

胶轮地铁道岔侧向通过性影响因素分析及优化^{*}杜子学¹ 徐晨瑜¹ 杨震¹ 廖从建²

(1. 重庆交通大学机电与车辆工程学院, 400074, 重庆; 2. 中车株洲电力机车有限公司, 412001, 株洲)

摘要 [目的] 胶轮地铁车辆在道岔区段由胶轮提供走行支撑, 钢轮提供导向, 轮轨关系较为特殊。为了提高胶轮地铁车辆的运行品质, 有必要对道岔侧向通过性进行研究。[方法] 依托墨西哥城地铁 1 号线新型胶轮地铁车辆, 分析了车辆的走行机理, 建立了车辆动力学模型, 提出了车辆道岔侧向通过性的评价指标; 对车辆的主要悬挂参数进行了灵敏度分析, 得出了悬挂参数对评价指标的影响系数, 运用第二代非支配排序遗传算法对影响较大的车辆悬挂参数进行了优化。[结果及结论] 将走行轮垂向力、导向轮横向力、轮轴横向力、走行轮载荷转移系数、车体侧滚角作为评价指标, 得出空气弹簧垂向刚度对胶轮地铁车辆道岔侧向通过性影响最大, 其余依次为垂向减振器阻尼、导向轮径向刚度等。优化后, 车体侧滚角降低了 8.7%, 走行轮载荷转移系数降低了 16.0%, 车辆满足以 45 km/h 的速度通过道岔, 且车辆道岔侧向通过性得到提高。

关键词 胶轮地铁; 车辆; 道岔侧向通过性; 影响因素

中图分类号 U270.33

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.01.030

Analysis and Optimization of Influencing Factors for Turnout Lateral Passing Performance of Rubber-tired Metro

DU Zixue¹, XU Chenyu¹, YANG Zhen¹, LIAO Congjian²

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, 400074, Chongqing, China; 2. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., 412001, Zhuzhou, China)

Abstract [Objective] In the turnout section, the wheel-rail relationship of the rubber-tired metro vehicle is relatively special as it is the rubber tire that provides running support and the steel wheel that provides guidance. In order to improve the operation quality of the rubber-tired metro vehicle, it is necessary to study the lateral passing performance of the turnout. [Method] Based on the new type of rubber-tired metro vehicle on Mexico City Metro Line 1, the running mechanism of the vehicle is analyzed, the dynamics model of the vehicle is estab-

lished, and the evaluation index of the vehicle turnout lateral passing performance is proposed. Through analyzing the sensitivity of the vehicle main suspension parameters, their influencing coefficient on the evaluation index is obtained. The parameters with greater influence are optimized by using the non-dominated sorting genetic algorithm-II. [Result & Conclusion] With the vertical force of the running wheel, the lateral force of the guide wheel, the lateral force of the axle, the load transfer coefficient of the running wheel, and the roll angle of the car body as evaluation indexes, it is concluded that the vertical stiffness of air spring has the greatest impact on the turnout lateral passing performance of rubber-tired metro vehicles, followed by the damping of the vertical shock absorber and the radial stiffness of the guide wheel and etc. After optimization, the roll angle of the car body is reduced by 8.7%, and the load transfer coefficient of the running wheel by 16.0%. The vehicle can pass through the turnout at a speed of 45 km/h, and the turnout lateral passing performance of the vehicle is improved.

Key words rubber-tired metro; vehicle; turnout lateral passing performance; influencing factor

胶轮地铁是一种采用道路交通轮胎技术, 运用在特定线路上的轨道交通系统。胶轮地铁列车具有起动、制动性能好, 爬坡能力强, 运行振动、噪声低, 乘坐舒适度高特点。胶轮地铁在保留了钢轮钢轨的基础上, 以胶轮代替钢轮作为走行轮, 钢轮-钢轨系统则起过载保护、辅助导向、驻车制动和通过道岔等作用^[1-3]。

我国目前尚未有完全意义上的胶轮地铁车辆, 且国内外对胶轮地铁动力学的研究较少。2020 年, 使用胶轮地铁系统的墨西哥城地铁 1 号线对车辆、控制系统及线路进行全面升级, 中车株洲电力机车有限公司负责该条线路新型胶轮地铁车辆的设计制造。该新型车辆的转向架结构与以往相比有所不同, 同时也与其他地铁车辆的转向架结构存在差异。为了具有良好的道岔通过能力, 须对该新型车

^{*} 现代跨座式单轨交通车辆关键技术自主开发及整车集成应用产业化课题(国家发改委投资[2015]1210 号文)

辆进行研究。本文建立了胶轮地铁车辆动力学模型,对车辆道岔侧向通过性的评价指标进行了研究,并对道岔侧向通过性以及车辆的主要悬挂参数进行了分析和优化。

1 标准化回归系数法

本文采用标准化回归系数法对主要悬挂参数进行了道岔侧向通过性灵敏度分析。该方法的基本原理如下。

自变量和因变量之间的关系可以用线性回归模型来表述^[4-7]:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j x_j \quad (1)$$

式中:

\hat{y} ——因变量估计值;

b_j ——第 j 个回归系数, $j=0,1,\dots,n$;

x_j ——第 j 个自变量。

使用最小二乘法确定回归系数。总偏差平方和 S_T^2 、回归平方和 S_R^2 与残差平方和 S_E^2 存在如下关系:

$$S_T^2 = S_R^2 + S_E^2 \quad (2)$$

即:

$$\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (3)$$

式中:

\bar{y} ——因变量的均值;

y_i ——第 i 个因变量的观测值;

\hat{y}_i ——第 i 个因变量的估计值。

对该回归方程使用 r (回归系数) 检验法进行显著性检验,使用回归平方和在总偏差平方和中所占的比例衡量自变量与因变量之间的线性相关密切程度。定义多重判定系数 R^2 如下:

$$R^2 = S_R^2 / S_T^2 \quad (4)$$

R^2 表示回归模型与观测数据的匹配程度。当该系数大于可接受的值时,可以采用该方法进行灵敏度分析。

将回归模型按照式(5)进行标准化。

$$(\hat{y} - \bar{y}) / \hat{s} = \sum_{j=1}^n [(b_j \hat{s}_{x_j} / \hat{s})(x_j - \bar{x}) / \hat{s}_{x_j}] \quad (5)$$

其中:

$$\hat{s} = \left[\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 / (N - 1) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中:

\hat{s} ——因变量的标准差;

\hat{s}_{x_j} ——第 j 个自变量 x_j 的标准差;

\bar{x} ——自变量的均值;

N ——样本数量。

定义 $\beta_j = b_j \hat{s}_{x_j} / \hat{s}$, β_j 称为标准化回归系数。

当变量 x_j 相互独立时,可以将 β_j 作为变量重要性的一种度量。 β_j 的绝对值越大,则对应的变量越重要。 β_j 的符号表示自变量和因变量的变化趋势。

2 车辆动力学模型

参照重庆交通大学单轨车辆创新团队的研究成果^[8-9],建立胶轮地铁车辆动力学仿真分析模型。

2.1 建模相关特征参数

建模所需的相关特征参数见表1。

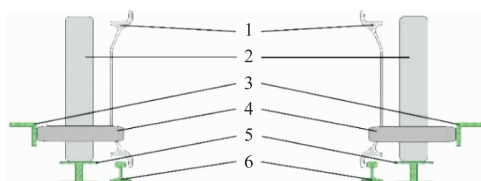
表1 建模相关特征参数取值

Tab.1 Values of relevant characteristic parameters for modeling

参数	取值	参数	取值
车辆总质量/kg	27 778	导向轮轴距/mm	3 610
车辆定距/mm	11 000	导向面轨距/mm	2 500
走行轮轴距/mm	2 000	钢轨轨距/mm	1 435
走行轮轮距/mm	1 993	道岔导曲线半径/m	140

2.2 车辆通过道岔走行机理

胶轮地铁轮轨之间的位置关系如图1所示。



注:1—钢轮;2—走行轮;3—导向面;4—导向轮;5—走行面;6—钢轨。

图1 胶轮地铁轮轨之间的位置关系

Fig.1 Wheel and rail position relationship of the rubber-tired metro

胶轮地铁在道岔区段运行时,走行面和钢轨同正常区段,单侧导向轨面离开导向轮,由钢轮的轮缘与钢轨接触提供导向力矩。驶出道岔时,导向轨继续与导向轮接触,恢复正常行驶。

墨西哥城地铁1号线道岔的最小曲线半径约为140 m,有轨底坡,不设超高。

2.3 车辆动力学模型

通过分析胶轮地铁车辆走行机理,得到车辆动

力学拓扑结构,如图2所示。

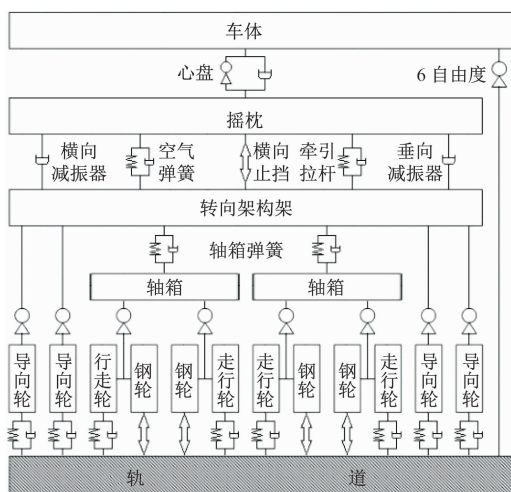


图2 胶轮地铁车辆动力学拓扑结构

Fig.2 Dynamics topological structure of rubber-tired metro vehicle

根据车辆拓扑结构,建立了车辆动力学模型,如图3所示。

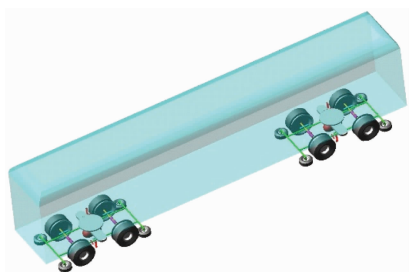


图3 胶轮地铁车辆动力学模型

Fig.3 Dynamics model of rubber-tired metro vehicle

3 车辆道岔侧向通过性影响因素分析

3.1 车辆道岔侧向通过性评价指标

将走行轮垂向力、导向轮横向力、轮轴横向力及走行轮载荷转移系数等作为车辆道岔侧向通过性的评价指标,将车体侧滚角作为参考指标。走行轮载荷转移系数按式(7)计算^[10]:

$$D = \frac{\Delta P}{P} \quad (7)$$

式中:

D ——走行轮载荷转移系数;

ΔP ——轮重减载量;

P ——减载和增载侧车轮平均轮重。

3.2 车辆道岔侧向通过性影响因素灵敏度分析

基于标准化回归系数法对悬挂参数进行全局

灵敏度分析,识别出对优化目标函数影响显著的设计变量,以提高优化效率。选取空气弹簧横向刚度、空气弹簧横向阻尼、空气弹簧垂向刚度及空气弹簧垂向阻尼等14个主要悬挂参数为设计变量,建立联合仿真灵敏度模型并进行分析,得到设计变量对各评价指标的影响系数。设计变量对各评价指标的影响系数如图4所示。

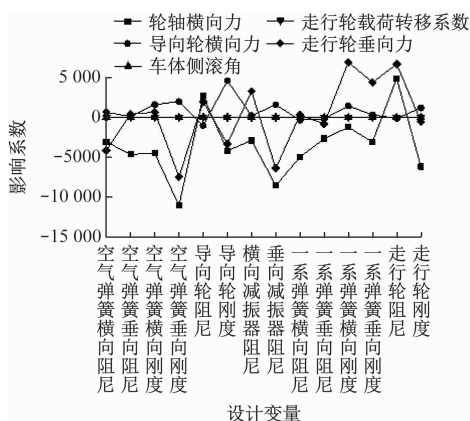


图4 设计变量对各评价指标的影响系数

Fig.4 Influencing coefficients of design variables on each evaluation index

由图4可以看出:空气弹簧垂向刚度、垂向减振器阻尼、导向轮径向刚度、空气弹簧横向刚度、空气弹簧垂向阻尼及走行轮径向阻尼是对车辆道岔侧向通过性影响较大的因素。

4 车辆道岔侧向通过性影响因素优化

4.1 优化前车辆道岔侧向通过性分析

车辆道岔侧向通过性分析的载荷工况为AW0(空载)、AW2(额定载荷)及AW3(超常载荷),速度工况分别为10 km/h、20 km/h、30 km/h、40 km/h、50 km/h、60 km/h。优化前各个评价指标的最大值-速度变化曲线如图5所示。

由图5可见:在AW3工况下,车辆以50 km/h、60 km/h的速度侧向通过道岔时,走行轮垂向力超过限值,分别超出486 N、2 544 N;在AW2、AW3工况下,车辆以60 km/h的速度侧向通过道岔时,钢轮轮轴横向力超过限值,分别超出28 854 N、23 408 N;其余工况各评价指标均在限值以内。

4.2 车辆道岔侧向通过性优化模型的建立

在AW3、45 km/h工况下,选取本文第3.2节中得到的6个主要悬挂参数为优化设计变量,将车体侧滚角、走行轮载荷转移系数作为优化目标,将

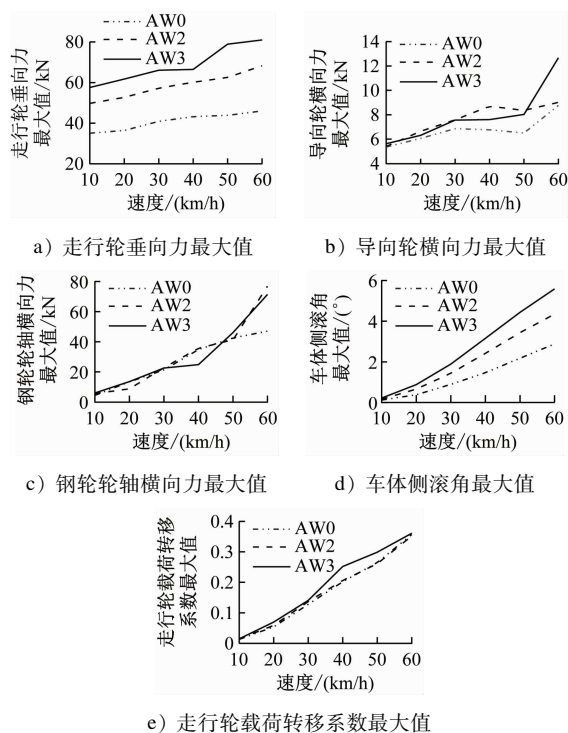


图5 优化前各个评价指标的最大值-速度变化曲线

Fig. 5 Curves of maximum value-speed change of each index before optimization

走行轮垂向力、导向轮横向力、钢轮轮轴横向力、走行轮载荷转移系数的限值作为约束条件,建立式(8)所示的优化模型。

$$\begin{aligned}
 \min f_1 &= |\theta| \\
 \min f_2 &= D \\
 \text{s. t. } G_1 &= F_z \in [0, a] \\
 G_2 &= F_d \in [0, b] \\
 G_3 &= F_h \in [0, c] \\
 G_4 &= D \in [0, d]
 \end{aligned} \quad (8)$$

式中:

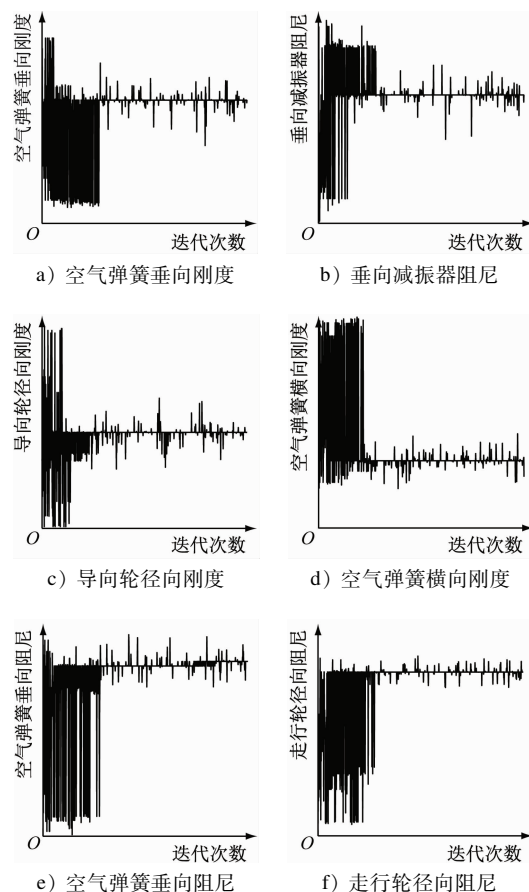
- θ ——车体侧滚角;
- F_z ——走行轮垂向力;
- a ——走行轮垂向力限值;
- F_d ——导向轮横向力;
- b ——导向轮横向力限值;
- F_h ——轮轴横向力;
- c ——轮轴横向力限值;
- d ——走行轮载荷转移系数限值;
- G_1, G_2, G_3, G_4 ——第1、2、3、4个约束条件;
- f_1, f_2 ——第1、2个优化目标函数。

在设计变量的取值范围内生成20组随机数列,运用NSGA-II(第二代非支配排序遗传算法)进行

优化。

4.3 优化结果分析

经过500次交叉迭代后,6个主要设计变量均收敛于一点。各设计变量的优化结果如图6所示。



注:本图的6个设计变量因涉及保密协议无法提取具体数值。

图6 各设计变量的优化结果

Fig. 6 Optimization results of each design variable

通过优化得到6个主要设计变量的数值。为了对优化结果进行验证,在多体动力学软件ADAMS中采用优化结果替换原有的设计变量参数,得到优化前评价指标对比,如表2所示。

由表2可见:通过优化,走行轮径向力最大值从74 899 N降至72 336 N,降低了3.4%;导向轮横向力最大值从7 410 N降至6 717 N,降低了9.4%;轮轴横向力最大值从40 484 N增至40 745 N,提高了0.6%,未超过限值;车体侧滚角最大值从3.80°降至3.47°,降低了8.7%;走行轮载荷转移系数从0.256降至0.215,降低了16.0%。由此可见,车辆道岔侧向通过性得到提高。

需指出,由于道岔区段不设超高,未平衡的离心加速度 g_c 主要来自于离心力,当列车运行速度为

表 2 优化前后评价指标对比

Tab. 2 Comparison of evaluation indexes before and after optimization

项目	走行轮径向力/N	导向轮横向力/N	轮轴横向力/N	车体侧滚角/(°)	走行轮载荷转移系数
优化前	74 899	7 410	40 484	3.80	0.256
优化后	72 336	6 717	40 745	3.47	0.215
降幅/%	3.4	9.4	-0.6	8.7	16.0

45 km/h 时,计算得到 g_c 为 $0.11g$ (g 为重力加速度)。而胶轮地铁车辆转向架结构不同于钢轮-钢轨制式的车辆转向架,轮对之间设有差速机构,且走行面间距比标准轨距大,目前尚无该指标的评价方法,因此目前综合参考钢轮-钢轨车辆和道路车辆的评价标准。国内外铁路领域的大量试验表明, $g_c=0.1g$ 时,一般旅客能够承受此种不频繁的未被平衡的离心加速度^[11]。胶轮地铁车辆侧向通过道岔属于不频繁工况,借用以上评价指标,在其他安全评价指标未超过限值的情况下, g_c 在可以接受的范围内。

5 结语

1) 在胶轮地铁车辆动力学模型的基础上,采用标准化回归系数法进行灵敏度分析,综合确定影响车辆道岔侧向通过性的主要因素依次是空气弹簧垂向刚度、垂向减振器阻尼、导向轮径向刚度、空气弹簧横向刚度、空气弹簧垂向阻尼及走行轮径向阻尼。

2) 采用多目标优化方法建立了胶轮地铁车辆道岔侧向通过性优化模型。优化后,走行轮径向力最大值、导向轮横向力最大值、轮轴横向力最大值、车体侧滚角最大值、走行轮载荷转移系数最大值分别降低 3.4%、9.4%、-0.6%、8.7% 及 16.0%,车辆道岔侧向通过性得到提高。

参考文献

- [1] 孙瑶,刘义,李梁,等. 胶轮钢轮双轨车辆在城市轨道交通中的应用[J]. 铁道机车与动车, 2021(10): 23.
SUN Yao, LIU Yi, LI Liang, et al. Application of a rubber-tyred and steel-wheeled dual-track vehicle in urban rail transit[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2021(10): 23.
- [2] 李芾,杨阳. 城市自导向胶轮电车技术特点与应用[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 291.
LI Fu, YANG Yang. Characteristics and application of urban rubber-tyred self-steering trams[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 291.
- [3] 李刚,李芾. 胶轮路轨系统车辆的发展与运用概况[J]. 铁道机车车辆, 2013, 33(5): 53.

- LI Gang, LI Fu. Development and operation description of rubber tire railway vehicles[J]. Railway Locomotive & Car, 2013, 33(5): 53.
- [4] 申震. 基于跨座式单轨走行轮轮胎偏磨研究的车辆动力学参数影响分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
SHEN Zhen. Analysis on the influence of vehicle dynamic parameters based on the study of tire eccentric wear of straddle-type monorail running wheels[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
 - [5] 杨虎,刘琼荪,钟波. 数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
YANG Hu, LIU Qionsun, ZHONG Bo. Mathematical statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
 - [6] 贾俊平. 统计学[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2015.
JIA Junping. Statistics[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2015.
 - [7] MCKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code[J]. Technometrics, 1979, 21(2): 239.
 - [8] 左长永. 基于 MD ADAMS 的跨座式单轨车辆动力学性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
ZUO Changyong. Study on dynamic performance of straddle-type monorail vehicle based on MD ADAMS [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
 - [9] 杜子学, 李宁, 陈帅. 跨坐式单轨车辆曲线通过性能仿真分析[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(7): 22.
DU Zixue, LI Ning, CHEN Shuai. Simulation of the curve negotiation performance of straddletype monorail vehicle[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(7): 22.
 - [10] 华祥安. 跨座式单轨车辆动力学性能评价标准关键问题研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
HUA Xiang'an. Research on key issues of dynamic performance evaluation criteria for straddle monorail vehicles[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.
 - [11] 严隽毫,傅茂海. 车辆工程[M]. 3 版. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
YAN Junmao, FU Maohai. Vehicle engineering[M]. 3rd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.

· 收稿日期:2022-08-18 修回日期:2022-11-18 出版日期:2025-01-10
Received:2022-08-18 Revised:2022-11-18 Published:2025-01-10
· 通信作者:杜子学,教授,aaadx@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license