

城市轨道交通信号系统更新改造需求分析

戴翌清

(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 随着城市轨道交通线路运营年限的增加,信号系统的更新改造逐渐规模化。结合国家相关规划要求,从城市轨道交通设施设备运行维护管理要求、信号系统功能与运营需求的匹配性、信号系统的先进性、工程的可实施性等 4 个角度,分析了城市轨道交通信号系统更新改造的需求,主要包括提高列车旅行速度、缩短列车最小追踪间隔、列车自动灵活编组、支持如大站快车、双向不均衡发车、运行交路调整等灵活的运营调整措施等。提出了拟采用的信号系统技术先进性评估的 5 个维度,分析了选择更新改造方案时需要重点考虑的因素及问题,可为信号系统更新改造方案的可行性研究和评价提供参考。

关键词 城市轨道交通; 信号系统; 更新改造; 需求分析; 技术先进性评估

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.11.004

Demand Analysis of Urban Rail Transit Signal System Renovation

DAI Yiqing

Abstract With the increase of urban rail transit service life, the renovation of signal system is gradually scaled up. Combined with the requirements of relevant national plans, the renovation of urban rail transit signal system is analyzed from four perspectives: the operation and maintenance management of rail transit facilities and equipment, the matching between signal system functions and operation requirements, the progressiveness of signal system, and the feasibility of the project. The signal system innovation mainly includes the increase of train travel speed, the reduction of train headway, the automatic and flexible coupling of trains, and the support for flexible operational adjustment measures, such as operation of large station express, bi-direction unbalanced departure, operation routing adjustment, etc. Then, five dimensions of the proposed assessment of the signal system technological advancement are put forward, factors and problems should be mainly considered in the selection of the innovation are analyzed, all of which can provide reference for the feasibility study and evaluation of the signal system renovation.

Key words urban rail transit; signal system; renovation; demand analysis; technology progressiveness assessment

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

北京、上海、广州等地城市轨道交通早期建设的线路中,其配套的信号设备已经逐步进入服役后期。这些线路大多是线网的骨干线路,其运力已经难以满足超大线网下的客流运输需求,线路的安全管理形势也随着客流的持续增加越来越严峻。其中,信号系统因制式陈旧、设备老化等原因引起的运营问题逐年递增,因此,对这些线路的信号系统进行更新改造迫在眉睫。

2022 年 4 月 8 日,国家交通运输部和科技部联合印发了《“十四五”交通领域科技创新规划》,该规划文件从基础设施、交通装备、运输服务 3 个要素维度和智慧、安全、绿色 3 个价值维度,布局了 6 个领域 18 个重点研发方向。其中,综合交通运输系统韧性和承载力提升的理论方法与技术研究为城市轨道交通在运营的灵活性和运能提升指明了方向。该规划作为城市轨道交通信号系统更新改造方案的指导文件,除了建立以运营需求为导向的原则外,还推动城市轨道交通进入“提质增效、量质齐升”的新阶段。为此,本文从多个角度分析城市轨道交通信号系统更新改造的具体需求。

1 城市轨道交通设施设备运行维护管理的要求

交运规[2019]8 号《交通运输部关于印发〈城市轨道交通设施设备运行维护管理办法〉的通知》第十二条规定:“信号系统整体使用寿命一般不超过 20 年。”该通知的第十九条规定:“对于车辆、供电、信号等涉及行车安全的关键设备,到达使用年限的应及时更新。未经充分技术评估论证,不能确

保运行安全的,不得延期使用。未达使用年限,但符合下列条件之一的设施设备,可提前更新:①故障率较高,严重影响运营安全和客运服务的;②存在重大安全隐患,经维修后仍无法消除的;③原设计功能、性能与当前运营要求严重不符的;④产品或设备供应商已退出市场,无法保障备品备件供应或服务质量的;⑤法律法规或强制性标准规定淘汰或功能需要提升的;⑥遭受事故或自然灾害破坏,不具备维修价值的。”

JT/T 1218.3—2018《城市轨道交通设备设施维护与更新技术规范 第3部分:信号》规定了城市轨道交通信号系统维修与更新的基本要求,明确了信号设备维修制度、维修修程等维修管理及更新改造的要求。

本文的研究对象是北京、上海等城市轨道交通线网中投入运营年限已超过10年、即将到达15年大修限期的城市轨道交通线路。这些线路信号系统的部分设备(如服务器、工作站、交换机、车载测速装置等)若按照安装时间核算,其寿命已远超JT/T 1218.3—2018附录C中表C.1《信号设备大修内容、要求及周期表》规定的更换期限(10年),因此,这些关键设备超龄服役所产生的运营安全风险逐年递增。此外,城市轨道交通部分产品或设备停产,也是触发技术改造、设备更新的主要原因之一。城市轨道交通上游产业链企业的发展水平不一,信号技术换代、产品升级、经营策略调整都可能导致信号设备停产,进而促使城市轨道交通运营单位努力寻求可替代的技术或产品,以维持线路的运营服务水平。

城市轨道交通信号系统更新改造的目的是为了满足未来长期运营服务水平需要,对信号系统进行整体或局部的更新,从而恢复并提高信号设备的可靠度,完善信号系统的使用功能,确保设备运行状态稳定,延长设备的使用寿命,满足线路运营服务水平和相应标准的要求。对于临近寿命周期的既有信号系统,在提高线路运行安全性、可靠性、经济性的同时,还应满足《“十四五”交通领域科技创新规划》中智慧、安全、绿色3个维度评价体系的要求。

2 信号系统功能与运营需求的匹配性

2.1 信号系统更新改造的实施方式

城市轨道交通线路在建设过程中,为配合城市

发展及规划、提升运营服务水平,部分线路会扩建延伸线。按照建设时序,最早建设的线路区段又称为一期工程,在此基础上扩建的延伸线区段按建成时间分别命名为二期工程、三期工程等。

目前国内进入改造期的城市轨道交通线路都是城市公共交通的命脉,因此需要基于不停运的原则实施更新改造,以确保城市的正常运转。城市轨道交通线路的改扩建及信号系统的更新改造是相伴相生、相辅相成的,其改造通常有以下两种情况。

2.1.1 在扩建延伸线时进行一期工程的更新改造

对于延伸线建设时机与一期工程信号系统改造工程时机重合的线路,既需要确保一期工程在更新改造期间的运营服务水平不能下降,又需要在最终全线开通后确保信号系统的功能满足线路运能及相关标准的要求。

2.1.2 同一线路信号系统各标段寿命周期不同设备的更新改造

拟更新改造的线路,因不同标段设备的寿命周期不同,因此在制定信号改造方案时,需要满足不同寿命周期设备的更新改造要求。与一期工程相比,延伸线的信号系统设备较新,在制定改造方案时必须考虑延伸线设备是随同主线设备报废,还是充分利用延伸线设备以节约资源和成本,并作出方案选择。例如,上海轨道交通2号线一期工程于2000年6月开通运营,其设备已达到寿命期限,但该线的3个延伸段(西延伸段、西西延伸段及东延伸段)的开通时间分别为2006年、2010年及2014年,这3个延伸段的线路长度占2号线全长的70%以上;重庆轨道交通2号线一期工程信号设备已经接近寿命期限,但该线的延伸线开通于2015年,延伸线上的设备远未达到寿命期限。因此,信号更新改造方案既要确保延伸线设备的利用率,又要满足一期工程更新改造的要求。

2.2 信号系统更新改造后需满足的运营需求

2.2.1 正常运营下的运营需求

1) 提高列车旅行速度。信号系统更新改造后,采用FAO(全自动运行)技术来提高运行交路的折返能力,优化列车停站时间。与没有采用FAO的线路相比,FAO线路上乘客在站台乘降时列车的安全监护不再由人工确认,而转为采用站台门间隙检测等手段予以保障,这将大大缩短列车关门后至发车前的时间(这部分时间属无效停站时间),如上海轨道交通10号线列车关门后至发车的时间一般为5s

左右,最长不超过 10 s。由此,与上海轨道交通网络中其他非 FAO 线路相比,10 号线列车的旅行速度可提高约 8.8%。此外,在相同的发车间隔情况下,与非 FAO 线路相比,FAO 线路的上线列车数较少,列车周转时间较短。

2) 缩短列车最小追踪间隔。列车追踪间隔是反映城市轨道交通线路运能和服务质量的关键指标。早期开通线路的列车最小追踪间隔往往受信号系统所约束。通过对信号系统进行更新改造,在线路运行交路的折返点采用列车自动折返模式,可优化人员操作,节省设备响应时间,减少列车折返时间,进而缩短列车追踪间隔,提升线路运力。

2.2.2 故障场景下提高系统可用性

5 min 及以上延误率作为运营可靠度指标,是衡量和评价国内城市轨道交通线路/线网行车服务水平的基本指标。提高系统的可用性可采用提高系统的可靠性和降低系统的修复时间 2 种方式,而提高系统可靠性的基本方法通常为增加冗余设计。冗余方式又分为同构冗余与异构冗余两种。为提高系统的可用性,无论采用哪种冗余方式,都需要减少系统故障后的修复时间。对于在扩建延伸线时进行一期工程更新改造的线路,可根据项目特点灵活采用同构冗余或异构冗余的方式。而对于各标段寿命周期不同的改造工程,其信号系统更适合采用异构冗余方式:一方面可提高列车运行控制系统的可靠性,有效减少系统故障后的修复时间,进而确保有效缓解因设备故障对运营造成的影响;另一方面可以最大程度发挥不同线路区段的投资效益,在不影响运营的情况下,实现车载信号系统的无扰升级。

2.2.3 支持灵活的运营组织方案

考虑到不同类型城市轨道交通线路的客流强度不同,其客流在时间、空间上的变化规律也有所不同,因此,更新改造后的信号系统应支持灵活的运营组织方案。改造后的信号系统可对运输组织模式进行优化,既可优化列车资源配置,又可通过如多种交路、大站快车、双向不均衡发车等方式满足不均衡客流的运营需求,合理匹配换乘站内不同线路间列车发车间隔的差异,缓解因换乘客流抵达引起的站台客流冲击,减少乘客在站台的候车时间,减少使用车站限流措施的频次,提高整个线网的运营效率,实现社会效益和经济效益最大化。

此外,在遇到轨道故障、牵引断电、列车故障救

援等突发事件时,改造后的信号系统可通过在局部区段采用单线双向、交路调整、越站等灵活的运营调整措施,最大程度地减少运营中断的线路范围,满足列车运行安全、行车调度便捷、客运服务高效的一体化管理要求。

目前,基于传统 CBTC(基于通信的列车控制)的信号系统难以支持灵活的运营调整需求。受制于传统的联锁技术及与之匹配的运营管理应急预案,CBTC 系统恢复正常运营秩序的效率较低,运营调整的灵活性不足。而基于车车通信的城市轨道交通列车自主运行系统对线路资源进行管理,可高效利用线路资源,有效提升线路通过能力,提高列车的出段/库能力。

3 信号系统技术先进性评价

传统 TBTC(基于轨道电路的列车控制)系统为 20 世纪 90 年代的技术,目前该技术已接近或达到生命周期年限,由此导致信号设备故障率持续上升、信号系统的可用性降低。又因轨道电路的部分零部件采用国外设备,且相应的技术在国外厂家多属逐步淘汰产品,所以备件采购及维护成本均大幅增加。此外,由于 TBTC 系统制式包含固定闭塞和准移动闭塞制式,难以有效满足缩短列车追踪间隔、提高运营效率的运营要求,也无法满足城市轨道交通智能化和数字化转型的需求,该技术已不符合信号系统技术发展的趋势。

城市轨道交通行业在 21 世纪初引入的 CBTC 信号系统也接近设备使用寿命,处于损耗失效期。CBTC 系统集成的部件众多,不能确保所有设备部件均满足整个系统的寿命标准,且各部件供货商的发展水平参差不齐,部分部件也因产品升级、技术迭代等原因停产。虽然当前 CBTC 系统仍是城市轨道交通信号系统的主流制式,但其自动化程度为 GoA2(半自动化列车运行),难以满足线路进一步增加运力、提升运营管理效率的要求。

为此,在进行信号系统的更新改造方案比选时,需要对拟采用的信号系统的先进性进行评估。可以通过以下 5 个维度来评价信号系统的技术先进性:

1) 自动化程度:即向运营人员及司乘人员提供高度智能化、自动化的运营功能。如在突发超大客流或疫情等情况下,通过自动调整列车运行计划,从而快速地调整作业策略,合理、高效地部署车底

运用方案。

2) 运营服务水平:即向乘客提供快速平稳的列车运行、较低的列车拥挤度、较短的站台换乘等待时间等优质服务。由于城市轨道交通线路客流潮汐现象较为突出,迫切需要信号系统缩短列车追踪间隔,并具备灵活的列车编组功能,以提高高峰时段的运营服务水平,尽量减少非高峰时段运力过于充足带来的能耗浪费。

3) 智能化程度:即云计算、大数据、物联网、移动互联网、区块链、人工智能等新一代信息技术与城市轨道交通运营业务的融合度。信号系统应在新技术的加持下持续提升城市轨道交通在运输组织、乘客服务、设备运维、运营管理等方面的智能化水平,打破各个专业的信息孤岛,增强不同专业间的协同作业能力,提升运营指挥的决策力。

4) 可维护性:采用先进的智能化措施为设备运维提供技术支持,尽可能减少设备维护(如智能诊断、故障预测、故障修等)的时间,提高运维效率,实现资源的优化配置,建立高效、环保、资源协同的设备运维体系。

5) 安全性和可靠度:信号系统作为影响运营的关键子系统,除了需要满足相关规范和标准所定义的安全功能外,还需通过合理的冗余配置提高系统的安全性和可靠度,减少因信号设备降级运行对运营造成的影响。

4 工程的可实施性

4.1 信号系统升级改造的实施方案

国内外城市轨道交通信号系统的升级改造,通常采用 4 种方案:①沿用既有的信号系统制式,仅对相关设备进行替换,以提高设备的可靠性;②升级既有信号系统,但系统制式保持不变,仅对信号设备进行更新,以提升部分设备的功能及可靠性;③采用全新的信号系统替代既有信号系统,以提高技术水平,提升信号系统的性能及可靠性;④采用新旧系统兼容方案,以满足旧系统与新系统的平稳过渡,并通过异构冗余方式提高信号系统的可靠性。

4.2 选择信号系统升级改造方案应考虑的因素

在国内,对于已经进入信号系统大修改改造期的城市轨道交通线路,在选择和制定信号系统改造方案时,必须综合考虑线路建设的先决条件和关键因素,通过多维度的信号系统评价体系来确定最优的更新改造方案,这样才能保证在项目工程可行性研

究阶段和实施阶段安全、稳定、高效地推进信号系统的更新改造工作。

若拟更新改造的城市轨道交通线路无增购列车的需求,则轨旁子系统和车载子系统可设置新旧系统的倒接装置,用以更新改造过渡阶段运营期间和调试期间的快速切换;若拟改造线路有增购列车的需求,并且增购列车若首次上线运营仅配置了既有线旧车载信号系统,则需要考虑在更新改造过渡阶段对这些列车实施二次改造,即升级为 CBTC 系统所需的设备及进行相应的调试,避免出现增购列车直接配置了 CBTC 车载信号系统却无法在改造前上线投运的情况。

在综合考虑轨旁子系统和车载子系统的倒接风险和调试资源后,建议采用异构冗余的改造方案,构建可兼容新旧信号系统的车载子系统,以满足既有信号制式和改造后 CBTC 信号制式的要求,规避倒接过程的风险,节省夜间调试的倒接耗时,提高倒接效率。通过该方案,轨旁设备改造和列车改造可同步进行,并解除车载改造和轨旁改造工序之间的制约关系,项目的可实施性强,灵活性大,有利于控制工程进度。

5 结语

随着城市轨道交通线路运营年限的增加,其信号系统不可避免地会经历多轮的更新改造。本文基于交运规[2019]8 号的要求,从城市轨道交通设施设备运行维护管理、运营需求、系统更新改造是否符合信号系统技术发展方向、工程可实施性等 4 个角度分析了影响城市轨道交通信号系统改造方案评价的相关因素,结合《“十四五”交通领域科技创新规划》指出的智慧、安全、绿色的核心目标,分析了既有线路信号系统升级改造方案的关键因素。此外,信号系统更新改造还需要综合考虑改造前后的经济效益和社会效益、运营维护难度及运营安全性,建立与之相匹配的信号系统更新改造的评估体系和相关标准,为后续城市轨道交通的可持续发展奠定坚实的基础。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部,中华人民共和国科学技术部.“十四五”交通领域科技创新规划[EB/OL].(2022-03-10)[2022-04-15]. https://www.mot.gov.cn/zhuanti/shisiwujtys-fzgh/202204/t20220408_3650006.html.