

## 基于降低悬挂式单轨车辆侧滚的结构参数优化研究\*

唐 飞<sup>1</sup> 杜子学<sup>2</sup>

(1. 重庆中车长客轨道车辆有限公司, 401133, 重庆; 2. 重庆交通大学轨道交通研究院, 400074, 重庆//第一作者, 教授)

**摘 要** 根据悬挂式单轨车辆的结构特点, 通过多体动力学软件 ADAMS 建立悬挂式单轨车辆动力学模型。以车辆走行轮、导向轮、吊架、空气弹簧、中心销、横向拉杆、横向减振器等结构参数作为设计变量, 结合多目标优化软件 Mode FRONTIER 和单因素敏感性分析方法, 探索了影响悬挂式单轨车辆侧滚的因素, 并甄别出影响悬挂式单轨车辆侧滚的主要因素; 针对影响车辆侧滚的主要因素, 确立将车辆具有良好的曲线通过性和运行稳定性作为约束条件, 建立了以车辆侧滚为目标的优化数学模型, 采用第二代非劣排序遗传算法为优化方法, 进行了以车辆侧滚最优为目的的优化研究。优化结果表明: 在满足给定的约束条件下, 当单轨车辆各参数达到最优解时, 车辆侧滚角减小了 6.3% ~ 11.4%。

**关键词** 悬挂式单轨车辆; 侧滚; 结构参数; 动力学模型; 敏感性试验

**中图分类号** U270.2; U232

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2019.03.009

## Optimization of Structural Parameter Based on Reducing the Side Roll of Suspended Monorail Vehicle

TANG Fei, DU Zixue

**Abstract** According to the structural characteristics of the suspension monorail vehicle, a dynamic model of monorail vehicle is established by using the multi-body dynamics software (ADAMS). In which the vehicle traveling wheel, guide wheel, hanger, air spring, center pin, horizontal rod and transverse vibration are selected as design variables, the main factors that influence the suspended monorail vehicle roll are explored and identified by combining the multi-objective optimization software (MODE FRONTIER) and the single factor sensitivity analysis method. Aiming at the above influencing factors, the vehicle good curve negotiation and running stability are selected as constraint conditions, an optimization mathematical model against the vehicle roll is established. Then, the second generation non-inferior ranking genetic algorithm is used as the optimization method to study the vehicle roll opti-

mization. The optimization results show that the vehicle roll has decreased 6.3% ~ 11.4% when the parameters of the monorail vehicle reach the optimal solution under given constraint conditions.

**Key words** suspension monorail; vehicle roll; structural parameter; dynamics model; sensitive experiment

**First-author's address** Chongqing CRRC Changke Railway Vehicle Co., Ltd., 401133, Chongqing, China

悬挂式单轨作为一种轻型、中速、中运量的新型公共交通方式, 具有施工简单、费用低、工期短、受地面交通干扰小、爬坡能力和曲线通过能力强、噪声低和乘坐舒适等特点<sup>[1]</sup>。其可与常规道路公交、轨道交通等其它公交方式错位发展、互为补充, 是其他公共交通方式的有益补充和完善。

由于悬挂式单轨车辆结构和运行方式的独特性, 在曲线入口、出口处的缓和曲线区间, 车辆受曲线离心力作用发生较大侧滚<sup>[2]</sup>, 乘客需要频繁控制身体不发生倾斜, 容易引起乘客身体疲倦, 影响车辆运行稳定性和舒适性。因此, 有必要对悬挂式单轨车辆在曲线运行时产生的较大的侧滚开展研究。

## 1 悬挂式单轨车辆模型的建立

### 1.1 悬挂式单轨结构

悬挂式单轨交通系统的车体是悬挂在轨道梁的下方, 车辆转向架、走行轨面、导向轨面及电力通信系统均安装在下部有开口的轨道梁内部, 走行轮和导向轮沿着轨道梁内部铺设的走行轨面和导向轨面行驶<sup>[3]</sup>。轨道梁由支柱支承, 支柱可采用混凝土结构或钢管结构。悬挂式单轨交通系统的结构如图 1 所示。

### 1.2 转向架结构

悬挂式单轨车辆转向架是其最独特的组成部分。悬挂式单轨车辆转向架主要由构架、走行轮、

\* 国家自然科学基金项目(51475062)

导向轮、空气弹簧、枕梁、横向拉杆、中心销、吊架、安全钢索、横向减振器、牵引电机和差速装置等组成。悬挂式单轨车辆转向架结构如图 2 所示。

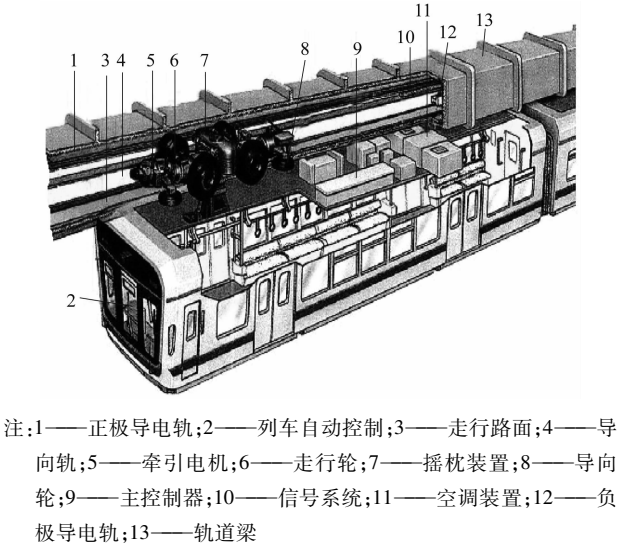


图 1 悬挂式单轨交通系统结构图

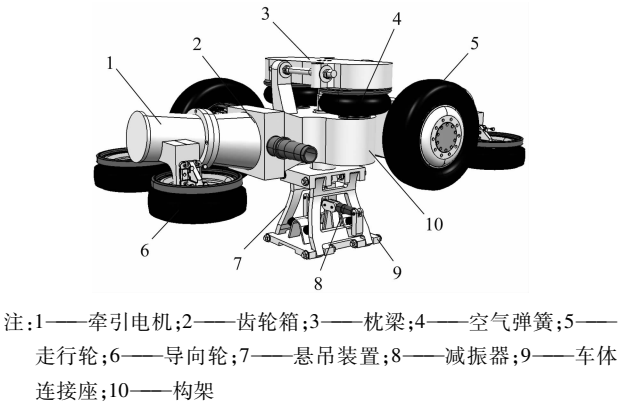


图 2 悬挂式单轨车辆转向架结构图

1.3 车辆拓扑构型

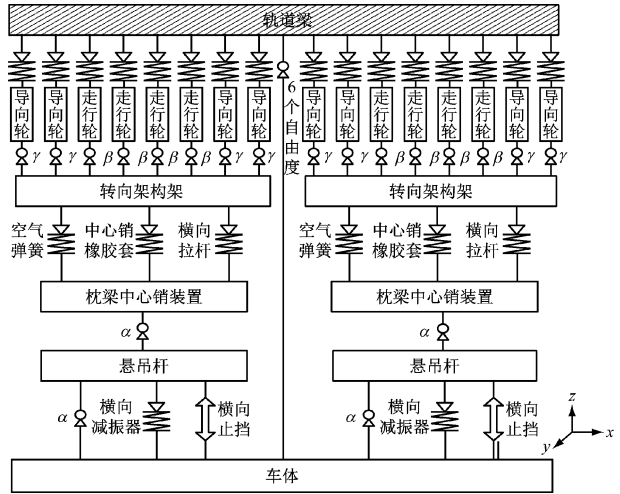
通过分析悬挂式单轨车辆结构,得到悬挂式单轨车辆动力学关系拓扑构型,如图 3 所示。

2 悬挂式单轨车辆动力学模型的建立

按照悬挂式单轨车辆动力学关系拓扑构型,运用多体动力学软件 ADAMS 建立悬挂式单轨车辆动力学模型,如图 4 所示。采用国标 GB 7031—1986《车辆振动输入-路面平度表示方法》中的 A 级路面来模拟轨道不平顺<sup>[5]</sup>。线路参数如表 1 所示。

3 悬挂式单轨车辆结构参数的敏感性分析

由于悬挂式单轨车辆结构和运行方式的独特性,在离心力的作用下,车辆通过曲线时产生的侧



注:α,β,γ 分别代表绕 x、y、z 轴的自由度  
图 3 悬挂式单轨车辆动力学关系拓扑构型

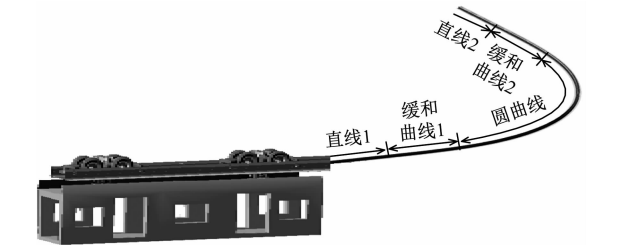


图 4 悬挂式单轨车辆动力学模型

表 1 线路参数表

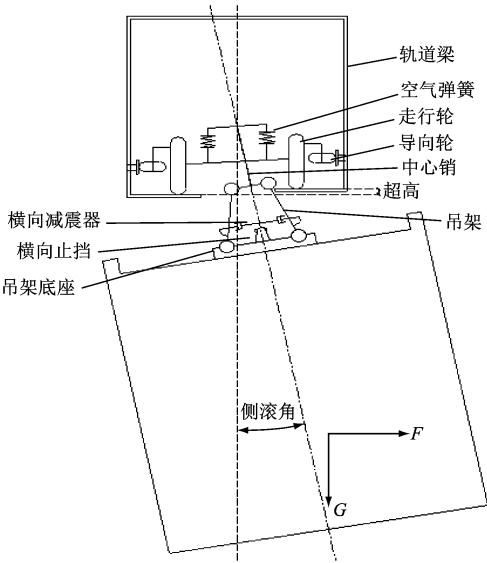
线路类型	直线 1 长/m	缓和曲线 1 长/m	圆曲线		缓和曲线 2 长/m	直线 2 长/m	总长/m	速度/(km/h)
			半径/m	长度/m				
1	100	40	50	50	40	100	330	25
2	100	50	100	105	50	100	405	36
3	100	80	200	160	80	100	520	50
4	100	100	300	160	100	100	560	60
5	100	90	400	140	90	100	520	70

滚较大。悬挂式单轨车辆通过曲线时车体的侧滚状态如图 5 所示。针对悬挂式单轨车辆通过曲线时的侧滚状态,从机构优化的角度,以走行轮、导向轮、中心销、吊架、吊架底座、横向减振器、横向止挡、横向拉杆的空间位置为设计变量,研究影响车辆侧滚的主要结构参数,共设置 23 个优化变量。

Mode FRONTIER 软件具有模型参数灵敏度分析的功能,可对动力学模型中的参数进行全局灵敏度分析。为研究结构参数对车辆侧滚的灵敏度影响,首先需设置 23 个结构参数的取值范围,如表 2 所示。

表 2 敏感性试验参数表

参数名称	取值范围/m
走行轮纵向轴距	$1.0 \leq \cdot \leq 2.0$
导向轮纵向轴距	$3.0 \leq \cdot \leq 3.5$
导向轮垂向高度	$0 \leq \cdot \leq 0.5$
中心销高度	$0.5 \leq \cdot \leq 1.0$
吊架顶端纵向间距	$0 \leq \cdot \leq 0.5$
吊架顶端横向间距	$0 \leq \cdot \leq 0.5$
吊架底端纵向间距	$0 \leq \cdot \leq 1.0$
吊架底端横向间距	$0 \leq \cdot \leq 1.0$
吊架垂向高度	$0.3 \leq \cdot \leq 1.0$
横向止挡纵向间距	$0 \leq \cdot \leq 0.5$
横向止挡横向间距	$0 \leq \cdot \leq 0.5$
横向止挡垂向高度	$0 \leq \cdot \leq 0.5$
横向止挡长度	$0 \leq \cdot \leq 0.5$
横向拉杆纵向间距	$0 \leq \cdot \leq 0.5$
横向拉杆横向间距	$0 \leq \cdot \leq 0.5$
横向拉杆垂向高度	$0 \leq \cdot \leq 0.5$
横向拉杆长度	$0 \leq \cdot \leq 0.5$
车辆质心高度	$1.5 \leq \cdot \leq 3.0$
空气弹簧横向间距	$0 \leq \cdot \leq 0.5$
空气弹簧中心高度	$0 \leq \cdot \leq 0.5$
空气弹簧长度	$0 \leq \cdot \leq 0.5$
吊架底座纵向宽度	$0 \leq \cdot \leq 0.5$
吊架底座高度	$0 \leq \cdot \leq 0.5$



注:  $F$  表示车辆受到的离心力;  $G$  表示车辆受到的重力

图 5 悬挂式单 4 轨车辆通过曲线时车体的侧滚状态

利用 Mode FRONTIER 软件中的建模功能,建立悬挂式单轨车辆结构参数灵敏度分析模型,如图 6 所示。

悬挂式单轨车辆结构参数灵敏度分析模型建立之后,采用 Mode FRONTIER 软件中的标准化回归系数法对影响因子进行定性和定量的全局灵敏度分析。各结构参数定性灵敏度分析的可视化柱状图如图 7 所示。

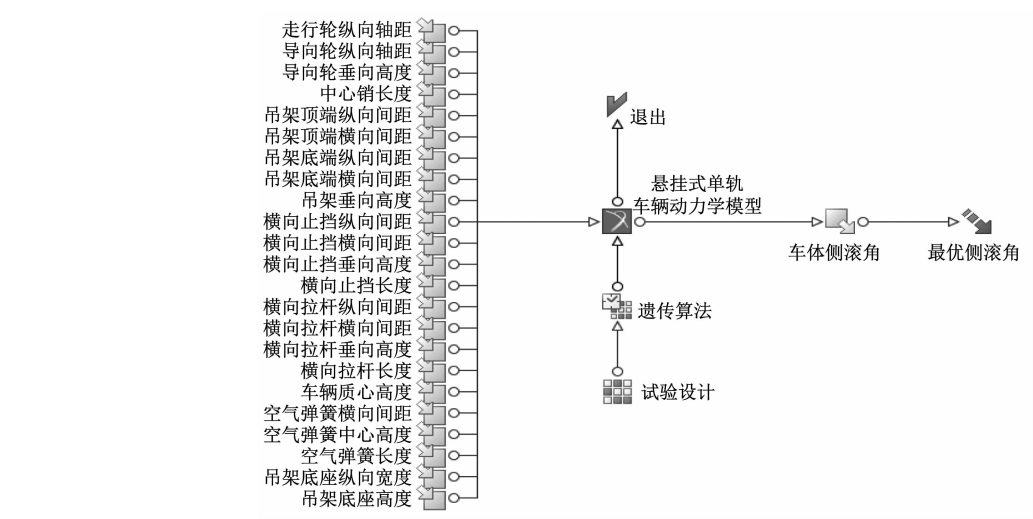


图 6 悬挂式单轨车辆结构参数敏感度分析模型

通过对灵敏度计算结果进行分析,得到主要影响悬挂式单轨车辆结构侧滚的 9 个结构参数为空气弹簧中心高度、导向轮垂向高度、横向拉杆纵向间距、吊架底端横向间距、空气弹簧横向间距、吊架底端纵向间距、横向止挡高度、横向拉杆长度和横向

止挡纵向间距。其中,空气弹簧中心高度、横向止挡纵向间距对侧滚的影响为正相关;导向轮垂向高度、横向拉杆纵向间距、吊架底端横向间距、空气弹簧横向间距、吊架底端纵向间距、横向止挡高度、横向拉杆长度对侧滚的影响为负相关。本文将选取

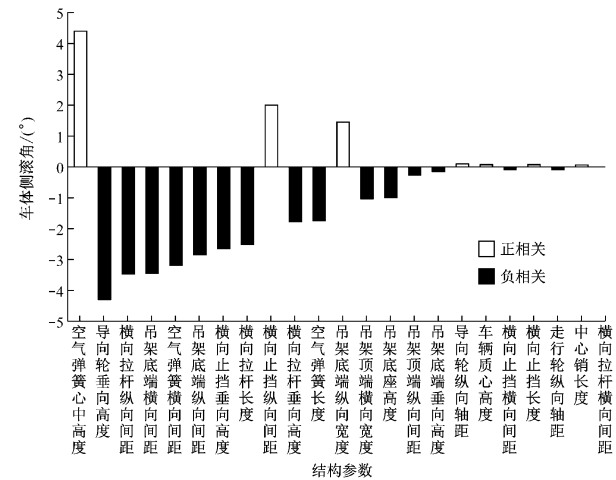


图7 悬挂式单轨车辆结构灵敏度分析柱状图

以上9个主要参数对悬挂式单轨车辆的侧滚进行优化。

4 悬挂式单轨车辆侧滚模型优化

4.1 优化变量及目标的确立

根据灵敏度分析,选取空气弹簧中心高度、导向轮垂向高度、横向拉杆纵向间距、吊架底端横向间距、空气弹簧横向间距、吊架底端纵向间距、横向止挡高度、横向拉杆长度和横向止挡纵向间距为主要优化变量,并以车辆侧滚为优化目标函数。

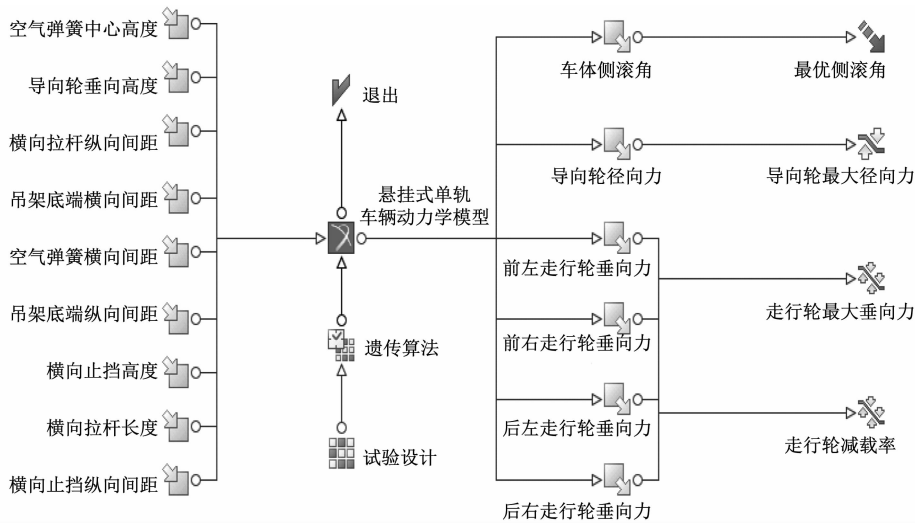


图8 Mode FRONTIER 与 ADAMS 的联合优化模型

表3 车体侧滚角		
线路曲线 半径/m	侧滚角/(°)	
	优化前	优化后
40	3.72	3.46
45	3.78	3.54
50	4.12	3.65
100	4.36	4.07

4.2 约束条件的确立

车辆通过曲线时应具有良好的通过性与稳定性,由于悬挂式单轨车辆不存在倾覆与脱轨等现象,所以拟采用的约束条件为:轮重减载率应小于0.6,走行轮最大垂向力应小于43.39 kN,以及导向轮最大径向力应小于23.05 kN<sup>[6]</sup>。

4.3 优化模型的建立

运用 Mode FRONTIER 与 ADAMS 建立联合优化模型,如图8所示。模型采用 NSGA-II 遗传算法,并进行多次迭代,最后9个结构参数及目标函数均收敛于一点,如图9所示。

通过优化得出空气弹簧中心高度为393.9 mm、导向轮垂向高度为122.8 mm、横向拉杆纵向间距为144.1 mm、吊架底端横向间距为272.5 mm、空气弹簧横向间距为181.8 mm、吊架底端纵向间距为459.1 mm、横向止挡高度为1 030.1 mm、横向拉杆长度为492.1 mm、横向止挡纵向间距为202 mm时车体侧滚角达到最优。为了对优化效果进行验证,本文选取半径分别为40 m、45 m、50 m和100 m时的4种典型弯道对优化效果进行验证,优化结果对比分析如表3和图10所示。由表3和图10可知,优化后车体侧滚角降低了6.3%~11.4%。

5 结语

(1) 针对悬挂式单轨车辆侧滚较大问题,从机构优化的角度,开展了车体侧滚的影响因子分析。通过分析发现空气弹簧中心高度、导向轮垂向高度、横向拉杆纵向间距、吊架底端横向间距、空气弹

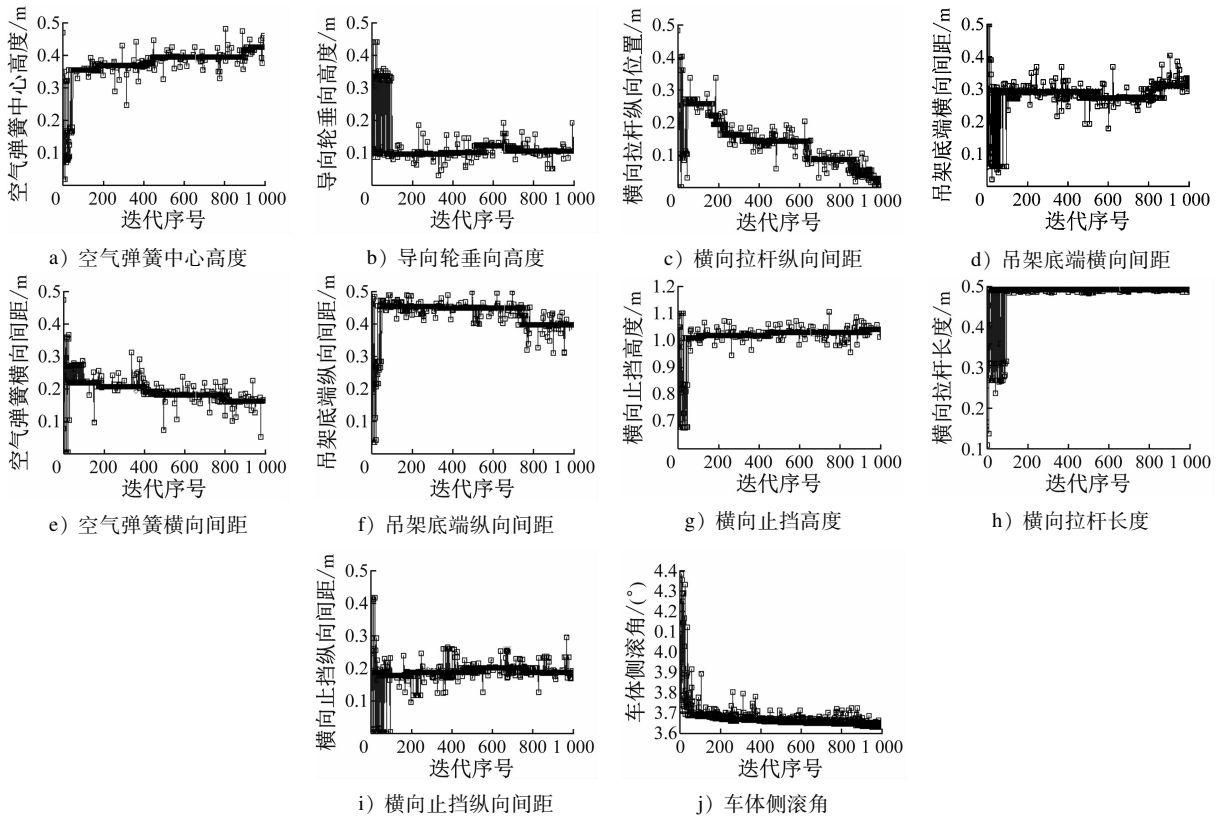


图9 优化模型中各参数及目标迭代过程

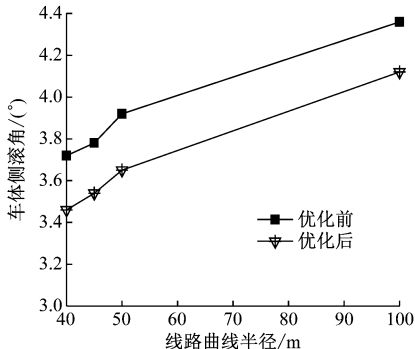


图10 模型优化前后车体侧滚角对比

簧横向间距、吊架底端纵向间距、横向止挡高度、横向拉杆长度和横向止挡纵向间距是影响悬挂式单轨车辆侧滚的主要结构参数。

(2) 当空气弹簧中心高度为 393.9 mm、导向轮垂向高度 122.8 mm、横向拉杆纵向间距 144.1 mm、吊架底端横向间距 272.5 mm、空气弹簧横向间距 181.8 mm、吊架底端纵向间距 459.1 mm、横向止挡高度 1 030.1 mm、横向拉杆长度 492.1 mm、横向止挡

纵向间距 202 mm 时车体侧滚角达到最优,此时车体侧滚角由 3.72° 降低至 3.46°,降低幅度为 6.9%。

(3) 选择曲线半径分别为 40 m、45 m、50 m、100 m 时的 4 种典型线路类型对优化效果进行验证,结果显示,车体侧滚角降低了 6.3% ~ 11.4%,说明优化方案具有可行性和普遍性。

## 参考文献

- [1] 周美艳. 悬挂式空中列车的应用发展[J]. 国外铁道车辆, 2014, 51(2): 10.
- [2] 铃木浩明. 车辆通过缓和曲线时乘坐舒适度评价法[J]. 国外铁道车辆, 2001, 38(3): 36.
- [3] 沈熙保. 单轨交通运输[J]. 交通与运输, 2006(4): 25.
- [4] 许文超, 李芾, 黄运华. 城市轻轨车辆走行部技术综述[J]. 城市轨道交通, 2015(1): 28.
- [5] 曹恺. 基于 ADAMS 的悬挂式单轨车辆悬挂参数优化和侧风影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [6] 曾令会, 王孔明, 刘文龙, 等. 两种悬挂式单轨车辆动力学性能对比分析[J]. 成都大学学报, 2016, 35(4): 400.

(收稿日期: 2017-05-18)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: [tougao. umt1998. com](http://tougao. umt1998. com)