

全自动运行线路多岗位联动平台的建模与仿真^{*}

刘见见 姜 辉 郭 凝 曾 彬 阎国强

(上海交通大学职业技术学院轨道交通学院, 201101, 上海)

摘 要 [目的]为展示正常和非正常情况下全自动运行线路的各运行场景,帮助调度人员和多职能队伍进行相关岗位联动培训,分析制定各种故障情形和应急场景的处置预案,提高应急处置能力和服务水平,有必要对全自动运行线路多岗位联动平台进行研究。[方法]以上海轨道交通 15 号线为例,对中央调度、车站控制及列车运行进行建模和仿真,在此基础上构建全自动仿真运行平台,并进行场景联动仿真,实现多职能队伍的联合培训和故障应急处置。[结果及结论]所构建的多岗位联动平台,能够对实际全自动运行场景进行展示和分析,适用于专业院校的专业教学及轨道交通多职能队伍的联合应急处置演练。

关键词 城市轨道交通;全自动运行线路;多职能队伍;多岗位联动平台

中图分类号 U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.032

Modeling and Simulation of Multi-Position Linkage Platform for FAO Lines

LIU Jianjian, JIANG Hui, GUO Ning, ZENG Bin, YAN Guoqiang

(Railway Transportation College of Shanghai Communications Polytechnic, 201101, Shanghai, China)

Abstract [Objective] To demonstrate various FAO (fully automatic operation) lines operating scenarios under normal and abnormal conditions, help dispatchers and multi-functional teams to conduct relevant job linkage training, analyze and formulate disposal plans for various fault situations and emergency scenarios, and improve emergency disposal capabilities and service levels, it is necessary to study the multi-job linkage platform for FAO lines. [Method] Taking Shanghai Metro Line 15 as an example, based on the modeling and simulation of central dispatching, station control and train operation, one FAO simulation platform is built, and a scenario linkage simulation is carried out to realize joint training and fault emergency response of multi-functional teams. [Result & Conclusion] The constructed multi-position linkage platform can display and analyze actual FAO scenarios, therefore suitable for speciality teaching in professional colleges and joint emergency response drills of rail transit multi-functional teams.

Key words urban rail transit; FAO line; multi-functional

team; multi-position linkage platform

全自动运行系统凭借其安全、高效等优势已在我国多个城市的轨道交通领域中获得了实际应用。相比于 CBTC(基于通信的列车控制)系统,全自动运行系统增加了列车自动发车、自动对位调整、远程唤醒与休眠等功能,降低了司机的劳动强度,提高了列车运营的安全性与运营效率,代表了未来城市轨道交通运营管理的发展方向^[1]。在全自动运行系统中,以传统地铁列车司机为核心的工作职能一部分由车载子系统负责,另一部分则由中央控制中心的调度人员完成,正常运营、故障与应急突发事件处理的流程与以往相比发生了较大的改变。

构建全自动运行仿真平台能够对运行场景进行编排与仿真,展示和验证各场景中子系统功能分配与基本流程的设计合理性,评估与优化全自动运行效果与场景流程,对调度人员和多职能队伍的正常流程操作和故障判断排除进行培训。此外,构建全自动运行仿真平台还能针对不同的应急场景制定相应的处置预案,并通过联合演练提高全自动运营各种运行模式下多职能队伍的协作应急处置能力。本文构建了一套全自动运行仿真平台,对多岗位联动进行研究,为全自动运行线路多岗位联动培训及应急处置演练提供实用操作平台。

1 全自动运行线路列车运行场景分析

全自动运行线路的运行系统涉及信号、车辆、综合监控、通信、站台门等多个与列车运行密切相关的子系统,子系统之间高度集成,整体系统结构、功能及工作方式十分复杂。因此,全自动运行线路的列车运行场景过程也包含多种情况。列车正常运营过程的场景包括:列车唤醒、列车出库、列车进入正线、列车区间运行、进站停车、站台发车、列车折返(终点站)、列车回库、场内作业、列车休眠等。

^{*}上海市教育科学研究一般项目(C2024131)

列车非正常运营情况则更为复杂,常见的故障包括:列车运行时驾驶室盖板开启、车门紧急解锁激活等列车故障;弓网冲突、轨道挤岔、线路障碍等线路故障;火灾、区间水患、人员入侵等险情场景。由此可知,全自动运行线路的列车非正常运行场景具有场景多变、故障险情突发等特点,往往需要中央调度和多职能队伍联合进行紧急处理,以尽快排除故障、化解险情、安抚与疏散乘客。

2 全自动运行线路仿真平台总体设计

为构建全自动运行线路仿真平台,首先需分析全自动运行线路的总体特点与结构。全自动运行线路控制系统与非全自动运行线路的 CBTC 控制系统结构完全一致,从中央 ATS(列车自动监控)到车站 ATS 设备,通过轨旁设备与车载设备进行通信。CBTC 控制系统结构示意图如图 1 所示。

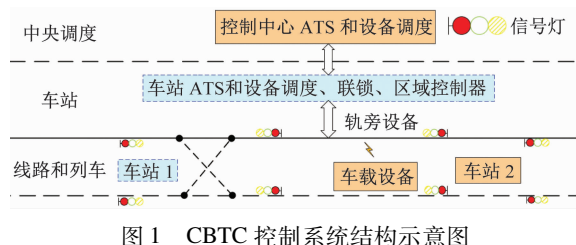


图 1 CBTC 控制系统结构示意图

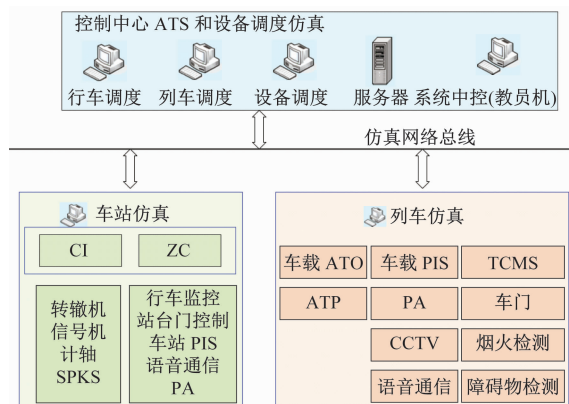
Fig. 1 Schematic diagram of CBTC control system structure

从功能及运行场景角度而言,相比于非全自动运行系统,全自动运行系统提升了系统的自动化程度,提高了系统自身的故障处理能力。全自动运行系统主要增加了障碍物检测装置、休眠唤醒模块、车载 CCTV(视频监控)、信号系统与车辆的接口信息(包括车辆设备的状态和指令信息);其在车站内增加了站台门开关、SPKS(工作人员保护开关),升级了车门和站台门间的防夹功能;其在车辆段内增加了 ZC(区域控制器)和应答器等,能够实现全自动运行列车的调车作业、自动洗车作业等。此外,全自动运行系统还增加了控制中心的调度和管理功能,包括线路运行情况、车辆设备状态、车辆远程监督控制等^[1]。

所构建的全自动运行线路仿真平台完全参照实际的全自动运行线路结构框架,根据各子系统进行建模和仿真,通过仿真骨干网络实现各子系统间的通信,进而在保证各子系统仿真独立和模块化的同时,实现整个全自动运行系统的联动^[2]。

全自动运行线路仿真平台结构示意图如图 2 所

示。全自动运行控制系统包括全自动列车中央调度中心仿真子系统、车站/车场(含轨旁)仿真子系统、列车仿真子系统。在实现 3 个子系统各功能模块的基础上,各子系统之间通过网络总线进行通信。此外,为模拟不同场景及不同场景下产生的故障,在仿真平台中加入中控系统,也称为教员控制系统。



注:CI 为列车自动控制计算机联锁;PIS 为乘客信息系统;ATP 为列车自动保护;PA 为列车广播;ATO 为列车自动运行;TCMS 为列车控制和管理系统。

图 2 全自动运行线路仿真平台结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of FAO line simulation platform structure

3 全自动列车仿真平台仿真模型

3.1 调度端仿真模型

为体现仿真平台的真实性,基于上海轨道交通 15 号线(以下简称“15 号线”)实际线路的信号数据、道岔位置数据、车站位置数据、横向曲线和纵向断面数据构建调度端仿真模型;采用基于 MS2005 的软件开发平台及 SQL Server2005 数据库,同时采用 C++ 编程语言实现系统的各功能模块,即实现调度端中央调度 ATS 的各项功能。

完成调度端仿真需要大量的仿真数据支持,这些数据分为静态数据和动态数据。静态数据主要包括线路数据的基本属性。动态数据主要包括设备状态、操作记录等动态数据信息。

在调度系统仿真中,列车的全线仿真运行需要大量的数据支撑,如车站位置、道岔类型、信号机位置等。将一般情况下不需要变化的数据作为静态数据,程序运行初始化时,读取静态数据,并初始化整个系统的基本信息。

在调度系统仿真中,许多设备元件的状态信息是实时变化的,这些设备信息数据即为动态数据。

动态数据表征的是设备元件的占用及空闲情况、进路是否被占用或某些命令状态的信息数据。一般的动态数据包括:车站状态数据(车站扣车及跳停等);进路状态数据(进路占用情况等);股道状态数据(股道占用情况等);道岔状态数据(道岔定位及反位状态等);信号机状态数据(信号机显示状态等);列车实时动态数据(列车目标距离及列车位置等)。除此之外,全自动中央调度仿真系统中还具备中央综合监控的功能,用于显示车辆、电力、PIS、CCTV 的实时状态。

3.2 调度端仿真运行模块

调度端仿真运行模块用于实时采集在线运行列车、车站、线路和信号设备的各种状态信息,在站场图上动态显示列车的运行状态和轨道区段的占用情况,并根据列车运行计划编制实时运行图,监督和记录运行图的执行情况,进而达到指挥列车运行、实现系统仿真的目的。调度端仿真运行模块主要包括列车进路排列模块、列车移动授权模块和列车时刻表模块。

3.2.1 列车进路排列模块

若要保证列车在站内安全运行,就必须保证进路处于安全状态,检查进路是否处于安全状态需要以下几个步骤:①确定进路内所有设备(信号机、道岔)状态正常,无故障;②确定进路内所有区段无列车占用;③将进路内处于解锁状态的所有道岔进行锁闭操作;④开放进路的始端信号机;⑤列车驶入进路。

列车进路是指列车在站内从一个指定位置到目标位置所经过的区段。列车进路排列模块主要包括进路建立和进路解锁两个过程。进路建立是指从车站出站信号机到列车前方目标位置开放的一段进路。进路解锁过程是指从列车驶入进路始端信号开始到进路目标位置全部道岔区段出清并解锁的过程。

列车进路建立需根据列车起始位置和目标位置排列进路,采集和处理进路相关信号机、道岔和区段的状态,然后对列车起始位置和目标位置之间的道岔和区段进行锁闭,同时开放信号机,并确定进路是否满足进路安全条件。若进路安全条件满足,则开放信号机,允许列车通过进路。进路建立将在系统定时器中进行实时计算。列车进路建立流程示意图如图 3 所示。列车进路解锁可在进路中各轨道区段的列车通过后自动解锁。列车进路建立与进路解锁均可在系统定时器中实时刷新,更新

列车进路状态。

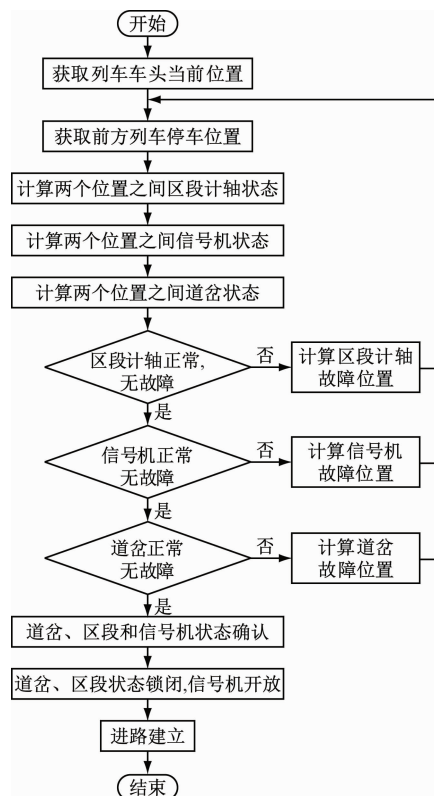


图 3 列车进路建立流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of train route establishment process

3.2.2 列车移动授权模块

列车移动授权模块可为每列车分配合理的移动授权,使所有列车在各自的移动授权内安全运行,实现列车联合运行效果。列车移动授权是一段特殊的轨道线路,具体范围为列车车尾至列车运行前方目标点的这部分线路^[3]。设置这段轨道线路的主要目的在于在 CBTC 移动闭塞工作模式下,列车仅能够在这段轨道线路中运行,前方目标点是列车基于当前车尾位置能到达的最远距离。根据这段距离及线路状态,列车移动授权模块通过计算可以得到合理的速度曲线,以保证列车运行速度保持在限制速度以下,并能够在前方目标点之前安全停车。移动授权示意图如图 4 所示。

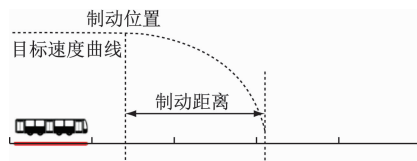


图 4 移动授权示意图

Fig. 4 Schematic diagram of movement authorization

在仿真运行中,移动授权模块根据线路所有列车当前位置计算出列车移动授权,并将移动授权分配给虚拟列车,随后虚拟列车根据分配移动授权计算出合理的速度曲线,在移动授权终点实现安全停车。移动授权模块也可根据前方目标点来计算列车的移动授权,目标点主要是指列车在线路运行过程中遇到的设备,如前方列车和被列车占用的车站。由于线路中列车的位置是动态改变的,所以移动授权模块会在每个周期中重新计算,以获取新的列车目标速度曲线。该过程就是列车不断追踪目标点向前运行的过程,下文将目标点分为前方列车和车站站台两种情况进行分析。

3.2.2.1 目标点为前方列车的移动授权计算

当目标点为前方列车时,为防止列车追尾等事故的发生,两列列车之间需要预留一定的安全间隔,此处的安全间隔设置为一个车长,以确保在不利情况下前、后方列车制动停车后还能留有一定的安全距离。目标点为前方列车的移动授权追踪计算是对前方列车位置的追踪,把当前目标点设置为前方列车车尾位置。在仿真运行中,通过访问前方列车的参数来获取前方列车的车尾位置。

目标点为前方列车的移动授权示意图如图5所示。目标点为前方列车的移动授权位置 S_{YDSQ} 可以表示为:

$$S_{YDSQ} = S_B - S_A - S_{tra} \quad (1)$$

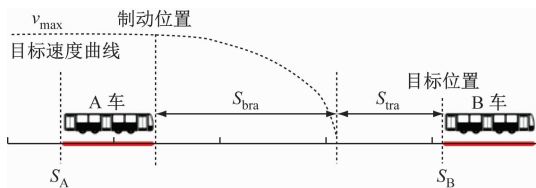
虚拟列车在 CBTC 移动闭塞模式下的最小追踪间隔 S_{bra} 可以表示为:

$$\begin{cases} S_{bra} = S_{YDSQ} + S_{tra} \\ S_{bra} = \frac{v_{max}^2}{2a} \end{cases} \quad (2)$$

式中:

a ——列车 A 的常用制动加速度。

当计算得到的移动授权小于 S_{YDSQ} 时,列车启动制动措施,对列车运行间隔进行保护。



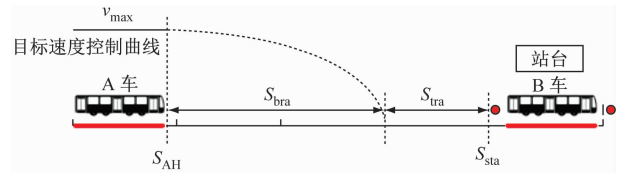
注: v_{max} 为列车最大运行速度; S_{bra} 为最小追踪间隔; S_B 为 B 车车尾位置; S_A 为 A 车车尾位置; S_{tra} 为两列车间的安全距离。

图5 目标点为前方列车的移动授权示意图

Fig. 5 Schematic diagram of movement authorization with the preceding train as the target point

3.2.2.2 目标点为车站站台的移动授权计算

站台区域一般会设置一个进站信号机和一个出站信号机,进站信号机设置在车站入口外适当距离处,用于确保车站内的作业安全。当前方列车停在站台时,进站信号机为红色。本文所提仿真系统将目标点设置为进站信号机的公里标,目标点为车站站台的移动授权示意图如图6所示。



注: S_{AH} 为 A 车车头位置; S_{sta} 为 B 车站台信号机位置。

图6 目标点为车站站台的移动授权示意图

Fig. 6 Schematic diagram of movement authorization with station platform as the target point

目标点为车站站台的移动授权位置 S'_{YDSQ} 可以表示为:

$$S'_{YDSQ} = S_{sta} - S_{AH} \quad (3)$$

当计算得到的移动授权小于 S'_{YDSQ} 时,列车将紧急制动,以保证列车间的安全距离。

3.2.3 列车时刻表模块

列车时刻表是组织列车运行的基础,其规定了各次列车占用区间的顺序、列车在车站到达和出发的时刻、列车在车站区间的运行时间及列车在车站的停站时间。正线列车根据列车时刻表运行,当某列列车偏离了列车时刻表时,列车时刻表模块会及时进行调整。列车时刻表模块通过判断列车位置来获取列车当前切换时刻表的标志位置。当列车到达转换轨时,列车时刻表模块通过车次连接来获取离当前仿真时间最近的时刻表,并将其作为当前列车的计划时刻表。在时刻表模块中,车次连接主要指当一列车按照当前车次任务到达目的地进行折返作业后,获取新的车次任务并继续运营,此时,前、后两个车次任务由同一列车完成并进行前后衔接。

3.3 车站端的构建与仿真

根据 15 号线全自动运行线路的典型集中车站控制室结构构建仿真车控室。车站调度仿真与上文所述的中央调度仿真基本一致,除车站 ATS 信号系统仿真、车站 ISCS (综合监控) 仿真外,车站仿真还包括 IBP (综合后备盘) 仿真、车站 CCTV 仿真、车站站台门和 PSL (屏蔽门站台操作盘) 等设备仿真。

3.4 线路与列车的建模与仿真

采用 15 号线全自动运行线路的实际弯道和坡度参数,并根据 15 号线的列车控制电路进行列车远程唤醒、升弓、开关门等逻辑关系的建模与仿真,同时计算列车牵引力、制动力、阻力等参数,获得列车在不同模式下的运行加速度、运行速度和运行距离等。当列车在全自动运行线路中发生故障时,往往需要多职能列车控制人员介入,此时列车控制人员可通过使用虚拟驾驶台仿真界面进行相关操作。

考虑到当列车分布在变坡点位置时,列车车辆分布在不同坡道或不同弯道上,即受到不同的坡道阻力或弯道阻力,因此,列车运行模型采用柔杆模型,可根据车辆不同的线路位置计算各自的坡道阻力和弯道阻力,然后相加求得线路阻力。根据牛顿第二定律,列车运动方程可以表示为:

$$\sum_{i=1}^n m_i \ddot{D}_i = \sum_{i=1}^n (F_i - F_{b,i} - F_{r,i} - F_{G,i}) \quad (4)$$

式中:

- m_i ——第 i 辆车的质量;
- D_i ——第 i 辆车的位移;
- F_i ——第 i 辆车的牵引力;
- $F_{b,i}$ ——第 i 辆车的制动力;
- $F_{r,i}$ ——第 i 辆车的的基本阻力;
- $F_{G,i}$ ——第 i 辆车的附加阻力。

采用数值积分法求解式(4),即可获得列车的加速度、速度和位置数据。

4 全自动运行线路仿真平台与应用

根据 15 号线全自动运行线路的结构和参数,结合中央调度的各项操作功能及设备调度、综合监控等操作界面的仿真,构建了全自动运行线路仿真平台的中央调度,并建立全自动运行线路仿真平台的车站端仿真及虚拟操作界面的列车端仿真,通过网络实现各子系统间的通信,并实现了多岗位联动。

全自动运行线路仿真平台不仅能够实现全自动运行线路在不同运行模式下的各种场景模拟,还可以通过教员系统设置各种故障场景,分析中央调度与各子系统间的联动关系,研究应急处置方案,实现多职能队伍联动的应急处置培训,提高多职能岗位人员的应急处置能力。

以列车救援为例,设置某区间故障,安排多职能列车控制人员 1 上车后,列车无法手动驾驶,中央

调度安排多职能列车控制人员 2 登乘救援列车,并作为后续救援列车控制人员进行救援。中央调度员、车站多职能站控人员、多职能列车控制人员 1 和多职能列车控制人员 2 开展联动操作。仿真平台联动应急处置案例示意图如图 7 所示。

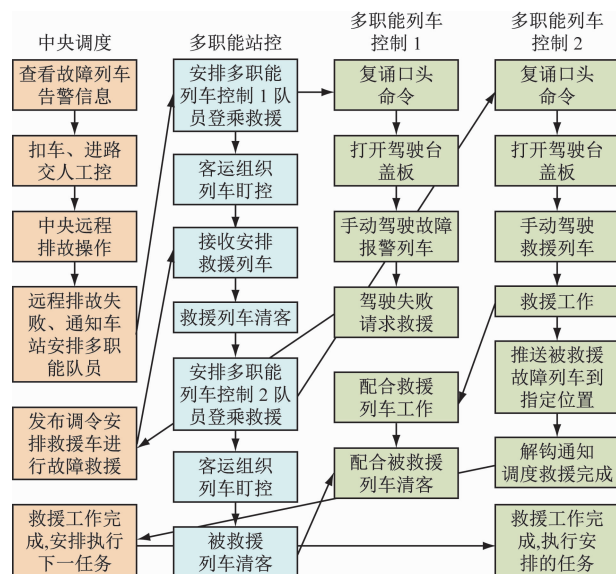


图 7 仿真平台联动应急处置案例示意图

Fig. 7 Schematic diagram of linkage emergency response scenarios on the simulation platform

5 结语

通过对全自动运行线路各子系统的分析和建模,结合各子系统岗位的操纵界面进行仿真,通过通信网络实现各子系统间的数据交互,构建全自动运行线路多岗位联动仿真平台。该仿真平台能够展示全自动运行线路中列车运行仿真的各种场景,实现了中央调度、车站多职能站控、多职能列车控制等多岗位联合操作控制,逼真地展示了全自动运行线路列车运营的工作模式。该仿真平台不仅可以实现全自动运行线路正常运行中多岗位的各项操作,还能进行故障和紧急场景下多职能队伍的协同应急处置培训,将大大提升全自动运行线路中各岗位人员的操作技能及故障应急处置能力。

参考文献

- [1] 王向阳, 朵建华, 高晓菲. 城市轨道交通全自动无人驾驶系统与传统 CBTC 系统差异分析与探讨[J]. 铁路技术创新, 2019(5): 22.

(下转第 198 页)



图6 乘客意图类别统计界面软件截图

Fig. 6 Software screenshot of the statistical interface for passenger intention categories

2) 所使用的语音样本存在多种类别、类别交叉或包含关系等情况,这些因素均影响了分类的准确性。因此,考虑进一步整理类别标签,继续优化模型,使得系统更加智能与高效。

参考文献

- [1] 张振海,李红亮,王晴雯,等. 地铁应急预案知识本体建模及案例库的构建[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(8): 17.
ZHANG Zhenhai, LI Hongliang, WANG Qingwen, et al. Ontology-based knowledge modeling of metro emergency response plan and construction of case database[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(8): 17.
 - [2] 孙超,曲维光,魏庭新,等. 中文连动句语义关系识别研究[J]. 中文信息学报, 2024, 38(5): 22.
SUN Chao, QU Weiguang, WEI Tingxin, et al. Semantic relation recognition of Chinese serial-verb sentences[J]. Journal of Chinese Information Processing, 2024, 38(5): 22.
 - [3] LOU C, TONG M, XUE L, et al. Multilingual semantic fusion network for text recognition in the wild[J]. Journal of Electronic Imaging, 2023, 32(2): 023015.
 - [4] 杨鹏,刘扬,杨青. 基于层次语义理解的电力系统客服工单分类[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(7): 231.
YANG Peng, LIU Yang, YANG Qing. Power system customer service tickets classification based on hierarchical semantic understanding[J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(7): 231.
 - [5] 艾文伟,胡媛,陈悦勤,等. 智能语音技术在城市轨道交通客运服务中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(3): 152.
AI Wenwei, HU Yuan, CHEN Yueqin, et al. Application of intelligent voice technology in urban rail transit passenger transport service[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(3): 152.
 - [6] 赵京胜,宋梦雪,高祥,等. 自然语言处理中的文本表示研究[J]. 软件学报, 2022, 33(1): 102.
ZHAO Jingsheng, SONG Mengxue, GAO Xiang, et al. Research on text representation in natural language processing[J]. Journal of Software, 2022, 33(1): 102.
- 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-08-25 出版日期:2025-05-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-08-25 Published:2025-05-10
· 通信作者:毛晓蕾,工程师,maoxiaolei1977@126.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 192 页)
- WANG Xiangyang, DUO Jianhua, GAO Xiaofei. Analysis and research of differences between URT fully automatic driverless system and traditional CBTC system[J]. Railway Technical Innovation, 2019(5): 22.
- [2] 李盼盼,郎诚廉. 城市轨道交通全自动运行线路调度系统的仿真研究[J]. 铁路计算机应用, 2021, 30(6): 74.
LI Panpan, LANG Chenglian. Simulation of fully automatic operation line dispatching system for urban rail transit[J]. Railway Computer Application, 2021, 30(6): 74.
 - [3] 荀径,宁滨,郜春海. 列车追踪运行仿真系统的研究与实现[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(2): 34.
XUN Jing, NING Bin, GAO Chunhai. Study and realization of train tracking simulation system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(2): 34.
- 收稿日期:2024-10-17 修回日期:2024-11-25 出版日期:2025-05-10
Received:2024-10-17 Revised:2024-11-25 Published:2025-05-10
· 第一作者:刘见见,副教授,184616288@qq.com
通信作者:阎国强,副教授,13611987126@139.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