

2-23-2022

## Multi-floor Evacuation Model Based on Wavelet Neural Network

Juan Wei

*1.School of Computer Science, Chengdu Normal University, Chengdu 611130, China;2.Key Laboratory of Interior Layout Optimization and Security, Institutions of Higher Education of Sichuan Province, Chengdu Normal University, Chengdu 611130, China;; weijuan0905@126.com*

Lei You

*3.College of Computer Science, Chengdu University, Chengdu 610106, China;*

Yangyong Guo

*1.School of Computer Science, Chengdu Normal University, Chengdu 611130, China;2.Key Laboratory of Interior Layout Optimization and Security, Institutions of Higher Education of Sichuan Province, Chengdu Normal University, Chengdu 611130, China;*

Zihai Tang

*1.School of Computer Science, Chengdu Normal University, Chengdu 611130, China;*

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.

---

## Multi-floor Evacuation Model Based on Wavelet Neural Network

### Abstract

**Abstract:** Crowd evacuation in a multi-floor environment is a popular social concern, while the stagnation phenomenon easily occurs when simulating a multi-floor complex environment with the traditional social force model. Therefore, An improved social force model is proposed by a wavelet neural network, and a new multi-floor evacuation model is built. *In the model, a pedestrian's direction of movement is obtained by the field model, which is used as the self-driving direction of the social force model. Meanwhile, the evaluation indexes of the exit congestion degree, path congestion degree, and average velocity in a multi-floor environment are given, and a wavelet neural network is employed to develop an evacuation optimization method.* The evacuation process is simulated by the platform and the improved model, and the key factors in this model are studied. The results show that properly increasing the evacuation velocity of pedestrians can improve evacuation efficiency, but if the velocity is too high, pedestrians will gather in the corridor quickly, which is not conducive to evacuation. In addition, the evacuation time shows a decreasing trend with the increase in the staircase width before becoming stable, and when the staircase width reaches 8 m, further growth of the staircase width will not reduce the evacuation time.

### Keywords

multi-floor, crowd evacuation, social force model, field, wavelet neural network

### Recommended Citation

Juan Wei, Lei You, Yangyong Guo, Zhihai Tang. Multi-floor Evacuation Model Based on Wavelet Neural Network[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(2): 269-277.

# 基于小波神经网络的多楼层疏散模型

魏娟<sup>1,2</sup>, 游磊<sup>3</sup>, 郭阳勇<sup>1,2</sup>, 唐志海<sup>1</sup>

(1. 成都师范学院 计算机科学学院, 四川 成都 611130;  
2. 成都师范学院 室内空间布局优化与安全保障四川省高校重点实验室, 四川 成都 611130;  
3. 成都大学 计算机学院, 四川 成都 610106)

**摘要:** 多楼层环境下室内人群疏散问题是社会关注的热点, 而传统的社会力模型在模拟多楼层环境时容易出现停滞等待现象。基于小波神经网络来改进社会力模型, 建立一种新的多楼层疏散模型。该模型利用场域模型来获得行人的运动方向, 以此作为社会力模型中行人的自驱力方向。同时给出了多楼层环境下出口拥挤度、路径拥挤度和平均速度的评价指标, 并利用小波神经网络建立疏散优化方法。利用搭建的仿真平台和上述改进模型模拟了多楼层疏散过程, 深入分析了影响该模型的关键因素。该环境下疏散结果表明: 适当提高行人的疏散速度有利于提高疏散效率, 但是速度过大会使行人快速聚集在楼道处, 反而不利于疏散; 此外疏散时间随楼梯宽度的增加呈现递减趋势直至平稳, 当楼梯宽度达到8 m时, 再增加楼梯宽度也不能降低疏散时间。

**关键词:** 多楼层; 人群疏散; 社会力模型; 场域; 小波神经网络

中图分类号: X913; TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2022)02-0269-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0718

## Multi-floor Evacuation Model Based on Wavelet Neural Network

Wei Juan<sup>1,2</sup>, You Lei<sup>3</sup>, Guo Yangyong<sup>1,2</sup>, Tang Zhihai<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science, Chengdu Normal University, Chengdu 611130, China;  
2. Key Laboratory of Interior Layout Optimization and Security, Institutions of Higher Education of Sichuan Province, Chengdu Normal University, Chengdu 611130, China; 3. College of Computer Science, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

**Abstract:** Crowd evacuation in a multi-floor environment is a popular social concern, while the stagnation phenomenon easily occurs when simulating a multi-floor complex environment with the traditional social force model. Therefore, An improved social force model is proposed by a wavelet neural network, and a new multi-floor evacuation model is built. *In the model, a pedestrian's direction of movement is obtained by the field model, which is used as the self-driving direction of the social force model. Meanwhile, the evaluation indexes of the exit congestion degree, path congestion degree, and average velocity in a multi-floor environment are given, and a wavelet neural network is employed to develop an evacuation optimization method.* The evacuation process is simulated by the platform and the improved model, and the key factors in this model are studied. The results show that properly increasing the evacuation velocity of pedestrians can improve evacuation efficiency, but if the velocity is too high, pedestrians will gather in the corridor quickly, which is not conducive to evacuation. In addition, the evacuation time shows a decreasing trend with the increase in the staircase width before becoming stable, and when the staircase width reaches 8 m, further growth of the staircase width will not reduce the evacuation time.

**Keywords:** multi-floor; crowd evacuation; social force model; field; wavelet neural network

收稿日期: 2020-09-18

修回日期: 2020-12-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978089); 四川省科技厅应用基础项目(2019YJ0306); 成都师范学院科研创新团队(CSCXTD2020B09)

第一作者: 魏娟(1983-), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向为智能交通。Email: weijuan0905@126.com

## 引言

随着城市建筑的快速增长,人们在多楼层建筑内生活工作的时间越来越长。多楼层建筑内通常内部结构较为复杂,人群可能对楼道或出口等环境不太熟悉,加大了人群的疏散难度。如何在紧急情况下保障人员快速疏散,逐渐成为社会关注的热点。同时,多楼层建筑内人群密度相对较大,聚集程度偏高。虽然人群聚集通常不会发生踩踏事故,但受到外界因素影响,在狭窄空间内就有可能出现危险事故。因此,有必要通过建立多楼层的人群疏散模型来刻画人群的行为特征,发现踩踏事故的形成机理,为防止灾害发生提供参考依据。

目前,微观的人群疏散模型主要分为连续模型和离散模型,连续模型包括社会力和磁力模型等<sup>[1-4]</sup>,离散模型包括元胞自动机、格子气和场域模型等<sup>[5-11]</sup>。Ma等<sup>[12]</sup>提出了一种电梯辅助超高层建筑疏散模型,发现通过电梯将适当比例人员运送到地面,而其他人员通过楼梯撤离的情况下,疏散过程可以达到最佳状态。Kretz等<sup>[13]</sup>通过收集世博会荷兰馆外楼梯上楼行走速度数据发现,有些人在向上走短楼梯时会加速,而对于短楼梯的向下运动或长楼梯的向上运动很少观察到这种现象,短楼梯的平均向上行走速度大约是长楼梯的平均向上行走速度的两倍。Zhang等<sup>[14]</sup>基于低密度群体组织模式建立了一种改进的两层社会力模型,并使用人群动态分组和引导的方式来模拟和再现群体聚集过程,实验结果发现稳定的团队结构和合适的领导者可以减少冲突,提高疏散效率。Takashi<sup>[15]</sup>利用元胞自动机分析人群的疏散效率,给出不同条件下发生相变的临界阈值。Song等<sup>[16]</sup>在元胞自动机模型中引入排斥力、摩擦力和吸引力,通过对比社会力模型验证了改进模型在计算速度等方面的性能优势。Sticco等<sup>[17]</sup>通过对密集人群进行数值模拟,适当修改摩擦系数来改进社会力模型,并给出了摩擦系数如何影响行人从自

由流动状态变化到拥挤状态的过程。Fang等<sup>[18]</sup>在8层高层建筑的楼梯间中进行疏散实验,提取了人群疏散的典型特性和参数,实验结果发现,人群下行速度主要由楼梯间入口缓冲区的合并行为、参与者的力量以及楼梯间的可见性来决定。Lui等<sup>[19]</sup>分析了疏散时间最短的最佳环境布局,并阐述了三维空间的配置与人群疏散所需时间之间的基本关系。Wu等<sup>[20]</sup>讨论分析了每个楼层在每个时间步的疏散动态特性,并基于均质流量与合并流量研究了高层建筑疏散过程的各种参数值。

但是,传统的社会力模型在模拟多楼层复杂环境时容易出现停滞等待的现象,不能有效引导行人进行疏散。对此,本文对社会力模型进行改进,利用场域模型获得行人的运动方向,并作为行人的自驱力方向。同时利用小波神经网络建立疏散优化方法,建立合适的路径规划方法,以此实现人群的快速疏散。

## 1 行人流模型

传统的社会力模型将行人疏散过程中所产生作用力划分为自驱力 $f_{iq}$ 、排斥力 $f_{ij}$ 和吸引力 $f_{iw}$ 。令行人 $i$ 的期望速率为 $v_i$ ,质量为 $m_i$ ,松弛时间为 $\tau$ 。社会力模型所描述的动力学方程为

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_q f_{iq} + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_w f_{iw} \quad (1)$$

令 $v_i^0$ 表示行人 $i$ 的初始速度, $e_i^0$ 表示初始运动方向,自驱力 $f_{iq}$ 可根据公式(2)获得:

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

如果人群处于复杂环境时,传统社会力模型不能有效解决人群的疏散问题。如图1所示,疏散环境中存在U型或者其他复杂障碍物时,可能会使行人出现停滞状态。其原因是传统社会力模型的自驱力方向始终朝着出口位置。

因此,本文将上述传统社会力模型中影响行人运动的自驱力方向进行改进。场域模型将空间离散为格点,给每个格点赋予一定的场域值。行

人通过比较周围格点的场域值大小进行移动, 即使在复杂环境中也能顺利到达出口。本文将结合场域模型来获得行人的运动方向, 并将此方向作为社会力模型的自驱力方向。

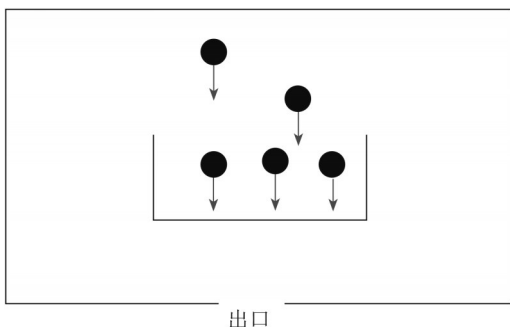


图1 行人停滞示意图  
Fig. 1 Stagnation phenomenon of a crowd

对于二维平面可以采用场域模型 Moore 型结构, 如图 2 所示, 将疏散空间划分为均匀格点, 每个格点按照式(3)所示赋予不同的场域值  $S_{ij}$ 。行人根据周围格点的场域值大小选择下一时刻移动的目标位置。那么本文就将该移动方向作为社会力模型的自驱力方向。

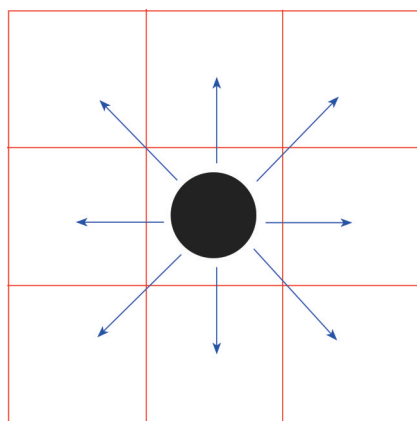


图2 场域模型  
Fig. 2 Field model

$$S_{ij} = \begin{cases} 0 \\ \min(S_{(i-1)j} + 1, S_{i(j-1)} + 1, \\ S_{(i+1)j} + 1, S_{i(j+1)} + 1, \\ S_{(i-1)(j-1)} + \sqrt{2}, S_{(i+1)(j-1)} + \sqrt{2}, \\ S_{(i-1)(j+1)} + \sqrt{2}, S_{(i+1)(j+1)} + \sqrt{2}) \end{cases} \quad (3)$$

但是对于如图 3 所示的多楼层环境, 则需要将上述场域模型进行改进。仍然将疏散空间划分为均匀格点。对于第一层和第二层内部而言, 仍按照式(3)计算每个格点的场域值  $S_{ij}$ 。

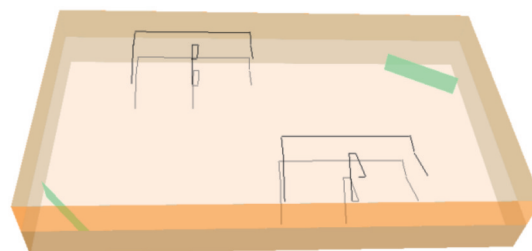


图3 多楼层环境  
Fig. 3 Multi-floor environment

在第一层与楼梯接口处、楼梯区域以及楼梯与第二层接口处, 则按照式(4)所示方法计算场域值。

$$S_{ij} = \min(\min(S_{i(j-1)} + 1, S_{i(j+1)} + 1), \min(S_{(i-1)j} + \sqrt{2}, S_{(i+1)j} + \sqrt{2}), \min(S_{(i+1)(j-1)} + \sqrt{3}, S_{(i-1)(j-1)} + \sqrt{3}, S_{(i-1)(j+1)} + \sqrt{3}, S_{(i+1)(j+1)} + \sqrt{3})) \quad (4)$$

式中:  $\min(S_{i(j-1)} + 1, S_{i(j+1)} + 1)$  比较的是向左右位置移动的场域值;  $\min(S_{(i-1)j} + \sqrt{2}, S_{(i+1)j} + \sqrt{2})$  比较的是向相邻上、下楼梯位置移动的场域值;  $\min(S_{(i+1)(j-1)} + \sqrt{3}, S_{(i-1)(j-1)} + \sqrt{3}, S_{(i-1)(j+1)} + \sqrt{3}, S_{(i+1)(j+1)} + \sqrt{3})$  比较的是向斜向上、下楼梯位置移动的场域值。

为了更清楚展现上述改进方法解决行人停滞现象的问题, 这里选取了一种 U 型障碍物来进行分析, 并分别利用传统社会力模型和上述改进方法进行模拟, 如图 4, 5 所示。从图 4, 5 可以看出, 上述改进方法能够较好地避免行人陷入 U 型障碍物而处于停滞状态, 而基于传统社会力模型来模拟的行人则陷入 U 型障碍物。

## 2 疏散优化方法

人群处于多楼层环境时, 上层的人群通常不清楚底层出口和楼道处的拥堵程度, 从而无法较好地进行路径规划。上述利用场域模型来改进社会力模型只能实现人群的移动, 避免陷入停滞等待状态,

而不能对路径进行优化。因此, 本文利用小波神经网络来解决多楼层多出口环境下的人群疏散问题, 建立合适的路径规划方法。小波神经网络结合了小

波变换和 BP 神经网络, 用小波基代替隐含层节点中的激励函数, 能够有效解决传统人工神经网络收敛速度慢、易陷入局部最优等问题。

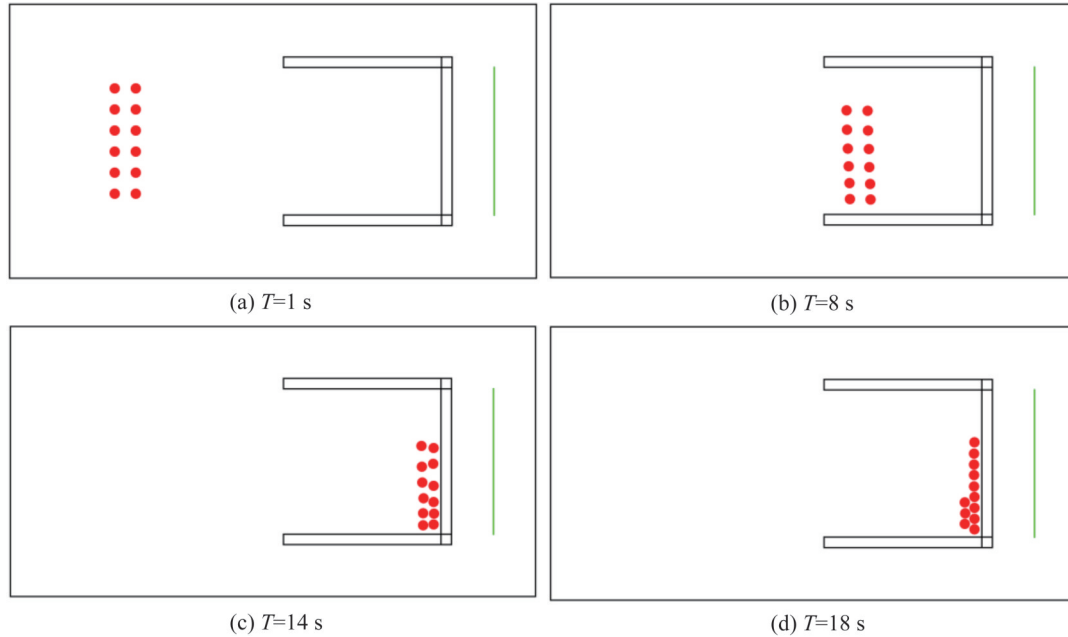


图4 停滞现象模拟(传统社会力模型)

Fig. 4 Simulation of stagnation phenomenon (traditional social force model)

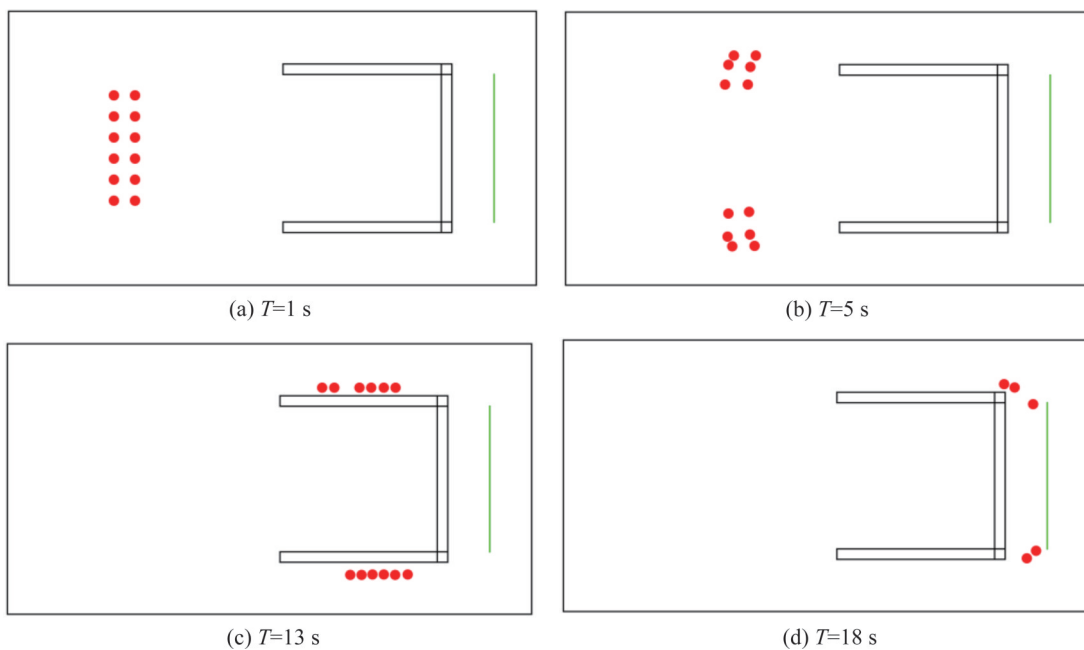


图5 停滞现象模拟(改进方法)

Fig. 5 Simulation of stagnation phenomenon (improved method)

这里首先定义人群疏散过程中使用的评价指标。

某时刻  $t$  出口拥挤度  $C_E(t)$  定义为

$$C_E(t) = \frac{N_k(t)}{\delta} \quad (5)$$

式中:  $N_k(t)$ 为时刻  $t$  出口  $k$  附近的人群数量;  $\delta$  为出口附近计算拥挤度的面积。

同时, 针对上述场域模型提供的路径(包括途经的楼道区域), 定义某时刻  $t$  路径拥挤度  $C_p(t)$  为

$$C_p(t) = \frac{N_p(t)}{L} \quad (6)$$

式中:  $N_p(t)$ 为时刻  $t$  路径  $P$  上的人群数量;  $L$  为该路径长度。

某时刻  $t$  路径  $P$  上的平均速度  $V_p(t)$  为

$$V_p(t) = \frac{1}{N_p(t)} \sum_{i=1}^{N_p(t)} v_i(t) \quad (7)$$

式中:  $v_i(t)$ 为  $t$  时刻路径  $P$  上第  $i$  个行人的速度。

本文结合上述 3 个指标: 出口拥挤度  $C_E(t)$ , 路径拥挤度  $C_p(t)$  和路径平均速度  $V_p(t)$ , 利用小波神经网络建立多楼层多出口环境下的疏散优化方法, 以此实现人群的快速疏散。

这里建立的小波神经网络优化模型参数主要设置为: 输入层  $X_i$  为出口拥挤度  $C_E(t)$ 、路径拥挤度  $C_p(t)$ 、路径平均速度  $V_p(t)$ 、场域值等数据序列, 输出层  $Y$  为路径规划坐标序列值, 中间层的  $\beta_{ij}$  和  $\beta_j$  为小波神经网络的权值,  $H_j$  为小波函数。

令  $num$  为输入层神经元个数, 即疏散环境关键状态测点数。  $\beta_{ij}$  为输入层第  $i$  个节点和隐含层第  $j$  个节点的连接权重值;  $a_j$  和  $b_j$  分别为小波基函数的尺度因子和平移因子;  $x_n^i$  为输入层第  $i$  个关键状态测点的第  $n$  个观测值。那么隐含层的输出  $H(j)$  可表示为

$$H(j) = H_j \left[ \sum_{i=1}^{num} \beta_{ij} X_n^i - \frac{b_j}{a_j} \right] \quad (8)$$

进一步, 小波神经网络输出层的输出可表示为

$$y^n = \sum_j \beta_j H(j) \quad (9)$$

式中:  $\beta_j$  为隐含层第  $j$  个节点和输出层的权重值。同时这里定义预测误差  $\varepsilon$  为

$$\varepsilon = \sum_n |Y^n - y^n|^2 \quad (10)$$

式中:  $Y^n$  为期望最优输出路径。令权值学习速率为  $\mu$ , 尺度因子学习率为  $\theta$ , 动量因子为  $\phi$ 。根据

预测误差  $\varepsilon$  反馈修正小波神经网络的参数  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $\omega_{ij}$  和  $\omega_j$ 。

$$\begin{cases} \beta_{ij}^{k+1} = \beta_{ij}^k + \mu \frac{\partial \varepsilon_n}{1 + \partial \omega_{ij}^k} + \phi(1 + \beta_{ij}^k - \beta_{ij}^{k-1}) \\ \beta_i^{k+1} = \beta_i^k + \mu \frac{\partial \varepsilon_n}{1 + \partial \beta_i^k} + \phi(1 + \beta_i^k - \beta_i^{k-1}) \\ a_i^{k+1} = a_i^k + \theta \frac{\partial \varepsilon_n}{1 + \partial a_i^k} + \phi(1 + a_i^k - a_i^{k-1}) \\ b_i^{k+1} = b_i^k + \theta \frac{\partial \varepsilon_n}{1 + \partial b_i^k} + \phi(1 + b_i^k - b_i^{k-1}) \end{cases} \quad (11)$$

根据上述描述的小波神经网络和改进的社会力模型, 这里建立多楼层多出口环境下的疏散优化方法, 命名为 wavelet neural network social force (WNNSF)。具体步骤如下所述:

(1) 初始化: 设置疏散人群数量为  $N$ , 行人初始速度  $v_i$ 。同时初始化小波神经网络的参数值  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $\beta_{ij}$ ,  $\beta_j$ ,  $\mu$  和  $\theta$ , 以及迭代最大值  $M$  和误差阈值  $Err$ 。

(2) 数据预处理: 设疏散环境中某一观测点的状态数据序列  $X=(X_1, X_2, \dots, X_n, \dots, X_N)$ 。其中,  $X_i$  对应疏散环境中的出口拥挤度  $C_E(t)$ 、路径拥挤度  $C_p(t)$ 、路径平均速度  $V_p(t)$ 、场域值  $S_{ij}$  等参数值。并对上述数据进行归一化处理。

(3) 构造小波神经网络: 这里采用式(12)所示的 Mexican Hat 小波基函数, 并构造小波神经网络。

$$y = \sqrt{2\pi} x^2 e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (12)$$

(4) 路径预测: 将状态数据序列输入上述建立的小波神经网络, 根据式(10)计算路径预测误差  $\varepsilon$ 。

(5) 迭代循环: 比较预测误差值  $\varepsilon$  与误差阈值  $Err$  的关系, 如果满足条件则停止迭代跳转到(6), 否则继续执行迭代。

(6) 反馈修正: 根据网络预测误差  $\varepsilon$  修正小波神经网络的参数  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $\beta_{ij}$ ,  $\beta_j$ ,  $\mu$  和  $\theta$ , 使其预测值更加逼近最优值。

(7) 进一步判断迭代次数是否到达最大值  $M$ , 如未达到则跳转到(4)重复训练, 否则结束算法。

### 3 数值仿真

根据上述建立的多楼层多出口环境下的人群疏

散模型 WNSF, 这里构造了实验仿真平台进行分析。多楼层多出口的疏散环境如图 6 所示。

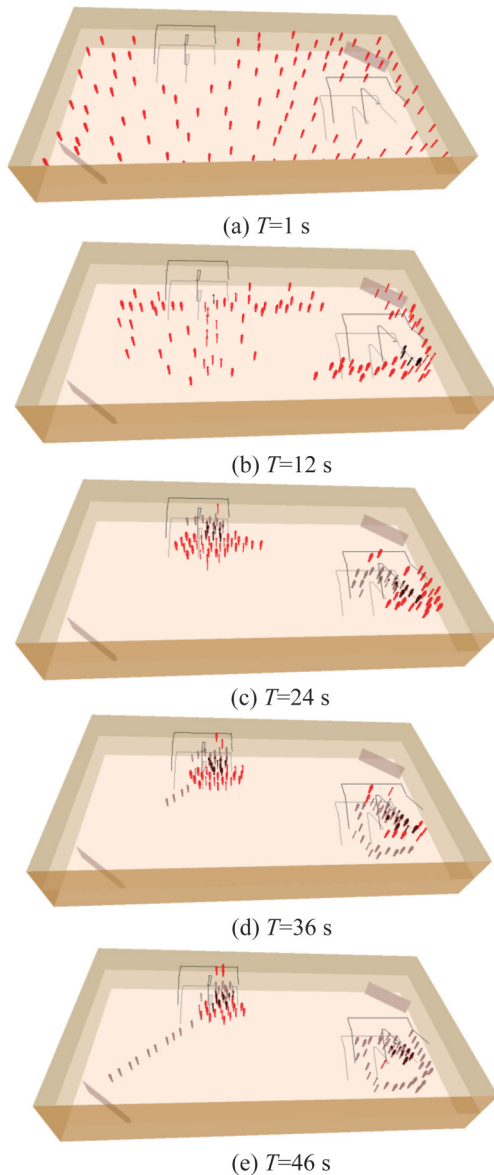


图 6 WNSF 模型的疏散模拟  
Fig. 6 Evacuation simulation of WNSF model

疏散空间共两层(多层疏散的场景存在遮挡问题, 为了能更清楚展现疏散状况, 所以本文采用了两层进行模拟), 每层楼的面积是  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 。有 2 座楼梯, 楼梯宽度为  $3\text{ m}$ , 如图中黑色线条所示。并且在第 1 层设置了 2 个出口, 可同时容纳 10 人通过, 如图中褐色区域所示。人在地面的投影面积大小设置为  $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ , 人处于第 2 层时, 仿真平台

采用红色表示, 一旦进入楼梯和第 1 层区域让其颜色改变。初始情况下设置了 100 人随机分布在第 2 层不同位置。同时参照以往文献和实验平台测试结果<sup>[13,21]</sup>, 这里设置其他参数: 行人初始速度  $v_i=1.3$ , 权值学习速率为  $\mu=2$ , 尺度因子学习率为  $\theta=0.8$ , 动量因子为  $\phi=1.5$ , 迭代最大值  $M=200$ 。这里分别根据 WNSF 模型和传统社会力模型来进行模拟仿真, 模拟过程如图 6, 7 所示。模拟平台中采用的传统社会力模型只是针对平层内部的疏散。从图 6 可以看出, 行人能够顺利地第 2 层区域疏散到第 1 层出口。而图 7 所示的传统社会力模型模拟过程中, 出现了行人因为楼梯边缘障碍物阻挡而停滞的现象, 在计算疏散参数时本文将此类情况剔除。在图 8 中对比了传统社会力模型和本文疏散模型 WNSF 在模拟该环境下的疏散状况, 其中纵坐标  $N_i$  表示当前时刻完成疏散的人数。从图 8 可以看出, 本文所提模型能够更快完成疏散。

进一步地, 这里对影响 WNSF 的关键因素进行数值分析。为了减少各项统计指标的影响, 每项指标分别取 20 次运行结果的平均值。图 9 给出了不同权值学习速率  $\mu$  下疏散时间  $T$  与人群数量  $N$  之间的变化关系。从图中可以看出, 随着人群数量的增加, 疏散时间呈现递增趋势。并且在人数较少(如 110 人以下时)的情况下, 权值学习速率越大对应的疏散时间越大; 而在人数较多(如 125 人以上时)的情况下, 权值学习速率越大对应的疏散时间越小。这是因为人数较多的情况下, 权值学习速率越大代表小波神经网络方法越能有效学习到更多人的疏散性能状况, 使得疏散效率高的行人策略传递到其他人。

图 10 给出了不同人群数量  $N$  下的疏散时间  $T$  与行人初始速度  $v_i$  之间的变化关系。从图 10 可以看出, 随着行人初始速度的增加, 疏散时间呈现出先降低后增加的趋势, 并且人群数量越大疏散时间越长。这一点刚好吻合“快即是慢”现象。适当提高行人的疏散速度有利于提高疏散效率, 但是速度过大会使行人快速聚集在楼道或出口处, 反而不利于疏散。



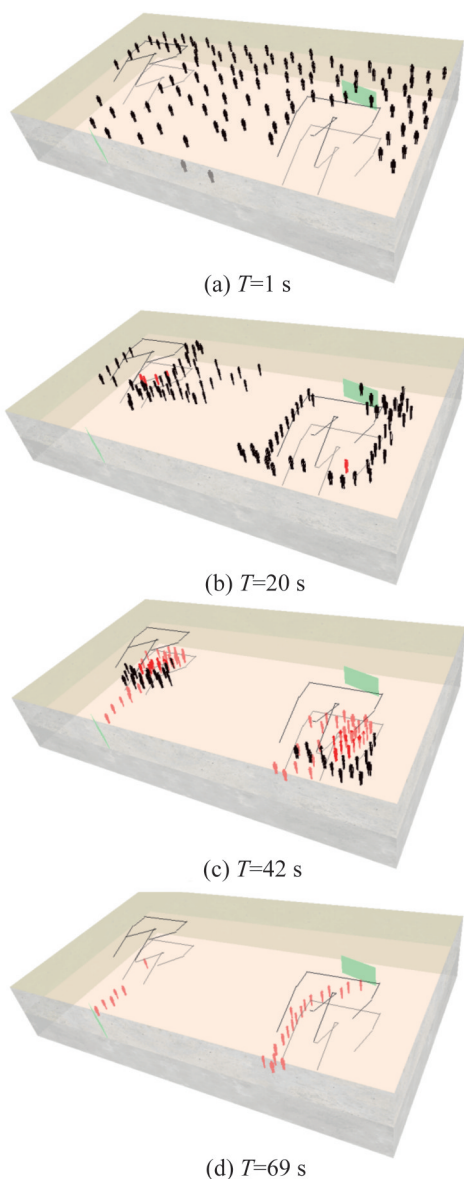


图 7 传统社会力模型的疏散模拟  
Fig. 7 Evacuation simulation of traditional

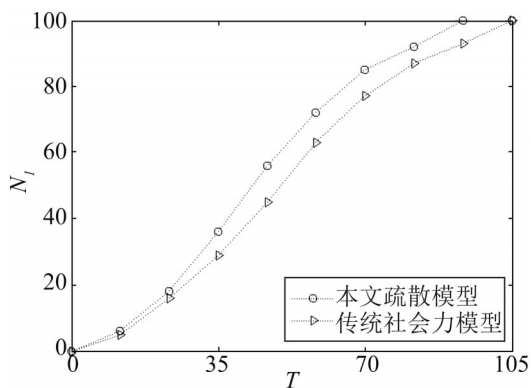


图 8 疏散性能比较  
Fig. 8 Comparison of evacuation performance

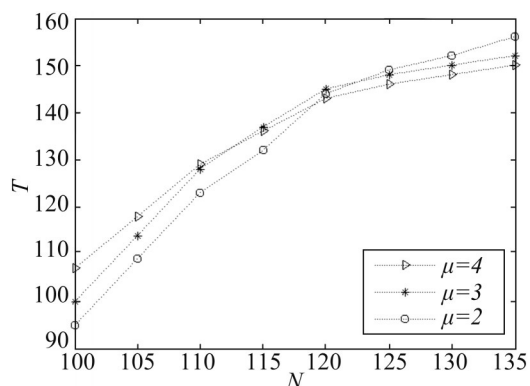


图 9 疏散时间  $T$  与人群数量  $N$  之间的变化关系  
Fig. 9 Relation between evacuation time  $T$  and the number of crowds  $N$

最后, 这里定义楼梯宽度  $w$  为两座楼梯宽度之和, 图 11 给出了不同人群数量  $N$  下疏散时间  $T$  与楼梯宽度  $w$  之间的变化关系。随着楼梯宽度的增加, 疏散时间呈现递减趋势直至趋于平稳。从图 6 的模拟过程可以发现, 第 2 层行人快速聚集在楼梯处, 形成了拥堵现象。说明楼梯宽度对于多楼层的疏散起着至关重要的作用, 适当加大楼梯宽度有利于提高疏散效率。同时, 从图中可以发现, 当楼梯宽度达到 8 m 左右大小时, 再增加楼梯宽度也不能降低疏散时间。

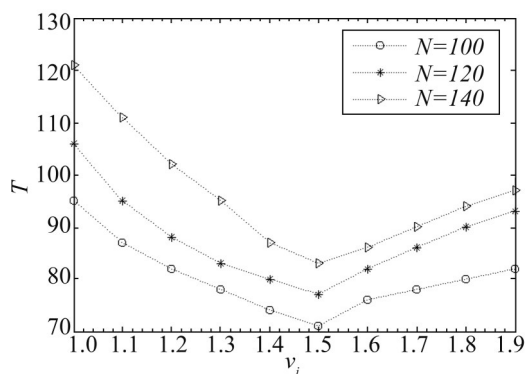


图 10 疏散时间  $T$  与行人初始速度  $v_i$  之间的变化关系  
Fig. 10 Relation between evacuation time  $T$  and initial velocity  $v_i$  of crowds

从以上的分析结果和以往的研究结果可以发现, 微观模型(如传统社会力模型、元胞自动机模型等)在简单环境下来模拟人群的疏散过程具有可行性, 能够再现诸如“快即是慢”、“成行”等典

型现象,但在复杂环境下模拟人群疏散则具有较大局限性,容易出现停滞或疏散路径不合理等问题,应该综合宏观或全局的优化方法,使得模拟过程更加符合真实情况。

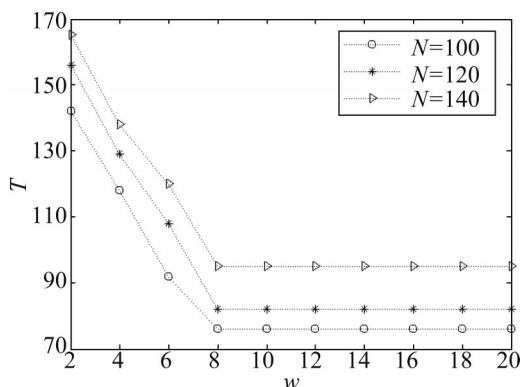


图11 疏散时间 $T$ 与楼梯宽度 $w$ 之间的变化关系  
Fig. 11 Relation between evacuation time  $T$  and staircase width  $w$

## 4 结论

针对社会力模型在模拟多楼层复杂环境时容易出现停滞等待的现象,本文基于小波神经网络来对社会力模型进行改进,形成了一种新的多楼层疏散模型。同时构造了实验仿真平台进行分析,并基于该模型模拟了多楼层疏散过程。对比传统的社会力模型,该模型显示了较好性能。此外,模拟结果表明:①在该疏散环境下,当人数达到如125人以上时,适当加大权值学习速率有利于提高疏散效率,权值学习速率越大使得疏散效率高的行人策略能够更快传递到其他人。②随着行人初始速度的增加,疏散时间呈现出先降低后增加的趋势,但是速度过大会使行人快速聚集在楼道处,形成“快即是慢”现象。③随着楼梯宽度的增加,疏散时间呈现递减趋势直至趋于平稳,在文中模拟环境下,当楼梯宽度达到8 m左右大小时,再增加楼梯宽度也不能降低疏散时间。在今后与实际疏散应用相结合时,该模型可考虑应用于诸如航站楼、教学楼等多楼层环境。

## 参考文献

- [1] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating Dynamical Features of Escape Panic[J]. Nature(S0028-0836), 2000, 407: 4282-4286.
- [2] Xu Mingliang, Wu Yunpeng, Lü Pei, et al. miSFM: on Combination of Mutual Information and Social Force Model Towards Simulating Crowd Evacuation[J]. Neurocomputing(S0925-2312), 2015, 168: 529-537.
- [3] Jiang Yanqun, Chen Bokui, Li Xi, et al. Dynamic Navigation Field in the Social Force Model for Pedestrian Evacuation[J]. Applied Mathematical Modelling(S0307-904X), 2020, 80: 815-826.
- [4] Liu Qian. A Social Force Model for the Crowd Evacuation in a Terrorist Attack[J]. Physica A(S0378-4371), 2018, 502: 315-330.
- [5] 董力耘, 陈立, 段晓茵. 基于教室人群疏散实验的行人建模和模拟[J]. 物理学报, 2015, 64(22): 220505. Dong Liyun, Chen Li, Duan Xiaoyin. Modeling and Simulation of Pedestrian Evacuation from a Single-exit Classroom based on Experimental Features[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(22): 220505.
- [6] 李明华, 袁振洲, 许琰, 等. 基于改进格子气模型的对向行人流分层现象的随机性研究[J]. 物理学报, 2015, 64(1): 018903. Li Minghua, Yuan Zhenzhou, Xu Yan, et al. Randomness Analysis of Lane Formation in Pedestrian Counter Flow based on Improved Lattice Gas Model[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(1): 018903.
- [7] 杨灿, 陈群, 陈璐. 考虑在能见度受限下行人跟随行为特性的建模与模拟[J]. 物理学报, 2019, 68(24): 240504. Yang Can, Chen Qun, Chen Lu. Modeling and Simulation of Following Behaviors of Pedestrians under Limited Visibility[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(24): 240504.
- [8] Tao Y Z, Dong L Y. A Cellular Automaton Model for Pedestrian Counter Flow with Swapping[J]. Physica A (S0378-4371), 2017, 475: 155-168.
- [9] Luo Lin, Fu Zhijian, Cheng Han, et al. Update Schemes of Multi-velocity Floor Field Cellular Automaton for Pedestrian Dynamics[J]. Physica A(S0378-4371), 2018, 491: 946-963.
- [10] 金辉, 郭仁拥. 基于元胞传输模型的楼梯区域行人运动[J]. 物理学报, 2019, 68(2): 020501. Jin Hui, Guo Renyong. Study of Pedestrian Flow on Stairs with a Cellular Transmission Model[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(2): 020501.
- [11] 岳昊, 何栋梁, 张滨雅, 等. 行人步行设施空间疏散特征指标[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(9): 17-24.

- Yue Hao, He Dongliang, Zhang Binya, et al. Spatial Characteristics Indexes of Pedestrian walking Facilities for Evacuation[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(9): 17-24.
- [12] Ma J, Lo S M, Song W G. Cellular Automaton Modeling Approach for Optimum Ultra High-rise Building Evacuation Design[J]. Fire Safety Journal(S0379-7112), 2012, 54: 57-66.
- [13] Kretz T, Grünebohm A, Kessel A, et al. Upstairs Walking Speed Distributions on a Long Stairway[J]. Safety Science, (S0925-7535), 2008, 46(1): 72-78.
- [14] Zhang Hao, Liu Hong, Qin Xin, et al. Modified Two-layer Social Force Model for Emergency Earthquake Evacuation[J]. Physica A(S0378-4371), 2018, 492: 1107-1119.
- [15] Takashi N. Four Species CA Model for Facing Pedestrian Traffic at Rush Hour[J]. Applied Mathematical Modelling (S0307-904X), 2012, 36(2): 702-711.
- [16] Song Weiguo, Yu Yanfei, Wang Binghong, et al. Evacuation Behaviors at Exit in CA Model with Force Essentials: A Comparison with Social Force Model[J]. Physica A(S0378-4371), 2006, 371: 658-666.
- [17] Sticco I M, Frank G A, Cornes F E, et al. A Re-examination of the Role of Friction in the Original Social Force Model[J]. Safety Science(S0925-7535), 2020, 121: 42-53.
- [18] Fang Zhiming, Song Weiguo, Li Zijuan, et al. Experimental Study on Evacuation Process in a Stairwell of a High-rise Building[J]. Building and Environment(S0360-1323), 2012, 47: 316-321.
- [19] Lui C H, Fong N K, Lorente S, et al. Constructal Design of Evacuation from a Three-dimensional Living Space[J]. Physica A(S0378-4371), 2015, 422: 47-57.
- [20] Wu Guanyuan, Huang Haochang. Modeling the Emergency Evacuation of the High Rise Building based on the Control Volume Model[J]. Safety Science(S0925-7535), 2015, 73: 62-72.
- [21] Sevcan Yilmaz, Yusuf Oysal. Fuzzy Wavelet Neural Network Models for Prediction and Identification of Dynamical Systems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks(S1045-9227), 2010, 21(10): 1599-1609.