

都市圈市域快线多网融合列控系统

贾 飞

(中铁建电气化局集团第四工程有限公司, 410016, 长沙//高级工程师)

摘 要 随着都市圈经济发展成熟,市域快线已逐渐成为构建都市圈轨道交通的重要制式之一。为进一步优化都市圈轨道交通运营管理、科学配置资源、节约通勤时间,研究不同制式列控系统之间贯通运营势在必行。通过分析当前国内外轨道交通融合发展现状,对比国内干线铁路 CTCS(中国列车控制系统)列控系统与城市轨道交通 CBTC(基于通信的列车控制)列控系统在系统架构、功能逻辑、信息流向等方面的技术差异性,结合多网融合列控系统设计要求,提出适用于市域快线的多网融合列控系统。

关键词 市域快线;贯通运营;多网融合;列控系统;切换
中图分类号 U284.48⁺2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.01.039

Multi-network Integrated Train Control System for Metropolitan Commuter Express

JIA Fei

Abstract With the economic development of metropolitan area, commuter express has gradually become one of the important modes of constructing metropolitan rail transit. In order to further optimize the operation management of metropolitan rail transit, to allocate resources scientifically and save commuting time, it is necessary to study the through train operation among different train control systems. By analyzing the current status of rail transit integrated development in China and abroad, and comparing the technical differences in system architecture, function logic and information flow of domestic trunk railway CTCS and urban rail transit CBTC train control systems, a multi-network integrated train control system suitable for commuter express is proposed considering multi-network integrated train control system design requirements.

Key words commuter express; through operation; multi-network integration; train control system; switch

Author's address China Railway Construction Electrification Bureau Group No. 4 Engineering Co., Ltd., 410016, Changsha, China

1 轨道交通融合发展概况

日本由于受地域条件的限制,早期就实现了 JR

(日本铁路)和地铁互联互通运行。例如中央缓行线—地下铁东西线及常盘缓行线—地下铁千代田线,其列控系统是通过加装多套车载设备实现对地面列控系统的兼容^[1]。伦敦中心城区隧道线路连接既有的西部和东部郊区线路,该项目也是通过安装三套车载系统,实现兼容核心线路 CBTC(基于通信的列车控制)、西部线路 ETCS(欧洲列车控制系统)、东部线路 TPWS(列车保护和报警系统)三种制式的地面列控系统。法国大巴黎地区郊区线路及市域快轨(RER)线路采用的列控系统有 KVB(列车速度控制系统)、SACEM(嵌入式系统)。为提高 RER 线路中心城区的运能,在 RER-E 率先采用 NExTEO(新东—西线列车运行系统),实现 KVB、SACEM 等系统与 CBTC 系统的地面设备及车载设备融合,并可实现装备 NExTEO 系统车载的列车开行至装备 KVB 系统、SACEM 系统的线路,实现贯通运营^[2]。

上海轨道交通 2 号线更新改造采用“TBTC(基于轨道电路的列车控制)+CBTC”双信号异型冗余方案,实现新建系统兼容既有设备^[3];重庆地铁 2 号线一期(较场口站—天堂堡站)通过增设车载 VOBC(车载控制器)设备升级至 CBTC 系统,兼容既有 ATP/TD(列车自动保护/列车检测)系统。

综上所述,国内外针对不同制式列控系统的贯通运营,除大巴黎地区 NExTEO 系统采用车地双向兼容的方案外,其余解决方案主要通过车载设备叠加增设方式实现车地单向兼容。

2 CTCS(中国列车控制系统)与 CBTC 系统架构及功能对比

国铁 CTCS 列控系统以 CI(计算机联锁)、TCC(列车控制中心)为核心,采用 TDCS(列车调度指挥系统),设置 TSRS(临时限速服务器)及 LEU(轨旁电子单元)实现对列车控制及超速防护。信息传输以 GMS-R(铁路移动通信系统)为主,辅以轨道电

路、应答器报文等传输方式,并设置集中监测系统^[4-6]。以珠三角城际铁路为例,该项目在 CTCS 列控系统中叠加 ATO(列车自动运行)子系统实现列车自动驾驶、站台门控制等功能,但其 ATO 模块仍基本独立于整体系统工作^[7]。CTCS 构成及子系统间信息流向如图 1 所示。

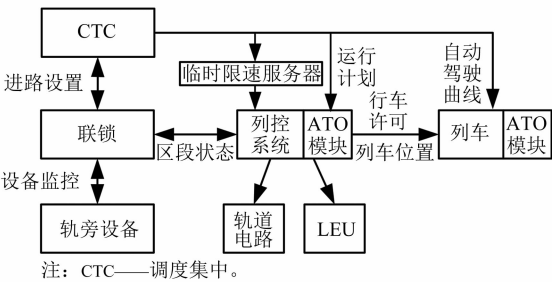


图 1 CTCS 构成及子系统间信息流向图

Fig. 1 Diagram of CTCS composition and information flow among subsystems

城市轨道交通(以下简称“城轨”)CBTC 列控系统以 CI、ZC(区域控制器)、ATS(列车自动监控)为核心,实现一体化控制及集中调度,信息传输以 WLAN/LTE-M(无线局域网/城市轨道交通车地综合通信系统)等无线技术为主。列车定位采用应答器和计轴组合方式,并设置集中监测系统^[8]。CBTC 系统构成及子系统间信息流向如图 2 所示。

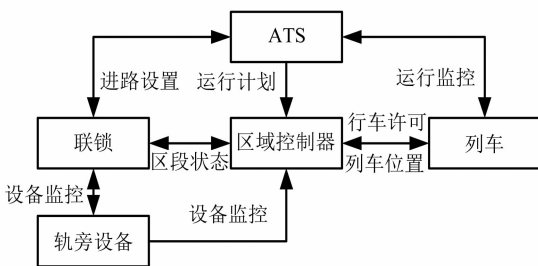


图 2 CBTC 系统构成及子系统间信息流向图

Fig. 2 Diagram of CBTC system composition and information flow among subsystems

相较于国铁 CTCS 列控系统,城轨 CBTC 联锁子系统功能更加丰富,可实现车站区间一体化控制,集成了站台门、SPKS(轨旁作业人员防护开关)、防淹门等一系列接口,ZC 整合了 ATP/ATO 及限速管理等功能。因此较 CTCS-2 级列控系统集成度更高、信息更丰富、功能更完备。国铁 CTCS 和城轨 CBTC 系统架构及功能特点对比如表 1 所示。

由表 1 可知,国铁列控系统和城轨列控系统的系统构成、信息流向、功能逻辑都相似,仅部分模块功能、传输媒介、接口形式有所差异。具体分析如下:

表 1 国铁 CTCS 与城轨 CBTC 系统架构及功能对比表
Tab. 1 Comparison of architecture and functionality between national railway CTCS and urban rail transit CBTC

项目	CTCS-2+ATO	CBTC
列控	独立设置列控系统,实现超速防护,轨道区段编码	独立设置列控系统,实现超速防护、自动驾驶、临时限速
联锁	独立设置联锁子系统,仅为车站联锁	独立设置联锁子系统,车站区间一体化控制,具备进路触发、虚拟区段功能接口丰富
集中调度	TDCS 支持多线路接入,具备线网控制能力	ATS 线路级控制,自动化程度高,具备进路自动触发、自动折返功能及多种运营模式
车地通信方式	GMS-R(ATO 信息)、轨道电路、应答器	WLAN/LTE(长期演进)
临时限速	设置临时限速服务器	集成于区域控制器
轨旁定位设备	轨道电路、应答器	计轴、应答器
ATO	独立设置 ATO,仅具备自动驾驶	集成 ATO,实现自动驾驶、折返、精准停车、站台门联动
车载	独立车载,接口协议公开,支持互联互通	独立车载,接口协议因厂家而异,互联互通困难
监测	独立设置监测系统	独立设置监测系统

1) 线路数据存储及移动授权方式不同。CTCS-2 级列控系统线路数据存储于地面设备,并通过地面应答器及轨道电路向车载设备发送目标点距离、线路速度和长度、临时限速等信息,车载 ATP 据此计算列车控制曲线。CBTC 列控系统由车载设备保存线路地图信息,地面 ZC 通过无线方式向车载设备发送走行路径方向、目标点位置、临时限速等动态数据,车载设备根据自身定位自动计算列车移动授权^[9]。

2) 车地通信技术不同。CTCS-2 级列控系统以轨道电路为主要传输媒介,叠加 ATO 模块后,还需增设 GSM-R 通道。传输方式方向单一、信道窄、迭代性差。CBTC 列控系统传输方式以 LTE-M/WLAN 技术为主,且具备逐步向 5G(第 5 代移动通信技术)/6G(第 6 代移动通信技术)演进的能力,具有传输速率高、带宽大、双向传输、抗干扰能力强、技术更新换代能力快等特点。在通信接口、协议方面,CTCS-2 级列控系统接口相对公开、单一;而 CBTC 列控系统以各自厂家为技术牵头方,接口私有化,难以满足不同厂家互联互通设计要求。

3) ATO 功能及实现方式不同。CTCS-2 级列

控系统中,ATO 作为相对独立单元可选配,但启用 ATO 功能时,需额外开辟 GSM-R 通道以实现移动数据传输,并同步对 TCC、TSRS 设备软硬件配套进行修改,以满足列车自动驾驶功能。CBTC 列控系统通过对 ATO 模块与 ATP 接口、联锁接口进行深化设计,使其功能深度嵌入其列控系统之中,列控设备一体化趋势尤为明显^[9]。另外,城轨 ATO 功能较 CTCS-2 级列控系统也更为丰富。

4) 列控系统设备组成及功能不同。CBTC 列控系统无 TCC、TSRS 设备,其相应功能分别由 ZC 和 CI 设备实现。另外,CBTC 列控系统 中的 ATS、CI 与 CTCS-2 级列控系统 中的 CTC、CI 设备功能亦存在差异。

3 多网融合列控系统 设计需求分析

多网融合列控系统若要实现列车在不同系统间的贯通运营,需在设计层面统一需求。多网融合列控系统应至少满足如下几个方面的需求:

- 1) 选择多家供货商或多种协议互通的设备,以确保系统持久有效;
- 2) 接口协议需标准化、透明化,供货商各自的技术方案需相互独立;
- 3) 建议数据传输和控制方案间保持相互独立,协议转换不得导致数据错误或失效;
- 4) 子系统层面需独立开发、独立运行,打造一

- 个公开、透明应用平台,提升系统通用性、兼容性;
- 5) 系统应实现模块化、参数化设计,便于日后运营维护、更换及系统升级;
- 6) 符合 EN 50126、EN 50128、EN 50129 安全标准(SIL4 级);
- 7) 遵守基于通信的列控标准(CTCS 及 CBTC)性能和功能要求(IEEE 1474.1)。

4 多网融合列控系统

4.1 多网融合列控系统车载方案

结合多网融合列控系统 设计需求,设计 CTCS-2 与 CBTC 统一车载设备系统(即通用式列控系统:General Train Control System,GTCS),该通用车载系统遵循统一接口协议、融合功能设计、兼容各类终端的设计思路,实现车载信息共享及计算输出。根据接收到的轨旁信息(轨道电路)和存储的电子地图数据,自动判断当前采取何种工作模式,实现不停车切换 CTCS-2 或 CBTC 两种制式。

基于 CTCS+CBTC 的融合列控系统车载架构图如图 3 所示。包括主控单元(ATP/ATO,采用二乘二取二或三取二架构)、DMI/MMI(桌面管理接口/人机界面)、测速测距系统(包含速度传感器、雷达传感器和测速测距单元)、BTM(应答器信息接收单元)系统(包含 BTM 主机和天线)、无线传输系统(包含 GSM-R/LTE-M 电台、车顶天线等)、列车接

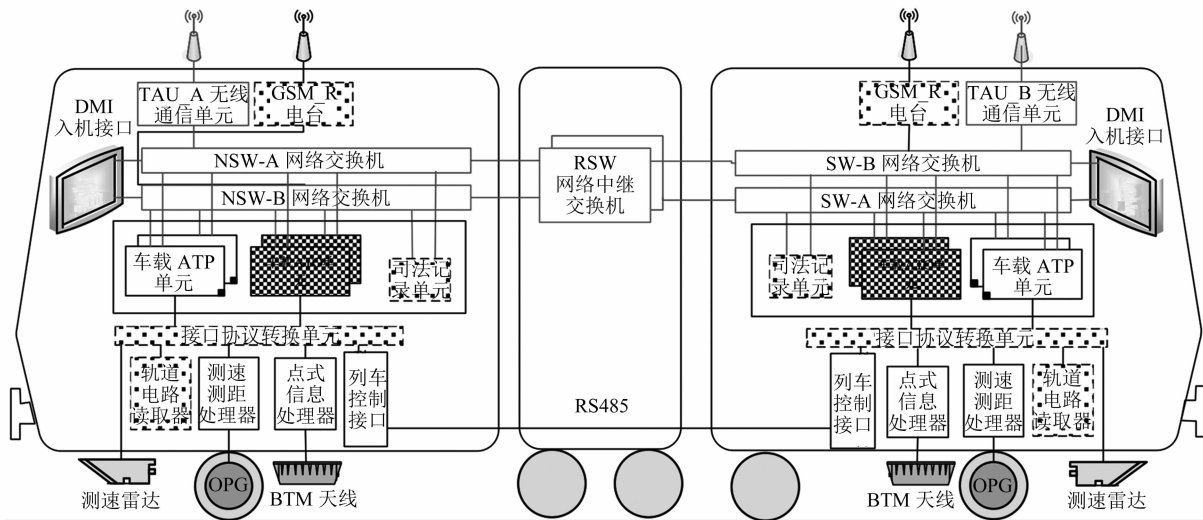


图 3 基于 CTCS+CBTC 融合列控系统车载架构图

图例: 新增设备 [虚线框] 增强设备 [斜纹框] 既有设备 [实线框]

注: TAU——车载终端; NSW——网络中继交换机; OPG——测速电机; SW——交换机。

Fig. 3 Onboard architecture diagram of integrated train control system based on CTCS+CBTC

口单元(主要包括安全输入输出单元、继电器等)及司法记录单元(包括 JRU/DRU(司法记录单元/数据记录单元)及监测模块)。同时,为融合 CTCS-2/3 级列控系统还需配置 TCR(轨道电路读取器)和 CIR(机车综合无线通信设备)。

1) 列车定位系统标准化。铁路信号系统的定位应答器制式有欧标、美标两种。为支持列车在线路间跨线运行时及时获得地面应答器的有效报文信息,需实现统一的应答器定位方案。多网融合列控系统车载设备需结合应答器定位系统的车地通信结构及接口连接方式、应答器报文结构及应答器报文编码规则等,参照 T/CAMET 04011.1—2018《城市轨道交通基于通信的列车运行控制系统(CBTC)互联互通接口规范 第 1 部分:应答器报文》和《CTCS-3 级列控系统应答器应用原则(V2.0)的通知》(科技运[2010]21 号),对其车载 MVB(车辆多功能总线)接口进行规范定义。

2) 测速系统标准化。测速系统作为列控系统的关键安全设备,通过连续测量并整合列车的瞬时行驶速度获得列车的行驶距离,其功能实现与轨旁设备无关联,测速信息准确与否主要依赖车轮转速测量的准确性。随着测速设备融合技术发展,采用多种测速设备(如速度传感器、加速度计、多普勒雷达等)进行数据及算法融合,提高测速精度。同时,

车载标准化方案考虑预留常用协议的物理接口或协议转换,满足不同设备、制式计数需求,并开发与之相匹配的软件,以实现列车速度计量功能。

3) 车地无线通信标准化。LTE-R(一种铁路专用)技术凭着传输速率高、抗干扰性强等优点发展迅速,已逐步成为城市轨道交通车地综合通信系统标准化技术。为兼容国铁 CTCS 级列控系统,车载通信单元以 LTE-M 为基础,增加 GMS-R 单元,采用双模冗余的架构,提升车载通信接口的兼容能力。

4) 信号-车辆接口标准化。列控系统的输入输出接口类型多、差异大。要实现基于多网融合列控系统的车载信号-车辆接口标准化,需根据现有车载接口形式和数据定义类型,如模拟量数据、ATCTCMS(列车控制与管理系统)通信数据、输入输出接口等,制定统一的、通用的、车辆侧可执行的输入输出接口标准。通过规范信号、车辆厂家接口,既可简化信号-车辆接口设计,强化接口功能,又可保证满足不同厂家、不同制式的通信输入接入。

4.2 多网融合列控系统地面切换方案

为实现地面控制无缝、自动切换,地面 CTCS+CBTC 多网融合列控系统线路控制区域按制式不同可划分 CTCS 控制区、CBTC 控制区及共管区。图 4 为 CTCS+CBTC 多网融合列控系统的地面区域管理划分示意图。

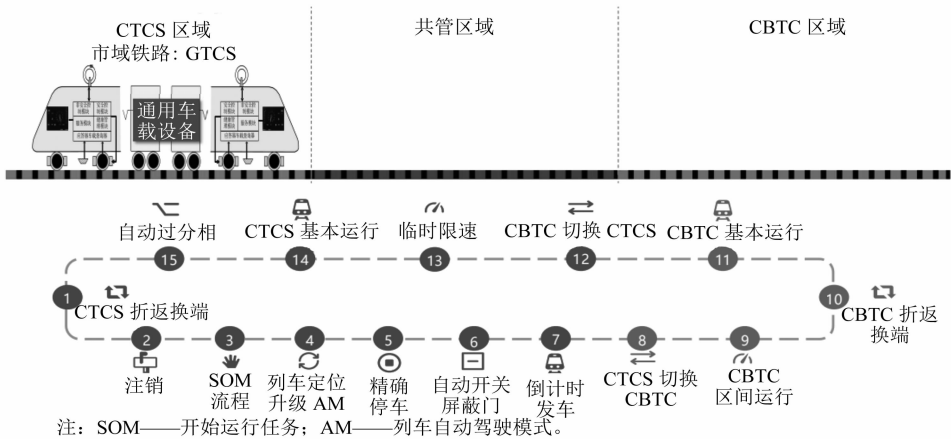


图 4 CTCS+CBTC 多网融合列控系统的地面区域管理划分图

Fig. 4 Ground area management division diagram of multi-network integrated train control system based on CTCS+CBTC

车载设备在共管区域实施地面控制系统的切换。本文将转换车站设置为 CBTC 与 CTCS-2 的切换区段,车载设备在切换区段实施地面控制系统切换,如图 5 所示。在既有 CTCS-2 系统地面设备基础上叠加定位应答器、系统切换预告应答器、系统

切换应答器,用于 ATP/ATO 向 TSRS 注册列车信息,实现列车控制权限交接,并连续向转换区内的列车发送移动授权和自动驾驶指令。

在转换车站, CBTC 与 CTCS-2 系统共用一套联锁设备,由联锁保证进路安全,进路办理由 CTCS

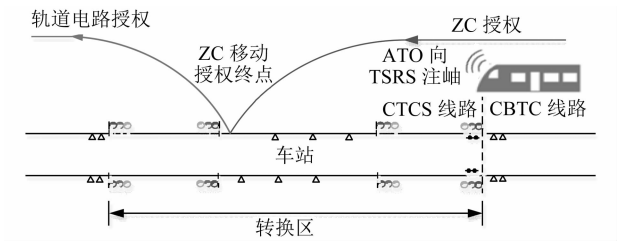


图 5 CTCS+CBTC 多网融合列控系统切换示意图

Fig. 5 Switching diagram of CTCS+CBTC multi-network integrated train control system

控制实现。

综上所述,CTCS+CBTC 多网融合列控系统以车载、地面为基础,实施多网融合,涉及的主要技术改进内容及与原系统技术发展对比分析如表 2 所示。由表 2 可知,基于多网融合的产品在车载设备互通、轨旁切换、兼容原地面系统等方面较为科学,符合技术本身的发展趋势,也符合我国列控系统技术特点及发展目标。

表 2 多网融合列控系统及与原系统技术发展对比表

Tab. 2 Comparison between multi-network integrated train control system and technological development of the original system

项目	车载设备	轨旁切换	地面系统
多网融合列控系统	无线技术改进,增加 LTE-M、GMS-R 通道;优化车载终端接口协议,增加协议转换及多样性;增加自动驾驶功能,实现移动闭塞;修改车地通信报文协议;统一信号-车辆接口	增加定位设备;补充切换应答器;增加轨旁系统间信息传输通道	未发生变化
原系统技术发展趋势	无线传输技术更新,提升带宽、安全、抗干扰能力;增加自动驾驶功能,实现移动闭塞;优化车载设备冗余度,提升系统可靠性、可用性	深度融合、优化切换机制	列控联锁一体化融合;执行单元电子化、集成化、智能化

5 结语

本文通过对比分析国铁 CTCS 列控系统与城轨 CBTC 列控系统在系统架构、功能逻辑、信息流向等方面的差异性,结合多网融合列控系统设计需求,提出 CTCS+CBTC 多网融合列控系统的车载、地面切换贯通运营方案,实现融合车载控制单元、统一车载接口类型、兼容车载通信、增强自动驾驶等功能,并对轨旁切换方案做简要设计。多网融合列控系统车载设备可以兼容当前国内列控系统,又符合列控系统技术发展趋势,为市域、市郊铁路信号系统互通性设计提供参考,也为不同制式信号系统的互通性发展提供思路。

参考文献

[1] 马大伟. 东京地铁副都心线的信号系统——新型的地下铁道信号系统[J]. 现代城市轨道交通,2012(5):89.
MA Dawei. Signaling system of Tokyo Metro Fukutoshin Line—new type of underground railroad signaling system[J]. Modern Urban Rail Transit,2012(5):89.

[2] 陈宇坤,李卫锋. 欧盟铁路信号系统互联互通技术规范研究[J]. 铁路通信信号工程技术,2021,18(10):111.
CHEN Yukun, LI Weifeng. Technical specifications for interoperability of EU railway signaling system[J]. Railway Signalling & Communication Engineering,2021,18(10):111.

[3] 张郁. 上海轨道交通 2 号线信号系统的更新改造[J]. 城市轨道交通研究,2020,23(6):126.
ZHANG Yu. Signal system renewal and transformation of Shanghai Urban Transit Line 2[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(6):126.

[4] 中国铁道学会. T/CRS C0101—2017 市域铁路设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2017.
China Railway Society. T/CRS C0101—2017 Code for design of suburban railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House,2017.

[5] 中国城市轨道交通协会. 市域快轨交通技术规范: T/CAMET 11001.1—2019[S]. 北京:中国城市轨道交通协会,2019.
China Association of Metros. Technical specification of metropolitan rapid rail transit[S]. Beijing:China Association of Metros,2019.

[6] 国家铁路局. CTCS-2 级列控系统总体技术要求: TB/T 3516—2018[S]. 北京:中国铁道出版社,2018.
National Railway Administration of the People's Republic of China. General technical specification for CTCS-2 train control system; TB/T 3516—2018[S]. Beijing:China Railway Publishing House,2018.

[7] 中国国家铁路集团有限公司. 城际铁路 CTCS2+ATO 列控系统暂行总体技术方案: 铁总科技[2013]79 号[S]. 北京:中国国家铁路集团有限公司,2013.
China State Railway Group Co., Ltd. CTCS2+ATO intercity railway train control system interim overall technical scheme: TZKJ[2013] No.79[S]. Beijing: China State Railway Group Co.,Ltd., 2013.

[8] 中国城市轨道交通协会. 基于通信的列车运行控制系统(CBTC)互联互通系统规范: T/CAMET 040010—2018[S]. 北京:中国城市轨道交通协会,2019.
China Association of Metros. system specification for interoperability of communication based train control: T/CAMET 040010—2018[S]. Beijing:China Association of Metros,2018.

[9] 张传琪,杨艳艳. 北京大兴国际机场线信号系统制式的选择[J]. 城市轨道交通研究,2019,22(12):145.
ZHANG Chuanqi, YANG Yanyan. Selection of signal system for Beijing Daxing International Airport Express[J]. Urban Mass Transit,2019,22(12):145.

(收稿日期:2022-05-31)