

文章编号:1673-9469(2024)04-0059-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.04.008

## 栏杆对景区人行悬索桥主梁涡振性能影响研究

李玉学<sup>1,2,3</sup>, 胡志勇<sup>1</sup>, 董阳<sup>1</sup>, 赵莉<sup>1,4</sup>

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 河北省风工程与风能利用工程技术创新中心, 河北 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043; 4. 河北劳动关系职业学院, 河北 石家庄 050093)

**摘要:** 为研究桥面栏杆对主梁涡振性能的影响,以国内某座宽跨比为0.0284的景区人行悬索桥为工程背景,采用CFD数值模拟方法分别对有栏杆、无栏杆主梁的涡振响应特性进行分析计算,并针对桥面栏杆的栏杆形式、不同透风率对主梁涡振特性的影响规律进行分析总结。在此基础上,从涡脱演化形式、风压系数分布揭示其对主梁涡振性能的影响机理。研究结果表明,设置栏杆后,主梁的最大涡振幅值达到无栏杆主梁的2.2倍;增大栏杆弧度会引起主梁涡振幅值增大,但增大栏杆透风率可以有效降低主梁涡振幅值;相较于无栏杆,有栏杆主梁上表面形成的漩涡尺度更大、数量更多,平均风压系数和脉动风压系数曲线均出现较大波动,这种较大波动在一定程度上说明了设置栏杆后主梁涡振幅值增大的原因。

**关键词:** 景区人行悬索桥;桥面栏杆;涡振特性;涡脱演化;栏杆透风率;栏杆形式

**中图分类号:** U448.11; U448.25

**文献标识码:** A

## Research on the Effect of Railings on the Vortex-induced Vibration Performance of Main Beam of Pedestrian Suspension Bridge in Scenic Spot

LI Yuxue<sup>1,2,3</sup>, HU Zhiyong<sup>1</sup>, DONG Yang<sup>1</sup>, ZHAO Li<sup>1,4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of China Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 4. Hebei Vocational College of Labour Relations, Shijiazhuang, Hebei 050093, China)

**Abstract:** In order to study the influence of bridge deck railing on the vortex-induced vibration performance of main beams, a domestic scenic pedestrian suspension bridge with wide-span ratio of 0.0284 was taken as the engineering background, and the vortex-induced vibration response characteristics of main beams with and without railings were analyzed and calculated by CFD numerical simulation method. The effects of the railing form and different air permeability on the vortex-induced vibration characteristics of the main beam are analyzed and summarized. On this basis, the influence mechanism of vortex stripping on the vortex-induced vibration performance of the main beam is revealed from the evolution form of vortex stripping and the distribution of wind pressure coefficient. The results show that the maximum vortex-induced vibration amplitude of the main beam with railings is 2.2 times that of the main beam without railings. Increasing the railing radia will increase the vortex-induced vibration amplitude of the main beam, but increasing the air permeability of the railing can effectively reduce the vortex-induced vibration amplitude of the main beam. Compared with those without railings, the vortices formed on the upper surface of the main beam with railings are larger in scale and more in number, and

收稿日期:2023-10-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278314);河北省自然科学基金资助项目(E2019210031);中央引导地方科技发展资金项目(206Z5401G);北京交通大学“结构风工程与城市风环境北京市重点实验室”开放课题(2023-1)

作者简介:李玉学(1978-),男,河北保定人,博士,副教授,从事桥梁风工程方面的研究。

the curves of the average wind pressure coefficient and the fluctuating wind pressure coefficient both fluctuate greatly, which explains the reason for the increase of the vortex-induced vibration amplitude of the main beam after the railings are set up to a certain extent.

**Key words:** scenic spot pedestrian suspension bridge; bridge deck railings; vortex-induced vibration characteristic; vorticity evolution; railing ventilation rate; railing form

近年来,人行悬索桥以其跨越能力强、造型美观等特点在景区大量兴建,景区人行悬索桥受复杂多变的气象和地理因素的影响,比一般人行悬索桥的风特性更复杂,这给景区人行悬索桥的抗风设计造成了很大困扰。涡激振动是人行悬索桥的主要风致振动形式之一,虽然涡激振动不会引起桥梁结构的破坏,但会影响桥上行人的舒适性和安全性,长期的涡激振动还会导致结构的疲劳破坏<sup>[1-2]</sup>。桥面栏杆作为人行悬索桥重要的必须附属设施,其结构形式、透风率等的改变都可能激发主梁的涡激振动,因此桥面栏杆对桥梁涡振性能的影响规律和作用机理成为国内外学者关注的热点问题之一。

针对桥面栏杆对主梁涡振性能的影响研究,目前已有不少成果。祝志文<sup>[3]</sup>对大带东桥主梁进行涡振响应的 CFD 模拟,发现有栏杆主梁阻力系数明显大于无栏杆主梁,且两者主梁均呈现出多阶涡脱特征。刘庆宽等<sup>[4]</sup>通过节段模型风洞动态测压与测振试验,研究了桥面栏杆高度对流线型箱梁涡激振动性能的影响。崔欣等<sup>[5]</sup>分析了栏杆透风率对箱型钢主梁涡激振动的影响。管青海等<sup>[6]</sup>通过风洞实验,发现栏杆改变了主梁上下表面的压力脉动幅值和上表面的压力系数均值,却不能改变下表面的压力系数均值。Nagao 等<sup>[7]</sup>发现栏杆能放大主梁的竖向涡振振幅,但会抑制主梁的扭转涡振。李永乐等<sup>[8]</sup>研究了不同栏杆工况对主梁涡振的影响,发现拆除栏杆可以有效抑制涡振。李明等<sup>[9]</sup>认为高透风率的圆形截面栏杆能显著改善钢箱梁的涡振性能。

目前的研究多是针对公路、铁路悬索桥,与之相比,景区人行悬索桥主梁的宽跨比更小、柔度更大、对风荷载也更加敏感。而且栏杆占主梁的比重较大,栏杆的设置会较大改变主梁的气动外形,从而引起主梁涡振性能的变化。因此,本文以国内某座景区人行悬索桥为工程背景,在分析总结有栏杆主梁最优透风率和结构形式的基础上,从涡脱演化和风压分布角度对有、无栏杆主梁涡振响应进行分析,从而揭示栏杆对景区人行悬索桥涡振作用机理,为景区人行悬索桥桥面栏杆的选取和设置提供指导。

## 1 工程背景及模型建立

### 1.1 工程背景

本文以一座 30 m+183 m+61 m 的双塔三跨地锚式景区人行悬索桥为工程背景,桥址位于风景名胜,地处黄海北岸,属暖温带湿润性季风气候。季风环流是该地区支配气候的主要因素,桥址山区峡谷风特性明显,易形成大于 $\pm 3^\circ$ 风攻角的来流风。该悬索桥的主缆矢跨比为 1/10,主缆间距为 4.8 m。主梁采用纵横梁结构体系,截面尺寸如图 1 所示。

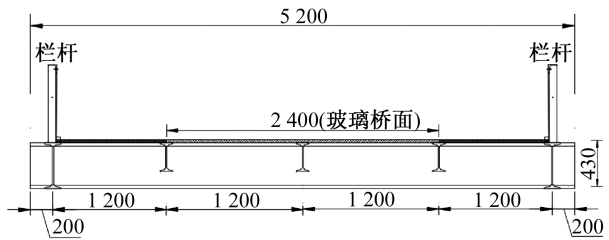


图 1 有栏杆主梁横断面图(单位:mm)

Fig. 1 Cross section of main beam with railings (unit:mm)

### 1.2 数值模型建立及相关参数选取

主梁断面在流场中的受力如图 2 所示, $B$  为主梁宽度; $D$  为主梁高度; $\alpha$  为扭转角; $x$ 、 $y$  为风轴坐标系; $F_L$  和  $F_M$  分别为主梁受到的升力和扭矩。

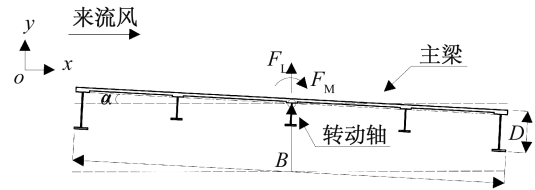


图 2 主梁在流场中受力示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mechanical analysis of main beam in flow field

图 2 中主梁竖弯和扭转涡振响应的运动方程分别为

$$m\ddot{y}(t) + c_y\dot{y}(t) + k_y y(t) = F(t) \quad (1)$$

$$I_\alpha\ddot{\alpha}(t) + c_\alpha\dot{\alpha}(t) + k_\alpha\alpha(t) = M(t) \quad (2)$$

式中, $m$ 、 $c_y$  和  $k_y$  分别为主梁单位长度的质量、竖弯阻尼和竖弯刚度; $I_\alpha$ 、 $c_\alpha$  和  $k_\alpha$  分别为主梁单位长

度的扭转质量惯性矩、扭转阻尼和扭转刚度;  $t$  表示时间(s);  $\ddot{y}(t)$ 、 $\dot{y}(t)$  和  $y(t)$  分别为主梁单位长度的竖弯加速度、速度和位移时程;  $\ddot{\alpha}(t)$ 、 $\dot{\alpha}(t)$  和  $\alpha(t)$  分别为主梁单位长度的扭转加速度、速度和位移时程(m);  $F(t)$  和  $M(t)$  分别为作用在主梁单位长度上的升力(N)和扭矩时程。

基于 FLUENT 软件并编译 UDF 程序,通过数值计算得到主梁上的  $F(t)$  和  $M(t)$ ,利用 Newmark- $\beta$  法迭代求解涡振响应运动方程(1)和(2)得到下一时刻  $t_2$  主梁的加速度、速度和位移响应,并不断迭代实现主梁升力  $F(t)$  和扭矩  $M(t)$  的更新及其相应时刻主梁加速度、速度和位移响应的求解。

根据本文研究景区人行悬索桥主梁几何特性以及有限元计算所得结构自振频率等确定的涡振响应计算相关参数,如表 1 所示,表中竖弯和扭转阻尼比根据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)<sup>[10]</sup> 相关规定均取为 0.5%。

表 1 主梁涡振响应计算相关参数

Tab. 1 Calculation of relevant parameters of vortex-induced vibration response of main beam

参数	无栏杆/有栏杆 加劲主梁数值
宽度 $B/m$	5.2
高度 $D/m$	0.43
单位长度质量/( $kg \cdot m^{-1}$ )	851/879
单位长度质量惯性矩/( $kg \cdot m^2 \cdot m^{-1}$ )	1 257/1 353
一阶竖弯频率/Hz	0.399 9/0.38
一阶扭转频率/Hz	1.280 4/1.279 9
竖弯阻尼比/%	0.5
扭转阻尼比/%	0.5

网格计算域分成三部分,从内到外依次为刚体网格区域、动网格区域和静止网格区域,如图 3 所示。其中,刚体网格区域和动网格区域采用三角形非结构化网格,静止网格区域由于距离主

梁较远,为提高计算效率,采用较为稀疏的四边形结构化网格。主梁表面定义为 Wall,内外网格接触面定义为 Interface,计算域入口边界定义为 Velocity-inlet,距离主梁中心  $5B$ 。出口边界定义为 Pressure-outlet,考虑到尾流对主梁的影响,距离主梁中心  $10B$ 。上下边界定义为 symmetry,距离主梁中心  $5B$ ,总体网格尺寸为  $16B \times 10B$ 。

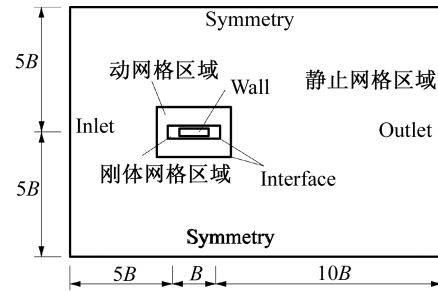


图 3 计算域、边界条件和网格范围示意图

Fig. 3 Computational domain, boundary conditions and meshing range

数值计算采用压力求解器,湍流模型采用 SSTk- $\omega$  模型,以二阶隐式积分进行时间离散,二阶迎风格式进行空间离散,速度-压力场的耦合问题采用 SIMPLEC 算法进行求解,残差控制在  $1 \times 10^{-5}$  以下。

### 1.3 网格无关性和时间步长无关性验证

以无栏杆的模型为例,在风攻角为  $-3^\circ$  (风攻角以水平风向平行于桥面定义为  $0^\circ$ ,以主梁相对于水平风向顺时针旋转为正),取无量纲折减风速  $U_r = U/f_n D$  ( $U$  为来流风速;当发生竖弯涡振时,  $f_n$  为一阶竖弯频率)为 20 时,分别计算了三个不同网格系统在三种时间步长上的涡振幅值,如表 2 所示。

由表 2 可以看出,从 Mesh3 到 Mesh1,三角形网格数量和四边形网格数量依次增加,Mesh3 的涡振幅值与 Mesh1 和 Mesh2 有较大偏差。虽然 Mesh1 的网格总数最多,但 Mesh1 在三个时间步长上的

表 2 不同网格系统的模拟结果对比

Tab. 2 Comparison of simulation results of different grid systems

网格	三角形网格数	四边形网格数	总网格数	Y+max	时间步长	涡振幅值/mm
Mesh1	283 374	24 892	308 266	0.94	$1 \times 10^{-3}$	31.3
					$3 \times 10^{-3}$	31.9
					$6 \times 10^{-3}$	30.0
Mesh2	220 738	16 928	237 666	0.9	$1 \times 10^{-3}$	31.5
					$3 \times 10^{-3}$	31.8
					$6 \times 10^{-3}$	30.3
Mesh3	182 156	11 248	193 404	0.98	$1 \times 10^{-3}$	30.2
					$3 \times 10^{-3}$	30.9
					$6 \times 10^{-3}$	29.7

涡振幅值与 Mesh2 相差不大,因此认为 Mesh2 已获得网格无关的 CFD 结果。Mesh2 在三个时间步长上的涡振幅值最稳定,时间步长为  $3 \times 10^{-3}$  时的涡振幅值与其他两个时间步长上的涡振幅值差距不大,因此认为当时间步长为  $3 \times 10^{-3}$  时已获得与时间步长无关的结果。据此综合考虑计算效率和计算精度,最终选定网格 Mesh2,时间步长为  $3 \times 10^{-3}$ 。

## 2 无栏杆和有栏杆主梁涡振响应分析

采用 1.2 和 1.3 节中的参数设置与网格划分方法,对悬索桥无栏杆和有栏杆主梁进行涡振响应计算,分别得到了  $-3^\circ$ 、 $0^\circ$  和  $3^\circ$  风攻角不同风速下主梁涡振响应(图 4)。

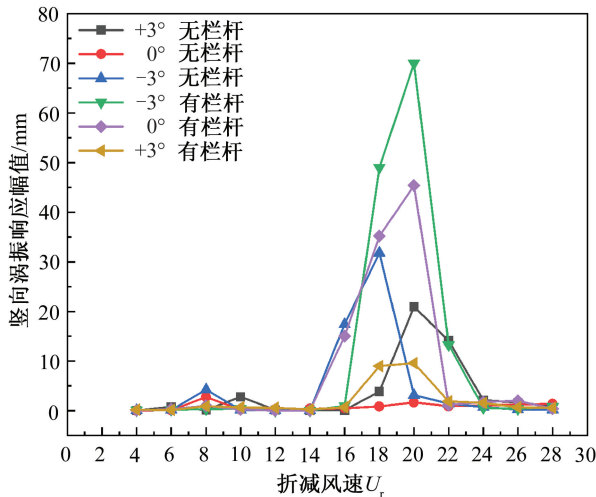


图 4 不同无量纲折减风速下主梁涡振响应

Fig. 4 vortex-induced vibration response of main beam under different dimensionless reduced wind speeds

由图 4 可见,主梁最大竖向涡振幅值发生在有栏杆主梁  $-3^\circ$  风攻角下,此时的涡振幅值是无栏杆主梁的 2.2 倍。另外,  $-3^\circ$ 、 $0^\circ$  和  $3^\circ$  三个风攻角下的涡振起振风速也较无栏杆提前。无栏杆主梁有两个明显的涡振风速锁定区间,对应无量纲折减风速  $U_r$  分别为  $6 \sim 10$  和  $16 \sim 22$ ,而有栏杆主梁只有一个明显的涡振风速锁定区间,对应无量纲折减风速  $U_r$  为  $16 \sim 22$ 。表明桥面栏杆使得主梁倾向于在更高的风速锁定区间内发生涡振,且在此风速锁定区间内的涡振幅值比无栏杆涡振幅值更大。

## 3 栏杆透风率和栏杆形式对主梁涡振的影响

### 3.1 栏杆透风率对主梁涡振的影响分析

主梁涡振响应分析结果表明,栏杆的布置会

显著影响主梁的气动特性,使得主梁竖向涡激振幅增大。为了考查不同透风率栏杆对主梁竖向涡激振幅的影响,选取最不利的  $-3^\circ$  风攻角,以原断面栏杆透风率为基础,通过增大、减小栏杆透风率,分别得到四种工况下主梁的涡振响应。图 5 为原断面栏杆与四种不同透风率栏杆主梁竖向涡激振幅与无量纲折减风速的关系曲线。

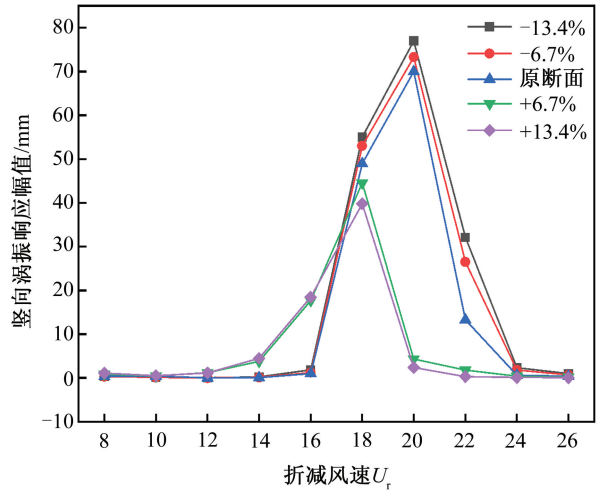


图 5 不同透风率栏杆主梁涡振幅值与无量纲折减风速关系

Fig. 5 Relationship between the vortex-induced vibration amplitude of railings with different air permeability and dimensionless reduced wind speed

由图 5 可见,透风率减小使得主梁竖向涡振幅值增大,与原断面相比,当透风率减小 13.4%、6.7% 时,主梁最大竖向涡振幅值分别增大 7 和 3.3 mm;透风率增大使得主梁竖向涡振幅值减小,与原断面相比,当透风率增大 6.7%、13.4% 时,主梁最大竖向涡振幅值分别减小 25.4 和 30.2 mm,且主梁起振风速有所提前。由此可知,可以通过增大栏杆透风率来减小主梁的竖向涡振幅值,从而达到实际工程要求的效果。

### 3.2 栏杆形式对主梁涡振的影响分析

弧形栏杆由于其特有的美观造型,目前在景区人行悬索桥中多有采用。栏杆弧度的计算如图 6 所示,图中密虚线所围成的图形为原直栏杆断面,疏虚线所形成角为弧形栏杆所对应的圆心角。为研究栏杆弧度对景区人行悬索桥涡振性能的影响,选取最不利的  $-3^\circ$  风攻角,分别计算得到了栏杆弧度为  $0.4$ 、 $0.52$ 、 $0.66$ 、 $0.79$  rad 四种不同工况下主梁竖向涡激振幅与无量纲折减风速的关系曲线,并与原断面直栏杆主梁涡激振幅进行对比,如图 7 所示。

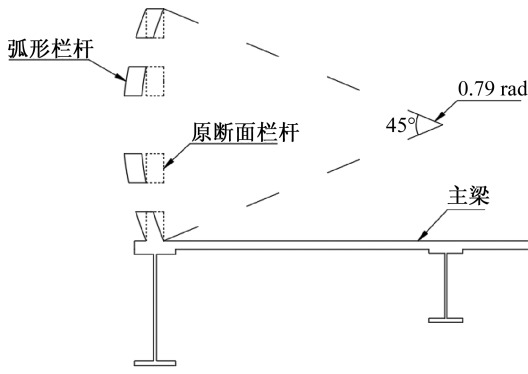


图 6 栏杆弧度示意图

Fig. 6 Schematic diagram of railing radian

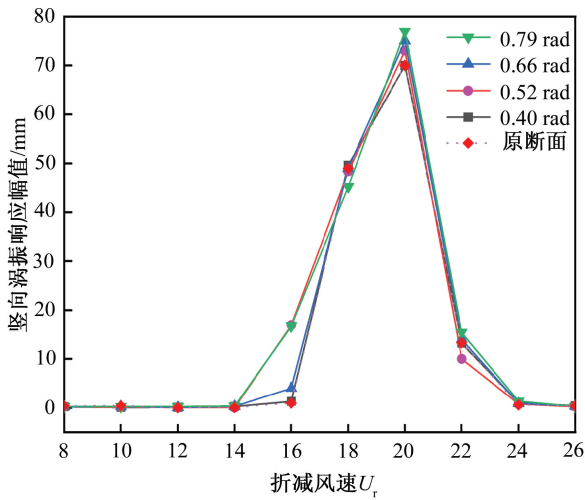


图 7 不同弧度栏杆主梁涡振幅值与无量纲折减风速关系

Fig. 7 Relationship between vortex excitation amplitude and dimensionless reduced wind speed of railings with different radians

由图 7 可见,采用弧度为 0.40 rad 的弧形栏杆后,主梁最大涡振幅值与原断面直栏杆最大涡振幅都为 70 mm,且振幅规律与原断面直栏杆保持

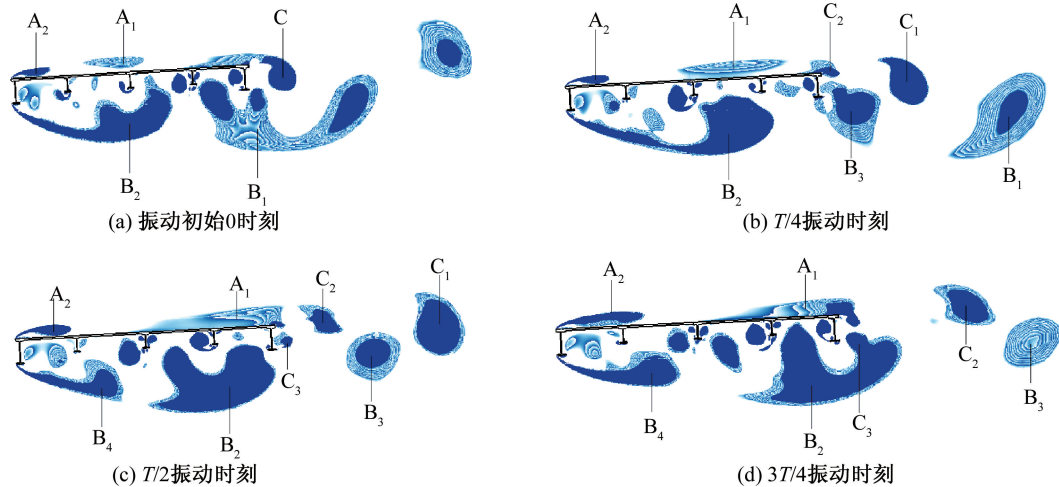


图 8 一个完整振动周期内无栏杆主梁周围涡量演化图

Fig. 8 Evolution of vorticity around a main beam without railings in a complete vibration period

一致。随着弧度变大,圆弧栏杆主梁的涡振性能逐渐变差,最大涡振幅值分别为 73、75、77 mm。由此可知,随着弧形栏杆弧度增大,主梁的涡振特性变差,据此建议尽量采用原断面直栏杆形式以得到主梁较优的涡振性能。

### 4 无栏杆和有栏杆主梁涡振发生机理探讨

#### 4.1 涡脱演化特点

以上研究分析总结了栏杆透风率、弧度的变化引起的主梁涡振幅值的变化,但栏杆引起主梁涡振幅值增大的机理尚不明确。为研究栏杆布置后对主梁涡振性能的影响机理,在风攻角 $-3^\circ$ 、无量纲折减风速  $U_r = 20$  工况下,分别提取了主梁在无栏杆和有栏杆时的流场信息,如图 8 和图 9 所示, $T$  表示一个完整振动周期时间;A 表示主梁上表面生成的漩涡;B 表示主梁下表面生成的漩涡;C 表示主梁尾部生成的漩涡;A、B、C 符号下标 1—5 表示相应漩涡生成顺序,数字越小表示漩涡生成越早。

由图 9(a)可见,对于有栏杆主梁,在振动初始 0 时刻,气流分成主梁上、下两部分,其中上部分由于栏杆的隔断作用,气流一部分从栏杆的孔洞经过,并分化成一些小漩涡,且每个孔洞都由一个逆时针漩涡和一个顺时针漩涡组成,靠近主梁表面的气流形成一个较大的顺时针漩涡  $A_3$ ;主梁下部的的气流由于工字钢的阻挡作用,形成一个逆时针旋转的漩涡  $B_2$ ,尾部的气流由于背风侧栏杆的作用,形成两个顺时针漩涡  $C_1、C_2$ 。由图 8(a)可见,对于无栏杆主梁,气流在上表面形成一个新的漩涡  $A_2$ ,尾部气流正脱离主梁上表面,形成一个顺

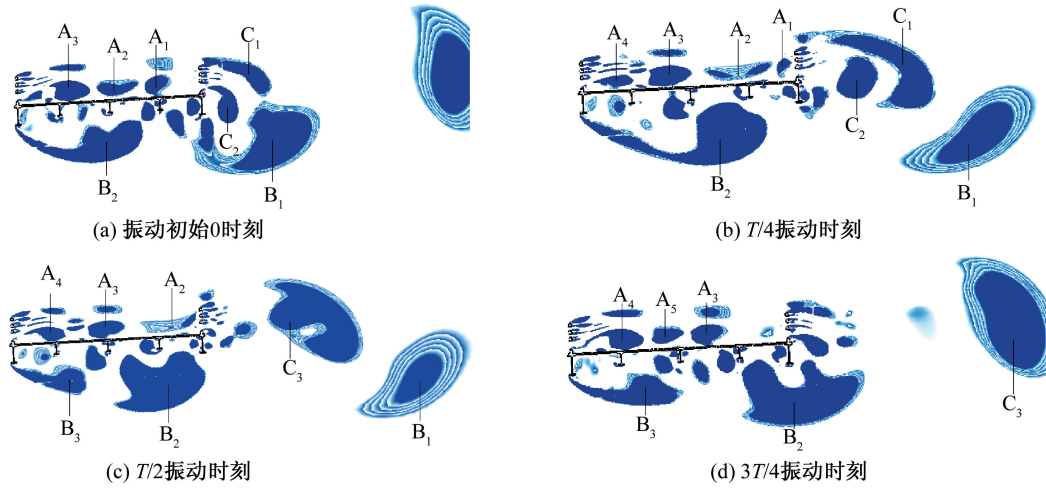
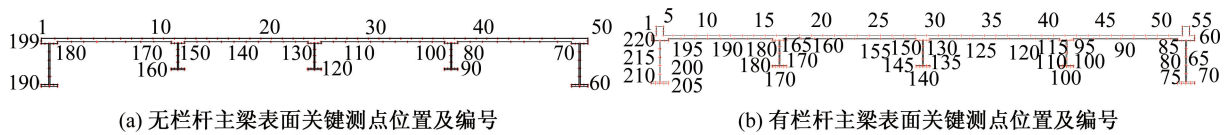


图9 一个完整振动周期内有栏杆主梁周围涡量演化图

Fig. 9 Evolution of vorticity around a main beam with railings in a complete vibration period



(a) 无栏杆主梁表面关键测点位置及编号

(b) 有栏杆主梁表面关键测点位置及编号

图10 主梁表面关键测点位置及编号

Fig. 10 Position and number of key measuring points on the surface of main beam

时针旋转涡流  $C_1$ ; 主梁下部的气流由于工字钢的阻挡作用,生成两个较大的涡流  $B_1$  和  $B_2$ 。

由图 9(b) 可见,对于有栏杆主梁,在  $T/4$  时刻,主梁表面附近生成一个新的涡流  $A_4$ ,同时,贴在主梁上表面的涡流  $A_1$  从主梁表面脱离,朝着栏杆孔洞方向移动;主梁下表面的涡流  $B_2$  继续发展, $B_1$  脱落完全。由图 8(b) 可见,对于无栏杆主梁,上表面的顺时针涡流  $C_1$  脱落完全,下表面逆时针涡流  $B_1$  分化出一个新的涡流  $B_3$ 。

由图 9(c) 可见,对于有栏杆主梁,在  $T/2$  时刻,主梁尾部的两个涡流  $C_1$ 、 $C_2$  发展成一个涡流  $C_3$ ,主梁下表面的涡流  $B_2$  脱落出一个新的涡流  $B_3$ 。由图 8(c) 可见,对于无栏杆主梁,上表面的涡流  $C_2$  完全脱落,下表面涡流  $B_2$  分化出一个新的涡流  $B_4$ 。

由图 9(d) 可见,对于有栏杆主梁,在  $3T/4$  时刻,主梁迎风侧栏杆上部分从孔洞分化出的小尺寸顺时针和逆时针涡流一起发展,形成一个新的涡流  $A_5$ ,此后,顺时针旋转涡流  $C_3$  和逆时针旋转涡流  $B_1$  在主梁尾部交替产生,发生“卡门涡街”现象。由图 8(d) 可见,对于无栏杆主梁,逆时针涡流  $B_3$  和顺时针涡流  $C_2$  在主梁尾部交替产生,同样发生“卡门涡街”现象。

#### 4.2 主梁表面风压分析

郎天翼等<sup>[11]</sup>采用本征正交分解法对大跨悬索

桥主梁表面压力的时空分布特征进行分析,发现主梁表面风压脉动的本征模式中存在与结构固有频率一致的卓越频率。为考察桥面栏杆布置前后,平均风压和脉动风压的变化,本文计算并提取有无栏杆在风攻角  $-3^\circ$ 、无量纲折减风速  $U_r = 20$  工况下,主梁表面关键位置(测点位置及编号见图 10)的平均风压和脉动风压的分布情况,如图 11 和图 12 所示,其中,  $X$  为测点位置到主梁迎风前端的水平距离,  $B$  为主梁宽度。为表达方便,根据公式(3)将计算所得主梁表面关键位置测点风压转化为无量纲的风压系数  $C_{pi}(t)$ ,并进一步由公式(4)和(5)计算得到平均风压系数  $\bar{C}_{pi}$  和脉动风压系数  $\tilde{C}_{pi}$ 。

$$C_{pi}(t) = \frac{p_i(t)}{0.5\rho U^2} \quad (3)$$

式中,  $p_i(t)$  为主梁表面  $i$  测点位置处的风压值(kPa);  $\rho$  为空气密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $U$  为来流风速( $\text{m}/\text{s}$ )。

$$\bar{C}_{pi} = \frac{\sum_{m=1}^N C_{pi}(t_m)}{N} \quad (4)$$

$$\tilde{C}_{pi} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^N [C_{pi}(t_m) - \bar{C}_{pi}]^2}{N-1}} \quad (5)$$

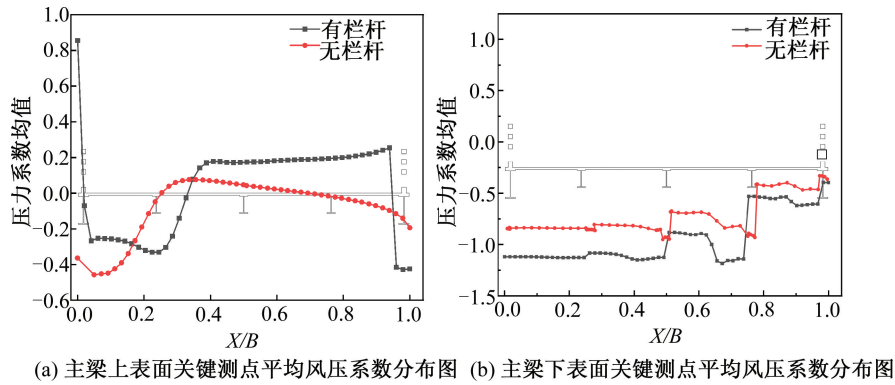


图 11 主梁表面关键测点平均风压系数分布图

Fig. 11 Distribution diagram of average wind pressure coefficient at key measuring points on main beam surface

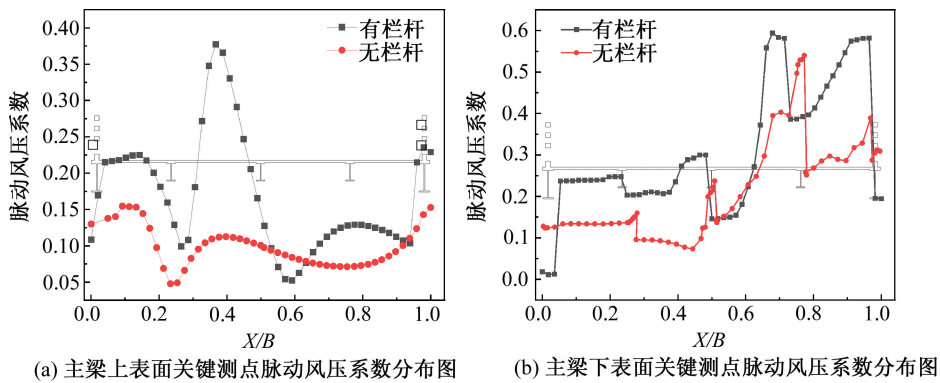


图 12 主梁表面关键测点脉动风压系数分布图

Fig. 12 Distribution of pulsating wind pressure coefficient at key measurement points on the main beam surface

式中,  $C_{p_i}(t_m)$  为  $m$  时刻主梁表面  $i$  测点位置处的风压系数值;  $N$  为  $t$  时间段内采样总数, 本文取  $t = 10$  s。

由图 11(a) 可见, 有栏杆主梁上表面在  $X/B = 0$  处平均风压为正压, 是无栏杆的 2.35 倍, 这是由于栏杆阻碍了风场的流动, 导致栏杆附近风压迅速增大。当气流经过栏杆后, 风压立刻变为负压, 结合图 9(a) 可以看出, 这是由于主梁上表面形成的漩涡  $A_3$  导致的。此后平均风压缓慢增大, 直到在  $X/B = 0.25$  处增大到  $-0.33$  后快速减小, 在  $X/B = 0.35$  处降为 0。而无栏杆主梁上表面则是先从  $-0.36$  增大到  $-0.46$ , 而后一直减小, 在  $X/B = 0.25$  处降为 0。相应的, 有栏杆的平均风压系数快速增大, 在  $X/B = 0.41$  处增大到 0.18, 而后缓慢增大, 在  $X/B = 0.94$  处增大到 0.25; 当气流经过背风侧栏杆后, 平均风压系数则骤升为  $-0.42$ , 结合图 9(a) 可以看出, 这是由于漩涡  $A_1$  从栏杆上表面脱落并从栏杆孔洞流出导致的。无栏杆则是先缓慢增大到 0.07 后缓慢降为 0, 最后缓慢升为  $-0.2$ , 这种系数上的变化与图 8(a) 中的漩涡  $A_1$  在主梁上

表面吸附后脱落的过程对应。进一步说明栏杆影响了漩涡生成与附着, 与无栏杆相比, 有栏杆生成的漩涡更多, 表现在平均风压系数上变化更复杂。

由图 11(b) 可见, 有、无栏杆的主梁下表面平均风压系数规律基本一致, 从绝对值大小来看, 当气流遇到工字钢后都会使平均风压系数骤降, 且越靠后, 降低越明显。虽然有、无栏杆的下表面平均风压系数在  $X/B = 0$  处大小不一致, 分别为  $-1.1$  和  $-0.85$ , 但是在  $X/B = 1$  处都减小为  $-0.36$ 。由此可以说明, 下表面平均风压系数基本不受栏杆的影响。

从图 12(a) 可见, 栏杆对主梁上表面 0 处的脉动风压系数影响不大, 当气流经过栏杆位置后, 脉动风压系数迅速增大到 0.22, 随后缓慢增大, 直到出现第一个极大值点 0.23, 是无栏杆的 1.4 倍; 随后迅速下降, 出现第一个极小值点 0.1, 是无栏杆的 2 倍; 此后迅速增大, 出现第二个极大值点 0.38, 是无栏杆的 3.4 倍; 在出现第二个极大值点后又迅速下降, 直到出现第二个极小值点 0.05, 随后缓慢上升, 在出现第三个极大值点 0.13 后又缓慢下降, 直到在背风侧栏杆附近迅速上升到 0.24。无栏杆主梁则是在出现第二个极大值点后缓慢下

降到第二个极小值点 0.07 后一直缓慢上升到 0.15。有栏杆和无栏杆脉动风压系数曲线特点正好对应图 9(a) 主梁上表面三个漩涡  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  与图 8(a) 主梁上表面两个漩涡  $A_1$ 、 $A_2$  的生成与脱落,正是这种交替的漩涡脱落诱导产生了脉动压力<sup>[12]</sup>,使脉动风压系数有规律地波动。说明栏杆的作用直接使得主梁上表面生成的漩涡更多更复杂,而漩涡的生成与脱落会直接影响到主梁上表面的脉动风压系数,进而导致有栏杆主梁涡振幅值较无栏杆更大。

由图 12(b)可以看出,有栏杆主梁下表面的脉动风压系数在  $X/B=0$  处为 0.02,为无栏杆的 0.14 倍,当气流经过第一个工字钢后骤升为 0.24,为无栏杆的 1.8 倍;此后两者基本保持缓慢增大,在第二个工字钢处,有栏杆及无栏杆表面脉动风压系数骤降,但是骤降点无量纲位移  $X/B$  相对有栏杆较靠后;此后三个工字钢附近的脉动风压系数都是先迅速上升后骤降,且无栏杆骤降点无量纲位移  $X/B$  相对有栏杆都靠后。结合图 9(a) 的涡量图,分析原因可能是背风面栏杆处主梁上表面脱落的漩涡  $C_2$  与下表面的漩涡结合,使主梁下表面的漩涡耗散加快,进而导致有栏杆下表面的脉动风压系数骤降点相对无栏杆靠前。

## 5 结论

1) 对小宽跨比景区人行悬索桥而言,栏杆对主梁涡激振动影响较大,随着风攻角由正转负,主梁竖向涡激振幅逐渐增大,涡振性能变差。

2) 主梁竖向涡激振幅随着栏杆透风率增大而减小;保持透风率不变,改变栏杆弧度时,主梁竖向涡激振幅随着栏杆弧度的增大而增大,但增大幅度很小。

3) 主梁上表面形成的漩涡尺度更大、数量更多,而下表面涡脱则不受影响;平均风压系数和脉动风压系数均有所提升,平均风压系数和脉动风压系数出现骤降和骤升,上表面脉动风压系数曲线波动更明显,下表面骤降点更靠近迎风前缘。

## 参考文献:

- [1] LI H, LAIMA S, OU J, et al. Investigation of vortex-induced vibration of a suspension bridge with two separated steel box girders based on field measurements[J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(6): 1894-1907.
- [2] LI M, SUN Y, JING H, et al. Vortex-induced vibration optimization of a wide streamline box girder by wind tunnel test[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2018, 22(12): 5143-5153.
- [3] 祝志文. 桥面栏杆对主梁气动力和涡脱特性的影响研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2016, 13(10): 1945-1954.
- [4] 刘庆宽, 王仰雪, 孙一飞, 等. 栏杆高度对流线型箱梁涡振性能影响的试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(07): 140-150.
- [5] 崔欣, 王慧贤, 管青海, 等. 栏杆透风率对主梁涡振特性影响的风洞试验[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(03): 71-79.
- [6] 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(03): 150-156.
- [7] NAGAO F, UTSUNOMIYA H, YOSHIOKA E, et al. Effects of handrails on separated shear flow and vortex-induced oscillation[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics: The Journal of the International Association for Wind Engineering*, 1997, 69: 819-827.
- [8] 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(06): 702-708.
- [9] 李明, 孙延国, 李明水, 等. 宽幅流线型箱梁涡振性能及制振措施研究[J]. *西南交通大学学报*, 2018, 53(04): 712-719.
- [10] 交通运输部. 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01-2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [11] 郎天翼, 王浩, 贾怀喆, 等. 桥面临时设施作用下大跨悬索桥主梁涡振性能及表面风压分布[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(05): 833-840.
- [12] 祝志文, 邓燕华, 陈魏. 圆柱高 Re 数绕流特性的大涡模拟研究[J]. *振动工程学报*, 2014, 27(1): 51-59.

(责任编辑 周雪梅)