

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202011022



单轴转向架跨座式单轨车辆 悬挂系统参数优化分析

文孝霞, 韩轲, 杜子学

(重庆交通大学 轨道交通研究院, 重庆 400074)

摘要: 为了改善单轴转向架跨座式单轨车辆的曲线通过性能,对单轴转向架跨座式单轨车辆的结构及运行机理进行分析;运用 SIMPACK 动力学仿真软件,建立单轴式单轨车辆动力学仿真模型;然后,通过 Isight 多目标优化软件对单轴式单轨车辆悬挂系统参数进行灵敏度分析,得到车辆过弯时对导向力矩和走行轮侧偏力影响较大的参数;最后,以导向力矩与走行轮侧偏力为目标,采用改进型遗传算法进行多目标优化研究.结果表明:优化后单轴式单轨车辆的导向力矩比优化前减少了 3.67%,走行轮侧偏力比优化前减少了 6.30%,在一定程度上改善了单轴转向架跨座式单轨车辆的曲线通过性能.

关键词: 单轴转向架跨座式单轨车辆;曲线通过性能;多目标优化;改进型遗传算法

中图分类号: U 232 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)06-0725-07

Optimization Analysis of Suspension System Parameters of Straddle Monorail Vehicle With Single Axle Bogies

WEN Xiaoxia, HAN Ke, DU Zixue

(Institute of Rail Transit, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to improve the curve negotiation performance of straddle monorail vehicles with single axle bogies, their structure and operation mechanism were analyzed, and the dynamics simulation model of single axle monorail vehicle was established using the dynamics simulation software SIMPACK. The sensitivity analysis of suspension system parameters of single axle monorail vehicle was carried out by multi-objective optimization software Isight, and the parameters were obtained which have great influence on guiding torque and running wheel cornering force. The multi-objective optimization research was carried out with an improved genetic algorithm aiming at optimizing the guiding torque and running wheel cornering force. For the optimized single axle monorail vehicle, they have been reduced by 3.67% and 6.30% respectively compared with those before optimization. The results show that the proposed method has improved the curve negotiation performance of straddle monorail vehicle with single axle bogie to a certain extent.

Keywords: straddle monorail vehicle with single axle bogies; curve negotiation performance; multi-objective optimization; improved genetic algorithm

目前,跨座式单轨车辆有两种典型结构型式的转向架,即单轴式转向架和双轴式转向架,它们在转向架构造、道岔、轨道梁等方面具有较大的区别^[1],从而导致运行机理和动力学性能等方面存在明显差

收稿日期: 2020-11-29

通信作者: 文孝霞(1977-),女,副教授,博士,主要从事城市轨道交通系统动力学研究. E-mail: wenxiaoxia150@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475062)

异. 单轴转向架跨座式单轨车辆(简称单轴式单轨车辆)的转向架是只有一个轮对的非传统转向架^[2], 具有质量轻、线路适应能力强、牵引能耗低、结构简单、制造成本低等优点, 使单轴式单轨车辆特别适用于中、小运量需求的城市轨道交通支线、辅助线和旅游线路. 为了适应中、小城市轨道交通小运量的运输需求, 轨道企业积极开发新型单轴式单轨车辆产品, 抢占中、小运量轨道运输的市场份额. 单轴式单轨车辆具有复杂的空间杆系结构, 由于悬挂系统和复杂空间杆系结构之间的相互作用对车辆过弯时的导向性能产生影响, 导致车辆的曲线通过性能变差、走行轮磨损严重等问题. 因此, 对单轴式单轨车辆过弯时的导向性能及走行轮磨损的减少等方面进行研究具有重要的意义.

目前, 国内外在跨座式单轨车辆领域的研究主要集中于车辆系统动力学及车轨耦合动力学方面. Jiang 等^[3]对车辆系统动力学进行研究, 建立铰接式跨座式单轨车辆动力学模型, 通过车体加速度响应与现场试验结果的比较, 验证单轨车辆模型的有效性. 任利惠等^[4]考虑轮胎的径向刚度、侧偏刚度及走行轮的纵向滑转等因素, 建立跨座式单轨车辆曲线段动力学分析模型, 发现水平轮预压力的大小对跨座式单轨车辆的曲线通过性能具有显著的影响. 杜子学等^[5]基于多刚体动力学理论, 建立跨座式单轨车辆动力学仿真模型, 仿真结果表明, 曲线超高率和半径对跨座式单轨车辆曲线通过性能有较大的影响. 梁志华^[6]结合地铁车辆的曲线通过性能评价指标, 制定跨座式单轨车辆曲线通过性能评价指标. 基于此, 本文对单轴转向架跨座式单轨车辆悬挂系统参数优化进行分析.

1 单轴式单轨车辆动力学模型

1.1 车辆走行机理分析

单轴式转向架, 如图 1 所示. 新开发的单轴式单轨车辆的转向架只有一个单独的轮对, 结构形式不稳定, 为了保持转向架和车体之间的相对平稳, 防止转向架出现俯仰和摆振等现象, 需要在车体和转向架构架之间设置约束装置, 即空间杆系结构. 空间杆系结构主要由牵引组件、抗点头扭杆等组成, 抗点头扭杆一端与车体相连, 另一端与转向架构架相连.

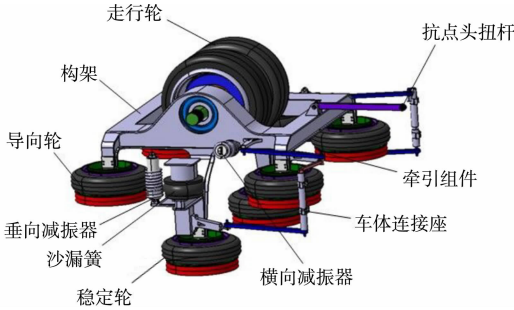


图 1 单轴式转向架
Fig. 1 Single axle bogies

在车辆行驶过程中, 一部分牵引力通过牵引组件传递, 牵引力从转向架构架传递给牵引连杆, 再通过牵引连杆上的车体连接座传递给车体; 另一部分牵引力则通过抗点头扭杆传递, 牵引力从与转向架构架相连的抗点头扭杆一端, 传递给与车体相连的另一端; 前、后转向架的空间杆系结构对称布置. 走行部件与车体之间通过横向和垂向减振器与液压弹簧相连接, 垂向和横向减振器一前一后斜对称布置于转向架左右两侧. 单轴式单轨车辆的垂向载荷从车体经一定垂向刚度的沙漏簧传递到转向架; 横向载荷从车体经一定横向刚度的沙漏簧和牵引杆系传递到转向架; 纵向载荷经一定纵向刚度的牵引杆系从转向架传递到车体^[7].

1.2 车辆动力学模型的建立

单轴式单轨车辆的实际结构较为复杂, 不仅各部件间存在相互作用力和相对运动, 而且车轮与轨道梁之间也存在复杂的轮轨耦合关系. 有的部件可视为刚体, 有的部件因具有特殊的非线性特性, 可视为弹性体. 在建立单轴式单轨车辆动力学模型时, 对动力学性能影响较大的部件应尽可能与实际情况相符, 而对动力学性能影响较小的部件可以进行适当的假设和简化^[8]. 因此, 文中做以下 3 点假设. 1) 忽略车体和前、后转向架等部件的弹性变形, 将其视为刚体. 2) 不考虑轨道梁弹性变形, 走行轮与轨道梁顶部始终保持接触状态. 3) 忽略单轴式单轨车辆中悬挂元件结构制造上的误差, 假定整个单轴式单轨车辆中各走行轮、导向轮和稳定轮结构对称, 且对应的动力学参数相等.

单轴式单轨车辆的动力学拓扑结构, 如图 2 所示. 图 2 中: γ, β 为自由度 (DOF). 车体与前、后转向架构架各有 5 个自由度, 分别为横摆、浮沉、侧滚、点头和摇头, 而走行轮只有相对于车轴绕 y 轴旋转 1 个自由度, 在 SIMPACK 动力学仿真软件中, 水平轮并非轮胎, 故通过弹簧-阻尼的接触力元的方式进行模拟, 不存在水平轮摇头的自由度. 因此, 单节单轴式单轨车辆模型的自由度为 19 个.

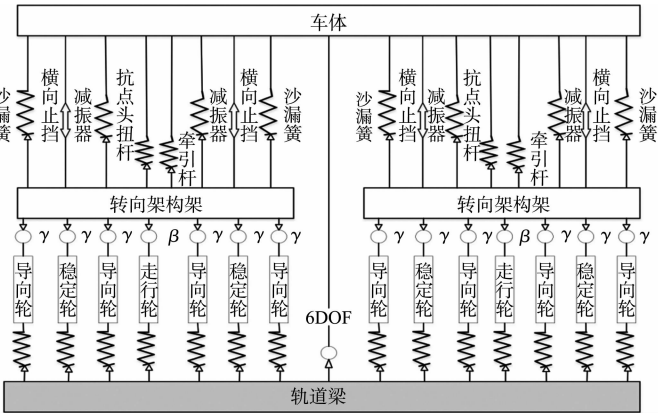


图 2 单轴式单轨车辆的动力学拓扑结构

Fig. 2 Dynamics topological structure of single axle monorail vehicle

基于单轴式单轨车辆的动力学拓扑结构,通过 SIMPACK 动力学仿真软件建立单节单轴式单轨车辆模型,以单轴式单轨车辆(车速 $v=30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)通过最小曲线半径为 100 m 线路时的工况为研究对象,其动力学模型,如图 3 所示。

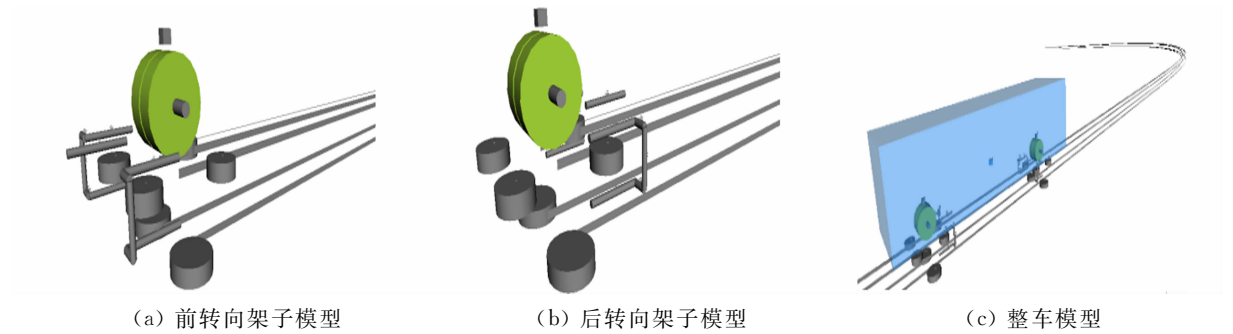


图 3 单轴式单轨车辆动力学模型

Fig. 3 Dynamics model of single axle monorail vehicle

2 灵敏度分析

2.1 灵敏度分析参数

通过 Isight 多目标优化软件建立单轴式单轨车辆灵敏度分析模型,选用 16 个参数进行分析,并对其上、下限进行设置。悬挂系统参数的设置,如表 1 所示。

表 1 悬挂系统参数的设置

Tab. 1 Setting of suspension system parameters

序号	参数	编号	上限	下限	序号	参数	编号	上限	下限
1	垂向减振器刚度/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	C-S	561 000	459 000	9	沙漏簧横向 阻尼/ $(\text{N}\cdot\text{s})\cdot\text{m}^{-1}$	TH-D-y	1 900	1 100
2	垂向减振器阻尼/ $(\text{N}\cdot\text{s})\cdot\text{m}^{-1}$	C-D	38 500	31 500	10	沙漏簧垂向 阻尼/ $(\text{N}\cdot\text{s})\cdot\text{m}^{-1}$	TH-D-z	49 940	40 860
3	横向减振器刚度/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	H-S	561 000	459 000	11	抗点头扭杆纵向 刚度/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	KDTNG-S-x	583 000	477 000
4	横向减振器阻尼/ $(\text{N}\cdot\text{s})\cdot\text{m}^{-1}$	H-D	16 500	13 500	12	抗点头扭杆横向 刚度/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	KDTNG-S-y	58 300	47 700
5	沙漏簧纵向刚度/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	TH-S-x	1 155 000	945 000	13	抗点头扭杆垂向 刚度/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	KDTNG-S-z	58 300	47 700
6	沙漏簧横向刚度/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	TH-S-y	945 000	115 500	14	抗点头扭杆纵向 阻尼/ $(\text{N}\cdot\text{s})\cdot\text{m}^{-1}$	KDTNG-D-x	16 500	13 500
7	沙漏簧垂向刚度/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	TH-S-z	962 500	787 500	15	抗点头扭杆横向 阻尼/ $(\text{N}\cdot\text{s})\cdot\text{m}^{-1}$	KDTNG-D-y	16 500	13 500
8	沙漏簧纵向阻尼/ $(\text{N}\cdot\text{s})\cdot\text{m}^{-1}$	TH-D-x	1 100	900	16	抗点头扭杆垂向 阻尼/ $(\text{N}\cdot\text{s})\cdot\text{m}^{-1}$	KDTNG-D-z	16 500	13 500

灵敏度分析是指分析一个系统的状态或输出的变化对系统参数变化的敏感程度. 一般通过逐一改变参数的数值来解释关键指标受参数变动影响的规律^[9]. 通过对输入参数进行分析, 筛选出对目标函数影响较大的参数, 再对其进行针对性的优化设计, 从而提高工作效率, 节省时间.

2.2 优化目标选择

跨座式单轨车辆的导向力矩(M)是衡量车辆曲线通过性能的指标, 走行轮侧偏力(F_{ty})是衡量走行轮偏磨程度的指标. 为了提高车辆曲线通过性能, 降低走行轮偏磨损程度, 将单轴式单轨车辆的导向力矩与走行轮侧偏力作为优化目标.

单轴式单轨车辆的结构特殊, 当车辆过弯道时, 轨道梁与导向轮之间的相互耦合作用产生使走行轮发生径向调节的导向力矩, 迫使车辆沿既定的轨道运行^[10]. 车辆通过弯道时, 最大导向力矩 M_{\max} 的计算公式为

$$M_{\max} = \frac{1}{2} \times L_1 \times (F_{d,1} + F_{d,4} - F_{d,2} - F_{d,3}). \tag{1}$$

式(1)中: $F_{d,1} \sim F_{d,4}$ 分别为 4 个导向轮的径向力; L_1 为导向轮的纵向距离.

跨座式单轨车辆过弯时转向架受力示意图, 如图 4 所示. 图 4 中: $F_{w,1}, F_{w,2}$ 为左、右稳定轮横向力; $F_{k,1}, F_{k,2}$ 为左、右沙漏簧纵向力; $F_{ty,1}, F_{ty,2}$ 为左、右走行轮侧偏力. 由图 4 可知: 当车辆过弯时转向架的导向力矩越小, 则车辆的曲线通过性越好; 走行轮偏磨损程度较低, 有利于提高走行轮的使用寿命.

2.3 灵敏度结果分析

为了筛选出对跨座式单轨车辆目标函数影响显著的参数, 对悬挂系统参数进行灵敏度分析. 结果表明, 对导向力矩影响最为明显的 4 个参数依次为沙漏簧横向刚度>抗点头扭杆横向刚度>横向减振器刚度>垂向减振器刚度. 导向力矩灵敏度分析柱状图, 如图 5 所示. 图 5 中: 正值表示正相关; 负值表示负相关; a 为灵敏度.

对走行轮侧偏力影响最为明显的 4 个参数依次为沙漏簧横向刚度>抗点头扭杆垂向阻尼>抗点头扭杆横向阻尼>横向减振器刚度. 走行轮侧偏力灵敏度分析柱状图, 如图 6 所示.

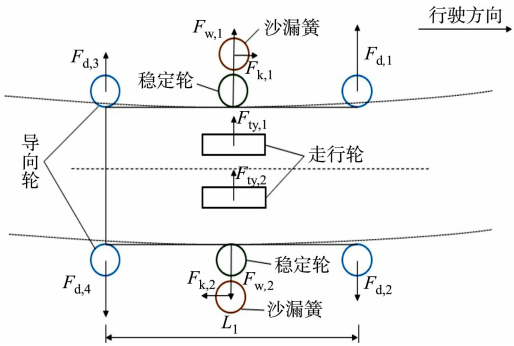


图 4 车辆过弯时转向架受力示意图
Fig. 4 Force schematic diagram of bogie during vehicle turning

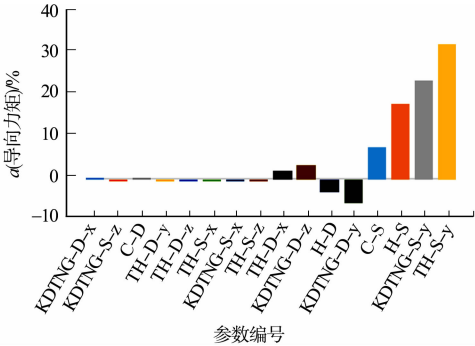


图 5 导向力矩灵敏度分析柱状图
Fig. 5 Sensitivity analysis histogram of guiding torque

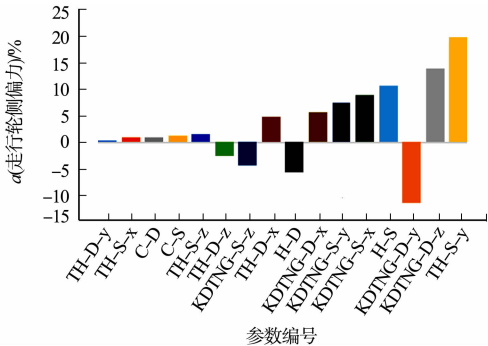


图 6 走行轮侧偏力灵敏度分析柱状图
Fig. 6 Sensitivity analysis histogram of running wheel cornering force

3 多目标优化分析

3.1 优化参数的取值范围

对单轴式单轨车辆悬挂系统参数进行灵敏度分析, 选取横向减振器刚度、垂向减振器刚度、沙漏簧横向刚度、抗点头扭杆横向刚度、抗点头扭杆横向阻尼、抗点头扭杆垂向刚度等对目标函数影响显著的

6 个优化参数,以车体侧滚角不超过 0.02 rad 和水平轮最大径向力不超过 20 kN 为约束条件^[11]. 优化参数的设置,如表 2 所示.

表 2 优化参数的设置
Tab. 2 Setting of optimization parameters

优化参数	编号	上限	下限
横向减振器刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	H-S	300 000	100 000
垂向减振器刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	C-S	300 000	90 000
沙漏簧横向刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	TH-S-y	530 000	300 000
抗点头扭杆横向刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	KDTNG-S-y	80 000	10 000
抗点头扭杆横向阻尼/ $(\text{N} \cdot \text{s}) \cdot \text{m}^{-1}$	KDTNG-D-y	300 000	100 000
抗点头扭杆垂向阻尼/ $(\text{N} \cdot \text{s}) \cdot \text{m}^{-1}$	KDTNG-D-z	300 000	100 000

3.2 优化模型搭建

采用 Isight 多目标优化软件,通过改进型遗传算法进行多目标优化分析. 首先,随机产生规模为 N 的初始化种群,非支配排序后,通过遗传算法的选择、交叉、变异 3 个基本操作,得到第 1 代子群;然后,从第 2 代开始,将父代个体与子代个体合并;再次,进行快速非支配排序,并对每个非支配层中的个体进行拥挤度排序,依据非支配关系及个体的拥挤度,选取合适的个体组成新的父代种群;最后,通过遗传算法的基本操作产生新的子代种群,依此类推,直到满足程序结束的条件^[12].

改进型遗传算法流程图,如图 7 所示.

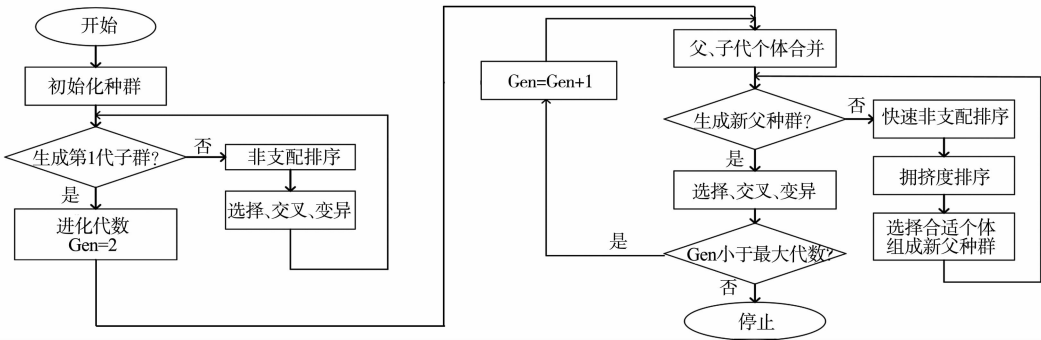


图 7 改进型遗传算法流程图
Fig. 7 Flow chart of improved genetic algorithm

搭建优化分析模型,首先,设置 Isight 多目标优化软件与 SIMPACK 动力学仿真软件的接口. 然后,将单轴式单轨车辆动力学模型需要的参数转化为优化模型中的设计变量,调用单轴式单轨车辆动力学模型,并进行第 1 次仿真计算;Isight 多目标优化软件通过改进型遗传算法对输入参数进行修改,并准备下一次计算. 计算完成后,Isight 多目标优化软件对获得的目标值进行评价,判断是否满足终止条件,如果没有,则重新进行上述迭代步骤^[13-16]. 优化分析模型,如图 8 所示.

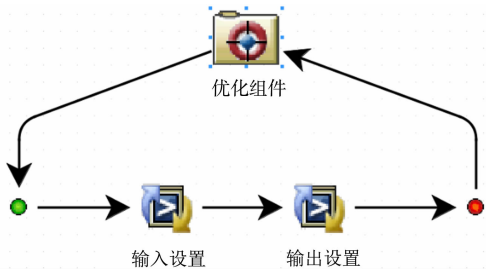


图 8 优化分析模型
Fig. 8 Optimization analysis model

基于搭建的优化分析模型,迭代 1 600 次(编号为 0~1 600 号)后,导向力矩与走行轮侧偏力均收敛,具体迭代过程,如图 9~12 所示. 图 9~12 中: n 为迭代步数. 在全面分析优化目标的前提下^[17-19],从帕累托(Pareto)优化解中挑选出 3 种比较理想的方案(462 号,672 号,926 号),如表 3 所示. 由表 3 可知:若以导向力矩为最优目标时,672 号方案较好,462 号方案较差;若以走行轮侧偏力为最优目标时,462 号方案较好,926 号方案较差.

综上可知,672 号方案导向力矩最小,走行轮侧偏力也较小. 因此,选用 672 号方案为最终优化方案. 导向力矩初始值为 21 927 $\text{N} \cdot \text{m}$,优化后为 21 116 $\text{N} \cdot \text{m}$,较优化前减少了 3.67%;走行轮侧偏力初始值为 2 348 N,优化后为 2 200 N,较优化前减小 6.30%. 因此,文中方法可达到优化目的,在一定程度

上改善了单轴式单轨车辆的曲线通过性能^[20-21].

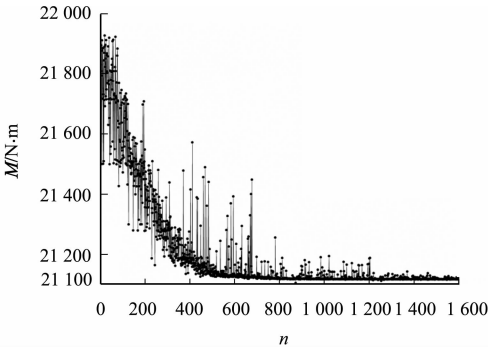


图 9 导向力矩的迭代过程

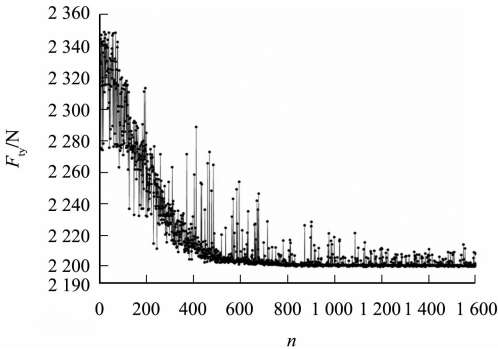


图 10 走行轮侧偏力迭代过程

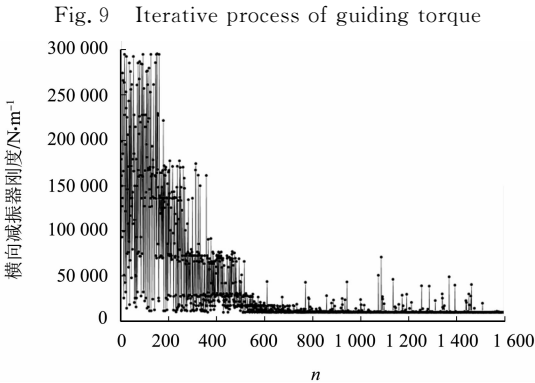


图 11 横向减振器刚度迭代过程

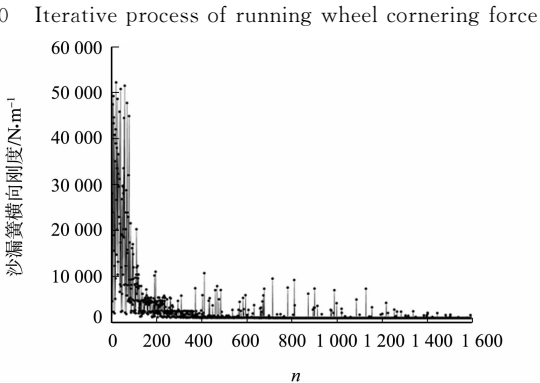


图 12 沙漏簧横向刚度迭代过程

Fig. 11 Iterative process of lateral shock absorber stiffness

Fig. 12 Iterative process of hourglass spring lateral stiffness

表 3 优化方案分析
Tab. 3 Analysis of optimization scheme

方案 编号	优化参数						优化目标	
	垂向减振器 刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	横向减振器 刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	沙漏簧横向 刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	抗点头扭杆 横向刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	抗点头扭杆 横向阻尼/ $(\text{N} \cdot \text{s}) \cdot \text{m}^{-1}$	抗点头扭杆 垂向阻尼/ $(\text{N} \cdot \text{s}) \cdot \text{m}^{-1}$	$M/$ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	$F_{\text{ty}}/$ N
462	117 664	74 951	11 823	60 891	52 558	43 588	21 214	2 190
672	149 857	10 181	10 024	10 165	57 217	20 939	21 116	2 200
926	181 095	14 045	10 024	36 306	57 672	20 895	21 144	2 211

4 结束语

对新型单轴式单轨车辆的曲线通过性能进行分析,运用 SIMPACK 动力学仿真软件与 Isight 多目标优化软件联合优化仿真,根据单轴式单轨车辆动力学拓扑结构,建立相应的单轴式单轨车辆动力学模型,对车辆悬挂系统参数灵敏度进行分析,筛选出对单轴式单轨车辆过弯时的导向力矩和走行轮侧偏力影响较大的参数,并对这些参数进行多目标优化分析,在保证车体侧滚角不超过 0.02 rad 和水平轮最大径向力不超过 20 kN 的前提下,单轴式单轨车辆过弯时的导向力矩比优化前减少了 3.67%,走行轮侧偏力比优化前减少了 6.30%。文中方法在一定程度上改善了单轴式单轨车辆的曲线通过性能。

参考文献:

[1] 杜子学,崔钰敏,唐飞.单轴式单轨转向架空气悬架参数优化[J].城市轨道交通研究,2020,23(6):44-48. DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.06.011.

[2] 韩志彬,李芾,黄运华,等.轨道参数对单轴转向架曲线通过性能的影响[J].电力机车与城轨车辆,2018,41(5):8-12,16. DOI:10.16212/j.cnki.1672-1187.2018.05.002.

[3] JIANG Yongzhi, WU Pingbo, ZENG Jing, *et al.* Multi-parameter and multi-objective optimisation of articulated monorail vehicle system dynamics using genetic algorithm[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2020, 58(1): 74-79. DOI: 10.1080/00423114.2019.1566557

[4] 任利惠, 冷涵, 黄有培, 等. 跨座式单轨车耦合转向架的径向机理及参数影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(5): 743-750. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.19296.

[5] 杜子学, 李云川, 梁志华, 等. 跨座式单轨车辆曲线通过安全性研究[J]. *机车电传动*, 2016(1): 79-83. DOI: 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.01.017.

[6] 梁志华. 跨座式单轨车辆动力学性能评价指标体系研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.

[7] 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.

[8] 文孝霞. 跨座式单轨车辆走行轮轮胎偏磨机理及控制方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.

[9] 杜子学, 李云川, 文孝霞, 等. 基于 SIMPACK/ISIGHT 的跨座式单轨列车走行轮偏磨研究与优化[J]. *铁道车辆*, 2016, 54(4): 1-5, 51. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7602.2016.04.001.

[10] 文孝霞, 杜子学, 左长永, 等. 曲线工况下跨座式单轨走行轮侧偏刚度对轮胎磨损的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2014, 14(2): 41-48. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2014.02.008.

[11] 郑凯锋, 杜子学. 车速和轨道半径对跨座式单轨车辆曲线通过性的影响[J]. *电力机车与城轨车辆*, 2011, 34(3): 23-24, 30. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1187.2011.03.007.

[12] 赵一霞. 改进自适应非支配排序遗传算法在多目标车间调度的研究与应用[D]. 大连: 大连交通大学, 2017.

[13] 崔钰敏. 单轴式单轨转向架空气悬架参数优化[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.

[14] 于大方. 基于 Isight 的城轨车辆动力学关键参数识别[J]. *机械工程与自动化*, 2018(5): 83-84. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6413.2018.05.030.

[15] 许亮. 曲线超高率对单轴转向架跨座式单轨车辆曲线通过性能的影响[J]. *无线互联科技*, 2018, 15(16): 117-119. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6944.2018.16.051.

[16] 杜子学, 申震. 基于遗传算法的跨座式单轨车辆曲线通过性能研究[J]. *中国铁路*, 2014(8): 59-62. DOI: 10.3969/j.issn.1001-683X.2014.08.016.

[17] 文孝霞, 尹晓康, 杜子学. 空气弹簧失效对高架胶轮驱动有轨电车小半径曲线通过性的影响[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(5): 587-592. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201903065.

[18] 杜子学, 邬浩鑫, 杨震. 直线电机跨座式单轨车辆曲线通过能力分析[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(4): 127-132. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2021.04.19.

[19] 谢毅, 寇峻瑜, 余浩伟, 等. 悬挂参数对悬挂式单轨车横向稳定性影响分析[J]. *铁道工程学报*, 2019, 36(12): 35-40. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2019.12.007.

[20] 杜子学, 许亮. 单轴转向架跨座式单轨车辆牵引平衡装置参数研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2020, 23(7): 129-132. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.07.027.

[21] 王红兵, 李国芳, 李炳劭, 等. 基于稳健试验设计的高速客车悬挂参数多目标优化[J]. *铁道机车车辆*, 2020, 40(2): 25-29, 97. DOI: 10.3969/j.issn.1008-7842.2020.02.06.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 崔长彩)