

多速混合车辆单车道元胞自动机交通流模型的研究*

邝 华 孔令江 刘慕仁†

(广西师范大学物理与信息工程学院, 桂林 541004)

(2003 年 7 月 3 日收到, 2003 年 11 月 4 日收到修改稿)

在交通流 NS 模型的基础上, 建立了多速混合车辆单车道元胞自动机交通流模型, 通过计算机数值模拟, 得到了混合车辆在不同参数下交通流模型的基本图, 并对混合交通的特性进行了分析和讨论.

关键词: 元胞自动机, 混合交通流模型, 计算机模拟

PACC: 0550

1. 引 言

元胞自动机 (cellular automaton, CA) 模型是一种时间、空间和变量均离散的数学模型, 由于其算法简单、灵活可调, 易于在计算机上进行模拟, 因此可以用于研究许多具体的复杂系统^[1]. 近年来, CA 模型被广泛应用于交通流的研究^[2-12], 并取得了许多成果.

由不同性能或类型的车辆构成的混合交通流是道路交通中常见的现象, 在我国尤其普遍. 目前, 在交通流元胞自动机模型的研究中, 大多数是研究由相同性能或类型的车辆构成的交通流问题. 例如 Nagel 和 Schreckenberg^[2]提出的考虑车速分布的随机加速、减速的 CA 模型 (简称 NS 模型); Fukui 和 Ishibashi^[3]提出的含高速车并可随机减速的 CA 模型 (简称 FI 模型) 等. 但实际交通中, 车道上一般都是由不同性能或类型的车辆混合行驶, 因此研究混合车辆的交通流问题更能反映真实交通的特性.

在本文的研究中, 道路上不同性能或不同类型的车辆混合, 主要是通过不同类型的车辆具有不同的最大行驶速度来表现. 首先考虑一种简单情况, 认为道路上只有两种类型的车辆, 一种类型的车辆具有的最大速度为 $V_{\max} = 5$, 其速度变化区间为 $V \in [0, 5]$, 这类车称为快车; 另一种类型的车辆具有的最大速度为 $V_{\max} = 3$, 其速度变化区间为 $V \in [0, 3]$,

称这类车为慢车, 这两类车辆混合在一条单车道上行驶. 然后将其推广到具有三种最大车速的车辆混合的交通情况. 通过计算机模拟, 得到了混合车辆的流量、速度与密度关系的交通流基本图, 结果表明, 在单车道上混合车辆行驶的交通流量与速度完全由慢车的流量与速度决定. 并对混合交通的特性进行了分析和讨论, 为实际的混合交通流研究奠定了一定的基础.

2. 模 型

将道路视为长度为 L 的一维离散格点链, 每一个格点在每一时刻或为空或被一辆车占据. 两种最大速度不同 (一种为 $V_{\max} = 5$, 另一种 $V_{\max} = 3$) 的车辆混合分布在道路上, 每一种类型的车辆状态由其本身的速度 V 所表示, $V \in [0, V_{\max}]$. 用 $x_i(t)$ 表示第 i 辆车 t 时刻的位置, 则 $\text{gap}_i(t) = x_{i+1}(t) - x_i(t) - 1$ 表示第 i 辆车 t 时刻与前方紧邻车辆之间的间距. 在每一演化时步 $t \rightarrow t+1$ 中, 格点上的每一辆车, 其状态都按照 NS 模型的演化规则进行速度和位置的并行更新. NS 模型车辆状态演化的更新规则为

(1) 加速过程:

$$V_i(t+1) \rightarrow \min(V_i(t) + 1, V_{\max});$$

(2) 确定性减速过程:

$$V_i(t+1) \rightarrow \min(V_i(t), \text{gap}_i(t));$$

* 国家自然科学基金 (批准号: 10062001, 70371067), 广西自然科学基金 (批准号: 0007017), 教育部科学技术重点研究项目 (批准号: 教技司 [2002] 397 号), 广西“新世纪百千万人才工程”专项基金 (批准号: 桂人函 [2002] 1629 号) 资助的课题.

† E-mail: jmlmr@mailbox.gxnu.edu.cn, 电话: 0773-5829863.

(3)以概率 p 随机减速过程 :

$$V_i(t+1) \rightarrow \max(V_i(t) - 1, 0);$$

(4)位置更新 :

$$x_i(t+1) \rightarrow x_i(t) + V_i(t+1).$$

3. 数值模拟结果和讨论

在模拟中 ,车道的长度为 L ,如果车道上车辆总

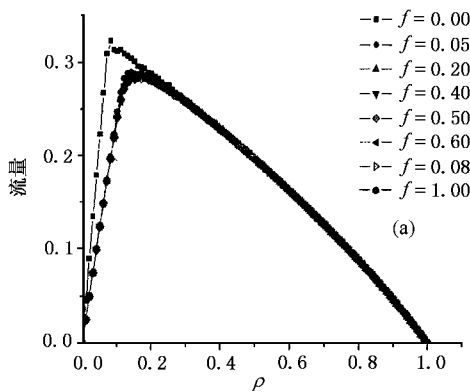
数为 N ,则总密度为 $\rho = \frac{N}{L}$;如快车数为 N_1 ,则其密

度为 $\rho_1 = \frac{N_1}{L}$;如慢车数为 N_2 ,则其密度为 $\rho_2 = \frac{N_2}{L}$;

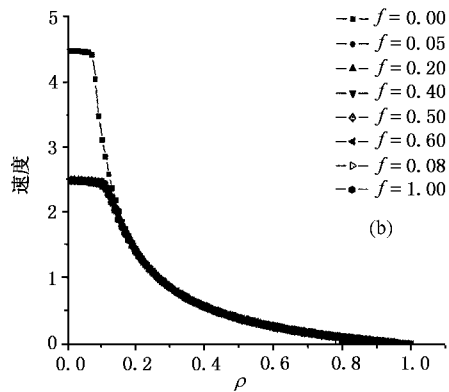
t 时刻的平均速度定义为 $\bar{V}_t = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^2 \sum_{i=1}^N V_{i,r}(t)$;平均

车流量为 $J = \bar{V}_t \rho$.为了考虑车辆的混合程度 ,引入混合比例系数 f ,令 f 满足 $\rho_1 = \alpha(1-f)$, $\rho_2 = \rho f$, $0 \leq$

$f \leq 1$.当 $f < 0.5$ 时 ,表示快车数多于慢车数 ;当 $f > 0.5$ 时 ,表示慢车数多于快车数 ;当 $f = 0.5$ 时 ,表示快车数与慢车数相等 .本文模拟时取单车道由 1000 个格点组成 ,对应的实际道路长度约为 7.5 km .快车最大速度 $V_{\max} = 5 \text{ cell/s}$,则对应的实际车速约为 135km/h ,慢车的最大速度 $V_{\max} = 3 \text{ cell/s}$,则对应的实际车速约为 80km/h .采用周期性边界条件 ,初始时刻 ,两种车辆按一定的混合比例系数 f 随机混合分布在车道上 ,且其初速度都为 0 .模型每一次运行演化的时步为 10^4 步 ,记录后面运行 10^3 步中每一时步内的速度 V_i ,然后将得到的 10^3 个速度值再作时间平均 ,得到一次运行的平均速度 $\bar{V} = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{t_0+T-1} V(t)$,为了消除初始位形的随机性对结果的影响 ,再对 20 个样本取平均 .数值模拟的结果如图 1—3 所示 .



(a) f 不同 , $p = 0.5$ 时 ,流量随密度的变化



(b) f 不同 , $p = 0.5$ 时 ,速度随密度的变化

图 1 混合车辆随参数 f 变化的基本图

图 1(a)(b) 分别给出了随机减速概率 $p = 0.5$,混合比例系数 $f = 0.0, 0.05, \dots, 1.0$ 时的流量-密度图与速度-密度图 .当 $f = 0.0$ 时 ,车道上只有快车 ,此时该模型变为最大速度为 5 的 NS 模型 ,具有最大车辆流量约为 0.32 ,最大速度约为 4.5 ,临界密度约为 0.08 ;当 $f = 1.0$ 时 ,车道上只有慢车 ,对应最大速度为 3 的 NS 模型 ,此时最大车辆流量约为 0.285 ,最大速度约为 2.5 ,临界密度约为 0.16 .当 $0 < f < 1$ 时 ,为两类车辆混合行驶的情况 .从图 1 发现 ,此时混合车辆的流量-密度图、速度-密度图都与 $f = 1.0$ 时 ,即只有慢车的 NS 模型的流量-密度图、速度-密度图完全重合 .这说明混合车辆在单车道行驶过程中 ,车辆间的相互影响很大 ,整个车道的流量与速度完全由慢车的流量与速度决定 .这是因为在单车道上 ,若一辆快车前面紧邻的车辆是慢车 ,由于快车的速

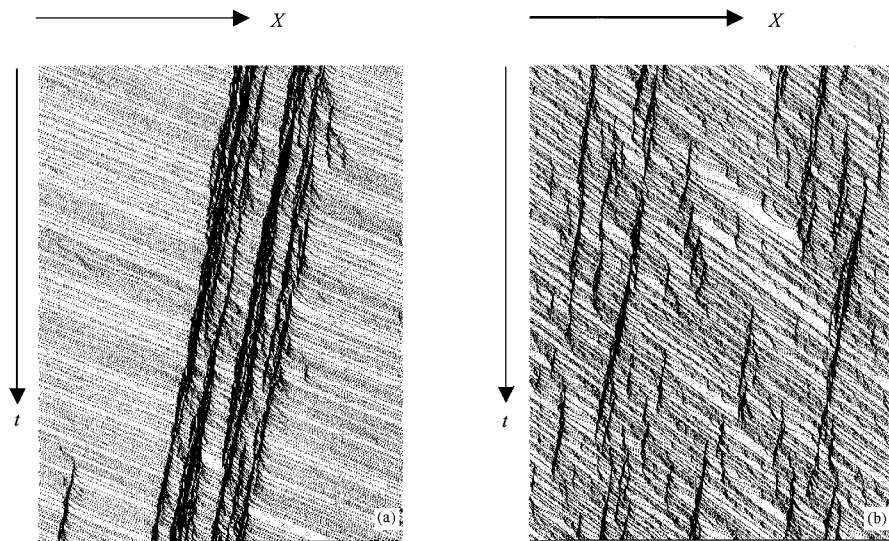
度大 ,很快便会赶上慢车 ,由于不能超越慢车 ,于是为了避免与慢车发生碰撞 ,不得不减速行驶 ,此后快车的速度也就不能超过慢车的最大速度 ,因此快车相当于变成了慢车 .若慢车前面紧邻的车辆是快车 ,则慢车不能保持紧随快车 ,因此两车间的间距将拉大 ,形成了道路间隙 ,这种大的间隙不能由慢车后的快车进行超车来填补 ,这就产生了道路空位和道路使用效率的降低 ,其后果是使相同道路和交通条件下的通行能力降低 ,速度减小 .因此 ,混合车辆在单车道上行驶 ,及容易出现更多的局部拥挤现象与时停时走现象 .具体的情况可以由其时空演化斑图看出 .图 2(a)(b) 分别是 $p = 0.5$, $\rho_0 = 0.16$, $f = 0.0$ NS 模型与 $p = 0.5$, $\rho_0 = 0.16$, $f = 0.5$ 混合车辆模型的时空演化斑图 ,图中给出的是 1000 个格点从 9520

到10000时步的演化过程.横轴表示车辆位置,车辆从左至右运动,纵轴表示时间,以黑点表示车辆的位置,白点表示空格点.图2中明显的黑色线条表示车辆阻塞区,即为局部阻塞现象,灰色区域表示车辆畅通,即自由运动.由图2(a)(b)对比可看出,NS模型与混合车辆模型都出现了局部阻塞,且向后传播,但是(b)的阻塞区域明显多于(a),也就是说在混合车辆模型中车辆时停时走现象会经常发生.因此混合车辆模型的流量与速度均小于单一快车的NS模型的流量与速度,且它的流量与速度完全由单一慢速

车辆的流量与速度决定.

在图3(a)(b)中,分别给出了 $f=0.5, f=1.0$,随机减速概率 $p=0.0, 0.2, \dots, 0.8$ 时的流量-密度图与速度-密度图.从图3可看出随着 p 的增加,流量最大值、速度最大值、临界密度都逐渐减小,并且它们的变化行为与最大速度为3的NS模型的变化行为一样.从而可以得知,随机减速概率 p 越大,则流量与速度会越小,因此随机减速概率 p 也是影响混合交通流运动状态的重要参数.

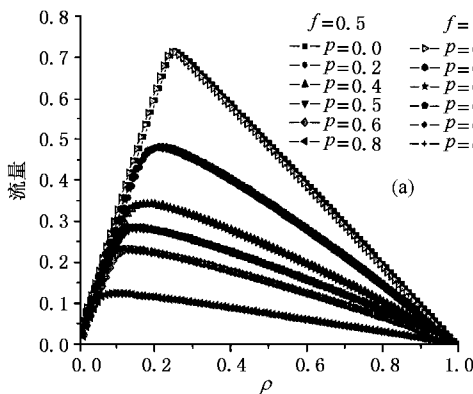
为了观察上面结果的普适性,现在考虑具有三



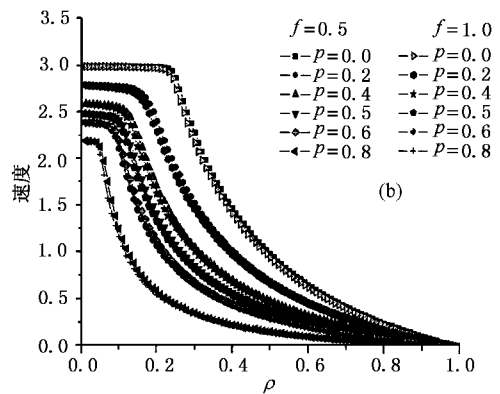
(a) $p=0.5, \rho_0=0.16, f=0.0$ NS 模型

(b) $p=0.5, \rho_0=0.16, f=0.5$ 混合车辆模型

图2 时空演化斑图



(a) p 不同 $f=0.5, 1.0$ 时, 流量随密度的变化



(b) p 不同 $f=0.5, 1.0$ 时, 速度随密度的变化

图3 混合车辆随参数 p 变化的基本图

种不同最大速度 ($V_{max} = 5$ 的快车、 $V_{max} = 3$ 的中速车和 $V_{max} = 2$ 的慢车) 的车辆在单车道上混合行驶

的交通情况.仍然假设道路的长度为 L , 如果车辆总数为 N , 则总密度 $\rho = \frac{N}{L}$; 如快车数为 N_1 , 则其密度

$\rho_1 = \frac{N_1}{L}$ 如中速车数为 N_2 ,则其密度 $\rho_2 = \frac{N_2}{L}$;如慢

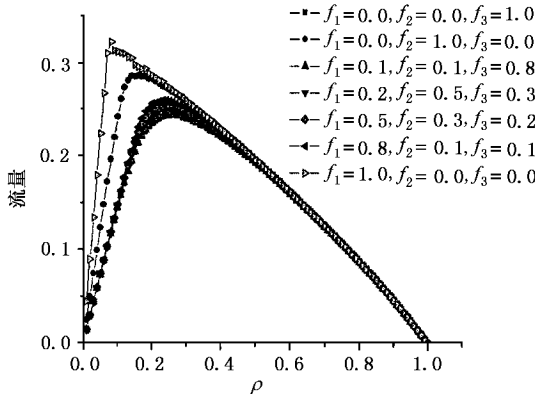
车数为 N_3 ,则其密度 $\rho_3 = \frac{N_3}{L}$. t 时刻的平均速度为

$\bar{V}_t = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^3 \sum_{r=1}^{N_r} V_{i,r}(t)$;平均车流量 $J = \bar{V}_t \rho$. 为了考虑

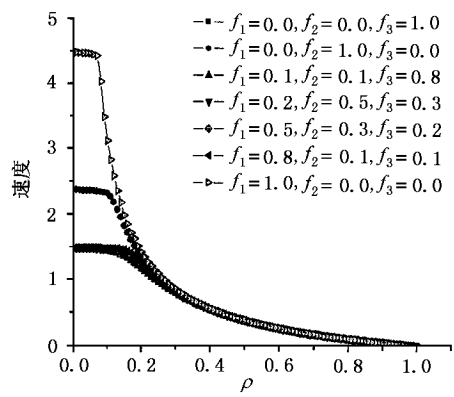
车辆的混合程度 ,引入混合比例系数 f_1, f_2 和 f_3 ,其中 f_1, f_2 和 f_3 分别满足 $\rho_1 = \rho f_1, \rho_2 = \rho f_2, \rho_3 = \rho f_3, 0 \leq f_1, f_2, f_3 \leq 1$ 且 $f_1 + f_2 + f_3 = 1$. 每种车辆的运动仍然采取 NS 模型的演化规则 ,边界条件和初始条件与前面的情况一样 ,模型的数值模拟结果及有关数据见图 4 .

当 $f_1 = 1.0, f_2 = 0.0, f_3 = 0.0$ 时 ,车道上只有快

车 ;当 $f_1 = 0.0, f_2 = 1.0, f_3 = 0.0$ 时 ,车道上只有中速车 ;当 $f_1 = 0.0, f_2 = 0.0, f_3 = 1.0$ 时 ,车道上只有慢车 ,此时该模型都是标准的 NS 模型 . 图 4 给出的显著结论是 :只要当 $f_3 > 0$ 时(即只要车道上有慢车存在) ,不管 f_1, f_2 和 f_3 怎样取值(即不管各种类型的车辆按多大的比例混合行驶) ,此时混合车流的流量-密度图、速度-密度图都与 $f_1 = 0.0, f_2 = 0.0, f_3 = 1.0$ 时 ,即只与慢速车的流量-密度图、速度-密度图完全重合 ,也就是车辆混合行驶的流量与速度完全由慢速车的流量与速度决定 . 通过上面分别模拟两种与三种最大速度不同的车辆混合行驶的基本图 ,可以推想 ,在单车道上混合车辆行驶的流量与速度



(a) f_1, f_2 和 f_3 不同 , $\rho = 0.5$ 时流量随密度的变化



(b) f_1, f_2 和 f_3 不同 , $\rho = 0.5$ 时速度随密度的变化

图 4 混合车辆随参数 f_1, f_2 和 f_3 变化的基本图

完全由慢速车的流量与速度决定 .

4. 总 结

本文在 NS 模型的基础上 ,建立了混合车辆在单车道上的交通流模型 . 从计算机数值模拟结果可看出 ,在单车道上 ,混合车流的流量与速度完全由慢车的流量与速度决定 ,这是混合车辆在单车道上

行驶的最大交通特点 . 同样 ,车辆的随机减速概率 p 会对混合车辆的运动状态及交通流起重要作用 . 总之 ,单车道混合交通易造成局部交通阻塞 ,降低车辆流量和道路的使用率等现象 . 因此 ,在实际的交通中应该根据车辆类型的不同情况合理设计车道和车道的运行规则 ,实现不同车辆的交通流分离 ,使混合车辆流有序化 ,这样才可以提高道路通行能力 ,改善交通环境 .

[1] Wolfram S 1986 *Word Scientific*(Singapore)
 [2] Nagel K and Schreckenberg M 1992 *J. phys.* **12** 2221
 [3] Fukui M and Ishibashi Y 1994 *J. Phys. Soc. Japan.* **63** 2882
 [4] Biham O , Middleton A and Levine D 1992 *Phys. Rev. E* **48** R6124
 [5] Li H B *et al* 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1769(in Chinese) [李华兵等 1998 物理学报 **47** 1769]

[6] Wang B H *et al* 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 906(in Chinese) [汪秉宏等 1998 物理学报 **47** 906]
 [7] Xue Y *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 445(in Chinese) [薛郁等 2001 物理学报 **50** 445]
 [8] Lü X Y *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1255(in Chinese) [吕晓阳等 2001 物理学报 **50** 1225]

- [9] Tan H L , Liu M R and 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]
- [10] Huang P H , Kong L J and Liu M R 2002 *Chin. Phys.* **11** 678
- [11] Lei L *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2121 (in Chinese) [雷 丽 等 2003 *物理学报* **52** 2121]
- [12] Bai K Z *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2421 (in Chinese) [白克 钊 等 2003 *物理学报* **52** 2421]

The study of a cellular automaton traffic flow model with mixed different-maximum-speed vehicles on single lane^{*}

Kuang Hua Kong Ling-Jiang Liu Mu-Ren

(*College of Physics and Information Technology , Guangxi Normal University , Guilin 541004 , China*)

(Received 3 July 2003 ; revised manuscript received 4 November 2003)

Abstract

Based on the NS models of traffic flow , a cellular automaton traffic model with different-maximum-speed vehicles mixed on single lane is proposed. We present the fundamental diagrams of traffic flow under different parameters by using computer numerical simulation. The model 's traffic flow characters are presented and analyzed.

Keywords : cellular automaton , mixed traffic flow model , computer numerical simulation

PACC : 0550

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10062001 , 70371067) , by the Natural Science Foundation of Guangxi Province , China (Grant No. 0007017) , Emphases Technology by the Ministry of Education of China (Grant No. [2002] 97) and by the Foundation of the Talent Project of Guangxi , China (Grant No. [2002] 329) .