亮, 周奇, 朱乐东. 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.
Guo Zhenshan, Meng Xiaoliang, Zhou Qi, Zhu Ledong. Aerodynamic interferences of an existed bridge on aerodynamic coefficients of an adjacent new bridge [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(9): 181—186, 200. (in Chinese)
- [9] 刘小兵, 陈政清, 刘志文, 杨群. 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, Yang Qun. Numerical study on interference of aerodynamic force on two rectangular sections with tandem arrangement in uniform wind field [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(12): 83—87. (in Chinese)
- [10] Honda A, Shiraishi N, Motoyama S. Aerodynamic stability of kansai international airport access bridge [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 33: 369—376.