

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201810055



遭遇横风时高墩高架上的 地铁车辆运行安全性

李军^{1,2}, 张云飞¹, 高健博¹

(1. 重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学 城市轨道交通车辆系统集成与控制重庆市重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 首先,基于山区城市地铁线路条件,建立风区横风-车辆-高墩桥梁模型;然后,选取计算参数并确定评价指标,对风-车-桥系统的特性进行分析;最后,对车速及风速的影响规律和安全阈值进行研究.结果表明:风区条件和高墩条件不可忽视;横风引起车、梁及墩的剧烈振动,由于高墩稳定性较差,加剧车辆运行的不稳定性;车-桥系统响应随风速显著增加,且随车速出现波动;当标准高度风速达到 $21.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,已无法保证车辆以最高时速运行.

关键词: 地铁车辆; 横风; 高墩高架; 地铁线路; 山区城市; 车辆-轨道-桥梁耦合振动

中图分类号: U 27

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2019)04-0421-08

Running Safety of Metro Vehicle Over High-Pier Viaduct Under Crosswind

LI Jun^{1,2}, ZHANG Yunfei¹, GAO Jianbo¹

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Integration and Control for Urban Rail Transit Vehicle System,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: According to actual construction conditions of the mountain city, a dynamic model of the vehicle-track-bridge system was established first. Then its calculation parameters were selected and evaluation indices were determined. The characteristics of the wind-vehicle-bridge system were analyzed. Finally the effect of vehicle speed and wind speed were studied. The experimental results indicates that the wind condition and high-pier condition cannot be neglected. The crosswind caused strong vibration of car, beam and pier. The responses of vehicle-bridge system increased significantly with wind speed, and fluctuated with train speed. When the wind speed of standard height reaches $21.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the highest speed of the vehicle on the bridge cannot be guaranteed.

Keywords: metro vehicle; crosswind; high-pier viaduct; metro lines; mountain city; vehicle-track-bridge coupled vibration

重庆是中国西南典型的山城,由于地形复杂崎岖,其地铁线路往往要跨越江河及山谷,导致桥隧占比大,高架墩高度甚至超过 100 m. 与平原城市地下线路相比,山城高架线路容易遭受横风袭扰,尤其是

收稿日期: 2018-10-23

通信作者: 李军(1964-),男,教授,博士,主要从事新能源汽车、自动驾驶车辆及城市轨道交通的研究. E-mail: cqleejun@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305472); 重庆市轨道交通车辆系统集成与控制重庆市重点实验室项目(CSTC2015yfpt-zdsys30001)

高墩高架在横风下的稳定性更差,会加剧地铁车辆横风下运行的不稳定、不安全^[1]. 目前,关于风-车-桥的研究主要集中于风洞试验及仿真方法等方面^[2-6],多关注高铁而非地铁,多关注普通桥梁而非高墩高架. 基于此,本文建立精细的风区横风-车辆-高墩桥梁模型,选取适当的计算参数并确定评价指标,进行风-车-桥的基本特性分析,研究车速及风速对运行安全性的影响,并得到相应的安全阈值.

1 风-车-桥动力学模型

1.1 风-车-桥系统的基本假设

风-车-桥动力学模型,如图 1 所示. 图 1 中: U_v 为车速; z 为上、下摩擦层高度; z_s 为标准高度; z_0 为风速减弱为零时的高度,即地面粗糙高度. 基于山区城市的实际线路条件及自然环境,结合实际需求对风-车-桥模型做以下 3 个方面的处理.

1) 车辆方面. 地铁车辆位于双线桥迎风侧,匀速行驶. 车辆由 1 个车身、2 个转向架、4 个轮对组成,均为刚体,且有伸缩、横摆、浮沉 3 个平动及侧滚、点头和摇头 3 个转动,整车共 42 个自由度^[7]. 悬挂系统均为粘性阻尼、线性弹簧;允许轮轨相互脱离,轮轨之间为非线性弹性接触^[8].

2) 桥梁方面. 高架结构简化为四墩三跨双线简支箱梁桥,并给予编号,基于有限元方法建立高墩桥梁,采用实体单元对桥墩和箱梁进行建模^[6]. 桥跨结构通过固定支座及活动支座与桥墩相联结,混凝土材质. 钢轨被视为连续弹性离散点支承上的无限长欧拉梁,且由线性扣件紧固,每根轨道被考虑为垂向、横向平动及扭转 3 个自由度,且轨道板与桥梁浇筑为一体.

3) 横风方面. 横风被描述为阶跃变化的自然非定常阵风,车辆在双线桥迎风侧轨运行. 同时,风区设置在三跨桥梁范围,车辆穿越风区分为驶入、穿越、驶离 3 个阶段. 横风风速沿高度方向呈梯度变化,水平方向不变,且任意两个相邻的模拟横风速点之间的距离相等^[1,5].

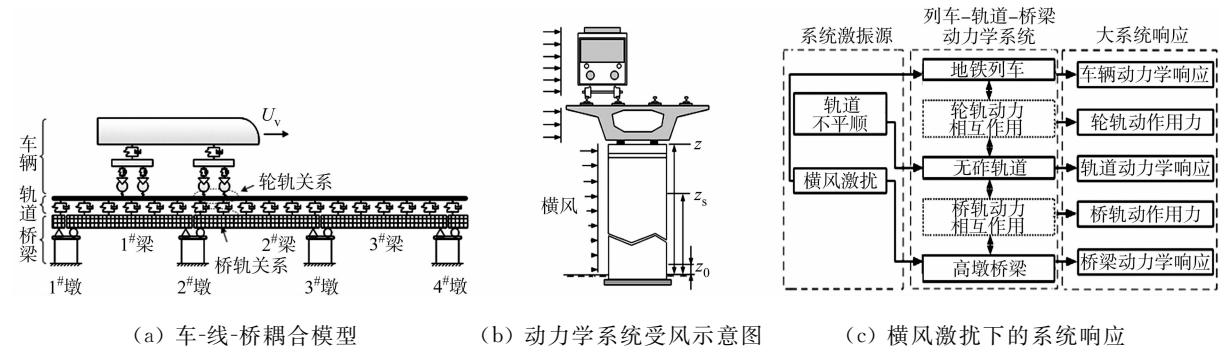


图 1 风-车-桥系统动力学模型

Fig. 1 Dynamic model of wind-vehicle-bridge system

1.2 车-线-桥耦合模型及其验证

车辆、轨道、桥梁分别被考虑为 3 个子系统. 横风作为外部激励输入系统,系统响应过程,如图 1(c) 所示. 横风下的车-线-桥系统动力学方程^[5]为

$$\left. \begin{aligned} M_v \ddot{X}_v + C_v \dot{X}_v + K_v X_v &= F_{vt} + F_{wv}, \\ M_t \ddot{u}_t + C_t \dot{u}_t + K_t u_t &= F_{tv} + F_{tb}, \\ q + \Phi^T C_b \Phi \dot{q} + \Phi K_b \Phi q &= \Phi^T (F_{bt} + F_{wb} + F_{wp}). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中:下标 v,t,b,p 分别表示车辆、轨道、箱梁及桥墩; M_v, C_v, K_v 分别为车辆的质量、阻尼及刚度矩阵; M_t, C_t, K_t 分别为轨道的质量、阻尼及刚度矩阵; $\ddot{X}_v, \dot{X}_v, X_v$ 分别为车辆的加速度、速度、位移矢量; $\ddot{u}_t, \dot{u}_t, u_t$ 分别为轨道的加速度、速度、位移矢量; \ddot{q}, \dot{q}, q 分别为桥梁的加速度、速度、位移矢量; Φ 分别为模态矩阵; C_b, K_b 分别为箱梁的阻尼和刚度矩阵; $F_{vt}, F_{tv}, F_{tb}, F_{bt}$ 分别为轮轨及桥轨的相互作用力; F_{wv}, F_{wb}, F_{wp} 分别为车辆、箱梁及桥墩所受的风载荷.

将结果与文献[9-10]进行对比验证. 桥梁均选用跨度为 30 m 的简支梁,双线箱梁参数一致(刚性桥墩),均为 B 型地铁车辆,采用德国低速轨道不平顺谱. 文中模型为直线高架段,文献[9-10]为曲线段(半径 R 为 800 m),两者基本参数一致. 计算结果的对比,如图 2 所示. 图 2 中: $\Delta P/\bar{P}$ 为轮重减载率.

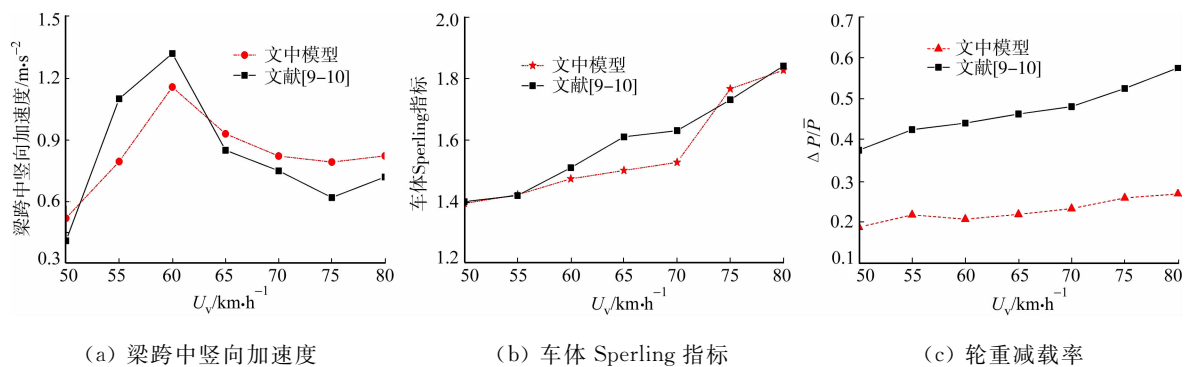


图 2 车-线-桥耦合模型验证

Fig. 2 Verification of vehicle-track-bridge coupled model

由图 2 可知:随着车速的增大,轮重减载率与车辆 Sperling 指标均呈上升趋势,而跨中竖向加速度出现车桥共振,导致幅值激增;文中所得数据与文献[9-10]的规律性保持高度一致;文中轮重减载率数值比文献[9-10]小,是由于文献[9-10]的曲线线路所致;文中车桥振动指标随车速变化的规律与文献[9-10]保持高度一致,说明车-线-桥模型计算结果与理论分析结论较为符合,车-桥耦合模型具有有效性,可信度高。

1.3 风载荷模型

横风风速沿着高度呈梯度变化,气流贴近地面运动时,受摩擦阻力较大,风速降低;反之,气流离地面较高时,部分能量损失较小,风速较大^[2,4]。在附面层之内,选取标准风压,按照 TB 10002.1-2017《铁路桥涵设计基本规范》,取标准高度 z_s 为 20 m,则平均风速沿高度上、下摩擦层分布为

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_{zu} &= \bar{U}_s (z/z_s)^\epsilon, \\ \bar{U}_{zd} &= \bar{U}_s (\lg z - \lg z_0) / (\lg z_s - \lg z_0). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)中: \bar{U}_{zu} , \bar{U}_{zd} 为上、下摩擦层高度 z 处的平均风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ϵ 为地面粗糙指标,取 0.30; \bar{U}_s 为标准高度 z_s 处的平均风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; z_0 取 1.0 m。

风载荷模型,如图 3 所示。图 3 中: $U(t)$ 为风速; U_R 为车辆运行时受到的相对风速; β 为偏航角; E 为箱梁高度; B 为桥面宽度; H 为桥墩截面长度; L 为桥墩截面宽度。

桥墩及箱梁受到攻角 α 及 γ 的自然风力(单位高度),其力系^[3-6]为

$$\left. \begin{aligned} F_{YP} &= 0.5\rho \cdot U(t)^2 C_{YP}(\alpha)L, & F_{DB} &= 0.5\rho \cdot U(t)^2 C_{DB}(\gamma)E, \\ F_{XP} &= 0.5\rho \cdot U(t)^2 C_{XP}(\alpha)H, & F_{LB} &= 0.5\rho \cdot U(t)^2 C_{LB}(\gamma)B, \\ F_{MP} &= 0.5\rho \cdot U(t)^2 C_{MP}(\alpha)H^2, & F_{MB} &= 0.5\rho \cdot U(t)^2 C_{MB}(\gamma)B^2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)中: F_{YP} , F_{XP} , F_{MP} 分别为桥墩受到的纵向、横向风力及扭转力矩; F_{DB} , F_{LB} , F_{MB} 分别为箱梁受到的阻力、抬升风力及扭转力矩; ρ 为空气密度; C_{YP} , C_{XP} , C_{MP} , C_{DB} , C_{LB} , C_{MB} 等空气动力学系数可由文献[10-11]中 $\alpha=90^\circ$, $\gamma=0^\circ$ 时的泰勒级数确定。

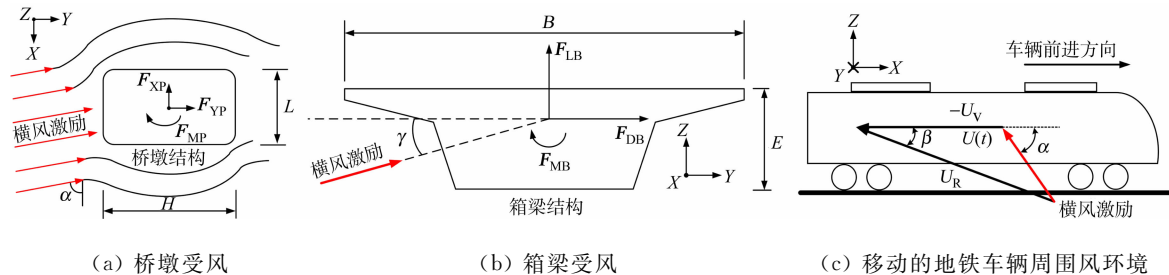


图 3 风载荷模型

Fig. 3 Wind loads model

地铁车辆进入或离开风区,其纵向位置随时间变化。然而,当地铁车辆完全处于风区时,风力和力矩是恒定的。当分析风压中心的变化时,将受风阶段细分为 7 个区间,选取 7 个离散的风压中心,并确定 7 个离散区间的横风压力中心位置。地铁车辆穿越风区具有代表性的 4 个阶段,如图 4 所示。

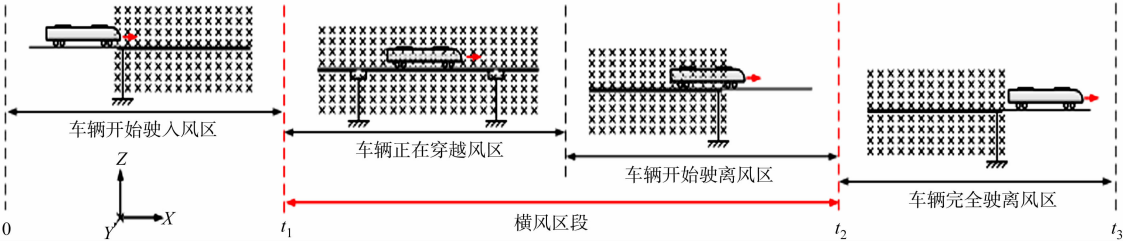


图 4 地铁车辆穿越风区的不同阶段

Fig. 4 Different stages of metro vehicle crossing crosswind zone

7 个阶段的风压中心在行驶方向上的位置可用时变函数 $X_{(t)}$ 替代,即

$$\begin{aligned} X_{(t)} = & \text{step}(\text{time}, 0, d_f, t_4, d_4) + \text{step}(\text{time}, t_4, d_4, t_5, d_5) + \\ & \text{step}(\text{time}, t_5, d_5, t_1, d_c) + \text{step}(\text{time}, t_1, d_c, t_2, d_c) + \\ & \text{step}(\text{time}, t_2, d_c, t_6, d_6) + \text{step}(\text{time}, t_6, d_6, t_7, d_7) + \\ & \text{step}(\text{time}, t_7, d_7, t_3, d_r). \end{aligned} \tag{4}$$

式(4)中: t_1 为车辆完全进入风区的时刻; t_2 为车辆开始驶离分区的时刻; t_3 为车辆完全离开横风区的时刻; t_4, t_5 分别为地铁车辆前、后转向架驶入横风区的时刻; t_6, t_7 分别为驶离时刻; d_3, d_4, d_5, d_6, d_7 分别为 t_3, t_4, t_5, t_6, t_7 时刻对应的风压中心在车辆行驶方向上的位置; d_f, d_r, d_c 分别为车头、车尾、车体质心在行驶方向上的位置。

相对风速 U_R 和偏航角 β 为

$$U_R = \sqrt{U(t)^2 + U_v^2 + 2U(t)U_v \cos \alpha}, \quad \beta = \arctan[U(t) \sin \alpha / (U(t) \cos \alpha + U_v)]. \tag{5}$$

车辆通过风区时的风力 F_{wv} 和力矩 M_{wv} (空气动力学系数由风洞试验拟合得到^[12])为

$$F_{wv}(t) = \begin{cases} \Delta T_1 \cdot F_{wv0}, & t \in (0, t_1), \\ F_{wv0}, & t \in (t_1, t_2), \\ \Delta T_2 \cdot F_{wv0}, & t \in (t_2, t_3), \end{cases} \quad M_{wv}(t) = \begin{cases} \Delta T_1^2 \cdot M_{wv0}, & t \in (0, t_1), \\ 0, & t \in (t_1, t_2), \\ -\Delta T_2^2 \cdot M_{wv0}, & t \in (t_2, t_3). \end{cases} \tag{6}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_1 &= \frac{t(t-2t_5)}{2t_1(t_1-2t_5)} + \frac{t(t-2t_4)}{2t_1(t_1-2t_4)}, \\ \Delta T_2 &= \frac{(t-t_3)(t+t_3-2t_7)}{2(t_2-t_3)(t_2+t_3-2t_7)} + \frac{(t-t_3)(t+t_3-2t_6)}{2(t_2-t_3)(t_2+t_3-2t_6)}, \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

$$F_{wv0} = 0.5 \rho S_v C_F U_R(t)^2, \quad M_{wv0} = 0.5 \rho S_v d_i C_M U_R(t)^2, \tag{8}$$

$$C_F = -0.106 \ 2 + 5.053 \ 5 \beta + 2.457 \ 8 \beta^2, \quad C_M = -0.334 \ 2 + 12.432 \ 9 \beta - 10.018 \ 6 \beta^2. \tag{9}$$

式(8)中: S_v 为车辆侧面受风面积; d_i 为不同阶段风压中心与车辆质心的距离。

2 评价指标与计算参数

2.1 地铁车-桥系统安全评价指标

地铁车辆在高架上运行需保证安全及稳定,各子系统之间的振动传递应最小化,以减少车辆及桥梁的疲劳损伤。基于此,运行车辆通过高架时的安全性、稳定性及桥梁的动力学响应是不可忽视的 3 个方面。选取的地铁车-桥系统安全评价指标^[13],如表 1 所示。表 1 中: Q 为轮轨横向力; Q/P 为脱轨系数; D 为倾覆系数; g 为重力加速度,取 $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

2.2 计算参数的选取

高墩高架为四墩三跨简支梁桥(图 1(a)),桥墩的高度为 50 m,其横截面为 $3.8 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$;箱梁长为 30 m,宽为 8.8 m,高为 1.8 m;标准高度($z=20 \text{ m}$)的平均风速取 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风攻角 $\alpha=90^\circ, \gamma=0^\circ$,

表 1 地铁车-桥系统安全评价指标

Tab. 1 Safety evaluation indexes for metro vehicle-bridge system

项目	指标	阈值
车辆运行 稳定性	车体横向 Sperling 指标	2.75
	车体横向加速度	0.2g
车辆运行 安全性	Q/kN	50
	Q/P	0.8
	$\Delta P/\bar{P}$	0.6
	D	0.8
	跨中横向位移/mm	7.5
桥梁动 力学响应	跨中横向加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	1.3
	墩顶横向位移/mm	8.5
	墩顶横向加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	—

过桥最高车速取 $100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. 风速 U_s 加载过程样本,以及车体受风力和力矩的变化曲线,如图 5 所示.

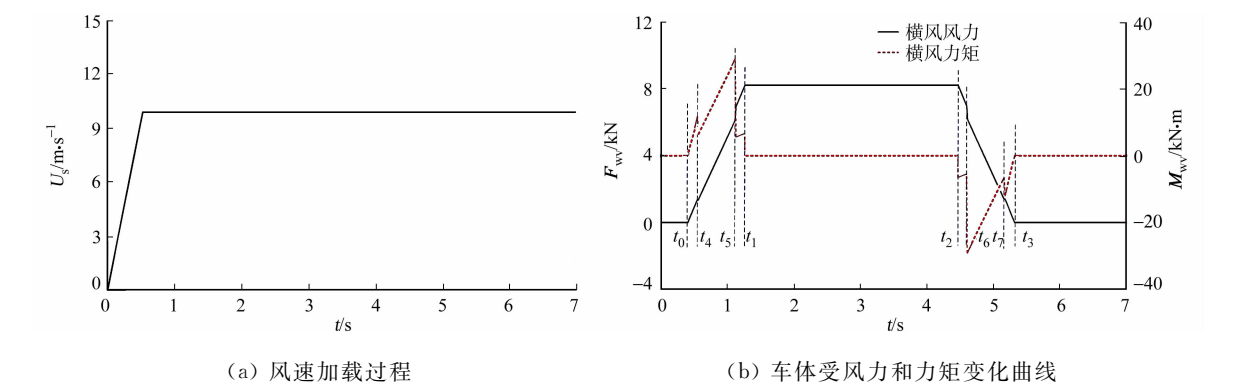


图 5 横风载荷样本
Fig. 5 Samples of wind loads

基于重庆地铁的实际情况,采用 B 型地铁车辆,其动力学参数,如表 2 所示. 同时,考虑德国低速谱轨道不平顺,其不平顺样本,如图 6 所示. 图 6 中: l 为沿轨道方向的长度.

表 2 B 型地铁车辆动力学参数
Tab. 2 Dynamic parameters of type-B metro vehicle

项目	数值	项目	数值	项目	数值	项目	数值
车体质量/t	35.443	滚动圆直径/mm	840	车辆高度/mm	3 695	一系悬挂垂向刚度/ $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	0.34
构架质量/t	4.007	轮距/mm	2 300	质量高度/mm	1 929	一系悬挂水平刚度/ $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	0.22
轮对质量/t	1.878	轴距/mm	12 600	车体宽度/mm	2 800	二系悬挂垂向刚度/ $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	0.34
车辆长度/mm	20 020	横向跨度/mm	1 493	轨距/mm	1 345	二系悬挂水平刚度/ $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	0.15

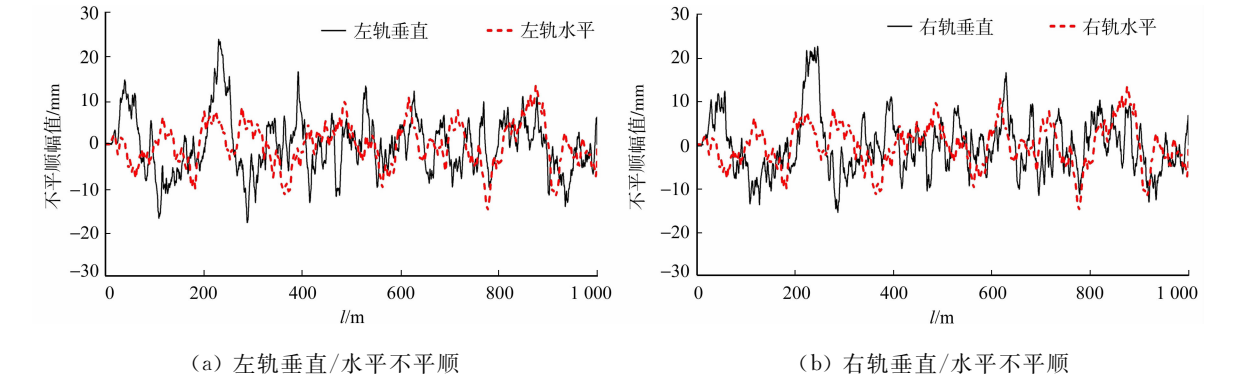


图 6 德国低速轨道谱样本
Fig. 6 Spectrum samples of German low-speed track

3 高架上运行的地铁车辆风致安全性分析

3.1 车辆直线运行受风理论分析

车辆在高架直线运行时,横风作用造成车辆的一侧车轮减载,另一侧车轮增载. 如果各种横向力在最不利组合作用下,车辆一侧车轮与钢轨之间的垂向作用力减少到零时,车辆有倾覆的危险. 当列车处于高架段时,横风也会引起桥面和桥墩振动,这将导致列车运行稳定性更差.

车辆受风分析,如图 7 所示. 图 7 中: $z_{\text{COG},0}$ 为簧下质量质心的坐标值; $z_{\text{COG},1}$ 为一系悬挂质量质心的坐标值; $z_{\text{COG},2}$ 为二系悬挂质量质心的坐标值; y_2 为车体横移量; y_1 为构架横移量. 车辆在直线线路上运行时,受到横风作用,轮对将向左贴靠于钢轨接触点 a . 此时,左侧轮为增载侧,右轮为减载侧,车辆有

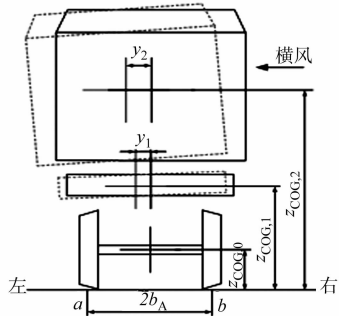


图 7 车辆受风分析
Fig. 7 Analysis of vehicle subjected to crosswind

向左侧倾覆的危险. a 点处力矩平衡为

$$-m_0gb_A - m_1g(b_A - |y_1|) - m_2g(b_A - |y_2|) + 4(Q_{i,1} + Q_{i,2})b_A + M_{x,lee} = 0,$$
 (10)

$$(m_0 + m_1 + m_2)g = 8Q_0, \quad (m_1y_1 + m_2y_2)g = M_{COG},$$
 (11)

$$mgb_A = M_m, \quad D = \Delta Q/Q_0 = 1 - (Q_{i,1} + Q_{i,2})/2Q_0.$$
 (12)

式(10)~(12)中: b_A 为轮间跨距的一半; Q_0 为静态轮重; $Q_{i,1}, Q_{i,2}$ 为同一转向架减载侧前、后轮的动态轮重; M_m 为回复力矩; D 为倾覆系数; m 为车辆总质量; m_0 为簧下质量; m_1 为一系二系间质量; m_2 为二系簧上质量; $M_{x,lee}$ 为临界气动力矩; M_{COG} 为由 m_1, m_2 横向位移引起的力矩.

此时,由式(10)~(12)在 a 点的平衡方程为

$$DM_m + M_{COG} - M_{x,lee} = 0.$$
 (13)

3.2 加载横风激励后车-桥系统的动力响应

横风作用于桥墩和桥面,引起整个桥梁的水平 and 垂直变形,桥墩越高,桥面风速越快,桥面变形越大,这将导致桥梁构件过早疲劳,严重时甚至造成桥梁破坏,影响交通安全.同时,横风作用于车身,直接引起车体振动,当风速过快时,可能引起车辆脱轨或倾覆^[1,4-6].加载横风后的响应变化,如图 8 所示.

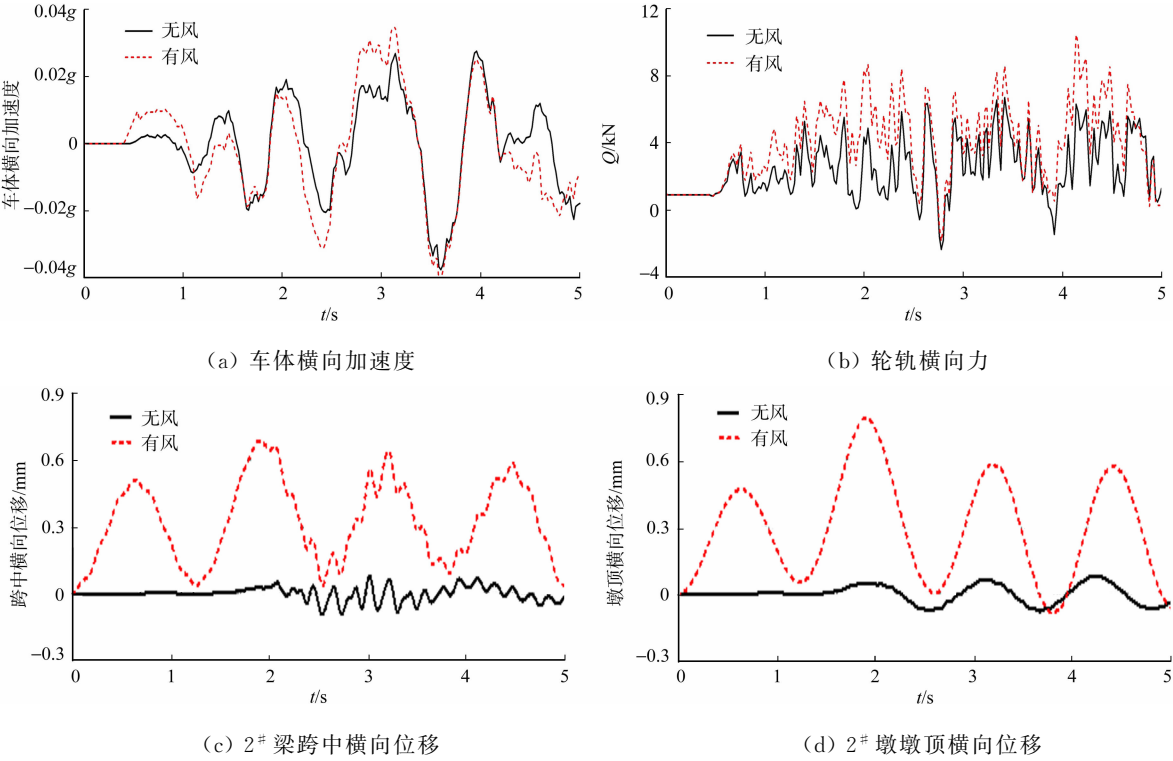


图 8 加载横风后的响应变化

Fig. 8 Changes of response after loading crosswind

由图 8 可知:当车速为 $100\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$,标准高度风速为 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,风攻角 $\alpha=90^\circ, \gamma=0^\circ$,其他参数不变的条件下,横风加载后,车-桥动力系统的响应大大提高;车体、轮轨、梁、墩在横风荷载作用下的动态评价指标值明显增加.值得注意的是,在车辆驶入风区及驶离风区阶段,车身由于进入和离开横风区的过程中风压中心变化及风力大小变化,而受到强大的扭转作用,振动又通过轮轨关系和桥轨关系传递到梁和墩上.加载横风后,各指标的振幅均大于无风条件,说明与无风工况相比,横风对动力系统响应较大,对地铁车辆运行安全性的影响较大.

3.3 车速对横风激励的车-桥系统运行安全性的影响

为了探讨车速对运行安全性的影响,采用与节 2.2 相同的计算参数.车速设置为 $50\sim100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的梯度,标准高度风速为 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其他参数不变.风-车-桥系统响应随车速的变化情况,如图 9 所示.

由图 9 可知:随着车速的增加,车身横向稳定性指标、轮轨横向安全性能指标和桥梁横向动力性能指标有所增大,但车身和桥梁振动的评价指标存在一些异常,特别是当车速为 $70, 80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时.运行的车辆对桥梁结构而言是移动载荷,载荷频率随车速和载荷的变化而变化^[5],而车-桥系统自振频率与

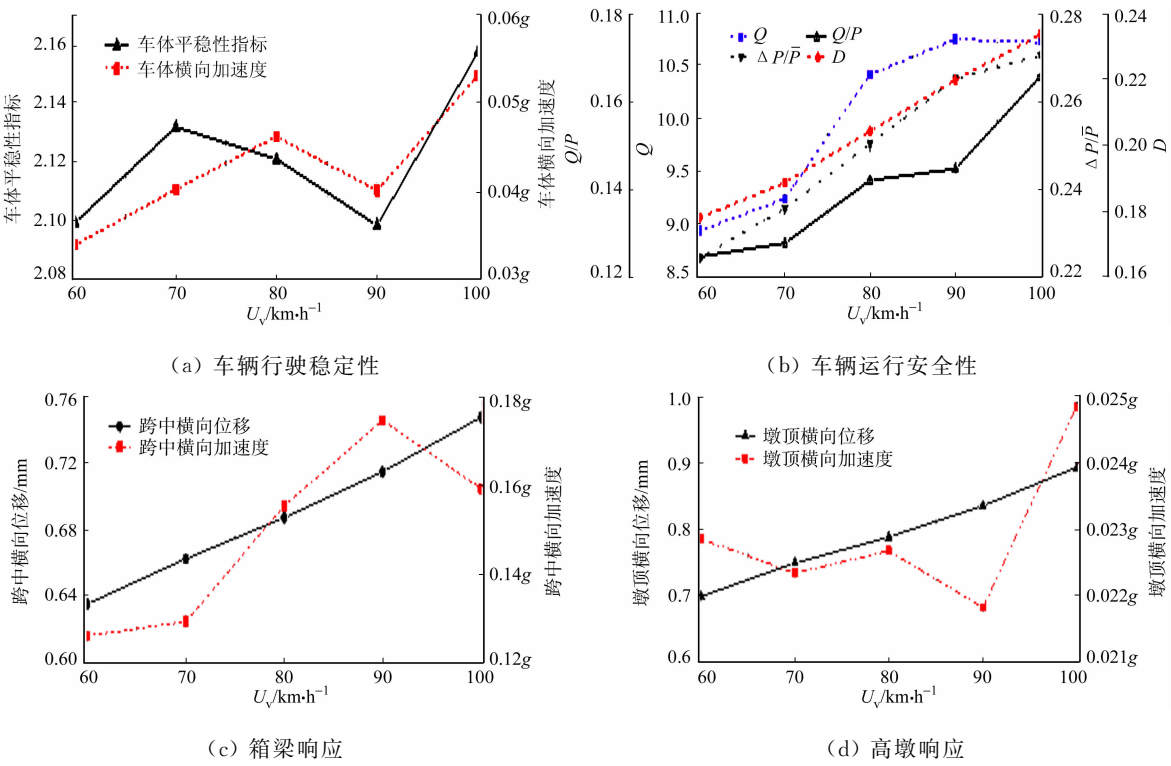


图 9 风-车-桥系统响应随车速的变化情况

Fig. 9 Response changes situation of wind-vehicle-bridge system with vehicle speed

载荷加载频率相同时,会产生共振,导致各结构之间剧烈振动,动力指标发生剧烈变化.假设车辆以速度 U_v 通过桥梁,则地铁车辆对桥施加频率 $f_v=U_v/L$ 的周期性荷载.同时,车速为 70,80,100 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,相应的荷载频率分别为 0.648,0.833,0.926 Hz.同时,地铁车辆扭转自振频率为 0.648 Hz,高墩横摆自振频率为 0.783 Hz,梁水平摆动自振频率为 0.961 Hz.这些加载频率接近于自振频率,从而产生共振,各结构互相传递剧烈振动,指标数值急剧增加^[14].

3.4 风速对车辆运行安全性的影响及其相应阈值

为探索风速的影响和相应的阈值,车辆速度取 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,标准高度风速为 $5 \sim 28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[15-16],风攻角 $\alpha=90^\circ$, $\gamma=0^\circ$,其他参数不变.由计算结果可知:车体横向 Sperling 评价指标, $\Delta P/\bar{P}$ 和 D 超过安全限值,其他指标则未达到安全限度,并且其规律性一致(随风速增大而增大).因此,文中不再赘述.车-桥系统的最大响应随风速的变化情况,如图 10 所示.

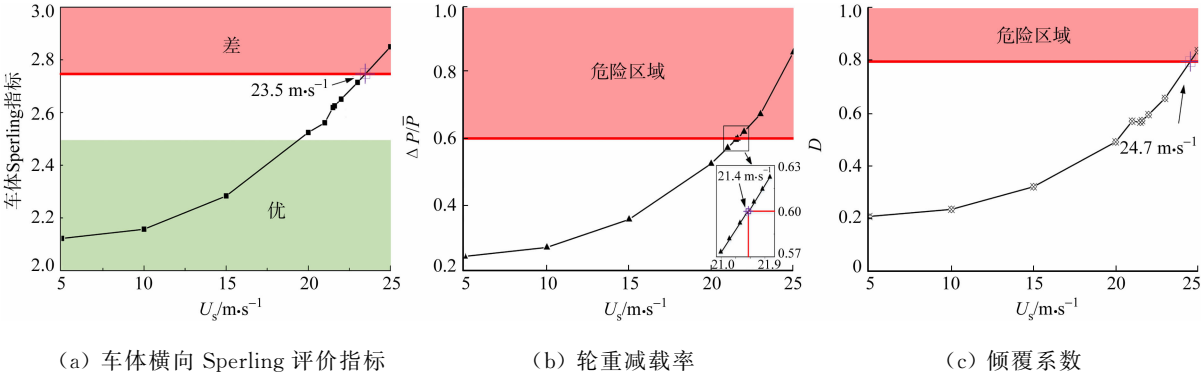


图 10 系统相应随风速的变化情况

Fig. 10 Situation of changes of dynamic system with wind speed

由图 10 可知:高墩高架运行的地铁车辆的响应峰值随着风速的增加而不同程度地增加;横风作用的影响比车速更加明显,在穿越横风区的过程中,车辆受到强大的扭转作用,振动通过轮轨关系和桥轨关系传递到梁和墩上,而横风直接对桥梁结构的影响又会传递到车体,横风风速的增加会迅速增加风力及力矩,车辆运行稳定性迅速变差.此外,车辆比桥梁对横风作用更为敏感,桥梁响应未达到限值时,

车辆已有部分指标超标. 车体横向 Sperling 评价指标(2.75), P/\bar{P} (0.6)和 D (0.8)的限制临界风速分别为 23.5, 21.4, 24.7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. 即当标准高度风速达到 21.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 已有评价指标超标, 说明此时已无法保证车辆以最高时速运行, 应采用风屏障等措施以保障安全.

4 结论

- 1) 考虑风区条件和高墩高架条件对保证横风扰动下的地铁车-桥系统安全运行至关重要.
- 2) 横风会引起车、梁及墩的剧烈振动, 尤其是高墩稳定性较差, 加剧车辆运行的不稳定.
- 3) 车-桥系统响应随风速显著增加, 随车速出现波动; 当标准高度风速达到 21.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 已无法保证车辆以最高时速运行.

参考文献:

- [1] CAI C S, HU Jiexuan, CHEN Suren, *et al.* A coupled wind-vehicle-bridge system and its applications: A review[J]. Wind and Structures, 2015, 20(2): 117-142. DOI: 10.12989/was.2015.20.2.117.
- [2] OLMOS J M, ASTIZ M Á. Improvement of the lateral dynamic response of a high pier viaduct under turbulent wind during the high-speed train travel[J]. Engineering Structures, 2018, 65: 368-385. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.03.054.
- [3] XIANG Huoyue, LI Yongle, CHEN Suren, *et al.* Wind loads of moving vehicle on bridge with solid wind barrier[J]. Engineering Structures, 2018, 65: 188-196. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.11.009.
- [4] LI Xiaozhen, WANG Ming, XIAO Jun, *et al.* Experimental study on aerodynamic characteristics of high-speed train on a truss bridge: A moving model test[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 179: 26-38. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.05.012.
- [5] NIU Jiqiang, ZHOU Dan, LIU Tanghong, *et al.* Numerical simulation of aerodynamic performance of a couple multiple units high-speed train[J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(5): 1-23. DOI: 10.1080/00423114.2016.1277769.
- [6] LI Yongle, XIAN Huoyue, WANG Bin, *et al.* Dynamic analysis of wind-vehicle-bridge coupling system during the meeting of two trains[J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(10): 1663-1670. DOI: 10.1260/1369-4332.16.10.1663.
- [7] 张云飞, 李军. 轨道客运车辆山区小半径曲线通过性能分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 343-348. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201711036.
- [8] 张云飞, 李军. 轮径差对轨道客车山区小半径曲线通过的影响[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 489-495. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201803037.
- [9] 金曼. 高架轨道交通引起的车桥振动及控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [10] 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(4): 83-87. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2018.04.020.
- [11] British Standards Institution. BSI standards limited railway applications: Aerodynamics-part 6: BS EN 14067-6: 2018[S]. London: Standards Policy and Strategy Committee, 2018.
- [12] CHELI F R, CORRADI R, SABBIONI E, *et al.* Wind tunnel tests on heavy road vehicles: Crosswind induced loads: Part 1&Part 2[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99(10): 1011-1024. DOI: 10.1016/j.jweia.2011.07.007.
- [13] 北京市规划委员会. 地铁设计规范: GB/T 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [14] 于梦阁, 张继业, 张卫华. 桥梁上高速列车的强横风运行安全性[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 104-111. DOI: 10.3901/JME.2012.18.104.
- [15] 豆丁网. 重庆风速与风向[EB/OL]. [2016-01-20]. <https://www.docin.com/p-1434128238.html>20161.
- [16] 百度文库. 重庆风速与风向[EB/OL]. [2005-07-21]. <https://wenku.baidu.com/view/98ca3cbf31126edb6e1a104a.html>2015.7.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 崔长彩)