

# 基于多智能体仿真的城市轨道交通限流策略

鲁工圆<sup>1,2</sup>, 雷元争<sup>1,2</sup>, 张宏翔<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:** 针对高峰时段城市轨道交通线路过饱和和客流的运输效率问题, 基于地铁线路的网络拓扑结构与客流需求矩阵, 建立了以客运周转量最大为目标的城市轨道交通线网限流的多智能体仿真模型。该模型以 Anylogic 软件为建模基础, 通过构建列车类、线路类、路网类、乘客类等 4 类智能体, 实现了乘车限流、站台限流和闸机限流等客流控制手段, 提出了针对单线多站地铁线路的全线协调的客流控制策略。规模为 23 个车站、122 933 对 OD(起讫点)的某条地铁线路的客流控制实验结果表明, 限流提升了 1.01% 的总客运周转量。

**关键词:** 过饱和客流; 多智能体仿真模型; Anylogic; 全线协调; 客流控制

中图分类号: U121

文献标志码: A

## Passenger Flow Control Strategy of Urban Rail Transit Based on Multi-Agent Simulation

LU Gongyuan<sup>1,2</sup>, LEI Yuanzheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Hongxiang<sup>1,2</sup>

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Aimed at the transportation efficiency problem of oversaturated passenger flow of urban rail transit lines during peak hours, a multi-agent simulation model of passenger flow control for urban rail transit with the goal of maximizing passenger turnover is established based on the network topology of subway lines and the passenger flow demand matrix. Based on the AnyLogic software, the model reconstructs the urban rail transit system by constructing four types of agents: train, line, road network, and passenger, which realizes several passenger flow control methods, including

boarding control, platform control, and gates control. In addition, a full-line coordinated passenger flow control strategy in multi stations of a single line in urban rail transit is proposed. Moreover, a passenger flow control experiment is conducted on a subway line with a scale of 23 stations and 122 933 passenger OD pairs, which increases the total passenger turnover by 1.01%.

**Key words:** oversaturated passenger flow; multi-agent simulation model; Anylogic; full-line coordination; passenger flow control

随着中国城市轨道交通建设的不断推进,城市轨道交通已经成为大中城市居民出行不可或缺的组成部分。城市轨道交通的效率与便捷性直接影响城市的整体交通效率和居民生活体验。在客流高峰时段,城市轨道交通往往会出现客流拥挤、等待时间变长、乘客滞留数增加等运输能力紧张的情形。传统的客流控制手段主要针对乘客的进站环节,较为单一,且缺乏相应的量化方法指导现场工作。因此,如何降低乘客滞留时间、提升城市轨道交通整体效率,成为研究热点。对于城市轨道交通线路客流控制问题,有多种模型和方法,文献[1-2]分别建立了单目标多站协同客流控制模型和多目标多站协同客流控制模型,均采用了调整列车开行方案的方式实现客流控制,操作难度较大,运行调整较为复杂。文献[3-4]以乘客等待时间最少或客运周转量最大建立了单目标整数线性规划模型,考虑了列车承载人数、乘降速度、站台滞留人数等限制,准确给出了总体客运周转量最大情形下各站的客流控制目标人数,但是没有给出具体的客流控制手段,在实际运营中无法再现其客流控制场景,难以实现其客流控制效果。

收稿日期: 2021-04-13

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1200700, 2017YFB1200701); 国家自然科学基金(61603317)

第一作者: 鲁工圆(1983—),男,副教授,工学博士,主要研究方向为交通运输优化与仿真。

E-mail: lugongyuan@swjtu.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

文献[5-7]均采用控流率来刻画对车站的限流程度,并给出了各个时段具体的限流方案,但文献[5]和文献[7]缺少每个站的上下行客流结构约束,导致通过控流率实现的客流控制造成了上下行客流结构的改变。通过控流率描述的客流控制在真实情形中难以准确实现。文献[8]建立了多目标整数规划模型,针对缓解轨道交通系统运输压力和提升系统运营安全给出了具体的限流方式和限流策略。

不同与以往研究,本文首先建立了城市轨道交通多智能体仿真模型,采用闸机限流、乘车限流和站台限流等3种手段实现客流控制。其次,为保证限流策略在现实中的可行性,考虑全线客流,对上行下行客流进行同步限流,提出了符合实际运营并容易在现实运营中实现的全线协调的客流控制策略,实

现了总体客运周转量的提升。

## 1 问题描述

本文研究的核心问题即为在城市轨道交通出行高峰期的一段时间内,如何通过闸机限流等手段,对部分车站进行限流,使得系统的总周转量增加并疏解客流饱和站的客流压力。客流饱和站指在一段时间内,当有上行或下行方向的地铁列车到站时,由于列车满载,站台上会有部分乘客无法乘车,则该车站为上行或下行客流饱和站。一个车站可以既是上行客流饱和站也是下行客流饱和站,这两类客流饱和站统称为客流饱和站。

本文所使用的符号和概念如表1所示。

表1 符号和概念

Tab.1 Symbols and concepts

符号	概念
$S$	上行站顺的地铁车站集合,索引为 $s, s \in S$
$z_s$	$s$ 站开放的进站闸机数
$K$	储存实验时间内所有地铁车次的集合,索引为 $k, k \in K$
$V$	储存时间区段的集合,本文中5 min为一个时间区段,索引为 $v, v \in V$
$X$	限流方案,即为储存所有车站进站闸机开放数量的集合, $\bigcup_{s \in S} Z_s \in X, X^0$ 中所有车站开放进站闸机数均为12个
$F_{r,q}^k$	乘坐 $k$ 次列车,从 $r$ 站出发至 $q$ 站下车乘客
$Z_{r,q}^v$	在时间区段 $v$ 中,从 $r$ 站至 $q$ 站的乘客
$O^{\text{up}}, O^{\text{down}}$	$O^{\text{up}}$ 为上行客流饱和车站集合,索引为 $o, o \in O^{\text{up}}$ ; $O^{\text{down}}$ 为下行客流饱和车站集合,索引为 $\dot{o}, \dot{o} \in O^{\text{down}}$
$B_s^{\text{up}}, B_s^{\text{down}}$	$B_s^{\text{up}}$ 为储存上行方向 $s$ 站后方站的集合,索引为 $b, b \in B_s^{\text{up}}$ ; $B_s^{\text{down}}$ 为储存下行方向 $s$ 站后方站的集合,索引为 $\dot{b}, \dot{b} \in B_s^{\text{down}}$
$C_s^{\text{up}}, C_s^{\text{down}}$	$C_s^{\text{up}}$ 为 $s$ 站的上行方向限流车站集合,索引为 $c, c \in C_s^{\text{up}}$ ; $C_s^{\text{down}}$ 为 $s$ 站的下行方向限流车站集合,索引为 $\dot{c}, \dot{c} \in C_s^{\text{down}}$
$I_s^{\text{up}}, I_s^{\text{down}}$	$I_s^{\text{up}}$ 为上行限流车站 $s$ 的限流方案集合,索引为 $i, i \in I_s^{\text{up}}$ ; $I_s^{\text{down}}$ 为下行限流车站 $s$ 的限流方案集合,索引为 $\dot{i}, \dot{i} \in I_s^{\text{down}}$
$H_X$	在限流方案 $X$ 下的系统总客运周转量

## 2 城市轨道交通线路限流仿真模型

### 2.1 模型的多智能体结构实现

#### 2.1.1 列车类智能体和乘客类智能体

列车类智能体主要规定了地铁列车的基本信息和附加信息。基本信息通常包括列车的大小、颜色和外观,一般在Anylogic自带的数据接口上进行设置。附加信息主要包括车载乘客信息、列车运行方向信息、列车当前站信息和列车车次号信息。附加信息的种类和内容一般由建模者自定义。在本文中,通过列车类智能体,模型能够实时统计任意列车在任意时刻的车载客流信息。乘客类智能体主要包括乘客起始站、乘客终到站、乘客路径、乘客总周转距离、乘客在每个站的进站时间和乘客在每个站的

出站时间等信息。

#### 2.1.2 路网层智能体

通过输入客流结构信息和地铁线路信息,路网层智能体主要实现了3个功能:客流统计工具的初始化、基于文献[9]的配流模型进行客流路径的分配以及客流分配。

#### 2.1.3 线路层智能体

线路智能体中为各个车站设置了集合,用以储存在当前车站候车的乘客类智能体。依据输入的线路信息,利用Anylogic构建了地铁列车行车仿真,如图1所示。地铁列车行车仿真主要包括4个部分:①trainSouce控件控制列车的产生。②trainMoveTo控件控制列车的运行。③delay控件控制列车的停车,在该控件中完成乘客乘车与下车过程的仿真,在此

过程中,更新乘客类智能体的旅行信息。④ selectOutPut5 控件控制列车是通过 exit-enter 控件返回至 trainMoveTo 控件中继续运行还是通过 trainDispose 控件从路网中被移除。

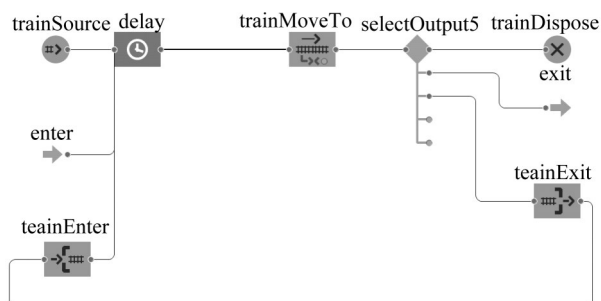


图1 路网层智能体仿真逻辑图

Fig.1 Logic diagram of network agent simulation

#### 2.1.4 社会力智能体

社会力智能体主要用于测试各种客流控制程度下地铁线路  $l$  上车站  $s$  的极限进站能力。首先,模型中构建了乘客走行仿真,如图2所示。图2中,乘客走行仿真包主要括3个部分:① pedSource 控件控制乘客的产生。② pedService 控件实现乘客在进站闸机处的排队、检票进站过程。③ pedGoTo 控件控制乘客进入到站台。④ pedSink 负责控制将所有已经通过进站闸机的乘客从社会力智能体中移除。此外,模型构建了人机交互按钮控制车站进站闸机的开闭。

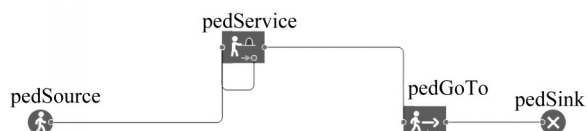


图2 社会力智能体仿真逻辑图

Fig.2 Logic diagram of social force agent

在模型中,为了获得各种限流程度下的车站极限进站能力,模型在 pedSource 控件中设置了一个极大的乘客到站速率:  $5\,000\text{人}\cdot\text{min}^{-1}$ ,通过控制进站闸机的开放数量,测试不同客流控制程度下车站的极限进站能力,如图3所示。经过多次仿真实验,得到了地铁线路  $l$  上车站  $i$  在各种客流控制程度下的极限进站能力,如表2所示。

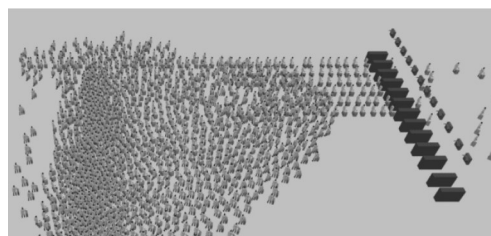


图3 闸机能力测试实验

Fig.3 Turnstile capacity test experiment

### 2.2 模型限流控制手段的实现

在模型中本文设置了站台限流、闸机限流和乘车限流3种限流方式,构成了闸机限流-站台限流-乘车限流的限流层次。

#### 2.2.1 模型闸机限流的实现

闸机限流是城市轨道交通中最为常见的限流方式,也是模型中限流控制手段的核心。

在路网层智能体中,模型为路网中的每一个车站设置了初始极限进站能力。在线路层智能体中实验者可以通过人机交互滑块来调整各个车站的闸机开放数量,从而完成对各车站极限进站能力的修改。在实验的每一分钟内,只有当车站的进站人数都必须小于该站极限进站能力且满足式(1)时,乘客才能通过闸机进站,即

$$E_l < U_l \quad (1)$$

式中:  $E_l$  为  $l$  站在一分钟内的进站人数;  $U_l$  为  $l$  站的极限进站能力。

#### 2.2.2 模型站台限流的实现

在路网层智能体中,本文设置了最大站台聚集人数。只有当站台人数小于该站的最大站台聚集人数时,乘客才能进入站台,即

$$D_l < M_z \quad (2)$$

式中:  $D_l$  为  $l$  站站台上的乘客数量;  $M_z$  为最大站台聚集人数。

在实际运营中,站台能力由站台布局、站台面积和设备设置能力等共同决定,且一般为固定值,不会轻易改变,同样也不会受到站内客流量大小的影响,故在仿真模型中直接通过设置站台限流参数  $M_z$  来实现站台限流。

#### 2.2.3 模型乘车限流的实现

在列车类智能体中,本文设置了最大乘车人数。

表2 不同限流条件下的车站极限进站能力

Tab.2 Extreme inbound capacity of the station under different conditions of passenger flow control

闸机开放数量/台	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
极限进站能力/(人·min <sup>-1</sup> )	12	23	35	47	60	74	89	102	115	128	138	150



只有列车上的载客人数小于最大乘车人数时,乘客才能完成乘车,即

$$C_k < M_C \quad (3)$$

式中:  $C_k$  为第  $k$  次列车的车载乘客人数;  $M_C$  为最大乘车人数。

在实际运营中,列车载客能力由地铁列车车型决定,且一般为固定值,不会轻易改变,同样也不会受到列车载客人数的影响,故在仿真模型中直接通过设置乘车限流参数  $M_C$  来实现乘车限流。

### 3 全线协调的客流控制策略

限流策略主要包括两个部分:①选择哪些车站作为限流的车站。②对限流车站实施什么样的限流措施。

#### 3.1 限流车站的选择

为了增加系统的总周转量,应当尽可能多地运输长距离客流,同时,为了缓解客流饱和站的客流压力,应当对客流饱和站的后方站进行限流。

图4为一个拥有6个车站的地铁线路,其中  $S_3$  为上行客流饱和站。为了疏解  $S_3$  的客流压力,让更多从  $S_3$  出发的乘客能够乘车,对其后方站  $S_2$  站进行客流控制,在上行方向,从  $S_2$  出发的客流减少了  $\Delta f_{S_2}$ , 从  $S_3$  出发的客流增加了  $\Delta f_{S_3}$ 。由于  $S_2$  有上行和下行两个方向的客流,故在实际限流中,对  $S_2$  实施限流措施时,会同时造成上行和下行方向乘车客流的减少,

故在对  $S_2$  站采取限流措施后,在下行方向,从  $S_2$  出发的客流减少了  $\Delta f'_{S_2}$ 。

客流变化量  $\Delta f_{S_3}$ 、 $\Delta f_{S_2}$ 、 $\Delta f'_{S_2}$  会影响客运周转量的变化,客运周转量变化量等于客流的变化量大小乘以其所包含乘客的平均周转距离。以客流变化量  $\Delta f_{S_3}$  为例,其客运周转量变化量等于  $\Delta f_{S_3}$  乘以客流  $\Delta f_{S_3}$  的平均周转距离。由于每个乘客类智能体均带有周转距离信息,且列车智能体中有储存车载客流的集合,所以客流变化量  $\Delta f_{S_3}$  的乘客数量和每个乘客的周转距离均可以通过读取相应的列车类智能体得到。故客流  $\Delta f_{S_3}$  的平均周转距离等于客流  $\Delta f_{S_3}$  的周转量之和除以客流变化量  $\Delta f_{S_3}$  的乘客数量。以图4为例,通过限流,车载客流产生了变化,分别为  $\Delta f_{S_3}$ 、 $\Delta f_{S_2}$ 、 $\Delta f'_{S_2}$ 。车载客流的变化导致系统所完成的总客运周转量发生变化,若客流变化量  $\Delta f_{S_3}$  所带来的客运周转量增量大于客流变化量  $\Delta f_{S_2}$ 、 $\Delta f'_{S_2}$  所造成的客运周转量损失,则系统总周转量就能够增加。上行客流客运周转量变化量和下行客流客运周转量变化量之和决定了限流车站。若上行客流客运周转量变化量和下行客流客运周转量变化量之和大于0,则  $S_2$  站可以被选为限流车站,因为对其限流可以带来系统总客运周转量的提升,若上行客流客运周转量变化量和下行客流客运周转量变化量之和小于等于0,则需要通过后文中的后方站分类来讨论  $S_2$  站是否应被选为限流车站。

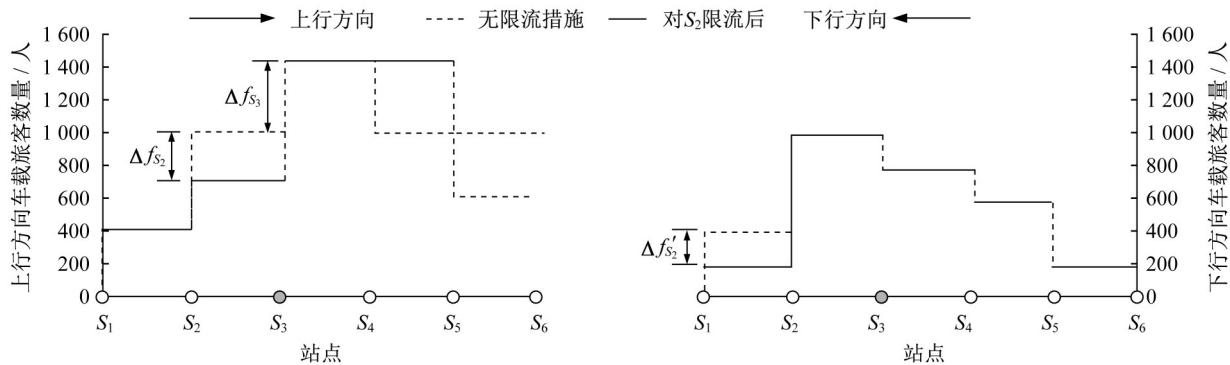


图4 限流示例

Fig.4 An instance of passenger flow control

客流饱和站的后方站可分为3类,不是每一类后方站都可以被选为限流车站。其中后方站指列车在当前行车方向上已经经过的车站,前方站指列车在当前行车方向上还未经过的车站。

##### 3.1.1 a类后方站

a类后方站指后方站为客流非饱和站,且后方站

和本站之间没有其他客流饱和站。如图5所示,  $r$  站为上行客流饱和站,  $q$  站为a类后方站,图中展示了所有从  $q$  站出发的上行客流。列车离开  $r$  站,只有一部分从  $S_2$  乘车的仍然继续乘车,本文将这类客流称为  $q$  站关于  $r$  站的关联客流。当对  $q$  站进行客流控制时,只有损失的关联客流能够为  $r$  站带来盈余的客流

空间。于是,通过式(4)~(6)来计算 $q$ 站关于 $r$ 站的关联客流比率 $\tau_{q,r}$ 和后方站 $q$ 对于客流饱和站 $r$ 的单位系统客运周转量增量 $E_{q,r}$ ,可以判断该站是否应当被选为限流车站。

$$g_{q,r} = \sum_{v \in V} \sum_{s \in (S \cap B_r^v)} Z_{r,s}^v \quad (4)$$

$$\tau_{q,r} = \frac{g_{q,r}}{\sum_{v \in V} \sum_{s \in (S \cap B_r^v)} Z_{r,s}^v} \quad (5)$$

$$E_{q,r} = d_r^{\text{up}} \tau_{q,r} - D_q \quad (6)$$

式(4)中 $g_{q,r}$ 表示在时间段 $v$ 内,所有从 $q$ 站出发,到达 $r$ 站上行方向以远车站的客流,即 $q$ 站关于 $r$ 站的关联客流。式(5)中的分母即为在时间段 $v$ 内,所有从 $q$ 站出发的客流,故式(5)求得了从 $q$ 站出发的客流中,有多少是到达 $r$ 站上行方向以远车站的客流,即 $q$ 站关于 $r$ 站的关联客流比率 $\tau_{q,r}$ 。由于每个乘

客类智能体均带有周转距离信息,且线路智能体中有储存站台客流的集合,故式(6)中的 $r$ 站的上行始发客流的平均客运周转量 $d_r^{\text{up}}$ 和 $r$ 站的始发客流的平均客运周转量 $D_q$ 可依据当前站台客流信息直接求得。在式(6)中, $d_r^{\text{up}} \tau_{q,r}$ 代表了当 $q$ 站由于限流减少了单位乘车乘客时,在 $r$ 站新增的车载客流所带来的客运周转量增加量。 $D_q$ 指当 $q$ 站由于限流减少了单位乘车乘客时(包括上行乘车乘客和下行乘车乘客),整个系统的客运周转量损失量。

所以当 $E_{q,r} > 0$ 时,说明对 $r$ 站的后方站 $q$ 站进行客流控制时,能够使得系统总客运周转量增加。以图5中的客流饱和站 $r$ 为例,若 $E_{S_1,r} > 0$ 、 $E_{q,r} > 0$ 、 $E_{S_3,r} < 0$ 、 $E_{S_4,r} < 0$ 、 $E_{S_5,r} < 0$ ,则其上行限流车站集合 $C_r^{\text{up}} = \{S_1, q\}$ 。

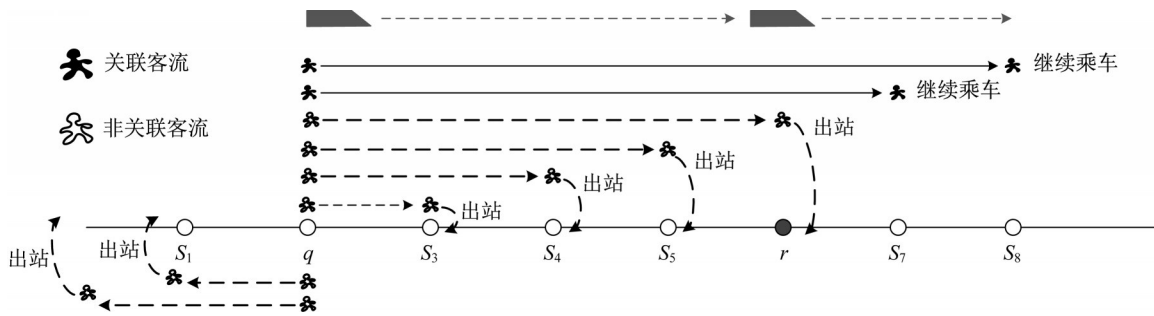


图5 a类后方站的简单示例

Fig.5 A simple instance of Type a succeeding station

### 3.1.2 b类后方站

b类后方站指该后方站和本站之间存在其他客流饱和站。当本站的后方站为b类后方站时,其后方的关联客流也无法为 $r$ 站带来盈余的客流空间。如图6所示, $r$ 和 $S_3$ 为上行客流饱和站, $q$ 站为 $r$ 站的b类后方站,图中展示了所有从 $q$ 站出发的上行客

流。当对 $q$ 站进行客流控制时,损失的关联客流被 $S_3$ 站的出发客流所侵占。此类情况同样会发生在 $S_1$ 站,即对 $S_1$ 站进行客流控制时,损失的关联客流也会被 $S_3$ 站的出发客流所侵占。故当某后方站为b类后方站时,该后方站不应被选入本站的限流车站集合。

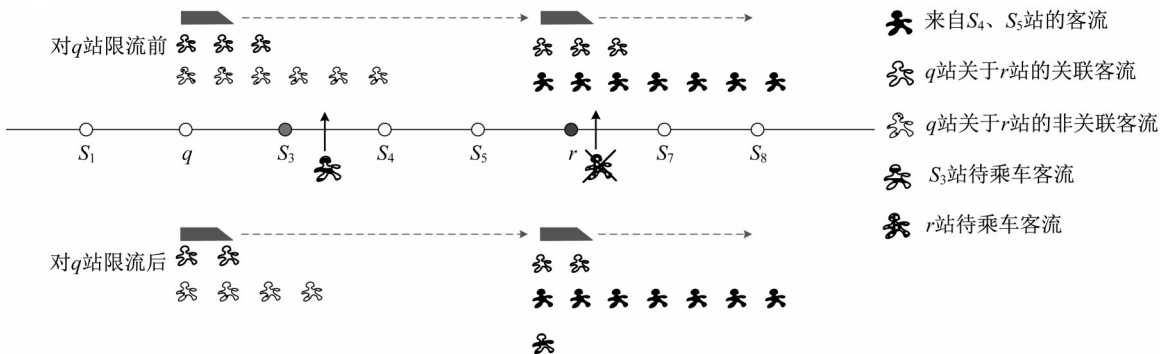


图6 b类后方站的简单示例

Fig.6 A simple instance of Type b succeeding station

### 3.1.3 c类后方站

c类后方站指该后方站为客流饱和站,且后方站与本站之间没有其他客流饱和站。对c类后方站进行限流时,会出现2个阶段。如图7所示, $S_3$ 站为 $r$ 站的c类后方站。在对c类后方站进行限流的初始阶段,从 $S_3$ 站出发的客流减少,但是列车仍然处于满载, $S_3$ 站仍然为客流饱和站,车载客流的结构没有发

生改变,无法为 $r$ 站产生盈余的客流空间。继续对 $S_3$ 站进行限流,直到有大量的乘客由于限流无法进入 $S_3$ 站, $S_3$ 站变为客流非饱和站,此时产生了盈余的客流空间供 $r$ 站的客流乘车。由于此类后方站有为本站创造盈余客流空间的可能,且损失的客流不易直接计算,故将此类车站纳入 $r$ 站的限流车站集合,通过3.2中策略来选取c类后方站最终的限流方案。

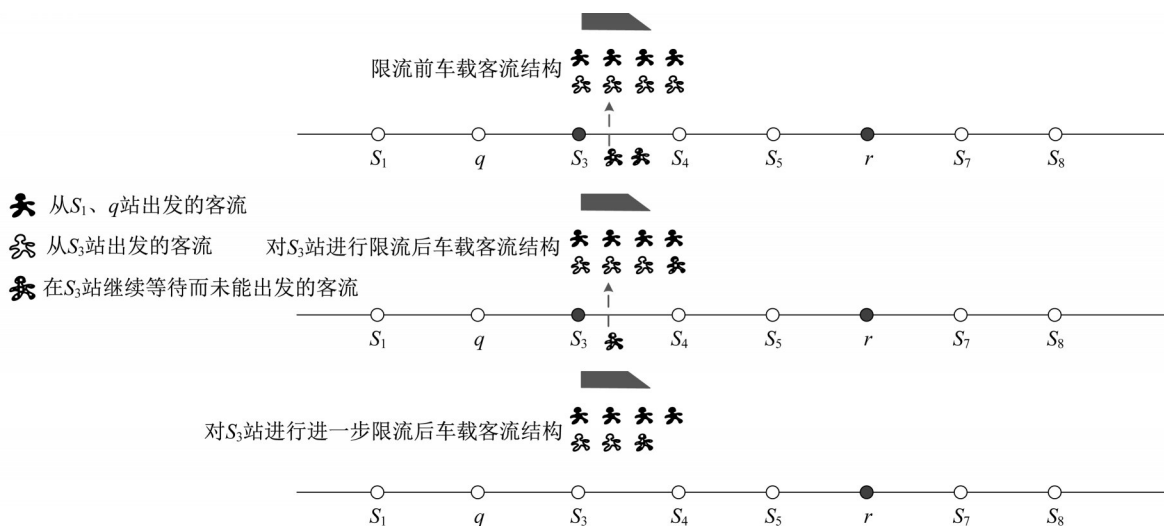


图7 c类后方站的简单示例

Fig.7 A simple instance of Type c succeeding station

### 3.2 限流车站的具体限流方案

乘车限流和站台限流在模型初始化过程中通过设定参数来实现,在仿真模型过程中,参数一般为固定值,故对限流车站实施具体限流策略时,不再对乘车限流和站台限流进行分析。参考文献[5-6],限流措施至多只能限制50%进站客流进站,否则会对地铁的正常运营和乘客的出行体验造成严重影响。故在仿真模型中,进站闸机不得全部关闭,至少保证50%的进站客流得以进站。

以图5中 $r$ 站为例,假设已经选定该站为限流车站,且当前限流方案没有对 $r$ 站的进站闸机进行任何调整,则当前限流方案 $X^0 = \{z_{s(s \in S)} = 12\}$ 。假设 $r$ 站每分钟进站客流量为 $100 \text{ 人} \cdot \text{min}^{-1}$ ,在为其选定具体的限流方案时,应当保证 $r$ 站开放的进站闸机数既能对 $r$ 站起到限流作用,又能够保证其对应的极限进站能力大于 $r$ 站每分钟进站客流量的50%。对于限流车站 $r$ 而言,参照表2,有 $z_r = 7, z_r = 6, z_r = 5$ 这3种可能的限流措施。在实验中,依次将当前的限流方案中 $z_r$ 赋值为7、6、5,形成包含3个限流方案的集合 $i_r^{\text{up}} = \{(z_r = 7, z_{s(s \in S_V)} = 12), (z_r = 6, z_{s(s \in S_V)} = 12), (z_r = 5, z_{s(s \in S_V)} = 12)\}$ ,对集合 $i_r^{\text{up}}$ 中的3个限流方案

进行仿真实验,若其中最优的方案 $i_{r, \max}^{\text{up}}$ 优于现有限流方案,则将 $i_{r, \max}^{\text{up}}$ 作为当前限流方案,否则保留当前限流方案。

同样以图5中 $r$ 站为例,假设已经选定该站为限流车站,但是当前限流方案存在对 $r$ 站的进站闸机进行调整,即 $z_r \neq 7$ ,且当前限流方案 $X^0 = \{z_r = 7, z_{s(s \in S_V)} = 12\}$ 。 $r$ 站每分钟进站客流量为 $100 \text{ 人} \cdot \text{min}^{-1}$ ,在为其选定具体的限流方案时,应当保证其对应的极限进站能力小于当前车站的极限进站能力,即 $z_r$ 新的取值要小于7,且大于 $r$ 站每分钟进站客流量的50%。所以对于限流车站 $r$ 而言,就只有 $z_r = 6, z_r = 5$ 两种可能的限流策略。在实验中,依次将当前的限流方案中 $z_r$ 赋值为6、5,形成包含2个限流方案的集合 $i_r^{\text{up}} = \{(z_r = 6, z_{s(s \in S_V)} = 12), (z_r = 5, z_{s(s \in S_V)} = 12)\}$ ,对集合 $i_r^{\text{up}}$ 中的2个限流方案进行仿真实验,若其中最优的方案 $i_{r, \max}^{\text{up}}$ 优于现有限流方案,则将 $i_{r, \max}^{\text{up}}$ 作为当前限流方案,否则保留当前限流方案。

此外,当为一个限流车站选定了其具体限流策略后,地铁线路上各车站的车站属性可能会发生变化,如图7所示,限流前后,客流饱和站 $S_3$ 变为客流

非饱和站。所以在完成对某个客流饱和车站的限流车站集合  $C_{s(s \in S)}^{\text{up}}$  中所有车站的限流后,需要重新统计地铁线路上各车站的车站属性。

### 3.3 单线地铁线路的限流策略

本文通过对上行客流和下行客流分别进行限流,实现全线协调的客流控制,提升系统总体的客运周转量。

#### 3.3.1 上行客流控制策略

在上行客流控制策略中,客流控制流程为:选取客流饱和站—选取后方站—筛选后方站—得到限流车站集合—对限流站进行客流控制—得到上行限流方案。具体客流控制策略如下。

步骤1 统计所有的上行客流饱和站,统计所有上行客流饱和站的后方站,分别对集合  $O^{\text{up}}$ 、 $B_{s(s \in S)}^{\text{up}}$  进行赋值。

步骤2 对于集合  $B_{s(s \in S)}^{\text{up}}$  中所有的车站,若不满

足以下任意条件,从集合中删除该站:①其极限进站能力大于等于该站每分钟客进站流量的50%。②在集合  $B_{s(s \in S)}^{\text{up}}$  中,其序列后不存在上行客流饱和站或双向客流饱和站。③参照式(6)进行计算,若  $E_{q(q \in B_{s(s \in S)}^{\text{up}}), r(r \in s)} \geq 0$ ,在完成筛选后,根据  $E_{q(q \in B_{s(s \in S)}^{\text{up}}), r(r \in s)}$  的数值降序排列集合  $B_{s(s \in S)}^{\text{up}}$  中的车站,加入  $B_{s(s \in S)}^{\text{up}}$  中的c类后方站,形成集合  $C_{s(s \in S)}^{\text{up}}$ 。

步骤3 依照3.2中为集合  $C_{s(s \in S)}^{\text{up}}$  中的车站选定  $I_{c(c \in C_{s(s \in S)}^{\text{up}})}^{\text{up}}$ ,对集合  $C_{s(s \in S)}^{\text{up}}$  中的车站进行客流控制。具体客流控制策略如图8所示。

步骤4 完成对一个集合  $B_{s(s \in S)}^{\text{up}}$  中车站的客流控制后,根据当前上行限流方案  $X^{\text{up}}$  进行一次完整的仿真实验,重新统计车站属性,更新  $O^{\text{up}}$  和  $B_{s(s \in S)}^{\text{up}}$ 。继续完成对所有限流车站集合的客流控制实验,得到上行的最终限流方案  $X^{\text{up}}$ 。

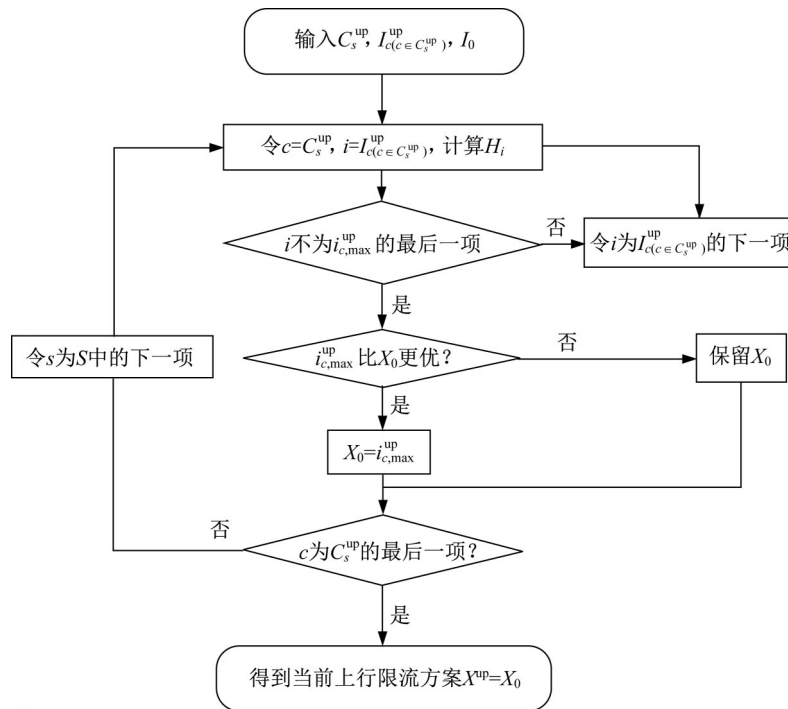


图8 客流控制策略流程图

Fig.8 Flow chart of passenger flow control strategy

#### 3.3.2 下行客流控制策略

在下行客流控制策略中,后方站的选取顺序与上行客流限流策略相反,其余同上行客流控制策略。在依据下行客流控制策略完成所有客流控制实验后,得到最终的限流方案  $X^{\text{final}}$ 。

## 4 算例

采用本文的仿真模型和客流控制策略对重庆地

铁一号线进行测试。该地铁线路包括23个车站。参考地铁B型车的额定载客人数1440人,地铁满载率一般小于135%,故分别设定  $M_z$  和  $M_c$  分别为3888人和1944人。首先根据其客流结构和限流方案  $X^0 = \{z_{s(s \in S)} = 12\}$ ,在规定实验时长1h内进行仿真实验,得到了系统客运周转量为1071096.18人·km,同时统计了地铁线路上的客流饱和站,  $O^{\text{up}} = \{13, 14, 15, 16\}$ ,  $O^{\text{down}} = \{5, 6, 10, 11, 12\}$ 。

第1轮迭代。  $O^{\text{up}} = \{13, 14, 15, 16\}$ , 令  $c=16$ , 统



计其所有的后方站,  $B_{16}^{\text{up}} = \{17, 18, 19, 20, 21, 22, 23\}$ 。由于  $B_{16}^{\text{up}}$  中所有车站均为 a 类后方站, 对其单位

系统客运周转量增量  $E_{b,16}$  进行计算, 结果如表 3 所示。

表 3  $E_{b,16}$  计算结果  
Tab.3 Results of  $E_{b,16}$

后方站编号	17	18	19	20	21	22	23
$E_{b,16}$	0.99	1.23	-0.43	-1.11	-1.74	-2.20	-3.51

依据  $E_{b,16}$  的计算结果, 得到  $C_{16}^{\text{up}} = \{18, 17\}$ 。首先对 18 号站进行客流控制, 18 号站每分钟客流量为 84 人·min, 实验结果如表 4 所示。

表 4 18 号站客流控制实验结果  
Tab.4 Results of passenger flow control experiment of Station 18

限流方案	系统总客运周转量/(人·km)
$z_{18} = 5, z_{s(s \in S \setminus 18)} = 12$	1 082 148.40
$z_{18} = 4, z_{s(s \in S \setminus 18)} = 12$	1 078 758.90
$z_{18} = 3, z_{s(s \in S \setminus 18)} = 12$	1 076 888.50

由于  $i_{16, \max}^{\text{up}}$  优于  $X^0$ , 故  $X^0 = \{z_{18} = 5, z_{s(s \in S \setminus 18)} = 12\}$ 。继续对 17 号站进行实验, 实验结果如表 5 所示。

经过 1 轮迭代, 得到  $X^0 = \{z_{18} = 5, z_{s(s \in S \setminus 18)} =$

表 6  $E_{b,15}$  计算结果  
Tab.6 Results of  $E_{b,15}$

后方站编号	17	18	19	20	21	22	23
$E_{b,15}$	0.21	-1.82	-1.04	-2.86	-2.50	-2.80	-4.27

虽然  $E_{17,15} > 0$ , 但是其极限进站能力已经等于该站每分钟进站流量的 50%, 故  $C_{15}^{\text{up}} = \{16\}$ 。对 16 号站进行客流控制, 实验结果如表 7 所示。

表 7 16 号站客流控制实验结果  
Tab.7 Results of passenger flow control experiment of Station 16

限流方案	系统总客运周转量/(人·km)
$z_{16} = 5, z_{18} = 6, z_{s(s \in S \setminus 18 \cup 16)} = 12$	1 076 446.30
$z_{16} = 4, z_{18} = 6, z_{s(s \in S \setminus 18 \cup 16)} = 12$	1 074 708.70
$z_{16} = 3, z_{18} = 6, z_{s(s \in S \setminus 18 \cup 16)} = 12$	1 072 603.40

经过 2 轮迭代, 得到  $X^0 = \{z_{18} = 5, z_{s(s \in S \setminus 18)} = 12\}$ ,  $X^{\text{up}} = \{z_{18} = 5, z_{s(s \in S \setminus 18)} = 12\}$ 。

在第 3 轮第 4 轮迭代中, 13 号站和 14 号站均没有符合条件的限流车站, 故上行限流实验结束, 当前限流方案  $X^0 = \{z_{18} = 5, z_{s(s \in S \setminus 18)} = 12\}$ , 上行限流方案  $X^{\text{up}} = \{z_{18} = 5, z_{s(s \in S \setminus 18)} = 12\}$ 。

第 5 轮迭代,  $O^{\text{down}} = \{5, 6, 10, 11, 12\}$ , 令  $c = 5$ , 统计其所有的后方站,  $B_5^{\text{down}} = \{1, 2, 3, 4\}$ 。由于  $B_5^{\text{down}}$  中所有车站均为 a 类后方站, 故对其单位系统客运周

表 5 17 号站客流控制实验结果

Tab.5 The results of the passenger flow control experiment of station 17

限流方案	系统总客运周转量/(人·km)
$z_{18} = 5, z_{17} = 6, z_{s(s \in S \setminus 18 \cup 17)} = 12$	1 082 148.40
$z_{18} = 5, z_{17} = 5, z_{s(s \in S \setminus 18 \cup 17)} = 12$	1 080 205.70
$z_{18} = 5, z_{17} = 4, z_{s(s \in S \setminus 18 \cup 17)} = 12$	1 080 283.80

12},  $X^{\text{up}} = \{z_{18} = 5, z_{s(s \in S \setminus 18)} = 12\}$ 。

第 2 轮迭代: 车站属性没有发生变化,  $O^{\text{up}} = \{13, 14, 15, 16\}$ , 令  $c = 15$ , 统计其所有的后方站,  $B_{15}^{\text{up}} = \{16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23\}$ 。由于  $B_{15}^{\text{up}}$  中除 16 号站外所有车站均为 a 类后方站, 故对其单位系统客运周转量增量  $E_{b,15}$  进行计算, 结果如表 6 所示。

周转量增量  $E_{b,5}$  进行计算, 结果如表 8 所示。

表 8  $E_{b,5}$  计算结果  
Tab.8 Results of  $E_{b,5}$

后方站编号	1	2	3	4
$E_{b,5}$	-9.64	-7.92	-5.60	-3.30

由于所有  $E_{b,5} < 0$ , 故  $C_5^{\text{down}} = \emptyset$ 。经过 7 轮迭代, 得到了最终限流方案,  $X^{\text{final}} = \{z_{10} = 5, z_5 = 4, z_{18} = 5, z_{s(s \in S \setminus (18 \cup 10 \cup 10))} = 12\}$ ,  $H_{X^{\text{final}}} = 1 082 616.10$  人·km, 系统总客运周转量提升了 1.01%。

## 5 结论

本文建立的仿真模型贴合真实运行场景, 考虑了地铁实际运营中客流控制的限制条件。提出的客流控制策略在地铁实际运营中较容易实现。在依据调研结果调整实验参数后, 仿真模型的实验误差能够进一步减小。此外, 仿真模型中可以追溯任意列车在任意时刻的车载客流结构, 可以综合考量全线



的客流来进行全线协调客流控制,不再仅仅只针对线路中的某一个站点进行单站调整亦或是针对某几个站点进行多站协同调整。算例实验表明,本文提出的限流策略能够有效提升系统的运输效率。

#### 作者贡献声明:

鲁工圆:算法构建与学术指导。

雷元争:算法设计与实验分析。

张宏翔:学术指导与论文修改。

#### 参考文献:

- [1] 姚向明,赵鹏,乔珂,等.城市轨道交通网络客流协同控制模型[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(1):342.  
YAO Xiangming, ZHAO Peng, QIAO Ke, *et al.* Modeling on coordinated passenger inflow control for urban rail transit network[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(1):342.
- [2] 姜曼.城市轨道交通单线多站协同客流控制研究[D].北京:北京交通大学,2016.  
JIANG Man. Coordination control of passenger flow in multi stations of a single line in urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [3] MENG F, YANG L, YUN W, *et al.* Collaborative passenger flow control on an oversaturated metro line: a path choice approach[J]. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2020, 8(1):376.
- [4] SHI J, YANG L, 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, 2018(2):110.
- [5] 鲁工圆,马骊,王坤,等.城市轨道交通线路客流控制整数规划模型[J].西南交通大学学报,2017,52(2):319.  
LU Gongyuan, MA Si, WANG Kun, *et al.* Integer programming model of passenger flow assignment for congested urban rail lines[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(2):319.
- [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.  
LI Denghui, PENG Qiyuan, LU Gongyuan, *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.
- [7] 赵鹏,姚向明,禹丹丹.高峰时段城市轨道交通线路客流协同控制[J].同济大学学报(自然科学版),2014,42(9):1340.  
ZHAO Peng, YAO Xiangming, YU Dandan. Cooperative passenger inflow control of urban mass transit in peak hours[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(9): 1340.
- [8] 蒋琦玮,蔡适,陈维亚,等.城市轨道交通车站客流控制决策模型[J].系统工程,2017,35(9):94.  
JIANG Qiwei, CAI Shi, CHEN Weiya, *et al.* Passenger flow control decision-making method of urban rail transit station[J]. Systems Engineering, 2017, 35(9):94.
- [9] 张永生,姚恩建,刘莎莎,等.地铁大线网条件下乘客SPSL路径选择模型[J].中国铁道科学,2016,37(5):138.  
ZHANG Yongsheng, YAO Enjian, LIU Shasha, *et al.* Passengers' spsl route choice model in a large scaled metro network[J]. China Railway Science, 2016, 37(5): 138.