DOI:10.11918/202412043

高速公路 CAV 专用车道出口换道意图识别与博弈决策模型

程国柱[1],路程程[1],方丽庄[2],尤志栋[2],潘屹磊[3]

(1.东北林业大学 土木与交通学院,哈尔滨 150040;2.公安部交通管理科学研究所,江苏 无锡 214151;
3.北大荒集团,哈尔滨 150036)

摘 要:为保证智能网联自动驾驶车辆(connected and autonomous vehicle,CAV)可安全高效进行多次换道,针对高速公路上CAV在专用车道出口这一特定场景,分析CAV的换道行为,以车道效用和换道迫切度之和超过阈值作为触发换道意图的条件,构建了高速公路CAV专用车道出口的强制换道意图识别模型。运用博弈理论,将车辆多次换道过程根据冲突点位置的不同,划分成两阶段,形成每个阶段的行动策略,将安全、速度、舒适度三方面作为博弈决策的评价指标,建立CAV博弈决策模型收益矩阵,建立收益函数,构建换道博弈决策模型。采用PreScan和MATLAB/Simulink进行仿真验证,在不同工况下,对换道决策模型进行仿真实验。结果显示,初始速度分别设置为30 m/s和31 m/s时,两种换道场景下的博弈决策模型在换道成功率方面表现更为优异。

关键词:高速公路;CAV专用车道;强制换道;博弈论;换道决策

中图分类号:U491 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)07-0062-09

Lane change intention recognition and game decision-making model for dedicated CAV lanes on freeways

Cheng Guozhu[1], Lu Chengcheng[1], Fang Lizhuang[2], You Zhidong[2], Pan Yilei[3]

(1. School of Civil Engineering & Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2. Traffic Management Research Institute of the Ministry of Public Security, Wuxi 214151, Jiangsu, China;
3. Beidahuang Group Co., Ltd, Harbin 150036, China)

Abstract: In order to ensure that the connected and autonomous vehicle (CAV) can safely and efficiently change lanes many times, aiming at the specific scene of CAV on the expressway at the exit of the dedicated lane, the lane-changing behavior of CAV is analyzed. Taking the sum of lane utility and lane-changing urgency exceeding the threshold as the condition to trigger the lane-changing intention, a forced lane-changing intention recognition model for the exit of the CAV dedicated lane on the expressway is constructed. Based on the game theory, the process of multiple lane change of vehicles is divided into two stages according to the different positions of conflict points, and the action strategy of each stage is formed. The safety, speed and comfort are taken as the evaluation indexes of game decision-making. The income matrix of the CAV game decision-making model is established, the income function is established, and the lane change game decision-making model is constructed. PreScan and MATLAB/Simulink are used for simulation verification. Under different working conditions, the lane change decision model is simulated. The results show that when the initial speed is set to 30 m/s and 31 m/s respectively, the game decision models in the two lane-changing scenes perform better in terms of lane-changing success rate.

Keywords: freeway; CAV dedicated lanes; mandatory lane change; game theory; lane change decision-making

异构交通条件下,高速公路CAV专用车道出口处车辆变道频繁显著高于其他路段[1]。近年来,关于换道意图识别和决策的研究逐步深入。文献[2-4]将换道意图识别,分成包括左换道、车道保持和右换道三个阶段。在文献[5]的规则决策模型基础上,文献[6]中将前车状态信息纳入考虑,将全速度差模型与通用模型进行了整合。文献[7-8]面向异构交通场景,提出协作合流算法的高速公路匝道分层协作合流框架和协作换道策略,研究不同渗透率下CAV对交织区交通状况的改善情况。文献[9-

收稿日期:2024-12-13;**录用日期**:2025-01-16;**网络首发日期**:2025-08-13
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250812.1821.010
基金项目:道路交通安全公安部重点实验室开放课题(2024ZDSYSKFKT01-1);中央高校基本科研业务费专项资金(2572023CT21)
作者简介:程国柱(1977—),男,教授,博士生导师
通信作者:潘屹磊,423533857@qq.com

13]通过多目标优化、鲁棒算法、安全指标和协同策略等方法，综合考虑相邻车道车辆的状态和意图。与传统的决策方法相比，博弈论方法在应对连续交互行为问题时展现出更为显著的优势。文献[14－15]研究了换道博弈模型，量化了博弈双方的性能指标，构建了收益矩阵。文献[16]采用德国 ExiD 轨迹数据集，刻画车辆换道行为的博弈交互过程，从博弈决策和代价成本视角解析车辆换道行为。文献[17]通过准确评估周围车辆的侵略性，在博弈框架内持续建立并求解多个参与车辆的 Stackelberg 均衡解，以此确定换道的最佳时机。

综上，现有研究在 CAV 换道问题上取得了一定进展，但对多次复杂换道场景的考虑仍显不足。本研究结合车道效用和换道迫切度，模型能够适用于强制换道场景的意图识别，并通过博弈论方法优化多次换道的冲突处理与策略选择。在实际应用中，该模型可为 CAV 换道行为提供更精准的决策参考。

1　换道场景界定及换道意图识别

1.1　换道场景界定

为了促进自动驾驶技术的发展和应用，提高道路安全性、交通效率和创新水平，道路上将设置 CAV 专用车道[18]。为了减少路段侧向干扰，CAV 专用车道应设在机动车行驶方向的内侧，并在适当位置设置出入口。在 CAV 专用车道出口区域，智能网联车辆需要进行多次换道，才能从专用车道驶离高速公路主线。高速公路出口处，设有智能网联车专用道的异构交通环境示意图如图 1 所示，研究对象为最内侧专用车道上的 CAV。

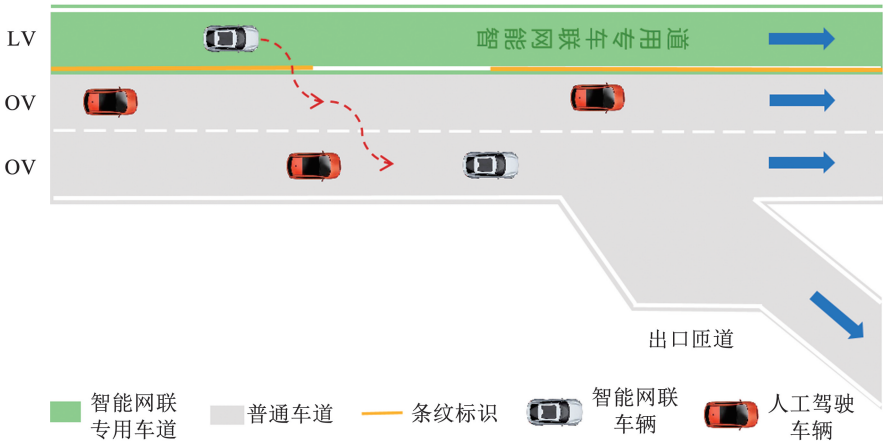


图 1　高速公路出口 CAV 驶出内侧专用车道场景

Fig. 1　Highway exit scenario for CAV departing dedicated inner lane

其中 LV 为目标车辆，OV 为道路上其他博弈车辆。最内侧车道为智能网联专用车道，外侧两车道为普通车道。目标车辆 LV 在行驶过程中，需在前方出口处驶出高速公路主线。图 1 中目标车辆通过与普通车道上的车辆进行信息交互，选择最合适的间隙进行换道操作。由于车辆在连续换道时，停顿会增加其他车辆与主车之间的距离，也会导致其他车辆不确定其行驶意图，从而可能造成交通混乱和危险情况。在高速公路环境下，需要保持流畅行驶，应尽量避免中间停顿，确保换道车辆在交通中不引起危险或者干扰其他车辆的行驶。

本文研究的假设条件如下：CAV 可以通过信息交互，获取周围环境、交通状况以及其他车辆的信息，并将自身信息传递给其他车辆和交通管理系统；在换道的过程中，只有主车在 CAV 专用车道上行驶，其他车道上的车辆不会驶入 CAV 专用车道。

1.2　换道过程分析

根据已有研究成果[19]，并针对本文研究的车辆换道场景，可将换道过程归纳为图 2 所示的流程。起点为换道意图产生，车辆产生换道的需求，例如为了超车、驶入/驶出匝道等。如果没有换道意图，车辆保持巡航状态，并持续监控周围环境，以判断是否需要产生换道意图。然后评估换道可能带来的收益，例如提高速度、改善行驶空间等。换道效用可以基于之前提到的速度收益、空间收益等因素进行计算。

接下来进行博弈决策，如果周围车辆较少，或者换道条件比较简单，则可能不需要进行博弈决策，可以直接进行换道。如果周围车辆较多，或者换道条件比较复杂，则需要进行博弈决策，以考虑其他车辆的行为对换道的影响。计算参与博弈的车辆（例如主车和目标车道上的车辆）在不同策略下的收益。收益函数基于速度、安全、舒适性等因素进行计算。

系统计算换道的效用，考虑换道迫切程度进行评估。在此基础上，系统判断是否需要进行博弈决策。如果需要，系统将计算各参与者不同策略的收益，并基于博弈论模型选择最优策略。判断是否存在唯一的纳什均衡。纳什均衡是指在所有参与者都

采取最优策略的情况下,在博弈均衡状态下,任何一方都无法通过独自调整决策来获得额外收益。如果存在唯一的纳什均衡,则表示所有车辆都找到了最优的策略,可以直接进行换道。如果不存在唯一的纳什均衡,则需要选择收益最大解,即选择能够使主车收益最大化的策略。

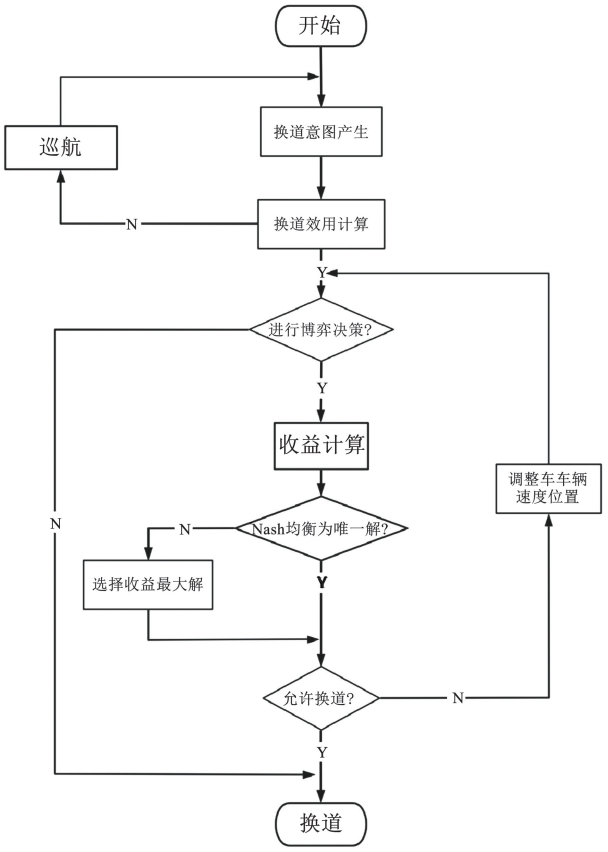


图 2 换道决策过程

Fig. 2 Lane change decision process

判断安全因素约束,例如是否存在足够的安全间隙。允许换道,则执行换道操作。如果不允许换道,则需要调整车辆速度位置,例如减速或调整行驶轨迹,并重新进行博弈决策。

从博弈论的角度分析,交通参与者会基于实时路况及周边车辆的行驶决策,采取最佳行动方案以优化自身效益。例如,目标车辆(LV)在决定是否换道时,会权衡自身的速度需求和安全性,而其他博弈车辆(OV)则会根据自身的行驶速度和位置,决定是否通过加速或减速来影响目标车辆的决策。

1.3 换道意图识别模型

在复杂的交通环境中,判断是否需要换道需综合考虑多种因素,其中车道效用和换道迫切度是两个关键指标。通过结合这两个指标,模型能够精准判断换道意图,决定换道的必要性和最佳时机。

1.3.1 车道效用

车速和行驶空间是评估车辆行驶时最常见且重要的指标。这些指标直接影响车辆的决策和车辆的整体行驶效率。车道收益与主车的换道需求密切相关。为了量化车道收益,系统可以通过前车的速度信息和主车与前车的相对距离进行评估。前车的速度信息提供了目标车道的行驶条件,而主车与前车的相对距离则反映了当前车道的拥堵程度和安全间距。这些数据共同帮助系统判断换道是否能够显著提升行驶速度或提供更宽敞的行驶空间。

$$\begin{cases} U_{\mathrm{l}} = R_{\mathrm{lv}} \cdot R_{\mathrm{ls}} \\ U_{\mathrm{o}} = R_{\mathrm{ov}} \cdot R_{\mathrm{os}} \end{cases} \tag{1}$$

式中:U_{l}为当前车道的车道效用,U_{o} 为目标车道的车道效用,R_{lv}、R_{ls}分别为当前车道速度收益值和空间收益值,R_{ov}、R_{os}分别为目标车道速度收益值和空间收益值。

当前车道和目标车道的车道效用由主车在各自车道行驶时所能获得的速度收益和空间收益构成。主车产生换道意图时,通常希望达到期望的行驶速度。如果速度未达到期望值,会选择跟随前车行驶。此时,相应车道中前车与主车的相对速度可以表示车道的速度优势,从而评估车道的速度收益。因此,车道的速度收益定义为

$$R_{\mathrm{v}} = \frac{v}{v_{\mathrm{des}}}$$
$$R_{\mathrm{iv}} = \min(R_{\mathrm{v}}(v_{\mathrm{lim}}), R_{\mathrm{v}}(v_{\mathrm{p}}), R_{\mathrm{v}}(v_{\mathrm{d}})),\ i \in (\mathrm{l},\mathrm{o}) \tag{2}$$

式中:v_{lim}代表当前车道上车辆的最大速度限制,v_{p}表示相应车道前车的速度,v_{d}表示主车的期望速度。

为了满足高速公路等道路的限速规定,车道效用中需纳入最高限速的因素。在行驶过程中,智能网联车辆通常会选择行驶空间较大的车道以提高通行效率。因此,定义车道的空间收益为

$$R_{\mathrm{s}} = \begin{cases} \dfrac{D}{D_{\mathrm{d}}}, & D \geqslant D_{\mathrm{d}} \\ 0, & D < D_{\mathrm{d}} \end{cases}$$
$$R_{\mathrm{is}} = \min(R_{\mathrm{s}}(D_{\mathrm{p}}),\ R_{\mathrm{s}}(D_{\mathrm{d}})),\ i \in (\mathrm{l},\mathrm{o}) \tag{3}$$

式中:D_{p}为主车与相应车道前车之间的距离,若不存在前车,则取最大感知距离;D_{d}为当前主车行驶速度下的期望跟车距离。

当行驶空间大于或等于 D_{d}时,行驶空间越大,收益越大。当行驶空间小于 D_{d}时,不足以带来收益。

1.3.2 换道迫切度

在网联车专用车道高速公路出口处的换道,属于强制性换道,使得车辆在有限范围内必须采取换道的操作,如接近出口或避开障碍物。传统的换道决策模型往往忽略了换道的紧迫性,导致在紧急情况下无法及时做出决策。为此,在换道意图识别模

型中，加入了换道迫切程度这一关键因素，以调整决策标准，增强模型的适应性和安全性，满足在强制换道场景下的需求。换道迫切程度反映了主车在当前车道上继续行驶的可行性和紧迫性。

$$P = \omega_1 \cdot (v_d - v) + \omega_2 \cdot \frac{1}{D} + \omega_3 \cdot \frac{1}{T_e} \tag{4}$$

式中：T_e为接近出口的时间，时间越短，迫切性越高；ω_1，ω_2，ω_3为权重系数，权重系数总和为 1，P 越接近 1，换道越迫切。

1.3.3　换道意图触发判断

决定换道时机是强制换道决策的基础。强制换道需要在满足换道需求的同时，尽量确保车辆处于良好的驾驶环境。本文将车道效用与换道迫切度结合，形成意图识别模型的公式为

$$U_o - U_l + P \geqslant \Delta U \tag{5}$$

式中 ΔU 为换道触发阈值，这个公式用于识别车辆是否进行换道。换道迫切度反映当前情况下换道的紧迫性。当目标车道与当前车道的效用差异以及紧迫程度的综合效益达到换道触发阈值时，车辆将产生换道意图。具体而言，当车道效用和迫切度均较高时，系统优先建议换道，以确保行驶的安全性和效率；而在效用或迫切度较低时，系统则根据实际情况建议继续当前车道行驶或适时换道。

通过综合分析车速、行驶空间、前车速度信息、相对距离以及换道迫切程度，系统能够更精准地评估车道收益，做出更智能和高效的换道决策，有助于在强制换道交通环境中做出更安全和高效的换道决策。

2　换道博弈模型建立

2.1　换道轨迹方程

在车辆换道的运动过程中，在纵向和横向分别用五次多项式来表示位置随时间的变化。通常，在运动路径规划领域，采用五阶多项式插值方法能够有效保证运动轨迹的光滑特性，该方法通过确保位移、速率及其变化率均保持连续来实现轨迹平滑。这类多项式包含 6 个待定参数，可以完整匹配起始点与终止点处设定的位移、速度及加速度边界条件，共计 6 个约束方程。这样生成的轨迹在运动学上是平滑的，避免了加速度的突变，提高了乘坐舒适性[20]。

$$y(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + a_5 x^5 \tag{6}$$

式中 a_1、a_2、a_3、a_4、a_5为待定系数，由车辆的始末状态来确定。智能驾驶轨迹建模的关键在于构建符合起止点运动学约束的数学表达式。以横向运动参数为例，选取时间轴 t_0 时刻作为轨迹起始时刻，此时系统的横向运动参数组可定义为：横向位移 d_0、横向速度$\dot{d}_0$ 和横向加速度$\ddot{d}_0$，构成初始状态向量$\boldsymbol{D}_0 = [d_0, \dot{d}_0, \ddot{d}_0]$。通过将这 3 个运动学参数代入五次多项式方程及其一阶、二阶导数表达式，即可构建描述轨迹特征的约束方程组[21]。该数学建模方法通过参数化方式精确锁定了轨迹的初始运动状态，为后续求解满足终止条件的多项式系数矩阵奠定基础。

$$\begin{cases} d_0 = a_0 + a_1 t_0 + a_2 t_0^2 + a_3 t_0^3 + a_4 t_0^4 + a_5 t_0^5 \\ \dot{d}_0 = a_1 + 2a_2 t_0 + 3a_3 t_0^2 + 4a_4 t_0^3 + 5a_4 t_0^4 \\ \ddot{d}_0 = 2a_2 + 6a_3 t_0 + 12a_4 t_0^2 + 20a_5 t_0^3 \end{cases} \tag{7}$$

在换道的初始时刻 t_0的状态位置 d_0，速度$\dot{d}_0$，和加速度$\ddot{d}_0$ 已经明确，因此仅需通过博弈交互来确定换道轨迹的终点位置 d_e 速度$\dot{d}_e$ 和加速度$\ddot{d}_e$。

2.2　换道可行性判断

在动态交通环境中，换道可行性判断是保障行车安全的核心环节。在车辆产生换道意图时，为确保安全，以最小安全间距作为道决策的关键判定条件。

在 LV 换道过程中，主车 LV 需要基于 Gipps 安全距离公式来判断是否可以安全换道[21]。采用 Gipps 安全距离模型来确保车辆行驶过程中的纵向安全性。该模型通过精确计算主车与前车辆之间的最小安全间距，有效保证在当前车道行驶时与前车保持足够的缓冲距离，从而避免潜在的追尾风险。

$$d_n(t) = v_n(t) \cdot \tau' + \frac{v_n(t) \cdot (v_n(t) - v_{n-1}(t))}{2 \cdot \sqrt{a' \cdot b'}} + \frac{v_{n-1}(t)^2}{2 \cdot b'} \tag{8}$$

式中：n 代表换道过程中的参与者；$a_n(t)$ 为车辆 n 与其当前车道上的前车之间的安全距离；$v_n(t)$ 和 $v_{n-1}(t)$ 分别为车辆 n 和在 t 时刻的速度；τ'为车辆 n 的反应时间，极小；a'是车辆 n 的最大加速度；b'是其前车的最大减速度。

由于 CAVs 的反应时间 τ'非常小，可以进一步简化为

$$d_n(t) = \frac{v_n(t) \cdot (v_n(t) - v_{n-1}(t))}{2 \cdot \sqrt{a' \cdot b'}} + \frac{v_{n-1}(t)^2}{2 \cdot b'} \tag{9}$$

与传统的碰撞时间不同，TDTC 更加关注换道过程中车辆之间的动态关系，特别是在车辆路径交叉点处的碰撞风险。如果 TDTC 值过小，意味着两车非常接近，碰撞的风险较高。TDTC 的表达式[22]为

$$\mathrm{TDTC} = |\mathrm{TTC}_A - \mathrm{TTC}_B| \leqslant T_{\max} \tag{10}$$

$$\mathrm{TTC}_A = \frac{d_A}{v_A(t)} = \frac{\int_0^{x_c} ds}{v_A(t)} = \frac{\sqrt{1 + y'}\, dx}{v_A(t)} \tag{11}$$

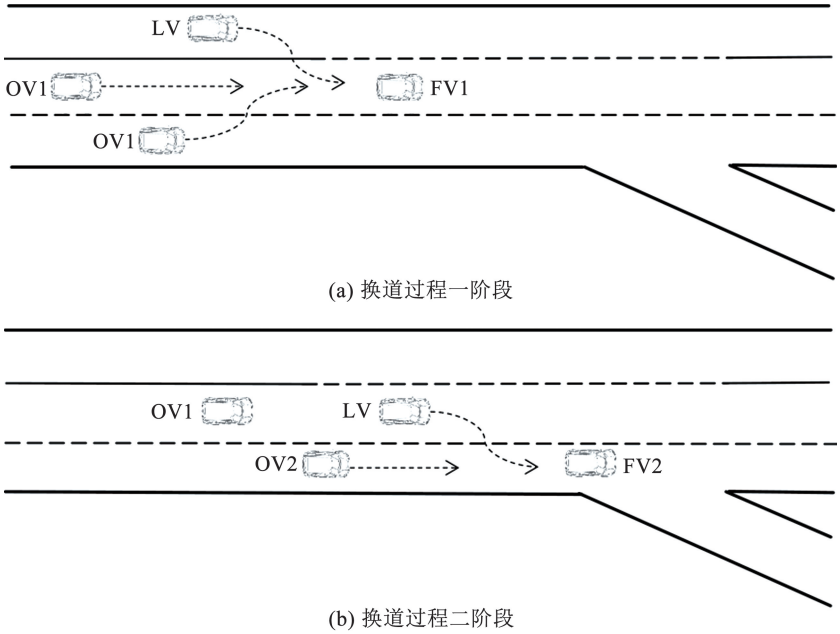
$$\mathrm{TTC}_B = \frac{d_B}{v_B(t)} = \frac{x_c + d}{v_B(t)} \tag{12}$$

式中：TTC_A和TTC_B为目标车 LV 与相邻车到达潜在碰撞点的时间，d_A表示从当前位置到达冲突点的 LV 的距离，d_B表示相邻车辆从当前位置到达冲突点的距离，d 表示是两车之间的纵向车头时距，$T_{\max}$表示 LV 与相邻车之间的最大碰撞时间差。

2.3 博弈收益矩阵

依据行为的合法性与安全性，筛选出符合高速公路交通规则的驾驶行为集合。由于高速公路画有车道标线，限制标识等特点，行车受到交通规则约束，仅允许 CAV 车辆使用专用车道。需要车辆确保在安全距离内变道，车辆应在车道内行驶不得长时间碾压车道线，提前规划出口，需要注意出口处的减速与分流区域。

因此综合上述规则，在 3 车道高速公路道路上 CAV 换道过程中，换道车辆 LV 在 CAV 专用车道出口处驶出匝道，需要进行两次换道，可将两次换道视为两阶段。第 1 阶段为 LV 由 CAV 专用车道换道至中间车道如图 3(a)所示，在换道过程中，LV 与中间车道的后车和外侧车道后车进行博弈，此时 LV 有换道(LC)和不换道(LK)两种策略，中间车道后车 OV 有减速避让(OD)和保持原速直行(OK)两种策略，外侧车道后车 OV 有换道(OC)和保持直行(OK)两种策略。第 2 阶段为 LV 由中间车道换道至外侧车道，如图 3(b)所示，在换道过程中，LV 与外侧车道上后车进行博弈，此时 LV 有换道和不换道两种策略，外侧车道后车 OV 有减速避让和保持原速直行两种策略。



(a) 换道过程一阶段

(b) 换道过程二阶段

图 3 换道场景示意

Fig. 3 Lane change scene diagram

表 1 和表 2 分别展示了换道过程两个阶段所对应的决策行为策略。

本研究建立了 3 ×2 和 2 ×2 两种维度的策略矩阵模型，采用博弈论中的纳什均衡原理确定最优策略解，并基于 Simulink 仿真平台实现模型求解。

表 1 一阶段博弈收益矩阵

Tab. 1 Stage one game payoff matrix

策略	换道车辆	
	LV 换道	LV 不换道
OV1 减速	(LC,OD)	(LK,OD)
OV1 不减速	(LC,OK)	(LK,OK)
OV1 换道	(LC,OC)	(LK,OC)

表 2 二阶段博弈收益矩阵

Tab. 2 Stage two game payoff matrix

策略	换道车辆	
	LV 换道	LV 不换道
OV2 减速	(LC,OA)	(LK,OA)
OV2 不减速	(LC,OK)	(LK,OK)

2.4 收益函数

2.4.1 安全收益

在车辆与周围车辆进行交互时，确保与周围车辆维持安全距离至关重要。引入车头时距作为碰撞风险评估的核心指标，并基于此构建安全收益量化模型。具体而言，当车头时距低于预设安全临界值时，安全收益与车头时距呈正相关关系；反之，当车

头时距达到或超过临界值时，安全收益将维持在最优水平。因此，安全收益函数可表述为

$$J_s = \min\left(1, \frac{T_h}{T_b}\right) \tag{13}$$

其中，车头时距 T_h 为

$$T_h = \frac{|x_{EV} - x_{HV}|}{v}$$
$$\begin{cases} x_{lv} > x_{ov}, \text{则 } v = v_{ov} \\ x_{lv} < x_{ov}, \text{则 } v = v_{lv} \end{cases} \tag{14}$$

式中：x_{lv}、v_{lv}、表示换道完成时 LV 的位置和速度，x_{ov} 和 v_{ov} 表示换道完成时 OV 的位置和速度。

2.4.2　速度收益

本文用车辆速度变化率来衡量速度收益，速度变化率不仅反映了车辆的加速性能，还揭示了在不同交通条件下的响应能力。其定义为

$$J_v = \frac{V(t) - V(0)}{V(0)} \tag{15}$$

式中：$V(t)$ 代表换道完成时的速度系数，$V(0)$ 为换道开始时速度系数。

$$\begin{cases} V(t) = \dfrac{v_{op} - v_{lv}}{v_{lv}} \\ V(0) = \dfrac{v_{lp} - v_{lv}}{v_{lv}} \end{cases} \tag{16}$$

式中：v_{op} 表示目标车道前车速度，v_{lp} 表示当前车道前车速度。

2.4.3　舒适度收益

在调整车辆纵向速度时，需要考虑舒适性，避免过度加减速。因此，使用加速度来衡量车辆的舒适性收益函数：

$$J_c = -\max\left|\frac{a_{lv}(t)}{a_{max}}\right| \tag{17}$$

式中：a_{lv} 为主车在策略中选择的加速度，a_{max} 为允许的最大加速度，t 是时间。

2.4.4　总收益函数

通过对上述 3 个收益函数进行加权组合，可以构建出一个总收益函数：

$$J_L = \alpha J_s + \beta J_v + \gamma J_c \tag{18}$$
$$J_O = \alpha J_s + \beta J_v + \gamma J_c \tag{19}$$

式中：J 为车辆的总收益；α，β，γ 分别表示安全，速度，舒适度收益指标对应的权重系数，其相互关系为 $\alpha + \beta + \gamma = 1$。为了考虑个性化驾驶偏好的影响，需对每辆车的权重系数进行调整。

3　仿真验证

为了验证所提出的博弈换道决策模型的有效性，采用 PreScan 软件搭建如图 4 所示的高速公路 CAV 专用车道出口环境，使用 MATLAB 实现上述模型，通过 Simulink 构建仿真环境，对本文的模型进行仿真和验证。

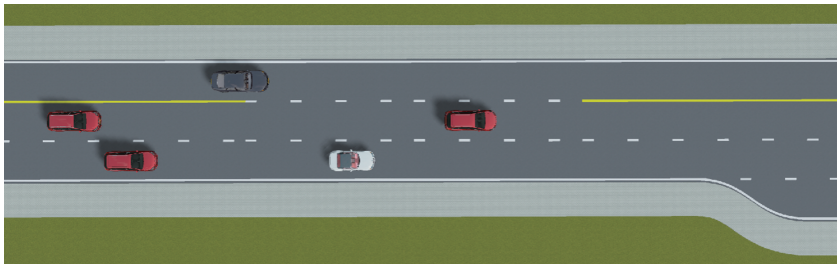


图 4　高速公路 CAV 专用车道出口场景设置

Fig. 4　Exit scene design of freeway cav dedicated lane

为验证本文提出的博弈决策模型性能，在 PreScan 中构建了包含 CAV 专用车道的高速公路三车道换道场景，并与现有混合策略博弈模型进行了对比仿真。两组实验采用了完全相同的控制器，参数详见表 3，以及一致的车辆初始状态等参数配置，唯一区别在于决策方法。仿真实验配置如下：时长为 14 s，步长为 0.05 s。在复杂交通环境的关键考量因素中，安全性被赋予最高权重取 0.5，是最重要的指标；速度的重要性次之取值 0.3，略高于舒适度的取值 0.2。

表 3　控制器参数

Tab. 3　Controller parameters

符号	含义	取值
Δt	时间步长	0.05 s
W_L	车辆宽度	2.04 m
a_{max}	最大加速度	0.8 m/s^2
α	安全效益权重	0.5
β	速度效益权重	0.3
γ	舒适度效益权重	0.2

实验设计了两种典型的换道博弈场景进行实验验证。场景一为相邻车道间的车辆博弈，具体包括

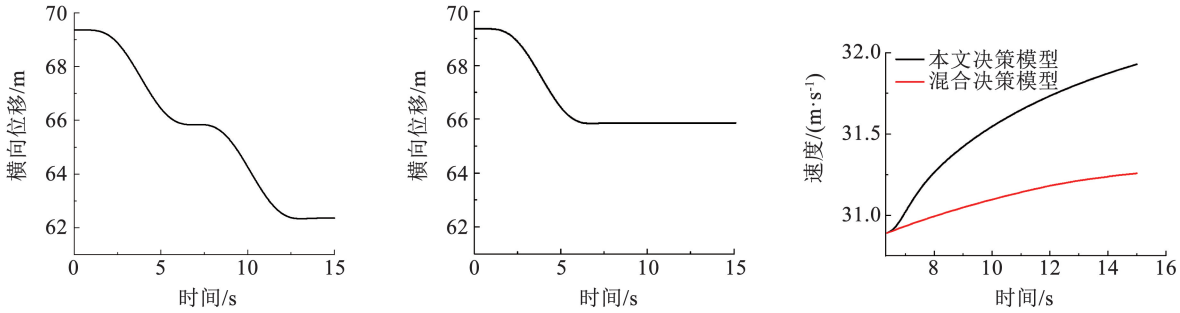
内侧车道车辆与中间车道车辆之间的博弈,以及中间车道车辆与外侧车道车辆之间的博弈。场景二则模拟了内侧车道车辆与外侧车道车辆之间的直接博弈过程。通过设置这两种具有代表性的博弈场景,能够全面考察不同车道位置情况下博弈决策模型的适应性。

本文所设计的决策模型设置为Ⅰ组,将现有混合策略决策模型设置为Ⅱ组。设定仿真开始时车辆开始产生换道意图,计算车道效用与换道迫切度,判定是否进行博弈决策。博弈决策模型通过当前车辆状态计算收益矩阵,Ⅰ组通过所设计的收益函数计算收益,速度为 30 m/s 时换道一阶段与二阶段的收益如表 4 所示。为了求解最优策略,首先进行纳什均衡的计算。如果纳什均衡解存在多个,则通过决策机制选择收益最大的策略。在决策完成后,直接执行换道操作。对于Ⅱ组,首先,对收益进行分析,然后评估安全区域是否达到了相应的条件。如果所计算的安全区域符合最低安全距离的标准,则执行换道操作。仿真对比结果为图 5,6 所示。

表 4 场景一 LV 速度为 30 m/s 收益矩阵

Tab. 4 Payoff matrix for scenae one at LV speed of 30 m/s

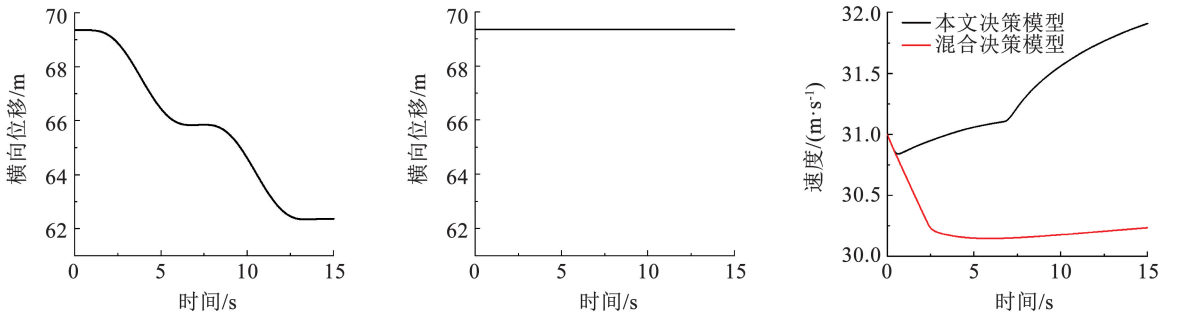
收益	{LC,OA}	{LC,OK}	{LK,OA}	{LK,OK}
一阶段	-0.03	-0.14	-1.72	-1.61
二阶段	0.46	0.23	-1.85	-1.62



(a) Ⅰ组主车换道轨迹 (b) Ⅱ组主车换道轨迹 (c) 两种决策仿真速度对比

图 5 LV 为 30 m/s 时的仿真结果

Fig. 5 The simulation results at a velocity of 30 m/s



(a) Ⅰ组主车换道轨迹 (b) Ⅱ组主车换道轨迹 (c) 两种决策仿真速度对比

图 6 LV 为 31 m/s 时的仿真结果

Fig. 6 The simulation results at a velocity of 31 m/s

通过划线法求解得出最优策略组合为:在一阶段 LV 选择换道,OV 选择减速避让。在二阶段 LV 选择换道,OV 选择减速避让。由于收益系数设置更侧重于安全方面,在Ⅱ组实验中,换道过程第二阶段 LV 选择不换道,博弈结果符合实际工况。

从仿真结果可以看出,换道车辆 LV 在 0 时刻开始进行换道决策,进入换道过程的第 1 阶段,并在 6.32 s 时进入第 2 阶段。在实验中,当 LV 的初始速度为 30 m/s 时,基于本文提出的博弈决策模型,Ⅰ组实验结果显示,LV 在整个换道过程中成功完成了两次换道操作;而在Ⅱ组实验中,LV 仅在第一阶段顺利完成了换道,但在第 2 阶段尝试换道时未能成功。

安全约束在决策中扮演着决定性角色,这直接影响着换道的最终结果。具体而言,仿真进行到第 6.32 s 时,LV 试图通过加速执行二次换道。Ⅱ组的决策过程显示,即使博弈模型预测此举可能带来更高的潜在收益,LV 仍需全面评估当下的换道可行性,尤其是空间可用性与安全性的约束。仿真设定的最小安全距离预设值较大,使得换道所需的空间阈值更为严格。因此,在第 2 阶段换道过程中,LV 无法满足这些必要的安全条件,导致其未能完成该

次换道操作。这一现象说明，尽管高收益可能促使车辆尝试换道，但安全约束始终是主导因素。

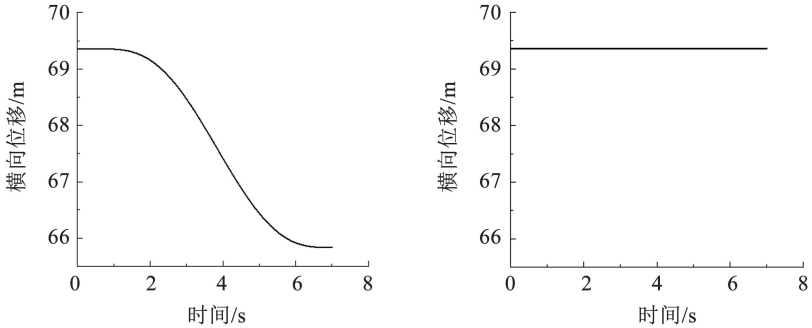
当初始速度设定为 31 m/s 时，Ⅰ组实验基于本文博弈决策模型的结果显示，换道车辆 LV 成功实现了两次换道操作。相比之下，Ⅱ组实验中 LV 在首次换道尝试阶段即告失败。对比两组结果可以观察到，采用本文模型的Ⅰ组，其 LV 得以在较高车速下顺利完成换道。成功换道后，LV 的速度与目标车道前车速度达到了良好协调。这证明了合理的博弈决策不仅能够有效促成换道动作，还能确保车辆在目标车道上与前车保持速度同步，进而显著提升行驶的流畅度与安全性。

在场景二中，换道过程第一阶段 LV 与目标车道上有换道意图的车辆 OV 进行博弈，设置 LV 初始速度为 31 m/s，通过当前车辆状态计算第一阶段收益矩阵如表 5 所示。

表 5　场景二 LV 速度 31 m/s 收益矩阵

Tab. 5　Payoff matrix for scenario one at LV speed of 31 m/s

收益	{LC,OC}	{LC,OK}	{LK,OC}	{LK,OK}
一阶段	-1.8	-0.51	-1.14	-2.43



(a) Ⅰ组主车换道轨迹　　(b) Ⅱ组主车换道轨迹

图 7　LV 为 31 m/s 时的换道轨迹

Fig. 7　Lane change trajectory of LV at 31 m/s initial velocity

对换道车辆 LV 的结果分析表明，本文提出的博弈换道决策模型具备更高的效率。如图 7 所示，在仿真初始时刻(0 秒)，LV 即启动换道决策流程，进入第一阶段操作。特别地，当 LV 初始速度为 31 m/s时，采用本文模型的Ⅰ组实验成功实现了换道操作。这一结果验证了该决策模型在此速度下能够有效引导车辆安全高效地完成换道。与之形成对比的是，Ⅱ组实验中 LV 的首次换道尝试未能成功，这主要源于决策模型本身的差异。Ⅰ组实验的成功充分体现了所提博弈决策模型在处理高速场景下的优越性，它使得车辆能够在维持较高行驶速度的同时，确保换道过程的安全完成。

通过对比实验结果的分析发现，本文提出的换道博弈决策模型在不同初始条件下的换道成功率方面，优于现有的混合决策模型博弈模型的设计旨在有效解决空间利益冲突问题。与Ⅱ组决策模型相比，该模型展现出更高的换道效率。

4　结　论

1)提出换道意图判断方法，引入换道迫切度的概念，构建换道意图识别模型，当车道效用差值与换道迫切度的综合效益高于换道触发阈值时触发强制换道意图，使换道决策过程更符合真实换道的场景。

2)将换道过程分为两阶段，根据换道车辆和其他车辆的位置、速度等信息，构建安全收益、速度收益和舒适度收益三方面的收益函数，形成总收益函数，建立博弈换道决策模型。

3)通过仿真实验，对比本文所提出的博弈换道决策模型与现有的混合决策模型在场景中的应用，结果表明，本文所提出的博弈换道决策模型在多种工况下，换道成功率均高于现有混合决策模型。

本文的研究成果可以为高速公路上智能网联车辆在专用车道出口处的多次换道提供决策依据。研究主要针对高速公路的强制换道场景，考虑了车速较高、交通流相对稳定、换道需求明确的特性，利用博弈论处理连续交互行为时的优势，在其他类型道路上同样具备一定的适用性。在其他道路上例如城市道路，通常具有更复杂的交通状况，未来的研究可以进一步优化换道意图识别模型，考虑更多动态因素如实时交通流量和驾驶员行为特征。此外，可以将博弈换道决策模型应用于更复杂的交通环境中，验证其在不同速度和密度条件下的适应性。

参考文献

[1]伊振鹏，李伟，石白茜，等. 协同自适应巡航控制车辆占比对下匝道分流区混合交通流安全性的影响分析[J]. 交通信息与安全，2022，40(1)：10

Yi Zhenpeng，Li Wei，Shi Baiqian，et al. An impact analysis of the

proportion of adaptive cruise control vehicles on the safety of mixed traffic flow at the off-ramp diverging area[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2022, 40(1): 10

[2]祝俪菱, 刘澜, 赵新朋, 等. 基于支持向量机的车辆驾驶行为识别研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(1): 91
Zhu Liling, Liu Lan, Zhao Xinpeng, et al. Driver behavior recognition based on support vector machine [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(1): 91

[3]陈亮, 冯延超, 李巧茹. 基于 Multi-class SVM 的车辆换道行为识别模型研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1): 193
Chen Liang, Feng Yanchao, Li Qiaoru. Probe into the Multi-class SVM-based recognition model for the vehicle lane-altering behaviors [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(1): 193

[4]Benterki A, Boukhnifer M, Judalet V, et al. Prediction of surrounding vehicles lane change intention using machine learning [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). Metz: IEEE, 2019: 839

[5]Gipps P. A model for the structure of lane-changing decisions[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1986, 20(5): 403

[6]Monteil J, Nantes A, Billot R, et al. Microscopic cooperative traffic flow: calibration and simulation based on a next generation simulation dataset[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2014, 8(6): 519

[7]郝威, 龚雅馨, 张兆磊, 等. 面向高速公路混合交通流的车辆协同合流策略[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(1): 224
Hao Wei, Gong Yaxin, Zhang Zhaolei, et al. Cooperative merging strategy for freeway ramp in a mixed traffic environment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(1): 224

[8]Guo J, Cheng S, Liu Y. Merging and diverging impact on mixed traffic of regular and autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 22(3):1639

[9]Zheng X, Huang H, Wang J, et al. Behavioral decision-making model of the intelligent vehicle based on driving risk assessment[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2021, 36(7): 820

[10]He X, Yang H, Hu Z, et al. Robust lane change decision making for autonomous vehicles: an observation adversarial reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2022, 8(1): 184

[11]Wang C, Sun Q, Li Z, et al. Human-like lane change decision model for autonomous vehicles that considers the risk perception of drivers in mixed traffic[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2259

[12]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换道模型[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 184
Li Linheng, Gan Jing, Qu Xu, et al. Lane-changing model based on safety potential field theory under the connected and automated vehicles environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(6): 184

[13]Duan X, Sun C, Tian D, et al. Cooperative lane-change motion planning for connected and automated vehicle platoons in multi-lane scenarios [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(7): 1

[14]程国柱, 孙秋月, 刘玥波, 等. 基于博弈论的城市道路变道切入行为模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(12): 2839
Cheng Guozhu, Sun Qiuyue, Liu Yuebo, et al. Cut-in behavior model based on game theoretic approach on urban roads [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(12): 2839

[15]Ali Y, Zheng Z, Wang M. A game theory-based approach for modelling mandatory lane-changing behaviour in a connected environment[J]. Transportation Research: Part C, 2019, 106: 220

[16]曲大义, 戴守晨, 陈意成, 等. 基于轨迹数据的车辆博弈切出及汇入行为建模[J]. 吉林大学学报(工学版), 2025, 55(10): 3208
Qu Dayi, Dai Shouchen, Chen Yicheng, et al. Modeling of vehicle game cut-out and merging behavior based on trajectory data[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2025, 55(10): 3208

[17]Zhang Q, Langari R, Tseng H, et al. A game theoretic model predictive controller with aggressiveness estimation for mandatory lane change[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2019, 5(1): 75

[18]Talebpour A, Mahmassani H S, Elfar A. Investigating the effects of reserved lanes for autonomous vehicles on congestion and travel time reliability[J]. Transportation Research Record, 2017, 2622(1): 1

[19]程国柱, 王文志, 陈永胜, 等. 基于 DQN 的快速路合流区 CAV 换道决策方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(3): 98
Cheng Guozhu, Wang Wenzhi, Chen Yongsheng, et al. Decision method of CAV lane change in expressway merging area based on DQN[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(3): 98

[20]李玮, 王晶, 段建民. 基于多项式的智能车辆换道轨迹规划[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(3): 242
Li Wei, Wang Jing, Duan Jianmin. Lane changing trajectory planning of intelligent vehicles based on polynomials[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(3): 242

[21]严永俊, 彭林, 王金湘, 等. 混驾环境下基于主从博弈的多车协同决策规划[J]. 中国公路学报, 2024, 37(3): 117
Yan Youjun, Peng Lin, Wang Jinxiang, et al. Multi-vehicle cooperative decision-making and trajectory planning based on Stackelberg game theory in mixed driving environments[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(3): 117

[22]Gipps P G. A behavioural car-following model for computer simulation[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1981, 15(2): 105