

# 城市轨道交通列车灵活编组方案及功能实现

范海宁<sup>1</sup> 何勇浩<sup>2</sup>

(1. 上海电气泰雷兹交通自动化系统有限公司, 上海, 201206;

2. 深圳地铁运营集团有限公司, 深圳, 510840 // 第一作者, 工程师)

**摘要** 城市轨道交通采用固定长编组列车运营, 在平峰期难以平衡线路的运行能力、运营成本及运营服务水平间的约束。基于灵活编组需求分析, 介绍了采用灵活编组线路的运营情况。以深圳地铁 9 号线为例, 介绍了具体的灵活编组方案、功能需求及其实施; 分析了平峰期采用 3 节编组列车运营的经济效益。在城市轨道交通运营的不同时段采用不同编组列车运营, 不仅具有技术可行性, 同时也能收到良好的经济效益。

**关键词** 城市轨道交通; 行车组织; 编组方案

**中图分类号** U292.4

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2021.09.043

## Flexible Marshalling Scheme and Function Realization of Urban Rail Transit Train

FAN Haining, HE Yonghao

**Abstract** Urban rail transit adopts fixed long formation marshalling for train operation. It is difficult to balance the constraints among operation capacity, operation cost and operation service level during normal peak period. Based on analysis of flexible marshalling requirements, operation status of lines adopting flexible marshalling is introduced. Taking Shenzhen Metro Line 9 as example, specific flexible marshalling scheme is introduced, as well as function requirements and implementation. Economic benefits from using three-section formation train operation for normal peak hour are analyzed. Assigning trains of different formation at different hour of the day depending on the urban rail transit general operation brings about not only technical feasibility, but also economic benefits.

**Key words** urban rail transit; operation organization; marshalling scheme

**First-author's address** Thales SEC Transportation System Co., Ltd., 201206, Shanghai, China

在全天不同运营时段, 城市轨道交通断面客流分布不均匀, 早晚高峰或临时性大客流时段客流强度大, 其余时段客流相对不饱和, 客流呈潮汐分布

态势。通过调研和相关研究发现, 大部分线路平峰期间满载率不足六成, 列车满载率低, 造成运力和能源浪费, 以及运营成本增加。

大客流情况下运力不足, 小客流情况下能源浪费大、运营服务水平低(运营间隔大), 这一矛盾越来越明显, 急需一种能够灵活应对这一矛盾, 同时又能减少运营成本的方案。本文基于灵活编组的需求分析, 提出了灵活编组的功能需求和实现方式。

## 1 列车灵活编组的需求分析及应用案例

### 1.1 需求分析

城市轨道交通运营部门主要关心的三点是: 上线运营列车的运能能够应对客流变化的挑战, 列车开行成本最低, 运营服务水平持续稳定。

城市轨道交通各线路断面客流不均衡, 同线路不同运营时段客流也不均衡, 如果按常规的列车编组方式, 采用固定编组, 在客流高峰时段, 按照长编组、高密度组织行车, 则能够应对客流压力; 但在平峰阶段, 如果仍以长编组、低密度组织行车, 则必然会造成运营能耗增加, 造成运力和能源的浪费, 同时, 开行对数的降低, 必然会降低运营服务水平(运营间隔大)。

基于运营部门的客观需求, 在客流高峰期, 采用长编组(固定长编组和短编组组合)的运营模式; 在客流平峰期间, 采用长编组(固定长编组)+短编组的组合运营模式, 通过采用灵活编组的方式, 能够根据不同的客流需求实现精准运能投放, 降低运营成本, 同时使运营服务水平保持相对较高的水平。

### 1.2 应用案例

国内采用灵活编组的代表性线路有广州地铁 3 号线和上海轨道交通 16 号线, 国外采用灵活编组的、比较有特点的线路有温哥华天车线和肯尼迪机场线。

广州地铁 3 号线列车采用“3+3”联挂方式, 每

一短编组列车的3辆车的编组形式为“带司机室动车-拖车-带司机室动车”,这种型式保证可从任意方向联挂编组成长编组列车。联挂或解编后的列车可以实现ATP/ATO(列车自动保护/列车自动运行)功能。同时信号系统可以对这些列车进行时刻表编辑,满足运营的调整需要<sup>[1]</sup>。信号系统通过完整性识别及VOBC(车载控制器)识别来确认列车在线联挂和解编后的列车编组变化情况。

上海轨道交通16号线大部分线路位于郊区,设计初期,列车按3节编组;远期,列车按“3+3”重联编组。3节编组列车肩负“大站车”使命,仅在龙阳路站、罗山路站、新场站、惠南站、临港大道站、滴水湖站停靠。

温哥华天车线在1986年首次投入运营时,在高峰期和重大活动期间,列车按4节编组运营;在平峰期和节假日期间,列车按2节编组运营。

肯尼迪机场线列车的编组形式有1节编组、2节编组、3节编组和4节编组。在夜晚低谷期,列车按1节编组运营;在高峰期,列车按4节编组运营。列车可以双向折返运行。

## 2 灵活编组功能的实现

本文以深圳地铁9号线工程为例,研究和讨论3节编组列车联挂、解编的功能需求和实现方案。为实现灵活编组,采用“3+3”编组方式替代6节固定编组,“3+3”编组列车可解编为2列3节编组列车。

### 2.1 灵活编组方案

1) 联挂:将2列3节编组列车通过全自动电气车钩以人工/自动的方式进行重联,扩编为6节编组(3+3)列车。在联挂过程中,司机不需要下车作业。联挂后,2列3节编组列车的控制硬线和网络等都能进行重联,车辆和信号系统支持扩编列车的运行。

2) 解编:是联挂的逆向过程。“3+3”编组列车通过全自动电气车钩以人工/自动的方式进行车辆脱钩解编,分离为2列独立的3节编组列车。在解编过程中,司机不需要下车作业。解编后,2列3节编组列车的控制硬线和网络等都能进行重联,车辆和信号系统支持2列3节编组列车的独立运行。

3) 长短编混跑:增购列车采用3节编组,实施灵活编组方案后,线路上将可能出现3节编组、6节编组和“3+3”编组3种编组列车。不同编组列车具备不同的运能,运营使用者可根据全日客流变化制

定运营组织方案。

适应全日客流变化的运营组织方案是指,在目前预测客流水平情况下,为保持服务水平<sup>[2]</sup>,在高峰小时开行大编组列车(包括6节编组和“3+3”编组),在平峰时段开行部分或全部小编组(6节编组和部分3节编组,或者全部3节编组)、高密度列车。

联挂、解编的列车数量需依据客流的实际需要和运营组织相关人员配置,并结合运营间隔所需,进行统筹考虑。混跑列车的比例可以根据客流变化进行调节。

在具体设计工作中,需根据线路初期、近期和远期的分时段客流,在考虑一定能力储备的前提下,分别计算不同编组列车的客流适应性,并进行全日行车计划编排<sup>[3]</sup>。

### 2.2 功能需求

1) 车辆:为支持2列3节编组列车的联挂、解编,车辆的列车功能至少包括牵引系统、辅助系统、制动系统、网络系统、乘客信息系统、列车控制、车门系统、空调系统、照明系统等的功能<sup>[4]</sup>。

2) 信号系统:为支持2列3节编组列车的联挂、解编,信号系统功能至少包括以下部分:

(1) 冗余功能:3节编组列车采用的应是热备冗余的车载设备架构。当2列3节编组编组列车联挂后,处于列车中间位置的2个信号系统设备断电、退出工作(外部电路控制);联挂后,新的头端和尾端车载设备需要建立通信和工作,并形成新的热备冗余架构。

(2) 网络重构:信号车载网络的架构设计应能保证当列车联挂或解编后,网络上各设备间的通信都能维持正常的功能需要。

(3) 车型车号:信号系统应根据联挂或解编状态下的各类输入,自动判断和识别当前列车的编组情况;信号系统根据联挂或解编状态来重新分配车号。

(4) 列车参数:信号系统固定存储该线路上所有可能编组类型列车的参数。当软件判断出联挂列车编组类型后,加载与之相匹配的列车参数;信号系统根据新编组列车参数进行计算和控制。

(5) 作业区域:对联挂、解编的作业区域设定,除了需满足信号系统本身功能需求限定条件以外,还要结合实际线路条件和车辆参数,最终需满足业主方的规定和需要。联挂、解编的作业区域一旦确定以后,需将其设定为数据库中新的参数。

(6) 命令控制:信号系统模式下,联挂、解编的命令控制可由中央 ATS(列车自动监控)人工下发,车辆自动执行作业。当 ATS 下发命令以后,信号车载设备根据当前条件将命令下达至车辆,通过 ATP/ATO 控制功能进行作业防护,最终实现联挂或解编。

(7) 停站对位:信号系统需具备不同编组列车到站后对位停准的功能。

(8) 开关门控制:信号系统需支持 3 节编组和 6 节编组列车到站后车门的开关与站台门开关保持关联性。

(9) 轨旁通信:信号系统需支持列车在联挂、解编前后,维持车载与轨旁的持续通信,以使联挂、解编后的列车能快速投运。

(10) 人机界面:信号车载人机界面(TOD)应支持联挂、解编的列车的状态信息显示。中央 ATS(列车自动监控)工作站调度界面应支持联挂、解编的列车的状态信息显示,应包括联挂、解编的作业操作界面,应能对 3 节编组、6 节编组和“3+3”编组列车进行区别显示。

(11) 运行图/时刻表:运行图、时刻表的设计应支持联挂、解编的不同编组列车运行班次调整需要,包括计划班次和临时调整。

3) 站台门功能:灵活编组下将出现 3 节编组、6 节编组和“3+3”编组列车(默认“3+3”编组情况下站台门能全开)混跑的情形,站台门系统功能至少包括以下部分:

(1) 区分不同编组列车开关站台门:可根据到站列车的不同编组情况,对应开启不同区域、不同数量的站台门。

(2) 信号系统正常模式下联动控制功能:在信号系统正常模式下,轨旁设备会根据到站列车的不同编组情况发给站台门不同的控制命令。

(3) 降级模式下手动控制功能:在信号故障或其它降级模式下,司机需要手动开关站台门,站台门设备以及 PSL(就地控制盘)应具备对应不同编组列车的使能、开关门、互锁解除等控制功能。

4) PIS(乘客信息系统)功能。

(1) 列车联挂状态下,2 列 3 节编组列车 PIS 系统的信息统一传输与控制。

(2) 当不同编组列车进站时,地面 PIS 能根据信号系统的报文通知,显示不同编组列车到站的相关信息。

5) 广播功能:当不同编组列车进站时,PA(广

播)系统能根据信号系统的报文通知,广播不同编组列车到站的相关信息。

### 2.3 功能实现

基于上文中关于列车联挂和解编的功能需求分析,提出信号系统改造方案的主要内容:

1) 信号轨旁设备硬件补点和软件升级。

(1) 信标:所有站台新增应答器,存车线、虚拟站台、试车线等处视需要新增应答器。

(2) 接近盘:所有站台新增精确停车应答器,存车线、虚拟站台、试车线等处视需要新增应答器。

(3) 移动授权单元(MAU)数据库更新,参数表更新等。

(4) 移动授权单元软件功能升级,以支持灵活编组。

(5) 计算机联锁单元(PMI)软件升级,以支持不同编组列车到站后,车门开关与站台门联动。

2) 信号 ATS 系统改造:ATS 系统设计、软件升级支持联挂、解编作业,以及灵活编组情形下的图形图标显示。

(1) ATS 界面改造:增加操作对话框、图形显示、信息提醒等功能。

(2) 列车车次号显示。

(3) 运行图、时刻表显示。

3) 与站台门接口的改造设计:ZC(区域控制器)与站台门接口需增加输出接口,用于控制不同编组列车到站后开关站台门。ZC 向 PSD(屏蔽门)系统每个车站(两站台)的输出命令应按站台前部开门命令、站台后部开门命令、站台前部关门命令、站台后部关门命令的顺序在 ZC 输出板卡上排列。表 1 为开关门继电器动作与站台门动作和控制命令之间的关系。

表 1 开关门继电器动作与站台门动作和控制命令之间的关系对应表

开门继电器		关门继电器		站台门动作	控制命令
FOR 前部	EOR 后部	FCR 前部	ECR 后部		
0 落下	0 落下	1 吸起	1 吸起	1-6 关门	6 编组车 站台门关门命令
1 吸起	1 吸起	0 落下	0 落下	1-6 开门	6 编组车 站台门开门命令
1 吸起	0 落下	0 落下	1 吸起	1-3 开门, 4-6 关门	3 编组车在站台 前部开门命令
0 落下	1 吸起	1 吸起	0 落下	1-3 关门, 4-6 开门	3 编组车在站台 后部开门命令
其他继电器状态组合				无效组合, 保持之前状态	无效命令

注:FOR、EOR——分别为前端和后端站台门开门继电器;FCR、ECR——分别为前端和后端站台门关门继电器。

4) 与 PIS、PA 的接口改造:信号系统与 PIS 和 PA 间的基本协议保持不变。协议中有一项 train ID 参数,为适应不同编组列车的乘客信息告知,信号系统对不同编组列车分配不同的 train ID。PIS 和 PA 可每次依据收到的 train ID 参数来关联不同的车长信息,以呈现不同的列车信息。

### 3 经济效益分析

城市轨道交通的能耗主要包括固定设施能耗和移动能耗。固定设施能耗主要指地面设施,如通风空调、照明、电扶梯等的能耗;移动能耗又由列车牵引能耗和列车辅助能耗组成。列车牵引能耗占城市轨道交通总能耗的一半以上,降低牵引能耗可产生巨大的经济效益<sup>[5]</sup>。

根据深圳地铁 9 号线的能耗统计数据,9 号线(含一期、二期)年总用电量为 19 710 万 kWh,其中牵引用电量为 7 884 万 kWh,占总用电量的 40%。平峰期列车开行对数占比约为 60%,故 9 号线平峰期日均牵引用电量约为 12.96 万 kWh。

根据 9 号线已运营阶段的能耗统计数据的预测计算结果为:在同一运行图运营情况下,平峰期若采用 3 节编组列车替代 6 节编组列车进行运营,节能率能达到 40%。即当 9 号线平峰期全部采用 3 节编组列车时,日均节电量约为 5.18 万 kWh。每度电按照 0.7 元计算<sup>[6]</sup>,全年可节省 1 323.49 万元。

(上接第 199 页)

性。通过对测试数据的统计分析,证明了在 AFC 系统的整个交易业务链条中,国密算法的功能和性能满足 AFC 系统的要求,可以替换国外算法。

目前,核心技术自主可控是国内技术发展的大趋势。城市轨道交通行业更应采用更安全、效率更好的国密算法。本文方案在不改变目前 AFC 系统密钥体系的前提下,通过增加支持 SM4 算法的应用,并考虑分阶段替换的方式更新票卡密钥,最终实现国外密钥卡的逐步自然淘汰。

### 参考文献

- [1] 杨旭方.一款基于 89C51 单片机实现的非接触式 IC 卡 AFC 系统[J].电子测试,2014(8): 52.
- [2] 杨毅,车高峰.非接触式 IC 卡读卡器的二次开发[J].电脑与

### 4 结语

采用灵活编组运营模式可以在平衡运营能力的同时,降低运营成本,符合运营部门的客观需求。本文从灵活编组的功能需求入手,分析联挂和解编的功能需求和实现方式,并从经济效益角度论证灵活编组方式具备良好的经济效益。灵活编组技术已逐渐成熟,未来,灵活的编组运营与全自动运行技术<sup>[7]</sup>结合,在正线混编运营、列车联挂救援等运营场景下将得到更多的应用。

### 参考文献

- [1] 唐玉川,马保仁.城市轨道交通灵活编组运营组织研究[J].铁道工程学报,2014(8): 96.
- [2] 潘丽莎,龚玲,冒玲丽.城市轨道交通车辆关键系统可靠性研究[J].中国铁路,2012(7): 80.
- [3] 赵文凤,梁永华.深圳龙华储能式低地板有轨电车项目日常维保执行模式解析[J].技术与市场,2018(10): 177.
- [4] 蒋晓东,刘厚林,尚江傲.宁波轨道交通 1 号线一期工程车辆辅助供电系统[J].电力机车与城轨车辆,2013(1): 25.
- [5] 唐玉川,马保仁.城市轨道交通灵活编组运营组织研究[J].铁道工程学报,2014(8): 96.
- [6] 赵家炜,刘婧婧.地铁列车在线联挂、解编功能分析[J].城市轨道交通研究,2012(8): 152.
- [7] 王冬海,黄柒光.列车灵活编组在城市轨道交通全自动运行线路中的应用[J].城市轨道交通研究,2019(增刊 2): 102.

(收稿日期:2021-01-28)

电信,2013(10): 29.

- [3] 高峰.浅谈信息加密技术在网络安全中的运用[J].黑龙江教育学院学报,2014(3): 193.
- [4] 吕迪,贾志洋.常用数据加密技术的对比研究[J].网络安全技术与应用,2014(2): 35.
- [5] 王卓人.智能卡大全——智能卡的结构、功能、应用[M].3 版.北京:电子工业出版社,2002: 112-118.
- [6] 杨振野.IC 卡技术及其应用[M].北京:科学出版社,2006: 54-56.
- [7] 陆永宁.非接触 IC 卡原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2006: 340-352.
- [8] 赖明.建设事业 IC 卡应用技术与发展[M].北京:中国建筑工业出版社,2003: 260-263.
- [9] (美)BRUCE S.应用密码学[M].北京:机械工业出版社,2007: 136-140.

(收稿日期:2021-03-20)