

地铁车站乘客疏散出口选择行为仿真建模

马洁¹, 徐瑞华¹, 李璇², 柳林³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 宁波大学 海运学院, 宁波 315211;
3. 南宁轨道交通集团有限责任公司, 南宁 530021)

摘要: 针对地铁车站乘客疏散过程中的出口选择行为受到自身感知和判断能力的制约,且可能会根据当前位置和出口实时状况重新选择出口,提出一种出口动态选择模型,模型引入感知因子和判断系数反映乘客的感觉和知觉能力,采用动态比较过程和预测决策过程来模拟乘客的出口选择和出口变换行为.以某地铁车站站台层为场景分析乘客的感知和判断能力对出口选择、出口变换行为及疏散效果的影响.仿真结果表明:模型参数可以有效调节乘客的出口选择和出口变换行为,进而影响疏散结果.当车站视野不佳或乘客偏好等待时,需要引导乘客从拥堵的出口到通畅的出口进行疏散;而当车站视野良好且乘客偏好走行时,需要引导乘客选择适当的出口,并在等待时多一些耐心.

关键词: 应急疏散仿真; 感知和判断过程; 主观疏散时间; 出口选择行为; 出口变换行为
中图分类号: U291.69 **文献标志码:** A

Simulation Modeling of Pedestrian Exit Selection in Evacuation Process of Rail Transit Station

MA Jie¹, XU Ruihua¹, LI Xuan², LIU Lin³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 3. Nanning Rail Transit Group Co., Ltd., Nanning 530021, China)

Abstract: Pedestrian exit selection behavior during evacuation process in a rail transit station is restricted by pedestrians' perceptual as well as cognitive abilities. Moreover, pedestrian may re-select the exit according to his or her current position and the real-time exit conditions. To simulate these behaviors, a dynamic exit selection model is presented. A perceptual parameter and a series of cognitive coefficients are introduced in the model to reflect pedestrians'

perceptual and cognitive level. Besides, two subjective evacuation time computing approaches are proposed to simulate pedestrians' exit selection and re-selection behavior. A scenario of a station platform is built. A number of simulation experiments are run to study the effect of pedestrians' perceptual parameter and cognitive coefficients on total evacuation time. The results show that the total evacuation time is sensitive to model parameters, furthermore, exit selection and re-selection behaviors can be modeled. It is found that when pedestrians can perceive only a few exits or pedestrians prefer waiting, the station staff should guide pedestrians who evacuate from the crowded exit to use the unobstructed exit; whereas when pedestrians can perceive enough exits and they prefer walking, measures should be taken to help them to choose a rational exit and let them wait a bit longer in front of the exit.

Key words: evacuation simulation; perceptual and cognitive process; subjective evacuation time; exit selection behavior; exit re-selection behavior

大型城市的轨道交通网络快速发展,客流量不断攀升,地铁车站,尤其大型换乘站,在早晚高峰、节假日和大型活动期间,客流密集,安全隐患大.地铁车站内的突发事件可能会导致严重的经济损失和人员伤亡,造成恶劣的社会影响.因此,研究地铁车站的高效应急疏散具有很强的现实意义.相比问卷调查和数学推演方法的低可信度,以及车站疏散试验的高成本、高难度和高危险,仿真作为一种安全可靠、动态直观、低成本、易实施、可重复的方法,具有显著的优势.不仅如此,仿真方法还具有突出的现实意义:既可以在车站规划设计阶段帮助完善车站设计,也可以在车站运营阶段辅助制订应急措施和应急预案,为车站疏散客流组织工作提供针对性建议.

收稿日期: 2016-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(71271153, 51208381, 51408323)

第一作者: 马洁(1989—),女,博士生,主要研究方向为行人仿真. E-mail: majie_2007@163.com

通讯作者: 徐瑞华(1963—),男,工学博士,教授,博士生导师,主要研究方向为交通运输规划与管理. E-mail: rhxu@tongji.edu.cn

因而,采用仿真方法研究车站乘客的疏散过程已成为一种主流趋势.提高仿真精度和可靠性的关键是要构建合理的仿真模型.微观仿真模型将每位行人都视作独立个体,可反映乘客与环境或是他人间的相互影响,能有效模拟车站疏散过程中乘客的各种行为,得到广泛的发展,现有的研究涉及:有毒气体对乘客行为的影响^[1],乘客的乘降行为^[2],乘客的扶梯、楼梯选择行为^[3]和乘客的上下楼梯行为^[4]等,但是关于出口选择行为的研究较少.

在实际疏散过程中,乘客的行为和决策对疏散效果有重要影响,其中,出口选择就是一项复杂且关键的决策过程^[5].乘客选择不同的出口进行疏散,走行路径不同,受到其他乘客的影响也不同,会导致不同的走行时间和等待时间,进而产生不同的疏散结果.乘客的出口选择行为,不仅关系到个体的疏散时间,也影响到整体的疏散时间.因此,有必要对疏散过程仿真中的出口选择行为专门进行建模研究.关于出口选择行为,目前大多数的研究是针对广义公共场所的.Heliiovaara^[6]认为采用最近规则和疏散时间最短规则进行出口选择都是不切实际的.Lovreglio^[7]提出基于随机效用的离散选择模型,Lo等^[8]采用非合作博弈论方法,两者都着重研究乘客间的相互影响对出口选择的作用.Guo等^[9]提出基于 logit 的出口选择模型,乘客选择负效用最小的出口.Huang^[10]和 Xu^[5]改进元胞自动机模型,采用基于 logit 的离散选择规则模拟乘客的出口选择行为.

上述针对公共场所乘客疏散过程仿真中的出口选择研究多数关注的是乘客间的相互影响和出口状况,将出口选择视为疏散前决策行为.然而,相比其他公共场所,大多数地铁车站结构紧凑,空间狭长,标识体系健全,设备布局符合一定规则,基于此,乘客对车站的设备布局规则和疏散流程比较熟悉,因此,乘客在疏散过程中具备一定的感知和判断出口情况的能力,其出口选择行为很大程度上依赖自身的认知,不会全然盲从.考虑到以上地铁车站所特有的结构特点和乘客特征,针对车站乘客疏散中的出口选择应该是一项需要考虑乘客感觉和知觉能力在内的动态决策过程.实际上,该过程具体有三个特点:首先,乘客的感知能力有限,并与外界环境相关,如烟气体浓度、人群密度等,可能不能感知所有可用出口^[11].其次,为了选出最优出口,乘客需要计算到各可视出口的走行时间和采用它们疏散的等待时间.是乘客主观认知到的走行时间和等待时间决定他们的出口选择行为^[12],其中有些行人偏好等待,也有些

行人偏好走行^[13].最后,由于乘客位置和出口条件的动态变化,乘客在疏散过程中可能会变换出口.

考虑以上特点,本文建立了乘客疏散出口动态选择模型.针对特点一,模型中引入感知因子,决定乘客可感知的出口个数,用来调节乘客的感觉能力.针对特点二,在模型中设置一系列判断系数,反映乘客受理性程度和主观偏好影响的知觉能力,用来调整乘客的主观走行时间和等待时间.针对特点三,模型提出两种主观疏散时间的计算方法,模拟乘客的出口选择和出口变换行为.通过调节感知因子和判断系数,可以实现乘客在不同场景下可产生不同的出口选择和出口变换行为.将该出口动态选择模型嵌入社会力模型中,用出口动态选择模型决定每一时刻的期望速度方向,用社会力模型推动仿真前进并反映乘客的微观走行行为.最后,通过算例,研究模型中的感知因子和判断系数对出口选择和出口变换行为的调节作用,以及对疏散效果的影响,为车站设计和疏散组织提供建议.

1 基于社会力的乘客疏散仿真模型

根据 Helbing 等提出的社会力模型,行人在疏散过程中所受的社会力由自驱动力、行人间的排斥力及人与障碍间的排斥力构成,根据牛顿第二定律,作用于乘客的社会力合力产生一个加速度,促使乘客前进^[14],见式(1).等式右边第一项表示自驱动力,第二、三项分别表示乘客间的排斥力及乘客与障碍间的排斥力,两种排斥力的构成见式(2)~(3).

$$\mathbf{f}_i^0 = m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \frac{\mathbf{v}_i^0(t)\mathbf{e}_i^0(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j \neq i} \mathbf{f}_{ij} + \sum_w \mathbf{f}_{iw} \quad (1)$$

其中, \mathbf{f}_i^0 是乘客的自驱动力; \mathbf{f}_{ij} 是乘客*j*施加的排斥力; \mathbf{f}_{iw} 是乘客受到来自障碍*w*的排斥力; m_i 是乘客*i*的质量; $\mathbf{v}_i^0(t)$ 、 $\mathbf{e}_i^0(t)$ 、 $\mathbf{v}_i(t)$ 分别代表*t*时刻乘客*i*的期望速度大小、方向和实际速度.

$$\mathbf{f}_{ij} = \{A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] + kg(r_{ij} - d_{ij})\} \mathbf{n}_{ij} + \kappa g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t \mathbf{t}_{ij} \quad (2)$$

$$\mathbf{f}_{iw} = \{A_i \exp[(r_i - d_{iw})/B_i] + kg(r_i - d_{iw})\} \mathbf{n}_{iw} - \kappa g(r_i - d_{iw})(\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{t}_{iw}) \mathbf{t}_{iw} \quad (3)$$

式(2)~(3)中, A_i 、 B_i 是常量; k 是弹性系数; κ 是摩擦系数; r_{ij} 为乘客*i*、*j*的身体半径和; d_{ij} 为乘客*i*、*j*间的质心距离.当 $r_{ij} > d_{ij}$ 时, $g(r_{ij} - d_{ij}) = r_{ij} - d_{ij}$;否则, $g(r_{ij} - d_{ij}) = 0$. \mathbf{n}_{ij} 是由乘客*j*指向乘客*i*的单位向量, \mathbf{t}_{ij} 是乘客*i*、*j*切线方向的单位向量,均表征

力的作用方向. $\Delta v_{ij} = (v_j - v_i) \cdot t_{ij}$ 是乘客切线方向的速率差.

社会力模型中没有将乘客如何确定期望速度方向,如何确定疏散出口作为研究重点,因此,基于社会力模型的乘客疏散仿真方法需要配合一定的规则实现乘客的出口选择,进而明确其期望速度方向.作为社会力模型的结合和补充,下文重点提出考虑感觉和知觉能力的,动态比较和预测决策相结合的出口动态选择模型,确定每一时刻车站疏散乘客的目标出口,作为其社会力模型中的期望速度方向 $e_i^0(t)$,进而根据式(1)–(3)计算社会力合力,更新乘客位置,推动仿真前进.

2 乘客疏散出口动态选择模型

2.1 比较出口集

对于地铁站,本文中所提及的“出口”,不仅指车站出口,还包括连接站台层和站厅层的楼扶梯和连通付费区和非付费区的闸机.车站乘客的疏散流程通常比较固定.突发事件发生时,乘客的初始位置不同,其疏散流程的完整程度可能不一致,其中站台层的乘客需要经过完整的疏散流程方可出站,由三个串联的疏散阶段组成:第一疏散阶段,通过站台层的楼扶梯到达站厅层;第二疏散阶段,通过站厅层的闸机由付费区到非付费区;第三疏散阶段,通过位于非付费区的车站出口到达安全区域.简言之,楼扶梯、闸机和车站出口分别为三个疏散阶段对应的目标出口.

地铁站内的乘客 i 处于某一疏散阶段,有 $r(r \in N^*)$ 个出口可供选择,定义出口集 $S = \{E_1, E_2, \dots, E_r\}$.乘客受自身感觉能力限制和外界环境影响,不一定能感觉到所有出口,只能感知并分析距离较近的一些可用出口.定义比较出口集 C_i ,乘客 i 在疏散开始时从出口集 S 中选择距离较近的 $m(1 \leq m \leq r, m \in N^*)$ 个出口,放入 C_i 中,显然 $C_i \subseteq S$.其中 m 为感知因子,其单位为个,反映乘客的感觉能力,可以描述乘客感觉能力的有限性以及环境条件的变化对感觉能力的影响.具体有:

乘客 i 从当前位置到 S 中任一出口 E_s 的直线距离为 $d_{E_s,i}^L = \sqrt{(x_{E_s} - x_i)^2 + (y_{E_s} - y_i)^2}$,将乘客 i 到 S 中各出口的直线距离 $d_{E_1,i}^L, d_{E_2,i}^L, \dots, d_{E_r,i}^L$ 按照从小到大的顺序排列为 $d_{E_{(1)},i}^L < d_{E_{(2)},i}^L < \dots < d_{E_{(r)},i}^L$,则:

$$C_i = \{E_{(1)}, E_{(2)}, \dots, E_{(m)}\} \quad (4)$$

比较出口集 C_i 中的出口是乘客 i 在疏散过程中

可感知并分析的出口.定义乘客 i 在当前疏散阶段的目标出口为 E_i ,在时刻 $t_n(n \in N^*)$ 的目标出口为 E_i^n .因此有:

(1) 当 $m=1$ 时,乘客 i 只能感知并选择此出口,即当前疏散阶段的目标出口 $E_i = E_{(1)}$.从第 2.1 节可知当 $r=1$ 时, m 也只能为 1.

(2) 当 $m \geq 2$ 时,乘客 i 至少可以感知并分析两个出口.通过第 2.2 提出的动态比较过程以及预测决策过程,计算 C_i 中各个出口的主观疏散时间,选择主观最优出口作为时刻 t_n 的目标出口 E_i^n .

2.2 目标出口的选择

2.2.1 动态比较过程

乘客在疏散过程中根据实时情况,不断对比较出口集内的出口进行评估和比较,选出每一时间步长主观疏散时间最短的出口,该过程为“动态比较过程”.在实际疏散场景中,乘客会一直关注各可视出口的情况,快速权衡,只考虑距离和等待人数之类的关键影响因素,因此,不会消耗太多精力,不影响行走,效率高,可以实现动态.

假设疏散仿真开始后的每一时间步长,即 $t_1 = 0, t_{n+1} = t_n + \tau_i$,对于乘客 i ,当 C_i 中的出口数量至少为两个时,对任一出口 $E_a \in C_i$,其动态比较疏散时间 $T_{E_a,i}^n$ 为

$$T_{E_a,i}^n = E_i d_{E_a,i}^L + F_i \frac{c_{wE_a}^n}{N} \quad (5)$$

其中,式(5)右侧第一项反映主观走行时间, $d_{E_a,i}^L$ 是乘客 i 从当前位置到出口 E_a 的直线距离.在乘客的主观预测中,是期望速率到达疏散目标的,根据社会力模型,该期望速率不随时间变化,乘客间无差异,是定值^[4],因此,该过程中乘客对主观走行时间的判断主要依赖于对距离的感知. E_i 和 F_i 为判断系数,其单位为 $s \cdot m^{-1}$.右侧第二项反映主观等待时间. $c_{wE_a}^n$ 为时刻 t_n 在出口 E_a 前等待疏散的乘客总数,根据实地考察,本文中将出口 5 m 范围内,且连续 6 个仿真时间步长(3 s)内实际走行速率低于 $0.5 m \cdot s^{-1}$ 的乘客定义为等待疏散的乘客. N 为出口设备的通过能力,采用基于社会力模型的仿真方法,在仿真场景中对各出口设备的通过能力进行统计和计算. F_i 为判断系数,是量纲一参数.

乘客的知觉能力是有限的,对空间、时间的知觉都不是精确的,且知觉与乘客的性格、偏好和认知相关,人与人之间存在差异. E_i 和 F_i 作为判断系数,反映乘客 i 的知觉能力.知觉能力是乘客的自身属性,与理性程度和主观偏好相关,不随疏散时间改变. F_i

越大,表示乘客对走行的偏好越大; E_i 越大,表示乘客对等待的偏好越大. 本文将乘客分为三种类型:判断力强、偏好走行和偏好等待,同一场景中每种类型乘客对应的比例分别为 p_s 、 p_m 和 p_w ,显然 $p_s + p_m + p_w = 1$. 乘客 i 按照自己的类型,对 E_i 和 F_i 取值,每位乘客的取值可以不同,具体有:

$$(E_i, F_i) = \begin{cases} (E_s, F_s) = (P, Q), & \text{若乘客 } i \text{ 判断力强} \\ (E_m, F_m) = (X, Y), & \text{若乘客 } i \text{ 偏好走行} \\ (E_w, F_w) = (U, V), & \text{若乘客 } i \text{ 偏好等待} \end{cases} \quad (6)$$

其中, P 与 Q 相近且 P 略大于 Q ; X 小于 Y ,且 Y 值越大,乘客越偏好走行厌恶等待; U 大于 V ,且 U 值越大,乘客越偏好等待厌恶走行.

定义乘客 i 在时刻 t_n 的比较目标出口为 $E_s^{t_n}$,该出口为该时刻乘客通过动态比较过程得到的主观最优出口,具体有:假设 $E_b \in C_i$,对任一出口 $E_a \in C_i$ 且 $E_a \neq E_b$,总有 $T_{\mathbb{E}_b}^{t_n} < T_{\mathbb{E}_a}^{t_n}$,则比较目标出口 $E_s^{t_n} = E_b$.

乘客 i 在时刻 t_n 的目标出口 $E_i^{t_n}$ 的确定规则有:

(1) 若 $E_s^{t_n} = E_i^{t_{n-1}}$ 或 $E_i^{t_{n-1}}$ 不存在,说明比较目标出口与上一时刻的目标出口一致,或者上一时刻目标出口不存在,则 $E_i^{t_n} = E_b$.

(2) 若 $E_s^{t_n} \neq E_i^{t_{n-1}}$,说明比较目标出口不再是原先的目标出口,在这种情况下,为了判断到底哪个出口更优,该时刻是否需要变换目标出口,乘客 i 通过下节提出的精细化的预测决策过程最终确定该时刻的目标出口 $E_i^{t_n}$.

2.2.2 预测决策过程

当某一时刻,乘客通过动态比较过程得到的目标出口与原先的目标出口不一致时,需要决策是否变换目标出口,这个决定可能意味着之前的“付出”都白费了,因此乘客需要花较多的精力和时间,对每个可视出口进行全面深入的精细评估和比较,选择主观疏散时间最少的出口作为当前时刻的目标出口,该过程为“预测决策过程”. 由于乘客考虑众多影响因素,计算和评估的精度较高,但是用时长,影响走行和疏散速度,所以动态地进行预测决策过程不妥.

乘客 i 在时刻 t_n ,对任一出口 $E_a \in C_i$,计算其预测决策疏散时间 $T_{\mathbb{E}_a}^{t_n}$ 为

$$T_{\mathbb{E}_a}^{t_n} = E_i T_{omE_a}^{t_n} + F_i T_{\omega E_a}^{t_n} \quad (7)$$

式中: $T_{omE_a}^{t_n}$ 为乘客 i 到出口 E_a 的预测走行时间; $T_{\omega E_a}^{t_n}$ 为乘客 i 在时刻 t_n ,预测到达出口 E_a 后还需等待的时间.

$$T_{omE_a}^{t_n} = \frac{d_{\mathbb{E}_a}^{S_i}}{\exp\left(-\frac{P_i^{t_n} - P_s^{t_n}}{P_s^{t_n}}\right) \bar{v}(\rho_i^{t_n})} \quad (8)$$

$$T_{\omega E_a}^{t_n} = f\left(\frac{c_{\omega E_a}^{t_n} + c_{E_a}^{t_n}}{N} - T_{omE_a}^{t_n}\right) \quad (9)$$

式(8)中,为配合计算,引入“网格地图”将本站空间离散化,兼顾计算精度和计算效率,选用 $05 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的网格. $d_{\mathbb{E}_a}^{S_i}$ 为乘客从当前位置到出口 E_a 考虑障碍避让的最短路径 R_{E_a} 的距离,本文采用改进的 A^* 算法进行计算,详见文献[15]. 速度的修正主要考虑乘客周围不同向客流和密度对乘客期望速率的影响. 乘客 i 到出口 E_a 的期望路径为 R_{E_a} ,以路径 R_{E_a} 为中心向两侧各扩展 1 m ,形成一个宽 2.5 m 的区域,定义为影响区域 S_{E_a} ,假设该区域内其他乘客对乘客 i 速度的影响较大. 首先,修正乘客周围不同向客流对期望速率的影响,显然,影响区域 S_{E_a} 内的反向乘客数与同向乘客数的比值越高,乘客的走行速率降低越显著. 定义 $P_i^{t_n}$ 和 $P_s^{t_n}$ 分别为时刻 t_n 区域 S_{E_a} 内的乘客总数和同向乘客总数. 具体有:假设乘客 $j(j \neq i)$ 为时刻 t_n 区域 S_{E_a} 内的任一乘客,判断: ①若 $E_j^{t_{n-1}} = E_a$,则 j 为同向乘客; ②若 $E_j^{t_{n-1}} \neq E_a$,则 j 为非同向乘客. 其次,乘客疏散时的期望速率是期望中可以达到的最大速率值. 本文以当前仿真场景推导速率—密度经验关系:其中, $\bar{v}(\rho_i^{t_n})$ 为在时刻 t_n 的密度水平下,区域 S_{E_a} 内所有乘客的平均速率值, v_{\max} 为疏散过程中乘客可达到的最大速率值,即低密度水平下的自由速率,采用两者的比值修正在时刻 t_n 的密度水平下,区域 S_{E_a} 内的客流密度对乘客期望速率的影响.

式(9)中等式右侧函数内的第一项表示出口设备将当前的等待乘客和比乘客 i 早到的乘客都疏散完毕所需要的时间,第二项则是乘客到达该出口设备的预测走行时间. $c_{E_a}^{t_n}$ 是预测比乘客 i 更早到达出口 E_a 的走行乘客总数,具体有:假设乘客 k 为走行乘客, $E_k^{t_{n-1}} = E_a$ 且 $d_{\mathbb{E}_a}^{S_k} < d_{\mathbb{E}_a}^{S_i}$,则认为乘客 k 比乘客 i 更早到达出口 E_a . $c_{\omega E_a}^{t_n}$ 和 N 的含义同式(5). 对于函数 $f(z)$: ①当 $z > 0$ 时, $f(z) = z$; ②当 $z \leq 0$ 时, $f(z) = 0$.

假设 $E_d \in C_i$,对任一出口 $E_a \in C_i$ 且 $E_a \neq E_d$,总有 $T_{\mathbb{E}_d}^{t_n} < T_{\mathbb{E}_a}^{t_n}$,则乘客 i 在时刻 t_n 的目标出口 $E_i^{t_n} = E_d$. 考虑到变换目标出口是有机会成本的,因此本文规定每位乘客在每个疏散阶段只可变换目标出口一次. 进行一次预测决策之后,有的乘客仍保持原目标,有的乘客改变了目标出口,下面将这两类乘客分

开讨论:

(1) 对于变换目标出口的乘客,即 $E_i^n \neq E_i^{n-1}$, 将该时刻的目标出口 E_i^n 作为当前疏散阶段的目标出口 E_i ,即 $E_i = E_i^n$, 停止后续的动态比较和预测决策过程。

(2) 对于未变换目标出口的乘客,即 $E_i^n = E_i^{n-1}$, 在时刻 t_{n+1} , 接着展开动态比较过程, 计算比较出口集 C_i 中各出口的动态比较疏散时间。

2.3 流程

设置初始时刻: $t_n = 0$, 对于任一乘客 i :

步骤 1. 根据乘客的初始位置, 判断其所处的疏散阶段. 转到步骤 2.

步骤 2. 判断: 乘客是否正在接受出口服务:

步骤 2.1. 是, 转到步骤 7;

步骤 2.2. 否, 转到步骤 3.

步骤 3. 确定乘客当前疏散阶段的出口集 S , 并计算比较出口集 C_i , 转到步骤 4.

步骤 4. 确定比较出口集 C_i 中出口的个数:

步骤 4.1. 若 $m = 1$, 即 C_i 中只有一个出口 $E_{(1)}$, 则当前疏散阶段的目标出口 $E_i = E_{(1)}$, 转到步骤 6;

步骤 4.2. 若 $m \geq 2$, 即 C_i 中至少有两个出口, 则计算 C_i 中各出口的动态比较疏散时间, 假设 $T_{E_g}^n$ 为最小, 则当前时刻的比较目标出口 $E_i^n = E_g$. 判断: E_i^n 和 E_i^{n-1} 是否为同一出口:

步骤 4.2.1. 若 $E_i^n = E_i^{n-1}$ 或 E_i^{n-1} 不存在, 则当前时刻目标出口 $E_i^n = E_g$, 转到步骤 5;

步骤 4.2.2. 若 $E_i^n \neq E_i^{n-1}$, 计算 C_i 中各出口的预测决策疏散时间, 假设 $T_{E_h}^n$ 为最小, 则当前时刻目标出口 $E_i^n = E_h$. 判断: E_i^n 和 E_i^{n-1} 是否为同一出口:

步骤 4.2.2.1. 是, 即 $E_i^n = E_i^{n-1}$, 转到步骤 5;

步骤 4.2.2.2. 否, 即 $E_i^n \neq E_i^{n-1}$, 则当前疏散阶段的目标出口 $E_i = E_i^n$, 转到步骤 6.

步骤 5. 期望速度方向 $e_i^0(t)$ 为 $e_{E_i^n}^i$, 由当前位置指向当前时刻目标出口 E_i^n . 通过式(1)–(3)计算社会力合力, 更新位置. 判断: 乘客是否正在接受出口服务:

步骤 5.1. 是, 转到步骤 7;

步骤 5.2. 否, $t_n \leftarrow t_n + \tau_i$, 转到步骤 4.2.

步骤 6. 期望速度方向 $e_i^0(t)$ 为 $e_{E_i}^i$, 由当前位置指向当前疏散阶段的目标出口 E_i . 通过式(1)–(3)计算社会力合力, 更新位置. 判断: 乘客是否正在接受出口服务:

步骤 6.1. 是, 转到步骤 7;

步骤 6.2. 否, $t_n \leftarrow t_n + \tau_i$, 转到步骤 6.

步骤 7. 当前疏散阶段的出口选择过程结束, 乘客通过阶段出口后, 判断: 乘客是否离开车站:

步骤 7.1. 是, 结束;

步骤 7.2. 否, 乘客进入下一疏散阶段, 转到步骤 3.

更新所有乘客.

3 算例分析

考虑到站台层的楼扶梯往往是整个车站疏散过程中的瓶颈, 因此本文选取某地铁车站站台层为场景进行仿真分析, 如图 1 所示. 该站台层有乘客 500 人, 初始状态时大多数乘客分布在两侧的候车区域. 站台层有 5 个“出口”, 其中 3 部扶梯, 2 部楼梯, 在乘客疏散时, 所有楼扶梯均为可用出口, 本文场景中, 每部楼梯的通过能力为每部扶梯能力的三倍. 算例中, 乘客的疏散过程指从开始疏散时起, 直到乘客通过楼扶梯离开站台层结束. 总疏散时间指从开始疏散时起, 直到最后一位乘客离开站台层所用的时间. 本文以课题组已有的基于社会力模型的客流仿真软件 StaPass^[16]为基础, 加入第 2 节的乘客疏散出口动态选择模型改进后, 进行算例设计与仿真. 社会力模型的参数与文献[14]中一致, 每一仿真步长为 0.5 s. 本文重点研究乘客的感觉和知觉能力对疏散效果的影响, 算例着重考察模型中不同的感知因子 m , 判断系数 (E_s, F_s) 、 (E_m, F_m) 、 (E_w, F_w) , 乘客比例 (p_s, p_m, p_w) 取值, 对总疏散时间的影响, 以及乘客在疏散过程中的出口选择和出口变换行为会有怎样的变化, 进而对车站设计和疏散组织提出建议.

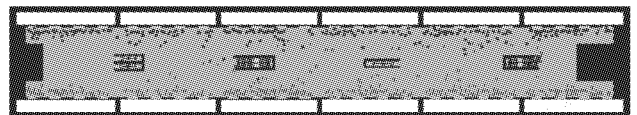


图 1 仿真初始场景

Fig.1 Simulation scenario and initial pedestrian distribution

3.1 乘客比例和感知因子对疏散效果的影响

通过对不同的 E_i 和 F_i 取值进行多次仿真试验并分析后, 在本算例中, 对于判断力强的乘客取 $(E_s, F_s) = (3, 2)$, 这个参数水平下, 乘客最为理性, 疏散效果最佳. 对于偏好走行和偏好等待的乘客分别取 $(E_m, F_m) = (2, 7)$, $(E_w, F_w) = (7, 2)$, 这个参数水平下, 乘客表现出适度的偏好性和非理性. 4 种具有

代表性的乘客比例 (p_s, p_m, p_w) 在不同的感知因子 m 取值时对总疏散时间的影响,如图 2 所示. 其中, $(p_s, p_m, p_w) = (1, 0, 0)$ 表示所有乘客的判断能力都强,是理性的; $(p_s, p_m, p_w) = (0, 1, 0)$ 表示所有乘客都偏好走行厌倦等待; $(p_s, p_m, p_w) = (0, 0, 1)$ 表示所有乘客都偏好等待厌倦走行; $(p_s, p_m, p_w) = (0.34, 0.33, 0.33)$ 表示理性乘客占 34%, 偏好走行和偏好等待的乘客各占 33%, 各种类型乘客接近于等比例混合.

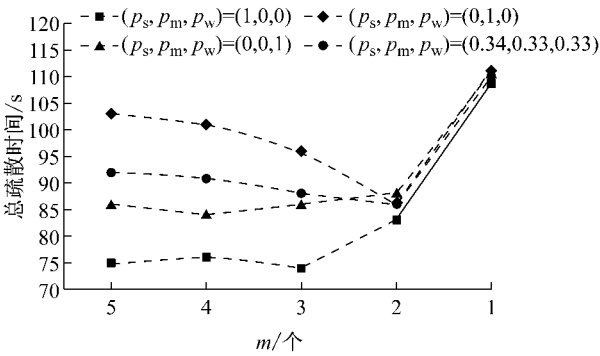


图 2 乘客比例和感知因子 m 对总疏散时间的影响
Fig. 2 Total evacuation time against perceptual parameter m

从图 2 中可以看出,当 $m=1$ 时,不论乘客的比例是怎样的,总疏散时间都会达到一个相似的最大值. 具体的仿真过程截图如图 3 所示. 因为所有乘客都只能感知到最近出口,并从最近出口疏散,当其他出口已经空了,瓶颈出口前仍有部分乘客在等待疏散(图 3d). 若车站视野条件不佳,总疏散时间受瓶颈出口制约,此时,需要车站工作人员引导使用瓶颈出口疏散的乘客采用附近通畅的出口进行疏散.

从图 2 可以看出,当 $m=3, 4, 5$ 时,4 种乘客比例的总疏散时间有差异,其中所有乘客都理性时的总疏散时间最短,所有乘客都偏好走行时的总疏散时间最长. 混合比例场景和全部偏好走行场景的总疏散时间的变化趋势相似,说明在混合比例场景,其中偏好走行的乘客对疏散效果的影响较大. 如果场景中所有乘客都偏好走行,那么在 $(E_m, F_m) = (2, 7)$ 这样的参数水平下,乘客感知到的出口越多,相应的总疏散时间也越长. 这是因为乘客感知到的出口越多,出口变换行为也越来越杂乱无章,导致总疏散时间变长. 这样的结果表明疏散时,需要采取措施安抚乘客情绪,使乘客理性决策. 如果乘客缺乏耐心厌恶等待,良好的外界视野环境甚至可能是不利于疏散的,此时需要车站工作人员发挥作用,让偏好走行的乘客多一些等待,不要匆忙换去其他出口.

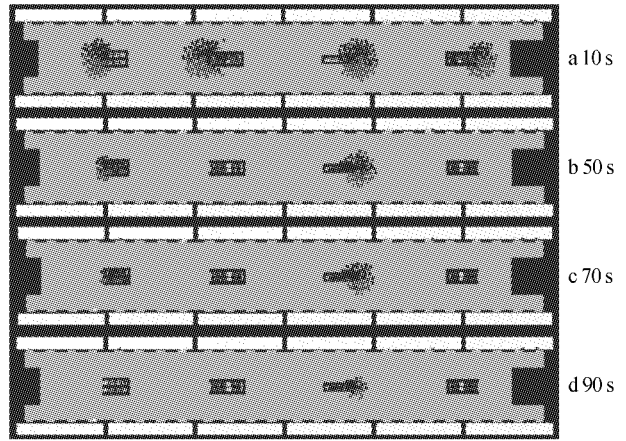


图 3 仿真过程图 $(p_s, p_m, p_w) = (1, 0, 0), (E_s, F_s) = (3, 2), m=1$ 时

Fig. 3 Screenshots of simulation when $(p_s, p_m, p_w) = (1, 0, 0), (E_s, F_s) = (3, 2)$ and $m=1$

3.2 判断系数 F_m 和感知因子对疏散效果的影响

假设场景中所有的乘客都偏好走行厌倦等待,即 $(p_s, p_m, p_w) = (0, 1, 0)$. 不同判断系数 F_m 和感知因子 m 取值对疏散效果的影响,如图 4 所示.

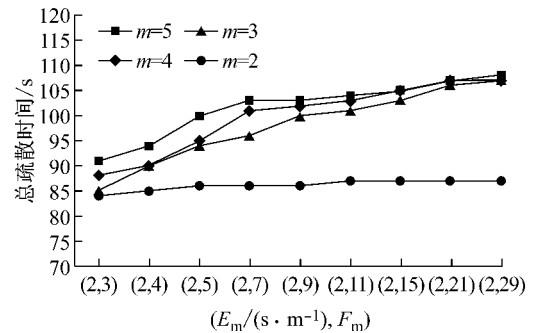


图 4 判断系数 F_m 和感知因子 m 对总疏散时间的影响
Fig. 4 Total evacuation time against cognitive coefficient F_m and perceptual parameter m

从图 4 可以看出,感知因子 $m=3, 4, 5$ 时,当 $F_m < 9$,随着 F_m 的增长,总疏散时间也明显变长,且 m 取不同值时的总疏散时间略有差异;而当 $F_m \geq 9$ 时,总疏散时间的增长缓和,三条曲线的差距逐渐缩小,最终趋于一致. 这是由乘客的出口选择和出口变换行为造成的. 仿真过程截图如图 5 所示. 当 F_m 较小时,疏散开始后大多数乘客向最近出口移动. 而随着 F_m 的变大,越来越多的乘客首先向通过能力大的楼梯移动(图 5a),造成楼梯拥堵(图 5b),随后部分乘客转向扶梯疏散(图 5c),但由于扶梯能力的制约,当楼梯已经空了,还有部分乘客在扶梯前等待(图 5d). 在这个过程中,非理性的出口选择和出口变换行为,先后造成扶梯和楼梯没有得到有效利用,使得总疏散时间变长. 尤其,当 F_m 大于 21 时,几乎所有

的乘客在疏散开始时都涌向楼梯,导致不论 m 为何值,总疏散时间达到相似的最大值.说明疏散过程中,需要对偏好走行的乘客进行引导,指引乘客选择恰当的出口,并在等待时多一些耐心.

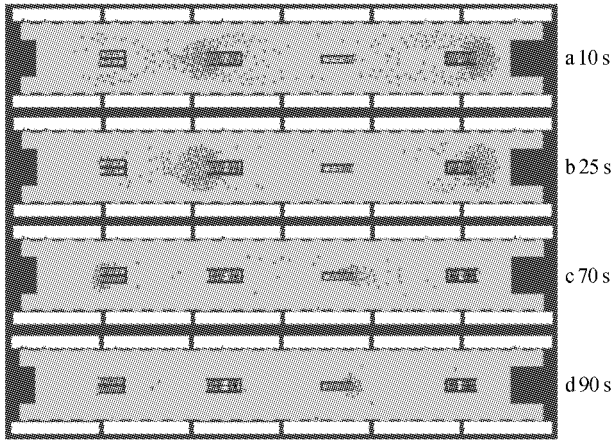


图 5 仿真过程图 $((p_s, p_m, p_w) = (0, 1, 0), (E_m, F_m) = (2, 29), m = 5)$ 时

Fig.5 Screenshots of simulation when $(p_s, p_m, p_w) = (0, 1, 0), (E_m, F_m) = (2, 29)$ and $m = 5$

当感知因子 $m = 2$ 时, F_m 的增长对总疏散时间没有影响,且总疏散时间比 $m = 3, 4, 5$ 场景时小.仿真过程截图如图 6 所示.初始位置在站台左侧的乘客只能感知到站台左侧的两部扶梯,因此不论 F_m 取何值,这些乘客都只会通过感知到的两部扶梯疏散(图 6).相比 $m = 3, 4, 5$ 的场景,这两部扶梯得到充分利用,所以总疏散时间较小.随着 F_m 的增长,越来越多的其他乘客在疏散开始时涌向楼梯(图 6a),这与 $m = 3, 4, 5$ 场景时的现象一致.从图 6 可以看出,当 $F_m = 29$ 时,中部扶梯无人使用,但是这并不会对总疏散时间造成影响,因为该场景下疏散瓶颈是站台左侧的两部扶梯(图 6d).说明疏散出口的有效利用,可使总疏散时间减少;乘客视野有限时,其理性程度对疏散效果的影响甚微,瓶颈出口才是制约疏散的关键,需要将乘客从拥挤的出口引导至通畅的出口进行疏散.

3.3 判断系数 E_w 和感知因子对疏散效果的影响

假设场景中所有乘客都偏好等待厌倦行走,即 $(p_s, p_m, p_w) = (0, 0, 1)$.不同判断系数 E_w 和感知因子 m 取值对疏散效果的影响,如图 7 所示.

从图 7 可以看出,总疏散时间随 E_w 的增长而增长.当 $E_w \leq 7$ 时, $m = 2$ 的场景比 $m = 3, 5$ 时的总疏散时间略长.疏散开始后,所有乘客都向最近出口移动.当 $m = 2$ 时,由于感知能力有限,左侧乘客只能通过左侧扶梯疏散,不能变换出口,受扶梯能力制约,

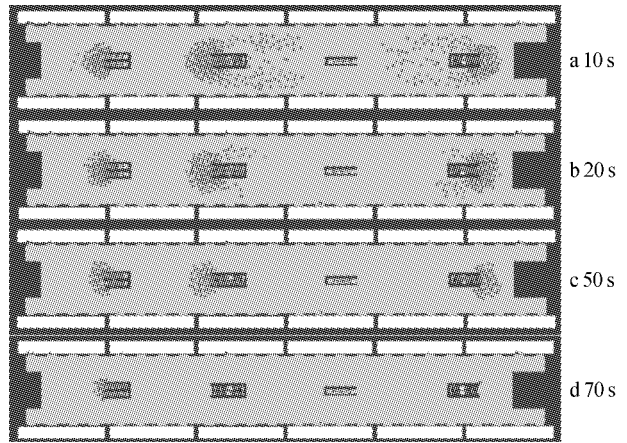


图 6 仿真过程图 $((p_s, p_m, p_w) = (0, 1, 0), (E_m, F_m) = (2, 29), m = 2)$ 时

Fig.6 Screenshots of simulation when $(p_s, p_m, p_w) = (0, 1, 0), (E_m, F_m) = (2, 29)$ and $m = 2$

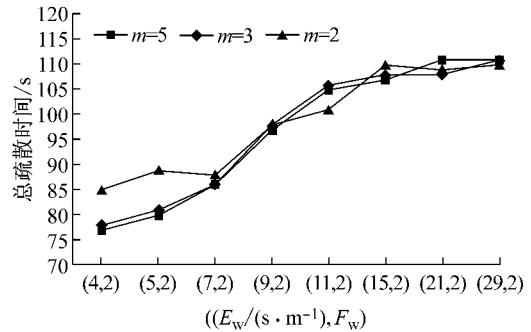


图 7 判断系数 E_w 和感知因子 m 对总疏散时间的影响

Fig.7 Total evacuation time against cognitive coefficient E_w and perceptual parameter m

总疏散时间较长;而当 $m = 3, 5$ 时,一部分乘客会由拥挤的扶梯换到通畅的楼梯完成疏散.上述变换出口的行为是理性的,减少了总疏散时间.随着 E_w 的增长,越来越少的乘客由扶梯换至楼梯,尤其当 $E_w > 21$ 时,几乎所有乘客都只通过最近出口疏散,疏散过程与图 3 中乘客只能感知到唯一出口的场景相似.说明疏散中需要引导偏好等待的乘客从拥挤的出口到附近通畅的出口完成疏散.

通过第 3.1~3.3 节算例分析,可知:当乘客只能感知到少数出口或偏好等待时,总疏散时间取决于各出口的能力与就近承担的疏散人数是否匹配.如果匹配,那么疏散效果良好;如果不匹配,总疏散时间受瓶颈出口制约.在车站设计时,应该考虑各个区域出口数量和能力的均衡,但考虑到车站内乘客的分布不一定是均衡的,所以在车站视野不良时,以及对于偏好等待的乘客,需要引导乘客从拥挤的出口到附近通畅的出口进行疏散.当乘客能感知到较多出口且偏好走时,乘客可能会在疏散开始时选

择通过能力大的出口,而在疏散过程中又变换到其他出口,这种非理性的出口选择和出口变换行为,使得总疏散时间延长.所以,车站视野良好时,需要引导偏好走行的乘客选择恰当的出口,并在等待时多一些耐心.

4 结论

本文建立了出口动态选择模型,研究地铁车站乘客在疏散过程中感觉和知觉能力对出口选择和出口变换行为的影响.模型中引入感知因子和一系列判断系数反映乘客的感觉和知觉能力,通过两种主观疏散时间的评估方法模拟乘客的出口选择和出口变换过程.最后,以某地铁车站站台层的疏散过程为场景,进行算例仿真,仿真结果表明:通过调节模型中的感知和判断参数可以有效改变出口选择和出口变换行为,进而得到不同的疏散效果.仿真结果可以为车站设计和疏散组织工作提供意见和建议:

关于车站设计,要避免明显的瓶颈出口.出口设备的通过能力应该考虑与乘客的分布相匹配:通常情况下,出口的位置要均衡,出口的数量要均匀,在乘客相对密集的区域,出口设备的能力应该相应加大.关于车站的疏散组织工作,只提供良好的疏散视野环境有时候不见得能发挥积极作用.为提高疏散效率,更重要的是需要提供有效的引导措施:一方面安抚乘客情绪,使乘客回归理性;另一方面帮助乘客做出合理的出口选择和出口变换决策,使得各个出口设备在整个疏散过程中都可以得到有效利用.

本文中的感知过程是静态的,下一步重点研究当乘客具备动态感知能力时的出口选择行为建模和仿真.此外,通过算例分析可以看出模型中感知和判断参数对疏散行为和效果的影响显著,由于目前仿真案例有限,实际数据缺乏,在具体案例中参数应如何取值也是下一步研究的重点.

参考文献:

- [1] Wan J, Sui J, Yu H. Research on evacuation in the subway station in China based on the Combined Social Force Model[J]. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2014, 394(2):33.
- [2] Zhang Q, Han B, Li D. Modeling and simulation of passenger alighting and boarding movement in Beijing metro stations[J]. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2008, 16(5):635.
- [3] 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.
- [4] Qu Y, Gao Z, Xiao Y, *et al.* Modeling the pedestrian's movement and simulating evacuation dynamics on stairs[J]. *Safety Science*, 2014, 70:189.
- [5] Xu Y, Huang H J, Yong G. Modified static floor field and exit choice for pedestrian evacuation[J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(8):80502.
- [6] Heliovaara S, Kuusinen J M, Rinne T, *et al.* Pedestrian behavior and exit selection in evacuation of a corridor-An experimental study[J]. *Safety Science*, 2012, 50(2):221.
- [7] Lovreglio R, Borri D, Dell'Olio L, *et al.* A discrete choice model based on random utilities for exit choice in emergency evacuations[J]. *Safety Science*, 2014, 62(2):418.
- [8] Lo S M, Huang H C, Wang P, *et al.* A game theory based exit selection model for evacuation[J]. *Fire Safety Journal*, 2006, 41(5):364.
- [9] Guo R, Huang H. Logit-based exit choice model of evacuation in rooms with internal obstacles and multiple exits[J]. *Chinese physics B*, 2010, 19(3):101.
- [10] Huang H J, Guo R Y. Static floor field and exit choice for pedestrian evacuation in rooms with internal obstacles and multiple exits[J]. *Phys Rev E*, 2008, 78(2):1815.
- [11] Pan X. Computational Modeling of human and social behaviors for emergency egress analysis [D]. California: Stanford University, 2006.
- [12] Kobes M, Helsloot I, Vries B D, *et al.* Building safety and human behaviour in fire: a literature review[J]. *Fire Safety Journal*, 2010, 45(1):1.
- [13] 李爱梅, 赵丹, 熊冠星, 等. 等待是一种折磨? 等待时间知觉及其导致的非理性决策行为[J]. *心理科学进展*, 2014, 22(11):1679.
- LI Aimei, ZHAO Dan, XIONG Guanxing, *et al.* Is waiting a kind of torture? perceived waiting time and the resulting irrational decision making [J]. *Advances in Psychological Science*, 2014, 22(11):1679.
- [14] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. *Nature*, 2000, 407(6803): 487.
- [15] Gao P, Xu R, Zou X. A modified heuristic search algorithm for pedestrian simulation[C]//Proceedings of the 7th International Conference of Chinese Transportation Professionals, American Society of Civil Engineers. Shanghai:[s. n.], 2008: 512-519.
- [16] 高鹏. 基于多智能体的轨道交通车站客流仿真模型及理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2010.
- GAO Peng. Agent-based simulation model for passengers in urban mass transit station[D]. Shanghai: Tongji University, 2010.