

8-25-2023

An Intelligent Driver Model Simulation Considering Both Backward Looking Effect and Velocity Difference

Yin Xu

School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; National Engineering Laboratory of Application Technology of Integrated Transportation Big Data, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China, xuyin@my.swjtu.edu.cn

Yun Pu

School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; National Engineering Laboratory of Application Technology of Integrated Transportation Big Data, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Haixu Liu

School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; National Engineering Laboratory of Application Technology of Integrated Transportation Big Data, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China, hxliu@swjtu.edu.cn

Yifan Tan

School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; National Engineering Laboratory of Application Technology of Integrated Transportation Big Data, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; Department of Civil and Environment Engineering, University of Wisconsin-Madison, Madison 53706, USA

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

An Intelligent Driver Model Simulation Considering Both Backward Looking Effect and Velocity Difference

Abstract

Abstract: Aiming at the phenomenon that driver adjusts vehicle movement by observing the following vehicles through rearview mirror in the actual car-following driving, *an improved intelligent driver model accounting for both backward looking effect and velocity difference is proposed, and the critical stability condition of the new model is obtained by employing the linear stability analysis. Based on the numerical simulation experiments, the car following characteristics analysis during the acceleration process of the vehicle and the traffic safety evaluation are carried out.* A small disturbance simulation under the periodic boundary condition is used to verify the conclusion consistency of stability theoretical analysis and numerical simulation. Results show that the vehicle acceleration changes more smoothly, and the time for the vehicle to reach the maximum speed and enter a constant speed state is shorter; the simultaneous consideration of the backward looking effect and velocity difference also plays an important role in strengthening the traffic flow stability and traffic safety.

Keywords

intelligent driver model, backward looking effect, traffic flow stability, traffic safety, numerical simulation

Recommended Citation

Xu Yin, Pu Yun, Liu Haixu, et al. An Intelligent Driver Model Simulation Considering Both Backward Looking Effect and Velocity Difference[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(7): 1562-1571.

考虑后视镜效应和速度差的智能驾驶模型仿真

徐银^{1,2}, 蒲云^{1,2}, 刘海旭^{1,2*}, 谭一帆^{1,2,3}

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 611756; 2. 西南交通大学 综合交通大数据应用技术国家工程实验室, 四川 成都 611756;
3. 威斯康星大学 麦迪逊分校 土木与环境工程系, 威斯康星州 麦迪逊 53706)

摘要: 针对实际跟驰驾驶中驾驶员通过后视镜观察后方车辆来调整本车运动的现象, 提出了一种同时考虑后视镜效应和速度差的智能驾驶模型, 应用线性稳定性分析获得了模型的临界稳定性条件。设计仿真实验, 分析了车辆加速过程中的跟驰特性, 对模型进行了交通安全性评价。采用周期性边界条件下的小扰动仿真实验, 验证了模型稳定性理论分析与数值模拟结论的一致性。研究表明: 在改进模型中车辆加速度变化更平缓, 车辆达到最大速度进入匀速状态的时间更短; 考虑后视镜效应和速度差有助于提高交通流稳定性和交通安全性。

关键词: 智能驾驶模型; 后视镜效应; 交通流稳定性; 交通安全性; 数值仿真

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)07-1562-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0341

引用格式: 徐银, 蒲云, 刘海旭, 等. 考虑后视镜效应和速度差的智能驾驶模型仿真[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(7): 1562-1571.

Reference format: Xu Yin, Pu Yun, Liu Haixu, et al. An Intelligent Driver Model Simulation Considering Both Backward Looking Effect and Velocity Difference[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(7): 1562-1571.

An Intelligent Driver Model Simulation Considering Both Backward Looking Effect and Velocity Difference

Xu Yin^{1,2}, Pu Yun^{1,2}, Liu Haixu^{1,2*}, Tan Yifan^{1,2,3}

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;
2. National Engineering Laboratory of Application Technology of Integrated Transportation Big Data, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 3. Department of Civil and Environment Engineering, University of Wisconsin-Madison, Madison 53706, USA)

Abstract: Aiming at the phenomenon that driver adjusts vehicle movement by observing the following vehicles through rearview mirror in the actual car-following driving, an improved intelligent driver model accounting for both backward looking effect and velocity difference is proposed, and the critical stability condition of the new model is obtained by employing the linear stability analysis. Based on the numerical simulation experiments, the car following characteristics analysis during the acceleration process of the vehicle and the traffic safety evaluation are carried out. A small disturbance simulation under the periodic boundary condition is used to verify the conclusion consistency of stability theoretical analysis and numerical simulation. Results show that the vehicle acceleration changes more smoothly, and the time for the vehicle to reach the maximum speed and enter a constant speed state is shorter; the simultaneous consideration of the backward looking effect and velocity difference also plays an important role in strengthening the traffic flow stability and traffic safety.

Keywords: intelligent driver model; backward looking effect; traffic flow stability; traffic safety; numerical simulation

收稿日期: 2022-04-12 修回日期: 2022-05-06

基金项目: 湖北省交通运输厅科技项目(2022-11-1-5); 国家自然科学基金(52002339); 四川省科技计划(2021YJ0535)

第一作者: 徐银(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为交通建模与仿真。E-mail: xuyin@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 刘海旭(1974-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为交通建模与仿真。E-mail: hxliu@swjtu.edu.cn

0 引言

跟驰模型是微观交通流仿真的重要研究主题之一,在交通流的理论分析和工程应用中都得到了广泛的关注和认可,对现代交通流的模拟、评价以及管理控制有着重要理论价值和实际意义^[1-2]。自从1953年文献[3]提出跟驰模型以来,国内外学者在车辆跟驰行为建模领域做了大量的工作,并取得了丰富的成果。最具代表性的模型包括Gipps安全距离模型^[4]、NaSch模型^[5]、最优速度模型^[6]、智能驾驶模型^[7]和全速度差模型^[8]等。

其中,文献[7]提出的智能驾驶模型(intelligent driver model, IDM)以较少的参数和统一的形式描述了车辆从自由流到拥堵流的跟驰行为。文献[9]通过增加车辆期望距离安全修正项来提高驾驶员在高速行驶时的安全性。文献[10]解决了IDM在满足期望距离非负问题上存在的缺陷。进而文献[11]结合Derbel等和Milanés等的修正,将改进的智能驾驶模型CAV(connected and autonomous vehicle)的跟驰模型,并研究了不同CAV渗透率和速度限制条件对高速公路通行能力的影响。

上述研究关注于对IDM在实际跟驰行为模拟中存在的不足进行模型的修正,避免了模型在特殊环境中出现的不合理交通现象。此外,IDM凭借其在交通动力学仿真方面的强大优势,在交通流领域得到了广泛的应用。如考虑驾驶任务动态交互的任务难度的智能驾驶模型^[12],具有随机性的智能驾驶模型^[13],考虑驾驶人感知不确定性产生后车速度波动的IDM-GARCH(IDM-generalized autoregressive conditional heteroskedasticity)模型^[14],涉及横向和纵向两个维度影响的增强型智能驾驶模型^[15],消除高速公路瓶颈运动波的拥堵吸收智能驾驶模型^[16],以及根据主要交通状况实时改变参数的自适应IDM^[17]等。

模型在交通动力学的仿真应用方面,综合考虑了各种人的因素(如反应延迟时间、估计误差等)、环境因素对跟驰行为的影响,以及从模型对

交通波的重现和解释等方面进行改进。改进之后的模型能更有效地描述许多复杂环境下的跟驰行为,提高了模型的拟合精度。但相关研究仅仅考虑了前车运动状态对跟驰车的影响,而忽略了后方车辆对跟驰车的影响。

实际上前车和后车的信息都会影响跟驰车的驾驶行为^[18]。特别是在前后两车距离较小的情况下,驾驶员综合前车和后车的信息进行驾驶决策,不仅可使得前后车距离尽量保持一致,有效稳定车流^[19-21],而且能提高车辆行驶的安全性^[22]。从考虑车辆跟驰行驶时相对于前后车的期望距离角度,文献[23]构建基于回望距离的智能驾驶模型(intelligent back-looking distance driver model, IBDM),以提高交通流稳定性,但该模型在典型场景如车辆起步加速过程中的跟驰特性,以及扰动对车流时空演化的影响,交通安全性等方面的规律尚待揭示。

结合文献[24],考虑后视效应的车辆跟驰模型建模框架,本文提出了一种同时考虑后视效应和速度差的智能驾驶模型(intelligent driver model considering backward looking effect and velocity difference, BLV-IDM),应用线性稳定性分析理论推导了本文模型的线性稳定性判据。通过数值仿真实验,研究了车辆在加速过程中的跟驰特性,对本文模型进行了交通安全性评价,最后采用对稳态交通流施加扰动的方式,仿真验证了稳定性理论分析的正确性。

1 考虑后视效应和速度差的IDM跟驰行为建模

考虑后视效应的车辆跟驰行为建模,其核心思想是驾驶员进行车辆跟驰的总决策由考虑不同权重的前向控制决策和后向控制决策共同决定。文献[24]建立的考虑后视效应的模型框架为

$$u = \zeta \cdot u_F + \xi \cdot u_B \quad (1)$$

即

$$u = \zeta \cdot f_F(x_F) + \xi \cdot f_B(x_B) \quad (2)$$

式中: u 为决策变量; x 为感知变量,跟驰模型用

$u=f(x)$ 表示；下标F和B分别为前向控制项和后向控制项； ζ 和 ξ 分别为前向控制和后向控制在总决策中所占的权重，且 ζ 和 ξ 满足 $0 \leq \xi < \zeta \leq 1$ ， $\xi + \zeta = 1$ 。

文献[7]提出了由二阶微分方程描述车辆运动的智能驾驶模型，模型中车辆的运动取决于车辆自身速度、相邻两车之间的净距离间隙和与前车之间的速度差。IDM运动方程为

$$a_n(t) = a \left[1 - \left(\frac{v_n(t)}{v_f} \right)^4 - \left(\frac{s \cdot (v_n(t), \Delta v_{n,n+1}(t))}{s_n(t)} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$s \cdot (v_n(t), \Delta v_{n,n+1}(t)) = s_0 + v_n(t)T + \frac{v_n(t)\Delta v_{n,n+1}(t)}{2\sqrt{ab}} \quad (4)$$

$$s_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t) - l, \Delta v_{n,n+1}(t) = v_n(t) - v_{n+1}(t) \quad (5)$$

式中： a 为车辆最大加速度； b 为期望减速度； v_f 为车辆自由流速度； l 为车辆长度； T 为期望车头时距常数； s_0 为相邻两车之间的最小安全空间距离。

由IDM模型分析可知，车辆 n 在 t 时刻的加速度是由相邻两车之间的净距离值 $s_n(t)$ ，车辆 n 在 t 时刻的速度 $v_n(t)$ ，车辆 $n+1$ 在 t 时刻的速度 $v_{n+1}(t)$ 的非线性函数决定的，为了简化，本文将IDM模型记为

$$a_n(t) = f[s_n(t), v_n(t), v_{n+1}(t)] \quad (6)$$

因此，结合考虑后视效应的建模思想和速度差影响，改进IDM模型为

$$a_n(t) = pf[s_n(t), v_{Fn}(t), v_{n+1}(t)] + (1-p)f[s_{n-1}(t), v_{n-1}(t), v_{Bn}(t)] + k\Delta v_n \quad (7)$$

式中： p 为前向控制权重系数； $v_{Fn}(t)$ 和 $v_{Bn}(t)$ 分别为前向控制项和后向控制项中车辆 n 在 t 时刻的速度； k 为速度差敏感系数； Δv_n 为前车与后车的速度差。

2 线性稳定性分析

假设初始时交通流是稳态的，即道路上所有车辆都以相同的车头间距 h 和稳态速度 v_c 行驶，则

$$x_n^0(t) = h(n-1) + v_c t, n = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

式中： N 为车辆总数。

在稳态交通流基础上引入小扰动 $y_n(t) = e^{ikn+zt}$ ($y_n(t) \rightarrow 0$)，则

$$x_n(t) = x_n^0(t) + y_n(t) \quad (9)$$

$$\frac{d^2 x_n(t)}{dt^2} = \frac{d^2 x_n^0(t)}{dt^2} + \frac{d^2 y_n(t)}{dt^2} \quad (10)$$

$$\frac{d^2 y_n(t)}{dt^2} = pf[s_n(t), v_{Fn}(t), v_{n+1}(t)] + (1-p)f[s_{n-1}(t), v_{n-1}(t), v_{Bn}(t)] + k\Delta v_n \quad (11)$$

将式(11)线性化处理可得

$$\frac{d^2 y_n(t)}{dt^2} = p \left[f_{s_n} \cdot \Delta y_n(t) + f_{v_{Fn}} \cdot \frac{dy_n(t)}{dt} + f_{v_{n+1}} \cdot \frac{dy_{n+1}(t)}{dt} \right] + (1-p) \left[f_{s_{n-1}} \cdot \Delta y_{n-1}(t) + f_{v_{n-1}} \cdot \frac{dy_{n-1}(t)}{dt} + f_{v_{Bn}} \cdot \frac{dy_n(t)}{dt} \right] + k \left[\frac{dy_{n+1}(t)}{dt} - \frac{dy_n(t)}{dt} \right] \quad (12)$$

$$\Delta y_n(t) = y_{n+1}(t) - y_n(t) \quad (13)$$

$$\Delta y_{n-1}(t) = y_n(t) - y_{n-1}(t) \quad (14)$$

$$f_{s_n} = \frac{\partial f}{\partial s_n}(v_c, h), f_{v_{Fn}} = \frac{\partial f}{\partial v_{Fn}}(v_c, h) \quad (15)$$

$$f_{s_{n-1}} = \frac{\partial f}{\partial s_{n-1}}(v_c, h), f_{v_{n+1}} = \frac{\partial f}{\partial v_{n+1}}(v_c, h) \quad (16)$$

$$f_{v_{n-1}} = \frac{\partial f}{\partial v_{n-1}}(v_c, h), f_{v_{Bn}} = \frac{\partial f}{\partial v_{Bn}}(v_c, h) \quad (17)$$

将式(12)写成差分方程的形式为

$$\frac{dy_n(t+2\tau)}{dt} - \frac{dy_n(t+\tau)}{dt} = p \left\{ \tau [f_{s_n} \cdot \Delta y_n(t)] + f_{v_{Fn}} [y_n(t+\tau) - y_n(t)] + f_{v_{n+1}} [y_{n+1}(t+\tau) - y_{n+1}(t)] \right\} + (1-p) \left\{ \tau [f_{s_{n-1}} \cdot \Delta y_{n-1}(t)] + f_{v_{n-1}} [y_{n-1}(t+\tau) - y_{n-1}(t)] + f_{v_{Bn}} [y_n(t+\tau) - y_n(t)] \right\} + k [y_{n+1}(t+\tau) - y_{n+1}(t)] - k [y_n(t+\tau) - y_n(t)] \quad (18)$$

将式(18)中的 y_n 按傅里叶级数展开可得

$$z(e^{2z\tau} - e^{z\tau}) = p \left\{ \tau f_{s_n} (e^{i\alpha} - 1) + f_{v_{Fn}} (e^{z\tau} - 1) + f_{v_{n+1}} e^{i\alpha} (e^{z\tau} - 1) + (1-p) \left[\tau f_{s_{n-1}} (1 - e^{-i\alpha}) + f_{v_{n-1}} e^{-i\alpha} (e^{z\tau} - 1) + f_{v_{Bn}} (e^{z\tau} - 1) \right] + k [e^{i\alpha} (e^{z\tau} - 1) - e^{i\alpha} + 1] \right\} \quad (19)$$

将 $e^{i\alpha}$ 和 $e^{z\tau}$ 按照泰勒公式展开，即 $e^{i\alpha} = 1 + i\alpha +$

$\frac{(ia)^2}{2} + \dots, e^{\tau z} = 1 + z\tau + \frac{(z\tau)^2}{2} + \dots$ 以及参数 z 展开, $z = z_1(ia) + z_2(ia)^2 + \dots$, 代入式(19)得到 z 的一阶系数 z_1 和二阶系数 z_2 分别为

$$z_1 = -\frac{pf_{s_n} + (1-p)f_{s_{n-1}}}{pf_{v_{Fn}} + pf_{v_{n+1}} + (1-p)f_{v_{n-1}} + (1-p)f_{v_{Bn}}} \quad (20)$$

$$z_2 = \frac{z_1^2 - z_1 pf_{v_{n+1}} - \frac{1}{2} pf_{s_n} + (1-p)z_1 f_{v_{n-1}} + \frac{1}{2} (1-p)f_{s_{n-1}} - kz_1}{pf_{v_{Fn}} + pf_{v_{n+1}} + (1-p)f_{v_{n-1}} + (1-p)f_{v_{Bn}}} - \frac{1}{2} z_1^2 \tau \quad (21)$$

当 $z_2 > 0$ 时, 为交通流在小扰动下的稳定状态, 因此使得交通流稳定的条件是

$$\frac{\tau}{2} < \frac{z_1^2 - z_1 pf_{v_{n+1}} - \frac{1}{2} pf_{s_n} + (1-p)z_1 f_{v_{n-1}} + \frac{1}{2} (1-p)f_{s_{n-1}} - kz_1}{z_1^2 [pf_{v_{Fn}} + pf_{v_{n+1}} + (1-p)f_{v_{n-1}} + (1-p)f_{v_{Bn}}]} \quad (22)$$

当 $p=1, k=0$ 时, 可得到 IDM 模型的稳定性条件为

$$\frac{\tau}{2} < \frac{1}{f_{v_n} + f_{v_{n+1}}} + \frac{f_{v_{n+1}} - f_{v_n}}{2f_{s_n}} \quad (23)$$

$$f_{s_n} = \frac{2ap(s^*)^2}{s^3} \quad (24)$$

$$f_{s_{n-1}} = \frac{2a(1-p)(s^*)^2}{s^3} \quad (25)$$

$$f_{v_{Fn}} = -\frac{4ap(v_c)^3}{(v_f)^4} - \frac{2aps^*(T+v_c/2\sqrt{ab})}{s^2} \quad (26)$$

$$f_{v_{n+1}} = \frac{\sqrt{a}ps^*v_c}{s^2\sqrt{b}} \quad (27)$$

$$f_{v_{Bn}} = \frac{\sqrt{a}(1-p)s^*v_c}{s^2\sqrt{b}} \quad (28)$$

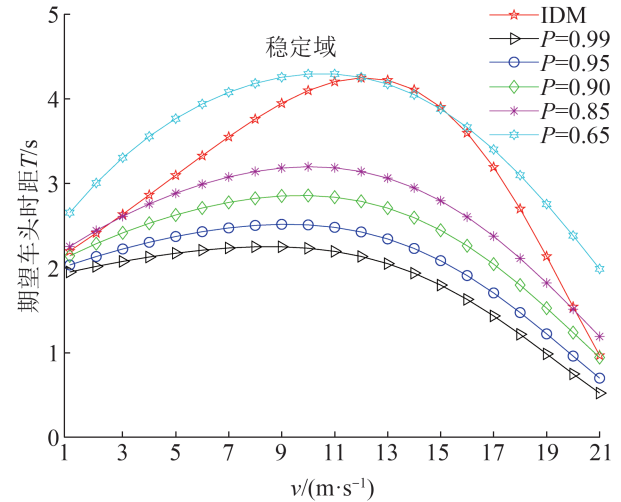
$$f_{v_{n-1}} = -\frac{4a(1-p)(v_c)^3}{(v_f)^4} - \frac{2a(1-p)s^*(T+v_c/2\sqrt{ab})}{s^2} \quad (29)$$

由式(22)令模型稳定性条件 F 为

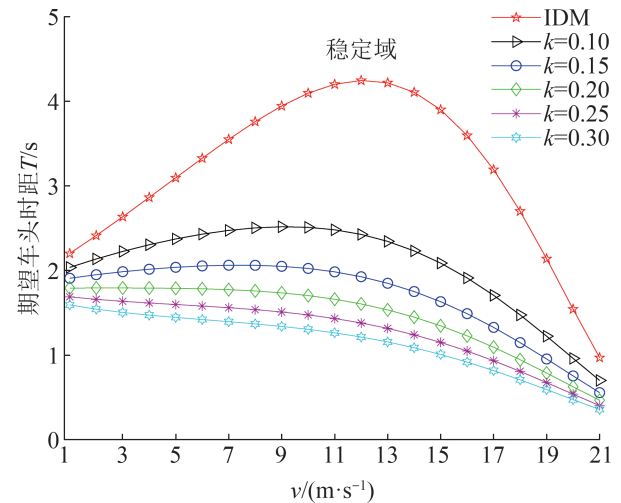
$$F = \frac{z_1^2 - z_1 pf_{v_{n+1}} - \frac{1}{2} pf_{s_n} + (1-p)z_1 f_{v_{n-1}} + \frac{1}{2} (1-p)f_{s_{n-1}} - kz_1}{z_1^2 [pf_{v_{Fn}} + pf_{v_{n+1}} + (1-p)f_{v_{n-1}} + (1-p)f_{v_{Bn}}]} - \frac{\tau}{2} > 0 \quad (30)$$

将式(24)~(29)代入式(30), 得到模型临界稳定

性曲线如图1所示。模型稳定性计算的参数具体取值分别为 $a=1 \text{ m/s}, b=2 \text{ m/s}, v_f=30 \text{ m/s}, l=6 \text{ m}, \tau=1, s_0=2 \text{ m}$ 。



(a) 参数 p 稳定性分析, $k=0.1$



(b) 参数 k 稳定性分析, $p=0.95$

图1 不同 p 值和 k 值的临界稳定性曲线

Fig. 1 Critical stability curves for different values of P and k

从图1中可以看到相图被分为2个区域: 稳定域和不稳定域分别位于临界稳定性曲线的上方和下方。交通流的稳定性与参数 p 密切相关: 随着参数 p 的减小, 临界稳定性曲线逐渐上升, 交通流稳定区域逐渐减小; 仅当后向控制权重比在适当范围内时, 参数 p 对稳定交通流具有积极影响, 可以提高交通流稳定性。而当参数 p 较小时, 即过多考虑后

车影响会使得交通流稳定性降低，并不利于车辆控制。而驾驶员对车辆速度差敏感性越高，交通流稳定性越强。换言之，考虑后视效应和速度差的改进 IDM 模型具有实际意义。

3 数值仿真实验

3.1 车辆加速场景仿真

为了验证改进模型在描述车辆跟驰行为中的表现，构建车辆起步加速场景仿真。仿真中考虑 10 辆车组成的车队，从头车到尾车依次编号 1, 2, …,

10。10 辆车在单车道道路上以 1 m/s^2 的初始加速度和 18 m/s 的初始速度运行，车头间距 20 m 。头车从 $t=0$ 时刻开始加速到最大速度 30 m/s ，之后保持匀速行驶，后车按跟驰模型作出响应^[25]。仿真参数取值与稳定性分析中取值一致。

由图 2 加速过程中的车辆加速度、速度和车位置变化趋势可见：对于 IDM 而言，在头车(第一辆车)自由加速过程中，头车加速度直接由 0.87 m/s^2 逐渐减小，而在考虑后视效应的 IDM (back looking-IDM, BL-IDM) 中的头车加速度先由 0.53 m/s^2 增大到 0.80 m/s^2 ，再缓慢减小。

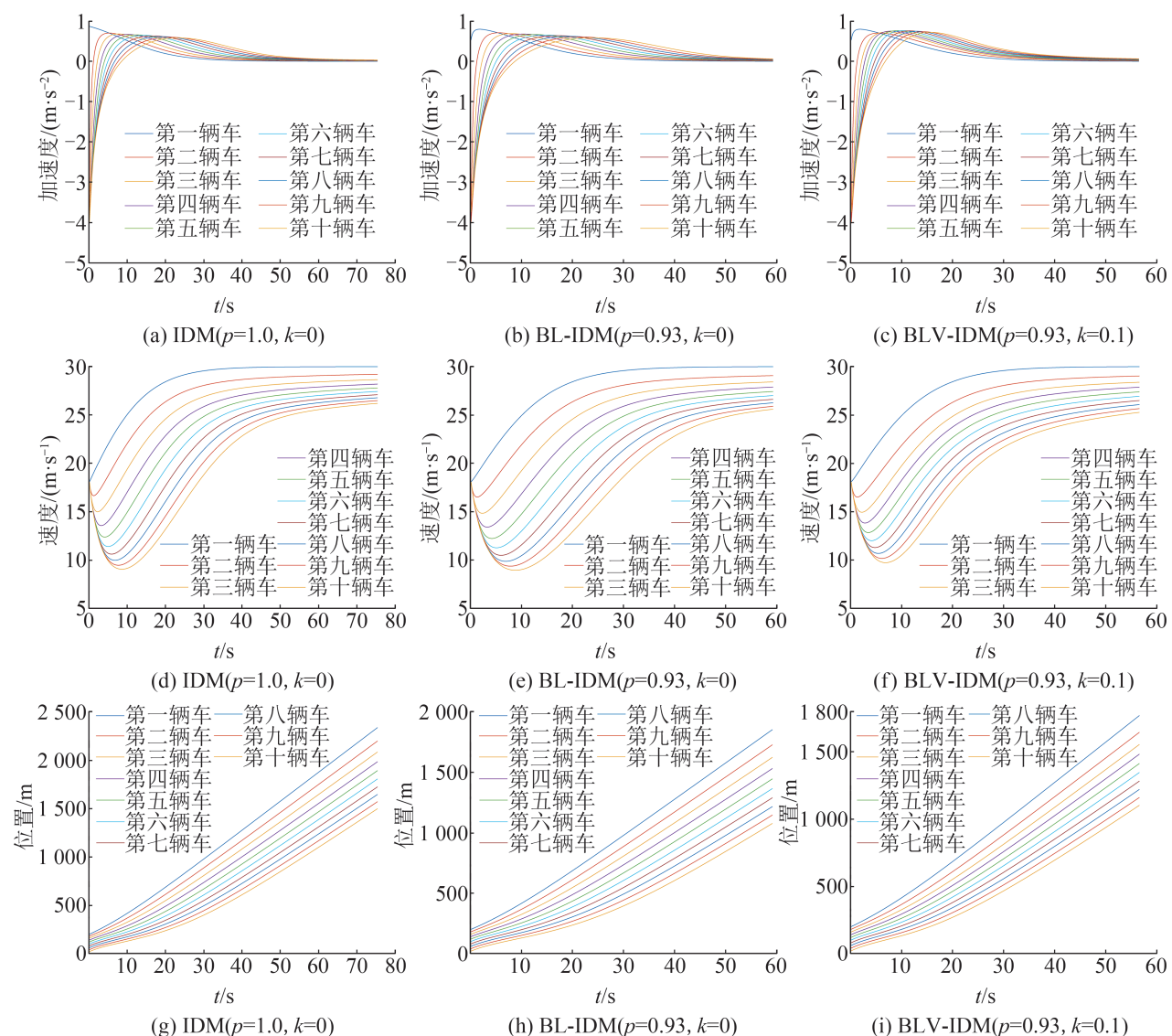


图 2 加速场景仿真中车辆加速度、速度和位置变化
Fig. 2 Acceleration change, velocity change and position change of vehicle acceleration scenario simulation

相比于IDM, BL-IDM控制下的车辆在整个加速过程中的加速度变化趋势相对稳定, 变化幅度更小, 这对于增强交通流的稳定性具有积极作用。而且加速度变化相对舒缓, 也有助于提高乘客舒适性。同时在仿真精度相同的情况下, BL-IDM中头车加速到最大速度的时间为59.3 s, 显著小于IDM中的75.4 s, 加速时间减少21.35%; 头车达到最大速度时的位置由IDM中的2 338.72 m减少到BL-IDM中的1 854.03 m, 距离缩短20.72%。通过进一步考虑速度差影响, 车辆在达到最大速度的时间比BL-IDM缩短2.7 s, 位置距离减少80.73 m。由此可见, 考虑后视效应和速度差的改进模型更有利于车辆在短时间内完成加速过程, 并进入车流匀速稳定运行的状态。

同时, 由于头车后方车辆之间的距离较近, 在模型控制下的后方车辆都先减速一段时间再加速。但IDM中减速度迅速减小并很快进入加速状态, 而BL-IDM和BLV-IDM中车辆减速度迅速减小后加速过程比较平缓, 车辆速度增加更平稳。

由上述分析可知, 同时考虑后视效应和速度差使得车辆在跟驰加速过程中车辆的加速度变化波动更小, 缩短了车辆加速达到最大速度的时间, 使得车辆更快地进入匀速稳定运行状态。这不仅增加了乘客舒适感, 也更有利于车辆的控制, 提高车流稳定性。

3.2 交通安全性评价

从交通安全性的角度出发, 本文选取基于碰撞时间(time-to-collision, TTC)的两个指标作为仿真实验评价BLV-IDM控制下车辆尾部碰撞安全风险的指标。两个指标分别为碰撞时间暴露时间(time exposed time-to-collision, TET)和碰撞时间整合时间(time integrated time-To-collision, TIT), 计算方式如下^[26]:

$$TTC_n(t) = \frac{x_{n+1}(t) - x_n(t) - L}{v_n(t) - v_{n+1}(t)}, v_n(t) > v_{n+1}(t) \quad (31)$$

$$TET = \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^T \delta_n(t) t_0, \quad \delta_n(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq TTC_n(t) \leq d_0 \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (32)$$

$$TIT = \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^T [d_0 - TTC_n(t)] t_0, \quad 0 \leq TTC_n(t) \leq d_0 \quad (33)$$

式中: $TTC_n(t)$ 为车辆 n 在 t 时刻与前车的TTC计算结果; L 为道路长度; d_0 为TTC的阈值; $t_0=0.1$ s为仿真时间步。TET和TIT分别描述了在仿真时间内存在交通冲突风险的次数和交通冲突风险的严重程度, 两个指标的计算结果越小表示安全水平越高。

仿真设计: 在1 800 m的单车道上, 10辆车以100 m的间距均匀分布, 第一辆车从初速度0加速到30 m/s, 后方车辆在BLV-IDM控制下依次加速, 直至头车最终停在道路尽头1 800 m处。头车减速, 后方车辆跟着减速至停止。统计上述仿真过程中表征交通安全性的TET和TIT两个指标, 其中, d_0 分别取2.0, 2.5, 3.0和3.5 s; $P=0.95$, 其余参数与3.1节中一致。

交通流安全性评价计算结果如表1, 2所示。随着驾驶员速度差敏感性参数 k 的增大, 描述在仿真持续时间内存在交通冲突风险次数的TET值和交通冲突风险的严重程度的TIT值逐渐减小。即考虑车辆速度差影响可提高交通安全性, 且驾驶员对车辆速度差越敏感, 交通安全性越高。当 d_0 取2.0 s时两个指标有最小减幅, 即从 $k=0.10$ 到 $k=0.30$, TET的值减小74.56%, TIT的值减小47.13%。

表1 不同 k 值对TET指标
Table 1 Impacts of different values p on TET index

k	不同TET计算值			
	2.0	2.5	3.0	3.5
0.10	11.4	30.9	42.5	51.5
0.15	5.0	17.2	33.1	43.0
0.20	4.8	8.1	18.4	33.9
0.25	3.0	8.0	11.4	13.4
0.30	2.9	6.8	10.4	12.7

表 2 不同 k 值对 TIT 指标
Table 2 Impacts of different values p on TIT index

k	不同 TIT 计算值			
	2.0	2.5	3.0	3.5
0.10	1.57	13.01	31.50	55.07
0.15	1.29	5.66	18.86	37.99
0.20	1.10	4.37	9.87	23.45
0.25	0.91	3.91	8.53	14.32
0.30	0.83	3.13	7.58	13.41

3.3 小扰动仿真验证

为了验证模型稳定性理论分析的准确性，对 BLV-IDM 改进模型进行了扰动影响仿真实验。本研究采用周期性边界条件，初始条件为 $L=1\ 000\text{ m}$ ， $N=100$ ，仿真时间步长为 0.1 s ，其余参数与 3.1 节中一致。所有车辆均匀分布且车距相同。对前车施加初始小扰动条件为^[20]

$$\begin{cases} \Delta x_j(0)=\Delta x_0=10.0, \Delta x_j(1)=\Delta x_0=10.0, j \neq 100 \\ \Delta x_j(1)=10.0-0.1, j=100 \end{cases} \quad (34)$$

图 3 描绘了参数 p 和 k 不同取值情况下时间步从 $t=2\ 700$ 到 $t=3\ 000$ 的速度时空演化关系。由图 3(a)可知，施加扰动后，IDM 控制下的车辆速度波动较大，车辆出现了明显的加速减速，即整个车队呈现出“时走时停”状态，并且由扰动产生的车辆速度波动开始在车队内传播。参数 P 和参数 k 的值分别体现了考虑后视效应和速度差对交通流的影响：从 $k=0$ 到 $k=0.10$ ，车辆速度波峰波谷差值由 0.34 m/s 减小到 0.07 m/s ；而随着参数 p 的减小，车辆速度逐渐向一个共同稳定值靠近，即同时考虑后视效应和速度差可使在交通流稳态时对头车施加的小扰动并随时间推移逐渐减小，更有利于提高交通流稳定性和缓解交通拥堵，这与从图 1 中得到的结论一致。数值仿真分析进一步验证了 BLV-IDM 模型稳定性理论分析结论的正确性，揭示了交通拥堵存在的内在机理。

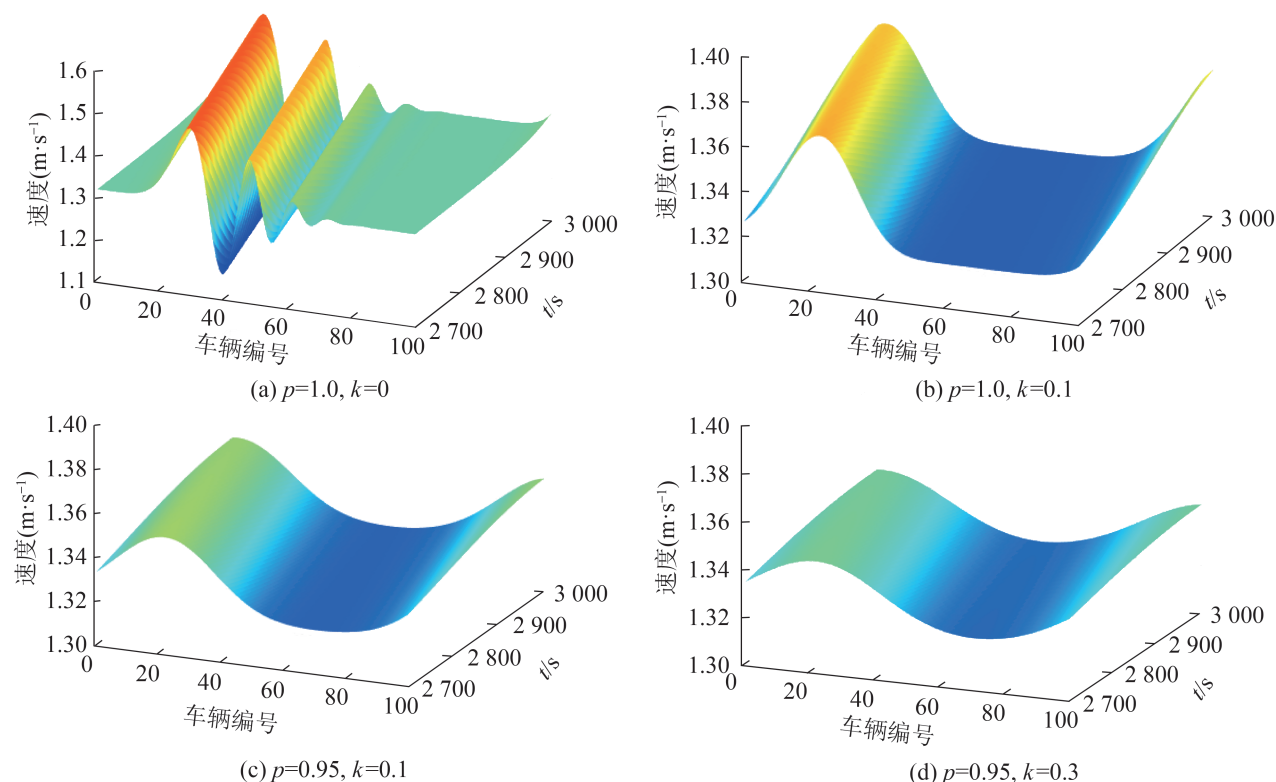


图 3 时间步从 $t=2\ 700$ 到 $t=3\ 000$ 的车辆速度时空演化
Fig. 3 Space-time evolution of the velocity of vehicles from $t=2\ 700$ to $t=3\ 000$

图4所示为时间步 $t=2800$ 时, 图3中的车辆速度分布, 更直观地体现了随着参数 p 和参数 k

变化, 系统中车辆速度波动幅度逐渐趋于稳定, 交通流的稳定性得到了提高。

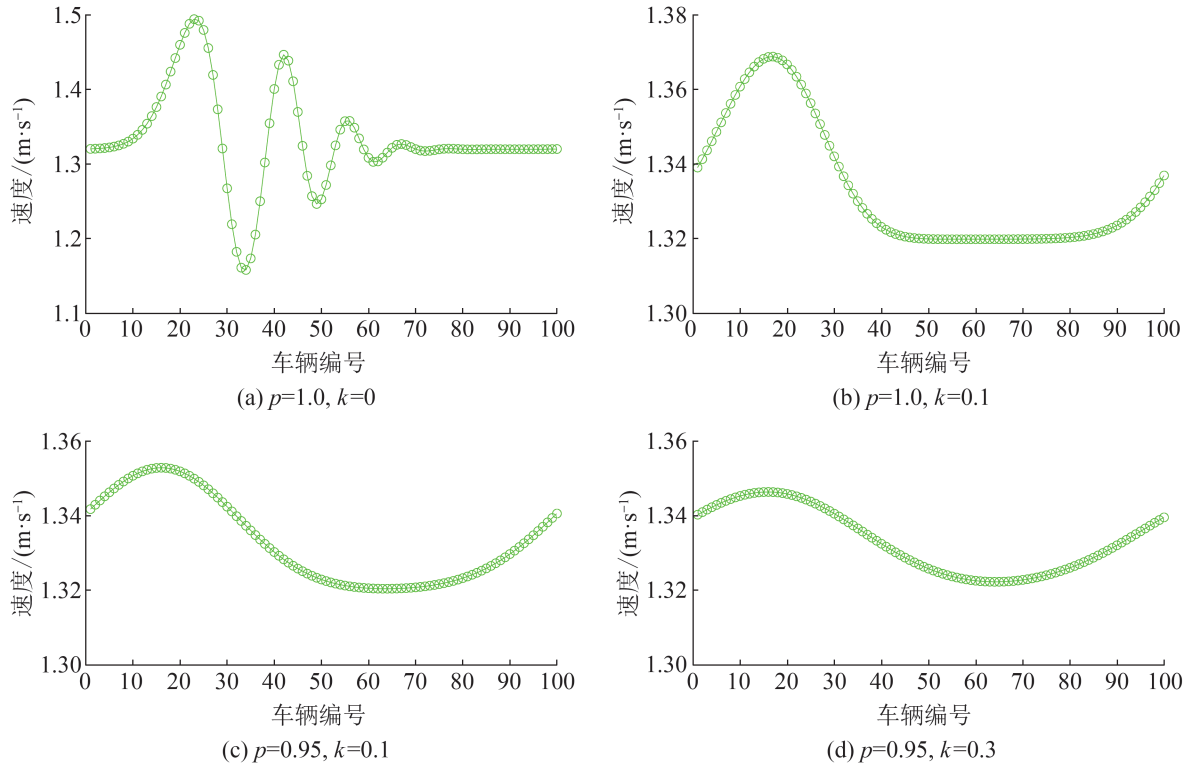


图4 时间步 $t=2800$ 时车辆速度分布
Fig. 4 Velocity profiles of all vehicles at $t=2800$

4 结论

本文提出了一种考虑后视效应和速度差的智能驾驶模型来描述车辆的跟驰行为, 并且采用数值仿真实验得到了与稳定性理论分析一致的结论, 验证了稳定性理论分析的正确性。设计仿真实验研究了BLV-IDM控制下车辆在加速过程中的跟驰特性, 对模型进行了交通安全性评价。具体结论如下:

(1) 线性稳定性理论分析表明, 随着参数 p 的减小, 即增加后车影响在跟驰决策中的权重, 交通流稳定区域逐渐减小。仅当后向控制权重比在适当范围内时, 才能提高交通流的稳定性; 而驾驶员对车辆速度差敏感性越高, 交通流稳定性越强。交通流稳态时小扰动的仿真模拟验证了BLV-IDM对提高交通流稳定性具有积极作用。

(2) 与IDM相比, 在车辆的加速过程中考虑后视效应时车辆加速度变化趋势更平缓, 同时车辆达到最大速度进入匀速稳定运行的时间缩短21.35%, 通过的距离减少20.72%; 同时考虑车辆速度差进一步缩短了车辆达到最大速度的时间和通过的距离。因此改进模型在车辆的控制和交通流的稳定方面更具优势。

(3) 随着参数 k 的增大, 评价BLV-IDM控制下车辆尾部碰撞安全风险的TET和TIT两个指标均减小, 即在模型中考虑车辆速度差的影响可提高交通流安全性, 并且驾驶员对速度差越敏感, 交通安全性越高。

参考文献:

- [1] 王殿海, 金盛. 车辆跟驰行为建模的回顾与展望[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 115-127.

- Wang Dianhai, Jin Sheng. Review and Outlook of Modeling of Car Following Behavior[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 115-127.
- [2] 费蓉, 刘方, 谢国, 等. 基于门控循环单元的车辆跟驰行为仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(10): 1862-1873.
- Fei Rong, Liu Fang, Xie Guo, et al. GRU-based Car-following Behavior Simulation Model[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(10): 1862-1873.
- [3] Pipes L A. An Operational Analysis of Traffic Dynamics[J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(3): 274-281.
- [4] Gipps P G. A Behavioural Car-following Model for Computer Simulation[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1981, 15(2): 105-111.
- [5] Nagel K, Schreckenberg M. A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic[J]. Journal De Physique, 1992, 2(12): 2221-2229.
- [6] 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.
- [7] Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations[J]. Physical Review E, 2000, 62(2): 1805-1824.
- [8] Jiang Rui, Wu Qingsong, Zhu Zuojin. Full Velocity Difference Model for A Car-following Theory[J]. Physical Review E, 2001, 64(1): 017101.
- [9] Derbel O, Tamás Péter, Zebiri H, et al. Modified Intelligent Driver Model[J]. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 2012, 40(2): 53-60.
- [10] Vicente Milanés, Shladover S E. Modeling Cooperative and Autonomous Adaptive Cruise Control Dynamic Responses Using Experimental Data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 48: 285-300.
- [11] Liu Pengfei, Fan Wei. Exploring the Impact of Connected and Autonomous Vehicles on Freeway Capacity Using a Revised Intelligent Driver Model[J]. Transportation Planning and Technology, 2020, 43(3): 279-292.
- [12] Saifuzzaman M, Zheng Zuduo, Mazharul Haque M, et al. Revisiting the Task-capability Interface Model for Incorporating Human Factors into Car-following Models[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 82: 1-19.
- [13] Treiber M, Kesting A. The Intelligent Driver Model With Stochasticity-new Insights Into Traffic Flow Oscillations[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 117: 613-623.
- [14] 肖新平, 姜蒙, 文江辉, 等. 基于改进IDM-GARCH模型的速度波动不确定性研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(2): 155-164.
- Xiao Xinping, Jiang Meng, Wen Jianghui, et al. Uncertainty of Velocity Fluctuation Based on an Improved IDM-GARCH Model[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(2): 155-164.
- [15] Sharath M N, Velaga N R. Enhanced Intelligent Driver Model for Two-dimensional Motion Planning in Mixed Traffic[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 120: 102780.
- [16] 王顺超, 李志斌, 吴瑶, 等. 面向瓶颈多簇运动波消除的拥堵吸收智能驾驶模型[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 137-150.
- Wang Shunchao, Li Zhibin, Wu Yao, et al. An Intelligent Jam-absorbing Driving Strategy for Eliminating Multiple Traffic Oscillations at Bottlenecks[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(1): 137-150.
- [17] Alhariqi A, Gu Ziyuan, Saberi M. Calibration of the Intelligent Driver Model (IDM) With Adaptive Parameters for Mixed Autonomy Traffic Using Experimental Trajectory Data[J]. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2022, 10(1): 421-440.
- [18] Ma Dongfang, Han Yueyi, Qu Fengzhong, et al. Modeling and Analysis of Car-following Behavior Considering Backward-looking Effect[J]. Chinese Physics B, 2021, 30(3): 034501.
- [19] Ma Guangyi, Ma Minghui, Liang Shidong, et al. An Improved Car-following Model Accounting for the Time-delayed Velocity Difference and Backward Looking Effect[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2020, 85: 105221.
- [20] Chen Can, Cheng Rongjun, Ge Hongxia. An Extended Car-following Model Considering Driver'S Sensory Memory and the Backward Looking Effect[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2019, 525: 278-289.
- [21] Ma Guangyi, Ma Minghui, Liang Shidong, et al. Nonlinear Analysis of the Car-following Model Considering Headway Changes With Memory and Backward Looking Effect[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2021, 562: 125303.
- [22] Zheng Liang, Ran Bin, Huang Helai. Safety Evaluation for Driving Behaviors Under Bidirectional Looking Context[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017, 21(4): 255-270.
- [23] Yi Ziwei, Lu Wenqi, Xu Linghui, et al. Intelligent Back-looking Distance Driver Model and Stability Analysis for Connected and Automated Vehicles[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(11): 3499-3512.

- [24] Jin P J, Yang Da, Ran Bin, et al. Bidirectional Control Characteristics of General Motors and Optimal Velocity Car-Following Models: Implications for Coordinated Driving in a Connected Vehicle Environment[J]. Transportation Research Record, 2013, 2381(1): 110-119.
- [25] 吴兵, 王文璇, 李林波, 等. 多前车影响的智能网联车辆纵向控制模型[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(2): 184-194.
- [26] Minderhoud M M, Bovy P H L. Extended Time-to-collision Measures for Road Traffic Safety Assessment[J]. Accident Analysis & Prevention, 2001, 33(1): 89-97.
- Wu Bing, Wang Wenxuan, Li Linbo, et al. Longitudinal Control Model for Connected Autonomous Vehicles Influenced by Multiple Preceding Vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(2): 184-194.