

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201811058



# 山区地铁车辆曲线通过时的 风致安全性分析

张云飞<sup>1</sup>, 李军<sup>1,2</sup>

(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:** 基于山区城市地铁线路条件, 建立中国帽阵风地铁车辆模型, 选取计算参数并确定评价指标. 对横风激励下的车辆受力进行理论推导及计算分析, 得出横风激励下地铁车辆安全运行的曲线半径和最高车速的限定条件. 结果表明: 过超高时, 外侧横风下车辆易倾覆; 欠超高时, 内侧横风车辆易倾覆; 圆曲线半径增大有利于提高安全性, 预设条件下圆曲线半径不能小于 770 m; 车速的增加会使安全性变差, 预设条件下车速不得超过  $48 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , 以保障运行安全.

**关键词:** 横风; 地铁线路; 山区城市; 曲线通过性能; 运行安全

**中图分类号:** U 27      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2019)03-0291-07

## Safety Problems Analysis of Metro Vehicle Induced by Crosswind While Passing Curved Section in Mountain City

ZHANG Yunfei<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1,2</sup>

(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:** Based on the metro lines conditions of mountain city, the dynamic model of the hat gust vehicle system was established, in which the calculation parameters were selected and the evaluation indices were determined. The theoretical derivation and calculation analysis of the vehicle under crosswind were finished, and the radius of the curve and the limit condition of the maximum speed of the metro vehicle under crosswind excitation were calculated. The results indicate that the vehicle is easy to overturn under outside crosswind when the situation is in surplus superelevation, but the vehicle is easy to overturn under inside crosswind when the situation is in deficient superelevation. The increase of the radius of circle curve is helpful to improve the safety, and the radius of circular curve cannot be less than 770 m. The increase of speed will make the safety worse, and the vehicle speed shall not exceed  $48 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  to guarantee the running safety.

**Keywords:** crosswind; metro lines; mountain city; curve passing performances; running safety

重庆是中国西南典型的山城, 由于复杂崎岖的地形, 其地铁线路往往要跨越江河及山谷, 与平原城

**收稿日期:** 2018-11-21

**通信作者:** 李军(1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事发动机排放与控制、新能源汽车及城市轨道交通车辆的研究. E-mail: cqlleejun@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)

市的地下线路相比,更容易遭受横风袭扰,导致地铁车辆不稳定、不安全运行<sup>[1]</sup>. 目前,针对横风激扰,很多专家论述了列车空气动力学研究方法<sup>[1]</sup>、空气动力特性<sup>[2]</sup>、形成机理及规律<sup>[3]</sup>、分析理论与工程应用<sup>[4]</sup>,并在列车空气动力学与系统动力学相结合的基础上,研究强侧风对高速列车运行安全的影响<sup>[5-10]</sup>. 然而,这些文献多集中于高铁而非地铁,多关注普通线路而非小半径曲线. 基于此,本文建立中国帽阵风地铁车辆模型,对横风激扰下的车辆受力进行理论推导及计算分析,研究圆曲线半径及车辆行驶速度对运行安全性的影响,得出横风激扰下地铁车辆安全运行的曲线半径和最高车速的限定条件.

1 风车动力学模型

1.1 地铁车辆动力学模型

基于山区城市的实际线路条件,结合实际需求对车辆轨道耦合动力学模型(图 1)做以下两方面处理.

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 个轮对及 8 个轴箱组成,均为刚体,且有伸缩、横摆、浮沉 3 个平动,以及侧滚、点头和摇头 3 个转动,而每个轴箱都只有绕轮轴的转动,整车共 50 个自由度. 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<sup>[1,5]</sup>.

2) 轨道方面. 长枕埋式无砟轨道,其轨枕与混凝土道床完全联接在一起,轨下基础质量很大,道床与底座间无弹性,轨道弹性主要由轨下胶垫提供,其振动主要体现在钢轨的振动上<sup>[3]</sup>.

基于此,横风激扰下的车辆轨道耦合模型的动力学方程为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{X}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{X}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{X}_v &= \mathbf{F}_{vt} + \mathbf{F}_{wv}, \\ \mathbf{M}_t \ddot{\mathbf{u}}_t + \mathbf{C}_t \dot{\mathbf{u}}_t + \mathbf{K}_t \mathbf{u}_t &= \mathbf{F}_{tv}. \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

式(1)中: $\mathbf{M}_v(\mathbf{M}_t)$ 、 $\mathbf{C}_v(\mathbf{C}_t)$ 、 $\mathbf{K}_v(\mathbf{K}_t)$ 分别为车辆(轨道)的质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{X}}_v(\ddot{\mathbf{u}})$ 、 $\dot{\mathbf{X}}_v(\dot{\mathbf{u}}_t)$ 、 $\mathbf{X}_v(\mathbf{u}_t)$ 分别为车辆(轨道)的加速度矢量、速度矢量和位移矢量; $\mathbf{F}_{vt}$ 、 $\mathbf{F}_{tv}$ 分别为车辆对轨道的作用力和轨道对车辆的作用力; $\mathbf{F}_{wv}$ 为车辆所受风载荷.

1.2 动态阵风模型

采用欧洲技术通用标准(TSI)提出的中国帽风动态阵风近似模型模拟动态风场<sup>[11]</sup>,将动态风速历程用双指数函数描述,其平均风速  $U_{\text{mean}}$  与最大风速  $U_{\text{max}}$  比值为 1.694 6,则功率谱密度函数(频率限制在  $n=[1/300\text{ Hz}, 1\text{ Hz}]$ )为

$$S_u(n) = 22.983\ 9mU_{\text{mean}}/[1 + 652\ 107m^2(n/U_{\text{mean}})^2]^{5/6}. \tag{2}$$

阵风的频率特性  $f_{\text{gust}}$  为

$$f_{\text{gust}} = 0.239\ 091 \cdot \left[ \int_{1/300}^1 n^2 S_u(n) dn / \int_{1/300}^1 S_u(n) dn \right]^{0.5}. \tag{3}$$

垂直于吹向车体的加速阵风风速  $G_{w-90}$  为

$$G_{w-90} = U_{\text{mean}} \cdot 0.694\ 6 \cdot \exp(\pm 16f_{\text{gust}}\tilde{x}/U_{\text{mean}}). \tag{4}$$

式(4)中: $\tilde{x}$  为指向阵风最大幅值位置的空间距离.

中国帽阵风模型的动态风速变化可由分段函数表示,即

$$U(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < t_1, \\ U_{\text{mean}}(t - t_1)/(t_2 - t_1), & t_1 \leq t < t_2, \\ U_{\text{mean}}, & t_2 \leq t < t_3, \\ \text{Mirrored } U_{\text{mean}}(1 + 0.694\ 6 \cdot \exp(-16f_{\text{gust}}\tilde{x}/U_{\text{mean}})), & t_3 \leq t < t_4, \\ U_{\text{mean}}(1 + 0.694\ 6 \cdot \exp(-16f_{\text{gust}}\tilde{x}/U_{\text{mean}})), & t_4 \leq t < t_5, \\ U_{\text{mean}}, & t_5 \leq t < t_6, \\ U_{\text{mean}}(t_7 - t)/(t_7 - t_6), & t_6 \leq t \leq t_7. \end{cases} \tag{5}$$

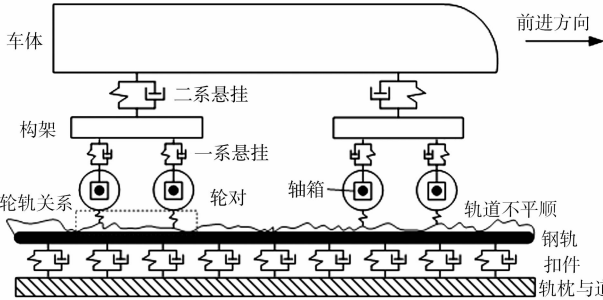


图 1 车辆-轨道耦合模型的动力学

Fig. 1 Dynamic model of vehicle-track coupled system

当最大风速  $U_{\max}$  为  $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 车速  $v_v$  为  $60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 风速时程样本曲线<sup>[11]</sup>, 如图 2 所示。

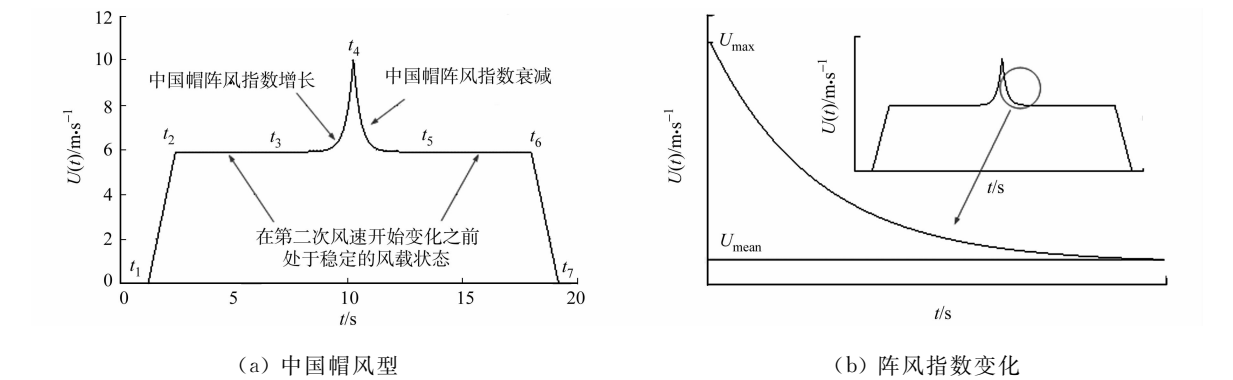


图 2 中国帽阵风时程样本  
Fig. 2 Samples of Chinese hat gust

1.3 气动载荷模型

移动的地铁车辆周围风环境, 如图 3 所示。图 3 中: 作用于地铁车辆的横风力系主要由阻力  $D_v$ 、升力  $L_v$  及扭转力矩  $T_v$  组成<sup>[3]</sup>。

横风激励下, 当车辆以匀速  $v_v$  运行时, 车辆受到攻角  $\alpha$  的自然风  $v_w$ , 横风与车辆移动合成的相对速度  $v_r$  及偏航角  $\beta$  为

$$v_r = \sqrt{v_w^2 + v_v^2} = \sqrt{[(U+u)^2 + w^2] + v_v^2}, \quad (6)$$

$$\beta = \arctan(\sqrt{[(U+u)^2 + w^2] + v_v^2}). \quad (7)$$

作用于移动车辆车体上的横风载荷力系为

$$\begin{bmatrix} D_v(t) \\ L_v(t) \\ T_v(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \rho A (U(t)^2 + v_v^2) \cdot \begin{bmatrix} C_D(\beta) \\ C_L(\beta) \\ HC_T(\beta) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

车辆气动载荷系数  $C_D, C_L$  及  $C_T$  由风洞试验拟合得到, 有

$$\left. \begin{aligned} C_D &= -0.106\,2 + 5.053\,5\beta + 2.457\,8\beta^2, \\ C_L &= -0.719\,4 + 2.492\,0\beta + 7.489\,3\beta^2, \\ C_T &= -0.017\,8 + 0.841\,1\beta + 0.066\,7\beta^2. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

2 横风激励下的车辆曲线通过基本特性

2.1 计算参数的选取

曲线段线路条件设置<sup>[12]</sup>: 曲线组成(缓、圆、缓)为  $50\text{ m}+200\text{ m}+50\text{ m}$ ; 圆曲线半径为  $300\sim1\,000\text{ m}$ ; 行车速度为  $1\sim100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ; 外轨超高为  $120\text{ mm}$ . 选取的 B 型地铁车辆的动力学模型参数, 如表 1 所示。

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

基于重庆地铁线路实际<sup>[13-14]</sup>, 采用德国低速轨道谱, 其左轨及右轨的垂直或水平不平顺沿线路长度变化样本, 如图 4 所示。图 4 中:  $l$  为轨道长度。

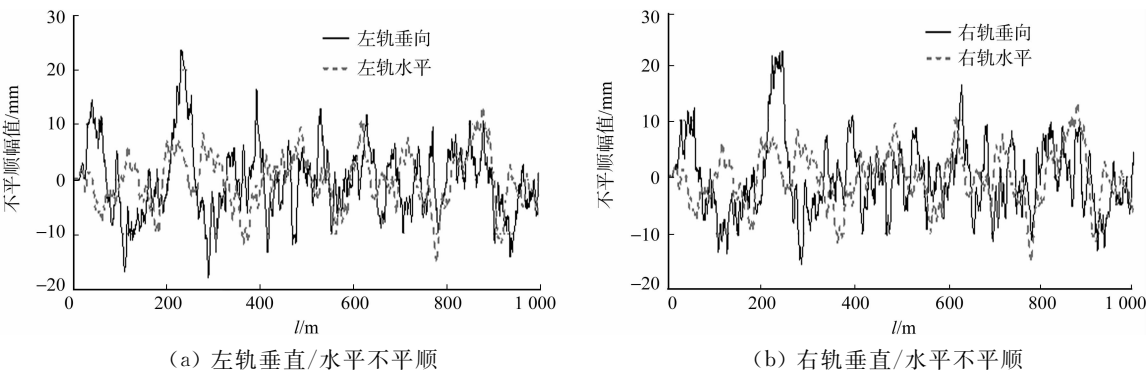


图 4 德国低速轨道谱样本  
Fig. 4 German low-speed track spectrum

2.2 横风作用下车辆行驶状态的理论推导

在横风力和未平衡作用力下造成车辆一侧车轮减载,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<sup>[13-14]</sup>.考虑车辆过曲线时,未平衡的加速度 $a_q$ 对地铁车辆曲线通过的影响,有

$$a_q = v_v^2/R - g \cdot h/(2b). \tag{10}$$

式(10)中: $v_v$ 为车辆行驶速度; $R$ 为圆曲线半径; $h$ 为线路超高; $b$ 为左右轮轨接触点间距的一半; $g$ 为重力加速度.

由式(10)可知:当 $a_q < 0$ 时,线路超高偏大,为过超高;当 $a_q > 0$ 时,线路超高偏小,为欠超高.此时,未平衡的加速度使车辆受未平衡力的作用,相对轮轨接触点产生未平衡力矩 $M$ ,即 $M = m \cdot a_q \cdot z$ .其中: $m$ 为车辆整车质量; $z$ 为车辆质心坐标值.

受力分析分为无风、曲线外侧横风及曲线内侧横风 3 种情况进行描述,如图 5 所示.图 5 中: $\theta$ 为超高抬高的角度.由图 5(a)可知:没有横风扰动时,车辆通过曲线时,由于外轨超高的存在,其提供的向心力在一定程度上抵消通过曲线时引起的离心力;当超高值恰好抵消离心作用时, $F_{离} = F_{向}$ ,此时,车辆受力平衡,左右车轮受力均等,不存在增载或减载情况.由图 5(b)可知:车辆通过曲线时,受到来自曲线外(左)侧的横风,横风相对轮轨接触点产生倾覆力矩 $M_{xl}$ ,此时,整车受横风作用向内轨一侧偏移,轮对将贴靠与钢轨接触;由于外(左)侧受风,导致内(右)侧轮对增载,而外(左)侧轮对减载,整车有向内(右)侧倾覆的危险.由图 5(c)可知:当车辆内(右)侧的横风时,产生倾覆力矩 $M_{xr}$ ,外(左)侧轮对增载,而内(右)侧轮对减载,则整车有向外(左)侧倾覆的危险.此时,力矩平衡方程为

$$\frac{1}{f_m} \cdot f_{\Delta Q} \cdot M_m + M_w - M - M_{xl} = 0, \quad \frac{1}{f_m} \cdot f_{\Delta Q} \cdot M_m + M_w - M - M_{xr} = 0. \tag{11}$$

式(11)中:方法系数 $f_m$ 为 1.2; $f_{\Delta Q}$ 为倾覆系数; $M_m$ 为回复力矩; $M_w$ 为车辆横向位移引起的力矩; $M_{xl}$ , $M_{xr}$ 分别为外(左)侧、内(右)侧横风所引起的倾覆力矩.

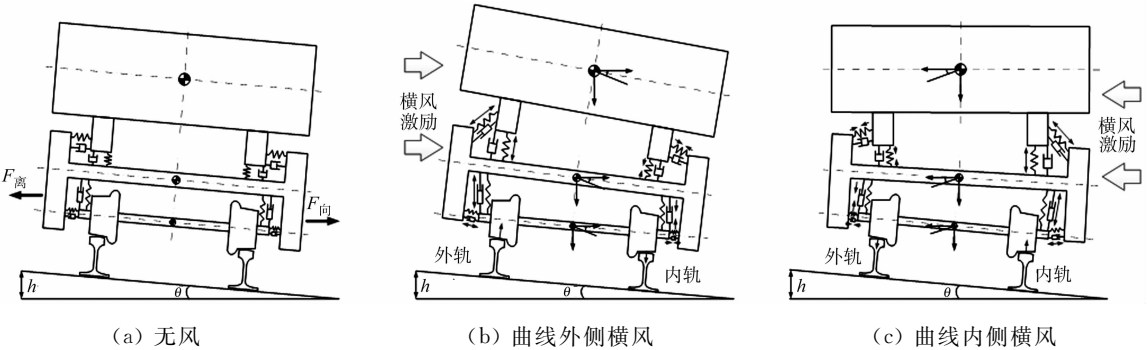


图 5 横风扰动加载情况  
Fig. 5 Situation of crosswind disturbance loading

过超高时,车辆的未平衡力向内轨;欠超高时,未平衡力向外轨.推导可得:车辆受外(左)侧横风欠(过)超高时的力矩平衡方程与车辆受内(右)侧横风过(欠)超高时一致.在过超高状态下,受外侧横风作

用的车辆易倾覆;在欠超高状态下,内侧横风对车辆的倾覆稳定性影响更大.即车辆的未平衡力与横风的方向同向时,车辆易倾覆;车辆的未平衡力和横风方向相反时,车辆不易倾覆.

2.3 横风加载对车辆曲线通过的安全性影响

基于山区城市实际线路条件,研究不同横风加载对车辆曲线通过的安全性影响.根据 GB/T 50157—2013《地铁设计规范》<sup>[14]</sup>,预设车速  $v_v=60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,圆曲线半径取正线最小半径 300 m,对应超高预设 120 mm.此时,加载外侧及内侧横风(根据重庆市主城周围风速记录,取  $U_{\max}=15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )后的动力学系统响应(取前转向架第一轮对左侧轮轨),如图 6 所示.图 6 中: $\Delta P/\bar{P}$  为轮重减载率; $a_y$  为车体横向振动加速度; $Q/P$  为脱轨系数; $Q$  为轮轨横向力.

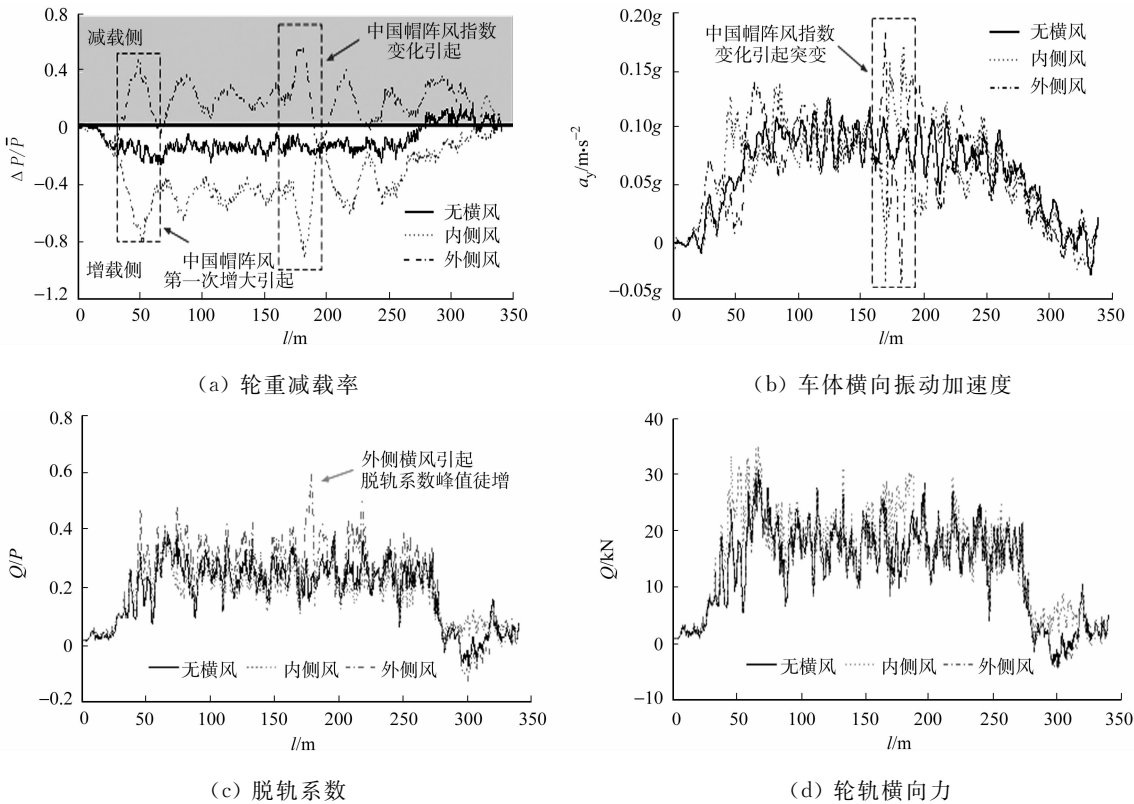


图 6 加载横风后的系统响应

Fig. 6 Responses of system after loading crosswind excitation

由图 6 可知:相较于没有横风的条件,无论来自曲线内侧还是来自外侧的横风都会极大影响车辆曲线通过的安全性,各种指标均有较大幅度的增加.由图 6(a)可知:车辆由于外侧受风,导致左侧轮对减载,车辆有向内侧倾覆的危险,而当车辆受到内侧的横风时,左侧轮对增载,整车有向外侧倾覆的危险.由图 6 还可知:除车辆通过缓和曲线及圆曲线引起指标变化外<sup>[12]</sup>,一些突变是由中国帽阵风引起的,尤其是其指数变化阶段达到最大风力而引起各安全运行指标突变<sup>[15]</sup>.此外,在 4 个指标中,有 3 个指标都是外侧风影响大一些,且过超高状态下,外侧横风作用下的车辆易倾覆.在曲线管理及车速限值的研究中,线路条件基本为过超高,故外侧风为重点考虑的情况.

3 车辆曲线通过时风致安全性的限值管理

3.1 横风激励下安全运行的曲线半径限值

研究不同圆曲线半径下横风对车辆曲线通过的影响,预设车速  $v_v=60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,圆曲线半径  $R$  为 300~1 000 m,对应超高 120 mm<sup>[14]</sup>,最大风速  $U_{\max}=15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,动力学响应峰值随曲线半径的变化情况,如图 7 所示.由图 7 可知:横风激励下的地铁车辆的响应峰值随曲线半径的扩大而不同程度地减小,车辆运行安全性提高;轮重减载率  $\Delta P/\bar{P}$  对横风激励最为敏感,当曲线半径  $R$  为 770 m 时,其达到阈值 0.60,即  $R$  减小到 770 m 时,已有评价指标超标,说明此时已无法保证车辆以预设车速安全运行.

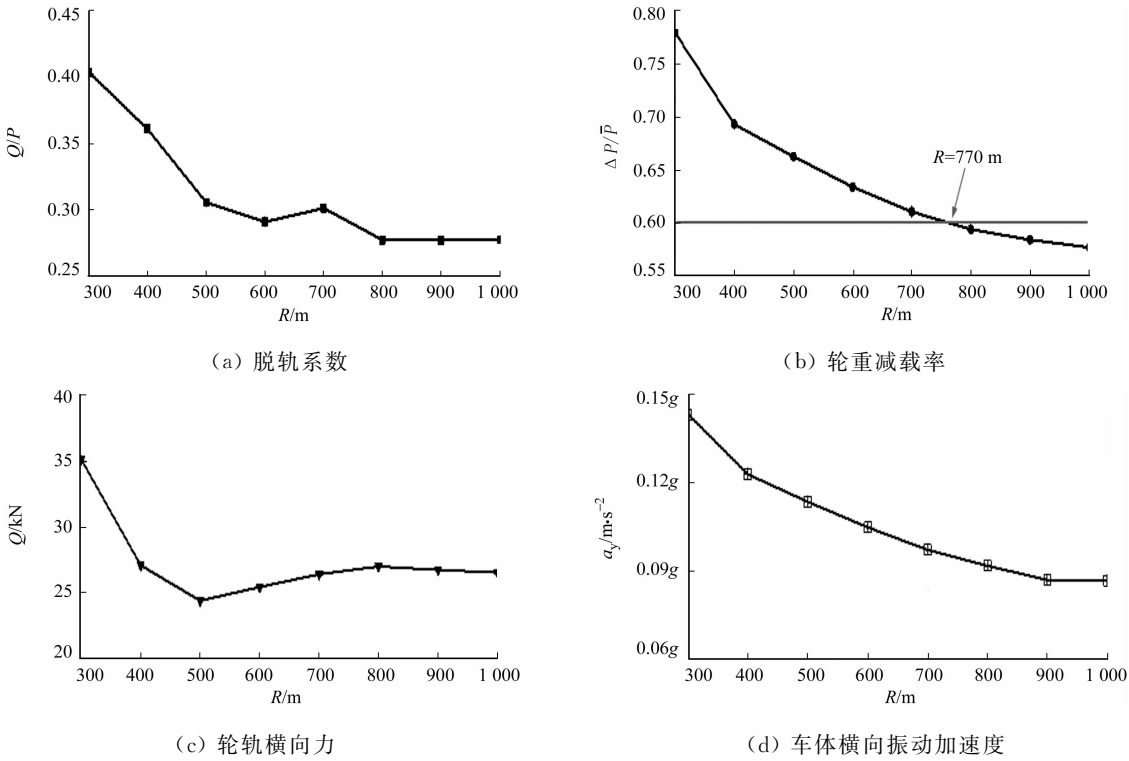


图 7 安全运行指标随半径变化情况

Fig. 7 Change situation of running safety indices with different radii

3.2 横风扰动下安全行驶车辆限速

研究横风扰动下车辆曲线通过的安全限速, 预设车速  $v_v$  为  $1\sim80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , 圆曲线半径选取正线最小半径  $300\text{ m}$ , 对应超高预设  $120\text{ mm}^{[14]}$ . 此时, 加载外侧横风最大风速  $U_{\text{max}}=15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  后的前转向架第一轮对左侧轮轨响应峰值随地铁车速的变化情况, 如图 8 所示.

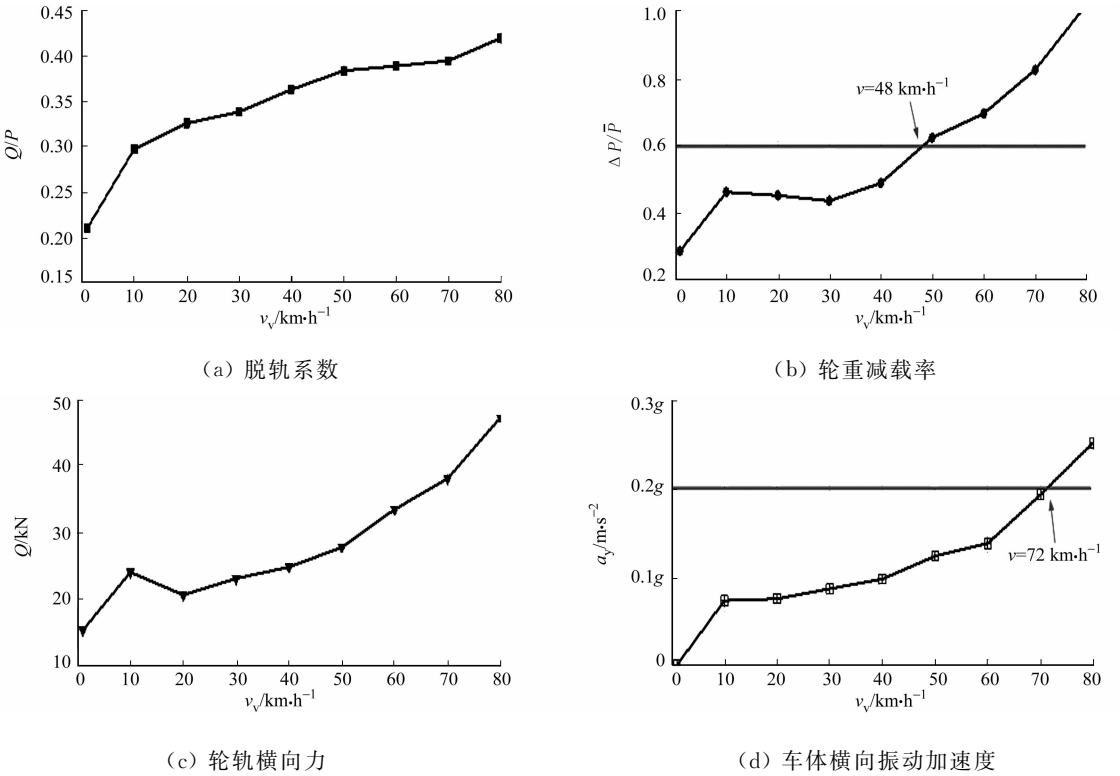


图 8 安全运行指标随车速变化情况

Fig. 8 Change situation of running safety indices with vehicle speed

由图 8 可知:横风扰动下的地铁车辆的响应峰值随车速的增加而增加,安全性变差;轮重减载率  $\Delta P/\overline{P}$ (阈值 0.6)及车体横向振动加速度(阈值  $0.2g$ )对横风扰动最敏感,临界车速分别为  $48\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $72\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,即当预设条件下,车速达到  $48\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  时,已有评价指标超标,车速不得大于该值,以保障安全.

4 结论

- 1) 过超高时,受外侧横风作用下的车辆易倾覆;欠超高时,内侧横风对车辆倾覆稳定性影响更大.
- 2) 横风扰动下的地铁车辆的响应峰值随着曲线半径的扩大而不同程度地减小,车辆运行安全性提高,且曲线半径  $R$  不能小于  $770\text{ m}$ ,否则,无法保证车辆以预设条件安全运行.
- 3) 横风扰动下的车辆响应峰值随车速的增加而增加,安全性变差,在预设条件下,当车速达到  $48\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  时,已有评价指标超标,即车速不得大于该值,以保障安全.

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] 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, 55(5), 2017: 1-23. DOI:10.1080/00423114.2016.1277769.

[3] LI Yongle, XIANG Huoyue, BIN Wang, *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.

[4] 钱科元, 罗赟, 侯跃. 基于标准研究横风下车辆运行安全性简化方法[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(10): 173-177. DOI:10.13238/jissn.1004-2954201710034.

[5] 曹亚博, 凌亮, 邓永权, 等. 强阵风环境下高速列车运行安全性研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(18): 30-37. DOI: 10.3901/JME.2013.18.030.

[6] 于梦阁, 张继业, 张卫华. 平地上高速列车的风致安全特性[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(6): 989-995. DOI: 103969/jissn.0258-2724.201106017.

[7] 彭伟恺, 罗仁, 胡俊波, 等. 不同侧风模型下的高速列车安全性研究[J]. 铁道车辆, 2015, 53(9): 5-10. DOI:10.3969/j.issn.1002-7602.2015.09.002.

[8] 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.

[9] 于梦阁, 张骞, 刘加利, 等. 随机风环境下高速列车运行安全评估研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 245-254. DOI:10.3901/JME.2018.04.245.

[10] 郗艳红, 毛军, 高亮, 等. 横风作用下高速列车安全运行速度限值的研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(6): 8-14. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.201.06.002.

[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] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 毛军, 郗艳红, 高亮, 等. 横风作用下高速列车气动阻力[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(11): 4059-4067.

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 崔长彩)