

文章编号: 1674—8247(2023)04—0056—07

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 04. 011

# 风屏障透风率对侧风下货运专线简支箱梁桥 车桥耦合振动影响研究

何宝华

(国能新朔准池铁路(山西)有限责任公司, 山西 朔州 036002)

**摘 要:**为探究强风作用下风屏障透风率对货运专线铁路车桥耦合振动的影响,通过数值模拟计算不同透风率风屏障桥梁在不同位置行车时的车桥系统三分力系数,根据弹性系统动力学总势能不变值原理建立考虑风荷载的车桥系统耦合振动方程,对横风作用下货运列车通过设置不同透风率风屏障的简支箱梁桥时的车桥动力响应进行计算。结果表明:(1)桥梁横向位移受到风屏障透风率和列车行驶位置的影响,存在某一个透风率使得桥梁横向位移最小;(2)风屏障透风率从20%增加到60%,列车的脱轨系数和轮重减载率呈增大趋势,迎风车的两项参数均大于背风车;(3)重车的横向摇摆力大于空车,横向摇摆力随风屏障透风率增大的幅度受列车重量影响较小。

**关键词:** 风屏障;风-车-桥耦合;动力响应;货运列车;简支箱梁

中图分类号: U441

文献标志码: A

56

## A Study on Effect of Ventilation Rate of Wind Barrier on Vehicle-bridge Coupling Vibration of Simply Supported Box Girder Bridge of Freight Dedicated Line under Crosswind

HE Baohua

(CHN Energy Xinsuo Zhunchi Railway (Shanxi) Co., Ltd., Shuozhou 036002, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of the ventilation rate of wind barrier on vehicle-bridge coupling vibration of freight dedicated railway under strong wind, this paper calculated the three-component coefficient of vehicle-bridge system of bridges with wind barriers with different ventilation rates during train operation at different positions by numerical simulation, established the vehicle-bridge coupling vibration equation considering wind load according to the principle of the constant total potential energy of elastic system dynamics, and calculated the vehicle-bridge dynamic response of freight trains passing through simply supported box girder bridges with different ventilation rates under crosswind. The results show that: (1) The lateral displacement of the bridge is affected by the ventilation rate of the wind barrier and the position of the running train, and there is a certain ventilation rate that minimizes the lateral displacement of the bridge. (2) When the ventilation rate of wind barrier increases from 20% to 60%, the derailment coefficient and wheel unloading coefficient of the train show an increasing trend, and both parameters of windward vehicle are greater than those of leeward vehicle. (3) The lateral swaying force of the loaded vehicle is greater than that of an empty vehicle, and the increased range of lateral

收稿日期: 2022-06-14

作者简介: 何宝华(1976-),男,教授级高级工程师。

引文格式: 何宝华. 风屏障透风率对侧风下货运专线简支箱梁桥车桥耦合振动影响研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(4): 56-62.

HE Baohua. A Study on Effect of Ventilation Rate of Wind Barrier on Vehicle-bridge Coupling Vibration of Simply Supported Box Girder Bridge of Freight Dedicated Line under Crosswind[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4): 56-62.

swaying force with wind barrier's ventilation rate is less affected by train weight.

**Key words:** wind barrier; wind-vehicle-bridge coupling; dynamic response; freight train; simply supported box girder

作为具有较好经济效益的运输方式,铁路货运始终受到运输部门的重视,如何保证其安全运行是学者们长久以来关注的问题。龙卫国<sup>[1]</sup>等研究了重载列车通过简支梁桥时桥梁的竖向动力响应;李奇<sup>[2]</sup>等研究了轻重混编货物列车通过中小跨度桥梁时的车桥动力响应;向俊<sup>[3]</sup>等研究了轻重车辆混编对列车脱轨安全性的影响。简支梁桥由于其较大的刚度对风荷载不敏感,因此学者们在研究货运列车与简支梁桥的动力响应时大多未考虑风荷载影响。但经过强风区时,货运列车的安全运行仍会受到挑战。为减小风荷载对行车安全性的影响,常采用的措施包括列车停运或降速、改善列车气动外形、设置风屏障。在不改变列车外形,同时不降低线路运输效率的情况下,通过设置风屏障以减小列车所受风荷载是最有效、最经济的方案。

新朔铁路某简支箱梁桥位于陕西省朔州市平鲁区境内,地处低中山区黄土坡及大沙沟沟谷,沟壑较深,地形起伏大。桥址区地形复杂,大风频繁,风力强劲、风力变化剧烈。简支梁部分桥墩最高达 99 m,桥址处风速相较地面处更大,横风作用对于列车行车安全性影响较大,需设置风屏障以减小列车所受风荷载。

本文以新朔铁路某简支箱梁桥和 C80 型敞车编组货物列车为研究对象,利用 CFD 方法计算 20%、40% 和 60% 3 种透风率风屏障下桥梁与列车的三分力系数,使用谐波合成法模拟脉动风速,依据弹性系统总势能不变值原理和形成矩阵对号入座法则建立车桥耦合振动方程,考虑作用于车桥系统上的静风荷载和抖振力荷载,将风效应作为外荷载作用于车桥耦合振动方程,研究不同透风率风屏障对车桥耦合振动的影响。

## 1 风车桥耦合系统

### 1.1 车辆模型

列车计算模型由车体、构架及轮对共 7 个刚体以及一系、二系悬挂组成,本文进行耦合振动分析时采用以下假定:(1)车体、构架和轮对均为刚体;(2)不考虑列车纵向自由度;(3)不考虑轮对的侧滚、点头的自由度;(4)弹簧、蠕滑力为线性关系,阻尼为粘滞阻尼;(5)轮对与桥上轨道在铅垂方向位移保持一致。车体及前后构架在空间上有侧摆、侧滚、点头、摇头以及浮

沉等 5 个自由度,每个轮对则有侧摆、摇头 2 个自由度,四轴机车车辆为 23 个自由度<sup>[4]</sup>。

### 1.2 桥梁模型

桥梁模型采用(64×8+48+64)m 简支梁桥,行车线间距为 4.2 m。桥梁和桥墩均采用二节点空间梁单元,考虑其竖向、横向受弯以及扭转变形,每个节点考虑 3 个线位移和 3 个转角位移,每个单元有 12 个自由度。桥梁系统的阻尼选用 Rayleigh 阻尼,阻尼比为 2%。

### 1.3 车桥相互作用模型

本文在建立风荷载作用下车桥耦合振动方程时,根据弹性系统动力学总势能不变值原理<sup>[5]</sup>及形成矩阵的“对号入座”法则<sup>[6]</sup>,将桥上列车与桥梁视为 1 个整体系统,轨道不平顺作为系统的自激激励源,风荷载作为外部激励,建立考虑风荷载作用的车桥耦合系统振动方程。风-车-桥耦合系统的非线性振动方程为<sup>[7]</sup>:

$$\begin{bmatrix} M_b \\ M_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_b \\ \ddot{X}_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_b + C_{btb} + C_{bw} & C_{bt} \\ C_{tb} & C_t + C_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_b \\ \dot{X}_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_b + K_{btb} + K_{bw} & K_{bt} \\ K_{tb} & K_t + K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_b \\ X_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_{be} + P_{bw} \\ P_{tw} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: $M_b$ 、 $M_t$ ——桥梁和列车的质量矩阵;

$C_b$ 、 $C_t$ 、 $K_b$ 和 $K_t$ ——桥梁和列车的阻尼矩阵和刚度矩阵;

$C_{btb}$ 、 $C_{tb}$ 、 $K_{btb}$ 和 $K_{tb}$ ——车桥耦合系统中由桥梁振动速度引起的阻尼矩阵和刚度矩阵;

$C_{bt}$ 、 $C_{tt}$ 、 $K_{bt}$ 和 $K_{tt}$ ——车桥耦合系统中由列车振动速度引起的阻尼矩阵和刚度矩阵;

$C_{bw}$ 、 $K_{bw}$ ——由脉动风力所产生的阻尼矩阵;

$P_{be}$ ——作用在桥梁结构上的列车自重荷载;

$P_{bw}$ 、 $P_{tw}$ ——作用在桥梁和列车上的风荷载;

$X_b$ 、 $X_t$ ——桥梁和列车的位移。

### 1.4 脉动风模拟

对于风-车-桥系统动力学计算模型,作用在车桥系统上的风荷载可以分为平均风引起的静风力和由脉动风引起的抖振力,故任意一点的风速可视为一维多变量的平稳 Gauss 随机过程。脉动风场可近似看

作沿桥梁顺桥向若干点处随机风波的合成,本文在考虑模拟点的空间相关性并取时间间隔为 0.1 s 的前提下,沿桥梁方向以 20 m 间距均匀布置水平脉动风模拟点,采用谐波合成法对脉动风场进行模拟<sup>[8-9]</sup>,仅考虑横向一维脉动风。平均风速 25 m/s 时第 1 点(即坐标 0 m)的脉动风时程曲线如图 1 所示。

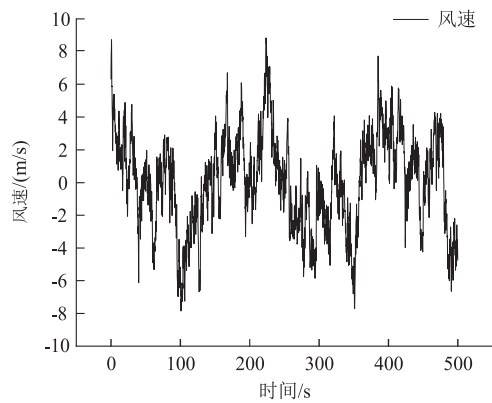


图 1 25 m/s 平均风速时 0 m 处脉动风时程曲线图

2 风荷载计算

2.1 基于 CFD 的桥梁列车气动三分力计算

CFD 模型中桥梁采用新朔铁路标准 64 m 简支箱形梁,考虑道砟外形,忽略桥面附属结构,忽略车顶设备、转向架、车下设备等。桥梁模型截面如图 2(a)所示。根据以往研究<sup>[10-12]</sup>,桥梁上风屏障高度宜取 2~4 m,本文将风屏障高度定为 3.5 m,以均匀布置的矩形镂空板条替代风屏障,40%透风率的风屏障模型如图 2(b)所示,车辆模型使用 C80 货车外观。选取 20%、40%和 60% 3 种透风率的风屏障,计算列车位于桥梁不同位置的桥梁与列车的气动三分力系数,共 9 种工况。

本文基于三维、非定常、不可压缩、黏性流场,采用工程上常用的 SST  $k-\omega$  湍流模型,使用商用 CFD 软件 FLUENT 对于桥梁和列车进行流场数值分析。压力与速度耦合方式采用 Simple 算法,时间离散格式按二阶完全隐式考虑,空间离散格式按二阶中心差分考虑。数值分析计算区域采用矩体,上下边界到主梁上下边距离为主梁断面宽度的 5 倍,入流边界到主梁断面迎风侧距离为主梁断面宽度的 5 倍,出流边界到桥梁截面背风侧的距离为主梁断面宽度的 20 倍。计算域和边界条件如图 3 所示,入流边界采用速度入口条件,出流边界为压力边界条件,流场侧面边界为对称壁面;为模拟车和桥之间的相对运动,桥梁及风屏障的边界条件设置为无滑移壁面条件。采用非结构

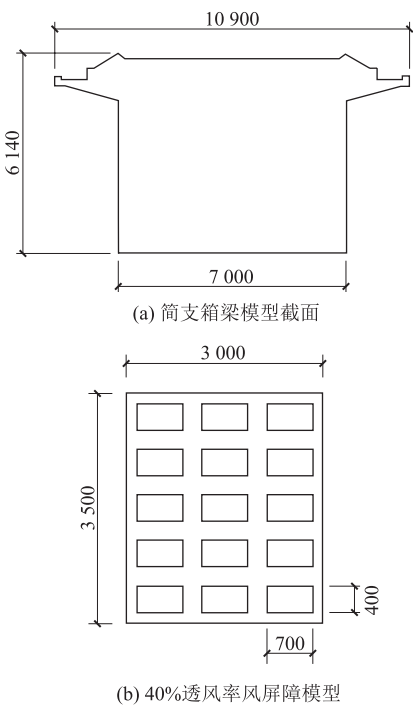


图 2 桥梁模型截面图(mm)

化网格划分模型,并且在桥梁和列车近壁面对网格进行局部细化处理,以一定的增长因子逐步过渡到远离壁面的稀疏网格。

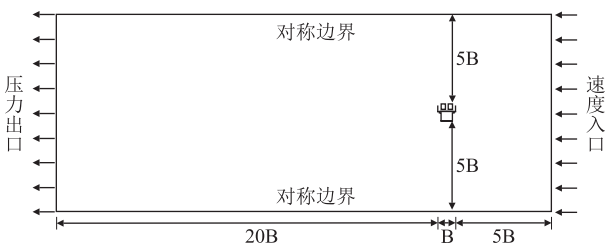


图 3 计算域和边界条件图

为便于分析,在规律分析中采用无量纲系数表征结构的气动力特性。处于风场中的桥梁断面所受到的风荷载包含 3 个分量:升力荷载力荷载  $F_D$ 、阻力荷载  $F_L$ 、扭矩荷载  $F_M$ ,如式(2)~式(4)所示。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 H} \tag{2}$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 B} \tag{3}$$

$$C_M = \frac{F_M}{\frac{1}{2} \rho U^2 B^2} \tag{4}$$

式中:  $C_D$ ——升力系数;  
 $C_L$ ——阻力系数;

$C_M$ ——扭矩系数;  
 $\rho$ ——空气密度取  $1.25\text{ kg/m}^3$ ;  
 $U$ ——横向来流向速;  
 $H$ ——物体沿体轴的侧向投影高度;  
 $B$ ——物体沿体轴的水平投影宽度。

数值模拟计算所得的列车和桥梁的气动力三分力系数如表 1 所示,形状为矩形的列车所受到的气动力主要通过阻力系数体现,桥梁系统横向响应对风荷载的敏感程度大于竖向响应。由表 1 可知,随着透风率的增大,列车受到的横风作用增大,桥梁受到的横风作用减小,故迎风车阻力系数随风屏障透风率的增大而增大,桥梁阻力系数随透风率增大减小。双线行车工况下,由于迎风车的遮挡,背风车所受横风作用较小,同时受到列车与背风侧风屏障之间的气流作用,因此背风车的阻力系数小于 0。对于在相同透风率风屏障条件下的桥梁阻力系数,单线背风工况的的桥梁阻力系数数值略大于单线迎风工况和双线行车工况。

表 1 CFD 计算三分力系数表

行车工况		风屏障透风率/%	三分力系数		
			$C_D$	$C_L$	$C_M$
单线迎风	C80	20	0.34	-0.04	-0.04
	主梁		2.10	0.35	0.10
	C80	40	0.97	-0.15	-0.08
	主梁		1.81	0.40	0.04
	C80	60	1.36	-0.29	-0.14
	主梁		1.63	0.42	0.15
单线背风	C80	20	0.04	0.07	0.00
	主梁		2.18	0.36	0.14
	C80	40	0.32	0.09	-0.03
	主梁		1.90	0.06	0.08
	C80	60	0.75	0.18	-0.02
	主梁		1.77	-0.07	0.18
双线行车	迎风C80	20	0.46	-0.01	-0.01
	背风C80		-0.07	0.10	0.00
	主梁		2.02	0.52	0.11
	迎风C80	40	1.00	-0.18	-0.03
	背风C80		-0.04	0.11	-0.01
	主梁		1.74	0.38	0.04
	迎风C80	60	1.38	-0.32	-0.04
	背风C80		-0.04	0.16	-0.01
	主梁		1.58	0.35	0.14

2.2 数值模型试验验证

为验证数值模拟的正确性,本文进行了节段模型的风洞试验。试验于中南大学高速铁路建造技术国家工程研究中心工程结构抗风研究所高速段进行,高

速测试段宽 3.0 m、高 3.0 m、长 15.0 m,试验风速在 0~94 m/s 范围内连续可调,风场湍流度小于 0.3%。模型几何缩尺比选为 1:25,箱梁节段模型横截面宽 0.436 m,高 0.217 6 m,长 1.8 m,长宽比约为 4.12,均满足规范长宽比大于 2 的要求。模型由钢板和 PVC 板加工而成,并在主梁模型中设置了加劲梁,以保证节段模型具有足够的刚度。测力装置采用中南大学高速铁路建造技术国家工程研究中心开发的组合节段模型气动力同步分离模拟装置,如图 4 所示,桥梁模型固定在可转动圆盘上,桥梁模型两端装有 ATI Delta F/T 传感器。参考风速采用澳大利亚 TFI 公司的眼镜蛇探针测量,参考点位于模型上游 1.5 m 处,高度与主梁顶面高度一致(约为 1.5 m)。

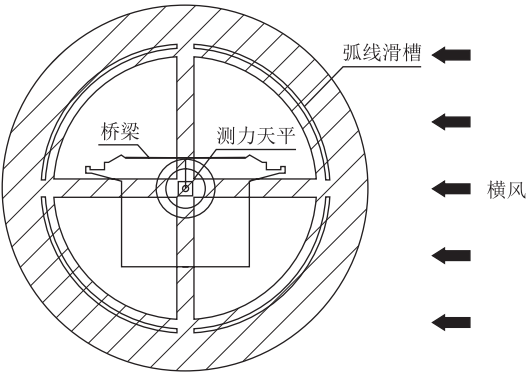


图 4 测力装置示意图

桥梁阻力系数的试验值与数值模拟值如表 2 所示,试验值与数值模拟值相对误差最大为 9.1%,符合规范要求的阻力系数相对误差(不超过 15%),说明本文数值模拟方法在计算三分力系数时是精确的。

表 2 风洞试验和数值模拟的桥梁阻力系数结果比较表

工况		风屏障透风率		
		20%	40%	60%
单线迎风	模拟值	2.03	1.81	1.63
	试验值	1.88	1.74	1.61
单线背风	模拟值	2.04	1.86	1.77
	试验值	1.87	1.73	1.70
双线运行	模拟值	1.95	1.74	1.58
	试验值	1.80	1.65	1.55

3 结果分析

3.1 计算工况

C80 型货车在满载和空载状态下的轴重相差极大,横风作用下二者的列车走行性差异较大,故采用轻重混编的列车编组:SS4+2×(5 节重车+5 节轻车)。列车车速为 80 m/s,采用美国六级谱模拟轨道



不平顺,风速采用 25 m/s、30 m/s 和 35 m/s 3 种速度,风屏障透风率采用 20%、40% 和 60%,列车位于单线迎风侧、单线背风侧和双线行车,总计 27 个工况。

3.2 桥梁响应

列车通过设置不同透风率风屏障的桥梁所产生的桥梁横向位移和竖向位移时程曲线如图 5、图 6 所示。

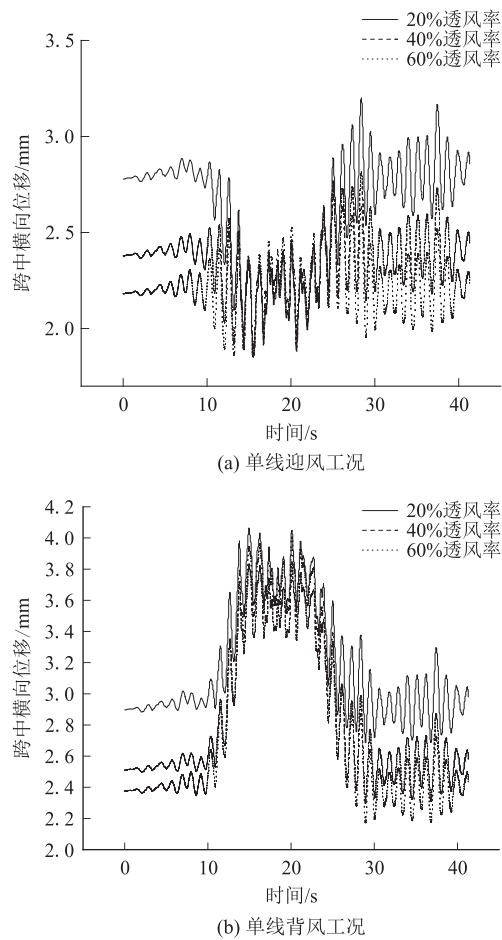


图 5 桥梁跨中横向位移时程曲线图

由图 5、图 6 可知：

- (1) 列车驶入前和驶出后,桥梁横向位移受透风率影响较大,透风率越小,作用在桥梁上的横风作用越大,桥梁的横向位移越大,并且随着透风率增大,桥梁横向位移增大的幅度减小。
- (2) 当时间  $t = 12\text{ s}$  时,列车开始驶入所指定的桥跨,桥梁横向位移开始出现较大变化,但是单线迎风 and 单线背风工况的变化情况相反,原因是当列车驶入桥跨时,桥梁横向位移不仅受横风作用影响,还受到行车线相对于桥面中心线偏心荷载的作用,单线迎风工况下该行车线偏心荷载引起的桥梁横向位移方向与横风作用引起的桥梁横向位移方向相反,而单线背

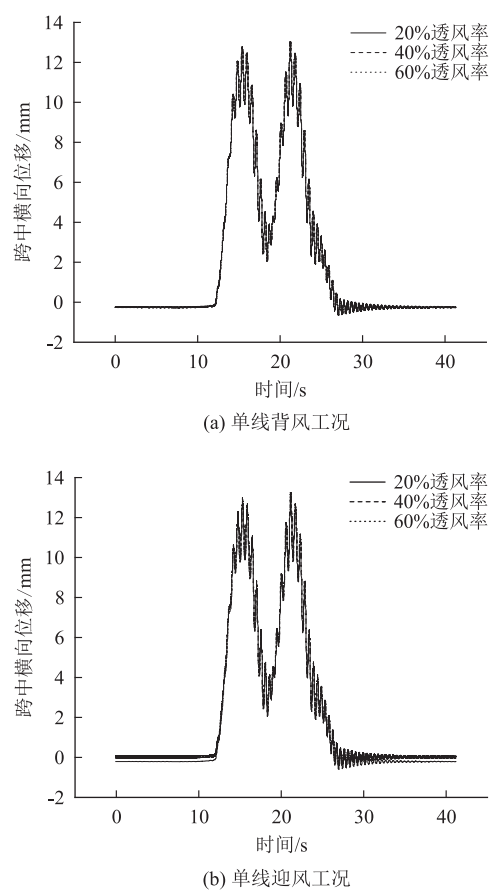


图 6 桥梁跨中竖向位移时程曲线图

风工况下该行车线偏心荷载引起的桥梁横向位移方向与横风作用引起的桥梁横向位移方向相同。

(3) 随着风屏障透风率的增大,列车所受的横风作用显著增大,表现为列车行驶至跨中位置时,桥梁的横向位移变化的幅值显著增大。单线迎风列车通过跨中位置时,不同透风率时桥梁横向位移的幅值基本相同,说明相对于列车所受横风荷载作用,列车相对于桥面中心线的偏心荷载作用对于桥梁横向位移的影响更大。单线背风行驶的列车通过跨中位置时,40%透风率时桥梁横向位移的幅值低于 20% 和 60%透风率,说明风屏障透风率对于桥梁横向位移存在影响,并且对于单线背风工况下的桥梁,采用 40%透风率风屏障时桥梁横向位移幅值最小。

(4) 桥梁横向位移和竖向位移都随时间出现 2 个波峰和 2 个波谷,与列车编组的  $2 \times (\text{重车} + \text{轻车})$  相对应。桥梁竖向位移受横风作用较小,主要受车辆荷载作用影响。

3.3 列车响应

平均风速为 25 m/s 时单线工况下列车在不同车速时的脱轨系数和轮重减载率,如表 3 所示。由表 3

可知,随着车速增大,列车脱轨系数和轮重减载率均增大,其中轮重减载率增大更为显著。随着风屏障透风率增大,列车的脱轨系数和轮重减载率均增大,由于背风车所受的横向风荷载作用较小,故与迎风工况相比,背风工况的脱轨系数和轮重减载率增长幅度较小。当风屏障透风率为20%时,横风作用对列车影响较小,列车运行位置对脱轨系数影响较小。

表3 机车响应最大值表

风屏障透风率/%	列车运行位置	脱轨系数			轮重减载率		
		车速	车速	车速	车速	车速	车速
		60 m/s	70 m/s	80 m/s	60 m/s	70 m/s	80 m/s
20	迎风	0.11	0.12	0.13	0.15	0.17	0.20
	背风	0.10	0.10	0.11	0.12	0.15	0.18
40	迎风	0.14	0.15	0.16	0.20	0.23	0.26
	背风	0.11	0.12	0.13	0.15	0.17	0.20
60	迎风	0.15	0.16	0.18	0.24	0.26	0.28
	背风	0.13	0.14	0.15	0.20	0.22	0.25

列车组在不同透风率、不同风速下的最大横向摇摆力如图7所示。由图7可知,重车轴重是轻车的5倍,重车所受的横向摇摆力仅为轻车的不到2倍。透风率在20%到60%范围内,随着透风率增大,列车所受的横向风荷载增大,故列车的最大横向摇摆力随之增大,且增大的幅度随透风率增大逐渐减小。随着风速增大,列车的横向摇摆力均有少许提高,并且随着透风率增大,列车横向摇摆力增大的幅度随之显著增大,重车和轻车增大的幅度相近。

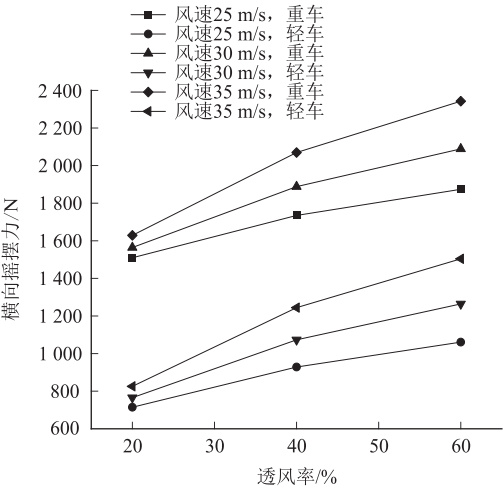


图7 不同透风率不同风速敞车横向摇摆力最大值图

4 结论

本文通过研究不同透风率风屏障对车桥耦合振动的影响,得出如下结论:

(1) 列车驶入前,桥梁的横向位移幅值主要受风屏障透风率影响,透风率越大,横向位移幅值越小。列车驶入后,桥梁横向位移的幅值主要受列车相对于桥面中心线的偏心荷载作用影响。列车单线背风行驶时,安装40%透风率风屏障的桥梁横向位移幅值小于20%和60%透风率时的数值,说明存在一个透风率使得桥梁横向位移最小,桥梁的竖向位移主要由列车轴重引起,受风屏障透风率影响较小。

(2) 随着风屏障透风率增大,列车的脱轨系数和轮重减载率均增大。迎风车受到的风荷载大于背风车,故相同风速、车速和风屏障透风率下,迎风车的脱轨系数和轮重减载率均大于背风车。

(3) 随着风速增加,列车的横向摇摆力增大,重车的最大横向摇摆力明显大于轻车;随着透风率增大,列车的最大横向摇摆力增大,且重车和轻车增大的幅度相近。

参考文献:

[1] 龙卫国,蒋丽忠,陈令坤. 重载列车过桥时桥梁的垂向动力分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(12): 140-143, 149.  
LONG Weiguo, JIANG Lizhong, CHEN Lingkun. Vertical Dynamic Analysis of a Bridge during a Heavy Haul Train Passing Through [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(12): 140-143, 149.

[2] 李奇,吴定俊,李俊. 混编货车通过中小跨度桥梁时车桥振动分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 171-175.  
LI Qi, WU Dingjun, LI Jun. Train-bridge Vibration Analysis of Mix-marshalling Freight Trains' Traversing Medium and Small Span Bridges [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(2): 171-175.

[3] 向俊,曾庆元. 轻重车辆混编对列车脱轨安全性的影响分析[J]. 长沙铁道学院学报, 2002(3): 1-6.  
XIANG Jun, ZENG Qingyuan. Analysis of the Effect of the Train Formation on the Safety of Train Derailment [J]. Journal of Changsha Railway University, 2002(3): 1-6.

[4] 郭向荣,曾庆元. 高速铁路结合梁桥与列车系统振动分析模型[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(3): 60-62.  
GUO Xiangrong, ZENG Qingyuan. Analytical Model of the System Vibration in High Speed Combination Girder Bridge and Train [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(3): 60-62.

[5] 曾庆元. 弹性系统动力学总势能不变值原理[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(1): 1-3, 14.  
ZENG Qingyuan. The Principle of Total Potential Energy with Stationary Value in Elastic System Dynamics [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(1): 1-3, 14.

[6] 曾庆元,杨平. 形成矩阵的“对号入座”法则与桁架空间分析的桁段有限元法[J]. 铁道学报, 1986, 8(2): 48-59.

- ZENG Qingyuan, YANG Ping. The "Set-in-right-position" Rule for Forming Structural Matrices and the Finite Truss-element Method for Space Analysis of Truss Bridges [J]. Journal of the China Railway Society, 1986, 8(2): 48–59.
- [7] 郭向荣, 何玮, 朱志辉, 等. 横风作用下货物列车通过大跨度铁路斜拉桥的走行安全性研究[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(2): 41–47.
- GUO Xiangrong, HE Wei, ZHU Zhihui, et al. Running Safety of Freight Train Passing Long-span Cable-stayed Railway Bridge under Cross Wind [J]. China Railway Science, 2016, 37(2): 41–47.
- [8] 骆宁安, 杨文武, 韩大建. 大跨度桥梁脉动风场的随机模拟[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2002, 30(3): 57–60.
- LUO Ning'an, YANG Wenwu, HAN Dajian. Stochastic Simulation of Wind Turbulence Field for a Long-span Bridge [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2002, 30(3): 57–60.
- [9] 郭向荣, 曾庆元. 京沪高速铁路南京长江斜拉桥方案车桥耦合风速分析[J]. 铁道学报, 2001, 23(5): 75–80.
- GUO Xiangrong, ZENG Qingyuan. Analysis of Critical Wind Speed for Running Trains on a Schemed Yangtze River Bridge at Nanjing on Beijing-Shanghai High Speed Railway Line [J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(5): 75–80.
- [10] 王厚雄, 高注, 王蜀东, 等. 挡风墙高度的研究[J]. 中国铁道科学, 1990, 11(1): 14–23.
- WANG Houxiong, GAO Zhu, WANG Shudong, et al. A Study on the Height of Wind Break Wall [J]. China Railway Science, 1990, 11(1): 14–23.
- [11] 张健. 铁路防风栅抗风性能风洞试验研究与分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(1): 13–17.
- ZHANG Jian. Wind-tunnel Test Investigations and Analysis on Wind Break Performances of Wind Fences on Railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2007, 4(1): 13–17.
- [12] 吕娜, 刘伟, 谢海清, 等. 叶片式导风屏障挡风性能优化研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(1): 78–82, 88.
- LV Na, LIU Wei, XIE Haiqing, et al. Study on Optimization of Wind-proof Performance of Vane-type Wind Deflector [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1): 78–82, 88.

(上接第12页)

## 参考文献:

- [1] 蒋楚生, 赵晓彦, 李庆海, 等. 铁路多级加筋土挡墙研究现状及应用展望[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(1): 44–48.
- JIANG Chusheng, ZHAO Xiaoyan, LI Qinghai, et al. Current Situation and Application Prospect of Multi-stage Reinforced Soil Wall for Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(1): 44–48.
- [2] 杨长卫, 周峰, 杨国涛, 等. 加筋土挡墙地震稳定性时频分析研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(9): 41–48.
- YANG Changwei, ZHOU Feng, YANG Guotao, et al. Seismic Stability Time-frequency Analysis Theory Resolution of Reinforced Retaining Wall [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(9): 41–48.
- [3] 杨广庆, 周亦涛, 周乔勇. 加筋土挡墙拉筋轴向应力分布规律研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 650–654.
- YANG Guangqing, ZHOU Yitao, ZHOU Qiaoyong. Distribution Rules of Axial Stress of Reinforcement in Reinforced Earth Retaining Wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 650–654.
- [4] 陈建峰, 柳军修, 石振明. 软土地基加筋土挡墙数值模拟及稳定性探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1928–1935.
- CHEN Jianfeng, LIU Junxiu, SHI Zhenming. Numerical Simulation and Stability Discussion of Reinforced Earth Retaining Wall in Soft Soil Foundation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1928–1935.
- [5] 苏骏. 双面加筋挡土墙的试验研究及数值模拟分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- SU Jun. Experimental Study and Numerical Simulation Analysis of Double-sided Reinforced Retaining Wall [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.
- [6] 李厚民, 熊健民, 余天庆. 互锚式薄壁挡土墙影响因素分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(S2): 897–901.
- LI Houmin, XIONG Jianmin, YU Tianqing. Finite Element Analysis of Mutual Anchoring Thin Retaining Wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S2): 897–901.