

# 基于动态切换的城市轨道交通车站应急疏散模型

洪玲, 徐瑞华, 段晓英

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 基于应急条件下乘客可能采取的最近疏散行为、退避疏散行为、从众疏散行为、回返疏散行为、均衡疏散行为等5种主要疏散行为对乘客吸引力的动态变化, 构建了基于应急信息刺激的乘客疏散行为动态切换的3层模型体系. 对不同微观行人仿真模型的优缺点进行分析, 构建了融合应急行为决策模型、A\*算法、社会力模型的应急疏散联合仿真体系. 最后, 利用实际城市轨道交通车站的应急疏散调查数据, 对模型参数进行了标定, 并对仿真效果进行了验证.

**关键词:** 城市轨道交通车站; 应急疏散行为; 动态切换; 应急疏散决策模型

中图分类号: U293.1

文献标志码: A

## Emergency Evacuation Model of Urban Rail Transit Station Based on Dynamic Switching Pattern

HONG Ling, XU Ruihua, DUAN Xiaoying

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Five evacuation behaviors, including the shortest evacuation behavior, avoidance evacuation behavior, herd evacuation behavior, returning evacuation behavior and equilibrium evacuation behavior, were analyzed and modelled in detail. Then a three-layer evacuation model system of dynamic switching pattern was developed based on emergency information stimulation. After analyzing the advantages and disadvantages of different microscopic pedestrian simulation models, a joint simulation system, which contains emergency evacuation decision-making model, A-star algorithm and social force model, was built. Finally, with the actual survey data of emergency evacuation of urban rail transit stations, the parameters of the model were calibrated and the simulation results were verified.

**Key words:** urban rail transit station; emergency evacuation behaviors; dynamic switch; emergency evacuation decision-making model

国内外城市轨道交通系统所发生的一些重大突发事件都曾有过惨痛的经验教训. 这些突发事件的发生具有难以预知和不可控制性, 不但对车站疏散乘客造成困难, 还会导致相邻线路车站上的客流积压, 引起网络上客流的波动<sup>[1]</sup>. 因此, 深入研究乘客应急疏散过程中的心理及行为特点, 总结乘客应急疏散的运动规律<sup>[2-4]</sup>, 是制定符合实际需求、适应事件演变应急预案的基础和前提, 对提高应急疏散预案的有效性和实用性具有重要的理论意义和实践指导作用.

本文基于对城市轨道交通车站乘客应急疏散流程的分析研究, 将相应的应急疏散仿真划分为“疏散信息层”、“行为决策层”、“行为执行层”3部分内容及相应的模型体系. 该研究结果可以用于构建更加完善的城市轨道交通客流疏散仿真系统, 用以评价城市轨道交通车站的规划、设计, 制定更加完善的应急疏散预案.

## 1 行人疏散仿真模型研究现状

国内外对行人仿真的研究经历了宏观模型<sup>[5-6]</sup>、中观模型<sup>[7-9]</sup>、微观模型<sup>[10-14]</sup>等不同阶段.

这些行人仿真模型各有优缺点, 在此不一一赘述, 其中应用较为广泛的模型主要是元胞自动机模型和社会力模型. 通过对比可以发现它们各有优缺点: 元胞自动机模型能够迅速、直接地模拟和反映现实中各类行人运动方向, 计算速度快, 物理意义明确. 但也存在着模拟效果粗糙, 行为规则较为简单, 移动方向机械, 不能精确反映行人的各类细节特征等缺点. 社会力模型能够连续计算行人行进过程中的行为变化(如自组织现象), 对仿真智能体的行为特征描述更加细腻, 更符合行人运动的实际特征, 还可通过个体“涌现”的方式真实模拟群体行为. 但其

缺点是计算量较大,运算效率较低,且对于特定行人行为(例如特定的疏散行为)的建模较为抽象、复杂。鉴于此,应综合考虑不同微观仿真模型(元胞自动机模型和社会力模型)的优缺点,来组合构建完善的城市轨道交通车站应急疏散仿真模型体系。

此外,上述行人运动微观仿真模型在应急疏散领域往往只考虑对1种疏散行为(主要是最近疏散行为)进行描述,很难对不同疏散行为进行综合考虑或进行疏散行为的切换建模。

## 2 车站乘客应急疏散流程与建模

### 2.1 总体疏散流程

通过对过往研究及调查成果的总结及分析<sup>[15-17]</sup>可以看出,应急疏散过程中最主要的疏散行为包括最近疏散行为、退避疏散行为、回返疏散行为、从众疏散行为以及均衡疏散行为。在这5种主要疏散行为中,只有2种疏散行为是疏散乘客自发产生的:1种是最近疏散行为,这种疏散行为直接反映了疏散乘客最直接的疏散动机——“尽快出站”;另1种是退避疏散行为,这种疏散行为是人类对灾害最自然的反应。这2种疏散行为反映了人类“趋利避害”的特性,其他的疏散行为都是为了能够达到这种疏散目的而采取的临时疏散策略。

回返疏散行为是乘客在决策变化时所采取的暂时按原路返回的补救行为。城市轨道交通车站的结构越来越复杂,功能也越来越多,进入车站内部犹如进入迷宫,这一点对于大型的换乘枢纽尤为明显。乘客身处内部经常分不清方向,即使经常在同站乘降的乘客也深有同感。所以在应急疏散过程中,各类客流有可能会选择自己先前采用的路径、闸机或是出入口,这样做更有安全感,更有把握。

从众疏散行为主要是因为乘客受到群体行为“感染”而采取的1种“跟随式”行为。跟从其他人会使疏散乘客具有很强的安全感,自然而然由个体从众行为涌现出群体疏散行为。除此之外,疏散引导人员给人的安全感更强,疏散乘客更容易跟随疏散引导人员进行疏散。

均衡疏散行为是当乘客在疏散过程中,如果面对多于1个选择(不同的疏散出口或是楼梯等)时,会对不同的疏散选择进行权衡,选择疏散速度最快的进行疏散。当某一个疏散出入口或是疏散楼梯聚集较多乘客,而其他疏散设施乘客较少时这种均衡选择行为尤为明显。

从上述分析可以看出,乘客在应急疏散状态下会重点比较不同疏散行为的利弊,进而选择1种最优的行为进行疏散,在疏散过程中还有可能会根据应急场景的变化而动态改变自己的疏散行为选择,直到疏散成功,其变化过程如图1所示。

图1中,疏散信息层、行为决策层、行为执行层模拟了应急条件下行人疏散的全过程。外部的车站环境影响因素为行人疏散提供了重要的外部刺激,但由于篇幅所限,本文重点对行人的内部疏散逻辑(疏散信息层、行为决策层、行为执行层)进行建模分析。

疏散信息层代表了乘客在应急条件下对不同疏散信息进行权衡利弊而判断各类可能的疏散行为选择。主要通过对乘客自身属性、疏散目的信息、当前位置信息、当前疏散行为信息,判断可供选择的疏散行为。

行为决策层首先对选择某一种疏散行为时可能付出的时间或距离代价,或选用某一种疏散行为的效用值大小进行估算。由于元胞自动机模型具有计算速度快、物理意义明确的特点,所以该层主要通过元胞自动机模型来计算或评估不同疏散行为的效用值,进而为行为决策层提供决策依据(疏散时间值或疏散距离值)。

行为执行层代表了乘客在选定某一种疏散行为时的具体执行过程。在实际仿真过程中,考虑到社会力模型能够连续计算行人行进过程中的行为变化,行为仿真更加细腻,而A\*算法能够高效地进行大范围最短寻路计算。因此,可以通过A\*算法与社会力模型的联合来模拟乘客具体的寻路模式及微观行为特征。

上述3层模型的运作流程是:首先,由疏散信息层根据各类应急信息,筛选可供选择的应急疏散行为;行为决策层利用元胞自动机模型计算不同疏散行为的临时目标点和效用值(格子数),并选定其中1种疏散行为,进而确定其临时目标点;最后,行为执行层根据临时目标点开展仿真模拟。因此,行为决策层模型不但提供了不同疏散行为的效用值,还为行为执行层提供了不同疏散行为的临时目标点,是3层模型的关键环节。

### 2.2 疏散信息层模型建模

在应急状态下,在站乘客会根据当前的应急场景信息、自身所处的位置、自身的各种属性来动态判断所应采取的应急疏散行为或改变当前疏散行为,疏散信息层为乘客的各种行为判断提供了必不可少

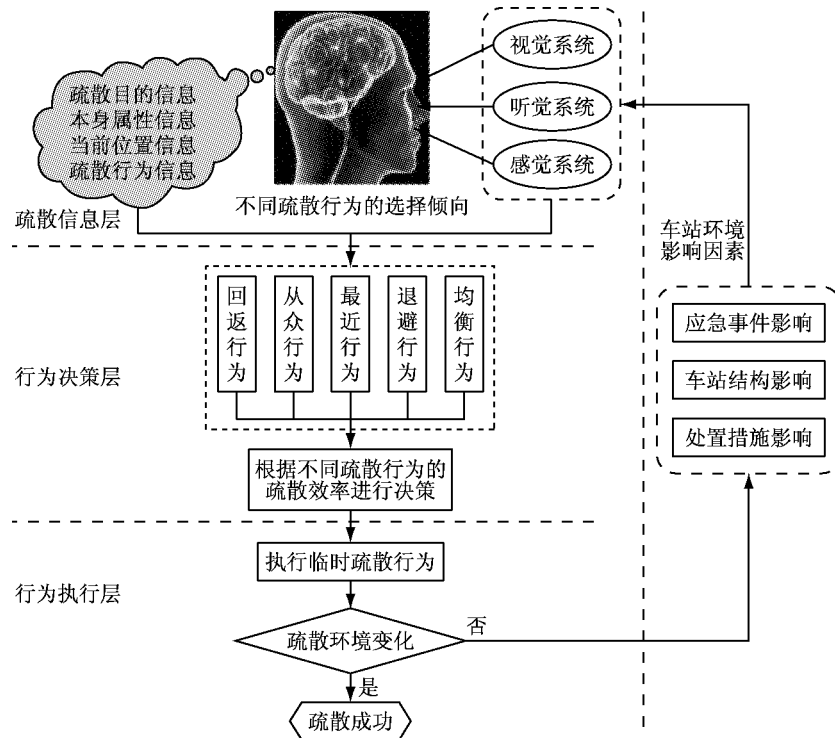


图 1 在站乘客的应急疏散自我决策流程

Fig.1 Self decision-making flow of emergency evacuation at stations

的动态信息<sup>[18-20]</sup>, 这些信息也是车站外部环境因素与疏散乘客产生联系与互动的主要纽带. 综合考虑在站乘客可能接收到的应急疏散信息, 该疏散信息模型可以建模为

$$A_i = \{S_i, E_i, B_i\} \quad (1)$$

式中:  $A_i$  为疏散信息数据集;  $S_i$  为仿真智能体在  $t$  时刻的状态信息集合;  $E_i$  为应急事件的刺激信息集合;  $B_i$  为智能体的应急疏散行为信息集合. 乘客本身状态信息为

$$S_i = \{p, v, c, a, b\} \quad (2)$$

式中:  $p$  为智能体在  $t$  时刻所占据的网格位置;  $v$  为智能体在  $t$  时刻的瞬时速度;  $c$  为智能体的个体属性, 包括强壮、一般、弱小;  $a$  为智能体的移动方向;  $b$  为智能体当前所采取的疏散行为. 应急事件信息为

$$E_i = \{g, f, j\} \quad (3)$$

式中:  $g$  为疏散指示灯等装置以及引导人员对智能体产生的影响;  $f$  为起火及火势扩散事件对智能体的影响;  $j$  为阻塞对智能体的影响. 对城市轨道交通车站行人的不同疏散行为的选择倾向信息建模为

$$B_i = \{\alpha, \beta, \gamma, \delta, \rho\} \quad (4)$$

式中:  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \rho$  分别代表最近疏散行为、退避疏散行为、从众疏散行为、回返疏散行为、均衡疏散行为选择倾向的权重系数.

疏散信息模型  $A_i$  包含了城市轨道交通车站内

部乘客疏散时所需要的 3 类主要信息: 乘客本身状态信息  $S_i$ ; 应急事件信息  $E_i$ ; 疏散行为信息(效用值)  $B_i$ . 综合利用这 3 类信息可以实现城市轨道交通车站乘客的应急疏散决策. 其中, 乘客本身状态信息  $S_i$  和应急事件信息  $E_i$  来源于系统设定或仿真过程输入, 而疏散行为信息(效用值)  $B_i$  则需要通过对不同疏散行为建模并计算其效用值来实现.

### 2.3 行为决策层模型建模

国内外利用元胞自动机原理构建了多种多样的微观行人仿真模型, 并用于仿真执行的具体过程. 参考其建模思路<sup>[21-23]</sup>, 对 5 种疏散行为分别进行建模, 但该建模并非用于仿真执行的具体过程, 而是每隔一定仿真间隔为行为决策层提供上述 5 种疏散行为的疏散效用值及不同疏散行为的临时目标点, 即起到导向的作用. 而具体的连续仿真执行模型则由行为执行层的 A\* 算法与社会力模型来完成.

#### 2.3.1 最近疏散行为

根据最近疏散行为的特点, 最近疏散行为模型可以构建为

$$A_{ij}^{(a)} = \alpha_{ij} P_{ij}^{(a)} = \alpha_{ij} \frac{D_{ij} - d_{ij}}{D_{ij}} \quad (5)$$

式中:  $A_{ij}^{(a)}$  为网格  $(i, j)$  对智能体的最短路径吸引力;  $P_{ij}^{(a)}$  为网格  $(i, j)$  对智能体的距离吸引参数;  $\alpha_{ij}$  为最近疏散行为选择倾向的权重系数;  $d_{ij}$  为位于网格  $(i,$

$j$ ) 的智能体沿最短路径到达最近出口的距离;  $D_{ij}$  为位于网格  $(i, j)$  的智能体沿最短路径到达最远出口的距离。

### 2.3.2 退避疏散行为

根据退避疏散行为的特点,退避疏散行为模型可以构建为

$$A_{ij}^{(\beta)} = \beta_{ij} P_{ij}^{(\beta)} = \beta_{ij} \frac{D_{ij} - d_{ij}}{D_{ij} - e_f} \quad (6)$$

式中:  $A_{ij}^{(\beta)}$  为网格  $(i, j)$  对智能体的退避吸引力;  $\beta_{ij}$  为退避疏散行为选择倾向的权重系数;  $P_{ij}^{(\beta)}$  为网格  $(i, j)$  对智能体退避安全参数;  $e_f$  为网格  $(i, j)$  到突发事件(例如火灾)的位置。

### 2.3.3 从众疏散行为

根据从众疏散行为的特点,从众疏散行为模型可以构建为

$$A_{ij}^{(\gamma)} = \gamma_{ij} P_{ij}^{(\gamma)} = \gamma_{ij} \frac{\sum_{n=1}^N d_a^{(n)}}{\sum_{n=1}^N d_a^{(n)} - \sum_{n=1}^N d_{ij}^{(n)}} \quad (7)$$

式中:  $A_{ij}^{(\gamma)}$  为网格  $(i, j)$  对智能体的从众吸引力;  $\gamma_{ij}$  为从众疏散行为选择倾向的权重系数;  $P_{ij}^{(\gamma)}$  为网格  $(i, j)$  对智能体的从众吸引参数;  $\sum_{n=1}^N d_{ij}^{(n)}$  为网格  $(i, j)$  与仿真地图中所有  $N$  个仿真乘客的距离之和;  $\sum_{n=1}^N d_a^{(n)}$  为仿真智能体与仿真地图中所有  $N$  个仿真乘客的距离之和;  $N$  为仿真地图中所有的仿真智能体个数。

式(7)中,如果  $\sum_{n=1}^N d_a^{(n)} > \sum_{n=1}^N d_{ij}^{(n)}$ ,则表示网格  $(i, j)$  相对于智能体当前的位置来说更具有从众吸引力;如果  $\sum_{n=1}^N d_a^{(n)} \leq \sum_{n=1}^N d_{ij}^{(n)}$ ,则表示网格  $(i, j)$  相对于智能体当前的位置来说没有从众吸引力。

### 2.3.4 回返疏散行为

根据回返疏散行为的特点,回返疏散行为模型可以构建为

$$A_{ij}^{(\delta)} = \delta_{ij} P_{ij}^{(\delta)} = \delta_{ij} \frac{D_{ij} - d_{ij}^{(\delta)}}{D_{ij} - d_{ij}} \quad (8)$$

式中:  $A_{ij}^{(\delta)}$  为网格  $(i, j)$  对智能体的回返吸引力;  $\delta_{ij}$  为回返疏散行为选择倾向的权重系数;  $P_{ij}^{(\delta)}$  为网格  $(i, j)$  对智能体的回返吸引参数;  $d_{ij}^{(\delta)}$  为位于网格  $(i, j)$  的智能体沿最短路径到达其进站口的距离。

### 2.3.5 均衡疏散行为

根据均衡疏散行为的特点,均衡疏散行为模型可以构建为

$$A_{ij}^{(\rho)} = \rho_{ij} P_{ij}^{(\rho)} = \rho_{ij} (\mu_d P_{ij}^{(\mu_d)} + \mu_j P_{ij}^{(\mu_j)}) = \rho_{ij} \left[ \mu_d \frac{D_{ij} - d_{ij}}{D_{ij}} + \mu_j \frac{\sum_{n=1}^N d_a^{(n)}}{\sum_{n=1}^N d_a^{(n)} - \sum_{n=1}^N d_{ij}^{(n)}} \right] \quad (9)$$

式中:  $A_{ij}^{(\rho)}$  为网格  $(i, j)$  对智能体的均衡疏散吸引力;  $\rho_{ij}$  为均衡疏散行为选择倾向的权重系数;  $P_{ij}^{(\rho)}$  为网格  $(i, j)$  对智能体的均衡吸引参数;  $\mu_d$  和  $\mu_j$  分别为距离吸引力和拥堵吸引力的平衡系数,  $\mu_d + \mu_j = 1$ , 且  $\mu_j$  随时间的推移逐渐增大;  $P_{ij}^{(\mu_j)}$  为考虑网格  $(i, j)$  的阻塞参数。

### 2.3.6 行为决策模型

针对前文所述的 5 类疏散行为,仿真乘客如何根据具体的环境、条件等信息来自动选择某一种疏散行为(根据不同疏散行为的效用值),或动态切换不同疏散行为,是仿真系统“上下串联”和开发实现的关键一环。国内外的仿真系统无论其仿真模型对疏散行为描述得如何精细,均没有对仿真乘客(智能体)的行为决策过程进行详细描述与仿真,并不能真正反映应急条件下不断变换的疏散行为。为在仿真环境中真实模拟该动态决策过程,本文从信息权重角度解决应急疏散行为的决策调用问题。根据上文疏散信息层中疏散行为初始选择倾向权重:  $B_i = \{\alpha, \beta, \gamma, \delta, \rho\}$ , 结合 5 种疏散行为的实时效用值,构建城市轨道交通车站行人的疏散行为动态选择模型为

$$p_{ij}^{(x)} = \frac{x P_{ij}^{(x)}}{\alpha P_{ij}^{(\alpha)} + \beta P_{ij}^{(\beta)} + \gamma P_{ij}^{(\gamma)} + \delta P_{ij}^{(\delta)} + \rho P_{ij}^{(\rho)}} \quad (10)$$

式中:  $p_{ij}^{(x)}$  为网格  $(i, j)$  对智能体选用某一疏散行为的概率;  $x$  为行人选择某一疏散行为的初始权重系数,取值为  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \rho$  之一。

### 2.4 行为执行层模型建模

当行为决策层选定某一种具体疏散行为,并确定具体的临时目标点后,具体的仿真驱动则由行为执行层来实现,即驱动仿真智能体到达具体的临时目标点。行为执行层主要由 A\* 算法以及社会力模型构成,其主要思路是通过 A\* 算法来搜索到达某一临时目标点的中长距离的最优路径,然后在实际的执行过程中依靠社会力模型优化调整阶段性或是小范围的具体路径或行为。

A\* 算法是即时战略游戏中经常采用的寻路算法,但是有一个缺点,即不能保证局部冲突之间的合理避让,对向冲突双方(仿真乘客之间)会机械地等待或是拥堵,同向仿真乘客会机械地沿一条线运动。所以在仿真过程中需要利用社会力模型来优化具体

的避让路径,以反映仿真乘客与仿真乘客之间以及仿真乘客与障碍物之间的作用力.

社会力模型<sup>[13]</sup>将客流仿真过程中各个乘客之间以及乘客与环境之间受到的物理力以及心理作用力都抽象为一种“社会”的作用,能够从微观角度模拟仿真乘客的细致运动轨迹,从而扩展了牛顿第二定律.利用社会力模型可以保证在多数仿真乘客采用同一最短路径疏散时进行更细微的避让模拟,使仿真乘客之间以及仿真乘客与障碍物之间的相互作用力更符合实际情况,仿真乘客的疏散路径不至于机械.

综上所述,疏散仿真路径规划分为 3 个步骤,如图 2 所示.疏散仿真的示意图如图 3 所示.

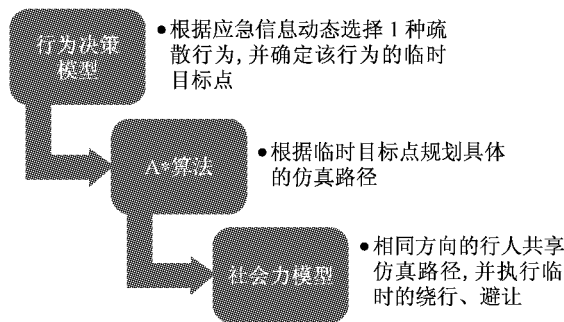


图 2 疏散仿真的路径规划  
Fig.2 Path planning of evacuation simulation

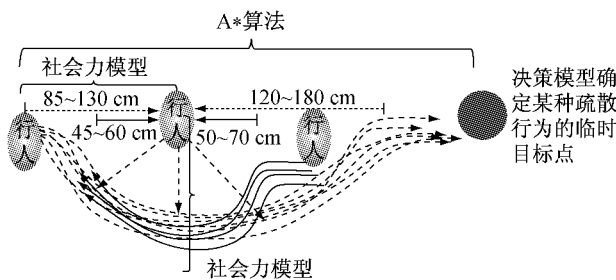


图 3 疏散仿真示意图

Fig.3 Schematic diagram of evacuation simulation

### 3 疏散模型应用实例

#### 3.1 模型样本数据

基于对地铁车站进行的应急问卷调查,得到了乘客在地铁车站应急情况下最可能采取的疏散行为数据,如图 4 所示.

从图 4 可以明显看出:地铁乘客在面临应急疏散时,对疏散行为的第一反应主要包括最近疏散、从众疏散、退避疏散、回返疏散、均衡疏散等 5 种疏散行为.“其他”选项合计约占 6%,其中较为集中的是“冷静”和“不知所措”等内容.这说明本模型所考虑

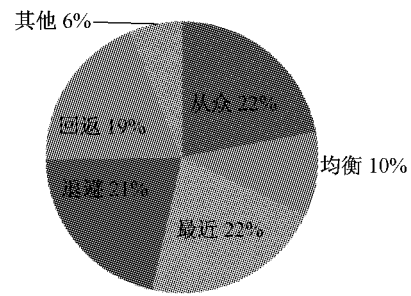


图 4 疏散行为选择倾向示意图

Fig.4 Choice tendency of evacuation behaviors

的 5 种疏散行为与城市轨道交通车站乘客的主流疏散意向比较一致.

问卷中,乘客对应急疏散最关注的影响因素调查结果如图 5 所示.

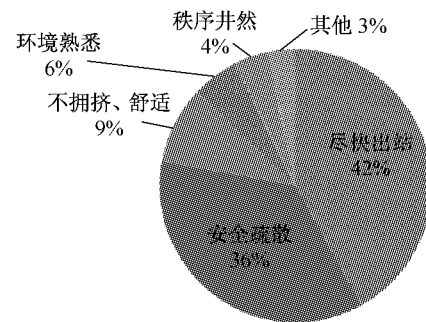


图 5 应急疏散最关注因素示意图

Fig.5 Passengers'concerned factors in emergency evacuation

从图 5 可以看出:乘客在疏散过程中最关注的问题是疏散的速度以及疏散的安全性,这也是影响乘客对不同疏散行为选择的关键因素.本模型中对 5 种疏散行为的效用值通过“疏散速度”(疏散路径所耗费网格数)予以描述,保证了疏散速度因素的基础性作用.

该调查并非单选题,大部分乘客选择了多种疏散行为作为自己可能的疏散选择,选择不同疏散行为个数的比例如图 6 所示.

由图 6 可以看出,选择 2 种疏散行为(34%)和 3 种疏散行为(33%)的比例最高,合计 67%,甚至有相当比例的乘客选择了 5 种疏散行为和 6 种疏散行为.虽然该问卷调查为意向性调查,不能完全反映在真实应急条件下乘客的应急选择,但从一个侧面揭示了城市轨道交通车站乘客的应急疏散绝不是单一的疏散行为,而是多种疏散行为间或切换的复杂过程,这也证明了本文考虑不同疏散行为动态切换的思想是符合实际情况的.本调查仅针对乘客面临应急事件时的自发反应,如果考虑到车站广播、引

导、导向标志对疏散乘客的影响,其选择行为将可能更多。

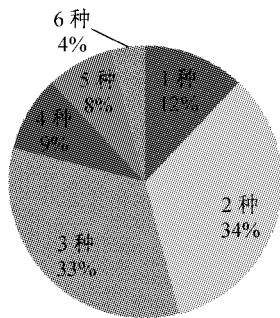


图6 多种疏散行为的变化  
Fig.6 Evacuation behaviors' change

### 3.2 模型仿真参数标定

利用上述数据为本文所构建应急疏散模型标定参数,即

$B_i = \{\alpha, \gamma, \beta, \delta, \rho\} = \{0.22, 0.21, 0.22, 0.19, 0.10\}$   
为保证疏散选择概率归一,上述参数适当调整为:  
 $\{0.24, 0.22, 0.24, 0.20, 0.10\}$ . 将该参数代入  $p_{ij}^{(x)}$

可以在仿真模型中动态选择不同的疏散行为。

利用上述模型,开展疏散仿真试验. 构建如图7所示的站厅仿真模型. 站厅层包括4个出入口:0号出入口、1号出入口、2号出入口、3号出入口;2组出入口闸机:1号出入口闸机、2号出入口闸机;4组出口闸机:1号出口闸机、2号出口闸机、3号出口闸机、4号出口闸机. 站台层、站厅层之间通过6组楼梯相关联:0号楼梯区、1号楼梯区、2号楼梯区、3号楼梯区、4号楼梯区、5号楼梯区. 其中,4号楼梯区为上行进站客流通往站台的单向楼梯;5号楼梯区为下行进站客流通往站台的单向楼梯;0号楼梯区和1号楼梯区为上行出站客流通往站厅的单向自动扶梯;2号楼梯区和3号楼梯区为下行出站客流通往站厅的单向自动扶梯. 站厅长度为118 m,宽度为38 m.

站厅布置驻留人数100人,火灾影响设置于展厅左侧,利用上述决策模型进行仿真,其评价结果通过空间利用分布图来展示,如图8所示,黑色虚线所示的区域为主要通行路径。

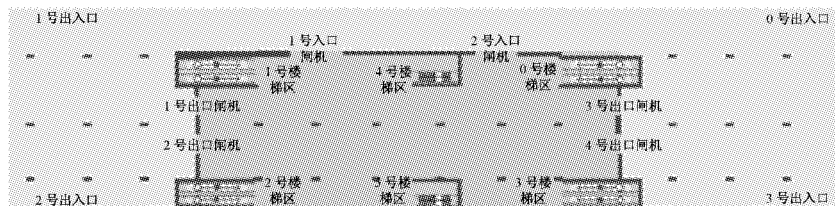


图7 站厅模型布局示意图  
Fig.7 Station hall's layout

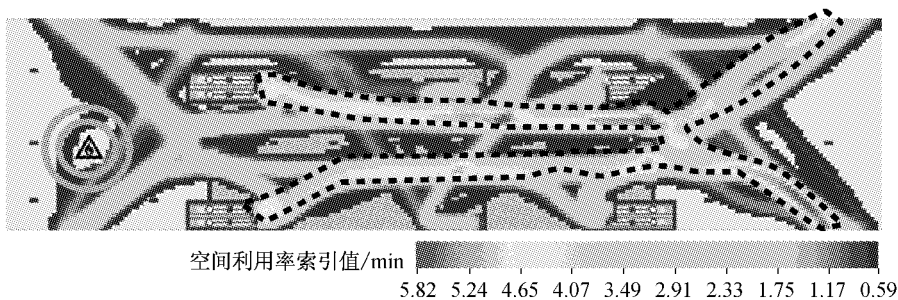


图8 空间利用分布图  
Fig.8 Space using map

### 3.3 仿真结果验证

为保证疏散仿真的可靠性,本结果为10次仿真模拟后的空间利用平均值,每次均设置100个仿真体进行试验. 根据仿真结果,在自发条件下的疏散行为不但种类多样,而且动态变换. 根据模型的输出结果统计分析:每次均有100%的仿真智能体曾经采用过最近疏散行为,平均有63%的仿真智能体采用过退避疏散行为,平均有53%的仿真智能体采用过从

众疏散行为,平均有18%的仿真智能体采用过回返疏散行为,平均有17%的仿真智能体采用过均衡疏散行为. 导致产生仿真统计结果与初始参数设定权重不一致的原因是:本模型用疏散速度作为各疏散行为效用值的评判标准,无形中增大了最近疏散行为被选择的几率. 但这种变化与相同受访者最关注的应急疏散影响因素调查结果是相一致的. 即:最近疏散行为(40%)反映了地铁乘客“尽快疏散”的意愿

(42%);退避疏散行为+从众疏散行为(合计32%)反映了地铁乘客“安全疏散”的意愿(36%);均衡疏散行为(7%)反映了乘客“不拥挤、舒适”的疏散意愿(9%);回返疏散行为(7%)反映了乘客“环境熟悉”的意愿(6%)。所以该模型的仿真结果比较合理地反映了地铁乘客的各类应急疏散意愿。具体对比关系如图9所示。

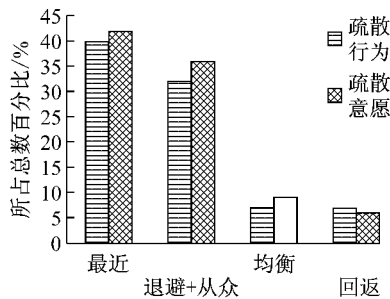


图9 仿真疏散行为与调查疏散意愿对比

Fig.9 Contrast of simulated evacuation behaviors and investigated evacuation intentions

在仿真智能体所选择的疏散行为数目的统计中可以看出:选择1种疏散行为完成疏散的约有10%;选择2种疏散行为完成疏散的约有53%,选择3种疏散行为完成疏散的约有25%,选择4种疏散行为完成疏散的约有7%,选择5种疏散行为完成疏散的约有5%。其统计结果与实际调查比例(选择1种的占12%,选择2种的占34%,选择3种的占33%,选择4种的占9%,选择5种的占8%,选择6种的占4%)略有异同。相同点主要是行为选择数目都集中在2种和3种,其中调查统计结果共计67%(2种和3种合计),仿真统计结果为75%(2种和3种合计),这反映了城市轨道交通车站乘客疏散行为选择数目的一种主流意向。不同的差异主要是仿真统计结果中选择2种疏散行为(53%)远高于选择3种疏散行为(25%),而调查统计结果中选择2种疏散行为(34%)与选择3种疏散行为(33%)的比例较为接近。这主要是因为本次仿真验证仅构建了城市轨道交通车站的站厅模型,并没有考虑更复杂的车站结构(例如站台、换乘等)。具体对比关系如图10所示。

总体而言,该模型的仿真结果与实际调查的趋势较为接近,其差异在可解释范围内,可以为进一步构建完善的城市轨道交通车站应急疏散仿真系统提供关键的乘客应急疏散决策模型的技术支持。

## 4 结语

本文对城市轨道交通车站乘客在应急条件下心

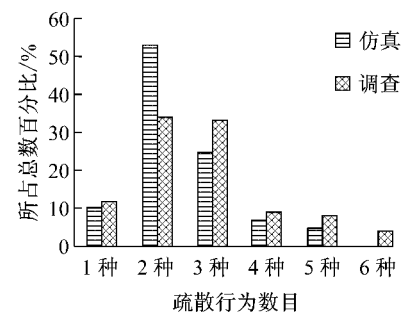


图10 仿真疏散行为与调查疏散行为选择对比  
Fig.10 Behaviors change contrast of evacuation simulation and evacuation investigation

理和行为特征进行了分析研究,并根据其决策、执行过程构建了相应的3层模型:疏散信息层模型、行为决策层模型、行为执行层模型。同时,创造性地融合了元胞自动机模型、A\*算法和社会力模型,保证了疏散行为决策(利用元胞自动机模型)的准确表达与行人微观行为的细腻模拟(利用社会力模型)。最后,通过实际调查数据对其疏散行为选择比例、疏散行为选择数目的可靠性进行了验证。

基于该模型的仿真系统可用于对城市轨道交通车站的规划设计、安全设施布置、应急预案以及应急疏散组织进行仿真评价,进而提供量化的优化建议。此外,通过对不同环境及疏散行为的专项调查、分析,调整部分参数,该模型也可适用于类似环境的行人疏散研究,例如楼宇、场馆等各类室内公共建筑。

## 参考文献:

- [1] 洪玲,高佳,徐瑞华.城市轨道交通网络突发事件影响客流量的计算[J].同济大学学报:自然科学版,2011,39(10):1485.  
HONG Ling, GAO Jia, XU Ruihua. Calculation method of emergency passenger flow in urban rail network [J]. Journal of Tongji University :Natural Science,2011,39(10):1485.
- [2] Galiza R J, Ferreira L. Developing standard pedestrian-equivalent factors passenger car; equivalent approach for dealing with pedestrian diversity[J]. Transportation Research Record, 2012, 2299: 166.
- [3] Kauffmann P, Kikuchi S. Modeling the practical capacity of escalators: a behavioral approach to pedestrian simulation[J]. Transportation Research Record, 2013,2350: 136.
- [4] Heliövaara S, Ehtamo H, Helbing D, et al. Patient and impatient pedestrians in a spatial game for egress congestion [J]. Physical Review E, 2013, 87(1): 012802.
- [5] Henderson L E. The statistics of crowd fluids [J]. Nature, 1971, 229(2):381.
- [6] 温坚,田欢欢,薛郁.考虑次近邻作用的行人交通格子流体力学模型[J].物理学报,2010,59(6):3817.

- WEN Jian, TIAN Huanhuan, XUE Yu. Lattice hydrodynamic model for pedestrian traffic with the next-nearest-neighbor pedestrian [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(6): 3817.
- [7] Muramatsu M, Nagatani T. Jamming transition in two-dimensional pedestrian traffic [J]. *Physica A*, 2000, 275(1): 281.
- [8] 郭细伟. 基于非均匀格子气模型的人群疏散动力学模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- GUO Xiwei. Modeling of pedestrian evacuation dynamics based on the heterogeneous lattice gas model [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [9] Hoogendoorn S, Bovy P H L. Gas-kinetic modeling and simulation of pedestrian flows [J]. *Transportation Research Record*, 2000, 1710(1): 28.
- [10] Gipps P G, Marksjo B. A micro-simulation model for pedestrian flows [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1985, 27(2): 95.
- [11] Blue V J, Adler J L. Cellular automata micro simulation for modeling bi-directional pedestrian walkways [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2001, 35(3): 293.
- [12] Okazaki S, Matsushita S. A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing [C]// *Proceeding of the International Conference on Engineering for Crowd Safety*. London: Elsevier, 1993: 271-280.
- [13] Helbing D, Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics [J]. *Physical Review E*, 1995, 51(5): 4282
- [14] Osaragi T. Modeling of pedestrian behavior and its applications to spatial evaluation [C]// *Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. New York: Association for Computing Machinery, 2004: 836-847.
- [15] 蓝善民. 高铁站应急疏散研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- LAN Shanmin. Research on emergency evacuation for high-speed railway station [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [16] 郭霄. 何理, 石杰红, 等. 地铁不同人群疏散行为特征调查问卷研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2012, 8(4): 183.
- GUO Yu, HE Li, SHI Jiehong, *et al.* Questionnaire research on the evacuation behavior characteristics of different crowds in subway [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2012, 8(4): 183.
- [17] 何理, 钟茂华, 史聪灵, 等. 北京地铁乘客疏散行为特征调查试验分析[C]//2010(沈阳)国际安全科学与技术学术研讨会论文集. 沈阳: 东北大学安全工程研究所, 2010: 1002-1006.
- HE li, ZHONG Maohua, SHI Congling, *et al.* Survy on behavioral features of evacuation of Beijing subway [C]// *Proceeding of 2010 (Shenyang) International Colloquium on Safety Science and Technology*. Shenyang: Northeast University Safety Engineering Institute, 2010: 1002-1006.
- [18] XU Li, LO Siu-ming, GE Hongxia. The Korteweg-de Vries equation for the bidirectional pedestrian flow model considering the next-nearest-neighbor effect [J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(12): 120508.
- [19] 徐瑞华, 洪玲, 高佳, 等. 城市轨道交通车站应急疏散的乘客行为及评价技术研究[R]. 上海: 同济大学, 2011.
- XU Ruihua, HONG Ling, GAO Jia, *et al.* Passengers behavior and evaluation research on emergency evacuation of urban rail transit station [R]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [20] 房志明. 考虑火灾影响的人员疏散过程模型与实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- FANG Zhiming. Modelling and experimental study of evacuation process considering effect of fire [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
- [21] 张立红, 王策源, 杨光, 等. 基于行人疏散模型的建筑出口设计优化研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2014, 10(10): 100.
- ZHANG Lihong, WANG Ceyuan, YANG Guang, *et al.* Study on optimization of building exits design based on pedestrian evacuation model [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2014, 10(10): 100.
- [22] 崔喜红, 李强, 陈晋, 等. 基于多智能体技术的公共场所人员疏散模型研究[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(4): 1006.
- CUI Xihong, LI Qiang, CHEN Jin, *et al.* Study on MA-based model of occupant evacuation in public facility [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(4): 1006.
- [23] 陈海涛, 杨鹏, 于润沧. 一种考虑斜向运动参量的行人疏散模型研究[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(3): 156.
- CHEN Haitao, YANG Peng, YU Runcang. A simulated pedestrians' evacuation model with a diagonal movement parameter [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(3): 156.