

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.04.021

信号交叉口人车交互运行元胞自动机模型构建

梁国华, 邓亚娟, 韩 海, 马荣国, 卢 杨
(长安大学 公路学院, 710064 西安)

摘 要: 为了确定过街设施的形式,分析了十字信号交叉口行人步行速度及机动车排队净空间距、转向车头时距等交通运行特性,通过对人车冲突行为调查与分析,构建了行人过街可插间隙选择概率模型.以人车交互运行特性为理论基础,建立了双向6车道行人正向前进、避让、侧向前进和机动车停车线前慢启动跟驰、停车线后转向跟驰、目标车道选择规则,引入了人行横道处行人和机动车冲突判定选择规则,将行人过街规则和机动车通行规则进行了叠加,构建信号交叉口人车交互运行元胞自动机模型.以主主相交的双向6车道十字信号交叉口为例,分析了采用行人过街专用信号相位和立体过街设施形式的适用性.结果表明:当交通量不小于 $4\,500\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ 、右转车比例不小于70%、信号周期不小于90 s、左转相位绿信比不小于50%、行人流量不小于 $2\,700\text{ 人}\cdot(\text{h}\cdot\text{m})^{-1}$ 时,应采用立体过街设施形式.

关键词: 交通工程;行人过街;信号控制交叉口;人车交互运行;元胞自动机模型
中图分类号: U121 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)04-0122-07

Construction of cellular automata model of alternate operation between pedestrians and vehicles at signal intersection

LIANG Guohua, DENG Yajuan, HAN Hai, MA Rongguo, LU Yang
(School of Highway, Chang'an University, 710064 Xi'an, China)

Abstract: To determine the form of crossing facilities, The traffic characteristics of pedestrians' walking speed and vehicles' queuing spacing, headway of steering were analyzed in signalized intersection. The probabilistic model of acceptable gap choice for pedestrians crossing the intersection was constructed by survey and analysis of conflicting operations between pedestrians and vehicles. On the theoretical foundation of characteristics from alternate operations between pedestrians and vehicles, rules concerning pedestrians walking forward, avoidance, lateral walking forward, vehicles stop-to-slow following, steering following, and target lanes selection in bidirectional six lanes were established; selective rules concerning conflicts identification between pedestrians and vehicles at pedestrian crossroads were introduced. Therefore, the cellular automata model of alternate operations between pedestrians and vehicles at signal intersection was constructed through overlapping the previous two rules. Taking the main signal intersection in the bidirectional six lanes as an example, the applicability of exclusive pedestrian signal phase and overpassing facilities were analyzed. The result indicates that the overpassing facilities are supposed to be adopted when the traffic less than 90 s, the proportion of left turn green split time is no less than 50% and the pedestrian volume is no less than $2\,700\text{ Ped}\cdot(\text{h}\cdot\text{m})^{-1}$.

Keywords: traffic engineering; pedestrians' crossing; signalized intersection; alternate operation between pedestrians and vehicles; cellular automata model

信号交叉口作为城市道路网络中的重要节点,汇集了大量的人流和车流,建立合理的人车交互运行关系模型能够较好地再现信号交叉口交通流的运行状态.对此,国内外学者做出了大量的研究,Chai等利用元胞自动机建立了交叉口机动车右转规则,构建了4种十字交叉口仿真情形并

收稿日期: 2014-07-11.
基金项目: 国家自然科学基金(51208054);中央高校基本科研业务费专项资金(0009-2014G1211011).
作者简介: 梁国华(1977—),男,博士,副教授.
通信作者: 梁国华, lgh@chd.edu.cn.

分析了机动车冲突与右转控制策略、交通流量间的关系,将仿真结果与其他仿真方法及实测冲突数据对比,发现利用该模型进行仿真分析能够更加有效地评价交叉口车辆运行冲突^[1-2];Vasic 等考虑了车辆尺寸和动力性能等因素,仿真分析了机动车和自行车分别在路段和交叉口的混合行驶的运行规律,结果发现车流量和到达率是影响交叉口服务水平的重要因素^[3];余艳等在对交叉口机动车流和行人交通分析的基础上,基于 VDR 模型建立了行人和机动车干扰元胞自动机规则,结果表明车辆产生概率、车辆消失概率只在一定范围内影响车流量,有红绿灯设置时存在绿信比最佳取值范围^[4-5];周金旺等考虑了行人的位置交换、侧向前进和后退行为,建立了一种改进的行人过街元胞自动机模型,结果表明当总穿越时间和等待时间一定时,穿越频率的提高扩大了饱和流量对应的密度范围^[6-7];刘小明等建立了无信号控制和信号控制交叉口行人过街元胞自动机模型,结果表明,随着行人到达概率和步速较快的行人比例的增加,行人过街数量及过街穿越概率亦呈现增长趋势^[8-10]。

上述研究主要是从单一的行人或机动车运行的角度对经典的元胞自动机模型进行改进及优化,且并未根据行人及机动车运行的交通特性系统地建立运行规则。而信号交叉口处人车交互行为对信号交叉口交通组织具有重要影响。因此,本文在综合分析信号交叉口人车冲突等交通特性的基础上,分别建立行人过街行为选择、机动车慢启动跟驰及转向车道位置选择规则,以人车冲突判定规则为纽带,将行人和机动车运行规则进行叠加,构建信号交叉口人车交互运行元胞自动机规则。

1 人车交互运行特性分析

信号交叉口机动车排队车头间距分布是影响车辆通过交叉口效率的重要因素。由于受到驾驶人驾龄、驾车经验以及期望停车间距的影响,交叉口引道的排队车辆停车车头间距不同。大量调查数据分析发现,交叉口车辆跟驰的车头时距近似符合偏正态分布^[11-12]。

在两条均为双向 6 车道的主干路相交形成的信号交叉口处,行人过街和机动车通行的空间和时间不能完全分离时,行人过街和机动车通行间的相互干扰情形就会发生,即人车冲突。人车冲突具体表现形式见图 1。

由于不同的行人对可插间隙的要求不同或即

使存在可插间隙行人也不会选择过街,即行人对可插间隙的选择具有一定的概率性。本文以二元 Logit 基础模型,通过调查记录西安市西华门与北大街十字交叉口晚高峰人车交互运行的车头间距、机动车速度、行人等待时间等数据,并运用 SPSS 软件进行二元 Logistic 回归分析拟合得到人流和相交进口右转车流冲突 a-A 和人流与相邻进口右转车流冲突 a-B 两种冲突类型的人车冲突概率选择模型,并利用 Hosmer-Lemeshow (HL) 拟合度最优模型对冲突概率选择模型进行拟合度最优检验。a-A 和 a-B 两种冲突类型的行人可插间隙选择概率模型公式分别为

$$P_{11} = \frac{1}{1 + e^{-(1.370H - 0.730v + 1.021t - 4.490)}}, \tag{1}$$

$$P_{12} = \frac{1}{1 + e^{-(1.456H - 0.503v + 1.362t - 9.490)}}. \tag{2}$$

式中: P_{11} 为 a-A 冲突类型行人选择接受可插间隙的概率; P_{12} 为 a-B 冲突类型行人选择接受可插间隙的概率; H 为冲突区车头间距; v 为冲突区机动车速度; t 为冲突区行人等待时间。

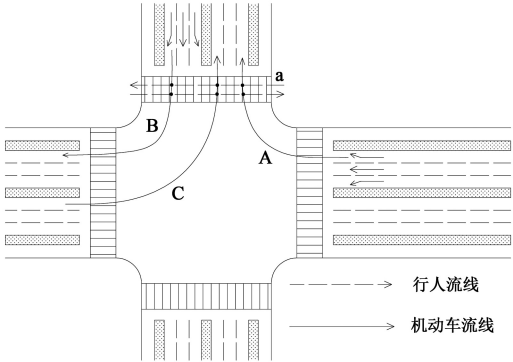


图 1 交叉口人车冲突

2 元胞自动机规则建立

2.1 行人过街规则

当行人流密度不大,行人间的相互干扰较小且基本无其他外界因素干扰时,行人的到达是随机的,用泊松分布描述效果较好;当行人流密度较大,行人到达的间隔长度一直延续到非高峰期和高峰期两个时段时,所得数据方差会较大,用负二项分布描述效果较好^[13]。据此,本文假定行人到达流量 Q_2 大于行人流量临界值 Q_1 时,行人到达服从负二项分布,反之则服从泊松分布。信号交叉口行人到达的演化规则为:当 $Q_1 > Q_2$ 时,若 $p_0 \leq p_1$,则 $v_1 = p_0 v_0$ 且 $x_1 = v_1$, 否则 $v_1 = 0$ 且 $x_1 = M$; 当 $Q_1 \leq Q_2$ 时,若 $p_0 \leq p_2$,则 $v_1 = p_0 v_0$ 且 $x_1 = v_1$, 否则 $v_1 = 0$ 且 $x_1 = M$ 。其中 v_0 、 v_1 分别为行人步行速度最大值和行人到达初速度; x_1 为行人所在的元胞位

置值; p_0, p_1, p_2 分别为系统产生的随机概率值、行人服从的泊松分布和负二项分布概率值; M 为空元胞标示符.

同时,行人过街后很少会在交叉口位置长时间逗留.因此,本文将行人过街的离去定义为:当行人通过人行横道后,以概率 1 离开系统.则行人离去演化规则为:若 $x_1 > L_1$,则 $v_2 = 0$ 且 $x_1 = M$, v_2 为完成过街的行人速度; L_1 为人行横道长度.

通常情况下,交叉口人行横道供双向行人通行.为解决双向行人相互占道的冲突,本文采用 Moore 型邻居形式^[14],如图 2 所示, $x_{11} \sim x_{16}$ 分别为行人左侧、后方、左前方、正前方、右前方及右侧

邻居的元胞位置值.当行人前方存在足够空间时,行人以较大概率 p_{11} 向前方移动;当正前方一定空间内存在速度大小相同、方向相反的行人时,两行人以 p_{12} 概率交换位置;当正前方存在对向步行行人占道时,行人以概率向两侧避让,如图 3 所示;当前方存在同向步行行人占道时,行人以概率侧向超越通过,如图 4 所示.

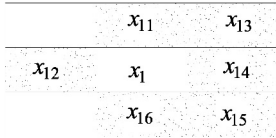


图 2 行人与邻居的位置关系

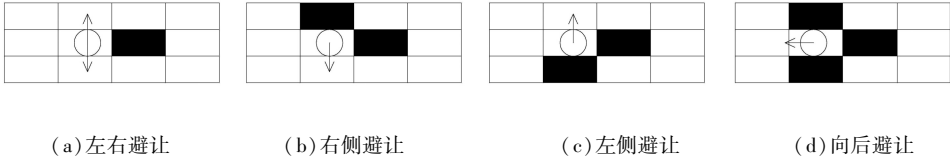


图 3 行人避让示意图

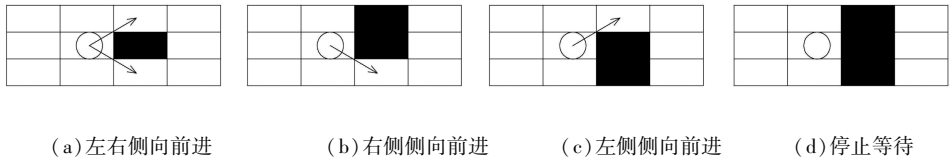


图 4 行人侧向前进示意图

在 t 到 $t + 1$ 时刻,行人过街行为选择的演化规则为:1) 自由前进, $v_3 = \min(\frac{d_{11}}{t_{11}}, v_0)$; 2) 减速, $v_3 = \min(v_3 - 1, d_{12})$; 3) 位置选择及更新,可分对向步行和同向步行两种情况考虑.

对向步行,即 $r_1 < 0$.若 $x_{11} = x_{16} = M$,则

$$\begin{cases} x_1 \rightarrow x_{11} \text{ 且 } x_1 = M, p_0 \leq p_{13}; \\ x_1 \rightarrow x_{16} \text{ 且 } x_1 = M, 1 - p_{13} < p_0 \leq 1. \end{cases}$$

若 $x_{16} = M$ 且 $x_{11} \neq M$,则 $x_1 \rightarrow x_{16}$ 且 $x_1 = M$.若 $x_{16} \neq M$ 且 $x_{11} = M$,则 $x_1 \rightarrow x_{11}$ 且 $x_1 = M$.若 $x_{16} \neq M$ 且 $x_{11} \neq M$,则

$$\begin{cases} x_1 \rightarrow x_1 - 1 \text{ 且 } x_1 = M, p_0 \leq 1 - p_{14}; \\ x_1 \rightarrow x_1, 1 - p_{14} < p_0 \leq 1. \end{cases}$$

同向步行,即 $r_1 > 0$.若 $x_{15} = x_{13} = M$ 且 $v_3 > v_4$,则

$$\begin{cases} x_1 \rightarrow x_{13} + 1 \text{ 且 } x_1 = M, p_0 \leq 1 - p_{15}; \\ x_1 \rightarrow x_{15} + 1 \text{ 且 } x_1 = M, 1 - p_{15} < p_0 \leq 1. \end{cases}$$

若 $x_{15} = x_{13} = M$ 且 $v_3 \leq v_4$,则 $v_3 = \min(v_3, d_{12}) \rightarrow x_1 = x_1 + v_3$.若 $x_{15} = M$ 且 $x_{13} \neq M$,若 $v_3 > v_4$,则 $x_1 \rightarrow x_{15} + 1$ 且 $x_1 = M$,否则 $v_3 = \min(v_3, d_{12}) \rightarrow x_1 = x_1 + v_3$.若 $x_{15} \neq M$ 且 $x_{13} = M$,若 $v_3 > v_4$,

则 $x_1 \rightarrow x_{13} + 1$ 且 $x_1 = M$,否则 $v_3 = \min(v_3, d_{12}) \rightarrow x_1 = x_1 + v_3$.若 $x_{13} \neq M$ 且 $x_{15} \neq M$,则 $v_3 = \min(v_3, d_{12}) \rightarrow x_1 = x_1 + v_3$,式中 d_{11}, d_{12} 分别为行人与前方人行横道边缘的元胞数目和其与正前方行人间的元胞数目; r_1 为行人正前方邻居步行方向标示符; v_3, v_4 分别为 t 时刻当前行人和其正前方邻居的步行速度; t_{11} 为行人过街剩余绿灯时间; p_{13}, p_{14}, p_{15} 分别为行人向左侧避让、后退、向左侧前进的概率.

2.2 机动车通行规则

2.2.1 车辆到达与离去规则

车辆的到达分布为元胞自动机模型车辆的入口边界.在观测到达的车辆数据方差很大时,车流波动很大,用负二项分布描述车辆的到达效果较好;当交通流比较拥挤时,车辆自由行驶机会不多、车流波动较小时,采用二项分布描述车辆的到达效果较好^[15].据此,本文在交通量较小、车流波动性较大的情形下,采用负二项分布;在交通流拥挤、车流波动较小的情形下,采用二项分布.在 t 到 $t + 1$ 时刻,车辆到达的演化规则为:当 $Q_3 \leq Q_4$ 时,若 $p_0 \leq p_3$,则 $v_5 = p_0 v_6 \rightarrow x_2 = v_5$,否则 $v_5 = 0$ 且 $x_2 = M$;当 $Q_3 > Q_4$ 时,若 $p_0 \leq p_4$,则 $v_5 = p_0 v_6 \rightarrow$

$x_2 = v_5$, 否则 $v_5 = 0$ 且 $x_2 = M$. Q_3 、 Q_4 分别为机动车到达流率及其临界值; v_5 、 v_6 分别为机动车初速度和机动车最大行驶速度; x_2 为机动车所在的元胞位置值; p_3 、 p_4 分别为机动车服从的负二项分布概率值和二项分布概率值. 车辆的离去是指在单位时间内道路上行驶的车辆驶离某断面的概率分布, 为元胞自动机模型车辆的出口边界. 在信号交叉口路段, 当下一交叉口因某种因素产生拥堵或车辆临时停车对后方车辆造成影响时, 车辆不会完全离开, 即车辆以某一概率离去. 故在 t 到 $t+1$ 时刻, 车辆离去的演化规则为: 当 $x_3 > L_2$ 时, 若 $p_0 \leq p_5$, 则 $v_7 = 0 \rightarrow x_3 = M$, 否则 $v_7 = 0 \rightarrow x_3 = x_3 + v_7$, x_3 为头车所在的元胞位置值; L_2 为仿真道路长度; p_5 为车辆驶离概率; v_7 为头车的行驶速度.

2.2.2 停车线后车辆慢启动跟驰规则

根据上文分析, 停车线后等待排队的车辆中, 前4辆车会存在启动及加速损失时间^[16], 为真实反映信号交叉口车辆的启动损失特性, 引入了车辆慢启动规则. 本模型中定义慢启动规则为: 红灯期间前4辆车在停车线后停车排队等待, 当绿灯亮起时, 停车线后第1辆车以概率 $1 - j_1$ 行驶, 第2辆车以 $1 - j_2$ 行驶, 第3辆车以 $1 - j_3$ 行驶, 第4辆车以 $1 - j_4$ 行驶, 其中 $j_i = t_i/t_0$ ($i = 1, 2, 3, 4$), j_i 为第 i 辆车的慢启动概率值. 从 t 到 $t+1$ 时刻, 车辆的慢启动规则如图5所示, $r_2 \sim r_5$ 为辨别车辆是否采用慢启动规则的标示符; $v_{21} \sim v_{24}$ 分别为 $t+1$ 时刻前4辆车的瞬时速度, $v_{11} \sim v_{14}$ 分别为 t 时刻前4辆车的瞬时速度.

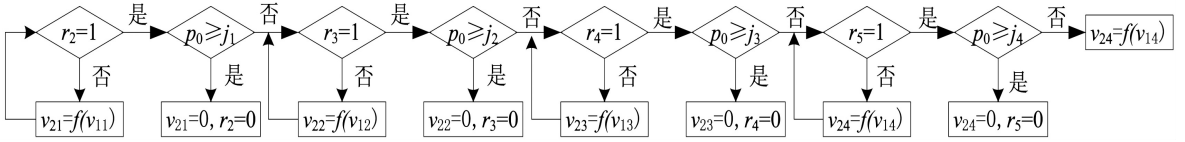


图5 停车线前后4辆车慢启动规则判定

红灯期间, 信号交叉口上游到达的车辆要在停车线后停车等待绿灯信号. 停车线后车辆排队等待的净空间距服从均值为 1.89 m、标准差为 0.723 的正态分布^[17]. 停车线后到达车辆净空间距 l_1 取值范围为 $a_1 \leq l_1 \leq b_1$ 的概率为 p_6 , a_1 、 b_1 分别为净空间距下限和上限. 则停车线后车辆跟驰安全间距服从的正态分布概率为

$$p_6 = \int_{a_1}^{b_1} \left(\frac{1}{0.723\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(l_1 - 1.89)^2}{1.045} \right) \right) dl_1. \quad (3)$$

从 t 到 $t+1$ 时刻, 停车线后车辆的跟驰规则如下:

1) 加速, $v_8 \rightarrow \min(v_8 + 1, v_6)$.

2) 减速, 考虑车辆间的净空距离并根据信号灯色的变化, 规则分两种情况. 当信号灯为红灯时, 若 $p_0 \leq p_6$ 且 $d_{13} \in (a_1, b_1)$, $v_8 \rightarrow 0$, 否则 $v_8 \rightarrow \min(v_8 - 1, d_{13}, d_{14})$. 当信号灯为绿灯且经过 τ 时步变为红灯时, 若 $p_0 \leq p_6$ 且 $d_{13} \in (a_1, b_1)$, $v_8 \rightarrow 0$. 若 $d_{13} \leq d_{14}$, $v_8 \rightarrow \min(v_8 - 1, d_{13})$, 否则

$\begin{cases} v_8 \rightarrow \min(v_8 - 1, d_{13}), \min(v_8 - 1, d_{13})\tau > d_{14}; \\ v_8 \rightarrow \min(v_8 - 1, d_{14}), \min(v_8 - 1, d_{13})\tau \leq d_{14}. \end{cases}$

3) 以概率 p_7 随机慢化, $v_8 \rightarrow \max(v_8 - 1, 0)$.

4) 位置更新, $x_2 \rightarrow x_2 + v_8$. 式中 v_8 为 t 时刻任意车辆的行驶速度; d_{13} 、 d_{14} 分别为 t 时刻当前车与前车和与离它最近的信号灯间的净空元胞数

目; p_7 为随机慢化概率.

2.2.3 停车线前车辆跟驰转向规则

交叉口机动车从一个进口驶入另一进口的转向类型有车辆左转、直行及右转. 本文从车辆转向的3种类型建立双向6车道车辆的转向规则. 当进口道信号灯为绿灯时, 在车辆左转驶入另一进口的转向过程中, 既存在群体车队弧形转弯的跟驰现象又存在相邻进口人行横道附近单体车辆的车道转向选择行为. 车队左转跟驰的车头时距服从偏正态分布. 停车线前左转车辆车头时距 h_{11} 取值 $a_2 \leq h_{11} \leq b_2$ 的概率为 p_8 , a_2 、 b_2 分别为左转车辆车头时距下限和上限. 则偏正态分布概率为

$$p_8 = \int_{a_2}^{b_2} \frac{1}{1.6727h_{11}} \exp \left[-\frac{(\ln h_{11} - 1.3423)^2}{0.8906} \right] dh_{11}. \quad (4)$$

在 t 到 $t+1$ 时刻, 停车线前车辆左转跟驰的演化规则如下:

1) 加速, $v_8 \rightarrow \min(v_8 + 1, v_6)$.

2) 减速, 考虑停车线前车辆跟驰间距, 若 $p_0 \leq p_8$ 且 $h \in (a_2, b_2)$, $v_8 \rightarrow 0$, 否则 $v_8 \rightarrow \min(v_8 - 1, d_{13})$.

3) 以概率 p_7 随机慢化, $v_8 \rightarrow \max(v_8 - 1, 0)$.

4) 位置更新, $x_2 \rightarrow x_2 + v_8$.

当左转车辆驶入双向6车道相邻进口人行横

道线附近,驾驶人要选择进入内侧车道、中间车道或外侧车道。一般小汽车驶入内侧车道的概率高于外侧,大型车等由于行车速度及车型的限制,驶入外侧车道概率高于内侧。为描述驾驶人转向车道选择过程,本文假定驾驶人选择内侧车道、中间车道和外侧车道的概率分别为 p_{16} 、 p_{17} 和 p_{18} ,且满足 $p_{16} + p_{17} + p_{18} = 1$ 。故在 t 到 $t+1$ 时刻,人行横道附近左转车辆的车道转向选择规则为

$$\begin{cases} x_{11} = x_2 + v_8 \text{ 且 } x_2 \rightarrow M, & p_0 \leq p_{16}; \\ x_{12} = x_2 + v_8 \text{ 且 } x_2 \rightarrow M, & p_{17} \leq p_0 \leq p_{16} + p_{17}; \\ x_{13} = x_2 + v_8 \text{ 且 } x_2 \rightarrow M, & p_0 \geq p_{18}. \end{cases}$$

式中: x_{11} 、 x_{12} 、 x_{13} 分别为当前车在相邻进口内侧车道、中间车道和外侧车道的元胞位置值。

在双向 6 车道道路上,直行车道上的车辆的转向过程主要包括直行道跟驰和人行横道附近车辆车道位置选择。停车线前车队直行跟驰的车头时距亦服从偏正态分布。停车线前直行车辆车头时距 h_{12} 取值范围为 $a_3 \leq h_{12} \leq b_3$ 的概率为 p_9 , a_3 、 b_3 分别为直行车车头时距下限和上限。则偏正态分布概率为

$$p_9 = \int_{a_3}^{b_3} \frac{1}{1.023 \cdot 2h_{12}} \exp \left[-\frac{(\ln h_{12} - 1.328 \ 1)^2}{0.333 \ 3} \right] dh_{12}. \quad (5)$$

故在 t 到 $t+1$ 时刻,停车线前直行车辆跟驰的加速、随机慢化和位置更新规则与左转车辆跟驰规则相同,而直行车减速规则为:若 $p_0 \leq p_9$ 且 $h \in (a_3, b_3)$, $v_8 \rightarrow 0$, 否则 $v_8 \rightarrow \min(v_8 - 1, d_{13})$ 。

直行车辆在驶入人行横道附近时,大部分车辆会保持原车道直行,只有少部分车辆等会选择最内侧车道或最外侧车道。因此本文假定驾驶人以某一概率值选择不同车道,且小型车在直行车道比在其他车道行驶概率高,而大型车在最右侧车道行驶比在其他车道行驶概率高。直行车辆驶入最内侧车道、中间车道和外侧车道的概率分别为 p_{19} 、 p_{20} 和 p_{21} ,而直行车辆选择不同车道的概率值满足的关系及其车道选择的演化规则与左转车辆左转向车道选择规则类似。

通常,在双向 6 车道道路上,车辆在转向选择车道的过程中,小汽车选择最内侧车道和中间车道的概率较高,大型车等选择最外侧车道的概率较高。设右转车辆驶入最内侧车道、中间车道和外侧车道的概率分别为 p_{22} 、 p_{23} 和 p_{24} 。右转车辆在驶入相邻进口直行车道时,会与相邻进口直行车辆产生合流冲突,如图 6 所示。

通常,当临界间距 d_{15} 满足合流并道所需的安全间距时,位于右转冲突线 x_0 的右转车辆可以驶入直行车道。因此,右转车辆转弯车道选择的演化规则为:若 $x_2 = x_0$ 且 $d_{16} \leq d_{15}$, 则 $v_8 = 0$ 且 $r_6 = 0$, 否则 $r_6 = 1$ 。若 $r_6 = 1$, 则

$$\begin{cases} x_{31} = x_2 + v_8 \text{ 且 } x_2 \rightarrow M, & p_0 \leq p_{22}; \\ x_{32} = x_2 + v_8 \text{ 且 } x_2 \rightarrow M, & p_{23} \leq p_0 \leq p_{22} + p_{23}; \\ x_{33} = x_2 + v_8 \text{ 且 } x_2 \rightarrow M, & p_0 \geq p_{24}. \end{cases}$$

式中: x_{31} 、 x_{32} 、 x_{33} 分别为当前右转车在相邻进口内侧车道、中间车道和外侧车道的元胞位置值; r_6 为右转车辆是否位于右转冲突线的状态标示符; d_{16} 为右转车与右转冲突线间的净空元胞数目。

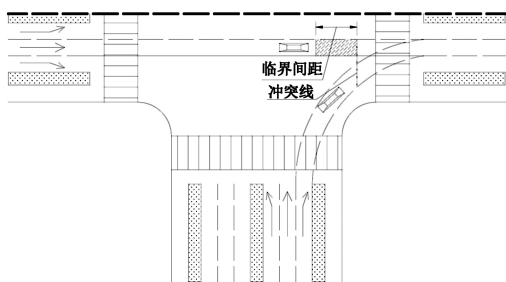


图 6 右转车与直行车冲突

由上述可知,停车线前车队右转跟驰的车头时距亦符合偏正态分布。停车线前右转车辆车头时距 h_{13} 取值 $a_4 \leq h_{13} \leq b_4$ 的概率为 p_{10} , a_4 、 b_4 分别为右转车车头时距下限和上限。则偏正态分布概率为

$$p_{10} = \int_{a_4}^{b_4} \frac{1}{1.151 \ 0h_{13}} \exp \left[-\frac{(\ln h_{13} - 1.761 \ 4)^2}{0.421 \ 7} \right] dh_{13}. \quad (6)$$

故在 t 到 $t+1$ 时刻,停车线前右转车辆跟驰的减速规则为:若 $p_0 \leq p_{10}$ 且 $h \in (a_4, b_4)$, $v_8 \rightarrow 0$, 否则 $v_8 \rightarrow \min(v_8 - 1, d_{13})$ 。跟驰的加速、随机慢化和位置更新规则与左转车辆跟驰规则一致。

2.3 规则叠加

四相位信号配时条件下,相邻进口行人与直行车辆共相,右转车辆与行人过街存在冲突。根据上文分析,行人选择相交进口右转车流可插间隙的概率为 P_{11} ,选择相邻进口右转车流可插间隙的概率为 P_{12} 。为保证信号交叉口人车交互运行的合理性,本文对行人与相交进口右转车冲突的演化规则定义为:若 $d_{17} \geq N$,即不满足人车冲突的条件,则 $x_1 = x_1 + \min(v_3 + \frac{d_{11}}{t_{11}}, v_0, d_{12})$ 且 $x_2 = x_2 + \min(v_8 + 1, v_6, d_{13})$; 否则,若 $p_0 \leq P_{11}$, 则 $x_1 =$

$$x_1 + \min(v_3 + \frac{d_{11}}{t_{11}}, v_0, d_{12}) \text{ 且 } x_2 = x_2 + \min(v_8 +$$

$1, v_6, d_{17})$, 否则 $v_3 = 0 \rightarrow x_1 = x_1 + v_3$, 且 $x_2 = x_2 + \min(v_8 + 1, v_6, d_{17})$. d_{17} 为行人与离其最近的右转车的垂直净空元胞数目; N 为满足人车冲突距离条件的临界元胞数目. 同理, 行人与相邻进口右转车辆的冲突演化规则亦可按照上述方法制定.

信号交叉口处, 信号交叉口行人和机动车元胞自动机模型的演化也是同步更新的. 信号交叉口的更新过程包括两部分, 即行人过街过程和

车辆通行过程. 行人过街过程主要包括行人进入仿真系统、自由行走 (追随、超越)、目标位置选择、冲突判定和离开系统; 机动车运行过程主要包括车辆驶入、跟驰排队、转向行为、目标车道选择、冲突判定和驶离系统.

因此, 行人过街和机动车通行规则既相互独立又彼此统一. 行人过街规则和机动车通行的叠加过程如图 7 所示.

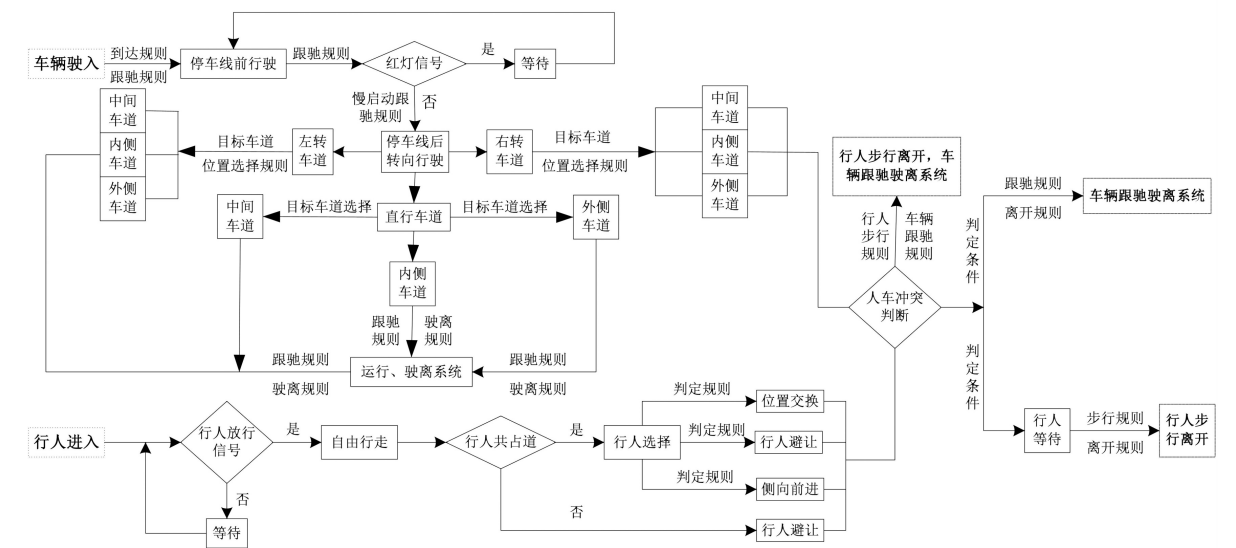


图 7 行人和机动车元胞自动机模型叠加过程

3 实 例

3.1 模型验证

以调查的西安市西华门与北大街十字交叉口晚高峰人车交互运行的车头间距、机动车速度、行人等待时间等数据为基础, 运用本次建立的人车

交互元胞自动机模型进行仿真, 仿真值与调查值的对比见表 1.

由表 1 可知, 车头间距、机动车速度和行人等待时间误差率分别为 5.95%、5.42%、6.58%, 均小于 8%, 可认为该模型能够表征实际人车交互运行规律.

表 1 人车交互元胞自动机模型仿真值与调查值的对比

对比参数	车头间距/m	机动车速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	行人等待时间/s
调查平均值	4.20	21.03	8.97
仿真平均值	3.95	19.89	9.56

3.2 实例分析

以人车交互运行元胞自动机规则为基础, 本文以主主相交的双向 6 车道信号交叉口 (4 幅路) 为例, 采用四相位信号配时方案, 以 0.8 m 为一个元胞单位, 每位行人占据 1 个元胞大小, 大、小型车长度分别为 12、6 m; 机动车初始速度取主干路设计速度 $40 \sim 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 行人初始步行速度按平均步行速度 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 取值. 每次仿真时长为 1 200 s, 为

消除随机因素干扰, 将前 300 s 作为仿真自由输入时段, 后 900 s 作为分析时段统计输出机动车和行人平均延误指标值. 选取机动车流量、右转车比例、信号周期、左转相位绿信比、行人流量作为仿真自变量, 构建各自变量值相互组合变化下的仿真方案, 编制人车交互运行元胞自动机代码, 仿真分析多因素组合下的行人过街专用相位和立体过街设施形式的适用性, 行人过街形式的适用性方案见表 2.

表 2 行人过街专用信号相位与立体过街设施形式适用性对比

机动车流量/ (pcu · h ⁻¹)	右转车比例/ %	信号周期/ s	左转相位绿信比/ %	行人流量/ (人 · h ⁻¹ · m ⁻¹)	采用的行人过街形式
>3 250	10~50	60~90	35~50	900~2 700	设置行人过街专用信号相位
>3 250	30~70	90~120	20~35	900~2 700	设置行人过街专用信号相位
>3 250	50~70	120~150	≥20	900~2 700	设置行人过街专用信号相位
>3 250	30~70	60~90	20~50	≥2 700	设置行人过街专用信号相位
3 250~4500	30~70	90~120	≥35	≥2 700	设置行人过街专用信号相位
>3 250	50~70	120~150	≥20	≥2 700	设置行人过街专用信号相位
≥4 500	≥70	≥90	≥50	≥2 700	采用立体过街设施

4 结 论

1) 基于人车交互运行特性分析, 分别建立了行人正向前进、位置交换、避让等过街行为选择规则和机动车慢启动、左转和右转跟驰、车道位置选择等转向判定规则, 并基于人车冲突行为叠加建立了人车交互运行元胞自动机模型规则。

2) 以主主相交的双向 6 车道信号交叉口为例, 仿真分析了采用行人过街专用相位和立体过街设施形式的适用性, 例如当交通量大于 4 500 pcu · h⁻¹、右转车比例大于 70%、左转绿灯时间比例大于 50%、行人流量大于 2 700 人 · (h · m)⁻¹ 时, 应采用立体过街形式。

3) 从行人过街和机动车通行相互冲突影响的角度, 建立了信号交叉口人车交互元胞自动机规则, 在进一步研究中, 非机动车作为影响信号交叉口服务水平的交通因素, 亦应考虑在内, 以更加客观地反映实际交通运行规律。

参考文献

[1] CHAI C, WONG Y D. Micro-simulation of vehicle conflicts involving right-turn vehicles at signalized intersections based on cellular automata [J]. Accident Analysis & Prevention, 2014, 63: 94–103.

[2] OH J, KIM E, KIM M, et al. Development of conflict techniques for left-turn and cross-traffic at protected left-turn signalized intersections [J]. Safety Science, 2010, 48(4): 460–468.

[3] VASIC J, RUSKIN H J. Cellular automata simulation of traffic including cars and bicycles [J]. Physical A: Statistical Mechanics and its Applications, 2012, 391(8): 2720–2729.

[4] 余艳, 白克钊, 孔令江. 行人与机动车相互干扰的元胞自动机模拟研究[J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2013, 31(1): 6–10.

[5] 余艳. 行人过街和机动车相互干扰的元胞自动机模拟研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2012.

[6] 周金旺, 陈秀丽, 周建槐, 等. 一种改进的多速双向行人流元胞自动机模型[J]. 物理学报, 2009, 58(4): 2281–2285.

[7] 李兴莉, 张健, 邝华. 行人穿越马路对交通流的影响[J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2010, 31(4): 414–418.

[8] 刘小明, 魏鹏飞, 李正熙. 无灯控行人过街元胞自动机交通模型研究[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(2): 6–9.

[9] 丁宁. 路段行人过街元胞自动机仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[10] 李静静. 信号控制路口人行横道的行人流仿真分析[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.

[11] 韩海. 基于元胞自动机的信号控制交叉口行人过街形式适用性分析[D]. 西安: 长安大学, 2014.

[12] 刘明君. 基于混合交通流的信号交叉口机动车车头时距研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.

[13] 王炜, 过秀成. 交通工程学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2003.

[14] 孙泽. 基于元胞自动机的行人和机动车相互干扰机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.

[15] 张生瑞, 邵春福, 周伟. 交通流理论与方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.

[16] 刘明君. 基于混合交通流的信号控制交叉口机动车车头时距研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.

[17] 胡庆华. 基于交叉口混合交通流特性的元胞自动机模型研究与仿真[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.

(编辑 魏希柱)