非对称线路车-桥气动特性风洞试验研究

韩 旭1,向活跃1.2,李 镇3,苑仁安4,李永乐1.2

(1.西南交通大学桥梁工程系,四川成都 610031; 2.风工程四川省重点实验室,四川成都 610031;3.江苏省交通工程建设局,江苏南京 210004; 4.中铁大桥勘测设计院集团有限公司,湖北 武汉 430050)

摘要:为了研究线路的非对称性布置对列车和桥梁系统气动特性的影响,开发了一种同步测试车-桥气动力的装置, 通过本装置对线路非对称布置的大跨度公铁两用斜拉桥进行了节段模型风洞试验。考虑了下层铁路和下层公路分 别为迎风侧的工况,测试了不同车-桥组合下车辆和桥梁各自的气动力,讨论了线路非对称布置、风攻角、双车交会 和汽车对车-桥系统气动特性的影响。结果表明:相对下层铁路侧迎风工况,下层公路迎风侧的桥梁升力系数和扭 矩系数差别较大,且车辆升力系数也变化较大;桥梁和车辆的阻力系数随风攻角的增加而减小;双车交会时,背风侧 车辆阻力系数发生突变;受公铁平层防眩网的作用,汽车对列车气动特性影响相对较小。

关键词:车-桥组合系统;气动特性;风洞试验;线路非对称;同步测试装置 中图分类号:U441⁺.2;V211.74 文献标志码:A 文章编号:1004-4523(2022)06-1388-07 DOI:10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.06.011

引 言

随着中国交通的快速发展,越来越多的桥梁向 大跨度、公铁两用方向发展,而大跨度桥梁结构相对 轻柔,高速列车在大跨度桥梁上运行时,列车的安全 性和舒适性成为重点关注的焦点。为评价桥上列车 在自然风作用下运行的安全性和舒适性,通常需要 进行风-车-桥耦合振动分析^[1],车辆和桥梁各自的气 动特性是进行风-车-桥耦合振动分析的基础^[24],而 桥梁的气动特性会受到列车运行的影响,列车的气 动特性也会受到桥梁断面的影响。因此,考虑车-桥 组合状态下车辆和桥梁的相互气动干扰是非常必 要的。

在已有的研究中,对于车-桥组合状态下车辆和桥梁气动特性的研究通常采用现场实测、数值模拟和风洞试验三种方法^[1],但现场实测受到诸多因素的影响,且操作不便、成本较高,相关研究相对较少,因此,数值模拟^[5]和风洞试验^[67]为车-桥系统气动特性的主要研究方法。周蕾等^[8]通过CFD数值模拟分析了风屏障对车-桥系统气动特性的影响机理。BAO 等^[9]采用CFD数值模拟方法,研究了列车双车交会时车辆和桥梁的气动系数,并通过风洞试验进行了 验证。姚志勇等^[10]采用CFD方法通过重叠网格模 拟了列车运动,分析了车-桥系统的绕流流场,讨论 了考虑列车运动对车-桥气动力的影响。CFD数值 模拟可便于修改风攻角、风速等系统参数,但数值模 拟技术计算量较大,且精度仍有待验证。风洞试验 可人为地改变、重复试验条件,更适合开展机理性研 究。王玉晶等[11]通过风洞试验研究了车辆在三种不 同路况上(平地路基、简支箱梁和简支T梁)的三分 力系数,并讨论了设置不同风屏障对车辆和桥梁气 动特性的影响。SUZUKI等^[12]进行了不同断面外形 的列车和不同桥梁形式组合的风洞试验,并考虑了 风偏角的影响,分析了桥梁高度对车辆阻力系数的 影响。XIANG等^[13]采用自主研制的移动车辆装置, 通过风洞试验研究了列车在桥上运行时的气动特 性,并讨论了风速和风向的影响。郭文华等[14]采用 自主研制的车-桥装置测试了头车、中车及尾车的气 动力,并分析了风速和车辆在横向位置的影响。但 文献[12-14]未考虑列车对桥梁气动特性的影响。 李永乐等[15]在常规节段模型三分力测试装置的基础 上,研制了三分力分离装置——交叉滑槽系统,并在 进行车-桥系统的风洞试验时对交叉滑槽系统的可 行性进行了检验。邹云峰等[16]对交叉滑槽系统进行 了改进,在车辆两侧增加了天平,以保证车辆和桥梁 气动力测试同步进行,并利用同步分离装置在风洞 试验中研究了车辆和桥梁的气动特性,讨论了风攻 角和车-桥组合方式的影响。但在进行风攻角等工

收稿日期: 2021-03-17;修订日期: 2021-07-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778544,51978589,51525804);中央高校基本科研业务费(2682021CG014)。

况的改变时,仍将车辆和桥梁分开调整。在试验过 程中,频繁更换车辆模型的位置,一定程度上降低了 试验效率。若桥梁模型为桁架结构,且列车位于下 层桥面或桁架内部时,由于桁片的遮挡作用,车辆模 型的安装和固定较为不便,频繁拆卸模型过程中,列 车与桥面的相对位置难以在不同对比测试工况中保 持一致。

在桥梁节段模型的两端,通常采用端板用于固 定桥梁模型,对于列车位于桁架桥梁下层桥面的情况,进行车-桥节段模型试验时,通常需要在端板上 开孔,以便列车模型顺利通过,并在保持车-桥相对 位置的条件下进行测试。常泰长江大桥下层桥面采 用非对称布置形式,公路与铁路处于下层桥面同层 之中。若此时在端板上对应铁路双线位置开孔,会 影响模型结构的安全,同时降低试验效率。

本文在研制车-桥气动力同步测试装置的基础 上,通过车-桥组合系统的节段模型风洞试验,测试 了下层铁路和下层公路分别作为迎风侧时,单车行 驶和双车交会时车-桥组合工况下车辆和桥梁各自 的气动力系数。分析讨论了线路非对称布置、风攻 角、双车交会和汽车对车-桥系统气动特性的影响。

1 节段模型风洞试验

常泰长江大桥为双塔双索面双层公铁两用斜拉桥,主跨为1176m,主梁采用两片主桁结构形式,主桁高15.5m,宽35.0m。上层为正交异性板桥面结构,通行双向六车道公路;下层为正交异性板箱型结构,一侧通行双向四车道,一侧通行两线客运专线,下层桥面公路和铁路在同层,且关于桥轴线非对称布置。

由于列车和桥梁的长度较长,属于线状结构,可 以采用节段模型风洞试验进行气动特性的研究。结 合风洞的几何尺寸,考虑阻塞率、长宽比及桁架节间 完整性等因素,节段模型选择8个节间,缩尺比设定 为1:53.46,桥梁模型长2.095 m,宽0.655 m,高 0.290 m(阻塞率约为4.7% < 5%,长宽比为 3.20 > 2,满足抗风规范的要求^[17]);列车模型采用 CRH2断面,长1.850 m,宽0.063 m,高0.065 m,车 辆和桥梁模型的横断面如图1所示。

主梁试验模型采用塑料和木材制作,列车模型 采用优质木材制作,除模拟主梁的主要构件之外,对 节点板、钢轨、栏杆和斜拉索锚拉板等细部构造也进 行了模拟,充分保证了结构的外形相似;另外,制作 的模型还需保证足够的强度和刚度,使试验过程中 模型不发生明显的变形和振动,以保证测得的车辆 和桥梁模型气动力的可靠性和准确性。车-桥组合 的节段模型如图2所示。



Fig. 1 Cross section of model (Unit: mm)



图 2 列车-桥梁组合节段模型 Fig. 2 Section model of vehicle-bridge system

为提高车-桥组合状态下列车和桥梁气动特性 测试效率,并避免更换工况过程中人为造成列车位 置变化对测试结果的影响,本文开发了一种同步测 试车辆和桥梁气动力的装置,其示意图如图3所示。

桥梁模型直接水平固定于风洞壁两侧的测力轴 上,且与两端用于形成二维流的端板保留一定间隙, 测力轴与风洞外的刻度盘相连,可通过刻度盘对桥 梁模型的风攻角进行精确调整。列车模型两端安装 Gamma六分量高频天平,再通过连接装置将天平固 定于桥梁上,列车与桥梁可同步变换风攻角。为满 足试验精度要求,需保证试验过程中天平、车辆和桥 梁三者之间不产生相对位移,且列车与桥梁仅通过 天平连接,其余位置无接触。测力轴和高频天平采 集的数据通过专用的数据采集软件将数据同步地记 录于电脑上,试验过程中始终观察车辆和桥梁模型 的状态,保证试验数据采集过程中车辆和桥梁模型 未发生振动。



图 3 铁路迎风时同步测力装置示意图 Fig. 3 Schematic diagram of synchronous test device

对于单车-桥梁气动力试验,只需将列车通过天 平固定于桥梁上,测试不同风速、不同攻角时列车和 桥梁的气动力,通过后期数据处理即可得到两者的 三分力系数。需要说明的是,试验中需要先对无风 工况下不同攻角的初始结果进行采集,以消除列车 和桥梁重力分量的影响;此外,测力轴得到的是列车 和桥梁的合力,而高频天平测得的仅为列车的气动 力,要得到桥梁的气动力,需要先通过力的平移法则 将列车的力转移到桥梁力的参考点,再进行力的合 成,即在测力轴和高频天平结果的基础上通过力的 合成定理可得到桥梁气动力。对于双车-桥梁试验, 由于天平数量限制,只能分别测试迎风侧车辆和背 风侧车辆的气动力,将两个车辆模型放置于桥梁轨 道线路位置,天平分别连接于迎风侧车辆和背风侧 车辆,测试得到不同线路位置上车辆的气动力,而桥 梁的三分力则需要测力轴的结果分别减去迎风侧列 车和背风侧列车的三分力才可得到。

相较于已有试验装置^[15-16],本文采用的同步测 试装置在进行单车-桥梁试验时,只需在试验开始前 调整并固定车-桥相对位置即可完成三分力测试,风 攻角调整在风洞外进行;对双车-桥梁试验也仅需调 整一次列车模型位置,更换过程中不会改变车辆与 桥梁模型间的间隙,提高了试验效率,增加了试验数 据的可靠性。另外,Gamma六分量高频天平与车辆 模型相比,尺寸相对较小,对列车的气动干扰较小, 对试验数据的影响也可以忽略。

试验前分别对测力轴和Gamma六分量高频天 平进行了标定,以确保试验测试数据的准确性。试 验中,桥梁和车辆模型的气动力分别由测力轴和高 频天平得到,两个设备的采集系统不同,数据采集在 均匀来流风速稳定后进行,桥梁受到来流的湍流度 较小,测力轴系统默认采样频率为800 Hz,采样时 间为5s;但主桁分离作用一定程度上增加了车辆所 受来流的湍流度,适当增加采样时间以减小测试误 差,设置高频天平采样时间为30 s,同时采样频率采 用软件默认的1 kHz。

2 试验工况及数据处理

风洞试验在西南交通大学单回流串联双试验段 工业风洞(XNJD-1)第二试验段中进行,试验段宽 2.4 m,高 2.0 m,风速范围为1.0~45.0 m/s,来流为 均匀流时湍流度小于1%。试验的具体工况如表1 所示,试验风速取10,13和16 m/s三级风速以相互 验证测试结果,三个试验风速对应的湍流度分别为 0.97%,1.02%和0.91%,表明来流湍流度较小;大 跨度桥梁在风和车辆荷载共同作用下,使桥梁产生 较大转角和附加风攻角,可能出现较大风攻角^[18],因 此试验中的风攻角考虑为±5°,±3°,0°。

表 1 风洞试验工况 Tab. 1 Cases of wind tunnel test

工况	车	三桥状态	测试车辆位置
1		下目研放力加区间	位于线路1
2	首左 括	下层状始为迎风侧	位于线路2
3	107-平平	下目八敗事加豆圓	位于线路1
4		下层公路万距风侧	位于线路2
5		下目研放力加回厕	位于线路1
6	四左 长	下层状始力迎风侧	位于线路2
7	双十-40	下目八敗事加豆圓	位于线路1
8		下层公路万迎风侧	位于线路2
9	单车-桥、汽车	下层公路为迎风侧 涧	则试列车位于线路2

注:线路1为靠近主梁中心侧,线路2为靠近主梁边缘侧。

由于来流的湍流度较小,桁片分离引起的流场 额外脉动分量相对有限,车-桥系统在不同组合下的 气动特性变化主要是车-桥系统的气动干扰引起横 风绕流流场显著改变引起的,本文忽略了来流脉动 分量对桥梁和列车气动特性的影响。作用在桥梁或 车辆上的静风荷载可通过静力三分力来定义,三分 力的表示有体轴和风轴两种坐标,这两种可以相互 转换,本文仅给出了体轴坐标系下的测试结果。体 轴坐标系下静力三分力系数的定义如下:

$$C_{H}(\alpha) = F_{H}(\alpha) / (\frac{1}{2} \rho U^{2} HL) \qquad (1)$$

$$C_{v}(\alpha) = F_{v}(\alpha) / (\frac{1}{2}\rho U^{2}BL)$$
(2)

$$C_{M}(\alpha) = M(\alpha) / \left(\frac{1}{2}\rho U^{2}B^{2}L\right)$$
(3)

式中 α 为来流风攻角;U为来流平均风速; ρ 为空气 密度,取为1.25 kg/m³;H,B和L分别为车辆或桥梁节 段模型的高度、宽度和长度,具体取值参照第1节桥梁 和车辆模型的尺寸; $F_H(\alpha)$, $F_V(\alpha)$ 和 $M(\alpha)$ 分别为体 轴坐标系下风攻角为 α 时的阻力、升力和扭矩; $C_H(\alpha)$, $C_V(\alpha)$ 和 $C_M(\alpha)$ 分别为体轴系下的阻力系数、升力系 数和扭矩系数。桥梁和车辆的三分力示意图如图3所示。其中,下标b表示桥梁的三分力,为测力轴的力减去Gamma六分量高频天平测得的列车力;下标v表示列车的三分力,为两个高频天平测得的合力。

3 试验结果及分析

由于桥梁断面为钝体断面,其扰流分离点较固定, 流体在尖角处迅速分离,可忽略雷诺数对桥梁的影响; 在车-桥组合状态下,主梁分离流中的脉动成分弱化了 弧形列车表面附面层的黏性作用,使得不同风速下流 场在列车表面的分离点较为固定,不同风速下的气动 力系数接近,试验结果稳定性较好¹¹⁹。考虑到试验低风 速下(10 m/s)模型受到的风荷载较小、测试相对误差 可能较大,而高风速下(16 m/s)节段模型存在一定程 度的风致振动,因此,本文选取中间风速下(13 m/s)测 试得到的三分力系数进行后续的分析。

3.1 线路非对称布置的影响

本文研究的主梁为非对称结构,下层铁路侧和 公路侧分别处于桥轴线的两侧,来流的情况复杂,出 现下层铁路侧和下层公路侧分别作为迎风侧的可能 性较大,这导致车辆和桥梁的气动特性有较大的差 异。为了研究线路非对称布置对车-桥系统气动特 性的影响,风洞试验中分别考虑了下层铁路侧和下 层公路侧作为迎风侧,表2给出了来流风攻角为0°、 单列车位于桥上时的车辆和桥梁的三分力系数。

表 2 不同侧作为迎风侧时车-桥系统三分力系数 Tab. 2 Three-component aerodynamic coefficients of vehicle-bridge system with different windward sides

迎风 侧	工况	桥	梁三分力	系数	车辆三分力系数			
		$C_{H\mathrm{b}}$	$C_{V\mathrm{b}}$	$C_{M\mathrm{b}}$	C_{Hv}	$C_{\scriptscriptstyle Vv}$	$C_{M^{\mathrm{v}}}$	
铁路	1	0.861	-0.230	-0.088	0.571	0.919	0.171	
	2	0.875	-0.190	-0.010	0.676	0.737	0.076	
公路	3	0.827	0.040	-0.149	0.599	0.523	-0.031	
	4	0.812	0.021	-0.146	0.512	0.470	-0.001	

由表2可得,相对于下层铁路侧迎风时,下层公 路侧迎风的桥梁阻力系数变化不大,但升力系数和 扭矩系数差别较大,且升力系数的方向发生了变化, 这可能是车辆和公铁防眩网相对于桥梁的位置引起 桥梁气流变化导致的。

进一步分析下层铁路和下层公路分别作为迎风 侧时车辆的气动特性,不同侧作为迎风侧对车辆的 阻力系数影响有限,但与单独的列车^[20]相比,阻力系 数减小了约60%,这是由于轨道距离桥梁前缘较 远,车辆处于桥梁前缘分离产生的低速区,并且桥梁 的竖腹杆、斜腹杆、节点板以及防弦屏网也有一定的 影响,这显著弱化了车辆上的气动阻力。与文献 [20]的单独列车相比,由于桥梁改变了车辆下缘的 气动绕流,本文车-桥组合下车辆的升力系数明显增 大,这一结果与文献[15]的研究结论一致;由于公路 侧栏杆和公铁防眩网的遮挡作用,导致下层公路作 为迎风侧时车辆的升力系数较小,其值约为下层铁 路作为迎风侧时的0.60。

与对称线路桥梁相比^[6,18-19],非对称线路桥梁上列 车的气动特性不仅随着线路位置变化而不同,还受到 来流方向(来流方向为上游或下游)的影响,由表2可以 看出,来流方向对列车的气动特性有较大影响。

3.2 风攻角的影响

桥梁断面属于钝体断面,这会引起气流分离后 部分气流重新附着于车辆表面,而气流经过钝体断 面后分离的剪切层厚度受到来流风攻角的直接影 响^[19],也进一步影响了气流对车辆的再附着,这种影 响通常通过气动力来体现。为了研究风攻角对车-桥组合下车辆和桥梁气动特性的影响,图4给出了 下层铁路和下层公路分别为迎风侧时,不同风攻角 下(α = ±5°,±3°和0°)车辆和桥梁的阻力系数。由



Fig. 4 Drag coefficients of vehicle and bridge at different wind attack angles

图4可知,随着风攻角的增加,桥梁和车辆的阻力系数不断降低,这可能是因为随着风攻角的增加使得分离点后剪切层的厚度增加^[21]。但相比风攻角为+3°时和风攻角为+5°时车辆和桥梁的阻力系数稍微增加,可能是车辆和桥梁的迎风面积增大,弦杆气流分离作用减弱导致的。

进一步分析,由图4(a)可得,风攻角对迎风侧 车辆(铁路迎风线路2和公路迎风线路1)的阻力系 数影响更大;相对于铁路迎风,公路迎风时阻力系数 有明显的降低趋势,这是由于公路侧栏杆和公铁防 眩网降低风荷载作用导致的。由图4(b)可知,对车 辆位于不同线路位置时,桥梁在不同风攻角下的阻 力系数较为接近,这表明不同线路的列车对桥梁流 场的影响基本一致,也可能是桁梁的腹杆和节点板 等结构的遮挡作用弱化了列车的影响。

3.3 双车交会的影响

为了考查双车交会时对车-桥系统气动特性的 影响,表3和4给出了下层铁路和下层公路分别作为 迎风侧时,列车双车交会和未交会时车-桥系统的三 分力系数。

由表3可得,双车交会时背风侧车辆的阻力系 数为接近0的负值,这是因为背风侧车辆处于迎风 侧车辆的遮挡效应中,而为负值可能是气流绕过迎 风侧车辆,在公铁防眩网的作用下,对背风侧车辆产 生了与来流相反方向的压力作用。值得注意的是,

表3 下层铁路迎风时的车-桥系统三分力系数

Tab. 3 Three-component aerodynamic coefficients of vehicle-bridge system in windward of lower-level railway

车-桥	ти	桥梁三分力系数				车辆三分力系数			
状态	LÜL	$C_{H\mathrm{b}}$	$C_{\rm Vb}$	$C_{M\mathrm{b}}$		C_{Hv}	C_{vv}	C_{Mv}	
单车	1	0.861	-0.230	-0.088		0.571	0.919	0.171	
工况	2	0.875	-0.190	-0.010		0.676	0.737	0.076	
双车交	5	0.007	0.007	0 0 0 0	—	0.023	0.242	0.065	
会时	6	0.907	-0.297	-0.033		0.664	0.800	0.095	

表4 下层公路迎风车-桥系统三分力系数

Tab. 4 Three-component aerodynamic coefficients of vehicle-bridge system in windward of lower-level highway

车-桥	工况	桥梁三分力系数			车辆三分力系数			
状态		$C_{H\mathrm{b}}$	$C_{\rm Vb}$	$C_{M\mathrm{b}}$	C_{Hv}	$C_{\scriptscriptstyle Vv}$	C_{Mv}	
单车	3	0.827	0.040	-0.149	0.512	0.470	-0.001	
工况	4	0.812	0.021	-0.146	0.599	0.523	-0.031	
双车交	7	0 709	0.010	0 1 6 9	0.309	0.634	-0.032	
会时	8	0.793	0.012	-0.163	0.382	0.140	-0.022	

由表4可知,下层公路作为迎风侧时,由于公路 侧栏杆和公铁防眩网的存在,扰乱了主梁下层的气 流,改变了气流的原有状态,使得双车交会时阻力系 数比单车状态下要小,且背风侧的阻力系数稍大于 迎风侧,这与下层铁路为迎风侧时有较大差异。

对比表3和4,双车交会时背风侧车辆的升力系 数较单车状态显著减小,下层铁路和下层公路迎风 时都减小了约75%,而迎风侧车辆的升力系数较单 车状态有小幅度的增加。与双车未交会时的气动力 系数相比,下层铁路迎风时双车交会状态下桥梁的 阻力系数和升力系数有所增大,而下层公路迎风时 却有所减小。

3.4 汽车对列车和桥梁的影响

由于主梁下层同时有公路和铁路,出现汽车和 列车同时在桥上运行的可能性极大,汽车和列车同 时运行于桥梁同一层面会使得气流变得复杂,因此, 研究汽车对列车的影响是非常必要的。

为了研究汽车对列车的影响,进行了下层公路 为迎风侧时汽车和列车共存于桥上的风洞试验。由 表4可知下层公路迎风时单车处于背风侧时更危 险,因此本文只研究了汽车和列车共存时列车处于 背风侧的工况,汽车布置于靠近迎风侧的车道(试验 模型中车道中心线离主桁中心线74 mm),示意图如 图5所示。表5给出了不同数量的汽车存在于桥上,



Fig. 5 Schematic diagram of car layout

表5 汽车和列车共存时车-桥系统三分力系数

Tab. 5 Three-component aerodynamic coefficients of vehicle-bridge system with coexisted automobiles and trains

车-桥	桥梁	¥三分力	系数	车辆三分力系数		
状态	$C_{H\mathrm{b}}$	$C_{\rm Vb}$	$C_{M\mathrm{b}}$	C_{Hv}	$C_{\scriptscriptstyle Vv}$	$C_{M\mathrm{v}}$
单车-桥	0.812	0.021	-0.146	0.599	0.523	-0.031
两辆汽车	0.828	0.072	-0.154	0.610	0.543	-0.040
四辆汽车	0.839	0.079	-0.149	0.610	0.438	-0.039

列车处于背风侧时车-桥系统的三分力系数。由于 小汽车尺寸较小且呈流线型,对来流的影响较弱,本 文仅考虑了客车和货车模型的影响。

由表5可知,随着汽车数量的增加,列车阻力系数略有增加,但增幅较小,这是因为公路和铁路之间的防眩网结构弱化了汽车对列车的影响,也可能是试验中考虑的汽车数量较少导致产生的影响较小。与单车-桥状态相比,汽车的存在使得桥梁的阻力系数和升力系数有所增加,尤其是升力系数。

4 结 论

结合常泰长江大桥主梁断面非对称布置的特点, 研制了用于车-桥组合状态下气动力测试的同步测试 装置。进一步结合气动力同步测试装置进行了风洞 试验,研究了线路非对称布置对车-桥组合气动特性的 影响。通过对比分析测试结果得到如下结论:

(1)相对于下层铁路侧迎风时,下层公路迎风侧的桥梁阻力系数差别较小,但升力系数和扭矩系数发生较大变化,且升力系数方向发生变化。

(2)下层铁路和下层公路分别作为迎风侧时, 车辆的阻力系数较为接近;与下层铁路作为迎风侧 相比,下层公路作为迎风侧的升力系数较小,与下层 铁路作为迎风侧相比,下层公路作为迎风侧车辆的 升力系数较小,约为0.6。

(3)桥梁和车辆的阻力系数随着风攻角的增加 而减小;风攻角对迎风侧车辆的阻力系数影响更大; 车辆所处的线路位置对桥梁在不同攻角下的阻力系 数影响有限。

(4)双车交会时背风侧车辆的升力系数较单车 状态减小了约75%,而迎风侧车辆的升力系数较单 车状态有小幅度的增加;下层铁路为迎风侧时,双车 交会的背风侧车辆的阻力系数接近0;但下层公路 为迎风侧时,背风侧车辆的阻力系数略大于迎风侧。

(5)由于公路和铁路间设置了防眩网,汽车的存在对列车阻力系数影响较小;与单车-桥状态相比,汽车的存在使得桥梁的阻力系数和升力系数有所增加,尤其是升力系数。

参考文献:

- [1] 李永乐,向活跃,强士中.风-列车-桥系统耦合振动研究综述[J].中国公路学报,2018,31(7):24-37.
 LI Yongle, XIANG Huoyue, QIANG Shizhong. Review on coupling vibration of wind-vehicle-bridge systems [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018,31(7):24-37.
- [2] 向活跃, 李永乐, 张明金, 等. 侧风作用下移动车辆模

型气动特性的试验方法[J]. 振动工程学报, 2017, 30 (6): 976-982.

XIANG Huoyue, LI Yongle, ZHANG Mingjin, et al. Test methods on aerodynamic characteristic of moving vehicle model under crosswinds [J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(6): 976-982.

- [3] ZHANG T, XIA H, GUO W W. Analysis on running safety of train on the bridge considering sudden change of wind load caused by wind barriers [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2018, 12 (4) : 558-567.
- [4] CHEN Z W, CHEN B. Recent research and applications of numerical simulation for dynamic response of long-span bridges subjected to multiple loads [J]. The Scientific World Journal, 2014: 763810.
- [5] 史康,褚杨俊,何旭辉,等.轨道交通百叶窗型风屏障防风效果研究[J].振动工程学报,2017,30(4):630-637.
 Shi Kang, CHU Yangjun, HE Xuhui, et al. Study on windshield performance of the louver-style wind barrier of rail transit [J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(4):630-637.
- [6] 邹云峰,何旭辉,李欢,等.风屏障对车桥组合状态下中间车辆气动特性的影响[J].振动工程学报,2016,29(1):156-165.
 ZOU Yunfeng, HE Xuhui, LI Huan, et al. Effect of wind barrier on aerodynamic characteristics for the trailing train under cases of vehicle-bridge coupling[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(1): 156-165.
- [7] OGUETA-GUTIERREZ M, FRANCHINI S, ALONSO G. Effects of bird protection barriers on the aerodynamic and aeroelastic behaviour of high speed train bridges [J]. Engineering Structures, 2014, 81: 22-34.
- [8] 周蕾,何旭辉,陈争卫,等.风屏障对桥梁及车桥系统 气动特性影响的数值研究[J].中南大学学报(自然科 学版),2018,49(7):1742-1752.
 ZHOU Lei, HE Xuhui, CHEN Zhengwei, et al. Numerical study of effect of wind barrier on aerodynamic of bridge and train-bridge system [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018,49 (7): 1742-1752.
- [9] BAO Y L, XIANG H Y, LI Y L, et al. Study of windvehicle-bridge system of suspended monorail during the meeting of two trains[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(8): 1988-1997.
- [10] 姚志勇,张楠,夏禾,等.基于重叠网格的三维车桥系统气动特性研究[J].工程力学,2018,35(2):38-46.
 YAO Zhiyong, ZHANG Nan, XIA He, et al. Study on aerodynamic performance of three-dimensional train-bridge system based on overset mesh[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(2):38-46.
- [11] 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-

tunnel test of tri-component coefficients for a trainbridge system considering wind barrier effect [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(20): 88-94.

- [12] SUZUKI M, TANEMOTO K, MAEDA T. Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds
 [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1-2): 209-218.
- [13] XIANG H Y, LI Y L, CHEN S R, et al. A wind tunnel test method on aerodynamic characteristics of moving vehicles under crosswinds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 163: 15-23.
- [14] 郭文华,张佳文,项超群.桥梁对高速列车气动特性影响的风洞试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(8):3151-3159.
 GUO Wenhua, ZHANG Jiawen, XIANG Chaoqun. Wind tunnel test of aerodynamic characteristics of high-speed train on bridge[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2015,46(8):3151-3159.
 [15] 李永乐,廖海黎,强士中.车桥系统气动特性的节段
- 模型风洞试验研究[J]. 铁道学报, 2004, 26(3): 71-75. LI Yongle, LIAO Haili, QIANG Shizhong. Study on aerodynamic characteristics of the vehicle-bridge system by the section model wind tunnel test[J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(3): 71-75.
- [16] 邹云峰,何旭辉,郭向荣,等.横风下流线箱型桥-轨 道交通车辆气动干扰风洞实验研究[J].振动与冲击, 2017,36(5):95-101.
 - ZOU Yunfeng, HE Xuhui, GUO Xiangrong, et al. Wind tunnel tests for aerodynamic interference between streamline type box bridges and rail vehicles under cross wind [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36 (5): 95-101.

- [17] 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, 2019.
 Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018[S]. Beijing: China Communication Press, 2019.
- [18] 郭薇薇,蔡保硕,娄亚烽,等.某大跨度公铁两用桁架 斜拉桥车桥系统三分力系数风洞试验研究[J].工程力 学,2021,38(3):192-201.
 GUO Weiwei, CAI Baoshuo, LOU Yafeng, et al.
 Wind tunnel test on tri-component force coefficients of the train-bridge system for a long-span rail-cum-road cable-stayed truss bridge [J]. Engineering Mechanics, 2021,38(3):192-201.
- [19] 李永乐,徐昕宇,郭建明,等.六线双层铁路钢桁桥车 桥系统气动特性风洞试验研究[J].工程力学,2016, 33(4):130-135.

LI Yongle, XU Xinyu, GUO Jianming, et al. Wind tunnel tests on aerodynamic characteristics of vehiclebridge system for six-track double-deck steel-truss railway bridge[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4): 130-135.

- [20] 李永乐,向活跃,侯光阳,等.车桥组合状态下CRH2 客车横风气动特性研究[J].空气动力学学报,2013, 31(5):579-582.
 LI Yongle, XIANG Huoyue, HOU Guangyang, et al. Aerodynamic characteristics of CRH2 train in combination of vehicle-bridge with cross wind action[J]. Acta
- Aerodynamica Sinica, 2013, 31(5): 579-582.
 [21] Yoon D H, Yang K S, Choi C B. Flow past a square cylinder with an angle of incidence [J]. Physics of Fluids, 2010, 22(4): 043603.

The effect of asymmetric layout of railway lines on the aerodynamic characteristics of vehicle-bridge system by wind tunnel tests

HAN Xu¹, XIANG Huo-yue^{1,2}, LI Zhen³, YUAN Ren-an⁴, LI Yong-le^{1,2}

(1.Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2.Wind Engineering Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610031, China; 3.Jiangsu Provincial Transportation Engineering Construction Bureau, Nanjing 210004, China; 4.China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co. Ltd., Wuhan 430050, China)

Abstract: In order to investigate the aerodynamic characteristics of vehicle-bridge system with asymmetric layout of railway lines, a device for measuring aerodynamic force of vehicle-bridge synchronously is introduced. A section model wind tunnel test of a long-span cable-stayed bridge with asymmetric layout of railway lines is carried out by the device introduced. The lower-level railway and the lower-level highway are considered as windward side respectively, and the aerodynamic forces on vehicle and bridge under various coupled combinations are measured. The effects of different factors, including asymmetric layout of railway lines, wind attack angle, two trains passing each other and automobile, on the aerodynamic characteristics of the vehicle-bridge system are discussed. The results show that compared with the condition of windward side of the lower railway, the lift coefficient and torque coefficient of the bridge on the windward side of the lower highway are quite different, and the lift coefficient of the vehicle also changes each other, the drag coefficient of bridge and vehicle changes suddenly. Due to the effect of anti-glare net between rail and road in the same floor, the influence of the automobile on the aerodynamic characteristics of the train is relatively small.

Key words: vehicle-bridge system; aerodynamic characteristics; wind tunnel test; asymmetric layout of railway lines; synchronous test device

作者简介: 韩 旭(1993—), 男, 博士研究生。电话: 18283616983; E-mail: xuhan2424@163.com。 通讯作者: 向活跃(1986—), 男, 副教授, 博士生导师。电话: 15928624030; E-mail: hy@swjtu.edu.cn。