

过路收费站对高速公路交通的影响^{*}

朱留华^{1)†} 陈时东²⁾ 孔令江¹⁾ 刘慕仁^{1)‡}

1) (广西师范大学物理与电子工程学院, 桂林 541004)

2) (玉林师范学院物理与信息科学系, 玉林 537000)

(2007 年 1 月 12 日收到, 2007 年 5 月 30 日收到修改稿)

基于 Nagel-Schreckenberg 交通流模型, 建立了关于单车道电子收费和人工收费系统的元胞自动机交通流模型. 通过计算机数值模拟, 得到了混合付费车流在不同参数下交通流模型的基本图, 并对电子收费和人工收费共存系统的交通流特性进行了分析和讨论.

关键词: 元胞自动机, 电子收费系统, 人工收费系统, 数值模拟

PACC: 0550

1. 引言

近年来, 交通问题已引起了广泛的注意^[1-9]. 基于各种交通流模型的模拟, 人们对交通问题的认识更为深刻. 然而, 交通流涉及到多自由度, 高速公路的交通更是车辆之间强烈相互作用的多体系统, 给模拟工作带来了意外的艰巨性. 元胞自动机由于其独特的优越性被广泛应用于交通流研究. 我国目前正值高速公路建设高峰, 国家对公路的投入逐年加大. 随着我国公路事业的发展, 解决收费站口人工收费排队等待的交通“瓶颈”问题和其他日益增长的交通需求引起了社会与交通管理部门的广泛关注.

目前发达国家普遍采用电子不停车收费 (electronic toll collection, ETC) 技术, 不仅缓解了收费站交通堵塞, 而且减少了环境污染. ETC 方式是目前世界上最先进的路桥收费方式. ETC 技术是通过安装在车辆挡风玻璃上的车载电子标签与在收费站 ETC 车道上的微波天线之间的微波专用短程通讯, 利用计算机联网技术与银行进行后台结算处理, 从而达到车辆通过路桥收费站不需停车而能交纳路桥费的目的新型收费技术. ETC 系统允许车辆高速 (≤ 160 km/h) 通过, 大大提高了公路的通行能力.

我国幅员辽阔, 地区差异显著, 各省市的公路收费方式不尽相同. 国内虽然新建了一些不停车收费

站, 但是常在收费站的前方安装对无车载电子标签的车辆进行人工收费的警示标志牌和检测设备. 一旦发现无车载电子标签的车辆进入时, 改由人工进行现场收费并放行. 这种方法, 一方面, 由于部分车辆接受人工收费, 使得正常车辆通行受阻; 另一方面, 由于不停车收费车辆的通行速度快, 一旦客户增加、交通流量增大时, 交通事故非常容易发生, 造成正常的收费通行秩序混乱.

本文着重研究传统人工收费 (manual toll collection, MTC) 方式的保留对交通的负面影响, 指出不同付费方式的车辆进入收费站时应分道行驶, 分道付费的必要性. 这对于改善收费站口收费通行秩序, 有效缓解高速公路收费处车辆的堵塞状态具有实际的指导意义.

2. ETC 和 MTC 系统的交通流模型

在本文的模型中, 高速公路的车道被视为长度为 L 的一维离散格点链, 每一格点在每一时刻或为空或被一辆车占据. 考虑车辆付费方式的差异, 车辆被分为两类: 一类是电子付费车辆, 对应于 ETC 系统; 另一类是现场付费车辆, 对应于 MTC 系统.

2.1. 电子付费车辆的演化规则

由于 ETC 系统允许车辆高速 (≤ 160 km/h) 通

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 10362001, 10562001, 70371067) 资助的课题.

[†] E-mail: zhuliuhua421@sina.com

[‡] 通讯联系人.

过,因此车辆在经过收费站时,既不需要减速,更不需要停车.以 V_{\max} 表示车辆行驶的最大速度,以 $v_i(t)$, $X_i(t)$ 和 $d_i(t)$ 分别表示第 i 辆车在 t 时刻的速度、位置及其与前车之间的空格点数,用刹车概率 p 表示以一定的概率随机减速.电子付费车辆的状态演化由下列四个过程构成^[10]:

(1) 确定性加速:

$$v_i(t+1/3) = \min(v_i(t) + 1, V_{\max});$$

(2) 确定性减速:

$$v_i(t+2/3) = \min(v_i(t+1/3), d_i(t));$$

(3) 随机减速:

$$v_i(t+1) = \max(v_i(t+2/3) - 1, 0), \text{以概率 } p \text{ 发生};$$

(4) 位置更新:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + v_i(t+1).$$

其中相邻车辆间空格点数 $d_i(t) = X_{i+1}(t) - X_i(t) - 1$.

2.2. 现场付费车辆的演化规则

由于是现场付费,因而车辆进入收费站区必须先减速.根据道路交通安全法的相关规定:警告标志牌通常设置在 MTC 站来车方向 150 m 以外,且规定车辆进入收费站区车速不超过 30 km/h.到达 MTC 站后,驾驶员通过停车进行现金交易,等候零钱和票据.这一过程需要驾驶员在收费站滞留一定的时间 T_w ,现场付费车辆的状态演化由下列过程构成:

(1) 速度演化:

若 $X_i(t) \geq X_{\text{warn}}$ 且 $X_i(t) < X_{\text{MTC}}$ 则

(a) 确定性加速:

$$v_i(t+1/3) = \min(v_i(t) + 1, V_{\max}^*);$$

(b) 确定性减速:

$$v_i(t+2/3) = \min(v_i(t+1/3), d_i(t));$$

(c) 随机减速:

$$v_i(t+1) = \max(v_i(t+2/3) - 1, 0), \text{以概率 } p \text{ 发生}.$$

若 $X_i(t) = X_{\text{MTC}}$ 且 $t_s < T_w$ 有

$$v_i(t+1) = 0; t_s = t_s + 1;$$

否则

(a) 确定性加速:

$$v_i(t+1/3) = \min(v_i(t) + 1, V_{\max});$$

(b) 确定性减速:

$$v_i(t+2/3) = \min(v_i(t+1/3), d_i(t));$$

(c) 随机减速:

$$v_i(t+1) = \max(v_i(t+2/3) - 1, 0), \text{以概率 } p \text{ 发生}.$$

(2) 位置更新:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + v_i(t+1);$$

(3) 时间反馈:

若 $(X_i(t+1) > X_{\text{MTC}})$:

$$t_s = 0,$$

其中 X_{warn} 为警告标志牌位置; X_{MTC} 为 MTC 站位置; t_s 为停车等待时间的积累; 相邻车辆间空格点数 $d_i(t) = X_{i+1}(t) - X_i(t) - 1$.

模拟时采用周期性边界条件,取 $L = 5000$ cells 组成一维格点链,每一格点对应的实际道路长为 7.5 m,整个格点链对应的实际道路长为 37.5 km. ETC 站设置在道路的中间部位, MTC 站设置在 ETC 站后方 3 cells 处,警告标志牌与 MTC 站间距取 $\delta = 150$ m,相当于 20 cells.设道路上车辆总数为 N ,车辆的最大速度取 $V_{\max} = 5$ cell/s,对应的实际车速为 135 km/h; 车辆的另一最大速度取 $V_{\max}^* = 1$ cell/s,对应的实际车速为 27 km/h.其中车流全局密度 ρ ,平均速度 \bar{v} 和平均车流量 J 的计算公式如下:

$$\rho = \frac{N}{L},$$

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i(t),$$

$$J = \rho \bar{v} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N v_i(t).$$

3. 数值模拟与分析

数值模拟时,初始时刻现场付费车辆和电子付费车辆按一定的比例,以给定的全局密度 ρ 随机分布在一维格点链 L 上,其中现场付费车辆占总车辆的比例为 R .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.图中的每个点是 30 次运行的平均值.

3.1. 比例系数 R 对交通流的影响

图 1 为本文模型在 $p = 0.25$, $T_w = 3$ s 时,比例系数 R 取不同值得到的基本图.从图 1 可看出, R 的取值对模拟道路的通行能力影响很大.当现场付费车辆仅占车辆总数的 10% 时,对应的最大流量值比单纯的 ETC 系统的最大流量值下降了 35% 左右.随着现场付费车辆比例的增加,对应的最大流量值

逐渐减小.当现场付费车辆达到道路上车辆总数的一半时,对应的最大流量值也大约是单纯的 ETC 系统最大流量值的一半.因为在单车道上,若一辆电子付费车辆前方紧邻的车辆是现场付费车辆,由于现场付费车辆需要停车付费,后面紧邻的车辆尽管不需要停车,甚至不需要减速就可以通过收费站了,但是受单车道条件的限制,后面紧邻的车辆也被迫停车等候,这样导致了车道上的平均速度急剧下降,如图 2 所示.这样收费站口就出现了向后传播的交通堵塞,造成了整个道路的通行能力下降.

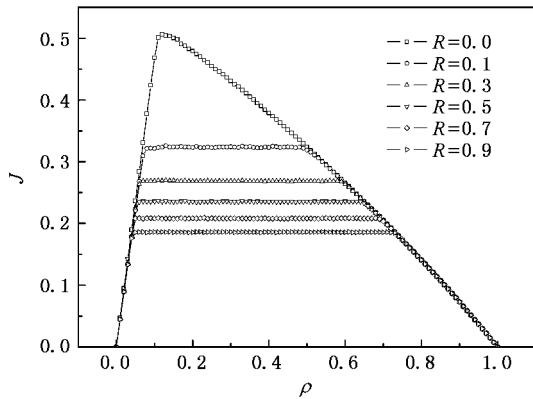


图 1 $p = 0.25, T_w = 3 \text{ s}$ 时的基本图

等密度区域,随着滞留时间 T_w 的延长,最大流量值逐渐减小,但滞留时间 T_w 对系统流量的影响不是非常显著,且中等密度区域都出现了流量平台,随着车流密度的增加,车辆之间的耦合程度加剧,平均速度减小,因而流量相对保持在一稳定的值.在高密度区域,车辆之间的平均间距较小,车辆时走时停现象经常发生,滞留时间 T_w 不再影响道路的通行能力.

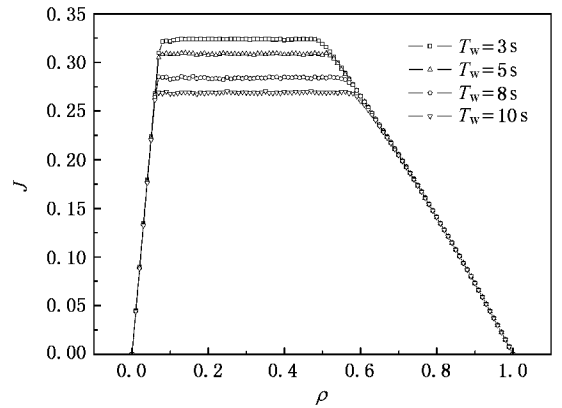


图 3 $p = 0.25, R = 0.1$ 时的基本图

3.3. 车流演化状态分析

为了具体的描述收费站口车流随车辆密度增加而出现由畅行相向宽幅运动阻塞相的演化过程,本文模拟了车辆运动过程中车辆位置与运动时间的关系图.取参数 $p = 0.25, T_w = 3 \text{ s}, R = 0.1$,模拟的空间位置为 2100—2600,时间为 50000—50400.

图 4—6 中黑点表示车辆,白色表示空白区域,图 4 为 $\rho = 0.06$ 时的车辆位置与时间的关系图,此时车道上车辆密度较低,在警告标志牌与 MTC 站以外的区域,车流处于畅行相,所有的车辆都以较高的

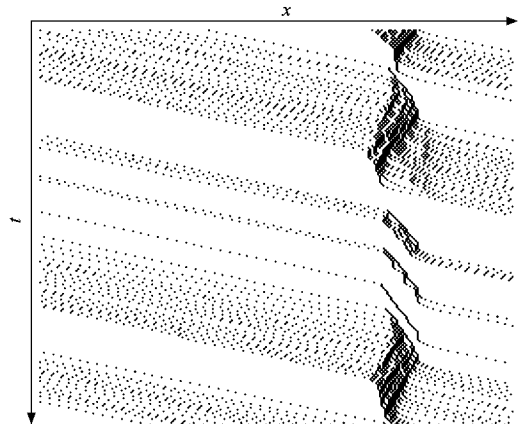


图 4 $\rho = 0.06$ 时的位置与时间的关系图

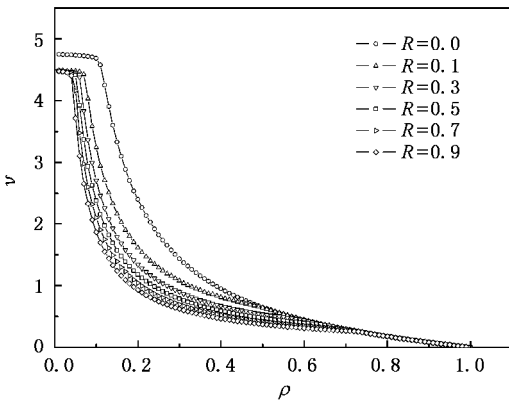


图 2 $p = 0.25, T_w = 3 \text{ s}$ 时的速度随密度变化曲线

3.2. 滞留时间 T_w 对交通流的影响

图 3 为本文模型在 $p = 0.25, R = 0.1$ 时, T_w 取不同值得到的基本图.观察图 3 可发现: T_w 的取值对低密度情形,即曲线的前端部分几乎没有任何影响,因为在这一阶段车辆之间的平均间距较大,在前一辆现场付费车辆的停车付费的过程中,后面的车辆不能及时跟上,不至于在收费站口形成堵塞;在中

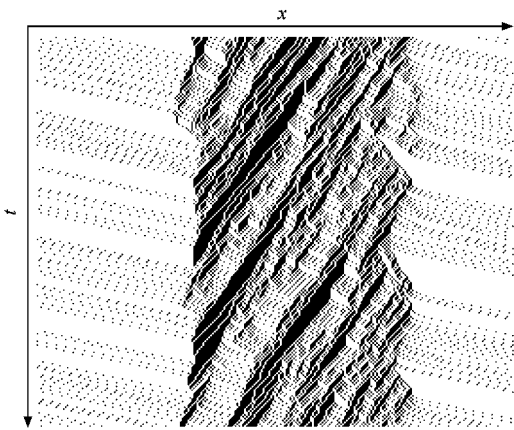


图 5 $\rho = 0.12$ 时的位置与时间的关系图



图 6 $\rho = 0.6$ 时的位置与时间的关系图

速度行驶,在警告标志牌与 MTC 站之间的区域,由于受现场付费车辆停车付费的影响,车辆的速度明显减小,收费站口甚至出现了零星的静止车辆并形

成了一些很小的堵塞区域,但是随着停车付费等待过程的结束,小的堵塞区域又很快消散了。

图 5 为 $\rho = 0.12$ 时的车辆位置与时间的关系图。此时在收费站口出现了大范围的局部阻塞,且向后传播。随着全局密度的增加,局部阻塞不再限制在警告标志牌与 MTC 站之间的区域,可以进一步向后蔓延。

图 6 为 $\rho = 0.6$ 时的车辆位置与时间的关系图,此时车道上车流密度较大,行驶车辆明显受到静止车辆的抑制,自由运动的进程显著减小,车辆时走时停现象经常发生,ETC 系统不再发挥其应有的功效。

4. 结 论

本文研究了传统 MTC 方式的保留对交通的负面影响。一方面,从数值模拟的结果来看,当现场付费车辆仅占车辆总数的 10% 时,对应的最大流量值比单纯 ETC 系统的最大流量值下降了 35% 左右。可见现场付费车辆与电子付费车辆混合收费,不仅减低了道路的通行能力,而且不能发挥 ETC 系统应有的功效,造成了资源的极大浪费。另一方面,现场付费车辆增加了停车次数和停车时间,从而增加了燃油消耗和汽车部件耗损,增加了运输成本,污染了人类生存环境。

目前,各国都把不停车收费系统作为智能运输系统(intelligent transport system, ITS)领域最先投入应用的系统来开发。我国交通部门已经把不停车收费系统的开发和应列为我国 ITS 领域首先启动的项目,并在“十五”期间列入交通科技的技术创新重点之一。

- [1] Helbing D, Schreckenberg M 1999 *Phys. Rev. E* **59** 2505
 [2] Lei L, Dong L Y, Dai S Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1711 (in Chinese) [雷 丽、董力耘、戴世强 2006 物理学报 **55** 1711]
 [3] Li K P, Gao Z Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 930
 [4] 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]
 [5] Maerivoet S, Moor B D 2005 *Phys. Rept.* **419** 46

- [6] Tang T Q, Huang H J, Xue Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4026 (in Chinese) [唐铁桥、黄海军、薛 郁 2006 物理学报 **55** 4026]
 [7] Liu Q X, Jin Z 2005 *Chin. Phys.* **14** 1370
 [8] Xiao S F, Liu M R, Kong L J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3328 (in Chinese) [肖世发、刘慕仁、孔令江 2006 物理学报 **55** 3328]
 [9] Huang D W, Huang W N 2002 *Physica A* **312** 597
 [10] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I France* **2** 2221

The influence of tollbooths on highway traffic^{*}

Zhu Liu-Hua^{1‡} Chen Shi-Dong²⁾ Kong Ling-Jiang¹⁾ Liu Mu-Ren^{1‡}

1)(*College of Physics and Electronic Engineering , Guangxi Normal University , GuiLin 541004 , China*)

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

(Received 12 January 2007 ; revised manuscript received 30 May 2007)

Abstract

Based on the Nagel-Schreckenberg traffic flow model ,the traffic flow models for electronic and manual toll collection systems are established. The fundamental diagrams of traffic flow are obtained under different parameters via computer simulation. Moreover , the characteristics of electronic and manual toll collection mixed system are analyzed and discussed.

Keywords : cellular automaton , electronic toll collection system , manual toll collection system , numerical simulation

PACC : 0550

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10362001 , 10562001 , 70371067).

[†] E-mail : zhuliuhua421@sina.com

[‡] Corresponding author.