

10-18-2022

## Adaptive Crowd Evacuation Simulation Model Based on Bounded Rationality Constraints

Liqiang Zhao

*1.College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;; zhaolq@mail.buct.edu.cn*

Mengqian Guo

*1.College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;*

Shuixiong Tang

*2.Beijing Yilu Rail Transit Engineering Co. , Ltd, Beijing 101200, China;*

Jinjin Tang

*3.School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;; jjtang@bjtu.edu.cn*

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.

---

## Adaptive Crowd Evacuation Simulation Model Based on Bounded Rationality Constraints

### Abstract

**Abstract:** To effectively improve the accuracy of evacuation simulation of a crowded environment, an adaptive crowd evacuation simulation model based on social force model and bounded rationality constraints is proposed. *The desired direction and desired speed of the self-driving force that affects the pedestrian movement in the traditional social force model is improved. The adaptive calculation is used in the optimization of direction and speed of pedestrian in an obstacle avoidance situation. The rational route decision mechanism is proposed to describe the route selection behavior of pedestrians in a congested state more accurately.* The results show that the proposed model is feasible and effective, in which the crowd evacuation process is more consistent with the real situation, and the bounded rationality constraints of pedestrians shows advantages in the high crowd density environment.

### Keywords

crowd evacuation simulation, social force model, adaptive calculation, bounded rationality constraints, path selection

### Recommended Citation

Liqiang Zhao, Mengqian Guo, Shuixiong Tang, Jinjin Tang. Adaptive Crowd Evacuation Simulation Model Based on Bounded Rationality Constraints[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(10): 2162-2170.

# 基于有限理性约束的自适应人群疏散仿真模型

赵利强<sup>1</sup>, 郭梦倩<sup>1</sup>, 唐水雄<sup>2</sup>, 唐金金<sup>3\*</sup>

(1. 北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029; 2. 北京驿禄轨道交通工程有限公司, 北京 101200;  
3. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

**摘要:** 为有效提高人群拥堵时的疏散模拟精度, 基于社会力模型和有限理性约束, 提出一种自适应人群疏散仿真模型。该模型改进了传统社会力模型中行人自驱动力的期望方向和期望速度, 对避障情况下行人的最优运动方向和速度进行自适应计算, 同时引入有限理性路径决策机制, 更为准确地描述行人在拥堵状态下的路径选择行为。结果表明: 所提出的模型是可行有效的, 行人的有限理性约束在人群密度较大的时候表现出疏散优势, 更加符合真实情况下的人群疏散过程。

**关键词:** 人群疏散仿真; 社会力模型; 自适应计算; 有限理性约束; 路径选择

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2022)10-2162-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0472

## Adaptive Crowd Evacuation Simulation Model Based on Bounded Rationality Constraints

Zhao Liqiang<sup>1</sup>, Guo Mengqian<sup>1</sup>, Tang Shuixiong<sup>2</sup>, Tang Jinjin<sup>3\*</sup>

(1. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;  
2. Beijing Yilu Rail Transit Engineering Co., Ltd, Beijing 101200, China;  
3. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** To effectively improve the accuracy of evacuation simulation of a crowded environment, an adaptive crowd evacuation simulation model based on social force model and bounded rationality constraints is proposed. *The desired direction and desired speed of the self-driving force that affects the pedestrian movement in the traditional social force model is improved. The adaptive calculation is used in the optimization of direction and speed of pedestrian in an obstacle avoidance situation. The rational route decision mechanism is proposed to describe the route selection behavior of pedestrians in a congested state more accurately.* The results show that the proposed model is feasible and effective, in which the crowd evacuation process is more consistent with the real situation, and the bounded rationality constraints of pedestrians shows advantages in the high crowd density environment.

**Keywords:** crowd evacuation simulation; social force model; adaptive calculation; bounded rationality constraints; path selection

## 引言

在人群密集、环境相对封闭的公共场所中, 一旦发生突发事件需对人员进行疏散时, 有限的空间和高密度人群的流动, 极易引发安全事故<sup>[1]</sup>。

因此, 研究行人在疏散过程中的行为特征, 引导人群快速有效疏散, 是目前公共安全领域的热点问题<sup>[2]</sup>。

近年来, 许多学者对人群疏散行为开展了广泛的研究和深入的探讨。目前, 基于个体行为模

收稿日期: 2021-05-24 修回日期: 2021-09-05

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1600200)

第一作者: 赵利强(1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为交通客流仿真。E-mail: zhaolq@mail.buct.edu.cn

通讯作者: 唐金金(1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能运输组织。E-mail: jjtang@bjtu.edu.cn

拟人群疏散的常用模型有元胞自动机模型(cellular automata model, CA)<sup>[3]</sup>、格子气模型(lattice gas model, LG)<sup>[4]</sup>、社会力模型(social force model, SF)<sup>[5]</sup>等。CA模型在制定行人移动策略时, 没有考虑到行人与行人之间的交互<sup>[6]</sup>, 而行人流的交互特性对于高密度人群的疏散影响不可忽略; LG模型提高了对粒子位置判断的准确度<sup>[7]</sup>, 但是LG模型与CA模型在本质上都无法解释行人交通行为本质原因<sup>[8]</sup>, 因此它们的疏散模拟精度存在一定的局限性; SF模型解释了行人交通行为源于其自身的主观驱动和意愿, 在场景复杂、人群拥挤的情况下可充分体现环境因素对行人行走方式的影响, 因而得到了广泛的应用, 一直有学者对其进行改进和发展<sup>[9-11]</sup>。

基于社会力模型进行人群疏散仿真时, 行人在拥挤状态下不可避免受到周围行人或障碍物的作用力而滞留原地, 大大延长了疏散时间。为了缓解行人的拥堵情况, Moussaïd等<sup>[12]</sup>运用社会力模型量化行人间的相互作用, 提出了行人调整移动方向以避免碰撞的自组织行为机制, 对于分析人群疏散过程中行人表现出的行为特征具有一定的借鉴意义; Qu等<sup>[13]</sup>基于行人面对火灾场景的微观心理特征引入了绕行算法, 但是所获得的绕行方向只是对危险源几何理论的计算, 没有真正将行人的实际心理运用到绕行方法的求解中; Wagoum等<sup>[14]</sup>引入行人的观察心理, 将行人对环境观察做出的决策运用到路径建模之中, 对于人群疏散的路径选择具有参考价值。解决群体疏散时的拥堵问题, 不仅要调整行人局部运动方向尽快走出拥堵区<sup>[15]</sup>, 还要充分考虑行人在拥堵状态下的心理作用对其路径决策的影响<sup>[16]</sup>。

基于上述分析, 本文在传统社会力模型基础上, 通过自适应计算改进模型中自驱动力的期望方向和期望速度, 并引入有限理性疏散路径决策机制, 提出基于有限理性约束的自适应人群疏散仿真模型, 利用该模型进行仿真实验, 探究行人的有限理性心理因素对人群疏散的影响, 真实有效地反映人群疏散过程。

## 1 自适应社会力模型

### 1.1 自适应期望方向

Moussaïd等提出, 行人在运动过程中依据视觉信息动态选择最佳行走方向<sup>[17]</sup>。当行人的目的地方向上存在障碍物时, 行人与障碍物的碰撞会对行人的运动方向选择产生影响, 因此基于自适应规则考虑碰撞对路径选择的影响, 引入路径偏差, 获得自适应期望方向。

图1为自适应计算示意图。假设行人*i*的质量为 $m_i$ , 用半径 $r_i = m_i/320$ 的圆表示行人*i*, 其舒适行走速度为 $v_i^0$ , 视野基准线为 $H_i$ , 视野波动范围为 $[-\phi, \phi]$ , 视距为 $d_{\max}$ , 阴影处行人为视线范围外的无效行人, 忽略其对行人*i*的避障影响。

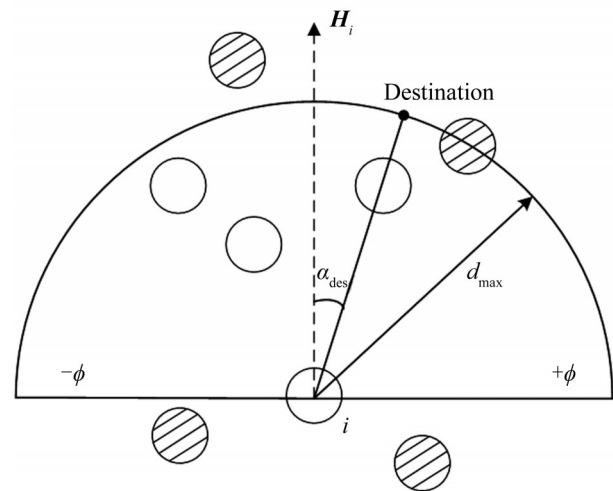


图1 自适应计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of adaptive calculation

在此, 引入路径偏差 $d_1$ 用于改进行人*i*与目的地之间的距离:

$$d(\alpha) = d_{\max}^2 + f(\alpha)^2 - 2d_{\max}f(\alpha)\cos(\alpha_{\text{des}} - \alpha) + d_1 \quad (1)$$

$$d_1 = \begin{cases} d_{\max} - f(\alpha), & f(\alpha) < d_{\max} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\alpha_{\text{des}}$ 为行人*i*的目的地方向与视野基准线之间的夹角;  $f(\alpha)$ 为行人*i*与障碍物的首次碰撞距离。

在视野范围内, 计算行人*i*的自适应期望方向为

$$\alpha^* = \arg \min \{ d_i(\alpha) \} \quad (3)$$

由此得到经路径偏差修正的自适应期望方向, 作为社会力模型中行人自驱动力的运动方向。

## 1.2 自适应期望速度

考虑到行人与障碍物或其他行人发生碰撞时, 其自身运动速度的变化对其行为产生重要影响。因此, 为了避免发生碰撞, 在*t*时刻行人的自适应期望运动速度大小为

$$\mathbf{v}_{\text{des}}(t) = \min \{ v_{\text{max}}^0, d_h/\tau \} \quad (4)$$

式中:  $v_{\text{max}}^0$  为行人*i*运动的最大速度;  $d_h$  为*a*方向上与行人*i*距离最近的障碍物或其他行人的距离;  $\tau$  为行人*i*在发生意外碰撞时改变其运动状态所需要的反应时间。

由此可计算出行人*i*在*t*时刻的加速度为

$$d\mathbf{v}_i/dt = (\mathbf{v}_{\text{des}} - \mathbf{v}_i)/\tau \quad (5)$$

式中:  $\|\mathbf{v}_{\text{des}}\| = v_{\text{des}}$ ;  $\mathbf{v}_i$  为行人*i*在*t*时刻的实际速率。

改进后的行人*i*的自驱动力为

$$\mathbf{f}_{im}(t) = m_i \frac{\mathbf{v}_{\text{des}} - \mathbf{v}_i}{\tau} \quad (6)$$

在空间有限但人群密度过大的情况下, 行人之间难免发生碰撞。此时, 行人*i*受到行人*j*身体碰撞的作用力为

$$\mathbf{f}_{ij} = kg(r_i + r_j - d_{ij})\mathbf{n}_{ij} \quad (7)$$

$$g(r_i + r_j - d_{ij}) = \begin{cases} r_i + r_j - d_{ij}, & r_i + r_j > d_{ij} \\ 0, & r_i + r_j \leq d_{ij} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $k$  为身体力弹性系数;  $r_i$  和  $r_j$  分别为行人*i*和行人*j*的半径;  $d_{ij}$  为行人*i*和行人*j*之间的中心距离;  $\mathbf{n}_{ij}$  为行人*j*对行人*i*的排斥力方向。

同理, 行人受到周围环境中障碍物的排斥力为

$$\mathbf{f}_{iW} = kg(r_i - d_{iW})\mathbf{n}_{iW} \quad (9)$$

式中:  $d_{iW}$  为障碍物*W*与行人*i*之间的距离;  $\mathbf{n}_{iW}$  为垂直于障碍物*W*的方向。

至此, 行人*i*在*t*时刻受到的自适应社会力为

$$\mathbf{f}_i(t) = m_i(\mathbf{v}_{\text{des}} - \mathbf{v}_i)/\tau + \sum_j \mathbf{f}_{ij} + \sum_W \mathbf{f}_{iW} \quad (10)$$

与传统社会力模型相比, 自适应社会力模型改进了行人自驱动力的期望运动方向和期望运动速度, 充分考虑了行人目的地方向上存在障碍物导致运动方向改变的情况, 并将传统模型中的期望速度由固定值改为自适应可变值, 该模型可用于解决环境相对封闭情况下的人群疏散问题。

## 2 有限理性约束的人群疏散方法

### 2.1 有限理性路径决策机制

当人群密度过大时, 传统社会力模型经常使行人处于停滞不前的状态, 行人无法根据拥堵情况调整自己的运动方向以尽快走出拥堵区。自适应社会力模型改进了影响行人自驱动力的期望方向和期望速度, 在局部范围内使行人获得运动方向的最优解。但是, 当疏散环境过于拥堵时, 局部调整无法满足疏散需求, 这是因为社会力模型本身缺乏对行人的理性局限的思考, 没有考虑行人无法承受拥堵状况从而改变疏散路线的可能性, 而是将行人看作完全理性人, 使大量行人拥堵在疏散出口位置, 延长疏散时间。

已有疏散事件表明<sup>[18]</sup>, 行人在决策惯性的影响下倾向于选择固有疏散出口并花费时间成本等待疏散, 但当另一条路径的效用大于初始路径的效用且达到行人的满意标准时, 行人会选择转换疏散路径, 因此行人的有限理性决策选择的是满意方案而不是最优方案。

由于行人流符合一般交通流的变化规律, 因此, 这里引入道路交通阻抗函数(bureau of public roads, BPR)<sup>[19]</sup>描述*t*时刻行人通过疏散出口的通行时间:

$$t_p = t_0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{Q}{C} \right)^\beta \right] \quad (11)$$

式中:  $t_0$  为行人自由通过疏散出口的通行时间;  $Q$  为出口区域的人流量;  $C$  为出口通行能力;  $\alpha, \beta$  为待标定参数, 此处取经典标定  $\alpha = 0.15, \beta = 4.0$ 。



BPR函数将通行时间看作流量和出口通行能力比值的非线性增长函数, 出口通行时间主要取决于流量的增加, 适用于自发连续流交通行为中通行时间的预估, 因此能够有效反映行人疏散时自发集结在出口区域造成拥堵的现象。

当疏散出口处行人密度过大导致出口拥堵时, 通行时间 $t_p$ 急剧变大, 当通行时间超过行人的理性等待时间阈值时, 行人会选择另一条疏散路径以达到满意决策。为了描述行人在 $t$ 时刻更换路径的可能性, 在此对通行时间 $t_p$ 进行归一化修正:

$$t'_p = t_0 \frac{\alpha(Q/C)^\beta}{1 + \alpha(Q/C)^\beta} \quad (12)$$

在实际决策过程中, 出口区域越拥堵, 则通行时间越长, 新的疏散路径越容易满足行人的满意标准, 行人选择更换路径的可能性越高。因此, 行人对路径的有限理性选择可采用正态分布函数来描述。行人在 $t$ 时刻选择新路径的概率为

$$P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t'_p} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (13)$$

式中:  $\mu$ 为行人的有限理性强度;  $\sigma$ 为有限理性标准差。

分析式(11)~(13)可知, 随着 $Q$ 增大, 通行时间 $t_p$ 呈指数形式上涨, 经归一化修正后,  $t'_p$ 的增长速度变慢, 且其取值范围为 $[0, 1)$ ,  $P(t)$ 的增长速度变慢, 其值趋于1。当有限理性强度 $\mu$ 增大时,  $P(t)$ 变小, 当 $\mu \rightarrow +\infty$ 时,  $P(t) \rightarrow 0$ 。由于 $\mu \rightarrow -\infty$ 时,  $P(t) \rightarrow 1$ , 行人选择新路径的概率接近100%, 不符合实际情况, 因此这里只考虑 $\mu \in (0, 1)$ 的情况。

引入有限理性路径决策机制, 充分考虑了行人面对拥堵状态时的心理承受能力, 在全局范围内调整行人的疏散路径, 更为真实地模拟人群疏散过程。引入BPR函数计算行人在拥堵区域的通行时间, 符合行人流的交通特性。

## 2.2 算法实现

根据上述描述, 给出基于有限理性约束的自适应社会力模型求解人群疏散的改进方法:

step 1: 初始化模型参数, 设置行人质量 $m_i$ 、期望舒适走行速度 $v_i^0$ , 视角范围 $[-\varphi^0, \varphi^0]$ , 视距 $d_{\max}$ 等行人的静态属性, 设置行人的首次疏散口位置和目的地位置。

step 2: 判断当前行人视野范围内是否有其他行人, 若有, 则计算当前行人受到其他行人身体碰撞的作用力, 计算当前行人与其他行人之间的最小直线距离 $d_{\text{side}}$ ; 若没有, 则取 $d_{\max}$ 作为行人的首次碰撞距离 $f(\alpha)$ 。

step 3: 判断当前行人视野范围内是否有其他墙壁, 若有, 则计算行人受到的墙壁排斥力, 计算行人到周围墙壁之间的最小距离 $d_{\text{wall}}$ , 在此保证行人到墙壁的垂足在墙壁范围内; 若没有, 则取 $d_{\max}$ 作为行人的首次碰撞距离 $f(\alpha)$ 。

step 4: 比较 $d_{\max}$ 、 $d_{\text{side}}$ 、 $d_{\text{wall}}$ , 选取三者中的最小值作为 $f(\alpha)$ 。

step 5: 在行人的视野范围内, 设定迭代步长, 重复执行step 2~4, 计算行人在各个方向 $\alpha$ 上的最小首次碰撞距离, 从而得到自适应期望方向 $\alpha^*$ 。

step 6: 根据最小首次碰撞距离, 计算出行人自适应期望运动速度及加速度。

step 7: 在行人受到其他行人身体碰撞产生的作用力及墙壁的排斥力影响下, 更新行人运动的加速度。

step 8: 根据行人的当前位置、速度、加速度, 确定行人下一步移动位置。

step 9: 重复执行step 8, 当行人移动到疏散出口区域时, 根据式(11)计算行人在出口处的通行时间, 并判断行人是否选择新路径。若行人选择新的疏散路径, 则执行step 10, 否则继续执行step 8直到行人运动到疏散出口, 算法结束。

step 10: 更新行人在新路径下的首次疏散口位置, 重新执行step 2~8, 直到行人运动到疏散出口, 算法结束。

有限理性约束的自适应仿真模型算法流程图如图2所示。

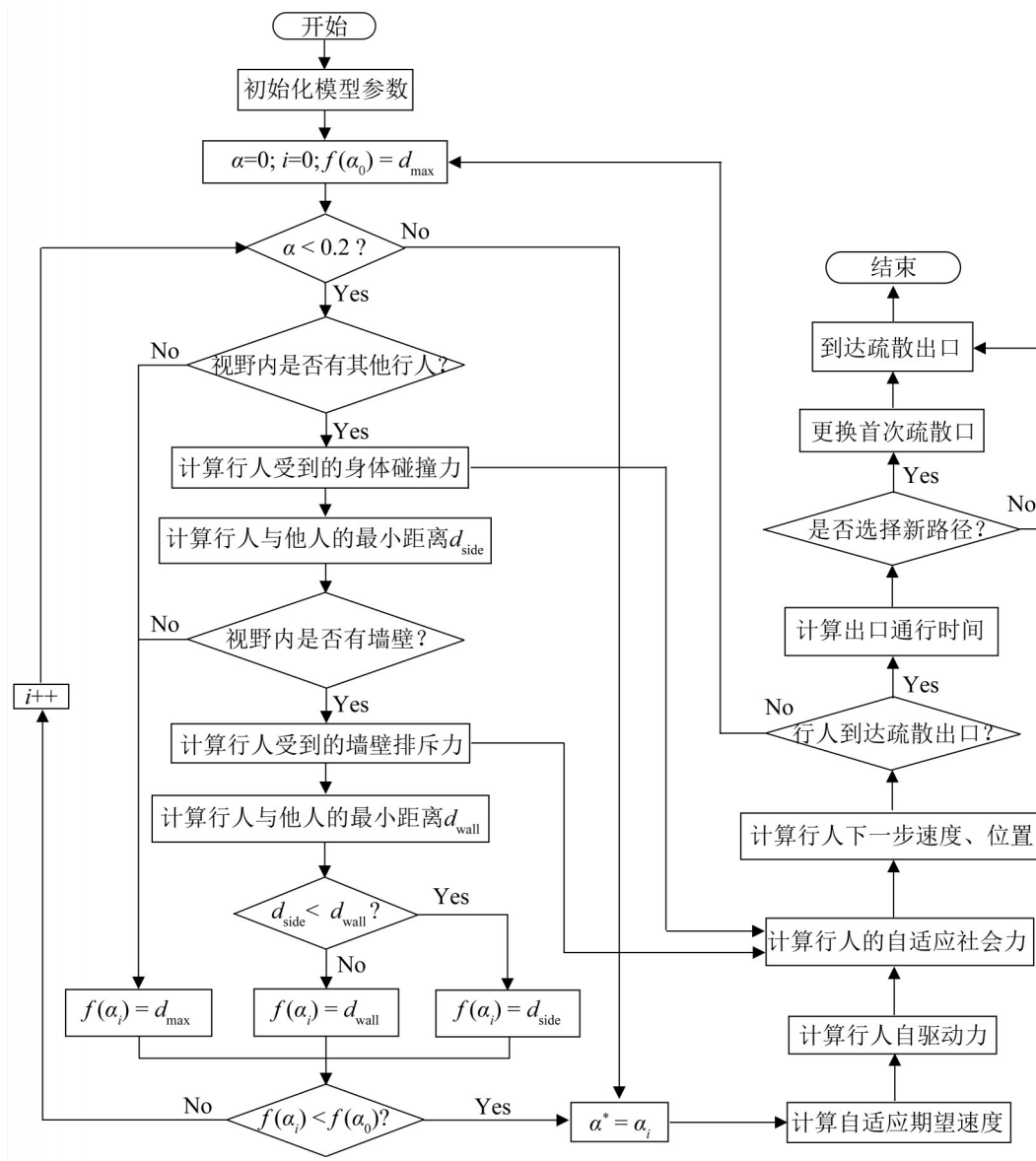


图 2 有限理性约束的自适应仿真模型算法流程图

Fig. 2 Calculation flow chart of adaptive simulation algorithm based on bounded rationality constraints

### 3 仿真实验

#### 3.1 仿真场景及参数设置

为了检验基于有限理性约束的自适应人群疏散仿真模型，以 Java 作为人群疏散仿真实验平台，采用如图 3 所示的疏散场景，对行人疏散过程中所表现出的有限理性路径决策机制进行仿真模拟。所搭建的场景中，外层大厅疏散尺寸大小为 54 m×46 m，大厅左下方是一个宽 5 m 的疏散出口

$E_1$ ，内层房间疏散尺寸大小为 32 m×30 m，房间左侧为通往大厅的宽 4 m 的出口  $R_1$ ，右侧下方是一个宽 4 m 的房间备用出口  $R_2$ 。

将建立的人群疏散模型应用于仿真场景之中，设置行人质量  $m_i$  为 70 kg，舒适行走速度  $v_i^0$  为 1.4 m/s，视距  $d_{max}$  为 40 m，视野波动范围为  $[-0.6, 0.6]$ rad，反应时间  $\tau$  为 0.5 s，身体力弹性系数  $k$  为  $3\ 000\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

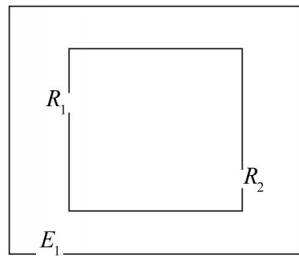


图3 人群疏散场景示意图  
Fig. 3 Scenario of crowd evacuation

### 3.2 仿真结果分析

在初始状态下,  $N$ 个行人随机分布在房间的各个位置。由于房间出口 $R_1$ 距大厅疏散出口 $E_1$ 更近, 因此假定行人在完全理性思考下选择经出口 $R_1$ 到达出口 $E_1$ 。考虑到行人对于疏散路径的选择受到自身理性局限的影响, 当 $R_1$ 处人群密度过大导致拥堵时, 行人首先倾向于等待当前疏散出口, 当等待时间成本超过理性范围且新疏散路径达到满意决策时,  $R_1$ 处的行人会重新规划疏散方案, 选择经 $R_2$ 到达 $E_1$ 的疏散路线。图4和图5分别给出了基于有限理性约束的自适应社会力模型和文献[20]中的传统社会力模型在相同场景下的人群疏散仿真过程。与传统社会力模型相比, 在基于有限理性约束的自适应社会力模型中, 疏散初期人群聚集在出口 $R_1$ 处, 但部分行人为了避免拥堵和浪费过多时间成本, 最终放弃等待, 转向出口 $R_2$ , 同时减小了 $R_1$ 处的疏散压力。而传统社会力模型中, 行人根据预设的疏散路线进行自驱运动, 造成大量行人拥堵在出口 $R_1$ 处停滞不前, 延长了疏散时间。改进后的模型中, 虽然更换新的疏散路径增加了个别行人的行走距离, 但却减小了总体疏散时间, 且符合实际人群疏散过程中行人在超越自身理性范围后改变行走路径的现象。

为了验证本模型的有效性, 设定室内房间的面积为 $100\text{ m}^2$ , 改变室内房间的疏散总人数, 探究不同有限理性强度下人群密度 $\rho$ 对疏散时间的影响如图6所示。当人群密度较小时, 完全理性状态下的疏散时间更短。随着人群密度的增大,

有限理性约束逐渐发挥优势, 当 $\rho \geq 0.75$ 时, 根据图3所搭建的人群疏散场景,  $R_1$ 处的人群冲突较为严重, 根据有限理性路径决策机制, 部分行人在等待 $R_1$ 处拥堵消散的过程中, 不断权衡 $R_1$ 和 $R_2$ 路径的优劣, 在 $R_2$ 达到自身满意标准后更换路径决策, 同时减小了 $R_1$ 处的人群拥堵压力, 缩短了总体疏散时间。因此, 当人群密度较大时, 有限理性模型表现出的疏散效率更高。

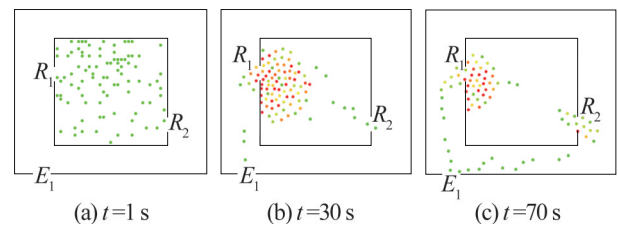


图4 基于有限理性约束的自适应社会力模型疏散仿真结果

Fig. 4 Evacuation simulation of adaptive SFM based on bounded rationality constraints

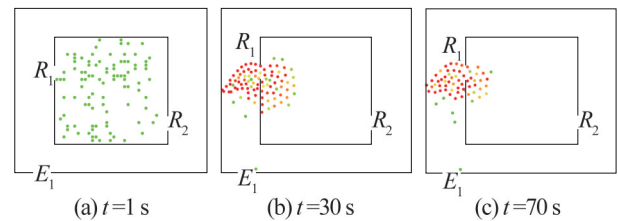


图5 传统社会力模型疏散仿真结果

Fig. 5 Evacuation simulation of traditional SFM

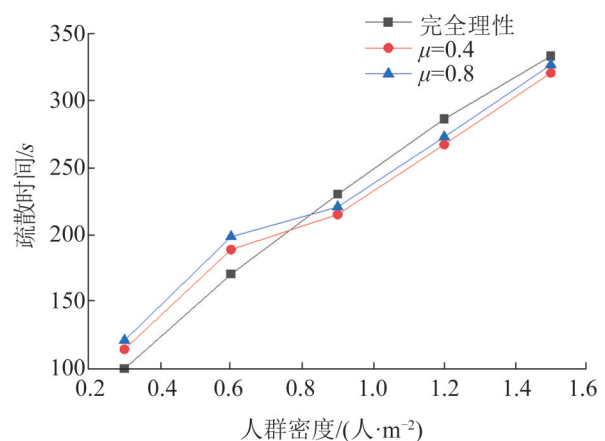


图6 不同有限理性强度下人群密度 $\rho$ 对疏散时间的影响  
Fig. 6 Effect of crowd density  $\rho$  on evacuation time under different strengths of bounded rationality



将自适应社会力模型与传统社会力模型进行对比分析，并对 2 种模型分别引入有限理性约束，探究相同时间下各模型的累计疏散人数。设定疏散总人数为 100 人，其他条件相同的情况下，重复做 10 组实验取平均值，每隔 35 s 记录一次累计疏散人数如图 7 所示。可以看出，在相同时间内，自适应社会力模型比传统模型的累计疏散人数更多，在疏散初期表现出 5 人的疏散优势，随着疏散时间的延长，疏散人数差值不断增大，在 210 s 时，自适应社会力模型疏散人数接近 90 人，而传统模型疏散人数不足 70 人。引入有限理性约束后，当疏散时间达到 160 s 之后，有限理性约束发挥出一定的疏散优势。在 210 s 时，引入有限理性约束前后，传统模型疏散人数由 70 人上升到 75 人，自适应模型的疏散人数由 90 人上升到近 100 人。与传统模型相比，基于有限理性约束的自适应社会力模型疏散人数在 175 s 和 210 s 时分别提高了 28.1% 和 40.3%，这是由于自适应模型改进了传统模型仿真时行人停滞不前的状态，相同时间下疏散人数更多，且引入有限理性约束后，在疏散后期体现了部分行人突破理性极限，放弃等待后改变行走路线从而提高总体疏散人数的现象，呈现了有限理性约束对行人疏散时间的影响。

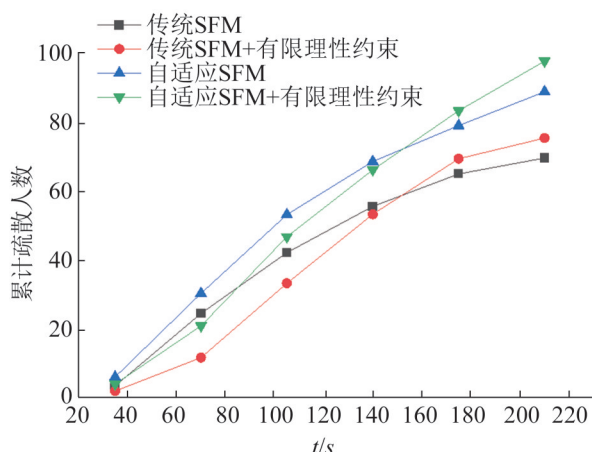


图 7 累计疏散人数随时间的变化情况  
Fig. 7 Relationship between time and cumulative number of evacuated

保持疏散总人数为 100 人，图 8 展示了不同有限理性强度  $\mu$  对  $E_1$  平均疏散时间及  $R_2$  疏散人数的影响。可以看出，随着  $\mu$  值的不断增大， $E_1$  平均疏散时间先减小后增加，且在  $\mu = 0.4$  时取得最小值。 $R_2$  疏散人数随着  $\mu$  值的不断增大而减少，这是因为  $\mu$  越大，行人选择出口  $R_2$  的概率越小。当房间各出口分别承担的疏散人数达到一定平衡状态时，出口  $E_1$  的平均疏散时间最优，此时行人在有限理性约束下做出的路径选择为人群疏散的满意方案。

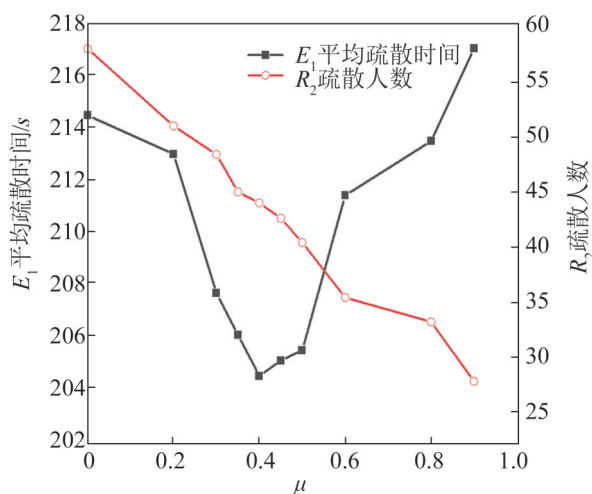


图 8  $\mu$  值对  $E_1$  平均疏散时间及  $R_2$  疏散人数的影响  
Fig. 8 Effect of  $\mu$  value on  $E_1$  average evacuation time and  $R_2$  evacuation number

## 4 结论

本文提出了基于有限理性约束的自适应人群疏散仿真模型，该模型改进了传统社会力模型中行人自驱动力，计算获得自适应期望方向和自适应期望速度，并引入有限理性路径决策机制，充分考虑行人有限理性心理因素对人群疏散的影响。设计自适应仿真模型算法，通过仿真实验，对比得出结论：

(1) 相同疏散时间下，自适应社会力模型较传统模型的疏散人数更多，在疏散后期有限理性约束下的自适应社会力模型疏散人数可提高 28% 以上，呈现了行人的有限理性心理对人群疏散时间

的影响;

(2) 随着有限理性强度的增大, 疏散时间呈现出先减小后增大的趋势, 当不同路径承载人数达到合理比例时, 疏散时间达到最优。

本文提出的自适应人群疏散仿真模型在人群密度较大时, 可充分表现出有限理性约束的优势。该模型更适合客流量大、人群拥堵的场合, 对于轨道交通大客流疏导有一定的参考价值。由于人群疏散是一个极为复杂的过程, 还有许多因素会对人群疏散结果产生影响, 如特定疏散场景、人员构成等。下一步研究将针对这几个方面对模型继续改进。

### 参考文献:

- [1] Ding H, Zhou J, Zheng X, et al. Perimeter Control for Congested Areas of a Large-Scale Traffic Network: A Method Against State Degradation Risk[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*(S0968-090X), 2020, 112: 28-45.
- [2] 许慧, 田铖, 王永. 轨道交通换乘站密集客流应急疏散仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(3): 492-500.  
Xu Hui, Tian Cheng, Wang Yong. Emergency Evacuation Simulation for Dense Passenger Flow in a Rail Transit Transfer Station[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(3): 492-500.
- [3] Blue V, Adler J. Emergent Fundamental Pedestrian Flows from Cellular Automata Microsimulation[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(S0191-2615), 1998, 1644(1): 29-36.
- [4] Guo X, Chen J, Zheng Y, et al. A Heterogeneous Lattice Gas Model for Simulating Pedestrian Evacuation[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* (S0378-4371), 2012, 391(3): 582-592.
- [5] Zeng W, Chen P, Nakamura H, et al. Application of Social Force Model to Pedestrian Behavior Analysis at Signalized Crosswalk[J]. *Transportation Research Part C* (S0968-090X), 2014, 40: 143-159.
- [6] Zheng Y, Li X, Jia B, et al. Simulation of Pedestrians' Evacuation Dynamics with Underground Flood Spreading based on Cellular Automaton[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*(S1569-190X), 2019, 94: 149-161.
- [7] Chen X, Treiber M, Kanagaraj V, et al. Social Force Models for Pedestrian Traffic-State of the Art[J]. *Transport Reviews*(S0144-1647), 2018, 38(5): 625-653.
- [8] Zhou X, Hu J, Ji X, et al. Cellular Automaton Simulation of Pedestrian Flow Considering Vision and Multi-Velocity[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*(S0378-4371), 2019, 514: 982-992.
- [9] Han Y, Liu H. Modified Social Force Model Based on Information Transmission Toward Crowd Evacuation Simulation[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*(S0378-4371), 2017, 469: 499-509.
- [10] 张蕊, 杨静, 杨晨威, 等. 考虑结伴行为的地铁通道行人仿真建模研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(5): 163-168.  
Zhang Rui, Yang Jing, Yang Chenwei, et al. Pedestrian Simulation Modeling of Subway Corridor Considering Group Behavior[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19(5): 163-168.
- [11] 李俊. 结合最短路径改进的社会力人群疏散仿真模型[J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(8): 264-270.  
Li Jun. Improved Social Force Crowd Evacuation Simulation Model Combined with Shortest Path[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(8): 264-270.
- [12] Moussaïd M, Helbing D, Garnier S, et al. Experimental Study of the Behavioural Mechanisms Underlying Self-Organization in Human Crowds[J]. *Proceedings Biological Sciences*(S0962-8452), 2009, 276(1668): 2755-2762.
- [13] Qu Y, Dan Y. Modeling the Evacuation Behavior Considering the Effect of Dangerous Source[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*(S1877-0428), 2014, 138: 800-810.
- [14] Wagoum A, Seyfried A, Holl S. Modelling Dynamic Route Choice of Pedestrians to Assess the Criticality of Building Evacuation[J]. *Advances in Complex Systems* (S0219-5259), 2012, 15(7): 145-155.
- [15] 魏娟, 郭阳勇, 游磊, 等. 一种基于多出口环境的人群疏散改进模型[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(7): 139-145.  
Wei Juan, Guo Yangyong, You Lei, et al. An Improved Crowd Evacuation Model for a Multi-Exit Environment [J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(7): 139-145.
- [16] 张有洋, 朱昌锋, 韩桴. 异质决策者划分下应急物流路径多准则群决策[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(1): 168-173.  
Zhang Youyang, Zhu Changfeng, Han Fu. Multi-Criteria Group Decision-Making for Emergency Logistics Route by Heterogeneous Decision Makers[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(1): 168-173.
- [17] Moussaïd M, Helbing D, Theraulaz G. How Simple Rules

- Determine Pedestrian Behavior and Crowded Disasters[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences (S0027-8424), 2011, 108(17): 6884-6888.
- [18] 龙雪琴, 宋嘉骐, 王建军, 等. 面向有限理性决策的出行者行为研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(5): 105-110.  
Long Xueqin, Song Jiaqi, Wang Jianjun, et al. Study on Traveler's Behavior for Bounded-rational Decision-Making[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(5): 105-110.
- [19] 潘义勇, 余婷, 马健霄. 基于路段与节点的城市道路阻抗函数改进[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(8): 76-81.  
Pan Yiyong, Yu Ting, Ma Jianxiao. Improvement of Urban Road Impedance Function Based on Section Impedance and Node Impedance[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2017, 36(8): 76-81.
- [20] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating Dynamical Features of the Escape Panic[J]. Nature(S0028-0836), 2000, 407(6803): 487-490.