

城市轨道交通联锁系统发展趋势分析

娄 琦

(上海申通地铁集团有限公司, 201103, 上海//高级工程师)

摘 要 城市轨道交通信号的联锁系统是保障列车运行安全的核心设备,根据安全防护条件和时序实现进路、信号和道岔之间联锁控制,满足列车安全运行的需求。分析了在大客流、高密度及超大网络的形势下,联锁系统作为信号系统安全最后一道防线所面临的发展需求。基于安全防护机理,结合当前信号系统故障-安全-持续运行的发展方向,从联锁系统的安全-效率平衡、全自动化运行适配及互联互通等方面分析了联锁系统的未来发展趋势。从联锁系统的安全理念、功能、形式和控制方式等方面阐述其演变要求,即:从“小联锁”向“大联锁”转变,从“硬联锁”向“软联锁”转变。

关键词 城市轨道交通;联锁系统;发展趋势

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.11.005

Analysis of the Interlocking System Development Tendency in Urban Rail Transit

LOU Qi

Abstract Urban rail transit signal interlocking system is the core equipment ensuring train safe operation by realizing interlocking control among routes, signals and switches according to safety protection conditions and sequences, fulfilling requirements of train safe operation. Under the situation of massive passenger flow, high operation density and super-large-scale network, the development requirement faced by interlocking system as the last defense of signaling system safety is analyzed. On the basis of safe protection mechanism, considering the development direction of current signaling system of fault-safety-operation, the future development trend of interlocking system is analyzed from perspectives including safety-efficiency balance, automatic operation adaption and interoperability. The development requirements are illustrated from the perspective of safety concept, functionality, format and control method, also as Narrow-sense Interlocking to Broad-sense Interlocking, from Hardware-based Interlocking to Software-based Interlocking.

Key words urban rail transit; interlocking system; development tendency

Author's address Shanghai Shentong Metro Group Co.,

Ltd., 201103, Shanghai, China

0 引言

CBTC(基于通信的列车控制)系统的信号制式(以下简称“CBTC 信号系统”)成为几乎所有国内在建城市轨道交通线路首选的信号制式。传统的联锁模式(以下简称“小联锁”)是以进路为中心,实现站内道岔、信号机、轨道电路之间的联锁控制,以满足行车安全的信号控制功能。在 CBTC 信号系统中,小联锁的地位不但不应该被削弱和忽视,而且应该发展成担负更重安全责任的“大联锁”,即:在小联锁的基础上纳入车辆系统状态、火灾监控系统状态、电力和机电系统状态、综合监控状态、乘客信息系统状态等与整体运营安全息息相关的控制系统状态信息,以进一步扩展其安全理念、扩充安全防护功能、优化和转变工作模式和控制模式。因而,小联锁向大联锁的演变过程是联锁系统的“优化”和“转型”,其权责得以扩展与延伸。此外,传统的联锁系统(以下称为“硬联锁”)的选型、软硬件配置和安全处理逻辑等在与外部接口、外部设备的连接方式上存在紧密的耦合关系,在运营组织和运营要求持续提高、信号硬件设备不断更新换代的大背景下,联锁系统应能够满足各种运营场景和运行环境的变化,与硬件“解耦”,转型为“软联锁”,应在不降低安全性的前提下,保持甚至提升联锁系统的可用性、可靠性和可维护性。

随着我国城市轨道交通的飞速发展,目前一线、二线城市的城市轨道交通网络已基本建成,并初步形成了网络化运营的格局。网络化运营管理对 CBTC 信号系统提出了安全、高效、全自动化、低运营维护成本等要求。而目前应用广泛的 CBTC 信号系统是基于传统固定闭塞为控制机理的计算机联锁构建而成的,由于其以始/终端信号机联锁进路为基础,列车移动授权依赖于联锁进路,控制

局限、可用性低和灵活度不高等问题越来越突显,而可被运行调配的轨旁和车载信号资源却没能得到最大化利用。基于此矛盾,联锁系统的优化和改进势在必行。同时兼顾安全和效率、适应全自动化运营模式、具备互联互通能力的联锁系统将成为未来城市轨道交通信号系统的研究方向。

1 优化联锁系统的背景分析

1.1 国内外城市轨道交通信号联锁系统的发展情况

如图 1 所示,我国的城市轨道交通信号联锁系统的演进与行车模式、闭塞模式的提升息息相关,经历了机械式联锁、电气集中式联锁、微机联锁和全电子联锁 4 个阶段。联锁系统的更新换代与闭塞模式的演进是同步推进的,这反映了信号系统的控制模式、行车模式和运营需求的创新与发展过程。

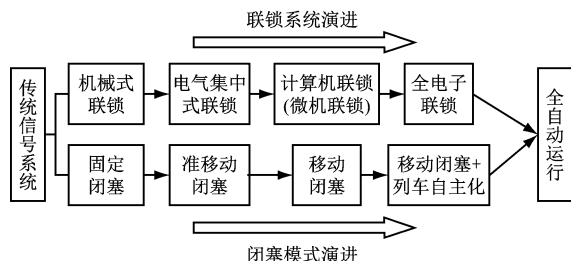


图 1 我国城市轨道交通信号联锁系统与闭塞模式的发展过程

Fig. 1 Development process of signal interlocking system and block mode of urban rail transit in China

在国外,欧洲地区(如法国、德国)和日本的铁路联锁技术一直处于领先地位。与我国城市轨道交通的联锁系统相比,国外城市轨道交通的联锁系统主要有两个特点:一是车站和区间的一体化联锁控制。西门子的 SimisW 系统、泰雷兹的 LockTrac 系统、阿尔斯通的 SMARTLOCK 系统、日立的 SaintLC 系统等均采用了车站和区间一体化联锁系统;二是全电子化。在 20 世纪 80 年代计算机联锁技术发展之初,欧洲就采用了以安全电子执行单元代替继电器逻辑“采集/驱动”电路,通过安全型室内目标控制模块或轨旁目标控制器,与道岔、信号等目标设备进行输入/输出的信息传输^[1]。

1.2 联锁系统发展的驱动力及需求

从系统研发和工程应用角度看,我国城市轨道交通在客流量、站间距、信号系统制式选择、信号类型设计等方面面临着较大的压力,乘客、城市轨道交通的运营单位、政府管理部门都对信号系统的高

效和灵活运行提出了更高的要求,对故障的“容忍”程度很低,“低故障-高安全-持续运行”成为信号系统的设计需求之一^[2]。此外,城市轨道交通运营主体对信号系统的更新升级、改造、过渡和兼容,以及现场测试验证、初期运营和调试等方面在时间上也提出了更高的要求。

上述的运营需求具体落实到联锁系统上,主要为以下几个方面:① 解决固定闭塞列车防护对于运营效能的制约,特别体现在折返能力和高密度列车追踪能力上;② 城市轨道交通系统运行的资源调配中心是列车,而非进路,因此联锁系统必须与列车联动;③ 采用精简的轨旁控制设备,减少维护和运营成本,特别体现在继电设备的精简和优化上。

具体分析如下:

1) 固定闭塞列车防护对运营效能的制约问题。以折返能力为例予以分析。如图 2 所示,前车从折返站台折出并出清交叉渡线所在区段(圆圈所示)后,道岔才可转至反位,然后方可办理后车进入折返站台的进路。据统计,折返间隔通常大于 100 s。目前大部分的 CBTC 信号系统基本上都是以信号机到信号机的联锁进路为中心进行控制,列车移动所依赖的移动授权需要基于联锁进路。联锁进路通过物理区段或逻辑区段是否出清占用状态来判断车辆的位置,而移动授权仍建立在联锁进路基础上,从而导致了在折返能力上受到制约。区间内列车高密度追踪能力的制约原因类同。

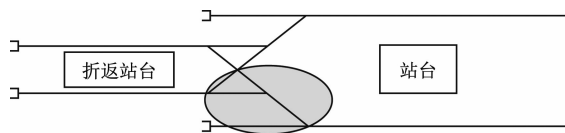


图 2 联锁进路的道岔区域站后 4 线折返示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 4-line turn back after station in turnout area of interlocking route

2) 以列车作为 CBTC 信号系统运行的资源调配中心。大部分既有线路的信号系统从固定闭塞演化升级而来,其控制机理是“以进路为中心”,根据进路的要求调配线路、道岔、信号机、站台门等轨道“资源”。而在实际的运营中,所有资源的最终用户是列车,进路应服务于行车^[3]。若进路未能关联到列车,则可能存在安全风险(如多车-多进路一次性办理的场景)。列车作为运行资源的调配者,应满足以下要求:① 列车作为资源的使用主体,进路等资源分配/关联到车,做到一车一进路;② 以地面 ATP(列车自动防护)为核心进行资源管理,确保申

请者与使用者在主体上保持一致性;③ 追踪/折返间隔最小化,计轴区段和信号机不作为移动授权追踪的分割点。

3) 采用精简的轨旁控制设备,以减少维护和运营成本。联锁系统一般采用人机会话层—联锁逻辑层—执行层—室外设备层的架构,目前国内主流的联锁设备使用继电器设备和继电器接口作为执行层和室外设备层的主要构成。在实际应用中,触点式的信号驱动和采集方式在可靠性和可用性上差强人意,且安装、维护、升级改造等运营和维护成本在轨旁建设成本中的占比较大。

2 联锁系统的转型与优化

综上所述,不断变化的需求对联锁系统提出了更高的要求,而联锁的发展可以用“转型”和“优化”概括,主要集中在联锁逻辑层、执行层和室外设备层。表 1 为 CBTC 与车车通信 2 种方式在信息流及接口上的对比情况,可以看出联锁系统的发展趋势主要体现在安全理念转变、功能转变、形式的转变和优化、控制方式的转变和优化等方面。

表 1 传统 CBTC 与车车通信在信息流及接口上的对比分析
Tab.1 Comparative analysis of information flow and interface between CBTC and vehicle communication

关注点	变更层次	传统 CBTC 联锁方式	车车通信联锁方式
安全理念	联锁逻辑层	进路-道岔-信号机安全	“人-机-车辆-环境”安全防护
功能	联锁逻辑层、执行层	小联锁	大联锁
形式	人机会话层、联锁逻辑层	硬联锁	软联锁
控制方式	执行层、室外设备层	继电器联锁	电子联锁

安全理念变化、功能变化、形式变化和控制方式变化之间也存在着逻辑因果和相互影响,如图 3 所示。安全理念的变化催生联锁功能的变化,同时联锁功能的扩充与优化完善了安全理念体系;联锁功能的变化催生了联锁表现形式和控制方式的变化,反过来联锁的形式和控制方式的变化也可进一步优化联锁功能。

2.1 联锁系统的安全理念

城市轨道交通的安全是人-机-环境-管理的整体安全,它虽穿插在运行、运营和信息等不同范畴之中,但最终必将统一到整个系统的安全上来。所以,将运行安全、运营安全 and 信息安全最终统一到

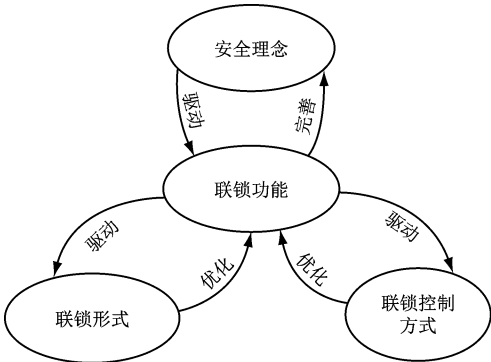


图 3 联锁系统中安全理念、功能、形式和控制方式变化的关系

Fig. 3 Relationship between safety concept, function and control mode in interlocking system as they change

系统整体安全的终极目标上,实现土建、信号、运营管理、车辆、供电等各个专业的联合联动,是降低城市轨道交通整体安全风险、给出优化安全输出的理想途径。从实际运营、科学报告特别是事故分析报告中发现存在安全风险转嫁的现象,即参与系统运营安全的某个专业领域在处理安全风险时可能会直接或间接地将安全风险责任输出给其他安全相关的学科/专业。例如,信号系统的紧急制动、关闭丢失通信的轨道区域符合故障-安全原则,由此会带来排除故障操作繁琐、故障恢复时间较长等问题。为了减少故障对运营造成的影响,在特定时段、特殊区域,运行管理人员和维护人员可能采取切除信号系统运行的方式以维持运营(如表 2 示例)。在这种情况下,系统的整体安全系数可能大大降低,甚至降至 SIL4(安全完整性等级 4)及以下^[4]。

具体至联锁系统,不难看出其安全职责和防护范围已经不局限在既有的信号设备,联锁系统不仅要进路、信号机、道岔负责,而且应该担负着将运行安全、运营安全 and 信息安全最终统一在系统整体安全的目标上,成为承担更多防护义务的大联锁。

2.2 联锁系统的功能

从当前采用小联锁到未来的大联锁,联锁功能的转变由安全理念的转变触发:城市轨道交通的两大趋势是全自动化和资源共享,本文以全自动运行为例进行分析。下一代城市轨道交通车辆的核心安全控制设备是列车控制系统^[5]。该系统可将列车驾驶员执行的工作实现全自动化、智能化和高度集中控制,全自动运行系统的主要特点之一就是将信号与车辆、综合监控、调度指挥、行车计划、电力监控系统、火灾报警系统、机电系统、乘客信息系

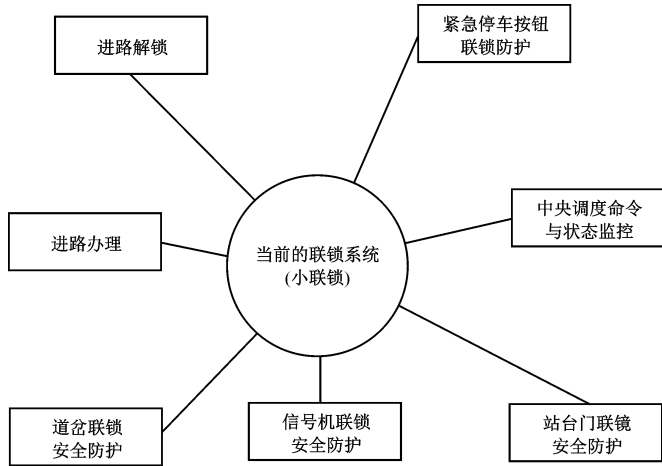
表 2 责任转移导致整体系统安全风险示例

Tab.2 Example of responsibility transfer leading to overall system security risk

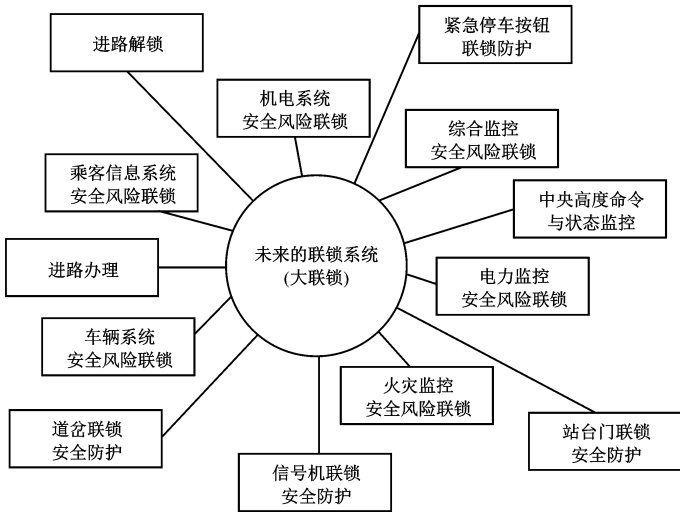
示例	安全风险场景	采取的安全措施	实际操作措施
运行安全风险转为运营安全风险	在车辆段出发咽喉区发生车地通信中断,信号系统在此区域失去对列车的追踪	紧急制动停车;在失去通信的区域封闭轨道,防止其他进路或列车穿越该区域	在实际操作中,由于重复开放信号等操作会消耗大量时间,在早晚高峰发车出库时段行车调度为确保列车的正常发车,可能采取完全人工操作来取代 ATP,以尽快恢复故障。采取措施包括:司机采取切除车载 ATP 方式动车;电话闭塞,红灯冒进动车;手摇道岔等

统、广播系统、闭路电视等多系统予以协同,并统一接口,以减少信息流通环节,最终体现在列车的运行上。因此,无论是采用固定闭塞模式还是移动闭

塞模式,应有更多的设备状态纳入安全防护的范畴,如图 4 所示。



a) 小联锁的功能



b) 大联锁的功能

图 4 小联锁和大联锁功能的对比示意图

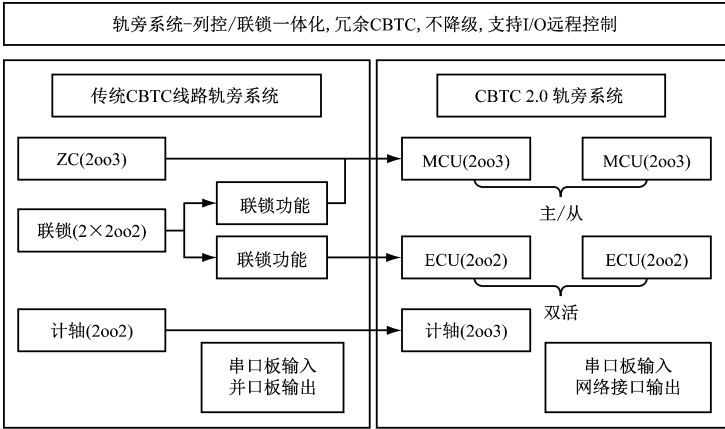
Fig. 4 Comparison between small interlocking and large interlocking functions

2.3 联锁系统的形式

联锁系统形式变化体现的是联锁功能的分布。随着城市轨道交通系统架构的演进,如联锁与移动授权一体化系统以及车车通信等架构的产生,联锁可能不再以轨旁独立、软硬件集成子系统的形式存

在,其功能分布形式将变得更加灵活和有效。其中一种可行的方式是联锁功能和操控采用软件形式,以集中式/分布式的方式部署于中央、轨旁、车载子系统中。换言之,联锁从形式上从硬联锁演变成软联锁。如图 5 所示,上海轨道交通 5 号线双套 CB-

TC 信号系统 (TSTCBTC® 2.0) 的联锁以软件功能模块方式嵌入到轨旁区域控制器中,实现了移动闭塞和固定闭塞的软硬件融合,联锁功能更加完善,可靠性和可用性也得到了进一步提升。



注:ZC——区域控制器;MCU——主运算单元;I/O——输入/输出;ECU——轨旁元素控制单元;2oo3——3取2(2 out of 3); 2oo2——2取2(2 out of 2)。

图 5 上海轨道交通 5 号线从硬联锁向软联锁演变

Fig. 5 Evolution of Shanghai Rail Transit Line 5 from hard interlocking to soft interlocking

图 5 中,2003 架构包含 3 个并列的通道,输出信号设定了 1 个多数表决机制,即少数服从多数原则。当其中 2 个通道输出信号都是 0,而第 3 个通道输出信号从 0 变为 1 时,此时最终的输出信号还是 0。多数表决机制的应用,可以防止误动作的发生。因此,在不影响安全功能执行的前提下,它能容许 1 个通道发生失效。只有当 2 个或 3 个通道都发生危险失效时,才会导致安全功能的失效。

2.4 联锁系统的控制方式

联锁系统功能、形式上的变化也为其控制方式的进一步优化提供了可能,控制方式的优化主要体现在联锁的执行层和室外设备层。全电子执行单元代替了传统的继电器,主要设备采用模块化结构,便于维修和应急处置;部分硬件支持热插拔方式,并具有过载和负载短路自动保护的功能,避免熔丝导致的短路现象;新增了多种功能,不仅能够实时监测电路,通过第三通道向监控机发送维护信息,还能在维护终端上实时地更新系统状态。

3 结语

全自动化、智能处理、高效、高度集中控制是城市轨道交通的发展趋势,因此对安全控制中的设备、人员、运行环境间更加紧密有机地结合提出了更高的要求。在安全理念完善的引领下,作为信号系统中的安全防护底线和基石的联锁系统,也面临着功能、运行形式和控制方法等方面的变革与创新。同时,在信号系统技术革新的同时,也必须意

识到面临的挑战和风险,特别是系统变更后的鲁棒性、稳定性和故障恢复等方面,需要进一步的研究并予以完善。

参考文献

[1] 郭玉华. 国外联锁系统的创新和发展 [J]. 铁道通信信号, 2020(3):101.

GUO Yuhua. Innovation and development of foreign interlocking system[J]. Railway Signalling & Communication, 2020(3):101.

[2] 孙来平, 洪海珠, 施聪, 等. 城市轨道交通运行安全、运营安全与信息安全的矛盾与统一 [J]. 城市轨道交通研究, 2019(6):15.

SUN Laiping, HONG Haizhu, SHI Cong, et al. Contradiction and unity between railway operation safety, service safety and information safety[J]. Urban Mass Transit, 2019(6):15.

[3] 杜恒, 孙军国, 张强, 等. 基于地面无联锁及区域控制器的新一代 CBTC 系统方案 [J]. 都市快轨交通, 2017(4):91.

DU Heng, SUN Junguo, ZHANG Qiang, et al. A new generation of CBTC system without CI and ZC[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017(4):91.

[4] 凌祝军. CBTC 系统中的联锁技术研究 [J]. 铁道通信信号, 2016(9):12.

LING Zhujun. Research on interlocking technology in CBTC system [J]. Railway Signalling & Communication, 2016(9):12.

[5] 李中浩. 浅析城市轨道交通信号系统的发展趋势 [J]. 城市轨道交通研究, 2016(增刊1):1.

LI Zhonghao. A brief analysis of the development trend of urban rail transit signaling system [J]. Urban Mass Transit, 2016(S1):1.

(收稿日期:2021-04-27)