

# 支持虚拟编组技术的列车运行控制系统方案研究

张 扬 李 旭 邬 江 刘合叶 贾庆东

(交控科技股份有限公司, 100070, 北京)

**摘 要** [目的] 随着城市轨道交通网络化发展, 线网客流时空分布不均衡的特性逐渐凸显, 既有列车固定编组方式难以实现“按需运输”。为充分利用线路运力, 需研究新一代列车运行控制系统。[方法] 提出了一种支持虚拟编组技术的列车运行控制系统设计方案, 并从列车运行逻辑控制、线路资源管理及调度指挥机制等方面分析了支持虚拟编组技术的列车运行控制系统与传统列车运行控制系统的性能差异; 介绍了虚拟编组的关键技术; 为实现虚拟编组技术在工程项目中的应用, 提出了在项目规划和设计阶段, 针对虚拟编组列车停车区域、正线站台区域及站台门接口等方面需要设计的工程内容。[结果及结论] 车车通信架构为虚拟编组技术的实现提供了更合理的系统架构设计基础; 基于“撞软墙”模型协同运行控制及智能感知的列车运行控制是虚拟编组列车运行控制系统的关键技术。随着虚拟编组技术的大规模应用, 列车运行控制系统能够在客流变化时快速调整在线列车编组长度, 提高了运输组织的灵活性, 提升了乘客服务水平。

**关键词** 城市轨道交通; 虚拟编组; 列车运行控制系统; 协同运行控制; 群体智能

**中图分类号** U284.48+2

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2024.06.057

lyzed from aspects of train operation logic control, line resource management and dispatching command mechanism. The key technology of virtual marshalling is introduced. In order to realize the application of virtual marshalling technology in engineering projects, the engineering design that needs to be considered in project planning and design stage for virtual marshalling train parking area, main line platform area and platform door interface are proposed. [Result & Conclusion] The vehicle-to-vehicle communication architecture provides a more reasonable system architecture design basis for realizing virtual marshalling technology. The train operation control based on "collision soft wall" model collaborative control and intelligent perception is the key technology in virtual marshalling train operation control system. With the extensive application of virtual marshalling technology, train operation control system can quickly adjust the online train length when the passenger flow changes, improving the flexibility of transportation organization and the passenger service level.

**Key words** urban rail transit; virtual marshalling; train operation control system; cooperative operation control; swarm intelligence

## Scheme Research on Train Operation Control System Supporting Virtual Marshalling Technology

ZHANG Yang, LI Xu, WU Jiang, LIU Heye, JIA Qingdong

(Traffic Control Technology Corporation, 100070, Beijing, China)

**Abstract** [Objective] With the development of urban rail transit network, the uneven temporal and spatial distribution characteristic of the network passenger flow is growing prominent, and it is difficult to achieve the "on-demand transportation" with the existing fixed marshalling train. In order to make full use of the line capacity, it is necessary to study a new generation of train operation control system. [Method] A design scheme of train operation control system supporting virtual marshalling technology is proposed, and the performance difference between the train operation control system supporting virtual marshalling technology and the traditional one is ana-

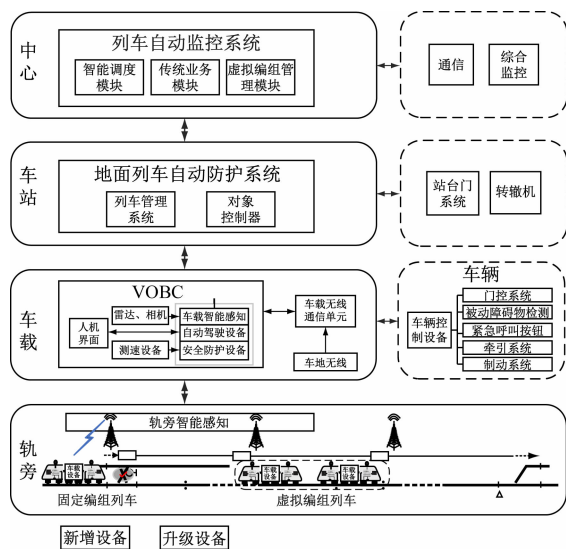
随着我国城市轨道交通网络化发展, 对行车组织方式和运力充分利用的需求越来越迫切。既有线路运营方式多采用固定编组列车单线运营, 列车控制系统按照固定行车间隔控制列车运行, 难以实现通过列车灵活编组满足不同运力需求, 存在部分线路、部分区段运力不足, 同时部分线路、部分区段运力浪费的情况, 因此亟需研究发展支持虚拟编组技术的新一代城市轨道交通列车控制系统<sup>[1]</sup>。为充分利用线路运力, 列车运行控制系统(以下简称“列控系统”)使用虚拟编组技术, 可不依赖列车物理车钩间的相互连接来实现列车动态编组和解编, 满足不同客流量的运输需求。

## 1 列控系统总体设计方案

### 1.1 系统总体架构

根据城市轨道交通运营需求, 本文提出了一个

基于车车通信架构<sup>[2]</sup>并支持虚拟编组技术的列控系统设计方案,该系统总体框架如图1所示。



注:VOBC—车载控制器。

图1 支持虚拟编组技术的列控系统总体架构

Fig. 1 Overall architecture of train control system supporting virtual marshalling technology

在中心层面,在传统调度指挥系统中增设了虚拟编组控制管理模块和应急调度指挥模块,能够实现虚拟编组管理、列车编组过程监控,以及异常编组、解编的动态调整等功能。

在车站层面,取消了区域控制器和联锁设备,设置了列车管理系统和对象控制器两个地面设备。列车管理系统监控在线列车状态,包括虚拟编组列车状态,为故障降级的列车设置防护区域。对象控制器可采集各种按钮状态、操作轨旁设备、联动站台门,也支持为包括虚拟编组列车在内的列车锁闭资源。

在列车层面,升级了车载设备,支持自主移动授权计算和虚拟编组。通过与地面对象控制器交互获取线路资源,基于车车通信获取交互确认编组信息后,调整安全防护模型,自动控制编组列车接近,实现自动虚拟编组;编组建立后,根据前车信息预测计算自身的移动授权,实现基于“撞软墙”模型的编组列车自动运行。增加了智能感知设备,可通过降低定位误差缩短编组内列车追踪间隔。

通过与列车自动监控系统通信,编组列车可识别本车的编组任务,协同前/后列车实现站台协同开关门、播报和显示编组相关信息。

取消了轨旁定位应答器,设置了标志牌,使用

智能感知定位技术实现了列车的快速初始定位。

## 1.2 与传统列控系统的差异分析

1) 运行控制逻辑。不同于使用车钩进行物理连接的编组列车,虚拟编组列车在运行过程中未使用车钩或其他机构连接列车,也就不能利用车钩在前后列车之间传递动能。因此虚拟编组内的列车均需要独立控制自身运行。与传统以单质点模型控制列车运行的机制相比,这种运行控制机制发生了显著变化。

2) 线路资源管理。传统列车控制系统中,两列列车紧密追踪,联锁及地面 ATP(列车自动防护)分别锁闭轨道资源和道岔资源,直到列车出清<sup>[2-3]</sup>。支持虚拟编组技术的列车控制系统中,虚拟编组的各列车同时执行同一运行计划,在线路资源(道岔、区段)的使用需求上保持一致,因此 ATP 在处理虚拟编组列车的资源锁闭需求时按照一列列车的方式使用和释放线路资源。该场景下两种列车控制系统的实现效果类似,但线路资源锁闭、解锁的逻辑不同,传统列控系统由地面设备完成线路资源管理,支持虚拟编组技术的列控系统由车载信号设备申请和释放线路资源。另一方面,两者的列车资源授权逻辑不同,在传统列控系统中,两列列车申请同一个进路资源时,进路内方信号机会有开放—关闭—重新开放的过程;而虚拟编组列车运行时,列控系统将编组列车视为一列列车,虚拟编组列车使用同一进路资源时,进路内方信号机不会有开放—关闭—重新开放的过程,随时允许编组内的后车进入进路。

3) 调度指挥机制。虚拟编组技术的应用,打破了固定编组运行模式,具备了以小编组、高密度开行列车的条件,列车运行间隔缩小,列车运行过程中可在线进行编组、解编作业,调度调整手段更加丰富。同时,虚拟编组下的故障场景也更加复杂,调度指挥难度更高。为了提升调度员的处置效率、减少人工操作的复杂度,需要提升系统故障自动判断和自动化处置能力,尤其是在突发事件条件下的应变能力。

## 2 虚拟编组关键技术

全自动虚拟编组方式与传统全自动车钩固定编组方式在列车运行控制功能方面应保持一致,如列车接近防护和控制、编组列车管理和监控等功能。因此支持虚拟编组技术的列控系统需解决以

下几个关键技术。

### 2.1 基于“撞软墙”的协同控制技术

为实现虚拟编组列车单元间近距离追踪运行,列控系统通过编组领头列车的速度、加速度、位置信息预测计算其制动过程的速度曲线和位置曲线,以此为依据计算编组领头列车与跟随列车的安全防护点,这种防护方式称为基于相对制动距离的安全防护,即“撞软墙”<sup>[4]</sup>。这种防护模型相比常规的瞬停防护模型能实现更近的追踪距离,而此技术要求前车向后车提供相关信息以实现停车紧急制动过程的预测,其实现原理如图2所示。仅基于前车即刻紧急制动来预测防护点的算法,列控系统考虑因素比较单一,控制裕量可能较多,导致后车的控车速度相对较低,影响了列车区间运行时间和停站间隔。因此,在控制算法中,需同时考虑系统制动性能偏差及牵引性能偏差在内的控制偏差,这些偏差直接影响虚拟编组系统性能。通过调整制动系统、牵引系统输出和控制策略,限制异常情况下的输出,降低系统对牵引、制动过程预测的误差,可缩小虚拟编组列车安全防护距离,进而实现较小的编组内列车运行间隔和停车间隔。

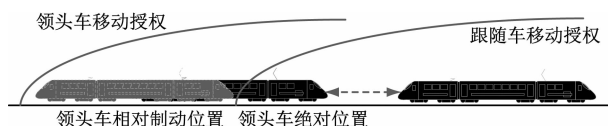


图2 “撞软墙”模型原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the “collision soft wall” model principle

### 2.2 调度辅助处理策略生成及计划在线调整

列车虚拟编组需以运营管理规则、应急故障处置预案和历史数据为基础,构建列车自动监控系统状态与调度决策的关联机制。列车自动监控系统的调度辅助决策模块能根据客流或故障的影响范围、影响时长及影响趋势,确定运行列车编组、解编、跳停、加开临客等方案,为调度提供决策支持。

根据运营组织需要,列车自动监控系统自动识别线路上可进行编组和解编的列车,自主确定需进行编组或解编的列车编号、编组位置及时机,自动生成列车在线编组方案,提示行调预览及调整运行方案,并能自动完成顺序扣车、文字指引、电子调度命令等操作,可减少调度员操作复杂性,提升调度员调度指挥的专注度和处置效率。

### 2.3 基于群体智能的虚拟编组控制技术

基于人工智能算法和深度学习技术,通过多传感器融合,利用深度学习算法实现对轨行区域的多目标识别检测,应用高精度电子地图及高精度定位技术实现列车的自主定位及行进线路精准预测。构建集实时监测和数据采集的传感器网络,结合人工智能领域的深度强化学习方法,实现全时空的动态信息采集与融合,实现数据共享和协同控制。

针对虚拟编组列车高密度行车过程中编组列车的安全防护需求,结合列车动态运行安全时空轨迹实时预测技术,构建基于相对速度的列车全时空避撞防护控制模型。基于模型预测控制理论,根据行车全场景进行多层控制器设计,建立群体协同追踪算法求解多目标优化问题,实现多车同步跟踪运行。

## 3 虚拟编组技术工程设计

### 3.1 停车区域

虚拟编组列车领头车尾端与跟随车头端的距离间隔被定义为虚拟编组停车间距,领头车与跟随车进入停稳状态的时间间隔被定义为列车单元停车时差。虚拟编组列车停车间距直接影响土建投资,需综合考虑线路旅行速度、运行间隔及建设成本。

经实测及分析,虚拟编组列车停车时,因低速停车阶段跟随车的安全限制速度较低,在其他因素固定的情况下,虚拟编组列车停车过程所耗费的时间与虚拟编组停车间距呈反相关性关系,列车单元停车时差与虚拟编组停车间距呈反相关性关系。

特别考虑到站台停车情况,领头车乘客等待开门时间不宜过长,宜为2 s以内<sup>[5]</sup>。结合城市轨道交通运行系统对停站时间、折返效率的要求,虚拟编组停车间距宜设置为5~6 m,如图3所示。虚拟编组列车停车区域长度应综合列车长度及虚拟编组停车间距进行设计。

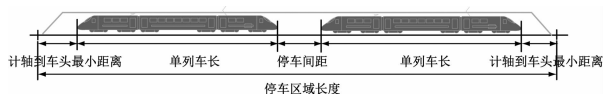


图3 虚拟编组列车停车区域长度

Fig. 3 Length of the virtual marshalling train parking area

### 3.2 正线站台区域

适配虚拟编组列车的正线站台区域设计需要



重点考虑乘客乘降作业及与站台门机械结构的匹配关系。由于存在虚拟编组列车停车间距原因,虚拟编组列车停车点需要结合站台门间距设置,在满足停车间距要求的情况下实现车门与常规列车站台门一一对应。基于上述原则,综合虚拟编组列车停车间距、常规站台门间距、列车第一客室门至第一节车厢车钩长度等因素,选取满足停车距离的最小间隔站台门数量,设置站台停车点和站台长度。

以北京地铁11号线为例,列车第一客室门至第一节车厢车钩断面长度为3.88 m,A型车的客室门间距为4.56 m,综合考虑得出虚拟编组列车在站台的停车间距为5.92 m。虚拟编组列车在站台停车时中间两个站台门不开启。

### 3.3 站台门接口

在虚拟编组列车与其他模式编组列车进行混合运行条件下,站台门系统需要支持多种编组类型的列车进站,以满足乘客乘降作业。为此,信号系统承载的控制设备与站台门系统可采用扩展性更强的网络接口方案(或网络及硬线共存方案)实现,既可根据编组类型控制站台门开闭,又可根据虚拟编组下每列列车对应的站台门进行灵活开闭。

## 4 结语

支持虚拟编组技术的列控系统,在传统列控系统和全自动车钩固定编组的关键技术基础上,采用了基于“撞软墙”模型协同运行控制、基于智能感知的列车运行控制等关键技术。同时,车车通信架构为进一步发挥虚拟编组技术优势提供了更合理的系统架构设计基础。

虚拟编组技术工程应用时,在规划设计阶段需对虚拟编组列车停车、乘客乘降过程进行分析,可通过优化站台区域设计方案,在较小投资增幅的情况下,实现对传统停站作业的兼容。

支持虚拟编组技术的列控系统已经从理论逐步走向了实践,越来越具备工程可实施性。随着虚拟编组技术在城市轨道交通领域的大规模应用,列控系统在客流变化时能够快速调整在线列车编组

长度,进而实现运输能力的调整;能够更好地解决不同时段、不同地段下“客流”与“运力”不匹配的问题,提高路网运输组织的灵活性,提升乘客服务水平。

## 参考文献

- [1] 施仲衡,丁树奎.城市轨道交通绿色低碳发展策略[J].都市快轨交通,2022,35(1):1.  
SHI Zhongheng, DING Shukai. Strategies for green and low-carbon development of urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(1): 1.
- [2] 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,2017,30(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, 30(4): 91.
- [3] 朱志伟,李聪.基于车车通信的地铁列车自主运行系统线路资源管理方案研究[J].城市轨道交通研究,2021,24(10):137.  
ZHU Zhiwei, LI Cong. Research on wayside infrastructure management scheme in metro train autonomous control system based on vehicle-to-vehicle communication[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(10): 137.
- [4] 唐涛,罗啸林,刘宏杰,等.城轨列车虚拟编组安全防护与运行控制技术研究进展[J].科技导报,2023,41(10):31.  
TANG Tao, LUO Xiaolin, LIU Hongjie, et al. Research review of the protection and operation technology for virtually coupled train sets in metros[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(10): 31.
- [5] 刘宏杰,唐涛,张艳兵,等.城轨虚拟编组关键性能指标及技术探讨[J].都市快轨交通,2023,36(1):28.  
LIU Hongjie, TANG Tao, ZHANG Yanbing, et al. Discussion on the key performance indicators and technologies of virtual coupling in metros[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(1): 28.

· 收稿日期:2023-06-26 修回日期:2023-10-15 出版日期:2024-06-10  
Received:2023-06-26 Revised:2023-10-15 Published:2024-06-10  
· 第一作者:张杨,高级工程师,yang.zhang@cq-tct.com  
通信作者:刘合叶,高级工程师,heye.liu@bj-tct.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license