

阵风下地铁列车曲线通过安全性研究*

谢小山 王为林 陈彦恒

(郑州铁路职业技术学院铁道工程学院, 451460, 郑州//第一作者, 讲师)

摘要 基于山地环境下城市轨道交通线路实际,建立了地铁列车曲线通过动力学模型及阵风载荷模型,并确定了列车运行安全性评价指标。研究了阵风下车辆曲线通过基本特性,并计算得出了阵风下地铁列车安全运行的曲线半径及风速安全限值。结果表明,横风载荷均在风攻角为 90° 附近出现了极大值;头车对的阵风影响最为敏感;圆曲线半径增大有利于提高列车运行安全性,在预设条件下,圆曲线半径不能小于 840 m;风速的增加会使列车运行安全性变差,在预设条件下,风速不得超过 17.5 m/s 以保障列车运行安全。

关键词 地铁列车;曲线通过性能;阵风;列车运行安全性

中图分类号 U270.1⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.10.010

Study on Metro Train Safety When Passing through Curved Section under Gust

XIE Xiaoshan, WANG Weilin, CHEN Yanheng

Abstract According to the actual construction of metro lines in mountain city, firstly a dynamic model of metro train-route and a load model for Chinese Hat Gust are established, and the operation safety evaluation index are determined. Then, the basic characteristics of train passing curved section under gust are studied, the curve radius and wind speed safety limits for metro train operating safely under gust are obtained by calculation. The results show that crosswind load reaches the maximum value when the wind attacking angle is around $\alpha = 90^\circ$; the first vehicle is most sensitive to the impact of gust; increasing radius may contribute to safety improvement, and under preset conditions, the radius should be no less than 840 m; increasing wind speed may worsen the safety, and under preset conditions, wind speed should be no more than 17.5 m/s to maintain the safe operation.

Key words metro train; Chinese Hat Gust; curve-passing performance; operation safety

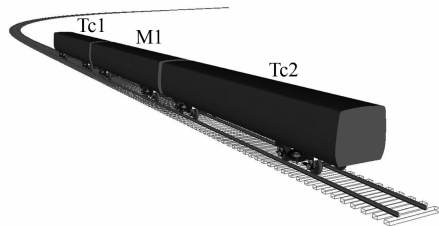
Author's address Railway Engineering College, Zhengzhou Railway Vocational & Technical School, 451460, Zhengzhou, China

我国山地分布广泛,尤其西南地区地势险要,其中重庆、贵阳等就是典型的山地城市,由于复杂崎岖的地形,其地铁线路往往要跨越江河及山谷,与平原城市地下线路相比,更易遭受横风袭扰^[1-2]。目前国内外许多专家就这一问题论述了列车空气动力学研究方法及其特性^[3-4]、形成机理以及工程应用^[5-6],并研究了强侧风下高速列车运行安全^[7-11]。但这些研究多集中在高铁领域,针对地铁小半径曲线线路研究甚少^[1-2]。基于以上原因,本文将研究首阵风下地铁列车小半径曲线安全通过问题。

1 地铁列车曲线通过动力学模型

1.1 地铁列车动力学模型

本文所用地体列车精细模型基于多体动力学计算软件 Universal Mechanism (UM) 进行搭建。车辆选用 B 型地铁列车;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。地铁列车动力学模型如图 1 所示。



注: Tc1、Tc2 代表带司机室的拖车;
M1 代表无受电弓的动力车

图 1 地铁列车动力学模型

1.2 曲线段线路设置

曲线线路由直线段、缓和曲线及圆曲线复合组成。根据缓和曲线和超高公式以及 GB/T 50157—2013《地铁设计规范》^[13-14],前后直线段各取 60 m,

* 河南省 2019 年科技发展计划项目(192102210067)

前后缓和曲线各取 50 m, 圆曲线段取 200 m, 圆曲线半径取 600 m, 超高取 70 mm。列车车速为 60 km/h。

本文中直线和曲线段轨道均采用 CN60 钢轨, 车轮踏面为 LM 型踏面, 轨底坡为 1/40。基于地铁实际线路, 采用德国高干扰轨道不平顺功率谱。

2 中国帽阵风载荷模型

2.1 中国帽阵风模型

欧盟铁路互联互通技术规范 (TSI) 提出采用 “Chinese Hat Gust” (简为 CHG, 中国帽阵风) 动态近似模型来模拟动态风场。该模型将动态风速历程用双指数函数描述, 其平均风速 U_{mean} 与最大风速 U_{max} 关系为^[1,15]:

$$U_{\text{mean}} = U_{\text{max}} / 1.694 \quad (1)$$

其功率谱密度函数 S_u 描述为下式, 且其频率 n 限制在 $[1/300 \text{ Hz}, 1 \text{ Hz}]$ 内。

$$S_u(n) = \frac{22.983 \, 9 \cdot m \cdot U_{\text{mean}}}{[1 + 652 \, 107 \, m^2 \cdot (n/U_{\text{mean}})^2]^{5/6}} \quad (2)$$

式中:

m ——阵风无量纲参数, 参见文献[15]。

阵风的频率特性 f_{gust} 可按如下进行积分:

$$f_{\text{gust}} = 0.24 \times \left[\int_{1/300}^1 n^2 \times S_u(n) \, dn / \int_{1/300}^1 S_u(n) \, dn \right]^{0.5} \quad (3)$$

垂直吹向车体的加速阵风风速 G_{w-90} 描述为:

$$G_{w-90} = 0.694 \, 6 \cdot U_{\text{mean}} \cdot e^{\pm 16 f_{\text{gust}} x / U_{\text{mean}}} \quad (4)$$

式中:

x ——指向阵风最大幅值位置的空间距离。

则 CHG 动态近似模型的动态风速 $U(t)$ 可由分段函数表示:

$$U(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_1 \\ U_{\text{mean}}(t - t_1)/(t_2 - t_1) & t_1 \leq t < t_2 \\ U_{\text{mean}} & t_2 \leq t < t_3 \\ U_{\text{mean, mirrored}}(1 + 0.694 \, 6 e^{\frac{-16 f_{\text{gust}} x}{U_{\text{mean}}}}) & t_3 \leq t < t_4 \\ U_{\text{mean}}(1 + 0.694 \, 6 e^{\frac{-16 f_{\text{gust}} x}{U_{\text{mean}}}}) & t_4 \leq t < t_5 \\ U_{\text{mean}} & t_5 \leq t < t_6 \\ U_{\text{mean}}(t_7 - t)/(t_7 - t_6) & t_6 \leq t \leq t_7 \end{cases} \quad (5)$$

式中:

t ——列车运行时间。

U_{max} 为 10 m/s、车速 U_v 为 60 km/h 时的风速时程样本曲线见图 2。

2.2 气动载荷模型

当车辆以匀速 U_v 运行时, 车辆受到攻角 α 的自然风 U_w 。由速度矢量合成可以计算出车速、风速和风向角的合成风速 U_{vw} 及合成风向角 β ^[1-3]。详情如图 3 所示。

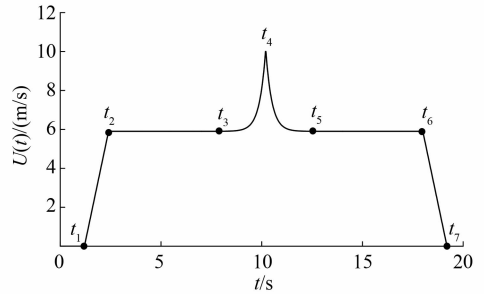


图 2 CHG 时程样本

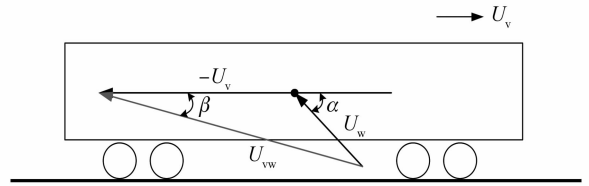


图 3 风速与车速矢量图

则横风与车辆移动合成的相对速度 U_{vw} 及偏航角 β 可描述为^[1]:

$$U_{vw} = \sqrt{(-U_v + U_w \cos \alpha)^2 + (U_w \sin \alpha)^2} \quad (6)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{U_w \sin \alpha}{-U_v + U_w \cos \alpha}\right) \quad (7)$$

横风激励下, 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 M_v 组成:

$$\begin{cases} D_v(t) = 0.5 \rho A U_{vw}^2 \cdot C_D(\beta) \\ L_v(t) = 0.5 \rho A U_{vw}^2 \cdot C_L(\beta) \\ M_v(t) = 0.5 \rho A U_{vw}^2 \cdot H C_M(\beta) \end{cases} \quad (8)$$

式中:

ρ ——空气密度, 取 1.225 kg/m^3 ;

A ——车辆侧面迎风面积, m^2 。

车辆气动载荷系数 C_D 、 C_L 及 C_M ^[8,10] 为:

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

3 阵风下车辆曲线通过基本特性

3.1 迎风角对横风风力作用的影响

不同风向的阵风侵袭对列车运行安全性的影响是不同的,所以应结合风向进行限速^[6,15]。基于此,为研究迎风角对横风风力作用的影响规律,选取 U_{\max} 为 15 m/s、 U_v 为 60 km/h、 α 为 0~180° 进行计算分析,得到 α 为 0~180° 范围内头车所受到的作用力,如图 4 所示。由图 4 可以看出,车辆受到的横风侧向力、升力及倾覆力矩均在 $\alpha=90^\circ$ 时出现了极大值。因此,在后续计算工况中,取 $\alpha=90^\circ$ 作为列车运行安全性的研究较为合理。

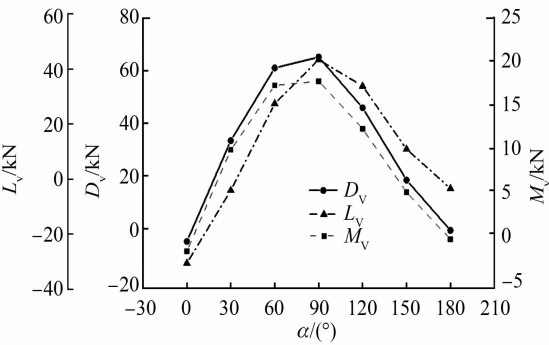


图 4 迎风角对横风载荷作用的影响

3.2 车辆动力学响应特性

选取 U_{\max} 为 10 m/s、 U_v 为 60 km/h、 α 为 90°、圆曲线半径 R 为 600 m 进行计算分析,得到不同车辆动力学响应特性,如表 1 所示。

由表 1 可知:从运行稳定性来看,除车体横向加速度表现为中间车 M1 比头、尾两车大外,其余指标均表现为头车 Tc1 最大、尾车 Tc2 最小。综合而

表 1 车辆动力学响应峰值

项目	指标	Tc1	M1	Tc2
运行稳定性	车体横向平衡性	2.08	2.00	1.96
	车体横向加速度/g	0.12	0.12	0.10
	轮轨横向力/kN	19.84	18.99	19.42
运行安全性	脱轨系数	0.39	0.35	0.30
	轮重减载率	0.57	0.56	0.53
	倾覆系数	0.61	0.52	0.47

注: g 为重力加速度,取 9.81 m/s²

言,横风激励下地铁列车的各节车辆中,头车 Tc1 运行状况要比中间车 M1 和尾车 Tc2 更糟糕,即头车 Tc1 对横风激励最为敏感且尾车 Tc2 最不敏感。故本文选择 3 节编组列车中的头车 Tc1 来作为安全限值研究的代表。

4 阵风下列车安全运行限值管理

4.1 阵风下列车安全运行曲线半径限值

选取 U_v 为 60 km/h、 R 为 300~1 000 m、超高为 120 mm、 U_{\max} 为 15 m/s,其余参数不变,进行计算分析,得到的动力响应峰值随曲线半径的变化如图 5 所示。从图 5 可以看出,CHG 激励下的地铁列车头车 Tc1 的响应峰值随着曲线半径的增大而表现出不同程度的减小,车辆运行安全性从而得到提高。其中轮重减载率对横风激励最敏感,当 R 为 840 m 时,其达到阈值 0.60。即当 R 减小到 840 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。

4.2 阵风下列车安全运行最大风速限值

研究 CHG 激励下车辆曲线通过的最大风速安全限值。预设车速 $U_v=60$ km/h,圆曲线半径 $R=600$ m,对应超高预设 70 mm,此时加载外侧横风最

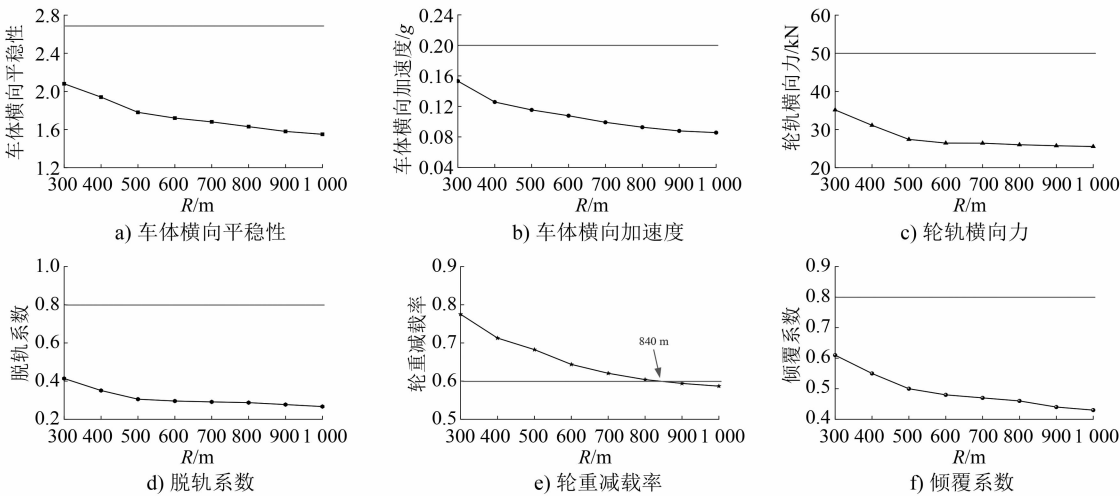


图 5 列车安全运行指标随曲线半径变化图

大风速 $U_{\max} = 1 \sim 30 \text{ m/s}$ 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见图6。从图6可以看出,CHG 激励下的地铁列车头车 TC1 的响应峰值随着最大风速 U_{\max} 的增大而不同程度地增加,安全性变差。其中,车体横向振动加速度(阈值为 0.20

g)、轮重减载率(阈值为 0.6)及倾覆系数(阈值为 0.8)对横风扰动最为敏感;临界最大风速分别为 19.0 m/s、21.7 m/s 及 17.5 m/s 时,在预设条件下,最大风速达到 17.5 m/s 时已有评价指标超标,表明为保障列车的安全运行,最大风速不得大于该值。

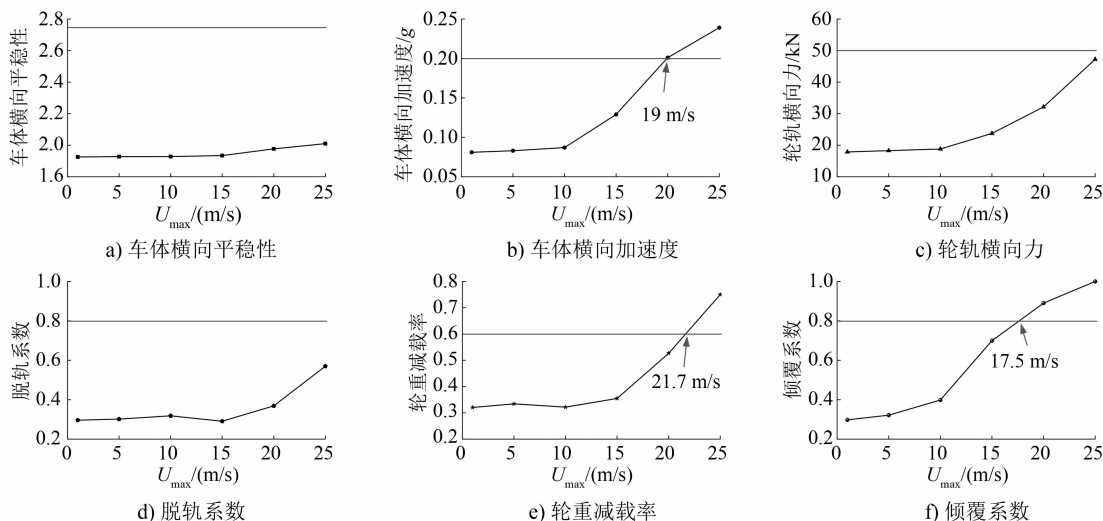


图6 列车安全运行指标随最大风速变化图

5 结论

1) 车辆受到的横风侧向力、升力及倾覆力矩均在 $\alpha = 90^\circ$ 时出现峰值。

2) 阵风下,头车 Tc1 运行状况最差,而尾车 Tc2 对于阵风扰动最不敏感。

3) 阵风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,圆曲线半径建议不小于 840 m 以保证车辆在预设条件下安全运行。

4) 阵风下车辆响应峰值随最大风速增加而增加,使列车运行安全性变差。在预设条件下,最大风速检测值不应大于 17.5 m/s,以保障车辆安全。

参考文献

[1] 张云飞,李军.山区地铁车辆曲线通过时的风致安全性[J].华侨大学学报(自然科学版),2019(3): 291.
 [2] 李军,张云飞,高健博.遭遇横风时高墩高架上的地铁车辆运行安全性[J].华侨大学学报(自然科学版),2019(4): 421.
 [3] CAI C S, HU J X, CHEN S, et al. A coupled wind-vehicle-bridge system and its applications: a review[J]. Wind and Structures, 2015, 20(2): 117.
 [4] NIU J Q, ZHOU D, LIU T H, et al. Numerical simulation of aerodynamic performance of a couple multiple units high-speed train [J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(5): 681.
 [5] LI Y L, XIANG H Y, WANG B, 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.

[6] 钱科元,罗贻,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(10): 173.
 [7] 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(18): 30.
 [8] 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(6): 989.
 [9] 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(9): 5.
 [10] 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(18): 104.
 [11] 张云飞.横风扰动作用下的山区地铁车辆-轨道-高墩桥梁耦合振动研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.
 [12] 陈兆玮.高速铁路桥墩沉降对行车性能影响的研究[D].成都:西南交通大学,2017.
 [13] 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(3): 343.
 [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.地铁设计规范:GB/T 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
 [15] British Standards Institution. Railway applications-Aerodynamics-Part 6:BS EN 14067-6:2018[S]. London:Standards Policy and Strategy Committee, 2018.
 [16] 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(4): 489.

(收稿日期:2019-07-20)