

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.02.001

基于车车通信的城轨列控系统 在线编组技术方法研究

魏柏全¹, 石海丰¹, 姜璐², 王猛¹, 张皓¹, 徐建军³, 王柯³

(1. 北京和利时系统工程有限公司, 北京 100176; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081; 3. 上海申铁投资有限公司, 上海 200032)

摘要: 为提高城轨列车运输效率, 满足动态调整编组的运营需求, 提出一种基于车车通信的列控系统在线编组技术, 包括车车通信灵活编组技术和车车通信虚拟编组技术。首先建立车车通信灵活编组功能的技术方案和作业步骤, 阐述灵活编组下的核心技术, 如编组区域停车点设置、控车端车载确定、编组形式校核与防护、碰撞包络方案、车辆与车载融合技术; 其次, 建立车车通信虚拟编组功能的技术方案和作业步骤, 阐述虚拟编组下的核心技术, 如高性能的车车通信技术、车车通信安全防护技术、协同控制技术、多传感器融合技术等。数据表明, 基于车车通信的编组技术较传统 CBTC 的编组技术作业时间减少约 14 s, 效率提升约 34%。研究结果旨在为下一代列控系统编组技术作业提供理论基础和借鉴作用。

关键词: 城市轨道交通; 列车控制系统; 车车通信; 在线编组; 灵活编组; 虚拟编组

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)02-0001-12

Online Marshalling Technology for of Urban Rail Train Control Systems Based on Vehicle-to-Vehicle Communication

WEI Baiquan¹, SHI Haifeng¹, JIANG Lu², WANG Meng¹, ZHANG Hao¹, XU Jianjun³, WANG Ke³

(1. Beijing Hollysys Systems Engineering Co., Ltd., Beijing 100176; 2. China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100081; 3. Shanghai Shen-Tie Investment Co., Ltd., Shanghai 200032)

Abstract: To enhance the train transportation efficiency under this system and meet the operational needs of dynamic marshalling adjustment, an online marshalling technology for urban rail train control systems based on vehicle-to-vehicle (V2V) communication is proposed, including flexible marshalling and virtual marshalling technologies. Firstly, the technical scheme and operation procedures for V2V-based virtual marshalling are established, and the core technologies under flexible marshalling are expounded, such as the setting of marshalling area parking points, determination of the vehicle-mounted control end, verification and protection of marshalling forms, collision envelope schemes, and vehicle- vehicle-mounted integration technology. Secondly, the technical scheme and operation procedures for the virtual marshalling function of V2V communication are established, and the core technologies under virtual marshalling are expounded, such as high-performance V2V communication technology, V2V communication security protection technology, collaborative control technology, multi-sensor fusion technology, etc. The results show that compared with the traditional CBTC marshalling technology, the the V2V-based marshalling technology reduces operational time by approximately 14 seconds and improves efficiency by about 34%. This study aims to provide a theoretical

收稿日期: 2025-06-10 修回日期: 2025-10-17

第一作者: 魏柏全, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事轨道交通信号控制、编组技术等研究, wbaiquan101@126.com

基金项目: 国家自然科学基金铁路基础研究联合基金项目(U2468208); 北京市自然科学基金丰台创新联合基金项目(L251033)

引用格式: 魏柏全, 石海丰, 姜璐, 等. 基于车车通信的城轨列控系统在线编组技术方法研究[J]. 都市快轨交通, 2026, 39(2): 1-12.

Wei Baiquan, Shi Haifeng, Jiang Lu, et al. Online marshalling technology for of urban rail train control systems based on vehicle-to-vehicle communication[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(2): 1-12.

basis and reference for the marshalling technology operations of the next-generation train control system.

Keywords: urban rail transit; train control system; vehicle-to-vehicle (V2V) communication; online marshalling technology; flexible marshalling technology; virtual marshalling technology

0 引言

基于通信的列车控制系统(communication based train control, CBTC)是目前城市轨道交通领域广泛使用的列车运行控制技术。在对 CBTC 系统的架构资源进行整合和功能分配后,基于车车通信的城轨列控系统逐渐成为城市轨道交通的主流信号系统。其通过车与车之间无线通信方式进行列车间隔的控制,同时整合地面资源设备,从车-地-车的控制方式转变为车-车之间的控制,具备地面设备资源最小化和车车通信的 2 大特征,同时具备列车主动进路、自主防护、自主运行等功能,是未来列控系统发展的重要方向^[1]。

目前,城市轨道交通面临着诸多问题,如线路增多,客流量增大,全天不同运营时段客流分布不均匀,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,在大客流的运力需求、小客流的能耗浪费及运营服务水平(运营间隔)的矛盾越来越明显。因此,灵活编组技术在城市轨道交通的运用越来越广泛。在客流高峰期,采用长编组的运营模式;在客流平峰期间,采用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^[2-3]。目前灵活编组技术已运用于配置 CBTC 系统灵活编组的上海地铁 5 号线和北京地铁 3 号线,配置全自动无人驾驶(full automatic operation, FAO)系统灵活编组的重庆江北机场捷运线路。

在车车通信列控系统上实现灵活编组技术,本文提出一种车车通信的城轨列控系统在线编组方法,包括车车通信灵活编组技术和虚拟编组技术。阐述车车通信列控系统架构和灵活编组技术特点,分别对灵活编组和虚拟编组的详细作业和核心技术进行阐述。该技术能显著提高运输效率和降低运营成本。

1 基于车车通信的城轨列控系统架构

基于车车通信的城轨列控系统主要包括列车监控系统(automatic train supervision, ATS)、运营控制中心(object control center, OCC)、数据通信系统(data communication system, DCS)和车载控制器(vehicle on-board controller, VOBC),如图 1 所示。

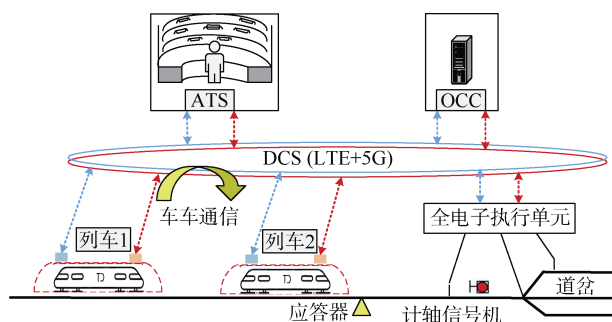


图1 基于车车通信的城轨列控系统架构

Figure 1 Architecture of urban rail train control system based on V2V communication

OCC 采用全电子模块,减小了继电器使用,降低了故障率。OCC 控制计轴、信号机、道岔等并反馈实时状态。VOBC 根据 OCC 实时获取线路内的其余列车信息(包括列车数量、列车 ID、运行方向、车组号、列车位置等),建立车车通信并主动计算移动授权。VOBC 之间交互的数据包括运行方向、头尾端状态、列车速度、对应移动授权(movement authority, MA)信息、列车包络位置等。DCS 使用长期演进(long-term evolution, LTE)和 5G 技术,采用双网冗余方式,负责各个子系统之间通信。系统模块划分如图 2 所示。

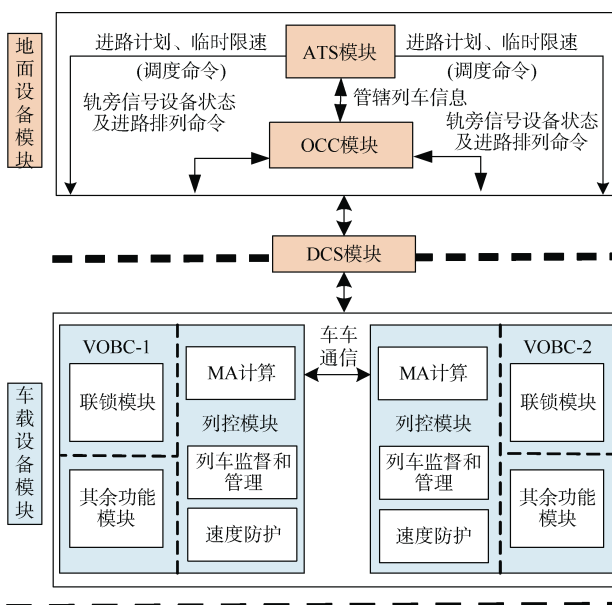


图2 基于车车通信的城轨列控系统模块划分

Figure 2 Module division of urban rail train control system based on V2V communication

相关设备模块功能如下。

1) ATS: 负责列车运行的控制和监督。下达行车计划至各个列车, 并采集 OCC 的轨旁设备状态。

2) OCC: 负责轨旁转辙机、信号机和道岔的执行及表示, 根据列车发出的进路信息办理操纵请求执行相应的命令。同时具备线路资源管理控制功能, 管理和记录各个列车的 ID 和信息, 为后车提供需要建立通信前车的编号和位置信息, 实现列车通信管理。具备接收来自 ATS 下发的临时操作命令^[4]。

3) VOBC: 列控模块负责超速防护、行车许可生成、车车通信管理等功能; 联锁模块负责与 OCC 模块交互, 对列车进路的管理、排列和执行; 其余功能模块负责电子地图存储查询、控车管理、全自动场景功能管理等。

4) DCS: 负责子模块之间的通信。

2 在线编组技术

在线编组技术包括灵活编组技术和虚拟编组技术。灵活编组技术是支持列车之间进行碰撞编组作业形成多编组列车, 或多编组列车进行灵活解编作业形成单编组列车, 灵活编组技术要求列车处于指定的线路(转换轨、存车线)^[5]。虚拟编组是列车之间可以进行实时通信, 无需进行实体连接, 根据实际运营需求进行虚拟连接运营, 虚拟编组包括虚拟联挂、正线编队运行、列车摘解等相关功能^[6-7]。

灵活编组技术在全自动线路运用也比较成熟^[8]。灵活编组要求信号系统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, 其总体目标为:

1) 实现 1 次 2 列装备车载设备的列车自动编组及解编, 编组及解编后保持编组前的驾驶模式;

2) 编组列车满足全自动运行相关场景下的全功能运行要求, 并具备与非编组列车的混合运行能力及互联互通跨线运营能力。

3 车车通信灵活编组技术

3.1 车车通信灵活编组方案

在车车通信的灵活编组过程中, ATS 自动给去编组列车(V2V-Positive Marshaled Train, VV-PMT)和被编组列车(V2V-Negative Marshaled Train, VV-NMT)分配编组计划, OCC 负责进路的排列、地面设备动作的执行及列车位置信息的记录和管理。VV-PMT 和 VV-NMT 根据计划和命令执行在线编组任务, 进行进路的自动排列及编组作业的自动执行, 即 VV-PMT 根

据计划自动运行至灵活编组区域与 VV-NMT 进行碰撞编组, 编组后列车(V2V-Marshaled Train, VV-MT)自动完成驾驶台换端且保持驾驶模式不变。此后列车可根据 ATS 计划出库运营至正线, 执行后续载客运营作业。车车通信灵活编组支持有人驾驶和无人驾驶的作业方式, 本文以无人驾驶为例阐述, 具体编组作业阶段如下。

3.1.1 编组命令下达阶段

如图 3 所示, VV-PMT 根据运营计划和规划路径以全自动驾驶模式运行至转换轨(ZHG)停车点 1 停稳待准, VV-NMT 根据运营计划以全自动驾驶模式在灵活编组区域的库内 A 轨(AG)停车点 3 停准。

在路径规划完成后, VV-PMT 向 OCC 发送排列对应编组进路的命令, OCC 负责进路的排列和地面设备动作的执行, 同时登记 VV-PMT 和 VV-NMT 列车编组前的编组形式等信息。

定义列车入库方向驾驶台端为 T1 端, 出库方向驾驶台端为 T2 端。VV-PMT 和 VV-NMT 激活端均为 T1 端, OCC 向 VV-PMT 提供 VV-NMT 的列车 ID 和位置, VV-PMT 建立与 VV-NMT 之间的通信。VV-PMT 和 VV-NMT 根据 VOBC 的列控模块计算移动授权, 移动授权(movement authority, MA)终点分别是前车尾后退一定距离(配置值), 即 MA1 和 MA2。

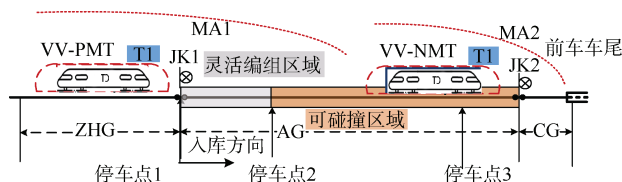


图 3 编组命令下达阶段

Figure 3 Marshalling command issuance phase

ATS 根据计划自动向 VV-PMT 发送去编组命令、VV-PMT 的 ID、VV-NMT 的编组形式和 VV-MT 列车编组形式, 向 VV-NMT 发送被编组命令、VV-NMT 的 ID、VV-PMT 编组形式和 VV-MT 编组形式。其中, 编组形式由列车编组数和各编组列车 ID 组成, 如 4 编组列车编组形式可为 {GroupNum; TrianId1; TrianId2; TrianId3; TrianId4}。

VV-PMT 和 VV-NMT 分别校核 ATS 下发的编组形式命令, 校核成功后自动回复命令确认。校核方式见表 1。

编组形式校核通过后, VV-PMT 自动进入编组停车点工况。VV-NMT 回撤 MA2 至进库(JK)信号机处,

并持续输出切除牵引命令。

表 1 校核方式

Table 1 Verification method

VV-PMT 校核方式	VV-NMT 校核方式
VV-PMT 编组数不大于 VV-NMT 编组数, 且不大于 VV-MT 编组数	VV-NMT 编组数大于 VV-PMT 编组数, 且不大于 VV-MT 编组数
VV-PMT 编组形式是 VV-MT 编组形式的子集	VV-NMT 编组形式是 VV-MT 编组形式的子集
VV-PMT 编组形式位于 VV-MT 编组形式的前端部分	VV-NMT 编组形式位于 VV-MT 编组形式的后端部分

3.1.2 准备编组阶段

VV-PMT 判断满足表 2 条件后, 自动计算和生成可碰撞 MA。

表 2 可碰撞 MA 生成条件

Table 2 Collision-permissible MA generation conditions

序号	可碰撞 MA 生成条件
1	VV-PMT 与 VV-NMT 之间区段无占用
2	VV-PMT 规划路径包括 VV-NMT 包络
3	VV-PMT 列车在 ZHG 停车点 1 停准, 且进入编组停车点工况, 且编组形式校核通过
4	VV-NMT 在 AG 停车点 3 停准, 且输出切除牵引, 且编组形式校核通过

可碰撞 MA 起点为 VV-PMT 最小安全后端, 终点为 VV-NMT 最大安全前端往后延伸一段距离(配置值), 碰撞限速点(可允许碰撞编组的位置)为 VV-NMT 最小安全后端, 如图 4 所示。

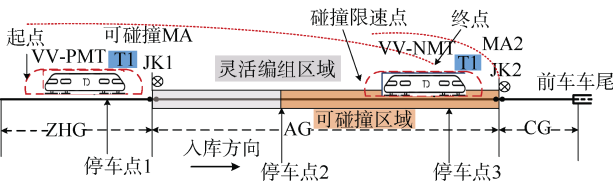


图 4 准备编组阶段

Figure 4 Marshalling preparation phase

可碰撞区域长度为 AG 轨道区段长度减去停车点 2 基于轨道区段的偏移, 停车点 2 的位置与 VV-NMT 的编组形式相关, 设置方式参见 3.4.1 节。

VV-PMT 根据可碰撞 MA 自动运行至停车点 2(具备去编组属性)停准并输出切除牵引命令, 然后进入去编组工况。此时 VV-PMT 进行各车辆子系统(包括车门系统、牵引系统、制动系统、车载火灾报警系统等)检测, 判断无影响去编组的故障后, 伸出去编组列车的车头车钩(T1 端), 并向 ATS 发送去编组工况、去编

组的车组号和伸出的车钩号。

ATS 收到 VV-PMT 的去编组工况后, 自动向 VV-NMT 转发该工况。VV-NMT 收到后, 自动进入休眠模式, 取消驾驶室激活, 进入被编组工况且持续输出紧急制动。此时 VV-NMT 进行各车辆子系统(包括车门系统、牵引系统、制动系统、车载火灾报警系统等)检测, 判断无影响编组的故障后, 伸出被编组列车的车尾车钩(T2 端), 向 ATS 发送被编组工况、被编组的车组号和伸出的车钩号。

3.1.3 碰撞编组阶段

如图 5 所示, ATS 收到对应工况和车钩状态后, 自动向 VV-PMT 下发开始编组命令, 此时 VV-PMT 自动缓解切除牵引, 且根据可碰撞 MA 生成碰撞防护曲线, 并以一定限速在可碰撞区域匀速运行。在运行至与 VV-NMT 一定距离时, VV-PMT 牵引切除, 以惰行状态在可碰撞区域与 VV-NMT 进行编组碰撞。

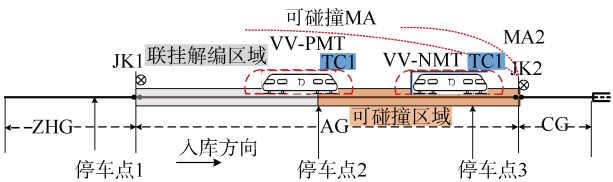


图 5 编组碰撞阶段

Figure 5 Marshalling collision phase

3.1.4 试拉和电气连接阶段

VV-PMT 与 VV-NMT 碰撞停稳后, 2 列车之间断开无线通信, 同时自动完成伸出车钩的机械连接(VV-PMT 的 T1 端车钩和 VV-NMT 的 T2 端车钩), 并分别将机械车钩状态上报至 ATS。

ATS 判断 2 列车对于伸出车钩的机械状态为连接且锁闭时, 自动向 VV-PMT 发送试拉命令, VV-PMT 收到后开始向 OCC 申请向后试拉的区段锁闭, OCC 完成区段锁闭后, 向 VV-PMT 回复试拉锁闭成功。VV-PMT 收到后, 允许向后(出库方向)试拉作业, VV-PMT 输出向后方向牵引指令, 当 VV-PMT 判断试拉牵引力达到一定值(列车启动运行的最小值)且机械车钩仍处于连接且锁闭状态时, 认为试拉成功, 取消试拉命令, 并向 ATS 发送试拉成功状态。

试拉成功后, VV-PMT 和 VV-NMT 开始进行电气编组阶段, 2 列车分别伸出电气车钩(VV-PMT 的 T1 端车钩和 VV-NMT 的 T2 端车钩), 进行电气车钩编组。电气编组完成后 2 列车重新完成车辆检测初运行, 形成编组后列车拓扑网结构, 重新计算列车方向, 完成

全列车网络地址重映射,实现 VV-PMT 和 VV-NMT 之间的电气网络贯通。此后 OCC 撤销对应的编组进路和资源占用。

3.1.5 自动换端阶段

电气贯通后, VV-PMT 和 VV-NMT 编组成功,分别退出去编组工况和被编组工况,并向 ATS 上报编组成功,此时 VV-NMT 自动断开与 ATS 的连接,同时断开与 VV-PMT 的无线通信。

VV-PMT 在编组成功且等待 VV-NMT 与 ATS 断开连接后,自动换端至出库方向一端(T2 端),并保持全自动驾驶模式不变, VV-PMT 取消可碰撞 MA,编组完成后的列车为 VV-MT, VV-MT 根据前车车尾位置计算出库 MA。OCC 根据计划和列车信息排列对应出库进路。VV-MT 根据出库 MA 和 ATS 运营计划进行后续载客作业。ATS 记录编组后的列车信息 VV-MT。编组自动换端作业如图 6 所示。

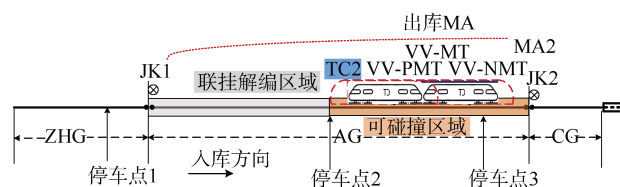


图 6 编组自动换端阶段

Figure 6 Marshalling automatic cab-changing phase

3.2 车车通信灵活解编方案

待解编列车(V2V-Decoupling Train, VV-DT)可根据运营计划自动解编为 VV-DT1 和 VV-DT2,解编后的列车可继续以全自动模式出库进行正线载客作业。具体解编作业阶段如下。

3.2.1 解编命令下达阶段

如图 7 所示, VV-DT 根据运营计划在库内编组解编区域停车点 3 停准, T1 为激活端, VV-DT 的移动授权为入库 MA。

ATS 根据计划自动向 VV-DT 发送解编命令, VV-DT 的 ID、VV-DT1 的编组形式和 VV-DT2 的编组形式。ATS 记录解编前 VV-DT 信息。

VV-DT 校核 ATS 下发的解编命令信息,判断其编组形式可解编成 VV-DT1 的编组形式和 VV-DT2 的编组形式之和,则认为校核通过并向 ATS 回复命令确认。VV-DT 进行车辆子系统(包括车门系统、牵引系统、制动系统、车载火灾报警系统等)检测,判断无影响解编的故障后,自动进入解编工况,并将工况信息发送给 ATS。

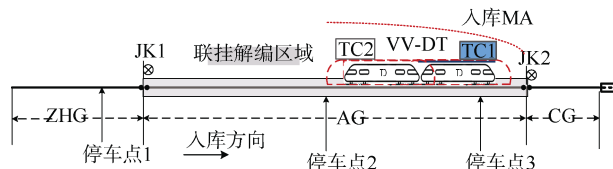


图 7 解编命令下达阶段

Figure 7 Decoupling command issuance phase

3.2.2 自动换端阶段

如图 8 所示, VV-DT 进入解编工况后, T1 端向 T2 端传送列车定位信息, T2 端定位后开始向 ATS 发起连接。VV-DT1 的移动授权为出库 MA, VV-DT2 的移动授权为入库 MA。

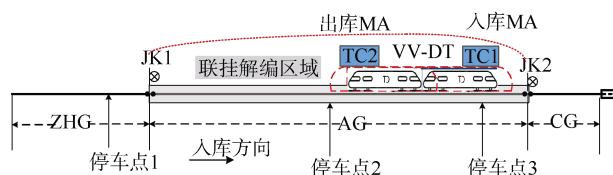


图 8 解编自动换端阶段

Figure 8 Decoupling automatic cab-changing phase

3.2.3 车钩解编阶段

T2 端与 ATS 连接成功后,根据 ATS 下发 VV-DT1 的编组形式和 VV-DT2 的编组形式找到需要解编的车钩,识别车钩号并开始执行电气车钩解编命令后,断开电气车钩(VV-DT1 的 T1 端车钩),此时 VV-DT2 自动输出 T2 端驾驶室激活信号。

T2 端驾驶室激活后, VV-DT1 和 VV-DT2 自动完成车辆自检工作且判断具备投入运营条件后,自动向根据解编的车钩号执行机械车钩的解编命令,断开机械车钩。

3.2.4 解编完成阶段

VV-DT1 和 VV-DT2 检测到机械车钩断开、电气车钩断开后,解编成功,退出解编工况,并将成功上报给 ATS。此时 VV-DT1 可根据运营计划出库进行载客作业。VV-DT2 可根据运营计划自动执行换端,进行出库载客作业。OCC 负责记录和管理列车解编后的列车 VV-DT1 和 VV-DT2 的信息,并执行对应出库的进路排列动作。在 VV-DT2 换端完成后, OCC 将 VV-DT1 的列车 ID 和位置发送给 VV-DT2, VV-DT2 判断条件满足后,建立与 VV-DT1 的通信,后续根据车车通信和线路规划预定地面资源进行追踪运营。

3.3 车车通信灵活编组功能分配

在车车通信的灵活编组功能下,各个子系统的功

能分配如下。

1) VV-PMT: 执行编组形式校核、去编组命令, 编组限速命令、试拉命令、机械车钩伸出命令、电气车钩编组命令。

2) VV-NMT: 执行编组形式校核、被编组命令、机械车钩伸出命令、电气车钩编组命令。

3) VV-MT: 执行自动换端命令且保持全自动驾驶模式。

4) VV-DT: 执行编组形式校核命令、解编列车执行编组形式校核命令、解编命令、机械车钩解编命令、电气车钩解编命令。

5) VV-DT1: 执行定位、连接 ATS 和输出驾驶室激活命令。

6) VV-DT2: 执行向发送解编后列车 1 定位信息, 执行换端命令。

7) ATS: 执行编组解编命令的下达, 运营计划的自动触发, 为列车提供路径规划输入。

8) OCC: 负责记录登记编组列车信息及前车信息的下发, 相关进路排列和资源预定。

3.4 车车通信灵活编组核心技术

3.4.1 编组区域停车点设置

在灵活编组区域, 可根据设置编组停车点个数和区域长度支持不同编组的列车编组和解编。被编组列车在编组前必须处于停准状态。在被编组停车点处, 去编组列车根据自身编组数和被编组列车编组数, 选择被编组列车最近的去编组停车点停车, 进行碰撞编组作业。

根据实际线路和运营制定, 假设线路支持 n 编组运行, 则在灵活编组区域, 制定 1 个被编组停车点, $n-1$ 个去编组停车点, 去编组停车点之间距离相差单编组车长 L , 最后一个去编组停车点距离被编组停车点之间相差 L +可碰撞区域长度 S 。如图 9 所示。

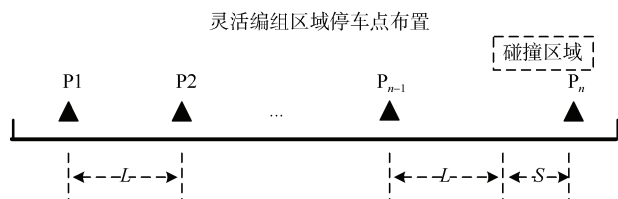


图 9 编组区域停车点设置

Figure 9 Layout diagram of parking spots in marshalling area

3.4.2 控车端车载确定

在基于车车通信的城轨系统灵活编组技术下, 多

车进行编组或解编后, 或列车上电确定编组形式后, 控车端车载的确定和建立逻辑尤其重要。满足以下任一条件时, 本车厢车载为控车端车载, 其余情况本车厢为非控车端车载。

1) 单编组列车, 本车厢有一端驾驶室激活。

2) 多编组列车, 未处于换端过程中, 且本车厢有任何一端驾驶室激活。

3) 多编组列车, 处于换端过程中, 且本车厢为换端前的原激活端, 且换端前的原非激活端驾驶室未激活。

4) 多编组列车, 处于换端过程中, 且本车厢为换端前的原激活端, 且本车厢有任何一端驾驶室激活。

5) 多编组列车, 处于换端过程中, 且本车厢为换端前的原非激活端, 且本车厢有任何一端驾驶室激活, 换端前原激活端未激活。

6) 多编组列车, 处于被编组工况, 且本车厢两端驾驶室都未激活, 且未接收到列车控制与管理系统(train control and management system, TCMS)编组完成状态, 且本车厢车载运行等级为 CBTC 等级。

3.4.3 编组形式校核及防护

车车通信灵活编组技术中, 列车在编组或解编时, 需要对编组形式进行实时确认和防护, 以保证列车正确计算位置和包络。当与 TCMS 通信由连接正常变为连接中断后, VOBC 判断列车编组形式未知, 此时若列车处于非静止状态, 则触发紧急制动停车, 否则输出切除牵引。列车编组数不能大于配置项目最大编组数 n , 否则认为列车编组形式未知。

列车上电后, 与 TCMS 通信正常前, VOBC 不进行编组形式比较, 编组形式为默认。与 TCMS 通信正常后, VOBC 周期使用从 TCMS 获取的编组形式和从下列来源得到的编组形式进行比较。

1) 人工确定: 待机模式(stand by mode, SB 模式)、人工限制模式(restricted manual mode, RM 模式)、人工驾驶模式(code mode, CM 模式)、自动驾驶模式(automatic mode, AM 模式)下, 列车处于静止状态时, 司机可在人机界面(human machine interface, HMI)上选择列车编组数。VOBC 周期将司机输入的列车编组数与 TCMS 发送的编组数进行校核。

2) 唤醒确定: 列车唤醒后, VOBC 读取休眠保存的编组形式, VOBC 周期将该编组形式与从 TCMS 接收到的编组形式进行校核。

3) 编组确定: FAM、AM 和 CM 模式列车编组成功后, VOBC 使用编组完成校核成功后的列车编组形

式。此后，VOBC 周期使用该编组形式与 TCMS 发送的编组形式进行校核。

4) 解编确定：FAM、AM 和 CM 模式列车解编成功后，VOBC 使用解编完成校核成功后的列车编组形式。此后，VOBC 周期使用该编组形式与 TCMS 接收到列车编组形式进行校核。

5) 换端后编组形式确定：多编组列车换端后，当前激活端周期使用原激活端发送的编组形式，VOBC 与 TCMS 接收到列车编组形式进行校核。

6) 远程重启确定：远程重启后，辅助驾驶设备 (assisted operation module, AOM) 向 VOBC 发送重启前的列车编组形式，VOBC 周期将编组形式与从 TCMS 接收到的列车编组形式进行校核。

7) 非控车车载确定：非控车车载从控车车载接收到列车编组形式后，与从 TCMS 接收到的列车编组形式进行比较。在无控车车载时，当列车完整性未丢失时，非控车车载保持已校验通过的编组形式；当列车完整性丢失时，非控车车载判定编组形式未知。

3.4.4 碰撞包络方案

在列车进行碰撞编组时，编组列车和被编组列车包络会发生重叠。此时编组列车的最大安全前端、估计前端、最小安全后端延伸至被编组列车的最大安全前端、估计前端、最小安全前端位置，而编组列车的最小安全后端、估计后端、最大安全后端位置保持不变。被编组列车在判断编组成功后，断开与编组列车的连接，同时降级休眠模式，清除记录的列车位置。OCC 需实时记录编组列车和被编组列车的包络和位置信息。

3.4.5 车辆和车载融合技术

车辆和车载采用融合设计，包括车载 HMI 一体化设计、车载网络融合设计。

1) 车载 HMI 一体化设计。车载 HMI 采用一体化融合设计，在同一个屏幕上同时显示 VOBC 和 TCMS 的信息。物理上 VOBC 和 TCMS 共用 1 套 HMI 硬件。物理连接如图 10 所示。HMI 界面融合设计原则如下：①VOBC 界面信息保持原产品界面不变；②TCMS 界面信息根据项目特点、原产品界面进行设计；③在 VOBC 故障时，TCMS 需提供必要的车辆监控功能；④需满足适当精简重复的界面信息。

2) 车载网络融合设计。车载网络采用实时以太网，并实现一体化融合设计，将传统信号车载网络、车辆控制网和车辆维护网进行融合和统一设计，设置

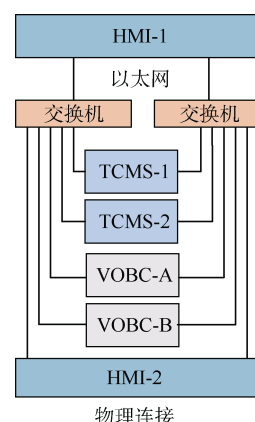


图 10 HMI 一体化设计

Figure 10 HMI integrated design

双套实时以太网，车载信号、TCMS 控制，以及牵引、制动、车门、空调等车辆子系统均通过交换机接入一体化车载网络，通过车载网络进行信息交互，从而简化网络结构，实现大带宽、高实时、高安全、高可靠以及信息共享。

单编组车辆网络拓扑结构如图 11 所示，其中，ETB 为以太网列车骨干网，ECN 为以太网编组网。

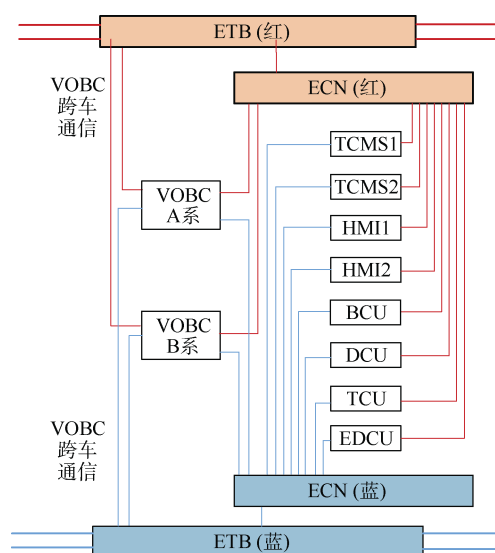


图 11 单编组车辆网络拓扑结构

Figure 11 Network topology structure of a single marshalled train

多编组车辆网络拓扑结构(以 4 编组为例)如图 12 所示。信号 VOBC 和车辆 TCMS 网络融合设计，采用实时以太网，每辆车上配置 2 套独立的融合交换机，各子设备为双归属。车载 PIS 网络单独设置，采用以太网，每辆车上均配置交换机。融合交换机节点使用链路聚合，具备旁路功能。

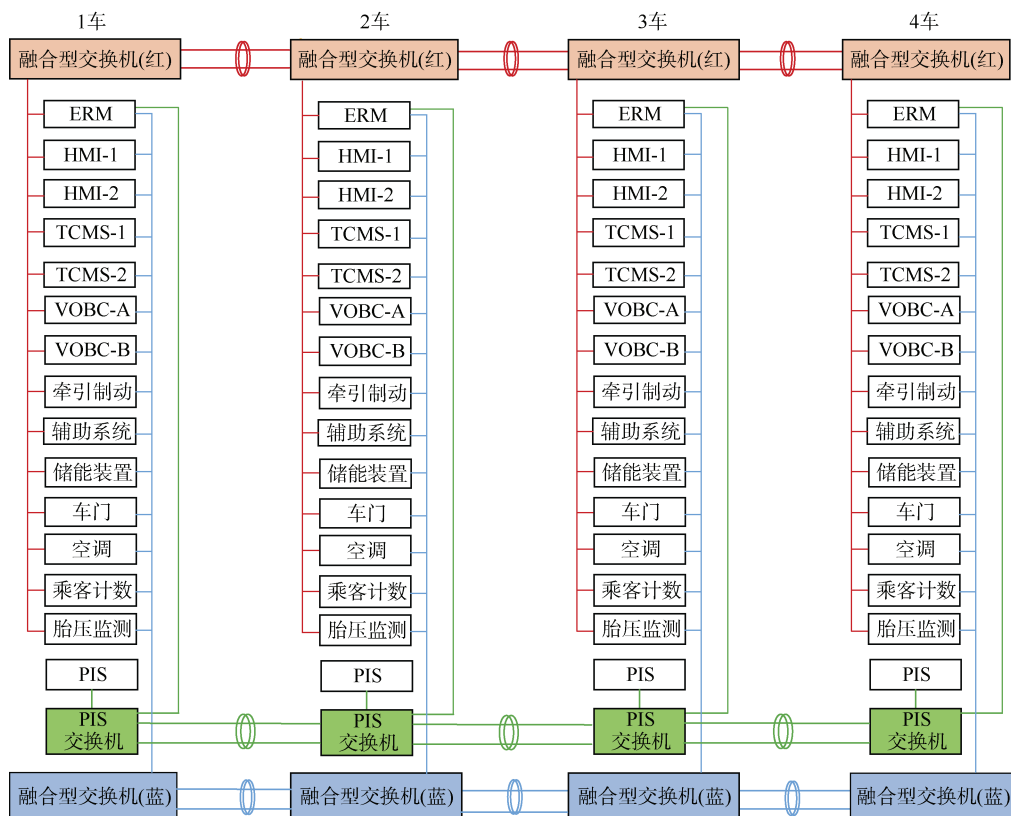


图 12 多编组车辆网络拓扑结构

Figure 12 Network topology of multi-marshalled trains

4 车车通信虚拟编组技术

灵活编组技术需在指定线路进行作业，而虚拟编组技术是一种渐进式的技术革新，对编组地点和运行速度无关系，可以在既有信号系统架构基础上，通过车车通信和协同控制技术实现灵活编组功能。基于车车通信的城轨列控系统虚拟编组技术包括车车通信虚拟重联和车车通信虚拟摘解。

4.1 车车通信虚拟重联方案

车车通信虚拟重联包括准备重联阶段、开始重联阶段、协同运行阶段和重联完成阶段。车车通信重联可包括 2 种方式，第 1 种是被重联列车(V2V-negative virtual coupling train, VV-NVT)静止，去重联列车(V2V-positive virtual coupling train, VV-PVT)低速运行，与前车进行虚拟编组。第 2 种方式是动态重联，即 VV-PVT 控车主动告知需追赶 VV-NVT 列车，完成虚拟重联的过程，以下就动态重联过程展开说明。

4.1.1 准备重联阶段

VV-PVT 以车车通信的方式追踪前车 VV-NVT，2 列车的运行模式独立，互不影响，VV-PVT 以绝对制动模型追踪 VV-NVT，VV-PVT 的行车许可为 MA1，VV-

NVT 的行车许可为 MA2。

ATS 根据 VV-NVT 的状态信息判断列车编组次序，确定虚拟编组信息，向 VV-PVT 发送虚拟编组命令、VV-NVT 的 ID、VV-NVT 的编组形式，向 VV-NVT 发送虚拟编组命令、VV-PVT 的 ID、VV-PVT 编组形式。VV-NVT 和 VV-PVT 判断车辆、牵引、制动等无影响虚拟编组的故障时，检测来自 ATS 编组的命令，通过后进入准备重联阶段，VV-PVT 规划路径，且向 OCC 申请路径资源，2 列车之间的置信区间包络延伸至虚拟预编组列车。如图 13 所示。

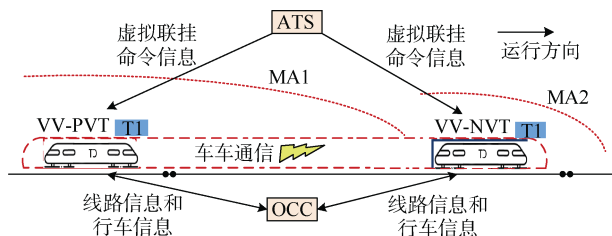


图 13 进入准备重联阶段

Figure 13 Coupling preparation phase

虚拟编组作业可在存车线、转换轨、库线、正线等地点完成。

4.1.2 开始重联阶段

VV-PVT 在校核 ATS 编组命令成功后, 根据车车通信机制, 自动切换撞软墙方式, 计算前车分配的编组目标位置, 规划动态编组目标曲线, 根据该曲线调整列车速度, 追踪前车, 虚拟编组行车许可变为 MA3。VV-NVT 校核编组命令成功后, 开始降速运行, 并实时共享目标位置给 VV-PVT。2 列车位置包络、速度差达到一定条件(根据配置确定)时, 认为虚拟重联成功。虚拟编组内, 列车保持最小追踪间隔, 实现列车协同运行。如图 14 所示。

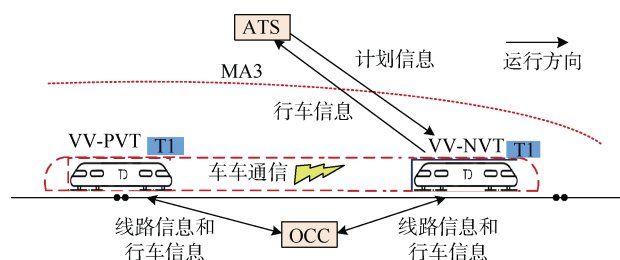


图 14 开始重联阶段

Figure 14 Coupling start phase

4.1.3 重联完成阶段

VV-PVT 和 VV-NVT 重联成功后, 实时共享位置和状态信息, 开始虚拟编组运行。VV-PVT 取消对前车的移动授权追踪, 按照 2 虚拟编队实时运行, 并将编组信息实时更新至 OCC, OCC 记录编组信息并实时监督行车信息, 列车进入虚拟编组运行模式。ATS 取消与 VV-PVT 的通信, 实时与 VV-NVT 通信, 并发送行车计划信息和路径信息。

4.1.4 协同运行阶段

在虚拟编组完成后, ATS 完成与编组后的虚拟编组列车信息和计划交互, OCC 将 2 列车标记为 1 列车进行资源控制, 同时建立虚拟联挂的轨旁资源共享。DCS 为各个系统提供连续独立的信息传输通道, 承载车车通信、车地通信的消息数据传输。

OCC 需实时判断虚拟编组列车是否需要改变行车策略, 需要改变行车策略则摘解虚拟编组, 不需要则按照虚拟编组运行。行车策略需要修改时, ATS 将策略信息发送至 VV-NVT, VV-NVT 判断是否本车满足策略变动时, 向 VV-PVT 申请行车策略变动, VV-PVT 收到后满足新的行车策略后, 回复确认执行, 此后虚拟编组列车保持新的行车策略协同运行, 如图 15 所示。

编组运行必须保证 2 列车有持续可靠的消息交互, 须考虑由于测速误差、通信延时、牵引制动差异引起

的安全间隔, 以及触发紧急制动后续的防护处理。

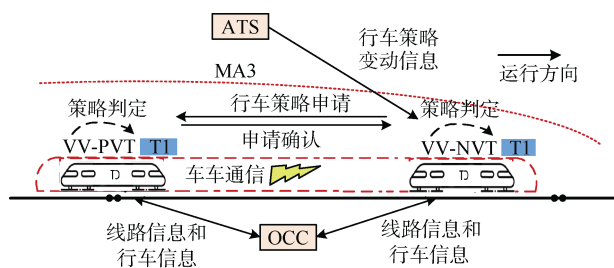


图 15 协同运行阶段

Figure 15 Collaborative operation phase

4.2 车车通信虚拟摘解方案

车车通信虚拟摘解包括准备摘解阶段、开始摘解阶段和摘解完成阶段。车车通信虚拟摘解可实现列车动态摘解, 即协同运行的虚拟编组列车可根据 ATS 计划命令字段进行摘解作业, 或摘解列车由于线路条件不满足协同运行时, 也可自动进行摘解作业。

4.2.1 准备摘解阶段

ATS 下发摘解计划, VV-NVT 接收到摘解计划后, 在判断本车满足摘解条件时(包括车门系统、牵引系统、制动系统、车载火灾报警系统等), 将摘解请求通过车车通信发送给本协同运行内的后车 VV-PVT。VV-PVT 接收到请求后, 检测本车是否满足摘解条件, 在完成摘解作业后, 向 VV-NVT 车回复摘解确认。如图 16 所示。

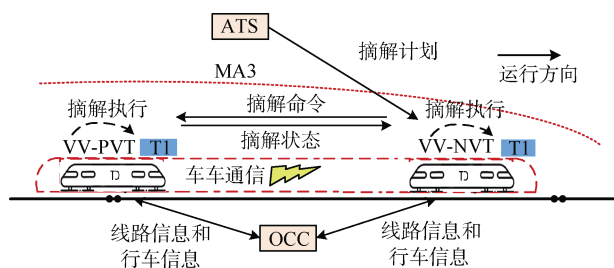


图 16 摘解作业

Figure 16 Uncoupling operation

4.2.2 开始摘解阶段

执行摘解计划时, VV-PVT 开始执行离队作业, 执行减速动作, 并实时监控与 VV-NVT 距离, 虚拟编组列车之间实时共享位置相关信息。2 列车满足一定距离和速度值时, 认为摘解成功。摘解完成信息和行车信息需实时发送给 OCC。

4.2.3 摘解完成阶段

摘解成功后, VV-NVT 向 ATS 上报摘解成功, 同时 ATS 分配新的车次号, 后续摘解后的列车根据移动授权追踪前车。同时, VV-PVT 建立与 ATS 通信, VV-

PVT 根据路径规划实时进行运营。

4.3 车车通信虚拟编组核心技术

4.3.1 高性能的车车通信无线技术

虚拟重联要求车车之间的通信具备消息延时长、设备响应快、可靠性高等特点。同时,需满足高安全性原则,即若出现消息延时大或消息中断等情况时,列车需导向制动停车或切换低模式运行。

在车车通信虚拟编组技术下,前车出现紧急制动至后车施加紧急制动之间的延时包括前车采集紧急制动时间 T_1 ,无线通信延时 T_2 ,后车施加紧急制动延时 T_3 ,若前后车协同运行的速度 V 和制动率一致,则最大延时下的虚拟编组列车间隔为 $S=(T_1+T_2+T_3)*V$ 。同时,考虑测速测距误差下的最小距离间隔 S_2 和一定的安全距离余量 S_3 ,最小协同控制距离为 $S=S_1+S_2+S_3$ 。

目前比较成熟的无线点对点通信技术有蜂窝车联网(cellular vehicle-to-everything, C-V2X)技术^[9]。该技术具备稳定的通信、延时较低且更新频率较快等特点。其基于 5G 的车车通信具备通信延时低、传输速率高特点,同时能显著增强列车之间的主动防护能力,保证列车安全运行^[10]。

4.3.2 车车通信安全防护技术

在车车通信的虚拟编组技术中,车车通信安全防护极其重要,一般需要在虚拟编组列车车头前配置高速摄像头、激光雷达等设备,从而实现对车辆之间及外部环境的自动检测、自主感知,并将相关距离、速度、外部异物反馈给车载系统。车载系统根据当前位置、前车位置、地面资源等信息,自动计算防护距离和保障安全防护。

虚拟编组中的碰撞编组核心在于碰撞的速度和牵引力,需要考虑各种碰撞编组异常场景,需基于“故障导向安全”及高可用性原则进行防护处理。后车需要实时同步前车的牵引制动控制,可以通过融合控制器实现,即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,基于此可减小延时,提高控制精度^[11]。

4.3.3 协同控制技术

在虚拟联挂过程中,车车通信虚拟联挂列车需根据车车位置、OCC 资源、当前列车状态进行协同控制,包括重联列车、被重联列车和摘解列车。各个列车及相关资源形成一个大整体,协同控制运行。其中,最关键技术包括控制算法技术和控制模型技术^[12-13]。

控制算法可基于机器学习算法的控制,而基于神经网络算法的列车自动驾驶参数自学习算法具有独特的优势,其可根据列车位置,建立列车运动模块,同时反馈训练数据的结果和过程,实时调整参数协同控制列车运行,保障列车运行安全。

基于滑模控制的控制模型是对列车的不确定性变化允许进行模块控制,使得列车在阻力、牵引力、异物等外界环境变化干扰时仍具备自适应性,动态响应快,具有极强的鲁棒性。

4.3.4 多传感器融合定位技术

目前 CBTC 系统采用加速度计、雷达、速度传感器、应答器等多种方式进行定位。在基于车车通信的虚拟编组技术下,列车可增加 5G 通信定位技术、全球卫星导航定位技术、惯性导航技术等进行融合定位,增强列车位置的高安全性,提升列车位置的精度。定位技术需独立于信号系统,在不同位置可使用不同的融合技术。

5 效率分析及对比

相比传统 CBTC 系统,基于车车通信的列控系统使用“车-车”通信方式,减少了地面设备,实现地面设备一体化。该技术下的编组技术能提高运营效率,降低运输成本,降低故障概率。

基于某线路数据下,对基于 CBTC 的灵活编组技术和基于车车通信的灵活编组技术作业时间进行试验。传统 CBTC 系统包括子系统 ATS、VOBC、区域控制器(zone controller, ZC)、计算机联锁(computer interlocking, CI)等,而基于车车通信的列控系统包括子系统设备 ATS、VOBC、OCC,且使用全电子联锁技术,降级了系统故障率和系统执行时间。

基于车车通信的列控系统较传统 CBTC 的减少时间集中在地面设备响应和执行时间、通信延长时间、地面设备建连和中断时间。针对灵活编组下的去编组列车作业时间进行分析,结果见表 3。各子系统设备间通信单方向延时 800 ms,各子系统设备任务处理时间周期为 400 ms。试验各个阶段任务执行时间多组,取执行时间的最大值,其中两种技术下的 ATS 下发编组命令时间为 1 000 ms,VOBC 任务执行时间为 400 ms,车辆检测及运行时间为 6 000 ms,执行碰撞编组时间为 6 000 ms,试拉时间为 2 000 ms,电气连接时间为 2 000 ms,自动换端时间为 4 000 ms。数据表明,基于车车通信的灵活编组技术较传统 CBTC 的编组技术作业时间减少约 14 s,效率提升近 34%。

表3 CBTC 和基于车车通信的去编组列车编组时间

Table 3 Marshalling time comparison between CBTC and V2V communication-based positive marshalled train

编组阶段	传统 CBTC		基于车车通信	
	子任务执行时间/ms	总计时间/ms	子任务执行时间/ms	总计时间/ms
编组命令下达阶段	ATS 下发命令时间(1 000)	4 400	ATS 下发命令时间(1000)	3 000
	VOBC 任务执行时间(400)		VOBC 任务执行时间(400)	
	通信延时(3 000)		通信延时时间(1 600)	
准备编组阶段	ZC 分配可碰撞 MA 时间(800)	14 200	VOBC 任务执行时间(400)	8 800
	VOBC 任务执行时间(400)		通信延时时间(400)	
	通信延时(3 000)		进路触发时间(2 000)	
	进路触发时间(4 000)		车辆检测及运行时间(6 000)	
	车辆检测及运行时间(6 000)			
碰撞编组阶段	执行碰撞编组时间(6 000)	6 000	执行碰撞编组时间(6 000)	6 000
试拉和电气连接阶段	VOBC 试拉执行时间(2 000)	10 000	VOBC 试拉执行时间(2 000)	5 000
	ZC 与 CI 执行区段锁闭时间(6 000)		OCC 执行区段锁闭时间(1 000)	
	电气连接时间(2 000)		电气连接时间(2 000)	
自动换端阶段	与 ZC 断开与连接时间(2 000)	6 000	执行自动换端时间(4 000)	4 000
	执行自动换端时间(4 000)			
总计时间	40 600		26 800	

基于车车通信的虚拟编组技术是在“车-车”通信基础上,增加协同控制技术,建立轨旁资源共享,完成运营的不同运输需求。在虚拟重联、虚拟摘解、协同运行阶段,减少了地面设备分配 MA 时间、资源动作时间,同时降低了故障发生概率。

由于精简了地面设备,实现轨旁设备一体化,该技术方案也降低了设备成本和维护成本,并且能够满足运营不同密度下的调度选择,对整个编组技术进行深度集成、集中控制、协同运行,资源统一管理,自动化程度高,可靠性高。

6 结束语

基于车车通信的城轨列控系统在线编组技术既能满足高效、快捷的运营需求,也能提升系统的可靠性和可用性,大大降低系统的故障,同时提升了不同运营级别的编组形式要求和客流密度要求。本文提出了基于车车通信的灵活编组技术和虚拟编组技术,详细阐述了编组过程及核心技术,同时提出了该技术下的前景和未来调整。本技术方案能够为基于城市轨道交通的下一代列控系统编组技术运营提供理论方法和技术支持,实现列控系统的自动化编组技术,具备高效率、低成本、自动化特点。

车车通信列控系统支持灵活编组和虚拟编组,可以提升线路运输效率,但是在工程化应用阶段仍然面临着许多挑战,这也是该技术下的发展方向和前景。

1) 灵活编组中,对车辆和车载的融合平台技术性能要求高,需提升车辆综合平台的高效率处理器性能,实现车辆和车载系统集中控制、深度集成,缩短编组和解编作业的时间。

2) 编组技术对 ATS 的在线编组和虚拟编组技术计划要求高,需满足基于车车通信的列控系统下,融合灵活编组和虚拟编组计划编制,标识不同编组列车,构建和实时调整在线编组技术运行计划图,满足运营针对不同编组技术下的作业方式。

3) 编组技术对车车通信之间的通信技术要求高,需充分运用高精度定位技术和新型通信技术满足车车通信的可靠性,降低延时,减小车车之间运行间隔。

4) 本方案对线路设计、土建、供电、屏蔽门等要求较高,工程化应用需考虑客流、编组策略和线路规划等,在满足运营效率和降低成本的基础上采用此技术方案。

参考文献

[1] 朱力,唐涛,龚泰源,等.面向城市轨道交通列车控制系

- 统的车车通信技术探讨[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(6): 13-21.
- Zhu Li, Tang Tao, Gong Taiyuan, et al. Train-to-train communication technology for train control system in urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(6): 13-21.
- [2] 李兆龄, 严业智. 城市轨道交通信号系统灵活编组关键技术研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(12): 72-77.
- Li Zhaoling, Yan Yezhi. Key technologies of flexible marshalling in signaling system for urban rail transit[J]. Railway signalling & communication engineering, 2021, 18(12): 72-77.
- [3] 田媛媛, 彭磊. 双碳背景下城市轨道交通列车灵活编组技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(9): 288-292.
- Tian Yuanyuan, Peng Lei. Research on flexible train marshalling technology for urban rail transit under the dual-carbon background[J]. Urban mass transit, 2024, 27(9): 288-292.
- [4] 崔轶昕, 刘琴, 赵程, 等. 基于车地和车车通信列车运行自动控制系统分析研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(6): 41-48.
- Cui Yixin, Liu Qin, Zhao Cheng, et al. Analysis and research on automatic train operation control system based on train-ground and train-train communication[J]. Modern urban transit, 2022(6): 41-48.
- [5] Nold M, Corman F. Dynamic train unit coupling and decoupling at cruising speed: Systematic classification, operational potentials, and research agenda[J]. Journal of rail transport planning & management, 2021, 18: 100241.
- [6] 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.
- [7] 罗情平, 陈丽君, 杜建新. 基于车车通信的列车自主运行系统(TACS)的探讨与研究[J]. 隧道与轨道交通, 2019(增刊 2): 140-143.
- Luo Qingping, Chen Lijun, Du Jianxin. Discussion and research on train autonomous operation system (TACS) based on train-vehicle communication[J]. Tunnel and rail transit, 2019(S2): 140-143.
- [8] 王立军, 张帅, 魏凡超. 灵活编组技术在城市轨道交通全自动运行系统中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(2): 111-115.
- Wang Lijun, Zhang Shuai, Wei Fanchao. Application of flexible train marshalling technology in urban rail transit FAO system[J]. Urban mass transit, 2023, 26(2): 111-115.
- [9] He Ruishi, Ai Bo, Zhong Zhangdui, et al. 5G for railways: next generation railway dedicated communications[J]. IEEE communications magazine, 2022, 60(12): 130-136.
- [10] 宁滨, 刘朝英. 中国轨道交通列车运行控制技术及应用[J]. 铁道学报, 2017, 39(2): 1-9.
- Ning Bin, Liu Chaoying. Technology and application of train operation control system for China rail transit system[J]. Journal of the China railway society, 2017, 39(2): 1-9.
- [11] 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.
- [12] Wu Qing, Ge Xiaohua, Han Qinglong, et al. Railway virtual coupling: a survey of emerging control techniques[J]. IEEE transactions on intelligent vehicles, 2023, 8(5): 3239-3255.
- [13] Felez J, Kim Y, Borrelli F. A model predictive control approach for virtual coupling in railways[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2019, 20(7): 2728-2739.

(编辑: 王艳菊)