

基于安全参数的双车道元胞自动机交通流模型及两种交通规则下的模拟分析

卫妮娜, 俞礼军, 李少龙

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: 提出了基于安全参数的双车道元胞自动机交通流模型, 该模型主要在车辆确定性减速的过程中考虑驾驶员对前方车辆下一时间步速度的预估, 安全参数代表驾驶员驾驶心理的冒险程度; 基于不同安全参数, 在双车道自由换道超车和禁止换道超车两种交通规则下, 通过 MATLAB 数值模拟仿真得到车流量和车流密度之间的关系曲线, 结果表明安全参数的增大可获得更大的交通量, 道路上车辆较少时禁止换道超车也可增加交通流量, 随着车辆的增加自由换道超车可提高道路利用率, 随着车辆的进一步增加两种交通规则下的车流量基本一致。

关键词: 公路交通; 双车道; 安全参数; 交通流模型; 元胞自动机(CA)

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)01-0040-04

元胞自动机(CA)模型是一种时间、空间都离散数学模型, 具有规则简单、灵活和易于编程等特点, 近年来在交通流研究中得到广泛应用。最具代表性的元胞自动机模型是由 Nagel 和 Schreckenberg 提出的 NaSh 模型, 其形式十分简单, 可描述实际的交通现象, 但其模拟的最大交通量小于实测数据。为此在 NS 模型的基础上提出了许多改进模型, 如引入慢启动规则的 BJH 模型和 VDR 模型、引入刹车灯效应的舒适驾驶模型、李晓白等提出的速度效应 VE 模型、董力耘等提出的基于跟车思想的一维元胞自动机交通流模型、孔宪娟提出的同时考虑近邻车辆和次近邻车辆影响的元胞自动机模型等。随后通过引入换道规则将单车道元胞自动机模型扩展到双车道系统中, 最具代表性的是 D. Chowhury 等提出的 STCA 模型, 该模型引入更符合现实的交通流状态的换道规则, 但其换道规则过于严苛, 造成道路资源的浪费。故在 STCA 模型的基础上又提出了很多改进模型, 如具有鸣笛效应的模型、王永明等根据驾驶员性格差异提出的更灵活的弹性换道规则、华学东等引入反映驾驶心理的选择换道概率的双车道元胞自动机模型等。

当车辆在道路上行驶时, 由于前方车辆的速度降低, 跟驰车辆需采取相应的减速或变换车道措施以免发生碰撞。以往的模型中驾驶员在决定是否采取减速措施时只考虑与前方车辆的间距。实际中,

驾驶员还会考虑前方车辆的运动状态, 其往往通过对前车下一时间步速度的预估来确定是否减速, 而驾驶心理不同的驾驶员对前车下一时间步速度的预估有很大不同。因此, 该文提出基于安全参数的双车道元胞自动机模型, 安全参数的大小反映驾驶行为的冒险程度, 在两种不同交通规则下, 通过数值模拟仿真分析其交通状况并讨论不同密度范围内两种交通规则的优劣。

1 模型的建立

将道路视为两条并列的、长度为 L 的一维离散格点链, 每个格点即为一个元胞, 其在 t 时刻的状态为空或被车辆占据。假定道路上行驶的均为小汽车, 每个元胞对应的实际道路长度为 7.5 m, 每辆车的最大行驶速度 $v_{\max} = 5 \text{ cell/s}$ (对应的实际最大车速为 135 km/h), 第 n 辆车在 t 时刻的状态由其速度 $v_n(t)$ 表示, $v_n(t) \in [0, v_{\max}]$ 。车道上第 n 辆车在 t 时刻与前车的距离 $d_n(t)$ 可表示为:

$$d_n(t) = X_{n-1}(t) - X_n(t) - 1$$

式中: $X_{n-1}(t)$ 为本车道上第 n 辆车的前车在 t 时刻的位置; $X_n(t)$ 为第 n 辆车在 t 时刻的位置。

车道上第 n 辆车在 t 时刻与相邻车道前方紧邻车辆间的距离 $d_{n,\text{other}}(t)$ 可表示为:

$$d_{n,\text{other}}(t) = X_{n-1,\text{other}}(t) - X_n(t) - 1$$

式中: $X_{n-1,\text{other}}(t)$ 为第 n 辆车在 t 时刻相邻车道前方紧邻车辆的位置。

车道上第 n 辆车在 t 时刻与相邻车道后方紧邻车辆的距离 $d_{n,back}(t)$ 可表示为:

$$d_{n,back}(t) = X_n(t) - X_{n+1,back}(t) - 1$$

式中: $X_{n+1,back}(t)$ 为第 n 辆车在 t 时刻相邻车道后方紧邻车辆的位置。

定义 $v_{n+1,back}(t)$ 为第 n 辆车在 t 时刻相邻车道后方紧邻车辆的速度, $v_{n-1,other}(t)$ 为第 n 辆车在 t 时刻相邻车道前方紧邻车辆的速度。

1.1 基于安全参数的模型

根据上述分析,在决定是否减速时,驾驶员会同时考虑与前车的距离及前车的行驶速度。为了避免与前方车辆发生碰撞,驾驶员将预估前方车辆下一时间步的速度。前方车辆在下一个时间步 $t+1$ 的运动状态能通过其当前时间步的运动状态获得,计算公式为:

$$v_{n-1}^e = \min(v_{n-1}^e + 1, v_{max}) \quad (1)$$

$$v_{n-1}^e = \min(v_{n-1}^e, d_{n-1}) \quad (2)$$

$$v_{n-1}^e = \max(v_{n-1}^e - 1, 0) \quad (3)$$

式中: v_{n-1}^e 表示第 n 辆车的前车在 $t+1$ 时刻的速度; d_{n-1} 表示第 $n-1$ 辆车和第 $n-2$ 辆车之间的空元胞数, $d_{n-1} = x_{n-2} - x_{n-1} - 1$; x_{n-2} 、 x_{n-1} 分别表示第 $n-2$ 辆车和第 $n-1$ 辆车在 t 时刻的位置。

式(1)意味着前方车辆首先将在下一个时间步进行加速运动,但其速度不能超过其最大行驶速度;式(2)意味着为了避免与前方车辆发生碰撞,第 $i+1$ 辆车将进行减速(确定性减速);式(3)表示前方车辆的随机减速过程。

为了描述不同驾驶员驾驶心理的冒险程度,引入安全参数 λ ,令 $\lambda v_{n-1}^e(t+1)$ 表示驾驶员对前车下一时间步速度的预估, $\lambda \in [0, 1]$ 。驾驶员对前车速度预估值越大,则驾驶员的驾驶心理越偏于冒险,安全参数 λ 也越大。

1.2 模型的确定性减速规则

根据上述安全参数,模型的确定性减速过程可改变为下面的形式:

$$v_n = \min(v_n + 1, d_i + \lambda v_{n-1}^e) \quad (4)$$

根据式(4),当安全参数 $\lambda=0$ 时,模型的规则即变为 NS 模型中的规则,表示的是驾驶心理偏安全的驾驶员的驾驶行为。当 $\lambda>0$ 时,驾驶员的驾驶心理偏于冒险,驾驶员的减速行为预估了前车在下一时间步的驾驶动机,随着安全参数的增大,驾驶员的驾驶心理逐渐偏向冒险,对于前车下一时间步的预估也越冒险。

1.3 换道规则

1.3.1 自由换道超车

双车道自由换道超车即道路中没有主要行驶车道和超车车道的区分,道路上的车辆采用自由的对称换道超车。其换道规则为:

$$d_{n,back}(t) + v_n(t) > v_{n+1}(t) \quad (5)$$

$$d_n(t) + \lambda v_{n-1}(t) < v_n(t) \leq d_{n,other}(t) + \lambda v_{n-1,other}(t) \quad (6)$$

式(5)表示车辆换道后避免与相邻车道的最近后车发生碰撞;式(6)表示车辆的换道动机,相邻车道的行驶条件比本车道的行驶条件好且换道后不会与相邻车道最近前车发生碰撞。

在制定换道规则时,常规的 STCA 模型中一旦发现满足换道条件则一定换道行驶,实际中驾驶员会对是否换道进行自我选择。为此,引入选择换道概率 P_s ,并令 $P_s = 0.8$ 。

1.3.2 禁止换道超车

考虑双车道交通中禁止车辆换道超车的交通规则,通过模拟仿真与自由换道超车的交通规则进行对比,该规则类似于并列的两条单车道,每条车道上的车辆按照该文新模型在本车道进行速度和位置更新,禁止其变换车道。

1.4 车辆的状态演化

双车道元胞自动机模型实施过程中,一般是把每个时间步划分为两个子时间步:在第一个子时间步,车辆按照换道规则换道;在第二个子时间步,车辆在两条车道上按照单车道的更新规则进行更新。状态演化过程包括换道、加速、确定性减速、随机减速及位置更新 5 个步骤。

1.4.1 换道过程

自由换道超车的交通规则下根据上述换道规则进行换道,即对于第 n 辆车,若其状态满足式(7)、式(8)所示条件,则换道至相邻车道。禁止换道超车的交通规则下则跳过该步骤直接进入下一步骤。

$$d_{n,back}(t) + v_n(t) > v_{n+1}(t) \quad (7)$$

$$d_n(t) + \lambda v_{n-1}(t) < v_n(t) \leq d_{n,other}(t) + \lambda v_{n-1,other}(t) \quad (8)$$

1.4.2 加速过程

车辆在加速过程中的状态演化表示为:

$$v_n(t+1/3) = \min(v_n(t) + 1, v_{max}) \quad (9)$$

1.4.3 确定性减速过程

为了避免与前方车辆发生碰撞,第 n 辆车需根据前方车辆下一时间步的速度和与前方车辆的间距

进行减速运动,其状态演化可表示为:

$$v_n(t+2/3) = \min(v_i(t+1/3), d_i(t) + \lambda v_{n-1}^*(t+1)) \quad (10)$$

1.4.4 随机减速过程

受各种不确定因素(如路面状况不好、驾驶员不同心态等)的影响,车辆在 $t+1$ 时刻以一定概率 P_d 减速,令 $P_d=0.4$,其状态演化可表示为:

$$v_n(t+1) = \max(v_n(t+2/3) - 1, 0) \quad (11)$$

1.4.5 位置更新过程

车辆的位置更新表达式为:

$$X_n(t+1) = X_n(t) + v_n(t+1) \quad (12)$$

2 数值模拟仿真结果

在数值模拟时,采用周期性边界条件,每车道视为由 $L=1\ 000$ 个元胞组成的一维元胞链,每个元胞的实际长度为 7.5 m ,对应实际道路长度约为 7.5 km ,每辆车占用一个元胞,时间步长取 1 s 。初始时刻所有车辆均随机分布,并连续运行 $10\ 000$ 个时间步,为消除暂态的影响,抛弃前 $5\ 000$ 个时间步的数据不作统计,对后 $5\ 000$ 个时间步的车流量和车流密度进行统计,用控制变量法得到不同安全参数、相同交通规则及相同安全参数、不同交通规则下的交通流量 Q 和车流密度 ρ 之间的关系。

2.1 不同安全参数时两种交通规则下车流量和车流密度的关系

自由换道超车即对称换道超车的交通规则下,安全参数 $\lambda=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 时车流密度 ρ 和车流量 Q 之间的关系见图1;禁止换道超车的交通规则下,安全参数 $\lambda=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 时车流密度 ρ 和车流量 Q 之间的关系见图2。

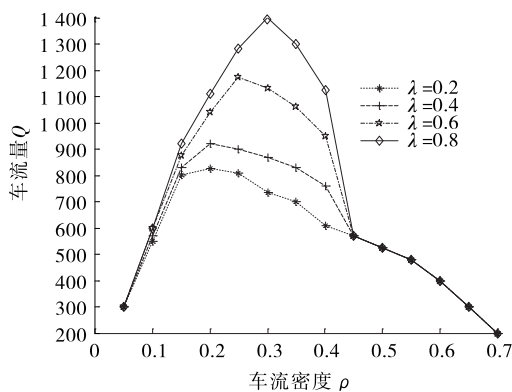


图1 不同安全参数 λ 时自由换道超车规则下车流量密度和车流量的关系

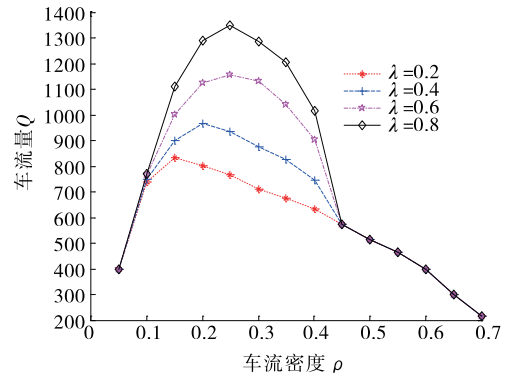


图2 不同安全参数 λ 时禁止换道超车规则下车流量密度和车流量的关系

从图1、图2可看出:当 $\rho < 0.1$ 时, λ 的大小对交通流量 Q 的影响很小,车流量 Q 随着车流密度 ρ 的增加而迅速增加,曲线的斜率也较大。当道路上的车流密度较小时,由于道路上的车辆较少,车辆和车辆之间的相互作用较弱,此时的交通流可视为自由流,驾驶员几乎不需采取减速与换道措施,其驾驶行为在整体上差异不大且车辆的行驶速度能达到最大。当 $\rho > 0.45$ 时, λ 的大小对车流量 Q 的影响也很小,车流量随着密度的增加而下降。此时道路上的车辆较多,彼此间的相互影响很大,车辆间的相互干扰使得车辆的平均速度减小,对于驾驶心理偏冒险的驾驶员,虽然其一直试图通过预估前车下一时间步的速度和寻求换道机会以避免速度的减小,但由于车辆间的间距小,很少有机会获得更高的速度,驾驶员的驾驶行为在整体上保持一致,图1和图2的曲线在该区域内也大致重合。当 $0.1 < \rho < 0.45$ 时, λ 的大小对车流量 Q 的影响很大,车流量 Q 表现出很大的差异。随着 λ 的增大,车流量 Q 大幅增大,而且最大车流量所对应的最佳密度也相应增加。在这种情况下,驾驶心理偏冒险的驾驶员通过预估前车下一时间步的速度来避免确定性减速,故保持了较大的平均行驶速度,在相同密度下能获得更大的流量。

2.2 相同安全参数时两种交通规则下车流量和车流密度的关系

取 λ 分别为 $0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 进行模拟仿真,分析相同安全参数时两种交通规则下车流量和车流密度之间的关系,仿真结果见图3~6。

从图3~6可看出:在相同安全参数条件下,当车流密度处于较低范围时,禁止换道超车规则下得到的车流量大于自由换道超车规则下得到的车流

量。因为道路上车辆较少的情况下,车辆行驶的自由度较大,车辆间相互干扰小且能达到较高速度,禁止换道超车可维持良好的交通秩序,有利于改善交通状况。随着车流密度的增大,自由换道超车时得到的车流量大于禁止换道超车时的车流量,由于车辆之间的相互干扰变大,车辆的行驶速度变小,自由换道超车的交通规则使驾驶员可通过变道超车来提高速度,从而有效利用道路资源。随着车流密度的进一步增加,两种交通规则下得到的车流量大致相同,因为此时车流密度很大,车辆干扰大、间距小,驾驶员很少有机会换道。

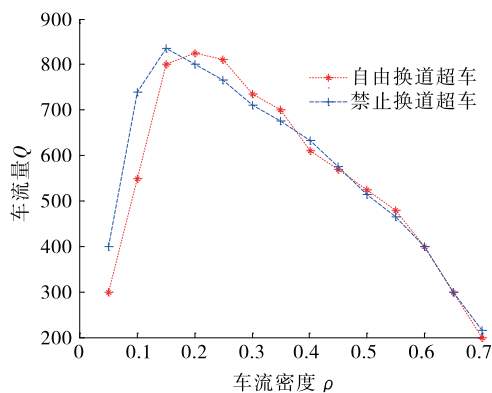


图 3 $\lambda=0.2$ 时两种交通规则下车流量与车流密度的关系

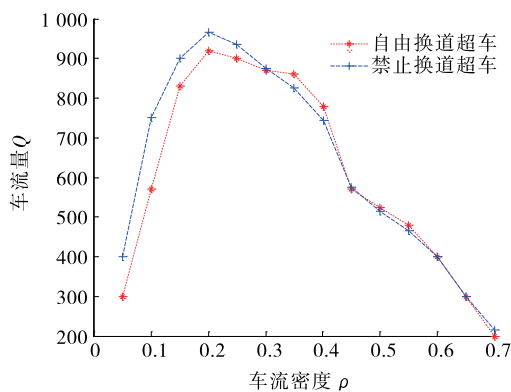


图 4 $\lambda=0.4$ 时两种交通规则下车流量与车流密度的关系

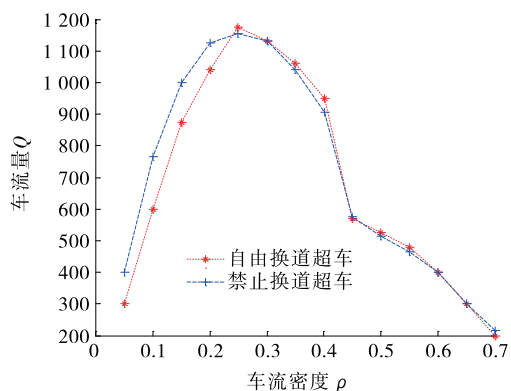


图 5 $\lambda=0.6$ 时两种交通规则下车流量与车流密度的关系

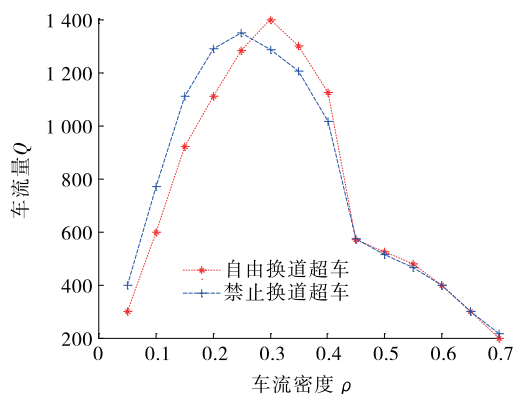


图 6 $\lambda=0.8$ 时两种交通规则下车流量与车流密度的关系

3 结论

该文提出了基于安全参数的双车道元胞自动机交通流模型,驾驶员在确定性减速过程中首先预估前方车辆下一个时间步的动机。MATLAB 仿真结果表明:车流密度较小和较大的情况下,安全参数对车流量的影响微小,在中间密度范围内,其值的增大能获得更大的车流量;车辆密度较小时禁止换道超车可提高道路利用率,随着密度的增加,与禁止换道超车相比自由换道超车规则下的道路利用率更高,随着密度的进一步增加,两种交通规则下的车流量基本一致。需指出的是,该文并没有对驾驶员的行为进行细致划分,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. Journal de Physique I: EDP Sciences, 1992, 2(12).
- [2] S C Benjamin, N F Johnson, P M Hui. Cellular automata models of traffic flow along a highway containing a junction[J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 1996, 29(12).
- [3] R Barlovic, L Santen, A Schreckenberg. Metastable states in cellular automata for traffic flow[J]. The European Physical Journal B: Condensed Matter and Complex Systems, 1998, 5(3).
- [4] W Knospe, L Santen, A Schadschneider, et al. Towards a realistic microscopic description of highway traffic[J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 2000, 33(48).

(下转第 56 页)

中弯道全封闭景观空间下的停车视距最小,直线全开敞下的最大;直线全封闭景观与弯道垂直景观下的停车视距值较为接近,相差约1 m。对于采用气压和真空助力制动系的轻型货车,不同路面条件下山区公路景观对停车视距的影响趋势与采用液压制动的大众轿车相同;在相同条件下,采用液压制动的大众轿车的停车视距比采用气压制动的轻型货车小10 m左右。2) 直线全开敞景观空间下的停车视距值与中国规范值较为接近,弯道全封闭景观空间下的停车视距值与改进值接近,其余公路景观下的停车视距均小于改进值和规范值。在公路景观设计时,对于因停车视距而事故多发的路段,可适当设置全封闭、垂直景观以减少交通事故。

未来研究中有待进一步细化公路景观分类规则并考虑不同半径、不同坡度和弯坡组合等情况下的景观形态。另外,汽车速度不是固定值,不同驾驶人的适宜性水平也会有所不同,在未来研究中均应予以考虑。

参考文献:

- [1] 刘玮.基于动力定型理论的驾驶员应激训练场景构建与评价[D].西安:长安大学,2012.
- [2] Bogdevicius M, Vladimirov O. Efficiency of a braking process evaluating the roughness of road surface [J]. Transport, 2006, 21(1).
- [3] 袁浩. 停车视距模型与参数研究[D]. 南京: 东南大学,
- [5] Li Xiaobai, Wu Qingsong, Jiang Rui. Cellular automaton model considering the velocity effect of a car on the successive car [J]. Physical Review E: Statistical, Non-linear, and Soft Matter Physics, 2001, 64(6).
- [6] 董力耘, 薛郁, 戴世强. 基于跟车思想的一维元胞自动机交通流模型[J]. 应用数学与力学, 2002, 23(4).
- [7] 孔宪娟. 基于元胞自动机的交通流建模及其特性分析研究[D]. 北京: 京交通大学, 2007.
- [8] D Chowdhury, D E Wolf, M Schreckenberg. Particle hopping models for two-lane traffic with two kinds of vehicles: effects of lane changing rules [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 1997, 235(3-4).
- [9] B Jia, R Jiang, Q S Wu, et al. Honk effect in the two-lane cellular automaton model for traffic flow [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2005, 348.
- [10] 王永明, 周磊山, 吕永波. 基于元胞自动机交通流模型

2009.

- [4] 姜虹, 李峰. 不同路面条件下高速公路的停车视距建模与安全车速分析[J]. 西安工业大学学报, 2012, 32(1).
- [5] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [6] 陈瑶. 公路景观对停车视距的影响研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [7] 雷同飞. 基于路面状况的汽车制动性能仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [8] JTG D20-2006, 公路路线设计规范[S].
- [9] 交公路字 259 号, 中华人民共和国机动车制动检验规范(试行)[S].
- [10] GB 7258-2012, 机动车运行安全技术条件[S].
- [11] 陈瑶, 郭凤香. 基于公路环境的停车视距模型分析[J]. 价值工程, 2014(34).
- [12] 王永平, 赵胜林, 周磊. 高速公路停车视距研究[J]. 交通标准化, 2010(17).
- [13] 袁浩, 史桂芳, 黄晓明, 等. 停车视距制动模型[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(4).
- [14] 魏嘉. 高速公路一般最小半径条件下的停车视距研究[J]. 淮北职业技术学院学报, 2014, 13(3).
- [15] 刘建锁, 惠彬永. 高速公路小半径圆曲线停车视距分析[J]. 山西建筑, 2010, 36(10).
- [16] 刘向阳, 周森, 郭腾峰. 公路行车视距分析与验证[J]. 中国公路学报, 2010, 23(增刊 2).
- [17] 王洁. 山区公路行车视距分析[J]. 青海交通科技, 2010(增刊).

收稿日期: 2016-08-01

(上接第 43 页)

- 的车辆换道规则[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1).
- [11] 华学东, 王伟, 王昊. 考虑驾驶心理的城市双车道交通流元胞自动机模型[J]. 物理学报, 2011, 60(8).
- [12] 贾斌, 高自友. 基于元胞自动机的交通系统建模与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [13] 朱昶胜, 马玉婷, 王庆荣. 入匝道系统元胞自动机模型的换道规则研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(13).
- [14] 徐尚义. 双车道混合交通流时间序列复杂性分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [15] 华雪东, 王伟, 王昊. 考虑驾驶心理的城市双车道交通流元胞自动机模型[J]. 物理学报, 2011, 60(8).
- [16] 刘立英. 多车种混合条件下的交织区车流仿真建模与特性分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [17] 袁亮. 元胞自动机双向交通流模型的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.

收稿日期: 2016-05-21