

基于轨迹数据的车辆博弈切出及汇入行为建模

曲大义¹, 戴守晨¹, 陈意成², 崔善柠², 杨宇翔²

(1. 青岛理工大学机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要:为提高网联自主车辆换道汇入的效率和安全性,刻画车辆换道行为的博弈交互过程。采用德国 ExiD 高精轨迹数据集,深入分析车辆换道汇入的动态交互博弈特性,从博弈决策和代价成本视角解析并定义轨迹数据中主线车辆的换道切出行为。在面对匝道车辆存在明确的汇入意图时,部分主线车辆为降低行驶效率代价选择加速向内侧换道切出且同时为匝道车辆提供汇入间隙。当车辆速度越高时主线车辆越倾向于换道切出降低损失,基于轨迹数据的车辆博弈切出及汇入模型能够刻画车辆博弈决策过程并有效缩短换道汇入距离,换道汇入距离平均缩短 11.51 m,车辆碰撞风险时间平均提高 6.77 s。

关键词:交通运输规划与管理;网联自主车辆;换道行为;博弈交互特性;轨迹数据

中图分类号:U491.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)10-3208-13

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231360

Modeling of vehicle game cut-out and merging behavior based on trajectory data

QU Da-yi¹, DAI Shou-chen¹, CHEN Yi-cheng², CUI Shan-ning², YANG Yu-xiang²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;
2. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: To improve the efficiency and safety of lane-changing merging of connected autonomous Vehicles, the game interaction process of vehicle lane-changing behavior is portrayed. The German ExiD high-precision trajectory dataset is used to deeply analyze the dynamic interactive game characteristics of vehicle lane changing and merging, and the lane-changing cut-out behavior of mainline vehicles in trajectory data is analyzed and defined from the perspectives of game decision-making and cost. When facing the ramp vehicles with clear intention to merge, part of the mainline vehicles choose to accelerate to the inside to change lanes to cut out and at the same time to provide a gap for the ramp vehicles to merge to reduce the cost of driving efficiency. When the vehicle speed is higher, the mainline vehicle tends to change lane and cut out to reduce the loss. The vehicle game cut-out and merge model based on trajectory data can portray the vehicle game decision-making process and effectively shorten the distance of changing lane and merging, the average reduction of the distance of changing lane and merging is 11.51 m, and the average improvement of vehicle collision time is 6.77 s.

收稿日期: 2023-12-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52272311, 51678320).

作者简介: 曲大义(1973-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 智能车路协同与安全控制. E-mail: dyqu@263.net

Key words: transportation planning and management; connected autonomous vehicles; lane-changing behavior; game interaction properties; trajectory data

0 引言

车辆换道和跟驰是道路交通中常见的微观驾驶行为,反映了车辆在不同交通状况下的决策行为过程。随着新能源汽车的生产推广以及网联智能设备的普及应用,车道保持和自适应巡航等车辆自主跟车功能逐渐成熟并表现出其优势,而车辆换道需要综合考虑交通环境并与周围车辆进行动态交互从而作出适当的决策,其相比于前者具有更加复杂的个体交互特点。

常见的车辆换道行为多发生在高速公路汇入汇出、交通瓶颈和城市交叉口进出口道等路段,以上换道行为的发生通常是由于驾驶意图和局部行驶路径的偏差,当车辆行驶状态与驾驶意图存在差异时,驾驶员需要寻找换道间隙进行换道从而纠正行驶偏差。在上述换道场景中,高速公路汇入路段最具典型性,从车辆汇入建模思路而言,部分学者基于宏观视角和以优化汇入路段的通行效率为目标,通过调度算法或上层控制策略优化主线和汇入车辆合流顺序,为车辆分配适当的时空通行权从而缓解车辆的路径冲突问题。郝威等^[1]基于分层协作框架提出了一种启发式规则的车辆合流序列调度算法,弥补了固定合流序列无法适应驾驶员车辆对车流扰动的缺点。Ma等^[2]以汇入路段的整体效率和安全为目标构建了主线速度控制和匝道协同控制策略,并基于宏观交通流理论构建了高速公路交通状态预测模型。Liu等^[3]考虑多车道交通流分布的不均匀特性,通过建立分布式车道选择和集中式协同控制框架,为主线车辆分配最优驶入车道缓解匝道车辆汇入使局部密度激增或交通流饱和的问题。另一部分学者基于车辆微观交互行为的视角,通过优化车辆换道的交互过程降低车辆汇入风险,进而完成车辆的汇入过程,以及随着社会经济和博弈理论与智能交通领域的交叉发展,拓展了传统交流领域研究中普遍将车辆换道划分为自由换道和强制换道的换道行为,其中,协作换道通常基于整体收益最大化对车辆做出决策引导,而非合作换道模型以自身收益为目标进行个体决策判断。曲大义等^[4]通过考虑动态风险建立了混合交通环境下的车辆

决策博弈模型,所建模型具有更高的道路利用率和安全性。马庆禄等^[5]以整体效益最大化为控制目标建立了多车道匝道合流区三方博弈模型,结果表明该合作模型可以有效缩短冲突时间并提高通行效率。祁宏生等^[6]基于网联驾驶车辆具有交互协作的优势提出了一种混合驾驶场景主动间隙适配协作换道模型,通过划分协作车群、规划换道序列和速度控制方法实现车辆群的整体约束,为换道车辆提供换道间隙并提高了道路通行能力。Wang等^[7]通过控制目标车道前车采取加速行为减小车辆换道对下游车辆的影响从而建立动态协同换道模型,结果表明该模型提高了换道成功率并平滑了下游车辆的运行轨迹,但协作范围限制在汇入车辆与目标车道前车之间,交互范围受限从而使得前车车速震荡较大。

车辆汇入是换道行为在一定场景下的拓展,学者通常基于轨迹数据和汇入过程对换道行为特性进行挖掘,并通过数理模型对车辆换道行为进行刻画。在对车辆汇入行为的划分中,张方方等^[8]通过提取车辆碰撞时间和跟车时距,将匝道合流区场景的车辆汇入行为划分为9种交互模型,不同交互类型体现了驾驶员在换道决策过程中对行驶效率和安全风险的判断取舍。除上述9种常见的交互模型外,叶颖俊等^[9]基于轨迹数据分析挖掘发现高流量瓶颈路段汇入车辆与主线车辆存在一种主动回应式交互行为,从而拓展了车辆换道汇入行为的划分,研究结果表明该模型能够反映匝道车辆与主线车道后车的双向决策互动过程并有效降低车辆的汇入风险。邬岚等^[10]通过NGSIM(Next generation simulation)轨迹数据对车辆的换道汇入行为进行对比分析,结果表明汇入车辆在加速车道的位置和速度等因素是影响汇入过程的重要因素。

基于车辆微观汇入行为的模型以单车为主体优化换道交互过程,在一定程度上无法较好地兼容宏观车流运行情况,而基于协同调度的车辆汇入框架则更加依赖于上层的策略控制,对车辆动态交互过程的刻画较为缺少。上层协同控制与协作式微观交互模型虽立足于不同的建模角度,但二者具有共通之处,即均通过协作的方式降低车

辆冲突风险。以及上述学者基于不同依据对车辆汇入类型进行了划分,并对车辆汇入行为进行了影响因素分析,在一定程度上均反映出车辆的交互过程和行驶状态是影响车辆换道的重要因素。但现有成果尚未充分挖掘车辆汇入过程的交互特性,且建模过程通常基于较为直接的上层或集中控制策略而缺少因果性或机理性阐述。本文通过对 ExiD 高精轨迹数据集场景中的车辆行驶状态对比分析,发现车辆汇入过程中存在一种伪协作交互换道行为,基于博弈视角解析车辆汇入交互特征并以此为依据为网联自主车辆的换道行为进行建模,探讨汇入车辆与主线车辆的协作换道可行性,并通过仿真分析验证模型的有效性。

1 基于轨迹数据的车辆汇入行为分析

1.1 车辆汇入轨迹数据

以往的换道汇入模型通常基于 NGSIM 数据集或其他数据集进行换道轨迹识别和特征分析,但由于所建模型具有较大差异且根据不同数据集进行的车辆行驶特征分析具有较强的主观性,难以对所建模型进行可重复性研究和客观性评价。德国高速公路 ExiD(The exits and entries drone dataset)数据集^[11]基于 lanelet 2 高精地图格式使车辆汇入数据具有相对客观化的参考,由此减小了对换道行为研究的主观性影响,图 1 为车辆汇入路段场景。

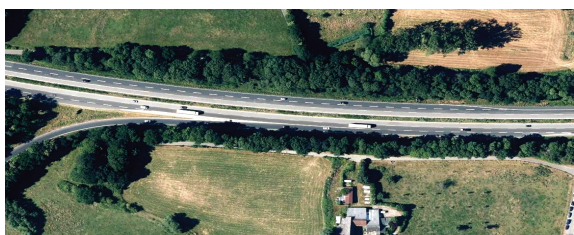


图 1 车辆汇入路段

Fig. 1 Section of vehicle merging

1.2 车辆汇入轨迹数据分析

由于大型车辆车身长度和高度明显区别于其他车辆,对匝道车辆的交互行为和汇入过程具有直接影响,通过筛选车辆类型为 truck 的轨迹数据,得到汇入车辆与主线车辆均为 car 或 van 类型的轨迹数据并用于车辆交互行为研究。

1.2.1 匝道车辆汇入间隙突变现象

驾驶员在汇入主线车道前通常需要预选汇入

间隙并判断换道条件,汇入间隙决定了车辆之间的交互过程。匝道车辆在加速车道行驶时具有明确的汇入意图,当其行驶到主线车辆右侧范围内,主线车辆需对该汇入意图做出一定的应对。在对车辆换道交互行为的研究中,主线车辆通常具有两种选择即减速让行或不让行,而通过轨迹数据分析发现存在相当数量的主线车辆采取向内侧换道以应对匝道车辆的汇入行为,主线车辆的换道切出行为使汇入间隙增加,促使匝道车辆顺利汇入主线并完成换道交互过程。图 2 所示为主线外侧车道的车辆行驶轨迹,图中下方中断的轨迹为换道至内侧车道的主线车辆,图中上方突然出现的轨迹为汇入主线的主线车辆,绿色和黄色轨迹分别表示具有典型汇入间隙突变现象的汇入车辆和主线车辆。

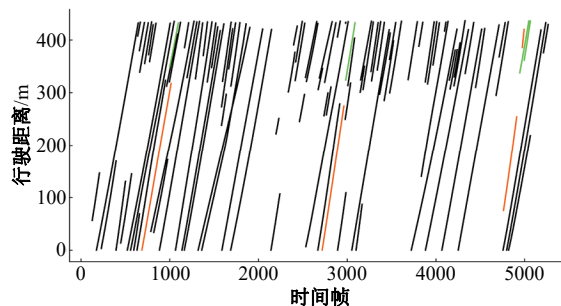


图 2 主线外侧车道车辆行驶轨迹

Fig. 2 Trajectories of vehicles in outer mainline lane

1.2.2 主线车辆换道切出行为类型划分

在参考文献[8]划分的 9 种车辆汇入行为类型中,协作式前切和协作式后切行为将冲突车辆之间的碰撞时间和跟车风险错时交替,从而有效降低车辆换道的整体风险。本文通过参考上述两种汇入类型定义并刻画轨迹数据集中存在的车辆换道切出行为,将主线车辆换道驶离的行为划分为 2 种类型,如图 3 所示,根据车辆的相对位置和交互结果划分为主线车辆后侧切出与前侧切出。

图 3(a)和图 4(a)为主线车辆后侧切出行为过程和汇入间隙变化, T_0 时刻当汇入车辆 LV 在纵向位置先前于主线后方车辆 RV 且汇入间隙不满足换道条件时,RV 需采取一定策略应对 LV 的汇入意图,RV 除减速让行外,通过判断内侧车道换道条件执行换道切出行为($T_0 \sim T_2$),此时汇入间隙的后方车辆由 RV 变为 RV',汇入间隙由此突变,LV 发现 RV 驶出外侧车道后通过再次判断汇入条件执行换道汇入行为($T_1 \sim T_3$)。

图 3(b)和图 4(b)为主线车辆前侧切出行为

过程和汇入间隙变化, T_0 时刻当汇入车辆LV在纵向位置后于主线前方车辆FV且二者车间距较小时, LV如若执行汇入行为需减速匹配汇入间隙, 由于FV进行了换道切出($T_0 \sim T_2$), 从而为LV提供了前方换道间隙, 前方车辆由FV变为FV', 汇入间隙由此突变, LV无须继续减速即可汇入主线车道($T_1 \sim T_3$)。从主线车辆的行为过程与交互结果来看其采取换道切出行为与现有研究中的协作减速行为效果相同, 均为汇入车辆提供了汇入间隙, 因此, 基于交互结果的视角可以将其视为一种协作式交互行为。

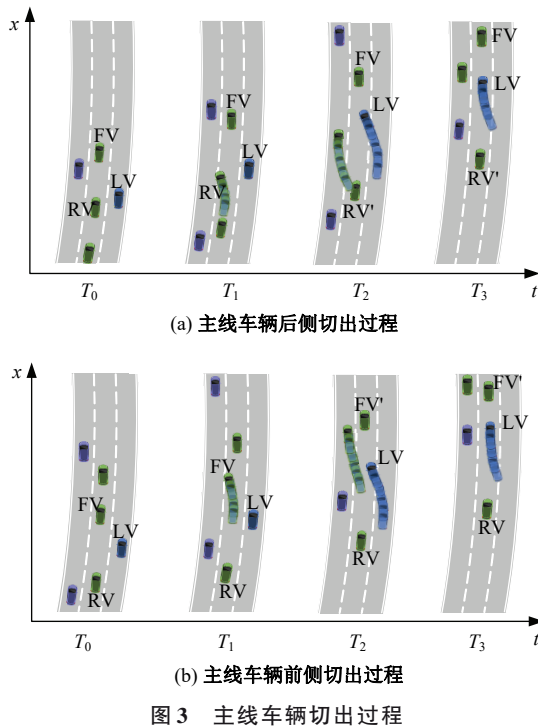


Fig. 3 Process of mainline vehicle cutting out

1.2.3 主线车辆切出行为特征分析

通过统计分析和筛选得到数据集场景中主要存在的3类汇入交互行为及车辆行驶数据, 图5(a~d)为主线车辆减速让行场景中的车辆状态数据, carID282为汇入车辆, carID284为主线前车, carID285为主线后车, 当主线后车主动减速并增加与前车的跟车距离时, 汇入间隙逐渐满足换道要求从而使汇入车辆换道汇入; 图5(e~h)为主线车辆后侧切出车辆状态数据, carID439为汇入车辆, carID441为主线前车, carID447为后切车辆; 图5(i~l)为主线车辆前侧切出车辆状态数据, carID_41为汇入车辆, carID_49为前切车辆, carID_45为前切车辆的前方车辆。由于该路段为主线双车道且上游一定距离存在另一汇入区域, 上游车道分布

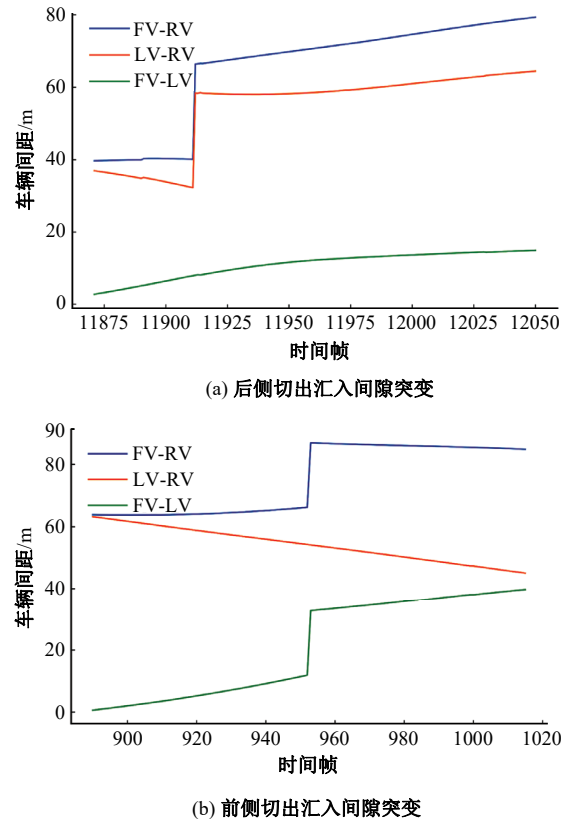


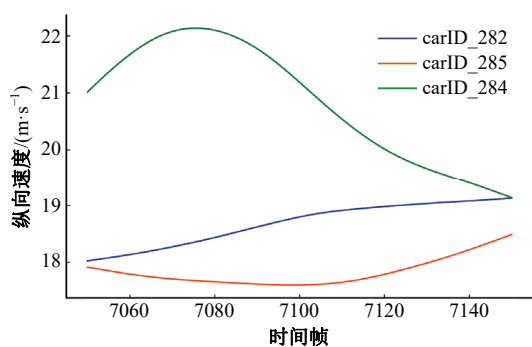
图4 车辆间距与汇入间隙变化

Fig. 4 Variation of vehicle distance and merging gaps

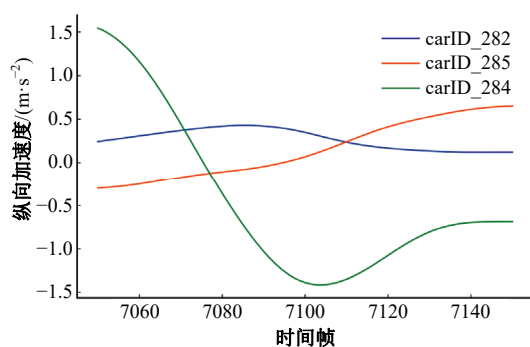
中部分车辆行驶在外侧车道, 从而为自上游外侧车道驶入的车辆数在一定时间内多于内侧车道和外侧车道车辆切出驶离提供存在的条件。

从交互结果来看, 换道切出车辆为匝道车辆提供了汇入间隙, 而通过车辆的速度大小和加速度变化趋势发现, 切出车辆通常具有高于周围车辆的行驶速度和较高的加速度, 表明其在换道前已经做出了加速行为。因此, 不能仅从交互结果的角度解析该换道切出行为, 而基于博弈收益和代价函数的视角来看, 主线车辆的换道切出并非是纯粹的协作行为。现有研究中对车辆换道博弈的协作性行为描述体现在车辆的主动让行过程中, 而切出车辆对速度的敏感性较高, 其倾向于追求较高的行驶速度而不愿牺牲速度收益, 当切出车辆具有较高的行驶速度时, 减速和保持车道行驶均会增加其效率成本代价。

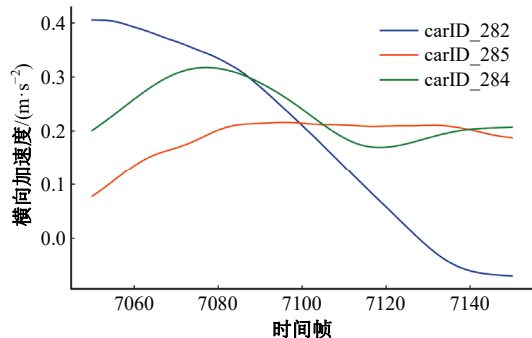
从博弈决策和代价成本的视角分析主线车辆后侧切出过程, 由于汇入车辆位置先前于切出车辆, 车辆换道汇入会迫使主线后车减速。当匝道车辆明确存在的汇入意图与主线后车的速度期望冲突时, 主线后车需对该汇入意图作出决策判断或进行博弈交互, 主线车辆尽管可以与汇入车辆



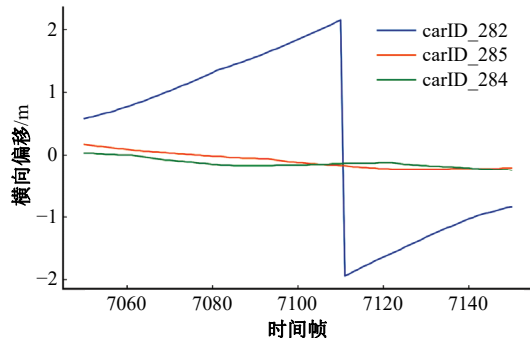
(a) 主线减速场景车辆速度



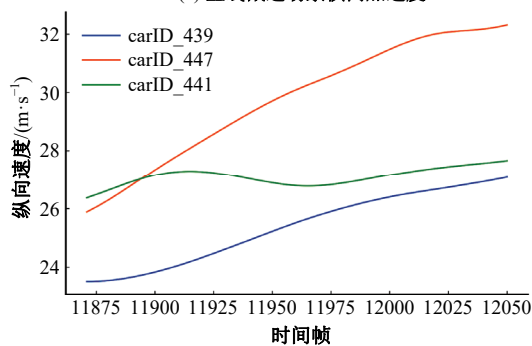
(b) 主线减速场景纵向加速度



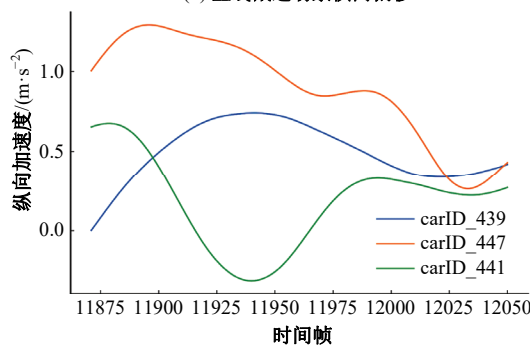
(c) 主线减速场景横向加速度



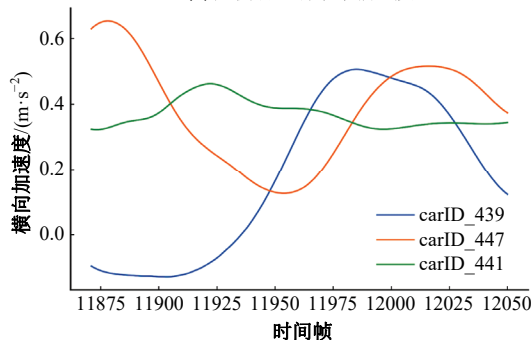
(d) 主线减速场景横向偏移



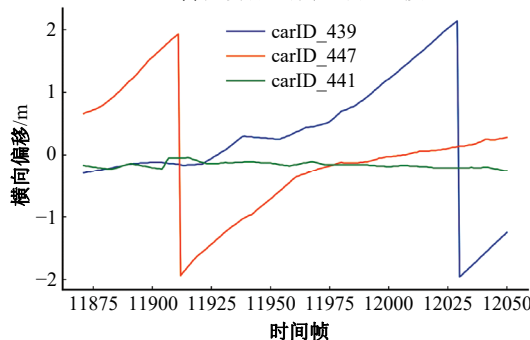
(e) 后侧切出场景车辆速度



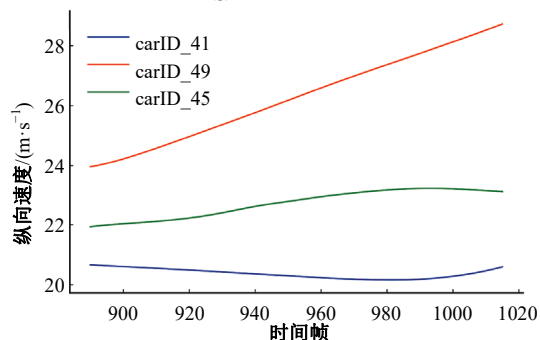
(f) 后侧切出场景纵向加速度



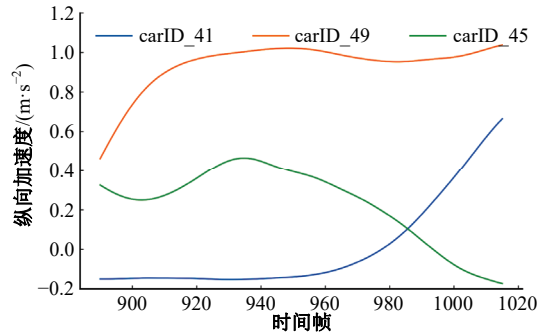
(g) 后侧切出场景横向加速度



(h) 后侧切出场景横向偏移



(i) 前侧切出场景车辆速度



(j) 前侧切出场景纵向加速度

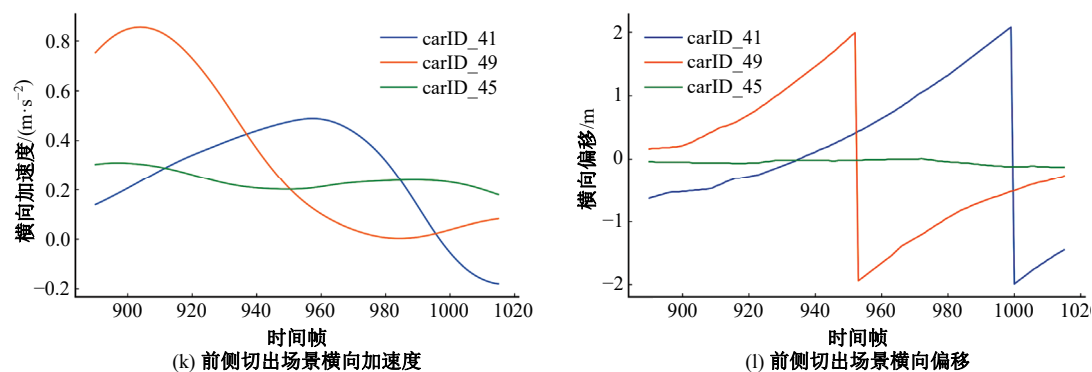


图5 汇入车辆与交互车辆行驶状态

Fig. 5 Driving status of merging and mainline vehicles

进行博弈交互,但当内侧车辆满足换道约束时,主线车辆可以换道驶离并收获期望的速度收益,且同时满足匝道车辆的汇入意愿。由此主线后车选择换道切出并避免了与汇入车辆直接进行博弈,从而降低了双方行驶意图的冲突风险。

在主线车辆前侧切出场景中,切出车辆具有明显高于周围车辆的行驶速度和较高的加速度,如若保持当前车道行驶则需减速,同时其右后侧范围存在匝道车辆,而此时内侧车道满足换道切出条件,主线前车为降低效率成本代价选择换道切出并为匝道车辆提供汇入间隙,匝道车辆无须继续减速即可换道汇入,汇入车辆纵向加速度由负转正,否则汇入车辆需继续减速适配前方较小的汇入间隙并与主线后车进行博弈交互。此外,

通过数据可视化工具发现,主线车辆前切行为多发生在主线车辆前方存在已完成换道汇入的匝道车辆且右后方又存在下一待汇入车辆,由此增加了主线前车换道切出的可能。

表1为不同车辆交互决策行为类型及结果对比,通过交互过程分析发现,主线车辆的行驶状态受到匝道车辆汇入意图的影响,前者应在权衡考虑不同决策对应代价损失的基础上择优选择应对策略,因此,不能仅从结果角度解析车辆的换道切出行为,而基于切出车辆的博弈代价视角探析主线车辆的决策过程,发现该协作交互行为并非具有协作的主观意愿,而是在不降低自身收益的基础上形成的协作式结果,因此,换道切出行为应是一种伪协作交互行为。

表1 不同交互类型汇入过程对比

Table 1 Comparison of merging processes for different interaction types

交互类型	主线车辆应对策略	匝道车辆交互过程	交互行为结果
减速让行	协作式减速让行	待主线车辆减速让行后换道汇入	主线后车减速让行,匝道车辆换道汇入
后侧切出	减少速度代价损失的同时协助匝道车辆汇入	待主线后车换道切出后再次判断汇入条件进行换道汇入	主线后车加速切出,匝道车辆加速汇入
前侧切出	减少速度代价损失的同时协助匝道车辆汇入	汇入车辆减速适配汇入间隙,待主线车辆前侧切出后紧随汇入	主线前车加速切出,匝道车辆先减速后加速汇入

1.3 伪协作换道切出行为分析与定义

车辆行驶轨迹数据表明汇入间隙突变的原因是由于主线车辆换道驶向内侧车道,从而为匝道车辆间接性提供了汇入间隙。基于博弈收益和行为意图的视角,当主线车辆对行驶速度降低的可接受性较低时,通常采用不让行的策略,因此,该车辆通常被划分为非合作性车辆,而减速行驶的车辆对速度降低的可接受性较高,因此,通常视为具有合作倾向的车辆^[12]。虽然前者的主观意图是为了追求较高的车辆行驶速度,但从汇入结果来看,向内侧车道换道驶入的车辆依旧为汇入车辆提供了汇入

间隙,其换道行为属于一种伪协作行为。

根据车辆交互行为过程和结果将伪协作换道切出行为的概念定义为:切出车辆不具备合作性行为意图,并非主动牺牲速度收益为匝道车辆提供汇入间隙,切出车辆在不降低自身速度收益的基础上仍然间接地为匝道车辆提供了汇入间隙,是一种决策意图不具备合作倾向但产生了具有合作倾向结果的换道行为。无论主线车辆进行减速让行还是换道切出,均产生了对汇入车辆有利的合作性结果。主线车辆不仅可以通过减速协助匝道车辆汇入,还可以通过向内侧换道切出,降低与

汇入车辆决策冲突的同时扩大或创造了汇入间隙。与传统博弈行为不同之处在于伪协作行为是一种主线车辆逃避与汇入车辆直接进行博弈的交互行为,而与博弈思想的相同之处在于决策主体仍然按照收益最大化或决策代价最小化的结果选择对应策略。

2 伪协作切出及汇入行为建模

2.1 基本假设与建模视角

(1) 本文不考虑网联自主车辆的驾驶风格倾向性,建模思路是通过建立车辆决策的统一模型刻画并解析轨迹数据中客观存在的上述交互行为过程。

(2) 假设汇入车辆不采取连续换道行为,车辆博弈决策只考虑相邻车道的交通情况。由于数据集场景中道路存在一定曲率而仿真软件精度有限,本文暂不考虑道路曲率对车辆决策行为的影响。

(3) 基于驶入高速区域的驾驶人均应具有一定熟练驾驶技术的假设,通过博弈收益视角解析其作为拥有熟练驾驶技术的决策个体在面对上述交通情况下做出的换道决策行为。基于人类个体智慧的交互决策是经历了时间和驾驶经验迭代得到的最优策略,能够为网联自动驾驶车辆建立换道汇入模型提供实际依据。

2.2 车辆博弈决策行为约束分析

2.2.1 换道轨迹约束

五次多项式曲线通常以跃度 Jerk 的泛函为代价并通过广义 Euler-Lagrange 方程解得换道轨迹,因此,通常可以满足换道决策中对舒适性的要求,假设换道轨迹为车辆质心轨迹,则轨迹曲线可以表示为:

$$\begin{cases} x(t) = a_0 t^5 + a_1 t^4 + a_2 t^3 + a_3 t^2 + a_4 t + a_5 t^0 \\ y(t) = b_0 t^5 + b_1 t^4 + b_2 t^3 + b_3 t^2 + b_4 t + b_5 t^0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $a_i (i=0, 1, \dots, 5)$ 和 $b_i (i=0, 1, \dots, 5)$ 为换道轨迹曲线的系数。

根据换道初始和结束时刻的车辆状态约束,将车辆的纵向轨迹、速度和加速度曲线用矩阵表示为:

$$X = \begin{bmatrix} x_0 \\ v_0 \\ a_{\text{lon}0} \\ x_1 \\ v_1 \\ a_{\text{lon}1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_0^5 & t_0^4 & t_0^3 & t_0^2 & t_0^1 & t_0^0 \\ 5t_0^4 & 4t_0^3 & 3t_0^2 & 2t_0^1 & 1 & 0 \\ 20t_0^3 & 12t_0^2 & 6t_0 & 2 & 0 & 0 \\ t_1^5 & t_1^4 & t_1^3 & t_1^2 & t_1^1 & t_1^0 \\ 5t_1^4 & 4t_1^3 & 3t_1^2 & 2t_1 & 1 & 0 \\ 20t_1^3 & 12t_1^2 & 6t_1 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_5 \\ a_4 \\ a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} = T \times A \quad (2)$$

车辆的横向轨迹、速度和加速度曲线的矩阵可以表示为:

$$Y = [0, 0, 0, W, 0, 0]^T = T \times [b_5, b_4, b_3, b_2, b_1, b_0]^T \quad (3)$$

式中: x_0 为车辆初始时刻纵向位置; v_0 和 v_1 为车辆换道初始和结束时刻纵向速度; $a_{\text{lon}0}$ 和 $a_{\text{lon}1}$ 为初始和结束时刻纵向加速度; W 为横向偏移。

2.2.2 跟车距离及换道间隙约束

车辆需在纵向行驶方向满足安全跟车距离约束,本文采用协同自适应巡航控制(即 CACC 模型)刻画车辆行驶过程中的纵向安全距离关系。

$$v_i = v_{\text{pre},i} + k_p e + k_d \dot{e} \quad (4)$$

$$e = d_{\text{cur}} - d_{\text{min}} - L_{\text{car}} - t_{\text{hw}} v_i \quad (5)$$

式中: v_i 为当前时刻车辆 i 的行驶速度; $v_{\text{pre},i}$ 为车辆 i 在上一时刻的速度; e 为车辆间距误差项; d_{cur} 为车头间距; d_{min} 为最小停车间距; L_{car} 为车身长度; t_{hw} 为安全车头时距。

车辆的换道过程通常包括换道意图产生、寻找换道间隙、执行换道过程和目标车道跟车行驶,对于存在明确换道意图的车辆而言,需要判断汇入间隙的约束条件执行换道汇入策略,汇入间隙作为中间环节制约着车辆的决策和行为过程。基于车辆换道安全距离方法^[13]将汇入车辆和切出车辆的安全换道距离约束(图6)表示为:

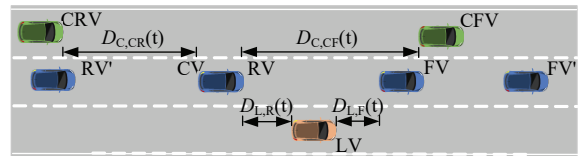


图6 车辆安全换道距离

Fig. 6 Safe lane-changing distance for a vehicle

$$D_{i,j}(t) \geq F_{i,j}(t) \quad (6)$$

$$(i,j) \in \{(LV, FV), (RV, LV), (CV, CFV), (CRV, CV)\} \quad (7)$$

$$F_{i,j}(t) = v_i(t) T_{\text{hw}} + \frac{v_i^2(t)}{2a_{i,\text{dec}}(t)} - \frac{v_j^2(t)}{2a_{j,\text{maxdec}}} \quad (8)$$

$$a_{i,\text{dec}}(t) = a_{i,\text{mindec}} + \frac{v_i(t)}{v_{i,\text{max}}(t)} (a_{i,\text{maxdec}} - a_{i,\text{mindec}}) \quad (9)$$

式中: $D_{i,j}(t)$ 和 $F_{i,j}(t)$ 分别为 t 时刻车辆 i 和车辆 j 的纵向车间距和安全距离要求。对下标进行简写表示,如 $D_{\text{LF}}(t)$ 表示 $D_{\text{LV},\text{FV}}(t)$; T_{hw} 为期望车头时距; $v_i(t)$ 和 $v_j(t)$ 分别为车辆 i 和 j 的纵向行驶速度; $a_{i,\text{dec}}(t)$ 为 t 时刻车辆 i 的减速度; $a_{i,\text{mindec}}$ 和

$a_{i, \max \text{dec}}$ 和分别为车辆 i 的最小和最大减速度;
 $v_{i, \max}(t)$ 为车辆 i 的最大行驶速度。

2.3 博弈策略与决策代价分析

现有文献中的车辆博弈交互过程通常考虑不同决策对应的行驶效率、驾驶安全和乘坐舒适性,根据上述基本假设和建模视角,为有效刻画真实场景中的个体决策过程并参考相关文献[14],将博弈收益设置在对行驶效率和安全收益的取舍判断中,而乘坐舒适性通常可以通过轨迹规划获得舒适收益最大化。通过非合作博弈和纳什均衡方法^[15]求解主线车辆的换道切出及其决策倾向,车辆行驶效率成本通常考虑车辆当前的纵向行驶速度与车道期望速度的差值,定义车辆的速度成本函数为:

$$J_{\text{eff}}(t) = e^{(v_{\text{cur}}(t) - v_{n, \max}(t))}, n \in \{0, 1\} \quad (10)$$

$$v_{n, \max}(t) = \begin{cases} \min(v_{n, \text{fcar}}(t), v_{\text{mercar}}(t)), & n = 0 \\ \min(v_{n, \text{lim}}, v_{n, \text{fcar}}(t)), & n = 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $v_{\text{cur}}(t)$ 为 t 时刻当前决策车辆的纵向行驶速度; $v_{n, \max}$ 为第 n 条车道最大期望行驶速度,主线外侧车道 n 为 0, 主线内侧车道 n 为 1; $v_{n, \text{fcar}}(t)$ 和 $v_{\text{mercar}}(t)$ 分别为 t 时刻第 n 车道前车和汇入车辆行驶速度; $v_{n, \text{lim}}$ 为第 n 车道最大行驶速度。

车辆换道的安全成本与车辆的相对位置和相对速度有关,反映了在未来一段时间内与交互车辆的风险冲突,定义车辆的安全成本函数为:

$$J_{\text{sec}}(t) = nJ_{\text{lat}}(t) + (n-1)J_{\text{lons}}(t), n \in \{0, 1\} \quad (12)$$

$$J_{\text{lons}}(t) = \frac{\delta_{\text{lon}, \Delta v} (\Delta v_{\text{lon}, ij}(t))^2 \epsilon(\Delta v_{\text{lon}, ij}(t)) + \delta_{\text{lon}, \Delta s}}{(\Delta s_{\text{lon}, ij}(t))^2 + \xi} \quad (13)$$

$$\epsilon(\Delta v_{\text{lon}, ij}(t)) = \begin{cases} 0, & \Delta v_{\text{lon}, ij}(t) < 0 \\ 1, & \Delta v_{\text{lon}, ij}(t) > 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\Delta v_{\text{lon}, ij}(t) = v_i(t) - v_j(t) \quad (15)$$

$$J_{\text{lat}}(t) = \frac{\delta_{\text{lat}, \Delta v} (\Delta v_{\text{lat}, ik}(t))^2 \epsilon(\Delta v_{\text{lat}, ik}(t)) + \delta_{\text{lat}, \Delta s}}{(\Delta s_{\text{lat}, ki}(t))^2 + \xi} \quad (16)$$

$$\epsilon(\Delta v_{\text{lat}, ki}(t)) = \begin{cases} 0, & \Delta v_{\text{lat}, ki}(t) < 0 \\ 1, & \Delta v_{\text{lat}, ki}(t) > 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\Delta v_{\text{lon}, ki}(t) = v_k(t) - v_i(t) \quad (18)$$

式中: $J_{\text{lons}}(t)$ 为车辆 i 选择当前车道行驶时的安全成本,考虑与汇入车辆 j 的相对距离 $\Delta s_{\text{lon}, ij}(t)$ 和速度差 $\Delta v_{\text{lon}, ij}(t)$ 因素影响; $v_i(t)$ 和 $v_j(t)$ 分别为 t 时

刻车辆 i 和车辆 j 的速度; $J_{\text{lat}}(t)$ 为车辆 i 选择换道切出时与内侧车道后车 k 的安全成本,考虑与车辆 k 的相对距离 $\Delta s_{\text{lat}, ki}(t)$ 和速度差 $\Delta v_{\text{lat}, ki}(t)$ 因素影响; $v_k(t)$ 为 t 时刻车辆 k 的速度; $\epsilon(\Delta v_{\text{lon}, ij}(t))$ 和 $\epsilon(\Delta v_{\text{lat}, ki}(t))$ 为阶跃函数,仅当 $\Delta v_{\text{lon}, ij}(t) > 0$ 或 $\Delta v_{\text{lat}, ik}(t) > 0$ 时考虑速度差的影响; $\delta_{\text{lon}, \Delta v}$ 、 $\delta_{\text{lon}, \Delta s}$ 、 $\delta_{\text{lat}, \Delta v}$ 、 $\delta_{\text{lat}, \Delta s}$ 分别为对应成本代价函数的系数。

综合式(10)~式(15),构建车辆博弈决策的总代价函数 J_{total} 为:

$$J_{\text{total}}(\Delta s_{n, ij}, \Delta v_{n, ij}, n, t) = \omega_{\text{eff}} \frac{J_{\text{eff}}(t)}{J_{\text{effmax}}} + (1 - \omega_{\text{eff}}) \frac{J_{\text{sec}}(t)}{J_{\text{secmax}}} \quad (19)$$

式中: ω_{eff} 为车辆决策过程中效率成本 $J_{\text{eff}}(t)$ 的系数; $J_{\text{sec}}(t)$ 为车辆行驶安全成本; J_{effmax} 和 J_{secmax} 分别为代价函数中的效率和安全的归一化值。

在车辆博弈决策交互过程中,通过考虑车辆的安全和效率成本以期实现代价函数最小化,从而得到主线车辆博弈决策的最优策略为:

$$n(t) = \operatorname{argmin} J_{\text{total}}(\Delta s_{n, ij}, \Delta v_{n, ij}, n, t), n \in \{0, 1\} \quad (20)$$

车辆通过对行驶效率和安全成本进行判断取舍,择优选择应对策略,车辆在博弈决策和换道过程中需要满足变量的范围要求。

$$v_{\min} \leq v(t) \leq v_{\max} \quad (21)$$

$$a_{\min} \leq a(t) \leq a_{\max} \quad (22)$$

$$d_{\max} \leq d(t) \leq d_{\min} \quad (23)$$

$$\mathbf{W}_{\min} \leq \mathbf{W} \leq \mathbf{W}_{\max} \quad (24)$$

$$t_{\min} \leq t_1 - t_0 \leq t_{\max} \quad (25)$$

式中: $v_{\min}$ 、 $v_{\max}$ 、 $a_{\min}$ 、 $a_{\max}$ 、 $d_{\min}$ 、 $d_{\max}$ 、 $\mathbf{W}_{\min}$ 、 $\mathbf{W}_{\max}$ 、 $t_{\min}$ 、 $t_{\max}$ 分别为车辆的最小和最大速度、加速度、减速度、横向位移、换道时间。

2.4 匝道车辆汇入间隙适配过程

在换道初始时刻, LV 的行驶位置为 $x_L(0)$, RV、FV 的位置分别为 $x_R(0)$ 和 $x_F(0)$, 与目标车道前车 FV 和后车 RV 的初始换道距离分别为 $D_{\text{LF}}(0)$ 和 $D_{\text{RL}}(0)$ 。当 $D_{\text{LF}}(0)$ 或 $D_{\text{RL}}(0)$ 不满足式(6)时,需要主线车辆协作使汇入间隙满足要求。

根据轨迹数据中存在的车辆动态交互行为,将车辆汇入决策流程表示为图 7,由于匝道车辆与主线车辆的纵向行驶位置具有相对性,以匝道车辆驶入加速车道虚线范围时刻进行判断和汇入流程执行。根据上述车辆安全汇入距离需求将车

辆汇入流程分为以下 3 种情况:当汇入间隙满足要求时 LV 即可进行换道汇入;当汇入间隙不满足要求,即 $D_{LF}(t) < F_{LF}(t)$ 或 $D_{RL}(t) < F_{RL}(t)$ 时,需要与主线车辆进行博弈交互。①如若前向汇入间隙不满足要求,判断主线前车 FV 是否满足切出条件,如若满足则主线前车进行换道切出,为匝道车辆提供前向汇入间隙;②如若后向汇入间隙不满足汇入条件,根据主线后车 RV 的切出条件和博弈代价选择减速或换道切出策略,为匝道车辆提供后向汇入间隙;③如若前向汇入间隙不满足条件且主线前车 FV 无法换道切出,则需由主线后车 RV 协助完成汇入过程,主线后车根据切出条件和博弈代价判断选择减速或换道切出策略,进而执行后向间隙适配过程。

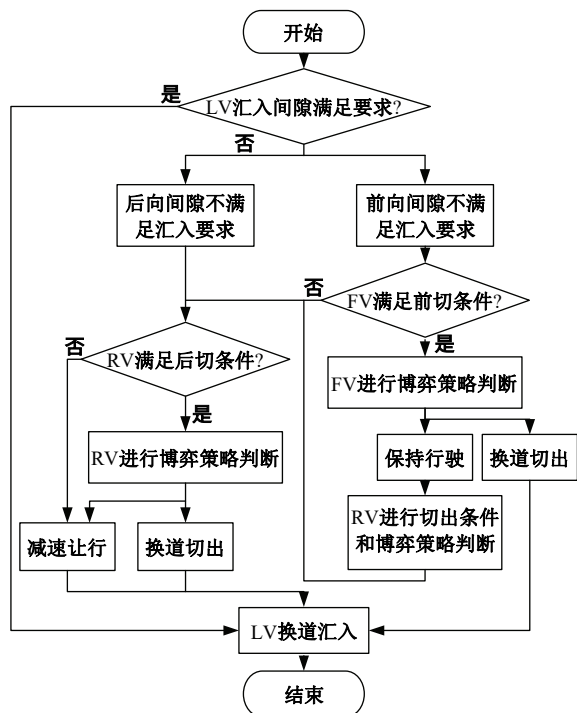


图 7 车辆汇入决策流程

Fig. 7 Decision-making process of vehicle merging

为详细阐述匝道车辆汇入间隙适配过程,通过图 8 所示主线车辆减速、后侧切出和前侧切出场景中车辆间隙变化进行说明,虚线表示车辆已驶出或未驶入主线外侧车道的车辆轨迹。

在主线后车换道切出场景中,当 $D_{RL}(t) < F_{RL}(t)$ 无法满足 LV 汇入要求而 RV 满足换道切出条件,通过判断 RV 切出使汇入间隙由 D_{FR} 突变为 $D_{FR'}$ 能否使汇入间隙满足要求,如图 8(b) 所示,判断 RV' 能否满足 $D_{RL'}(t) \geq F_{RL'}(t)$,如若满足要求则 RV 进行博弈策略判断,根据收益期望择优

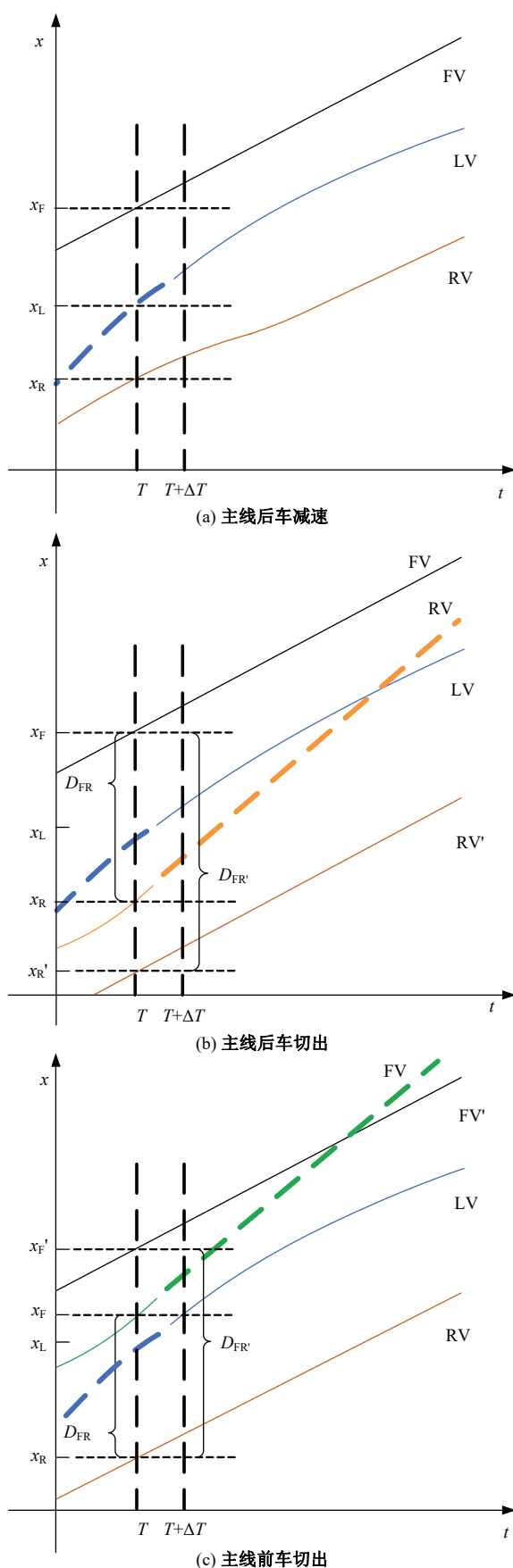


图 8 车辆距离汇入间隙变化

Fig. 8 Changes in the distance and merging gap of vehicles

选择最佳策略。当RV在 T 时刻选择换道切出时,LV即可进行汇入并在 $T+\Delta T$ 时刻进入主线车道;当RV通过考虑博弈代价选择减速或RV无法满足换道切出条件时,则RV需减速增加前方车间距使LV汇入。

在主线前车换道切出场景中,当 $D_{LF}(t)<F_{LF}(t)$ 即车间距无法满足LV汇入要求而FV满足换道切出条件时,通过判断RV切出使汇入间隙由 D_{FR} 突变为 $D_{FR'}$ 能否使汇入间隙满足要求,如图8(c)所示,判断FV'能否满足 $D_{LF'}(t)\geq F_{LF'}(t)$,如若满足汇入间隙要求则FV进行博弈策略判断,FV根据收益期望择优选择最佳策略。当FV在 T 时刻选择换道切出且LV同时满足后向汇入间隙要求,则LV即可进行换道汇入并在 $T+\Delta T$ 时刻进入主线车道;当FV通过考虑博弈代价选择不切出或保持车道行驶时则需转换汇入协作对象,由RV进行博弈判断即重复进行上述主线后车切出博弈策略过程。

3 仿真实验与数值分析

3.1 仿真场景及参数设置

为验证本文所建模型的有效性,使用SUMO软件进行仿真实验和分析,通过轨迹数据集和PATH实验室标定结果^[16]得到如表2所示模型参数。

表 2 参数标定结果		
Table 2 Parameter calibration results		
符 号	符号含义	取值
$a_{\max}$	最大加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	3.15
d_{comf}	舒适减速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	1.42
t_{hw}	期望车头时距/s	3.09
$d_{\min}$	最小停车间距/m	7.47
L_{car}	车身长度/m	4.70
k_p	车间距系数	0.45
k_d	车间距变化系数	0.25

3.2 车辆行驶速度影响分析

由式(9)和式(11)可知,车辆的行驶速度是构成车辆决策成本的主要因素,为刻画真实场景中上游车辆的行驶状态,在仿真测试过程中通过设置速度因子为自上游驶入的车辆设置不同的初始行驶速度,通过控制其他变量不变和选取仿真测试过程中汇入车辆和内侧车道车速分别为23.52 m/s和31.90 m/s的行驶场景,调整主线车辆速度为25~30 m/s分析不同行驶速

度对主线车辆决策结果的影响。如图9所示,当主线车辆行驶速度加快时,选择保持当前车道行驶和换道切出决策成本均显著增加且前者曲线斜率高于后者,表明当主线车辆速度较高时,匝道车辆的汇入行为会显著增加主线车辆的速度代价,当主线车辆速度高于汇入车辆时,换道切出的成本代价显著小于减速策略。

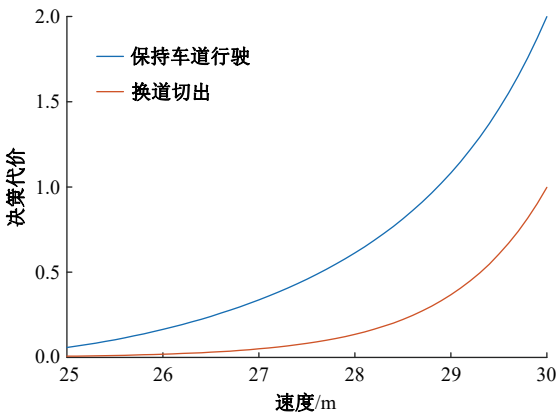


图 9 不同行驶速度的决策代价

Fig. 9 Decision costs of different travel speeds

3.3 仿真实验与结果分析

3.3.1 主线后车切出场景中车辆行驶状态变化

仿真场景中以汇入路段外侧车道起始位置中心为横向位置原点,由于车辆汇入区域属于非直线路段,车辆沿车道行驶时横向位置会逐渐降低,图10为主线后切场景中车辆的横向位置变化,横向位置增加时表明车辆进行了换道。当LV驶入汇入路段时,主线外侧车道存在后车RV,而内侧车道后方存在CRV,RV根据博弈代价判断选择采取主线后侧切出策略且LV同时进行换道汇入。

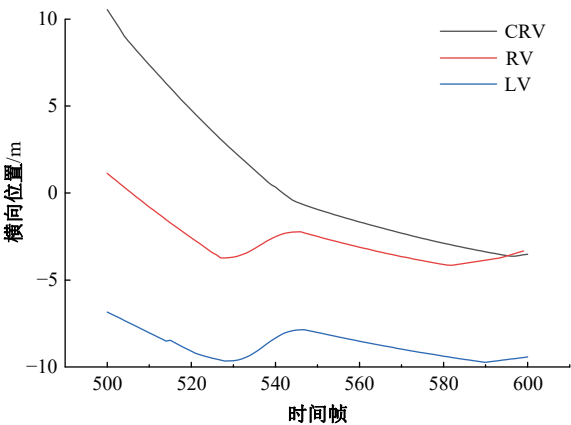


图 10 主线后车切出场景中车辆横向位置变化
Fig. 10 Change of vehicle lateral position in mainline rear car cut-out scenario

图 11 为主线后车切出场景中车辆驶入汇入区域行驶速度变化,当 RV 发现 LV 驶入右前方时,通过对左侧切出条件和博弈策略成本进行判断,由于匝道车辆换道汇入会显著增加 RV 的行驶代价, RV 择优选择换道切出策略,由于 RV 驶入内侧车道且位置先前于 CRV 从而使后者需减速跟随其行驶。

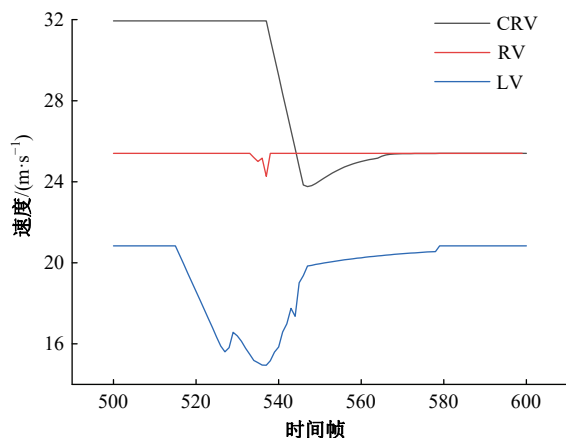


图 11 主线后车切出场景中车辆速度变化

Fig. 11 Changes of vehicle speed in mainline rear car cut-out scenario

3.3.2 主线前车切出场景中车辆行驶状态变化

在数据集和仿真实验中,前侧切出行为多发生在前方存在已汇入的匝道车辆而右后方存在下一待汇入车辆。如图 12 所示,主线车辆 FV 前方为已完成汇入的匝道车辆 FLV,由于 FLV 已汇入主线车道且当前行驶速度显著低于 FV, FV 根据博弈代价作出切出决策,由此增加了 LV 的前向汇入间隙,促使 LV 在 FV 换道切出后汇入主线车道。

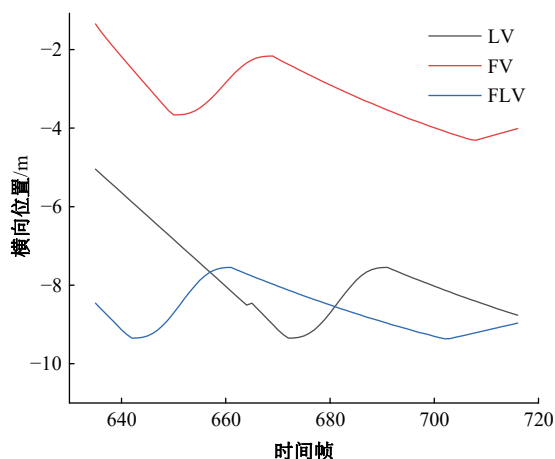


图 12 主线前车切出场景中车辆横向位置变化

Fig. 12 Change of vehicle lateral position in mainline front car cut-out scenario

图 13 为主线前车切出场景中车辆驶入汇入区域行驶速度变化,由于 FLV 已换道汇入主线车道且 FLV 行驶速度明显低于 FV, FV 如若降低速度损失则需进行换道切出,同时为 LV 提供前向换道汇入间隙, LV 由此汇入主线外侧车道。

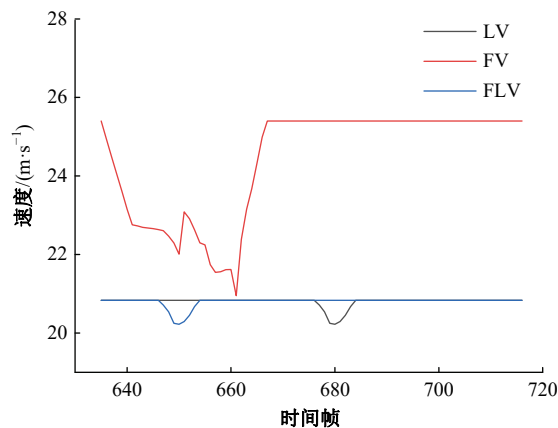


图 13 主线前车切出场景中车辆速度变化

Fig. 13 Changes of vehicle speed in mainline front car cut-out scenario

3.3.3 车辆换道汇入距离对比分析

以汇入路段加速车道左侧虚线相交位置为原点,如图 14 所示,通过对数据集和仿真实验的车辆汇入位置进行统计得到换道汇入距离分布箱型图,统计数据表明数据集场景中换道汇入距离介于 $[-40.38, 137.30]$ m 范围内,均值为 57.41 m,标准差为 31.76 m,部分换道汇入距离小于或趋于 0,原因是部分匝道车辆在实线区压线驶入主线车道。较大数值的换道汇入距离反映了车辆在较长时间内无法满足汇入条件而被迫行驶至加速车道末端进行汇入,通过数据可视化工具发现该情况常发生于主线车辆未及时有效协助匝道车辆汇入而迫使匝道车辆驶近车道末端。

仿真实验场景中, SUMO 内置子车道 SL2015 微观换道模型汇入距离均值为 129.16 m 而标准差为 42.08 m,车辆汇入受主线车辆影响较大且同样存在受迫驶近车道末端的情况,从而使车辆换道汇入距离波动性较大、数值较为离散。本文所建伪协作换道切出汇入模型的汇入距离介于 $[37.74, 63.65]$ m 区间范围内,均值为 45.90 m,标准差为 5.22 m,换道汇入距离相比数据集场景缩小 11.51 m,相较于 SL2015 微观换道模型降低 83.26 m 且数值分布更为集中,匝道车辆在主线车辆博弈换道切出协助下均可有效汇入主线车道。

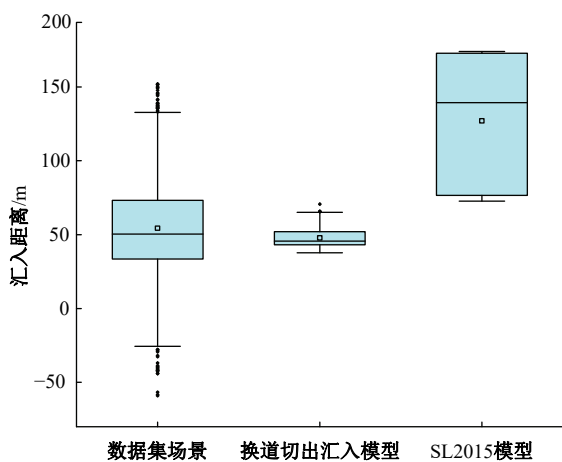


图 14 车辆汇入距离对比

Fig. 14 Comparison of vehicle merging distances

3.3.4 车辆汇入安全性对比分析

车辆的行驶安全性通常用 TTC 等指标进行量化对比和分析,本文采用二维 TTC 安全指标^[17]刻画车辆的博弈决策行为和行驶安全性。如图 15 所示,通过统计分析并对比匝道车辆在汇入主线车道时刻与周围车辆的换道安全数据,得到不同模型下车辆换道汇入的 TTC 值分布箱型图,数据集场景中 TTC 均值为 7.01 s,标准差为 5.15 s,SL2015 换道模型的 TTC 分布均值为 6.39 s,标准差为 4.86 s,本文所建伪协作换道切出汇入模型 TTC 均值为 13.78 s,标准差为 4.74 s。由于数据集场景中不存在其他交互行为,因此,数据集场景中 TTC 值低于本文所建模型,后者相较于数据集场景车辆碰撞风险时间平均增加 6.77 s,相较于 SL2015 换道模型增加 7.39 s。

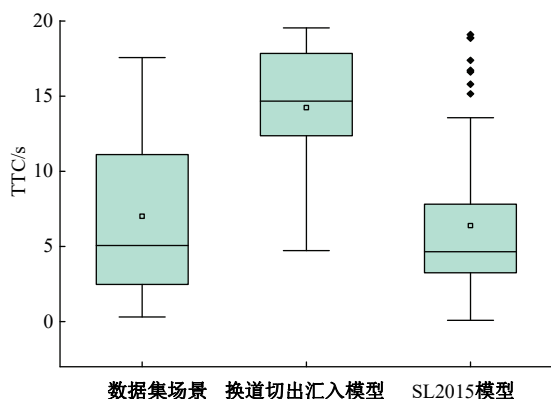


图 15 换道安全性对比

Fig. 15 Comparison of safety of changing lane

仿真结果表明基于博弈视角的伪协作切出汇入模型可以有效刻画轨迹数据集中的车辆交互过程并提高车辆的换道汇入安全性。主线车辆的换道切出行为使得匝道汇入车辆的交互对象发生转

变,由相对位置最近且存在行驶意图冲突的车辆转变为较远的主线行驶车辆,通过主线车辆的错位交替实现车辆行驶风险的降低。

4 结 论

(1)通过分析德国 ExiD 高精轨迹数据集中的车辆行驶数据,发现车辆换道汇入时存在汇入间隙突变的现象,由此阐述并定义了主线车辆的伪协作交互行为,基于博弈决策和代价成本视角解析主线车辆的换道切出过程,拓展了现有研究中对车辆换道汇入的类型划分和博弈交互行为视角。

(2)通过对比主线车辆的换道切出和交互行为过程,发现主线前车切出现象通常发生在主线车辆前方存在已汇入的匝道车辆且同时右后方存在下一待汇入车辆,主线前车为降低速度损失选择换道切出并为待汇入车辆提供汇入间隙。主线后车切出行为通常发生在内侧车道满足切出条件而匝道车辆汇入增加了自车行驶代价,主线后车选择向内侧换道而无须与匝道车辆进行后续博弈交互。主线车辆的换道切出行为改变了汇入车辆的交互对象,通过错位交替降低车辆换道汇入的风险。

(3)车辆行驶速度对主线车辆决策有着直接影响,当主线车辆行驶速度越高时,匝道车辆换道汇入会显著增加主线车辆的速度代价。当主线车辆行驶速度高于汇入车辆时,如若车辆满足换道切出条件,则选择换道切出的成本代价低于减速让行策略。

(4)主线车辆的伪协作换道切出行为虽是决策代价分析过程中的主观非合作行为,但在决策结果上有效协助了匝道车辆汇入。主线车辆受到匝道车辆汇入意图的影响触发了其对不同决策成本代价的期望,前者在现有交通约束条件下选择了最优策略又恰好协助了匝道车辆汇入。

参考文献:

- [1] 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): 224-235.
Hao Wei, Gong Ya-xin, Zhang Zhao-lei, et al. Co-operative merging strategy for freeway ramp in a mixed traffic environment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(1): 224-235.
- [2] Ma C C, Wang J J, Wang S, et al. Research on a

- collaborative control strategy of an urban expressway merging bottleneck area[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(22): 11397-11422.
- [3] Liu J Q, Zhao W Z, Xu C. An efficient on-ramp merging strategy for connected and automated vehicles in multi-lane traffic[J]. *Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(6): 5056-5067.
- [4] 曲大义, 黑凯先, 郭海兵, 等. 车联网环境下车辆换道博弈行为及模型[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2022, 52(1): 101-109.
- Qu Da-yi, Hei Kai-xian, Guo Hai-bing, et al. Game behavior and model of lane-changing on the internet of vehicles environment[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2022, 52(1): 101-109.
- [5] 马庆禄, 闫浩, 聂振宇, 等. 匝道合流区智能网联车辆协同控制方法[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2024, 54(5): 1332-1346.
- Ma Qing-lu, Yan Hao, Nie Zhen-yu, et al. Cooperative control method for intelligent networked vehicles in ramp confluence area[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2024, 54(5): 1332-1346.
- [6] 祁宏生, 应雨燕, 林俊山, 等. 混合自动驾驶场景多换道需求下的主动间隙适配和换道序列规划[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2021, 19(4): 36-51.
- Qi Hong-sheng, Ying Yu-yan, Lin Jun-shan, et al. Proactive gap adaption and sequence planning for multiple lane-changing requests under mixed autonomous vehicle flow[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2021, 19(4): 36-51.
- [7] Wang Z, Zhao X M, Chen Z W, et al. A dynamic cooperative lane-changing model for connected and autonomous vehicles with possible accelerations of a preceding vehicle[J]. *Expert Systems With Applications*, 2021, 173(1): 114675-114693.
- [8] 张方方, 王长君, 王俊骅. 城市快速路匝道合流区车辆交互行为模式[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(9): 66-79.
- Zhang Fang-fang, Wang Chang-jun, Wang Jun-ye. Vehicle interaction patterns on-ramp merging area of urban expressway[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(9): 66-79.
- [9] 叶颖俊, 倪颖, 孙剑. 高密度瓶颈交通流主动-回应汇入行为定义与建模[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(8): 278-290.
- Ye Ying-jun, Ni Ying, Sun Jian. Defining and modeling active-responsive merging behavior at high-density expressway on-ramp bottlenecks[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(8): 278-290.
- [10] 邬岚, 赵乐, 李根. 基于方差异质性随机参数模型的汇合行为分析[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2024, 54(4): 883-889.
- Wu Lan, Zhao Le, Li Gen. Analysis of merging behavior based on random parameter model with heterogeneity in variances[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2024, 54(4): 883-889.
- [11] Moers T, Vater L, Krajewski R, et al. The exiD dataset: a real-world trajectory dataset of highly interactive highway scenarios in germany[C]//*IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Aachen, Germany, 2022: 958-964.
- [12] Arbis D, Dixit V. Game theoretic model for lane changing: incorporating conflict risks[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2019, 125(1): 158-164.
- [13] Xu H L, Zhang Y G, Cassandras C, et al. A bi-level cooperative driving strategy allowing lane changes[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 120(1): 102773-102790.
- [14] 郝威, 张兆磊, 吴其育, 等. 网联自动驾驶车辆下匝道换道决策模型[J]. *交通运输工程学报*, 2023, 23(5): 242-252.
- Hao Wei, Zhang Zhao-lei, Wu Qi-yu, et al. Lane-changing decision model of connected and automated vehicles driving off ramp[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(5): 242-252.
- [15] Hang P, Lv C, Xing Y, et al. Human-like decision making for autonomous driving: a noncooperative game theoretic approach[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(4): 2076-2087.
- [16] Milanés V, Shladover S. Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 48(1): 285-300.
- [17] Ward J, Agamennoni G, Worrall S, et al. Extending time to collision for probabilistic reasoning in general traffic scenarios[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 51(1): 66-82.