

上海城市轨道交通下一代信号系统发展趋势研究^{*}

施 聪

(上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 200235, 上海//高级工程师)

摘 要 基于上海城市轨道交通超大规模网络化的运营需求,结合 CBTC(基于通信的列车控制)系统的应用及维护现状,针对上海城市轨道交通下一代 CBTC 系统在设备选型和标准化、运营效能提升、关键子系统多模冗余、系统的长期演进等 4 个层面的应用展开分析与规划。结合既有线路信号系统大修更新改造及新线建设,逐步落地下一代 CBTC 系统的规划。

关键词 上海城市轨道交通; 信号系统; 基于通信的列车控制

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.11.004

Research on Shanghai Urban Rail Transit Next Generation Signaling System Development Tendency

SHI Cong

Abstract Based on the demand of Shanghai urban rail transit super-large-scale network operation, considering the application and maintenance status of CBTC system (communication-based train control), analysis and planning is developed centering application of next generation CBTC system in the four aspects of equipment type and standardization, high system efficiency, multi-mode redundancy of key subsystems and long-term evolution of the system. Considering the overhaul and renovation of existing line signaling system and new line construction, the plan for next-generation CBTC system will be gradually implemented.

Key words Shanghai urban rail transit; signaling system; CBTC

Author's address Telecom & Signaling Branch, Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China

自 1993 年开通第 1 条城市轨道交通线路以来,上海城市轨道交通信号系统经历了固定闭塞、准移动闭塞及基于车地通信的移动闭塞 3 个发展阶段。目前,上海城市轨道交通线网的 18 条线路中,

CBTC(基于通信的列车控制)系统占据了绝对主导地位。作为全国最早使用 CBTC 系统的城市,上海城市轨道交通完整经历了 CBTC 系统的 3 个技术发展阶段——分阶段开通、全面升级换代、开通全自动运行,在 CBTC 系统的应用和维护方面已积累了大量的经验。与此同时,在日常的运维中也发现既有 CBTC 系统存在着诸多问题,主要包括:①信号系统的标准化不足,主要限于功能性的描述,底层设备的应用封闭性较强,接口设备种类待优化;②部分关键子系统冗余不足、系统可靠度不高、信号无线通信设备性能不稳定等问题尤为突出;③随着各项技术的迅速发展,要求信号系统技术迭代能力更强、兼容性更高,而既有 CBTC 系统兼容性较差,单一子系统升级改造难度较大;④既有信号系统下线路提升运能空间很有限。

针对以上问题,目前国内外研究多聚焦于技术分析与理论探索,如针对 CBTC 的标准化研究主要集中于互联互通标准规范,文献[1]从需求、架构、功能、接口、测试及工程应用等 6 个层面对比分析了中国和韩国在 CBTC 互联互通研究上的成果;面向系统的高可用性要求,文献[2]提出了一种 CBTC 热备冗余系统的安全切换技术;结合智能化运维的新需求,文献[3]提出一种数据通信系统的故障诊断与预警装置,可实现对 DCS(数据通信子系统)网络交换机实时信息及无线场强等的自动监测。但是,在如何推进下一代 CBTC 系统技术的实施路线、应用实践方面的研究较为匮乏。要解决既有线路 CBTC 系统在实际运维中的问题,只有通过有规划、有引导的大修改造才能实现。在分析现有问题和超大规模网络化运维需求的基础上,结合对未来战略规划和对技术发展的判断,本文重点对上海城市轨道交通下一代 CBTC 系统的发展和应用进行研究,下一代的 CBTC 系统应该是基于标准化的高

^{*} 上海市科学技术委员会科研计划项目(18DZ1205802)

效能、多模冗余、支持长期演进的列车控制系统。

1 设备统型和标准化

1.1 车载标准化

目前上海城市轨道交通线网各线路间存在着列车上线率、配属率不均衡等现象,因车辆架修和大修集中扣车等因素造成短时缺车的问题时有发生。为实现线网列车资源的合理调配,结合各线路信号系统的大修更新改造项目,可通过“车载标准化”来实现线间列车的互通互用。

车载标准化是指统一定义车载相关接口,统一车载外挂设备的型号。其工作内容主要包括以下 4 个部分:

1) 信号-车辆接口。对车载系统各板块的接口条件、电气参数、数据格式、通信标准等进行梳理,以形成统一的信号-车辆接口需求。

2) 车地通信。统一车载 DCS 相关硬件设备的型号,采用 LTE-M(城市轨道交通用长期演进)标准,结合综合承载(含通信专业的业务)的需求,统一进行规划和设计。

3) 列车定位系统。统一使用欧标定位系统,统一信标天线在列车上的安装位置,统一信标天线设备选型。

4) 测速系统。测速设备与信号 ATP(列车自动防护)/ATO(列车自动运行)直接对接。车载标准化方案可考虑后续技术升级方向,降低对计轴设备的依赖,并简化、统一测速系统与信号 ATP/ATO 系统的接口。此外,不同信号系统对测速设备的功能定义、速度精度等方面的需求不同,相关的软件算法差异较大,鉴于此特殊性,应分类、分步完成标准化工作,研究多种测速设备的数据和算法融合,以提高测速的精准度。

既有线的车载标准化可与线路的大修更新改造同步进行,优势如下:①基本不增加额外费用;②接口的改造相对简单,仅涉及车载-车辆接口;③仍使用原系统核心设备,不降低设备的运营性能;④便于维护,单车故障对全线运营的影响较小;⑤改造测试工作少、风险小,支持既有线边改造、边运营。

1.2 智能运维标准化

为了满足上海城市轨道交通高密度、高标准、高强度的运维需求,下一代 CBTC 系统应能满足数字化和智能化运维的要求,支持板卡级的监测,支持统一接口、标准协议和高带宽的数据上传,支持

远程处置以及无人巡检。其维护支持子系统应能实现关键设备的状态全监测、智能化的故障诊断和科学化的维修决策,并形成设备全寿命周期的健康管理模式。具体要求主要包括:

1) 集成化状态监测。设备数据采集实现全覆盖,故障可以定位到板卡级。采集数据类别包括系统日志、故障报警、设备状态和性能信息等,可概览设备状态全况。

2) 向导化故障处置。基于数据分析结果和案例系统辅助,提供规范化和标准化的故障及隐患处理流程,建立准确、快速、规范的故障及隐患处理体系。

3) 智能化分析预警。利用多维度数据分析技术实现设备间的综合关联分析,挖掘设备数据特征并提供预测预判,辅助预测分析设备隐患,提前预知设备的异常状态。

4) 协同化远程支持。具备远程控制、远程分析、远程应急指挥和远程维护作业等功能。

5) 精准化决策分析。根据设备状态的监测,提供动态维护策略。

6) 一体化运维管理。实现设备履历数据“一管到底”式的全寿命周期管理,推动组织架构、业务流程、检修制度、资源管理的创新。

2 系统效能的提升

2.1 道岔资源精细化管理

列车控制系统的效能高低决定了列车的追踪间隔和线路运能的大小。上海城市轨道交通线路在开通后,日均客流量持续保持增长趋势。受到列车折返间隔的约束,全线网线路的列车最小间隔只能达到 2 min 左右,部分线路早晚高峰客流积压,无法满足短时断面大客流运输的要求。如果优化列车控制系统性能,提升折返效率,线路运能就可同步提高。

目前的 CBTC 系统下,列车运行间隔主要受到列车折返间隔的影响,而列车折返间隔主要受制于道岔资源的管理。通过对道岔资源进行精细化管理、优化进路触发并实时解锁,可实现列车折返效能的提升。具体的措施有:①将道岔区段占用出清区域进行细分,分为岔前区域、可动区域、侧防区域和岔后区域;②列车出清道岔可动区域后即可动道岔,而不用出清整个道岔轨道区段;③只有前序列车出清了侧防区域后,后序列车才可占用该侧防区

域,道岔的定位和反位等岔后部分可分别被不同的列车占用;④改双动道岔为单动道岔。

2.2 联锁列控一体化

既有 CBTC 系统具有如下特点:各子系统间功能相互依赖,耦合度高;各子系统间接口多,接口内容重复度高;设备数量多,导致故障点多、维护工作量大。以线路区段占用状态为例予以说明:ZC(区域控制器)子系统的逻辑区段占用状态是根据联锁子系统提供的计轴区段占用状态和车载子系统提供的列车位置报告综合判定而来,联锁子系统根据计轴区段占用状态和 ZC 子系统提供的逻辑区段占用状态综合判定线路区段的占用状态。在此过程中,联锁子系统分别直接、间接使用了计轴区段占用状态。

新一代 CBTC 系统可考虑将联锁子系统与 ZC 子系统合并,将既有 CBTC 系统中的联锁和 ZC 的部分功能“移植”至车载设备内,实现联锁列控一体化,从而达到减少轨旁设备、优化系统结构、减少通信延时、提升系统效能的目的。联锁和 ZC 合并后的新系统无需设置信号机、有源应答器和计轴系统,其结构更为简单。联锁列控一体化的新系统以列车为中心,采用基于资源点的资源管理方式,将既有 CBTC 系统以轨旁为主进行列车间隔防护的闭塞功能升级为车车协同的主动间隔防护,从而使列车运行交路的变更也更加灵活。

3 CBTC 关键子系统的多模冗余

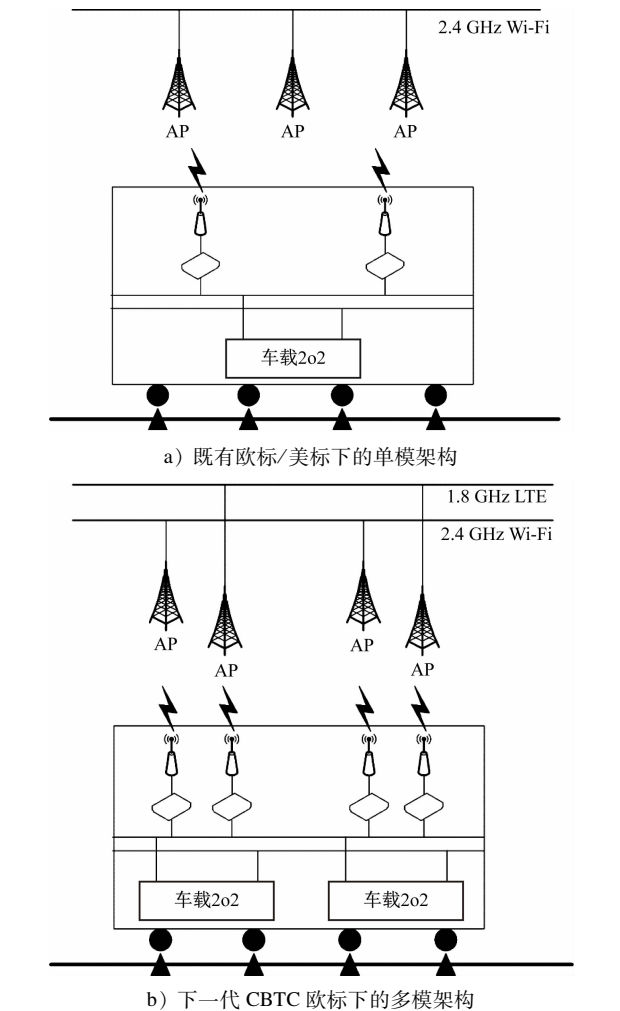
在城市轨道交通超大规模网络化运营条件下,设备故障导致列车发生 15 min 及以上延误(特别是早晚高峰时段),将对城市的公共交通产生很严重的影响。但设备故障不可避免,因此只能通过冗余配置,在设计层面实现关键子系统故障情况下对运营的“零影响”。冗余可分为同型冗余和异型冗余 2 种,其中,异型冗余可有效减少共模故障,可靠性更高,同时异型冗余配置也为 CBTC 各子系统单独大修改造创造了条件。对车载子系统、无线网络和列车定位子系统等 CBTC 的关键子系统实施多模冗余配置,可有效提高 CBTC 系统的可用性,确保设备故障对运营影响的最小化。

3.1 车载子系统

2019 年 12 月至 2020 年 11 月,上海城市轨道交通线网总的运营里程为 10 114 万列 km。运营期间共接报车载 ATC(列车自动控制)设备故障 2 678 次,其在整个信号系统故障数中的占比为 74%。故

障主要集中在定位设备、测速设备、车地通信和板卡等设备上。因此,提高车载子系统的高可靠性、高冗余性,可大幅度降低信号系统故障对运营造成的影响。

为提升车载子系统的可靠性,上海既有线路大修更新改造及新线建设采用“2 乘 2 取 2”的双套热备冗余车载子系统,如图 1 所示。当车载板卡故障、外设传感器故障、电源故障、当前模式不可用、列车位置丢失及轮径校验失败等情况发生时,车载子系统可做到主备机无缝切换,确保列车的正常运行。



注:AP——接入点;RRU——射频拉远单元;LTE——长期演进;Wi-Fi——无线保真;2o2表示2取2。

图 1 车载子系统多模架构演进示意图
Fig. 1 Diagram of on-board system multi-module architecture evolution

3.2 无线网络

目前国内的城市轨道交通线路中,投用的绝大部分信号系统都是 CBTC 系统。车车通信等热门制式的实质仍属于 CBTC 系统,只是通信路径有所

变化。因此,确保车地无线通信不中断是确保信号系统正常运行的根本。上海城市轨道交通车地无线通信网络在既有线路大修更新改造及新线建设中将按照“LTE-M 和 (Wi-Fi)”双制式网络进行建设,LTE-M 和 Wi-Fi 同时工作且相互独立,车地间的信息传输可经由任一网络完成,单个网络的故障不影响整个 CBTC 系统的正常运作。此外,双制式四网络的模式也解决了单个频段受干扰对运营产生影响的问题。

3.3 列车定位辅助子系统

2020 年上海城市轨道交通信号专业子系统故障占比排各第 2 的是列车定位检测故障,其在整个信号系统故障的占比为 9.6%,在 5 min 晚点指标中的占比也较高。列车定位设备易受外界干扰,与轨旁环境的关联度较高,故障处置措施大多采用人员下线路处理的方式。若列车定位故障发生在早晚运营高峰时段,受限列车运行间隔,维修人员无法及时下线路实施应急处置,将导致故障影响范围扩大。

既有 CBTC 系统主要通过列车主动发送定位报告来获取列车位置,同时借助计轴区段进行安全防护计算,确保列车安全运行。下一代 CBTC 系统可利用地面信标替代计轴,对列车位置进行辅助定位,从而建立一套“列车主动发送定位 + 信标辅助定位”的架构。在此基础上,在全线网逐步统一使用欧式信标,统一规划信标 ID(标识号)和通信地址规则,统一接口通信协议,进而组建一套全线网使用的列车自主定位系统。

自主定位是列车定位的辅助子系统,在列车 ATP 无法定位的情况下将启用自主定位。自主定位设备安装在列车上,与信标天线连接,用于读取轨道上的信标位置信息(主要包括列车号、信标号及线路号等),并通过车地无线链路上传至地面。轨旁服务器负责接收、存储、转换列车的定位信息。列车位置通过人机界面进行输出显示,无线传输可使用信号系统独立的以太网,也可在确保信息安全的前提下使用公网。列车定位辅助子系统的安全等级为 SIL 4(安全完整性等级 4),可实现故障列车与正常列车的混跑。

4 支持 LTE 技术

基于上海城市轨道交通 1 号线、2 号线、5 号线信号系统“边改造、边运营”的项目经验,新旧技术平稳地迭代显得尤为重要。同时考虑到技术的不断演进,下一代 CBTC 系统应尽量利用冗余架构,

构建“成熟 + 先进”的冗余模式,即:在异型冗余的 2 套设备中,应尽量将 1 套成熟的技术与 1 套先进的技术匹配使用,以应对技术的发展。该模式也为 CBTC 系统各子系统的更新改造创造了条件,可确保不同建设时期的信号系统拥有 1 套相同制式的子系统,为实现城市轨道交通线网间列车的互通互用提供技术支持。

1) 车地无线子系统的演进。上海城市轨道交通车地无线通信系统近期采用的是“LTE-M 和 Wi-Fi”双制式。随着通信技术迅速发展,待 5G(第 5 代移动通信技术)商用化条件成熟后,无线通信系统可以向 LTE-M + 5G 的双制式模式演进。

2) 列车辅助定位子系统的演进。待隧道中卫星定位技术成熟后,CBTC 系统的列车辅助定位子系统可向卫星定位技术演进。卫星定位不依赖轨旁设备的可靠性,定位误差小,可更好地满足全线网的列车定位需求。

5 结语

城市轨道交通信号系统应结合所在城市的特点和本地运维需求开展不同方向的规划。为适应城市轨道交通超大规模网络化运维的需要,上海城市轨道交通信号系统将以标准化、高效能、高可靠、高冗余、高智能的发展方向为目标,不断细化功能需求和架构设计,结合信号大修更新和新线建设项目,逐步实现规划的落地,实现企业的战略发展目标。

参考文献

- [1] 冯浩楠,马晓皎,董成文,等. 中韩 CBTC 系统互联互通研究及应用[J]. 铁道标准设计,2020(12):134.
FENG Haonan, MA Xiaojiao, DONG Chengwen, et al. Research and application of interoperability of CBTC system in China and South Korea[J]. Railway Standard Design, 2020(12):134.
- [2] 孙来平. CBTC 热备冗余系统软件安全切换技术的研究与实现[J]. 城市轨道交通研究,2018(增刊1):13.
SUN Laiping. Research and implementation of software-based switch over between CBTC hot redundant systems[J]. Urban Mass Transit, 2018(S1):13.
- [3] 裴加富,胡恩华,林立,等. 基于通信的列车控制数据通信子系统的智能诊断和预警分析[J]. 城市轨道交通研究,2020(1):75.
PEI Jiafu, HU Enhua, LIN Li, et al. Intelligent diagnosis and early warning analysis based on CBTC data communication subsystem[J]. Urban Mass Transit, 2020(1):75.

(收稿日期:2021-04-27)