

中文引用格式:米根锁,张园香. 突发大客流下地铁客流控制优化模型[J]. 中国安全科学学报,2024,34(10):174-182.

英文引用格式:MI Gensuo, ZHANG Yuanxiang. Optimization model of subway passenger flow control under sudden large passenger flow [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(10):174-182.

突发大客流下地铁客流控制优化模型^{*}

米根锁 教授, 张园香

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

中图分类号: X951 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.10.0520

基金项目: 国家自然科学基金资助(61763025)。

【摘要】 为及时响应和缓解地铁线路突发大客流,避免出现过度拥挤现象,提出地铁客流控制优化模型。首先以最小化乘客总等待时间与最大化区间通过客流量为目标,以允许进站客流量为决策变量,考虑供给侧、需求侧与客流控制强度等约束,构建精细化的确定型模型(RDM)。在此基础上,分析客流需求的波动性,结合鲁棒优化理论建立鲁棒模型(RM)。其次,利用鲁棒对等转换理论,线性化处理RM中的非线性约束,并借助Lingo优化求解器进行求解。最后,以某地铁线路为例进行分析验证。结果表明:在RDM模型中,利用运力平衡系数来决策允许进站客流量,可以有效缓解客流拥挤压力,提高区间运输效率;在应对不确定客流需求时,通过RM模型引入鲁棒系数来调节客流需求的波动区间,从而降低客流聚集风险,提高客流控制方案的可靠性。

【关键词】 突发大客流; 地铁; 客流控制; 优化模型; 精细化的确定型模型(RDM); 鲁棒模型(RM)

Optimization model of subway passenger flow control under sudden large passenger flow

MI Gensuo, ZHANG Yuanxiang

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University,
Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: To respond and alleviate the sudden large passenger flow of metro lines in time, a subway passenger flow control optimization model was proposed. Firstly, with the goals of minimizing the total waiting time of passengers and maximizing passenger flow through the interval, permitted inbound passenger flow was used as a decision-making variable to propose a RDM considering constraints such as the supply side, demand side, and passenger flow control intensity. Moreover, the volatility of passenger flow demand was analyzed, and a RM was developed by combining robust optimization theory. The volatility of passenger flow demand was analyzed, and an RM was developed combined with robust optimization theory. Secondly, the robust equivalent transformation theory was used to linearize the nonlinear constraints in RM and solved by the Lingo optimization solver. Finally, a metro line was taken as an example for analysis and verification. The results showed that the RDM model using capacity balance coefficients to decide the permissible inbound passenger flow effectively alleviated the pressure of passenger

congestion and improved the efficiency of interval transport. When dealing with uncertain passenger demand, robustness coefficients were introduced in the RM model to adjust fluctuations range of passenger flow demand, thereby reducing the aggregation passenger flow risk and improving the reliability of the passenger flow control scheme.

Keywords: sudden large passenger flow; metro systems; passenger flow control; optimization model; refined deterministic model (RDM); robust model (RM)

0 引言

地铁凭借准时、高效、运量大等优势吸引了大量客流,但在节假日或举办大型活动时,大量客流会在短时间内涌入地铁部分站点,对轨道交通系统造成巨大的瞬时冲击,导致出现列车超载、站台拥堵等现象,给乘客和地铁线路带来极大的安全隐患。

为缓解大客流压力,最常用的运输组织方式为客流控制,即通过限制客流进入站台的速度,来缓解站台客流聚集和拥挤程度,以提高运输安全水平。相关客流控制研究已取得了一定成果,如王培恒等^[1]考虑早高峰时段地铁线路和换乘站的客流运输压力,构建了列车换乘站跳站开行与客流控制协同优化模型,以降低换乘站客流疏解压力。康崇仁等^[2]针对高峰时段客流需求过饱和问题,提出了客流控制策略与列车运行图协同优化方案,在保障安全的基础上提高了系统运营效率,缩短了乘客延误时间。LU Yahan 等^[3-4]在深入分析高峰客流的动态性和不确定性的基础上,构建了客流控制与列车时刻表协同优化模型,并设计了混合算法,以提高求解效率;另外,还针对高峰期轨道交通车站过度拥挤问题,构建了新型 2 阶段分布稳健优化模型,以避免大量乘客同时涌入站台,从而缓解运输组织压力。周厚盛等^[5]针对通勤客流需求的动态性,提出了客流控制策略 2 阶段随机规划模型,减少了车站乘客聚集数量,使各车站等待乘客数量更加均衡。此外,还有部分学者对突发客流进行了研究,如周慧娟等^[6]综合考虑乘客在突发事件下路径决策行为中的有限理性,并分析了突发情况下乘客在不确定环境中的路径选择行为。吴海涛等^[7]以城市大型活动为背景,建立了匹配轨道交通站台条件的风险等级模型,并基于风险阈值构建了跨站停车方案优化模型。吴洁^[8]以突发大客流为研究对象,分析了客流特征和时空分布特性,设计了疏散组织方案,并通过仿真验证了疏散方案的有效性。冯树民等^[9]以突发客流形成机制为基础,建立了以乘客平均延误时间最小和各区间满载率之和最大为目标的确定型模型

(Deterministic Model, DM)。

综上,现有客流控制研究主要集中在高峰期客流方面,而针对突发大客流的研究主要在于突发客流的形成、特征分析及客流组织等方面,对突发大客流进行客流控制的研究较少,且并未考虑列车运力在各站点分配的合理性;此外,也没有考虑突发大客流下各站点客流需求的不确定性,因此,笔者将在 DM 的基础上,通过引入运力平衡系数,约束允许进站客流量,得到精细化的 DM (Refined DM, RDM),并分析突发大客流的不确定客流需求,同时利用鲁棒优化理论构建鲁棒模型 (Robust Model, RM),以期及时响应客流需求的波动情况,提高方案的可靠性。

1 客流控制优化模型

1.1 地铁突发大客流描述

突发大客流,不同于早晚高峰大客流,其诱因复杂,具有短时客流需求过大、流速缓慢、持续时间长及影响范围不确定等特点^[8]。为降低突发大客流带来的风险,文中以单向地铁线路为研究对象,统筹考虑线路上各个站点的客流,以各站点允许进站客流为决策变量,搭建客流控制模型,根据时变的客流需求协调各站点各时段的进站量,以缓解全线客流拥挤。

在搭建客流控制模型时,为方便定量描述,定义如下变量: $S = \{s_1, s_2, \dots, s_j, s_k, \dots, s_n\}$ 为车站集合, s_j 为车站索引。现假设大量乘客因某种特定原因在某一时段聚集在 s_j 站点,如图 1 所示,此时,站点 s_j 客流迅速增多,拥挤感加剧,为避免到达客流的持续聚积,需要对前方各站点采取有效的客流控制方案,保证列车到达站点 s_j 时仍有剩余运力,能够满足部分客流需求,加速大客流的疏散。

1.2 客流控制模型假设

为便于模型构建,假设:①列车运行图已知,各线路列车严格按照预先设定的发车间隔运行,忽略列车运行干扰因素对模型造成的偏差;②乘客具有

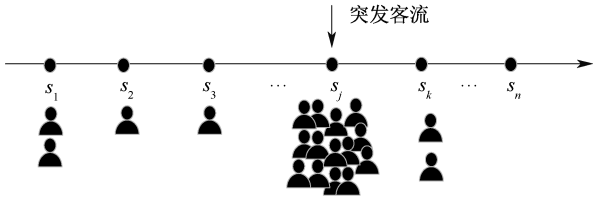


图1 站点突发客流

Fig. 1 Sudden passenger flow at subway stations

一致的时间价值及拥挤敏感性,在列车未满载时,在站台等候的乘客均会积极上车,车厢过度拥挤时,个别乘客会选择乘坐最近的下一趟列车;③基准进站客流量及客流的起止点(Origin-Destination, OD)可通过历史突发大客流事件的自动售检票(Automatic Fare Collection, AFC)系统数据近似估计。

1.3 RDM

1) 目标函数。应对突发大客流时,采取客流控制方案,以便快速缓解客流拥挤压力,并充分利用列车运能来提高企业运营效益,故文中构建以最小化乘客总等待时间 Z_1 和最大化区间通过客流量 Z_2 的多目标规划模型,如下所示:

$$\min Z_1 = \sum_{t \in T} \sum_{s_j \in S} (N_{s_j,t} - A_{s_j,t}) \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$\max Z_2 = \sum_{t \in T} \sum_{q \in Q} C_{q,t} \quad (2)$$

式中: $s_j \in S$; $t \in T$, t 为客流控制时段索引, T 为客流控制时段集合; $q \in Q$, q 为线路区间索引, Q 为线路区间集合; $N_{s_j,t}$ 为 t 时段站点 s_j 的客流需求量,人; $A_{s_j,t}$ 为 t 时段站点 s_j 的允许进站客流量,人; Δt 为控流时段长度, \min ; $C_{q,t}$ 为 t 时段区间 q 的通过客流量,人。

2) 需求侧约束。需求侧约束主要约束客流需求。在研究时段 t 内,每个时间间隔的进站客流需求由新到达客流量与滞留客流量组成,而滞留客流量为前一时段的客流需求量与允许进站客流量的差值。客流需求约束为:

$$N_{s_j,t} = \begin{cases} \alpha_{s_j,t} + W_{s_j,t-1}, t > 1, s_j \in S, t \in T \\ \alpha_{s_j,t}, t = 1, s_j \in S, t \in T \end{cases} \quad (3)$$

$$W_{s_j,t-1} = N_{s_j,t-1} - A_{s_j,t-1}, s_j \in S, t \in T \quad (4)$$

式中: $\alpha_{s_j,t}$ 为 t 时段站点 s_j 的到达客流量,人; $W_{s_j,t-1}$ 为 $t-1$ 时段站点 s_j 的站外滞留客流量,人。允许进站客流量 $A_{s_j,t-1}$ 为模型的决策变量,为保证列车运力在线路各站点的分配较为均衡, $A_{s_j,t-1}$ 不能过低,因此,需控制其上下限,即:

$$\eta N_{s_j,t-1} \leq A_{s_j,t-1} \leq N_{s_j,t-1} s_j \in S, t \in T \quad (5)$$

式中 η 为运力平衡系数, η 越大,允许进站的最低客流量越高。

3) 供给侧约束。地铁系统的供给侧能力由站点服务能力与线路运输能力构成,前者受站点通过能力与站台承载能力的影响,而后者受区间运输能力的影响。现约束这3类指标:

① 站点通过能力约束。站点通过能力受售检票机、闸机、扶梯等设施影响。文中主要从站点间协同角度控制进站客流,因此,弱化站内基础设施通过能力,通过设定站点通过能力折减系数来强化突发大客流带来的运营安全管控,建立以下约束条件:

$$A_{s_j,t} \leq (1 - \theta_{s_j}) \cdot E_{s_j} \cdot \Delta t, s_j \in S, t \in T \quad (6)$$

式中: θ_{s_j} 为站点 s_j 的通过能力折减系数,在此设为 $0.2^{[8]}$; E_{s_j} 为站点 s_j 的设计通过能力,人/min。

② 站台承载能力约束。突发大客流时,站台是关键的风险控制点。当站台客流量达到一定密度时,极易引发踩踏事故,因此,控制客流时,要保证站台客流密度不得超过站台最大允许客流密度,即

$$\frac{A_{s_j,t} + C_{q,t} \cdot d_{s_j,t}}{M_{s_j}} \leq \varepsilon, s_j \in S, t \in T, q \in Q \quad (7)$$

式中: $d_{s_j,t}$ 为 t 时段站点 s_j 的下车率; M_{s_j} 为站台有效面积, m^2 ; ε 为站台最大允许客流密度,人/ m^2 ,取 4 人/ $m^2^{[8]}$ 。

③ 区间运输能力约束。该约束是模型的核心约束,用于体现突发客流在线路上的动态传播过程。当 $A_{s_j,t}$ 达到最佳时,区间上的客流量不能超过最大区间运输能力,否则会出现区间输送堵塞与乘客滞留现象。区间运输能力约束为:

$$C_{q,t} = \sum_{t' \in T} \sum_{s_j \in S} A_{s_j,t'} \cdot R_{s_j,q}^{t',t} \leq C_{q,t}^{\max} \quad (8)$$

$$C_{q,t}^{\max} = n_{q,t} \cdot C_o \cdot \gamma \quad (9)$$

式中: $q \in Q$; $C_{q,t}^{\max}$ 为 t 时段区间 q 的最大通过能力,人; $n_{q,t}$ 为 t 时段区间 q 的列车通过能力,列; C_o 为列车定员,人/列; γ 为列车满载系数。 $R_{s_j,q}^{t',t}$ 为拥挤传播影响系数,含义为 t' 时段由站点 s_j 进站的客流在 t 时段内通过区间 q 的客流量与 t' 时段站点 s_j 总进站客流量的比值,用于刻画客流在线路上的动态移动过程,体现了客流在区间的拥挤情况,计算表达式为:

$$R_{s_j,q}^{t',t} = \sum_{s_k \in S} \beta_{s_j,s_k,t'} \cdot x_{s_j,s_k}^q \cdot T_{s_j,q}^{t',t} \quad (10)$$

式中: $s_j, s_k \in S$; $t, t' \in T$ 且 $t' \leq t$; $q \in Q$; $\beta_{s_j,s_k,t'}$ 为 t' 时段从站点 s_j 进站去往站点 s_k 的乘客比例,即 OD

率; x_{s_j, s_k}^q 为 0-1 变量, 判断站点 s_j 到 s_k 是否经过区间 q ; $T_{s_j, q}^{u', t}$ 为列车区间通过率, 描述为 t' 时段内经过站点 s_j 的列车在 t 时段内通过区间 q 的比例。

4) 控流率约束。控流率指不能被满足的客流需求与实际需求的比值, 是反映客流控制强度的关键指标。为保证乘客的总等待时间最短, 各站点的控流率不得超过最大控流率 φ , 此处取 60%^[10], 即:

$$0 \leq \frac{N_{s_j, t} - A_{s_j, t}}{N_{s_j, t}} \leq \varphi, s_j \in S, t \in T \quad (11)$$

综上所述, 式(1)一式(11)组成 RDM 模型。

1.4 RM

突发大客流时, 地铁各站点的到达客流量与客流 OD 率存在不确定性, 这将严重影响上述客流控制方案的有效性。因此, 将突发客流的不确定性作为关键变量, 分别纳入到达客流量与客流 OD 率中, 并采用鲁棒优化方法处理, 从而保证客流控制方案的可靠性。

1) 到达客流量的不确定性。在到达客流量中引入 $\alpha_{s_j, t} = \bar{\alpha}_{s_j, t} \pm \mu_{s_j, t} \hat{\alpha}_{s_j, t}$, 来描述到达客流量的波动性, 其取值范围为 $\alpha_{s_j, t} \in [\alpha_{s_j, t}^L, \alpha_{s_j, t}^B]$, 式中: $\alpha_{s_j, t}^L$, $\alpha_{s_j, t}^B$ 为到达客流量的波动上下界, $\alpha_{s_j, t}^L = \bar{\alpha}_{s_j, t} - \hat{\alpha}_{s_j, t}$, $\alpha_{s_j, t}^B = \bar{\alpha}_{s_j, t} + \hat{\alpha}_{s_j, t}$; $\bar{\alpha}_{s_j, t}$ 为基准到达客流量; $\hat{\alpha}_{s_j, t}$ 为波动范围; $\mu_{s_j, t} \in [0, 1]$ 表示客流在区间的波动幅度。根据绝对鲁棒思想^[11], 采用客流波动上限进行需求侧约束, 将式(3)修正为:

$$N_{s_j, t} = \begin{cases} \alpha_{s_j, t}^B + W_{s_j, t-1}, t > 1, s_j \in S, t \in T \\ \alpha_{s_j, t}^B, t = 1, s_j \in S \end{cases} \quad (12)$$

2) 客流 OD 率的不确定性。在客流 OD 率中引入不确定参数 $\beta_{s_j, s_k, t'} = \bar{\beta}_{s_j, s_k, t'} \pm \nu_{s_j, s_k, t'} \hat{\beta}_{s_j, s_k, t'}$, 用以描述 OD 率的波动性, 其取值范围为 $[\beta_{s_j, s_k, t'}^L, \beta_{s_j, s_k, t'}^B]$ 。其中, 下界 $\beta_{s_j, s_k, t'}^L = \bar{\beta}_{s_j, s_k, t'} - \hat{\beta}_{s_j, s_k, t'}$, 上界 $\beta_{s_j, s_k, t'}^B = \bar{\beta}_{s_j, s_k, t'} + \hat{\beta}_{s_j, s_k, t'}$; $\bar{\beta}_{s_j, s_k, t'}$ 为基准 OD 率; $\hat{\beta}_{s_j, s_k, t'}$ 为波动范围; 波动幅度 $\nu_{s_j, s_k, t'} \in [0, 1]$ 。为保证鲁棒优化模型求解结果在客流波动情形下仍能满足约束(8), 根据鲁棒优化理论, 将式(8)修正为:

$$\begin{aligned} & \sum_{t' \in T} \sum_{s_j \in S} \sum_{s_k \in S} A_{s_j, t'} \cdot \bar{\beta}_{s_j, s_k, t'} \cdot x_{s_j, s_k}^q \cdot T_{s_j, q}^{u', t} + \\ & \max \sum_{t' \in T} \sum_{s_j \in S} \sum_{s_k \in S} A_{s_j, t'} \cdot \hat{\beta}_{s_j, s_k, t'} \cdot x_{s_j, s_k}^q \cdot \\ & T_{s_j, q}^{u', t} \cdot \nu_{s_j, s_k, t'} \leq C_{q, t}^{\max} \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)为非线性约束, 若直接求解模型, 会降低模型的求解效率。因此, 运用 Bertsimas 和 Sim 鲁棒对等转换理论^[12]线性化约束:

$$\sum_{t' \in T} \sum_{s_j \in S} \sum_{s_k \in S} A_{s_j, t'} \cdot \bar{\beta}_{s_j, s_k, t'} \cdot x_{s_j, s_k}^q \cdot T_{s_j, q}^{u', t} + \sum_{s_j \in S} z_{s_j} \cdot \Gamma_{s_j} + \sum_{t' \in T} \sum_{s_j \in S} \sum_{s_k \in S} P_{s_j, s_k, t'} \leq C_{q, t}^{\max} \quad (14)$$

$$z_{s_j} + P_{s_j, s_k, t'} \geq A_{s_j, t'} \cdot \hat{\beta}_{s_j, s_k, t'} \cdot T_{s_j, q}^{u', t} \cdot x_{s_j, s_k}^q \quad (15)$$

式中: $z_{s_j} \geq 0, P_{s_j, s_k, t'} \geq 0$ 为构造模型所需的对偶辅助变量; 鲁棒系数 $\Gamma_{s_j} \in [0, 1]$ 为衡量 $\beta_{s_j, s_k, t'}$ 波动范围的参数, 表示模型的保守程度, 当 $\Gamma_{s_j} = 0$ 时, 表示客流 OD 率的波动集合为空集, 模型退化为 RDM 模型; 当 $\Gamma_{s_j} = 0.5$ 时, 模型为中等保守程度; 当 $\Gamma_{s_j} = 1$ 时; 表示客流处于最大波动区间, 此时方案能够完全应对客流波动影响, 但会使乘客与运营商利益受损严重。

综上所述, 针对突发大客流的不确定性, 式(1)、式(2)、式(4)一式(6)、式(8)一式(12)和式(14)、式(15)构成了 RM 模型。

2 客流控制优化模型验证与分析

2.1 某地铁线路运行基本信息及参数

以某地铁线路的上行方向为例, 该线路共有 10 个车站, 按照等间隔平行运行图, 列车发车间隔为 3 min, 研究总时长为 90 min, 控流时段长度 $\Delta t = 5$ min。列车定员 $C_0 = 1\ 260$ 人/列, 满载系数 $\gamma = 110\%$ 。选取某大型活动下的 AFC 记录为数据源, 统计得到模型所需客流信息, 主要包括到达客流量 $\alpha_{s_j, t}$, 乘客 OD 率 $\beta_{s_j, s_k, t'}$, 列车区间通过率 $T_{s_j, q}^{u', t}$ 等。其中, 突发大客流时各站点到达客流量如图 2 所示。

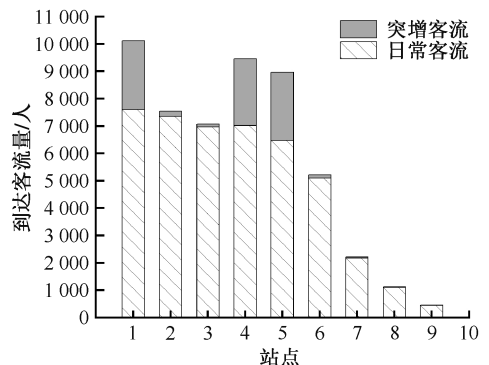


图 2 各站点到达客流量

Fig. 2 Passenger arrivals at subway stations

由图 2 可知: 突发大客流期间, 到达各站点的客

流量是由通勤、公务等日常客流与突增客流 2 部分组成,其中,站点 1、4、5 突增客流较大,均已超过 2 000 人,其余站点的突发客流量较小,可看作日常客流量的波动。因此,确定站点 1、4、5 为突发大客流站点,并利用客流震荡系数 $\zeta_{s_j,t}$ 来刻画客流需求的波动情况,从而确定突发客流的影响时段与影响程度,将 $\zeta_{s_j,t}$ 定义为:

$$\zeta_{s_j,t} = \begin{cases} \frac{|Y_{s_j,t} - B_{s_j,t}|}{B_{s_j,t}}, & B_{s_j,t} > 0 \\ 0, & B_{s_j,t} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $Y_{s_j,t}$ 为 t 时刻 s_j 站点的真实客流量,人; $B_{s_j,t}$ 为 t 时刻 s_j 站点的基准客流量,人。 $\zeta_{s_j,t}$ 越大,客流波动

幅度越大。绘制突发站点的常态客流与突发客流震荡系数曲线,如图 3 所示。

由图 3 可知:3 个站点的常态客流波动幅度较小,均在 0 附近波动,而突发客流分别在时段 2~12, 5~14, 3~13 有较强的波动幅度, $\zeta_{s_j,t}$ 的最大值依次接近 0.8, 0.9, 1, 其他时段各站点常态与突发客流震荡系数基本一致。以上结果说明:相较于常态客流,突发客流会在某时段持续聚集,超过站点日常运输的客流承载量,导致站台极度拥挤,严重威胁列车安全运营。故需采取客流控制措施,协调控制各站进站人数,从而避免突发站点客流不断堆积,引发踩踏等意外事故。

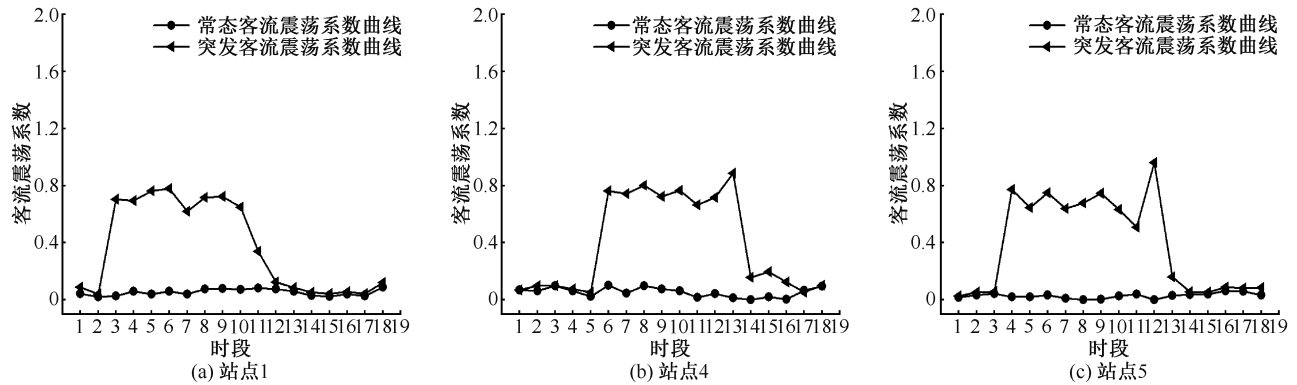


图 3 突发站点客流震荡曲线

Fig. 3 Sudden station passenger flow shock curve

2.2 客流控制优化模型求解

基于以上基本信息与参数设置,将相关数据导入所建模型中,并利用 Lingo 求解器编译求解模型。在求解过程中,不同取值的 η 与 Γ_{s_j} 会得到不同的客流控制方案,为保证求解结果全局最优,需先分析 η 与 Γ_{s_j} 。

1) 运力平衡系数 η 。 η 的取值决定着各时段各站点的最低允许进站客流量,而允许进站客流量决定着滞留客流量与区间通过客流量。将客流数据导入 Lingo 中进行求解,记录不同 η 下的目标函数值。可以发现,当 $\eta < 0.5$ 时,表示允许进站客流量不及到达客流量的一半,若此时列车运力虚靡,而到达乘客未能及时进站乘车,则导致乘客与运营商利益严重受损;当 $\eta > 0.6$ 时,允许进站客流量已超过站台所能承受的客流量,会导致约束机制被破坏,模型无解。由此可知:为得到最佳客流控制方案, η 的最佳取值为 $0.5 \leq \eta \leq 0.6$, 对应的目标函数值见表 1。

从表 1 中可以看出:不同 η 对应的目标函数值有所差异,且当 $\eta = 0.54$ 时, Z_1 效果最佳,乘客总等

表 1 不同运力平衡系数下的目标函数值

Table 1 Objective function value with different capacity-balancing factors

η	Z_1/min	$Z_2/\text{人}$
0.50	67 745	196 956
0.51	67 513	196 877
0.52	56 622	198 648
0.53	57 422	198 302
0.54	56 477	198 760
0.55	57 569	198 418
0.56	62 007	198 615
0.57	60 661	198 080
0.58	57 767	197 992
0.59	58 145	199 002
0.60	56 953	198 499

待时间最小为 56 477 min; 当 $\eta = 0.59$ 时, Z_2 效果最佳,区间通过客流量最大为 199 002 人。说明设置适当的 η , 可以有效控制允许进站客流量,从而降低乘客总等待时间,加大区间通过客流量。

2) 鲁棒系数 Γ_{s_j} 。鲁棒系数 Γ_{s_j} 用来调控客流

OD 率的波动区间。不同鲁棒系数 Γ_{s_j} 对优化目标的影响如图 4 所示。

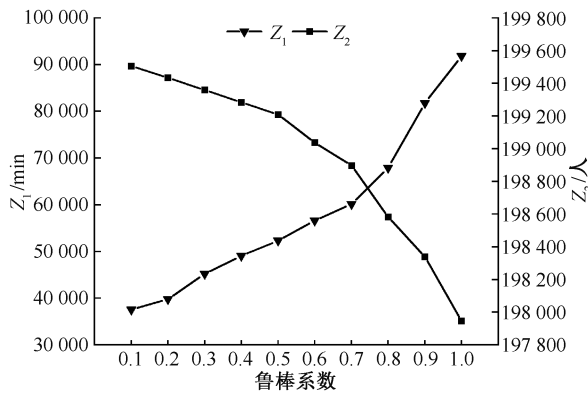


图 4 不同鲁棒系数对优化目标的影响

Fig. 4 Effect of different robustness coefficients on optimization objective

由图 4 可知:随着 Γ_{s_j} 的增加,即突发客流 OD 率的波动区间变大,客流的不确定性相应增强,目标函数曲线呈现负趋势变化,且当 $\Gamma_{s_j} = 0.5$ 时, Z_1 增加了 28.04%, Z_2 降低了 1.15%。即目标受到了一定的损失,这意味着客流的不确定性会严重影响客流运营管理方案的可靠性。

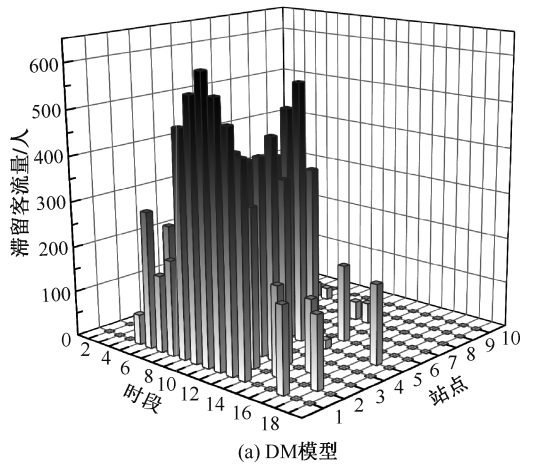
综上,将 RDM 中运力平衡系数 η 设置为 0.55,以保证乘客乘车的均衡性;将 RM 中的鲁棒系数 Γ_{s_j} 设置为 0.5,以保证客流 OD 率既受一定程度的波动影响,目标损失又在可接受范围之内。在此设置前提下,求解得到最优目标函数值 Z_1 与 Z_2 、各区间通过客流量 $C_{q,t}$ 、允许进站客流量 $A_{s_j,t}$ 及滞留客流量 $W_{s_j,t}$ 等。下面将分析不同模型下的性能指标。

2.3 DM 与 RDM 模型对比

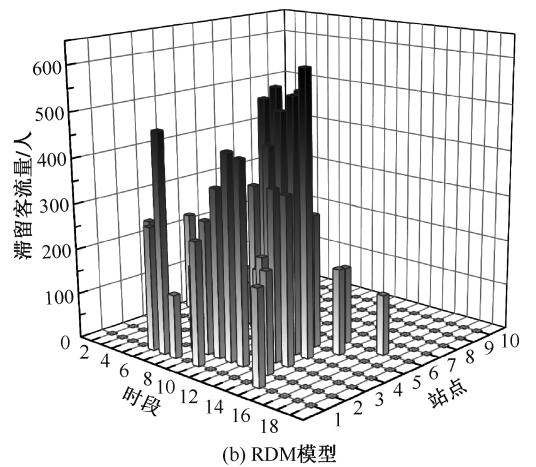
在 DM 的基础上,通过引入运力平衡系数 η 来约束允许进站客流量 $A_{s_j,t}$,以得到 RDM。而 $A_{s_j,t}$ 直接决定了滞留客流量 $W_{s_j,t}$ 与区间通过客流量 $C_{q,t}$,故比较突发大客流下 DM 与 RDM 模型的滞留客流量 $W_{s_j,t}$ 与区间通过客流量 $C_{q,t}$,以验证所提 RDM 模型的优越性。

1) 滞留客流量 $W_{s_j,t}$ 。控制各站点客流时,滞留客流量直观地体现了站点客流积压严重程度。将到达客流量分别导入 DM 与 RDM 模型中进行求解,并分析比较不同模型下的滞留客流量,如图 5 所示。

从图 5 中可以看出:采用 DM 模型,突发站点的滞留客流量较多,尤其在站点 1 的时段 9—13 内,滞留客流量积压严重;而采用 RDM 模型时,站点 4 在时段 10—14 内滞留客流量较集中。由 Lingo 计算



(a) DM模型



(b) RDM模型

图 5 不同模型下各时段各站点滞留客流量

Fig. 5 Stalled passenger flow at each station in each period under different models

得出:DM 模型下站点总滞留客流量为 14 226 人, RDM 模型下为 12 282 人。以上结果表明:相比 DM, RDM 模型下的优化方案可使各站点总滞留客流量减少 15.83%。

2) 区间通过客流量 $C_{q,t}$ 。 $C_{q,t}$ 是衡量运营商效益的关键指标。故分析比较 DM 与 RDM 下的各区间通过客流量,如图 6 所示。

从图 6 中可以看出:RDM 下各区间的通过客流量均高于 DM,其中, RDM 对应的区间通过客流量可达 201 826 人, DM 模型下为 197 754 人,说明采用 RDM 模型下的优化方案可使区间通过客流量增加 2.02%,提高了区间运输效率。

2.4 RDM 与 RM 模型对比

RDM 模型主要针对确定性突发客流,而 RM 模型主要解决不确定性突发客流。现比较不确定突发客流下 RDM 与 RM 模型的控制率、滞留客流量及区间通过客流量,验证所提 RM 模型是否能够更好地

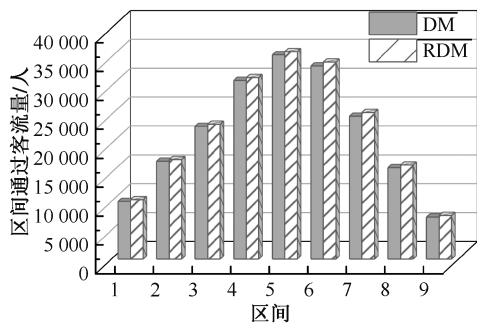


图6 不同模型下各区间通过客流量

Fig.6 Passenger flow through each interval under different models

应对突发客流及其波动性。

1) 控流率。控流率能够反映不同模型对突发客流的控制强度。当控流率为0表示无需进行控制。比较突发客流在RDM模型与RM模型($\Gamma_{s_j} = 0.5$)下的控流率,见表2(只列出了重点需要控制的时段与站点)。

表2 不同模型下控流率对比

Table 2 Comparison of flow control rates under different models %

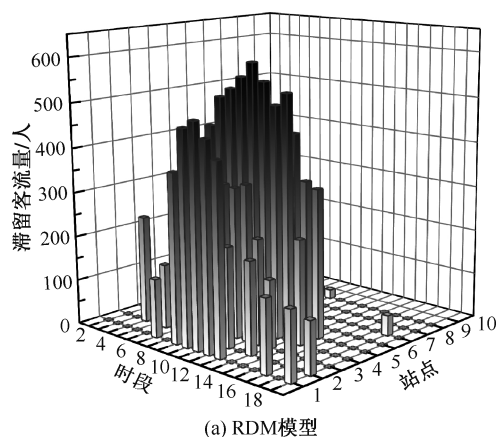
时段		站点					
		1	2	3	4	5	6
4	RDM	—	—	—	11.1	—	41.9
	RM	—	32.7	20.8	50	1.8	—
5	RDM	—	—	—	29.4	—	—
	RM	—	—	—	—	11.8	—
6	RDM	50	—	—	34.8	—	—
	RM	50	—	24	23.7	15.9	—
7	RDM	11.6	—	—	—	50	—
	RM	16.5	—	32	18.2	50	50
8	RDM	—	—	50	—	50	—
	RM	50	—	50	50	50	—
9	RDM	42.3	—	50	25.1	31.1	—
	RM	48.7	21.6	50	50	50	50
10	RDM	—	50	—	—	40	50
	RM	29.4	50	—	13	41.2	50
11	RDM	—	—	49.9	48.3	50	—
	RM	—	13.3	50	50	33	—

注:“—”代表无需控制。

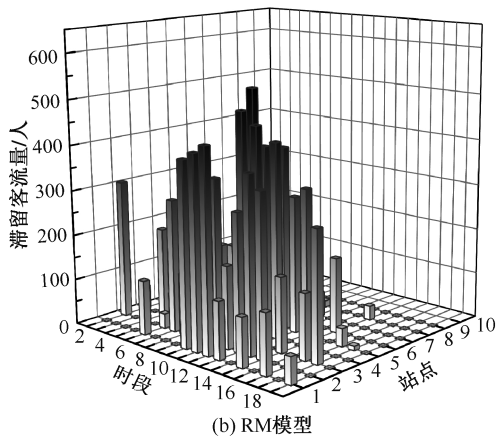
从表2中可以看出:RM模型下所得控流率高于RDM模型,且大部分时段的控流率已达到50%。这是因为RM模型下的优化方案需要处理突发客流的不确定因素,通过加大对部分站点的控流强度,以快速响应大客流带来的较大波动,合理调整进站人数,避免客流聚集风险。此外,站点1、4、5作为突发客流站点,在部分时段客流急剧增多,需加强对站点

1、4、5的控流强度,以确保各站点在短时间内快速有效应对突发大客流,且应用RM模型时预先加强了对站点2,站点3的客流控制强度,以便列车到达站点4、5时,仍有剩余容量满足部分客流需求。需要说明的是,由式(11)可知:各站点在各时段的控流率不得超过最大控流率60%。而表2中RM模型下的控流率均在此范围内,说明控流强度合理。

2) 滞留客流量 $W_{s_j,t}$ 。不同模型下的滞留客流量可以判断该模型是否有效应对了客流需求的不确定性。故将不确定突发客流分别导入RDM与RM模型中进行求解,分析比较其滞留客流量,如图7所示。



(a) RDM模型



(b) RM模型

图7 不确定性客流在不同模型下的滞留客流量
Fig.7 Detained passenger flow for uncertain passenger flow under different models

由图7可知:在应对不确定突发客流时,RDM模型下各站点的滞留客流量较为密集,滞留量在400人以上的站点较多,而RM模型下各站点的滞留量相对较少,大部分站点的滞留量集中在300~400之间。其中,站点1、4、5为突发客流站点,站外客流聚集严重。现比较它们在不同模型下的滞留客流量如图8所示。

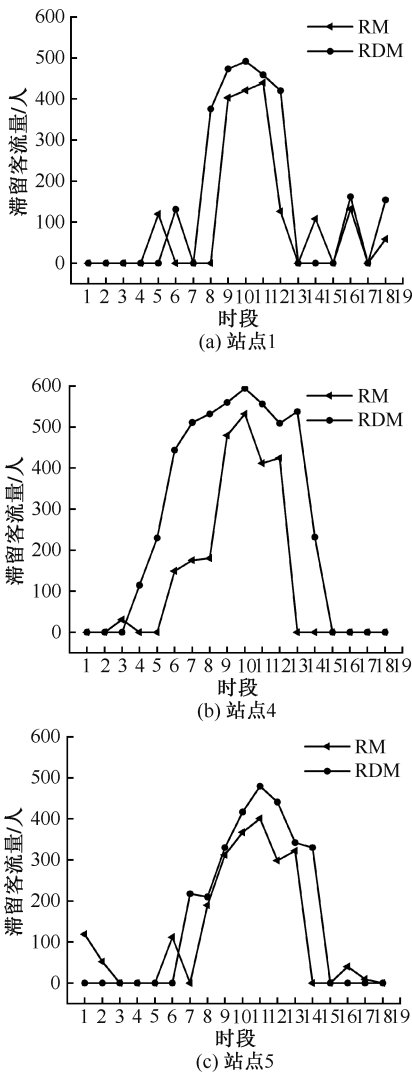


图 8 部分站点在不同模型下的滞留客流量对比

Fig. 8 Comparison of stranded patronage at selected stations under different models

很明显,RDM 模型下各站滞留客流量较多,站点 1、4、5 的最大滞留人数分别为 492、594、480 人;与之相比,RM 模型下滞留客流量相对较少,各站最大滞留人数分别为 440、532、401 人。考虑乘客总等待时间与滞留客流量直接相关,其大小可以更加直观的反映优化效果,故由 Lingo 计算得到:RDM 模型下乘客总等待时间为 73 311 min;RM 模型下为 64 334 min。以上结果说明 RM 模型下的优化

方案可有效应对不确定客流需求,减少乘客的总等待时间。

3) 区间通过客流量 $C_{q,t}$ 。在 RM 模型中引入 OD 率的波动会影响区间通过客流量。现计算 RDM 模型与 RM 模型下各区间通过客流量,如图 9 所示。

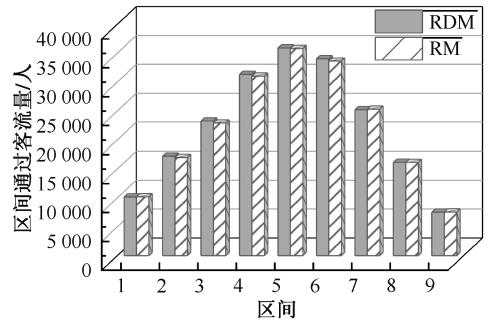


图 9 不同模型下各区间通过客流量对比

Fig. 9 Comparison of passenger flow in each interval under different models

可以看到,相较 RM 模型,RDM 模型下部分区间通过客流量略高,其中,RM 模型控制下区间通过客流量为 199 656 人,而 RDM 模型下可达 200 999 人。以上结果说明:RM 模型中为应对乘客 OD 率的波动,仅牺牲了 0.67% 的区间通过客流量,确保了整体方案的可靠性。

3 结 论

1) 采用 RDM 模型约束允许进站客流量,可以有效缓解突发大客流带来的拥挤压力,减少站外滞留客流量,提高区间运输效率,优化乘客服务水平与运营商效益。

2) 在 RM 模型中引入鲁棒系数,可以及时应对突发大客流的不确定性,调整客流进站速度,减少滞留乘客量,降低乘客总等待时间,提升乘客出行体验感。因此,采取 RM 对实际运营过程中的突发客流具有较好的适应性。

3) 文中对动态突发大客流只进行了客流控制,而未考虑客流与车流之间的耦合关系,后续将进一步考虑列车运行图与客流控制的协同优化研究,以制定更加高效的客流组织管控方案。

参 考 文 献

[1] 王培恒, 杨立兴, 李树凯, 等. 考虑换乘站客流疏散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.
- [2] 康崇仁, 杨欣, 张萍, 等. 地铁乘客限流控制与列车运行图协同优化方法研究[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2023, 21(1): 94–112.
KANG Chongren, YANG Xin, ZHANG Ping, et al. Collaborative optimization method of passenger flow control and train timetable for metro systems[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2023, 21(1): 94–112.
- [3] LU Yahan, YANG Lixing, YANG Hai, et al. Robust collaborative passenger flow control on a congested metro line: a joint optimization with train timetabling[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2023, 168: 27–55.
- [4] LU Yahan, YANG Lixing, YANG Kai, et al. A distributionally robust optimization method for passenger flow control strategy and train scheduling on an urban rail transit line[J]. *Engineering*, 2022, 12: 202–220.
- [5] 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): 2 663–2 671.
ZHOU Housheng, QI Jianguo, YANG Lixing, et al. Joint optimization for rolling stock circulation plan based on flexible train composition mode and robust passenger flow control strategy on urban rail transit lines[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(9): 2 663–2 671.
- [6] 周慧娟, 瓮冬阳, 李蓓, 等. 城市轨道交通运营中断下客流分配方法[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33 (6): 144–151.
ZHOU Huijuan, WENG Dongyang, LI Bei, et al. Passenger flow distribution method under urban rail transit operation interruption[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33 (6): 144–151.
- [7] 吴海涛, 侯成龙, 黎双喜, 等. 考虑客流聚集风险的轨道交通跨站停车方案优化[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32 (6): 157–162.
WU Haitao, HOU Chenglong, LI Shuangxi, et al. Optimization of skip-stop strategy for urban rail transit considering passenger flow aggregation risk[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(6): 157–162.
- [8] 吴洁. 城市轨道交通大客流传播机理及疏散方案研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2022.
WU Jie. Research on propagation mechanism and evacuation scheme of large passenger flow in urban rail transit[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2022.
- [9] 冯树民, 陈勇, 辛梦薇. 突发大客流下地铁协调限流优化模型[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(2): 179–185.
FENG Shumin, CHEN Yong, XIN Mengwei. Coordination passenger flow control model for metro under sudden large passenger flow[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(2): 179–185.
- [10] 姚向明, 赵鹏, 乔珂, 等. 城市轨道交通线路高峰客流控制方案鲁棒优化模型[J]. *铁道学报*, 2021, 43(11): 29–37.
YAO Xiangming, ZHAO Peng, QIAO Ke, et al. Robust optimization model of designing inflow control scheme for urban rail transit line during peak hours[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2021, 43(11): 29–37.
- [11] SOYSTER A L. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming[J]. *Operations Research*, 1973, 21(5): 1 154–1 157.
- [12] BERTSIMAS D, SIM M. The price of robustness[J]. *Operations Research*, 2004, 52(1): 35–53.

作者简介: 米根锁 (1966—),男,内蒙古卓资人,硕士,教授,主要从事轨道交通运营管理方面的研究。E-mail:1831293632@qq.com。

