

文章编号: 1005-0523(2025)04-0061-09



## S型小半径曲线有轨电车车辆悬挂参数优化研究

党红玲<sup>1</sup>, 张硕<sup>2</sup>, 赵晨<sup>3</sup>, 赖晨翔<sup>3</sup>, 娄平<sup>2</sup>

(1. 广州地铁建设管理有限公司, 广东广州 510330; 2. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075;  
3. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东广州 510010)

**摘要:** 为提高有轨电车通过S型小半径曲线线路时的安全性及平稳性, 提出车辆悬挂参数合理优化的建议。以广州某有轨电车S型小半径曲线线路为工程背景, 基于多体动力学及有限元理论建立车辆-轨道耦合系统动力学模型, 探究车辆悬挂参数对其平稳性指标、轮轨力、脱轨系数、轮重减载率等运行评价指标的影响规律, 基于最优拉丁超立方采样技术、BP神经网络及多目标遗传算法, 研究并获得有轨电车车辆悬挂参数多目标优化建议值。研究结果表明: 车辆悬挂参数优化后, 其运行评价指标得到显著改善, 与优化前相比, 车辆脱轨系数的降幅达10%以上。研究结果可为有轨电车悬挂参数的优化设计提供理论支撑。

**关键词:** 有轨电车; 车辆悬挂参数; 多目标优化; 车轨动力作用; 神经网络; 遗传算法

中图分类号: U211.5

文献标志码: A

本文引用格式: 党红玲, 张硕, 赵晨, 等. S型小半径曲线有轨电车车辆悬挂参数优化研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(4): 61-69.

## Study on Vehicle Suspension Parameters Optimization of Tram Running on S-shaped Curve Lines with Small Radius

Dang Hongling<sup>1</sup>, Zhang Shuo<sup>2</sup>, Zhao Chen<sup>3</sup>, Lai Chenxiang<sup>3</sup>, Lou Ping<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Metro Construction Management Co., Ltd, Guangzhou 510330, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

3. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd, Guangzhou 510010, China)

**Abstract:** In order to improve the driving safety and stability of trams passing through the S-shaped curve lines with small radius, the rational optimization of vehicle suspension parameters is proposed. Taking a tram line in Guangzhou as the engineering background, the dynamic model of vehicle-track coupling system was established by using the multi-body dynamics and finite element methods and the influence laws of vehicle suspension parameters on the operational evaluation indicators such as vehicle stability index, wheel-rail force, derailment coefficient, and wheel load reduction rate, were explored. By combining the optimal Latin hypercube sampling technique, BP neural network, and multi-objective genetic algorithm, the optimized suggestions for the tram suspension parameters were obtained. The results show that the operational evaluation indicators of the vehicle are significantly improved after the optimization. Compared with before optimization, the derailment coefficient of the vehicle has decreased by more than 10%. The research results provide theoretical support for the optimization design of suspension parameters for trams.

**Key words:** trams; vehicle suspension parameters; multi-objective optimization; dynamic response of vehicle-

收稿日期: 2024-12-04

基金项目: 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划课题(2022-重大-14); 广州地铁设计研究院股份有限公司科研项目(KY-2022-071)

track; neural networks; genetic algorithm

**Citation format:** DANG H L, ZHANG S, ZHAO C, et al. Study on vehicle suspension parameters optimization of tram running on S-shaped curve lines with small radius[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42 (4): 61-69.

现代有轨电车的结构形式多样,主要包括单车型、浮车型和铰接型,其中单车型因车体受力均匀、编组灵活、爬坡能力强等特点在国内外得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。由于城市建(构)筑物布局等因素的影响,有轨电车线路存在大量的小半径曲线(半径小于250 m),车辆通过小半径曲线时在强烈的轮轨相互作用下,其运行评价指标接近限值<sup>[6-7]</sup>。

国内外学者研究了车轨系统参数对行车安全性及平稳性的影响。一方面,有学者研究了弹性支承块式轨道刚度<sup>[8]</sup>、嵌入式轨道填充材料刚度<sup>[9]</sup>、浮置板轨道橡胶垫层刚度<sup>[10-11]</sup>、弹性扣件轨道扣件刚度<sup>[12]</sup>等轨道参数的影响;另一方面,有学者研究了车辆悬挂参数<sup>[13-14]</sup>、车轮型面<sup>[15-17]</sup>等车辆参数的影响。参数优化方法也从单一变量分析发展到多目标优化设计。SHARMA等<sup>[18]</sup>为降低车辆横向振动,研究了基于自适应模糊神经推理系统的半主动悬架控制策略,显著提高了行车舒适性。李小伟等<sup>[19]</sup>利用线性加权建立统一目标函数并设置一定约束条件,采用内点罚函数法对车辆悬挂参数进行优化设计。徐磊等<sup>[20]</sup>基于系统动力学原理,提出了一种用于车辆-轨道耦合系统参数优化的分层设计与权重组合方法。姚远等<sup>[21]</sup>提出评估高速列车横向稳定性的健壮性指标,并通过多目标遗传算法和参数筛选进行高速列车悬挂参数优化匹配。肖乾等<sup>[22]</sup>结合最优拉丁超立方采样方法、径向基函数神经网络和多目

标遗传算法,开展考虑弹性车体的车辆悬挂参数多目标优化设计。

需要指出的是,现代有轨电车线路不可避免受到城市道路及各种建筑物的阻碍与限制,存在多条曲线衔接情况,车辆通过曲线线路时的运行评价指标易受线路扰动而超过限值,严重影响其通过S型小半径曲线的行车安全性及平稳性。已有研究主要针对直线和单一曲线线路,尚未深入探讨有轨电车通过多条衔接曲线时的车辆悬挂参数优化问题,且相比高速铁路等其他轨道交通形式,有轨电车的车辆结构、线路技术标准均有很大不同,对其进行车辆悬挂参数优化研究有一定的创新意义。

论文以广州某有轨电车S型小半径曲线线路为工程背景,基于车轨耦合动力学理论,建立有轨电车-轨道耦合系统动力学模型,研究车辆悬挂参数对车辆运行评价指标的影响规律,并结合最优拉丁超立方采样和多目标遗传算法对有轨电车车辆悬挂参数进行优化,为有轨电车悬挂参数的优化设计提供理论支撑。

## 1 S型曲线及车-轨模型

### 1.1 S型曲线概况

广州某有轨电车S型小半径曲线线路由两条小半径曲线衔接,有关线路参数如图1所示。

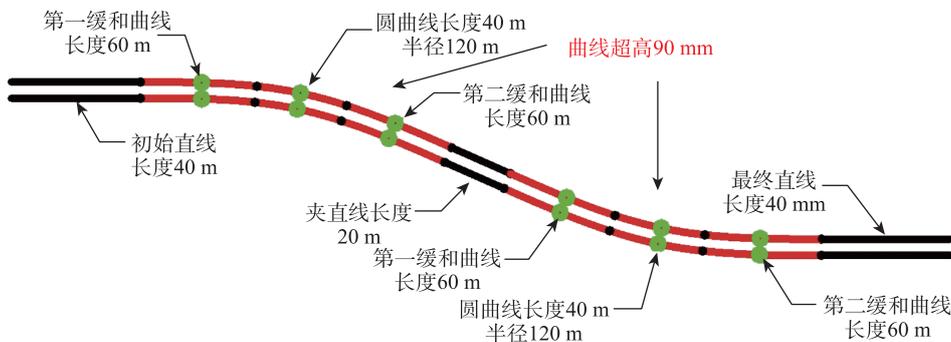


图1 线路曲线参数

Fig. 1 Line curve parameters

1.2 车-轨模型

1.2.1 车辆模型

有轨电车由四模块100%低地板车辆组成,从头至尾为“Mc1+T+M+Mc2”,其中Mc表示含司机室的动车,符号后数字1、2表示车辆编号,T表示拖车,M表示不含司机室的动车,车辆中部正下方设置一个转向架,有轨电车模型如图2所示。车辆由车体和转向架组成,车体自由度数量为6个,平动和转动自由度数量各为3个,车体之间纵向通过设置弹性铰或自由铰实现连接;动力转向架中的构架自由度数量为6个,摇枕考虑沉浮、摇头、侧滚3个自由度,车轮自由度数量为6个,考虑轮对弹性,采用有限元软件建立弹性轮对模型形成刚柔耦合模型,弹性轮对有限元模型网格尺寸控制在10 mm,弹性轮对网格划分后共60 409个节点,56 164个实体单元,然后采用Lanczos法提取轮对自由模态。采用Craig-Bampton超单元法即模态综合法剔除弹性体刚性模态实现模态缩减,最后将弹性轮对模型导入构成刚柔耦合动力学模型。拖车转向架中构架及摇枕设置与动力转向架相同,车轮采用独立轮对,考虑7个自由度,左右车轮可分别相对车轴转动,一系、二系悬挂系统用线性弹簧和阻尼器模拟,有轨电车共计110个独立自由度。动力转向架示意图见图3,车辆计算参数见表1。

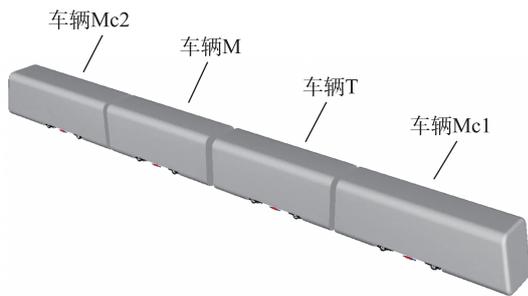


图2 四模块100%低地板有轨电车模型  
Fig. 2 Four-module 100% low-floor tram model

1.2.2 轨道模型

轨道结构类型为混凝土长枕埋入式无砟轨道,本文主要研究车辆的动力响应,轨道结构可进行一定程度简化,其中钢轨用铁木辛柯梁模拟,扣件用弹簧阻尼器模拟(扣件垂向刚度30 kN/mm、横向刚度35 kN/mm),轨枕用刚体模拟,轨道结构模型见图4。60R2槽型钢轨,其截面力学特性与普通60型工字钢轨不同,依照文献[23]所述方法,通过AN-

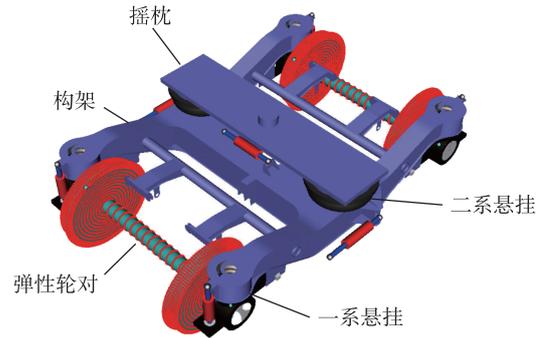


图3 动力转向架示意图  
Fig. 3 Diagram of power bogie

表1 有轨电车车辆计算参数  
Tab.1 Simulation parameters of tram vehicle

名称	数值
车辆全长、宽度、高度/m	36.00、2.65、3.28
Mc模块与T/M模块转向架中心点距/m	8.6
T模块与M模块转向架中心点间/m	9.18
车体质量/kg	19 815
摇枕质量/kg	500
构架质量/kg	2 819
轮对质量/kg	933
轴重/t	12.5
轴距/m	1.8

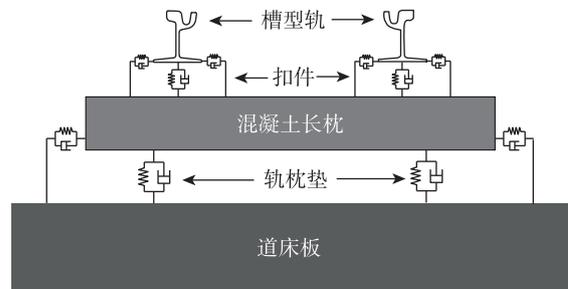


图4 轨道结构模型  
Fig. 4 Track structure model

SYS有限元软件建立槽型钢轨截面并提取截面力学参数,如表2所示。考虑轨道的高低、水平、轨距、轨向等不平顺,选用美国五级轨道谱作为轨道的激励源。

1.3 模型验证

为了验证建立模型的正确性,采用文献[24]四模块有轨电车通过单一曲线的工况:车辆运行速率为20 km/h,直线长度50 m,第一、第二缓和曲线长度均为20 m,圆曲线半径及长度分别为35、50 m,外轨超高120 mm。用本文模型计算及文献中的脱轨

系数列在表3中,由表中结果可知,两种模型计算结果吻合程度较好,说明本文建立的模型是正确的。

表2 60R2槽型轨部分截面特性  
Tab.2 Cross-section some characteristics of 60R2 grooved rail

截面力学特性参数	标准值	计算值	偏差/%
截面面积/(10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> )	7.611	7.591	0.26
对竖直轴惯性矩/(10 <sup>-6</sup> m <sup>4</sup> )	9.201	9.100	1.98
自由扭转常数/(10 <sup>-6</sup> m <sup>4</sup> )	—	1.240	
对水平轴惯性矩/(10 <sup>-5</sup> m <sup>4</sup> )	3.298	3.300	0.058
翘曲常数/(10 <sup>-8</sup> m <sup>6</sup> )	—	3.080	

表3 两种模型计算的脱轨系数

位置	本文模型	文献[24]模型	相对偏差/%
左轮	0.585	0.569	2.8
右轮	0.439	0.433	1.4

## 2 S型小半径曲线有轨电车通过性能分析

为研究多条曲线衔接线路对有轨电车通过性能的影响,考虑前述S型小半径曲线线路工况,另外设置与S型曲线线路里程相等的单一小半径曲线线路工况、直线线路工况,其中单一小半径曲线工况起始及最终直线长度130 m,第一、第二缓和曲线长度均为60 m,圆曲线半径及长度分别为120,40 m。车辆轴重取定员轴重12.5 t,扣件垂向、横向刚度参照YGI-2型扣件分别取30 kN/mm和35 kN/mm,有轨电车运行速率取设计运行速率30 km/h。

### 2.1 不同线路工况下有轨电车通过性能

针对S型小半径曲线、单一小半径曲线及直线线路3种工况,以头部车体Mc1横向加速度为例,不同线路条件下其车体横向加速度随里程的变化如图5所示。其余车辆运行评价指标变化规律与之类似。

由图5可知,相比直线线路和单一小半径曲线,有轨电车S型小半径曲线的车体横向加速度随里程运行的变化幅度更大,直接影响有轨电车通过S型小半径曲线的横向平稳性指标,主要原因是与直线和单一小半径曲线线路相比,S型小半径曲线线路变化复杂,曲线附加动力响应更激烈。有轨电车通过S型小半径曲线的车体横向平稳性指标为2.657,超过GB/T 5599—2019规范限值2.5。由此可见,很有必要开展车辆悬挂参数优化研究以提高有轨电车S型小半径曲线的通过性能。

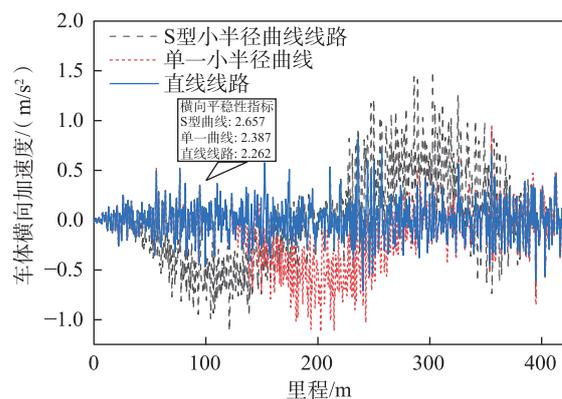


图5 不同线路车体横向加速度及平稳性指标

Fig. 5 Lateral acceleration and stability index of carbody running on different lines

### 2.2 S型小半径曲线不同车辆运行评价指标分析

限于篇幅,仅列出车辆轮重减载率随运行距离变化曲线,如图6所示,其超限区域集中在曲线位置。各车辆运行在S型小半径曲线线路上的车辆运行评价指标最值列在表4中,此处计算中,车辆悬挂参数取表5中的初始值。由表4可知,各车辆运行评价指标在S型小半径曲线上均有超限情况,端部车辆的车辆运行评价指标略高于中部车辆,主要原因是中部拖车采用独立轮对,独立轮对的解耦作用使中部车辆动力响应略微减小。综合来看头部车辆Mc1的各项评价指标相比其他车辆幅值变化更显著,表明头部车辆对S型小半径曲线线路更敏感。为简化车辆悬挂参数优化设计过程,可选取头部车辆Mc1的运行评价指标作为S型小半径曲线有轨电车车辆悬挂参数优化设计的依据。

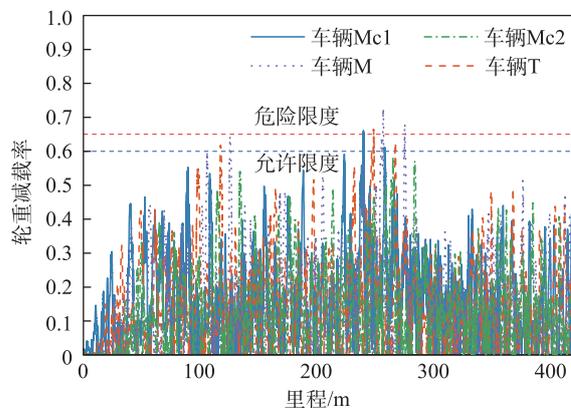


图6 车辆Mc1轮重减载率随运行距离的变化曲线  
Fig. 6 Curve of wheel load reduction rate of vehicle Mc1 with mileage

表4 各车辆运行评价指标最值  
Tab.4 The maximum value of each vehicle operation evaluation index

评价指标	车辆Mc1	车辆T	车辆M	车辆Mc2
脱轨系数	0.851	0.990	0.934	0.851
轮重减载率	0.660	0.663	0.727	0.581
横向平稳性指标	2.657	2.397	2.421	2.373
垂向平稳性指标	1.960	1.824	1.824	1.956
轮轨横向力/kN	44.127	39.311	36.778	39.571

### 3 优化策略

基于支配关系的多目标进化优化快速发展于20世纪80年代末,随后多种进化算法被提出。其中快速非支配排序遗传算法NSGA-II引入了精英策略,保证具有较好特性的个体能够保留在种群中,提高了计算效率。论文采用快速非支配排序遗传算法NSGA-II进行优化求解计算。

#### 3.1 车辆运行评价指标

综合考虑行车安全性及平稳性,进行车辆悬挂参数优化设计。输入变量 $X$ 包括7个,一系弹簧垂向刚度 $x_1$ 、一系弹簧横向刚度 $x_2$ 、二系弹簧垂向刚度 $x_3$ 、二系弹簧横向刚度 $x_4$ 、一系阻尼器垂向阻尼 $x_5$ 、二系阻尼器垂向阻尼 $x_6$ 、二系阻尼器横向阻尼 $x_7$ 。以车辆运行平稳性指标、轮轨力、脱轨系数、轮重减载率等作为车辆悬挂参数优化的评价指标,其值参考GB/T 5599—2019和GB/T 42334.1—2023,如式(1)~式(5)所示

$$U_1(X) = D_{1,\max}(X) \quad (1)$$

$$U_2(X) = D_{2,\max}(X) \quad (2)$$

$$Y_1(X) = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left( 7.08 \sqrt{\frac{A_{yj} K_{yj}(f_j)}{f_j}} \right)^2} \leq 2.5 \quad (3)$$

$$Y_2(X) = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left( 7.08 \sqrt{\frac{A_{yj} K_{yj}(f_j)}{f_j}} \right)^2} \leq 2.5 \quad (4)$$

$$Y_3(X) = F_{y,\max}(X) \leq 10 + P_0/3 \quad (5)$$

式中: $U_1, U_2$ 为优化目标函数; $D_{1,\max}$ 为脱轨系数最值; $D_{2,\max}$ 为轮重减载率最值; $Y_1$ 为车辆运行横向平稳性指标; $n$ 为频段数量; $j$ 为第 $j$ 频段; $A_{yj}$ 为第 $j$ 频段车辆横向振动加速度; $K_{yj}(f_j)$ 为第 $j$ 频段横向振动频率修正系数; $f_j$ 为第 $j$ 频段振动频率; $Y_2$ 为车辆运行垂向平稳性指标; $A_{yj}$ 为第 $j$ 频段车辆垂向振动加速度; $Y_3$ 为优化约束条件; $K_{yj}(f_j)$ 为第 $j$

频段垂向振动频率修正系数; $F_{y,\max}$ 为轮轨横向力最值; $P_0$ 为静轴重。

#### 3.2 算法机制

快速非支配排序遗传算法NSGA-II与经典遗传算法类似,包含选择、交叉及变异等优化迭代过程。但NSGA-II算法在执行上述过程前,采用非支配排序对种群进行处理,解的非支配性即一个解的所有目标都不劣于另一个解,且至少有一个目标优于另一个解,通过比较不同个体解的非支配性将个体划分为不同层级。在同一层级个体的比较中引入拥挤度概念,个体的拥挤度越大,其聚集密度越小,能更好地保持种群的分布性和多样性。NSGA-II算法的精英策略就是保证层级高且拥挤度大的个体优先传递到新种群中。

在车辆运行评价指标中选择车辆脱轨系数和轮重减载率为优化目标函数,车辆运行横向平稳性指标、车辆运行垂向平稳性指标及轮轨横向力为约束条件。在优化迭代过程中首先比较样本点是否满足约束条件,满足约束条件则进入新种群,反之则将其剔除,然后比较样本点目标函数大小,按目标函数值大小将样本点按支配性进行分层,较小者划入优先层,对同层的样本点通过拥挤度进行比较,将各样本点按目标函数大小顺序排列,拥挤度参考目标函数值计算样本点相邻两侧样本点的相对距离,其值越大表明样本点周围越稀疏,可以更好地保持种群分布性和多样性,应优先传递到新种群。对于车辆脱轨系数和轮重减载率目标函数而言,其拥挤度如式(6)~式(7)

$$U(X) = \min[U_1 \ U_2]^T \quad (6)$$

$$D_i = \sum_{m=1}^2 \frac{U_m(X_{i+1}) - U_m(X_{i-1})}{U_m^{\max}(X) - U_m^{\min}(X)}, i=2, \dots, (l-1) \quad (7)$$

式中: $U(X)$ 为目标函数; $D_i$ 为第 $i$ 个体在目标函数下的总拥挤度; $i$ 为第 $i$ 个体; $l$ 为个体数量; $m$ 为第 $m$ 子目标函数; $U_m(X_i)$ 为第 $i$ 个体在第 $m$ 子目标函数的子拥挤度; $U_m^{\max}(X)$ 为所有个体在第 $m$ 子目标函数下的最大值; $U_m^{\min}(X)$ 为所有个体在第 $m$ 子目标函数下的最小值。

### 4 车辆悬挂参数优化

#### 4.1 优化过程

##### 4.1.1 输入变量及取值范围

依照2.2所述,选取车辆各悬挂参数作为输入

变量,以车辆悬挂参数初始值为基准,上、下浮动30%进行参数优化设计。输入变量及其取值范围如表5所示。

表5 输入变量及取值范围  
Tab.5 Input variables and value ranges

变量取值	一系刚度/ (kN/m)		二系刚度/ (kN/m)		一系垂 向阻尼/ [kN·(s/m)]	二系阻尼/ [kN·(s/m)]	
	垂向	横向	垂向	横向		垂向	横向
下限	420	7 000	315	105	4.2	56	42
初始值	600	10 000	450	150	6.0	80	60
上限	780	13 000	585	195	7.8	104	78

#### 4.1.2 样本点选取及运行指标预测

相比蒙特卡罗法采样,最优拉丁超立方采样方法通过分层抽样保证样本在整个参数空间中的均匀分布,有更好的空间填充性和样本多样性。在相同样本数量下,最优拉丁超立方采样通过均匀分布减弱了样本间的相关性,使样本结果更有代表性。

为保证样本代表性同时减少迭代次数,设置样本点数量为150组。预先编写所需的参数文件,通过命令行进行仿真,实现不同样本点参数自动计算、结果自动保存,而后对仿真数据进行后处理,得到车辆运行评价指标,进而得到基于局部样本点的较优车辆悬挂参数组合。但若想获得整体参数空间内的最优悬挂参数组合,则需要不断扩大样本点规模,而车辆-轨道系统动力学仿真需要较大的时间成本,不利于大量样本点的参数优化,可以选用神经网络模型作为代理模型近似替代车辆-轨道动力系统。BP神经网络作为一种经典神经网络模型,在非线形数据序列回归预测方面有很大优势,可利用已计算的样本点数据,BP神经网络为代理模型近似替代车辆-轨道动力系统获取车辆运行评价指标。

训练样本共150组,按8:1:1划分为训练集、验证集和测试集。创建3层BP神经网络结构,包括输入层、隐含层及输出层,其中隐含层包括5个节点,隐含层节点激活函数均采用双曲正切函数,输出层节点激活函数采用线性函数,设置迭代次数1 000次。预测拟合结果见图7,训练最佳效果均方误差小于0.01,相关系数 $R$ 达到0.95以上。另外,采用初始车辆悬挂参数组合下的车辆运行评价指标对BP神经网络代理模型的预测结果进行对比分析,结果见表6。车轨模型与代理模型所得的车辆运行评价

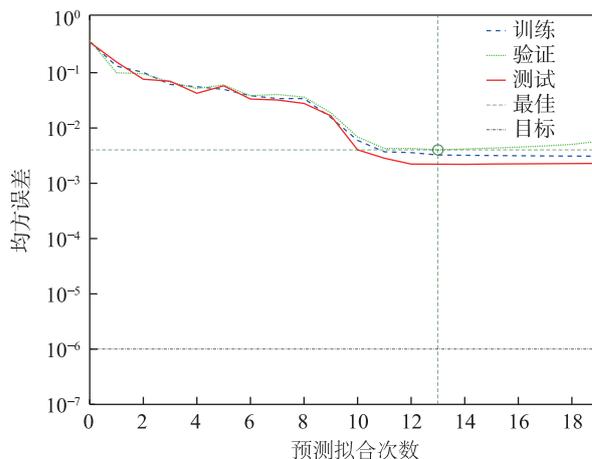


图7 BP神经网络预测性能

Fig. 7 Prediction performance of BP neural network

表6 两种模型所得评价指标对比

Tab.6 Comparison of evaluation indexes obtained by the two models

评价指标	车轨模型	代理模型	相对误差/%
脱轨系数	0.851	0.936	8.81
轮重减载率	0.660	0.699	5.91
横向平稳性	2.657	2.629	1.05
垂向平稳性	1.960	1.974	0.71
轮轨横向力/kN	44.127	41.525	5.90

指标相对误差保持在10%以内,表明BP神经网络代理模型对复杂车轨系统有较好的预测能力,可用作进一步分析。

#### 4.1.3 车辆悬挂参数优化流程

S型小半径曲线有轨电车车辆悬挂参数优化流程如下:

1) 设定参数优化对象及参数取值范围,采用最优拉丁超立方采样方法获取参数空间内的代表样本;

2) 通过命令行仿真完成样本点计算,利用仿真数据进行BP神经网络训练,建立车辆运行评价指标代理模型;

3) 利用多目标遗传算法NSGA-II进行参数寻优计算,求解符合车辆运行评价指标的Pareto解,最后根据实际情况确定参数范围。

## 4.2 多目标优化设计

综合车辆运行评价指标,以脱轨系数及轮重减载率为优化目标,车辆横向平稳性指标、车辆垂向平稳性指标及轮轨横向力为约束条件,利用NS-

GA-II 遗传算法进行优化计算。设置种群个体 60 个,优化代数 100 代,对有轨电车悬挂参数进行优化计算,优化计算次数 6 000 次。符合目标函数及约束条件的 Pareto 解集见图 8。为验证优化结果,

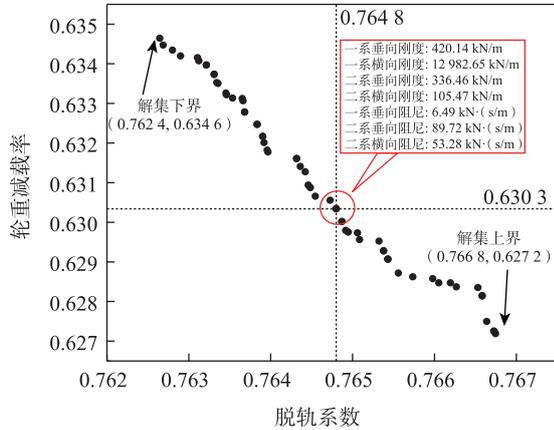


图 8 Pareto 最优解集

Fig. 8 Pareto optimal solution set

选择 Pareto 解集的上、下两侧边界对应的悬挂参数组合代入车轨系统中获取相应的车辆运行评价指标进行验算,与优化结果进行对比验证,验证结果见表 7。

由表 7 可知,采用优化算法获得的各个车辆运行评价指标,车辆平稳性指标、轮轨横向力的相对误差保持在 5% 以内,而脱轨系数、轮重减载率的相对误差较大,并且相对实际车轨系统所得的车辆运行评价指标略微偏大,主要原因是车辆悬挂参数改变对车辆系统振动特性有较大影响,轨道不平顺激励下的轮轨力也随之产生较大的变异性,而脱轨系数、轮重减载率是由轮轨力的非线性计算而来,这增大了脱轨系数、轮重减载率的预测及优化难度。综合来看,上述优化算法所得的优化结果相对误差满足精度要求,针对车辆悬挂参数的多目标优化对车辆运行评价指标优化起到了有效作用。

表 7 优化结果验证

Tab.7 Verification of optimization results

评价指标	解集下界	解集下界车轨系统验算	相对误差/%	评价指标	解集上界	解集上界车轨系统验算	相对误差/%
脱轨系数	0.763	0.733	4.00	脱轨系数	0.767	0.740	3.64
轮重减载率	0.634	0.568	11.53	轮重减载率	0.627	0.586	7.12
横向平稳性	2.499	2.589	3.48	横向平稳性	2.492	2.505	0.52
垂向平稳性	2.088	2.042	2.25	垂向平稳性	1.873	1.860	0.69
轮轨横向力/kN	49.289	50.372	2.15	轮轨横向力/kN	45.906	48.154	4.66

如图 8 所示的 Pareto 解集各目标函数相差不大,说明符合条件的解集已经收缩到一个较小的范围。通过比较各样本点车辆运行评价指标找到结果较为适中的样本点在图 8 中示出,该样本点悬挂参数为一系垂向刚度 420.14 kN/m,一系横向刚度 12 982.65 kN/m,二系垂向刚度 336.46 kN/m,二系横向刚度 105.47 kN/m,一系垂向阻尼 6.49 kN·s/m,二系垂向阻尼 89.72 kN·s/m,二系横向阻尼 53.28 kN·s/m。将该样本点输入车轨系统,获取优化后悬挂参数组合下的车辆运行评价指标,并与优化前初始悬挂参数组合下的车辆运行评价指标以及优化算法优化结果进行比较,如表 8 所示。

由表 8 可知,优化前车辆脱轨系数及轮重减载率处于超限状态,优化后车辆运行评价指标均有不同程度的减小,且评价指标均满足规范规定的限值要求,相比优化前车辆运行评价指标,优化后脱轨

表 8 优化前后车辆运行评价指标对比

Tab.8 Comparison of vehicle operation evaluation index before and after optimization

评价指标	优化前	优化后	优化结果
脱轨系数	0.851 00	0.725 48	0.764 80
轮重减载率	0.660 00	0.627 23	0.630 34
横向平稳性	2.657 00	2.487 00	2.499 77
垂向平稳性	1.960 00	1.944 22	1.974 84
轮轨横向力/kN	44.127 00	43.827 21	47.138 45

系数降幅 14.75%,轮重减载率降幅 4.96%,车辆横向平稳性指标降幅 6.40%,车辆垂向平稳性指标降幅 0.80%,轮轨横向力降幅 0.68%。此外,将优化后的车辆运行评价指标与优化算法得到的优化结果进行对比,脱轨系数、轮重减载率、车辆横向平稳性指标、车辆垂向平稳性指标、轮轨横向力的相对误差分别为 5.13%、0.49%、0.51%、1.55%、7.02%,各运行评价指标的预测偏差均保持在 10% 以内。以上

结果表明,上述优化算法针对车辆悬挂参数组合的多目标优化可以有效提高有轨电车S型小半径曲线通过性能。

## 5 结论

基于车轨耦合动力学理论建立有轨电车-轨道耦合系统动力学模型,研究车辆悬挂参数对车辆运行评价指标的影响规律,并结合最优拉丁超立方采样和多目标遗传算法对有轨电车车辆悬挂参数进行优化,获得车辆悬挂参数多目标优化建议值,结论如下。

1) 有轨电车S型小半径曲线运行评价指标易超限,端部车辆的运行评价指标劣于中间车辆,其中端部车辆横向平稳性指标相比中间车辆增大10.8%。

2) 相比传统单目标优化方法,利用全局均匀采样方法和基于BP神经网络代理模型及多目标遗传算法NSGA-II的多目标优化方法能综合考虑不同悬挂参数组合对车辆运行评价指标的影响,得到整体参数空间内的优化组合。

3) 通过分析有轨电车S型小半径曲线车辆悬挂参数多目标优化结果,优化后车辆运行评价指标得到显著改善,与优化前相比,车辆脱轨系数和车辆横向平稳性指标优化效果最明显,其中车辆脱轨系数的降幅达10%以上。

### 参考文献:

- [1] 李刚,李芾,黄运华. 100%低地板轻轨车辆的发展与运用[J]. 机车电传动, 2013(4): 51-55.  
LI G, LI F, HUANG Y H. The development and operation of 100% low floor light rail vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(4): 51-55.
- [2] 苗彩霞. 现代有轨电车系统特点及应用前景[J]. 都市轨道交通, 2013, 26(3): 9-12.  
MIAO C X. Characteristics of modern tram and its application prospect[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013, 26(3): 9-12.
- [3] JEONG N T, WANG M S, YOO S, et al. Conceptual design of high-speed semi-low-floor bogie for train-tram[J]. International Journal of Automotive Technology, 2017, 18(3): 523-533.
- [4] ZEHETBAUER F, EDELMANN J, PLÖCHL M. A minimal model to study self-excited vibrations of a tram wheelset in curves with small radius of curvature[J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(11): 2867-2887.
- [5] LING L, HAN J, XIAO X B, et al. Dynamic behavior of an embedded rail track coupled with a tram vehicle[J]. Journal of Vibration and Control, 2017, 23(14): 2355-2372.
- [6] 汪群生,曾京,成元辉,等. 有轨电车小半径曲线通过性能及关键参数研究[J]. 机车电传动, 2021(4): 14-19.  
WANG Q S, ZENG J, CHENG Y H, et al. Research on small radius curve negotiation and key parameters of tram[J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(4): 14-19.
- [7] BETHEL LULU G, CHEN R, WANG P, et al. Random vibration analysis of tram-track interaction on a curve due to the polygonal wheel and track irregularity[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(4): 1125-1147.
- [8] 蔡成标,徐鹏. 弹性支承块式无砟轨道结构参数动力学优化设计[J]. 铁道学报, 2011, 33(1): 69-75.  
CAI C B, XU P. Dynamic optimization design of the structural parameters of low vibration track[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(1): 69-75.
- [9] 韩健,肖新标,杨刚,等. 地铁列车-嵌入式轨道系统动力学性能II: 轨道参数对动力学性能影响[J]. 机械工程学报, 2020, 56(24): 173-180.  
HAN J, XIAO X B, YANG G, et al. Dynamic behaviour of metro train and embedded track system II: effect of track parameters on dynamic behaviour[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(24): 173-180.
- [10] ALABBASI S, HUSSEIN M, ABDELJABER O, et al. A numerical and experimental investigation of a special type of floating-slab tracks[J]. Engineering Structures, 2020, 215: 110734.
- [11] 郑翔,罗信伟,李平,等. 市域快线预制钢弹簧浮置板轨道振动特性研究[J]. 振动工程学报, 2021, 34(5): 951-958.  
ZHENG X, LUO X W, LI P, et al. Vibration performance of a prefabricated steel-spring floating-slab track for urban express rail transit[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(5): 951-958.
- [12] ZENG Z P, HE X D, HUANG X D, et al. Numerical simulation research on mechanical optimization of a novel fastener type ballastless track (NFTBT) for tram[J]. Applied Sciences, 2022, 12(17): 8807.
- [13] 赵树恩,聂小芮,陈文斌. 基于田口稳健设计的跨座式单轨车辆悬挂系统多参数优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(12): 136-142.  
ZHAO S E, NIE X R, CHEN W B. Multi-parameter optimization of suspension system of straddle monorail vehicle based on taguchi robust design[J]. Journal of Chongq-

- ing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(12): 136-142.
- [14] LI G, WU R D, DENG X X, et al. Suspension parameters matching of high-speed locomotive based on stability/comfort Pareto optimization[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(11): 3848-3867.
- [15] 祁亚运, 戴焕云, 干锋. 高速列车车轮型面多目标优化研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(24): 188-197.  
QI Y Y, DAI H Y, GAN F. Optimization of wheel profiles for high-speed trains[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(24): 188-197.
- [16] 陈玉洪, 黎嘉欣, 张更娥, 等. 基于多目标优化的地铁车轮低轮缘磨损型面设计[J]. 机械工程学报, 2025, 61(8): 261-271.  
CHEN Y H, LI J X, ZHANG G E, et al. Metro wheel profile design with low flange wear based on multi-objective optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(8): 261-271.
- [17] DE PAULA PACHECO P A, ENDLICH C S, VIEIRA K L S, et al. Optimization of heavy haul railway wheel profile based on rolling contact fatigue and wear performance[J]. Wear, 2023, 522: 204704.
- [18] 秦武, 李春归, 潘兵兵, 等. 考虑材料硬度与缩径量的橡胶衬套各向刚度优化设计[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(3): 90-100.  
QIN W, LI C G, PAN B B, et al. Optimal design of isotropic stiffness for rubber bushing by considering material hardness and diameter reduction for conveyance[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(3): 90-100.
- [19] 李小伟, 史俊武, 张建树. 基于车-轨耦合的轨道特种车辆横向建模及参数优化[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(2): 236-241.  
LI X W, SHI J W, ZHANG J W. The lateral modeling and parameter optimization based on vehicle-track coupled dynamics for a special railway vehicle[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(2): 236-241.
- [20] 徐磊, 陈宪麦. 用于车辆-轨道系统参数优化的分层设计与权重组合方法[J]. 铁道学报, 2019, 41(5): 177-183.  
XU L, CHEN X M. Multi-layer design and weight method for parameter optimization of vehicle-track system[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(5): 177-183.
- [21] 姚远, 李广, 梁树林, 等. 基于健壮稳定性的高速列车悬挂参数优化匹配方法[J]. 铁道学报, 2021, 43(8): 35-44.  
YAO Y, LI G, LIANG S L, et al. Optimal matching method for suspension parameters of high-speed train bogie based on robust hunting stability[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(8): 35-44.
- [22] 肖乾, 罗佳文, 周生通, 等. 考虑弹性车体的轨道车辆转向架悬挂参数多目标优化设计[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(2): 125-133.  
XIAO Q, LUO J W, ZHOU S T, et al. Multiobjective optimization design for suspension parameters of rail vehicle bogie considering elastic carbody[J]. China Railway Science, 2021, 42(2): 125-133.
- [23] 王瑶. 基于ANSYS的截面几何特性参数计算方法[J]. 科技信息, 2013(13): 149-150.  
WANG Y. Calculation method of cross-section geometric characteristic parameters based on ANSYS[J]. Science & Technology Information, 2013(13): 149-150.
- [24] 汪振国, 雷晓燕, 罗锐. 普通轨与槽型轨对现代有轨电车小半径曲线通过能力的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(1): 72-76.  
WANG Z G, LEI X Y, LUO K. Influence of general rail and grooved rail on small radius curve passing capacity of modern tram[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(1): 72-76.



第一作者:党红玲(1980—),女,高级工程师,研究方向为城市轨道交通建设及管理。E-mail: danghongling@gzmt.com。



通信作者:委平(1968—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为铁道工程设计与理论研究。E-mail: pinglou@csu.edu.cn。

(责任编辑:李根)