

基于改进社会力模型的老旧小区道路疏散仿真研究

晏晗琪¹, 张 垚²

¹北方工业大学土木工程学院, 北京

²南昌职业大学工程技术学院, 江西 南昌

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年4月5日; 发布日期: 2025年4月16日

摘 要

老旧小区道路狭窄、人员密度大, 道路内临时停放车辆进一步压缩有效宽度, 易导致疏散拥堵。本文基于改进社会力模型, 构建适应占道车辆场景的人员避让行为仿真模型, 并进行行人疏散仿真分析。结果表明, 通道密度增加会显著降低行人速度, 加剧拥挤; 适当拓宽道路可提升疏散效率, 但当宽度超过5.5 m后, 效率提升趋缓。本研究可为老旧小区道路疏散优化提供参考。

关键词

老旧小区, 应急疏散, 空间障碍物, 社会力模型

Simulation Study on Road Evacuation in Old Residential Areas Based on an Improved Social Force Model

Hanqi Yan¹, Yao Zhang²

¹School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing

²School of Engineering Technology, Nanchang Vocational University, Nanchang Jiangxi

Received: Mar. 14th, 2025; accepted: Apr. 5th, 2025; published: Apr. 16th, 2025

Abstract

The roads in old residential areas are narrow with high population density, and temporarily parked vehicles further reduce the effective width, which can easily lead to evacuation congestion. Based on an improved social force model, this study constructs a pedestrian avoidance behavior simulation model adapted to scenarios with road-occupying vehicles and conducts pedestrian evacuation

simulation analysis. The results show that increasing passage density significantly reduces pedestrian speed and aggravates crowding. Appropriately widening the road can improve evacuation efficiency, but when the width exceeds 5.5 m, the efficiency improvement tends to slow down. This study provides a reference for optimizing road evacuation in old residential areas.

Keywords

Old Residential Area, Emergency Evacuation, Spatial Obstacles, Social Force Model

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市居住区是城市应急治理的基础单元, 肩负着应对各种灾害、保障社会安全稳定的重要责任, 也是综合防灾减灾体系的关键环节。在城市中, 老旧小区因其狭窄的道路和有限的停车空间, 常常存在道路被临停车辆占用的现象。特别是在紧急疏散情况下, 临时停放的车辆成为行人的障碍物, 迫使疏散人员不断调整行进路线。这不仅影响疏散效率, 还使行人流动模式更加复杂, 增加了疏散过程中的阻力[1]。

居住小区是社区的重要组成部分, 当前国内主要以社区作为研究对象来涵盖对小区各方面的评价和优化。当前, 城市社区的防灾研究仍存在较大局限, 已有研究多侧重于公共场所的社交与休憩功能[2], 而关于小区内居民紧急疏散的探讨仍显不足。徐波[3]等人提出了基于不同层级行政划分的防灾空间优化方案, 包括市、区、社区三个层面, 但研究未涉及疏散过程中的实际问题, 同时对于疏散模拟过程中涉及的人员行为、路径选择及可能的影响因素尚缺乏系统性分析。因此, 研究老旧小区道路障碍物场景下的居民疏散问题, 不仅对提升居民的疏散安全具有重要意义, 还对推动老旧小区改造及城市防灾减灾工作的科学化、规范化起到了积极作用。

在人员疏散仿真模型上, 国内外研究主要采用宏观模型和微观模型两类方法。宏观模型如气态动力学模型、流体动力学模型和连续介质模型等, 通过将人群视为连续流体, 模拟高密度情况下人群向目标运动的过程, 以反映人群在疏散中的避障和交汇行为[4]。在微观模型中, 元胞自动机模型、社会力模型和基于 Agent 的模拟方法被广泛应用。元胞自动机模型通过设定个体行为规则, 模拟疏散过程中微观个体的运动[5]; 社会力模型由 Helbing 提出, 考虑了人员在疏散时的心理和社会行为特征, 能够真实反映行人在避障过程中的相互作用和动态行为[6]。然而, 传统社会力模型的应用存在局限性, 特别是在面对有障碍物的复杂场景时, 模型容易出现行人穿透障碍、轨迹震荡等问题[7]。为解决这一问题, 本文基于改进的社会力模型, 提出了一种适用于老旧小区道路场景的疏散仿真模型, 能够更准确地模拟行人在临时停放车辆等障碍物前的避让行为。

本文旨在从老旧小区居民道路空间疏散效率的角度出发, 分析占道停车对行人疏散的影响, 探索行人在该类通道内的运动规律, 并提出相应的疏散优化建议。研究成果不仅能够为老旧小区的应急预案提供理论依据, 优化城市防灾减灾体系, 还能为改善小区居民的生活环境和提升城市应急管理水平提供技术支持。

2. 老旧小区道路疏散仿真模型

2.1. 改进社会力模型

在社会力模型中, 行人受到的合力和速度变化是通过叠加仿真场景中行人自身所受的驱动力 f_i^m 、行

人间的作用力 f_{ij} 和行人与边界或障碍物之间的作用力 f_{iw} ，得到行人受到的合力 $f_{i\text{合}}$ ，最后应用牛顿第二定律，通过逐步迭代确定行人在任意时刻的速度和位置，动力学表达式如下：

$$\begin{cases} f_{i\text{合}} = m_i \frac{dv_i}{dt} = f_i^m + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_w f_{iw} \\ \alpha = \frac{f_{i\text{合}}}{m_i} \\ v_i(t) = v_i(0) + \alpha t \\ s_i(t) = s_{i-1}(t) + \int_0^t v_i(t) dt \end{cases} \quad (1)$$

其中，行人自驱力表示行人 i 在弛豫时间 τ_i 内以期望速度 v_i 向期望方向 e_i^0 运动，代表行人自身朝出口或目标方向前进的主观意识作用，表达式如下：

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

式中， m_i 为行人质量， v_i^0 为行人为期望速度大小， e_i^0 为行人在 t 时刻期望速度方向；弛豫时间 τ_i 是一个时间常数，表示行人调整速度以达到目标速度的反应时间，参数具体详见表 1。

行人间的作用力表达式如下：

$$f_{ij} = \left[A_i \exp\left(\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_i}\right) + kg(r_{ij} - d_{ij}) \right] n_{ij} + \kappa g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij} t_{ij} \quad (3)$$

式中， $A_i \exp\left(\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_i}\right) n_{ij}$ 代表行人靠近时的心理排斥作用，如果行人之间的距离 d_{ij} 小于半径总和 d_{ij} ，则会产生该排斥力，并伴随着产生正压力 $kg(r_{ij} - d_{ij}) n_{ij}$ 抵消身体的压缩和摩擦力 d_{ij} 阻碍行人的切向运动。 A_i ， B_i ， k ， κ ，均为模型参数，具体详见表 1。

f_{iw} 描述行人与边界之间的相互作用力，它的形式和行人间的作用力 f_{ij} 非常相似，其表示式如下：

$$f_{iw} = \left[A_w \exp\left(\frac{r_i - d_{iw}}{B_w}\right) + kg(r_i - d_{iw}) \right] n_{iw} + \kappa g(r_i - d_{iw}) \langle v_i, t_{iw} \rangle t_{iw} \quad (4)$$

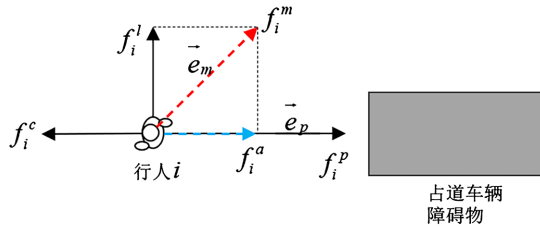


Figure 1. Schematic diagram of self-driving force improvement in pedestrian avoidance behavior

图 1. 行人避让行为过程中自驱力改进示意图

行人在面临障碍物时，往往会在接近障碍物的正向适当减速，并在远离障碍物的切向适当加速，以此实现避让行为[8]。故本文在考虑障碍物影响下的改进社会力模型自驱动力计算中，引入冲突力 f_i^c 与换道力 f_i^l 分别描述移动行人与障碍物冲突时的正向减速与侧向加速行为，形成一对共轭的前进力 f_i^a 和换道力 f_i^l ，修正原始的期望驱动力，实现行人对障碍物的避让行为，如图 1 所示，原始自驱力 f_i^m 和冲突力 f_i^c 在期望方向 e_p 会形成一个合力，即为行人所受的前进力 f_i^a 。同时在方向 e_m 上的换道力 f_i^l 的作用下，

将原始自驱力修正为前进力 f_i^a 和换道力 f_i^l 的合力, 即为修正后的行人自驱力 f_i^m , 上述计算关系如式(5), 可推导出修正后的行人自驱力为式(6)。

$$f_i^a = f_i^p + f_i^c \quad (5)$$

$$f_i^m = f_i^l + f_i^a$$

$$f_i^m = f_i^l + f_i^p + f_i^c \quad (6)$$

冲突力 f_i^c 在行人避让行动启动后产生, 表示行人为了避免碰撞障碍物所产生的正向减速度, 其计算公式如式(7), 冲突力的大小与冲突时间 t_i^c 的长短成反比, 冲突时间越短, 行人越早撞击障碍物, 其减速以避免冲突的心理越强烈, 产生的冲突力作用越大; 而冲突时间越长则反之。

$$f_i^c = \left\| \frac{m_i v_i^0}{\tau} \right\| \cdot \cos \alpha \cdot \exp \left(-\frac{t_i^c}{C_i} \right) \cdot (-e_p) \quad (7)$$

式中, $\left\| \frac{m_i v_i^0}{\tau} \right\|$ 为反应行人的移动能力的参数, 与期望速度相联系, 其取值可以保证行人保持一定的速度前进; $\cos \alpha$ 为行人相对速度和与障碍物相对位置两个向量的夹角余弦值; t_i^c 冲突时间为行人发生碰撞所需要的时间; C_i 为行人面临冲突时反应的灵敏度, C_i 取值的增加会使行人反应时间更短。

由式(2)和式(5)可以计算出前进力的大小, 计算公式如下:

$$f_i^a = f_i^p + f_i^c = m_i \frac{v_i^0(t) e_p^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} + A_i \cdot B_i \cdot \exp \left(-\frac{t_i^c}{C_i} \right) \cdot (-e_p) \quad (8)$$

换道力和前进力是一对共轭力, 则 f_i^l 的计算公式如下:

$$f_i^l = \sqrt{\|f_i^p\|^2 - \|f_i^c\|^2} \cdot d = \sqrt{-2f_i^p \cdot f_i^c - \|f_i^c\|^2} \cdot d \quad (9)$$

式中, d 为行人避让障碍物而换道方向的单位向量。

2.2. 模型架构

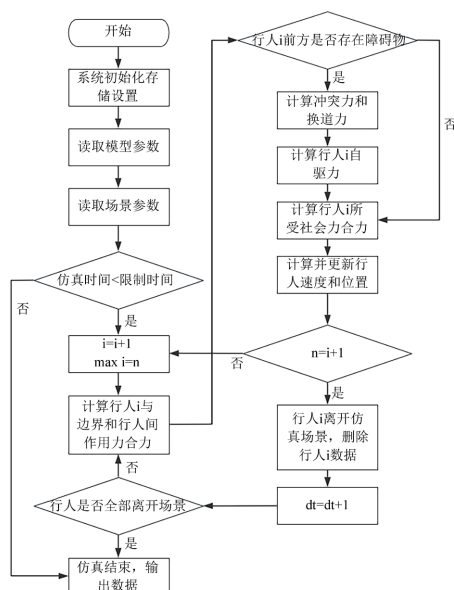


Figure 2. Flowchart of pedestrian evacuation simulation model

图 2. 行人疏散仿真模型流程图

本文使用 MATLAB 作为疏散模型仿真平台, 通过 MATLAB 编程生成通道内行人避让行为仿真模型, 该模型基于改进社会力模型计算行人受到的合力和加速度, 实时变化行人的速度和位置, 不仅可以更好地模拟行人疏散的复杂过程, 还能够基于仿真数据进行深入分析。疏散模型的流程见图 2。

2.3. 模型参数设置

改进社会力模型参数采用 D. Helbing [9]和 Jia [10]等的研究成果进行确定, 具体见表 1, 仿真通道场景参数见表 2。行人半径依据《中国成年人人体尺寸》(GB 10000-1988)中成年男性和女性肩宽的平均值 40 cm 设定。行人期望速度取男性步行速度 1.37 m/s 和女性步行速度 1.24 m/s [11]的平均值, 即 1.3 m/s。仿真场景参数见表 2。

Table 1. Simulation parameters of the improved social force model
表 1. 改进社会力模型仿真参数

模型参数	参数意义	取值范围	单位
τ	松弛时间	0.5	s
A_i	行人间作用力强度	2000	N
B_i	行人间影响范围	0.08	m
A_w	行人与边界之间作用力强度	10	m/s ²
B_w	行人与边界之间影响范围	0.4	m
k	正压力弹性系数	1.2×10^5	kg/s ²
κ	滑动摩擦系数	2.4×10^5	kg/m·s
C_i	行人冲突力参数	4	m
t_i^c	冲突时间	3.25	s
r_i	行人半径	0.2	m
v_i	行人期望速度	1.3	m/s

Table 2. Simulation scenario parameters
表 2. 仿真场景参数

场景参数	取值	单位
通道宽度	4.5	m
占道车辆长度	4.5	m
占道车辆宽度	2	m

3. 行人避让行为仿真与对比

以直行通道存在占道停车为仿真场景, 相关参数见表 2。设置行人数量为 8, 分别以 1 s 间隔随机出现在通道出口位置, 占道车辆障碍物位于道路旁, 坐标为(15, 4.5)。

仿真过程如图 3 所示, 在传统社会力模型下, 由于缺乏避让机制, 行人到达障碍物前不会主动调整速度或方向, 而是与障碍物发生反弹和振荡, 导致运动轨迹异常, 不符合真实行人行为, 如图 3(a)。在此情况下, 部分行人顺利到达出口, 而受障碍物影响的行人 a 被完全阻挡, 无法继续移动。

采用改进社会力模型后, 行人能够预测潜在碰撞并采取避让措施, 如图 3(b)。在初始阶段, 行人 b、c、d 向出口行进时检测到前方障碍物, 并预测未来可能发生碰撞。当 $t=12.5$ s 时, 行人 b 的预测冲突时

间超过心理避让阈值，触发避让行为，调整速度方向。同理，行人c和行人d在 $t = 16.1\text{ s}$ 时改变速度方向开始避让障碍物，当 $t = 19\text{ s}$ 时，所有行人均成功绕行至障碍物下方，避免了碰撞，提高了疏散效率。

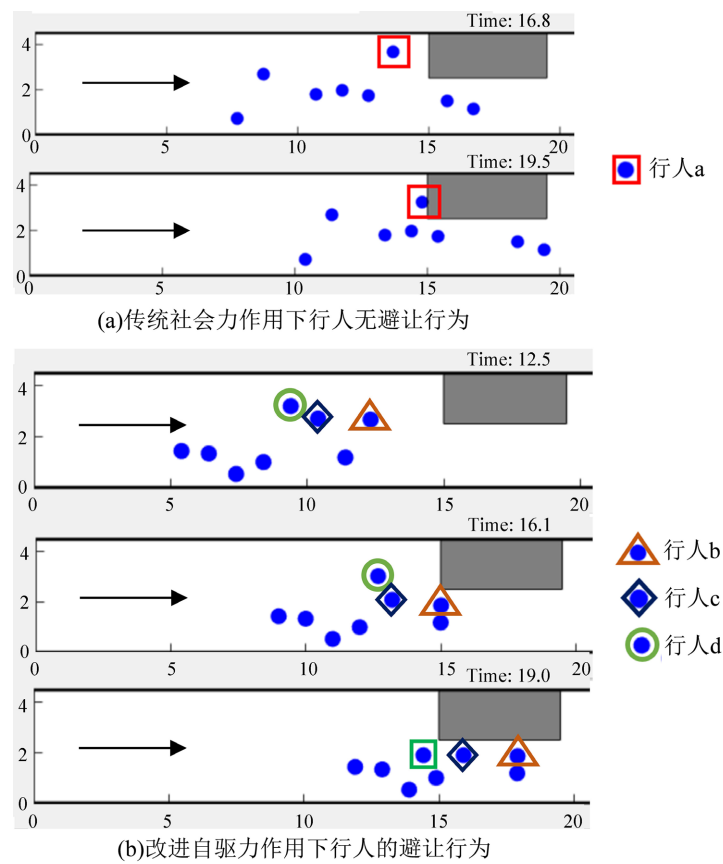


Figure 3. Comparison of pedestrian evacuation simulation considering road-occupying parking scenarios
图 3. 考虑占道停车场景下行人疏散仿真对比

由图 4 行人 d 避让行为轨迹图可以看出，行人在仿真开始时往往先按照直线移动，在距障碍物一定距离时开始改变移动方向以绕过障碍物，对行人行走轨迹影响较大，形成了一个“避让三角区”区域。

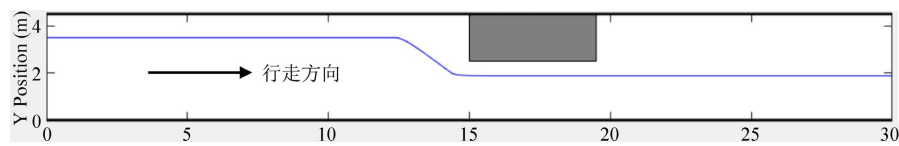
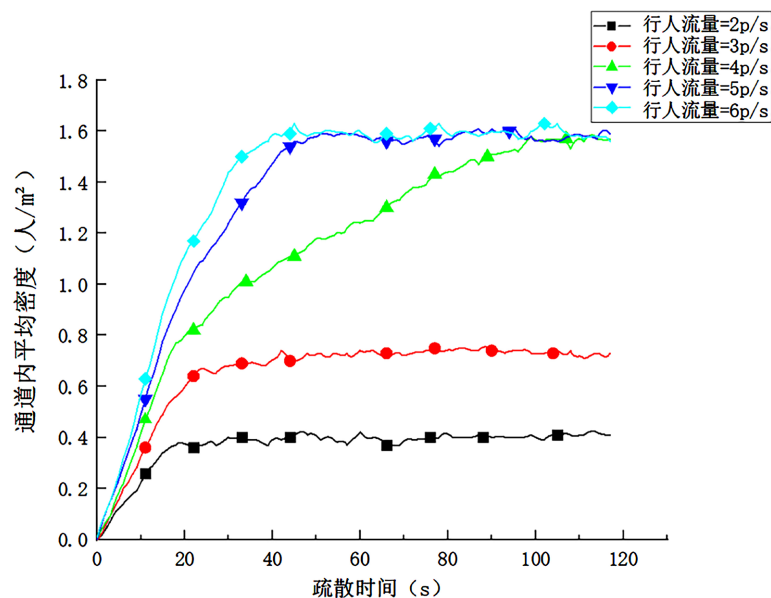


Figure 4. Pedestrian d avoidance behavior trajectory diagram
图 4. 行人 d 避让行为轨迹图

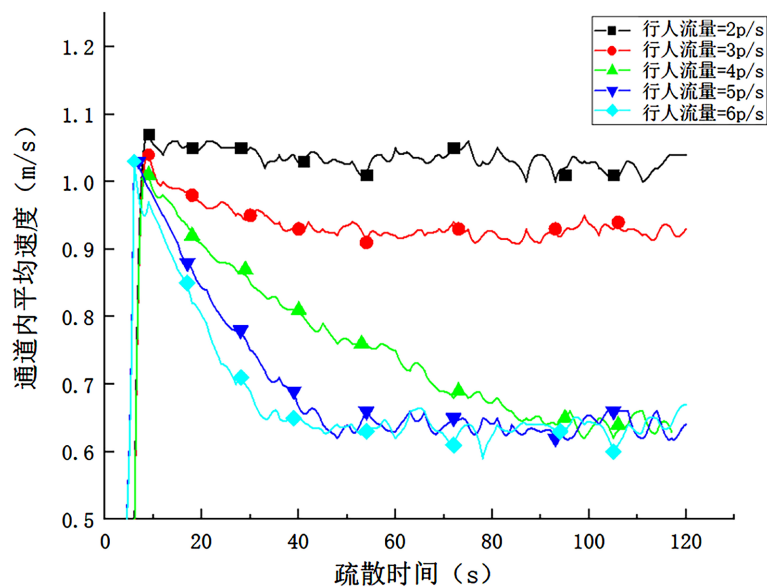
4. 老旧小区占道停车道路疏散模拟

4.1. 行人流量对疏散的影响

疏散模拟设定直行通道内通道长度 $L = 20\text{ m}$ ，宽度 $D = 4.5\text{ m}$ ，占道车辆长度 $l = 4.5\text{ m}$ ，宽度 $d = 2\text{ m}$ ，控制进入该占道停车通道的行人流量为实验变量，分别设定行人进入流量为 2 p/s 、 3 p/s 、 4 p/s 、 5 p/s 、 6 p/s ，统计输出各仿真时长内通道内平均密度和平均速度变化如图 5 所示。



(a) 通道内平均密度变化



(b) 通道内平均速度变化

Figure 5. Changes in average speed and average density in the passageway with different pedestrian flow inputs

图 5. 输入不同行人流量的通道内平均速度和平均密度变化

从中可以得出,随着疏散时间的增加,通道内平均密度均逐渐增加,并在达到一定峰值后趋于稳定;行人速度也逐渐下降并趋于稳定,且不同进入流量下稳定后的平均速度有明显差异。具体来看,行人进入流量越大,通道内行人数量越多,因此密度的峰值也越高。行人进入通道流量为 2 p/s 和 3 p/s 的情况下密度增长较慢,并在低密度下行人流趋于稳定,此时行人有充足的行走空间,行走时受到其他行人的干扰程度较小,速度变化也较小,行人流平均速度保持 1.05 m/s 和 0.94 m/s,分别降低了 4.5%和 14.5%。行人进入流量为 5 p/s 和 6 p/s 的情况下密度增长最快,且在 $t=50\text{s}$ 左右达到最高峰值,由于通道内行人数量较多,行人间的干扰程度较大,使得平均速度大大降低,趋于稳定后保持在 0.62 m/s 左右,速度下降 44%。

4.2. 道路宽度对疏散的影响

由上述对 4.5 m 宽的占道停车通道疏散行人流分析可知, 输入通道的行人流量为 4 p/s 时, 通道内行人的平均密度达到峰值, 并且由于占道车辆的影响, 行人入口至占道车辆区域内最大密度达到 2.08 p/m², 行人速度受到较大影响, 造成大面积的拥堵, 疏散效率大大降低。在输入行人流量为 5 p/s 的条件下, 通过改变占道停车通道的宽度, 计算随着时间变化成功疏散的行人比例作为量化疏散效率的指标, 以此衡量疏散效果。各占道停车通道的疏散成功人数见表 3, 由此可见, 从 4.5 宽通道拓宽至 5 m 宽时, 在经过 100 s 后疏散成功人数从 250 增至 290 人, 增加了 40 人; 拓宽至 5.5 m 后, 疏散成功人数增加了 19 人; 进一步拓宽通道至 6 m 后, 相比 5.5 m 通道仅增加了 5 人。计算成功疏散的行人比例如图 6 所示, 可以直观看出疏散效率的变化程度。

Table 3. Number of successfully evacuated pedestrians in road-occupying parking passages of different widths
表 3. 不同宽度的占道停车通道疏散成功人数

疏散时间(s)	4.5 m 宽通道疏散人数 (人)	5 m 宽通道疏散人数 (人)	5.5 m 宽通道疏散人数 (人)	6 m 宽通道疏散人数 (人)
20	5	5	5	6
30	28	31	36	36
40	57	65	70	72
50	90	99	107	116
60	122	138	150	155
70	158	175	190	195
80	185	213	231	233
90	219	252	270	275
100	250	290	309	314

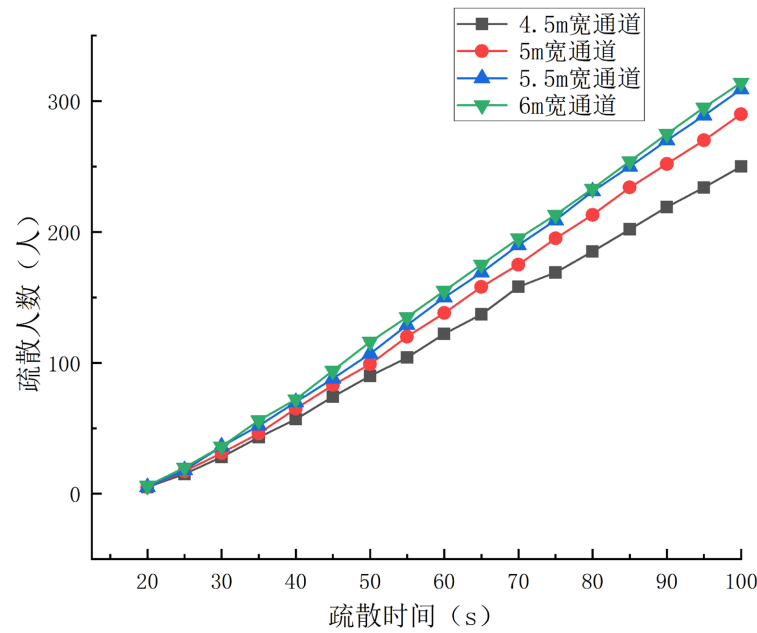


Figure 6. Comparison of evacuation efficiency in road-occupying parking passages of different widths
图 6. 不同宽度占道停车通道的疏散效率对比

整体来看,不同宽度疏散通道在行人疏散效率方面表现出显著差异。随着疏散时间的增加,疏散效率呈现出线性增长趋势,通道宽度对疏散效率的影响主要体现在曲线的斜率上,较宽通道的曲线增长速率较高;4.5 m 通道的疏散效率显著低于其他通道,其增长速率较为缓慢,说明由于存在拥堵状况,该通道在单位时间内可通过的行人人数较少。5 m 通道的疏散效率有所提升,表现为曲线相对更陡峭,与 4.5 m 通道相比,其疏散能力得到一定改善,能够缓解拥堵状况。5.5 m 与 6 m 通道的曲线几乎重叠,说明当通道宽度达到一定程度(超过 5.5 m)时,进一步增加宽度对提升疏散效率的作用减弱。

5. 结论

本文基于避让行为的改进社会力模型,模拟分析了不同行人进入流量和道路宽度对老旧小区占道停车通道内疏散效率的影响。结果表明,行人流量较低时,通道内密度增长缓慢,行人受干扰较小,速度保持较高水平;流量较大时,密度迅速上升,行人速度显著下降,疏散效率降低。此外,道路宽度对疏散效率影响显著。4.5 m 通道因拥堵疏散效率最低,通道宽度超过 5.5 m 后,进一步扩宽对效率提升作用有限。因此,应综合考虑行人流量与通道宽度,优化疏散设计,提高疏散效率。

参考文献

- [1] 金盛. 减灾社区步行应急疏散空间评价及优化策略研究——以广州市商品房型老旧小区为例[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- [2] 朱雯. 高密度城市社区公共交往空间的改进策略研究[J]. 美术教育研究, 2015(13): 68-69.
- [3] 徐波, 关贤军, 尤建新. 城市防灾避难空间优化模型[J]. 土木工程学报, 2008, 41(1): 93-98.
- [4] 孙立博, 孙晓峰, 秦文虎. 基于连续模型和动力学仿真模型的高密度人群仿真算法[J]. 计算机学报, 2016, 39(7): 1375-1392.
- [5] 李伟, 张鑫龙. 考虑个体行为的改进 CA 模型人员疏散研究[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(17): 275-282.
- [6] 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.
- [7] 张发, 宋志华, 吴诗辉, 等. 多障碍物场景中的行人运动模型[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(6): 1599-1608.
- [8] 罗倩. 考虑障碍物影响的通道行人实验与仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [9] Helbing, D. and Molnár, P. (1995) Social Force Model for Pedestrian Dynamics. *Physical Review E*, **51**, 4282-4286. <https://doi.org/10.1103/physreve.51.4282>
- [10] Jia, X., Yue, H., Tian, X. and Yin, H. (2017) Simulation of Pedestrian Flow with Evading and Surpassing Behavior in a Walking Passageway. *Simulation*, **93**, 1013-1035. <https://doi.org/10.1177/0037549717734633>
- [11] 尚凯, 翟国方, 钟光淳, 等. 基于多智能体疏散仿真模拟的城市高密度片区避难空间优化研究——以南京某高校为例[J]. 震灾防御技术, 2023, 18(2): 398-410.