

关于紧急情况下人员疏散问题的研究

朱文艳, 欧阳思荣, 杨亚妮, 何艳, 莫宏敏*

吉首大学数学与统计学院, 湖南 吉首

收稿日期: 2023年5月22日; 录用日期: 2023年7月23日; 发布日期: 2023年7月31日

摘要

随着社会和时代的发展, 各种集会活动的数量和规模逐渐增加, 紧急情况下人员疏散问题亟待解决。本文针对紧急情况下的人员疏散问题进行了建模研究, 并采用蒙特卡洛算法随机模拟出人们安全离开耗时最短的最优模型。

关键词

人员疏散, 元胞自动机, 多元线性回归模型, 蒙特卡洛算法, 最优目标规划模型

Research on Personnel Evacuation in Emergency Situations

Wenyan Zhu, Sirong Ouyang, Yani Yang, Yan He, Hongmin Mo*

College of Mathematics and Statistics, Jishou University, Jishou Hunan

Received: May 22nd, 2023; accepted: Jul. 23rd, 2023; published: Jul. 31st, 2023

Abstract

With the development of society and times, the number and scale of various gatherings are increasing gradually, and the problem of personnel evacuation in emergency needs to be solved urgently. In this paper, the modeling of evacuation problem in emergency is studied and Monte Carlo algorithm is used to randomly simulate the optimal model of the shortest time for people to leave

*通讯作者。

文章引用: 朱文艳, 欧阳思荣, 杨亚妮, 何艳, 莫宏敏. 关于紧急情况下人员疏散问题的研究[J]. 建模与仿真, 2023, 12(4): 4223-4232. DOI: 10.12677/mos.2023.124385

safely.

Keywords

Personnel Evacuation, Cellular Automata, Multiple Linear Regression Model, Monte Carlo Algorithm, Optimal Goal Programming Model

Copyright © 2023 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. 绪论

1.1. 研究背景及进展

由于大规模集会活动的数量和规模的增加,当紧急情况发生时,人员是否能有组织、有秩序地疏散逐渐成为极重要的问题。为了避免真人实验研究所造成的大量成本浪费和不必要的损失,缓解伤亡事件可能发生的严重后果,规避紧急条件下疏散实验的危险性。我们需要尝试在不同情况下以不同参数及数据来建立数学模型进行研究,模拟在疏散逃生时人员可能出现的所有情况,找出影响人员逃生的因素并对其做出分析,了解其呈现出的不同动力学行为,科学合理地指导人员紧急疏散问题。1898年,疏散人口模式被霍华德首次提出,疏散研究从此进入了人们的视野。1959年,建筑科学研究院工业及民用建筑研究室首次对疏散计算方法进行总体阐述并改进,为我国疏散领域的研究奠定了基础。人员疏散的研究逐渐趋向智能化[1]。由于这方面的数据较为缺乏,所以这方面的研究并不成熟,目前疏散领域正处于探索阶段,还有很大的发展空间,国内研究人员对人员疏散已经有了较好的总结,为了保证研究结果的重复性和可靠性,应进一步加强研究。

1.2. 研究的目标及思路

通过对研究背景及进展的分析,本文的研究目标及思路如下:

1) 基于元胞自动机原理,构建危险度来描述行人对紧急情况的认识,进行紧急情况下人员疏散的模拟。再根据相关文献及模拟情况设立影响人群疏散的因素,通过 Excel 筛选出对人群疏散影响较大的因素即关键因素。对关键因素进行相关性分析,再根据收集的数据进而建立多元线性回归模型,得到各关键因素与疏散时间的定量关系。同时基于梯度提升模型得到定性关系。从而对紧急情况下的疏散问题做出科学合理的指导。

2) 基于本文所确定的关键参数进行 0-1 规划,对疏散速率随时间变化关系曲线通过单一变量法得出相应的曲线图像,研究各关键因素对曲线的影响。并对提高疏散速率给出一些指导性的建议。

3) 基于蒙特卡洛算法随机模拟出空间的人口分布、两个门的位置分布,再建立条件约束方程得出人们安全离开耗时最短的最优模型。根据建立的最优模型,单独改变门的宽度,研究剩余人数随时间变化的动态过程。

1.3. 符号说明

本论文中使用了一些特定的符号、缩写和标记,为了帮助读者理解,以下是这些符号的含义和解释。

符号	说明	单位
x_1	平均年龄	岁
x_2	情况紧急程度	
x_3	门的宽度	m
x_4	人群焦虑程度	
x_5	人数	
q_i	第 i 个人的所处位置坐标	
v	人的步行速度	m/s
y	每分钟通过人数	
t_i	第 i 个人到门前的时间	s
$w_i(t)$	t 时刻的第 i 门前的队列长度	m
D_{ij}	距第 i 人到第 j 个门的距离	m
N_i	第 i 门进出最大流量	
A_i	第 i 个人的状态(未在门前或在门前)	
l_{AC}	在 A 区、C 区危险度	
l_B	在 B 区危险度	

请注意，以上符号仅为本论文中使用的一部分，其他符号和术语将在上下文中进行解释。在整个论文中，我们将遵循统一的符号使用标准，确保读者能够准确理解和解释论文的内容。

2. 基于元胞自动机的疏散模拟

2.1. 元胞自动机原理

基于元胞自动机(CA)原理[2]，将所要研究的区域均匀地分成小正方形(即元胞)，这些小正方形对应着真实情况下的 $0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 的空间，见图 1。单元格状态、邻域规则和更新规则是 CA 模型的重要组成部分。单元格状态：行人、墙壁、空格、出口；领域规则：Moore 邻居；基本规则：每位行人有八个方向的走向，根据每个方向的危险度不同，行人选择各方向的概率也各不相同。每位行人在下一个状态优先选择危险度最低的单元格，若单元格内有障碍物则转向危险度次低的单元格；若同时有多个危险度相同的单元格且为空地，则优先考虑具有较多危险度低的邻居的单元格；若邻居单元格的危险度情况近似相同，则随机选择。假设黄色元胞的状态为行人，它的下一个状态由它及绿色元胞共同决定。

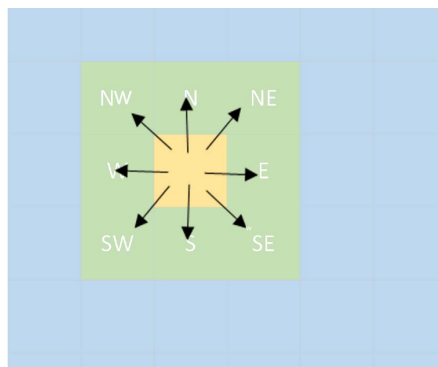


Figure 1. Cellular automata schematic
图 1. 元胞自动机原理图

2.2. 危险度的构建

依据行人离出口的距离远近将房间划分为 A、B、C 三个区域，见图 2，根据行人离出口的远近程度定义危险度。

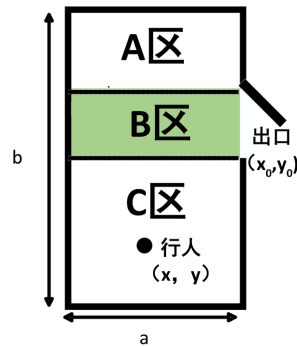


Figure 2. Simulate the layout of a scene in a single-door interior

图 2. 模拟单门室内的场景布局

在 A 区、C 区范围内的危险度如下：

$$l_{AC} = |x - x_0| + |y - y_0| \quad (1)$$

在 B 区范围内的危险度如下：

$$l_B = |x - x_0| \quad (2)$$

式中， (x_0, y_0) ——出口的坐标位置， (x, y) ——行人的坐标位置。

2.3. 行人运动规则

路人根据距离出口的危险度比较陌生环境中的每个网格点的位置危险度，距路人位置危险度最小的这一个网格点将会成为路人运动目标的下一个网格点[3]。如果运动目标网格点的位置危险度比路人现在所在网格点的位置危险度小，那么该网格点就是路人新的运动目标网格点；如果路人的运动目标网格点的位置危险度和路人现在所在的网格点位置危险度相等，那么路人会运动到目标网格点的概率为 0.5，在原地一动不动的概率为 0.5；如果运动目标网格点的位置危险度比该路人所在网格点的位置危险度大，那么路人将以运动到该网格点的概率为 0.2，静止在原地不动的概率为 0.8。在路人有多个可以选择目标网格点，区域 A 内和区域 C 路人将平等的概率选择其一网格点作为运动目标网格点。如果路人在 B 区，根据移动目标网格点的位置的概率不同，运动到该网格点。下面是在不同情况下路人运动到该方向网格点的概率 (P_{stop} 为路人在该时刻静止不动的概率)。

如果 S、SW (或 SE) 方向的网格点均为运动目标网格点，则 $P_s = 0.8$ ， $P_{sw} = 0.2$ ($P_{se} = 0.2$)；

如果 SW、SE 方向的网格点均为运动目标网格点，则 $P_{sw} = P_{se} = 0.5$ ；

如果 S、SW、SE 方向的网格点均为运动目标网格点，则 $P_s = 0.8$ ， $P_{sw} = P_{se} = 0.1$ ；

如果 W、E 方向的网格点均为运动目标网格点，则 $P_{stop} = 0.5$ ， $P_w = P_e = 0.25$ ；

如果 NW、N、NE 方向中任意两个网格点均为运动目标网格点，则 $P_{stop} = 0.8$ ， $P_{sw} = P_x = 0.1$ 或 $P_w = P_{ne} = 0.1$ 或 $P_{sw} = P_{ne} = 0.1$ ；

如果 NW、N、NE 方向的网格点均为运动目标网格点，则 $P_{stop} = 0.8$ ， $P_{rw} = P_v = P_{ne} = 0.213$ 。所

有路人根据上面的规则同步更新位置,若一个网格点同时被多个路人选中作为运动目标网格点(发生冲突)时,根据路人到达目标网格点的距离来确定次路人进入目标网格点的概率。 n 个路人同时选择相同的目标网格点时,第 i 个路人进入该目标网格点的概率为:

$$P_i = \frac{1 - \frac{\Delta d_i}{\sum_{i=1}^n \Delta d_i}}{n-1} \quad (3)$$

这里 Δd_i 表示第 i 个行人到目标格点的距离。

2.4. 模拟结果

取初始时刻房间内 500 人随机分布的状态,通过 MATLAB 代码的运行,本文实现了紧急情况下人员疏散模拟的动态过程。由图 3 可以看出,在紧急情况下,行人一蜂窝地向出口快速聚集,造成了暂时性的堵塞,但是随着时间的流逝,行人最终从房间全部疏散完毕。

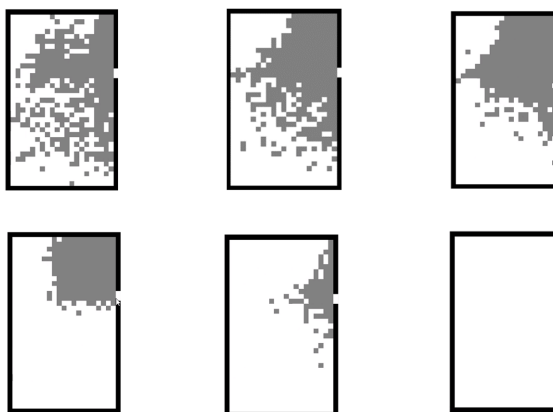


Figure 3. Simulate the dynamic evacuation process
图 3. 模拟动态疏散过程

3. 疏散效果的研究

3.1. 基于多元线性回归模型的疏散效果研究

根据相关文献及模拟情况,整理出了在密闭空间内人群在面临突发情况时影响疏散效果的相应数据,通过 Excel 筛选出人群焦虑程度,情况紧急程度[1],人数,门的宽度[4],平均年龄五个比较突出的影响因素见图 4,并以此作为可供选择的关键因素进行下一步深入的研究。

为了研究在无障碍的规则方形空间内的疏散效果即每分钟会通过的人数,以人数,门的宽度,人群焦虑程度,情况紧急程度,平均年龄来构建多元线性回归模型:

$$y(x) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (n=1,2,3,4,5). \quad (4)$$

3.2. 结论及检验

通过相关数据使用 matlab 的多元线性回归函数求解可以得到:

$$y(x) = 199.3326 + 0.0004x_1 + 0.9686x_2 + 0.0079x_3 - 1.1761x_4 + 0x_5, \quad (5)$$

并对该回归方程进行残差分析见图 5。

人数	门的宽度	人群焦虑程度	情况紧急程度	平均年龄	每分钟通过人数	疏散时间(min)
3650	2	80	2	24	198	18.43434343
2650	2	80	2	24	198	13.38383838
4100	3	72	2.5	21.6	203	20.19704433
4220	2	62	2	18.6	198	21.31313131
2420	3	64	3	19.2	205	11.80487805
2180	2	78	1.5	23.4	190	11.47368421
3380	3	80	3	24	205	16.48780488
2200	4	92	4	27.6	196	11.2244898
4000	2	78	2	23.4	198	20.2020202
3560	3	85	3	25.5	205	17.36585366

Figure 4. Filter out important influence data
图 4. 筛选出的重要影响因素数据

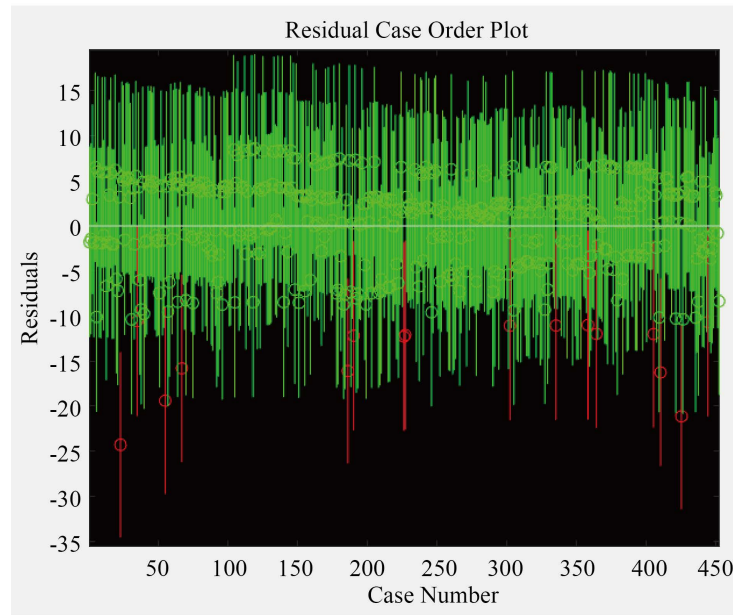


Figure 5. Residual plot of multiple linear regression function (5)
图 5. 多元线性回归函数(5)的残差图

根据残差图分析可知，这是一个在可接受范围的回归方程。
本文结合了熵权法进一步进行了分析，如表 1。

Table 1. Entropy weight method results
表 1. 熵权法结果

项	熵权法		
	信息熵值 e	信息效用值 d	权重
门的宽度	0.973	0.027	39.761%
人群焦虑程度	0.993	0.007	9.901%

Continued

每分钟通过人数	0.995	0.005	7.523%
人数	0.992	0.008	11.581%
情况紧急程度	0.985	0.015	22.787%
平均年龄	0.994	0.006	8.447%

由此得出多元线性回归的权重判断与熵权法的一致性验证了该模型的合理性。

4. 疏散速率的研究

4.1. 基于单一变量法的疏散速率研究

人群密度较大的时候, 人群疏散效率较低, 速度较慢。这里要研究疏散速率随时间的变化规律, 所以要客观的描述人群的疏散速率。

设房间大厅内的人数为 a 人, 由于人的步行速度与人的焦虑程度成正相关[5]。所以可以设立人群焦虑程度为 x_4 , 人群的步行速度为 $v = g(x_4)$, 在问题一所假设的无障碍房间大厅中第 i 个人到门前的路程为 d_i , 第 i 个人步行到门前的时间为

$$t_i = \frac{d_i}{g(x_4)} (i = 1, 2, \dots, n), \quad (6)$$

这里我们忽略人的反应速度, 房间大厅内人群在面对突发情况时将同时向门靠近, 反应随时间 t_i 变化, 人群中的第 i 个人的状态仅有两种如下:

$$A_i = \begin{cases} 0, & \text{不在门前,} \\ 1, & \text{在门前.} \end{cases} \quad (7)$$

所以在 t 时刻到达门前的人数为 $\sum_{i=1}^n A_i$, 门能通过的最大流量是 N , 任意时刻通过的人流量为

$$Z(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n A_i, & \sum_{i=1}^n A_i \leq N \\ N, & \sum_{i=1}^n A_i > N \end{cases} \quad (8)$$

使用 matlab 中的 0-1 规划, 控制在问题 1 中已经确定的关键因素。

- (1) 人数: 设为 300 人;
- (2) 门的宽度: 最大进出流量为 3;
- (3) 设置人的步行速度分别为 1, 2, 3, 4, 5 (m/s)。

探究人群在门前的队列人数与时间的函数关系图像。

通过分析图 6 可以得出步行速度的快慢对疏散完成所需要的时间影响不大。

维持条件(2) (3)不变, 将人群数上调至 1000 人, 相比人数为 300 人时疏散完成所需时间越来越长, 见图 7。

维持条件(1) (3)不变, 增加门的宽度也就是最大出流量, 人群疏散完成时间将越来越短见图 8。

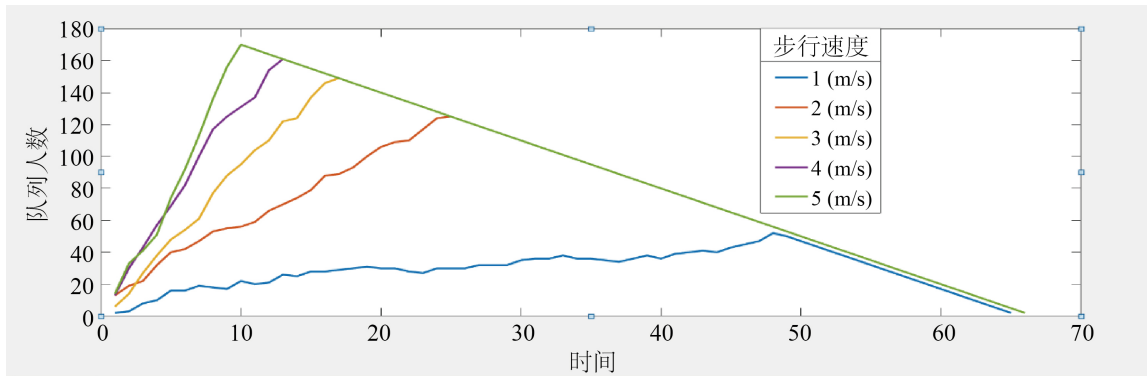


Figure 6. Time change of crowd at different walking speeds (300 people)
图 6. 人群在步行速度不同时时间变化(300 人)

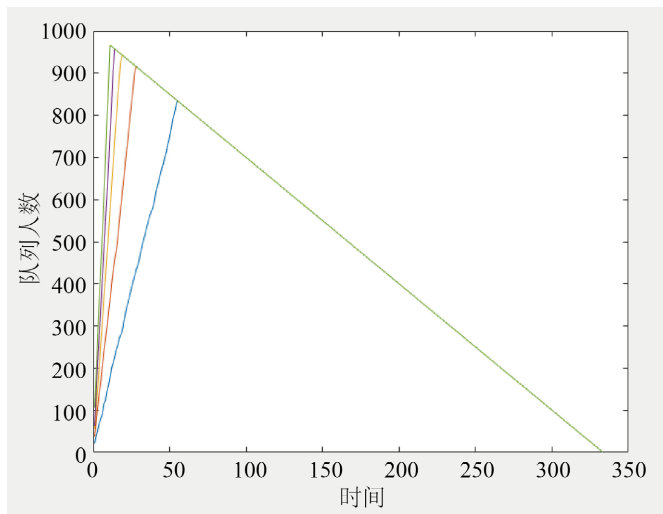


Figure 7. Time change of crowd at different walking speeds (1000 people)
图 7. 人群在步行速度不同时时间变化(1000 人)

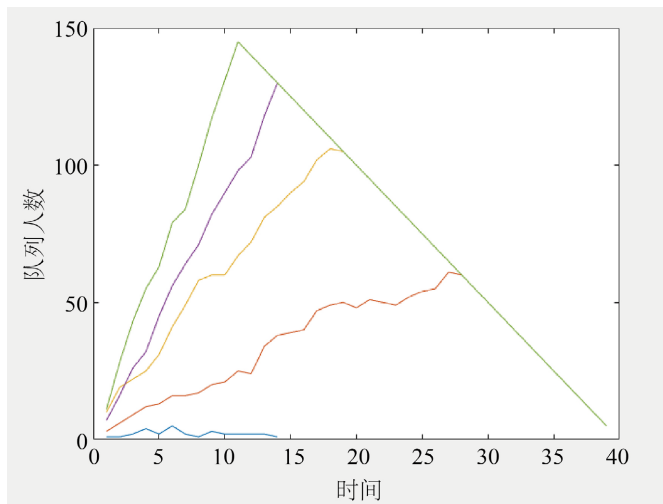


Figure 8. Changes in crowd and walking speed over time (increase in the width of the door)
图 8. 人群与步行速度在不同时间内的变化(门的宽度增加)

4.2. 结论

根据以上信息可以建立问题一中确定的关键因素人员总数、门的宽度即进出流量对疏散完成时间的影响情况表如表 2。

Table 2. The number of people in different queues and the speed of walking change over time
表 2. 不同队列人数与步行速度在不同时间内的变化

		疏散完成时间
总人数(人)	增加(减少)	增加(减少)
门最大进出流量(人/秒)	增加(减少)	增加(减少)
人的步行速度(米/秒)	增加(减少)	无明显变化

5. 双门情况下的疏散研究

5.1. 行人运动规则

在灾难到来的时候, 人体会对风险进行一个评估, 选择风险小的进行疏散, 这里可以把人群看作一个风险因素, 人群密度大的地方疏散所需时间 T 更长, 首先确定初始状态:

1) 使用蒙特卡洛随机数在房间大厅设立 n 个人, 在房间的周边随机获取两个门[6]的坐标 d_1, d_2 , 其最大人流量分别为 N_1, N_2 , 每个人的坐标是随机产生的设为 $q_i (i=1,2,3,\dots,n)$, 人的步行速度为:

$$v = g(x_4) \quad (9)$$

两个出口的队列长度为 $w_1(t), w_2(t)$; 第 i 个人的选择方式。

2) 若 t 时刻两个出口排队长度不相同, 选择排队长度短的出口;

3) 若 t 时刻两个出口排队长度相同时,

① 优先考虑距离近的出口;

② 若距离相同, 优先考虑门的宽度大的出口。

5.2. 结论

根据上述模型, 使用 matlab 求解, 结果见图 9。由图 9 可知两个门的队列人数由少到多再到少。随着时间的推移, 行人不断地从出口疏散, 最终人员疏散完毕即队列人数为 0。

6. 模型评价

6.1. 模型的优点

问题一中的多元线性回归模型是一种简单而且有效的数学模型, 优点: 能够快速得到多个数据变量与目标变量之间所存在的关系, 当得到的是线性关系时还能根据变量前的回归系数进行权重判断, 是判断影响的不错选择; 缺点: 数据波动较大时对产生的回归方程有较大的影响, 增大后续的误差产生。

问题三的问题优化模型容易通过如 matlab, lingo 等软件进行优化求解, 快速得出最优结果。

6.2. 模型的缺点

问题一数据波动较大时对产生的回归方程有较大的影响, 增大后续的误差产生。

问题三缺点在于约束的构造会影响结果的数值, 若无法在相应数据中构建好的约束, 可能返回的是空值。

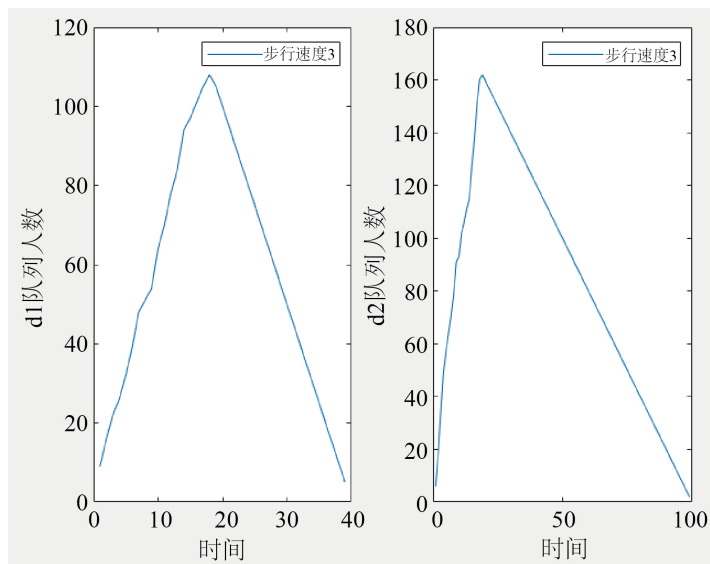


Figure 9. The number of people in the queue is related to the time
图 9. 队列人数与时间关系

7. 结语

由于大规模聚集活动的增加, 紧急情况下人员疏散问题也逐渐得到了世界各国的关注。对紧急情况下人员疏散问题的研究可以让人员在遇到不同突发情况下, 采用更合理的逃生方案, 更安全快速地逃生, 降低发生安全事故的概率。

对此, 本文简单研究了影响紧急情况下人员疏散问题的因素, 并通过数学模型分析了这些因素对人员疏散影响的程度大小, 模拟了疏散路线选择过程, 最终得出了人为控制一些因素对人员疏散是有一定益处的, 具有极其重大的现实意义。以该研究思想为基础, 进一步将理论和实践相结合, 将会被更普遍的采用, 也将能够最大程度地保障居民的人身安全, 实现伤亡最小化。

基金项目

吉首大学 2022 年度本科生科研项目(Jdx22010)。

参考文献

- [1] 陈一洲, 张洪, 单欣可. 基于文献计量的人员疏散研究现状及发展趋势研究[J]. 安全与环境报, 2023, 23(5): 1725-1732. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2022.1831>
- [2] 周金旺, 陈秀丽, 孔令江, 刘慕仁, 苏磊, 唐国宁. 基于元胞自动机的行人疏散模拟研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2008, 26(4): 14-17.
- [3] 高越超. 考虑人员复杂交互行为和空间布局效应的应急疏散研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2020. <https://doi.org/10.27105/d.cnki.ghbgu.2020.001011>
- [4] 朱伟, 王亚飞, 马英楠, 孔媛, 杜博, 周晓峰. 紧急疏散路径选择行为的实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(3): 115-121.
- [5] 谢启苗, 王焘, 王维莉. 考虑恐慌心理的人员疏散模型[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(7): 180-187. <https://doi.org/10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2022.07.0585>
- [6] 禹尔东, 吴正, 郭明旻. 双出口房间人群疏散的实验研究和数学建模[J]. 物理学报, 2014, 63(9): 217-224.