

# 基于实测数据的信控环交驾驶行为建模与仿真

马新露\*, 关晓东

(重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074)

**摘要:** 通过图像识别得到单进口轮流放行信控环交的车辆轨迹数据,发现车辆在信控环交内的换道行为主要集中在入环阶段和出环阶段发生.在换道空间分布特征及其原因剖析的基础上,引入驾驶心理参数,分别建立了入环、环中阶段和出环阶段的信控环交元胞自动机模型.模型的数值模拟结果表明,由于进口车道功能未渠化,车辆在环内换道引发的冲突与阻滞是导致信控环交运行不畅的重要原因,换道动机与时机取决于转向比例与渠化方案,与进口道绿灯时间的增减相关性甚微,过长的放行时间反而会导致环内车流密度加大,换道所造成的阻滞更难以消散,不利于信控环交的运行.

**关键词:** 智能交通; CA模型; 数值模拟; 信号控制环形交叉口; 阻滞

## Driving Behavior Model and Simulation of the Signalized Roundabout Based on Vehicle Trajectory

MA Xin-Lu, GUAN Xiao-Dong

(Transportation College, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** By analyzing the vehicle trajectory data of the single-approach-entering operation in signalized roundabout, which is obtained by the image recognition, it is found that vehicles' lane-changing behavior mainly concentrated in the entry and exit area. Based on the analysis of the spatial distribution characteristics and reasons, the driving psychological parameter is introduced and the cellular automaton models for the different areas of the roundabout are established. Numerical simulation results indicate that, due to entrance lane's construction not channelized, retardation that induced by lane-changing and traffic conflicts is the main factor of traffic congestion in signalized roundabout, and lane-changing motivation and occasion depends on turning ratio and channelization, which has little relevance to the length of entrance's green time, and given long time may cause traffic flow density within roundabout increasing, then the retardation caused by lane-changing, which may block the operation of signalized roundabout, is more difficult to dissipate.

**Keywords:** intelligent transportation; CA model; numerical simulation; signalized roundabouts; retardation.

### 0 引言

面对日益增长的交通压力,出于景观与成本的考虑,对环形交叉口实施信号控制(以下简称信控环交)成为较为普遍的选择,与无信控环交相比,信控环交流量大,驾驶行为更为复杂.薛昆等针对环交各流向的不对称性,以饱和度均衡为优化目

标,对左转二次停车进行了优化<sup>[1]</sup>.高云峰等对五叉环交的信控方法进行了研究,给出了基于环道容量约束的信控参数优化的模型<sup>[2]</sup>.刘灿齐分别在进口道与环道设置了8组交通信号灯,在 Webster 周期公式的基础上,提出了这种协调信号配时方案的周期计算方法<sup>[3]</sup>.杨晓光等分别给出信控环交直

收稿日期: 2017-10-30

修回日期: 2018-01-04

录用日期: 2018-01-15

基金项目: 国家自然科学基金/ National Natural Science Foundation of China(61403052); 重庆市基础与前沿研究计划/ Chongqing Basic and Frontier Research Project(cstc2016jcyjA0576).

作者简介: 马新露(1981-),男,重庆万州人,副教授,博士.

\*通信作者: maxinlu2002@163.com

行和左转的延误计算模型;并在此基础上提出了一种以交叉口车均延误最小为目标的多进口道协同放行最佳周期值计算方法<sup>[4]</sup>.刘泽等分析环交不同控制模式,针对左转二次控制法适用条件的限制,提出了环交各进口轮流放行的相位重叠控制法<sup>[5]</sup>.徐洪峰提出了单进口轮流放行方式配时设计方法<sup>[6]</sup>.

综上所述,已有文献侧重于信控环交的控制方案与配时方法的探讨,信控环交运行机制的研究尚不透彻.因此,对信控环交内驾驶行为特征,以及其与渠化形式和信控参数的相互作用关系进行研究是一项值得开展的工作.

## 1 信控环交换道行为特性分析

以某市一主干道环交作为实体研究对象,其特征为:①单进口轮流放行方式且环内的车流为非自由流状态;②无二次停车线,且进口道无左/直车道划分.以该环交某一入环口停车线至直行出环口为研究路段,在其高峰时段进行定点拍摄,利用TLD(Tracking-Learning-Detection)<sup>[7]</sup>跟踪算法对视频进行处理,获取车辆从入环至出环车速、换道次数、换道位置等数据.

通过图像处理得到10个周期绿灯时间内进入环道车辆的换道次数及位置实测数据,所选取的10个周期为连续的10个周期,且均为环交晚高峰时期拍摄,交通流量较大,环道处于非自由流状态.以横轴表示距离停车线长度 $l$ (m),纵轴表示绿灯启亮后的时间 $t$ (s),对其进行统计得到图1,其中距离停车线长度是指两帧之间车辆行驶距离的累加,即与车流行驶轨迹相近似的多个直线段长度之和.图2为内环车辆期望最早换道出环和最晚换道出环位置示意图,对于内侧车道的直行车,换道进入外侧车道方可出环,图中“M”点为内侧车道直行车辆最晚向外换道位置,“N”点为出环切线与内侧车道中心线的交点,代表车辆出环时的最早期望向外换道位置.根据图1可得,随着与停车线之间距离的增加,换道次数呈“N”型分布.换道行为主要集中分布在距离停车线15~25 m和70~100 m,前者占比为28%,后者为50%.由此可见,后者的换道次数要大于前者,且分布于两者之间的换道次数

较少.将环形交叉口划分为入环、环中、出环区域<sup>[8]</sup>,对比拍摄视频进一步分析观察到如下现象:

(1)入环区域(15~20 m),换道行为主要是由于车队在入环过程中,车流密度由致密向稀疏过程中产生的,当本车道行驶缓慢,车辆会利用邻道上的间隙进行换道.此外,部分内侧车道的直行车辆及外侧车道的左转车辆会为回到目标出口相对应的车道产生换道行为.

(2)环中区域(20~70 m),车流密度变小且趋于稳定,车辆根据本车道的行驶状态及邻道是否具有更好的行驶条件来决定是否需要换道.但由于车间距较小,换道行为较少出现.

(3)出环区域(70~100 m),接近环交的直行出环口,由于入环进口道未对左/直车辆进行划分,内侧行驶的直行车辆为了能够出环,必须换入外侧车道,造成出环口处换道行为的频繁出现,且与外侧车道的左转车在出环口处容易发生交叉冲突,进而形成阻滞.

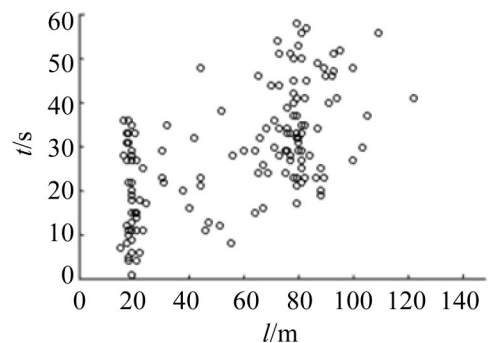


图1 车辆换道行为分布

Fig. 1 The distribution of vehicle lane changing

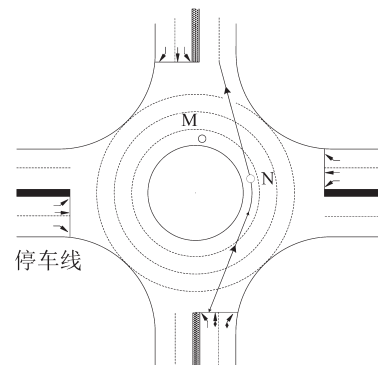


图2 内环车辆期望最早换道出环和最晚换道出环位置示意图

Fig. 2 The earliest expect lane changing position and the latest lane changing position of vehicle on the inner ring

## 2 模型的建立

由图1分析可知,信控环交的换道行为主要集中在20 m之前和70 m之后,中间换道行为较少,且与20 m之前的换道行为类似,大多为跟驰换道,因此环交换道行为主要考虑2个阶段,即入环至环中阶段的换道行为和出环阶段的换道行为,针对这2种不同情况分别建立换道元胞自动机(Cellular Automaton, CA)模型.

### 2.1 速度更新规则

信控环交内车辆以队列行进,车速较低,车间距较小,车间干扰大.考虑性格差异,引入反映驾驶员心理的参数 $\lambda \in (0, 1)$ , $\lambda$ 越小表明驾驶员性格越保守;反之,越激进.速度的更新规则采用考虑驾驶员心理的速度效应模型.

#### (1) 参数设置.

$t$ 时刻第 $i$ 辆车位置、速度和与前车的空间距离分别记为 $x_i(t)$ 、 $v_i(t)$ 、 $d_i(t)$ , $i$ 车与目标车道最近前车间的空元胞数为 $d_{i,other}(t)$ ,与目标车道最近后车间的空元胞数为 $d_{i-1,other}(t)$ , $v_{i-1,other}(t)$ 表示 $i$ 车与目标车道最近后车的速度,将其前车相对应的量分别记为 $x_{i+1}(t)$ 、 $v_{i+1}(t)$ 、 $d_{i+1}(t)$ . $d_{safe}$ 为2辆车之间的最小安全距离,一般取1,其中每辆车占据5个元胞,即 $L_{car} = 5$ . $i$ 车期望它的前车在下一时刻的速度为 $v_{i+1}(t)_{anti} = \min[d_{i+1}(t), v_{i+1}(t)]$ .

#### (2) 考虑驾驶员心理的速度效应模型.

##### Step 1 加速,公式为

$$v_i(t) \rightarrow \min[v_i(t) + 1, v_{max}]$$

##### Step 2 减速,公式为

$$v_i(t) \rightarrow \min[d_i(t) + \lambda v_{i+1}(t)_{anti}, v_i(t)]$$

在减速过程中,车辆会根据前车的速度和车间距,即 $d_i(t) + \lambda v_{i+1}(t)_{anti}$ 来调整自身的速度.

##### Step 3 随机慢化,以概率 $p$ ,即

$$v_i(t) \rightarrow \max[v_i(t) - 1, 0]$$

##### Step 4 位置更新,公式为

$$x_i(t+1) \rightarrow x_i(t) + v_i(t)$$

在 $t \rightarrow t+1$ 的过程中,模型中的车辆按照上述规则进行更新.

### 2.2 入环至环中阶段的跟驰换道模型

在入环至环中阶段,由于车队行驶轨迹为弧

形,驾驶员可以观察到各车道前方车流密度与行驶状况,以此决定下一时刻是否换道,并根据目标车道相邻车间距来决定换道时机,是属于典型的跟驰换道.

定义 $i$ 车最多可以查看前方 $n_{max}$ 个元胞状态,从第1个非空元胞开始至 $n_{max}$ , $N_i$ 代表中间存在的车辆数.

由于前后车之间至少要保持1个最小安全距离 $d_{safe}$ ,在这种情况下,中间存在的最大车辆数

$$N_{max} = \text{ceil}\left[\frac{n_{max} - d_i(t) + d_{safe}}{L_{car} + d_{safe}}\right], \text{ceil为向上取整函数.}$$

对于 $i$ 车驾驶员来说,如果 $N_i = \text{ceil}[(1 - \lambda)N_{max}]$ ,那么在短时间内就无法按照期望速度继续前行,由于 $\lambda$ 与 $N_i$ 成反比关系,且 $\lambda \in (0, 1)$ ,因此用 $(1 - \lambda)$ 作为系数来计算车辆数.

换道规则如下:

(1) 原车道, $v_i(t) > d_i(t) + \lambda v_{i+1}(t)_{anti}$ 时,原车道不能满足 $i$ 车以期速度行驶.

(2)  $N_i = \text{ceil}[(1 - \lambda)N_{max}]$ , $\lambda = \text{rand}(1)$ 时,前方存在的车辆数使 $i$ 车驾驶员认为短时间内无法按照期望速度继续前行.

(3) 目标车道, $d_{i,other}(t) > \min[v_i(t) + 1, v_{max}]$ 时,前方有更好的行驶条件.

满足以上3个条件, $i$ 车换道 $C_i = 1$ .

(4) 对于目标车道最近后车,如果 $v_{i-1,other}(t) - d_{i-1,other} > v_i(t)$ , $v_{i-1,other}(t+1) \rightarrow \min[v_{i-1,other}(t) - 1, d_{i-1,other}]$ ,则目标车道后车根据与换道车辆之间的间距进行减速或停车让行;否则,目标车道后车按照2.1节中(2)的速度效应模型更新.

### 2.3 出环阶段的强制换道模型

研究路段的出口为直行出环口,如图2所示,外侧车道上的直行车辆可直接行驶出环,内侧车道上的直行车辆需要进行换道进入外侧车道方可出环,外侧车道上的左转车辆只有在受到阻滞时才会换道进入内侧车道.因此,出环阶段的换道行为分为2种:即内侧车道的直行车辆为出环向外强制换道和外侧车道的左转车辆受到阻滞而向内强制换道.

#### 2.3.1 内侧车道的直行车辆出环强制换道模型

根据文献[9]可知,车辆即使在非自由流的情

况下也偏向于选择自由流下的期望行驶路线,以最短的距离驶离环形交叉口.内侧车道[N,M]之间的直行车辆换道规则如下:

(1)  $d_{i,other}(t) > L_{car} + \min[v_i(t), d_{i,other} - d_{safe}]$ 时,目标车道有间隙,为了防止与目标车道前车碰撞, $i$ 车换道后最多只能行进到与前车相隔最小安全间距的位置.满足条件, $i$ 车进行换道 $C_i = 1$ .

(2) 如果  $v_{i-1,other}(t) - d_{i-1,other} > v_i(t)$ ,  $v_{i-1,other}(t+1) \rightarrow \min[v_{i-1,other}(t) - 1, d_{i-1,other}]$ ,则目标车道后车根据与换道车辆之间的间距进行减速或停车让行;否则,目标车道后车按照速度效应模型更新.

(3) 当条件(1)不满足, $C_i = 0$ 时,如果  $d_i(t) \geq d_{safe}$ , $i$ 车减速行驶  $v_i(t+1) \rightarrow \min[v_i(t) - 1, d_i(t)]$ ,并等待机会进行换道;如果车辆行驶至M点时仍未换道出环,则车停车等待间隙.

### 2.3.2 外侧车道的车辆受阻强制换道模型

实测数据显示,出环区域外侧车道的车辆(无论是直行还是左转)主动换道概率极低,主要是在本车道受阻滞而被动换道.

前方至少有3辆车停滞不前可认为本车道阻滞<sup>[10]</sup>,后车表现出强烈的换道欲望,换道规则如下:

(1) 原车道,  $d_i(t) = d_{i+1}(t) = d_{i+2}(t) = d_{safe}$ ,  $v_{i+1}(t) = v_{i+2} = v_{i+3}(t) = 0$ ,则 $i$ 车处于阻滞状态,且短时间内无法前行.

(2) 目标车道,  $d_{i,other}(t) > L_{car} + d_{safe}$ ,则目标车道出现间隙;满足条件,  $v_i(t) = 1$ , $i$ 车进行换道 $C_i = 1$ .

(3) 目标车道最近后车,如果  $v_{i-1,other}(t) > 1 + d_{i-1,other}$ ,  $v_{i-1,other}(t+1) = d_{i-1,other}$ ,则目标车道后车根据与换道车辆之间的间距进行减速或停车让行;否则,目标车道后车按照速度效应模型更新.

## 3 数值模拟

### 3.1 参数设定

设每个元胞的长度为1.5 m,1辆车占据5个元胞,每个时间步长对应与实际时间的1 s,车辆在每一个时间步长中增加一个速度单位.模型设定的研究路段为双车道,长度为150 m,最早期望换道位置设定在距停车线90 m处, $n_{max}$ 取20,模型采用开放性边界条件.最大车速为  $v_{max} = 40 \text{ km/h} = 7 \text{ cell/s}$ .各个车道的随机慢化概率  $p = 0.3$ ,驾驶员心理参数

$\lambda$ 随机产生且  $\lambda \in (0, 1)$ .

为了研究信号控制参数对交通流特性的影响,设进口道一直有足量的车辆排队等待,红灯时间设为固定值60 s,绿灯时间以5 s为步长,由10 s逐渐增大到80 s,每一种配时模拟15次.设定内/外侧车道的左/直车辆占比均为50%,仿真步长为  $1.36 \times 10^4$ ,舍弃前  $1 \times 10^4$ ,通过仿真得到相应的流量、速度及换道等数据,并从中探讨不同参数对环交驾驶行为的影响.

### 3.2 模型的仿真分析

#### (1) 通行能力分析

调整绿灯时间进行仿真,每次仿真结束后,从后3 600时间步长内选取20个周期,对每个周期内进入环交的车辆数进行统计,并根据统计结果计算不同绿灯时长下的通行能力如图3所示.

由图3可知,绿灯时间由10 s变为50 s的过程中,研究路段内的通行能力骤增;绿灯时间在大于50 s之后,通行能力增幅趋于稳定.由此表明,绿灯时间的增加固然能提高信控环交通行效率,但过长的放行时间对通行能力的提升贡献有限.

#### (2) 速度分析

记录所有车辆从进入至驶离环交所有瞬时速度,并计算其平均值,得到图4,图中纵轴为不同绿灯时长下的瞬时速度平均值(cells/s).

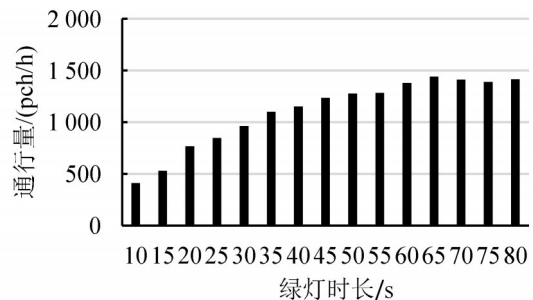


图3 不同绿灯时长下的通行能力变化图

Fig. 3 The relationship of capacity on the different green time

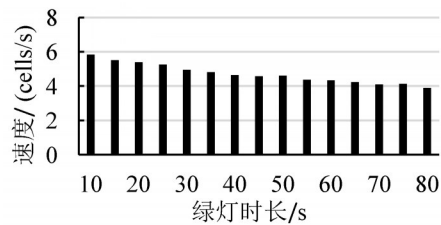


图4 不同绿灯时长下的平均速度变化图

Fig. 4 The relationship of effective velocity on the different green time

由图4分析可知,绿灯时间较短时,进入环交车辆较少,环内车间距较大,车间影响较小;随着绿灯时间的增长,进入环交车辆增多,车间距减小,车辆无法按照期望速度行驶,总体车速就会下降.

(3) 换道次数分析.

车道直行/左转随机分布在各车道,设内侧车道直行车辆占比20%和50%时进行仿真得到换道次数,得到图5.绿灯时间在10~35 s之间时,换道行为极少,直行车占比对换道行为的影响甚小,换道行为随着绿灯时间增长而增加,且直行车辆占比越大,换道次数增长的越快.这表明内侧车道中直行车辆占比对环交的换道行为有很大影响,减少内侧车道直行车辆的比例,可以在一定程度上减少环交出环时的换道行为.

(4) 阻滞分析.

为了分析不同绿灯时长下,阻滞产生的位置(以头车所在元胞位置为标记点)及持续时间长短,绿灯时间分别取20 s、40 s和60 s,选取最后连续4个周期得到其时空图如图6所示.

用颜色深浅表示阻滞持续的时间步长(0~6之间颜色依次由深变浅),并根据统计结果对比三者的阻滞情况如图7所示.

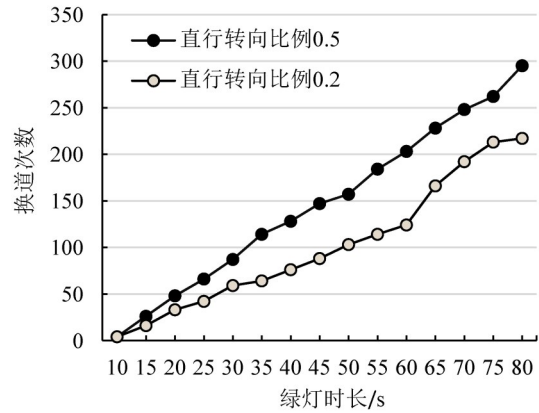


图5 不同转向比例下绿灯时长与换道次数关系图  
Fig. 5 The context diagram of green time and the number of lane changing

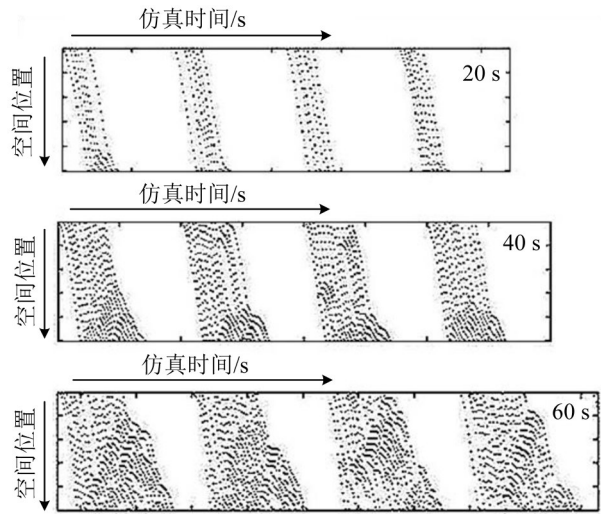


图6 不同绿灯时长下的时空图

Fig. 6 The space-time figure on the different green time

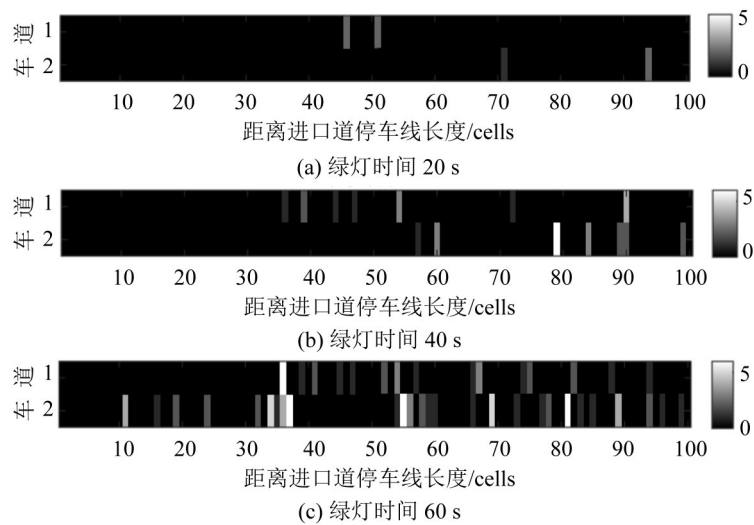


图7 绿灯时长与出现阻滞的位置及时间步长的关系图

Fig. 7 The context diagram of the block's location and time on the different green time

分析图6和图7可知,绿灯时间为20 s时,进入车辆数较少,路段内有足够的行驶空间提供给车辆,因而极少出现阻滞;当绿灯时间为40 s时,进入车辆数增加,出环及环中路段阻滞现象开始出现,但持续时间较短,容易消散;当绿灯时间增加至60 s时,单个周期内进入路段的车辆数持续增加,出现减速及停滞现象,且阻滞出现频率增加,持续时间变长,外侧车道出现阻滞较为频繁,且对后续到达的车辆产生影响。

#### 4 结 论

本文根据对信控环交实测驾驶行为的分析,引入驾驶员心理参数,基于CA分别建立了适用于入环和环中阶段的跟驰换道模型与出环阶段的强制换道模型,数值模拟结果表明,换道行为对通行能力与阻滞产生的作用显著。

此外,值得注意的是,与绿灯时长无关,由于进口道未对车道功能进行渠化,在入环或出环过程中不可避免的会出现强制换道,是引发阻滞降低通行能力的主要诱因。当绿灯时长较短时,车流密度较小,能够部分“吸收”强制换道导致的负面效应,过长的放行时间并不能带来理想的通行效率。因此,应充分考虑信控环交运行特性与驾驶行为特征,选用合理的渠化形式与信控方案。

本文未考虑公交车对环交运行的影响,实地调查过程中发现社会车辆在遇到公交车时会表现出不同的驾驶行为,因此,公交车作为一个影响因素有必要加入到后续的环交建模中。

#### 参考文献:

- [1] 薛昆, 杨晓光, 白玉. 给定周期条件下环形交叉口优化控制方法研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(5): 83-87. [XUE K, YANG X G, BAI Y. Study on optimal control method of circular intersection under given period conditions[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(5): 83-87.]
- [2] 高云峰, 杨晓光, 伍速峰, 等. 五叉环形交叉口信号协调控制模型[J]. 系统工程, 2006, 24(8): 27-31. [GAO Y F, YANG X G, WU S F, et al. Signal coordinated control model for fork-ring intersection[J]. Systems Engineering, 2006, 24(8): 27-31.]
- [3] 刘灿齐. 基于冲突分析的四肢环形交叉口信号周期计算[J]. 同济大学学报, 2007, 35(8): 1048-1052. [LIU C Q. Signal cycle calculation of articulated intersection based on conflict analysis[J]. Journal of Tongji University, 2007, 35(8): 1048-1052.]
- [4] 杨晓光, 赵靖, 汪涛. 环形交叉口信号控制最佳周期计算方法[J]. 中国公路学报, 2008, 21(6): 90-95. [YANG X G, ZHAO J, WANG T. Calculation method of optimal cycle for signal control of circular intersection[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(6): 90-95.]
- [5] 刘泽. 环形交叉口相位重叠控制法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. [LIU Z. Research on phase overlapping control method of circular intersection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.]
- [6] 徐洪峰, 耿现彩, 何龙. 单进口轮流放行方式的四路环形交叉口交通信号控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014(4): 953-962. [XU H F, GENG X C, HE L. Traffic signal control of four-way intersection with single inlet and alternating flow[J]. Journal of Jilin University (Engineering Science), 2014(4): 953-962.]
- [7] 刘南云. 信号控制环形交叉口微观交通流信息采集与分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016. [LIU N Y. Micro-traffic flow information collection and analysis at signalized intersection[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.]
- [8] 韩萍. 环形交叉口交通流运行特性[D]. 长春: 吉林大学, 2011. [HAN P. Traffic operation characteristics of roundabout[D]. Changchun: Jilin University, 2011.]
- [9] 史峰, 周文梁, 刘芬芳, 等. 基于元胞自动机的双车道环岛交通流特性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(4): 1616-1622. [SHI F, ZHOU W L, LIU F F, et al. Research on traffic flow characteristics of double-lane roundabout based on cellular automaton[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(4): 1616-1622.]
- [10] 钱勇生, 曾俊伟, 杜加伟, 等. 考虑意外事件对交通流影响的元胞自动机交通流模型[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 103-112. [QIAN Y S, ZENG J W, DU J W, et al. Cellular automaton traffic flow model considering influence of accidents[J]. Chinese Journal of Physics, 2011, 60(6): 103-112.]