

阵风对山地城市桥上地铁列车平稳运行影响^{*}

祖雅甜^{**} 左海平

(柳州铁道职业技术学院建筑技术学院, 545616, 柳州//第一作者, 讲师)

摘要 目的:在山地城市高架段运行的地铁列车容易受到阵风影响,导致列车运行平稳性较差,因此,研究阵风作用下,列车平稳运行的影响因素具有较大的现实意义。**方法:**基于 Simpack 软件建立车-桥耦合振动分析模型;分析有无阵风、桥墩高度、迎风情况及是否设置风屏障这4个方面对列车运行平稳性的影响。**结果及结论:**①阵风作用下,桥梁高墩段比低墩段遇风更易激发车辆、桥梁系统的横向振动;与背风侧相比,车辆在迎风侧的动力学响应均较大,选择车辆运行在高墩段迎风侧可使计算阈值更趋于保守,有利于安全评估。因此,选择列车运行于高墩段、迎风侧工况,可使计算所得的动力学响应平稳性评价指标阈值的取值趋于保守,有利于安全评估。②设置风屏障措施对车辆动力学响应的改善较为显著,所有动力学响应评价指标均未超限。无风屏障条件下,影响车辆横向加速度的风速阈值为 21 m/s,影响车辆垂向加速度的风速阈值为 24 m/s,影响轮重减载率的风速阈值为 20 m/s,影响倾覆系数风速阈值为 22 m/s。

关键词 地铁;阵风;山地城市;列车运行平稳性

中图分类号 U270.1⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.09.003

Influence of Gusty Wind on Metro Train Operation Stability on Bridges in Mountainous Cities

ZU Yatian, ZUO Haiping

Abstract Objective: Metro trains running on elevated sections in mountainous cities are susceptible to gusty wind, resulting in poor train operation stability. Therefore, studying the factors influencing train operation stability under gusty wind action is of significant practical importance. **Method:** A vehicle-bridge coupled vibration analysis model is established using Simpack software. The impacts on train operation stability are analyzed from 4 aspects of gusty wind existence, bridge pier height, windward condition, and installation of wind barrier. **Result & Conclusion:** (1) Under gusty wind action, bridge sections with higher piers are more prone to excite lateral vibra-

tions of vehicles and the bridge system than those with lower piers. Compared to the leeward side, the vehicle dynamics response on the windward side is slightly greater. Choosing windward side and high pier section for vehicle operation can make the calculation threshold more conservative, conducive to safety assessment. Therefore, the above working condition for vehicle operation is selected, making the calculated threshold values for dynamics response stability indicators conservative and facilitating safety assessment. (2) The implementation of wind barrier measures significantly improves the vehicle dynamics response, and all evaluated indicators for dynamics response remain within the limits. Without wind barriers, the wind speed thresholds affecting the vehicle lateral acceleration, the vehicle vertical acceleration, the wheel load reduction rate, and the overturning coefficient are 21 m/s, 24 m/s, 20 m/s, and 24 m/s, respectively.

Key words metro; gusty wind; mountainous city; train operation stability

Author's address School of Building Technology, Liuzhou Railway Vocational Technical College, 545616, Liuzhou, China

0 引言

山地城市的城市轨道交通目前正处于快速发展的阶段,面对复杂的山区地势,许多地铁不得不在大江、深谷间穿梭,高墩桥梁的应用屡见不鲜。但山地城市的高架区段常伴有雷雨天气,同时还遭受大风的侵扰。当地铁行驶于桥隧相连区段时,若峡谷风突然袭来,列车的车体表面由于气流原因受到横向阻力、垂向升力和侧滚力矩等作用,导致列车运行平稳性变差。因此,研究阵风环境下,地铁列车过桥的平稳性问题具有较大的现实意义。

目前,已有许多学者对阵风环境下,车辆的平稳安全运行问题进行了研究。文献[1]研究了非稳

^{*} 2022 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2022KY1400)

^{**} 通信作者

态振风下的车辆稳定性问题。文献[2-4]对山区城市地铁列车行驶于高架线路、跨越江河时遭遇的振风情况进行了初步研究。文献[5]基于计算流体力学,对侧风激励下的列车运行平稳性指标阈值进行了分析。以上研究总结了非稳态横风下的列车稳定性及强侧风下的列车安全行驶等问题,但对于山地城市桥上地铁遇风运行平稳安全性问题涉及较少。

鉴于此,本文基于 Simpack 及 ANSYS 软件搭建了车-桥耦合振动分析模型,计算分析了列车在遭遇阵风激励时的动力响应,研究了桥墩高度变化、迎风情况变化、风速变化对列车运行平稳性的影响,以及设置风屏障措施后的列车运行平稳性的改善情况。本文研究可为山地城市地铁的安全运营提供理论参考。

1 车-桥耦合振动分析模型

基于刚柔耦合理论,车-桥耦合振动分析模型由刚体系统及柔性系统两部分组成。在 Simpack 软件中建立列车模型,将其设为刚体系统;在 ANSYS 软件中建立桥梁模型并导入 Simpack 软件,将其设为柔性系统。列车与桥梁通过轮轨关系耦合在一起,车-桥耦合振动分析模型示意图如图 1 所示。

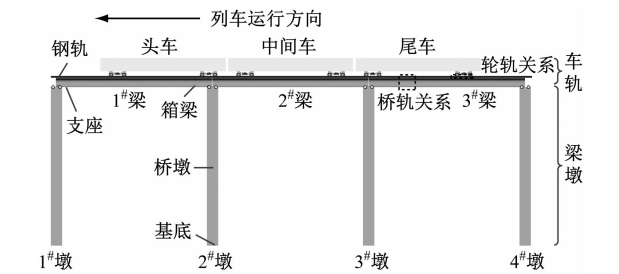


图 1 车-桥耦合振动分析模型示意图
Fig. 1 Diagram of vehicle-bridge coupled vibration analysis model

1.1 车辆多刚体子系统

地铁列车模型采用 3 节编组,每辆车之间的横向运动、垂向运动为弱耦合,横风作用主要表现为横向力作用,故列车模型暂不考虑车钩。车辆模型简化为 1 个车身、2 个转向架及 4 个轮对,每个刚性构件有 2 个平动自由度及 3 个转动自由度,每辆车有 35 个自由度,3 节车共有 105 个自由度。

在车辆内部的分层弹簧-阻尼系统中,垂向液压装置均考虑了非线性特性,弹簧系统设为线性模型,同时考虑了抗蛇行、垂向、横向减振及止挡等部

件的影响。钢轨型号为 CN60,车轮踏面类型为 LM 型,轮轨耦合模块的蠕滑力求解选择 FASTSIM 算法。车辆主要参数如表 1 所示。

表 1 车辆主要参数			
Tab.1 Main vehicle parameters			
名称	取值	名称	取值
车体质量/t	35.443	轨距/mm	1 435
构架质量/t	4.007	轮距/mm	2 300
轮对质量/t	1.878	定距/mm	12 600
一系悬挂垂向刚度/(MN/m)	17	二系悬挂垂向刚度/(MN/m)	0.34
一系悬挂纵向刚度/(MN/m)	17	二系悬挂纵向刚度/(MN/m)	0.15
一系悬挂横向刚度/(MN/m)	5~15	二系悬挂横向刚度/(MN/m)	0.10~0.30

横风激励下的车辆空间振动方程可以表示为:

$$m_v \ddot{X}_v + C_v \dot{X}_v + K_v X_v = F_{vb} + F_{vw} \quad (1)$$

式中:

m_v 、 C_v 、 K_v ——车辆子系统的质量、阻尼、刚度矩阵;

\ddot{X}_v 、 \dot{X}_v 、 X_v ——车辆子系统的加速度、速度、位移向量;

F_{vb} ——车辆各自由度受到的来自桥梁、轨道的刚度或几何不平顺激励向量;

F_{vw} ——车辆受到的风载荷向量,包括阻力、升力、倾覆力矩、俯仰力矩及侧摆力矩。

已知系统作用力后,可通过牛顿第二定律或达朗贝尔原理计算获得车辆主要部件(如车体、构架和轮对)的运动方程。

1.2 桥梁有限元子系统

模型中轨道板和桥梁之间无相对滑动,忽略胶垫及扣件的变形,考虑轨道板质量影响。所建立的桥梁节点运动方程为:

$$m_b \ddot{X}_b + C_b \dot{X}_b + K_b X_b = F_{bv} + F_{bw} \quad (2)$$

式中:

m_b 、 C_b 、 K_b ——桥梁子系统的质量、阻尼、刚度矩阵;

\ddot{X}_b 、 \dot{X}_b 、 X_b ——桥梁子系统的加速度、速度、位移向量;

F_{bv} ——桥梁各自由度受到的来自列车过桥的动载荷向量;

F_{bw} ——桥梁结构受到的阵风激励作用的风载

荷向量,分为加载、稳定、增长、衰减、稳定、卸荷6个阶段。

桥梁有限元子系统中的 m_b 和 K_b 信息直接从有限元模型中抓取,而 C_b 根据 Rayleigh 阻尼公式计算获得。

1.3 车-桥耦合振动模型及求解

根据轮轨接触点的力和位移与桁架桥的节点力和节点位移之间的关系,可以获得车辆及桥梁受力的表达式,实际计算中以轮轨接触面作为车辆、桥梁间的数据交互接口。阵风激励作用下的车-桥耦合振动方程可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} m_v \ddot{X}_v + C_v \dot{X}_v + K_v X_v &= F_{vb} + F_{vw} \\ m_b \ddot{X}_b + C_b \dot{X}_b + K_b X_b &= F_{bv} + F_{bw} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:

- $F_{vb} + F_{vw}$ ——车辆运动状态函数;
- $F_{bv} + F_{bw}$ ——桥梁运动状态函数。

基于分离迭代法,可在每个积分步中获得满足其相互作用力的解。

实际建模时,将轨道、桥梁、桥墩考虑为柔性系统,在 ANSYS 软件中对轨道和桥梁进行子结构分析建模,生成所需要 *.cdb 和 *.sub 文件,并作为柔性体模型导入 Simpack 软件,各部件通过考虑非线性的相应力元连接。桥墩底部视为固定端,桥梁分为三跨箱梁简支桥(32.6 m×3 跨),桥墩采用 C30 混凝土。几何外形不参与动力学计算,故在 Simpack 软件中直接选择默认车体几何外形(不参与计算),计算时列车单线匀速通过桥梁区段。钢轨建模参考 CN60 型参数,只考虑桥梁段上的轨道为柔性体结构。通过 *.fbi 格式及编写内嵌轨道信息 *.ftr 格式等文件来搭建柔性轨道,实现轮轨间的数据交互,扣件间隔设为 0.6 m。柔性体构件计算参数如表 2 所示。

表 2 柔性体构件计算参数

Tab.2 Calculation parameters of flexible components

名称	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
钢轨	7 830	210	0.3
箱梁	3 115	36	0.3
桥墩	3 000	30	0.2

车-桥耦合振动模型建模过程示意图如图 2 所示。车-桥耦合模型结果与文献[5]中的实测结果较为接近,说明所提模型的可靠度和准确性较高。

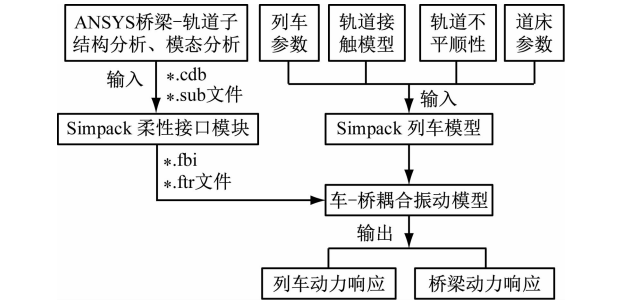


图 2 车-桥耦合振动模型建模过程示意图
Fig. 2 Diagram of modeling process of the vehicle-bridge coupled model

2 车辆及桥梁所受阵风荷载模型

本文参考 CHG(中国帽风)与线性叠加理论^[3,6]合成动态阵风样本。所模拟的阵风荷载最终加载于桥梁和桥墩,并被简化为桥梁与桥墩受到的阻力、升力及扭转力矩。在车辆向前行驶的过程中,与横风产生相对运动,形成相对风速及偏航角。车辆所受五分力气动载荷主要由横向阻力 F_{side} 、垂向升力 F_{lift} 、倾覆力矩 M_{roll} 、俯仰力矩 M_{pitch} 及横摆力矩 M_{yaw} 组成。车辆五分力气动载荷示意图如图 3 所示。

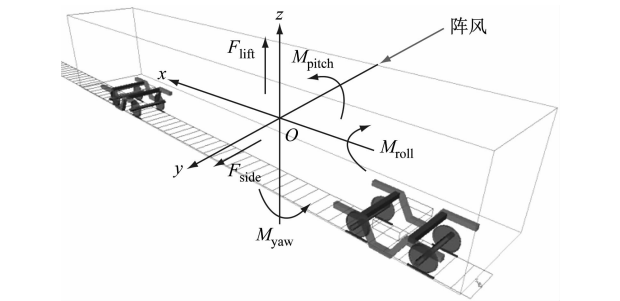


图 3 车辆五分力气动载荷示意图
Fig. 3 Diagram of vehicle five-component aerodynamic load

3 阵风对桥上地铁列车的运行平稳性影响分析

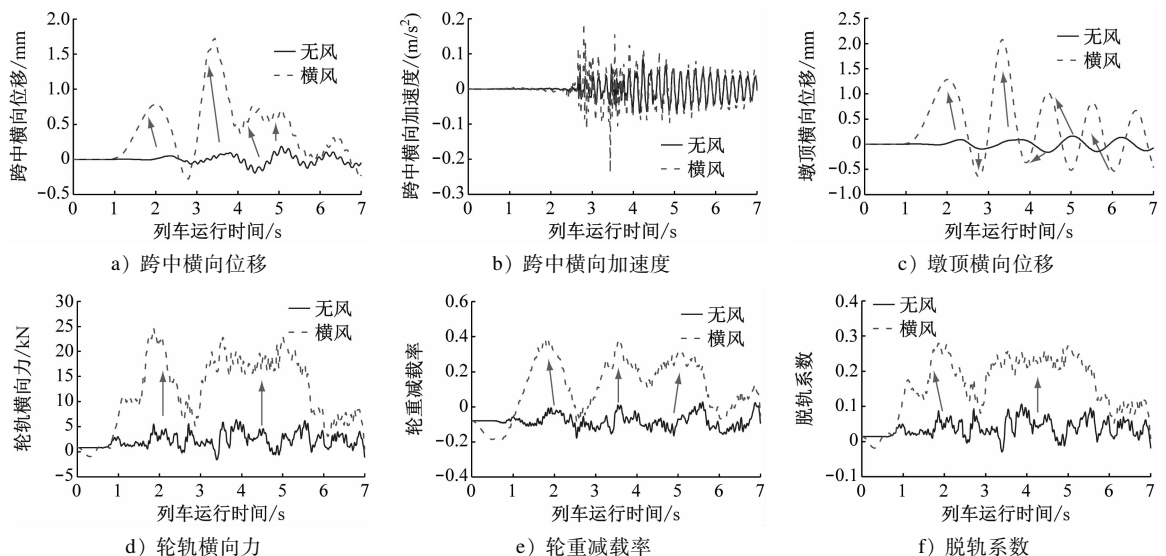
3.1 阵风对列车运行平稳性的影响

研究山地城市阵风荷载对于桥上地铁列车的运行平稳性影响时,列车受到侧向风力、车桥耦合等条件的影响,可能出现振动超标现象,甚至发生车体倾覆。根据 GB/T 50157—2013《地铁设计规范》,采用脱轨系数(限值为 0.8)、轮重减载率(限值为 0.6)、倾覆系数(限值为 0.8)、轮轨横向力(限值为 50 kN)、车体加速度(垂向加速度≤0.13g,横

向加速度 $\leq 0.10g$, g 为重力加速度) 及 Sperling 平稳性指标来判断车体的振动程度(横向及垂向 Sperling 平稳性指标不大于 3.0)。当任一指标超出限值,即可判定为列车运行平稳性不合格。

取列车运行速度为 60 km/h,桥墩高为 50 m,标高风速为 10 m/s。阵风作用下,列车过桥时的桥梁和车辆动力学响应如图 4 所示。由图 4 可知:当列车在桥上区段运行时,阵风荷载能够引起车辆和桥

梁的大幅振动,6 个相关平稳性指标均有明显增幅;当列车运行时间为 1 s 时,桥梁的横向响应较为平缓,在此之后,桥梁的横向响应开始激增,在 3.5 s 前后出现响应峰值,之后在阻尼耗散作用下振动响应逐渐收敛。由此可知,相比于无风条件,阵风条件下更易激发车辆、桥梁系统的振动,使计算结果阈值更趋于保守,有利于安全评估。



注:轮重减载率为正表示减载,为负表示增载;脱轨系数为正表示轮轨分离,为负表示轮轨挤压;动态计算时,数值的正负仅表示方向不同,下文评价时取绝对值进行计算。

图 4 阵风作用下列车过桥时的桥梁和车辆动力学响应

Fig. 4 Dynamics responses of bridge and vehicle under gusty wind action when the train crosses a bridge

3.2 桥梁高度对列车遇风时的运行平稳性影响

桥梁高度越高,列车运行时的侧面来风风速越大,故需进行桥梁高度对桥上地铁列车遇风时的运行平稳性影响分析。取列车运行速度为 60 km/h,高墩、低墩高度分别为 50 m(山地城市典型墩高)及 5 m(平原城市典型墩高),标高风速为 10 m/s。列车遇风时,不同桥梁高度对车辆及桥梁系统的动力学响应影响如表 3 所示。

由表 3 可知:相比于低墩情况,遇风时,运行在山地城市高墩桥段的车辆及桥梁的振动更为强烈;对于桥梁结构而言,其横向变形比垂向变形更为严重,这是由于风速沿墩高方向呈梯度变化,近地风速小而远地风速大,且高墩桥梁的结构横向刚度较弱导致的。在阵风作用下,高墩桥段遇风更容易激发列车和桥梁系统发生振动,因此应使计算所得的动力学响应平稳性评价指标阈值的取值更趋于保守,有利于安全评估。

3.3 迎风情况对地铁遇风时运行平稳性的影响

地铁列车行驶于迎风侧与背风侧所遭遇的阵风动力学响应有所不同。取列车运行速度为 60 km/h,高墩高度为 50 m,标高风速为 10 m/s。列车运行于迎风侧(上行线)与背风侧(下行线)的位置示意图如图 5 所示。

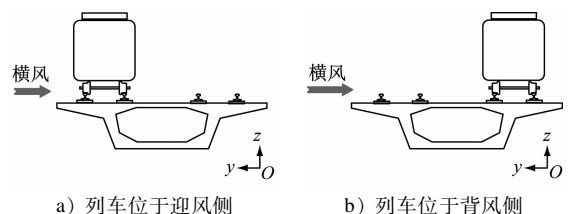


图 5 列车位于迎风侧与背风侧的位置示意图

Fig. 5 Diagram of train positions on windward and leeward sides

迎风侧及背风侧的车辆及桥梁系统动力学响应如表 4 所示。由表 4 可知:与背风侧相比,车辆运

行在迎风侧时的车辆横向振动加速度、横向 Sperling 平稳性指标、轮重减载率、轮轨横向力和倾覆系数等响应指标均较大;与背风侧相比,迎风侧桥梁结构的墩顶横向位移、跨中横向位移、墩顶垂向位移及跨中垂向位移等响应指标均较大。由此可知,选取迎风侧的动力学响应指标更具有代表性,即列车行驶于迎风侧工况时计算所得的动力学响应平稳性评价指标阈值的取值更趋于保守,有利于安全评估。

表 3 不同桥梁高度对车辆及桥梁系统的动力学响应影响
Tab.3 Influence of different bridge heights on the dynamics responses of vehicle and bridge system

评价指标		低墩	高墩
车体运行平稳性指标(车体)	车体横向加速度/(m/s ²)	0.13	0.43
	车体垂向加速度/(m/s ²)	0.11	0.23
	横向 Sperling 指标	0.16	0.30
	垂向 Sperling 指标	0.21	0.64
	轮重减载率	0.29	0.98
车体运行安全性指标(轮轨)	轮轨横向力/kN	0.37	1.03
	脱轨系数	1.65	2.27
	倾覆系数	1.58	2.16
桥梁位移响应峰值/mm	墩顶横向	0.08	2.42
	跨中横向	0.15	3.41
	墩顶垂向	0.01	0.08
	跨中垂向	0.55	0.51
桥梁振动加速度峰值/(m/s ²)	墩顶横向	0.03	0.08
	跨中横向	0.14	0.28
	墩顶垂向	0.01	0.20
	跨中垂向	1.22	1.07

3.4 设置风屏障对地铁遇风时运行平稳性的影响
参考文献[3],选取一种高度为 5.0 m(下部 2.0 m 为实心板,上部 3.0 m 部分开孔,孔隙率为 30%)的双边风屏障进行研究分析。双边风屏障示意图如图 6 所示。计算工况为:列车运行速度为 60 km/h,高墩高度为 50 m,列车位于迎风侧,标高风速为 10 m/s。整个计算过程中,由于桥梁结构的动力学响应均超标,且风速阈值主要与车辆的动力学响应相关,故此处重点研究车辆的动力学响应指标。有无风屏障条件下,不同风速的车辆动力学响应如图 7 所示。

由图 7 可知:设置风屏障对车辆动力学响应的改善较为显著;无风屏障时,车辆对阵风较为敏感,

各动力学响应指标快速超限;设置风屏障时,车辆各动力学响应指标均未超限;无风屏障条件下,影响车辆横向加速度的风速阈值为 21 m/s,影响车辆垂向加速度的风速阈值为 24 m/s,影响轮重减载率的风速阈值为 20 m/s,影响倾覆系数的风速阈值为 22 m/s;车辆的横向 Sperling 指标及垂向 Sperling 指标均未超限。

表 4 迎风侧及背风侧的车辆及桥梁系统动力学响应
Tab.4 Dynamics responses of vehicle and bridge system on windward and leeward sides

评价指标		背风侧	迎风侧
车体运行平稳性指标(车体)	车体横向加速度/(m/s ²)	0.29	0.33
	车体垂向加速度/(m/s ²)	0.35	0.30
	横向 Sperling 指标	1.61	1.71
	垂向 Sperling 指标	1.70	1.66
车体运行安全性指标(轮轨)	轮重减载率	0.18	0.20
	轮轨横向力/kN	1.28	1.32
	脱轨系数	0.18	0.17
	倾覆系数	0.18	0.19
桥梁位移响应峰值/mm	墩顶横向	1.02	1.07
	跨中横向	1.29	1.45
	墩顶垂向	0.08	0.08
	跨中垂向	0.54	0.56
桥梁振动加速度峰值/(m/s ²)	墩顶横向	0.04	0.03
	跨中横向	0.13	0.14
	墩顶垂向	0.01	0.01
	跨中垂向	1.29	1.29

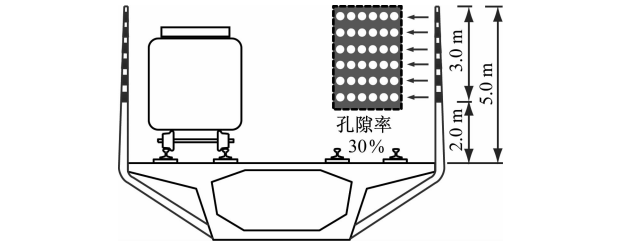
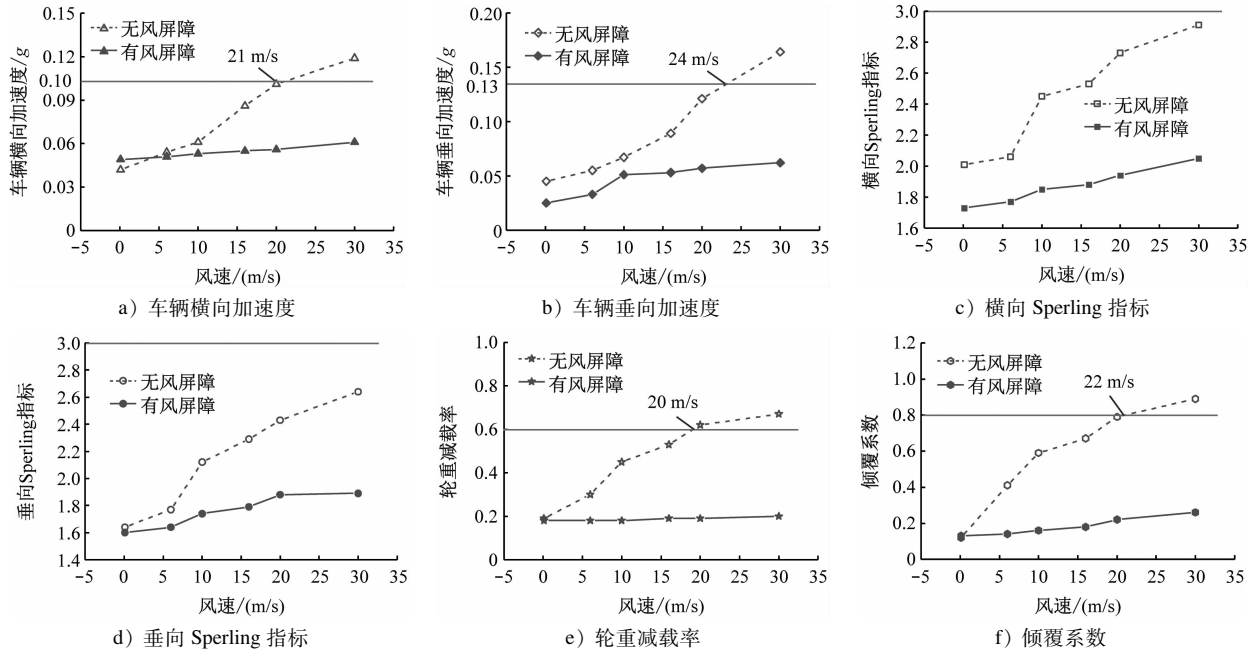


图 6 双边风屏障示意图
Fig.6 Diagram of two-sided wind barriers

综上所述,对于车辆平稳性而言,列车运行速度为 60 km/h 时,过桥的平均风速综合限值为 21 m/s;对于车辆安全性而言,列车运行速度为 60 km/h 时,过桥的平均风速综合限值为 20 m/s。在桥上设置风屏障会在一定程度上增加桥梁的横向响应,对桥梁的振动响应有一定的影响,但设置风屏障可以大幅改善阵风时桥上列车的运行平稳性与安全性。



注:图中实线与无风屏障的交点代表无风屏障条件下,各动力学响应指标临界状态时的风速阈值。

图7 有无风屏障条件下不同风速的车辆动力学响应

Fig. 7 Vehicle dynamics response at different wind speeds with and without wind barriers

4 结论

1) 若地铁列车在山区高架段运行时遭遇阵风影响,容易引起车辆、桥梁大幅振动,二者的动力学响应指标明显增大。在阵风作用下,高墩桥段遇风更容易激发列车和桥梁系统发生振动;与背风侧相比,车辆和桥梁在迎风侧的动力学响应均较大。因此,选择列车运行于高墩段、迎风侧工况,可使计算所得的动力学响应平稳性评价指标阈值的取值趋于保守,有利于安全评估。

2) 设置风屏障措施对车辆动力学响应的改善较为显著,所有动力学响应评价指标均未超限。无风屏障时,车辆对阵风较为敏感,各动力学响应指标快速超限。无风屏障条件下,影响车辆横向加速度的风速阈值为 21 m/s,影响车辆垂向加速度的风速阈值为 24 m/s,影响轮重减载率的风速阈值为 20 m/s,影响倾覆系数的风速阈值为 22 m/s;车辆的横向 Spirling 指标及垂向 Spirling 指标均未超限。

参考文献

[1] CAI C S, HU J, CHEN S, et al. A coupled wind-vehicle-bridge system and its applications; a review[J]. Wind and Structures, 2015, 20(2): 117.

[2] ZHANG Y, LI J, CHEN Z, et al. Running safety of metro train over a high-pier bridge subjected to fluctuating crosswind in mountain city[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2020, 76(2): 207.

[3] 张云飞. 横风扰动作用下山区地铁车辆-轨道-高墩桥梁耦合振动研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.

ZHANG Yunfei. Research on the coupled vibrations of metro vehicle-track-bridge with high-pier subjected to crosswind in mountain city[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.

[4] 张云飞, 李莉, 雷震宇, 等. 阵风下高速列车-独塔斜拉桥耦合振动分析[J]. 中国公路学报, 2021, 34(4): 128.

ZHANG Yunfei, LI Li, LEI Zhenyu, et al. Analysis of high-speed train-single-tower cable-stayed bridge coupling vibration under gust[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(4): 128.

[5] 杭锦, 张允士. 高架城市轨道交通车辆及桥梁振动的理论研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4): 83.

HANG Jin, ZHANG Yunshi. Theoretical study on vehicles and bridges vibration induced by viaduct rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(4): 83.

[6] 谢小山, 王为林, 陈彦恒. 阵风下地铁列车曲线通过安全性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(10): 38.

XIE Xiaoshan, WANG Weilin, CHEN Yanheng. Study on metro train safety when passing through curved section under gust[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 38.

(收稿日期:2021-05-27)