

# 多目标约束的自动驾驶车辆换道决策

林国庆<sup>1,2</sup>, 秦宇<sup>1,3</sup>, 张传飞<sup>4</sup>, 熊造成<sup>1,2</sup>, 郭岩<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 能源与电气工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 西安市交通先进动力重点实验室, 陕西 西安 710064; 3. 陕西法士特齿轮有限责任公司, 陕西 西安 710077; 4. 中国重汽集团汽车研究总院, 山东 济南 250101)

**摘要:**为实现复杂交通环境下自动驾驶车辆的安全高效换道,提出一种基于多目标约束的换道策略。将驾驶不满意度分解为速度不满意度与行驶空间不满意度,用于评估当前车道状态并产生换道意图;构建车道评价函数对候选车道进行定量评估,确定最优目标车道。结合智能网联环境,从合法性、安全性与利他性3方面进行约束判定,仅在满足约束条件时执行换道。采用五次多项式进行换道轨迹规划,并引入效率与舒适权重,实现换道效率与乘坐舒适性的平衡。基于 CarSim-Simulink 联合仿真及车辆在环实验的结果表明:所提换道策略能够满足多目标约束要求,完成稳定可靠的换道决策与执行,其中横摆角最大为  $3.45^\circ$ , 横向加速度最大为  $1.31 \text{ m/s}^2$ , 轨迹跟踪横向最大误差为  $0.020 \text{ m}$ 、纵向最大误差为  $0.012 \text{ m}$ , 证明该决策模型能够实现精确的换道控制,换道效果良好。

**关键词:**自动驾驶车辆;多目标约束;换道决策;轨迹规划;仿真分析;车辆在环实验

**中图分类号:** TP391.9; U463.6

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2027.01.001

在科技革命和产业变革背景下,自动驾驶汽车已经成为全球汽车产业发展的战略方向,需要复杂的决策与控制算法支持。换道决策研究自 20 世纪 80 年代起逐步兴起, Gipps<sup>[1]</sup> 首次在城市道路场景中提出基于逻辑规则的换道方法,考虑了车辆类型、交通信号和障碍物等因素; Sun 等<sup>[2]</sup> 通过实车实验和  $K$ -means 聚类,分析驾驶员行为与换道概率,揭示不同场景下的驾驶决策特性; 杨敏等<sup>[3]</sup> 将加减速对驾驶体验的影响融入换道决策过程,并在高速交通环境下对模型进行了验证。

近年来,多种人工智能技术被用于优化换道决策, Balal 等<sup>[4]</sup> 基于模糊系统,以车距为输入指标,通过 NGSIM 数据库验证其模型能显著提高换道准确性和安全性; Zhou 等<sup>[5]</sup> 结合博弈论和规则模型,对传统的最小化换道引起的整体制动模型 (minimizing overall braking induced by lane changes, MOBIL) 进行了改进,在智能网联场景下提高了换道效率并缓解拥堵; Scheel 等<sup>[6]</sup> 设计了基于双向递归神经网络的换道预测模型,通过长期和短期记忆单元优化预测性能,验证结果显示该模型优于传统方法,在安全性和舒适性方面表现突出; 贾寒冰等<sup>[7]</sup> 提出规则与机

器学习融合的换道决策模型,将换道必要性、安全性及收益等规则因素作为机器学习特征,并结合支持向量机进行分类决策,在保证可解释性的同时提升了复杂交通环境下的适应能力。

与此同时,在智能网联环境下,车辆可通过 V2X 技术获取道路信息以及周围交通参与车辆的运行状态数据,从而实现对周围交通信息的全面感知。基于该环境感知条件,并结合中国交通场景中车辆类型多样、驾驶行为差异显著等特点,以小型车辆为研究对象,从单车决策角度出发,构建了一种基于多目标约束的自动驾驶车辆换道决策模型,实现交通运行效率的提升。

## 1 车辆换道决策模型

### 1.1 换道意图产生

将驾驶不满意度作为换道意图产生的量化指标,并将其分解为速度不满意度与行驶空间不满意度两部分。

#### 1.1.1 速度不满意度

当前方车辆速度较低时,自动驾驶系统对当前车道的满意度下降。基于已有驾驶不满意度研

收稿日期: 2026-06-01; 修订日期: 2026-07-02

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2023-YBGY-117)

作者简介: 林国庆 (1978—), 男, 山东潍坊人, 长安大学副教授, 博士, 主要从事智能网联汽车与汽车测试技术的研究,

E-mail: lgq@chd.edu.cn。

究<sup>[8]</sup>,构建速度不满意度模型以量化对当前速度的不满程度,当累计超过阈值时触发换道意图。同时,引入车辆类型因素以体现对重型车辆的避让倾向。速度不满意度累计值  $\sum SD(k)$  表达式为

$$\sum SD(k) = \sum_{k=0} \frac{v_m(k) - v_{de}(k)}{v_{de}(k)} \cdot T_s \cdot \beta. \quad (1)$$

式中:  $v_m(k)$  为  $k$  时刻本车的行驶速度, m/s;  $v_{de}(k)$  为  $k$  时刻系统期望的行驶速度, m/s;  $T_s$  为数据采样时间步长, s;  $\beta$  为前车类型影响系数。

当速度不满意度的累计值超过预设阈值  $SD_{th}$  时,即  $\sum SD(k) > SD_{th}$  时系统将触发换道意图。

### 1.1.2 行驶空间不满意度

构建行驶空间不满意度模型,并以车辆安全行驶距离作为行驶空间不满意度的评价依据。当实际可用行驶空间小于车辆安全行驶距离时,认为行驶空间不足,从而促使车辆产生换道意图。

文献[9]给出了不同类型小型车辆在良好路面条件下的制动距离计算公式:

$$S_{brake} = 0.0585 \cdot v_m^2 + 0.0122 \cdot v_m. \quad (2)$$

最小车距定义为后车相对于前车静止时需维持的最小安全距离,在车辆行驶过程中,该距离会随行驶速度的提升而增大,并与道路附着系数有关,最小车距  $d_0$ <sup>[10]</sup> 计算公式为

$$d_0 = \frac{3v_m}{k_{rp}(\mu + b)}. \quad (3)$$

式中:  $k_{rp}$  取值 22.5;  $b$  取值 0.3;  $\mu$  为道路附着系数。

车辆安全行驶距离  $S_{safe}$  由车辆制动距离与最小车距共同构成:

$$S_{safe} = S_{brake} + d_0. \quad (4)$$

当本车  $M$  与当前车道前车  $F$  之间的距离  $S_{M,F}$  小于车辆安全行驶距离时,即  $S_{M,F} < S_{safe}$  时将触发换道意图。

综上,驾驶不满意度主要体现在速度与行驶空间两个方面,换道意图的触发条件为

$$\sum SD(k) > SD_{th} \text{ 或 } S_{M,F} < S_{safe}. \quad (5)$$

## 1.2 目标车道选择

研究表明,车道内的重型车辆比例能够反映交通流潜在拥堵程度<sup>[11]</sup>。同时,行驶速度是反映车道通行状况的重要指标,而换道时间对换道效率具有直接影响<sup>[12-13]</sup>。因此,基于重型车辆比例、平均安全行驶速度和换道时间 3 个因素,构建车道评价函数对候选车道进行定量评估。

为突出决策完成时刻环境信息的重要性,引入观测数据权重  $q_i$ ,在决策时域内,越接近作决策的

时间点,观测数据的重要性越高<sup>[14]</sup>。权重的计算表达式为

$$q_i = i / \sum_{k=1}^n k. \quad (6)$$

式中:  $i$  表示第  $i$  次观测;  $n$  为时域内观测的总次数。

将传统重型车辆比例与观测数据权重相结合,对其进行加权修正:

$$\bar{P}_h = \sum_{i=1}^n (q_i \cdot P_h^i). \quad (7)$$

式中:  $P_h^i$  为第  $i$  次观测的重型车辆比例;  $\bar{P}_h$  为观测范围内的重型车辆比例。

将传统平均安全行驶速度与观测数据权重相结合:

$$\bar{V}_s = \sum_{i=1}^n (q_i \cdot V_s^i). \quad (8)$$

式中:  $V_s^i$  为第  $i$  次观测的行驶速度;  $\bar{V}_s$  为观测范围内的平均安全行驶速度。

驾驶风格差异会影响自动驾驶车辆的乘坐体验,为满足不同乘坐需求,需依据乘坐者的驾驶风格偏好对车辆驾驶风格进行调整。换道时间依据 3.2 节中不同驾驶风格下换道轨迹的评估结果进行确定,在此基础上得出满足乘坐体验的换道时间  $t_{cha}$ 。

设定最左侧车道为 1 号,最右侧车道为  $N$  号。对车道评价函数中的 3 项指标进行归一化处理,并结合行驶成本因素设定权重系数,从而计算各候选车道的综合评价值:

$$J_m = \begin{cases} w_h \frac{\bar{P}_h^m}{\bar{P}_{max}^m} + w_t \frac{t_{cha}^m}{t_{max}^m} - w_v \frac{\bar{V}_s^m}{\bar{V}_{max}^m}, m \neq c; \\ w_h \frac{\bar{P}_h^m}{\bar{P}_{max}^m} - w_v \frac{\bar{V}_s^m}{\bar{V}_{max}^m}, m = c. \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $c$  为当前行驶车道编号;  $m$  为候选车道编号;  $w_h$  为重型车辆比例的权重系数;  $w_t$  为换道时间的权重系数;  $w_v$  为平均安全行驶速度的权重系数;  $\bar{P}_h^m$  为候选车道  $m$  重型车辆比例;  $t_{cha}^m$  为候选车道  $m$  符合乘坐体验的换道时间, s;  $\bar{V}_s^m$  为候选车道  $m$  平均安全行驶速度, m/s;  $\bar{P}_{max}^m$  为最大重型车辆比例;  $t_{max}^m$  为最长换道时间, s;  $\bar{V}_{max}^m$  为最高行驶速度, m/s。

考虑实际换道过程中优先选择左车道,当候选车道位于当前行驶车道左侧时 ( $m < c$ ),引入车道偏好权重  $w_m$  对车道选择进行研究,其表达式为

$$w_m = \begin{cases} \eta, & m < c; \\ 1, & m \geq c. \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $0 < \eta < 1$ , 参数  $\eta$  的取值直接反映换道的偏好程度,  $\eta$  越小表明自动驾驶系统对左侧车道的偏好程度越高。综上, 最优车道的选择条件如式 (11) 所示, 函数评价最小的车道被确定为最优车道。

$$L_{\text{fin}} = \operatorname{argmin}_m (w_m \cdot J_m). \quad (11)$$

## 2 换道决策模型的多目标约束建模

### 2.1 换道合法性

依据相关交通法规, 车辆在换道过程中通常优先向左侧车道变换, 且不得一次跨越多条车道<sup>[15]</sup>。换道合法性的判断条件为

$$\begin{cases} 1 \leq L_{\text{tar}} \leq N; \\ 1 \leq L_{\text{cur}} \leq N; \\ |L_{\text{tar}} - L_{\text{cur}}| = 1; \\ B_{\text{leg}} = B_{\text{dot}} \circ \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $L_{\text{tar}}$  为目标车道;  $L_{\text{cur}}$  为当前行驶车道;  $B_{\text{leg}}$  为合法车道线;  $B_{\text{dot}}$  为虚线车道线。

### 2.2 换道安全性

在换道安全性评估阶段, 为降低模型复杂度并突出关键影响因素, 本文对周围车辆的运动状态进行了适度简化。在安全性预测过程中主要考虑纵向安全约束, 并假设在短时预测区间内周围车辆的纵向速度变化较小, 可近似视为稳定行驶状态<sup>[16]</sup>。

#### 2.2.1 前车距碰撞安全分析

针对不同场景和换道阶段, 对前车距碰撞风险进行分析。

(1) 换道过程中, 在本车 M 即将越过车道线进入目标车道的临界状态下, 本车 M 与当前车道前车 F (以下简称前车 F) 位置关系如图 1 所示。

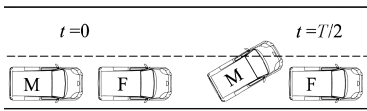


图 1 本车 M 与前车 F 位置关系

Figure 1 Positional relationship between ego vehicle M and front vehicle F

根据文献[17], 设置系统延迟时间为 950 ms。在系统延迟时间内本车 M 与前车 F 产生的相对距离  $S_{\text{del}}$  为

$$S_{\text{del}} = (v_F(0) - v_M(0)) T_{\text{del}}. \quad (13)$$

式中:  $v_M(0)$  和  $v_F(0)$  分别为本车 M 和前车 F 在初始时刻 ( $t=0$ ) 的纵向速度, m/s;  $T_{\text{del}}$  为系统延迟时间, s。

在实际行驶过程中, 两车纵向距离过小不仅会影响乘坐舒适性, 还可能对车辆换道行为造成不利

影响<sup>[18]</sup>。设  $T$  为换道执行时间, 当  $t = T/2$  时, 本车 M 与前车 F 纵向距离取得最小值, 最小纵向距离应该大于最小车距  $d_0$ , 即

$$S_{\text{MF}} + \int_0^T \int_0^T (a_F - a_M) dt d\tau + S_{\text{del}} + (v_F(0) - v_M(0)) T/2 > d_0. \quad (14)$$

式中:  $S_{\text{MF}}$  为初始时刻本车 M 和前车 F 的车距, m;  $a_M$  和  $a_F$  分别为本车 M 和前车 F 的纵向加速度, m/s<sup>2</sup>。

(2) 换道过程中, 由于目标车道前车 TF (以下简称前车 TF) 速度高于本车 M 行驶速度, 本车 M 完成换道进入目标车道后, 两车距离将呈逐步增大的趋势。此场景下本车 M 与前车 TF 位置关系如图 2 所示。

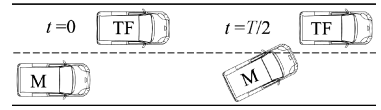


图 2 本车 M 与前车 TF 位置关系

Figure 2 Positional relationship between ego vehicle M and front vehicle TF

当  $t = T/2$  时, 本车 M 与前车 TF 纵向距离取得最小值, 最小纵向距离应该大于最小车距, 即

$$S_{\text{MTF}} + \int_0^T \int_0^T (a_{\text{TF}} - a_M) dt d\tau + S_{\text{del}} + (v_{\text{TF}}(0) - v_M(0)) T/2 > d_0. \quad (15)$$

式中:  $S_{\text{MTF}}$  为初始时刻本车 M 和前车 TF 的车距, m;  $a_{\text{TF}}$  为前车 TF 的纵向加速度, m/s<sup>2</sup>;  $v_{\text{TF}}(0)$  为前车 TF 初始时刻的纵向速度, m/s;  $S_{\text{del}}$  为系统延迟时间内本车 M 与前车 TF 产生的相对距离, m。

(3) 换道完成后, 自动驾驶的本车 M 在目标车道内进行跟车行驶, 与前车 TF 的位置关系如图 3 所示。

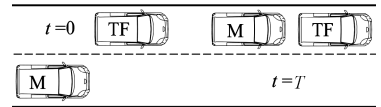


图 3 换道完成时本车 M 与前车 TF 位置关系

Figure 3 Positional relationship between ego vehicle M and front vehicle TF after lane-changing completion

换道完成时, 两车的车距计算表达式为

$$S_{T, \text{M, TF}} = S_{\text{MTF}} + \int_0^T \int_0^T (a_{\text{TF}} - a_M) dt d\tau + S_{\text{del}} + (v_{\text{TF}}(0) - v_M(0)) T. \quad (16)$$

为确保前车 TF 发生紧急制动时, 本车 M 仍具备足够的制动距离, 以避免发生追尾, 约束条件为

$$S_{T, \text{M, TF}} > d_0 + \frac{v_{\text{TF}}^2(T)}{2a_{\text{TFmax}}} - \frac{v_M^2(T)}{2a_{\text{Mmax}}}. \quad (17)$$

式中:  $a_{TFmax}$  和  $a_{Mmax}$  分别为前车 TF 和本车 M 的最大制动减速度,  $m/s^2$ ;  $v_{TF}(T)$  和  $v_M(T)$  分别为换道完成时前车 TF 和本车 M 的速度,  $m/s$ 。

### 2.2.2 目标车道后车距碰撞安全分析

由于本车 M 与目标车道后车 TR(以下简称后车 TR)的相对速度存在不确定性,故结合具体场景展开分析。

(1)在换道初始时刻,若本车 M 速度大于后车 TR 速度。此场景 1 下两车的位置关系如图 4 所示。

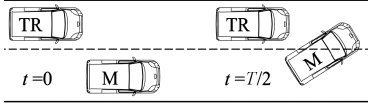


图 4 本车 M 与后车 TR 位置关系(场景 1)

Figure 4 Positional relationship between ego vehicle M and rear vehicle TR (Scene 1)

本车 M 和目标车道后车 TR 的最小纵向距离应大于最小车距  $d_1$ , 即

$$S_{MTR} + \int_0^T \int_0^T (a_M - a_{TR}) dt d\tau + S_{del2} + (v_M(0) - v_{TR}(0))T/2 > d_1. \quad (18)$$

式中:  $a_{TR}$  为本车换道初始时刻目标车道后车的加速度;  $S_{MTR}$  为初始时刻本车 M 和后车 TR 的车距,  $m$ ;  $S_{del2}$  为系统延迟时间内本车 M 与后车 TR 产生的相对距离,  $m$ ;  $v_{TR}(0)$  为后车 TR 初始时刻的纵向速度,  $m/s$ 。

(2)在换道初始时刻,若后车 TR 速度介于本车 M 与前车 TF 速度之间。此场景 2 下两车的位置关系如图 5 所示。

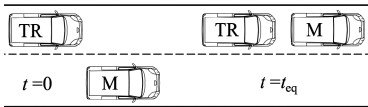


图 5 本车 M 与后车 TR 位置关系(场景 2)

Figure 5 Positional relationship between ego vehicle M and rear vehicle TR (Scene 2)

记  $t = t_{eq}$  时,两车的速度相等,且最小纵向距离应该大于最小车距,即

$$S_{MTR} + \int_0^{t_{eq}} \int_0^T (a_M - a_{TR}) dt d\tau + S_{del2} + (v_M(0) - v_{TR}(0))t_{eq} > d_1. \quad (19)$$

(3)在换道初始时刻,若后车 TR 速度大于前车 TF 速度。此场景 3 下两车的位置关系如图 6 所示。最小纵向距离表达式如下所示:

$$S_{min,M,TR} = S_{MTR} + \int_0^T \int_0^T (a_M - a_{TR}) dt d\tau + S_{del2} + (v_M(0) - v_{TR}(0))T. \quad (20)$$

为保证行驶安全,最小纵向距离应大于最小车

距,同时还需确保本车 M 发生紧急制动时,后车 TR 仍有足够的制动余量,以避免发生追尾,即

$$S_{min,M,TR} > d_1 + \frac{v_{TR}^2(T)}{2a_{TRmax}} - \frac{v_M^2(T)}{2a_{Mmax}}. \quad (21)$$

式中:  $a_{TRmax}$  为后车 TR 的最大制动减速度,  $m/s^2$ ;  $v_{TR}(T)$  为换道完成后车 TR 的速度,  $m/s$ 。

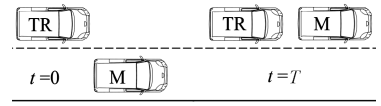


图 6 本车 M 与后车 TR 位置关系(场景 3)

Figure 6 Positional relationship between ego vehicle M and rear vehicle TR (Scene 3)

### 2.3 换道利他性

MOBIL 模型能够在换道决策中同时兼顾自车与周围车辆的利益,较好地体现驾驶行为中的利他性特征。该模型主要适用于自由换道场景,通过分析换道车辆及其周围局部车辆的加速度变化来评估换道收益,整体由安全准则与激励准则两部分构成。换道收益阈值  $\Delta a_{thr}$  从换道策略的全局性层面提升换道行为的整体效益,而礼让系数  $\rho$  通过表征不同的驾驶风格从局部层面影响换道行为<sup>[19]</sup>,其表达式如下所示:

$$u_M = \tilde{a}_M - a_M + \rho(\tilde{a}_R - a_R) + \rho(\tilde{a}_{TR} - a_{TR}) > \Delta a_{thr}. \quad (22)$$

式中:  $u_M$  为本车换道的收益,  $m/s^2$ ;  $a_M$  和  $\tilde{a}_M$  分别为本车换道初始时刻和换道完成时刻的加速度,  $m/s^2$ ;  $a_R$  和  $\tilde{a}_R$  分别为本车换道初始时刻和完成时刻原车道后车的加速度,  $m/s^2$ ;  $\tilde{a}_{TR}$  为本车换道完成时刻目标车道后车的加速度,  $m/s^2$ ;  $\rho$  为礼让系数;  $\Delta a_{thr}$  为换道收益阈值,  $m/s^2$ 。

在实际驾驶过程中,换道引起的加速度扰动会沿交通流向后传播。若仅考虑单一后车的加速度变化,难以全面反映本车换道行为对局部交通流的影响<sup>[20]</sup>。将观测范围内所有后方车辆的加速度变化纳入分析,对式(22)进行修正,从而得到换道收益为

$$u_M = \tilde{a}_M - a_M + \rho \left( \sum_{i=1}^{n_R} (\tilde{a}_{Ri} - a_{Ri}) + \sum_{j=1}^{n_{TR}} (\tilde{a}_{TRj} - a_{TRj}) \right). \quad (23)$$

式中:  $\sum_{i=1}^{n_R} (\tilde{a}_{Ri} - a_{Ri})$  和  $\sum_{j=1}^{n_{TR}} (\tilde{a}_{TRj} - a_{TRj})$  分别为原车道和目标车道后车加速度的整体扰动。

### 3 换道轨迹规划

五次多项式曲线更符合驾驶员实际换道特



征<sup>[21]</sup>,本文选其进行换道轨迹规划。为提升换道效率与乘坐舒适性,构建以换道时间与横向加速度为评价指标的换道轨迹评价函数。进而考虑不同驾驶风格对换道轨迹的影响,在评价函数中引入效率权重与舒适权重,以实现对换道轨迹的合理选择。

### 3.1 基于五次多项式的换道轨迹约束分析

在五次多项式轨迹模型中,车辆的横向与纵向位移可表示为时间  $t$  的函数,且各自包含 6 个参数:

$$\begin{cases} X_{\text{ref}_5}(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5; \\ Y_{\text{ref}_5}(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^5. \end{cases} \quad (24)$$

为在换道过程中保持良好的乘坐舒适性<sup>[22]</sup>,设置横纵向加速度绝对值最大不超过  $2 \text{ m/s}^2$ 。在满足约束条件的情况下,共生成 59 条换道轨迹,如图 7 所示。约束后的换道轨迹更加平缓,同时剔除了不满足需求的轨迹,进而提高了计算效率。

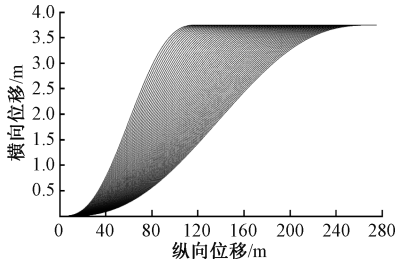


图 7 有约束下换道轨迹

Figure 7 Constrained lane-changing trajectory

### 3.2 考虑驾驶风格的换道轨迹评估

通过对大量交通数据的分析,将驾驶风格划分为平静型、标准型和激进型 3 种类型<sup>[23]</sup>。引入驾驶风格因素,定义效率权重为  $w_1$ ,舒适性权重为  $w_2$ ,并进一步构造驾驶风格权重比  $w_1/w_2$ 。不同驾驶风格对应不同的权重比,反映了换道轨迹中效率与舒适性的权衡关系:当  $w_1/w_2$  较小时,车辆更偏向于追求行驶舒适性;随着  $w_1/w_2$  的增大,换道轨迹对效率的关注程度逐渐增强,即车辆更倾向于快速完成换道行为。从图 8 的不同驾驶风格的换道轨迹可以看出,不同权重比对应的轨迹表现出明显差异。

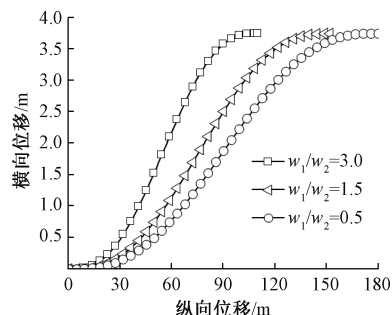


图 8 不同驾驶风格的换道轨迹

Figure 8 Lane-changing trajectories for different driving styles

为综合评估换道轨迹的效率与舒适性,构建如式(25)所示的评价函数  $J(a_i)$ ,对候选轨迹进行分析,最终选取评价价值最小者作为最优换道轨迹。

$$J(a_i) = w_1 \frac{t_i}{t_{\min}} + w_2 \frac{\max(|a_{y,i}|)}{a_{y,\max}}. \quad (25)$$

式中:  $t_i$  为候选轨迹换道时间, s;  $t_{\min}$  为轨迹簇中的最短换道时间, s;  $\max(|a_{y,i}|)$  为候选轨迹最大横向加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $a_{y,\max}$  为轨迹簇中的最大横向加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

最后,得到满足乘坐体验的换道时间  $t_{\text{cha}}$ :

$$t_{\text{cha}} = t_i |_{\min(J)}. \quad (26)$$

式中:  $t_i |_{\min(J)}$  为评价函数值最小化下的换道时间, s。

### 3.3 轨迹跟踪仿真验证

采用线性二次型调节器 (linear quadratic regulator, LQR) 和比例-积分-微分控制器 (proportional-integral-derivative controller, PID) 实现车辆对期望轨迹的精确跟踪。通过仿真来验证车辆运动控制器的可行性,仿真实验过程中设置系统采样时间步长  $T_s$  为  $0.005 \text{ s}$ ,道路附着系数  $\mu$  为  $0.8$ 。其中比例项参数  $k_p$  为  $3$ ,积分项参数  $k_i$  为  $0.1$ ,微分项参数  $k_d$  为  $0.5$ 。

通过双移线轨迹实验对车辆的操纵稳定性进行验证。自动驾驶车辆以恒定速度  $100 \text{ km/h}$  跟踪该轨迹,轨迹控制横向误差图如图 9 所示。结果表明,车辆实际轨迹与期望轨迹在横向位移上的最大误差为  $0.007 \text{ m}$ ,说明车辆运动控制器具备较高的控制精度。

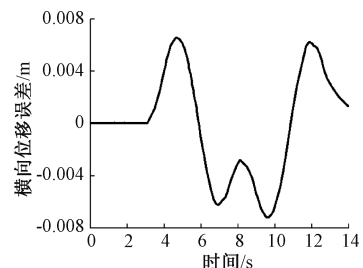


图 9 轨迹控制横向误差图

Figure 9 Trajectory control lateral error diagram

## 4 换道决策仿真实验验证

### 4.1 仿真平台的搭建

在 CarSim-Simulink 联合仿真平台上搭建了高速公路换道场景和整车动力学仿真模型。仿真平台采用 MATLAB R2020b 与 CarSim 2020,二者通过 CarSim 提供的 Simulink 接口实现联合仿真。

仿真场景设定为高速公路单向三车道直线路

段,道路平直且无纵坡影响。在仿真初始时刻,本车位于中间车道,初始速度设定为 100 km/h。周围交通车辆共 8 辆,1 号车~8 号车行驶速度设置如下:1 号车 95 km/h、2 号车 90 km/h、3 号车 110 km/h、4 号车 112 km/h、5 号车~7 号车均为 100 km/h、8 号车为 95 km/h。各车辆与本车的空间分布关系如图 10 所示。

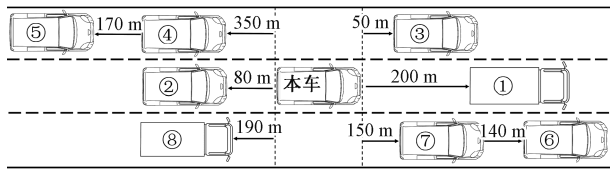


图 10 仿真工况

Figure 10 Simulation conditions

假定自动驾驶系统期望的行驶速度为 120 km/h,根据文献[24-26],仿真中设置决策时域为 2 s,礼让系数为 0.7,换道收益阈值为 0.05,速度不满意度阈值设为 0.63,权重参数分别为  $w_h = 0.3$ 、 $w_l = 0.3$ 、 $w_v = 0.4$ ,驾驶风格权重比为  $w_1/w_2 = 4/5$ 。

4.2 换道决策仿真分析

图 11 为换道决策模型仿真结果,其中图 11(a)表示本车速度不满意度的累计情况;图 11(b)表示本车行驶空间不满意度的变化情况。可以看出,速度不满意度随时间逐步上升,两车距离也呈增大趋势,且大于安全行驶距离。速度不满意度在 40 s 时首次达到设定阈值,此时本车产生换道需求,并进入目标车道选择阶段。

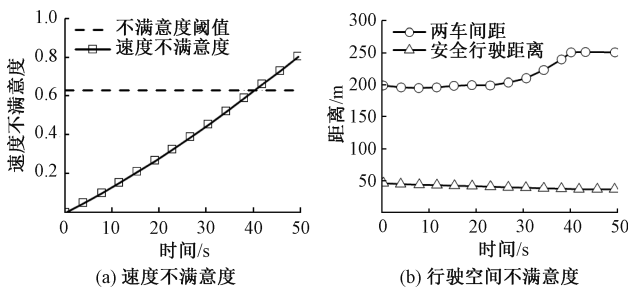


图 11 换道决策模型仿真结果

Figure 11 Simulation results of the lane-changing decision-making model

在目标车道选择方面,从图 11(c)与图 11(d)分别可以看出决策时域内左侧车道和右侧车道对应的最优换道时间。仿真结果表明,左侧车道和右侧车道对应的最优换道时长分别为 4.2 s 和 3.8 s。

将计算结果代入车道评价函数进行分析,可得左侧车道的评价值为 -0.216,右侧车道为 -0.086,当前车道为 -0.150。由于左侧车道的评价值最小,因此将其确定为目标车道。

4.3 换道约束模型仿真分析

在确定最优目标车道后,基于换道约束模型,从合法性、安全性及利他性 3 个方面对该车道进行分析。图 12 为换道约束模型的仿真结果。

图 12(a)为邻车道及道路规则的合法性判定结果,相邻车道判定为 1,表明目标车道与当前车道相邻;车道线判定为 0,说明目标车道与本车道之间的标线为虚线,满足换道条件。

图 12(b)为换道过程中当前车道前车与目标车道前车对本车行驶安全性影响的分析结果;图 12(c)为目标车道后车对本车行驶安全性影响的分析结果。可以看出,目标车道前后车距以及当前车道前车距均始终高于安全行驶距离要求,且整体车距较为充裕,从而能够保证车辆在换道过程中的安全性。

图 12(d)为对目标车道的利他性判断结果。本车换道收益曲线始终位于收益阈值之上,说明在换道过程中能够在保证自身收益的同时兼顾周围车辆的行驶感受,减小对整体交通流的影响,从而满足利他性约束条件。

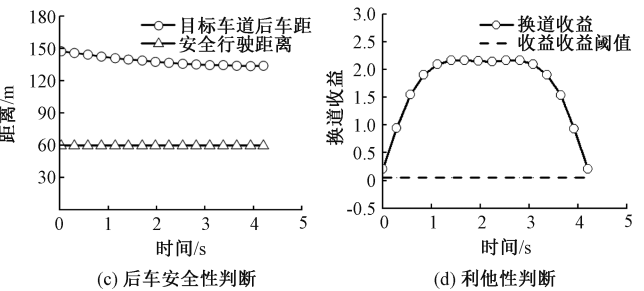
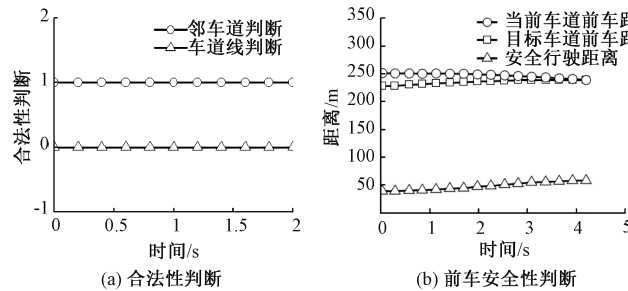
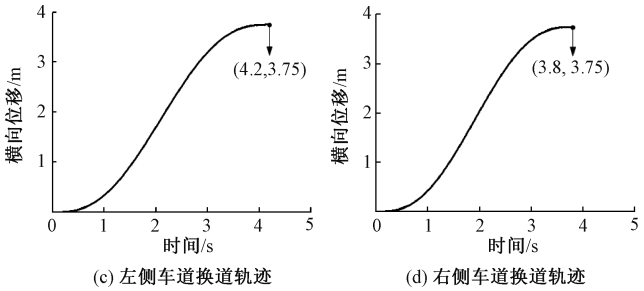


图 12 换道约束模型仿真结果

Figure 12 Simulation results of lane-changing constraint model

5 车辆在环实验验证

5.1 实验设备介绍

车辆在环实验基于长安大学智能驾驶实验平台开展。如图 13 所示,该实验平台由三自由度运动平台、实车驾驶舱以及 180°环幕显示系统共同构成。实验所用实车为小型乘用车,参数为长 453 cm×宽 182 cm×高 150 cm,整备质量 1 325 kg,轴距 2.7 m。前景显示系统采用三通道投影,水平视场角约 180°,刷新率 60 Hz;运动平台支持俯仰、横滚及升降运动。



图 13 智能驾驶实验平台

Figure 13 Intelligent driving experimental platform

仿真计算单元采用工业控制计算机,并通过 CAN 总线与车辆执行系统通信;仿真与显示系统之间采用千兆以太网连接。系统整体控制周期为 10 ms,车辆状态数据采样频率为 100 Hz,虚实通信延迟小于 30 ms,可满足换道决策与轨迹跟踪的实时性需求。

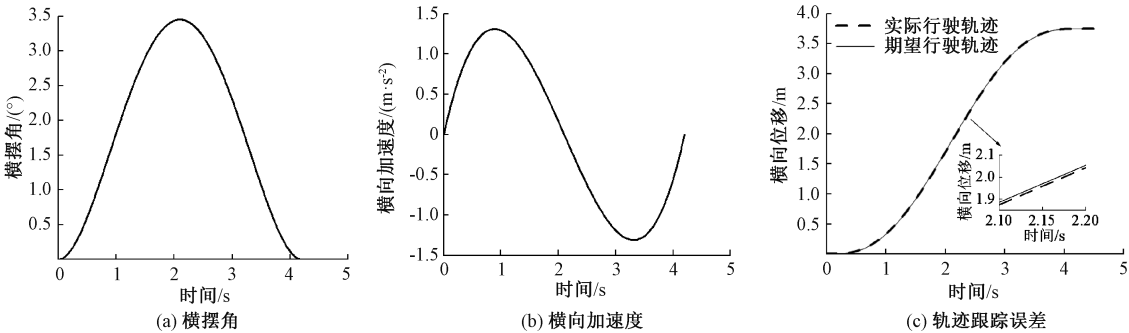


图 14 车辆在环实验结果

Figure 14 Vehicle-in-the-Loop experiment results

6 结论

本文构建了基于换道意图生成与目标车道选择的换道决策模型。换道意图基于速度不满意度与行驶空间不满意度识别,可有效反映车辆对当前车道行驶状态的综合评价。在目标车道选择中,引入重型车辆比例、平均安全行驶速度和换道时间作为关键指标,构建车道评价函数并实现对候选车道的量化评估,从而确定最优目标车道。

智能驾驶实验平台集成的 SILAB 仿真软件能够快速构建多类型静态交通环境,包括道路结构、沿线建筑物以及交通标识与设施等要素,同时支持对其他交通参与者行为模式的灵活编辑,以满足不同驾驶任务的需求。

5.2 实验与结果分析

依托上述软硬件平台,本文开展了高拟真度的车辆在环实验,并构建了与仿真阶段相一致的测试工况。在实验过程中,车辆通过车载传感器实时获取自身速度和加速度等运动学数据,同时仿真平台提供周围交通参与车辆的位置信息及运动状态。所有信息统一传输至研华 MIC-770V2 工业控制计算机,在该平台上运行换道决策算法,并将算法输出的控制指令通过车载控制器实时发送至车辆执行系统,实现换道动作的闭环控制。

车辆在环实验结果如图 14 所示,可以看出车辆在整个换道过程中表现出良好的安全性与平稳性。图 14(a)为换道过程中横摆角随时间的变化曲线,其最大值为 3.45°,表明车辆姿态变化平稳、无明显剧烈波动。图 14(b)为车辆换道过程中的横向加速度变化情况,横向加速度最大值为 1.31 m/s<sup>2</sup>,始终处于舒适范围之内。从图 14(c)看出,车辆换道过程中期望行驶轨迹与实际行驶轨迹保持了较高的一致性,其中横向位移最大误差和纵向位移最大误差分别为 0.020 m 和 0.012 m,说明换道轨迹跟踪准确。

在换道执行约束阶段,建立了融合合法性、安全性与利他性的多目标约束模型。合法性通过相邻车道状态与交通法规约束进行判断;安全性结合周围车辆的实时运动状态,分别对前车距与后车距进行安全性评估;利他性基于智能网联环境改进了传统 MOBIL 模型的激励准则,在保证本车换道效率的同时减少对整体交通流的负面影响。

仿真结果表明,本文所提出的换道策略能够有效识别换道意图并合理选取最优目标车道,在合法

性、安全性与利他性约束下表现稳定,同时在轨迹规划中兼顾换道效率与乘坐舒适性。在车辆在环实验中,车辆在多车交通场景下顺利完成换道,换道全过程平稳顺滑,进一步验证了所提换道策略在真实交通环境中的安全性和舒适性。

## 参考文献:

- [1] Gipps P G. A model for the structure of lane-changing decisions[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1986, 20(5): 403-414.
- [2] Sun D J, Eleftheriadou L. Lane-changing behavior on urban streets: an "in-vehicle" field experiment-based study[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2012, 27(7): 525-542.
- [3] Yang Min, Wang Lichao, Wang Jian. Adaptive lane-changing model for autonomous vehicles under deceleration frequency to induce lane-changing intentions[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(11): 204-217. [杨敏, 王立超, 王建. 减速频次催生换道意图下自动驾驶车辆自适应换道模型[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(11): 204-217.]
- [4] Balal E, Cheu R L, Sarkodie-Gyan T. A binary decision model for discretionary lane changing move based on fuzzy inference system[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 67: 47-61.
- [5] Zhou Shutong, Zhang Jian, Li Linheng, et al. Discretionary lane change model for intelligent connected vehicles on expressway[C]//*Proceedings of the CICTP 2019*. Reston: ASCE, 2019: 5671-5683.
- [6] Scheel O, Schwarz L, Navab N, et al. Situation assessment for planning lane changes: combining recurrent models and prediction[C]//*The 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Piscataway: IEEE, 2018: 2082-2088.
- [7] Jia Hanbing, Liu Peng, Zhang Lei, et al. Lane-changing decision model development by combining rules abstract and machine learning technique[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(4): 212-221. [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.]
- [8] Yuan Chang, Mo Tianshi, Shu Hong. Decision making and optimization of trajectory planning of lane change on highway curve[J]. *Journal of Chongqing University*, 2024, 47(3): 30-43. [袁昌, 莫天石, 舒红. 高速公路弯道换道决策及运动规划优化[J]. *重庆大学学报*, 2024, 47(3): 30-43.]
- [9] Wang Zheng. Research on autonomous lane changing method of intelligent vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2016. [王政. 智能车辆自主换道方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.]
- [10] Pan Yong, Tang Ziqiang, Gong Xianwu, et al. Collaborative vehicles longitudinal safety distance model based on driving state estimation[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2016, 33(7): 137-144. [潘勇, 唐自强, 龚贤武, 等. 基于行驶状态估计的车车协同纵向安全距离模型[J]. *公路交通科技*, 2016, 33(7): 137-144.]
- [11] Kong Dewen. Research on the impact of heavy vehicles on the traffic operation of multi-lane freeways[D]. Nanjing: Southeast University, 2018. [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.]
- [12] Li Yang, Li Linbo, Ni Daiheng, et al. Automatic lane-changing trajectory planning: from self-optimum to local-optimum[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(11): 21004-21014.
- [13] Mahajan N, Hegyi A, Hoogendoorn S P, et al. Improving traffic efficiency with lane guidance based on desired speeds[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(3): 2222-2234.
- [14] Yang Da, Lyu Meng, Dai Liyuan, et al. Decision-making model for lane selection of automated vehicles in connected vehicle environment[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(4): 243-255. [杨达, 吕蒙, 戴力源, 等. 车联网环境下自动驾驶车辆车道选择决策模型[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(4): 243-255.]
- [15] Zhang Shuai. Studies on lane changing algorithm of intelligent vehicle on highways[D]. Changchun: Jilin University, 2019. [张帅. 高速公路下智能车自主换道算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.]
- [16] Zhang Chuanfei. Research on decision and motion control for lane changing of autonomous vehicle in intelligent networked environment[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023. [张传飞. 智能网联环境下自动驾驶车辆换道决策与运动控制研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.]
- [17] Chen Jiajia, Zhao Pan, Mei Tao, et al. Lane change path planning based on piecewise Bezier curve for autonomous vehicle[C]//*2013 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*. Piscataway: IEEE, 2013: 17-22.
- [18] Yao Jun. Development of intelligent cruise control algorithm based on preceding vehicle lane change intention identification[D]. Changchun: Jilin University, 2020. [姚军. 基于前车换道意图辨识的智能巡航控制算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.]
- [19] 秦严严. 交通流分析理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2023.



[20] Ding Wanting. Research of discretionary lane change model for connected and autonomous vehicles on expressway[D]. Nanjing: Southeast University, 2017. [丁婉婷. 智能网联汽车高速公路自主性换道决策模型研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.]

[21] Zhang Sanchuan, Ma Xiao. A safe distance model and algorithm for active collision avoidance based on weighted prediction of trajectory[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2022, 43(3): 104–110. [张三川, 马啸. 基于轨迹加权预测的主动避撞安全距离模型及算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2022, 43(3): 104–110.]

[22] He Yichao, Kou Shengjie, Tian He, et al. Research on decision-making and planning method for intelligent highway lane-changing system for mass production[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(3): 418–430. [何一超, 寇胜杰, 田贺, 等. 面向量产的高速公路智能换道系统决策规划方法研究[J]. 汽车工程, 2024, 46(3): 418–430.]

[23] Mohammadnazar A, Arvin R, Khattak A J. Classifying travelers' driving style using basic safety messages generated by connected vehicles: application of unsupervised machine learning[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 122: 102917.

[24] Qu Wentao, Li Wenrui, Wang Yong, et al. Microscopic lane-changing decisions based on vehicle dissatisfaction with the road[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(30): 13497–13506. [屈文涛, 李文锐, 王勇, 等. 基于车辆对道路不满意度的微观换道决策[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(30): 13497–13506.]

[25] Wang Qiming, Wan Xuan, Fang Ming, et al. Decision-making research on overtaking behavior of connected and automated vehicles based on dynamic non-cooperative game[J]. Control and Decision, 2025, 40(7): 2300–2312. [王启明, 万璇, 方鸣, 等. 基于动态非合作博弈的智能网联汽车超车行为决策研究[J]. 控制与决策, 2025, 40(7): 2300–2312.]

[26] Yang Jinshan. Research on interaction behavior prediction and lane changing behavior decision making approaches for intelligent vehicles[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2024. [杨金山. 智能车辆交互行为预测和换道行为决策方法研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2024.]

Multi-objective Constrained Lane-changing Decision-making for Autonomous Vehicles

LIN Guoqing<sup>1, 2</sup>, QIN Yu<sup>1, 3</sup>, ZHANG Chuanfei<sup>4</sup>, XIONG Haocheng<sup>1, 2</sup>, GUO Yan<sup>1, 2</sup>

(1. School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Xi'an Key Laboratory of Advanced Transport Power Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. Shaanxi Fast Gear Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 4. China National Heavy Duty Truck Group Automotive Research Institute, Jinan 250101, China)

**Abstract:** To achieve safe and efficient lane-changing of autonomous vehicles in complex traffic environments, a lane-changing strategy based on multi-objective constraints was proposed. Driving dissatisfaction was decomposed into speed dissatisfaction and space dissatisfaction, which was used to evaluate the current lane condition and generate lane-changing intentions. A lane evaluation function was established to quantitatively assess candidate lanes and determine the optimal target lane. In conjunction with the intelligent connected environment, constraint checks were conducted from the perspectives of legality, safety, and altruism, and lane-changing was executed only when all constraints were satisfied. A quintic polynomial was employed for lane-changing trajectory planning, and efficiency and comfort weights were introduced to balance lane-changing efficiency and ride comfort. Results from Car-Sim-Simulink co-simulation and Vehicle-in-the-Loop experiments demonstrated that the proposed lane-changing strategy could meet multi-objective constraint requirements and achieve stable and reliable lane-changing decision-making and execution. Specifically, the maximum yaw angle was 3.45°, the maximum lateral acceleration was 1.31 m/s<sup>2</sup>, and the maximum trajectory tracking errors were 0.020 m in the lateral direction and 0.012 m in the longitudinal direction. These results verified that the proposed decision-making model could achieve precise lane-changing control with satisfactory performance.

**Keywords:** autonomous vehicles; multi-objective constraints; lane-changing decision-making; trajectory planning; simulation analysis; Vehicle-in-the-Loop experiments