

列车虚拟编组应用需求及关键技术研究^{*}

纪玉清^{1,2} 欧冬秀^{2,3**} 常 鸣^{1,4} 宁 正¹

(1. 同济大学交通运输工程学院, 201804, 上海; 2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海; 3. 运营主动安全保障与风险防控铁路行业重点实验室, 100091, 北京; 4. 上海轨道交通无人驾驶列控系统工程技术研究中心, 200072, 上海//第一作者, 博士研究生)

摘 要 列车虚拟编组是基于车车通信的新型列车灵活编组技术,已逐渐成为业内的研究热点。列车灵活编组可有效解决轨道交通客流时空分布不均衡问题,在节能降耗上也意义重大。阐述了轨道交通网络的运力瓶颈问题及其对列车灵活编组的需求,对比了国内外列车灵活编组实际应用案例及其特征。分析了列车虚拟编组的技术理念,研究了虚拟编组车队的组编过程及解编过程。提出了列车虚拟编组应用所需的关键技术支撑(包括高精度的列车主动实时定位及低延时、高可靠的车车无线通信等),以及其核心技术(包括高智能、自适应的编队协同优化及高安全、强韧性的多车协同控制与防护等)。

关键词 轨道交通; 灵活编组; 虚拟编组

中图分类号 U292.31

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.11.013

Research on Application Requirements and Key Technologies of Train Virtual Formation

Ji Yuqing, OU Dongxiu, CHANG Ming, NING Zheng

Abstract Train virtual formation is a new type of train flexible formation technology based on train-to-train communication, and has gradually become a research hotspot in the industry. Flexible train formation can effectively solve the problem of uneven spatial and temporal distribution of rail transit passenger flow, it is also of great significance in terms of energy saving and consumption reduction. In this paper, the capacity bottleneck problem of rail transportation network and its demand for flexible train formation are expounded, the practical application cases and characteristics of flexible train formation at home and abroad are compared. With an analysis of the technical concept of virtual formation, the coupling and decoupling processes of virtual train formation are studied. On this basis, the key technical support (including train active real-

time positioning with high accuracy and low-latency, highly reliable vehicle-to-vehicle wireless communication, etc.) and core technologies (including the optimization of highly intelligent, adaptive train formation cooperation, the multi-vehicle collaborative control and protection with high safety and strong resilience) required for the application of train virtual formation are proposed.

Key words rail transit; flexible formation; virtual formation

First-author's address College of Transportation Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China

随着轨道交通网络运输需求的日益增长,使以下问题更为突出:空间上,部分繁忙的轨道交通线路已接近运力饱和状态,运力不足、列车开行间隔难以再压缩等问题愈加严重^[1];我国中西部地区部分轨道交通线路列车的空载率高、发车间隔长,导致线路能耗偏高、服务水平偏低。时间上,部分轨道交通线路的繁忙程度不均,存在旺季一票难求、淡季车票过剩等问题。为此,本文通过灵活编组方式,将不同类型的列车组合成不同长度的车队用于正线运行,既能缓解客流高峰时段的运输压力,又能提高非高峰时段列车的运行效率和线路的服务水平(此时采用高密度小编组方式),这对推动中国的“双碳”目标如期实现,推动全球可持续发展有着重大意义。

1 列车灵活编组的需求与现状分析

1.1 列车灵活编组的需求分析

1.1.1 通过灵活大编组疏解核心通道运力瓶颈

轨道交通线路核心通道段(连接不同线路/区域的核心路段)的运输压力往往较大,其运力直接

^{*} 国家自然科学基金面上项目(52172329);上海市科委项目(22ZR1422200,21DZ2204500)

^{**} 通信作者

影响和限制着整条线路乃至整个路网的运力。通道段主要有主线及干线型、共线型、小交路型 3 种类型,如图 1 a)—图 1 c)所示的粗黑线路。如京沪线徐州站—蚌埠站这一核心通道段(见图 2),因其处于京沪干线上,且连接郑州、合肥 2 个省会城市,运

输需求大。该核心通道段因信号制式制约列车追踪间隔,其运力已饱和。若将进入该核心通道段的多列车进行在线编组,形成大编组列车,则能有效突破行车闭塞的束缚,疏解该核心通道段的运力瓶颈问题。

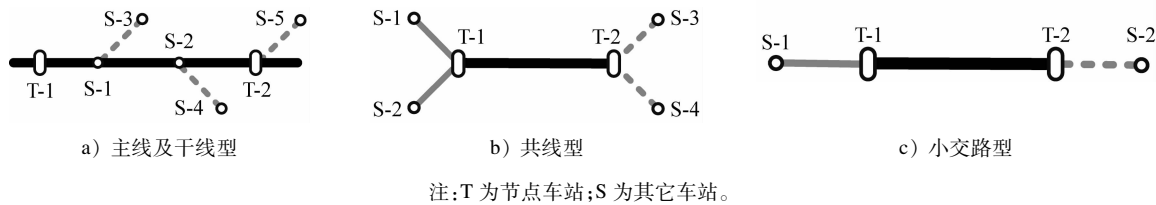


图 1 轨道交通线路核心通道段 3 种类型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3 types of rail transit core channel section

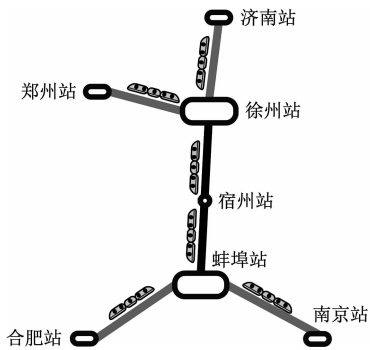


图 2 共线型核心通道段示例(京沪线徐蚌段)

Fig. 2 Example of core channel section (Xuzhou-Bengbu section on Beijing-Shanghai Railway)

1.1.2 通过灵活小编组缩短支线段的列车开行间隔
与核心通道段相比,轨道交通线路支线段(属非核心通道段)承担的运输压力较小,具有运量较低、客流分散等特点。支线段主要有支线型、Y 型/

双 Y 型及大交路型 3 种类型,如图 3 a)—图 3 c)所示的粗黑线路。为控制运营成本,支线段的发车间隔较大,乘客等待时间往往较长。

以上海轨道交通 11 号线为例,如图 4 所示,2 个支线段分别为嘉定新城站—花桥站、嘉定新城站—嘉定北站。11 号线全线均采用固定的 6 节编组 A 型车,2 个支线段内的列车发车间隔均长达 12 min。因 2 个支线段内客流较小,尽管列车发车间隔超过 10 min,但 2 个支线段内的列车空载率仍较高(非高峰时段更为明显)。因此,若根据支线段运输需求,在进入支线段之前将共线段的大编组列车进行在线解编,则列车可在支线段采用灵活小编组方式运行,这既能大大节省列车的运力损耗,又能提升支线段的服务水平。当然,这种运营方式需匹配精准的导乘服务,以避免乘客错乘。

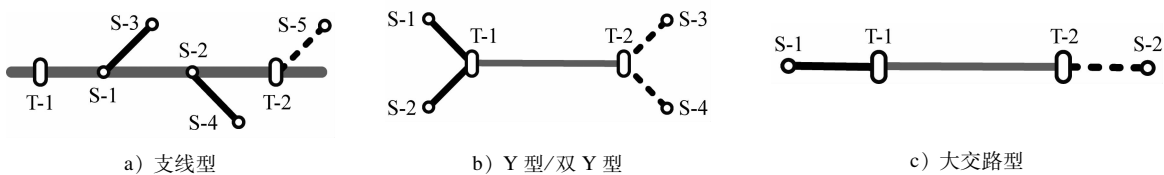


图 3 轨道交通线路支线段 3 种类型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of 3 types of rail transit branch line section

1.1.3 通过列车灵活编组缓解客流在时间上分布不均

我国轨道交通客流普遍存在旺季一票难求、淡季车票过剩的季节性特征,以及高峰时段车厢较拥挤、非高峰时段空座率较高的潮汐性特征。如何积极应对客流的“冷热不均”和动态多变,进一步平衡运力供给,确保满足客运服务水平和节能减排的要求,是轨道交通业内面临的一大难题。目前国内外

的研究大多集中于列车固定的多编组策略,并未实现真正意义上的灵活编组。换言之,目前虽然支持在既定规律性时段下运行不同编组的列车,但仍无法根据实时客流分布情况快速、动态地在线上调整列车编组数。

因此,亟需研究一种以客流需求为导向的、能在运营时段内动态匹配运力与运量的列车灵活编组技术。

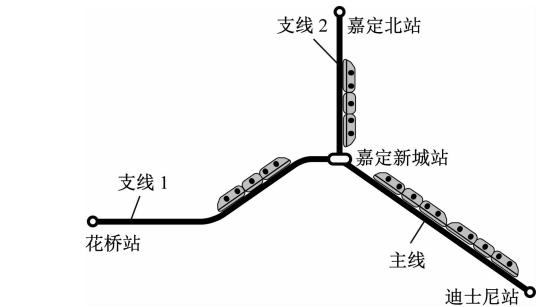


图 4 Y 型支线段示例(上海轨道交通 11 号线)

Fig. 4 Example of Y-shaped branch line section (Shanghai Metro Line 11)

1.1.4 线间互联互通、跨线运营

为建设城市群一体化交通网,推进“四网”融合

发展,应加快实现不同层次轨道交通列车控制系统间的互联互通,满足列车跨线运营需求。列车灵活编组技术可适配不同类型、不同速度等级列车之间的编组要求,对提高轨道交通系统的多元化、便捷化具有重大意义。

1.2 列车灵活编组的应用现状及分析

国内外针对列车灵活编组技术展开了一系列的研究,其工程应用对比分析如表 1 所示,其中:国外项目包括阿姆斯特丹地铁^[2]、温哥华天车线^[3]、日本东京地铁(翼型编组^[4])等;国内项目包括北京的轨道交通 11 号线西段(又称“冬奥支线”)及大兴国际机场线,以及上海轨道交通 16 号线等。越来越多的轨道交通线路提出了灵活编组建设需求。

表 1 列车灵活编组技术在国内外各工程中的应用对比

Tab.1 Application comparison of flexible train coupling technology in various projects around the world					
国家	城市及线路	列车编组单元	组合形式	客流特征	备注
荷兰	阿姆斯特丹地铁 M50、M51、M53、M54 线	2/6	13 种可变组合	时间上分布不均	最早拥有成熟列车灵活编组技术
加拿大	温哥华天车线 (SkyTrain)	2	2 组或 3 组重联运行	时间上分布不均	已成功实施运营多年
美国	旧金山湾区捷运系统	1/2/3	3 种可变编组	空间上分布不均	列车可在特定中间站拆解
日本	东京地铁网	3/6/8/10	15 种可变编组	空间上分布不均	列车可在特定车站拆解
德国	柏林 S-Bahn S-5 线 ^[5]	3/6	2 组重联	时间上分布不均	不同时段开行编组数不同的列车
中国	北京轨道交通冬奥支线	3/6	拟采用虚拟编组	时间上分布不均	不同时段开行编组数不同的列车
中国	北京轨道交通大兴国际机场线	4/8	2 组重联	时间上分布不均	不同时段开行编组数不同的列车
中国	上海轨道交通 16 号线	3/6	2 组重联	时间和空间上分布不均	全自动在线联挂/解编

注:列车编组单元中,2/6 表示列车编组单元是 2 节编组或 6 节编组,其余表述类同。

目前,国内外常见的列车编组方式如表 2 所示。由于受站场/线路基础设施装备水平、车钩技术等方面限制,综合考虑乘客安全等方面因素,目前大多限制在固定地点(如车辆段、存车线等)进行列车的联挂或解编。为了提高列车编组效率、减少能源损耗,应进一步寻找效率更高、更为灵活的列车编

组方式。

2019 年,CAF(西班牙铁道车辆制造商)、庞巴迪等公司依托 Shift2Rail 项目在有轨电车试验线上首次实现列车虚拟编组方案,并对方案进行了测试。该方案将列车间距缩减至几米以内,这对虚拟编组的研究与应用产生了新的推动作用。

表 2 不同列车编组方式的对比

Tab.2 Comparison of train coupling modes					
编组方式	车钩连接方式	车钩组成	联挂/解编的实施地点	联挂用时/解编用时	在工程中的应用
固定编组	永久或半永久	机械或电气+机械	车站、车辆段或停车场	长	常规的地铁列车、铁路动车组等
可变编组	自动或半自动	机械或电气+机械	车辆段或停车场	较长	阿姆斯特丹地铁 M50、M51、M53、M54 线
翼型编组	自动或半自动	电气+机械	到发线或线路区间	较长	旧金山湾区捷运系统
在线编组	自动	电气+机械	到发线或存车线	较短	上海轨道交通 16 号线
虚拟编组	虚拟	通信	任意区域	短	CAF 有轨电车试验线

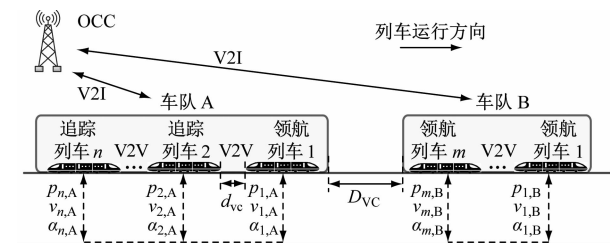
2 列车虚拟编组技术

2.1 技术理念

列车虚拟编组是指通过无线通信方式,将多个列车单元组合成一个逻辑整体,以摆脱了各列车间的机械连接,实现灵活的列车编队组合。该技术在轨道交通领域是一种颠覆式的技术变革。编队中的后行列车根据前行列车的位置、速度及加减速等数据信息,保持与前行列车的相对位置和编队关系。如图 5 所示,以车队 A 为例予以说明。沿列车运行方向上第 1 列车为领航列车,领航列车基于车地无线通信与地面 OCC(运营控制中心)进行数据交换(包括位置 $p_{1,A}$ 、速度 $v_{1,A}$ 及加速度 $a_{1,A}$ 等),以列车移动授权终点为运行控制目标,其运行不受车队内其他列车运行状态的影响。其余列车为追踪列车,追踪列车 i 通过车车无线通信接收前方列车的数据信息(包括位置 $p_{i,A}$ 、速度 $v_{i,A}$ 及加速度 $a_{i,A}$ 等),并结合自身运行状态和运营调度指令计算其运行控制目标。因此,追踪列车前方的列车也被称为该车的目标列车。各列车建立并维持编队运行,实现稳定的协同控制,以确保队列内基于相对制动距离的虚拟编组安全间隔。行车过程中,虚拟编组车队的构成可根据客流变化进行动态调整,以匹配不同线路/区域和不同时间段内的运量差异,实现线路及列车资源的合理配置。

2.2 基本特征

虚拟编组车队的运行控制方法可分为巡航控制和编组调整控制两种。其中:巡航控制用以保证



注: V2I——车地无线通信; V2V——车车无线通信; D_{VC} ——两个虚拟编组车队间的安全距离; d_{VC} ——基于相对制动距离的两列虚拟编组列车间的安全距离。

图 5 虚拟编组车队运行控制示意图

Fig. 5 Schematic diagram of operational control of virtual coupling train formation

车队在线路条件、无线通信质量发生动态扰动等情况下仍能维持虚拟编组状态及稳定的编队运行;编组调整控制用以实现车队编组构成的灵活调整,可进一步细分为组编控制和解编控制两种情况。

如图 6 a) 所示,独立运行的多列车通过调整运行的速度及间隔,形成新的虚拟编组车队,该过程被称为组编过程。组编开始前,前后 2 列车的实际间隔 $d > d_{VC}$ 。组编过程中,追踪列车与前行目标列车的间隔逐渐缩小至 d_{VC} 。当追踪列车与目标列车的运行速度一致且两者间隔为 d_{VC} 时,两车构成虚拟编组,以车队形式协同运行。

如图 6 b) 所示,解编控制是将处于虚拟编队运行的列车通过调整其追踪速度,使其与目标列车的间隔不断增大,直至大于等于基于绝对制动距离追踪的列车间隔 d_{SEP} ,从而脱离车队。在道岔处或在不同的车站进行乘降作业时,经常需要车队提前进行解编。

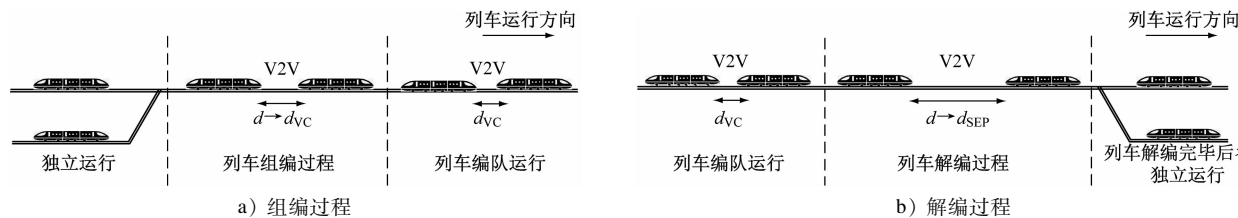


图 6 虚拟编组车队组编及解编过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of virtual coupling and decoupling process of virtual coupling train formation

3 列车虚拟编组的关键技术

基于多网融合、互联互通的需求,列车虚拟编组的终极目标是实现车队“零时延”编组及车间“零距离”耦合,这需要多方面关键技术的支撑。

3.1 高精度的列车主动实时定位

虚拟编组列车的运行间隔很短,相互间的耦合

作用非常强,因此,位置感知信息(列车定位信息、前后车间距信息等)的精准和实时获取至关重要。常规的列车定位技术主要包括基于应答器/轮轴传感器的列车定位、全球卫星导航定位系统、惯性导航系统及各种融合定位技术等,但这些技术存在定位信息不连续、定位误差大、受信号遮挡影响等局限性,均未能达到列车虚拟编组所需的定位精度。

因此,亟需深入研究可提供连续不间断、高精度、小误差、抗干扰性强的列车位置感知和导航技术,突破既有列车定位技术的技术瓶颈。

3.2 低延时、高可靠的车车无线通信

列车虚拟编组的实现还高度依赖于高质量的车车无线通信技术,以进行车车信息(如位置信息、速度、加速度、控制指令、状态信息等)的交互。在确保列车运行安全的前提下,亟需建立低时延、高可靠的车车通信保障机制,设计一种时变复杂电磁环境下的无线通信干扰(如弓网电弧脉冲宽频无线干扰、电力线噪声等)消除方法,以确保车车信息的快速传输,以及与安全相关指令的实时、可靠交互。

3.3 灵活、高效的运输组织调整

在列车虚拟编组模式下,列车在规定时间内到达指定地点,组建形成合理的编组车队,是确保轨道交通线路畅通、提升系统效能的关键。然而,动态变化的客运需求、资源受限的通行能力增加了车队在制定停站方案及列车运行路径等运输组织工作的难度。编制车队编组计划时,应基于虚拟编组列车的运营实况及客流在时空上的分布特征,并充分考虑列车条件(如最大制动率、加速性能)、编组能力、车站站型等因素,以提高服务水平、区间通行能力和运营可靠性为核心目标,形成高效、可行的运输计划和运营组织方案。

3.4 高智能、自适应的编队协同优化

列车虚拟编组技术具有高自主化、高智能化的特点。为了积极应对列车运行过程的突发事件,列车的调度组织应满足实时动态、智能自适应的要求。列车编队需要平衡列车集群效益与资源供给关系,基于外部的环境变化,确定车队内部的协调/制约机制。为此,应优化小编组列车的运行次序和轨迹,规划车队之间的线路资源占用关系,以匹配不同的运力需求,使车队收敛于不同队形,充分发挥虚拟编组技术优势。

3.5 高安全、强韧性的多车协同控制与防护

车队协同控制中,需要考虑列车不同车型的特点、运行线路的特征,还需要对环境因素变化(如网络连接不稳定)等造成的影响进行及时应对和调整,这使得车队有效、安全、稳定的运行具有非常大的挑战性。此时,必须进一步强化列车安全防护措施。可基于多车协同下的时空认知规律,实时推算车队间前后车的安全防护距离。在车队的组编过

程与解编过程中,对动态几何拓扑变换进行冲突化解与平滑优化,实现运行环境变化、突发扰动等情况下的编队稳态控制及多车协同韧性控制,保证虚拟编组列车的运行安全。

4 结语

对于具有区域性、季节性、潮汐性等客流时空分布不均衡特性的轨道交通线路,发展以高新技术为支撑的智能化的列车灵活编组技术,是进一步提高轨道交通线路运输效能、推动“双碳”达标的有效手段。列车的灵活编组方式可采用机械联挂,也可采用虚拟编组,不管采用何种方式,安全、可靠、高效地满足轨道交通的运营需求,是列车灵活编组技术创新的核心。

从目前的发展现状看,机械联挂的“硬”联挂方式已能在工程中稳定、可靠地实现线路运力的灵活匹配。虚拟编组所采用的“软”联挂所引出的若干关键问题已成为当前研究的热点。若不能攻克本文所述的关键技术,列车的运行安全和效率将无法得到有效保障。而虚拟编组在后续工程中应用时,还应进一步探索其实施适用性和客运组织适配性。

参考文献

- [1] Egidio Quaglietta, Meng Wang, Rob Mp Goverde. A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2020, 15: 100195.
- [2] 王冬海, 黄柒光. 列车灵活编组在城市轨道交通全自动运行线路中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2019(增刊2): 102. WANG Donghai, HUANG Qiguang. Application of flexible train formation on rail transit FAO lines[J]. Urban Mass Transit, 2019(S2): 102.
- [3] Yihui Wang, Miao Zhang, Jiaqi Ma. Survey on driverless train operation for urban rail transit systems[J]. Urban Rail Transit, 2016(3-4): 106.
- [4] 聂磊, 廉文彬. 国外高速铁路运输组织方案特点分析[J]. 中国铁路, 2008(2): 74. NIE Lei, LIAN Wenbin. Characteristic Analysis of foreign high-speed railway transport organization schemes[J]. Chinese Railways, 2008(2): 74.
- [5] Andrew Nash, Ulrich Weidmann, Stephan Bollinger, et al. Increasing schedule reliability on the S-Bahn in Zurich, Switzerland: Computer analysis and simulation[J]. Transportation Research Record, 2006, 1955(1): 16.

(收稿日期:2022-06-09)