

以列车为中心的自主控制系统功能及运营场景研究^{*}

冯浩楠^{1,2} 白广争^{1,2} 于健洁^{1,2**} 刘海祥^{1,2} 黄苏苏^{1,2}

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所, 100081, 北京;

2. 国家铁路智能运输系统工程技术研究中心, 100081, 北京//第一作者, 副研究员)

摘要 以列车为中心的列车自动控制系统通过列车间的通信和列车与轨旁间的通信等方式, 来实现列车自主运行控制。从系统架构、功能分配和场景分析 3 个方面对以列车为中心的列车自主控制系统的特点进行了分析。重点介绍了列车定位、信息共享、资源管理、间隔控制、自主排路和移动授权、列车状态监控、车速控制等 7 大功能, 以及正常运营、降级运营和紧急运营等 3 种工作场景。

关键词 城市轨道交通; 列车自主运行; 运行场景

中图分类号 U231+.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.10.022

Research on Functions and Operation Scenario of Train-centric Autonomous Train Control System

FENG Haonan, BAI Guangzheng, YU Jianjie, LIU Haixiang, HUANG Susu

Abstract The train-centric autonomous train control system achieves autonomous operation control through inter-train communication and vehicle-wayside communication. The characteristics of the train-centric autonomous train control system are analyzed from aspects of system architecture, function allocation and scenario analysis. Seven functions such as train positioning, information sharing, resource management, interval control, autonomous route arrangement and mobile authorization, train status monitoring and speed control, as well as three working scenarios including normal operation, degraded operation, emergency operation are emphatically introduced.

Key words urban rail transit; train autonomous operation; operation scenario

Author's address Signal and Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, 100081, Beijing, China

城市轨道交通的快速发展使得列车运输性能

得到极大提升。以列车为中心的列车自主控制系统在精简原系统架构的同时, 实现了多业态运输方式, 同时提升了运力, 成为下一代城市轨道交通列车控制系统发展的方向^[1-3]。

本文主要叙述了以列车为中心的自主控制系统的架构、功能和运行场景等 3 部分内容。通过对比以列车为中心的自主控制系统和 CBTC(基于通信的列车控制)系统在功能上的差异来突出以列车为中心的自主控制系统的核心功能, 如基于列车通信的安全间隔控制、虚拟连挂、态势感知与判断、动态路线控制等。

1 以列车为中心的自主控制系统

1.1 系统架构

与文献[4-6]车车通信的 CBTC 系统架构类似, 以列车为中心的自主控制系统由地面系统和车载系统组成。地面系统包括 ATS(列车自动监控系统)、RM(资源管理器)和 OC(目标控制器)。其中, RM 负责管理共享资源, 包括轨道、道岔和 PSD(站台门)的资源, 其不能决定共享资源是否被拥有和控制, 只通过信号量的互斥功能, 完成共享资源的记录和管理; OC 实现对轨旁设备的操作。车载系统包括无线通信设备、ATO(列车自动运行)系统和 ATP(列车自动防护)系统。与 CBTC 中的 ZC(区域控制器)计算移动授权、联锁建立进路和控制道岔功能的设计不同, 自主控制系统的车载 ATP 通过与前车直接通信, 接收前车的位置和速度信息, 同时接收来自 RM 提供的资源占用情况, 并计算出列车运行速度曲线, 自主确定列车运行的移动权限, 控制与前车的安全行车距离; ATO 则能实现自动驾驶等的非安全功能。以列车为中心的自主控

^{*} 中国铁道科学研究院集团有限公司科技研究开发计划项目(2021YJ018)

^{**} 通信作者

制系统架构如图 1 所示。

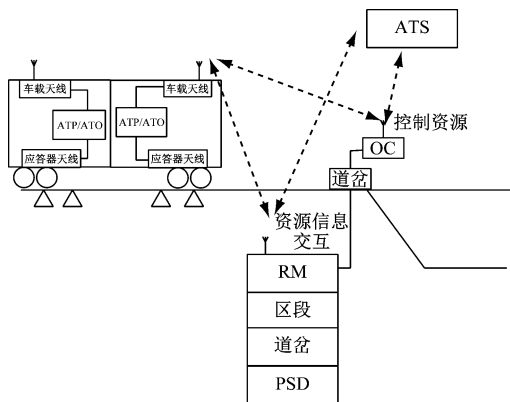


图 1 以列车为中心的自主控制系统架构

Fig. 1 Architecture of train-centric autonomous train control system

1.2 系统特点

以列车为中心的自主控制系统,通过识别和判断列车周边状况以实现自动控制的功能。与 CBTC 系统相比,自主控制系统具有如下特点。

1) 基于 T2X (Train-to-Everything) 的自主列车控制。以列车为中心的自主控制系统基于列车之间直接通信、列车和轨旁设施通信的通信方式,在无地面控制系统的情况下,可实现列车间隔控制。列车间隔控制本质上是对本区段共享资源的划分控制,使两列或多列列车在时间和空间上不同时占用相同的区段。基于列车之间直接通信完成前后两列列车之间的安全间隔控制。车-车通信示意图如图 2 所示。对于有道岔的进路,需要进行道岔进路控制。列车控制系统对共享资源——道岔进行控制,使两列或多列列车不同时占用。对于车载系统而言,所有的道岔都是独立操作的。通过与轨旁设备的通信,列车可自主控制道岔位置和行进路线。车-地通信控制道岔示意图如图 3 所示。



图 2 车-车通信示意图

Fig. 2 Diagram of train-to-train communication

2) 基于 T2X 的列车虚拟编队控制。车虚拟编队是指在没有物理连接器的情况下,通过减小列车间距离来操作两列或更多列车编队运行。自主控制系统通过识别虚拟连接列车的完整性防止编队内

列车碰撞,编组列车像一列列车一样运行,如图 4 所示。虚拟编队的列车控制系统须包括 7 大管理功能:列车位置管理,列车速度管理,列车移动权限管理,编队内虚拟连接管理,整体虚拟编队管理,列车安全防护和列车制动控制管理。

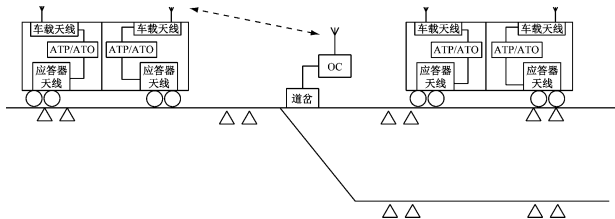


图 3 车-地通信控制道岔示意图

Fig. 3 Diagram of turnout control by train-to-ground communication

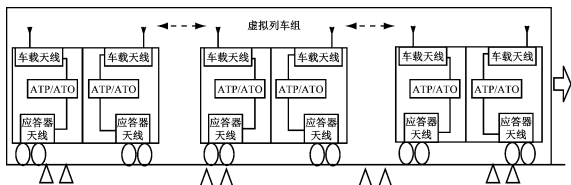


图 4 基于 T2X 的虚拟编队

Fig. 4 Virtual formation based on T2X

3) 基于 T2X 的环境感知和决策/控制。在发生故障和延误的情况下,自主控制系统的列车根据自身和周围列车状态,评估与原列车计划时刻的差异:当差异在系统阈值范围内,则列车基于智能化策略按照原列车的子时刻表进行并通知 ATS 系统,在得到 ATS 系统授权后可调整自己的速度、路线和时刻表等。灵活的自组织方式减少了故障引起的延误,提高了运营效率。

2 以列车为中心的自动控制系统功能

以列车为中心的自主控制系统功能包括列车定位、信息共享、资源管理、列车间安全间隔控制、自主排路和移动授权、列车状态监控、列车速度控制等 7 大功能。

2.1 列车定位

以列车为中心的自主控制系统需自主确定列车位置,将确定的列车位置报告给 ATS 系统和其他列车。列车定位包括:

- 1) 列车位置的计算:列车控制系统通过车轮的转数来计算列车的位置,进而计算出行驶的距离。
- 2) 列车位置修正:列车控制系统利用地面标尺修正列车累计误差。

3) 列车位置补偿:列车控制系统在行驶过程中实时计算累积误差,并反映在列车长度中。

2.2 信息共享

信息共享功能包括:在路线上运行的列车共享位置等的列车状态信息;列车与 ATS 系统均可控制轨旁的共享资源并进行监控;轨道的共享资源状态信息通过 RM 传送给路线上所有的列车。

2.3 资源管理

以列车为中心的自主控制系统的资源包括轨道区段、道岔和 PSD(见表 1)。所有共享资源都由 RM 管理。列车通过 RM 对资源进行预留、释放和控制操作。能够占用和控制资源的对象包括 ATS 和列车。ATS 有权控制和恢复列车占用的共享资源。但是,列车控制系统只有在安全释放共享资源状态时,才可将其共享资源转移给 ATS。列车控制系统只有在安全占用资源后才可进行控制。在临时限速的特殊情况下,列车控制系统可立即对共享资源进行控制。一个轨道区段中可建立多个临时限速。

表 1 以列车为中心的自主控制系统控制的资源
Tab.1 Resources controlled by the train-centric autonomous train control system

资源名称	占用方式	控制方式
区段	锁闭/解锁	设置/解除保护区段; 设置/解除临时限速
道岔	锁闭/解锁	定位/反位
PSD	锁闭/解锁	打开/关闭

在 RM 资源管理规则中,资源不能同时占用,因此设置成信号量进行互斥管理。RM 管理资源的原则如下:①RM 管理资源的占用状态和常态,如区段是否占用、道岔是否故障、PSD 是否故障等;②RM 拒绝对占用资源的请求;③RM 同意对未占用资源的请求;④当资源请求同时到来时,RM 将 RA(资源权限)授予一个请求,RM 不决定资源请求的优先级;⑤RM 根据资源的请求授予,同时锁定资源;⑥RM 仅在资源所有者的请求下才解锁资源;⑦RM 收到资源拥有者的资源控制命令,对资源进行控制;⑧RM 记录资源所有者。

列车请求共享资源示意图见图 5。自主控制系统的列车通过与相邻列车及 RM 通信,获知所需的资源占用状态和限制情况,并向 RM 请求列车前进区域内的可用资源;RM 响应请求,通过 RM 锁闭未

占用的资源;列车再根据通过 RM 的资源状态和与前车的位置,来确定自己的移动权限。如列车所需的资源已经被另一列车占用,则列车可通过与另一列车直接协同处理,以确保使用必要的资源。

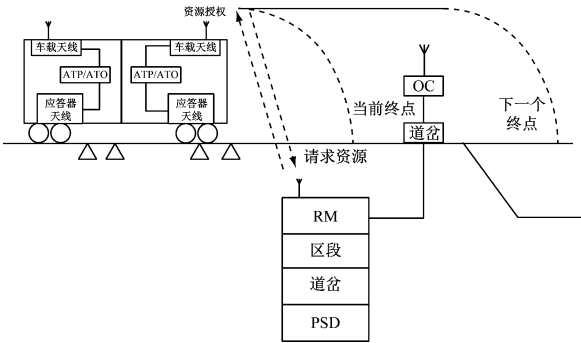


图 5 列车请求共享资源示意图
Fig. 5 Diagram of train requesting the shared resources

列车通过快速释放通过路线中占用的资源,以提高资源的利用率。RM 收到资源占用者的有效解锁请求后,对占用资源进行解锁;资源通过 RM 释放,但解锁的责任在于资源所有者;资源拥有者通过 RM 查询共享资源是否成功解锁。

2.4 列车间安全间隔控制

以列车为中心的自主控制系统存在 3 种列车间隔控制策略:

1) 基于前车位置。列车控制系统根据前车报告的列车位置生成本车的移动授权,同时,列车控制系统补偿和更正本车的位置误差。

2) 基于前车速度。列车控制系统根据前车当前的速度进行间隔控制。以列车为中心的自主控制系统中,列车的制动距离为列车在移动授权范围内,以当前速度制动时,其不与前车发生碰撞的距离。列车的制动距离是基于前车的最佳制动距离计算得出的,新的移动授权的计算还应考虑前车速度、位置误差等因素。此外,还需实时对本车的速度误差进行修正和补偿。

3) 基于前车的加速度进行虚拟编队。列车基于前车的加速度信息进行虚拟编队的列车间隔控制;与前车进行虚拟编队时,后车切换到被动工作模式,利用前车的减速度/加速度来控制与前车间隔。在虚拟连接过程中,前车和后车选择最低的性能来匹配列车间的性能(最大速度、减速度/加速度)。虚拟编队成功后,编队中的引导列车计算的编队列车长度包括尾随的所有列车长度,列车需对本车的加速度误差进行修正和补偿。

传统列车编队通过物理耦合,后方列车靠近,前方列车必须停下来后,再通过连接器接触建立物理连挂。此外,物理连接和分离需要相当长的时间,对列车整体运营会产生不利影响。虚拟编队技术为提高运营效率提供了基础。它无需物理连接器,通过车车通信将列车间距减少,确保灵活性。虚拟编队新增了 3 种场景:

1) 站内虚拟解挂。虚拟编队列车运行至站台后,头车完成与后车的虚拟解挂继续前进,后车停留在站台。这种方式减少了物理解挂所需消耗,如时间、人力等因素。

2) 站内虚拟连挂。站台停留一列列车,后续进站列车缓慢靠近站台,基于虚拟连挂技术,突破站外信号防护,实现与站内列车虚拟连挂后组成虚拟编队。

3) 站台虚拟解编和连挂。虚拟编队低速进站,在站前的道岔前解编,驶入不同的站台;两列列车出发后,再次通过车-车通信进行编组,以作为一个虚拟编队运行。

这样的场景可以在不改变站台长度的情况下,提高站台利用率,增加运输量。

2.5 自主排路和移动授权

列车的运行路线由 ATS 提供。当列车被分配一个列车编号时,会收到完整的时刻表和与该列车编号对应的运行路径信息,其信息包括列车到达目的地所需的共享资源(区段、道岔和控制方向、PSD 和状态等)。

ATS 下发给列车的运行路线不能与其他列车的运行路径冲突;当列车改变路线时,能自主搜索到目的地的最佳路线。运行路线指定列车移动权限需要的资源,但并不执行对资源的获取和控制。运行路线是为了防止列车的移动权限在获取资源的过程中出现死锁,并不判断该资源是否实际被其他列车占用。列车控制系统依据下发的运行路线自主计算列车的移动授权。

列车控制系统完成移动权限所需资源(区段、道岔、PSD)的获取和控制。当运行路线发生变化时,列车向 RM 请求获取最新运动路线所需资源。在某些情况下,如所需资源已被其他列车占用时,可直接与占用资源的列车协商获取资源。

2.6 列车状态监控

列车运行过程中遇到情况分为以下 3 类。

2.6.1 列车上的紧急情况

列车内紧急情况通常分为列车故障和列车事故 2 个部分。

在列车发生故障的情况下,列车将以降级模式减速运行或停止运行。在必须停止操作的情况下,尝试进入最近的站台让乘客下车。列车故障因素包括:车厢故障、列车低速运行的条件(如列车牵引装置的故障等)、停车条件(行驶到最近的站台并打开车门)及必要时的紧停条件(列车无线通信设备故障等)。在识别列车故障后,其采取的措施包括列车临时限速、列车运行路线修改、列车紧急制动等。

当列车发生火灾事故时,根据火灾的严重程度,列车直接停在轨道上或进入最近的站台让乘客下车。如果车内发生紧急的事故,列车会通知 ATS 控制列车并停在最近的站台。

2.6.2 轨道上的紧急情况

轨道上的紧急情况包括人或障碍物在轨道上的存在或碰撞、轨道缺陷、道岔故障、PSD 故障、隧道或站台起火等。

当发现区域有人或障碍物出现在轨道上时,则封锁该区间禁止列车进入。如果有轨道缺陷、道岔故障、隧道或站台发生火灾,则必须封锁进入该区域的通道。如果站台火势较小,可考虑不停车通过。

RM 实时监控轨旁设备状态。列车控制系统通过 RM 获得轨旁状态,根据轨旁状态判断检测区间是否需要设置为临时限速或禁止进入的保护区间。如果需要,列车控制系统可通过 RM 将区段设置为临时限速区段或保护区段。

2.6.3 其他灾害情况

其他灾害情况包括暴雨、大雪、台风等,以列车为中心的自主控制系统需采用相应的应急方案。暴雨、大雪和台风不仅发生在特定轨道区域,还会影响整条线路,因此路线上的所有列车在必要时全部减速或停车。轨旁的监控设备向 RM 实时提供监测到的异常情况,列车控制系统通过 RM 接收检测设备的状态和检测结果,判断是否设置为保护区段或临时限速区段。

2.7 列车速度控制

轨道的永久限速和由 ATS 系统下发的临时限速信息,是列车的移动授权计算的重要参数,并由此生成阶梯状的速度安全控制曲线。速度控制曲线包括了列车的制动信息。

3 以列车为中心的自主控制系统运行场景

以列车为中心的自动控制系统具有3种工作场景:①正常运行场景;②性能下降运行场景;③应急运行场景。

3.1 正常运行场景

在正常运行模式下,根据列车时刻表到达、停车和离开站台。

运营开始前,列车在车辆段进行准备工作,运营结束后进行清理工作。运行期间在车辆段进行检查,维修人员对列车进行检查。

正常运行场景包括:①开始运营——从系统启动到开始运营的所有任务;②运营结束——从运营业务结束到系统关闭;③正常情况——按计划在线正常运行;④特殊情况——超出正常的情况,如轻微延误、临时限速等情况。

3.2 降级运行场景

降级的运行场景与操作优化、系统故障管理和维护等活动相关。在此模式下,列车不遵循ATS的列车时间表。降级运行场景通常是由于系统故障引起。此时,列车按照自己的子时刻表自行运行,但需在ATS的监督和控制在运行。列车子时刻表基于各种策略,应尽量减少因列车故障和地面设施故障造成的停运时间。

3.3 应急运行场景

在火灾、停电等紧急事故的应急运行场景下,列车选择相应的运行策略。

一般情况下,处于紧急状态的列车无法自动运行,必须使用救援车将其拖至疏散线。为确保拖曳空间,须将相关区间与运行区间分开,禁止列车进入拖曳作业区间,将故障列车先牵引至疏散线,在运营结束后移至停车场。

4 结语

通过与CBTC系统相比,以列车为中心的自主控制系统具有如下3个特点:

1) 通过列车间通信的直接控制,可提高运能,减少轨旁设施。

2) 通过虚拟连接控制使运能最大化,并改善乘客和运营服务质量。

3) 根据列车事故和故障、运行前方的轨道事故和故障以及灾害信息,通过态势感知、判断和识别周围情况,自主确定运行策略和动态调度,能提高列车运行的安全性和运行效率。

以列车为中心的自主控制系统的系统功能和场景分析为系统的应用和工程化应用奠定了基础。同时,运行场景将随着系统运营过程中也不断丰富和完善,进而科学合理规范列车运行过程,更好地服务乘客。

参考文献

- [1] 冯浩楠,范楷,段宏伟,等.城市轨道交通信号系统互联互通协议框架研究[J].城市轨道交通研究,2018(11):63.
FENG Haonan, FAN Kai, DUAN Hongwei, et al. Study on the interconnection protocol framework for urban rail transit signal system[J]. Urban Mass Transit, 2018(11):63.
- [2] 黄苏苏,冯浩楠.基于车车通信的CBTC系统[J].城市轨道交通研究,2021(6):188.
HUANG Susu, FENG Haonan. CBTC system based on train-train communication[J]. Urban Mass Transit, 2021(6):188.
- [3] 冯浩楠.车车通信系统中车地控制机理分析及验证[J].科学技术与工程,2020(13):5345.
FENG Haonan. Analysis and verification of control mechanism between train and wayside equipment in VBTC system[J]. Science Technology and Engineering, 2020(13):5345.
- [4] 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.
- [5] 刘会明,高翔.下一代城市轨道交通信号系统研究[J].城市轨道交通研究,2020(增刊2):7.
LIU Huiming, GAO Xiang. Research on the next generation urban rail transit signaling system[J]. Urban Mass Transit, 2020(S2):7.
- [6] 柴明东,祝陶美,王涛.基于车-车通信的CBTC系统方案研究[J].城市轨道交通研究,2019(5):80.
CHAI Mingdong, ZHU Taomei, WANG Tao. Research on the train-to-train communication based train control system[J]. Urban Mass Transit, 2019(5):80.

(收稿日期:2021-08-17)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao.umt1998.com