

交通灯控制下城市主干道双车道多速元胞自动机交通流模型研究^{*}

彭 麟 谭惠丽 吴大艳 刘慕仁[†] 孔令江

(广西师范大学物理与信息工程学院, 桂林 541004)

(2003 年 7 月 18 日收到 2003 年 11 月 4 日收到修改稿)

提出一个城市主干道双车道多速元胞自动机交通流模型, 此模型采用开放性边界条件, 在考虑诸多实际因素影响情况下, 研究了主干道中车站的设置、交通灯绿信比对车流量和车流速度的影响. 计算机模拟所得到的基本图(流量-速度图)能较好地反映在交通灯控制下城市主干道交通流真实状况.

关键词: 元胞自动机模型, 交通流, 主干道

PACC: 0550

1. 引 言

近年来, 一维元胞自动机交通流模型得到了广泛地研究^[1-7]. 然而在现实交通系统中大多是纵横交错的二维交通网络.

1992 年 Biham, Middleton 和 Levine 提出一个理想化二维元胞自动机交通流模型, 称为 BML 模型^[8]. Biham 利用此模型模拟了城市网络的交通现象, 研究了交通阻塞问题, 模拟结果表明当车辆的密度大于某一临界值时, 将会发生拥挤甚至阻塞; Nagtani^[9] 使用非常简单的规则, 研究了由事故车辆引起的交通阻塞的传播, 从数量上得出了阻塞传播与时间的关系; Cuesta 等^[10] 引入转向指数, 研究了能够改变车辆运动方向的元胞自动机模型; Huang 等人^[11] 提出了一个二维主干道交通流模型, 用计算机模拟方法对影响主干道上车流速度及流量的因素进行分析, 研究了城市交通系统中自组织合作现象. Tan 等人^[12] 用元胞自动机模型模拟二维交通流, 通过交叉口红绿灯的设置, 研究了交通激波的形成和传播. 这些研究, 对城市交通网络的合理设置和管理提供了有价值的参考. 但文献[11, 12] 是在周期性边界条件下, 仅考虑主干道为单车道城市交通系统的

情况. 文献[13] 提出一个高速公路双车道元胞自动机模型模拟了开放边界条件下的车流运动, 本文在文献[11, 12] 的基础上将文献[13] 提出的模型推广到交通灯控制下城市主干道双车道多速元胞自动机交通流模型中, 考虑车站位置设置、交通灯绿信比等因素对车流的影响. 通过选择模型的某些参数进行数值模拟, 为优化车站位置设置和交通灯的控制提供依据.

2. 城市主干道双车道元胞自动机交通流模型

模型如图 1 所示, 系统由一条主干道和 N 个等距离的干道与支道的交叉口组成. 主干道由两条车道组成, 分别记为 1 车道和 2 车道. 每条车道视为长度 L 的一维离散格点链, 格点链上每格点或为空或只能被一辆车占据. 主干道与支道的交叉口设置有红绿灯, 用来控制交叉口处的车辆运动, 红绿灯周期由 T 个时步组成. 在 2 车道侧各路段之间各设有一个停靠车站, 其车站设置在距本段路后方交叉口位置 K 处. 1 车道(2 车道)自初始端注入速度为 $V_{1,\max}$ ($V_{2,\max}$) 的车子, 由于车辆之间相互作用的影响, 车道上的车辆速度分布为 $0 \sim V_{j,\max}$ ($j = 1, 2$) 的值. 每

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 20062001, 70371067)、广西自然科学基金(批准号: 2007017)、教育部科学技术重点研究项目(批准号: 教技司[2002]97 号)、广西“新世纪百千万人才工程”专项基金资助项目(批准号: 桂人函[2002]629 号)资助的课题.

[†] E-mail: jmlmr@mailbox.gxnu.edu.cn, Tel: 0773-5829863.

一条车道上的车辆自左向右运动并根据规则进行速度、位置的更新.

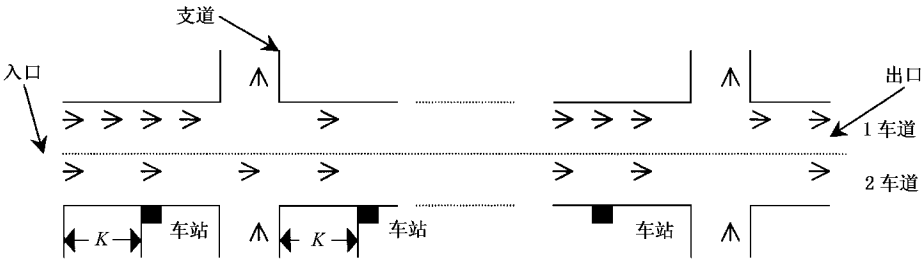


图 1 双车道元胞自动机交通流模型

将每一演化时步更新过程分成两个子过程:第一个子过程为各车道上的车辆按转道规则进行车道转换,第二个子过程为转道后的车辆在各自车道上按规则运行.在转道过程中,转道规则满足超车原则和安全原则.

车辆的转道规则为:

1) 1 车道超车原则为

$$\text{gap}_1 < V_{\text{hope}},$$

安全原则

$$\text{gap}_1 < \text{gap}_{\text{other}2},$$

$$V_{\text{back}2} \leq \text{gap}_{\text{back}2}.$$

2) 2 车道超车原则为

$$\text{gap}_2 < V_{\text{hope}},$$

安全原则

$$\text{gap}_2 < \text{gap}_{\text{other}1},$$

$$V_{\text{back}1} \leq \text{gap}_{\text{back}1},$$

其中 V_{hope} 为司机的期望速度, $\text{gap}_1, \text{gap}_2$ 分别为 1, 2 车道当前车辆前面的空格数. $\text{gap}_{\text{other}2}$ 为 2 车道上对应于 1 车道当前车辆相应位置前面的空格数, $\text{gap}_{\text{other}1}$ 为 1 车道上对应于 2 车道当前车辆相应位置前面的空格数. $V_{\text{back}2}$ 为 2 车道上对应于 1 车道当前车辆相应位置后面近邻车辆的速度, $V_{\text{back}1}$ 为 1 车道上对应于 2 车道当前车辆相应位置后面近邻车辆的速度. 满足上述转道规则, 各车道上当前车辆则以一定概率 p_2 转道.

车辆的运行规则如下:

1) 更新所有车辆 $t + 1$ 时刻的速度分布

if

$$(V_{j,i}(t) \geq \text{gap}_{j,i}(t) + \Delta X_{j,i+1}(t))$$

$$V_{j,i}(t+1) = \begin{cases} \max(\text{gap}_{j,i}(t) + \Delta X_{j,i+1}(t) - 1, 0), & \text{以概率 } p_1, \\ \text{gap}_{j,i}(t) + \Delta X_{j,i+1}(t), & \text{以概率 } (1 - p_1), \end{cases}$$

(跟车 / 减速规则),

else

$$V_{j,i}(t+1) = \begin{cases} V_{j,i}(t), & \text{以概率 } p_1, \\ \min(V_{j,\text{max}}, V_{j,i}(t) + 1), & \text{以概率 } (1 - p_1), \end{cases}$$

(自由运动 / 加速规则).

2) 更新所有车辆的位置

$$X_{j,i}(t+1) = X_{j,i}(t) + V_{j,i}(t+1).$$

以上各式中, $V_{j,i}(t)$ 表示 j 车道上第 i 辆车在 t 时刻的速度; $V_{j,\text{max}}$ 表示 j 车道上车辆的最大速度, $\text{gap}_{j,i}(t)$ 表示 j 车道上第 i 辆车在 t 时刻与前方近邻车辆之间的空格数, 即

$$\text{gap}_{j,i}(t) = X_{j,i+1}(t) - X_{j,i}(t) - 1;$$

p_1 代表车辆具有的刹车概率; $\Delta X_{j,i+1}(t)$ 是相对位置,

$$\begin{aligned} \Delta X_{j,i+1}(t) &= X_{j,i+1}(t+1) - X_{j,i+1}(t) \\ &= V_{j,i+1}(t+1), \end{aligned}$$

即 j 车道上前方近邻车辆在第 $t + 1$ 时步前移的距离; $X_{j,i}(t)$ 表示 j 车道上第 i 辆车在 t 时刻的位置.

在交叉口设置的红绿灯对通过交叉口处的车辆进行控制. 红绿灯的周期由 T 个时步组成.

1) 主干道上交叉口近邻、次近邻车辆主要演化规则如下:

绿灯时步 车辆可移近、穿过交叉口或以一定概率 p_{out} 在交叉口处转向至支道上, 但最后一个绿灯时步作为警告时步, 车辆可穿过交叉口或在交叉口转向, 而不允许移近并占据交叉口.

红灯时步 车辆不容许转向、穿过或进入交叉口. 主干道交叉口处以概率 p_{in} 转入一辆车, 相当于车辆从支道转到主干道上.

2) 停靠车站处车辆的演化规则:

进入车站位置处的车辆按一定概率 p_3 停靠车站.

3. 计算机模拟与数值分析

主干道系统基本量的定义:定义 t 时刻车辆密度 $\rho(t) = N(t)/2L$,平均速度

$$\bar{V}(t) = \{1/N(t)\} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^{N_j(t)} V_{j,i}(t),$$

流量 $f(t) = \rho(t) \bar{V}(t)$,其中, $N(t)$ 是 t 时刻 1,2 车道上车辆总数, $V_{j,i}(t)$ 为 j 车道第 i 辆车 t 时刻的速度, $N_j(t)$ 为 j 车道 t 时刻的车辆总数,即 $N(t) = \sum_{j=1}^2 N_j(t)$.

各车道基本量的定义为:第 $j(j=1,2)$ 车道密度 $\rho_j(t) = N_j(t)/L$,平均速度

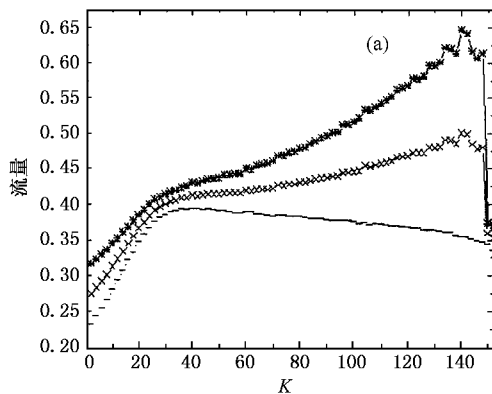
$$\bar{V}_j(t) = \{1/N_j(t)\} \sum_{i=1}^{N_j(t)} V_{j,i}(t),$$

流量 $f_j(t) = \rho_j(t) \bar{V}_j(t)$,并定义红绿灯周期为 $T = T_G + T_R$, T_G 为绿灯信号时间, T_R 为红灯信号时间,绿信比 $S = T_G/T$.

借鉴文献[1],一个格点所对应的实际道路长度为 3.75m,而每个时间步长 $\Delta t \approx 1s$,本文每条车道由 2000 个格点组成,对应的实际道路长度为 7.5km,1 车道与 2 车道具有相同的最大速度,即 $V_{1,max} = V_{2,max} = 3$,则对应的实际车速为 40.5km/h.演化时步取为 50000 步,从 30000 步开始取数据进行统计,即对后 $\tau = 20000$ 的值作统计平均,则

$$\rho = \frac{1}{\tau} \sum \rho_i,$$

$$V = \frac{1}{\tau} \sum V_i,$$



采用开放性边界条件,在下面给出的基本图上,每一个点代表 20 个样本的平均值.数值模拟结果如图 2—5 所示.

3.1. 车站位置的影响

图 2(a)和(b)为 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5, \beta_1 = \beta_2 = 0.6, N = 12$,各交叉口对主干道的转入转出概率 $p_{in} = p_{out} = 0.2$,刹车概率 $p_1 = 0.2$,转道概率 $p_2 = 0.8$,停靠车站的概率 $p_3 = 0.3$,红绿灯周期 $T = 100$ (其中 $T_G = 50, T_R = 50$) 时,车道上车站的位置设置对交通系统和各车道的车流量、车速带来的影响.基本图上横轴表示各段车道上车站所在位置距近邻交叉口的距离,其大小用 K 表示.从左到右随着坐标值 K 的增大,各段车道上车站位置远离后方近邻交叉口、靠近前方近邻交叉口.从图中可看出,系统和主干道各车道流量、速度随车站位置设置而变化,在 $K < 25$ 的情况下,即各路段上车站位置靠近后面近邻交叉口时,系统和各车道上的流量较小,且随 K 变大而增大.当 $K > 25$ 时,随着 K 的增大,1 车道的流量增大较快,而速度变化较平稳;2 车道由于车辆停靠车站的影响,流量较平稳,但速度下降较快.系统的流量缓慢增加,而速度也下降较快.当 $K > 140$ 时,系统和各车道流量和速度都有较大程度的减小.这表明各路段上车站距交叉口的的位置越近,系统和各车道的流量越小.这是因为,车站距后方交叉口较近,车辆停靠车站时影响了主干道入口处和支道上交叉口的车辆进入主干道,主干道上车辆的速度虽很大,但由于车辆密度很小而使得流量较小,车站距前方交叉口位置较近,车辆停靠车站时影响了主干道出

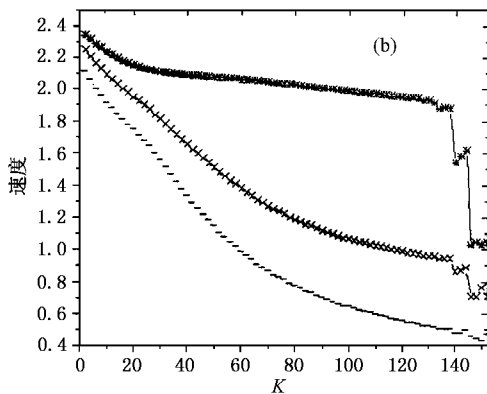
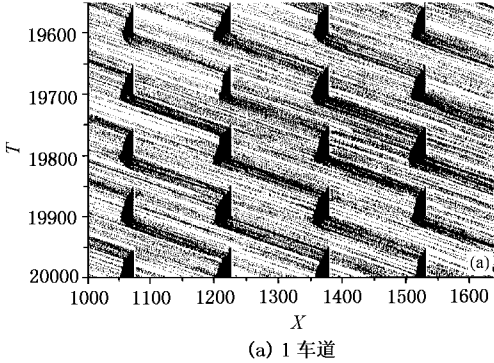


图 2 车流量、车流速度随车站位置变化的关系图(— × — system, — * — 1th, — o — 2nd) (a), (b)控制参数均为 $T = 100, S = 0.5, \alpha_1 = \alpha_2 = 0.5, \beta_1 = \beta_2 = 0.6, p_{in} = p_{out} = 0.2, p_1 = 0.2, p_2 = 0.8, p_3 = 0.3, N = 12, L = 2000$

口处和主干道上交叉口处的车辆驶出主干道,主干道上车辆密度较大而发生拥挤(速度很小)也使得流量减小.考虑到上下班城市主干道各时段的车流情况, K 的值大于 25 小于 140 时较适宜.

根据以上分析,图 3 模拟了在 $K = 125, T = 100, S = 0.5, N = 12, p_{in} = p_{out} = 0.2, p_1 = 0.2, p_2 = 0.8, p_3 = 0.3$ 时主干道局部时空二维图,其中横轴表示空间坐标位置,纵轴表示时间步,黑点代表车辆,白点代表空格点.从时空二维图可以看出,在 $\alpha_1 = \alpha_2 =$



$0.5, \beta_1 = \beta_2 = 0.6$ 的情况下,红灯的作用使得车辆在交叉口前排队而形成一定长度的堵塞带,随着时间的演化就形成了图中的黑色堵塞区域,明显地,2 车道(图(b))堵塞区域较大,故车辆密度较大.图 4 是与图 3 在相同情况下主干道系统各车道车辆密度分布图.各车道位置车辆的密度呈锯齿波分布.车辆自左向右运动,靠近交叉口处,密度迅速增加,这是因为红灯的控制交叉口前形成堵塞的缘故,而远离交叉口处,密度较小且趋于平缓.

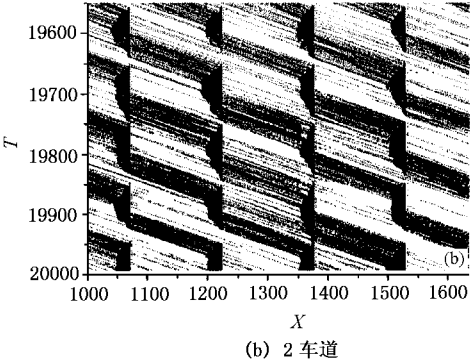


图 3 两车道时空演化图 (a),(b)控制参数均为 $T = 100, S = 0.5, \alpha_1 = \alpha_2 = 0.5, \beta_1 = \beta_2 = 0.6, p_{in} = p_{out} = 0.2, p_1 = 0.2, p_2 = 0.8, p_3 = 0.3, N = 12, L = 2000, K = 125$

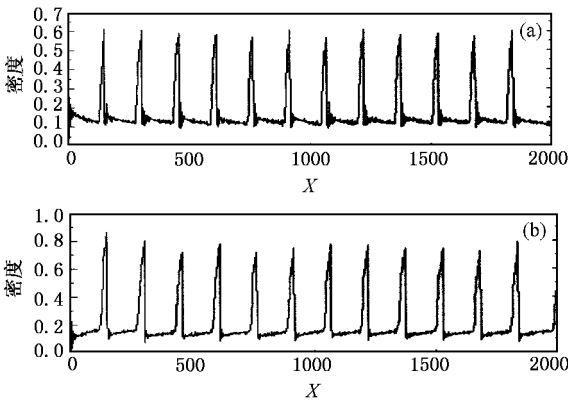


图 4 位置密度图 (a),(b)控制参数均为 $T = 100, S = 0.5, \alpha_1 = \alpha_2 = 0.5, \beta_1 = \beta_2 = 0.6, p_{in} = p_{out} = 0.2, p_1 = 0.2, p_2 = 0.8, p_3 = 0.3, N = 12, L = 2000, K = 125$ ((a)为 1 车道,(b)为 2 车道)

3.2. 绿信比的影响

图 5 为 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5, \beta_1 = \beta_2 = 0.6, p_{in} = p_{out} = 0.2, p_1 = 0.2, p_2 = 0.8, p_3 = 0.3, N = 12, K = 125$ 的情况下绿信比变化时的基本图.从图 5(a),(b)和(c)上看到,1 车道流量在 $S > 0.32$ 后,随绿信比增

大下降程度较大,2 车道由于车站的影响在 $S < 0.7$ 时流量一直增大,在 $S = 0.7$ 时达到最大值.系统在 $S = 0.32$ 附近达到最大流量后开始缓慢下降.系统和各车道的速度随绿信比增大而增大,密度随绿信比的增大迅速减小而后趋于平稳.因此,绿信比对主干道系统车流量有较大影响.特别是上班或下班车流高峰期时,短时期内将有大量的车辆涌入主干道或分散进入各支道,这时适当调整绿信比是保障主干道上车辆运行通畅的一个关键因素.考虑到主干道系统和各车道车流情况,在我们的模拟条件下,在 $S = 0.5$ 附近取值比较适宜,此时能保证整个系统和 1,2 车道都保持较大的流量.

4. 结 论

本文提出一个城市主干道双车道多速元胞自动机交通流模型,采用开放性边界条件,在考虑诸多实际因素影响情况下,研究了主干道交通中车站位置、绿信比对车流量和流速的影响.计算机模拟所得到的基本图能较好地反映在交通灯控制下城市主干道交通流真实情况.

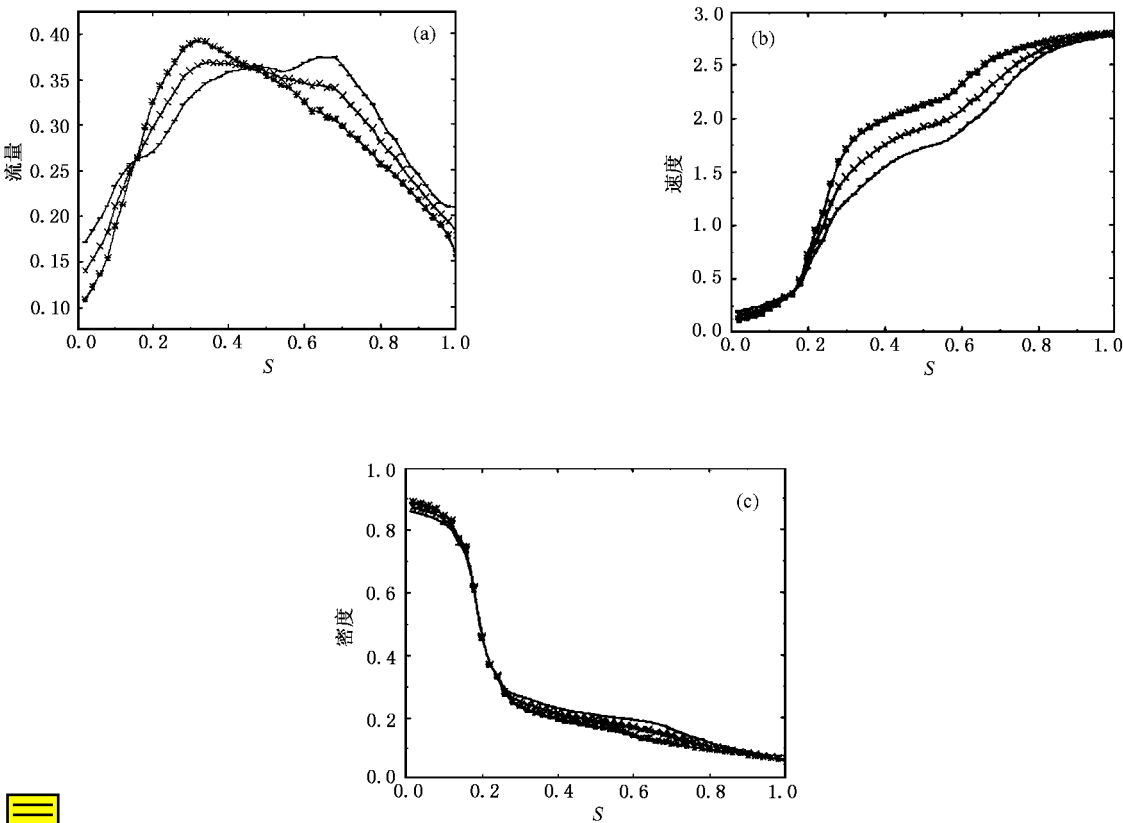


图 5 随绿信比而变化的基本图(曲线标注同图 2) (a),(b),(c)控制参数均为 $T=100, \alpha_1=\alpha_2=0.5, \beta_1=\beta_2=0.6, p_{in}=p_{out}=0.2, p_1=0.2, p_2=0.8, p_3=0.3, N=12, L=2000, K=125$

[1]

Nagel K and Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I France* **2** 2221

[2]

Fukui M and Ishibashi Y 1996 *J. Phys. Soc. Japan* **65** 2345

[3]

Wang B H *et al* 1998 *Phys. Rev. E* **57** 2568
Wang B H *et al* 1998 *Physica A* **254** 122

[4]

Wang B H, Kuang L Q and 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]

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]

Huang P H, Kong L J and Liu M R 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 30 (in Chinese) [黄兵花、孔令江、刘慕仁 2001 物理学报 **50** 30]

[7]

Lü X Y, Kong L J and Liu M R 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1225 (in Chinese) [吕晓阳、孔令江、刘慕仁 2001 物理学报 **50** 1225]

[8]

Biham O, Middleton A and Levine D 1992 *Phys. Rev. E* **48** R6124

[9]

Nagatani T 1994 *Physica A* **202** 449

[10]

Cuesta J *et al* 1993 *Phys. Rev. E* **48** R4175

[11]

Huang P H, Kong L J and Liu M R 2002 *Chin. Phys.* **11** 678

[12]

Tan H L, Huang P H and Li H B 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1127 (in Chinese) [谭惠丽、黄兵花、李华兵 2003 物理学报 **52** 1127]

[13]

Peng L *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3007 (in Chinese) [彭 麟等 2003 物理学报 **52** 3007]

A study on multi-speed cellular automata model of traffic flow of Main-road with Two-lane under the traffic light control^{*}

Peng Lin Tan Hui-Li Wu Da-Yan Liu Mu-Ren Kong Ling-Jiang

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

(Received 18 July 2003 ; revised manuscript received 4 November 2003)

Abstract

A multi-speed and two-lane cellular automata model of traffic flow was proposed to simulate the main road traffic in city under the open boundary conditions. By considering many real factors, the effects on traffic flow and velocity of the main-road, produced by the bus stop and the time switched between the green light and the red light, have been analyzed. The result can reflect the real traffic flow of the main-road in city under the control of the traffic lights.

Keywords : cellular automaton model, traffic flow, main-road

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]629).