



基于介观元胞自动机的城市区域人员疏散模拟方法

吕伟 汪京辉 房志明 毛盾

Simulation method of urban evacuation based on mesoscopic cellular automata

Lü Wei Wang Jing-Hui Fang Zhi-Ming Mao Dun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 100706 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210018

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210018>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

温度梯度区域熔化作用下熔池迁移的元胞自动机模拟

Cellular automaton simulation of molten pool migration due to temperature gradient zone melting

物理学报. 2019, 68(4): 048102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181587>

多路段元胞自动机交通流模型

Multi-section cellular automata model of traffic flow

物理学报. 2017, 66(19): 194501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.194501>

基于元胞自动机的气动光学光线追迹算法

Cellular automata ray tracing in two-dimensional aero-optical flow fields

物理学报. 2020, 69(19): 194201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200532>

蚁群元胞优化算法在人群疏散路径规划中的应用

Application research of ant colony cellular optimization algorithm in population evacuation path planning

物理学报. 2020, 69(8): 080504 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191774>

考虑在能见度受限下行人跟随行为特性的建模与模拟

Modeling and simulation of following behaviors of pedestrians under limited visibility

物理学报. 2019, 68(24): 240504 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190707>

基于心脏腔式结构的心电图元胞自动机建模

A cellular automaton model for electrocardiogram considering the structure of heart

物理学报. 2017, 66(20): 200501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.200501>

基于介观元胞自动机的城市区域 人员疏散模拟方法*

吕伟¹⁾²⁾ 汪京辉¹⁾²⁾ 房志明^{3)†} 毛盾¹⁾²⁾

1) (武汉理工大学, 中国应急管理研究中心, 武汉 430070)

2) (武汉理工大学安全科学与应急管理学院, 武汉 430070)

3) (上海理工大学管理学院, 上海 200093)

(2021年1月4日收到; 2021年2月19日收到修改稿)

传统元胞自动机疏散模型中, 空间多划分为微观层面的精细网格, 难以对大范围的疏散场景进行模拟. 基于此, 本文结合行人流的运动特征, 建立了应用于大尺度人员疏散场景的人员疏散介观元胞自动机模型. 该模型以道路元胞划分替代平面网格元胞划分方式, 并引入“源加载”元胞加载模拟场景内疏散人员, 建立元胞间状态转移方程模拟疏散过程中的人员运动. 应用该模型, 对高校校园进行疏散子网划分, 模拟应急疏散过程并规划疏散路径, 既可以对场景内宏观疏散情况进行分析, 又可以观测单个元胞的状态变化. 基于模拟结果, 能够发现实际疏散过程中可能存在的问题, 提出相应的改进指引和意见.

关键词: 介观元胞自动机, 大尺度模拟, 人员疏散, 分区疏散**PACS:** 07.05.Tp, 05.10.-a, 05.65.+b**DOI:** 10.7498/aps.70.20210018

1 引言

近年来, 随着我国城市规模扩大, 人口数量和密度迅速攀升, 以及全球气候环境的持续恶化, 频发的地震、海啸、洪水等自然灾害和火灾爆炸、危化品泄漏等事故灾难已经给许多城市造成巨大的生命和经济损失, 城市公共安全正面临着巨大压力和挑战. 当城市遭受重大灾害事故时, 迅速将灾害事故影响范围中的人口转移疏散至安全地带, 是保障人民生命安全的重要途径, 城市区域性疏散问题正逐步成为疏散领域新的研究焦点. 与传统建筑火灾疏散场景不同, 城市区域性疏散场景所涉及的空间范围更大、疏散距离更长、疏散设施更依赖于区域内的道路或路网, 因此, 为分析区域性应急疏散

方案的可行性及效果, 开展大尺度疏散演习显然不切实际, 必须采用基于疏散模型的模拟技术进行研究, 通过计算机模拟人员的移动过程, 得出疏散时间、疏散效率、人员密度和人员流量等数据结果, 用于评估疏散风险、优化疏散方案等实际工作. 在人员疏散模型研究领域, 元胞自动机技术因其高效和易实现的优势, 已在建筑空间人员疏散模拟中广泛应用, 同样具有模拟城市区域应急疏散的能力.

在元胞自动机人员疏散模型研究层面, 国外学者研究起步较早并在不同疏散场景下开展了广泛的元胞自动机拓展模型研究. Miyagawa 和 Ichinose^[1]建立了人群疏散中的多网格元胞自动机模型, 研究了人员横向移动和转弯行为对疏散过程的影响. Ji 等^[2]通过将元胞形状由矩形改成三角形, 使得模型中行人的运动方向由 8 个变为 14 个. Maniccam^[3]

* 国家自然科学基金 (批准号: 52072286)、中国博士后科学基金 (批准号: 2018M632937) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2019IVA075, 2019III053GX) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhmfang2015@163.com

将元胞形状由矩形改成六边形,研究了元胞内临界密度的变化. Leng 等^[4]建立了一种基于正六边形的场域元胞模型,研究了走廊中的行人动态特征. Jooyoung 等^[5]通过拓展元胞自动机模型,模拟了不同比例的残障人群对通道疏散的影响. Hanisch 等^[6]利用交通研究中的元胞传输模型对公共场所行人流进行研究, Crociani 等^[7]提出了一种基于元胞自动机的多尺度建模方法,用于模拟纽约市史坦顿岛渡轮运输场景. Lämmel 和 Flötteröd^[8]建立了一种基于事件动态发展的元胞自动机模型,模拟了单、双向行人流疏散场景. Kaji 和 Inohara^[9]结合多网格元胞自动机模型和静态场模型,研究了层流中流体的流动特征. Shi 等^[10]提出了一种介观疏散模型,并开发了一套新的静态场算法用于介观尺度下人员疏散建模. 国内学者主要聚焦于建筑内部微观疏散场景下的元胞自动机疏散模型研究. 胡俊等^[11,12]建立了三维元胞自动机模型来研究阶梯上的行人流特征. 张磊等^[13]利用元胞自动机模型对行人拥堵区域的拥挤致伤机理进行了研究. 任刚等^[14]建立考虑行人行走倾向性特征的元胞自动机模型并利用复杂网络理论对行人流特征进行分析. 胥旋等^[15]通过引入行人感知范围参数建立了考虑绕行行为的元胞自动机模型. 金泽人等^[16]通过考虑行人基于场景的移动方向和期望速度规则拓展了场强模型. 陆卓谟和秦文虎^[17]通过考虑个体的反应时间和群组运动方式等因素拓展了元胞自动机模型. 张维等^[18]通过考虑人群拥挤受力作用机制,利用改进的多格子元胞自动机模型和具有特殊赋值规律的静态场模型对出口处拥挤人群的动力学特征进行模拟. Cao 等^[19]建立了无能见度环境下多网格人员疏散模型,研究了出口宽度、出口数量和初始密度对疏散时间的影响. 陈雍容^[20]结合元胞自动机模型与多智能体技术建立复合疏散模型,实现了介观疏散引导模型和微观自主疏散模型的耦合,杨兆升等^[21]将交叉口控制参数引入到基于元胞传输模型的应急疏散仿真模型中,并应用反流策略,对城市疏散场景下的交通分配进行优化.

总结国内外研究现状可知,现有的元胞自动机疏散模型基本上都是微观层面的精细网格模型,主要应用于二维平面场景,疏散空间也多为小范围的建筑空间或局部区域,而可应用于大范围城市区域疏散模拟的元胞自动机模型尚不成熟,这主要是因为微观元胞自动机模型的高精度特点使其在向大

尺度空间拓展时计算效率受到极大制约. 因此,为探索元胞自动机疏散模型在大尺度空间中的适用性,本文拟通过对疏散区域的路网道路划分微观元胞,对特定元胞加载和卸载人员流量实现疏散生成和完成,对道路元胞上的宏观状态量迁移实现疏散过程,提出一种基于介观元胞自动机的城市区域应急疏散模拟方法,以期为大尺度应急疏散方案论证提供科学支撑.

2 介观元胞自动机疏散模型

2.1 微观元胞自动机疏散模型

目前传统的元胞自动机疏散模型多为微观网格疏散模型,是一类按照预定规则改变系统状态的时空离散模型,包括有偏无后退随机行走模型^[22]、场域模型^[23]、多作用力模型^[24]、多格子模型^[25]和 k 近邻模型^[26]等,这些模型的核心思想都是通过个体在元胞上的迁移来实现疏散人员空间状态的改变,相应地,模型的关键在于计算元胞之间的迁移概率. 以经典的场域 (FF) 模型为例,它通过“静态场”考虑系统结构或建筑空间构形对疏散者的影响,通过“动态场”考虑系统中人群移动的引导效应,然后根据 (1) 式计算每个元胞上的疏散个体在“静态场” S_{ij} 和“动态场” D_{ij} 综合影响下的转移概率 p_{ij} ,进而根据转移概率更新系统中疏散个体的空间位置,实现动态疏散过程模拟,如图 1 所示.

$$p_{ij} = \left(\sum p_{ij} \right)^{-1} \exp(k_D D_{ij}) \times \exp(k_S S_{ij})(1 - n_{ij}) \xi_{ij}. \quad (1)$$

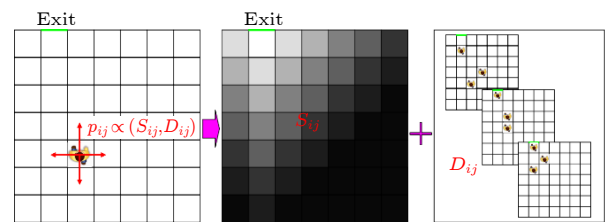


图 1 场域模型中的运动过程示意图
Fig. 1. Sketch map of the movement process in FF model.

由图 1 可以看出,以场域模型为代表的元胞自动机疏散模型是典型的微观尺度模型,随着元胞规模的增大,模拟运算的效率将大幅下降,因而难以适用于大尺度空间的城市区域性应急疏散模拟研究.

2.2 介观元胞自动机疏散模型

为实现元胞自动机技术在城市区域性应急疏散模拟中的应用,可以维持经典元胞自动机疏散模型通过元胞间的疏散者迁移实现系统状态更新的核心思想不变,但是在模型尺度上必须由微观转换为介观.所谓介观,包括两个层面:一是在空间元胞划分上,放弃平面网格划分的方式,采用道路元胞切分方式,只对疏散路网进行空间离散,其他区域的人员向道路的转移过程通过疏散路网中特定元胞的“源加载”形式体现,如图2所示;二是在疏散者的元胞迁移上,放弃个体依转移概率实现疏散运动过程的方式,直接通过元胞对应宏观状态量的更新实现疏散群体的流动过程,宏观状态量包括元胞上的人群数量、人群密度、疏散速度等,如图3所示.

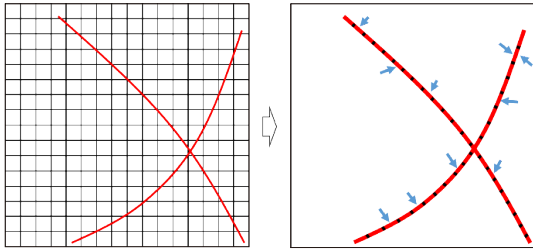


图2 平面网格划分向道路元胞切分转变示意图
Fig. 2. Change from plane mesh to road cell segmentation.

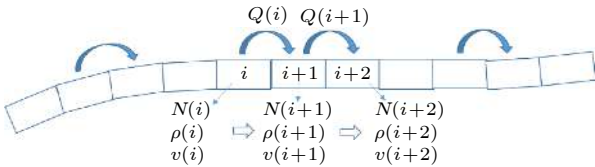


图3 疏散道路元胞间宏观状态量更新示意图
Fig. 3. The update of macro-state variable between road cells.

根据上述思想,构建城市区域应急疏散的介观元胞自动机模型并进行模拟研究的基本程序是:

第一步,确定待研究的城市区域边界范围,提取该边界范围内的疏散路网;

第二步,对疏散道路进行元胞切分,定位“源加载”元胞和疏散“出口”元胞;

第三步,计算每个道路元胞和每个出口元胞之间的距离,按照就近出口选择原则,确定每个道路元胞疏散指向的出口元胞;

第四步,根据流量守恒、容量限制和疏散交通

流规律,建立疏散道路元胞宏观状态量更新规则;

第五步,设定模拟条件,进行路网元胞状态值计算和更新,直至疏散路网中人数降低至临界值,疏散结束.

结合图4,介观元胞自动机疏散模型中,道路元胞形态本质只有两种:一种是图4(a)所示的无外部人员加载的普通元胞;另一种是图4(b)所示的有外部“源加载”的特定元胞.无论是哪种元胞形态,所遵循的规则是相似的,并且都必须满足流量守恒、容量限制和疏散交通流规律.

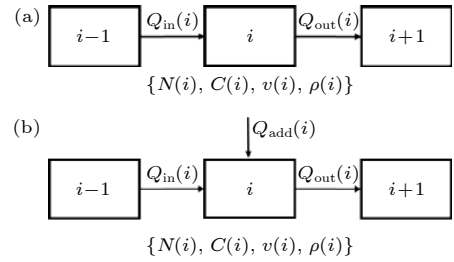


图4 疏散道路元胞间宏观状态量更新规则示意图 (a) 无加载源; (b) 有加载源
Fig. 4. The update rule of macro-state variable between the evacuation road cells: (a) Without load source; (b) with load source.

在流量守恒方面,元胞*i*中的人员数量*N*(*i*)更新需满足:

$$N_{t+\Delta t}(i) = N_t(i) + Q_{in,\Delta t}(i) - Q_{out,\Delta t}(i). \quad (2)$$

在容量限制方面,元胞*i*中的人员数量*N*(*i*)不得超过元胞*i*的最大容量*C*(*i*):

$$N_t(i) \leq C(i). \quad (3)$$

在疏散交通流规律方面,元胞*i*与其相邻的元胞之间的流量需满足流量-密度关系:

$$Q_{in,\Delta t}(i) = \rho_t(i-1) \cdot v_t(i-1) \cdot w \cdot \Delta t, \quad (4)$$

$$Q_{out,\Delta t}(i) = \rho_t(i) \cdot v_t(i) \cdot w \cdot \Delta t. \quad (5)$$

以上公式中,*N_t*(*i*)表示*t*时刻元胞*i*中的人员数量,单位为人;*Q_{in,Δt}*(*i*),*Q_{out,Δt}*(*i*)表示在Δ*t*的时间间隔内元胞*i*进入和流出的人员数量,单位为人;*C*(*i*)表示元胞*i*中最多容纳的人数,单位为人;*ρ_t*(*i*),*v_t*(*i*)分别表示*t*时刻元胞*i*中的人员密度(人/m²)和流动速度(m/s);*w*表示元胞宽度,单位为m.

基于以上三条基本规则,建立无加载源元胞宏观状态量更新方程如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{in,\Delta t}(i) = \min\{\rho_t(i-1) \cdot v_t(i-1) \cdot w \cdot \Delta t, \\ \quad C(i) - N_t(i)\}, \\ Q_{out,\Delta t}(i) = \min\{\rho_t(i) \cdot v_t(i) \cdot w \cdot \Delta t, \\ \quad C(i+1) - N_t(i+1)\}, \\ N_{t+\Delta t}(i) = \min\{N_t(i) + Q_{in,\Delta t}(i) \\ \quad - Q_{out,\Delta t}(i), C(i)\}. \end{array} \right. \quad (6)$$

建立有加载源元胞宏观状态量方程如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{if } Q_{in,\Delta t}(i) + Q_{add,\Delta t}(i) \leq C(i) - N_t(i), \\ Q_{in,\Delta t}(i) = \rho_t(i-1) \cdot v_t(i-1) \cdot w \cdot \Delta t, \\ Q_{add,\Delta t}(i) = Q_{add,\Delta t}(i), \\ \text{if } Q_{in,\Delta t}(i) + Q_{add,\Delta t}(i) > C(i) - N_t(i), \\ Q_{in,\Delta t}(i) = \alpha \cdot [C(i) - N_t(i)], \\ Q_{add,\Delta t}(i) = (1 - \alpha) \cdot [C(i) - N_t(i)], \\ \alpha = Q_{in,\Delta t}(i) / [Q_{in,\Delta t}(i) + Q_{add,\Delta t}(i)], \\ Q_{out,\Delta t}(i) = \min\{\rho_t(i) \cdot v_t(i) \cdot w \cdot \Delta t, \\ \quad C(i+1) - N_t(i+1)\}, \\ N_{t+\Delta t}(i) = \min\{N_t(i) + Q_{in,\Delta t}(i) \\ \quad + Q_{add,\Delta t}(i) - Q_{out,\Delta t}(i), C(i)\}. \end{array} \right. \quad (7)$$

状态更新方程中, 元胞 i 中的流动速度、容量和密度可用如下公式求取:

$$v_t(i) = v_f \cdot \exp[-\rho_t(i)/\rho_m], \quad (8)$$

$$\rho_t(i) = N_t(i)/(l_i \cdot w), \quad (9)$$

$$C(i) = l_i \cdot w \cdot \rho_m, \quad (10)$$

其中 ρ_m 表示临界密度, 在该密度下, 人群只能以极小的速度行进, 临界密度通常取 5 人/ m^2 ; l_i 表示元胞 i 的长度, m; v_f 表示自由疏散速度, m/s.

3 基于介观元胞自动机的城市区域疏散建模

3.1 城市区域选取

考虑到高校校园兼具空间范围广和人群聚集程度高的特点, 适合开展较大尺度的区域性疏散模拟研究, 选取位于武汉市洪山区街道口附近的某高校校园区域, 如图 5 所示, 对前文提出的介观元胞自动机疏散模型开展区域应急疏散模拟可行性研究. 该校园区域占地约 675 亩 (450000 m^2), 区域内有教学楼 2 栋、图书馆 1 个、学生宿舍楼 10 栋、教师宿舍楼 39 栋, 根据调查统计, 所有建筑满载

时约容纳 16838 人, 而实际教学工作日时校区内人数在 8200 人左右. 此外, 该区域路网由 8 条东西道路 (编号 1—8) 和 7 条南北走向道路 (编号 9—15) 构成, 路网通往边界外部的出口有 4 个 (星标).

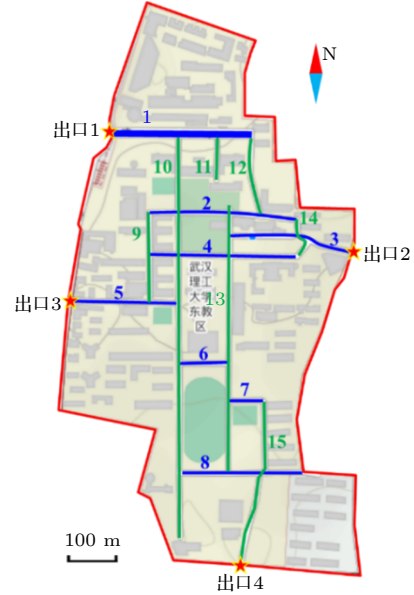


图 5 研究区域的空间范围及边界

Fig. 5. The spatial scope and boundary of the study area.

3.2 路网元胞切分

沿道路网中的道路方向, 以 10 m 长度和 6 m 宽度为基本元胞尺寸, 将路网道路切分为元胞单元, 并结合教学楼、学生宿舍、图书馆和师生宿舍的位置, 选取与这些人群密集场所较近的元胞作为疏散“源加载”元胞 (箭头所指元胞), 选取边界出口元胞作为疏散“出口”元胞 (星标处元胞), 如图 6 所示.

进一步, 按道路编号, 对每条道路从一端 (西端或北端) 开始向另一端 (东端或南端) 依次进行元胞编码, 编码后的元胞用 $\text{Cell}_{i,j}$ 表示, i 表示道路编号, j 表示元胞在第 i 条道路中的次序, 本文研究区域的道路元胞编码统计信息如表 1 所列.

3.3 疏散子网划分

将四个出口分别标记为出口 1、出口 2、出口 3 和出口 4, 通过计算每个道路元胞与 4 个“出口”元胞间的距离, 以距离最近的出口作为该元胞疏散的目标出口, 确定 4 个出口覆盖的道路元胞范围, 如图 7 所示.

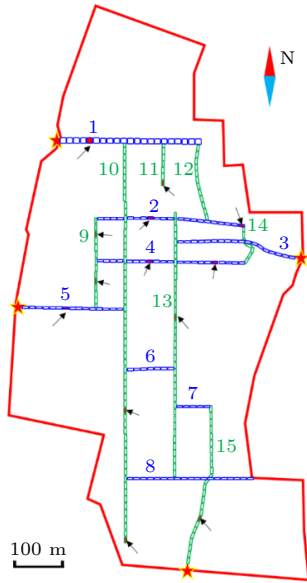


图 6 路网的元胞切分示意图

Fig. 6. The road cell segmentation of the road network.

表 1 区域道路元胞编码统计信息

Table 1. Statistical information of regional road cellular coding.

道路编号	长/m	宽/m	元胞数量	“源加载”元胞	“出口”元胞
1	280	12	28	Cell _{1,8}	Cell _{1,1}
2	290	6	29	Cell _{2,9} , Cell _{2,29}	—
3	230	6	23	—	Cell _{3,23}
4	290	6	29	Cell _{4,9} , Cell _{4,17}	—
5	200	6	20	Cell _{5,9}	Cell _{5,1}
6	90	6	9	—	—
7	68	6	7	—	—
8	250	6	25	—	—
9	180	6	18	Cell _{9,5} , Cell _{9,13}	—
10	795	6	80	Cell _{10,59} , Cell _{10,80}	—
11	90	6	9	Cell _{11,9}	—
12	148	6	15	—	—
13	530	6	53	Cell _{13,21}	—
14	70	6	7	—	—
15	326	6	33	Cell _{15,22}	Cell _{15,33}

4 城市区域疏散模拟分析

4.1 情景与参数设置

模拟情景为发生重大灾害事故时,须迅速将校园内的人口转移疏散至安全区域,假设疏散总需求

为 8200 人且疏散需求分布于 13 个“源加载”元胞附近的教学楼、图书馆和宿舍建筑中,所有人员同时接受到疏散动员指令,并通过步行方式从“源加载”元胞进入疏散路网,模型中涉及的参数值如下表 2 所列.

根据实际调查确定各“源加载”元胞的加载人数,得出各元胞实际加载人数见表 3,并依据图 7 的疏散子网划分,得出各出口在疏散过程中的疏散总人数,见表 4,考虑到人员从楼栋疏散时的瓶颈效应,将源加载元胞的加载概率设置为梯形概率密度分布见图 8,每个“源加载”元胞在每个时间步内的加载人数为该时间步加载概率与该“源加载”元胞加载总人数之积,各“源加载”元胞从开始加载到加载结束总时间为 240 个时间步,在模拟开始后,各“源加载”元胞开始进行人员加载,并在第 240 时间步结束加载,加载后的行人会通过道路运动到“出口”元胞,离开校园,当模拟中剩余人数低于 0.5 人时,判定为所有人员均疏散出校园,疏散结束.

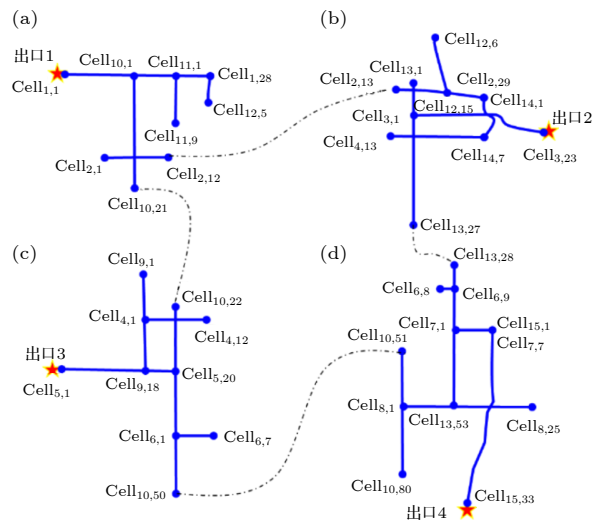


图 7 各出口覆盖疏散道路范围示意图

Fig. 7. Evacuation range of the roads covered by each exit.

表 2 模型参数

Table 2. Model parameters.

参数	含义	值
l	道路元胞长度	10 m
w	道路元胞宽度	6 m
v_f	自由疏散速度	1.5 m/s
Δt	计算时间间隔	1 s
ρ_m	拥塞临界密度	5 per/m ²

表 3 各“源加载”元胞加载人数

Table 3. The number of pedestrians loaded by each ‘source loading’ cell.

“源加载”元胞	加载总人数/人	“源加载”元胞	加载总人数/人
Cell _{1,8}	500	Cell _{2,9}	500
Cell _{2,29}	500	Cell _{4,9}	700
Cell _{4,17}	500	Cell _{5,9}	900
Cell _{9,5}	800	Cell _{9,13}	800
Cell _{10,59}	600	Cell _{10,80}	600
Cell _{11,9}	600	Cell _{13,21}	700
Cell _{15,22}	500		

表 4 各出口疏散人数

Table 4. Evacuation number at each exit.

出口	疏散总人数/人
出口1	1600
出口2	1700
出口3	3200
出口4	1700
总计	8200

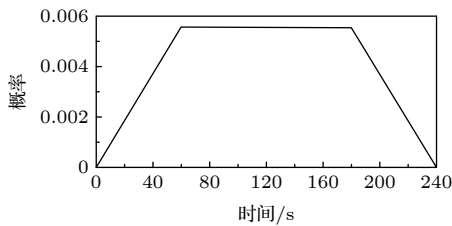


图 8 “源加载”元胞加载概率密度分布图

Fig. 8. Probability density distribution figure of ‘source loading’ cell.

4.2 结果分析与讨论

依据上文给出的元胞加载数据和状态更新规则，利用介观元胞自动机模型对该校区进行大规模疏散模拟。

根据模拟结果，绘制出各出口处疏散人数及总疏散人数随时间的变化关系情况如图 9 所示，从图 9 中可以看出，在 40 s 之后，曲线开始呈现上升的趋势，表示在疏散开始 40 s 后，开始有行人从“源加载”元胞运动到“出口”元胞撤离出校园，疏散人数峰值出现在 250 至 400 s 时间段内，观察各出口疏散人数随时间的变化关系曲线可以发现出口 3 和出口 4 的疏散人数峰值对应的时间点晚于出口 1 和出口 2 的疏散人数峰值对应的时间点，这是由于出口 3 承载着较大的疏散压力，而出口 4 与该

疏散子网内加载元胞的距离较远，总体上看，该校区的疏散人数呈现先上升，再稳定，后下降的情况。

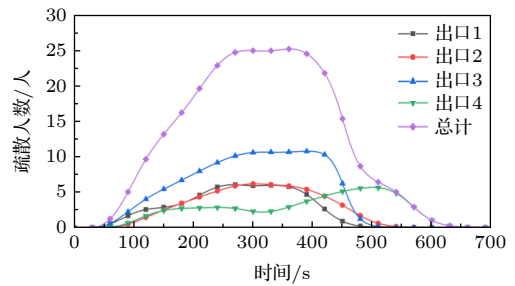


图 9 各出口及总疏散人数随时间变化关系

Fig. 9. The relationship between the exits and the total number of evacuees varies with time.

图 10 显示出了各出口及总疏散剩余人数随时间的变化关系情况，各曲线总体上在疏散前期呈现出平稳的状态，在经历过一段平稳期后曲线开始显著下降，在疏散的后期，下降趋势开始放缓，疏散剩余人数逐渐趋近于 0，在 672 s 时刻，总疏散剩余人数为 0.4925 人，表示所有人员均撤离出校园，疏散结束。

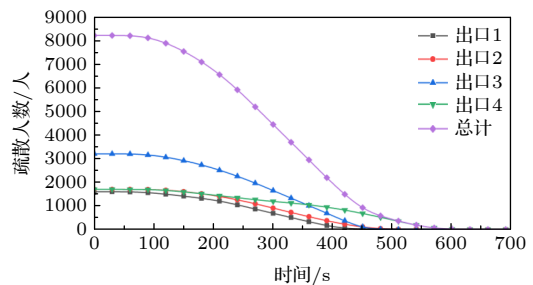


图 10 各出口及总疏散剩余人数随时间变化关系

Fig. 10. The total number of remaining evacuees at each exit varies with time.

为了进一步了解元胞状态的微观变化情况，选取 8 个“观测”元胞，观测元胞内人员数量和人员速度随时间的变化情况，各“观测”元胞的具体位置见图 11，选取的 8 个“观测”元胞分别分散在四个疏散子网中，包括 1 个“源加载”元胞，1 个出口元胞，4 个道路节点元胞和 2 个道路元胞。

图 12 和图 13 显示出了选取的 8 个元胞的元胞内人数和速度随时间的变化关系，从图中可以看出元胞 7 作为“源加载”元胞，其人数变化和元胞加载概率密度分布图类似，呈现出严格的梯形变化，而元胞 6 作为“出口”元胞，人数峰值出现在 420 s 时刻，晚于其他“观测”元胞的人数峰值时间，

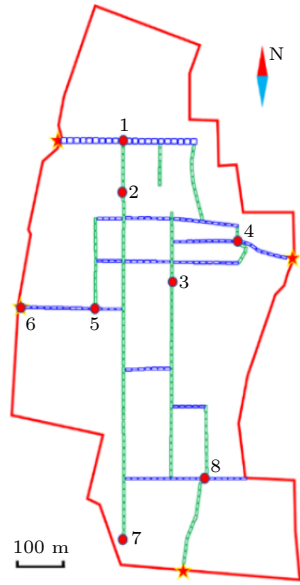


图 11 “观测”元胞的位置分布

Fig. 11. The location distribution of “observed” cellular.

元胞 5 为出口 3 前的道路节点元胞, 承载的疏散压力较大, 人数峰值也远高于其他“观测”元胞, 最高人数接近 120 人, 其对应位置处的速度也为 8 个“观测”元胞中最低, 略高于 1 m/s, 各“观测”元胞在疏散过程中速度均在 1 至 1.5 m/s 范围内波动。

图 14 为各元胞在以 100 s 为时间间隔的时间节点人员数量分布图, 可以观察出在 200 至 400 s 时间段内各道路人员数量较高, 各出口承载了较大

的疏散压力, 在 500 s 时刻, 出口 1、出口 2 和出口 3 出口元胞人数较少, 而出口 4 仍然还有一定数量行人未完成疏散, 在 600 s 时刻, 疏散场景内只剩余少量人员, 疏散接近尾声。

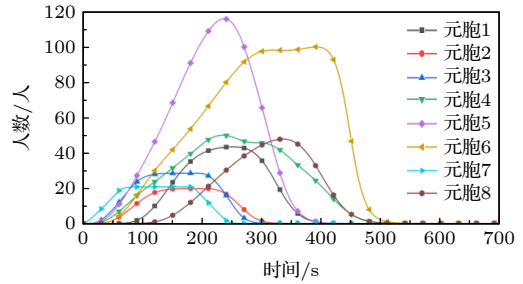


图 12 各“观测”元胞人数随时间的变化

Fig. 12. Changes in the number of “observed” cells over time.

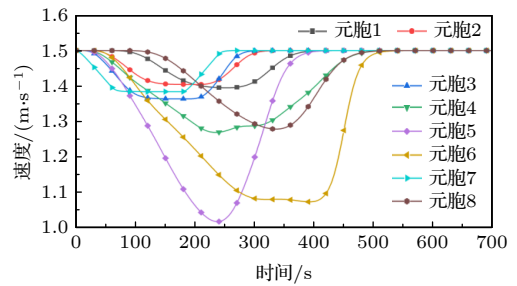


图 13 各“观测”元胞速度随时间的变化情况

Fig. 13. Variations of cell velocity with time in each observed cell.

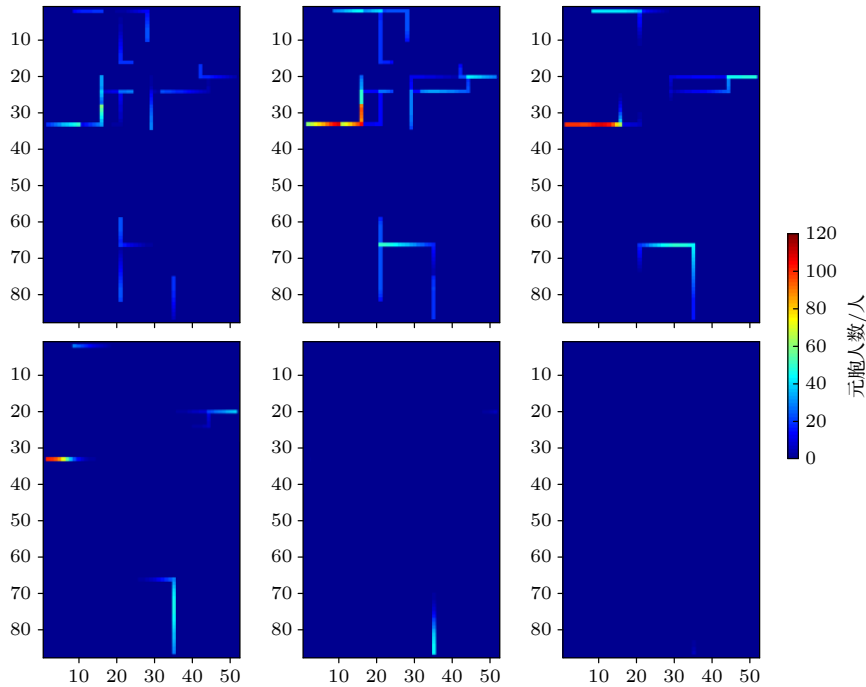


图 14 空间人员数量分布图 (a) $t = 100$ s; (b) $t = 200$ s; (c) $t = 300$ s; (d) $t = 400$ s; (e) $t = 500$ s; (f) $t = 600$ s

Fig. 14. Spatial staffing distributions: (a) $t = 100$ s; (b) $t = 200$ s; (c) $t = 300$ s; (d) $t = 400$ s; (e) $t = 500$ s; (f) $t = 600$ s.

5 结 论

1) 本文提出了一种新的人员疏散介观元胞自动机模型, 摒弃了传统元胞自动机精细化网格的元胞划分方式, 利用道路元胞建立连续模型对行人疏散进行模拟, 解决了传统微观元胞自动机模型难以对大尺度空间人员疏散状况进行模拟的问题, 并且应用该模型对高校校园进行模拟, 得出了较好的模拟结果;

2) 模拟疏散总时间为 672 s, 在 250 至 400 s 时间段内, 达到了总疏散人数的峰值, 且在该时段位于道路交叉口的“观测”元胞 5 位置处元胞峰值人数接近 120 人, 在实际疏散过程中, 要避免出现人员过于密集造成踩踏事故;

3) 通过模拟发现, 出口 3 所在疏散子网内存在较多生活场所及设施, 元胞加载人数最多, 路网承受的疏散压力最大, 因此, 在考虑实际疏散问题时, 可以对该区域内人员进行分流, 降低局部路网疏散压力;

4) 通过分析模拟结果, 可以发现出口 4 疏散人数不多, 但是在四个出口中所需疏散时间最久, 这是由于人员加载场所与出口之间距离较远导致, 因此, 在实际疏散中可以考虑在人员密集场所与校区出口之间规划出一条捷径, 以加快疏散速度, 降低疏散时间.

参考文献

- [1] Miyagawa D, Ichinose G 2020 *Physica A* **549** 124376
- [2] Ji J W, Lu L G, Jin Z H, Wei S P, Ni L 2018 *Physica A* **509** 1034
- [3] Maniccam S 2003 *Physica A* **321** 653
- [4] Leng B, Wang J Y, Zhao W Y, Xiong Z 2014 *Physica A* **402** 119
- [5] Jooyoung K, Chiwon A, Seungjae L 2018 *Physica A* **510** 507
- [6] Hanisch A, Tołujew J, Richter K 2003 *Proc. Winter Simul. Conf.* **2** 1635
- [7] Crociani L, Lämmel G, Park H J, Vizzari G 2017 *Transportation Research Board. Annual Meeting of the Transportation Research Board* Washington, D.C., USA, Jan, 2017 p1
- [8] Lämmel G, Flötteröd G 2015 *Proc. Comput. Sci* **52** 950
- [9] Kaji M, Inohara T 2017 *Physica A* **467** 85
- [10] Shi M, Lee E W M, Ma Y 2018 *Physica A* **497** 198
- [11] Hu J, You L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 080507 (in Chinese) [胡俊, 游磊 2014 物理学报 **63** 080507]
- [12] Hu J, You L, Wei J, Gu M S, Liang Y 2014 *Phys. Lett. A* **378** 1913
- [13] Zhang L, Yue H, Li M, Wang S, Mi X Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 060505 (in Chinese) [张磊, 岳昊, 李梅, 王帅, 米雪玉 2015 物理学报 **64** 060505]
- [14] Ren G, Lu L L, Wang W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 144501 (in Chinese) [任刚, 陆丽丽, 王炜 2012 物理学报 **61** 144501]
- [15] Xu X, Shi C L, Li J, Che H L 2018 *J. Saf. Sci. Technol.* **14** 20 (in Chinese) [胥旋, 史聪灵, 李建, 车洪磊 2018 中国安全生产科学技术 **14** 20]
- [16] Jin Z R, Ruan X, Li Y 2018 *J. Tongji Univ. (Nat. Sci.)* **46** 1026 (in Chinese) [金泽人, 阮欣, 李越 2018 同济大学学报(自然科学版) **46** 1026]
- [17] Lu Z M, Qin W H 2011 *J. Southeast Univ. (Nat. Sci. Ed.)* **41** 1295 (in Chinese) [陆卓谟, 秦文虎 2011 东南大学学报(自然科学版) **41** 1295]
- [18] Zhang W, Zheng X P, Cheng L S 2013 *J. Univ. Electron. Sci. Technol. Chin. (Social Sci. Ed.)* **15** 26 (in Chinese) [张维, 郑小平, 程礼盛 2013 电子科技大学学报(社科版) **15** 26]
- [19] Cao S C, Song W G, Lü W, Fang Z M 2015 *Physica A* **436** 45
- [20] Chen Y R 2012 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [陈雍容 2012 博士学位论文(武汉: 华中科技大学)]
- [21] Yang Z S, Gao X Y, Sun D 2011 *J. Traff. Transp. Eng.* **11** 114 (in Chinese) [杨兆升, 高学英, 孙迪 2011 交通运输工程学报 **11** 114]
- [22] Muramatsu M, Irie T, Nagatani T 1999 *Physica A* **267** 487
- [23] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, Zittartz J 2001 *Physica A* **295** 507
- [24] Yu Y F 2008 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [于彦飞 2008 博士学位论文(合肥: 中国科学技术大学)]
- [25] Xu X, Song W G, Zheng H Y 2008 *Physica A* **387** 5567
- [26] Ma J, Song W G, Zhang J, Lo S M, Liao G X 2010 *Physica A* **389** 2101

Simulation method of urban evacuation based on mesoscopic cellular automata*

Lü Wei¹⁾²⁾ Wang Jing-Hui¹⁾²⁾ Fang Zhi-Ming^{3)†} Mao Dun¹⁾²⁾

1) (*China Research Center for Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*)

2) (*School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*)

3) (*Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

(Received 4 January 2021; revised manuscript received 19 February 2021)

Abstract

In the traditional cellular automata evacuation model, the space is divided into fine grids at a micro level, which is mainly used in a two-dimensional plane case. The evacuation space is mostly a small-scale architectural space or local area. Therefore, it is difficult to simulate a wide range of evacuation scenario, and there are less researches of the cellular automata model for a wide range of evacuation. Therefore, this article combines the movement characteristics and status of the pedestrian flow to establish a mesoscopic cellular automata model of evacuation applied to larger evacuation scenarios. This model uses road cell division instead of planar grid cell division, which augments the area of a single cell physically, increases the number of people occupied by a single cell, and expresses the number of people in each cell in the form of state variables. By changing personnel density and personnel speed, and by introducing “source loading” cell loading to simulate the evacuation of people in the scene, the behavior of pedestrians evacuating from the building to the road in the actual evacuation process can be simulated. The state transition equation simulates the movement of people in the evacuation process. When the number of people in the cell is larger, the density of people in the cell is higher, and their walking speed also decreases, which reflects the distribution and movement characteristics of pedestrian flow. This paper uses this model to divide the evacuation area of the college campus, and divides the entire campus into four evacuation areas. The evacuees in each area are evacuated corresponding to the corresponding exit, by planning the evacuation path, pedestrians walking from the “source loading” cell to the exit for evacuation. Through simulation, it is possible to analyze the macro-evacuation situation in the scene and observe the status change of a single cell. There are observed a high density of people in local road sections during campus evacuation, and the problem about the distribution of people on campus problems such as unevenness of pedestrian distribution and long evacuation schedules in certain places. Through the simulation of this model, possible problems in the actual evacuation process are found, and the improvement guidance and opinions are presented correspondingly.

Keywords: mesoscopic cellular automata, large-scale simulation, pedestrian evacuation, partition evacuation

PACS: 07.05.Tp, 05.10.-a, 05.65.+b

DOI: [10.7498/aps.70.20210018](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210018)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52072286), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2018M632937), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant Nos. 2019IVA075, 2019III053GX).

† Corresponding author. E-mail: zhmfang2015@163.com