

基于车车通信的虚拟重联技术研究

陈 凯

(中车信息技术有限公司, 北京 100036)

摘 要: 虚拟重联技术作为提升轨道交运力使用效能的有效手段, 可以解决现有机车重联操作繁琐、列车网络初运行效率低等问题。为提高运营的灵活性, 实现安全、高效的列车追踪运行, 总结分析机械重联的透明传输和闭环控制思想, 在基于前车速度的列车安全间隔防护技术的基础上, 依据阈值管理的动态运行调整方式, 提出基于车车通信和车辆—信号系统融合的虚拟重联方案。依托高质量的车车通信技术, 前后车实时通信, 后车充分响应前车的控制命令、运行状态等信息, 确保后车始终基于前车的安全状态控车, 从而实现虚拟重联列车的闭环同步控制, 进一步减小虚拟重联列车内部的运行间隔, 提高行车效率。

关键词: 城市轨道交通; 车辆—信号融合; 车车通信; 虚拟重联; 同步控制

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2023)01-0022-06

Research of Virtual Coupling Technology Based on Vehicle-to-Vehicle Communication

CHEN Kai

(CRRC Information Technology Co., Ltd, Beijing 100036)

Abstract: Virtual coupling technology, an effective means to improve the efficiency of rail transportation capacity use, can solve the problems of cumbersome operation and low initial efficiency of train network existing in mechanical coupling. To improve the flexibility of operation and achieve safe and efficient train tracking, this study summarizes the ideas of transparent transmission and closed-loop control of mechanical coupling. On the basis of the safety interval protection technology of the preceding train speed and the dynamic operation adjustment mode of threshold management, a virtual coupling scheme based on vehicle-to-vehicle communication and vehicle-signal system fusion is proposed. Thanks to high-quality vehicle-to-vehicle communication technology, real-time communication occur between two vehicles, and the following train fully responds to the control command and operation status of the predecessor and always operates according to the safety status of the predecessor. In this case, the closed-loop synchronous control of the virtual coupled train can be realized and further reduce the internal running intervals of the virtual coupled train, improving the operation efficiency of the train.

Keywords: urban rail transit; vehicle-signal fusion; vehicle-to-vehicle communications; virtual coupling; synchronous control

1 研究背景

轨道交通具有运能大、速度快、安全准时等优点, 为了更精准灵活地匹配客流需求变化, 进一步提升运力使用效能, 近年来列车在线重联成为新的技术研究

和实践探索的方向^[1-3]。中国铁路总公司在车站通过两端的全自动钩, 实现动车组在线灵活编组重联及解编, 按铁路 2022 年第一季度列车运行图, 福州站每日有 5 组动车组在车站重联或解编后运行。城市轨道交通领域也开始研究地铁在线编组技术, 近期上海地铁

收稿日期: 2022-07-30 修回日期: 2022-12-30

作者简介: 陈凯, 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事轨道交通控制技术研究, 1347173285@qq.com

引用格式: 陈凯. 基于车车通信的虚拟重联技术研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(1): 22-27.

CHEN Kai. Research of virtual coupling technology based on vehicle-to-vehicle communication[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 22-27.

表 1 机械重联编组控制命令与状态反馈
Table 1 Control commands and status feedback of mechanical coupling

序号	信息类型	主要控制信息	序号	信息类型	主要控制信息
1	网络控制指令	生命信号	18	空调控制指令	空调温度调节指令
2		时间	19	联挂指令	后开闭机构开关指令
3		列车配置	20	牵引状态	线电压百分比
4		列车速度	21		线电流值
5	牵引控制指令	列车运行方向	22		主断路器状态
6		牵引允许	23		受电弓状态
7		牵引启动	24		牵引力矩设定/实现值
8		力矩百分比	25		牵引故障状态
9		恒速控制指令	26	制动状态	制动施加状态
10		牵引限速指令	27		主风管压力
11	制动控制指令	手柄制动位状态	28		手柄制动位状态
12		保持制动请求/缓解指令	29	辅助状态	轮径值
13		最大常用制动指令	30		辅助系统状态
14		轮径值	31	烟火状态	烟火报警信号
15	辅助控制指令	空调启动指令	32	车门状态	车门状态
16		风机启动指令	33	充电机状态	电池电压
17		辅变控制指令	34		充电状态

3 虚拟重联控制技术

列车机械重联运行技术成熟、可靠，能够满足列车在线灵活连挂解编的需求，但也存在连挂操作繁琐的问题。以上海地铁 16 号线为例，在人工驾驶(RM)模式下，人工操作两列车的连挂操作需要 5 min 以上，连挂后列车网络初运行和信号系统确认也需要 100 s 以上。由于在线连挂操作都是占用车站线路资源进行的，所以系统运行效率偏低。

虚拟重联控制取消了物理节点连接，由基于无线通信的虚拟节点代替，列车间的虚拟编组、解编和运行通过无线通信控制，在保证灵活运营、提高运行能力的同时，可以大大提升列车重联操作效率。相对于机械重联控制，由于虚拟重联控制没有物理连接，在运行过程中车组间会有不同的动力学行为，因此该技术的核心是重联编组内部两列车之间如何高效合理地实现安全防护和同步控制，使列车以尽可能小的间隔安全运行。

通过无线网络，虚拟重联编组内的列车可以建立稳定的车车通信，通过无线网关实现两列车之间类似 ETB 总线的连接和传输，保证前后车控制轮询周期的同步，确保表 1 所列运行及状态数据的透明传输。在

此基础上，提出基于车车无线通信的虚拟重联控制思想：充分发挥列车间无线网络的作用，在编组内部前车运行状态和操纵控制指令向后车进行透明传输的基础上，后车通过分析前车运行控制指令和执行状态数据，实时根据前车的当前位置、速度以及下一控制周期的运行情况(包括牵引和制动指令及其执行状态反馈)，制定后车的运行指令并进行控制和修正，以保证编组内必要的列车间安全防护距离和前后车的实时同步运行。此控制策略借鉴了机械重联中透明传输、统一控制的思想，尽可能充分发挥无线通信优势，避免传统信号追踪运行控制中将前车作为黑箱或障碍物进行追踪的做法，以提高系统控制安全性和重联运行效率。

3.1 虚拟重联列车的安全防护

对于虚拟重联列车来说，虽然列车间进行了虚拟连接，但本质上是不同列车，首先要解决编组内列车间的安全间隔防护。在传统基于通信的列车控制(communication-based train control, CBTC)系统中，列车由于不掌握前车运行控制指令和执行数据，间隔防护均是将前车作为只有位置信息的黑箱，即后车将前车安全车尾作为安全防护点，默认前方列车的速度为

零,基于静态制动距离来计算安全防护曲线。实际上,在虚拟重联前后车追踪运行的条件下,如果后车能够实时同步获知前车的制动指令,以及包括速度、位置在内的执行状态,并保证两车制动指令同步执行,就完全可以按照实时动态制动距离来获得更小的安全防护间隔,即保证后车的列车自动防护(automatic train operation, ATP)在完全监控模式下,按照前车实际位置、速度以及制动状态,实时计算基于动态制动距离的行车间隔和限速曲线,从而对列车同步控制进行安全防护。

在虚拟编组内对同步运行的前后车进行安全防护时,主要考虑各种可能的延时对同步运行安全防护的影响,具体有以下3种场景。

1) 场景1:前车在ATP防护触发紧急制动时,后车立即同步紧急制动,此场景需考虑无线通信延时(包括端到端通信延时和判定通信中断的时间) t_c 、后车处理延时 $t_{后}$ 。

2) 场景2:非信号触发前车紧急制动,如车门状态丢失、触发紧急制动手柄等,后车通过无线网络收到前车紧急制动状态后同步制动,此场景需考虑前车紧急制动采集处理延时 $t_{前}$ 、无线通信延时 t_c 和后车处理延时 $t_{后}$ 。

3) 场景3:车组间无线通信丢失时,后车获取不到前车状态,根据故障导向安全原则,后车将紧急制动停车,此场景需考虑无线通信延时 t_c 和后车处理延时 $t_{后}$ 。

综合以上情况分析,系统延时最大的为场景2,考虑到目前主流无线通信系统的可靠性,可将无线通信延时 t_c 设定为最大200 ms,前车处理延时 $t_{前}$ 设定为50 ms,后车处理延时(含继电器驱动时间50 ms)设定为100 ms,则系统最大延时估算为

$$t_{延}=t_{前}+t_c+t_{后}=350 \text{ ms} \quad (1)$$

当前后两列车组速度相同(即 $v_i=v_{i-1}$)、紧急制动率相同时,两列车组的间隔可达到理想的最小值,此时因延时导致的列车安全间隔 $L_{延}$ 与列车实时运行速度成正比,有

$$L_{延}=v_{i-1}t_{延} \quad (2)$$

另一方面,基于当前速度传感器+应答器的列车定位方式,速度传感器测速定位会带来一定的误差,列车离应答器越远,定位误差会越大。根据线路应答器布置和安全位置计算,该位置误差导致的列车安全间隔 $L_{安}$ 最小可控制在1~5 m,与运行速度无关。

基于以上分析,两列车间的最小间隔为 L_0 ,即列

车间同步运行时,列车间隔小于 L_0 时则触发安全防护控制,有

$$L_0=L_{延}+L_{安} \quad (3)$$

理论上,在虚拟重联编组内,如果后车能够实时同步获知前车状态,并保证两车制动指令同步执行,当车速80 km/h时,虚拟编组安全间隔的最大估算值可不超过12.8 m。运行速度越低,需要的安全间隔越小,后车ATP可以根据速度实时动态控制两车的安全间隔。

3.2 虚拟重联列车的同步运行控制

虚拟重联编组内列车在安全间隔防护下的同步运行,与CBTC系统中前后车在安全防护状态下的追踪运行有相似之处。在传统CBTC系统中,常用的列车运行控制方法为目标速度追踪控制,即后车根据前车的运行状态及地面设备状态生成目标速度曲线,并利用比例积分微分(proportional integral derivative, PID)算法进行牵引制动指令计算,控制本车按照目标速度曲线运行。在虚拟重联列车中,后车能够实时同步获知前车的牵引制动指令及其执行状态,并可以保证两车运行指令同步执行,列车间应按照机械重联的控制思想实现同步控制,即两车速度要保持基本同步,而PID控制方式会增大列车间的控制误差,难以满足编组内短距离同步控制的需求。因此,本研究参考机械重联编组技术,结合虚拟编组自动运行场景,提出采用以下同步控制方式(见图2)。

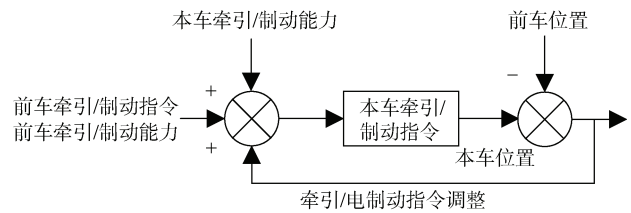


图2 后车同步控制牵引制动

Figure 2 The following train synchronous control schematic

1) 前车利用无线网络,参照机械重联列车透明传输控制机制,将表1中的牵引制动命令等控制指令和运行状态数据发送给后车,传输率可参照ETB总线传输率。

2) 以列车运行速度同步为控制目标,后车直接响应前车牵引制动指令,并结合自身载荷状况、牵引制动设备状态来动态调整牵引和电制动指令。

3) 当由于速度误差积累等导致前后车距离超过自动同步间距阈值区间(L_1)时,触发后车ATO控制,在前车牵引制动指令的基础上进行实时调节,调整列

车速度,以保证列车间隔回归到自动同步间距 L_1 阈值的区间以内。

按照这一控制思想,虚拟编组同步运行控制主要是:在列车运行过程中,通过牵引和电制动来小范围调整后车运行速度。为了更及时有效地响应前车控制命令,从系统构成上应将 ATO 设备与车辆牵引系统控制设备进行功能融合,如图 3 所示。在融合控制器中,ATO 与牵引控制单元(traction control unit, TCU)进行背板级融合,在硬件和软件层面形成控制和执行闭环,接收前车的相关运行指令和运行信息,根据本车状态计算并输出牵引或电制动力。当融合控制器接收到前车牵引或制动命令并判断列车间距超过自动同步阈值(L_1)时,会直接通过牵引逆变器实现快速的牵引或电制动力调整。相比传统车辆 ATP/ETB-ATO-VCU-TCU 的控制链路,融合控制大大缩短了牵引和电制动控制延时,预计可减少 200 ms 以上的延时,提升列车同步控制精度。

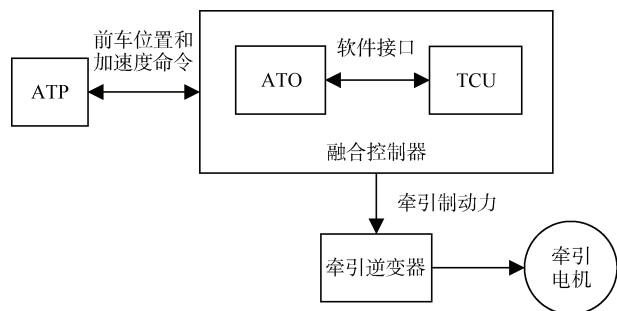


图3 信号与车辆牵引融合控制

Figure 3 Signal and vehicle traction fusion control

3.3 仿真计算结果

通过对虚拟重联编组内安全间隔防护和同步运行控制的分析表明,后车通过运行同步控制,保证了前后车运行间隔在自动同步阈值 L_1 区间内,后车 ATO 可以同步执行前车 ATO 的牵引制动指令。当运行间隔小于阈值下限时,后车可通过施加电制动等方式调速,增大两车的距离,保证列车之间的间距不会进一步减小到 L_0 而触发 ATP 紧急制动;当运行间隔大于阈值上限时,后车通过增加牵引力调速,缩小两车的距离,保证列车的理想运行间隔。

根据信号系统 ATO 控制经验, L_1 可设定为 $1.5L_0 \sim 2L_0$ 之间,即

$$1.5L_0 < L_1 < 2L_0 \quad (4)$$

$$\frac{1.5v_{i-1}t_{\text{延}}}{3.6+1.5L_{\text{安}}} < L_1 < \frac{2v_{i-1}t_{\text{延}}}{3.6+2L_{\text{安}}}$$

其中 $t_{\text{延}}=0.35$ s。

通过以上分析可以看出,虚拟重联列车最小运行间隔正常控制在 $1.5L_0 \sim 2L_0$ 之间。当超过该范围时,触发 ATO 调节;运行间隔小于 L_0 时,则触发紧急制动防护。虚拟重联列车运行间隔是重联列车运行速度的正相关函数,根据速度不同,运行间隔同步增大,假设 $L_{\text{安}}$ 取最大值为 5 m,运行间隔仿真计算结果如图 4 所示。列车在自动同步间距阈值区间(L_1)自动虚拟重联运行,当列车运行速度为 80 km/h 时,安全运行间隔为 12.8 m,自动同步控制的间距阈值区间控制在 19.2~25.6 m 之间。

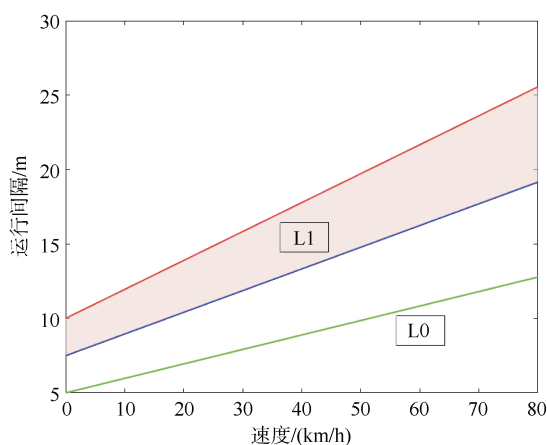


图4 自动同步控制间隔与速度的关系

Figure 4 Automatic synchronous control interval versus speed

为进一步提高虚拟重联技术的可用性,结合同步运行的控制策略,可进一步研究仿真虚拟重联内的两列车动态运行至同一站台进站停车的可能性。通过对线路应答器位置的优化,结合 ATP 基于速度对安全间隔的实时动态控制,可以使编组内两车运行的间距尽可能小,以保证两列车最近的车门之间在停车后间隔一个站台门的距离,满足站台门与车门一一对应的要求。以某车型和站台门为例,在虚拟重联编组停车时,前后两车相邻最近车门的间隔需要控制在 9.12 m,前后车车钩连挂面之间的距离为 1.5 m 左右。站台停车误差以 0.3 m 计算,结合上述公式分析可得出,列车运行速度在 5 km/h 时,即可满足 1.5 m 编组内两车的列车间距,保证车门和站台门的对位。此时,再通过无线网络,保证前后车同侧车门在前车司机控制下,统一实现开关门操作和状态反馈以及安全联锁,虚拟重联控制技术可以满足编组在同一站台同步停车上下客的需求。

4 虚拟重联技术发展方向

基于以上分析,虚拟重联运行效率的提升主要受制于无线通信的丢包率、时延及吞吐量、列车—信号控制的效率、车辆内部控制的处理延时以及列车安全定位精度等因素。为了进一步缩小车组间的运行间隔,应采用以下手段提高系统相关设备的性能和可靠性。

1) 运用高效能处理器,采用综合承载网络和通用安全平台,统一车辆感知与集中运算,突破车辆控制和信息集成的一体化平台技术瓶颈,实现列车多专业系统深度集成,缩短车载内部状态感知和控制的延时。

2) 充分利用 5G 等新型通信手段,实现车车通信技术,提升车车间通信的可靠性,降低丢包率,降低端到端延时。

3) 采用基于多传感器融合的高精度列车安全定位技术,减小列车安全包络。

5 结语

虚拟重联列车是未来轨道交通研究的热点之一,但也存在很多尚待解决的问题。笔者主要依托于车车通信和车辆融合控制技术,研究更加高效的编组内安全防护和更加精准的编组内同步控制的手段,为进一步缩短虚拟重联列车编组长度、实现真正的虚拟重联同步运行控制,提供一种新的设计思路和方法。随着无线通信技术和车辆控制水平的不断提升,虚拟重联控制的安全性和效率将逐步达到工程应用水平,从而能够真正发挥虚拟重联列车灵活、高效、节能等特点,大幅提高轨道交通运输效率。

参考文献

- [1] 范海宁,何勇浩.城市轨道交通列车灵活编组方案及功能实现[J].城市轨道交通研究,2021,24(9):200-203.
FAN Haining, HE Yonghao. Flexible marshalling scheme and function realization of urban rail transit train[J]. Urban mass transit, 2021, 24(9): 200-203.
- [2] 卫亮,严业智,王洪智.无人驾驶模式下地铁列车在线联挂解编技术研究[J].科技创新与应用,2022,12(28):1-4.
WEI Liang, YAN Yezhi, WANG Hongzhi. Research on decode technology of metro train online coupling in unmanned driving mode[J]. Technology innovation and application, 2022, 12(28): 1-4.
- [3] 胡荣华.城市轨道交通列车自动灵活编组技术应用研究[J].城市轨道交通研究,2022,25(11):143-147.
HU Ronghua. Application of flexible urban rail transit train formation technology[J]. Urban mass transit, 2022, 25(11): 143-147.
- [4] 乔志远.上海轨道交通16号线列车在线联挂/解编功能的优化[J].城市轨道交通研究,2022,25(11):103-106.
QIAO Zhiyuan. Optimization of Shanghai metro line 16 online coupling and uncoupling functions[J]. Urban mass transit, 2022, 25(11): 103-106.
- [5] 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):19-26.
ZHANG Lei, WU Mengwei. Research on operation control technology of virtual marshalling train[J]. Railway technical standard, 2022, 4(1): 19-26.
- [6] 白佳薇,张琦,鲁放.城市轨道交通虚拟编组列车慢车组织方案研究[J].都市快轨交通,2022,35(1):126-133.
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): 126-133.
- [7] 纪玉清,欧冬秀,常鸣,等.列车虚拟编组应用需求及关键技术研究[J].城市轨道交通研究,2022,25(11):57-61.
JI Yuqing, OU Dongxiu, CHANG Ming, et al. Research on application requirements and key technologies of train virtual formation[J]. Urban mass transit, 2022, 25(11): 57-61.
- [8] SCHUMANN T. Increase of capacity on the shinkansen high-speed line using virtual coupling[J]. International journal of transport development and integration, 2017, 1(4): 666-676.
- [9] 陈启香.基于列车间直接通信的列车编队追踪间隔控制策略研究[J].电子设计工程,2016,24(9):97-100.
CHEN Qixiang. Research on adjustment strategy of tracking interval of trains formation operation based on train-to-train communication[J]. Electronic design engineering, 2016, 24(9): 97-100.
- [10] 刘岭.基于虚拟耦合的列车群体智能控制技术研究及展望[J].铁路通信信号工程技术,2020,17(2):1-9.
LIU Ling. Research and prospect of intelligent control technology for virtually coupled train formation[J]. Railway signalling & communication engineering, 2020, 17(2): 1-9.
- [11] 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):155-159.
SONG Zhidan, XU Xiaoning, LI Hui, et al. Study on virtual-coupling-orientated train control technique[J]. Railway standard design, 2019, 63(6): 155-159.

(编辑:王艳菊)