

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于灵活编组的城轨车底运用计划及鲁棒客流控制策略

周厚盛, 戚建国, 杨立兴, 石俊刚, 龚聪聪

引用本文:

周厚盛, 戚建国, 杨立兴, 石俊刚, 龚聪聪. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.2054>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于卷积长短时记忆神经网络的城市轨道交通短时客流预测

Metro short-term traffic flow prediction with ConvLSTM

控制与决策. 2021, 36(11): 2760–2770 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0501>

#### 基于鲁棒优化的云医疗资源配置问题

Robust optimization based medical resource allocation problem in cloud healthcare system

控制与决策. 2021, 36(2): 469–474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0455>

#### 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>

#### 基于两阶段迭代优化的空天观测资源协同任务规划方法

A two-stage iterative optimization method for the coordinated task planning of space and air observation resources

控制与决策. 2021, 36(5): 1147–1156 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1193>

#### 基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller

控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

# 基于灵活编组的城轨车底运用计划及鲁棒客流控制策略

周厚盛<sup>1</sup>, 戚建国<sup>1</sup>, 杨立兴<sup>1†</sup>, 石俊刚<sup>2</sup>, 龚聪聪<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044;

2. 华东交通大学 交通运输与物流学院, 南昌 330013)

**摘要:** 针对通勤客流需求的动态性、不均衡性和随机性等复杂特征, 提出基于灵活编组的城轨车底运用计划及鲁棒客流控制策略两阶段随机规划模型. 第1阶段为编组类型指派和车底运用计划优化模型, 以极小化系统运营成本为目标; 第2阶段为车站协同限流鲁棒优化模型, 以极小化乘客等待时间为目标. 通过线性化方法将原模型重构为可被CPLEX等优化软件直接求解的混合整数线性规划模型. 算例结果表明, 灵活编组模式在仅增加0.5%乘客等待时间的基础上, 可降低约30.2%的系统运营费用, 表明灵活编组方案在满足客流需求的同时可合理地降低运营费用. 此外, 所提出鲁棒客流控制策略能够避免传统鲁棒优化方法过于保守的问题, 对于实际运营过程中随机客流需求具有较好的适应性.

**关键词:** 城市轨道交通; 灵活编组模式; 车底运用计划; 鲁棒客流控制策略; 随机客流需求; 两阶段随机规划

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.2054

引用格式: 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.

## Joint optimization for rolling stock circulation plan based on flexible train composition mode and robust passenger flow control strategy on urban rail transit lines

ZHOU Hou-sheng<sup>1</sup>, QI Jian-guo<sup>1</sup>, YANG Li-xing<sup>1†</sup>, SHI Jun-gang<sup>2</sup>, GONG Cong-cong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. College of Transportation and Logistics, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** A two stage stochastic programming model of the rolling stock circulation plan based on flexible train composition mode and the robust passenger flow control strategy is proposed to satisfy the dynamic, non-equilibrium and stochastic passenger demands. The first stage is the optimization model of the train composition assignment and rolling stock circulation plan, and the objective is to minimize the operating costs of the urban metro system. The second stage is the optimization model of the robust passenger flow control strategy on all the stations of the urban rail transit line, to minimize the total passenger waiting time. The original model is reformulated as a mixed-integer linear programming model through some linearization methods, which can be directly solved by some optimization softwares (e.g., CPLEX/GUROBI). The numeral experiments demonstrate that the flexible train composition mode can reduce the operating costs by 30.2% with only 0.5% increase of the total passenger waiting time, which shows that the flexible train composition mode can reasonably reduce the operating costs while meeting the passenger demands. In addition, the robust passenger flow control strategy can avoid the conservative optimization results, which can be adapted to the stochastic passenger demands in the actual operation environment.

**Keywords:** urban rail transit; flexible train composition mode; rolling stock circulation plan; robust passenger flow control strategy; stochastic passenger demand; two stage stochastic programming

## 0 引言

第7次全国人口普查数据显示, 我国超大城市(常住人口1000万以上)达7座, 特大城市(常住人口

500万以上1000万以下)达14座<sup>[1]</sup>. 随着城市规模的扩大, 城市各功能分区间的空间距离不断增加, 导致职住分离现象突出. 由于工作与居住空间距离过远,

收稿日期: 2021-11-24; 录用日期: 2022-04-27.

基金项目: 中央高校基本科研业务费研究生创新项目(2020YJS217); 国家自然科学基金项目(72001019, 71825004).

责任编委: 龙建成.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: lxyang@bjtu.edu.cn.

上下班通勤时间和通勤距离增加,引发了一系列交通拥堵问题。

城市轨道交通因具有方便、快捷、运量大等特点,有利于降低通勤时间,缓解城市交通压力,吸引了大量通勤客流,导致通勤城轨线路常具有复杂的客流特征,如时空不均衡性,即早高峰进城方向客流量大,出城方向客流较少,晚高峰则出现相反的特征。客流的这种潮汐现象增加了城市轨道交通运输组织难度。传统成对单一编组模式易导致高峰期非拥堵方向运力的浪费,低峰期乘客等待时间过长,难以适应潮汐客流在时间和空间上的不均衡性。而灵活编组模式能够根据不同方向、不同时间段客流的特征,灵活改变列车编组类型,动态调整列车容量,有利于实现客流需求与运输能力的精准匹配。目前,灵活编组模式已在国内上海地铁16号线以及国外肯尼迪机场线、温哥华天车线等开展运营工作。实际运营效果表明灵活编组模式为缩短列车发车间隔,提升乘客服务质量提供了条件,且能够在保证运力的同时,有效降低系统运营能耗,减少车辆走行公里数。

虽然灵活编组模式能够较好地适应客流需求的差异性,且具有良好的社会、经济效益,但是也增加了城市轨道交通系统运输组织的复杂性。一方面,客流需求决定了编组方案,另一方面,编组方案需要车底运用计划的支撑,否则会导致编组方案难以执行。因此,灵活编组模式下的车底运用计划不仅需要保证车底的正常接续,还要根据编组类型进行车底的解编或重联操作。而现有文献大多侧重于单一固定编组方面的研究。如姚宇等<sup>[2]</sup>以具有2个车辆段的城市轨道交通线路为研究对象,构建了列车时刻表与车底运用计划协同优化模型,该混合整数线性规划模型可直接通过求解器进行求解。Wang等<sup>[3]</sup>考虑时变客流需求,在保证乘客服务水平的基础上,以极小化运营费用(车底出入库次数)为目标,建立了关于单个车辆段的列车时刻表与车底运用计划协同优化模型,并提出了3种求解策略。此外,虽然有文献在制定列车运行计划时,考虑采用多种列车编组,但是列车编组方案在其研究中是与车底运用计划分离的。如李正洋等<sup>[4]</sup>研究了多交路和多编组情况下列车运行计划优化问题,并构建了可被求解器直接求解的混合整数线性规划模型。许得杰等<sup>[5]</sup>以极小化乘客出行成本和企业运营成本为目标,建立了考虑大小交路列车开行比例和编组类型的列车开行方案优化模型,并设计了遗传算法进行求解。

另外,由于巨大的客流需求,某些城市轨道交通

线路在高峰期存在拥堵现象,客流的大量聚集存在巨大的安全隐患<sup>[6]</sup>。在车站空间改造受限的情况下,通过客流控制等管理措施以降低乘客的进站速率,进而控制车站内的乘客数量,是降低车站大客流聚集风险的有效方法。孟凡婷等<sup>[7]</sup>以极小化乘客等待时间为目标,构建了考虑列车跳站行为的时刻表与客流控制协同优化模型,该模型被线性化处理为混合整数线性规划形式。Shi等<sup>[8]</sup>建立了以乘客服务为导向的列车时刻表与精细化客流控制策略协同优化的混合整数线性规划模型,并设计了基于局部搜索的启发式算法进行求解。Liu等<sup>[9]</sup>研究了超拥堵情况下,列车时刻表、客流控制策略和车底运用计划一体化优化方法,并采用拉格朗日松弛算法进行求解。然而,上述文献均是在客流需求确定的情况下进行的研究,所得方案在应对具有较强随机性客流需求时存在一定的局限。因此,部分研究在制定列车运输组织方案时对客流需求的随机性进行了一定的考虑。如毕明凯等<sup>[10]</sup>假设市郊铁路的OD客流需求服从正态分布,建立了包含随机机会约束的市郊铁路停站方案优化模型。Meng等<sup>[11]</sup>构建了基于离散时间的城轨鲁棒客流控制优化模型,并设计了拉格朗日松弛算法进行求解。但是,该方法包含大量的决策变量和中间辅助变量,难以利用优化软件直接进行求解。

鉴于此,本文聚焦于城市轨道交通通勤线路,充分考虑客流的动态性、不均衡性和随机性,采用基于列车的建模方法以减少变量数量、方便求解,构建灵活编组模式下车底运用计划与鲁棒客流控制策略协同优化的两阶段随机规划模型,并通过线性化方法将原模型转化为混合整数线性规划模型。

## 1 问题描述

考虑如图1所示的车辆段位于两端的双向轨道交通线路,其中上行车站集合为 $\bar{S} = \{1, 2, \dots, S\}$ ,上行车次集合为 $N^{\text{up}} = \{1, 2, \dots, N\}$ ,下行车站集合为 $\underline{S} = \{S+1, S+2, \dots, 2S\}$ ,下行车次集合为 $N^{\text{dn}} = \{1, 2, \dots, N\}$ 。考虑多种编组类型,编组集合为 $\mathcal{J} = \{1, 2, \dots, J\}$ , $J$ 为编组的最大种类数量,如 $J=2$ 表示共有两种类型的编组(1个车组构成的编组类型、2个车组构成的编组类型)可投入运营。该集合的元素亦可代表组成编组类型的车组数量,如2表示第2种编组类型由2个车组构成。该线路客流需求具有明显的时空不均衡性,即高峰期一个方向客流需求较大,另一个方向需求较小。本文假设下行方向为客流需求较大方向。此外,针对客流的随机性,本文基于AFC历史客流数据构建客流需求随机场景集合 $\mathcal{W} =$

$\{1, 2, \dots, W\}$ , 每一随机场景  $\omega$  对应 1 组客流需求数据,  $\omega \in \mathcal{W}$ , 每一场景发生的概率为  $P(\omega)$ ,  $\sum_{\omega \in \mathcal{W}} P(\omega) = 1$ . 由于轨道交通系统通常是在工作日早晚高峰期间实行客流控制策略, 在实际应用中, 可将工作日每天的客流数据作为一个客流需求场景, 进而可将 1 周 5 个工作日或几周所有工作日客流需求作为客流需求场景集合. 基于上述线路拓扑结构和客流情况, 采用灵活编组模式以适应客流需求的不均衡性: 在客流需求较低方向和时段采用小编组(如图 1 中上行方向 1 个车组), 客流需求较大方向和时段采用大编组(如图 1 中下行方向 2 个车组). 当上下行不同编组类型车次衔接成功时, 需进行改编操作. 如图 1 所示, 下行大编组列车需进行解编操作, 上行小编组列车需进行重联操作, 以满足不同编组类型车次接续要求. 在此过程中, 需结合列车时刻表, 合理指派列车编组类型, 满足改编和车底衔接等相关约束, 同时考虑客流需求的动态性和随机性, 以极小化乘客等待时间和车底运营费用为目标, 得到基于灵活编组的车底运用计划和鲁棒客流控制策略.

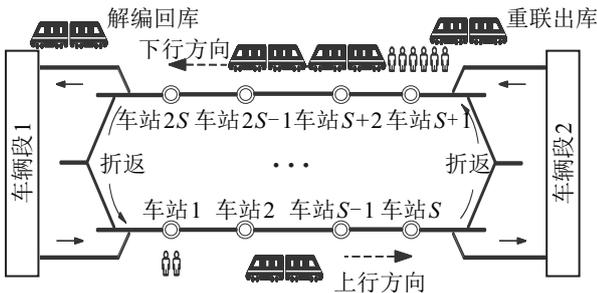


图 1 双向城市轨道交通线路结构

1.1 参数及变量定义

为便于描述, 表 1 为本文模型中参数的符号和定义. 本文模型所包含决策变量如下.

1) 基于灵活编组的车底运用计划相关变量.

$x_k$ : 整数变量, 车次  $k$  所选择的编组类型包含车组的数量,  $x_k \in \mathcal{J}$ .

$p_{k,k'}^{(j)}$ : 解编指示变量, 表示执行车次  $k$  的车底是否需要解编  $j$  个车组后接续执行车次  $k'$ , 是取值为 1, 否则为 0.

$q_{k,k'}^{(j)}$ : 重联指示变量, 表示执行车次  $k$  的车底是否需要重联  $j$  个车组后接续执行车次  $k'$ , 是取值为 1, 否则为 0.

$o_{k,k'}$ : 无操作指示变量, 表示接续执行车次  $k$  与车次  $k'$  的车底是否需要解编或重联操作, 不需要取值为 1, 否则为 0. 注意: 车次衔接失败以及相同编组车次衔接成功均不需要解编和重联操作.

$\alpha_k$ : 车底出库指示变量, 表示执行车次  $k$  的车底

是否需要从车辆段出发, 不需要取值为 1, 否则为 0.

$\beta_k$ : 车底入库指示变量, 表示执行完车次  $k$  的车底是否需要返回车辆段, 不需要取值为 1, 否则为 0.

$\gamma_{k,k'}$ : 衔接成功指示变量, 表示车次  $k$  与车次  $k'$  的车底是否能够成功接续, 是取值为 1, 否则为 0. 注意: 车底成功接续包含相同编组车次直接接续和不同编组车次通过解编或重联接续两种情况.

2) 鲁棒客流控制策略相关变量.

$n_{k,i}^{in,c}$ : 鲁棒客流控制策略下车站  $i$  允许乘坐车次  $k$  的乘客数量, 可视为各场景指导客流控制策略.

$n_{k,i}^{in,a}(\omega)$ : 场景  $\omega$  中车站  $i$  实际允许乘坐车次  $k$  的乘客数量.

表 1 参数说明

符号	定义
$\mathcal{W}$	场景集合
$\mathcal{J}$	编组类型集合
$N^{up}, N^{dn}$	上行、下行车次集合
$\bar{S}, \underline{S}$	上行、下行车站集合
$T$	规划离散时域集合
$\omega$	场景索引
$k, k', k''$	车次索引
$i, i', i''$	车站索引
$t$	离散时间索引
$S_i^-$	车站 $i$ 上游方向车站集合 (包含 $i$ )
$S_i^+$	车站 $i$ 下游方向车站集合 (不包含 $i$ )
CAP	单位车组的容量
$m_1$	单位车组正线运营费用
$m_2$	车底出入库费用
$m_3$	解编车组回库或重联车组出库费用
$a_{k,i}$	车次 $k$ 到达车站 $i$ 的时间
$d_{k,i}$	车次 $k$ 从车站 $i$ 出发的时间
$t_{k,i}^{(dw)}$	车次 $k$ 在车站 $i$ 的停站时间
$h_{k,i}$	车次 $k$ 与车次 $k+1$ 在车站 $i$ 的发车间隔
$\bar{A}, \underline{A}$	车辆段 1、车辆段 2 中初始车组数量
$\rho_{k,i}(t)$	$t$ 时刻车次 $k$ 是否已访问过车站 $i$ , 是 $\rho_{k,i}(t) = 1$ , 否则 $\rho_{k,i}(t) = 0$
$\bar{t}^{(tl)}, \bar{t}^{(tk)}$	车底从车站 $S$ 到车站 $S+1$ 在折返股道的最小走行时间和最大占用时间
$\underline{t}^{(tl)}, \underline{t}^{(tk)}$	车底从车站 $2S$ 到车站 $1$ 在折返股道的最小走行时间和最大占用时间
$\bar{t}^{(ep)}, \underline{t}^{(ep)}$	上行、下行车底重联时间
$\bar{t}^{(uep)}, \underline{t}^{(uep)}$	上行、下行车底解编时间
$\bar{t}^{(le)}, \underline{t}^{(le)}$	车底从车辆段 1、车辆段 2 到起点站的运行时间
$\bar{t}^{(re)}, \underline{t}^{(re)}$	车底从终点站返回车辆段 1、车辆段 2 的运行时间
$P(\omega)$	场景 $\omega$ 发生的概率
$\eta_{i,t}(\omega)$	场景 $\omega$ 中车站 $i$ 在 $t$ 时刻到达乘客的数量
$\theta_{k,i',i''}$	车次 $k$ 中从车站 $i'$ 上车到车站 $i''$ 的乘客所占比例

1.2 问题假设

1) 假设列车时刻表给定, 区间运行时间、停站时间均为事先给定的固定值。

2) 假设改编(解编和重联)操作只能在始发站或终到站进行, 且改编时间为事先给定的固定值。

3) 假设解编车组需返回车辆段, 重联车组需要从车辆段发出。

2 模型构建

2.1 两阶段随机规划模型

本文结合城市轨道交通运营特点, 构建基于灵活编组的城轨车底运用计划和鲁棒客流控制策略两阶段随机规划模型。第1阶段模型中, 主要考虑列车编组分配和车底运用计划的决策, 具体模型如下。

第1阶段模型目标函数主要包括4部分, 即列车正线运营费用、车底出入库费用、解编或重联车组出入库费用以及所有场景乘客等待时间期望, 有

$$\min \lambda_1 \cdot (F_1 + F_2 + F_3) + \lambda_2 \cdot \mathbf{E}_\xi[Q(x_k, \xi(\omega))].$$

$$F_1 = \sum_{k \in N^{\text{up}} \cup N^{\text{dn}}} x_k \cdot m_1, \tag{1}$$

$$F_2 = \sum_{k \in N^{\text{up}} \cup N^{\text{dn}}} (1 - \alpha_k + 1 - \beta_k) \cdot m_2, \tag{2}$$

$$F_3 = m_3 \cdot \left[ \sum_{k \in N^{\text{up}}, k' \in N^{\text{dn}}} \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} j \cdot (p_{k,k'}^{(j)} + q_{k,k'}^{(j)}) + \sum_{k \in N^{\text{dn}}, k' \in N^{\text{up}}} \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} j \cdot (p_{k,k'}^{(j)} + q_{k,k'}^{(j)}) \right]. \tag{3}$$

其中:  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为运营费用和乘客等待时间的权重系数,  $F_1$  为正线运营费用的计算,  $F_2$  为车底出入库费用的计算,  $F_3$  为解编或重联编组出入库费用的计算。

下式分别为上行、下行车次与车底的匹配关系:

$$\begin{cases} \beta_k = \sum_{k' \in N^{\text{dn}}} \gamma_{k,k'}, \\ \alpha_k = \sum_{k' \in N^{\text{dn}}} \gamma_{k',k}, \end{cases} \quad \forall k \in N^{\text{up}}; \tag{4}$$

$$\begin{cases} \beta_{k'} = \sum_{k \in N^{\text{up}}} \gamma_{k',k}, \\ \alpha_{k'} = \sum_{k \in N^{\text{up}}} \gamma_{k,k'}, \end{cases} \quad \forall k' \in N^{\text{dn}}. \tag{5}$$

其中: 式(4)为执行上行车次  $k$  的车底最多可接续执行1个后续车次, 且最多来自1个执行前向车次的车底; 式(5)执行下行车次  $k'$  的车底同理。

车次未衔接成功时 ( $\gamma_{k,k'} = 0$ ) 无需解编或重联操作, 有

$$\begin{cases} \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} q_{k,k'}^{(j)} \leq \gamma_{k,k'}, \\ \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} p_{k,k'}^{(j)} \leq \gamma_{k,k'}, \end{cases}$$

$$\forall k \in N^{\text{up}}, k' \in N^{\text{dn}} \text{ or } \forall k \in N^{\text{dn}}, k' \in N^{\text{up}}. \tag{6}$$

上行、下行车次衔接成功时必须满足必要的最小折返时间、解编或重联时间约束, 即

$$\begin{cases} a_{k',1} - d_{k,2S} \geq \underline{t}^{(\text{nl})} + \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} q_{k,k'}^{(j)} \cdot \underline{t}^{(\text{cp})} + \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} p_{k,k'}^{(j)} \cdot \underline{t}^{(\text{ucp})} - M \cdot (1 - \gamma_{k,k'}), \\ a_{k,S+1} - d_{k',S} \geq \bar{t}^{(\text{nl})} + \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} q_{k',k}^{(j)} \cdot \bar{t}^{(\text{cp})} + \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} p_{k',k}^{(j)} \cdot \bar{t}^{(\text{ucp})} - M \cdot (1 - \gamma_{k',k}), \end{cases} \quad \forall k \in N^{\text{up}}, k' \in N^{\text{dn}}. \tag{7}$$

车次衔接过程受到折返股道最大占用时间的限制为

$$\begin{cases} a_{k',1} - d_{k,2S} \leq \underline{t}^{(\text{tk})} + M \cdot (1 - \gamma_{k,k'}), \\ a_{k,S+1} - d_{k',S} \leq \bar{t}^{(\text{tk})} + M \cdot (1 - \gamma_{k',k}), \end{cases} \quad \forall k \in N^{\text{up}}, k' \in N^{\text{dn}}. \tag{8}$$

灵活编组相关的决策变量  $p_{k,k'}^{(j)}$ 、 $q_{k,k'}^{(j)}$ 、 $o_{k,k'}$  只能存在一种状态, 有

$$\sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} (p_{k,k'}^{(j)} + q_{k,k'}^{(j)}) + o_{k,k'} = 1,$$

$$\forall k \in N^{\text{up}}, k' \in N^{\text{dn}} \text{ or } \forall k \in N^{\text{dn}}, k' \in N^{\text{up}}. \tag{9}$$

当车次  $k'$  与  $k$  的车底能够成功接续时(即  $\gamma_{k,k'} = 1$ ), 其编组类型存在如下关系:

$$x_{k'} = x_k + \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} [j \cdot q_{k,k'}^{(j)} - j \cdot p_{k,k'}^{(j)}].$$

如: 当  $J = 2$  时,  $\mathcal{J} = \{1, 2\}$ , 上述关系为: 若  $\gamma_{k,k'} = 1$ ,  $x_{k'} = x_k + q_{k,k'}^{(1)} - p_{k,k'}^{(1)}$ . 此时, 若  $x_k = 2, x_{k'} = 1$ , 则执行车次  $k$  的车底需要解编1个车组后才能继续接续执行车次  $k'$ , 即  $p_{k,k'}^{(1)} = 1, q_{k,k'}^{(1)} = 0$ . 当  $x_{k'}$  和  $x_k$  取其他值时, 该表达式同样成立. 综上, 该过程可构建为

$$\begin{cases} x_{k'} \leq x_k + \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} (j \cdot q_{k,k'}^{(j)} - j \cdot p_{k,k'}^{(j)}) + M \cdot (1 - \gamma_{k,k'}), \\ x_{k'} \geq x_k + \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} (j \cdot q_{k,k'}^{(j)} - j \cdot p_{k,k'}^{(j)}) - M \cdot (1 - \gamma_{k,k'}), \end{cases}$$

$$\forall k \in N^{\text{up}}, k' \in N^{\text{dn}} \text{ or } \forall k \in N^{\text{dn}}, k' \in N^{\text{up}}. \tag{10}$$

车辆段1中, 车底回库、解编车组回库会增加车辆段剩余车组数量. 车底出库、重联车组出库会减少

车辆段剩余车底数量. 其中,回库车底数量由

$$\sum_{k \in N^{dn}} \rho_{k,2S}(t - \underline{t}^{(re)}) \cdot (1 - \beta_k) \cdot x_k$$

计算,解编回库车组数量由

$$\sum_{k \in N^{dn}} \sum_{k' \in N^{up}} j \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} j \cdot p_{k,k'}^{(j)} \cdot \rho_{k,2S}(t - \underline{t}^{(re)} - \underline{t}^{(ucp)})$$

计算,出库车底数量由

$$\sum_{k' \in N^{up}} \rho_{k',1}(t + \bar{t}^{(le)} + t_{k',1}^{(dw)}) \cdot (1 - \alpha_{k'}) \cdot x_{k'}$$

计算,重联出库车组数量由

$$\sum_{k \in N^{dn}} \sum_{k' \in N^{up}} \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} j \cdot q_{k,k'}^{(j)} \cdot \rho_{k',1}(t + \bar{t}^{(le)} + \underline{t}^{(cp)})$$

计算. 综上,任意离散时间内车辆段1中剩余车组数量的限制为

$$\begin{aligned} & \bar{A} + \sum_{k \in N^{dn}} \rho_{k,2S}(t - \underline{t}^{(re)}) \cdot (1 - \beta_k) \cdot x_k - \\ & \sum_{k' \in N^{up}} \rho_{k',1}(t + \bar{t}^{(le)} + t_{k',1}^{(dw)}) \cdot (1 - \alpha_{k'}) \cdot x_{k'} + \\ & \sum_{k \in N^{dn}} \sum_{k' \in N^{up}} \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} j \cdot p_{k,k'}^{(j)} \cdot \rho_{k,2S}(t - \underline{t}^{(re)} - \\ & \underline{t}^{(ucp)}) - \sum_{k \in N^{dn}} \sum_{k' \in N^{up}} \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} j \cdot q_{k,k'}^{(j)} \cdot \rho_{k',1}(t + \\ & \bar{t}^{(le)} + \underline{t}^{(cp)}) \geq 0, \\ & \forall t, t + \bar{t}^{(le)} + t_{k',1}^{(dw)}, t - \underline{t}^{(re)} - \underline{t}^{(ucp)}, \\ & t + \bar{t}^{(le)} + \underline{t}^{(cp)} \in \mathcal{T}. \end{aligned} \quad (11)$$

其中  $\rho_{k,i}(t)$  表示  $t$  时刻车次  $k$  是否已访问过车站  $i$ , 是  $\rho_{k,i}(t) = 1$ , 否则  $\rho_{k,i}(t) = 0$ . 如车次  $k$  在  $t = 2$  时刻从车站  $i$  出发, 则对于  $\forall t \geq 2$ , 均有  $\rho_{k,i}(t) = 1$ .

同理,车辆段2中剩余车组数量的限制为

$$\begin{aligned} & \underline{A} + \sum_{k' \in N^{up}} \rho_{k',S}(t - \bar{t}^{(re)}) \cdot (1 - \beta_{k'}) \cdot x_{k'} - \\ & \sum_{k \in N^{dn}} \rho_{k,S+1}(t + \underline{t}^{(le)} + t_{k,S+1}^{(dw)}) \cdot (1 - \alpha_k) \cdot x_k + \\ & \sum_{k \in N^{dn}} \sum_{k' \in N^{up}} \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} j \cdot p_{k',k}^{(j)} \cdot \rho_{k',S}(t - \bar{t}^{(re)}) - \\ & \bar{t}^{(ucp)}) - \sum_{k \in N^{dn}} \sum_{k' \in N^{up}} \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} j \cdot q_{k',k}^{(j)} \cdot \rho_{k,S+1}(t + \\ & \underline{t}^{(le)} + \bar{t}^{(cp)}) \geq 0, \\ & \forall t, t + \underline{t}^{(le)} + t_{k,S+1}^{(dw)}, t - \bar{t}^{(re)} - \bar{t}^{(ucp)}, \\ & t + \underline{t}^{(le)} + \bar{t}^{(cp)} \in \mathcal{T}. \end{aligned} \quad (12)$$

第2阶段模型是在给定编组类型和车底运用计划的基础上,给出指导客流控制策略并对场景  $w$  中具

体客流控制策略进行决策. 具体模型如下.

第2阶段模型以极小化乘客总等待时间为目标. 本文对乘客等待时间采用近似的计算方法: 发车间隔的一半乘以等待乘客数量,有

$$\begin{aligned} & Q(x_k, \xi(\omega)) = \\ & \min \sum_{i \in \bar{\mathcal{S}} \cup \underline{\mathcal{S}}} \sum_{k \in N^{up} \cup N^{dn}} \frac{h_{k,i}}{2} \cdot \left[ \sum_{t \leq d_{k,i}} \eta_{i,t}(\omega) - \right. \\ & \left. \sum_{k'' < k} n_{k'',i}^{in,a}(\omega) \right]. \end{aligned}$$

场景  $w$  中实际上车乘客数量不大于等待乘客数量,有

$$\begin{aligned} & n_{k,i}^{in,a}(\omega) \leq \sum_{t \leq d_{k,i}} \eta_{i,t}(\omega) - \sum_{k'' < k} n_{k'',i}^{in,a}(\omega), \\ & \forall k \in N^{up}, i \in \bar{\mathcal{S}}, \omega \in \mathcal{W} \text{ or } \forall k \in N^{dn}, \\ & i \in \underline{\mathcal{S}}, \omega \in \mathcal{W}. \end{aligned} \quad (13)$$

车载乘客数量受列车容量的限制如下式所示:

$$\begin{aligned} & \sum_{i' \in \bar{\mathcal{S}}_i} \sum_{i'' \in \underline{\mathcal{S}}_i^+} n_{k,i'}^{in,c} \cdot \theta_{k,i',i''} \leq x_k \cdot \text{CAP}, \\ & \forall k \in N^{up}, i \in \bar{\mathcal{S}} \text{ or } \forall k \in N^{dn}, i \in \underline{\mathcal{S}}. \end{aligned} \quad (14)$$

各场景  $w$  中实际上车乘客数量小于等于鲁棒客流控制策略上车乘客数量,有

$$\begin{aligned} & n_{k,i}^{in,a}(\omega) \leq n_{k,i}^{in,c}, \forall k \in N^{up}, \\ & i \in \bar{\mathcal{S}}, \omega \in \mathcal{W} \text{ or } \forall k \in N^{dn}, i \in \underline{\mathcal{S}}, \omega \in \mathcal{W}. \end{aligned} \quad (15)$$

下式分别为场景  $w$  中上行、下行乘客需求均应被满足:

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} \eta_{i,t}(\omega) = \sum_{k \in N^{up}} n_{k,i}^{in,a}(\omega), \forall i \in \bar{\mathcal{S}}, \omega \in \mathcal{W}; \quad (16)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} \eta_{i,t}(\omega) = \sum_{k' \in N^{dn}} n_{k',i}^{in,a}(\omega), \forall i \in \underline{\mathcal{S}}, \omega \in \mathcal{W}. \quad (17)$$

## 2.2 模型线性化及求解方法

上述两阶段随机规划模型中,目标函数中所有场景乘客等待时间的期望可等价转换为确定的等价类,即

$$E_{\xi}[Q(x_k, \xi(\omega))] = \sum_{\omega \in \mathcal{W}} P(\omega) \cdot Q(x_k, \xi(\omega)).$$

此外,式(11)和(12)为非线性约束,由以下定理对其进行线性化处理.

**定理1** 式(11)和(12)为典型的整数变量与0-1变量相乘形式的非线性约束,可参考文献[12]中方法,引入2个辅助变量进行处理:  $\underline{z}_k(t) = \rho_{k,2S}(t - \underline{t}^{(re)}) \cdot (1 - \beta_k) \cdot x_k$  和  $\bar{v}_{k'}(t) = \rho_{k',1}(t + \bar{t}^{(le)} + t_{k',1}^{(dw)}) \cdot (1 - \alpha_{k'}) \cdot x_{k'}$ . 综上,式(11)可等价转换为

$$\bar{A} + \sum_{k \in N^{dn}} \zeta_k(t) - \sum_{k' \in N^{up}} \bar{\kappa}_{k'}(t) + \sum_{k \in N^{dn}} \sum_{k' \in N^{up}} \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} [j \cdot p_{k,k'}^{(j)} \cdot \rho_{k,2S}(t - \underline{t}^{(re)}) - \underline{t}^{(ucp)}] - j \cdot q_{k,k'}^{(j)} \cdot \rho_{k',1}(t + \bar{t}^{(le)} + \underline{t}^{(cp)}) \geq 0, \quad \forall t, t - \underline{t}^{(re)} - \underline{t}^{(ucp)}, t + \bar{t}^{(le)} + \underline{t}^{(cp)} \in \mathcal{T}. \quad (18)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \zeta_k(t) &\leq \rho_{k,2S}(t - \underline{t}^{(re)}) \cdot x_k, \\ \zeta_k(t) &\leq M \cdot (1 - \beta_k), \\ \zeta_k(t) &\geq \rho_{k,2S}(t - \underline{t}^{(re)}) \cdot x_k - M \cdot \beta_k, \\ \bar{\kappa}_{k'}(t) &\leq \rho_{k',1}(t + \bar{t}^{(le)} + t_{k',1}^{(dw)}) \cdot x_{k'}, \\ \bar{\kappa}_{k'}(t) &\leq M \cdot (1 - \alpha_{k'}), \\ \bar{\kappa}_{k'}(t) &\geq \rho_{k',1}(t + \bar{t}^{(le)} + t_{k',1}^{(dw)}) \cdot x_{k'} - M \cdot \alpha_{k'}, \end{aligned} \right. \quad \forall k \in N^{dn}, k' \in N^{up}, t, t - \underline{t}^{(re)}, t + \bar{t}^{(le)} + t_{k',1}^{(dw)} \in \mathcal{T}. \quad (19)$$

同理,通过引入  $\bar{\zeta}_{k'}(t) = \rho_{k',S}(t - \bar{t}^{(re)}) \cdot (1 - \beta_{k'}) \cdot x_{k'}$  和  $\underline{\kappa}_k(t) = \rho_{k,S+1}(t + \underline{t}^{(le)} + t_{k,S+1}^{(dw)}) \cdot (1 - \alpha_k) \cdot x_k$ , 式(12)可等价转换为

$$\underline{A} + \sum_{k' \in N^{up}} \bar{\zeta}_{k'}(t) - \sum_{k \in N^{dn}} \underline{\kappa}_k(t) + \sum_{k \in N^{dn}} \sum_{k' \in N^{up}} \sum_{j \in \mathcal{J} \setminus \{J\}} [j \cdot p_{k',k}^{(j)} \cdot \rho_{k',S}(t - \bar{t}^{(re)}) - \bar{t}^{(ucp)}] - j \cdot q_{k',k}^{(j)} \cdot \rho_{k,S+1}(t + \underline{t}^{(le)} + \bar{t}^{(cp)}) \geq 0, \quad \forall t, t - \bar{t}^{(re)} - \bar{t}^{(ucp)}, t + \underline{t}^{(le)} + \bar{t}^{(cp)} \in \mathcal{T}. \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\zeta}_{k'}(t) &\leq \rho_{k',S}(t - \bar{t}^{(re)}) \cdot x_{k'}, \\ \bar{\zeta}_{k'}(t) &\leq M \cdot (1 - \beta_{k'}), \\ \bar{\zeta}_{k'}(t) &\geq \rho_{k',S}(t - \bar{t}^{(re)}) \cdot x_{k'} - M \cdot \beta_{k'}, \\ \underline{\kappa}_k(t) &\leq \rho_{k,S+1}(t + \underline{t}^{(le)} + t_{k,S+1}^{(dw)}) \cdot x_k, \\ \underline{\kappa}_k(t) &\leq M \cdot (1 - \alpha_k), \\ \underline{\kappa}_k(t) &\geq \rho_{k,S+1}(t + \underline{t}^{(le)} + t_{k,S+1}^{(dw)}) \cdot x_k - M \cdot \alpha_k, \end{aligned} \right. \quad \forall k \in N^{dn}, k' \in N^{up}, t, t - \underline{t}^{(re)}, t + \bar{t}^{(le)} + t_{k,S+1}^{(dw)} \in \mathcal{T}. \quad (21)$$

综上,原两阶段随机规划模型可重构为如下等价的混合整数线性规划模型,该模型可利用优化软件(如CPLEX等)直接进行求解:

$$\begin{aligned} \min \quad & F_1 + F_2 + F_3 + \sum_{\omega \in \mathcal{W}} P(\omega) \cdot Q(x_k, \xi(\omega)); \\ \text{s.t.} \quad & \text{式(1)} \sim (10), (13) \sim (21). \end{aligned}$$

### 3 数值算例

#### 3.1 算例描述

本文以某城市轨道交通线路实际运营数据为基础,设计3组数值算例测试所提出方法的有效性.该线路现采用单一编组方式运行,车辆段位于线路两端,上下行各有14座车站,车站1~14为下行方向,车站15~28为上行方向.研究运营时段为7:00~11:00.研究时段内动态客流需求如图2所示.由图2可见,该线路高峰期(7:30~8:30)下行方向客流需求明显大于上行方向客流需求,存在明显时空不均现象,适合用于本文数值算例.选择某工作日运营时刻表作为输入参数,其中上下行方向各开行46个车次.考虑采用两种编组方式运行,单位车组容量为730人.列车正线运营费用、车底出入库费用、解编车组回库或重联车组出库费用采用文献[2]中计算方法,即  $m_1 = 700, m_2 = 200, m_3 = 100$ .其他参数取值如表2所示.所有实验均在CPU为i7-9750的Windows 10操作系统上,使用VB.NET(Visual Studio 2019)调用CPLEX 12.5优化软件进行求解.

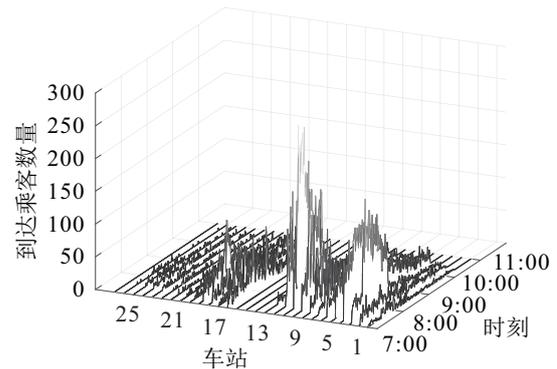


图2 研究时段客流需求

表2 参数取值

参数符号	参数取值/min
$\bar{t}^{(rl)}, \underline{t}^{(rl)}$	2, 1
$\bar{t}^{(cp)}, \underline{t}^{(cp)}$	1, 1
$\bar{t}^{(ucp)}, \underline{t}^{(ucp)}$	1, 1
$\bar{t}^{(tk)}, \underline{t}^{(tk)}$	6, 6
$\bar{t}^{(le)}, \underline{t}^{(le)}$	2, 2
$\bar{t}^{(re)}, \underline{t}^{(re)}$	2, 2

#### 3.2 结果分析

本文首先在客流需求确定情况下,对灵活编组模式下车底运用计划与客流控制协同优化结果进行分析.经过4.9s,CPLEX返回目标函数为150949且gap为0的解.其中:乘客等待时间为186981min,总运营费用为96900元.车底运用计划和客流聚集情况如图3所示.由图3可见,在编组指派方面,大编组在下行方向客流高峰期投入使用,而在客流需求较低的

上行方向和平峰期的下行方向,小编组列车投入运营. 在车底运用计划方面,为满足时刻表和编组方案的可行性,车辆段1和车辆段2分别有13辆和12辆车底出库. 此外,为实现小编组列车与大编组列车的成功衔接,车辆段1有15个重联车组出库(图3实线椭圆部分),21个车组在车站15进行解编后返回车辆段

2(图3虚线椭圆部分). 在所研究运营时段内,大部分车底承担了5列以上车次,在全天运营计划中,其将完成更多车次. 表明所提出方法能够根据客流需求动态指派列车编组,并能够保证车底资源有效地循环利用,缓解了城市轨道交通供给与需求间的矛盾.

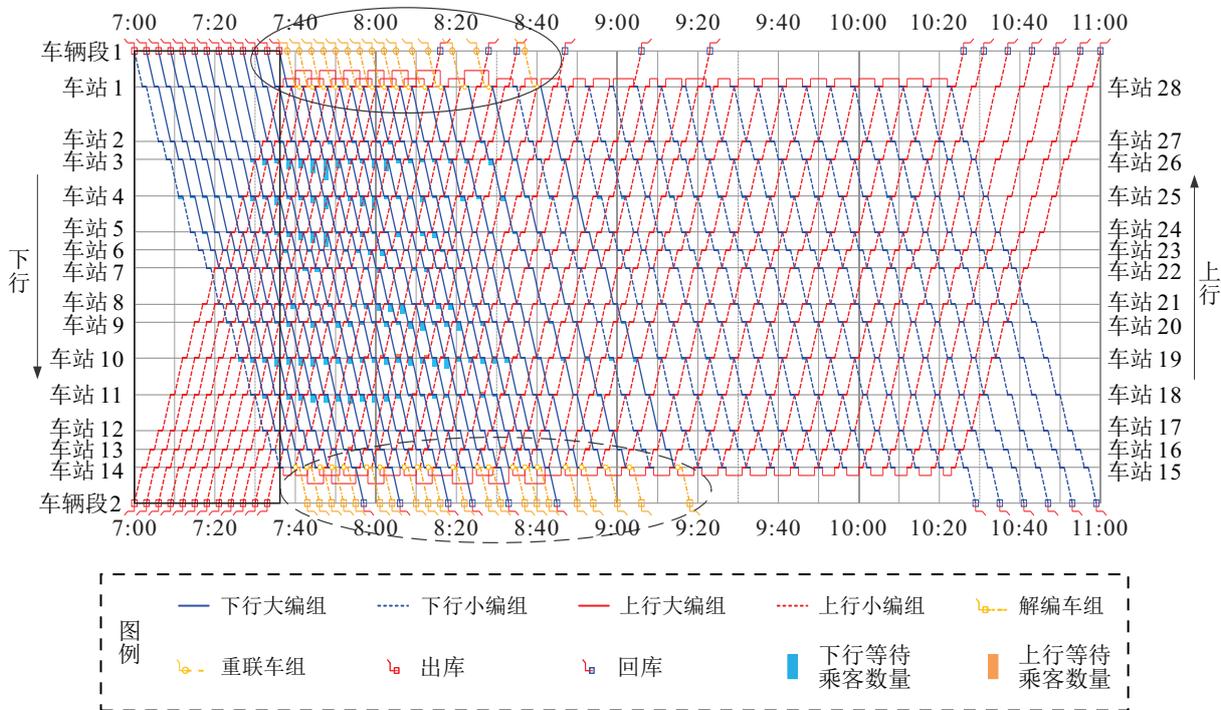


图3 灵活编组模式下车底运用计划与客流控制协同优化结果

此外,表3比较了灵活编组模式与固定编组模式的运营效果,其中  $gap_1$  和  $gap_2$  分别为两种模式乘客等待时间、总运营费用的偏差. 由表3可见,在使用车底数量相同的情况下,相比固定编组模式,灵活编组模式在仅增加0.5%乘客等待时间的基础上,降低了30.2%的总运营费用. 表明所提出方法在满足客流需求的同时,能够有效降低总运营费用,得到系统较优的效果.

表3 灵活编组模式与固定编组模式运营效果对比

编组模式	乘客等待时间/min	$gap_1$ /%	总运营费用/元	$gap_2$ /%	使用车底数量
固定编组模式	185 969	—	138 800	—	25
灵活编组模式	186 981	0.5	96 900	30.2	25

为比较客流控制策略对乘客等待时间的影响,以图3中列车时刻表和车底运用计划为基础,在相同客流需求条件下,计算得到无客流控制策略时乘客等待时间为209 546 min. 可知实行客流控制策略与无客流控制相比,乘客等待时间降低了10.8%. 图4为无客流控制策略时,车站等待乘客情况. 由图4可见,无客流控制策略时,下行方向车站10出现大量滞留乘

客,最大等待乘客数量达2 707人,存在较大的安全隐患. 而图3中实行客流控制策略时,各车站等待乘客数量较为均衡,未出现客流大量积压现象. 上述结果表明,客流控制策略能够明显改善客流聚集和拥堵情况,降低车站安全风险.

进一步,基于图2中的客流需求,本文在0.8~1.2范围内随机生成另外9个场景客流数据,以分析鲁棒客流控制策略下城市轨道交通系统服务水平. 基于上述10个场景客流数据,表4比较了单场景最优客流控制策略、鲁棒客流控制策略与极端条件下客流控制策略(分别记为  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ )乘客等待时间的差异,其中  $Dev_1$ 、 $Dev_2$  计算方法如下:  $Dev_1 = [(L_2 - L_1) / L_2] \times 100\%$ ,  $Dev_2 = [(L_3 - L_2) / L_3] \times 100\%$ . 由表4可见,由于极端条件下客流控制策略过于保守,  $L_3$  情形下乘客等待时间远高于  $L_2$  与  $L_1$ ,表现较差. 而所提出鲁棒客流控制策略乘客等待时间虽然比单场景最优客流控制方法略高,但偏差仍在2.2%以内,总体表现良好,具有较强的鲁棒性. 上述结果表明,所提出方法可避免得到过于保守的客流控制策略,对实际运营过程中随机客流需求表现出较好的适应性.

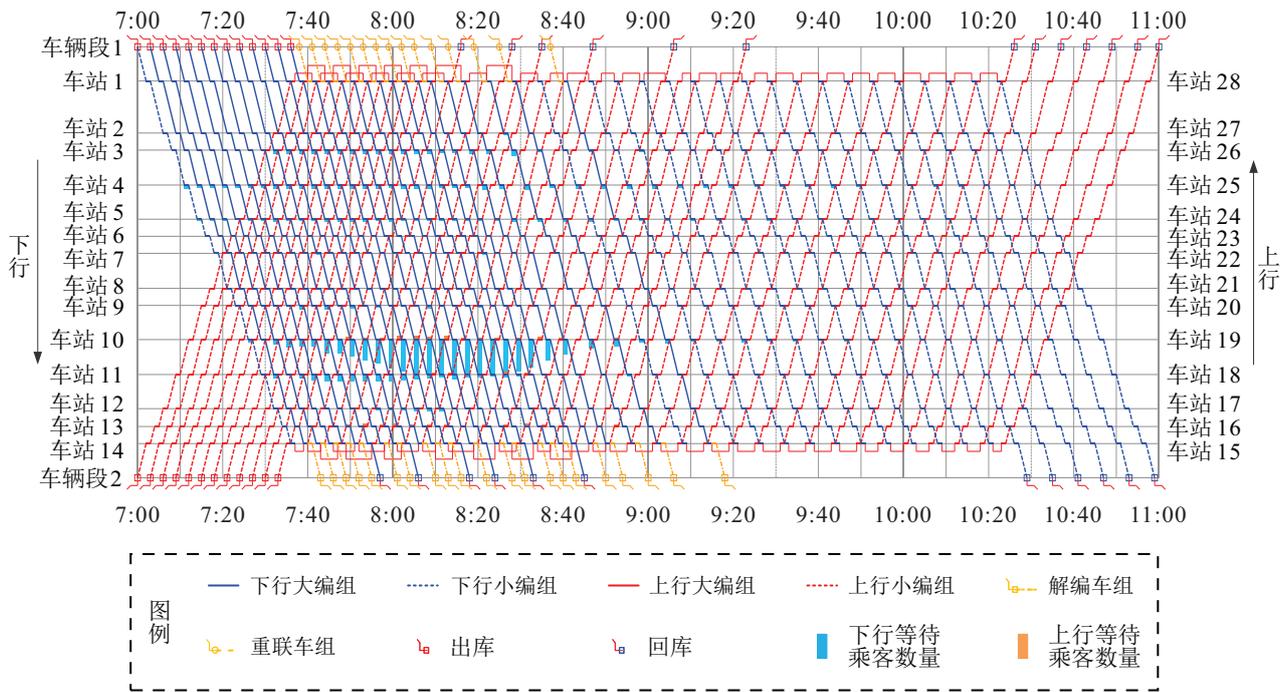


图4 无客流控制结果

表4 不同场景乘客等待时间对比

场景	$L_1 / \text{min}$	$L_2 / \text{min}$	$\text{Dev}_1 / \%$	$L_3 / \text{min}$	$\text{Dev}_2 / \%$
场景1	186981	187725	0.4	267987	29.9
场景2	190859	193311	1.3	268016	27.9
场景3	188679	191879	1.7	271610	29.3
场景4	186928	190580	1.9	264416	27.9
场景5	185870	187986	1.1	267230	29.6
场景6	188195	191660	1.8	269983	29.0
场景7	189352	191843	1.3	266020	27.9
场景8	182954	186006	1.7	266263	30.1
场景9	191615	195908	2.2	268394	27.0
场景10	184318	187514	1.7	266677	29.7

### 4 结论

本文综合考虑了城市轨道交通通勤线路客流需求的动态性、不均衡性和随机性,构建了灵活编组模式下车底运用计划和鲁棒客流控制策略两阶段随机规划模型,通过线性化处理,该模型转化为可被优化软件直接求解的混合整数线性规划模型. 通过数值实验得到主要结论如下.

1) 与单一固定编组模式相比,灵活编组模式在使用相同车底数量的情况下,未对乘客服务水平产生较大影响(乘客等待时间仅增加0.5%),可大幅度降低轨道交通企业运营成本(约30.2%的运营费用).

2) 良好的客流控制策略不仅可降低乘客等待时间(约10.8%),且可有效降低车站聚集乘客数量,使得各车站等待乘客数量更加均衡,降低乘客聚集的风

险.

3) 鲁棒客流控制策略与单场景最优客流控制策略相比偏差较小,且能够避免传统鲁棒方法过于保守的问题,对运营过程中随机客流需求具有较好的适应性.

### 参考文献(References)

[1] 庞无忌. 我国千万级人口城市持续增多[N]. 中国改革报, 2021-09-29(002).  
(Pang W J. The cities with tens of millions of population continue to increase[N]. China Reform Daily, 2021-09-29(002).)

[2] 姚宇, 朱晓宁, 康柳江, 等. 城市轨道交通列车时刻表与车底运用整合优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(1): 200-206.  
(Yao Y, Zhu X N, Kang L J, et al. An integrated optimization model of train timetabling and rolling stock scheduling for an urban railway line[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(1): 200-206.)

[3] Wang Y H, D'Ariano A, Yin J T, et al. Passenger demand oriented train scheduling and rolling stock circulation planning for an urban rail transit line[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 118: 193-227.

[4] 李正洋, 赵军, 彭其渊. 考虑多交路多编组的城市轨道交通线路列车交路计划优化[J]. 铁道学报, 2020, 42(6): 1-11.  
(Li Z Y, Zhao J, Peng Q Y. Optimizing the train service route plan in an urban rail transit line with multiple service routes and multiple train sizes[J]. Journal of the

- China Railway Society, 2020, 42(6): 1-11.)
- [5] 许得杰, 毛保华, 陈绍宽, 等. 考虑开行比例的大小交路列车开行方案优化[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 173-186.  
(Xu D J, Mao B H, Chen S K, et al. Optimization of operation scheme for full-length and short-turn routings considering operation proportion[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 173-186.)
- [6] 李登辉, 彭其渊, 鲁工圆, 等. 城市轨道交通高峰线路客流协同控制方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(6): 141-147.  
(Li D H, Peng Q Y, Lu G Y, et al. Control method for passenger inflow control with coordination on urban rail transit line in peak hours[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(6): 141-147.)
- [7] 孟凡婷, 杨立兴, 卢亚菡, 等. 考虑跳停策略的城轨列车运行图与车站限流协同优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(3): 156-162.  
(Meng F T, Yang L X, Lu Y H, et al. Collaborative optimization of urban rail transit operation and passenger flow control at stations using skip-stop pattern strategy[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(3): 156-162.)
- [8] Shi J G, Yang L X, Yang J, et al. Service-oriented train timetabling with collaborative passenger flow control on an oversaturated metro line: An integer linear optimization approach[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 110: 26-59.
- [9] Liu R M, Li S K, Yang L X. Collaborative optimization for metro train scheduling and train connections combined with passenger flow control strategy[J]. Omega, 2020, 90: 101990.
- [10] 毕明凯, 何世伟, 黎浩东, 等. 基于随机客流OD的市郊铁路停站方案优化研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(10): 1-7.  
(Bi M K, He S W, Li H D, et al. Research on optimization of suburban railway stop schedule based on random traffic OD[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(10): 1-7.)
- [11] Meng F T, Yang L X, Shi J G, et al. Collaborative passenger flow control for oversaturated metro lines: A stochastic optimization method[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2022, 18(3): 619-658.
- [12] Bemporad A, Morari M. Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints[J]. Automatica, 1999, 35(3): 407-427.

#### 作者简介

周厚盛(1996—), 男, 博士生, 从事城市轨道交通列车运行组织优化的研究, E-mail: hszhou@bjtu.edu.cn;

戚建国(1990—), 男, 讲师, 博士, 从事铁路运输组织与轨道交通运营管理等研究, E-mail: qijianguo@bjtu.edu.cn;

杨立兴(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 从事交通运输规划与管理等研究, E-mail: lxyang@bjtu.edu.cn;

石俊刚(1986—), 男, 副教授, 博士, 从事轨道交通运营管理研究, E-mail: jgshi@ecjtu.edu.cn;

龚聪聪(1995—), 女, 博士生, 从事城市轨道交通列车运行组织优化的研究, E-mail: 19114002@bjtu.edu.cn.