

基于列车自主运行系统的线路资源管理方案研究^{*}

潘亮¹ 吴杰² 浦伦² 顾鑫²

(1. 卡斯柯信号有限公司, 200072, 上海; 2. 上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 200235, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘要 对计算机操作系统资源管理的特点与城市轨道交通线路资源管理的特点进行了差异性对比。在此基础上根据城市轨道交通的运营特点, 研究与之相适应的线路资源管理方法。对线路资源进行静态和动态分析, 总结了引发线路资源死锁的条件, 提出规避线路资源死锁的技术措施。提出了基于列车自主运行控制系统的线路资源管理方案。该方案通过合理划分资源及动态调整资源分配, 提高了线路资源的利用率, 规避了线路资源死锁问题, 解决了列车实际运行任务与运行计划不匹配问题。

关键词 城市轨道交通; 信号系统; 列车自主运行; 线路资源管理; 线路资源死锁

中图分类号 U29-39

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.11.015

Line Resource Management Scheme Based on Train Autonomous Operation

PAN Liang, WU Jie, PU Lun, GU Xin

Abstract The characteristics of computer operating system resource management and rail transit line resource management are compared. On this basis, according to the operation characteristics of urban rail transit, corresponding line resource management methods are studied. Through static and dynamic analysis of the line resource, the conditions leading to line resource deadlock are summarized, and technical measures to avoid the line resource deadlock are proposed. At the same time, a line resource management scheme based on train autonomous operation control system is put forward. By rationally dividing resources and dynamically adjusting resource allocation, the scheme improves the utilization rate of line resource, avoids the deadlock problem of line resource and finally solves the mismatch problem between actual train operation task and operation plan.

Key words urban rail transit; signaling system; train autonomous operation; line resource management; line resource deadlock

First-author's address CASCO Signal Ltd., 200072, Shanghai, China

在列车自主运行系统中引入线路资源管理方法, 以重构城市轨道交通信号系统的功能, 既可有效解决列车的正面冲突、侧面冲突、追尾冲突及过岔脱轨等运营风险, 避免列车与乘客间发生冲突, 又可利用既有线路资源进一步提高线路运力、减少站场的改造成本。但是, 因列车自主规划路径及申请线路资源可能会导致多列车运行任务并发一起竞争线路资源, 进而引发线路资源死锁及列车实际运行任务与运行计划不匹配等问题, 最终导致运营秩序紊乱。为此, 需要对线路资源管理在列车自主运行的车车通信系统中应用时带来的多车并发和线路资源死锁问题加以分析和研究。

1 城市轨道交通线路资源的特点

城市轨道交通线路作为列车运行的基础要素, 主要功能体现在为列车提供线路空间资源。在规定时间内通过空间资源的列车数量决定着城市轨道交通线路的通过能力。在引入线路资源管理后, 需要结合城市轨道交通的运营需求, 分析其线路资源管理的特点。城市轨道交通线路资源的特点主要包括以下方面:

1) 线路资源的独占/共享。当前后列车在一段线路区域内追踪运行时, 该线路区域需要为这两列车分配线路资源。后车基于信号系统计算得到与前车尾部的安全距离来追踪前车运行。在此运营场景下, 该区域线路资源的状态为“共享”; 当在一段线路区域内仅允许一列车运行时, 该段线路资源若未经区域内列车释放, 不得给其他列车使用, 则该区域的线路资源状态为“独占”。

^{*} 上海市自然科学基金资助项目(22ZR1422200)

2) 线路资源的死锁。当多列车同时触发运行任务请求时,这些列车在互相等待对方释放所拥有的线路资源,但这些并发运行任务在未获得对方的线路资源前并不会主动释放自己所拥有的线路资源,从而造成所有列车都无法获得新的线路资源。将某线路区域内多列车运行任务并发而因无法获取线路资源,导致列车均不能继续向前运行的状态,称为“线路资源死锁”。

3) 线路资源的分时复用。城市轨道交通线路资源属于可基于方向和顺序循环重复使用的资源。

在有限的轨道线路上,通过恰当的运营调度策略、合理的资源划分和分配机制,可在单位时段内增加线路区内通过的列车数,以提高线路的运力。

综上所述,城市轨道交通线路资源所具有的特点与计算机操作系统的算力资源和存储资源特点非常相似。但在资源的调度管理上,两者又有很多差异,其对比分析如表 1 所示。

在表 1 的基础上,根据城市轨道交通的运营特点,本文重点研究与之相适应的线路资源管理方法。

表 1 计算机操作系统与城市轨道交通在资源管理上的差异

Tab.1 Differences in resource management between computer operating system and urbin rail transit		
项目	计算机操作系统的资源管理	城市轨道交通的线路资源管理
资源申请	计划性	任务触发时机具有随机性
	并发性	任务申请时机具有并发性
	运行任务间的关联关系	任务间无拓扑连接关系,相互独立;基于作业分解的短任务有"上下文"关系
资源分配	资源申请的约束条件	列车运行任务与线路拓扑、列车运行方向、前后车相邻关系间需相互匹配
	资源分配策略	受当前列车占用线路资源制约;受列车运行前方区段是否具有连续的线路资源制约
	资源死锁	基于城市轨道交通的运营特点选用分配策略;多采用非抢占方式,即对冲突区域的资源采用先到先得机制(基于列车运行计划按顺序分配)或中断机制(取消列车运行任务)
	资源动态特点	当多个任务竞争同一段资源时,将导致每个任务都在等待其他任务释放资源,而造成资源死锁
资源释放	资源释放策略	后车先于前车抢占了列车后续运营的线路资源,导致前车和后车都无法继续前行
	资源利用指标	可根据列车的运行任务确定线路资源的风险,以确定线路资源是独占还是共享
评价指标	资源释放策略	对已分配的资源有 2 种释放方式:①对于列车不可能进入的线路区域,采用强制释放方式;②对于列车所在的线路区域,采用列车主动释放或次级列车检测方式,确定列车基于出清线路的合理顺序,并逐段释放线路资源
	资源利用指标	对已分配的资源有 4 种释放的方式:①计时器(时间片轮转机制);②主动释放;③强制释放(中断机制);④一次性释放
评价指标	资源利用指标	资源的周转时间、吞吐率、响应时间,以及资源利用率
	资源利用指标	正常行车组织下的准点率和兑现率;非正常行车下的各类设备故障对全线运营影响的程度;紧急行车下的应急预案技术方法/应急预案的耗时,以及对正常运营影响的程度

2 城市轨道交通线路资源静态分析

传统城市轨道交通线路信号系统的列车侧面冲突防护技术,因进路未经过资源细化分解,而导致办理进路时所需消耗的线路资源较大,消耗的安全空间余量也较大。采用资源管理方法后,根据列车运行过程中可能出现的风险,将相应的线路区域作进一步细分,以提升线路资源的利用率。

文献[2]中提出,线路资源需通过细分来优化列车占用线路资源时所消耗的空间安全余量。城

市轨道交通线路的空间资源通过特定功能划分为相应的逻辑分区。逻辑分区是列车运行空间与运行路径的最小元素,其可分为两种类型:道岔逻辑分区和无岔逻辑分区。

2.1 道岔逻辑分区

如图 1 所示,道岔逻辑分区可分为道岔可动区和道岔侧防区。其中:道岔可动区对应的逻辑分区用于规避列车过岔脱轨风险;道岔侧防区对应的逻辑分区可分为道岔定位侧防区和道岔反位侧防区,用以规避列车侧面冲突风险。

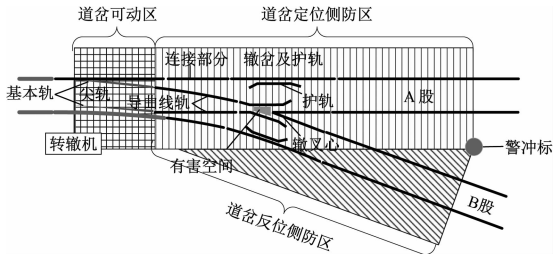


图1 道岔区域逻辑分区示意图

Fig.1 Schematic diagram of switch area logical division

2.2 无岔逻辑分区

无岔逻辑分区需根据对应的风险源进行划分。例如:为避免乘客在站台候车时的风险,需定义站台门对应的逻辑分区;为避免区间内逃生乘客与列车发生冲突,需定义乘客逃生区段对应的逻辑分区;为避免通风井处因多列车进入而阻滞了有害空气的疏散,需定义通风井逻辑分区;等等。

2.3 逻辑分区的特点分析

逻辑分区具有方向属性。多列车征用同一个逻辑分区的线路资源时,应通过列车运行方向确定列车之间的冲突关系。对于某一个逻辑分区,若前后车运行任务经过该逻辑分区的方向一致且道岔位置一致,则可同时共享该逻辑分区的线路资源。此时应通过前后车实时交互列车定位信息计算两列车的安全位置,以确保前后车跟驰运行安全。若一个逻辑分区内所有列车都已经出清,则应立即释放该逻辑分区的线路资源。

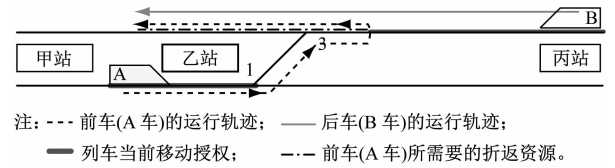
根据相应的风险源,逻辑分区具备线路资源“独占”的特点。若该逻辑分区内前后车的运行方向不一致、道岔位置不一致,或者该逻辑分区内仅允许一列车通行,则该逻辑分区的线路资源只能分配给一列车。只有逻辑分区方向的锁闭状态解除后,方可将该独占的逻辑分区资源分配给后续列车。

3 城市轨道交通线路资源动态分析

3.1 线路资源死锁

由表1可知,与计算机操作系统一样,线路资源管理在执行过程中也存在死锁现象。一旦发生死锁,基于线路资源管理的整个系统都无法继续正常运转,因此需要通过对线路资源进行静态和动态分析,以研究规避死锁的方法。图2和图3为两个典型的线路资源死锁导致列车实际运行与运行计划不匹配的场景。这两个场景共同特点是:折返线为前后两列车的冲突区域,前车(A车)申请折返线所

需的第二段运行任务线路资源的时机均滞后于后车(B车)到达折返线执行运行任务的触发时机。



a) 列车大小交路站后折返路线示意图

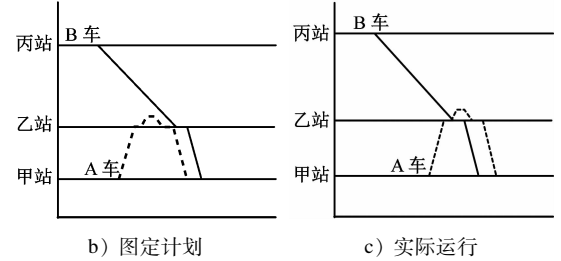
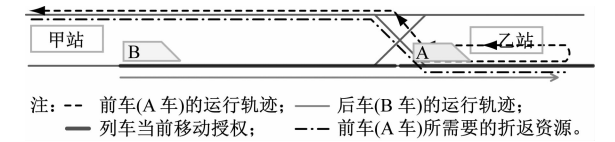


图2 列车大小交路站后折返实际运行与图定计划不匹配

Fig.2 Mismatch between actual turn-back operation and fixed plan after full-length and short-length routing stations



a) 列车大小交路站前折返路线示意图

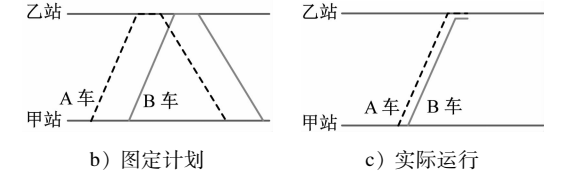


图3 列车大小交路站前折返实际运行与图定计划不匹配

Fig.3 Mismatch between actual turn-back operation and fixed plan before full-length and short-length routing stations

对于图2所示的站后折返场景,若A车和B车均自主申请前方运行任务的线路资源,轨旁线路资源管理器不作干涉,则可能会导致B车先于A车进入乙站。这虽然不会导致两列车之间的死锁,但却与图定计划不符,导致运行秩序紊乱。

对于图3所示的站前折返场景,若前车(A车)和后车(B车)分别基于运行任务自主申请折返线的线路资源,轨旁线路资源管理器若加以防范,虽然可满足正常折返的运营需求,但在前车(A车)故障时,不能满足与相邻列车连挂后救援的运营需求;若线路资源管理器不做干涉,则会导致A车无法完成折返,造成线路资源死锁,产生如图3c所示的情况。

3.1.1 引发线路资源死锁的条件

根据表 1 的分析及图 3 的场景分析,可以总结出引发资源死锁的条件,主要包括以下 4 个方面:

1) 互斥条件。线路资源不能同时被多列车同时分配或使用,对多列车所需的资源需要进行排他性控制,即“独占”控制。敌对防护和侧冲防护涉及的运营场景主要包括图 4 a) 的交汇运行、图 4 b) 的分岔运行、图 4 c) 的侧面冲突敌对运行、图 4 d) 的交叉运行及图 4 e) 的敌对运行等场景,还包括需要独占相关线路资源(如通风井区域等)的其它运营场景。

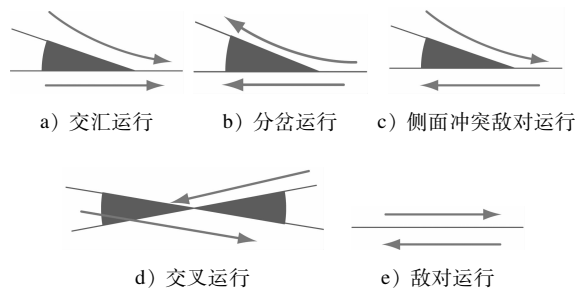


图 4 独占线路资源的运营场景

Fig. 4 Operation scenario of exclusive line resources

2) 不剥夺条件。对于已为当前列车分配的线路资源,在该资源未获得释放前,不可将此资源强行分配给其他列车;只有在该资源被当前列车释放后,才允许为其他列车分配。

3) 接近触发逐段申请。将列车运行任务分解为若干个短任务,列车在获取当前任务后,基于当前车速触发申请下一个短任务所需的线路资源;在等待申请新资源的同时,列车仍保持对已分配得到线路资源的占用状态。

4) 环路死锁条件。由于多列车均自主申请任务,可能形成任务的循环链,链中的每一个列车运行任务应获得相应的线路资源。与此同时,该资源也是下一个运行任务所需申请的线路资源,进而造成线路资源死锁环路等待。图 5 为线路资源死锁环路等待的 4 类典型运营场景。

3.1.2 规避线路资源死锁的技术措施

若要防止列车之间发生如图 3、图 5 所示场景下的线路资源死锁,需要在技术上采取有效的措施,以规避引发线路资源死锁的条件。

3.1.2.1 线路资源死锁的静态预防

基于环路死锁条件和互斥条件的站型拓扑关

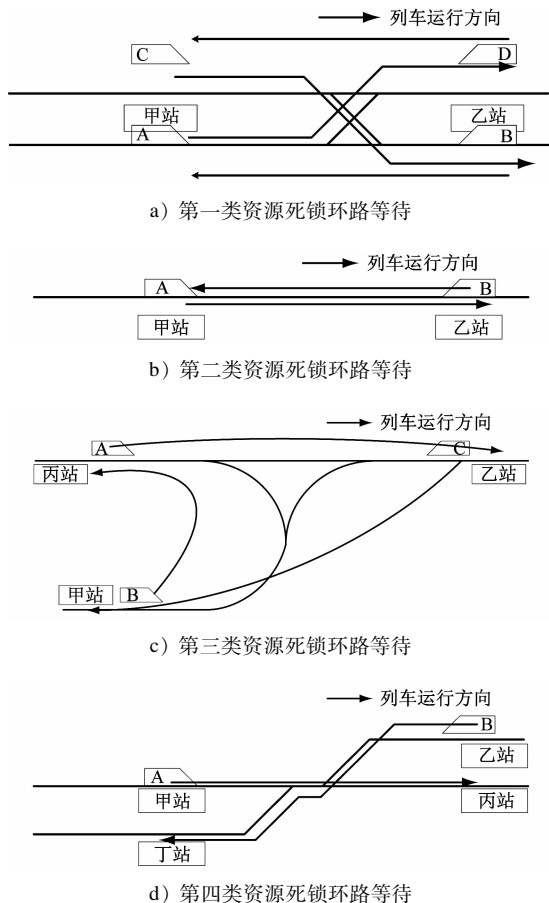


图 5 产生线路资源死锁环路等待的运营场景

Fig. 5 Operation scenario causing line resource deadlock loop waiting

系,将有冲突关系的死锁防护区域合并为 1 个道岔逻辑分区。在制定运行计划前,计算列车通过该死锁防护区的时间,以确定该死锁防护区的最大负荷量,进而确定该死锁防护区域的列车通过能力。在此基础上,合理规划前后两列车运行线之间的时序关系,在编制运行计划层面上规避图 5 所示的线路资源死锁环路等待的 4 类场景。

3.1.2.2 线路资源死锁的动态预防

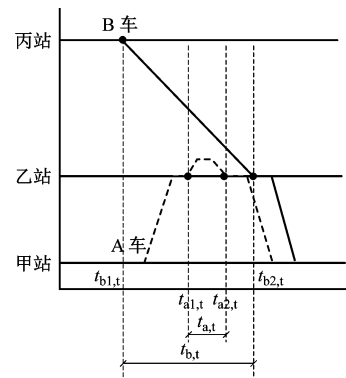
传统信号系统的进路申请采用“整段申请、整段锁闭”方式,即在规定的进路检查条件满足时才锁闭整段进路。为了防止线路资源死锁,本文提出动态申请和分配线路资源,采用的方式为“整段申请、逐段分配”,即:列车运行任务中的任意一段线路区域在相关联锁安全防护条件满足的情况下,可以立即为列车分配该区段的所有线路资源。此时列车在汇总线路资源分配情况、前车安全位置、当前列车运行方向等信息,以及线路资源情况后,通过车车协同控制完成跟驰运行。

信号系统采用动态申请和动态分配线路资源的方式,在分配资源前根据运行计划安排的顺序,对列车当前运行任务所需要的线路资源进行一次申请,完成资源排序后对该排序予以确认和校验,用以规避引发线路资源死锁的第 3 个条件——接近触发逐段申请。如对于图 2、图 3 所示的两种运营场景,ATS(列车自动监控)在为前车发布第一段运行任务时,轨旁线路资源管理器将前车后续折返任务所覆盖的所有逻辑分区设为死锁防护模式,并将该折返区域内所有的逻辑分区和第一段任务所需的线路整合成一个资源集合。待线路资源管理器确认将前车所需的资源集合排入资源序列后,ATS 再向后车发布运行任务。当前车进入折返线且第二段运行任务已确认触发,再解除该折返区域内逻辑分区的死锁防护模式,将折返线至乙站的线路资源分配给后车。这样,既可避免发生线路资源死锁的情况,又能确保前后车的运行任务与运行计划一致。

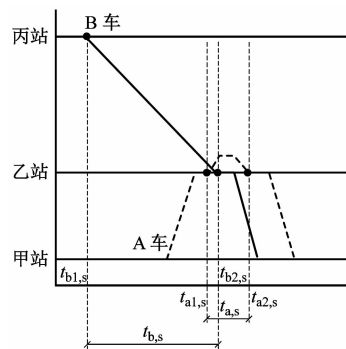
3.2 与图定运行计划不匹配

文献[3]中阐明了利用接近触发逐段申请资源的方式和采用动态规划模型分配线路资源的策略,通过求解最优值函数来决策两列车从当前位置触发至都通过道岔区域的最小耗时,以确定前后列车通过道岔的顺序。其模型目标是在多列车之间建立协同运行机制,使列车能更快地通过道岔区域,但该模型并未考虑列车通过道岔顺序与图定运行计划的匹配性。因此,受制于各列车实际运行过程的各种不确定性,前后车在交汇运行时易发生实际运行与图定运行计划不匹配的现象,导致运行秩序混乱,进而引发与其他在线运行列车间的线路资源死锁问题,以及换乘枢纽站内该线路与其他线路间客流衔接能力降低等问题。

图 6 为大小交路混合或两个交路交汇下的运营场景,仍采用图 2 a) 的折返路线。如图 6 a) 所示,前车(A 车)和后车(B 车)均需执行到达乙站下行站台的运行任务,设 $t_{a1,t}$ 、 $t_{b1,t}$ 分别为图定计划中 A 车从乙站上行站台出发的时刻和 B 车从丙站下行站台出发的时刻, $t_{a2,t}$ 、 $t_{b2,t}$ 分别为 A 车、B 车到达乙站下行站台的时刻, $T_{a,t}$ 、 $T_{b,t}$ 分别 A 车和 B 车运行的时间段。基于图定运行计划, A 车需满足 $t_{a1,t} \geq t_{b1,t}$ 。图中的 $t_{a2,t} \leq t_{b2,t}$, B 车执行任务耗时较长,因此 $T_{b,t}$ 完全包含在 $T_{a,t}$ 内,即前车插入后车任务范围,实际运行情况与图定运行计划是一致的。



a) 图定计划



b) 实际运行

注: —— 前车(A 车)的运行轨迹; - - - - 后车(B 车)的运行轨迹。

图 6 与列车大小交路站后折返计划不匹配

Fig. 6 Mismatch with turn back plan after full-length and short-length routing stations

如图 6 b) 所示,前车(A 车)和后车(B 车)均需执行到达乙站下行站台的运行任务,设 $t_{a1,s}$ 、 $t_{b1,s}$ 分别为实际运行时 A 车到达乙站上行站台的时刻和 B 车到达丙站下行站台的时刻, $t_{a2,s}$ 、 $t_{b2,s}$ 分别为 A 车、B 车到达乙站下行站台的时刻, $T_{a,s}$ 、 $T_{b,s}$ 分别 A 车和 B 车运行的时间段。由于 $t_{a1,s} \geq t_{b1,s}$,若列车基于任务自主申请原则采用列车接近触发逐段申请线路资源或在动态规划模型申请线路资源,通过最优决策判断两列车通过道岔区域的最小耗时,则导致乙站下行站台被 B 车先行征用,进而产生 $t_{a2,s} \geq t_{b2,s}$ 的情况,此时 $T_{b,s}$ 不能完全包含 $T_{a,s}$,即 B 车先于 A 车到达乙站下行站台,最终导致前后车运行顺序与运行计划不匹配的现象。

图 6 中,由于不能确定多列车获得的运行任务顺序是否与运行计划要求的顺序一致,应采用线路资源死锁静态预防和动态预防相结合的原则,建立合理的线路资源排序机制,以规避上述问题。

4 结语

在列车运行过程中,因列车运行任务并发导致线路资源死锁及与运行计划不匹配问题,是列车自主运行控制系统带来的一个常见且复杂的问题。本文通过对比计算机操作系统资源管理特点与城市轨道交通线路资源管理特点的异同,分析了线路资源死锁产生的条件,提出了解决线路资源死锁问题的技术思路及措施,以期在有效减少系统复杂度及系统运作成本的前提下,对线路资源进行动态划分及分配,以提高线路资源的利用率,确保在各种情况下行车组织均能高效、安全地完成目标任务。

参考文献

- [1] 刘林,刘正熙.基于排序的避免死锁的方法[J].微计算机信息,2009(15):141.
LIU Lin, LIU Zhengxi. An approach to avoid a deadlock database by batch updating records[J]. Microcomputer Information, 2009(15):141.

(上接第 65 页)

3 结语

本文通过对成都某地铁线列车停车精度的历史数据进行数据分割和数据预处理,对获得的 256 个样本序列采用 Weibull 分布的方式对样本数据进行拟合,获得了 Weibull 最大极值分布的尺度参数和形状参数,以及 Weibull 最小极值分布的尺度参数和形状参数。采用对时间序列预测表现良好的 LSTM 算法对这 4 个参数值的时间序列进行训练,在 100 轮训练后用测试集对参数值进行验证,其均方误差 E_{RMS} 满足统计学的要求。因此,本文研究得到的 LSTM 预测模型对列车停车精度的预测有效且准确。

参考文献

- [1] 唐涛,黄良骥.列车自动驾驶系统控制算法综述[J].铁道学报,2003(2):98.
TANG Tao, HUANG Liangji. A survey of control algorithm for automatic train operation[J]. Journal of the China Railway Society, 2003(2):98.
- [2] 王道敏.ATO 站台精确停车功能实现的制约因素分析[J].铁路通信信号工程技术,2012(4):41.
WANG Daomin. Analysis on the restrictive factors of realizing ac-

- [2] 汪小勇.城市轨道交通基于车车通信的列车自主运行系统探讨[J].中国铁路,2020(9):77.
WANG Xiaoyong. Discussion on train autonomous circumambulate system based on vehicle to vehicle communication in urban rail transit[J]. China Railway, 2020(9):77.
- [3] 方思仪,徐超凡.一种基于自主控制的列车运行控制系统资源管理策略研究[J].铁路计算机应用,2017(2):1.
FANG Siyi, XU Chaofan. Resource management strategy of train operation control system based on autonomous control[J]. Railway Computer Application, 2017(2):1.
- [4] 朱志伟,李聪.基于车车通信的地铁列车自主运行系统线路资源管理方案研究[J].城市轨道交通研究,2021(10):137.
ZHU Zhiwei, LI Cong. Research on wayside infrastructure management scheme in metro train autonomous control system based on vehicle-to-vehicle communication[J]. Urban Mass Transit, 2021(10):137.
- [5] 张尧学,石美林.计算机操作系统教程[M].北京:清华大学出版社,2000:72.
ZHANG Yaoyue, SHI Meilin. Computer Operating System Tutorial [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000:72.

(收稿日期:2022-03-14)

curate parking function on ATO platform[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2012(4):41.

- [3] 王坚.城市轨道交通 CBTC 线路列车制动参数对列车自动运行停站精度的影响[J].城市轨道交通研究,2020(增刊2):172.
WANG Jian. Influence of train braking parameters on CBTC lines on the train stop accuracy under ATO mode [J]. Urban Mass Transit, 2020(S2):172.
- [4] 宁晨鹤,阴佳腾,宿帅,等.基于深度学习的高速列车精确停车模型研究[C]//中国自动化学会.2020 中国自动化大会(CAC2020)论文集.上海:中国自动化学会,2020:64.
NING Chenhe, YIN Jiateng, SU Shuai, et al. Research on accurate stopping model of high-speed train based on deep learning [C]// Chinese Association of Automation. Proceedings of 2020 China Automation Conference (CAC 2020). Shanghai: Chinese Association of Automation, 2020:64.
- [5] 骆书林.基于数据挖掘的列车停车精度分析[D].北京:北京交通大学,2012.
LUO Shulin. Analysis of train stopping accuracy based on data mining[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [6] 周骥,陈德旺.机器学习在列车精确停车问题的应用[J].计算机工程与应用,2010(25):226.
ZHOU Ji, CHEN Dewang. Application of machine learning methods in problem of precise train stopping[J]. Computer Engineering and Application, 2010(25):226.

(收稿日期:2022-05-16)