

自动巡航混合交通系统的研究*

陈时东^{1)†} 朱留华¹⁾ 郑容森¹⁾ 孔令江²⁾ 刘慕仁²⁾

1) (玉林师范学院物理与信息科学系, 玉林 537000)

2) (广西师范大学物理与电子工程学院, 桂林 541004)

(2008 年 6 月 20 日收到, 2008 年 10 月 13 日收到修改稿)

基于自动驾驶原理, 建立了单车道上由两种长度、可分别以不同的最大速度行驶、具有自动巡航驾驶功能的车辆构成的混合交通流模型. 通过计算机数值模拟, 得到了混合车流在不同参数下交通流模型的基本图, 并借助平均场理论对其进行解析. 得到的理论结果与实验模拟相一致.

关键词: 元胞自动机, 自动巡航控制系统, 临界占用率, 临界密度

PACC: 0550

1. 引 言

近年来, 交通流问题由于其高度的非线性及实际观察到的非平衡相变引起了物理学界的普遍关注, 已逐渐成为当前科学研究的一个热点课题^[1-9]. 到目前为止, 文献中常被讨论的交通流模型至少有以下三类^[10]: 基于连续性描述的流体力学模型 (hydrodynamic model)、基于概率性描述的气体动力学模型 (gas-kinetics model)、基于离散性描述的跟车模型 (car-following model) 和元胞自动机模型 (cellular automaton model), 其中元胞自动机交通流模型备受青睐. 与其他模型相比, 元胞自动机交通流模型在保留交通流这一复杂系统的非线性行为和其他物理特征的同时, 更易于在计算机上操作, 并能灵活地修改有关参数以模拟真实交通条件下的各种效应, 例如路障、过路收费站、高速公路连接点、阻滞随机性、驾驶员过度反应等引起的随机慢化.

统计资料表明, 我国在“十五”期间建成高速公路 24700 km, 是“七五”、“八五”和“九五”建成高速公路总和的 1.5 倍. 2005 年, 全国新增高速公路通车里程 6717 km^[11]. 我国的高速公路通车里程超过 40000 km, 继续位于世界第二位^[12]. 随着我国高速公路建设的迅速发展, 安装自动巡航控制系统的车辆日益增多. 自动巡航控制系统可以在汽车行驶过程中根

据驾驶员事先设定的参数实时调节车速, 实现车速的自动控制, 具有巡航 (定速)、恢复车速、加速及减速等功能. 安装有这种装置的车辆在高速公路上行驶时, 能提高驾驶的舒适性, 并且可以节省燃料.

交通流是由道路、车辆、驾驶员构成的复杂系统, 因而车辆的性能及类型成为影响交通流的重要因素. 实际道路交通往往是由不同性能及类型的车辆构成的混合交通流, 对混合交通流的研究可以进一步揭示真实交通的内在机制. Jiang 等^[7]基于恒常时间间距策略、自动巡航控制原理和 NaSch 模型的演化规则提出了改进的元胞自动机交通流模型, 有效地抑制了交通堵塞. 本文基于自动巡航控制原理, 引入驾驶员的速度期望因子, 提出了另一改进的元胞自动机交通流模型, 研究了周期性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、具有自动巡航控制系统的车辆构成的混合交通流.

2. 模 型

将道路视为一维离散格点链, 每一格点对应实际道路的长为 7.5 m, 每一时刻格点可能被两种长度不同、最大速度不同的车辆所占据或为空. 设短车占据 1 个格点, 具有的速度极限 $V_{\max}^1 = 4$, 对应实际车速为 108 km/h; 长车占据 2 个格点, 具有的速度极限 $V_{\max}^2 = 3$, 对应实际车速为 81 km/h. 每种类型的车

* 国家自然科学基金 (批准号: 10762005) 和广西壮族自治区教育厅科研计划 (批准号: 200607LX079, 200507209, 200807LX401) 资助的课题.

† E-mail: chenshidong128@sina.com

辆进行速度更新时不能超过自身的速度极限.用 $x_i^j(t)$ 表示第 i 辆车 t 时刻的车尾位置,其中 j 用来区分车辆的长短类型, $j=1$ 表示目标车辆为短车, $j=2$ 表示目标车辆为长车. $d_i^j(t)$ 表示第 i 辆车 t 时刻与前方紧邻车辆间的空格点数,则 $d_i^j = x_{i+1}(t) - x_i^j(t) - j$.

下面给出具有自动巡航控制系统的车辆演化规则.

确定补偿概率:若 $w \cdot d_i^j < V_{\max}^j$,就有 $p = \Gamma w d_i^j / V_{\max}^j$,否则 $p = 0$.其中车辆类型 $j \in \{1, 2\}$,速度期望因子 $w \in (0, 1]$ 为驾驶员事先设定的参数.

速度更新规则:

$$v_i^j(t + 1/2) = \min(V_{\max}^j, \Gamma w d_i^j).$$

速度补偿规则:

$$v_i^j(t + 1) = \max(v_i^j(t + 1/2) - 1, 0) \quad (\text{以概率 } p \text{ 补偿}).$$

位置更新规则:

$$x_i^j(t + 1) = x_i^j(t) + v_i^j(t + 1).$$

3. 数值模拟结果与分析

模拟时设车道的长度为 L ,车道上的车辆总数为 N ,则车流的全局密度为 $\rho = N/L$,设短车数为 N_1 ,则短车对车道的占用率为 $C_1 = N_1/L$,设长车数为 N_2 ,则长车对车道的占用率为 $C_2 = 2N_2/L$.因此,车道全局占用率 $C = C_1 + C_2 = (N_1 + 2N_2)/L$.为了考虑车辆的混合程度,引入混合比例系数 R ,设 R 为长车占用率与全局占用率的比值.由上述定义可得,车辆的全局密度与全局占用率之间满足如下关系:

$$\rho = \alpha(1 - R/2). \quad (1)$$

t 时刻的平均速度定义为

$$\bar{v}_t = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=0}^{N_j-1} v_i^j(t); \quad (2)$$

平均车流量为

$$J = \bar{v}_t \rho = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=0}^{N_j-1} v_i^j(t). \quad (3)$$

模拟时采用周期性边界条件,初始时刻两种类型的车辆按照混合比例系数 R 随机混合分布在车道上.为消除暂态影响,每次运行对最初的 5×10^4 时步不做统计,以后 1×10^4 时步进行时间平均,这样就得到了每一次运行的结果.为了减小初始分布对结果的影响,取样本数为 30,本文图中每个点是

30 次运行的平均值.

3.1. 速度期望因子对交通流的影响

交通流模型的一个基本特性是正确反映流量与密度之间的关系.图 1 反映了相同混合比例系数条件下,速度期望因子对交通流的影响.从图 1(a) 可以发现,速度期望因子 w 产生了两方面的效应,一是随着 w 值的增加,最大流量值逐渐增加,二是随着 w 值的增加,最大流量向更大的全局占用率偏移.因为图 1 设定的长车占用率与全局占用率的比值是常数,所以随着 w 值的增加,最大流量向更大的全局车流密度偏移,如图 1(b) 所示.

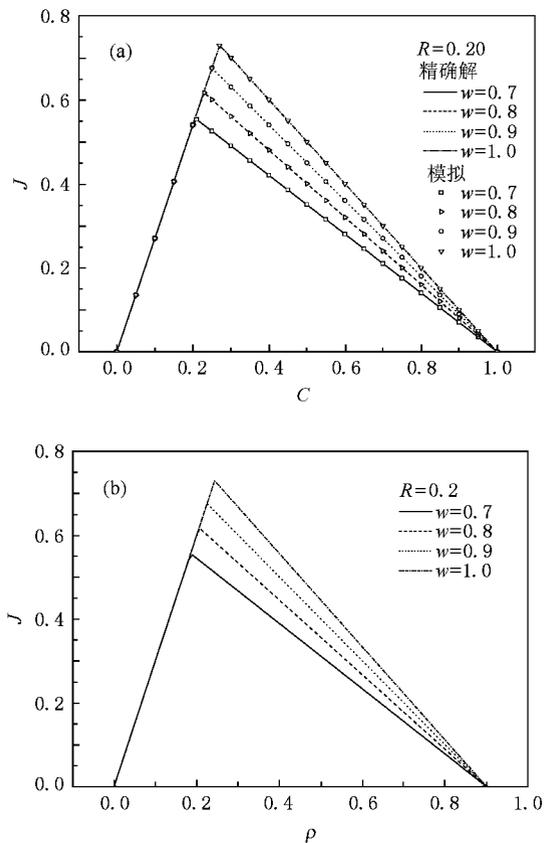


图 1 混合比例系数时 $R = 0.20$ 时,速度期望因子 w 对交通流的影响 (a)流量 J -全局占用率 C 关系曲线,(b)流量 J -全局密度 ρ 关系曲线

为了形象地描述车道上的车流演化过程,我们模拟了车辆运动过程中位置与运动时间的关系,结果如图 2 所示.取参数 $R = 0.2, C = 0.23$,模拟的空间位置为 2000—2500,时间为 50000—50400,图中黑点表示车辆,白色表示空白区域.

对于图 2 车道上车流的全局占用率 $C = 0.23$ 已经超过了系统的临界占用率 0.21,此时系统中并

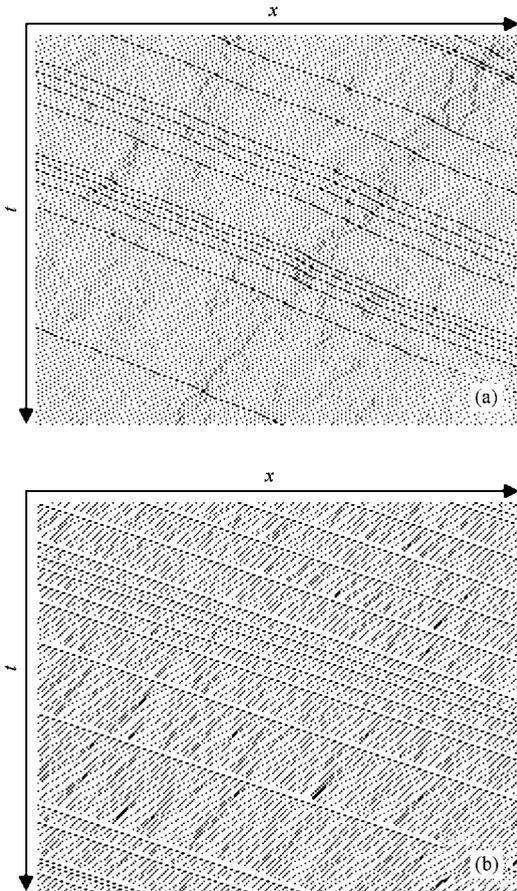


图2 混合比例系数 $R = 0.20$, 全局占用率 $C = 0.23$ 时, 车辆位置与运动时间的关系 (a) $w = 0.7$, (b) $w = 0.9$

没有出现预料中的自由运动相与阻塞相相分离的现象, 系统自组织演化成一种均匀的结构. 但从图 2(a) 可以看出, 自由运动进程显著变慢, 位移对时间的变化率明显低于相同全局占用率下期望因子较高的情形, 如图 2(b) 所示.

3.2. 混合比例系数对交通流的影响

图 3 反映了速度期望因子相同时, 混合比例系数 R 对交通流的影响. 从图 3(a) 可以发现, 混合比例系数同样产生了两方面的效应, 一是随着 R 值的增加最大流量值逐渐减小, 二是随着 R 值的增加最大流量向更大的全局占用率偏移. 然而这并不意味着随着 R 值的增加最大流量向更大的全局车流密度偏移, 因为 R 值的增加导致了长车比例增加, 而一辆长车占据 2 个格点, 此时道路上的全局车流密度反而相对变小, 如图 3(b) 所示. 由以上所述可知, 随着 R 值 ($R \neq 0$) 的增加, 最大流量向更小的全局车流密度偏移. 这与文献 [13] 的情形相类似.

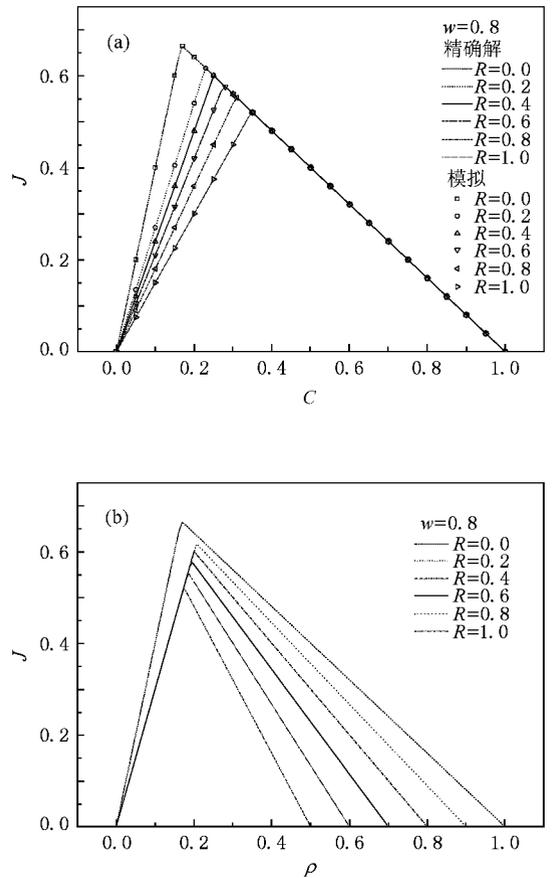


图3 速度期望因子 $w = 0.8$ 时, 混合比例系数 R 对交通流的影响 (a) 流量 J -全局占用率 C 关系曲线, (b) 流量 J -全局密度 ρ 关系曲线

图 4 给出了混合比例系数 $R = 0.20$, 速度期望因子 $w = 0.8$ 时, 不同全局占用率下车辆位置随运动时间的演化情形. 图 4(a) 为 $C = 0.20$ 时的车辆位置与运动时间的关系. 此时车道上车流密度较低 ($\rho = 0.18$), 车流处于畅行相, 所有的车辆都以较高的速度行驶, 甚至某些相邻车辆间形成了稳定的空白区域, 位置与时间的关系呈线性关系. 图 4(b) 为 $C = 0.30$ 时的车辆位置与运动时间的关系. 此时车道上的全局占用率已经超过了临界值, 但系统中并没有出现预料中的宽幅运动阻塞相, 而是自组织演化成相对致密的结构. 图 4(c) 为 $C = 0.40$ 时的车辆位置与运动时间的关系. 此时车道上车流密度较大 ($\rho = 0.36$), 行驶车辆明显受到堵塞车辆的抑制, 自由运动的进程显著减小, 车道上出现了零星的静止车辆并形成了一些很小的堵塞区域, 但是随着时间的推移, 小的堵塞区域又很快消散. 系统中并没有出现大范围的“时走时停”交通波, 车辆分布相对比较均匀, 没有出现完全堵塞簇和自由流相分离的现象.

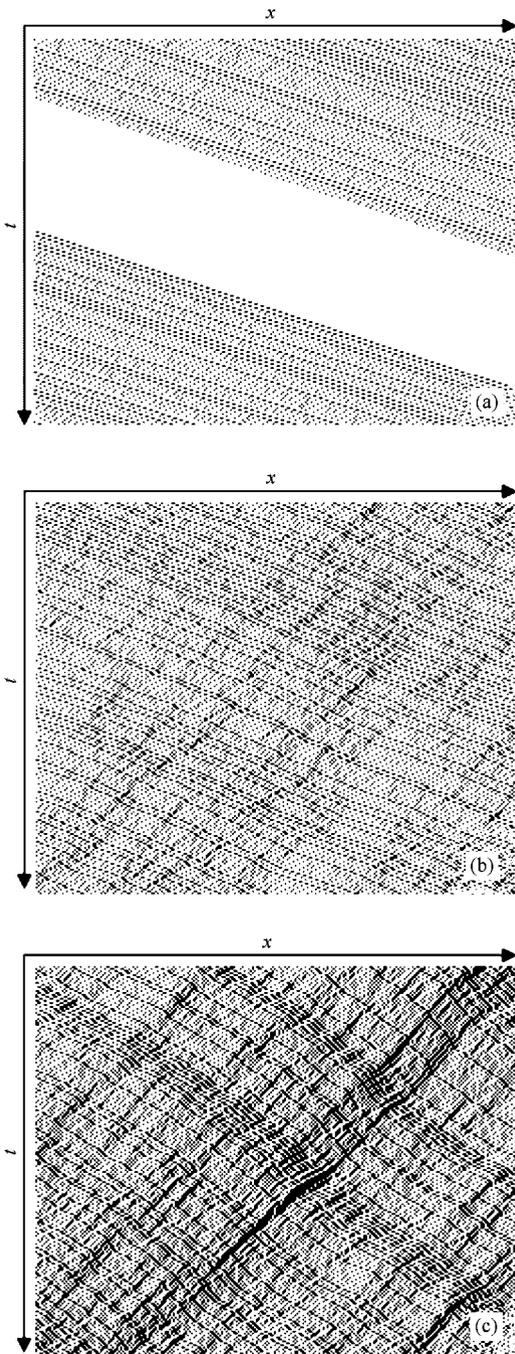


图 4 混合比例系数 $R=0.20$ 速度期望因子 $w=0.8$ 时, 车辆位置与运动时间的关系 (a) $C=0.20$, (b) $C=0.30$, (c) $C=0.40$

3.3. 理论解析

借助于平均场理论, 可获得流量在低密度下的解析解. 在较低的车流密度下, 所有车辆都期望以最快的速度行驶, 但是受单车道条件的约束, 短车(即快车)不能全速前进, 而是保持与长车(即慢车)相同的速度极限向前行驶. 在系统达到临界密度之前, 快

车的平均速度等于慢车的平均速度, 此时系统的流量由慢车的流量和平均速度决定, 因此低密度下的流量

$$\begin{aligned} J_{\text{low}} &= \bar{v} \rho \\ &= V_{\text{max}}^2 \rho \\ &= CV_{\text{max}}^2 (1 - R/2). \end{aligned} \quad (4)$$

在较高的车流密度下, 当全局占用率超过临界值时, 车辆不允许全速流动. 此时, 相邻车辆间的平均空格点数可表示为

$$\bar{d} = l(1 - C)N. \quad (5)$$

相应车辆的平均速度可表示为

$$\begin{aligned} \bar{v} &= w\bar{d} \\ &= \frac{u(1 - C)}{\rho}. \end{aligned} \quad (6)$$

结合车流量公式(3), 获得了高密度下的流量

$$\begin{aligned} J_{\text{high}} &= \bar{v} \rho \\ &= u(1 - C). \end{aligned} \quad (7)$$

综合(4)(7)两式, 流量的解析解为

$$J = \min[CV_{\text{max}}^2(1 - R/2), u(1 - C)], \quad (8)$$

相应的临界占用率为

$$C = \frac{2w}{2V_{\text{max}}^2 - RV_{\text{max}}^2 + 2w}, \quad (9)$$

临界密度为

$$\rho = \frac{(2 - R)w}{2V_{\text{max}}^2 - RV_{\text{max}}^2 + 2w}. \quad (10)$$

特别情况下, 当 $R=0$ 时, 车道上不存在长车, 短车摆脱了长车的限制, 在低密度下可以全速前进, 因此(8)式修正为

$$J_1 = \min[CV_{\text{max}}^1, u(1 - C)], \quad (11)$$

相应的临界占用率和临界密度为

$$C_1 = \rho_1 = \frac{w}{V_{\text{max}}^1 + w}. \quad (12)$$

当 $R=1$ 时, 车道上为单一类型的长车, 其流量公式改写为

$$J_2 = \min[CV_{\text{max}}^2/2, u(1 - C)], \quad (13)$$

相应的临界占用率和临界密度为

$$C_2 = 2\rho_2 = \frac{2w}{V_{\text{max}}^2 + 2w}. \quad (14)$$

分析流量公式(8)(11)(13)发现, 在较低的全局占用率下, 速度期望因子不影响系统的流量; 在较高的全局占用率下, 长、短车按一定的比例混合与车道上是单一类型车辆的情形相符, 系统的流量由全局占用率和速度期望因子两个参数确定. 由图 1(a)和图 3(a)可见, 解析解与数值模拟完全一致.

对比两种单一类型车辆的情形, 发现单一类型

车辆的临界密度近似相等, $\rho \approx 0.17$, 单一短车的最大流量高达 0.66, 单一长车的最大流量仅为 0.52. 此结果并不能作为推广短车的理由, 因为从车载人流的角度看, 长车的一次承载能力是短车的几倍或十几倍. 因此从节能、环保和车载人流方面考虑, 长车才是今后交通发展的主流.

4. 结 论

本文基于自动驾驶原理提出了单车道自动巡航

驾驶的混合交通流模型, 研究了速度期望因子和混合比例系数对交通流的影响. 同时, 借助于平均场理论获得了该模型的解析解. 在较低的全局占用率下, 系统的流量与事先设定的速度期望因子无关; 在较高的全局占用率下, 系统的流量不受长、短车混合比例的影响, 同时系统会自组织演化成比较均匀的状态, 而不会演化成一个大的堵塞簇和一个自由流相分离的状态. 本文的研究结果对于交通预测、管理和规划具有一定的理论指导意义.

- [1] Hu S X, Gao K, Wang B H, Lu Y F 2008 *Chin. Phys.* **17** 1863
- [2] Tang T Q, Huang H J, Xu G, Xue Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 56 (in Chinese) [唐铁桥、黄海军、徐刚、薛郁 2008 物理学报 **57** 56]
- [3] Li K P, Gao Z Y 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 2120
- [4] Jiang R, Jin W L, Wu Q S 2008 *Chin. Phys.* **17** 829
- [5] Shang H Y, Huang H J, Gao Z Y 2007 *Acta Phys Sin.* **56** 4342 (in Chinese) [尚华艳、黄海军、高自友 2007 物理学报 **56** 4342]
- [6] Hua W, Liu J 2006 *Chin. Phys.* **15** 687
- [7] Jiang R, Wu Q S 2006 *Phys. Lett. A* **359** 99
- [8] Tian L J, Liu T L, Huang H J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2122 (in Chinese) [田丽君、刘天亮、黄海军 2008 物理学报 **57** 2122]
- [9] Lei L, Dong L Y, Song T, Dai S Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1711 (in Chinese) [雷丽、董力耘、宋涛、戴世强 2006 物理学报 **55** 1711]
- [10] Liu M R, Xue Y, Kong L J 2005 *Mech. Eng.* **27** 1 (in Chinese) [刘慕仁、薛郁、孔令江 2005 力学与实践 **27** 1]
- [11] The Ministry of Communication of the People's Republic of China 2006 *Trans. World* **5** 25 (in Chinese) [中华人民共和国交通部 2006 交通世界(建养机械) **5** 25]
- [12] Zhang J, Wang Y 2006 *Compr. Trans.* **2** 85 (in Chinese) [张菁、王毅 2006 综合运输 **2** 85]
- [13] Xiao R J, Kong L J, Liu M R 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 740 (in Chinese) [肖瑞杰、孔令江、刘慕仁 2007 物理学报 **56** 740]

Investigation on mixed traffic system with automatic cruise control^{*}

Chen Shi-Dong^{1)†} Zhu Liu-Hua¹⁾ Zheng Rong-Sen¹⁾ Kong Ling-Jiang²⁾ Liu Mu-Ren²⁾

1) (Department of Physics and Information Science, Yulin Normal College, Yulin 537000, China)

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

(Received 20 June 2008; revised manuscript received 13 October 2008)

Abstract

Based on the principle of automatic driving, the mixed traffic flow model of vehicles with different lengths and maximum velocities on one-lane highway is proposed. We obtained the fundamental diagrams of traffic flow model under different parameters via numerical simulation. Moreover, with the help of mean-field theory, the analytical results are given. The theoretical results are in agreement with those from numerical simulations.

Keywords: cellular automaton, automatic cruise control system, critical occupation ratio, critical density

PACC: 0550

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10762005) and the Scientific Research Program of the Department of Education of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China (Grant Nos. 200607LX079, 200507209, 200807LX401).

[†] E-mail: chenshidong128@sina.com