

城市轨道交通虚拟编组列车间隔防护距离计算的工程应用研究

梁九彪

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉)

摘要 [目的]城市轨道交通虚拟编组列车运行符合绿色节能和绿智融合发展工程的建设要求。为了解决虚拟编组列车运行追踪间隔控制难题,应确定影响虚拟编组间隔距离控制的主要因素。[方法]针对虚拟编组列车运行控制技术,以虚拟编组列车间隔防护原理及信号系统方案为基础,建立虚拟编组列车追踪相对速度防护模型,通过计算参数分析间隔距离控制的影响因素,并总结虚拟编组的技术特点和工程应用优势。[结果及结论]虚拟编组的前后列车追踪距离的主要影响因素是追踪列车的控制设备动作反应时间和列车运行速度,虚拟编组列车具备追踪间距短、列车运行效率高、运输组织灵活等应用价值。

关键词 城市轨道交通;虚拟编组列车;间隔防护距离计算

中图分类号 U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.12.042

Engineering Application of Calculation for Interval Protection Distance between Virtual Marshalling Trains in Urban Rail Transit

LIANG Jiubiao

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China)

Abstract [Objective] The operation of virtual marshaling trains (abbreviated as V-train) in urban rail transit meets the construction requirements for green energy conservation and green intelligence integrated development projects. In order to solve tracking interval control problems of V-train operation, the main factors affecting the virtual marshaling interval distance control should be determined. [Method] Aiming at the V-train operation control technology, a tracking relative speed protection model for V-train is established based on its interval protection principle and signal system scheme. The influencing factors of interval distance control are analyzed through calculation parameters. The technical characteristics and engineering application advantages of virtual marshaling are also summarized. [Result & Conclusion] Main factors affecting the tracking distance between the front and rear V-train are the ac-

tion response time of the control equipment on the tracking train and the train running speed. V-train application values such as short tracking distance, high train running efficiency and flexible transportation organization are exhibited.

Key words urban rail transit; virtual marshaling trains; interval protection distance calculation

国家近期发布了绿色节能行动方案和绿智融合发展的建设要求,中国城市轨道交通协会也提出了绿色城市轨道交通发展行动方案,信号系统作为绿智融合发展的最重要环节,通过合理控制列车运行间隔、灵活编组和自动运行以实现节能的目的,由于虚拟编组列车运行控制技术具有小编组、运输能力大的特点,可以通过灵活的编组技术来提高列车利用率,达到乘客出行与车辆运能的协同匹配,实现绿色出行、快速乘车的设计理念。虚拟编组技术充分展现了绿智融合发展要求,故研究虚拟编组列车间隔防护的关键技术具有重要意义。

欧盟在“地平线 2020”的构筑未来铁路系统联合计划(Shift 2 Rail)项目中提出了虚拟编组概念^[1],主要包含列车与信号控制系统协同控制以实现列车间按虚拟编组方式进行运行。灵活实现列车的解编和联挂(车钩连挂不改),其具有运输灵活、能力提高明显、客运适应性强的优势,将成为未来运输组织和列车控制技术的发展方向^[2]。

虚拟编组列车控制技术是在车-车通信技术之上的演进,属于城市轨道交通列车运行控制系统第四代(CMTCS 4 级)技术,根据信号系统技术演进,可以延伸提出虚拟闭塞概念,使信号列车控制技术由移动闭塞进入虚拟闭塞阶段。虚拟编组技术的核心是列车间隔安全防护技术,虚拟编组两列车间最小间隔距离是工程应用关注的重要技术指标^[3]。

1 虚拟编组列车间隔防护原理

列车虚拟编组自主运行系统是在车-车通信系

统移动闭塞列车运行的基础上,通过信号系统控制列车间的信息交互与感应,实现两列车或多列车的虚拟闭塞运行。基于虚拟编组的列车运行,主控车与追踪车按照车-车通信方式保持连接,建立动态的追踪距离,实现前后车的安全追踪,从而提高运输效率^[4]。

列车虚拟编组的建立是基于车-车通信的共享列车运行控制信息,打破了传统的通过物理机械车钩联挂(车钩连挂不改)与解编的限制,列车运行控制系统采用相对速度防护模型,将两列车或多列车进行逻辑锁闭方式组成单列车运行;列车运行基于行为轨迹预测的车群控制,以加速度趋同为目标,按照相对速度防护模型实现距离、速度同步控制。列车运行控制系统采用的相对速度防护模型原理如图 1 所示。

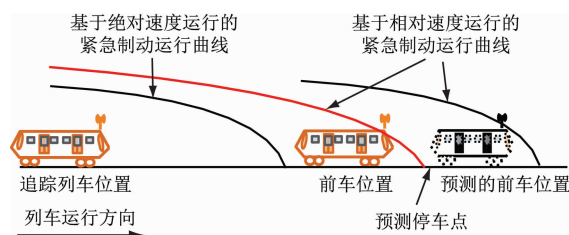


图 1 相对速度防护模型原理图

Fig. 1 Schematic diagram of relative speed protection model

追踪列车的运行轨迹以前车动态运行的预测列车停车位置包络线尾端为停车点,追踪列车根据前车的运行状态动态调整,以相对速度防护模型曲线按照移动闭塞方式追踪运行。该模型基于相对速度的列车全时空避撞防护控制机制,采用列车动态运行安全时空轨迹实时预测技术,构建面向全过程避撞的高密度追踪防护控制优化模型。

前车按正常的列车运行速度曲线运行,追踪列车的安全防护是按照紧急制动曲线模型动态防护至前车的尾端安全点,保证前车紧急制动停车时追踪列车能够以紧急制动停车在前车安全包络线的尾端,以避免碰撞,从而保证两车的运行安全。追踪列车与前车相互传输列车位置、列车运行速度、加速度、紧急制动状态、移动授权、列车完整性、定位误差等安全信息,为相对速度防护模型曲线提供必要的实时计算信息,控制本列车的安全运行。前后列车必要时相互传输列车运行计划、列车运行状态、虚拟联挂(车钩连挂不改)指令等非安全信息,条件具备时,形成虚拟编组车队运行。

当追踪运行的两车间隔满足安全距离要求时,两车可通过信号系统控制锁闭组成一列车队,组合为主控车和追踪车^[5],由前车作为主控车控制两列车的运行,形成两列车虚拟编组车队;根据同样原理,追踪运行的后车还可以加入已有的虚拟编组车队,形成三列车或更多列车构成的虚拟编组车队。三列车虚拟编组车队示意如图 2 所示。

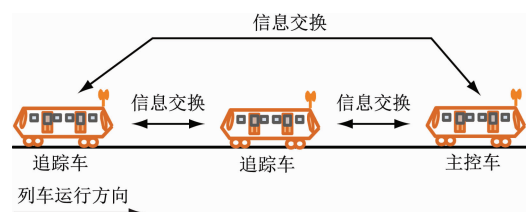


图 2 三列车虚拟编组车队示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three-train virtual marshaling fleet

列车虚拟编组的解编是编组车队到达共同的目的地后,列车运行控制系统根据列车运行计划目的地的差异进行虚拟解编作业,主控车向追踪列车交出控制权,使追踪列车作为主控车,或各个列车独立按照列车运行计划运行。

2 虚拟编组列车运行控制系统方案

虚拟编组主要由信号系统和车辆系统实现,技术核心是信号系统对列车的精确、实时、安全控制,虚拟编组列车运行控制系统整体采用中心、轨旁、列车三层架构,分为中心控制层、轨旁控制层和列车车载设备层。

虚拟编组列车运行控制系统以车-车通信系统控制架构进行搭建,系统构成如图 3 所示。

控制中心设备主要由 ATS、MSS、SMC 及 DCS 等设备构成,信号的应用服务器、数据库服务器可以纳入云平台统一控制,能够实现多专业高度集成,实现运营的监控、调度指挥。

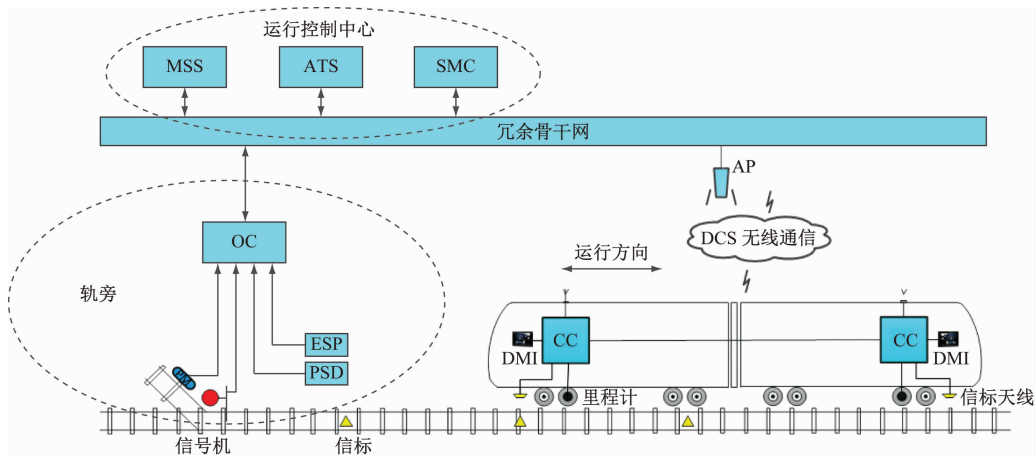
轨旁控制层主要由 OC、DCS 等组成,实现轨旁道岔、站台门、紧急关闭按钮等线路资源设备的控制和管理;DCS 实现车地通信、数据交互功能^[6]。

列车车载设备层主要由 ATP(列车自动防护)/ATO(列车自动运行)、DCS 及测速、定位等设备组成,实现列车自主安全运行、虚拟编组与解编、与前后列车无线通信等功能;必要时列车可配置基于车路协同感知的列车自主防护运行系统,以相机、激光雷达和毫米波雷达等多传感器信息融合技术实

现列车降级模式运行。

所示。

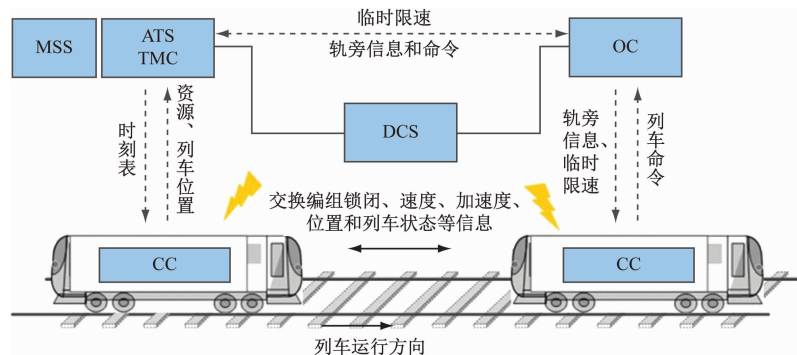
虚拟编组列车运行控制系统的信息流向如图 4



注:MSS 为维护监测系统;ATS 为列车自动监控;SMC 为资源管理器;OC 为目标控制器;ESP 为紧急关闭按钮;PSD 为站台门;AP 为无线接入点;DCS 为数据通信系统;DMI 为车载人机界面;CC 为车载控制器。

图 3 虚拟编组列车运行控制系统构成图

Fig. 3 Composition diagram of virtual marshaling train operation control system



注:TMC 为列车管理器。

图 4 虚拟编组列车信息流向示意图

Fig. 4 Schematic diagram of virtual marshaling information flow

虚拟编组列车接收运行控制中心 ATS 运行计划命令,由运行控制中心、车站、车载信号设备协同控制实现,虚拟编组主控车与追踪车需要实时交互编组锁闭、速度、加速度、紧急制动状态、移动授权、列车完整性、位置、定位误差和列车运行状态等信息^[7],不断调整自己在编组中的目标速度、目标加速度和目标间距,避免与前方列车相撞,以保障列车安全运行。

3 列车间隔防护距离计算与分析

虚拟编组列车间隔采用基于相对速度距离控制追踪技术,列车间隔防护距离与前后两列车的控车曲线密切相关。基于相对速度的追踪模型如图 5 所示。

虚拟编组列车正常追踪运行时,其前后列车速度差应在允许范围之内,可以假定在最不利情况出现时,前后列车运行的初速度 v_0 一致,在追踪列车车载设备及车辆的反应时间内,虚拟编组追踪列车的最大速度 $v_{\text{追}}$ 计算可简化为:

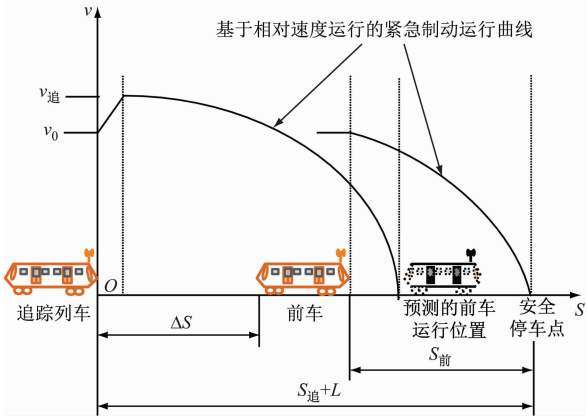
$$v_{\text{追}} = v_0 + a_{\text{追}} t_{\text{追}}$$

式中:

$a_{\text{追}}$ ——追踪列车的最大加速度;

$t_{\text{追}}$ ——追踪列车设备动作反应时间,其中包括追踪列车接收前车信息的通信延迟时间。

在忽略线路坡度因素下,前后列车按虚拟编组的最小追踪距离与前后车的运行速度、加减速度及追踪列车的车载设备及车辆的反应时间密切相关。最小追踪距离的最不利应用场景是前车紧急制动



注： v 为列车速度； S 为距离； L 为列车长度； v_0 为列车运行初速； $v_{\text{追}}$ 为追踪列车最大计算速度； ΔS 为追踪列车与前车的最小间隔； $S_{\text{追}}$ 为追踪列车在最不利场景下的运行距离； $S_{\text{前}}$ 为前车在最不利场景下的运行距离。

图 5 虚拟编组列车间隔相对速度追踪模型图
Fig. 5 Tracking model diagram of virtual marshaling train interval relative speed

时,追踪列车处于最大加速阶段,在追踪列车收到前车紧急制动信息后开始紧急制动减速,由于追踪列车设备动作反应时间引起两列车在最不利场景下的最大运行距离差值即为安全防护追踪间隔。

$$\Delta S = S_{\text{追}} - S_{\text{前}}$$

假定不考虑列车定位误差,追踪列车设备动作反应时间为 1 s,最大常用加速度为 1 m/s^2 ,最大紧急制动减速度为 1.2 m/s^2 ,根据虚拟编组列车基于相对速度追踪模型速度-距离计算曲线,计算结果详见表 1 所示。

表 1 虚拟编组前后列车追踪距离计算结果表
Tab. 1 Calculation results of tracking distance between the front and rear virtual marshaling train

$v_0 / (\text{km/h})$	$S_{\text{前}} / \text{m}$	$S_{\text{追}} / \text{m}$	$\Delta S / \text{m}$
100	321.50	368.63	47.13
80	205.76	243.63	37.87
70	157.54	190.78	33.24
60	115.74	144.35	28.61
50	80.38	104.36	23.98
40	51.44	70.79	19.35
30	28.94	43.66	14.72
20	12.86	22.95	10.09
10	3.22	8.68	5.46
5	0.80	3.95	3.15

假定列车运行速度分别为 100 km/h、10 km/h 时,通过相对速度追踪计算模型改变不同参数,分

析虚拟编组列车间隔距离影响因素,不同列车设备延时时间的计算结果详见表 2 所示。

表 2 虚拟编组追踪列车不同延时时间间隔距离计算结果表
Tab. 2 Calculation results of distance between different time delay intervals for virtual marshaling tracking train

$v_0 / (\text{km/h})$	$t_{\text{追}} / \text{s}$	$S_{\text{前}} / \text{m}$	$S_{\text{追}} / \text{m}$	$\Delta S / \text{m}$
100	0.5	321.50	344.86	23.36
	1.0	321.50	368.63	47.13
	1.5	321.50	392.82	71.32
	2.0	321.50	417.43	95.93
10	0.5	3.22	5.74	2.52
	1.0	3.22	8.68	5.46
	1.5	3.22	12.03	8.82
	2.0	3.22	15.81	12.59

经计算可知,列车运行在某一速度下,虚拟编组前后列车跟踪距离影响最大因素是追踪列车的控制设备动作反应时间(包括追踪列车接收前车信息的通信延迟时间);与列车最小跟踪距离密切相关的还有列车运行速度,当虚拟编组前后列车运行速度较高时,两列车安全防护追踪间隔较大,随着列车运行速度的降低或进站停车时,两列车的安全防护追踪间隔可以相距很小。根据工程应用考虑,在保证包括通信延时在内的追踪列车的设备动作反应时间小于 1 s 时,车站站台上虚拟编组前后列车最小间距可按 5 m 布置,或为保证列车车门和站台门对位停车前后列车中间间隔一扇车门或一节车辆长度布置比较合适,以保证运营安全和运行效率的基础上节约投资。

4 工程应用分析

虚拟编组列车运行控制技术是在车-车通信技术基础上的发展和优化的,具有追踪间距短、能力大、列车运行效率高等优势,虚拟组编和解编时间均较短,对线路通过能力几乎没有影响,同时也具有任意点折返功能,这些特点在工程应用上具备传统 CBTC(基于通信的列车控制)系统无法比拟的应用优势。

虚拟编组能适应客车协同的运输组织需求,可以根据客流的需要,灵活编组列车运行,若辅以智能调度系统,就能实现乘客与列车的最佳匹配,在提高乘客服务水平的同时,提高列车利用率,减少

列车空驶,实现绿色节能出行的目的,并可体现绿智融合工程建设理念,还可以通过工程优化设计,旅客高峰时组织大编组列车运行,非高峰时组织小编组列车运行^[8],并辅以智能判断车站客流,适当延长停站时间,以实现乘客快速乘车的新一代智能运营理念。

虚拟编组技术基础是沿用车-车通信架构,具备互联互通的优势,可有效实现网络化的互联互通运行,列车通过灵活编组、解编,可有效组织主支线运行、跨线运行、快慢车运行^[9]、大小交路运行^[10]等多种运营组织模式,有效适应平峰与早晚高峰客流的最佳匹配,在满足运输组织前提下,能够有效保证线路运力。

5 结语

城市轨道交通虚拟编组技术是列车运输组织绿智融合的重要应用方向,通过解析虚拟编组信号系统方案及数据流,研究基于相对速度安全防护追踪模型及间隔计算,明确虚拟编组列车的运行速度和追踪列车设备动作反应时间是保证安全追踪间隔距离的重要影响因素,虚拟编组列车的运行效率高、站台停车距离可控、运输组织的灵活性高,具备较高的工程应用价值。

参考文献

- [1] 宋志丹,徐效宁,李辉,等.面向虚拟编组的列控技术研究[J].铁道标准设计,2019,63(6):155.
SONG Zhidan, XU Xiaoning, LI Hui, et al. Study on virtual-coupling-orientated train control technique[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(6): 155.
- [2] 贾利民,秦勇,王莉.轨道交通科技发展的方向与任务[J].北京交通大学学报,2016,40(4):25.
JIA Limin, QIN Yong, WANG Li. Scientific and technological innovation of rail transportation—trends and tasks[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, 40(4): 25.
- [3] 余江枫.基于模型预测控制的虚拟编组列车集中式控制方法[D].北京:北京交通大学,2021.
SHE Jiangfeng. A centralized control method for virtually coupled train set based on model predictive control[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [4] 张友兵,刘岭.基于虚拟编组的列车控制系统研究[J].铁道工程学报,2022,39(3):94.
ZHANG Youbing, LIU Ling. Research on the train control system based on virtual coupling[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(3): 94.
- [5] 温佳坤.基于“双领导者-跟随者”模型的虚拟编组列车控制方法研究[D].北京:北京交通大学,2021.
WEN Jiakun. Research on control method of virtual coupling train formation based on 'dual leader-follower' model[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [6] 刘佳.CBTC系统中虚拟编组列控方案研究[J].铁路通信信号工程技术,2022,19(1):73.
LIU Jia. Research on virtual coupling train control solution in CBTC system[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1): 73.
- [7] 张蕾,吴梦委.虚拟编组列车运行控制技术研究[J].铁道技术标准(中英文),2022,4(1):19.
ZHANG Lei, WU Mengwei. Research on operation control technology of virtual marshalling train[J]. Railway Technical Standard (Chinese & English), 2022, 4(1): 19.
- [8] 赵兴东,张蕾,谢莎婷,等.基于虚拟编组技术的首都机场线列车开行方案研究[J].现代城市轨道交通,2022(4):59.
ZHAO Xingdong, ZHANG Lei, XIE Shating, et al. Research on train operation plan of Capital Airport Express based on virtual coupling technology[J]. Modern Urban Transit, 2022(4): 59.
- [9] 白佳薇,张琦,鲁放.城市轨道交通虚拟编组列车快慢车组织方案研究[J].都市轨道交通,2022,35(1):126.
BAI Jiawei, ZHANG Qi, LU Fang. Skip-stop operation organization plan of virtual coupling trains in urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(1): 126.
- [10] 杨安安,孙继营,汪波,等.基于虚拟编组技术的大小交路列车开行方案优化[J].北京交通大学学报,2022,46(4):9.
YANG An'an, SUN Jiying, WANG Bo, et al. Optimization of virtual-coupling-orientated train operation plan based on full-length and short-turn routing[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(4): 9.
- 收稿日期:2022-11-24 修回日期:2022-12-24 出版日期:2024-12-10
Received:2022-11-24 Revised:2022-12-24 Published:2024-12-10
· 通信作者:梁九彪,正高级工程师,ljb611@126.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

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umt 1998. tongji. edu. cn