

1-13-2022

## Predictive Control Method of Peak Hour Passenger Flow at Urban Rail Station

Xiaohe Li

*Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

Jianping Wu

*Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

Depin Peng

*Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Predictive Control Method of Peak Hour Passenger Flow at Urban Rail Station

### Abstract

**Abstract:** With the rapid development of subway in China, the urban rail station, especially the transfer station, is prone to generate passenger congestion in the peak period. *After analyzing the types of passenger flow in and out of the platform, a predictive control model of passenger flow is established based on the discrete linear quadratic optimal control theory.* Taking Fuxingmen Station as an example, the simulation environment of the station is built by using the simulation software of Anylogic. The historical passenger flow data in peak period and the optimal passenger flow control sequence obtained by solving the passenger flow predictive control model are introduced into the simulation environment. The feasibility of the model and the rationality of the passenger flow control method are verified by the output passenger flow data obtained from the simulation.

### Keywords

urban rail transit, passenger flow prediction, passenger flow control, model predictive control, Anylogic

### Recommended Citation

Li Xiaohe, Wu Jianping, Peng Depin. Predictive Control Method of Peak Hour Passenger Flow at Urban Rail Station[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(12): 2952-2958.

# 城轨站点高峰小时客流预测控制方法

李晓赫, 吴建平, 彭德品\*

(清华大学 土木工程系, 北京 100084)

**摘要:** 我国城市轨道交通正在快速发展, 城轨站点特别是换乘站点在高峰时段的客流拥堵已成为制约城市发展的突出问题。对进出站台的客流种类进行分析后, 在离散线性二次最优控制理论基础上建立了换乘站点高峰时段客流预测控制模型。以北京地铁复兴门站为实例, 使用 Anylogic 仿真软件搭建该站的仿真环境, 将高峰时段的历史客流数据和求解客流预测控制模型得到的最优客流控制序列导入仿真环境中, 根据仿真所得客流数据验证了客流控制方法的可行性和模型的合理性。

**关键词:** 城市轨道交通; 客流预测; 客流控制; 模型预测控制; Anylogic

中图分类号: TP391.9      文献标志码: A      文章编号: 1004-731X (2021) 12-2952-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-FZ0814

## Predictive Control Method of Peak Hour Passenger Flow at Urban Rail Station

Li Xiaohe, Wu Jianping, Peng Depin\*

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** With the rapid development of subway in China, the urban rail station, especially the transfer station, is prone to generate passenger congestion in the peak period. After analyzing the types of passenger flow in and out of the platform, a predictive control model of passenger flow is established based on the discrete linear quadratic optimal control theory. Taking Fuxingmen Station as an example, the simulation environment of the station is built by using the simulation software of Anylogic. The historical passenger flow data in peak period and the optimal passenger flow control sequence obtained by solving the passenger flow predictive control model are introduced into the simulation environment. The feasibility of the model and the rationality of the passenger flow control method are verified by the output passenger flow data obtained from the simulation.

**Keywords:** urban rail transit; passenger flow prediction; passenger flow control; model predictive control; Anylogic

## 引言

随着我国的城市轨道交通的快速发展, 客流需求也正在不断增长, 给城市轨道交通的客运组织与运营管理带来了更多问题与挑战。部分城市轨道交通站点存在基础设施不健全、客流管控措施不完善等问题, 客运需求与运输能力之间的供需关系出现

失衡, 尤其是在早晚高峰时段, 城轨站点特别是换乘站的客流拥堵问题严重, 导致乘客出行时间增长、站点客流服务能力及安全水平下降。城轨站点尤其是换乘站点的客流拥堵问题日渐严重, 已成为制约城市健康、持续发展的突出问题。

针对高峰时段城轨车站的客流拥挤问题, 工作

收稿日期: 2021-06-30      修回日期: 2021-08-17

基金项目: 国家自然科学基金-浙江两化融合联合基金(U1709212); 中国科协调查项目(2018DX2QY04)

第一作者: 李晓赫(1998-), 男, 硕士生, 研究方向为智能交通、交通仿真。E-mail: lixiaohe20@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 彭德品(1985-), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能交通系统、城市智能仿真。E-mail: pengdepin@tsinghua.edu.cn

人员会对城轨站点采取限制客流的措施。然而现有的管控措施依赖于工作人员的主观经验和历史数据, 往往采取阈值控制策略, 对客流控制的使用条件、触发时间、布设位置、限制客流的数量等方面缺少相关依据, 降低了高峰时段城轨站点的客运服务水平, 同时也增大了客流管控的难度。因此, 在城市轨道交通快速发展的背景下, 为了应对高峰小时城市轨道交通站点的客流拥挤, 迫切需要形成更完备的方案来实施对客流的预测与控制。

针对上述问题, 本文建立基于离散线性二次最优控制理论提出城轨站点高峰时段的客流预测控制模型, 利用 MPC 思想求解模型, 确定流入站台客流的最优控制序列, 不仅提出了高峰小时城轨站点客流控制的具体策略, 还为控制方案的实施提供了数据支撑。

## 1 研究现状

在城轨站点客流预测与控制方面的国内外已有文献中, 虽然有诸多客流预测和客流控制方面的理论与方法, 但是普遍存在以下 2 方面问题:

(1) 在客流预测方面, 现有理论多为数学规划法, 具有模型求解复杂、只能求解线性问题、工程实用性差等缺点, 不能降低或消除当前客流控制方案对未来客流状态的不利影响, 无法提前预测由当前控制作用而导致的客流拥堵<sup>[1-2]</sup>。

(2) 在车站客流控制方面, 现有客流控制策略大多基于直观或经验构造, 忽略了需要限制的具体客流数量和客流控制措施的实施时长<sup>[3-4]</sup>, 具有无法保证解的可行性与最优、表现不够稳定、理论解析性较弱等缺点, 无法实现动态客流的最优控制。

为了应对城轨站点高峰时段的客流拥挤问题, 需要深入分析城轨站点的设施设备布局与客流特征, 并以此为基础, 研究高峰时段城轨站点的客流预测与控制策略, 建立起完善的客流控制方案, 提高站点服务能力与安全水平, 促进我国城市轨道交通事业的持续、健康发展。

## 2 客流预测控制模型

### 2.1 站台客流状态分析

站台是换乘站内旅客候车、上车及下车的区域。如图 1 所示, 列车 1 与列车 2 为同线路上先后到达车站的列车, 在一个完整的采样周期内, 可将列车的走停行为划分为 2 个时段: 列车 1 进站与出站时刻之差为停站时段, 列车 1 出站时刻与列车 2 的进站时刻之差为间隔时段。

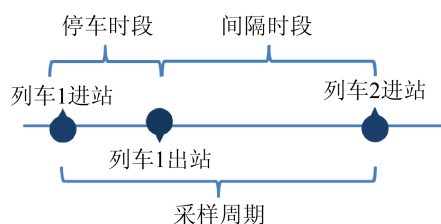


图 1 采样周期内列车走行图

Fig. 1 Train running diagram during sampling period

由图 2 可知, 站台上的客流种类包含: 采样时刻站台上的聚集客流、在一个采样周期内流入站台的客流、一个周期内离开站台的客流。

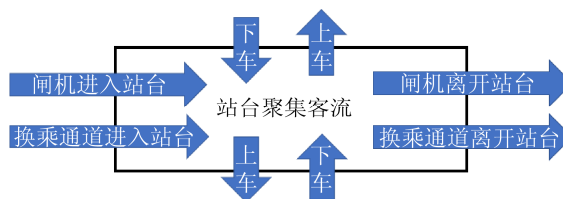


图 2 站台客流分类示意图

Fig. 2 Classification of passenger flow on platform

在一个采样周期内流入站台的客流包括: 通过闸机进入站台的客流  $U_1$ 、通过换乘通道进入站台的客流  $U_2$ 、下车客流  $U_3$ ; 在一个采样周期内流出站台的客流包括: 通过闸机离开站台的客流  $Q_1$ 、通过换乘通道离开站台的客流  $Q_2$ 、上车客流  $Q_3$ 。

假设一个采样周期内进入站台的客流为  $U_{\text{站}}(k)$ , 离开站台的客流为  $Q_{\text{站}}(k)$ 、站台上的客流人数在采样时刻点时为  $N_{\text{站}}(k)$ , 可以得到在  $k+1$  时刻的站台客流聚集人数为<sup>[5]</sup>

$$\begin{aligned}
 N_{\text{站}}(k+1) &= N_{\text{站}}(k) + U_{\text{站}}(k) - Q_{\text{站}}(k) = \\
 & N_{\text{站}}(k) + (U_1(k) + U_2(k) + U_3(k)) - \\
 & (Q_1(k) + Q_2(k) + Q_3(k)) \quad (1)
 \end{aligned}$$

## 2.2 建立模型

为缓解高峰小时城轨站点客流拥堵,保障地铁运营安全,并将客流控制在期望值附近,以站台实际客流密度追踪期望站台客流密度的误差值最小为目标函数:

$$\begin{aligned}
 \min J &= \sum_{k=0}^{T-1} (N^T(k)QN(k) + U^T(k)RU(k) - E) = \\
 & \sum_{k=0}^{T-1} [(N(k) - \bar{N})^T Q(N(k) - \bar{N}) + U^T(k)RU(k)] \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中:  $Q$  与  $R$  为正定对角矩阵。式中的第一项是为了实现站台聚集客流与期望站台密度之差最小化,  $N(k)$  表示站台上、下行方向聚集客流,  $Q$  的实际意义为站台客流候车面积  $S_{\text{候}}$  的倒数。第二项表示矩阵  $R$  与客流最优控制序列  $U(k)$  的控制能力大小成正比,其中  $R=rI$  ( $I$  为单位阵),  $r$  的取值需要多次调试模型后确定,以确保模型的准确性和合理性。 $E$  为期望站台客流密度值,其具体数值需要根据站台空间服务水平等级及站台容纳系数确定。

高峰时段站台客流总是在一定范围内波动,其数值主要受以下几种因素限制:

(1) 站台容纳能力。当高峰时段客流量较大时,需要将站台上的总客流量控制在站台容纳能力之内来确保乘客安全和客流的稳定<sup>[6]</sup>,假设站台最大承载人数为  $C_{\text{站,max}}$ ,其数值可根据站台服务水平等级规定和站台有效面积确定,则采样周期内的站台聚集人数  $N_{\text{站}}(k)$  取值范围为:  $0 \leq N_{\text{站}}(k) < C_{\text{站,max}}$ 。

(2) 基础设施设备通行能力。站台的各类客流中流入站台的客流主要受到车站基础设施通行能力限制,例如进站客流主要受到闸机以及楼扶梯通行能力限制,换乘客流主要受到换乘通道通行能力限制<sup>[7]</sup>,假设车站基础设施的最大通行能力为  $C_{\text{基,max}}$ ,则采样周期内流入站台的客流  $U_{\text{站}}(k)$  取值范围为:  $0 \leq U_{\text{站}}(k) < C_{\text{基,max}}$ 。

(3) 区间输送能力。流出站台的客流由下车客流组成,而采样周期内下车客流的具体数值取决于线路列车的区间输送能力<sup>[8]</sup>,假设线路上的列车最大客流输送能力为  $C_{\text{车,max}}$ ,则有流出站台的客流量  $Q_{\text{站}}(k)$  取值范围为:  $0 \leq Q_{\text{站}}(k) < C_{\text{车,max}}$ 。

## 2.3 模型求解

高峰时段换乘车站内的客流通常为通勤客流,具有固定的客流流线。高峰时段内上车客流大于列车定员限制,导致上车客流不能在一个周期内全部完成上车,部分客流滞留站台,站台聚集客流量  $N_{\text{站}}(k)$  在采样时刻点达到一个采样周期内的最大值。由于受到站台容纳能力和设施设备通行能力限制,在高峰时段,离开站台客流  $Q_{\text{站}}(k)$  和站台聚集客流  $N_{\text{站}}(k)$  之间呈线性关系:  $Q_{\text{站}}(k) = \alpha \cdot N_{\text{站}}(k)$ <sup>[9]</sup>,其中  $0 < \alpha < 1$ ,并且  $Q_{\text{站}}(k) < N_{\text{站}}(k)$ 。为简化模型,可假设每个采样周期内  $Q_{\text{站}}(k)$  和  $N_{\text{站}}(k)$  的比值  $\alpha$  不变,则有一个周期内  $Q_{\text{站}}(k)$  和  $N_{\text{站}}(k)$  的近似关系为

$$N_{\text{站}}(k+1) = (1-\alpha)N_{\text{站}}(k) + U_{\text{站}}(k) \quad (3)$$

将站台划分为上下行 2 个方向,则状态空间表达式为

$$N(k+1) = AN(k) + BU(k) \quad (4)$$

式中:  $A = \begin{bmatrix} 1-\alpha & 0 \\ 0 & 1-\beta \end{bmatrix}$ , 为在一个采样周期内站

台流出的客流人数与采样时刻点的站台内聚集人数的比值;  $\alpha, \beta$  分别为每个采样周期内站台上行和下行方向  $Q(k)$  和  $N(k)$  的比值,  $B$  为  $2 \times 2$  单位矩阵,  $N(k+1), N(k)$  为 2 维状态向量,  $U(k)$  为 2 维控制输入向量。对于式(4)可用离散系统线性二次型最优控制理论进行分析。

假设高峰时段站台理想聚集人数为  $\bar{N}$ ,理想的流入站台客流量为  $\bar{U}$ 。可以根据站台服务水平等级规定的人均占据面积和站台有效面积计算得到  $\bar{N}$ ,由式(4)计算站台理想聚集人数  $\bar{N}$ :

$$\bar{N} = A\bar{N} + B\bar{U} \quad (5)$$

由式(5)可求解得到  $\bar{U}$ :

$$\bar{U} = (I - A)B^{-1}\bar{N} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)可得

$$N(k+1) = AN(k) + BU(k) = A(N(k) - \bar{N}) + B(U(k) - \bar{U}) + \bar{N} \quad (7)$$

由式(5)~(7), 可得到最优控制规律为

$$U^*(k) = (I + APB^T R^{-1})\bar{N} - APB^T (B^T PB + R)^{-1} N^*(k) \quad (8)$$

式中:  $P$  为半正定对称矩阵。

为简化模型, 可假设:

$$Y = (I + APB^T R^{-1})\bar{N} \quad (9)$$

$$K = APB^T (B^T PB + R)^{-1} \quad (10)$$

则式(8)可简写为

$$U^*(k) = Y - K \cdot N^*(k) \quad (11)$$

### 3 站点客流控制仿真

#### 3.1 离散系统二次型最优控制建模

以复兴门站地铁 1 号线站台为实例建立客流预测控制模型, 使用 Anylogic 软件搭建复兴门车站的物理仿真环境, 将关键设施设备、行人交通特性等属性值代入 Anylogic 仿真模型中, 模型的输入数据包含: 控制步长  $T$ 、站台聚集人数  $n_i(k)$ 、采样周期内流出站台上行与下行方向客流数与采样时刻点的站台聚集客流数的比值  $\alpha, \beta$ , 站台上下行方向候车面积  $S_1, S_2$ , 上下行方向站台期望聚集客流数为  $\bar{N}_1, \bar{N}_2$ , 模型参数  $r_1, r_2$ 。模型的输出数据即为最优控制序列: 流入站台的客流  $u_i(k)$ 。

由式(2), (7)可得 1 号线站台客流控制模型的目标函数为

$$J = \min \sum_{k=0}^{T-1} \left( \begin{bmatrix} n_1(k) - \bar{N}_1 \\ n_2(k) - \bar{N}_2 \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} n_1(k) - \bar{N}_1 \\ n_2(k) - \bar{N}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix}^T R \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} \right) \quad (12)$$

其中:  $Q = \begin{bmatrix} \frac{1}{S_1^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_2^2} \end{bmatrix}$ ,  $R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix}$ 。

由式(11), 求解得到最优控制规律:

$$\begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 - K_1 \cdot n_1(k) \\ Y_2 - K_2 \cdot n_2(k) \end{bmatrix} \quad (13)$$

结合复兴门站实地观测和历史数据<sup>[10]</sup>, 得到  $\alpha=0.375, \beta=0.65$ 。参考相关文献<sup>[11]</sup>所得城市轨道交通车站站台空间服务水平划分, 假设站台理想聚集人数  $\bar{N}_1=190, \bar{N}_2=180$ <sup>[12]</sup>, 将  $\alpha, \beta, \bar{N}_1, \bar{N}_2$  代入式(6), 即可得到上下行方向的理想输入客流  $\bar{U}_1=100, \bar{U}_2=95$ 。经换算后人均占据面积分别为  $S_1=0.7018 (m^2/人), S_2=0.7012 (m^2/人)$ , 此时站台服务水平等级为 D 级(0.33~0.75 (m<sup>2</sup>/人)), 可以考虑进行客流控制, 避免产生客流拥堵。

#### 3.2 仿真客流控制

如图 3 所示, 仿真客流控制流程为: 首先初始化仿真模型, 输入进站、换乘客流数据。当列车进站, 乘客上下车结束后可通过列车逻辑模块采集当前站台聚集客流人数, 若未达到仿真周期, 将该值输入 Matlab 编制的模型求解函数中, 计算出  $K$  值及未来  $T$  步内通过闸机和通道流入站台的客流的最优控制序列  $U$ , 在仿真软件中对流入站台的客流量进行控制。将以上控制流程循环运行, 直至到达设定的仿真周期长度。

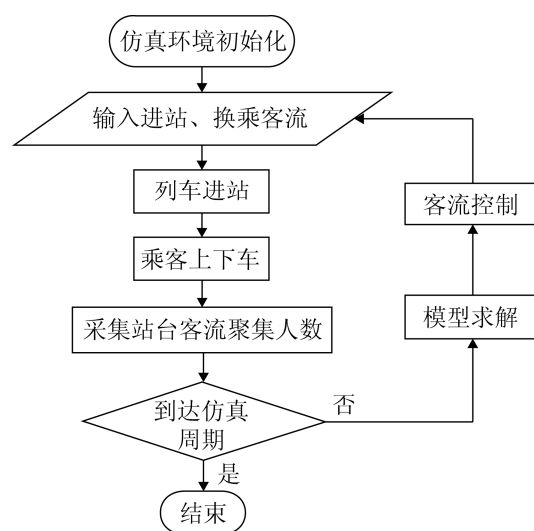


图 3 仿真客流控制流程图

Fig. 3 Flow chart of passenger flow control simulation

MPC 控制思想包含模型预测、滚动优化、反馈校正 3 个要点<sup>[13]</sup>, 在该客流控制流程中, 使用 Matlab 计算通过闸机和通道流入站台的客流预测值, 体现了“模型预测”思想; 重复上述过程直到仿真周期结束, 体现了“滚动优化”思想; 每次求解模型的最优控制序列前, 均使用新的采样时刻点站台聚集人数, 实现了反馈校正。

由站台模型可知, 流入站台的客流可以划分为: 进站客流、换乘客流和下车客流 3 种类型, 因此客流控制可以分为以下 2 种控制方式。

### 3.2.1 进站客流控制

该种方式主要通过影响乘客的进站速度和进站流量来控制进站客流, 达到减轻车站内各客运设施设备的负荷和缓解客流拥堵的目的<sup>[14]</sup>, 具体措施包含在进出站口外侧设置围栏铁马、限制进出站出入口的行人走行方向、封闭或开放临时出入口、关闭或增设人工售票窗口或自动售票机、控制闸机的工作数量、提前分流购票乘客和持卡乘客等。

图 4 所示为进站客流控制时的站台各类客流

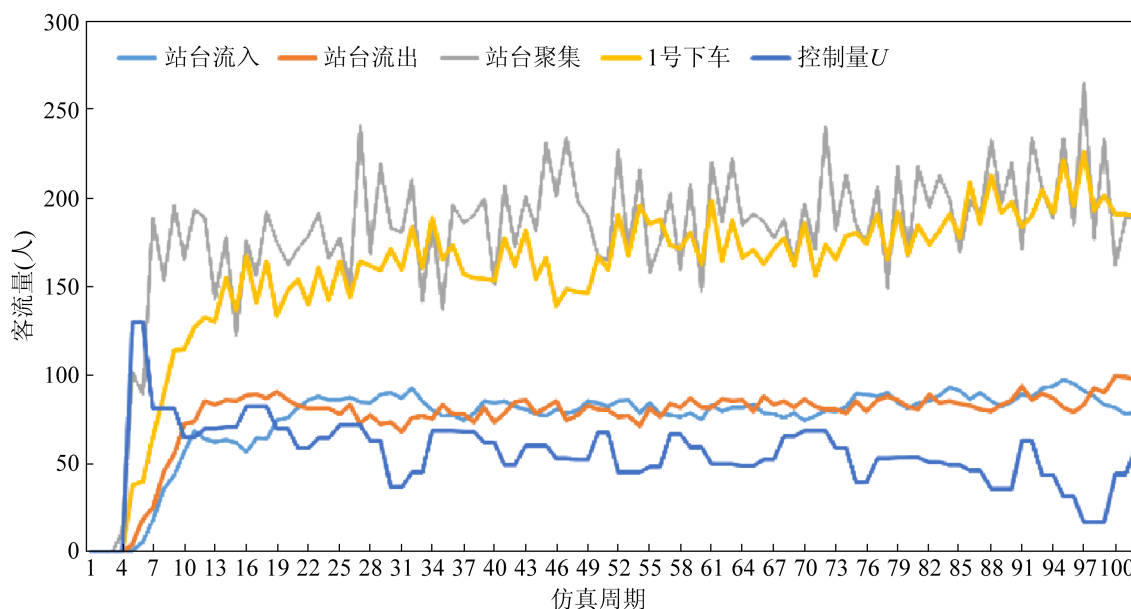


图 4 进站客流控制时的站台各类客流量图

Fig. 4 Chart of the platform passenger flow during the control of incoming passenger flow

量, 可以看出, 采用进站客流控制方式, 站台聚集人数围绕 180(人)震荡, 实现了将站台密度控制在期望密度值附近的目的, 整个仿真过程内无拥堵现象发生, 实现了进站客流的合理控制。

### 3.2.2 行人流线控制

该种方式主要通过管理乘客的走行路线或控制行人的走行时间来控制客流<sup>[15]</sup>。例如在平峰时刻, 将站内楼扶梯和行人通道设置为双向通行, 而在高峰期, 可以采取在站台指挥乘客有序排队上下车、在楼扶梯和通道出入口等处设置行人限流栅栏、将楼扶梯和行人通道设置为单向通行、在站厅设置引导标识将入站乘客尽早分流等措施, 实现人工控制客流走行方向。

图 5 所示为行人流线控制时的站台各类客流量, 可以看出, 采用行人流线控制方式, 站台聚集人数围绕 180(人)震荡, 同样实现了将站台密度控制在期望密度值附近的目的, 达到了缓解站台内客流压力的目的。



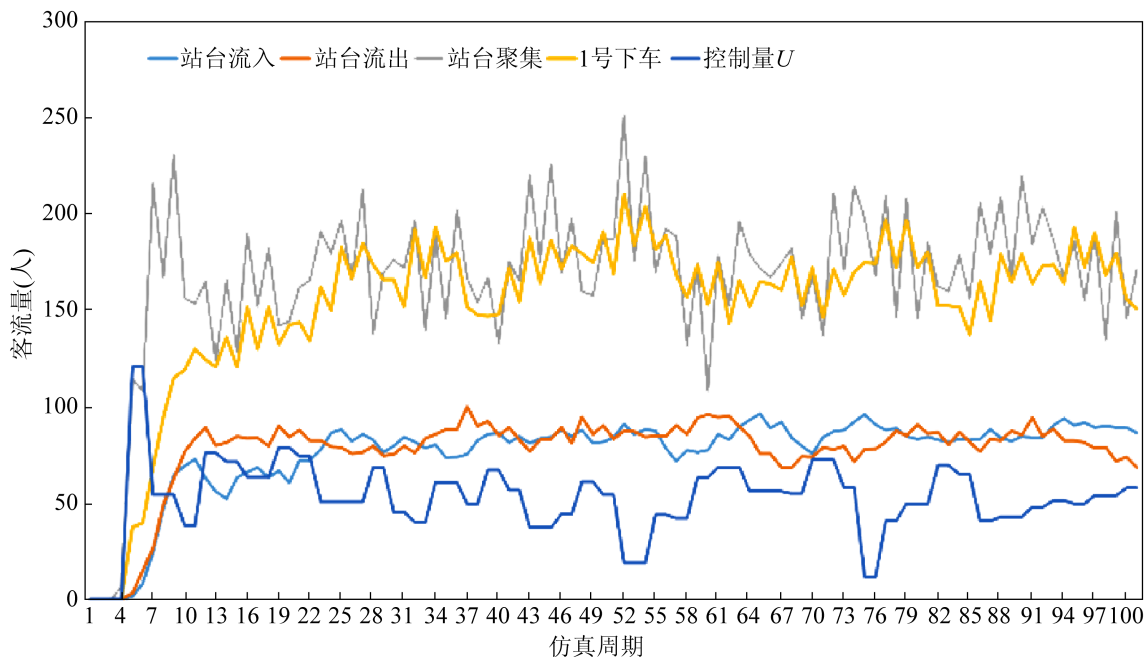


图 5 行人流线控制时的站台各类客流量图

Fig. 5 Chart of the platform passenger flow during pedestrian flow line control

## 4 结论

我国城市轨道交通正在快速发展,城市客流需求急剧增长导致了运输能力与客运需求之间的供求关系的不平衡。本文以模型预测控制理论为基础,将客流密度追踪期望密度的误差最小为目标函数,建立城轨换乘站点高峰小时客流预测控制模型,可将站内客流密度控制在期望密度。在仿真软件中构建复兴门站实例仿真程序,以进站客流控制、行人流线控制方式对客流进行控制仿真,验证了客流预测控制方法的可行性和模型的合理性,为城轨换乘车站高峰时段客流预测控制提供了方法和理论基础,但在技术和应用等方面仍需要进一步探索和研究。主要包含以下 3 点:

(1) 目前,在技术上精确地采集站台聚集客流的实际数据仍有困难,因此本文使用 Anylogic 编制客流控制仿真程序,在仿真环境中获取站台聚集客流数据,在之后的研究中,可以考虑实地采集站台聚集客流数据来提高客流控制的精度。

(2) 本文所建立的站台客流控制模型中的站台类型仅考虑了岛式站台,对于侧式站台、岛侧混合

式站台的客流控制暂未考虑,今后可将客流预测控制模型的应用扩展到其他类型的站台。

(3) 本文仿真客流控制中采用的客流控制方式均是从空间角度缓解客流压力,并未从时间角度考虑,例如调节城轨站点通勤客流的上下班时间,使不同流线的行人达到错峰出行。今后的客流管控措施研究可以从时间与空间相结合的角度考虑,更加科学高效地调控城轨站点的高峰小时客流。

## 参考文献:

- [1] 杨安安, 陈艳艳, 黄建玲, 等. 基于短时客流预测的地铁动态限流预警模型研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(10): 29-33.  
Yang An'an, Chen Yanyan, Huang Jianling, et al. Research on Subway Dynamic Flow Restriction Early Warning Model Based on Short-term Passenger Flow Prediction[J]. Urban Rail Transit Research, 2018, 21(10): 29-33.
- [2] 黎新华, 李俊辉. 城市轨道交通运营安全预警系统研究[J]. 现代城市轨道交通, 2018(10): 53-57.  
Li Xinhua, Li Junhui. Research on Operation Safety Early Warning System of Urban Rail Transit[J]. Modern Urban Rail Transit, 2018(10): 53-57.
- [3] 豆飞, 姚向明, 张文强, 等. 大规模城市轨道交通网常态限流方案编制[J]. 北京工业大学学报, 2019,



- 45(10): 988-997.
- Dou Fei, Yao Xiangming, Zhang Wenqiang, et al. Compilation of Normal Current Limiting Scheme for Large-scale Urban Rail Transit Network[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 45(10): 988-997.
- [4] 潘罗敏. 地铁短时客流量预测预警研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2011.
- Pan Luomin. Research on Short-term Passenger Flow Prediction and Early Warning of Subway[D]. Beijing: Capital University of Economics and Trade, 2011.
- [5] 冯延伟. 城市轨道交通换乘站高峰期客流控制方法研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2016.
- Feng Yanwei. Research on Passenger Flow Control Method of Urban Rail Transit Transfer Station in Peak Period[D]. Beijing: Northern University of Technology, 2016.
- [6] 任洺萱. 地铁大客流疏运风险预警技术研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2017.
- Ren Mingxuan. Research on Risk Early Warning Technology of Subway Large Passenger Flow Distribution[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2017.
- [7] 赵保锋, 邹晓磊, 屈晓宜. 基于仿真的城市轨道交通站台客流滞留分级预警方法[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(9): 107-110, 115.
- Zhao Baofeng, Zou Xiaolei, Qu Xiaoyi. Simulation based Hierarchical Early Warning Method for Passenger Flow Detention at Urban Rail Transit Platforms[J]. Urban Rail Transit Research, 2017, 20(9): 107-110, 115.
- [8] 唐巧梅. 城市轨道交通大客流运营组织方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- Tang Qiaomei. Research on Large Passenger Flow Operation Organization Method of Urban Rail Transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [9] Xu X Y, Liu J, Li H Y, et al. Capacity-oriented Passenger Flow Control Under Uncertain Demand: Algorithm Development and Real-world Case Study[J]. Transportation Research Part E (S1366-5545), 2016, 87: 130-148.
- [10] 康亚舒. 城市轨道交通车站客流控制方案的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- Kang Yashu. Research on Passenger Flow Control Scheme of Urban Rail Transit Stations[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [11] 毕艳祥, 蒋顺章. 城市轨道交通车站站台空间服务水平指标体系探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(10): 7-10.
- Bi Yanxiang, Jiang Shunzhang. Discussion on Platform Space Service Level Index System of Urban Rail Transit Station[J]. Urban Rail Transit Research, 2013, 16(10): 7-10.
- [12] 王雪梅, 周立新, 冯昊月. 城市轨道交通车站大客流预警及其疏解[J]. 城市建设理论(电子版), 2017(16): 208-209.
- Wang Xuemei, Zhou Lixin, Feng Haoyue. Early Warning and Relief of Large Passenger Flow in Urban Rail Transit Stations[J]. Theoretical Research on Urban Construction (Electronic Version), 2017(16): 208-209.
- [13] 冒建亮. 面向高精度光电跟踪系统的非线性抗干扰控制方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- Mao Jianliang. Research on Nonlinear Anti-interference Control Method for High-precision Photoelectric Tracking System[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [14] 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 (S0191-2615), 2018, 110(4): 26-59.
- [15] Felipe D, Juan C M, Ricardo G. How Much Can Holding and/or Limiting Boarding Improve Transit Performance?[J]. Transportation Research Part B (S0191-2615), 2012, 46(9): 1202-1217.