

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202101011



行人对人行桥三分力系数的影响

徐亚琳^{1,2}, 胡海涛², 钱长照², 雷鹰¹, 陈昌萍^{1,2}

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005;
2. 厦门理工学院 风灾害与风工程福建省重点实验室, 福建 厦门 361024)

摘要: 以风洞试验方法为主、计算流体力学(CFD)方法为辅,研究不同角度风嘴入流、行人密度和行人横向排列位置条件下的人行桥主梁断面三分力系数的变化规律.结果表明:桥上行人的存在会改变截面周围气流的流态,从而对桥梁断面的静力三分力系数产生显著影响;风攻角在 $-12^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 范围内,阻力系数均呈现先增加后减小趋势,负风攻角范围内行人密度是阻力系数变化的主导因素,而正风攻角范围内阻力系数变化受风攻角主导;当风攻角由 -12° 变化到 12° 时,小风嘴入流状态下的升力系数和扭矩系数整体逐渐减小,而大风嘴入流状态下的升力系数和扭矩系数整体呈现先增大后减小的趋势,随着行人由迎风侧移动到背风侧,阻力系数略微增大,升力系数显著减小,扭矩系数几乎不变.

关键词: 非对称桥梁断面; 行人密度; 横向位置; 风洞试验; 计算流体力学(CFD)

中图分类号: U 446.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)05-0611-08

Influence of Pedestrian on Tri-Component Coefficients of Footbridge

XU Yalin^{1,2}, HU Haitao², QIAN Changzhao²,
LEI Ying¹, CHEN Changping^{1,2}

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
2. Fujian Key Laboratory of Wind Disasters and Wind Engineering,
Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: Mainly by the wind tunnel test method, and assistantly by the computational fluid dynamics (CFD) method, the variation of the tri-component force coefficients with different wind fairing angles, pedestrian densities and arrangements of pedestrian lateral position is studied. The results show that the pedestrians on the bridge change the flow pattern of the airflow around the cross section, consequently influence significantly the tri-component coefficients of the bridge section. With the wind attack angle varying from -12° to 12° , the drag coefficient increases at first and then decreases. Pedestrian density is the main factor for negative wind attack angle, while the wind attack angle plays a dominant role in drag coefficient for positive wind attack angle. With the wind attack angle varying from -12° to 12° , the lift coefficient and torque coefficient gradually decrease under small wind fairing angle, while the lift coefficient and torque coefficient show a trend of first increasing and then decreasing under large wind fairing angle. As the pedestrian moves from the windward side to the leeward side, the drag coefficient increases slightly, the lift coefficient decreases significantly, and the torque coefficient is almost unchanged.

Keywords: asymmetric bridge section; pedestrian density; lateral position; wind tunnel test; computational fluid dynamics (CFD)

人行桥一般建造在行人密集地段的城市高空或深山峡谷的景区里,大多采用轻质高强材料,结构较轻柔,对风荷载更敏感.同公路桥相比,人行桥的主梁高度更小、桥面更窄,所以处于桥面上的行人对人行桥气动外形的影响也更显著.桥梁断面的静力三分力系数是一组很重要的抗风设计参数,静力风荷载往往是桥梁的控制设计荷载^[1],而桥上通行的大量行人势必会改变主梁断面周围的流场,对桥梁的静力三分力系数造成影响.

目前,研究桥梁抗风问题的主要手段有计算流体力学(CFD)方法和风洞试验方法.文献[2-3]利用 CFD 方法和风洞试验方法计算桥梁的静风作用,并对比两种方法的结果,结果表明,CFD 方法能够较为精确地模拟主梁断面的三分力系数.文献[4-5]利用 CFD 方法识别不同风攻角下的三分力系数结果,并研究雷诺数和来流湍流度对桥梁断面三分力系数的影响.文献[6-7]研究栏杆、中央稳定板和风屏障等桥面附属设施对桥梁断面三分力系数的影响.国内外对三分力系数影响因素的研究主要集中于截面外形和桥面附属物等方面^[8-11],而针对行人对桥梁断面三分力系数的影响研究较少.文献[12-13]通过风洞试验方法进行行人-桥系统节段模型的测力试验,研究不同人群密度引起的主梁断面气动参数的变化规律.以上研究对于分析行人对桥梁的气动影响有一定的推动作用,然而,仅采用风洞试验方法并不能直观地获得流场的特性,具有局限性.CFD 方法可以有效求解气流通流主梁断面时的流态^[14],将风洞试验方法与 CFD 方法相结合,可以更好地研究行人对桥梁断面静力三分力系数的影响.

本文以福建省厦门市健康步道的某行人密集路段的人行桥为工程背景,结合风洞试验方法和 CFD 方法,研究非对称桥梁断面在不同风嘴角度入流的情况下,行人密度和排列位置对三分力系数的影响.

1 三分力系数

三分力系数是描述具有相同形状的截面静力风荷载共同特性的无量纲参数^[1].桥梁断面的三分力示意图,如图 1 所示.图 1 中: v 为横向风的速度; F_V 为由于上、下表面压强的不同而在顺桥方向产生的升力; F_H 为由于前、后表面压强不同而在横桥方向产生的阻力; M_T 为由于升力与阻力的合力点与扭心不一致产生的扭矩^[1].

上述三分力是按桥梁断面本身的体轴坐标系分解定义的,因此,称为体轴坐标系下的三分力(F_V, F_H, M_T),在风洞试验中是按风轴坐标系测定三分力的,即

$$\begin{bmatrix} F_V \\ F_H \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{bmatrix} F_L \\ F_D \end{bmatrix}.$$

(1)

体轴坐标系下,阻力系数函数为 $C_H(\alpha)$,升力系数函数 $C_V(\alpha)$ 及扭矩系数函数 $C_T(\alpha)$ 和三分力之间的关系分别为

$$C_H(\alpha) = \frac{2F_H}{\rho_a v^2 D},$$

(2)

$$C_V(\alpha) = \frac{2F_V}{\rho_a v^2 B},$$

(3)

$$C_T(\alpha) = \frac{2M_T}{\rho_a v^2 B^2}.$$

(4)

式(2)~(4)中: ρ_a 为空气密度, $\rho_a=1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; B 为节段模型的宽度, m; D 为节段模型的高度, m.

2 研究方法

厦门市某人行桥为单塔单侧悬挂的地锚式悬索人行桥,跨径布置为(216.7+10.0) m,全长 226.7 m.桥梁主梁采用扁平钢箱结构,宽为 4.4 m,梁高为 1.2 m,标准段梁顶板宽为 4.0 m,底板宽为 0.9 m.

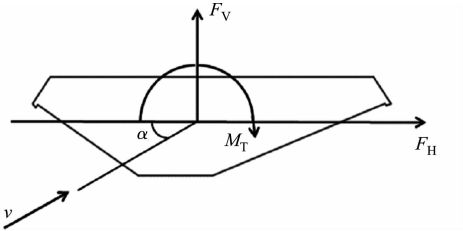


图 1 桥梁断面三分力示意图
Fig. 1 Tri-component forces on bridge section

主梁结构标准横断面,如图 2 所示。

考虑不同因素对桥梁断面气动参数的影响,主要针对桥上行人密度和桥上行人的横向排列位置对三分力系数的影响进行研究。

2.1 风洞试验方法

设计试验模型时,以工程实际模型为标准,满足几何形似准则,选取的几何缩尺比为 1:20。模型长为 1.00 m,宽为 0.22 m,长宽比为 4.55(大于 2.50),满足抗风规范要求^[15]。模型桥面净宽为 0.20 m,截面高度为 0.06 m,栏杆的附加透风率为 85%。模型骨架选用铝合金方管,外衣则采用木板制作,主梁上的人行道栏杆采用 ABS(丙烯腈/丁二烯/苯乙烯共聚物)板制作,并模拟了栏杆的形状与透风率。模型需具有足够大的刚度,避免试验时出现较大振动,模型主要尺寸的加工误差控制在 2% 以内^[16]。以 2014 年国民体质监测公报的体质指标平均数作为参考,试验用的人体微缩模型采用几何缩尺比 1:20 的,人体微缩模型的高度约为(8.0±0.5) cm。相较于长方体模型,人体微缩模型更加接近真实人体外形,人体四肢等细节表现更加精细准确。试验在厦门理工学院风洞实验室进行,其中,风洞低速试验段尺寸为 25.0 m×6.0 m×3.6 m,低速段风速范围为 0.5~30.0 m·s⁻¹。采用美国高精度 6 分量测力天平测试桥梁断面的三分力,测力天平与测试模型连接,专用采集仪和计算机相连进行数据采集,数据的采样频率为 1 000 Hz,采样时间为 180 s,匀速风场的来流风速为 10 m·s⁻¹。

2.2 CFD 方法

根据条带假定,假定桥梁足够长且平直,任一断面的风荷载可以代表其他断面的风荷载^[1],采用 CFD 方法模拟模型研究静力三分力系数问题。桥梁断面模型采用和风洞试验模型相同的几何尺寸,将计算区域划分为网格加密区、次加密区与非加密区,分别对应近壁面区域 S1,尾流区域 S2,外流区域 S3。定义主梁断面计算区域的入口边界为速度入口边界条件,出口边界为压力出口边界条件,上下边界为对称边界条件,具体的模型计算区域及边界条件,如图 3 所示。选择求解模型为 SSTk-ω 模型,湍流强度为 0.5%^[17],压力插值方法为二阶格式,采用 SIMPLE 算法处理压力与速度的耦合。

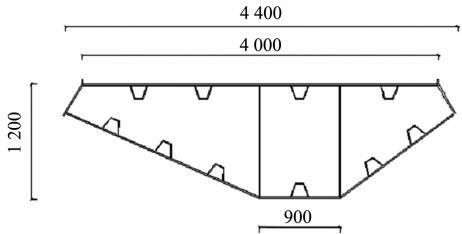


图 2 主梁结构标准横断面(单位:mm)
Fig. 2 Standard cross section of main girder structure (unit: mm)

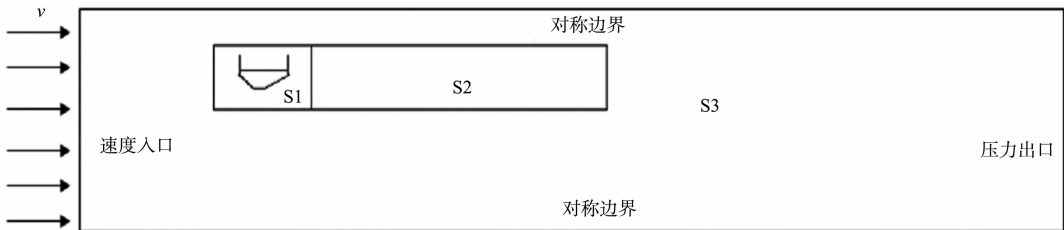


图 3 主梁断面计算区域及边界条件
Fig. 3 Calculation domain and boundary condition of main girder section

3 行人密度对三分力系数的影响

3.1 工况设置

文献[18-19]建议行人交通级别确定桥面允许的最大行人密度(ρ_p)为 1.5 人·m⁻²,文中设置 5 种不同行人密度工况,分别为 0,0.2,0.5,1.0,1.5 人·m⁻²,行人的排列方式采取列队式排列方式,等间距分布在桥面上。

定义从小风嘴角度一侧的入流状况为 A 侧入流;定义从大风嘴角度一侧的入流状况为 B 侧入流。不同入流示意图,如图 4 所示。由图 4 可知:桥梁断面模型为非对称形状,图 4(a)的入流风嘴角度小于图 4(b)的风嘴角度。由于风的方向具有不确定性,需考虑入流风从左、右两侧分别流入时

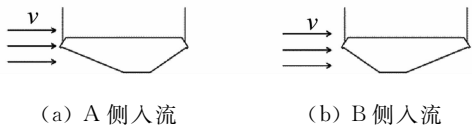


图 4 不同入流示意图
Fig. 4 Inflow conditions in different directions

的情况. 针对 5 种行人密度工况, 分别测试在风攻角为 $-12^{\circ} \sim 12^{\circ}$, 角度间隔为 1° 的 25 个风攻角下的桥梁断面的三分力. 行人密度分别为 0 和 $1.0 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 的试验模型, 如图 5 所示. 选取体轴坐标系下的三分力系数进行分析, 将风洞试验得到风轴三分力的数据通过式(1)~(4)转换成体轴三分力系数.

3.2 A 侧入流的三分力系数变化规律

为了研究行人密度变化对桥梁断面三分力系数的影响, 对 A 侧小风嘴入流的的 5 种不同行人密度工况的风洞试验结果进行分析. A 侧入流的不同行人密度工况下的三分力系数试验结果, 如图 6 所示.

由图 6(a)可知: 阻力系数随着风攻角变化而发生改变, 在风攻角为 $-12^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 范围内, 阻力系数整体呈现先增大后减小的趋势, 各个行人密度下的阻力系数在 $-4^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 间达到峰值, 当行人密度变化时, 阻力系数也随之改变; 而在负风攻角范围内, 风攻角一定时, 阻力系数随着行人密度的增大而增大; 但在正风攻角范围内, 则出现明显的不同. 当风攻角为 $2^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 范围内, 行人密度为 $0.2 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 的工况的阻力系数超过行人密度为 $0.5 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 的工况, 风攻角为 $7^{\circ} \sim 9^{\circ}$ 时, 行人密度为 $0.2 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 的工况的阻力系数进一步超越行人密度为 $1.0 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 的工况, 而行人密度为 $0.5 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 的工况阻力系数更加趋近于桥面无人的工况.

由图 6(b)可知: 不同行人密度工况的升力系数变化规律基本一致, 行人密度稀疏($0, 0.2 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$)的工况升力系数非常接近, 行人密度较密集($0.5, 1.0, 1.5 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$)的工况升力系数非常接近; 不同行人密度工况的升力系数在小风攻角范围内差异较大, 而在较大的风攻角范围内的升力系数出现交叠现象, 数值比较接近, 因此, 较大攻角范围内的升力系数受桥上行人密度的影响较小; 在从负风攻角转向正风攻角过程中, 竖向力由向上的升力转为向下的压力, 在行人密度较小、风攻角为 2° 时, 竖向力由正转负, 在行人密度较大、风攻角为 -1° 时, 竖向力由正转负.

由图 6(c)可知: 扭矩系数的变化规律和升力系数的变化规律类似, 在旋转风攻角的过程中, 多次出现不同行人密度的扭矩系数曲线交叠的情况; 在从负风攻角转向正风攻角过程中, 扭矩方向发生改变, 在行人密度较小、风攻角为 8° 时, 扭矩由正转负, 在行人密度较大、风攻角为 5° 时, 扭矩由正转负.

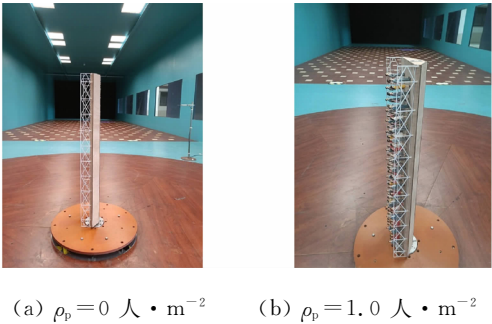


图 5 试验模型
Fig. 5 Test model

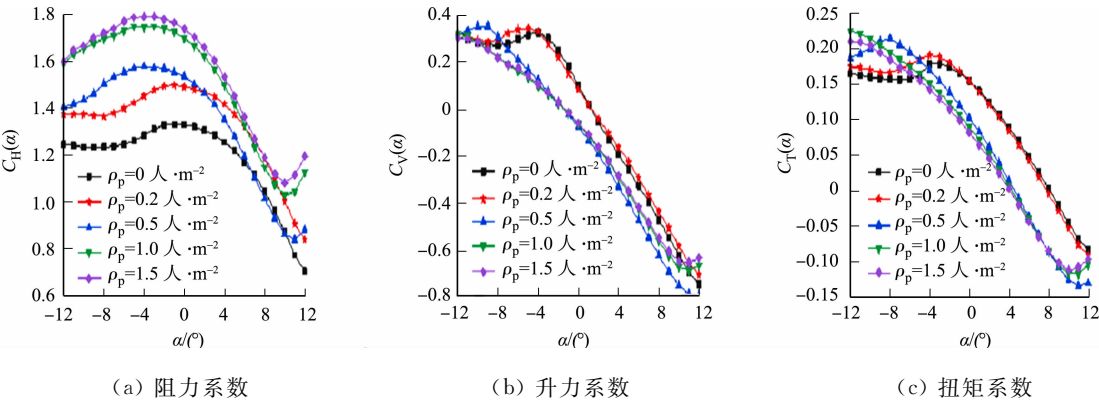


图 6 A 侧入流时不同行人密度工况下的三分力系数试验结果

Fig. 6 A-side inflow tri-component force coefficients test results under different pedestrian density conditions

挡风面积是阻力系数的一个重要影响因素^[20]. 当行人密度逐渐增大时, 挡风面积也逐渐开始增大, 导致阻力系数也将随之增加. 当行人密度增大至一定值时, 挡风面积将成为影响阻力系数变化的最主要因素. 因此, 风攻角为 $-12^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 的范围内, 行人密度为 $1.0, 1.5 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 的工况下的阻力系数均处于极大值状态, 且两者数值非常接近. 但当行人密度稀疏时, 挡风面积迅速减少, 此时, 阻力系数变化的主导因素为风攻角的变化.

根据试验结果发现, 阻力系数在负风攻角范围内的变化规律明显, 在正风攻角范围内变化规律复杂, 特别是风攻角为 6° 时还出现了多个密度工况阻力系数重叠的现象, 所以分别取风攻角为 $-6^{\circ}, 6^{\circ}$ 的

数值模拟结果进行分析. A 侧入流数值模拟绕流结果图, 如图 7 所示. 图 7 中: p 为压强.

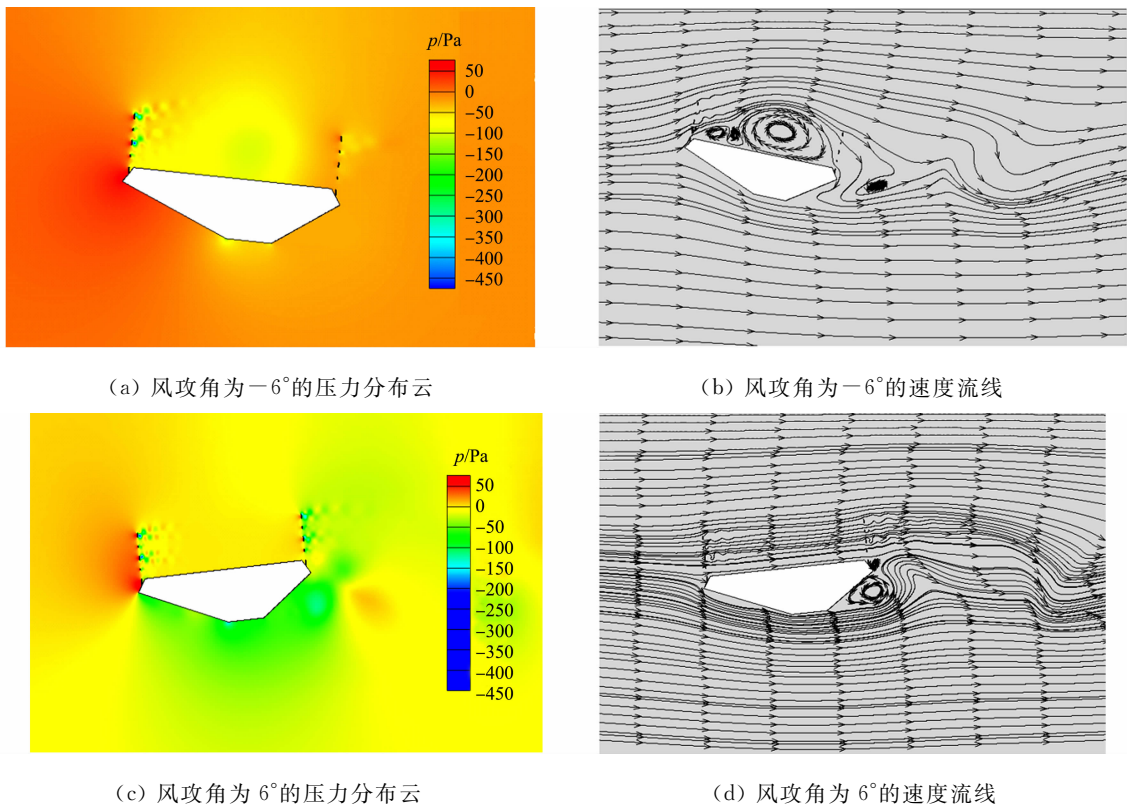


图 7 A 侧入流的数值模拟绕流结果图

Fig. 7 Numerical simulation circumfluence flow results of A-side inflow

由图 7(a)可知: 由于桥梁的迎风面为正压集中区域, 背风面为负压集中区域, 在风攻角为 -6° 的条件下, 增大入流处的挡风面积, 桥梁入流风嘴下缘及栏杆处为高压状态.

由图 7(b)可知: 气流不能快速通过桥面, 桥面上形成低压区域, 因此, 桥面位置形成明显的气流涡旋. 与之相反, 由图 7(d)可知: 在风攻角为 6° 的条件下, 由于风嘴较小的气流能够快速通过桥面和风嘴下缘, 仅在桥梁栏杆处形成高压区域, 最终气流聚集在断面的出流风嘴下缘, 形成明显的涡旋. 显然, 处在断面尾部的气流漩涡对三分力系数的影响较大, 所以在正风攻角范围内, 风攻角度是阻力系数的主要影响因素.

由图 7(c)可知: 截面的上、下表面为负压集中区域, 主梁的上表面压力大于下表面, 所以在正风攻角范围内, 呈现向下的压力状态.

3.3 B 侧入流的三分力系数变化规律

对 B 侧的大风嘴入流时的 5 种不同行人密度工况的风洞试验结果进行分析, B 侧入流的不同行人密度工况的三分力系数试验结果, 如图 8 所示. 由图 8 可知: 行人密度为 $0.2, 0.5 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 工况的三分力系数非常接近, 而行人密度为 $1.0, 1.5 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 工况的三分力系数非常接近.

由图 8(a)可知: 随着行人密度的增大, 阻力系数也逐渐增大, 当风攻角由 -12° 转至 12° 时, 阻力系数与 A 侧入流的结果一样, 呈现先增大后减小的趋势, 阻力系数的峰值出现在风攻角为 -6° 附近; B 侧大风嘴入流下的阻力系数在 $1.3 \sim 2.1$ 之间, 整体大于 A 侧小风嘴入流的结果; 在负风攻角范围内, 阻力系数由行人密度主导变化, 所以不同行人密度下的阻力系数差值较大, 在正风攻角范围内, 阻力系数数值由风攻角主导变化, 所以不同行人密度工况下的阻力系数数值越来越接近.

由图 8(b)可知: 行人密度变化对 B 侧入流的升力系数影响一样较小, 但 B 侧入流的升力系数随风攻角的变化规律和 A 侧入流的结果相比有较大不同, 各行人密度工况下的升力系数随着风攻角的变化先增加后减小, 但拐点出现在不同的风攻角处, 行人密度为 $0, 0.2, 0.5 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 工况的峰值出现在风攻角为 0° 附近, 行人密度为 1.0 和 $1.5 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 工况的峰值则出现在风攻角为 3° 附近.

由图 8(c)可知: B 侧入流的扭矩系数的变化规律较为复杂, 多次出现波动现象, 在正风攻角范围内

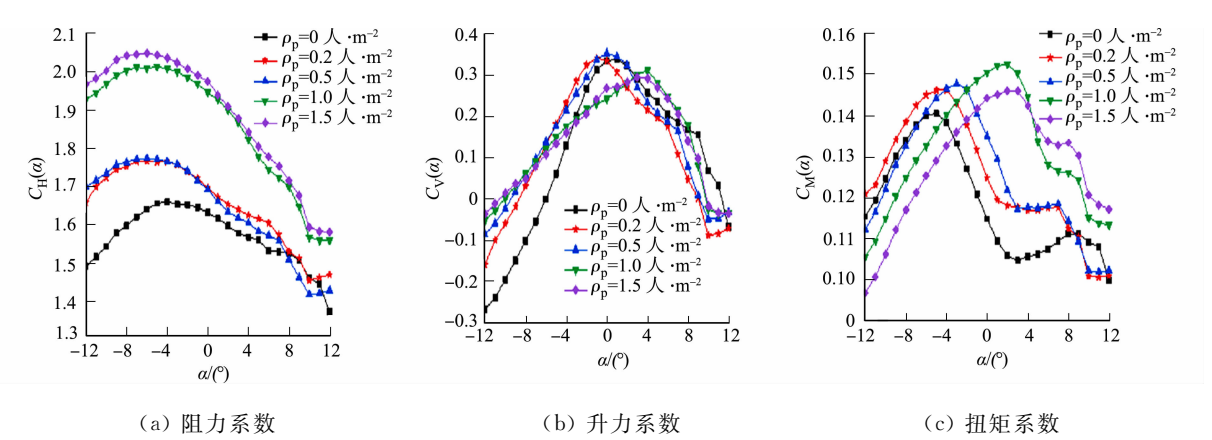


图 8 B 侧入流的不同行人密度工况下的三分力系数试验结果

Fig. 8 B-side inflow tri-component force coefficients test results under different pedestrian density conditions

的扭矩系数差异较大。

B 侧入流数值模拟绕流结果图,如图 9 所示.由图 7(a),(c)及图 9(a),(c)可知:A,B 两侧入流的压力分布情况基本一致.

由图 9(a)可知:截面的迎风面为正压集中区域,背风面为负压集中的区域,截面前后的压差较大,所以此时阻力系数较大.

由图 9(b),(d)可知:风攻角为 -6° 时,尾流区的表面积较大,桥面上的涡旋位置较 A 侧入流时更靠后;风攻角为 6° 时,截面底部的气流涡旋现象更加明显.

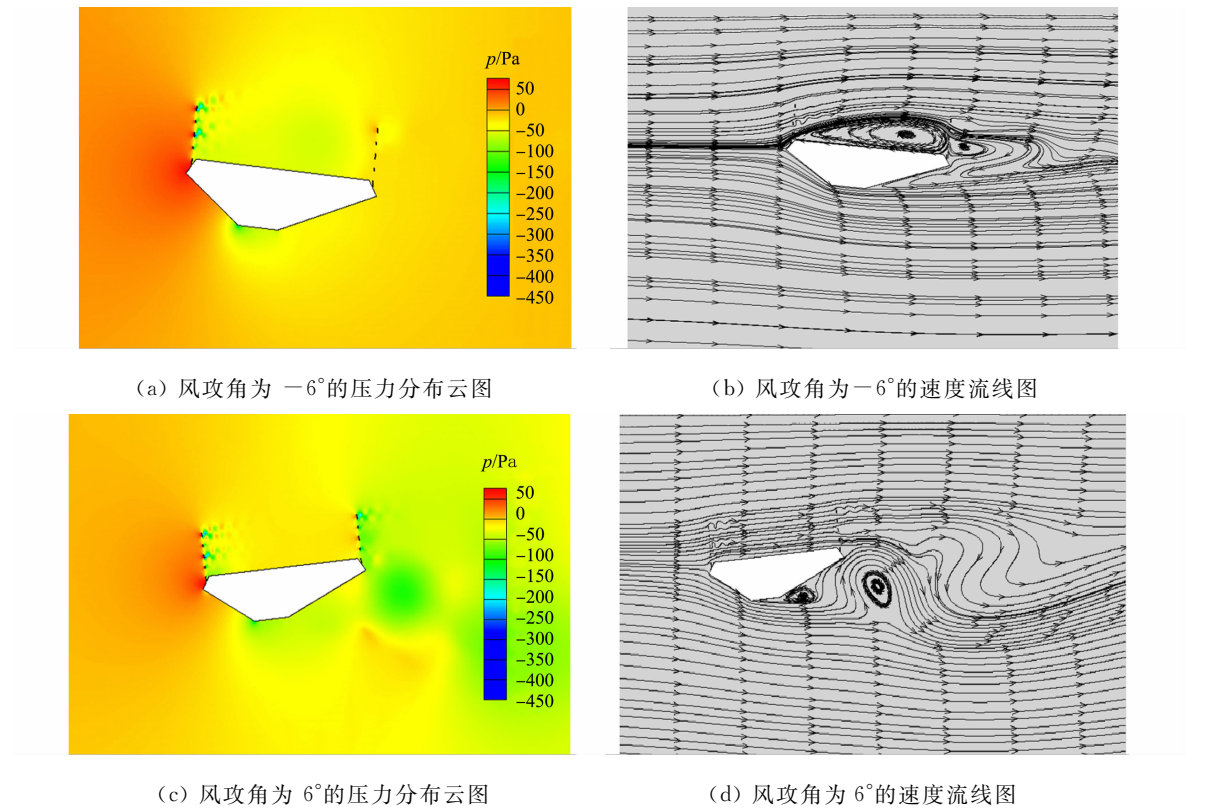


图 9 B 侧入流的数值模拟绕流结果图

Fig. 9 Numerical simulation circumfluence flow results of B-side inflow

4 行人横向排列位置对三分力系数的影响

除了桥上行人密度对三分力系数有影响外,桥上行人排列的横向位置也会影响三分力系数.试验取行人密度为 $0.2\text{人}\cdot\text{m}^{-2}$,即桥上有 15 个行人等间距地排列成纵排,按迎风面、桥中心和背风面分为

左、中和右三个区域. 不同横向排列位置下的三分力系数结果,如图 10 所示. 由图 10 可知:随着行人从左侧移动到右侧,阻力系数逐渐增大,而扭矩系数基本不变,试验值与模拟结果基本一致;但升力系数出现明显下降的趋势,并且模拟数值远低于试验结果. 这是由于风洞试验采用的是三维模型,沿桥面等间距分布的行人对不同区域的升力系数作用并不同,对整体桥梁的影响并非简单的叠加状态,而 CFD 方法模拟的是二维模型,相当于是截取桥梁长度方向的某一截面采集结果,因此,二维模型模拟与风洞试验结果的升力系数有明显误差,关于行人的排列方式对桥梁断面的升力系数影响还需后续深入研究.

不同横向排列位置下压力等值线图,如图 11 所示. 由图 11 可知:行人前部的迎风面为正压最大区,而桥梁截面的下表面和背风面是负压集中的区域;随着行人由桥面左侧移动到右侧,压力最大区域也逐渐覆盖桥梁截面的上部分,截面下表面和背风面的负压越来越大,此时,上、下表面的压差越来越大. 这也和图 10 中的升力系数的变化趋势相吻合.

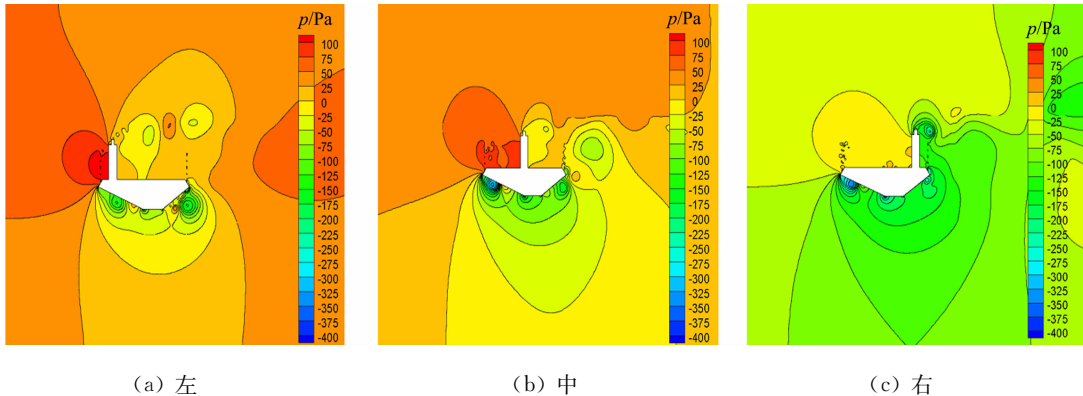


图 11 不同横向排列位置下压力等值线图

Fig. 11 Pressure contour of different lateral positions

5 结论

结合风洞试验和 CFD 方法,研究不同风攻角条件下,人行桥上行人密度和行人横向排列位置对断面三分力系数的影响,得到了如下 4 个结论.

- 1) 在风攻角为 $-12^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 范围内,阻力系数均呈现先增加后减少趋势. 行人密度对阻力系数具有显著影响,在负风攻角范围内行人密度是阻力系数变化的主导因素,在正风攻角范围内风攻角为阻力系数变化的主导因素.
- 2) 在风攻角为 $-12^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 范围内,小风嘴入流状态下的升力系数和扭矩系数整体呈现下降趋势,而大风嘴入流状态下的升力系数和扭矩系数则整体呈现先上升后下降趋势.
- 3) 随着桥上行人由迎风侧移动到背风侧,升力系数逐渐减小,阻力系数略微增大,扭矩系数几乎不受影响.
- 4) 以行人密度为 $0.5\text{ 人}\cdot\text{m}^{-2}$ 为分界线,在小入流风嘴时呈现和密集行人状态接近的变化规律,在大入流风嘴时呈现和稀疏行人状态接近的变化规律,所以建议桥上行人密度不要超过 $0.5\text{ 人}\cdot\text{m}^{-2}$.

参考文献:

[1] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
[2] GUO Jian,ZHU Minjun. Static aerodynamic force coefficients for an arch bridge girder with two cross sections[J].

- Wind Struct, 2020, 31(3): 209-216. DOI: 10. 12989/was. 2020. 31. 3. 209.
- [3] 王旭, 袁波, 陈耀, 等. 桥梁断面三分力系数的数值风洞研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2017, 34(2): 128-133. DOI: 10. 15958/j. cnki. gdxzbzrb. 2017. 02. 26.
- [4] 汪家继, 樊健生, 聂建国, 等. 大跨度桥梁箱梁的三分力系数识别研究[J]. 工程力学, 2016, 33(1): 95-104. DOI: 10. 6052/j. issn. 1000-4750. 2014. 06. 0475.
- [5] 刘昊苏, 雷俊卿. 大跨度双层桁架主梁三分力系数识别[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(6): 1092-1100. DOI: 10. 3785/j. issn. 1008-973X. 2019. 06. 008.
- [6] ZHANG Tian, GUO Weiwei, DU Fei. Effect of windproof barrier on aerodynamic performance of vehicle bridge system[J]. Procedia Engineering, 2017, 199: 3083-3090. DOI: 10. 1016/j. proeng. 2017. 09. 426.
- [7] 白桦, 马腾飞, 杨鹏瑞, 等. 附属设施对近流线形桥梁三分力的雷诺数效应影响研究[J]. 振动工程学报, 2019, 32(2): 340-349. DOI: 10. 16385/j. cnki. issn. 1004-4523. 2019. 02. 018.
- [8] SHANG Jingmiao, ZHOU Qiang, LIAO Haili, *et al.* Numerical study of wake and aerodynamic forces on a twin-box bridge deck with different gap ratios[J]. Wind Struct, 2020, 30(4): 367-378. DOI: 10. 12989/was. 2020. 30. 4. 367.
- [9] MA Cunming, DUAN Qingsong, LI Qiusheng, *et al.* Aerodynamic characteristics of a long-span cable-stayed bridge under construction[J]. Engineering Structures, 2019, 184: 232-246. DOI: 10. 1016/j. engstruct. 2018. 12. 097.
- [10] 樊文书, 李永乐. 风嘴形式对桥梁断面三分力系数影响的数值模拟[J]. 四川建筑, 2018, 38(3): 163-165. DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-8983. 2018. 03. 057.
- [11] XU F Y, LI Binbin, CAI C S, *et al.* Experimental Investigations on aerostatic characteristics of bridge decks under various conditions[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(7): 27-35. DOI: 10. 1061/(ASCE)BE. 1943-5592. 0000601.
- [12] 杨赐. 风与人群荷载共同作用下人行悬索桥的振动响应[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [13] 吴桂楠. 风-人-桥系统的步行参数与气动参数研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [14] 李加武, 宋特, 林立华, 等. 变截面连续钢箱梁桥静气动性能研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(4): 88-95. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-0268. 2020. 04. 012.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 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.
- [16] 葛耀君. 桥梁风洞试验指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [17] 林震云, 李永乐, 汪斌. 基于 CFD 的大跨度邻近桥梁气动干扰效应分析[J]. 铁道建筑, 2018, 58(2): 18-22. DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-1995. 2018. 02. 05.
- [18] BUTZ C, HEINEMEYER C, KEIL A, *et al.* Design of footbridges guideline: RFS2-CT-2007-00033[S]. Berlin: [s. n.], 2008.
- [19] National Research Council. HCM2010: Highway capacity manual[M]. 5 版. Washington D C: National Academies Press, 2010.
- [20] 蒋廷球, 韦楼. 攻角变化下流线型桥梁断面三分力系数的数值模拟[J]. 中国西部科技, 2011, 10(10): 15-16, 25. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-6396. 2011. 10. 006.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)