

# Research on Emergency Evacuation Model and Simulation of Stair Exit in University Teaching Building

Yali Lu\*, Pengfei Yang, Zhongjun Kang, Tao Shi, Fengyu Yue, Jiachen Zhu

School of Management and Economics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan  
Email: [luyali@ncwu.edu.cn](mailto:luyali@ncwu.edu.cn)

Received: Nov. 10<sup>th</sup>, 2017; accepted: Nov. 24<sup>th</sup>, 2017; published: Nov. 29<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Through the field survey and observation of North China University of Water Conservancy and Hydropower on corridor, classroom and teaching building stairs, evacuation data associated with the University's staff were collected, and the school personnel density, stair walking speed, congestion time were calculated using the evacuation variables to analyze the correlation between the variables. At the same time, the classroom and corridor modeling, analysis and simulation research were carried out. The results show that the reasonable emergency evacuation rules in the classroom and corridor, can effectively reduce the probability of maintaining, shorten sustained congestion time in the floor, thereby reducing the population density of stairs for export, shortening the evacuation time and improving the efficiency of the whole teaching building evacuation.

## Keywords

Teaching Building, Modeling and Simulation, Evacuation Data, Evacuation Variables, Cellular Automata

---

# 高校教学楼楼梯出口应急疏散的建模仿真研究

卢亚丽\*, 杨鹏飞, 康忠俊, 师涛, 岳风羽, 朱家琛

华北水利水电大学, 管理与经济学院, 河南 郑州  
Email: [luyali@ncwu.edu.cn](mailto:luyali@ncwu.edu.cn)

收稿日期: 2017年11月10日; 录用日期: 2017年11月24日; 发布日期: 2017年11月29日

\*通讯作者。

文章引用: 卢亚丽, 杨鹏飞, 康忠俊, 师涛, 岳风羽, 朱家琛. 高校教学楼楼梯出口应急疏散的建模仿真研究[J]. 建模与仿真, 2017, 6(4): 228-235. DOI: [10.12677/mos.2017.64027](https://doi.org/10.12677/mos.2017.64027)

## 摘要

通过对华北水利水电大学教学楼教室、楼道和楼梯进行实地测量和观测,采集与该高校相关的人员疏散数据,并对楼梯中学生的密度、行走速度、拥堵时间等疏散变量进行计算,量化分析疏散变量之间的相关关系。同时对教室和楼道进行建模、分析和仿真研究。结果表明:在教室和楼道制定合理的应急疏散规则,能够有效地降低保持概率,缩短楼层内的持续拥堵时间,从而降低楼梯出口的人群密度,缩短疏散时间,提高教学楼整体的疏散效率。

## 关键词

教学楼, 建模仿真, 疏散数据, 疏散变量, 元胞自动机

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

教学楼是学校内学生密集分布区域,在发生火灾、地震、以及其它重大安全事故等情况下,需要用尽可能短的时间对教学楼内的学生进行紧急疏散。学生在紧急疏散过程中的情绪恐慌、无序、拥挤、踩踏等众多因素往往导致疏散时间延长,降低疏散效率,甚至造成学生伤害。研究学生从教学楼的紧急疏散问题现实意义重大,但是,采取在教室内大规模组织学生多次进行真实紧急疏散实验来获取最优疏散路线和策略的方法,不仅成本高,而且也会影响学校的正常教学秩序。在这样的情形下,通过数值模拟研究学生从教学楼的紧急疏散问题就成为一种好的实行方案。

近年来,国内外学者运用数学模型和计算机仿真对紧急疏散问题进行了相关研究。Meiling Chu 等[1]提出 SAFEgress (社会代理出口)代理模型建立仿真平台,用来模拟不同居住者的行为。比如在校园建筑方面。Jack Guest 等[2]采用修改 heuristic-based 疏散算法的变体重新设计了系统,使其能够处理更大的群体建筑。Junfang Zhang 等[3]研究了许多影响高层建筑和高层疏散的人为因素并设置了疏散策略。Min Fan 等[4]提出了一种逻辑最短路径计算方法,满足了应急疏散预案设计的要求。国内对应急疏散方面的研究主要包括计算机仿真方法与数学分析法。杨雪等[5]提出了一种用元胞格点到出口的最短路径构建地面场的新方法,对矿工井下疏散过程进行仿真。张涛等[6]以某高校大型教学楼为例,基于 Pathfinder 软件对该教学楼建模并进行仿真模拟。朱振华等[7]细化了元胞自动机、改进了速度-密度公式,建立教学楼人员疏散仿真系统。傅玲等[8]利用元胞自动机模型对行人疏散行为的影响因素进行了模拟分析。沈文翠等[9]建立双路线模型和四队补齐模型,确定出安全疏散方案。武小云等[10]发现在有效的指挥下,人员疏散时间明显低于没有指挥的自然疏散的结论。综上,现有的研究为本文在研究方法和思路打下了铺垫,但是同时考虑和教学楼楼梯口和楼道疏散研究相关的文献还鲜见,本文通过对华北水利水电大学具有代表性的三栋教学楼教室、楼道和楼梯出口进行实地观测,结合教学楼教室、走道、出口等实际结构和布局,研究每一层的楼层教室数、学生人数以及疏散过程中教室、楼道和楼梯出口的人员疏散情况,对教室、楼道及楼梯的情况进行建模、分析和数值仿真,研究不同的疏散路线与疏散策略情景下学生紧急疏散的效率。

## 2. 楼梯数据的采集、分析与建模

### 2.1. 研究对象

选取华北水利水电大学的三栋比较有代表性的教学楼作为研究对象，观测高峰期学生移动情况。这三栋教学楼是分别是 2、3、4 号教学楼，它们是本科生集中上课的场所，也比较具有代表性。2、3、4 号教学楼在校园内的分布见图 1，这三栋教学楼的楼间距为 21 米，建筑结构相同。这些教学楼共分为五层，以 2 号楼为例，共有 32 间教室，一楼和二楼有部分办公教室，三、四、五楼都为普通教室，有东西两个出口，主楼梯平台净宽 3.77 米，楼梯有 13 级踏步，副楼梯平台净宽度 3.17 米，两侧的副楼梯有 12 级踏步，主楼梯和副楼梯踏步跨度都为 0.3 米。

### 2.2. 数据的搜集与方法设计

通过对学校教学楼实地考察调研，在中午 11:40~12:00 下课放学期间，各楼梯出口处通常学生较多。因此本文疏散观测时间为中午 11:40~12:00，地点 2 号、3 号和 4 号教学楼，以下课铃响为开始计时时间，将测量结果都换算成秒。通过实地测量和课间人群录像，得出楼梯投影面积，人群密度，人群移动时间，群集步速，各楼层持续拥堵时间以及教室使用率，下课后 1~3 分钟为人群出现最为拥堵的时间段，计量以及测算结果如表 1 所示。



Figure 1. The distribution of three school buildings (No. 2, 3 and 4)  
图 1. 三栋教学楼(2、3、4 号)的分布图

Table 1. Analysis table of stairs congestion of teaching Building No. 2  
表 1. 2 号教学楼楼梯口拥堵时间段数据分析表

楼层 (2 号楼)	环境	步行 状态	楼梯总人 数估计(单 位: 人)	楼梯投影 面积(单位: 平方米)	人群密度 (人/平方 米)	单层阶梯 长度(单位: m)	人群移动 时间(单位: s)	群集步速 (m/s)	楼梯持续 拥堵时间 (单位: s)	教室使用 率
一楼	中午下课	缓慢	40	14.2	2.82	4.36	8	0.55	24	57.14%
二楼	中午下课	缓慢	93	28.9	3.22	8.72	18	0.48	30	71.43%
三楼	中午下课	正常	87	28.9	3.01	8.72	17	0.51	27	71.43%
四楼	中午下课	正常	55	28.9	1.90	8.72	13	0.67	无	45.71%
五楼	中午下课	较快	15	14.7	1.02	4.36	6	0.73	无	30.00%

1) 群集步速。根据拍摄下课后同学下楼视频以及实地测量等数据并结合单位面积内人群移动的时间求出人群下楼的群集步速。通过综合表 1 中数据可知, 二、三层楼梯群集步速很小, 可见人群密集, 下楼速度缓慢, 然后一楼和四楼次之, 而相对于五楼的步速则接近于正常步速, 所以, 除了五楼, 其它楼层都要存在不同程度的拥堵问题。

2) 人群密度。“楼梯人群密度 = 楼梯总人数/楼梯投影面积”来计算。在下楼过程中计算单层楼梯的通过人数时就可以通过测量单层楼梯面积再乘以人群密度即可。综合表 1 中数据可得, 从五楼到一楼人群密度一直增大, 一楼人群密度最大, 而一楼有大厅出口, 则人群密度相对二楼来说稍微变小, 各层教学楼的拥堵情况可以通过人群密度变化直观显示。

3) 各楼层持续拥堵时间。根据疏散变量测算结果得出一楼至三楼出现了一段时间的拥堵, 而四、五楼没有发生拥堵。相对四、五楼, 下边的楼层要接受来自上边楼层的人数, 人数剧增导致出现拥堵现象, 并且持续相当一段时间。

### 2.3. 疏散变量相关性分析

对计算得出的疏散变量通过计算 Pearson 进行相关性分析, 进一步找出在教学楼楼梯出口疏散过程中的各疏散变量间存在的关系。总体来说, 群集步速与人群密度的相关系数, 以及持续拥堵时间与群集步速的相关系数均处于中等偏上水平, 而人群密度与拥堵时间有较强相关性。畅通部分(人群密度小于 2 人/ $\text{m}^2$ ), 各元素之间的相关性都相对较弱, 尤其是群集步速和人群密度之间基本没有相关性。

拥堵部分(人群密度大于 2 人/ $\text{m}^2$ ), 其中群集步速和人群密度呈-0.958 高度负相关, 人群密度和各楼层持续拥堵时间的相关系数为 0.939, 具有较高的正相关性, 拥堵时间和群集步速呈-0.934 高度负相关。

所以针对拥堵部分, 各楼层持续拥堵时间变化趋势和人群密度变化趋势相近, 二者呈正相关关系。随着人群密度的增大, 各楼层持续拥堵时间增加, 疏散速度降低。在相关性分析中, 群集步速和人群密度的相关性较强, 必须分析出群集步速和人群密度之间的关系。

## 3. 教室和楼道建模及数值仿真研究

### 3.1. 模型与方法

#### 3.1.1. 问题描述与假设

学生在教学楼内的移动具有自主性、无序性、同时性、随机性等特征, 可用元胞自动机模拟。元胞自动机通常包含元胞、移动规则、邻居、状态空间 4 部分[11]。本文对学生的紧急疏散行为用元胞自动机方法进行建模和仿真分析, 仅研究在楼道内的所有学生在发现灾情后从其当前位置移动到楼道出口的疏散过程, 全体学生离开教学楼则疏散完成。同时, 提出下述假设:

1) 设楼道是一个长为 L 米, 宽为 W 米的矩形空间, 其中  $W < L$ , 楼道有两个出口。基于以往众多研究结论[12], 可假设每个学生的平均占地面积为  $0.4 \times 0.4 \text{ m}^2$ , 随机分布在远离出口教室。

2) 将楼道矩形空间分为  $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$  的矩形网格。每个网格可以为空, 或者被学生占据。

3) 每个学生都同时按照地面场的指引移动, 且只能移动一个网格或者不动。

4) 设学生的移动速度都相同, 根据紧急情况下的学生拥挤状态, 通常学生的移动速度能达到 1.2 m/s, 从而可知, 每个时间步耗时约为  $0.4/1.2 = 0.33 \text{ s}$ 。

5) 为体现紧急疏散过程中学生的恐慌心理以及其它因素造成的移动迟疑, 设位置保持概率为 P, 在每个时间步, 学生以概率 P 保持不动, 以概率  $1 - P$  发生移动。

6) 学生经过楼道出口离开楼道后不能再返回楼道内。

### 3.1.2. 地面场

在人员疏散问题研究中,提出了“地面场”的概念[13][14][15][16][17]。然而,在以往众多文献中,地面场的构建通常采用当前网格到出口的最小距离表示[14][15][16][17]。这种构造地面场的方法对于最小距离路线上存在障碍物的情形将失效。针对上述众多文献中用距离来表示地面场在疏散空间内存在障碍物情景下的不足,在空间内存在障碍物的情境下,本文设计如下构造地面场方法:

步骤 1: 设教室出口所在网格(元胞)的地面场数值为 0。把地面场数值为 0 的网格称为第 1 层网格。

步骤 2: 地面场数据中用显著大正数  $M$  表示障碍物。

步骤 3: 把与第 1 层网格相邻的、尚未设置地面场数值的网格称为第 2 层网格(不包含障碍物所占无用的网格)。设相邻 2 层网格之间地面场的势差为  $s$ , ( $s > 0$ ), 从而第 2 层所有网格的地面场数值为  $s$ 。

步骤 4: 若第  $t-1$  层网格的地面场数值已设置为  $(t-2)s$ , 这里正整数  $t \geq 2$ , 则把与第  $t-1$  层网格相邻的、尚未设置地面场数值的第  $t$  层网格的地面场数值设置为  $(t-1)s$ 。

步骤 5: 重复步骤 4, 直至教室和楼道内所有网格的地面场数值设置完毕。

从而, 当学生依据构造的地面场移动时, 该学生所走过的轨迹实际上就是该学生从其最初位置到出口的最短路径。该方法既避免了可能穿越障碍物的错误, 又能够沿着最短路径移向楼道出口。

### 3.1.3. 更新规则与冲突处理

在利用元胞自动机方法对学生的疏散行为模拟时, 所有学生的状态应同步更新。在每一个离散的时间步, 每一个学生在其所在网格的前方、左方、右方 3 个相邻网格中选择没有被障碍物或其他学生占用的网格, 依据地面场数值越小越优先的原则, 确定其向哪一个网格移动。当学生按上述规则自主移动时, 若出现多个学生竞争同一网格的位置冲突, 则从中等概率随机选择一名学生, 允许其进入竞争网格, 其他学生退回原位置。当所有学生都离开系统时, 仿真结束, 统计并输出结果。

## 3.2. 数值仿真

利用 Matlab7.0 编写程序对存在障碍情景下学生的紧急疏散问题进行仿真模拟。结合教学楼实地调研数据, 设楼道的长度为  $L = 30.4 \text{ m}$ , 宽度为  $W = 21.2 \text{ m}$ , 把楼道分割为  $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$  的网格。不妨设地面场的势差为  $s = 0.1$ , 对于教室内存在桌椅等障碍物的情形, 仿真中黑色区域表示墙壁等占据的空间, 红色区域表示桌椅、讲台等障碍物占据的空间, 484 名学生在常见的五个教室内的随机分布示意图见图 2。在图 2 中, 网格内的每个蓝色圆圈表示一名学生。

在对学生疏散过程进行数值模拟时, 取位置保持概率  $P = 0.05$ , 也即在每一次位置更新时, 每个学生以 5% 的概率迟疑不动, 以 95% 的概率按方向场指向和移动规则进行移动。按照上文所设计的学生位置更新算法和冲突处理规则, 经过 150 步迭代后的仿真结果见图 3。由图 3 可见, 学生在疏散过程中相对有序, 个别教室会出现学生疏散过程中的拥堵现象, 这与实际观察到的情形基本相符。为研究学生疏散的效率, 通过仿真计算, 绘制疏散过程中教室和楼道内剩余学生人数  $n$  与迭代次数  $k$  之间的变化关系曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出, 在最初的 30 次迭代中, 曲线相对比较平缓, 这表明刚开始疏散时, 教室和楼道内学生人数多, 相对比较拥挤, 学生移动相对比较迟缓, 疏散速度较慢。图 4 中, 第 30 次迭代以后, 曲线变的相对比较陡峭, 曲线的斜率比较稳定, 这表明教室与楼道内剩余的学生人数以稳定的速率减少, 学生处于有序的疏散过程中。在第 180 次迭代以后, 曲线变的更加陡峭, 教室与楼道内剩余的学生人数以更快的速率减少, 这表明大部分学生已经疏散出去, 教室与楼道内剩余的学生已经不多, 其在疏散过程中几乎不再有拥挤现象, 疏散速度明显加快。在第 210 次迭代时, 曲线与横轴相交, 教室与楼道内剩余的学生人数为 0, 表明学生已全部疏散出去, 疏散过程结束。在上述数值模拟过程中, 取位置

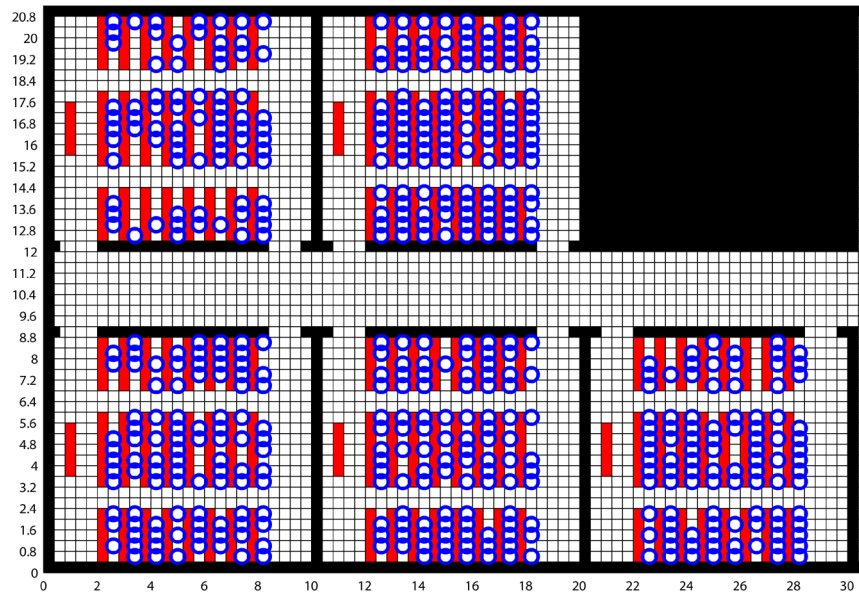


Figure 2. Atypical student's initial position randomly distributed  
 图 2. 一个典型的学生初始位置随机分布

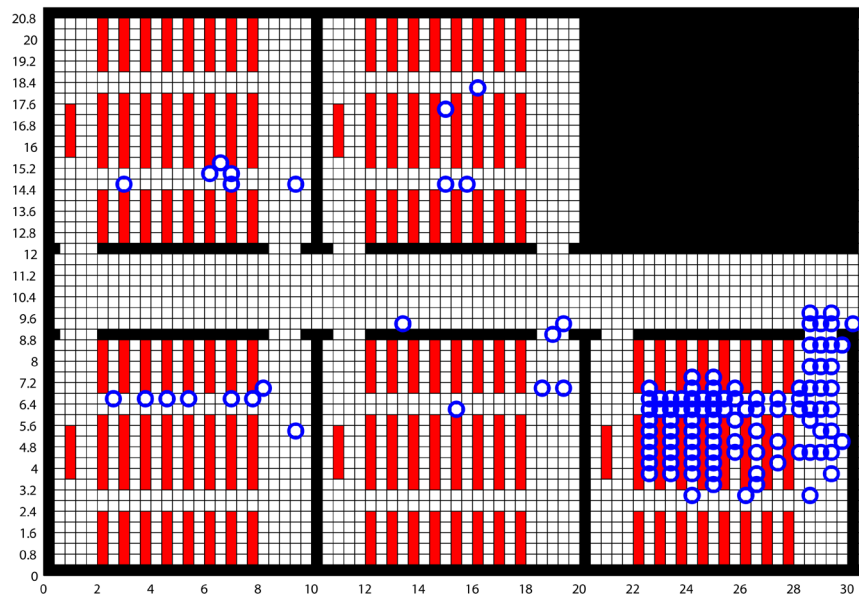
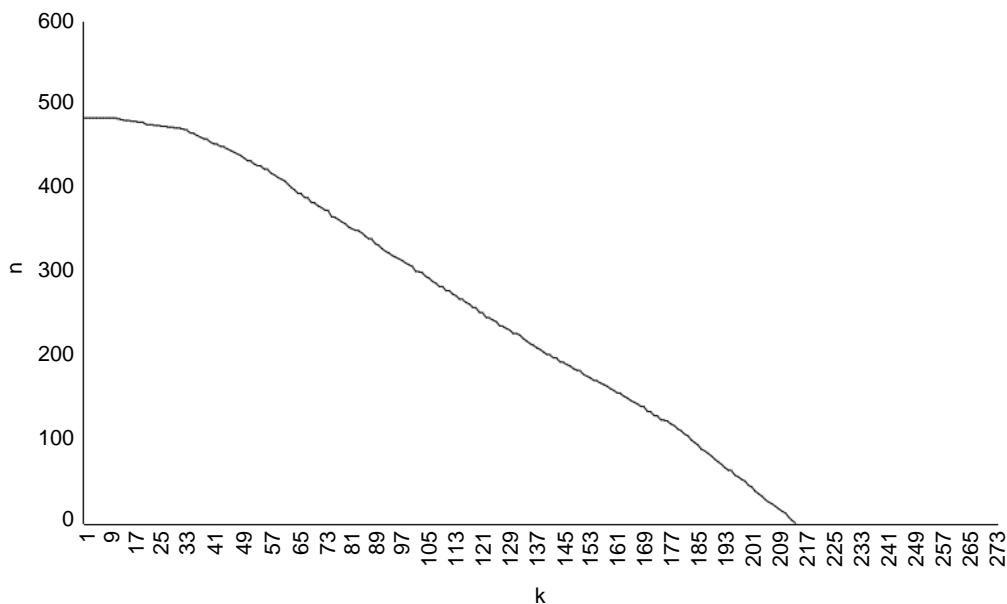


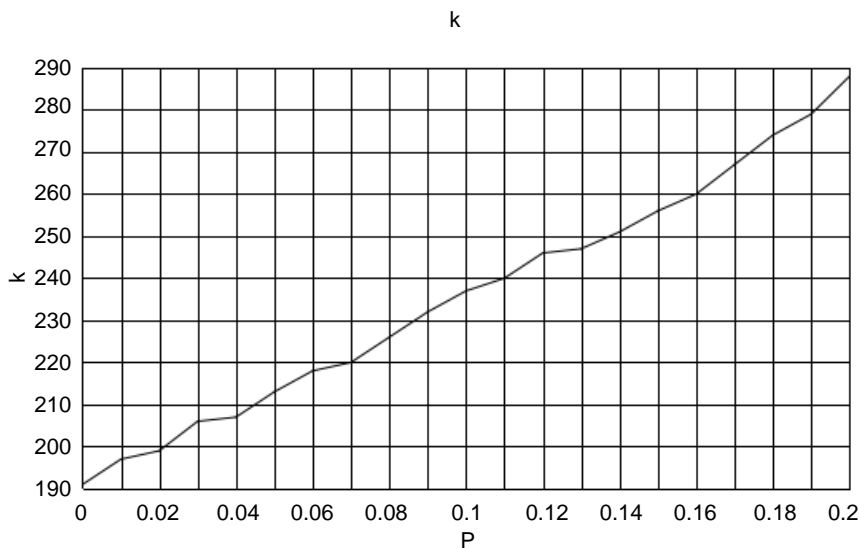
Figure 3. The simulation results after 150 iteration ( $p = 0.05$ )  
 图 3. 经过 150 次迭代时的仿真结果( $p = 0.05$ )

保持概率  $P = 0.05$ ，为研究位置保持概率  $P$  变动时对学生疏散时间的影响，对于  $P$  在区间 $[0,0.2]$ 上按步长  $0.01$  变化时的每个值，计算完成疏散所需要的迭代次数在 20 次模拟中的平均值，绘制平均迭代次数与概率  $P$  的关系曲线如图 5 所示。由图 5 可见，曲线整体上向右上方倾斜，斜率相对比较稳定，波动不大，这表明随着保持概率  $P$  的增大，学生完成疏散所需要的平均迭代次数单调增长，且增长的速率相对稳定。上述模拟结果表明，在发现灾情或接到报警信号后，为了尽快离开教室和楼道，学生应克服恐慌心理，在疏散过程中毫不迟疑地沿着最短路径向楼道出口移动，行动上的迟疑势必会增大疏散时间。仿真实验结果符合实际观察到的疏散情景。



**Figure 4.** Evolution curve of the rest of the students (n) in corridor along with the number of iterations (k) (p = 0.05)

**图 4.** 楼道内剩余学生人数 n 随迭代次数 k 演化曲线(p = 0.05)



**Figure 5.** Relation curve of the average of iteration times (K) between the probability location keeping (P)

**图 5.** 迭代次数平均值 K 与位置保持概率 P 关系曲线

#### 4. 结论

本文针对高校教学楼学生紧急疏散问题，对楼梯和楼道两部分进行了建模、分析及仿真研究，学生疏散过程能用建立的元胞自动机模型有效模拟。对楼梯的分析表明，教学楼楼梯出口人员疏散过程中的群集步速由人群密度决定。要缩短楼层内的持续拥堵时间，需要合理地调整人群密度来增加群集步速，提高疏散速度。结合楼梯和楼道的研究结果，在教室和楼道制定合理的应急疏散规则，降低位置保持概率，缩短楼层内的持续拥堵时间，能够使学生尽快完成疏散。

## 基金项目

2016 年度华北水利水电大学创新创业训练计划项目。

## 参考文献 (References)

- [1] Chu, M.L., Parigi, P., Law, K. and Latombe, J.-C. (2014) Modeling Social Behaviors in an Evacuation Simulator. *Computer animation & Virtual Worlds*, **25**, 373-382. <https://doi.org/10.1002/cav.1595>
- [2] Guest, J., Eaglin, T., Subramanian, K. and Ribarsky, W. (2014) Interactive Analysis and Visualization of Situationally Aware Building Evacuations. *Information Visualization*, **22**, 47-53.
- [3] Zhang, J.F. and Wang, S.P. (2012) Application of Virtual Reality Technology for Emergency Evacuation in High-Rise Buildings. *Applied Mechanics and Materials*, **204-208**, 4941-4945. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.4941>
- [4] Fan, M., Liu, G., Li, P.G. and Zhu, G.F. (2013) Emergency Evacuation Path Choice Based on Space Network in Public Building. *Applied Mechanics and Materials*, **405-408**, 2370-2375. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.405-408.2370>
- [5] 杨雪, 李战国, 卢亚丽. 多障碍情境下矿工紧急疏散建模及仿真[J]. 工业工程, 2014, 17(6): 23-29.
- [6] 张涛, 吕淑然. 大型教学楼紧急疏散仿真模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2015(6): 747-749.
- [7] 朱振华. 基于元胞自动机的多智能体教学楼紧急疏散问题研究[D]: [硕士学位论文]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2012.
- [8] 傅玲. 教学楼学生紧急疏散的自动机模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 广西师范大学, 2011.
- [9] 沈文翠, 毛翟, 刘会民. 学校教学楼的紧急疏散模型[J]. 辽宁科技大学学报, 2010, 33(4): 349-352.
- [10] 武小云, 李彩娟, 张新. 有效疏散指挥下教学楼人员紧急疏散数学模型探讨[J]. 河北建筑工程学院学报, 2013, 31(2): 118-120.
- [11] 金小刚. 基于 MATLAB 的元胞自动机的仿真设计[J]. 计算机仿真, 2002, 19(4): 27-30.
- [12] 赵宜宾, 黄猛, 张鹤翔. 基于元胞自动机的多出口人员疏散模型的研究[J]. 系统工程学报, 2012, 27(4): 439-445.
- [13] Hoop, W.J. and Spearman, M.L. (2002) *Factory Physics*. Tsinghua University Press, Beijing.
- [14] Alizadeh, R. (2011) A Dynamic Cellular Automaton Model for Evacuation Process with Obstacles. *Safety Science*, **49**, 315-323. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.09.006>
- [15] Zheng, X.-P., Li, W. and Guan, C. (2010) Simulation of Evacuation Processes in a Square with a Partition Wall Using a Cellular Automaton Model for Pedestrian Dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **389**, 2177-2188. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.01.048>
- [16] 岳昊, 邵春福, 姚智胜. 基于元胞自动机的行人疏散流仿真研究[J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4523-4530.
- [17] 宋卫国, 于彦飞, 范维澄, 等. 一种考虑摩擦与排斥的人员疏散元胞自动机模型[J]. 中国科学: E 辑, 2005, 35(7): 725-736.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2324-8696, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [mos@hanspub.org](mailto:mos@hanspub.org)