

文章编号: 1003-1421(2026)10-0064-11

引用格式: 朱巧珍, 闫冬阳, 汪茜. 地铁列车故障救援场景下的行车计划调整与车站客流管控协同优化方法[J]. 铁道运输与经济, 2026, 48(10): 64-74.

ZHU Qiaozhen, YAN Dongyang, WANG Qian. Collaborative Optimization Methods of Train Rescheduling and Passenger Flow Control in Case of Metro Train under Failure Rescue[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(10): 64-74.

地铁列车故障救援场景下的行车计划调整与 车站客流管控协同优化方法

朱巧珍¹, 闫冬阳^{2, 3}, 汪茜⁴

(1. 山东职业学院 城市轨道学院, 山东 济南 250104; 2. 青岛大学 商学院, 山东 青岛 266071;
3. 青岛大学 标准化战略研究院, 山东 青岛 266071; 4. 中国民航管理干部学院
大数据与人工智能系, 北京 100102)

摘要: 城轨列车救援通常会导致运营中断, 造成运输能力下降和站台客流累积等问题。为了提高线路运输效率、保障站台乘客安全, 实现运输能力与客流需求相适应, 从系统优化角度进行站车协同优化。考虑列车容量、站台容量等关键约束, 以涵盖小交路折返、加开备车、列车跳停和调整列车到发时刻在内的运行调整方案和客流管控方案为决策变量, 构建最小化乘客总等待时间的行车计划调整与客流管控协同优化非线性规划模型, 并采用双层的暴力搜索和遗传算法(BF-GA)求解。研究结果表明, 与仅顺延时刻表方法相比, 协同优化方法可使全线乘客的总等待时间降低23.42%, 人均站外和站台等待时间分别下降18.08%和28.72%; 较采取行车计划调整但不优化客流控制方法相比, 提出的方法在保证站台安全的前提下, 可进一步节约乘客总等待时间2.32%。该研究方法可为城轨行车调度提供参考。

关键词: 城市轨道交通; 协同优化; 双层求解算法; 列车故障; 行车计划调整; 客流管控
中图分类号: U292.4⁺2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250530005

Collaborative Optimization Methods of Train Rescheduling and Passenger Flow Control in Case of Metro Train under Failure Rescue

ZHU Qiaozhen¹, YAN Dongyang^{2, 3}, WANG Qian⁴

(1. School of Urban Rail Transit, Shandong Polytechnic, Jinan 250104, Shandong, China; 2. Business College, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China; 3. Institute of Standardization, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China;
4. Department of Big Data and Artificial Intelligence, Civil Aviation Management Institute of China, Beijing 100102, China)

Abstract: Train rescue usually leads to operational disruption in urban rail transit, resulting in reduced transport capacity and passenger accumulation on the platform. To improve the transport efficiency and passenger safety on the platform and realize the adaptation of transport capacity and passenger flow demand, a collaborative optimization of stations and trains was proposed from the perspective of system optimization. Considering such key constraints as train capacity and platform

收稿日期: 2025-05-30 修订日期: 2026-09-01

通信作者: 闫冬阳(1993—), 男, 河南禹州人, 青岛大学商学院副教授。

基金项目: 国家社会科学基金一般项目(25BJY138)

capacity, a collaborative optimization nonlinear programming model of train rescheduling and passenger flow control was constructed by minimizing the total passenger waiting time, with the decision variables including short-turnings, operating extra trains, train skip stops, and rescheduling the service timetable. The bilevel Brute Force-Genetic Algorithm (BF-GA) was used to solve the model. Experimental results show that, compared with postponing the timetable alone, the collaborative optimization method can effectively reduce the total passenger waiting time by 23.42%, with waiting time per passenger outside the station and platform lower by 18.08% and 28.72%, respectively. Compared to train rescheduling without optimized passenger flow control, while ensuring platform passenger safety, the proposed method can reduce total passenger waiting time by 2.32%. This research method can provide references for urban rail train operation dispatching.

Keywords: Urban Rail Transit; Collaborative Optimization; Bilevel Solution Algorithm; Train Failure; Train Rescheduling; Passenger Flow Control

0 引言

城市轨道交通系统受到突发事件扰动后,其恢复能力是衡量系统韧性和应对能力的重要指标。恢复能力不仅取决于基础设施的可靠性,还与应急预案的科学性以及行车调整的灵活性、客流管控策略的有效性密切相关。其中,基础设施与应急预案等因素在扰动发生前已确定;而在扰动发生后,提升城市轨道交通系统恢复能力的关键因素是行车调整方案。当线路的客流量较大,或扰动发生在早晚高峰时段时,恢复能力还与客流控制方案密切相关^[1]。目前,城轨行车计划调整和客流控制方案主要是基于调度员的既往经验及应急预案相结合而得到,不仅无法确保结果的最优性,还可能引发潜在的安全风险。因此,有必要研究列车故障救援下的行车计划调整和客流管控,实现时刻表与客流控制方案的自动生成。

列车运行调整一直是轨道交通研究热点问题之一。根据系统受到扰动程度的不同,将运行调整问题分为干扰(Disturbance)和中断(Disruption)2种类型^[2]。一般而言,干扰情形下,仅需调整列车到发时刻即可恢复计划时刻表,即局部调整列车的区间运行时分、停站时分、发车间隔或者上述三者的组合方式^[3]。中断情形下,城市轨道交通通常采取包括压缩时分、跳停、小交路、备车、扣停、跳停等在内的运行调整策略。根据突发事件的类型以及故障持续时间,可选择单/多种运行调整,且组合策略往往具有更好的优化效果^[4-5]。对此,肖红等^[6]基于复杂网络理论,采用多种不同恢复策略下的恢复时序方案对地铁网络失效站点进行修复,并选择网络

韧性值最大的恢复时序方案为最优。诸多学者构建了数学优化模型,通过求解列车的最优行车调整方案来提高中断场景下线路运营效率^[7]。例如,Zhan等^[8]探讨了双向中断下车次的取消、停站等待以及列车到发时刻调整问题。周玮腾等^[9]则针对单向中断场景提出了“反向运行+小交路”组合调整策略,并构建了中断和恢复两阶段的运行调整模型。针对列车故障具有运营中断时间长、影响范围大的特点,朱巧珍等^[10]以给定的列车故障救援方案为基础,采取列车跳停和加开备车的方式,构建了列车运行调整模型,最小化总滞留乘客数量与备车加开数量的加权和。

城市轨道交通客流控制通过限制进入站台和上车人数,不但能够有效降低乘客在站台和车厢内的密度从而减少因人员过于拥挤而导致的跌倒、踩踏等安全事故的风险^[11-12],还能够合理分配列车输送能力、实现地铁运力与乘客需求相匹配、提升整体运营效率^[13]。Liang等^[14]研究了随机需求下的客流控制问题,运营企业在调度过程中呈现显著的短途优先倾向,通过邻近下游车站的运力释放策略,优化不同区间的上车人数,可以均衡企业的运营成本和乘客的出行成本。

上述研究均是对城市轨道交通列车运行调整或客流控制策略的单独优化,忽略了行车计划调整和客流控制之间的耦合关系。本研究的创新点在于着重研究行车计划调整和客流控制之间的耦合关系,并拟解决在列车故障等运营场景下,如何通过协同优化行车计划和客流管控来提高因故障而降低的服务水平这一关键问题。对此,学者们以车站客流控制和列车跳停策略的组合方案为重点开展研究^[15]。

王培恒等^[16]构建了地铁线路列车跳停开行与客流控制协同优化模型,极小化乘客在始发站和换乘站的延误时间。刘泓茗等^[17]针对各站乘客差异化的出行需求进行精细化的站内限流和跳停策略调整,有效减少旅客延误人数并缓解站台拥挤,快速恢复因某趟列车延误造成的大面积晚点。

列车故障是运营过程中最常见的设备故障之一。其中,列车的牵引或制动系统发生故障时,需要组织列车救援^[18]。列车故障救援会造成较长时间的运营中断,导致部分区段列车堵塞,影响双方向列车运行,且线路上车底不足,仅靠跳站方法难以恢复正常行车秩序。因此,面向城市轨道交通列车故障救援场景,通过协同优化行车计划和客流管控,解决列车故障救援场景下线路上车辆不足且仅靠跳站方法难以恢复正常行车秩序这一问题,以提高因故障而降低的服务水平。

1 问题描述

针对一条双向、具有 N 个车站的城市轨道交通线路,非故障情形下,单一编组的列车从上行起点车站运行至终点车站,折返之后再从下行起点车站运行至终点车站,运行调整方案示意图如图1所示。

当运营列车发生故障后,原运行计划被打破,为避免出行乘客等待时间大幅延长,需组织列车救

援,并调整运行计划。运营公司依据提前制定的故障救援预案,结合故障位置 L^F ,确定救援方案,即 $N^{SC} = \{N_{rt}^{RT}, N_{sp}^{SP}, z_{rr}\}$ 。其中, N_{rt}^{RT} , N_{sp}^{SP} 表示救援列车 rt 和存放位置 sp 所在的车站。 z_{rr} 表示救援路径,定义为列车救援对正线运营影响的起终点车站,即 $z_{rr} = \{\min(N_{rt}^{RT}, N_{sp}^{SP}, L^F), \max(N_{rt}^{RT}, N_{sp}^{SP}, L^F)\}$ 。由此可确定故障救援区段 S_F^T ,图1中, $\{s_{up}, N_{up}\}$ 为救援路径,则 $\{s_{up}, s'_{up}, \dots, N_{up}\}$ 为故障救援区段。其中, s_{up} , N_{up} 表示车站的编号,up表示列车运行上行方向。根据救援组织方案、计划时刻表和故障救援区段,确定备用列车加开方案 N^B 和小交路方案 N^{ST} 的备选集。

在此基础上,通过调整列车到发时刻、加开备用列车、组织小交路折返、列车跳停,优化列车接续关系,制定新的列车时刻表。这些运行调整策略在一定程度上提高了故障后线路的输送能力,但仍然难以满足客流需求。乘客在车站内不断地累积,受站台能力限制,短时间内站台区域客流密度增加,易造成乘客拥挤、踩踏。对此,在尽可能提升线路输送能力的同时,还需要进行客流控制,让乘客在区域更为广阔的站外等待,而不是在站台等待上车。

将研究时段 T 分为 n 个小时段,每个小时段的长度为 t_{unit} 。考虑到客流控制方案实施的可行性,将 t 时刻OD的客流需求表示为一个矩阵,即 $TOD^R(t)$ 。

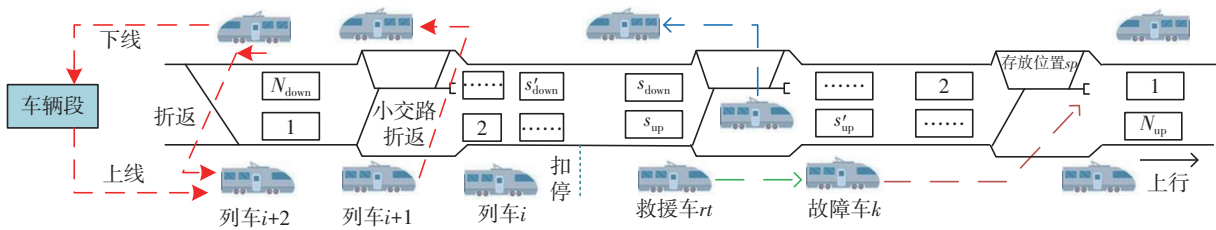


图1 运行调整方案示意图
Fig.1 Operational rescheduling plan

$$TOD^R(t) = \begin{pmatrix} 0 & \lambda_{1,2}^R(t) & \cdots & \lambda_{1,N-1}^R(t) & \lambda_{1,N}^R(t) \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_{2,N-1}^R(t) & \lambda_{2,N}^R(t) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \lambda_{N-1,N}^R(t) \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{cases} \lambda_{s,s'}^R(t) & s < s' < N, s < s' \in N^s, t \in T \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\lambda_{s,s'}^R(t)$ 表示 R 方向 t 时段内起点为车站 s_R 、终点为车站 s'_R 的客流需求。

用 $\eta_{s,s'}^R(t)$ 表示车站 s_R 前往车站 s'_R 的限流率,即

时段 t 内不允许进入从车站 s_R 前往车站 s'_R 的客流量为 $p_{s,s'}^{R,X'}(t) = \lambda_{s,s'}^R(t) \cdot \eta_{s,s'}^R(t)$ 。此处及后文为简化符号的复杂度,凡符号中的上下标带有 R 这一表示列车

运行方向的符号, 则将 $s_{\mathcal{R}}$ 用 s 来表示。

需要注意的是, 运行调整与客流管控方案存在紧密的耦合关系。列车运行交路的调整等运行调整措施会直接改变列车的运行状态, 进而影响各车站的客流到达和分布情况; 而是否控制乘客进站等客流管控方案则会影响车站内乘客的累积数量以及列车的清客等操作。运行调整和客流管控方案单独实施都难以有效应对复杂的客流情况以及保障运营的顺畅, 它们之间相互影响、相互制约, 所以有必要协同优化行车计划和客流管控方法, 实现系统最优, 以综合平衡各方面因素, 保障城市轨道交通系统的高效、安全运行。

综上所述, 本研究在已知救援组织方案前提下, 根据客流OD需求, 以列车运行调整方案、列车到发时刻、车底接续关系、客流管控方案为决策变量, 构建协同控制模型, 使得优化后的时刻表和客流管控方案可满足站台安全容量限制, 并尽可能降低乘客总等待时间。

2 优化模型

2.1 模型假设

假设1: 为了不降低已上车乘客的满意度, 故障发生时已经发出的车次不改变停站方案, 仅调整列车到发时分; 允许故障发生后发出的车次更改列车停站方案, 此时可以提前在车站通知乘客调整后的停站方案, 且乘客不会选择搭乘在其终点站不停站通过的列车。

假设2: 为避免强行清客造成的乘客满意度下降或站台人数的急剧增加, 仅考虑故障列车、救援列车以及需要小交路折返的列车清客, 其他列车均不清客。

假设3: 车站采取限流措施后, 若到站乘客在站外排队等待时间超过其可接受的最大容忍阈值, 部分乘客会选择其他交通方式(如公交、共享单车等), 未超过阈值的乘客仍保持原出行方式, 本研究将这一容忍阈值设置为一个较大的数, 即默认乘客不会更改出行方式。

2.2 参数及决策变量

为便于描述, 模型的参数及决策变量定义如表1所示。

2.3 优化目标

乘客期望自己到达车站之后, 能够尽快乘坐上列车; 而运营公司在列车故障引发大客流现象后, 期望能够避免乘客在车站的拥挤。以乘客在站外和站台的等待时间加权和最小化为优化目标, 如下所示。

$$\begin{aligned} \min Z = & \alpha \sum_{\mathcal{R}=\{\text{up}, \text{down}\}} \sum_{s \in N^s} W_{\mathcal{R}, s}^p + \\ & \beta \sum_{\mathcal{R}=\{\text{up}, \text{down}\}} \sum_{t \in T} \sum_{s \in N^s} W_{\mathcal{R}, s}^o(t) + \gamma \sum_{\mathcal{R}=\{\text{up}, \text{down}\}} \sum_{s \in N^s} W_{\mathcal{R}, s}^q \end{aligned} \quad (2)$$

$$W_{\mathcal{R}, s}^p = \sum_{s'=s+1}^{n'} p_{i, s, s'}^{\mathcal{R}, F} \cdot (d_{i, s}^{\mathcal{R}} - d_{i-1, s}^{\mathcal{R}}) + \sum_{\tau=d_{i-1, s}^{\mathcal{R}}}^{d_{i, s}^{\mathcal{R}}} \left((d_{i, s}^{\mathcal{R}} - \tau) \cdot \sum_{s'=s+1}^{n'} p_{s, s'}^{\mathcal{R}, C}(\tau) \right) \quad i \in N_{\text{service}}^{\mathcal{R}}, s < s' \in N^s \quad (3)$$

$$W_{\mathcal{R}, s}^o(t) = p_{s, s'}^{\mathcal{R}, X'}(t-1) \cdot t_{\text{unit}} + (t_{\text{unit}}/2) \lambda_{s, s'}^{\mathcal{R}}(t) \quad t \in T, s < s' \in N^s \quad (4)$$

$$W_{\mathcal{R}, s}^q = p_{s, s'}^{\mathcal{R}, X'}(n) + p_{i_{\text{end}}, s, s'}^{\mathcal{R}, F} \quad (5)$$

式中: $p_{s, s'}^{\mathcal{R}, C}(\tau)$ 可通过上一时段进站乘客数计算得到, $p_{s, s'}^{\mathcal{R}, C}(\tau) = f(p_{s, s'}^{\mathcal{R}, X}(t-1), \tau)$, $\tau \in [t_{\text{unit}}(t-1)+1, t_{\text{unit}}(t)]$; f 是一个分布函数, 指 $(t-1)$ 时段的人数($p_{s, s'}^{\mathcal{R}, X}(t-1)$)在 t 时段均匀分布的乘客密度; α, β, γ 分别为站台乘客等待时间 $W_{\mathcal{R}, s}^p$, 站外乘客等待时间 $W_{\mathcal{R}, s}^o$ 的权重系数, 以及研究时段末未进站乘客的惩罚时间。

2.4 约束条件

(1) 时刻表约束。

$$r_{\mathcal{R}, \min}^{s, s+1} \leq a_{i, s+1}^{\mathcal{R}} - d_{i, s}^{\mathcal{R}} \leq r_{\mathcal{R}, \max}^{s, s+1} \quad i \in N_{\text{service}}^{\mathcal{R}}, s \in N^s \quad (6)$$

$$\begin{cases} d_{i, s}^{\mathcal{R}} - a_{i, s}^{\mathcal{R}} \geq dw_{\mathcal{R}, \min}^{s, 1} & u_{i, s}^{\mathcal{R}} = 0 \wedge e_{i, s}^{\mathcal{R}} = 0, \\ i \in N_{\text{service}}^{\mathcal{R}}, s \in N^s \\ d_{i, s}^{\mathcal{R}} - a_{i, s}^{\mathcal{R}} = 0 & u_{i, s}^{\mathcal{R}} = 1, i \in N_{\text{service}}^{\mathcal{R}}, s \in N^s \\ d_{i, s}^{\mathcal{R}} - a_{i, s}^{\mathcal{R}} \geq dw_{\mathcal{R}, \min}^{s, 2} & u_{i, s}^{\mathcal{R}} = 0 \wedge e_{i, s}^{\mathcal{R}} = 1, \\ s \in N^{\text{ST}}, i \in N_{\text{service}}^{\mathcal{R}, \text{ST}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} q_{k, i}^{\mathcal{R}} = 1 & \theta_i = 0, v_k = 0, a_{k, s}^{\mathcal{R}} - d_{i, s}^{\mathcal{R}} \geq tr^s; \\ q_{k, i}^{\mathcal{R}} = 0 & \text{无约束} \end{cases},$$

$$x_{i, s}^{\mathcal{R}} = 0 \quad i, k \in N_{\text{service}}^{\mathcal{R}}, s = \{1, N\} \quad (8)$$

$$\begin{cases} d_{i+1, s}^{\mathcal{R}} - d_{i, s}^{\mathcal{R}} \geq I_{\min}^{dd} \\ a_{i+1, s}^{\mathcal{R}} - d_{i, s}^{\mathcal{R}} \geq I_{\min}^{ad} \end{cases} \quad i \in N_{\text{service}}^{\mathcal{R}}, s \in N^s \quad (9)$$

$$\begin{cases} d_{i, s}^{\mathcal{R}} = D_{i, s}^{\mathcal{R}} \\ a_{i, s}^{\mathcal{R}} = A_{i, s}^{\mathcal{R}} \end{cases} \quad d_{i, s}^{\mathcal{R}} \leq F^s, a_{i, s}^{\mathcal{R}} \leq F^s, i \in N_{\text{service}}^{\mathcal{R}}, s \in N^s \quad (10)$$

表1 参数及决策变量定义
Tab.1 Parameters and decision variables

参数	
N^S	车站集合, $N^S = \{s_{\mathfrak{R}}, s = 1, 2, \dots, N\}$, N 表示车站数量, 索引为 s' 或 s
$\mathfrak{R}$	列车运行方向 $\mathfrak{R} = \{\text{up}, \text{down}\}$ 。若 $\mathfrak{R}=\text{up}$, 则为上行; 若 $\mathfrak{R}=\text{down}$, 则为下行
$N_{\text{service}}^{\mathfrak{R}}$	$\mathfrak{R}$ 方向上的列车集合, $\{1, 2, 3, \dots, I_{\text{total}}^{\mathfrak{R}}\}$, $I_{\text{total}}^{\mathfrak{R}}$ 表示该方向总列车数量, 包括既有车次、加开备车
N^B	备用列车备选集, 用所在车站编号来表示, $N^B = \{N_b^B, b = 1, 2, \dots, n^B\}$
$N_{\text{service}}^{\mathfrak{R}, \text{ST}/N^{\text{ST}}}$	小交路列车和折返车站(非起讫站)备选集, $N_{\text{service}}^{\mathfrak{R}, \text{ST}} \in N_{\text{service}}^{\mathfrak{R}}$, $N^{\text{ST}} \in N^S$; $N_{\text{service}}^{\mathfrak{R}, \text{ST}} = \{1, 2, \dots, n_{\text{service}}^{\mathfrak{R}, \text{ST}}\}$, $N^{\text{ST}} = \{1, 2, \dots, n^{\text{ST}}\}$
$I_{\min}^{\text{ad}}/I_{\min}^{\text{dd}}$	列车之间需要满足的最小发到/发发间隔
$r_{\mathfrak{R}, \min}^{s, s+1}/r_{\mathfrak{R}, \max}^{s, s+1}$	$\mathfrak{R}$ 方向上列车在区间 $[s, s+1]$ 的最小/最大运行时分
$\text{dw}_{\mathfrak{R}, \min}^{s, 1}/\text{dw}_{\mathfrak{R}, \min}^{s, 2}$	$\mathfrak{R}$ 方向上列车在车站 s 的最小停站时间/最小清客时间
tr^s	列车在车站 s 的最小折返时间
$C_{\text{tra}}/C_{\text{sta}}^s$	列车容量/车站 s 的容量
$\gamma_{\text{tra}}/\gamma_{\text{sta}}$	列车满载系数/车站拥挤系数, 运营公司可根据实际情况, 设定合适系数, 以此调节列车和站台的拥挤程度
$A_{i, s}^{\mathfrak{R}}/D_{i, s}^{\mathfrak{R}}$	$\mathfrak{R}$ 方向上列车 i 在车站 s 的计划到达/发车时间
$\lambda_{s, s'}^{\mathfrak{R}}(t)$	t 时段车站外各OD乘客的到达需求
$p_{s, s'}^{\mathfrak{R}, \text{X}}(t)$	$\mathfrak{R}$ 方向, t 时段末车站 s 实际进站的各OD乘客数
$p_{s, s'}^{\mathfrak{R}, \text{X}'}(t)$	$\mathfrak{R}$ 方向, t 时段末车站 s 被限流的各OD乘客数
$p_{s, s'}^{\mathfrak{R}, \text{L}'}(t)$	$\mathfrak{R}$ 方向, t 时段末站外各OD累计客流量, 即总需求数
$p_{s, s'}^{\mathfrak{R}, \text{C}}(\tau)$	$\mathfrak{R}$ 方向, τ 时刻车站 s 到达站台的各OD乘客数, 服从均匀分布
$p_{s, s'}^{\mathfrak{R}, \text{L}}(\tau)$	$\mathfrak{R}$ 方向, τ 时刻站台的各OD累计客流量
$p_{i, s, s'}^{\mathfrak{R}, \text{A}}$	$\mathfrak{R}$ 方向, 从列车 i 下车的各OD乘客数量
$p_{i, s, s'}^{\mathfrak{R}, \text{B}}$	$\mathfrak{R}$ 方向, 在站台 s 可以乘上列车 i 的各OD乘客数
$p_{i, s, s'}^{\mathfrak{R}}$	$\mathfrak{R}$ 方向, 列车 i 上各OD乘客数量
$p_{i, s, s'}^{\mathfrak{R}, \text{F}}$	$\mathfrak{R}$ 方向, 列车 i 离开当前车站时, 各OD的滞留数量
θ_i/ν_k	0-1变量, 表示从正线返回车辆段的列车 i (下线列车), 或从车辆段发车的列车 k (上线列车)
$e_{i, s}^{\mathfrak{R}}$	表示清客集合, 由故障列车、救援列车和小交路折返列车组成
决策变量	
$a_{i, s}^{\mathfrak{R}}/d_{i, s}^{\mathfrak{R}}$	$\mathfrak{R}$ 方向, 列车 i 在车站 s 的到达或发车时刻, $i \in N_{\text{service}}^{\mathfrak{R}}$
$u_{i, s}^{\mathfrak{R}}$	0-1变量, 若列车 i 在车站 s 不停站通过, 则取值为1, 否则, 取值为0, $i \in N_{\text{service}}^{\mathfrak{R}}$
$q_{i, k}^{\mathfrak{R}}$	0-1变量, 若 $\mathfrak{R}$ 方向的列车 i 和反方向的列车 k 共用同一个车底, 则取值为1, 否则为0
$\eta_{s, s'}^{\mathfrak{R}}(t)$	小时段 t 内, 车站 s 的限流率, 即实际不能进站的乘客数量 $p_{s, s'}^{\mathfrak{R}, \text{X}}(t)$ 与进站客流需求数量比
$w_{i, s}^{\mathfrak{R}}$	0-1变量, 位于车站 s 的备车若从 $\mathfrak{R}$ 方向加开, 且担任第 i 列车, 则取值为1, 否则为0, $s \in N^B$
$x_{i, s}^{\mathfrak{R}}$	0-1变量, $\mathfrak{R}$ 方向列车 i 若在车站 s 折返(小交路列车), 则为1, 否则为0, $i \in N_{\text{service}}^{\mathfrak{R}, \text{ST}}$, $s \in N^{\text{ST}}$

注: 本研究中 t 时段指的是5 min; τ 采用的时间粒度是1 s。

式(6)为区间运行时分约束, 由于列车的区间运行时分受到列车的技术速度和乘客需求的影响, 列车在各区间的运行时间应该满足上下限的要求。式(7)为停站时分约束, 存在3种情形: 当列车跳停当前车站时, 停站时分为0; 列车在当前车站清客时, 停站时分应大于等于 $\text{dw}_{\mathfrak{R}, \min}^{s, 2}$; 否则, 停站时分应大于等于 $\text{dw}_{\mathfrak{R}, \min}^{s, 1}$ 。式(8)为列车小交路运行的核心约束, 涵盖折返时间与列车上下线逻辑。当 $q_{k, i}^{\mathfrak{R}} = 1$ 时, $\theta_i = 0$, $\nu_k = 0$, 且 $\mathfrak{R}$ 方向与 $\mathfrak{R}'$ 方向列车的折返时间差需满足最小阈值约束 $a_{k, s}^{\mathfrak{R}'} - d_{i, s}^{\mathfrak{R}} \geq tr^s$; 当 $q_{k, i}^{\mathfrak{R}} = 0$ 时, 则不限制 θ_i 、 ν_k 的取值。式(9)为列车发发间隔和发到间隔约束。式(10)表示故障发生前, 各列车在各车站到发时刻均按计划时刻表执行, F^s 表示列车故障发生时刻。

(2) 运行调整方案约束。

$$u_{i, s}^{\mathfrak{R}} = 1 \quad s = \{1, n^s\}, i \in N_{\text{service}}^{\mathfrak{R}} \quad (11)$$

$$u_{i, s}^{\mathfrak{R}} + u_{i, s+1}^{\mathfrak{R}} \geq 1 \quad i \in N_{\text{service}}^{\mathfrak{R}}, s \in N^s \quad (12)$$

$$u_{k, s}^{\mathfrak{R}} + u_{i, s'}^{\mathfrak{R}} \geq 1 \quad i = k + 1, i, k \in N_{\text{service}}^{\mathfrak{R}}, s, s' \in N^s \quad (13)$$

$$d_{i, s}^{\mathfrak{R}} - a_{i, s}^{\mathfrak{R}} \geq T' \quad i \in N_{\text{service}}^{\mathfrak{R}}, s \in N^s \quad (14)$$

$$a_{k, s}^{\mathfrak{R}'} - d_{i, s}^{\mathfrak{R}} \geq tr^s \quad x_{i, s}^{\mathfrak{R}} = 1, i, k \in N_{\text{service}}^{\mathfrak{R}, \text{ST}}, s \in N^{\text{ST}} \quad (15)$$

$$a_{i, s}^{\mathfrak{R}} > F^s + T'' \quad w_{i, s}^{\mathfrak{R}} = 1, i \in N_{\text{service}}^{\mathfrak{R}}, s \in N^B \quad (16)$$

$$w_{i, s}^{\mathfrak{R}} = 0 \quad a_{i, s}^{\mathfrak{R}} \in [F^s, F^s + T''], s \in S_{F^s}^{\mathfrak{R}} \in N^B, i \in N_{\text{service}}^{\mathfrak{R}} \quad (17)$$

$$x_{i, s}^{\mathfrak{R}} = 0 \quad a_{i, s}^{\mathfrak{R}} \in [F^s, F^s + T''], s \in S_{F^s}^{\mathfrak{R}} \in N^B, i \in N_{\text{service}}^{\mathfrak{R}} \quad (18)$$

式(11)—(13)表示停站方案约束, 即首末站不允许跳停、同一车次不允许连续跳停相邻的2个车站、

同一车站不允许被两个连续的车次跳过。式(14)表示救援区段后方的第一列列车的停站时分应该不小于 T' ，以避免该列车进入救援区段， T' 为该列车扣停时长，即列车救援时长。式(15)表示如果列车 i 为小交路列车，车站 s 为小交路折返车站，则需满足最小折返时间要求。式(16)表示备用列车的最早加开时刻应该满足备车最小准备时间 T'' 的要求。式(17)–(18)分别表示备用列车和小交路列车的加开/折返位置，需满足不在故障救援区段内的要求。

(3) 客流约束。

$$p_{s, s'}^{\mathcal{R}, L'}(t) = \begin{cases} \lambda_{s, s'}^{\mathcal{R}}(t) & t = 1 \\ \lambda_{s, s'}^{\mathcal{R}}(t) + p_{s, s'}^{\mathcal{R}, X'}(t-1) & t \neq 1 \end{cases} \quad (19)$$

$$s < s' \in N^s, t \in T$$

$$p_{s, s'}^{\mathcal{R}, X}(t) = p_{s, s'}^{\mathcal{R}, L'}(t) (1 - \eta_{s, s'}^{\mathcal{R}}(t)) \quad (20)$$

$$s < s' \in N^s, t \in T$$

$$p_{s, s'}^{\mathcal{R}, X'}(t) = p_{s, s'}^{\mathcal{R}, L'}(t-1) - p_{s, s'}^{\mathcal{R}, X}(t) \quad (21)$$

$$s < s' \in N^s, t \in T$$

$$\begin{cases} \gamma_{\text{tra}} C_{\text{tra}} \geq p_{i, s}^{\mathcal{R}} \\ p_{i, s}^{\mathcal{R}} = p_{i, s}^{\mathcal{R}, B} & s = 1 \\ p_{i, s}^{\mathcal{R}} = p_{i, s-1}^{\mathcal{R}} - p_{i, s}^{\mathcal{R}, A} + p_{i, s}^{\mathcal{R}, B} & s \neq 1 \end{cases} \quad (22)$$

$$s \in N^s, i \in N_{\text{service}}^{\mathcal{R}}$$

$$\begin{cases} p_{s, s'}^{\mathcal{R}, L}(\tau) = p_{s, s'}^{\mathcal{R}, L}(\tau-1) + p_{i, s, s'}^{\mathcal{R}, A}(\tau) - p_{i, s, s'}^{\mathcal{R}, B}(\tau) + p_{s, s'}^{\mathcal{R}, C}(\tau) \\ \gamma_{\text{sta}} C_{\text{sta}} \geq \sum_{s'=s+1}^{n'} p_{s, s'}^{\mathcal{R}, L}(\tau) \end{cases} \quad (23)$$

$$s < s' \in N^s, t \in n, \tau \in [t_{\text{unit}}(t-1) + 1,$$

$$t_{\text{unit}}t], i \in N_{\text{service}}^{\mathcal{R}}$$

$$p_{i, s}^{\mathcal{R}, B} =$$

$$\begin{cases} \min \left\{ \gamma_{\text{tra}} \cdot C_{\text{tra}} - \left(p_{i, s-1}^{\mathcal{R}} - \sum_{s' \in N^s} p_{i, s, s'}^{\mathcal{R}, A} \right), \right. \\ \left. \sum_{s' \in N^s} p_{i, s, s'}^{\mathcal{R}, F} + \sum_{s' \in N^s} \sum_{\tau = a_{i-1, s}^{\mathcal{R}}}^{a_{i, s}^{\mathcal{R}}} p_{s, s'}^{\mathcal{R}, C}(\tau) \right\} u_{i, s'}^{\mathcal{R}} = 0 \\ 0, u_{i, s'}^{\mathcal{R}} = 1 \end{cases} \quad (24)$$

$$s < s' \in N^s, i \in N_{\text{service}}^{\mathcal{R}}$$

$$p_{i, s, s'}^{\mathcal{R}, F} = p_{i, s'}^{\mathcal{R}, L}(\tau) - p_{i, s, s'}^{\mathcal{R}, B} \quad i \in N_{\text{service}}^{\mathcal{R}}, \quad (25)$$

$$\tau = d_{i, s}^{\mathcal{R}}, s < s' \in N^s$$

$$p_{i, s'}^{\mathcal{R}, A} = \begin{cases} p_{i, s'}^{\mathcal{R}} & e_{i, s}^{\mathcal{R}} = 1, u_{i, s'}^{\mathcal{R}} = 0 \\ \sum_{s=1}^{s'-1} p_{i, s, s'}^{\mathcal{R}, B} & e_{i, s}^{\mathcal{R}} = 0, u_{i, s'}^{\mathcal{R}} = 0 \\ 0 & e_{i, s}^{\mathcal{R}} = 0, u_{i, s'}^{\mathcal{R}} = 1 \end{cases} \quad (26)$$

$$s < s' \in N^s, i \in N_{\text{service}}^{\mathcal{R}}$$

式(19)为 t 时段末车站 s 的总累积乘客数的计算方法。式(20)表示 t 时段末车站 s 允许进站的乘客数。式(21)为 t 时段末车站 s 的被限流乘客数，可由累积乘客数减去允许进站乘客数计算得到。式(22)表示列车容量约束，第一项为当前列车的实际在车人数不能超过列车最大满载人数；第二项表示各列车在起点车站的在车人数应等于上车人数，列车在中间车站的在车人数应等于上一车站的在车人数减去当前车站的下车人数加上上车人数，其中 $p_{i, s}^{\mathcal{R}} = \sum_{s'=1}^{s'} p_{i, s, s'}^{\mathcal{R}}$ 。式(23)表示站台容量约束，时刻 τ 下的站台累积人数受上一时刻站台累积人数、当前时刻列车上车/下车人数、当前时刻从站外到达站台人数的影响。式(24)表示当前列车的上车人数，当 $u_{i, s'}^{\mathcal{R}} = 0$ 时，取列车剩余容量与期望上车人数中的较小值；当 $u_{i, s'}^{\mathcal{R}} = 0$ 时，则为0。式(25)为列车 i 离开车站 s 时的滞留乘客数量。式(26)表示当前列车的下车人数，根据列车 i 在车站 s' 是否清客及跳停分情况计算。

3 求解算法

3.1 模型分析

上述模型的决策变量包括：①行车计划调整(小交路、加开备车、停站方案)；②时刻表(列车到发时分)；③车底接续；④客流管控。决策变量复杂度分析如表2所示。由于车站数量和上下行的车次数量无法更改，故该模型的复杂度受小交路和备车加开方案数量影响较大，呈现指数增长的趋势。

表2 决策变量复杂度分析

Tab.2 Complexity analysis of decision variables			
类型	变量类型	变量	数量
小交路方案	0-1变量	$x_{i, s}^{\mathcal{R}}$	$n^{\text{ST}} \cdot (n_{\text{service}}^{\text{up, ST}} + n_{\text{service}}^{\text{down, ST}})$
备车加开方案	0-1变量	$w_{i, s}^{\mathcal{R}}$	$2 \cdot n^{\text{B1}} \cdot (I_{\text{total}}^{\text{up}} + I_{\text{total}}^{\text{down}})$
停站方案	0-1变量	$u_{i, s}^{\mathcal{R}}$	$N \cdot (I_{\text{total}}^{\text{up}} + I_{\text{total}}^{\text{down}})$
时刻表	整数变量	$a_{i, s}^{\mathcal{R}}$	$N \cdot (I_{\text{total}}^{\text{up}} + I_{\text{total}}^{\text{down}})$
时刻表	整数变量	$d_{i, s}^{\mathcal{R}}$	$N \cdot (I_{\text{total}}^{\text{up}} + I_{\text{total}}^{\text{down}})$
车底接续	0-1变量	$q_{i, k}^{\mathcal{R}}$	$2 \cdot I_{\text{total}}^{\text{up}} \cdot I_{\text{total}}^{\text{down}}$
客流管控	连续变量	$\eta_s^{\mathcal{R}}(t)$	$2 \cdot N \cdot (T t_{\text{unit}})$

3.2 算法框架

由于上述模型为非线性模型，属于NP-hard问题，而考虑到运行调整问题对求解时效性具有较高的要求，既有研究多采用启发式算法求解该类问题。因此，本研究采用基于并行求解策略的双层

暴力搜索-遗传算法(BF-GA)进行求解,算法框架如图2所示。

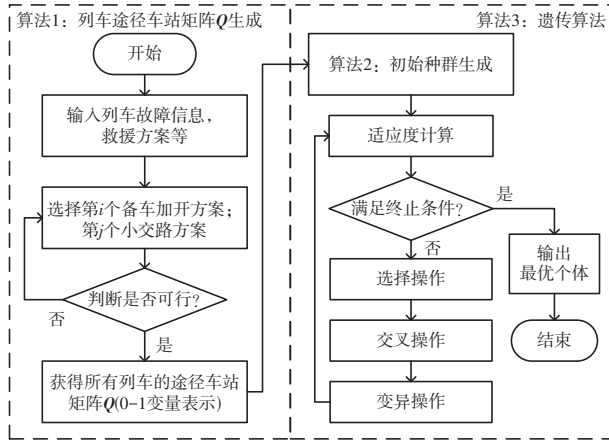


图2 算法框架

Fig.2 Algorithm framework

上层暴力搜索(BF)出满足安全约束的所有可行备车加开方案和小交路方案,生成待优化列车的途经站点矩阵。由此将原问题分解为多个子问题,以便于下层的求解。针对上层得到每个可行的备车和小交路方案,下层设计遗传算法(GA)进行求解,得到优化后的时刻表和限流方案。

3.3 生成列车途经车站矩阵 Q

在给定救援组织方案下,采用暴力搜索算法将可行的备车加开方案和小交路方案转化为列车途经车站矩阵 Q ,形式如下所示。其中,行表示车次,列表示车站,若矩阵中的 $q_{i,s}$ 取值为1,表示当前车次 i 经过车站 s ,若 $q_{i,s}$ 取值为0,表示当前车次不经过该车站。生成方法见图2中的算法1。

$$Q = [Q^{\text{up}}, Q^{\text{down}}] =$$

$$\begin{bmatrix} q_{1,1} & q_{1,2} & \cdots & q_{1,s} & \cdots & q_{1,n^s-1} & q_{1,n^s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ q_{i,1} & q_{i,2} & \cdots & q_{i,s} & \cdots & q_{i,n^s-1} & q_{i,n^s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ q_{I_{\text{total}}^{\text{R}},1} & q_{I_{\text{total}}^{\text{R}},2} & \cdots & q_{I_{\text{total}}^{\text{R}},s} & \cdots & q_{I_{\text{total}}^{\text{R}},n^s-1} & q_{I_{\text{total}}^{\text{R}},n^s} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} q_{1,1} & q_{1,2} & \cdots & q_{1,s} & \cdots & q_{1,n^s-1} & q_{1,n^s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ q_{i,1} & q_{i,2} & \cdots & q_{i,s} & \cdots & q_{i,n^s-1} & q_{i,n^s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ q_{I_{\text{total}}^{\text{R}},1} & q_{I_{\text{total}}^{\text{R}},2} & \cdots & q_{I_{\text{total}}^{\text{R}},s} & \cdots & q_{I_{\text{total}}^{\text{R}},n^s-1} & q_{I_{\text{total}}^{\text{R}},n^s} \end{bmatrix}$$

3.4 初始解

生成初始解的基本思想:根据故障时长,利用贪婪算法,顺延时刻表。以上层暴力搜索得到的可行备车加开方案和小交路方案为基础,假设所有列车都采用站站停方式。每次决策都采用当前能使时刻表可行的最小的决策变量值。考虑到遗传算法需要保证基因的多样性,便于后续交叉、变异等操作,给决策变量取值时,在满足约束条件的前提下,通过引入随机数的方式,生成初始种群。

3.5 遗传算法

遗传算法的基本原理即模仿生物体的遗传,基于生成的初始解,采用编码、适应度计算、选择、交叉、变异、解码等操作,适应度较小的个体被淘汰,最后留下适应度较强的个体,当达到算法设定的迭代次数时,遗传算法即可终止,输出最优解。

(1) 编码方式。为减少不可行解的数量,用列车区间运行时分、停站时分、首站发车间隔表示模型中的列车到发时刻。染色体结构由区间运行时分、停站时分、发车间隔、限流率、跳停方案、列车接续关系构成。所有的决策变量均采用浮点数编码,将个体的每个基因用一个位于一定区间范围的浮点数来表示,可提高求解精度,便于较大空间的遗传算法搜索,可改善算法的计算复杂性,提高运算效率。

(2) 选择。提出精英选择与随机概率选择相结合的方式,可将适应度最高的个体基因保留下来,对于适应度较低的个体,也设置了一定的保留概率,从而不至于忽略潜在的最优解。

(3) 交叉。考虑到本研究编码方式为浮点数编码,采用算术交叉来产生新个体。

(4) 变异。为使遗传算法具有局部搜索的能力,并防止出现未成熟收敛现象,以一定概率进行保守的基因突变,即允许基因小幅度变化,加速向最优解收敛。同时,以一定概率进行激进的基因突变,即允许基因大幅度变化,防止陷入局部最优。

4 算例分析

4.1 算例数据

以一条包含10个车站的地铁线路为例,该线路起终点站(车站A和车站J)、车站D、车站F和车站G具有存车线兼折返功能,且车站G的存车线上存有

一列备用列车,地铁线路示意图如图3所示。某工作日早高峰期间,上行的车次3在车站E突发故障,由前方车次2前去救援,并牵引至车站F的存车线。针对上述故障场景,在处理器为Intel(R) Core(TM) i7-8565U CPU @ 1.80GHz 2.00 GHz,内存为8 GB的笔记本电脑上使用Python语言编程,求解非线性混合整数规划模型,所得结果可在保证行车安全、降低站台拥挤的同时,指导调度员的行车指挥工作。

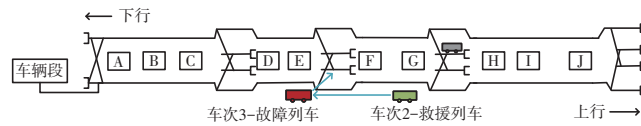


图3 地铁线路示意图
Fig.3 Metro lines

案例涉及的参数如下:列车容量为1 400人;站台容量为800人;最小发车间隔为180 s;列车最小/最大区间运行时分与区间距离相关;最小/最大停站时分分别为30 s和60 s;目标函数的权重为 α : β : $\gamma=1:1:2\ 000$ (其合理性将在文末敏感性分析中证明);种群规模为50,迭代次数为100 000轮。

4.2 优化结果分析

根据救援组织方案,修改模型参数,达到采用或不采用与某一策略相关的公式来实现不同方法下的行车计划调整和客流管控方案优化,各方法优化结果如表3所示。其中,方法1中的无行车计划调整指的是不采取任何运行调整,仅顺延时刻表,不优化客流管控指的是不优化各时段进站客流量,按照站台容量上限让乘客进入车站。方法6是提出的协同优化方法,即行车计划调整和客流管控同时进

行优化。采用提出的方法,可在5 min内求得收敛解,满足列车故障情形下列车调度需求。

各方法的列车运行图如图4所示。其中,绿色运行线表示故障列车,红色运行线表示救援列车,蓝色运行线表示上行列车,黄色运行线表示下行列车,圆圈表示被列车跳停的车站,带圆圈的数字表示上行方向的车次号,不带圆圈的表示下行方向的车次号。

方法6的优化结果如图4f所示,基于“前车救援-就近存放”的救援组织方案,备用列车加开方案为临近车站G存车线上的一列备用列车于上行方向的车站G加开,并担任上行方向的车次⑤。小交路运行方案为下行方向的车次5运行至车站G,利用车站G的折返线折返至上行方向,并作为上行方向的车次⑥继续运行。列车跳停车站大多为客流量较小的车站,且跳停车站客流量占总客流需求比率8.0%以内,从而可将有限的列车运力分配给客流量较大的车站。方法6较无客流管控方法相比,可将站台累积人数控制在安全容量范围内。与方法1相比,方法6可使全线乘客的总等待时间降低23.42%,人均站外和站台等待时间分别下降了18.08%和28.72%。由于故障列车和救援列车下线,提出的加开备车和组织小交路折返方法能够很好地弥补线路车底不足的情形,可以有效缩短上/下行的行车间隔,进而降低乘客等待时间。此外,由于救援列车和故障列车的清客车站分别为上行方向的车站G和车站E,救援影响的区段为[E, F, G],该区段内的客流难以在短时间内运走,导致对应各个站台乘客总(人均)等待时间仍然较高。

表3 各方法优化结果
Tab.3 Optimization results of each method

救援组织 方案	方法	备车	小交路	跳停	客流 管控	站外等待 时间/s	站外人均 等待时间/s	站台等待 时间/s	站台人均 等待时间/s	乘客总等待 时间优化率/%
前车救援- 就近存放	方法1: 无行车计划调整- 不优化客流管控	无	无	无	不优化	24 420 601	365	37 505 707	491	0.00
	方法2: 无行车计划调整- 优化客流管控	无	无	无	优化	22 233 495	293	36 795 995	454	4.68
	方法3: 有行车计划调整 (无小交路)-优化客流管控	上行-车站G	无	有	优化	22 846 179	329	29 232 286	353	15.90
	方法4: 有行车计划调整 (无备车)-优化客流管控	无	下行车次5- 车站G	有	优化	23 370 938	293	32 935 268	378	9.08
	方法5: 有行车计划调整- 不优化客流管控	上行-车站G	下行车次5- 车站G	有	不优化	19 260 881	296	29 601 851	362	21.10
	方法6: 有行车计划调整- 优化客流管控	上行-车站F	下行车次5- 车站G	有	优化	18 564 691	299	28 857 371	350	23.42

注:各方法优化结果为基于求解时间设定为5 min获得的结果;优化率的计算基准是“无行车计划调整-不优化客流管控”方法。

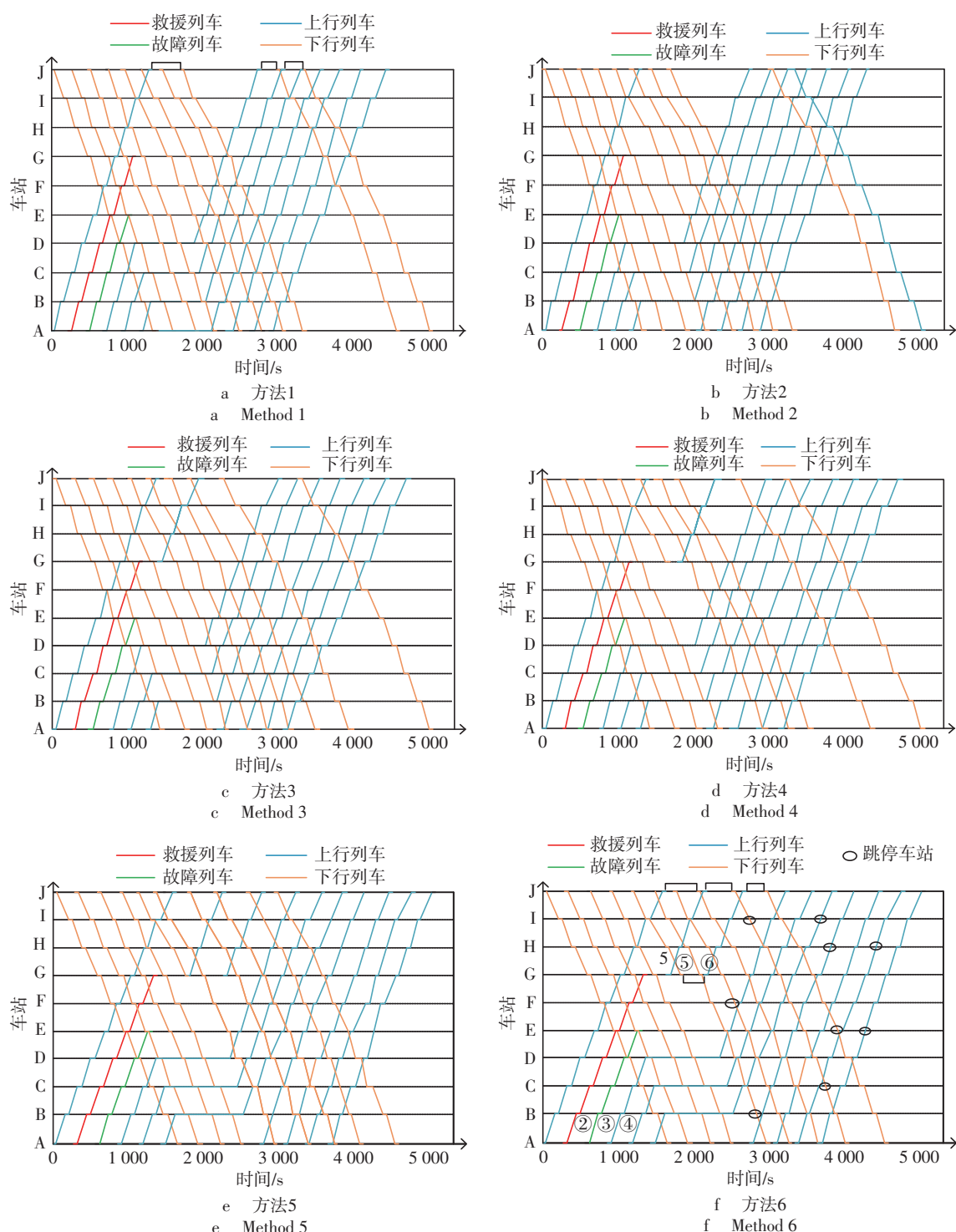


图4 各方法的列车运行图

Fig.4 Train working diagrams of different menthods

较不优化客流管控的方法5相比,方法6的优化效果更好。优化客流管控方法可以更高程度地使能力和需求相匹配,实现本线路乘客总等待时间进一步降低了2.32%。由于模拟的列车故障场景为客流需求较大的高峰时段,虽然客流管控措施存在优

化效果,但未能充分显现。需要注意的是,方法6的站台乘客人均等待时间降低了3.31%,但方法6的站外等待时间比方法5更低,人均站台等待时间却更高,这是因为不同方法下不同的进站客流量导致的。

在优化客流管控前提下,分析不同调整优化结

果。①方法2没有采取任何调整,即使采取优化客流管控方法,站台乘客的等待时间仍然比较大,优化效果也很有限,总等待时间仅优化了4.68%。②方法3和方法4相比,加开备车比组织小交路折返的优化效果更好,具有7%左右的优化率,虽然备车和小交路列车的始发和终到车站均相同,但是下行方向小交路列车在折返前,需要在折返车站清客,这会导致站台容量突增,为保证站台安全,相应的站外限流率及限流时长也会提高。此时,站台和站外乘客的等待时间便会增加。而备用列车的运用受限于运营线路的车辆购置成本以及存车线等配线的设计,运营公司需综合考虑备车的存放。

权重系数 γ 对目标值的影响如图5所示。权重系数 γ 是对研究时段末未进站和未上车乘客的惩罚,一定程度上会影响结果中乘客实际总等待时间的优化效果。图5横坐标表示权重系数 γ 取值为[0, 100, 200, ..., 6 600],纵坐标对应不同 γ 取值下乘客总等待时间的变化情况。由图5可以看出,总等待时间会随着 γ 的增大而减小。 $\gamma = 2\,000$ 是这个趋势的拐点,乘客的总等待时间优化效果相对较优。此外,乘客在站台和站外等待的感知时间一般是一致的,故不再专门进行灵敏度分析。该结果证明了将目标函数的权重系数 α, β, γ 分别设置为1, 1, 2 000的合理性。

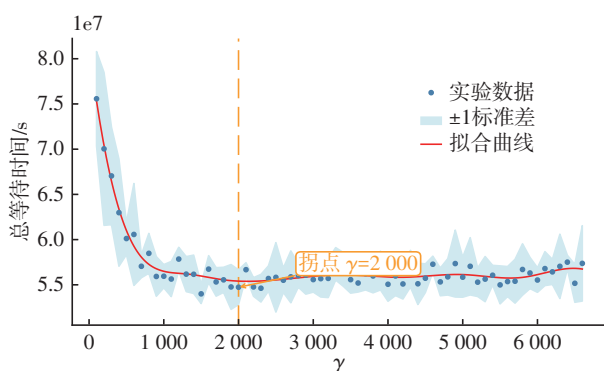


图5 权重系数 γ 对目标值的影响

Fig.5 Influence of weight coefficients γ on target values

5 结论

为降低城市轨道交通列车故障对运营公司和出行乘客的负面影响,采用加开备车、组织列车小交路、跳停和调整时刻表策略,并辅以客流管控手段

调节进站需求,构建考虑车底周转的混合整数非线性协同优化模型,最小化乘客站外和站台等待时间的加权和。根据模型具有非线性、求解空间大等特点,设计了双层的暴力搜索和遗传算法进行求解。

通过算例验证本研究模型和算法的有效性。研究结果表明:①与仅顺延时刻表方法相比,协同优化方法可使全线乘客的总等待时间降低23.42%;②相较于不采取任何行车组织方法,仅加开备用列车和仅组织列车小交路运行的方法分别能使乘客等待时间降低15.90%和9.08%。然而,小交路列车在折返车站清客时会导致站台人数增加,可能引发站外限流及乘客等待时间上升;备用列车的运用受车辆成本和配线设计限制,需综合考虑其存放等问题;③协同优化方法在提高故障情形下线路输送能力的同时,还可调节各时段的进站需求,提升线路服务水平。但受救援影响区段客流短时间难运走、不同方法下进站客流量差异等因素影响,部分站台乘客总(人均)等待时间仍较高,需结合实际场景进一步优化策略适用性。

参考文献:

- [1] ZHU Q Z, BAI Y, YANG L L, et al. Collaborative Optimization of Rescue Operation and Timetable Rescheduling under Metro Train Failure[J]. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2023, 11(1): 2203847.
- [2] CACCHIANI V, HUISMAN D, KIDD M, et al. An Overview of Recovery Models and Algorithms for Real-Time Railway Rescheduling[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, 63: 15–37.
- [3] 郭 戢. 城市轨道交通等间隔行车调整方法优化设计[J]. *铁道运输与经济*, 2016, 38(11): 87–92.
GUO Jian. Optimization of Constant Headway Regulation Method in Urban Rail Transit[J]. *Railway Transport and Economy*, 2016, 38(11): 87–92.
- [4] LIAO J L, YANG G, ZHANG S W, et al. A Deep Reinforcement Learning Approach for the Energy-Aimed Train Timetable Rescheduling Problem under Disturbances[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(4): 3096–3109.
- [5] 江志彬, 季婷婷. 基于客流影响的城市轨道交通列车运行调整策略[J]. *城市轨道交通研究*, 2014, 17(1): 39–42.
JIANG Zhibin, JI Tingting. URT Train Regulation Strategy

- Based on Passenger Flow Influence[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(1): 39–42.
- [6] 肖 红, 刘书君, 王孝坤. 突发事件下地铁网络韧性评估及恢复策略研究[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(2): 161–171.
XIAO Hong, LIU Shujun, WANG Xiaokun. Resilience Assessment and Recovery Strategy of Metro Network under Emergencies[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(2): 161–171.
- [7] 白治翔, 冯 琳, 李 博, 等. 临时天窗下重载铁路列车运行调整两阶段优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(5): 131–140.
BAI Zhixiang, FENG Lin, LI Bo, et al. Two-Stage Optimization of Train Operation Adjustment under Temporary Time Window for Heavy-Haul Railways[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(5): 131–140.
- [8] ZHAN S G, WONG S C, SHANG P, et al. Integrated Railway Timetable Rescheduling and Dynamic Passenger Routing during a Complete Blockage[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2021, 143: 86–123.
- [9] 周玮腾, 李卓一, 冉江亮, 等. 基于组合策略的城市轨道交通运营中断列车运行调整模型[J/OL]. 西南交通大学学报, 1–10[2026-06-23]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1277.U.20241231.1438.002>.
- [10] 朱巧珍, 柏 赞, 闫冬阳, 等. 故障救援情形下的地铁列车调度调整模型[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(1): 166–174.
ZHU Qiaozhen, BAI Yun, YAN Dongyang, et al. Metro Train Scheduling Adjustment Model in the Case of Failure Rescue[J]. China Railway Science, 2021, 42(1): 166–174.
- [11] HU L, LI D J, REN Z C. Collaborative Train Timetabling and Passenger Flow Control in Oversaturated Metro Lines Considering State-Dependence[J]. Expert Systems with Applications, 2025, 261: 125436.
- [12] SHI J G, YANG L X, YANG J, et al. Cooperative Passenger Flow Control in an Oversaturated Metro Network with Operational Risk Thresholds[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 107: 301–336.
- [13] 郇 宁, 张金萌, 姚恩建. 考虑效率与公平的城轨网络客流协同控制优化模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(6): 1148–1155.
HUAN Ning, ZHANG Jinmeng, YAO Enjian. Coordinated Optimization Model for Passenger Flow Control in Metro Network Considering both Efficiency and Equity[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(6): 1148–1155.
- [14] LIANG J P, REN M X, HUANG K, et al. Data-Driven Timetable Design and Passenger Flow Control Optimization in Metro Lines[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 166: 104761.
- [15] 孙晟凯, 李思杰, 刘志钢, 等. 基于客流与列车动态交互的多站协同客流管控策略评价[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(12): 116–125.
SUN Shengkai, LI Sijie, LIU Zhigang, et al. Evaluation on Multi-Station Collaborative Passenger Flow Control Strategy Based on Dynamic Interaction between Passenger Flow and Trains[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(12): 116–125.
- [16] 王培恒, 杨立兴, 李树凯, 等. 考虑换乘站客流疏解的地铁列车跳站与客流控制协同优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(6): 196–205.
WANG Peiheng, YANG Lixing, LI Shukai, et al. Collaborative Optimization of Train Skip-Stop and Passenger Flow Control on Subway Line Considering Passenger Evacuation at Transfer Stations[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(6): 196–205.
- [17] 刘泓茗, 刘皓玮, 郑泽熙. 基于时空协同优化的多目标城市轨道交通延误恢复研究[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(1): 109–114.
LIU Hongming, LIU Haowei, ZHENG Zexi. Research on Multi-Objective Urban Rail Transit Delay Recovery Based on Spatio-Temporal Collaborative Optimization[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(1): 109–114.
- [18] 赵丹丹, 柏 赞, 曹耘文, 等. 多编组模式下城市轨道交通列车救援组织方案优化研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(3): 42–46.
ZHAO Dandan, BAI Yun, CAO Yunwen, et al. Optimization of Urban Rail Transit Train Rescue Organization Scheme under Multi-Formation Mode[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(3): 42–46.

(责任编辑 汪沁莹)