

## 考虑多车反馈的网联自主车辆跟驰行为建模

康爱平<sup>1a,2</sup>, 魏传宝<sup>1a</sup>, 战锦涛<sup>1b</sup>, 李妍妍<sup>1a</sup>

(1. 青岛理工大学 a. 机械与汽车工程学院; b. 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 兰州现代职业学院 理工学院, 兰州 730300)

**摘要:**为提高网联自主车辆(Connected Autonomous Vehicles, CAV)跟驰模型的稳定性,以 CAV 网联特性为依据,考虑速度、距离等要素构建行车风险场。根据对主体车造成的势场强度差异性,建立影响权重系数以表示不同交互车辆对跟驰车辆的影响强度,按照影响权重系数的大小考虑多车运动状态信息建立 CAV 跟驰模型。对模型进行稳定性分析,并进行数值模拟验证。结果表明:在相同外部条件下,与全速度差(Full Velocity Difference, FVD)模型相比,所建立的 CAV 跟驰模型表现出更优的抗干扰能力。该能力的大小取决于通信的车辆数量以及模型中各影响因素的权重配置。因此,提升网联技术水平,扩展 CAV 的通信范围,并在控制策略中综合考虑各影响因素之间的耦合关系与权值平衡,将有助于显著增强交通流在干扰下的鲁棒性。

**关键词:**网联自主车辆;跟驰模型;势场理论;行车风险场;多车反馈

**中图分类号:**U491.112 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2026)01-0126-09

**DOI:**10.3969/j.issn.1673-4602.2026.01.016

## Modeling of the following behavior of connected autonomous vehicles considering multi-vehicle feedback

KANG Aiping<sup>1a,2</sup>, WEI Chuanbao<sup>1a</sup>, ZHAN Jintao<sup>1b</sup>, LI Yanyan<sup>1a</sup>

(1. a. School of Mechanical and Automotive Engineering; b. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. School of Science and Engineering, Lanzhou Modern Vocational College, Lanzhou 730300, China)

**Abstract:** To enhance the stability of the following model for Connected Autonomous Vehicles (CAV), the driving risk field was constructed according to the CAV network characteristics and considering the speed, distance and other factors. Based on the difference of potential field strength caused to the main vehicle, the influence weight coefficient is set up to represent the influence intensity of different interactive vehicles on the following vehicle, and the CAV following model is established according to the size of the influence weight coefficient and considering the multi-vehicle motion state information. The stability of the model was analyzed and verified by numerical simulation. Results indicate that under identical external conditions, the CAV following model demonstrates superior disturbance resistance compared with the full-velocity-difference (FVD) model. The magnitude of this capability depends on the number of communicating vehicles and the weight configuration of various influencing factors within the model. Therefore, enhancing connected technology levels, ex-

收稿日期:2024-06-14

基金项目:国家自然科学基金(52272311)

作者简介:康爱平(1991—),男,甘肃岷县人。硕士,研究方向为道路交通安全控制。E-mail:kangaiping555@163.com。

panding CAV communication ranges, and comprehensively considering the coupling relationships and weight balancing among various influencing factors in control strategies will significantly strengthen traffic flow robustness under interference.

**Key words:** connected autonomous vehicles; car-following model; potential field theory; driving risk field; multi-vehicle feedback

随着车联网技术的发展,网联自主车辆(Connected Autonomous Vehicles, CAV)间可以进行车车交互,实现信息的交换与传输,相较于传统车辆,可以更为全面地获取周围车辆运动状态信息,从而提高行车安全与车辆通行效率,针对 CAV 进行交通流建模成为目前的研究热点<sup>[1]</sup>。车辆跟驰行为作为交通流中基本的驾驶行为,是连接微观驾驶行为与宏观交通流特性的桥梁,跟驰模型的研究对认识和了解交通流特性具有重要意义<sup>[2]</sup>。

车辆在网联交通环境中,可以通过专用短程通信(Dedicated Short Range Communication, DSRC)等先进技术,精准地获取周围车辆信息,减小信息延迟,实现协同自适应巡航控制(Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC),提高车流稳定性。由于条件限制,CACC 的研究多以仿真实验的方式进行,实测实验的方式较少,其中 PATH 实验室<sup>[3]</sup>利用车车通信技术对行车队列进行纵向控制的实验,大合作驾驶挑战赛<sup>[4]</sup>中根据前车及队列首车的反馈实现 CACC 车辆控制,皆证明了考虑多车运动状态信息可以提高车辆纵向控制的安全与稳定。

此外,国内外诸多学者在车辆跟驰方面也进行了大量研究。JIANG 等<sup>[5]</sup>在 GFM 模型的基础上考虑前后车的正负速度差调整前后车间距,建立全速度差(Full Velocity Difference, FVD)模型,可在保证安全跟车距离的同时,最大限度地保证行车速度。宗芳等<sup>[6]</sup>在 FVD 模型的基础上引入分子动力学理论,考虑多前车运动状态信息建立混行车辆跟驰模型,研究表明考虑多前车信息可以提前获取整个车队的运动趋势,有效提高交通流稳定性。LI 等<sup>[7]</sup>从电子节气门角度引入 FVD 模型,所建立的 T-FVD 模型具有更大的稳定区域。秦严严等<sup>[8]</sup>在此基础上考虑多前车电子节气门的角度建立 CAV 跟驰模型,相较于 FVD 模型和 T-FVD 模型,所建立的 CAV 跟驰模型具有更优的稳定性,且所考虑的前车数量越多,模型的稳定性越好。吴兵等<sup>[9]</sup>在纵向控制模型(Longitudinal Control Model, LCM)的基础上考虑多前车的速度和加速度的影响,建立网联环境下的纵向控制模型,研究结果表明,考虑的前车数量越多,交通流的稳定域越大。一系列的研究表明,考虑多车影响建立的车辆跟驰模型可以提高交通流的稳定性。

人工势场法被应用于机器人路径规划方面<sup>[10]</sup>,受此启发,学者们将势场理论引入交通领域,进行了大量研究<sup>[11-17]</sup>。势场可以将运动物体的相关参数进行整合,用以表征交互车辆之间所造成的风险强度,具有客观性、普遍性、可变性等特点。智能网联技术的发展,使车辆可以获得更加详细的交通状态信息,场论思想在交通领域的实用性进一步提升,可以更为详细地刻画车辆微观驾驶行为。

目前基于场论思想建立的跟驰模型大多只考虑相邻前车的运动状态,而忽略了前后车对跟驰车辆的影响,不能充分体现 CAV 的网联特性。因此,以 CAV 网联特性为依据,参考 FVD 模型的构建思路,根据车辆受到的势场强度,考虑多车运动状态对 CAV 跟驰行为进行分析与建模。

## 1 CAV 行车风险势场分析

车辆行驶过程中,运动状态主要受交互车辆及车道线的影响,车辆之间、车辆与车道线之间会产生虚拟的外力使车辆改变自身的行驶策略。因此,将对车辆运动造成影响的各因素看作是场源,而风险势场则是各场源的集合。根据车辆不同的驾驶需求,将各场源按照不同权重进行叠加,即可得到车辆行驶过程中所面临的总势场强度。

$$E_t = \omega_1 U_v + \omega_2 U_l \quad (1)$$

式中: $E_t$  为总势场强度; $U_v$  为车辆势场强度; $U_l$  为车道线势场强度; $\omega_1$ 、 $\omega_2$  分别为车辆势场与车道线势场在总势场中所占的权重,与车辆行驶场景相关。

### 1.1 车辆风险势场

车辆势场由车辆产生,势场强度与车间距离和车辆的运动状态有关,在一定范围内场强随车间距离的减小而增强,在目标车辆位置处达到最大值。

车辆的自身属性和运动状态会影响其产生的风险势场范围的大小。文献[14]提出虚拟质量的概念,用虚拟状态定义车辆的自身属性,其大小与自身的质量及行驶速度有关,并通过对公路上的车速、事故数据及死亡人数进行拟合得到虚拟质量表达式中的相关参数。虚拟质量表达式为

$$M_j = m_j \cdot T_j \cdot (1.566 \times 10^{-10} v_j^{6.687} + 0.3345) \quad (2)$$

式中: $M_j$  为车辆  $j$  的虚拟质量; $m_j$  为车辆  $j$  的实际质量; $T_j$  为车辆种类参数; $v_j$  为车辆  $j$  的当前行驶速度。

实际交通场景中,从不同方向靠近目标车辆时所面临的风险强度不同,目标车辆行驶时前后方的风险要大于车体两侧。为更好地描述车辆不同方向的势场分布情况,需对车间距离  $|r|$  进行修正,取  $x$  轴方向为车辆行驶方向, $y$  轴为车辆垂直方向,目标车辆的质心坐标为  $(x_0, y_0)$ ,前后车辆的坐标为  $(x_1, y_1)$ ,则修正后的距离公式为

$$|r'| = \begin{cases} \sqrt{\left[ \frac{\beta_1 \cdot (x_0 - x_1)}{e^{\kappa \cdot v - \epsilon \cdot a}} \right]^2 + [\beta_2 \cdot (y_0 - y_1)]^2}, & x_0 - x_1 < 0 \\ \sqrt{\left[ \frac{\beta_1 \cdot (x_0 - x_1)}{e^{\kappa \cdot v + \epsilon \cdot a}} \right]^2 + [\beta_2 \cdot (y_0 - y_1)]^2}, & x_0 - x_1 > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $|r'|$  为修正后的距离; $\beta_1, \beta_2$  为目标车辆长和宽的相关系数; $\kappa$  为与速度相关的系数; $v$  为车辆速度; $\epsilon$  为与加速度相关的系数; $a$  为车辆加速度。

当车辆间的距离处于一定范围内时,彼此之间会产生相互作用力,对驾驶行为造成影响,类似于核子间的短程相互作用力。因此,参考 Yukawa 势的构建方式,车辆势场模型通过量化车辆间的交互作用来定义势场,车辆通过感知势场强度以调整驾驶策略,确保安全。该模型表述为

$$U_v = \frac{M \cdot c \cdot e^{\tau \cdot v \cdot \cos \theta}}{|r'|} \quad (4)$$

式中: $M$  为虚拟质量; $c, \tau$  均为不为 0 的待定系数; $v$  为车辆速度; $\theta$  为势场内车辆行驶方向与车辆速度方向的夹角。

### 1.2 车道线风险势场

车辆行驶过程中会受到车道线的约束,在交通系统中常见的车道线有虚线、双黄线、道路边界线。虚线为同向车道分界线,在安全的情况下可以跨道行驶;双黄线为反向车道分界线,正常情况下不能跨道行驶;道路边界线用于标识道路边界,提醒车辆在道路范围内行驶,减小车辆冲出道路的风险。以双向四车道为例,用指数函数的形式建立车道线势场模型。

$$U_l = \mu \cdot e^{\frac{-b^2}{2\sigma^2}} \cdot \frac{b}{|b|} \quad (5)$$

式中: $\mu$  为不同车道线的场强系数,道路边界线的  $\mu$  值最大,双黄线的  $\mu$  值次之,虚线的  $\mu$  值最小; $b$  为车辆与相邻车道线之间的距离; $\sigma$  为场强增幅系数,受车道宽度影响。

## 2 CAV 跟驰行为建模

### 2.1 CAV 跟驰行为分析

车辆跟驰过程可分为自由跟驰和非自由跟驰。自由跟驰指车辆所处的驾驶环境中交通流密度较小,与前车的距离较远或者无前车,驾驶过程中不受其他车辆的影响,车辆的状态主要取决于驾驶人的意愿与车辆性能,发生事故的概率较小。非自由跟驰指车辆行驶过程中受交互车辆的制约,无法按照驾驶人意愿行驶,需根据交互车辆对自身的影响调整车辆运动状态,具有制约性、延迟性、传递性。

如图 1 所示,在非自由跟驰过程中,车辆  $n$  主要受到驾驶人为抵达目的地或满足驾驶需求产生的驱动力  $F_n$  及前车  $n+1$  产生的约束力  $P_{n+1}$  的影响。以此为基础建立的车辆跟驰模型更适用于通信手段不足

的人工驾驶车辆(Human-driven Vehicle, HV)。

如图 2 所示,与 HV 相比,CAV 相同点在于网联车辆  $n$  跟随前车行驶时,主要受到相邻前车  $n+1$  的影响,但通过车车通信技术可以获取一定范围内多个车辆的运动状态信息,为考虑多车反馈建立跟驰模型奠定了基础。

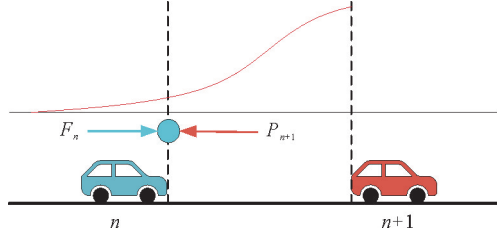


图 1 跟驰车辆受力分析

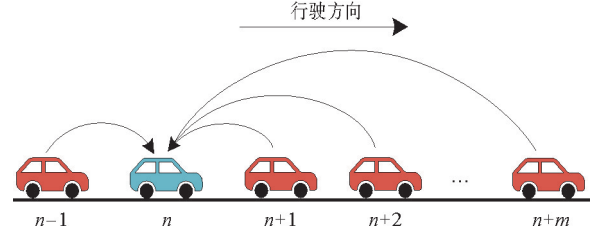


图 2 多车反馈的 CAV 跟驰关系示意

## 2.2 CAV 跟驰行为建模

JIANG 等<sup>[5]</sup>考虑车辆间的速度差,修正前后车间距,建立 FVD 模型:

$$a_n(t) = \alpha(V(\Delta x_n(t)) - v_n(t)) + \delta \Delta v_n(t) \quad (6)$$

式中: $a_n(t)$ 为  $t$  时刻车辆  $n$  的加速度; $\alpha$  为最优速度敏感系数; $V$  为优化速度函数; $\Delta x_n(t)$  为  $t$  时刻车辆  $n$  与相邻前车的距离; $v_n(t)$  为车辆  $n$  在  $t$  时刻的速度; $\Delta v_n(t)$  为  $t$  时刻车辆  $n$  与相邻前车的速度差; $\delta$  为速度差敏感系数。

采用文献[18]中跟驰车辆对前后车的优化速度函数:

$$\begin{cases} V_{n+1}(\Delta x_{n+1}(t)) = \alpha_1 \cdot (\tanh(\Delta x_{n+1}(t) - d_0) + \tanh d_0) \\ V_{n-1}(\Delta x_{n-1}(t)) = -\alpha_2 \cdot (\tanh(\Delta x_{n-1}(t) - d_0) + \tanh d_0) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\Delta x_{n+1}$  为相邻前车  $n+1$  与车辆  $n$  之间的距离; $\Delta x_{n-1}$  为相邻后车  $n-1$  与车辆  $n$  之间的距离; $d_0$  为车辆跟驰安全距离; $\alpha_1$  为跟驰车辆对前车的最佳速度敏感系数; $\alpha_2$  为跟驰车辆对后车的最佳速度敏感系数。

以 FVD 模型为基础,综合考虑 CAV 通信范围内多车运动状态对跟驰车辆的影响,根据交互车辆对跟驰车辆造成的势场强度的差异性,对 FVD 模型进行改进,建立符合 CAV 网联特性的跟驰模型。

当车辆  $n$  处于非自由跟驰状态时,运动状态受前后方交互车辆的影响,由式(1)建立的车辆势场函数可知前车  $j$  ( $j \in [n+1, n+m]$ ) 与后车  $n-1$  对车辆  $n$  造成的势场强度分别为

$$U_j = \frac{M_j \cdot c \cdot e^{[(\tau+g) \cdot v_j - \epsilon \cdot a_j]}}{\beta_1 \cdot L_{j-n}} \quad (8)$$

$$U_{n-1} = \frac{M_{n-1} \cdot c \cdot e^{[(\tau+g) \cdot v_{n-1} + \epsilon \cdot a_{n-1}]}{\beta_1 \cdot L_{j-n}} \quad (9)$$

式中: $U_j$  为前车对车辆  $n$  形成的势场强度; $U_{n-1}$  为后车  $n-1$  对车辆  $n$  形成的势场强度; $L_{j-n}$  为前车  $j$  到车辆  $n$  的实际距离; $g$  为重力加速度常数。

CAV 跟驰过程中受通信范围内多辆前车影响,前车位置不同,对目标车辆的影响程度也不同。CAV 组成的交通流,当前方车辆造成扰动时,由于 CAV 的车车通信功能,通信范围内的后方 CAV 会在下一时刻同时做出响应,有效降低扰动对后方车辆的影响。

车辆行驶过程中彼此间的位置和速度存在差异,因此,综合考虑前方车辆的运动状态信息,基于前方车辆对跟驰车辆形成的势场强度建立影响系数,表示不同位置的车辆对跟驰车辆的影响程度。

$$\eta_j = \frac{U_j}{\sum_{j=n+1}^{n+m} U_j} \quad (10)$$

式中: $\eta_j$  为前方车辆  $j$  对跟驰车的影响系数; $\sum_{j=n+1}^{n+m} U_j$  为前方  $m$  辆车对跟驰车辆  $n$  形成的总势场强度。

考虑前后车头间距的最优速度记忆项,可获得驾驶人为达到最优速度产生的加速度,进而提高车流稳定性<sup>[19]</sup>。

$$a_1 = \gamma [P \cdot \lambda \cdot V'_{n+1}(\Delta x_{n+1}(t)) \cdot \Delta v_{n+1} + (1-P) \cdot \lambda \cdot V'_{n-1}(\Delta x_{n-1}(t)) \cdot \Delta v_{n-1}] \quad (11)$$

式中: $a_1$ 为最优速度记忆项产生的加速度; $\gamma$ 为最优速度记忆项影响系数; $P$ 为相邻前车优化速度函数对跟驰车辆的影响权重; $\lambda$ 为记忆时间步长; $\Delta x_{n+1}(t)$ 为前车 $n+1$ 与跟驰车辆 $n$ 车头之间的距离; $V'_{n+1}(\Delta x_{n+1}(t))$ 为前车 $n+1$ 最优速度产生的加速度; $\Delta x_{n-1}(t)$ 为后车 $n-1$ 与跟驰车辆 $n$ 车头之间的距离; $V'_{n-1}(\Delta x_{n-1}(t))$ 为后车 $n-1$ 最优速度产生的加速度; $\Delta v_{n-1}$ 为后车 $n-1$ 与车辆 $n$ 的速度差; $\Delta v_{n+1}$ 为相邻前车 $n+1$ 与车辆 $n$ 的速度差。

CAV跟驰模型表达式为

$$a_n(t) = \alpha [P \cdot V_{n+1}(\Delta x_{n+1}(t)) + (1-P) \cdot V_{n-1}(\Delta x_{n-1}(t)) - v_n(t)] + \delta \cdot \left[ \sum_{j=n+1}^{n+m} (\zeta \cdot \eta_j \cdot \Delta v_j) + (1-\zeta) \cdot \Delta v_{n-1} \right] + \gamma \cdot [P \cdot \lambda \cdot V'_{n+1}(\Delta x_{n+1}(t)) \cdot \Delta v_{n+1} + (1-P) \cdot \lambda \cdot V'_{n-1}(\Delta x_{n-1}(t)) \cdot \Delta v_{n-1}] \quad (12)$$

式中: $a_n(t)$ 为跟驰车辆 $n$ 在 $t$ 时刻的加速度; $V_{n+1}(\Delta x_{n+1}(t))$ 为前车的速度函数; $\zeta$ 为前方车辆 $j$ 与车辆 $n$ 之间的速度差对车辆 $n$ 的影响权重; $\Delta v_j$ 为前方车辆 $j$ 与跟驰车辆 $n$ 的速度差。

### 2.3 CAV跟驰模型稳定性分析

为验证CAV跟驰模型的稳定性,添加扰动后进行稳定性分析。假设在稳态交通流中相邻车辆间的安全距离为 $d_0$ ,车速为 $v_0$ ,则交通流中车辆所处的位置为

$$S_n^0(t) = (n-1) \cdot d_0 + v_0 \cdot t \quad (13)$$

式中: $S_n^0(t)$ 为 $t$ 时刻车辆 $n$ 所在的初始位置; $n$ 为车辆数量, $n \in \mathbf{N}$ 。

在稳态交通流中添加扰动 $y_n(t) = e^{ikn+zt}$ ,扰动后车辆所在位置为

$$S_n^1(t) = y_n(t) + S_n^0(t) \quad (14)$$

式中: $S_n^1(t)$ 为扰动后车辆所在的位置; $y_n(t)$ 为车辆 $n$ 在时间 $t$ 的扰动位置; $i$ 是虚数单位; $k$ 为波数,表示扰动在空间中的频率; $z$ 为复数频率。

扰动后车间距离为

$$d_1 = d_0 + \Delta y_n(t) \quad (15)$$

式中: $\Delta y_n(t)$ 为扰动位置变化的差值。

将式(15)代入优化速度函数,得

$$V(\Delta x_n(t)) = V(d_0 + \Delta y_n(t)) = V(d_0) + V'(d_0) \cdot \Delta y_n(t) \quad (16)$$

式(14)两侧对 $t$ 进行求一阶导和二阶导,得到扰动后的速度和加速度:

$$\frac{d(S_n^1(t))}{dt} = v_1(t) = y'_n(t) + v_0 \quad (17)$$

$$\frac{dv_1(t)}{dt} = a_1(t) = y''_n(t) \quad (18)$$

将式(17)、式(18)代入CAV跟驰模型式(12),得

$$y''_n(t) = \alpha \cdot [P \cdot V'_{n+1}(d_0) \cdot \Delta y_{n+1}(t) + (1-P) \cdot V'_{n-1}(d_0) \cdot \Delta y_{n-1}(t) - y'_n(t)] + \delta \cdot \left[ \sum_{j=n+1}^{n+m} (\zeta \cdot \eta_j \cdot \Delta y'_j(t)) + (1-\zeta) \cdot \Delta y'_{n-1}(t) \right] + \gamma \cdot [P \cdot \lambda \cdot V'_{n+1}(d_0) \cdot \Delta y'_{n+1}(t) + (1-P) \cdot \lambda \cdot V'_{n-1}(d_0) \cdot \Delta y'_{n-1}(t)] \quad (19)$$

对 $y_n(t)$ 进行简化,令 $y_n(t) = e^{ikn+zt} = e^\eta$ ,得

$$\begin{cases} y'_n(t) = z \cdot e^\eta \\ y''_n(t) = z^2 \cdot e^\eta \\ \Delta y_n(t) = e^\eta \cdot (e^{ik} - 1) \\ \Delta y'_n(t) = z \cdot e^\eta \cdot (e^{ik} - 1) \end{cases} \quad (20)$$

将式(20)代入式(19)得

$$z^2 \cdot e^\gamma = \alpha \cdot \{P \cdot V'_{n+1}(d_0) \cdot [e^\gamma \cdot (e^{ik} - 1)] + (1-P) \cdot V'_{n-1}(d_0) \cdot [e^\gamma \cdot (1 - e^{-ik})] - z \cdot e^\gamma\} + \delta \cdot \left\{ \sum_{j=n+1}^{n+m} [\zeta \cdot \eta_j \cdot z \cdot e^\gamma \cdot (e^{ik} - 1)] + (1-\zeta) \cdot z \cdot e^\gamma \cdot (1 - e^{-ik}) \right\} + \gamma \cdot [P \cdot \lambda \cdot V'_{n+1}(d_0) \cdot z \cdot e^\gamma \cdot (e^{ik} - 1) + (1-P) \cdot \lambda \cdot V'_{n-1}(d_0) \cdot z \cdot e^\gamma \cdot (1 - e^{-ik})] \quad (21)$$

将  $e^{ik}$  和  $z$  进行泰勒展开,  $e^{ik} = 1 + ik + \frac{(ik)^2}{2}$ ,  $z = z_1(ik) + z_2(ik)^2$ , 其中,  $z_1, z_2$  为复数频率特征方程的系数, 代入式(21)可得  $z_1, z_2$  的表达式

$$\begin{aligned} [z_1(ik) + z_2(ik)^2]^2 = & \alpha \cdot \left\{ P \cdot V'_{n+1}(d_0) \cdot \left[ ik + \frac{(ik)^2}{2} \right] + (1-P) \cdot V'_{n-1}(d_0) \cdot \left[ ik - \frac{(ik)^2}{2} \right] \right\} - \\ & \alpha \cdot [-z_1(ik) - z_2(ik)^2] + \delta \cdot \sum_{j=n+1}^{n+m} \left\{ \zeta \cdot \eta_j \cdot [z_1(ik) + z_2(ik)^2] \cdot \left[ ik + \frac{(ik)^2}{2} \right] \right\} + \\ & \delta(1-\zeta) \cdot [z_1(ik) + z_2(ik)^2] \cdot \left[ ik - \frac{(ik)^2}{2} \right] + \gamma \cdot P \cdot \lambda \cdot V'_{n+1}(d_0) \cdot \\ & [z_1(ik) + z_2(ik)^2] \cdot \left[ ik + \frac{(ik)^2}{2} \right] + \gamma(1-P) \cdot \lambda \cdot V'_{n-1}(d_0) \cdot \\ & [z_1(ik) + z_2(ik)^2] \cdot \left[ ik - \frac{(ik)^2}{2} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

根据对应系数相等, 得

$$z_1 = P \cdot V'_{n+1}(d_0) + (1-P) \cdot V'_{n-1}(d_0) \quad (23)$$

$$\begin{aligned} z_2 = & \frac{1}{2} [P \cdot V'_{n+1}(d_0) - (1-P) \cdot V'_{n-1}(d_0)] - \\ & \frac{z_1^2}{\alpha} + \frac{\delta \cdot \sum_{j=n+1}^{n+m} (\zeta \cdot \eta_j \cdot z_1) + \delta \cdot (1-\zeta) \cdot z_1}{\alpha} + \\ & \frac{\gamma \cdot P \cdot \lambda \cdot V'_{n+1}(d_0) \cdot z_1 + \gamma \cdot (1-P) \cdot \lambda \cdot V'_{n-1}(d_0) \cdot z_1}{\alpha} \end{aligned} \quad (24)$$

当跟驰模型满足  $z_2 > 0$  时, 处于稳定状态, 因此, 模型的稳定性条件为

$$\alpha > \frac{2 \cdot (1-\gamma \cdot \lambda) \cdot z_1^2 - 2\delta \cdot z_1 \cdot \left[ \sum_{j=n+1}^{n+m} \zeta \cdot \eta_j + (1-\zeta) \right]}{P \cdot V'_{n+1}(d_0) - (1-P) \cdot V'_{n-1}(d_0)} \quad (25)$$

### 3 数值模拟分析

将建立的 CAV 跟驰模型与 FVD 模型对比可知, 当式(25)中的参数  $P=1, m=1, \zeta=1, \gamma=0$  时, 可得 FVD 模型的稳定性条件:

$$\alpha > \frac{2z_1^2 - 2\delta \cdot z_1}{V'_{n+1}(d_0)} \quad (26)$$

$$z_1 = V'_{n+1}(d_0) \quad (27)$$

运用 MATLAB 软件 R2018b 版本对模型进行数值模拟分析, 根据相关计算与测试, 令安全距离  $d_0=4$  m,  $P=0.9$ , 其余相关参数取值如表 1 所示。为便于计算分析, 以 CAV 可通信前车数量  $m=5$  为例, 改变某一参数, 其他参数不变且取值如表 1 所示, 获得各参数对模型稳定性的影响, 如图 3 所示, 其中曲线外部为稳定区域, 内部为不稳定区域。

表 1 相关参数取值

参数	$\delta$	$\zeta$	$\gamma$	$\lambda$
取值	0.2	0.9	0.2	0.2

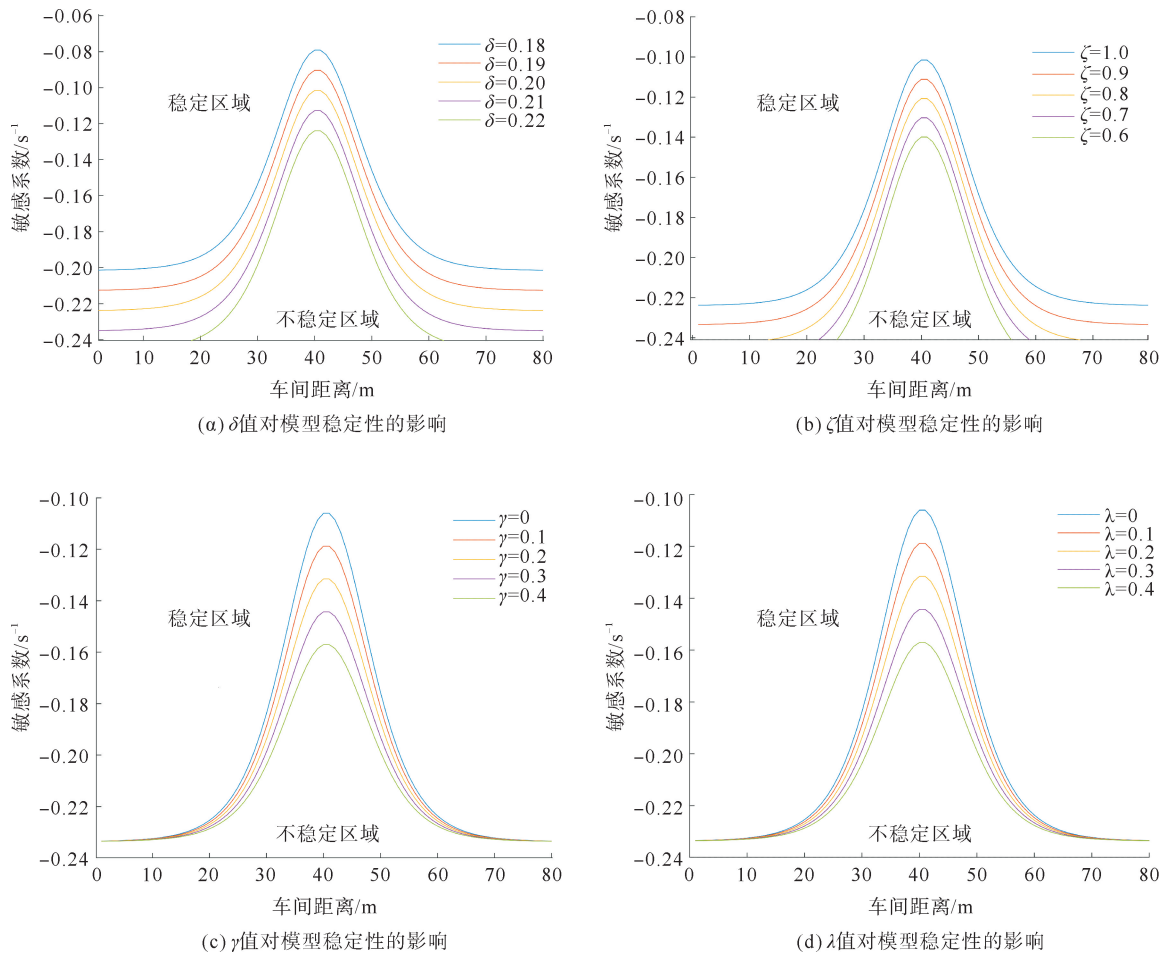


图3 相关参数取值对模型稳定性的影响

图3(a)为速度差敏感系数影响参数 $\delta$ 对模型稳定性的影响,由图可知, $\delta$ 取值的增减对模型稳定性影响较大,在一定范围内增加 $\delta$ 值,可以增大稳定区域,提高交通流的抗干扰能力。

图3(b)为前后车速度差影响权重 $\zeta$ 对模型稳定性的影响,由CAV跟驰模型式(12)可知,当 $\zeta=1$ 时,不考虑跟驰车辆与后车速度差的影响,此时模型的稳定区域最小;当 $\zeta$ 在一定范围内增大时,模型稳定区域增大,抗干扰能力增强,因此,考虑跟驰车辆与其后车的速度差,有助于提高模型稳定性。

图3(c)和(d)分别为最优速度记忆项影响系数 $\gamma$ 和记忆时间步长 $\lambda$ 对模型稳定性的影响示意,由图可知,模型的稳定区域与 $\gamma$ 、 $\lambda$ 的取值成正比。当 $\gamma=0$ ,即不考虑速度记忆项时,模型的稳定区域最小;当 $\gamma$ 、 $\lambda$ 值在一定范围内增大时,模型的稳定区域扩大。

根据建立的CAV跟驰模型和FVD模型稳定性条件(式(25)、式(26)),取 $\delta=0.09$ ,其他参数取值如表1所示,得到模型的稳定性曲线,如图4所示。

由图4可知,在各参数相同的情况下,CAV跟驰模型的稳定区域大于FVD模型,其抗干扰能力更强。在不考虑后车对主体车辆的影响,即模型参数 $P=\zeta=1$ 时,CAV跟驰模型稳定区域明显减小,说明考虑主体车后车的影响,可以增加模型稳定性,提高抗干扰能力。

图5为可通信前车数量 $m$ 对模型稳定性的影响,由图可知,稳定区域大小与 $m$ 值呈正相关。CAV在网联环境下可通信的车辆越多,稳态交通流的抗干扰能力越强。

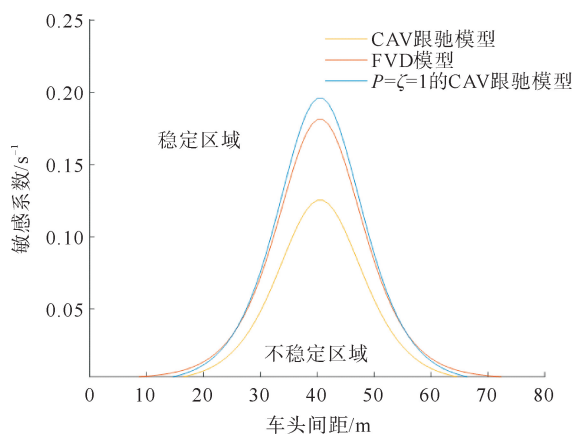


图 4 模型稳定性对比

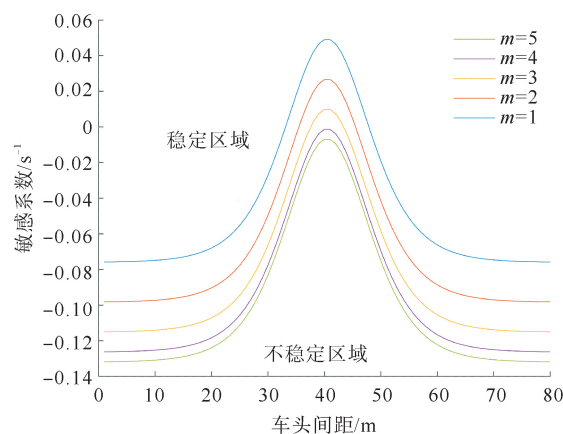


图 5 前车数量对模型稳定性的影响

## 4 结论

1) 引入场论思想,将车辆交互行为类比为核子间的短程相互作用力,考虑距离、速度等因素建立行车风险场,根据对主体车造成的势场强度,反映不同车辆对主体车驾驶的影响程度。

2) 在 FVD 模型的基础上,根据势场强度的差异性,建立影响权重系数。依据 CAV 网联特性,考虑多前车及后车运动状态对主体车辆跟驰行为的影响,建立考虑多车反馈的 CAV 跟驰模型并进行稳定性分析。

3) 对建立的 CAV 跟驰模型进行分析验证,结果显示,在相同条件下,与 FVD 模型相比,CAV 跟驰模型具有较高的抗干扰能力,考虑多前车及后车运动状态,调整各因素的影响权重可以有效提高交通流的稳定性。交通流稳定性强弱与通信车辆数量以及模型中各影响因素的权重配比相关,在一定范围内可通信的车辆数量越多,交通流的稳定性越高。

## 参考文献(References):

- [1] 秦严严,杨金滢,李淑庆.考虑可变车头时距的智能网联车跟驰模型[J].江苏大学学报(自然科学版),2022,43(4):381-385.  
QIN Yanyan, YANG Jinying, LI Shuqing. Car-following model of intelligent and connected vehicle considering variable headway[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2022, 43(4): 381-385.
- [2] 李林恒,甘婧,曲栩,等.智能网联环境下基于安全势场理论的车辆跟驰模型[J].中国公路学报,2019,32(12):76-87.  
LI Linheng, GAN Jing, QU Xu, et al. Car-following model based on safety potential field theory under connected and automated vehicle environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(12): 76-87.
- [3] RAJAMANI R, SHLADOVER S E. An experimental comparative study of autonomous and co-operative vehicle-follower control systems[J]. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, 2001, 9(1): 15-31.
- [4] VAN NUNEN E, KWAKKERNAAAT M R J A E, PLOEG J, et al. Cooperative competition for future mobility[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(3): 1018-1025.
- [5] JIANG R, WU Q S, ZHU Z J. Full velocity difference model for a car-following theory[J]. Physical Review E, 2001, 64(1): 17101-17105.
- [6] 宗芳,王猛,曾梦,等.考虑多前车作用势的混行交通流车辆跟驰模型[J].交通运输工程学报,2022,22(1):250-262.  
ZONG Fang, WANG Meng, ZENG Meng, et al. Vehicle-following model in mixed traffic flow considering interaction potential of multiple front vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(1): 250-262.
- [7] 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.
- [8] 秦严严,王昊,冉斌.考虑多前车反馈的智能网联车辆跟驰模型[J].交通运输系统工程与信息,2018,18(3):48-54.  
QIN Yanyan, WANG Hao, RAN Bin. Car-following model of connected and autonomous vehicles considering multiple feedbacks[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(3): 48-54.
- [9] 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.  
WU Bing, WANG Wenxuan, LI Linbo, et al. Longitudinal control model for connected autonomous vehicles influenced by multiple pre-

- ceding vehicles[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*,2020,20(2):184-194.
- [10] KATHIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1986,5(1):90-98.
- [11] GAO K, YAN D, YANG F, et al. Conditional artificial potential field-based autonomous vehicle safety control with interference of lane changing in mixed traffic scenario[J]. *Sensors*,2019,19(19):4199-4212.
- [12] 贾彦峰,曲大义,赵梓旭,等. 基于安全势场的网联自主车辆跟驰行为决策及模型[J]. *交通运输系统工程与信息*,2022,22(1):85-97.  
JIA Yanfeng, QU Dayi, ZHAO Zixu, et al. Car-following decision-making and model for connected and autonomous vehicles based on safety potential field[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*,2022,22(1):85-97.
- [13] 李林恒,甘婧,曲棚,等. 智能网联环境下基于安全势场理论的车辆跟驰模型[J]. *中国公路学报*,2019,32(12):76-87.  
LI Linheng, GAN Jing, QU Xu, et al. Car-following model based on safety potential field theory under connected and automated vehicle environment[J]. *China Journal of Highway and Transport*,2019,32(12):76-87.
- [14] WANG J Q, WU J, ZHENG X J, et al. Driving safety field theory modeling and its application in pre-collision warning system[J]. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*,2016,72:306-324.
- [15] KO C, HAN S, CHOI M, et al. Integrated path planning and tracking control of autonomous vehicle for collision avoidance based on model predictive control and potential field[C]// 2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). Busan,2020:956-961.
- [16] 谢楚安,任羿,杨德真,等. 面向无人驾驶车辆的行车安全场模型构建方法[J]. *北京航空航天大学学报*,2024,50(4):1375-1383.  
XIE Chu'an, REN Yi, YANG Dezhen, et al. Construction method of driving safety field model for unmanned vehicles[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*,2024,50(4):1375-1383.
- [17] 邵德栋,曲大义,陈意成,等. 基于驾驶风险场的网联自主车辆跟驰行为建模[J]. *青岛理工大学学报*,2025,46(1):123-131.  
SHAO Dedong, QU Dayi, CHEN Yicheng, et al. Following behavior modeling of connected autonomous vehicles based on driving risk field[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*,2025,46(1):123-131.
- [18] 李腾龙,惠飞. 考虑后视和最优速度记忆的跟驰模型及仿真[J]. *计算机工程与应用*,2017,53(12):249-254.  
LI Tenglong, HUI Fei. Numerical simulation of car-following model considering optimal velocity changes with memory and backward looking effect[J]. *Computer Engineering and Applications*,2017,53(12):249-254.
- [19] 宋慧,曲大义,王少杰,等. 考虑多车响应的网联混行车流跟驰模型及稳态分析[J]. *吉林大学学报(工学版)*,2024,54(11):3220-3230.  
SONG Hui, QU Dayi, WANG Shaojie, et al. Connected mixed traffic flow car-following model and stability analysis considering multiple vehicles response[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*,2024,54(11):3220-3230.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)

## (上接第 104 页)

- [10] 钱倍奇,陈谦,李宗源,等. 基于马尔可夫转换场与多头注意力机制的电能质量扰动分类方法[J]. *电网技术*,2024,48(2):721-733.  
QIAN Beiqi, CHEN Qian, LI Zongyuan, et al. Power quality disturbances classification based on Markov transition field and multi-head attention[J]. *Power System Technology*,2024,48(2):721-733.
- [11] 赵兵,王增平,纪维佳,等. 基于注意力机制的 CNN-GRU 短期电力负荷预测方法[J]. *电网技术*,2019,43(12):4370-4376.  
ZHAO Bing, WANG Zengping, JI Weijia, et al. A short-term power load forecasting method based on attention mechanism of CNN-GRU[J]. *Power System Technology*,2019,43(12):4370-4376.
- [12] 肖宏峰,罗日成,黄军,等. 基于多重雷击的超高压输电线路雷过电压分析[J]. *高压电器*,2022,58(8):245-251.  
XIAO Hongfeng, LUO Richeng, HUANG Jun, et al. Lightning overvoltage analysis of EHV transmission lines based on multiple lightning strikes[J]. *High Voltage Apparatus*,2022,58(8):245-251.
- [13] 李晓刚. 输电线路雷击过电压种类的识别研究[D]. 上海:上海交通大学,2015.  
LI Xiaogang. Study on the identification of lightning over-voltage of transmission line[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [14] ASMAN S H, ABIDIN A F, YUSOH M A T M, et al. Identification of transient overvoltage using discrete wavelet transform with minimised border distortion effect and support vector machine[J]. *Results in Engineering*,2022,13:100311.
- [15] 王坤,李昕光,詹郡,等. 改进麻雀搜索算法优化 BP 神经网络的短时交通流预测[J]. *青岛理工大学学报*,2024,45(1):126-133.  
WANG Shen, LI Xinguang, ZHAN Jun, et al. The improvement of sparrow search algorithm and the optimization of BP neural network for short term traffic flow prediction[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*,2024,45(1):126-133.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)