

# 基于云边协同的城市轨道交通信号系统方案

李 云<sup>1</sup> 王崇国<sup>1</sup> 殷江宁<sup>2</sup>

(1. 南京地铁建设有限责任公司, 210010, 南京; 2. 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** 目的: 传统 CBTC(基于通信的列车控制)系统已不能完全适应大规模城市轨道交通线网建设及运营的需求, 亟需对融合了最新的云计算、IoT(物联网)和安全电子系统技术的 EC-CBTC(基于云边协同的 CBTC)系统方案进行深入研究。方法: 提出了 EC-CBTC 系统的架构, 分析了 EC-CBTC 系统较传统 CBTC 系统具有的优势; 探讨了 EC-CBTC 系统的实时安全集群、安全边缘控制器、低时延及高确定性的通信网络三大关键技术的具体设计方案和措施。结果及结论: 构建了 EC-CBTC 系统基于 2oo2(二取二)的“裸金属”安全计算机集群方案架构、基于 2oo2(二取二)的安全云平台架构及基于 2oo3(三取二)的安全云平台架构。相比于传统 CBTC 系统, EC-CBTC 具有可用性高、可维护性和安全性好、建设运维和改造成本低、支持大规模线网互联互通等优势, 是未来城市轨道交通大规模线网化运营条件下信号系统的备选方案。

**关键词** 城市轨道交通; 信号系统; 基于通信的列车控制; 云边协同

**中图分类号** U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.036

## Urban Rail Transit Signaling System Scheme Based on Cloud-edge Collaboration

LI Yun, WANG Chongguo, YIN Jiangning

**Abstract** Objective: Conventional CBTC (communication-based train control) systems are no longer able to fully meet the needs of large-scale urban rail transit line network construction and operation. Therefore, it is urgent to conduct in-depth research on the EC-CBTC (CBTC based on cloud-edge collaboration) system, which integrates the latest cloud computing, IoT (Internet of Things), and safety electronic system technologies. Method: The architecture of the EC-CBTC system is proposed, and the advantages of the EC-CBTC system over conventional CBTC systems are analyzed. The specific design schemes and measures for the three key technologies of the EC-CBTC system: real-time safety cluster, safety edge controller, low latency and high deterministic communication network are discussed. Result & Conclusion: The EC-CBTC system is

constructed based on 'bare metal' secure computer cluster architecture, a 2oo2 (two out of two) safety cloud platform architecture and a 2oo3 (two out of three) safety cloud platform architecture. Compared with the conventional CBTC system, EC-CBTC has the advantages of higher availability, better maintainability and safety, lower operation, maintenance and reconstruction costs, and support for large-scale line network interoperation, making it a viable option for the signaling system under future urban rail transit large-scale line networking operation conditions.

**Key words** urban rail transit; signaling system; CBTC; cloud-edge collaboration

**First-author's address** Nanjing Metro Construction Co., Ltd., 210010, Nanjing, 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<sup>[1]</sup>, 我国自 21 世纪初开始在城市轨道交通线路中采用 CBTC 系统。目前, 我国多个城市已形成了较大规模的城市轨道交通网络, 如何适应大规模城市轨道交通线网的建设与运营需求, 已成为 CBTC 系统演进过程中必须考虑的问题。与此同时, 近年来云计算、IoT(物联网)技术和安全电子系统设计理论的快速发展, 为改善 CBTC 系统的可用性、可维护及安全性, 降低建设、运营及维护成本, 支持大规模线网的互联互通提供了技术支撑, 可显著提高 CBTC 系统针对大规模城市轨道交通线网建设、运营和改造应用的适应性。本文对融合了云计算、IoT 等新技术的 EC-CBTC(基于云边协同的 CBTC)方案开展深入研究。

## 1 传统 CBTC 系统存在的问题

经过 10 余年的应用, 传统 CBTC 系统技术已较为成熟。但在随着城市轨道交通线网规模的日益扩大, 传统 CBTC 系统的一些弊端正日益显现, 主

要包括：

1) 系统设备部署分散,运维难度大。系统设备分散部署在 OCC(运营控制中心)机房、集中站信号设备机械室及列车设备柜内。因此,在 OCC、集中站和车辆基地内均需配备运维人员值守,并配置备件库,供应链压力较大,人力成本较高。

2) 车载设备工作条件严苛,系统可靠性提升存在瓶颈。车载设备需要在严苛环境下工作,在系统对车载设备算力要求日益提高的背景下,难以实现高算力与可靠性之间的平衡。

3) 电气集中体制电缆消耗量大,建设成本高。传统 CBTC 系统集中站管辖范围长达数公里,集中站联锁设备与轨旁设备间采用硬线连接,电缆消耗量大。

4) 部分系统设备的安全性存在短板。部分与信号系统直接接口的系统(如站台门系统)所使用的控制器没有通过安全认证或只通过了 SIL(安全完整性等级)2 级或 3 级安全认证,对于 FAO(全自动运行)线路而言,设备在安全性上存在不足。

5) 系统升级改造困难。无论是采用新旧设备兼容共存的改造方案<sup>[2]</sup>,还是采用基于 TACS(列车自主控制系统)的改造方案<sup>[3]</sup>,均需花费大量时间进行正线运行测试。该测试过程繁琐,且需要经常在新旧系统间进行倒换,存在较大的安全风险。

6) 难以支持大规模线网的互联互通。传统 CBTC 系统需要在 VOBC(车载控制器)中存储线路电子地图数据,受限于 VOBC 的存储容量,传统 CBTC 系统仅适用于小规模线网的互联互通。而对于大规模线网互联互通的电子地图的实时下载<sup>[4]</sup>,传统 CBTC 系统因受到 VOBC 算力、车地无线网络可靠性等因素的制约,易造成电子地图数据下载失败,进而影响列车正常运行。

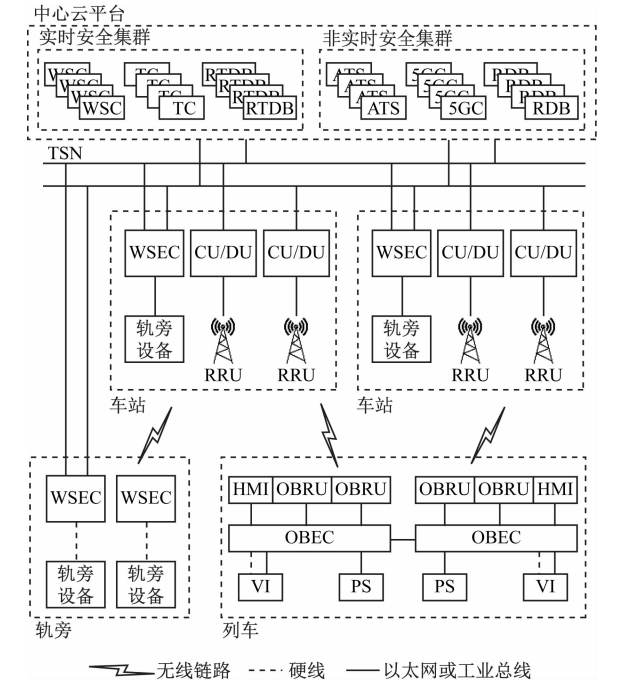
## 2 EC-CBTC 系统的架构及特点

### 2.1 EC-CBTC 系统架构

借鉴云计算与 IoT 技术,EC-CBTC 系统可有效提高传统 CBTC 系统对于大规模线网化运营的适应性,其系统架构如图 1 所示。

#### 2.1.1 中心云平台

中心云平台统一部署在 OCC 内,包括实时安全群和非实时安全群 2 个部分。其中:实时安全群包含了 WSC(轨旁控制器)、TC(列车控制器)和 RTDB(实时数据库)3 个子系统模块;非实时安全



注:TSN—时间敏感网络;WSEC—轨旁边缘控制器;CU/DU—中心单元/分布单元;RRU—无线拉远单元;HMI—人机接口;OBRU—车载无线单元;OBEC—车载边缘控制器;VI—车辆接口;PS—定位系统。

图 1 EC-CBTC 系统架构  
Fig. 1 Architecture of EC-CBTC System

群包含了 ATS(列车自动监控)、5GC(5G 核心网)和 RDB(关系数据库)3 个子系统模块。

1) ATS:功能与传统 CBTC 系统中 ATS 子系统基本一致。

2) TC:只包括传统 CBTC 系统或 TACS 中 VOBC 的控制部分,在列车上中仅保留 I/O(输入/输出)模块和少量必须的安全防护功能。

3) WSC:功能与传统 CBTC 系统中的“CI(计算机联锁)+ZC(区域控制器)”一体化系统,或与 TACS 中的 RMC(资源管理控制器)<sup>[5]</sup>基本相同。

中心云平台中引入 RTDB 和 RDB 后,安全应用无状态化,在主备切换时无需进行数据同步,这不仅可以提高主备用设备的切换速度,还可以避免因数据不一致带来的潜在风险。

#### 2.1.2 边缘控制器

边缘控制器包括 WSEC(轨旁边缘控制器)和 OBEC(车载边缘控制器)两类。WSEC 和 OBEC 均为 SIL4 小型安全控制器,也可基于 SIL4 的 PLC(可编程逻辑控制器)实现。

每个车站均部署了 WSEC,用于控制轨旁设备(包括道岔、信号机、各类按钮、站台门等)。在 EC-

CBTC 中,车站不再区分集中站和非集中站。WSEC 也可以灵活地直接部署在轨旁,通过有线或无线通信接入 EC-CBTC 系统,以实现轨旁设备的就近控制。

列车上部署了 OBEC,OBEC 的主要功能包括采集车载传感器(包括速度传感器和各类监测传感器)的数据,采集车辆接口数据,发送控制指令,管理车地通信,实施必要的安全防护等。

### 2.1.3 通信系统

EC-CBTC 系统中,列车运动控制是由部署于中心云平台实时安全集群中的 TC 实现的,车地通信网络涉及列车牵引、制动等类别的高实时性信号。因此,EC-CBTC 所采用的地面网络和车地无线网络均应为基于 5G 与 TSN(时间敏感网络)技术相融合的低时延确定性网络。其中,5GC 部署在中心云平台的非实时安全集群中。

## 2.2 EC-CBTC 系统的优势

与传统 CBTC 系统相比,EC-CBTC 系统具有如下优势:

1) EC-CBTC 系统更易于运维,可有效提高系统的可用性。EC-CBTC 系统绝大部分设备部署在中心云平台实时安全集群和非实时安全集群中,可实现集中运维,提高系统的可维护性;维修实时安全集群和非实时安全集群的计算单元时,直接更换预先烧写程序的板卡即可,无需烧写或同步数据。任何 1 块板卡都可在数分钟内更换完毕,系统可用性较传统 CBTC 显著提高。集中运维可以改善系统的可用性,减少备品备件的库存,降低运维工作所需的人力资源,进而有效降低设备的运维成本。

2) TC 无需承受严苛的工作环境,可实现高可靠性与高算力的平衡。TC 集中部署在中心云平台的实时安全集群中,由于地面机房的环境远优于车载设备的工作环境,集中部署 TC 可显著改善设备的工作环境,有利于提高设备可靠性;同时由于 TC 设备不再受到环境因素和功率的严格限制,可采用高性能硬件,这为开发算力需求较高的智能功能奠定了基础。

3) 边缘控制器的分布式部署可降低工程的建设 and 改造成本。WSEC 既可部署在每个车站信号设备室内,以直接驱动本站范围内的轨旁设备并采集设备状态,也可部署在轨旁,以就近驱动轨旁设备并采集设备状态。WSEC 无需通过硬线连接至相邻车站,可节省大量的控制电缆,降低建设成本。以 1

条 30 km 城市轨道交通线路所需的站台门控制电缆为例,与传统 CBTC 相比,EC-CBTC 可使站台门控制电缆减少 40 ~ 60 km,建设成本可降低 600 万元以上。此外,EC-CBTC 还可以采用 COTS(商业现货)硬件方式,以进一步节约建设和改造成本。

4) EC-CBTC 系统更易于升级改造。相比传统 CBTC 系统,EC-CBTC 系统的车载设备较为简单,OBEC 只根据 TC 发送的控制命令驱动列车并将采集到的传感器数据发送给 TC,不需装载线路电子地图。此外,由于 OBEC 本身是无状态设备,改造过程中只需在试车线对 OBEC 与 TC 的接口进行测试,原则上在通过测试后列车即可上线运行,这样,列车的上线调试时间可减少 50% 以上。

5) 所有 WSEC 和 OBEC 的安全完整性等级均为 SIL4,系统安全性更高。站台门控制器可基于 WSEC 实现。WSEC 可直接驱动站台门的 DCU(门控单元),同时兼顾采集站台上各按钮状态的功能。

6) EC-CBTC 系统支持大规模线网的互联互通。传统 CBTC 系统和 TACS 由于严重依赖车载线路电子地图数据,难以支持大规模线网的互联互通运行。EC-CBTC 系统中不存在上述问题,该系统中控制列车运行的 TC 全部集中部署在中心云平台的实时安全集群中,这些 TC 设备可以通过共享统一的线路电子地图存储设备,实现电子地图数据的统一更新。

## 3 EC-CBTC 系统的关键技术

### 3.1 实时安全集群

实时安全集群用于承载 EC-CBTC 系统的 TC、WSC 和 RTDB 模块,这 3 个子系统模块的安全完整性等级均为 SIL4。实时安全集群可以采用以下 2 种方案实现。

#### 3.1.1 “裸金属”安全计算机集群方案

“裸金属”安全计算机集群由相互独立的板卡式安全计算机单元构成。这些板卡式安全计算机被高密度地设置于 OCC 机房的机柜中。每套板卡式安全计算机由独立的电源板供电,其单元结构可以是 2oo2(二取二),也可以是 2oo3(三取二)。

基于 2oo2 的“裸金属”安全计算机集群方案架构如图 2 所示。

安全计算机集群中用于承载安全应用的 SCU 被分别部署在主用集群和备用集群中;用于承载 RTDB 的 SCU 被分别部署在静态数据库集群和动

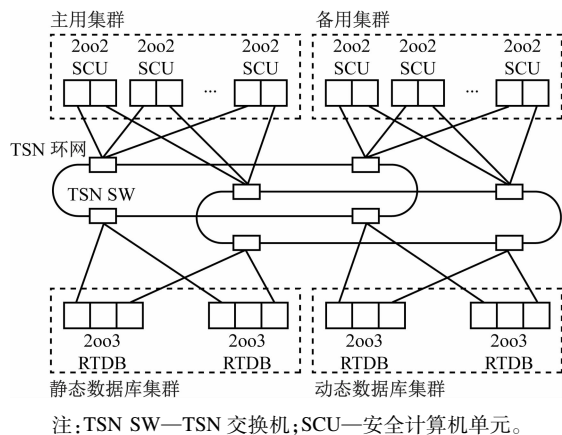


图2 基于2oo2的“裸金属”安全计算机集群架构

Fig. 2 Architecture of 2oo2-based 'bare metal' safety computer cluster

态数据库集群中; SCU 间通过双环 TSN 互连。安全计算机集群中所有 SCU 均可共享静态数据库和动态数据库。出于高可用性考虑, 承载静态数据库和动态数据库的 SCU, 其冗余度宜高于承载应用的安全计算机单元的冗余度。静态数据库和动态数据库只对有限数量的 SCU 服务, 且严格按照查询请求顺序在确定的时延范围内输出查询结果。

通过共享静态数据库, 可实现线路电子地图数据的统一升级, 为支持大规模线网的互联互通奠定基础。同时, 可使 TC、WSC 应用成为无状态应用, 在双系切换时无需进行数据同步, 只需从备用单元集群中任意分配 1 个热备单元, 从动态数据库加载数据后接管主用单元的工作, 即可完成主备单元间的切换。在主用单元可靠性较好、维护及时的情况下, 可以减少备用单元的配置数量, 备用单元与主用单元无需按 1:1 予以配置, 以降低系统成本。

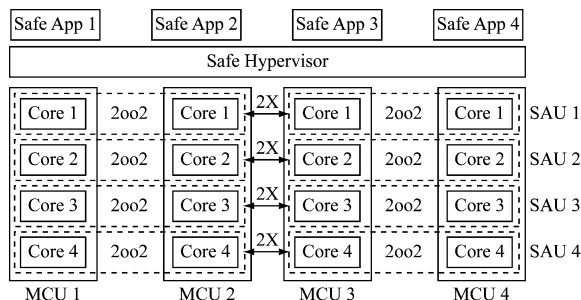
### 3.1.2 安全云平台方案

近年来, 基于云平台实现功能安全系统, 已逐渐成为轨道交通领域的研究热点。与此同时, 随着汽车向电动化和智能化的不断演进, 传统的分布式电子电气架构已经不能满足 ADAS (高级辅助驾驶) 等新功能的需求。为此, 近年来汽车电子系统逐渐向域控制架构拓扑和中央计算架构拓扑<sup>[6]</sup>演进, 这 2 类拓扑结构中均需要在 1 个控制器内承载多个“域”(即控制单元)。AUTOSAR (汽车开放系统架构) 提供了一套相关工具链, 以实现上述目标, 同时提供了相应的安全机制<sup>[7]</sup>。

与 AUTOSAR 架构类似, 安全云平台也需要在 1 片多核心处理器上承载多个独立的 SCU。与传统

分立结构的安全计算机直接基于 MCU (微控制器) 构建不同, 安全云平台引入了 Safe Hypervisor (安全虚拟化层)。Safe Hypervisor 的基本功能包括: ①为应用层提供 Runtime (运行时); ②对硬件随机故障进行检测, 并作出安全反应; ③执行输出表决和故障切换; ④控制安全应用间、安全应用与外部网络间通信; ⑤对安全应用程序进行调度, 以保证系统的实时性。

基于 2oo2 的安全云平台架构如图 3 所示。该架构中的最小组成单元包含 4 片 MCU, 每片 MCU 又包含 4 个 Core (核心)。不同 MCU 中的 2 个 Core 构成 2oo2 单元, 2 组 2oo2 单元构成 2X2oo2 的 SAU (安全应用单元), 4 片 4 个 Core 组成的 MCU 可构成 4 组 SAU。Safe App (安全应用程序) 通过 Safe Hypervisor 与 SAU 绑定, 每个 Safe App 对应 1 组 SAU, 安全云平台每个最小组成单元中的 4 组 SAU 可承载 4 个 Safe App。安全云平台可以通过增加最小组成单元的形式扩展。此外, 每组 SAU 中的 2 个 2oo2 单元应为主备“交叉”配置, 即采用此架构时, 当任意 1 片 MCU 故障时, 最多只有一半的 SAU 进行主备切换, 从而避免了 1 片 MCU 故障时全部 SAU 均发生主备切换的情况。如果对系统的 RAMS (可靠性、可用性、可维护性和安全性) 指标更高的要求, 可以采用双核心 MCU, 此时 1 片 MCU 故障时只有 1 组 SAU 发生主备切换。



注: 2X—双系切换。

图3 基于2oo2的安全云平台架构

Fig. 3 Architecture of 2oo2-based safety cloud platform

与“裸金属”安全计算机集群类似, 安全云平台也可通过共享静态数据库和动态数据库来实现安全应用的无状态化。同样, 承载数据库安全云平台的冗余度宜高于承载 Safe App 安全云平台的冗余度。

基于 2oo3 的安全云平台架构如图 4 所示。该架构可用于承载静态数据库和动态数据库, 其最小



势,以及对信号系统改造和大规模线网互联互通的良好支持,可作为未来城市轨道交通大规模线网化运营条件下信号系统的备选方案。

## 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] 朱莉. 城市轨道交通信号系统改造方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(4): 118.  
ZHU Li. Retrofit solution research of urban rail transit signaling system[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(4): 118.
- [3] 倪尉. TACS 系统在城市轨道交通信号系统更新改造工程中的应用研究[J]. 铁道通信信号, 2022, 58(8): 73.  
NI Wei. Research on application of TACS in renovation project of signal system in urban rail transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2022, 58(8): 73.
- [4] 通号城市轨道交通技术有限公司. 一种 CBTC 系统电子地图实时传输方法;202010615061.4[P]. 2020-06-30.  
CRSC Urban Rail Transit Technology Co., Ltd. A method of CBTC system electronic map real-time transmission; 202010615061.4[P]. 2020-06-30.
- [5] 高翔, 刘会明. 新一代 CBTC 系统关键技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(7): 80.  
GAO Xiang, LIU Huiming. Research on new generation CBTC system key technology development[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(7): 80.
- [6] 张政. 车辆电子电气架构演进趋势研究[J]. 汽车文摘, 2021(12): 29.  
ZHANG Zheng. Research on evolution trends of vehicle electronic and electrical architecture[J]. Automotive Digest, 2021(12): 29.
- [7] 詹克旭. 基于 AUTOSAR 架构的汽车电子软件产品的开发方法[J]. 汽车电器, 2021(11): 73.  
ZHAN Kexu. Development method of automotive electronic software products based on AUTOSAR architecture[J]. Auto Electric Parts, 2021(11): 73.
- [8] 张斌, 张鹏, 薛超粤. uRLLC 业务时延分析及低时延网络部署探讨[J]. 邮电设计技术, 2022(5): 37.  
ZHANG Bin, ZHANG Peng, XUE Chaoyue. Analysis of latency of uRLLC service and discussion of low latency network deployment[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2022(5): 37.
- [9] 汪硕, 尹淑文, 卢华, 等. 面向时间敏感网络的控制管理机制研究综述[J]. 网络与信息安全学报, 2021, 7(6): 11.  
WANG Shuo, YIN Shuwen, LU Hua, et al. Survey of control and management mechanisms for time-sensitive network[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2021, 7(6): 11.
- [10] 吴思远, 毕紫航, 王健全, 等. 5G-TSN 协同网络架构与关键传输流程研究[J]. 邮电设计技术, 2022(3): 29.  
WU Siyuan, BI Zihang, WANG Jianquan, et al. Research on 5G-TSN cooperation architecture and key transmission process[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2022(3): 29.
- [11] 刘明霞. 上海 5 号线折返性能提升分析[EB/OL]. (2021-09-03) [2022-06-20]. <https://mp.weixin.qq.com/s/K5mpMDZqq8suCJoRAwADFA>.  
LIU Mingxia. Analysis of Shanghai Metro Line 5 turn-back performance improvement. [EB/OL]. (2021-09-03) [2022-06-20]. <https://mp.weixin.qq.com/s/K5mpMDZqq8suCJoRAwADFA>.

(收稿日期:2022-09-23)

## 敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式阅读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

