

# 新一代 CBTC 系统关键技术研究

高翔 刘会明

(上海电气泰雷兹交通自动化系统有限公司, 201206, 上海//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 对 CBTC(基于通信的列车控制)技术现状及用户需求的变化趋势进行分析,总结新一代 CBTC 系统应具备的特性目标,深入研究 TACS(列车自动运行系统)自主运行、资源细化以及精简架构三大关键技术特征,提出了新的 TACS 架构,并对其优势进行了分析说明,可为新一代 CBTC 系统开发、应用及相关标准的制定提供参考。

**关键词** 城市轨道交通; 基于通信的列车控制; 列车自主运行系统; 车车通信; 自主运行

**中图分类号** U283.5

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2022.07.017

## Research on New Generation CBTC System Key Technology Development

GAO Xiang, LIU Huiming

**Abstract** By analyzing the latest status of CBTC (communication-based train control) technology and the tendency of customer demand change, the target attribute that new generation CBTC system should equip are summarized. Three key technical characteristics of TACS system autonomous operation, resource refinement and architecture simplification are studied in-depth. New TACS (train autonomous circumambulate system) system architecture is proposed, and the advantages of this new system are analyzed, providing reference for new generation CBTC system development, application and relevant technical standard formulation.

**Key words** urban rail transit; CBTC (communication-based train control); TACS (train automatic circumambulate system); V2V (vehicle-to-vehicle) communication; autonomous operation

**Author's address** Thales SEC Transportation System Limited Company, 201206, Shanghai, China

《智慧城轨发展纲要》提出,在 CBTC(基于通信的列车控制)已经普及的情况下,新一代列车控制技术发展方向应该是系统更加智慧并最终能够实现列车的自主控制<sup>[1]</sup>。近年来,基于车车通信(V2V)的列车自主运行系统(TACS)是新一代列控

技术的研究热点之一。然而,行业内对于 TACS 内涵的理解并不一致,国内外不同信号系统研制单位采用的 TACS 架构和技术路线均有不同,在系统功能定义、接口协议、运用规则等方面都存在巨大差异,对新一代 CBTC 系统的应用及发展造成了困扰。

为厘清概念,本文就 CBTC 技术现状及用户需求的变化趋势进行分析,总结了新一代 CBTC 列控系统应具备的特性目标,深入研究了新一代 CBTC 信号系统 TACS 的关键技术特征:自主运行、资源细化以及架构精简。在此基础上,提出了新的 TACS 架构,可为新一代 CBTC 信号系统开发、应用及相关标准的制定提供参考。

## 1 CBTC 技术现状及用户需求变化趋势

CBTC 系统 1984 年在加拿大多伦多士嘉堡快轨线和 1985 年温哥华天车世博线首次开通<sup>[3]</sup>。引入我国后,CBTC 系统用户的需求强调基于联锁的降级运行,同时增加列车的点式运行模式,以确保线路开通运行为主要目标。随着技术的成熟,我国 CBTC 系统实现一次性全功能开通已经没有难度。同时,多年运行证明,因地面 ATP(列车自动防护)设备故障而导致控区降级到联锁模式的情况极少,启用点式模式运行的情况也不多。将降级功能简化,减少降级功能设备,并增强 CBTC 主系统的可靠性和冗余性成为用户需求转变的一大趋势,例如上海轨道交通 5 号线的 TSTCBTC<sup>®</sup> 2.0 信号系统方案<sup>[4]</sup>,以及国内已开通的多条 FAO(全自动运行)线路。此外,联锁区域控制一体化、全电子执行单元及云平台信息化集成等技术也越来越多地受到关注并得以部署应用<sup>[5]</sup>。这些技术为 CBTC 系统的精简提供了可能。

CBTC 系统用户需求的另一大转变是从以建设开通为主转变为以运营使用为主,需求更加关注全生命周期过程。主要包括:旧有线路的改造升级过

程中,强调倒切平滑,不影响持续运营;提升运营过程的自动化、信息化和智能化水平,减少工作人员数量;绿色节能,强调城市轨道交通的可持续发展。

基于用户需求的这些变化趋势,可以总结出新一代 CBTC 信号系统的特性目标包括:架构精简、实施便利;智能高效、弹性可靠;绿色友好、标准易用。

## 2 TACS 信号系统关键技术特征分析

为实现新一代 CBTC 信号系统的特性目标,一般认为<sup>[2]</sup>,TACS 应采用三项主要关键技术:自主运行、资源细化以及精简架构。

### 2.1 自主运行

自主控制系统的研究最早是在美国喷气推进实验室(JPL)开展,并在1991年的论文中对自主(Autonomous)的概念进行了阐述<sup>[6]</sup>。文中提到自主系统能够运行在不确定性较大的环境中,能够在无外部介入的条件下自主调节,以适应环境和条件的变化。参照国际汽车工程师协会(SAE)在行业技术规范J3016中基于汽车的驾驶功能对“自主控制”进行的分级和界定,SAE将自主系统按功能复杂程度分为三层:操控功能、战术功能和战略功能。在城市轨道交通中,操控功能对应ATO(列车自动运行)功能,核心的ATP功能属于战术功能,而ATS(列车自动监控)执行了一定程度上的战略功能。“自主运行”控制强调的是无人员介入调节下的系统自适应能力,对环境进行自感知和自适应,实现智能化的自动控制。因此,TACS作为新一代CBTC系统,要实现真正的“自主运行”,应该具备的关键技术特征需包括列车精确位置的主动感知、障碍物主动探测和避障、运营环境感知(客流、天气等)。

### 2.2 资源细化

信号系统最重要的安全控制功能就是对列车运行线路资源的管理。线路资源对列车运行而言就是一段列车运行空间。通过资源的时空分配实现对列车运行间隔的防护即“闭塞”技术。不同的闭塞技术下,列车对线路资源的使用效率不同,体现在线路列车的最小追踪间隔时间、最小折返间隔时间等性能指标中。

典型的CBTC系统在传统计算机联锁上叠加列控系统,列车移动授权的计算依赖于联锁进路,列车的间隔防护需要结合联锁进路和移动授权两

部分功能实现,包括前后列车间隔、列车与未按指定方向锁闭的道岔间隔以及两车侧面冲撞防护等。折返过程中,前后车的间隔以联锁进路和相关联的区段为单位,与非道岔区段前后车按列车精确位置进行追踪差异巨大,因此折返间隔成为提高线路资源利用率的瓶颈。为解决该瓶颈问题,TACS结合通信技术,通过获取实时更新的CBTC列车精确位置,将联锁与区域控制器的功能融合,构建地面一体化ATP控制器,将联锁的二值布尔逻辑数据化,对道岔区段线路资源进行精细管理,实现了一种以列车为中心的岔区移动闭塞。TACS资源细化技术在道岔区段折返间隔防护上的应用如图1所示。

基于联锁的防护需要遵循进路的防护原则。在图1所示折返站内,后车发车进路(起始信号机X2323)至少需要等到前车的折出进路解锁,且前车尾部出清计轴区段GC2311-2313,才能开始办理,需额外等待一个道岔的动作时间,完成进路办理后授权发车。

可以看出,在联锁二值布尔逻辑中,线路资源按区段为单位进行划分。道岔区段的占用、出清代表了列车的位置,联锁的道岔占用锁闭和解锁与道岔区段的状态直接关联,这是一种非常简化的资源管理手段,便于逻辑实现。但道岔区段线路资源使用效率不高,列车折返间隔时间较长。

通过研究道岔的机械结构特征,根据岔区防护的联锁要求,在前后两列CBTC列车位置已知且车载ATP确保列车不超过危险点运行的条件下,基于TACS资源细化技术对道岔区域进行数字化。其具体的做法是将道岔区段细化为尖轨防护区和侵限防护区,在地面一体化ATP控制器的数据库中进行定义,如图1中圈出部分。这样,当折出中的前车车尾出清尖轨防护区时,后车折入的资源申请就能够进入道岔2313,命令2313移动到侧向,而当前车车尾出清侵限防护区后,后车的授权延伸进入折返轨,后车起动发车。这一过程与基于传统联锁的CBTC相比,节省了道岔的动作时间和前车走行出清岔区GC2311-2313的时间。在上海轨道交通5号线实际线路的应用中,TACS道岔区段资源细化技术使得折返运营间隔从113 s显著减少到86 s。此外,整个过程中,地面ATP系统对两列车的运行模式实时监督,一旦任意一列车发生降级运行的情况,系统的防护原则自动回归到与传统联锁一致的逻辑,确保各种场景下的安全运行。

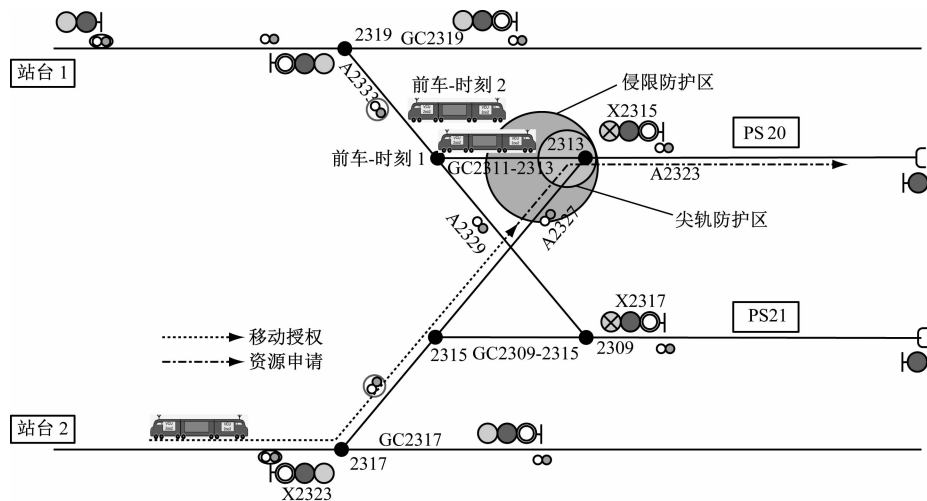


图1 基于TACS资源细化的高性能折返

Fig. 1 High performance turnback based on resource refinement of TACS

TACS 资源细化技术的另一个优点是列车运行的灵活性大大增加。由于列车的换方向运行脱离了联锁进路限制,从而实现了列车在轨道的任意点进行折返运行。以区间火灾为例,列车因为前方火灾需要退回到后方车站,目前传统联锁叠加 ATO 模式的 CBTC 由于受联锁进路的限制,无法实现任意点(火灾可以发生在任意点)改变列车运行方向。而基于资源细化的 TACS 则很容易实现列车在任意点停车后,给出反向授权,使得列车可以以全自动运行模式回到后方站台,避免由于一个灾害引发的次生灾害。

### 2.3 精简架构

车车通信的城市轨道交通信号系统架构最早由阿尔斯通在法国里尔胶轮轻轨改造项目中提出<sup>[7]</sup>。该方案的目标是实现一种简化的 CBTC 列控系统,从而减少地面设备的数量和安装工程量。相较于典型的 CBTC,简化的 CBTC 列控系统最大的改动是取消地面联锁和区域控制器,两列车的车载控制器之间进行通信,联锁和区域控制器功能重新分配到车载控制器和地面目标控制器。典型的 CBTC 及车车通信的 CBTC 概念架构如图 2 所示。

实际上,信号系统需要对一条线路甚至是一个城市线路网络内的所有列车进行协同控制。在分析车车通信的 CBTC 架构时,车车通信的 CBTC 概念架构需要展开,展开后的完整系统架构如图 3 所示中间部分“完整架构”。

针对车车通信系统完整架构,就以下关键问题及其解决方案进行分析。

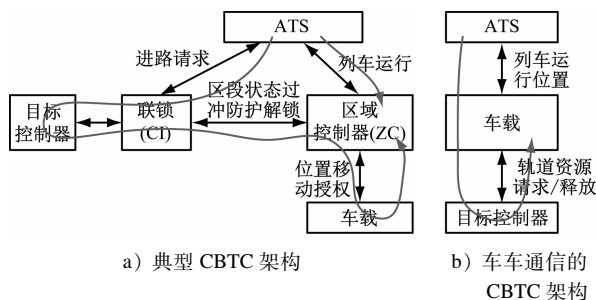
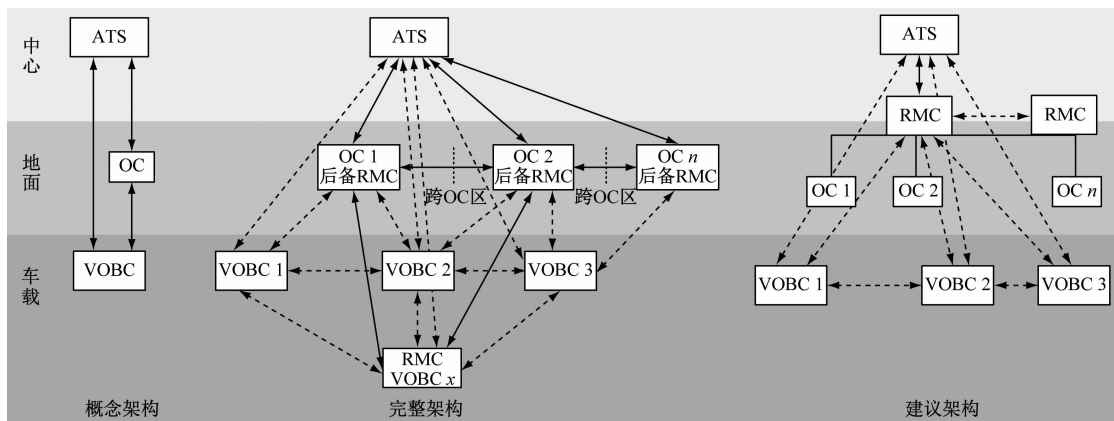


图2 典型CBTC及车车通信的CBTC概念架构

Fig. 2 Conceptual architectures of typical CBTC and CBTC based on V2V communication

1) 通信故障时如何管理非通信列车:通信发生故障时,系统应该能对非通信车进行跟踪并为这些列车分配线路资源,支持非通信车的持续运行。一类方案是由其中一列车载控制器健康的列车对这类非通信车进行管理。要实现这类方案,前提是这列健康主控列车需要一开始就实时对所有其它列车进行跟踪,以便一旦发生某列车通信故障的情况,立即接手故障前已获得资源,并按非通信车的原则进行资源的切换。因此,主控列车车载需要与所有列车保持通信,通信量巨大;主控列车车载控制器不能发生故障,一旦发生故障就需要其它列车的车载控制器来接手主控的功能,备份车载控制器的选择将非常困难。另一类方案则是把非通信车的管理功能由地面 ATP 来承担。

2) 如何建立车车通信:一种最直接的建立车车通信的方式是启动后尝试与所有列车进行握手通信,或至少根据与当前所在区域 OC(目标控制器)报告的所有注册列车建立通信。另外一种方式



注:VOBC——车载控制器;RMC——资源管理控制器; $n$ ——车站数。

图3 细化的车车通信CBTC系统架构

Fig. 3 Detailed system architecture of V2V communication based CBTC

是基于列车位置追踪,根据本列车的当前位置来搜索前方资源干扰位置的列车。第一种方案的通信量会随着列车数量的增加而大量增加,建立保持的车间链接数量为 $2^i$  ( $i$ 为列车数)个。后一种方案可以考虑由车载控制器来负责搜索和更新,或由地面设备来实现。如果由车载来进行搜索,则车载控制器还需要知道一个区域内所有列车的信息,在没有地面设备对列车追踪的情况下,车载控制器依然需要与所有列车建立通信以了解各个列车的任务和当前位置,其本质与第一种方案没有区别。而最为合理的方式依然是地面设备对所有列车进行追踪,并为新进入控制区域范围内的列车提供前方待通信列车的信息。

3) 资源在非通信列车与通信列车之间如何交接:已经分配给一列健康列车的资源在该列车丢失通信后,应能保留已有的分配并转交给负责非通信列车跟踪控制的子系统,这一非通信车跟踪控制功能如果由另一列健康车来实现,则这列控制列车需要对所有的列车资源进行跟踪记录,一旦该列控制列车出现问题,则会造成非通信列车管理的混乱,难以快速恢复。因此合理的解决方式与问题2类似,基于地面设备实现对所有列车的跟踪,这一资源交接问题则非常易于处理,可以实现无缝切换。

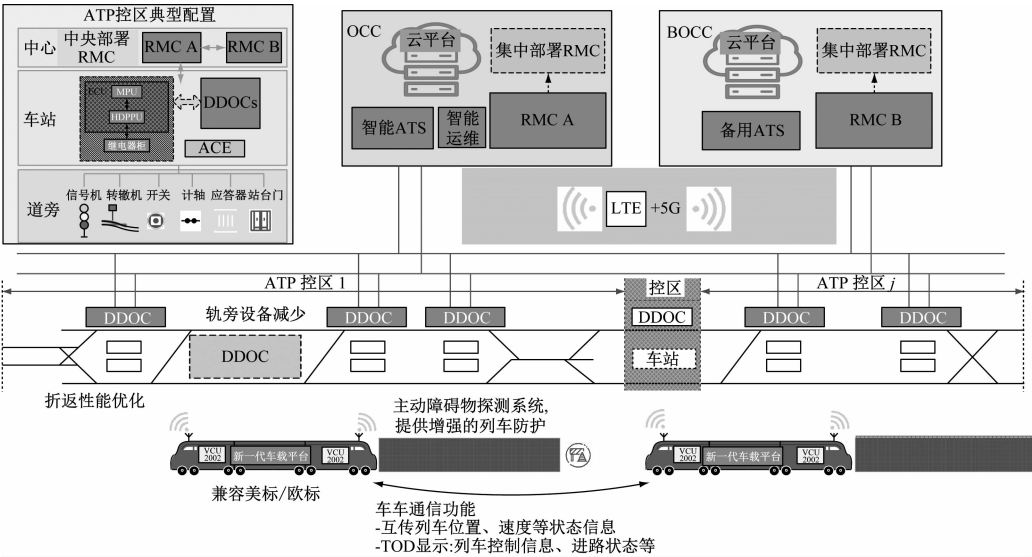
4) 基于全局智能调整的多车协同调度如何实现:线路规模的增加,尤其运行列车数量增加后,为实现全局调度的优化,提升系统效能,需对多列车根据扰动情况进行实时调度调整,因此系统应对全局信息进行分析,包括对所有运行车辆的动态、早晚点、客流甚至突发事件进行信息提取和优化计算。将ATS时刻表任务交给各列列车的方式无法

实现这些更加智能化的功能。

综上所述,资源细化技术能进一步提升线路资源使用效率,但现有的V2V架构并没有带来资源使用效率的显著变化,甚至还在一些场景下出现劣化的情况。为此,考虑对现有的V2V架构进行优化,提出了一种更加可行的车车通信CBTC系统建议架构如图3中所示。此建议架构从既有的CBTC系统演化而来,将联锁与区域控制器的功能进行融合,构成地面ATP资源管理控制器,降低了复杂度,系统应付故障场景具备更高的弹性,易于实现故障下的持续运行。

### 3 新一代TACS信号系统架构

对图3中所示建议架构完整展开,即新一代TACS信号系统架构,如图4所示。该系统采用在中心、地面以及车载三层部署方式。地面系统与典型的CBTC系统不同,车站上仅分布部署目标控制器,通过目标控制器的全电子化,减少或无需点式后备,取消独立联锁设备。该系统能够节省约20%的地面设备硬件全生命周期投入。资源管理器灵活部署到中心或指定车站,按线路运行等级适配维护人员。在不增加地面设备的前提下,车载设备增加了基于多传感器融合和人工智能技术的主动障碍物探测系统,在系统故障的情况下为列车提供一种降级模式下的辅助安全防护功能。列车根据地面系统提供的所有列车的追踪信息,建立与前后相关列车的车间通信,实现大运量线路短间隔运行时系统ATO速度协同调整功能及虚拟联挂功能,结合智能ATS的绿色CBTC功能达到整体的能耗优化控制。



注:OCC——运营控制中心;DDOC——电子联锁执行单元;BOCC——备用 OCC;ACE——计轴;MPU——主处理器;HDPPU——外设接口单元;TOD——司机操作主屏;LTE——长期演进;5G——第5代移动通讯技术;j——ATP控区的数量。

图4 新一代 TACS 信号系统架构

Fig. 4 Architecture of new generation signaling system TACS

4 结语

本文通过对 TACS 的自主控制、以车为中心的资源管理、架构精简等关键技术特征进行分析得出结论:TACS 的自主控制技术增强系统的感知能力和决策能力,资源细化管理技术是提升 TACS 性能的核心,而车与车之间直接通信在系统中的作用需要重新思考。借助 V2V 技术,系统能够实现多车间协同控制、虚拟联挂等功能,进而带来系统性能的提升,但如果提升的重点是用于功能分配重组,则需要平衡由此增加的系统复杂度,并避免故障情况下系统可用性的损失。基于此,本文提出了新一代 TACS 信号系统架构。由于涉及到的技术内容较多,受篇幅限制,本文未就新系统的关键信息传输路径和时序,资源申请、分配和移动授权计算三层控制逻辑等方面进行详细展开。这些内容可另行探讨。

参考文献

[1] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要[R]. 中国城市轨道交通协会,2020.  
China Association of Metros. China urban rail transit smart urban rail development outline [R]. Beijing: China Association of Metros, 2020.

[2] 罗情平, 陈丽君, 杜建新. 基于车车通信的列车自主运行系统(TACS)的探讨与研究[J]. 隧道与轨道交通, 2019(增刊2):140.  
LUO Qingping, CHEN Lijun, DU Jianxin. Discussion and research on train autonomous circumbulate system (TACS) based on V2V communication[J]. Tunnel and Rail Transit, 2019(S2): 140.

[3] FAROOQ J, SOLER J. Radio communication for communications-based train control (CBTC): a tutorial and survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1377.

[4] 张郁. 基于TSTCBTC® 2.0系统的上海轨道交通5号线信号系统大修改造工程[J]. 城市轨道交通研究, 2019(11):4.  
ZHANG Yu. Large-scale reformation of Shanghai Rail Transit Line 5 signaling system based on TSTCBTC® 2.0 system[J]. Urban Mass Transit, 2019(11):4.

[5] 姜庆阳. 城市轨道交通CBTC系统精简化研究[J]. 现代城市轨道交通, 2020(10):53.  
JIANG Qingyang. Research on refinement and simplification of urban rail transit CBTC system[J]. Modern Urban Rail Transit, 2020(10):53.

[6] ANTSAKLIS P J, PASSINO K M, WANG S J. An introduction to autonomous control systems[C]//IEEE. Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Intelligent Control. Philadelphia, Pennsylvania, USA. Newyork: IEEE,1990:21.

[7] BRIGINSHAW D. Alstom's simplified CBTC technology to debut in Lille[J]. International Railway Journal, 2013, 53(6):29.

(收稿日期:2021-11-24)