

混合非机动车流的多值元胞机模型模拟研究^{*}

李新刚^{1)†} 高自友^{1)†} 赵小梅²⁾ 贾 斌²⁾

1) 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044)

2) 北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

(2007 年 11 月 16 日收到, 2008 年 4 月 3 日收到修改稿)

采用多值元胞机模型对混合非机动车流进行了建模模拟研究. 混合非机动车流在我国城市交通中主要表现为三轮车和自行车的混合. 针对三轮车和自行车实际尺寸的差异, 设定自行车占据一个单位空间, 三轮车占据两个单位空间. 模拟结果显示, 在三轮车与慢速自行车混合的系统中, 三轮车比例和三轮车先行概率不会对系统流量造成影响, 而三轮车先行概率只会影响到车辆的平均速度. 在三轮车与快速自行车混合的系统中, 确定性条件下在自由流区域和堵塞流区域都会出现多分支现象, 快速自行车具有慢化概率时多分支现象消失.

关键词: 混合非机动车流, 元胞自动机, 多分支

PACC: 0550

1. 引 言

交通流是车辆群体在道路上行驶形成的交通状态, 具有个别行驶车辆所没有的类似流体的特性. 对交通流理论进行研究, 不仅具有重要的工程应用价值, 还能够加深人们对人类社会一类伴有复杂相互作用的多体系统远离平衡态时演化规律的认识. 近年来, 交通流理论的研究工作不仅受到了交通工程学者的重视, 而且引起了广大物理学家的兴趣^[1,2]. 20 世纪 90 年代, 交通流理论模型得到了迅猛的发展, 最具代表性的为元胞自动机 (cellular automata) 模型. 在元胞自动机交通流模型中, 采用离散的时空和状态变量, 规定车辆运动的演化规则, 通过大量的样本平均来解释交通规律. 元胞自动机模型具有计算速度快、易于计算机操作的特性, 适合大规模的交通模拟. 1992 年, Nagel 和 Schreckenberg 提出了著名的 NaSch 模型^[3]. NaSch 模型规则简单却可以模拟很多实际交通现象. 随后很多学者在该模型的基础上提出了诸多改进模型^[4-6], 并推广到对实际交通状况的模拟研究中^[7-14].

交通流理论的研究一般都集中于对机动车流特性进行建模. 然而, 在我国城市交通中, 自行车交通

是一种主要的交通方式, 对自行车交通流的研究具有非常现实的意义. 目前, 国内对自行车流的研究工作开展较少. 姜锐等^[15]指出, 鉴于自行车灵活多变、行驶速度较为缓慢的特点, 可以采用多值元胞机模型对自行车流进行建模. 将随机慢化引入到多值元胞机模型中, 可以较好地对自行车流特性进行模拟. 随后贾斌等^[16]对具有快慢车的自行车流系统进行了模拟研究.

在实际的交通情况中, 非机动车道上通常是各种非机动车混合行驶, 这些非机动车包括自行车、三轮车、畜力车等. 这些非机动车在行驶速度和车体形状上都存在着差异, 对于这种混合车流状况还缺乏有效的模型进行描述. 本文针对自行车和三轮车混合的车流提出了一种新的多值元胞机模型. 在该模型的基础上对三轮车与慢速自行车以及三轮车与快速自行车的混合系统分别进行了模拟研究. 模拟结果显示, 该模型能够描述非机动车混合车流的一些特性.

2. 模 型

Nishinari 和 Takahashi^[17]最早提出了多值元胞机模型, 并进行了大量的研究工作. 在多值元胞机模

^{*} 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2006CB705500) 国家自然科学基金 (批准号: 70501004, 70701004) 和北京交通大学优秀博士生科技创新基金 (批准号: 48025) 资助的课题.

[†] E-mail: gaoziyou@jtys.bjtu.edu.cn

型中,每个元胞最多可以容纳 M 辆车. 最原始的多值元胞机模型是通过将 Burgers 方程进行离散化得到的,因此也称为 Burgers 元胞自动机(BCA). BCA 模型的演化方程为

$$U_j(t+1) = U_j(t) + \min(U_{j-1}(t), M - U_j(t)) - \min(U_j(t), M - U_{j+1}(t)), \quad (1)$$

其中 $U_j(t)$ 表示在 t 时刻元胞 j 上的车辆数. 在 BCA 模型中车辆的最大速度为 1, 随后 Nishinari 和 Takahashi 又将 BCA 模型扩展成为最大速度为 2 的模型^[18-20], 称之为 EBCA 模型. EBCA 模型有 EBCA1 和 EBCA2 两种形式. 在 EBCA1 模型中, 速度为 1 的车辆具有优先权; 在 EBCA2 模型中, 速度为 2 的车辆具有优先权. 本文是在 EBCA1 模型的基础上进行扩展的, 因此下面提到的 EBCA 模型专指 EBCA1 模型.

EBCA 模型的演化过程可分为两步. 第一步, 如果前面紧邻的元胞上有空位, 车辆移动到下一个元胞上; 第二步, 在上一步中移动的车辆, 如果此时其前面的元胞还有空位, 继续向前移动一个元胞.

在 EBCA 模型中, 速度为 1 的车辆具有优先权. EBCA 模型的元胞状态演化方程为

$$U_j(t+1) = U_j(t) + b_{j-1}(t) - b_j(t) + c_{j-2}(t) - c_{j-1}(t), \quad (2)$$

其中

$$b_j(t) = \min(U_j(t), M - U_{j+1}(t))$$

表示 t 时刻元胞 j 上在第一步中移动的车辆数;

$$c_j(t) = \min(b_j(t), M - U_{j+2}(t) - b_{j+1}(t) + b_{j+2}(t))$$

表示 t 时刻元胞 j 上在第二步中移动的车辆数.

本文对自行车与三轮车混合的车流进行模拟研究, 自行车占据一个单位空间, 三轮车占据两个单位空间. 车流中共有下列三种类型车辆: 慢速自行车, 其最大速度为 1; 快速自行车, 其最大速度为 2; 三轮车, 其最大速度为 1. 设系统中每个元胞的容量为 M 个单位空间, 道路长度为 L 个元胞, 系统中自行车的总量为 N_1 , 其中慢速自行车数量为 N_1^s , 快速自行车数量为 N_1^f ; 三轮车数量为 N_2 , 则系统元胞空间的占有率 O 可表示为

$$O = \frac{N_1 + 2N_2}{LM}. \quad (3)$$

三轮车在总车辆数中所占的比例 r 定义为

$$r = \frac{2N_2}{2N_2 + N_1}. \quad (4)$$

将(3)(4)式联立可解得

$$N_1 = OLM(1 - r),$$

$$N_2 = OLMr/2.$$

元胞 j 产生的流量为

$$q_j = b_{j-1}(t) + c_{j-2}(t) + 2b_{j-1}(t).$$

由于三轮车占据两个单位的空间, 统计流量时以移动的元胞空间数量为单位, 因此统计三轮车流量需要乘以 2. 系统统计流量为

$$Q = \frac{1}{LM} \sum_{j=1}^L q_j. \quad (5)$$

自行车的平均速度为

$$\bar{v}_1 = \frac{\sum (b_{j,1}(t) + c_{j,1}(t))}{N_1},$$

三轮车平均速度为

$$\bar{v}_2 = \frac{\sum b_{j,2}(t)}{N_2},$$

系统的平均速度为

$$\bar{v} = \bar{v}_1 + (\bar{v}_2 - \bar{v}_1)r,$$

因而系统流量又可表示为

$$Q = \frac{1}{LM} (N_1 \bar{v}_1 + 2N_2 \bar{v}_2). \quad (6)$$

考虑如下两种不同的混合系统: 系统 1 中只有慢速自行车和三轮车, 系统 2 中只有快速自行车和三轮车. 当自行车和三轮车都要向前行驶, 而前方元胞空间有限无法同时容纳前行的自行车和三轮车时, 就需要确定哪种车辆具有优先权. 设三轮车优先行驶的概率是 p_c .

系统 1 中三轮车与自行车最大速度都为 1, 演化规则如下:

(1) 计算元胞 j 上向前移动的自行车数和三轮车数. 产生 0 到 1 之间的随机数 n_r , 如果 $n_r < p_c$, 那么三轮车先行. 这样, 先计算元胞 j 上移动一个元胞的三轮车数量 $b_{j,2}(t)$, 再计算元胞 j 上移动一个元胞的自行车数量 $b_{j,1}(t)$. 具体可表示为

$$b_{j,2}(t) = \min(U_{j,2}(t)(M - U_{j+1}(t))/2),$$

$$b_{j,1}(t) = \min(U_{j,1}(t), M - U_{j+1}(t) - 2b_{j,2}(t)).$$

如果 $n_r \geq p_c$, 那么自行车先行. 这样, 先计算元胞 j 上移动一个元胞的自行车数量 $b_{j,1}(t)$, 再计算元胞 j 上移动一个元胞的三轮车数量 $b_{j,2}(t)$. 具体可表示为

$$b_{j,1}(t) = \min(U_{j,1}(t), M - U_{j+1}(t)),$$

$$b_{j,2}(t) = \min(U_{j,2}(t)(M - U_{j+1}(t) - b_{j,1}(t))/2).$$

(2) 更新元胞 j 上自行车数量 $U_{j,1}(t+1)$ 三轮

车数量 $U_{j,2}(t)$ 以及自行车和三轮车占据单位空间的总量 $U_j(t)$, 可分别表示为

$$U_{j,1}(t+1) = U_{j,1}(t) + b_{j-1,1}(t) - b_{j,1}(t),$$

$$U_{j,2}(t+1) = U_{j,2}(t) + b_{j-1,2}(t) - b_{j,2}(t),$$

$$U_j(t+1) = U_{j,1}(t+1) + 2U_{j,2}(t+1).$$

系统 2 中自行车最大速度为 2, 三轮车最大速度为 1, 演化规则如下:

(1) 计算元胞 j 上向前移动的自行车数和三轮车数.

步骤 I 是计算向前移动 1 个元胞的自行车数和三轮车数. 产生 0 到 1 之间的随机数 n_r , 如果 $n_r < p_c$, 那么三轮车先行. 这样先计算元胞 j 上移动一个元胞的三轮车的数量 $b_{j,2}(t)$, 再计算元胞 j 上移动一个元胞的自行车的数量 $b_{j,1}(t)$. 具体表示为

$$b_{j,2}(t) = \min(U_{j,2}(t), (M - U_{j+1}(t))/2),$$

$$b_{j,1}(t) = \min(U_{j,1}(t), M - U_{j+1}(t) - 2 \times b_{j,2}(t));$$

如果 $n_r \geq p_c$, 那么自行车先行. 这样, 先计算元胞 j 上移动一个元胞的自行车数量 $b_{j,1}(t)$, 再计算元胞 j 上移动一个元胞的三轮车数量 $b_{j,2}(t)$. 具体表示为

$$b_{j,1}(t) = \min(U_{j,1}(t), M - U_{j+1}(t)),$$

$$b_{j,2}(t) = \min(U_{j,2}(t), (M - U_{j+1}(t) - b_{j,1}(t))/2).$$

步骤 II 是计算元胞 j 上向前移动 2 个元胞的自行车数量 $c_{j,1}(t)$.

$$c_{j,1}(t) = \min(b_{j,1}(t), M - U_{j+2}(t) - b_{j+1,1}(t) - 2 \times b_{j+1,2}(t) + b_{j+2,1}(t) + 2 \times b_{j+2,2}(t)).$$

(2) 更新元胞 j 上自行车数量 $U_{j,1}(t+1)$ 三轮车数量 $U_{j,2}(t+1)$ 以及自行车和三轮车占据单位空间的总量 $U_j(t+1)$, 可分别表示为

$$U_{j,1}(t+1) = U_{j,1}(t) + b_{j-1,1}(t) - b_{j,1}(t) + c_{j-2,1}(t) - c_{j-1,1}(t),$$

$$U_{j,2}(t+1) = U_{j,2}(t) + b_{j-1,2}(t) - b_{j,2}(t),$$

$$U_j(t+1) = U_{j,1}(t+1) + 2U_{j,2}(t+1).$$

在实际自行车行驶过程中, 由于骑车人体力上的消耗或其他随机因素的影响, 自行车并不能一直保持最大速度行驶, 因此快速自行车的行驶速度是存在波动的. 在这里我们假定快速自行车具有随机慢化, 随机慢化的概率为 p . 对于系统 2, 当步骤 II 中的计算完成之后, 如果 $c_{j,1}(t) > 0$, 那么 $c_{j,1}(t) = c_{j,1}(t) - 1$ 的概率为 p .

3. 模拟结果

在下面模拟中, 取系统长度 $L = 5000$, 初始的 10000 个时间步舍弃不用, 模拟结果通过 50000 个时间步的统计平均得到. 模拟时采用的是周期边界条件.

3.1. 系统 1

首先考察三轮车比例对系统的影响. 图 1 给出了三轮车比例不同时的统计流量. 从图 1 可以看出, 系统的流量不会受到三轮车比例的影响, 而且在不同比例下三轮车和自行车的平均速度是一致的(图 2). 在自由流区域, 自行车和三轮车都能够自由行驶, 平均速度 $\bar{v}_1 = \bar{v}_2 = 1$. 在堵塞流区域, 由于车辆之间的间距变小, 车辆行驶受到车头距的限制, 随着密度的增加, 自行车和三轮车的平均速度都变小.

接着考察三轮车先行概率 p_c 对系统的影响. 图 3 为三轮车先行概率 p_c 不同时的统计流量. 从图 3 可以看出, p_c 对系统的流量也不会产生影响. 但是三轮车和自行车的平均速度是存在差异的(图 4). 在自由流区域, 三轮车与自行车的平均速度 $\bar{v}_1 = \bar{v}_2 = 1$. 在堵塞流区域, 随着三轮车先行概率的增大, 自行车的平均速度减小, 而三轮车平均速度增大.

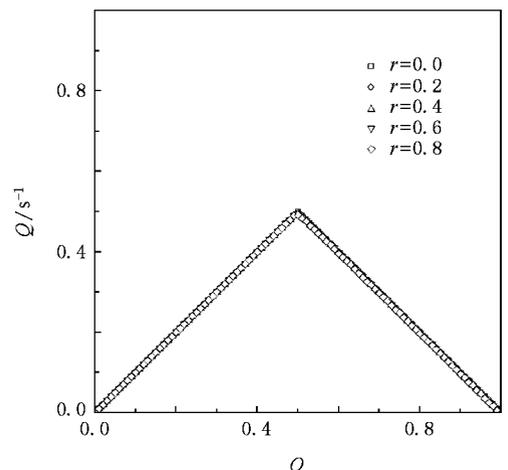


图 1 三轮车所占比例 r 不同时系统 1 的统计流量 $p_c = 0.5$, $M = 4$

下面通过自行车和三轮车的时空图分析车辆的运行状况. 图 5 为系统的时空状态演化图. 由图 5 可以看出, 虽然三轮车先行概率 p_c 不同, 但是从整

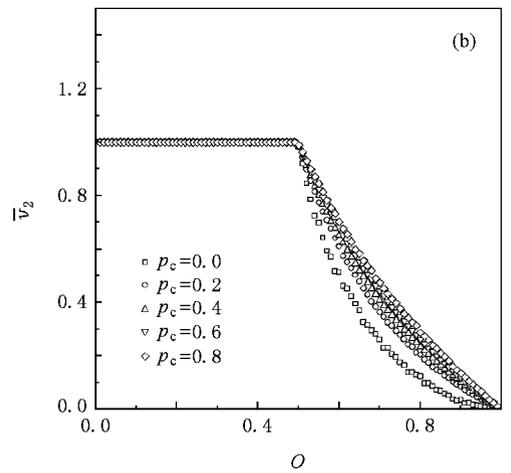
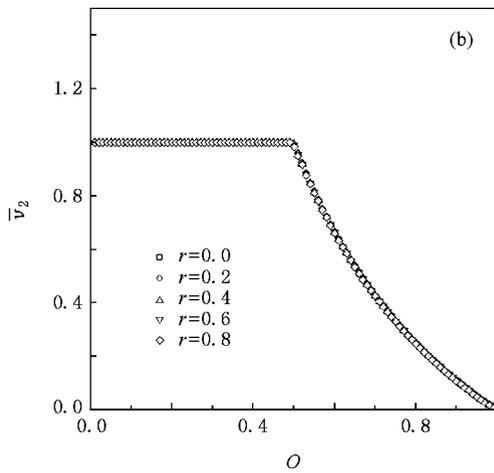
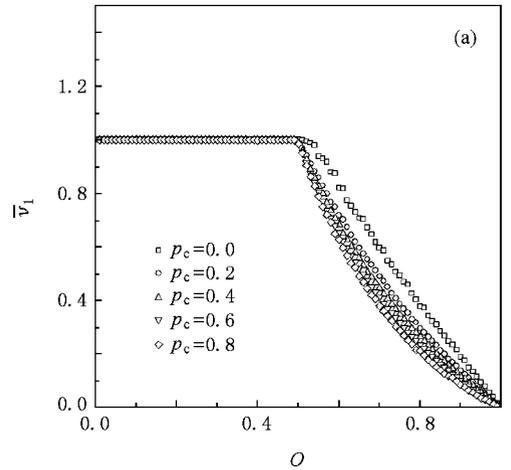
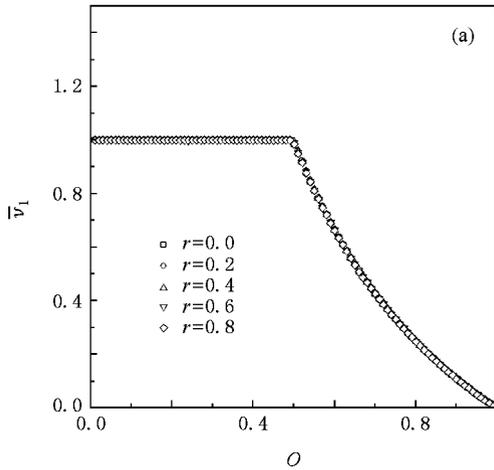


图2 三轮车所占比例 r 不同时系统 1 的车辆平均速度 $p_c = 0.5, M = 4$. (a) 自行车 (b) 三轮车

图4 三轮车先行概率 p_c 不同时系统 1 的车辆平均速度 $r = 0.5, M = 4$. (a) 自行车 (b) 三轮车

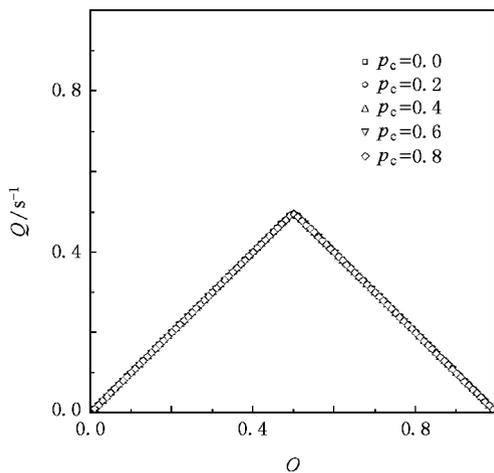


图3 三轮车先行概率 p_c 不同时系统 1 的统计流量 $r = 0.5, M = 4$

系统流量造成影响. 只是当 $p_c = 0.0$ 时, 自行车的行驶状况要比三轮车好. 三轮车在连续的几个时间步内都是静止的(图 5(e) 中竖线所在元胞), 而相应元胞上的慢速自行车向前移动. 当 $p_c = 1.0$ 时, 三轮车的行驶状况好于自行车. 慢速自行车在连续几个时间步内是静止的(图 5(d) 中竖线所在元胞), 而相应元胞上三轮车向前移动. 对于自行车, p_c 越大, 其行驶状况越差; 对于三轮车, p_c 越大, 其行驶状况越好. 原因在于 p_c 越大, 三轮车优先进行的可能性就越大. 而且在堵塞流区域, 车辆的行驶是受到前方空余元胞空间限制的. 当三轮车的先行概率较大时, 说明三轮车优先进行, 前方有限的元胞空间先被三轮车占据, 那么留给自行车的空间就更小了, 自行车向前行驶就变得困难. 因此, 三轮车先行概率越大, 其平均速度就越大, 而自行车的平均速度越小.

个元胞的演化状态看, 并没有太大区别, 因此不会对

以上结果都是取 $M = 4$ 对于 $M = 5$ 的情况也进行了模拟, 所得结果与 $M = 4$ 的结果基本一致.

3.2. 系统 2

系统 2 中只有快速自行车和三轮车, 首先考察快速自行车没有慢化概率的情况. 快速自行车的最大速度是 2, 如果条件允许其可以超越三轮车. 如果 M 是偶数, 元胞空间可以被三轮车占满. 如果 M 是奇数, 元胞空间不能够被三轮车占满, 这样就一定会留出空隙以便自行车超越. 因此 M 取值会对系统的行为造成影响, 下面分别取 $M = 4$ 和 $M = 5$ 两种情况进行详细讨论.

首先研究 $M = 4$ 时系统 2 的演化情况. $r = 0.0$ 时, 系统中不存在三轮车, 模型简化为 EBCA 模型. 由图 6 可以看出, 在堵塞流区域统计流量图中出现了多分支现象. 这一现象在文献 [17] 中已做了详尽的分析, 这里不再赘述.

当系统中存在三轮车时, 统计流量图中的自由流区域也会出现多分支现象. 这与具有快慢速自行车的系统结果类似^[16]. 下面对自由流区域的多分支现象做详细分析.

如果系统中至少有一个元胞被两个三轮车占据, 那么快速自行车不能超越这个元胞, 该元胞成为系统的一个瓶颈. 此时, 系统中三轮车和自行车的平均速度 $\bar{v}_1 = \bar{v}_2 = 1$, 则由 (6) 和 (3) 式得

$$Q = 0. \tag{7}$$

如果系统中元胞最多被一个三轮车占据, 那么快速自行车可以超越该元胞. 此时, 系统中最多允许 $(M - 2)L/2$ 辆快速自行车以速度 2 行驶. 因此, 当

$$N_1 < (M - 2)L/2 \tag{8}$$

时, 就有

$$\begin{aligned} \bar{v}_1 &= 2, \\ \bar{v}_2 &= 1. \end{aligned} \tag{9}$$

当

$$N_1 \geq (M - 2)L/2 \tag{10}$$

时, 就有

$$\begin{aligned} \bar{v}_1 &= \frac{(N_1 - (M - 2)L/2) \times 1 + (M - 2)L/2 \times 2}{N_1}, \\ \bar{v}_2 &= 1. \end{aligned} \tag{11}$$

将 $N_1 = OLM(1 - r)$, $N_2 = OLMr/2$ 分别代入 (8) 和 (10) 式, 将 (9) 和 (11) 式代入 (6) 式后可得到以下结

果. 当

$$O < \frac{M - 2}{2M(1 - r)} \tag{12}$$

时, 就有

$$Q = (2 - r)O. \tag{13}$$

当

$$O \geq \frac{M - 2}{2M(1 - r)} \tag{14}$$

时, 就有

$$Q = O + \frac{M - 2}{2M}. \tag{15}$$

图 6 中实线为理论分析值, 可以看出模拟结果与理论分析相符. (7) 式对应最下面那条线段 l_1 . (13) 式对应各条从原点出发的线段, 当 r 取 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 时, 分别与线段 l_5, l_4, l_3, l_2 相对应. (15) 式对应图 6 中与 $Q = 0$ 平行的线段 l_6 , 当 $r \geq 0.5$ 时, 线段 l_6 消失. 这说明当 r 值变大时, 系统中快速自行车数量减少, 如果系统中的元胞最多被一个三轮车占据, 那么快速自行车都能够自由行驶. 当 r 值较大时, 一个元胞被两个三轮车占据是很容易发生的. 因此 $r > 0.5$ 时, 在中间密度区域数据点基本上都落在了线段 l_1 上. 图 7 显示的是三轮车所占比例 $r = 0.2$, 取不同 p_c 值时统计流量的比较, 由此可以看出 p_c 不会对系统流量产生影响.

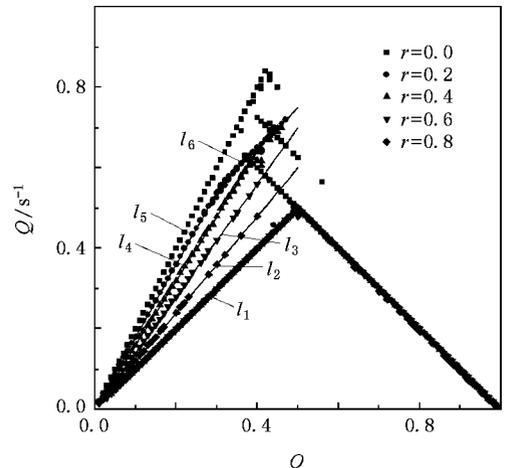


图 6 三轮车所占比例 r 不同时系统 2 的统计流量 $p_c = 0.5$, $M = 4$

接下来研究 $M = 5$ 时系统 2 的演化情况. 与 $M = 4$ 时的情况类似, 由图 8 可以看到, 在自由流区域和堵塞流区域都会出现多分支现象. 由于元胞不能够被三轮车完全占据, 快速自行车不会被三轮车完

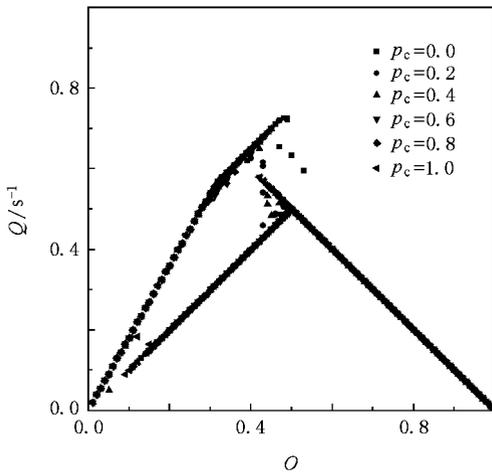


图7 三轮车先行概率 p_c 不同时系统 2 的统计流量 $r = 0.2$, $M = 4$

全阻挡,因此自由流区域的统计流量与 $M = 4$ 时的情况有一些差别,只有当 $r = 1.0$ 时,统计流量才会落在直线 $Q = O$ 上.下面同样给出自由流区域各分支的表达式.

如果系统中有一个元胞被两辆三轮车占据,那么系统中最多允许 $L/2$ 辆快速自行车自由行驶.当

$$O < \frac{M - 4}{2M(1 - r)} \quad (16)$$

时,就有

$$Q = (2 - r)O. \quad (17)$$

当

$$O \geq \frac{M - 4}{2M(1 - r)} \quad (18)$$

时,就有

$$Q = \frac{M - 4}{2M} + O. \quad (19)$$

如果系统中的元胞最多被一辆三轮车占据,那么系统中最多允许 $3L/2$ 辆快速自行车自由行驶.当

$$O < \frac{M - 2}{2M(1 - r)} \quad (20)$$

时,就有

$$Q = (2 - r)O. \quad (21)$$

当

$$O \geq \frac{M - 2}{2M(1 - r)} \quad (22)$$

时,就有

$$Q = \frac{M - 2}{2M} + O. \quad (23)$$

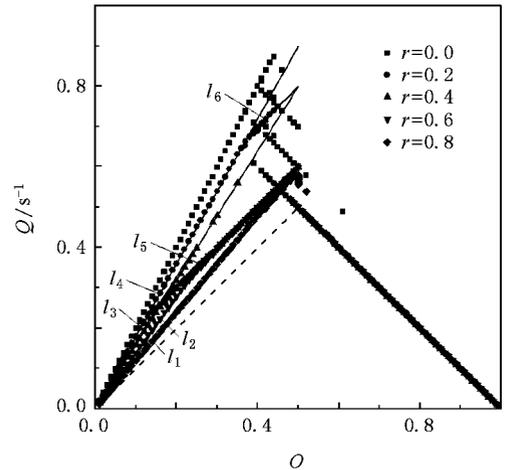


图8 三轮车所占比例 r 不同时系统 2 的统计流量 虚线表示 $Q = O, p_c = 0.5, M = 5$

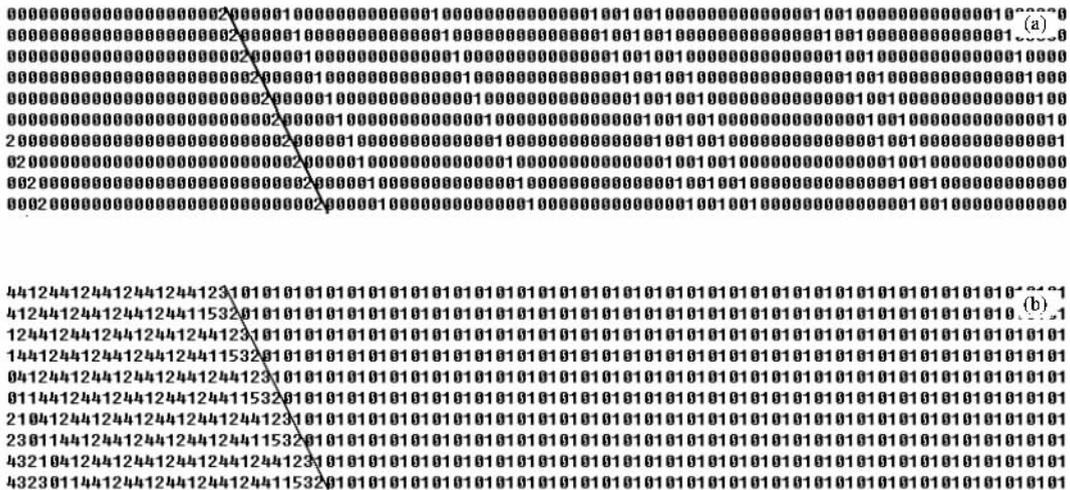


图9 系统 2 的时空演化图(车辆由左向右行驶,竖直向下为时间演化方向) $M = 5, O = 0.2, r = 0.2, p_c = 0.5$. (a) 每个元胞上三轮车数量 (b) 每个元胞上自行车数量

(17)和(21)式对应图8中各条从原点出发的线段,当 $r=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 时,分别对应图8中线段 l_4, l_3, l_2, l_1 . (19)式对应图8中与 $Q=0$ 平行的线段 l_5 ,当 $r>0.4$ 时,线段 l_5 消失. (23)式对应图8中与 $Q=0$ 平行的线段 l_6 ,当 $r>0.8$ 时,线段 l_6 消失.

图9为 $M=5, O=0.2, r=0.2$ 时系统的时空演化图. 由图9可以看出,当一个元胞被两辆三轮车占据后,该元胞就成为了移动瓶颈. 在移动瓶颈前方,快速自行车自由行驶,在移动瓶颈后面,快速自行车聚集在一起.

最后考察慢化概率对系统的影响. 引入慢化概率之后,自由流区域和堵塞流区域的多分支现象都消失了. 在一定的三轮车比例条件下,慢化概率不同的统计流量如图10所示. 从图10可以看出,在自由流区域,随着慢化概率的增加流量也会降低. 在堵塞流区域,流量不会受到慢化概率的影响,原因在于堵塞流状态下快速自行车不能够自由行驶,其速度达不到2,因此就没有慢化. 固定慢化概率,三轮车所占比例不同时统计流量如图11所示. 从图11可以看出,随着三轮车比例的增大,流量减小. $r=0.0$ 时,系统等价于EBCA模型,因此自由流到堵塞流的相变是二阶相变^[19]. 当 $r>0.0$ 时,自由流到堵塞流的相变是高阶的,曲线是平滑的.

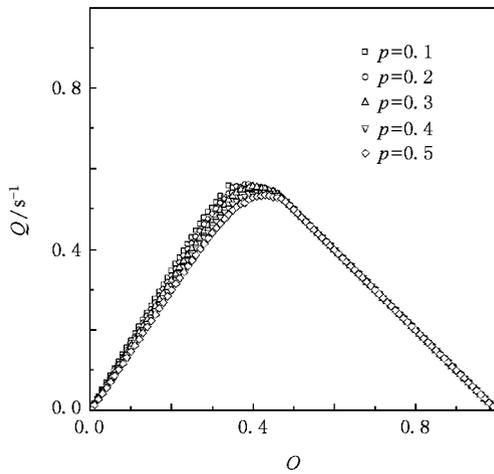


图10 慢化概率 p 不同时系统2的统计流量 $r=0.2, p_c=0.5, M=5$

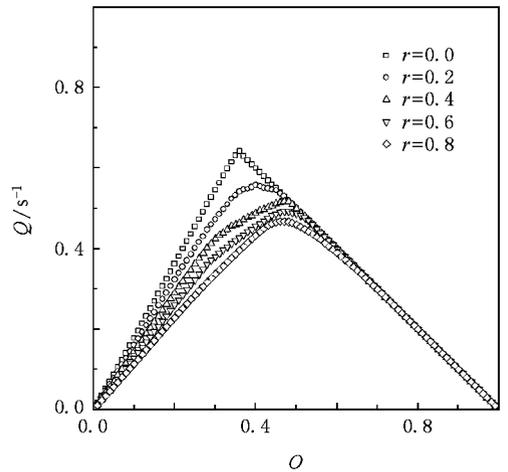


图11 自行车具有随机慢化概率,三轮车所占比例 r 不同时系统2的统计流量 $p=0.3, p_c=0.5, M=5$

4. 结 论

本文对自行车与三轮车混合系统进行了研究,应用了多值元胞机模型对混合非机动车流进行建模. 考虑到自行车与三轮车占据的空间不一样,规定自行车占据一个单位空间,而三轮车占据两个单位空间. 自行车又分为快速自行车和慢速自行车.

在慢速自行车和三轮车混合的系统中,三轮车的比例 r 以及三轮车先行概率 p_c 对系统的流量都不会产生影响. 在堵塞流区域, p_c 的值越大,三轮车的平均速度越大,慢速自行车平均速度越小.

在快速自行车和三轮车混合的系统中,在确定性条件下,在自由流区域和堵塞流区域统计流量图中都会出现多分支现象. 当 $M=4$ 时,两个三轮车并排行驶就会将快速自行车全部挡在后面,此时系统流量与全部是三轮车(即 $r=1$)时的流量一致. 当 $M=5$ 时,三轮车不能够占满整个元胞,在自由流区域快速自行车可以超越三轮车,因此系统流量大于 $r=1$ 时的流量. 如果快速自行车具有随机慢化,那么多分支现象将消失. 在自由流区域,流量会随着慢化概率 p 的增加而减小. 在堵塞流区域,流量不受 p 的影响.

- [1] Chowdhury D , Santen L , Schadschneider A 2000 *Phys. Rep.* **329** 199
- [2] Helbing D 2001 *Rev. Mod. Phys.* **73** 1067
- [3] Nagel K , Schreckenberg M 1992 *J. Phys.* I **2** 2221
- [4] Fukui M , Ishibashi Y 1996 *J. Phys. Soc. Jpn.* **65** 1868
- [5] Benjamin S C , Johnson N F , Hui P M 1996 *J. Phys. A : Math. Gen.* **29** 3119
- [6] Li X B , Wu Q S , Jiang R 2001 *Phys. Rev. E* **64** 066128
- [7] Tan H L , Huang P H , Li H B , Liu M R , Kong L J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1127 (in Chinese) [谭惠丽、黄丘花、李华兵、刘慕仁、孔令江 2003 物理学报 **52** 1127]
- [8] Kuang H , Kong L J , Liu M R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2894 (in Chinese) [邝 华、孔令江、刘慕仁 2004 物理学报 **53** 2894]
- [9] Xue Y , Dong L Y , Dai S Q 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 445 (in Chinese) [薛 郁、董力耘、戴世强 2001 物理学报 **50** 445]
- [10] Tan H L , Liu M R , Kong L J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2713 (in Chinese) [谭惠丽、刘慕仁、孔令江 2002 物理学报 **51** 2713]
- [11] Lei L , Xue Y , Dai S Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2121 (in Chinese) [雷 丽、薛 郁、戴世强 2003 物理学报 **52** 2121]
- [12] Zheng R S , Tan H L , Kong L J , Liu M R 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3516 (in Chinese) [郑容森、谭惠丽、孔令江、刘慕仁 2005 物理学报 **54** 3516]
- [13] Lei L , Dong L Y , Song T , Dai S Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1171 (in Chinese) [雷 丽、董力耘、宋 涛、戴世强 2006 物理学报 **55** 1171]
- [14] Ge H X , Zhu H B , Dai S Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4621 (in Chinese) [葛红霞、祝会兵、戴世强 2005 物理学报 **54** 4621]
- [15] Jiang R , Jia B , Wu Q S 2004 *J. Phys. A : Math. Gen.* **37** 2063
- [16] Jia B , Li X G , Jiang R , Gao Z Y 2007 *Eur. Phys. J. B* **56** 247
- [17] Nishinari K , Takahashi D 1998 *J. Phys. A : Math. Gen.* **31** 5439
- [18] Nishinari K , Takahashi D 1999 *J. Phys. A : Math. Gen.* **32** 93
- [19] Nishinari K , Takahashi D 2000 *J. Phys. A : Math. Gen.* **33** 7709
- [20] Nishinari K 2001 *J. Phys. A : Math. Gen.* **34** 10727

Multi-value cellular automata model for mixed non-motorized traffic flow^{*}

Li Xin-Gang^{1,2)†} Gao Zi-You^{1,2)†} Zhao Xiao-Mei²⁾ Jia Bin²⁾

1) *State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China*)

2) *School of Traffic and Transportation , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China*)

(Received 16 November 2007 ; revised manuscript received 3 April 2008)

Abstract

In this paper , a multi-valued cellular automata model for mixed non-motorized traffic flow is proposed and the simulation results are studied. The mixed non-motorized traffic flow is mainly composed of bicycles and tricycles in Chinese towns. According to the fact that bicycles and tricycles have different sizes , a bicycle is assumed to occupy one unit cell space and a tricycle two units of cell space. The simulation results show that : In the system with slow bicycles and tricycles , the ratio and the first moving probability of tricycles do not affect the flux , however , the first moving probability of tricycles will impact on the average velocity of bicycles and tricycles. In the system with fast bicycles and tricycles , the multiple state effect appears both in free flow and congested flow regions under the deterministic case , and it disappears when the fast bicycles has the randomization effect.

Keywords : mixed non-motorized traffic flow , cellular automata , multiple states

PACC : 0550

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2006CB705500) , the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 70501004 , 70701004) and the Innovation Foundation of Science and Technology for Excellent Doctorial Candidate of Beijing Jiaotong University , China (Grant No. 48025).

[†] E-mail : gaoziyou@jtys.bjtu.edu.cn