

## 考虑多前车反馈的智能网联车辆跟驰模型

秦严严<sup>1a, 1b, 1c, 2</sup>, 王昊<sup>\*1a, 1b, 1c</sup>, 冉斌<sup>1c, 2</sup>

(1. 东南大学 a. 城市智能交通江苏省重点实验室, b. 现代城市交通技术江苏高校协同创新中心, c. 交通学院, 南京 210096; 2. 美国威斯康星大学麦迪逊分校 土木与环境工程系, 麦迪逊 53706, 美国)

**摘要:** 基于智能网联车辆(Connected Autonomous Vehicle, CAV)跟驰特性, 本文研究CAV跟驰模型, 考虑多前车电子节气门角度反馈, 构建CAV跟驰模型, 并应用稳定性分析方法, 推导所提模型稳定性判别条件. 以考虑3辆前导车的CAV跟驰模型为例, 设计数值仿真实验, 分析不同CAV比例时混合交通流的安全性. 模型稳定性分析表明: 所提模型相比已有模型(CAV的T-FVD模型及常规车辆FVD模型)具备更优的稳定域, 且考虑前车数量越多、多前车反馈权重系数越大, 所提模型的稳定性越好; 相同取值条件下, 距离越远的前车反馈权重系数对所提模型稳定性的影响越大. 数值仿真表明, CAV有利于降低交通流的车辆尾部碰撞安全风险.

**关键词:** 交通工程; 跟驰模型; 稳定性分析; 智能网联车辆

## Car-following Model of Connected and Autonomous Vehicles Considering Multiple Feedbacks

QIN Yan-yan<sup>1a, 1b, 1c, 2</sup>, WANG Hao<sup>1a, 1b, 1c</sup>, RAN Bin<sup>1c, 2</sup>

(1a. Jiangsu Key Laboratory of Urban ITS, 1b. Jiangsu Province Collaborative Innovation Center of Modern Urban Traffic Technologies, 1c. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Department of Civil and Environment Engineering, University of Wisconsin-Madison, Madison 53706, USA)

**Abstract:** Based on the car-following characteristic of connected autonomous vehicles (CAV), the CAV car-following model is studied. By considering electronic throttle angle feedbacks from multiple preceding vehicles, this paper proposes CAV's car-following model. Then, stability analysis method is used to derive stability condition for the proposed model. Taking three-head vehicles into consideration, the numerical simulations are performed to study the safety of mixed traffic flow under different CAV rates. Stability analysis shows that the presented CAV model has better stability regions than the previous models (T-FVD model of CAV and FVD model of regular vehicles). In addition, the proposed CAV car-following model is more stable, with the increase of the number of preceding vehicles and the corresponding feedback weight coefficients. Moreover, the feedback weight coefficient of a preceding vehicle has greater effect on stability, if this vehicle is farther away. Besides, simulations indicate that CAV can reduce rear-end collision risks of traffic flow.

**Keywords:** traffic engineering; car-following model; stability analysis; connected and autonomous vehicles

### 0 引言

智能网联车辆(Connected and Autonomous

Vehicle, CAV)基于车车通信技术, 实时获取前车行驶状态, 优化加速度输出, 可从车辆微观层面改善

收稿日期: 2018-01-08

修回日期: 2018-03-26

录用日期: 2018-04-02

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(51478113); 东南大学优秀博士学位论文培育基金/Scientific Research Foundation of the Graduate School of Southeast University(3221008737); 中央高校基本科研业务费专项资金资助与江苏省研究生科研与实践创新计划项目/Fundamental Research Funds for the Central Universities and Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province(KYCX17\_0146).

作者简介: 秦严严(1989-), 男, 江苏沛县人, 博士生.

\*通信作者: haowang@seu.edu.cn

交通流运营质量<sup>[1]</sup>.CAV跟驰模型的研究可为未来大规模实地测试的实施提供模型参考,已成为交通流及智能交通领域的研究热点<sup>[2]</sup>.

跟驰模型已发展60年,其中Newell模型<sup>[3]</sup>、优化速度模型(Optimal Velocity Model, OVM)<sup>[4]</sup>、广义力模型(Generalized Force Model, GFM)<sup>[5]</sup>、全速度差模型(Full Velocity Difference Model, FVD)<sup>[6]</sup>体现了速度优化的控制思想,逐渐被用于CAV跟驰模型的建模研究.已有研究成果较多地集中在FVD模型基础之上,考虑多前车间距变化项、速度差项、加速度项等不同条件建立了CAV跟驰模型<sup>[7-11]</sup>.

Ioannou等<sup>[12]</sup>于1994年开展了电子节气门角度控制系统与车辆加速度输出之间的建模研究,建立的电子节气门角度与车辆加速度输出模型得到了较好应用<sup>[13]</sup>.国内也有不少关于电子节气门控制的研究成果<sup>[14-15]</sup>,但是较多的还是关注控制系统的设计方面,缺乏与纵向跟驰模型之间的关联性研究.电子节气门角度作为未来CAV智能控制系统的核心变量,其与车辆运行的速度及加速度密切相关,因此,电子节气门角度的反馈能够起到实时感知前车运行状态的作用,进而提高后车的微观跟驰特性.然而,目前国内外基于电子节气门角度控制建立CAV跟驰模型的研究较少,文献[16]考虑最紧邻车辆电子节气门角度信息,尝试在FVD基础之上提出CAV跟驰模型,在一定程度上提高了常规车辆交通流稳定性.但是该模型没有考虑多前车电子节气门角度控制的影响,不能充分体现CAV具有的车联网特性.鉴于此,本文考虑多前车电子节气门控制,提出更加一般性的CAV跟驰模型,通过模型稳定性理论解析及数值仿真实验,分析所提模型对交通流稳定性与交通安全的影响作用.

## 1 跟驰模型

早在1961年,Newell<sup>[3]</sup>基于优化速度的思想提出了速度控制方程的跟驰模型,模型公式为

$$v_n(t+\tau) = V(x_{n-1}(t) - x_n(t)) \quad (1)$$

式中: $V(\cdot)$ 为速度关于车头间距的优化速度函数; $\tau$ 为反应延时; $v_n(t+\tau)$ 为第 $n$ 辆车在 $t+\tau$ 时刻的速度; $x_{n-1}(t)$ 、 $x_n(t)$ 分别为第 $n-1$ 辆车、第 $n$ 辆车在 $t$ 时刻的位移.

1995年,Bando等<sup>[4]</sup>进一步提出了OVM模型,该模型为加速度控制公式,即

$$\dot{v}_n(t) = \alpha[V(x_{n-1}(t) - x_n(t)) - v_n(t)] \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 为敏感系数,本质上, $1/\alpha$ 可视为OVM模型隐含的反应延时; $v_n(t)$ 为第 $n$ 辆车在第 $t$ 时刻的速度.

鉴于OVM具有较大加速度等缺陷,Helbing等<sup>[5]</sup>于1998年提出GFM模型.姜锐等<sup>[6]</sup>考虑全速度差项,在GFM基础之上于2001年提出FVD模型,模型公式为

$$\dot{v}_n(t) = \alpha[V(x_{n-1}(t) - x_n(t)) - v_n(t)] + \lambda(v_{n-1}(t) - v_n(t)) \quad (3)$$

式中: $\lambda$ 为速度差系数; $v_{n-1}(t)$ 为第 $n-1$ 辆车在第 $t$ 时刻的速度.

Li等<sup>[6]</sup>于2016年以FVD模型为基础,基于电子节气门角度控制,提出了针对CAV车辆的跟驰模型,记为T-FVD(Throttle-based FVD).模型公式为

$$\dot{v}_n(t) = \alpha[V(x_{n-1}(t) - x_n(t)) - v_n(t)] + \lambda(v_{n-1}(t) - v_n(t)) + \kappa(\theta_{n-1}(t) - \theta_n(t)) \quad (4)$$

式中: $\kappa$ 为电子节气门角度控制系数; $\theta_{n-1}(t)$ 、 $\theta_n(t)$ 分别为第 $n-1$ 辆车、第 $n$ 辆车 $t$ 时刻的电子节气门角度.

依据文献[12-13],电子节气门角度与车辆速度、加速度可建立数学模型为

$$\dot{v}_n(t) = -b(v_n(t) - v_e) + c(\theta_n(t) - \theta_e) \quad (5)$$

式中: $b$ 与 $c$ 均为大于零的系数; $v_e$ 为当前平衡态速度; $\theta_e$ 为当前平衡态速度 $v_e$ 对应的电子节气门角度.

T-FVD模型由于考虑了前车与后车电子节气门角度差项,能够有效提升CAV交通流稳定性.基于车车通信技术,CAV车辆可实时获取车队前方多辆车行驶状态,进而更好地优化自身加速度输出.而T-FVD模型仅考虑了紧跟前车电子节气门角度信息,并未考虑多前车电子节气门角度的影响,未能充分体现CAV车辆在车联网环境下的车间通信特性.鉴于此,在T-FVD模型基础上,提出考虑多前车电子节气门控制的CAV跟驰模型,模型公式为

$$\dot{v}_n(t) = \alpha[V(x_{n-1}(t) - x_n(t)) - v_n(t)] + \lambda(v_{n-1}(t) - v_n(t)) + \sum_{j=1}^m w_j(\theta_{n-j}(t) - \theta_n(t)) \quad (6)$$

式中: $m$ 为前 $m$ 辆车,且满足 $m < n$ ;  $w_j$ 为前 $j$ 辆车电子节气门角度差项的权重系数,且满足 $0 \leq w_j \leq 1$ .

可以看出,当 $m=1$ 时,本文模型可退化为T-

FVD模型;当 $m=0$ 时,即不考虑前车电子节气门角度信息,本文模型退化为常规车FVD模型.并且,优化速度函数 $V$ 可以选取不同的函数形式及参数.

## 2 模型稳定性解析

应用稳定性分析方法对所提CAV跟驰模型进行稳定性分析,为避免混淆,本文模型及推导过程中,用 $n-1$ 表示车辆 $n$ 的前车.初始状态下的车流处于平衡态,则CAV车辆位置坐标解为<sup>[17]</sup>

$$\bar{x}_n(t) = (N-n)s_e + v_e t, \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (7)$$

式中: $s_e$ 为平衡态车头间距; $\bar{x}_n(t)$ 为第 $n$ 辆车在 $t$ 时刻平衡态位置; $N$ 为交通流中车辆总量.

在CAV车流平衡态添加扰动项 $r_n(t)$ ,即

$$r_n(t) = x_n(t) - \bar{x}_n(t) \quad (8)$$

式中: $x_n(t)$ 为扰动影响下车辆的实际位移.

对式(8)求关于时间 $t$ 的导数,可得

$$\dot{r}_n(t) = v_n(t) - v_e \quad (9)$$

依据式(8)可得

$$r_{n-1}(t) - r_n(t) = [x_{n-1}(t) - x_n(t)] - [\bar{x}_{n-1}(t) - \bar{x}_n(t)] = s_n(t) - s_e \quad (10)$$

式中: $s_n(t)$ 表示车头间距, $s_n(t) = x_{n-1}(t) - x_n(t)$ .

针对 $V[x_{n-1}(t) - x_n(t)] - v_n(t)$ ,应用一阶泰勒公式进行线性化展开,并将式(9)与式(10)带入,可得

$$V(x_{n-1}(t) - x_n(t)) - v_n(t) = V[s_n(t)] - v_n(t) = V'(s_e)[r_{n-1}(t) - r_n(t)] - \dot{r}_n(t) \quad (11)$$

针对 $v_{n-1}(t) - v_n(t)$ ,依据式(9)可得

$$v_{n-1}(t) - v_n(t) = \dot{r}_{n-1}(t) - \dot{r}_n(t) \quad (12)$$

对扰动项求二阶导数可得 $\dot{v}_n(t) = \ddot{r}_n(t)$ ,将其与式(11)、式(12)带入本文CAV跟驰模型式(6)中,得到

$$\ddot{r}_n(t) = \alpha[V'(s_e)[r_{n-1}(t) - r_n(t)] - \dot{r}_n(t)] + \lambda[\dot{r}_{n-1}(t) - \dot{r}_n(t)] + \sum_{j=1}^m w_j(\theta_{n-j}(t) - \theta_n(t)) \quad (13)$$

针对前 $m$ 辆车电子节气门角度控制项 $\sum_{j=1}^m w_j(\theta_{n-j}(t) - \theta_n(t))$ ,依据电子节气门角度控制式(5),可得

$$\theta_n(t) = \frac{1}{c}[\dot{v}_n(t) + b(v_n(t) - v_e)] + \theta_e \quad (14)$$

依据式(14),可得到

$$\theta_{n-j}(t) - \theta_n(t) = \frac{1}{c}[\dot{v}_{n-j}(t) - \dot{v}_n(t) + b(v_{n-j}(t) - v_n(t))] = \frac{1}{c}[\ddot{r}_{n-j}(t) - \ddot{r}_n(t)] + \frac{b}{c}[\dot{r}_{n-j}(t) - \dot{r}_n(t)] \quad (15)$$

将式(15)带入式(13),得到关于扰动项 $r_n(t)$ 的微分方程为

$$\ddot{r}_n(t) = \alpha[V'(s_e)[r_{n-1}(t) - r_n(t)] - \dot{r}_n(t)] + \lambda[\dot{r}_{n-1}(t) - \dot{r}_n(t)] + \sum_{j=1}^m \frac{1}{c} w_j[\ddot{r}_{n-j}(t) - \ddot{r}_n(t) + b[\dot{r}_{n-j}(t) - \dot{r}_n(t)]] \quad (16)$$

将扰动 $r_n(t)$ 写成傅里叶级数形式:

$$r_n(t) = A \exp(ikn + zt), \text{ 并带入式(16)展开,可化简得到} \\ z^2 = \alpha[V'(s_e)(\exp(-ik) - 1) - z] + \lambda[z \exp(-ik) - z] + \frac{1}{c} \sum_{j=1}^m w_j [z^2 \exp(-jik) - z^2 + b[z \exp(-jik) - z]] \quad (17)$$

基于长波展开的假设,将 $z$ 按照 $z = z_1(ik) + z_2(ik)^2 + \dots$ 展开,并带入式(17),求得 $(ik)$ 平方项系数 $z_2$ 为

$$z_2 = \frac{(\frac{1}{2}\alpha + \lambda)V'(s_e) - (V'(s_e))^2 + \frac{b}{c}V'(s_e) \sum_{j=1}^m jw_j}{\alpha} \quad (18)$$

根据长波理论,若 $z_2 > 0$ ,则CAV跟驰模型稳定.令 $z_2 > 0$ ,可进一步化简得到CAV跟驰模型稳定应满足式(19).

$$V'(s_e) < \frac{1}{2}\alpha + \lambda + \frac{b}{c} \sum_{j=1}^m jw_j \quad (19)$$

由式(19)可知,当 $m=1$ 时,可得到文献[16]中T-FVD模型稳定性条件为

$$V'(s_e) < \frac{1}{2}\alpha + \lambda + \frac{b}{c}w_1 \quad (20)$$

当 $m=0$ 时,即不考虑前车电子节气门角度信息,本文CAV模型退化为FVD模型,相应的稳定性条件退化为FVD模型稳定性条件,即

$$V'(s_e) < \frac{1}{2}\alpha + \lambda \quad (21)$$

因此,T-FVD模型相比于FVD模型,在区域 $\frac{1}{2}\alpha + \lambda < V'(s_e) < \frac{1}{2}\alpha + \lambda + \frac{b}{c}w_1$ 内,CAV车辆可提升常规车辆交通流稳定性.本文所提CAV模型相比于T-FVD模型,可在区域 $\frac{1}{2}\alpha + \lambda + \frac{b}{c}w_1 < V'(s_e) < \frac{1}{2}\alpha + \lambda + \frac{b}{c} \sum_{j=1}^m jw_j$ 内,进一步稳定CAV车辆交通流.并且,由式(19)可以看出,多前车数量 $m$ 越大、权重系数 $w_j$ 越大,本文CAV模型稳定域越大;在相同取值条件下, $j$ 值越大,对应的权重系数 $w_j$ 对CAV模型稳定性的影响越大.稳定性的推导结果进一步证实了T-FVD模型为本文CAV模型的一个特例.

### 3 数值仿真实验

以交通安全冲突指标为依据,基于数值仿真实验,分析不同CAV车辆比例对交通安全的影响.其中,选取文献[18]中FVD模型的优化速度函数及参数标定结果,作为常规车辆跟驰模型,并选取 $m=3$ ,得到具有3辆前车电子节气门控制的CAV车辆跟驰模型,进行数值仿真实验.

#### 3.1 跟驰模型优化速度函数

Kesting等<sup>[18]</sup>应用城市交叉口环境中车辆轨迹数据对FVD模型进行了标定,采用FVD模型优化速度函数为

$$V = \frac{v_0}{2} [\tanh(\frac{s_n(t)}{l} - \beta) - \tanh(-\beta)] \quad (22)$$

式中: $v_0$ 为自由流速度;参数 $l$ 和 $\beta$ 确定优化函数 $V$ 的曲线形状.

FVD模型标定结果为如表1所示,文献[18]验证了该标定结果可较好地反应常规车辆在城市交叉口环境中的驾驶跟驰特性.

表1 FVD模型参数取值

Table 1 Parameter values of FVD model

参数	参数值
$v_0$	18.1 m/s
$\alpha$	0.204 s <sup>-1</sup>
$l$	5.23 m
$\beta$	2.14 m
$\lambda$	0.536 s <sup>-1</sup>

对于CAV车辆而言,以 $m=3$ 为例,得到3辆前导车电子节气门控制的CAV车辆跟驰模型.式(5)中系数 $b$ 和 $c$ 取值<sup>[16]</sup>为: $b=0.8, c=0.27$ .依据文献[17]中对前车信息系数取值的研究结果,本文取值为: $w_1=0.1, w_2=0.05, w_3=0.03$ .

在上述模型参数具体取值情况下,依据模型稳定性判别式(19)可求得本文选取的常规车模型,以及3辆前导CAV模型各自稳定与否的平衡态速度范围.方便起见,将式(19)改写为

$$f = \frac{1}{2}\alpha + \lambda + \frac{b}{c} \sum_{j=1}^m jw_j - V'(s_c) > 0 \quad (23)$$

式中: $f$ 记为模型稳定性条件,当 $f>0$ 时,稳定;反之,则不稳定.将模型参数带入,可计算得到常规车与3辆前导CAV车辆稳定的速度范围,如图1所示.

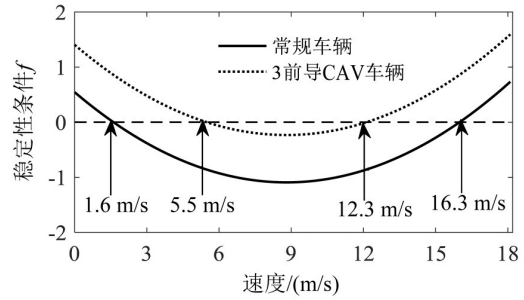


图1 跟驰模型稳定性

Fig. 1 Stability of car-following models

由图1可知,在自由流速度范围以内(0~18.1 m/s),常规车仅在0~1.6 m/s及16.3~18.1 m/s较小速度范围内稳定,在1.6~16.3 m/s较大速度范围内均不稳定;而3辆前导CAV车辆在5.5~12.3 m/s的速度范围内不稳定,在其他速度范围内稳定.

#### 3.2 安全评价指标

选取文献[19]中基于TTC(Time-to-collision)得到的TET(Time Exposed Time-to-collision)和TIT(Time Integrated Time-to-collision)作为仿真实验中的安全评价指标.TET和TIT指标是目前交通流车辆尾部碰撞安全风险的主流评价指标,计算公式为<sup>[20]</sup>

$$TTC_n(t) = \frac{x_{n-1}(t) - x_n(t) - L}{v_n(t) - v_{n-1}(t)}, \forall v_n(t) > v_{n-1}(t) \quad (24)$$

$$TET = \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^T \delta_n(t) \tau_{sc}, \delta_n(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq TTC_n(t) \leq TTC^* \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

$$TIT = \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^T [TTC^* - TTC_n(t)] \tau_{sc}, 0 \leq TTC_n(t) \leq TTC^* \quad (26)$$

式中: $L$ 为车长,取为5 m; $\tau_{sc}$ 为仿真步长,本文取0.1 s; $TTC^*$ 为TTC指标阈值,一般取为1~3 s.

TET和TIT指标值越小,表明安全性越高,可以看出,TET指标侧重于描述存在冲突风险的次数,而TIT指标侧重于描述冲突风险的严重程度.

#### 3.3 仿真结果

如前所述,常规车FVD模型参数取值选取了基于城市交叉口环境的车辆轨迹数据标定结果<sup>[18]</sup>,而交叉口红灯启停、绿灯启亮的过程中存在较多的车辆尾部碰撞安全风险隐患<sup>[21]</sup>.因此,参照文献[21]进行安全性仿真实验设计:在单车道开放

性边界条件下,距道路起点 225 m 处设有信号灯,信号灯上游 20 m 为停车线.在初始状态,车队共有 20 辆车,车队初始速度为 12.87 m/s,信号灯绿灯亮,尔后变为红灯,红灯时间为 60 s,然后再恢复为绿灯,红灯可模拟成停车线上静止的车辆,详细实验设计可参见文献[21].仿真实验中统计在上述红灯启停、绿灯启亮的过程中车辆尾部碰撞安全风险指标TET和TIT,且在统计TET和TIT指标时,针对阈值TTC<sup>\*</sup>取值 1.0 s、1.5 s、2.0 s、2.5 s、3.0 s 做参数敏感性分析.同时考虑仿真中的随机性,对每次仿真均独立重复 3 次,并取均值作为仿真结果.

仿真实验结果如表 2 和表 3 所示,表 2 为不同

CAV 比例下TET指标情况,表 3 为TIT指标情况.表 2 和表 3 中数据的含义是,以 CAV 比例为 0 时的安全风险指标TET和TIT为基准,其他不同 CAV 比例时,安全风险隐患降低的百分比.由表 2 和表 3 可以看出,CAV 车辆比例的增加,可逐渐减低车辆尾部碰撞安全风险隐患.当 CAV 车辆比例达到 100%时,尾部碰撞安全隐患可降低 99%,不可否认的是,TET和TIT作为安全性影响分析的仿真模拟化替代手段,具有一定的局限性,其仿真结果可看出定性化的影响趋势,对于安全性风险的量化评价,还需依赖未来大规模 CAV 真车实验的实施.

表 2 TET 指标下的安全影响

Table 2 Safety impacts under TET indicator

CAV 车辆 比例/%	尾部碰撞安全风险隐患降低百分比均值/%				
	TTC <sup>*</sup> =1.0 s	TTC <sup>*</sup> =1.5 s	TTC <sup>*</sup> =2.0 s	TTC <sup>*</sup> =2.5 s	TTC <sup>*</sup> =3.0 s
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	-13.22	-10.63	-6.69	-3.07	-1.01
20	-25.53	-21.60	-15.06	-6.74	-2.20
30	-32.82	-28.44	-18.59	-10.42	-3.41
40	-43.60	-39.31	-29.91	-16.31	-5.02
50	-63.29	-57.78	-46.46	-27.57	-7.82
60	-66.91	-63.13	-52.13	-30.40	-11.17
70	-76.24	-73.22	-64.02	-42.70	-21.05
80	-87.63	-85.02	-77.01	-57.75	-33.51
90	-96.27	-95.13	-90.53	-78.37	-62.56
100	-99.44	-99.41	-99.39	-97.24	-95.46

表 3 TIT 指标下的安全影响

Table 3 Safety impacts under TIT indicator

CAV 车辆 比例/%	尾部碰撞安全风险隐患降低百分比均值/%				
	TTC <sup>*</sup> =1.0 s	TTC <sup>*</sup> =1.5 s	TTC <sup>*</sup> =2.0 s	TTC <sup>*</sup> =2.5 s	TTC <sup>*</sup> =3.0 s
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	-17.90	-12.52	-10.73	-8.39	-6.45
20	-30.06	-24.22	-21.52	-17.36	-13.33
30	-39.14	-31.65	-28.45	-23.33	-18.34
40	-47.49	-42.11	-38.84	-32.81	-25.81
50	-68.04	-61.23	-57.26	-49.67	-39.25
60	-67.52	-65.32	-62.16	-54.40	-43.62
70	-77.14	-74.93	-72.38	-65.46	-54.62
80	-89.83	-86.76	-84.36	-78.19	-67.86
90	-96.43	-95.82	-94.61	-90.99	-84.38
100	-99.50	-99.90	-99.94	-99.33	-98.37

## 4 结 论

(1) 本文提出了考虑多前车电子节气门角度

控制的 CAV 跟驰模型,模型结构具备一般性,使得已有 CAV 车辆 T-FVD 模型及常规车辆 FVD 模型

均是本文所提模型的特例,且本文所提模型具有更优的稳定域.

(2) 模型稳定性理论解析表明,考虑的前车数量越多、电子节气门角度控制权重系数越大,所提模型稳定性越好.前车位置越远,其电子节气门角度控制权重系数在相同取值条件下,对所提模型稳定性的影响越大.

(3) 数值仿真实验表明,在CAV市场率逐步普及阶段,所提CAV模型可逐渐降低混合交通流中车辆尾部碰撞安全风险隐患,可为未来大规模真车实验的实施提供模型参考.

(4) 多前车行车状态数据的传递,以一定概率的传递失效情况值得考虑,该情况下的CAV跟驰建模工作将是下一步的研究.

#### 参考文献:

- [1] 秦严严,王昊,王炜,等.自适应巡航控制车辆跟驰模型综述[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(3): 121-130. [QIN Y Y, WANG H, WANG W, et al. Review of car-following models of adaptive cruise control[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(3): 121-130.]
- [2] 秦严严,王昊,王炜,等.混有CACC车辆和ACC车辆的异质交通流基本图模型[J]. 中国公路学报, 2017, 30(10): 127-136. [QIN Y Y, WANG H, WANG W, et al. Fundamental diagram model of heterogeneous traffic flow mixed with cooperative adaptive cruise control vehicles and adaptive cruise control vehicles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(10): 127-136.]
- [3] NEWELL G F. Nonlinear effects in the dynamics of car following[J]. Operations Research, 1961, 9(2): 209-229.
- [4] 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.
- [5] HELBING D, TILCH B. Generalized force model of traffic dynamics[J]. Physical Review E, 1998, 58(1): 133-138.
- [6] JIANG R, WU Q, ZHU Z. Full velocity difference model for a car-following theory[J]. Physical Review E, 2001, 64(1): 017101.
- [7] TANG T Q, ZHANG J, CHEN L, et al. Analysis of vehicle's safety envelope under car-following model[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2017(474): 127-133.
- [8] YU S, SHI Z. The effects of vehicular gap changes with memory on traffic flow in cooperative adaptive cruise control strategy[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2015(428): 206-223.
- [9] 唐毅. 基于前后多车信息的跟驰模型及其车流平稳性控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014. [TANG Y. Study on the car following model and its smoothness control based on the information of preceding and following vehicles[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.]
- [10] YU G, WANG P, WU X, et al. Linear and nonlinear stability analysis of a car-following model considering velocity difference of two adjacent lanes[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 84(1): 387-397.
- [11] 李修云,周桐,杨智勇. 基于最紧邻前车加速度信息的跟驰模型[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2015, 38(6): 153-158. [LI X Y, ZHOU T, YANG Z Y. Car-following model based on the information of the nearest-neighbor leading car's acceleration[J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(6): 153-158.]
- [12] IOANNOU P, XU Z. Throttle and brake control systems for automatic vehicle following[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 1994, 1(4): 345-377.
- [13] LI K, IOANNOU P. Modeling of traffic flow of automated vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2004, 5(2): 99-113.
- [14] 王耀南,申永鹏,孟步敏,等. 车用汽油发动机电子控制系统研究现状与展望[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(4): 432-447. [WANG Y N, SHEN Y P, MENG B M, et al. Electronic control system for gasoline automotive engine: state of the art and perspective[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(4): 432-447.]
- [15] 郑太雄,杨斌,李永福,等. 车联网环境下电子节气门全局快速滑模控制[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(10): 2356-2364. [ZHENG T X, YANG B, LI Y F, et al. Global fast sliding mode controller for electronic throttle valve under the environment of IoV[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(10): 2356-2364.]
- [16] LI Y, ZHANG L, PEETA S, et al. A car-following model considering the effect of electronic throttle opening angle under connected environment[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 85(4): 2115-2125.
- [17] LI Z, LI W, XU S, et al. Stability analysis of an extended intelligent driver model and its simulations under open boundary condition[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2015(419): 526-536.
- [18] KESTING A, TREIBER M. Calibrating car-following models by using trajectory data: Methodological study[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008 (2088): 148-156.
- [19] 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.
- [20] 秦严严. 自适应巡航控制系统对交通安全的影响研究[J]. *徐州工程学院学报(自然科学版)*, 2017, 32(4): 46-49. [QIN Y Y. Study on impacts of adaptive cruise control system on traffic safety[J]. *Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 2017, 32(4): 46-49.]
- [21] YU S, SHI Z. An improved car-following model considering relative velocity fluctuation[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2016(36): 319-326.

---

上接第35页

- [3] SHI L, ZHU H, ZHONG S, et al. Synchronization for time-varying complex networks based on control[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2016, 301(8): 178-187.
- [4] XU M, WANG J L, HUANG Y L, et al. Pinning synchronization of complex dynamical networks with and without time-varying delay[J]. *Neurocomputing*, 2017, 266(11): 263-273.
- [5] GENG N, ZHAO X, XIE D, et al. Congestion mechanism and demand adjustment strategies for double-cell system with bottlenecks[J]. *Transportation Research Part C*, 2015, 57(8): 122-145.
- [6] XIANG J, CHEN G. On the V-stability of complex dynamical networks[J]. *Automatica*, 2007, 43(6): 1049-1057.
- [7] BOYD S, EI GHAOU L, FERON E, et al. *Linear matrix inequalities in system and control theory*[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994.

---

上接第47页

- [13] 杨伟, 艾廷华. 基于车辆轨迹大数据的道路网更新方法研究[J]. *计算机研究与发展*, 2016, 53(12): 2681-2693. [YANG W, AI T H. A method for road network updating based on vehicle trajectory big data[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2016, 53(12): 2681-2693.]
- [14] 胡一竑, 吴勤旻, 朱道立. 城市道路网络的拓扑性质和脆弱性分析[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2009, 6(3): 69-76. [HU Y H, WU Q M, ZHU D L. Topological properties and vulnerability analysis of spatial urban street networks[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2009, 6(3): 69-76.]
- [15] NIK HASHIM NIK MUSTAPHA, NIK NUR WAHIDAH NIK HASHIM. Outflow of traffic from the national capital Kuala Lumpur to the north, south and east coast highways using flow, speed and density relationships[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2016, 6(3): 540-548.
- [16] 张琨, 李配配, 朱保平, 等. 基于PageRank的有向加权复杂网络节点重要性评估方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013, 45(3): 429-434. [ZHANG K, LI P P, ZHU B P, et al. Evaluation method for node importance in directed-weighted complex networks based on pagerank[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2013, 45(3): 429-434.]
- [17] MOKBEL M F, et al. MNTG: An extensible web-based traffic generator[M]. In: Nascimento M A, et al. (eds), *Advances in Spatial and Temporal Databases, SSTD 2013. Lecture Notes in Computer Science*, vol 8098. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [18] 马云飞. 基于出租车轨迹点的居民出行热点区域与时空特征研究: 以昆山市为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2014. [MA Y F. Research on residents behavior of attractive areas and spatial-temporal feature based on taxi trajectory data: A case of kunshan city[D]. Nanjing Normal University, 2014.]
- [19] 中华人民共和国公共安全行业标准. 城市道路交通管理评价指标体系[S]. 中华人民共和国公共安全行业标准, 2002. [People's Republic of China Public Safety Industry Standard. Evaluation index system of urban road traffic management[S]. People's Republic of China Public Safety Industry Standard, 2002.]