

城市协调控制主干路交通流模型

张萌萌^{1,2}, 贾磊¹

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东交通学院交通与物流工程系, 山东 济南 250023)

摘要: 城市协调控制主干路交通流模型是交通预测、仿真、信号配时的前提和基础. 论文通过改进开放性边界条件, 利用一维元胞自动机模型模拟协调控制主干路交通流状况. 该模型采用差分方程的形式描述车辆动态行为. 解除了信号灯等间距布设的限制, 每个路口的信号灯可以根据交通流变化选择绿信比, 相邻交叉口采用绿波控制方式调整相位差. 论文利用MATLAB软件对模型进行仿真, 分析了驶入主干路流量以及干、支路的转弯流量对于主干路平均速度、平均密度和平均流量的影响. 在仿真结果的基础上, 提出了相应的控制措施改善主干路交通状况.

关键词: 交通流; 元胞自动机; 主干路; 协调控制; 开放性边界

中图分类号: U491.51 **文献标识码:** A

Mathematical model of traffic flow on arteries with coordinated control system

ZHANG Meng-meng^{1,2}, JIA Lei¹

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan Shandong 250061, China;

2. Department of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong 250023, China)

Abstract: Mathematical model of traffic flow on arteries with coordinated control system is a prerequisite for traffic forecasting, simulating and signal timing. A one-dimensional cellular automaton-model with improved open boundary conditions is used to simulate the traffic flow on arterial roads with coordinated control system. The model employs difference equations to describe dynamic behaviors of vehicles. The restriction on regularly spaced distribution of traffic signal lamps can be eliminated. Furthermore, the green-signal-ratio on every intersection can be chosen according to traffic flow fluctuations. The phase difference between adjacent intersections can be adjusted by green wave control. MATLAB is employed to simulate this model to analyze the impacts on mean velocity, density and volume of arterial traffic flow by the flow volume on the artery and the turning flow volumes from branches. Based on the results of simulation, a series of proposals for improving the arterial traffic situations are put forward.

Key words: traffic flow; cellular automaton; artery; coordinate control; open boundary

1 引言(Introduction)

城市主干路承担着巨大的交通负荷, 提高其协调控制效果, 减少交通延误对改善整个城市交通状况具有重大意义. 要实现城市主干路交通系统的最优控制, 合理确定受控系统内交叉口信号配时, 首先需要确定受控系统交通流特性.

国内外对于信号控制交叉口车队离散规律已经做了一些研究. Pacey^[1]和Robertson^[2]分别利用正态分布模型、几何分布模型分析车队离散规律, 王殿海等人^[3]基于我国城市交通实际建立了无变换正态分布的车队离散模型. 这些概率统计模型均是基于严格的数学假设, 车辆到达交叉口后位于停车线处等待, 忽略了下游排队车辆对于上游驶出车辆的影响. 然而, 在实际的交通系统中, 交通流多处于不稳

定状态, 且由于信号控制交叉口的影响, 交通激波频繁出现, 在这种复杂的交通情况下, 基于概率统计的数学模型无法精确地描述交通流, 因此限制了其在交通控制系统中的应用.

谭惠丽、彭麟、Makoto等人^[4~6]分别建立了二维元胞自动机模型(以下简称CA模型)模拟信号控制主干路交通流, 这些模型均假设交通流满足周期性边界条件, 且支路间距相等、各交叉口信号控制同步. 黄兵花等人^[7]在以上研究的基础上, 打破了周期性边界条件的约束, 提出了开放性边界二维CA模型以模拟信号控制同步、支路等间距布设的主干路交通流. 顾国庆等人^[8,9]对二维CA模型进行改进, 引入绿波控制, 以模拟信号灯随机分布的主干路交通流, 使得模型更贴合实际主干路信号灯布设位置以及配时

收稿日期: 2010-06-08; 收修稿日期: 2010-12-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60674062); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060422054); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2009GM032); 山东大学自主创新基金资助项目(2009TS046).

情况.

上述CA模型均通过描述一系列车辆运行规则模拟主干路交通流,但当主干路采用绿波协调控制方式调节相邻交叉口相位差,各路口的信号灯可以根据交通流状况自由选择绿信比,且解除了信号灯等间距布设的限制时,车辆运行状况会变得更加复杂,如果仍采用描述车辆在各时步运行演变规则的方法,会导致模型规模庞大、结构繁杂.为简化规则描述,Fukui和Ishibashi^[10]以差分方程的形式给出了确定CA模型.定义车辆 m 在 t 时步的位置为 $x(m, t)$,其中标号 m 与 t 均为整数.该确定CA模型如式(1)所示:

$$x(m, t+1) = \min\{x(m, t) + v_{\max}, x(m+1, t) - 1\}, \quad (1)$$

式中: $\min\{A, B\}$ 为最小化函数且取 A, B 的最小值; v_{\max} 为车辆在主干路的最大行驶速度.

车辆的速度取决于车头间距,如果车头间距大于单位时间最大行进距离,则车辆在单位时间内向前行驶 v_{\max} ;如果车头间距小于单位时间最大行进距离,则车辆在单位时间内行驶 $\text{gap}(m) - 1$, $\text{gap}(m)$ 为第 m 辆车距离前车的最大空格数.

该模型利用差分方程取代演化规则,更加简明、有效地模拟了未布设信号灯的主干路交通流状况.Takashi Nagatani^[11]在Fukui和Ishibashi提出的模型的基础上,考虑信号灯对交通流的影响,提出了改进的CA模型:

车辆 m 在 t 时步即将驶达的交叉口 s 的坐标位置 $x(m, s, t)$ 由式(2)给出:

$$x(m, s, t) = [\text{int}(x(m, t)/l) + 1]l. \quad (2)$$

车辆 m 在 $t+1$ 时步的位置由式(3)给出:

$$\begin{aligned} x(m, t+1) = & \min\{x(m, t) + v_{\max}, x(m+1, t) - 1\} \cdot \\ & [1 - \xi(\sin(2\pi t/c))] + \\ & \min\{x(m, t) + v_{\max}, x(m+1, t) - 1, \\ & x(m, s, t) - 1\} \cdot \xi(\sin(2\pi t/c)), \end{aligned} \quad (3)$$

式中: c 为主干路协调控制系统公共周期; $\xi(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases}$, 主干路没有信号灯时,式(3)可以简化成式(1).如果信号灯在车辆 m 到达交叉口之前变为绿灯, $\xi(\sin(2\pi t/c)) = 0$;如果信号灯在车辆到达前变为红灯, $\xi(\sin(2\pi t/c)) = 1$.

式(3)简单描述了车辆在一系列信号灯作用下的动态行为,比用一组CA规则描述仿真更为容易.但该模型仅能够仿真主干路上交叉口等间距布设且信号控制同步变化的情况;此外,模型还假设各交叉口均采用绿信比为0.5的两相位信号控制,且忽略了

主干路以及与之相交的支路转弯车辆对于主干路交通流的影响.对于城市主干路,各交叉口之间的距离并不一定相同,并且由于主干路的交通量要远远大于支路交通量,绿信比也很难控制在0.5.基于以上考虑,论文在Takashi Nagatani CA模型的基础上,考虑主干路绿波控制、驶入流量、转弯流量以及下游交叉口排队“溢出”等因素对主干路交通流的影响,提出了开放性边界的一维元胞自动机模型以描述交叉口随机分布的主干路协调控制系统.

2 符号说明及前提假设(Notation definition and premise)

2.1 符号说明(Notation definition)

- $x(i)$ 为交叉口 i 的坐标位置;
- $l(i)$ 为主干路交叉口 i 与交叉口 $i+1$ 之间的距离, $l(i) = x(i+1) - x(i)$;
- $d(t)$ 为 t 时步元胞长度;
- $K(t)$ 为 t 时步主干路交通流平均密度;
- K_j 为阻塞密度;
- $V(t)$ 为 t 时步主干路车辆平均速度;
- V_f 为自由流速度;
- $V(m, t)$ 为 t 时步第 m 辆车的速度;
- $r(i)$ 为交叉口 i 从红灯转为绿灯的时步;
- $\lambda(i, j)$ 为交叉口 i 第 j 相位绿信比;
- $t_{\text{offset}}(i, t)$ 为 t 时步交叉口 i 与交叉口 $i+1$ 之间的相位差;
- $p_{\text{in}}(t)$ 为 t 时步主干路驶入概率;
- $Q_{\text{in}}(t)$ 为 t 时步驶入主干路的交通流量(veh/h);
- $p_x(t)$ 为 t 时步支路车辆转弯概率;
- $Q_{xL}(t)$ 为 t 时步支路左转车流量(veh/h);
- $Q_{xR}(t)$ 为 t 时步支路右转车流量(veh/h);
- $p_y(t)$ 为 t 时步主干路车辆转弯概率;
- $Q_{yL}(t)$ 为 t 时步主干路左转车流量(veh/h);
- $Q_{yR}(t)$ 为 t 时步主干路右转车流量(veh/h).

2.2 前提假设(Premise)

1) 主干路交叉口采用单点定时信号控制方式,选取周期最长的交叉口作为关键路口,并将其周期作为协调控制系统的公共周期 c ;交叉口采用两相位信号配时,根据实际流量确定绿信比,第一相位主干路车辆通行,第二相位支路车辆通行.主干路各交叉口绿灯(红灯)时间为 $c\lambda(i, 1)$ ($c\lambda(i, 2)$),且 $\lambda(i, 1) + \lambda(i, 2) = 1$.各交叉口相位差按照线控单向绿波控制原理设定.

2) 车辆运行状态以1s为单位更新.

3) 将主干路离散成小格,每个小格的长度等于单位时间车辆行进距离,即 $d(t) = V(t)$,为简化计算近似取 $d(t) = 7.5 \text{ m}$.

4) 车辆速度用单位时间车辆位置的改变来表征, 在自然数集合 $\{1, 2, \dots, v_{\max}\}$ 中选取相应值.

5) 主干路仅有一条车道且车道宽度相等. 将主干路起点处作为车辆位置坐标的零点.

2.3 初始条件(Initial conditions)

2.3.1 信号控制(Signal Control)

1) 令第一个交叉口初始红灯变为绿灯的时间:

$$r(1) = 0. \tag{4}$$

2) 相位差满足式(5)(6)所列约束条件:

$$r(i+1) - r(i) = t_{\text{offset}}(i), \tag{5}$$

$$t_{\text{offset}}(i) = \text{mod}(l(i), (V(t) \cdot c)). \tag{6}$$

第 i 个交叉口信号灯由红灯变为绿灯的时间:

$$r(i) = (\text{int}(t/c))c + \text{mod}\left(\sum_{i=1}^{s-1} t_{\text{offset}}(i), c\right). \tag{7}$$

2.3.2 车辆分布(Vehicle distribution)

1) 假设初始时步主干路车辆数为 N , 车辆以密度 $K = N/L$ 随机均匀分布.

2) 确定距离车辆最近的交叉口位置:

车辆 m 在 t 时步即将驶达的交叉口位置 $x(m, s, t)$ 满足式(8)约束:

$$\begin{cases} x(m, s, t) - x(m, t) \geq 0, \\ |x(m, s, t) - x(m, t)| \leq |x(i) - x(m, t)|, \forall i \in S, \end{cases} \tag{8}$$

式中 S 为主干路交叉口集合;

信号灯 s 在 t 时步的状态用阶跃函数 $\zeta(s, t)$ 来表示, 具体形式见式(9):

$$\begin{cases} \zeta(s, t) = \\ \zeta(t - \text{int}(t/c)c - \\ \text{mod}\left(\sum_{i=1}^{s-1} t_{\text{offset}}(i), c\right) - \lambda(s, 1)c), \\ \zeta(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta > 0, \\ 0, & \theta < 0. \end{cases} \end{cases} \tag{9}$$

3 模型(Model)

3.1 CA模型的建立(CA model construction)

主干路车辆位置演化规则可用式(10)表示:

$$\begin{aligned} x(m, t+1) = & \min\{x(m, t) + v_{\max}, x(m+1, t) - 1\} \cdot \\ & (1 - \zeta(s, t)) + \\ & \min\{x(m, t) + v_{\max}, x(m+1, t) - 1, \\ & x(m, s, t) - 1\} \cdot \zeta(s, t). \end{aligned} \tag{10}$$

如果车辆即将驶达的信号灯为绿灯状态, 则 $\zeta(s, t) = 0$, 即相当于无信号控制情况, 式(10)可

以简化为式(1).

如果车辆即将驶达的信号灯为红灯状态, 则 $\zeta(s, t) = 1$. 当车辆 m 驶入下游交叉口时, 前方车辆已在该交叉口形成排队, 则车辆 m 在队尾等待, 排队消散后通过交叉口; 如果前方无车辆排队, 则车辆 m 在停车线处等待绿灯放行. 公式(10)可转化成:

$$\begin{aligned} x(m, t+1) = & \\ & \min\{x(m, t) + v_{\max}, x(m+1, t) - 1, x(m, s, t) - 1\}. \end{aligned} \tag{11}$$

3.2 边界条件(Boundary conditions)

本模型采用开放性边界条件:

1) t 时步在主干路的起点前以概率 $p_{\text{in}}(t)$ 产生一辆速度为 $\min\{\text{gap}(1), v_{\max}\}$ 的车辆, 该车按照式(10)提出的规则演化, 若 t 时步该车不能前移, 则消除该车.

$$p_{\text{in}}(t) = \frac{Q_{\text{in}}(t)}{3600}. \tag{12}$$

2) t 时步如果车辆更新位置坐标超出主干路格点数则认为车辆驶离主干路.

3) t 时步在交叉口 $x(i)$ 处, 如果该交叉口信号控制处于第2相位, 则该位置以概率 $p_x(t)$ 产生一辆速度为1的干道车, 该车按照式(10)提出的规则演化, 若产生时步该车不能前移, 则消除该车; 如果信号控制处于第1相位, 则以概率 $p_y(t)$ 消除位于该处的干道车. $p_x(t), p_y(t)$ 分别由支路转入主干路交通量和主干路转入支路交通量确定, 计算式如下:

$$\begin{cases} p_x(t) = \frac{Q_{xL}(t) + Q_{xR}(t)}{3600}, \\ p_y(t) = \frac{Q_{yL}(t) + Q_{yR}(t)}{3600}. \end{cases} \tag{13}$$

模拟交叉口交通流的元胞自动机模型多采用二维形式, 本论文通过引入边界条件3), 可以通过一维元胞自动机模型实现交叉口模拟, 并且可以更加方便地分析转弯流量对主干路交通流的影响.

4 计算机数值模拟及讨论(Computerized numerical simulation and discussion)

采用MATLAB软件对上述协调控制主干路交通流模型的特性进行模拟, 研究驶入主干路流量以及干、支路的转弯流量对主干路平均速度、密度、流量的影响. 假设 t 时步车辆密度 $K(t) = \frac{N(t)}{L}$, 平均速度

$$V(t) = \frac{\sum_{m=1}^{N(t)} V(m, t)}{N(t)},$$

交通流量 $Q(t) = K(t)V(t)$. 图中给出的平均速度、平均密度、平均流量的计算均是从统计时步 t_1 开

始,到总时步 t_2 结束的平均值,即

$$V = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2} V(t)}{t_2 - t_1}, K = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2} K(t)}{t_2 - t_1}, Q = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2} Q(t)}{t_2 - t_1} \quad (14)$$

模拟时,取 $L = 200$,支路数 $M = 7$,交叉口位置坐标 $x = [30 \ 55 \ 85 \ 105 \ 135 \ 165 \ 200]$,各交叉口绿信比 $\lambda(i, 1) = 0.6$.车辆最大行驶速度 $v_{\max} = 5$ 即 135 km/h .演化总步长 $t_2 = 15000$,统计开始时步 $t_1 = 5000$.图1为干道平均速度、密度、流量随驶入概率的变化关系,图中取干、支道转弯流量 $p_x = p_y = 0.2$.图3为干道平均速度、密度、流量随干、支路转弯概率的变化关系,图中取 $p_{in} = 0.2$.

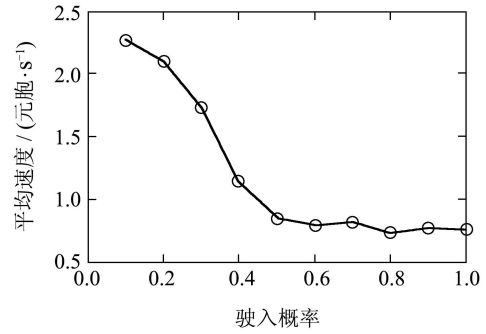
从图1可以看出,在给定参数下,主干路车辆平均速度、密度、流量随着驶入概率的增加呈现一定规律,具体分析如下:

1) 主干路车辆平均速度随驶入概率的增加而降低.当 $0 < p_{in} < 0.5$ 时(主干路驶入流量介于 0 veh/h 至 1800 veh/h 之间),驶入流量低于主干路道路通行能力,平均速度随着驶入流量的增加呈现明显下降趋势,速度值从 $2.25(60.75 \text{ km/h})$ 降至 $0.85(22.95 \text{ km/h})$;当驶入概率升至 $0.5 \sim 1$ 时(主干路驶入流量达到 1800 veh/h),驶入流量接近于或超过了主干路道路通行能力,主干路交通状态由畅通相转为阻塞相,车辆平均速度基本维持在 20 km/h ,震荡下降但下降幅度很小.由此可见,驶入主干路的流量对于主干路交通状态影响较大.当驶入流量超过主干路通行能力时,车辆速度会出现较大幅度下降.为保证车辆在主干路高速行驶,在驶入流量接近通行能力时,应当采取适当控制措施分流驶入主干路车辆.

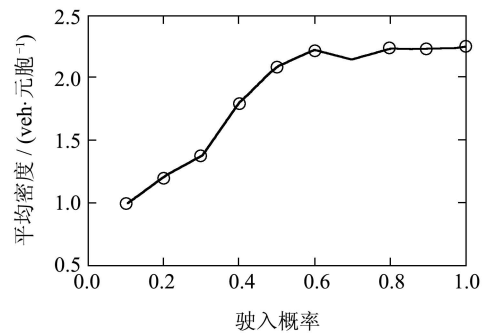
2) 主干路车辆平均密度与平均速度呈现出相反的变化趋势,随驶入概率的增加而增加.同样以 $p_{in} = 0.5$ 作分界点.

3) 主干路平均流量呈现出明显的峰值,在 $p_{in} = 0.3$ 时,车流量达到最大值 $0.282(1157 \text{ veh/h})$,所对应的车辆平均速度为 $1.7(45.9 \text{ km/h})$,车辆平均密度为 $0.18(25.2 \text{ veh/km})$.从以上数据可以看出,当驶入概率维持在 $0.3 \sim 0.4$ 时,主干路交通流呈现高流量、高速度运行状态.当驶入概率小于 0.3 时,主干路车流处于自由流状态,车速较高,密度较小.当驶入概率大于 0.5 时,交通流量降低至 0.26 ,并基本稳定,波动不大.

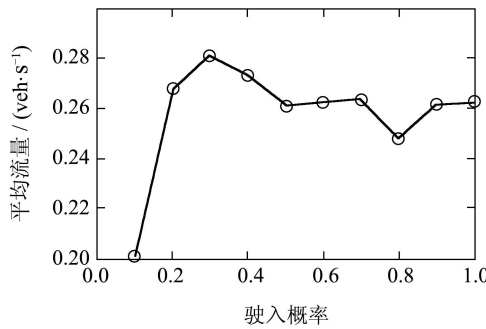
图2分别给出 $p_{in} = 0.3$ 以及 $p_{in} = 0.8$ 时的车辆运行轨迹图.从图中可以看出,当驶入概率维持在 0.3 时,交通流由于红灯期间交叉口对车流的挤压作用,车流呈组团行驶状态,但在路口处并未形成过长的排队.但当 $p_{in} = 0.8$ 时,路口排队现象明显.



(a) 平均速度随驶入概率变化曲线



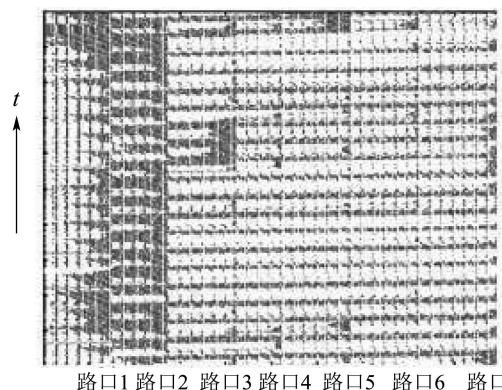
(b) 平均密度随驶入概率变化曲线



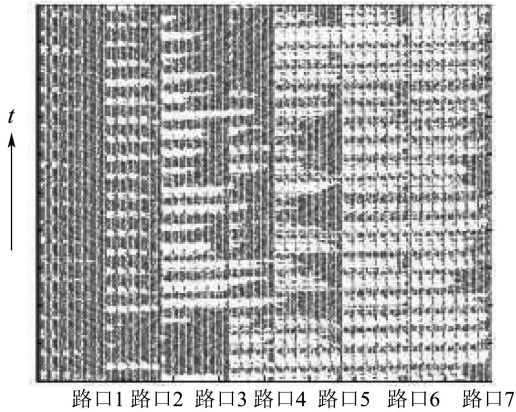
(c) 平均流量随驶入概率变化曲线

图1 交通参数随驶入概率变化曲线

Fig. 1 The curve of traffic parameters fluctuating with probability of vehicle moving into artery



(a) $p_{in} = 0.3, p_x = p_y = 0.2$ 主干路车辆运行时距图



(b) $p_{in} = 0.8, p_x = p_y = 0.2$ 主干路车辆运行时距图

图 2 主干路车辆运行时距图

Fig. 2 Moving locus of vehicles on artery

从图3可以看出, 在给定参数下, 主干路车辆平均速度、密度、流量随着车辆从支路转入主干路的概率 p_x 以及从主干路转入支路的概率 p_y 的变化呈现一定规律, 具体分析如下:

1) 当 p_x 一定时, 随着 p_y 的增加, 车辆速度呈上升趋势. 当支路转入主干路车辆较少或较多时, 即当

$$0 < p_x < 0.2, 0.5 < p_x < 1$$

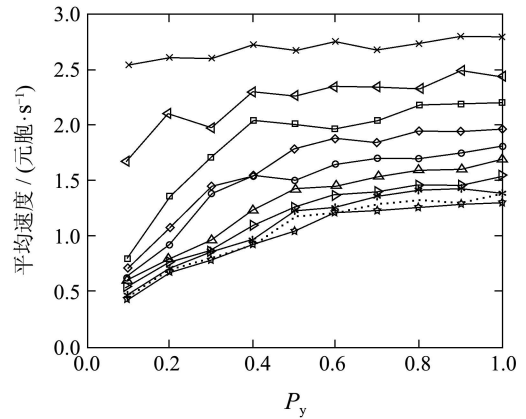
时, 车辆平均速度增加幅度较小; 而当

$$0.2 < p_x < 0.5$$

时, 驶出主干路车流量的变化能够引起平均车速较大范围的波动. 出现这种交通现象的原因在于: 主干路车流初始设为自由流状态, 在支路转入主干路车流量较小时, 因为主干路上路口较多, 车辆受到信号灯影响停车频繁, 即使增加转出流量也无法大幅度提高车辆车速; 当支路转入主干路车辆较多时, 主干路车流增加, 交通由自由相转为阻塞相, 车速降低, 当阻塞到达一定程度, 即使增加转出流量也很难提高交通流平均车速. 在进行交通控制时, 应该有效控制支路驶入主干路的交通流量, 既有利于提高主干路利用率, 又能有效提高车辆在主干路上的运行效率.

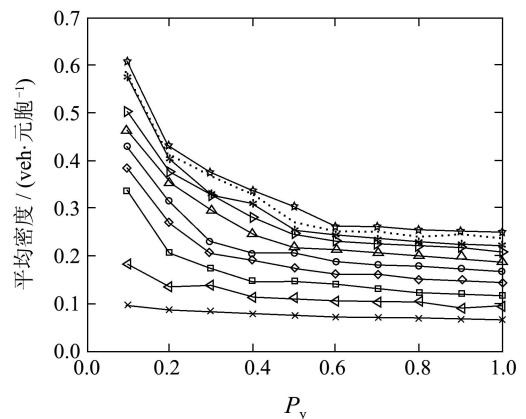
2) 主干路车辆平均密度与平均速度呈现出相反的变化趋势. 当 p_x 一定时, 随着 p_y 的增加, 车辆速度呈下降趋势; 当支路转入主干路的车辆较少时, 车流密度较小且变化幅度不大; 当 p_x 增至0.3~1时, 车辆密度随着主干路转入支路的车流增加而呈现明显的下降趋势.

3) 当 $0 < p_x < 0.2$, 主干路车流量随着 p_y 的增加呈现下降趋势, 并未出现明显的峰值. 当 p_x 增至0.3~1时, 主干路车流在0.2~0.5之间出现明显的峰值. 当转弯概率维持在上述水平, 主干路车流可以维持在高速、高流量状态.



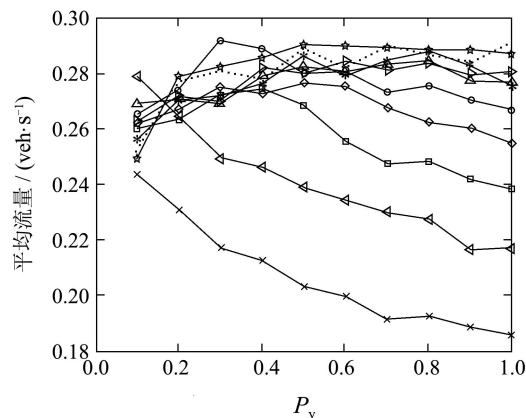
— \times — $P_x = 0.1$ — \triangleleft — $P_x = 0.2$ — \square — $P_x = 0.3$ — \diamond — $P_x = 0.4$
— \circ — $P_x = 0.5$ — \triangle — $P_x = 0.6$ — \rightarrow — $P_x = 0.7$ — \star — $P_x = 0.8$
..... $P_x = 0.9$ — \star — $P_x = 1.0$

(a) 平均速度随转弯概率变化曲线



— \times — $P_x = 0.1$ — \triangleleft — $P_x = 0.2$ — \square — $P_x = 0.3$ — \diamond — $P_x = 0.4$
— \circ — $P_x = 0.5$ — \triangle — $P_x = 0.6$ — \rightarrow — $P_x = 0.7$ — \star — $P_x = 0.8$
..... $P_x = 0.9$ — \star — $P_x = 1.0$

(b) 平均密度随转弯概率变化曲线



— \times — $P_x = 0.1$ — \triangleleft — $P_x = 0.2$ — \square — $P_x = 0.3$ — \diamond — $P_x = 0.4$
— \circ — $P_x = 0.5$ — \triangle — $P_x = 0.6$ — \rightarrow — $P_x = 0.7$ — \star — $P_x = 0.8$
..... $P_x = 0.9$ — \star — $P_x = 1.0$

(c) 平均流量随转弯概率变化曲线

图 3 交通参数随驶入概率变化曲线图

Fig. 3 The curve of traffic parameters fluctuating with turning probability

5 结语(Conclusion)

本论文利用元胞自动机理论建立了开放性边界的一维元胞自动机模型,以模拟主干路协调控制系统交通流.仿真结果表明:模型能够较准确地模拟在不同信号控制方案下、不同驶入流量、转弯流量情况下的信号控制主干路交通流,为主干路信号配时优化、交通流预测提供了技术支持.

该模型与以往研究成果相比有了以下几个方面的改进:

1) 该模型每个路口的信号灯可以根据交通流变化自由选择绿信比,且解除了信号灯等间距布设的限制,使得该模型更具普适性.

2) 通过改进元胞自动机开放性边界条件,利用一维元胞自动机理论模拟主干路以及主干路与支路交叉口处的交通流状况.

3) 以差分方程的形式描述车辆位置更新规则,将车辆跟驰、减速等规则融入到一个方程中,使模型更加简洁、清晰.

4) 分析了驶入概率以及转弯概率对于主干路协调控制系统交通流的影响,并提出相应的控制建议.

但该模型也还存在一些不足之处需要进一步改进:

1) 模型仅针对主干路单向单车道交通系统进行模拟,在下一步的研究中,应该将其扩展到双向多车道交通系统,将超车、变更车道等驾驶行为加入模型中,使其更加贴近于实际主干路运行状况.

2) 主干路信号控制相位差选择绿波控制模式,利用平均车速实时调整,但由于主干路车辆车速波动性较大,相位差按照上述方式设计是否能够有效提高主干路通行效率还需进一步验证分析.

参考文献(References):

- [1] PACEY G M. *The progress of a bunch of vehicles released from a traffic signal*, Report 2665[R]. Road Research Laboratory, 1956.
- [2] ROBERTSON D I. *Transyt: a traffic network study tool*, Report 253[R]. Road Research Laboratory, 1969.
- [3] 王殿海,李凤,宋现敏.一种新的车队离散模及其应用[J].吉林大学学报(工学版),2009,39(4):891-894.

- (WANG Dianhai, LI Feng, SONG Xianmin. A new platoon dispersion model and its application[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and technology Edition)*, 2009, 39(4): 891-894.)
- [4] 谭惠丽,黄兵花,李华兵,等.交通灯控制下主干路的交通流研究[J].物理学报,2003,52(5):1127-1131.
(TAN Huili, HUANG Pinhua, LI Huabing, et al. A study on the traffic flow of the main road under the traffic light control[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(5): 1127-1131.)
- [5] 彭麟,谭惠丽,吴大艳,等.交通灯控制下城市主干路双车道多速元胞自动机交通流模型研究[J].物理学报,2004,53(9):2899-2904.
(TAN Lin, TAN Huili, WU Dayan, et al. A study on multi-speed cellular automata model of traffic flow of main-road with two-lane under the traffic light control[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(9): 2899-2904.)
- [6] MAKTO S W. Dynamical behavior of a two-dimensional cellular automaton with signal processing[J]. *Physica A*, 2003, 324(1-2): 707-716.
- [7] 黄兵花,谭惠丽,孔令江,等.开放边界条件下二维可转向主干路交通流模型的研究[J].物理学报,2005,54(7):3044-3050.
(HUANG Pinhua, TAN Huili, KONG Linjiang, et al. A study of a main-road traffic flow model with turning-probability under open-bound condition[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(7): 3044-3050.)
- [8] 顾国庆,许伯铭,王秉宏,等.随机化交通灯的二维元胞自动机交通模型[J].应用数学与力学,1998,19(9):753-758.
(GU Guoqing, XU Boming, WANG Binhong, et al. Two-dimensional cellular automaton traffic model with randomly switching traffic lights[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1998, 19(9): 753-758.)
- [9] 钱新建,许彦冰,顾国庆.二维元胞自动机交通流的绿波模型与交通灯效应[J].上海理工大学学报,2000,22(3):207-210.
(QIAN Xinjian, XU Yanbin, GU Guoqing. Green wave model for two dimensional cellular automaton traffic flow and traffic lights effects[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2000, 22(3): 207-210.)
- [10] FUKUI M, ISHIBASHI Y. Traffic flow in 1D cellular automaton model including cars moving with high speed[J]. *Journal of the Physical Society of Japan(Japan)*, 1996, 65(6): 1868-1870.
- [11] TAKASHI N. Traffic state and fundamental diagram in cellular automaton model of vehicular traffic controlled by signals[J]. *Physica A*, 2009, 388(8): 1673-1681.

作者简介:

张萌萌 (1981—),女,讲师,博士研究生,目前研究方向为智能交通,E-mail: mengmeng8169@126.com;

贾磊 (1959—),男,教授,博士生导师,目前研究方向为智能交通、智能建筑,E-mail: Jialei@sdu.edu.cn.