

考虑安全的城市轨道交通三级客流控制模型

陈治亚, 甘金荣, 王小军

(中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙, 410075)

摘要: 针对城市轨道交通高峰期车站内聚集大量乘客而导致的安全问题和运营管理不便的问题, 对单线多站和车站内部建立客流控制模型, 为高峰期实施客流控制提供理论依据。首先, 依据车站内部的三级控制策略和单线多站协调客流控制影响因素, 对乘客的乘车过程进行动态建模; 然后, 建立以乘客等待时间最小为目标函数的客流控制模型, 根据计算精度选取单位计算时间 t_0 , 将时间进行离散化, 运用 CPLEX 求解器进行求解; 最后, 通过算例进行验证。研究表明: 此模型能在高峰期通过控制线路各站及车站内各区域的客流人数, 在均衡线路车站等待客流的基础上, 将各车站等待乘客压力分至其各区域, 避免站内乘客过度拥挤, 从而保证车站的安全与运营管理的正常进行。

关键词: 城市轨道交通; 三级客流控制; 安全; 车站

中图分类号: U239.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2020)05-1441-10

Three-level passenger flow control model for urban rail transit in consideration of safety

CHEN Zhiya, GAN Jinrong, WANG Xiaojun

(School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Aiming at the problems of safety and operation management caused by a large number of passengers in the stations of the urban rail transit during the peak period, a passenger flow control model was established for a single line and multiple stations and inside the stations, which provided a theoretical basis for the implementation of passenger flow control during the peak period. Firstly, according to the three-level control strategy inside the station and the influencing factors of the passenger flow control coordinated by a single line and multiple stations, the dynamic modeling of passenger boarding process was carried out. Then, the passenger flow control model with the minimum passenger waiting time as the objective function was established. The unit of the calculation time t_0 was selected according to the calculation accuracy. The time was discretized and the model was solved with the CPLEX solver. Finally it was validated by a small-scale case. The results show that this model can control the number of passengers in each station of the line and each region of the station in the peak period, and distribute the pressure of waiting passengers waiting inside the stations to each region of the stations on the basis of balancing

收稿日期: 2019-07-28; 修回日期: 2019-09-06

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划项目(2017YFB1201300); 中南大学研究生自主探索创新项目(2018zzts512) (Project(2017YFB1201300) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project (2018zzts512) supported by the Postgraduate Exploratory and Innovative Program of Central South University)

通信作者: 陈治亚, 博士, 教授, 从事交通运输规划与管理研究; E-mail: chzy@csu.edu.cn

the waiting passenger flow in stations of the line, so as to avoid overcrowding inside the stations and ensure the normal operation and management of the stations.

Key words: urban rail transit; three-level passenger flow control; safety; station

随着国内外城市轨道交通的快速建设和发展,客流需求的快速增长使得大城市路网中部分线路的运输强度长期处于超负荷状态,列车满载率高、站内长时间聚集大量乘客给城市轨道交通的运营组织带来极大的挑战,乘客上车难、下车更难,乘客挤门、坠轨事情等时有发生,对运输管理带来了很大的安全问题。为保障乘客在旅程中的安全以及便利运输组织的管理,对车站实施客流控制(即“限流”)是一种简单有效的方法。目前,北京、上海、广州等大城市在高峰期对部分车站实施限流措施,在一定程度上缓解了客流需求与运能供给的不匹配问题,保障了车站的安全。然而,如何选择控流车站、如何对车站实施具体的控流措施,目前仅仅依靠运营者的经验,有时候甚至因为客流量过大而进行封站措施,给乘客造成了不便,降低了服务水平。目前,针对城市轨道交通客流控制的研究主要从车站级、线路级和网络级3个层次^[1-2]进行。刘晓华等^[3]提出了车站联合客流控制的方法。此外,赵鹏等^[4-5]分布从线路层和网络层构建客流控制模型,以提高线路的利用率和减小乘客等待时间。姜曼^[6]则针对单线多站构成的系统构建了相应的客流协同控制概念理论体系,并建立了数学模型进行验证。鲁工圆等^[7]针对客流过饱和的地铁线路以旅客周转量最大为目标进行了客流控制。石俊刚等^[8]则在考虑了站厅安全的情况下,建立了地铁线路客流协同控制模型,以增加乘客总等待时间为代价而使线路所有站的客流聚集人数在安全预警之下。蒋琦玮等^[9]根据车站三级控流策略,建立车站层次的双目标客流控制模型,通过开启设备的数量来控制客流。冯树民等^[10]针对突发大客流建立以乘客平均延误最小和各区区间满载率之和最大为目标的协调限流控制优化模型。此外,还有一些学者结合客流控制与列车组织优化来满足高峰期乘客需求^[11-15]和研究根据地铁车站的设施布局来估算车站或拥挤区域的通行能力,作为进行客流控制的指导信息^[16-21]。LI等^[12]将客流控制策略与列车调度相结合,以消除列车延误,并利用预测控制方法求解了所建立的耦合状

态空间模型。SHI等^[13]提出了一种协同优化列车时刻表和客流控制策略的整数规划模型,以最小化线路上所有车站的旅客等候时间为目标并给出了相应算法。JIANG等^[14]研究了在给定客流总进站需求的情况下,对旅客需求进行控制和调整列车运力供给,建立了基于效用理论的客运站选择模型,对客运站之间的客流分布进行了修正。XU等^[15]基于排队网络理论,研究了不确定需求下的客流控制组织。综上,目前的研究多单一从车站、线路或路网进行客流控制,没有考虑车站和线路客流控制的联动性。为此,本文作者联合线路和车站的客流控制,依据车站三级客流控制策略,提出考虑安全的城市轨道交通三级客流控制模型,在对车站的各个区域人数进行限制的基础上,提高运输效率,以达到解决在高峰期等大客流时期各区域的安全和拥堵问题。

1 问题描述

城市轨道交通出行具有较强的时变特性,乘客在高峰时段和大型活动举办时期在地铁短时间内大量聚集,其运输需求远超过载运能力,造成大量乘客在站内滞留,给地铁站内造成安全隐患;此外,由于站台等待上车人数过多还将造成乘客下车的障碍以及地铁运营管理不便。为保证乘客安全及站内正常运营,需进行客流控制。在本文中,客流控制是指控制乘客进入车站各区域(非付费区、付费区和站台)的速率,达到减小站内聚集过多人数的目的,本质上,客流需求总量不变。一般高峰期客流拥挤只在单方向发生,所以,考虑如图1所示的1个典型单向城市轨道交通线路,共有 J 个车站。城市轨道交通出行具有较强的时变特性,乘客在高峰时段和大型活动举办时期在地铁短时间内大量聚集,其运输需求远超过载运量,造成大量乘客在站内滞留,给地铁站内造成安全隐患,此外由于站台等待上车人数过多还将造成乘客下车存在障碍以及地铁员工生产管理不便。

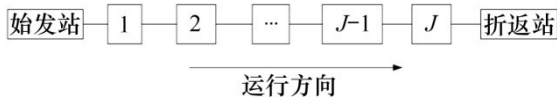


图 1 单向城市轨道交通线路

Fig. 1 Single-way urban rail transit line

为简化问题, 进行如下假设。

假设 1: 控制时段内容流的时变需求已知, 在整个过程中, 到达地铁的乘客不会因为等待时间过长而放弃乘坐地铁。

假设 2: 出站客流能够快速出站, 对站台及站厅客流影响较小, 可忽略。

假设 3: 忽略乘客自到达车站步行至站台的时间。

2 站内客流动态建模

乘客乘坐地铁的过程是一个从进入车站到乘坐列车再到在区间运行最后下车出站的动态转移过程, 下面对这个动态过程进行建模分析。

2.1 决策变量

由于本模型为协同控制线路及车站各区域的客流, 依据的策略为车站的三级控制措施, 所以, 建立的模型中的决策变量为进站台率、进站厅率和进非付费区率, 其中, $X_i(t)$ 为车站 i 乘客在时刻 t 的进站台率, $Y_i(t)$ 为车站 i 乘客在时刻 t 的进站厅率, $Z_i(t)$ 为车站 i 乘客在时刻 t 的进站率。

2.2 客流需求

城市轨道交通系统中乘客的到达率随时间变化曲线如图 2 表示, 其中 $\lambda(t)$ 为乘客到达率(即客流需求)。

地铁站客流需求表示为动态 OD 矩阵形式^[21],

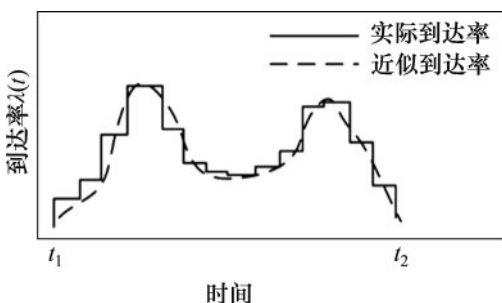


图 2 客流到达曲线图

Fig. 2 Curves of passenger flow arrival

一个典型的单方向城市轨道交通线路的动态客流量可以表示为

$$O_{TOD} = \begin{pmatrix} 0 & e_{1,2} & e_{1,j} \\ 0 & \ddots & e_{ij} \\ 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: O_{TOD} 为客流的 OD 比例矩阵, 在实际应用中可以利用地铁 AFC 历史刷卡数据来估计; e_{ij} 为行程为 $i \rightarrow j$ 的比例。

则时刻 t 行程为 $i \rightarrow j$ 的旅客为

$$A_{ij}(t) = A_i(t) \cdot e_{ij} \quad (2)$$

式中: $A_{ij}(t)$ 为车站 i 时刻 t 行程为 $i \rightarrow j$ 的乘客到达率; $A_i(t)$ 为车站 i 时刻 t 的乘客到达率。

2.3 地铁各区域人数

在高峰期等大客流时期, 由于客流量远超过地铁的运量, 所以乘客从到达地铁到乘坐地铁需要排队依次进入非付费区、付费区(即站厅)和站台区等待列车到来乘车。故接下来将依次计算时段 t 内到达人数、进入非付费区人数、进入付费区人数和进入站台区人数。

车站 i 时段 t 内到达的客流人数为将乘客的到达率从时间 0 到 t 进行积分, 计算如下:

$$L_i^a(t) = \int_0^t A_i(\tau) d\tau \quad (3)$$

式中: $A_i(\tau)$ 为车站 i 时刻 τ 乘客到达率; $L_i^a(t)$ 为车站 i 时段 t 内的客流总人数; τ 为时刻。

车站 i 时段 t 内进入站台的客流人数为将乘客的进站台率从时间 0 到 t 进行积分, 计算如下:

$$L_i^p(t) = \int_0^t X_i(\tau) d\tau \quad (4)$$

式中: $X_i(\tau)$ 为车站 i 时刻 τ 乘客进站台率; $L_i^p(t)$ 为车站 i 时段 t 内的进入站台的客流总人数。

车站 i 时段 t 内进入付费区的客流人数为将乘客的进付费区率从时间 0 到 t 进行积分, 计算如下:

$$L_i^b(t) = \int_0^t Y_i(\tau) d\tau \quad (5)$$

式中: $Y_i(\tau)$ 为车站 i 时刻 τ 乘客进站台率; $L_i^b(t)$ 为车站 i 时段 t 内的进入付费区的客流总人数。

车站 i 时段 t 内进入非付费区的客流人数为将乘客的进非付费区率从时间 0 到 t 进行积分, 计算如下:

$$L_i^f(t) = \int_0^t Z_i(\tau) d\tau \quad (6)$$

式中: $Z_i(\tau)$ 为车站 i 乘客进非付费区率; $L_i^f(t)$ 为车站 i 时段 t 内的进入非付费区的客流总人数。

同理,可计算出车站*i*在两列车之间(即从时间 $d_{i,m-1}$ 到 $d_{i,m}$ 之间)到达的客流量和进入站台的客流量。

则车站*i*的乘客在等待列车*m*的时间段内(即列车*m-1*离开至列车*m*离开期间)到达客流量为

$$\lambda_{i,m} = \int_{d_{i,m-1}}^{d_{i,m}} A_i(\tau) d\tau \quad (7)$$

式中: $\lambda_{i,m}$ 为车站*i*的乘客在等待列车*m*的时间段内的到达客流量。

车站*i*的乘客在等待列车*m*的时间段内进入站台客流量为

$$\eta_{i,m} = \int_{d_{i,m-1}}^{d_{i,m}} X_i(\tau) d\tau \quad (8)$$

式中: $\eta_{i,m}$ 为车站*i*的乘客在等待列车*m*的时间段内进入站台客流量。

高峰期由于短期内客流的迅速聚集,给车站带来巨大的压力,易发生安全事故且对站内的正常组织带来巨大的挑战,在上车量大的车站,容易造成上下车秩序混乱,下车乘客无法下车等情况,因此需对车站各区域人数进行控制,即需对站台区的人数、站厅内的人数、非付费区的人数进行控制,以下为时刻*t*各区域人数的计算公式。

由于控制进入站台的客流即为可乘坐即将到来的列车,所以车站*i*乘坐列车*m*的人数为

$$L_{i,m}^{ba} = \int_{d_{i,m-1}}^{d_{i,m}} X_i(\tau) d\tau \quad (9)$$

式中: $L_{i,m}^{ba}$ 为车站*i*乘坐列车*m*的人数。

车站*i*时刻*t*排队等在站台外的乘客(即在站外、非付费区、付费区的乘客)为时段*t*内到达的乘客人数减去时段*t*内进入站台的乘客人数:

$$L_i^w(t) = L_i^a(t) - L_i^p(t) \quad (10)$$

式中: $L_i^w(t)$ 为车站*i*时刻*t*排队等在站台外的乘客人数。

车站*i*时刻*t*排队等在付费区的乘客为时段*t*内进入付费区的乘客人数减去时段*t*内进入站台的乘客人数:

$$L_i^{wh}(t) = L_i^h(t) - L_i^p(t) \quad (11)$$

式中: $L_i^{wh}(t)$ 为车站*i*时刻*t*排队等在付费区的乘客人数。

车站*i*时刻*t*排队等在非付费区的乘客为时段*t*内进入非付费区的乘客人数减去时段*t*内进入付费区的乘客人数:

$$L_i^{wf}(t) = L_i^f(t) - L_i^h(t) \quad (12)$$

式中: $L_i^{wf}(t)$ 为车站*i*时刻*t*排队等在非付费区的乘客人数。

车站*i*时刻*t*排队等在站外的乘客为时段*t*内到达的乘客人数减去时段*t*内进入非付费区的乘客人数:

$$L_i^{ww}(t) = L_i^a(t) - L_i^f(t) \quad (13)$$

式中: $L_i^{ww}(t)$ 为车站*i*时刻*t*排队等在站外的乘客人数。

2.4 乘客上下车动态

同理,列车*m*在车站*i*($i \geq 2$)下车的乘客数为所有在车站*i*之前的站点上车且终点为车站*i*的所有乘客人数之和:

$$L_{i,m}^{al} = \sum_{v=1}^{i-1} L_{v,m}^{ba} \cdot e_{v,i} \quad (14)$$

式中: $L_{i,m}^{al}$ 为列车*m*在车站*i*($i \geq 2$)下车的乘客数。

则列车*m*在区间*i*→*i+1*的载客量为

$$L_{i,m}^{on} = \begin{cases} L_{i,m}^{ba} (i = 1) \\ L_{i-1,m}^{on} - L_{i,m}^{al} + L_{i,m}^{ba} (i \geq 2) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $L_{i,m}^{on}$ 为列车*m*在区间*i*→*i+1*的载客量。在第1→2站时,列车车上的客流量即为上车的总人数,从第2→*j*站时,列车上的客流为前一站的客流量减去在本站的上车人数再加上在本站的上车人数。

2.5 等待时间

乘客从到达车站到乘车离开过程中的等待时间包括在站外等待时间、在非付费区等待时间、在站厅等待时间和在站台内等待乘车时间4个部分。在站外等待时间、在非付费区等待时间和在站厅等待时间为时刻*t*等待人数从时间0→*T*之间的积分,分别为:

$$t_i^{wh} = \int_0^T L_i^{wh}(t) dt \quad (16)$$

$$t_i^{wf} = \int_0^T L_i^{wf}(t) dt \quad (17)$$

$$t_i^{ww} = \int_0^T L_i^{ww}(t) dt \quad (18)$$

式中: t_i^{wh} 为车站*i*乘客在站厅等待时间; t_i^{wf} 为车站*i*乘客在非付费区等待时间; t_i^{ww} 为车站*i*乘客在站外等待时间。

同理,乘客在车站*i*的站台等待列车*m*的等待时间为时刻*t*等待人数从时间 $d_{i,m-1}$ 到 $d_{i,m}$ 之间的积分,即

$$t_{i,m}^{wp} = \int_{d_{i,m-1}}^{d_{i,m}} (X_i(t) \cdot dt) dt \quad (19)$$

式中: $t_{i,m}^{wp}$ 为在车站 i 的站台等待列车 m 的乘客的等待时间。

车站 i 的乘客在站台总等待时间 t_i^{wp} 为

$$t_i^{wp} = \int_0^T (X_i(t) \cdot dt) dt \quad (20)$$

式中: t_i^{wp} 为在时段 T 内在车站 i 的站台等待列车的乘客的等待时间。

3 客流控制模型

3.1 目标函数

此模型是联合单线多站和车站进行客流控制, 不仅要保证车站的安全, 而且要减小乘客等待列车的总时间, 因此, 本模型目标函数为乘客总等待时间总和最小。

$$\min T_A = \left(\sum_{i \in J} t_i^{ww} + \sum_{i \in J} t_i^{wf} + \sum_{i \in J} t_i^{wh} + \sum_{i \in J} t_i^{wp} \right) \quad (21)$$

式中: T_A 为线路上车站的乘客的总等待时间。乘客的等待时间包括在站外等待时间、在非付费区等待时间、在站厅等待时间和在站台内等待乘车时间 4 个部分, 乘客的总等待时间为这 4 部分之和。

3.2 约束条件

乘客从进入车站等待乘车到上车的过程要满足相应的设施能力限制, 即为站内设施限制、列车容量限制以及客流需求限制和客流控制限制。

1) 客流需求约束。

对于轨道交通乘客来说, 在控制时段内, 客流需求要求全部满足, 即在控制时段 t 内进入非付费区的人数、付费区的人数、站台的人数与到达车站的人数相等, 且所有乘客都能乘坐上车, 表达如下:

$$\int_0^T X_i(t) dt = \int_0^T Y_i(t) dt = \int_0^T Z_i(t) dt = \int_0^T A_i(t) dt = \sum_{m \in M} L_{i,m}^{ba} \quad (22)$$

2) 相邻时刻进站人数、单位时间进站人数限制。

在实际控流过程, 为保证客流流动的顺畅性, 相邻时间段的各区域进站量之差不能过大, 表示为:

$$|L_i^p(t+1) - L_i^p(t)| \leq a \quad (23)$$

$$|L_i^h(t+1) - L_i^h(t)| \leq a \quad (24)$$

$$|L_i^f(t+1) - L_i^f(t)| \leq a \quad (25)$$

式中: a 为相邻时段进入乘客之差; $L_i^p(t)$ 为第 t' 个单位时间内进入站台的乘客数; $L_i^p(t+1)$ 为第 $t'+1$ 个单位时间内进入站台的乘客数。

此外, 乘客在站内通过各种设施有通过量限制, 对于站内设备的服务能力, 将车站闸机、通道、升降设备等设施通过能力的最小值作为车站通过能力, 在这里简化为:

$$L_i^p(t) \leq c \quad (26)$$

$$L_i^h(t) \leq c \quad (27)$$

$$L_i^f(t) \leq c \quad (28)$$

式中: c 为站内设备通过乘客限制。

3) 车站各区域容量约束。

高峰期乘客由于短时期的需求远大于地铁的运输能力, 无法及时将乘客输送出去, 导致大量乘客滞留在车站, 因此, 为保证车站在大客流时期的运输组织安全, 需控制车站各区域的客流人数, 即站台区的人数、付费区的人数、非付费区的人数。车站的三级客流控制策略即通过控制各区域人数实现, 其计算如下。

在站台等待乘车的所有人数不得超过站台容纳人数, 即 $L_{i,m}^{ba}$ 为

$$L_{i,m}^{ba} \leq h_p \quad (29)$$

式中: h_p 为站台容量限制。

在付费区(即站厅)等待乘车的所有人数不得超过站厅容纳人数, 站厅人数为双向等待乘车人数之和, 即 $L_i^{wh}(t)$ 为

$$L_i^{wh}(t) \leq h_h \quad (30)$$

式中: h_h 为付费区容量限制。

在非付费区等待乘车的所有人数不得超过非付费区容纳人数, 非付费区人数为双向等待乘车人数之和, 即 $L_i^{wf}(t)$ 为

$$L_i^{wf}(t) \leq h_f \quad (31)$$

式中: h_f 为非付费区容客量限制。

当人数过多时, 乘客排队到车站外, 则站外等待人数 $L_i^{ww}(t)$ 为

$$L_i^{ww}(t) \geq 0 \quad (32)$$

需要注意的是, 三级控流策略是由内向外控制的, 即当等待人数大于付费区容纳人数, 乘客才需要在非付费区进行等待。

4) 列车能力约束。

列车载客量不能超过其载运量, 即

$$L_{i,m}^{on} \leq h_v \quad (33)$$

式中: h_v 为列车载客量限制。

3.3 模型求解

文中建立的模型为积分模型, 在实际应用中, 由于动态客流需求可以利用地铁 AFC 历史刷卡数据来估计 OD 比例矩阵, 所以可以选取单位计算时间 t_0 , 将时间进行离散化, 根据计算精度选取单位控制时间, 将模型转化为线性模型运用 CPLEX 进行求解。

以 $L_i^a(t)$ 的计算为例(其他类似),

$$L_i^a(t) = \sum_{t=0}^t A_i(t) \cdot t_0 \quad (34)$$

4 算例分析

4.1 算例数据

为验证本文提出模型的有效性, 本节考虑 1 个简单的仿真案例。仿真案例中仅考虑单向线路, 共 4 个车站、3 个运行区间, 车站记为 A, B, C 和 D。在计算中, 取单位计算时间 t_0 为 30 s, 计算时长 $T = 43t_0$ 。由于进行客流控制时, 为尽快将人群疏散, 将相邻列车开行时间间隔设为 120 s, 相邻区间运行 120 s, 在区间停留为 30 s, 列车数 $m=8$ 。相应的模型相关参数如表 1 所示。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

参数	数值
列车数 m /辆	8
列车定员 h_v /人	500
发车间隔 t_1 /s	120
站间停留时间 t_2 /s	30
区段运行时间 t_3 /s	120
单位计算时间 t_0 /s	30
控制时段 T /s	$43t_0$
车站数 J /个	4
站台承载量 h_p /人	500
付费区承载量 h_h /人	600
非付费区承载量 h_f /人	600
相邻时段通过乘客差 a /人	60
站内设备通过能力 C /(人·(30 s))	300

客流需求通过正态分布产生, 其各站客流需求如表 2 所示, 各站到达客流的去向人数如表 3 所示。

OD 比例矩阵 O_{TOD} 为

$$O_{TOD} = \begin{pmatrix} 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

表 2 客流需求表

Table 2 Passenger flow demand table

车站	A 站	B 站	C 站
客流需求/人	2 500	2 400	500

表 3 各站到达客流的去向人数

Table 3 Number of passengers arriving at each station

车站	B	C	D
A	1 000	1 000	500
B	—	1 200	1 200
C	—	—	500

4.2 结果计算与分析

4.2.1 结果计算

使用 IBM ILOG CPLEX 12.5 进行求解。所有的计算工作在 1 台 Intel i3 3.4 GHz, 32 G 内存, window 10 操作系统的计算机上进行求解, 计算的终止条件为上下界 Gap 为 1%。

此次结果耗时 3 s, 得最优解 $T_A=1\ 545\ 150\ s=429.21\ h$ 。

4.2.2 乘客到达乘车特性分析

图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)所示分别为 A、B 和 C 站乘客到达、进站台乘车曲线图。由图 3 可以看出: A 和 B 站在高峰期乘客需求较大, 为了协调 A、B 和 C 站以减小总等待时间, A 和 B 站在高峰期都采取协调限流措施, 使得在控制时段内进入站台乘车的乘车过程变得较为平缓, 缓解供需矛盾, 从而得以保障后方 C 站的乘客在高峰期可以乘车。

4.2.3 乘客进入各区域过程分析

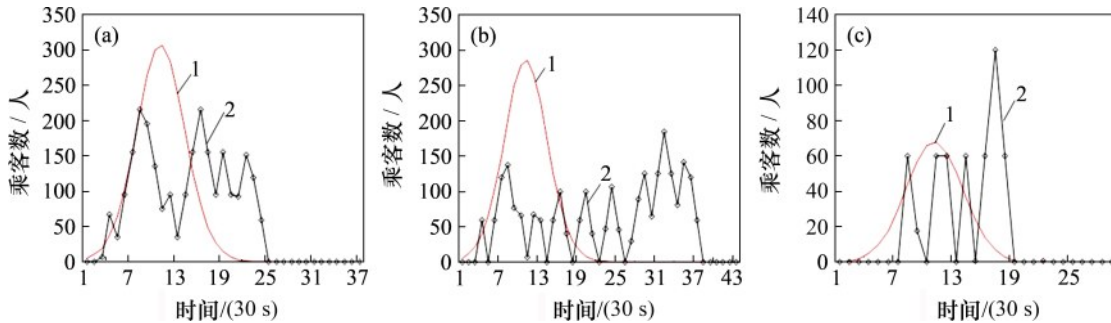
图 4(a)、图 4(b)和图 4(c)所示分别为 A、B 和 C 站乘客依次进入非付费区和付费区的动态过程图。A 站到达人数曲线图和进入非付费区人数曲线图重合, 而乘客进入付费区曲线图在前期与其他曲线

图重合, 后期进入人数比其他区域的小, 表明付费区承载人数有限, 还有部分乘客被限制在非付费区等待。B站同理。C站则3条曲线重合, 表明站内乘客较小, 只需限制进入站台乘车的人数, 其他区域无需进行客流控制。

4.2.4 车站各区域客流人数分析

乘客到达后, 可分为2部分: 站台等待乘车乘

客和站台外等待乘客。站台外乘客包括付费区乘客、非付费区乘客和站外乘客。图5(a)、图5(b)和图5(c)所示分别为A、B和C站的站台、站外等待乘客人数。站台等待乘客人数曲线即为各站控制乘坐列车的人数, 为锯齿形, 在列车即将离开车站时达到最大。而站外等待乘客较多, A站和B站都超过1 000人。

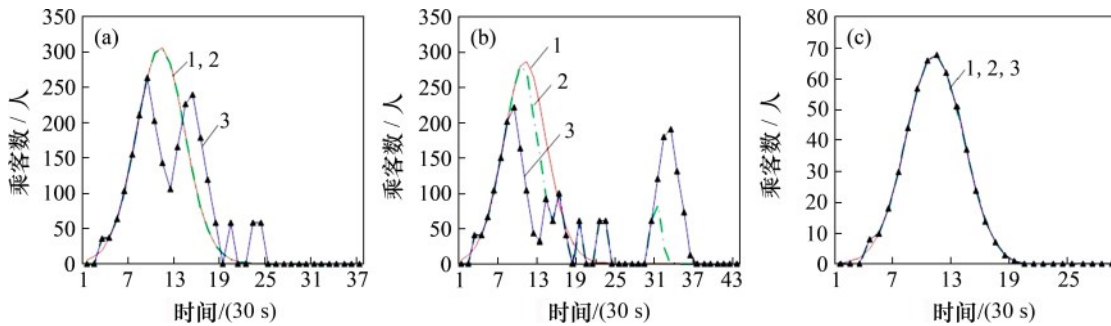


(a) A站; (b) B站; (c) C站

1—车站到达人数; 2—车站进入站台人数。

图3 乘客乘车过程

Fig. 3 Process of passenger boarding

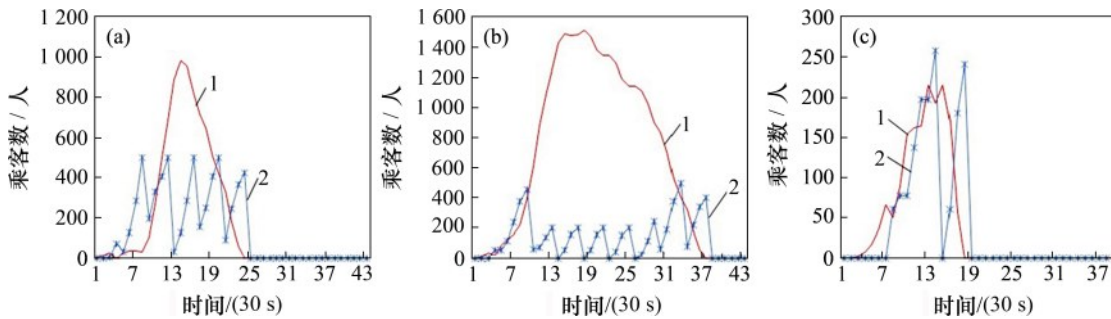


(a) A站; (b) B站; (c) C站

1—车站到达人数; 2—车站进入非付费区人数; 3—车站进入付费区人数。

图4 乘客进入车站过程

Fig. 4 Process of passenger entering station



(a) A站; (b) B站; (c) C站

1—车站站台外等待人数; 2—车站站台等待人数。

图5 车站等待乘车人数

Fig. 5 Number of people waiting at station

图 6 所示为车站各区域等待乘客人数。由图 6 可知：实施车站三级控制策略后，将站台外聚集的等待乘客压力分散到付费区、非付费区和站外，大大减小车站压力。由图 6 可知：A 站和 B 站需实施三级客流控制，C 站无需实施三级客流控制。

高峰期往往由于客流在短时期内大量聚集，通过控制各个区域的人数，既可保障车站安全，也有利于站内管理和保证服务水平。

4.3 对比分析

为比较实施三级控流策略的优势，设计计算站内区域容量无约束下(即无 h_p 和 h_h 约束)乘客的乘车特性，并进行对比。

表 4 所示为 2 种情况下乘客总等待时间，相较于有车站区域容量限制，无限制的总等待时间减小 $1\ 659\ 990 - 1\ 545\ 150 = 114\ 840\ s = 31.9\ h$ 。

图 7 所示为在 2 种情况下各站乘车、站台外等待人数变化图。

表 4 等待时间对比

Table 4 Comparison of waiting time

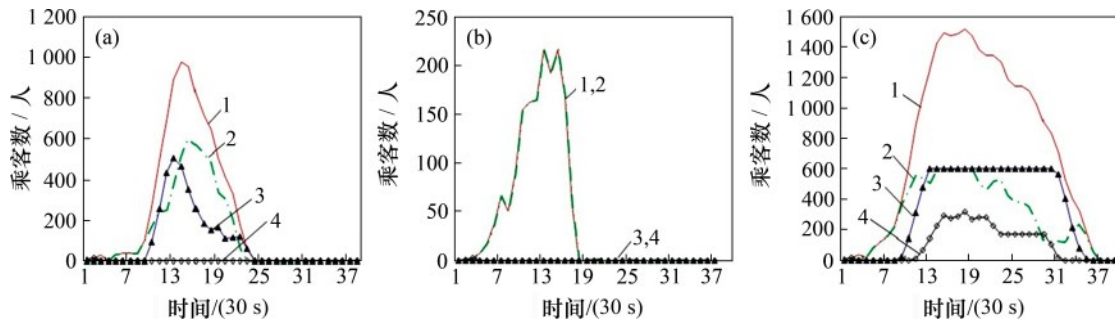
等待总时间	无车站区域容量限制	车站区域容量限制
T_A/s	1 545 150	1 659 990

由图 7 可知：有站台容量限制下的 A 站和 B 站站台最大等待人数均比无容量限制下的少。由此可知，即使列车能承载更多的乘客，由于受到站台容量限制，使站台等待上车人数减少、站台外等待人数增加。

由图 7 还可知：无站内容量限制下，站厅等待人数过多，A 站和 B 站最大等待乘客数都超过 2 000 人，给车站带来安全问题及生产管理的不便。而由以上对实施车站三级客流控制可知，站台外等待乘车的乘客分布在付费区、非付费区和站外，大大减小对于车站的压力。

4.4 灵敏度分析

在高峰期实施车站三级控流策略具体是根据

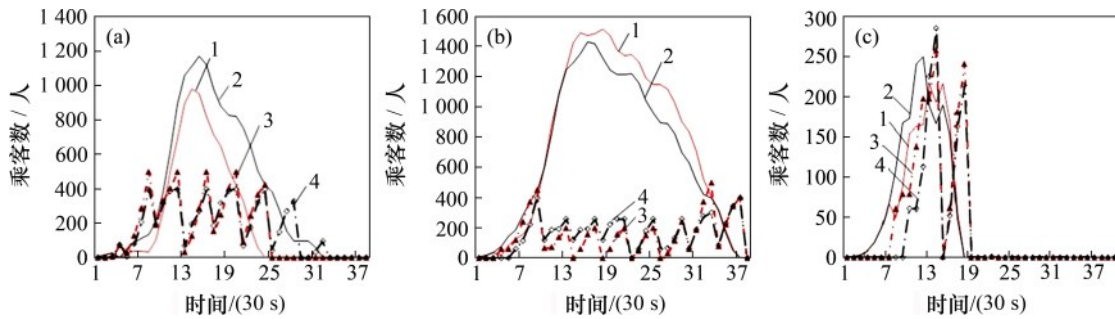


(a) A 站; (b) B 站; (c) C 站

1—车站站台外等待人数; 2—车站付费区等待人数; 3—车站非付费区等待人数; 4—车站站外等待人数。

图 6 车站各区域等待人数

Fig. 6 Number of people waiting in each area of station



(a) A 站; (b) B 站; (c) C 站

1—车站站台外等待人数(站台容量无约束); 2—车站站台外等待人数(站台容量有约束);
3—车站站台等待人数(站台容量无约束); 4—车站站台等待人数(站台容量有约束)。

图 7 不同限制下车站乘客等待人数

Fig. 7 Number of passengers waiting at station under different constraints

车站各区域的容量限制实施, 接下来通过改变 h_p 、 h_h 和 h_f 来计算其对目标值的改变。

通过设置不同的 h_p 、 h_h 和 h_f , 发现 h_h 和 h_f 只影响站外等待乘客在各区域的人数, 不会影响目标值, 而 h_p 会影响目标值, 具体如表5所示。

表5 h_p 对目标值影响

Table 5 Performance of parameter h_p

h_p /人	T_A/s
600	1 545 150
500	1 545 150
400	1 659 990
300	1 932 030

通过分析无容量限制可知由于受列车容量限制, 每车最多上500人, 单向站台最多聚集500人, 所以, 当 $h_p \geq 500$ 时, 在其他约束不变下, h_p 、 h_h 和 h_f 的改变不影响目标值。

5 结论

1) 依据城市轨道交通车站三级控制策略, 针对在高峰期车站内聚集了大量乘客而导致的安全问题和地铁运营管理不便的问题, 联合线路和车站客流控制建立了考虑站内安全的以乘客等待时间最小为目标函数的客流控制模型; 根据计算精度选取单位计算时间 t_0 , 将时间进行离散化, 从而模型转化为整数线性规划模型, 运用CPLEX即可求解。

2) 通过算例验证了模型的有效性, 该模型能在高峰期通过控制各区域的客流人数, 将车站等待乘客压力分至各区域, 减小站内压力来达到保证车站的安全与运营的正常进行。

3) 通过对站台容量、站厅容量和非付费区容量进行灵敏度分析, 结果表明站台容量影响乘客总等待时间, 当增大站台容量至一定值时, 相较于无容量限制可不影响目标值。本文所建立的模型为城市轨道交通高峰期实施线路和车站的客流控制提供了理论依据。

参考文献:

[1] 刘莲花, 蒋亮. 城市轨道交通网络客流控制方法研究[J]. 铁

道运输与经济, 2011, 33(5): 51-55.

LIU Lianhua, JIANG Liang. Research on inflow control for urban mass transit network[J]. Railway Transport and Economy, 2011, 33(5): 51-55.

[2] 张正, 蒋熙, 贺英松. 城市轨道交通高峰时段车站协同限流安全控制研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(10): 5-9.

ZHANG Zheng, JIANG Xi, HE Yingsong. Study on collaborative flow-limiting safety control of urban railway station in peak hours[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(10): 5-9.

[3] 刘晓华, 韩梅, 陈超. 城市轨道交通车站联合客流控制研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(5): 106-108, 114.

LIU Xiaohua, HAN Mei, CHEN Chao. Study on passenger cooperated-controlling for urban rail stations[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(5): 106-108, 114.

[4] 赵鹏, 姚向明, 禹丹丹. 高峰时段城市轨道交通线路客流协调控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(9): 1340-1346, 1443.

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): 1340-1346, 1443.

[5] 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): 342-350.

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): 342-350.

[6] 姜曼. 城市轨道交通单线多站协同客流控制研究[D]. 北京: 北京交通大学交通运输学院, 2016: 11-12.

JIANG Man. Coordination control of passenger flow in multi stations of a single line in urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University. School of Traffic and Transportation, 2016: 11-12.

[7] 鲁工圆, 马驹, 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): 319-325.

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): 319-325.

[8] 石俊刚, 杨静, 杨立兴. 以安全为导向的地铁高峰时段多车站客流协同控制模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(1): 125-131.

SHI Jungang, YANG Jing, YANG Lixing. Safety-oriented cooperative passenger flow control model in peak hours for a metro line[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(1): 125-131.

- [9] 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): 94–102.
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): 94–102.
- [10] 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.
- [11] LIU Renming, LI Shukai, YANG Lixing. Collaborative optimization for metro train scheduling and train connections combined with passenger flow control strategy[J]. Omega, 2020, 90: 101990.
- [12] LI Shukai, DESSOUKY M M, YANG Lixing, et al. Joint optimal train regulation and passenger flow control strategy for high-frequency metro lines[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 99: 113–137.
- [13] SHI Jungang, YANG Lixing, YANG Jing, 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.
- [14] JIANG Man, LI Haiying, XU Xinyue, et al. Metro passenger flow control with station-to-station cooperation based on stop-skipping and boarding limiting[J]. Journal of Central South University, 2017, 24(1): 236–244.
- [15] YANG Jingfeng, JIN Jiangang, WU Jianjun, et al. Optimizing passenger flow control and bus-bridging service for commuting metro lines[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(6): 458–473.
- [16] XU Xinyue, LIU Jun, LI Haiying, et al. Capacity-oriented passenger flow control under uncertain demand: algorithm development and real-world case study[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 87: 130–148.
- [17] QUATTRONE A, VITETTA A. Random and fuzzy utility models for road route choice[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2011, 47(6): 1126–1139.
- [18] FERNÁNDEZ R, VALENCIA A, SERIANI S. On passenger saturation flow in public transport doors[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2015, 78: 102–112.
- [19] DAVIDICH M, GEISS F, MAYER H G, et al. Waiting zones for realistic modelling of pedestrian dynamics: a case study using two major German railway stations as examples[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 37: 210–222.
- [20] CHEN Suhua, YIN Zhen, LUO Shenglian, et al. Photoreactive mesoporous carbon/Bi₂WO₆ composites: synthesis and reactivity[J]. Applied Surface Science, 2012, 259: 7–12.
- [21] BARRENA E, CANCA D, COELHO L C, et al. Single-line rail rapid transit timetabling under dynamic passenger demand[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 70: 134–150.

(编辑 杨幼平)