

驾驶员属性对信号灯路口交通流的影响研究*

梅超群†

(首都经济贸易大学统计学院, 北京 100070)

(2013年9月28日收到; 2013年10月21日收到修改稿)

采用元胞自动机模型研究信号灯路口的交通流特性, 系统地分析了与性别、驾驶经验、性格等驾驶员属性相关的驾驶行为对交通流的影响. 数值模拟发现, 技术生疏或紧张驾驶、急躁行驶等驾驶行为更易引发自由流到阻塞流的相变, 是路口通行低效率及事故隐患的重要原因, 信号周期是影响流量与个人通行时间公平的主要因素.

关键词: 交通流, 驾驶员属性, 信号控制, 通行时间公平

PACS: 89.40.-a, 45.70.Vn, 64.60.Ak, 02.60.Cb

DOI: 10.7498/aps.63.038901

1 引言

近年来, 交通流理论在揭示交通流内在机理、挖掘交通拥堵成因等方面取得了丰富的成果^[1-9]. 路口是城市交通拥堵的重要瓶颈, 目前针对路口交通的研究很活跃^[7-15], 梅超群等^[7]采用非线性模型详细探讨了信号灯与公交车站对T形路口交通流的影响; Huang等^[8]采用元胞自动机模型发现饱和流量与信号灯周期和控制规则无关; Jiang等^[9]发现, 当周期不超过300s时, 周期越短, 流量越大; Wastavino等^[10]通过研究两辆车通过一系列有信号灯的交叉路口, 揭示了城市交通中混沌等不可测因素是交通的本质; Wong等^[11]对香港262个信号交叉路口附近的事故原因做了详细分析, 发现道路的几何构建、公交车站的位置、行人流的大小等均是导致事故的重要因素; 然而统计表明, 交通问题特别是交通事故主要由驾驶员造成, 学者们针对驾驶员因素, 比如性别、年龄、驾驶技术等与交通事故之间的关系进行了统计研究^[16-21]. Turner等^[16]发现男性驾驶员更喜欢寻求刺激和冒险, 17—29岁的驾驶员出现过至少一次剐蹭的情形是超过50周岁驾驶员的两倍; 庄明科等^[17]指出风

险驾驶与驾驶员年龄、驾龄及每周驾车出行频率呈负相关. 但是, 目前缺少考虑驾驶员属性行为的路口交通流模型.

我国大城市路口的通行效率普遍低于欧美发达国家^[22], 本文建立考虑驾驶员属性的路口交通流模型, 分析驾驶员属性行为对路口交通流相变、通行效率及通行时间公平性等产生的影响.

2 考虑驾驶员属性行为的路口交通流模型

元胞自动机模型适合刻画路口复杂的交通参与者行为, 我们在一条带有信号灯的环路上建立元胞自动机模型, 考虑车辆的行程: 由于观察到前方的路口而开始提高警惕, 并小心进行速度控制; 根据前方信号灯与前车状况, 红灯时制动至停止, 当信号变绿时, 车辆启动通过路口并进入正常行驶; 绿灯时保持警惕通过路口继续正常行驶.

驾驶员注意到前方信号灯并开始注意控制速度的行为, 据我们的调查发现, 此时距离信号灯的远近与信号和驾驶员性别有关, 表1给出了这种距离的记号.

* 北京市属市管高校人才强教计划项目和国家自然科学基金(批准号: 71271016)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: meichaoqun@126.com

现实交通中,当红灯变成绿灯时,驾驶员会考虑与前车的间距而出现延迟启动,记停车后车头与前车车尾间的空隙(称停车间距)为 D , t 时刻与前车距离为 d ,不同的 D 与 d 组合下驾驶员有不同的启动概率,据我们的实地调查,启动概率是 d 的增函数,特别是 D 较小时驾驶员对较大的 d 的需求越强烈.

表1 驾驶员开始注意速度控制的位置标记

	男	女
红灯	d_{m1}	d_{f1}
绿灯	d_{m2}	d_{f2}

再启动过程中,在可以提速的情形下,驾驶员的加速行为出现了加速度为负值、零和正值,假设男、女新手中,采取加速度为负值的比例为 p_{m0} 与 p_{f0} ,采用加速度为零的比例记为 p_{m1} 与 p_{f1} ;男、女熟练驾驶员中,采用加速度为零的比例记 p_{m2} 与 p_{f2} ;其余驾驶员采取正加速度.

现实路口各个方向的道路一般为多车道,本文分析驾驶员在路口的速度控制、制动及启动等行为,暂不考虑换道行为.先来回顾元胞自动机模型的一般思想,设一个时步为1 s,每个元胞或为空或被一辆车占据. v_{max} 为最大速度, v_n 为第 n 辆车的速度, x_n 为第 n 辆车的位置, $d_n = x_{n-1} - x_n - 1$ 为第 n 辆车前方的空元胞数.NS迭代规则:(i)加速, $v_n \rightarrow \min(v_{max}, v_n + 1)$;(ii)减速, $v_n \rightarrow \min(v_{max}, d_n)$;(iii)以概率 p 随机慢化, $v_n \rightarrow \max(v_n - 1, 0)$;(iv)位置更新, $x_n \rightarrow x_n + v_n$.若考虑通过信号灯的车辆,则上述(ii)换成信号灯引起的制动:红灯时, $v_n \rightarrow \min(v_n, d_n, s_n)$;绿灯时, $v_n \rightarrow \min(v_n, d_n)$,其中 s_n 为第 n 辆车与信号灯的间距.

为了更细致地刻画路口行为,本文假设一个元胞长为0.5 m,车身长记为 l ,设 l 占据10个元胞,以下提到长度均以元胞作为单位.为方便起见,将停车间距设为 $D = 1, 2, 3, 4, 5$;整个行车过程分

为三个阶段,阶段i):正常行驶阶段,即车辆已获得稳定的速度而未进入信号灯之前的速度控制区域;阶段ii):进入信号灯前的警惕区,此时注意速度控制,特别是当前方红灯时,会在路口前适当位置进入制动阶段,即从当前速度持续以加速度 a 减速为0,停在路口前,称为阶段ii-2),否则称为阶段ii-1);阶段iii):红灯停车后,绿灯亮起车辆重新启动,到达稳定行驶前的加速阶段,设稳定状态的标志是 $v \geq V_1$,其中 V_1 取正值,根据道路及车辆条件适当选取.若是前方持续绿灯,则驾驶员只需注意速度控制通过路口即可.就刚才所定义的不同行车阶段,本模型将NS迭代步骤前三步做如下修改:

1)阶段i)与阶段ii):(i)加速, $v_i \rightarrow \min(v_i + \tau, v_i + b, v_{max})$, τ 与 b 为速度调整因子, τ 刻画驾驶员结合与前车的距离及与前车的速度比较, b 表现当前速度以及是否进入信号灯前的速度控制区;(ii)减速,

$$v_n \rightarrow \begin{cases} \min(d, v_{max}, \max(a, v_n)), \\ \text{阶段 ii-2}), \\ \max(0, \min(d, v_{max}, v_n)), \\ \text{阶段 i) 或阶段 ii-1}). \end{cases} \quad (1)$$

(iii)随机慢化,

$$v_n \rightarrow \begin{cases} v_n, & p > p_0 \text{ 或 } \tau \leq 0 \text{ 且 } b \leq 0, \\ \max(v_n - 1, 0), & \text{否则}. \end{cases} \quad (2)$$

2)阶段iii):(i)加速, $v_n \rightarrow \max(0, v_n + \tau)$;(ii)减速, $v_n \rightarrow \max(0, \min(d, v_{max}, v_n))$;(iii) $v_n \rightarrow \max(0, \min(d, v_{max}, v_n + \zeta))$, ζ 为性格或经验造成的速度调整因子.

模型中用到如下参数:

$$b = \begin{cases} a, & \text{阶段 ii-2}), \\ b_1, & \text{阶段 ii-1) 且 } v_n > V_2, \\ b_2, & \text{阶段 ii-1) 且 } v_n \leq V_2, \\ b_3, & \text{阶段 i);} \end{cases} \quad (3)$$

$$\tau = \begin{cases} \tau_1, & v_n > v_{n-1} \\ \tau_2, & v_n = v_{n-1} \\ \tau_3, & v_n < v_{n-1} \\ \tau_4, & \text{否则;} \end{cases} \quad x_{n-1} - x_n < v_{max} + \beta \times v_n, \quad (4)$$

$$d = \begin{cases} x_{n-1} - x_n - l - D_i, & \text{阶段 ii-2) 或阶段 ii-1) 但前车已进入阶段 ii-2),} \\ & \text{且 } x_{n-1} - x_n \leq v_{\max} + \gamma \text{ 或阶段 iii),} \\ x_{n-1} - x_n - l - 5, & \text{否则;} \end{cases} \quad (5)$$

$$\zeta = \begin{cases} \zeta_1, & p_{f0} \text{ 比例的女性新手与 } p_{m0} \text{ 比例的男性新手,} \\ \zeta_2, & p_{f1} \text{ 比例的女性新手与 } p_{m1} \text{ 比例的男性新手及} \\ & p_{f2} \text{ 比例的女性熟练司机与 } p_{m2} \text{ 比例的男性熟练司机,} \\ \zeta_3, & \text{其他.} \end{cases} \quad (6)$$

其中 a 为制动时的加速度, V_2 为驾驶员就当前速度考虑如何进行速度调整的一个参考值, 根据当时的交通条件可取适当的正值; β 为驾驶员根据当前位置及与前车的距离来调整当前速度的参数; γ 表示驾驶员意识到已经与进入阶段 ii-2) 的前车距离比较近的标志参数, 此时驾驶员会根据个人习惯调整与前车的安全距离.

3 数值模拟与分析

设模拟路段长度 $L = 900$, 相当于实际道路 450 m; 设最大速度 $v_{\max} = 10$, 相当于 54 km/h. 模拟中, 取 $V_1 = V_2 = 10$, $\beta = 2$, $b_1 = 0$, $b_2 = 1$, $b_3 = 2$; 绿信比 $\alpha = 0.5$; $\tau_1 = -1$, $\tau_2 = 0$, $\tau_3 = 1$, $\tau_4 = 2$; $\zeta_1 = -1$, $\zeta_2 = 0$, $\zeta_3 = 1$; 随机慢化概率 $p = 0.01$; 采用我们的实测与统计数据:

1) $d_{m1} = 80$, $d_{m2} = 150$, $d_{f1} = 130$, $d_{f2} = 180$.

2) $p_{b1} = 0.034$ 比例的驾驶员习惯 $D = 1$, $p_{b2} = 0.196$ 习惯 $D = 2$, $p_{b3} = 0.319$ 习惯 $D = 3$, $p_{b4} = 0.360$ 习惯 $D = 4$, $p_{b5} = 0.091$ 习惯 $D = 5$; 同时若 $D \leq 0.5$ m, 则当 $d \leq 0.5$ m 时, 驾驶员以概率 0.1 启动, 当 $0.5 \text{ m} < d \leq 1 \text{ m}$ 时, 以概率 0.1 启动, 当 $1 \text{ m} < d \leq 1.5 \text{ m}$ 时, 以概率 0.1 启动, 当 $1.5 \text{ m} < d \leq 2 \text{ m}$ 时, 以概率 0.5 启动, 当 $d > 2 \text{ m}$ 时, 以概率 1 启动; 类似可见 D 为其他情形时的启动概率, 见表 2.

3) 男性驾驶员比例为 74%, 女性驾驶员比例为 26%, $p_{m0} = 0.3$, $p_{f0} = 0.5$, $p_{m1} = 0.2$, $p_{f1} = 0.3$, $p_{m2} = 0.05$, $p_{f2} = 0.35$, 为考察驾驶员行为对路口交通的影响, 不妨将以上 1)–3) 参数条件的模型称为 N-model; 将 1)–3) 参数取值变换, 取 $d_{m1} = 0$, $d_{m2} = 0$, $d_{f1} = 0$, $d_{f2} = 0$, 即取消信号

灯前的特别速度警惕区, $p_{b1} = 0$, $p_{b2} = 0$, $p_{b3} = 0$, $p_{b4} = 0$, $p_{b5} = 1$, 即驾驶员均保持红灯前停车时与前车的间距不小于 4 个元胞, 表 2 中最后一列为 1, 其他数据均取为 0, 即信号灯前的再启动过程, 驾驶员均等到前方安全距离满足至少 4 个元胞才开始启动, $p_{m0} = 0$, $p_{f0} = 0$, $p_{m1} = 0$, $p_{f1} = 0$, $p_{m2} = 0$, $p_{f2} = 0$, 即驾驶员没有信号灯前重新启动时的过分犹豫与徘徊, 以上这种没有考虑驾驶员属性行为的模型称为 B-model.

先考察在密度变化下的路口通行效率, 计算路口区域的流量、单位时间 (/小时) 内通过路口的车辆数, 计算 100001 到 150000 时步内 $v(t-1) - v(t) \geq 15$ 出现的次数 k , 称为速度波动值, 以 k 值来考察由于考虑安全而非主动减速时造成的较大的速度波动, k 值越大, 发生追尾等事故的可能性就越大, 其中 $v(t)$ 为车辆在 t 时步的速度.

表 2 红灯变成绿灯时驾驶员的再启动概率

D/m	d/m				
	(0, 0.5]	(0.5, 1]	(1, 1.5]	(1.5, 2]	(2, +∞)
(0, 0.5]	0.1	0.1	0.1	0.5	1
(0.5, 1]	0.3	0.3	0.5	0.5	1
(1, 1.5]	0.7	0.95	0.99	1	1
(1.5, 2]	0.9	0.99	1	1	1
(2, 2.5]	1	1	1	1	1

取 $T = 120$, 我们模拟了密度区间 [0.05, 0.95], 主要结果如图 1.

1) 密度-流量基本图告知, 流量先呈现为密度的线性增函数, 接着在一个关键点 (称为前关键点) 出现从自由流向阻塞流的相变, 然后流量有一个保持的状态, 最后在另一个关键点 (称为后关键点) 开始流量成为密度的递减函数; 其中 N-model 的相变较 B-model 明显, 且前关键点出现得更早, 在一定

的密度区间(B-model 约在 $(0.25, 0.275]$, N-model 在 $(0.175, 0.25]$) 出现了大于阻塞相流量的自由流分支; B-model 取得高于 N-model 的最大自由流流量, 在整个阻塞流区间内一直持续高于 N-model 的流量, 后关键点早于 N-model; N-model 在流量保持阶段呈现一定的振荡, B-model 在后关键点右侧的密度区间内流量没有呈现 N-model 那样的线性下降, 而是显示出接近三次曲线类型的下降。

2) 密度-车辆数的关系图类似于密度-流量基本图, 这两个图都表明, 流量和通过路口的车辆数没有受到制动加速度大小变化的影响。

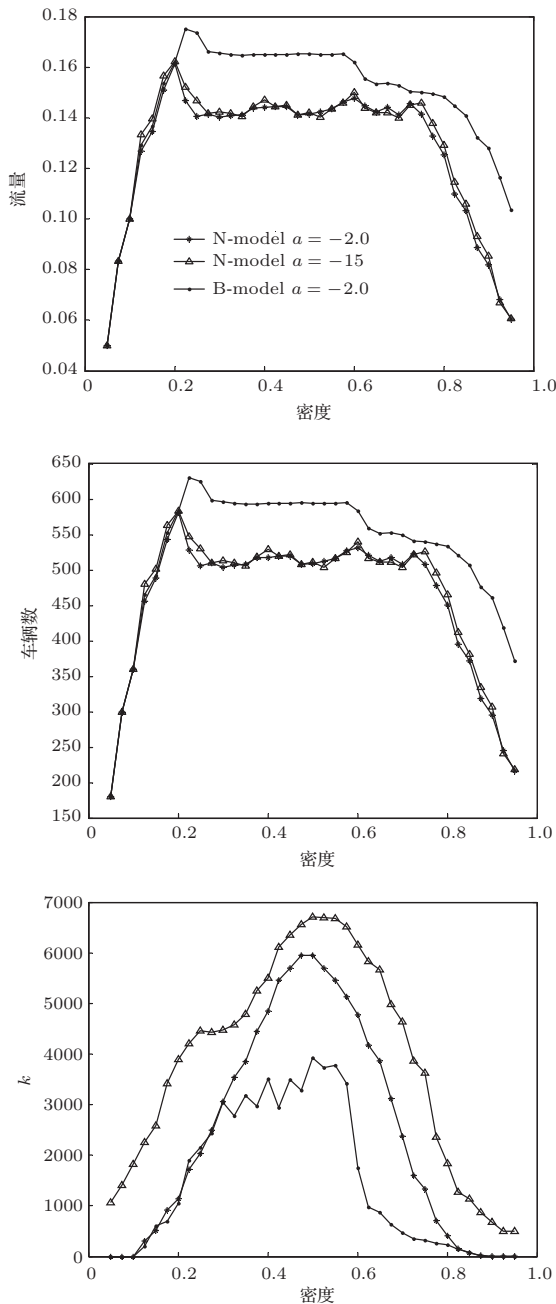


图1 流量、单位时间内通过路口的车辆数、速度波动 k 值关于密度的变化

3) 速度波动 k 值随密度的增加先递增后递减、呈现接近正态分布密度曲线形态, 并且较大的制动加速度比较小的制动加速度带来了更明显的速度波动, 对于 N-model 的两种加速度而言, 这种波动差异在密度区间的前、后两个关键点附近达到两个峰值, 其中前关键点处的差异峰值超过后关键点; B-model 在密度区间 $[0.05, 0.3]$ 与 $[0.825, 0.95]$ 内的表现几乎与 N-model 取 $a = -2$ 一致, 而当 $k_d \in [0.3, 0.825]$ 时, B-model 的 k 值显著低于 N-model。

以上 N-model 与 B-model 数值模拟结果表现出来的差异是由于前者引入了现实的驾驶员属性行为所致。

交通工程师有时会对路口的信号灯周期进行调节, 实测发现周期长短变化以后, 路口交通形势会发生较大转变, 为再现更真实的交通, 我们采用 N-model, 考察流量、整个行程的通行时间(称通行时间1)、从信号灯前的开始制动到通过路口(称通行时间2)、以及通行时间1与通行时间2的标准差等五个方面对于周期调整所反映出的变化特性, 结果如图2。

1) 流量: 当密度较小 ($k_d = 0.15$), 流量在较短周期 $T \in [20, 60]$ 内增大至最高值, 带有轻微波动地缓慢提升; 当 $k_d = 0.3$ 时, 流量一直随密度的增大振荡上升; 当 $k_d = 0.75$ 时, 流量在中等周期 $T \in [40, 130]$ 内获得较大值, 而在两端周期则取值较小。

2) 通行时间: 密度越大, 通行时间1越长, 特别是 $k_d = 0.75$ 时, 能达到低密度的通行时间的5—8倍, 达到中等密度的3—4倍, 与流量一样, 高密度下通行时间1的较优值在中等周期 $T \in [40, 130]$ 内取得, $T \in [20, 30]$ 时非常不利于高密度车辆的通行; 中等密度的通行时间1会随周期的增大而轻微下降; 低密度则在 $T = 80$ 前后有一个小的波峰, 而在别的周期段内均随周期的增大而呈现非常微小的下降。 $k_d = 0.75$, 通行时间2是周期的增函数, 结合通行时间1可见, 通行时间在周期区间 $[120, 240]$ 内的持续上升主要是由开始制动后的等待导致的; $k_d = 0.3$ 与 $k_d = 0.15$ 时的变化趋势相似, 先表现为周期的线性增函数, 然后非线性增长至最高值, 最后表现为轻微下降或轻微波动, 最高值点会随着密度的减少而提前。

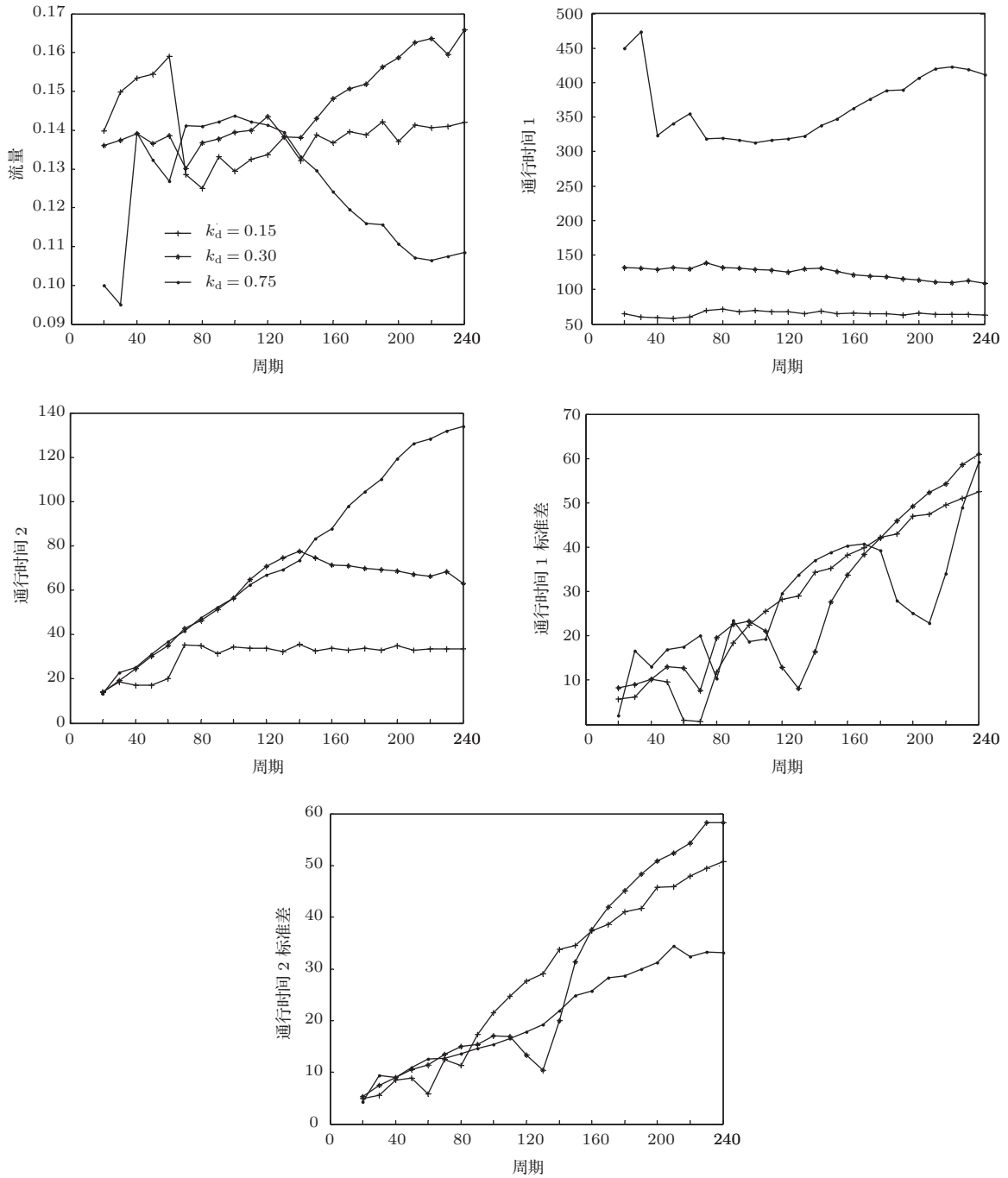


图2 N-model, 流量、通行时间及通行时间的标准差关于信号周期的变化

3) 通行时间的标准差: 均随周期增大而振荡上升, 低、中密度的两类标准差曲线各自相似, 而高密度下通行时间2的标准差上升幅度相对小且振荡少. 其中, 通行时间1的标准差在密度较大 ($k_d = 0.75$) 且周期较长 ($T \in [180, 240]$) 时, 出现了非常明显的波谷, 这种波谷会随着密度的减少而依次在更短的周期附近产生; 对于通行时间2的标准差, 类似的波谷在对应相同的周期位置也出现了.

总之, 图2告知, 当密度很大时 ($k_d = 0.75$), 周

期太长或太短都不利于交通通行效率(流量、通行时间), 当密度中等时 ($k_d = 0.3$), 较长周期更利于通行效率, 周期长短基本不影响低密度环境的通行效率, 三种密度条件下, 周期太长都非常不利于个人通行时间的公平(通行时间的标准差).

图3给出了密度 $k_d = 0.3$, $a = -2$, 周期分别为 $T = 60$ 与 $T = 240$ 时车流的时空图, 由图易见, 周期较短时, 道路上的车流分布得比周期较大时均匀且相对稀疏; 周期较长时, 道路上在不同的时间

段缓慢车流与道路空置交替出现,路口前的车队相对长,其消散也慢,特别是遭遇红灯的车辆在路口前的等待时间远远长于遇到绿灯的车辆,这就加大了通行时间的标准差。

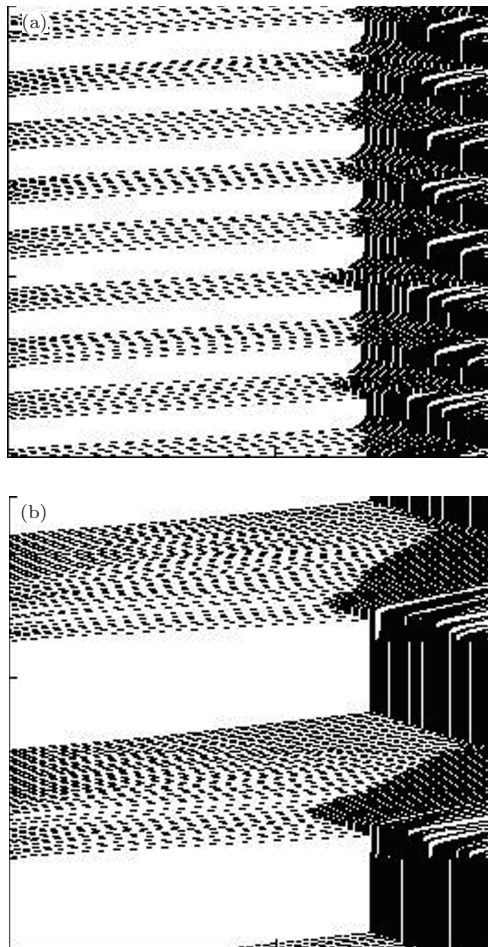


图3 N-model 时空图,从左至右为车流方向,从下至上为时间方向 ($k_d = 0.3$, $a = -2$) (a) $T = 60$; (b) $T = 240$

4 结 论

将驾驶员的性别、性格、驾驶经验等因素在信号灯前的速度控制、停车间距及绿灯后的重新启动等驾驶行为上的表现引入迭代规则,建立新的元胞自动机模型(N-model),比较了N-model与以往忽略上述驾驶员属性行为的元胞自动机模型(B-model)的差异,采用N-model分析了驾驶员行为因素对路口通行效率、驾驶时间公平性等产生的影响。数值模拟表明,N-model表现出了更明显的相变,现实交通中复杂的驾驶员行为降低了路口通行效率,并增大了追尾等事故的可能性。

当密度很大时,中等周期比较利于交通通行效

率,周期过短,则非常不利于通行效率,周期过长不利于通行时间的公平;当密度中等时,长周期利于通行效率,但这会使通行时间 T 保持在较高水平,不利于环境,且此时通行时间标准差较大,有损个人通行时间公平;如果密度很小,则较短周期明显利于通行效率与个人通行时间的公平。

参考文献

- [1] Jetto K, Ez-Zahraouy H, Benyoussef A 2012 *Chin. Phys. B* **21** 18901
- [2] Ning H X, Xue Y 2012 *Chin. Phys. B* **21** 040506
- [3] Ding J X, Huang H J, Tian Q 2011 *Chin. Phys. B* **20** 28901
- [4] Tian J F, Jia B, Li X G, Gao Z Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 010511
- [5] Zhao B H, HU M B, JIANG R, Wu Q S 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 118902
- [6] 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]
- [7] Mei C Q, Huang H J, Tang T Q, Wang H W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1497 (in Chinese)[梅超群, 黄海军, 唐铁桥, 王惠文 2009 物理学报 **58** 1497]
- [8] Huang D W, Huang W N 2003 *Phys. Rev. E* **67** 056124
- [9] Jiang R, Wu Q S 2005 *Physica A* **355** 551
- [10] Wastavino L A, Toledo B A, Rogan J, Zarama R, Muñoz V, Valdivia J A 2007 *Physica A* **381** 411
- [11] Wong S C, Sze N N, Li Y C 2007 *Accid. Anal. Prev.* **39** 1107
- [12] Mei C Q, Huang H J, Tang T Q 2009 *Int. J. Mod. Phys. C* **20** 711
- [13] Bai K Z, Chen R X, Liu M R, Kong L J, Zheng R S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4500 (in Chinese)[白克钊, 陈瑞熊, 刘慕仁, 孔令江, 郑容森 2009 物理学报 **58** 4500]
- [14] Zhao X M, Gao Z Y, Li K P 2008 *Physica A* **387** 4649
- [15] Ceder A, Eldar K 2002 *Transp. Res. A* **36** 699
- [16] Turner C, McClure R 2003 *Injury Control Safe Promot.* **10** 123
- [17] Zhuang M K, Bai H F, Xie X F 2008 *Acta Scientiarum Naturalium Un* **44** 475 (in Chinese) [庄明科, 白海峰, 谢晓 2008 北京大学学报 **44** 475]
- [18] Laspotti S, Keskinen E 1998 *Accid. Anal. Prev.* **30** 435
- [19] Gunilla M, Björklund, Aberg L 2005 *Transp. Res. F* **8** 239
- [20] Naatanen R, Summala H 1976 *Road User Behavior and Traffic Accident* (Oxford: North Holland)
- [21] Chen X M, Gao L, Wei Z H, Li Q F 2007 *J. Univ. Tech. B* **33** 697 (in Chinese) [陈雪梅, 高利, 魏中华, 李潜飞 2007 北京工业大学学报 **33** 697]
- [22] Li J, Van Z L, Liu C, Lu S F 2011 *Procedia-Soc. Behav. Sci.* **20** 630

Influences of driver's attributions on signalized intersection traffic*

Mei Chao-Qun[†]

(Institute of Statistics, Capital University of Economic Trade, Beijing 100070, China)

(Received 28 September 2013; revised manuscript received 21 October 2013)

Abstract

A cellular automaton model is proposed to study the traffic at signalized intersection. The driving behaviors induced by driver's attribution (gender, driving experience, character, etc.) are numerically analyzed. Simulation results show that the rusty driving skills or tension driving, impatient driving and so on can lead to the transition from free flow to congestion more easily, and these behaviors are the important cause for low travel efficiency at the intersection; the signal cycle is the main factor influencing traffic flux and travel time fairness.

Keywords: traffic flow, driver attributions, signal control, the fairness of travel time

PACS: 89.40.-a, 45.70.Vn, 64.60.Ak, 02.60.Cb

DOI: [10.7498/aps.63.038901](https://doi.org/10.7498/aps.63.038901)

* Project supported by the Funding Project for Academic Human Resources Development in Institutions of Higher Learning under the Jurisdiction of Beijing Municipality; and the National Natural Science Foundation of China(Grant No.71271016).

† Corresponding author. E-mail: meichaoqun@126.com