

# 风屏障对平层公铁桥上列车气动特性影响的风洞试验研究

刘 叶<sup>1</sup>, 韩 艳<sup>1</sup>, 胡 朋<sup>1</sup>, 李 凯<sup>1</sup>, 蔡春声<sup>2</sup>, 何旭辉<sup>3</sup>

(1.长沙理工大学土木工程学院, 湖南长沙 410114; 2.Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803; 3.中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075)

**摘要:** 基于列车测压试验,以平层公铁桥梁和CRH2列车为背景,分析了风屏障对平层公铁桥上列车表面风压分布的影响,研究了有无风屏障时列车表面压力以及气动力的跨向相关性的变化规律。研究表明:设置风屏障后,列车迎风面与背风面、顶面和底面风压差随风屏障透风率的减小而减小,使得列车总体侧力和升力减小,风屏障透风率为20%时,列车表面脉动压力分布较均匀,有利于桥上列车运行时的安全与舒适。风屏障的防风效果不会随着风屏障高度的增加一直变好,透风率为40%时,风屏障存在一个最优高度3.5 m。风屏障透风率对列车迎风面以及顶面圆弧过渡段表面风压的影响明显大于高度。设置风屏障后,列车底面和背风面测点压力跨向相关性更好,风屏障的挡风效应增强了这两部分展向流场的一致性,使流体的脱落点更一致。随着跨向间距的增大,气动力的相关性越来越差,风屏障对气动力的跨向相关性较无风屏障时弱,设置风屏障时跨向间距超过5倍列车高,气动力完全不相关。

**关键词:** 风屏障; 风洞试验; 平均风压; 脉动风压; 跨向相关性

**中图分类号:** U448.12; TU317+.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)02-0284-13

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.02.004

## 引 言

随着列车轻量化、高速度的发展,使得其对横风的作用更加敏感。已有研究表明<sup>[1-3]</sup>,横风下列车在桥上行驶所受风荷载要大于列车单独存在时的风荷载,列车在桥上行驶相对较危险,需引起重视。在桥面两侧设置风屏障能有效改善列车在桥上行驶时的风环境,提高列车的临界风速,是解决桥面行车安全和舒适性问题的主要手段<sup>[4-5]</sup>。为提高桥梁通行能力,缓解交通压力,大跨度跨江、跨海大桥通常采用公铁两用的结构形式,常见的公铁两用大桥主要为分层或分离式结构,针对公铁平层大跨度桥梁的研究还很缺乏。

目前,国内外研究者通过风洞试验和数值模拟方法对风屏障的防风效果进行了大量的研究。董香婷等<sup>[6]</sup>利用数值模拟方法,对列车在侧风下的三维绕流情况进行了分析,研究了有无风屏障时列车表面的压力分布、流线以及气动力。Telenta等<sup>[7]</sup>通过CFD数值模拟,分析了风屏障的障条倾斜角度对车

辆气动特性的影响情况,并以车辆所受最小侧向力为目标,对障条间距及倾斜角度进行了优化。王玉晶等<sup>[8]</sup>采用节段模型风洞试验,分析了不同行车工况、不同线路构造形式,设置了单、双侧风屏障后车辆和桥梁的三分力系数,解释了风屏障-车-桥系统气动绕流机理。项超群等<sup>[9]</sup>利用流体计算软件FLUENT计算了不同风屏障高度下桥上列车的气动力系数,研究了列车周围流场静压和速度分布。何旭辉等<sup>[10-11]</sup>基于风洞测压试验与流体力学理论,分析了风屏障对车桥系统下列车的风压分布情况以及气动力分布特征,并解释了风屏障的气动效应机理。Zhang等<sup>[12]</sup>利用CFD数值模拟方法对风屏障的选型进行了研究,分析了筒支箱梁桥桥面以上高度的风速分布规律,在此基础上给出了评价风屏障防风效果的建议指标以及风屏障的合理高度和孔隙率。向活跃等<sup>[4,13-14]</sup>利用风洞试验和数值模拟两种方法,对风屏障作用下桥梁和列车的气动特性进行了系统分析,研究了不同风屏障高度和透风率下轨道上方的流场分布和车辆风荷载,并通过移动列车

**收稿日期:** 2020-07-01; **修订日期:** 2021-01-30

**基金项目:** 国家自然科学基金优秀青年基金资助项目(51822803);湖南省杰出青年基金资助项目(2018JJ1027);国家自然科学基金资助项目(51778073,51878080);湖南省研究生科研创新项目(QL20210181)。

风洞试验,对装有风屏障的桥上列车气动性能进行了研究,分析了不同风屏障高度和风向角对列车风荷载的影响,并对风屏障的防风性能进行了评估。Hrvoje Kozmar等<sup>[15]</sup>为确定高架桥道路防风屏障的最佳气动设计,在边界层风洞中研究了风屏障的挡风效率,分析了风攻角对风屏障后流场特性的影响,采用粒子成像技术(PIV)研究了风屏障的高度和通风率。这些研究仅针对线路下部结构为路基或典型高铁高架桥断面,主要通过车辆整体平均气动力或测试线路上方流场来评估风屏障的防风效果,对于平层公铁桥梁这种特殊线路构造形式下的列车表面风压分布研究鲜有报道。

徐志豪<sup>[16]</sup>通过风洞测压试验,研究了双主梁断面形式的 Stonectters 大桥抖振力的展向相关性,分析了开槽间距以及紊流度对抖振力跨向相关性的影响规律。Nagao等<sup>[17]</sup>通过测量两个不同形状平板的表面压力,研究了气动力空间相关性与来流空间相关性的关系。廖海黎等<sup>[18]</sup>通过对流线箱型桥梁断面进行风洞测压试验,研究了紊流积分尺度对桥梁断面抖振力相关性的影响,得到了紊流积分尺度与桥梁断面的三维气动导纳以及跨向相干函数的经验公式。Miyata等<sup>[19]</sup>通过现场实测,对明石海峡大桥风场及响应进行了研究,并将脉动风的相关性与抖振力的空间相关性进行了对比分析,得出了低频区抖振力的空间相关性逐渐变差的结论。马存明等<sup>[20]</sup>利用风洞试验,研究了两种大气紊流场下桥上列车的气动力,考虑紊流度、攻角以及列车位置等因素,对列车抖振力的跨向相关性进行了分析。大量针对空间相关性的研究主要集中在桥梁等相关结构,关于列车断面气动力的跨向相关性研究非常少,进而考虑风屏障的影响研究更加缺乏。

因此,本文以平层公铁桥梁和CRH2列车为背景,对风屏障作用下某公铁平层大跨度斜拉桥上列车表面平均压力、脉动压力分布以及气动力跨向相关性进行研究,探究风屏障对列车气动特性的影响机理。

## 1 试验概况

本次试验在长沙理工大学大型边界层风洞实验室高速试验段(宽4.0 m×高3.0 m×长21 m)进行,风场为均匀流场,试验风速为11.5 m/s。采用测压法对公铁平层大跨度斜拉桥上静止列车表面压力进行测试,通过压力积分得到列车任一测压断面上的气动力。

### 1.1 试验模型

一组高速列车通常由多节车厢组成,相比头车和尾车,中间车厢形状不变且规则,测压点布置较方便合理,试验精度易得到保障,因此文中取中车为研究对象。列车车辆模型采用CRH2型列车截面,缩放比为1:43,模型尺寸为2300 mm(长)×78.6 mm(宽)×81.4 mm(高),列车模型忽略了底部的转向架等的影响,并将其简化为平面。在列车表面采用纵向不等间距布置测压断面,列车在桥上单车布置时,考虑如图1(a)所示的列车测压断面布置形式,测压断面4为列车中心;双车交会时,迎风侧列车如图1(a)所示,背风侧列车如图1(b)所示,背风侧列车考虑的两个测压断面分别对应迎风侧列车断面3和断面5。每个测压断面共布置了30个测压孔,由于列车断面圆弧过渡段及顶面压力变化较大,所以该处测点布置较密以捕捉更多的流场信息,列车测压孔布置如图2所示。

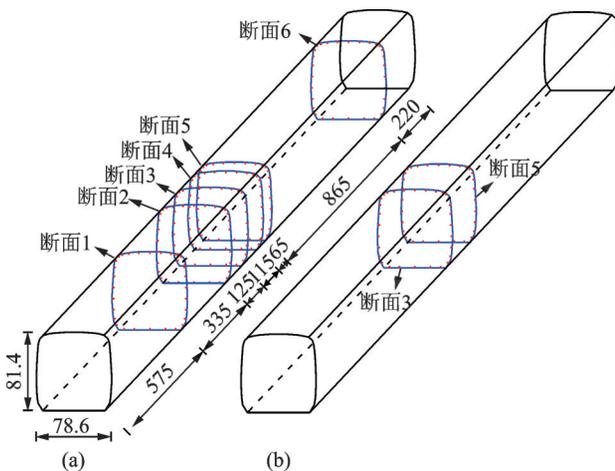


图1 列车测压断面图(单位:mm)

Fig. 1 Section diagram of train pressure measurement (Unit: mm)

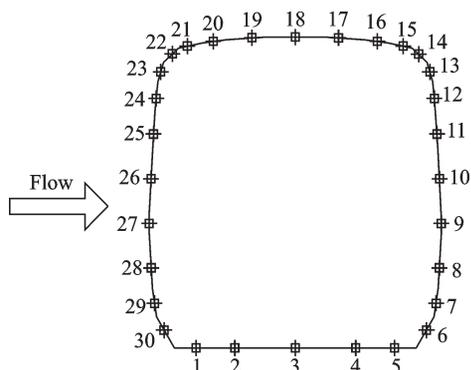


图2 列车测压孔布置图

Fig. 2 Train pressure hole arrangement plan

桥梁模型为某平层公铁两用大桥,桥梁中间为双线铁路,线间距为4.6 m,铁路两边是双向6车道

的高速公路,公路与铁路之间设有防护栏,采用的缩尺比与列车模型相同,桥梁模型尺寸为2300 mm(长)×1153 mm(宽)×112 mm(高)。缩尺后的主梁断面模型如图3所示。

风屏障缩尺模型通过等效透风率法设计了三种高度(3.0,3.5和4.0 m)下的三种透风率(20%,40%和60%),采用圆形开口方式,图4(a)给出了风屏障在不同透风率下的试验模型;风屏障设置在内侧防护栏所在位置如图4(b)所示。

### 1.2 试验工况及设备

本文考虑了列车不同组合方式,分析风屏障对列车表面压力分布情况,仅针对0°风攻角,风偏角为90°横风下的风屏障-列车-桥梁系统进行研究。工况编号及列车位置如表1所示。

表1中红色车体为测试车辆,列车a上有6个测压断面,列车b上有两个测压断面。实验中列车采用电子压力扫描阀测压,采样频率为330 Hz,采样时长60 s。

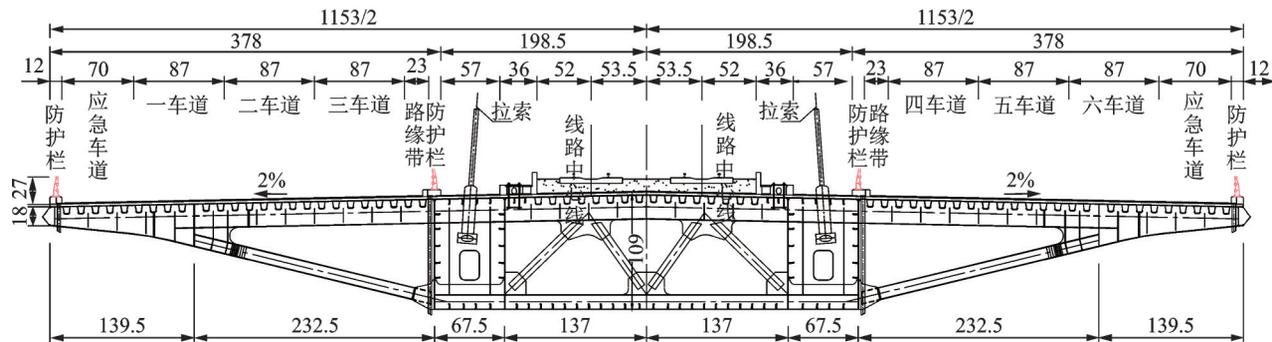


图3 桥梁断面缩尺图(单位:mm)

Fig. 3 Scale drawing of bridge section (Unit: mm)



(a) 风屏障模型  
(a) Wind barrier model

(b) 试验模型  
(b) Test model

图4 试验模型

Fig. 4 Test model

表1 测试工况

Tab. 1 Testing case

工况编号	列车位置示意	测试列车状态描述	风屏障		试验风速/ (m·s <sup>-1</sup> )
			透风率/%	高度/m	
1		单车上游			
2		单车下游			
3		双车交会上游	20, 40, 60	3.0, 3.5, 4.0	11.5
4		双车交会下游			

## 2 数据处理

本文采用风压系数和风压来表示作用在列车断

面上的风荷载。通过测压可获得列车断面各测点的瞬时风压系数及其统计特性,从而可计算得到断面的气动力。

测点*i*处的风压系数 $C_{P_i}(t)$ 和风压系数均方根

$C_{Pri}$  分别定义为:

$$C_{Pi}(t) = \frac{P_i(t)}{\frac{1}{2}\rho U_H^2} \quad (1)$$

$$C_{Pri} = \frac{P_{ri}}{\frac{1}{2}\rho U_H^2} \quad (2)$$

其中

$$P_{ri} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [P_i(t) - P_{ai}]^2} \quad (3)$$

$$P_{ai} = \frac{1}{2} C_{Pai} \rho U_H^2 \quad (4)$$

式中  $P_i(t)$  为模型测压孔第  $i$  点的压力时程,规定以结构表面受压为正,反之则为负; $t$  为时间; $\rho$  为空气密度,取  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $U_H$  表示无穷远处参考点高度处的来流风速; $N$  为采样长度; $P_{ai}$  为点  $i$  处的参考点平均压力值; $C_{Pai}$  为模型表面  $i$  点的参考点平均风压系数。

列车三个方向的气动力可通过列车表面压力积分得到:

$$F_y(t) = \sum_l^n P_i(t) L_i \cos \alpha_i \quad (5)$$

$$F_z(t) = \sum_l^n P_i(t) L_i \sin \alpha_i \quad (6)$$

$$M(t) = \sum_l^n P_i(t) L_i \cos \alpha_i \cdot Y_i + \sum_l^n P_i(t) L_i \sin \alpha_i \cdot X_i \quad (7)$$

式中  $F_y(t)$ ,  $F_z(t)$  和  $M(t)$  分别为体轴坐标系单位长度下对于扭转中心的侧力、升力和扭矩时程; $L_i$  表示  $i$  点的积分长度; $\alpha_i$  表示第  $i$  点的水平面与内法线的夹角。

实际应用中,气动力跨向相关性是另一个重要的参数,其可以对比空间两点以及不同间距断面压力和气动力的相关性。在时域中,一般以相关系数表示,具体为:

$$C_{or}(x_1, x_2) = \frac{P_1(x_1, t) \cdot P_2(x_2, t)}{\sigma_{u_1} \sigma_{u_2}} \quad (8)$$

式中  $x_1, x_2$  分别为空间两点的位置; $P_1(x_1, t)$ ,  $P_2(x_2, t)$  分别表示空间两点的脉动压力或力; $\sigma_{u_1}, \sigma_{u_2}$  分别表示两点处脉动压力或力标准差; $P_1(x_1, t) \cdot P_2(x_2, t)$  表示空间两点的协方差。

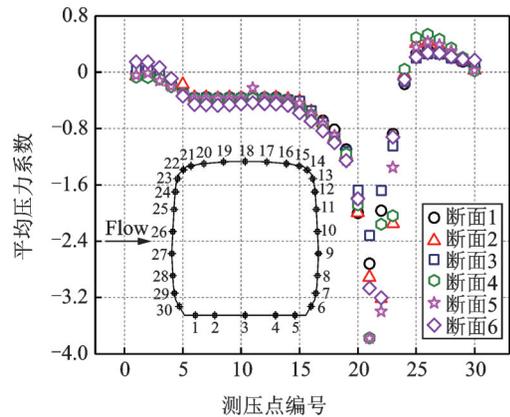
### 3 试验结果与分析

#### 3.1 桥上列车表面平均压力分布

列车表面压力分布特征可由平均压力系数体

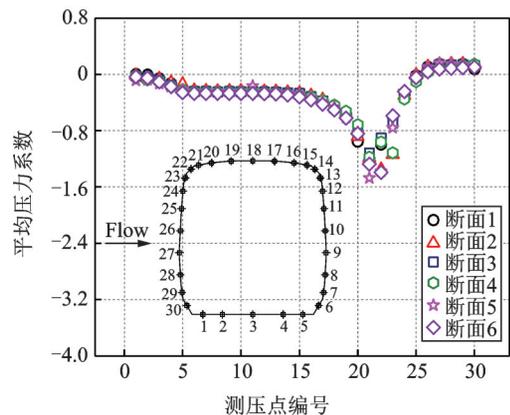
现,且通过平均压力系数可以很好地反映列车表面的受力情况。

图5给出了单车上游列车不同测压断面在有风屏障作用下的表面平均压力系数分布情况。由图5(a)可知,列车各测压断面表面压力变化趋势基本一致;单车上游列车仅迎风面测点全为正风压,在迎风面与顶面圆弧过渡段测点产生较大负压,由于涡脱的形成使得列车各断面的背风面均为负压,此处无流速,因此压力值基本一致。由图5(b)可知,设置风屏障后,列车各断面平均压力值有明显减小,风屏障降低了迎风面正风压和背风面负风压,使得列车所受侧力减小。列车迎风面与顶面圆弧过渡段测点在风屏障作用下平均负压力为不设风屏障时的二分之一,原本在主梁迎风前缘分离形成的大旋涡在经过风屏障后(尤其经过孔隙)被打散成大量的小涡,使得测压点21~23处的负压急剧减小。各工况下列车断面的迎风面与顶面圆弧过渡段是风压变化最大的地方,该处气流的分离和附着比较强烈。设置风屏障能够有效降低列车各断面整体压力值。



(a) 无风屏障

(a) Without wind barriers

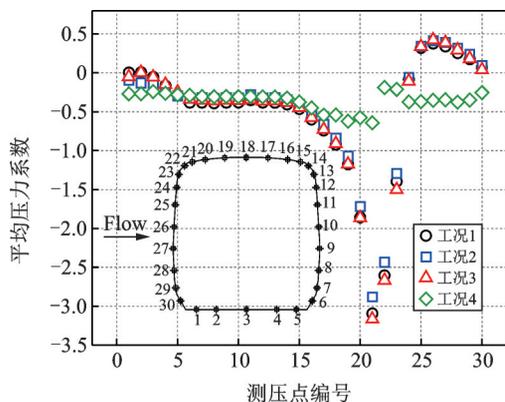


(b) 风屏障高3.5 m,透风率40%

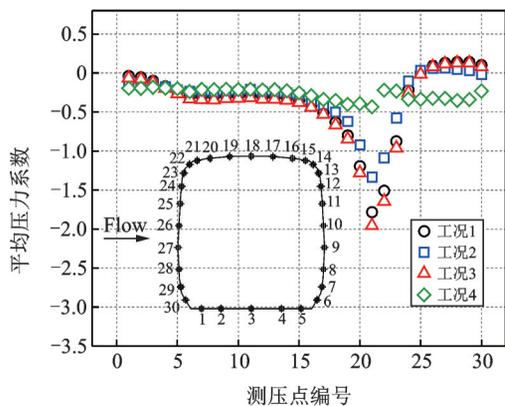
(b) Wind barrier height 3.5 m and porosity 40%

图5 单车上游列车不同测压断面表面压力系数分布特征  
Fig.5 Distribution characteristics of surface pressure coefficient of different pressure sections for single vehicle upstream train

图6所示为有无风屏障时,桥上列车在四种不同工况下表面平均压力系数分布情况。从图6(a)可以看出,单车上、下游以及双车交会上游列车平均压力系数分布规律一致,数值相差不大,列车表面迎风侧主要承受正压,背风侧承受负压,在迎风面与顶面的圆弧过渡段均产生较大负压。双车交会下游车由于受上游列车的挡风作用,列车表面全部承受负压,且各面压力值变化较小,各点负压值相差不大,上游列车的存在使下游列车全部处于旋涡脱落区。对比图6(a)和(b),除双车交会下游列车表面压力基本不受风屏障影响,单车上、下游和双车交会上游列车在设置风屏障后列车顶面和迎风面压力系数明显减小,单车下游列车受其影响最显著;列车底面和背风面风压受风屏障影响较小,有小幅度减小趋势。



(a) 无风屏障  
(a) Without wind barriers

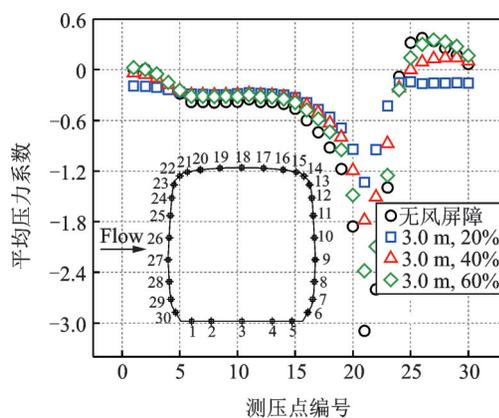


(b) 风屏障高3.0 m, 透风率40%  
(b) Wind barrier height 3.0 m and porosity 40%

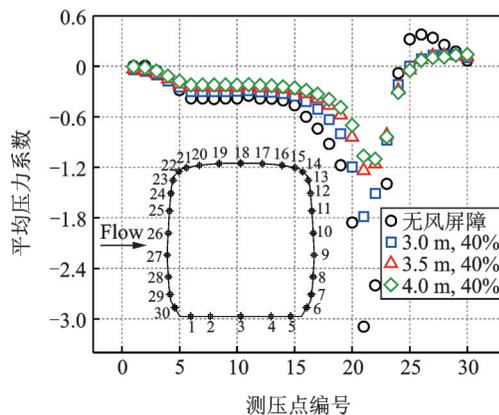
图6 桥上列车不同组合方式对列车表面平均压力系数的影响  
Fig. 6 Influence of different combinations of trains on bridge on average pressure coefficient of train surface

图7给出了单车上游列车在不同风屏障透风率和高度作用下列车表面平均压力系数分布情况。由图7(a)可知,列车背风面和靠近背风面的底面风压受风屏障透风率影响较小。列车顶面负压和迎风面

正压随风屏障透风率的减小而减小,在风屏障透风率为20%时,迎风面变为负压,此时列车表面平均压力均为负风压,靠近迎风面的底面测点与迎风面测点风压值相同。风屏障透风率大于40%时,从迎风面到底面风压逐渐由正变负。风屏障透风率为20%,列车迎风面与背风面、顶面与底面风压差均最小,此时列车所受侧力和升力最小。从图7(b)可以看出列车迎风面和底面风压基本不受风屏障高度的影响;列车背风面和顶面负压随风屏障高度的增加而减小,但减小程度随风屏障高度的增加越来越趋于平缓,且列车背风面和迎风面风压值在风屏障高度为3.5和4.0 m时基本相同,列车所受侧力大小一致;可以推测风屏障应当存在一个最优高度,超过最优高度后,风屏障的防风效果不会随着风屏障高度的增加而改变。对比图7(a)和(b),风屏障透风率对列车迎风面以及迎风面与顶面圆弧过渡段风压的影响明显大于高度。



(a) 风屏障高3.0 m  
(a) Wind barrier height 3.0 m



(b) 风屏障透风率40%  
(b) Wind barrier porosity 40%

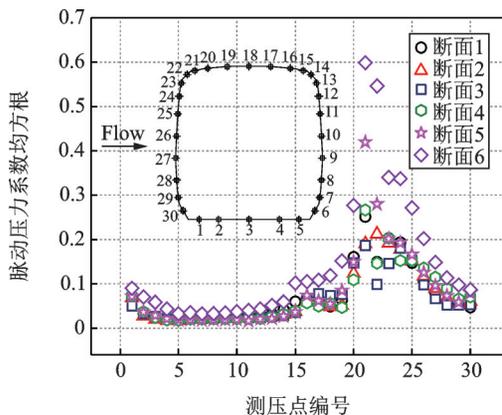
图7 风屏障透风率和高度对单车上游列车表面压力系数的影响

Fig. 7 Influence of air permeability and height of wind barrier on surface pressure coefficient of single train upstream train

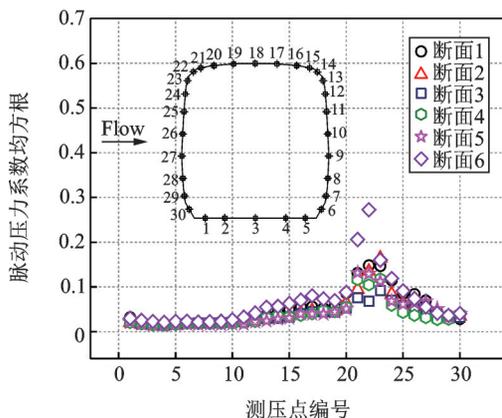
### 3.2 桥上列车表面脉动压力分布

在进行测压试验时,模型表面不仅有平均压力还有脉动压力,若对每一时刻的脉动压力进行积分,便能得到模型受到的抖振力。模型表面所受到的脉动力大小可由脉动压力系数的均方根(RMS)值表示。

图 8 所示为有无风屏障时单车上游列车不同测压断面脉动压力系数均方根值分布情况。由图 8(a)可知,单车上游列车测压断面 6 比其他断面各测点的脉动压力系数 RMS 值大,列车所受的脉动风压从底面到顶面逐渐增大,从顶面到迎风面开始减小,在迎风面与顶面圆弧过渡段测点所受的脉动风压达到最大,列车断面 1~5 在底面、背风面以及迎风面所受的脉动风压值相差不大,列车背风面所受到脉动风压最小。对比图 8(a)和(b),设置风屏障后,未改变各断面脉动风压分布趋势,列车整体表面脉动压力明显减小。风屏障对于列车背风面的脉动风压



(a) 无风屏障  
(a) Without wind barriers



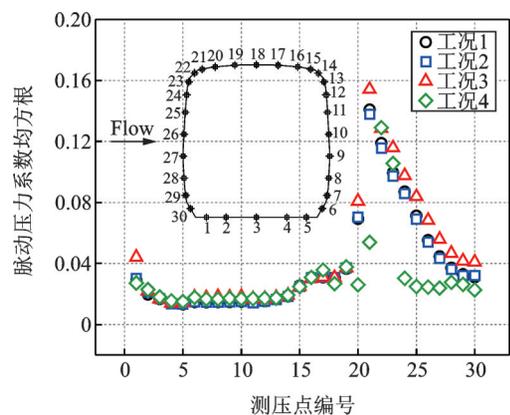
(b) 风屏障高 3.5 m, 透风率 40%  
(b) Wind barrier height 3.5 m and porosity 40%

图 8 单车上游列车不同测压断面脉动压力均方根系数分布情况

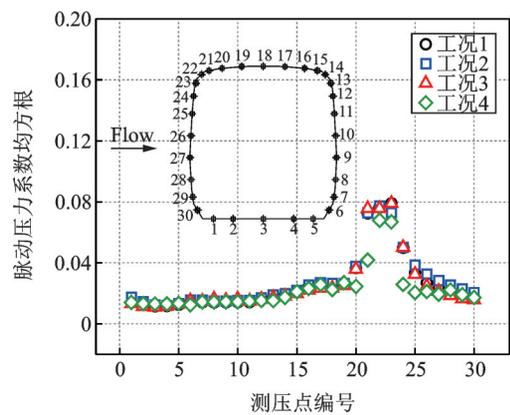
Fig. 8 The distribution of the root mean square coefficient of pulsating pressure at different measured pressure sections of the upstream single train

系数 RMS 值影响较小;由于风屏障存在 40% 的透风率,测压断面不是等间距布置,使得列车各测压断面受到的挡风面积可能不一样,因此各断面迎风面的脉动风压减小程度不一致。

图 9 给出了有无风屏障时桥上列车在四种不同工况下列车表面脉动压力系数均方根值分布情况。由图 9(a)可知,单车上游与单车下游列车断面测点的脉动压力系数 RMS 值基本相同,双车交会上游列车迎风面所受的脉动风压较单车上游列车大一点,双车交会下游列车对上游列车的干扰作用较弱。在四种工况下列车背风面与靠近背风面的底面测点脉动压力系数 RMS 值大小一样,不受列车布置方式的影响。由于双车交会上游列车的挡风效果明显,使得下游列车迎风面所受脉动风压最小。对比图 9(a)和(b)可知,设置风屏障后,四种工况下列车断面各测点的脉动压力系数 RMS 值均明显减小;双车交会下游列车受风屏障影响相对较小,其表面脉动风压变化趋势和其他三种工况类



(a) 无风屏障  
(a) Without wind barriers



(b) 风屏障高 3.0 m, 透风率 40%  
(b) Wind barrier height 3.0 m and porosity 40%

图 9 桥上列车不同组合方式对列车表面脉动压力系数均方根值的影响

Fig. 9 The influence of different combinations of trains on bridge on the RMS of the train surface pulsating pressure coefficient

似。风屏障能够有效减小列车迎风面至顶面圆弧过渡段的脉动压力。

图 10 给出了单车上游列车在不同风屏障透风率和高度作用下列车表面脉动压力系数均方根值分布情况。对比图 10(a)~(c)可知,列车迎风面至顶面过渡段测点的脉动压力系数 RMS 值随风屏障透风率的增大而增大,列车背风面的脉动风压随风屏障透风率的增大有些许减小,由于迎风面脉动风压减小程度远大于背风面脉动风压的增加,因此,整个列车表面侧向脉动风压随透风率的减小而减小。风屏障透风率为 20% 时,列车断面各测点的脉动压力

系数 RMS 值相差不大,列车各面受到的脉动风压较均匀,对桥上列车运行是有利的。对比图 10(b), (d)和(e)可知,列车迎风面测点脉动风压系数 RMS 值随风屏障高度变化不明显,迎风面至顶面过渡段整体脉动风压在风屏障高度为 3.5 m 时最小。风屏障高度在 3.5 和 4.0 m 时,列车背风面和底面脉动风压大小一致,因此,在风屏障高度为 3.5 m 时,列车所受的侧向脉动风压最小。列车底面和背风面脉动风压受风屏障高度和透风率的影响很小,风屏障透风率对列车迎风面至顶面圆弧过渡段脉动风压的影响要大于风屏障高度的影响。

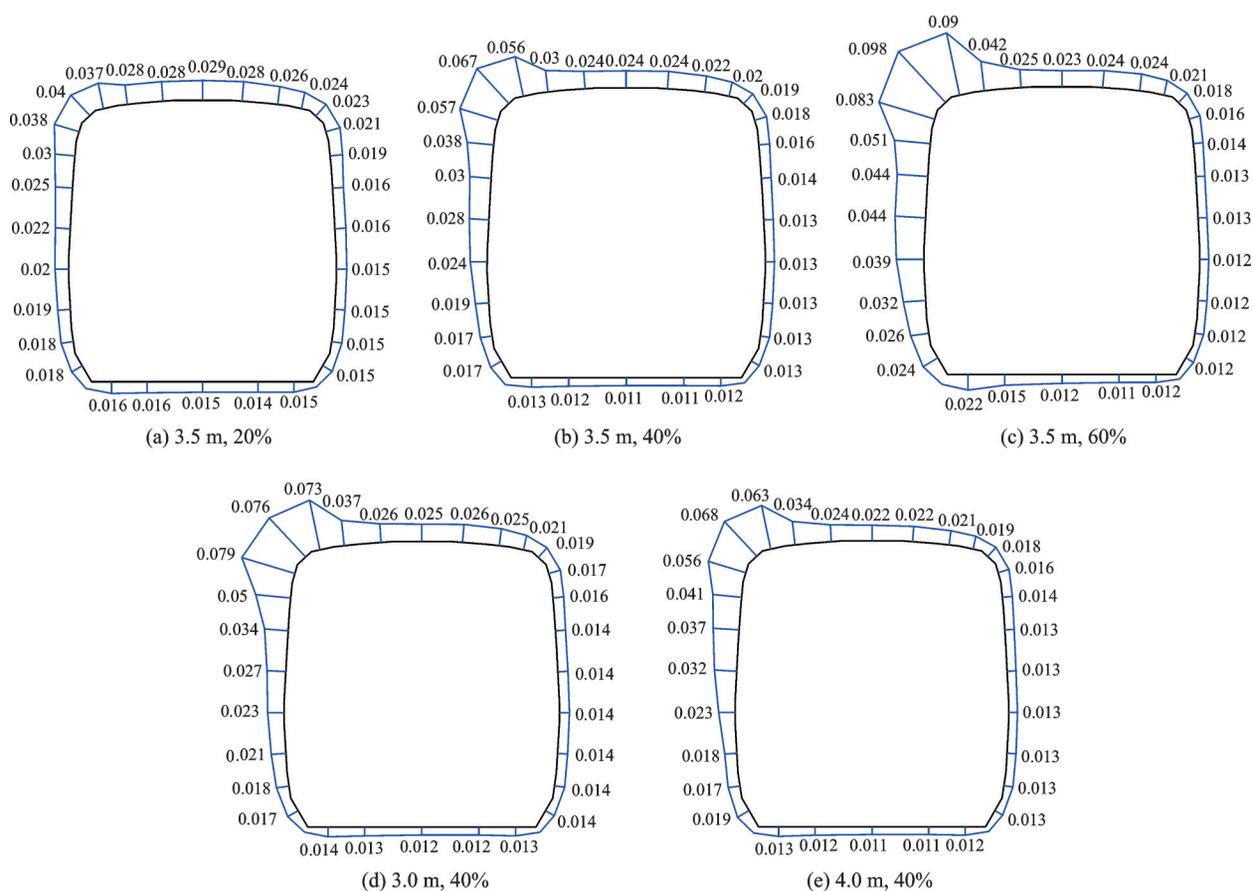


图 10 风屏障透风率和高度对单车上游列车表面脉动压力系数均方根值的影响

Fig. 10 The influence of wind barrier permeability and height on the RMS of surface pulsating pressure coefficient of single upstream train

### 3.3 桥上列车的三分力系数

横风下列车的三分力系数随风屏障透风率和高度变化曲线如图 11 所示。无风屏障考虑透风率为 100%,高度为 0。从图 11(a)可以看出,列车阻力系数和升力系数随风屏障透风率的增加而增大,扭矩系数随风屏障透风率的增大而减小;风屏障透风率在 20%~60% 区间内,列车阻力系数呈比例增大。当风屏障透风率大于 60% 时,列车三分力系数随风屏障透风率变化趋势显著减小,其中升力系数和扭

矩系数基本不受风屏障透风率的影响。由图 11(b)可知,列车阻力系数和升力系数随风屏障高度的增大而减小,而扭矩系数变化趋势与之相反;风屏障高度超过 3.5 m 时,列车的三分力系数基本不随风屏障高度的变化而变化,进一步说明风屏障存在最优高度,风屏障的防风效果不会随着风屏障高度的增加一直变好。风屏障参数对列车阻力系数影响最为显著,且阻力系数受风屏障透风率的影响程度明显大于高度的影响。

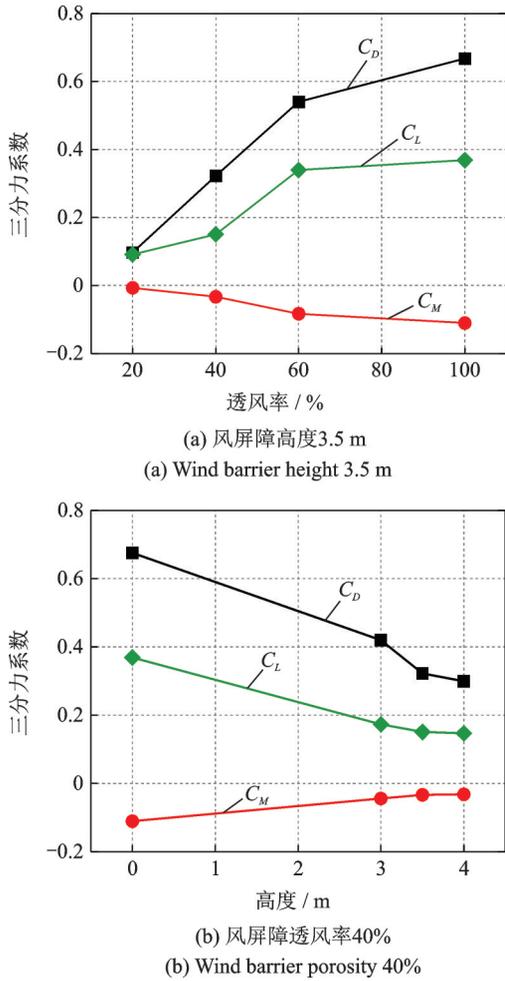


图 11 风屏障透风率和高度对桥上列车三分力系数的影响  
Fig. 11 Influences of porosity and height of wind barriers on three component force coefficients of trains on bridge

### 3.4 桥上列车表面压力跨向相关性

考虑列车位置、跨向间距以及风屏障高度和透风率等因素,对列车断面测点表面压力相关性的影响进行一些比较分析,以便了解列车断面相关性的特性。图 12 反映了测点与风屏障开孔位置的对应

情况,图中未给出的断面测点均被风屏障遮挡。图 13 以断面 4 为起点,表面压力的跨向间距  $l$  分别为 0.065, 0.115, 0.24, 0.575, 0.93 m。图 14 和 15 考虑断面间距为 0.065 m 时列车表面测点的跨向相关性。

图 13 所示为有无风屏障时单车上游列车断面各测点表面压力的跨向相关性。从图 13(a) 可以看出,单车上游列车背风面和底面测点压力相关系数值随跨向距离的增大而减小;列车顶面以及圆弧过渡段在跨向间距为 0.065 m 时基本呈负相关,但其相关系数绝对值依旧最大,相关系数同样满足随跨向间距增大而减小的规律;列车迎风面测点相关系数随跨向距离变化规律不明显,气流在桥迎风前缘分离时可能由于栏杆的作用形成大量的时空上离散的随机小涡,这些无规律的随机小涡降低了列车迎风面流态的一致性,导致列车迎风面风压相关系数的急剧降低,相当于增加了列车迎风面来流的紊流度而导致相关性减弱;列车背风面压力跨向相关性最好,跨向间距为 0.93 m 时,列车断面各测点相关系数值相差不大且接近 0,相关性极差。对比图 13(a) 和 (b) 可知,设置风屏障后,列车底面和背风面测点压力跨向相关性明显更好,风屏障的挡风效应很好地增强了这两部分展向流场的一致性,流体的脱落点更一致。在风屏障作用下,压力相关系数沿跨向间距变化趋势更加一致。

图 14 所示为有无风屏障时桥上列车在四种不同工况下列车断面各测点压力跨向相关性研究,由图 14(a) 可知,单车上游与单车下游列车背风面测点压力跨向相关系数值基本相同;单车上游列车断面测点压力跨向相关性明显要好于双车交会

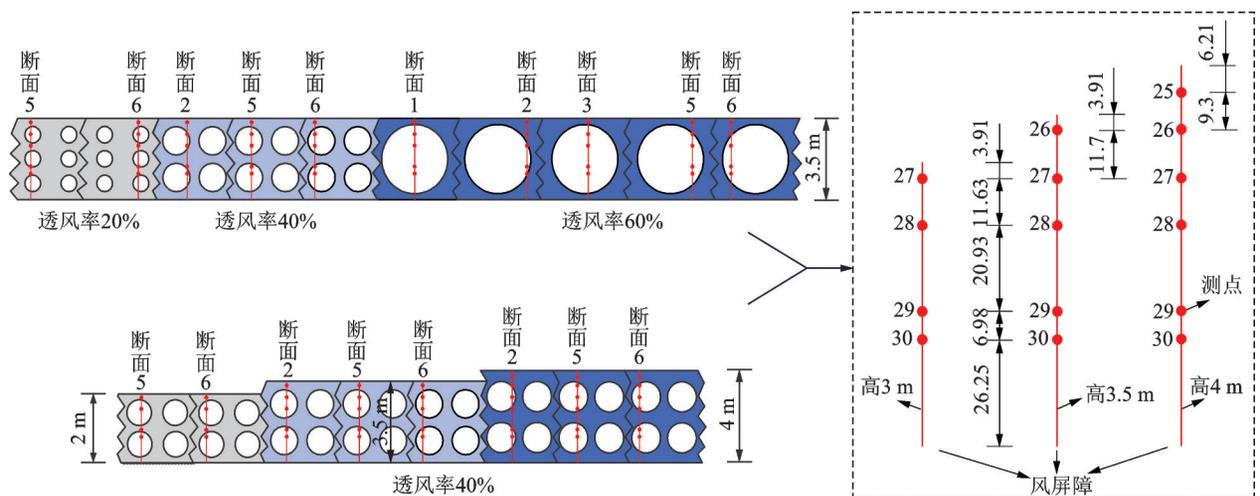
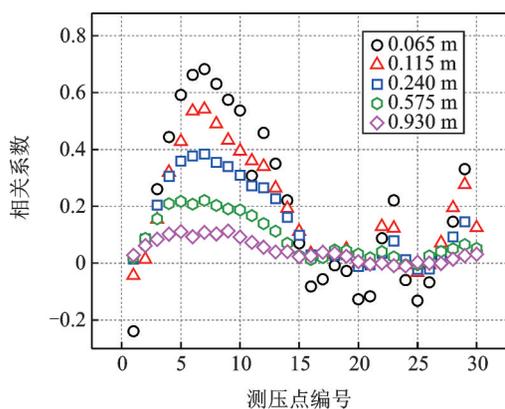
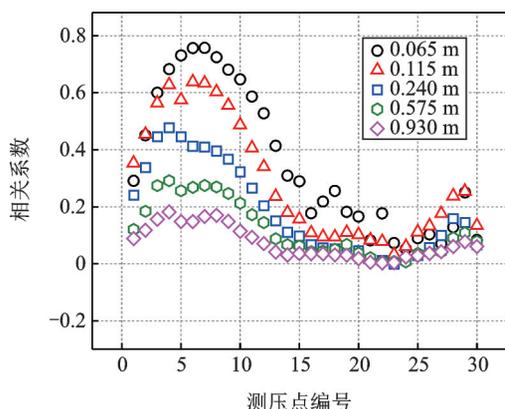


图 12 列车断面测点与风屏障开孔位置对应情况(单位: mm)

Fig. 12 Corresponding situation between measuring points of train section and opening position of wind barrier (Unit: mm)



(a) 无风屏障  
(a) Without wind barriers

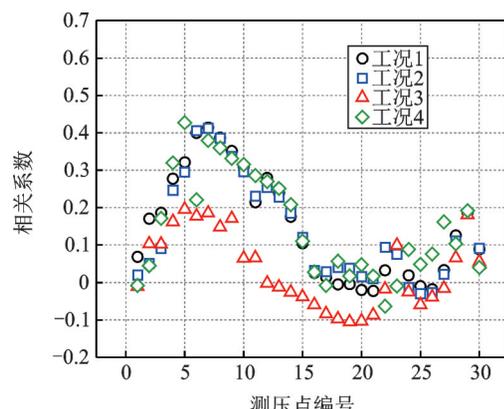


(b) 风屏障高3.5 m, 透风率40%  
(b) Wind barrier height 3.5 m and porosity 40%

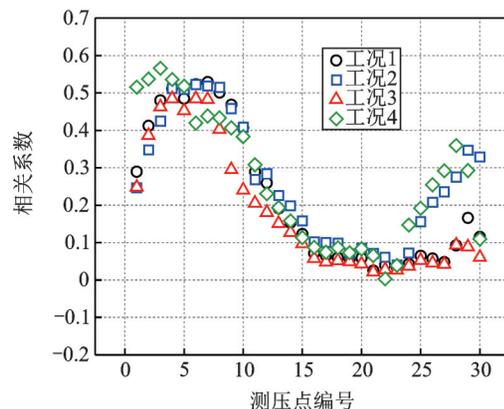
图13 单车上游列车断面各测点表面压力的跨向相关系数  
Fig. 13 Cross-direction correlation coefficient of surface pressure at each measuring point of the single upstream train section

上游列车; 双车交会时, 下游列车对上游列车的气动干扰, 使得上游列车断面压力跨向相关性差, 双车交会下游列车断面测点压力跨向相关系数值基本都大于上游列车, 尤其是列车背风面和顶面测点二者跨向相关系数相差较大。对比图 14(a) 和 (b) 可知, 设置风屏障后, 列车在四种测试工况下, 底面、背风面以及迎风面压力跨向相关性均更好, 各测点压力跨向相关性变化规律更趋向于一致性。

图 15 给出了风屏障透风率和高度对单车上游列车断面各测点压力跨向相关性的影响情况。从图 15(a) 可以看出, 风屏障透风率对列车迎风面、背风面以及底面测点压力跨向相关性影响较大, 随风屏障透风率的增大列车这三个面压力跨向相关系数值减小; 对于列车顶面及两侧圆弧过渡段测点, 风屏障透风率对其压力跨向相关性影响不明显。从图 15(b) 可以看出, 风屏障高度对列车断面测点压力跨向相关性影响较小, 不同风屏障高度下断面跨向相关性变化趋势相同, 呈现一个躺着的 S 形曲线, 在列车



(a) 无风屏障  
(a) Without wind barriers



(b) 风屏障高3.5 m, 透风率40%  
(b) Wind barrier height 3.5 m and porosity 40%

图14 列车位置对列车断面各测点表面压力跨向相关性的影响(跨向间距0.065 m)

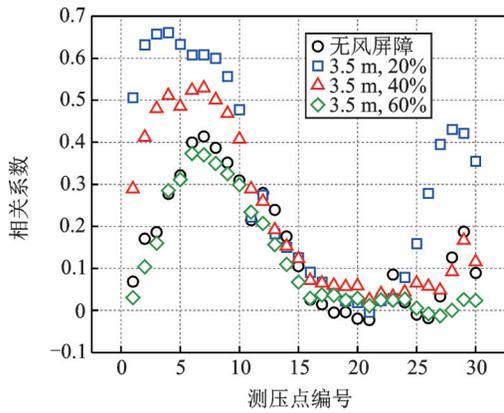
Fig. 14 Influence of train position on cross-correlation of surface pressure at each measuring point of train section (cross-spacing 0.065 m)

底面与背风面过渡段出现波峰, 相关性最好, 在列车迎风面与顶面过渡段出现波谷, 相关系数值接近 0, 基本不相关; 列车顶面测点压力跨向相关系数值随风屏障高度的增大略微增大。风屏障对列车顶面以及两侧圆弧过渡段测点相关性影响很小。风屏障透风率对列车底面、背风面和迎风面压力跨向相关性影响大于高度。

### 3.5 桥上列车气动力跨向相关性

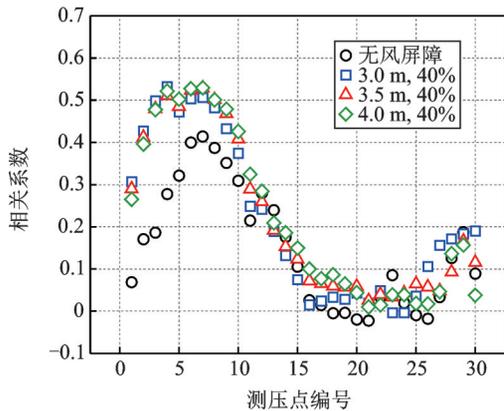
对试验采集到的表面压力根据式(5)~(7)沿列车断面进行积分, 便能得到断面位置的侧力、升力和力矩。将力和力矩通过式(8)求出两断面间力的相关系数和力矩的相关系数。

图 16 列出了列车在三种测试工况下气动力的空间相关系数。图中横坐标通过列车跨向间距  $l$  与列车高度  $H$  的比值进行无量纲化处理。从图中可以看出, 随着跨向间距的增大, 力的相关性越来越差。跨向间距小于列车高度时, 单车上游列车



(a) 风屏障高3.5 m

(a) Wind barrier height 3.5 m



(b) 风屏障透风率40%

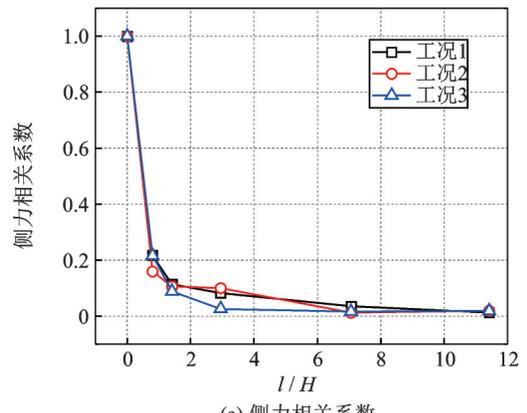
(b) Wind barrier porosity 40%

图 15 风屏障透风率和高度对单车上游列车断面各测点表面压力跨向相关性的影响

Fig. 15 The influence of wind barrier permeability and height on the cross-sectional correlation of surface pressure at each measuring point of single upstream train

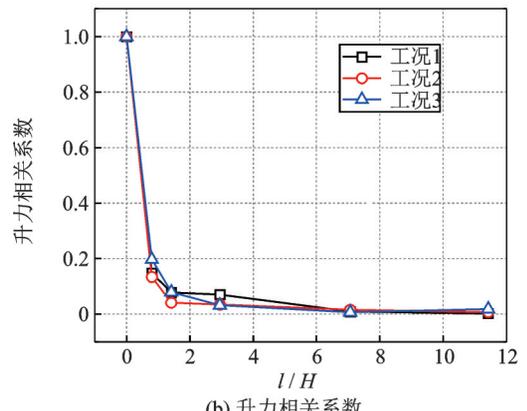
侧力和升力相关系数要大于双车交会上游列车,对于扭矩相关系数,双车交会上游列车要大于单车上游列车;当跨向间距大于列车高度时,三种工况下列车的气动力相关系数数值基本吻合且基本不相关。

图 17 和 18 给出了风屏障不同透风率和高度下列车气动力的空间相关系数。从图 17 可以看出,侧力相关系数基本随风屏障透风率的增大而增大,跨向间距超过 2 倍列车高度时,不设置风屏障,侧力跨向相关性更好。跨向间距小于列车高度,无风屏障时,升力相关系数更大,跨向间距在 1~2 倍列车高度内,升力相关系数随风屏障透风率的减小而减小。跨向间距大于 5 倍列车高度,扭矩跨向基本不相关,风屏障透风率对其相关性无影响。由图 18 可知,跨向间距小于 2 倍列车高度时,侧力相关系数在风屏障高度为 3.5 m 时最大,跨向间距超过 2 倍列车高度时,侧力空间相关系数随风屏障高度的减小而增大。跨向间距在 2.5~7 倍列车高度内,不设置风屏障侧



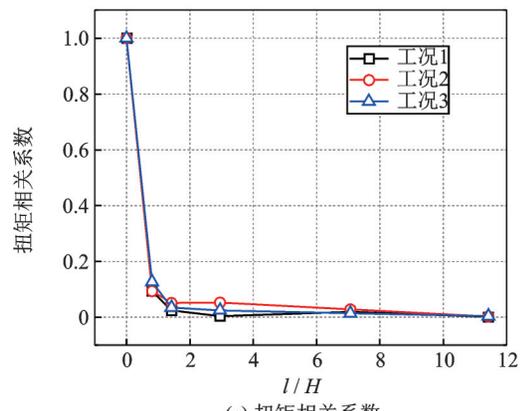
(a) 侧力相关系数

(a) Side force correlation coefficient



(b) 升力相关系数

(b) Lift force correlation coefficient

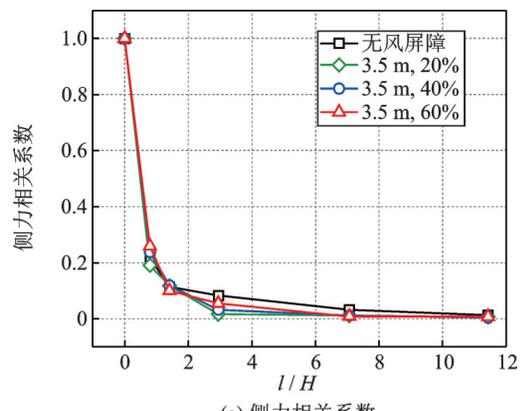


(c) 扭矩相关系数

(c) Torque correlation coefficient

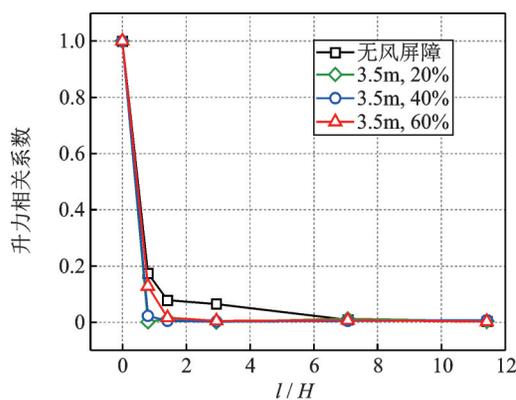
图 16 列车在三种测试工况下气动力的空间相关系数(无风屏障)

Fig. 16 The spatial correlation coefficient of train aerodynamic force under three test conditions without wind barriers



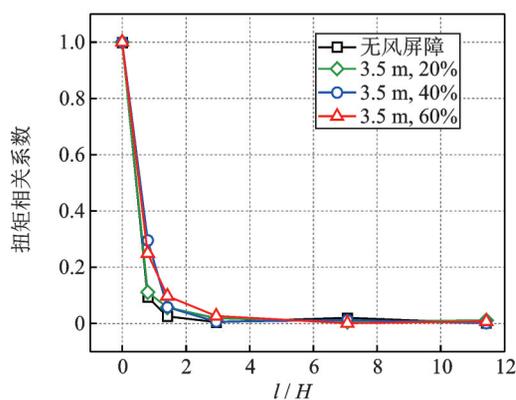
(a) 侧力相关系数

(a) Side force correlation coefficient



(b) 升力相关系数

(b) Lift force correlation coefficient



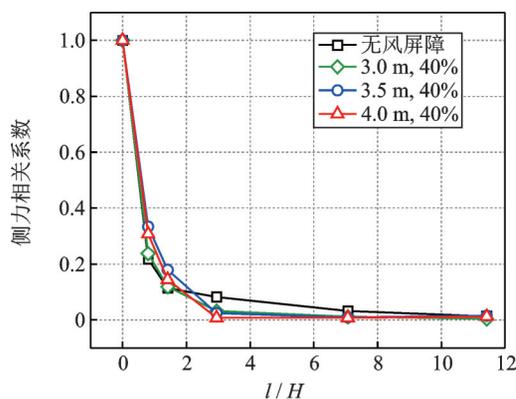
(c) 扭矩相关系数

(c) Torque correlation coefficient

图17 不同风屏障透风率下列车气动力的空间相关系数(高3.5 m)

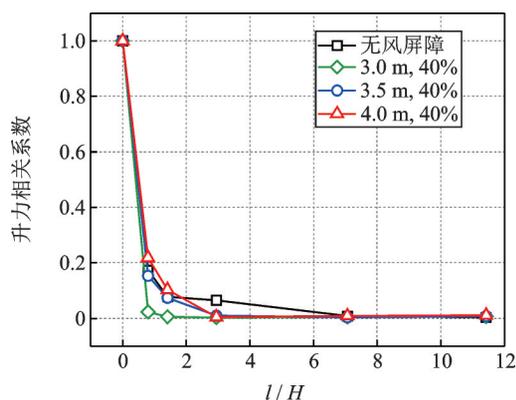
Fig. 17 Spatial correlation coefficient of train aerodynamic force under different wind barrier permeability (high 3.5 m)

力和升力空间相关性更好,跨向间距超过3倍列车高度,风屏障高度对气动力相关性基本没有影响且气动力跨向基本不相关。跨向间距小于1.5倍列车高度时,设置风屏障后,列车迎风面与背风面测点跨向相关性相对较好,因此列车侧力跨向相关性要好于不设置风屏障情况。



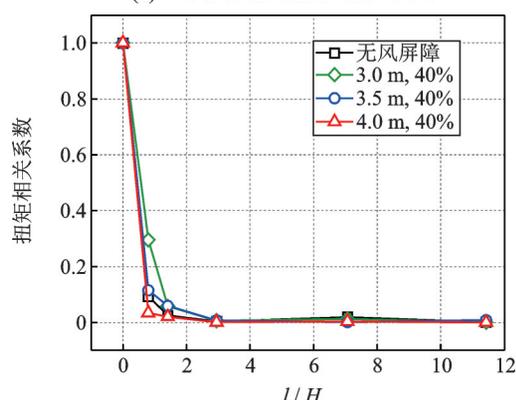
(a) 侧力相关系数

(a) Side force correlation coefficient



(b) 升力相关系数

(b) Lift force correlation coefficient



(c) 扭矩相关系数

(c) Torque correlation coefficient

图18 不同风屏障高度下列车气动力的空间相关系数(透风率40%)

Fig. 18 Spatial correlation coefficient of train aerodynamic force at different wind barrier heights (air permeability of 40%)

## 4 结论

本文以某平层公铁桥梁和CRH2列车为背景,基于列车测压试验,探究了风屏障对平层公铁桥上列车表面风压分布的影响以及对列车断面压力和气动力的跨向相关性的影响,得到了如下结论:

(1)列车表面负压占据很大比例,在迎风面与顶面圆弧过渡段测点产生较大负压,且由于涡脱的形成使得列车各断面的背风面均为负压。单车上、下游以及双车交会上游列车平均压力系数分布规律一致,压力值相差不大。双车交会下游列车由于受上游列车的挡风作用,使下游列车全部处于旋涡区,列车表面全部承受负压,且各面压力值变化较小,各点负压值相差不大。

(2)设置风屏障后列车表面平均风压和脉动风压整体减小,列车表面所受的整体风压随风屏障透风率的减小而减小。当风屏障透风率为20%时,列

车表面均为负压,此时迎风面与背风面、顶面和底面风压差最小,列车所受的侧力和升力最小,且在风屏障透风率为20%时,列车表面脉动压力分布较均匀,有利于桥上列车运行时的安全与舒适。

(3)风屏障透风率为40%时,列车背风面和迎风面平均风压值在风屏障高度为3.5和4.0 m时基本相同,列车所受侧力大小一致,列车所受的侧向脉动风压在风屏障高度为3.5 m时最小,说明风屏障在40%透风率下存在最优高度,超过最优高度后,风屏障的防风效果不会随着风屏障高度的增加而改变,甚至会变差。风屏障透风率对列车迎风面以及顶面圆弧过渡段平均风压与脉动风压的影响明显大于高度。

(4)列车断面测点压力跨向相关性大致随跨向间距的增大而减小,设置风屏障后,测点压力跨向相关性变化规律更趋向于一致性,列车底面和背风面测点压力跨向相关性明显更好,风屏障的挡风效应很好的增强了这两部分展向流场的一致性,流体的脱落点更一致。

(5)随着跨向间距的增大,气动力的相关性越来越差。在跨向间距不超过列车高度时,设置风屏障会使列车侧力和扭矩空间相关性稍微好一点,但影响较小,随着跨向间距的增大,设置风屏障后对气动力的跨向相关性较无风屏障时弱。设置风屏障跨向间距超过5倍列车高度,无风屏障时跨向间距超过7倍列车高度,气动力完全不相关。

(6)运动列车的绕流场与静止列车的相比会存在一定的差异,然而现阶段移动列车装置的实现比较困难,后期会研发移动列车测试装置与方法,进一步研究动态和静止列车气动特性及其差别,建立更加准确的列车气动力模型。

#### 参考文献:

- [1] 葛玉梅,李永乐,何向东.作用在车桥系统上风荷载的风洞试验研究[J].西南交通大学学报,2001,36(6):612-616.  
GE Yu-mei, LI Yong-le, HE Xiang-dong. Study on wind-induced loads of train-bridge system by wind tunnel test[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001,36(6):612-616.
- [2] 祝志文,陈伟芳,陈政清.横风中双层客车车辆的风荷载研究[J].国防科技大学学报,2001,23(5):117-121.  
ZHU Zhi-wen, CHEN Wei-fang, CHEN Zheng-qing. A survey on wind loads for double-deck vehicle in cross wind [J]. Journal of National University of Defense Technology,2001,23(5):117-121.
- [3] 杨明智,袁先旭,鲁寨军,等.强侧风下青藏线列车气动性能风洞试验研究[J].实验流体力学,2008,22(1):76-79.  
YANG Ming-zhi, YUAN Xian-xu, LU Zhai-jun, et al. Experimental study on aerodynamic characteristics of train running on Qinghai-Tibet railway under cross winds[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2008,22(1):76-79.
- [4] 向活跃.高速铁路风屏障防风效果及其自身风荷载研究[D].成都:西南交通大学,2013.  
Xiang Huoyue. Protection effect of wind barrier on high speed railway and its wind loads[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [5] Chu Chia-Ren, Chang Chao-Yen, Huang Chih-Jung, et al. Windbreak protection for road vehicles against crosswind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013,116:61-69.
- [6] 董香婷,党向鹏.风障对侧风作用下列车行车安全影响的数值模拟研究[J].铁道学报,2008,30(5):36-40.  
DONG Xiang-ting, DANG Xiang-peng. Study on influence of wind barriers on traffic safety of trains under crosswind by numerical simulation [J]. Journal of the China Railway Society,2008,30(5):36-40.
- [7] Telenta Marijo, Batista Milan, Biancolini M E, et al. Parametric numerical study of wind barrier shelter[J]. Wind and Structures,2015, 20(1):75-93.
- [8] 王玉晶,郭薇薇,夏禾,等.考虑风屏障效应的车桥系统三分力系数风洞试验研究[J].振动与冲击,2018,37(20):88-94.  
WANG Yujing, GUO Weiwei, XIA He, et al. Wind tunnel test of tri-component coefficients for a train-bridge system considering wind barrier effect[J]. Journal of Vibration and Shock,2018,37(20):88-94.
- [9] 项超群,郭文华,陈涛,等.风屏障对桥上高速列车气动性能影响的数值研究[J].中国铁道科学,2014,35(5):113-120.  
Xiang Chaoqun, Guo Wenhua, Chen Tao, et al. Numerical study on effect of wind barriers on aerodynamic performance of high-speed train on bridge [J]. China Railway Science,2014,35(5):113-120.
- [10] 何旭辉,邹云峰,杜风宇.风屏障对高架桥上列车气动特性影响机理分析[J].振动与冲击,2015,34(3):66-71.  
HE Xu-hui, ZOU Yun-feng, DU Feng-yu. Mechanism analysis of wind barrier's effects on aerodynamic characteristics of a train on viaduct [J]. Journal of Vibration and Shock,2015,34(3):66-71.
- [11] He X H, Zou Y F, Wang H F, et al. Aerodynamic characteristics of a trailing rail vehicles on viaduct based on still wind tunnel experiments[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 135:

- 22-33.
- [12] Zhang T, Xia H, Guo W W. Analysis on running safety of train on bridge with wind barriers subjected to cross wind[J]. *Wind Structures, An International Journal*, 2013,17(2):203-225.
- [13] 向活跃,李永乐,胡喆,等. 铁路风屏障对轨道上方风压分布影响的风洞试验研究[J]. *实验流体力学*, 2012, 26(6):19-23.  
XIANG Huo-yue, LI Yong-le, HU Zhe, et al. Effects of wind screen on wind pressure distribution above railway tracks by wind tunnel test[J]. *Journal Experiments in Fluid Mechanics*, 2012,26(6): 19-23.
- [14] Xiang H Y, Li Y L, Chen S R, et al. Wind loads of moving vehicle on bridge with solid wind barrier[J]. *Engineering Structures*, 2018,156:188-196.
- [15] Kozmar H, Procino L, Borsani A, et al. Optimizing height and porosity of roadway wind barriers for viaducts and bridges [J]. *Engineering Structures*, 2014, 81:49-61.
- [16] 许志豪. 紊流风对大跨度分体双箱梁桥梁的作用[D]. 上海:同济大学,2006.  
HUI Chi-ho. Turbulent wind action on long span bridges with separated twin-girder decks [D]. Shanghai: Tongji University,2006.
- [17] Nagao F, Utsunomiya H, Noda M, et al. Basic study on spatial correlations of fluctuating lifts acting on plates [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(12-15):1349-1361.
- [18] 廖海黎,马存明. 流线箱型桥梁断面气动导纳研究[C]. 第十三届全国结构风工程学术会议论文集(上册), 2007:120-125.  
Liao Haili, Ma Cunming. Study on aerodynamic admittance of streamline box bridge section[C]. *Proceedings of the 13th National Conference on Structural Wind Engineering (Volume I)*, 2007:120-125.
- [19] Miyata T, Yamada H, Katsuchi H, et al. Full-scale measurement of Akashi-Kaikyo Bridge during typhoon [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2001, 90(12):1517-1527.
- [20] 马存明,段青松,廖海黎. 横风作用下钢桁梁桥上列车气动导纳的风洞试验研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(2):150-155.  
MA Cunming, DUAN Qingsong, LIAO Haili. Wind tunnel tests for aerodynamic admittances of trains on a steel truss bridge under crosswind[J]. *Journal of Vibration and Shock*,2018,37(2):150-155.

## Wind tunnel test studies on the influences of wind barrier on the aerodynamic characteristics of trains on a highway and railway same-story bridge

LIU Ye<sup>1</sup>, HAN Yan<sup>1</sup>, HU Peng<sup>1</sup>, LI Kai<sup>1</sup>, CAI Chun-sheng<sup>2</sup>, HE Xu-hui<sup>3</sup>

(1.School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2.Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA; 3.School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** Based on the train pressure measurement experiments, the influences of wind barrier on the wind pressure distribution of the train surface on a highway and railway same-story bridge and CRH2 train are analyzed. The change rules of the correlation between the train surface pressure and the aerodynamic force are also studied with/without considering the wind barrier. The results show that when the wind barrier is set, the air pressure differences between the windward and leeward side, top and bottom of the train decrease with the reduction of the air permeability of the wind barrier, which makes the overall side force and lift of the train reduce. When the air permeability of the wind barrier is 20%, the fluctuating pressure distribution on the train surface is uniform, which is conducive to the safety and comfort of the train running on the bridge. The windproof effects of the wind barrier do not always get better with the increase of the height of the wind barrier. When the air permeability is 40%, the wind barrier has an optimal height of 3.5 m. The influence of the air permeability of the air barrier on the surface wind pressure of the windward side and the arc transition section of the top side of the train are obviously greater than those of the height. After the wind barrier is set, the pressure cross-correlation between the measuring points on the bottom and the leeward side of the train is better. The wind barrier effect enhances the consistency of the two parts of the flow fields, and makes the falling point of the fluid more consistent. With the increase of span distance, the correlation of aerodynamic force gets worse. The correlation of wind barrier to aerodynamic force is weaker than that without the wind barrier. When the wind barrier is set, the aerodynamic force is completely irrelevant when the span distance is more than 5 times of the train height.

**Key words:** wind barrier; wind tunnel test; mean wind pressure; fluctuating wind pressure; cross-correlation

作者简介: 刘叶(1995—),女,博士研究生。电话:18390217302;E-mail:csust\_liuye@163.com。