

控制与决策

Control and Decision

综合负载均衡下市域-城轨贯通运营开行方案优化

杨雯雯, 孟学雷, 韩立刚, 方立海, 付艳欣, 康茜, 王保灵

引用本文:

杨雯雯, 孟学雷, 韩立刚, 等. 综合负载均衡下市域-城轨贯通运营开行方案优化[J]. *控制与决策*, 2026, 41(2): 351-361.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.0646>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

工序加工时间不确定的可重入调度问题的求解

Solution of reentrant scheduling problem with uncertain processing time

控制与决策. 2021, 36(5): 1127-1136 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1036>

铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化

Integrating optimization of resource allocation and handling scheduling in railway container terminal

控制与决策. 2021, 36(12): 3063-3073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0597>

区间数可重入混合流水车间调度与预维护协同优化

Collaborative optimization of interval number reentrant hybrid flow shop scheduling and preventive maintenance

控制与决策. 2021, 36(11): 2599-2608 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0973>

基于改进多目标优化算法的分布式数据中心负载调度

Multi-objective optimization of energy and performance management in distributed data centers

控制与决策. 2021, 36(1): 159-165 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0702>

考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题

Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints

控制与决策. 2020, 35(12): 2999-3005 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1756>

综合负载均衡下市域-城轨贯通运营开行方案优化

杨雯雯^{1,2}, 孟学雷^{1†}, 韩立刚³, 方立海⁴, 付艳欣¹, 康 茜¹, 王保灵¹

- 兰州交通大学 交通运输学院, 兰州 730070;
- 兰州石化职业技术大学 国际商务学院, 兰州 730060;
- 中国铁路兰州局集团有限公司 调度所, 兰州 730000;
- 中国铁路兰州局集团有限公司 施工管理办公室, 兰州 730000)

摘要: 针对市域铁路与城市轨道交通贯通运营中系统负载不均衡与多制式协同不足问题, 提出一种基于“区间-全网”二维综合负载均衡的多编组列车开行方案, 旨在实现局部区间与全网整体负载均衡的协同优化. 构建以乘客出行成本、企业运营成本及综合负载均衡度最优为目标, 考虑贯通列车折返能力、可用车辆数等约束的多目标优化模型. 针对模型特征, 设计结合变邻域搜索机制与分层扰动策略的自适应变邻域麻雀搜索算法. 运用算例验证模型与算法的有效性, 结果表明, 与贯通短编组、贯通长编组及换乘多编组模型相比, 贯通多编组模型在降低乘客与企业成本的同时, 可提升区间-全网综合负载均衡性; 与麻雀搜索算法和粒子群算法相比, 所提出算法在求解质量上分别提高3.37%和6.98%, 计算效率更优, 可为多制式轨道交通贯通运营的列车调度优化提供参考.

关键词: 贯通运营; 市域铁路; 城轨交通; 开行方案; 自适应变邻域麻雀搜索算法; 综合负载均衡

中图分类号: U292.4 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0646

引用格式: 杨雯雯, 孟学雷, 韩立刚, 等. 综合负载均衡下市域-城轨贯通运营开行方案优化 [J]. 控制与决策, 2026, 41(2): 351-361.

Optimization of train operation plans for suburban and urban rail integration based on comprehensive load balancing

YANG Wen-wen^{1,2}, MENG Xue-lei^{1†}, HAN Li-gang³, FANG Li-hai⁴, FU Yan-xin¹, KANG Qian¹, WANG Bao-ling¹

(1. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of International Business, Lanzhou Petrochemical University of Vocational Technology, Lanzhou 730060, China; 3. Dispatching Office, China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Lanzhou 730000, China; 4. Construction Management Office, China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: To address system load imbalance and insufficient coordination in the integrated operation of suburban railways and urban rail transit, a multi-type train formation operation plan based on two-dimensional “section-network” comprehensive load balancing is proposed, aiming to coordinate local section and overall network loads. A multi-objective optimization model is established to minimize passenger travel cost and enterprise operating cost while maximizing load balancing, subject to constraints such as through-train turnaround capacity and available vehicles. An adaptive variable neighborhood sparrow search algorithm, integrating variable neighborhood search and hierarchical disturbance strategies, is developed to solve the model. A case study shows that, compared with plans involving integrated operation with short formations, long formations, and transfer-based multi-type formations, the proposed plan significantly reduces passenger and enterprise costs and enhances section-network load balancing. Compared with the standard sparrow search algorithm and particle swarm optimization, the proposed algorithm improves solution quality by 3.37% and 6.98%, respectively, with higher computational efficiency. The results provide a methodological reference for optimizing train scheduling in multi-system integrated rail transit operations.

Keywords: integrated operation; train operation plan; suburban railway; urban rail transit; adaptive variable neighborhood sparrow search algorithm; comprehensive load balancing

收稿日期: 2025-06-18; 录用日期: 2025-10-31.

基金项目: 甘肃省科技计划项目 (24JRRA865); 中央引导地方科技发展资金项目 (25ZYJA015); 国家自然科学基金项目 (72361020).

责任编辑: 陈家伟.

†通信作者. E-mail: mxl@mail.lzjtu.cn.

0 引言

随着城市化进程的加速,城市群轨道交通网络正逐步向多制式协同的“四网融合”体系演进.作为其中的重要实现方式,市域铁路与城市轨道交通的贯通运营已成为缓解交通压力、提升出行效率的重要手段.然而,该模式在带来诸多优势的同时,面临着多制式协同不足、系统负载不均衡等挑战^[1-2].如何实现全网与局部区间的综合负载均衡,成为亟待解决的重要课题.针对列车开行方案的优化,文献[3]基于线路客流分布的不均衡性,构建了结合大小交路模式的城轨列车开行方案模型;文献[4]考虑企业、乘客、资源、环境四方效益,构建了大小交路多编组的列车开行方案;文献[5]提出了考虑快慢车模式的列车开行方案.针对贯通运营,文献[6]构建了最优化乘客出行费用、运输成本及运力运量匹配度的双层规划模型;文献[7]提出了最小化乘客换乘次数的列车开行模型;文献[8]基于城轨线路互联运营模式中满载率不均衡问题,构建了考虑多编组的列车开行方案模型;文献[9-10]综合考虑乘客和企业利益,构建了市域与城轨贯通运营的列车运行优化方案.针对列车负载均衡,文献[11]将列车满载率过高或过低的情况作为惩罚项纳入优化目标;文献[12]基于城轨直通运营模式,提出了考虑企业和乘客成本及满载均衡的列车开行方案.针对列车开行方案的求解,多数研究采用传统的启发式算法,如遗传算法^[7]等.

综上,现有文献主要集中于单一制式或单一线路的列车开行方案优化研究^[3-5],针对贯通运营的研究亦多限于单一制式情境^[6-8],对多制式贯通运营的探讨仍相对较少,且关注重点多集中在列车开行频率、折返站位置和客流分配等方面,对多编组列车开行关注较少.优化目标大多侧重于减少乘客出行时间^[13]和降低企业运营费用^[6].基于路网负载均衡的研究大多仅考虑单一制式^[11]且主要探讨全网层面的均衡^[12],而对于局部区间负载均衡的考虑较为缺乏.因此,现有关于多制式贯通运营模式、区间与全网综合负载均衡及多编组列车方面的系统性研究仍显不足.

基于此,本文在“四网融合”背景下,构建基于综合负载均衡的市域-城轨贯通运营列车开行方案优化模型,在兼顾企业与乘客利益的基础上,从区间和全网两个层面协调列车运力配置,既解决了局部区间负载失衡的问题,又能确保全网资源的高效配置.此外,针对模型特性,设计了一种自适应邻域麻雀搜索算法,以提高求解质量和效率.

1 问题描述

1.1 贯通线路概况

某城市群存在一条市域线和城市轨道交通双向贯通线路,空间上呈首末站“一字型”衔接,如图1所示.该线路共有 N 座车站,市域线路车站集合 $S_s = \{S_1, \dots, S_a, \dots, S_p\}$,城轨线路车站集合 $S_u = \{S_p, \dots, S_b, \dots, S_N\}$,车站 S_p 为市域和城轨线路的贯通衔接车站.该贯通线路共开行4种类型的列车:市域本线、城轨本线、市域贯通、城轨贯通列车,开行频率分别记作: f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 (对 $\cdot h^{-1}$),上行方向,市域本线列车从 S_1 站出发到 S_p 站折返,城轨本线列车从 S_p 站出发到 S_N 站折返,市域贯通列车从 S_1 站出发到 S_b 站折返,城轨贯通列车从 S_a 站出发到 S_N 站折返.列车均采用多编组的运营模式,编组集合为 $M' = \{m_1, m_2\}$, m_1 、 m_2 分别代表短编组列车和长编组列车的编组数(辆).根据列车运行分布,将贯通线路分为4个区段:I、II、III、IV,区段I开行市域本线和市域贯通列车;区段II开行市域本线、市域贯通和城轨贯通列车;区段III开行城轨本线、市域贯通和城轨贯通列车;区段IV开行城轨本线和城轨贯通列车.

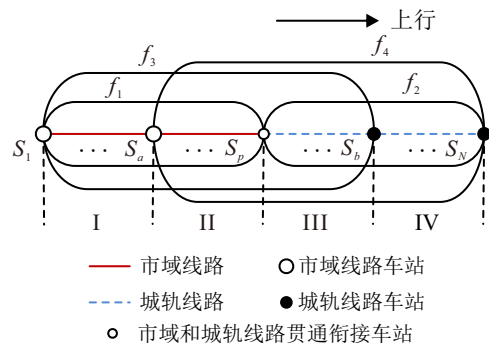


图1 市域和城轨贯通线路

1.2 客流分类

根据乘客出行起讫点位置不同,可将上行客流分为10类,下行客流分为10类,共计20类,如图2所示.除④、⑭两类客流以外,其余客流均可乘坐列车直达目的地,客流④可先乘坐市域本线或市域贯通列车,然后换乘城轨本线或城轨贯通列车到达目的地;客流⑭可先乘坐城轨本线或城轨贯通列车,然后换乘市域本线或市域贯通列车到达目的地.

2 贯通运营开行方案模型

2.1 模型假设

为简化模型复杂度、突出研究重点,本文作出以下理想化假设.

- 1) 市域和城轨线路均具备开行多编组贯通列车的行车条件和工程技术条件.
- 2) 乘客均匀到达车站,没有乘客滞留情况,且市

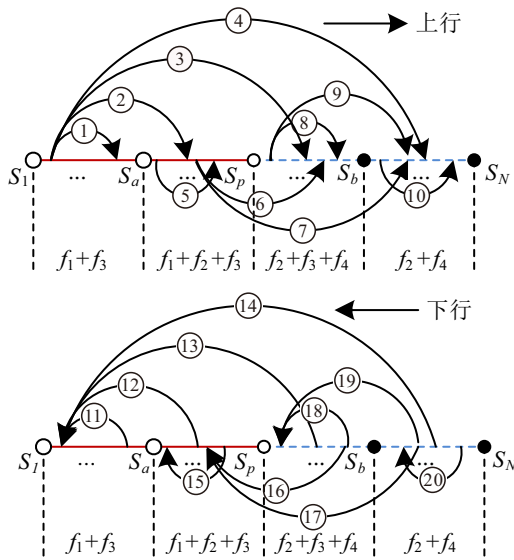


图2 客流分类图

域和城轨列车均采用站站停的停站模式。

3) 若起讫点间有直达列车, 则乘客选直达方式; 若只能换乘, 则最多换乘一次, 且换乘时间相同。

4) 各类列车的折返时间相同, 不考虑贯通列车折返对本线路列车开行的影响。

2.2 目标函数

2.2.1 目标 1: 乘客出行成本最低

乘客的出行成本包括票价成本、在车时间成本、候车时间成本和换乘时间成本, 乘客的出行起讫点固定, 且列车运行参数已确定, 单个乘客的票价成本和乘车时间成本保持不变, 因此, 本文只考虑乘客的候车时间成本和换乘时间成本。由于乘客均匀到达车站, 候车时间可近似为发车间隔的一半^[14-16]。此外, 除④、⑭两类客流外, 其余客流均选择直达列车到达目的地。据此, 可得直达客流的出行时间为

$$T_Z = \frac{T_y}{2(f_1+f_3)} \left(\sum_{i=1}^{a-1} \sum_{j=i+1}^p q_{ij} + \sum_{i=2}^a \sum_{j=1}^{i-1} q_{ij} + \sum_{i=a+1}^p \sum_{j=1}^{a-1} q_{ij} \right) + \frac{T_y}{2f_3} \left(\sum_{i=1}^{a-1} \sum_{j=p+1}^b q_{ij} + \sum_{i=p+1}^b \sum_{j=1}^{a-1} q_{ij} \right) + \frac{T_y}{2(f_1+f_3+f_4)} \left(\sum_{i=a}^{p-1} \sum_{j=i+1}^p q_{ij} + \sum_{i=a+1}^p \sum_{j=a}^{i-1} q_{ij} \right) + \frac{T_y}{2(f_3+f_4)} \left(\sum_{i=a}^{p-1} \sum_{j=p+1}^b q_{ij} + \sum_{i=p+1}^b \sum_{j=a}^{p-1} q_{ij} \right) + \frac{T_y}{2f_4} \left(\sum_{i=a}^{p-1} \sum_{j=b+1}^N q_{ij} + \sum_{i=b+1}^N \sum_{j=a}^{p-1} q_{ij} \right) + \frac{T_y}{2(f_2+f_3+f_4)} \left(\sum_{i=p}^{b-1} \sum_{j=i+1}^b q_{ij} + \sum_{i=p+1}^b \sum_{j=p}^{i-1} q_{ij} \right) +$$

$$\frac{T_y}{2(f_2+f_4)} \left(\sum_{i=p}^{b-1} \sum_{j=b+1}^N q_{ij} + \sum_{i=b}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N q_{ij} + \sum_{i=b+1}^N \sum_{j=p}^{i-1} q_{ij} \right). \quad (1)$$

其中: T_y 为研究时段 (h), q_{ij} 为从 S_i 站出发到达 S_j 站的客流量 (人)。

④、⑭两类客流必须通过换乘方式到达目的地, 因此换乘客流的出行时间为

$$T_H = \left[\frac{T_y}{2(f_1+f_3)} + t_h + \frac{T_y}{2(f_2+f_4)} \right] \cdot \left(\sum_{i=1}^{a-1} \sum_{j=b+1}^N q_{ij} + \sum_{i=b+1}^N \sum_{j=1}^{a-1} q_{ij} \right), \quad (2)$$

其中 t_h 为乘客换乘站的换乘走行时间 (min)。

开行频率满足如下关系式:

$$f_n = f_{n,m_1} + f_{n,m_2}, \quad n \in \{1, 2, 3, 4\}. \quad (3)$$

其中: f_{n,m_k} 为 n 类列车中编组数量为 m_k 的列车开行频率 (对 $\cdot h^{-1}$); f_{1,m_1} 、 f_{1,m_2} 、 f_{2,m_1} 、 f_{2,m_2} 、 f_{3,m_1} 、 f_{3,m_2} 、 f_{4,m_1} 、 f_{4,m_2} 分别为: 市域本线短编组、市域本线长编组、城轨本线短编组、城轨本线长编组、市域贯通短编组、市域贯通长编组、城轨贯通短编组、城轨贯通长编组列车的开行频率 (对 $\cdot h^{-1}$)。

综上, 最小化乘客出行成本可表示为

$$\min Z_1 = C_{\text{time}}(T_Z + T_H), \quad (4)$$

其中 C_{time} 为乘客时间价值折算系数 (元 $\cdot h^{-1}$)。

2.2.2 目标 2: 企业运营成本最少

企业运营成本包括固定成本和变动成本两部分。固定成本主要体现为车辆购置费用, 并需考虑备用车辆配置, 为保障列车运行的连续性与应急调度能力, 车辆购置总量通常按实际运用数量的 1.2 倍进行配置^[17]。因此, 固定成本 C_{fix} 可表示为

$$C_{\text{fix}} = 1.2T_y \left[C_{\text{sf}} \left(\sum_{k=1}^2 T_{Z1} f_{1,m_k} m_k + \sum_{k=1}^2 T_{Z3} f_{3,m_k} m_k \right) + C_{\text{cf}} \left(\sum_{k=1}^2 T_{Z2} f_{2,m_k} m_k + \sum_{k=1}^2 T_{Z4} f_{4,m_k} m_k \right) \right]. \quad (5)$$

其中: C_{sf} 、 C_{cf} 分别为市域和城轨列车车辆固定成本 (元 $\cdot \text{辆}^{-1} \cdot h^{-1}$), 此处是将车辆购置、折旧及相关固定支出折算为单位车辆、单位时间的等效成本; T_{Z1} 、 T_{Z2} 、 T_{Z3} 、 T_{Z4} 分别为市域本线、城轨本线、市域贯通、城轨贯通列车的运行周转时间 (h)。

$$T_{Z1} = 2 \left(\frac{\sum_{e=1}^{p-1} t_e}{3600} + \frac{\sum_{i=1}^p t_i}{3600} + \frac{t_Z}{60} \right), \quad (6)$$

$$T_{Z2} = 2 \left(\frac{\sum_{e=p}^{N-1} t_e}{3600} + \frac{\sum_{i=p}^N t_i}{3600} + \frac{t_z}{60} \right), \quad (7)$$

$$T_{Z3} = 2 \left(\frac{\sum_{e=1}^{b-1} t_e}{3600} + \frac{\sum_{i=1}^b t_i}{3600} + \frac{t_z}{60} \right), \quad (8)$$

$$T_{Z4} = 2 \left(\frac{\sum_{e=a}^{N-1} t_e}{3600} + \frac{\sum_{i=a}^N t_i}{3600} + \frac{t_z}{60} \right). \quad (9)$$

其中: e 为区间索引, t_e 为列车在第 e 个区间的运行时间(s), t_i 为列车在第 i 站的停车时长(s), t_z 为列车折返时间(min).

变动成本受列车运行里程和车辆数量的影响. 当市域贯通列车运行至城轨线路时, 其运营遵循城轨线路的运营标准; 同理, 城轨贯通列车在市域线路上遵循市域线路运营标准. 变动成本为

$$\begin{aligned} C_{\text{var}} = & 2T_y C_{\text{sy}} \left\{ \sum_{e=1}^{p-1} l_e \left[\sum_{k=1}^2 (f_{1,m_k} + f_{3,m_k}) m_k \right] + \right. \\ & \left. \sum_{e=a}^{p-1} l_e \sum_{k=1}^2 f_{4,m_k} m_k \right\} + \\ & 2T_y C_{\text{cy}} \left\{ \sum_{e=p}^{N-1} l_e \left[\sum_{k=1}^2 (f_{2,m_k} + f_{4,m_k}) m_k \right] + \right. \\ & \left. \sum_{e=p}^{b-1} l_e \sum_{k=1}^2 f_{3,m_k} m_k \right\}. \quad (10) \end{aligned}$$

其中: C_{sy} 、 C_{cy} 为市域和城轨线路的车辆公里运行成本(元·辆⁻¹·km⁻¹), l_e 为第 e 个区间里程(km).

综上, 最小化企业运营成本可表示为

$$\min Z_2 = C_{\text{fix}} + C_{\text{var}}. \quad (11)$$

2.2.3 目标3: 区间-全网综合列车负载均衡度最佳

区间负载均衡度可通过计算各区间内不同类型列车负载率的方差进行量化; 全网负载均衡度则通过全网列车负载率的方差进行衡量, 方差越小, 负载分布越均衡. 为此, 需首先确定各区间内不同类型列车所承担的断面客流量. 客流按照不同类型列车的开行比例进行分配, 并综合考虑编组方式对运能的影响. 本文以开行频率与编组数量的联合比例近似表征运能占比, 兼顾模型的合理性与简洁性. 此外, 为降低计算复杂度并提升模型求解效率, 假设换乘客流在首次乘车的终点站完成换乘. 限于篇幅, 考虑到贯通线路上下行方向的运行结构基本对称, 本文仅以上行方向为例展开建模分析, 下行方向可参照处理, 故不再赘述.

设上行方向第 e 个区间内, 分配至 n 类列车中、

编组类型为 m_k 的列车所承担的断面客流量为 $q_{e,n,k}^{\text{up}}$, 对应的负载率为 $\varphi_{e,n,k}^{\text{up}}$. 在区段I中, 仅开行市域本线和市域贯通列车, 故该区段第 e 个区间内的断面客流量将分别分配至市域本线短编组、市域本线长编组以及市域贯通短编组、市域贯通长编组列车, 相应的断面客流量分配结果如下:

$$\begin{aligned} q_{e,1,k}^{\text{up}} = & \frac{f_{1,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{1,3\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \left(\sum_{i=1}^e \sum_{j=e+1}^p q_{ij} + \sum_{i=1}^e \sum_{j=b+1}^N q_{ij} \right), \\ & e \in \text{I}, k \in \{1,2\}; \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{e,3,k}^{\text{up}} = & \frac{f_{3,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{1,3\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \left(\sum_{i=1}^e \sum_{j=e+1}^p q_{ij} + \sum_{i=1}^e \sum_{j=b+1}^N q_{ij} \right) + \\ & \frac{f_{3,m_k} m_k}{\sum_{k \in \{1,2\}} f_{3,m_k} m_k} \sum_{i=1}^e \sum_{j=p+1}^b q_{ij}, \quad e \in \text{I}, k \in \{1,2\}. \quad (13) \end{aligned}$$

同理, 在区段II、III和IV的第 e 个区间内, 断面客流量将按照各类列车的开行比例及编组特征进行分配, 具体分摊至各类列车的客流量为

$$\begin{aligned} q_{e,1,k}^{\text{up}} = & \frac{f_{1,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{1,3\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \left(\sum_{i=1}^{a-1} \sum_{j=e+1}^p q_{ij} + \sum_{i=1}^{a-1} \sum_{j=b+1}^N q_{ij} \right) + \\ & \frac{f_{1,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{1,3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \sum_{i=a}^e \sum_{j=e+1}^p q_{ij}, \\ & e \in \text{II}, k \in \{1,2\}; \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{e,3,k}^{\text{up}} = & \frac{f_{3,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{1,3\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \left(\sum_{i=1}^{a-1} \sum_{j=e+1}^p q_{ij} + \sum_{i=1}^{a-1} \sum_{j=b+1}^N q_{ij} \right) + \\ & \frac{f_{3,m_k} m_k}{\sum_{k \in \{1,2\}} f_{3,m_k} m_k} \sum_{i=1}^{a-1} \sum_{j=p+1}^b q_{ij} + \\ & \frac{f_{3,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{1,3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \sum_{i=a}^e \sum_{j=e+1}^p q_{ij} + \\ & \frac{f_{3,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \sum_{i=a}^e \sum_{j=p+1}^b q_{ij}, \\ & e \in \text{II}, k \in \{1,2\}; \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_{e,4,k}^{\text{up}} = & \frac{f_{4,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \sum_{i=a}^e \sum_{j=p+1}^b q_{ij} + \\
 & \sum_{i=a}^e \sum_{j=e+1}^p q_{ij} \frac{f_{4,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{1,3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} + \\
 & \frac{f_{4,m_k} m_k}{\sum_{k \in \{1,2\}} f_{4,m_k} m_k} \sum_{i=a}^e \sum_{j=b+1}^N q_{ij}, \quad e \in \text{II}, k \in \{1, 2\};
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 q_{e,2,k}^{\text{up}} = & \frac{f_{2,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{2,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \sum_{i=p}^e \sum_{j=b+1}^N q_{ij} + \\
 & \frac{f_{2,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{2,3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \sum_{i=p}^e \sum_{j=e+1}^b q_{ij} + \\
 & \frac{\sum_{k \in \{1,2\}} f_{1,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{1,3\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \frac{f_{2,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{2,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \cdot \\
 & \sum_{i=1}^{a-1} \sum_{j=b+1}^N q_{ij}, \quad e \in \text{III}, k \in \{1, 2\};
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 q_{e,3,k}^{\text{up}} = & \frac{f_{3,m_k} m_k}{\sum_{k \in \{1,2\}} f_{3,m_k} m_k} \sum_{i=1}^{a-1} \sum_{j=e+1}^b q_{ij} + \\
 & \frac{f_{3,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{1,3\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \sum_{i=1}^{a-1} \sum_{j=b+1}^N q_{ij} + \\
 & \frac{f_{3,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \sum_{i=a}^{p-1} \sum_{j=e+1}^b q_{ij} + \\
 & \frac{f_{3,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{2,3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \sum_{i=p}^e \sum_{j=e+1}^b q_{ij}, \\
 & e \in \text{III}, k \in \{1, 2\};
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
 q_{e,4,k}^{\text{up}} = & \frac{f_{4,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \sum_{i=a}^{p-1} \sum_{j=e+1}^b q_{ij} + \\
 & \frac{f_{4,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{2,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \sum_{i=p}^e \sum_{j=b+1}^N q_{ij} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{f_{4,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{2,3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \sum_{i=p}^e \sum_{j=e+1}^b q_{ij} + \\
 & \frac{\sum_{k \in \{1,2\}} f_{1,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{1,3\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \frac{f_{4,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{2,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \cdot \\
 & \sum_{i=1}^{a-1} \sum_{j=b+1}^N q_{ij} + \frac{f_{4,m_k} m_k}{\sum_{k \in \{1,2\}} f_{4,m_k} m_k} \sum_{i=a}^{p-1} \sum_{j=b+1}^N q_{ij}, \\
 & e \in \text{III}, k \in \{1, 2\};
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
 q_{e,2,k}^{\text{up}} = & \frac{f_{2,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{2,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \left(\sum_{i=1}^{a-1} \sum_{j=e+1}^N q_{ij} + \sum_{i=p}^e \sum_{j=e+1}^N q_{ij} \right), \\
 & e \in \text{IV}, k \in \{1, 2\};
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
 q_{e,4,k}^{\text{up}} = & \frac{f_{4,m_k} m_k}{\sum_{n \in \{2,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} m_k} \left(\sum_{i=1}^{a-1} \sum_{j=e+1}^N q_{ij} + \sum_{i=p}^e \sum_{j=e+1}^N q_{ij} \right) + \\
 & \frac{f_{4,m_k} m_k}{\sum_{k \in \{1,2\}} f_{4,m_k} m_k} \sum_{i=a}^{p-1} \sum_{j=e+1}^N q_{ij}, \quad e \in \text{IV}, k \in \{1, 2\}.
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

进一步计算上行方向第 e 个区间内,第 n 类列车中编组类型为 m_k 的负载率,有

$$\varphi_{e,n,k}^{\text{up}} = \frac{q_{e,n,k}^{\text{up}}}{f_{n,m_k} C_{n,m_k}}, \tag{22}$$

其中 C_{n,m_k} 为第 n 类列车中编组类型 m_k 的列车定员(人·列⁻¹).

基于上述数据,可分别评估区间层级与全网层级的负载均衡度.

1) 区间层级负载均衡度.

在综合衡量列车负载均衡时,应关注各运行区间内不同类型列车负载率的均衡性,以避免因局部运力配置失衡造成的资源浪费或乘客拥挤等问题.为此,需首先计算上行方向第 e 个区间内各类列车的负载率平均值 $\varphi_{e,\text{avg}}^{\text{up}}$,即

$$\varphi_{e,\text{avg}}^{\text{up}} = \frac{\sum_{n \in \{1,3\}} \sum_{k \in \{1,2\}} \phi_{e,n,k}^{\text{up}}}{\sum_{n \in \{1,3\}} \sum_{k \in \{1,2\}} Y_{e,n,k}}, \quad e \in \text{I}; \tag{23}$$

$$\varphi_{e,\text{avg}}^{\text{up}} = \frac{\sum_{n \in \{1,3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} \phi_{e,n,k}^{\text{up}}}{\sum_{n \in \{1,3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} Y_{e,n,k}}, \quad e \in \text{II}; \tag{24}$$

$$\phi_{e,avg}^{up} = \frac{\sum_{n \in \{2,3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} \phi_{e,n,k}^{up}}{\sum_{n \in \{2,3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} Y_{e,n,k}}, e \in III; \quad (25)$$

$$\phi_{e,avg}^{up} = \frac{\sum_{n \in \{2,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} \phi_{e,n,k}^{up}}{\sum_{n \in \{2,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} Y_{e,n,k}}, e \in IV. \quad (26)$$

其中: $Y_{e,n,k}$ 为 0-1 变量, 若在区间 e 内, 第 n 类编组类型为 m_k 的列车实际开行, 则取值为 1, 否则为 0.

计算上行方向各区间中第 e 个区间内负载率的方差 σ_e^{up} , 即

$$\sigma_e^{up} = \frac{\sum_{n \in \{1,3\}} \sum_{k \in \{1,2\}} (\phi_{e,n,k}^{up} - \phi_{e,avg}^{up})^2}{\sum_{n \in \{1,3\}} \sum_{k \in \{1,2\}} Y_{e,n,k}}, e \in I; \quad (27)$$

$$\sigma_e^{up} = \frac{\sum_{n \in \{1,3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} (\phi_{e,n,k}^{up} - \phi_{e,avg}^{up})^2}{\sum_{n \in \{1,3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} Y_{e,n,k}}, e \in II; \quad (28)$$

$$\sigma_e^{up} = \frac{\sum_{n \in \{2,3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} (\phi_{e,n,k}^{up} - \phi_{e,avg}^{up})^2}{\sum_{n \in \{2,3,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} Y_{e,n,k}}, e \in III; \quad (29)$$

$$\sigma_e^{up} = \frac{\sum_{n \in \{2,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} (\phi_{e,n,k}^{up} - \phi_{e,avg}^{up})^2}{\sum_{n \in \{2,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} Y_{e,n,k}}, e \in IV. \quad (30)$$

以最小化线路上下行各区间负载率方差之和作为优化目标, 衡量列车在区间层面的负载均衡程度. 考虑不同区间方差存在数量级差异, 采用最大值归一化方法, 以该方向上所有区间方差中的最大值为基准, 对各区间方差进行归一化处理, 相应的目标为

$$\min Z_3 = \sum_{e=1}^{N-1} \frac{\sigma_e^{up}}{\sigma_{e,max}^{up}} + \sum_{e=1}^{N-1} \frac{\sigma_e^{down}}{\sigma_{e,max}^{down}}. \quad (31)$$

其中: σ_e^{down} 为下行方向上第 e 个区间内的负载率方差, $\sigma_{e,max}^{up}$ 、 $\sigma_{e,max}^{down}$ 分别为上下行方向各区间负载率方差的最大值.

2) 全网层级负载均衡度.

在综合衡量列车负载均衡时, 应进一步关注全网层面运力资源的利用均衡性, 以增强列车运力配置的整体协调性, 避免因资源配置不合理造成的过载或闲置现象. 鉴于上下行方向客流强度存在差异, 为了更准确地评估运力利用的均衡性, 需分别计算上下行方向的平均列车负载率. 首先, 计算上行方向所有列车负载率的平均值 φ_{avg}^{up} , 即

$$\varphi_{avg}^{up} = \frac{\sum_{e=1}^{p-1} \sum_{k=1}^2 \varphi_{e,1,k}^{up} + \sum_{e=p}^{N-1} \sum_{k=1}^2 \varphi_{e,2,k}^{up} + \sum_{e=1}^{b-1} \sum_{k=1}^2 \varphi_{e,3,k}^{up} + \sum_{e=a}^{N-1} \sum_{k=1}^2 \varphi_{e,4,k}^{up}}{\sum_{e=1}^{p-1} \sum_{k=1}^2 Y_{e,1,k} + \sum_{e=p}^{N-1} \sum_{k=1}^2 Y_{e,2,k} + \sum_{e=1}^{b-1} \sum_{k=1}^2 Y_{e,3,k} + \sum_{e=a}^{N-1} \sum_{k=1}^2 Y_{e,4,k}}. \quad (32)$$

将最小化全网各类型列车负载率的方差设为优化目标, 以量化全网层级的运力利用均衡水平. 对应目标函数 Z_4 表达如下:

$$\begin{aligned} \min Z_4 = & \left\{ \sum_{e=1}^{p-1} \sum_{k=1}^2 [(\varphi_{e,1,k}^{up} - \varphi_{avg}^{up})^2 + (\varphi_{e,1,k}^{down} - \varphi_{avg}^{down})^2] + \right. \\ & \sum_{e=p}^{N-1} \sum_{k=1}^2 [(\varphi_{e,2,k}^{up} - \varphi_{avg}^{up})^2 + (\varphi_{e,2,k}^{down} - \varphi_{avg}^{down})^2] + \\ & \sum_{e=1}^{b-1} \sum_{k=1}^2 [(\varphi_{e,3,k}^{up} - \varphi_{avg}^{up})^2 + (\varphi_{e,3,k}^{down} - \varphi_{avg}^{down})^2] + \\ & \left. \sum_{e=a}^{N-1} \sum_{k=1}^2 [(\varphi_{e,4,k}^{up} - \varphi_{avg}^{up})^2 + (\varphi_{e,4,k}^{down} - \varphi_{avg}^{down})^2] \right\} / \\ & \left(\sum_{e=1}^{p-1} \sum_{k=1}^2 Y_{e,1,k} + \sum_{e=p}^{N-1} \sum_{k=1}^2 Y_{e,2,k} + \sum_{e=1}^{b-1} \sum_{k=1}^2 Y_{e,3,k} + \right. \\ & \left. \sum_{e=a}^{N-1} \sum_{k=1}^2 Y_{e,4,k} \right). \quad (33) \end{aligned}$$

其中: $\varphi_{e,n,k}^{down}$ 为下行方向区间 e 内第 n 类编组为 m_k 的列车负载率, φ_{avg}^{down} 为下行方向所有负载率的平均值.

2.3 约束条件

$$\begin{aligned} \max_{1 \leq e \leq a-1} \left\{ \sum_{i=1}^e \sum_{j=e+1}^N q_{ij}, \sum_{i=e+1}^N \sum_{j=1}^e q_{ij} \right\} \leq \\ \sum_{n \in \{1,3\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} C_{n,m_k} \theta_{max}^s, \quad (34) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \max_{a \leq e \leq p-1} \left\{ \sum_{i=1}^e \sum_{j=e+1}^N q_{ij}, \sum_{i=e+1}^N \sum_{j=1}^e q_{ij} \right\} \leq \\ \sum_{n \in \{1,3\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} C_{n,m_k} \theta_{max}^s + \\ \sum_{k \in \{1,2\}} f_{4,m_k} C_{4,m_k} \theta_{max}^s, \quad (35) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \max_{p \leq e \leq b-1} \left\{ \sum_{i=1}^e \sum_{j=e+1}^N q_{ij}, \sum_{i=e+1}^N \sum_{j=1}^e q_{ij} \right\} \leq \\ \sum_{n \in \{2,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} C_{n,m_k} \theta_{max}^s + \\ \sum_{k \in \{1,2\}} f_{3,m_k} C_{3,m_k} \theta_{max}^s, \quad (36) \end{aligned}$$

$$\max_{b \leq e \leq N-1} \left\{ \sum_{i=1}^e \sum_{j=e+1}^N q_{ij}, \sum_{i=e+1}^N \sum_{j=1}^e q_{ij} \right\} \leq$$

$$\sum_{n \in \{2,4\}} \sum_{k \in \{1,2\}} f_{n,m_k} C_{n,m_k} \theta_{\max}^c, \quad (37)$$

$$f_1 + f_3 + f_4 \leq N_s^{\max}, \quad (38)$$

$$f_2 + f_3 + f_4 \leq N_c^{\max}, \quad (39)$$

$$f_1 + f_3 \geq N_s^{\min}, \quad (40)$$

$$f_2 + f_4 \geq N_c^{\min}, \quad (41)$$

$$\sum_{k=1}^2 (f_{1,m_k} m_k + f_{3,m_k} m_k) \leq O_s, \quad (42)$$

$$\sum_{k=1}^2 (f_{2,m_k} m_k + f_{4,m_k} m_k) \leq O_c, \quad (43)$$

$$f_3 \leq \frac{60}{t_s^{\min}}, \quad (44)$$

$$f_4 \leq \frac{60}{t_c^{\min}}, \quad (45)$$

$$1 < a < p < b < N, \quad (46)$$

$$a \in A, \quad (47)$$

$$b \in B, \quad (48)$$

$$0 \leq f_{n,m_k} \leq Y_{e,n,k} M, \quad (49)$$

$$f_{1,m_k}, f_{2,m_k}, f_{3,m_k}, f_{4,m_k}, a, b \in N, \forall k \in \{1, 2\}. \quad (50)$$

其中: 式 (34) ~ (37) 为客流需求满足约束; 式 (38) 和 (39) 为线路通过能力约束; 式 (40) 和 (41) 为最小发车频率约束; 式 (42) 和 (43) 为可用车辆数约束; 式 (44) 和 (45) 为贯通列车折返能力约束; 式 (46) ~ (48) 为贯通列车折返站位置约束; 式 (49) 为决策变量有效性约束; 式 (50) 为决策变量的自然数约束。 θ_{\max}^s 、 θ_{\max}^c 分别为市域和城轨列车的最大满载率; N_s^{\max} 、 N_c^{\max} 分别为市域和城轨线路的线路最大通过能力 (对 $\cdot h^{-1}$); N_s^{\min} 、 N_c^{\min} 分别为市域和城轨线路的最小发车频率 (对 $\cdot h^{-1}$); O_s 、 O_c 分别为市域和城轨列车的可用车辆数 (辆); t_s^{\min} 、 t_c^{\min} 分别为市域和城轨贯通列车在折返站的最小折返时间间隔 (min); A 、 B 分别为市域和城轨线路上具备折返条件的站点集合; M 代表无穷大的数。

2.4 多目标模型的单目标转化

鉴于本模型 4 个目标函数存在数量级与单位差异, 本文采用 min-max 归一化法结合加权求和法, 将多目标模型转化为单目标模型。具体包括: 首先确定各目标函数最大值 Z_x^{\max} 与最小值 Z_x^{\min} , 然后进行归一化处理, 最后按设定权重进行加权求和, 即

$$\min Z = \sum_{x=1}^4 \alpha_x \frac{Z_x - Z_x^{\min}}{Z_x^{\max} - Z_x^{\min}}. \quad (51)$$

其中: α_x 为第 x 个目标的权重值, 满足 $\sum_{x=1}^4 \alpha_x = 1$, 为在各目标均衡的基础上适当突出区间-全网综合列车负载均衡目标的重要性, 本文采用专家评分法确定权重值为 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.2$, $\alpha_3 = \alpha_4 = 0.3$ 。

3 算法设计

鉴于模型复杂性较高、求解难度较大, 本文采用启发式算法进行模型求解。

3.1 传统的麻雀搜索算法

麻雀搜索算法 (SSA) 是一种模拟麻雀觅食与警戒行为的群智能优化算法^[18]。具有参数少、结构简单、收敛速度快和稳定性强等优点, 已广泛应用于多个领域^[19-20]。该算法根据适应度值将麻雀种群中表现较优的个体设定为发现者, 引导种群探索潜在的优质觅食区域; 然后, 将其余麻雀个体设定为加入者, 协同完成最优觅食位置的搜索; 最后, 从种群中随机选取部分个体作为侦察者, 监测外部环境变化。算法迭代过程中不断更新麻雀个体位置与适应度并动态调整角色分配, 直至满足终止条件, 最终得出全局最优解。

3.2 SSA 算法改进策略

虽然 SSA 具有诸多优势, 但在求解大规模复杂问题时, 易因早熟收敛陷入局部最优, 影响优化效果。因此, 针对模型特征, 本文结合高斯变异与柯西变异, 引入变邻域搜索 (VNS) 机制, 设计分层扰动策略, 同时动态调节参数 ST, 提出一种自适应变邻域麻雀搜索算法 (AVN-SSA), 以增强算法跳出局部最优的能力, 提升全局搜索与局部开发性能。

3.2.1 变邻域搜索机制和分层扰动策略

为提升算法在复杂问题中的搜索性能, 本文将 VNS 与分层扰动策略嵌入 SSA 主循环, 构建多层次扰动机制。算法通过周期性轻扰动增强局部搜索能力, 并在解陷入停滞时引入强扰动, 以拓展全局搜索范围, 从而提高求解效率和质量。

每隔固定迭代次数 t_0 , 对当前全局最优解执行局部搜索, 依次调用 3 个轻扰动结构: 1) 列车开行数量微调邻域 (N_1), 随机调整一类列车开行频率, 增加或减少 1 列; 2) 贯通折返站位置微调邻域 (N_2), 随机移动贯通折返站至相邻候选站点; 3) 高斯变异邻域 (N_3), 为依据下式对当前解施加高斯扰动:

$$x_{\text{Gauss}}^t = x_{\text{best}}^t [\text{Gauss}(0, 1)]. \quad (52)$$

其中: x_{Gauss}^t 为第 t 次迭代中经高斯变异后的麻雀位

置; x_{best}^t 为第 t 次迭代时的全局最优位置; Gauss(0, 1) 为符合标准高斯分布的随机变量. 当任一邻域获得更优解时, 更新全局最优解并终止本轮轻扰动, 若未产生更优解, 则继续执行 SSA 主循环.

当全局最优解在连续 t_s 轮迭代中未获得改进时, 激活强扰动机制. 依次调用以下 3 类扰动邻域结构: 1) 多变量联合扰动邻域 (N_4), 随机调整 3 类列车的开行频率, 增加或减少 2 列; 2) 贯通折返站大幅调整邻域 (N_5), 同步调整市域和城轨贯通列车的贯通返站点位置, 跳跃至相邻候选站点; 3) 柯西变异邻域 (N_6), 依据下式利用柯西变异对解进行强幅扰动, 若扰动获得更优解, 则更新全局最优解, 否则继续执行 SSA 主循环:

$$x_{Cautly}^t = x_{best}^t [Cautly(0, 1)]. \quad (53)$$

其中: x_{Cautly}^t 为第 t 次迭代中柯西变异后的麻雀位置; Cautly(0, 1) 为符合标准柯西分布的随机变量.

3.2.2 参数动态调整

安全阈值参数 ST 用于判定发现者是否迁移, 影响探索与开发的平衡. 为增强搜索效果, 算法初期设置较低 ST 值以促进广泛探索, 迭代后期逐步提高 ST 值以强化局部开发. 因此, 参数 ST 设计为随迭代次数递增的动态参数, 有

$$ST(t) = ST_{min} + \frac{(ST_{max} - ST_{min})t}{iter_{max}}. \quad (54)$$

其中: ST_{min} 、 ST_{max} 为安全阈值的最小和最大值, 取值分别为 0.5、1.

3.3 自适应变邻域麻雀搜索算法步骤

AVN-SSA 流程如图 3 所示.

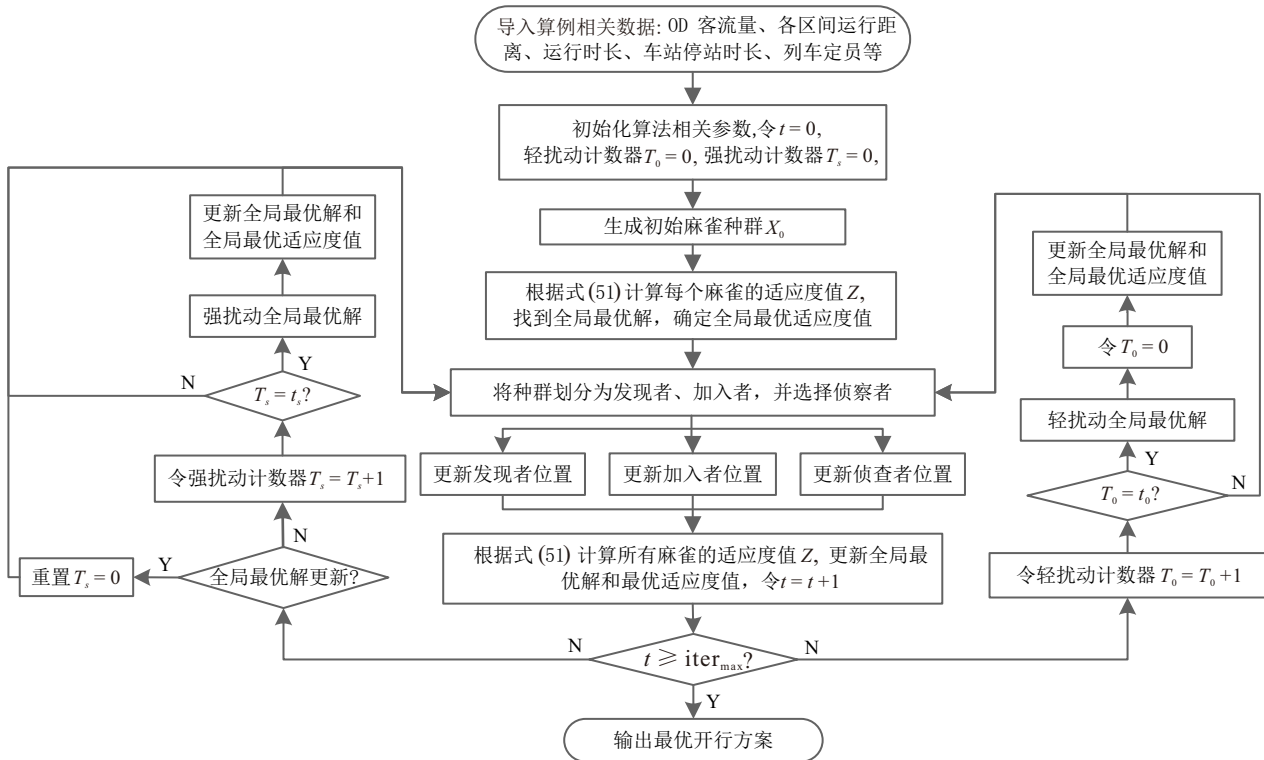


图3 AVN-SSA 流程

4 算例分析

4.1 算例背景

在 C 市现有轨道交通网络中, 存在一条市域铁路与城市轨道交通双向贯通运营的线路^[17], 市域铁路全长 41.7 km, 设站 11 座, 车站集合为 $S_s = \{S_1, S_2, \dots, S_{11}\}$, 其中具备折返条件的站点集合 $A = \{S_1, S_3, S_5, S_9, S_{11}\}$; 城市轨道交通线路全长 39.76 km, 设站 24 座, 车站集合为 $S_u = \{S_{11}, S_{12}, \dots, S_{34}\}$, 其中具备折返条件的站点集合 $B = \{S_{11}, S_{22}, S_{26}, S_{31}, S_{34}\}$, 两线路于各自首末站 S_{11} 站实现贯通衔接. 该线路各区间运行距离、运行时长、车站停站时长参照文献 [17].

本文基于该线路早高峰时段 (08:00 ~ 09:00) 的客流 OD 数据^[17] 展开研究, 参照运营实际和既有文献, 模型参数取值见表 1.

经过大量实验并参考相关文献 [4, 17, 21], 将算法参数设置为: $Pop = 50$ 、 $iter_{max} = 1000$ 、 $t_0 = 50$ 、 $t_s = 80$ 、 $ST_{min} = 0.5$ 、 $ST_{max} = 1$.

4.2 结果分析

本文所有计算均在同一台计算机上使用 Python 编程完成. 采用 AVN-SSA 对所建模型进行求解, 得出结果: 迭代至第 596 代时, 适应度值趋于稳定并收敛至最小值 $Z = 0.373$, 各决策变量的取值分别为

表1 模型参数取值

参数	取值	参数	取值
t_h/min	0.5	$C_{n,m_1}/(\text{人}\cdot\text{列}^{-1})$	1210
$C_{st}/(\text{元}\cdot\text{辆}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	45	$C_{n,m_2}/(\text{人}\cdot\text{列}^{-1})$	1860
$C_{ct}/(\text{元}\cdot\text{辆}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	40	$\theta_{\max}^s, \theta_{\max}^e$	1.2
t_2/min	4	$N_s^{\max}, N_c^{\max}/(\text{对}\cdot\text{h}^{-1})$	30
$m_1/\text{辆}$	4	$N_s^{\min}, N_c^{\min}/(\text{对}\cdot\text{h}^{-1})$	5
$m_2/\text{辆}$	6	$O_s/\text{辆}$	160
$C_{sy}/(\text{元}\cdot\text{辆}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$	12	$O_c/\text{辆}$	180
$C_{cy}/(\text{元}\cdot\text{辆}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$	10	$t_s^{\min}, t_c^{\min}/\text{min}$	2
$C_{\text{time}}/(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$	25		

$$f_{1,m_1} = 3, f_{1,m_2} = 3, f_{2,m_1} = 4, f_{2,m_2} = 2, f_{3,m_1} = 8, f_{3,m_2} = 2, f_{4,m_1} = 10, f_{4,m_2} = 1, a = 5, b = 26.$$

4.2.1 模型对比分析

采用 AVN-SSA 分别求解贯通短编组、贯通长编组及换乘多编组模型,并将求解结果与本文所建模型结果进行对比,具体结果见表2;同时,上下行方向各区间列车负载率方差分布情况见图4.

本文模型在4个性能指标上均展现出显著优势.相较于上述3种对比模型,本文模型的乘客出行成本分别降低了4.17%、6.05%和10.88%;企业运营成

本分别降低了2.83%、15.58%和19.48%;在区间-全网综合列车负载均衡度方面,区间列车负载均衡度分别优化了2.73、2.8和6.71,全网列车负载均衡度分别优化了0.017、0.015和0.051;同时,与对比模型相比,上下行各区间列车负载率的方差均较低.上述结果验证了所提出模型在提升乘客出行经济性、优化运营主体成本控制以及实现系统资源均衡配置方面的协同优化能力,为轨道交通网络化运营的优化提供了重要参考.

通过对贯通单一编组模型中短编组与长编组模型的对比分析,得出以下结论:与贯通长编组模型相比,贯通短编组模型在乘客出行成本、企业运营成本和区间列车负载均衡度方面分别优化了1.96%、13.12%和0.55%,且上下行各区间列车负载率的方差较小;全网列车负载均衡度仅轻微下降了0.002.此外,贯通短编组模型的适应度值较贯通长编组模型优化了2.8%.上述结果验证了在市域-城轨贯通运营中,短编组模式在经济性和资源利用均衡方面的协同优势.

在不同衔接方式的对比中,换乘模型在各项指标上均不如贯通模型,且上下行各区间列车负载率

表2 模型结果对比分析

模型	f_{1,m_1}	f_{1,m_2}	f_{2,m_1}	f_{2,m_2}	f_{3,m_1}	f_{3,m_2}	f_{4,m_1}	f_{4,m_2}	a	b	Z	$Z_1/\text{元}$	$Z_2/\text{元}$	Z_3	Z_4
本文模型	3	3	4	2	8	2	10	1	5	26	0.373	169132.45	198477.84	9.95	0.061
贯通短编组	8	—	9	—	8	—	13	—	5	31	0.452	176491.57	204254.75	12.68	0.078
贯通长编组	—	6	—	5	—	8	—	9	5	31	0.465	180027.81	235104.28	12.75	0.076
换乘多编组	8	14	15	13	—	—	—	—	—	—	0.671	189782.13	246504.61	16.66	0.112

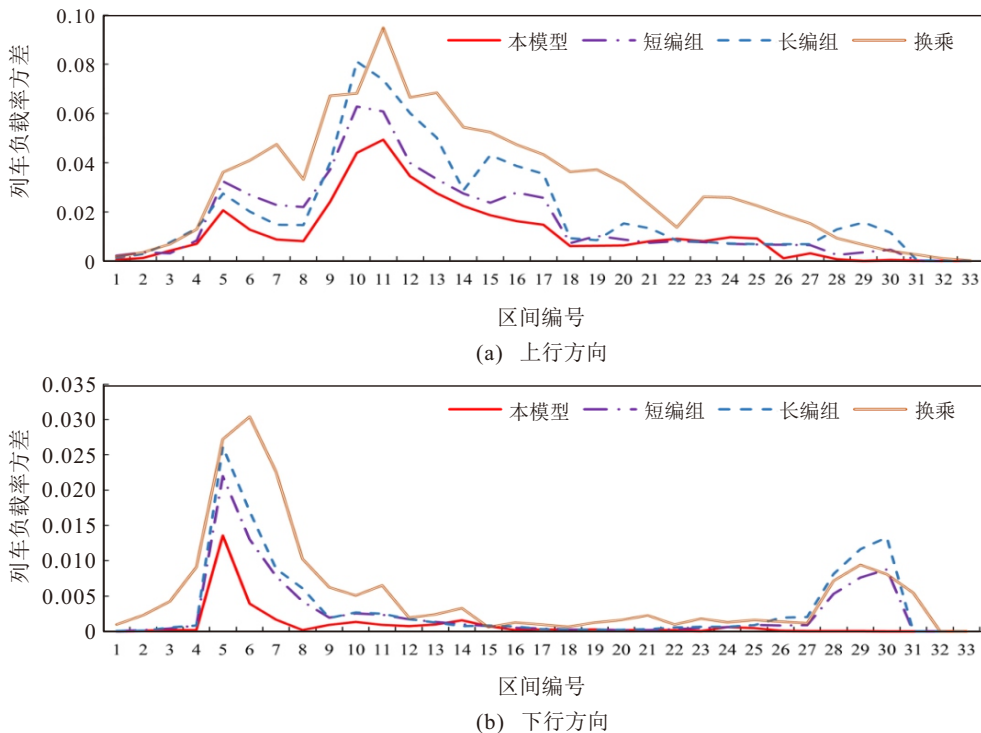


图4 区间列车负载率方差

的方差较大,表明贯通运营模式在整体交通系统的成本降低和负载均衡提升方面更具优势。

4.2.2 算法对比分析

采用 SSA 和经典的群智能优化算法——粒子

群算法 (PSO) 对本文模型进行求解,实验数据显示,SSA 在迭代至 637 代时收敛至最优适应度值 $Z = 0.386$, PSO 在迭代至 685 代时收敛至最优适应度值 $Z = 0.401$ 。3 种算法的求解结果对比见表 3。

表3 算法结果对比分析

算法	f_{1,m_1}	f_{1,m_2}	f_{2,m_1}	f_{2,m_2}	f_{3,m_1}	f_{3,m_2}	f_{4,m_1}	f_{4,m_2}	a	b	$Z_1/\text{元}$	$Z_2/\text{元}$	Z_3	Z_4
AVN-SSA	3	3	4	2	8	2	10	1	5	26	169132.45	198477.84	9.95	0.061
SSA	4	1	3	2	8	3	9	2	5	26	172645.37	199016.00	10.37	0.066
PSO	3	3	5	2	7	3	8	2	5	26	174163.94	202095.92	9.83	0.069

通过算法对比实验得出: AVN-SSA 相比于 SSA 和 PSO, 在乘客出行成本上分别优化了 2.03% 和 2.89%; 在企业运营成本上分别优化了 0.27% 和 1.79%; 全网列车负载均衡度分别优化了 7.58% 和 11.59%。然而, 在区间列车负载均衡度方面, AVN-SSA 虽然相较于 SSA 优化了 4.05%, 但与 PSO 相比, 仍存在 1.21% 的差距。关于求解质量, AVN-SSA 的适应度值较 SSA 和 PSO 分别优化了 3.37% 和 6.98%; 在求解速率方面, AVN-SSA 的迭代次数分别减少了 41 次和 89 次。

上述结果表明, AVN-SSA 在优化效果和计算效率方面具有显著优势, 与本文模型中的适配度高。

5 结论

1) 本文以市域-城轨贯通运营线路为研究背景, 针对路网系统中“区间-全网”两个维度的负载均衡需求, 提出了一种多编组列车开行方案优化模型。目标是在局部区间和全网层面同步优化资源配置, 有效缩小负载差异, 提升整体系统运行效率。同时, 针对模型特征设计了自适应邻域麻雀搜索算法, 并结合算例验证了模型与算法的可行性与优越性。本研究为多制式轨道交通系统下贯通运营模式中的负载均衡优化问题提供了新的思路。

2) 本文设计的自适应邻域麻雀搜索算法, 通过引入变邻域搜索机制和分层扰动策略, 结合高斯变异、柯西变异与参数的动态调节优化了算法的搜索性能, 显著提升了本文模型的求解效率和精度, 与本文模型适配度高。

3) 在市域与城轨贯通运营模式下引入多编组策略, 能够在有效降低企业运营成本与乘客出行成本的同时, 提升区间与全网层面的负载均衡效果。与传统换乘衔接模式相比, 贯通运营模式在整体成本控制、资源配置均衡性及服务质量等方面均表现出明显优势; 此外, 相比单一编组模式, 多编组运营策略进一步增强了系统运力资源的分布均衡性。

4) 本研究为多制式轨道交通系统的贯通运营模

式构建了新的理论框架, 通过优化负载均衡与资源配置, 不仅提升了系统整体运行效率, 也促进了城市轨道交通系统的公平性与协调性。

5) 本研究聚焦于静态客流场景下的负载均衡优化, 未来可结合实时客流数据, 构建动态负载均衡模型, 以便更好地应对客流潮汐出行的变化特征。

参考文献 (References)

- [1] Ju Y N, Yuan H H, Li Z P, et al. Multilayer structures and resilience evaluation for multimode regional rail transit system[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2022, 16(7): 843-859.
- [2] Mo P L, D'Ariano A, Yang L X, et al. An exact method for the integrated optimization of subway lines operation strategies with asymmetric passenger demand and operating costs[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 149: 283-321.
- [3] 许得杰, 毛保华, 雷莲桂. 城市轨道交通大小交路列车开行方案优化研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17(1): 120-126.
(Xu D J, Mao B H, Lei L G, et al. Optimization for train plan of full-length and short-turn routing in urban rail transit[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2017, 17(1): 120-126.)
- [4] 杨雯雯, 孟学雷, 高如虎, 等. 考虑运能利用和碳排放的绿色城轨开行方案研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2025, 25(1): 122-132.
(Yang W W, Meng X L, Gao R H, et al. Train operation plan of green urban rail transit considering transportation capacity utilization and carbon emissions[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2025, 25(1): 122-132.)
- [5] Feng T, Lusby R M, Zhang Y X, et al. Integrating train service route design with passenger flow allocation for an urban rail transit line[J]. *European Journal of Operational Research*, 2024, 313(1): 146-170.
- [6] 闫菲, 姚向明, 赵鹏, 等. 互通运营模式下轨道交通开行方案编制模型[J]. *铁道学报*, 2023, 45(2): 13-21.
(Yan F, Yao X M, Zhao P, et al. Modelling train operation plan for urban rail transit under interconnection operational mode[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2023, 45(2): 13-21.)
- [7] 董敏, 陈绍宽, 王卓, 等. 城市轨道交通网络跨线列车

- 开行方案优化模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(5): 116-127.
- (Jian M, Chen S K, Wang Z, et al. Cross-line train service plan optimization in urban rail transit network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(5): 116-127.)
- [8] 曾庆文, 彭其渊. 考虑多编组的城轨列车跨线运营开行方案研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(3): 878-889.
- (Zeng Q W, Peng Q Y. Cross-line train plan in urban rail transit considering the multi-group train[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(3): 878-889.)
- [9] 彭其渊, 刘思源, 江山, 等. 贯通运营下市域铁路与地铁列车开行方案协同优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2025, 25(2): 36-47.
- (Peng Q Y, Liu S Y, Jiang S, et al. Collaborative optimization of suburban railway and metro train operation plans under the interconnection operational mode[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2025, 25(2): 36-47.)
- [10] 王义惠, 巨妙玉, 黄雯铮, 等. 市域与地铁贯通运营下列车周期运行图与车底周转一体化编制[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(05): 2013-2026.
- (Wang Y H, Ju M Y, Huang W Z, et al. Integrated cyclic train timetabling and rolling stock circulation for through operation of suburban railway and subway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(05): 2013-2026.)
- [11] Li S J, Xu R H, Han K. Demand-oriented train services optimization for a congested urban rail line: Integrating short turning and heterogeneous headways[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2019, 15(2): 1459-1486.
- [12] 魏润斌, 贾顺平, 毛保华, 等. 考虑满载率均衡的城市轨道交通直通运营开行方案优化[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(3): 68-77.
- (Wei R B, Jia P S, Mao B H, et al. Train planning optimization for through operation of urban rail transit considering load balance[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(3): 68-77.)
- [13] Sun L S, Lu H B, Xu Y, et al. Fairness-oriented train service design for urban rail transit cross-line operation[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2022, 606: 128124.
- [14] Li Z Y, Zhao J, Peng Q Y. Train service design in an urban rail transit line incorporating multiple service routes and multiple train compositions[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 123: 102959.
- [15] 周厚盛, 戚建国, 杨立兴, 等. 基于灵活编组的城轨车底运用计划及鲁棒客流控制策略[J]. 控制与决策, 2023, 38(9): 2663-2671.
- (Zhou H S, Qi J G, Yang L X, et al. Joint optimization for rolling stock circulation plan based on flexible train composition mode and robust passenger flow control strategy on urban rail transit lines[J]. Control and Decision, 2023, 38(9): 2663-2671.)
- [16] 袁音, 李树凯, 陈泽彬, 等. 城市轨道交通网络列车运行调整与速度曲线选择实时优化[J]. 控制与决策, 2025, 40(11): 3415-3423.
- (Yuan Y, Li S K, Chen Z B, et al. Real-time optimization for train rescheduling and speed profile selection in urban rail transit networks[J]. Control and Decision, 2025, 40(11): 3415-3423.)
- [17] 李雅雯. 市域铁路与城市轨道交通贯通运营模式分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- (Li Y W. Analysis of the through operation mode between the suburban railway and the urban rail transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.)
- [18] Xue J K, Shen B. A novel swarm intelligence optimization approach: Sparrow search algorithm[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34.
- [19] 顾清华, 姜秉佼, 常朝朝, 等. 求解大规模优化问题的改进麻雀搜索算法[J]. 控制与决策, 2023, 38(7): 1960-1968.
- (Gu Q H, Jiang B J, Chang Z Z, et al. An improved sparrow search algorithm for solving large-scale optimization problems[J]. Control and Decision, 2023, 38(7): 1960-1968.)
- [20] 刘耿耿, 张丽媛, 刘笛, 等. 求解复杂约束优化问题的多策略混合麻雀搜索算法[J]. 控制与决策, 2023, 38(12): 3336-3344.
- (Liu G G, Zhang L Y, Liu D, et al. Multi-strategy hybrid sparrow search algorithm for complex cons-trained optimization problems[J]. Control and Decision, 2023, 38(12): 3336-3344.)
- [21] Lin L, Meng X L, Cheng X Q, et al. Train service plan design under the condition of multimodal rail transit systems integration and interconnection[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2023, 2023: 8275191.

作者简介

杨雯雯 (1993-), 女, 博士生, 主要研究方向为轨道交通运行规划、决策优化, E-mail: yangwenwen199302@163.com;

孟学雷 (1979-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为轨道交通运行规划、决策优化, E-mail: mxl@mail.lzjtu.cn;

韩立刚 (1976-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为轨道交通调度优化, E-mail: h-l-g@126.com;

方立海 (1977-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为轨道交通运输组织, E-mail: 421572264@qq.com;

付艳欣 (1989-), 女, 博士生, 主要研究方向为轨道交通运行规划, E-mail: fuyanxin@mail.lzjtu.cn;

康茜 (1989-), 女, 博士生, 主要研究方向为交通运输规划, E-mail: kay@lzjtu.edu.cn;

王保灵 (1999-), 男, 硕士, 主要研究方向为交通运输规划, E-mail: 3241568365@qq.com.