

城市轨道交通车站出站闸机组前方区域 客流排队分析方法^{*}

何 彬¹ 刘亚苹^{1**} 顾保南² 吕希奎³

(1. 河北交通职业技术学院轨道交通系, 050035, 石家庄; 2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海; 3. 石家庄铁道大学交通运输学院, 050043, 石家庄//第一作者, 讲师)

摘 要 针对城市轨道交通车站出站闸机组前方区域在整个集散过程中的客流排队情况, 基于闸机组实结点模型, 划分了基础区域和 8 类极限区域, 并对 2 部梯组对应 1 组出站闸机时的极限区域进行划分; 阐述了出站客流到达出站闸机组前方区域后经历的客流集散过程, 并基于时间离散化进行迭代计算, 提出了出站闸机组前方区域客流排队分析方法。设计了客流同时到达与客流不同时到达 2 种工况, 通过算例验证了该分析方法的广泛适用性和实用性。

关键词 城市轨道交通车站; 出站闸机组前方区域; 客流排队分析

中图分类号 U293.1⁺3; U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.010

Analysis Method of Passenger Flow Queuing in front of Outbound Gate Unit at Urban Rail Transit Station

HE Bin, LIU Yaping, GU Baonan, LYU Xikui

Abstract Targeting the passenger flow queuing situation in front of outbound gate unit at urban rail transit station during the distribution process of passenger flow, based on the true node model of gate unit, a basic area and 8 types of limit areas are divided, and the limit area where 2 sets of staircase-escalator correspond to 1 set of outbound gate units is divided. The passenger flow gathering and distributing process after arriving at the exit of outbound gate unit is expounded. Based on the time discretization for iterative calculation, the analysis method of passenger flow queuing in front of outbound gate unit is proposed. Two working conditions of simultaneous non simultaneous arrivals of passenger flow are designed. The wide applicability and practicability of the analysis method are verified by calculation examples.

Key words urban rail transit station; area in front of outbound gate unit; passenger flow queuing analysis

First-author's address Department of Rail Transit of Hebei Jiaotong Vocational and Technical College, 050035, Shijiazhuang, China

出站闸机组是乘客离开城市轨道交通车站付费区的唯一通道。若出站闸机组配置不合理, 则出站乘客会在出站闸机组前方区域长时间排队等待, 势必影响乘客的出行体验。对此, 有必要分析出站闸机组前方区域的排队情况。文献[1-4]利用不同的微观客流仿真平台对包括出站闸机组在内的轨道交通车站行人设施布置方案进行拥堵评价, 其效果虽佳, 但只要闸机组布置方案(数量或位置等)发生变化, 设计人员就必须返回设计软件修改并重新建立整个仿真场景。文献[5]结合实际案例说明, 在使用 CAD 图纸作为仿真底图的情况下, 利用 Legion 软件完成 1 次车站客流仿真分析的实际耗时会超过 14 h。

将出站闸机组视作排队系统时, 其排队长度和排队时间等静态参数不能体现出站闸机组前方行人拥堵状态的动态变化。针对这一不足, 文献[6]构建了闸机组前方区域实结点模型, 将分析时长分为若干个较小的时段, 分析每个时段内闸机组前方区域的客流进出情况, 但未考虑客流不同时到达的情况。

本文借鉴闸机组实结点模型的思路, 以全部乘客使用实体票卡为基础, 提出具有广泛适用性的出站闸机组前方区域客流排队分析方法。

^{*} 河北省高等学校人文社会科学研究项目(SQ2022071); 中国高校产学研创新基金北创助教项目(二期)(2021BCB02018)

^{**} 通信作者

1 出站闸机组前方区域的划分

根据文献[6],在排队初期,各出站闸机组前方区域内滞留客流较少,个体间出于保证舒适性及自我的安全空间不被侵犯的目的,会保持一定间距;当滞留量逐渐增加时,个体间挤压程度加大,人均空间减小。为了体现滞留乘客在集散过程不同阶段中的占用空间,对出站闸机组前方区域进行划分。

一般情况下,排队过程中滞留乘客大致均匀分布于闸机前,同一闸机组的各闸机前排队长度大致相当,其形成的矩形排队区域称为基本区域,如图1所示。基本区域宽度为闸机组宽度,长度为闸机组前方区域出现拥挤无序状态的最短长度,通常为5人左右的排队长度,一般取 2.5 m [6]。

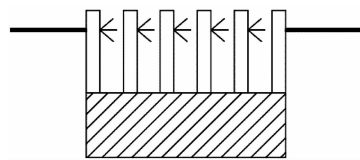
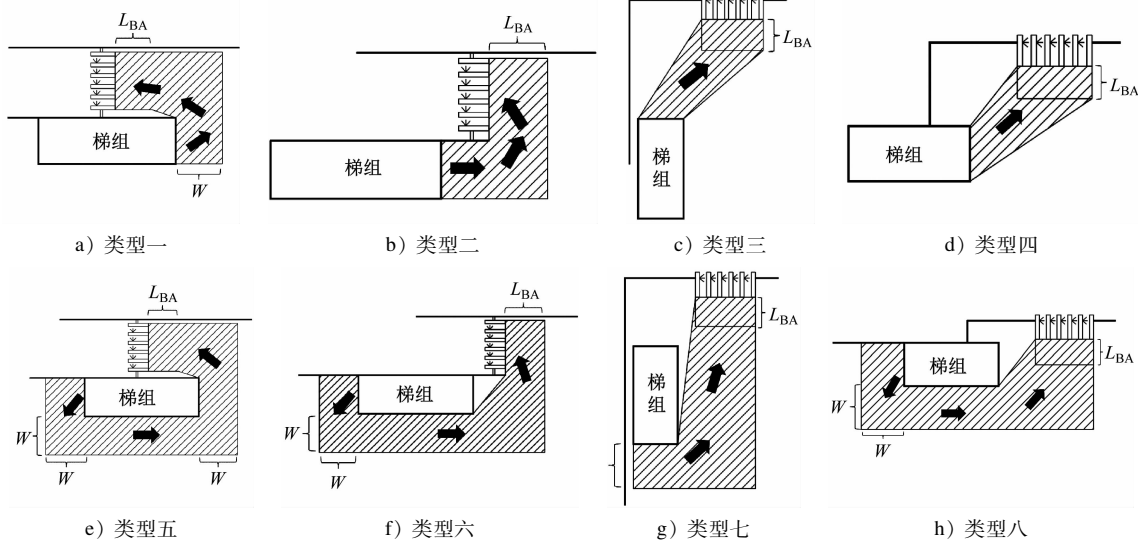


图1 闸机组基本区域

Fig. 1 Basic area of of gate unit

根据排队乘客不得侵入上游固定设施使用空间的规定,本文采用文献[6]观点来定义极限区域。当滞留乘客到达上游梯组离开断面时,客流排队达到极限,相应的排队区域为极限区域。按照梯组和闸机组的相对位置,以及楼梯口位置,可将出站闸机组对应单个梯组的极限区域分为如图2阴影区域所示的8类。



注: 阴影区域为极限区域; W 为梯组宽度; L_{BA} 为基本区域长度; \rightarrow 为客流方向。

图2 单出站闸机组前方的极限区域

Fig. 2 Limit area in front of the outbound-only gate unit

如图3所示,当2个梯组对应1个闸机组时,该闸机组的极限区域取2个梯组极限区域的并集。客流到达出站闸机组后,先在基本区域内排队等候,当基本区域被完全占据后,来自梯组1和梯组2的出站客流才在各自排队区域(区域1和区域2)等候。当区域1和区域2存在重叠区域(即图3阴影区域)时,由于该区域面积一般不大,区域1和区域2划分时可平分该重叠区域面积。

2 出站客流排队分析方法

本文以2个梯组对应1个闸机组为研究工况,分析出站客流的排队问题。

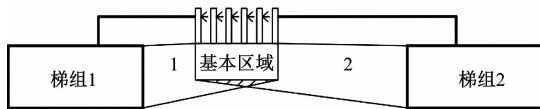


图3 相邻2个梯组的极限区域划分示例

Fig. 3 Diagram of dividing the limit area with two adjacent sets of staircase-escalator

出站闸机组客流来自于闸机组左右的2部梯组, G_1 和 G_2 分别为2部梯组的客流出发点。基本区域长度和宽度分别为 L_{BA} 和 W_{BA} , 区域1和区域2面积分别为 A_{z1} 和 A_{z2} 。将分析时间离散化,切分为多个长度为数秒的时段 Δt 。出站客流的排队情况计算过程为:

步骤 1, 在出站客流到达前, 出站闸机组前方区域内没有出站客流存在。

步骤 2, 当出站客流到达后, 基于流密速(即客流量-客流密度-客流速度)基本关系, 根据上一时段的出站闸机组前方区域客流状态(速度、密度等)推算本时段该区域的进出客流量。

步骤 3, 由出站闸机组前方区域进出客流量推算得到本时段末该区域存在的客流人数, 进而能够得到本时段末该区域的客流密度。

循环步骤 1—步骤 3, 直至出站客流全部离开为止, 即可得到每个时段末出站闸机组前方区域的排队人数。

2.1 客流集散过程

当客流开始到达出站闸机组后, 客流集散过程可分为 5 个阶段。

阶段 1: 来自梯组 G_1 和梯组 G_2 的客流初到达闸机组, 基本区域内客流人数 >0 , 并开始有客流通通过闸机组。此阶段基本区域尚未被出站客流占满。

阶段 2: 随着客流持续进入, 基本区域被出站客流占满, 变为行人拥堵区域, 其保持客流密度不变; 来自不同梯组的客流分布区域由基本区域逐渐向区域 1 和区域 2 扩展。

阶段 3: 梯组 G_1 和梯组 G_2 中的 1 个梯组不再输出出站客流, 区域 G_1 或区域 G_2 中的排队人数逐渐下降, 出站乘客在相应区域中的占用面积也逐渐降低。

阶段 4: 梯组 G_1 和梯组 G_2 均不再输出出站客流, 区域 1 和区域 2 内的排队人数逐渐降低为 0, 出站客流占用区域逐渐缩小至基本区域。

阶段 5: 区域排队人数继续减少, 出站客流在出站闸机组前方的排队人数无法占满基本区域, 基本区域内的客流密度减小、离开客流量增加, 直至客流全部离开基本区域。

2.2 出站闸机组前方区域的进出客流量

2.2.1 出站闸机组前方区域的进入客流量

假设出站闸机组前方区域客流到达分布已知, 其中第 $i+1$ 个时段内从梯组 G_1 和梯组 G_2 到达出站闸机组前方区域的客流人数分别为 $D_{G_1 O_{outF}, i+1}$ 和 $D_{G_2 O_{outF}, i+1}$ 。

2.2.2 出站闸机组前方区域的离开客流量

文献[6]提出了三杆式闸机组单个闸机通道的流量与基本区域客流密度的关系, 考虑到三杆式闸机、门扉式闸机和双向门扉式闸机的上述关系应不

同, 第 $i+1$ 个时段内出站闸机组离开流量和离开人数分别为:

$$Q_{O_{outF}C, i+1} = \min \left\{ \sum_{j=1}^3 n_j Q_{j, i+1} (K_{O_{outF}, BA, i}), \sum_{j=1}^3 n_j C_{j, \max} \right\} \quad (1)$$

$$D_{O_{outF}C, i+1} = Q_{O_{outF}C, i+1} \Delta T \quad (2)$$

式中:

$K_{O_{outF}, BA, i}$ ——第 i 个时段末出站闸机组前方基本区域客流密度;

n_j ——第 j 类出站闸机个数, 其中, $j=1$ 表示三杆式闸机, $j=2$ 表示门扉式闸机, $j=3$ 表示双向门扉式闸机;

$C_{j, \max}$ ——第 j 类出站闸机的最大通行能力;

$Q_{j, i+1}(\cdot)$ ——第 i 个时段内第 j 类出站闸机的通过速度。

需要注意的是, 当 $K_{O_{outF}, BA, i} = 0$ 时, $Q_{O_{outF}C, i+1} = 0, D_{O_{outF}C, i+1} = 0$ 。

设 $D_{O_{outF}C, i+1}$ 中来源于 G_1 和 G_2 的客流人数分别为 $D_{O_{outF}C, G_1, i+1}$ 和 $D_{O_{outF}C, G_2, i+1}$, 其与第 i 个时段末出站闸机组前方基本区域客流人数 $D_{O_{outF}, BA, i}$ 中来自梯组 G_1 的客流人数 $D_{O_{outF}, BA, G_1, i}$ 和梯组 G_2 的客流人数 $D_{O_{outF}, BA, G_2, i}$ 的比例成正比。

2.3 客流迭代过程

步骤 1: 初始化。令 $i=0$, 第 i 个时段末出站闸机组前方区域客流人数 $D_{outF, i} = 0$, 相应的客流密度 $K_{outF, i} = 0$, 则 $D_{outF, i}$ 中来自于 G_1 和 G_2 的客流人数 $D_{outF, G_1, i} = D_{outF, G_2, i} = 0$, 由区域 1 和区域 2 进入基本区域的客流人数 $D_{Z1, BA, i} = D_{Z2, BA, i} = 0$, 转步骤 2。

步骤 2: 判断 $\sum_i D_{O_{outF}C, i} = \sum_i D_{G_1 O_{outF}, i} + \sum_i D_{G_2 O_{outF}, i}$ 是否成立。若成立, 转步骤 9; 若不成立, 转步骤 3。

步骤 3: 根据客流到达分布, 更新 $D_{G_1 O_{outF}, i+1}$ 和 $D_{G_2 O_{outF}, i+1}$ 。转步骤 4。

步骤 4: 更新 $Q_{O_{outF}C, i+1}$ 、 $D_{O_{outF}C, i+1}$ 、 $D_{O_{outF}C, G_1, i+1}$ 、 $D_{O_{outF}C, G_2, i+1}$ 、 $D_{O_{outF}, G_1, i+1}$ 和 $D_{O_{outF}, G_2, i+1}$ 。转步骤 5。

步骤 5: 更新 $K_{O_{outF}, BA, i+1}$ 、区域 1 和区域 2 客流密度 $K_{Z1, i+1}$ 和 $K_{Z2, i+1}$ 、第 $i+1$ 个时段末基本区域客流人数 $D_{O_{outF}, BA, i+1}$ 、区域 1 和区域 2 的客流人数 $D_{Z1, i+1}$ 和 $D_{Z2, i+1}$ 。当 $D_{O_{outF}, G_1, i+1} + D_{O_{outF}, G_2, i+1} > A_B K_{O_{outF}, \max}$ 时, 转步骤 6, 其中 A_B 为基本区域面积; 当 $D_{O_{outF}, G_1, i+1} + D_{O_{outF}, G_2, i+1} \leq A_B K_{O_{outF}, \max}$ 时,

$K_{O_{outF},BA,i+1} = (D_{O_{outF},G_1,i+1} + D_{O_{outF},G_2,i+1})/A_B$, $K_{Z1,i+1} = K_{Z2,i+1} = 0$, $D_{O_{outF},BA,i+1} = D_{O_{outF},G_1,i+1} + D_{O_{outF},G_2,i+1}$, $D_{O_{outF},BA,G_1,i+1} = D_{O_{outF},G_1,i+1}$, $D_{O_{outF},BA,G_2,i+1} = D_{O_{outF},G_2,i+1}$, $D_{Z1,i+1} = D_{Z2,i+1} = 0$, 转步骤8。

步骤6:更新第*i*+1个时段内由区域1和区域2分别进入基本区域的客流人数 $D_{Z1,BA,i+1}$ 和 $D_{Z2,BA,i+1}$ 。当 $D_{O_{outF},G_1,i} > D_{O_{outF},G_1,i}$ 时, $D_{Z1,BA,i+1} = D_{O_{outF},G_1,i}$;否则 $D_{Z1,BA,i+1} = D_{O_{outF},G_1,i}$ 。当 $D_{O_{outF},G_2,i} > D_{O_{outF},G_2,i}$ 时, $D_{Z2,BA,i+1} = D_{O_{outF},G_2,i}$;否则 $D_{Z2,BA,i+1} = D_{O_{outF},G_2,i}$ 。当 $D_{O_{outF},BA,i} + D_{Z1,BA,i+1} + D_{Z2,BA,i+1} > A_B K_{O_{outF},max}$ 时, $D_{Z1,BA,i+1}$ 和 $D_{Z2,BA,i+1}$ 要在原有基础上减小以保证基本区域密度限值,设基本区域进入人数超出总量为 $D_{over} = (D_{O_{outF},BA,i} + D_{Z1,BA,i+1} + D_{Z2,BA,i+1}) - K_{O_{outF},max} A_B$,即二者的减少量分别为 $D_{over} \frac{D_{Z1,BA,i+1}}{D_{Z1,BA,i+1} + D_{Z2,BA,i+1}}$ 和 $D_{over} \frac{D_{Z2,BA,i+1}}{D_{Z1,BA,i+1} + D_{Z2,BA,i+1}}$ 。转步骤7。

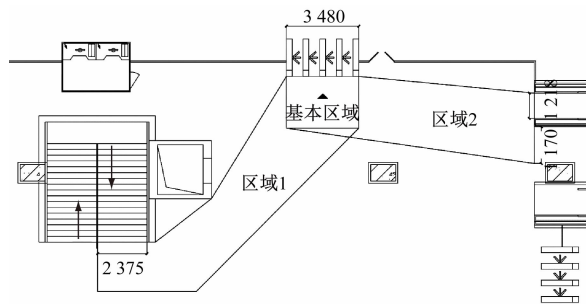
步骤7:更新 $D_{O_{outF},BA,i+1}$ 、 $D_{Z1,i+1}$ 、 $D_{Z2,i+1}$ 、 $D_{O_{outF},BA,G_1,i+1}$ 和 $D_{O_{outF},BA,G_2,i+1}$ 。转步骤8。

步骤8:更新 $K_{O_{outF},BA,i+1}$ 。转步骤2。

步骤9:客流全部通过出站闸机组,迭代结束。

3 案例计算

本文按实际案例布置出站闸机组及其周围设施,如图4所示。其中,出站闸机组由4个三杆式闸机组成,基本区域宽度为3.48 m,基本区域、区域1和区域2面积分别为8.7 m²、30.5 m²和19.1 m²。由左侧楼梯到达出站闸机组的客流为客流1,由右侧扶梯梯组到达的客流为客流2。根据经验,本文设定客流1的客流量为2.0人/s,客流2的客流量为2.5人/s,二者的客流持续到达时长均为30 s。取 $K_{O_{outF},max}$ 为4人/m², $\Delta t = 2$ s。计算工况有2个:



单位:mm

图4 算例设施布置图

Fig. 4 Layout drawing of facilities in calculation example

工况1,客流1和客流2同时到达出站闸机组;工况2,客流1比客流2晚10 s到达出站闸机组。

2种工况下各时段末的排队人数如图5所示。由图5可以看出,与工况2相比,工况1的客流排队高峰更加集中,但二者的排队乘客清空时间相差不大。

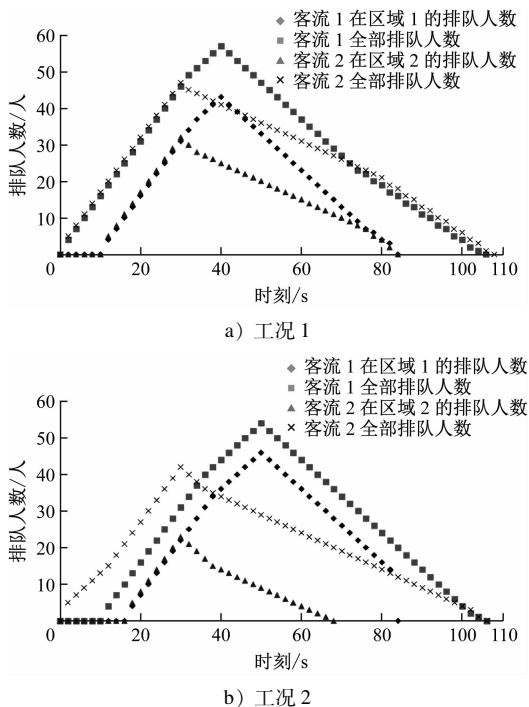


图5 2种工况下的客流排队计算结果

Fig. 5 Calculation results of passenger flow queuing under two working conditions

4 结语

本文基于闸机组实结点模型的思路,以全部乘客使用实体票卡为基础,提出了出站闸机组前方区域客流排队分析方法。与既有方法相比,该方法考虑了客流同时到达和不同时到达2种工况,并通过设置区域1、区域2进入基本区域的客流量,使模型更加贴近实际情况。为了继续扩展模型的适用场景,后续将考虑扫码支付、NFC(近场通信)支付和人脸识别等各种电子支付方式对出站闸机组通过能力的影响。

参考文献

- [1] 张金伟. 基于行人仿真模拟技术的与既有地铁站换乘设计研究[J]. 隧道建设,2013(4):287.
ZHANG Jinwei. Study on design of transfer between new metro station and existing metro line based on passenger simulation technology[J]. Tunnel Construction, 2013(4):287.

(下转第64页)