

文章编号:1001-7372(2022)04-0243-13

车联网环境下自动驾驶车辆车道选择决策模型

杨 达^{1,2,3}, 吕 蒙¹, 戴力源¹, 王啸文¹, 郭 茜^{*1}

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 综合交通运输
智能化国家地方联合工程实验室, 四川 成都 610031; 3. 西南交通大学 综合
交通大数据应用技术国家工程实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 试验车道选择行为是自动驾驶车辆最基本的决策行为之一, 利用车联网技术可以使车道选择结果更加全面、合理。首先, 对高速公路自动驾驶车辆车道选择决策过程进行分析, 并以车联网感知通信范围内的车辆的平均速度、重车比例及前往车道的理想换道时间为主要指标创建成本函数, 根据计算结果输出最优车道序列; 然后, 以 Gipps 安全驾驶模型为基础, 构建下层安全条件判断模型对最优车道序列进行筛选, 获得安全可行的最优目标车道; 最后, 搭建高速公路基本路段的仿真环境, 利用仿真试验对建立的模型进行验证, 并分析重车比例、车道间的速度差等要素对模型结果的影响和模型的安全性特征。研究表明: 该模型综合考虑主车感知范围内的多项指标, 使其行驶优势得到增强, 并且提高了换道成功概率; 当车道上车流参数发生变动时, 模型始终表现出良好的区分度; 在当前间隙不满足换道条件时, 通过考虑前、后方多个间隙, 使车辆充分把握主动换道的机会, 实现行车收益最大化; 该模型具有安全性高、适应性强等特点, 可为未来车联网环境下的自动驾驶车辆车道选择提供借鉴。

关键词: 交通工程; 车道选择决策模型; 建模仿真; 自动驾驶车辆; 车联网环境

中图分类号: U492 **文献标志码:** A

Decision-making Model for Lane Selection of Automated Vehicles in Connected Vehicle Environment

YANG Da^{1,2,3}, LYU Meng¹, DAI Li-yuan¹, WANG Xiao-wen¹, GUO Qian^{*1}

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;
2. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Southwest
Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 3. National Engineering Laboratory of
Integrated Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong
University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Lane selection maneuvering is an essential decision-making ability of automated vehicles. The connected vehicle technology can enhance the lane selection maneuvering of automated vehicles. First, the lane selection decision-making process of automated vehicles on freeways was analyzed in this study, and a cost function was derived based on the average speed of vehicles, proportion of heavy vehicles, and ideal lane-changing time within the perception and communication range. The cost function output the optimal lane sequence based on the calculation

收稿日期: 2020-08-16

基金项目: 四川省科学技术厅重点研发计划项目(19ZDYF2068); 国家自然科学基金项目(52172333);

交通运输行业重点科技项目(cgky004)

作者简介: 杨 达(1985-), 男, 山西忻州人, 副教授, 工学博士, 博士后, E-mail: yangd8@swjtu.edu.cn。

* 通讯作者: 郭 茜(1975-), 女, 河南南阳人, 讲师, 管理学博士, E-mail: guoqianlt@swjtu.edu.cn。

results. Second, the Gipps safe driving model was used to establish a lower-level safety condition judgment model and determine the safe and feasible optimal target lane by filtering the optimal lane sequence. Third, a simulation platform suitable for basic sections of the expressway was constructed, based on which the proposed model was verified. The effects of the factors, including the proportion of heavy vehicles, the speed difference between two lanes on the simulation results, and the safety characteristics of the proposed model, were analyzed. The results indicate that the proposed model can comprehensively reflect various indicators within the perception range of vehicles, enhance the driving benefits of vehicles, and increase the probability of successful lane-changing. When the traffic parameters change, the model exhibits a good discrimination degree. When the current gap does not satisfy the lane-changing requirement, the front and rear gaps are evaluated to increase the lane-changing probability of the vehicles. Furthermore, the model shows improved safety and strong adaptability, providing a reference for future studies on the lane selection of automated vehicles in the connected vehicle environments.

Keywords: traffic engineering; lane selection decision model; modeling and simulation; automated vehicles; connected vehicle environment

Received 16 Aug. 2020

Funding: Key Research and Development Project of Science and Technology Department of Sichuan Province (19ZDYF2068); National Natural Science Foundation of China (52172333); Key Science and Technology Project in Transportation Industry (cgky004)

*Corresponding author. *E-mail address:* guoqianlt@swjtu.edu.cn.

<https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.04.020>

0 引言

车道选择是自动驾驶车辆最基本的决策行为之一,对自动驾驶车辆的安全性和行驶效率有着重要影响^[1]。随着车联网技术的快速发展,自动驾驶车辆能够利用其网联通信的强大功能感知到更大范围内周边车辆的状态,接收到的信息更加复杂、精确,车道选择决策算法也需要随之更新。

自动驾驶车道选择决策的相关领域是换道决策,已有车辆换道决策的相关研究中,换道决策模型主要是基于规则和基于机器学习的模型。基于规则的模型中,驾驶人根据若干规则进行车道改变的决策,例如优选目标车道、改变车道的必要性、改变车道的可行性等,代表性模型是 Gipps^[2]提出的换道模型,许多学者在此基础上又进行了扩展和升级。Barceló 等^[3-4]添加了新的换道条件, Yang 等^[5]提出高速公路上基于规则的换道模型,被应用到 MITSIM(Microscopic Traffic Simulator)中。袁盛珏^[6]对复杂交通场景进行了分类,针对不同场景提取规则,并基于有限状态机建立换道规则库; Chen 等^[7-8]采用层次分析法、相似度排序法等多属性决策方法来选择驾驶行为,所建模型使自动驾驶车辆在复杂交通环境下的决策更为合理。早期 DARPA

(Defense Advanced Research Projects Agency)自动驾驶挑战赛中,绝大多数参赛车的换道决策系统也采用基于规则的模型^[9-11]。基于机器学习的模型通过训练大量的换道数据来挖掘影响驾驶人做换道决策的潜在因素,该类模型精度较高、所需数据量较大,并需要与人工神经网络、模糊逻辑、贝叶斯分类器、决策树、随机森林等^[12-15]机器学习算法结合使用。其中, Hou 等^[13]通过研究随机森林算法和自适应增强算法(AdaBoost)开发了提高安全性的变道辅助系统。Liu 等^[16]提出了基于贝叶斯参数优化的支持向量机(SVM)决策模型。相较于基于规则的模型, SVM 模型对结果的真阳性与假阴性表现出更高的准确度,并较好地考虑了驾驶人的换道行为。

已有相关研究普遍关注于换道决策支持系统的完善,针对自动驾驶车道选择的研究仍处于起步阶段。 Dao 等^[17]提出了自动驾驶单车主动车道选择的分布式控制策略,以车辆的总体旅行时间为成本函数建立了车道分配的线性规划模型,仿真结果表明,该模型能够有效地减少车辆的行驶时间。随后, Dao 等^[18]又提出了高速公路多车协同队列选择方法,假设自动驾驶车辆有条件实现车辆队列行驶,以最大化车队行驶距离为目标建立车辆协同下车道分配的线性规划模型,使交通流得到明显改善。但是,

上述研究没有考虑到自动驾驶车辆处于车联网环境中时可以获取较大范围数据的情况,其车道选择结果具有一定局限性。目前,车联网技术可以获取观测范围内的平均速度、平均车头时距、重车比例等宏观要素,配合以 Gipps 模型为基础的安全判断条件,以上指标可以对当前换道决策进行分析判断并辅助车辆选择最优车道,实现车辆安全性、运行效率以及换道难度的量化评估,提高自动驾驶车辆的安全性与行驶效率。

基于此,本文建立车联网环境下自动驾驶车辆的车道选择决策模型。首先,以车联网观测范围内得到的车流平均速度、重车比例以及预估的理想换道时间为指标建立成本函数,并基于该函数输出初步的最优车道序列;然后,以安全间隙条件为基础建立下层安全条件判断模型,并以各条车道具体的微观安全间隙条件衡量前往该车道的可行性,对最优车道序列进行筛选获得最优的决策结果;最后,通过仿真试验验证算法的有效性,并进一步分析各项指标对模型的影响效应。此模型具备安全性高、适应性强等优点,可为未来车联网环境下的自动驾驶车辆车道选择提供借鉴。

1 模型构建

本节通过分析车联网环境下车道选择的评价指标,建立相应的综合成本函数;并进一步分析自动驾驶车辆周围各车道的间隙条件,以此为依据对车道进行二次筛选,获得最优目标车道。

1.1 模型框架

本文构建的车道选择决策模型可分为 2 个阶段,如图 1 所示。

第 1 阶段:将车联网环境下自动驾驶车辆所采集的车流平均速度、车道重车数量、主车换道时间等宏观指标代入成本函数模型,得出行驶成本与换道成本基础上的车道综合成本,并通过比较车道成本输出当前的最优车道序列。

第 2 阶段:以成本函数模型输出的车道序列为依据,确定目标车道,并由车道所在位置决定决策类型。若自动驾驶车辆进入换道准备阶段,间隙选择模型将确认换道间隙的可行性,即根据行驶环境对间隙展开分析判断,车辆将根据模型输出进行车道选择决策。

1.2 成本计算模型

借助于车联网技术,自动驾驶车辆在行驶过程

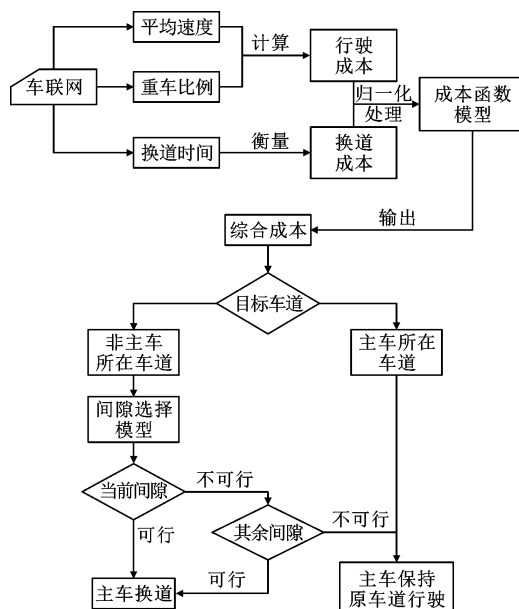


图 1 模型判断决策流程

Fig. 1 Model Judgment and Decision Flow Chart

中能够实时采集所在一定范围内的交通数据,然后通过计算车道成本进行车道选择决策。在目前车联网的技术条件下,自动驾驶车辆对本车道和其他车道的观测区域有限,其观测距离会受到实际交通情况的影响,故假设前提条件如下:

- (1)根据现有技术条件,高速公路环境中自动驾驶车辆可采集的数据范围大小确定,感知区域长度为 l ;
- (2)基于车联网技术,可以采集到感知范围内模型所需精确数据,自动驾驶车辆感知示意图 2。



图 2 自动驾驶车辆感知范围示意

Fig. 2 Schematic Diagram of the Perception Range of Autonomous Vehicles

车辆的车道选择决策模块使用多个相关指标计算出每条车道的成本值,输出初步的最优车道序列;然后基于初步输出结果和下层安全条件判断模型,输出最终目标车道。其成本计算包括 2 个部分,包括对主车沿车道行驶时的成本计算以及对主车前往目标车道预期的换道成本的计算。其中,沿车道行驶的成本是指自动驾驶车辆预期在某条车道上行驶时的成本,所考虑的指标包括平均速度、密度、重车影响程度等;前往目标车道的换道成本是指自动驾

驶车辆从本车道更换到目标车道过程中的预期换道成本,采用换道次数、换道时间等指标衡量。对自动驾驶车辆当前正在行驶的车道进行计算时,不需要考虑换道成本。

1.2.1 沿车道行驶成本

沿车道行驶的驾驶环境评价指标包括 2 个部分:第 1 部分是决策时域内该车道感知区域中所有车辆的平均速度,该指标可以衡量车辆的运行效率,无论是人工驾驶还是自动驾驶车辆,都追求运行速度的提升,平均速度越低,运行成本越高;第 2 部分是主车前方重车对决策也存在重要的影响,大型车辆不仅会降低周围车辆的潜在安全性,也会影响后方车辆的速度^[19],使得主车倾向于不跟随重型车辆行驶,因此,可以用决策时域内主车前方感知区域内重车比例的平均值来衡量重车影响程度,相应地,重车比例越大,成本越高。

设置自动驾驶车辆每隔 t_s 的时间步长接收到 1 次环境数据,在决策时域 t_d 中,车辆将收集 t_d/t_s 次交通环境数据。对于车道 m ,用 \bar{v}_m^i 表示第 i 次观测时感知区域内车流的平均速度,用 Q_m^i 代表第 i 次观测时感知区域内的重型车辆占有所有车辆的比例,越接近做决策的时间点,观测数据的重要性越高。为此,将一定决策时域内、第 i 次观测数据的权重 w_i 设置为

$$w_i = i \left(\sum_{k=1}^{t_d/t_s} k \right)^{-1} \quad (1)$$

综合统计决策时域内的数次观测数据,得到决策时域 t_d 内车道 m 的 2 项评价指标,即平均速度 \bar{v}_m 与重车比例 Q_m ,用以计算成本函数,其计算公式如下

$$\bar{v}_m = \bar{v}_m^i \sum_{i=1}^{t_d/t_s} w_i \quad (2)$$

$$Q_m = Q_m^i \sum_{i=1}^{t_d/t_s} w_i \quad (3)$$

1.2.2 换道成本

因车辆在换道过程中会产生横向位移干扰相邻车道车流,所以换道行为比跟驰行为有更高的潜在安全风险,换道开始后主车期望尽快完成换道。即使某车道在平均速度、重车数量等方面具有更好的优势,但当换道成本过高时,车辆就会放弃将该车道作为目标车道,因此本文用车辆前往目标车道的换道时间衡量换道成本,其中换道时间可以通过规划前往目标车道的理想换道轨迹计算得出。

车辆的换道运动轨迹可近似为多项式曲线。其

中,三次多项式不仅在线形方面和车辆换道轨迹曲线相近,又有二阶光滑度的特点,同时还能避免高次多项式需要引入抽象参数来约束轨迹的复杂性^[20],因此本文基于三次多项式设计换道轨迹函数,具体如下

$$y(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 \quad (4)$$

式中: a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 均为多项式的参数; x 为纵向上(沿车道方向)车辆的位置; y 为横向上(垂直车道方向)车辆的位置。

设在换道起点处车辆的横向与纵向位置都为 0,航向角为水平状态。换道终点位置处车辆的纵向和横向位置分别为 x_f 、 y_f ,航向角也是水平状态,可得

$$\left. \begin{aligned} y(0) &= 0 \\ y'(0) &= 0 \\ y(x_f) &= y_f \\ y'(x_f) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由以上条件可以推算换道轨迹函数的参数为

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= 0 \\ a_1 &= 0 \\ a_2 &= \frac{3y_f}{x_f^2} \\ a_3 &= -\frac{2y_f}{x_f^3} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)代入式(4),得到换道轨迹模型为

$$y(x) = \frac{3y_f}{x_f^2} x^2 - \frac{2y_f}{x_f^3} x^3 \quad (7)$$

换道终点的横向位置 y_f 通过车道宽度确定,其纵向位置 x_f 通过权衡换道的舒适性和效率来确定。 x_f 越大,换道的舒适性越高但效率变低; x_f 减小时,换道的舒适性变低,而效率升高。为此,构建包含换道舒适性和效率的目标函数 f 以求解 x_f ,目标函数为

$$f(x_f) = \omega \left(\frac{a_s^{\text{last}}}{a_s^{\text{max}}} \right)^2 + (1 - \omega) \frac{x_f}{x_f^{\text{max}}} \quad (8)$$

式中: ω 为舒适性权重参数; a_s^{max} 为车辆侧翻临界侧向加速度; x_f^{max} 为换道轨迹最大纵向距离的经验值; a_s^{last} 为车辆在换道轨迹终点处的侧向加速度,使用式(9)计算得出,即

$$a_s^{\text{last}} = v_f^2 K(x_f) \quad (9)$$

式中: v_f 为换道轨迹终点处车辆的速度。

根据以上假设, v_f 为目标车道的平均速度,用 $K(x_f)$ 表示换道轨迹曲线的终点位置处的曲率,计算表达式为

$$K(x_f) = \left| \frac{y''(x_f)}{\sqrt{(1+y'(x_f)^2)^3}} \right| \quad (10)$$

再根据式(7)可计算 $y'(x_f)$, $y''(x_f)$, 即

$$\left. \begin{aligned} y'(x_f) &= 0 \\ y''(x_f) &= -\frac{6y_f}{x_f^2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将 $y'(x_f)$ 、 $y''(x_f)$ 代入式(10)中, 可得 $K(x_f)$ 的最终表达式为

$$K(x_f) = \frac{6y_f}{x_f^2} \quad (12)$$

再将式(9)、(12)代入式(8)中, 得目标函数 $f(x_f)$ 为

$$f(x_f) = \omega \left(\frac{6v_f^2 y_f}{x_f^2 a_s^{\max}} \right)^2 + (1-\omega) \frac{x_f}{x_f^{\max}} \quad (13)$$

当 $f(x_f)$ 取最小值时, x_f 相应的取值为

$$x_f^{\text{op}} = \sqrt[5]{4\omega \left(\frac{6v_f^2 y_f}{a_s^{\max}} \right)^2 \left[(1-\omega) \frac{1}{x_f^{\max}} \right]^{-1}} \quad (14)$$

式中: x_f^{op} 为合理换道终点的纵向位置。

将 x_f^{op} 代入换道轨迹方程, 获得理想换道轨迹曲线, 其长度值可通过积分求出。设自动驾驶车辆在换道过程中的平均速度是初始速度 v_0 与目标速度 v_f 的平均值, 则理想换道时间 t_c 表达式为

$$t_c = \frac{2 \int_0^{x_f^{\text{op}}} \sqrt{1+y'^2} dx}{v_0 + v_f} \quad (15)$$

用理想换道时间 t_c 衡量车辆前往目标车道的换道成本。在决策时域 t_d 内, 车辆收集交通环境数据并利用式(15)计算该瞬时交通状态下的理想换道时间 t_c^i , 经多次计算后取其平均值, 可得决策时域内前往车道 m 最终的理想换道时间 t_c^m 。

1.2.3 综合成本函数

本文构建的综合成本函数充分借鉴了相关资料, 基于 Yang 等^[21]与 Wang 等^[22]对车道成本函数的研究, 明确换道时间是换道成本函数的关键指标, 车辆速度是车辆运行成本函数的核心要素。在此基础上本文对车道运行成本与换道成本进行整合, 将重车比例纳入车道运行成本的影响指标, 充分考虑了车流平均速度、车道重车比例与主车换道时间对车道综合成本的影响, 根据各指标的重要程度赋予相应的权系数, 并采用线性加权和法进行综合集成。

对车道的评价涉及多个指标, 为了合理地运用多指标设计成本函数, 需要对指标进行归一化处理, 归一化采用的参数设置为: v_{\max}^m 为车道 m 对应的最高限速值; Q_{\max}^m 为车道 m 感知区域内可能存在的最大

重车比例; t_{\max}^m 为换道轨迹最大纵向距离对应的换道时间, 计算公式如下

$$y(x) = \frac{3y_f}{x_f^{\max 2}} x^2 - \frac{2y_f}{x_f^{\max 3}} x^3 \quad (16)$$

$$t_{\max} = \frac{2 \int_0^{x_f^{\max}} \sqrt{1+y'(x)^2} dx}{v_0 + v_f} \quad (17)$$

式(15)~(17)经归一化处理后, 车道 m 的综合成本函数为

$$J_m = \begin{cases} \alpha_h \frac{Q_m}{Q_{\max}^m} + \alpha_c \frac{t_c^m}{t_{\max}^m} - \alpha_v \frac{v_m}{v_{\max}^m} & m \neq i_1 \\ \alpha_h \frac{Q_m}{Q_{\max}^m} - \alpha_v \frac{v_m}{v_{\max}^m} & m = i_1 \end{cases} \quad (18)$$

式中: J_m 为车道 m 的综合成本值; i_1 为车辆当前行驶的本车道序号; α_h 、 α_c 与 α_v 为各项评价指标相应的权重。

通过以上模型计算得出各车道的综合成本值, 以此为依据进行排序, 获得成本值由低到高的车道序列。

1.3 安全条件判断

本文第1.2节的上层决策模型主要使用宏观指标, 包括平均速度、感知范围内重车数量等, 得到宏观角度下综合成本值最低的车道, 但无法保证主车一定能够前往该车道, 原因在于该模型中没有考虑目标车道的实际车头间距条件, 模型输出的目标车道可能不满足换道条件。为此设计微观安全条件判断模型, 对上层决策模型的输出结果进行判断和筛选。

设在决策过程中, 车辆计算得出另一条车道的成本值最低, 将其作为目标车道。换道之前, 车辆还需要对周围车辆的状态进行评估, 主要是判断本车与周围车辆之间的间隙能否满足换道条件。如果不满足该条件, 车辆将继续判断是否有必要进入换道准备阶段; 若仍有必要, 则通过调整自身速度尝试获取可行的换道间隙; 若感知范围内不存在可行的换道间隙, 车辆将放弃换道, 评估次优车道, 重新进行间隙选择。

1.3.1 间隙安全性判断

间隙选择过程中, 自动驾驶车辆首先根据本车和周围车辆的状态筛选出安全间隙, 安全性条件参考 Gipps 模型^[23]的思路确定。Gipps 模型主要考虑驾驶人反应时间与车辆最大减速度, 可以保障前后2辆车跟驰的安全性, 在前车紧急刹车时, 后车也能成功刹车而不至于引发碰撞事故。另外, Gipps 模

型作为客观性安全跟驰模型,以“安全第一”准则为基本原则^[24],能够保证车辆换道间隙的安全可行,其参数设置简单,与本文自动驾驶车辆仿真场景高度贴合,为此下文以 Gipps 模型为基础展开讨论。

图 3 为安全跟驰间隙示意。如图 3 所示, t 时刻后车 n 跟驰前车 $n-1$ 行驶,此时前车紧急制动,后车在经历了一段反应时间后也紧急制动,最终前车在 t_f 时刻停止,为保证前后车不发生碰撞,需要满足

$$x_{n-1}(t_f) - x(t_f) - \frac{l_{n-1} + l_n}{2} \geq 0 \quad (19)$$

式中: l_{n-1} 、 l_n 分别为前车车辆 $n-1$ 和后车 n 的车长; $x_{n-1}(t_f)$ 、 $x_n(t_f)$ 分别为停止时刻前后车形心的纵向位置,其计算公式如下

$$x_{n-1}(t_f) = x_{n-1}(t) + \frac{v_{n-1}^2(t)}{2b_{n-1}} \quad (20)$$

$$x_n(t_f) = x_n(t) + \frac{\tau_n}{2}(2v_n(t) - a_n\tau_n) - \frac{v_n^2(t)}{2b_n} \quad (21)$$

式中: $x_{n-1}(t)$ 、 $x_n(t)$ 分别为 t 时刻前车和后车形心的纵向位置; $v_{n-1}(t)$ 、 $v_n(t)$ 分别为前车与后车在 t 时刻的速度; b_{n-1} 、 b_n 分别为前车与后车紧急刹车时的最大减速度; τ_n 在 Gipps 模型中表示后车驾驶人的反应时间,此处表示自动驾驶车辆信息交互和控制系统的延误; a_n 为后车当前的加速度。

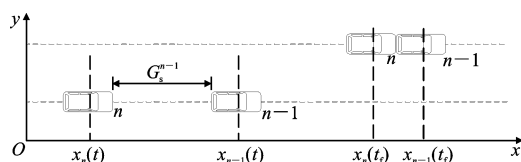


图 3 安全跟驰间隙示意

Fig. 3 Schematic Diagram of Safe Car Following Clearance

由式(20)、(21)可以推导得出后车跟随前车的的核心安全距离 G_s^{n-1} , 计算公式如下

$$G_s^{n-1} = x_{n-1}(t) - x_n(t) - \frac{(l_{n-1} + l_n)}{2} = \frac{v_{n-1}^2(t)}{2b_{n-1}} + \frac{\tau_n}{2}(2v_n(t) - a_n\tau_n) \quad (22)$$

在整个换道过程中,自动驾驶车辆与本车道前车、目标车道前车、目标车道后车的间隙都需要大于最小安全间隙,这样能够减小换道导致的交通事故发生率。设换道场景安全间隙示意如图 4 所示,主车作为自动驾驶车辆,在完成成本计算后发现左侧车道的成本值最小,为此针对左侧车道中当前间隙进行可行性判断。

图 4 中, G_s^{CL} 、 G_s^{TL} 、 G_s^{TF} 分别为主车与本车道前车 CL、目标车道前车 TL、目标车道后车 TF 的最小安全间隙。其中,主车与目标车道上车辆的安全跟

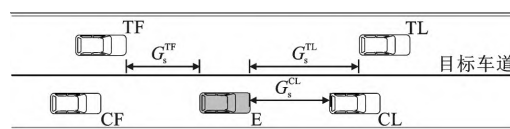


图 4 换道场景安全间隙示意

Fig. 4 Schematic Diagram of Safety Clearance in the Lane Changing Scene

驰距离指主车与前后车之间的纵向间距,图 4 中最小安全间隙的推理过程在图 3 处已有介绍,计算公式如下

$$G_s^{CL} = \frac{v_E^2(t)}{2b_E} - \frac{v_{CL}^2(t)}{2b_{CL}} + \frac{\tau_E}{2}(2v_E(t) - a_E\tau_E) \quad (23)$$

$$G_s^{TL} = \frac{v_E^2(t)}{2b_E} - \frac{v_{TL}^2(t)}{2b_{TL}} + \frac{\tau_E}{2}(2v_E(t) - a_E\tau_E) \quad (24)$$

$$G_s^{TF} = \frac{v_{TF}^2(t)}{2b_{TF}} - \frac{v_E^2(t)}{2b_E} + \frac{\tau_{TF}}{2}(2v_{TF}(t) - a_{TF}\tau_{TF}) \quad (25)$$

式中: τ_E 为主车的反应时间,即自动驾驶车辆决策与控制系统的反应时间; τ_{TF} 为目标车道后车的反应时间,即驾驶人的反应时间。

1.3.2 间隙位置分析

传统的人工驾驶换道决策过程中,驾驶人产生换道意图后,将观察目标车道间隙条件并分析换道的可行性。人类驾驶人的注意力和视野有限,只能关注目标车道上距离最近的一两个间隙。而车联网环境下自动驾驶车辆的环境感知能力更强,可以采集到目标车道上更远的间隙数据。图 5 为目标车道间隙示意,其中标注的 $G_{(TF_2, TF_1)}$ 为车辆 TF_2 与车辆 TF_1 之间的距离,下文基于该场景对不同间隙的特点进行分析。

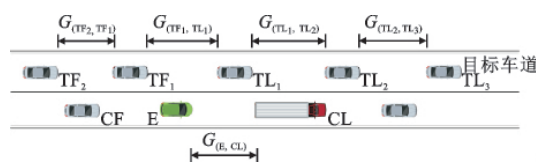


图 5 目标车道间隙示意

Fig. 5 Schematic Diagram of Target Lane Clearance

(1) 当前间隙

当前间隙是指主车的当前位置所对应的目标车道上的间隙,见图 5 中 $G_{(TF_1, TL_1)}$, 当前间隙满足安全性的条件是

$$G_{(TF_1, TL_1)} \geq G_s^{TL_1} + G_s^{TF_1} + l_E + 2\epsilon \quad (26)$$

式中: $G_s^{TL_1}$ 为主车 E 与目标车道前车 TL_1 的最小安全间隙; $G_s^{TF_1}$ 为目标车道后车 TF_1 与主车 E 的最小安全间隙; l_E 为主车长度; ϵ 为在最小安全间隙之外预留的安全余量。

若当前间隙可行,则车道选择决策模块的输出

结果确定为该目标车道。车辆进入换道准备阶段,主车通过改变自车速度来调整自身与目标车道前后车 TL_1, TF_1 的间隙以达到安全间隙标准,然后开始换道轨迹规划与执行。若当前间隙不可行,车辆需要继续评估前方或后方的间隙以确定目标车道。

(2) 前方间隙

前方间隙是指目标车道上位于当前间隙前方的间隙,见图5中 $G_{(TL_1, TL_2)}, G_{(TL_2, TL_3)}$ 。判断此类间隙的可行性时,需要主车E的速度、最大减速度、反应时间等实时数据。

若前方不存在可行间隙,车辆需要继续评估后方间隙以确定目标车道;若前方存在可行间隙,车道选择决策模块的输出结果确定为该目标车道。此时车辆获取自身与本车道前车的间距,若该间距 $G_{(E, CL)}$ 过大,需要提速来及时明确前方间隙情况,本车可以提速的条件是

$$G_{(E, CL)} > G_s^{CL} + \epsilon \quad (27)$$

由于车辆短时间内无法获取前方间隙,而交通场景是动态变化的环境,所以对前方间隙可行性的评价并不稳定,在车辆到达前方的目标间隙时,需要再次进行间隙可行性评价。

(3) 后方间隙

后方间隙是指目标车道上当前间隙后方的间隙,见图5中 $G_{(TF_2, TF_1)}$,其可行性判断同样是基于最小安全距离。本文的车道选择决策模型考虑的是车辆主动获取“收益”的行为,当后方间隙需要主车减速才能获取时,就不再考虑该间隙,即不再考虑该目标车道。若目标车道后车 TF_1 的速度大于主车速度,则主车保持原有速度行驶即可,车道选择决策模块的输出结果仍是该目标车道;等到主车获取到目标间隙后,需要再次进行间隙可行性评价。

综上所述,下层安全条件判断决策的过程如下:

①上层成本函数模型输出目标车道,判断主车是否进入换道准备阶段。②若主车需要换道,启动间隙选择模型。首先对当前间隙进行可行性判断,间隙可行则执行换道;间隙不可行则评估其余间隙,判断距离主车位置最近间隙的类型,并按照不同间隙的特点以及当前交通环境的状态对目标车道进行确认或否定。③若间隙选择模型输出可行间隙,则主车确认目标车道并执行换道;若经模型评估,间隙均不可行,则主车放弃换道,保持原车道行驶。

2 仿真试验与分析

本节搭建了高速公路基本路段的仿真测试环境,并依据所建模型设计自动驾驶车辆车道选择决

策模块,观察车辆在该模块控制下的仿真运行情况。同时,通过调整车道上的重车比例与车流平均速度,分析不同指标变化时决策结果的变动情况,并验证模型的安全性和合理性。

2.1 仿真环境

仿真试验环境中,设置车辆以一定的时间间隔更新状态,基于车联网技术可以准确地采集周围交通数据,将数据输入车道选择决策模块,基于算法输出结果判断下一时刻主车的目标车道。主车遵循Gipps跟驰模型运行,并按照一定时间步长循环调用上述车道选择决策算法。在没有前车的状态下,规定车辆以自由速度运行,背景车辆保持安全距离跟驰模型输出的速度运行,并给予部分车辆随机慢化以创造换道条件;背景车的换道决策参考基于元胞自动机换道模型的换道规则^[25]。若车辆产生换道意图,则进入换道准备和执行阶段,判断背景车是否换道的条件依次设置为:①判断本车道上主车前方车辆的速度是否会低于主车的速度;②判断目标车道上主车前方车辆的速度是否会大于主车的速度;③判断目标车道上主车后方的车辆能否安全跟驰主车。

仿真场景使用Python和PyQt工具搭建,自动驾驶车辆基于以上规则持续计算并更新自身的位置与速度。模拟道路为车联网环境下的高速公路双车道路段。按照《公路工程技术标准》(JTGB01—2003),中国当量小汽车尺寸为(5.0 m×1.8 m×1.8 m)^[26],为贴合实际车辆跟驰环境,将车辆紧急刹车后的最小安全间距纳入自动驾驶车辆的车长范畴,故试验中小汽车尺寸设置为长6 m、宽1.8 m,重型车辆尺寸设置为长12 m、宽2.5 m,车道宽度设计为3.5 m,程序运行界面如图6所示。仿真试验参数见表1。



图6 仿真软件界面

Fig. 6 Interface Diagram of Simulation Software

表 1 仿真试验参数

Table 1 Simulation Experiment Parameters

符号	含义	取值
l	感知区域长度/m	150
t_s	时间步长/s	0.1
t_d	决策时域/s	3
ω	舒适性权重	0.5
a_s^{\max}	车辆侧翻临界侧向加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	10.78
v_{\max}	车道最高限速值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	35
Q_{\max}	车道上可能存在的最大重车比例	1
b_n	车辆的最大减速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	2
τ_E	自动驾驶车辆信息交互和控制系统延误/s	0.3
τ_{TF}	人类驾驶人反应时间/s	0.8
ϵ	最小安全间隙之外的安全余量/m	0.5

初始时刻,在车道中安排各辆车的位置、速度与车辆类型,主车和背景车开始按照上述规则运行试验,并持续更新自身的位置、速度与加速度。试验的基础参数设置如下:本文所建立的是典型双车道交通场景,初始时刻将主车置于车道 1,如图 7 所示;A 类场景中,设计车道 1 内车辆的平均速度高于车道 2 上车辆的平均速度;然后,从 0 开始逐步增加车道 1 上的重车数量,并观察双车道的成本变化情况;B 类场景中,设计车道 1 内车辆的平均速度低于车道 2 中车辆的平均速度,从 0 开始逐步增加车道 2 上的重车数量,并观测成本变化情况。



图 7 仿真场景设计示意

Fig. 7 Schematic Diagram of Simulation Scenario Design

在 A 类场景中,模型参数设置为 $\alpha_v = 0.3, \alpha_n = 0.3, \alpha_c = 0.4$ 。首先,初始化两车道内车辆的速度和重车数量,进行第 1 次仿真试验并以此作为参照。然后,增加车道 1(本车道)上的车辆初始速度,考察参数设置的合理性。后续试验逐渐增加感知范围内的重型车辆数量,观察其成本变化情况。A 类场景的成本值及部分计算结果如表 2 所示。

结果显示,当两车道速度和重车指标相同,主车会因为换道成本过高而选择继续在车道 1 行驶;若

表 2 A 类场景运行数据

Table 2 Operating Data of Type A Scenario

场景序号	车道 1(本车道)			车道 2				最优车道
	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	重车/veh	成本值	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	重车/veh	换道时间/s	成本值	
1	9.38	0	-0.234	8.56	0	3.30	-0.123	1
2	13.87	0	-0.347	8.72	0	2.67	-0.125	1
3	14.10	1	-0.269	8.77	0	2.65	-0.125	1
4	14.04	2	-0.184	8.89	0	2.65	-0.127	1
5	13.64	3	-0.091	8.85	0	2.64	-0.126	2
6	13.93	3	-0.098	8.81	1	2.65	-0.076	1

提升车道 1 的车流平均速度,主车更偏向于车道 1;若车道 1 重车条件变得恶劣,尤其是当重车数比车道 2 多出 3 veh 时,主车则愿意放弃本车道良好的速度条件而选择车道 2;若增加车道 2 的重车数,其成本增加,模型输出结果重新选择车道 1。结果表明 A 类场景下各权重参数设置较为合理。在 B 类场景中,为两车道赋予相同的初值后重新运行仿真试验,然后增加车道 2 的平均速度;后续试验中再逐渐增加重型车辆数量,成本值及部分计算结果见表 3。

表 3 B 类场景运行数据

Table 3 Operating Data of Type B Scenario

场景序号	车道 1(本车道)			车道 2				最优车道
	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	重车/veh	成本值	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	重车/veh	换道时间/s	成本值	
1	8.95	0	-0.224	9.75	0	3.30	-0.123	1
2	8.86	0	-0.222	18.54	0	2.67	-0.217	1
3	8.91	0	-0.223	14.02	0	3.80	-0.259	2
4	8.99	0	-0.225	14.05	1	3.79	-0.210	1
5	8.92	1	-0.140	14.04	1	3.80	-0.210	2
6	8.94	1	-0.140	14.03	2	3.79	-0.160	2

该结果表明,当两车道交通环境相同时,车辆会优先选择本车道。在 2 号场景中,车道 2 的速度指标被提升为车道 1 平均速度的 2 倍,而模型输出结果依然为本车道,结果显示 B 类场景下平均速度的权重过低而换道成本的权重过高,适用于 A 类场景的参数并不一定适用于 B 类场景。为此,将 B 类场景的参数 α_v 增加为 0.4, α_c 减少为 0.3 后再次运行仿真,此时主车因速度优势选择车道 2;当车道 2 的重车比车道 1 多 1 veh 时,两车道的成本值接近;多 2 veh 时,主车会选择车道 1,说明更新后的权重参数数值更为合理。

2.2 重车比例对车道选择决策的影响

2.2.1 车道 1 重车比例对车道选择决策的影响

接下来分析主车所在车道重车比例对车道选择

的影响关系。设置主车初始位置在车道1,在主车所在车道重车比例分别为0%、25%、50%、75%的情况下,为全部车辆赋予 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的初始速度并逐步增加到车道限速 v_{\max} ,步长为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。统计每条车道的综合成本值、平均速度、重车比例、换道时间,输出结果如下。

图8(a)显示:当车道1上重车比例为0,模型输出结果为车道1;随着车辆平均速度的增加,车道成本值随着平均速度线性下降,两车道的成本差距逐渐增大,且理想换道时间的降速放缓导致车道2的成本值呈现非线性变化。图8(b)显示出车道1的成本曲线整体向上偏移0.1个单位,即车道1上重车比例的增加导致其成本值增大,车道2的成本维持原状。在低速仿真情况下,模型输出结果为车道2;随着速度增加,两车道的成本均呈下降趋势,其中换道成本导致车道2的成本降速低于车道1,当平均速度超过约 $19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,模型输出结果重回车道1。图8(c)中,重车比例的增加导致车道1成本值进一步升高,车道1相对于车道2的竞争力下降,导致模型输出结果稳定在车道2,且重车比例的提高导致高速状态下两车道的成本差距更大。与图8(a)不同的是,在 v_{\max} 的限制范围内,随着平均速度的增大,两车道的成本差距逐渐变小。在图8(d)中,75%的重车比例使得在 v_{\max} 以内车道1的成本远高于车道2,模型输出结果始终为车道2,模型对2条车道成本的区分度较好。

本阶段中,车道1综合成本函数中重车比例以25%的步长增长,车道综合成本曲线相应地随之提升0.1个单位;当车道1的重车比例达到25%时,在车流平均速度低于 $19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时车道1成本高于车道2;在平均速度提升至 $19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 后,重车比例促使的成本增量被抵消,车道1成本低于车道2;当两车道重车比例差距高于50%后,车道1的成本比车道2至少高出0.1个单位,该条件下两车道成本差值明显。

综上所述,车道感知范围内的重车比例是决策模型中的敏感因素。当重车比例为0,即车辆在行驶过程中无重车影响时,主车将保持在原车道行驶,运行收益更高;当主车所在车道的重车比例提升时,车道成本随之增加,主车将比较换道成本和原车道重车影响下的成本增量,通过车道选择决策模型获取成本更低的车道。

2.2.2 车道2重车比例对车道选择决策的影响

在针对车道2的试验中,设置车道1的重车比

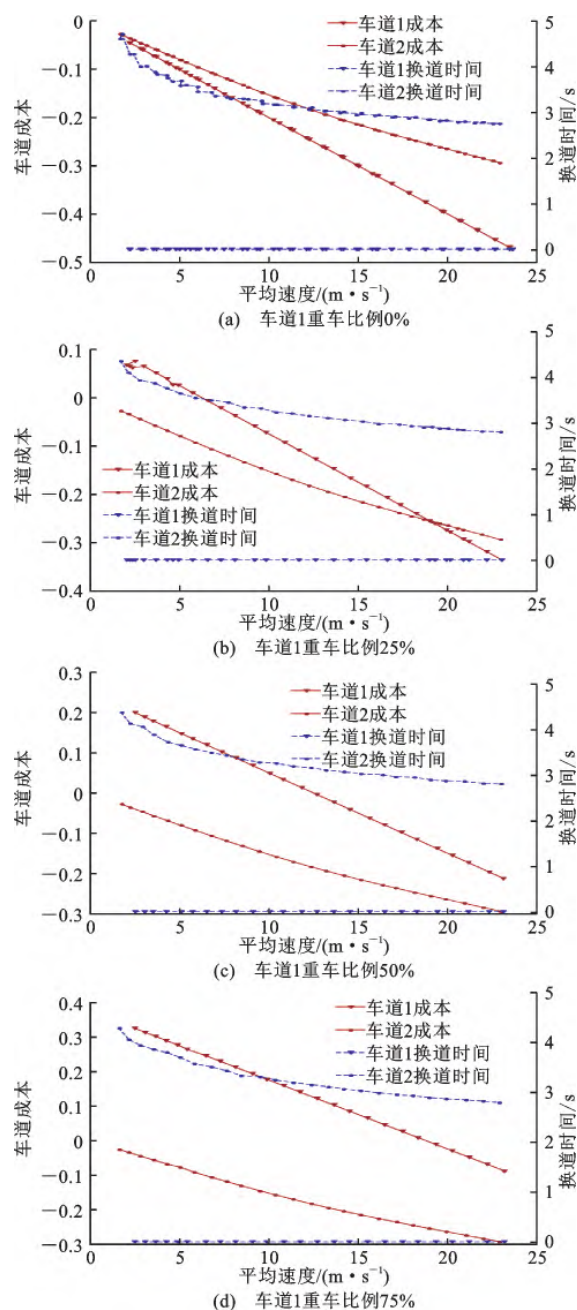


图8 成本或理想换道时间与平均速度的关系

Fig. 8 Relationship Between Cost or Ideal Lane Change Time and Average Speed

例为0,车道2重车比例分别为0%、25%、50%、75%的情况下,为全部车辆赋予 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的初始速度并逐步增加到车道限速 v_{\max} ,步长为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,输出结果如下。

图9(a)表明:在车道2上重车比例为0的情况下模型输出结果是车道1;随着车辆平均速度的增加,两车道的成本差距逐渐增大。图9(b)显示,车道2重车比例的增加导致成本升高,两车道间的成本差距也随之增加。尤其是在低速情况下,重车比例的提升使得成本骤增,模型输出结果恒定为车道

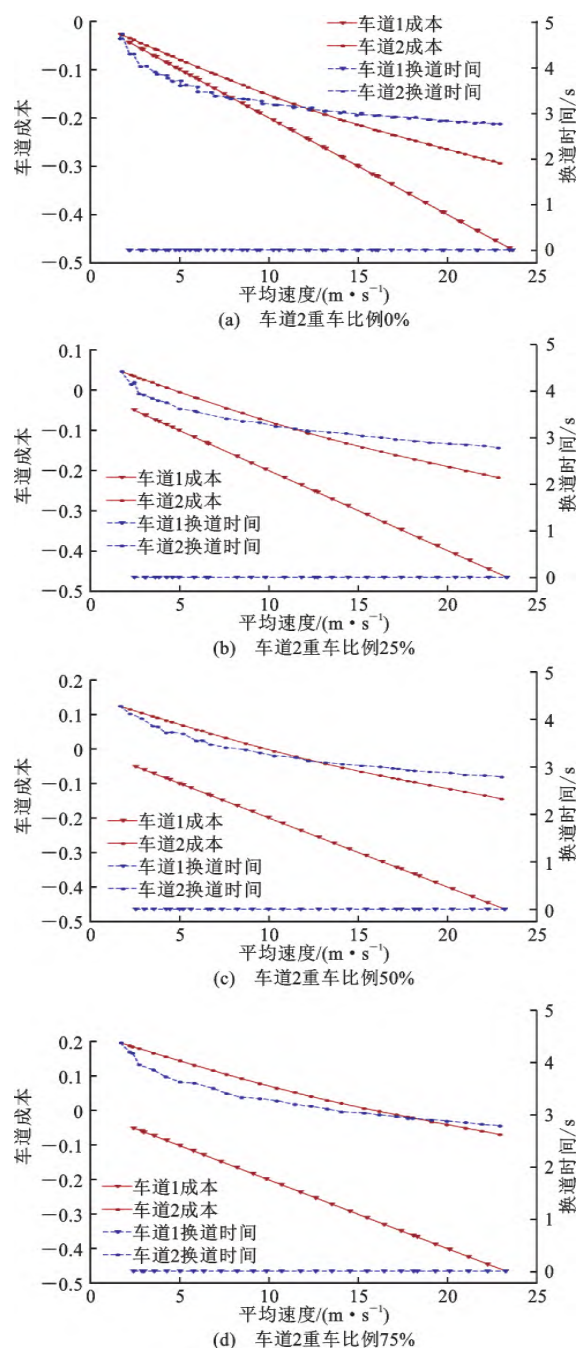


图9 成本或理想换道时间与平均速度的关系
Fig. 9 Relationship Between Cost or Ideal Lane Change Time and Average Speed

1。图9(c)、(d)的结果则表明:随着车道2重车比例的进一步提升,再加之前往该车道的换道成本,导致车道2的成本远大于车道1的成本,模型输出结果恒定为车道1。对比本文第2.2.1节的仿真结果,车道2重车比例的提升使得主车始终保持在车道1行驶,模型对2条车道成本值的区分度更明确。

本阶段中,车道2综合成本函数中重车比例以25%的步长进行增长;当两车道间出现重车比例差

距时,车道2的成本增量高于车道1;在重车比例为25%时,车道2的成本相比车道1高出0.1个单位;在重车比例差距达到50%后,车道2成本比车道1至少高出0.2个单位。由此可见,车道2重车比例的增加使换道成本与行驶成本出现叠加,两车道成本差值更加显著。

综上所述,主车目标车道的成本随着车道上重车比例的增加而呈现出升高的趋势。当在感知范围内目标车道比本车道有更高的重车比例,主车将继续在原车道行驶,以确保行驶过程中的收益更高;当目标车道重车比例明显高于主车所在车道,此时主车将避免换道,以减少不必要的成本,结果充分体现了本文车道选择决策模型的作用。

2.3 两车道速度对车道选择决策的影响

为了观察车流平均速度与换道时间对车道选择的影响,将主车初始位置置于车道1,全部车辆赋予 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的初始速度并逐步增加到车道限速 v_{\max} ,步长为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。试验中两车道均不设置重车,统计每条车道的综合成本值、平均速度、换道时间,输出结果如图9(a)所示。

图9(a)表明:随着车辆行驶速度的逐步提高,车道1与车道2的成本均保持着稳定的下降态势,去往车道2的换道时间呈现非线性减少趋势。当车辆行驶速度达到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时车道2的成本比车道1高出0.05个单位,车辆换道成本使主车选择在车道1继续行驶。另一方面,车辆行驶速度的提高降低了主车换道时间,消减了车道2成本中的换道成本;但是,当换道时间趋近3 s后,车道2的成本下降趋势有所减缓,与车道1成本间的成本差值更加显著,主车始终保持在车道1行驶。

综上,当主车行驶过程中无重车影响时,换道成本的存在使主车选择始终保持在原车道行驶;仅当两车道间存在抵消换道成本的速度差值后,主车方可进行车道成本比较,展开车道选择阶段。下文对两车道间的速度差对车道选择的影响进行分析。

为观察两车道间的速度差对车道选择的影响,将主车置于车道1上,首轮试验设置车道1上所有车辆的初始速度为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,车道2上车辆的初始速度从 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度增至 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,步长为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;次轮试验设置车道2上所有车辆的初始速度为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,车道1上车辆的初始速度从 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度增至 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,步长为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,试验中两车道均不设置重车。仿真输出结果如下。

图10(a)中的车道1和图10(b)中的车道2成

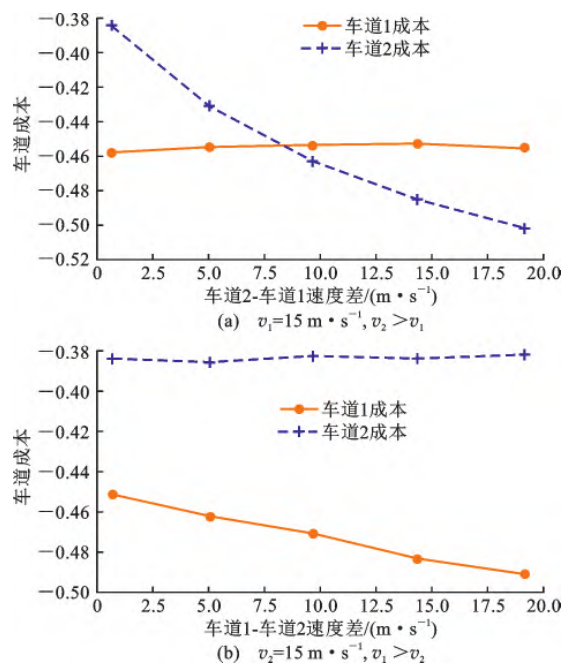


图 10 成本与车道速度差关系
Fig. 10 Relationship Between Cost and Lane Speed Difference

本值均呈现波动,原因是仿真运行时随机慢化机制导致车辆整体平均速度在 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下波动。图 10(a)显示出:首轮试验中随着车道 2 上行驶速度的增大,车道 2 的成本呈现非线性的减小趋势直至明显低于车道 1 的成本;当两车道速度差增至 $8.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右后,车道 2 的速度优势克服了换道成本,主车选择车道 2 作为目标车道。图 10(b)显示出,次轮试验中由于换道成本的存在,在无速度差距时车道 1 的优先级明显高于车道 2,配合车道 1 速度优势的出现,其成本进一步降低,此时主车更倾向于选择车道 1。

本阶段中,两车道平均速度差值以 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的步长进行增长,相应地,车道成本随之产生下降态势;

当两车道间无速度差距时,车道 2 的成本比车道 1 高出约 0.08 个单位;当车道 2 的车流平均速度高出 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,车道 2 的成本比车道 1 低 0.008 个单位,高出 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时车道成本差达到 0.03 个单位;当车道 1 的车流平均速度高于车道 2 时,车道成本差始终大于 0.08 个单位。由此可见,对不同车道而言,车道速度差的增加对车道成本值的影响效应相似,但两车道成本差值呈现出不同的发展态势。

综上所述,两车道速度差值对车道选择具有显著影响。当主车所在车道存在速度优势时,主车只需保持在原车道行驶;当目标车道出现速度优势时,该车道的成本降低,此时模型将综合考虑速度成本和换道成本,此时应视具体情况确定最优车道,以实现运行收益最大化。

2.4 安全性分析

在上层决策模型输出结果的基础上,利用下层安全条件判断模型验证目标车道的合理性。从 A 类场景的试验中抽取第 5 次试验,从 B 类场景的试验中抽取第 3、5、6 次试验,重新按序排列为以下 1~4 号试验。安全条件判断仿真场景示意图 11。

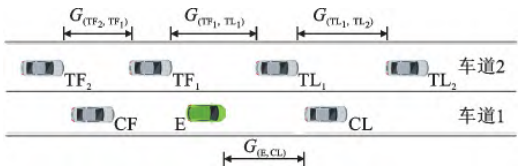


图 11 安全条件判断仿真场景示意
Fig. 11 Schematic Diagram of Simulation Scenario of Safety Condition Judgment

在上层模型输出成本计算结果的同时,下层安全条件判断模型会收集决策时刻周围车辆的速度和位置,并以实时数据为基础进行间隙安全性判断和间隙位置特征分析,决策时刻的部分数据统计如表 4 所示。

表 4 仿真结果

Table 4 Simulation Results

试验 序号	主车 E 仿真结果		CL 车仿真结果		TL ₁ 车仿真结果		TF ₁ 车仿真结果	
	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	位置/m	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	位置/m	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	位置/m	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	位置/m
1	12.01	38.10	12.72	54.27	7.60	44.13	6.51	32.54
2	6.57	42.59	7.59	53.90	12.43	53.70	11.52	10.55
3	6.56	42.71	7.75	53.89	13.00	47.25	11.69	37.19
4	7.10	47.20	8.21	56.78	14.11	54.22	13.47	20.67

安全条件判断模型决策结果如表 5 所示,仿真结果表明,安全条件判断模型可以判断出换道间隙的可行性。试验场景 1 中,本车道的平均速度较大

造成 $G_{(TF_1, TL_1)}$ 不可行,其主要原因在于主车和车道 2 上前车 TL_1 的距离 $G_{(E, TL_1)}$ 过近,同时 TL_1 车的前方存在可行间隙,因此模型最终输出结果为车

表 5 安全条件判断模型决策结果

Table 5 Decision Results of Safety Condition

Judgment Model

试验 序号	$G_{(E,CL)}$ 间隙距离	$G_{(TF_1,E)}$ 间隙距离	$G_{(E,TL_1)}$ 间隙距离	当前间隙 是否可行	其他可行 间隙位置	最终确认 目标车道
1	16.17	5.56	6.03	不可行	前方	车道 2
2	11.31	32.04	11.11	可行		车道 2
3	11.18	5.52	4.54	不可行	无	车道 1
4	9.58	26.53	7.02	不可行	前方	车道 2

道 2。在试验场景 2、3、4 中,车道 2 上全体车辆的平均速度较大,因此主车与车道 2 的后车 TF_1 之间需要较大的间隙,场景 3 和场景 4 的 $G(TF_1, E)$ 均不满足要求,此时的理想间距条件至少为 30 m 以上。同时,场景 3 中的主车前后一定范围内均不存在可行间隙,因此最终目标车道仍为车道 1;而场景 4 中 TL_1 车前方存在可行间隙,因此模型最终输出结果为车道 2。

综上所述,安全条件判断模型对主车最终的车道选择起决定性作用。当且仅当目标车道的间隙能够满足主车换道要求时,主车才可以选择目标车道;若车头间距不满足换道要求,主车则应取消换道维持原车道行驶,以保证行车过程中的安全性。

3 结 语

本文研究车联网环境下高速公路基本路段内自动驾驶车辆的主动车道选择决策问题,在车辆可以基于车联网技术准确感知周围交通环境数据的前提下,以车流平均速度、车道重车影响、主车换道时间等为主要指标设计成本函数,在此基础上建立基于成本函数的主动车道选择决策模型;然后基于安全性原则设计安全条件判断模型并对上层模型决策结果进行筛选,输出安全可行的最优目标车道。仿真试验表明,本文的自动驾驶车道选择决策模型能够解决人工驾驶决策的有限理性、异质性问题,保证决策过程的安全性和效率,具体如下:

(1) 本文所建模型适用于高速公路基本路段场景,旨在解决自动驾驶车辆的车道选择决策问题。与传统换道决策中的车道选择决策相比,该模型可以综合考虑主车感知范围内的各项指标,当主车所在车道重车比例为 25% 时,通过判断车速是否高于 $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 主车即可做出最优车道选择,行驶优势得到增强;目标车道决策阶段中,主车不会仅考虑局部紧邻车辆的表现,而是充分统筹考虑此路段的宏观交通流因素,配合 Gipps 模型所输出的换道安全间

隙,使主车充分把握主动换道机会,避免高成本换道行为,确保运行收益最大化。

(2) 基于综合成本函数的上层成本计算模型中,各指标均属于车道成本值的关键影响因子,其中车道重车比例每增加 25%,车道成本随之增加 0.1 个单位;车流平均速度每增加 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,车道 1 成本随之减少 0.1 个单位。车道成本计算模型综合考虑主车感知范围内的多项交通流指标,以车道成本比对结果明确主车的车道选择决策,促使主车选择具备行驶优势的车道,并为下层安全条件判断模型提供最优车道序列。

(3) 基于 Gipps 安全跟驰模型构建的下层安全条件判断模型,旨在对上层成本计算模型输出的最优车道序列进行约束筛选;通过目标间隙的位置特征与车辆间的相对速度关系,判断当前换道间隙;以 Gipps 模型输出的安全间隙为换道实现的基本依据,筛选出最优目标车道。

本文中的自动驾驶车道选择决策模型仍存在一些不足。文章中对模型的分析与验证停留在计算机仿真阶段,仿真和真实交通环境还是存在一定差异,后续研究将基于硬件在环和实车在环对模型展开进一步的测试与改善。

参考文献:

References:

- [1] DAO T S, HUISSOON J P, CLARK C M. A Strategy for Optimisation of Cooperative Platoon Formation [J]. International Journal of Vehicle Information and Communication Systems, 2013, 3 (1): 28-43.
- [2] GIPPS P G. A Model for the Structure of Lane-changing Decisions [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1986, 20 (5): 403-414.
- [3] BARCELO J, CASAS J, FERRER J L, et al. Modelling Advanced Transport Telematic Applications with Microscopic Simulators: The Case of AIMSUN2 [C] // BRILON W, HUBER F, SCHERCKENBERG M, et al. Traffic and Mobility: Simulation-economics-environment. Berlin: Springer, 1999: 205-221.
- [4] BARCELO J, CASAS J R, CODINA E, et al. A Parallel Environment for a Real-time Traffic Management and Information Systems [J]. IFAC Proceedings Volumes, 1997, 30 (8): 1183-1188.
- [5] YANG Q, KOUTSOPOULOS H N. A Microscopic Traffic Simulator for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1996, 4 (3): 113-129.
- [6] 袁盛玥. 自动驾驶车辆城区道路环境换道行为决策方法研究

- [D]. 北京:北京理工大学,2016.
- YUAN Sheng-yue. Study on the Decision-making Method of Lane Changing Behavior in Urban Road Environment of Autonomous Vehicles [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [7] CHEN J, ZHAO P, LIANG H, et al. A Multiple Attribute-Based Decision Making Model for Autonomous Vehicle in Urban Environment [C] // IEEE. 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings. New York: IEEE, 2014: 480-485.
- [8] 陈佳佳. 城市环境下无人驾驶车辆决策系统研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- CHEN Jia-jia. Research on Unmanned Vehicle Decision System in Urban Environment [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [9] BAKER C R, DOLAN J M. Traffic Interaction in the Urban Challenge: Putting Boss on Its' Best Behavior [C] // CHATILA R, KELLY A, MERLET J P. 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2008: 1752-1758.
- [10] MONTEMERLO M, BECKER J, BHAT S, et al. Junior: The Stanford Entry in the Urban Challenge [J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25 (9): 569-597.
- [11] WEI J, DOLAN J M, SNIDER J M, et al. A Point-based MDP for Robust Single-lane Autonomous Driving Behavior Under Uncertainties [C] // IEEE. IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA. New York: IEEE, 2011: 2586-2592.
- [12] DAS S, BOWLES B A. Simulations of Highway Chaos Using Fuzzy Logic [C] // DAVE R N, SUDKAMP T. 18th International Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society-NAFIPS. New York: IEEE, 1999: 130-133.
- [13] HOU Y, EDARA P, SUN C. Situation Assessment and Decision Making for Lane Change Assistance Using Ensemble Learning Methods [J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42 (8): 3875-3882.
- [14] PENG J, GUO Y, FU R, et al. Multi-parameter Prediction of Drivers' Lane-changing Behaviour with Neural Network Model [J]. Applied Ergonomics, 2015, 50: 207-217.
- [15] YI H, EDARA P, SUN C. Modeling Mandatory Lane Changing Using Bayes Classifier and Decision Trees [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15 (2): 647-655.
- [16] LIU Y, WANG X, LI L, et al. A Novel Lane Change Decision-making Model of Autonomous Vehicle Based on Support Vector Machine [J]. IEEE Access, 2019, 7: 26543-26550.
- [17] DAO T S, CLARK C M, HUISSOON J P. Optimized Lane Assignment Using Inter-vehicle Communication [C] // IEEE. 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. New York: IEEE, 2007: 1217-1222.
- [18] DAO T S, CLARK C M, HUISSOON J P. Distributed Platoon Assignment and Lane Selection for Traffic Flow Optimization [C] // IEEE. 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. New York: IEEE, 2008: 739-744.
- [19] 孔德文. 大型车辆对多车道高速公路交通运行影响研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- KONG De-wen. Research on the Influence of Large Vehicles on Multi-lane Expressway Traffic Operation [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [20] 郑施雨. 自动驾驶车辆换道过程建模与分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- ZHENG Shi-yu. Modeling and Analysis of Lane Changing Process of Autonomous Vehicles [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [21] YANG I, KIM H J, JEON W H, et al. Development of Realistic Shortest Path Algorithm Considering Lane Changes [J]. Journal of Advanced Transportation, 2016, 50 (4): 541-551.
- [22] WANG M, HOOGENDOORN S P, DAAMEN W, et al. Game Theoretic Approach for Predictive Lane-changing and Car-following Control [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 58: 73-92.
- [23] GIPPS P G. Behavioral Car-following Model for Computer Simulation [J]. Transport Research Part B: Methodological, 1981, 15 (2): 105-111.
- [24] 吴 琼, 孙亚夫, 党利刚. 北京市自动驾驶车辆测试报告(2018)[J]. 智能网联汽车, 2019(2): 64-75.
- WU Qiong, SUN Ya-fu, DANG Li-gang. Beijing Autonomous Vehicle Test Report (2018) [J]. Intelligent Connected Vehicle, 2019 (2): 64-75.
- [25] 马丽娜. 基于元胞自动机的自动驾驶-手动驾驶交通流特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- MA Li-na. Autonomous Driving-manual Driving Traffic Flow Characteristics Based on Cellular Automata [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [26] 王维礼, 朱 杰, 郑莘蓂. 无人驾驶汽车时代的城市空间特征之初探[J]. 规划师, 2018(12): 155-160.
- WANG Wei-li, ZHU Jie, ZHENG Xin-yi. A Preliminary Study of Urban Spatial Features in the Age of Driverless Cars [J]. Planner, 2018 (12): 155-160.