

# 基于车车通信的列车自主运行系统研究及应用

王学浩 刘瑞娟

(深圳地铁建设集团有限公司, 518026, 深圳//第一作者, 工程师)

**摘要** 在中国城市轨道交通建设规模跃居世界第一的同时,如何探索研发更安全、更灵活、更高效的列车控制系统,满足当下 5G(第五代移动通信技术)及智慧城市轨道交通的应用要求,是城市轨道交通未来发展的主要目标之一。对 TACS(列车自主运行系统)的原理及系统架构进行阐述,从 CI(计算机联锁)的优化、系统运算变量的优势、线路折返效率的提升、系统可靠性和灵活性的提高及在工程实施及改造项目中的优势等方面,将 TACS 与传统 CBTC(基于通信的列车控制)进行对比,并对部分参数进行了实例验证。结果表明:基于车车通信的 TACS 是目前国际上城市轨道交通应用于载客的列控系统最前沿的技术。

**关键词** 城市轨道交通;通信系统;列车自主运行系统;车车通信

**中图分类号** U284.48;U231.7

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.11.030

## Research and Application of Train Autonomous Control System Based on Vehicle-to-Vehicle Communication

WANG Xuehao, LIU Ruijuan

**Abstract** While the construction scale of urban rail transit in China has ranked first in the world, one of the main goals of urban rail transit development in the future becomes the exploration and development of a safer, more flexible and more efficient train control system, in order to meet the application requirements of 5G (5th generation mobile communication technology) and smart urban rail transit. In this paper, the principle and system architecture of TACS (train autonomous control system) are described and from such aspects as optimization of CI (computer interlock), advantages of system operation variables, improvement of train turn back efficiency, improvement of system reliability and flexibility, as well as advantages in project implementation and reconstruction projects, TACS is compared with traditional CBTC, and some parameters are verified by examples. Results show that TACS based on vehicle-to-vehicle communication is the most advanced technology applied to the passenger train control system in current international urban rail transit.

**Key words** urban rail transit; communication system; TACS; vehicle-to-vehicle communication

**Author's address** Shenzhen Metro Construction Group Co., Ltd., 518026, Shenzhen, China

国内城市轨道交通普遍应用的 CBTC(基于通信的列车控制)系统采用“车-地-车”的信息传输方式和系统架构。CBTC 系统承载 FAO(全自动运行)功能后,需面对系统设备增多、接口复杂、列车运行对系统设备严重依赖等问题。此外,由于 FAO 复杂的硬件结构及高精度的安装要求,导致项目的施工周期长、系统调试复杂、故障影响范围大、维护成本高、系统间壁垒增加等问题,加大了城市轨道交通线路建设的难度及成本。

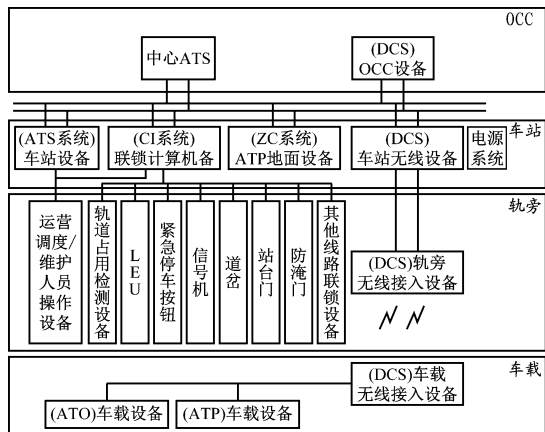
FAO 技术的发展及其庞大的市场需求,迫使城市轨道交通信号系统急需进一步改进与优化。与传统 CBTC 系统相比,TACS(列车自主运行系统)既能保证新的列车控制(以下简称“列控”)技术承接/保留既有安全性能,又能提供更高效、更多元化、更经济的技术方案,因而备受业内专业人员的关注。本文重点对基于车车通信的 TACS 进行研究,结合深圳 20 号线一期工程项目实践经验,分析车车通信列控系统如何通过调整架构来提升系统效率,降低建设成本及运维成本,提高整体系统可用性。

## 1 传统 CBTC 在我国的应用状况及存在问题

目前,在我国城市轨道交通领域中应用最广泛的列控系统是 CBTC 系统。该系统基于高性能通信功能,对区域内列车进行实时通信,计算列车安全行驶的移动授权终点,通过安全算法及列车的瞬时位置信息,实现列车自动高效运行及自动运行调度等自动化功能。

传统的 CBTC 系统通过轨旁计算机经由无线传输子系统下发授权终点,并将授权终点信息传给控制区域内的所有列车,以达到控制列车运行的目

的。授权终点信息由轨旁计算机综合控制区域内的列车信息变量、联锁信息变量、ATS(列车自动监控)子系统变量等数据汇总后计算所得。典型的 CBTC 信号系统的架构如图 1 所示。



注:CI——计算机联锁;ZC——区域控制器;LEU——轨旁电子单元;ATO——列车自动运行;ATP——列车自动防护;DCS——数据通信子系统;OCC——运营控制中心;备用 OCC 的设备结构与 OCC 相同,或在 OCC 基础上简化配置。

图 1 传统 CBTC 系统架构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of traditional CBTC system architecture

传统 CBTC 采用“ZC + CI + 车载计算机”的架构<sup>[1]</sup>,其主要特点是:①列车将实时位置及状态信息发给 ZC,ZC 汇总管辖区域内所有列车的信息后进行列车移动授权计算,再将计算结果发送给列车,以进行列车移动授权;②CI 负责轨旁设备(如轨道区段和道岔)的管理,并与 ZC 进行实时信息交互;③ZC 完成列车位置移动授权的计算后,将计算结果与 CI 进行实时交互,ZC 根据 CI 提供的设备资源使用状态及列车实时位置信息为列车计算移动授权。

综上所述,传统 CBTC 系统设计方案以 ZC 和 CI 作为区域内列车运行控制的核心。此方案存在以下 2 个主要问题,导致传统 CBTC 在可靠性、可用性 & 互联互通等方面已无法满足新一代列控系统发展的要求:

1) 传统 CBTC 系统对列车的控制均需 ZC、CI 及车载计算机 3 个子系统进行实时信息的交互、处理和协调,列车移动授权每次计算均需经过 ZC 及 CI 双核心的计算及信息交互,这导致了系统处理效率低下。为此,传统 CBTC 系统一般会引入更多的请求/确认信息,以避免系统处理数据逻辑带来的

效率低下问题。这些请求/确认信息虽然改善了系统的性能,但也使得整个系统更加脆弱,对通信系统的性能及丢包率的要求也更为苛刻。系统易因通信系统宕机导致发生大面积的严重故障。

2) 对所有与安全相关的场景,传统 CBTC 系统均须考虑 CBTC 和降级混跑两种情况,并要求这两种情况间可灵活切换,这大大降低了系统的可用性和可靠性。而在实际运用中,在故障情况下降级或切换时,设备降级和切换所需的时间往往会超过设备重启时间,且需遵循繁杂苛刻的安全限制及操作步骤,这给设备故障处置带来了一定的影响。

## 2 TACS 原理及架构设计

传统 CBTC 上述问题的根本原因在于系统结构过于复杂,应通过优化该结构来构建新一代城市轨道交通信号系统<sup>[2]</sup>。基于车车通信技术的 TACS 以列车自主计算为核心,采用了扁平化的系统架构,在确保传统 CBTC 运行安全的基础上,将 CI 及 ZC 的职责下沉至列车设备上,减少了系统的设备配置,优化了系统结构。

### 2.1 TACS 的功能原理

如图 2 所示,TACS 主要分为 3 个部分:车载计算机、对象控制器及 ATS。其中:①车载计算机在集成 ZC、CI 功能的前提下,通过与对象控制器、前车的通信获得参数信息来进行本车的移动授权计算,同时根据本车的运行路径及计划目的地向轨旁资源管理器发出控制请求;②对象控制器设置在轨旁,用以采集计轴信息,并控制道岔、站台门、紧急停车按钮等设备;③ATS 负责列车的运行计划及运行监视,基于 LTE-M(城市轨道交通车地综合通信系统)的通信传输子系统负责车车、车地的无线数据通信。

TACS 的功能原理主要如下:①ATS 子系统将列车运行时刻表或人工进路命令直接下达至列车的车载控制机,车载控制机根据收到的列车时刻表主动触发行车进路,列车根据触发的进路自主运行;②线路资源控制器负责记录所有在线列车列表,实时更新轨旁设备(如道岔、信号机等)的使用状态信息,将该信息与列车进行实时交互,同时执行列车发来的操作轨旁设备的命令;③列车车载计算机根据进路需求向资源控制器发出资源请求,同时查询轨旁设备资源的使用请求结果,资源控制器还同步接受其他列车释放的资源;④列车通过资源

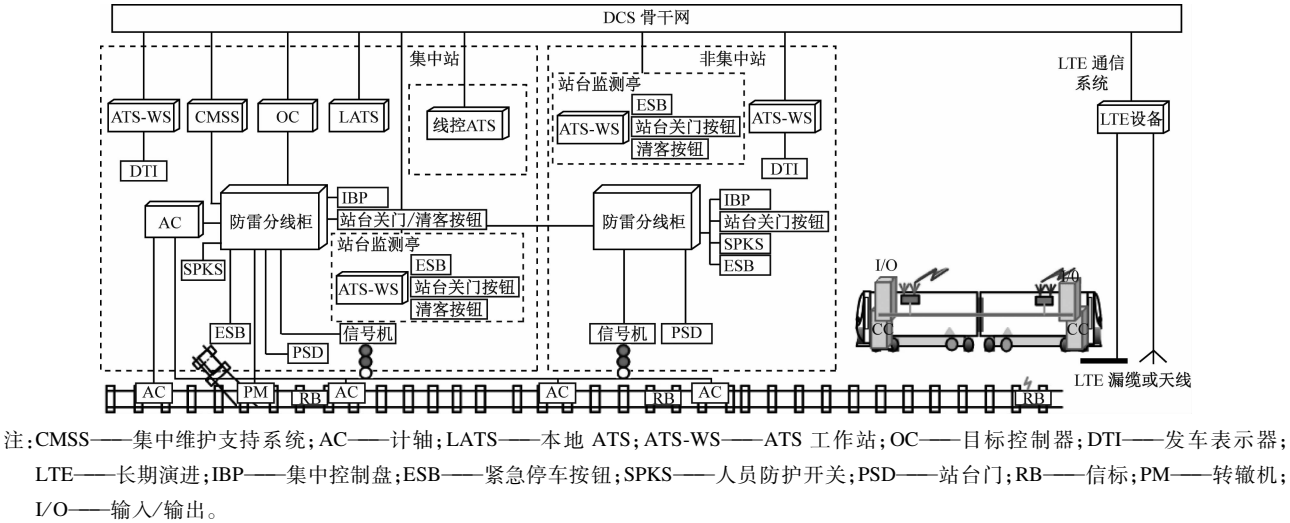


图 2 TACS 主要组成部分示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of main TACS system components

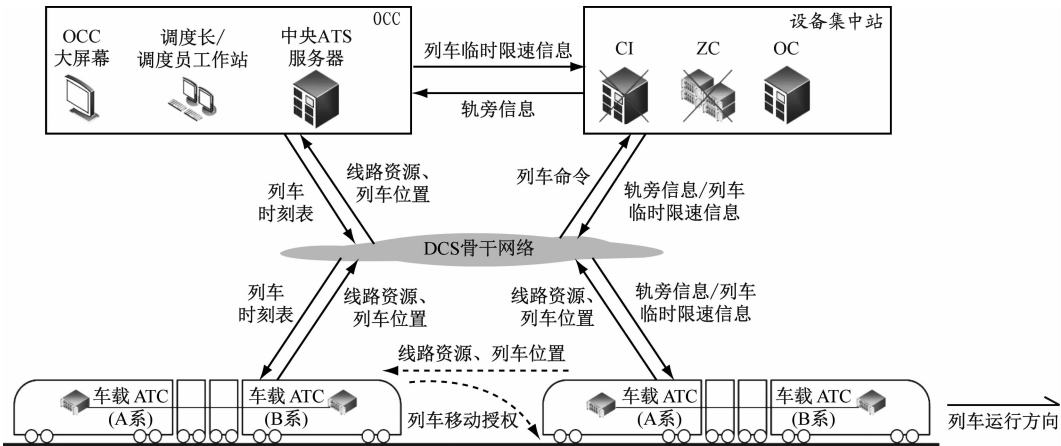
控制器完成轨旁设备资源的更新登记后,经由执行机构对线路资源进行状态采集;⑤列车在获得的独占轨道资源内计算列车移动授权终点,以防护列车安全运行;⑥基于 LTE-M 的车地无线通信子系统为 TACS 提供可靠的通信载体及通道,该子系统保留了传统 CBTC 的设计方案,采用多级冗余的设计,在系统架构、接口衔接、网络链路、系统供电等方面均考虑了多重冗余配置,以提升 TACS 下网络系统的可靠性和可用性;⑦列控系统应用的通信协议为成熟且广泛应用的安全通信协议,能最大程度地保障 TACS 高效、安全、灵活的运用。

2.2 TACS 的架构设计

TACS 以 LTE-M 作为传输媒介基础,对传统 CBTC 的传输架构和功能进行了重新分配,保留了

传统 CBTC 通信子系统的功能,并对车载控制子系统、车辆的牵引子系统和制动子系统等进行整合。其设计核心是以列车自主运行为核心,将传统 CBTC 系统的轨旁列控方式转移至列车车载计算机上,以实现优化系统架构,减少轨旁设备的目的,并对设备功能分配方式进行优化。

如图 3 所示,TACS 取消了传统 CBTC 的轨旁 CI 及 ZC 设备,将 CI、ZC 的功能下放至列车车载计算机。车载计算机承担了 CI、ZC 的列车移动授权计算职责,同时负责将线路资源控制命令发生给 OC,OC 收到命令后对轨旁设备资源进行控制。TACS 的架构方案减少了多余的信息传递,降低了接口的复杂程度,实现了行车资源的简易交互。



注:A 系、B 系——独立运算冗余车载设备的编号;除单箭头外其它箭头表示信息流的方向,图 4、图 5 类同。

图 3 TACS 架构示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of TACS architecture

基于上述设计方案,TACS 不再需要 ZC、CI 进行计算及安全信息授权,而将 CI 对轨旁资源的道岔、列车进路等的控制转为由列车自主分散控制,从而提高了轨旁资源的利用率。同时,TACS 将 ZC 集中管辖区域内列车移动授权的方式优化为列车分散自主计算的方式,实现了完全的以车载计算为核心的 CBTC 系统。列车能主动地触发进路、计算防护距离和控制轨旁设备。对比传统 CBTC 系统,TACS 设备架构从集中型转为分散、扁平型,实现了从列控中心集中控制到列车分布式控制、从列车自动运行向列车自主运行的技术转变。

## 2.3 TACS 的优势分析

### 2.3.1 CI 的优化

在传统 CBTC 系统架构(见图 4)基础上,TACS 对 ATC(列车自动控制)子系统进行了优化。列车授权终点的计算方式将传统 CBTC 通过轨旁计算机下发改为列车接收来自轨旁计算机的变量后自行计算。由此,轨旁计算机的作用也随之转变,从原来的命令下发者改为各列车间、列车与设备间、区域内设备间的信息交互平台。

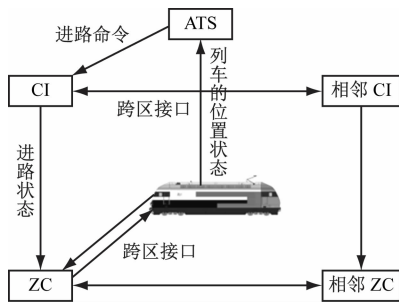


图 4 传统 CBTC 系统架构下数据传输与接口示意图

Fig. 4 Schematic diagram of data transmission and interface under traditional CBTC system architecture

如图 5 所示,列车通过通信传输子系统实时获取轨旁计算机发送过来的前车和本车的信息变量、轨旁设备信息变量及 ATS 子系统信息变量后,对本车的移动授权终点进行计算。ATO 控制曲线仍与传统 ATC 保持一致,只是 ATP(列车自动防护)曲线的生成方式有所变更,由传统 CBTC 的轨旁计算机授予更改为列车自行计算获取。

### 2.3.2 系统运算变量的优势

在 TACS 的扁平化系统架构下,TACS 取消了 CI,大大减少了 ATC 系统需要运算的变量种类及数量。同时,因移动授权终点的获取方式改为由列车自行计算获取,进一步减少了对计算机算力的要求。

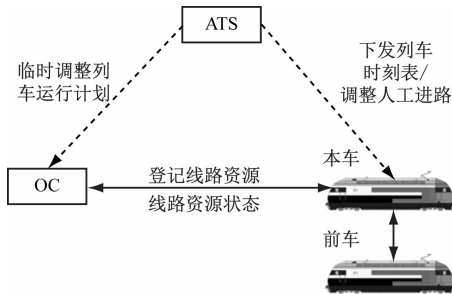


图 5 TACS 架构下数据传输与接口示意图

Fig. 5 Schematic diagram of data transmission and interface under TACS system architecture

计算机的算力瓶颈问题得到了有效解决,因运算变量带来的设备购置及运维成本也随之减少。

### 2.3.3 线路折返效率的提升

线路折返效率是线路运力的最主要影响因素。本文以上海轨道交通 3 号线、4 号线共线区段的中潭路站、上海火车站站、宝山路站三站两区间作为试点,对上海火车站站基于车车通信的 TACS 进行测试,利用专业牵引计算软件对列车折返间隔进行分析。上海火车站站的线型如图 6 所示,列车在站后单股道折返。由图 6 可知,基于车车通信的 TACS 在道岔控制上更高效,道岔控制不再需要遵循繁琐的联锁关系。经实测,TACS 下列车在上海火车站站的折返效率比采用传统 CBTC 系统时约可提升 20%。

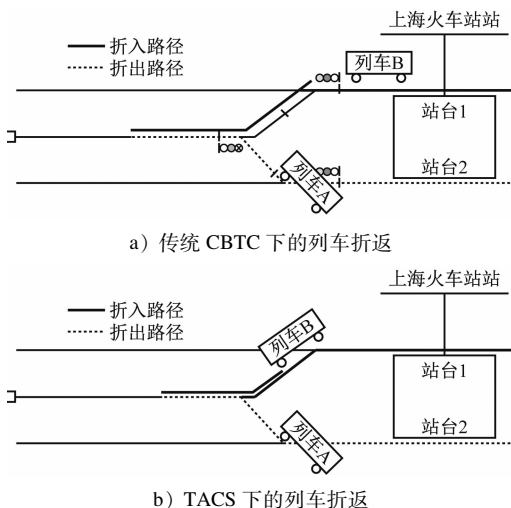


图 6 传统 CBTC、TACS 下列车折返原理对比示意图  
Fig. 6 Comparison of train turn back principles under traditional CBTC and TACS

### 2.3.4 系统可靠性和灵活性的提高

系统可靠性方面,TACS 扁平化的架构使得系统设备的独立性更加突出,列车的控制均由自身完

成,列车移动授权计算所需考虑的因素也较传统 CBTC 少。因此,当单体设备故障时,列车受故障影响的概率也大为降低,系统的可靠性得以提升。

系统灵活性方面,TACS 下的列控由列车自身根据参数及变量计算完成,不再需要考虑联锁关系,仅考虑目标区域内的线路资源及邻近列车信息。因此,列车可实现实时换端/调头等传统 CBTC 不能实现的功能。

### 2.3.5 在工程实施及改造项目中的优势

传统 CBTC 实施最困难的阶段主要是动车调试阶段。在该阶段中,为了保证系统的安全性,一般需要进行较长时间的列车低速测试验证。基于车车通信的 TACS 与传统 CBTC 在各个阶段的调试要求是一致的,因 TACS 在结构进行了优化,减少了参数及变量,列车的低速测试不再需要考虑联锁关系和信号机等测试项,仅需考虑列车的线路资源控制及运行追踪。所以,与传统 CBTC 对比,基于车车通信的 TACS 在动车调试中的优势非常明显,减少了进路、信号机、联锁关系等现场测试工作,大大缩短了工程实施时间,提高了工程的可实施性。

此外,城市轨道交通线路列控系统的全寿命周

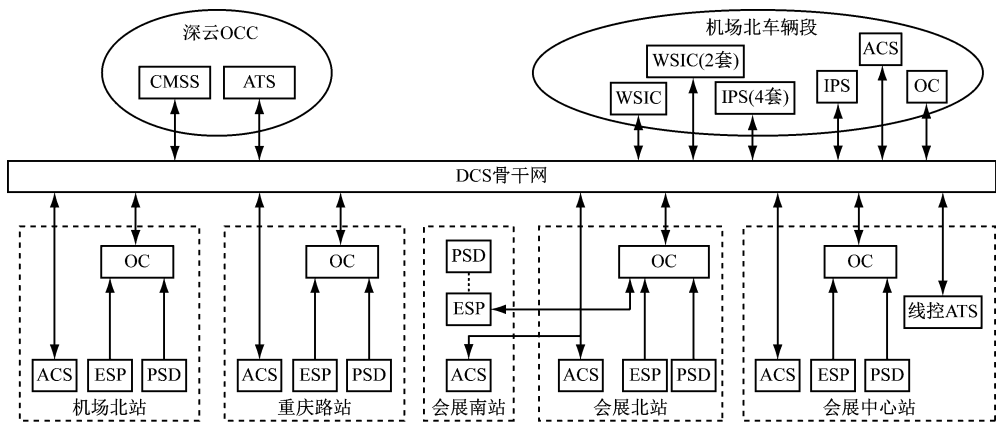
期一般为 15 年。在列控系统需要改造时,改造的高成本、长时间、高风险是运营单位难以承受的。与传统 CBTC 对比,基于车车通信 TACS 的架构更简单,轨旁设备更少,改造时间更短,因而更适用于既有城市轨道交通线路信号系统的改造更新。

## 3 TACS 的工程应用实践

### 3.1 工程概况

本文以深圳地铁 20 号线一期工程(以下简称“20 号线一期工程”)为例,阐述 TACS 的应用效果。20 号线一期工程全长 8.43 km,均为地下线路,列车采用 8 节编组 A 型车。该工程范围包括 5 座车站、1 个车辆段、1 个 OCC,以及 1 处线路控制(以下简称“线控”)中心、1 处培训中心、1 处维修中心等。该工程于 2021 年 12 月完成交付并投入载客运营。

如图 7 所示,20 号线一期工程的列控系统采用基于车车通信的 TACS,其系统架构采取分散控制式,整体系统架构扁平化。基于移动闭塞原则,基于车车通信的 TACS 由 ATS、ATC、OC、DCS 及 CMSS 等子系统构成,并配备了 CI 和计轴设备,以实现联锁级后备系统的降级功能。



注:WSIC——轨旁资源控制器;WSTC——轨旁列车控制器;CC——车载控制器;IPS——联锁处理系统;ACS——计轴系统。

图 7 深圳 20 号线一期工程信号系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the signal system of Shenzhen Line 20 (Phase I)

20 号线一期工程采用的列控系统组成架构与上文所述基于车车通信的 TACS 架构一致。该线设置了 2 套 WSIC 及 1 套 WSTC,列车车载计算机为 CC。该线 TACS 的与传统 CBTC 的主要区别如下:

1) CI 的区别:与传统 CBTC 的 CI 相比,20 号线一期工程的 CI 由两部分设备组成,分别为负责执行轨旁设备动作命令的 OC 及负责联锁逻辑计算的 IPS,其中,OC 是轨旁设备控制的执行单元。TACS

模式下,OC 接受 WSIC 的控制命令,并对轨旁设备进行直接控制。但是,OC 不参与逻辑计算,此时 IPS 也不参与 TACS 模式下系统的计算及执行。当系统处于联锁后备模式时,OC 与 IPS 连接,接收 IPS 的执行命令,并对轨旁设备进行控制及操作。

2) 与传统 ATC 的区别:传统 ATC 下列车的移动授权终点由 ZC 进行集中控制及集中计算,列车通过与 ZC 实时通信来获取/上传本车的相关安全

信息和运行信息。

如图 8 所示,20 号线一期 TACS 采用扁平架构,列车通过通信传输子系统获取本车相邻列车的信息,通过 WSIC 获取相邻轨旁设备的使用状态。在此基础上,TACS 结合相邻列车信息对本车的移动授权进行计算,并根据列车运行计划发布线路资源命令等。

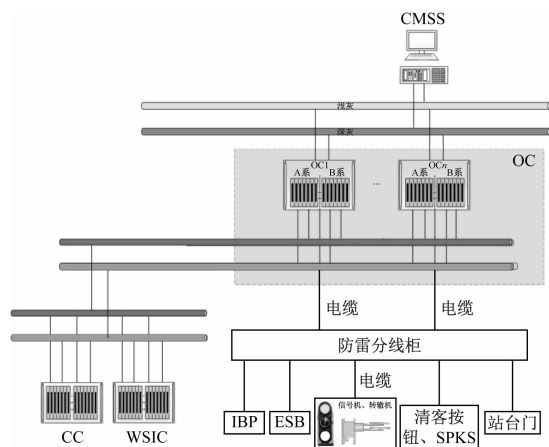


图 8 深圳地铁 20 号线一期工程 WSIC、CC 及 OC 的接口示意图

Fig. 8 Interface diagram of WSIC, CC and OC of Shenzhen metro Line 20 (Phase I)

### 3.2 20 号线一期工程实测数据优势分析

1) 轨旁设备单点控制带来了更为高效的运行效率。20 号线一期工程列车折返追踪间隔的设计值为不大于 180 s,其实测列车折返追踪间隔为 146 s,较设计值提升了 18%。同时,该线的旅行速度设计值为不低于 50.0 km/h,实测的旅行速度在上行方向为 55.5 km/h,在下行方向为 55.9 km/h,均满足设计值的要求。

2) 降级模式下影响更小,克服了传统 CBTC 关键核心部件故障时影响面广、系统恢复时间长等问题。由于移动授权的计算功能下放至列车,且轨旁设备不再进行逻辑计算,仅保留执行单元,轨旁设备故障时并不影响列车的移动授权计算,对系统整体的影响较小;当列车故障时,TACS 能识别降级列车,此时 WSTC 替代降级列车进行轨旁资源控制及

进路办理,故障仅影响该列车及相邻后车,对全线或本区域的其它列车影响均较小。与传统 CBTC 的 ZC 或 CI 发生故障带来全系统或全区域的系统降级相比,TACS 的可用性和可靠性大大提高。当 TACS 发生多点故障时,TACS 仍可以降级为联锁模式,对系统进行降级控制。

## 4 结语

基于车车通信的 TACS 是目前国际轨道交通业内应用于载客的列控系统最前沿的技术。国内外关于车车通信列控系统虽然在技术特点上存在区别,但从技术发展路线、系统原理架构、可实现功能等方面是一致的:均是基于扁平化的架构设计;列车均能主动计算进路、列车移动授权、安全防护距离、运行速度等参数;在保证系统安全的前提下,可进一步提高列控系统的可靠性和运行效率,降低设备数量及接口信息,减少不必要的、重复的信息传递,降低建设和运营维护成本。

基于车车通信 TACS 的系统架构和功能创新是在确保系统安全性和可靠性的基础上,为平衡全生命周期成本、满足目前城市轨道交通行业发展而进行的大胆尝试。在该系统后续的优化及技术推进上,需结合更多的应用经验和理论数据进行进一步的论证分析,以避免系统性能的倒退。

## 参考文献

- [1] 赵晓峰. 下一代 CBTC 系统离我们还有多远——富欣智控自主化 JeRail CBTC 信号系统创新探索[J]. 城市轨道交通研究, 2014(7): 彩 25.  
ZHAO Xiaofeng. How far is the next generation CBTC system from us — Innovative exploration of the independent JeRail CBTC signal system of Fuxin Intelligent Control[J]. Urban Mass Transit, 2014 (7): C25.
- [2] 罗情平, 吴昊, 陈丽君. 基于车车通信的列车自主运行系统研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018(7): 46.  
LUO Qingping, WU Hao, CHEN Lijun. Train autonomous circum-ambulate system based on train to train communication[J]. Urban Mass Transit, 2018(7): 46.

(收稿日期: 2022-07-12)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821