

基于车-车通信的 CBTC 系统方案研究

柴明东 祝陶美 王 涛

(同济大学浙江学院,314051,嘉兴//第一作者,工程师)

摘 要 基于通信的列车控制(CBTC)系统已在城市轨道交通中得到广泛使用,并在工程实践中展现出较大的优势,但其具体实现方案仍是现阶段研究的一个重要方面。提出了一种基于车-车通信的新型 CBTC 系统,给出了系统构架和功能原理,并就相邻列车通信和全网列车通信两种实现方案进行了讨论。分析了该新型 CBTC 系统的核心——车载控制器的具体功能,对基于车-车通信的 CBTC 系统在实际应用中面临的问题及其解决方案进行了探讨。

关键词 城市轨道交通;车-车通信;基于通信的列车控制;车载控制器

中图分类号 U285.21⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.05.018

Research on the Train-to-Train Communication Based Train Control System

CHAI Mingdong, ZHU Taomei, WANG Tao

Abstract Due to the greater advantages in engineering projects, communication based train control (CBTC) system has been widely used in urban rail transit system, but the application of the system still remains a difficult issue in current research. In this paper, a CBTC system based on train-to-train communication is proposed, the system structure and principle are presented, two implementation schemes—the neighboring train communication and whole network train communication—are discussed. Then, the performance of the on-board controller is analyzed, which is the core of the new CBTC system, problems facing the application of CBTC based on train-to-train communication and the solutions are discussed.

Key words urban rail transit; train-to-train communication; communication based train control; on-board controller

Author's address Zhejiang College of Tongji University, 314051, Jiaxing, China

基于通信的列车控制(CBTC)系统是目前城市轨道交通中广泛使用的信号系统。随着城市轨道交通信号系统的发展,对传统的 CBTC 系统的运营灵活性提出了更高的要求,并希望在一定程度上减

少轨旁设备数量以减小维护成本。基于车-车通信的新型 CBTC 系统将为满足上述需求提供新的方向。

随着技术的发展,基于车-车通信的 CBTC 系统有可能取代传统的 CBTC 系统,成为今后轨道交通信号系统的主流。2013 年,文献[1]介绍了阿尔斯通在法国 Lille 1 号线采用精简 CBTC 系统的方案(该方案提出了追踪列车之间直接实时通信的构想)。2014 年,文献[3]以阿尔斯通精简 CBTC 系统为原型,提出基于车-车通信的新型 CBTC 系统构架、功能以及子系统之间信息交互接口。2016 年,文献[4]根据列车控制系统发展趋势提出车-车通信的构想,并对车-车通信信号系统的结构、控制逻辑以及特点进行了论述。2017 年,文献[6]更为系统地开展了对基于车-车通信的 CBTC 系统的车载设备相关功能的应用研究。我国也有相关研究机构就车-车通信技术进行立项研究。

本文在对比了现有的基于车-地通信的 CBTC 系统的基础上,对基于车-车通信的 CBTC 系统的结构和功能进行分析,并就相邻列车通信和全网列车通信等具体实现方案展开了讨论。

1 CBTC 系统结构

1.1 传统 CBTC 系统的结构

一般而言,传统的 CBTC 系统主要包含列车自动监控(ATS)、区域控制器(ZC)、车载控制器(VOBC)、数据库存储单元(DSU)、数据通信系统(DCS)等子系统。其中,DCS 将各个子系统相连,并确保任意两个子系统之间都可以相互通信。图 1 所示为一个典型的 CBTC 系统结构。

从图 1 中可以看出,传统的 CBTC 系统采用车-地无线通信方式,将区域控制器作为轨旁核心设备,由区域控制器完成列车的移动授权计算和联锁运算并发送给车载控制器。中心控制设备将行车指挥权交给轨旁控制设备,轨旁控制设备发送控制

命令至轨旁受控设备;也可以由控制中心直接控制轨旁受控设备;轨旁监测设备将接收到的轨旁受控设备的状态信息处理后发送给中心控制设备;中心控制设备与列车(必要时)、轨旁控制设备与车载无线设备分别通过无线网络相连接,完成数据通信。

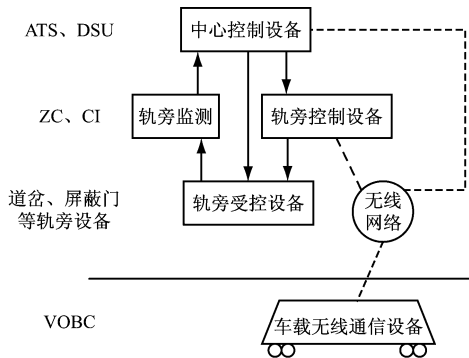


图 1 传统 CBTC 系统结构概念示意图

虽然传统的 CBTC 系统在技术上已较为成熟,并得到了广泛应用,但其系统接口过于复杂,某种程度上仍不利于维护,且车-地通信数据流量较大,难以进一步缩短通信时延。

1.2 基于车-车通信的 CBTC 系统结构

相对传统的 CBTC 系统,基于车-车通信的 CBTC 系统取消了计算机联锁(CI)子系统和 ZC,加入了对象控制器(Object Controller)。VOBC 和对象控制器共同作用,实现了原 ZC 和 CI 子系统的功能。各个子系统都由 DCS 相连。本文给出了一种基于车-车通信的 CBTC 系统构架,如图 2 所示。

对比图1,图2中减少了轨旁ZC、CI及其对应

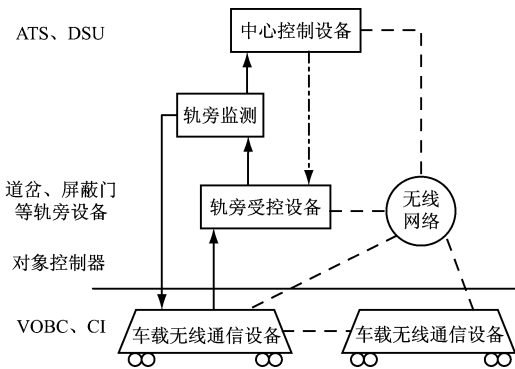


图2 基于车-车通信的CBTC系统结构概念示意图

的与各个子系统间的接口,增加了列车与列车之间的通信接口、轨旁受控设备和无线网络的接口,以及对象控制器。对象控制器用以实现列车对轨旁道岔及屏蔽门等设备的控制,以及轨旁监测设备向车载通信设备直接反馈实时状态信息。

2 基于车-车通信的 CBTC 系统的功能原理

基于车-车通信的 CBTC 系统由于取消了轨旁核心设备 ZC,在功能原理和功能分配上与传统的 CBTC 系统有较大的差别。基于车-车通信的 CBTC 系统基本功能原理如图 3 所示。其主要分为三个功能层次,即车-车通信的 VOBC、对象控制器和 ATS 功能。

基于车-车通信的 CBTC 系统功能主要集权于 VOBC, VOBC 通过无线网络直接和邻车、ATS 进行通信。这种方式减少了信息传输经过的接口,缩短了 VOBC 获取信息的时间,提高了 VOBC 的反应速

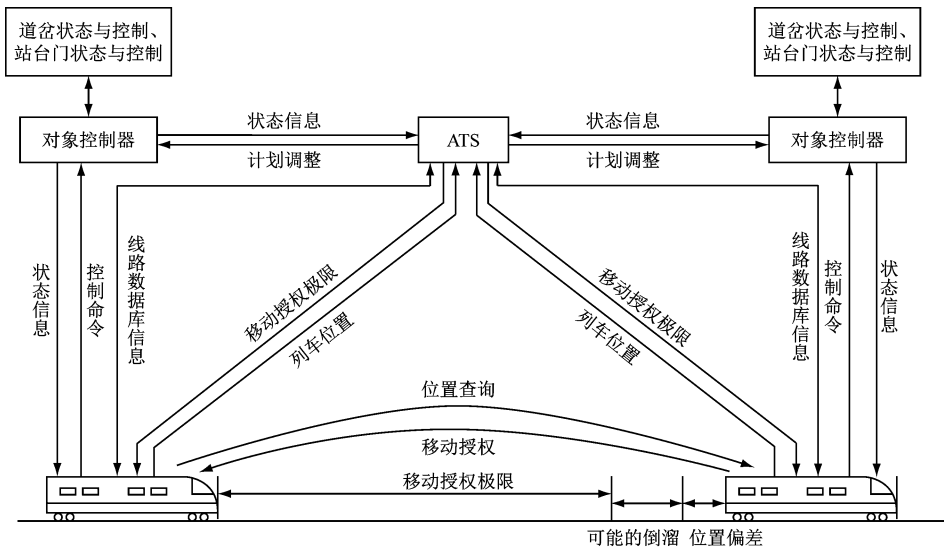


图3 基于车-车通信的CBTC系统基本功能原理图

度,使整个系统的运行性能得到了提高。在车-车信息传递过程中,VOBC 的通信模块在软件和硬件上要具备冗余结构,使系统符合故障-安全原则。

对象控制器通过接收 VOBC 所发出的控制命令来控制道岔、站台门等轨旁联锁设备。同时,对象控制器向 VOBC 和 ATS 反馈轨旁设备的实时状态。列车通过接收到的相关信息进行联锁逻辑计算,并实时向对象控制器发出征用命令和控制命令,从而提高了系统运行灵活性。

在车-车通信正常状态下,ATS 负责监督列车与对象控制器等轨旁设备状态。当基于车-车通信的 CBTC 系统难以保证列车运行效率时,ATS 根据车流情况对全局或相关部分列车进行运行计划调整,并向所有 VOBC 和对象控制器发送调整后的计划或控制命令。

3 基于车-车通信的 CBTC 系统方案

3.1 只与相邻列车通信

在这一方案中,所有列车只与其相邻的前车和后车进行通信。相邻两车之间通过无线接入点 (AP) 进行信息交互,后车得到前行列车位置信息并计算移动授权;同时,列车通过 AP 将自身数据发送给 ATS 进行报备。ATS 下发给线路列车的信息为相应列车的前后车数据信息,列车的 VOBC 将车-车之间交互获得的数据信息与 ATS 反馈的信息进行核对后,计算其速度曲线。

列车只与相邻列车通信的概念模型如图 4 所示。在该方案下,为保证相邻列车之间的通信质量和通信覆盖面,列车可通过两个 AP 将数据信息同时发送给相邻列车,如列车 3 的数据信息传输途径;也可通过同一个 AP 分别转发给两列相邻列车,如列车 2 的数据信息传输途径。

该方案的优点是在一定程度上减轻了 VOBC 处理信息和计算的负担。由于相互通信的列车数

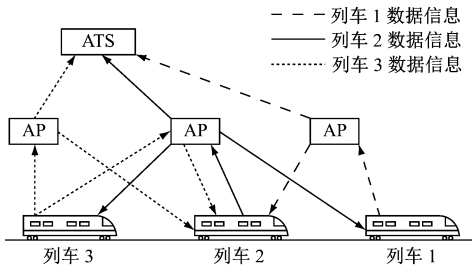


图 4 列车只与相邻车通信的概念模型

量较少,列车可以迅速做出动态计划变更。其缺点在于列车只与相邻列车在小范围内进行通信,不能得到全列车的具体情况,也不能将自身行车计划的变更及时通知给线路上的每一列列车。在此情况下,当列车进行一定幅度的动态计划变更时,极易产生“多米诺骨牌效应”,使其后的每一列列车均被动地改变行车计划,造成全线路列车大面积的晚点,影响全线运营效率。

3.2 全线所有列车可相互通信

在这一方案中,某一列车的 VOBC 可与线路上的其他列车保持实时通信。线路上的每一列列车均通过通信网络向线路上的其他列车及 ATS 发送列车实时数据信息,列车的 VOBC 将接收到的线路上其他列车的实时信息和 ATS 所反馈的信息进行核对,然后计算出列车运行曲线。

全线所有列车可相互通信的概念模型如图 5 所示。由于系统的通信规模庞大,且对通信质量有很高的要求,该方案可借助“云平台”实现资源与信息的共享。列车将自身数据信息上传到“云”中,供线路上其他列车以及 ATS 调用,实现列车之间的数据信息快速共享,也相应解决现有通信设备难以实时高效完成全线列车通信的问题。

这种通信方案的优点是任一列车都可掌握线路上其他列车的信息。当线路上某一列车出现异常状况时,列车可根据自身情况预先做出运行计划变更。全线所有列车的信息共享,可以大幅度减少

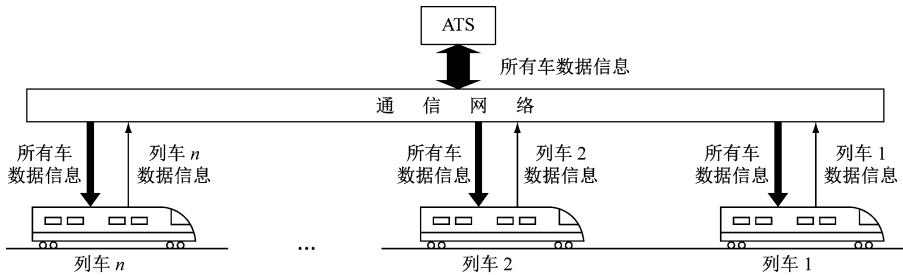


图 5 全线所有列车可相互通信的概念模型

因某一列车故障导致其后行所有列车晚点的情况发生。该通信方式也可以更好地保证列车运行的安全。但是,该方式需要 VOBC 处理较大的信息,故要求 VOBC 具备与其信息处理功能相适应的硬件资源;此外,线路上的每一列列车均需保持良好的实时通信和信息共享,这也对无线通信设备的性能提出了更高的要求。

3.3 两种通信方案的对比

对比上述两种通信方案,列车只与邻车通信(方案一),虽然保证了列车之间通信的时效性,但难以在特殊情况下保证线路的运营能力;全线路所有列车可相互通信(方案二),可以保证全线路的运营能力,但为保证其高质量信息共享,需要相应配置列车运行管理“云”等资源共享平台。因此,在列车运行间隔相对较大、运行列车较少线路上,可以使用方案一;在列车运行间隔小、运行密度大的线路上,方案二更加适合。

4 基于车-车通信的 CBTC 系统 VOBC 的主要功能

由于基于车-车通信的 CBTC 系统是集权于 VOBC 的列车运行控制系统,因此其功能分配与传统的 CBTC 系统有较大的差别。传统 CBTC 系统中的轨旁核心功能基本都移至基于车-车通信的 CBTC 系统中的 VOBC 上实现。基于车-车通信的 CBTC 系统的 VOBC 功能和传统 CBTC 系统的 VOBC 功能的区别见表 1。

表 1 基于车-车通信的 CBTC 系统的 VOBC 与传统 CBTC 系统的 VOBC 的功能对比

| 功能 | 基于车-车通信的 CBTC 系统的 VOBC | 传统 CBTC 系统的 VOBC |
|-----------------|------------------------|------------------|
| 移动闭塞条件下的列车控制 | √ | √ |
| 列车定位的运行速度、距离的确定 | √ | √ |
| 列车运行间隔控制 | √ | √ |
| 列车定位停车及车门控制 | √ | √ |
| 紧急制动的启用 | √ | √ |
| 临时限速和区域关闭 | √ | √ |
| 车站控制 | √ | √ |
| 联锁计算功能 | √ | × |
| 移动授权功能 | √ | × |
| 控制模式管理 | √ | × |

4.1 联锁计算功能

基于车-车通信的 CBTC 系统在执行进路过程中,由 VOBC 完成联锁计算,并向对象控制器发送

相应的征用请求和控制命令,再由对象控制器控制道岔动作,从而实现进路控制。列车进路完成后,自动取消对对象控制器的征用,供后行列车使用。通过这种方式,各个子系统间的接口数量可以大量减少,数据信息的传递时间也可以相应缩短。这改变了传统 CBTC 系统中由 ZC 计算移动授权并转发 ATS 调整信息给列车的方式,使列车运行灵活性更高。基于车-车通信的 CBTC 系统中虽然取消了 ZC,但 VOBC 和对象控制器的共同作用依旧可以保证列车的运行安全。

在线路异常情况下,如果 VOBC 难以处理联锁信息,为保证全线路列车的运行安全和秩序,ATS 将根据全线路列车和对象控制器反馈的信息,对线路上所有列车的运行计划进行大规模的调整,列车按 ATS 下达的运行计划运行。

4.2 移动授权功能

在基于车-车通信的 CBTC 系统中,VOBC 还具有自身移动授权计算的功能。后行列车在得到前行列车的位置后,对应的 VOBC 可以根据该位置信息计算列车的移动授权和速度曲线。

VOBC 不间断地与相邻列车通信,并计算移动授权,实现移动闭塞。在列车运行过程中,由于前行列车相对位置不停地变化,VOBC 计算的移动授权也不断地更新。列车之间的通信必须保证严格的时效性。

4.3 控制模式管理

从行车调度和联锁控制的角度,基于车-车通信的 CBTC 系统的控制模式有以下两种:①VOBC 主控,ATS 辅助监督;②控制中心 ATS 主控。VOBC 需具备相应的模式管理功能,在一定的条件下实现以上两种控制模式的转换。

正常情况下,所有列车及轨旁设备都工作在 VOBC 主控模式下。

VOBC 的通信模块要具有识别和处理异常数据信息的功能,并对异常数据进行报警和记录。当列车接收到异常数据时,列车将根据自身运行情况判定风险等级。在列车不能处理自身异常情况下,列车的行车指挥权由车载控制转为控制中心控制。控制中心直接对列车下达调度命令,指挥列车安全运行。若车-车通信方案选用方案一,故障列车通信异常会影响其前后相邻列车的位置确认,则故障列车及其前后列车均转为控制中心 ATS 主控,其余列车仍保持 VOBC 主控。若车-车通信方案采用方案

二,由于全线列车信息共享,某一列车的故障会造成全线列车的错误判断,则需将全线列车的控制转为列控中心 ATS 主控,由 ATS 直接对全线列车下达调度计划,列车按计划运行。不论选择哪一种方案,当系统局部或整体失去通信时,按照故障-安全原则,失去通信的列车将紧急制动,等待通信恢复,必要时 ATS 可通过其他方式向列车下达紧急调整命令。

在列车通信恢复正常后,管理模式切换回 VOBC 主控。实现切换可以有两种协商方案。其一,由 ATS 判定列车 VOBC 是否恢复正常通信功能,并向 VOBC 发起询问;VOBC 根据自身通信状态,在 VOBC 收发数据信息符合准确、安全的前提下,接受 ATS 的授权,完成由控制中心 ATS 控制向 VOBC 控制的切换。其二,VOBC 判定自身通信功能恢复正常后,向 ATS 发送请求;ATS 通过对 VOBC 的监视,判定 VOBC 是否可以取得控制权,条件判定符合后,恢复 VOBC 主控模式。

5 结语

从目前通信技术和列车运行控制系统的发展趋势来看,基于车-车通信的 CBTC 系统符合轨道交通信号系统精简、高效和安全的发展需求^[4]。本文给出了基于车-车通信的 CBTC 系统的理论构架,并对基于车-车通信的 CBTC 系统的两种方案进行对比,为该系统适应不同的线路需求提供选择方案。同时,分析了基于车-车通信的 CBTC 系统的 VOBC

的功能,构建了在车-车通信下的列车运行控制流程和故障模式处理的理论基础。本文讨论的方案预示着:①基于车-车通信的 CBTC 系统可不受轨旁设备的限制,这为列车跨线运营提供了更好的条件,便于实现线路的互联互通;②配置列车运行管理“云”资源共享平台,可使列车更快地上传和下载大流量的信息;③列车的 VOBC 具备更强的自主运营和调整能力,有助于使列车行车调度更加智能化。

综上所述,基于车-车通信的 CBTC 系统具有很大的发展空间,其理念有望成为今后轨道交通信号系统发展的新方向。但该系统的 VOBC 是否可以弱化甚至取代 ATS 的职能,以及整个系统在失去通信情况下的具体应急方案等问题,可在后续进一步展开研究。

参考文献

- [1] BRIGINSHAW D. Alstom's simplified CBTC technology to debut in Lille[J]. International Railway Journal, 2013, 53(60): 29.
- [2] 徐金祥,贺鹏,冲蕾,等.城市轨道交通列车运行自动控制技术[M].北京:中国铁道出版社,2013.
- [3] 徐继康.基于车-车通信的新型 CBTC 系统分析[J].轨道交通信号,2014,50(6):78.
- [4] 杜建新.城市轨道交通车-车通信信号系统的控制思想[J].城市轨道交通研究,2016(增刊2):21.
- [5] 安彬.城市轨道交通基于通信的列车控制系统实现互联互通存在的主要问题分析[J].城市轨道交通研究,2017(8):18.
- [6] 王鹏.车-车通信技术在列控系统车载设备中的应用研究[D].北京:北京交通大学,2017.

(收稿日期:2018-03-28)

(上接第 79 页)

参考文献

- [1] 梁鑫,罗世辉,马卫华,等.磁浮列车单铁悬浮车桥耦合振动分析[J].交通运输工程学报,2012(2):32.
- [2] CAI Y, CHEN S S, ROTE D M. Vehicle/guideway dynamic interaction in maglev system[J]. Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Transportation, 1996, 118(9): 526.
- [3] 汪科任,罗世辉,张继业.磁悬浮控制器设计及静悬浮稳定性分析[J].西南交通大学学报(自然科学版),2017(1):118.
- [4] 邓永权,罗世辉,梁红琴,等.基于 SIMPACK 的磁悬浮车辆耦合动力学性能仿真模型[J].交通运输工程学报,2007,7

(1):12.

- [5] 李晓龙,龙鑫林,翟明达.永磁电磁型低速磁悬浮车轨耦合振动抑制新方法[J].振动工程学报,2016(4):649.
- [6] 梁鑫,罗世辉,马卫华.常导磁浮列车动态磁轨关系研究[J].铁道学报,2013(9):39.
- [7] 王超,蒋启龙.基于 Halbach 阵列的斥力型磁悬浮模型有限元分析[J].磁性材料及器件,2016(5):12.
- [8] 蒋咏志,王月明,谢倩,等.悬挂式单轨车辆动力学及平稳性分析[J].城市轨道交通研究,2017(4):97.
- [9] 陈鑫,练松良,李再韩.轨道交通无砟轨道不平顺谱的拟合与特性分析[J].华东交通大学学报,2013(1):46.

(收稿日期:2017-06-19)