

基于元胞自动机的泵站电站厂房人员疏散模拟研究

柴 昭¹, 吴天齐², 郝志红¹, 吴鑫淼¹

(1. 河北农业大学 城乡建设学院, 河北 保定 071001; 2. 国网北京市电力公司丰台供电公司,
北京 丰台 100071)

摘要: 为解决电站厂房内突发事件下安全疏散引导问题, 基于对人员疏散运动规则的分析, 引入吸引力概率对元胞自动机模型进行改进, 建立基于扩展 Moore 型元胞自动机的疏散模拟模型, 通过不同安全指示灯数量与位置组合条件下疏散模拟, 分析不同指示灯布置方案的疏散时间。实例分析结果表明, 随着指示灯数量的增加, 疏散时间曲线显著降低, 达到一定数量时, 疏散时间曲线趋于平缓。同时在可行设计方案中, 最优指示灯布置方案可使疏散效率提升 1.17% ~ 11.3%。

关键词: 元胞自动机; 疏散指示灯; 模拟; 电站厂房; 优化布置

中图分类号: S277.1; X93

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文献标识码: A



Simulation research on evacuation of power plant based on cellular automata

CHAI Zhao¹, WU Tianqi², QIE Zhihong¹, WU Xinmiao¹

(1. College of Urban and Rural Construction, Hebei Agriculture University, Baoding 071001, China; 2. Fengtai Power Supply Company of State Grid, Beijing Electric Power Company, Fengtai 100071, China)

Abstract: In order to solve the problem of safe evacuation guidance in power plant, this study analyzed the layout of safety indicator using an improved evacuation simulation model. The attraction probability was introduced to improve the cellular automata model according to the evacuation rules and an evacuation simulation model was then established using extended Moore cellular automata. Through the evacuation simulation model, the evacuation time was analyzed under different number and location of safety indicator. The results showed that the evacuation time curve decreases significantly with the increase of the indicators. When the indicators reached a certain level, the evacuation time curve tended to be flat. At the same time, the optimal indicator layout scheme can improve the evacuation efficiency by 1.17% ~ 11.3% among the feasible layout scheme.

Keywords: cellular automaton; evacuation strobe light; simulation; hydropower station; optimize

水电站、水泵站等是发电、灌溉、排涝、输水工程中的重要建筑物, 由于其结构复杂, 又涉及大型机械和大量电气设备, 电缆夹层、排水廊道纵横交错, 如遇火灾、地震、事故等突发事件, 不熟悉

厂内结构布置的人员在紧急情况下容易迷失方向或者不能及时有效地组织疏散逃生, 造成人身伤亡事故, 即使熟悉水电站结构的运行人员, 也不容易在灾情发生的第一时间有效选择最佳逃生线路。为保

收稿日期: 2021-01-14

基金项目: 河北省水利科研和推广计划项目(2013-121)。

第一作者: 柴 昭(1995—), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 从事水利水电工程研究。E-mail: 1023715362@qq.com

通信作者: 吴鑫淼(1972—), 女, 河北承德人, 博士, 教授, 从事水利工程信息化研究。E-mail: wuxinmiao001@163.com

本刊网址: <http://hauxb.hebau.edu.cn>

证疏散安全,在设计中必须设置疏散通道,加强消防设计^[1-2];陆雪涛^[3]针对引江济淮工程蜀山泵站枢纽内的防护对象做出了防火设计方案及灭火措施;张圣楠^[4]结合自身工作情况对常见水利泵站类建筑防火疏散问题进行一些讨论;胡超鹏等^[5]对长洲水电站厂房事故照明进行了优化改造;韩宏斌等^[6]对小浪底水电站厂房照明系统进行了优化分析,袁正东^[7]发明了小型水电站事故应急照明系统。

随着计算机技术和人工智能的发展,建立1种多智能体系统模拟人员疏散过程可以有效提高紧急情况下人员疏散的效率。廖灿等^[8]建立了行人流多智能体仿真模型研究突发事件对隧道行人疏散时间的影响,张晶等^[9]提出了1种基于多目标规划和智能体仿真的社区人员疏散方案。目前常用的模型有“社会力模型”(Socialforce modal)^[10-13]、格子气模型^[14-15]以及以元胞自动机模型^[16-19]为代表的离散模型。元胞自动机模型具有计算规则简单和计算效率高等特点,使其成为用于模拟人员疏散最广泛的模型之一。在经典疏散模型的基础上,学者们根据研究方向的不同提出了各类扩展模型。崔喜红、李强等^[20-21]对人员的从众行为、个体特征以及引导人员数量与位置对疏散效率的影响做了比较深入的研究;胡志飞等^[22]通过对疏散指示灯的影响范围及布置数量对疏散过程与时间做了比较深入的研究;李伟等^[23]通过对惯性、趋光、避害、恐慌、从众等人员个体行为的分析,并将连续模型的社会力模型规则引入元胞自动机模型中,结合二者优点使疏散中个体的自组织现象更加明显。

本研究以改进的元胞自动机为基础建立水电站厂房人员疏散模型,改进了前人每个时间只移动1格的理论,引入了吸引力概率以及个体感知范围,个体的移动方向与移动速度根据视野范围及其内部障碍物与人员数量来决定,应用扩展的 Moore 型模型提供更多可移动方向的选择,使模拟更贴近真实情况。重点分析指示灯在疏散过程中的引导作用,对比研究不同数量指示灯和指示灯不同布置情况下人员疏散的速度和时间,以期对水电站厂房照明指示系统布置以及人员疏散提供参考。

1 元胞自动机原理及模型基本假定

1.1 元胞自动机模型

元胞自动机(Cellular automata, CA)最早是

由 John von Neumann 和 Ulam 提出的^[24],它是由大量互相作用的个体细胞构成的1种动力系统^[25]。元胞自动机模型具有时空的离散型、状态离散型和有限性、同步性等基本特征,同时它具有模拟复杂系统时空演化过程的功能。状态、邻域和更新规则是元胞自动机的三大核心要素^[26],即每个元胞都是离散的,所有元胞的状态同步改变。CA模型通过局部变化带来的反馈信息,从而更好地模拟现实系统中的突变、自组织等特性,在交通流、优化算法等方面得到广泛应用。CA的2种常用邻居为 Von Neumann 型和 Moore 型,如图1和图2所示。本研究考虑更多的方向选择自由度,采用扩展的 Moore 型邻居($r=4$)。

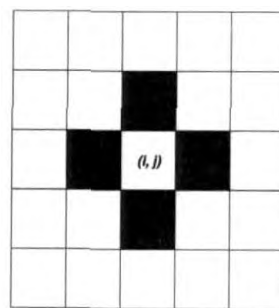


图1 Von Neumann 型邻居 ($r=1$)
Fig.1 Von Neumann neighbor ($r=1$)

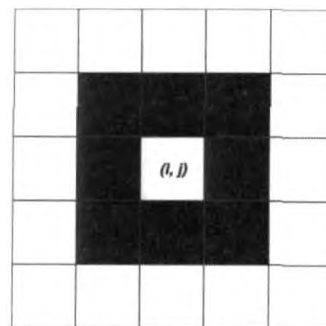


图2 Moore 型邻居 ($r=1$)
Fig.2 Moore neighbor ($r=1$)

1.2 疏散模型的基本假设

元胞自动机人员疏散模型主要框架为疏散场所、疏散人员、环境和运动规则等。本文根据具体情况对模型做了如下假定:

①场地模型进行均匀的网格划分,大数据统计男性平均肩宽 48.1 cm,女性平均肩宽 43 cm,所以取每个网格对应 0.5 m × 0.5 m 的空间;

②每个元胞有自己的特殊属性,可能是障碍物、墙壁、指示灯、疏散人员、指示灯或者空,且每个元胞空间在同一时间只能被1个疏散个体或障碍物占据。

③疏散模型采用扩展的 Moore 型邻居 (视野范围示意图, 图 3), 疏散人员根据移动速度的不同分别移动至视野范围内吸引力最大的网格。

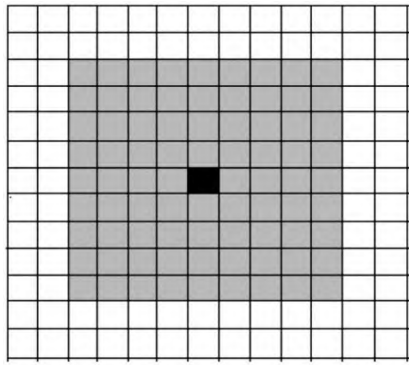


图 3 视野范围示意图 ($r=4$)

Fig.3 Range of occupant's vision field ($r=4$)

$$v = \begin{cases} 0.37, & \text{当 } N \geq 3; \\ v_0 \{ 0.35 [1.32 - 0.82 \ln(N)] + 0.03 (3.0 - 0.76N) + 0.2 \}, & \text{当 } 0.5 \leq N < 3; \\ v_0, & \text{当 } N < 0.5. \end{cases} \quad (1)$$

式中: v 表示人员疏散过程的实际速度;

v_0 表示人员正常状态下的行进速度, 取 $v_0=1$ m/s;

N 表示单位面积上人和障碍物的总数量。

视野范围以元胞 (i, j) 为中心的 1 个 $(2r+1) \times (2r+1)$ 阶方阵, 在模拟时取 $r=4$, 如图 4 所示。按上述公式计算每 1 个疏散人员的实际速度, 当最后 1 个人疏散成功时计算疏散总时间。

2.2 人员疏散的基本运动规则

突发事件发生时人员会采取何种疏散行为模式 (即疏散路线的选择问题) 是避难研究和疏散模型关注的重点和难点。紧急情况下, 疏散个体因恐慌等外界因素从而降低自身的判断, 因此在选择逃生方向时具有一定的盲目性与从众性。本研究赋予网格一定吸引力, 把网格吸引力的大小作为疏散路径选择^[28]的主要依据。在 t 时刻根据人员所在网格的状态、自身的速度、疏散人员的视野范围以及视野范围内其他网格属性, 计算出感知范围内网格的吸引力概率, 疏散个体将根据自身移动速度选择移动至吸引力概率最大的网格作为下一时刻的目标网格^[26]。网格 $N(i, j)$ 的吸引力概率 $P(i, j)$ 定义为:

$$P(i, j) = k_{ij} \times (k_{dis} P_{dis(i,j)} = k_{dir} P_{dir(i,j)}) \quad (2)$$

式中: $P_{dis(i,j)}$ 表示网格 $N(i, j)$ 的位置吸引力概率; k_{dis} 是位置吸引力的影响系数; $P_{dir(i,j)}$ 表示网格 $N(i, j)$ 的方向吸引力概率; k_{dir} 是方向吸引力的影响系数。

k_{dis} 和 k_{dir} 的值可以根据不同疏散模式进行调整,

④人员疏散的位置和特性随机产生。

⑤由于所有元胞状态是按规则同步更新, 因此规定 1 个人行进决策的时间为 2 s, 每个决策时间可移动的网格数为 $vt/0.5$ 个, 可更突出表现出行人的运动状态, 即在人少时移动速度快, 人多时移动速度慢。

2 基于元胞自动机的人员疏散模型的建立

2.1 疏散速度与疏散时间

考虑到人员在疏散过程中会因人群密度、障碍物等外界因素变速前进, 改进文献 [27] 的速度计算方法, 得到速度计算公式如下:

$k_{dis} + k_{dir} = 1$ 。 k_{dis} 越大, 说明疏散人员对场地越熟悉, 相反, 疏散人员的行为模式受从众心理的影响越大 (本文取 $k_{dis}=0.2$, $k_{dir}=0.8$)。 k_{ij} 为网格吸引力概率 $P(i, j)$ 的调节系数。

(1) 位置吸引力概率 $P_{dis(i,j)}$

在单疏散出口的前提下, 根据网格距离出口位置距离与最远距离的比值确定位置吸引力概率 $P_{dis(i,j)}$, 其计算公式如下:

$$P_{dis(i,j)} = \frac{[\max(D_{(i,j)}) - D_{(i,j)}]}{[\max(D_{(i,j)}) - \min(D_{(i,j)})]} \quad (3)$$

式中: $D_{(i,j)} = \sqrt{(i_k - i)^2 + (j_k - j)^2}$, 表示网格 $N(i, j)$ 到疏散出口中心 (i_k, j_k) 的距离; $\max(D_{(i,j)})$ 和 $\min(D_{(i,j)})$ 表示所有网格到疏散出口中心距离的最大值和最小值。

(2) 方向吸引力概率 $P_{dir(i,j)}$

紧急情况下人员疏散行为非常复杂, 个体对逃生出口有个人判断和从众行为, 即个体在进行下一步移动前会考虑视野范围内其他个体的运动方向。参照 Moore 型元胞自动机规则, 在疏散人员有 8 个可移动方向的前提下, 改进本次扩展的 Moore 型元胞自动机模型, 人员选择的方向可用方向吸引力概率 $P_{dir(i,j)}$ 表示, 其表达式为:

$$P_{dir(i,j)} = \frac{N_{dir(k)}}{\sum_{k=1}^m N_{dir(k)}} \quad (4)$$

式中: $N_{dir(k)}$ 是一定视野范围内 k 方向的总人数,

$k=(1, \cdots m)$; m 是视野范围内可移动的总网格数(若采用 Von Neumann 型, 则 $m=4$; 若采用 Moore 型, 则 $m=8$)。

本研究采用扩展的 Moore 型, 取 $m=80$, 视野范围参考图 4 ($r=4$)。

(3) 出口位置直接吸引力

为使模拟更加符合实际的疏散情况, 本研究还引入了出口位置的直接吸引力这一概念。即在个体视野范围内可看到出口时, 使用最短路径规则, 根据速度公式以最快的速度走向出口, 进入疏散安全区。出口位置直接吸引力范围如图 3 蓝色区域所示。

2.3 疏散照明指示灯引入分析

疏散出口和通道的信息可以通过指示灯明确指出, 以保证疏散个体可以快速撤离。疏散指示灯根据功能不同分为 2 大类: 一是出口指示灯, 布设于出口顶部; 二是方向指示灯, 布设在安全通道及拐角处, 本文模拟中引入疏散指示灯模块^[29]。疏散指示灯根据位置不同分为 2 大类: 一是附着式指示灯, 其贴附于墙壁, 影响范围为扇形区域; 二是地理式指示灯, 铺设于地面, 影响范围为圆形区域。

本次模拟对疏散指示灯做出如下假定: 一是疏散指示灯类型选择, 在出口布设附着式指示灯, 在

过道、走廊等处布设地理式指示灯; 二是指示灯影响范围, 地理式指示灯影响范围是半径 5 个网格的圆形, 附着式指示灯因本文设立出口位置直接吸引力而不再考虑影响范围, 只起到标识作用。最后, 将指示灯的特性赋予特殊网格。本次模拟由于选择场景为水电站厂房, 人员拥堵的几率较小, 在假设了出口直接吸引力范围后, 设置出口附着式指示灯只起到提示作用, 不参与疏散行为。在疏散模拟过程中, 个体的感应范围感受到指示灯影响范围时向指示灯方向移动, 进入指示灯影响范围后, 受到引导后以最短路径向出口移动, 未受指示灯影响的个体将继续按原有疏散模式移动。

3 实例分析

3.1 水电站厂房基本情况

以某水电厂房的实际布局为研究场景, 水电厂房模型平面图如图 4 所示。水电站厂房的有效长度为 75 m, 宽度为 25 m, 区域分为办公区和水电站工作区, 红色为水轮机、工作站或墙壁等, 可将其视为障碍物, 蓝色为出口直接吸引力范围, 绿色为厂房设立的出口。该水电站每年都有高校学生集中前来参观实习。

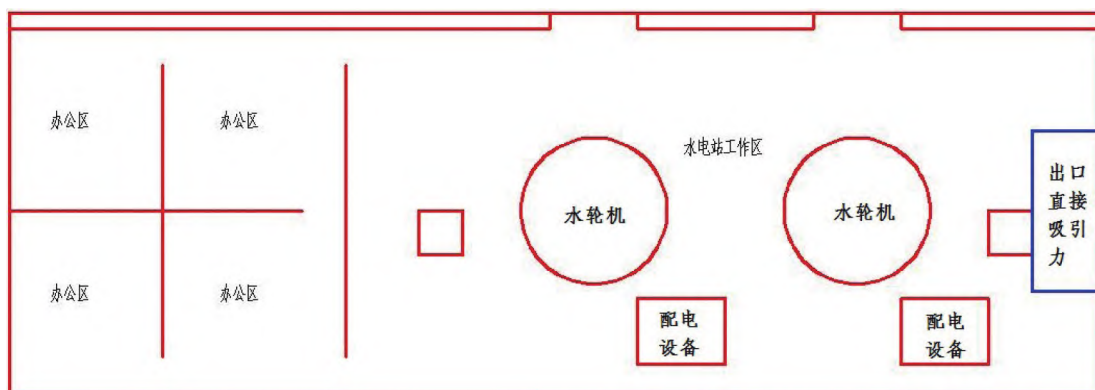


图 4 模型平面布置图

Fig.4 Layout plan

3.2 水电站厂房人员疏散模拟及分析

本研究以水电站厂房为研究场景, 对其进行模型概化, 假定在无外界干扰的情况下疏散人员位置随机分布, 并设定场景中人员数量为 100 人。模拟情景假设为学生实习时突发火灾, 在疏散模拟过程中, 个体在选择过程中存在从众心理 ($K_{dir}=0.8$)^[20], 设定疏散个体的视野范围为 4 个网格 ($r=4$), 模拟 20 次结果取其平均值。本次主要从疏散指示灯的数

量和优化布置 2 方面来对疏散的过程与时间进行模拟分析, 最终确定数量和位置的最优组合方案。

(1) 在不同数量指示灯条件下对人员进行疏散模拟研究

目前水电站、泵站等水利工程在安全疏散指示灯布置方面没有相关规范规定, 参照《地铁规范》中的规定, 在站厅、站台、自动扶梯、楼梯口、疏散通道拐弯处、交叉口、安全出口, 沿通道长向每

隔不大于 20 m 处均需设置疏散指示灯^[30], 对厂房通道拐角处、安全出口、障碍物以及厂房必要位置, 分别布置 12、14、16、18、20、22、24 个疏散指示灯, 以此作为基础布置, 模拟疏散指示灯对疏散过程与疏散时间的影响, 指示灯个数与疏散时间关系曲线如图 5 所示。

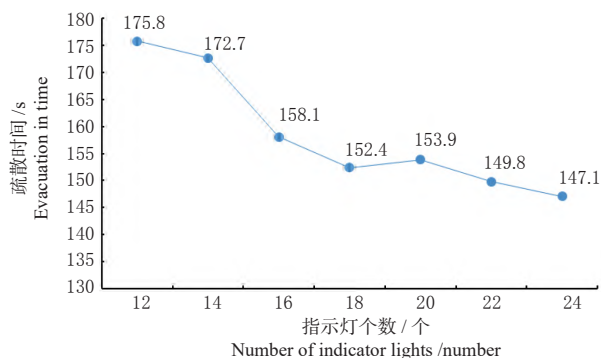


图 5 指示灯数量与疏散时间关系曲线图

Fig.5 Different number of indicator light and evacuation time relationship graph

由图 5 可知, 参照上述规范要求布置时, 随着指示灯数量增多, 疏散时间总体呈下降趋势。指示灯数量增加到 18 个之前 (包括 18 个) 疏散时间降幅明显, 当布置 20 个指示灯时, 布置数量增多, 为疏散个体提供了更多疏散路径的选择, 影响个体判断, 致使疏散时间增长。当指示灯数量增加至 24 个时, 疏散时间降低较少, 整体走势趋于平缓。

(2) 基于以上分析, 所做的不同数量指示灯对疏散效率的研究, 在此仅选取 18 个指示灯为例考虑位置布置对疏散时间的影响, 从而得出相对最优布置方案。根据模型空间将厂房位置分别对办公区与工作区提供 3×4 共计 12 种模拟方案, 指示灯布置位置图如图 6、图 7 所示。依据对办公区与工作区不同方案组合的模拟, 得到不同方案疏散时间对比图, 如图 8 所示。

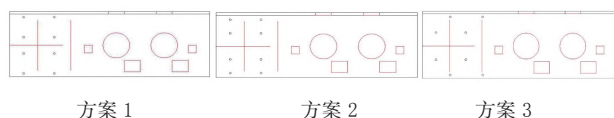


图 6 办公区指示灯布置图

Fig.6 Light layout of office area

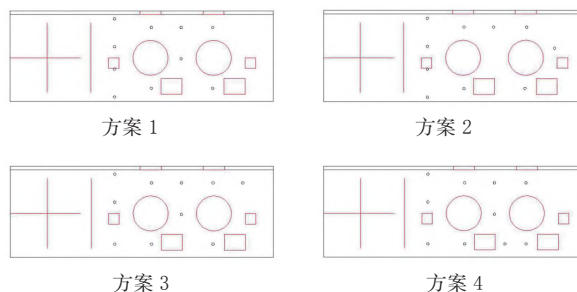


图 7 工作区指示灯布置图

Fig.7 Working area indicator light layout

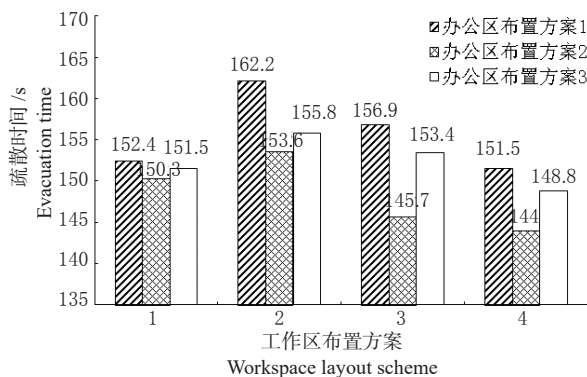


图 8 疏散时间对比图

Fig.8 Comparison diagram of evacuation time

本试验研究单出口水电站厂房的疏散模拟, 由于厂房内部办公区距离出口较远, 整体疏散时间都处于 140 s 以上。图 8 给出了办公区与工作区共 12 种指示灯位置布置组合的疏散时间, 组合 1 (办公区布置方案 1 与工作区布置方案 1 组合) 为参照规范布置方案, 组合 2 (办公区布置方案 1 与工作区布置方案 2 组合) 为最长疏散时间布置方案, 组合 12 (办公区布置方案 2 与工作区布置方案 4 组合) 为最优布置方案, 由上图可知不同组合对疏散时间影响较大。组合 12 疏散时间 144 s, 与组合 1 相比疏散时间减少了 5.5%, 与组合 2 相比疏散时间减少了 11.3%。组合 12 所给出的 18 个指示灯布置方案优于图 7 中 24 个指示灯布置方案。

4 结论

以水电站厂房在突发情况下人员疏散为例, 基于元胞自动机原理建立了人员疏散模拟的改进模型。研究了疏散指示灯布置数量以及位置的不同对疏散过程以及疏散时间的影响

(1) 在单出口的人员疏散过程中, 增加厂区办公区指示灯数量, 尽快疏散厂房内部人员可以提高疏散效率。

(2) 在给定指示灯数量的前提下,通过对比分析办公区与工作区共12种指示灯位置布置组合,得到最优布置方案,结果表明合理地优化指示灯位置可以大大提高疏散效率。

(3) 该模拟结果可对水电站厂房的照明指示系统以及人员疏散提供参考,同时也可对不同场景的人员疏散模拟提供模型上的支持。

参考文献:

- [1] 董新,赵忠会.水电站地下厂房电梯消防疏散探讨[J].水力发电,2010,36(5):71-72.
- [2] 程玉超.设置避难走道解决某厂房疏散距离问题探讨[J].消防科学与技术,2013,32(6):613-616.
- [3] 陆雪涛.引江济淮工程蜀山泵站枢纽消防设计[J].江淮水利科技,2019(3):8-9.
- [4] 张圣楠.常见水利泵站建筑防火疏散设计[J].治淮,2019(3):52-53.
- [5] 胡超鹏,付雪辉,吴亚杨.长洲水电站厂房事故照明优化改造[J].广西水利水电,2018(4):54-55.
- [6] 韩宏斌,陈健,王丹阳,金洋,等.小浪底水电站厂房照明系统优化分析[J].机电信息,2018(18):86-87.
- [7] 袁正东.小型水电站事故应急照明系统[P].北京:CN203398866U,2014-01-15.
- [8] 廖灿,郭海湘,唐健,等.突发事件对隧道行人疏散时间的影响[J].系统管理学报,2020,29(4):711-720.
- [9] 张晶,陈涛,黄丽达,等.基于多目标规划和智能体仿真的社区疏散方案[J/OL].清华大学学报:自然科学版:1-7[2021-01-05].<https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2020.22.032>.
- [10] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. Nature, 2000, 407(28):487-490.
- [11] LI Meifang, ZHAO Yongxiang, HE Lerong, et al. The parameter calibration and optimization of social force model for the real-life 2013 Ya'an earthquake evacuation in China[J]. Safety Science, 2015, 79: 243-253.
- [12] MA Peijie, WANG Binghong. The escape of pedestrians with view radius[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2013, 392: 215-220.
- [13] WAN Jiahui, SUI Jie, YU Hua. Research on evacuation in the subway station in China based on the Combined Social Force Model[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, 394: 33-36.
- [14] Cirillo Emilio N M, Colangeli Matteo, Muntean Adrian, et al. A lattice model for active-passive pedestrian dynamics: a quest for drafting effects. [J]. Mathematical biosciences and engineering: MBE, 2019, 17(1): 460-477.
- [15] 胥旋,史聪灵,李建,等.考虑绕行效应的人员疏散元胞自动机模型研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(2):20-25. DOI:10.11731/j.issn.1673-193x.2018.02.003
- [16] LI Dewei, HAN Baoming. Behavioral effect on pedestrian evacuation simulation using cellular automata[J]. Safety Science, 2015, 80: 41-55.
- [17] WANG Ziyang, SONG Bingxue, QIN Yong, et al, LiminJia. Effect of vertical grouping behavior on pedestrian evacuation efficiency[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2013, 392(20): 4847-4883.
- [18] SONG P, GAO Y, XUE Y, et al. Human Behavior Modeling for Evacuation from Classroom Using Cellular Automata[J]. IEEE Access, 2019, 7: 98694-98701.
- [19] LI Y, WANG D Z W, MENG M, et al. Simulation of Pedestrian Evacuation in University Canteen Based on Cellular Automata[J]. IEEE Access, 2019, 7: 130120-130132.
- [20] 崔喜红,李强,陈晋,等.大型公共场所人员疏散模型研究——考虑个体特性和从众行为[J].自然灾害学报,2005(6):133-140.
- [21] 李强,崔喜红,陈晋.大型公共场所人员疏散过程及引导作用研究[J].自然灾害学报,2006(4):92-99.
- [22] 胡志飞,段中兴,陈胜,等.地铁站疏散照明指示系统的引导作用研究[J].计算机工程与应用,2016,52(15):237-242.
- [23] 李伟,张鑫龙.考虑个体行为的改进CA模型人员疏散研究[J/OL].计算机工程与应用:1-11[2020-12-28].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.tp.20200908.1138.004.html>. DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2005-0272.
- [24] Von Neumann J, Burks A W. Theory of self-organized criticality[J]. Nature, 1996, 383(6603): 772-773.
- [25] 曾志峰.基于细胞自动机的协同演化优化方法[D].长沙:湖南大学,2010.
- [26] 曾明如,王从庆,刘公法,等.基于元胞自动机的移动机器人路径规划[J].南昌大学学报:工科版,2012,34(3):287-290.
- [27] 赵宜宾,刘艳艳,张梅东,等.基于模糊元胞自动机的多出口人员疏散模型[J].自然灾害学报,2013,22(2):13-20.
- [28] 冯焕东,杨静,刘博,等.基于元胞自动机的行人流疏散仿真研究[J].建设科技,2017(7):64-66. DOI: 10.16116/j.cnki.jskj.2017.07.020.
- [29] 李强,崔喜红,陈晋.大型公共场所人员疏散策略模拟与应用[M].北京:气象出版社,2011:57-66.
- [30] 北京市规划委员会. GB 50157-2013 地铁设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

(责任编辑:张月清)