

# 机动车协商模型与分岔特性研究\*

黄晨<sup>1)†</sup> 陈龙<sup>1)</sup> 毕勤胜<sup>2)</sup> 江浩斌<sup>1)</sup>

1) (江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

2) (江苏大学土木工程与力学学院, 镇江 212013)

(2013年6月3日收到; 2013年7月18日收到修改稿)

在环行交叉路口交通流中, 由于行驶目的的不同存在三种类型冲突. 为了真实模拟人类的自治性和智能性, 先将机动车建立一个含有驾驶员模型的智能体, 再耦合环形交叉口的元胞自动机模型组成多智能体系统. 在总结每种类型交通冲突特点和规律的基础上, 提出通过优先级策略和动态协商机制消解机动车智能体相互之间的冲突问题. 以某中小城市城的典型环行交叉路口交通流量为样本数据, 对比验证模型的正确性, 并且进一步研究了交通流的分岔特性, 发现一定条件下流量的周期分岔和混沌现象. 数值模拟结果表明, 所建模型符合实际情况, 并且内环发生冲突越严重车流量越低, 随着机动车属性参数  $k$  和  $p$  的变化, 系统从稳定走向分岔再到混沌.

**关键词:** 多智能体, 元胞自动机, 协商, 分岔

**PACS:** 05.50.+q, 05.45.Gg

**DOI:** 10.7498/aps.62.210507

## 1 引言

每年道路上 60% 以上的交通事故都是由于交通冲突造成的, 并且数据表明交通冲突和交通事故存在着密切的正相关, 所以各国专家都致力于研究这一方向, 并且提出各种解决方案来改善交通安全和提高道路通行能力<sup>[1]</sup>. 按照冲突发生地点的不同, 可将交通冲突分为路段和交叉口. 按照冲突对象的不同, 又可以分为机动车之间、机动车与非机动车之间和机动车与行人之间的三种主要冲突. 若按冲突成因划分, 可以分为骤停、交织、减速、超车等<sup>[2]</sup>. 随着时代的发展和机动车保有量不断增长, 城市规划者在道路设计上为避免混合交通, 实行机动车、非机动车和行人的分道行驶, 同时增加交叉口的信号灯消除右转与直行的矛盾. 同时也越来越多地建造互通式立交作为道路联结的纽带, 使得相互交叉的道路之间得以快速而安全地进行交通流的转换<sup>[3-4]</sup>. 但是, 由于立交工程量大、成本高等因素不利于普及, 所以大量采用平面环行交叉口作为环岛组织渠化交通的一种重要补充形式(如

图 1). 车辆进入环岛做逆时针绕行, 连续通过交叉口, 避免了周期性的阻塞, 但是还是存在车辆进出路口的交点. 因此, 环行交叉口是冲突较为复杂的场所, 拥有着消除冲突降低交通事故等诸多交通流研究中重要意义的课题<sup>[5,6]</sup>.

在匝道交通方面, Tang 等研究了高速公路匝道的交通流波动特性, 发现早晚高峰时期交通密度对流量的影响, 成功再现了多匝道的复杂交通现象和效应<sup>[7-9]</sup>. 而在换道和超车方面, 又通过引入新的流量转移函数, 改进了两车道交通流格子模型, 并且基于跟车模型的特点, 提出了跟车模型的动能变化公式, 利用该公式研究潜在的换道概率对交通流的影响<sup>[10-12]</sup>. 另外针对环岛交通通常会受到信号灯的影响, 提出了一种新的信号灯模型<sup>[13-15]</sup>. 梅超群等则采用非线性映射模型研究 T 形路口的交通问题, 利用点平均流量指标系统地分析了公交车站、信号灯周期、绿信比、车辆左右转弯等因素对路径交通流量的影响<sup>[16]</sup>; 白克钊等对环行交叉路口建立了具有多个道路瓶颈的元胞自动机模型和开放边界条件下平面环行交叉路口的交通流<sup>[17,18]</sup>.

\* 国家自然科学基金(批准号: 50875112)、教育部博士点基金(批准号: 20093227110013)、江苏省自然科学基金(批准号: BK2010337)、江苏省高校自然科学基金(批准号: 09KJA580001)和江苏省高校科研创新计划(批准号: CX10B\_253Z)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: hcshumo@163.com

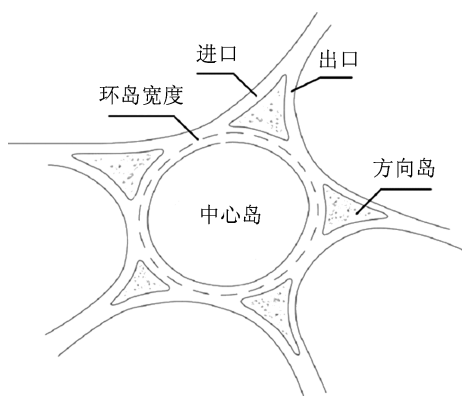


图1 环形交叉口示意图

微观交通流模型经过多年的发展, 目前已形成三类主要模型: 以力学模型为基础的跟驰模型、元胞自动机模型和多智能体模型<sup>[19-21]</sup>. 其中, 元胞自动机模型基于跟驰模型的理论基础, 将交通流从时间和空间上离散化, 研究交通流的变化特征. 然而, 元胞模型中的规则过于简单, 在冲突中缺少对外界环境的反应机理, 并且没有记忆、反馈功能, 缺乏信息元素的交互, 不能完整刻画人与交通工具相结合产生的智能行为. 而多智能体模型具有较强冲突消解能力, 非常符合交通运输系统中各元素的智能特征. 因此, 采用多智能体与元胞模型相结合的原则既能弥补元胞模型中的智能不足, 又能提高多智能体模型的仿真效率与可编程性<sup>[22,23]</sup>. 同时, 本文所研究的交通系统具有很强的非线性, 在机动车属性参数变化下, 可能出现不稳定的情况, 因此需要充分讨论系统的分岔特性<sup>[24]</sup>. 综上所述, 本文采用元胞自动机模型建立环形交叉口模型, 同时每辆车视为一个智能体建立驾驶员模型, 耦合两者后组成多智能体系统. 驾驶员智能体模型包括行为决策和动作空间两部分组成. 此外在建立了环形交叉路口中行驶的交通规则基础上, 分析了在通行过程中由于换道的存在导致的三种类型冲突. 提出通过优先级策略和动态协商机制消解相互机动车智能体之间的冲突问题. 最后, 通过某中小城市城郊结合部的典型环形交叉路口交通流量为样本验证了模型的正确性, 并且数值模拟研究了不同比例的驾驶员类型  $k$  和换道概率  $p$  等因素对机动车流量动态特性的影响.

## 2 模型

以元胞自动机为基础, 将智能体引入到元胞空间网格中, 智能体按照一定的局部规则并行地进行

重复更新. 机动车在运动时占用的元胞除了仍具有状态 0 和 1 外, 还具有其他的特性: 包括速度、加速度等, 元胞状态进行同步更新和感知与外界环境交互, 可以根据与领域内其他车辆协商决定下一个周期内自身状态.

路段由相同大小的元胞连续排列而成, 并且分内侧和外侧两条组成. 在本文中, 整个路网是一个二维的空间网格结构, 单个元胞的大小定义为与车辆大小相同的  $2.0\text{ m} \times 3.0\text{ m}$  矩形方格. 元胞的状态有 0 和 1 两种, 如果该部分元胞有车辆占据, 则为 1; 没有则为 0.

### 2.1 驾驶员行为决策模型

驾驶员要能根据当前的状态和环境变化选择最优的动作策略<sup>[25]</sup>. 因此, 在 Liu 的方法的基础上, 本文提出如下模型:

$$\text{DBDM} = (\text{DA}, \text{E}, \text{S}, \text{A}, \text{Event}, \text{T}, \text{W}), \quad (1)$$

其中, DA 表示处于交通环境中的驾驶 Agent,  $\text{DA}_i \in \text{DA}$ ,  $\text{DA}_i$  表示第  $i$  个驾驶 Agent; E 表示驾驶 Agent 所处的环境; Event 表示驾驶 Agent 在驾驶过程中的事件集合.  $\text{Event} = (\text{DA}_s, \text{DA}_a)$ ,  $\text{DA}_s \in \text{DA}$ ,  $\text{DA}_a \in \text{DA}$ , 下标  $s$  和  $a$  表示当前驾驶 Agent 和相邻的驾驶 Agent; S 表示车辆的有限离散状态空间,  $\text{S}_j \in \text{S}$ ,  $\text{S}_j$  是第  $j$  个状态, 状态数  $j \geq 2$ ; A 表示驾驶 Agent 的有限离散动作空间,  $\text{A}_n \in \text{A}$ ,  $\text{A}_n$  是第  $n$  个动作, 动作数  $N \geq 2$ ; T 表示驾驶 Agent 决策函数, 可以简单地描述为  $\text{T}: \text{S} \xrightarrow{\text{Event}} \text{St}$ ; W 表示驾驶 Agent 决策类型, 分为激进型和保守型. 从以上可以看出, 要计算出驾驶 Agent 的策略, 就需要对 Agent 的动作和车辆状态作详细的定义和更新.

### 2.2 驾驶的动作空间

驾驶员在驾驶过程中可以采取的动作有很多种, 这些动作都会对驾驶员当前所处的状态产生影响. 定义驾驶 Agent 的动作空间就需要对驾驶员的复杂动作做一些抽象和分解<sup>[26]</sup>. 根据 Rigolli 等人对驾驶员动作的分解, 本文选取以下 7 个动作组成驾驶 Agent 的动作空间: 加速 (Accelerate)、减速 (Brake)、保持 (Do Thing)、换到左边车道 (Change To Left)、换到右边车道 (Change To Right)、左转 (Turn Left) 和右转 (Turn Right), 即

$$\text{A} = \{\text{Accelerate}, \text{Brake}, \text{DoThing}, \text{TurnLeft}, \text{TurnRight},$$

$$\text{ChangeToLeft, ChangeToRight}\}. \quad (2)$$

### 2.3 车辆的状态

$$\text{加速过程: } v_i \rightarrow \min(v_{\max}, v_{i+1}); \quad (3)$$

$$\text{确定性减速过程: } v_i \rightarrow \min(v_i, d_i); \quad (4)$$

$$\text{以概率 } P_d \text{ 随机减速过程: } v_i \rightarrow \max(0, v_{i-1}); \quad (5)$$

$$\text{位置更新: } x_i \rightarrow x_i + v_i; \quad (6)$$

$x_i$  和  $v_i$  为第  $i$  辆车  $t$  时刻的位置和速度,  $d_i$  为第  $i$  辆车  $t$  时刻与前方紧邻车辆之间的间距,  $v_{\max}$  为车辆的最大速度.

### 2.4 车头时距的生成

道路上车辆的车头时距(前后两辆车到达同一道路断面的时间差)往往服从特定随机分布规律. 车辆的出发时间模型是根据已知车辆进出点在某一时段内的总量按照一定的车头时距随机分布规律来确定每辆车的出发时间, 在交通仿真中泊松分布被成功地用于描述连续时间间隔内源节点的出发车辆数, 这种计数分布所对应的间隔分布(车头时距分布)满足负指数分布, 以下是车头时距服从负指数分布的情况下对于某给定的进出点, 其车辆产生时刻的确定方法:

$$t_n = t_{n-1} - \frac{\ln(r)}{\lambda}, \quad (7)$$

式中,  $t_n, t_{n-1}$  分别为该进出点第  $n$  辆车和第  $n-1$  辆车的产生时刻(s);  $\lambda$  为某进出点对车辆到达率, 即单位时间内通过该进出点的车辆总数(辆·s<sup>-1</sup>), 其值可由进出点表确定;  $r$  为一个数值在 (0, 1] 之间变化的随机数.

### 2.5 车辆进出点属性及速度初始化的确定

在开始进入路网时, 车辆的速度是位于 (0,  $V_{\max}$ ) 的一个整数值, 通过均匀分布产生车辆的初始速度. 在道路的出口处, 如果车辆位置超出道路长度, 则车辆驶出道路.

## 3 环行交叉口通行规则与协调

### 3.1 通行规则

在环行交叉路口中(如图 2 所示), 道路分内外两种车道, 并呈同心圆分布. 根据《道路交通管理

条例》规定, 靠近中心岛的车道为内侧车道供车辆绕行, 最外侧车道供车辆右转弯之用. 本文为了简化, 假设都为单车道对称分布, 车辆沿逆时针绕环岛行驶.

环岛的设计消除了交通信号灯带来的车辆拥挤和长时间等待, 提高了车辆通行速度和安全性, 可以轻松实现 U 形调头, 很大程度上降低了交通流的复杂程度. 行驶方式可以简单归结为以下两种方式:

1) 车辆驶入环岛准备在下一个路口离开, 则右转进入外侧车道在下一个路口右转离开(如图 2 中线路一).

2) 如果车辆驶入环岛不准备在下一个路口离开, 则右转进入内侧车道, 然后绕环岛行驶直到所要离开的路口之前换到外侧车道右转驶出为止(如图 2 中线路二).

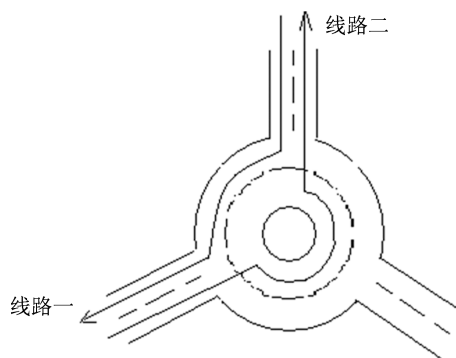


图 2 环行交叉路口中行驶线路图

### 3.2 冲突干扰

在通行过程中, 由于进入和离开环岛内外侧车道, 车辆存在换道超车. 因此, 车辆驾驶者需要时刻高度警惕侧方车道的交通状况, 随时调整车辆的行驶速度和安全距离, 以避免其他车辆变更车道造成的交通事故.

由于换道的存在, 致使环岛内行驶的车辆相互之间存在如下三种冲突干扰:

**类型1** 当 B 车在外环车道行驶, 在换向内侧车道的过程中, 会对正在内侧后方行驶的车辆 A 产生干扰(如图 3(a)).

**类型2** 当位于内环的 A 车想在下一个路口离开环岛, 在换向外侧车道的过程中, 会对正在外侧后方行驶的车辆 B 产生干扰(如图 3(b)).

**类型3** 当 B 车在外环车道行驶, 想换入内侧车道的同时, 位于内环的 A 车也想换入外侧车道, 出现交织, 势必会发生冲突干扰(如图 3(c)).

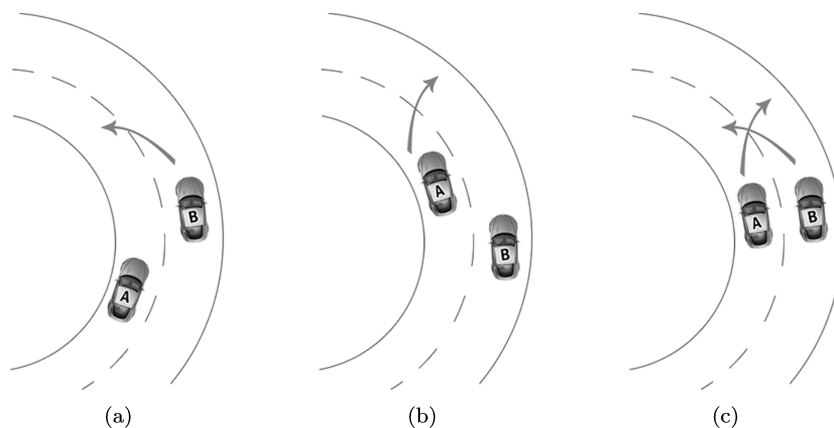


图3 冲突分类

### 3.3 冲突消解

从以上分析可以看出, 在车辆换道过程中, 每辆车会按照自己的目标和驾驶习惯行驶, 但是遇到冲突干扰时往往需要依靠驾驶者的经验判断. 因此, 如何模拟车辆之间的冲突消解, 真实反映道路实际状况具有很重要的意义.

多智能体系统在解决车辆行驶过程中出现的冲突干扰, 从以下两个方面出发:

首先, 冲突消解应该遵循交通法规的规定. 在静态设计中尽量分解潜在的冲突干扰. 如果不能分解, 按照法规和文明行车制定优先级策略, 赋予车辆不同的优先级别. 那么高优先级的车辆具有行驶优先权, 当车辆之间发生冲突的时候, 保证高优先级车辆加速或优先动作, 其他车辆采取减速、避让或等待排队策略.

其次, 如果车辆没有优先级或者两者的优先级相同, 实际中驾驶者通过鸣笛和灯光提示等措施动态协商解决冲突.

在图3中类型一和类型二可以共同分解为图4中前三种方案.

1) 若A车想向B车所在车道换道, 在变道前与B车并行行驶(如图4(a)). 根据交通规则和文明行车的社会风俗, 换道的A车须避让B车, 让其先行通过. 即A车主动减速, 待B车超过后再换道:

$$\begin{aligned} D < 0 \rightarrow \Psi(A) < \Psi(B) \rightarrow V_A(t+1) \\ = V_A(t) - \Delta V, \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $D$  为A车距离B车的距离,  $\Psi(A)$ ,  $\Psi(B)$  分别为A车和B车的优先级,  $\Delta V$  为车速调节量.

2) 在A车与B车距离未超过安全距离情况下(如图4(b)), A车会通过转向灯光征询B车是否同

意换道. 如果B车主动减速, 则A车会加速并线换道. 如果B车通过鸣笛或者远近光灯的变换提示A车禁止换道, 并且加速行驶, 则A车必须减速等待B车通过. 即

$$\begin{aligned} k_A = 1 \cap d_B = 1 \rightarrow \psi(A) \psi(B) \rightarrow V_A(t+1) \\ = V_A(t) + \Delta V; V_B(t+1) = V_B(t) - \Delta V \\ k_A = 1 \cap d_B = 0 \rightarrow \psi(A) \langle \psi(B) \rightarrow V_A(t+1) \\ = V_A(t) - \Delta V; V_B(t+1) = V_B(t) + \Delta V, \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $k_A, k_B$  分别代表A车、B车转向信号灯的状态, 1表示开启, 0表示关闭.  $d_A, d_B$  分别代表A车、B车对应车辆换道请求的同意度, 1示同意, 0表示拒绝.

3) 若A车与B车距离超过安全距离(一般与车速相等)(如图4(c)), A车向B车所在车道换道, B车出于安全考虑, 不会加速:

$$D > V \rightarrow \Psi(A) = \Psi(B) \rightarrow V_B(t+1) \leq V_B(t). \quad (10)$$

4) 在交叉换道中(如图4(d)), 先打转向灯者占优, 如果后者通过鸣笛或者远近光灯表示拒绝让道, 则前者减速让后者先换道. 反之, 前者加速换道, 后者减速换道. 即

$$\begin{aligned} k_A = 1 \cap d_B = 1 \rightarrow V_A(t+1) = V_A(t) + \Delta V, \\ k_B = 1 \cap d_A = 1 \rightarrow V_B(t+1) = V_B(t) + \Delta V, \\ k_A = 1 \cap d_B = 0 \rightarrow V_A(t+1) = V_A(t) - \Delta V, \\ k_B = 1 \cap d_A = 0 \rightarrow V_B(t+1) = V_B(t) - \Delta V. \end{aligned} \quad (11)$$

## 4 数值模拟

本文监测了某中小城市的典型环形交叉路口交通流量, 并作为研究样本, 限于篇幅仅举例列取

不同时间段环形交叉口入口交通流量(如表 1). 基于 MATLAB 仿真工具和该环形交叉路口的几何数据(如表 2), 进行了仿真试验. 比较了在不同时间段实际与模拟的环形交叉路口的车流量, 即进出口流量和内环流量.

在试验中, 取环形交叉口入口处和出口处以

及内环道作为流量监测点(如图 5 中红块位置). 起始将车辆从环形交叉路口入口前方 50 m 处开始行驶, 车速控制在 20 km/h 到 40 km/h 之间变化. 理想车速的分布呈均匀变化, 变化量 5 km/h. 早晚高峰时间内环的车流量每 10 min 变化一次, 车辆流量从每小时 300 辆增加至每小时 1200 辆.

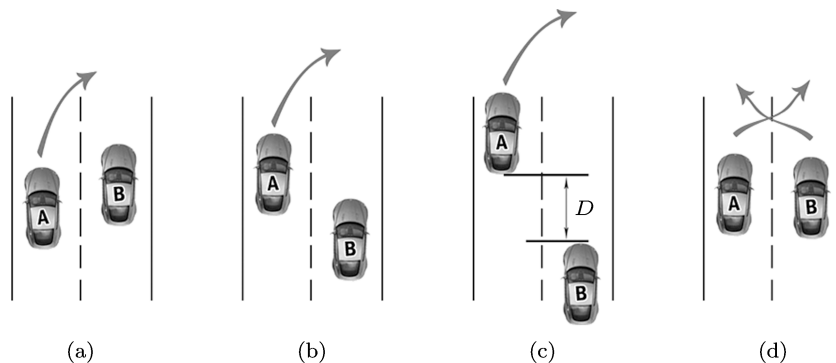


图 4 优先级与冲突协商

表 1 不同时间段环形交叉口入口交通流量(辆)

时间点/h	区间/min					
	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60
7	75	106	80	130	116	155
8	162	172	180	175	170	188
9	190	197	186	174	155	104
17	113	115	144	156	178	185
18	199	195	196	168	159	157
19	150	137	124	112	101	104

表 2 环形交叉口几何数据

中心岛半径/m	每车道基本宽度/m	环道的每车道宽度/m	环道路面总宽度/m
50	3.5	4.5	14



图 5 环形交叉路口流量监测点位置

在图 6 中,  $X$  坐标代表环形交叉路口内环的流量而  $Y$  坐标则代表入口流量. 对比图中的曲线可以

看出模拟流量接近真实情况, 并且内环发生冲突越严重车流量越低.

在上文的模型建立过程中可以看出, 参数激进型驾驶员比例  $k$  和换道概率  $p$  与机动车特性有关, 下面分析机动车具有不同特性时(参数  $k$  和  $p$  取不同值), 系统具有的物理规律.

图 7 至图 16 分别是  $k$  从 0 到 0.9 时的流量关于参数  $p$  的分岔图. 可以看出, 随着  $k$  从小到大变化, 系统出现稳定—倍周期分岔—混沌的过程. 并且, 随着  $p$  的增大, 分岔越来越多, 混沌越来越剧烈.

进一步分析, 在相同条件下,  $k$  从低到高变化, 车流流量越来越小. 原因在于正常行驶中车辆速度往往比较稳定, 但是激进型驾驶员在冲突协商过程

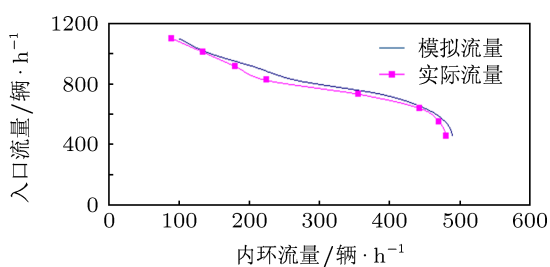


图6 入口流量与内环的流量的关系

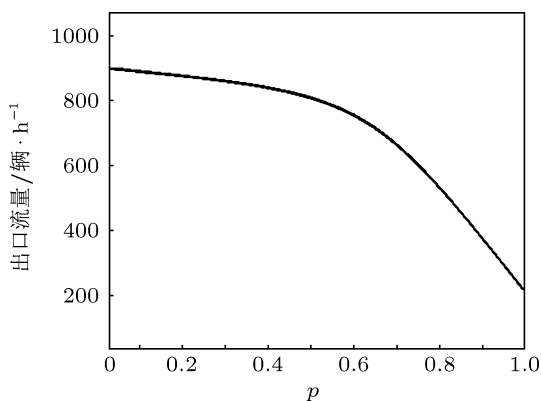


图7  $k=0$ 时流量关于参数  $p$  的分岔图

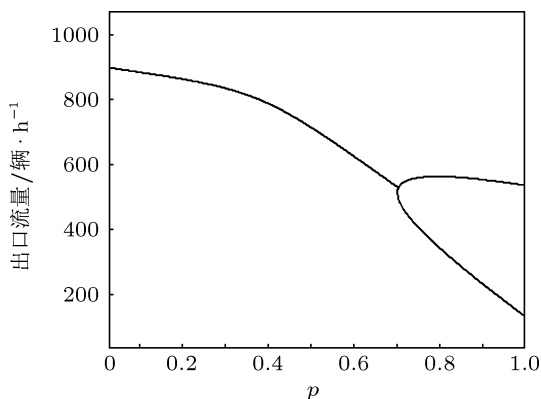


图8  $k=0.1$ 时流量关于参数  $p$  的分岔图

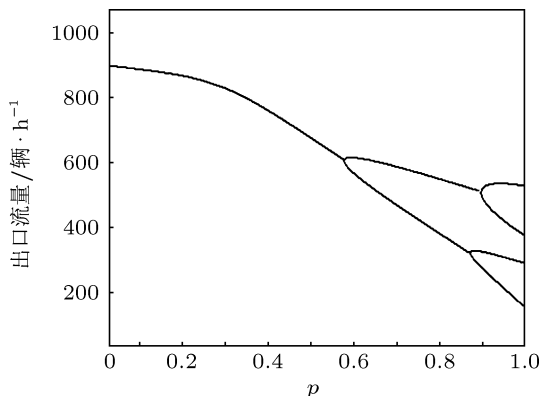


图9  $k=0.2$ 时流量关于参数  $p$  的分岔图

中采取拒绝让步. 所以要换道车辆减速等待, 其速度对后面车辆的换道造成了不良影响, 使得这些

车辆调整跟驰以达到安全行车, 造成不良循环, 相互克制, 所以驾驶员特性对流量的影响比较明显.

判别混沌系统的方法主要有功率谱法、主分量分析法、庞加莱截面法、最大李雅谱诺夫指数法和相平面法. 本文采用分岔图和最大李雅谱诺夫指数法相结合.

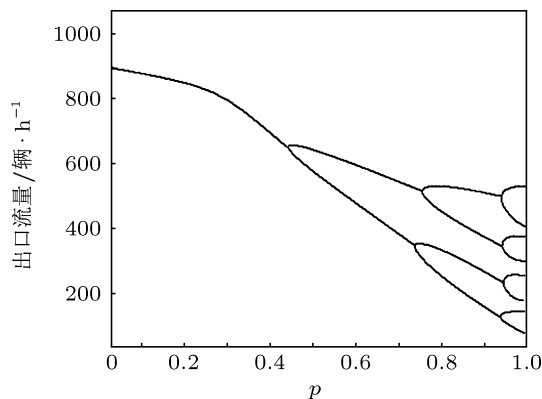


图10  $k=0.3$ 时流量关于参数  $p$  的分岔图

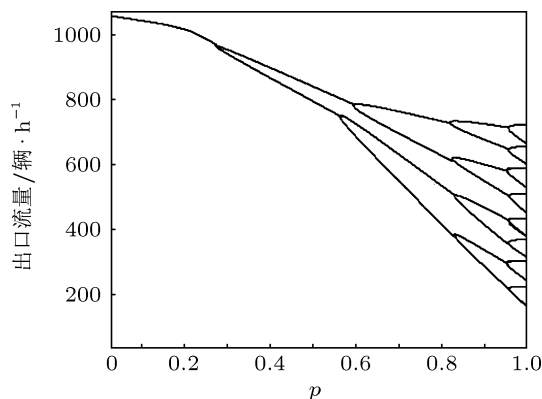


图11  $k=0.4$ 时流量关于参数  $p$  的分岔图

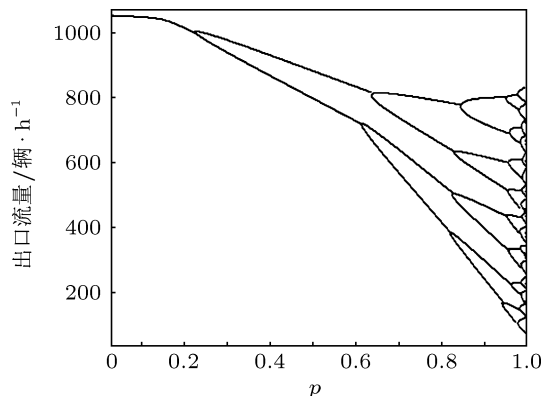


图12  $k=0.5$ 时流量关于参数  $p$  的分岔图

在计算最大 Lyapunov 指数过程中, 采用时间序列重构, 对每个点  $V_j$  寻找其最近邻点  $V_j'$ .

定义分离间隔

$$\omega = \max(\tau_i)/\Delta t, \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (12)$$

假定  $d_j(0)$  为  $V_j$  到其最近邻点  $V_{j'}$  的距离, 即

$$d_j(0) = \|V_j - V_{j'}\|, \quad |j - j'| > \omega. \quad (13)$$

对相空间中的每个点  $V_j$ , 计算出其最近邻点在第  $i$  步前向演化后的距离, 即

$$d_j(i) = \|V_{j+1} - V_{j+i'}\|. \quad (14)$$

其中,  $i = J_0, J_0 + 1, \dots, N$ .

假定  $V_j$  的最近邻点以最大 Lyapunov 指数的速率发散, 即  $d_j(i) = d_j(0) \times e^{\lambda(i\Delta t)}$ , 两边取对数, 得  $\ln d_j(i) = \ln d_j(0) + \lambda(i\Delta t)$ , 针对  $\ln d_j(i)$  相对  $i\Delta t$  的曲线, 利用最小二乘法拟合得到最大 Lyapunov 指

数  $\lambda_1$  为

$$\lambda_1 = [i \times y(i)] / \sum i^2, \quad (15)$$

式中

$$y(i) = \left( \sum_{j=1}^p \ln d_j(i) \right) / (p\Delta t),$$

$p$  为非零的  $d_j(i)$  个数.

通过数值实验发现, 当  $k > 0.5$  时, 系统的 Lyapunov 指数将出现大于 0 的情况, 即系统出现混沌现象. 图 13 至图 16 分别是  $k$  从 0.6 到 0.9 时的流量关于参数  $p$  的分岔图和系统的 Lyapunov 指数.

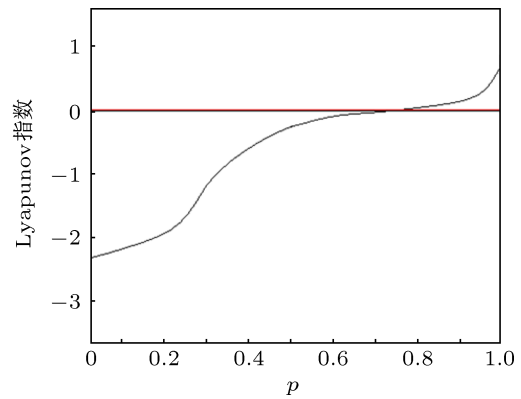
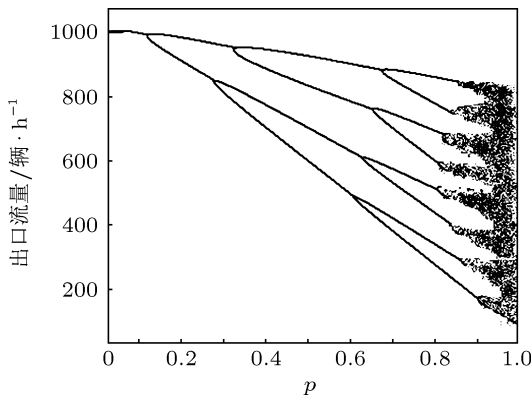


图 13  $k = 0.6$  时的流量关于参数  $p$  的分岔图和系统的 Lyapunov 指数

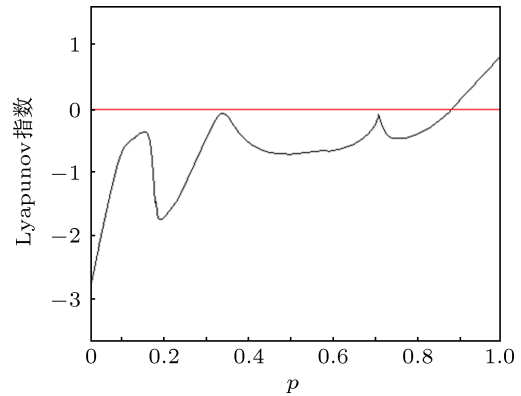
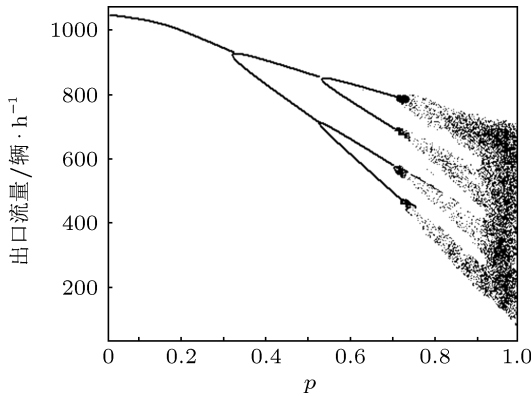


图 14  $k = 0.7$  时的流量关于参数  $p$  的分岔图和系统的 Lyapunov 指数

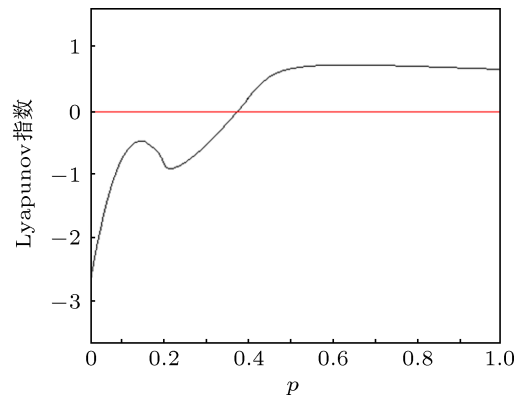
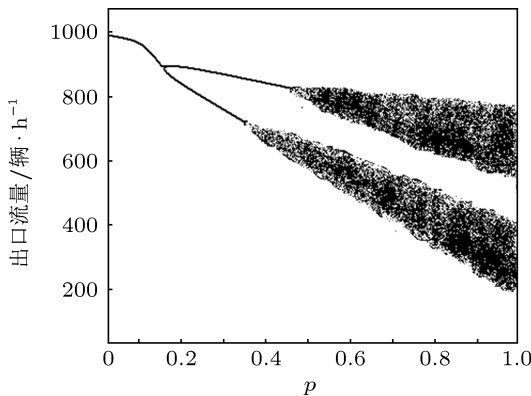


图 15  $k = 0.8$  时的流量关于参数  $p$  的分岔图和系统的 Lyapunov 指数

由图 13—图 16 看出  $p$  对流量的影响情况. 在  $k$  超过 0.5 时, 流量随  $p$  的提高而明显下降伴随混沌现象, 这是与实际交通规律是符合的. 因为, 车辆换道请求往往遭到拒绝, 不仅导致车流的速度

降低, 而且降低了车辆的跟驰速度, 增加了行驶时间, 最终造成流量的明显下降. 当  $k$  较低时, 车辆在大部分时间都可以自由换道,  $p$  的影响居于次要位置, 所以流量变化不是特别明显.

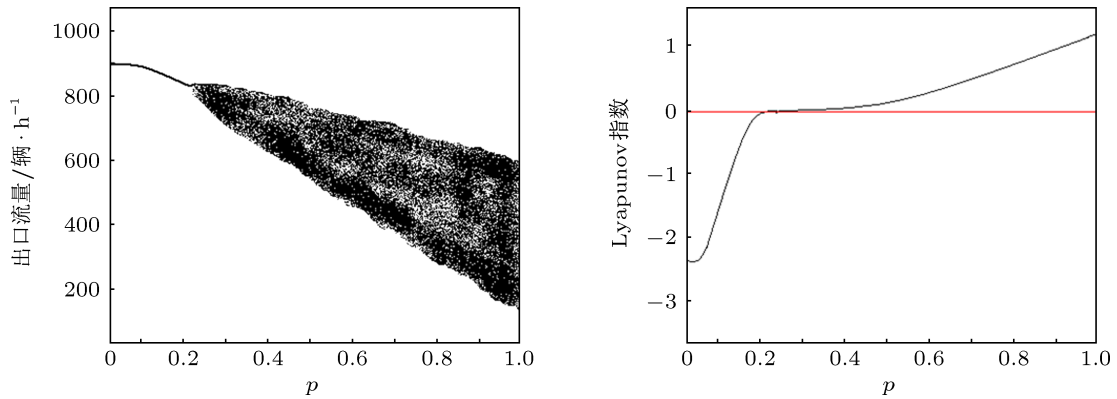


图 16  $k = 0.9$  时的流量关于参数  $p$  的分岔图和系统的 Lyapunov 指数

## 5 结论

环行交叉口是冲突较为复杂的场所, 拥有着消除冲突降低交通事故等诸多交通流研究中重要意义的课题. 本文通过将机动车建立为一个含有驾驶员模型的智能体, 再耦合环行交叉口的元胞自动机模型组成多智能体系统. 在建立了环行交叉路口中行驶的交通规则基础上, 分析了换道导致的三种类

型冲突. 针对每种类型总结特点和规律, 提出优先级策略和动态协商机制消解冲突. 以某中小城市的典型环行交叉路口交通流量为样本数据对比验证模型的正确性, 结果表明模拟流量接近真实情况, 并且内环发生冲突越严重车流量越低. 进一步研究得出如下结论: 机动车属性参数  $k$  达到 0.1 和  $p$  达到 0.7 时出现分岔, 当  $k$  超过 0.5 时系统出现混沌.

- [1] Han M, Yuan L 2012 *Highway Engineering* **37** 3701 (in Chinese) [韩敏, 袁黎 2012 公路工程 **37** 3701]
- [2] Li Y, Liu J X, Shen D J, Liu X, Qu D 2009 *Highways & Automotive Applications* **06** 16 (in Chinese) [李洋, 刘建勋, 沈大吉, 刘璇, 曲冬 2009 公路与汽车 **06** 16]
- [3] Gao X, Zhu R J, Jin W G 2009 *Transportation Science & Technology* **S2** 22 (in Chinese) [高欣, 朱荣军, 金文刚 2009 交通科技 **S2** 22]
- [4] Zhu H Y 2007 *Shanxi Architecture* **33** 3303 (in Chinese) [朱海英 2007 山西建筑 **33** 3303]
- [5] Wang Y Z 2005 *Nonferrous Metals Engineering & Research* **26** 58 (in Chinese) [王杨振 2006 有色冶金设计与研究 **26** 58]
- [6] Jing C G, Wang D H 2004 *China Civil Engineering Journal* **37** 3706 (in Chinese) [景春光, 王殿海 2004 土木工程学报 **37** 3706]
- [7] Tang T Q, Huang H J, Gang X, Ying Z 2008 *Euro Phys. Lett.* **84** 14006
- [8] Tang T Q, Huang H J, Wong S C, Gao Z Y, Zhang Y 2009 *Commun. in Theor. Phys.* **51** 71
- [9] Tang T Q, Huang H J, Shang H Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 050517
- [10] Tang T Q, Huang H J, Shang H Y 2011 *International Journal of Modern Physics* **25** 4471
- [11] Tang T Q, Huang H J, Shang H Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6003 (in Chinese) [唐铁桥, 黄海军, 尚华艳 2010 物理学报 **59** 6003]
- [12] Tang T Q, Huang H J, Shang H Y 2010 *Commun. in Theor. Phys.* **54** 943
- [13] Tang T Q, Wu Y H, Caccetta L 2011 *Phys. Lett. A* **375** 3845
- [14] Tang T Q, Huang H J 2010 *International Journal of Modern* **24** 5613
- [15] Tang T Q, Li C Y, Wu Y H 2011 *Physica A-Statistical Mechanics and its Applications* **390** 3362
- [16] Mei C Q, Huang H J, Tang T Q, Wang H W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5803 (in Chinese) [梅超群, 黄海军, 唐铁桥, 王惠文 2009 物理学报 **58** 5803]
- [17] Bai K Z, Chen R X, Liu M R, Kong L J, Zheng R S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5807 (in Chinese) [白克钊, 陈瑞熊, 刘慕仁, 孔令江, 郑容森 2009 物理学报 **58** 5807]
- [18] Bai K Z, Kuang H, Liu M R, Kong L J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5909 (in Chinese) [白克钊, 邝华, 刘慕仁, 孔令江 2010 物理学报 **59** 5909]
- [19] Sun S P, Zhao D P, Li Y H 2004 *Journal of Dalian Maritime University* **30** 3004 (in Chinese) [孙少鹏, 李德鹏, 李源惠 2004 大连海事大学学报 **30** 3004]
- [20] Pan M Y, Yan F, Xie H Y 2006 *Journal of Traffic and Transportation Engineering* **6** 0602 (in Chinese) [潘明阳, 严飞, 谢海燕 2006 交通运输工程学报 **6** 0602]
- [21] Yang F, Yun M P, Yang X G 2012 *Journal of Tongji University (Natural Science)* **40** 4008 (in Chinese) [杨帆, 云美萍, 杨晓光 2012 同济大学学报 (自然科学版) **40** 4008]



- [22] Yang Q S, Li X 2007 *Scientia Geographical Sin.* **27** 2704 (in Chinese) [杨青生, 黎夏 2007 地理科学 **27** 2704]  
[23] Quan Q, Tian G J, Sha M Q 2011 *Acta Ecological Sin.* **31** 3110 (in Chinese) [全泉, 田光进, 沙默泉 2011 生态学报 **31** 3110]  
[24] Liu S X, Guan H Z, Yan H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 090506 (in Chinese) [刘诗序, 关宏志, 严海 2012 物理学报 **61** 090506]  
[25] Arnaud D, Rene M A, Sylvain P, Stephane E 2008 *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **21** 1443  
[26] Öznur Y, Alberto C, Alessandro L, Emanuele R 2012 *Social and Behavioral Sciences* **54** 1350

## Vehicle negotiation model and bifurcation dynamic characteristics research\*

Huang Chen<sup>1)†</sup> Chen Long<sup>1)</sup> Bi Qin-Sheng<sup>2)</sup> Jiang Hao-Bin<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (College of Civil Engineering of Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

<sup>2)</sup> (College of Civil Engineering of Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(Received 3 June 2013; revised manuscript received 18 July 2013)

### Abstract

There are three kinds of conflicts in a traffic flow at the traffic circle because of track changing. We establish the driver model by regarding each vehicle as an intelligent agent which constitutes the multi-agent system by integrating the cellular automation model at the traffic circle. Besides, we put forward the problem how to eliminate the conflicts between the vehicle agents by priority strategy and dynamic negotiation mechanism. Take the traffic flow at the classic traffic circle of the suburban area of a small-medium city as the sample data to simulate and verify the accuracy of the model, and study the influences of some factors on the flow of motor vehicle, such as the proportion of different driver type and track changing probability, etc. The experimental result shows that the model constructed is consistent with the actual situation. Meanwhile, it is found that the driver characteristics have obvious influences on the flow, and the track changing probability follows, which does not have obvious influences on the fluctuation in the flow.

**Keywords:** multi-agent, cellular automation, negotiation, bifurcation

**PACS:** 05.50.+q, 05.45.Gg

**DOI:** 10.7498/aps.62.210507

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50875112), the Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (Grant No. 20093227110013), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (Grant No. BK2010337), the Postgraduate Innovation Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (Grant No. CX10B\_253Z).

† Corresponding author. E-mail: hcshumo@163.com