

文章编号: 1009-6744 (2009) 03-0140-06

## 系统工程理论与方法

# 基于元胞自动机模型的行人排队行为模拟

廖明军<sup>1,2</sup>, 孙 剑<sup>\*2</sup>, 王凯英<sup>1</sup>

(1. 北华大学 交通建筑工程学院, 吉林 132013 ; 2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 排队行为模型是常态下行人交通仿真系统模型的基础. 本文利用排队论、有限状态自动机原理以及元胞自动机模型对排队系统进行建模. 排队行为模型以邻居方向与目标方向间的修正夹角作为主要因子构造了元胞自动机模型的转移概念率函数. 利用 C# 对行人排队行为模型进行实现, 并构造了两个不同数量的售票服务台的仿真场景. 从仿真动画来看, 该模型逼真地模拟行人的排队活动; 从不同场景的队长与时间关系曲线可以看出, 增加一个售票服务台明显可以减少队列长度, 排队系统性能得到改善. 由此说明该模型具有模拟行人排队行为的能力.

**关键词:** 行人仿真; 排队行为; 元胞自动机模型; 修正夹角

**中图分类号:** U491

**文献标志码:** A

## Simulation of Queuing Behavior Based on Cellular Automata Model

LIAO Ming-jun<sup>1,2</sup>, SUN Jian<sup>2</sup>, WANG Kai-ying<sup>1</sup>

(1. Traffic and Construction Engineering College of Beihua University, Jilin 132013, China;

2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Queuing behavior model is the basis of pedestrian traffic simulation system in normal situation. The paper models queue system using queuing theory, finite state machine principle, and cellular automata model. The queuing behavior model takes modified included angle between goal direction and neighbor direction as the main factors of transition probability function. Then the queuing behavior model is implemented with object-oriented program language-C#. Two simulation scenarios are established with different amount of ticket sales window. The animation of simulation shows that the queuing model effectively simulates queue activities. From the relationship between queue length and time, it can be found that the length of queue can be decrease by adding ticket sales point, and the performance of queue system can also be improved, which demonstrates that the model can be used to simulate the pedestrian queuing behavior.

**Key words:** pedestrian simulation; queuing behavior; cellular automaton model; modified included angle

**CLC number:** U491

**Document code:** A

收稿日期: 2008-10-09 修回日期: 2009-02-11 录用日期: 2009-03-31

基金项目: 同济大学青年优秀人才培养行动计划 (2007KJ027); 上海市自然科学基金 (07ZR14120); 吉林教育厅“十一五”规划重点项目 (2007-122).

作者简介: 廖明军 (1974-), 男, 湖南邵东人, 博士生.

\* 通讯作者: sunjian@126.com

## 1 引言

随着诸如奥运会和世博会等这样的大型活动的日益增多以及人群高度集中的交通枢纽的大量兴建,行人交通的研究已经变得越来越重要.行人设施的科学规划以及人群活动的组织离不开对行人交通行为的研究.行人交通行为一般分为两种情形:常态和疏散状态.在常态下,行人交通行为中一个普遍存在的现象就是有秩序的排队.服务设施的数量,排队空间的大小是否合理等这些问题都与排队有关.面对这些问题时,通常的做法是利用排队理论的方法大约估计行人的排队参数,该方法可以在一定程度上满足要求,但不直观而且不灵活.而微观仿真已是一个被证明用作分析复杂交通系统的一个有力工具.基于此,本文从微观仿真角度利用元胞自动机(Cellular Automata,简称CA)模型模拟行人的排队行为,为常态下行人系统仿真模型开发奠定基础.

CA模型最初作为人工生命的研究工具和方法.1986年,Cremer et al<sup>[1]</sup>首次将元胞自动机(CA)理论应用到交通领域,为交通流这一复杂系统的研究开辟了新的途径.德国学者Nagel et al<sup>[2]</sup>和美国学者Biham et al<sup>[3]</sup>分别在Wolfram规则的基础上分别将CA模型应用于高速公路一维交通流和城市交通网络二维交通流.目前,借鉴机动车元胞自动机模型的一些思想,CA模型也已经应用于行人交通流的微观仿真.V. J Blue<sup>[4-7]</sup>用CA模型对单向、双向通道以及十字路口和开放空间的行人运动进行了建模,制定一系列行为规则.我国从事公共安全、消防科学、建筑设计以及交通方面的学者也对行人CA模型进行了大量研究,但他们主要利用元胞自动机模型来研究行人的疏散问题<sup>[8-11]</sup>.从以往的研究可知,目前对行人行为模型的研究主要集中在道路上的行人交通流分析和人群疏散领域方面.对于行人有秩序的行人排队活动的相关行为研究较少.特此,本文将基于CA模型,提出考虑目标方向的排队行为模型.并以售票设施为例构建排队仿真系统,分析该模型的适应性.

## 2 行人排队系统建模

### 2.1 排队系统概念

排队系统包括3个组成部分:输入过程、排队

规则和服务机构.输入过程是指顾客到达服务系统的规律.它可以用一定时间内顾客到达数或前后两个顾客相继到达的间隔时间来描述,一般分为确定型和随机型.排队规则可分为等待制、损失制和混合制.当顾客到达时,所有服务机构都被占用,则顾客排队等候,即为等待制.服务机构是指一个或多个服务台,多个服务台可以是平行排列的,也可以是串连排列的,其服务时间一般分为确定型和随机型两种.

本模型假定:排队系统的行人到达服从泊松分布;行人的排队规则为等待制,先到先服务;服务时间服从正态分布.

### 2.2 微观排队系统建模

排队系统微观建模主要分为两个方面:排队系统设施建模和行人排队行为.

微观排队系统设施主要有服务窗口、队列以及队列的形状.服务窗口一般由几个元胞单元格组成,定义中间的一个为提供服务的元胞.队列是微观排队系统的主要对象.一般的面向对象编程语言(C#)都把队列封装为最基本的数据结构.基本队列类封装有队长属性以及判断队列是否为空、入队和离队的基本方法.用户针对特定排队系统也可以在继承基类的基础上对自定义队列进行扩展.另外,队列具有一定的形状.队形一般成直线,但空间不够或者排队阻碍其他流向的行人行走时,为充分利用空间,队形变为曲线(见图1).因此,在程序中,用一个链表管理曲线的参数,以便确定队列的形状.程序中,队列的形状由用户自定义(见图2).



图1 不同环境下的不同形状的队列(上海火车站地铁)

Fig. 1 Different shapes of queue in different environment

排队行为与行人排队过程中的决策和运动行为有关.行人排队行为主要有:行人加入队列、等待服务,接受服务、离开队列以及队列中行人移动(见图3).为描述行人的排队行为,需要设置系列的状态变

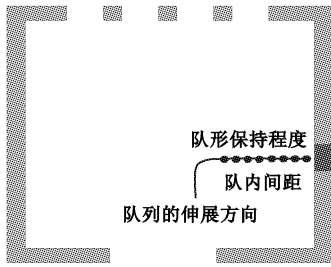


图2 队列模型示意图

Fig. 2 Queue model sketch

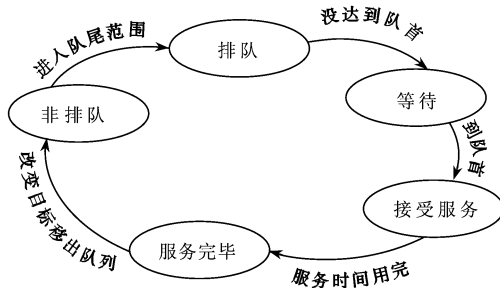


图3 行人排队行为状态转换图

Fig. 3 State transition of pedestrian queuing behavior

量和逻辑规则来反映行人行为状态的变化。

行人的排队行为状态主要有:非排队( $q_0$ )→排队( $q_1$ )→等待( $q_2$ )→接受服务( $q_3$ )→服务完毕( $q_4$ )。假定行人的初始状态为非排队,则终止状态为服务完毕。这些活动状态转移可应用确定型有限自动机模型进行描述。确定型有限自动机五元组模型表示为

$$M = (Q, T, \delta, q_0, F) \quad (1)$$

式中  $Q$  表示为有限的状态集合;  $T$  为有限的输入;  $\delta$  为转换函数;  $q_0$  为初始状态;  $F$  终止状态集。

对应排队活动,式(1)中  $Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4\}$ ;  $T$  为行人位置和时间等规则的集合,该集合的元素记为  $t_i$ ;  $\delta$  为排队状态转移函数,以确定下一个状态,如  $q_j = q_i \times t_i$ ;  $q_0$  为非排队状态;  $F$  为服务完毕状态。

### 3 基于 CA 的行人运动行为模型

#### 3.1 元胞自动机模型概念

排队行为模型中最重要的子模型为行人运动行为模型。本论文将采用元胞自动机模型来实现行人的运动行为。

元胞自动机模型是一时间和空间都离散的动力系统。散布在规则格网中的每一元胞取有限的离

散状态,遵循同样的作用规则,依据确定的局部规则进行同步更新。元胞自动机最基本组成单位包括:元胞,元胞空间,元胞的邻居,元胞间的相互作用的局部规则,以及元胞的状态<sup>[12]</sup>。

为了构造基于 CA 的行人运动行为模型,本文先对元胞自动机模型做一些假定:

① 元胞自动机中的元胞和行人的尺寸都设为  $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ ,也就是说,一个行人只能占据一个元胞;

② 行人之间的速度差异不大,行人的最大速度为 1 个单元格;

③ 模型的时间步长为 0.25 秒。

根据假定②,选择 Moore 邻居作为本元胞自动机模型的邻居。具体见图 4。

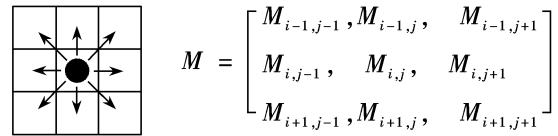


图4 Moore 邻居以及方向矩阵

Fig. 4 Moore neighbor and direction matrix

#### 3.2 转移概率函数确定

转移概率函数,也称为演化规则,是 CA 模型中的一个重要组成部分,它用于实现行人从当前单元格运动到新的单元格。由于行人所从事的是有序的排队活动,如买票。此时,行人主要目的就是以一定的速度沿着当前位置和队尾连成的直线一步一步的朝队列方向靠近,并加入到队列的队尾进行排队。在选择路径时,行人一般考虑路径最短这个因素。根据 Moore 邻居概念可知行人有 8 个运动方向,每个方向与目标方向都有一个夹角。行人倾向于选择与目标(动态队列队尾)方向夹角最小的那个方向作为运动方向。夹角越小说明偏离目标越小。因此,可用行人运动方向与目标方向之间的夹角对行人运动规则进行控制。基于此,下面将构造一个考虑该夹角的转移概率函数:

$$\begin{cases} p_{ij} = N \{ \exp(k_\theta \theta_{ij}) \} (1 - n_{ij}) \xi_{ij} \\ N = \left[ \sum_{(i,j)} \{ \exp(k_\theta \theta_{ij}) \} (1 - n_{ij}) \xi_{ij} \right]^{-1} \\ n_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{空闲} \\ 1, & \text{被行人占据} \end{cases} \\ \xi_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{有墙或其他障碍物} \\ 1, & \text{无障碍物可以利用} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $p_{ij}$  为选择单元格  $(i, j)$  的概率;  $N$  为正规化数值以保证  $\sum_{(i,j)} p_{ij} = 1$ .  $n_{ij}$  为单元格  $(i, j)$  被行人占用状态;  $\xi_{ij}$  用来判定单元格是否是障碍物;  $\theta_{ij}$  为修正夹角;  $k_\theta$  为方向敏感因子, 其值越大, 表示行人随机性越小, 到一定程度后, 该函数成为确定性演化规则.

在式(2)中, 最重要的是确定  $\theta_{ij}$ . 为计算  $\theta_{ij}$ , 先假定一个坐标系. 原点为当前行人的位置, 横轴为东西方向, 纵轴为南北方向. 东、南、西、北以及各个象限的角平分线方向代表行人邻居的方向 (见图5). 它们与目标方向的最小夹角  $\beta_{ij}$  表示该单元格方向偏离目标的程度. 在本模型中, 最小夹角  $\beta_{ij}$  最小为  $0^\circ$ , 最大为  $180^\circ$ . 为揭示  $\beta_{ij}$  越小的单元格被选中的概率越大这样一种规律, 须对  $\beta_{ij}$  进行修正, 即  $\theta_{ij} = 180^\circ - \beta_{ij}$ . 接下来, 介绍  $\beta_{ij}$  的算法.

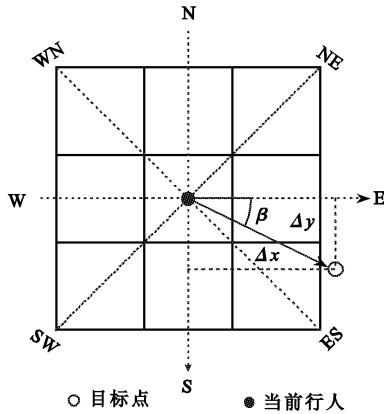


图5 夹角计算示意图

Fig. 5 Computation sketch of included angle

先用式(3)计算紧邻的邻居单元格与目标方向的最小夹角, 记为  $\beta$  ( $0 \leq \beta \leq 45^\circ$ ):

$$\beta = \arctan \left| \frac{\Delta y}{\Delta x} \right| = \arctan \left| \frac{y_{\text{goal}} - y_{\text{cur}}}{x_{\text{goal}} - x_{\text{cur}}} \right| \quad (3)$$

式中  $(x_{\text{cur}}, y_{\text{cur}})$  为当前单元格的位置;  $(x_{\text{goal}}, y_{\text{goal}})$  为目标点的位置.

最小夹角  $\beta$  得到后, 应用下面的算法计算修正夹角  $\theta_{ij}$ . 算法如下:

①扫描周围8个邻居, 得出紧邻的单元格与目标方向夹角最小的单元格的角  $\beta$ ;

②判断该单元格是在目标方向的左侧还是右侧;

③以最小夹角所在单元格为基准, 并根据②所

确定的位置, 以目标方向为轴, 分别向逆时针和顺时针方向计算出4个单元格的最小夹角  $\beta_{ij}$ ;

$$\textcircled{4} \theta_{ij} = 180^\circ - \beta_{ij}.$$

此时, 通过式(2)就可以确定当前行人移动到邻居或者保持当前位置的概率, 也就是说通过上述方法, 可以确定每一个仿真步长的行人运动方向. 另外, 除了行人到达队列的运动行为外, 还有队列内的行人运动, 即一个行人服务完毕后, 后面的行人一次往前移动一个位置, 这种运动通过队列的元素位置属性更新即可解决. 另外, 上述模型同样适合多队列和曲线队列, 只是在寻找队列时, 需要增加路径搜索算法, 可以用基于网络图的障碍物搜索方法, 这将择文介绍.

### 3.3 冲突解决方法

另外, 还需要注意行人冲突的问题. 行人在移动的过程中, 很可能存在两个不同单元格的行人在下一个步长运动到同一个空闲单元格的情况. 由于一个单元格只能在同一时刻被一个人占据, 所以需要在模型中设定一些规则来解决行人的冲突. 解决的办法有很多, 其主要的出发点是从人的属性考虑, 比如, 按照行人的体力, 行人的迫切程度, 或者干脆各50%的机会随机确定等, 本文按照已经计算出来的方向选择概率的大小来决定谁将占据该单元格 (见图6). 这其实是行人优先的反映, 从实际生活经验来看也具有一定的合理性. 因此, 可用式(4)~式(5)判断单元格的优先度:

$$p_1 = \frac{M_{1,0}^{(1)}}{M_{1,0}^{(1)} + M_{-1,1}^{(2)}} \quad (4)$$

$$p_2 = \frac{M_{-1,1}^{(2)}}{M_{1,0}^{(1)} + M_{-1,1}^{(2)}} \quad (5)$$

式(4)和式(5)中,  $M_{i,j}^{(m)}$  为位于  $(i, j)$  单元格第  $m$  个人向邻域移动的概率 (参考图4) ( $m = 1, 2$ ;  $i, j = -1, 0, 1$ ).

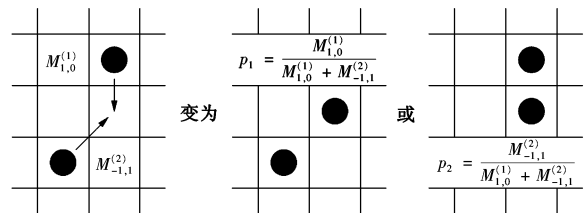


图6 冲突解决示意图<sup>[13]</sup>

Fig. 6 The method for pedestrian's conflict avoidance

比较式(4)中的  $p_1$  和式(5)中  $p_2$  的大小,谁大谁优先.此时的选择变成一个确定型的选择,省去随机选择的麻烦,本文选择此种方法解决行人冲突问题.

### 3.4 $k_\theta$ 值对转移概率的影响

夹角是转移概率函数中一个主要变量,其影响因子取不同的值,夹角的影响也是不一样的.为此,取一个单元格进行分析,假设目标方向与东边的单元格的顺时针夹角为  $30^\circ$ .此时,通过上述修正夹角的算法得到如图7所示的修正夹角矩阵.其中右下角(ES)的单元格的夹角最大.

图8(a)说明当  $k_\theta$  在0到0.1之间变化时,右下角单元格的概率值变化还比较明显.从图8(b)可以看出:当  $k_\theta$  值为0时,所有的值为11.11%,各个单元格机会均等;当  $k_\theta$  值为0.3时,右下角单元格对应的概率值达到了99%,接近于1;当  $k_\theta$  值大于0.3时,其对应的概率趋向于1,几乎不变.

15	60	105
30	0	150
75	120	165

图7 邻域的目标方向修正夹角

Fig.7 The include angle of goal direction of neighbor cell

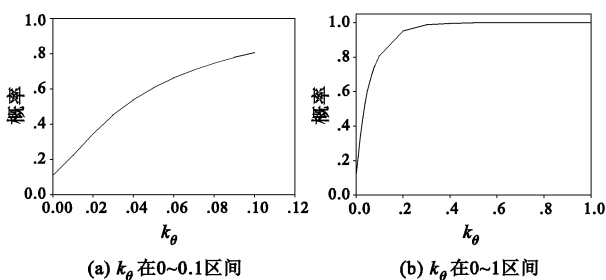


图8 不同  $k_\theta$  与最大值单元格的概率的影响关系

Fig.8 The relationship between  $k_\theta$  and the probability of cell with maximum value

## 4 实例分析

本实例构造了一个  $40 \times 50$  个单元格大小的售票大厅,并在厅里面设置了售票设施,行人从入口进入,50%的旅客排队买票.通过分析  $k_\theta$  与转移概率的关系,确定式(2)中的方向敏感因子  $k_\theta$  为

0.03.假设行人服从到达率为1800人/小时的泊松分布,行人的服务时间服从正态分布  $N(17, 4^2)$ .利用C#对上述模型进行实现,最后得到图9所示的仿真动画场景.

另外,为研究其他参数不变的情况下不同数量服务台的队长与仿真时间的关系,特别构造了一个单服务台和双服务台的场景并对它们进行仿真试验.从实验结果看(见图10和图11),由于其他条件不变,只设一个服务台的队列长度一直在增加,而设置两个服务台的队列长度却保持在稳定状态.这与现实情况吻合.

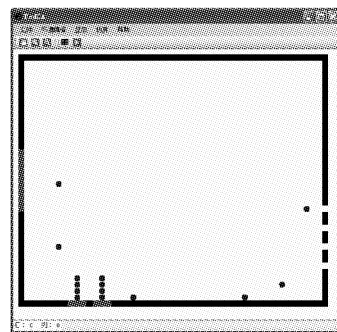


图9 排队行为仿真动画截屏

Fig.9 Snapshot of simulation animation

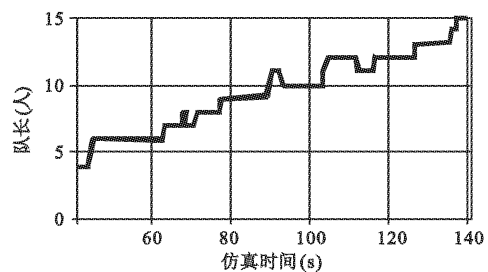


图10 单售票服务台排队仿真结果

Fig.10 Result of queue simulation with a ticket sales point

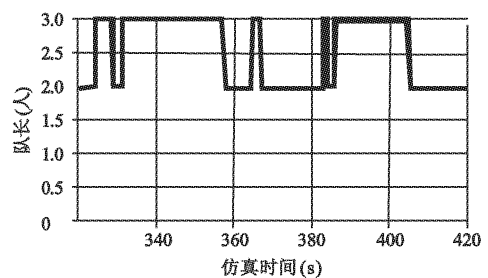


图11 两个售票服务台的仿真结果

Fig.11 Result of queue simulation with two ticket sales point

从上述仿真动画看,文中排队行为模型具有描

述现实世界排队活动的的能力. 另外, 从上述两个仿真的队长和仿真时间的关系曲线看, 该仿真模型具有评价排队系统的能力.

## 5 研究结论

本文主要研究基于 CA 模型的行人排队行为, 从理论和试验来看, 其主要结论有:

(1) 从仿真动画看, 元胞自动机模型可适用于常态下行人排队行为的模拟.

(2) 基于目标方向修正角度的状态转移函数能够反映行人选择最短路线的心理, 能较好地模拟行人的运动行为.

(3) 从不同服务台的队长与仿真时间关系曲线看, 在其他参数相同的条件下, 增加一个服务台能明显改善排队系统的服务, 这与实际情况相吻合, 也证明本文的模型的合理性和实用性.

## 参考文献:

- [ 1 ] Cremer M, Ludwig J. A fast simulation model for traffic flow on the basis of boolean operations[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1986, 28(4): 297-303.
- [ 2 ] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. J. Physique I, 1992, 2(12): 2221-2229.
- [ 3 ] Biham O, Middleton A A, Levine D. Self-organization and a dynamical transition in traffic flow models[J]. Phys. Rev. A, 1992, 46(10): 6124-6127.
- [ 4 ] Blue V J and Adler J L. Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata microsimulation[J]. Transportation Research Record, 1998, 1644: 29-36.
- [ 5 ] Blue V J and Adler J L. Cellular automata model of emergent collective bi-directional pedestrian dynamics [C]// Accepted by Artificial Life VII, The Seventh International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems, Reed College, Portland Oregon, August 2000: 1-6.
- [ 6 ] Blue V J and Adler J L. Modeling four-directional pedestrian movements[C]// the 79th Annual meeting of the Transportation Research Board, January 2000.
- [ 7 ] Blue V J and Adler J L. Using cellular automata microsimulation to model pedestrian movements [C]// Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, A. Ceder ed. Elsevier Science Ltd, July 1999.
- [ 8 ] 田娟荣, 周孝清, 李健. 地铁自动检票闸机对人员疏散的影响分析[J]. 火灾科学, 2006, 15(1): 38-43. [TIAN Juan-rong, ZHOU Xiao-qing, LI Jian. Influences of automatic fare gate in subway on pedestrian evacuation[J]. Fire Safety Science, 2006, 15(1): 38-43.]
- [ 9 ] 宋娜娜. 基于“元胞自动机”的人员疏散仿真模型初探[J]. 消防科学与技术, 2006, 25(6): 733-735. [SONG Na-na. Study on simulation models of the occupant evacuation based on cellular automata [J]. Fire Science and Technology, 2006, 25(6): 733-735.]
- [ 10 ] 李伏京, 方卫宁. 磁悬浮车辆中人员紧急疏散的仿真研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(8): 17-21. [LI Fu-jing, FANG Wei-ning. Simulation of passenger evacuation under emergency in maglev train [J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(8): 17-21.]
- [ 11 ] 吕春杉, 翁文国, 杨锐, 等. 基于运动模式和元胞自动机的火灾环境下人员疏散模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(12): 2158-2162. [LV Chun-shan, WENG Wen-guo, YANG Rui, et al. Fire evacuation model based on motor schema and cellular automaton [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(12): 2158-2162.]
- [ 12 ] 贾斌, 高自友, 李克平, 等. 基于元胞自动机的交通系统建模与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 10-11. [JIA Bin, GAO Zi-you, LI Ke-ping, et al. Models and simulations of traffic system based on the theory of cellular automaton [M]. Beijing: Science Press, 2007: 10-11.]
- [ 13 ] SCHADSCHNEIDER. A cellular automation approach to pedestrian dynamics theory[M]. Pedestrian and Evacuation Dynamics, Spring, 2001: 75-86.