

智能交通系统的元胞自动机交通流模型^{*}

葛红霞^{1)†} 祝会兵^{1)‡} 戴世强¹⁾

¹⁾上海市应用数学和力学研究所, 上海大学, 上海 200072)

²⁾宁波大学建筑工程与环境学院, 宁波 315211)

(2004 年 11 月 12 日收到, 2005 年 3 月 1 日收到修改稿)

在 Nagel-Schreckenberg (NS) 模型的基础上, 提出一种可应用智能交通系统 (ITS) 信息的新的交通流元胞自动机模型. 其中考虑了有效间距及刹车灯的作用, 并引入了可变安全间距的新概念. 数值模拟表明: 对于这种改进的 ITS 元胞自动机模型, 道路交通量有了显著提高, 体现了智能交通的优越性——有效地扩大交通流量, 减少阻塞生成. 当考虑快车和慢车的混合交通流时, 发现即使少量的慢车也会导致交通流量大幅度下降, 说明了严格实施快车道行驶的必要性.

关键词: 交通流, 智能交通系统 (ITS), 元胞自动机模型, 刹车灯, 可变安全间距

PACC: 0550, 0520

1. 引 言

交通系统是由人、车、路和环境构成的大系统, 具有复杂性、动态性和随机性^[1]. 交通流理论研究的目的在于建立能描述实际交通一般特性的交通流模型, 揭示制约交通流动的基本规律, 从而为交通系统的规划、设计建设和控制系统提供理论依据. 交通流建模大体分两类: 宏观模型和微观模型. 宏观模型将交通流看作由大量车辆组成的可压缩流体介质, 研究车辆集体的综合平均行为, 而不考虑单个车辆的运动特性. 微观模型则是在分析单个车辆在相互作用下的个体行为的基础上描述交通流特性^[2]. 元胞自动机模型是在 20 世纪 80 年代末提出, 90 年代得到迅速发展的一种微观交通流模型. 由于它的简单性和易于计算机操作, 特别是易于实现并行计算, 越来越广泛地应用于交通模拟^[3-10].

最重要的元胞自动机模型是由 Nagel 和 Schreckenberg 于 1992 年提出的 NS 模型^[3]. NS 模型尽管简单, 却可以描述一些实际交通现象, 并应用于美国联邦公路运输局的 TRANSIMS 项目^[11]以及交通联机模拟系统^[12]. 但用 NS 模型所作的数值模拟中, 最大交通流量小于实测数据^[13], 图 1 为在加利福尼亚某条公路上 6 分钟内的实测数据取平均而得

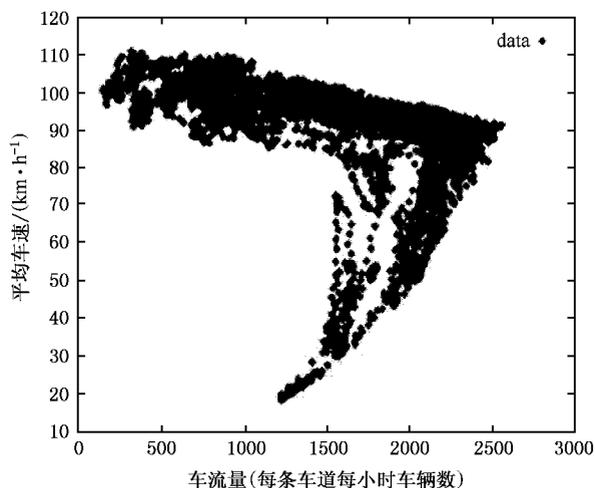


图 1 在加利福尼亚某条公路上实测得到的流量-平均速度关系图

到的流量与平均速度的关系图, 图 2 为 NS 模型在同样的条件下数值模拟得到的流量与平均速度的关系图. 比较两者的最大流量可发现由 NS 模型模拟出的最大流量 1700 辆/h, 远小于实测结果 2500 辆/h, 并且 NS 模型不能发现在临界点附近存在的亚稳态现象, 说明该模型车辆演化规则尚不能尽如人意. 在 NS 模型中, 道路被划分为离散的格子 (即元胞), 每个元胞或者是空的, 或者被一辆车占据, 每辆车的速度经过无量纲化可以取 $0, 1, 2, \dots, v_{\max}, v_{\max}$ 是最大

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 19932020, 10202012) 和教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20040280014) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: mocyl1109@163.com.

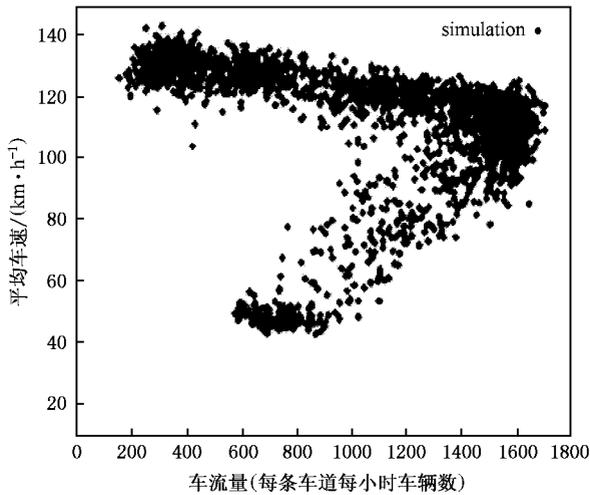


图2 元胞自动机模型数值模拟得到的流量-平均速度关系图

速度. 在 $t \rightarrow t+1$ 的过程中, NS 模型车辆状态演化的并行更新规则如下:

- (1) 加速: $v_n \rightarrow \min(v_n + 1, v_{\max})$;
- (2) 减速: $v_n \rightarrow \min(v_n, d_n - 1)$;
- (3) 以概率 p 随机减速: $v_n \rightarrow \max(v_n - 1, 0)$;
- (4) 位置更新: $x_n \rightarrow x_n + v_n$.

其中 v_n, x_n 分别表示第 n 辆车的速度和位置, $d_n = x_{n+1} - x_n - 1$ 表示第 $n+1$ 辆车和第 n 辆车的间距. 随机慢化步用来描述实际交通中的随机因素. 在 NS 模型车辆状态演化的并行更新规则基础上, 近年来又有一些学者对 NS 模型作了改进, 先后提出随机延迟刹车的 VDR 模型^[14], T^2 模型^[15] 和 BJH 模型^[16]. 改进的模型主要针对静止车辆与运动车辆的延迟刹车概率不同, 引进慢启动规则. 模拟结果表明随机延迟刹车概率对交通流状况影响很大, 并且能用来揭示亚稳态及相分离等交通非线性现象. 下面我们给出 NS 模型、VDR 模型和 T^2 模型分别采用的有效延迟刹车概率^[17]

NS 模型 $P = \text{常数}$

$$\text{VDR 模型 } P_1 = \begin{cases} \min(P + P_{\text{VDR}}, 1) & v_n = 0 \\ P & \text{其他} \end{cases}$$

$$\text{T}^2 \text{ 模型 } P_2 = \begin{cases} \min(P + P_{\text{T}^2}, 1) & v_n = 0 \\ P & \text{其他} \end{cases}$$

NS 模型的慢化概率是常数, VDR 模型和 T^2 模型都是 NS 模型的简单推广. 在 VDR 模型和 T^2 模型中仅对速度为零的车辆使用慢启动, $P_{\text{VDR}}, P_{\text{T}^2}$ 是相应模型的概率, 而对其他不为零速度的车辆按 NS 模型的慢化概率刹车.

最近 Knosp 等人提出了 BL (Brake Light) 模型^[18,19], 为了更切实际地描述高速公路上车辆行驶状况. 在实际交通中, 驾驶员通常会集中精力观察与前车的车间距, 同时还会关注前车的运动状况, 是加速、减速或是匀速行驶. BL 模型中考虑了车辆之间的有效间距, 在动态过程中决定当前车速, 更加符合实际交通状况.

随着社会文明化程度不断提高, 人们对交通的需求也与日俱增, 与此同时智能交通运输系统 (简称 ITS) 应运而生, 它是在交通流基础理论研究的前提下, 将先进的信息技术、数据通信技术、电子控制技术以及计算机处理技术有效的综合应用于地面交通管理体系, 从而建立起一种大范围、全方位发挥作用的, 并且实时、准确、高效的交通管理体系^[2]. 驾驶员通过反馈回来的信息, 有助于自己调节当前的车速, 并且有助于增大交通流量, 减少交通阻塞的形成.

本文基于应用 ITS 信息的考虑, 在 NS 模型的基础上提出了一个改进的元胞自动机模型, 并且考虑了刹车灯的有效作用及引进了可变安全间距的概念^[17]. 通过数值模拟, 将改进的 ITS 元胞自动机模型以及改进模型的非预期效应与 NS 模型作了比较. 同时考虑了有两种不同车种混合对交通流的影响.

2. ITS 元胞自动机模型

在给出模型之前, 简要叙述一下 NS 的单车道模型. 用长度为 L 的一维离散的格点链来表示一条单向车道, 每个格点上可能有 $v_{\max} + 2$ 个状态: 空格 (表示无车), 或有一辆以速度 v 运动的车, 其中 $v \in \{0, 1, \dots, v_{\max}\}$, v_{\max} 表示车辆可以达到的最大速度. ITS 元胞自动机模型在车辆更新规则中满足三方面条件:

(1) 低密度时, 车辆尽可能的以最大速度行驶, 静止车辆的启动加速度相对运动车辆的加速度要小, 可以通过 ITS 掌握前方车辆动态信息, 从而提高车速, 在安全行驶的前提下减小车间距;

(2) 中密度时, 车辆之间相互影响, 驾驶员需要注意前车的刹车灯在前一时刻的状态;

(3) 高密度时, 驾驶员根据反馈信息调节车速保持安全间距行驶, 避免撞车.

下面我们引进随机慢化函数 P :

$$P(v_n(t), d_n(t), b_{n+1}(t)) = \begin{cases} P_1 & b_{n+1}(t) = 1 \text{ 和 } v_n(t) > d_n(t) \\ P_2 & b_{n+1}(t) = 0 \text{ 和 } v_n(t) > d_n(t) \\ P_3 & v_n(t) = 0 \end{cases}$$

其中 $v_n(t), x_n(t)$ 分别表示第 n 辆车在 t 时刻的速度和位置, $d_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t) - 1$ 表示车间距, $b_n(t) = 1(0)$ 表示第 n 辆车刹车灯是开(关), P_1, P_2, P_3 是针对不同条件下的概率. 定义有效间距为

$$d_{n+m-1}^{(eff)} = d_{n+m-1} + \max(v_{n+m}(t+1) - \text{gap}_{secm}, 0).$$

其中 m 表示在当前车前方的第 m 辆车, $\text{gap}_{secm} = \text{round}(\tau v_{n+m-1}(t))$ (round 为四舍五入) 表示前方第 m 辆车的安全间距, 保证了安全行驶, 前后两辆车的安全间距与后车的速度有关, 即跟驰车的车速越大, 所需的安全距离也越大. 在文中 m 取 1, 2, 3, 分别对应着当前车前方的第一辆车, 第二辆车和第三辆车. τ 定义为速度调节因子, 我们通过数值模拟^[17]确定了当 $v_{\max} = 5$ 时以取 $\tau = 0.5$ 为宜.

ITS 元胞自动机模型的演化规则包括如下五个步骤:

(1) 确定随机慢化函数参数

$$P : P = P(v_n(t), d_n(t), b_{n+1}(t)), b_n(t+1) = 0.$$

(2) 加速

如果 $(b_{n+1}(t) = 0, b_n(t) = 0)$,

$$\text{则 } v_n(t+1) = \min(v_n(t) + 1, v_{\max}).$$

(3) 减速规则

$$\begin{aligned} v_n(t+1) &= \min(v_n(t), d_n^{(eff)}), \\ v_{n+1}(t+1) &= \min(v_{n+1}(t), d_{n+1}^{(eff)}), \\ v_{n+2}(t+1) &= \min(v_{n+2}(t), d_{n+2}^{(eff)}), \\ v_{n+3}(t+1) &= \min(v_{n+3}(t), d_{n+3}), \end{aligned}$$

如果

$$(v_n(t+1) < v_n(t)),$$

则 $b_n(t+1) = 1.$

(4) 随机慢化: 如果 $(\text{rand}() < P)$,

则 $v_n(t+1) = \min(v_n(t+1) - 1, 0),$

$$b_n(t+1) = 1.$$

(5) 位置更新

$$x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1).$$

第一步根据前车刹车灯的状态 $b_{n+1}(t) = 1(0)$, 当前车的车速 $v_n(t)$ 以及两车间的车间距 $d_n(t)$ 来决定随机慢化参数 P . 接下来的三步计算第 n 辆车在下一时刻的车速 $v_n(t+1)$. 第二步表示车辆状态

在非刹车情形下将会加速行驶, 直到最大限速. 如果前车和当前车的刹车灯均是关着的, 当前车就加速行驶, 如果车间距足够大, 当前车可以达到 v_{\max} . 第三步是为了保证安全性, 应用减速规则. 通过智能交通系统提供的信息, 驾驶员可以收到前方车辆的信息, 比如它们的速度和位置, 考虑了与前车的有效间距, 这样即使缩短与前车的间距也能保证安全行驶. 如果当前车速减慢, 刹车灯亮, 即 $b_n(t+1) = 1$. 下一步引入了由第一步决定的随机慢化概率 P , 某些车辆会进行随机慢化. 刻画了由于驾驶员具有主观能动性, 谨慎的司机会刹车, 激进的司机则不会. 最后车辆位置得到更新, 并初始化刹车灯状态.

3. 数值模拟与结果分析

数值模拟的每个格点长度为 7.5m, 单位时间步长 $\Delta t \approx 1s$. 本文中车道由 1000 个格点表示, 对应实际道路长度 $L = 7.5km$. 最大速度 $v_{\max} = 5$ (无量纲单位, 下同), 对应的实际车速为 $v_{\max} = 135km/h$, N 是分布在 L 上的车辆总数. 采用周期性边界条件, 则车辆密度为 $\rho = N/L$, t 时刻空间平均速度定义为: $V(t) = (1/N) \sum_{i=1}^N v_i(t)$, 平均车流为 $q = \rho V$. 在进行模拟时, 每次运行取 2×10^4 时间步长, 开始的半数时间步不进行统计, 以便消除暂态影响, 将后半段时间步中得到的速度进行时间平均, 就得到每一次运行的平均速度 V . 取样本数为 30, 即基本图上的每一点是 30 次运行的平均值.

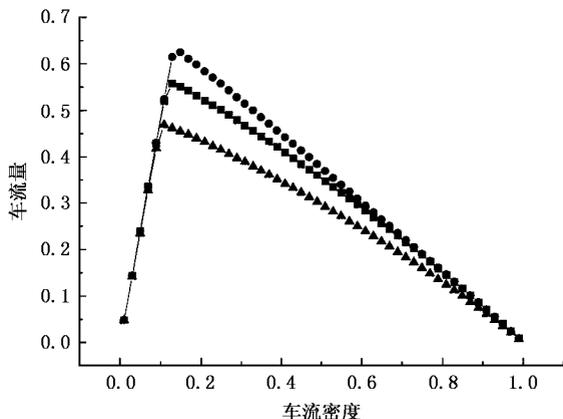


图3 改进模型与元胞自动机模型的对比. 圆形点, 方形点和三角形点分别对应于 ITS 元胞自动机模型、非预期效应模型和元胞自动机模型.

对于一维交通流模型,人们最关心的是:一条公路上的车辆密度应该维持多大才能获得最大的车流量?车流量或车流平均速度关于车辆密度的函数关系是什么?为了比较 ITS 元胞自动机模型、非预期效应模型即在改进模型中未考虑 ITS 效应的模型与 NS 元胞自动机模型,我们用这三种模型在一定的随机慢化概率条件下进行了数值模拟,图 3 给出了所获得的基本图,其中前两者的概率为 $P_1 = 0.94, P_2 = 0.5, P_3 = 0.2$ (P_1 的数据可参考文献 [20]),后者为 $P = 0.3$. 在最简单的 NS 元胞自动机模型的基础上,改进的模型最大车流量达到了 2250 辆/h,对应车辆密度为 0.15,与 NS 模型相比,我们的模拟结果与实测数据更为接近. 对于 ITS 元胞自动机模型,若不考虑 ITS 的预期效应,其他条件均不变,由流量-密度曲线显示,考虑 ITS 之后,流量增长了 11.25%,说明 ITS 对改善整个车流状况有着重要的作用.

先进的交通流理论的应用以及先进的交通工程与技术可以产生重大的经济效应. 20 世纪 90 年代,纽约市政府原拟修建通往新泽西的新隧道,但经过合理的交通建模和分析,调整了交通控制和管理系统,使交通量增加 20%,缓解了交通压力,并取消了新隧道的修建. 此处也有同样的问题,如果由先进的 ITS 作为驾驶员的“军师”,政府同样可以减少数以亿计的财政开支去修建新公路,非但如此,出行人员可以更便捷的到达自己的目的地,极大地缩短出行时间. 可见交通科学对交通工程有着重要的指导作用.

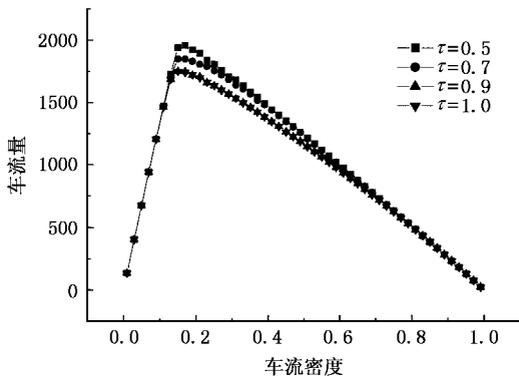


图 4 在一种改进的元胞自动机模型中 $v_{\max} = 4$ 时,对应不同的速度调节因子 τ 得到的基本图

考虑单一车速 $v_{\max} = 5$ 之后,在车辆的初始分布中随机地加入一些慢车 $v_{\max} = 4$,其中慢车占车辆总

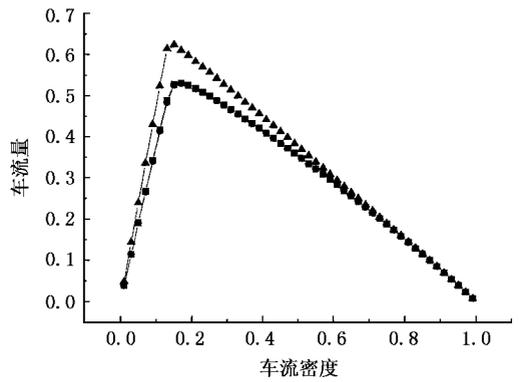


图 5 在 ITS 元胞自动机模型中比较单一车流 $v_{\max} = 5$ (三角形表示)和混合车流 $v_{\max} = 4.5$ 对应的慢车概率分别为 0.1 (0.8) (圆,方块表示)的基本图

数分别为 10% 和 80%. 在给出混合车辆的 ITS 元胞自动机模型之前,我们首先要确定参数速度调节因子 τ 的值. 在文献 [17] 中,通过一种改进的元胞自动机模型,我们确定了 $v_{\max} = 5$ 对应的 $\tau = 0.5$. 用同样的模型,在相同的条件下,我们得到了 $v_{\max} = 4$ 时 τ 在不同取值下得到的基本图(见图 4). 从图 4 中可以看到,随着 τ 的增大,最大车流量逐渐减小,当流量达到 1750 辆/h 基本稳定,对应的 τ 值为 0.9 (取临界值). 从车速和车流量的对比我们认为 $\tau = 0.9$ 是较为理想的数值. 从直观上也可以想象,慢车和快车在 τ 值相同的情况下,前者的安全间距小于后者. 但是现实交通中,慢车的安全间距不能过小,因为慢车的减速或加速需要的时间比快车要长,即慢车的反应时间更长,所以在 v_{\max} 相对小的情况下, τ 的值要大,这样才能保证车辆安全行驶. 图 5 给出了 ITS 元胞自动机模型在单一车速 $v_{\max} = 5$ 和混合车速 $v_{\max} = (4-5)$ 下的基本图. 混合车辆中模拟了慢车比例分别为 0.1 和 0.8 的情形. 从图 5 中可以观察到,不同比例的混合车辆在基本图上反映出的变化微乎其微. 在快车中加入慢车,即使比率很小,也会极大地降低整个交通流量,因此在实际交通中,经常设置快速车道,就是为了要扩大流量,减少慢车带来的负面效应. 可见,混合车辆行驶中慢车所占比例倒不起主要作用,但只要慢车存在,且与快车相混合,就确实会影响整个交通状况. 目前国内高速公路上,慢车司机常常漠视快慢车分流的规则,这就是快速干道上交通拥堵的原因之一. 要改变这种状况,必须加大执行交通法规的力度.

4. 结 论

本文提出了一种基于 ITS 的元胞自动机新模型,即 ITS 元胞自动机模型.模型中包括了刹车灯、可变安全间距以及慢启动等现实交通影响因素.文

中还分析了快车和慢车通行的混合交通流.数值模拟表明:ITS 元胞自动机模型能够有效大幅度增加道路容量,ITS 是缓解交通拥堵行之有效的方法之一.混合车流的基本图显示只要有慢车的加入,不论比例大小,都会极大程度地影响整个交通流量,因此有必要严格执行快慢车分流的规则.

-
- [1] Li Z M 2000 *Traffic Engineering* (Beijing : People 's Transportation Press)(in Chinese)[李作敏 2000 交通工程学 北京 :人民交通出版社]
- [2] Dai S Q and Xue Y 2004 *Traffic Flow and Grand Flow* , In :Tang X W *et al* eds.(Hangzhou : Zhejiang University 's Press) p66 (in Chinese)[戴世强、薛 郁 2004 交通流与颗粒流(见 :唐孝威等主编 杭州 :浙江大学出版社)p66]
- [3] Nagel K and Schreckenberg M 1992 *J. Physique I France* **2** 2221
- [4] Xue Y , Dong L Y and 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]
- [5] Dong L Y , Xue Y and Dai S Q 2002 *Appl. Math. Mech.* **23** 331 (in Chinese)[董力耘、薛 郁、戴世强 2002 应用数学和力学 **23** 331]
- [6] Knospé W , Santen L , Schadschneider A *et al* 2004 *Phys. Rev. E* **70** 016115
- [7] Wang B H , Kuang L Q and Hui P 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]
- [8] 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]
- [9] Lei L , Xue Y and 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]
- [10] Wang L and Wang B H 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 808 (in Chinese) [王 雷、汪秉宏 1999 物理学报 **48** 808]
- [11] Nagel K , Stretz P , Pieck M *et al* 1997 TRANSIMS traffic flow characteristics. PREPRINT October 21
- [12] OLSIM , Online Simulation of the Inner City of Duisburg , Physics of Transport and Traffic University of Duisburg [<http://traffic.comphys.uni-duisburg.de>]
- [13] Wagner P 1996 In : Wolf D E *et al* eds. *Traffic and Granular Flow* , (Singapore :World Scientific)p193
- [14] Barlovic R , Santen L , Schadschneider A *et al* 1998 *Europ. Phys. J. B* **5** 793
- [15] Benjamin S C , Johnson N F and Hui P M 1996 *J. Phys. A* **29** 3119
- [16] Takayasu M and Takayasu H 1993 *Fractals* **L** 860
- [17] Xue Y 2002 *Shanghai University doctoral dissertation* (in Chinese) [薛 郁 2002 上海大学工学博士学位论文]
- [18] Knospé W , Santen L , Schadschneider A *et al* 2000 *J. Phys. A : Math. Gen.* **33** L477
- [19] Knospé W , Santen L , Schadschneider A *et al* 2002 *Phys. Rev. E* **65** 015101
- [20] Ge H X , Dong L Y , Lei L *et al* 2004 *J. Shanghai Univ.* **8** 1

Cellular automaton traffic flow model considering intelligent transportation system^{*}

Ge Hong-Xia^{1)†} Zhu Hui-Bing¹⁾²⁾ Dai Shi-Qiang¹⁾

¹⁾ *Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China*

²⁾ *Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China*

(Received 12 November 2004 ; revised manuscript received 1 March 2005)

Abstract

A novel cellular automaton model for traffic flow on highway is proposed considering Intelligent Transportation System (ITS). Based on the Nagel-Schreckenberg model (NS for short), it includes effective gap and brake light. Moreover, a novel concept about the variable security gap is introduced. The simulation shows that the road capacity of the modified ITS cellular automaton model is higher than the measured data on certain highway, further indicating the important role of ITS enlarged traffic flow and suppressed traffic jam. The mixed traffic flow related to two different vehicles' velocity is studied. The simulation shows even few slow vehicles will lead to drastic decrease of traffic flow, which demonstrates the necessity to implement strictly special fast lane.

Keywords : traffic flow, intelligent transportation system (ITS), cellular automaton model, brake light, variable security gap

PACC : 0550, 0520

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 19932020, 10202012) and the Specialized Research Fond for the Doctoral Program Higher Education (Grant No. 20040280014).

[†] Corresponding author. E-mail : mocv1109@163.com.