

基于轨道交通仿真测试平台的全自动运行系统 测试方法验证^{*}

马迪迪 虞赛君 王靖雯

(合肥市轨道交通集团有限公司, 230001, 合肥)

摘要 [目的] 目前轨道交通全自动运行系统中各子系统设计方案的完备性, 以及各子系统间的兼容适应度缺乏科学的评估方法, 因此亟须建立一套轨道交通仿真测试平台进行验证评估。[方法] 通过轨道交通仿真测试平台, 基于线路和站场、信号系统及车辆系统等方面提出全自动运行系统的测试方法, 进而评估相应系统的设计性能是否满足运营要求。以合肥轨道交通7号线为例, 运用全自动运行系统测试方法对该线路的车辆系统、线路及站场及信号系统等的设计性能进行仿真测试验证。[结果及结论] 在列车仿真测试运行过程中, 线路最小曲线半径、线路坡度、站台长度、线路限制速度等线路和站场的设计指标, 列车运行速度、技术速度、旅行速度、正线追踪间隔、列车停站时间等信号系统的设计指标, 列车最大/平均启动加速度、列车常用/紧急制动减速度等车辆系统的设计指标均在可接受范围内, 验证了全自动运行系统测试方法的可靠性。

关键词 轨道交通; 仿真测试平台; 全自动运行系统测试方法

中图分类号 U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.20230525

Verification of Testing Methods for Fully Automated Operation Systems Based on Rail Transit Simulation Testing Platform

MA Didi, YU Saijun, WANG Jingwen

(Hefei Urban Rail Transit Group Co., Ltd., 230001, Hefei, China)

Abstract [Objective] In light of the current lack of systematic and scientific evaluation methods for the completeness of subsystem design schemes, and the compatibility/adaptability among subsystems in rail transit FAO (fully automated operation) systems, it is urgently necessary to establish a rail transit simulation testing platform for validation and assessment. [Method] Based on the above testing platform, testing methods are proposed for FAO systems from the perspectives of track and station layouts, signaling and vehicle systems, in or-

der to evaluate whether the design performance of the corresponding systems meets operational requirements. Taking Hefei Rail Transit Line 7 as a case study, the FAO system testing methods are applied to simulate and verify the design performance of the line vehicle system, track alignment and station layout, and signaling system. [Result & Conclusion] During the train simulation test operation, design indicators for tracks and stations such as track minimum curve radius, track gradient, station platform length, line speed limits; signaling system design indicators such as train operating speed, technical speed, travel speed, mainline tracking interval and train dwell time; vehicle system design indicators such as train maximum/average acceleration during startup, train service/emergency braking deceleration are all within acceptable range. The reliability of FAO system testing methods is verified.

Key words rail transit; simulation test platform; fully automated operation system testing method

城市轨道交通建设和运营是一项庞大的系统工程。以全自动运行系统为例, 其接口既包括与其他专业的外部交互, 也涉及内部各子系统的协同^[1-3]。该系统的设计方案及其设备功能安全性需要进行充分完备的功能测试及验证^[4-5]。本文研究的轨道交通仿真测试平台及测试方法可为后续类似工程提供仿真验证及相关指导。

1 轨道交通仿真测试平台

1.1 平台简介

轨道交通仿真测试平台采用高精度、高倍速仿真建模方法建立。该平台汇集了1整套多专业高度集成联动的仿真测试系统, 适用于国内外既有铁路、高速铁路、城际铁路、磁浮交通及城市轨道交通等多种轨道交通制式, 且能够用于线网规划、车辆配置、时刻表编制、系统设计验证、列车运行节能优

^{*} 国家自然科学基金面上项目(52472343)

化、无线通信布点优化、牵引供电系统仿真及系统功能联调测试等的仿真测试评估。

1.2 平台主要功能

1) 支持建立轨道交通线路模型、车辆模型及计划时刻表模型,并针对不同信号系统制式进行建模,最终实现信号系统设计的仿真与验证。

2) 支持线网能力验证和评估,实现线路追踪间隔、列车运行速度、旅行速度、通过能力的验证及计算。

3) 轨道交通仿真测试平台能够在可行性研究、初步设计、施工图设计等阶段提供辅助设计功能测试。

2 全自动运行系统测试方法

基于轨道交通仿真测试平台及系列软件,对全自动运行系统的设计性能进行仿真测试验证。本文主要从线路及站场、信号系统及车辆系统等的设计性能进行仿真测试验证。

2.1 线路及站场设计性能测试方法

对线路及站场建模并开展系统级仿真,验证其功能需求是否达标。针对线路曲线半径、线路坡度、站台长度及线路限制速度等关键指标进行仿真分析,进而评估该线路及站场的设计性能是否满足运营要求。

1) 线路最小曲线半径。对列车运行区间线路分段设置曲线半径,将列车放置于线路上,在规定速度范围内按照计划时刻表运行。查看列车运行过程中输出的速度曲线、加速度曲线、线路曲线半径等数据,来判断不同曲线半径对列车运行的影响。

2) 线路坡度。对列车运行区间线路分段设定坡度,将列车放置于线路上,在规定速度范围内按照计划时刻表运行。在列车运行过程中输出速度曲线、加速度曲线以及坡度曲线,根据输出的数据判定不同线路坡度对列车运行的影响。

3) 站台长度。将列车放置于线路上,在规定速度范围内按照计划时刻表运行。通过线路路径测量工具,测量出线路模型中车站站台长度,在列车运行过程中输出列车速度曲线,并且根据输出的数据判定在设定站台长度下列车是否能够正常运行。

4) 线路限制速度。在列车运行区间设定线路限制速度,并将列车放置于线路上,在规定速度范围内按照计划时刻表运行。在列车运行过程中输出速度曲线,并且根据输出的数据判定此线路限制

速度能否满足列车正常运行要求。

2.2 信号系统设计性能测试方法

对信号系统建模并开展系统级仿真,验证其功能需求是否达标。针对区间列车运行速度、技术速度、旅行速度、正线追踪间隔及列车停站时间等关键指标进行仿真分析,进而评估该信号系统的设计性能是否满足运营要求。

1) 区间列车运行速度。将列车的初始位置放置于正线,并设定区间列车限制速度。列车按照运行时刻表在区间运行,在此过程中输出列车运行速度曲线,并判断其是否满足信号设计方案需求。

2) 技术速度。将列车的初始位置放置于正线,设定区间列车限制速度、列车加速度,以及列车制动和停站时间,使列车在两站间按照时刻表进行上行和下行,在此运行过程中输出列车总运行时间(不包含停站时间)以及运行里程,计算列车上行或下行过程中的技术速度,并判断其是否满足信号系统设计方案需求。

3) 旅行速度。将列车的初始位置放置于正线,设定区间列车限制速度、列车加速度,以及列车制动和停站时间,使列车在两站间按照时刻表分别进行上行和下行,在此运行过程中输出列车停站时间的总运行时间以及运行里程,计算列车上行和下行过程的旅行速度,并判断其是否满足信号系统设计方案需求。

4) 正线追踪间隔。将多列列车的初始位置放置于正线,设定区间限制速度、列车加速度及每站停车时间,使列车在区间正线上按照计划时刻表正常运行。在此运行过程中对多列列车输出列车运行间隔监视,并得出最小追踪间隔,判断其是否满足信号系统设计方案需求。

5) 列车停站时间。将列车的初始位置放置于正线,设定区间列车限制速度、列车加速度及每站停车时间,使列车在区间正线上按照计划时刻表正常运行。在列车运行过程中输出列车停站监视,得到列车停站时间,并判断其是否满足信号系统设计方案需求。

2.3 车辆系统设计性能测试方法

对车辆系统建模并开展系统级仿真,验证其功能需求是否达标。针对列车最大/平均启动加速度、列车常用/紧急制动减速度等关键指标进行仿真分析,进而评估该车辆系统的设计性能是否满足运营要求。

1) 列车最大/平均启动加速度。将列车的初始位置放置于正线,设定区间列车最大/平均启动加速度、列车限制速度等,使列车在区间正线上按照计划时刻表正常运行。在列车运行过程中输出列车运行速度曲线及加速度曲线,得到列车启动加速度,并判断其是否满足车辆系统设计方案需求。

2) 列车常用/紧急制动减速度。将列车的初始位置放置于正线,设定区间列车常用/紧急制动减速度、列车限制速度等。具体如下:①使列车在区间正线上按照计划时刻表正常运行,输出列车运行速度曲线及加速度曲线,得到列车常用制动减速度;②使列车在区间正线上按照计划时刻表正常运行,在运行过程中引入列车故障,使列车紧急制动,输出列车运行速度曲线及加速度曲线,得到列车紧急制动减速度。通过上述所得列车常用/紧急制动减速度判断其是否满足车辆系统设计方案需求。

3 全自动运行系统测试验证

基于本文提出的轨道交通仿真测试平台,对合肥轨道交通7号线(以下简称“7号线”)进行仿真建模。依据所提的全自动运行系统仿真测试方法,对其设计性能进行仿真验证。

7号线西起松林路站,东至巢湖南路站,线路全长21.0 km。全线为地下线,共设17座车站,其中换乘站为7座,分别与3号线、9号线、8号线、1号线、S1线、5号线和10号线换乘。7号线平均站间距为1.276 km,最大站间距为1.97 km,最小站间距为0.772 km;新建1座紫云路车辆段和1座莲花路主变电所。

3.1 线路及站场设计性能

根据7号线线路和站场设计性能参数取值(见表1)及相关数据,通过计算检查线路及站场设计性能是否存在安全隐患,并兼顾保障列车运营效率。

以线路最小曲线半径为例,列车在天津路站—上海路站区间正线的曲线半径设置为300 m,线路限制速度为80 km/h,加速度为 1.0 m/s^2 。列车根据计划时刻表从天津路站运行至上海路站,运行过程中的速度曲线如图1所示,加速度曲线如图2所示。由图1和图2可知:列车在运行过程中满足线路限制速度以及相关性能要求。

根据表1以及相关数据,对7号线的线路坡度、线路限制速度、道岔选型及参数、站台参数、最小竖曲线半径、轨道曲线超高,以及转换轨、停车线、折

返线和保护区段的设计进行仿真验证。结果表明,以上设计指标均满足列车正常运营需求。

表1 7号线线路和站场设计性能参数取值

Tab.1 Value of Line 7 track and station design performance parameters

参数	取值或说明
线路最小曲线半径	区间正线最小曲线半径一般为300 m,困难情况为250 m;车站正线最小曲线半径在车站站台计算长度范围内不小于1 000 m;辅助线最小曲线半径一般地段为200 m,困难地段为150 m
线路坡度	区间正线最大坡度一般为30‰,困难情况为35‰;地下线最小坡度为3‰,车站坡度为2‰
站台长度/m	120
线路限制速度/(km/h)	80

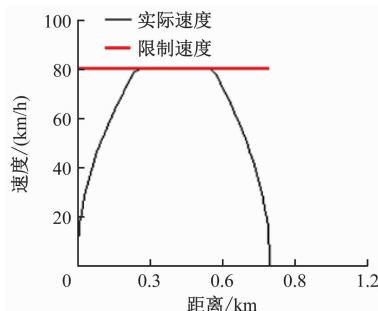


图1 列车运行速度曲线(天津路站—上海路站)

Fig. 1 Train operating speed curve (Tianjin Road Station to Shanghai Road Station)

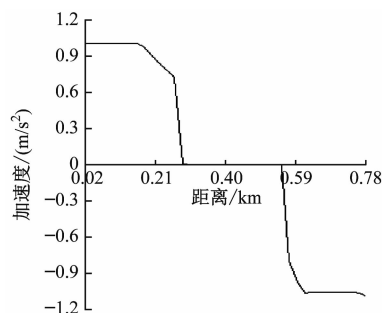


图2 列车运行加速度曲线(天津路站—上海路站)

Fig. 2 Train operation acceleration curve (Tianjin Road Station to Shanghai Road Station)

3.2 信号系统设计性能

根据信号系统设计性能参数取值(见表2)及相关数据,通过计算检查信号系统设计性能是否存在安全隐患。

以区间行车速度测试验证为例,列车按照计划时刻表在正线正常运行。列车到站后查看列车运行速度曲线(见图3),可得列车最小运行速度为0

表 2 信号系统设计性能参数取值

Tab. 2 Values of signaling system design performance parameters

参数	取值
区间行车速度/(km/h)	0~80
旅行速度/(km/h)	33
折返时间/min	2
正线最小追踪间隔/s	85
列车停站时间/s	30

km/h, 列车最大运行速度为 80 km/h (约 22.22 m/s)。由此可得, 列车在区间的正常运行速度为 0~80

km/h, 满足设计方案需求。

根据表 2 以及相关数据, 对 7 号线的技术速度、旅行速度、折返能力、正线追踪间隔、行车间隔、列车停站时间及列车运行时间等指标进行仿真验证。结果表明, 上述指标均满足列车正常运营需求。

3.3 车辆系统设计性能

根据车辆性能参数取值 (见表 3) 以及相关数据, 通过计算检查 6 节编组列车的车辆系统设计性能是否存在安全隐患, 并在此过程中兼顾保障列车运营效率。

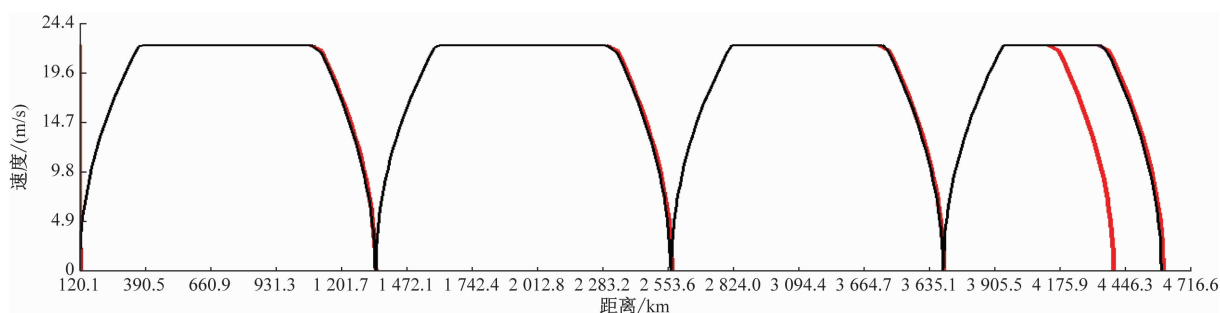


图 3 列车运行速度曲线(松林路站—莲花路站)

Fig. 3 Train operating speed curve (Songlin Road Station to Lianhua Road Station)

表 3 车辆系统设计性能参数取值

Tab. 3 Values of vehicle system design performance parameters

参数	取值	说明
最大启动加速度/(m/s ²)	≥1.0	速度为 0~40 km/h
平均启动加速度/(m/s ²)	≥0.6	速度为 0~80 km/h
最大线路限制速度/(km/h)	80	包括超限限值
列车常用制动平均减速度/(m/s ²)	≥1.0	
列车紧急制动平均减速度/(m/s ²)	≥1.2	

以列车最大启动加速度验证分析为例, 将列车在区间的最大启动加速度参数设定为 1.0 m/s²。在仿真软件中将列车初始位置设置于线路正线, 列车按照计划时刻表由松林路站出发运行至繁华大道站, 运行过程中输出列车运行速度曲线 (见图 4) 和加速度曲线 (见图 5)。

根据列车在 0~40 km/h 范围内的运行速度曲线, 将列车 t 时刻时速度 $V_t = 39.6$ km/h, 列车运行距离 $s = 0.0605$ km 代入 $a = (V_t - V_0)/(2s)$ (a 为列车加速度, V_0 为列车初速度) 进行计算, 得到 $a = 1.0$ m/s², 并根据加速度曲线可验证列车最大启动加速度为 1.0 m/s², 满足设计要求。

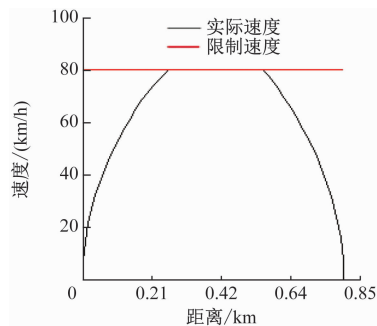


图 4 列车运行速度曲线(松林路站—繁华大道站)

Fig. 4 Train operating speed curve (Songlin Road Station to Fanhua Avenue Station)

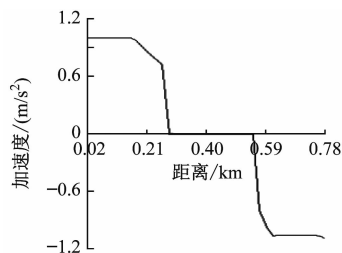


图 5 列车运行加速度曲线(松林路站—繁华大道站)

Fig. 5 Train operation acceleration curve (Songlin Road Station to Fanhua Avenue Station)

在仿真测试软件中将列车按照相应的测试条

件运行,根据运行过程中速度、加速度或阻力曲线进行计算并判断。仿真验证结果表明,列车平均启动加速度、列车常用制动平均减速度、紧急制动平均减速度、列车测速测距误差及列车牵引能耗等指标均满足列车正常运营需求。

4 结语

本文基于轨道交通仿真测试平台,研究了全自动运行系统的车辆系统、线路及站场,以及信号系统设计性能的测试方法,并利用7号线初步设计数据进行测试方法验证。结果表明,所提全自动运行系统仿真测试方法可行、简易、高效,可为该系统的建设加强安全保障。

参考文献

- [1] 胡康琼. 上海城市轨道交通旅行速度影响因素分析及对策[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(5): 89.
HU Kangqiong. Analysis of Shanghai urban rail transit travel speed influencing factors and countermeasures[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(5): 89.
- [2] 文峥, 吴卫平, 路向阳. 城市轨道交通全自动无人驾驶系统国际标准研究[J]. 控制与信息技术, 2023(2): 85.
WEN Zheng, WU Weiping, LU Xiangyang. Research on the international standards of fully automatic operation system in urban rail transit[J]. Control and Information Technology, 2023(2): 85.
- [3] 何倩. 城市轨道交通全自动运行功能需求探讨[J]. 城市轨道交通, 2023(2): 50.
HE Qian. Discussion on functional requirements of fully automatic operation of urban rail transit[J]. China Metros, 2023(2): 50.
- [4] 吴妍燕. 城市轨道交通全自动运行线路的功能测试与验证[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(2): 86.
WU Yanyan. Function testing and trial of urban rail transit FAO line[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(2): 86.
- [5] 王天娇. 轨道交通全自动运行系统新增功能研究[J]. 运输经理世界, 2022(24): 71.
WANG Tianjiao. Research on new functions of rail transit fully automatic operation system[J]. Transport Business China, 2022(24): 71.
- [6] 何文青. 轨道交通全自动无人驾驶运营信号系统应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
HE Wenqing. Research on application of fully automatic driverless operation signal system in rail transit[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [7] 袁重阳. 基于FAO仿真测试系统应用的底层框架设计[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(6): 81.
YUAN Chongyang. Design of underlying frame based on FAO simulation test system[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(6): 81.
- [8] 方倩. 城轨列车运行仿真验证平台的设计与实现[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
FANG Qian. Design and implementation of subway train operation simulation and verification platform[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [9] 李冰, 蔡鹏飞, 谈逸文, 等. 从运营角度谈城市轨道交通全自动运行系统建设和设计中的关键问题[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(4): 87.
LI Bing, CAI Pengfei, TAN Yiwen, et al. Discussion on key issues in the design and construction of urban rail transit FAO system from operation perspective[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(4): 87.
- [10] 孟凡铁. 城市轨道交通全自动运行线路工程设计关键技术研究与应用[R]. 天津: 天津市政工程设计研究总院有限公司, 2022.
MENG Fantie. Research and application of key technologies in the engineering design of fully automated urban rail transit lines[R]. Tianjin: Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, 2022.
- [11] 张军. 城市轨道交通全自动运行FAO系统工程建设探索与思考[J]. 现代城市轨道交通, 2022(2): 18.
ZHANG Jun. Exploration and reflection on construction of FAO system engineering of urban rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2022(2): 18.
- [12] 路向阳, 陈华国, 雷成健, 等. 城市轨道交通全自动运行系统仿真验证平台的设计与实现[J]. 控制与信息技术, 2020(5): 17.
LU Xiangyang, CHEN Huaguo, LEI Chengjian, et al. Design and implementation of emulation and verification platform for urban rail transit FAO system[J]. Control and Information Technology, 2020(5): 17.
- [13] 杜恒, 郜春海, 黄勃, 等. 城市轨道交通全自动运行系统仿真研究及应用[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(2): 157.
DU Heng, GAO Chunhai, HUANG Qing, et al. Simulation research and application on urban rail transit fully automatic operation system[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(2): 157.
- [14] 冯浩楠, 黄苏苏, 付伟, 等. 城市轨道交通全自动运行系统多功能仿真平台设计与实现[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(1): 238.
FENG Haonan, HUANG Susu, FU Wei, et al. Design and realization of multi-function simulation platform of full-automatic operation system for urban transit[J]. Experimental Technology and Management, 2020, 37(1): 238.
- [15] 龚韬懿, 马骞, 朱晟, 等. 全自动运行系统综合测试培训平台建设方案研究[J]. 自动化应用, 2022(1): 167.
GONG Taoyi, MA Qian, ZHU Sheng, et al. Research on the construction plan of the comprehensive testing and training platform for the automatic operation system[J]. Automation Application, 2022(1): 167.

- [16] 张伟. FAO 试验线系统设计及关键场景实施[J]. 铁道通信信号, 2023, 59(4): 73.
ZHANG Wei. System design and implementation of key operation scene of the FAO test line[J]. Railway Signalling & Communication, 2023, 59(4): 73.
- [17] 邸鑫鹏, 钱枫. 轨道交通全自动运行系统探究[J]. 智能建筑电气技术, 2019, 13(4): 55.
DI Xinpeng, QIAN Feng. Research on automatic operation system of rail transit[J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings, 2019, 13(4): 55.
- [18] 谭文举, 杨卫峰, 廖云, 等. 城市轨道交通全自动运行系统设计及场景分析[J]. 机车电传动, 2019(4): 112.
TAN Wenju, YANG Weifeng, LIAO Yun, et al. Overview of urban rail transport fully automatic operation system and typical scenario[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(4): 112.
- [19] 刘晨阳. 城市轨道交通全自动运行系统信号功能设计及实际应用[J]. 科技创新与应用, 2018, 8(19): 92.
LIU Chenyang. Signaling function design and practical application of urban rail transit fully automated operation system[J]. Technology Innovation and Application, 2018, 8(19): 92.
- [20] 闫宏伟, 燕飞. 城市轨道交通全自动运行系统及安全需求[J]. 都市快轨交通, 2017, 30(3): 50.
YAN Hongwei, YAN Fei. Fully automatic operation system and its safety requirement of urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(3): 50.
- [21] 蒋勇. 城市轨道交通全自动运行系统综合联调方案[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(2): 125.
JIANG Yong. Integrated joint commissioning scheme of urban rail transit FAO system [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(2): 125.
- [22] 颜纯. 南宁轨道交通 5 号线行车综合自动化系统新增功能联调方案与验证[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(2): 128.
YAN Chun. Joint commissioning scheme and verification of Nan-ning rail transit line 5 train integration automatic system newly added functions[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(2): 128.
- 收稿日期:2023-05-10 修回日期:2023-06-02 出版日期:2025-06-10
Received:2023-05-10 Revised:2023-06-02 Published:2025-06-10
• 通信作者:马迪迪,工程师,252736890@qq.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
- ~~~~~
- (上接第 196 页)
- [14] 张艳兵,王道敏,肖衍. 城市轨道交通全自动驾驶的发展与思考[J]. 铁道运输与经济,2015,37(9):70.
ZHANG Yanbing, WANG Daomin, XIAO Yan. Development and thoughts on full-automatic operation of urban rail transit [J]. Railway Transport and Economy, 2015, 37(9):70.
- [15] 韩延光, 饶东, 闫磊. 全自动驾驶车辆网络系统的应用分析[J]. 铁道车辆, 2017, 55(10): 27.
HAN Yanguang, RAO Dong, YAN Lei. Application analysis of the network system for vehicles with fully automatic driving[J]. Rolling Stock, 2017, 55(10): 27.
- [16] 谢正媛, 李月. 城市轨道交通全自动运行系统应用研究[J]. 数字技术与应用, 2018, 36(2): 53.
XIE Zhengyuan, LI Yue. Study on the application of automatic operation system for urban rail transit[J]. Digital Technology and Application, 2018, 36(2): 53.
- [17] 刘磊, 胡荣华, 薛强. 基于虚拟分区的城市轨道交通全自动运行控制系统动态测试安全防护方法[J]. 城市轨道交通研
究, 2023, 26(8): 210.
LIU Lei, HU Ronghua, XUE Qiang. Safety protection method for dynamic testing of urban rail transit FAO control system based on virtual partitioning [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(8): 210.
- [18] 张九高. 城市轨道交通全自动运行列车唤醒场景动态测试需求探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(2): 42.
ZHANG Jiugao. Dynamic test requirements in urban rail transit FAO train wake-up scenario[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(2): 42.
- 收稿日期:2024-12-31 修回日期:2025-03-11 出版日期:2025-06-10
Received:2024-12-31 Revised:2025-03-11 Published:2025-06-10
• 第一作者:杨利强,正高级工程师,wangdawei335@126.com
通信作者:张爱平,高级工程师,zhangai ping7105@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