

自然风下大比例模型的雷诺数效应

卢 斌,陈子涛,王 新

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为了分析阻塞度和洞壁效应对大比例模型风洞试验结果精度的影响,通过制作缩尺比为 1:9 的大比例尺流线型桥梁断面模型,安装到高速移动的汽车上,形成不同风速的自然风场。测量了不同车速下(即不同雷诺数)模型的表面压力,拟合了试验数据,研究了自然风作用下高雷诺数区的流线型断面的三分力系数的变化规律以及表面压力分布的特点,并将自然风场数据与风洞试验数据进行了对比。研究结果表明:阻塞度和洞壁效应将对大比例模型的雷诺数效应产生较大影响,其中,当 $Re < 3 \times 10^5$ 时,随着雷诺数 Re 的增加,考虑阻塞度和洞壁效应影响的阻力系数呈不断减小的变化趋势,而不考虑其影响的阻力系数呈上升的变化趋势;阻塞度和洞壁效应使得升力系数数值变小,而升力矩系数数值却变大;阻塞度和洞壁效应不会改变模型表面最小压力点出现的位置,但是会使模型表面压力系数数值变小。

关键词: 桥梁工程;雷诺数;高缩尺比;自然风;三分力系数;压力系数;阻塞率

中图分类号: U446

文献标志码: A

Reynolds number effect of large-scale model in natural wind

LU Bin, CHEN Zi-tao, WANG Xin

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to analyze the effect of wall interference and blockage on the accuracy of wind tunnel test, a streamlined model of bridge deck in 1:9 ratio was made to do the experiment on a high speed vehicle in natural wind. After measuring the surface pressures under different speeds different Reynolds numbers, and fitting the data, the test data between natural wind and wind tunnel were compared to figure out the varying pattern of the mean aerodynamic force coefficient and the distribution characteristics of surface pressure on streamlined section in high Reynolds number under natural wind. The results show that there exist differences between the experiment under wind tunnel test and that under natural wind in mean aerodynamic force coefficient. When Reynolds number $< 3 \times 10^5$, wall interference and blockage make the tendency of drag coefficient decrease, however, the tendency increases without the effect of wall interference and blockage; wall interference and blockage make lift coefficient decrease and torsion coefficient increase. They won't change the position of the lowest pressure point, but diminish the value of surface pressures. 1 tab, 10 figs, 16 refs.

Key words: bridge engineering; Reynolds number; high ratio; natural wind; mean aerodynamic force coefficient; pressure coefficients; blockage

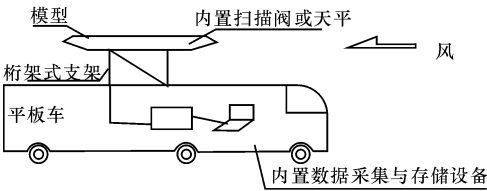
0 引言

随着现代桥梁跨度的增大、刚度的降低,在桥梁建设的过程中都会进行风洞试验,以便确定该桥型的可靠性。在试验过程中,Scanlan 等指出,当桥梁风洞试验模型的缩尺比小于 1 : 300 时,雷诺数效应应该引起重视^[1]。在很多基于风洞试验的研究中,国内外学者总结出许多宝贵的结论,Larsen 等得到大海带东桥引桥的三分力系数^[2-4]、Strouhal 数随雷诺数变化的关系^[5];李加武等研究了典型的近流线型桥梁断面的雷诺数效应。但是在进行风洞试验时,由于风洞实验室的尺寸限制,阻塞效应对试验结果影响很大^[6-9],庞加斌等在对汽车风洞的试验中提出雷诺数、阻塞和边界层效应的问题^[10]。即使模型的阻塞度在百分之二以下,洞壁的干扰也会使试验值和真值相差很大。然而在进行风洞试验时,大部分试验模型的阻塞度均会大于百分之二。目前提出的解决办法是用修正系数对试验结果进行修正,然而还没有一个准确可靠的修正函数,所以国内外的大部分学者,在进行风洞试验时都没有考虑阻塞度效应的影响,显然这种做法是不严谨的^[11-14]。为此,本文分析了在自然风场条件下雷诺数效应对三分力系数以及压力系数的影响,通过对比试验结果,寻求在不考虑阻塞效应下的三分力系数以及压力系数随雷诺数改变的变化关系。

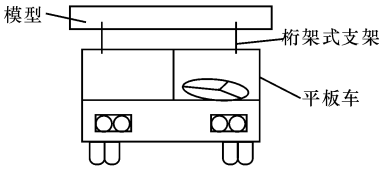
1 试验研究

本试验在长安大学汽车试验跑道进行模拟自然风的试验,以厦漳跨海大桥为工程算例,制作了宽高比为 11 : 1,缩尺比为 1 : 9 的主梁节段模型,其断面为流线型断面,模型骨架由槽钢焊接而成,主模型外衣均由有机玻璃制作,辅助模型外衣由泡沫板制作。在模型的 1/2 长度处设置测压孔,孔径为 1 mm。模型的长度、宽度、高度分别为 2.97、3.3、0.3 m。不同于传统的风洞试验,该试验用试验专用车载着大比例模型在汽车跑道高速行驶,模拟自然风环境下的风场,见图 1、图 2。

平板车内放入纵横搭配的钢桁架,并用高强螺栓固定。模型底焊接在桁架之上,并且在此处架立平整的木板。节段模型的下缘距二元端板 30 cm,因此无需考虑试验过程中的壁面效应。试验时风攻角为 0°,让平板车在高速跑道上行驶,通过改变车速来达到改变雷诺数大小的目的。试验时,现场为无风状态,风场特性为均匀流。



(a) 平板车侧面概念图



(b) 平板车正面概念图

图 1 自然风场模型

Fig. 1 Illustration of model in natural wind



(a) 平板车侧面实物

(b) 平板车正面实物

图 2 大模型在自然风场跑车试验

Fig. 2 Test of the model in natural wind

模型的测点布置见图 3,图中数字为测压孔编号,A 点为迎风向最近点,B 点为背风向最远点。

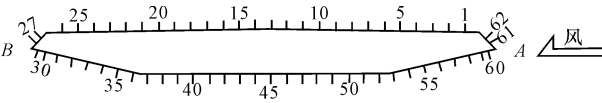


图 3 模型表面测点分布

Fig. 3 Distribution of pressure point on model surface

下文中,测点到 A 点的距离用量纲一距离 D 来表示。 D 的定义为:如果某测点(如点 1)距离上游点 A 的实际距离为 D_d ,而从上游点 A 沿着模型表面到最下游点 B 的距离为 D_t ,那么该点的量纲一距离为

$$D = \frac{D_d}{D_t} \quad (1)$$

2 自然风下雷诺数效应与三分力系数的关系

将该模型与在长安大学 CA-1 风洞中测得的数据进行对比,2 组试验条件对比见下页表 1。

测力均采用框式天平测力系统,阻力方向最大量程为 300 N,升力方向 1 000 N,升力矩 100 N · m,表面压力采用相同的压力测量系统,系统由美国 PSI 公

表 1 试验条件对比		
Tab. 1 Comparison of test conditions		
试验条件	CA-1 风洞	自然风场
风场特性	均匀流(紊流度<0.3%)	均匀流
缩尺比	1:9	1:9
试验工况		2.8, 5.6, 8.3, 11.1,
风速/(m·s ⁻¹)	2, 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 10, 15, 20, 25	13.9, 16.7, 19.4, 22.2
阻塞率/%	12	0
试验数据量	50 组(每个工况 5 组)	48 组(每个工况 6 组)

司电子压力扫描阀,A/D 板,PC 机,自编的信号采集及数据处理软件组成,电子压力扫描阀量程为±254 mm 水柱。由于风洞试验段尺寸的问题,使得阻塞率很大,必须对数据进行阻塞效应的修正。修正公式为

$$C_{DC}=KC_D\frac{S}{C}+C_D$$

(2)

$$C_{PC}=KC_P\frac{S}{C}+C_P$$

(3)

式中: C_D 、 C_P 分别为风洞试验得到的阻力系数和压力系数; C_{DC} 、 C_{PC} 分别为修正后的阻力系数和压力系数; S 为模型的正投影面积; C 为风洞试验段截面的面积; K 为量纲一的系数,一般由试验提供。

2.1 阻力系数

由图 4 可知,在自然风场下,当 $Re<7.5\times10^4$ 时,阻力系数 C_D 增加剧烈;而当 $Re>7.5\times10^4$ 时,阻力系数 C_D 随着雷诺数的增加变化幅度不大,在 $Re>4.5\times10^5$ 时,随着雷诺数的增加,阻力系数 C_D 呈下降的态势,降幅并不剧烈。从拟合方程的曲线得知,当 $Re<3\times10^5$ 阻力系数 C_D 随着雷诺数 Re 的增加而增加,阻力系数 C_D 的极值不超过 0.6;当 $Re=3\times10^5$ 后,阻力系数 C_D 随着雷诺数 Re 的增加而减小。这与之前国内外学者根据风洞试验拟合出的流线型桥梁断面阻力系数随雷诺数变化的趋势在雷诺数 $Re<3\times10^5$ 时明显不同^[15-16],在之前基于风洞试验的拟合曲线均呈现下降的趋势,而本试验却呈现上升的趋势,但是在雷诺数 $Re>3\times10^5$ 之后,基于自然风条件下拟合的方程和基于风洞试验拟合的方程变化趋势是比较接近的。

2.2 升力系数

由图 5 可以看出,自然风场下,升力系数 C_L 随着雷诺数 Re 的增加而逐渐降低,降幅缓慢。这与基于风洞试验的拟合方程基本接近。自然风场下得到的升力系数普遍比风洞试验得到的数值大。

2.3 升力矩系数

由图 6 可以看出,自然风场下,升力矩系数 C_M

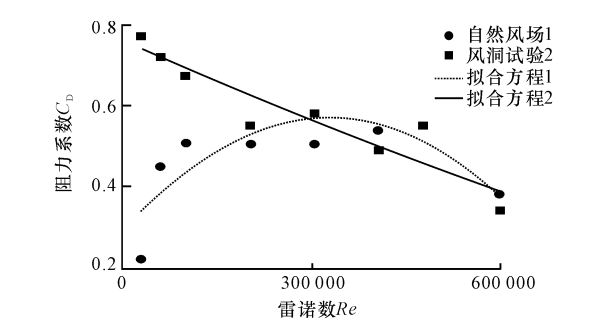


图 4 阻力系数随雷诺数变化规律
Fig. 4 Variation of drag coefficient with the changes of Reynolds number

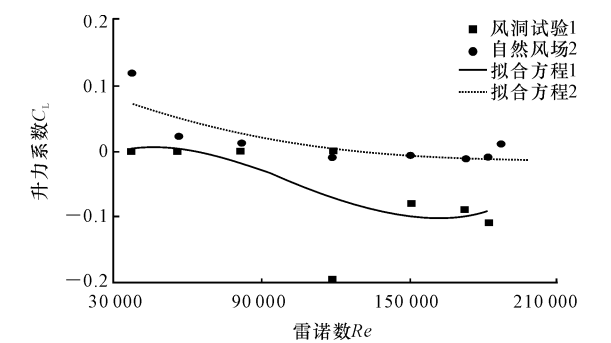


图 5 升力系数随雷诺数变化规律
Fig. 5 Variation of lift coefficient with the changes of Reynolds number

随着雷诺数 Re 变化基本不发生明显变化。由此可见流线型桥梁断面的升力矩系数的雷诺数效应并不明显,因此在抗风设计中有关升力矩系数的,可以不考虑雷诺数效应,这与基于风洞试验得出的结果是相同的。但是就数值来说,自然风场下的升力矩系数都比风洞试验得出的结果小。

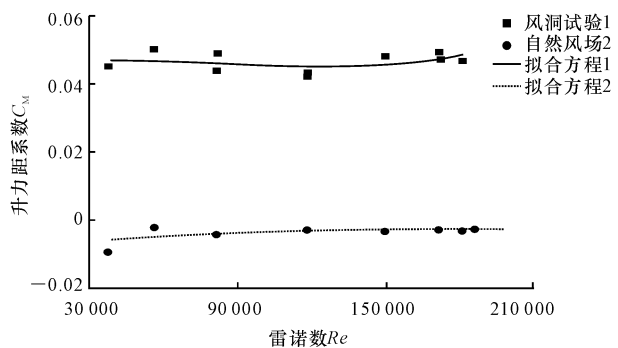


图 6 升力矩系数随雷诺数变化规律
Fig. 6 Variation of moment coefficient with the changes of Reynolds number

3 雷诺数效应下表面压力特征

3.1 上表面

下页图 7 为 0°风攻角下,流线型桥梁断面模型

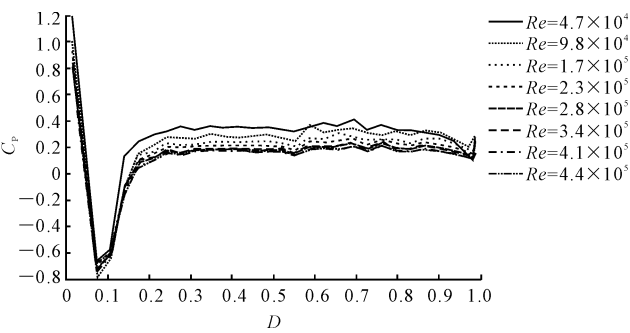


图 7 自然风场流线型断面(0°风攻角)模型上表面压力分布

Fig. 7 Distribution of upper surface pressures on streamlined model in natural wind

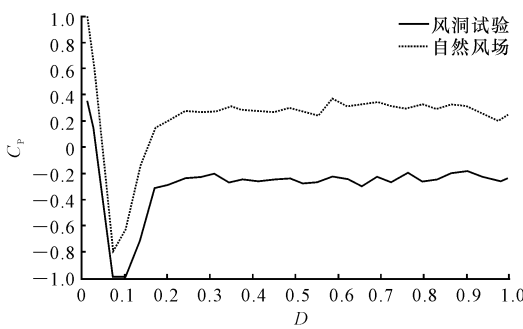
上表面压力分布图。

从图 7 中可以看出:①在 0°风攻角时,上表面压力系数从 $D=0.014$ 的 $C_p=1.2$ 向下游逐渐减小,到 $D=0.05$ 时, $C_p=0$;当压力系数 C_p 过了零点以后,继续减小,到 $D=0.07$ 时,压力系数达到最小

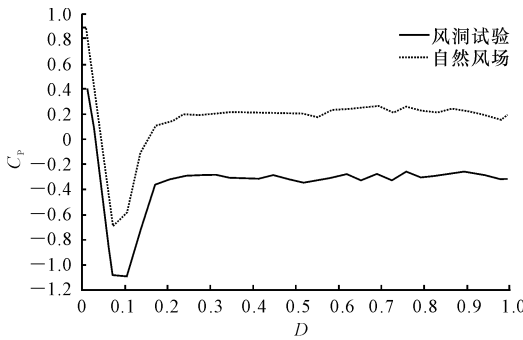
值;②不同雷诺数下,压力系数的最小值也不同,但是压力系数最小值的位置是基本相同的;③雷诺数对于压力系数最小值出现的位置没有影响,对最小压力系数的数值大小是有影响的;④当压力系数 C_p 越过最小值,便开始快速的增加,进入逆压梯度区;当到达 $D=0.17$ 时,压力系数的增加速度开始减慢,直到最后,压力系数一直在缓慢的增加,但是增加的幅度很小。

试验结果表明:上表面最小压力系数的数值会随着雷诺数的变化而变化,当 $Re>1\times10^5$ 时,上表面最小压力系数的数值会随着雷诺数的增加而减小,雷诺数的变化并不会改变上表面最小压力系数出现的位置。

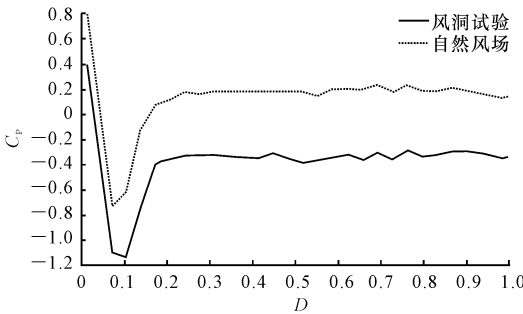
由图 8 可以看出,不同雷诺数下,自然风场和风洞试验得到的上表面压力系数最小值出现的位置没有区别,但是自然风场下得到的上表面压力系数数值比风洞试验得到的的大。



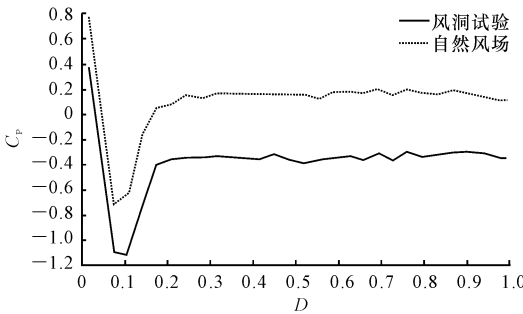
(a) $Re=1\times10^5$



(b) $Re=2\times10^5$



(c) $Re=3\times10^5$



(d) $Re=4\times10^5$

图 8 流线型断面上表面压力分布对比

Fig. 8 Comparison of upper surface pressures

3.2 下表面

下页图 9 为 0°风攻角下,流线型桥梁断面模型下表面压力分布图。

从图 9 可以看出:①在 0°风攻角下,下表面压力系数从 $D=0.015$ 的 $C_p=0.07$ (对应于模型上的测点 60)向下游开始快速的增大,到 $D=0.05$ 附近, C_p 达到最大值;②随着雷诺数的变化, $C_p=0$ 的位置也

会稍微的变化,随着雷诺数的增加, $C_p=0$ 的位置会向上游移动,但是移动的幅度并不是很大。可见雷诺数对压力系数 $C_p=0$ 的位置有一定的影响,变化有一定的周期性;③压力系数过了最大值以后,便快速减小,到 $D=0.2$ 附近时, $C_p=0$;过了零点后压力系数继续减小压力系数到达第一个最小值,为了和后边的另一压力系数最小值区别,定义该点为下表

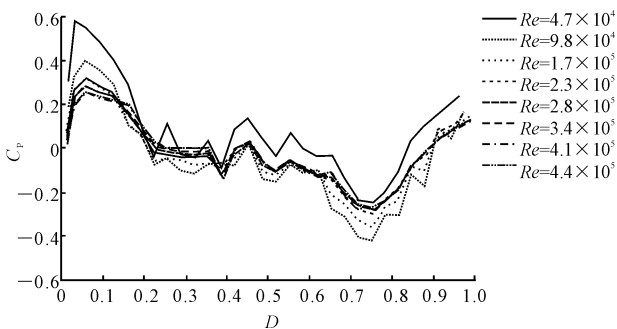
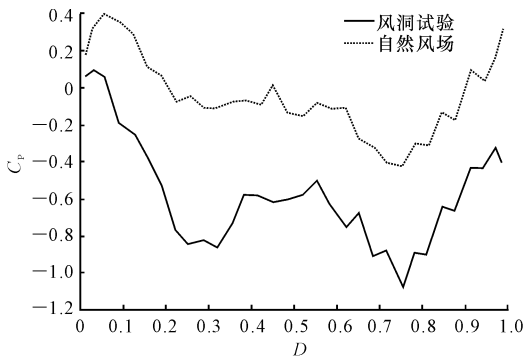


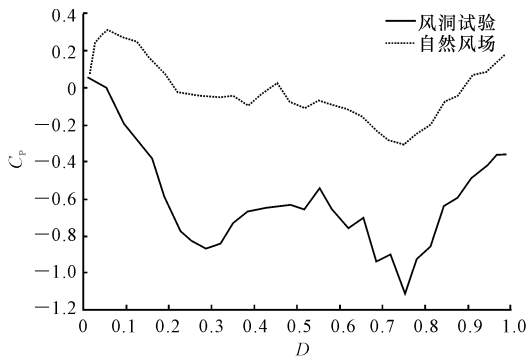
图 9 流线型断面(0°风攻角)模型下表面压力分布

Fig. 9 Distribution of down surface pressures on streamlined model in natural wind

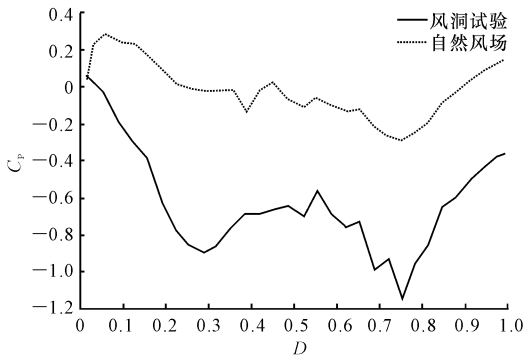
面第一最小压力点,不同雷诺数下第一最小压力点均出现在该位置。雷诺数对于第一最小压力点出现的位置没有影响,但是对第一最小压力系数的值是有影响的,雷诺数越大,其值越小;④从 $D=0.3$ 到



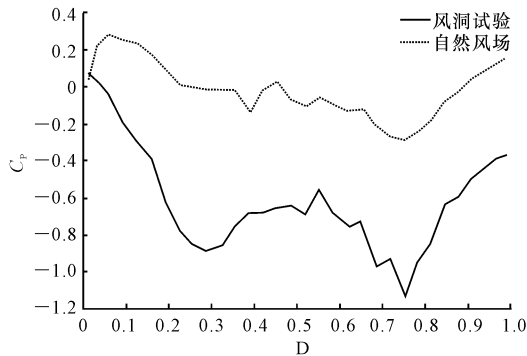
(a) $Re=1 \times 10^5$



(b) $Re=2 \times 10^5$



(c) $Re=3 \times 10^5$



(d) $Re=4 \times 10^5$

图 10 流线型断面下表面压力分布对比

Fig. 10 Comparison of down surface pressures

4 结 语

(1)对于近流线型断面,在 0° 风攻角下,自然风场下阻力系数的变化近似呈抛物线形式,与风洞测试结果不一致;升力系数数值相比较风洞试验的大;升力矩系数随着雷诺数的增加基本没有变化。

(2)自然风场测试的表面压力系数随雷诺数的

$D=0.6$ 这一区域,压力系数周期变化的增加,基本在 0 附近变化。从 $D=0.6$ 开始,压力系数再次开始减小,到 $D=0.75$ 压力系数到达另一最小值(即第 2 最小压力系数点)。从图上可以看出该点的压力系数要比第一最小压力系数小的多,越过第 2 最小压力点之后,压力系数又开始增加,到 $D=0.99$ (点 29),完成整个下表面压力分布,定义该区域为第 2 逆压梯度区。

试验结果表明:雷诺数的大小对零点、最小压力系数点出现的位置没有影响,雷诺数影响的只是最小压力系数数值的大小。

由图 10 可以看出,不同雷诺数下,自然风场和风洞试验得到的下表面压力系数最小点出现的位置基本一致,自然风场下得到的表面压力系数数值比风洞试验得到的大。

演变规律与风洞风场测试结果类似,但是模型置于自然风场中得到的上下表面压力系数均大于风洞均匀风场中得到的结果。

(3)目前对于阻塞效应的修正公式还没有一个确定的公式,大部分的公式都是采用半理论半经验的公式,修正后的压力系数及三分力系数取决于对量纲一的 K 值的选取,同时, K 的取值对于流场以及模型

的外形都具有很高的敏感度,同时紊流尺度和紊流强度也对 K 值影响很大。因此, K 的取值不应该仅仅用线性插值就得出,而是应该通过试验测出。

(4) 本文只是针对在自然风场下流线型桥梁断面的三分力系数以及表面压力系数的雷诺数效应作了分析,还有待于进一步研究以钝体桥梁断面或者不同宽厚比的桥梁断面来研究自然风场下的雷诺数效应问题。

参考文献:

References:

- [1] Scanlan R H, Sabzevari A. Experimental aerodynamic coefficients in the analytical study of suspension bridge flutter[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1969, 11(3): 234-242.
- [2] Schewe G. On the force fluctuations acting on a circular cylinder in cross flow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 133(7): 265-285.
- [3] Schewe G, Larsen A. Reynolds number effects in the flow around a bluff bridge deck cross section[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74-76(4): 829-838.
- [4] Schewe G. Reynolds-number effects in flow around more-or-less bluff bodies[J]. Journal of Wind Engineering and industrial Aerodynamics, 2001, 89 (14/15): 1267-1289.
- [5] 周志勇. 桥梁断面雷诺数效应数值模拟研究[J]. 空气动力学学报, 2009, 27(6): 664-670.
ZHOU Zhi-yong. Numerical simulation study on Reynolds number effect on bridge decks[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2009, 27(6): 664-670. (in Chinese)
- [6] 李加武, 林志兴, 项海帆. 极端桥梁断面雷诺数效应研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2003, 24(2): 22-25.
LI Jia-wu, LIN Zhi-xing, XIANG Hai-fan. Study on the Reynolds number effect of two extreme bridge sections[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2003, 24(2): 22-25. (in Chinese)
- [7] 李加武, 林志兴, 项海帆. 雷诺数对桥梁断面表面压力分布影响[J]. 桥梁建设, 2005(1): 12-14.
LI Jia-wu, LIN Zhi-xing, XIANG Hai-fan. Influences of Reynolds number on surface pressure distribution around bridge deck section[J]. Bridge Construction, 2005(1): 12-14. (in Chinese)
- [8] 李加武. 桥梁断面雷诺数效应及其控制研究[D]. 上海: 同济大学, 2003.
LI Jia-wu. Study on Reynolds number effect and control[D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in Chinese)
- [9] 李加武, 林志兴, 项海帆. 桥梁断面三分力系数的雷诺数效应[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(10): 1329-1333.
LI Jia-wu, LIN Zhi-xing, XIANG Hai-fan. Reynolds number effect of mean force coefficient of bridge deck section[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(10): 1329-1333. (in Chinese)
- [10] 庞加斌, 刘晓晖, 陈力, 等. 汽车风洞试验中的雷诺数、阻塞和边界层效应问题综述[J]. 汽车工程, 2009, 31(7): 609-615.
PANG Jia-bin, LIU Xiao-hui, CHEN Li, et al. A Review on Reynolds number, blockage and boundary layer effects in automotive wind tunnel tests[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(7): 609-615. (in Chinese)
- [11] Michael C H H, Larsen A. Aerodynamic investigations for the deck of stonecutters bridge emphasizing Reynolds number effects[R]. Busan Korea: Elsevier Publication, 2002.
- [12] Barre C, Barnaud G. High Reynolds number simulation techniques and their application to shaped structures model test[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 57(2/3): 145-157.
- [13] 崔欣, 李加武, 陈飞, 等. 准流线型桥梁断面涡激共振的雷诺数效应[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(2): 47-51.
CUI Xin, LI Jia-wu, CHEN Fei, et al. Reynolds number effect on vortex resonance of streamline-like bridge deck section[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(2): 47-51. (in Chinese)
- [14] 李加武, 崔欣, 张宏杰, 等. 粗糙度对雷诺数效应的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(2): 56-59.
LI Jia-wu, CUI Xin, ZHANG Hong-jie. Influence of surface roughness on Reynolds number effects[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(2): 56-59. (in Chinese)
- [15] 白桦. 流线型桥梁断面雷诺数效应[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(5): 17-22.
BAI Hua. Reynolds number effect of streamlined bridge section[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(5): 17-22. (in Chinese)
- [16] 白桦. 近流线型断面静力三分力系数的雷诺数效应识别[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(4): 60-63.
BAI Hua. Identification of Reynolds Number Effect of Tri-component Force Coefficient of Streamline-like Section[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(4): 60-63. (in Chinese)