

灵活编组技术在城市轨道交通全自动运行系统中的应用

王立军 张 帅 魏凡超

(北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 100073, 北京//第一作者, 高级工程师)

摘 要 为实现城市轨道交通运输能力与运输效率的有机结合,使之在满足运营需求的条件下最大限度地降低运营成本。基于灵活编组技术的特点,详细介绍了灵活编组技术在城市轨道交通全自动运行系统中的应用方案,包括该技术对信号系统的要求、列车连挂/解编区域的选择、列车连挂/解编轨道区段长度的设置、列车连挂与解编场景等。重点介绍了连挂列车位置报告发送方案、连挂列车接口技术、近距离停车技术、车辆网络融合技术等列车灵活编组的关键技术。以北京地铁3号线列车灵活编组技术的应用为例,对其经济性进行了分析,证明该技术的合理性和可行性。

关键词 城市轨道交通;全自动运行系统;灵活编组技术

中图分类号 U292.3⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.02.025

Application of Flexible Train Marshalling Technology in Urban Rail Transit FAO System

WANG Lijun, ZHANG Shuai, WEI Fanchao

Abstract To realize the organic combination of urban rail transit transportation capacity and efficiency, and to minimize the operation cost to the greatest extent under the condition of meeting the operation demands. Based on the characteristics of flexible train marshalling technology, the flexible marshalling technical schemes are introduced in detail, including the requirements of this technology for the signaling system, the selection of train coupling/uncoupling area, the setting of train coupling/uncoupling track section length, and the coupling/uncoupling scenarios. The key technologies of flexible train marshalling are introduced emphatically, such as the sending coupling train position report, the coupling train interface technology, the proximity parking technology, and the vehicle network fusion technology. Taking the application of flexible marshalling technology in Beijing Subway Line 3 as an example, its economy is analyzed, and the rationality and feasibility of this technology are proven.

Key words urban mass transit; FAO (fully automatic operation) system; flexible train marshalling technology

Author's address CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., 100073, Beijing, China

灵活编组技术是随着我国城市轨道交通建设发展而逐步发展的,早期建设的线路基本上是城市轨道交通的骨干线,对该技术的应用需求不高。随着城市轨道交通向高质量、智能化、集约化方向发展,该技术的优势逐步得以体现。

我国城市轨道交通同一条线路上一般采用固定编组方式,列车运输能力的调整仅能通过调整列车追踪间隔、在线列车数量等方式实现。如何解决不同时段客流不均衡、列车运输能力与运输效率动态匹配问题,灵活编组技术为该问题的解决奠定了基础。本文以4辆编组和4/8辆灵活编组列车为例进行论述。

1 灵活编组技术的特点

1.1 灵活编组技术的目的

1) 满足初、近、远期的客流差别大、高峰和非高峰客流不均衡条件下的运营服务水平,降低运营维护成本。

2) 实现两列装备车载设备的列车自动连挂解编,列车在连挂及解编后应保持连挂前的运行模式。

3) 连挂列车应满足FAO(全自动运行)功能要求,并具备灵活调整列车编组以及不同编组列车混合运行的能力。

1.2 采用灵活编组技术时信号系统需考虑的因素

1) 信号系统需要增加车载连挂/解编相关硬件设备及相关软件。

2) 信号系统需在连挂/解编区域,与车辆接口实现对全线不同编组列车的连挂/解编功能。

3) 不同编组列车的停车方案和连挂/解编需求,对信号系统轨旁设备(如应答器、计轴等)布置

方案的影响。

4) 不同编组列车的停车方案、连挂/解编及洗车需求,对信号系统在正线站台、折返线、停车线,以及车辆段的列检线、牵出线和洗车线的轨旁设备布置及线路长度需求的影响。

5) 信号系统与站台门的接口需根据不同编组列车匹配站台门开关门命令、对位隔离信息等。

6) ATS(列车自动监控)系统与站台广播系统、乘客信息系统的接口发生变化,需为站台广播系统和乘客信息系统提供不同编组列车的到/离站信息等。

7) 不同编组列车对信号系统参数、列车控制策略,以及对 ATS 系统显示及其与 ATS 相关功能匹配的影响等。

1.3 灵活编组方式的选择

灵活编组技术可分为硬连挂编组和虚拟连挂编组两种方式。本文仅就硬连挂编组技术和“4 + 4”编组方式进行论述。采用灵活编组技术时,需结合初、近、远期的客流预测情况,在满足运输能力要求的前提下,从节约工程建设初期与近、远期投资以及节约运营维护成本等角度出发综合考虑。

2 灵活编组技术方案

2.1 灵活编组技术对信号系统的要求

1) 信号系统应支持自动/人工发起的连挂和解编作业。

2) 列车的连挂/解编作业不能影响信号系统的正常运营。

3) ATS 能够实现对连挂/解编列车信息的识别,如车次号、列车运行图、与通信等专业的接口等。

2.2 列车连挂/解编区域的选择

1) 2 列列车的连挂需要低速撞击(3 ~ 5 km/h),其撞击时将产生一定的冲击,不利于乘客舒适度及安全性,因此连挂作业应在列车空载时进行。

2) 列车的连挂/解编作业不能影响既有线路的正常运营,因此,列车连挂/解编作业仅在正线车站(如站台轨道区段、停车线、折返线等)或车辆基地的指定区域(如存车线、牵出线等)进行。

2.3 列车连挂/解编所在轨道区段长度的设置

具备连挂/解编功能的轨道区段长度设计时需考虑的因素主要包括列车长度、保护区段长度、一度停车间距、列车包络线范围等。正线折返线连挂/解编的轨道区段长度如图 1 所示。正线停车线连挂/解编的轨道区段长度如图 2 所示。停车列检库内列车连挂/解编的轨道区段长度如图 3 所示。

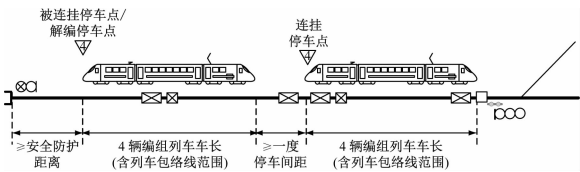


图 1 正线折返线列车连挂/解编的轨道区段长度示意图
Fig. 1 Diagram of train coupling/uncoupling track section length of main line turn-back line

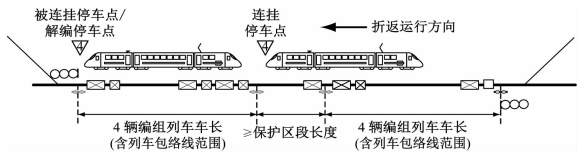


图 2 正线停车线列车连挂/解编的轨道区段长度示意图
Fig. 2 Diagram of train coupling/uncoupling track section length of main line parking line

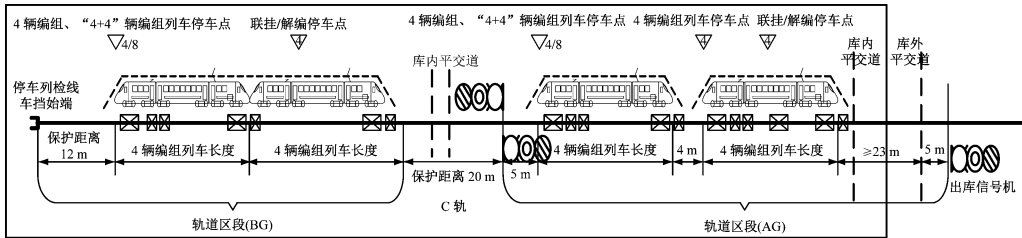


图 3 停车列检库内列车连挂/解编的轨道区段长度示意图

Fig. 3 Diagram of train coupling/uncoupling track section length of parking inspection garage

2.4 列车连挂场景

步骤 1:ATS 根据调度计划采取设置列车头码或人工办理进路的方式,为被连挂列车办理至连挂/解编区域的进路,如图 4 所示。

步骤 2:被连挂列车以 FAM(全自动运行模式)或 AM(自动模式)运行至连挂解编区域的被连挂停车点停车,列车停准、停稳后释放激活端,车辆自动施加紧急制动。被连挂端列车车钩处于对中状态

后,被挂列车 VOBC(车载控制器)向车辆发送“被挂请求”。车辆通过 TCMS(列车控制与管理)向被挂列车 VOBC 反馈“被挂允许”。被挂列车 VOBC 收到车辆反馈的“被挂允许”后,向 ZC(区域控制器)及 ATS 反馈已进入“被挂工况”(见图 5)。

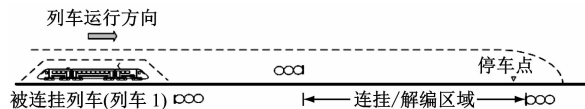


图4 被挂列车运行场景示意图

Fig. 4 Diagram of coupled train operation scenario

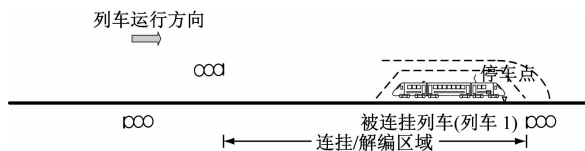


图5 被挂列车停车就位示意图

Fig. 5 Diagram of the coupled train parking in place

步骤3:ATS 根据调度计划采用设置头码或人工办理的方式,为去挂列车办理进入至连挂解编区域的进路,连挂列车以 FAM 或 AM 运行至连挂解编区域,连挂解编区域 ZC 为去挂列车计算用于连挂的可碰撞 MA(移动授权),连挂列车的停车点位于被挂列车包络线内的一定距离,连挂列车根据 MA 以及特殊控制曲线运行至距被挂列车 4 m 的位置停车(一度停车),并完成连挂准备工作(见图 6)。

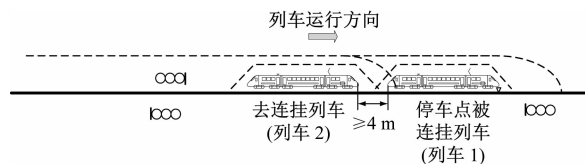


图6 列车连挂准备就绪示意图

Fig. 6 Diagram of train coupling readiness

步骤4:连挂列车与被挂列车均处于连挂工况,根据 ATS 发送的“开始连挂”指令和 MA 防护曲线,连挂列车 VOBC 自动通过 TCMS 向车辆发送连挂、牵引制动、级位、运行方向等指令,信号系统判断连挂列车非零速后,向 TCMS 保持输出 2 s 的连挂牵引指令和牵引级位后停止输出,连挂列车以 3~5 km/h 的速度与被挂列车进行低速碰撞,以完成两列列车的机械连挂,去挂列车 VOBC 判断零速后施加保持制动(见图 7)。机械连挂完成后,去挂列车及被挂列车分别通过硬线接口向各

端 VOBC 输出“机械连挂”安全信号。

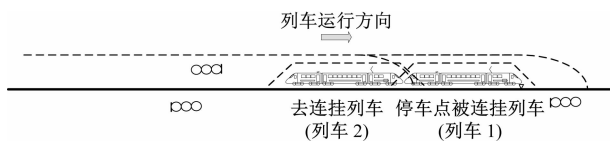


图7 列车连挂场景示意图

Fig. 7 Diagram of train coupling scenario

步骤5:被挂列车 VOBC 收到“机械连挂”状态后,VOBC 向 TCMS 发送对应端“电气连挂”指令,TCMS 控制被挂列车伸出对应端电钩。ATS 向去挂列车 VOBC 下达“试拉指令”,去挂列车激活端 VOBC 向 ZC 申请试拉锁闭,并在收到允许试拉后,向 TCMS 输出试拉、牵引制动、级位命令、运行方向等指令,TCMS 收到“试拉指令”后,牵引系统开始试拉,试拉持续时间约 3~5 s。若牵引系统反馈的整车实际牵引力大于人工设定牵引力并将其持续 1 s,则反馈“试拉牵引有效”。去挂列车 VOBC 收到 TCMS 反馈的“试拉牵引有效”后,若机械钩状态有效且车辆速度 ≤ 5 km/h,则判断试拉成功(见图 8)。



图8 连挂列车试拉场景示意图

Fig. 8 Diagram of test pulling scenario of the coupled train

步骤6:试拉成功后,列车与 VOBC 配合,依次完成电气钩连挂、初运行(网络贯通)、PIS(乘客信息系统)网络贯通及车辆自检。去挂挂与被挂列车的 VOBC 间建立通信,ZC 收到去挂挂及被挂挂列车更新的位置报告后,将两列列车标记为 1 列连挂列车进行控制,从而完成连挂(见图 9)。

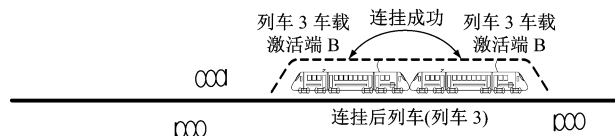


图9 列车连挂成功场景示意图

Fig. 9 Diagram of successful train coupling scenario

步骤7:连挂完成后,ATS 合并两列列车的车次窗并显示列车连挂状态和连挂端信息,自动更新车组号及车次号,并根据调度计划重新投入运营。

根据测算,目前 2 列 4 辆编组列车能够实现在 1 min 20 s 内完成连挂作业,基本能够满足运营要求。

2.5 列车解编场景

步骤 1:ATS 根据调度计划采取设置列车头码或人工办理进路的方式,为待解编列车办理至连挂解编区域的进路。待解编列车以 FAM 或 AM 运行至连挂解编区域的停车点停车,如图 10 所示。

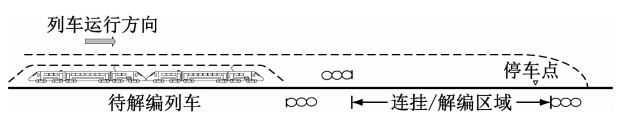


图 10 待解编列车运行场景示意图

Fig. 10 Operation scenario diagram of trains to be uncoupled

步骤 2:ATS 根据调度计划向待解编列车两端 VOBC 发送“解编指令”,列车头端 VOBC(激活端 A)收到“解编指令”并判断在解编停车点停准、停稳后,列车头端 VOBC 向 TCMS 发送“解编工况请求”。TCMS 向待解编列车头、尾两端 VOBC 反馈已进入“解编工况”,VOBC 向 ZC 及 ATS 反馈待解编列车进入“解编工况”(见图 11)。

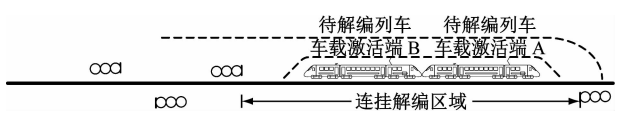


图 11 连挂列车解编准备就绪示意图

Fig. 11 Diagram of uncoupling readiness of the coupled trains

步骤 3:待解编列车的非激活端 VOBC 通过硬线向车辆发送对应端“电钩解编”指令,车辆收到该指令后断开电钩。同时车辆通过硬线电路接口向 VOBC 反馈电钩“未连挂”状态,通过 TCMS 给两列列车 VOBC 反馈“电钩解编完成”。一定时间后,两列列车 VOBC 通过安全输出硬线向车辆输出“机械钩解编”命令,车辆完成机械钩的解编,并通过硬线接口向 VOBC 反馈机械钩“未连挂”状态。待解编列车的头车完成连挂端安全相关接口测试后,按照解编后列车的更新状态向 ZC/ATS 发送有效的位置报告,并向 ATS 发送“解编完成”信息(见图 12)。待解编列车分离为 2 列小编组列车,同时下载应用小编组列车相关数据。

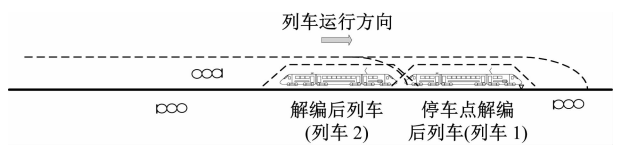


图 12 列车解编场景示意图

Fig. 12 Diagram of train uncoupling scenario

步骤 4:ATS 收到头车和尾车 VOBC 发送的

“解编完成”信息后,根据后续列车运行计划分别为解编后两列列车分配车次号,调度人员对解编完成的列车状态进行确认后,向解编完成后的列车设置新的运营计划,办理相应的进路。

综上所述,相较固定编组的 FAO 系统,基于灵活编组技术的 FAO 系统增加了“列车连挂”“列车解编”两个运营场景,同时对“休眠”“唤醒”“车门/站台门对位隔离”“故障复位控制”“进站停车”“站台发车”“车门/站台门状态丢失”等场景亦有一定的调整。

根据测算,2 列 4 辆编组列车能够实现在 2 min 30 s 内完成解编作业。

3 列车灵活编组的关键技术

3.1 连挂列车位置报告发送方案

灵活编组与传统固定编组信号系统的控制技术存在一定差异。采用固定编组方式时,VOBC 通过车载测速、测距设备和轨旁应答器建立定位,并根据列车固定长度向 ZC 发送位置报告;采用灵活编组方式时,列车长度将发生动态改变,需考虑列车位置报告的发送方式。目前,对于连挂列车位置报告发送方案有如下两种。

3.1.1 方案 1:单包络方案

两列固定编组列车连挂后,两列列车 VOBC 间建立通信,将两列列车的包络线进行融合,VOBC 向 ZC 发送连挂后整列车的位置报告,ZC 将连挂列车按照 1 列列车进行控制及防护。连挂列车单包络方案示意如图 13 所示。

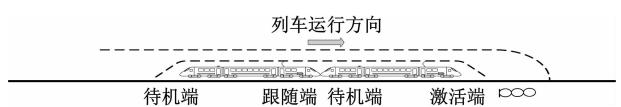


图 13 连挂列车单包络方案示意图

Fig. 13 Diagram of single envelope scheme of coupled trains

3.1.2 方案 2:双包络方案

双包络方案是指连挂前后两列单编组列车与轨旁通信的方式均未发生变化,两列列车维持各自的包络。两列固定编组列车连挂后,两列列车 VOBC 同时与 ZC 保持通信,仅激活的 VOBC 控制列车运行,并向 ZC 发送原固定编组列车的位置报告,ZC 将连挂列车按照两列列车进行控制及防护。同时考虑在折返、唤醒等场景下,两列列车 VOBC 需交互信息,以保证和原 CBTC(基于通信的列车控制)系统基本一致的功能分配和功能要求。双包络

方案下两列列车 VOBC 间可通过有线或无线建立通信,如图 14 所示。

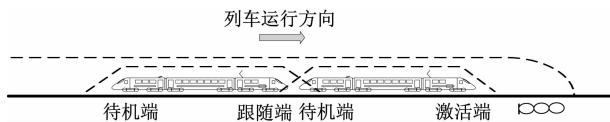


图 14 连挂列车双包络方案示意图

Fig. 14 Diagram of double envelopes scheme of coupled trains

双包络方案下列车 VOBC 间逻辑耦合性较低,为虚拟连挂/解编提供了技术保障,顺应后续技术发展的方向,因此双包络方案更符合技术发展方向。

3.2 连挂列车接口技术

列车连挂后,1 列列车存在 4 套 VOBC,需对这 4 套 VOBC 进行协同控制。考虑到列车连挂需求,短编组列车 VOBC 在既有电气及网络接口的基础上,需新增部分接口,包括机械连挂状态、电气连挂状态、机械钩解编指令、电钩解编指令、电钩连挂指令等。

连挂列车正向运行时,信号系统根据列车运行方向自动激活相应端的 VOBC,由激活端 VOBC 控制列车运行。将连挂列车按照 1 列列车进行控制,尾车 VOBC 正常运行时不参与控制,将连挂列车整合为统一的车辆平台进行控制。列车在折返站折返时,连挂列车 VOBC 进行协同折返控制。两列列车分别完成折返后,整列列车完成换端(见图 15)。

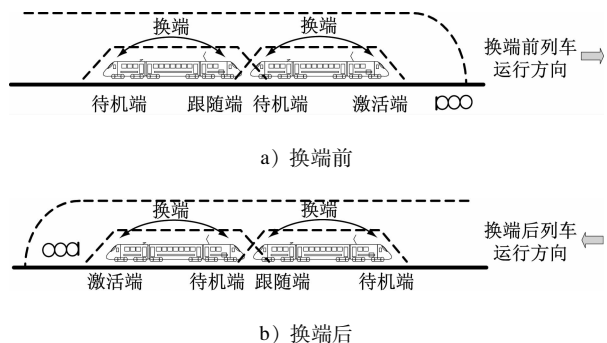


图 15 连挂列车折返换端交互示意图

Fig. 15 Diagram of turn-back and end change interaction of coupled trains

3.3 近距离停车技术

目前,信号系统按照 IEEE 1474. 1:2004《基于通信的列车控制(CBTC)性能及功能要求》中的安全制动模型对安全防护距离进行计算。传统 CBTC 系统安全防护距离一般为 40 ~ 50 m。为实现列车在 ATP(列车自动防护)下近距离停车,需优化信号

系统安全制动模型,采用可碰撞 MA 的方式。ZC 判断列车位于连挂解编区域后,将向 VOBC 下发可碰撞 MA, MA 终点位于前车内部,同时 ZC 向 VOBC 下发前方列车的允许碰撞点及碰撞速度。VOBC 收到 MA 后,据此计算列车速度曲线。采用可碰撞 MA 的方式,信号系统按照特殊的安全制动模型,可缩短列车停车所需的安全防护距离。

3.4 车辆网络融合技术

传统的 CBTC 系统下列车头尾两端的 VOBC 通信采用独立敷设贯通列车线的方式,各信号厂家首尾贯通线制式不同。为实现装备不同厂家信号系统列车的连挂,取消 VOBC 首尾贯通线,首尾两端的 VOBC 通过车辆网络进行通信。

车辆网络分为车辆级网络和列车级网络两个层面。车辆级网络作为本编组列车的内部网络,连接车厢内的终端设备,负责本车厢或本编组列车内部各个节点的数据通信与网络管理,VOBC 通过该网络进行本列车首尾 VOBC 间的通信;列车级网络作为列车通信的骨干网络,承载着跨编组传输的通信信息,VOBC 通过该网络采用全局 IP(互联网协议)的方式进行连挂列车间的通信。

4 技术经济分析

以北京地铁 3 号线列车灵活编组技术的应用为例,采用 8 辆固定编组和 4/8 辆灵活编组方案时,其综合投资初期减少 7.7 亿元,近期增加 4.7 亿元,远期增加 5.0 亿元。虽灵活编组方案在近、远期投资有所增加,但初、近、远期节省的列车走行公里分别为 1 960 万车·km/年、810 万车·km/年、1 060 万车·km/年,每年分别节约 6 488 万元、2 681 万元、3 509 万元。

综合上述分析,灵活编组技术在整个系统生命周期内既能满足运营需求,又能节约可观的运营成本。

5 结语

随着国家绿色节能环保战略的实施,如何实现城市轨道交通绿色、节能、环保,将成为城市轨道交通研究的主要课题之一。灵活编组技术恰恰是基于满足运输能力要求前提下的节能、环保技术,它能够实现运输效率与绿色节能环保的有机结合。灵活编组技术必将成为城市轨道交通领域的一个

(下转第 120 页)