

龙雪琴,毛健旭,王远泽,等.基于多元效益的异质驾驶人换道轨迹规划[J].长安大学学报(自然科学版),2025,45(4):153-165.

LONG Xue-qin, MAO Jian-xu, WANG Yuan-ze, et al. Lane-changing trajectory planning for heterogeneous drivers based on multivariate benefits[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2025, 45(4): 153-165.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2025.04.013

## 基于多元效益的异质驾驶人换道轨迹规划

龙雪琴,毛健旭,王远泽,翟曼蓉

(长安大学 运输工程学院,陕西 西安 710064)

**摘要:**针对驾驶人风格实时变化和换道需求多样的特点,提出一种考虑驾驶人短时驾驶风格的换道轨迹动态规划方法。首先,基于极端梯度提升树算法获取影响换道行为的关键特征变量,采用聚类算法将驾驶人分为保守型、一般型、激进型。然后,提出安全性和舒适性指标,构建3种风格驾驶人轨迹规划的效益函数。其次,采用五次多项式方法,建立纵向和横向轨迹规划模型,并实时判断周围车辆的运动状态对轨迹进行调整。最后,对规划轨迹与真实轨迹的偏差、不同风格驾驶人规划轨迹进行对比。研究表明:与实际轨迹相比,大多数驾驶人规划轨迹纵向的偏差小于5 m,横向偏差大多集中在0.77~0.90 m;规划轨迹的最小车头间距平均值由34.39 m增加到了47.53 m,加速度最大差值平均值由0.45 m/s<sup>2</sup>降低到0.17 m/s<sup>2</sup>,体现了规划轨迹的安全性和舒适性;各类驾驶人规划轨迹之间具有明显差异,验证了所划分的驾驶风格的正确性;研究考虑了驾驶风格的短时多变性以及不同风格驾驶人对安全性和舒适性的需求差异性,能针对不同驾驶风格计算最优轨迹,可为提升换道舒适性和安全性提供理论支撑。

**关键词:**交通工程;换道轨迹动态规划;五次多项式;驾驶行为;驾驶风格

中图分类号:U491

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2025)04-0153-13

## Lane-changing trajectory planning for heterogeneous drivers based on multivariate benefits

LONG Xue-qin, MAO Jian-xu, WANG Yuan-ze, ZHAI Man-rong

(College of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** According to the characteristics of driver style's real-time changes and diverse lane-changing requirements, a dynamic lane-changing trajectory planning method considering drivers' short-term driving styles was proposed. First, the key feature variables affecting the lane-changing behavior were obtained based on the eXtreme Gradient Boosting algorithm, and drivers were classified into conservative, ordinary, and aggressive types using a clustering algorithm. Then, safety and comfort indicators were proposed, and benefit functions of trajectory planning for the three styles of drivers were constructed. Next, the quintic polynomial method was adopted to establish longitudinal and lateral trajectory planning models separately, and the trajectory was adjusted in real time based on the motion states of surrounding vehicles. Finally,

收稿日期:2025-01-09

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBMS-338);陕西省重点研发计划项目(2023-YBGY-138)

作者简介:龙雪琴(1982-),女,湖北荆门人,副教授,工学博士,E-mail:xqlong@chd.edu.cn.

the deviations between the planned trajectory and the actual trajectory, and the planned trajectories for different styles of drivers were compared. Results show that, compared to the actual trajectory, the longitudinal deviation of the planned trajectory is less than 5 m for most drivers, while the lateral deviation is mostly concentrated between 0.77 m and 0.90 m for most drivers. The average minimum headway distance of the planned trajectory increases from 34.39 m to 47.53 m, and the average maximum difference of acceleration decreases from  $0.45 \text{ m/s}^2$  to  $0.17 \text{ m/s}^2$ , demonstrating the safety and comfort of the planned trajectory. Significant differences exist among the planning trajectories of different types of drivers, validating the correctness of the driving style classification. This research considers the short-time variability of driving style and the differing demands of various driver styles regarding safety and comfort. It can calculate the optimal trajectory for different driving styles, providing theoretical support for enhancing lane-changing comfort and safety. 7 tabs, 11 figs, 25 refs.

**Key words:** traffic engineering; dynamic planning of lane-changing trajectory; quintic polynomial; driving behavior; driving style

## 0 引言

换道是车辆常见行驶行为,指驾驶人基于周围车速、间距等信息作出的综合决策,与跟驰行为相比更为复杂,容易引发交通事故和道路堵塞<sup>[1-2]</sup>。换道模型在微观交通流仿真、通行能力分析、驾驶辅助操作,以及交通安全评价等领域都有着广泛的应用价值<sup>[3]</sup>。随着自动驾驶技术普及,合理规划换道轨迹对提升单车及路网安全效率至关重要。

现有智能网联车辆的换道轨迹规划方法主要包括3类:基于采样和搜索的算法、基于几何曲线函数的算法、基于优化的控制算法<sup>[4]</sup>。李伟东等<sup>[5]</sup>提出了一种基于快速扩展随机树(rapidly-exploring random tree, RRT)的综合改进路径规划算法,解决了无人车在复杂环境中进行全局路径规划时存在的盲目搜索、节点冗余、路径不光滑及不安全等问题。Zhang等<sup>[6]</sup>设计了一种改进的A-star路径规划算法,减少了规划路径中不必要的转折点,使路径更加平滑。王莹等<sup>[7]</sup>提出了一种动态交通环境下的换道轨迹规划模型,有效缩短了模型优化求解时间。汪海松等<sup>[8]</sup>定义了换道安全域,并对比分析了多项式曲线、Dubins曲线、正弦曲线以及B样条曲线的路径曲率。Alberto等<sup>[9]</sup>使用了计算智能(computational intelligence, CI)技术探讨了驾驶人对车道变化的接受情况。Deng等<sup>[10]</sup>考虑车辆制动过程的安全距离,以安全舒适为目标构建了换道轨迹的五次多项式规划方法,并取得良好的跟踪效果。潘兵宏等<sup>[11]</sup>提出了考虑换道紧急程度的sigmoid换道轨迹模型,采用拟合优度检验验证了其在匝道连

续分流区的适用性。

一般情况下的换道持续时间短,因此安全性是换道过程中不容忽视的关键要素。唐斌等<sup>[12]</sup>采用分段优化的方法进行换道轨迹规划,在满足换道平顺、舒适要求的基础上提高了车辆的环境适应性和避障调整能力。温惠英等<sup>[13]</sup>综合长短期记忆网络(long short term memory, LSTM)和多层感知机(multi-layer perception, MLP),提出了一种基于生成对抗网络的车辆换道轨迹预测模型,有效提高了预测精度。Christoph等<sup>[14]</sup>运用Stuttgart驾驶模拟器研究了双车道高速公路场景下自动换道过程中乘客的舒适性,分析了轨迹特征的客观标准与主观舒适度评分之间的相关性。Li等<sup>[15]</sup>提出了一种考虑舒适性和效率的时变换道轨迹优化方法。Wang等<sup>[16]</sup>提出了一种基于多段Bezier曲线拼接的局部颗粒路径规划和模型规划控制方法,提高了自动驾驶车辆规划模型的实时性和乘客的舒适性。针对多目标规划,赵树恩等<sup>[17]</sup>提出了安全、舒适、节能等多目标协同优化的换道轨迹规划算法,提高了换道轨迹规划的拟人性和实时性。

驾驶风格决定了驾驶人的微观驾驶行为,是换道决策研究的基础。尚婷等<sup>[18]</sup>发现不同风格驾驶人的换道行为会有显著差异。以往的驾驶风格分类一般针对固定场景下驾驶人的长时驾驶行为进行聚类。然而,驾驶风格具有动态演化特性,会随着实际行驶过程中道路状况及周边车辆运行状态等因素而发生改变。因此驾驶人风格存在短时变化的特点,不一定与其长时驾驶行为一致,而现有关于驾驶风格的研究无法体现其时变性特点。

可以看出,大多数研究<sup>[12,14-17,19]</sup>仅考虑了驾驶人的单一换道目标(如安全性或舒适性);而多目标换道轨迹研究没有考虑不同驾驶人的异质性偏好。实际驾驶行为中,不同类别驾驶人对安全性、舒适性的追求程度具有差异性,需基于多目标视角,提出符合不同驾驶人行为特性的轨迹规划方法。

驾驶人换道过程中需同时考虑换道的安全性、舒适性,针对此多目标优化问题,本文引入多元效益,考虑不同风格驾驶人对安全性、效益性的权重区别,提出基于多元效益最大的轨迹规划方法。考虑目标车辆与周围车辆的交互运动状态,采用极端梯度提升(eXtreme gradient boosting, XGBoost)模型和基于密度的噪声应用空间聚类(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)得到驾驶人的短时换道风格,体现驾驶风格实时变化的特点;引入安全性和舒适性2个指标构建综合多元效益函数,根据历史驾驶数据得到不同风格驾驶人的多目标权重,提出异质性驾驶人的多项式轨迹规划方法。研究成果可应用于人机混驾环境下的最优换道轨迹控制,针对不同类型驾驶人实施差异化的速度引导策略,提高换道的舒适性和效率。

## 1 数据处理

highD数据集是德国公路上记录的自然车辆轨迹的数据集。数据集帧率为25帧/s,数据内容包括每辆车每帧的位置、速度、加速度、碰撞时间(time-to-collision, TTC)、车道编号、周围车辆的ID等信息,使用的坐标系如图1所示。

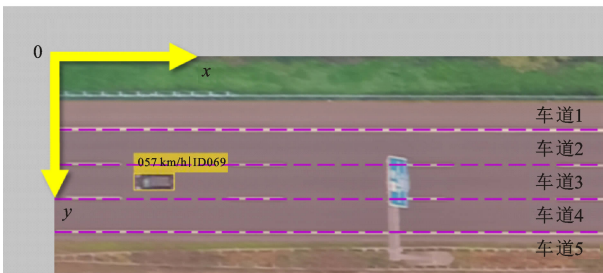


图1 highD数据集坐标系

Fig. 1 Coordinate system of highD dataset

为方便统计,使驾驶行为更符合一般的认知,根据车辆所在的车道对数据符号进行变换。 $x$ 方向(纵向),速度统一变换为正值,加速时加速度为正值,减速时加速度为负值; $y$ 方向(横向),车辆向左运动时速度和加速度方向为正值,向右运动时为负值。

考虑到规范中对超车行为的规定,本文只研究小汽车向左换道的轨迹。驾驶人在换道过程中的横向速度会有明显变化,大多采用大于0.2 m/s的横向速度完成单次换道<sup>[20]</sup>。采用由车道编号发生变化的时刻开始向前递推的方式寻找换道开始点<sup>[21]</sup>,换道决策时间窗常定义为2 s<sup>[22-23]</sup>。结合上述结论,确定本文换道行为提取准则如下:

(1)判断目标车辆在每帧时对应的车道编号 $I$ ,若 $I(t_0) \neq I(t_0 + 1)$ ,则将 $t_0$ 作为换道临界点,记为 $t_c$ 。

(2)由 $t_c$ 开始向前遍历,若某帧 $t_1$ 时目标车辆的横向速度 $v_y \geq 0.2$  m/s,并且 $t_1$ 前50帧(即2 s)过程中车辆横向速度平均值小于0.2 m/s,即 $v_y(t_1) \geq 0.2$  m/s且 $\frac{1}{50} \sum_{t=t_1-50}^{t_1-1} v_y(t) < 0.02$  m/s,则将 $t_1$ 作为换道起始时刻,记为 $t_s$ 。

(3)由 $t_c$ 开始向后遍历,若某帧 $t_2$ 时目标车辆的 $v_y \geq 0.2$  m/s,并且 $t_2$ 后50帧(即2 s)过程中车辆横向速度平均值小于0.2 m/s,即 $v_y(t_2) \geq 0.2$  m/s且 $\frac{1}{50} \sum_{t=t_2+1}^{t_2+50} v_y(t) < 0.02$  m/s,则将 $t_2$ 作为换道结束时刻,记为 $t_e$ 。

(4)对 $[t_s, t_e]$ 中的每个时刻,判断是否存在 $t^*$ 使得 $v_y(t^*)v_y(t^* + 1) < 0$ ,若不存在,则保留本条换道数据,否则舍弃。

$[t_s, t_e]$ 包含的时间记为换道总时间,其中 $[t_s, t_c]$ 为跨道前换道时间, $[t_c, t_e]$ 为跨道后换道时间。依据上述规则共提取得到598条完整的换道轨迹,对应的换道时间统计如图2所示。

统计结果显示跨道前、跨道后以及整个换道过程的时间分别近似服从 $N(3.11, 0.582)$ 、 $N(2.65, 0.692)$ 、 $N(5.76, 0.922)$ 的正态分布。本文取临界点前3.11 s以及后2.65 s共计5.76 s<sup>[24]</sup>作为换道持续时间。目标车辆与周边车辆的位置关系如图3所示。

提取目标车辆与周边车辆的驾驶行为,包括:各车辆对应的位置、速度、加速度以及车头间距。需要注意的是,行驶过程中目标车辆周边各位置未必全部有车辆行驶。为防止空白数据对后续模型造成影响,提高模型精度,准确提炼换道行为的影响因素,对缺失车辆数据进行虚拟填充。若某个位置不存在车辆,则目标车辆不会受到来自该位置虚拟车辆的

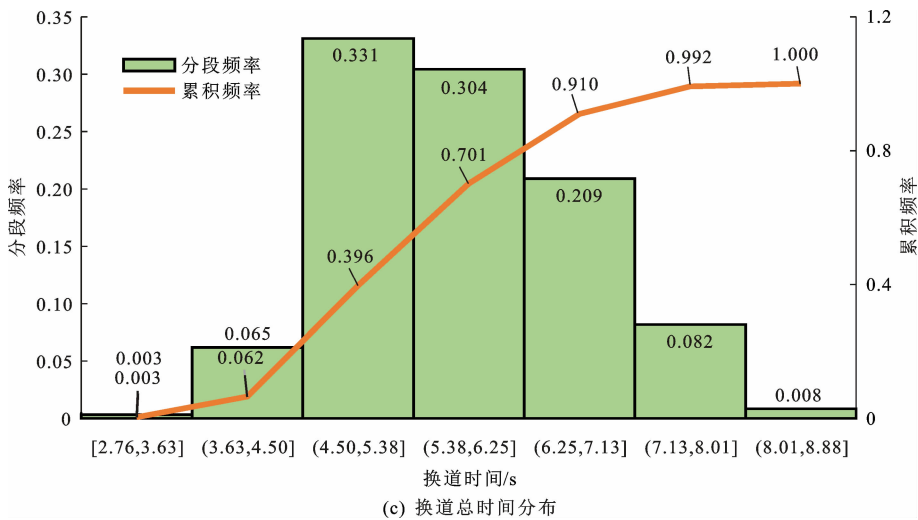
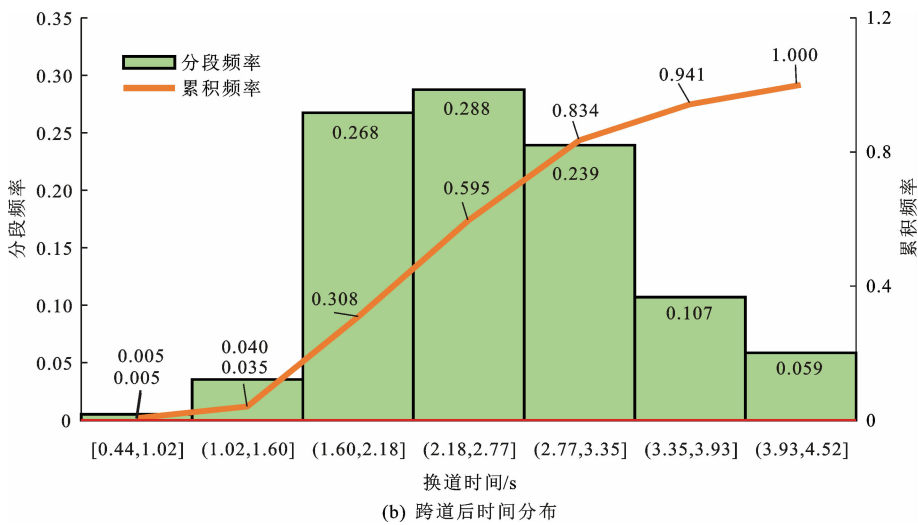
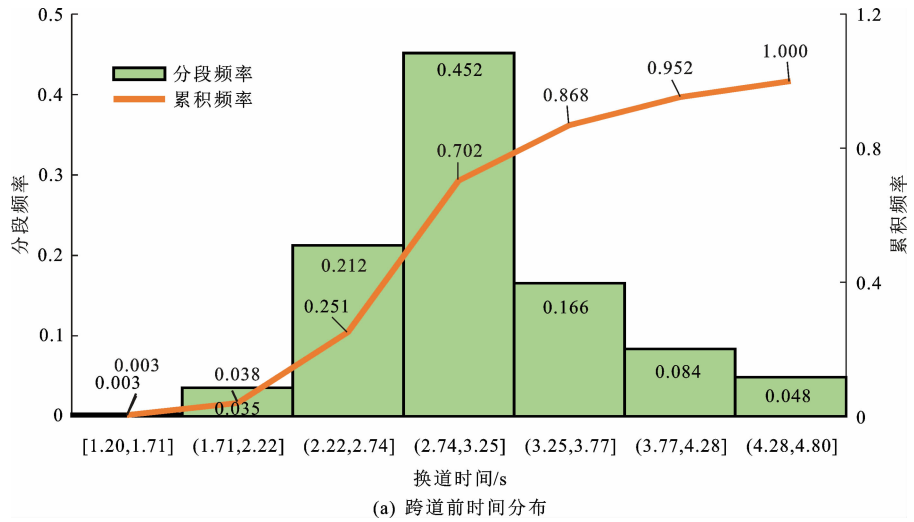


图2 换道时间分布

Fig. 2 Lane-changing time distribution

安全威胁。因此,目标车辆虚拟前车( $P$ 、 $T_P$  位置)的速度和加速度应足够大;虚拟后车( $F$ 、 $T_F$  位置)的速度和加速度应足够小;所有虚拟车辆与目标车

辆的车头间距均应设置为较大值。对于  $y$  方向,速度、加速度均为 0 时对目标车辆影响最小。经过对实际驾驶数据的统计发现,驾驶人  $x$  方向的速度不

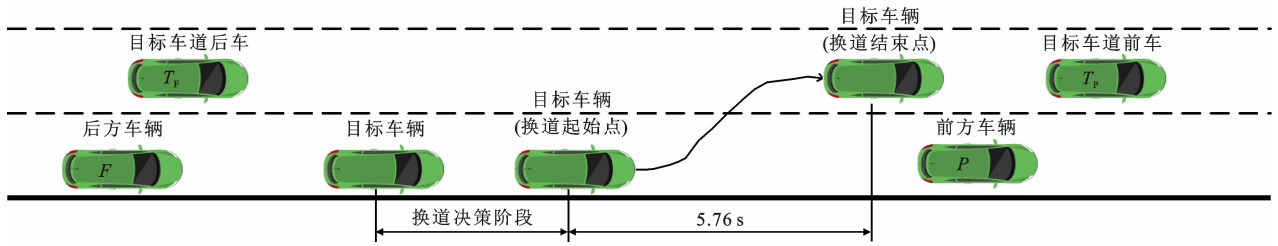


图3 目标车辆与周边车辆位置关系

Fig. 3 Position diagram between target vehicle and surrounding vehicles

大于  $50 \text{ m/s}$ , 加速度不大于  $1 \text{ m/s}^2$ , 两车间距最大为  $400 \text{ m}$ 。基于以上分析, 数据补全原则可描述为: 若  $P$ 、 $T_P$  位置无车辆, 则对应  $P$ 、 $T_P$  位置虚拟车辆的  $x$  方向的速度和加速度分别设置为  $50 \text{ m/s}$ 、 $1 \text{ m/s}^2$  (足够大),  $y$  方向的速度、加速度设置为  $0$ ; 若  $F$ 、 $T_F$  位置无车辆, 则对应  $F$ 、 $T_F$  位置的虚拟车辆  $x$  和  $y$  方向的速度和加速度均设置为  $0$  (足够小); 当某位置不存在车辆时, 将该位置的虚拟车辆与目标车辆的车头间距设置为  $400 \text{ m}$ 。

## 2 驾驶风格划分

驾驶风格是表征驾驶人主观行为趋向性的指标, 不同风格的驾驶人在行驶速度、加速度、换道决策和换道轨迹等方面存在较为明显的差异。

在分析驾驶人换道风格前, 需首先明确影响驾驶人换道意图的关键要素, 因此, 需同时选取换道和未换道车辆作为研究对象。针对换道车辆, 以换道执行点前  $2 \text{ s}$  时间窗内的状态为换道决策阶段<sup>[23]</sup>, 提取  $598$  辆换道车辆; 针对未换道车辆, 从数据集中随机选取  $725$  辆全程未换道的车辆。分别提取换道和未换道车辆及周边车辆驾驶行为数据, 以是否换道为因变量, 对当前车辆和周边车辆的驾驶行为共  $15$  个自变量进行分析 (表 1)。训练集与测试集按  $7:3$  划分, 使用 XGBoost 模型对换道决策行为进行分析, 得到换道识别模型准确率为  $94.12\%$ , 各决策行为的影响因素特征重要性排名如表 1 所示。

选用重要度排名前三的自变量作为衡量驾驶人换道风格的主要因素, 采用 DBSCAN 聚类方法, 以上述  $3$  个重要变量为依据, 将换道驾驶人分为  $3$  类。部分变量聚类结果均值如表 2 所示。

根据上表可知,  $1$  类驾驶人换道时的碰撞时间较小, 而速度较大, 定义为激进型。与之相反,  $-1$  类驾驶人换道时的碰撞时间值较大, 而  $x$ 、 $y$  方向的速度较低, 表明其换道环境更安全, 故定义为保守

型。 $0$  类驾驶人介于两者之间, 定义为一般型。

表 1 换道决策行为影响因素特征重要性排名

Table 1 Ranking of characteristic importance of influencing factors of lane-changing decision behavior

特征名称	特征含义	特征重要性	排名
$T$	与前车的碰撞时间(TTC)	0.352	1
$v_{T_Fx}$	目标车道后车 $x$ 方向的速度	0.271	2
$d_{T_P}$	与目标车道前车的纵向距离	0.096	3
$v_{Px}$	前车 $x$ 方向的速度	0.034	4
$a_x$	本车 $x$ 方向的加速度	0.031	5
$a_{T_Px}$	目标车道前车 $x$ 方向的加速度	0.029	6
$v_{Py}$	前车 $y$ 方向的速度	0.029	7
$d_P$	与前车的纵向距离	0.027	8
$v_{T_Px}$	目标车道前车 $x$ 方向的速度	0.026	9
$v_{T_Py}$	目标车道前车 $y$ 方向的速度	0.026	10
$a_{T_Py}$	目标车道前车 $y$ 方向的加速度	0.026	11
$a_{Px}$	前车 $x$ 方向的加速度	0.018	12
$a_{Py}$	前车 $y$ 方向的加速度	0.018	13
$v_x$	本车 $x$ 方向的速度	0.013	14
$v_{T_Fy}$	目标车道后车 $y$ 方向速度	0.007	15

表 2 行驶变量聚类均值

Table 2 Meverage means of driving variables

分类	$T/s$	$v_{T_Fx}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$d_{T_P}/\text{m}$	$v_x/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_y/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
-1	324.654	15.116	216.796	30.701	0.603
0	198.531	11.781	202.439	31.436	0.636
1	39.560	10.907	234.438	35.323	0.648

注:  $v_y$  为本车  $y$  方向速度。

## 3 换道轨迹规划

### 3.1 多项式分析

将规划轨迹  $(X(t), Y(t))$  在  $x$  和  $y$  方向的分轨迹用五次多项式表达, 设其表达式分别为

$$X(t) = \varphi_5 t^5 + \varphi_4 t^4 + \varphi_3 t^3 + \varphi_2 t^2 + \varphi_1 t + \varphi_0 \quad (1)$$

$$Y(t) = \Psi_5 t^5 + \Psi_4 t^4 + \Psi_3 t^3 + \Psi_2 t^2 + \Psi_1 t + \Psi_0 \quad (2)$$

式中:  $t$  为时间;  $\varphi_0 \sim \varphi_5$ 、 $\Psi_0 \sim \Psi_5$  均为待定系数。

分别对  $X(t)$  和  $Y(t)$  求一阶导数、二阶导数, 可

得其速度及加速度的表达式,即

$$X'(t) = 5\varphi_5 t^4 + 4\varphi_4 t^3 + 3\varphi_3 t^2 + 2\varphi_2 t + \varphi_1 \quad (3)$$

$$Y'(t) = 5\Psi_5 t^4 + 4\Psi_4 t^3 + 3\Psi_3 t^2 + 2\Psi_2 t + \Psi_1 \quad (4)$$

$$X''(t) = 20\varphi_5 t^3 + 12\varphi_4 t^2 + 6\varphi_3 t + 2\varphi_2 \quad (5)$$

$$Y''(t) = 20\Psi_5 t^3 + 12\Psi_4 t^2 + 6\Psi_3 t + 2\Psi_2 \quad (6)$$

以换道起始点为坐标原点,则换道过程中  $t$  时车辆的状态可以用向量  $\mathbf{W}(t) = (X, v_x, a_x, Y(t), v_y, a_y)$  表征。换道起始点的初始状态与换道结束点的状态可分别表示为  $\mathbf{W}(0) = (0, v_{x_0}, a_{x_0}, 0, v_{y_0}, a_{y_0})$ 、 $\mathbf{W}(5.76) = (L, v_{x_1}, a_{x_1}, h, 0, 0)$ 。其中,对于即将换道的车辆,起始状态的  $v_{x_0}$ 、 $a_{x_0}$ 、 $v_{y_0}$ 、 $a_{y_0}$  是已知量,结束状态  $v_{x_1}$  和  $a_{x_1}$  是未知量, $L$ 、 $h$  分别为换道长度和换道宽度,是未知量。

将车辆的初始状态和结束状态分别代入式(1)~(6),可得式(7)、(8)所示的方程组,即

$$\begin{cases} \varphi_0 = 0 \\ v_{x_0} = \varphi_1 \\ a_{x_0} = 2\varphi_2 \\ L = 5.76^5 \varphi_5 + 5.76^4 \varphi_4 + 5.76^3 \varphi_3 + \\ \quad 5.76^2 \varphi_2 + 5.76 \varphi_1 + \varphi_0 \\ v_{x_1} = 5 \times 5.76^4 \varphi_5 + 4 \times 5.76^3 \varphi_4 + \\ \quad 3 \times 5.76^2 \varphi_3 + 2 \times 5.76 \varphi_2 + \varphi_1 \\ a_{x_1} = 20 \times 5.76^3 \varphi_5 + 12 \times 5.76^2 \varphi_4 + \\ \quad 6 \times 5.76 \varphi_3 + 2\varphi_2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Psi_0 = 0 \\ v_{y_0} = \Psi_1 \\ a_{y_0} = 2\Psi_2 \\ h = 5.76^5 \Psi_5 + 5.76^4 \Psi_4 + 5.76^3 \Psi_3 + \\ \quad 5.76^2 \Psi_2 + 5.76 \Psi_1 + \Psi_0 \\ 5 \times 5.76^4 \Psi_5 + 4 \times 5.76^3 \Psi_4 + \\ \quad 3 \times 5.76^2 \Psi_3 + 2 \times 5.76 \Psi_2 + \Psi_1 = 0 \\ 20 \times 5.76^3 \Psi_5 + 12 \times 5.76^2 \Psi_4 + \\ \quad 6 \times 5.76 \Psi_3 + 2\Psi_2 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式(7)、(8)为六元一次方程组。可知,当  $L$ 、 $v_{x_1}$ 、 $a_{x_1}$  确定时,可求出系数  $\varphi_0 \sim \varphi_5$ ,进而  $x$  方向的轨迹可以唯一确定;同理,通过  $h$  可求出待定系数  $\Psi_0 \sim \Psi_5$ ,可确定  $y$  方向的轨迹。

### 3.2 $x$ 方向轨迹规划

#### 3.2.1 多元效益函数构建

车辆换道时应兼顾安全性和舒适性,因此,本文从安全性和舒适性构建驾驶人在  $x$  方向上的最优换道轨迹目标函数。

#### (1) 舒适性效益函数

舒适性效益以换道过程中目标车辆  $x$  方向加速度的变化值与本类别驾驶人换道过程中  $x$  方向加速度变化值的最大值之比来表示,即

$$U_c^{(j)} = \frac{a_u - a_d}{a_{\max}^{(j)} - a_{\min}^{(j)}} \quad (9)$$

式中: $a_u$ 、 $a_d$  分别为规划轨迹中加速度的最大值和最小值; $a_{\max}^{(j)}$ 、 $a_{\min}^{(j)}$  分别表示  $j$  类驾驶人实际换道过程中加速度的最大值和最小值; $j = -1, 0, 1$ ,分别对应保守型、一般型、激进型驾驶人。

舒适性效益函数  $U_c^{(j)}$  越小,代表加速度的变化值越小,舒适性越高。加速度差值(即式中的分子)通常小于 0.1,而  $a_{\max}^{(j)} - a_{\min}^{(j)}$  (分母)为大于 1 的值,因此  $U_c^{(j)}$  一般小于 0.1。

#### (2) 安全性效益函数

车辆换道时的安全隐患主要来自于周边车辆,目标车辆与本车道前车  $P$  在  $t$  时的距离  $D_P(t)$ 、与本车道后车  $F$  在  $t$  时的距离  $D_F(t)$ 、与目标车道前车  $T_P$  在  $t$  时的距离  $D_{T_P}(t)$ 、与目标车道后车  $T_F$  在  $t$  时的距离  $D_{T_F}(t)$  分别可以表示为

$$D_P(t) = d_P + x_P(t) - X(t) \quad (10)$$

$$D_F(t) = d_F - x_F(t) + X(t) \quad (11)$$

$$D_{T_P}(t) = d_{T_P} + x_{T_P}(t) - X(t) \quad (12)$$

$$D_{T_F}(t) = d_{T_F} - x_{T_F}(t) + X(t) \quad (13)$$

式中: $d_P$ 、 $d_F$ 、 $d_{T_P}$ 、 $d_{T_F}$  分别为换道开始时刻目标车辆与本车道前车、本车道后车、目标车道前车、目标车道后车的距离; $x_P(t)$ 、 $x_F(t)$ 、 $x_{T_P}(t)$ 、 $x_{T_F}(t)$  分别为对应位置的车辆从换道开始时刻至  $t$  时在  $x$  方向的位移。

其中  $X(t)$  可由式(1)确定。假设目标车辆换道过程中周边车辆的运动状态保持不变,则周边车辆位移可表示为

$$x_i(t) = v_{x_0}^{(i)} t + 0.5 a_{x_0}^{(i)} t^2 \quad (14)$$

式中: $x_i(t)$  为  $i$  位置( $i$  分别表示前方车辆  $P$ 、后方车辆  $F$ 、目标车道前车  $T_P$ 、目标车道后车  $T_F$ )的车辆  $0 \sim t$  时内  $x$  方向的位移; $v_{x_0}^{(i)}$ 、 $a_{x_0}^{(i)}$  分别为  $i$  位置的车辆在换道开始时刻  $x$  方向的速度、加速度。

分别求得当前车辆换道过程中与周围各车辆距离的最小值,即  $D = \min\{D_P(t), D_F(t), D_{T_P}(t), D_{T_F}(t)\}$ ,以最小值  $D$  与最大距离  $D'$  的比值表征安全性,则安全性效益函数可以表示为

$$U_s = D/D' \quad (15)$$

根据前文的定义,设定无车区域与目标车辆的距离为 400 m,因此,本文 3 种驾驶风格驾驶人统一

取  $D'=400\text{ m}$ 。  $U_s$  取值为  $[0,1]$ ,且越接近于 1,说明目标车辆与前后车距离越远,安全性越高。

(3)综合多元效益函数

以线性组合的方式表示综合效益函数,其表达式可表示为

$$U^{(j)} = \alpha^{(j)} U_s - \beta^{(j)} U_c^{(j)} \quad (16)$$

式中:  $\alpha^{(j)}$ 、  $\beta^{(j)}$  均为  $j$  类驾驶人的权重系数;  $U^{(j)}$  取值越大代表轨迹越优。

根据舒适性效益函数的分析,可以认为  $1-U_c^{(j)} > 0.9$ 。而安全性效益函数中,目标车辆与周围车辆的最小值  $D$  一般为  $50\text{ m}$  左右,  $U_s$  一般小于  $0.125$ 。  $U_s$  和  $1-U_c^{(j)}$  的数量级相差较大,权重系数  $\alpha$ 、  $\beta$  难以体现 3 类驾驶人之间的差异性,因此,引入车辆最小安全距离  $S$  对安全效益函数进行调整<sup>[17]</sup>,即

$$S = 0.058\ 96 v_x(t) + 0.004\ 51 v_x^2(t) + 3 \quad (17)$$

调整后的安全性效益函数表达式为

表 3 各驾驶风格驾驶人参数取值

Table 3 Parameter values of drivers with different driving styles

$j$	驾驶风格	$a_{\max}^{(j)} - a_{\min}^{(j)}$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	$L$ 上限/ $\text{m}$	$L$ 下限/ $\text{m}$	$v_{x_1}$ 上限/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$v_{x_1}$ 下限/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$a_{x_1}$ 上限/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	$a_{x_1}$ 下限/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
-1	保守型	1.57	225	100	45	20	2.0	-0.7
0	一般型	2.47	250	100	50	20	2.7	-1.0
1	激进型	3.47	300	100	60	20	3.0	-1.5

按以上步骤计算 3 种驾驶风格的驾驶人的  $\alpha^{(j)}$ 、  $\beta^{(j)}$ ,结果如表 4 所示。

表 4 各驾驶风格驾驶人权重参数取值

Table 4 Weight parameter values of drivers with different driving styles

$j$	驾驶风格	$\alpha^{(j)}$	$\beta^{(j)}$
-1	保守型	0.65	0.35
0	一般型	0.69	0.31
1	激进型	0.83	0.17

由表 4 可知:  $\alpha^{(1)}$  明显高于  $\alpha^{(0)}$  和  $\alpha^{(-1)}$ ,因为激进型驾驶人的速度明显更高,需要与周围车辆保持更远的距离,所以对安全性要求更高。

确定  $\alpha^{(j)}$ 、  $\beta^{(j)}$  后,即可通过遍历的方式以  $U^{(j)}$  取最大值为目标确定未知参数  $L$ 、  $v_{x_1}$ 、  $a_{x_1}$ ,进而确定  $x$  方向的轨迹。

3.3 y 方向轨迹规划

车辆只有在换道过程中  $y$  方向才会有明显的速度、加速度,因此将  $y$  方向轨迹结束点的速度、加速度即  $v_{y_1}$ 、  $a_{y_1}$  设置为 0。只需确定不同驾驶风格驾驶人的换道宽度  $h$ ,即可确定  $y$  方向的轨迹。

历史驾驶行为数据集显示,保守型、一般型、激

$$U_s = \frac{D}{D'/S} \quad (18)$$

3.2.2 效益函数权重计算

根据历史驾驶行为数据,确定  $\alpha^{(j)}$ 、  $\beta^{(j)}$  的步骤为:

第 1 步:用  $m^{(j)}$  表示某类驾驶人中更在意舒适性的驾驶人的数量;  $n^{(j)}$  表示更在意安全性的驾驶人的数量;  $m^{(j)}$ 、  $n^{(j)}$  初始值均为 0。对于即将换道的驾驶人,在已获取其  $v_{x_0}$ 、  $a_{x_0}$  前提下,令  $L$ 、  $v_{x_1}$ 、  $a_{x_1}$  在对应区间内依次取值并计算对应的  $U_s$  和  $(1-U_c^{(j)})$  的值,若最大值由  $U_s$  取得,则表示此驾驶人对安全性关注度更高,  $n^{(j)} \rightarrow n^{(j)} + 1$ ;反之则此驾驶人对舒适性关注度更高,  $m^{(j)} \rightarrow m^{(j)} + 1$ 。各驾驶风格驾驶人参数遍历区间如表 3 所示。

第 2 步:统计  $j$  类驾驶人的  $m^{(j)}$ 、  $n^{(j)}$  取值,  $m^{(j)}$ 、  $n^{(j)}$  的比值代表  $j$  类驾驶人总体上对舒适性和安全性的关注度比例,即  $\beta^{(j)} = \frac{m^{(j)}}{m^{(j)} + n^{(j)}}$ ,  $\alpha^{(j)} = 1 - \beta^{(j)}$ 。

激进型驾驶人的平均换道宽度分别为  $3.01$ 、  $3.04$ 、  $3.33\text{ m}$ ,将其代入式(8)即可得  $y$  方向的规划轨迹。

3.4 动态轨迹调整

根据前述方法,分别求得  $x$ 、  $y$  方向的轨迹,  $x$  方向与  $y$  方向轨迹合并后即最终换道轨迹。

计算安全性效益函数  $U_s$  时,目标车辆与周边车辆的最小距离  $D$  是在周围车辆运动状态不变的假设下计算的,然而车辆实际行驶过程中周围车辆运动状态未必不变。

根据周荣贵等<sup>[25]</sup>的研究结果,当周围车辆的加速度满足以下条件时,说明周围车辆会对目标车辆产生明显影响,该条件可表示为

$$a_x^{(i)}(t) - a_{x_0}^{(i)} > 0.176g \left\{ 0.198 \left[ \frac{v_x^{(i)}(t)}{3.6 \times 100} \right]^2 - 0.592 \left[ \frac{v_x^{(i)}(t)}{3.6 \times 100} \right] + 0.569 \right\} + 0.541 \quad (20)$$

$$a_x^{(i)}(t) - a_{x_0}^{(i)} < -0.212g \left\{ 0.198 \left[ \frac{v_x^{(i)}(t)}{3.6 \times 100} \right]^2 - 0.592 \left[ \frac{v_x^{(i)}(t)}{3.6 \times 100} \right] + 0.569 \right\} - 0.51 \quad (21)$$

式中:  $a_x^{(i)}(t)$  为  $i$  位置 ( $i = P, F, T_P, T_F$ ) 处的车辆在

$t$  时  $x$  方向的加速度;  $a_{x_0}^{(i)}$  为其在目标车辆开始换道时  $x$  方向的加速度;  $v_x^{(i)}(t)$  为  $i$  位置处的车辆在  $t$  时  $x$  方向的速度;  $g$  为重力加速度, 可取  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。

因此, 在轨迹规划中, 每隔  $1 \text{ s}$  按照文献[25]的方法判断 1 次周围车辆的运动状态, 进行后续轨迹的重新计算。

### 4 实例验证

以提取的换道车辆换道初始时刻的驾驶行为数据为基础, 进行轨迹规划。

#### 4.1 规划轨迹与实际轨迹偏差对比

分析换道持续过程中所有驾驶人规划轨迹与实际轨迹在  $x$  和  $y$  方向的偏差, 即同一时刻规划轨迹与实际轨迹  $X, Y$  坐标之差。总体上, 随着时间推移, 偏差总体呈增大趋势。但不论是哪 1 类驾驶人, 其规划轨迹偏差均较小。  $x, y$  方向的偏差情况如图 4~5 所示。

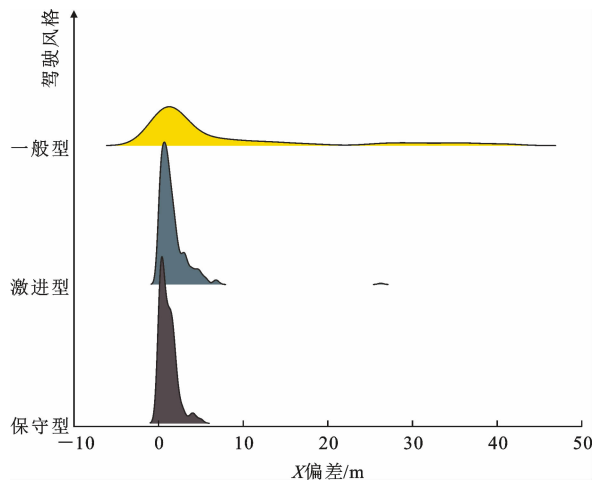


图 4 所有驾驶人  $x$  方向偏差统计

Fig. 4 Statistical diagram of  $x$ -direction deviations for all drivers

对于  $x$  方向, 大多数驾驶人的轨迹偏差小于  $5 \text{ m}$ 。保守型驾驶人的轨迹偏差最小, 均集中在  $2 \text{ m}$  以内, 与实际轨迹重合度较高; 一般型驾驶人的轨迹偏差明显增加, 有大约 20% 的偏差位于  $13.63 \sim 40.90 \text{ m}$ , 不过结合车辆与前后车的平均车头间距

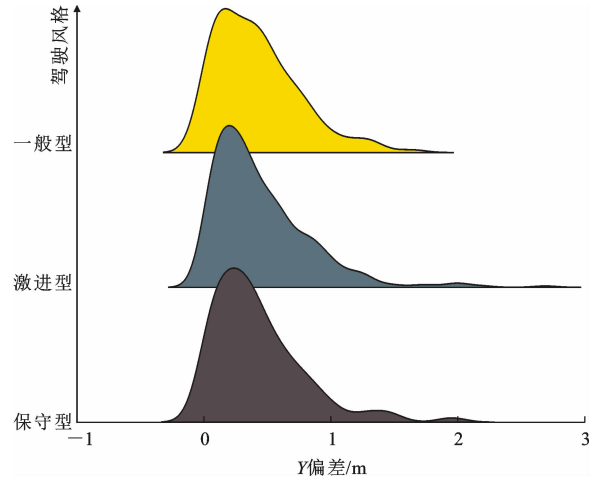


图 5 所有驾驶人  $y$  方向偏差统计

来看, 可以仍与周边车辆保持安全距离; 对于激进型, 绝大部分驾驶人的轨迹偏差同样位于较低水平内。

对于  $y$  方向, 保守型、一般型、激进型驾驶人轨迹偏差的 85% 分位数分别为  $0.77, 0.73, 0.90 \text{ m}$ , 均为车道宽度的  $1/4$  左右。

为进一步比较不同类型驾驶人的规划轨迹和实际轨迹之间的差异性, 进行 Wilcoxon 符号秩检验, 结果如表 5 所示。

根据检验结果可知,  $x$  方向和  $y$  方向偏差的  $p$  均为 0。因此, 尽管  $x$  方向和  $y$  方向的偏差均较小, 但是从统计学角度来看, 规划轨迹与实际轨迹存在显著差异 ( $p < 0.01$ ), 说明规划轨迹从根本上改善了车辆的驾驶行为特征。

#### 4.2 规划轨迹和实际轨迹的行为特征对比

车头间距和加速度是驾驶人行为特征的代表性指标, 表征了驾驶人对周围环境的响应, 同时也是进行轨迹规划的重要特征变量。分别采用舒适性效益函数和安全性效益函数中的加速度差值[式(9)中的  $a_u - a_d$ ]和最小车头间距[式(15)中的  $D$ ]来表征其行为特征, 针对不同类型驾驶人规划前后的行为特征参数进行曼-惠特尼检验, 结果如表 6 所示。

表 5 规划轨迹-实际轨迹偏差的威尔科克森符号秩检验

Table 5 Wilcoxon test of deviation between planned and actual trajectories

轨迹方向	$x$ 方向			$y$ 方向		
	保守型	一般型	激进型	保守型	一般型	激进型
实际轨迹标准偏差/m	115.54	109.80	105.34	7.04	6.51	6.81
规划轨迹标准偏差/m	115.47	110.27	105.23	7.08	6.49	6.78
$p$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注:  $p$  为显著性概率。

表 6 规划轨迹-实际轨迹驾驶行为特征的曼-惠特尼检验

Table 6 Mann-Whitney test of driving behavior characteristics between planned and actual trajectories

样本配对	变量	最小车头间距/m			加速度差值/( $m \cdot s^{-2}$ )		
		保守型	一般型	激进型	保守型	一般型	激进型
规划轨迹配 对实际轨迹	驾驶风格						
	中位数	36.38 <sup>a</sup> /24.02 <sup>b</sup>	27.65 <sup>a</sup> /14.33 <sup>b</sup>	48.09 <sup>a</sup> /33.94 <sup>b</sup>	0.16 <sup>a</sup> /0.29 <sup>b</sup>	0.13 <sup>a</sup> /0.45 <sup>b</sup>	0.16 <sup>a</sup> /0.36 <sup>b</sup>
	曼-惠特尼检验	6 050	17 090	80 503	1 947	2 636	18 770
	标准误差	385.00	781.46	2 652.19	384.97	781.43	2 652.09
	$p$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注:上标 a、b 分别表示规划轨迹、实际轨迹的特征变量中位数。

假设检验结果表明,无论是何种类型驾驶人,规划轨迹和实际轨迹之间的最小车头间距、加速度差值均具有显著差异性。从中位数结果来看,无论是何种类型驾驶人,实际轨迹的车头间距明显小于规划轨迹,而实际轨迹的加速度差值显著大于规划轨迹,验证了规划轨迹在舒适性与安全性上的显著提升。以最小车头间距为例,规划轨迹和实际规划的样本分布情况如图 6 所示,图 6 中  $N$  为驾驶人数量,  $A$  为秩平均值,值越小表明车头间距越小。

从图 6 可以看出,无论是何种类型驾驶人,实际轨迹对应的最小车头间距均在较小值时累积频率就达到 80%,而规划轨迹的最小车头间距总体上大于实际轨迹。

### 4.3 驾驶人规划轨迹特征分析

针对 3 类驾驶人的规划轨迹,分析最小车头间距  $D$  以及加速度的差值  $a_u - a_a$ ,结果如图 7、8 所示。图 9、10 为各种类型驾驶人的最小车头间距和加速度差值的独立样本检验结果。

由图 7~10 可知,一般型驾驶人的最小车头间距分布最集中。激进型驾驶人的平均最小车头间距最大,这是因为激进型驾驶人的速度远大于其他 2 类驾驶人,必须保证足够的车头间距才能安全换道。保守型驾驶人最小车头间距大于一般型驾驶人,且最大值达到了 240.75 m,远高于其他 2 类驾驶人。

3 类驾驶人的加速度差值集中分布在较小范围内,激进型驾驶人的加速度变化值最大,且有更多样本分布在更大值附近,保守型驾驶人的加速度差值更集中。

各种不同类型驾驶人的 2 类特征指标差异性配对检验结果如表 7 所示。由表 7 可知:不同类型驾驶人的最小车头间距和加速度的差值具有显著差异性。结合上述结果可以认为,保守型驾驶人的最小车头间距较大,加速度差值较小,说明了此类驾驶人

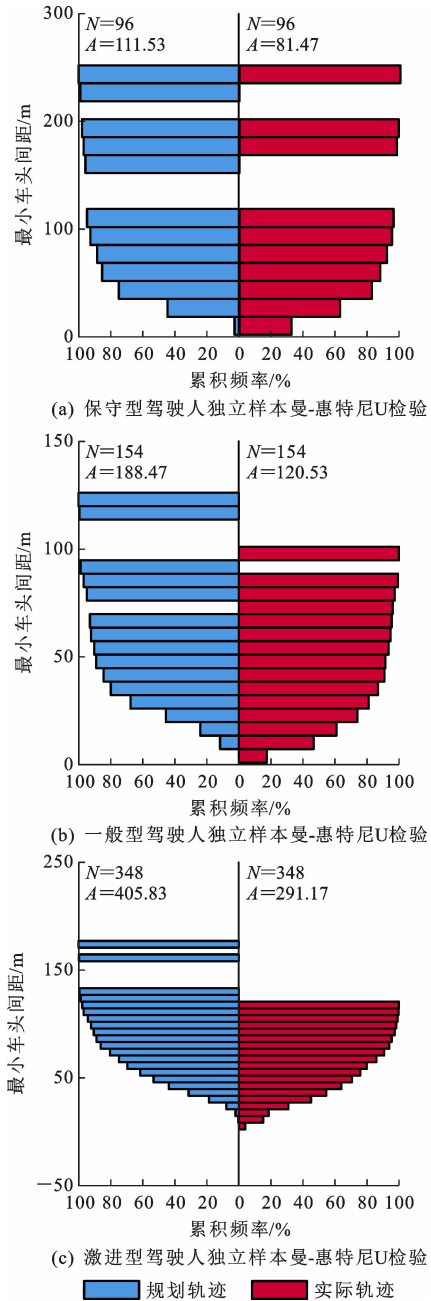


图 6 最小车头间距  $D$  的独立样本检验

Fig. 6 Independent sample test of minimum space headway  $D$  较为小心谨慎,对安全距离的要求较高。一般型驾驶人的最小车头间距比保守型明显减小,但是行驶

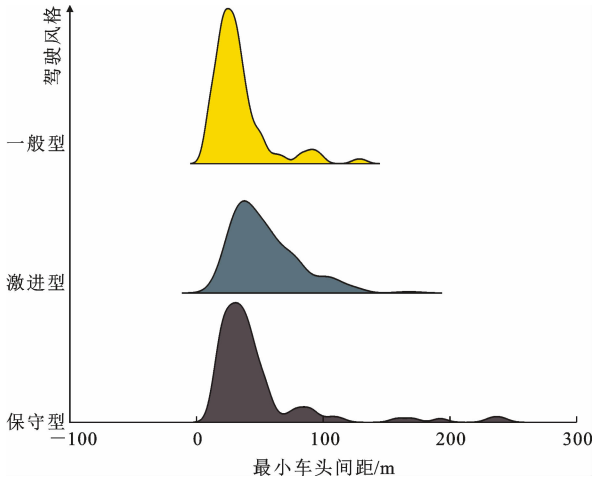


图7 最小车头间距分布

Fig. 7 Distributions of minimum space headway

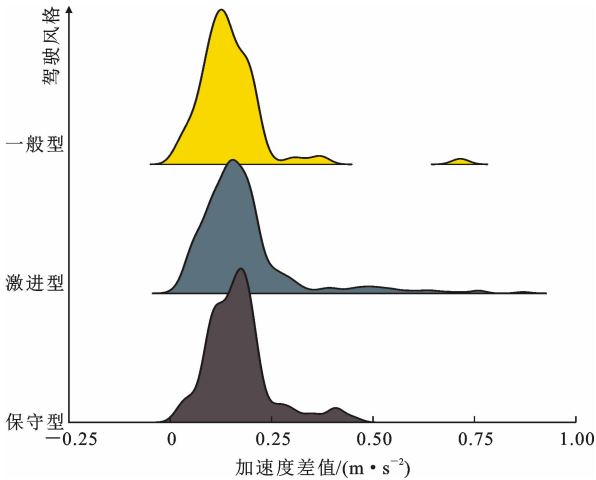


图8 加速度差值  $a_u - a_d$  分布

Fig. 8 Distributions of acceleration difference values of  $a_u - a_d$

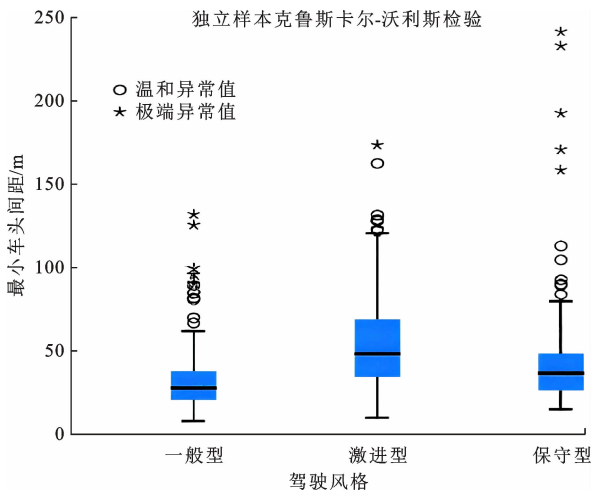


图9 最小车头间距检验

Fig. 9 The minimum space headway test

行驶速度明显增大,加速度差值不论是聚集区间还是最大值均明显增大。换道行为轨迹的结果与前文驾驶风格划分对应的特征一致。

#### 4.4 不同类型驾驶人规划轨迹对比

为更直观地观察3种驾驶风格驾驶人规划轨迹的不同,给3类驾驶人赋予相同的初始状态,分别规划其换道轨迹。根据历史数据,初始状态具体取值为: $a_{x_0} = 0.04 \text{ m/s}^2, v_{x_0} = 30.41 \text{ m/s}, a_{y_0} = 0, v_{y_0} = 0, a_{P_{x_0}} = 0.04 \text{ m/s}^2, v_{P_{x_0}} = 26.15 \text{ m/s}, d_p = 45.66 \text{ m}$ ,其余位置无车辆。3类驾驶人的轨迹规划结果如图11所示。

从图11可以看出,激进型驾驶人轨迹长度明显小于另外2类驾驶人,而换道宽度明显较大。保守型驾驶人换道宽度略小于一般型驾驶人,两者换道长度相差不大。表明激进型驾驶人倾向于快速从原车道中心换到目标车道中心,在较短的纵向距离内便可完成换道;而保守型和一般型驾驶人则需要更长的距离来完成换道,且一般在行驶到目标车道中心之前便完成了换道。

### 5 结语

(1)与实际轨迹相比,规划轨迹在  $x$  方向的偏差大多集中在 5 m 之下,在  $y$  方向的偏差大多在 0.8 m 之下。不同驾驶风格驾驶人的偏差有所不同,且规划轨迹与实际轨迹具有显著差异性。

(2)对于3种类型驾驶人,实际轨迹的最小车头间距明显小于规划轨迹,而加速度差值显著大于规划轨迹,说明规划轨迹具有更明显的舒适度和安全性。保守型驾驶人的加速度变化值最小,且车头间距较大,体现了其谨慎驾驶的特点,而激进型驾驶人行为特征则恰好与其相反,与驾驶风格定义相符。

(3)在同样初始条件下,激进型驾驶人的规划轨迹在纵向上要明显比其他2类驾驶人短,横向明显更宽,说明其换道效率较高,换道占用道路较短且倾向于一次性换到目标车道正中间,符合其驾驶风格激进的特性。

(4)本文的研究对周边车辆运动状态建模存在简化假设,未来可在规划周围车辆实时轨迹的基础上实时调整目标车辆的行为特征。研究结果可用于智能车辆、人机混驾场景下的换道行为引导,基于实时行为特征参数优化换道轨迹,提高路网的整体运行效率和安全性。

速度差距不大,换道过程比较舒适。激进型驾驶人

表 7 规划轨迹下的驾驶行为特征克鲁斯卡尔-沃利斯检验

Table 7 Kruskal-Wallis test of driving behavior characteristics for planned trajectories

样本配对	D/m				加速度差值/(m·s <sup>-2</sup> )			
	检验统计	标准误差	标准检验统计	p	检验统计	标准误差	标准检验统计	p
一般型-激进型	-169.10	16.72	-10.11	0.000	-52.51	16.72	-3.14	0.005
一般型-保守型	-78.43	22.47	-3.49	0.001	-55.96	22.47	-2.49	0.038
激进型-保守型	90.67	19.92	4.55	0.000	-53.45	19.92	-2.17	0.024

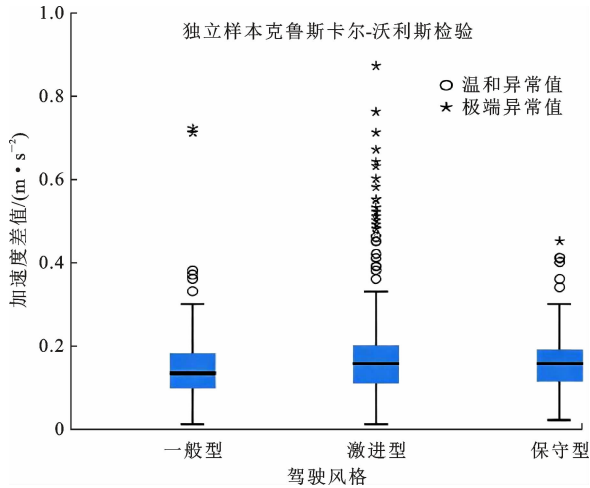


图 10 加速度差值检验

Fig. 10 Acceleration difference test

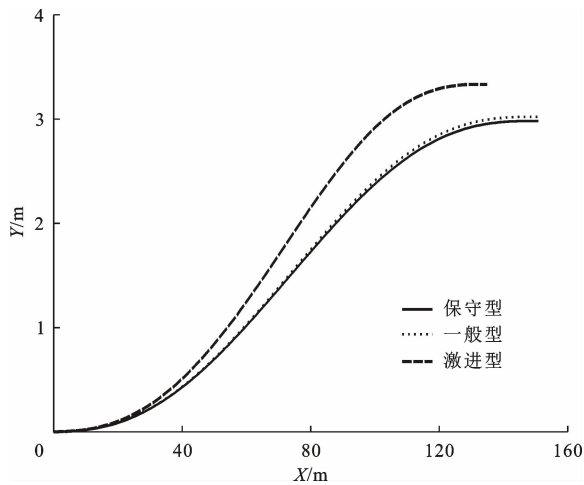


图 11 三类驾驶人规划轨迹对比

Fig. 11 Comparison of planned trajectories of three types of drivers

参考文献:

References:

[ 1 ] 李 硕,杨晓芳.基于元胞自动机的竞争型换道模型[J]. 交通运输研究,2018,4(4):9-15.  
 LI Shuo, YANG Xiao-fang. A competitive channel change model based on cellular automata [J]. Transportation Research, 2018,4(4): 9-15.

[ 2 ] SHARMA A, ZHENG Z D, BHASKARA A. A

pattern recognition algorithm for assessing trajectory completeness[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 96: 432-457.

[ 3 ] 陆 建,李英帅.车辆换道行为建模的回顾与展望[J]. 交通运输系统工程与信息,2017,17(4):48-55.  
 LU Jian, LI Ying-shuai. Review and perspective of the modeling of vehicle lane changing behavior[J]. Transportation System Engineering and Information, 2017,17(4): 48-55.

[ 4 ] 冯 耀,景首才,惠 飞,等.基于深度强化学习的智能网联车辆换道轨迹规划方法[J]. 汽车安全与节能学报,2022,13(4):705-717.  
 FENG Yao, JING Shou-cai, HUI Fei, et al. Track change track planning method for intelligent connected vehicles based on deep reinforcement learning [J]. Journal of Automotive Safety and Energy Conservation, 2022,13(4): 705-717.

[ 5 ] 李伟东,李 乐.基于改进 RRT 算法的无人车路径规划[J]. 计算机测量与控制,2023,31(1):160-166.  
 LI Wei-dong, LI Le. Unmanned vehicle path planning based on an improved RRT algorithm[J]. Computer measurement and control, 2023, 31(1): 160-166.

[ 6 ] ZHANG J, WU J, SHEN X, et al. Autonomous land vehicle path planning algorithm based on improved heuristic function of A-star [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2021, 18(5): 1-10.

[ 7 ] 王 莹,卫 翀,马 路.基于二次规划的智能车辆动态换道轨迹规划研究[J]. 中国公路学报,2021, 34(7):79-94.  
 WANG Ying, WEI Chong, MA Lu. Research on dynamic lane change trajectory planning of intelligent vehicles based on secondary planning[J]. Highway Journal of China, 2021, 34(7): 79-94.

[ 8 ] 汪海松,胡明辉,黎万洪,等.建立安全换道域的换道决策与规划[J]. 重庆大学学报,2024,47(3):16-29.  
 WANG Hai-song, HU Ming-hui, LI Wan-hong, et al. Establish the lane change decision and planning of

- safe lane change domain[J]. *Journal of Chongqing University*, 2024, 47(3): 16-29.
- [9] ALBERTO D, MIGUEL C, FELIPE J, et al. Modelling the human lane-change execution behavior through multilayer perceptrons and convolutional neural networks[J]. *Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour*, 2018, 56: 134-148.
- [10] DENG H, WANG J, YANG J, et al. Study on automatic lane change trajectory control of intelligent vehicle on expressway [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2480(1): 012003.
- [11] 潘兵宏,章泽龙,周 乾,等.基于 sigmoid 换道模型的匝道连续分流间距[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2023, 43(6): 37-48.  
PAN Bing-hong, ZHANG Ze-long, ZHOU Qian, et al. Continuous diversion spacing of ramps based on sigmoid lane-change mode[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2023, 43(6): 37-48.
- [12] 唐 斌,许占祥,江浩斌,等.基于分段优化的车辆换道避障轨迹规划[J]. *汽车工程*, 2022, 44(6): 831-841.  
TANG Bin, XU Zhan-xiang, JIANG Hao-bin, et al. Vehicle lane change and obstacle avoidance trajectory planning based on segment optimization [J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(6): 831-841.
- [13] 温惠英,张伟罡,赵 胜.基于生成对抗网络的车辆换道轨迹预测模型[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(5): 32-40.  
WEN Hui-ying, ZHANG Wei-gang, ZHAO Sheng. Prediction model of vehicle lane switching trajectory based on the generated adversarial network [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(5): 32-40.
- [14] CHRISTOPH H, WERNER K, JENS N, et al. Passengers comfort during automated motorway lane changes: A subject study on different lane change trajectories at the Stuttgart driving simulator [J]. *Automotive and Engine Technology*, 2022, 7(3/4): 343-351.
- [15] LI X, GUO Z, SU D, et al. Time-dependent lane change trajectory optimization considering comfort and efficiency for lateral collision avoidance[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2021, 15(5): 595-605.
- [16] WANG X, QIN X, ZHANG H, et al. Cognitive granular-based path planning and tracking for intelligent vehicle with multi-segment Bezier curve stitching [J]. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2023, 37(1): 385-400.
- [17] 赵树恩,王金祥,李玉玲.基于多目标优化的智能车辆换道轨迹规划[J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(2): 232-242.  
ZHAO Shu-en, WANG Jin-xiang, LI Yu-ling. Track-changing trajectory planning of intelligent vehicles based on multi-objective optimization [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2021, 21(2): 232-242.
- [18] 尚 婷,吴 鹏,唐伯明,等.隧道至互通小间距路段车辆换道博弈行为研究[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(10): 68-75.  
SHANG Ting, WU Peng, TANG Bo-ming, et al. Study on the game behavior of tunnel to interchange[J]. *Chinese Journal of Safety Science*, 2021, 31(10): 68-75.
- [19] 张雅丽,付 锐,袁 伟,等.考虑能耗的进出站驾驶风格分类及识别模型[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2023, 53(7): 2029-2042.  
ZHANG Ya-li, FU Rui, YUAN Wei, et al. The driving style classification and identification model [J]. *Journal of Jilin University (Engineering Edition)*, 2023, 53(7): 2029-2042.
- [20] 汪 猛.基于高精度数据的换车道行为特征研究[D].长沙:湖南大学,2017.  
WANG Meng. Study on the behavior characteristics of lane changing based on high-precision data [D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [21] 贾寒冰,刘 鹏,张 雷,等.基于规则与机器学习融合的换道决策建模方法研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(4): 212-221.  
JIA Han-bing, LIU Peng, ZHANG Lei, et al. Research on the lane-change decision modeling method based on the fusion of rules and machine learning [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(4): 212-221.
- [22] 董俊一.考虑驾驶风格的智能驾驶换道决策模型研究[D].长春:吉林大学,2022.  
DONG Jun-yi. Study of intelligent driving considering driving style [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [23] ALI Y, ZHENG Z, HAQUE M M, et al. A game theory-based approach for modelling mandatory lane-changing behaviour in a connected environment [J].

- Transportation Research Part C, 2019, 106: 220-242.
- [24] 郝艳军. 基于自然驾驶的换道意图识别及轨迹预测研究[D]. 西安:长安大学,2022.
- HAO Yan-jun, Research on lane change intention recognition and trajectory prediction based on natural driving[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [25] 周荣贵,高 沛,李雨璇,等. 基于轨迹数据的高速公路小客车异常驾驶行为[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024,54(9):2581-2587.
- ZHOU Rong-gui, GAO Pei, LI Yu-xuan, et al. Anomalous driving behavior threshold of highway passenger cars based on trajectory data[J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2024,54(9): 2581-2587.