

The Direct Simulations of Cellular Automata for the Real Traffic Flow

Yiqin Xie, Xiaoyang Wu*, Xing Cui, Le Hao

College of Mathematics, Jilin University, Changchun
Email: 18243189980@163.com, *wuxiaoyang1226@gmail.com

Received: May 15th, 2014; revised: Jun. 2nd, 2014; accepted: Jun. 7th, 2014

Copyright © 2014 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

Abstract

The article simulates the urban traffic flow with the application of Cellular Automata model, mainly targeting at simulations of one-dimensional lane, two-dimensional lane and square. We establish traffic rules and analyze the fluctuation of traffic flow under different initial conditions and boundary conditions. The result shows that the boundary conditions make greater difference to the traffic density than the initial conditions. The traffic density will fluctuate around the boundary when the duration is enough. In the case of the two-dimensional lane, the part of traffic density will balloon; the traffic wave will appear when the boundary condition is relatively great, and traffic jam engenders if the conditions keep accelerating. All the results accord with the reality.

Keywords

Cellular Automata Model, Traffic Flow, Numerical Simulation

真实交通流动的元胞自动机直接模拟

谢益芹, 吴晓阳*, 崔星, 郝乐

吉林大学数学学院, 长春
Email: 18243189980@163.com, *wuxiaoyang1226@gmail.com

收稿日期: 2014年5月15日; 修回日期: 2014年6月2日; 录用日期: 2014年6月7日

*通讯作者。

摘要

应用元胞自动机模型对城市道路交通流进行模拟,其中主要对一维、二维、及方形区域道路工况进行实现。制定交通规则分析不同初始条件和边界条件对所研究道路内车流的影响规律。结果表明:虽然在不同工况下,交通流的运动状态不同,但边界条件对车流密度的影响比初始条件影响大,时间越长,相差越明显,且当足够时间后,车流密度在边界条件附近波动;在同向双车道情况下,出现局部车流密度显著增大,在边界条件较大时会出现交通波现象,继续增大则出现长时间堵塞现象,得出了与实际情况相吻合的结论。

关键词

元胞自动机, 交通流, 数值模拟

1. 引言

元胞自动机(Cellular Automata, 又称细胞自动机, 点格自动机, 简称 CA)是空间、时间和状态变量完全离散的动力系统[1]。根据不同的出发点,其长期的行为可以在定性地归结为四类:均匀状态,稳定结构和周期结构,混沌状态,复杂结构[2]。它是多种学科的交叉和边缘领域,是一个重要的研究复杂系统的方法。在 Ulam 的协助下, Von Neumann[3]使用了称为元胞自动机的模型工具,这是最早的元胞自动机[4]。最基本的一维交通流 CA 模型是 Wolfram[5]提出的 184 号 CA 模型,之后 Nagel 和 Schreckenberg[6]于 1992 年提出 NS 模型,其考虑车逐步有限加速和随机慢化可能。二维交通流 CA 模型是 Biham[7]提出的 BML 模型,之后 Nagel 等进行了改进,使模型逐渐应用于城市网络交通系统。尽管如今人们在这方面有很多研究,但不能将多种工况下交通流真实的展现,与实际紧密结合。本文要解决在一二维及方形区域道路工况下的车流模拟,并在不同的初始条件和边界条件下进行比较分析,得出在这三种工况下车流密度的变化规律。

2. 一维城市道交通流的模拟仿真

在考虑一维交通流的数值模拟时,将道路离散为 1001 个格点,得到 1000 个单元,假设每辆车占用一个单元。在 t 个时间内,每增加一个时间,道路中的车辆按规则更新一次,并假设在每个时间内车辆都可能进入或离开此道路。在这个系统中,演化规则是局部的,仅与相邻单元的状态有关。用 s_i^t 表示 t 时刻第 i 个单元的状态,则一维 r 邻域的演化规则为

$$s_i^{t+1} = f(s_{i-r}^t, s_{i-r+1}^t, \dots, s_i^t, \dots, s_{i+r-1}^t, s_{i+r}^t)$$

其中, s_i^t 只有 0 和 1 两个数值,0 代表此单元无车,1 代表此单元有车。

在计算密度时,将有车单元的数量与总单元的数量的比值作为所研究道路交通流的密度。用 d^t 表示所研究道路车流密度,则 t 时刻密度为:

$$d^t = \left(\sum_{i=1}^n s_i^t \right) / n$$

其中, n 为单元数量。

首先,规定道路初始时刻有车,根据不同情况(如畅通、阻塞等)设定一定密度值,并利用随机函数对此道路的单元分布车辆,使得每个单元内是否有车的概率相等。通过改变初始状态密度值刻画道路情况。

利用随机函数对 t 时刻边界处单元状态进行设置, 通过不断改变的模拟不同情况下的交通流规律。用 d_1 表示进车的概率, d_n 表示出车的概率, 则边界处单元的状态为:

$$s_0^t = \begin{cases} 1 & rand < d_1 \\ 0 & rand > d_1 \end{cases} \quad s_n^t = \begin{cases} 1 & rand < d_n \\ 0 & rand > d_n \end{cases}$$

然后, 设定更迭规则, 本文选取一邻域作为规则演化邻域, 根据 wolfram 二进制计数原则可知共有 $2^8 = 255$ 种规则, 所用规则为 240 号规则。

一邻域规则更替包括 8 种情形(见图 1):

其中, 黑色部分代表有车, 数值为 1; 白色部分代表没车, 数值为 0。

最后, 通过观察在不同初始状态及不同边界条件下元胞系统内交通流的变化, 分析其变化原因规律。

比较图 2、图 3 可以看出:

- 1) 当车流畅通时, 交通流稳定, 车流密度在 0.3 附近震荡, 接近初始密度。
- 2) 当进车概率增大或出车概率减小时均会造成道路阻塞现象。说明所研究道路内的交通状况与该路段前后路段车流有关系, 即前后路段车流的阻塞是造成该路段车流阻塞的主要原因。

比较图 4 可以看出:

1) 在道路初始密度相差不大和出车概率为 1 时, 二者均需要 1000 个时间左右将车辆密度将至进车概率左右, 在此之后, 道路内车辆密度稳定在进车概率附近。可以看出: 当出车概率为 1 时, 道路的畅通情况仅由进车概率决定, 初始密度仅影响道路刚开始时的车流情况。

2) 在道路在阻塞时, 缓解交通阻塞所需的时间仅与出车概率的设置有关。在出车畅通时, 无论道路

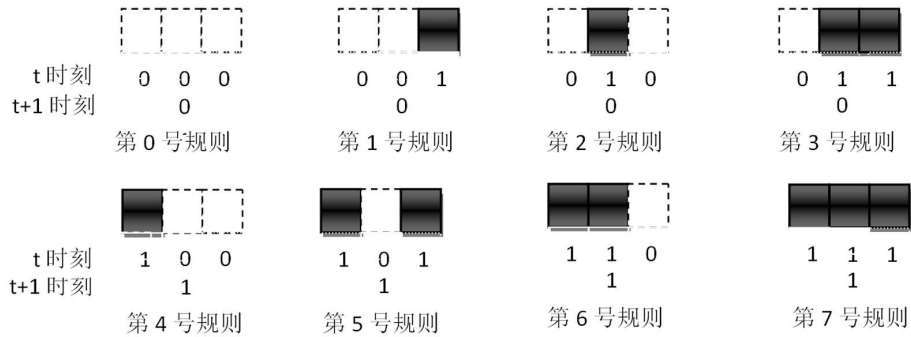


Figure 1. The diagram of the changed rules of one-dimensional traffic flow
图 1. 一维交通流更迭规则示意图

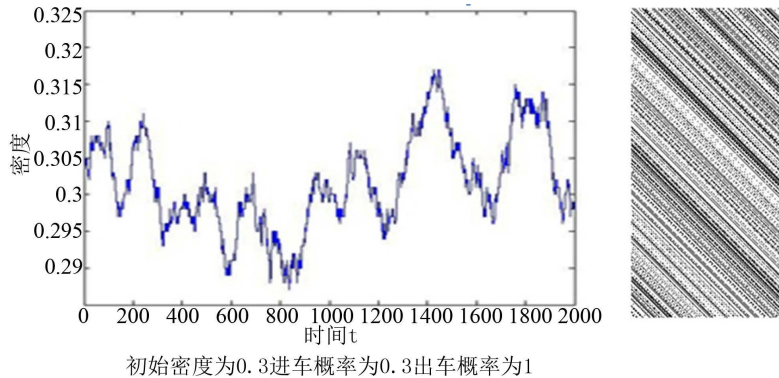


Figure 2. The density figure and space-time figure of the smooth one-dimensional traffic flow
图 2. 一维交通流畅通时密度图和时空斑图

初始情况如何，随着时间的推移道路车流密度将在进车密度附近波动。

比较图 5 可以看出：

在阻塞情况下(初始密度很大时)，若进车概率小于出车概率时，随着时间的推移道路将会畅通，密度稳定在进车概率附近，并且进车概率与出车概率相差越大，缓解阻塞所需要的时间越少。若进车概率等于出车概率时，道路阻塞处车辆将不断替，但阻塞区域及车辆密度不变。若进车概率大于出车概率时，道路阻塞情况更加严重。

3. 二维城市道路交通流的模拟仿真

二维问题时，将道路离散为 $m \times n$ 个单元(本文采用 3×1000)，即单向三车道，每辆车占用一个元胞。当时间变化一次，元胞自动机中的车按照规则更新一次，有新车辆按照给定规则进入系统。最后一个元胞的车按照一定概率输出。相应的演化规则为：

$$s_{ij}^{t+1} = f(s_{i+1j+1}^t, s_{i+1j}^t, s_{i+1j-1}^t, \dots, s_{ij+1}^t, s_{ij-1}^t)$$

当 $j-1=0$ 或 $j+1=4$ 时相应的自变量 s_{ij+1}^t 和 s_{ij-1}^t 不存在。

t 时刻相应的密度为：

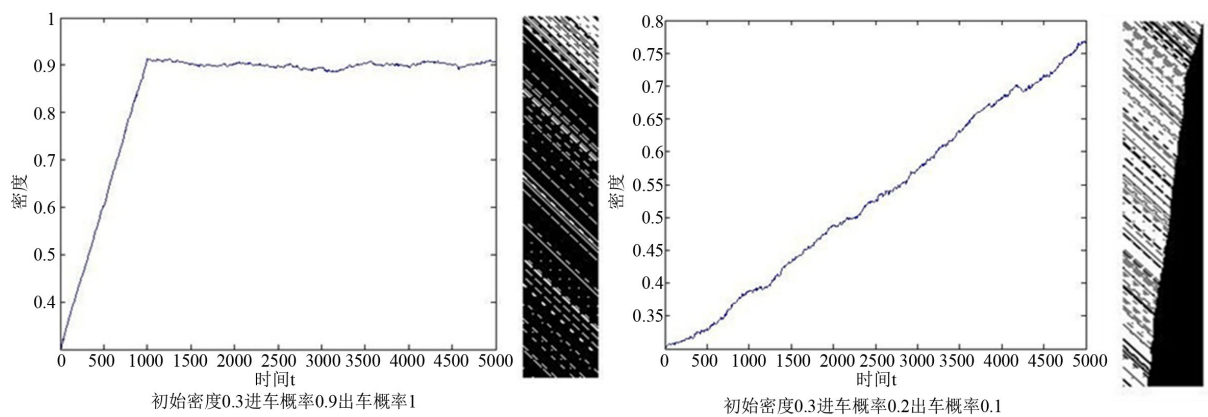


Figure 3. The density figure and space-time figure of the congested one-dimensional traffic flow

图 3. 一维交通流阻塞时密度图和时空斑图

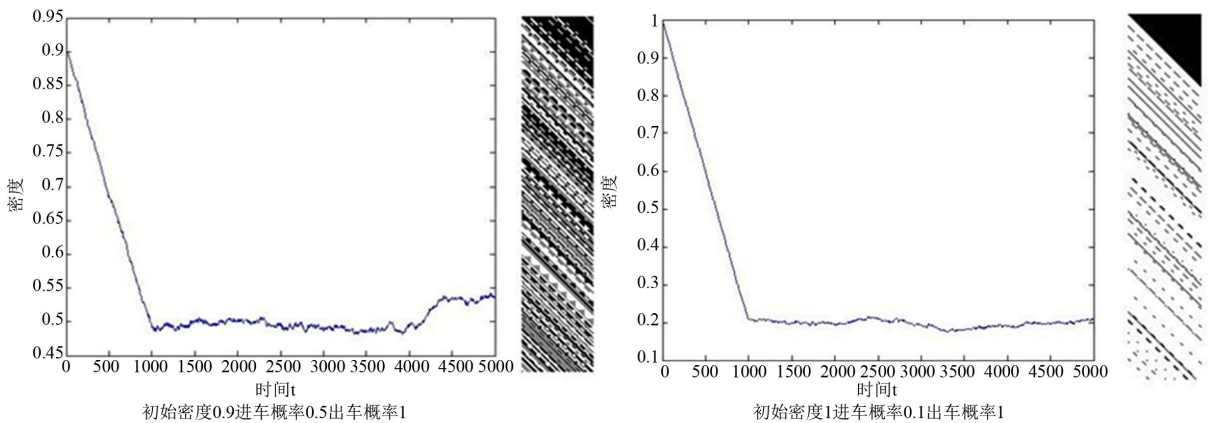


Figure 4. The density figure and space-time figure of the smooth one-dimensional traffic flow were showed, when cars draw out

图 4. 一维交通出车顺畅时密度图和时空斑图

$$d^t = \left(\sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^n s_{ij}^t \right) / 3n$$

相应的边界条件为:

$$s_{0j}^t = \begin{cases} 1 & rand < d_1 \\ 0 & rand > d_1 \end{cases} \quad s_{nj}^t = \begin{cases} 1 & rand < d_n \\ 0 & rand > d_n \end{cases}$$

在模拟的过程中首先在空间定义一个 $m \times n$ 的空元胞，每个元胞是否有车按照给定密度给出。接下来，我们规定一点状态变化仅受该时刻前点及左右点状态影响，当正前点为空时，该点状态更新到正前点，同时自身变为空，当正前点被占用时，如果左前点和左点同时为空时，该点状态更新到左前点，同时自身变为空，考虑右边情况相同。在考虑时优先考虑左边，当然在上下边界处不存在此种判断。按照上述规则更新(本实验更新 5000 步)之后计算元胞自动机密度并画图。

比较图 6 可以看出:

通过上述过程，发现道路内的车流密度与初始密度关系很小，而与边界条件关系很大，当车辆不断进入，一段时间后道路车流密度依赖边界条件波动。当道路出口状况良好时，即使进车密度大，道路也不会发生交通拥堵现象。

选取初始条件 0.4，进车边界 0.6 情况下，调整出车边界条件进行模拟(如图 7)。

比较图 7 可以看出:

当进车概率大于出车概率时，道路很快进入拥堵状态，而当进车概率小于或等于出车概率时道路车辆密度在进车密度附近波动，而不会发生拥堵。T 型道路设计时尽量避免与交通繁忙路口有交点。

考虑变换车道对于系统密度的影响，选取上述条件，分别在有换道规则条件下和无换道规则条件下模拟(如图 8)。

比较图 8 可以看出:

当进车概率大于出车概率时，道路很快进入拥堵状态，但同换车道情况相比完全堵塞时间发生稍晚，而在进车与出车概率相同的情况下随着时间的增加，斑图显示在路口会出现短时间性的堵塞，且频率较高。

考察当某条车道发生故障时，变换车道与否对系统的影响(如图 9)。

比较图 9 可以看出:

当其他条件相同时，换道规则在相同时间内可以使更多的车辆进入系统。斑图显示故障车道和邻近

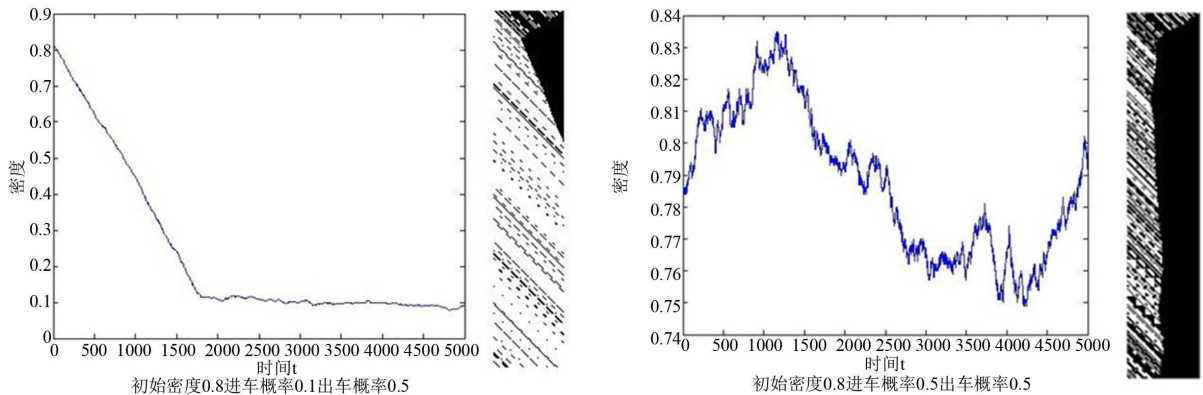


Figure 5. The density figure and space-time figure of the smooth one-dimensional traffic flow were showed, when cars that draws in reduced

图 5. 一维交通进车减少时密度图和时空斑图

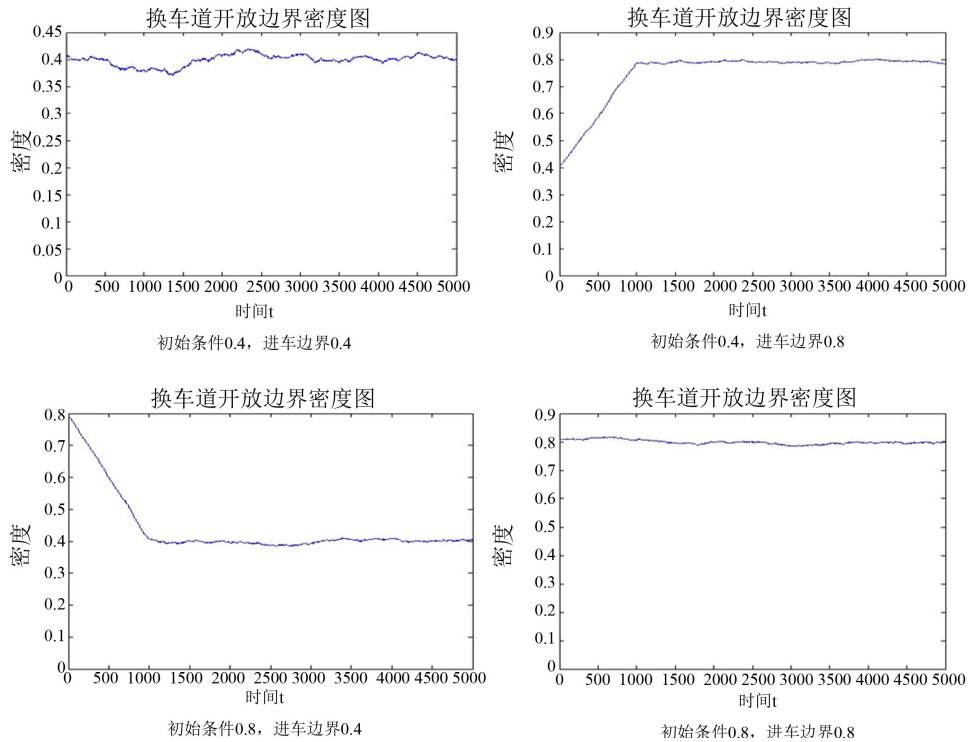


Figure 6. The density figure of changing lanes in open boundaries

图 6. 换车道开放边界密度图

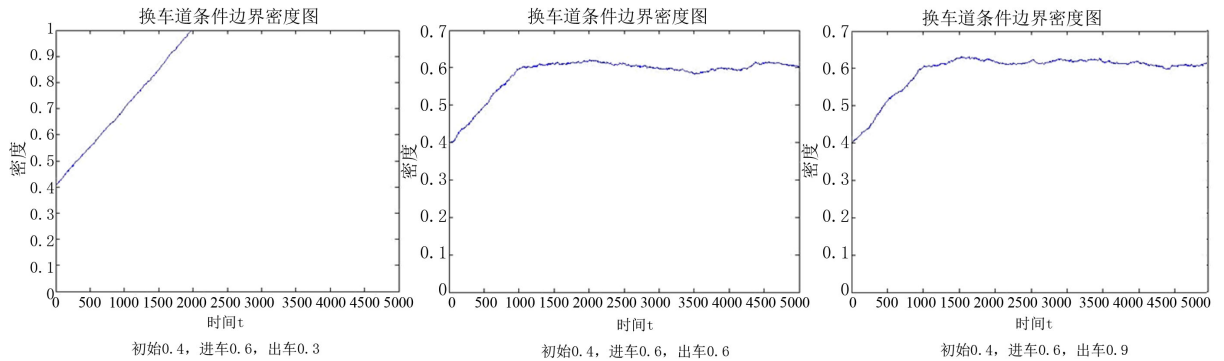


Figure 7. The density figure of changing lanes in conditional boundaries

图 7. 换车道条件边界密度图

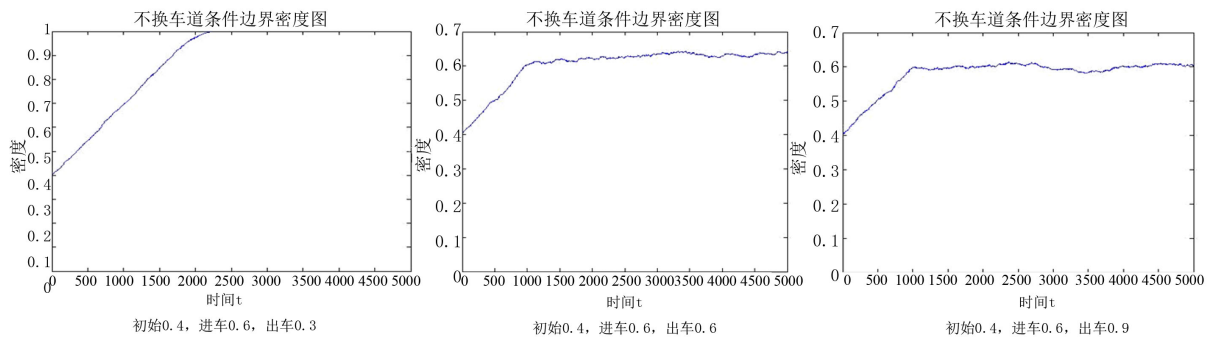


Figure 8. The density figure of fixed lanes in conditional boundaries

图 8. 不换车道条件边界密度图

车道产生阻塞现象，其他车道正常通行。

考虑上述情况下增加车道的影晌，考虑单向五车道(如图 10)。

4. 方形广场区域交通流的模拟仿真

在一个方形的广场上，四边分别可以进车和出车，我们分为两种情况设置进车和出车状态，并根据实际情况设定一定的规则模拟此广场内交通流状态变化。

4.1. 一边进车，其他三边出车

首先，设定边界处单元车辆进入的概率，利用随机函数对每时刻边界单元是否进车进行设置，并规定每一时刻末，出车边界元胞均没车即其数值为 0。

然后，根据实际情况设定一定的规则。假设当 $i > n/2$ 时，车辆均向下向前运动；当 $i < n/2$ 时，车辆均向上向前运动，则由 1 运动到研究元胞的概率为 1/3，由 2 运动到研究元胞的概率为 1/3，有 3 运动到研究元胞的概率为 5/9(如图 11)。

最后，计算所有单元内的密度并绘制密度曲线及单元动态时空斑图(如图 12)。

比较图 12 可以看出：

当只有一边进车三边出车时，无论初始密度及进车密度是多大，此元胞系统内车流密度都将趋近于 0。

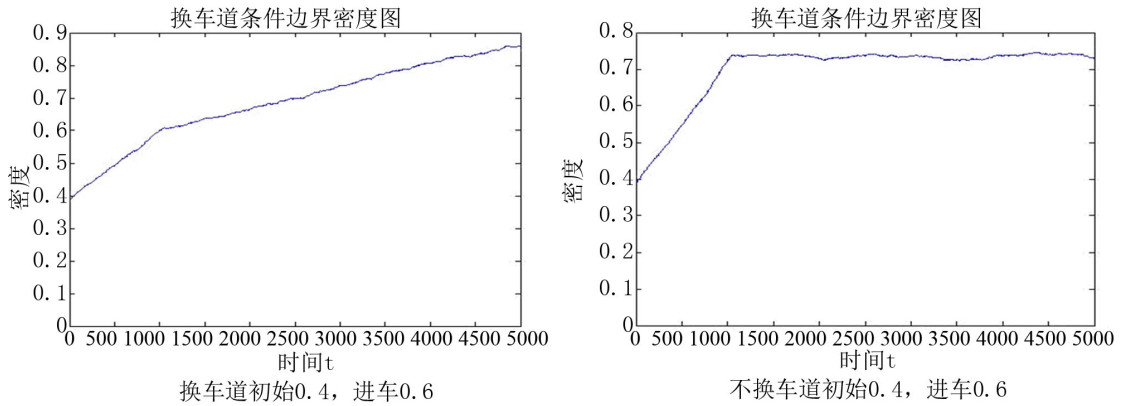


Figure 9. The changing lane's density figure was showed when one of the lanes broke down
图 9. 某条车道发生故障时变换车道影响密度图

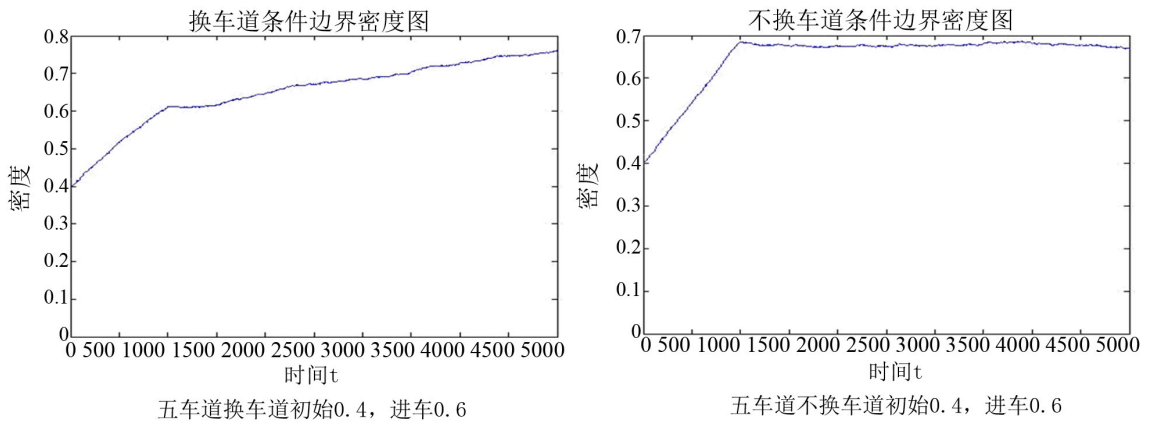


Figure 10. The changing lane's density figure was showed when one of five lanes broke down
图 10. 五车道下某条车道发生故障时变换车道影响密度图

4.2. 相邻两边进车, 另外两边出车

首先, 设定一个进车概率, 并通过随机函数对每时刻进车边界元胞是否进车进行设置, 规定在每一时刻末, 出车边界元胞均没车即其数值为 0。由于系统从相邻的两边进车(不妨假设从左上边界), 需要对两个边界进行进车设置。

然后, 根据实际情况设定一定的规则。假设当从左上边界进入系统时, 车辆均向下向前运动, 则由 1 运动到研究元胞的概率为 $1/3$, 由 2 运动到研究元胞的概率为 $1/3$, 有 3 运动到研究元胞的概率为 $5/9$ (如图 13)。

最后, 计算所有单元内的密度, 并绘制密度曲线及单元动态时空斑图, 如图 14 所示。

比较图 14 可以看出:

当只有一边进车三边出车时, 无论初始密度及进车密度是多大, 此元胞系统内车流密度都将趋近于 0。

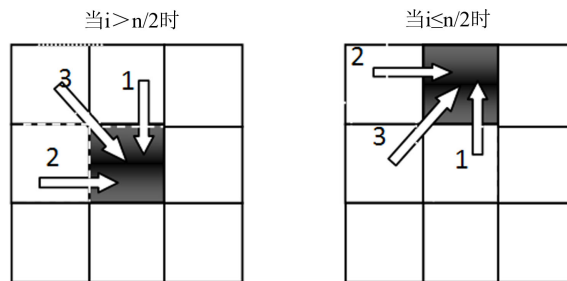


Figure 11. The traffic flow's rule diagram of the square for condition one

图 11. 情况一方形广场交通流规则示意图

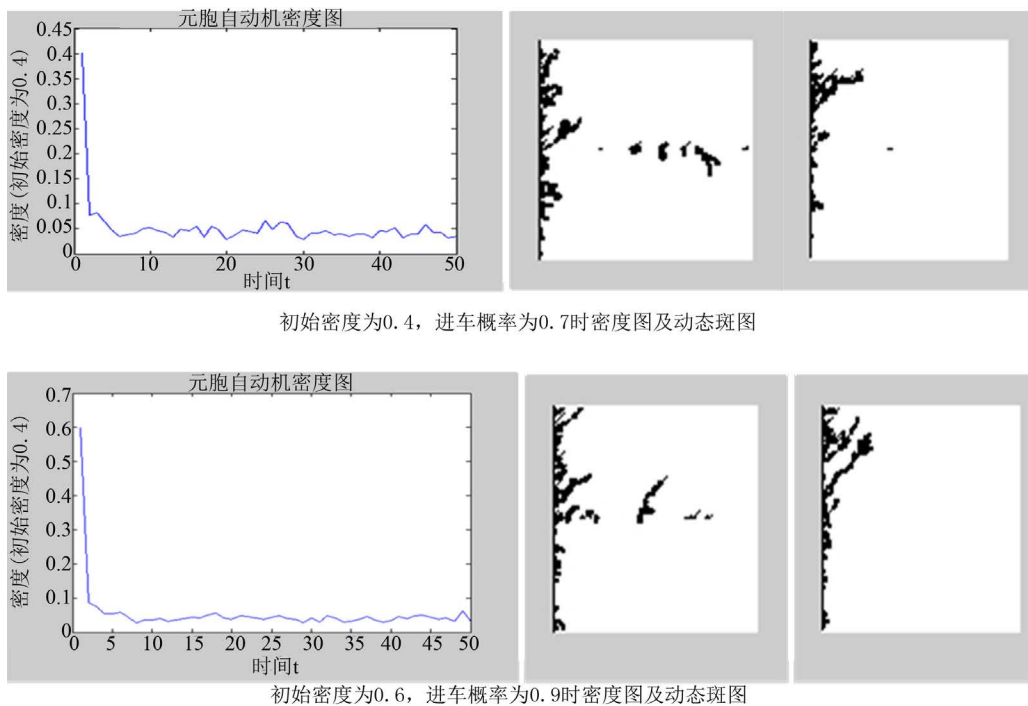


Figure 12. The space-time figure of traffic flow in the square for condition one

图 12. 情况一方形广场交通流时空斑图

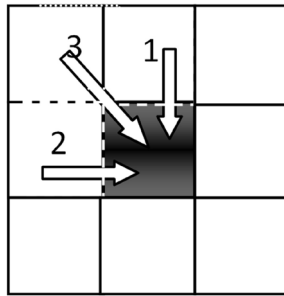


Figure 13. The traffic flow's rule diagram of the square for condition two

图 13. 情况二方形广场交通流规则示意图

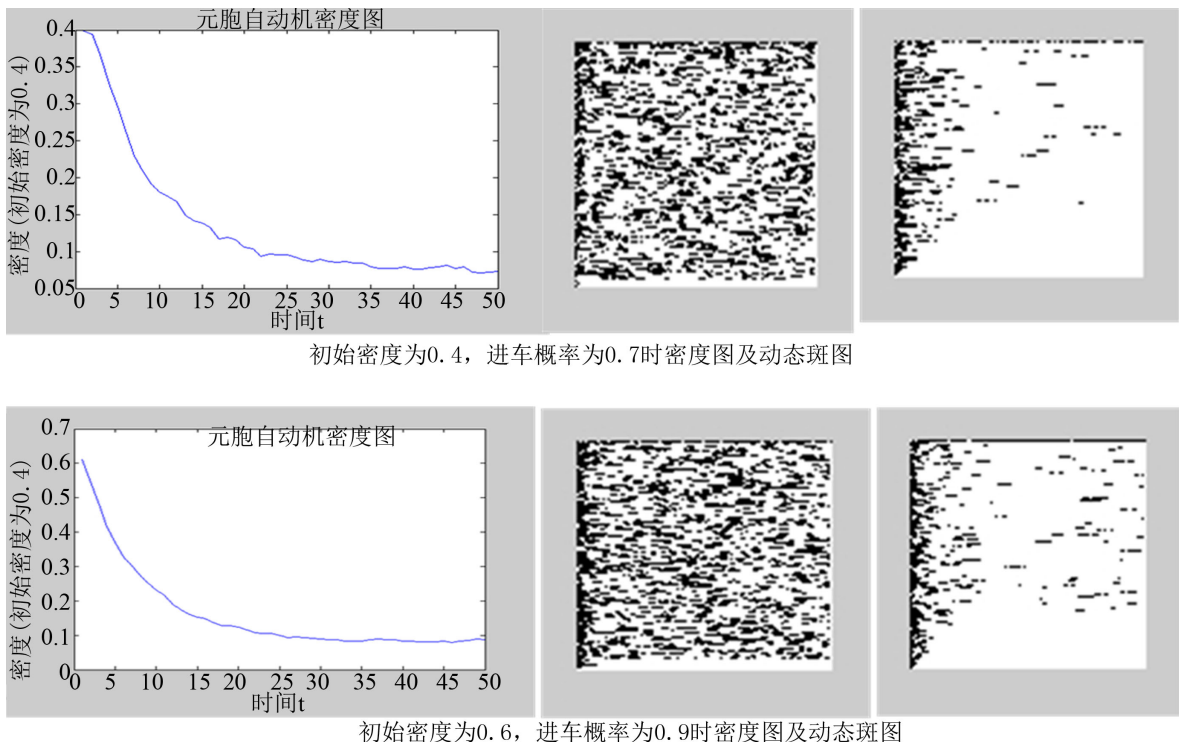


Figure 14. The space-time figure of traffic flow in the square for condition two

图 14. 情况二方形广场交通流时空斑图

比较两种情形可以看出，在第二种情形时，元胞系统内车流密度减小的慢，耗散较慢。

项目基金

本文得到吉林大学“大学生创新创业计划”创新训练项目(项目编号 2013B31073)的资助。

致谢

本文是在闫广武教授的指导完成。在研究过程中，多次得到闫广武教授有价值的意见,受益匪浅，谨此致谢。

参考文献 (References)

- [1] 金玉良, 闫广武 (2005) 三维 Fredkin 规则元胞自动机. *吉林大学学报(理学版)*, 1, 47-48.

- [2] 闫广武 (2002) 元胞自动机中的组织生长. *吉林大学学报(理学版)*, **3**, 247-249.
- [3] Von Neumann, J. (1966) Theory of self-reproducing automata. In: Burks, A., Ed., Illinois University Press, Champaign, 1-6.
- [4] 闫广武 (2003) 元胞自动机与人工生命研究进展. *吉林大学学报(理学版)*, **1**, 40-44.
- [5] Wolfram, S. (1983) Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of Modern Physics*, **55**, 601-644.
- [6] Nagel, K. and Schreckenberg, M. (1992) A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I (France)*, **2**, 2221-2229.
- [7] Biham, O., Middleton, A.A. and Levine, D. (1992) Self-organization and a dynamical transition in traffic-flow models. *Physical Review A*, **46**, R6124-R6127.