

# 城市轨道交通信号系统架构研究

余 继

(合肥市轨道交通集团有限公司, 230001, 合肥//高级工程师)

**摘 要** 城市轨道交通信号系统在保证列车安全、高效运行,提高行车指挥的自动化程度方面发挥着重要的作用。随着城市轨道交通大规模的线网建设和运营,经典的 CBTC (基于通信的列车控制)系统架构存在的一系列问题日益显现,如资源分配不够精细,难以实现敏捷功能;后备系统投资大,使用较少,投入产出比低;系统健壮性不足;升级改造困难和建设运维成本高等。通过改进 CBTC 系统架构,可使上述问题得以改善。精简的 CBTC 系统架构和 TACS (列车自主运行系统)架构针对经典的 CBTC 系统架构存在的问题进行了改进。通过综合分析二者的主要特点(优势和技术成熟度)和应用状况,得出以下结论:目前精简的 CBTC 系统架构已较为成熟,具备大范围推广条件;而 TACS 架构尚处于应用初期,在高密度线路运用必须慎重考虑针对故障运营场景的后备系统设计。

**关键词** 城市轨道交通;信号系统;系统架构;基于通信的列车控制;列车自主运行系统

**中图分类号** U231+.7

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2022.10.025

## Research on Architecture of Urban Rail Transit Signaling System

YU Ji

**Abstract** Urban rail transit signaling system plays an important role in ensuring safe and highly efficient operation of train, and in elevating automation level of train command. With large scale of urban rail transit line network construction and operation, problems existing in typical CBTC (communication based train control) system architecture have become increasingly evident, such as insufficient refinement of resource allocation, difficult to implement agile function; large investment of fallback system together with low utilization efficiency and ROI (return of investment); poor system robustness; difficulty in upgrading and retrofit and the high cost of system construction, operation and maintenance. Through enhancement of CBTC system architecture, the above problems can be ameliorated. Simplified CBTC system architecture and TACS (train autonomous control system) architecture have made improvement targeting the problems existing in typical CBTC system

architecture. By comprehensively analyzing the main characteristics of the two (advantages and technical maturity) and the application status, conclusions are obtained that currently, the simplified CBTC system architecture has become relatively mature for large-scale promotion, while the TACS architecture is still in the initial stage of application. The fallback system design for the operation scenario under failure conditions must be carefully considered in high-density line application.

**Key words** urban rail transit; signaling system; system architecture; CBTC; TACS

**Author's address** Hefei Metro Group Co., Ltd., 230001, Hefei, China

CBTC(基于通信的列车控制)系统早在20世纪80年代中期就被应用于城市轨道交通线路(1984年加拿大多伦多士嘉堡快轨线和1985年温哥华天车世博线<sup>[1]</sup>)。21世纪初,我国引进了CBTC系统,历经10余年的发展,实现了对CBTC系统的引进、消化与吸收,形成了被广泛应用的经典的CBTC系统架构。同时,针对经典的CBTC系统在大规模线网的建设运营中暴露出的问题,不同的业内集成商分别提出了精简的CBTC系统架构和TACS(列车自主运行系统)架构两种改进方案。本文对经典的CBTC系统存在的问题及精简的CBTC系统架构和TACS架构的特点和应用状况进行了分析,并对精简的CBTC系统架构和TACS架构进行了比选。

## 1 经典的CBTC系统应用现状

经典的CBTC系统通常在以联锁系统为核心的列车运行控制系统上叠加CBTC功能,并新增了ZC(区域控制器)设备为列车计算移动授权,同时将基于联锁的列车运行控制系统作为后备模式。为解决大容量双向车-地通信问题,通常采用基于WLAN(无线局域网)的车-地无线通信系统。随着欧标应答器的发展成熟,欧标应答器取代了交叉感应环线,成为主流CBTC系统采用的定位技术。在

中国,工作在 1.8 GHz 频段的 LTE-M(城市轨道交通综合无线通信系统)由于其在移动性、可靠性方面的优势,逐步取代了 WLAN,成为主流 CBTC 系统的车-地通信体制。经过上述演进,形成了如图 1 所示的典型的 CBTC 系统架构。

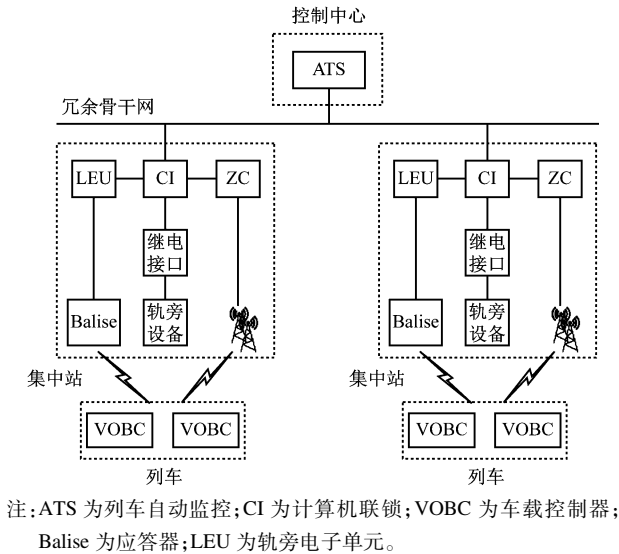


图 1 经典的 CBTC 系统架构

Fig. 1 Architecture of typical CBTC system

经典的 CBTC 系统技术较为成熟,且已形成招标文件标准范本,被业界广泛采用。但经过长期建设和运营实践,经典的 CBTC 系统逐渐暴露出其弊端,主要表现在以下几个方面:

1) 资源分配不够精细,难以实现敏捷功能。受制于联锁逻辑的限制,系统资源分配不够精细,难以实现诸如任意位置折返,双向移动闭塞运行等敏捷功能;同时,在道岔区段,按逻辑区段进行资源分配,限制了折返能力的提高。经典的 CBTC 系统的列车折返能力普遍在 120 s 左右。

2) 后备系统建设和运维成本高、使用少、投入产出比低。经典的 CBTC 系统中,后备系统主要包括计算机联锁(主用和后备系统共用)、LEU 及有源应答器系统(仅后备系统使用)。其中计算机联锁使用继电器接口执行单元,不仅需要大量继电器,而且继电器接口单元配线工作繁重、维护工作量大、建设和运维成本高,但后备系统却较少被使用,投入产出比较低。

3) 系统健壮性不足。经典的 CBTC 系统的核心设备计算机联锁和 ZC 通常采用单套 3 取 2 或者 2 乘 2 取 2 的安全计算机平台承载,只能抵御一次计算单元故障,在维护不及时的情况下容易导致设备宕机而影响运营。继电器接口执行单元的继电器

寿命影响系统可靠性,以站台门接口继电器为例,在密度高的线路上此类继电器每日动作 100 次以上,动作寿命 10 万次的铁路信号继电器需要每 3 年更换一次,加重了维护负担。无线网络采用相同制式的两路网络,且两路网络采用相同的工作频率,易受共因故障影响。

4) 系统升级改造困难。经典的 CBTC 系统轨旁设备多,改造调试过程需要对既有系统的信号机、计轴系统、有源应答器和道岔等大量设备进行更新和倒接,工作量大且存在安全隐患。

5) 建设和运维成本高。经典的 CBTC 系统复杂,设备数量和种类多,建设成本高;备品备件供应链压力大,需要较多维护人员,增加了维护成本。

目前,经典的 CBTC 系统仍是城市轨道交通列控系统的主流架构,但在部分新建线和改造线路中,为了改善经典的 CBTC 系统中存在的上述问题,已经开始采用两种新型 CBTC 系统架构,即精简的 CBTC 系统和 TACS。

## 2 精简的 CBTC 系统架构及其特点

为改善经典的 CBTC 系统存在的问题,部分国内集成商提出精简的 CBTC 系统方案<sup>[24]</sup>,其典型代表为上海电气泰雷兹交通自动化系统有限公司的 TSTCBTC 2.0 产品,并成功应用于上海轨道交通 5 号线的改造项目。精简的 CBTC 系统架构如图 2 所示。

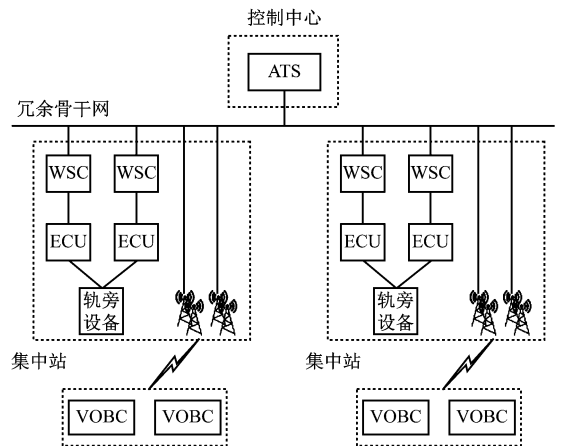


图 2 精简的 CBTC 系统架构

Fig. 2 Architecture of simplified CBTC system

### 2.1 精简的 CBTC 系统主要技术特点

1) 计算机联锁与 ZC 一体化,并使用 ECU。将

计算机联锁与 ZC 部署在同一套安全计算机平台中,构成一体化 WSC 设备<sup>[2]</sup>。ECU 具有体积小,可靠性高的特点。使用 ECU 取代继电器接口,不仅可以节省大量的继电器设备<sup>[3]</sup>,亦可改善系统的可靠性。

2) 加固 CBTC 主用系统。WSC 设备,采用双套冗余配置<sup>[4]</sup>,每套均采用 3 取 2 安全计算机平台,构成 2 乘 3 取 2 结构,这种结构可以抵御 3 次计算单元故障,从而提高了系统可用性。同时,为了避免车地无线通信中断对运营造成的影响,采用双套双路无线网络系统,例如分别使用双路 1.8 GHz LTE-M 网络和双路 5.8 GHz Wi-Fi 6(第六代无线网络技术)网络,可进一步提升无线网络的可靠性。

3) 取消点式后备系统。在主用 CBTC 系统被有效加固后,系统降级运行的概率进一步降低,点式后备系统已无存在的必要,取消点式后备系统,成为顺其自然的选择。取消点式后备系统可节省大量轨旁设备(LEU、有源应答器和配套线缆等)。

## 2.2 精简的 CBTC 系统主要优势

与经典的 CBTC 系统相比,精简的 CBTC 系统具有下列优势:

1) 资源分配更加精细,易于实现敏捷功能。精简的 CBTC 系统在将计算机联锁与 ZC 集成的同时,采用更加精细的资源分配机制,可实现任意位置折返、双向移动闭塞运行等敏捷功能;在道岔区段、可实现双动道岔解耦,列车出清道岔可动区域即可提前动岔,可将系统折返间隔缩短至 90 s 以内<sup>[5]</sup>。

2) 系统健壮性更好。精简的 CBTC 主用系统和无线网络均为双套冗余配置,且使用 ECU 取代继电器接口单元,极大地降低了故障的概率,为长期持续运营奠定了基础。

3) 系统兼容性好,易于实现平滑演进。精简的 CBTC 系统基本上保持了经典的 CBTC 系统中的功能分配,可与既有的经典 CBTC 系统实现兼容。同时,由于轨旁设备大幅度减少,也降低了既有经典的 CBTC 系统改造过程中的施工总量,可通过逐步改造实现平滑演进。

4) 系统建设和运维成本低。精简的 CBTC 系统采用的是计算机联锁与 ZC 一体化轨旁控制器和电子执行单元,并取消点式后备系统,省去了继电器接口单元、LEU、可变应答器等设备,极大地减少了轨旁设备数量,可节约大量机房空间和电缆消

耗。同时,设备种类减少,运维复杂度降低,从而大幅节约运维成本。

综上所述,精简的 CBTC 系统极大地改善了经典的 CBTC 系统中存在的问题,可较好地适应未来线网化运行的需求。

## 3 TACS 架构及其特点

在经典的 CBTC 系统向精简的 CBTC 系统演进的同时,部分集成商另辟蹊径,基于“以列车为中心”和“车-车通信”理念,开发了 TACS,以卡斯柯信号有限公司的“启骥”TACS 为代表,已应用于深圳地铁 20 号线。

最早的以列车为中心和基于车-车通信的信号系统是由法国阿尔斯通(Alstom)公司开发的,并应用于法国里尔轨道交通线路<sup>[6]</sup>,该系统为 TACS 的雏形。

### 3.1 TACS 主要技术特点

与精简的 CBTC 系统相比,TACS 具有如下技术特点:

1) 自主运行。TACS 的工作原理为 ATS 直接向列车下达运行计划,列车根据目的地自主向对象控制器(OC)请求轨旁资源(道岔、轨道区段、站台门等),列车通过与前方列车和对象控制器通信,获取前方列车位置及资源使用情况,为自身计算移动授权,并依据移动授权控制列车,实现“自主”运行<sup>[7]</sup>。

2) 轨旁设备进一步简化。TACS 对经典的 CBTC 系统进行了更大幅度的简化,不仅取消了点式后备系统,而且不再需要计算机联锁、ZC 等的轨旁设备,取而代之的是用于控制轨旁设备的 OC<sup>[8]</sup>,在一些设计方案中计轴系统和信号机也被取消。

### 3.2 TACS 主要优势

与精简的 CBTC 系统相比,TACS 具有如下优势:

1) 系统反应敏捷,控制时延小。TACS 采用与精简的 CBTC 系统类似的精细资源分配机制,可实现与精简的 CBTC 系统相似的敏捷功能,可支持快速折返。同时 TACS 车载控制器可为自身计算移动授权,无需反复多次与地面系统交互,故通信时延低,相对精简的 CBTC 系统控制更加敏捷。

2) 进一步降低建设和运维成本。轨旁设备进一步精简,仅有 OC(含电子执行单元),在节约大量线缆和机房空间的同时简化了系统调试,有利于降

低建设成本。文献[9]的研究认为,设备室面积可减少 15%~20%,调试时间可缩短 30%。同时,更少的设备有利于降低运维成本。针对既有线改造项目,由于 TACS 轨旁设备较少,可一定程度上降低改造的工作量。在取消计轴和信号机的情况下,仅需要对道岔进行倒接操作。

### 3.3 TACS 应用中需要注意的问题

TACS 的原型系统应用于国外中低运量线路,在我国尚处于应用早期,缺乏在高密度线路上的运营经验。因此,在应用 TACS 的线路建设和运营过程中,下列问题必须谨慎对待。

#### 3.3.1 系统健壮性

与精简的 CBTC 系统可从经典的 CBTC 系统平滑演进相比,TACS 对系统功能进行了重新分配。VOBC 在 TACS 中承担了较多的系统功能,复杂度和对算力的要求较高。而基于工业级嵌入式系统开发的 VOBC,在严苛的工作条件下,较难实现高算力与高可靠的平衡。同时,在高峰时刻,VOBC 或车地通信故障,将导致列车失去位置汇报,影响对列车的资源分配和移动授权计算,故障列车可能阻塞正线,进而造成全线严重晚点,将对运营造成较大影响,乘客体验较差。为了保证系统的可靠性,TACS 车载应至少在头尾各配置 1 套 3 取 2 系统互为冗余,车地无线通信系统应采用两套不同制式的双路无线网络。

#### 3.3.2 故障情况下运营场景的后备系统设计

TACS 的原型系统应用于国外低密度线路,是 CBTC 系统的一种低成本实现,未考虑后备系统问题;但在高密度线路应用时,如不设置后备系统,主用系统故障后,故障恢复耗时较长,会对运营秩序造成较大干扰。因此,在高密度线路运用的 TACS 需要设置后备系统。TACS 可采用的后备系统包括如下几种。

1) 无线列车调度电话。VOBC 故障或车地通信故障后,调度员可通过轨旁列车管理模块,人工向 OC 为故障列车申请运行资源,建立安全防护区域<sup>[10]</sup>;轨旁列车管理模块可将故障列车安全防护区域位置发送给线网内其他列车,实现对故障列车的安全防护。同时,调度员使用无线列车调度电话,指挥故障列车司机安全退出运行,并释放相关资源。利用无线列车调度电话指挥的方式无需增加成本,但自动化程度低,故障处理过程耗时较长;且依赖于人工操作与确认,存在安全隐患,因此在高

密度的线路中不宜采用。

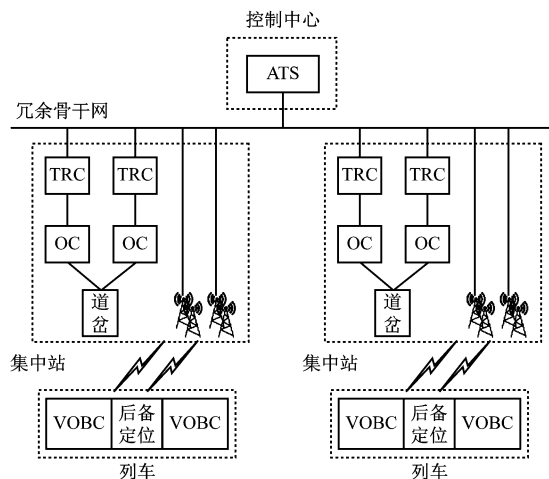
2) 自主障碍物检测系统。其采用多传感器融合技术,基于激光雷达、二次雷达、毫米波雷达和工业相机等传感器检测列车前方的障碍物,可在信号系统故障的情况下独立工作,为列车提供安全防护<sup>[10]</sup>。采用自主障碍物检测系统时,前方列车 VOBC 故障或失去通信时,后方列车只需降低运行速度(而不是立即停车),使制动距离小于主动障碍物检测系统的探测距离,即可保证列车安全运行。当前自主障碍物检测系统的性能尚存在一些局限:① 由于传感器性能的限制及受线路曲线和坡道的影响,难以实现高速运行(25~40 km/h 以上)条件下制动距离内连续探测,如引入车路协同技术,在轨旁安装传感器,将导致成本大幅增加;② 移植自汽车 ADAS(高级自动驾驶)技术的自主障碍物检测系统,往往使用卷积神经网络一类的深度学习技术<sup>[11]</sup>,其难以满足轨道交通领域 SIL(安全完整性等级)2 级及 2 级以上的认证要求。解决这一问题,有赖于科学界对于人工神经网络可解释性研究,但这一研究目前尚未取得突破。综上,在当前条件下,基于非深度学习技术实现的自主障碍物检测系统,只能在低速(25~40 km/h)条件下有限地运用。自主障碍物检测系统所用的高性能激光雷达等传感器价格在数万元左右,每列车需装备头尾两套自主障碍物检测系统,整体成本约数十万元,整条线路的投入在千万元左右。

3) 后备定位系统。增设后备列车定位系统,使轨旁列车管理模块和列车调度员可以实时掌握列车的精确位置,从而改善故障恢复过程的安全性,以提高系统效率。为避免削弱 TACS 轨旁设备少的优势,后备列车定位系统不宜使用计轴系统。在无线网络较为可靠的情况下,独立的基于无线位置汇报的后备定位系统,可在 VOBC 故障的情况下,提供基于应答器定位信息的列车位置汇报,为列车计算移动授权及故障恢复提供安全保证<sup>[10]</sup>。采用基于无线位置汇报的后备定位系统只需每列车增加一套定位处理单元,且与 VOBC 共用传感器系统,故整体成本增加不多。

4) 后备计算机联锁系统。使用通过 OC 驱动轨旁设备的计算机联锁(后备联锁)系统,作为降级模式下的安全保证设备。后备联锁系统可以用于为故障列车建立安全区域<sup>[10]</sup>。使用后备联锁系统,需要增加计算机联锁机柜和相应的轨道占用检测

设备,将导致轨旁设备数量增加,从而抵消 TACS 的轨旁设备少的优势。

综合上述分析,一种可用于高密度线路运营的实用 TACS 架构如图 3 所示。



注:TRC 为列车与资源控制器。

图 3 可用于高密度线路的 TACS 架构

Fig. 3 TACS architecture applicable to high-density line

该架构车载系统为双套 3 取 2 VOBC 头尾冗余配置,考虑到后备系统的成本和应用效果,选取了成本较低,且可以解决后备模式下定位问题的基于无线位置汇报的后备定位系统。后备定位系统通过独立于 VOBC 的通信通道汇报位置。车地无线通信系统为双路 LTE 与双路 Wi-Fi 6 构成的双制式网络。

轨旁配置 TRC,包括轨旁列车管理模块和轨旁资源管理模块,主要功能包括线路资源分配管理、故障列车位置维持、故障列车安全区建立和轨旁资源管理。基于 TRC 系统算力和故障分散考虑,TRC 仍然需要每个集中区设置,而不是全线仅在中心设置<sup>[10]</sup>。由于 TRC 需要承担线路资源分配管理,其故障对运营秩序影响较大,因此 TRC 亦采用双套 3 取 2 冗余配置。

## 4 CBTC 系统架构比选

上述对精简的 CBTC 系统和 TACS 的分析表明,相较于经典的 CBTC 系统二者均具有控制敏捷、可靠性好、轨旁设备少、建设及运维成本低、既有有线改造工作量小等特点,可较好地解决大规模线网建设过程中对信号系统的需求。

TACS 轨旁设备较少,无需计轴系统和信号机;虽为实现故障情况下的列车追踪,需增加车载后备

定位系统,由于车载系统算力增加,成本亦有所增加,但整体部署成本仍低于精简的 CBTC 系统。

当前,精简的 CBTC 系统技术相对成熟,且可通过经典的 CBTC 系统通过平滑演进实现,具备大范围推广条件。

TACS 相对于精简的 CBTC 系统,虽然在控制敏捷性和成本上略有胜出,但 TACS 尚处在应用初期,如图 3 所示的“可用于高密度线路的 TACS”尚未有实施案例,针对高密度运营的线路需要谨慎处理针对故障情况下的运营场景的后备系统设计。

## 5 结语

CBTC 系统的架构对 CBTC 系统控制的敏捷性、健壮性、改造的便利性、建设和运维成本有着显著的影响。在进行系统选型时,必须依据系统需求,予以综合考虑,选择合适的系统架构。针对经典的 CBTC 系统存在的问题,精简的 CBTC 系统和 TACS 都进行了针对性的改进,可作为未来一段时间内大规模线网建设可选用的系统架构。精简的 CBTC 系统是在经典的 CBTC 系统基础上,针对我国的应用实践开发的。而当前 TACS 尚需要进行针对性的改进,以适应我国高密度线路应用。在未来线网建设选择 CBTC 系统架构时需要因地制宜,针对相关技术在我国应用的适应性进行分析和改进,避免产生因应用环境不一致而可能导致的潜在问题。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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
- [3] 冷勇林,付胜华,付芳容.城市轨道交通信号系统设备精简化及云架构研究[J].城市轨道交通研究,2020(11):134.  
LENG Yonglin, FU Shenghua, FU Fangrong. Research on equipment simplification and cloud construction of urban rail transit signal system[J]. Urban Mass Transit, 2020(11):134.
- [4] 刘义强, TSTCBTC 2.0 信号系统特点及应用[J]. 运输经理世界, 2021(18):159.  
LIU Yiqiang. Characteristics and application of TSTCBTC 2.0 signaling system[J]. Transport Business China, 2021(18):159.

(下转第 143 页)