

# V2V 环境下基于改进 OV 模型的交叉口通行效率分析

徐 伟,梁文丽,刘海青

(山东科技大学 交通学院,山东 青岛 266590)

**摘 要:**在 V2V 环境下,驾驶员可以直接获取邻接车辆的运动状态和交叉口的信号时长,利用和前车之间的车头间距与安全距离差对车辆进行预加速控制,对驾驶行为产生积极影响。本研究基于 V2V 环境考虑驾驶员反应提前时间的改进 OV 模型,选取交叉口排队消散效率和直行车道的通行能力作为分析信号交叉口通行效率的指标,研究了考虑驾驶员反应提前时间的改进 OV 模型对信号交叉口通行效率的影响。仿真结果表明,相比传统 OV 模型和考虑驾驶员反应延迟时间的 OV 模型,基于 V2V 环境改进的 OV 模型在交叉口处能获得更高的消散效率和直行车道的通行能力,极大提高了交叉口的通行效率。

**关键词:**V2V 环境;跟驰模型;消散效率;通行能力;仿真分析

**中图分类号:**U463

**文献标志码:**A

## Traffic efficiency analysis of intersections based on improved OV model in V2V environment

XU Wei, LIANG Wenli, LIU Haiqing

(College of Transportation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** In vehicle-to-vehicle (V2V) environment, drivers can directly obtain the motion state of the adjacent vehicle and the signal duration of the intersection to carry out pre-acceleration control by using the headway and safety distance from the front vehicle, which has a positive impact on the driving behavior. It investigated the impact of the improved optimal velocity (OV) model with the consideration of drivers' response time on the traffic efficiency of signalized intersections by selecting the queuing dissipation efficiency of intersections and the capacity of through lanes as indicators to analyse the traffic efficiency of signalized intersections. The simulation results show that compared with the traditional OV model and the OV model considering the drivers' response delay time, the proposed model can obtain higher dissipation efficiency and greater capacity of through lanes at intersections, which greatly improves the traffic efficiency of intersections.

**Key words:** V2V environment; car following model; dissipation efficiency; capacity; simulation analysis

自 20 世纪初起,随着机动化和城市化水平的快速提升,城市道路交通压力不断增大,交通拥堵现象经常发生,交通流中车辆的运行独立性逐渐变小,车辆之间的跟驰行为成为当前城市道路上的基本交通行为。在交叉口车辆通行过程中,车辆的微观跟驰行为对道路的通行能力产生重要影响。基于微观跟驰行为对道路通行能力进行分析,结果更加客观合理。

传统道路交通环境下,驾驶员并不能实时获取交叉口信号灯的运行状态和邻接车辆的运动情况等信息,只能根据前车的运行状态做出判断和决策。国内外很多学者对考虑驾驶员反应延迟的跟驰模型进行了研究

**收稿日期:**2020-09-11

**基金项目:**山东省社会科学规划研究项目(18CCXJ25);青岛市社会科学规划研究项目(QDSKL1801134);青岛市双百调研工程项目(2019-B-10)

**作者简介:**徐 伟(1979—),男,山东巨野人,副教授,博士,主要从事交通行为、交通经济、供应链管理与物流管理的研究。

梁文丽(1996—),女,山东青岛人,硕士研究生,主要从事车路协同技术研究,本文通信作者。

E-mail: lw10301@126.com

并取得了阶段性的研究成果。Jin 等<sup>[1]</sup>提出基于车头距和速度差的延迟反馈控制来确保考虑驾驶员反应延迟的模型稳定性。Li 等<sup>[2]</sup>研究了考虑驾驶员反应延迟的跟驰模型的一般非线性稳定策略。Zhou 等<sup>[3]</sup>构建了考虑驾驶员反应延迟的全速度差模型并进行非线性分析。此外,还有很多学者从驾驶员反应延迟时间对交通流的影响角度展开了研究<sup>[4-6]</sup>。上述研究绝大部分是在传统环境下考虑驾驶员获取信息的滞后性基础上进行研究,尽管上述研究取得了一定的成效,但由于传统条件下驾驶员获得信息具有滞后性,限制了驾驶员获取道路交通信息。

在车-车通信(vehicle-to-vehicle, V2V)环境下,红灯期间排队等待的驾驶员可以利用无线网络,实时获取周围邻接车辆的运动信息和前方交叉口信号灯的灯态,进而提前操控车辆,在红灯起亮前较短时间内,利用停车间距提前启动,突破传统概念上的最小安全距离,实现车辆预加速,跟车行为发生了实质性的变化,并进一步影响车队的消散状态。V2V 环境下,车辆与车辆之间的相互通信形成了强大的共享信息网络<sup>[7]</sup>,充分利用车辆的运动状态、路况等信息能够辅助驾驶员进行提前决策,进而对驾驶行为产生影响。不少学者从宏观角度揭示引入智能电子设备后的交通流特征<sup>[8-11]</sup>。Kuang 等<sup>[12]</sup>考虑平均速度效应,提出一种扩展的多预期平均速度模型。华雪东等<sup>[13]</sup>建立了考虑 V2V 技术的改进 Newell 模型,研究 V2V 通信技术对交通运行的影响。Peng 等<sup>[14]</sup>结合 V2V 通信技术,提出一种跟车模型的延迟反馈控制方法。Sun 等<sup>[15]</sup>考虑 V2V 通信技术背景下前方两辆连续车辆的影响,提出一种改进的跟车模型。Wang 等<sup>[16]</sup>提出一种扩展的跟车模型,分析 V2V 通信技术对无信号交叉口微观驾驶行为的影响。

1995 年 Bando<sup>[17]</sup>提出的优化速度(optimal velocity, OV)模型是描述车辆动力学行为的基础模型之一,由此延伸出广义优化速度模型<sup>[18]</sup>、全速度差模型<sup>[19]</sup>、最优速度差模型<sup>[20]</sup>等一系列的优化模型,对交通流微观行为分析具有重要的价值。本研究基于 V2V 环境下改进的 OV 模型,对比考虑驾驶员反应延迟的跟驰模型和传统跟驰模型,仿真分析了其对交叉口通行效率的影响。结果表明,在驾驶员提前反应条件下,交叉口的通行效率得到了显著提升。

## 1 模型建立

### 1.1 V2V 环境下改进的 OV 模型

驾驶员通过 V2V 设备获取前方交通流的实时状态后,在前车启动之前会有提前反应时间  $t_f$ ,基于此,设计了考虑驾驶员反应提前时间的改进 OV 跟驰模型:

$$\frac{d^2 x_n(t)}{dt^2} = \alpha [V(\Delta x_n(t + t_f)) - v_n(t)], \quad (1)$$

其中:  $\alpha$  表示驾驶员敏感系数;  $v_n(t)$  为  $n$  车 ( $n=1, 2, \dots, N$ ;  $N$  为总车辆数) 在  $t$  时刻的实际速度;  $\Delta x_n(t)$  为  $n+1$  车与  $n$  车在  $t$  时刻的车头间距;  $t_f$  表示驾驶员提前反应时间。优化速度  $V(\Delta x_n(t))$  亦可以被期望的稳定速度,并服从如下条件:

$$V(\Delta x_n(t)) \geq 0, V(0) = 0, \lim_{\Delta x_n(t) \rightarrow \infty} V(\Delta x_n(t)) = v_{\max}, \quad (2)$$

式中,  $h_c$  表示安全间距,  $v_{\max}$  表示最大速度,  $V(\Delta x_n(t))$  的双曲正切函数可以用式(3)来表示:

$$V(\Delta x_n(t)) = \frac{v_{\max}}{2} [\tanh(\Delta x_n(t) - h_c) + \tanh(h_c)]. \quad (3)$$

### 1.2 改进模型在信号交叉口处的应用

考虑驾驶员反应提前时间的改进 OV 模型在信号交叉口处的应用可以分为 3 个阶段:

#### 1) 初始状态

车队处于停车状态,驾驶员通过 V2V 设备获取与前车之间的车头间距  $\Delta x_n$ ,安全车距为  $h_c$ ,如图 1 所示。

#### 2) 后车预加速

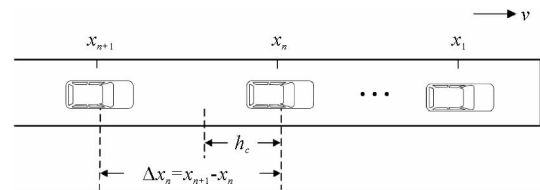


图 1 初始状态车队位置、安全车距示意图

Fig. 1 Schematic diagram of parking fleet's positions and safety distance in the initial state

在绿灯启亮时刻  $g_0$  前的较短时间  $t_n$  内, 停车等待车队最后 1 辆车的驾驶员根据 V2V 设备的提示开始提前启动车辆, 经过时间间隔  $t_f$  后, 当前车的前一辆车开始启动, 依次向前传递至第一辆车启动。位置更新如公式(4)所示。

$$x_n(t) = x_n(t-t_i) - \dot{x}_n(t-t_i)\Delta t_n - \frac{1}{2} \frac{d^2 x_n(t-1)}{dt^2} \Delta t_n^2, \quad (4)$$

式中  $t_i$  为更新时间间隔。

### 3) 绿灯启亮时刻的跟车行驶状态

在绿灯启亮时刻, 信号交叉口的第一辆等待车的车头间距瞬时增大, 由式(3)可知, 此时第一辆车此时的最优速度为最大速度, 即:

$$v_1(g_0) = v_{\max}。 \quad (5)$$

## 2 通行效率分析

选取交叉口排队消散速率和直行车道通行能力为指标, 分别对在交叉口处应用传统 OV 模型<sup>[17]</sup>、考虑反应延迟的 OV 模型<sup>[17]</sup>、考虑反应提前的改进 OV 模型的通行效率进行评价。

### 2.1 消散速率

利用传统模式下交通波的波速表达式来计算交叉口处交通波的消散速率:

$$u_w = \frac{u_1 k_1 - u_2 k_2}{k_1 - k_2}, \quad (6)$$

式中:  $u_w$  为交叉口处交通波的消散速度, 为矢量;  $u_1$  为绿灯启亮前的车队速度;  $k_1$  为绿灯启亮前的车队密度;  $u_2$  为绿灯启亮后的车队速度;  $k_2$  为绿灯启亮后的车队密度。

更直观的示意如图 2 所示。

在传统 OV 模型下,  $u_1 = 0, k_1 > k_2$ ;

在考虑驾驶员反应延迟的 OV 模型下,  $u_1 = 0, k_1 > k_2$ ;

在考虑驾驶员反应提前的改进 OV 模型下,  $u_1 > 0, k_1 > k_2$ 。

考虑到整个车队的波动传播是一个由头车到尾车的逐次传播过程, 整个车队的车辆状态传播速度可表示为车队中两辆相邻车辆间的运动状态传播速度的平均值, 即

$$u_1 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} u_i。 \quad (7)$$

### 2.2 直行车道通行能力

交叉口直行车道通行能力用以下公式来计算:

$$C_s = \frac{3600}{T_c} \left[ \left( \frac{t_g - t_0}{t_i} \right) + 1 \right] \varphi, \quad (8)$$

式中:  $T_c$  表示信号周期, s;  $t_g$  表示对应相位的绿灯时间, s;  $t_0$  表示绿灯亮后第一辆车启动通过停车线的时间, s;  $t_i$  表示车辆通过停车线的平均时间, s;  $\varphi$  表示折减系数, 可取 0.9。

传统 OV 模型下, 根据经验数据, 全部为小型车组成的车队,  $t_i$  取 2.5 s; 全部为大、中型车组成的车队,  $t_i$  取 3.5 s; 全部为拖挂车组成的车队,  $t_i$  取 7.5 s。

绿灯启亮后同时联动的车辆启动模式下, 每辆车的通过停车线的时间组成等差数列:

$$t_i = \frac{t_1 + t_n}{2}。 \quad (9)$$

考虑驾驶员反应提前的改进 OV 模型下, 由于车辆提前启动,  $t_i$  需实际计算:

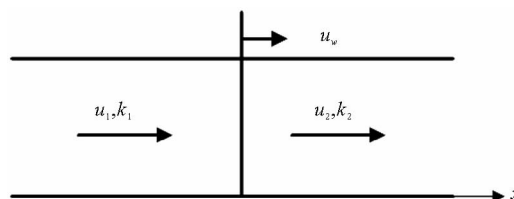


图 2 车队消散速率示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fleet dissipation rate

$$t_i = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} \quad (10)$$

3 仿真分析

对信号交叉口处单直行车道排队车辆跟车行为进行仿真分析,车辆队列中共包含 5 辆车,采用对比策略,在不同的参数条件下对比分析模型的性能优势。车辆分布及运动情况遵循如下假设:

- 1) 系统初始时刻,信号灯为红灯,此时停车线前停有 5 辆车,车辆间的车头间距为  $\Delta x_n$ ;当  $t = g_0$  时,信号灯由红灯转为绿灯;
- 2) 假设车辆性能一样,在仿真时将车辆视为质点。

3.1 消散效率分析

设置初始条件  $h_c = 4 \text{ m}$ ,  $v_{\max} = 20 \text{ km/h}$ ,  $\Delta x_n(0) = 7 \text{ m}$ ,  $t_f = 2 \text{ s}$ ,  $t_d = 2 \text{ s}$ ,  $k_1$  取绿灯启亮前的最小密度,  $u_2$  取绿灯启亮后的最大速度。在 3 种模型下,车辆的参数变化如图 3 所示。表 1 为所设条件下不同模型下车队参数的具体数值。

对比图 3 中 3 种模型的时间速度图像,考虑驾驶员反应提前的 OV 模型下,在绿灯启亮前,待行车队已经有一个较小的初速度,随着前车的启动,后车的速度会有一个小振荡。在绿灯启亮后,第 1 辆车呈现加速度不断减小的加速运动至最大速度。跟驰车队的行驶速度呈现先振荡后加速度不断减小的加速运动至最大速度。对比跟驰模型及考虑反应延迟的跟驰模型,考虑反应提前的 OV 模型的车队系统恢复稳定前车辆之间的速度差远小于考虑反应延迟的 OV 模型和 OV 模型,提高了交叉口处的通行效率。

表 1 不同模型下车队的参数值

Tab. 1 Vehicle fleet's parameters under different models

参数	模型		
	考虑驾驶员反应延迟的 OV 模型	OV 模型	考虑驾驶员反应提前 OV 模型
绿灯启亮前车队速度 $u_1/(\text{km/h})$	0	0	4.43
绿灯启亮后车队速度 $u_2/(\text{km/h})$	20	20	20
绿灯启亮前车队密度 $k_1/(\text{辆/km})$	83	83	119
绿灯启亮后车队密度 $k_2/(\text{辆/km})$	31	39	75
消散速率 $u_w/(\text{km/h})$	-11.92	-17.73	-22.11

由表 1 可知:V2V 背景下,驾驶员可提前获取交叉口完备的道路信息及临接车辆信息,提前启动车辆,因此 V2V 车队在绿灯启亮前有小的向前的初速度,绿灯启亮前车队的密度大于传统条件下的车队密度。绿灯启亮后,V2V 车队快速而紧凑的通过交叉口,交通流稳定后的车队密度仍大于传统条件下的车队密度。由式(6)进行计算可知,交叉口处 V2V 车队的消散速率  $u_w$  为 22.11 km/h,高于 OV 模型的 17.73 km/h 和考虑反应延迟 OV 模型的 11.92 km/h。

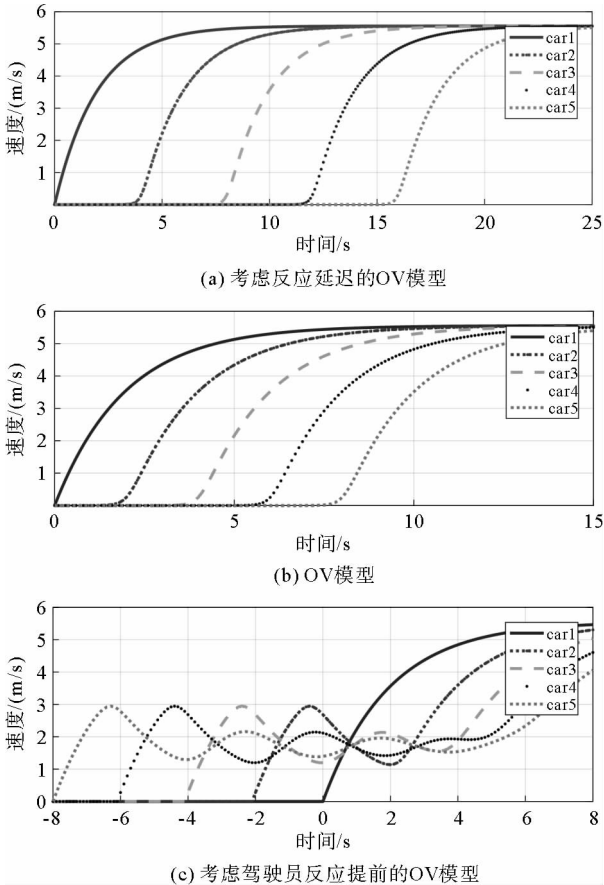


图 3 三种模型下车队速度变化图

Fig. 3 Vehicle speed change under three models

### 3.2 直行车道通行能力

分析交叉口直行车道的通行能力,设置初始条件  $h_c = 4 \text{ m}$ ,  $v_{\max} = 20 \text{ km/h}$ ,  $\Delta x_n(0) = 7 \text{ m}$ ,  $t_f = 2 \text{ s}$ ,  $t_d = 2 \text{ s}$ ;设置车辆位置为车辆到停车线之间的距离;取信号周期为  $180 \text{ s}$ ,其中绿灯相位时长为  $60 \text{ s}$ 。

3种模型下车辆的时间-位置图像如图4所示,每辆车通过停车线的时间如表2所示,直行车道的通行能力如表3所示。

对3种模型下车辆位置变化进行对比分析,传统模型下的车队车辆间的间距较大,V2V车队由于在绿灯启亮前形成“聚集”现象,拥有小的初速度,车辆间密度较大,较为紧凑。

结合表2和图5,对比分析3种模型下车辆通过停车线的时间。考虑驾驶员反应提前的OV模型时,绿灯启亮后  $7.1 \text{ s}$ ,最后1辆车通过停车线。对比OV模型,绿灯启亮后最后1辆车通过停车线的时间为  $15.1 \text{ s}$ ,效率提升了  $52.98\%$ 。对比考虑反应延迟的OV模型,绿灯启亮后最后1辆车通过停车线的时间为  $22.6 \text{ s}$ ,效率提升了  $68.58\%$ 。

将不同模型下车辆通过停车线的平均时间代入公式(8)中,求得不同模型下直行车道的通行能力如表3所示。

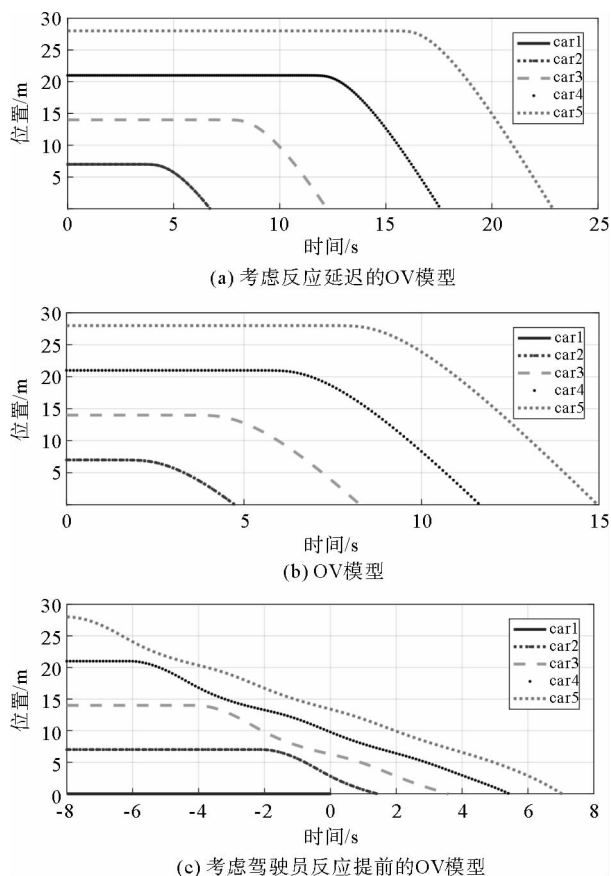


图4 不同模型下车辆位置变化图

Fig. 4 Vehicle position change under different models

表2 不同模型下车辆通过停车线的时间表

Tab. 2 Timetable for vehicles passing through the parking line under different models

模型	车辆	车辆通过停车线的时间/s	车辆通过停车线的平均时间/s
考虑驾驶员反应延迟的OV模型	第一辆车	0	11.92
	第二辆车	6.9	
	第三辆车	12.4	
	第四辆车	17.7	
	第五辆车	22.6	
OV模型	第一辆车	0	8.04
	第二辆车	4.9	
	第三辆车	8.4	
	第四辆车	11.8	
	第五辆车	15.1	
考虑驾驶员反应提前的OV模型	第一辆车	0	3.54
	第二辆车	1.5	
	第三辆车	3.6	
	第四辆车	5.5	
	第五辆车	7.1	

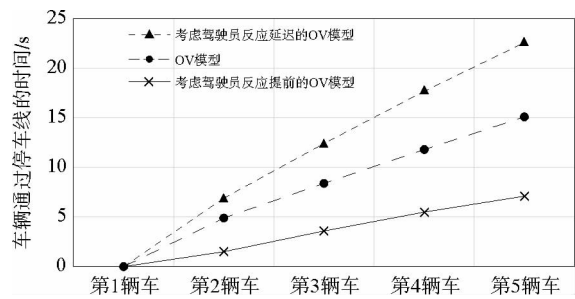


图 5 不同模型下车辆通过停车线的平均时间对比图

Fig. 5 Comparison of the average time of vehicles passing through the parking line under different models

表 3 不同模型下直行车道的通行能力

Tab. 3 Capacity of straight lane under different models

模型	直行车道的通行能力/(pcu/h)
考虑驾驶员反应延迟的 OV 模型	108
OV 模型	152
考虑驾驶员反应提前的 OV 模型	323

相较于 OV 模型下直行车道的通行能力 152 pcu/h,承载 V2V 车队下直行车道的通行能力为 323 pcu/h,通行能力提高了 112. 5%;但相较于考虑驾驶员反应延迟的 OV 模型下直行车道的通行能力为 108 pcu/h,承载 V2V 车队的直行车道通行能力提升了 298. 15%。

4 结论

本研究在考虑驾驶员反应提前时间的改进交通流跟驰模型的基础上,研究了改进交通流跟驰模型在交叉口处的通行效率。通行效率指标选取交叉口处车队消散效率和交叉口处直行车道的通行能力。同时对传统模型中考虑驾驶员反应延迟的 OV 模型和 OV 模型的相关指标进行仿真,对比分析 V2V 条件下考虑驾驶员反应提前的跟驰模型对交叉口通行效率的影响。与考虑反应延迟的 OV 模型和 OV 模型相比,本研究提出的模型提高了交叉口的通行效率,对于解决交通拥堵、提高路口通行效率等问题具有参考价值。

但仿真验证时设置的条件均为理想条件,与实际情况有较大出入,在后续的研究工作中,将在实际交通环境中检验模型的有效性。

参考文献:

[1]JIN Y F,XU M.Stability analysis in a car-following model with reaction-time delay and delayed feedback control[J].Physica A;Statistical Mechanics and Its Applications,2016,459:107-116.

[2]LI S K,YANG L X,GAO Z Y,et al.Stabilization strategies of a general nonlinear car-following model with varying reaction-time delay of the drivers[J].ISA Transactions,2014,53(6):1739-1745.

[3]ZHOU J,SHI Z K,CAO J L.Nonlinear analysis of the optimal velocity difference model with reaction-time delay[J].Physica A;Statistical Mechanics and Its Applications,2014,396:77-87.

[4]YU L,LI T,SHI Z K.Density waves in a traffic flow model with reaction-time delay[J].Physica A,2010,389(13):2607-2616.

[5]NAGATANI T,NAKANISHI K.Delay effect on phase transitions in traffic dynamics[J].Physical Review E,1998,57(6): 6415-6421.

[6]周杰.交通流跟驰模型及其应用研究[D].西安:西北工业大学,2016.

ZHOU Jie.On car-following models of traffic flow and their applications[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University, 2016.

[7]曾华倩.V2V 条件下的车辆队列跟驰行为建模与仿真实现[D].西安:长安大学,2018.

ZENG Huaqian.Modeling and simulation of vehicle platoon following behavior under the condition of V2V[D]. Xi'an: Chang'an University,2018.

[8]JULIO S,JAVIER B,MANUEL F,et al.Sensing traffic density combining V2V and V2I wireless communications[J].Sensors,2015,15(12):31794-31810.

[9]KUANG H,XU Z P,LI X L,et al.An extended car-following model accounting for the average headway effect in intelligent transportation system[J].Physica A;Statistical Mechanics and Its Applications,2017,471:778-787.

- [10] ZHU W X, ZHANG L D. A new car-following model for autonomous vehicles flow with mean expected velocity field[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 492: 2154-2165.
- [11] 秦严严, 宋永朝, 何兆益. 混有自适应巡航控制汽车的交通流通行能力分析[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(5): 115-121.
- QIN Yanyan, SONG Yongchao, HE Zhaoyi. Capacity analysis of traffic flow mixed with adaptive cruise control vehicles[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2020, 39(5): 15-121.
- [12] KUANG H, WANG M T, LU F H, et al. An extended car-following model considering multi-anticipative average velocity effect under V2V environment[J/OL]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2019, 527: 121268. DOI: 10.1016/j.physa.2019.121268.
- [13] 华雪东, 王炜, 王昊. 考虑车与车互联通讯技术的交通流跟驰模型[J]. *物理学报*, 2016, 65(1): 44-55.
- HUA Xuedong, WANG Wei, WANG Hao. A car-following model with the consideration of vehicle-to-vehicle communication technology[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(1): 44-45.
- [14] PENG G H, YANG S H, XIA D X, et al. Delayed-feedback control in a car-following model with the combination of V2V communication[J/OL]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2019, 526: 120912. DOI: 10.1016/j.physa.2019.04.148.
- [15] SUN Y Q, GE H X, CHENG R J. An extended car-following model under V2V communication environment and its delayed-feedback control[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 508: 349-358.
- [16] WANG T, ZHAO J, LI P. An extended car-following model at un-signalized intersections under V2V communication environment[J/OL]. *PLoS One*, 2018, 13(2): e0192787. DOI: 10.1371/journal.pone.0192787.
- [17] BANDO M, HASEBE K, NAKAYAMA A, et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation[J]. *Physical Review E*, 1995, 51(2): 1035-1042.
- [18] HELBIG D, TILCH B. Generalized force model of traffic dynamics[J]. *Physical Review E*, 1998, 58(1): 133-138.
- [19] JIANG R, WU Q, ZHU Z. Full velocity difference model for a car-following theory[J]. *Physical Review E*, 2001, 64(1): 017101.
- [20] PENG G H, CAI X H, LIU C Q, et al. Optimal velocity difference model for a car-following theory[J]. *Physics Letters A*, 2011, 375(45): 3973-3977.

(责任编辑: 刘西奎)