

基于元胞鱼群算法的人员疏散模型^①



刘文宁, 王家伟, 汤雪芹

(重庆交通大学 信息科学与工程学院, 重庆 400047)

通讯作者: 刘文宁, E-mail: 2388935167@qq.com

摘要: 针对元胞自动机模型以及原始人工鱼群算法在刻画综合交通枢纽人员常规疏散行为上的局限性, 本文提出了一种基于元胞鱼群算法的人员疏散模型, 考虑个体之间的行走速度、视野范围差异, 将排队机制和出(入)口选择行为、导向行为、记忆功能加入原始人工鱼群算法中, 顶层采用改进的人工鱼群算法进行移动位置更新, 底层采用元胞自动机模型解决移动位置冲突. 实验证明, 该模型可真实反映人员在综合交通枢纽内换乘时的疏散过程; 在同等环境下, 与原始人工鱼群模型相比, 该模型实现了个体按照疏散引导进行有序移动, 避免了陷入局部最优; 与元胞自动机模型相比, 其更好地体现了个体的从众、避障和出(入)口选择行为, 有效地降低了时间复杂度.

关键词: 综合交通枢纽; 常规疏散; 疏散行为; 元胞自动机 (CA); 人工鱼群算法

引用格式: 刘文宁, 王家伟, 汤雪芹. 基于元胞鱼群算法的人员疏散模型. 计算机系统应用, 2019, 28(5): 131-136. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/6886.html>

Pedestrian Evacuation Model Based on CA-IAFSA Algorithm

LIU Wen-Ning, WANG Jia-Wei, TANG Xue-Qin

(School of Information Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: For the limitations of the Cellular Automata (CA) model and the original Artificial Fish Swarm Algorithm (AFSA) in describing the conventional evacuation behavior of the comprehensive transportation hub personnel, a kind of pedestrian evacuation model based on the CA-Improved AFSA (CA-IAFSA) is proposed with considering the difference of walking speed and the difference of view between individuals. As the queuing mechanism and the export (entrance) selection behavior, the guiding behavior, and the memory function are added to the original AFSA. The top layer adopts the IAFSA for mobile location updating, and the bottom layer uses the CA model to solve moving position conflicts. Experiments show that the model can truly reflect the evacuation process of people transferring vehicles in an integrated transportation hub. Under the same environment, compared with the original AFSA, the proposed model realizes the orderly movement of individuals according to guidance, avoiding falling into local optimum. Compared with the CA model, it is better in terms of reflecting the individual's herd, obstacle avoidance, and export (entrance) selection behavior, thus effectively reduces the time complexity.

Key words: integrated transportation hub; conventional evacuation; evacuation behavior; Cellular Automaton (CA); Artificial Fish Swarm Algorithm (AFSA)

元胞自动机模型 (Cellular Automaton, CA) 作为一种实现规则简单, 可以将复杂系统简单化的模型, 是目前应用最广泛的疏散模型之一^[1]. 然而, 其简单的实现

规则也导致了其在描述疏散个体行为上具有一定的局限性, 而且当元胞的邻域为扩展 Moore 邻域时, 会花费较多的时间用于搜索可行领域元胞.

① 收稿时间: 2018-11-12; 修改时间: 2018-12-03; 采用时间: 2018-12-11; csa 在线出版时间: 2019-05-01

人工鱼群算法 (Artificial Fish Swarm Algorithm, AFSA) 作为一种较为新型的群集智能算法, 其利用群体之间信息交互来实现全局寻优的思想, 为微观疏散模型的研究提供了一种新的思路. Lu DJ 等人^[2,3]使用人工鱼群算法来描述应急疏散时个体在路网中寻找疏散出口的过程.

不同于应急疏散, 在综合交通枢纽常规疏散的过程中, 人员的行为表现更为丰富, 具有排队等待、逗留、从众、跟随、随机探索、出(入)口选择行为、导向行为等, 使用单一的 CA 模型或者原始的 AFSA 算法都是难以完全刻画这些行为的. 因此, 本文改进原始 AFSA 算法, 结合 CA 模型, 提出一种基于元胞鱼群算法 (CA-IAFSA) 的人员疏散模型, 在刻画人员多样行为的同时, 降低模型的时间复杂度.

1 相关研究

CA 模型是把空间和时间按照一定间距离散化, 系统物理量只取有限个状态的物理系统简化模型^[1]. 它具有四个基本组成部分: 元胞、状态、邻域和转换规则. 基于 CA 的疏散模型侧重于研究应急情况下的人员疏散过程^[4-6], 关注于人员特性或者环境对疏散效率造成的影响^[7-10], 忽略个体在疏散过程中的行为表现和相互影响.

AFSA 算法最早是在 2002 年被提出的^[11], 该算法使用人工鱼的四种基本行为: 聚群行为、追尾行为、觅食行为、随机行为来实现变量在变量空间中寻优的过程^[12]. 该算法在解决配电网重构等一系列连续性优化问题取得了较好的效果, 但在解决离散型优化问题上仍具有一定的局限性^[13].

目前, 将 AFSA 算法和 CA 结合起来进行研究的文献较少. 柳毅^[14]在研究带时间窗可回程取货车辆路径问题数据模型的基础上, 将 AFSA 算法和 CA 结合设计了元胞鱼群算法. 将二者结合起来, 一方面可以提高 AFSA 算法对离散型优化问题的处理能力, 另一方面可以使用 AFSA 算法中人工鱼的搜索规则来替代 CA 模型中的元胞状态转换规则, 从而降低模型的时间复杂度.

2 基于元胞鱼群算法的疏散模型

将综合交通枢纽内需要换乘的人员看成是人工鱼, 按照乘车意向划分为多个种群, 上层采用改进的 AFSA 算法, 底层采用 CA 框架, 将搜索空间离散化, 在每轮

迭代过后, 利用 CA 模型的邻域模型和状态转换规则, 解决位置冲突.

2.1 模型假设

- (1) 人员在移动过程中, 不考虑碰撞与挤压;
- (2) 换乘客流全部来源于火车到站客流, 其乘车意向假设已知. 人员在移动过程中不会更改乘车意向.

2.2 个体抽象

考虑个体的速度差异、视野差异, 个体表示为:

$$p = \{X, O, v_0, w, M, Q\} \tag{1}$$

其中, X 代表个体 p 的位置; O 表示乘车意向; v_0 是初始速度; $v(t) = v_0 \times e^{-\omega \times (\rho(t)-1)}$, $\rho(t)$ 是 t 时刻周围人群密度 (单位: 人/ m^2); w 为视野范围; M 是一张记忆表, $M = (l_1, l_2, \dots, l_k)$, 用于记录个体 p 记忆中的引导指示, 防止陷入局部最优, $l = (st, en)$, l 表示引导指示的方向矢量, st 表示起始坐标, en 表示终点坐标; $Q = (exit, t_1, t_2)$, 保存个体 p 当前的排队信息, $exit$ 表示 p 正在出口 (乘车点) $exit$ 处排队, t_1 表示到达 $exit$ 的时刻, t_2 表示离开 $exit$ 的时刻.

2.3 行为抽象

- (1) 出(入)口选择行为:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \frac{e_0 - X_i^t}{\|e_0 - X_i^t\|} \times v(t) \tag{2}$$

$$e_0 = \arg \min T(E_k) \tag{3}$$

$$T = \sum_{j=1}^n t(j) + \frac{d(E_k, X_i^t)}{v_0} \tag{4}$$

其中, X_i^t 表示个体 p_i 在 t 时刻的位置; E_k 表示视野范围内可见的第 k 个出(入)口; n 表示当前时刻正在出口 E_k 处排队等待的人数; $t(j)$ 表示队列中第 j 个个体的所需服务时间; $d(E_k, X_i^t)$ 表示 X_i^t 与 E_k 之间的欧式距离.

- (2) 导向行为: 当在视野可见范围内, 没有目标出口, 存在引导指示时, 选择距离最近的引导指示 l .

若 $l \notin M$:

$$M = \{l_1, l_2, \dots, l_k, l\} \tag{5}$$

若 $d(st, X_i^t) > \eta$:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \frac{st - X_i^t}{\|st - X_i^t\|} \times v(t) \tag{6}$$

若 $d(st, X_i^t) \leq \eta$:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \frac{en - st}{\|en - st\|} \times v(t) \tag{7}$$

其中, η 是一个自定义参数, 表示疏散引导指示的作用范围.

若 $l \in M$:

$$X_i^{t+1} = \frac{l_k(en) - l_k(st)}{\|l_k(en) - l_k(st)\|} \times v(t) \quad (8)$$

当 p_i 视野可见范围内即无出口又无引导指示时, 则选择从众行为、跟随行为、探索行为中最优的一种行为执行.

(3) 从众行为: p_i 搜索视野可见范围内具有相同意向的伙伴, 计算其中心位置 X_c , 若 $Y(X_c)$ 优于 $Y(X_i^t)$, 将 $S_{X_i^{t+1}}$ 作为 p_i 下一个时间步的待选位置.

$$S_{X_i^{t+1}} = X_i^t + \frac{X_c - X_i^t}{\|X_c - X_i^t\|} \times v(t) \quad (9)$$

(4) 跟随行为: p_i 搜索视野可见范围内具有相同乘车意向的伙伴 p_j , 若 $Y(X_j)$ 优于 $Y(X_i^t)$, 将 $F_{X_i^{t+1}}$ 作为 p_i 下一个时间步的待选位置.

$$F_{X_i^{t+1}} = X_i^t + \frac{X_j - X_i^t}{\|X_j - X_i^t\|} \times v(t) \quad (10)$$

(5) 探索行为: 个体在视野范围内随机而不重复的任选一个位置 X_r , 若 $Y(X_r)$ 优于 $Y(X_i)$, 则将 $P_{X_i^{t+1}}$ 作为 p_i 下一个时间步的待选位置.

$$P_{X_i^{t+1}} = X_i^t + \frac{X_r - X_i^t}{\|X_r - X_i^t\|} \times v(t) \quad (11)$$

若 p_i 在尝试了 try_num 次后, 仍没找到较优的位置, 则停留在原地.

(6) 随机行为: 当 p_i 在尝试了以上五种行为后, 仍停留在原地, 说明陷入了局部最优, 此时, 随意选择一个可行的方向进行移动.

完成一轮迭代后, 最终确定下一时间步的移动位置 X_n .

2.4 排队机制的实现

p_i 在 t 时刻确定相应的出(入)口 e_0 , 且 $d(p_i, e_0) < \xi$ (ξ 表示距离阈值), p_i 进入到 e_0 当前的排队队列中, p_i 停止移动, 排队结束后, 则恢复运动.

$$Q = (e_0, t, t_2) \quad (12)$$

$$t_2 = t + \sum_{j=1}^n t(j) \quad (13)$$

2.5 位置冲突的解决

当个体确定了下一个时间步的移动位置 X_n 时, 底

层使用 CA 模型的并行更新策略来解决位置冲突. 冲突解决规则如下:

(1) 将 X_n 作为中心元胞, 使用 Moore 型邻域, 当 X_n 与 X_i^t 之间既没有障碍物, X_n 也没有被其他个体占据, 优先选择 X_n .

(2) 当发生冲突时, 遍历 X_n 周围满足条件的邻域元胞 $N(X_n)$, 分别计算未被其他个体占据且与 X_n 之间不存在障碍物的元胞与 X_i^t 的欧式距离, 随机选择一个元胞作为下一个时间步的目标移动位置.

(3) X_n 周围没有满足条件的邻域元胞时, 停留在原地.

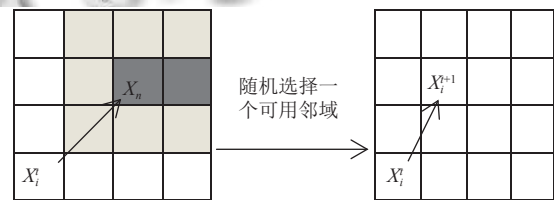


图1 CA 模型解决位置冲突

3 实验及结果分析

3.1 环境设置

在 MATLAB 上搭建 2D 模拟环境, 进行实验. 疏散环境设置如下:

(1) 环境区域为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$, 元胞边长为 0.2 m , 设置火车站的范围为 $x \in [0\text{ m}, 100\text{ m}], y \in [0\text{ m}, 20\text{ m}]$. 各交通方式的出/入口参数设置如表 1 所示.

(2) 这里参考文献[15], 设置个体占地面积 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$, 初始速度服从正态分布 $N(1.34, 0.26^2)$, (单位: m/s) 时间变化步长为 1 s .

(3) $\omega = 0.01, \eta = 2, \xi = 2v$.

表 1 各交通方式的出/入口参数设置

交通方式	出入口设置	平均安检时间
火车	(44,20)、(50,20)、(55,20)	2 s/人
长途客运	(26,75)、(74,75)	5 s/人
轨道交通	(36,86)、(62,86)	3 s/人
公交	(95,70)、(10,70)	3 s/人
出租	(90,70)、(15,70)	5 s/人

3.2 算法参数分析

采用控制变量法依次测试人工鱼的探索尝试次数 try_num 及视野范围 w 对于疏散效果的影响. 设置人数为 500, 换乘其他四种交通方式的人数各占 25%.

(1) 调试 try_num 参数值: 设置 w 随机分布在 $[20,30]$ 范围内. try_num 变化步长为 5, 分析 $try_num = 5, 10, \dots, 50$ 时对于疏散效果的影响. 实验结果如图 2 所示.

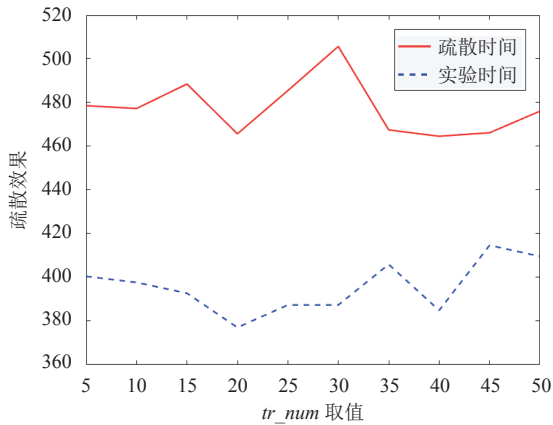


图 2 参数 try_num 对疏散效果的影响

(2) 调试 w 参数值: 基于实验 (1), 设置 $try_num = 20$, 设置 w 变化步长为 5, 分析 w 分布 $[5,10], [10,15], \dots, [45,50]$ 范围时对于疏散效果的影响. 实验结果如图 3 所示.

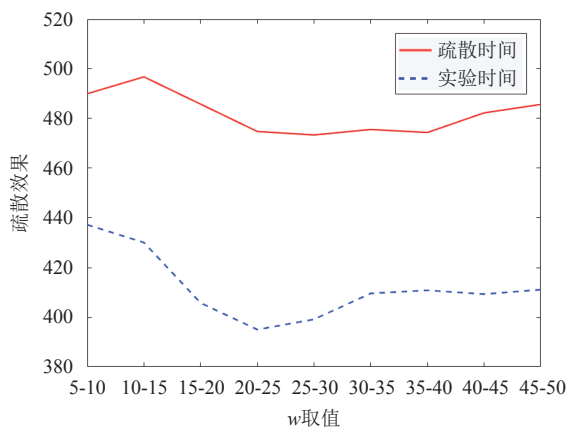


图 3 参数 w 对疏散效果的影响

从图 2 可知, 当设定人工鱼的视野范围 $w \in [20,30]$ 时, $try_num=20$ 时, 平均疏散时间与平均实验时间最短, 而当 try_num 大于 35 时, 平均疏散时间基本变化不大, 平均实验时间却在上下波动变化. 因此, 这里设置 $try_num=20$.

从图 3 中可知, 当设定人工鱼的探索尝试次数 $try_num=20$ 时, $w \in [20,25]$ 时, 平均疏散时间和平均实

验时间最少, w 的分布范围大于 30 时, 其对应的平均疏散时间和平均实验时间基本上变化不大. 因此这里设置 w 的分布范围为 $[20,25]$.

3.3 实验及对比分析

设置人数为 500, 换乘其他 4 种交通方式的人数各占 25%. 对比三种模型: ① ICA 模型: 在 CA 模型中, 加入导向行为、排队行为和出口选择机制; ② CA-AFSA: 将 CA 模型和原始 AFSA 模型结合, 加入排队行为和出口选择机制, 不加导向行为; ③ 本文提出的 CA-IAFSA 模型. (注: 由于完整截取的图片较大, 图 4 中的 (c) 和 (d) 只截取了部分效果图.)

对比图 4 中的 (a) 和 (b) 可以发现, 模型①中, 位于火车站内的绝大多数个体“绝对理性地”选择了距离出口最近的位置, 紧贴靠近出口的障碍物进行移动, 且趋向于在出口处形成“拱形”. 而在模型③的模拟效果图中, 人群是从远离出口的初始位置以聚集的趋势逐渐向三个出口靠近, 有效地避免了“紧贴墙壁行走”. 模型③相比模型①更好地体现了“从众”和“避障”行为.

对比图 4 中的 (c) 和 (d), 相比模型②, 加入“导向行为”的模型③克服了根据“最短路径原则”移动而陷入局部最优, 原地徘徊而无法继续疏散的缺陷, 实现了人群自发有序地向着目的换乘点移动, 很好地体现了人员疏散的“导向”行为.

对比图 5 中的 (a), (b), 对于距离较近的三个火车出口, 模型③相比模型①, 实现了资源的均衡利用, 比较符合实际情况下人员的“出口选择”行为.

为了进一步验证 CA-IAFSA 模型在疏散模拟时间性能上的提升, 分别将人数设置为 300 人, 500 人, 1000 人, 在同等条件下, 使用 ICA 模型和 CA-IAFSA 模型进行 10 次模拟实验取均值, 结果如表 2 所示.

由表 2 可以看出, 在同一实验条件下, 模型③与模型①相比, 平均疏散时间在一定程度上有所降低, 在实验时间花费上至少降低了 59%. 原因是: 前者采用扩展型摩尔型邻域, 遍历邻域元胞获得下一个移动位置时花费了大量的时间. 后者采用 AFSA 算法中人工鱼的搜索规则来替代 CA 模型中的元胞状态转换规则, 避免了盲目搜索, 同时, 在一定程度上避免了“快即是慢”现象的发生, 防止人群由于“最短路径原则”产生过度拥挤, 从而提升疏散性能.

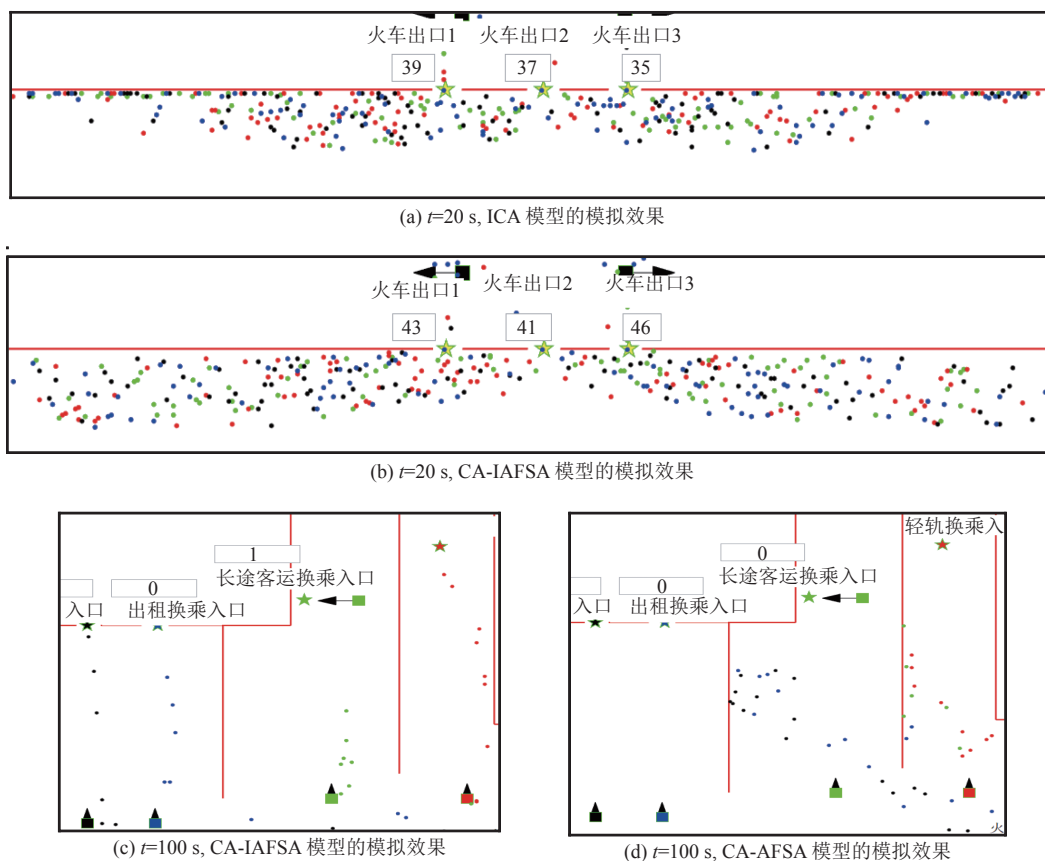


图4 三种模型的模拟效果

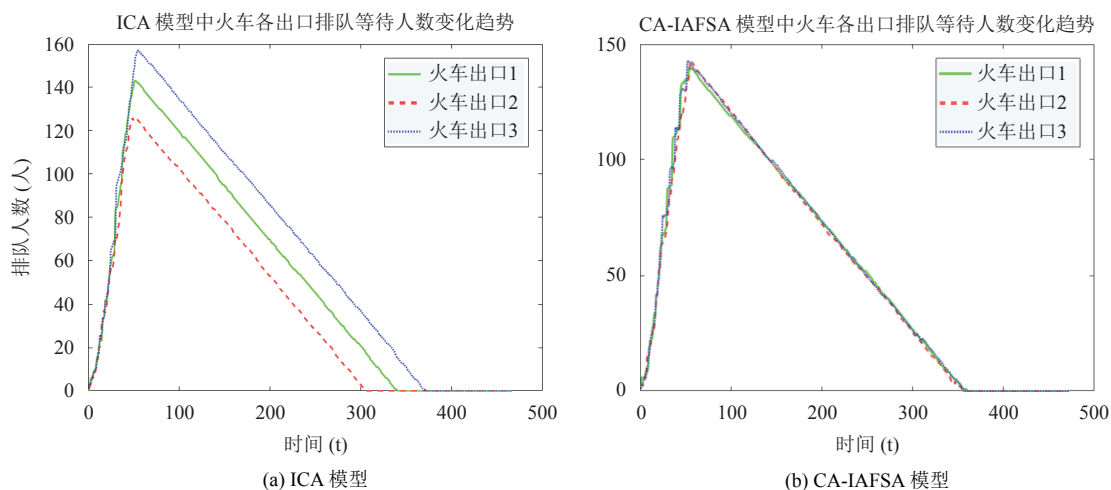


图5 两种模型的火车出口排队人数变化趋势

表2 两种模型的疏散效果对比

模型	时间	300人	500人	1000人
ICA	疏散时间	330.6	487	871.3
	实验时间	870.4	1536.5	3786.9
CA-IAFSA	疏散时间	322.4	478.7	845.9
	实验时间	160.8	424	1549.8

4 结论与展望

本文提出的 CA-IAFSA 模型, 针对综合交通枢纽的常规疏散, 考虑个体之间的速度差异、视野差异, 将导向行为和排队机制加入原始 AFSA 算法中, 融合 CA 模型构建人员常规疏散模型. 实验结果证明, CA-

IAFSA 模型,可真实的反映人员在综合交通枢纽内进行换乘时的疏散过程.克服了原始 AFSA 在存在障碍物的疏散环境中,易陷入局部最优的缺陷,在刻画人员的导向行为、避障行为、排队行为、出(入)口选择行为上具有较好的模拟效果,相比 ICA 模型,CA-IAFSA 模型在一定程度上减少了疏散时间,在时间复杂度上至少降低了 59%.在今后的研究中,会根据实际情况,进一步对模型参数进行调整,为特定综合交通枢纽场景中的人员常规疏散提供决策辅助.

参考文献

- 1 Bakar NAA, Majid MA, Ismail KA. An overview of crowd evacuation simulation. *Advanced Science Letters*, 2017, 23(11): 11428–11431. [doi: [10.1166/asl.2017.10298](https://doi.org/10.1166/asl.2017.10298)]
- 2 Zong XL, Jiang YL, Wang CZ. Evacuation behaviors and link selection strategy based on artificial fish swarm algorithm. *Proceedings of the 7th International Conference on Cloud Computing and Big Data*. Macau, China. 2016. 279–283.
- 3 Lu DJ, Zhang GJ, Liu YL, *et al.* AFSA based path planning method for crowd evacuation. *Journal of Computational Information Systems*, 2014, 11(11): 3815–3823.
- 4 张鑫龙, 陈秀万, 李怀瑜, 等. 一种改进元胞自动机的人员疏散模型. *武汉大学学报·信息科学版*, 2017, 42(9): 1330–1336.
- 5 杨波, 陈丹丹, 夏颖, 等. 基于 GIS 的 CA-PSO 多出口场景疏散模型研究. *中南民族大学学报 (自然科学版)*, 2017, 36(1): 107–112.
- 6 袁野, 田中旭. 隧道火灾疏散模型实时仿真算法的实现. *计算机工程与应用*, 2017, 53(23): 208–211. [doi: [10.3778/j.issn.1002-8331.1606-0083](https://doi.org/10.3778/j.issn.1002-8331.1606-0083)]
- 7 李世威, 王建强, 刘应东. 初始分布非均匀的行人疏散仿真研究. *计算机应用研究*, 2017, 34(3): 702–705. [doi: [10.3969/j.issn.1001-3695.2017.03.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3695.2017.03.014)]
- 8 Fu ZJ, Zhou XD, Zhu KJ, *et al.* A floor field cellular automaton for crowd evacuation considering different walking abilities. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015, 420: 294–303. [doi: [10.1016/j.physa.2014.11.006](https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.11.006)]
- 9 蒋雪玲, 潘颖. 大规模聚集人群的疏散仿真模型研究. *计算机仿真*, 2015, 32(6): 398–402, 415. [doi: [10.3969/j.issn.1006-9348.2015.06.088](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2015.06.088)]
- 10 Zhong W, Tu R, Yang JP, *et al.* Simulation of evacuation process in a supermarket with cellular automata. *Procedia Engineering*, 2013, 52: 687–692. [doi: [10.1016/j.proeng.2013.02.207](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.207)]
- 11 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法. *系统工程理论与实践*, 2002, 22(11): 32–38. [doi: [10.3321/j.issn:1000-6788.2002.11.007](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6788.2002.11.007)]
- 12 Neshat M, Adeli A, Sepidnam G, *et al.* A review of artificial fish swarm optimization methods and applications. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 2017, 5(1): 107–148.
- 13 Neshat M, Sepidnam G, Sargolzaei M, *et al.* Artificial fish swarm algorithm: A survey of the state-of-the-art, hybridization, combinatorial and indicative applications. *Artificial Intelligence Review*, 2014, 42(4): 965–997. [doi: [10.1007/s10462-012-9342-2](https://doi.org/10.1007/s10462-012-9342-2)]
- 14 柳毅, 沈勤. 带时间窗可回程取货车路径问题的元胞鱼群算法. *系统管理学报*, 2011, 20(6): 739–743.
- 15 杨立中. 建筑内人员运动规律与疏散动力学. 北京: 科学出版社, 2012.