

# 基于鲁棒性的换乘模型下多制式列车运行图协同优化研究

李紫郡<sup>1,2,3</sup>, 倪少权<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>西南交通大学交通运输与物流学院, 四川 成都

<sup>2</sup>西南交通大学综合交通大数据应用技术国家工程实验室, 四川 成都

<sup>3</sup>西南交通大学综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 四川 成都

收稿日期: 2026年2月14日; 录用日期: 2026年3月11日; 发布日期: 2026年3月19日

## 摘要

在高密度行车条件下, 城市轨道交通系统极易受运行干扰影响, 尤其在衔接高速铁路的换乘枢纽站, 瞬时大规模换乘客流常导致列车停站时间延长并引发晚点传播, 本文提出一种计划层面的协同优化方法, 通过在列车运行图编制阶段动态调整各区间缓冲时间, 以提升运行图鲁棒性。模型充分考虑列车载客能力约束, 基于历史客流数据, 结合候车乘客与到站列车之间的动态交互关系, 精确刻画实际停站时间, 建立以最小化城市轨道交通列车运行图扰动时间和乘客换乘等待时间为目标的多制式换乘列车运行图协同优化模型。运用改进的遗传算法对该优化模型进行求解; 仿真实验结果表明, 模型与算法能够有效平衡运行稳定性与换乘服务水平, 显著提升网络在面对外部客流冲击时的韧性与可靠性。

## 关键词

列车运行图, 鲁棒性, 换乘等待时间, 多制式轨道交通

# Research on Collaborative Optimization of Multi-Standard Train Operation Chart under Robustness Transfer Model

Zijun Li<sup>1,2,3</sup>, Shaoquan Ni<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>National Engineering Laboratory for Comprehensive Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

<sup>3</sup>National and Local Joint Engineering Laboratory for Intelligent Comprehensive Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

\*通讯作者。

文章引用: 李紫郡, 倪少权. 基于鲁棒性的换乘模型下多制式列车运行图协同优化研究[J]. 交通技术, 2026, 15(2): 293-302. DOI: 10.12677/ojtt.2026.152027

## Abstract

Under the condition of high-density driving, the urban rail transit system is very susceptible to operation interference, especially at the transfer hub station connecting the high-speed railway, the instantaneous large-scale transfer of passengers often leads to the prolongation of train stoppage time and causes delay propagation. This paper proposes a planning-level collaborative optimization method, which dynamically adjusts the buffer time of each section during the train timetable compilation stage to enhance the robustness of the timetable. The model fully considers train passenger capacity constraints and is based on historical passenger flow data and the dynamic interaction between waiting passengers and arriving trains, the model accurately depicts the actual stopping time, and establishes a multi-standard transfer train operation chart collaborative optimization model with the goal of minimizing the disturbance time of urban rail transit train operation chart and passenger transfer waiting time. The improved genetic algorithm is used to solve the optimization model. Simulation results show that the model and algorithm can effectively balance the operation stability and transfer service level, and significantly improve the resilience and reliability of the network in the face of external passenger flow impacts.

## Keywords

Train Operation Diagram, Robustness, Transfer Waiting Time, Multi-Standard Rail Transit

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在大城市普遍面临交通拥堵与可持续发展双重压力的现实背景下, 高速铁路(HSR)与城市轨道交通(Urban Rail Transit, URT)构成的多制式衔接网络已成为提升区域可达性与城市内部通勤效率的重要支撑。然而, 这种高效换乘也带来了新的运营难题: 当高铁集中到站时, 大量换乘客流短时间内涌入城轨枢纽站, 形成远超日常设计容量的瞬时高峰。这不仅容易造成站台拥挤、秩序混乱, 还会迫使列车延长停站时间以完成上下客作业, 从而产生初始晚点。在高密度行车条件下, 此类局部扰动极易沿运行图向下游传播, 并通过换乘节点在不同线路间交叉扩散, 最终可能引发大范围运行紊乱, 严重损害公共交通系统的可靠性与服务吸引力。

针对这一问题, 传统“刚性”运行图编制方法已难以应对。早期国外研究(如文献[1]-[5])主要基于随机优化或鲁棒优化框架, 通过在区间运行时间或停站时间中引入冗余(即缓冲时间)来吸收不确定性干扰。近年来, 随着计算能力提升, 基于微观仿真的优化方法逐渐受到关注, 能更真实地反映客流动态与列车运行之间的耦合关系。国内学者(如文献[6]-[10])则开始探索融合乘客行为的协同调度策略, 并尝试引入强化学习等智能算法进行实时调整。但现有工作仍存在明显不足: 一方面, 多数模型将运行鲁棒性与效率视为互斥目标, 依赖单目标加权或分阶段优化, 难以揭示二者内在的权衡机制; 另一方面, 换乘协同研究常以最小化乘客等待时间为唯一导向, 忽视了过度压缩运行间隔或停站时间可能削弱系统应对突发客流的弹性, 反而增加运行风险。

为此, 本文提出一种面向多制式换乘场景的列车运行图协同优化方法。该方法在计划编制阶段就已

统筹考虑鲁棒性与服务水平, 不再将缓冲时间简单视为冗余成本, 而是作为一种可调控的资源, 在各运行区间进行精细化分配。所构建的双目标模型同步优化系统总扰动时间与乘客总换乘等待时间, 旨在生成一个既能有效吸收高铁换乘客流冲击、抑制延误传播, 又能保障良好换乘体验的运行图方案。本研究试图在运行韧性(“安全底线”)与服务品质(“服务高线”)之间建立协同机制, 为提升城市轨道交通网络在复杂外部扰动下的适应性与可靠性提供可行的技术路径。

## 2. 问题描述

城市轨道交通列车运行图一般为等间隔发车, 绝大多数到站客流在时段上呈现正态分布。但对于衔接铁路客运站的换乘枢纽站来说, 在铁路列车密集到达时段, 换乘客流剧增, 反之, 在铁路列车未到达时段, 站内客流明显减少。换车站的到达客流分布特征与中间站有较大差异, 客流呈现时空不均衡性, 导致换乘资源竞争, 可能引发乘客滞留甚至安全隐患, 常规的等间隔运行图难以适应客流动态波动的状态。

传统列车运行图优化多以运行效率为核心目标, 往往未能充分考虑延误在网络中的传播风险。在高密度行车条件下, 城市轨道交通系统尤为脆弱, 尤其是在换乘节点——这些关键位置一旦因瞬时大客流(如高铁集中到达引发的换乘客流)导致车门关闭延迟, 极易造成列车出发晚点。若运行图缺乏足够的鲁棒性, 此类局部扰动将通过线路间的换乘衔接关系迅速扩散, 甚至诱发连锁性延误或列车退出运营(“掉线”), 对整个网络的稳定性构成严重威胁。

为解决以上问题, 本研究聚焦于换乘场景下运行图的协同优化, 其核心在于: 在计划编制阶段, 合理配置各区间缓冲时间, 以增强系统对外部扰动的吸收能力。然而, 缓冲时间的设定面临显著权衡: 过长的缓冲虽可提升抗干扰性, 但会增加乘客在途时间、降低服务频率与整体效率; 而过短的缓冲则难以有效抑制扰动传播, 削弱运行图的韧性。因此, 如何在保障鲁棒性的同时最小化乘客换乘等待时间, 成为协同优化的关键难点。为降低问题的难度, 更方便合理地描述换乘协同过程及求解, 对考虑鲁棒性的换乘运输模式下多制式运行图动态优化模型做出以下假设:

- 1) 研究对象为独立的城市轨道交通线路, 且采用站站停的运营模式;
- 2) 允许在合理范围内对列车的区间运行时间及车站停站时长进行微调;
- 3) 线路按双线设计, 上行与下行方向列车独立运行, 且两个方向之间不存在换乘客流交互;
- 4) 在与高速铁路衔接的换车站, 仅考虑由高铁到达列车产生的换乘客流, 忽略其他来源的常规客流影响;
- 5) 所有列车采用统一编组, 具有相同的载客能力  $C$  (单位: 人/列), 其中  $C$  由座位数与允许站立人数之和确定;
- 6) 当列车未达到满载状态时, 站台候车乘客均可顺利登乘, 不发生滞留;
- 7) 各车站同一时刻仅能容纳一列列车停靠, 全线不支持越行操作;
- 8) 高铁换乘乘客至多等待一班后续城市轨道交通列车, 即不会连续错过两班及以上列车。

## 3. 模型构建

### 3.1. 约束条件

- 1) 行车组织基本约束条件

列车计划到发时刻满足安全追踪间隔约束, 即

$$D_{i,j} - D_{i,j-1} \geq h \quad (1)$$

任意列车的计划到发时刻存在

$$D_{i,j} = A_{i,j} + \tau_{i,j} \quad (2)$$

$$A_{i,j} = D_{i,j-1} + T_{i,j-1,j}^S \quad (3)$$

列车计划出发时刻应大于或等于计划到达时刻和最小停站时间  $\tau_{i,j,\min}$  之和

$$D_{i,j} \geq A_{i,j} + \tau_{i,j,\min} \quad (4)$$

### 2) 乘客和列车的交互关系约束

对于城市轨道交通列车  $i$ , 在车站  $j$  的等待客流量  $W_{i,j}$  为

$$W_{i,j} = \sum_{k=j+1}^n W_{i,j,k} \quad (5)$$

其中,

$$W_{i,j,k} = L_{i-1,j,k} + \lambda_{j,k} (D_{i,j} - D_{i-1,j}) \quad (6)$$

对于城市轨道交通列车  $i$ , 在车站  $j$  的等待客流量  $U_{i,j}$  为

$$U_{i,j} = \sum_{f=1}^{j-1} U_{i,f,j} \quad (7)$$

由  $W_{i,f,j}$  与  $L_{i,f,j}$  之差计算得到:

$$U_{i,f,j} = W_{i,f,j} - L_{i,f,j} \quad (8)$$

城市轨道交通列车  $i$  在离开车站  $j$  时, 车内客流量  $Q_{i,j}$  为

$$Q_{i,j} = Q_{i,j-1} - U_{i,j} + B_{i,j} \quad (9)$$

式中  $B_{i,j}$  取列车  $i$  在车站  $j$  的剩余载客能力  $Q_{i,j}^{rem}$  与等待客流量的最小值  $W_{i,j}$

$$B_{i,j} = \min \{ Q_{i,j}^{rem}, W_{i,j} \} \quad (10)$$

式中,

$$Q_{i,j}^{rem} = C - Q_{i,j-1} + B_{i,j} \quad (11)$$

在客流高峰时段, 由于列车载客能力限制, 列车  $i$  在车站  $j$  滞留客流量  $L_{i,j}$  为

$$L_{i,j} = W_{i,j} - \min \{ Q_{i,j}^{rem}, W_{i,j} \} \quad (12)$$

其中,  $L_{i,j}$  的 OD 组成由  $L_{i,j,k}$  得到, 即

$$L_{i,j,k} = L_{i,j} \frac{W_{i,j,k}}{W_{i,j}} \quad (13)$$

为满足假设(3), 列车  $i$  在车站  $j$  的实际停站时间  $A\tau_{i,j}$  为列车最短停站时间  $\tau_{\min}$  与根据客流上下车所需停站时间的最大值, 即

$$A\tau_{i,j} = \max \{ \tau_{\min}, t_{fixed} + \beta \times (p_a + p_b) \} \quad (14)$$

分析铁路列车与城市轨道交通列车在 S 站的换乘衔接关系, 若要实现两列车中换乘客流时间上的衔接需满足:

$$AD_{i-1,s} \leq SD^a + t_s \leq AD_{i,s} \quad (15)$$

### 3) 列车运行图鲁棒性约束

城市轨道交通在实际运营中不可避免地会受到各类干扰, 因此提升运行图的鲁棒性是其内在设计要求。通常, 运行干扰的衡量基准是最小技术运行时间。例如, 若某区间最小技术运行时间为 3 分钟, 而

运行图中规定的计划运行时间为 4 分钟, 则该区间预留了 1 分钟的缓冲时间。在客流高峰时段, 若列车因上下客延误导致实际停站时间超出计划值超过 1 分钟, 则其抵达下一站的时间必然发生晚点, 凸显了合理设置缓冲对抑制扰动传播的关键作用。基于上述分析, 城市轨道交通图定时间  $T_{i,j-1,j}^S$  可定义为列车实际运行时间的期望值  $E(T_{i,j-1,j})$  和缓冲时间之和  $x_{i,j-1,j}$ , 即

$$T_{i,j-1,j}^S = E(T_{i,j-1,j}) + x_{i,j-1,j} \quad (16)$$

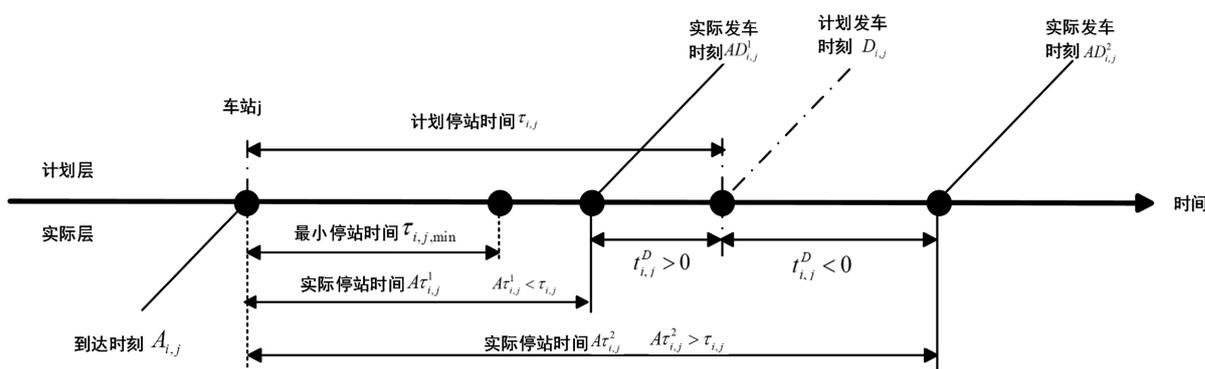


Figure 1. Disturbance time of train operation chart

图 1. 列车运行图扰动时间

如图 1 所示, 列车运行图扰动时间  $t_{i,j}^D$  可定义为列车计划出发时刻  $D_{i,j}$  和实际出发时刻  $AD_{i,j}$  之差, 即

$$t_{i,j}^D = D_{i,j} - AD_{i,j} \quad (17)$$

如果  $t_{i,j}^D < 0$ , 说明列车  $i$  在车站  $j-1$  发车晚点; 如果  $t_{i,j}^D > 0$ , 说明列车  $i$  在车站  $j-1$  提前发车, 表面计划停站时间过长, 需要调整。

当列车实际出发时间因干扰而偏离计划时刻时, 司机可通过调节运行速度, 利用区间内预留的缓冲时间, 尽可能抵消延误影响, 从而避免到站晚点或减轻晚点程度。定义列车可恢复时段  $t_{i,j-1,j}^a$  为

$$t_{i,j-1,j}^a = \delta_{i,j-1,j} (D_{i,j-1} + AD_{i,j-1}) \quad (18)$$

式中,  $\delta_{i,j-1,j} \in (0,1)$ , 令  $\delta_{i,1,2} = 0$ , 即列车  $i$  在始发站正点出发。

司机调整列车运行速度后列车的运行时间  $T'_{i,j-1,j}$  为

$$T'_{i,j-1,j} = T_{i,j-1,j} + t_{i,j-1,j}^a \quad (19)$$

列车  $i$  在车站  $j$  的实际出发时刻有

$$AD_{i,j} = AD_{i,j-1} + T'_{i,j-1,j} + A\tau_{i,j} \quad (20)$$

基于上述公式, 可推导并得到列车运行图扰动时间  $t_{i,j}^D$  的递推公式, 即

$$\begin{aligned} t_{i,j}^D &= D_{i,j} - AD_{i,j} \\ &= D_{i,j-1} + T_{i,j-1,j}^S + \tau_{i,j} - (AD_{i,j-1} + T'_{i,j-1,j} + t_{i,j-1,j}^a + A\tau_{i,j}) \\ &= (D_{i,j-1} - AD_{i,j-1}) + (T_{i,j-1,j}^S - T'_{i,j-1,j}) - \delta_{i,j-1,j} (D_{i,j-1} + AD_{i,j-1}) + \tau_{i,j} - A\tau_{i,j} \\ &= (1 - \delta_{i,j-1,j}) (D_{i,j-1} - AD_{i,j-1}) + (T_{i,j-1,j}^S - T'_{i,j-1,j}) + \tau_{i,j} - A\tau_{i,j} \\ &= (1 - \delta_{i,j-1,j}) t_{i,j-1}^D + (T_{i,j-1,j}^S - T'_{i,j-1,j}) + \tau_{i,j} - A\tau_{i,j} \end{aligned} \quad (21)$$

基于式子(1), 可进一步写成

$$t_{i,j}^D = (1 - \delta_{i,j-1,j}) t_{i,j-1}^D + [E(T_{i,j-1,j}) + x_{i,j-1,j} - T_{i,j-1,j}] + \tau_{i,j} - A\tau_{i,j} \quad (22)$$

因为始发站列车不晚点, 那么

$$t_{i,1}^D = 0 \quad (23)$$

令  $T = \{T_{i,j-1,j}, i \in I, j \in J\}$ ,  $\delta = \{\delta_{i,j-1,j}, i \in I, j \in J\}$ ,  $A\tau = \{A\tau_{i,j}, i \in I, j \in J\}$  和  $X = \{x_{i,j-1,j}, i \in I, j \in J\}$ , 则列车运行图扰动时间  $t_{i,j}^D$  为以上变量的函数  $t_{i,j}^D(T, \delta, A\tau, X)$ 。因为  $T$ ,  $A\tau$  可根据历史客流量数据计算得到,  $\delta$  为经验变量取值, 所以本文将  $T$ ,  $A\tau$ ,  $\delta$  作为输入变量,  $X$  则区间运行缓冲时间为输出结果。

### 3.2. 目标函数

1) 列车运行图鲁棒性函数

令  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  分别作为惩罚列车发车晚点  $t_{i,j}^D < 0$  和列车发车提前  $t_{i,j}^D > 0$  的惩罚因子, 则广义列车运行图扰动函数可扩展为

$$\begin{aligned} Gt_{i,j}^D(T, \delta, A\tau, X, \gamma_1, \gamma_2) \\ = \gamma_1 \max\{Gt_{i,j}^D(T, \delta, A\tau, X), 0\} + \gamma_2 \max\{-Gt_{i,j}^D(T, \delta, A\tau, X), 0\} \end{aligned} \quad (24)$$

$\gamma_1$  和  $\gamma_2$  可通过列车实际运行数据进行参数标定, 城市轨道交通列车运行图扰动时间之和最小化为目标, 构建优化函数如下:

$$\min \Omega(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |Gt_{i,j}^D(T, \delta, A\tau, X, \gamma_1, \gamma_2)| \quad (25)$$

2) 乘客换乘等待时间

S 站为列车  $i$  运行线路上的枢纽换乘站, 由高铁到达列车  $SD^a$  换乘到接续列车  $AD_{i,s}$  的单个乘客的换乘等待时间可表示为:

$$W_a = AD_{i,s} - (SD^a + t_s) \quad (26)$$

假设多列到达列车和衔接列车形成衔接关系, 在研究时段  $[t_y, t_z]$  内, 高铁列车换乘城市轨道交通的客流数量为  $H_a$  人, 则可求得在此衔接方向上的  $[t_y, t_z]$  内, 全部乘客换乘列车  $i$  的换乘等待时间为:

$$W = \sum_{a=1}^q W_a * H_a \quad (27)$$

由于列车  $i$  承载能力有限, 无法容纳站台上的等待乘客全部乘坐列车, 未上车乘客需等待下一班列车乘坐, 所以滞留乘客的额外等待时间为:

$$W' = \sum_{a=1}^q (AD_{i+1,s} - AD_{i,s}) * L_{i,a} \quad (28)$$

其中,

$$L_{i,a} = H_a - \min\{Q_{i,j}^{rem}, H_a\} \quad (29)$$

基于对换乘衔接方向上的换乘等待时间的分析, 在研究时段  $[t_y, t_z]$  内, 换乘乘客总等待时间为:

$$W^{总} = W + W' \quad (30)$$

## 4. 求解算法

本文所构建的列车运行图协同优化模型是双目标非线性规划问题, 包含多个决策变量(即各列车在各

运行区间的缓冲时间分配)。该问题具有目标函数相互冲突、约束条件复杂且仿真评估过程高度非线性特点, 传统的数学规划方法难以有效求解。为此, 本文采用带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)对模型进行求解。

NSGA-II 是一种经典的多目标进化算法, 其核心优势在于能够通过一次优化运行, 获得一组在 Pareto 意义上互不支配的最优解集(即 Pareto 前沿), 为决策者提供多样化的权衡方案。该算法不依赖于目标函数的梯度信息, 仅需通过输入决策变量即可获得对应的性能指标, 适用基于复杂仿真的黑箱优化场景。

具体的求解流程如下:

1) 问题定义: 将每个个体编码为一个长度为  $I \times (J-1)$  的实数向量  $\mathbf{b}$ , 其中每个元素  $b_{i,e}$  代表第  $i$  列车在第  $e$  个运行区间分配的缓冲时间。

2) 适应度评估: 对于种群中的每一个个体, 调用定制的仿真评估函数 `_evaluate`。该函数根据给定的缓冲时间向量  $\mathbf{b}$ , 动态模拟整个列车运行过程, 精确计算由常规客流及高铁换乘客流共同作用下产生的实际到发时刻, 并最终输出两个目标函数值: 总运行扰动时间  $f_1$  和总换乘等待时间  $f_2$ 。

3) 进化机制: 种群演化采用锦标赛选择策略, 并结合模拟二进制交叉(Simulated Binary Crossover, SBX)与多项式变异(Polynomial Mutation, PM)算子。为兼顾解集的收敛性与多样性, 算法在每一代均执行非支配快速排序, 并基于拥挤距离对个体进行环境选择。

4) 参数配置: 综合考虑问题维度与计算效率, 参考同类多目标优化研究的常用设置, 将种群规模设为 50, 最大迭代代数设为 100; SBX 交叉概率取 0.8, PM 变异算子的分布指数设为 10。

## 5. 算例分析

### 5.1. 概况

选取城市轨道交通换乘站 S 站为研究对象, 线路图如图 2 所示, S 站为 L1 线路中的铁路换乘站, 铁路乘客经由此站换乘城市轨道交通 L1 线抵达各自出行点, 选取 L1 线中的 19 个车站作为研究区段, 铁路换乘站为研究区段中的第 9 站。

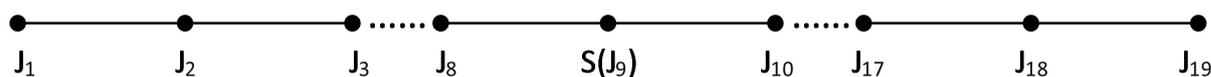


Figure 2. L1 line study section

图 2. L1 线路研究区段

### 5.2. 参数设计

确定研究时段为 17:30~19:00, 为便于建模和计算, 将起始时刻 17:30 作为 0 时刻。研究时段内, 在换乘站到达的铁路列车具体数据如下表 1 所示。

Table 1. High-speed rail train data during the study period

表 1. 研究时段内高铁列车数据

列车编号	到站时间	列车定员(人)
G8574	17:36	556
G1591	17:38	576
G2852	17:42	556
G1887	17:53	576
G3764	17:54	1053

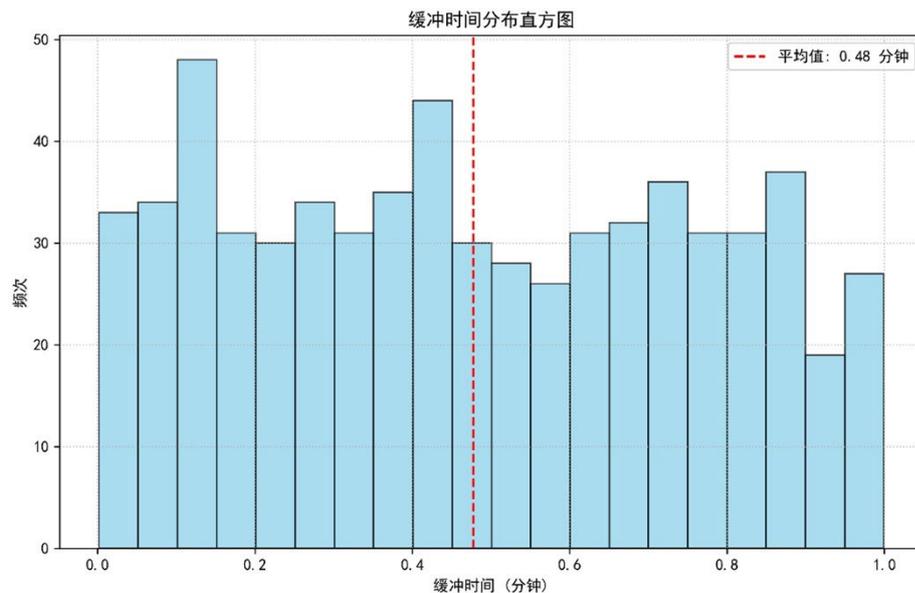
续表

G8746	18:06	556
G8626	18:15	578
G2244	18:16	576
G2964	18:21	1156
G8744	18:24	556
G2322	18:25	556
G1975	18:27	1193
G1573	18:38	556
G2240	18:39	1112
G8689	18:45	1152
G2242	18:46	556
G8664	18:51	576
G307	18:55	1061
G387	19:00	619

**Table 2.** Technical parameters of subway trains

**表 2.** 地铁列车技术参数

参数描述	取值
列车定员(人)	1880
车门数量(个/列)	24
列车最小停站时间(s)	30
起动加速度(m/s <sup>2</sup> )	0.8
制动减速度(m/s <sup>2</sup> )	0.9



**Figure.3.** Histogram of buffer time distribution

**图 3.** 缓冲时间分布直方图

本研究设定列车平均客座率为 85%；同时，假定高铁到站旅客中有 90%的比例换乘城市轨道交通，且该换乘客流在分析时间窗内以正态分布的形式到达换乘站。地铁列车技术参数如表 2 所示。

### 5.3. 结果分析

通过具体案例验证模型的有效性，本文采用 NSGA-II 算法对 L1 线进行了仿真优化。如图 3 所示，优化后缓冲时间的平均值为 0.48 分钟，且主要集中在 0.2~0.6 分钟范围内。

通过仿真实验获得优化后的列车运行图方案。为定量评估模型效果，将其与对比方案(即总缓冲时间相同，采用均匀分布的方式分配总缓冲时间的原始计划)进行对比。如表 3 所示，优化方案将系统总扰动时间减少了 36.04%，表明合理分配缓冲时间能够有效吸收高铁换乘客流引发的运行扰动，显著增强运行图的鲁棒性。同时，乘客总换乘等待时间下降了 69.85%，说明该方法在维持运行稳定的同时，大幅缩短了换乘等候时间，兼顾了运营可靠性与乘客服务水平。具体对比如下：

**Table 3.** Comparison data of schemes

**表 3.** 方案对比数据

方案	总扰动(分钟)	总等待(分钟)
对比方案	23682.76	39284.36
优化方案	15146.54	11844.81
优化效果	↓ 36.04%	↓ 69.85%

以列车 1 为例展示列车运行优化结果，具体见表 4。

**Table 4.** Display of train 1 operation

**表 4.** 列车 1 运行情况展示

区间序号	起始站	终到站	出发时间	到达时间	区间运行时间(秒)	缓冲时间(秒)
1	站 1	站 2	17:17:00	17:19:25	135.54	45.6
2	站 2	站 3	17:19:58	17:21:46	115.26	38.4
3	站 3	站 4	17:22:18	17:24:30	145.32	31.8
4	站 4	站 5	17:25:02	17:26:42	95.94	7.8
5	站 5	站 6	17:27:12	17:29:15	122.58	32.4
6	站 6	站 7	17:29:45	17:31:46	121.32	23.4
7	站 7	站 8	17:32:16	17:34:27	130.86	28.8
8	站 8	站 9	17:34:57	17:37:08	130.74	25.8
9	站 9	站 10	17:37:38	17:39:31	113.28	23.4
10	站 10	站 11	17:40:01	17:41:49	108.66	20.4
11	站 11	站 12	17:42:19	17:44:17	117.36	26.4
12	站 12	站 13	17:44:47	17:46:57	129	40.8
13	站 13	站 14	17:47:27	17:48:58	90.96	1.8
14	站 14	站 15	17:49:28	17:51:08	99.84	7.2
15	站 15	站 16	17:51:38	17:53:58	140.46	50.4
16	站 16	站 17	17:54:28	17:56:12	103.62	13.8
17	站 17	站 18	17:56:42	17:58:57	134.7	41.4
18	站 18	站 19	17:59:27	18:01:43	136.8	48

上述结果表明, 本文所提出的协同优化方法能够在提升列车运行图鲁棒性的同时, 有效控制乘客换乘等待时间, 验证了该方法在平衡运营稳定性与服务质量方面的实际效果。该模型为应对高铁—城轨换乘场景下由瞬时大客流引发的运行扰动问题, 提供了一种可行的技术路径。

## 6. 结束语

本文针对多制式换乘环境下城市轨道交通运行图编制问题, 构建了一个双目标优化模型, 旨在同步降低系统总运行扰动时间和乘客总换乘等待时间。模型通过在计划阶段合理配置区间缓冲时间, 兼顾运行鲁棒性与换乘效率, 并采用改进的遗传算法进行求解。仿真实验显示, 优化方案在两项指标上均取得明显改善, 证实了该方法在协调抗干扰能力与服务水平方面的有效性, 可为高密度城轨网络的韧性运行图设计提供参考。

## 基金项目

国家重点研发计划课题: 轨道交通复杂路网多模式耦合需求的列车运行图动态智能编制技术(2022YFB4300502)。

## 参考文献

- [1] Tuzun Aksu, D. and Akyol, U. (2014) Transit Coordination Using Integer-Ratio Headways. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **15**, 1633-1642. <https://doi.org/10.1109/tits.2014.2301821>
- [2] Luo, Z.Y., Liu, X.T., Tan, S.X., Xu, H. and Liu, J. (2023) Multi-Objective Multi-Stage Optimize Scheduling Algorithm for Nonlinear Virtual Work-Flow Based on Pareto. *Processes*, **11**, Article 1147. <https://doi.org/10.3390/pr11041147>
- [3] Kusakabe, T. and Asakura, Y. (2014) Behavioural Data Mining of Transit Smart Card Data: A Data Fusion Approach. *Transportation Research Part C*, **46**, 179-191. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.05.012>
- [4] Jiang, F., Cacchiani, V. and Toth, P. (2017) Train Timetabling by Skip-Stop Planning in Highly Congested Lines. *Transportation Research Part B: Methodological*, **104**, 149-174. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.06.018>
- [5] Zhou, L., Tong, L., Chen, J.H., Tang, J. and Zhou, X. (2017) Joint Optimization of High-Speed Train Timetables and Speed Profiles: A Unified Modeling Approach Using Space-Time-Speed Grid Networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, **97**, 157-181. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.002>
- [6] 禹丹丹, 韩宝明, 董宝田, 等. 基于换乘协同的轨道交通网列车时刻表优化模型[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(4): 129-135.
- [7] 倪陈佳. 高速列车运行图鲁棒性及冗余时间协同优化研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [8] 李智, 张琦, 孙延浩, 等. 高速铁路列车运行图鲁棒性协同优化模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(5): 169-176.
- [9] 曹志超, 袁振洲, 李得伟, 等. 城市轨道交通列车运行图鲁棒性优化模型[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(3): 130-136.
- [10] 孙梦霞. 多模式区域轨道交通运行图协调优化研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2019.