

车辆的长度和速度对单车道 混合交通流的影响*

肖瑞杰 孔令江 刘慕仁†

(广西师范大学物理与电子工程学院, 桂林 541004)

(2005 年 12 月 16 日收到, 2006 年 6 月 18 日收到修改稿)

在 NaSch 交通流模型的基础上, 建立了单车道上由两种长度不一样、可分别以不同最大速度行驶的车辆构成的混合交通流模型. 在周期性边界条件下, 通过计算机模拟研究了车辆的长度、最大速度和混合比例系数对混合交通流的影响.

关键词: 元胞自动机, 混合交通流, 计算机模拟

PACC: 0550

1. 引 言

近年来, 交通流已成为一个多学科交叉研究的热点课题. 由于交通流现象复杂多样, 针对不同情况, 人们提出了多种交通流模型^[1], 如流体力学模型、动力论模型、跟车模型、元胞自动机模型等. 其中, 元胞自动机(简称 CA)模型是一种时间、空间和变量均离散的模型. 由于其算法简单、灵活可调, 易于在计算机上进行模拟, 能有效模拟交通流中车辆微观运动状态, 有利于了解车辆间的相互作用机理对交通流的影响, 因此在交通流的研究中得到了广泛的应用和发展^[2-7].

交通流是由道路、车辆、人员以及环境构成的复杂系统. 因此车辆的性能或类型是影响交通流的重要因素之一. 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, 特别在我国尤其普遍. 目前, 在交通流 CA 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^[8-15]. 考虑到混合交通流的普遍性, 最近一些学者开始了这方面的研究^[16-18]. 车辆的长度和车辆在安全行驶条件下通常达到的最大速度是刻画车辆性能或类型的主要参数. 因此, 研究由不同长度和不同最

大速度的车辆构成的混合交通流问题能进一步了解真实交通的特性.

为此, 本文研究了周期边界条件下单车道上由两种长度、可分别以不同最大速度行驶的车辆构成的混合交通流. 通过计算机模拟, 研究了车辆长度和最大速度以及车辆的混合比例对混合交通流的影响.

2. 模 型

将道路视为长度为 L 的一维离散格点链, 每一时刻, 格点上可能被两种长短不同、最大速度不同的车辆占据. 短车占据 1 个格点, 具有的最大速度为 $V_{\max}^1 = 5$, 长车占据 2 个格点, 具有的最大速度为 $V_{\max}^2 = 3$. 每一种类型的车辆状态由其本身的速度 V^j 所表示, $V^j \in [0, V_{\max}^j]$, $j = 1, 2$. 用 $x_i(t)$ 表示第 i 辆车 t 时刻的车尾位置, 如该车是短车, 则第 i 辆车 t 时刻与前方紧邻车辆($i+1$)之间的间距 $\text{gap}_i^1(t) = x_{i+1}(t) - x_i(t) - 1$; 若第 i 辆车为长车, 则第 i 辆车 t 时刻与前方紧邻车辆($i+1$)之间的间距 $\text{gap}_i^2(t) = x_{i+1}(t) - x_i(t) - 2$. 在每一演化时步 $t \rightarrow t+1$ 中, 车辆状态都按照 NaSch 模型^[19]的演化规则进行速度和位置的并行更新. NaSch 模型车辆状态演化的更

* 国家自然科学基金(批准号: 10562001, 70371067, 10362001), 广西自然科学基金(批准号: 0447030)和广西壮族自治区“十百千人才工程”专项基金(批准号: 2001204)资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: 3mrlmr@mailbox.gxnu.edu.cn

新规则和步骤为

- 1) 加速过程 : $V_i^j(t+1) \rightarrow \min(V_i^j(t)+1, V_{\max}^j)$,
- 2) 确定性减速过程 : $V_i^j(t+1) \rightarrow \min(V_i^j(t), \text{gap}_i^j(t))$,
- 3) 以概率 p 随机减速过程 : $V_i^j(t+1) \rightarrow \max(V_i^j(t)-1, 0)$,
- 4) 位置更新 : $x_i(t+1) \rightarrow x_i(t) + V_i^j(t+1)$,

之所以选择 NaSch 模型的演化规则是因为 :一方面 , NaSch 模型能体现交通流的基本特性 ,另一方面 ,采用 NaSch 模型演化规则更方便看出车辆长度和车辆最大速度对混合交通流的影响。

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 ,则车辆的总密度为 $\rho = \frac{N}{L}$;其中若短车辆数量为 N_1 ,则其车道占用率 $C_1 = \frac{N_1}{L}$,即短车所占据的格点数占车道长的比值 ;若长车数量为 N_2 ,则其车道占用率 $C_2 = \frac{2N_2}{L}$,即长车所占据的格点数占车道长的比值 .因此 ,车道总占用率(所有车辆所占据的格点数与车道长度的比值)为 $C = C_1 + C_2 = \frac{N_1 + 2N_2}{L}$.为了考虑车辆的混合程度 ,引入混合比例系数 n , $n = \frac{C_2}{C}$ 是长车的占用率与总占用率的比值 ,则 $C_1 = (1-n)C$, $C_2 = nC$, $0 \leq n \leq 1$,密度与占用率之间满足 $\rho = C(1 - \frac{1}{2}n)$. t 时刻的平均速

度定义为 $\bar{V}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^{N_j} V_i^j(t)$;平均车流量为 $J_i = \bar{V}_i \times \rho$.本文模拟过程中 ,车道由 1000 个格点组成 ,对应的实际道路长度大约为 7.5 km .一辆短车占据一个格点 ,则对应的实际长度约为 7.5 m ,一辆长车占据两个格点 ,则对应的实际长度约为 15 m .短车的最大速度 V_{\max}^1 为每秒 5 个格点 ,对应的实际车速约为 135 km/h ;长车的最大速度 V_{\max}^2 为每秒 3 个格点 ,对应的实际车速约为 80 km/h .本文长度单位均以格点为单位进行了无量纲化 .模拟采用周期性边界条件 ,初始时刻 ,两种车辆按照混合比例系数 n 随机混合分布在车道上 ,且其初速度都为 0 .模型每一次进行演化的时步为 20000 步 ,记录后面运行的 2000 步中每一时步内的速度 \bar{V}_i ,然后将得到的 2000 个速度值再做时间平均 ,得到一次运行的平均速度 $V = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{t+T-1} \bar{V}_i$,平均流量 $J = V \times \rho$,为了消除初始位形的随机性对结果的影响 ,再对 25 个样本取平均。

3.1. 车辆长度对混合交通流的影响

为了考察车辆的长度对混合交通流的影响 ,我们让短车和长车都具有相同的速度 ,取 $V_{\max}^1 = V_{\max}^2 = 5$.图 1 中 (a) (b) 分别给出了随机减速概率 $p = 0.5$,混合比例系数为 $n = 0.0, 0.2, \dots, 1.0$ 时的流量-占用率图和平均速度-占用率图。

当 $n = 0.0$ 时 ,车道上只有短车 ,此时该模型变为最大速度为 5 的 NaSch 模型 ,具有最大流量约为 0.327 ,最大平均速度约为 4.5 ,临界占用率约为 0.08 ;当 $n = 1.0$ 时 ,车道上只有长车 ,此时该模型变

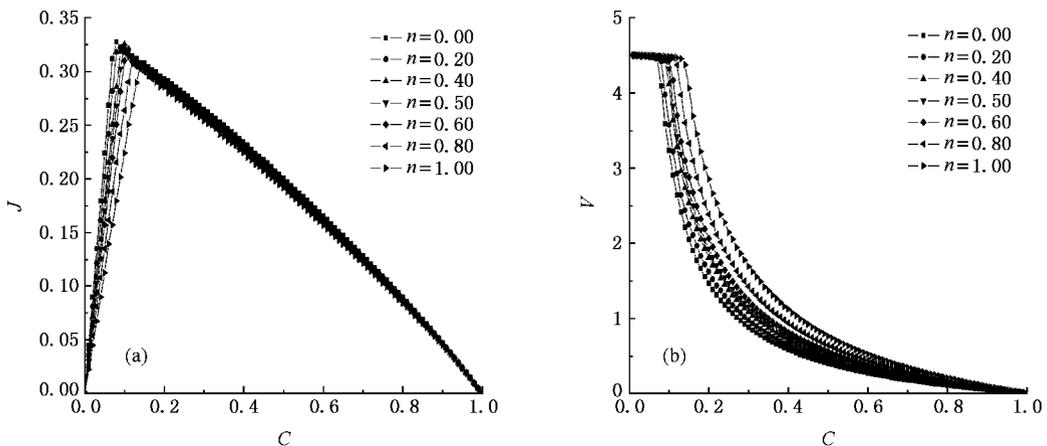


图 1 混合车辆流量、速度随参数 n 变化的关系图 (a) n 不同 , $p = 0.5$ 时 ,流量随车道占用率的变化 (b) n 不同 , $p = 0.5$ 时 ,速度随车道占用率的变化

为一辆车占据两个格点最大速度为 5 的 NaSch 模型,此时最大流量约为 0.306,最大平均速度约为 4.5,临界占用率约为 0.14.

当 $0 < n < 1$ 时,为两类车混合行驶的情况.我们从图 1(a)看到,随着混合比例系数的逐渐增加,混合交通流的临界占用率逐渐增加,而临界最大流量逐渐减小.当占用率小于临界占用率时,混合交通流处于自由运动相,此时的流量大于只有单一长车时的流量,小于只有单一短车时的流量,由混合比例系数的大小决定.此时的流量可以表示为 $J \approx (V_{\max}^1 - p)C(1 - \frac{1}{2}n)$,在占用率一定的情况下,混合比例系数 n 值越大,车辆密度减小,导致流量减小.在占用率大于临界占用率以后,混合交通流处于拥堵相,此时的流量基本上由占用率来决定,与混合比例系数关系不大,表现为不同占用率下的流量曲线基本是重合的.我们从图 1(b)看到,在自由运动相,混合交通流的平均速度都为最大速度 4.5,与混合比例系数无关.在拥堵相,混合交通流的平均速度也是介于只有短车($n = 0.0$)和只有长车($n = 1.0$)的交通流的平均速度之间,随着 n 的增大,平均速度增大.这是因为,在堵塞相,在占用率一定的情况下, n

值越大,车辆总数越小,车辆之间的相互影响也越小,那么平均速度就相应增大.

因此,由长短不同的车辆构成的混合交通流,如果不同长短的车辆的最大速度相同,则其临界占用率由混合比例系数 n 决定;在自由运动相,流量随着混合比例系数 n 的增大而减小,平均速度与混合比例系数 n 无关;在拥堵相,平均速度随着 n 值的增大而增大,流量与 n 基本无关.

为了观察由不同长短车辆构成的混合交通流和由单一车辆构成的交通流在微观层次上运动的区别,我们在图 2(a)(b)中分别给出了 $p = 0.5, C = 0.09$ 时, $n = 0.0$ (单一车辆交通流), $n = 0.5$ (混合交通流)时空演化斑图.图 2 中给出的是 400 个格点从 10000 到 10400 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,以黑点表示车辆位置,白点表示空格点.图 2 中明显的黑色区域部分表示车辆出现局部堵塞,灰色区域表示车辆自由运动、畅通行驶.由图 2(a)(b)对比可看出,NaSch 模型在 $C = 0.09$ 下出现了局部阻塞,而混合车辆模型却还处于畅通相.因此,混合交通流比单一车辆的交通流的临界占用率要大.

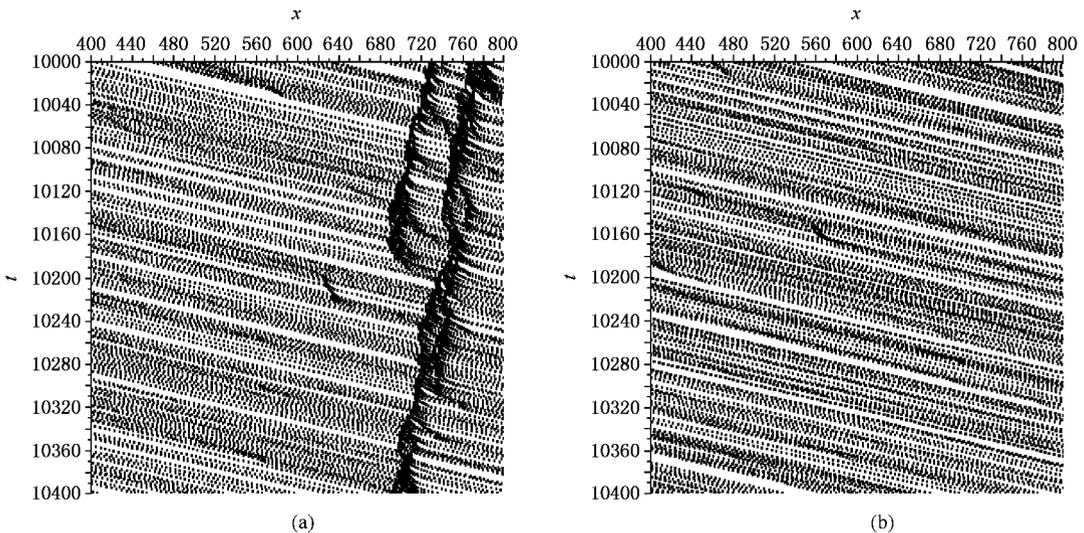


图 2 时空演化斑图 (a) $p = 0.5, C = 0.09, n = 0.0$ NaSch 模型 (b) $p = 0.5, C = 0.09, n = 0.5$ 混合车辆模型

为了观察刹车概率 p 对混合交通流的影响,在图 3(a)(b)中,分别给出了 $n = 0.5, 1.0$ 时,随机减速概率取 $p = 0.0, 0.2, \dots, 0.8$ 时的流量-占用率图与平均速度-占用率图.从图 3 可看出随着 p 值的增加,流量最大值、平均速度最大值、临界占用率都逐渐减小.从图 3(a)流量-占用率图可以看出,在自由

相下,当 n 相同, p 不同时,虽然流量的最大值不同,但流量大体上基本满足相同的线性关系;当 p 相同, n 不同时, n 越大,流量越小.在拥堵相, p 值越大,流量越小,流量与 n 无关.由图 3(b)速度-占用率图可看出,在自由运动相,速度完全重合,满足平均速度 $\bar{V} = V_{\max}^1 - p$ 的关系^[20],与 n 无关;在拥堵

相, n 值相同, p 值不同时, p 越大, 平均速度越小; p

相同, n 不同时, n 越大, 平均速度越大.

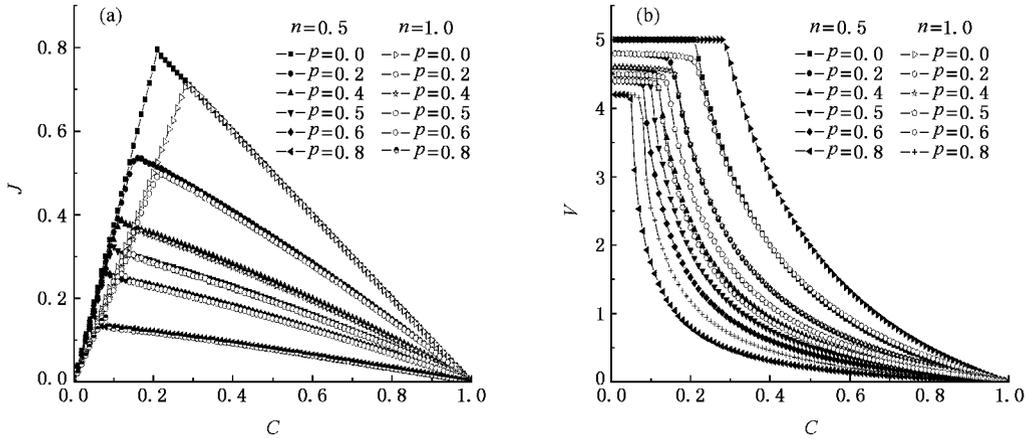


图3 混合车辆随参数 p 变化的关系图 (a) p 不同, $n = 0.5, 1.0$ 时, 流量随车道占用率的变化 (b) p 不同, $n = 0.5, 1.0$ 时, 速度随车道占用率的变化

3.2. 车辆的长度和最大速度对混合交通流的影响

文献 [16] 研究了车辆长度都为 1、车辆的最大速度分别取 5 和 3 的混合交通流的情况, 模拟结果表明: 混合交通流的流量和平均速度完全由最大速度为 3 的慢车构成的交通流来决定, 与快车的最大速度无关, 与快慢车的混合比例无关. 当车辆的长度都为 2 而其他的条件不改变时, 本文的模拟表明, 上面的结论仍然成立, 即单一车辆长度的混合交通流完全由慢车决定.

为了考察由车辆长度不同具有不同最大速度的车辆构成的混合交通流的特性, 图 4(a) (b) 分别给出了短车最大速度为 $V_{max}^1 = 5$, 长车最大速度为 $V_{max}^2 = 3$, 随机减速概率都为 $p = 0.5$, 混合比例系数取 n

$= 0.0, 0.1, \dots, 1.0$ 时的流量-占用率图和平均速度-占用率图. 当 $n = 0.0$ 时, 对应车道上只有短车, $V_{max}^1 = 5$ 的 NaSch 模型, 和前面一样, 此时最大流量约为 0.327, 最大速度约为 4.5, 临界占用率约为 0.08; 当 $n = 1.0$ 时, 对应车道上只有长车, $V_{max}^2 = 3$ 的 NaSch 模型, 此时最大流量约为 0.255, 最大速度约为 2.5, 临界占用率约为 0.23.

当 $0 < n < 1$ 时, 为两类车混合行驶的情况. 从图 4(a) 看到, 混合交通流的临界占用率介于短车和长车交通流的临界占用率之间, 随混合比例系数 n 增加而增加. 在自由运动相, 流量随 n 的增加而减小, 基本上可以由 $J \approx (V_{max}^2 - p)C(1 - \frac{1}{2}n)$ 描述. 在拥堵相, 当占用率大于只有长车的交通流的临界

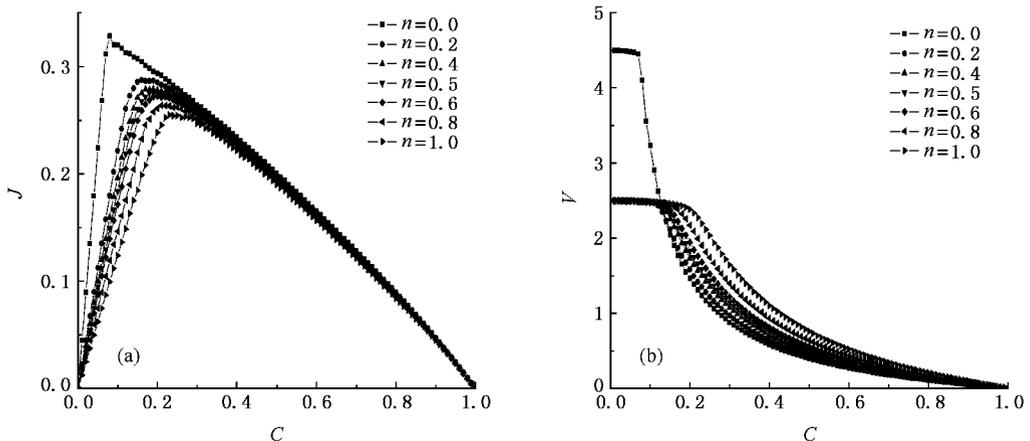


图4 混合交通流流量、速度随混合比例系数 n 的变化图 (a) n 不同, $p = 0.5$ 时, 流量随车道占用率的变化 (b) n 不同, $p = 0.5$ 时, 速度随车道占用率的变化

占用率后,混合交通流的流量基本上由长车的流量决定和混合比例系数 n 关系不大.这是因为,在堵塞相,虽然 n 值不同,车道上车辆总数不同,随 n 增大,车辆总数减小,使车辆之间的相互作用也越小,导致平均速度增大,从而保持流量不变.从图 4(b)看到,在自由运动相,混合交通流的平均速度完全由长车决定和混合比例无关;在堵塞相,混合交通流的平均速度介于长车交通流和短车交通流的平均速度之间,随混合比例系数增加而增大.这些特点表明,当考虑了不同长度的车辆具有不同的最大速度时,混合交通流的流量和平均速度与长短车(慢快车)的混合比例有关.

为了观察由车辆长度不同具有不同最大速度的车辆构成的混合交通流与由单一长度、速度车辆构成的交通流在微观层次上运动的区别,图 5(a)(b)分别给出了 $p = 0.5, C_0 = 0.23$ 时, $n = 0.0$ (对应最大速度为 5,长度为 1 的 NaSch 模型)与 $n = 0.5$ 时的时空演化斑图.图中给出的是 400 个格点从 10000 到 10400 时步的演化过程.由图 5(a)(b)对比可看出,NaSch 模型与混合车辆模型都处于拥堵状态,出现了局部堵塞,且向后传播,但是图 5(b)的阻塞区域和堵塞程度明显多于图 5(a).这是因为长车的最大速度小于短车的最大速度,造成较多的短车尾随在长车后面而形成的.

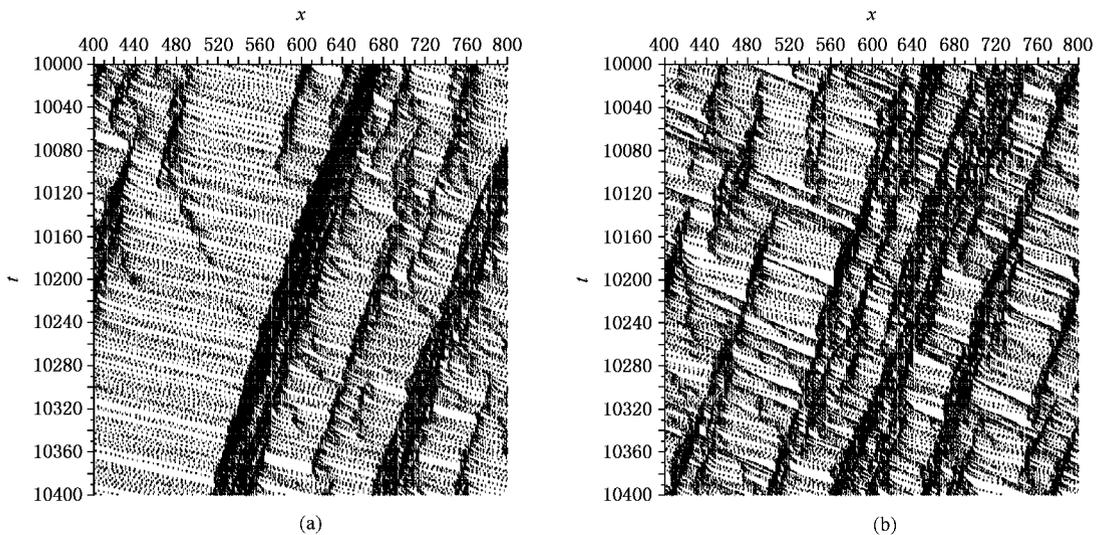


图 5 时空演化斑图 (a) $p = 0.5, C_0 = 0.23, m = 0.0$ NaSch 模型 (b) $p = 0.5, C_0 = 0.23, m = 0.5$ 混合车辆模型

为了考察刹车概率 p 对由车辆长度不同具有不同最大速度的车辆构成的混合交通流的影响,在

图 6(a)(b)中,分别给出了 $n = 0.5, n = 1.0$ 随机减速概率 $p = 0.0, 0.2, \dots, 0.8$ 时的流量-占用率图与

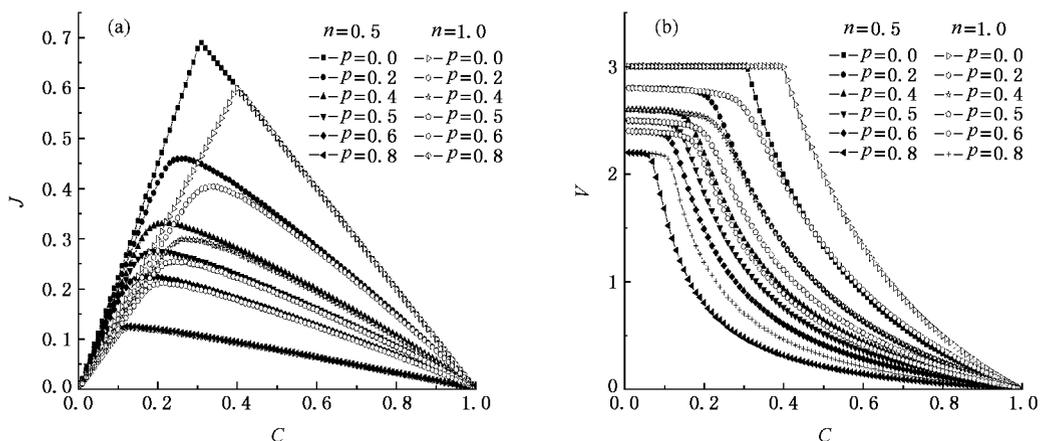


图 6 混合车辆随参数 p 变化的关系图 (a) p 不同, $m = 0.5, 1.0$ 时,流量随车道占用率的变化 (b) p 不同, $n = 0.5, 1.0$ 时,速度随车道占用率的变化

平均速度-占用率图.从图 6 可看出随着 p 值的增加,流量最大值、速度最大值、临界占用率都逐渐减小.混合交通流随 n 和 p 变化的情况相当于由最大速度都为 3 但长度不同的车辆构成的混合交通流随 n 和 p 变化的情况.

4. 结 论

本文在 NaSch 交通流模型的基础上,建立了由

不同长度和不同最大速度的车辆构成的混合交通流模型.计算机模拟结果给出,在单车道上,混合车辆流的流量和平均速度与混合比例系数的变化有较大关系.混合交通流的临界占用率随混合比例系数的增大而增大;当小于临界占用率时,流量随混合比例系数增大而减小,平均速度和混合比例系数无关;当大于临界占用率时,流量基本上与混合比例系数无关,平均速度随混合比例系数增大而增大.

-
- [1] Chowdhury D , Santen L , Schadschneider A 2000 *Phys. Rep.* **329** 199
- [2] Biham O , Middleton A , Levine D 1992 *Phys. Rev. A* **46** R6124
- [3] Fukui M , Ishibashi Y 1996 *J. Phys. Soc. Japan* **65** 1868
- [4] Wang B H , Kuang Y Q , Xu B M 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 906(in Chinese)[汪秉宏、邝乐琪、许伯铭 1998 物理学报 **47** 906]
- [5] Wang L , Wang B H 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 808(in Chinese) [王 雷、汪秉宏 1999 物理学报 **48** 808]
- [6] Wang B H , Wang L , Xu B M 2000 *J. Guangxi Normal University* **18** 1(in Chinese)[汪秉宏、王 雷、许伯铭 2000 广西师范大学学报(自然科学版) **18** 1]
- [7] Maerivoet S , De Moor B 2005 *Phys. Rep.* **419** 1
- [8] Huang P H , Liu M R , Kong L J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 30(in Chinese)[黄丘花、刘慕仁、孔令江 2001 物理学报 **50** 30]
- [9] Huang P H , Kong L J , Liu M R 2002 *Chin. Phys.* **11** 678
- [10] Xue Y , Chen G Z 2002 *Chin. Phys.* **11** 1128
- [11] Li L , Shi P F 2005 *Chin. Phys.* **14** 576
- [12] Li K P , Gao Z Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 930
- [13] 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]
- [14] Tan H L , Liu M R , Kong L J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2713(in Chinese)[谭惠丽、孔令江、刘慕仁 2002 物理学报 **51** 2713]
- [15] Bai K Z , Tan H L , Kong L J , Liu M R 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2421(in Chinese) [白克钊、谭惠丽、孔令江、刘慕仁 2003 物理学报 **52** 2421]
- [16] Kuang H , Liu M R , Kong L J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2894(in Chinese)[邝 华、刘慕仁、孔令江 2004 物理学报 **53** 2894]
- [17] Ez-Zahraouy H , Jetto K , Benyoussef A 2004 *Eur. Phys. J. B* **40** 111
- [18] Zheng R S , Tan H L , Kong L J , Liu M R *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3517(in Chinese) [郑容森、谭惠丽、孔令江、刘慕仁 2005 物理学报 **54** 3517]
- [19] Nagel K , Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I France* **2** 2221
- [20] Huang D W , Tsai C W 2001 *Phys. Rev. E* **63** 012101

The influence of the length and the velocity of vehicles on the mixed traffic flow in one-lane highway^{*}

Xiao Rui-Jie Kong Ling-Jiang Liu Mu-Ren[†]

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

(Received 16 December 2005 ; revised manuscript received 18 June 2006)

Abstract

Based on NaSch traffic flow model , the mixed traffic flow model of whicles with different length and different maximum velocitdes on one-lane highway is proposed. Under periodic boundary condition , the influence of the length and the velocity of vehicles on the mixed traffic flow is studied by computer simulation .

Keywords : cellular automaton , mixed traffic flow , computer simulation

PACC : 0550

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10562001 ,70371067 ,10362001) , the Natural Science Foundation of Guangxi Province , China(Grant No. 0447030) and the Special Foundation of the Talent Program of Guangxi Province , China(Grant No. 2001204).

[†] Corresponding author. E-mail :lmrlmr@mailbox.gxnu.edu.cn