

轨道交通虚拟编组列车运行计划 优化与调整研究综述

张 琦, 鲍薪宇, 徐英浩, 李卓一

(北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

摘 要: 为梳理虚拟编组技术在轨道交通运输组织领域的研究进展, 明确其在列车运行计划优化与运行调整中的应用现状及未来发展方向, 对近年来国内外相关文献进行综述。基于运营与服务视角, 以 2022—2025 年发表于 Web of Science、Scopus、IEEE Xplore 及中国知网等数据库的 42 篇代表性文献为研究对象, 对开行方案编制、时刻表优化、时刻表与车底周转一体化优化, 以及列车延误调整、中断持续阶段调整和中断恢复阶段调整等研究进行归纳与比较分析。结果表明: 虚拟编组通过缩小列车运行间隔和支持动态重联/解编, 能够显著提升线路通过能力与运力配置灵活性; 在运行计划优化方面, 研究已由单一时刻表优化逐步发展为时刻表、停站方案、交路及车底周转的一体化优化; 在运行调整方面, 虚拟编组可有效提高中断场景下的运输组织韧性与客流疏散效率。当前研究仍存在一体化程度有限、复杂网络场景考虑有限、多策略协同机制缺乏以及全过程中断调整研究欠缺等问题。未来应重点关注时刻表—停站—交路—车底协同优化、行-调-控一体化建模、多策略协同调整、全过程中断调整以及深度强化学习等智能优化方法在虚拟编组场景下的应用, 为虚拟编组技术在轨道交通运输组织中的深入应用与工程实践提供理论参考和方法指导。

关键词: 轨道交通; 虚拟编组; 列车运行计划; 运输组织优化; 运行调整

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)04-0080-13

Review of Optimization and Rescheduling of Train Operation Plans under Virtual Coupling in Rail Transit

Zhang Qi, Bao Xinyu, Xu Yinghao, Li Zhuoyi

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: To review the research progress of Virtual Coupling (VC) technology in rail transit transportation organization and identify its applications in train operation plan optimization and rescheduling, this paper presents a comprehensive literature review of recent studies in the field. From an operational and service-oriented perspective, 42 representative publications published between 2022 and 2025 were collected from major academic databases, including Web of Science, Scopus, IEEE Xplore, and CNKI. Research on train operation plan design, timetable optimization, integrated timetable and rolling stock circulation planning, as well as train delay rescheduling, disruption management during disruption and recovery phases, was reviewed and compared. The results indicate that VC technology can significantly enhance line capacity and operational flexibility through reduced train headways and dynamic coupling and decoupling operations. In terms of operation planning, existing studies have evolved from isolated timetable optimization to integrated optimization of timetables, stopping patterns, train routing, and rolling stock circulation. In terms of operation rescheduling, VC has demonstrated considerable potential in improving transportation organization resilience

收稿日期: 2026-06-03 修回日期: 2026-06-16

第一作者: 张琦, 女, 博士, 副教授, 从事轨道交通智能运输组织领域研究, qzhang6@bjtu.edu.cn

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2026JBZX017); 国家自然科学基金(72471023, 52372300); 北京市自然科学基金—丰台轨道交通前沿研究联合基金(L201013)

引用格式: 张琦, 鲍薪宇, 徐英浩, 等. 轨道交通虚拟编组列车运行计划优化与调整研究综述[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(4): 80–92.

and passenger evacuation efficiency under disruption scenarios. However, current research still faces several limitations, including insufficient integration among planning elements, limited consideration of complex rail networks, inadequate investigation of multi-strategy collaborative rescheduling, and a lack of unified frameworks covering the entire disruption process. Future research should focus on integrated optimization of timetables, stopping patterns, train routing, and rolling stock circulation; integrated modeling of train operation organization, dispatching, and control; multi-strategy collaborative rescheduling; full-process disruption rescheduling; and the application of intelligent optimization approaches such as deep reinforcement learning in VC-enabled rail transit systems.

Keywords: rail transit; virtual coupling; train operation plans; transportation organization optimization; train rescheduling

虚拟编组(virtual coupling, VC)是一种先进的列车运行控制技术。在该模式下,前后接续的列车通过车-车通信实时交互动态信息,并以相对制动距离保持运行间隔,即该间隔小于传统的绝对制动距离,从而无需机械联挂就可实现列车的虚拟编队运行。目前,虚拟编组已被公认为干线铁路与城市轨道交通系统中极具发展前景的新一代列车控制技术。通过相对制动距离约束下的协同控制,列车能够以极小的间隔运行,这一模式突破了传统基于基础设施的防护体系限制,为轨道交通运输组织创造了全新的可能。该技术在保障与先进移动闭塞信号系统同等安全水平的前提下,有望大幅提升线路通过能力、运行图灵活性与列车节能水平。同时,虚拟列车编队、动态联挂与解编、异构编组等技术的引入,也对轨道交通网络中开行计划编制、运行控制、运营调整的协同模式产生了深远影响。这意味着虚拟编组不应仅被理解为信号系统的技术升级,更应被视作轨道交通运营模式与组织体系的全面革新。

在近 10 年间,虚拟编组相关研究实现了快速发展与研究方向的多元化拓展。早期研究主要聚焦于虚拟编组列车编队的间隔控制策略与避碰逻辑,形成了多种基于运行状态的间隔模型、预测式避碰方案,以及适配高速铁路、普速铁路、地铁、重载铁路等不同场景的纵向协同控制算法。近期的研究将虚拟编组视作新型运输组织模式的核心赋能技术,研究范畴覆盖了开行方案编制、运行图设计、车底周转计划、列车编组方案,以及基于动态编队特性的以乘客为中心的运营调整策略。还有配套研究构建了系统级仿真框架与性能评估模型,量化分析虚拟编组对运输系统安全性、通过能力、韧性、与能耗水平的影响。

近年来,多篇综述从不同视角系统梳理了虚拟编组相关研究。文献[1-2]聚焦控制层面,将其归纳为纵向控制与稳定性问题,并从控制范式、建模假设及性

能指标等方面进行分类。文献[3]结合文献计量分析,总结信号架构、协同控制及多场景落地挑战。文献[4-5]基于工程实践,重点分析虚拟编组的功能架构、通过能力影响、技术可行性及分阶段实施路径,并讨论制动、通信、定位与完整性监测等关键技术及风险。上述研究虽已全面梳理了虚拟编组的核心概念、控制方法与系统级可行性,但对于虚拟编组如何重塑铁路运输组织模式、应急处置与以乘客为中心的服务供给体系,仅给予了有限的关注。

本综述以列车运行组织与调整为核心视角,系统梳理了虚拟编组应用于客运列车运输组织的相关既有研究,范畴涵盖开行方案编制、运行图与车底周转优化,以及运营调整、服务恢复等列车运输组织方面。

1 轨道交通虚拟编组列车运输组织研究统计分析

本综述纳入的文献均来自 Web of Science、Scopus、IEEE Xplore、中国知网等学术论文数据库。采用“虚拟编组”“虚拟编组列车”“列车编队运行”等关键词进行组合检索,筛选了 2022—2025 年发表的期刊论文、部分学位论文与精选会议论文。在剔除重复文献、排除与列车虚拟编组及其运营应用无直接关联的研究后,最终纳入 42 篇代表性文献开展结构化主题分析,具体年份和论文类型如图 1 所示。

为进一步分析虚拟编组条件下列车运行计划研究的内容构成,对列车运行计划优化与列车运行调整研究在客流考虑方式、重联解编以及运行计划要素等方面的分布情况进行研究,如图 2 所示。

由图 2 可以看出,现有列车运行计划优化和运行调整两类研究在客流需求考虑、重联解编方式以及优化决策范围等方面既存在共性,也呈现出不同特点。在列车运行计划优化研究中,动静态客流因素已得到广泛关注,表明研究者更加注重根据客流需求特征优化

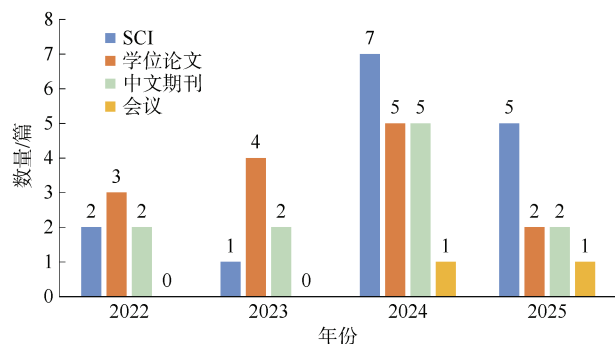


图1 综述文献数量及分布情况

Figure 1 Quantity and distribution of reviewed publications

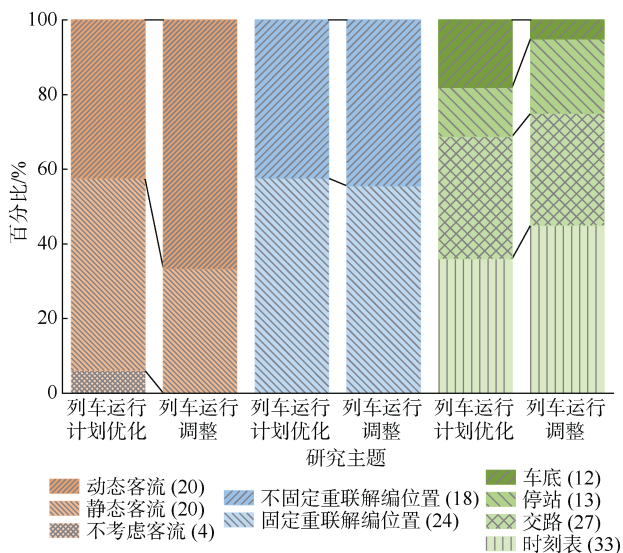


图2 研究主题与研究要素交叉分析

Figure 2 Cross-analysis of research topics and research elements

运力配置。在编组方面,多数研究仅考虑在车站进行重联解编作业且提前指定作业车站,不到半数的研究将列车重联解编作业位置作为决策内容。从运行计划要素来看,时刻表是最主要的研究对象,同时部分研究进一步考虑交路、停站及车底等要素,逐步由单一时刻表优化向多层次协同优化拓展。

在列车运行调整研究中,考虑动态客流的比例高于静态客流,表明列车运行调整研究对客流需求实时变化更为关注。与列车运行计划优化研究类似,多数列车运行调整研究仅考虑在车站重联解编且固定了作业位置,个别文献讨论了区间运行状态下的编解作业。从运行计划要素来看,时刻表调整仍占据核心地位,而交路调整也较为常见,反映出研究者更加重视通过多种运行组织手段恢复运营秩序、降低扰动影响。相比之下,停站方案与车底运用调整的相关研究相对较少。

为明确虚拟编组技术在轨道交通运输组织领域的研究范围及不同研究方向之间的逻辑关系,本文结合运营决策过程和实际应用场景,对相关文献进行分类整理,构建了分析框架与文献分类体系,如图3所示,本文按照“运营决策层级与应用场景”对虚拟编组相关研究进行层次化分类,主要包括列车运行计划优化和列车运行调整两个方面。其中,列车运行计划优化主要面向运行计划编制阶段,关注开行方案、时刻表及车底协同优化;列车运行调整则面向运营过程中的动态变化,重点研究列车延误、中断及恢复阶段的动态调整。

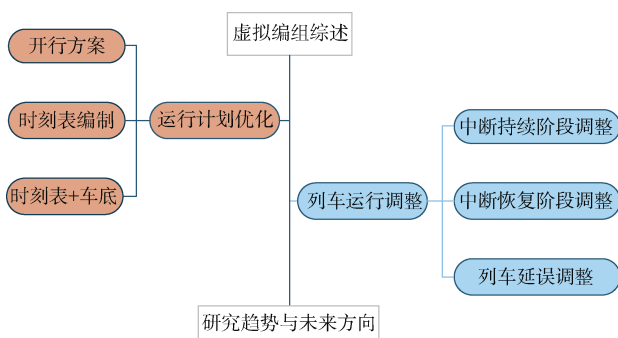


图3 分析框架和文献分类体系

Figure 3 Analytical framework and literature classification system

遵循图3的分析框架,第2章聚焦于虚拟编组下的运行计划优化研究,涵盖开行方案编制、时刻表编制、时刻表和车底周转一体化优化。第3章聚焦于虚拟编组下的列车运行调整研究,涵盖列车延误调整、中断持续阶段和恢复阶段调整。第4章探讨虚拟编组在列车运行计划优化与列车运行调整方面未来的研究方向。

2 虚拟编组列车运行计划优化

依托车-车通信技术,列车可在运行过程中根据运输需求灵活完成重联、协同运行及解编,实现运力资源的动态配置。图4阐释了基于车-车通信的相对制动距离模式下虚拟编组的运行机制,包括列车重联和解编的过程。该特性使列车编组规模和运行组织方式具备更高灵活性,为列车运行计划优化问题提供了新的研究空间。

虚拟编组(VC)下的列车运行计划编制,已突破了单一的运行图优化范畴,涵盖了开行方案编制、时刻表编制、时刻表与车底周转一体化优化等多个决策层级。在每个决策层级中,追踪间隔约束的放宽与动态

联挂解编技术的引入,都直接影响着运力分配、冲突疏解与车队资源利用效率。尽管这些问题在建模方式与决策变量上存在差异,但其共同特征在于:均将虚

拟编组带来的追踪间隔灵活性转化为运营方案的设计优化空间。表 1 总结了运行计划优化在上述 3 个决策层级的代表性研究文献。

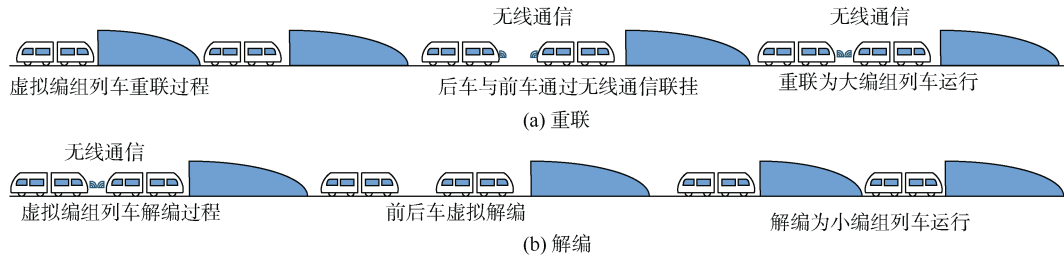


图 4 虚拟编组重联解编过程

Figure 4 Process of virtual coupling, train coupling, and train decoupling

表 1 虚拟编组列车运行计划优化研究

Table 1 Studies on optimization of train operation plans under virtual coupling

文献编号	问题层面	研究领域	目标	模型	求解方法
6	开行方案编制	城轨	乘客出行时间成本,企业运营成本(上层)+大小交路列车的满载率差值的平方(下层)	双层非线性整数规划模型	多种群遗传算法(上层)+枚举法(下层)
10		城轨	乘客出行时间成本和企业运营成本+节约效益	两阶段混合整数非线性规划模型	枚举法(第一阶段)上层+预设方案评估法,反馈调整(第二阶段)
11		城轨	乘客出行时间成本,企业运营成本(上层)+大小交路列车的满载率差值的平方(下层)	双层非线性整数规划模型	多种群遗传算法(上层)+枚举法(下层)
12		城轨	乘客等待时间,车辆走行距离	混合整数线性规划模型	商业求解器
13		城轨	总乘客等待时间,系统运营成本	混合整数线性规划模型	商业求解器
14		城轨	总乘客等待时间,系统运营成本	混合整数线性规划模型	商业求解器
15		城轨	总运营成本	混合整数线性规划模型	商业求解器
16		城轨	乘客旅行成本,列车容量公平性,运营成本	整数非线性规划模型	自适应模拟退火遗传算法
17		城轨	列车走行距离,乘客等待时间	整数非线性规划模型	粒子群算法
18		城轨	乘客等待时间,列车走行公里数	整数非线性规划模型	遗传算法
19		城轨	乘客等待时间,乘客在途时间,列车走行公里,平均列车满载率	方案比选	无
7	时刻表编制	城轨	乘客总旅行时间	混合整数线性规划模型	结合模拟退火的自适应大规模邻域搜索算法
8		城轨	乘客等待时间,乘客在车时间,列车开行成本	混合整数非线性规划模型	遗传算法和粒子群算法
9		城轨	列车总净牵引能耗	强化学习模型	Q 学习算法
20		城轨	列车利用率,列车停站时间,乘客旅行时间	混合整数线性规划模型	商业求解器
21		城轨	列车通过瓶颈区段的总时间	混合整数线性规划模型	基于效用的列车联盟形成算法
22		城轨	车底使用数量,车辆总走行公里,乘客总等待时间,乘客总旅行时间,各区间平均满载率,列车平均满载率	方案比选	无
23		城轨	因列车剩余容量不足而无法登上首列到达列车的累积乘客数	混合整数线性规划模型	商业求解器
24		城轨	滞留乘客总数	混合整数线性规划模型	商业求解器
25		城轨	列车旅行时间,乘客旅行时间,停站时间,列车服务频率,乘客流失情况	方案比选	无
26		城轨	乘客总旅行时间	混合整数线性规划模型	结合模拟退火的自适应大规模邻域搜索算法
27		城轨	乘客旅行时间,列车运输效率,列车平均载客率	整数非线性规划模型	快速非支配排序遗传算法
28		高铁	列车总旅行时间	混合整数线性规划模型	商业求解器

续表

文献编号	问题层面	研究领域	目标	模型	求解方法
29	时刻表和车底周转一体化优化	城轨	乘客平均等待时间, 列车走行里程	混合整数非线性规划模型	拉格朗日松弛算法
30		城轨	列车发车间隔的不均匀程度	混合整数线性规划模型	商业求解器
31		城轨	列车发车间隔的不均匀程度	混合整数线性规划模型	商业求解器
32		城轨	乘客总等车时间, 乘客总在车时间, 开行列车数量, 使用车底数量	混合整数线性规划模型	基于效用均衡的自适应大规模邻域搜索算法
33		城轨	因列车容量有限而无法登上首列到达列车的累计乘客数	混合整数线性规划模型	分支切割算法
34		城轨	乘客等待时间, 列车购置成本, 列车走行成本	混合整数线性规划模型	遗传-模拟退火混合算法
35		城轨	滞留乘客数量, 车底运营成本	混合整数线性规划模型	分支定价算法
36		城轨	乘客总等待时间, 运营成本	混合整数线性规划模型	自适应模拟退火算法
37		城轨	乘客总等待时间, 运营成本	整数线性规划模型	滚动时域求解
38		城轨	运营成本, 乘客服务质量, 公平性	混合整数线性规划模型	分支与 Benders 割平面法, 基于区段分解的方法, 分支与区段添加法

2.1 列车开行方案编制

虚拟编组下的开行方案编制, 核心研究内容是如何将放宽的安全间隔限制转化为更优的服务模式。现有研究通过虚拟编组技术提升线路瓶颈区段的通过能力, 在空间不均衡客流下实现大小交路服务模式, 并扩展到多线网络中的跨线协同运营与共线运营场景。因此, 虚拟编组在此主要发挥运力赋能的核心作用: 首先扩大可行运力的上限, 再通过编组灵活性来适配差异化的服务需求结构。

2.1.1 运输能力提升目标

虚拟编组在运输能力提升方面主要体现在其相较于传统列控技术具有更小的列车运行间隔, 在同一时段内可以开行更多列车, 从而提升了线路的通过能力。以能力提升为目标, 已有研究在计算虚拟编组列车运行间隔的基础上, 优化列车开行对数。文献[6-7]针对虚拟编组列车, 区分了区间与车站追踪间隔, 分别推导绝对与相对追踪模式下 2 种追踪间隔的计算公式, 并与传统模式进行对比。结果表明, 虚拟编组技术能显著缩短列车追踪间隔, 从而提高线路通过能力。

为提高对列车运行间隔刻画的准确性并保证运行安全, 部分研究考虑了更多的影响因素。文献[8]基于安全制动模型, 构建虚拟编队列车安全制动模型, 分析最小安全间隔与速度、制动性能、通信延迟的相互影响。仿真获得不同速度下重联/解编的时间、距离等参数, 为运行图优化提供时距标尺。文献[9]针对虚拟编组两列车单元协同运行场景, 构建相对制动模式下的安全制动模型, 综合考虑前车制动、车车通信延迟及后车响应等因素。根据最不利的组合形式, 推导最

小安全间隔的简化计算公式, 为虚拟编组节能优化中的安全约束设计提供了理论依据。文献[10]在追踪间隔基础上, 补充虚拟编组技术下站后折返时间间隔的计算方法, 并对比传统 CBTC 与虚拟编组在折返时间上的差异, 更适用于大小交路中频繁折返的场景。

2.1.2 编组灵活性目标

传统模式下列车编组相对固定, 运力调整能力有限。基于虚拟编组技术, 列车可根据客流需求动态编组与解编, 实现大小交路、长短编组等灵活运营, 从而实现运力资源的动态匹配与灵活配置, 提高列车开行方案对时空客流分布的适应能力。

在线路层面, 编组变化条件下的列车开行方案研究中, 主要考虑了大小交路的列车运行模式。文献[11]和文献[6]面向城市轨道交通线路场景, 采取大小交路的服务模式, 构建双层优化模型。上层模型以乘客等待时间和企业列车走行公里最小为目标, 决策发车频率和小交路折返站位置; 下层模型以小交路区段内大、小交路列车满载率均衡为目标, 决策各次列车编组辆数。该模型通过允许同一条线路中共存多种不同服务频率的服务, 在有限的车队规模与基础设施条件下, 实现核心区段高频发车、外围区段基础服务的运营模式, 解决了客流非对称分布的问题。

也有文献在给定时刻表的基础上决策各次列车的编组, 文献[12]构建面向城市轨道交通线路的领头车-跟随车双目标整数非线性规划模型, 该模型采用基于虚拟编组的跟随车分段编组运行模式, 使一条线路中可实现“两端小编组、中间大编组”的差异化运力配置, 从而在保障全线统一发车间隔的前提下精准匹配

客流空间差异化分布。针对早高峰潮汐客流双方向分布不均问题,文献[13-14]采用列车单元跨方向动态重联解编模式,使列车单元可在指定车站实现实时编组调整与跨方向复用,从而在给定的列车时刻表与车辆段资源条件下,实现潮汐客流方向运力动态增强、全时段运营成本精准控制的灵活运营模式。文献[15]针对区域快速轨道交通长里程、客流不均衡的特点,提出支持多个中间站及终点站联挂/解编的灵活编组模式。在大小交路方案的基础上,文献[10]将大小交路和快慢车结合,该模型通过快慢车速度差实现区间虚拟解编过程,从而在无需额外越行设施的前提下同时满足核心区段大运能需求与长距离乘客快速出行需求。

将问题扩展到网络层面,面向城市轨道交通Y型线场景,文献[16-19]均对城市轨道交通列车开行方案进行了优化,其中文献[18]提出列车在主线虚拟重联、分叉点虚拟解编分开运行的列车运行模式,并考虑乘客出行成本和企业运营成本两方面目标。而文献[17]进一步细分,将选定的2种交路形式按照列车虚拟重联解编方案再分为4种类型,与无虚拟编组技术的交路方案进行对比,体现了虚拟编组技术在提高服务水平和节省企业成本方面的优势。网络层面的研究不只停留在Y型线的场景,文献[16]在Y型线的基础上增加了与主线和支线均有部分平行的第3条线路,采用跨线运营的模式,列车在共线区段依靠虚拟编组技术以大编组形式运行,并在其余区段执行解编操作,在保持列车交路方案给定的前提下,实现运能动态调配。文献[19]以首都机场线为例,在传统Y型线的基础上增加了回路,根据场景特点设计3种虚拟编组列车运行方案,并从乘客、企业和可行性3个方面进行方案比选,为虚拟编组技术在实际运营线路中的应用提供具体的工程案例参考。

2.1.3 小结

总体而言,上述研究表明,虚拟编组从两方面支撑列车开行方案优化:一是以更小的列车运行间隔带来列车开行频率上限的提升,扩大线路区段的通过能力;二是依托列车编组的灵活性,组合采用大小交路、快慢车等运行模式,实现线路及线网层面区段运力的空间动态分配。然而,现有研究仍主要集中于理想化场景下的优化,对实际运营中通信延迟的随机波动、无线环境干扰、动态编组后列车单元间制动性能差异等,尚未充分考虑,工程适用性仍有待提升。同时,对于乘客选择行为、网络级多线协同以及大规模复杂

模型的高效求解等问题,仍缺乏系统深入研究。

2.2 列车时刻表编制

虚拟编组条件下的列车时刻表研究可从“时刻表—停站—交路”3个层面展开。传统时刻表编制通常建立在固定编组基础上,重点优化列车到发时间、停站时间等,运力配置方式相对固定。引入虚拟编组技术后,列车可根据客流需求灵活重联与解编,并以更小间隔协同运行,从而实现编组规模、运输能力与运行组织的动态协调。

2.2.1 时刻表编制

部分现有研究聚焦于单一的時刻表层面,仅对列车发车时刻、停站时间或列车间隔进行优化,未考虑列车交路或列车停站方案的变化。文献[20]依托虚拟编组技术动态改变发车间隔、追踪间隔以及每个车次的编组数量,在高峰时段增加运力、减少乘客等待时间,在低峰时段节约运力,节省成本。文献[9]考虑列车能耗问题,根据虚拟编组列车再生制动能量产生与利用方法,以发车间隔和停站时间为决策变量,构建多虚拟编组列车运行优化模型,提出基于Q学习算法的节能优化算法。案例结果证明,该方法可提高再生能量利用率,有效节省总列车能耗。文献[21]针对交叉口瓶颈区段,融合列车编组策略与交叉口准入控制,结果表明,在编组决策中结合局部时间弹性,同时充分考虑编组耗时成本,能够有效提升线路通行能力。

2.2.2 时刻表和交路一体化优化

现有研究并未完全停留在单一的時刻表优化层面,研究范围已逐渐扩展至時刻表和交路一体化优化。時刻表和交路一体化优化研究多集中在网络层面,因网络中线路的交叉,列车可以从一条线路运行至另一条线路中,从而产生多种列车运行交路。除此之外,虚拟编组技术的引入,使得虚拟编队中的两列车可以在交叉点解编进入不同线路,从而具有不同运行交路。这部分研究的核心是在乘客需求异质性条件下如何利用虚拟编组技术优化大规模轨道交通系统的运力分配。文献[8]和文献[22]均研究了Y型线场景下列车运行图优化问题,文献[8]采用两支线各1列小编组列车虚拟重联成大编组列车在主线继续运行的模式,以最小化乘客出行成本与列车开行成本为目标,构建优化模型,并设计遗传算法和粒子群算法求解。与之相反,文献[22]着重研究主线大编组列车在交叉点解编为2列小编组列车的形式,从乘客总等待时间、乘客总旅行

时间、列车满载率等多方面与既有方案进行对比,验证了干线差异化客流场景下虚拟编组在列车运行优化方面的适用性与有效性。这些研究充分证明了虚拟编组技术在不同服务模式下的通用性。

针对特定的网络拓扑结构,现有研究表明虚拟编组可有效解决轨道交通系统的结构性瓶颈问题。文献[23]将时变乘客需求直接嵌入混合整数线性规划模型,证明了自适应编组长度与发车时刻调整能够有效缓解车站拥堵并缩短高峰时段乘客等待时间,在换乘节点处优化效果尤为显著。文献[24]构建混合整数线性规划模型,使不同线路列车可在共线区段临时编组运行,随后拆分并驶入各支线。该运行方式无需改扩建基础设施,即可大幅提升共线区段通行能力。

2.2.3 时刻表和停站一体化优化

除与列车交路结合之外,也有部分文献聚焦于虚拟编组技术与列车停站方案的结合,文献[25]提出虚拟编组下快慢车的2种组织策略(有越行与无越行),推导车站追踪间隔的计算公式,并通过算例对比表明虚拟编组可缩短慢车待避时间,减少非平行运行图带来的能力损失并降低乘客旅行时间。在此基础上,文献[7]进一步构建以最小化乘客总旅行时间为目标的运行图优化模型,引入虚拟编组相关作业约束,设计结合模拟退火的自适应大规模邻域搜索算法。实际案例结果表明,所提出的方案较传统方案可有效降低乘客总旅行时间。文献[26]完善乘客路径选择行为(多项Logit模型),细化安全间隔约束与越行顺序处理方法,再次证实虚拟编组技术能有效减少滞留与换乘时间,提升运营服务品质。3篇文献共同构成虚拟编组下快慢车运行图优化的理论基础与算法框架,为改进传统快慢车模式提供了新思路。

上述研究均聚焦于乘客出行体验方面,优化目标中仅考虑了乘客的总旅行时间,而文献[27]在考虑乘客出行成本的基础上还增加了对列车运输效率的考量,优化结果表明,虚拟编组优化方案在保证列车运输效率的同时,可以有效缩短乘客旅行时间,提升轨道交通客运服务质量。文献[28]研究虚拟编组下高铁时刻表与停站方案协同优化。该模型考虑了G字头和D字头2种速度等级的列车,以及长编组与短编组2种编组类型的列车,以最小化列车总旅行时间为目标,构建混合整数线性规划模型,验证了虚拟编组技术能有效提升运输效率。

2.2.4 小结

从比较视角来看,该领域研究呈现出清晰的分层与递进结构:现有研究从单一的时刻表优化拓展至时刻表与停站方案或列车交路的协同优化,已实现了虚拟编组与列车时间约束及停站方案或交路选择的有机融合,并确立了需求响应式运力分配原则。相对于开行方案研究,核心转变在于增加了时间相关的决策变量(列车到发时间、列车停站时间等),突出了虚拟编组时空同步性与动态重构能力。尽管已取得上述进展,但现有研究仍有以下不足:一方面,现有研究对虚拟编组下的列车运行参数计算依赖理想化假设,未充分考虑制动性能差异、线路条件差异等实际影响要素;另一方面,现有研究的一体化程度仍然有限,多集中于“时刻表+交路”或“时刻表+停站”两两协同优化,对时刻表、停站方案与交路方案三者的联合优化研究相对不足,难以全面刻画实际运营过程中各要素之间复杂的耦合与交互关系。

2.3 列车时刻表与车底周转一体化优化

在虚拟编组技术背景下,列车时刻表编制与车辆周转计划的一体化优化已成为必然趋势,其核心在于协调乘客需求在时间与空间维度上的不均衡性,并兼顾车底周转的规律性与车辆运用的高效性。在运力供给相对均衡的条件下,传统时刻表编制与车辆运用计划通常采用顺序化优化方式,即先编制列车时刻表,再制定车底周转方案。然而,虚拟编组技术引入动态编组解编、小交路运行等灵活运营模式,打破了传统车底周转的规律性,易导致车底接续困难、车底运用不均衡、车辆利用效率下降等问题。因此,时刻表编制与车底周转分别独立优化已难以充分刻画二者之间复杂的动态耦合关系,亟须在统一框架下开展协同决策与一体化优化。

2.3.1 固定折返时机

现有研究大多基于一个通用运营场景展开:设有多个车站及一个或多个车辆段的城市轨道交通线路,列车可在运行途中进行虚拟重联/解编以提供差异化运力。在此背景下,早期一体化优化研究在列车交路选择方面考虑较少,车辆段设于线路两端,列车运行至端点站回段或折返运行,在线路中间车站不考虑折返的情况。文献[29]针对高峰时段客流与运力不匹配问题,采用S型函数拟合动态客流需求,并考虑折返接续与车场等待2种车底周转方式,建立以最小化乘客平均等待时间和列车走行里程为目标的一体化优化

模型。采用拉格朗日松弛与次梯度迭代算法求解,实现上下行车底接续约束的高效分解。文献[29]中虽考虑了车底接续相关的约束,但未考虑车辆段中可用车底数量。文献[30-31]面向城市轨道交通高平峰时段及其过渡时段,考虑列车停站、车底接续时间、可用车底数量等约束,以均衡发车间隔为目标,构建列车时刻表与车底周转一体化模型,实现高峰时大编组列车高密度发车与平峰时期小编组低密度发车之间的过渡转化。

上述文献在列车停站、车底周转与客流分配等方面的综合考虑仍存在一定不足。为进一步研究三者之间的耦合关系,文献[32]综合考虑分钟级客流分配及虚拟编组/解编、列车停站和车底数量等约束,构建虚拟编组条件下运行图与车底运用计划一体化优化模型。针对模型非线性与大规模特点,设计基于效用均衡的自适应大邻域搜索算法,并结合客流导向机制与模糊规划实现多目标均衡优化。将问题扩展到网络层面,针对线路交叉点冲突问题,除列车编组、列车到发时间、客流分配、车底周转约束外,文献[33]进一步考虑了列车到达交叉区段的顺序关系。为提高模型求解效率,设计了包含3类有效不等式和一种混合节点分支策略的分支切割算法。实际案例表明,虚拟编组技术在多线互联网络中具有显著提升运营服务质量的潜力。

2.3.2 不固定折返时机

随着研究的深入,列车折返作业不再局限于线路两端。在满足安全间隔等条件下,列车也可在线路中具备折返条件的车站进行折返作业。此时,列车折返站不再固定为端点站,列车交路形式更加灵活,时刻表与车底周转一体化优化中需要进一步考虑列车交路的组织与选择,需要综合协调时刻表编制、车底接续与交路组织之间的关系。文献[34]以最小化乘客等待成本和企业运营成本为目标,建立混合整数线性规划模型。模型中引入虚拟编组决策变量,并考虑列车运行、车站服务、交路类型及车底周转等约束,设计嵌入列车运行仿真的遗传-模拟退火算法进行求解。文献[34]采用传统建模方法对列车运行、列车交路及车底周转等过程进行刻画,而更多研究则借助时空网络建模方法,对上述过程进行统一描述与优化。文献[35]采用基于弧段与路径的时空网络建模方法,结合分支定价算法,将一体化优化视角拓展至多车辆段系统。尽管该研究未显式建模虚拟编组过程,但其框架涵盖

了灵活编组与车辆段交互关系,为揭示车底周转约束与需求响应式服务设计之间的相互作用机制提供了研究思路。文献[36]基于路径式时空网络构建需求驱动的一体化优化模型,实现动态客流需求下列车编组、列车交路与车底周转路径的一体化决策。该模型通过精细化刻画乘客上车过程并考虑多样化的乘客等待行为,在保持较低建模复杂度的同时,显著提升了客流刻画真实性。值得注意的是,文献[35-36]均强调,路径式时空网络表达方法能够在降低计算复杂度的前提下,有效支持包含虚拟重联/解编操作的车底周转建模。

上述文献的研究重点主要在于利用时空网络建模方法,对列车运行过程与乘客选择行为进行精细化刻画;与此同时,也有部分研究更加侧重于求解算法的设计与优化,以提升复杂模型的求解效率与计算性能。文献[37]构建滚动时域优化框架,利用深度学习实时预测区间客流,并根据预测偏差或固定周期动态更新模型。该方法能够在正常与异常客流场景下快速生成适配运行图,实现干线与支线服务模式的灵活切换。文献[38]将时刻表、列车编组与车底周转路径一体化建模为时空网络模型。该研究的核心贡献不仅在于建模的完备性,更在于通过定制化精确算法实现了计算可处理性——包括分支-Benders切割算法(branch-and-benders-cut)、基于区段的分解算法(section-based decomposition)以及分支-区段添加算法(branch-and-section-add),这些算法充分利用了大规模虚拟编组列车运行计划优化问题的结构特性,具有较好的求解效率。

2.3.3 小结

综上所述,现有文献清晰地展现了该领域的研究趋势:从相互独立的时刻表编制与车底周转优化模型,发展为同时考虑到发时间、停站方案、列车编组、列车交路与车底周转的一体化优化模型。在方法层面,随着研究内容增多与问题规模扩大,传统建模方法复杂度高,计算求解困难。时空网络建模与定制化精确求解算法为解决求解效率问题带来了新的突破。现有研究已围绕虚拟编组条件下列车时刻表与车底周转一体化优化开展了较为丰富的探索,但仍存在一定不足:现有研究中车辆段多集中在线路两端,对多车辆段场景研究较少;多数文献主要针对线路或局部网络展开,对复杂线网条件与车底跨线运用模式研究仍相对有限。

3 虚拟编组列车运行调整问题

中断发生后,线路上列车停车待令,同步进行线路条件排查、运行图调整等响应工作。响应工作结束

后，进入中断持续阶段，列车按照调整后的运行图运行，运输服务水平较低；中断结束后，进入恢复阶段，列车逐步由中断运行图过渡至计划运行图，线路运能逐渐恢复。为减轻中断影响并尽快恢复运营秩序，有必要开展列车运行调整工作。

虚拟编组条件下的列车运行调整，核心目标在于减轻突发事件对线路运输能力的影响，保障运营服务水平，并尽快恢复至正常运行图。虚拟编组技术支持

运营过程中的动态虚拟重联/解编，使原本独立运行的列车能够临时组成协同运行单元，从而显著提升运营组织灵活性与中断响应能力，加快运行图恢复并提高滞留乘客疏散效率。因此，基于虚拟编组的列车运行调整需要将列车运行与客流分配一体化决策，在满足安全约束的前提下充分利用缩小后的发车间隔，以减轻突发事件对线路能力的影响。表 2 总结了虚拟编组条件下列车运行调整领域的代表性研究成果。

表 2 虚拟编组列车运行调整研究
Table 2 Studies on train rescheduling under virtual coupling

文献编号	问题层面	研究领域	目标	模型	求解方法
39	列车运行调整	城轨	乘客总等待时间	混合整数线性规划模型	双层模拟退火-遗传算法
40		城轨	乘客站台等待时间	混合整数非线性规划模型	嵌套式遗传算法
41		城轨	乘客站台等待时间	混合整数非线性规划模型	嵌套式遗传算法
42		城轨	乘客总出行时间	混合整数线性规划模型	自适应精英策略遗传算法
43		城轨	乘客总等待时间	混合整数线性规划模型	商业求解器
44		城轨	乘客成本，运营企业成本	混合整数线性规划模型	改进的遗传融合变邻域搜索
45		城轨	乘客总旅行时间	混合整数非线性规划模型	遗传算法
46		城轨	总延误时间，滞留乘客总数，乘客总等待时间	混合整数线性规划模型	商业求解器
47		智轨	乘客旅行时间，终点站准点偏差	仿真优化模型+马尔可夫决策过程	Q 学习算法

3.1 中断持续阶段

在中断持续阶段，突发事件对线路运输能力的影响仍然持续存在，此时运行调整的重点在于尽可能保障线路服务水平并加快滞留乘客疏散。虚拟编组技术能够通过动态重联/解编与缩小列车追踪间隔，在线路条件不变的情况下，提高线路运输能力，增强中断条件下的运输组织灵活性，缓解客流积压并加快运营恢复。

针对城轨线路单向运营中断问题，文献[39]提出基于虚拟编组的反向行车策略：双方向列车虚拟重联后通过单线区段，构建以乘客总等待时间最小为目标的混合整数线性规划模型，并采用双层模拟退火-遗传算法求解。结果表明，该策略能有效减少乘客等待时间与滞留人数，提升运行调整效率。文献[40-41]提出两侧小交路与单线区段内列车虚拟重联往复运行的调整策略，以乘客站台等待时间最小为目标建立模型，并设计嵌套遗传算法求解。案例验证表明，该策略能有效减少乘客站台等待时间，保障乘客出行衔接性，提升列车运行调整效率。针对城轨网络中线路双向运营中断问题，文献[42]提出中断线路采用两端小交路折返、衔接线路采用区间或车站虚拟重联的组合调整

策略，以乘客总出行时间最小为目标构建运行调整模型，并设计自适应精英遗传算法求解。案例验证表明，该策略能有效减少滞留乘客等待时间，提升调整的灵活性与时效性。

3.2 中断恢复阶段

虚拟编组技术的应用能够提升中断恢复阶段的运输组织灵活性，快速疏散因中断积压的客流，缩短运行图恢复时间，并进一步提高线路整体运营恢复效率。针对双向中断后过度拥挤的场景，文献[43]提出虚拟编组与跳停策略相结合的列车运行调整方法，构建混合整数线性规划模型并求解。基于实际地铁线路的算例表明，该策略可使乘客总等待时间减少近 50%，且组合策略效果优于单一策略。在此基础上，文献[44]提出基于虚拟编组的编组、停站、交路多要素协同调整策略：通过在线虚拟重联快速增大运力疏散滞留客流，随后适时解编恢复计划行车间隔，并结合跳停与小交路措施加速车底周转。以最小化乘客与运营成本为目标建模，设计遗传-变邻域搜索算法求解。案例表明，该策略能有效减少乘客等待时间与站台拥挤，显著提升中断恢复阶段的调整效率。相比于文献[43]，文献[44]在运行调整策略中进一步考虑了列车交路选

择,并在优化目标中纳入企业运营成本,从而实现了运营服务水平与企业运营效益之间的综合平衡。

3.3 列车延误调整

当突发事件影响较小时,线路基础设施条件通常未发生变化,主要表现为列车运行延误。虚拟编组技术能够利用缩小后的列车间隔与动态协同运行能力,抑制延误传播并提升线路运行恢复效率。针对城轨线路列车延误问题,文献[40]和文献[45]提出基于虚拟编组的跳停调整策略,以乘客总旅行时间最小为目标构建模型,采用遗传算法进行求解。算例表明,该策略相比传统跳停方案可减少15.64%的乘客总旅行时间,提升延误恢复效率。文献[46]针对Y型地铁线路在扰动下的实时调整问题,通过对主干段列车动态编组以及支线列车通行顺序优化,在解决列车分合流冲突的同时,实现非对称支线间的客流运力再平衡。针对Y型线场景下ART列车延误问题,文献[47]提出基于虚拟编组的调整策略,考虑解编作业、信号等待时间与动态客流进行建模,采用DQN算法求解,以实现最小化乘客旅行时间,并保障列车准点运行。

3.4 小结

综上所述,现有虚拟编组条件下的列车运行调整研究普遍围绕提升滞留乘客疏散效率展开,通过虚拟重联/解编、缩小列车追踪间隔、跳停及小交路等策略,提高中断条件下的运输能力与灵活性。现有多数研究主要针对单线路或局部场景展开,对复杂网络条件下多线路协同运行调整的研究相对不足;同时,部分研究侧重于单一调整策略,对列车运行、客流分配、车底周转及交路组织之间的动态耦合关系考虑不够全面。此外,当前研究多集中于单一阶段,对中断持续阶段与中断恢复阶段的协同优化关注不足,尚未形成面向全过程的统一建模与联动调整机制。

4 未来研究方向

现有研究已从多个方面对虚拟编组条件下的列车运行计划优化与运行调整问题进行了探索,并取得了一定成果,但整体研究体系仍有待完善,未来可从以下方面进一步深入研究。

4.1 虚拟编组时刻表—停站—交路—车底一体化优化

应进一步推动时刻表、停站方案、交路组织、车底周转的协同优化,将四部分由传统的独立决策转变为一体优化问题,在提升运输能力的同时,进一步增强运输组织的灵活性,并实现与车底资源利用效率

之间的协调与平衡。

4.2 虚拟编组行-调-控一体化优化

未来研究应突破行车组织、调度指挥与列车控制相互独立的优化模式,进一步考虑列车运行控制与运输组织之间的深度耦合关系,推进虚拟编组条件下行车组织、调度指挥与列车控制的一体化优化研究。在行车组织层面,优化列车停站方案、到发时刻及运行顺序等决策;在调度指挥层面,优化车队解体与重组、列车编组调整及折返作业等决策;在列车控制层面,优化列车跟驰、速度控制及驾驶策略等决策,从而实现多层次决策的一体化优化。

4.3 虚拟编组运行计划优化统一建模框架

虚拟编组下列车运行计划优化问题仍缺乏统一且成熟的建模范式,尤其是在虚拟编组引入后,行车、调车与控制决策高度耦合,使得传统分阶段、分模块的建模方式难以准确刻画系统整体行为。未来研究有必要进一步梳理列车运行组织中的关键决策变量及其内在关联机制,构建更具一般性与可扩展性的统一建模框架,从而提升模型对复杂运营场景的表达能力和适用范围。

4.4 虚拟编组运行计划优化算法

在运行计划优化统一建模框架基础上,应重点面向大规模轨道交通网络下的高维优化问题,深入挖掘问题结构特征,发展高效的分解算法与近似求解方法。例如,可结合列车运行优化模型特性,尝试采用拉格朗日松弛法、列生成法、Benders分解法等将模型进行分解简化。此外,考虑运用深度强化学习等人工智能求解算法,并结合优化模型对其进行针对性的改进,从而将列车运行计划优化模型嵌入到深度学习和强化学习等算法框架之中,通过多次训练和持续迁移,进而提升列车运行计划优化模型的求解效率和求解质量。

4.5 虚拟编组运行调整多策略协同优化

针对虚拟编组下列车运行调整问题,应突破当前单一策略预设与静态应用的局限,进一步探索多策略协同优化机制。现有研究多在模型构建阶段固定采用某一类调整手段,缺乏对不同策略适用条件及其组合效应的分析。未来研究可构建面向虚拟编组的策略库体系,将重联/解编、停站调整、运行顺序重排、折返等多种手段纳入统一框架,并通过优化模型实现策略间的动态选择与协同组合,从而形成具有自适应能力的柔性调整机制,更充分释放虚拟编组在提升系统韧性方面的潜力。

4.6 面向中断全过程的运行调整

在中断阶段层面,应进一步强化对全中断阶段的过程刻画与差异化建模。目前研究多将中断过程割裂处理,缺乏对中断发生、中断持续与中断恢复3个阶段之间内在关联的分析。未来有必要基于扰动传播与客流重分配特征,建立面向全过程的分阶段决策框架,明确各阶段的关键控制目标与约束条件,并实现不同阶段之间的策略联动与动态衔接。

4.7 基于深度强化学习的虚拟编组列车运行调整方法

相较于传统优化方法,深度强化学习能够通过环境交互实现复杂动态场景下的实时、自适应决策,尤其适用于高动态性、高时效性的虚拟编组列车运行调整问题。未来研究可进一步结合多智能体强化学习,提升虚拟编组列车运行调整的智能化、自主化与鲁棒性。

5 结论

本文围绕虚拟编组技术在轨道交通列车运行计划优化与调整领域的应用,对近年来国内外相关研究进行了系统梳理与分析。结果表明:

1) 现有研究已由单一时刻表优化逐步拓展至开行方案、时刻表、停站方案、列车交路及车底周转等多要素协同优化,实现了列车运行计划与客流需求、车辆资源的动态匹配。同时,虚拟编组技术结合跳停、小交路等调整策略,为突发事件条件下的列车运行调整提供了新的解决方案,提高中断及延误场景下的客流疏散效率,加快运行图恢复过程。

2) 当前虚拟编组列车运行计划优化与调整研究仍存在一定局限。一方面,现有研究多采用分层次、分阶段优化方法,对行车组织、调度指挥与列车控制之间的深度耦合关系考虑不足,尚缺乏时刻表—停站—交路—车底一体化以及行-调-控一体化的统一优化框架;另一方面,大规模复杂网络条件下模型求解效率、多种优化策略协同以及与实际运营需求结合等方面仍需进一步完善。

3) 未来研究需加强虚拟编组与智能通信、数据驱动方法及人工智能技术的深度融合,面向实际运营环境构建兼顾效率、韧性与服务水平的协同优化体系,推动相关理论方法向工程应用转化,为虚拟编组技术在轨道交通系统中的推广应用提供理论依据与技术支撑。

参考文献

- [1] Xun Jing, Li Yanyan, Liu Ronghui, et al. A survey on control methods for virtual coupling in railway operation[J]. IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems, 2022, 3: 838-855.
- [2] 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.
- [3] Felez J, Vaquero-Serrano M A. Virtual coupling in railways: a comprehensive review[J]. Machines, 2023, 11(5): 521.
- [4] Schenker M, Stickel S, Dittus H, et al. Virtually Coupled Train Sets - A Comprehensive Analysis[J]. WCRR, 2022.
- [5] Stickel S, Schenker M, Dittus H, et al. Technical feasibility analysis and introduction strategy of the virtually coupled train set concept[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 4248.
- [6] 周旭. 城市轨道交通虚拟编组列车大小交路开行方案优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
Zhou Xu. Optimization for Train Operation Plan with Full-length and Short-turn Routes of Virtual Coupling Trains in Urban Rail Transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [7] 白佳薇. 虚拟编组技术应用下城市轨道交通快慢车运行图优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
Bai Jiawei. Optimization of running diagram of fast and slow trains in urban rail transit with virtual marshalling technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [8] 肖李蔚宁. 基于虚拟编组技术的地铁Y型线运行图优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
Xiao Liweining. Research on optimization of metro Y-line operation diagram based on virtual marshalling technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [9] 吕文博. 基于强化学习的城轨虚拟编组列车节能运行优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2024.
Lyu Wenbo. Research on energy-saving operation optimization of urban rail virtually coupled trains based on reinforcement learning[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024.
- [10] 李育瑾. 基于虚拟编组技术的城市轨道交通大小交路结合快慢车开行方案优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2025.
Li Yujin. Research on the optimization for urban rail train operation plan with "full-length and short-turn and skip-stop" of virtual coupling trains[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2025.
- [11] Zhou Xu, Lu Fang, Wang Liyu. Optimization of train operation planning with full-length and short-turn routes of virtual coupling trains[J]. Applied Sciences, 2022, 12(15): 7935.

- [12] 程志伟, 潘寒川, 黎旭帆, 等. 基于虚拟编组的城市轨道交通列车开行方案研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(12): 227-236.
Cheng Zhiwei, Pan Hanchuan, Li Xufan, et al. Train operation scheme of urban rail transit based on virtual coupling[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(12): 227-236.
- [13] 周厚盛, 戚建国, 杨立兴, 等. 虚拟编组条件下城轨列车单元灵活运用方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(5): 140-147.
Zhou Housheng, Qi Jianguo, Yang Lixing, et al. An optimization method for train unit flexible scheduling using virtual coupling technology[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(5): 140-147.
- [14] Chen Xingqi, Wang Yu. Research on an optimization method for metro train formation based on virtual coupling technology[J]. Applied Sciences, 2025, 15(18): 10046.
- [15] Tai Guoxuan, Lai Anzheng, Li Guangzu, et al. Flexible train composition mode-based rolling stock circulation planning problem for regional rapid rail transit[J]. Journal of Advanced Transportation, 2025, 2025: 2721207.
- [16] Sun Lishan, Liu Yue, Xu Yan, et al. Train service design for rail transit cross-line operation applying virtual coupling[J]. Applied Sciences, 2024, 14(15): 6787.
- [17] 孙众人. 基于虚拟编组技术的城市轨道交通 Y 型线路列车开行方案研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
Sun Zhongren. Research on train operation scheme of Y line in urban rail transit based on virtual marshalling technology[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2024.
- [18] 许可. 虚拟编组条件下城市轨道交通 Y 型线路列车交路方案优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
Xu Ke. Train traffic optimization scheme of urban rail transit Y-type line under virtual coupling condition[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [19] 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): 59-65.
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): 59-65.
- [20] 付兵, 马新源, 田婉琪, 等. 面向虚拟编组的城市轨道交通运行优化调度方法[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(1): 124-132.
Fu Bing, Ma Xinyuan, Tian Wanqi, et al. Urban rail transit scheduling optimization method for virtual coupling trains[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(1): 124-132.
- [21] Ning Zheng, Ou Dongxiu, Xie Chi, et al. Optimal convoy composition for virtual coupling trains at junctions: a coalition formation game approach[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 154: 104277.
- [22] 韩宝明, 龙宇轩, 张琦, 等. 基于虚拟编组的市域列车运行组织优化研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 43-50.
Han Baoming, Long Yuxuan, Zhang Qi, et al. Optimization of suburban train operation organization based on virtual coupling[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(1): 43-50.
- [23] Chai Simin, Yin Jiateng, D'ariano A, et al. Scheduling of coupled train platoons for metro networks: a passenger demand-oriented approach[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2023, 2677(2): 1671-1689.
- [24] Wang Pengling, Ge Jianhao, Xiao Xiaofang, et al. Transport capacity analysis for sharing-corridor metro lines under virtual coupling[J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 192: 110217.
- [25] 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.
- [26] Bai Jiawei, Zhang Qi. Optimization of skip-stop train schedule in urban rail transit under virtual coupling[J]. Journal of Advanced Transportation, 2025, 2025: 7897020.
- [27] 游婷, 马法运, 苗峰, 等. 城市轨道交通虚拟编组列车优化运行方案研究[J]. 都市快轨交通, 2023(1): 36-42.
You Ting, Ma Fayun, Miao Feng, et al. Optimal operation plan design for virtually coupled trains in urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023(1): 36-42.
- [28] 冯颖. 虚拟编组技术下铁路列车时刻表与停站方案协同优化研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2024.
Feng Ying. Collaborative optimization of train timetable and stopping scheme in railway with virtual formation technology[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2024.
- [29] 李岩, 巩亮, 许得杰, 等. 基于虚拟编组的城轨列车时刻表优化方法[J]. 交通信息与安全, 2024, 42(3): 74-84.
Li Yan, Gong Liang, Xu Dejie, et al. A timetable optimization method for urban train transit based on virtual coupling[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2024, 42(3): 74-84.
- [30] 李晓刚. 考虑灵活编组的城轨列车运行图编制方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2024.
Li Xiaogang. The method of metro train operation graph

- scheduling considering flexible train composition[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024.
- [31] 赵杰, 李晓刚, 刘永壮, 等. 考虑虚拟灵活编组的城轨列车运行图编制方法[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(9): 135-145.
- Zhao Jie, Li Xiaogang, Liu Yongzhuang, et al. Scheduling method for train working diagram considering flexible train composition with virtual coupling technology[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(9): 135-145.
- [32] 赵亚琼. 可变编组条件下城市轨道交通列车运行计划一体化优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- Zhao Yaqiong. Research on the integrated optimization of train scheduling for urban rail transit under variable train formation conditions[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [33] Chai Simin, Yin Jiateng, D'ariano A, et al. A branch-and-cut algorithm for scheduling train platoons in urban rail networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2024, 181: 102891.
- [34] Lu Fang, Wang Liyu, Hu Jiangfeng, et al. Integrated optimization of train diagrams and rolling stock circulation with full-length and short-turn routes of virtual coupling trains in urban rail transit[J]. Applied Sciences, 2024, 14(12): 5006.
- [35] Wang Entai, Yang Lixing, Yin Jiateng, et al. Passenger-oriented rolling stock scheduling in the metro system with multiple depots: network flow based approaches[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2024, 180: 102885.
- [36] Bao Xinyu, Zhang Qi, Yin Haodong, et al. Integrated optimization of demand-oriented timetabling and rolling stock circulation planning with flexible train compositions and multiple service routes on urban rail lines[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2025, 174: 105071.
- [37] Wang Hongyang, Yang Lixing, Zhang Jinlei, et al. Real-time train timetabling with virtual coupling operations on a Y-type metro line[J]. European Journal of Operational Research, 2024, 319(1): 168-190.
- [38] Wang Hongyang, Yang Lixing, Zhou Housheng. Enhancing efficiency and fairness: rolling stock scheduling with virtual coupling and short-turning strategies[J]. Transportation Science, 2025, 59(6): 1303-1328.
- [39] 周玮腾, 高捷, 韩波, 等. 基于虚拟编组的城轨线路单向运营中断场景下的列车运行调整研究[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(5): 72-82.
- Zhou Weiteng, Gao Jie, Han Bo, et al. Research on train operation adjustment in urban rail lines under unidirectional operation interruption scenarios based on virtual coupling technology[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2025, 38(5): 72-82.
- [40] 黄静仪. 基于虚拟编组技术的城市轨道交通列车运行调整研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- Huang Jingyi. Research on adjustment of urban rail transit train operation based on virtual coupling technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [41] 陈非. 虚拟编组技术条件下城市轨道交通单向中断列车运行调整研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2024.
- Chen Fei. Train rescheduling under urban rail transit one-way disruption based on virtual coupling technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024.
- [42] 高菡. 基于虚拟编组技术的中断下城市轨道交通列车运行调整研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- Gao Han. Research on train operation adjustment of urban rail transit under interruption based on virtual marshalling technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [43] Long Yuxuan, Han Baoming, Chen Zebin. Rescheduling metro trains in the over-crowded situation after disruptions with virtual coupling technology and stop-skipping strategy[C]//The Proceedings of the 11th International Conference on Traffic and Transportation Studies. Singapore: Springer, 2025: 552-560.
- [44] 龙宇轩. 中断场景下基于虚拟编组的城轨列车运行调整优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2025.
- Long Yuxuan. Research on train rescheduling optimization of urban rail transit under disruptions based on virtual coupling[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2025.
- [45] 黄静仪, 张琦. 基于虚拟编组技术的城市轨道交通列车延误跳停调整研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(2): 151-158.
- Huang Jingyi, Zhang Qi. Research on train delay skip-stop adjustment in urban rail transit based on virtual coupling technology[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(2): 151-158.
- [46] Chen C, Zhu L, Wang X. Enhancing subway efficiency on Y-shaped lines: A dynamic scheduling model for virtual coupling train control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(8): 10020-10034.
- [47] Liu Yafei, Dai Shihao, Luo Chenyu, et al. Virtual coupling rescheduling for autonomous rail rapid transit on Y-type lines with signalized intersections[C]//2025 IEEE 14th Data Driven Control and Learning Systems (DDCLS). May 9-11, 2025, Wuxi, China. IEEE, 2025: 281-286.

(编辑: 傅依萱)