Journal of System Simulation

Volume 35 | Issue 5 Article 19

5-22-2023

Improved Social Force Model Based on Enhancing Psych behavioral Heterogeneity

Yandong Liu
College of Arts and Sciences, China University of Petroleum (Beijing) at Karamay, Karamay 834000, China;, 2020016086@st.cupk.edu.cn

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

Wen Chen
College of Arts and Sciences, China University of Petroleum (Beijing) at Karamay, Karamay 834000, China;, chenwen@cupk.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.

Improved Social Force Model Based on Enhancing Psych behavioral Heterogeneity

Abstract

Abstract: Simulating the evacuation behavior of people under anxiety is of great significance for solving the kinematic problems such as escape. At present, most at home and abroad studies consider the anxiety factors as the only medium of population evacuation without considering how external key factors affect anxiety factors in such emergency environments. *The improved social force model is proposed, combined with Agent-based stampede risk assessment, the influence of key environmental variables on the anxiety factor is quantified. The psychological force parameters are introduced, and the impact of the anxiety factor on the actual evacuation process is applied to the model through the physical vector. The model carries out the selection of individual motor vectors by enhancing the heterogeneity of individual psychological behavior.* Compared with the real evacuation scenario, the experiment results show that the improved social force model can better describe the individual evacuation behavior and are more realistic and convincing.

Keywords

crowd stampede, systems engineering, social force model(SFM), psychodynamic, multi-agent

Recommended Citation

Yandong Liu, Gaoxiang Huang, Wen Chen. Improved Social Force Model Based on Enhancing Psych behavioral Heterogeneity[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(5): 1120-1130.

This paper is available in Journal of System Simulation: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol35/iss5/19

第 35 卷第 5 期 系统仿真学报© Vol. 35 No. 5
2023 年 5 月 Journal of System Simulation May 2023

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)克拉玛依校区 文理学院，新疆 克拉玛依 834000)

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。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，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。*提出了改进社会力模型(improving social force model, ISFM)，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。ISFM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：ISFM更能反映个体疏散行为，更具说服力。

关键词：人群踩踏；系统工程；社会力模型；心理动力学；多智能体
中图分类号：TP391.9 文献标志码：A 文章编号：1004-731X(2023)05-1120-11
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0965
引用格式: 刘延东, 黄高翔, 陈文. 基于增强心理行为异质性的改进社会力模型[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(5): 1120-1130.
Reference format: Liu Yandong, Huang Gaoxiang, Chen Wen. Improved Social Force Model Based on Enhancing Psych behavioral Heterogeneity[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(5): 1120-1130.

Improved Social Force Model Based on Enhancing Psych behavioral 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 behavior of people under anxiety is of great significance for solving the kinematic problems such as escape. At present, most at home and abroad studies consider the anxiety factors as the only medium of population evacuation without considering how external key factors affect anxiety factors in such emergency environments. *The improved social force model is proposed, combined with Agent-based stampede risk assessment, the influence of key environmental variables on the anxiety factor is quantified. The psychological force parameters are introduced, and the impact of the anxiety factor on the actual evacuation process is applied to the model through the physical vector. The model carries out the selection of individual motor vectors by enhancing the heterogeneity of individual psychological behavior.* Compared with the real evacuation scenario, the experiment results show that the improved social force model can better describe the individual evacuation behavior and are more realistic and convincing.

Keywords: crowd stampede; systems engineering; social force model(SFM); psychodynamic; multi-agent

收稿日期：2022-08-16 修回日期：2022-10-17
基金项目：新疆维吾尔自治区自然科学基金(2021D01A202)；新疆维吾尔自治区自然科学青年项目(XJEDU2018Y063)
第一作者：刘延东(2002-)，男，本科生，研究方向为人工智能、人群疏散等。E-mail: 2020016086@st.cupk.edu.cn
通讯作者：陈文(1988-)，男，讲师，硕士，研究方向为人工智能、人群疏散等。E-mail: chenwen@cupk.edu.cn

Journal of System Simulation, Vol. 35 [2023], Iss. 5, Art. 19

0 引言

重大事故与灾害下的人群疏散是基于现实中大型集会的数量与规模增加下，由运动学等衍生的系统性问题。主要研究模拟应急疏散行为模型同结果的可靠性。

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等[1]提出的社会力模型(social force model, SFM)建立起连续的个体疏散微观模拟模型，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，可以在疏散过程中获取行人的详细路径信息[2]。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。李锋等[3]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等[4]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等[5]以Al Masjid An Nabawi为实例，在模拟人群疏散过程中，利用GEP(general evacuation patterns)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。李昌华等[6]基于传统SFM，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。Schantz等[7]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[8]提出了基于深度强化学习的端到端智能疏散引导方法，设计基于SFM的强化学习智能体仿真交互环境。

随着时间的推移，具有高仿真逼真度的疏散模拟方法越来越普遍，现有疏散模型对不同疏散场景的适应性相对有限[9]。上述成果丰富了疏散模型，但仍有不足：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。

本文在原有模型的基础上，将SFM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SFM。

1 改进社会力模型

对原有SFM的改进：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为第i个行人，k为第k个关键因素，量化外界关键因素与焦虑因子σ_{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SFM。

Helbing等[1]的SFM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[10]，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，本文使用原始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为

$$f_i = m_i \frac{\mathrm{d}v_i(t)}{\mathrm{d}t} = f_i^0 + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_w f_{iw} \tag{1}$$

式中：m_i为行人i的质量；v_i为行人i当前的速度；f_i^0为行人i的自驱力；f_{ij}为行人i和行人j之间的相

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol35/iss5/19
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0965

Liu et al.: Improved Social Force Model Based on Enhancing Psych behavioral H

互作用力；f_{iw}为障碍物对行人i的作用力。

行人i的自驱力为

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

式中：$v_i^0(t)$、e_i^0分别为质量为m_i的行人i在t时刻的期望速度和方向；$v_i(t)$为行人i在t时刻的实际运动速度；τ_i为行人i调整行走速度的特征时间。

实验表明，人群的焦虑程度对疏散过程有明显影响，因此，需对原始SFM进行修正。由邓宇菁等[11]的研究可知：心理状态、理性、恐慌或利他行为的差异对疏散进度有显着影响。在疏散模型中，行人一定程度的焦虑会提高疏散效率[12]。在这里引入焦虑因子σ_{anxious}，令其对行人的速度$v_i^0(t)$进行修正。当行人离出口越远，受焦急因子影响导致期望速度越大，引入焦虑因子后修正的期望速度为

$$v_i^0(t)' = v_i^0(t) + \sigma_{\text{anxious}} d_{\text{exit}} \tag{3}$$

式中：d_{exit}为行人距离出口处的距离。

将影响疏散心理及行为的因素综合划分：主观因素、环境因素、社会因素、事故因素等。

1.1 基于Agent的踩踏风险评估

引入Agent-based模型，将模拟过程中的每一个行人视作Agent，由于Agent是具有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5类基本特性[13]。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SFM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[14]。

在这个层面上，系统中每一个Agent都为有意识的粒子，具有社会力量和互动能力，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[15]。

王艳等[16]研究的踩踏事故相关系数是指在某种含有踩踏风险隐患的情况下，“评估状态”与“风险状态”所涉及的要素之间的偏差程度。

计算“评估状态”与“风险状态”下的各安全要素的偏差：

$$\begin{aligned} &\Delta x^{(1)}(k_i) = |x^{(1)}(k_i) - x^{(0)}(k_i)|, \\ &i = 1, 2, \cdots, M; \quad k = 1, 2, \cdots, N \end{aligned} \tag{4}$$

式中：$\Delta x^{(1)}(k_i)$为第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$\Delta x^{(1)}(k_i)$，$i = 1, 2, \cdots, M$；$k = 1, 2, \cdots, N$的最小值和最大值：

$$\begin{cases} \Delta_m x^{(1)} = \min\limits_k x^{(1)} k_i = \min \left| x^{(1)}(k_i) - x^{(0)}(k_i) \right| \\ \Delta_n x^{(1)} = \max\limits_k x^{(1)} k_i = \max \left| x^{(1)}(k_i) - x^{(0)}(k_i) \right| \end{cases} \tag{5}$$

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，得到各状态相应极差的最小差与最大差。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$X^{(0)}$中对第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SFM

为评价在危险状态时各因素同人群疏散效率的关联度关系，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

Published by Journal of System Simulation, 2023

Journal of System Simulation, Vol. 35 [2023], Iss. 5, Art. 19

因子的特征重要性。

选取前100组用于量化工作，将此类数据用以反映真实情况的程度，为衡定标准进行专家赋权，即每一组数据拥有不同的权重，以实现对真实疏散情景有更加良好的反应；使用焦虑程度等级描述焦虑因子，0~0.4为无焦虑状态，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；0.41~0.6为轻度焦虑状态，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”；0.61~0.7为中度焦虑状态，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为重度焦虑状态，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定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

Table 1 Feature importance analysis

关键因素	信息熵值	信息效用值	权重
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。分析可知：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。田玉敏[17]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影响。

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，还需如下计算：

$$Y_k^i=\sum_{k=1}^{N}W(k_i)\zeta_k^i(k_i),\quad i=1,2,\cdots,M;\ k=1,2,\cdots,N \tag{6}$$

式中：$W(k_i)$为第i个人的第k个要素的权重；ζ_k^i为第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上，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：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σ_{anxious}的关系：

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

式中：$e_i^0(t)$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[18]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2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：

$$f_{ik}=H\exp(r_{ik}-d_{ik})\boldsymbol{n}_{ik} \tag{8}$$

式中：H为行人的心理作用系数；r_{ik}为行人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；

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol35/iss5/19
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0965

Liu et al.: Improved Social Force Model Based on Enhancing Psych behavioral H

$\boldsymbol{n}_{ik}$为行人i质心指向行人k质心的单位向量。

将行人i的受力情况重新定义：

$$m_i\frac{\mathrm{d}v_i}{\mathrm{d}t}=f_i^0+\sum_{j\neq i}f_{ij}+\sum_{k\neq i}f_{ik}+\sum_{w}f_{iw} \tag{9}$$

结合σ_{anxious}对其心理作用进行分析，等价于H与σ_{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：

$$f_{ik}=\sigma_i^0(t)\sigma_{\text{anxious}}\exp(r_{ik}-d_{ik})\boldsymbol{n}_{ik} \tag{10}$$

最终，将其风险评估水平与式(9)合并，得到改进社会力模型(improving social force model，ISFM)公式:

$$\begin{aligned}m_i\frac{\mathrm{d}v_i}{\mathrm{d}t}&=f_i^0+\sum_{i\neq j}f_{ij}+\sum_{k\neq i}f_{ik}+\sum_{w}f_{iw}=\\&m_i\frac{[v_i^0(t)+\sigma_i^0(t)d_{\text{exit}}]e_i^0(t)-v_i(t)}{\tau_i}+\sum_{i\neq j}f_{ij}+\\&\sum_{w}f_{iw}+\sum_{k\neq i}\sigma_i^0(t)\cdot\sigma_{\text{anxious}}\exp(r_{ik}-d_{ik})\boldsymbol{n}_{ik}\end{aligned} \tag{11}$$

式中：$\sigma_i^0(t)$为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。

更新式(7)焦虑因子：

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

式中：$k_1=d_{\text{cw}}$，$k_2=s_{\text{an}}$，$k_3=f_{\text{ev}}$，$k_4=z_{\text{ep}}$。

1.3 局部关键因素分析

在紧急情况下。人类的前瞻性控制表明，环境可以提供一定的物理和心理条件，以选择有限数量的可行的人类行为，从而导致期望的系统状态。因此，通过建立可变环境参数的紧急疏散环境，可探究细分环境因素与人类心理作用与社会行为之间的关系[19]。

利用 AnyLogic 建立一个 60 m×60 m 的矩形区域，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。占据房间的人数/位置在实际中受制于可变性，以及传入的人群密度[20]。选择相对可靠的人群密度参数能够更好地反映环境细分参数对人群疏散的影响。

如图 1 所示，设置 500 人聚集于 60 m×60 m 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$v_{\max}$= 7 m/s，k=1.2×10^5 kg/s，A_i=2×10^3 N，B_i=0.08 m，t_i= 0.5 s，每一个个体的最大速度限制在 10 m/s 以内。

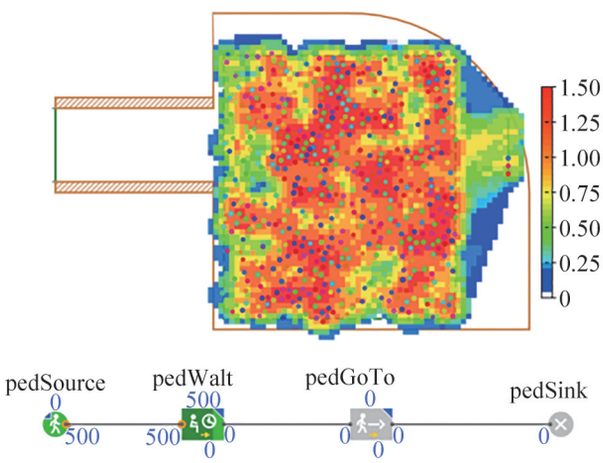


图 1 初始状态
Fig. 1 Initial state

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

表 2 仅改变通道宽度，控制疏散环境内其他变量不变，分析通道宽度对人群疏散效率的影响。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的方程：

$$\sigma_{\text{anxious}}=\frac{e^{-14\times0.47\times d_{\text{cw}}}}{|e_i^0(t)|} \tag{13}$$

σ_{anxious}与d_{cw}成负相关关系，即d_{cw}越大σ_{anxious}越小，由式(11)可知σ_{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$\sum_{k\neq i}f_{ik}$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 ISFM 中可知其疏散效率也越大。

用 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 中宽度为 15 m 的通道中人群最拥挤，在

Published by Journal of System Simulation, 2023

Journal of System Simulation, Vol. 35 [2023], Iss. 5, Art. 19

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 m的通道中人群较拥挤，但拱形趋势得到了较大的改善，通行效率得到较大的提高；宽度为19 m的通道中人群密度则逐渐舒缓，通行效率所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。

表2　通道宽度分析
Table 2　Channel width analysis

通道宽度/m	噪声/dB	能见度/%	环境温度/K	人群数(人)
15	50	100	300	500
17	50	100	300	500
19	50	100	300	500

导出人群疏散数据至R统计软件中，绘制其效率折线图，如图3所示。

由图3可知，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，这是因为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其余人通过。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。在整体疏散过程中，前端集团以较快速度完成疏散，并与后端集团产生优势距离，而最后端的集团由于距离差值明显，导致在某个时间段内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19 m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ISFM对关键因素具有良好的敏感程度。

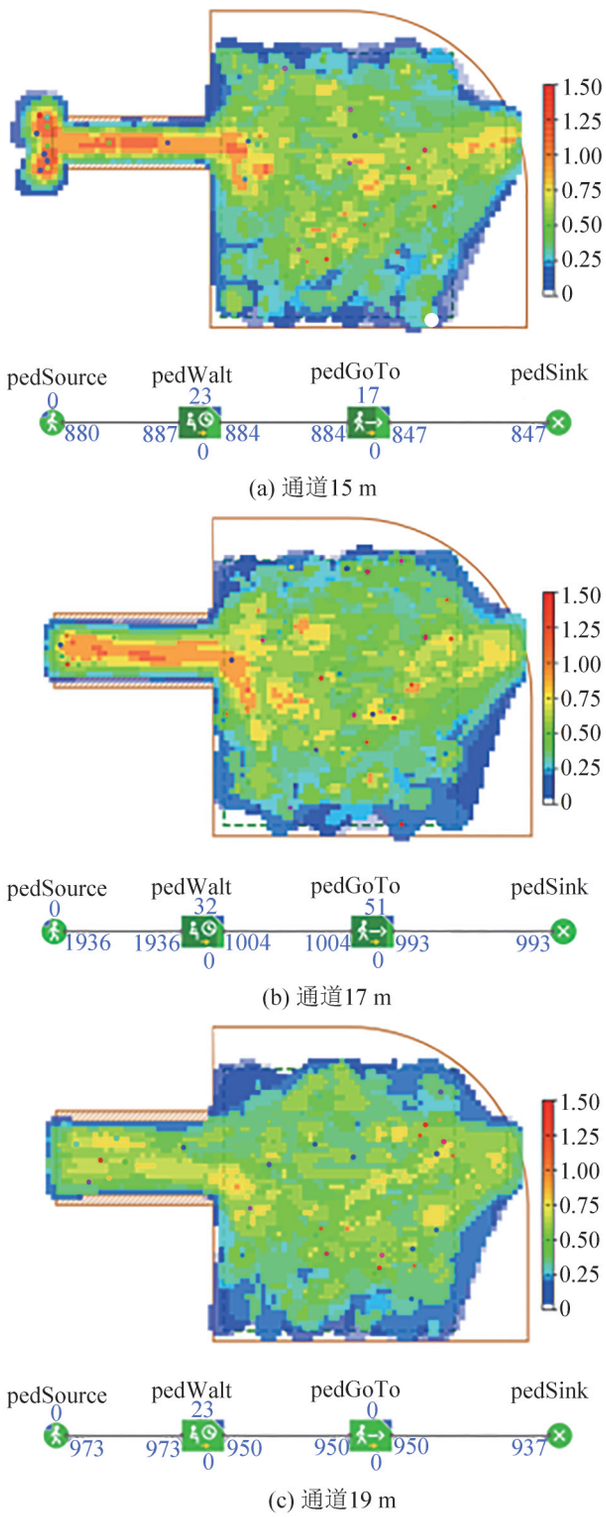
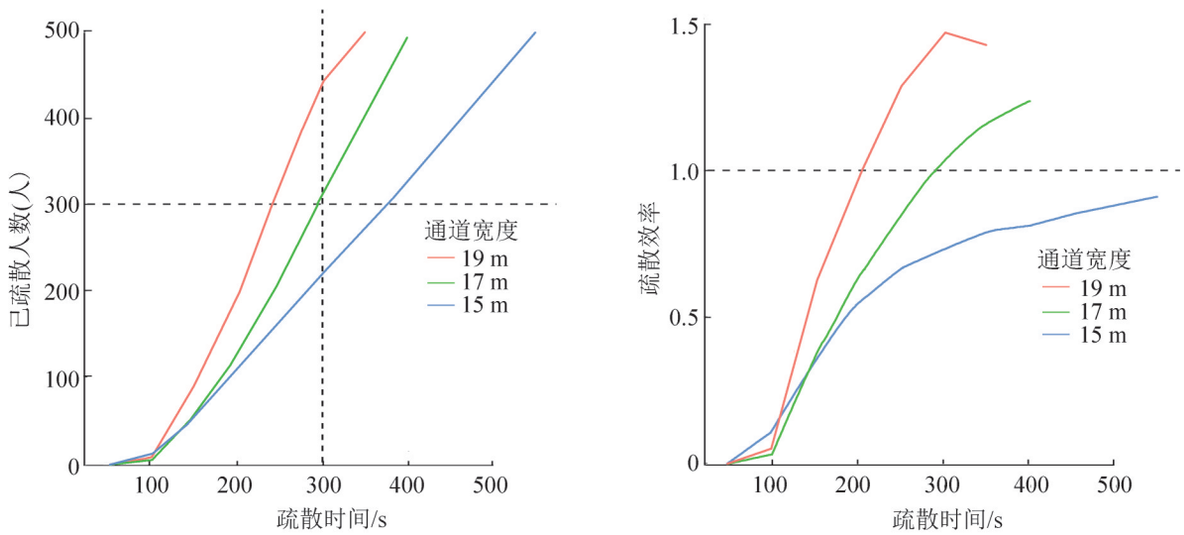


图2　改变通道宽度对疏散效率的影响
Fig. 2　Effect of changing aisle width on evacuation efficiency

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol35/iss5/19
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0965

Liu et al.: Improved Social Force Model Based on Enhancing Psych behavioral H



(a) 仿真数据 (b) 效率

图3 AnyLogic仿真模拟

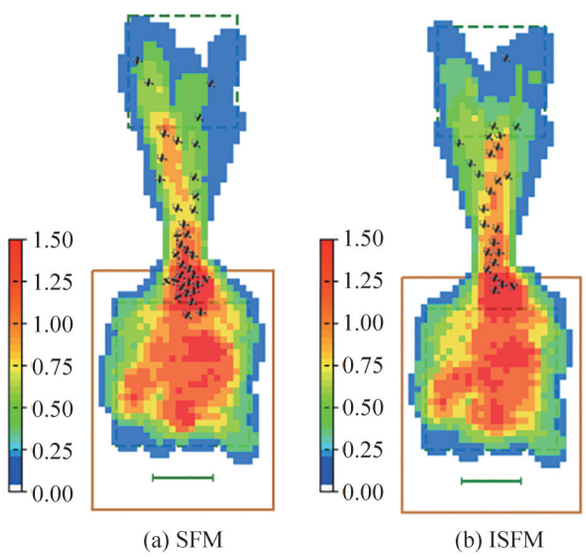
Fig. 3 AnyLogic simulation

2 ISFM与原始SFM对比

本文用一个20 m×20 m，通道宽度为17 m的教室来进行疏散模拟，每次实验以50人为初始疏散人数，初始位置随机设置且不重叠，初始方向随机分布。实验数据：v_{max}=7 m/s，k=1.2×10^5 kg/s，A_i=2×10^3 N，B_i=0.08 m，t_i= 0.5 s。

由图4可知，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，在通道入口方向形成了拱形趋势，对人群的疏散形成了很大的阻碍，导致该过程疏散效率低下。

图5显示，在真实的疏散过程中，人群由于受到环境因素与社会因素的影响，会不断地对行为方向进行修正，从而产生一系列的个体或社会行为[21]，例如迷失道路，自组织行进等；ISFM中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[22]，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进行疏散，提升了人群逃生效率。



(a) SFM (b) ISFM

图4 SFM与ISFM的模拟比较

Fig. 4 Simulation comparison of traditional SFM and ISFM

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

图6中原始社会力模型理想地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，该模型明显忽略了行人方向偏好与行人移动偏好。

图7中的ISFM较为充分地考虑到行人心理行为差异性，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

Published by Journal of System Simulation, 2023

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。从理论上看，当行人空间认知受到一定程度的影响时，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，使行人最终的自驱矢量方向难以确定，从而发生“迷路”现象。

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

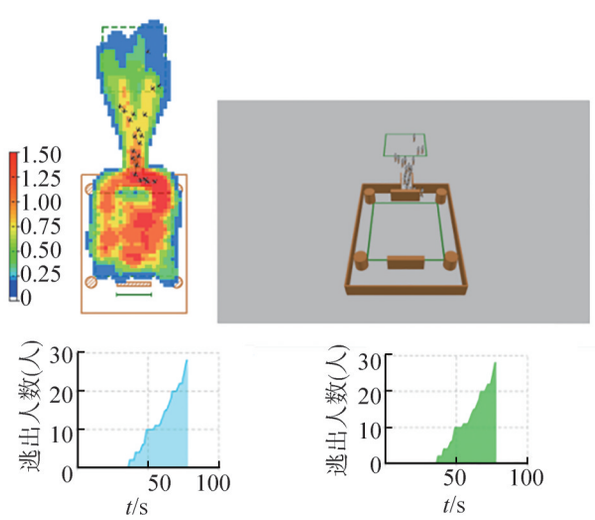


图6　SFM模拟疏散过程
Fig. 6　SFM simulation of evacuation process

图8为放大下的ISFM疏散模拟中出现的“迷路”现象，图中显示约有5人“迷路”在教室中未逃出。ISFM模拟的结果表明在开始逃生后的一小段时间(第22 s)即有人陆续逃出，SFM呈现的是在一个较长的时间(第40 s)才有人逃出，而在实际实验情景里，第18 s后便有人陆续逃出，且最终有7人“迷路”在教室未逃出。综上，ISFM能更为明显地模拟出在真实场景中同样出现的迷路现象，且模拟出第1个人逃出的时刻与现实更为贴近。

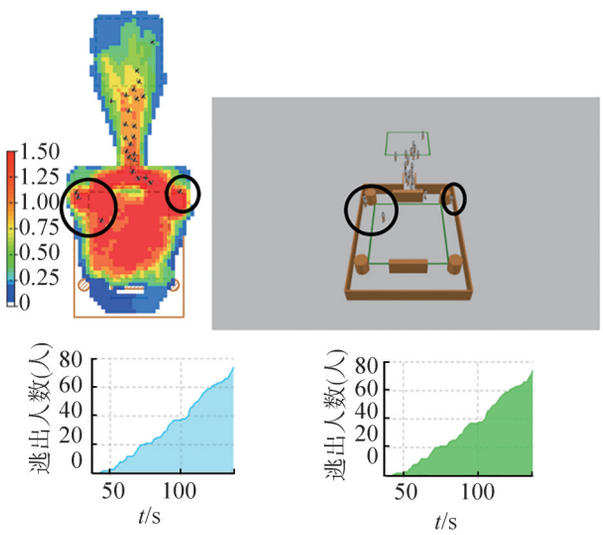


图7　ISFM模拟疏散过程
Fig. 7　ISFM simulation of evacuation process

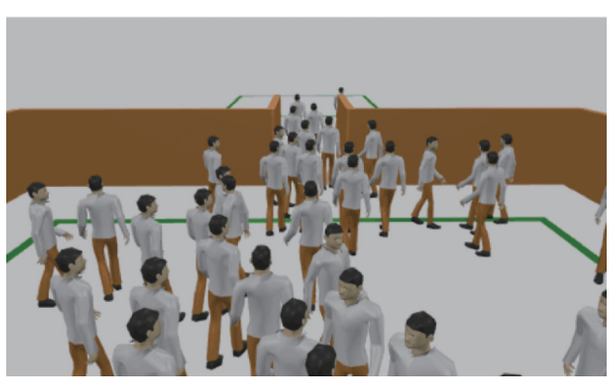


图8　放大下 ISFM 模拟疏散中的迷路现象
Fig. 8　Zooming in on ISFM simulation of disorientation in evacuation

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，ISFM、SFM和实际实验的效率比较分析图。

由图9可知，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，ISFM效

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol35/iss5/19
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0965

率明显优越于SFM。通过计算得到ISFM与实际情况的偏差大致在0.05~0.11 s^{-1}，SFM与实际情况的偏差大致在0.09~0.34 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，ISFM所用的疏散时间较少，效率高于SFM，且与真实情况更为贴近。综上，ISFM模拟的疏散效率优于SFM，ISFM能更加真实地模拟现实情景，更能反映个体疏散行为，更具真实性。

3 模型应用与分析

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，绿地广场内可容纳约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7 m，支线应急道路大于3 m，周边主干道路大于15 m；支线道路未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，如图10所示。

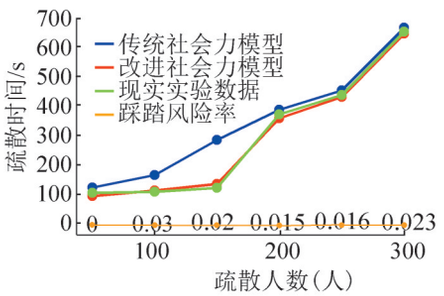


图9 效率比较分析
Fig. 9 Comparative efficiency analysis

国家规定最小避难路宽度为15 m以上[23]，如图11所示，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较大量级人群的基本疏散，并保证疏散行人流在疏散过程中有较好的疏散空间。

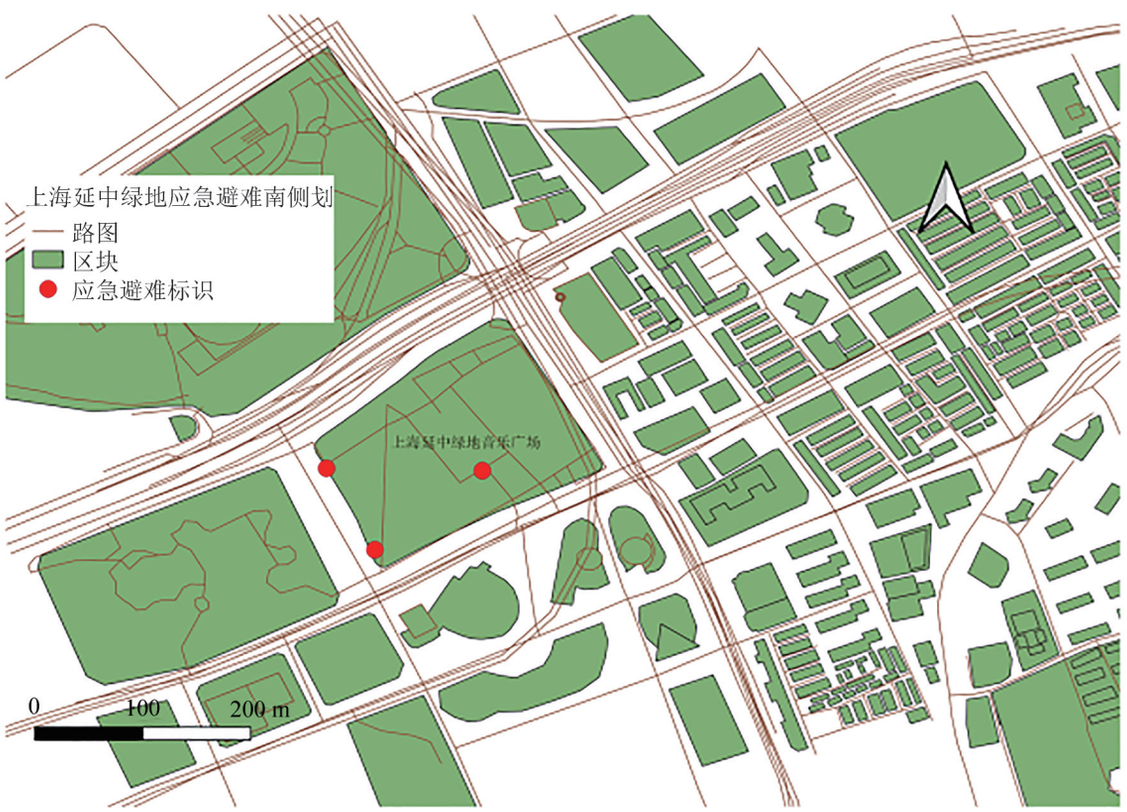


图10 上海延中绿地音乐广场规划
Fig. 10 Shanghai Yanzhong Greenland Music Plaza planning

Journal of System Simulation, Vol. 35 [2023], Iss. 5, Art. 19

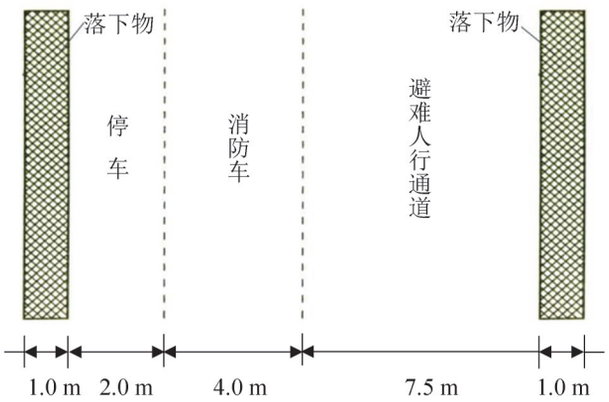


图11 应急避难通道最小宽度分析
Fig. 11 Analysis of minimum width of emergency evacuation routes

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，各支线道路的宽度仅大于3 m，这对人群疏散时的能见度造成消极影响，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。

4 结论

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，较为充分地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，有关焦虑因子等其他心理学内容与实体的联系提供了一种新的思路。

ISFM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SFM所反映的结果更具有真实性。结合彭锐等[24]研究与该模型仿真模拟的结果表明：ISFM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。

相较以往焦虑因子与社会力模型之间的分析探究工作，本模型细分量化了通道宽度、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。

ISFM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、个体差异性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] Dirk Helbing, Illés Farkas, Tamás Vicsek. Simulating Dynamical Features of Escape Panic[J]. Nature, 2000, 407(6803): 487-490.

[2] Han Yanbin, Liu Hong, Moore P. Extended Route Choice Model Based on Available Evacuation Route Set and Its Application in Crowd Evacuation Simulation[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2017, 75: 1-16.

[3] 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, 20(15): 4163-4167.
Li Feng, Liu Xiaoqiang. Simulation of Escape from Fire Based on Agent and Cellular Automaton[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(15): 4163-4167.

[4] Mitsopoulou M, Dourvas N I, Sirakoulis G C, et al. Spatial Games and Memory Effects on Crowd Evacuation Behavior with Cellular Automata[J]. Journal of Computational Science, 2019, 32: 87-98.

[5] Alginahi Y M, Mudassar M, Kabir M N, et al. Analyzing the Crowd Evacuation Pattern of a Large Densely Populated Building[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44(4): 3289-3304.

[6] 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(3): 521-528.
Li Changhua, Yang Jing, Li Zhijie. An Improved Social Force Model for Crowd Simulation[J]. Journal of System

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol35/iss5/19
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0965

Liu et al.: Improved Social Force Model Based on Enhancing Psych behavioral H

Simulation, 2021, 33(3): 521-528.

[7] Anton von Schantz, Harri Ehtamo. Minimizing the Evacuation Time of a Crowd from a Complex Building Using Rescue Guides[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2022, 594: 127011.

[8] 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(8): 29-38.
Xue Yiran, Wu Rui, Liu Jiafeng. Crowd Evacuation Guidance Based on Combined Action-space Deep Reinforcement Learning[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(8): 29-38.

[9] Chen Jieyu, Shi Tianxing, Li Nan. Pedestrian Evacuation Simulation in Indoor Emergency Situations: Approaches, Models and Tools[J]. Safety Science, 2021, 142: 105378.

[10] Chen Xu, Treiber M, Kanagaraj V, et al. Social Force Models for Pedestrian Traffic-state of the Art[J]. Transport Reviews, 2018, 38(5): 625-653.

[11] 邓宇菁, 冯贝新, 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. 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.

[12] Richardson O, Jalba A, Muntean A. Effects of Environment Knowledge in Evacuation Scenarios Involving Fire and Smoke: A Multiscale Modelling and Simulation Approach[J]. Fire Technology, 2019, 55(2): 415-436.

[13] Ding Ning, Zhang Hui, Chen Tao. Simulation-based Optimization of Emergency Evacuation Strategy in Ultra-high-rise Buildings[J]. Natural Hazards, 2017, 89(3): 1167-1184.

[14] Chen Xiaowei, Wang Jian. Entropy-based Crowd Evacuation Modeling with Seeking Behavior of Social Groups[J]. IEEE Access, 2021, 9: 4653-4664.

[15] 曹宁博, 陈永恒, 曲昭伟, 等. 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(2): 352-357.
Cao Ningbo, Chen Yongheng, Qu Zhaowei, et al. Pedestrian Route Choice Model Based on Social Force Model[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2018, 52(2): 352-357.

[16] 王艳. 地铁踩踏事故机制分析及应对措施探讨[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
Wang Yan. Analysis and Discussion on the Subway Stampede Mechanism and Countermeasures[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.

[17] 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(3): 53-55, 82.
Tian Yumin. Exploration of Individual Differences in Crowd Evacuation Psychology and Behavior[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2010, 16(3): 53-55, 82.

[18] 卓霖, 刘婷婷, 刘箴, 等. 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, et al. Simulation Analysis of Crowd Stampeding Near Evacuation Exit[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(11): 234-241.

[19] Busogi M, Shin D, Ryu H, et al. Weighted Affordance-based Agent Modeling and Simulation in Emergency Evacuation[J]. Safety Science, 2017, 96: 209-227.

[20] Cristiani E, Peri D. Handling Obstacles in Pedestrian Simulations: Models and Optimization[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 45: 285-302.

[21] 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, 2017, 473: 97-110.

[22] Liu Chi, Ye Rui, Lian Liping, et al. A Least-effort Principle Based Model for Heterogeneous Pedestrian Flow Considering Overtaking Behavior[J]. Physics Letters A, 2018, 382(20): 1324-1334.

[23] 赵来军, 王珂, 汪建. 城市应急避难场所规划建设理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Zhao Laijun, Wang Ke, Wang Jian. Theory and Methods of Urban Emergency Shelter Planning and Construction [M]. Beijing: Science Press, 2014.

[24] 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. The Planning for Evacuation Area in Japan[J]. New Architecture, 2009(2): 102-106.

Published by Journal of System Simulation, 2023