

上海轨道交通信号系统演进方案研究

王历珩

(上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 200235, 上海)

摘 要 [目的] 随着城市轨道交通高速发展, 列车的运营量大幅增加, 现有的 CBTC (基于通信的列车自动控制) 系统已无法满足高密度运营的信号系统需求, 有必要对城市轨道交通信号系统演进方案进行研究。[方法] 提出一种城市轨道交通信号系统演进方案, 使得信号系统在出现单发故障时, 由上-下后备降级运行模式向左-右互备冗余模式转变。首先, 合并 ZC (区域控制器) 与 CI (计算机联锁) 系统, 从而减少信号系统的架构层级; 然后, 改进 ATS (列车自动监控系统) 为以太网心跳信息交互的热备冗余结构; 同时, 设计 DCS (数据通信系统) 高冗余架构, 实现信号核心业务间的物理隔离; 最后, 改变车载信号系统为头尾冗余结构, 以完成主备方式的无缝切换。[结果及结论] 此方案可显著提升信号系统的可靠性和可用性, 实现故障时的无感运营, 确保了高密度运营下的系统稳定性和连续性。

关键词 城市轨道交通; 信号系统; 演进方案; 故障运营无感

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.11.001

Research on Shanghai Rail Transit Signaling System Evolution Scheme

WANG Lizhou

(Telecom & Signal Branch, Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China)

Abstract [Objective] With the rapid development of urban rail transit, the operational volume of trains has significantly increased. The existing CBTC (communication-based train control) system can no longer meet the signaling system needs of high-density operations, necessitating the research into urban rail transit signaling system evolution scheme. [Method] An evolution scheme for urban rail transit signaling system is proposed, with transitioning from an up-down backup degradation operation mode to a left-right mutual backup redundancy mode in the event of single-point failures in signaling system. First, the ZC (zone controller) and CI (computer interlocking) systems are merged to decrease signaling system framework levels. Then, the ATS (automatic train supervision) system is improved to a hot standby redundancy structure for Ethernet heartbeat information exchange. Additionally, a highly redun-

dant DCS (data communication system) architecture is designed to achieve physical isolation between core signal operations. Finally, the on-board signaling system is modified to a head-tail redundancy structure, enabling seamless switching between primary and backup modes. [Result & Conclusion] The proposed method significantly enhances the reliability and availability of the signaling system, ensuring seamless operations during failures, maintaining system stability and continuity under high-density operations.

Key words urban rail transit; signaling system; evolution scheme; seamless malfunction operation

上海轨道交通线路众多, 覆盖多种信号制式、多种运营模式。由于信号系统的设计寿命一般为 15~20 年, 故上海轨道交通将进入信号系统更新改造高峰期。既有线路的整体化更新改造将成为上海超大规模城市轨道交通运营网络运维中的一项周期性、常态化工作^[1]。

城市轨道交通作为城市交通的主动脉^[2], 需要以“韧性”为目标, 结合既有运维经验、城市运营需求及新技术迭代情况开展研究, 明确信号系统的演进方向和演进内容, 并以常态化信号系统更新改造为契机逐步提高信号系统工作质量, 支持“韧性安全城市”的推进与建设。对此, 本文主要从既有 CBTC (基于通信的列车控制) 系统的现状及不足出发, 探索信号系统优化设计可行性, 旨在研究出一种适应高密度运营维护需求的信号系统演进方案。

1 既有 CBTC 系统的现状及不足

既有 CBTC 系统由 ATS (列车自动监控) 子系统、ZC (区域控制器)、CI (计算机联锁) 子系统、车载信号子系统及 DCS (数据通信系统) 等组成, 能实现 CBTC 模式功能与后备模式功能。

上海轨道交通部分线路的客流高峰时段运营间隔已接近 2 min。道岔资源精细化管理等新技术已在 3、4 号线 TACS (列车自主运行系统) 试点项目和 5 号线奉贤新城站进行测试, 预计未来的运营间

隔将缩至 100 s 以内。既有 CBTC 系统在区域控制器或 DCS 发生故障时可降级至后备模式,由 CI 子系统基于计轴器、有源信标等轨旁设备的状态信息对信号机进行授权,实现列车的安全行车^[3]。然而,后备模式仅支持 5 min 的运营间隔,已无法应对超大规模网络高密度运营。为此,5、14、15、18 号线等线路已取消后备模式。

此外,高峰时段对信号系统的可靠性要求极高,任何运营故障都可能影响大量乘客出行。例如,早高峰时段的运营间隔为 2 min,一旦出现 5 min 以上的延误,就会影响上万人次的乘客出行,若故障发生在换乘站附近,还会影响邻线的正常运营。

由于上海轨道交通早期线路建设时的运营密度不高,信号系统设计对于运维场景和运能需求预估不足,存在信号系统架构冗余不充分的隐患。一旦发生单点故障,就会对运营造成影响。其中,1、3、4 号线的轨道电路无冗余设计,6、7、8、9、11 号线的车载关键板卡无冗余设置。随着运营年限的增加、线路运能密度的提高,这些问题已成为影响上海轨道交通运营服务质量的最主要因素。

2 信号系统的演进方案

结合运营需求、运维经验和新技术迭代情况,新建线路或更新改造项目的新一代信号系统应通过系统级架构简化,子系统及部件冗余优化,使列车在子系统及部件单点发生故障后的运行,由上-下后备降级运行模式向左-右互备冗余模式转变,确保故障列车运能不降,使乘客无感。

2.1 轨旁信号子系统的优化设计

在既有信号系统中,CBTC 模式功能以 ZC 为核心,后备功能以 CI 子系统+计轴器为核心。轨旁设备层级多,子系统接口复杂,导致设备数量多、故障点多,不利于维护。优化后信号系统以取消后备模式运营需求与道岔资源精细化的新技术为基础,以精简系统架构、提高可靠性与冗余度、减少与钢轨耦合为原则,开展轨旁-列车控制一体化设计。信号系统轨旁子系统的架构优化方案如图 1 所示。

2.1.1 合并 ZC 与 CI 子系统

传统 CI 子系统基于一定的安全逻辑对位于其负责区域内的信号机、道岔和进路进行控制、监测,并将这些信息发送给 ATS 系统及 ZC,以实现整个信号系统的安全运行。

优化后信号系统使 ZC 合并了传统 CI 子系统

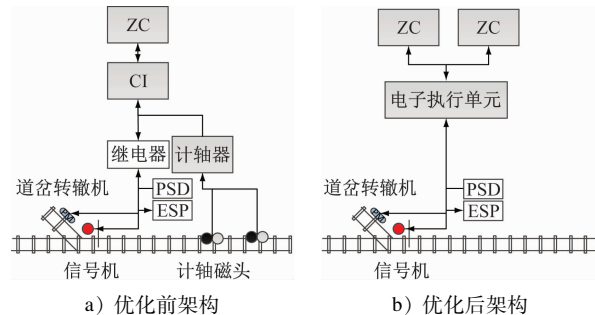


图 1 信号系统轨旁子系统的架构优化方案

Fig. 1 Architecture optimization scheme for signaling system trackside subsystems

的功能,由 ZC 统一管理站台门及转辙机等设备的接口,以减少信号系统的架构层级。

ZC 采用 2×2003 架构,采用主备冗余。当主用 ZC 工作时,备用 ZC 处于热备状态;当主用 ZC 发生故障时,备用 ZC 可在短时间内完成接管,不影响列车正常运行。

2.1.2 采用电子执行单元代替继电器

既有信号系统通过继电器组合来实现 CI 子系统对屏蔽门、转辙机等设备的控制输出和状态采集。但继电器组合体积大、数量多、配线复杂、焊接节点多,没有冗余,只能离线维修,存在人为封连接点及线路混线等安全隐患。电子执行单元利用现代电子信息、电力电子开关、嵌入式计算机、自动控制、冗余及容错等多项技术,将新型电力电子器件作为开关元件,替代安全型继电器,可以实现信号系统的全电子化、模块化、智能化、数字化和网络化。采用电子执行单元不仅能大幅节省安装空间,能实现信号系统与外部接口的冗余,能杜绝人为封连继电器接点导致联锁关系失效的重大安全问题,还能实现设备状态预警功能,实现联锁逻辑的全电子控制。

2.1.3 取消计轴设备

传统信号系统中计轴设备负责检测列车占用、出清等状态,并与 CI 子系统共同实现降级后备模式与次级检测功能。计轴磁头安装于钢轨上,易受振动、磁场等外部环境干扰,故障率高。优化后的信号系统不考虑后备模式功能,故可取消计轴设备,采用其他不依赖钢轨的系统或设备来实现次级检测功能。

2.2 ATS 子系统的优化设计

既有信号系统的 ATS 子系统采用 2 台服务器

组成主-备服务器组,并通过串口完成主备机的心跳信息交互。主备机均放置于同一位置。随着服务类功能的增加,ATS 子系统承载的业务内容增多。一旦主机发生故障,切换备机时同步更新信息需要时延较长,可能会影响正线行车,甚至导致全自动运行线路的列车自动扣车。

优化后,ATS 子系统采用高冗余架构。如图 2 所示,ATS 子系统采用由 3 台服务器组成的热备冗余服务器组,按易于维护的原则布置在不同位置。3 台服务器之间通过 DCS 网络进行心跳信息交互。当主用的 ATS 服务器 1 发生故障时,备用的 ATS 服务器 2 与 ATS 服务器 3 可根据预设的优先级进行接管;同时 ATS 子系统须对切换机制进行优化,控制切换过程中必要业务信息同步成功的时延,以确保主-备机切换不影响线路运营。

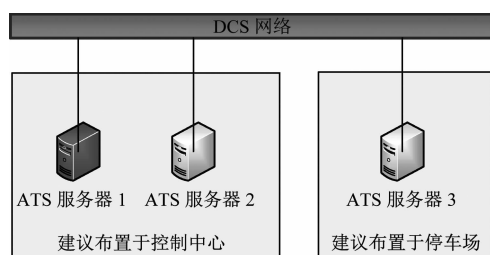


图 2 高冗余 ATS 系统架构示意图

Fig. 2 Diagram of high-redundancy ATS system architecture

2.3 DCS 的优化设计

DCS 为信号系统内部各子系统的信息传输通

道。既有信号系统线路 DCS 有线侧网络采用多业务共用骨干网的方案。如:6、7、8、9、11 号线有线侧的 ATP(列车自动防护)子系统、ATS 子系统及车-地通信子系统共用一张骨干网;12、13、16 号线有线侧的 ATS 深灰网、ATP 红网 + 车-地通信 A 网、ATS 浅灰、ATP 蓝网 + 车-地通信 B 网共 4 张骨干网(ATP 网与车-地通信网逻辑隔离)。在共用骨干网方案中,关键设备的单点故障影响范围大。

既有 DCS 的无线通信网络多采用以 2.4 GHz 为主频率的 Wi-Fi 技术,制式单一,一旦硬件设备发生故障或者受到外部干扰都会对运营造成严重影响。

优化后,DCS 高冗余架构示意图如图 3 所示。DCS 有线通信网络采用 8 张独立的骨干网子网作为通信通道,实现了信号核心业务间的物理隔离,提升了无线通信的可靠性。DCS 系统无线通信网络采用 LTE(长期演进) + Wi-Fi 双制式方案,从多个维度提高了车地无线通信系统的冗余度,确保单点故障、单制式故障及外部单频段干扰都不会影响整个信号系统车-地通信网络的正常运行。车-地通信网络同 ATP 骨干网(ATP-A 子网及 ATP-B 子网)通过 2 个热备的三层交换机连接,以提高冗余度。即使单个关键交换机发生故障也不会影响车-地通信网络与 ATP 骨干网的数据交互功能。基于易于维护的原则,无线通信网络与有线通信网络的

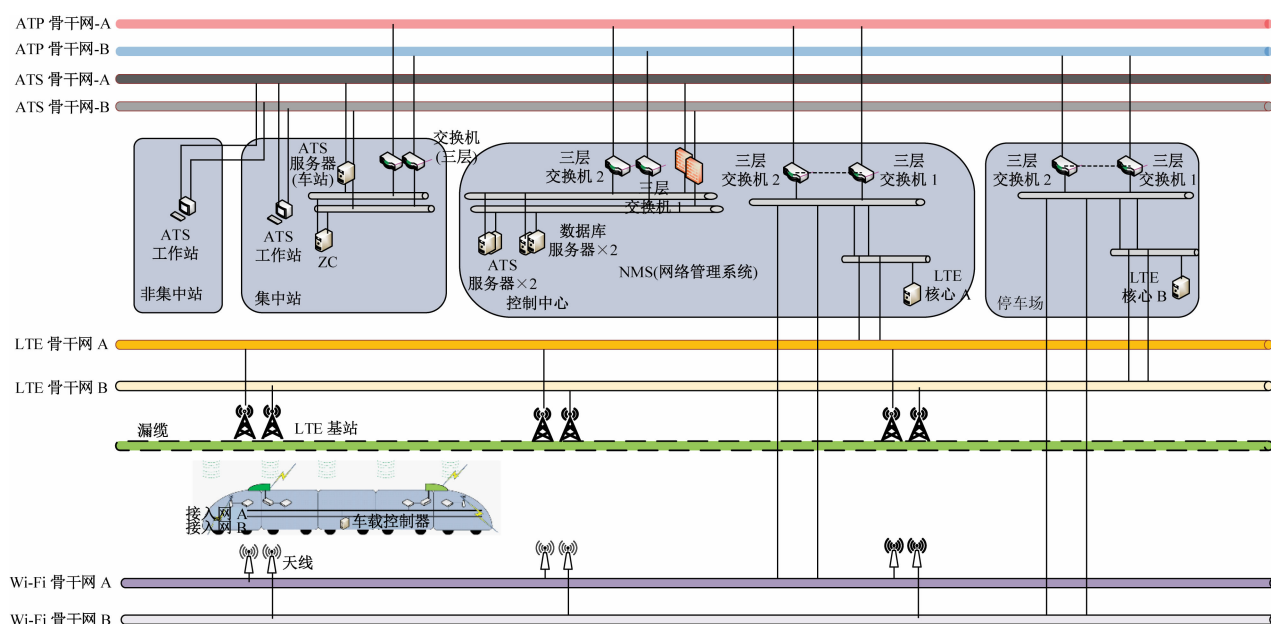


图 3 DCS 的高冗余架构示意图

Fig. 3 Diagram of DCS high-redundancy architecture

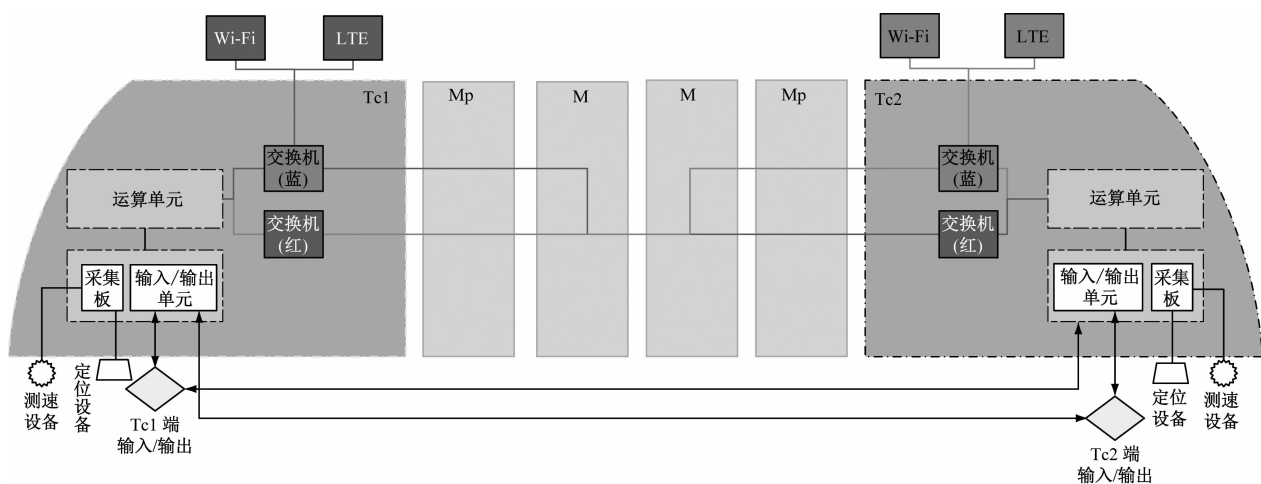
核心接口设备(如主核心交换机、LTE 的 EPC(演进型分组核心)设备)采用异地部署的原则,实现异构冗余。

2.4 车载信号子系统的优化设计

受电磁及振动等环境影响,车载信号子系统的整体故障率最高。由于既有信号系统的硬件架构未实现完全冗余,故单点故障的发生会严重影响运营。6、7、8、9、11 号线车载信号子系统均采用单端架构,除 CPU(中央处理器)采用 2oo3 的主备架构外,其他关键板卡或部件都无冗余设计。一旦输入板、外围设备接口板、定位设备、测速设备等发生单点故障,列车就会紧急制动,极易造成清客或列车晚

点等运营事件。既有车-地通信采用 Wi-Fi 单制式通信,无法应对高架区段复杂的电磁环境及设备老化问题,更无法保证整体运营质量。

优化后,信号系统车载信号子系统硬件采用头尾冗余的整体架构。高冗余车载信号子系统架构如图 4 所示。任一板卡或部件发生故障都能实现主备无缝切换,不影响运营。车-地通信网络匹配 DCS 整体设计采用双制式方案,在单点故障及单制式故障情况下都对运营无影响;车辆的信号子系统输入/输出接口亦支持头尾冗余,即在车辆每端的车载信号设备都能控制或监督列车任一端的车辆信号接口。



注:Tc1、Tc2 为拖车;Mp 为带受电弓的动车;M 为动车。

图 4 高冗余车载信号子系统架构示意图

Fig. 4 Diagram of high-redundancy on-board signaling sub-system architecture

3 结语

信号系统作为城市轨道交通的“大脑”,全面负责行车的安全与效率。本文以高密度运营需求为基础,以故障运营无感为目标,优化信号系统各子系统设计,可全面提高信号系统的可靠性与可用性,形成与上海轨道交通超大规模网络运营相匹配的信号系统演进方案,支撑后续新线建设与既有线更新改造中信号系统的高质量发展。

参考文献

- [1] 施聪. 上海城市轨道交通下一代信号系统发展趋势研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(11): 14.
SHI Cong. Research on Shanghai urban rail transit next generation signaling system development tendency[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(11): 14.

- [2] 苗沁, 周天星. 城市轨道交通折返站折返能力分析[J]. 城市轨道交通研究, 2010, 13(11): 57.
MIAO Qin, ZHOU Tianxing. Analysis of turning-back capacity at urban rail transit station[J]. Urban Mass Transit, 2010, 13(11): 57.
- [3] 陈欣. 城市轨道交通列车自主运行系统后备模式研究[J]. 铁道通信信号, 2024, 60(3): 7.
CHEN Xin. Research on fallback mode of train autonomous control system of urban rail transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2024, 60(3): 7.

· 收稿日期:2024-04-24 修回日期:2024-05-29 出版日期:2024-11-10
Received:2024-04-24 Revised:2024-05-29 Published:2024-11-10
· 通信作者:王历琦,高级工程师,927682958@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license