

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

朱志伟 李 聪

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州//第一作者, 高级工程师)

摘 要 基于车车通信的 TACS(列车自主运行系统)在既有列车运行控制系统的基础上,突破传统联锁的进路理念,通过线路资源管理方式,实现与联锁系统进路安全防护一致的列车运行路径防护。从线路资源化理念出发,研究线路资源的划分和管理方式,并从基于车车通信的 TACS 层面分析线路资源管理的关键技术和主要功能。

关键词 地铁; 车车通信; 列车自主运行系统; 线路资源管理

中图分类号 U29-39

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.027

Research on Wayside Infrastructure Management Scheme in Metro Train Autonomous Control System Based on Vehicle-to-Vehicle Communication

ZHU Zhiwei, LI Cong

Abstract On the basis of existing train operation control system, the TACS (train autonomous control system) based on vehicle-to-vehicle communication breaks through the route concept of traditional interlocking, and achieves the train operation path protection through the way of wayside infrastructure management that is consistent with the route safety protection of interlocking system. Starting from the concept of line resources, the division and management of wayside infrastructure are studied, the key technologies and main functions of wayside infrastructure management are analyzed from the TACS system level that is based on vehicle-to-vehicle communication.

Key words metro; vehicle-to-vehicle communication; train autonomous operation system; line resource management

Author's address Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

目前,CBTC(基于通信的列车控制)系统属于城市轨道交通信号系统的主流制式,而其联锁系统在 CBTC 系统中主要负责管理轨旁信号设备,通过进路控制与 ATP(列车自动防护)相结合,共同实现

列车运行的安全防护。近年来迅速发展的基于车车通信的 TACS(列车自主运行系统),通过增强列车车载设备功能并增加列车之间的通信接口,实现线路列车群的分散自律运行,突破了既有 CBTC 系统的地面集中控制方式。TACS 具有系统架构精简、信息传输实时性高、系统能力强等优质特点,将既有联锁系统的进路控制方式转变为资源管理方式,大幅精简轨旁设备,由地面执行单元、资源管理设备、列车车载设备协同进行线路资源管理,完成列车运行路径的安全防护。

1 城市轨道交通联锁进路与线路资源化理念

城市轨道交通联锁系统主要实现道岔、信号机、轨道区段间正确联锁关系及进路控制,通过次级检测设备检测列车位置,并基于列车位置的 3 点检查完成联锁进路的解锁,如图 1 所示。根据 IEEE Std 1474.4—2011 IEEE Recommended Practice for Functional Testing of a Communications-Based Train Control (CBTC) System,CBTC 系统提供的联锁功能包括进路接近锁闭、进路占用锁闭、道岔区段占用锁闭和区段解锁等。CBTC 系统中,ATP 子系统计算移动授权,并基于已排列的进路范围进行移动授权延伸。CBTC 系统中为保证通信列车速度曲线连续性存在进路重叠情形,位于同一进路中的列车由移动授权保证列车安全运行间隔。

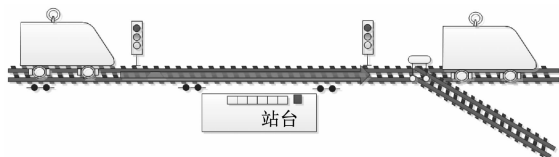


图 1 城市轨道交通联锁进路示意图

Fig. 1 Interlocking route diagram of urban rail transit

CBTC 系统是位于地面的一个独立系统,联锁与 CBTC 系统通过接口实现 CBTC 模式下的进路功能。联锁系统的功能包括进路控制、信号控制、道岔控制等。行车安全防护主要由 ATP 设备实现。

进一步对 CBTC 模式下的联锁进路逻辑进行分析。针对 CBTC 模式下的进路排列,一般只检查进路内部第 1 个区段的空闲条件。联锁表对于行车安全的防护主要体现在道岔正确锁闭、敌对信号关闭,其他联锁条件满足如站台门关闭、紧急停车按钮未按下等情况。CBTC 模式下对于较长的物理区段,可进一步分解为若干逻辑区段,实现 CBTC 进路的快速响应。针对联锁模式下的进路,需对其检查整个进路范围内所有区段的空闲状态。CBTC 系统允许进路重叠覆盖,通信列车的行车凭证源于车站设备而不再依赖于信号机显示。

随着通信技术的发展以及车地无线通信可靠性的提高,CBTC 系统可考虑摆脱对联锁的依赖,通过对线路组成元素进行分解,提取必要的组成元素构成线路资源,并对线路资源重新整合,建立线路资源的使用逻辑,实现列车对于线路资源的有序占用,从而达到与联锁进路一致的安全防护目的。在无岔区段,列车可通过获取前行列车信息进行间隔防护;在道岔区域,基于列车的连续定位信息控制道岔位置,解决列车在岔区可能发生的冲突场景。

相比于进路控制方式,线路资源管理方式通过合理利用线路元素,简化复杂的物理区段划分,着重处理具有冲突关系的线路资源。

2 线路资源管理方案研究

2.1 线路资源划分

基于线路资源化理念,分析线路上的主要组成元素,并按专业进行分类,如表 1 所示。

表 1 城市轨道交通线路元素分类	
Tab.1 Rail transit line element classification	
元素	元素分类
轨道、道岔、车挡等	线路设施
站台门、防淹门	站台门、防淹门
转辙机、信号机、计轴器、紧急停车按钮、 人员防护开关等	信号设备
接触网、接触轨等	供电设施
区间电话、天线等	通信设备
疏散平台、区间照明设施、消防设施	其他

表 1 中,对于线路轨道元素,由于 TACS 系统不依赖轨道区段次级检测设备,不存在物理区段划分,影响行车的主要元素为标志线路起终点的车挡,以及影响运行方向的道岔,须将这两种元素纳入线路资源管理。车挡状态相对固定,而线路道岔具有定位、反位、四开等 3 种状态。道岔区域是行车安全防护的重点,也是线路资源管理的重点。

站台门、防淹门具有开、闭两种状态,站台门、防淹门状态均影响到行车安全,需将其纳入线路资源管理。

信号设备均与行车安全相关,应纳入线路资源管理范围,而 TACS 系统不依赖联锁设备,因此,信号设备中作为线路资源的设备不包括信号机和计轴器。

供电设施、通信设备及其他设备均属于固定设施,正常工作状态下与行车安全不存在直接联系,可不纳入线路资源管理。

综上所述,参与行车安全防护的线路资源主要包括车挡、道岔、站台门、防淹门以及信号设备。

2.2 线路资源管理

线路资源管理由地面线路资源管理设备结合车载 ATP 设备共同完成。线路资源管理设备作为资源分配的主体,通过接收列车的控制指令完成线路资源的申请、锁定和释放。线路资源状态可初步分为 3 种状态:①资源空闲——表示资源未被分配,可申请状态;②资源锁定——表示资源已分配给列车;③资源故障——表示资源故障,须恢复后方可使用。

线路资源状态之间的转换如图 2 所示。

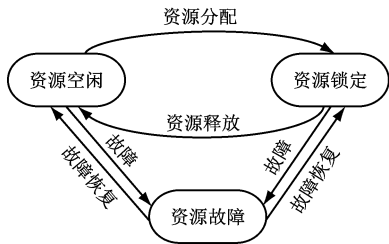


图 2 线路资源状态转换示意图

Fig. 2 State transition diagram of wayside infrastructure

从信号系统能力角度分析,线路资源分配应能适应系统最大运行能力。针对图 2 描述的线路资源状态,可对资源锁定状态进一步划分为资源共享锁定状态和资源独占锁定状态。以图 3 所述场景为例,为确保 B 车在 A 车出清站台区域时可及时进

站, B 车应能申请以道岔 2 作为进站保护区段, 此时 A 车尚未释放道岔 2 的资源, 在这种场景中道岔 2 可由 A 车、B 车共同使用, 这种可由后续列车继续申请的资源锁定形式为共享锁定。



图 3 共享资源场景示意图

Fig. 3 Shared resource scene diagram

对于资源独占锁定, 锁定资源仅可供已分配独占资源的列车使用, 在资源释放前无法再分配给其他列车。以图 4 a) 所述场景为例, 设 A 车在车站进行站前折返作业, 则 A 车申请道岔 1、道岔 2 的独占资源, 资源申请成功后, 后续 B 车无法再申请道岔 2 的资源; 当 A 车出清道岔 2 后, 可释放道岔 2 的资源 (TACS 取消联锁的联动道岔形式, 线路道岔均定义为单动形式), 此时道岔 1 的资源依旧由 A 车独占, B 车可申请道岔 2 的资源, 如 B 车计划经道岔直向进站, 可直接申请至车站内停车所需的线路资源, 如图 4 b) 所示。

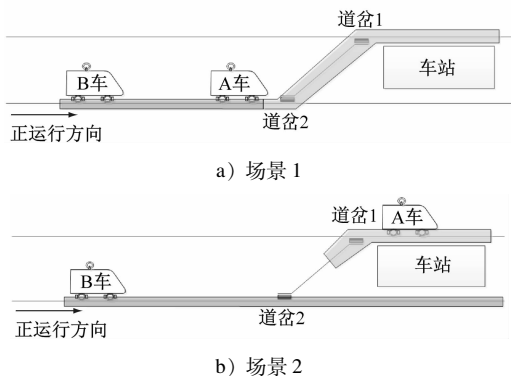


图 4 独立资源场景示意图

Fig. 4 Exclusive resource scene diagram

综上在对资源锁定场景进行分析的基础上, 对图 2 中的线路资源锁定状态进行细化。如图 5 所示, 列车根据运行计划自主确定申请的资源形式, 对于已申请的共享锁定资源可在资源释放前继续分配给其他列车, 而独占锁定资源则需在资源释放后方可另行分配。这种资源分配和释放机制, 主要依靠车载设备和地面线路资源管理设备配合实现, 可大幅提高线路资源使用效率, 有利于提升系统能力。

2.3 非通信列车的线路资源管理

TACS 采用地面列车管理设备统一管理非通信

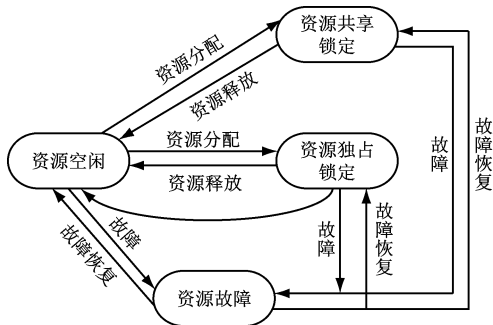


图 5 优化后的线路资源状态转换示意图

Fig. 5 Optimized state transition diagram of wayside infrastructure

列车, 地面列车管理设备承担非通信列车的线路资源申请功能。经司机向行车调度员确认非通信列车位置, 由行车调度员根据列车运行计划, 在人机界面输入非通信列车位置、目的地等信息后, 由列车管理设备为非通信列车申请当前位置到目的地之间所需的线路资源。对于已分配的线路资源, 经人工确认出清后, 系统根据人工输入的非通信列车位置自行释放非通信列车的线路资源。

3 线路资源管理在基于车车通信的 TACS 中的应用

3.1 线路资源管理关键技术

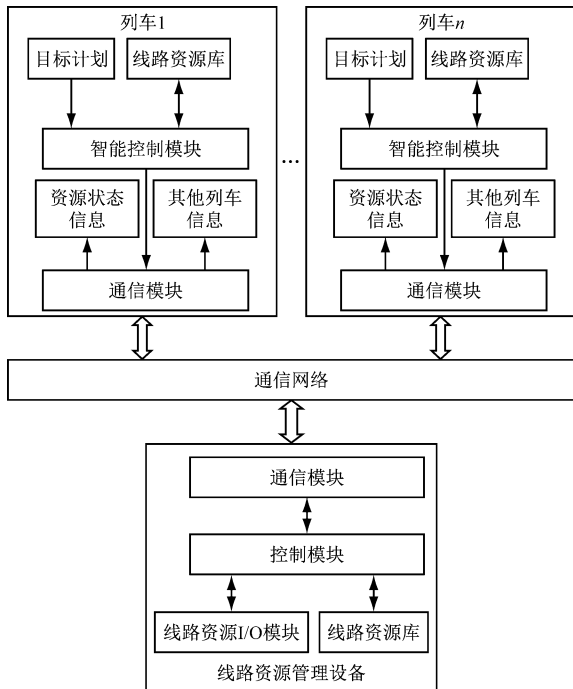
线路资源的申请和释放实际上是一种自组织形式, 与智能交通中应用的物联网技术类似, 通过统一的、去中心化的方式实现列车之间的有序、安全、可靠运行。根据实际运行环境, 列车自组织网络中的通信主要包括列车与地面线路资源管理设备的通信和列车之间的通信。其中, 列车为移动节点, 地面设备为固定节点, 节点之间利用车地无线通信网络进行通信。

列车群的自主运行核心在于列车间智能行为的协作与协调。在复杂多变的线路运行环境中, 每列列车都具有高度的自主性, 列车自主申请和释放资源的行为随着运行环境动态变化, 是实现线路资源有序分配、解决列车运行冲突场景的关键。

从资源管理层面分析, 每列列车均属于一个具有自主行为的个体。其核心构成包括线路资源库、线路资源控制逻辑以及通信模块。线路资源管理的整体自组织结构体系如图 6 所示。

3.2 线路资源管理设备功能需求

1) 线路资源存储、动态更新维护功能。线路资源管理设备通过数据库形式对于静态的线路数据



注:I/O 模块为输入/输出模块。

图6 线路资源管理结构体系示意图

Fig. 6 Structure and system diagram of wayside infrastructure administration

进行统一管理,针对不同线路资源在数据库中建立相应的链表进行分类存储。线路资源管理设备应具备系统维护功能,维护信息以数据表、图、日志分析等形式进行存储,以便于维护人员进行日常管理,及时对故障进行修复、更新。

2) 适应各类运营场景的线路资源分配和释放功能。类似于联锁系统中联锁表的建立和执行,系统设计过程中针对线路资源的分配和释放,应结合线路参数、道岔类型、车辆模型等进行统筹考虑,寻找线路资源利用率和系统运行能力的平衡点。

3) 接口信息功能。线路资源管理设备之间,以及线路资源管理设备与轨旁执行单元、地面列车管理单元、车载设备之间具备接口通信功能。通过线路资源管理设备与轨旁执行单元的接口完成资源状态信息的汇总,并通过与车载设备接口将汇总信息传输到列车车载设备,根据列车运行需求对列车进行资源分配及资源释放。

4 结语

线路资源管理属于基于车车通信的列车自主运行系统的核心功能,其对于城市轨道交通的行车安全防护、行车效率均有重大影响。本文系统阐述了线路资源管理的基础方案,以及其在信号系统中的主要功能。可为基于车车通信的列车自主运行系统的系统设计、工程应用提供借鉴。

参考文献

- [1] 刘大为,郭进,王小敏,等. 智能铁路信号系统展望[J]. 中国铁路,2013(12):25.
LIU Dawei, GUO Jin, WANG Xiaomin, et al. Prospect of intelligent railway signal system[J]. China Railway, 2013(12):25.
- [2] 唐涛,郝春海,李开成,等. 基于通信的列车运行控制技术发展策略探讨[J]. 都市快轨交通, 2005(6):25.
TANG Tao, GAO Chunhai, LI Kaicheng, et al. A discussion on the CBTC development strategy [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2005(6):25.
- [3] 温杜仲. 基于车-车通信技术的新型城市轨道交通信号系统研究[J]. 中国新通信,2016(24):122.
WEN Duzhong. Study on new urban rail transit signal system based on train-to-train communication technology[J]. China New Telecommunications, 2016(24):122.
- [4] 田晔非. 基于频谱协作技术的车辆自组织网络仿真系统设计与实现[J]. 自动化应用,2020(9):39.
TIAN Yefei. Design of a vehicle self-organizing network simulation system based on spectrum collaboration technology [J]. Automation Application, 2020(9):39.
- [5] 李福涛. 车联网通信技术简析[J]. 数字通信世界, 2020(2):87.
LI Futao. Communication technology in vehicular networks [J]. Digital Communication World,2020(2):87.
- [6] 李华,杨燕玲. 基于 LTE-V2X 的车联网关键技术研究[J]. 广东通信技术,2019(11):61.
LI Hua, YANG Yanling. Research on key technologies in vehicular networks based on LTE-V2X [J]. Guangdong Communication Technology,2019(11):61.
- [7] 徐启禄. 基于车车通信的 CBTC 系统关键技术研究[J]. 城市轨道交通研究,2020(5):110.
XU Qilu. Key technology research on CBTC system based on vehicle-vehicle communication [J]. Urban Mass Transit, 2020(5):110.

(收稿日期:2021-01-20)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com