有应急车辆的双车道交通流元胞自动机模型

赵韩涛，冷军强，马国胜

（哈尔滨工业大学（威海）汽车工程学院，264209 山东 威海）

摘 要：为明确应急车辆对交通流的影响，引入应急车辆影响区域和普通车辆让行概率，修改换道规则，建立了双车道元胞自动机模型. 通过计算机数值模拟，生成不同密度下的时空图以及不同参数取值下的密度-流量、密度-速度基本图. 研究表明：应急车辆影响区域的设置提高了0.08～0.18密度范围内的车流量和速度，同时提高了所有密度条件下的应急车辆速度；在密度大于0.08时，让行概率对换道次数产生明显影响. 应急车辆促使较低密度的交通流更为均衡，对较高密度的交通流干扰有限.

关键词：交通流；元胞自动机；应急车辆；让行概率

中图分类号：U491 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2013)02－0060－06

A two-lane cellular automaton traffic flow model with influence of emergency vehicle

ZHAO Hantao, LENG Junqiang, MA Guosheng

(School of Automotive Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, Shandong, China)

Abstract: A two-lane cellular automaton model was developed to analyze traffic flow considering influence of emergency vehicle. The affected areas of emergency vehicle and the give way probability of general vehicles was introduced to modify lane change rules. Space-time diagram of different densities and fundamental diagrams under different parametric conditions were given by numerical simulations. The simulation results indicate that the parameter settings for affected areas of emergency vehicle only improves traffic volume with density in the range of 0.08 to 0.18 but it makes the emergency vehicle speed increase significantly in larger density. And the give way probability has an important impact on lane change times with density greater than 0.8. The study found that appearance of emergency vehicles promoted traffic flow of lower density more balanced and the interference on traffic flow of higher density was limited.

Key words: traffic flow; cellular automaton; emergency vehicle; give way probability

交通流系统相当于一种大型、相互作用的动态粒子系统，交通流处理的对象实际上是离散态物质[1]. 交通流理论的研究主要有概率论方法、运动学模型、车辆跟驰模型和流体力学模型，近年来微观的元胞自动机模型受到众多研究人员的关注. 元胞自动机模型（Cellular automaton）简称为CA模型，将车辆抽象为单个的元胞格子，以确定的规则模拟单个车辆的速度、位移等参数，能够充分描述交通元素的离散特性. 元胞自动机完全离散化的模型特征决定了其适合于模拟微观交通流现象. 基于元胞自动机建立的交通流模型早期形式包括184号规则、NaSch模型[2]等. 在这些模型的基础上，通过改进慢化、加速、减速、换道等规则，众多学者提出了相应的修正模型[3-8]. 双车道CA模型是通过对单车道CA模型增加明确的换道规则来实现的. 换道规则的制定需要综合考虑驾驶员行为、道路和交通条件.

相对于正常行驶的交通流而言，应急车辆的出现是一种导致普通车辆行为发生改变的特殊事

收稿日期：2012－07－10.

基金项目：国家博士后科学基金资助项目(2011M500676)；
山东省科技发展计划项目(2012G0020129).

作者简介：赵韩涛(1978—)，男，博士，讲师.

通信作者：赵韩涛，zhthitwh@163.com.

件. 应急车辆在响应突发事件途中警笛长鸣，对城市道路正常行驶的交通流造成干扰. 为减少延误，应急车辆一般行驶在速度相对较高的内侧车道. 受持续鸣叫的警笛影响，应急车辆所在车道的车辆倾向于加速行驶或主动换道让行，外侧车道的车辆则会选择保持速度或减速为换道车辆提供空间. 因此，受警笛影响的普通车辆驾驶员的心理特征和行为特性不同于正常行驶时，这在以往的元胞自动机模型中并未体现. 本文针对此问题，分析车辆的换道和减速特征，提出考虑应急车辆影响的城市双车道交通流元胞自动机模型. 利用 Matlab 对模型进行数值模拟，研究交通流基本参数的相互关系，与已有模型进行对比，分析应急车辆对交通流的影响.

1　模型建立

MCD 模型称之为改进的舒适驾驶模型，因其模拟结果较为接近实际交通流微观特性而被国内外文献所引用，文献[1]进一步研究了双车道的 MCD 模型，本文在此基础上，研究应急车辆影响下的换道规则.

1.1　基本参数和变量

将双车道道路离散化为长度为 L 的两条并列的格链，1 个格点代表 1 个元胞. 不考虑车辆长度的差别，每辆车占据 1 个元胞. 定义内侧车道为车道 1，外侧车道为车道 2. CA 模型所需其他变量及参数见表 1.

表 1　模型参数与变量汇总

参数与变量	定义
$x_n^i(t)$	车道 i 上车辆 n 在 t 时刻的位置
$v_n^i(t)$	车道 i 上车辆 n 在 t 时刻的速度
$D_{n\mathrm{E}}(t)$	t 时刻车辆 n 与应急车辆的距离
$d_n^i(t)$	车道 i 上车辆 n 在 t 时刻与前车的距离
$d_{3-i}^{\mathrm{np}}(t)$	车道 i 车辆 n 在 t 时刻与相邻车道上前车的距离
$d_{3-i}^{\mathrm{ns}}(t)$	车道 i 车辆 n 在 t 时刻与相邻车道上后车的距离
D	应急车辆的影响区域
$b_n^i(t)$	$b_n^i(t)=1$，刹车灯亮；$b_n^i(t)=0$，刹车灯灭
T_n^i	$T_n^i=1$，快车；$T_n^i=0$，慢车
$v_{\max}$	普通车辆的最高速度
$v_{\max}^{\mathrm{E}}$	应急车辆的最高速度
p_0	受前车速度影响的换道概率
p_1	响应应急车辆警笛声的概率
p	目标车道车辆让行概率

1.2　换道规则

在应急车辆产生干扰前，普通车辆的驾驶行为采取贪婪机制，即在保证安全的前提下通过换道避免速度的降低. 在听到警笛声后，应急车辆所在车道的普通车辆试图加速以尽快驶离或换道让行，而其他车道的车辆会保持速度避免扰动交通流或减速为换道车辆让行. 应急车辆通过后，普通车辆恢复之前的驾驶行为前行. 考虑到车辆的换道特征存在差异，依据普通车辆是否位于应急车辆影响区域，本文分别讨论模型的换道条件.

1.2.1　普通车辆位于应急车辆影响区域之外

在此阶段，普通车辆不受应急车辆影响，换道规则主要考虑安全性、可移动性和行程时间最短原则，同时考虑不同速度车辆的换道需求，建立基于现有 MCD 模型的双车道 CA 模型换道规则. 当行驶在车道 i 上的车辆满足下述条件时实施换道：

$$b_n^i(t)=0, \tag{1}$$

$$T_n^i=1, T_{n+1}^i=0, \tag{2}$$

$$d_n^i(t)<\min(v_n^i(t)+1, v_{\max}), \tag{3}$$

$$v_n^i(t)\leqslant d_{3-i}^{\mathrm{np}}(t), v_{\mathrm{ns}}^{3-i}(t)\leqslant d_{3-i}^{\mathrm{ns}}(t), \tag{4}$$

$$rand()<p_0. \tag{5}$$

上述条件统称为条件 1. 从安全及舒适性角度考虑，为减少车辆换道时产生的相互影响，在车辆与前车距离非常小时刹车灯亮起，为简化问题，此时禁止换道；式(1)表示刹车灯处于灭的状态，可以换道；式(2)体现了快车和慢车所处位置对换道需求的影响，快车位于慢车后面时换道意愿强烈；式(3)表示车辆受制于前车速度，难以满足本身的速度要求；式(4)是安全性条件，即车辆换道需满足与目标车道上相邻前后车辆的空间要求；式(5)中 $rand()$ 为 0 ~ 1 之间的随机数，满足换道概率时车辆实施换道.

1.2.2　普通车辆位于应急车辆影响区域之内

应急车辆影响区域粗略等同于其警笛声所传播的范围. 现实交通中，与应急车辆距离的远近决定了驾驶员所采取措施的差异：距离较远时同车道普通车辆倾向于尽速驶离影响区域，非同车道车辆保持速度，以避免对交通形成新的干扰；距离较近时同车道车辆倾向于换道为应急车辆让行，非同车道车辆则倾向于减速为换道车辆让行. 本文将影响区域内的普通车辆以近邻车辆和非近邻车辆的方式予以考虑.

受应急车辆影响时，换道仅发生在从内侧车道前往外侧车道，即如果满足条件 1 且 $i=1$，则实施换道. 对于非近邻车辆而言，若满足下述约束条件(称为条件 2)，亦实施换道.

$$d_n^1(t)\geqslant\min(v_n^1(t)+1, v_{\max}), \tag{6}$$

$$v_n^1(t)\leqslant d_2^{\mathrm{np}}(t), v_{\mathrm{ns}}^2(t)\leqslant d_2^{\mathrm{ns}}(t), \tag{7}$$

$$rand() < p_1. \tag{8}$$

上述条件2表明车辆即使在本车道满足加速前行的前提下,若相邻车道满足安全要求,仍会以一定的概率换道行驶. 位于$\frac{D_0}{2} \leqslant D_{n\mathrm{E}}(t) \leqslant D_0$区域的车辆,换道概率$p_1$应取较小值;位于$0 \leqslant D_{n\mathrm{E}}(t) < \frac{D_0}{2}$区域的车辆(不包含近邻车辆),$p_1$应取接近于1的较大值.

对于近邻车辆而言,若满足条件1、2,则实施换道. 此外,因直接感受警笛刺激,近邻车辆换道欲望强烈,在下述约束条件(称为条件3)的情况下,将强制换道.

$$d_n^1(t) \leqslant v_n^1(t) \leqslant d_2^{np}(t), \tag{9}$$

$$2 \leqslant d_2^{ns}(t) \leqslant v_{ns}^2(t), \tag{10}$$

$$rand() < p. \tag{11}$$

上述条件3中,式(9)表明近邻车辆换道的条件是必须保证换道之后不能和相邻车道最近前车发生碰撞;式(10)表明车辆与相邻车道最近后车距离较近时,在接收到近邻车辆发出的换道信号后,若其保持原来速度则换道行为不能发生,若其减速让行,则近邻车辆可以换道. 式(11)体现了相邻车道最近后车减速让行的意愿概率.

1.3 模型

根据前文对车辆换道规则的改进,在每一个离散的单位时间步长内,对车辆的换道、加速、随机减速、确定性减速和位置方面展开并行式的状态更新. 双车道CA模型的演化过程是采取在一个时步内分两步运行的方式:首先按照指定规则并行换道,然后所有车辆在各自车道根据MCD模型进行位置和速度更新.

对于应急车辆,为简化问题,不考虑逆向行驶,在普通车辆为其让行的情况下,保持在内侧车道可以维持较高的行驶速度,因此模型中不允许其换道,在本过程中保持原状.

对于非近邻车辆,在$D_{n\mathrm{E}}(t) > D_0$时,若满足条件1,车辆将换道,其状态演化为

$$x_n^{3-i}(t+1) = x_n^i(t), \tag{12}$$

$$v_n^{3-i}(t+1) = v_n^i(t). \tag{13}$$

在$0 \leqslant D_{n\mathrm{E}}(t) \leqslant D_0$时,若满足条件1且$i=1$,或者满足条件2,车辆将换道,其状态演化为

$$x_n^2(t+1) = x_n^1(t), \tag{14}$$

$$v_n^2(t+1) = v_n^1(t). \tag{15}$$

对于近邻车辆,若其满足条件1、2,其状态演化与式(14)及式(15)一致;若满足条件3,则车辆状态演化需增加规则为

$$v_{ns}^2(t+1) = \min(d_2^{ns}(t), v_{ns}^2(t)-1). \tag{16}$$

车辆完成换道之后,更新单车道车辆位置. 确定随机慢化概率,即

$$p_n^i(t+1) = p(v_n^i(t), b_{n+1}^i(t), t_h^i, t_s^i),$$

$$b_n^i(t+1) = 0.$$

其中:$p_n^i(t)$为随机慢化概率,根据刹车状态及停车时间的不同取值不同;t_{h}^i、t_{s}^i均为反映刹车作用范围的时间参数.

加速过程. 若$b_{n+1}^i(t)=0$,$b_n^i(t)=0$或$t_{\mathrm{h}}^i > t_{\mathrm{s}}^i$,则$v_n^i(t+1) = \min(v_n^i(t)+1, v_{\max})$.

安全刹车过程. $v_n^i(t+1) = \min(v_n^i(t), d_n^{\mathrm{eff}})$. 若$v_n^i(t+1) < v_n^i(t)$,则$b_n^i(t+1)=1$.

随机慢化和刹车状态更新. 若$rand() < p_0$,则$v_n^i(t+1) = \max(v_n^i(t+1)-1, 0)$. 若$p_0 = p_b$,则$b_n^i(t+1)=1$.

位移更新. $x_n^i(t+1) = x_n^i(t) + v_n^i(t+1)$.

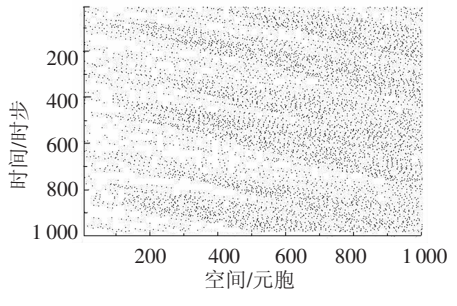
2 数值模拟与结果分析

数值模拟采用周期性边界条件,即车辆右出左进,车辆总数恒定,应急车辆为1辆. 双车道车辆的总密度固定取值为$\rho = N/2L$,t时刻j车道的密度为$\rho_j(t) = N_j(t)/L$,平均速度为$V(t) = (1/N)\sum_{j=1}^{2}\sum_{i=1}^{N_j(t)} V_i^j(t)$,其中$N$为车辆总数,$L$为单车道元胞总数,$N_j(t)$为$t$时刻$j$车道的车辆数,$V_i^j(t)$为$j$车道第$i$辆车在$t$时刻的速度. 密度单位为车辆数/单元格数,速度单位为单元格数/时步,流量单位为车辆数/时步.

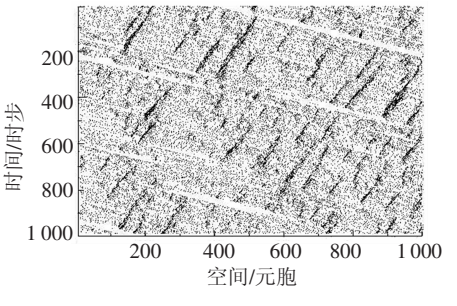
取元胞长度为7.5 m,模拟车道由1 000个格点组成,对应道路实际长度约为7.5 km. 假定道路上3种类型车辆的$v_{\max}$分别为3、5、6(单位为格数每秒). 初始时刻车辆以一定比例随机分布于车道上,速度随机. 时步长取1 s,模型每次运行20 000时步,记录每一时步所有车辆的速度,求取该时步的平均速度,继而计算最后2 000时步的平均速度,以消除模拟开始时的伪随机性影响.

图1为车辆总密度取值不同时的时空状态演化斑点图,其中慢车所占比例$R=0.05$,应急车辆影响区域D为50个元胞,$p_0=0.3$,$p_1=1$,$p=1$,时步t从18 001 s到19 000 s,距离从1到1 000. 车辆在空间上从左至右运动,以横轴表示;在时间上为从上至下,以纵轴表示;以黑点表示车辆位置,白点表示空格. 图1(a)及1(b)为道路上无应急车辆的运行时空图,不考虑内外车道的差别,即对称模式的换道,1、2车道的运行效果相

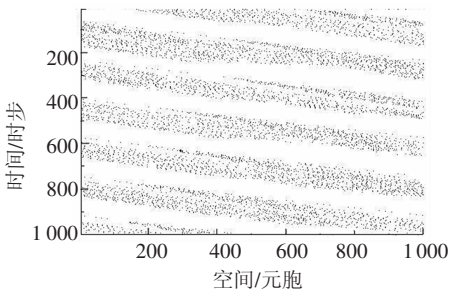
似；密度较低时（$\rho = 0.04$），车辆以自由流状态行驶，分布较均匀，因随机性影响，在某一时刻会出现密集但不拥挤的状态，见图 1（a）右侧；在密度较高时（$\rho = 0.16$），车辆以同步流状态行驶，周期性出现阻塞后短时内自动消散，这和现有研究结论相吻合. 图 1（c）~1（f）为考虑应急车辆影响的两车道时空图. 图 1（c）、1（d）因密度较低，车辆均以期望速度行驶；应急车辆所在车道交通流几乎没有扰动，相对于图 1（a）出现较多空当，而相邻车道则是短时阻塞和空当并列出现. 在密度较高时，周期性阻塞在两车道均会出现，如图 1（e）、1（f）所示. 1 车道因应急车辆前方部分车辆让行以及后方出现短暂空隙而使得道路利用率明显低于 2 车道，阻塞产生次数及消散时间均高于 2 车道，两车道在应急车辆干扰区域为非对称换道模式.



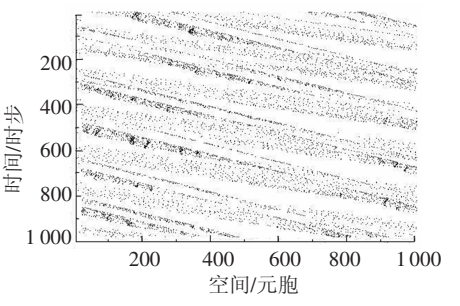
（a）$\rho = 0.04$，1 车道，无应急车辆影响



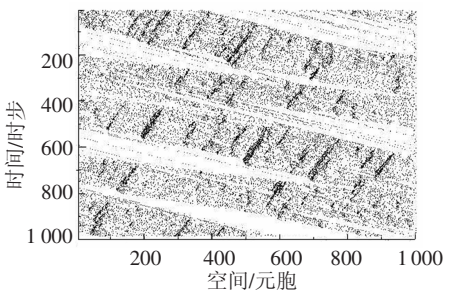
（b）$\rho = 0.16$，2 车道，无应急车辆影响



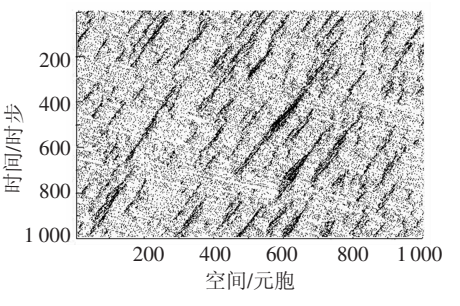
（c）$\rho = 0.04$，1 车道，有应急车辆影响



（d）$\rho = 0.04$，2 车道，有应急车辆影响



（e）$\rho = 0.16$，1 车道，有应急车辆影响

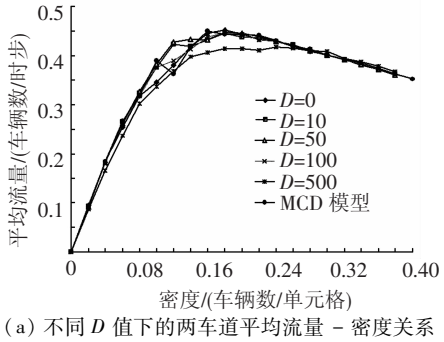


（f）$\rho = 0.16$，2 车道，有应急车辆影响

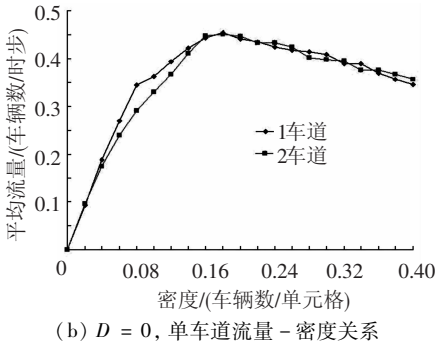
图 1　双车道元胞自动机模型时空图

图 2 为 $p_0 = 0.3$、$p_1 = 1$、$p = 1$、$R = 0.05$ 条件下不同应急车辆影响区域 D 所对应的车流密度与流量的关系. 图 2（a）为两车道平均流量 - 密度关系，由图可见：1）各条曲线均再现了经典交通流理论模型的曲线特征，即在达到最大流量前，随着密度的增加，流量以较大的斜率增加，达到最大流量（约为 0.46）后，流量以较小的斜率缓慢递减，对应的最佳密度为 0.18. 2）$D = 0$ 时，模型类似于考虑快慢车影响的 MCD 模型，差别在于车辆类别增加了一辆应急车辆，其曲线与 MCD 模型曲线几乎完全重合，这验证了 MCD 模型的适用性. 3）$D = 500$ 代表一种极端情形，即一半的道路空间受应急车辆干扰，这在现实中是不存在的，此处只是为说明其对模型产生的影响. 图示表明在 $\rho < 0.02$ 及 $\rho > 0.26$ 时，曲线与其他 D 值的曲线相吻合，而在其他密度区域内流量值有明显降低，尤其是在最佳密度前后范围内. 4）其他 D 值，当 $\rho \leqslant 0.08$ 时，曲线一致，表明在密度较低时，应急车辆对流量无明显影响，各种车辆均可以自由流速度前行；当 $0.08 < \rho < 0.18$ 时，相较 $D = 0$ 的曲线，流量出现不同程度的增加，产生的原因在于受应急车影响，同道普通车辆随机慢化的概率减少，相邻车道的空间则被更加充分的利用，这明显有别于慢车、瓶颈等造成的流量下降；当 $\rho \geqslant 0.18$

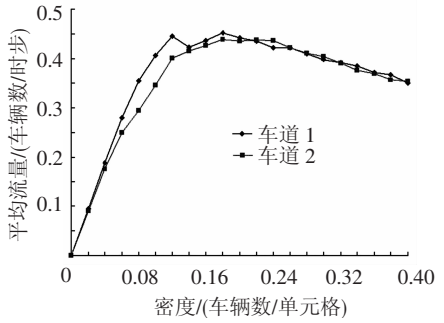
时,受制于密度过大,普通车辆加速驶离或主动让行的行为难以奏效,因此流量曲线重新和 $D = 0$ 的曲线相一致. 不同 D 值下流量变化不尽相同,$D = 10$ 及 $D = 50$ 的流量波动量在 $\rho = 0.12$ 时达到最大值,$D = 100$ 的流量趋近于 $D = 0$ 的基准曲线. 相邻两车道的流量变化如图 2(b) ~ 2(f) 所示. 图 2(b) 表明应急车辆对车流无影响,1 车道在密度低于 0.16 时流量增加由其车辆快速的性质决定. 图 2 (c) 和 2(d) 曲线形状类似,在密度小于 0.1 时随着密度的增加 1 车道流量曲线逐渐偏离 2 车道流量曲线,并在 $\rho = 0.1$ 前后流量波动幅度达到最大值,之后两条曲线趋向统一. 当 $D = 100$ 时,1 车道流量在所有密度条件下均大于 2 车道流量,如图 2(e) 所示;在 $D = 500$ 时,两车道曲线随着密度的增大逐渐偏离,接近不对称双车道模型曲线,如图 2(f) 所示.



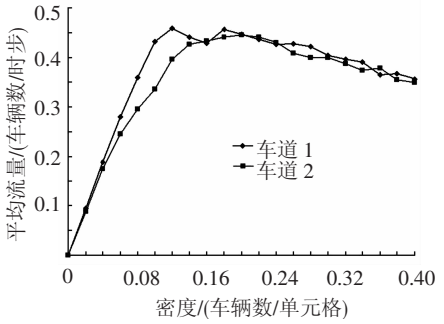
(a) 不同 D 值下的两车道平均流量 - 密度关系



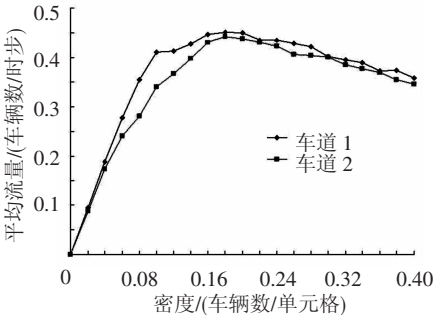
(b) $D = 0$, 单车道流量 - 密度关系



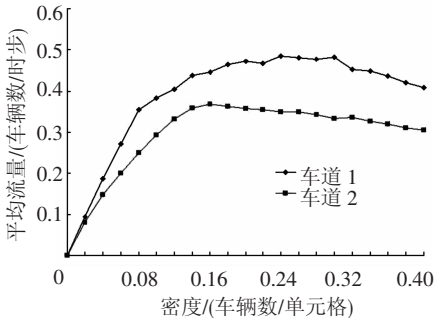
(c) $D = 10$,单车道流量 - 密度关系



(d) $D = 50$,单车道流量 - 密度关系



(e) $D = 100$,单车道流量 - 密度关系

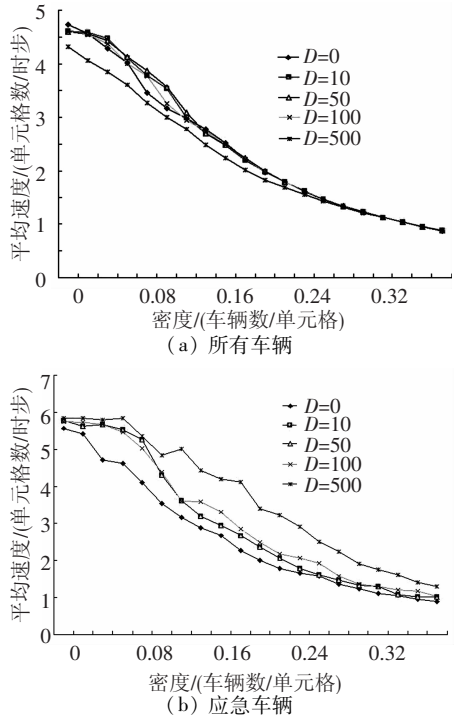


(f) $D = 500$,单车道流量 - 密度关系

图 2　有应急车辆影响的双车道元胞自动机模型基本图

图 3 为 $p_0 = 0.3$、$p_1 = 1$、$p = 1$、$R = 0.05$ 条件下不同 D 值所对应的车流密度与速度关系. 图 3(a) 为两车道所有车辆的平均速度,与流量 - 密度关系相一致. 图 3(b) 为应急车辆平均速度与密度的关系,相较于 $D = 0$ 时的速度曲线,不同 D 值的速度提高明显,随着密度增加,速度增加量逐渐减小. D 值的设定表明应急车辆对于交通流速度的扰动集中在 $0.08 < \rho < 0.18$,对于其自身速度的影响则贯穿在几乎全部的密度区间,运行结果更加符合现实的交通运行状况.

图 4 为 $p_0 = 0.3$、$p_1 = 1$、$p = 1$、$R = 0.05$ 条件下不同 D 所对应的每时步换道次数与车流密度的关系. 当 $\rho < 0.04$ 时,车辆换道需求较低,车辆换道次数增长较慢;当 $0.04 \leqslant \rho \leqslant 0.12$ 时,快车及应急车辆被阻挡的情况较多出现,车辆换道次数增长较快,不同 D 值在此区间的换道次数相较 $D = 0$ 时增加较多;当 $0.12 < \rho < 0.2$ 时,每时步车辆换道保持在 3.3 ~ 3.8 次,表明因密度增加而增加的换道数量与因 D 值设置而减少的换道数量相互抵消,维持在一定的平衡范围;在 $\rho \geqslant 0.2$ 时,随着密度增加而导致相邻车道空间不足,车辆换道次数逐渐减少.



（a）所有车辆

（b）应急车辆

图 3　有应急车辆影响的速度与密度关系

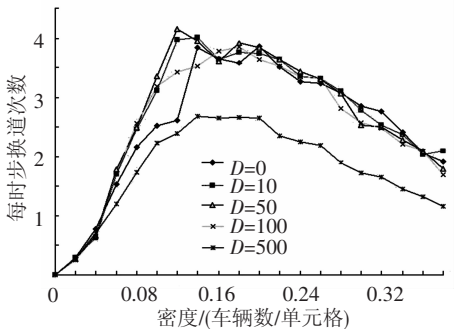


图 4　不同 D 值条件下密度与换道次数关系

图 5 为 $p_0 = 0.3$、$p_1 = 1$、$D = 50$、$R = 0.05$ 条件下不同让行概率 p 所对应的密度与换道次数关系. 在 $\rho < 0.08$ 时，不同 p 值的换道次数接近一致，表明密度较低时让行概率对换道影响不大；在 $0.08 \leqslant \rho \leqslant 0.14$ 时，不同 p 值的换道次数曲线逐渐分离，让行概率越大，换道次数越多，并均于 $\rho = 0.14$ 左右达到极值；在 $\rho > 0.14$ 以后，各条曲线走向一致，换道次数在一定的密度区间内维持一定数量之后随着密度的增加而逐渐减少，且 p 值较大则换道次数较多，表明密度较大时让行概率的取值对换道有明显影响.

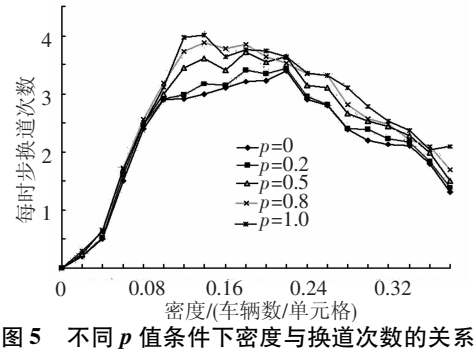


图 5　不同 p 值条件下密度与换道次数的关系

3　结　论

1）基于对驾驶员听到警笛声后所作反应的分析，引入参数应急车辆影响区域 D，同时考虑到应急车辆前方车辆换道时的安全条件，引入参数相邻车道车辆的让行概率 p. 通过对换道规则的改进，建立了新的元胞自动机模型.

2）数值模拟结果表明：当车流密度在 $0.08 < \rho < 0.18$ 时，应急车辆促使前方车辆加速，并使得相邻车道空间得以充分利用，提高了流量；在其他密度区间，应急车辆的影响主要体现在左右车道的差别上，对整体流量影响有限. 车流平均速度的变化与平均流量变化一致，应急车辆速度有明显提高，D 的设置使得模型更接近实际交通流. 在车流密度 $\rho \geqslant 0.08$ 时，让行概率 p 对车辆换道次数影响较为明显，其值越大，换道次数越多.

3）应急车辆对普通车流的影响并非完全负面，因其在密度较低时能够促使交通流更加均衡. 应急车辆影响区域和让行概率的提出突出了应急车辆的优先权，体现在其速度的提高上，表明所提出的模型更能反映实际交通状况.

参考文献

[1] 李新刚. 基于元胞自动机模型的交通系统微观建模与特性研究[D]. 北京：北京交通大学，2009.

[2] NAGEL K, SCHRECHKENBERG M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. Journal de Physique Ⅰ France, 1992, 2(12): 2221 – 2229.

[3] JIA B, JIANG R, WU Q S. Honk effect in the two-lane cellar automaton model for traffic flow[J]. Physica A, 2003, 348(3): 544 – 552.

[4] 王永明，周磊山，吕永波. 基于元胞自动机交通流模型的车辆换道规则[J]. 中国公路学报，2008，21(1)：89 – 93.

[5] 郑英力，翟润平，马社强. 交通流元胞自动机模型综述[J]. 公路交通科技，2006，23(1)：10 – 115.

[6] MOUSSA N, MOOR B D. Modeling evacuation of emergency vehicles by cellular automata models[J]. International Journal of Modern Physics C, 2008, 19(6): 947 – 956.

[7] KANAI M. Two-lane traffic flow model with an exact steady state solution[J]. Physical Review E, 2010, 82: 66107.

[8] LAN L W, CHIOU Y C, LIN Z S, *et al*. A refined cellular automaton model to rectify impractical vehicular movement behavior[J]. Physica A, 2009, 388: 3917 – 3930.

（**编辑**　魏希柱）