

文章编号:1671-8879(2018)03-0071-09

栏杆透风率对主梁涡振特性影响的风洞试验

崔欣^{1,2}, 王慧贤¹, 管青海², 刘建新²

(1. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 河南 郑州 450011; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为了研究栏杆透风率对箱形钢主梁涡激振动特性的影响,通过不同的封闭栏杆方案改变外侧栏杆的透风率,并在试验模型表面布置测压孔道,进行测振、测压风洞试验。采取 2 种封闭形式,一封三空和一封二空方案,即比原方案的透风率分别降低 25% 和 33%。在不同的透风率工况下,同步测量主梁断面风速与振幅的关系及模型表面各测点的风压时程,分析模型表面各测点的平均压力系数、脉动压力系数及功率谱密度随栏杆透风率的变化情况。研究表明:降低栏杆透风率可有效抑制主梁的涡激振动;不同工况下,主梁表面压力系数的分布规律一致,仅在数值上有所差异,这是由阻风面积改变造成;封闭栏杆方案较原方案的脉动压力系数在分布规律及数值上均有显著差异;原方案绝大部分测点的涡脱频率集中在模型的竖弯和扭转频率,且能量较大,而封闭栏杆方案的涡脱频率仅有小部分集中在竖弯和扭转频率,且能量较小,栏杆透风率的降低改变气流的绕流,有效打散了能量在竖弯及扭转频率上的集中,因此未能激起结构的显著振动;涡激振动对栏杆透风率具有敏感阈值,栏杆透风率降低 25% 是对该桥竖弯涡振影响的阈值。

关键词:桥梁工程;涡振;风洞试验;气动措施

中图分类号:U448.27 **文献标志码:**A

Wind tunnel experimental on influence of railing ventilation rate on characteristics of vortex-induced vibration of main girder

CUI Xin^{1,2}, WANG Hui-xian¹, GUAN Qing-hai², LIU Jian-xin²

(1. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, Henan, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To study the influence of railing ventilation rate on characteristics of vortex-induced vibration of main girder in box-shaped steel, ventilation rate of outside railing with different sealing strategies on railings were changed, and manometric holes were arranged on the surface of model, the vibration measurement and manometric method in the wind tunnel experiment were conducted. The railings were sealed in two ways, in the one-sealed three-open plan (a sealed segment was arranged between every three open segments) and in the one-sealed two-open plan (a sealed segment was arranged between every two open segments), the ventilation rate of two ways were reduced by 25% and 33%, respectively, compared to the original plan. The

收稿日期:2017-12-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51308214);河南省高等学校重点科研项目(16A560031);

华北水利水电大学高层次人才科研启动项目(40445)

作者简介:崔欣(1983-),女,河南郑州人,华北水利水电大学讲师,工学博士,E-mail:18424878@qq.com。

通讯作者:刘建新(1942-),男,山西清徐人,教授,博士研究生导师,E-mail:ljx@gl.chd.edu.cn。

relationship of the air speed on the section of main girder and its amplitude were measured based on the different vibration rates, and the change history of the average pressure coefficient, the pulsating pressure coefficient, and the power spectral density were analyzed on the tested holes which located on the surface of model. The results show that the reduce of railing vibration rate could restrain the vortex-induced vibration of the main girder effectively, and with different operating conditions, pressure coefficient distributes coherently on the surface of the main girder, the only difference caused by changing choke proportion lies on numerical values. Compared with the original plan, there are significant differences in railing sealing plan on distribution and values of pulsating pressure coefficient. The vortex-shed frequency on the majority of tested points concentrates on vertical bending and torsional frequency of the model, and the energy is larger, in the original plan, while there is only a small part of the vortex-shed frequency concentrates on the vertical bending and torsional frequency and the energy is small in the railing sealing plan, thus the reduce of railing ventilation rate changes the turbulent flow of air, effectively distributes the concentration of energy on the vertical bending and torsional frequency, therefore undoes the dramatic vibration of the framework. There is a susceptible threshold of vortex-induced vibration on railing ventilation rate, and while the railing ventilation rate reduce by 25% is the susceptible threshold which influences this bridge's vertical bending vortex-induced vibration. 1 tab, 13 figs, 24 figs.

Key words: bridge engineering; vortex-induced vibration; wind tunnel experiment; aerodynamic measurement

0 引言

涡激振动是大跨度桥梁在低风速下易出现的一种风致振动现象。涡激共振是一种带有自激性质的限幅振动,虽然不会像颤振一样给桥梁结构带来毁灭性的破坏,但其在低风速下发生的频率高,且振幅大足以影响行车安全,因此在施工或成桥阶段抑制涡激共振的发生或限制其振幅在可接受的范围内十分重要。目前抑制涡激振动的措施可分为结构措施、机械措施和气动措施,文献[1]~文献[6]中分别针对这些措施进行了参数分析。常规的气动措施有导流板、抑流板、风嘴、整流板、扰流板、分流板、稳定板等^[7-12]。张建经过多次风洞试验,发现某扁平钢箱梁在导流板紧贴风嘴时涡激振动性能最佳^[13]。虽然这些气动措施可以有效地消除或减轻桥梁的涡激共振现象,但也有些效果非常好的措施常因为不符合设计要求而被放弃。栏杆形式的变化具有实用、经济的优势,使得诸多学者致力于研究其对桥梁涡激振动性能的影响。曹丰产等认为涡激振动幅值对栏杆构造尺寸比较敏感^[14];管青海等依托江海直达船航道桥风洞试验详细研究了有无栏杆对主梁断面涡激振动特性的影响^[15-16];钱国伟等研究了栏杆形式对叠合梁断面斜拉桥的涡振性能影响,结果表

明,栏杆形式会改变主梁断面的气动外形,建议栏杆横梁采用圆形截面^[17];张国强等的研究表明,栏杆横梁断面形式、栏杆高度、栏杆向内倾斜角度、有无栏杆均会影响主梁的涡激振动特性^[18-19]。虽然诸多学者研究指出栏杆形式对主梁的涡激振动有显著影响,然而,栏杆造型往往涉及桥梁景观等问题,不便随意变更。为此,本文以江海直达船航道桥为背景,在不改变栏杆造型的基础上,仅通过封闭栏杆来改变栏杆透风率,研究栏杆透风率对箱形主梁涡激共振的影响,并从能量层面揭示抑振机理^[20]。

1 试验概况

本试验在长安大学 CA-1 风洞实验室进行^[21],以江海直达船航道桥为背景,此桥为单索面钢箱梁斜拉桥,其主梁断面如图 1 所示,制作成桥阶段缩尺比为 1:50 的节段模型,模型长度为 2.2 m,进行涡激共振试验及表面压力测量。

涡激共振试验采用刚体悬挂模型,模型与刚臂相连,通过 8 根弹簧将模型与刚臂组成的系统悬挂于内支架 α 机构上(图 2)。在刚臂两端安装 3 个加速度传感器,采集竖弯和扭转的振动信号。试验模型的阻尼比为 0.5%,风速比为 1:2.5,模型设计参数见表 1。

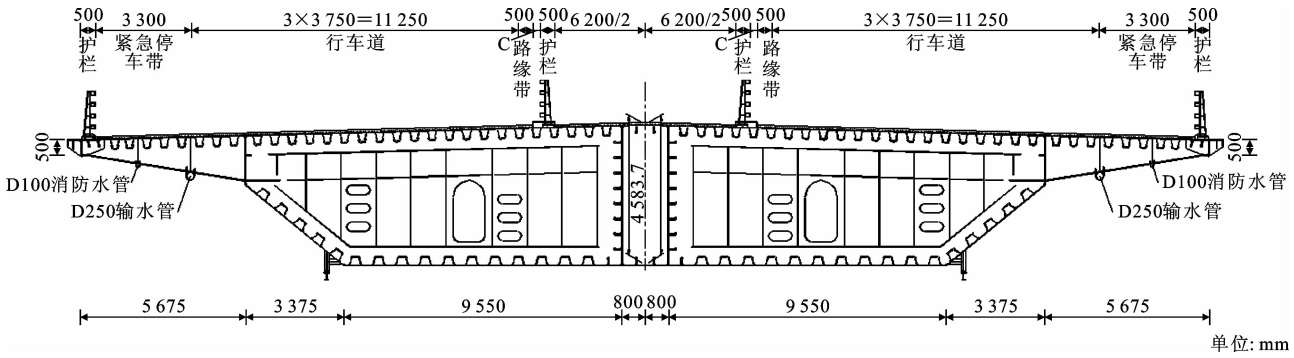


图 1 箱梁标准断面

Fig. 1 Typical cross section of box girder

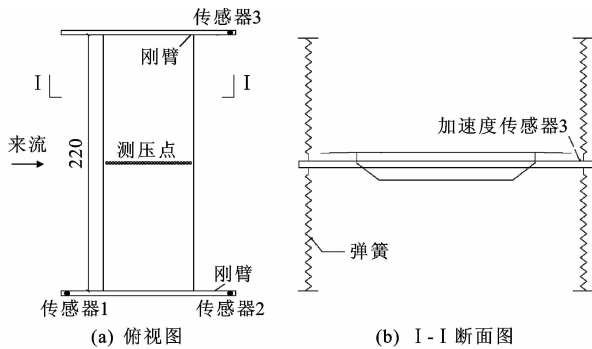


表 1 节段模型参数

Tab. 1 Parameters of segmental model

工况	模型 缩尺比	参数	实桥值	缩尺比	模型	模型	相对误 差/%
					设计值	实测值	
成桥 状态	1:50	等效质量/ ($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	35	1/502	14.00	13.93	0.50
		等效质量惯矩/ ($\text{Mg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)	3 630	1/504	0.58		
		竖弯基频/Hz	0.337 3	50/2.5	6.75	6.67	1.19
		扭转基频/Hz	0.925 3	50/2.5	18.51	18.25	1.41



(c) 风洞试验中的模型

单位: cm

图 2 试验模型的安装

Fig. 2 Layout of wind tunnel test

在模型的 1/2 长度处布设测压孔,共有 80 个测压孔,孔径为 1 mm,用于模型表面压力测量,测压点的分布如图 3 所示。图 3 中,1,2,⋯,80 为测压点编号。假设某测点距上游点 A 的距离为 D_{dist} ,而从上游点 A 沿着模型表面到下游点 B 距离为 D_{total} ,则该点

的量纲一化距离 $D_D = \frac{D_{\text{dist}}}{D_{\text{total}}}$, $D_D \leq 1$ 。

在均匀流场中,对 5° 、 3° 、 0° 、 -3° 、 -5° 攻角进行风洞试验。结果发现,在 5° 攻角下发生了竖弯涡激共振,在 -5° 攻角下发生了扭转涡激共振。为了抑制竖弯及扭转涡激共振的发生,对图 1 标准断面上外侧的两排栏杆进行封闭,采取 2 种封闭形式:一封三空和一封二空方案,与原方案相比,其透风率分别降低 25%、33%,如图 4 所示。对 2 种方案分别进行 -5° 及 5° 攻角下的涡激共振试验及表面压力测量,试图从压力层面揭示栏杆透风率对桥梁断面涡激特性的影响机理。

2 试验结果与分析

2.1 涡振响应与风速关系

图 5(a)为 -5° 攻角下原方案与 2 种封闭栏杆方案的扭转角与风速关系曲线,图中纵坐标为扭转

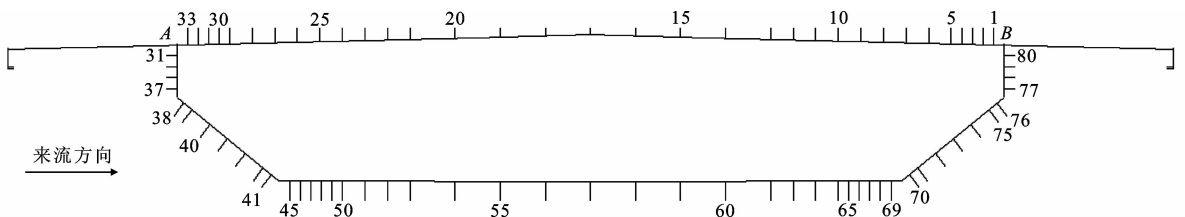


图 3 测压孔道布设示意

Fig. 3 Sketch of pressure taps layout

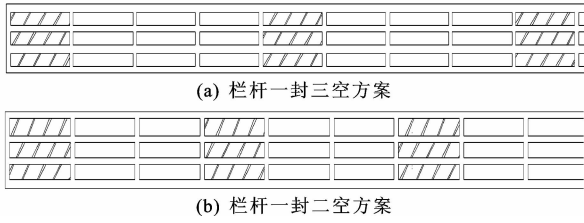


图4 栏杆封闭措施示意

Fig. 4 Sketch of suppression measures

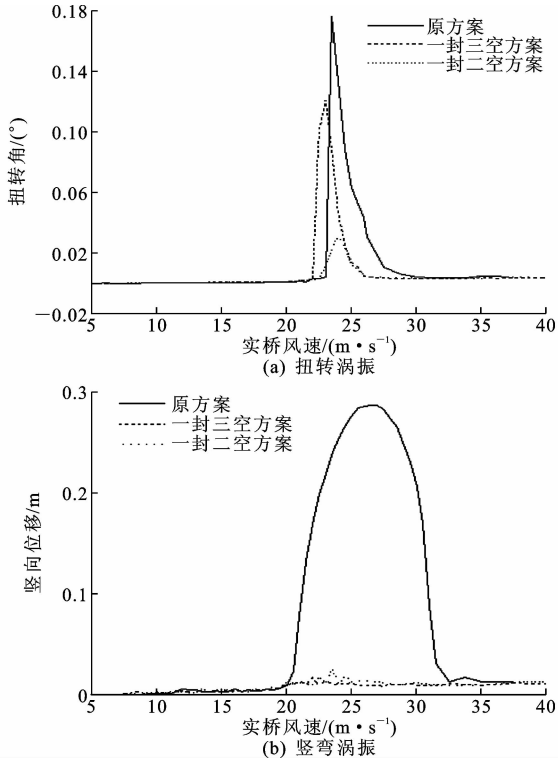


图5 涡振振幅与风速关系

Fig. 5 Vortex-induced vibration amplitude versus wind velocity

角在对应风速下的标准差。从图 5(a)可以看出:原方案在 -5° 攻角下发生了显著的扭转涡激共振,在实桥风速为 23.5 m/s 时扭转角振幅为 0.248 ° (振幅为标准差的 $\sqrt{2}$ 倍),不满足《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01—2004)(简称规范,下同)的要求;采用一封三空方案时,仍存在显著的扭转涡激共振现象,但扭转角振幅已降至 0.170 ° ,表明封闭栏杆能有效降低扭转涡激共振的振幅;采取一封二空方案时,风速 24.5 m/s 时最大振幅仅为 0.033 ° ,满足规范的要求。改变栏杆的透风率能显著降低扭转涡激共振的振幅。

图 5(b)为 5° 攻角下原方案与 2 种封闭栏杆方案的竖向位移与风速关系曲线。从图 5(b)可以看出:原方案在 5° 攻角下发生了显著的竖弯涡激共振,在实桥风速为 26.5 m/s 时竖向振幅为

$0.406\text{ }1\text{ m}$,不满足规范要求;对栏杆一封三空和一封二空方案进行风洞试验,可知在试验风速内未出现显著的竖弯涡激共振,改变栏杆的透风率也能有效抑制竖弯涡激共振的发生。

栏杆一封三空和一封二空方案均满足桥梁结构对颤振稳定性及静风稳定性的要求,并且此 2 种方案在其他攻角作用下均未发生显著的涡激共振现象。

2.2 压力分布

2.2.1 平均压力系数

图 6、图 7 分别为扭转、竖弯涡振振幅最大风速下模型表面各测点的平均压力系数^[22-23]。由于 -5° 攻角下一封三空方案试验数据坏点过多,因此图 6 中压力系数仅为原方案和一封二空方案。可以看出,无论是扭转涡振还是竖弯涡振,原方案和封闭栏杆方案平均压力系数的分布规律一致,即栏杆透风率的改变,并未从本质上改变断面的形状。但平均压力系数随着栏杆透风率的减小呈增大的趋势,这是由于透风率的减小,栏杆阻风面积增大造成的。表面压力系数的分布并不能解释栏杆透风率对桥梁涡激共振的影响。

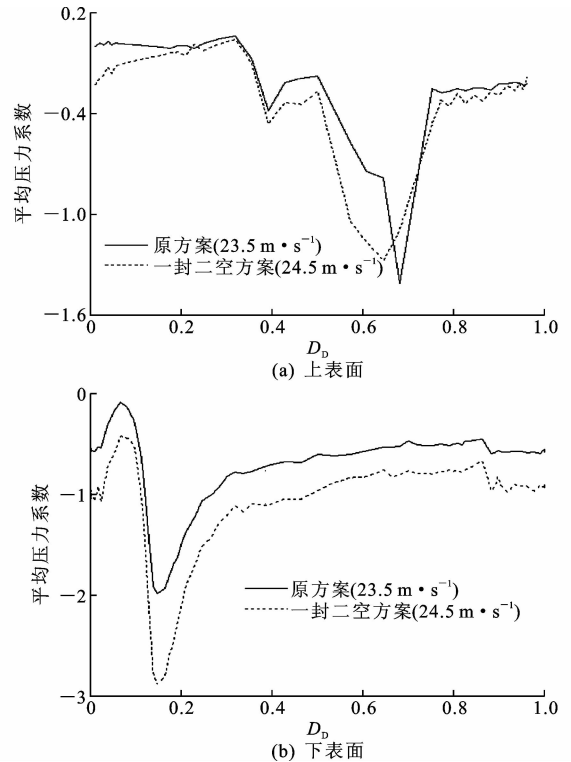
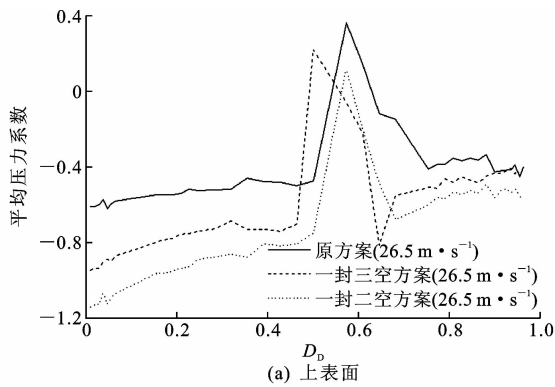


图6 扭转涡振振幅最大风速下各测点表面平均压力系数

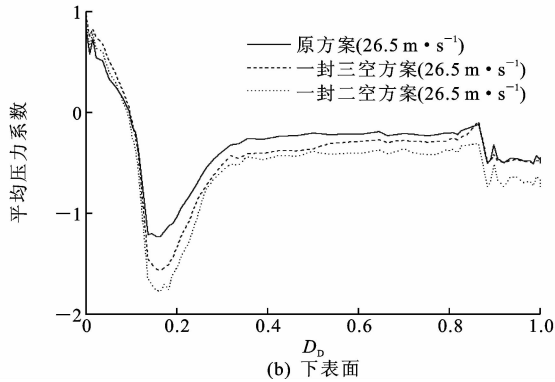
Fig. 6 Mean pressure coefficients at wind velocity of largest torsion amplitude of vortex-induced

2.2.2 脉动压力系数

图 8 为扭转涡振振幅最大风速下各测点脉动压



(a) 上表面



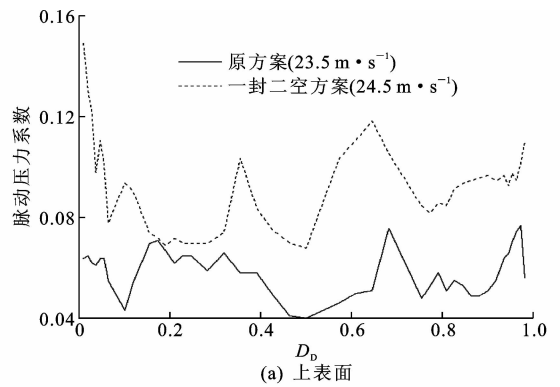
(b) 下表面

图 7 竖弯涡振幅最大风速下各测点表面平均压力系数

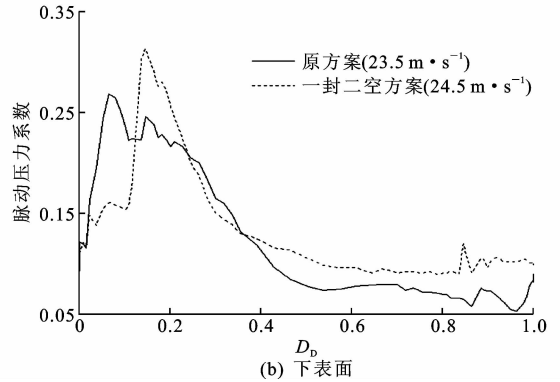
Fig. 7 Mean pressure coefficients at wind velocity of largest vertical amplitude of vortex-induced

力系数。从图 5(a)可知,一封二空方案的涡振振幅远小于原方案,但图 8(a)显示,一封二空方案模型上表面的脉动压力系数却明显大于原方案。虽然下表面的脉动压力系数随栏杆透风率的变化较上表面复杂,但从图 8(b)可看出,下表面的脉动压力系数总体上仍表现出封闭栏杆方案大于原方案的规律。以上分析表明,封闭栏杆方案的模型各测点表面压力波动大于原方案。

图 9 为竖弯涡振幅最大风速下模型表面各测点的脉动压力系数。可知,测点脉动压力系数的分布受栏杆透风率的影响较为显著。从图 9(a)可以看出,封闭栏杆方案模型表面的脉动压力系数较为平稳,尤其在 $D_D > 0.4$ 之后,一封三空和一封二空方案模型表面脉动压力系数均在 0.1 附近,而原方案的脉动压力系数在此点之后骤增,表明不封闭栏杆时在上表面中下游有较大旋涡产生。由图 9(b)可知,下表面在 $D_D < 0.3$ 时,原方案与封闭栏杆方案的脉动压力系数分布规律一致,数值也较为接近,但越过此点之后,原方案的脉动压力系数明显大于封闭栏杆方案,表明在原方案下表面中下游同样有较大旋涡产生。封闭栏杆方案和原方案的脉动压力系数有显著差异,但一封三空和一封二空方案的脉



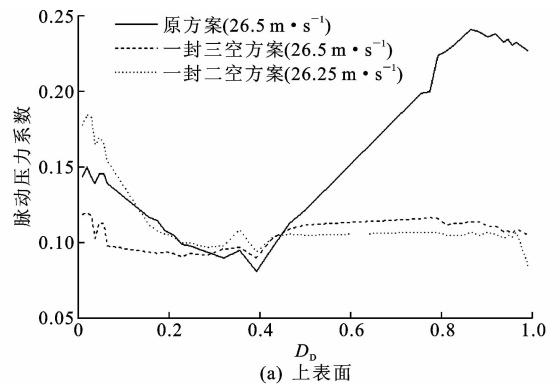
(a) 上表面



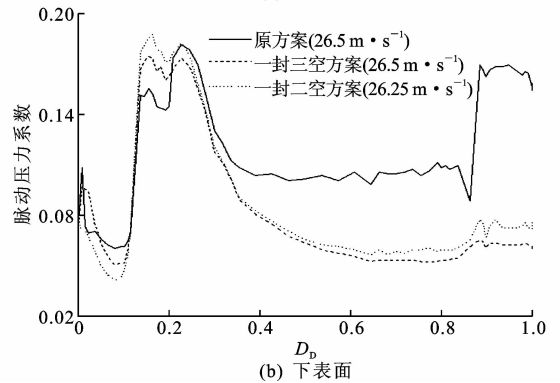
(b) 下表面

图 8 扭转涡振幅最大风速下各测点脉动压力系数

Fig. 8 Fluctuating pressure coefficients at wind velocity of largest torsion amplitude of vortex-induced



(a) 上表面



(b) 下表面

图 9 竖弯涡振幅最大风速下各测点脉动压力系数

Fig. 9 Fluctuating pressure coefficients at wind velocity of largest vertical amplitude of vortex-induced

动压力系数较为接近,其测点脉动压力的波动性明

显小于原方案。

通过以上分析可以得出,脉动压力系数与涡振是否发生或涡振振幅的大小并不完全一致。即不能通过脉动压力系数来判断抑振措施对涡激共振的抑制效果。

2.3 功率谱密度

通过对比原方案与封闭栏杆方案模型表面各测点的平均压力系数及脉动压力系数,并未揭示栏杆透风率对涡振性能影响,因此下文从能量角度进一步分析。模型表面各测点的频谱不仅能反映各测点的脉动频率特性,更能反映其与整体振动的关系。

从图 5(a)可看出,原方案与封闭栏杆方案涡振振幅最大风速并不相同,为规避风速对能量的影响,对压力时程进行了量纲一化,针对压力系数时程的功率谱密度(PSD)^[24]进行研究。

图 10 为原方案与一封二空方案在涡振振幅最大风速下各测点的压力系数时程的功率谱密度峰值所对应的频率。从图 10 可以看出,原方案大部分测点的卓越频率均为 18.34 Hz,在模型的一阶扭转频率附近,而封闭栏杆方案仅有上表面少数测点的卓越频率集中在一阶扭转频率附近。这也就解释了图 8 所示的封闭栏杆方案的脉动压力系数较大,而在图 5 中并未产生显著的扭转涡激共振现象。即封闭栏杆方案表面压力波动是在远离一阶扭转频率处发生的。此现象解释了栏杆透风率对桥梁结构涡激共振特性影响的内在原因:栏杆透风率的减小改变了涡脱频率,使其远离扭转频率,从而削弱涡振振幅或抑制涡振的发生。

图 11 为原方案与 2 种封闭栏杆方案在涡振振幅最大风速下各测点的压力系数时程的功率谱密度峰值所对应的频率。与图 10 所表现出的规律相似:原方案大部分测点的卓越频率均为 6.49 Hz,在模型的一阶竖弯频率附近,而 2 种封闭栏杆方案所有测点的卓越频率均在 0 Hz,远远低于竖弯频率。栏杆透风率的减小改变了能量在竖弯频率上集中,从而抑制了竖弯涡激共振的发生。

比较图 5(a)、(b)发现,与扭转涡激共振相比,竖弯涡激共振对栏杆透风率的改变更加敏感。为了研究竖弯涡激共振对栏杆透风率的敏感阈值,对栏杆一封五空和一封四空方案均进行了风洞试验,发现其均未能有效抑制涡激共振的发生,可见栏杆透风率降低 25%是其对竖弯涡激共振影响的阈值。

分别提取扭转频率、竖弯频率所对应的各测点的能量,如图 12、图 13 所示。从图中可以看出,原

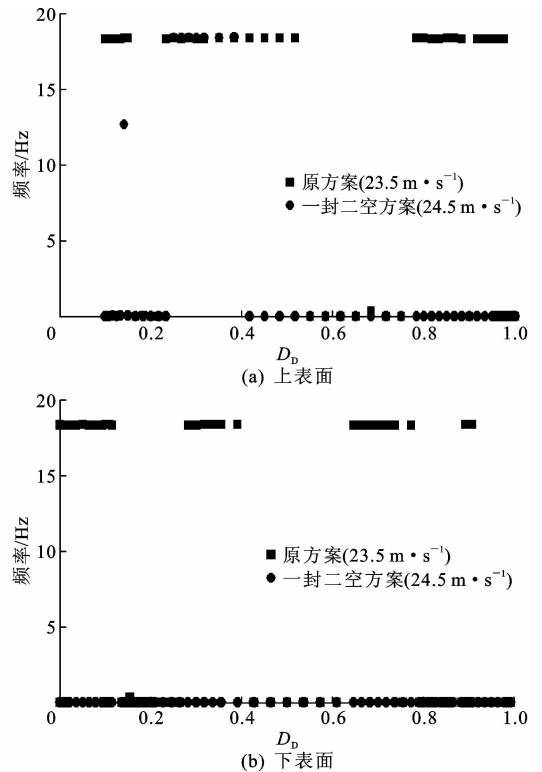


图 10 压力系数 PSD 峰值对应的频率(扭转涡振)

Fig. 10 Frequencies at peak value of pressure coefficients PSD (torsion of vortex-induced)

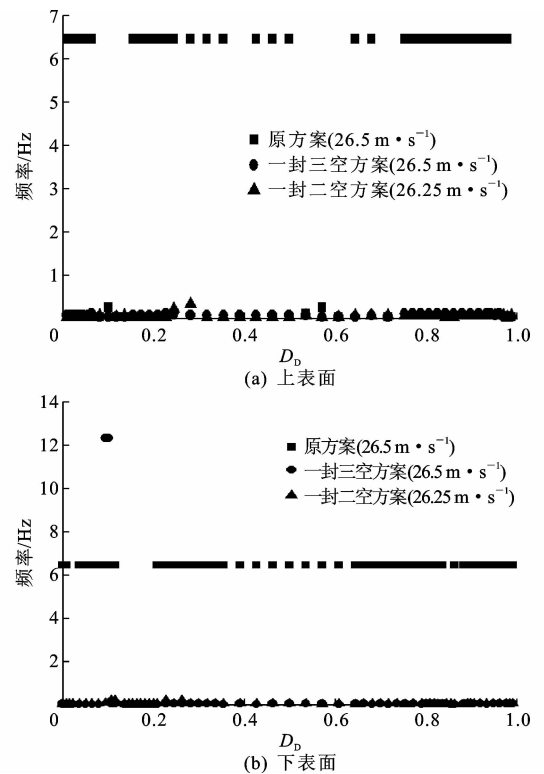


图 11 压力系数 PSD 峰值对应的频率(竖弯涡振)

Fig. 11 Frequencies at peak value of pressure coefficients PSD (vertical of vortex-induced)

方案各测点能量集中于模型扭转、竖弯频率上能量远大于封闭栏杆方案。集中于一阶频率上的较大能量激起相应的涡激共振,而封闭栏杆方案集中在一阶频率上的能量较小,不足以激发结构的振动。此即为改变栏杆透风率抑制涡激共振发生的内在机理。

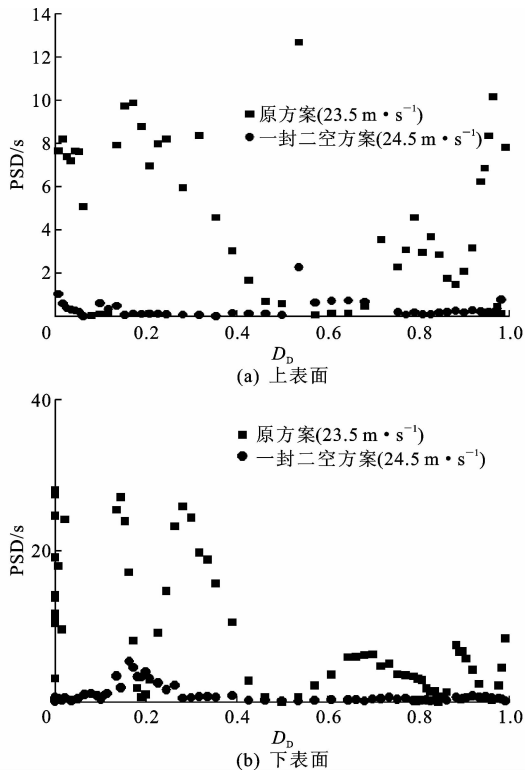


图12 扭转涡脱频率对应的各测点压力系数 PSD

Fig. 12 Pressure coefficients PSD at torsion frequency of vortex shedding

3 结 语

(1)钝体钢箱梁断面在某些风攻角下会产生超过规范限值的涡激振动,采用按照一定规则封闭栏杆的方案(即降低栏杆的透风率)有效抑制了涡激振动的发生。栏杆透风率的变化改变了气流的绕流,有效地打散了表面各点能量在一阶频率上的集中,因此改变栏杆透风率可作为抑制扭转、竖弯涡激振动发生的有效措施。

(2)扭转、竖弯涡激振动特性对栏杆透风率的敏感程度不同,当栏杆透风率降低到一定阈值时可有效抑制涡激共振的发生。本文主梁竖弯涡激共振对栏杆透风率的改变更加敏感,当栏杆透风率降低25%时可有效抑制竖弯涡激振动的发生,而透风率降低33%时可有效限制扭转涡激振动的振幅。建议本桥栏杆在不改变断面造形的情况下,采用一封

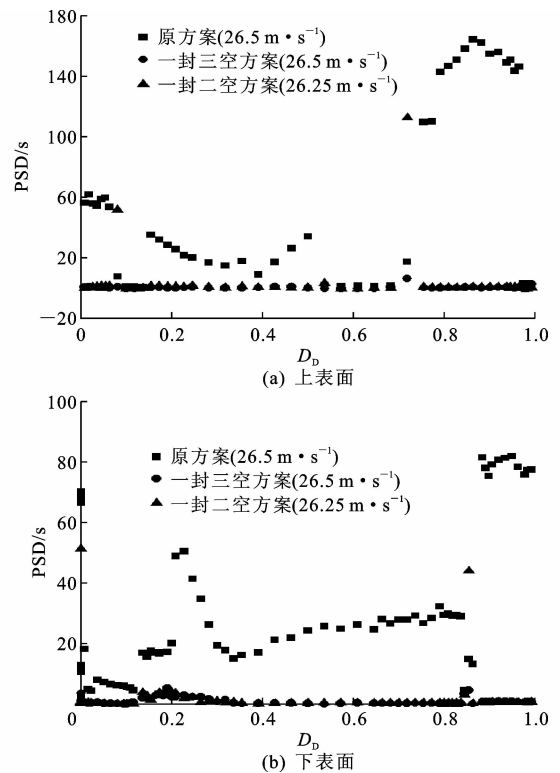


图13 竖弯涡脱频率对应的各测点压力系数 PSD

Fig. 13 Pressure coefficients PSD at vertical frequency of vortex shedding

二空方案将栏杆透风率降低33%。

(3)栏杆透风率的变化不影响平均压力系数的分布规律,仅影响数值;影响脉动压力系数的分布及数值,但脉动压力系数的大小不能作为判断涡激振动发生与否或振幅大小的依据,应结合功率谱特性进行分析,从能量角度分析涡激振动的特性。

(4)不改变栏杆形式,仅改变栏杆透风率可作为抑制主梁涡激振动的措施,但本文仅研究了采用某一封闭规则降低栏杆透风率对主梁涡激振动特性的影响,下一步应研究不同封闭规则对主梁涡激振动特性的影响。

参考文献:

References:

- [1] 项海帆,陈艾荣,顾明. 调质阻尼器(TMD)对桥梁涡激共振的抑制[J]. 同济大学学报:自然科学版, 1994,22(2):159-164.
XIANG Hai-fan, CHEN Ai-rong, GU Ming. Suppressing the vortex-excited vibration of bridge with tuned mass damper (TMD) [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1994, 22(2): 159-164.
- [2] 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, 8(2): 74-79.

- LIU Jian-xin. Vortex-induced vibration and its control in responses of bridge to wind[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 1995, 8(2): 74-79.
- [3] 项海帆. 我国大跨度缆索承重桥梁的空气动力性能研究[J]. *力学季刊*, 2000, 21(4): 393-400.
- XIANG Hai-fan. Aerodynamic studies of long-span cable-supported bridges in China[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2000, 21(4): 393-400.
- [4] 张伟, 魏志刚, 杨咏昕, 等. 高雷诺数下悬索桥加劲梁节段模型风洞试验[C]//中国土木工程学会. 第十二届全国结构风工程学术会议论文集. 北京: 中国土木工程学会, 2006: 447-453.
- ZHANG Wei, WEI Zhi-gang, YANG Yong-xin, et al. Wind tunnel test of suspension bridge stiffening beam at high Reynolds-number[C]//China Civil Engineering Society. Proceedings of the 12th National Conference on Structural Wind Engineering. Beijing: China Civil Engineering Society, 2006: 447-453.
- [5] GOSWAMI I, SCANLAN R H, JONES N P. Vortex-induced vibration of circular cylinders I: Experimental data[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1993, 119(11): 2270-2287.
- [6] GOSWAMI I, SCANLAN R H, JONES N P. Vortex-induced vibration of circular cylinders II: New model[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1993, 119(11): 2288-2302.
- [7] 郭增伟, 赵林, 葛耀君, 等. 基于桥梁断面压力分布统计特性的抑流板抑振机理研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(7): 89-94.
- GUO Zeng-wei, ZHAO Lin, GE Yao-jun, et al. Mechanism analysis for vortex-induced vibration reduction of a flat streamlined steel box-shaped girder with air-flow-suppressing board based on statistical property of surface pressure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(7): 89-94.
- [8] 李春光, 陈政清, 韩艳. 带悬臂流线型箱梁大比例节段模型涡振试验研究[J]. *桥梁建设*, 2014, 44(6): 12-18.
- LI Chun-guang, CHEN Zheng-qing, HAN Yan. Experimental study of large scale sectional model for vortex-induced vibration of streamlined box girder with cantilever walk slabs[J]. *Bridge Construction*, 2014, 44(6): 12-18.
- [9] 李永乐, 侯光阳, 向活跃, 等. 大跨度悬索桥钢箱主梁涡振性能优化风洞试验研究[J]. *空气动力学学报*, 2011, 29(6): 702-708.
- LI Yong-le, HOU Guang-yang, XIANG Huo-yue, et al. Optimization of the vortex induced vibration for steel box girder of long span suspension bridges by wind tunnel test[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2011, 29(6): 702-708.
- [10] 王骑, 廖海黎, 李明水, 等. 流线型箱梁气动外形对桥梁颤振和涡振的影响[J]. *公路交通科技*, 2011, 29(8): 44-50.
- WANG Qi, LIAO Hai-li, LI Ming-shui, et al. Influence of aerodynamic shape of streamline box girder on bridge flutter and vortex-induced vibration[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2011, 29(8): 44-50.
- [11] 朱乐东, 张海, 张宏杰. 多孔扰流板对半封闭窄箱梁涡振的减振效果[J]. *实验流体力学*, 2012, 26(3): 50-55.
- ZHU Le-dong, ZHANG Hai, ZHANG Hong-jie. Mitigation effect of multi-orifice flow-disturbing plate on vortex induced resonance of narrow semi-closed box deck[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2012, 26(3): 50-55.
- [12] 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 Chun-guang, CHEN Zheng-qing, 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.
- [13] 张建. 扁平钢箱梁的颤振性能数值研究及涡振性能试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- ZHANG Jian. Research of flutter by numerical simulation and vortex-induced vibration by wind tunnel test for flat steel box girder bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [14] 曹丰产, 葛耀君, 吴腾. 钢箱梁斜拉桥涡激共振及气动控制措施研究[C]//中国土木工程学会. 第十三届全国结构风工程学术会议论文集. 北京: 中国土木工程学会, 2007: 668-673.
- CAO Feng-chan, GE Yao-jun, WU Teng. Study on control measures for vortex induced vibration in steel box girder of cable-stayed bridge[C]//China Civil Engineering Society. Proceedings of the 13th National Conference on Structural Wind Engineering. Beijing: China Civil Engineering Society, 2007: 668-673.
- [15] 管青海, 李加武, 胡兆同, 等. 栏杆对典型桥梁断面涡激振动的影响研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(3): 150-156.
- GUAN Qing-hai, LI Jia-wu, HU Zhao-tong, et al. Effects of railings on vortex-induced vibration of a bridge deck section[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(3): 150-156.
- [16] 管青海, 李加武, 刘健新. 典型桥梁断面双竖向涡振区的成因分析[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2013, 33(4): 40-46.
- GUAN Qing-hai, LI Jia-wu, LIU Jian-xin. Investiga-

- tion into formation of two lock-in districts of vertical vortex-induced vibration of a typical box girder bridge deck section[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2013, 33(4): 40-46.
- [17] 钱国伟,曹丰产,葛耀君. π 型叠合梁斜拉桥涡振性能及气动控制措施研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(2): 176-181.
QIAN Guo-wei, CAO Feng-chan, GE Yao-jun. Vortex-induced vibration performance of a cable-stayed bridge with π shaped composite deck and its aerodynamic control measures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(2): 176-181.
- [18] 张国强. 栏杆构造对 π 型桥梁断面涡激振动的影响研究[D]. 西安:长安大学, 2015.
ZHANG Guo-qing. Research on influence of handrail structures of the π bridge section on vortex-induced vibration[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [19] 杨詠昕,周锐,葛耀君. 大跨度分体箱梁桥梁涡振性能及其控制[J]. 土木工程学报, 2014, 47(12): 107-114.
YANG Yong-xin, ZHOU Rui, GE Yao-jun. Vortex-induced vibration and its control for long-span bridge with twin-box girder [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(12): 107-114.
- [20] 李加武,王新,张悦,等. 桥梁风致振动的混沌特性[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(3): 34-42.
LI Jia-wu, WANG Xin, ZHANG Yue, et al. Chaos characteristics of wind-induced vibrations for bridge [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(3): 34-42.
- [21] 长安大学. 港珠澳大桥江海直达船航道桥抗风性能研究[R]. 西安:长安大学, 2012.
CHANG'AN UNIVERSITY. Research about anti-wind performance of Gang-Zhu-Ao Bridge[R]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [22] 刘健新,崔欣,李加武. 桥梁断面表面压力分布及Strouhal数的雷诺数效应[J]. 振动与冲击, 2010, 29(4): 146-149.
LIU Jian-xin, CUI Xin, LI Jia-wu. Reynolds number effect of surface pressure distribution and Strouhal number of a typical bridge deck section[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(4): 146-149.
- [23] 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.
- [24] 崔欣. 影响主梁涡激共振试验结果的因素及其机理研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2015.
CUI Xin. Investigation into influencing factors on wind tunnel test of vortex-induced vibration and mechanism [M]. Beijing: China Water Power Press, 2015.
-
- (上接第70页)
- HU Xiao-bin, QIAN Jia-ru. Dynamic effect analysis during progressive collapse of a single-story steel plane frame[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(6): 38-43.
- [19] 陆新征,李易,叶列平,等. 钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌设计方法的研究[J]. 工程力学, 2008, 25(增2): 150-157.
LU Xin-zheng, LI Yi, YE Lie-ping, et al. Study on design method to resist progressive collapse for reinforced concrete frames[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(S2): 150-157.
- [20] DASSAULT SYSTEMES. ABAQUS theory manual [M]. Providence: Dassault Systemes, 2014.
- [21] 张劲,王庆扬,胡守营,等. ABAQUS混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构, 2008, 38(8): 127-130.
ZHANG Jin, WANG Qing-yang, HU Shou-ying, et al. Parameters verification of concrete damaged plastic model of ABAQUS[J]. Building Structure, 2008, 38(8): 127-130.
- [22] 聂建国,王宇航. ABAQUS中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 59-68.
NIE Jian-uo, WANG Yu-hang. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 59-68.
- [23] BIRTEL V, MARK P. Parameterized finite element modeling of RC beam shear failure[C]//GADSTEIN M. ABAQUS Users' Conference. Providence: Dassault Systemes, 2006: 95-108.
- [24] 雷拓,刘伯权,刘锋. 基于ABAQUS显式分析的梁单元材料模型开发应用[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 259-268.
LEI Tuo, LIU Bo-quan, LIU Feng. Development and application of material constitutive models based on ABAQUS/Explicit beam elements [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 259-268.