

上海轨道交通 3、4 号线信号系统改造方案研究

陈思维

(上海地铁维护保障有限公司通号分公司,200235,上海//工程师)

摘要 自 1993 年以来,上海城市轨道交通已运营近 28 年。部分老线已无法满足高密度、高可靠性和高性能的超大规模网络化运营需要。因此,需要通过信号系统改造来解决信号制式落后、设备老化和技术支持薄弱等问题,以提高运营服务质量。以上海轨道交通 3、4 号线信号系统改造为例,从需求、工期、影响和效益等多维度考量,对信号系统改造项目的前期分析与方案比选进行了研究,最后推荐基于车地通信的列车自主控制系统作为上海轨道交通 3、4 号线信号系统的改造方案。

关键词 城市轨道交通;信号系统;大修改造

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.07.032

Research on Signaling System Transformation Scheme of Shanghai Urban Rail Transit Line 3/4

CHEN Siwei

Abstract Since 1993, Shanghai Urban Rail Transit has been in operation for nearly 28 years, and some old lines have been unable to meet the need of Shanghai's high density, high reliability and high performance super large-scale network operation. Therefore, the problems of backward signaling system, aging equipment and weak technical support need to be solved through signaling system transformation to improve the operation service quality. Taking the signaling system transformation of Shanghai Metro Line 3/4 as an example, from the perspective of multiple dimensions including demand, construction period, impact and benefit, the preliminary analysis and scheme comparison of the signaling system transformation project is studied. Finally, it is recommended to adopt CBTC train control system as the transformation scheme for Shanghai Metro Line 3/4.

Key words urban rail transit; signaling system; heavy repair transformation

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

0 引言

上海轨道交通 3、4 号线,是目前全国唯一有共线段运营的线路。其中:3 号线全长 40.3 km,29 座车站,12 座换乘站,单日客流量达 61 万人次;4 号线全长 33.6 km,26 座车站,20 座换乘站,单日客流量 95 万人次。两线共线段的换乘在上海城市轨道交通全网络运营中起着举足轻重的地位。但随着客流量的日益增长,换乘压力日趋增大,其信号系统性能已无法满足日益增长的近远期客流需求。特别是早高峰期间,3 号线长江南路站—宝山路站区间也因此时常进行车站限流。自 2004 年开通上海轨道交通 3、4 号线信号系统至今,设备已投用 17 年,出现设备老化严重、故障率较高、部分设备的元器件与芯片已经停产、采购与返厂维修时间长达 14 个月以上和维修成本高等问题。上海轨道交通 3、4 号线使用法国 ALSTOM U200 准移动闭塞信号系统,由 SACEM(固定式闭塞区间升级的列车控制系统)设备通过轨道电路加载至钢轨的载波向列车传送报文实现单向车地通信;通过逻辑计算控制列车,是固定闭塞向移动闭塞发展过程中的过渡。全球轨道交通除印度使用准移动闭塞信号系统较多外,仅中国、韩国少量使用。随着 2014 年法国将技术转让给印度,技术支持度大幅下降。在 2017 年与 2020 年同济大学第三方安全评估报告中上海轨道交通 3、4 号线均低于综合评价合格线,建议尽快大修。因此上海轨道交通 3、4 号线信号系统的更新改造是当下迫切需要研究解决的问题。

上海轨道交通 3、4 号线的信号改造首先需满足 3、4 号线近远期客流需求。根据客流分析,共线段近期需满足开行 33 对/h,远期需满足开行 36 对/h;上海轨道交通 3 号线北延伸近期需满足开行 22 对/h,远期满足开行 24 对/h。详见表 1。

上海轨道交通 4 号线(包括与 3 号线共线段)是构通上海中心城区轨道交通换乘最重要的环线,

表 1 上海轨道交通 3、4 号线开行能力分析表

区段	方向	起终车站	现状断面客流/ (万人次/h)	现状 开行 对数/ (列/h)	现状 需要 对数/ (列/h)	2024 年 预测断面 客流/(万 人次/h)	2024 年 需要 对数/ (列/h)	2031 年 预测断面 客流/(万 人次/h)	2031 年 需要 对数/ (列/h)	2046 年 预测断面 客流/(万 人次/h)	2046 年 需要 对数/ (列/h)
江 杨 北 路 站—宝 山 路 站(3 号线北 段)	上行	宝山路站—东宝兴 路站	1.14	9	8	1.37	9	1.56	10	1.72	11
	下行	赤峰路站—虹口足 球场站	2.91	15	18	3.03	20	3.52	22	4.02	24
宝 山 路 站— 虹 桥 路 站(共 线段)	上行	上海火车站站—宝 山路站	2.66	24	17	3.27	20	3.43	22	3.65	23
	下行	宝山路站—上海火 车站站	2.68	24	17	3.08	20	3.45	22	3.97	24
虹 桥 路 站— 宝 山 路 站(4 号线非共线 段)	内圈	宝 山 路 站—海 伦 路站	2.56	15	15	2.84	18	2.9	18	3.01	18
	外圈	西藏南路站—南浦 大桥站	1.48	9	9	1.69	10	1.79	11	1.98	12
虹 桥 路 站— 上 海 南 站 站 (3 号线南 段)	上行	漕 溪 路 站—宜 山 路站	1.21	9	8	1.01	7	1.18	8	1.21	8
	下行	虹 桥 路 站—宜 山 路站	0.88	15	6	1.2	8	1.47	9	1.76	11

其发生故障或停运都将对上海交通与市民出行产生较大影响。因此,在信号系统改造方案选用上需满足更高的安全性、可靠性、冗余性和运营组织的灵活性,以降低改造影响,缩短改造工期,实现边运营、边改造;同时,还需满足新维保组织架构,建立与之配套的信号系统浸入式在线监控的智能运维平台,以降低维护成本,实现上海申通地铁集团有限公司从运营到经营转型的目标。

全国常见的既有线路改造方案有:以上海轨道交通 1 号线保持既有系统制式的信号系统更新改造项目为典型样板的沿用既有系统改造方案;以北京地铁 1 号线采用 CBTC(基于通信的列车控制)为典型的全替代改造方案;以上海轨道交通 2 号线为代表的采用既有轨道电路+CBTC 系统的双套兼容冗余改造方案等。结合上海轨道交通 3、4 号线在路网中的重要地位、运营需求、维护需求、投资需求和改造难度与风险,比选探寻其最适用的信号系统制式的改造方案是一项重要课题。

1 信号系统改造的必要条件

共线段宝山路站上行站前合岔是限制运能提升的瓶颈,因此要满足近远期开行对数需求,就必须对宝山路站进行土建改造。即:将 4 号线外圈宝山路站接轨点由站前改造成站后接轨,扩建宝山路

站站台,并新增站后折返单渡线以提升 4 号线与 3 号线北延伸在共线段应急情况下的运营组织灵活性。

若宝山路站土建优先改造,势必在既有 ALSTOM U200 信号系统上进行改造。基于对既有上海轨道交通 3、4 号线 ALSTOM U200 系统运行状态的评估与印度技术支持弱等现状,须尽可能减少对既有 ALSTOM U200 系统的改动。但为维持宝山路站土建改造时上海轨道交通 3、4 号线非改造区域不中断运营且尽可能缩小停运区域,信号系统需在土建改造前和改造后割接宝山路站区域大量信号骨干网与终端光电缆,土建改造前还需对 ATS(列车自动监控)网络、SACEM(列车自动控制)网络、VPI(路径识别)网络进行改造以维持运营的临时环网结构,用于停运调试的临时环网结构,并增加 4 个临时折返交路,以及配套大量的信号软件、数据修改。还需在停运时间有限的改造过程中,对新插入线路新增轨道电路。这涉及宝山路站及相邻 SACEM 设备区域大面积既有轨道电路频率布局以及 SACEM 设备的数据修改与调试,其改造难度极大、工程量巨大、改造风险高和停运时间较长。因此,必须对信号系统进行优先改造,在使用新信号系统的基础上再对宝山路站土建开展改造。

除了沿用既有信号系统的改造方案外,所有替

代方案或双系统冗余方案均需先对列车在既有车载系统的基础上,加装新的车载信号系统,复用车底外挂设备,并增加切换开关。双系统冗余方案则切换开关保留,替代方案则在轨旁一次性倒接后拆除。

2 信号系统改造方案

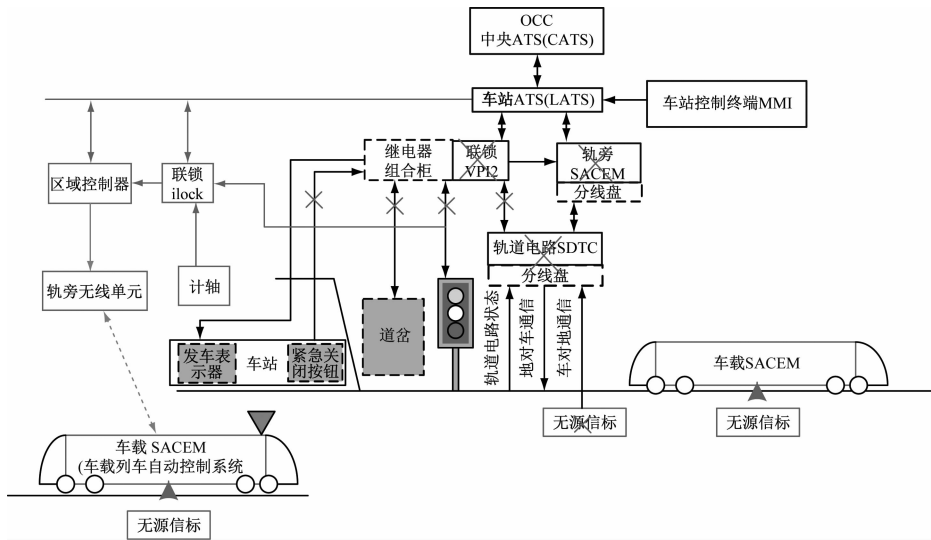
2.1 沿用既有 ALSTOM U200 信号系统改造方案

上海轨道交通 3、4 号线沿用原 ALSTOM U200 信号系统改造方案(以下简称“方案 1”),即保持既有系统架构、接口基本不变的前提下,对信号轨旁设备进行翻新改造;并对既有上海轨道交通 3、4 号线 3 种车型 91 列列车的两种车载信号设备进行改造,降低设备老化所带来的高故障率,以提升信号车载子系统冗余度与可靠性。其优点在于可以逐列、逐站和逐段地进行分批分段改造,既有备件可

延续使用。但由于制式没有发生根本性的变化,其旅行速度、顶棚速度、运行间隔、折返能力和出库能力等各项性能指标都没有得到提升。即便宝山路站完成土建改造,其理论开行对数也最多达到 29 对/h,不能满足运能需求,无法解决技术支持与服务弱、元器件停产和备件返修周期长等问题,故改造风险大,也不利于后期的宝山路站土建改造;同时,信号制式也不符合主流信号系统技术发展的方向。在线监控方面,由于系统没有原生的监测感知层接口,无法建立有效的系统在线监测和智能运行与维护。

2.2 CBTC 系统替代改造方案

该改造方案为上海轨道交通 3、4 号线以全新 CBTC 系统整体替代既有 U200 系统(以下简称“方案 2”),如图 1 所示。其优点是采用目前主流的信号技术,技术成熟,具有系统原生在线监测的基础。



注:OCC——运营控制中心;ATS——列车自动监控;MMI——人机接口;ilock——计算机联锁;“x”表示改造后需拆除。

图 1 CBTC 系统替代改造方案示意图

方案 2 的室内外设备及接口较多,并且 ALSTOM U200 本身就是 CBTC 的同源同系列过渡系统。例如,ALSTOM U200 有源、无源信标与 CBTC 无源信标的布局类同,改造中为满足白天老系统运营与夜间新系统内部调试的需要,需对全线信标开展兼容双系统的重新布局设计与数据修改,其工作量巨大、次级检测设备布置(日夜倒接期间,夜间调试使用的 CBTC 计轴对白天运营的 U200 的 DTC921 数字轨道电路可能产生的影响)等子系统上的耦合度过高,新老系统存在较多的相互影响。日夜调试倒接以及一次性割接工作量非常大、改造

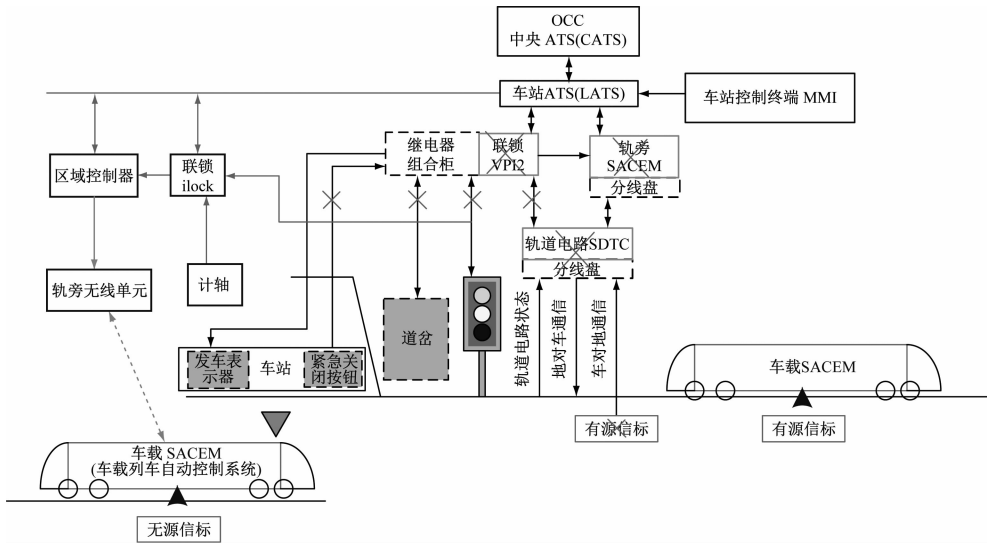
复杂、工程筹划难度高。通过仿真计算,即便宝山路站采用此方案改造完成,其共线段理论运营对数也仅能达到 33 对/h,仅能满足近期运量的需求。

2.3 CBTC + ALSTOM U200 的双套冗余系统改造方案

该改造方案对上海轨道交通 3、4 号线以既有 ALSTOM U200 系统 + 轨道电路次级检测进行翻新,联锁以 ilock 代替 VPI,在此基础上加装一套 CBTC 系统进行改造(以下简称“方案 3”),如图 2 所示。其优点是改造后 ALSTOM U200 系统替下的设备与备件都可作为新 ALSTOM U200 的备件;后

备模式 ALSTOM U200 也具有准移动闭塞的 ATP (列车自动防护)/ATO(列车自动运营),轨道电路

还具备断轨检测功能。



注：“×”表示改造后需拆除。

图 2 CBTC + ALSTOM U200 双套冗余改造示意图

不同于上海轨道交通 2 号线的双系统异构,上海轨道交通 3、4 号线由于方案 2 中提到的 ALS-TOM U200 与 CBTC 系统耦合度过高,除导致的改造复杂筹划难、倒接工作量和风险大等问题外,还将产生主备系统相同设计架构下会有较大概率发生一个故障源同时影响两套系统的情况,同时还存在 ALSTOM U200 系统缺乏技术支持等问题。因此,在上海轨道交通 3、4 号线使用上海轨道交通 2 号线方案势必使后备的可用性大幅度降低,失去双套系统冗余的最大优势与意义。在技术层面,双套冗余系统接口需印度授权开放接口,并重新研发,开发周期冗长,无法满足改造工期需求。以目前中印紧张的国际关系以及印度技术服务与支持能力,其投

资风险较高。同时相比较其他几种方案,方案 3 是所有方案中投资量最大、维护成本最高的,性能也仅维持在 CBTC 水准。因此,该方案不适用于上海轨道交通 3、4 号线,本文也不再对该方案进行后续比选。

2.4 基于车车通信的列车自主控制系统的替代改造方案

使用基于车车通信的列车自主控制系统 (TACS) 替代改造方案(以下简称“方案 4”)如图 3 所示。改造时遵循“不停运改造”原则,即在改造期间,既有设备和新增设备并存,利用倒接开关进行倒接,以确保改造对日常运营不产生影响。

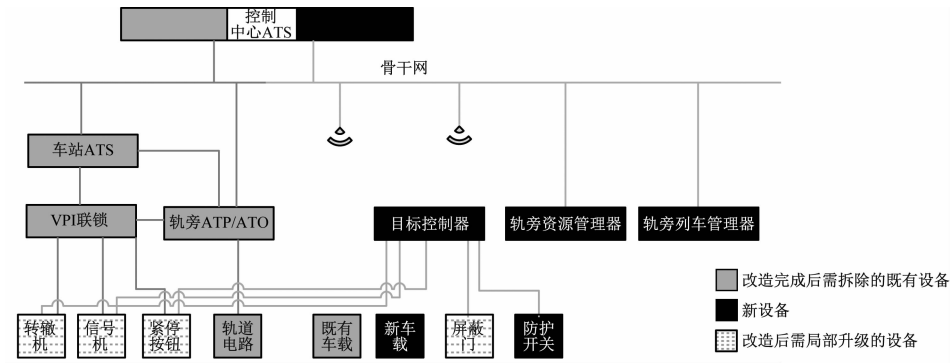
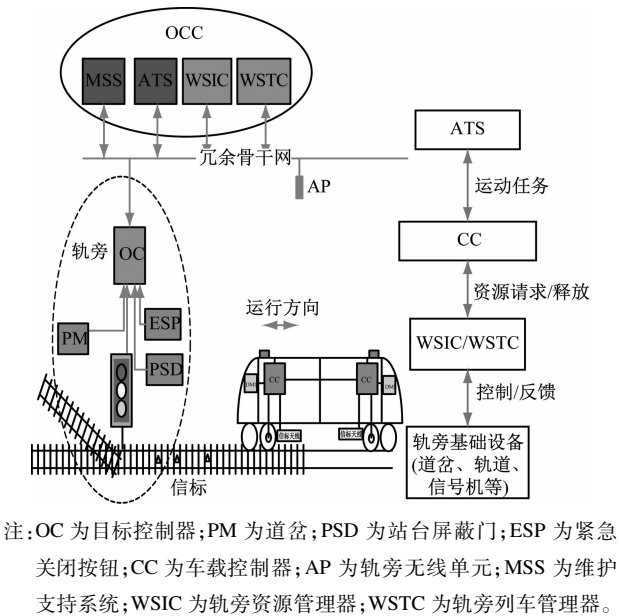


图 3 基于车车通信的 TACS 替代改造方案示意图

TACS 是新一代的列车运行控制系统,其以系

统资源管理为核心,细化资源粒度,优化资源管理,

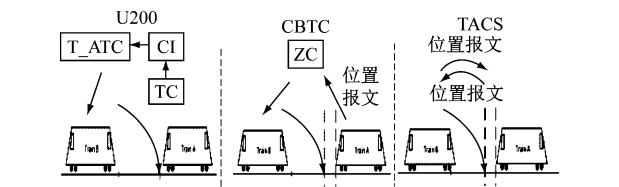
列车根据任务实现自主资源管理,具有安全、高效、灵活和经济等特点。其系统结构如图 4 所示。



注:OC 为目标控制器;PM 为道岔;PSD 为站台屏蔽门;ESP 为紧急关闭按钮;CC 为车载控制器;AP 为轨旁无线单元;MSS 为维护支持系统;WSIC 为轨旁资源管理器;WSTC 为轨旁列车管理器。

图 4 TACS 结构示意图

得益于移动授权理念的改变,TACS 仅通过 DCS(数据通信系统)将行车间的位置报文以及对轨旁设备的控制命令进行交互(见图 5),大幅度缩减了交互路径距离与时间,实现了轨旁资源控制权的先到先得与通过快速释放,取消了计划型资源分配的进路概念,从而提高了行车效率的各项指标。通过试验线,对 TACS 实际行车效率实测值与其他方案的信号制式进行了对比(见表 2)。表 2 中,仅有 TACS 系统具备穿梭和任意点折返功能。通过仿真计算显示,TACS 可满足上海轨道交通 3、4 号线开行对数 36 对/h 的需求。



注:T_ATC 为车载自动列车控制系统;CI 为联锁;TC 为轨道电路;ZC 为区域控制器。

图 5 各制式信息传输图

TACS 采用新的资源管理和安全确认的安全设计理念。与传统的 CBTC 系统相比,TACS 将安全风险管理由多车降维到单车,方便实现多车汇合、分叉和区间任意点折返。TACS 适合上海轨道交通 3、4 号线这种多线多车复杂线路的运营需求。系统

表 2 信号系统各种制式下的性能对比表

测试项	实测或仿真值/s			提升百分比/%	
	U200 系统	CBTC 系统	TACS 系统	TACS 与 U200 比	TACS 与 CBTC 比
宝山路汇合	106	81	65	38.68	19.75
宝山路分岔	113	75	59	47.79	21.33
上海火车站站进出折返线	43	33	18	58.14	45.45
上海火车站站折返	148	147	108	27.03	26.53

改造涉及倒切车载和轨旁设备,车载设备倒接方案与前述方案类似。得益于 TACS 的轨旁设备简化,减少了大量轨旁设备。在后续宝山路站土建改造时,除骨干光缆与少量室外终端光电缆需要按临时管道敷设并在改造后割接外,电缆割接数量大幅度降低。室外设备临时拆装与调试工作量也大幅度下降。宝山路站土建改造时需维持运营的临时交路仅需纳入新系统设计,不需要像 ALSTOM U200、CBTC 等传统信号系统在区间新增折返区域因考虑敌对进路而增设轨旁信号机等。

此方案改造实施过程中的难点在于既要确保白天运营安全,又要便于夜间调试,并需具有迅速恢复的能力。因此 TCAS 替代方案中的轨旁倒切装置设计尤为重要。改造期间,TACS 与 ALSTOM U200 需共用部分为:道岔动作电路、信号机点灯电路、紧急停车和站台门。倒接装置需确保既有系统与新系统输出的可靠隔离,实现对轨旁设备控制的唯一性,并集中控制,同时需避免倒接继电器失电对白天既有系统运营产生的影响。

如图 6 所示,以道岔组合倒接为例,切断上述电路既有组合的原有连接 A-A',将既有交流道岔主组合侧面端子接入新增设的倒接机柜(DNS)的倒接继电器,选用失电不动作的双稳态安全继电器(偏极继电器)作为倒接继电器前级,后级分别接入既有副组合侧面端子和受新系统控制的新设倒接机柜(DNS)内道岔 DCJ(定位操纵继电器)、FCJ(反位操纵继电器)等新增继电器。利用提供正负极相反的日夜倒接总开关控制双稳态安全继电器的两个线圈,实现白天运营与夜间调试两个状态切换,并保持了套系统输出控制的隔离,以确保输出唯一性。即便失电也将保持失电前的新老系统选择状态。同时切断的既有组合的原有连接,分割为 C1 和 C0 两段,接入安装在继电器组合空位的程序插

头底座上。当未插入程序插头时,保持倒接继电器控制;当发生倒接继电器故障无法选择白天既有系统控制状态时,插入程序接头,直接构通既有 ALS-TOM U200 控制链路,实现快速甩开倒接开关,恢复既有系统运营状态。

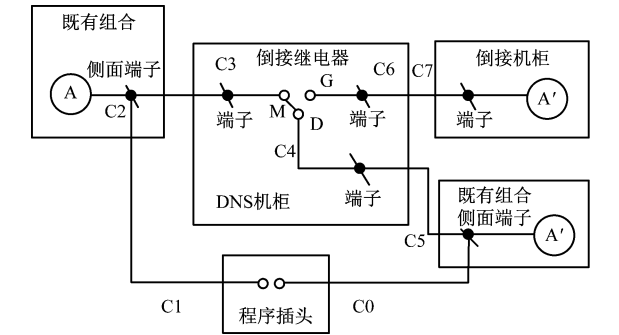


图 6 道岔倒接流程示意图

无论从安装、割接、软件修改和调试的工作量以及随之次生的难度与风险等各方面比较,车车通信均有得天独厚的优势。在线监测方面,由于 TACS 将更多的逻辑集中至列车,相比 CBTC 系统的车载、轨旁设备分别监测,控制命令链路更为简单,有利于实现车载、轨旁设备融合的全系统级浸入式监测,更容易实现高精度故障源诊断的专家系统与智能运维平台。采用 TACS 的改造方案符合

改造的需求和目标。

2.5 信号系统制式及改造方案的比选

宝山路站土建改造后,各制式信号系统开行列车数见表 3。其中:方案 1 共线段勉强满足开行 29 对/h,3 号线北延伸段开行 20 对/h,4 号线外圈开行 10 对/h,形成 20:10 的不对称交路,仅能满足初期运量需求;方案 2 共线段开行 33 对/h,3 号线延伸北段开行 22 对/h,4 号线外圈开行 11 对/h,形成 22:11 的不对称交路,也只能满足初、近期运量需求;方案 4 共线段开行 36 对/h,3 号线北延伸段开行 24 对/h,4 号线外圈开行 12 对/h,形成 24:12 的不对称交路,可满足所有运量需求,详见表 3。

表 3 各制式信号系统开行列车数表

信号系统制式	3、4 号线共线段整体运行能力/(对/h)	
	上行	下行
U200 系统	29	29
CBTC 系统	34	33
TACS 系统	36	37

如表 4 所示,对三种改造方案的技术、经济、实施和运能进行了比选。

表 4 3 种改造方案比选表

方案	技术比选			经济比选		实施比选			运能比选	
	技术发展	技术成熟度	系统可用性	建设成本	维护成本	工程案例多少	实施难度	对运营影响	工期长短	对运能提升度
①	落后	中	中	高	高	较少	高	低	中	低
②	较先进	高	中	中	中	较多	较高	中	中	中
④	先进	中	高	中	低	较少	中	中	较短	较高

由技术、经济、实施和运能等各方面经综合比选可见,TACS 的技术先进,在性能、改造风险、改造周期、建设和运维成本等方面优势明显。只有 TACS 的通过能力既可满足上海轨道交通 3、4 号线远期交路运能需求,同时又能满足运营、维护和工程的需求。因此推荐 TACS 替代改造方案作为上海轨道交通 3、4 号线信号系统改造的优选方案。

3 结语

信号系统的改造项目难度远高于新线建设难度,不仅涉及的接口专业多,而且不能影响正常运营。信号系统改造项目的前期工作需要结合线路特点,对国内已采用的各类方案的优劣势及适用性进行综合分析研究,避免照搬硬套;应探索更合理、适用度更高的老线信号系统改造方案。

参考文献

[1] 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(6):126.

[2] 张郁. 基于 TSTCBTC 2.0 系统的上海轨道交通 5 号线信号系统大修改造工程[J]. 城市轨道交通研究,2019(11):149.

[3] 包佳伟,吕丰武,徐烨,等. 大修线路信号系统改造方案的研究[J]. 铁路通信信号,2020(4):91.

[4] 上海申通地铁集团有限公司,中铁上海设计院. 3 号线宝山路改造工程项目建议书[R]. 上海:上海申通地铁集团有限公司,2019.

[5] 卡斯柯信号有限公司. 上海 3 & 4 号线 Fluncc 验证项目方案[R]. 上海:卡斯柯信号有限公司,2019.

[6] 卡斯柯信号有限公司. 上海 3/4 号线 TACS 验证项目结项报告[R]. 上海:卡斯柯信号有限公司,2021.

(收稿日期:2021-04-04)