

# 基于增强心理行为异质性的改进社会力模型

刘延东, 黄高翔, 陈文

(中国石油大学(北京) 理学院, 北京市 102249)

**摘要:** 模拟焦虑情绪下的人群疏散, 对于解决逃生等运动学问题具有重要意义。目前国内外大多数研究在人群疏散问题中单纯引入焦虑因子这一介质, 但并未考虑在此类紧急环境下外界关键因素如何影响焦虑因子; 本文在原始模型的基础上, 结合基于 Agent 的踩踏风险评估, 量化了环境关键变量对焦虑因子的影响, 引入心理作用力参数, 将焦虑因子对现实疏散过程中所造成的影响通过物理矢量的方式作用在模型中, 提出了改进社会力模型; 该模型通过增强个体心理行为异质性, 实现了个体运动矢量的选择; 对比真实疏散情景, 实验结果表明: 改进社会力模型更能反应个体疏散行为, 更具现实说服力;

**关键词:** 人群踩踏; 系统工程; 社会力模型; 心理动力学; Anylogic; 多智能体

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 01-

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.xx-xxxx

## Improved Social Force Model Based on

## Enhancing Psychobehavioral Heterogeneity

Liu Yandong, Huang Gaoxiang, Chen Wen

(College of Arts and Sciences, China University of Petroleum (Beijing) at Karamay, Karamay 834000, China)

**Abstract:** Simulating the evacuation of people under anxiety is of great significance for solving kinematic problems such as escape. At present, most studies at home and abroad simply introduce anxiety factors as a medium in the problem of population evacuation, but do not consider how external key factors affect anxiety factors in such emergency environments; *On the basis of the original model, combined with the agent-based stampede risk assessment, this paper quantifies the influence of key environmental variables on the anxiety factor, introduces the psychological force parameters, and the impact of the anxiety factor on the actual evacuation process is applied to the model through the physical vector, and the improved social force model is proposed. This model realizes the selection of individual motor vectors by enhancing the heterogeneity of individual psychological behavior.* Compared with the real evacuation scenario, the experimental results show that the improved social force model can better reflect the individual evacuation behavior and be more realistic and convincing.

**Keywords:** Crowd stampede; Systems engineering; SFM; Psychodynamic; Anylogic; Agent

收稿日期: xxxx-xx-xx

修回日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 北京市自然科学基金(2021D01A202), 北京市自然科学基金青年项目(XJEDU2018Y063)

第一作者: 刘延东(2002-), 男, 本科, 研究方向为人工智能、人群疏散等。E-mail: 2020016086@st.cup.edu.cn

通讯作者: 陈文(1988-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为人工智能、人群疏散等。E-mail: chenwen@cup.edu.cn

<http://www.china-simulation.com>

## 引言

重大事故灾害下的人群疏散,是基于现实中大規模集会活动的数量与规模增加下,有关逃生等运动学衍生的系统问题。其复杂性主要体现在模拟人群疏散行为模型与结果的可靠性。

目前,国内外为研究人群疏散问题已经进行了大量的工作,并取得了建设性的成果。Helbing<sup>[1]</sup>提出的社会力模型建立起连续的个体疏散微观模拟模型,其主要通过研究个体的行为属性来判断之后的行为决策,解释了行人流中个体行为的本质内容,在该理论层面上,每个目标都依赖于其他目标与环境因素,即个体的实际行动受主观意识、个体之间以及障碍物这三方面的影响,但其缺点在于该模型探讨行人正常疏散下的行为决策,未考虑出现踩踏风险时人群活动;李锋<sup>[2]</sup>在分析传统离散元胞模型和 Agent-based 仿真模型的基础上,针对其不足进行了改进,提出了基于 Agent 和元胞的火灾逃生仿真模型,考虑逃生人员的个体差异外,给出了人员的移动方向和速度的连续性方程;Mitsopoulou<sup>[3]</sup>引用空间游戏反映焦虑人群中的冲突情况,针对人群疏散模型,增添拓扑结构与行为特征,并将不同的移动速度和记忆特征纳入到疏散人员中;Alginahi<sup>[4]</sup>以 Al Masjid An Nabawi 为实例,在模拟人群疏散过程中,利用 GEP 捕获建筑物中一般人群疏散行为,聚合了建筑物中每个部分的疏散模式;李昌华<sup>[5]</sup>等基于传统社会力模型,引入人群恐慌因子等因素,通过考虑行人疏散过程中运动方向的选择,改进行人疏散过程中的轨迹,将所有人的特征视为一致,从而更好地预测了险情来临时人群的疏散轨迹,但这类群集疏散模式不能反映个体对于疏散空间环境的感知程度;Ehtamo<sup>[6]</sup>将疏散人群整理为多代理系统,结合数值模拟与遗传算法解决最小化疏散时间问

题(随机优化);薛怡然等<sup>[7]</sup>提出了基于深度学习端到端智能疏散引导方法,设计基于社会力模型的强化学习智能体仿真交互环境。上述成果丰富了疏散模型,但仍有稍许不足:大多数研究没有充分分析心理动力学,未考虑真实情景中踩踏风险隐患下的行为决策,难以反映个体对于疏散空间环境的了解程度,以及大多数疏散模型将个体视为无意识粒子,忽略了行人实际运动方向的选择。

本文在原有基础上,将社会力模型结合基于 Agent 的踩踏风险评估理论,量化了疏散门宽、能见度、噪音等关键环境变量对焦虑因子这一介质的影响,引入了心理作用力这一概念,将焦虑因子对现实疏散过程中所造成的影响通过物理矢量的方式作用在模型中,由此改进了传统社会力模型;在研究的最后阶段,引入了真实疏散情景进行对比,验证改进社会力模型的优良性。

## 1 改进社会力模型

对原有模型的改进主要集中于:考虑个体心理行为异质性,引入基于 Agent 的踩踏风险评估,加入心理作用力  $f_{ik}$  ( $i$  是第  $i$  个行人,  $k$  是第  $k$  个关键因素),量化外界关键因素与焦虑因子  $\sigma_{anxious}$  的关系,以物理矢量的形式反映焦虑因子对疏散过程的作用,以此改进原始社会力模型。

Helbing<sup>[1]</sup> 等的社会力模型以牛顿第二定律为基础,由个体所受的各个分力的表达式来体现行人不同的动机和行为。个体的实际行动受其主观意识、个体之间相互作用以及障碍物的阻碍作用这三方面因素的影响,均可等效为合力在个体上的作用。

对于人群疏散的模拟,本文起初使用原始社会力模型 (Social Force Model:SFM) 进行描述,由牛顿第二定律,推得该模型的主要动力学方程:

$$f_i = m_i \frac{dv_i(t)}{dt} = f_i^0 + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_w f_{iw} \quad (1)$$

式中:  $m_i$  是行人  $i$  的质量,  $v_i$  是行人  $i$  当前的速度矢量,  $f_i^0$  是行人  $i$  的自驱力,  $f_{ij}$  是行人  $i$  和行人  $j$  之间的相互作用力,  $f_{iw}$  是障碍物对行人  $i$  的作用力。

行人  $i$  的自驱力  $f_i^0$ :

$$f_i^0 = m_i \frac{v_i^0(t)e_i^0 - v_i(t)}{\tau_i} \quad (2)$$

式中: 质量为  $m_i$  的行人  $i$  在  $t$  时刻的期望速度为  $v_i^0$ , 方向为  $e_i^0$ ;  $v_i$  是行人在  $t$  时刻实际的运动速度,  $\tau_i$  是行人调整行走速度的特征时间。

现实实验经验表明, 人群的焦虑程度对疏散过程有明显影响, 因此对原始社会力模型进行修正, 由邓宇菁<sup>[5]</sup>的研究可知: “在疏散模型中, 行人一定程度的焦虑会提高疏散效率。”在这里引入焦虑因子  $\sigma_{anxious}$ , 令其对行人的速度矢量  $v_i^0(t)$  进行修正, 由邓宇菁<sup>[5]</sup>可知当行人离出口越远, 受焦急因子影响导致期望速度越大, 则修正得:

$$v_i^0(t)' = v_i^0(t) + \sigma_{anxious} \cdot D_{exit} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{anxious}$  是焦虑因子(用于反应个人的焦虑程度),  $D_{exit}$  是行人距离出口处的距离,  $v_i^0(t)$  是质量为  $m_i$  的行人  $i$  在  $t$  时刻的期望速度,  $v_i^0(t)'$  是引入焦虑因子后修正的期望速度。

将影响疏散心理及行为的因素综合划分为: 主观因素、环境因素、社会因素、事故因素等。接下来, 主要探究哪些环境因素对焦虑因子的影响较为关键以及其特征重要性。

## 1.1 基于 Agent 的踩踏风险评估

在这里引入 Agent-based 模型, 将模拟过程中的每一个行人视作 agent, 由于 agent 是具心智状态和智能的对象, 便可运用它的反应性、自治性、进化性、主动性、社会性这五类基本特性, agent 体的反应性、自治性与社会性

能够感知外界环境因素的变化, 使用社会力模型对其变化数据进行分析, 并获得新的运动矢量; agent 体通过其进化性, 学习修正后的运动数据, 规划新的运动路径, 通过其主动性表现出来, 由此实现在复杂的模拟过程中更好地去描述行人这个实体。

在这个层面上, 系统中每一个 agent 都为有意识粒子, 具有社会力量和互动能力, 它克服了一般连续方程模型将个体视为无意识粒子这一缺点, 为改进模型实现行人实际运动方向的选择提供了良好的理论支撑。

王艳等<sup>[6]</sup>研究的踩踏事故相关系数是指在在某种含有踩踏风险隐患的情况下, “评估状态”所涉及的要素与“风险状态”的要素之间的偏差程度。首先, 应计算“评估状态”下的各安全要素与“风险状态”下的安全要素的偏差, 即:

$$\Delta x^{(1)}(k_i) = |x^{(1)}(k_i) - x^{(0)}(k_i)| \quad (4)$$

( $i = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, 3, \dots, N$ )

其中:  $\Delta x^{(1)}(k_i)$  是第  $i$  个 agent 评估状态  $x^{(1)}$  的第  $k$  个安全要素  $x^{(1)}(k_i)$  与危险状态  $x^{(0)}$  的相应安全要素  $x^{(0)}(k_i)$  的偏差。当  $\Delta x^{(1)}(k_i)$  的值越大, 评估状态的安全因素越偏离危险状态, 疏散情景越安全, 反之, 当  $\Delta x^{(1)}(k_i)$  的值越小, 评估状态的安全因素越接近于危险状态。尤其是当  $\Delta x^{(1)}(k_i) = 0$  时, 评估状态的安全因素与危险状态的偏差为 0, 即评估状态的安全状态处于最危险状态。从评估状态的各安全因素对危险状态的偏差中求出  $\Delta x^{(1)}(k_i)$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, M; k = 1, 2, 3, \dots, N$ ) 的最大值和最小值, 即令:

$$\begin{cases} \Delta_m x^{(1)} = \min_k x^{(1)} k_i = \min |x^{(1)}(k_i) - x^{(0)}(k_i)| \\ \Delta_n x^{(1)} = \max_k x^{(1)} k_i = \max |x^{(1)}(k_i) - x^{(0)}(k_i)| \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\Delta_m x^{(1)}$ ,  $\Delta_n x^{(1)}$  为评估状态  $x^{(1)}$  对危险状态  $x^{(0)}$  的极差。极差是对某个既定状态的

基数,即对某个既定状态的固定状态。关键因素对应的每个状态都有相应的最大极差和最小极差,对每个状态的极差进行比较,求出各状态的极差的最小差和最大差;根据极差定义,令式(5)中的 $k_i$ 为评估状态 $X^{(1)}$ 对危险状态 $X^{(0)}$ 中对 $i$ 个 agent 的第 $k$ 个因素的关联度。第 $k$ 个因素通常是离散的,需要捕获每个坐标的具体环境因素,进而具体分析。

## 1.2 量化对焦虑因子的影响及建立改进社会力量模型

为评价上文在危险状态时各因素同人群疏散效率的关联度关系,在这里建立焦虑因子的评价模型。数据来源于北京市轨道交通设计研究院,城市轨道交通 BIM 平台,获得了 458 组 double 型人群疏散实验数据,进而分析人群疏散过程中各因素对焦虑因子的特征重要性。

通过数据清洗,选取前 100 组用于量化工作,将此类数据以反映真实情况的程度为衡量标准进行专家赋权,即每一组数据拥有不同的权重,以实现真实疏散情景有更加良好的反映;使用焦虑程度等级描述焦虑因子,0~0.40 为无焦虑状态,无焦虑状态对应:“生理上没有疾病与虚弱,同时具备完整的生理、心理状态和社会适应能力的人群”,0.41~0.60 为轻度焦虑状态,轻度焦虑状态对应:“生理上没有疾病与特别虚弱,心理上存在注意力不集中,社会状态欠佳,工作效率相对较弱的人群”,0.61~0.70 为中度焦虑状态,中度焦虑状态对应:“生理上出现一定程度的病症,心理状态不稳定,社会生活受到一定影响,工作效率受到较大影响的人群”,0.71~1.0 为重度焦虑状态,重度焦虑状态对应:“生理上出现明显的病症,心理状态极度不稳定,难以维持正常的社会行为,难以进入工作状态的人群”;在这里同样使用专家赋权法以行人在长时间内运动状态为衡量标准来确定实体的焦虑程度等

级;最终,捕获了不同疏散环境下的行人状态以及其在综合评价中的特征占比(权重),与各类状态对应下 agent 系统的焦虑因子程度。使用熵权法获取特征重要性,如表 1 所示。

表 1 特征重要性分析  
Tab.1 Feature importance analysis

关键因素 $k$	信息熵值 $e$	信息效用值 $d$	权重 $W(k_i)$
逃生通道宽度	0.973	0.027	0.403
预期悲观程度	0.994	0.006	0.086
空间内噪音程度	0.994	0.006	0.086
疏散人数	0.992	0.008	0.118
空间内能见度	0.985	0.015	0.231

信息熵本质是将信息中排除了冗余后的平均信息量,采用熵值来判断指标的离散程度。由分析知:通道宽度的信息熵值为 0.973,则其离散程度较大,权重达到 0.403,对综合评价具有重大影响,即该指标为影响焦虑程度的外部关键因素;预期悲观程度的特征占比(权重)为 0.086,说明该指标在评价中的作用较为显著;噪音与空间内能见度的信息熵值分别为 0.994、0.985,信息效用值分别为 0.006、0.015,其权重较为关键。同时田玉敏等<sup>[1]</sup>就人群疏散问题探讨了其心理及行为个体差异,可知外界因素中噪音与能见度同样对焦虑程度有着关键性的影响。

在这里,引入关联度系数,关联度系数是局部反映焦虑因子 $X^{(1)}$ 与疏散状态 $X^{(0)}$ 第 $k$ 个要素的接近程度(权重)。为了描述从总体上反映评估状态 $X^{(1)}$ 对危险状态 $X^{(0)}$ 的关联程度,还需要如下计算:

$$Y_k^i = \sum_{k=1}^N W(k_i) \zeta_k^i(k_i) \quad (6)$$

式中:  $i=1, 2, 3, \dots, M$ ;  $k=1, 2, 3, \dots, N$ ; 其中,  $W(k_i)$  为第 $i$ 个人的第 $k$ 个要素的权重,  $\zeta_k^i$  是第 $i$ 个人的第 $k$ 个安全因素的相关函数;  $Y_k^i$  为总体考虑权重的基础时,全面定量计算

评估状态  $X^{(1)}$  与危险状态  $X^{(0)}$  的关联程度（接近程度）。基本数据可结合相应避难场所的规划进行修改与实验获得，相关函数可基于需要分析的关键因素，在原物理函数的基础上进行量化获得。同时，结合上述特征重要性图：预期悲观程度的接近程度（权重）为 0.086，通道宽度的接近程度为 0.403，噪音的接近程度为 0.086，能见度的接近程度为 0.231；推导出关键因素与焦虑因子  $\sigma_{anxious}$  的关系：

$$\sigma_{anxious} = \frac{e^{14[0.086\zeta(z_{ep})+0.403\zeta(d_{cw})+0.086\zeta(s_{an})+0.231\zeta(f_{ev})]}}{|e_i^0(t)|} \quad (7)$$

式中： $\sigma_{anxious}$  为焦虑因子（用于反应个人的焦虑程度）， $e_i^0(t)$  为随机因子（在理想条件下一般取 1）， $z_{ep}$  为预期悲观程度， $d_{cw}$  为逃生通道宽度， $s_{an}$  为空间内噪音程度， $f_{ev}$  为能见度。卓霖等<sup>[12]</sup>分析了行人在疏散过程中所受到的心理作用对踩踏风险的影响，行人存在倒地和站立两种情况。在隐含踩踏风险的情景下，站立的行人  $i$  会受到倒地的行人  $k$  的影响而产生心理作用力  $f_{ik}$ ，其定义如下：

$$f_{ik} = H \exp(r_{ik} - d_{ik}) n_{ik} \quad (8)$$

式中： $H$  是行人的心理作用系数， $r_{ik}$  是行人  $i$  和行人  $k$  的半径之和， $d_{ik}$  为行人  $i$  和行人  $k$  的质心距离， $n_{ik}$  是从行人  $k$  质心指向行人  $i$  质心的单位向量，心理作用力为  $f_{ik}$ 。于是，将行人  $i$  的受力情况重新定义为：

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_i^0 + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_{k \neq i} f_{ik} + \sum_{w} f_{iw} \quad (9)$$

结合焦虑因子  $\sigma_{anxious}$  对其心理作用进行分析，等价于  $H$  与  $\sigma_{anxious}$  存在关系，增加外界环境-踩踏风险影响因子  $\sigma_i^0(t)$  对焦虑因子的影响有：

$$f_{ik} = \sigma_i^0(t) \cdot \sigma_{anxious} \exp(r_{ik} - d_{ik}) n_{ik} \quad (10)$$

最终，将其风险评估水平与上述公式合并，

得到改进社会力模型 (Improving Social Force Model: ISFM) 公式：

$$\begin{aligned} m_i \frac{dv_i}{dt} &= f_i^0 + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_{k \neq i} f_{ik} + \sum_w f_{iw} \\ &= m_i \frac{[v_i^0(t) + \sigma_i^0(t) \cdot D_{exit}] e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j \neq i} f_{ij} \\ &\quad + \sum_w f_{iw} + \sum_{k \neq i} \sigma_i^0(t) \cdot \sigma_{anxious} \exp(r_{ik} - d_{ik}) n_{ik} \end{aligned} \quad (11)$$

式中： $\sigma_i^0(t)$  是踩踏风险的评估状态对危险状态中第  $i$  个行人、第  $k$  个因素的关联度； $k_1 = d_{cw}$ （通道宽度）、 $k_2 = s_{an}$ （噪音程度）、 $k_3 = f_{ev}$ （能见度）、 $k_4 = z_{ep}$ （预期悲观程度），更新 (7) 焦虑因子为：

$$\sigma_{anxious} = \frac{e^{14*[-0.47*k_1+0.08*k_2+0.02*k_3+0.43*k_4]}}{|e_i^0(t)|} \quad (12)$$

### 1.3 局部关键因素分析

首先利用 Anylogic 软件建立一个  $60m \times 60m$  类矩形区域，绘制该空间内人群疏散初始状态的热力图（反应一个时段其空间内所分布人数的密度，颜色越偏红色，人群密度越高）：

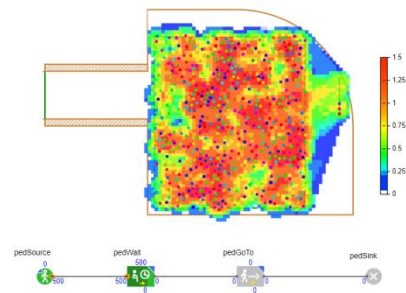


图1 初始状态  
Fig.1 Initial state

如图 (1) 设置 500 人聚集于  $60m \times 60m$  的区域，通道宽度可变，其余变量在每次实验中保持一致。在初始状态下，人群随机分布在空间的任意位置，设定人流密度参数，它们分别为  $v_{max} = 7m/s$ ， $k = 1.2 \times 10^5 kg/s$ ，

$k = 2.4 \times 10^5 \text{ kg/s}$ ,  $A_i = 2 \times 10^3 \text{ N}$ ,  $B_i = 0.08 \text{ m}$ ,  
 $T_i = 0.5 \text{ s}$ , 每一个个体的最大速度限制在  $10 \text{ m/s}$  以内。

在该实验中分别将通道宽度这一参数调整为  $15\text{m}$ 、 $17\text{m}$ 、 $19\text{m}$ ；噪声，能见度，环境温度，人群数分别保持在  $50\text{DB}$ 、 $100\%$ 、 $300\text{K}$ 、 $500$  人。

表 2 通道宽度分析

Tab.2 Channel width analysis

序号	通道宽度 m	噪声 DB	能见度	环境温度 K	人群数
1	15	50	100%	300	500
2	17	50	100%	300	500
3	19	50	100%	300	500

表(2)仅改变通道宽度，控制疏散环境内其它变量不变，分析通道宽度对人群疏散效率的影响效果。由式(12)量化通道宽度与焦虑因子之间的关系，得到二者之间方程有：

$$\sigma_{anxious} = \frac{e^{-14*0.47*d_{cw}}}{|e_i^0(t)|} \quad (13)$$

易知  $\sigma_{anxious}$  与  $d_{cw}$  成负相关关系，即  $d_{cw}$  越大， $\sigma_{anxious}$  越小，对式(11)则可知  $\sigma_{anxious}$  越小， $f_i$  越小；由此可推断出行人在初始疏散过程中其心理作用力  $\sum f_{ik}$  越小，自驱力  $f_i^0$  越大，即在人群疏散过程中自驱合力  $f_i$  越大，由改进社会力模型中可知其疏散效率也越大；紧接着，通过 Agent-based 来模拟不同通道宽度下的人群疏散的过程。

分别得到不同参数下的模拟结果：

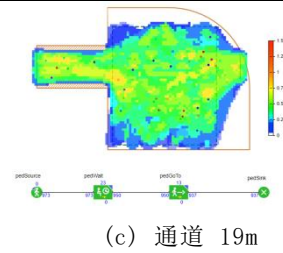
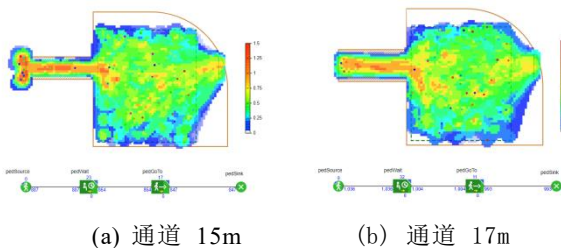
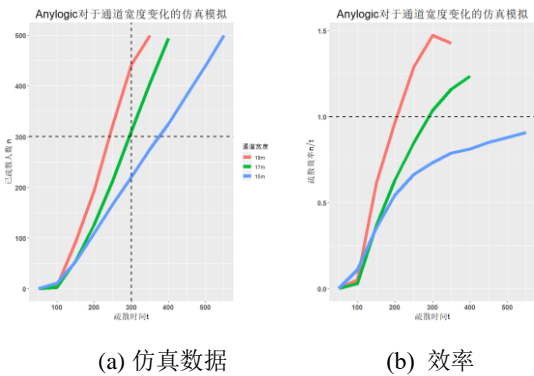


图 2 改变通道宽度对疏散效率的影响

Fig.2 Effect of changing aisle width on evacuation efficiency

图(2)中，由  $15\text{m}$ 、 $17\text{m}$ 、 $19\text{m}$  逐级往上增长的通道宽度中：宽度为  $15\text{m}$  的通道中，人群最拥挤，以至于在通道出口部位产生了明显的拱形趋势，通行效率极低；宽度为  $17\text{m}$  的通道中，人群较拥挤但拱形趋势以得到较大的改善，通行效率得到较大的提高；宽度为  $19\text{m}$  的通道中，人群密度则逐渐舒缓，通行效率受到的影响逐渐不明显；由此可初步看出通道宽度与人群疏散效率成正相关；

导出人群疏散数据至 R 中，绘制其效率折线图：



(a) 仿真数据

(b) 效率

图 3 Anylogic 仿真模拟

Fig.3 Anylogic Simulation

图(3)：发现当通道宽度上升至一定程度时，在疏散过程后期，疏散效率会出现降低的现象，为此本文进行实验去验证该现象：当通道宽度上升到一定程度时，人与人之间的距离在疏散过程中动态保持着一个较大的宽度，该宽度在运动过程中可容纳人的通过。从宏观上看，疏散行人流中速度较快的个体能够从此类间隙



通过, 从而移动至行人流的前端。在系统动态过程中, 行人流显著分流成以速度为特征的多个集团, 前后集团的速度极差较大, 速度分化明显; 则在整体疏散过程中, 前端集团以较快速度完成疏散, 并与后端集团产生距离优势, 而最后端的集团由于距离差值明显, 导致其疏散效率下降的趋势更为显著, 在图中表现为通道宽度为 19m 的疏散效率在 300 S 时突然下降。

总的来看: 疏散通道宽度是决定疏散时间的关键影响因素, 疏散通道宽度与疏散效率呈现出动态变化, 通道宽度越宽, 焦虑因子程度越小, 导致个体的心理作用力越小, 踩踏风险隐患越低, 有效地提升了疏散效率。

上述实验通过对通道宽度的灵敏度分析, 验证了改进社会力模型对关键因素具有良好的敏感程度。

## 2 改进社会力模型与原始社会力模型对比

本文在这里建立与实际场景做对比的分析实验: 使用一个  $20\text{m} \times 20\text{m}$ , 通道宽度为 17m 的教室来进行疏散模拟, 每次实验中, 将疏散行人的数量以 50 人为初始人数, 初始位置随机设置且不重叠, 初始方向随机分布。收集到有关数据:  $v_{\max} = 7\text{m/s}$ ,  $k = 1.2 \times 10^5 \text{kg/s}$ ,  $k = 1.2 \times 10^5 \text{kg/s}$ ,  $A_i = 2 \times 10^3 \text{N}$ ,  $B_i = 0.08\text{m}$ ,  $T_i = 0.5\text{s}$ 。实验结果及仿真结果如图:

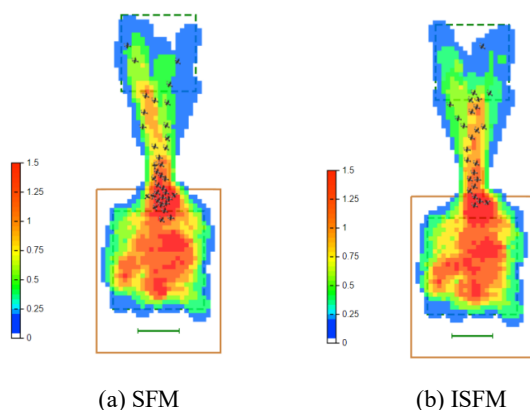


图 4 传统社会力模型与改进社会力模型的模拟比较  
Fig.4 Simulation comparison of traditional social force model and improved social force model

由图(4)可见, SFM 中人群在一定时间内大量地涌入通道中, 超出了通道的承载能力, 由此在通道入口方向形成了拱形趋势, 对人群的疏散造成了很大的阻碍, 导致了该过程疏散效率低下; ISFM 中的 agent 体通过引入焦虑因子与心理作用力参数, 感知得到外界关键因素影响焦虑因子的程度, 促使心理作用力作用在 agent 体的运动矢量上, 从而使 agent 体的运动行为发生改变, 使其对外界环境的因素做出更多的反馈, 由此对自身的速度与方向进行了一定的调整, 促使了人群形成类队列形式通过通道, 提升了人群逃生效率;

接下来, 将该实验每次增加 10 人, 当空间里有 200 人时, 实验发现此时人群疏散的运动轨迹发生改变:



图 5 真实疏散中的迷路  
Fig.5 Lost in a real evacuation

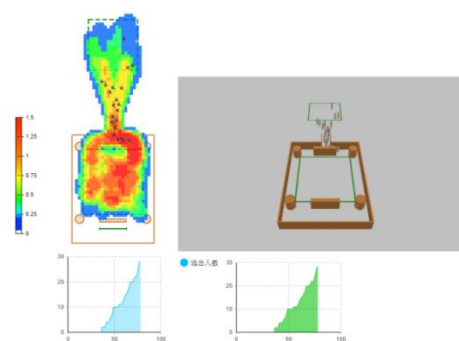


图 6 SFM 模拟疏散过程

Fig.6 SFM Simulation of evacuation process

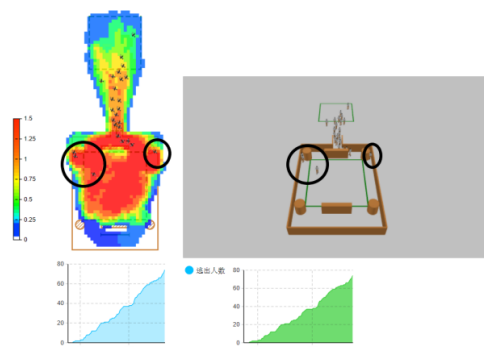


图 7 ISFM 模拟疏散过程

Fig.7 ISFM simulation of evacuation process

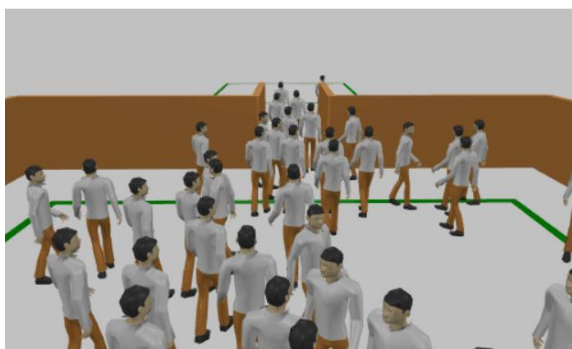


图 8 放大下 ISFM 模拟疏散中的迷路现象

Fig.8 Zooming in on the ISFM simulation of disorientation in evacuation

图(6)原始社会力模型理想的将每个人的行为决策视为一致,并未考虑到个人行为决策的差异性,该模型明显忽略行人方向偏好与行人移动偏好;图(7)改进社会力模型较为充分的考虑到行人心理行为为差异性,即模拟过程中每一个粒子(agent)皆有意识。在该疏散过程中,除“人群渠化”的自组织现象外,还存在着“迷路”现象,即在特定的环境下,个别行人未能找到出口,被困在角落或障碍物等。从理论上讲:当行人空间认知受到一定程度影响时,便难以判断正确方向。即环境能见度  $f_{ev}$  影响焦虑因子  $\sigma_{anxious}$  的矢量判别,最终导致了心理作用力  $f_{ik}$  超过一定限度,对行人的自驱力矢量造成

影响,使得行人最终的自驱矢量方向难以确定,从而发生“迷路”现象;图(8)为放大下 ISFM 疏散模拟中出现的“迷路”现象,图中显示约有七人“迷路”在教室中未逃出;改进社会力模型模拟的结果表明在开始逃生后的一小段时间(第 22 秒)即有人陆续逃出,原始社会力模型呈现的是在一个较长的时间(第 40 秒)才有人逃出,而在实际实验情景里,第 18 秒后便有人陆续逃出,且最终有七人“迷路”在教室未逃出;综上,ISFM 更为明显的模拟出在真实场景中同样出现的迷路现象,且它模拟出第一个人逃出的时刻与现实更为贴近。由比较可得:相较于 SFM, ISFM 更为真实的模拟现实情景。

紧接着将该实验每次增加 10 人,直至房间内站满 300 人为止,记录每次实验的疏散时间,实验结果取平均值。

利用 R 统计软件绘制随着疏散人数不断增加下,改进社会力模型、传统社会力模型及实际实验的效率比较分析图:

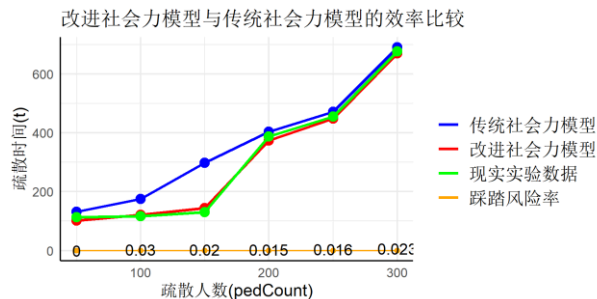


图 9 效率比较分析

Fig.9 Comparative efficiency analysis

在疏散过程中,随着疏散人数不断增加,导致踩踏风险率上升,下降,再上升。在该场景下,当疏散人数小于 200 人时,改进社会力模型效率明显优越于传统社会力模型。通过计算得到 ISFM 与实际情况的偏差大致在  $0.05 s^{-1}$  至  $0.11 s^{-1}$ , SFM 与实际情况的偏差大致在  $0.09 s^{-1}$  至  $0.34 s^{-1}$ , ISFM 模拟的疏散时间与真实疏散时间的偏差较小。从宏观上看,改进社会力模型所用疏散时间较少,效率高于传统社



会力模型, 且与真实情况更为贴近; 综上: ISFM 模拟的疏散效率优于 SFM, ISFM 更加真实的模拟现实情景, 更能反应个体疏散行为, 更具真实性。

### 3 结论

1) 本文提出的改进社会力模型, 结合了基于 agent 的踏踩风险评估理论, 量化了诸多心理学内容与外界实体的关系, 将心理学中的介质对现实疏散过程中所造成的影响通过物理矢量的形式作用在模型中, 较为充分考虑疏散中的心理动力学问题, 这一工作为后续其他科研工作者研究隐含踩踏风险下, 有关焦虑因子等其它心理学内容与实体的联系提供了一种新的思路;

2) 改进社会力模型进行仿真模拟得出通道宽度等影响焦虑因子的外界因素对现实人群疏散所造成的影响效果相较于传统社会力模型所反应的结果, 更具有真实性。结合彭锐等<sup>[13]</sup>研究与该模型仿真模拟的结果表明改进模型能够较好地、完整地模拟疏散场景, 该模拟的结果可对城市紧急避难场所规划起到一定的指导作用:



图 10 上海延中绿地音乐广场规划

Fig.10 Shanghai Yanzhong Greenland Music Plaza Planning

以上海延中绿地音乐广场黄埔段为例, 该广场属于上海市 I 类应急避难场所, 绿地广场

内约可容纳 800 人避难, 在各个方向均有进入场地的支线道路; 其避难场地内部, 主要应急通道宽度大于 7m, 支线应急道路大于 3m, 周边主干道路大于 15m; 支线道路未有设置指示疏散方向的醒目标识; 场所绿化程度较高, 对噪音有着较好的吸收效果。

国家规定最小避难路宽度为 15m 以上<sup>[29]</sup>, 可见避难场所周边主干道满足国家规定的最小避难路要求, 该 I 类应急避难场所能够满足一个大量级人群的基础疏散, 并保证疏散行人在疏散过程中有较好的疏散空间。

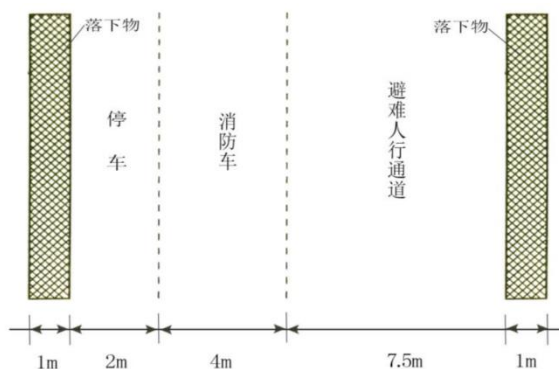


图 11 应急避难通道最小宽度分析<sup>[29]</sup>

Fig.11 Analysis of the minimum width of emergency evacuation routes<sup>[29]</sup>

但同时, 在该绿地广场各方向的通道中, 仅有几处入口处设置了橙色应急避难场所指示牌, 大部分林道通道未有设置指示疏散道路方向的醒目标识, 同时由于各支线道路的宽度仅大于 3m, 这会对人群疏散时的能见度因素造成消极影响, 因此应适当加宽支线道路的通道宽度。同时在支线道路上增加醒目的疏散方向标识, 这将有利于降低疏散人群的焦虑因子, 以此在物理与心理层面上一定程度地提升了在应急情况下人群的疏散效率。

3) 模型中量化了通道宽度、噪音程度及能见度等关键因素与焦虑因子的关系, 对人群疏散过程研究具有现实指导意义, 对改善现实中紧急避险的人类心理行为提供理论依据;

改进模型提高了仿真精度,更好地反映个体对于疏散空间环境的感知程度,在疏散能力、人流轨迹、自组织现象、个体差异等方面对现实避险情景有着更加真实的模拟;本文所提出的模型重点探讨了疏散环境中的静态因素,未充分考虑危险环境下的动态因素,如:救援车辆在疏散道路上对行人疏散的通行阻碍,待爆炸危险物对疏散人群产生的心理驱动影响。下一步工作将针对该部分进行深化研究。

## 参考文献:

- [1] Helbing, D., Farkas, I. & Vicsek, T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature* (S1476-4687) 2000,407:487-490.
- [2] 李锋, 刘晓强. 基于 Agent 和元胞的火灾逃生仿真模型应用研究 [J]. 系统仿真学报, 2008(15):4163-4167.  
LI Feng, LIU Xiao-qiang, et al. Simulation of Escape from Fire Based on Agent and Cellular Automaton [J]. *Journal of System Simulation*, 2008(15):4163-4167.
- [3] Mitsopoulou, Martha, Nikolaos I. Dourvas, Georgios Ch. Sirakoulis & Katsuhiro Nishinari. Spatial Games and Memory Effects on Crowd Evacuation Behavior with Cellular Automata [J]. *Journal of Computational Science*(S1877-7503), 2019(32): 87-98.
- [4] Alginahi, Yasser M., Mohammed Mudassar, Muhammad Nomani Kabir & Omar Tayan. Analyzing the Crowd Evacuation Pattern of a Large Densely Populated Building [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*(S2191-4281), 2019(44): 3289-3304.
- [5] 李昌华, 杨晶, 李智杰. 一种应用于人群仿真的改进社会力模型 [J]. 系统仿真学报, 2021,33(03):521-528.  
Li Changhua, Yang Jing, et al. An Improved Social Force Model for Crowd Simulation [J]. *Journal of System Simulation*, 2021,33(03):521-528.
- [6] Schantz, Anton von, & Harri Ehtamo. Minimizing the Evacuation Time of a Crowd from a Complex Building Using Rescue Guides [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*(S0378-4371), 2022(594): 127011.
- [7] 薛怡然, 吴锐, 刘家锋. 组合动作空间深度强化学习的人群疏散引导方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021,53(08):29-38.  
XUE Yiran, WU Rui, LIU Jiafeng, et al. Crowd evacuation guidance based on combined action-space deep reinforcement learning [J]. *JOURNAL OF HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY*, 2021,53(08):29-38.
- [8] 邓宇菁, 冯页新, 胡列格. 社会力模型中行人的心理因素和随机行为对人群疏散过程的影响 [J]. 系统工程, 2014,32(11):144-148.  
DENG Yujing, FENG Yexin, HU Liege, et al. The Impact of Psychology and Randomness on the Evacuation of Pedestrians: A Modification of Social Force Model [J]. *Systems Engineering*, 2014,32(11):144-148.
- [9] 王艳. 地铁踩踏事故机制分析及应对措施探讨 [D]. 北京交通大学, 2015.  
WANG Yan, et al. Analysis and Discussion on the Subway Stampede Mechanism and Countermeasures [D]. Beijing Jiaotong University, 2015.
- [10] 于恒. 基于火灾动力学与人群疏散模拟的地铁车站火灾安全疏散问题研究 [D]. 华南理工大学, 2020.  
YU Heng, et al. Research on the Evacuation Problems of Metro Station based on Fire Dynamic Simulation and Crowd Evacuation Simulation [D]. South China University of Technology, 2020.
- [11] 田玉敏. 人群疏散心理及行为个体差异的探讨 [J]. 人类工效学, 2010,16(03):53-55+82.  
TIAN Yumin, et al. Exploration of individual differences in crowd evacuation psychology and behavior [J]. *Chinese Journal of Ergonomics*, 2010,16(03):53-55+82.
- [12] 卓霖, 刘婷婷, 刘箴, 柴艳杰. 疏散出口附近的人群踩踏仿真分析 [J]. 计算机工程与应用, 2022,58(11):234-241.  
ZHUO Lin, LIU Tingting, LIU Zhen, CHAI Yanjie, et al. Simulation Analysis of Crowd Stamping Near Evacuation Exit [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2022,58(11):234-241.
- [13] 彭锐, 刘皆谊. 日本避难场所规划及其启示 [J]. 新建筑, 2009(2):102-106.  
Peng Rui, Liu Jieyi, et al. The Planning for Evacuation Area in Japan [J]. *New Architecture*, 2009, No. 123(02):102-106.
- [14] William H.K Lam, Jodie Y.S Lee, K.S Chan, P.K Goh, A generalised function for modeling bi-directional flow effects on indoor walkways in Hong Kong, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, (S0965-8564), 2003,37(9):789-810.

- [15] Emiliano Cristiani, Daniele Peri, Handling obstacles in pedestrian simulations: Models and optimization, *Applied Mathematical Modelling* (S0307-904X), 2017, 45: 285-302.
- [16] Helbing, D. A mathematical model for the behavior of individuals in a social field. *The Journal of Mathematical Sociology* (S0022-250X), 1994, 19(3): 189-219.
- [17] Moise Busogi, Dongmin Shin, Hokyoung Ryu, Yeong Gwang Oh, Namhun Kim, Weighted affordance-based agent modeling and simulation in emergency evacuation, *Safety Science* (S0925-7535), 2017, 96: 209-227.
- [18] Ding, N., Zhang, H. & Chen, T. Simulation-based optimization of emergency evacuation strategy in ultra-high-rise buildings. *Nat Hazards* (S0378-4371) 2017, 89: 1167-1184.
- [19] 曹宁博, 陈永恒, 曲昭伟, 赵利英, 白乔文, 杨秋杰. 基于社会力模型的行人路径选择模型 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2018, 52(02): 352-357.
- Hu Huimin, Chao Chuizhi, Zhao Chaoyi, et al. Correlation Study of Human Body Size Data in Chinese Adults [J]. *Ergonomics*, 2014, 20(3): 49-53.
- [20] Thompson P, Marchant E. A Computer Model for the Evacuation of Large Building Populations [J]. *Fire safety Journal* (S0379-7112), 1995, 24(2): 131-148.
- [21] Jieyu Chen, Tianxing Shi, Nan Li, Pedestrian evacuation simulation in indoor emergency situations: Approaches, models and tools, *Safety Science* (S0925-7535), 2021, 142: 105378.
- [22] Chen, X., Treiber, M., Kanagaraj, V., & Li, H. Social force models for pedestrian traffic – state of the art [J]. *Transport Reviews* (S1464-5327). 2018, 38(5): 625-653.
- [23] Zhang Y L, Zhou X B. The Occurrence Laws of Campus Stampede Accidents in China and its Prevention and Control Measures [J]. *Natural Hazards* (S0921-030X), 2017, 87(2): 659-673.
- [24] Pereira L A, Burgarelli D, Duczmal L H, et al. Emergency Evacuation Models Based on Cellular Automata with Route Changes and Group Fields [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* (S0378-4371), 2017, 473(Complete): 97-110.
- [25] X. Chen and J. Wang, "Entropy-Based Crowd Evacuation Modeling With Seeking Behavior of Social Groups," in *IEEE Access*, vol. 9, pp(S2169-3536), 2021, 9: 4653-4664.
- [26] Yanbin Han, Hong Liu, Philip Moore, Extended route choice model based on available evacuation route set and its application in crowd evacuation simulation, *Simulation Modelling Practice and Theory* (S1569-190X), 2017, 75: 1-16.
- [27] Chi Liu, Rui Ye, Liping Lian, Weiguo Song, Jun Zhang, Siuming Lo, A least-effort principle based model for heterogeneous pedestrian flow considering overtaking behavior, *Physics Letters A* (S0375-9601), 2018, 382(20): 1324-1334.
- [28] Richardson, O., Jalba, A. & Muntean, A. Effects of Environment Knowledge in Evacuation Scenarios Involving Fire and Smoke: A Multiscale Modelling and Simulation Approach. *Fire Technol* (S1572-8099), 2019, 55: 415-436.
- [29] 赵来军. 城市应急避难场所规划建设理论与方法 [M]. 科学出版社, 2014.
- Zhao Laijun. Theory and methods of urban emergency shelter planning and construction [M]. Science Press, 2014.