

地铁车辆受流器归算质量模型动态参数优化^{*}

阮 杰¹ 王柄钦¹ 郭 文¹ 黄冬亮² 阎晓晖³

(1. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 430070, 武汉; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司电气化设计研究院, 430063, 武汉; 3. 武汉地铁运营有限公司, 430035, 武汉//第一作者, 副教授)

摘 要 为改善地铁车辆靴轨系统动力学性能, 实现列车提速的目的, 对武汉市某地铁线路使用的受流器进行优化设计。通过动态标定试验得到受流器归算质量模型及其各项参数, 建立全参数化靴轨耦合有限元模型, 并利用试验数据验证了仿真模型的准确性。对该模型在 160 km/h 速度下进行了靴轨系统动力学仿真, 基于 MATLAB 软件编写了智能优化算法——粒子群算法, 并联合 ANSYS 软件进行协同优化分析, 以最小化接触力标准差为目标对受流器动态参数进行优化并得到了一组最优设计参数。结果显示, 优化后接触力标准差较优化前降低 43.89%, 极大地提高了受流器稳定性。

关键词 地铁; 车辆; 受流器; 归算质量模型; 动态参数

中图分类号 U264.3⁺4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.10.012

Dynamic Parameters Optimization for the Reduction Mass Model of Metro Vehicle Current Collector

RUAN Jie, WANG Bingqin, GUO Wen, HUANG Dongliang, YAN Xiaohui

Abstract To improve the dynamic performance of metro vehicle shoe-rail system, achieve the goal of train speed elevation, optimization design is carried out on the current collector used on a Wuhan metro line. Through the dynamic calibration test, the reduction mass model of the current collector and its parameters are obtained, and the fully parameterized shoe-rail coupling finite element model is established, and the accuracy of the simulation model is verified by the test data. A shoe-rail system dynamic simulation is carried out on the model at the speed of 160 km/h, and the intelligent optimization algorithm—particle swarm optimization algorithm is compiled based on MATLAB software for synergetic optimization analysis in conjunction with ANSYS software. The dynamic parameters of the current collector are optimized with the goal of minimizing the standard deviation of contact force, and a set of

optimal design parameters are obtained. Results show that the standard deviation of dynamic contact force after optimization is lowered by 43.89%, which greatly improves the current collection stability.

Key words metro; vehicle; current collector; reduction mass model; dynamic parameter

First-author's address Provincial Laboratory of Modern Automotive Parts Technology, Wuhan University of Technology, 430070, Wuhan, China

目前, 地铁车辆受流器与第三轨系统仅能承载 120 km/h 的设计速度^[1]。然而, 设计实现 160 km/h 甚至更高时速的地铁车辆, 已成为当前城市轨道交通行业的研究热点。

对于如何提升地铁车辆靴轨动力学性能, 国内外学者进行了大量的研究。文献[2]建立了受流器多体动力学模型, 分析了不同运行速度、不同结构参数对受流器靴轨冲击振动响应的影响规律。文献[3]通过开展靴轨关系动态试验, 对受流器与第三轨进行优化及改造升级, 进一步验证了列车运行速度提升至 160 km/h 的可能性。文献[4]探讨了第三轨轨面不平顺与径向倾斜等因素带来的靴轨间动态接触力及其振动特性的变化规律。文献[5]将受流器等效为带有扭转特性的悬臂梁机构, 建立了靴轨耦合动力学模型, 研究发现当列车运行速度超过 120 km/h 时, 靴轨接触质量急剧变差。上述文献在改善靴轨系统动力学性能的基础上进行了诸多研究和试验, 但对于高速工况下靴轨系统结构设计与优化的研究略显不足。

本文基于 ANSYS 软件建立地铁车辆靴轨耦合系统参数化模型。将受流器归算质量参数作为优化对象, 针对平直段线路靴轨的接触特性设计单目标优化方案, 通过智能算法得到适合列车设计速度

^{*} 中国铁路总公司课题(2016J006-B)

为 160 km/h 时受流器的最优设计参数,从而减少列车运行时的压力波动,提高受流质量。

1 地铁车辆靴轨耦合系统参数化模型的建立

1.1 受流器归算质量模型及靴轨仿真模型的建立

武汉某地铁线路使用下接触式受流器,对其进行受流器动态标定试验,识别目标受流器归算质量模型阶数以及动态参数的具体数值,具体测量方法参见文献[6]。为更好地模拟靴轨间的接触状态,还原靴轨系统的功能度,保留滑块几何形貌并进行实体建模,其外形尺寸与实测值保持一致。图 1 显示了通过标定试验得到的受流器归算质量等效模型与有限元模型。模型中各参数的定义和取值为: $m_1 = 2.0\text{ kg}$ 、 $m_2 = 1.8\text{ kg}$ 分别为质量块的第 1 阶、第 2 阶当量质量(m_1 与 m_2 之间、 m_2 与基座之间均通过弹簧阻尼器进行连接); $k_1 = 31\ 326\text{ N/m}$ 、 $k_2 = 1\ 456\text{ N/m}$,为弹簧阻尼器的刚度; $c_1 = 0.01\text{ N/(m/s)}$ 、 $c_2 = 20.18\text{ N/(m/s)}$,为弹簧阻尼器的阻尼。

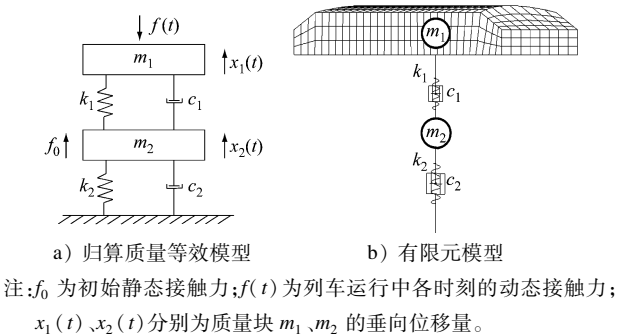


Fig. 1 Current collector reduction mass equivalent model and finite element model

由于第三轨的铝合金轨体和不锈钢带紧密压合,滑靴与之接触滑动过程中两者间不存在相对位移,故忽略其复合结构而将不锈钢带和铝合金基体进行整体建模。不区分两者材料属性,使用同种弹性模量对模型进行统一求解。另外,第三轨模型采用的体积质量为单位长度第三轨质量与其截面积的比值。在 ANSYS 软件中建立图 2 所示的第三轨有限元模型。

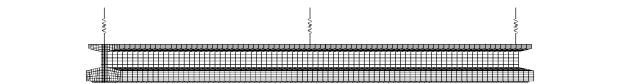


Fig. 2 Finite element model of the third rail

受流器通过与第三轨接触获取电流。在 ANSYS 软件中基于接触对单元建立靴轨耦合关系,接触算法采用罚函数法。

1.2 靴轨动态接触力仿真及模型验证

基于上述建立的靴轨耦合系统参数化模型,以 40 km/h 的列车运行速度作为研究工况,对弹性元件施加初始压力 135 N,以此来模拟受流器与第三轨实际接触时的静态接触力。根据仿真结果,提取接触力数值,并与相同跨距下靴轨动态接触力的实测数据对比,如图 3 所示。

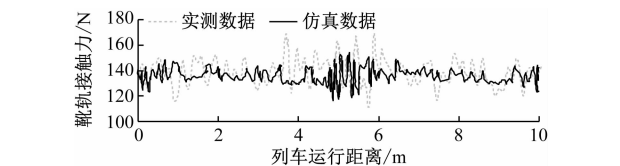


图 3 靴轨动态接触力实测数据与仿真数据对比曲线
Fig. 3 Comparison curve of measured data and simulated data of shoe-rail dynamic contact force

将仿真结果与试验结果中靴轨动态接触力的最大值、最小值、平均值及标准差作为评价指标。各参数对比结果如表 1 所示。

表 1 靴轨动态接触力仿真结果与试验结果统计分析对比
Tab. 1 Comparison of shoe-rail dynamic contact force simulation results and test results

项目	靴轨动态接触力/N			
	最大值	最小值	平均值	标准差
试验	169.47	108.15	138.24	8.04
仿真	154.42	116.36	135.78	6.74

根据图 3 与表 1 可以发现,靴轨动态接触力的仿真值与试验值基本吻合。靴轨动态接触力仿真最大值与最小值分别为 154.42 N 和 116.36 N,与试验数据相比,其最大值偏小,最小值偏大,这是由于仿真时忽略了轨道不平顺、环境及施工误差等因素的影响。另外,靴轨动态接触力标准差的仿真值较试验值虽存在 16.17% 的误差,但因为该试验值本身较小,仅有 8.04 N,而仿真值为 6.74 N,与试验数据相差不大。因此,可以对该模型进行下一步的优化研究。

2 受流器归算质量模型优化设计

2.1 受流器动态参数优化的数学模型

最优受流器的表征问题是非凸的且受到多种

条件的制约,无法保证设计空间是连续的,在使用基于梯度定义的搜索算法时容易造成收敛困难甚至无法求解。而基于全局寻优的粒子群算法不需要了解优化问题的全部特征即可完成求解,适应性更强,收敛速度更快,更加适合本文受流器动态参数的优化工作。

2.1.1 适应度函数

改进的第三轨-受流器相互作用的受流器相关优化问题可被定义为:

$$\begin{cases} \min F_0(u) \\ \text{s. t. } \begin{cases} g_m(u_i) = 0, m = 1, 2, \dots, M \\ h_n(u_i) \leq 0, n = 1, 2, \dots, N \end{cases} \\ u_{i, \text{lower}} \leq u_i \leq u_{i, \text{upper}}, i = 1, 2, \dots, I \end{cases} \quad (1)$$

式中:

- u_i ——设计变量;
- $F_0(u_i)$ ——适应度函数;
- $g_m(u_i)$ 、 $h_n(u_i)$ ——分别代表第 m 个等式约束和第 n 个不等式约束;
- $u_{i, \text{lower}} \setminus u_{i, \text{upper}}$ ——分别代表第 i 个设计变量取值的下限和上限;
- M 、 N 、 I ——分别代表等式约束、不等式约束和设计变量的数量。

此次优化的最终目标是使靴轨动态接触力标准差最小。如果靴轨动态接触力标准差低于其平均值的 20%, 则可以通过调节受流器拉伸弹簧机构来控制接触力平均值, 亦能确保受流器具有更好的安全边际量。因此, 适应度函数初步定义如下:

$$F_0(u_i) = \sigma_{\text{std}} \quad (2)$$

式中:

- σ_{std} ——靴轨动态接触力的标准差。

2.1.2 约束条件的处理方法

目前,国内外对列车高速运行工况下受流器与第三轨间的接触标准尚未明确, 仅能参考 TB/T 3271—2011《轨道交通 受流系统 受电弓与接触网相互作用准则》中对列车设计速度在 200 km/h 以内的弓网接触特性的相关规定。对受流器与第三轨接触作以下约束:

- 1) $120 \text{ N} \leq F_{\text{mean}} \leq 150 \text{ N}$, F_{mean} 为靴轨动态接触力平均值。
- 2) $\sigma_{\text{std}} \leq 0.2 F_{\text{mean}}$ 。
- 3) $H = (F_{\text{max}} - F_{\text{min}}) / 2 < 90 \text{ N}$, H 为接触力幅值^[7], F_{max} 、 F_{min} 分别为受流过程中靴轨动态接触力

的最大值与最小值。

- 4) 离线时间 $t = 0$ 。

本文采用罚函数法处理上述约束条件, 将其转化为无约束的最小值问题。通过罚函数法对适应度函数进行调整。

$$F_s(u_i) = \begin{cases} F_0(u_i) \\ F_0(u_i) + \gamma \sum_{i=0}^n \Phi_i \end{cases} \quad (3)$$

式中:

- $F_s(u_i)$ ——引入罚函数后新的适应度函数;
- γ ——惩罚因子;
- Φ_i ——第 i 个约束条件下的惩罚值;
- n ——约束条件的总个数。

2.1.3 设计变量

优化过程中使用的设计变量是在受流器集中质量模型中唯一具有物理意义的变量, 即所使用的受流器归算质量模型的质量、刚度和阻尼, 见图 1。因此, 设计变量的向量为:

$$u = [m_1 \quad m_2 \quad k_1 \quad k_2 \quad c_1 \quad c_2] \quad (4)$$

设计变量的约束范围直接影响优化结果的合理性。选择适当的边界不仅可以提高算法收敛的速度, 还能间接剔除不合理的设计参数。通过对仿真结果进行分析, 定义各设计参数的约束与取值范围, 如表 2 所示。

表 2 设计变量的约束与取值范围		
Tab.2 Constraint and value range of design variables		
设计变量	约束范围	取值范围
m_1/kg	$0.3m_1 \sim 1.5m_1$	$0.6 \sim 3.0$
$k_1/(\text{N/mm})$	$0.5k_1 \sim 1.2k_1$	$20 \sim 47$
$c_1/(\text{N}/(\text{m/s}))$	$0.1c_1 \sim 10.0c_1$	$0.001 \sim 0.100$
m_2/kg	$0.3m_2 \sim 1.5m_2$	$0.54 \sim 2.70$
$k_2/(\text{N/mm})$	$0.5k_2 \sim 1.2k_2$	$0.87 \sim 2.00$
$c_2/(\text{N}/(\text{m/s}))$	$0.1c_2 \sim 10.0c_2$	$2 \sim 100$

2.2 基于 MATLAB 软件和 ANSYS 软件的协同优化分析

基于 ANSYS 软件提供的批处理运行方式, 依靠 ANSYS 软件与 MATLAB 软件强大的数据读写能力, 在 MATLAB 软件中编写粒子群算法主程序; 由 ANSYS 软件接收 MATLAB 软件提供的设计变量, 通过 ANSYS 软件自动化建模进行受流器和第三轨耦合系统动态仿真; 将计算得到的靴轨动态接触力通过文本文档返回给 MATLAB 软件对该程序

进行优化,通过变量更新及不断迭代,实现二者的联合优化仿真。图 4 显示了 MATLAB 软件与 ANSYS 软件的协同优化流程。

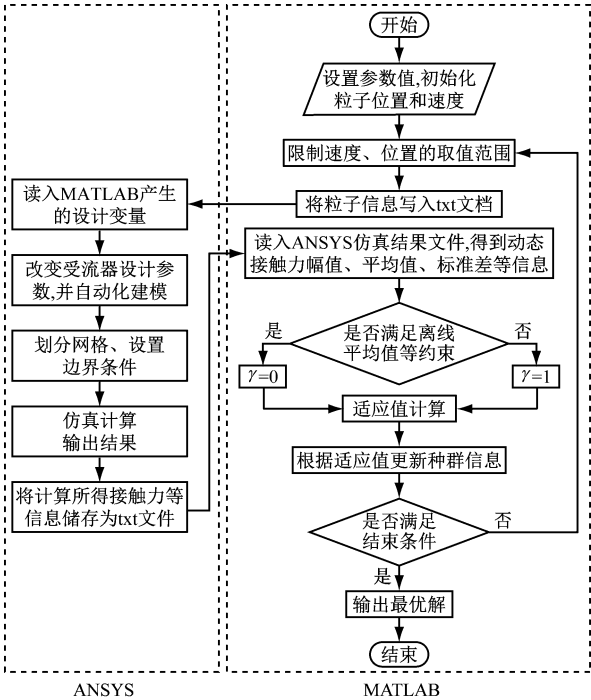
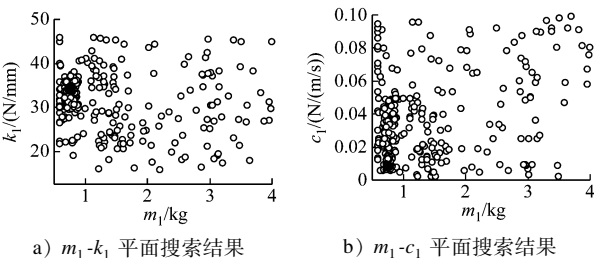


图 4 MATLAB 软件与 ANSYS 软件交互设计流程
Fig.4 Interactive design process of MATLAB and ANSYS

3 受流器归算质量参数优化结果分析

3.1 受流器归算质量参数优化结果

整个优化过程共设置初始粒子 15 个、迭代 20 次,受流器加载运行速度 160 km/h。将优化结果分为 m_1 、 k_1 、 c_1 和 m_2 、 k_2 、 c_2 两个搜索空间。图 5 和图 6 分别显示了粒子在三维空间中两个平面上的投影。



注: · 为最优解,图 6 同。

图 5 受流器一阶动态参数的二维搜索空间
Fig.5 Two dimensional search space for first-order dynamic parameters of current collector

m_1 的取值主要由滑靴质量决定, k_1 、 c_1 主要受

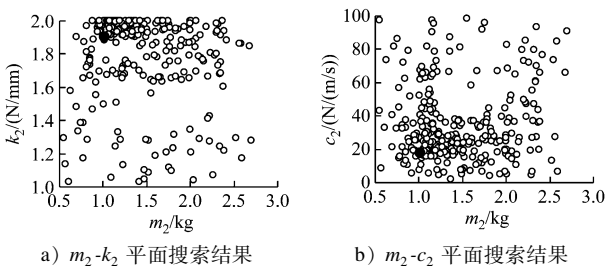


图 6 受流器二阶动态参数的二维搜索空间
Fig.6 Two dimensional search space for second-order dynamic parameters of current collector

摆杆弹性变形的影响。通过粒子寻优, m_1 在解空间中迅速降低至设计要求的最小值附近, 达到 0.76 kg, 远低于试验标定结果; c_1 、 k_1 分别在 0.005 ~ 0.050 N/(m/s) 和 30 ~ 36 N/mm 范围内聚集。综上, 在适当范围内有效减小滑靴质量可降低列车行驶时的压力波动; 摆杆的等效刚度可适当降低, 但不宜低于 30 N/mm; c_1 对于靴轨动态接触力标准差的影响较小, 建议控制在 0.05 N/(m/s) 以下。

m_2 由除滑靴外其余部件的质量决定, k_2 、 c_2 代表了拉伸弹簧的等效刚度与阻尼。在整个解空间中, k_2 呈明显增加趋势, 基本达到规定范围的上限, 最优结果为 1 905 N/m; c_2 在其初始值附近小幅变动; m_2 呈减小趋势, 且该值最终稳定在 0.9 ~ 1.4 kg 范围内。仿真结果表明, 增加拉伸弹簧的刚度并降低集电靴的质量可以降低靴轨动态接触力标准差, 但集电靴质量不宜过小, 否则会降低靴轨间接触力; 同时, 建议将拉伸弹簧的等效刚度设置在 1 900 N/m 左右。表 3 为优化前后受流器各参数取值对比。

表 3 优化前后受流器各参数取值对比		
Tab.3 Comparison of parameter values before and after optimization		
设计变量	优化前后设计变量取值	
	优化前	优化后
$k_1/(N/m)$	39 967	34 172
m_1/kg	2.00	0.76
$c_1/(N/(m/s))$	0.010	0.008
$k_2/(N/m)$	1 672.00	1 905.00
m_2/kg	1.80	1.02
$c_2/(N/(m/s))$	20.18	17.92

3.2 优化后列车不同速度下的靴轨接触特性

采用优化前后受流器的两组动态参数, 在列车运行速度分别为 40 km/h、80 km/h、120 km/h 及

160 km/h 的条件下,对靴轨接触特性进行动力学仿真对比分析。图 7 为优化前后靴轨动态接触力变化曲线。由图 7 可见,优化前后靴轨动态接触力最大值均出现在支撑位置附近,而优化后靴轨动态接触力幅值有了明显降低。表 4 为优化前后列车不同运行速度下靴轨动态接触力的对比情况。

根据表 4 可知,优化后受流器的各参数不仅可以满足列车不同速度下的运行要求,同时对于降低靴轨动态接触力标准差有明显优势,且随着列车运行速度的增加,改善效果越为明显。当列车运行速度为 160 km/h 时,优化前靴轨动态接触力最大值达到 247.64 N,最小值仅为 48.92 N,标准差为 31.62 N。由此表明,在该运行速度下靴轨动态接触力变化幅度较大,波动剧烈。优化后靴轨动态接触力标准差降至 17.74 N,降幅达 43.89%;而靴轨动态接触力平均值与优化前基本一致,且该值在列车不同运行速度下均可维持在 130~140 N。由此表明,优化后靴轨动态接触力波动更加平稳,即受流器的功能特性有所改善。

3.3 受流器通过端部弯头的仿真计算

端部弯头作为第三轨断口处的过渡件,引导受流器进入端部弯头时若不能保持良好接触,势必增加受流器与端部弯头的冲击频率,产生拉弧现象,影响行车安全。根据 CJ/T 414—2012《城市轨道交通钢铝复合导电轨技术要求》中对端部弯头的相关规定,建立了 1:30 坡度低速端部弯头与 1:50 坡度高速端部弯头仿真模型。按照规定,低速端部弯头

适用于列车运行速度在 35 km/h 以下的工况,高速端部弯头适用于列车运行速度在 120 km/h 以下的工况。

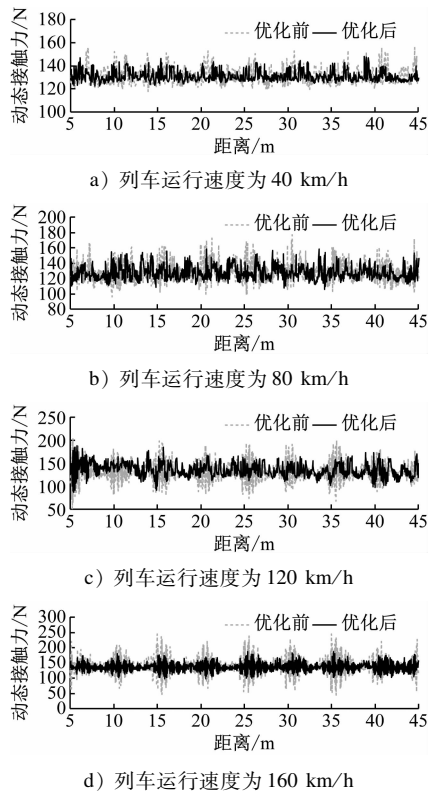


图 7 优化前后不同列车运行速度下靴轨动态接触力随运行距离变化曲线

Fig. 7 Variation curve of shoe-rail dynamic contact force with running distance at different train running speeds before and after optimization

表 4 优化前后列车不同运行速度下靴轨动态接触力

Tab.4 Shoe-rail dynamic contact force of train at different running speeds before and after optimization										
列车运行速度/ (km/h)	优化前后靴轨动态接触力/N								接触状态	
	最大值		最小值		平均值		标准差			
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
40	157.24	148.25	117.63	124.26	136.55	133.69	7.14	6.32	未离线	未离线
80	176.72	158.55	94.66	109.86	132.81	130.63	13.24	10.28	未离线	未离线
120	203.61	176.83	53.67	82.09	132.66	134.81	22.34	15.82	未离线	未离线
160	247.64	185.62	48.92	82.45	139.58	138.72	31.62	17.74	未离线	未离线

本文以 35 km/h 和 120 km/h 两个列车运行速度阈值分别进行优化前后受流器行经低速端部弯头和高速端部弯头时的靴轨动力学仿真计算,如图 8 所示。选取列车运行过程中靴轨动态接触力的最大值、最小值,离线时间及碰撞次数作为指标进行优化分析,如表 5 所示。

由表 5 可见,当受流器行经低速端部弯头时,优化前后靴轨动态接触力在平直线路段的波动范围基本一致;但在倾斜线路段,优化后靴轨动态接触力波动范围明显低于优化前,整体变动更加平缓。当受流器行经高速端部弯头时,优化前受流器在初始碰撞后以及经过变轨点时出现离线脱轨现象,并

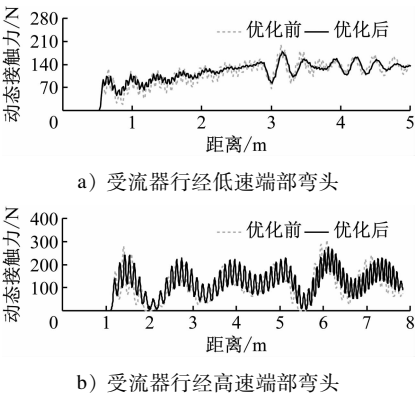


图 8 端部弯头处靴轨接触特性对比曲线

Fig. 8 Comparison curve of shoe-rail contact characteristics at end elbow

表 5 优化前后受流器行经低速、高速端部弯头时的计算结果

Tab. 5 Calculation results of current collector passing through the low-speed, high-speed end elbows before and after optimization

端部弯头类型		接触力/N		碰撞次数/次	离线时间/ms
		最大值	最小值		
低速端部弯头	优化前	198.4	23.7	0	0
	优化后	179.3	41.9	0	0
高速端部弯头	优化前	376.6	0	2	13.6
	优化后	294.5	23.7	0	0

和端部弯头产生两次碰撞,整个离线过程历时 13.6 ms;而优化后受流器可始终与第三轨保持接触,靴轨动态接触力幅值亦有明显降低。仿真结果表明,经优化后的受流器不仅可以正常通过低速、高速端部弯头,也显著改善了非平顺工况下的靴轨接触特性。

4 结语

- 1) 建立了地铁车辆靴轨耦合参数化模型,并根据试验结果验证了该模型的可靠性。
- 2) 基于 MATLAB 软件和 ANSYS 软件进行协同优化分析,证明了将智能算法引入靴轨系统参数优化的可行性。
- 3) 对设计速度为 160 km/h 工况下受流器的设计参数进行优化,得到了适合该工况下的一组最优

设计参数,并根据仿真结果提出优化建议。

4) 对受流器归算质量参数进行了多种工况的仿真验证,证明了优化结果的可靠性。

参考文献

[1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通列车运行速度限制与匹配技术规范: T/CAMET 04015—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.

China Association of Metros. Technical specification for train operation speed restriction and its matching of urban rail transit: T/CAMET 04015—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.

[2] 梁潇, 陈峰, 傅庆湘. 160 km/h 中速磁浮交通系统的关键技术问题[J]. 城市轨道交通研究, 2019(9): 21.

LIANG Xiao, CHEN Feng, FU Qingxiang. Key technical issues on 160 km/h medium-speed maglev transit system[J]. Urban Mass Transit, 2019(9): 21.

[3] 向泉笛, 罗湘萍, 宫政, 等. 准高速条件下三轨受流器靴轨动态接触分析[J]. 机械工程学报, 2020(20): 185.

XIANG Xiaodi, LUO Xiangping, GONG Zheng, et al. Dynamic contact analysis of current collector shoe and third rail under quasi high speed condition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020(20): 185.

[4] STEWART E, WESTON P, HILLMANSEN S, et al. Using bogie-mounted sensors to understand the dynamics of third rail current collection systems[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2011, 225: 219.

[5] GUAN J, WU J, ZHONG Y. Dynamics analysis of electric shoe-gear and conductor rail system[J]. Journal of Vibroengineering, 2014, 16(4): 1992.

[6] 阮杰, 刘子知, 闫晓晖, 等. 武汉地铁第三轨受流器动态接触力测量模型及参数标定[J]. 城市轨道交通研究, 2019(3): 97.

RUAN Jie, LIU Zizhi, YAN Xiaohui, et al. Measurement model and parameter calibration of the dynamic contact force for the third rail receiver in Wuhan Metro[J]. Urban Mass Transit, 2019(3): 97.

[7] 宁晓芳. 受流器/第三轨系统受流质量评价指标研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.

NING Xiaofang. Study on the evaluation index of the current collecting quality of the third-rail power supply system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

(收稿日期: 2021-05-27)