

基于改进 PFV 策略的双车道连续元胞自动机模型^{*}赵子翔¹, 彭勇¹, 沙晓宇²

(1.重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2.华设设计集团, 江苏 南京 210002)

摘要: 根据道路实际情况, 提出考虑多车信息的改进 PFV 策略, 并进行参数标定; 将跟驰策略和换道规则相结合, 建立双车道连续元胞自动机模型, 采用周期边界式条件进行模型仿真, 比较不同密度下双车道交通流变化情况和车辆换道行为, 通过仿真结果的时空图显示车辆换道造成的系统速度延迟, 通过比较双车道系统的交通流密度—交通流量、交通流密度—行驶速度关系分析车辆在双车道环境下的行驶状况。仿真结果表明所建立的模型合理, 能用于道路交通流分析。

关键词: 公路交通; 交通流; 连续元胞自动机; 双车道; 跟驰策略; 换道规则; 改进 PFV 策略

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)01-0017-04

微观交通流仿真模型是研究交通问题的重要手段, 元胞自动机模型能有效描绘交通流运转机理, 探究道路中存在的交通问题。1992 年, Nagel K. 等将微观交通流仿真与元胞自动机相结合, 提出经典的 NaSch 模型。随后大量学者在此基础上进一步展开研究。但传统元胞自动机模型将跟驰行为离散化, 难以精细刻画道路交通流状态。为此, Öznuur Yeldan 等提出采用连续元胞自动机模型研究高速公路随机交通流, 探究道路的连续性动态变化情况。基于该方法, 彭勇等考虑多车影响的跟驰策略, 构建了单车道连续元胞自动机模型。但现实中的道路由多条车道组成, 行驶过程中车辆并非一直沿同一车道行驶, 会出现换道行为, 车辆跟驰不仅受到前后车的影响, 还受到相邻车道车辆的影响, 不宜将单车道连续元胞自动机模型直接应用于多车道交通流仿真分析。对于多车道跟驰策略, Ge H. X. 等提出一种结合反馈控制的双车道跟驰策略, 在跟驰策略中引入换道规则; 夏冬雪等综合考虑各种因素对驾驶行为的影响, 提出考虑相邻车道车辆和前方多辆车影响的跟驰策略; Ou H. 等提出一种考虑车间通信的双车道跟驰策略跟车模型。但在实际跟驰行为中, 驾驶员通常会根据前后及相邻车道多车信息进行跟驰决策。该文考虑多车信息的跟驰策略, 结合换道规则, 构建双车道连续元胞自动机模型, 并利用实际道路交通流数据对模型进行验证。

1 双车道连续元胞自动机模型

假设跟驰车队在一条双车道道路上行驶, 将道

路上的车辆视作元胞, 车道路段长度 L , 元胞长度 (车辆长度) l , 路段的车辆承载力 $N_s = L/l$ 。模型采用周期性边界条件。双车道元胞自动机模型仿真流程见图 1。

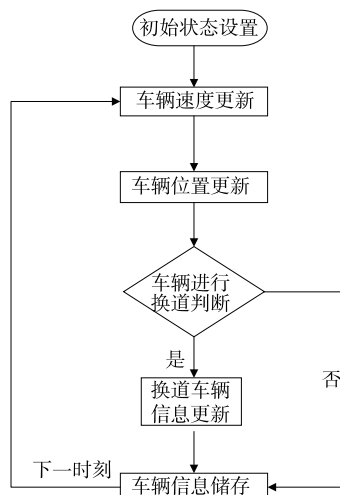


图 1 双车道连续元胞自动机模型仿真流程

(1) 初始车辆设置。每条车道车辆的初始位置和速度表达式如下:

$$x_{i,j}(0) = (L/N_a - l) \text{rand}(1) + (L/N_a)(i-1) + l \quad (1)$$

$$v_{i,j}(0) = \min(v_{\max} \text{rand}(1), d_{i+1,j}), \quad v_{i,j}(0) > 0 \quad (2)$$

式中: $x_{i,j}(0)$ 为每条车道上车辆的初始位置; i 为车辆编号; j 为道路编号; N_a 为道路上初始车辆数; $\text{rand}(1)$ 表示生成 0—1 的随机函数; $v_{i,j}(0)$ 为每条车道上车辆的初始速度; v_{\max} 为最大速度; $d_{i+1,j}$ 为

^{*} 基金项目: 重庆市社会科学规划项目(2019YBGL049); 教育部人文社会科学研究规划基金项目(17YJA630079)

当前车辆与前车的距离。

(2) 速度更新。车辆速度更新规则如下:

$$v_{i,j}(t+1) = \min(v_{\max}, d_{i+1,j}, v_{i,j}(t) + a_{i,j}(t+1)) \quad (3)$$

式中: $v_{i,j}(t+1)$ 为车辆在 $t+1$ 时刻的行驶速度; $v_{i,j}(t)$ 为车辆在 t 时刻的速度; $a_{i,j}(t+1)$ 为车辆在 $t+1$ 时刻的加速度。

(3) 车辆位置更新。更新规则如下:

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) \quad (4)$$

式中: $x_{i,j}(t+1)$ 为车辆在 $t+1$ 时刻的位置信息; $x_{i,j}(t)$ 为车辆在 t 时刻的位置信息; $v_{i,j}(t+1)$ 为仿真步长为 1 s 时车辆行驶的距离。

(4) 车辆换道。按换道策略进行换道决策。

2 跟驰和换道策略

2.1 跟驰规则

在 PFV 策略的基础上, 综合考虑多车最优速度和前后车最优速度差的影响建立新的跟驰策略, 表达式如下:

$$\begin{aligned} \frac{dv_{i,j}(t)}{dt} = & \alpha[\beta V(\Delta x_{i,j}(t)) + \gamma V(\Delta x_{i-1,j}(t)) + \\ & \phi V(\Delta x_{i+1,j}(t)) - v_{i,j}(t)] + \sigma \Delta v_{i,j}(t) + \\ & \kappa(V(\Delta x_{i+1,j}(t)) - V(\Delta x_{i,j}(t))) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $V(\cdot)$ 为 t 时刻车辆 i 在车道 j 上的最优速度; $\Delta v_{i,j}(t)$ 为 t 时刻车辆 i 在车道 j 上与前车的速度差; $\alpha, \beta, \gamma, \phi, \sigma, \kappa$ 为敏感系数。

采用 Bando M. 等提出的最优速度函数, 表达式如下:

$$V(\Delta x_n(t)) = \frac{V_{\max}}{2} [\tanh(\Delta x_n(t) - h_c) + \tanh(h_c)] \quad (6)$$

式中: h_c 为安全距离。

选取文献[9]中 NGSIM 高速公路数据, 采用遗传算法对跟驰策略参数进行标定。遗传算法种群规模为 50 个, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.2, 迭代次数为 200 次。目标函数 F_{obj} 如下:

$$F_{\text{obj}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |a_i^* - a_i| \quad (7)$$

式中: N 为数据编号; a_i^* 、 a_i 分别为计算数据和实际数据。

参数标定结果如下: $\alpha = 0.5214$; $\beta = 0.5423$; $\gamma = 0.2317$; $\phi = 0.1231$; $\sigma = 0.1186$; $\kappa = 0.0984$; $F_{\text{obj}} = 0.8571$ 。实测加速度与计算加速度对比见图

2, 标定计算出的加速度与实际加速度有较好的拟合度, 跟驰策略能较好地反映跟驰行为。

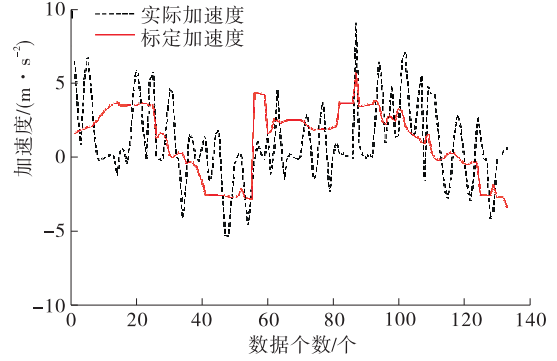


图2 标定加速度与实际加速度对比

2.2 换道规则

实际道路中有强制换道和非强制换道 2 种换道行为。当车辆与前方车辆的距离几乎小于安全距离时, 车辆必须根据安全需要采取换道措施, 这是一种强制换道行为。当车辆与前方车辆保持安全距离, 但相邻车道车辆较少时, 可选择是否换道, 属于非强制换道行为。据此制定变道策略(见图 3)如下:

(1) 车道 1 上车辆 i 与车辆 $i+1$ 间距小于在时间步长 Δt 内车辆 i 行驶的距离时, 车辆 i 产生换道意愿, 即:

$$D_n < (v_{i,1}(t) + a_{i,1}(t) \cdot \Delta t) \cdot \Delta t \quad (8)$$

式中: D_n 为车辆 i 与前车 $i+1$ 之间的距离(m); $v_{i,1}(t)$ 为车辆 i 当前的速度(m/s); $a_{i,1}(t)$ 为车辆 i 当前的加速度(m/s²); Δt 为单位时间。

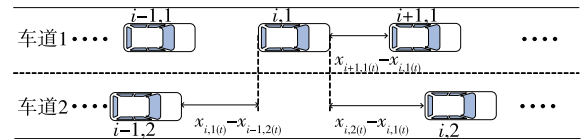


图3 车辆换道示意图

(2) 车道 1 上车辆 i 产生换道意愿后, 当满足车辆 i 与相邻车道上前车的间距大于在时间步长 Δt 内车道 1 上车辆 i 行驶的距离与安全距离 d_{safe} 之和, 且车辆 i 与目标车道上后车的间距大于在时间步长 Δt 内目标车道上后车行驶的距离与安全距离 d_{safe} 之和时, 产生实际换道行为, 即:

$$\begin{aligned} D_Q & > (v_{i,1}(t) + a_{i,1}(t) \cdot \Delta t) \cdot \Delta t + d_{\text{safe}} \\ D_H & > (v_{i-1,2}(t) + a_{i-1,2}(t) \cdot \Delta t) \cdot \Delta t + d_{\text{safe}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: D_Q 为换道车辆与目标车道前车之间的距离(m); d_{safe} 为车辆之间的最小安全距离(m); D_H 为

换道车辆与目标车道后车间的距离(m); $v_{i-1,2}(t)$ 为目标车道后车的速度(m/s); $a_{i-1,2}(t)$ 为目标车道后车的加速度(m/s²)。

(3) 根据2种换道行为的情况,加入换道概率 p_s ,如果车辆与前方车辆保持相当大的安全距离,仍有可能产生换道意图,然后重复第二步判断是否存在换道条件进行换道。符合换道条件的车辆换道至目标车道,不符合换道条件的车辆不换道。当车辆横向移动时,保持换道前的速度和加速度,然后根据跟驰规则更新行驶状态。

3 仿真分析

3.1 仿真设置

仿真时长为5 000 s,2条车道初始车辆数相同($N_a=100$ 辆),车辆长度 $l=5$ m,最大车速 $v_{\max}=30$ m/s,最大加速度 $a_{\max}=6$ m/s²,换道概率 $p_s=0.6$ 。

3.2 仿真结果分析

如图4所示,当交通流密度小于0.05 veh/m时,仿真结果较好;当交通流密度大于0.05 veh/m时,仿真结果比实际数据略高。总体来讲,仿真结果与实际数据的拟合程度较好,说明基于上述跟驰—换道策略建立的双车道连续元胞自动机模型合理,能用于交通流仿真。

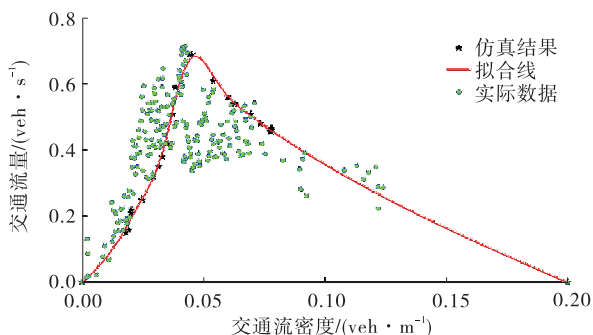


图4 实际数据与仿真结果对比

图5为车辆平均速度仿真结果。车辆根据跟驰策略和换道规则进行车速更新与调整,车道1与车道2车速相差不大,车速在26 m/s上下波动,道路总体情况较通畅,仿真效果与模型设置情况相符。

根据图4仿真结果,分别选取交通流密度0.02、0.06 veh/m,比较分析在交通状况良好和交通状况较拥堵情况下双车道交通流情况。图6、图7为不同交通流密度下仿真时空图,图中的点代表当前时刻车辆所处位置,可通过点的密集程度判断道路的

拥堵情况。

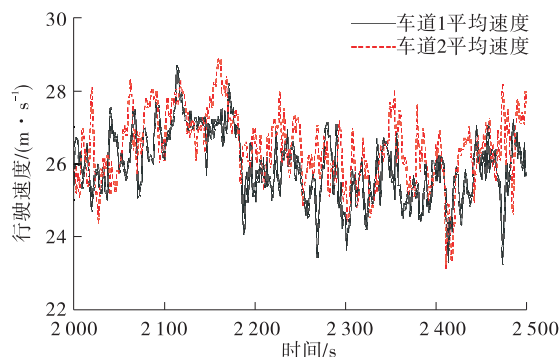
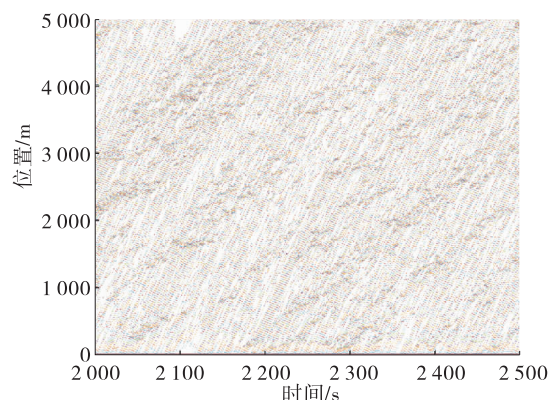
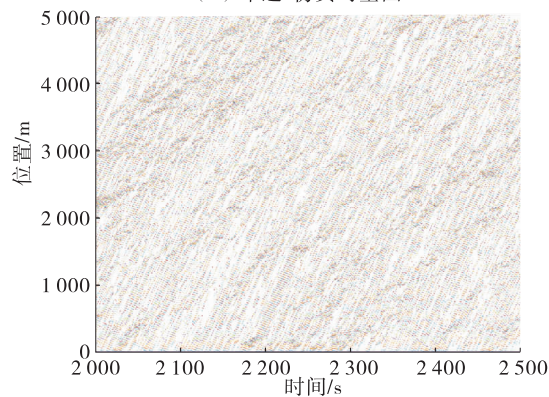


图5 双车道连续元胞自动机仿真平均速度



(a) 车道1仿真时空图



(b) 车道2仿真时空图

图6 交通流密度为0.02 veh/m时双车道时空图

由图6可知:交通流密度为0.02 veh/m时,车辆具有良好的行驶条件,车辆换道条件充分。仿真结束,统计2条车道通车情况,共有5 145辆车通过路段终点。车辆换道会对目标车道上车辆造成一定影响,使目标车道上车辆出现一定减速,且减速情况向车流下游传递。车道1和车道2上车辆的平均速度分别为24.98、25.56 m/s,平均速度没有发生明显变化,整体通行较顺畅。考虑跟驰与换道策略的仿真结果更符合实际情况。

由图7可知:由于交通流密度增加,道路行驶状

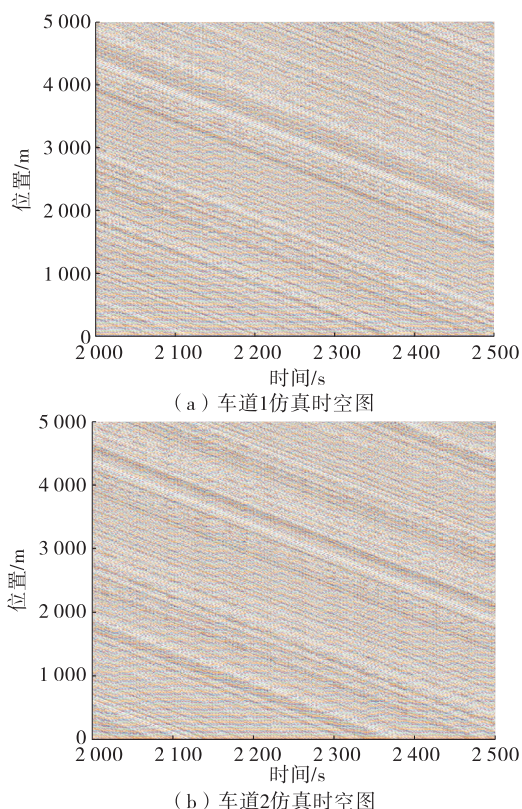


图7 交通流密度为0.06 veh/m时双车道时空图

况较差,换道条件不充足,极大减少了非强制换道次数,同时由于交通流密度较大,系统整体运行速度有所降低。在总仿真时长内,车道1、车道2上车辆的平均速度分别为11.82、11.51 m/s,与交通流密度为0.02 veh/m时相比,道路通行效率明显下降,且由于车辆换道造成拥堵和延误。在交通流密度较大的情况下,车辆的通行效率和换道次数都明显下降,仿真结果与实际道路运行规律较相符。

平均速度与交通流密度的关系见图8。由图8可知:速度—交通流密度关系曲线的趋势与现实交通情况相符。交通流密度小于0.02 veh/m时,道路上的车辆行驶状况很好,车辆可在本车道上以最大速度行驶,不需要通过换道就可获得更好的速度,故车辆的平均速度无明显变化。密度为0.02~0.08 veh/m时,3条曲线存在明显差别,此时交通流密度适中,道路中具备一定换道条件,车辆会通过换道来获得更优的行驶速度,故车辆会有较多的换道行为,导致两车道平均速度存在差异,与仿真设置的双车道模型行驶条件相符。密度大于0.1 veh/m时,3条曲线基本重合,平均速度与密度关系基本没有变化。在交通流密度过大时,行驶在道路上的车辆没有足够的换道条件,大部分车辆不发生换道行为。

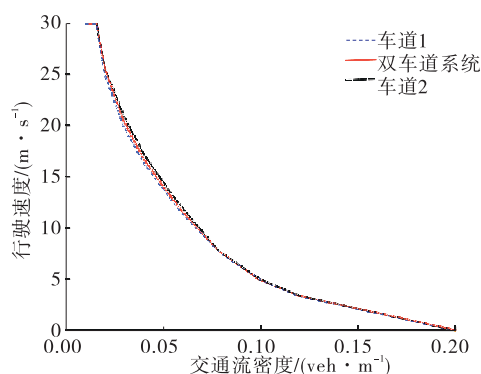


图8 单条车道与系统整体的速度—密度关系

4 结语

将考虑多车信息的跟驰策略与换道策略相结合,建立双车道连续元胞自动机模型,通过对模型进行模拟仿真,验证模型的适用性和合理性,并探究交通流特性。通过仿真对比不同交通流密度下车辆时空变化,描绘不同密度下双车道上车辆换道情况;通过分析对比双车道的交通流三要素指标,证明所建双车道连续元胞自动机模型与实际道路情况相符,能应用于实际交通流问题研究。

参考文献:

- [1] NAGEL K, SCHRECKENBERG M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. Journal De Physique I, 1992, 2(12): 2221—2229.
- [2] ÖZNUR Yeldan, COLORNI A, LUÈ A, et al. A stochastic continuous cellular automata traffic flow model with a multi-agent fuzzy system[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, 54: 1350—1359.
- [3] 彭勇, 沙晓宇, 刘世洁, 等. 基于PFV策略的连续型元胞自动机交通流模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(3): 75—80.
- [4] GE H X, MENG X P, ZHU H B, et al. Feedback control for car following model based on two-lane traffic flow[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, 408: 28—39.
- [5] 夏冬雪, 李春贵. 基于邻近车道车辆和多前车信息的双车道交通流动力学模型[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(7): 1562—1567.
- [6] OU H, TANG T Q. An extended two-lane car-following model accounting for inter-vehicle communication[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 495: 260—268.
- [7] 彭勇, 刘世洁, DENNIS Z Y. 前后多车影响的跟驰模型

(下转第25页)

(1) 在遭受攻击时,增大网络中城市节点容忍系数 α 可有效增强网络抗毁性。

(2) 在蓄意攻击中不同攻击节点策略导致的网络崩溃情况各不相同,其中在攻击少量节点时,基于介数优先攻击策略相较于其他两种攻击策略网络效率会迅速降低,表现出较差的抗毁性。

(3) 随机攻击下成渝区域高速公路网络具有较强的抗毁性,而在蓄意攻击策略下表现出脆弱性。

(4) 对成渝区域高速公路网络中关键节点予以保护可增强网络抗毁性。

参考文献:

- [1] 崔杨,曾俊伟,钱勇生,等.基于复杂网络的西部地区公路网可靠性研究[J].公路工程,2018,43(3):46—51.
- [2] 金雷.基于复杂网络的地域公路交通网抗毁性分析[D].长沙:国防科学技术大学,2008.
- [3] 邓亚娟,杨云峰,马荣国.基于复杂网络理论的公路网结构特征[J].中国公路学报,2010,23(1):98—104.
- [4] 曹祥.基于复杂网络理论的区域公路交通网络可靠性研究[D].南京:南京信息工程大学,2011.
- [5] 王雪.基于复杂网络理论的区域煤炭运输公路网的可靠性研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [6] 王家琦.中国城际公路网效率的空间异质性及其组织机制[D].武汉:湖北大学,2017.
- [7] 代洪娜,姚恩建,刘莎莎,等.基于基尼系数的高速公路网流量不均衡性研究[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(1):205—211.
- [8] 翁小雄,谢志鹏.基于多层复杂网络的高速公路节点重要性研究[J].广西师范大学学报(自然科学版),2021,39(5):78—88.
- [9] MOTTER Adilson E, LAI Ying-Cheng. Cascade-based attacks on complex networks[J]. Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2002, 66(6 Pt 2):065102.
- [10] CRUCITTI Paolo, LATORA Vito, MARCHIORI Massimo. Model for cascading failures in complex networks[J]. Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2004, 69(4 Pt 2):045104.
- [11] PER Bak, TANG Chao, KURT Wiesenfeld. Self-organized criticality: an explanation of the $1/f$ noise[J]. Physical Review Letters, 1987, 59(4):381—384.
- [12] DOBSON I, CARRERAS B A, NEWMAN D E A. A probabilistic loading-dependent model of cascading failure and possible implications for blackouts[J]. Probability in the Engineering and Informational Sciences, 2005, 19(1):15—32.
- [13] DOU Bing-Lin, WANG Xue-Guang, ZHANG Shi-Yong. Robustness of networks against cascading failures[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2010, 389(11):2310—2317.
- [14] 吴晓平,王甲生,秦艳琳,等.非线性负载容量模型的小世界网络级联抗毁性研究[J].通信学报,2014,35(6):1—7.

收稿日期:2021—05—18

(上接第20页)

- 及稳定性分析[J].交通运输系统工程与信息,2018,18(6):45—51+84.
- [8] BANDO M, HASEBE K, NAKAYAMA A, et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation[J]. Physical Review E: Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 1995, 51(2):1035—1042.
- [9] JAMES C. Next generation simulation (NGSIM) vehicle trajectories and supporting data[EB/OL]. [2020—11—12]. <https://catalog.data.gov/dataset/next-generation-simulation-ngsim-vehicle-trajectories-and-supporting-data>.
- [10] JIANG N, YU B, CAO F, et al. An extended visual angle car-following model considering the vehicle types in the adjacent lane[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2021, 566:125665.
- [11] HOSSAIN M A, KABIR K, TANIMOTO J. Improved car-following model considering modified backward op-

timal velocity and velocity difference with backward-looking effect[J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2021, 9(2):242—259.

- [12] 卫妮娜,俞礼军,李少龙.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[J].公路与汽运,2017(1):40—43+56.
- [13] 曾俊延,彭金栓,韩东鑫,等.变道辅助系统弯道目标车辆位置识别方法[J].公路与汽运,2018(2):1—4.
- [14] 唐夕茹,陈艳艳.基于改进型元胞自动机模型的双车道道路交通特征分析[J].北京工业大学学报,2014,40(1):1—10.
- [15] 余森彬.基于三相交通流理论的双车道交通流临界特征研究[D].兰州:兰州交通大学,2016.
- [16] 叶品,钟诚文,李兵强.基于快慢车辆主动换道特性的双车道元胞自动机模型研究[J].交通与计算机,2007,25(1):86—89.

收稿日期:2021—06—21