

城市轨道交通网络化运营下的运力匹配研究

陈左添 张宇欣

郑州交通发展投资集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 本文旨在深入探讨城市轨道交通网络化运营环境下的运力匹配问题。首先,系统阐述了网络化运营的核心特征及其对运力匹配带来的新挑战;其次,构建了以“需求-供给-协同”为核心的运力匹配理论框架,并详细剖析了客流需求精准预测、动态运力供给优化及跨线协同调度三大关键环节;再次,针对当前实践中存在的主要问题,提出了基于大数据与人工智能的精细化客流预测、面向网络韧性的弹性运力配置、以及以乘客一体化出行体验为导向的跨线协同调度等优化策略;最后,通过一个简化的案例分析,验证了所提策略的有效性,并对未来研究方向进行了展望。研究表明,实现网络化运营下的高效运力匹配,是提升城市轨道交通系统整体效能、保障乘客出行体验、促进城市可持续发展的关键所在。

关键词: 城市轨道交通; 网络化运营; 运力匹配; 客流预测; 协同调度; 运营优化

引言

城市轨道交通作为现代大都市公共交通系统的骨干,承担着缓解交通拥堵、减少环境污染、引导城市空间结构优化的重要使命。近年来,我国城市轨道交通建设取得了举世瞩目的成就,北京、上海、广州、深圳等超大城市已建成或正在形成规模庞大、结构复杂的轨道交通网络。网络化运营并非简单地将多条独立线路进行物理连接,而是指各条线路在物理、信息、管理、服务等多个层面深度融合,形成一个有机的整体系统。乘客可以在网络内便捷地换乘,实现“一张网、一盘棋”的出行体验。然而,网络化在带来便利的同时,也极大地增加了运营的复杂性。客流在路网中的流动呈现出高度的动态性、关联性和不确定性,一条线路的运营状态(如延误、中断)会通过换乘节点迅速波及整个网络,产生“蝴蝶效应”。在此背景下,如何科学、精准、动态地匹配运力与客流需求,成为网络化运营面临的最核心挑战之一^[1]。传统的运力匹配研究多聚焦于单条线路,通过调整列车运行图(如发车间隔、编组数量)来适应本线客流。这种“头痛医头、脚痛医脚”的模式在网络化环境下显得力不从心。它忽视了客流在网络中的转移、叠加与分流效应,容易导致局部运力过剩而其他区域运力不足,造成资源浪费与服务失衡。因此,亟需构建一套面向网络全局的运力匹配理论与方法体系。

1 网络化运营的特征与运力匹配的新挑战

1.1 网络化运营的核心特征

(1) 物理连通性: 各条线路通过换乘车站实现物理连接,形成一张覆盖城市主要功能区的交通网络。乘客出行路径不再局限于单一轨道,而是可以在网络中自由

选择最优路径。(2) 客流关联性: 客流在网络中流动,各线路、各车站的客流不再是孤立的,而是相互影响、相互制约的。某条线路的客流激增或运营中断,会通过换乘行为引发相邻线路客流的连锁反应。(3) 运营协同性: 网络内各线路的列车运行图、车辆调度、人员安排等需要高度协同,以确保换乘衔接顺畅、网络整体运能最大化。任何一个环节的失调都可能影响全局。(4) 需求复杂性: 网络化运营下的客流需求呈现出时空分布不均、动态变化快、出行目的多元等特点。通勤、通学、购物、娱乐等不同目的的客流交织在一起,对运力供给的灵活性和精准性提出了更高要求。

1.2 运力匹配面临的新挑战

(1) 需求预测难度剧增: 传统的基于历史数据的单线客流预测模型难以捕捉网络中复杂的客流转移动态。乘客路径选择行为受多种因素影响(如票价、时间、拥挤度、可靠性),使得精准预测网络级客流变得异常困难。(2) 供给优化维度复杂: 运力供给不再仅仅是调整某条线的发车间隔。它涉及到车辆资源(列车)在整个网络中的动态分配、跨线交路的设置、大小交路的组合、备用车的部署等多个维度,是一个高维、非线性的优化问题。(3) 协同调度机制缺失: 目前多数城市的轨道交通运营仍以线路为单位进行管理,缺乏一个强有力的、统一的网络级协同调度指挥中心。这导致在应对突发事件或高峰时段时,难以实现跨线路的运力资源快速、高效调配^[2]。(4) 乘客体验与系统效率的平衡: 网络化运营的目标不仅是系统效率最大化,更要保障乘客的一体化出行体验。例如,为了减少某条线的拥挤而增加其运力,可能会导致换乘站的过度拥挤,反而损害了

乘客体验。如何在系统效率与乘客体验之间找到最佳平衡点，是运力匹配的核心难题。

2 网络化运营下运力匹配的理论框架

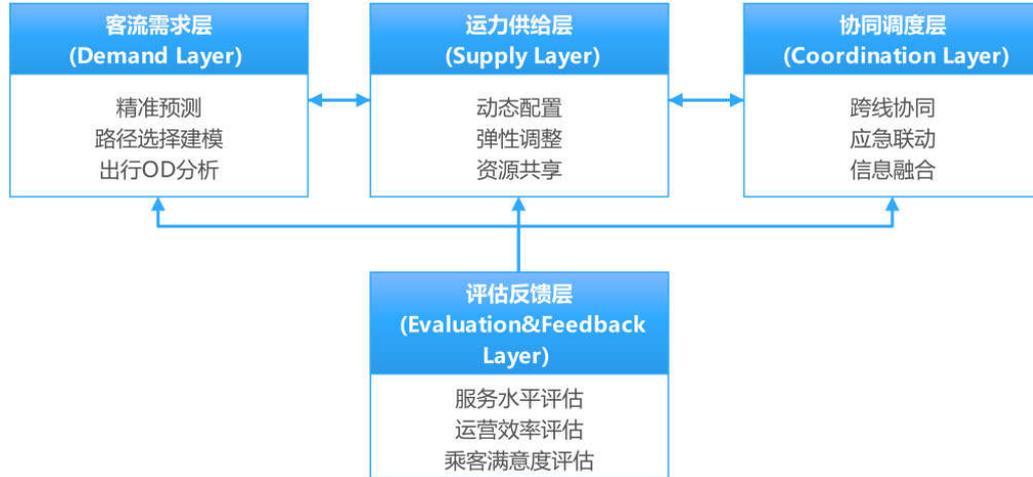


图1 网络化运营下运力匹配理论框架

该框架包含四个层次：

（1）客流需求层：这是运力匹配的起点和依据。核心任务是利用多源数据（AFC、视频监控、手机信令等），构建高精度的网络级客流预测与出行行为模型，准确刻画乘客的时空分布及路径选择偏好。（2）运力供给层：这是运力匹配的执行主体。根据需求层的输入，动态、弹性地配置网络内的运力资源，包括列车开行方案、车辆运用计划等，以实现供给与需求在时空上的最优匹配。（3）协同调度层：这是网络化运营的灵魂。它负责打破线路壁垒，实现跨线路的运力资源协同、应急事件联动处置以及信息的深度融合，确保整个网络作为一个有机整体高效运转。（4）评估反馈层：这是闭环优化的关键。通过建立科学的评估指标体系（如列车满载率、乘客候车时间、换乘等待时间、网络准点率等），对运力匹配的效果进行量化评估，并将结果反馈至前三个层次，驱动运力匹配策略的持续迭代与优化。

3 运力匹配的关键环节剖析

3.1 客流需求精准预测

在网络化运营背景下，客流预测必须从传统的“点-线”模式跃升为“网-流”模式。这意味着预测的目标不仅是某个车站或某条线路的进出站量，更是整个网络中客流的动态流动路径及其在各节点、各区段的分布状态。实现这一目标，离不开对多源数据的深度融合与先进人工智能模型的应用。自动售检票（AFC）系统提供了精确的乘客进出站和换乘交易记录，是构建出行OD（起讫点）矩阵的基础；车站和车厢内的视频监控、Wi-

Fi/蓝牙探针等物联网设备，则能实时感知站台和车厢的拥挤程度，为动态调整提供即时反馈；而手机信令等大数据则能有效补充非付费区客流信息，并揭示更长距离的出行链。将这些数据整合于统一的数据中台，可以构建出全息、立体的客流画像^[1]。在此基础上，以图神经网络（GNN）和长短期记忆网络（LSTM）为代表的深度学习模型展现出巨大优势。GNN能够有效学习路网的拓扑结构，捕捉车站之间的空间依赖关系；LSTM则擅长处理客流随时间演变的动态特性。二者的结合，如时空图神经网络（ST-GNN），能够以前所未有的精度对未来短时乃至中长期的网络级客流进行预测，为运力的前瞻性配置奠定基础。

3.2 动态运力供给优化

运力供给的优化必须摆脱过去静态、刚性的计划思维，转向动态、弹性的响应模式。这要求运营管理者从网络全局而非单一线路的视角来审视和配置运力资源。网络化列车运行图的编制是这一转变的基础，它需要统筹考虑各线路间的换乘衔接时间、车辆资源共享的可能性以及检修基地的布局，以编制出一体化的、协同的运行图，从而在源头上减少乘客的换乘等待时间并提高车辆的周转效率。在此基础上，一系列弹性运力配置策略应运而生。例如，在客流分布呈现明显潮汐特征的线路上，采用大小交路嵌套的模式，可以将宝贵的运力资源集中投放在高客流的核心区段，避免在低客流区段造成浪费。对于物理上贯通且客流需求匹配的相邻线路，探索跨线运行（贯通运营）模式，能够实现乘客的“一车

直达”，从根本上减少换乘需求和网络压力。更为前沿的探索是动态编组技术，即采用可灵活组合的列车单元，根据实时预测的客流需求，动态调整上线列车的编组数量，实现运力供给的“按需定制”^[4]。此外，备用车的调度也应从被动响应转向主动预防，通过建立网络级的智能备用调度系统，根据客流预测模型预判的风险点，提前将备用车部署到关键位置，从而在客流高峰或突发延误时能够实现运力的秒级补充。

3.3 跨线协同调度

如果说精准预测和弹性供给是运力匹配的“手”和“脚”，那么跨线协同调度就是其“大脑”和“神经系统”。协同调度的核心在于打破长期以来形成的以线路为单位的壁垒，建立起一个能够统揽全局的指挥中枢。这个中枢应是一个集成了信号、通信、供电、车辆、客流等所有子系统信息的中央级调度指挥中心（TCC），能够实现对全网运营状态的“一屏总览”和调度指令的“一键下达”。在日常运营中，协同调度中心负责监控各线路的运行状态，微调列车运行图以确保换乘衔接的无缝化。在应急状态下，其作用更为关键。当某条线路发生故障时，协同调度中心能够迅速启动网络级应急预案，综合运用多种手段进行联动处置：一方面，通过调整相邻线路的运行计划，加密相关区段的车次，为受影响的乘客提供替代路径；另一方面，通过乘客信息系统（PIS）、官方APP等渠道，向乘客推送实时、精准的诱导信息，主动引导客流在网络中合理分流。这种信息的深度融合与发布，不仅是技术问题，更是服务理念升级，它将乘客从被动的接受者转变为主动的参与者，共同参与到运力与需求的再平衡过程中，从而在保障网络韧性的同时，最大程度地维护乘客的出行体验。

4 运力匹配的优化策略

基于上述理论框架与关键环节分析，本文提出以下优化策略：

4.1 构建基于大数据与AI的精细化客流预测体系

城市轨道交通运营企业应加大在数据基础设施上的投入，打通各数据孤岛，构建统一的数据中台。在此基础上，研发并部署基于GNN、LSTM等先进算法的客流预测模型，实现对未来15分钟、1小时乃至更长时间尺度的网络级客流精准预测。预测结果应细化到每个车站、每个时段、每条路径，为运力动态调整提供坚实的数据支撑。

4.2 推行面向网络韧性的弹性运力配置模式

运力配置策略应从追求“计划完美”转向追求“动态适应”。大力推广大小交路、跨线运行等灵活的运营组织模式。积极探索智能备用调度系统，使其能根据预测的客流风险自动触发调度指令。长远来看，应推动车辆技术的革新，为动态编组等更高级别的弹性运力配置创造条件。

4.3 建立以乘客一体化出行体验为导向的跨线协同调度机制

协同调度的最终目标是提升乘客体验。因此，协同调度的决策模型应将“乘客总出行时间”、“换乘便捷性”、“车厢舒适度”等乘客感知指标纳入优化目标函数。通过统一的调度平台，实现对全网列车的协同控制，确保换乘衔接的无缝化。同时，加强与地面公交、共享单车等其他交通方式的协同，构建一体化的综合交通出行服务体系。

5 结语

本文聚焦城市轨道交通网络化运营下的运力匹配问题，指出网络化运营将多线路整合为复杂巨系统，运力匹配内涵发生深刻变革，成为涉及需求感知、供给优化、主体协同的复杂系统工程。实现高效运力匹配，关键在于树立网络全局观，构建“需求-供给-协同”理论框架，推动客流预测精细化、运力供给弹性化、调度指挥协同化。展望未来，技术进步将推动运力匹配研究升级。数字孪生技术可实现运营策略全要素仿真推演，达成智能决策。MaaS理念下，轨道交通运力匹配将融入综合交通体系，与多模式交通深度融合，提供一体化出行服务。同时，运力匹配模型还需考虑韧性与可持续性，兼顾安全、能源效率与环保，助力城市轨道交通支撑城市高质量发展。

参考文献

- [1]吴桐.城市轨道交通网络化运营现状、挑战与对策分析[J].城市轨道交通,2025,(04):58-60.
- [2]王京.城市轨道交通网络化运营模式下行车组织优化研究[J].运输经理世界,2024,(28):4-6.
- [3]杨宇航,方志伟,官振冲,等.城市轨道交通运力运量匹配评价研究[J].交通工程,2023,23(06):8-14.
- [4]田婉琪.城市轨道交通运力运量综合匹配评估研究[D].北京交通大学,2018.