

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.01.012

# 城市轨道交通车站设施 客流集散分析

袁博晖

(中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300308)

**摘要:** 针对城市轨道交通站内设施客流分布受限于设施能力和设施拓扑结构, 难以量化的问题, 总结站内设施客流走行研究现状, 进行站内设施客流状态及其转化分析; 基于设施容纳和通行能力, 借鉴排队论的思想, 构建客流状态转移模型, 描述客流在设施前堵塞和消解的概率表达。以某城市轨道交通换乘车站为例, 进行走行设施拓扑网络客流集散特征分析, 结果表明: 客流密度超过自由流的密度时, 由于实际客流超过一定阈值, 在能力较小的设施前必然会发生客流拥堵的情况, 实际客流分布特征不仅与单个走行设施的能力有关, 同时也受设施网络瓶颈的影响。研究结果以期车站管理人员制定和实施限流方案提供数据和技术支撑。

**关键词:** 城市轨道交通; 客流集散模型; 转移概率模型; 车站设施; 稳态概率

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2025)01-0090-09

## Gather-distributing Characteristics of Passengers between Facilities in Subway Station

YUAN Bohui

(China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., Tianjin 300308)

**Abstract:** Given that passenger flow distribution in urban rail transit station facilities is limited by the capacity and topology of these facilities, making quantification difficult, this study addresses this issue by analyzing the current state of research on passenger flow in station facilities. First, an analysis of the passenger flow state and its transformation within station facilities is conducted. Based on the capacity and transit capacity of the facilities, a passenger flow state transition model is constructed using queuing theory to describe the probability of congestion and dissipation at facility junctions. Taking an urban rail transit interchange station as an example, an analysis of the passenger flow distribution characteristics on the walking facility topology network is performed. The results show that when passenger flow density exceeds the density of free flow, congestion inevitably occurs in facilities with smaller capacities due to the actual passenger flow surpassing a certain threshold. The actual passenger flow distribution characteristics are influenced not only by the capacity of individual walking facilities but also by bottlenecks within the facility network. The research results provide data and technical support for station managers in developing and implementing flow restriction schemes.

**Keywords:** urban rail transit; passenger gathering-distributing model; transition probability model; station facilities; steady probability

收稿日期: 2024-01-04 修回日期: 2024-09-04

作者简介: 袁博晖, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事轨道交通规划及客流需求预测工作, 1822361976@qq.com

基金项目: 天津市科技重大专项与工程项目(17ZXGDGX00110); 中铁第六勘察设计院集团有限公司科研项目(YW-2023-06)

引用格式: 袁博晖. 城市轨道交通车站设施客流集散分析[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(1): 90-98.

YUAN Bohui. Gather-distributing characteristics of passengers between facilities in subway station[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(1): 90-98.

## 1 引言

城市轨道交通线网客流量日趋增多, 高峰时段关键车站常超负荷运营, 由于走行设施通行能力存在差异, 设施前常形成等待和徘徊客流<sup>[1]</sup>, 影响客流组织和应急疏散的效率。客流走行受设施几何属性及其结构特征<sup>[2]</sup>、单位时间进站和到站客流量<sup>[3]</sup>、路径选择偏好<sup>[4]</sup>等因素影响, 具有不确定性。客流走行特征的研究, 可指导应急疏散方案的制定和优化, 也可为走行设施设计优化提供依据<sup>[5]</sup>。

目前, 相关研究多基于排队论和元胞自动机等理论<sup>[6]</sup>, 研究宏观层面或基于离散模型的客流密度和流量关系, 以及在设施几何属性约束下评估车站客流承载能力, 客流聚散机理的研究尚不多见。基于自动售检票系统(automatic fare collection, AFC)数据, 利用断面客流预测方法, 可进行指定时段站内客流量的粗略<sup>[7]</sup>, 但不能反映客流在车站内的分布特征<sup>[8]</sup>。而车站内部客流路径选择的研究, 仅仅针对车站拓扑结构和设施几何属性对客流走行行为的影响<sup>[9]</sup>, 没有描述设施客流的聚散参数。本文进行客流走行状态的定性分析, 划分客流分布状态空间, 设定走行行为参数, 推演相应状态下客流在设施前的聚集—拥堵—消散机理, 量化站内具体走行设施的客流及其状态演化过程。在此基础上, 基于站内设施排队网络构建客流状态转移模型, 量化客流在设施两端的状态转移, 探究列车运行周期内客流在站内的分布。

## 2 走行设施客流状态分析

不受他人或设施影响的期望走行速度为自由流速度<sup>[10]</sup>, 与设施能力和客流特征相关, 其值参考文献<sup>[9]</sup>, 本文基于设施能力和自由流速度评价客流状态和探究客流走行规律(见图 1)。

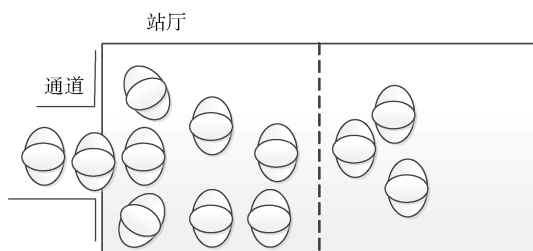


图 1 连接设施客流密度不均衡示意

Figure 1 Illustrative representation of the imbalanced passenger flow density within interconnected facilities

### 2.1 设施通行能力

相比于体育馆、商场等大型公建内的走行设施, 城

市轨道交通车站走行设施有显著特征, 即走行设施受墙壁、立柱等障碍物影响, 没有座椅和摊位等与设施通行能力相关的其他设施, 相对来说其通行能力仅受设施宽度的影响, 设施有效宽度  $W^{\text{eff}}$  由式(1)求得<sup>[11]</sup>:

$$W^{\text{eff}} = \frac{u}{N \times v} \quad (1)$$

式中,  $u$  为单位时间通过设施的客流量, 人;  $v$  为客流平均走行速度, m/s;  $N$  为设施的客流平均密度, 人/ $\text{m}^2$ 。

客流密度大于  $0.54$  人/ $\text{m}^2$  时, 速度随客流密度增加而下降<sup>[12]</sup>。客流走行行为类似于道路车流行驶, 沿直线或类直线方向列队有序走行。借鉴道路交通中车道划分, 引入行人线。

行人线: 走行设施横向虚拟划分为若干区域, 其宽度为客流并肩或相向走行相互无干扰所需的平均宽度, 每个纵向区域即为行人线, 客流组形成队列。设施有效宽度比实际宽度少  $0.75 \sim 1.07$   $\text{m}^{\text{[11]}}$ , 设施  $i$  可划分为  $pl_i$  个行人线数量, 计算式为

$$pl_i = \frac{W_i - 1.07}{w_d} = \frac{W^{\text{eff}}}{w_d} \quad (2)$$

式中,  $W_i$  为设施  $i$  的宽度;  $w_d$  为客流走行时所需的横向宽度, m。进一步, 沿纵向方向将行人线划分为行人段。

行人段: 行人线上的客流走行纵向所需最小距离的区域为行人段。

设设施  $i$  长度为  $Le_i$ ,  $le_i$  为行人段长度, 该设施包含的行人段数量  $C_i$  可表示为

$$C_i = \frac{Le_i}{le_i} \times pl_i \quad (3)$$

若通过能力定义为给定时段内设施的最大通过客流量<sup>[5]</sup>, 若仅考虑理想属性的设施, 则行人段的数量即是设施的客流通行能力  $C_i$ , 站内设施的建造受地质条件或换乘、设施接续的需要由坡道连接, 通道属性的改变导致通行能力与理想状态的通行能力存在差异, 根据连接设施的几何属性进行车站设施网络能力计算, 可引入折扣系数(0.95~1.05)进行微调<sup>[13]</sup>。

### 2.2 客流状态空间

车站设施网络的潜在瓶颈在设施前部, 若接续目标设施的通行能力较小(如上坡道、楼梯或漏斗型通道<sup>[14]</sup>等), 速度较快的后续客流走行受靠近出口速度较慢的客流干扰, 密度增加到一定阈值时由自由流发展为跟随流(拥堵流), 达到堵塞状态时后续客流趋于停滞<sup>[15]</sup>。区别于开放空间行人可以根据前方

人群密度对走行的影响，在较大空间进行行走行为的调整，站内设施前客流会等待并跟随前方客流。堵塞阶段若设施容纳能力饱和，入口处将产生等待客流。根据走行状态将设施客流分为 3 类：①设施  $i$  容纳能力饱和，到达入口处缓冲区的客流为等待客流集  $S_i$ ；②设施  $i$  上的走行客流为活动客流集  $A_i$ ；③堵塞阶段达到设施  $i$  容纳能力上限的客流量为堵塞客流集  $B_i$ 。

显然，客流在设施  $i$  上的状态空间可表示为

$$x(i) = (a_i, b_i, s_i) \quad (4)$$

式中， $a_i$ 、 $b_i$  和  $s_i$  分别为活动客流、堵塞客流和等待客流的数量，设施  $i$  的通行能力  $C_i = \max a_i + b_i$ ，容纳能力  $N_i^{\text{jam}} = C_i + s_i$ 。将走行设施视为服务器，通过客流量、堵塞概率、走行时间状态可用排队论模型参数进行描述和分析。显然，若后续设施通行能力大于当前设施能力，如不考虑客流属性特征差异，则不会出现等待和堵塞客流。因此，在设施网络中如果存在潜在瓶颈，可以采用文献[13]的策略，将设施能力通过折扣系数进行调整。

### 2.3 客流状态稳态概率

$\lambda$  表示到达概率(包括因堵塞而选择其他设施的损失客流)，其计算式为

$$\lambda = w_d \times N \times v_f \quad (5)$$

式中， $v_f$  为自由流的平均走行速度，m/s。

行人段的服务率为  $\mu^s$ ，则设施  $i$  的服务率  $\mu_i$  为

$$\mu_i = w_d \times N_i^{\text{jam}} \times v_f \quad (6)$$

显然，客流到达率  $\lambda$  随  $N$  变化，而  $N_i^{\text{jam}}$  是定值，因此服务率  $\mu_i$  为常数。若走行客流量为  $n(n \leq pl)$ ，且为泊松流，通过客流量均值为  $n\mu^s$ ，平均通过时间为  $\frac{1}{n\mu^s}$ ，客流  $n$  的稳态概率为<sup>[11]</sup>

$$p_n = \frac{\lambda \lambda \dots \lambda}{(\mu^s)(2\mu^s) \dots (n\mu^s)} p_0 = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu^s}\right)^n}{n!} p_0 \quad (7)$$

式中， $p_0$  表示设施上的客流为 0 的概率。

若  $n > pl$ ， $pl$  为客流  $n$  所对应的行人线数量，通过设施平均时间为  $\frac{1}{pl \times \mu^s}$ ，客流  $n$  的稳态概率为

$$p_n = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu^s}\right)^n}{p! p^{n-p}} p_0 \quad (8)$$

根据概率归一化公式  $p_0 + \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu^s}\right)^n}{n!} p_0 + \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu^s}\right)^n}{p! p^{n-p}} p_0 = 1$ ,

可得

$$p_0 = \left[ 1 + \sum_{n=1}^{p-1} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu^s}\right)^n}{n!} + \sum_{n=p}^{\infty} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu^s}\right)^n}{p! p^{n-p}} \right]^{-1} \quad (9)$$

$$= \left[ \sum_{n=0}^{p-1} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu^s}\right)^n}{n!} + \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu^s}\right)^p}{p! \left(1 - \frac{\lambda}{p\mu^s}\right)} \right]^{-1}$$

## 3 设施的客流状态转移模型

### 3.1 设施的客流状态转移

考虑客流接近饱和情形，客流状态空间为  $x(i) = (a_i, b_i, s_i)$ 。客流量达到通行能力  $C_i$  时，处于堵塞状态，达到设施容纳能力  $N_i$ ，则入口处客流处于停滞状态。设施  $i$  上的客流量  $N_i$  为

$$N_i = a_i + b_i + s_i \quad (10)$$

设施  $i$  上的客流状态的转移概率矩阵为  $Q(i)$ ， $P_i^f$  为设施  $i$  堵塞的概率，转移概率矩阵非对角元素  $Q(i)_{kx} (k \neq x)$  表示由状态  $x$  到状态  $k$  的转移概率， $Q(i)_{xx}$  则为保持状态  $x$  的概率，转移概率  $Q(i)$  的可能值如下：①若  $a+b+1 < C_i$ ，入口到达率为  $\lambda_i$ ，下一阶段客流状态为  $(a+1, b, s)$ ，则  $Q(i)$  为  $\lambda_i$ ；②若  $a+b+1 = C_i$  且  $s+1 \leq N_i - C_i$ ，入口处到达率为  $\lambda_i$ ，下一阶段客流状态为  $(a, b, s+1)$ ， $Q(i)$  也为  $\lambda_i$ ；③若缓冲区无等待客流，也没有新到达客流，即  $s=0$ ，下一阶段客流状态为  $(a-1, b, s)$ ， $Q(i)$  为  $\mu_i(1 - P_i^f)$ <sup>[16]</sup>。或者下一阶段客流状态为  $(a, b-1, s)$ ，而  $Q(i)$  为有  $b$  个客流堵塞的设施消解率  $\tilde{\mu}(i, b)$ ；④若缓冲区有 1 个以上的客流，即  $s \geq 1$ ， $Q(i)$  为  $\mu_i(1 - P_i^f)$ ，下一阶段客流状态为  $(a, b, s-1)$ ，或为  $(a+1, b-1, s-1)$ ，而  $Q(i)$  为设施  $i$  的堵塞消解率  $\tilde{\mu}(i, b)$ ；⑤上述任何情形下，客流状态也可能由  $(a, b, s)$  到  $(a-1, b+1, s)$ ，

而  $\mathbf{Q}(i)$  为  $\mu_i(P_i^f)$ 。

也即  $\mathbf{Q}(i)$  可以看作  $\lambda_i$ 、 $\tilde{\mu}_i$ 、 $\mu_i$  和  $P_i^f$  的函数, 其中,  $\tilde{\mu}_i$  为堵塞客流  $b$  所有可能取值下的设施堵塞消解的概率, 在知道上述 4 个参数的情形下, 可以求得  $\mathbf{Q}(i)$ 。

### 3.2 设施客流堵塞概率

根据客流平衡方程, 状态转移矩阵中每行元素之和为 0, 显然有  $\mathbf{Q}(i)_{xx} = -\sum_{k \neq x} \mathbf{Q}(i)_{xk}$ 。设  $\pi(i)$  为设施  $i$  上的客流状态的稳态概率, 则客流全局平衡方程组<sup>[15]</sup>为

$$\begin{cases} \pi(i)\mathbf{Q}(i) = 0 \\ \sum_{x \in X(i)} \pi(i)_x = 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\pi(i)_x$  表示设施  $i$  上的客流状态为  $x$  的稳态概率, 到达和离开客流量平衡可表示为

$$\sum_{k \in X(i)} \pi(i)_k \mathbf{Q}(i)_{kx} = -\pi(i)_x \mathbf{Q}(i)_{xx} \quad (12)$$

设施  $i$  上的客流处于堵塞状态的概率  $P_i^f$  为

$$P_i^f = P(N_i = C_i) = P\left(N_i = \frac{L_i}{l_i} \times pl_i\right) \quad (13)$$

$P_i^f$  也可根据客流守恒定律, 由设施  $j$  上的客流堵塞概率推算为

$$P_i^f = \sum_j p_{ij} P(N_j = C_j) \quad (14)$$

式中,  $p_{ij}$  为离开设施  $i$  的客流选择设施  $j$  走行的概率。

### 3.3 堵塞客流消解模型

设施  $i$  后续设施为  $j$ , 若设施  $i$  处于堵塞状态, 设施  $j$  的实际服务率为  $\mu_j^{\text{eff}}$ , 设施  $i$  的后续设施  $j$  的通行能力为  $C_j$ , 单位时间内设施  $j$  上客流通过能力为  $\mu_j^{\text{eff}} c_j$ , 单位时间通过客流为  $r_{ij} \mu_j^{\text{eff}} c_j$ , 可由客流选择后续设施的的概率求得客流消解的时间。则设施  $i$  的堵塞客流平均消解率  $\tilde{\mu}_i^a$  近似为

$$\frac{1}{\tilde{\mu}_i^a} = \sum_j \tilde{p}_{ij} \frac{1}{r_{ij} \mu_j^{\text{eff}} c_j} \quad (15)$$

式中,  $\tilde{p}_{ij}$  为处于堵塞状态的设施  $i$  处客流选择设施  $j$  走行的平均条件概率。  $\tilde{p}_{ij}$  计算公式为

$$\tilde{p}_{ij} = \frac{p_{ij} P(N_j = C_j)}{P_i^f} = \frac{p_{ij} P(N_j = k_j)}{\sum_l p_{il} P(N_l = k_l)} \approx \frac{p_{ij}}{\sum_l p_{il}} \quad (16)$$

$r_{ij}$  为设施  $i$  上堵塞客流实际到达设施  $j$  的比例。  $r_{ij}$

计算公式为

$$r_{ij} = \frac{\tilde{p}_{ij} \lambda_i^{\text{eff}}}{\lambda_j^{\text{eff}}} \quad (17)$$

式中,  $\lambda_i^{\text{eff}}$  和  $\lambda_j^{\text{eff}}$  分别为设施  $i$  和  $j$  上的客流实际到达率。受限于设施容纳能力引起客流损失, 由客流守恒定律, 设施  $i$  入口客流实际到达率(不含损失客流)  $\lambda_i^{\text{eff}}$  为

$$\lambda_i^{\text{eff}} = \gamma_i (1 - P(N_i = N_i^{\text{jam}})) + \sum_j p_{ji} \lambda_j^{\text{eff}} \quad (18)$$

式中,  $\gamma_i$  为设施  $i$  外部客流到达率, 即前置第  $(i-1)$  个设施的实际服务率  $\mu_{i-1}$ 。

设施能力不足处于堵塞状态的客流为  $b$ , 增加虚拟设施使得能力和客流量协调, 即设施  $i$  划分成与客流量相匹配的  $D(i, b)$  条平行或虚拟行人线。假设客流没有穿越和横向等影响纵向走行的行为, 据先进先服务机制(FIFO), 设施  $i$  上的客流堵塞平均消解时间为<sup>[8]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tilde{\mu}(i, b)} &= E\left[\frac{1}{\tilde{\mu}(i, b)} \middle| D(i, b)\right] \\ &= \sum_{d=1}^{\min(b, \text{card}(\Gamma^*))} P(D(i, b) = d) \frac{1}{d \tilde{\mu}_i^0} \end{aligned} \quad (19)$$

式中,  $\Gamma$  为行人线集合,  $\text{card}(\Gamma)$  为集合  $\Gamma$  的基数;  $P(D(i, b) = d)$  为设施  $i$  中  $d$  条行人线上堵塞客流量为  $b$  的概率, 可采用下式计算<sup>[8]</sup>:

$$\begin{aligned} P[D(i, b) = d] &= \sum_{d \in \Delta(i, b, d)} P[\delta(i, b, d) = d] \\ &= \sum_{d \in \Delta(i, b, d)} P[\delta(i, b, d)_1 = d_1, \delta(i, b, d)_2 \\ &= d_2, \dots, \delta(i, b, d)_b = d_b] = \sum_{d \in \Delta(i, b, d)} \tilde{P}_{id_1 d_2 \dots d_b} \end{aligned} \quad (20)$$

式中,  $\delta(i, b, d)$  为随机向量, 表示设施  $i$  中堵塞队列  $b$  的行人线  $d$ ;  $\Delta(i, b, d)$  为  $\delta(i, b, d)$  的状态空间,  $d$  为  $\delta(i, b, d)$  的一个实现。

将公式(17)中  $r_{ij}$  代入公式(15), 可得

$$\tilde{\mu}_i^a = \sum_{j \in J^+} \frac{\lambda_j^{\text{eff}}}{\lambda_i^{\text{eff}} \mu_j^{\text{eff}} c_j} \quad (21)$$

式中,  $J^+$  为行人线集合;  $\frac{1}{\mu_j^{\text{eff}}}$  为客流在设施  $j$  上的通过时间(包括走行和堵塞时间)。设施  $i$  上堵塞客流量为  $b$ , 设  $t_i^b$  为表征客流堵塞时间的随机变量, 那么设施  $i$  服务率  $\mu_j^{\text{eff}}$  由下式计算:

$$\frac{1}{\mu_j^{\text{eff}}} = \frac{1}{\mu_i} + P_i^f E[t_i^b] \quad (22)$$

式中,  $P_i^f E[t_i^b]$  为客流在设施  $i$  的平均堵塞时间,  $E[t_i^b]$  可由堵塞队列  $b$  客流量计算, 即

$$E[t_i^b] = E[E[t_i^b | b_i]] = \sum_{b \geq 1} \frac{P(b_i = b)}{P(b_i > 0)} E[t_i^b | b_i = b] \quad (23)$$

令  $t(i, b)_j$  表示设施  $i$  上堵塞队列  $b$  中第  $j$  位置客流的堵塞时间, 可得

$$E[t_i^b | b_i = b] = \frac{1}{b} \sum_{j=1}^b E[t(i, b)_j] \quad (24)$$

在堵塞状态下客流队列  $b$  中, 处于第一位置客流通过设施  $b$  用时为  $\frac{1}{\tilde{\mu}_i}$ , 则第  $j$  位置客流通过设施用时为

$$E[t(i, b)_j] = \sum_{k=b-j+1}^b \frac{1}{\mu(i, k)} \quad (25)$$

则

$$E[t_i^b | b_i = b] = \frac{1}{b} \sum_{j=1}^b \sum_{k=b-j+1}^b \frac{1}{\mu(i, k)} = \frac{1}{b} \sum_{k=1}^b \frac{k}{\tilde{\mu}(i, k)} \quad (26)$$

进一步可得

$$E[t_i^b] = \sum_{b \geq 1} \frac{P(b_i = b)}{P(b_i > 0)} \sum_{k=1}^b \frac{k}{\tilde{\mu}(i, k)} \quad (27)$$

定义  $l(i, b, d)_j$  为设施  $i$  中行人线  $j$  堵塞的客流量, 公式(20)可等价

$$P(D(i, b) = d) = \sum_{d \in \Delta(l, b, d)} \prod_{j \in I^+} \tilde{p}_{ij}^{l(i, b, d)_j} \quad (28)$$

$l(i, b, d)_j \in L(i, b, d)_j$ , 则集合  $L(i, b, d)_j$  可由下式定义:

$$L(i, b, d)_j \leftrightarrow \begin{cases} \sum_{j \in I^+} l(i, b, d)_j = b \\ \sum_{j \in I^+} \mathbb{I}(l(i, b, d)_j > 0) = d \\ l(i, b, d)_j \geq 0 \quad \forall j \in I^+ \end{cases} \quad (29)$$

式中,  $\mathbb{I}(l(i, b, d)_j > 0)$  为指示函数。在设施  $j$  处对于每个向量  $b$  相应的可选择的目标设施的排列组合可以重复  $l(i, b, d)_j$  次, 也即共有  $\frac{b!}{\prod_{j \in I^+} l(i, b, d)_j!}$  个实现可

以满足式(29)成立, 所以有

$$P(D(i, b) = d) = \sum_{l(i, b, d)_j \in L(i, b, d)_j} \frac{b!}{\prod_{j \in I^+} l(i, b, d)_j!} \prod_{j \in I^+} \tilde{p}_{ij}^{l(i, b, d)_j} \quad (30)$$

所以, 可计算堵塞平均消解时间为

$$\frac{1}{\tilde{\mu}(i, b)} = \frac{1}{\tilde{\mu}_i^a} \sum_{d=1}^{\min(b, \text{card}(I^+))} \frac{1}{a} \sum_{l(i, b, d) \in L(i, b, d)} \frac{b!}{\prod_{j \in I^+} l(i, b, d)_j!} \prod_{j \in I^+} \tilde{p}_{ij}^{l(i, b, d)_j} \quad (31)$$

求得设施  $i$  入口到达率  $\lambda_i$ 、堵塞消解率  $\tilde{\mu}_i$ 、堵塞概率  $P_i^f$  及设施服务率  $\mu_i$ , 由公式(11)可以计算设施客流的稳态概率  $\pi(i)$ , 由公式(27)可以得到站内客流在设施上走行时间。

### 4 实例分析

地铁客流具有明显的潮汐特征, 且在运营的不同时段, 位于不同城市功能区的地铁车站进站-出站客流比例差异性非常大, 瞬间客流峰值低于设施能力也无法验证模型。因此, 仅以平峰和高峰期客流明显较多场景的商业区车站为例进行模型的验证。

图 2 和图 3 分别为北京地铁某商业区车站内拓扑结构和设施连接网络, 设施几何属性和走行参数如表 1 所示。出入闸机通过能力为 1500 人次/h, 为输出方便, 出站闸机(6#)和出站闸机(11#)分别记为 E1 和 E2, 见图 3 车站设施连接网络。客流进出站规律随列车运行呈周期性变化, 因此仿真周期取一个列车进站—停站—出发运行环节。停站时下车客流为出站设施外部到达率  $\gamma_1$ , 进站客流为进站闸机外部到达率  $\gamma_2$ , 利用 AnyLogic 进行走行仿真。列车到站前站台候车客流为 61 人, 上行扶梯客流为 14 人, 停站时上班次列车客流均已离开扶梯和楼梯, 因此下行楼梯扶梯客流均为 0, 如图 4(a)所示。

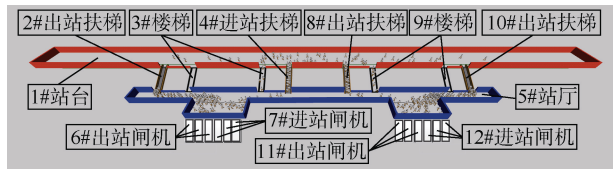


图 2 车站设施连接关系

Figure 2 Connectivity of facilities at the station

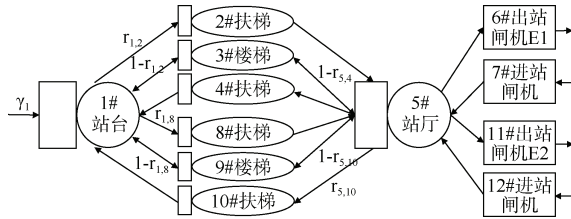


图3 车站设施连接网络

Figure 3 Layout of facilities layout at the station

表1 走行设施几何属性

Table 1 Dimensions of facilities inside the station

设施	宽度/m	长度/m	走行能力/(p/h)
进站扶梯	1.2	30	8 190
出站扶梯	1.2	30	8 190
楼梯	2.4	11.55	3 700

由于车站为商业中心, 高峰期和平峰期到站下车客流变化不大, 而进站乘车客流有一定的差异。根据2周工作日客流调研, 计算得到客流进站速率和列车停站期间下车人数(为计算方便, 对调研得到的客流数量和走行时间四舍五入取整)。假设下车人数服从均匀分布, 设置仿真场景参数如表2所示。其中, 场景一为平峰期, 场景二及场景三为高峰期, 应用 AnyLogic 软件进行客流走行仿真, 楼扶梯选择比例及得到客流在设施上走行参数如表3~表5所示, 以表5为例, 3#出站楼梯通过时间比相同位置的2#出站扶梯少27.4%; 9#出站楼梯通过时间比相同位置的8#出站扶梯少12.6%。通过仿真平台多场景模拟, 相同位置出站, 使用楼梯比使用扶梯用时少9.8%~29.0%。

表2 场景参数设置

Table 2 Scenario parameter settings

场景	进站速率/(人/h)	下车人数	进站闸机人均时间/s	出站闸机人均时间/s
场景一	1 500	[260, 300]	2	6
场景二	3 500	[260, 300]	4	6
场景三	3 500	[400, 440]	4	6

表3 平峰期进出站方向设施客流走行参数

Table 3 Off-peak passenger walking behavior parameters for facility entrances and exits

进出站扶梯	客流走行参数			
	选择比例	通过时间/s	客流量/人	服务率/%
2#出站扶梯	0.8	25.56	115	128
8#出站扶梯	0.75	27.97	127	128
3#出站楼梯	0.2	20.84	27	63
9#出站楼梯	0.25	22.11	32	63
10#进站扶梯	0.8	20.57	27	128
4#进站扶梯	0.8	19.92	25	128
9#进站楼梯	0.2	21.92	5	48
3#进站楼梯	0.2	20.08	6	48

表4 仿真场景二进出站设施客流走行参数

Table 4 Passengers walking behavior parameters at the station (simulation scenario 2)

进出站扶梯	客流走行参数			
	选择比例	通过时间/s	客流量/人	服务率/%
2#出站扶梯	0.8	26.04	110	128
8#出站扶梯	0.7	26.29	95	128
3#出站楼梯	0.2	20.93	38	63
9#出站楼梯	0.3	21.5	44	63
10#进站扶梯	0.8	23.91	58	128
4#进站扶梯	0.7	20.62	50	128
9#进站楼梯	0.2	22.04	14	48
3#进站楼梯	0.3	21.38	21	48

表5 场景三(早高峰期)进出站设施客流走行参数

Table 5 Passengers walking behavior parameters at the station (scenario about morning peak duration)

进出站扶梯	客流走行参数			
	选择比例	通过时间/s	客流量/人	服务率/%
2#出站扶梯	0.6	38.21	122	128
8#出站扶梯	0.6	39.39	92	128
3#出站楼梯	0.4	27.74	67	63
9#出站楼梯	0.4	34.44	72	63
10#进站扶梯	0.6	20.12	46	128
4#进站扶梯	0.6	19.18	37	128
9#进站楼梯	0.4	25.15	30	48
3#进站楼梯	0.4	27.84	38	48

#### 4.1 场景一(平峰期)

进出站客流选择楼扶梯的比例根据调研数据计算得到, 并在表3列出, 该场景中客流到达率设为1 500人/h。由公式(27)计算得到客流在楼扶梯走行时间, 扶楼梯等设施的服务率由公式(18)推算得到, 通过的客流量则为客流选择设施的比例与设施的通行能力相乘得到, 具体结果见表3。进站闸机通过客流38人, 最大等候客流量4人, 客流的平均通过时间5.84s, 出站闸机通过客流量140人, 最大等候客流量54人, 通过时间39.12s。基于上述相关数据, 可以计算得到列车在站的不同阶段, 站内客流在相关设施上的分布数量。

在 Anylogic 仿真平台中输入相关调研参数进行仿真, 可以得到仿真周期内客流在车站各设施的分布情况如图4所示。图4(a)左下侧为输出的具体仿真结果, 与表3中实地客流调研参数相比较, 计算的误差在1.7%~7%。同时在一个列车运行周期内, 进出站闸机客流与进出站楼扶梯客流数量不完全相同, 说明在本

仿真周期内,有少量客流没有完成出站。

### 4.2 场景二(晚高峰期商业区)

该场景中进站客流到达率设为 3 500 人/h,分别利用公式(18)和公式(27)计算得到站内设施的客流相关参数。进站闸机通过客流 76 人,最大等候客流量 8 人,客流的平均通过时间 6.3 s,出站闸机通过客流量 139 人,最大等候客流量 56 人,通过时间 40.40 s。该调研场景为晚高峰商业区车站,由于客流量增加超过扶梯的能力,有一些客流不愿意在扶梯前等待而选择楼梯行走。由于晚高峰时段客流对于时间的价值不是十分敏感,仍有 70%~80%的客流选择乘坐扶梯行走。

在仿真周期内客流在车站各设施的分布情况如图 4(b)所示。图中左下侧为仿真的具体输出结果,与实地客流调研参数相比,计算误差在 1.54%~6.7%之间,随着客流量的增加,模型计算得到结果的不确定性减小。

### 4.3 场景三(早高峰期)

该场景为早高峰期场景,进站客流到达率设为 3 500 人/h,分别利用公式(18)和公式(27)计算得到站内设施客流相关参数。进站闸机通过客流 75 人,最大等候客流量 8 人,客流的平均通过时间 6.1 s,出站闸机通过客流量 147 人,最大等候客流量 60 人,通过时间 42.93 s。客流选择楼扶梯的比例取表 4 中的相关参数时,在仿真周期内客流在车站各设施的分布情况如图 4(c)所示,仿真输出结果与表 5 中实际调研得到的参数相差较大。

调整客流走行过程中选择楼扶梯的比例,仿真输出主要参数如表 6 所示,与表 5 中实际调研得到的参数相差小于 5%,在 0~4.27%之间。

由上述场景仿真的结果可以看出,客流密度超过自由流的密度时,在能力较小的设施前必然会发生客流拥堵的情况。而拥堵的严重程度,主要受上游设施

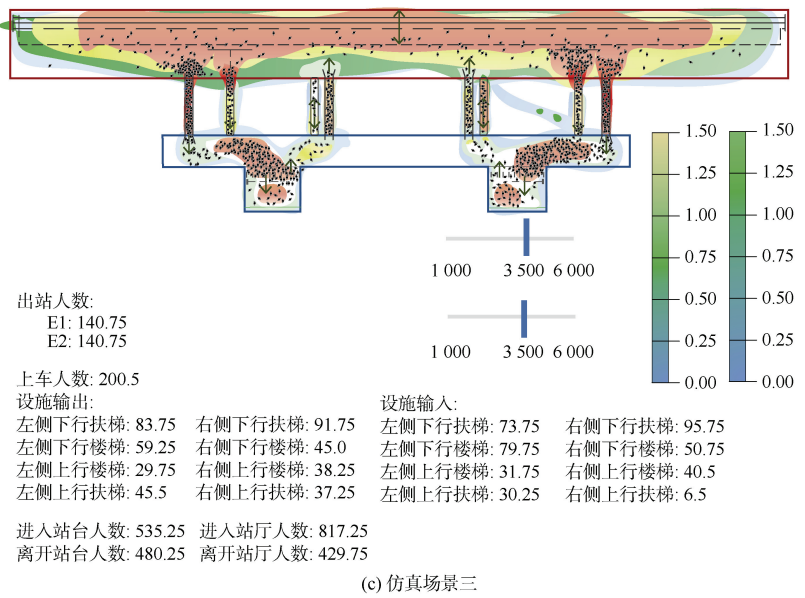
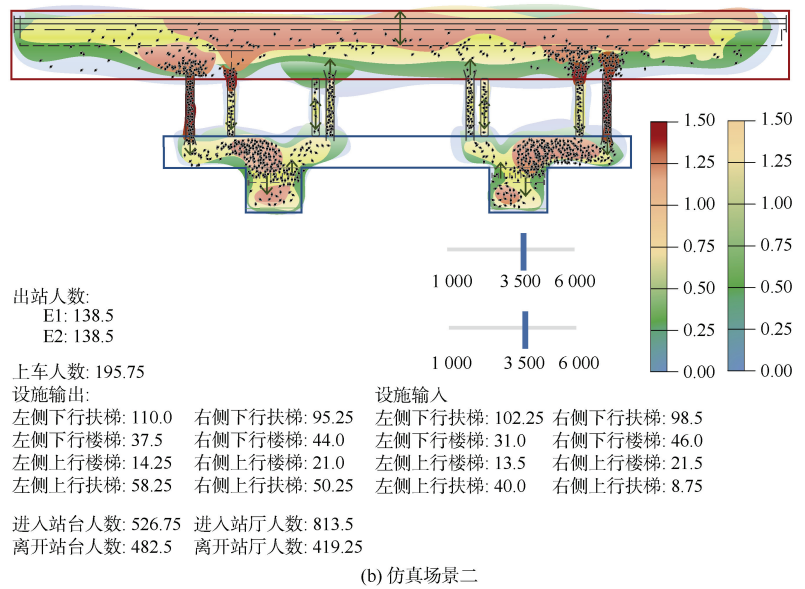
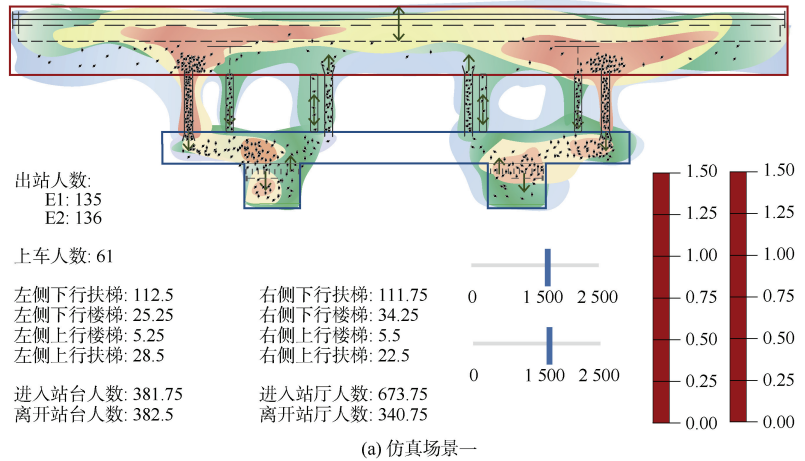


图 4 客流在车站各设施的分布示意  
Figure 4 Passenger distribution at the station

表6 仿真场景三进出站设施客流走行参数  
Table 6 Passengers walking behavior parameters in station (scenario about morning peak duration)

进出站扶梯	客流走行参数			
	选择比例	通过时间/s	客流量/人	服务率/%
2#出站扶梯	0.6	37.26	118	128
8#出站扶梯	0.6	38.94	92	128
3#出站楼梯	0.4	28.48	67	63
9#出站楼梯	0.6	33.82	75	63
10#进站扶梯	0.6	19.79	45	128
4#进站扶梯	0.6	18.54	38	128
9#进站楼梯	0.4	25.35	29	48
3#进站楼梯	0.4	27.73	39	48

输出客流的影响,为减轻能力欠缺设施前的客流的拥挤程度,可以采取相关措施:①充分利用上游设施的容纳能力,在拥挤风险可承受的情况下,进行能力较大设施的流线重新分割优化,设置较长的行走路径,引导客流尽量分散予能力大的设施,减少其单位时间的客流通过率;②限制进站客流量,进一步减少客流在上游设施的到达率,在保证客流顺利乘车的前提下,将客流尽量均衡分布于站内设施,充分利用设施的容纳能力。

同时可以看出,拥堵发生在设施的客流到达率大于设施服务率时,但客流的排队和走行时间还小于列车运行周期,也就是客流可以在下一列车到站之前离开车站,提出的模型算法可以针对具体结构的车站进行能力校核,确定站内设施网络的客流通过能力和瓶颈。随着客流的进一步加大,当到达客流超过一定的阈值时,由于通过能力的限制,客流在能力较小的设施前出现拥堵,在列车运行周期内不能全部出站,将会出现恶性循环,使得客流在站内越积越多,下车客流大于出站客流。因此,也可以进行车站设施属性和布局不合理性的辨识,为车站设施网络的改进和优化提出有针对性的建议。

## 5 结论

城市轨道交通车站内客流分布状态不仅仅与设施能力有关,而且受走行瓶颈的制约。确定客流在设施网络的分布状态,可对客流控制方案实施效果以及制定客流控制方案提供基础依据。由构建的模型和仿真结果可以得到:

1) 客流在设施网络上的分布状态不仅与设施能力相关,而且与客流走行偏好关系密切,扶梯处客流

密度相对更大。

2) 通过仿真平台多场景模拟,相同位置出站,使用楼梯比使用扶梯用时少 9.8%~29.0%。

3) 仿真周期内,进出站闸机处客流留滞比例大于 40%,即闸机为设施网络瓶颈点或潜在瓶颈点,在不同的运营时段根据客流量的波动,需要重点关注。

因此,由于客流通常选择扶梯走行,在满足应急疏散要求的前提下,与扶梯并行的楼梯的宽度不宜过宽;而闸机是设施网络的潜在瓶颈点,在条件允许的情况下尽可能多设置。列车运行周期内客流的分布特征与设施能力有关,设施通行能力及其利用需要进一步校核。在后续的工作中,将对客流随列车运行计划波动的前提下,对其由站台到出站的闸机、扶梯或楼梯的能力运用校核做进一步的研究。

## 参考文献

- [1] SRIKUKENTHIRAN S, FISHER D, SHALABY A, et al. Pedestrian route choice of vertical facilities in subway stations[J]. Transportation research record: journal of the transportation research board, 2013, 2351(1): 115-123.
- [2] 谭晓伟, 杨兴, 马壮林, 等. 不同类型的城市轨道交通车站客流时空分布特征[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(1): 129-140.  
TAN Xiaowei, YANG Xing, MA Zhuanglin, et al. Spatial-temporal distribution characteristics of passenger flow in different types of urban rail transit stations[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(1): 129-140.
- [3] 傅搏峰, 吴娇蓉, 华陈睿. 轨道站出入口客流分布系数估计方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(11): 1660-1665.  
FU Bofeng, WU Jiaorong, HUA Chenrui. Estimation method of distribution coefficient of passenger flow of subway station entrance[J]. Journal of Tongji University (Natural Science edition), 2012, 40(11): 1660-1665.
- [4] 曹敬滢, 许琰, 孙立山, 等. 基于轨道交通数据的客流特征与城市功能结构分析[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(2): 71-78.  
CAO Jinghan, XU Yan, SUN Lishan, et al. Passenger flow characteristics and analysis of urban functional structure based on rail transit data[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(2): 71-78.
- [5] 唐鹏程, 孙颖, 丁时政, 等. 基于火场信息的地铁车站智能疏散技术研究[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(1): 69-74.  
TANG Pengcheng, SUN Ying, DING Shizheng, et al. Intelligent evacuation technology of metro station fire based on surveillance video[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 69-74.

- [6] XU Xinyue, LIU Jun, LI Haiying, et al. Analysis of subway station capacity with the use of queueing theory[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2014, 38: 28-43.
- [7] 蔡昌俊, 姚恩建, 张永生, 等. 基于 AFC 数据的城轨站间客流量分布预测[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(1): 126-132. CAI Changjun, YAO Enjian, ZHANG Yongsheng, et al. Forecasting of passenger flow's distribution among urban rail transit stations based on AFC data[J]. China railway science, 2015, 36(1): 126-132.
- [8] 陈炎, 赵华伟, 杨军, 等. 基于多源数据融合的北京轨道交通既有线路客流特征与优化提升对策研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(2): 176-183. CHEN Yan, ZHAO Huawei, YANG Jun, et al. Research on passenger flow characteristics and optimization and promotion countermeasures of Beijing rail transit lines based on multi-source data fusion[J]. Railway transport and economy, 2024, 46(2): 176-183.
- [9] CHEUNG C Y, LAM W H K. Pedestrian route choices between escalator and stairway in MTR stations[J]. Journal of transportation engineering, 1998, 124(3): 277-285.
- [10] Daamen W, et al. Modelling pedestrians in transfer stations[J]. Pedestrian and evacuation dynamics, 2001: 59-74.
- [11] RAHMAN K, GHANI N A, KAMIL A A, et al. Modelling pedestrian travel time and the design of facilities: a queueing approach[J]. PLoS One, 2013, 8(5): e63503.
- [12] Lawson G Predicting human behaviour in Emergencies[D]. 2011(July).
- [13] WANG Litao, SHEN Shifei. A decay model for the fundamental diagram of pedestrian movement[J]. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2019, 531: 121739.
- [14] SUN Lishan, LUO Wei, YAO Liya, et al. A comparative study of funnel shape bottlenecks in subway stations[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2017, 98: 14-27.
- [15] OSORIO C, BIERLAIRE M. An analytic finite capacity queueing network model capturing the propagation of congestion and blocking[J]. European journal of operational research, 2009, 196(3): 996-1007.
- [16] KERBACHEA L, MACGREGOR SMITH J. The generalized expansion method for open finite queueing networks[J]. European journal of operational research, 1987, 32(3): 448-461.

(编辑: 傅依萱)

(上接第 89 页)

- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通工程基本术语标准: GB/T 50833—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Standard for basic terminology of urban rail transit engineering: GB/T 50833—2012[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.
- [3] 赵小文. 我国中低运量城市轨道交通发展的几点思考[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(10): 1-5. ZHAO Xiaowen. Research on the development of medium and low traffic volume rail transit in China[J]. Urban mass transit, 2019, 22(10): 1-5.
- [4] 魏宏伟, 田沃, 雷慧锋, 等. 智慧跨座式单轨发展深化研究[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(6): 25-29. WEI Hongwei, TIAN Wo, LEI Huifeng, et al. Development of a smart-straddle monorail[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(6): 25-29.
- [5] 彭飞, 杨柳燕. 我国中低运量城市轨道交通发展现状分析及可持续发展建议[J]. 现代城市轨道交通, 2023(5): 14-17. PENG Fei, YANG Liuyan. Analysis on the development status of medium and low traffic volume urban rail transit in China and suggestions for sustainable development[J]. Modern urban transit, 2023(5): 14-17.
- [6] 陈国芳, 卓开阔. 城轨交通弱电一体化及在跨座式单轨交通的应用探讨[J]. 铁路技术创新, 2018(6): 51-54. CHEN Guofang, ZHUO Kaikuo. Discussion on the integration of weak current in urban rail transit and its application to the straddle monorail transit[J]. Railway technical innovation, 2018(6): 51-54.
- [7] 邱鹏, 赵晓峰. 跨座式单轨全自动运行系统关键接口分析[J]. 铁道通信信号, 2021, 57(9): 76-82. QIU Peng, ZHAO Xiaofeng. Analysis of key interfaces of fully automatic operation system for straddle monorail[J]. Railway signalling & communication, 2021, 57(9): 76-82.
- [8] 韩玉雄, 丁建中. 城市轨道交通综合监控系统的实时性设计[J]. 城市轨道交通研究, 2008, 11(10): 18-22. HAN Yuxiong, DING Jianzhong. Real-time property design of the integrated supervisory control system for urban mass transit[J]. Urban mass transit, 2008, 11(10): 18-22.
- [9] 刘敏杰, 梁小斌. 基于云平台及数据共享模式的线网及线路层融合调度指挥系统[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(3): 174-179. LIU Minjie, LIANG Xiaobin. Network-integrated dispatching command system based on cloud platform and data sharing mode[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(3): 174-179.
- [10] 张正彬, 孙柯, 张德明, 等. 城轨快线多线路网络化调度系统研究[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(6): 8-14. ZHANG Zhengbin, SUN Ke, ZHANG Deming, et al. Network dispatching system for multi-line of a city rail fast line[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(6): 8-14.
- [11] 蔡佳妮. 基于网络化运营的城市轨道交通控制中心设置研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(2): 14-18. CAI Jiani. On urban rail transit operation control center based on network management[J]. Urban mass transit, 2014, 17(2): 14-18.

(编辑: 王艳菊)