

# 控制与决策

Control and Decision

## 多切入机制下基于信息物理系统的混合车群协同控制

黄帅, 孙棣华, 赵敏

引用本文:

黄帅,孙棣华,赵敏. 多切入机制下基于信息物理系统的混合车群协同控制[J]. *控制与决策*, 2024, 39(1): 17–25.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.2023>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [空间机器人双臂捕获卫星操作的事件采样输出反馈神经网络避撞柔顺控制](#)

Collision avoidance and compliance control based on event sampling output feedback neural network for space robot dual arm capture satellite operation

*控制与决策*. 2021, 36(9): 2113–2122 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1754>

#### [通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制](#)

Cooperative adaptive cruise control of connected vehicles under communication interruption

*控制与决策*. 2021, 36(4): 933–939 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0837>

#### [通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制](#)

Cooperative adaptive cruise control of connected vehicles under communication interruption

*控制与决策*. 2021, 36(4): 933–939 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0837>

#### [带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制](#)

Prescribed performance adaptive control of flexible-joint manipulators with output constraints

*控制与决策*. 2021, 36(2): 387–394 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0974>

#### [有向切换拓扑条件下多航天器分组姿态协同控制](#)

Group attitude coordinated control of multi-spacecraft with directed switching topologies

*控制与决策*. 2021, 36(10): 2389–2398 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0311>

# 多切入机制下基于信息物理系统的混合车群协同控制

黄 帅<sup>1,2</sup>, 孙隽华<sup>1,2†</sup>, 赵 敏<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400030; 2. 重庆大学 信息物理  
社会可信服务计算教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:** 传统人驾车(HVs)为了能够快速行驶到目标车道,常常会向目标车道进行强制换道,这一过程被视为传统人驾车的切入机制.然而,该过程会影响目标车道中由传统人驾车和网联自动车(CAVs)组成的混合车群稳定性.当一个车道上由多个传统人驾车组成的车群同时切入到目标车道上的混合车群中时会对混合车群的稳定性影响较大.针对这一问题,首先对车辆动力学模型进行刻画,以描述车辆行驶的平稳性和混合车群的稳定性.然后,为了确保由多个传统人驾车组成的车群同时切入到混合车群时的稳定性,从信息物理系统(CPS)的视角出发,并基于一致性约束和通信拓扑结构,提出一种考虑通信时延和反应时延的混合车群协同控制方法;同时,利用 Lyapunov-Krasovskii 理论进一步分析所提出控制方法满足的稳定性条件.最后,通过仿真实验结果表明了所提出控制方法的有效性和可行性.

**关键词:** 混合交通; 信息物理系统; 混合车群; 切入机制; 协同控制; 李雅普诺夫理论

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.2023

引用格式: 黄帅,孙隽华,赵敏.多切入机制下基于信息物理系统的混合车群协同控制[J].控制与决策,2024,39(1): 17-25.

## CPS-based mixed vehicle group cooperative control with multiple cut-in maneuvers

HUANG Shuai<sup>1,2</sup>, SUN Di-hua<sup>1,2†</sup>, ZHAO Min<sup>1,2</sup>

(1. School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Key Laboratory of Dependable Service Computing in Cyber Physical Society of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** In order to quickly drive to the target lane, traditional human-driving vehicles (HVs) often forcibly change to the target lane, which is deemed as traditional human-driving vehicles cut-in maneuvers. However, this process will affect the stability of a mixed vehicle group composed of traditional human-driving vehicles and connected automated vehicles (CAVs) in the target lane. When a vehicle group consisting of multiple traditional human-driving in a lane cut-ins to the mixed vehicle group in the target lane, it will have greater impact on the stability of the mixed vehicle group. In response to this concern, the paper first characterizes the vehicle dynamics model to describe the smoothness of vehicle driving and the stability of the mixed vehicle group. Then, to guarantee the stability of a vehicle group composed of multiple traditional human-driving vehicles cut-ins to a mixed vehicle group, this paper proposed a mixed vehicle group cooperative control method via considering communication delay and reaction delay based on consensus constraints and communication topologies from the perspective of cyber-physical systems (CPS). Simultaneously, the Lyapunov-Krasovskii theory is used to further analyze the stability conditions of the proposed control method. Finally, the results from the simulation experiments show the effectiveness and feasibility of the proposed control method.

**Keywords:** mixed traffic; cyber-physical system; mixed vehicle group; cut-in maneuvers; cooperative control; Lyapunov theory

## 0 引言

近年来,随着通信技术和自动驾驶技术逐渐渗透

到交通中,网联自动车也开始逐渐上路<sup>[1]</sup>.此外,由于网联自动车能够提供更快的响应时间和更短的车头

收稿日期: 2022-11-22; 录用日期: 2023-04-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62073049); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2022CDJDX-003); 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0099).

责任编辑: 郭戈.

†通讯作者. E-mail: d3sun@163.com.

时距,提高了交通安全和交通效率,因此受到了研究者的广泛关注<sup>[2]</sup>.然而,由于网联自动驾驶技术还不太成熟,且受经济限制,它还不能完全取代传统人驾车,因此未来的交通将是由传统人驾车与网联自动驾驶混合,被称为混合交通<sup>[3-4]</sup>.在该场景下,根据时间的变化或车辆间距的尺度,在动态演化过程中会自动形成由网联自动驾驶和传统人驾车组成的混合车群<sup>[5-6]</sup>,这可以为解决交通问题(如交通拥堵、交通安全)带来新的解决方案.

针对交通问题,研究者们也开展了大量的相关研究.例如,Guo等针对执行器故障的车队容错控制问题,提出了基于改进二次间距策略的车队自适应容错控制方案<sup>[7]</sup>和一种基于非线性车辆动力学和二次间距策略的自适应容错控制方法<sup>[8]</sup>,这些方法不仅能够确保车队的串稳定性,同时可以减小执行器故障的影响.同时,Guo等针对车队速度跟踪控制问题,提出了基于庞特里亚金最小值原理的车队速度跟踪滑模控制算法<sup>[9]</sup>和一种车队分层速度跟踪控制方案<sup>[10]</sup>.然而,针对上述研究仅仅考虑了同质交通的情况,对于传统人驾车与网联自动驾驶混合的情况没有深入分析,导致这些方法在混合交通中很可能不适用.另外,Guo等针对车群的轨迹优化与控制问题,提出了一种基于二次型间距策略的分布式最优队列控制框架<sup>[11]</sup>和一种分布式轨迹优化与固定时间跟踪控制的两层框架<sup>[12]</sup>,结果表明所提出的控制框架能够减少间距误差,同时能够确保车队的串稳定性.然而,针对这些研究,没有考虑网联自动驾驶之间的通信时延对车队稳定性的影响.随后,Wen等<sup>[13]</sup>针对车队中的网联自动驾驶的通信时延问题,提出了一种基于跟踪误差的采样数据队列控制方法,该方法可以保证在给定的扰动衰减水平下跟踪误差稳定在均方指数级.然而,这一研究只考虑了网联自动驾驶的通信时延,未深入分析网联自动驾驶之间会随机混入传统人驾车时驾驶员的反应时延.

随着混合交通的出现也会不断涌现出一些新的交通问题.一方面,由于传统人驾车和网联自动驾驶的模式、决策和控制完全不同,它们的驾驶行为差异很大,这更容易造成交通堵塞.另一方面,由于传统人驾车和网联自动驾驶之间信息不对称和智能水平的不平衡性,两者之间信息传递和交互更加复杂.此外,混合交通也会带来新的交通问题,如异质车辆间行驶的稳定性和一致性问题、异质车辆的组群与分群问题、异质车辆的切入与切出对混合车群的影响等.

针对上述问题,本文主要关注由多个传统人驾车

组成的车群同时切入到目标车道的混合车群中对混合车群的稳定性影响.目前,已有一些学者对车辆的切入机制进行了一些研究.例如,文献[14]提出了一种换道分类方法来检测高速公路上车辆的切入行为.文献[15]使用双向领航跟随(bidirectional-leader following, BDLF)通信拓扑结构分析车辆切入行为时的群体形成.文献[16]分析了切入机制对周围驾驶员舒适度的影响.文献[17]针对具有切入机制的车队提出了一种分布式非线性模型预测控制(model predictive control, MPC)算法,该算法能够保持期望的车间距并跟踪期望的速度.然而,对于上述研究,一方面,大多数研究只分析了一辆车切入对同质车辆或同质车群的影响,没有深入讨论混合交通的情况;另一方面,这些研究只考虑了一辆车切入对周围车辆的影响,并没有从信息物理系统的角度研究多辆车同时切入对混合车群的影响.

根据上述分析,本文以网联自动驾驶和传统人驾车组成的混合交通场景为研究对象,在该场景下研究一个车道上由多辆传统人驾车组成的车群切入到目标车道上混合车群时的稳定性.在此基础上,从CPS的视角出发,基于一致性约束和通信拓扑结构,提出了一种考虑通信时延和反应时延的混合车群协同控制方法,以保证由多个传统人驾车组成的车群同时切入到混合车群时的稳定性,并通过仿真实验验证所提出控制方法的有效性和可行性.

## 1 问题描述及车辆动力学模型

本文主要研究当一个车道上由多辆传统人驾车组成的车群切入到目标车道上混合车群时,如何保证该混合车群的稳定性.在本节中,首先描述一个双车道混合交通场景,以揭示一个车群中的多辆传统人驾车同时切入到另一个混合车群中.

### 1.1 混合交通场景下多传统人驾车切入机制描述

在本节中,主要考虑一个双车道混合交通场景,其中第2个车道包含 $l$ 辆传统人驾车,第1个车道(目标车道)包含 $m$ 辆传统人驾车、1辆领头网联自动驾驶和 $n$ 辆网联自动驾驶,那么第1个车道上的总车辆数为 $m+n+1=N$ .由于传统人驾车为了能够快速行驶到目标车道,常常会向目标车道进行强制换道,这会影响到目标车道上混合车群的稳定性.为解决上述问题,本文研究一个车道上由多辆传统人驾车组成的车群切入到目标车道上混合车群的稳定性.

在第2个车道上一个车群中的多辆传统人驾车切入到第1个车道上的混合车群中有两个过程.第1

个过程为第2个车道上的一个车群中的多辆传统人驾车开始向第1个车道上切入;第2个过程为第2个车道上一个车群中的多辆传统人驾车完成切入到第1个车道.同时,将第1个车道上的混合车群的头车设置为网联自动驾驶车,以确保其后车能够维持到期望的车间距和速度,其他车辆则随机分布.

此外,网联自动驾驶车可以通过车车通信进行信息交换,利用获取的信息调节其自身状态.同时,网联自动驾驶车可以通过安装的车载传感器(如激光雷达、毫米波雷达)获取其前面相邻传统人驾车信息.传统人驾车可以通过人的感知获得相邻车辆的信息.

## 1.2 车辆动力学模型

车辆动力学模型主要描述车辆行驶的平稳性和混合车群的稳定性,根据牛顿第二定律<sup>[18]</sup>,车辆纵向动力学模型可表示为

$$M_i a_i(t) = F_{T,i}(t) - F_{R,i}(t). \quad (1)$$

其中:  $M_i$  为第  $i$  辆车的质量,  $a_i$  为第  $i$  辆车纵向加速度,  $F_{T,i}$  和  $F_{R,i}$  为施加在第  $i$  辆车上的牵引力和总阻力.

利用牵引力和阻力的定义,式(1)可改写为

$$M_i a_i(t) = \frac{\bar{\omega}_i T_i(t)}{r_i} - \frac{1}{2} C \rho A_i v_i(t)^2 - M_i g f_i \cos \theta - M_i g \sin \theta. \quad (2)$$

其中:  $\bar{\omega}_i$ 、 $T_i(t)$  和  $r_i$  分别表示第  $i$  辆车的传动系统机械效率、制动力矩和轮胎半径;  $C$ 、 $\rho$  和  $A_i$  为第  $i$  辆车的空气阻力系数、空气密度和正面面积;  $g$  为重力加速度;  $f_i$  为第  $i$  辆车阻力系数;  $\theta$  为路面坡度角.

根据控制理论,车辆的位置和速度可以表示为

$$\begin{cases} \dot{p}_i(t) = v_i(t), \\ \dot{v}_i(t) = a_i(t) = \\ \frac{\bar{\omega}_i T_i(t)}{M_i r_i} - \frac{1}{2M_i} C \rho A_i v_i(t)^2 - g f_i \cos \theta - g \sin \theta. \end{cases} \quad (3)$$

其中  $p_i(t)$  和  $v_i(t)$  表示第  $i$  辆车的位置和速度.

根据式(3),第  $i$  辆车的状态空间可表示为

$$\dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + BT_i(t). \quad (4)$$

其中

$$x_i(t) = [p_i(t), v_i(t)]^T, \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \phi \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\bar{\omega}_i}{M_i r_i} \end{bmatrix};$$

$$\phi = -\frac{1}{2M_i} C \rho A_i v_i(t) - \frac{g f_i \cos \theta}{v_i(t)} - \frac{g \sin \theta}{v_i(t)}. \quad (6)$$

## 2 多切入机制下基于CPS的混合车群协同控制策略

在信息物理系统下,为保证在多切入机制下混合车群能够稳定行驶,本节基于一致性约束和通信拓扑结构,提出一种考虑网联自动驾驶车之间通信时延和传统人驾车中驾驶员反应时延的混合车群协同控制方法,如图1所示.

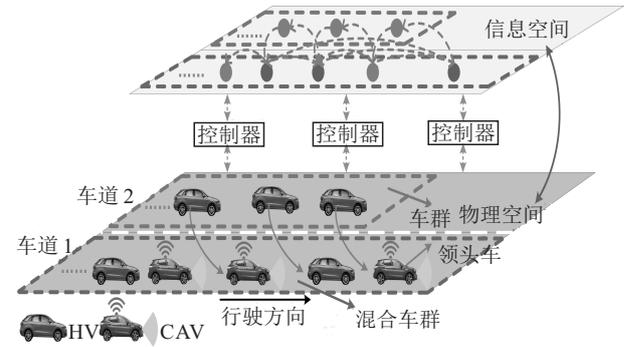


图1 信息物理系统下第2个车道上的车群切入到第1个车道上的混合车群示意图

由图1可以看出:物理空间描述了不同车道上车辆的分布和车群的行驶状态,以及一个群体中的多辆传统人驾车同时切入机制;另外,异质车辆可以将信息空间获取不同车辆信息传输到车辆的控制系统,以控制其自身的行驶状态.信息空间则刻画了将物理空间中的车辆通过车车通信、人的感知和传感器的感知以及车辆之间的通信拓扑映射到信息空间中,以揭示车辆之间的关系和获取信息的方式.所提出控制策略的具体过程如下.

### 2.1 通信拓扑

混合车群的通信拓扑可以用有向图  $G = \{V, E, H\}$  来描述<sup>[9]</sup>.其中:  $V = \{1, 2, \dots, N + l\}$  为车辆节点集合,  $E \subseteq V \times V$  为车辆之间边的集合,  $H = \{h_{ij}\}$  表示节点  $i$  和节点  $j$  之间的通信连接.度矩阵为  $D = \text{diag}\{\text{deg}_1, \text{deg}_2, \dots, \text{deg}_{N+l}\}$ ,这是一个对角矩阵,其

中  $\text{deg}_i = \sum_{j=1}^{N+l} h_{ij}$ .因此,拉普拉斯矩阵为  $L = D - H$ .

引入牵制矩阵  $F = \text{diag}\{f_1, f_2, \dots, f_{N+l}\}$  来描述后面车辆与头车的连接方式,如果边  $\{0, i\} \in E$  有  $f_i = 1$ ,则表示第  $i$  辆车可以与头车通信;否则,  $f_i = 0$ .

### 2.2 网联自动驾驶车控制算法

在混合车群中,第  $j$  辆 CAV 可以通过车车通信获取其他 CAVs 的信息.为了保证混合车群行驶的稳定性,第  $j$  辆网联自动驾驶车的纵向控制器为

$$T_j^{\text{CAV}}(t) =$$

$$M_j^{\text{CAV}} \left( \sum_{l=0, j>l}^n k_p^{\text{CAV}} (p_l^{\text{CAV}}(t) - p_j^{\text{CAV}}(t) - d_{jl, \text{des}}) + \sum_{l=0, j>l}^n k_v^{\text{CAV}} (v_l^{\text{CAV}}(t) - v_j^{\text{CAV}}(t)) \right). \quad (7)$$

其中:  $M_j^{\text{CAV}}$  表示第  $j$  辆网联自动车的质量;  $k_p^{\text{CAV}}$  和  $k_v^{\text{CAV}}$  分别表示第  $j$  辆网联自动车的控制增益;  $p_l^{\text{CAV}}(t)$ 、 $v_l^{\text{CAV}}(t)$ 、 $p_j^{\text{CAV}}(t)$  和  $v_j^{\text{CAV}}(t)$  分别表示第  $l$  辆和第  $j$  辆网联自动车在  $t$  时刻的位置和速度.  $d_{jl, \text{des}} = (j-l)\text{TH} \cdot v_j^{\text{CAV}}(t)$  表示第  $l$  辆网联自动车与第  $j$  辆网联自动车之间的期望车间距, 其中 TH 为车头时距.

由于传统人驾车驾驶的随机性较大, 会对其后车的稳定性产生影响. 为了保证网联自动车能够追踪其前面相邻车辆的速度和车间距, 设计的网联自动车控制器需要考虑前面相邻车辆为传统人驾车的情况. 在这种情况下, 网联自动车可以通过安装的车载传感器获取前面相邻传统人驾车的速度和车间距; 同时, 第  $j$  辆网联自动车可以通过车车通信获取其他网联自动车的状态信息. 因此, 当第  $j$  辆网联自动车前面相邻车辆是传统人驾车时, 第  $j$  辆网联自动车的位置误差和速度误差可表示为

$$\begin{cases} \tilde{p}_j^{\text{CAV}}(t) = p_{j-1}^{\text{HV}}(t) - p_j^{\text{CAV}}(t) - d_{j, \text{des}}^{\text{CAV}}, \\ \tilde{v}_j^{\text{CAV}}(t) = v_{j-1}^{\text{HV}}(t) - v_j^{\text{CAV}}(t); \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \tilde{p}_j^{\text{CAV}}(t) = p_l^{\text{CAV}}(t) - p_j^{\text{CAV}}(t) - d_{jl, \text{des}}^{\text{CAV}}, \\ \tilde{v}_j^{\text{CAV}}(t) = v_l^{\text{CAV}}(t) - v_j^{\text{CAV}}(t). \end{cases} \quad (9)$$

当第  $j$  辆网联自动车前面相邻车辆是网联自动车时, 第  $j$  辆网联自动车的位置误差和速度误差直接退化为式(9). 同时, 式(7)可改写为

$$T_j^{\text{CAV}}(t) = M_j^{\text{CAV}} \sum_{l=0, j>l}^n k^{\text{CAV}} \tilde{x}_j^{\text{CAV}}(t). \quad (10)$$

其中

$$k^{\text{CAV}} = [k_p^{\text{CAV}}, k_v^{\text{CAV}}], \quad \tilde{x}_j^{\text{CAV}}(t) = [\tilde{p}_j^{\text{CAV}}(t), \tilde{v}_j^{\text{CAV}}(t)]^T.$$

然后, 第  $j$  辆网联自动车误差状态方程为

$$\dot{\tilde{x}}_j^{\text{CAV}}(t) = A \tilde{x}_j^{\text{CAV}}(t) + B T_j^{\text{CAV}}(t). \quad (11)$$

由于混合车群包含  $n$  辆网联自动车, 混合车群状态向量可以描述如下:

$$\tilde{x}^{\text{CAV}}(t) = [\tilde{x}_1^{\text{CAV}}(t), \tilde{x}_2^{\text{CAV}}(t), \dots, \tilde{x}_n^{\text{CAV}}(t)]^T. \quad (12)$$

为了描述车辆间信息传递的拓扑结构并考虑通信时延, 混合车群中所有网联自动车的误差状态方程可表示为

$$\dot{\tilde{x}}^{\text{CAV}}(t) = E_{n \times n} \otimes A \tilde{x}^{\text{CAV}}(t) + ((L + F) \otimes$$

$$B k^{\text{CAV}} M^{\text{CAV}}) \tilde{x}^{\text{CAV}}(t - \tau) = E_{n \times n} \otimes A \tilde{x}^{\text{CAV}}(t) + (E_{n \times n} \otimes B K) \tilde{x}^{\text{CAV}}(t - \tau). \quad (13)$$

其中:  $E_{n \times n} = \text{diag}\{a_{00}, a_{11}, \dots, a_{NN}\}$  表示混合车群中网联自动车的相对阶数;  $N$  表示混合车群内车辆的数量;  $L$  和  $F$  表示拉普拉斯矩阵和牵制矩阵;  $K = (L + F) \otimes k^{\text{CAV}} M^{\text{CAV}}$ ,  $M^{\text{CAV}}$  为网联自动车的质量;  $\tau$  表示通信时延.

### 2.3 传统人驾车模型

在实际场景中, 由于同一车道上的传统人驾车仅考虑其前面相邻车辆的速度和位置信息, 为保证混合车群行驶的稳定性的, 基于 Helly 模型<sup>[20]</sup> 给出传统人驾车的跟驰模型

$$T_k^{\text{HV}}(t) = M_k^{\text{HV}} (\beta_p^{\text{HV}} (p_{k-1}^*(t) - p_k^{\text{HV}}(t) - d_{k-1, k, \text{des}}^{\text{HV}}) + \beta_v^{\text{HV}} (v_{k-1}^*(t) - v_k^{\text{HV}}(t))). \quad (14)$$

其中:  $M_k^{\text{HV}}$  表示第  $k$  辆传统人驾车的质量;  $\beta_p^{\text{HV}}$  和  $\beta_v^{\text{HV}}$  分别表示传统人驾车中驾驶员的响应参数;  $p_k^{\text{HV}}(t)$  和  $v_k^{\text{HV}}(t)$  分别表示第  $k$  辆传统人驾车在  $t$  时刻的位置和速度;  $p_{k-1}^*(t)$  和  $v_{k-1}^*(t)$  分别表示第  $k-1$  辆网联自动车或传统人驾车在  $t$  时刻的位置和速度, \* 表示网联自动车或传统人驾车;  $d_{k-1, k, \text{des}}^{\text{HV}}$  表示第  $k$  辆传统人驾车与前面相邻车辆之间的期望车间距.

传统人驾车的位置误差和速度误差可以表示为

$$\begin{cases} \tilde{p}_k^{\text{HV}}(t) = p_{k-1}^*(t) - p_k^{\text{HV}}(t) - d_{\text{des}}^{\text{HV}}, \\ \tilde{v}_k^{\text{HV}}(t) = v_{k-1}^*(t) - v_k^{\text{HV}}(t). \end{cases} \quad (15)$$

然后, 式(14)可重新写为

$$T_k^{\text{HV}}(t) = M_k^{\text{HV}} \beta^{\text{HV}} \tilde{x}_k^{\text{HV}}(t). \quad (16)$$

其中:  $\beta^{\text{HV}} = [\beta_p^{\text{HV}}, \beta_v^{\text{HV}}]$ ,  $\tilde{x}_k^{\text{HV}}(t) = [\tilde{p}_k^{\text{HV}}(t), \tilde{v}_k^{\text{HV}}(t)]^T$ . 第  $k$  辆传统人驾车的误差状态方程为

$$\dot{\tilde{x}}_k^{\text{HV}}(t) = A \tilde{x}_k^{\text{HV}}(t) + B T_k^{\text{HV}}(t), \quad (17)$$

其中  $\tilde{x}_k^{\text{HV}}(t) = [\tilde{p}_k^{\text{HV}}(t), \tilde{v}_k^{\text{HV}}(t)]^T$ . 一个混合车群包含  $m$  辆传统人驾车, 状态向量可表示为

$$\tilde{x}^{\text{HV}}(t) = [\tilde{x}_1^{\text{HV}}(t), \tilde{x}_2^{\text{HV}}(t), \dots, \tilde{x}_m^{\text{HV}}(t)]^T. \quad (18)$$

考虑传统人驾车中驾驶员的反应时延, 所有传统人驾车的误差状态方程可写为

$$\dot{\tilde{x}}^{\text{HV}}(t) = E_{m \times m} \otimes A \tilde{x}^{\text{HV}}(t) + (E_{m \times m} \otimes B \beta^{\text{HV}} M^{\text{HV}}) \tilde{x}^{\text{HV}}(t - \sigma) = E_{m \times m} \otimes A \tilde{x}^{\text{HV}}(t) + (E_{m \times m} \otimes B \beta) \tilde{x}^{\text{HV}}(t - \sigma). \quad (19)$$

其中:  $E_{m \times m} = \text{diag}\{b_{11}, b_{22}, \dots, b_{NN}\}$  分别为混合车群中传统人驾车的相对阶数;  $\beta = \beta^{\text{HV}} M^{\text{HV}}$ ,  $M^{\text{HV}}$  为

传统人驾车的质量;  $\sigma$  为传统人驾车的反应时延.

#### 2.4 切入机制下的传统人驾车模型

当一个车道上的多辆传统人驾车同时切入到另一个车道上的混合车群中时, 会影响混合车群的稳定性. 为了保证混合车群行驶的稳定, 切入车辆需要采用Helly跟驰模型. 同时, 为了确保切入车辆能够稳定地切入到混合车群中, 切入车辆的速度需要追踪期望的速度. 切入车辆的模型相似于式(14), 如下所示:

$$T_{\text{cut}}^{\text{HV}}(t) = M_{\text{cut}}^{\text{HV}}(\beta_{p,\text{cut}}^{\text{HV}}(p_{\text{tar}}^*(t) - p_{\text{cut}}^{\text{HV}}(t) - d_{\text{des}}^{\text{HV}}) + \beta_{v,\text{cut}}^{\text{HV}}(v_{\text{des}}^*(t) - v_{\text{cut}}^{\text{HV}}(t))). \quad (20)$$

其中:  $M_{\text{cut}}^{\text{HV}}$  表示切入传统人驾车的质量,  $\beta_{p,\text{cut}}^{\text{HV}}$  和  $\beta_{v,\text{cut}}^{\text{HV}}$  分别表示切入车辆中驾驶员的响应参数,  $p_{\text{cut}}^{\text{HV}}(t)$  和  $v_{\text{cut}}^{\text{HV}}(t)$  分别表示切入传统人驾车的位置和速度,  $p_{\text{tar}}^*(t)$  表示切入传统人驾车相对于目标车道上前面相邻车辆的位置,  $v_{\text{des}}^*(t)$  表示相对于目标车道上车辆的期望速度.

假设一个车道上其中某一群体中的多辆传统人驾车同时切入到目标车道上混合车群中, 所有传统人驾车的误差状态方程可改写为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}^{\text{HV}}(t) = & E_{(m+l) \times (m+l)} \otimes A \tilde{x}^{\text{HV}}(t) + \\ & (E_{(m+l) \times (m+l)} \otimes B \beta_{\#}^{\text{HV}} M_{\#}^{\text{HV}}) \tilde{x}^{\text{HV}}(t - \sigma) = \\ & E_{(m+l) \times (m+l)} \otimes A \tilde{x}^{\text{HV}}(t) + \\ & (E_{(m+l) \times (m+l)} \otimes B \beta_{\#}) \tilde{x}^{\text{HV}}(t - \sigma). \end{aligned} \quad (21)$$

其中:  $E_{(m+l) \times (m+l)} = \text{diag}\{b_{11}, b_{22}, \dots, b_{(N+l) \times (N+l)}\}$  表示混合车群内所有传统人驾车(即目标车道的传统人驾车和切入的传统人驾车)的相对阶数,  $\#$  表示目标车道上传统人驾车或另一车道上切入的传统人驾车.

为确保切入车辆横向的稳定性和系统计算的便利性, 假设一车道上一群体中的多辆传统人驾车以不同的恒定横向速度切入到目标车道中的混合车群中, 切入车辆的横向速度可表示为

$$v_{o,\text{cut},y}^{\text{HV}}(t) = V_{o,\text{con},y}, \quad (22)$$

其中  $v_{o,\text{cut},y}^{\text{HV}}$  为一个群体中第  $o$  辆切入的传统人驾车的横向速度.

#### 2.5 混合车群系统

基于以上对网联自动驾驶控制算法、传统人驾车模型和切入车辆模型描述, 混合车群系统可表示为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) = & E_{(N+l) \times (N+l)} \otimes A \tilde{x}(t) + \\ & ((E_{(N+l) \times (N+l)} - E_{(m+l) \times (m+l)}) \otimes BK) \tilde{x}(t - \tau) + \\ & ((E_{(N+l) \times (N+l)} - E_{n \times n}) \otimes B \beta_{\#}) \tilde{x}(t - \sigma). \end{aligned} \quad (23)$$

其中:  $E_{(N+l) \times (N+l)} = \text{diag}\{c_{11}, c_{22}, \dots, c_{(N+l)(N+l)}\}$  表示混合车群中所有车辆的相对阶数, 如果  $c_{ii} = 1$ , 则第  $i$  辆车为网联自动驾驶; 否则, 第  $i$  辆车为传统人驾车.  $E_{(m+l) \times (m+l)} = \text{diag}\{b_{11}, b_{22}, \dots, b_{(N+l)(N+l)}\}$ , 如果  $b_{kk} = 1$ , 则第  $k$  辆车为传统人驾车; 否则, 第  $k$  辆车为网联自动驾驶. 对角元素  $(m+l)$  代表传统人驾车(目标车道上的传统人驾车和切入的传统人驾车). 相似地,  $E_{n \times n} = \text{diag}\{a_{00}, a_{11}, \dots, a_{(N+l)(N+l)}\}$ , 如果  $a_{jj} = 1$ , 则第  $j$  辆车为网联自动驾驶; 否则, 第  $j$  辆车是传统人驾车, 其中对角线元素  $n$  表示网联自动驾驶.

为便于分析和处理, 式(23)可简化为

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \Xi_1 \tilde{x}(t) + \Xi_2 \tilde{x}(t - \tau) + \Xi_3 \tilde{x}(t - \sigma). \quad (24)$$

其中

$$\Xi_1 = E_{(N+l) \times (N+l)} \otimes A, \quad (25)$$

$$\Xi_2 = (E_{(N+l) \times (N+l)} - E_{(m+l) \times (m+l)}) \otimes BK, \quad (26)$$

$$\Xi_3 = (E_{(N+l) \times (N+l)} - E_{n \times n}) \otimes B \beta_{\#}. \quad (27)$$

#### 2.6 约束条件

为确保多车同时切入到混合车群的稳定性, 给出一致约束条件为

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|p_i(t) - p_{i-1}(t) - d_{\text{des}}\| \rightarrow 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|p^*(t) - p_{\text{cut}}(t) - d_{\text{des}}\| \rightarrow 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|v_i(t) - v_{i-1}(t)\| \rightarrow 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|v^*(t) - v_{\text{cut}}(t)\| \rightarrow 0. \end{cases} \quad (28)$$

式(28)表示多辆传统人驾车同时切入到目标车道上的混合车群时, 如何确保混合车群内的异质车辆随着时间  $t$  的不断增加达到一致稳定的状态. 式(28)中, 当  $t \rightarrow \infty$  时, 满足混合车群内相邻两车之间的位置差与期望的车间距的误差, 以及切入车辆与相邻前车的位置差与期望车间距的误差趋近于零, 同时满足混合车群内相邻两车之间的速度差, 以及切入车辆与相邻前车的速度差也趋近于零时, 则能够保证多车同时切入到混合车群的渐近稳定性.

由式(28)可知, 混合车群中的切入车辆和其他异质车辆应与前面相邻车辆维持期望的车间距以及保持期望的速度. 同时, 安全约束、速度约束、加速度约束和转矩约束分别为

$$p_{i-1}(t) - p_i(t) \geq d_{\text{safe}}, \quad (29)$$

$$0 \leq v_i(t) \leq v_{\text{max}}, \quad (30)$$

$$a_{\text{min}} \leq a_i(t) \leq a_{\text{max}}, \quad (31)$$

$$T_{\min} \leq T_i(t) \leq T_{\max}. \quad (32)$$

其中:  $d_{\text{safe}} = v_i(t) \cdot \text{TH}$  为车辆之间的安全距离, 当混合车群没有达到稳定时, 第  $i$  辆车的速度是不断变化的, 那么车辆之间的安全距离  $d_{\text{safe}}$  也在不断变化; 当混合车群达到稳定状态时, 第  $i$  辆车的速度不再变化, 车辆之间的安全距离  $d_{\text{safe}}$  也不再变化. 因此, 相邻两辆车之间的位置差满足式(29), 那么混合车群中车辆之间的安全性就能够确保.  $a_{\min}$  和  $T_{\min}$  分别为加速度和转矩的下界;  $v_{\max}$ 、 $a_{\max}$  和  $T_{\max}$  分别表示速度、加速度和转矩的上界.

## 2.7 燃油消耗

本文采用的是 Akcelik 的燃油消耗模型<sup>[21]</sup>, 它可以表示为

$$H_i(t) = \alpha + \beta_1 P_T(t) + (\beta_2 m_i a_i(t)^2 v_i(t))_{a_i(t) > 0}. \quad (33)$$

其中:  $P_T(t)$  表示行驶车辆的总功率, 可表示为

$$P_T(t) = \max\{0, d_1 v_i(t) + d_2 v_i(t)^2 + d_3 v_i(t)^3 + m_i a_i(t) v_i(t)\}. \quad (34)$$

其中:  $\alpha$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_3$  的值来自文献[22].

## 3 稳定性分析

**引理1** 对于任意矩阵  $a$  和  $b$  以及任意对称正定矩阵  $C$ , 满足以下不等式<sup>[23]</sup>:

$$\pm 2a^T b \leq a^T C a + b^T C^{-1} b. \quad (35)$$

**引理2** (Hermite-Hadamard 不等式<sup>[24]</sup>) 设  $f: [c, d] \rightarrow R$  是一个凸函数, 有

$$f\left(\frac{c+d}{2}\right) \leq \frac{1}{d-c} \int_c^d f(x) dx \leq \frac{f(c) + f(d)}{2}. \quad (36)$$

当多辆传统人驾车同时切入混合车群时, 为了确保混合车群能够一致稳定地行驶, 给出如下定理.

**定理1** 对于有多个传统人驾车切入的混合车群系统(23), 有界标量  $\tau(t) \in \{\tau_{\min}, \tau_{\max}\}$ ,  $\dot{\tau}(t) \in \{0, s\}$ ,  $s \leq 1$ ,  $\sigma(t) \in \{\sigma_{\min}, \sigma_{\max}\}$ ,  $\dot{\sigma}(t) \in \{0, s\}$ ,  $s \leq 1$ , 如果存在正定矩阵  $P, Q, R, C$ , 矩阵  $\xi$ , 使得

$$\begin{aligned} & (\Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_3)^T P + P(\Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_3) + \\ & \tau_{\max} P \Xi_2 C^{-1} \Xi_2^T P^T + \sigma_{\max} P \Xi_3 C^{-1} \Xi_3^T P^T + \\ & \frac{\tau_{\max}}{2} C + \frac{\sigma_{\max}}{2} C + \Xi_2^T Q \Xi_2 + \Xi_3^T R \Xi_3 = \xi < 0, \end{aligned} \quad (37)$$

$$\frac{\tau_{\max}}{2} C - \Xi_2^T Q \Xi_2 (1 - \dot{\tau}(t)) < 0, \quad (38)$$

$$\frac{\sigma_{\max}}{2} C - \Xi_3^T R \Xi_3 (1 - \dot{\sigma}(t)) < 0, \quad (39)$$

则  $\dot{V}(\tilde{x}(t)) < 0$ ,  $V(\tilde{x}(t)) > 0$ . 因此, 系统(23)是渐近稳定的.

**证明** 使用牛顿-莱布尼茨公式, 具体如下:

$$\begin{aligned} x(t - \tau(t)) &= x(t) - \int_{t-\tau(t)}^t \dot{x}(s) ds = \\ &= x(t) - \int_{-\tau(t)}^0 \dot{x}(t+s) ds. \end{aligned} \quad (40)$$

式(24)可被改写为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= (\Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_3) \tilde{x}(t) - \\ &= \Xi_2 \int_{t-\tau}^t \dot{\tilde{x}}(s) ds - \Xi_3 \int_{t-\sigma}^t \dot{\tilde{x}}(s) ds. \end{aligned} \quad (41)$$

在时间  $t$  选择李亚普诺夫-克拉索夫斯基函数为

$$V(\tilde{x}(t)) = V_1(\tilde{x}(t)) + V_2(\tilde{x}(t)) + V_3(\tilde{x}(t)). \quad (42)$$

其中

$$V_1(\tilde{x}(t)) = \tilde{x}^T(t) P \tilde{x}(t), \quad (43)$$

$$V_2(\tilde{x}(t)) = \int_{t-\tau}^t \tilde{x}^T(s) \Xi_2^T Q \Xi_2 \tilde{x}(s) ds, \quad (44)$$

$$V_3(\tilde{x}(t)) = \int_{t-\sigma}^t \tilde{x}^T(s) \Xi_3^T R \Xi_3 \tilde{x}(s) ds. \quad (45)$$

$V_1(\tilde{x}(t))$ ,  $V_2(\tilde{x}(t))$  和  $V_3(\tilde{x}(t))$  的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(\tilde{x}(t)) &= \\ &= \tilde{x}^T(t) ((\Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_3)^T P + P(\Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_3)) \tilde{x}(t) - \\ &= 2\tilde{x}^T(t) P \Xi_2 \int_{t-\tau}^t \dot{\tilde{x}}(s) ds - 2\tilde{x}^T(t) P \Xi_3 \int_{t-\sigma}^t \dot{\tilde{x}}(s) ds, \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(\tilde{x}(t)) &= \\ &= \tilde{x}^T(t) \Xi_2^T Q \Xi_2 \tilde{x}(t) - \\ &= \tilde{x}^T(t - \tau) \Xi_2^T Q \Xi_2 \tilde{x}(t - \tau) (1 - \dot{\tau}(t)), \end{aligned} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_3(\tilde{x}(t)) &= \\ &= \tilde{x}^T(t) \Xi_3^T R \Xi_3 \tilde{x}(t) - \\ &= \tilde{x}^T(t - \sigma) \Xi_3^T R \Xi_3 \tilde{x}(t - \sigma) (1 - \dot{\sigma}(t)). \end{aligned} \quad (48)$$

利用引理1和引理2, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(\tilde{x}(t)) &\leq \\ &= \tilde{x}^T(t) ((\Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_3)^T P + P(\Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_3)) \tilde{x}(t) + \\ &= \tau_{\max} \tilde{x}^T(t) P \Xi_2 C^{-1} \Xi_2^T P^T \tilde{x}(t) + \\ &= \sigma_{\max} \tilde{x}^T(t) P \Xi_3 C^{-1} \Xi_3^T P^T \tilde{x}(t) + \frac{\tau_{\max}}{2} \tilde{x}^T(t) C \tilde{x}(t) + \\ &= \frac{\sigma_{\max}}{2} \tilde{x}^T(t) C \tilde{x}(t) + \frac{\tau_{\max}}{2} \tilde{x}^T(t - \tau) C \tilde{x}(t - \tau) + \\ &= \frac{\sigma_{\max}}{2} \tilde{x}^T(t - \sigma) C \tilde{x}(t - \sigma). \end{aligned} \quad (49)$$

结合式(46)~(48)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{x}(t)) &\leq \\ &= \tilde{x}^T(t) \left( (\Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_3)^T P + P(\Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_3) + \right. \\ &= \tau_{\max} P \Xi_2 C^{-1} \Xi_2^T P^T + \frac{\tau_{\max}}{2} C + \\ &= \sigma_{\max} P \Xi_3 C^{-1} \Xi_3^T P^T + \frac{\sigma_{\max}}{2} C + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \Xi_2^T Q \Xi_2 + \Xi_3^T R \Xi_3) \hat{x}(t) + \\ & \hat{x}^T(t - \tau) \left( \frac{\tau_{\max}}{2} C - \Xi_2^T Q \Xi_2 (1 - \dot{\tau}(t)) \right) \hat{x}(t - \tau) + \\ & \hat{x}^T(t - \sigma) \left( \frac{\sigma_{\max}}{2} C - \Xi_3^T Q \Xi_3 (1 - \dot{\sigma}(t)) \right) \hat{x}(t - \sigma). \end{aligned} \quad (50)$$

根据李亚普诺夫-克拉索夫斯基理论<sup>[25-26]</sup>, 如果混合车群能够实现一致稳定的行驶, 则  $\dot{V}(\hat{x}(t)) < 0, V(\hat{x}(t)) > 0$ . 一定存在一个矩阵  $\xi$ , 使得

$$\begin{aligned} & (\Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_3)^T P + P(\Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_3) + \\ & \tau_{\max} P \Xi_2 C^{-1} \Xi_2^T P^T + \sigma_{\max} P \Xi_3 C^{-1} \Xi_3^T P^T + \\ & \frac{\tau_{\max}}{2} C + \frac{\sigma_{\max}}{2} C + \Xi_2^T Q \Xi_2 + \Xi_3^T R \Xi_3 = \xi < 0, \end{aligned} \quad (51)$$

$$\frac{\tau_{\max}}{2} C - \Xi_2^T Q \Xi_2 (1 - \dot{\tau}(t)) < 0, \quad (52)$$

$$\frac{\sigma_{\max}}{2} C - \Xi_3^T Q \Xi_3 (1 - \dot{\sigma}(t)) < 0. \quad (53)$$

当方程(51)~(53)同时满足时, 混合车群系统是渐近稳定的. □

### 4 仿真实验

为了验证所提出方法的有效性和可行性, 给出了第2个车道上由3辆传统人驾车组成的车群同时切入到第1个车道上的9辆异质车辆(传统人驾车和网联自动驾驶)组成的混合车群中的仿真实验例子. 在仿真实验设置中, 第1个车道一开始有9辆异质车辆组成的混合车群, 包括1辆头车(网联自动驾驶)、5辆网联自动驾驶和3辆传统人驾车. 第2个车道一开始有3辆传统人驾车组成同质车群, 由于它们的目标车道是第1个车道, 它们需要同时往第1个车道上切入. 第2个车道上的3辆传统人驾车分别往第1个车道上混合车群中头车与第1辆车之间、第3辆车与第4辆车之间及第6辆车与第7辆车之间同时切入. 当切入完成时, 第1个车道上会形成一个由12辆异质车辆组成新的混合车群.

上述车辆的初速度是随机给定的, 车辆的长度和宽度分别设置为4m和2m, 车道的宽度设置为3.5m,

表1 初始参数设置

参数	值	参数	值
$\bar{\omega}$	0.5	$T/s$	50
$r/m$	0.5	$\Delta t/s$	0.1
$C$	0.335	$v_{\max}/(m/s)$	22
$\rho/(kg/m^3)$	1.2	$v_{\min}/(m/s)$	0
$A/m^2$	2	$a_{\max}/(m/s^2)$	4
$M/kg$	1470	$a_{\min}/(m/s^2)$	-4
$g/(m/s^2)$	9.8	$v_{des}/(m/s)$	15
$f$	0	$d_{des}/m$	15
$\theta$	0	$TH/s$	1
$\tau/s$	0.25	$\sigma/s$	2.5

表2 异质车辆参数设置

CAVs参数	值	HVs参数	值	切入HVs参数	值
$k_p^{CAV}$	0.1	$\beta_p^{HV}$	0.3	$\beta_{p,cut}^{HV}$	0.01
$k_v^{CAV}$	0.25	$\beta_v^{HV}$	0.5	$\beta_{v,cut}^{HV}$	0.6

所有车辆的质量都是相同的. 其他初始参数值见表1, 网联自动驾驶、传统人驾车和切入传统人驾车的参数值如表2所示.

在第2个车道上一个群体中的3辆车同时往第1个车道上的混合车群中切入的过程中, 这些车辆的位置、速度和瞬时燃油消耗的变化曲线如图2~图5所示.

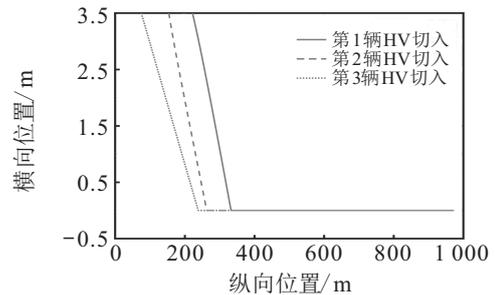


图2 第2个车道上一个群体中3辆同时切入的传统人驾车轨迹

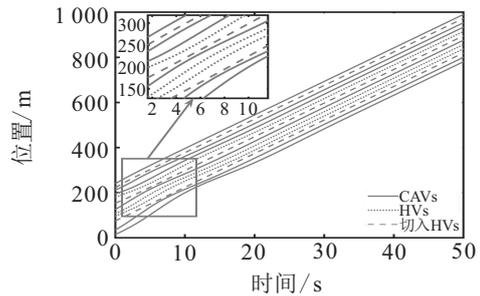


图3 混合车群中所有车辆的纵向位置变化曲线

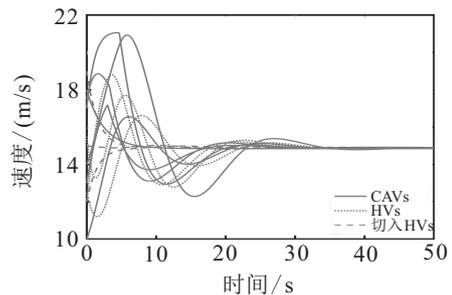


图4 混合车群中所有车辆的纵向速度变化曲线

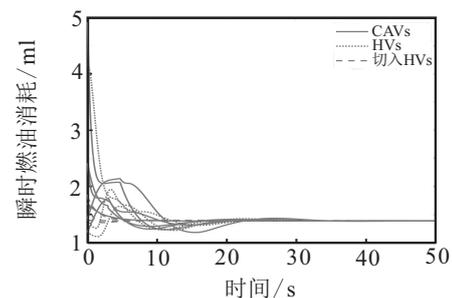


图5 混合车群中每一辆车的瞬时燃料消耗变化曲线

图2显示了第2个车道上一个群体中3辆同时切入的传统人驾车的横向和纵向运动轨迹。由图2中可以看出,曲线的斜率表示切入车辆的横向速度,即一个恒定值。同时,3辆切入传统人驾车的横向初始位置是相同的,表明它们同时从相同的横向初始位置开始向目标车道上的混合车群切入。另外,由图2可以看出,第2个车道上一个群体中的3辆传统人驾车在同时切入的过程中,他们的斜率是不相同的,即他们的恒定横向速度不同,当他们向目标车道完成切入时,他们的恒定横向速度变为零。

图3表示混合车群中所有车辆随时间变化的纵向位置变化曲线。由图3可以看出,第2个车道上3辆切入的传统人驾车会影响第1个车道上另一个混合车群的行驶状态。特别地,当切入车辆切入到混合车群时,它们会对后车的行驶状态有一个较大的影响。当第2个车道上的传统人驾车切入完成时,采用所提出控制算法能够确保第1个车道(目标车道)上混合车群行驶的稳定性。所提出方法的有效性可以从图3中连续的两辆车之间的间距看出。

图4给出了在多个传统人驾车切入机制的情况下混合车群中所有车辆的纵向速度变化曲线。由图4可以看出,当第2个车道上一个车群中的多辆传统人驾车开始切入到目标车道上的混合车群时,在大约0~25s之间,混合车群中的所有车辆的速度都有较大的波动。采用所提出的控制算法保证了混合车群行驶的一致性和稳定性。由图4可以看出,在约40s的时间内,混合车群达到了稳定的行驶状态,进一步验证了所提出控制方法的有效性和可行性。

图5显示了混合车群中每一辆车的瞬时燃油消耗变化曲线。由图4和图5可以看出,当混合车群中的车辆速度波动较大时,瞬时燃油消耗相对较高,而当混合车群中的车辆速度波动较小时,瞬时燃油消耗也相对较低。在第2个车道一个车群中的3辆传统人驾车切入完成后,通过使用所提出的控制方法,目标车道上混合车群中所有车辆的瞬时燃油消耗最终都达到稳定状态,表明了所提出控制方法的可行性。

## 5 结论

本文关注一个车道中多辆传统人驾车向目标车道上的混合车群同时切入时对混合车群稳定性的影响。为了实现这一目标,首先对混合交通场景进行描述,并给出和分析了一个车道上有一个群体中的多辆传统人驾车同时向目标车道上的混合车群切入的情形。其次,对车辆动力学模型进行了刻画,以描述车辆行驶的平稳性和混合车群的稳定性。然后,从信息物

理系统的视角,基于一致性约束和通信拓扑结构,提出了一种基于车辆动力学模型的混合车群协同控制方法,该方法考虑了网联自动车的通信时延和传统人驾车的反应时延。最后,通过一个车道上的3辆传统人驾车组成的车群与另一个车道上的6辆网联自动车和3辆传统人驾车组成的混合车群进行了切入仿真实验。仿真实验验证了所提出控制方法的有效性和可靠性。

本文的研究给新型混合交通带来了新视角,为解决混合交通中一些新问题提供了理论支撑。在未来的研究中,将会考虑多种异质车辆切入机制对混合车群的影响;同时,在未来研究中也会进一步考虑多种异质车辆切入对混合车群稳定性的影响。此外,未来的工作也将进一步研究在不同的场景及不同的通信拓扑条件下的切入切出机制。

## 参考文献(References)

- [1] Bagheri H, Noor-A-Rahim M, Liu Z L, et al. 5G NR-V2X: Toward connected and cooperative autonomous driving[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2021, 5(1): 48-54.
- [2] Talebpour A, Mahmassani H S. Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 71: 143-163.
- [3] Huang S, Sun D H, Zhao M, et al. Consensus-based distributed cooperative control for mixed vehicle group systems with packet losses and information uncertainty in the vicinity of traffic signal light[C]. 2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference. Indianapolis, 2021: 3623-3628.
- [4] 姚志洪, 顾秋凡, 徐桃让, 等. 考虑时延的智能网联汽车混合交通流稳定性分析[J]. 控制与决策, 2022, 37(6): 1505-1512.  
(Yao Z H, Gu Q F, Xu T R, et al. Stability of mixed traffic flow with intelligent connected vehicles considering time delay[J]. Control and Decision, 2022, 37(6): 1505-1512.)
- [5] Huang S, Sun D H, Zhao M, et al. SFM-based modeling and string stability analysis of mixed vehicle groups with distributed cooperative method from cyber-physical perspective[J]. Nonlinear Dynamics, 2023, 111(5): 4395-4423.
- [6] Huang S, Sun D H, Liu X Y, et al. Observer-based double closed-loop control for mixed vehicle groups: A macro and micro perspective[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(10): 18129-18144.
- [7] Guo G, Li P, Hao L Y. Adaptive fault-tolerant control of platoons with guaranteed traffic flow stability[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(7): 6916-6927.
- [8] Guo G, Li P, Hao L Y. A new quadratic spacing

- policy and adaptive fault-tolerant platooning with actuator saturation[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(2): 1200-1212.
- [9] Guo G, Li D D. PMP-based set-point optimization and sliding-mode control of vehicular platoons[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2018, 5(2): 553-562.
- [10] Guo G, Wang Q. Fuel-efficient en route speed planning and tracking control of truck platoons[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(8): 3091-3103.
- [11] Guo G, Yang D Q, Zhang R. Distributed trajectory optimization and platooning of vehicles to guarantee smooth traffic flow[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(1): 684-695.
- [12] Guo G, Zhao Z W, Zhang R. Distributed trajectory optimization and fixed-time tracking control of a group of connected vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(2): 1478-1487.
- [13] Wen S X, Guo G. Sampled-data control for connected vehicles with Markovian switching topologies and communication delay[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(7): 2930-2942.
- [14] Liu P, Kurt A, Redmill K, et al. Classification of highway lane change behavior to detect dangerous cut-in maneuvers[C]. *Proceedings of the 95th Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington, DC, 2015: 1-13.
- [15] Li Y F, Chen W B, Peeta S, et al. Platoon control of connected multi-vehicle systems under V2X communications: Design and experiments[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(5): 1891-1902.
- [16] Zhao C Q, Wang W S, Li S P, et al. Influence of cut-In maneuvers for an autonomous car on surrounding drivers: Experiment and analysis[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(6): 2266-2276.
- [17] Basiri M H, Ghogh B, Azad N L, et al. Distributed nonlinear model predictive control and metric learning for heterogeneous vehicle platooning with cut-in/cut-out maneuvers[C]. *The 59th IEEE Conference on Decision and Control*. Jeju, 2021: 2849-2856.
- [18] 杨奇. 城市轨道交通车辆起动牵引力选择研究[J]. *通信电源技术*, 2012, 29(6): 16-18.
- (Yang Q. Study on choosing of start-up traction force of urban rail transit vehicle[J]. *Telecom Power Technologies*, 2012, 29(6): 16-18.)
- [19] Yu C, Wang X, Xu X, et al. Distributed multiagent coordinated learning for autonomous driving in highways based on dynamic coordination graphs[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(2): 735-748.
- [20] Helly W. Simulation of bottlenecks in single-lane traffic flow[C]. *The Symposium on Theory of Traffic Flow*. Amsterdam, 1959: 207-238.
- [21] Akcelik R. Efficiency and drag in the power-based model of fuel consumption[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1989, 23(5): 376-385.
- [22] Chen C Y, Wang J W, Xu Q, et al. Mixed platoon control of automated and human-driven vehicles at a signalized intersection: Dynamical analysis and optimal control[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 127: 103138.
- [23] Rajamani R. *Lateral vehicle dynamics*[M]. Boston: Mechanical Engineering Series, 2011: 15-46.
- [24] Ion D A. Some estimates on the hermite-hadamard inequality through quasi-convex functions[J]. *Annals of the University of Craiova-Mathematics and Computer Science Series*, 2007, 34: 82-87.
- [25] 王宇奇, 林麒, 王晓光, 等. 一种绳牵引并联机器人系统控制律设计及Lyapunov稳定性分析[J]. *控制与决策*, 2018, 33(7): 1329-1334.
- (Wang Y Q, Lin Q, Wang X G, et al. Design of control law of WDPR and Lyapunov stability analysis[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(7): 1329-1334.)
- [26] Kharitonov V L, Zhabko A P. Lyapunov-Krasovskii approach to the robust stability analysis of time-delay systems[J]. *Automatica*, 2003, 39(1): 15-20.

## 作者简介

黄帅(1990—), 男, 博士生, 从事智能交通系统、交通信息工程与控制等研究, E-mail: huangs316@163.com;

孙棣华(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能交通系统、交通信息工程与控制等研究, E-mail: d3sun@163.com;

赵敏(1980—), 女, 教授, 博士生导师, 从事智能交通系统、交通信息工程与控制等研究, E-mail: zhaomin@cqu.edu.cn.