

线网结构下的城市轨道交通运输组织行车方法

张照松¹ 刘泽琛²

1. 温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司运营分公司 浙江 温州 325000

2. 浙江幸福轨道交通运营管理有限公司 浙江 温州 325000

摘要: 随着我国城市化进程的加速,城市轨道交通已从单线运营迈入复杂的网络化运营时代。线网结构的形成对传统的运输组织行车方法提出了前所未有的挑战与机遇。本文旨在系统性地探讨在复杂线网结构背景下,城市轨道交通运输组织的核心行车方法。文章首先剖析了线网结构的基本形态、特征及其对运输组织带来的根本性变革;其次,深入阐述了网络化行车组织的核心原则,包括全局优化、资源共享与协同联动;在此基础上,重点论述了三大核心行车方法——列车运行图的协同编制、跨线/共线运行组织以及应急条件下的行车调整策略;最后,结合智能技术的发展趋势,展望了未来行车组织方法的演进方向。研究表明,构建一套适应线网结构、以乘客为中心、具备高度韧性及智能化水平的行车组织体系,是提升城市轨道交通整体效能与服务水平的关键所在。

关键词: 城市轨道交通;线网结构;行车方法;运行图;跨线运行

引言

城市轨道交通是大都市公共交通骨干,发展从“单线”到“多线”再到“成网”。早期线路独立运营,运输组织简单。但随着城市扩张、出行需求多元,孤立线路难满足高效便捷出行要求,通过换乘枢纽形成复杂线网成普遍选择。线网结构形成标志运营模式根本转变,它是有机整体系统,对传统单线运输组织行车方法构成挑战。一条线路问题会迅速传导至全网,乘客出行路径也变复杂,对全网可达性和可靠性要求更高。因此,在复杂线网结构下,如何科学高效组织列车运行、实现运力资源全局最优配置、保障网络稳定与韧性、提升乘客出行体验,成为城市轨道交通运营管理核心课题。本文将围绕此梳理分析行车方法,为理论与实践提供参考。

1 线网结构的特征及其对运输组织的影响

1.1 线网结构的基本形态与类型

城市轨道交通线网由多条线路交织,按拓扑结构分为以下几种基本形态:①放射型线网:以城市中心区为核心向外延伸,利于加强中心与外围联系,但外围区域联系弱,中心区换乘压力大。②网格型线网:线路纵横交错,换乘选择多、绕行距离短,网络连通性与可达性高,但建设成本高、运营复杂。③环+放射型线网:在放射型基础上增加环线,疏解中心区换乘客流,加强外围横向联系,是超大城市常用模式。④带状/枝状线网:沿城市主要发展轴布设,适用于带状或组团式城市,结构简单但灵活性和冗余度低。实际应用中,城市线网多为多种形态复合体,复杂度高。

1.2 线网结构对运输组织的根本性影响

线网结构使运输组织从“单线”跃升至“全网”,影响如下:①运营目标转变:单线运营关注本线正点率与满载率,网络化运营则追求全网运输效率与乘客服务水平最大化,有时需牺牲局部最优换取整体效益。②客流特征复杂化:客流呈现 OD、断面、换乘等多重分布特征,高峰时段大量换入客流冲击,准确预测和动态管理交织客流是行车组织前提^[1]。③资源约束关联性:运力资源全网共享与竞争,车辆段位置影响备用车共享,关键咽喉区段通过能力制约多线协同运行。④运营干扰传导性:网络耦合性强,“蝴蝶效应”显著,一条线路问题会迅速波及其他线路,引发全网紊乱,行车组织需具备协同联动和应急响应能力。⑤乘客体验全局性:乘客以全程出行时间、换乘便捷性等综合指标评价服务质量,行车组织需以乘客完整出行链为出发点规划。

2 网络化行车组织的核心原则

面对线网结构带来的挑战,网络化行车组织必须遵循一系列超越单线思维的核心原则。

2.1 全局优化原则

这是网络化行车组织的最高准则。一切行车决策都应服务于全网整体效能的最大化。这要求建立一个能够模拟和评估全网运行状态的模型,将各线路的列车运行、客流分布、换乘衔接等要素纳入统一的优化框架中。例如,在编制运行图时,不仅要考虑本线的发车间隔,更要考虑与其他线路在换乘站的接续时间,以最小化乘客的平均换乘等待时间。

2.2 资源共享与动态调配原则

打破线路壁垒,实现运力资源的集约化管理和动态

化调配。这包括：①车辆资源共享：建立跨线路的车辆运用计划，利用夜间或平峰时段的富余能力，将车辆灵活调拨至需求旺盛的线路。②人力资源共享：培养具备多线驾驶资质的司机，建立统一的乘务派班系统，应对突发的人员短缺或临时加开任务。③轨道资源共享：对于共线运行或通过联络线跨线运行的区段，需制定精细的调度规则，确保不同交路的列车有序、安全地使用有限的轨道资源。

2.3 协同联动原则

各运营主体（即使分属不同公司）以及调度、客运、车辆、供电、信号等各专业部门之间，必须建立高效的协同机制。信息的实时共享、指令的快速下达与执行、应急预案的联合演练，都是保障网络稳定运行的基础。特别是在发生突发事件时，协同联动能力直接决定了应急处置的效率和效果。

3 线网结构下的核心行车方法

3.1 列车运行图的协同编制

运行图是行车组织的“宪法”。在网络化背景下，运行图的编制从单线独立走向全网协同。

3.1.1 基础：客流OD矩阵与换乘量预测

协同编制的起点是对全网客流的精准把握。通过AFC（自动售检票）数据、手机信令数据等，构建高精度的全网OD矩阵，并预测各换乘站在不同时段的内、换出及站内滞留客流。这是确定各线路合理运力投放和列车交路的基础。

3.1.2 核心：多线协同优化模型

传统的单线运行图编制主要解决列车追踪间隔、停站时间、折返能力等问题。而协同编制则需构建一个多目标、多约束的复杂优化模型。其目标函数通常包括：最小化全网乘客总旅行时间、最小化换乘等待时间、均衡各线路/区段的满载率、最大化车辆运用效率等^[1]。约束条件则涵盖：各线路的物理通过能力、信号系统限制、车辆保有量、司乘人员工时、关键换乘站的容纳能力等。

3.1.3 关键技术：接续时间优化

在换乘站，后到达列车的乘客需要时间完成下车、步行至另一站台、上车的过程。这个“接续时间”是影响换乘体验的关键。协同编制的核心任务之一就是精细化设计不同线路列车在换乘站的到发时刻，使其形成良好的“接驳”关系。例如，可以安排A线列车到达后2-3分钟，B线列车正好发车，从而将大部分换乘客流高效地输送出去，避免在站台过度积压。这被称为“时刻表协调”（Timetable Coordination）。

3.1.4 实施：滚动优化与动态调整

全网协同运行图并非一成不变。在日常运营中，调度中心会根据实时客流、天气、事件等信息，对运行图进行微调。例如，在大型活动散场时，临时加密通往该区域的线路班次，并同步调整相关接驳线路的运行计划。

3.2 跨线与共线运行组织

3.2.1 跨线运行

指列车从一条线路出发，经由联络线驶入另一条线路继续运营，乘客无需换乘即可到达目的地。典型案例如上海地铁3/4号线、广州地铁3/北延段。优势是极大提升了特定OD间的直达性，减少了换乘次数和总旅行时间，提高了乘客满意度；同时，可以整合两条线路的部分运力，提高车辆运用效率。组织难点包括：①交路设计复杂：需要设计多种交路组合（如A线独立运行、B线独立运行、A-B跨线运行），并精确计算每种交路的开行对数^[1]。②调度指挥难度高：列车跨越不同线路的调度管辖区域，对调度员的业务能力和通信系统的可靠性要求极高。③乘客引导要求高：必须通过清晰的广播、PIS（乘客信息系统）和导向标识，告知乘客列车的终到站，防止乘客坐错车。④应急处置复杂：一旦跨线列车在非本线区域发生故障，救援和清客工作更为复杂。

3.2.2 共线运行

指两条或多条线路在部分区段共享同一轨道。常见于快慢车模式（快车与普通车共线）或不同制式线路的互联互通（如市域铁路与市区地铁）。优势是节省了宝贵的地下或地上空间资源，降低了建设成本；对于快慢车模式，可以在不增加轨道的情况下，为长距离乘客提供更快的服务。组织难点包括：①通过能力瓶颈：共线段的通过能力是所有使用该区段线路的共同瓶颈。必须精心设计快慢车的越行方案（如设置越行线），确保快车能顺利超越慢车，同时不影响慢车的正常停站。②运行图冲突：不同线路、不同速度等级的列车在共线段交织运行，对运行图的稳定性和容错性提出极高要求。微小的晚点都可能在共线段被放大，影响多条线路。③信号系统兼容：如果涉及不同制式的线路共线，信号系统的互联互通是技术前提。

3.3 应急条件下的行车调整策略

3.3.1 信息感知与态势研判

应急响应的第一步是快速、准确地掌握故障信息（位置、性质、影响范围）和实时客流态势。依托CBTC（基于通信的列车控制）、视频监控、AFC数据等，构建“一张图”式的应急指挥平台，实现对全网运行状态的全景感知。

3.3.2 分级分类的调整预案

针对不同类型的故障（列车故障、信号故障、供电中断、大客流冲击、公共安全事件等）和不同的影响程度，预先制定标准化的、可组合的调整预案库。例如：小范围延误采用“压缩停站时间”、“调整区间运行速度”等方式追赶正点。单线中断启动“小交路+公交接驳”模式，同时通过PIS、APP等渠道向受影响乘客推送替代出行方案^[4]。换乘站大客流实施“限流”措施，控制进入换乘站的客流；同时，对上游线路采取“跳停”（列车不停靠该换乘站）或“缓行”（放慢进入该站的速度）策略，从源头上削减客流冲击。

3.3.3 全网联动的疏导策略

这是网络化应急处置的精髓。当A线发生中断时，不能只关注A线本身，更要主动干预与之相关的B、C、D线。①运力再分配：临时抽调邻近线路的备用车或调整交路，加密通往A线替代公交接驳点的线路班次。②客流诱导：通过全网的PIS、广播和官方APP，向所有可能前往A线区域的乘客推送绕行建议，引导他们选择其他路径，从而减轻A线及周边路网的压力。③跨线支援：在具备条件的情况下，组织其他线路的列车通过联络线进入A线非故障区段，维持部分区段的运营。

3.3.4 事后恢复与学习

应急处置结束后，需迅速组织列车回库、清理现场，并逐步恢复正常运行图。更重要的是，要对整个事件进行复盘，分析预案的有效性、协同中的不足，并更新预案库和培训内容，实现“打一仗、进一步”。

4 未来发展趋势：智能化驱动的行车组织

4.1 基于AI的精准客流预测与动态调度

利用深度学习模型，融合历史数据、实时数据、外部事件（天气、节假日、大型活动）等多源信息，实现分钟级、站点级的客流精准预测。在此基础上，调度系统可以自动生成最优的、动态的列车运行调整指令，甚至实现“需求响应式”公交（DRT）与轨道交通的无缝融合。

4.2 全自动运行（FAO）与智能调度一体化

GoA4级（无人值守的全自动运行）系统不仅解放了司机，更重要的是其毫秒级的数据交互能力，为实现更精细、更柔性的列车控制（如动态调整追踪间隔、精确对标）提供了可能。智能调度中心可以与FAO系统深度

融合，实现从宏观计划到微观控制的一体化闭环管理。

4.3 数字孪生赋能的仿真与推演

构建城市轨道交通的“数字孪生”体，可以在虚拟空间中对各种运行场景（如新线接入、大型活动保障、极端天气应对）进行高保真度的仿真推演，提前发现潜在风险，优化行车组织方案，实现“先试后行”。

4.4 MaaS（出行即服务）理念下的协同

未来的行车组织将不再局限于轨道内部，而是作为城市MaaS生态的核心组成部分。通过与地面公交、共享单车、网约车等其他交通方式的数据共享和业务协同，为乘客提供端到端的、一键式的最优出行方案，并反向指导轨道运力的动态投放。

5 结语

线网结构的形成是城市轨道交通发展的必然结果，它深刻地改变了运输组织的内涵与外延。本文系统论述了在此背景下，城市轨道交通运输组织行车方法的演进与创新。研究表明，成功的网络化行车组织必须摒弃单线思维，牢固确立全局优化、资源共享与协同联动的核心原则。通过协同编制全网运行图、科学组织跨线与共线运行、构建强大的全网联动应急调整体系，才能有效应对线网复杂性带来的挑战。展望未来，以人工智能、大数据、全自动运行等为代表的智能技术，将成为驱动行车组织方法再次革新的核心动力。未来的行车组织将更加精准、柔性、自主和人性化，不仅能高效地运送乘客，更能主动地塑造和优化城市居民的出行行为，为构建绿色、高效、宜居的未来城市交通体系贡献核心力量。持续深化对线网结构下行车组织规律的研究与实践，是城市轨道交通行业高质量发展的必由之路。

参考文献

- [1]袁瑞辰,殷程,王雪皓,等.线网结构下的城市轨道交通运输组织行车方法[J].时代汽车,2025,(12):160-162.
- [2]杨海溯.基于路网的城市轨道交通运输组织行车策略研究[J].中国设备工程,2025,(14):269-271.
- [3]顾御坤.城市轨道交通网络化行车组织优化方法分析[J].交通世界,2024,(15):34-36.
- [4]安彤,卢天星,张宏磊.城市轨道交通全自动运行线路行车组织风险与应对方法[J].人民公交,2024,(05):77-82.