doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.05.010

# 基于虚拟编组的城轨线路单向运营中断场景下的列车运行调整研究

周玮腾[1]，高　婕[1]，韩　波[2]，鲁　放[1]，韩宝明[1]，胡江枫[1]
（1. 北京交通大学交通运输学院，北京 100044；2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司，北京 100082）

**摘　要：**针对城市轨道交通线路单向运营发生中断时，线网运输能力降低、大面积乘客滞留导致运营安全风险增加的问题，构建基于虚拟编组技术的列车运行调整模型，通过优化模型刻画基于虚拟编组的列车运行调整过程，并结合双层模拟退火-遗传算法进行求解。最后，以某城市地铁线路单向中断为例，对本文提出的策略进行验证。研究结果表明：与传统反向行车列车运行调整技术相比，基于虚拟编组技术的列车反向运行调整策略可使乘客总等待时间减少 16.4%，乘客在站等待时间减少 14.1%，滞留乘客人数明显减少，列车运行调整的灵活性与效率显著提升。研究结果可为运营中断场景下的列车运行调整提供参考。

**关键词：**城市轨道交通；列车运行调整；虚拟编组；单向中断；反向行车
**中图分类号：**U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)05-0072-11

# Research on Train Operation Adjustment in Urban Rail Lines under Unidirectional Operation Interruption Scenarios Based on Virtual Coupling Technology

**ZHOU Weiteng[1], GAO Jie[1], HAN Bo[2], LU Fang[1], HAN Baoming[1], HU Jiangfeng[1]**
(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;
2. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082)

**Abstract:** To address the issues of reduced network transport capacity and increased operational safety risks caused by large-scale passenger stranding when unidirectional service interruptions occur on urban rail transit lines, a train rescheduling model based on virtual coupling technology is constructed, and the optimization model is utilized to characterize the train rescheduling process under virtual coupling technology. A hybrid two-layer simulated annealing-genetic algorithm is employed to solve the problem. Finally, taking a case of unidirectional disruption in a city's subway line as an example, the feasibility and effectiveness of the proposed strategy are verified. The results demonstrate that compared with the traditional reverse operation strategy, the reverse operation strategy under virtual coupling technology reduces passenger total waiting time by 16.4%, passenger waiting time at stations by 14.1%, and significantly decreases the number of stranded passengers. Moreover, the flexibility and efficiency of train operation adjustments are substantially enhanced. The findings provide a modeling and optimization approach for train rescheduling under similar operational disruption scenarios.

**Keywords:** urban rail transit; train rescheduling; virtual coupling; unidirectional interruption; reverse operation

收稿日期：2025-01-03　修回日期：2025-04-30

第一作者：周玮腾，男，博士，高级实验师，主要从事城市轨道交通系统运营管理研究，zhouwt@bjtu.edu.cn
通信作者：鲁放，男，博士，高级工程师，主要从事轨道交通规划、运营管理和行业研究，flu@bjtu.edu.cn

基金项目：中央高校基本科研业务费(2024JBZX030)；国家自然科学基金面上项目(72471023)
引用格式：周玮腾，高婕，韩波，等. 基于虚拟编组的城轨线路单向运营中断场景下的列车运行调整研究[J]. 都市快轨交通，2025，38(5)：72–82.
ZHOU Weiteng, GAO Jie, HAN Bo, et al. Research on train operation adjustment in urban rail lines under unidirectional operation interruption scenarios based on virtual coupling technology[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(5): 72–82.

在城市轨道交通系统中，突发事件所引起的线路故障导致运营中断，进而造成运输能力下降、大量乘客滞留，并因系统封闭、人流密集而加剧安全风险，甚至危及生命财产安全[1]。因此，快速、高效地进行列车运行调整，恢复运营秩序，对轨道交通运营安全至关重要。

目前传统的面向区间中断运行的列车调整问题，其应对策略主要集中在小交路运行、反向行车[2-7]等。主要的研究内容集中在针对各单一策略或组合策略下的列车运行调整优化模型的构建和求解，通过优化模型实现列车运行计划的调整。但上述策略均属于传统运输组织模式下的运行调整，受固定编组、线路能力等条件的限制，调整效率相对低下。

近年来，虚拟编组技术得到了进一步发展并逐渐运用于城市轨道交通列车运输组织的各个层面。在英国西南干线、日本新干线进行的虚拟编组列车运行仿真实验表明，虚拟编组在所有测试场景中均能显著减少列车间隔，从而提升系统运能[8-9]。随着虚拟编组技术的发展成熟，通过车车无线通信保持最小安全间隔追踪运行[10]，实时调整列车编组和运行间隔，采用虚拟重联、解编策略等方法，为运营中断的列车运行调整问题提供了新的解决思路[11-12]。基于该思路，部分研究[13-14]通过构建虚拟编组控制策略，在不同中断条件如运营中断或高需求情况下能实现精确的列车调度优化，有效提升了系统对突发事件的响应能力与资源配置效率，保障运输系统的安全稳定运行；同时展开基于虚拟编组的城市轨道交通列车调整建模研究[15-16]，为列车重联、动态编组与运行调整提供了理论基础和实证验证。

为了进一步提升城市轨道交通单向区间中断场景的应对能力，保障运营安全，本文提出了采用虚拟编组技术应对城轨线路单向运营中断场景下的列车运行调整方法，即利用中断区间的渡线择机折返实现双方向列车虚拟重联编组通过，并构建了基于列车虚拟重联的运行图调整优化模型，设计并改进算法实现模型的高效求解。

# 1 基于虚拟编组的列车运行调整策略

## 1.1 问题描述

本文研究情景如图 1 所示，假设中断发生在线路上行方向，中断区间为 $m$ 站和 $n$ 站之间。上行车站集合记为 $S_u=\{1,2,\cdots,m-1\}\cup\{2X+1-m,2X-m,\cdots,2X+1-n\}\cup\{n+1,n+2,\cdots,X\}$；下行车站集合记为 $S_d=\{X+1,X+2,\cdots,2X\}$。其中，$X$ 为单向线路车站总数量；$s$ 为线路上任一车站，$s\in S_u\cup S_d$。上行列车 $i$ 与上行列车 $i+1$ 在 $\{1,2,\cdots,m-1\}$ 范围内的车站可以进行重联，下行列车 $l$ 与下行列车 $l+1$ 在 $\{X+1,X+2,\cdots,2X-n\}$ 范围内的车站可以进行重联。

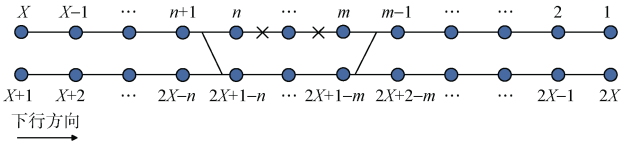



图 1　中断线路场景示意

Figure 1　Diagram of the interrupted line

## 1.2 基于虚拟编组的列车运行调整策略

针对单向线路运营中断场景，传统的反向行车策略利用渡线、折返线等设施，使列车在对向轨道反向运行一段距离后再回到原线路运行，如图 2 所示。该策略能够维持中断线路一定的运输服务水平，但会导致列车发车间隔增大，乘客等待时间增加。

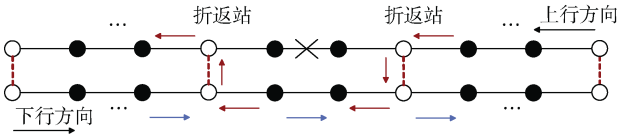



图 2　反向行车策略示意

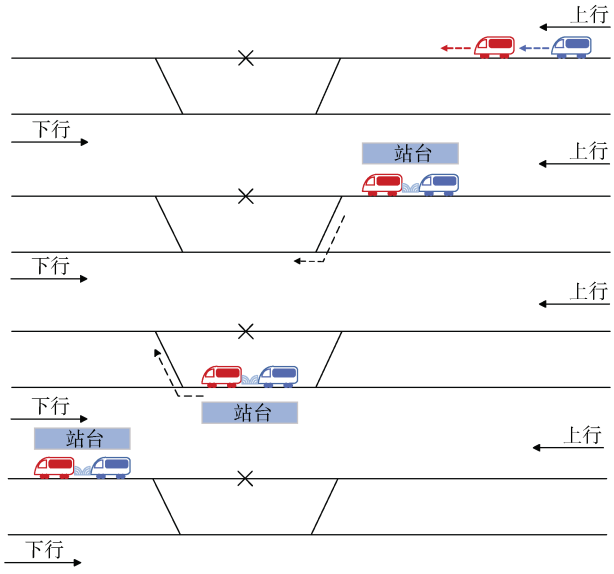
Figure 2　Diagram of reverse operation strategy

虚拟编组技术通过车-车无线通信实时获取前车状态，以更加智能和灵活的方式调整列车编组，缩短追踪间隔从而实现快速重联或解编。本文提出基于虚拟编组的反向行车策略为：双方向列车重联以大编组形式通过单线区段，如图 3 所示。以上行方向列车重联为例，前车在单线区段前的车站停车完成乘客乘降，后车到站后与前车重联并完成乘客乘降。重联列车通过渡线、折返线等进入单线区段运行，并返回上行线路至终点站。同时对向列车需在中断区段前的车站等待重联列车完全通过。该策略可快速疏散乘客，减少滞留人数，降低站台聚集风险，保障运营安全，提高运营效率。

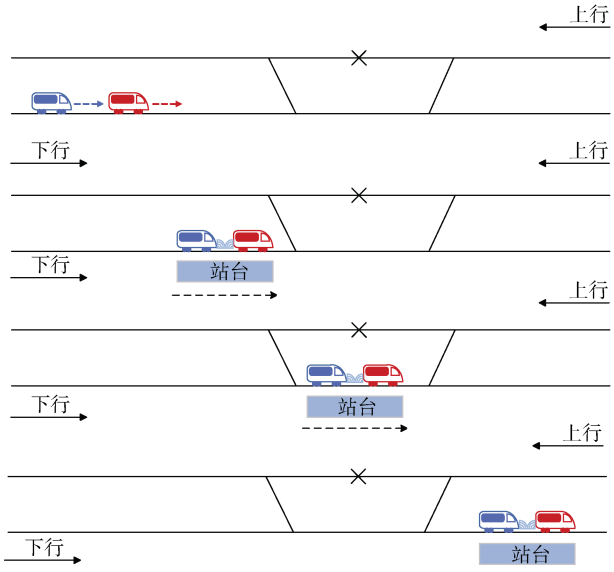
# 2 模型与算法

## 2.1 模型假设与参数说明

为便于构建模型，本文对部分复杂因素进行简化处理，做出以下假设：①列车在线路中的任何位置均




(a) 上行方向




(b) 下行方向

图 3 双方向列车重联通过单线区段运行示意

Figure 3 Diagram of bidirectional trains passing through a single-track sector after coupling

不允许越行，不考虑列车跳停情况。②区间运行时间不进行调整，停站时间可适当调整。③考虑到站台长度因素，最多允许两列车在站重联，并假设所有车站站台能够容纳重联后的列车长度；列车在进入单线区段前的车站选择重联或者不重联，即图 1 中的 $m$–1 站和 $2X$–$n$ 站。④忽略乘客因等待时间过长而转向其他交通方式或放弃轨道交通出行的情况。⑤车底资源充足，能够满足列车运行调整的需求。⑥车站的基础设施条件(包括站台宽度、屏蔽门配置等)已满足实施虚拟编组的要求。

对模型相关参数、变量进行定义说明，如表 1 所示。

表 1 模型参数和变量说明

Table 1 Explanation of Model Parameters and Variables

| 类型 | 模型参数和变量 | 含义 |
|---|---|---|
| 参数 | $I/L$ | 上行/下行列车集合 |
| | $T$ | 列车运行调整研究时段 |
| | $\mathrm{tr}_{s',s}$ | 列车在车站 $s'$和车站 $s$ 间的运行时间 |
| | $d_{\max}$ | 列车最大停站时间，s |
| | $d_{\min}$ | 列车最小停站时间，s |
| | $t_z$ | 列车通过渡线的时间，s |
| | $h_{\min}$ | 列车追踪运行的最小安全间隔 |
| | $\mathrm{OD}^{\mathrm{up}}_{s,s'}(k)$ | 第 $k$ 个时间间隔内，上行方向以 $s$ 站和 $s'$站为起讫点的乘客数量 |
| | $\mathrm{OD}^{\mathrm{dn}}_{s,s'}(k)$ | 第 $k$ 个时间间隔内，下行方向以 $s$ 站和 $s'$站为起讫点的乘客数量 |
| | $A^{\mathrm{up}}_{s,s'}$，$A^{\mathrm{dn}}_{s,s'}$ | 上行/下行方向以 $s$ 站和 $s'$站为起讫点的乘客数量，占 $s$ 站总乘客数的比例 |
| | $C$ | 列车容量 |
| | $\tau$ | 安全间隔时间 |
| | $t_k$ | 时间节点 |
| 中间变量 | $t^{\mathrm{dep}}_{i,s}, t^{\mathrm{dep}}_{l,s}$ | 上行列车 $i$，下行列车 $l$ 在车站 $s$ 的离站时间 |
| | $p_{i,s,s'}, p_{l,s,s'}$ | 上行列车 $i$ 与列车 $i$–1 时间间隔内，下行列车 $l$ 与列车 $l$–1 时间间隔内到达 $s$ 站前往车站 $s'$的到达乘客人数 |
| | $p_{i,s,s'}(k)$, $p_{l,s,s'}(k)$ | 上行列车 $i$ 与列车 $i$–1 时间间隔内，下行列车 $l$ 与列车 $l$–1 时间间隔内，第 $k$ 个时间间隔到达 $s$ 站前往车站 $s'$的到达乘客人数 |
| | $w_{i,s,s'}, w_{l,s,s'}$ | 上行列车 $i$，下行列车 $l$ 在 $s$ 站等待去往 $s'$站的等待乘客人数 |
| | $W_{i,s}, W_{l,s}$ | 上行列车 $i$，下行列车 $l$ 在 $s$ 站时的等待乘客数量 |
| | $w^{\mathrm{a}}_{i,s}, w^{\mathrm{a}}_{l,s}$ | 上行列车 $i$，下行列车 $l$ 在 $s$ 站下车乘客数量 |
| | $V_{i,s}, V_{l,s}$ | 上行列车 $i$，下行列车 $l$ 离开 $s$ 站的在车乘客数量 |
| | $r_{i,s}, r_{l,s}$ | 上行列车 $i$，下行列车 $l$ 在 $s$ 站的剩余容量 |
| | $w^{\mathrm{b}}_{i,s,s'}, w^{\mathrm{b}}_{l,s,s'}$ | 在 $s$ 站乘坐上行列车 $i$，下行列车 $l$ 前往车站 $s'$的上车乘客人数 |
| | $w^{\mathrm{b}}_{i,s}, w^{\mathrm{b}}_{l,s}$ | 上行列车 $i$，下行列车 $l$ 在车站 $s$ 的总上车乘客数 |
| | $v_{i,s,s'}, v_{l,s,s'}$ | 上行列车 $i$，下行列车 $l$ 因列车容量不足导致的滞留在 $s$ 站等待去往 $s'$站乘客数量 |
| | $v_{i,s}, v_{l,s}$ | 上行列车 $i$，下行列车 $l$ 离开 $s$ 站后站台滞留乘客数量 |
| | $t^{\mathrm{arr}}_{i,s}, t^{\mathrm{arr}}_{l,s}$ | 上行列车 $i$，下行列车 $l$ 在车站 $s$ 的到站时间 |
| | $d_{i,s}, d_{l,s}$ | 上行列车 $i$，下行列车 $l$ 在车站 $s$ 的停站时间 |
| 决策变量 | $x_{i,l}, x_{l,i}$ | 0–1 变量，表示上下行列车通过单线区段的顺序，当列车 $i$ 优先于列车 $l$ 通过，$x_{i,l}=1$，$x_{l,i}=0$；反之，当列车 $l$ 优先于列车 $i$ 通过，$x_{i,l}=0$，$x_{l,i}=1$ |
| | $y_{i,i'}, y_{l,l'}$ | 0–1 变量，当上行列车 $i$ 与 $i'$，下行列车 $l$ 与 $l'$ 在 $m$–1，$2X$–$n$ 站重联时，$y_{i,i'}=1, y_{l,l'}=1$ 否则 $y_{i,i'}=0$，$y_{l,l'}=0$ |

## 2.2 列车运行调整模型

### 2.2.1 目标函数

运营中断后，为维持运输服务水平并减少安全隐患，本文提出的模型旨在最小化所有乘客的总等待时间，以确保乘客快速到达目的地并降低长时间滞留的风险。乘客总等待时间包括乘客在站等待时间 $T_1$ 和滞留乘客等待时间 $T_2$，即

$$\min T = \min\left(T_1 + T_2\right) \tag{1}$$

1) 乘客在站等待时间。为了描述研究时段内客流的到达情况，本文将中断研究时段细化为 $N$ 个 1 min 粒度的时间单元且在每个时间粒度内乘客均匀到达。乘客的在站等待时间为其到站时间与列车离站时间之差，因此可分为两部分计算：第一部分为由于乘客在每个时间粒度内均匀到达，因此每位到站乘客需要平均等待 0.5 min；第二部分为每个时间粒度内到达并等待上车的乘客均需要持续等待直至列车到达。$T_1$ 的表达式为

$$\begin{aligned} T_1 = & \sum_{i=1}^{I}\sum_{s=1}^{S_u-1}\sum_{s'=s+1}^{S_u}\sum_{k=1}^{N}0.5p_{i,s,s'}(k) \\ & + \sum_{i=1}^{I}\sum_{s=1}^{S_u-1}\sum_{s'=s+1}^{S_u}\sum_{k=1}^{N}p_{i,s,s'}(k)\cdot\left(t_{i,s}^{\mathrm{dep}} - t_k\right) \\ & + \sum_{l=1}^{L}\sum_{s=1}^{S_d-1}\sum_{s'=s+1}^{S_d}\sum_{k=1}^{N}0.5p_{l,s,s'}(k) \\ & + \sum_{l=1}^{L}\sum_{s=1}^{S_d-1}\sum_{s'=s+1}^{S_d}\sum_{k=1}^{N}p_{l,s,s'}(k)\cdot\left(t_{l,s}^{\mathrm{dep}} - t_k\right) \end{aligned} \tag{2}$$

2) 滞留乘客等待时间。滞留乘客等待时间为滞留乘客数量与其等待时间的乘积。列车 $i$ 的滞留乘客的等待时间为列车 $i$+1 在 $s$ 站的离站时间与列车 $i$ 在 $s$ 站的离站时间之差，表达式为

$$T_2 = \sum_{i=1}^{I}\sum_{s=1}^{S_u}v_{i,s}\cdot\left(t_{i+1,s}^{\mathrm{dep}} - t_{i,s}^{\mathrm{dep}}\right) + \sum_{l=1}^{L}\sum_{s=1}^{S_d}v_{l,s}\cdot\left(t_{l+1,s}^{\mathrm{dep}} - t_{l,s}^{\mathrm{dep}}\right) \tag{3}$$

### 2.2.2 约束条件

约束条件包括虚拟编组约束、列车运行约束及乘客乘车约束。约束条件以上行列车为例进行说明，下行列车的约束与上行列车基本保持一致。

1) 虚拟编组约束。考虑到站台长度问题，需满足只有两列车能保持重联状态，即

$$y_{i-1,i} + y_{i,i+1} \leqslant 1, \forall i \in \{2,3,\cdots,I-1\} \tag{4}$$

$$y_{l-1,l} + y_{l,l+1} \leqslant 1, \forall l \in \{2,3,\cdots,L-1\} \tag{5}$$

2) 列车运行约束

①列车到发时间关系。上行列车 $i$ 在其服务的车站 $s$ 的到站时间为上行列车 $i$ 在 $s'$站的离站时间与 $s'$ 站和 $s$ 站的区间运行时间之和，即

$$t_{i,s}^{\mathrm{arr}} = t_{i,s'}^{\mathrm{dep}} + \mathrm{tr}_{s',s}, \forall i \in I, \forall s, s' \in S_u \tag{6}$$

上行列车 $i$ 在 $s$ 站的离站时间为上行列车 $i$ 在 $s$ 站的到站时间和停站时间之和，即

$$t_{i,s}^{\mathrm{dep}} = t_{i,s}^{arr} + d_{i,s}, \forall i \in I, \forall s \in S_u \tag{7}$$

②列车停站时间关系。上行列车 $i$ 在 $s$ 站的停站时间需满足最大最小停站时间约束，即

$$d_{\min} \leqslant d_{i,s} \leqslant d_{\max}, \forall i \in I, \forall s \in S_u \tag{8}$$

③行车间隔时间约束。上行列车 $i$ 和 $i$+1 在 $m$ 站之前需满足最小发车间隔，列车重联示意如图 4 所示。其中，$L_{r1}$ 为前车在制动反应时间内的行走距离，$L_{r2}$ 为后车在制动反应时间内的行走距离；$L_{b1}$ 为前车制动距离，$L_{b2}$ 为后车制动距离；$h$ 为上行列车 $i$ 和 $i$+1 分别离开车站 $s$ 的时间间隔，$h = t_{i+1,s}^{\mathrm{dep}} - t_{i,s}^{\mathrm{dep}}$。如果列车 $i$ 和 $i$+1 在 $m$ 站虚拟重联，则列车 $i$ 和 $i$+1 在 $m$ 站之后的行车间隔被视为 0，反之则需满足最小行车间隔。通过引入极大数 $M$ 增加线性化约束，对应的表达式为

$$h \geqslant h_{\min}, \forall i \in I, \forall s \in \{1,\cdots,m-1\} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} & \max\left\{h_{\min} - M\cdot y_{i,i+1}, -M\cdot\left(1-y_{i,i+1}\right)\right\} \leqslant h \\ & \leqslant M\cdot\left(1-y_{i,i+1}\right), \\ & \forall i \in I, \forall s \in \{n+1, n+2, \cdots, X\} \\ & \cup\{2X+1-m, 2X-m, \cdots, 2X+1-n\} \end{aligned} \tag{10}$$

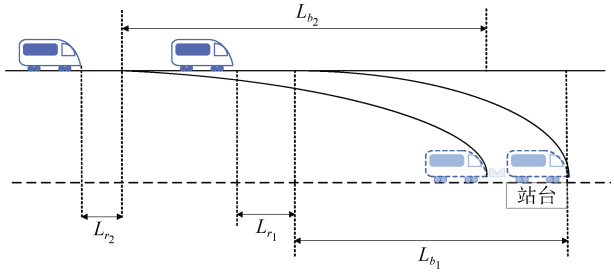



图 4 虚拟编组下列车重联示意

Figure 4 Diagram of multiple-unit train formation under virtual coupling technology

④反向运行安全约束。单线区段考虑行车安全，因此如果车站 2$X$+1–$m$ 被下行列车 $l$ 占用，即下行列车 $l$ 优先上行列车 $i$ 通过单线区段，那么上行列车 $i$

必须在 $m$–1 站等待下行列车 $l$ 驶离 2$X$+1–$m$ 站并且驶过一个安全距离后，上行列车才可以驶入 2$X$+1–$m$ 站，即

$$t_{l,2X+1-m}^{\mathrm{dep}}+\tau\leqslant t_{i,2X+1-m}^{\mathrm{arr}}+M\left(1-x_{l,i}\right),\quad \forall i\in I,\forall l\in L \tag{11}$$

如果车站 2$X$+1–$n$ 被上行列车 $i$ 占用，即上行列车 $i$ 优先下行列车 $l$ 通过单线区段，那么下行列车 $l$ 必须在 2$X$–$n$ 站等待上行列车 $i$ 离开 2$X$+1–$n$ 站并且驶过一个安全距离后，下行列车才可以驶入 2$X$+1–$n$ 站，即

$$t_{l,2X+1-n}^{\mathrm{dep}}+\tau\leqslant t_{i,2X+1-\mathrm{n}}^{\mathrm{arr}}+M\left(1-x_{l,i}\right),\quad \forall i\in I,\forall l\in L \tag{12}$$

上行列车 $i$ 和下行列车 $l$ 占用单线区段具有唯一性，即若上行列车 $i$ 优先下行列车 $l$ 通过单线区段，则下行列车 $l$ 不可能优先上行列车 $i$ 通过单线区段，即

$$x_{i,l}+x_{l,i}=1,\forall i\in I,\forall l\in L \tag{13}$$

3) 乘客乘车约束

①到达乘客数量。引入 0–1 变量 $\lambda_{i,s,k}$ 表示列车 $i$ 在车站 $s$ 的离站时间与时间节点 $t_1,t_2,\cdots,t_N$ 的关系，若 $t_{i,s}^{\mathrm{dep}}$ 大于时间节点 $t_k$，则 $\lambda_{i,s,k}=1$；否则，$\lambda_{i,s,k}=0$，即

$$\lambda_{i,s,k}=\begin{cases}1, t_{i,s}^{\mathrm{dep}}\geqslant t_k\\ 0, t_{i,s}^{\mathrm{dep}}<t_k\end{cases} \tag{14}$$

借助式(14)，上行列车 $i$ 和上行列车 $i$–1 发车间隔内到达乘客数量为，两车发车间隔内包含的所有时间单元内到达乘客人数的总和，即

$$p_{i,s,s'}=\begin{cases}\sum_{k=1}^{N}\left(\lambda_{i,s,k}-\lambda_{i-1,s,k}\right)\times\mathrm{OD}_{s,s'}^{\mathrm{up}}(k), & i>1,s,s'\in S_{\mathrm{u}},s'>s\\ \sum_{k=1}^{N}\lambda_{i,s,k}\times\mathrm{OD}_{s,s'}^{\mathrm{up}}(k), & i=1,s,s'\in S_{\mathrm{u}},s'>s\end{cases} \tag{15}$$

如图 5 所示，如果上行列车 $i$ 和列车 $i$–1 的发车间隔包含时间单元 4、5、6，那么列车 $i$ 的到达乘客人数为这三个时间单元内到达乘客人数之和。

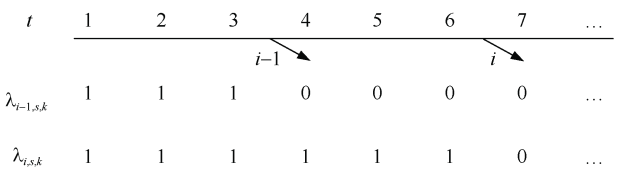



图 5 客流划分与列车出发时刻的关系约束

Figure 5 Constraints on passenger flow segmentation in relation to train departure time

另外，上行列车 $i$ 和上行列车 $i$–1 发车间隔内，每个时间单元内到达乘客数量为发车间隔内每个时间单元内到达乘客人数，即

$$p_{i,s,s'}(k)=\begin{cases}\left(\lambda_{i,s,k}-\lambda_{i-1,s,k}\right)\times\mathrm{OD}_{s,s'}^{\mathrm{up}}(k), & i>1,s,s'\in S_{\mathrm{u}},s'>s\\ \lambda_{i,s,k}\times\mathrm{OD}_{s,s'}^{\mathrm{up}}(k), & i=1,s,s'\in S_{\mathrm{u}},s'>s\end{cases} \tag{16}$$

②等待乘客数量。上行列车 $i$ 在 $s$ 站等待去往 $s'$ 站的等待乘客数量为上行列车 $i$–1 因列车容量不足导致的滞留在 $s$ 站等待去往 $s'$站乘客数量 $v_{i-1,s,s'}$，加上时间段 $\left[t_{i-1,s}^{\mathrm{dep}},t_{i,s}^{\mathrm{dep}}\right]$ 内的到达乘客数量，即

$$w_{i,s,s'}=\begin{cases}p_{i,s,s'}, & i=1,\forall s,s'\in S_{\mathrm{u}},s<s'\\ v_{i-1,s,s'}+p_{i,s,s'}, & \forall i\in\{2,\cdots,I\},\forall s,s'\in S_{\mathrm{u}},s<s'\end{cases} \tag{17}$$

上行列车 $i$ 在 $s$ 站的总等待乘客数量为

$$W_{i,s}=\sum_{s'=s+1}^{S_{\mathrm{u}}}w_{i,s,s'},\forall i\in I,s\in S_{\mathrm{u}} \tag{18}$$

③下车乘客数量。上行列车 $i$ 在 $s$ 站的下车乘客数量为以 $s$ 站之前的车站为起点，以 $s$ 站为终点的上车乘客人数之和，即

$$w_{i,s}^{\mathrm{a}}=\begin{cases}\sum_{s'=1}^{s-1}w_{i,s',s}^{\mathrm{b}}, & \forall i\in I,s\in S_{\mathrm{u}}\setminus\{1\}\\ 0, & \forall i\in I,s=1\end{cases} \tag{19}$$

④在车乘客数量。上行列车 $i$ 离开 $s$ 站的在车乘客数量为上行列车 $i$ 到达 $s$–1 站的在车乘客容量，减去 $s$ 站下车乘客人数，加上 $s$ 站上车乘客人数，即

$$V_{i,s}=\begin{cases}V_{i,s-1}-w_{i,s}^{\mathrm{a}}+w_{i,s}^{\mathrm{b}}, & \forall i\in I,\forall s\in S_{\mathrm{u}}\setminus\{1\}\\ w_{i,s}^{\mathrm{b}}, & \forall i\in I,s=1\end{cases} \tag{20}$$

⑤剩余乘客容量。上行列车 $i$ 在 $s$ 站的剩余乘客容量为列车容量减去上行列车 $i$ 离开 $s$–1 站的在车乘客数量加上 $s$ 站下车乘客人数，即

$$r_{i,s}=\begin{cases}C-V_{i,s-1}+w_{i,s}^{\mathrm{a}}, & \forall i\in I,\forall s\in S_{\mathrm{u}}\setminus\{1\}\\ C, & \forall i\in I,s=1\end{cases} \tag{21}$$

⑥上车乘客数量。上行列车 $i$ 在 $s$ 站的上车乘客数量等于等待乘客数量 $W_{i,s}$ 与列车剩余容量 $r_{i,s}$ 之间的较小值，即

$$w_{i,s}^{\mathrm{b}}=\min\left\{W_{i,s},r_{i,s}\right\},\forall i\in I,\forall s\in S_{\mathrm{u}} \tag{22}$$

此外，上车乘客数量遵循一定的比例，该比例为 $s$ 站出发前往 $s'$站的乘客数量与 $s$ 站出发的乘客数量的比值，即

$$A_{s,s'}^{\mathrm{up}}=\frac{\mathrm{OD}_{s,s'}^{\mathrm{up}}}{\sum_{s'=s+1}^{X}\mathrm{OD}_{s,s'}^{\mathrm{up}}},\forall s,s'\in S_{\mathrm{u}},s<s' \tag{23}$$

上行列车 $i$ 在 $s$ 站上车前往 $s'$站的乘客数量为

$$w_{i,s,s'}^{\mathrm{b}}=w_{i,s}^{\mathrm{b}}\cdot A_{s,s'}^{\mathrm{up}},\forall i\in I,\forall s,s'\in S_{\mathrm{u}},s'>s \tag{24}$$

⑦滞留乘客数量。上行列车 $i$ 因列车容量不足导致的滞留在 $s$ 站等待去往 $s'$站乘客数量 $v_{i,s,s'}$ 为站台等待乘客数量 $W_{i,s,s'}$ 与上车乘客数量 $w_{i,s,s'}^{b}$ 之差，即

$$v_{i,s,s'}=w_{i,s,s'}-w_{i,s,s'}^{\mathrm{b}},\forall i\in I,\forall s,s'\in S_{\mathrm{u}} \tag{25}$$

上行列车 $i$ 在 $s$ 站滞留乘客为

$$v_{i,s}=\sum_{s'=s+1}^{X}v_{i,s,s'},\forall i\in I,\forall s,s'\in S_{\mathrm{u}},s<s' \tag{26}$$

列车 $i$ 在车站 $s$ 实际上车乘客总人数不能超过该站的等待乘客人数，即

$$w_{i,s}^{\mathrm{b}}\leqslant w_{i,s} \tag{27}$$

列车 $i$ 在车站 $s$ 实际上车乘客总人数不能超过列车在该站的剩余容量，即

$$w_{i,s}^{\mathrm{b}}\leqslant r_{i,s} \tag{28}$$

列车 $i$ 在车站 $s$ 发生满载时(引入 0–1 变量 $u_{i,s}$，当列车满载时 $u_{i,s}$ 为 1，否则为 0；引入极大数 $M$)，其上车乘客数等于列车剩余容量，即

$$w_{i,s}^{\mathrm{b}}\geqslant r_{i,s}-\left(1-u_{i,s}\right)\cdot M,\ u_{i,s}\in\{0,1\} \tag{29}$$

列车 $i$ 在车站 $s$ 未满载时，站台等待乘客均可上车，即

$$w_{i,s}^{\mathrm{b}}\geqslant w_{i,s}-u_{i,s}\cdot M,\ u_{i,s}\in\{0,1\} \tag{30}$$

## 2.3 模型复杂度分析及求解

由于模型的非线性化约束已被线性化，当前模型为混合整数线性规划。随着问题规模扩大，变量和约束数量显著增长，直接使用求解工具处理大规模案例耗时剧增。由于模型的决策变量包括列车是否重联、单线区段占用顺序、首站到站时间和各站停站时间，各变量相互影响，为了进一步提升求解效率，本文设计了双层模拟退火-遗传算法进行求解。在传统遗传算法的基础上建立精英保留策略，通过加入检查解的方法进行算法优化。算法具体流程如图 6 所示。

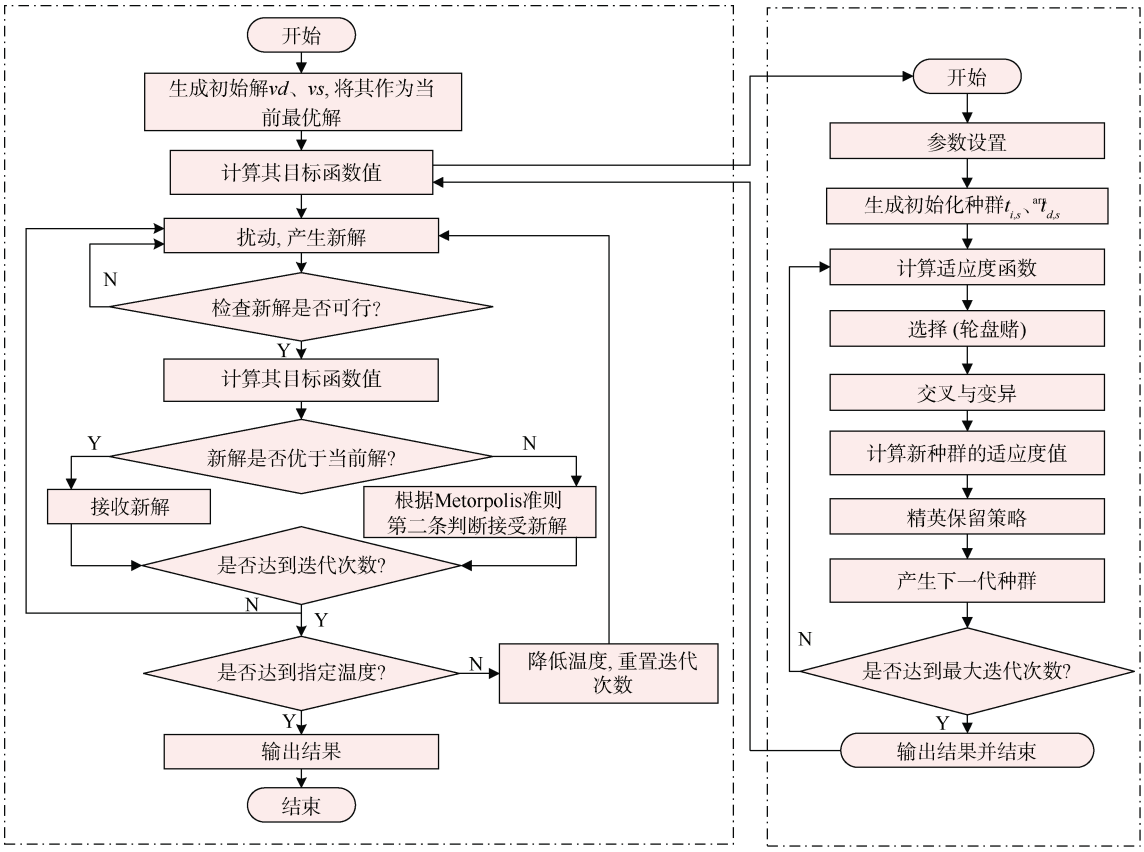



图 6　双层模拟退火-遗传算法流程

Figure 6　Flowchart of two-layer simulated annealing-genetic algorithm

# 3 案例研究

## 3.1 案例背景

### 3.1.1 线路数据

本文选取我国某城市实际的地铁线路作为研究对象，如图 7 所示。该线路包括 22 座车站及 42 个区间。以 8:00～9:30 为研究时段，设定中断发生在 8:10，持续 40 min，响应时间为 3 min。在案例中，列车运营中断导致上行方向的 12 站和 13 站无法正常运行。针对这种情况，采用模型中的基于虚拟编组的反向行车调整策略，即双方向列车重联通过单线区段，图 7 中，11 站和 13 站之间的区段为单线区段。

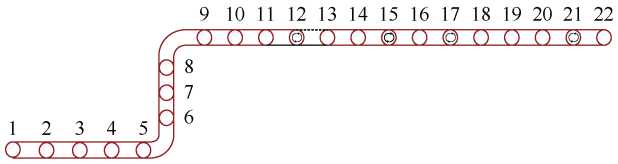



图 7 中断区段场景下的线路示意

Figure 7 Diagram of the line in an interruption sector scenario

列车的初始时刻表如图 8 所示。列车的停站时间如表 2 所示，区间运行时间如表 3 所示，其他相关参数如表 4 所示。

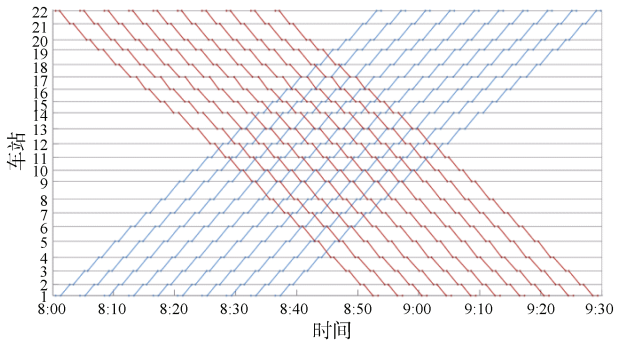



图 8 计划运行图

Figure 8 Planned timetable

**表 2 列车停站时间**

**Table 2 Train stopping time** s

| 车站 | 上行 | 下行 |
|---|---|---|
| 1 | 50 | 50 |
| 2 | 35 | 35 |
| 3 | 30 | 30 |
| 4 | 30 | 30 |
| 5 | 35 | 35 |
| 6 | 40 | 35 |
| 7 | 40 | 35 |
| 8 | 35 | 35 |
| 9 | 40 | 35 |
| 10 | 40 | 35 |
| 11 | 40 | 35 |
| 12 | 50 | 45 |
| 13 | 50 | 50 |
| 14 | 50 | 50 |
| 15 | 40 | 40 |
| 16 | 35 | 35 |
| 17 | 60 | 60 |
| 18 | 35 | 35 |
| 19 | 50 | 50 |
| 20 | 35 | 35 |
| 21 | 30 | 35 |
| 22 | 45 | 40 |

续表

**表 3 列车区间运行时间**

**Table 3 Train interval running time** s

| 区间 | 上行 | 下行 |
|---|---|---|
| 1-2 | 90 | 90 |
| 2-3 | 110 | 110 |
| 3-4 | 110 | 120 |
| 4-5 | 130 | 120 |
| 5-6 | 120 | 120 |
| 6-7 | 110 | 110 |
| 7-8 | 110 | 110 |
| 8-9 | 145 | 140 |
| 9-10 | 90 | 85 |
| 10-11 | 105 | 105 |
| 11-12 | 110 | 105 |
| 12-13 | 120 | 120 |
| 13-14 | 130 | 140 |
| 14-15 | 90 | 90 |
| 15-16 | 100 | 110 |
| 16-17 | 100 | 90 |
| 17-18 | 100 | 110 |
| 18-19 | 120 | 120 |
| 19-20 | 80 | 80 |
| 20-21 | 130 | 130 |
| 21-22 | 105 | 100 |

### 3.1.2 客流数据

客流基础数据来源于某城市某工作日的 8:00～9:30

的 AFC 系统数据，根据提取所需研究时段和 OD 的客流数据，形成客流 OD 矩阵，部分数据如表 5 所示。

表 4　模型相关参数

Table 4　Model related parameters

| 参数 | 取值 | 参数 | 取值 |
|---|---|---|---|
| 研究时间范围 | 90 min | 客流时间粒度 | 1 min |
| 上/下行方向列车数 | 10 列/10 列 | 最小行车间隔 | 3 min |
| 最小停站时间 | 25 s | 列车通过渡线时间 | 60 s |
| 清客换端时间 | 120 s | 反向安全时间 | 60 s |

表 5　部分 AFC 数据

Table 5　Partial AFC data

| 卡序号 | 起点站 | 终点站 | 进站时间 | 出站时间 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 8 | 8:05 | 8:21 |
| 2 | 1 | 10 | 8:05 | 8:31 |
| 3 | 1 | 10 | 8:06 | 8:30 |
| 4 | 6 | 11 | 8:30 | 8:42 |
| 5 | 14 | 1 | 8:35 | 9:01 |
| 6 | 14 | 12 | 9:14 | 9:25 |
| 7 | 10 | 11 | 9:20 | 9:30 |
| … | … | … | … | … |

### 3.1.3　模型参数

本文提出的双层模拟退火-遗传算法中模拟退火算法的参数设置如下：初始温度 100、结束温度 1、降温速率 0.9；遗传算法的参数设置如下：种群规模 100、交叉概率 0.5、变异概率 0.25、最大迭代次数 200。

## 3.2　案例结果及分析

中断区段场景下，中断发生时在线列车的位置如表 6 所示。利用本文提出的双层模拟退火-遗传算法对案例进行求解，运行得到的算法迭代曲线如图 9 所示。为了进一步说明本文模型的有效性，采用反向行车策略调整下的列车运行图与采用本文策略调整后的列车运行图进行对比，见图 10，8:10 发生区间中断，中断响应时间为 3 min，中断持续时间为 47 min，8:50 中断区间恢复正常运行。加粗部分表示列车处于重联状态。

表 6　中断时在线列车位置

Table 6　Online train position at the time of interruption

| 方向 | 列车 | 所在位置 | 方向 | 列车 | 所在位置 |
|---|---|---|---|---|---|
| 上行 | 1 | 区间 4-5 | 下行 | 1 | 区间 19-18 |
| 上行 | 2 | 区间 3-4 | 下行 | 2 | 停于 20 站 |
| 上行 | 3 | 区间 1-2 | 下行 | 3 | 区间 22-21 |

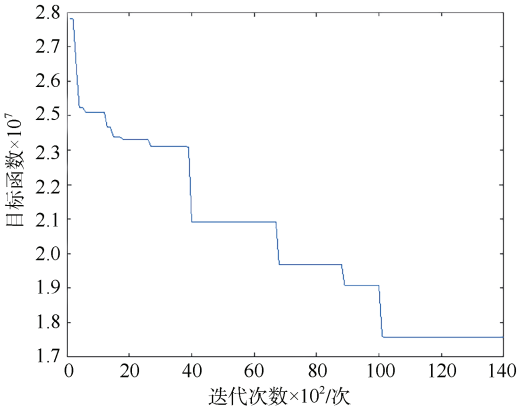
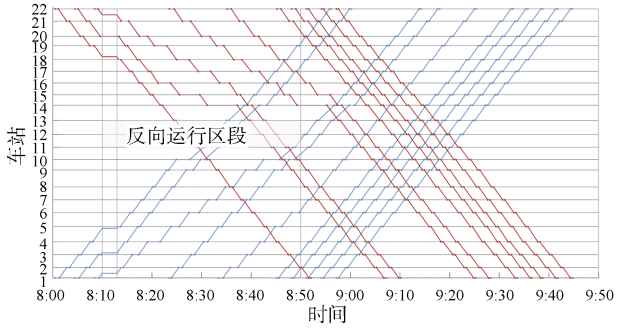
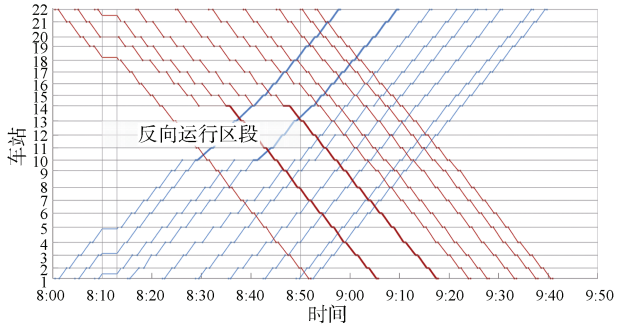



图 9　算法迭代

Figure 9　Algorithm iteration diagram




(a) 反向运行策略




(b) 虚拟编组+反向行车策略

图 10　两种策略下调整运行图

Figure 10　Comparative Adjusted Train Diagram under Two Strategies

由图 8 和图 10 可知：当中断发生后，由于列车运行安全约束，此时列车发车间隔相较于计划运行图发车间隔增大，运力减小；从中断开始至中断恢复的时段内，若不采取调整策略，仅有 5 列车(下行 5 列、上行 0 列)能够通过中断区间；采用反向行车策略后，列车通过数量为 5 列(下行 3 列、上行 2 列)；而在应用本文提出的基于虚拟编组的反向行车策略后，通过列车数量进一步提升至 7 列(下行 3 列、上行 4 列)，其中上下行方向各有两列列车以重联编组形式运行。

由结果对比可知，通过两种策略的有效调整，能进一步均衡区间单向中断时上下行列车的发车间隔。而采用结合虚拟编组的反向行车策略调整效果更优。

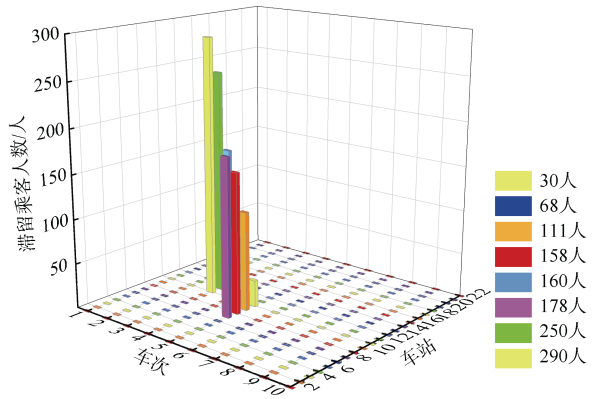
为进一步验证本文所提出策略的优化效果，将两种策略下的乘客总等待时间、乘客在站等待时间、滞留乘客等待时间和滞留乘客数量与不采取调整策略下的数据进行对比，结果如表 7 所示。

表 7　列车运行调整结果

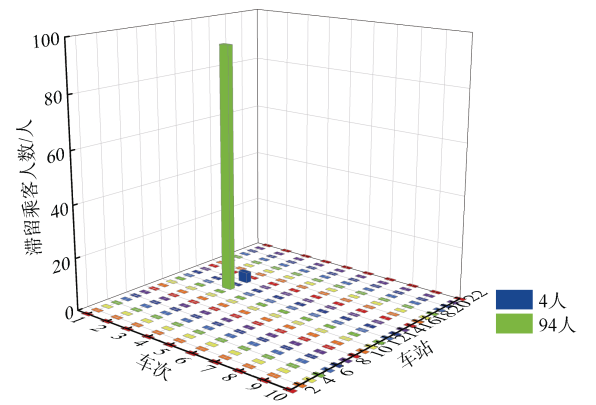
Table 7　Results of train rescheduling

| 调整策略 | 乘客总等待时间/min | 乘客在站等待时间/min | 滞留乘客等待时间/min | 滞留乘客数量/人 | 总等待时间优化效果/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 不采取调整策略 | 264 449 | 258 366 | 6 083 | 2 030 | - |
| 反向行车 | 210 250 | 204 667 | 5 583 | 1 173 | 20.5 |
| 虚拟编组+反向行车 | 175 750 | 175 750 | 0 | 98 | 33.5 |

采用反向行车策略和采用基于虚拟编组的反向行车策略下的滞留乘客分布如图 11 所示。




(a) 反向行车策略




(b) 虚拟编组+反向行车策略

图 11　两种策略下滞留乘客分布示意

Figure 11　Comparative Distribution of Stranded Passengers under Two Strategies

由表 7 可知：采用反向行车和基于虚拟编组的反向行车策略均能极大降低乘客的总等待时间，包括乘客在站等待时间和滞留乘客等待时间，进而减少了滞留乘客的出现；采用基于虚拟编组的反向行车策略较不采用调整策略，乘客总等待时间减少了 33.5%，乘客在站等待时间减少了 32%；相较于采用反向行车策略，乘客总等待时间减少了 16.4%，乘客在站等待时间减少了 14.1%。

由图 11 可知：①单向中断后滞留乘客多集中在中断区段，而基于虚拟编组的反向行车策略通过提高单线区段列车容量，提升运输效率，有效缓解中断区段的乘客滞留现象，相比传统策略显著减少了乘客等待时间，更好地服务乘客。②基于虚拟编组的反向行车策略下，在 12 站和 14 站，上行列车 3 容量不足导致了部分乘客滞留，但该部分滞留乘客可立即转乘后续重联列车；由于列车 3 和列车 4 为重联列车，离站时间相同，因此滞留乘客的等待时间为 0。

## 3.3　灵敏度分析

为进一步分析基于虚拟编组的反向行车列车调整模型的有效性，针对已提出的模型，对中断时间分别为 20、25、30、35、40、45、50 min 的情况得到的列车运行调整结果进行求解。这些数据有助于评估不同中断持续时间下采用基于虚拟编组的反向行车策略的效果，进一步了解该策略在不同情况下的有效性和适用性。

中断区段场景下，不同中断持续时间下的乘客等待时间和滞留乘客人数如表 8 所示，乘客总等待时间的变化趋势如图 12 所示。

表 8　中断场景不同中断持续时间下的列车运行调整结果

Table 8　Train rescheduling results under different disruption durations in shorter interruption scenarios

| 中断持续时间/ min | 乘客总等待时间/min | 乘客在站等待时间/min | 滞留乘客等待时间/min | 滞留乘客数量/人 |
|---|---|---|---|---|
| 20 | 136 223 | 136 223 | 0 | 0 |
| 25 | 147 060 | 147 060 | 0 | 0 |
| 30 | 153 186 | 153 186 | 0 | 0 |
| 35 | 170 333 | 170 333 | 0 | 103 |
| 40 | 175 750 | 175 750 | 0 | 98 |
| 45 | 186 316 | 186 316 | 0 | 113 |
| 50 | 188 300 | 188 300 | 0 | 113 |

由表 8 和图 12 可知：在本案例中，随着中断持续时间的增加，乘客总等待时间呈现不断增大的趋势，

但是增速逐渐放缓，这表明本文所提出策略在有效缓解中断区段的乘客滞留现象的同时，能够控制乘客等待时间的过快增长。

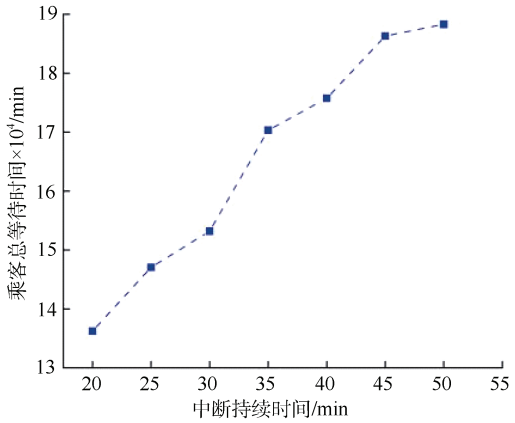



图 12　中断区段场景不同中断持续时间下乘客总等待时间趋势

Figure 12　Trend of total waiting time for passengers under different interruption durations in shorter interruption sector scenario

中断区段场景下，不同中断持续时间下，两种策略的列车运行调整结果如表 9 所示，变化趋势如图 13 所示。

**表 9　中断场景不同中断持续时间下两种策略的列车运行调整结果**

**Table 9　Train rescheduling results of two strategies under different disruption durations in shorter interruption scenarios**　min

| 中断持续时间 | 目标函数值 | |
|---|---|---|
| | 基于虚拟编组的反向行车策略 | 反向行车策略 |
| 20 | 136 223 | 147 123 |
| 25 | 147 060 | 172 916 |
| 30 | 153 186 | 185 300 |
| 35 | 170 333 | 204 733 |
| 40 | 175 750 | 210 250 |
| 45 | 186 316 | 221 016 |
| 50 | 188 300 | 233 100 |

由图 13 可知：在本案例中，无论采用基于虚拟编组的反向行车策略，还是传统的反向行车策略，乘客的总等待时间均呈现持续增长的趋势；采用基于虚拟编组的反向行车策略，乘客的等待时间的增加速度较慢，整体比较平缓，而采用传统的反向行车策略，乘客等待时间的增长较快。

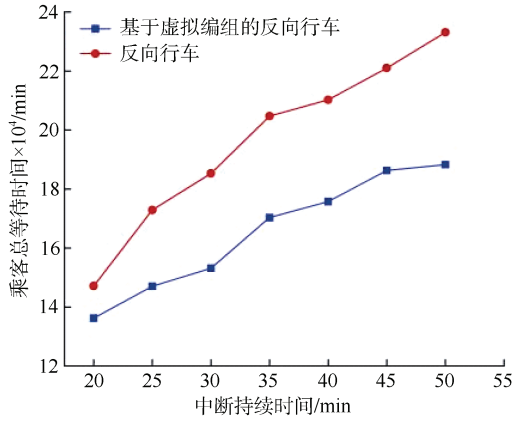



图 13　中断场景不同中断持续时间下两种策略的调整效果趋势

Figure 13　Adjustment effects using two strategies under different disruption durations in shorter interruption scenarios

此外，由表 9 和图 13 可知：在不同中断持续时间下，采用基于虚拟编组的反向行车策略均优于反向行车策略，且优化效果随着中断时间的延长不断增强。因此，理论上，当城市轨道交通线路发生单向运营中断且中断区段时，可以考虑采用本文提出的基于虚拟编组的反向行车策略(双方向列车重联通过单线区段)来进行调整，最大化中断线路的运输效能，更有效地满足乘客的出行需求。

## 4　结论

1) 本文针对城轨线路单向运营中断场景，采用基于虚拟编组的反向行车策略，以乘客总等待时间最小为目标函数，考虑虚拟编组数量、列车运行和乘客乘车方面的约束，建立了混合整数线性规划模型，并提出了模型的求解方法。构建了数字化列车运行调整模型，并设计了双层模拟退火-遗传算法进行求解。

2) 案例研究表明，对比传统反向行车策略，单向线路运营中断场景下，采用本文提出策略可以使乘客总等待时间减少 16.4%，乘客在站等待时间减少 14.1%，调整效果较好，从而验证了本文方法的可行性和有效性。

由于城轨线路单向运营中断场景下的列车运行调整十分复杂，本文仍存在一些不足，如在建模阶段忽略了车底运用周转存在限制的情况，该限制在实际运营中会直接影响到列车运行调整的灵活性和可行性。因此，后续可考虑对在车底周转约束下的基于虚拟编组策略的列车运行调整进一步研究；由于本文未考虑在实际运营过程中因中断时间增加导致乘客流失的情

况，因此如何运用虚拟编组技术来更加高效地实现列车运行调整仍需进一步研究。

## 参考文献


[1] 钱蕾, 周玮腾, 韩宝明. 城市轨道交通运营突发事件数据可视化分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(4): 1025-1035.
QIAN Lei, ZHOU Weiteng, HAN Baoming. Visual exploration of emergency operation events in urban rail transit[J]. Journal of railway science and engineering, 2020, 17(4): 1025-1035.

[2] 周玮腾, 钱蕾, 韩宝明, 等. 运营区间双向中断下城市轨道交通列车运行调整[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(4): 770-779.
ZHOU Weiteng, QIAN Lei, HAN Baoming, et al. Train rescheduling of urban rail transit under bi-directional interruption in operation section[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52(4): 770-779.

[3] 王义惠, 赵康祺, 王航宇, 等. 地铁线路双向中断时长不确定下的列车运行调整[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(4): 230-240.
WANG Yihui, ZHAO Kangqi, WANG Hangyu, et al. Train rescheduling under bi-directional interruption with uncertain duration of a metro line[J]. China railway science, 2023, 44(4): 230-240.

[4] XU X M, LI K P, YANG L X. Rescheduling subway trains by a discrete event model considering service balance performance[J]. Applied mathematical modelling, 2016, 40(2): 1446-1466.

[5] JAMILI A, NEJAD M G. Urban railway operation recovery during disruption[C]//2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Gran Canaria, 2015: 2825-2830.

[6] 刘浩江. 单线双向运行在地铁行车组织中的应用[J]. 都市快轨交通, 2008, 21(3): 17-19, 23.
LIU Haojiang. Application of bidirectional operation on single track in subway train operation organization[J]. Urban rapid rail transit, 2008, 21(3): 17-19, 23.

[7] LONG Y X, HAN B M, ZHOU W T, et al. Rescheduling trains by crossover tracks to promote service quality of urban rail transit under partial blockages[J]. PLoS One, 2024, 19(1): e0296018.

[8] SCHUMANN T. Increase of capacity on the Shinkansen high-speed line using virtual coupling[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems. Madrid, 2016: 57-69.

[9] QUAGLIETTA E, WANG M, GOVERDE R M P. A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations[J]. Journal of rail transport planning & management, 2020, 15: 100195.

[10] ZHU L, LI X, HUANG D, et al. Cooperative control of virtually coupled trains considering train-to-train communication cycle: a tube-based model predictive control approach[J]. Vehicle system dynamics, 2025, 63(1): 3-25.

[11] PARK J, LEE B H, EUN Y. Virtual coupling of railway vehicles: gap reference for merge and separation, robust control, and position measurement[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022, 23(2): 1085-1096.

[12] PERIS E, GOIKOETXEA J. Roll2Rail: new dependable rolling stock for a more sustainable, intelligent and comfortable rail transport in Europe[J]. Transportation research procedia, 2016, 14: 567-574.

[13] 黄静仪, 张琦. 基于虚拟编组技术的城市轨道交通列车延误跳停调整研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(2): 151-158.
HUANG Jingyi, ZHANG Qi. Research on train delay skip-stop adjustment in urban rail transit based on virtual coupling technology[J]. Railway transport and economy, 2024, 46(2): 151-158.

[14] 白佳薇, 张琦, 鲁放. 城市轨道交通虚拟编组列车快慢车组织方案研究[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(1): 126-133.
BAI Jiawei, ZHANG Qi, LU Fang. Skip-stop operation organization plan of virtual coupling trains in urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(1): 126-133.

[15] LI Z X, YIN J T, BEŠINOVIĆ N, et al. Resilience assessment and optimization of urban rail systems with train platoons: a passenger demand oriented approach[C]//2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Edmonton, 2024: 2698-2704.

[16] YUXUAN L, BAOMING H, ZEBIN C. Rescheduling metro trains in the over-crowded situation after disruptions with virtual coupling technology and stop-skipping strategy[C]//International Conference on Traffic and Transportation Studies. Singapore, 2024: 552-560.


（编辑：王艳菊）