

## 基于微观车流的拟人化换道决策规划

付翔<sup>1</sup>, 裴超<sup>2</sup>, 万佳琦<sup>3</sup>, 江学良<sup>4</sup>, 王文举<sup>5</sup>

1. 武汉理工大学 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430070;
2. 武汉理工大学 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 武汉 430070;
3. 武汉理工大学 湖北省新能源与智能网联车工程技术研究中心, 武汉 430070;
4. 武汉理工大学 汽车工程学院, 武汉 430070; 5. 武汉华夏理工学院, 武汉 430223)

**摘要:** 为提高无人驾驶车辆换道过程中的安全舒适性, 在传统换道决策基础上引入换道对局部交通流的影响, 并加入换道惯性因子。针对解耦式横纵向轨迹规划不足, 提出联合横纵向约束规划; 基于动态规划及二次规划算法, 结合上一帧纵向规划约束当前时刻横向轨迹曲率; 纵向规划过程中根据当前时刻横向规划结果筛选关键障碍物, 并添加曲率限速约束, 结合横纵向规划最终生成换道轨迹。实车验证结果表明, 所述方法生成的横向、纵向换道轨迹能有效提升换道轨迹的合理性、稳定性和舒适性。

**关键词:** 智能驾驶; 微观车流; 换道行为决策; 横纵向联合约束规划

中图分类号: U467 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.06.04

## A Humanized Lane-Changing Decision-Making and Planning Method Based on a Microscopic Traffic Flow Model

FU Xiang<sup>1</sup>, PEI Chao<sup>2</sup>, WAN Jiaqi<sup>3</sup>, JIANG Xueliang<sup>4</sup>, WANG Wenju<sup>5</sup>

1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
3. Hubei Research Center for New Energy & Intelligent Connected Vehicle, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
4. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070;
5. Wuhan Huaxia University of Technology, Wuhan 430223, China)

**Abstract:** To improve the safety and comfort of autonomous vehicles during lane changes, the proposed approach incorporates the impact of lane-changing on local traffic flow and introduces a lane-changing inertia factor based on traditional decision-making models. To overcome the limitations of decoupled longitudinal and lateral trajectory planning, a joint constraint planning approach is proposed. Using dynamic programming and quadratic programming algorithms, the current lateral trajectory curvature is adjusted based on the longitudinal constraints from the previous frame. In the longitudinal planning process, key obstacles are filtered based on the current lateral planning results, and curvature-based speed constraints are

收稿日期: 2023-10-16 改稿日期: 2023-11-26 网络首发日期: 2024-06-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3006005): 高性能水陆两栖艇救援关键技术研究

参考文献引用格式:

付翔, 裴超, 万佳琦, 等. 基于微观车流的拟人化换道决策规划[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(6): 959-969.

FU Xiang, PEI Chao, WAN Jiaqi, et al. A Humanized Lane-Changing Decision-Making and Planning Method Based on a Microscopic Traffic Flow Model[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(6): 959-969. (in Chinese)



applied. The results from real vehicle experiments show that the proposed approach generates lateral and longitudinal lane-changing trajectories that effectively enhance the rationality, stability, and comfort of lane changes.

**Keywords:** intelligent driving; the microscopic traffic car; lane-changing behavior decision-making; horizontal and vertical joint constrained programming

车道变更作为最常见的驾驶行为之一, 在很大程度上影响道路的流通性和安全性, 快速、安全、平稳的换道行为可提高自车及道路通行效率<sup>[1-2]</sup>。换道过程涉及多个交通参与者之间的交互, 在换道决策过程中, 不仅需要考虑自车运动状态, 还需结合周边实际交通情况<sup>[3-4]</sup>。此外, 基于换道决策进行横纵向规划时, 其生成的轨迹必须符合车辆动力学约束及安全舒适性要求<sup>[5-6]</sup>。

针对换道决策, GIPPS等<sup>[7]</sup>提出换道规则模型, 在决策中考虑了换道过程的安全性、稳定性及舒适性等方面, 并使用决策树方法将结果作为二元分类结果进行输出, 但是在复杂道路条件下应用性较差。HALATI等<sup>[8]</sup>提出CORridor SIMulation(CORSIM)模型, 将影响决策行为因素划分为三方面: 动机、优势和紧迫性。当车头间距小于设定的临界值时, 会产生换道动机; 根据当前行驶车道及目标车道的队列长度及实时行驶车速判断当下换道优势。宋威龙等<sup>[9]</sup>基于FMS的横向决策和POMDP的纵向决策构建了车辆换道行为决策模型, 并在纵向决策模型增加了对交通场景中其他交通参与者的预测概率置信度的考虑。

针对换道路径规划, CAO Haotian等<sup>[10]</sup>提出了一种基于模型的最优轨迹跟踪算法, 将五次多项式融入计算模型中, 保证了换道轨迹的平滑性和舒适性。牛国臣等<sup>[11]</sup>对五次多项式进行改进, 采用了双五次多项式曲线, 动态规划换道时间, 同时增加舒适性约束指标构建代价函数。ZIEGLER等<sup>[12]</sup>基于变分法, 开发了一种新的局部连续的路径规划算法, 将车辆的动态特征纳入到一个复杂的目标函数中, 从而实现了更高效的路径规划, 同时也确保了曲率的连续, 从而达到了更好的舒适性。PALATTI等<sup>[13]</sup>建立障碍物车辆与道路势场, 通过势场函数值标记车辆可达集的安全点, 通过非线性模型预测控制实现超车轨迹的规划, 然而基于离散

优化和人工势场法的超车轨迹的计算成本较高, 不能满足自主地面车辆的实时性要求。杨志刚等<sup>[14]</sup>在换道函数中融入双曲正切曲线, 优化了传统换道模型, 使车辆在换道时更加平顺。阙嘉岚等<sup>[15]</sup>在概率路图的基础上, 基于启发式搜索生成全局路径, 有效提高了复杂环境下的规划效率, 但是提高搜索速度的同时, 也容易陷入局部最优解。

综上所述, 目前对于换道决策的研究, 主要集中于换道过程的安全性及舒适性<sup>[16]</sup>, 而未涉及自车换道对周边交通流扰动影响。此外, 现阶段在进行换道轨迹规划时, 主要采用传统横纵向规划解耦的方法生成轨迹<sup>[17]</sup>, 然而此方法并未考虑到横纵向轨迹之间的约束关系, 导致规划出的横纵向轨迹无法同时满足车辆动力学约束及安全舒适性要求。

本文提出一种基于微观车流的拟人化换道决策规划方法, 引入换道对局部交通流的影响, 在决策过程中, 不仅考虑自车收益, 还将局部交通效率考虑其中, 同时加入换道惯性因子, 增加换道决策的合理性。针对传统横纵向解耦规划出的横向轨迹曲率及纵向车速无法满足行车安全舒适性等问题, 提出联合横纵向约束的规划方法。在横向轨迹规划层面, 基于动态规划及二次规划算法, 并结合上一帧的纵向规划约束横向轨迹曲率, 实现对目标动态障碍物的横向避障, 最终生成合理安全的横向轨迹。在纵向轨迹规划层面, 基于当前帧的横向轨迹曲率对纵向规划提供速度约束, 同时根据上一帧的纵向轨迹, 结合动静态障碍物筛选, 对横向规划提供轨迹约束。同时, 也对所提出的基于微观车流的拟人化换道决策过程和横纵向联合约束规划方法进行了实车验证。

## 1 换道决策规划总体架构及换道模型建立

### 1.1 换道决策规划总体架构

换道决策规划总体架构分为决策层和规划层。

决策层用于获取合适的换道间隙，构建基于交通流扰动因子、换道惯性因子及换道收益的换道函数，提高换道决策合理性；规划层采用横纵向相互约束耦合的方法规划换道轨迹，提升换道安全性和舒适性，总体架构如图 1 所示。

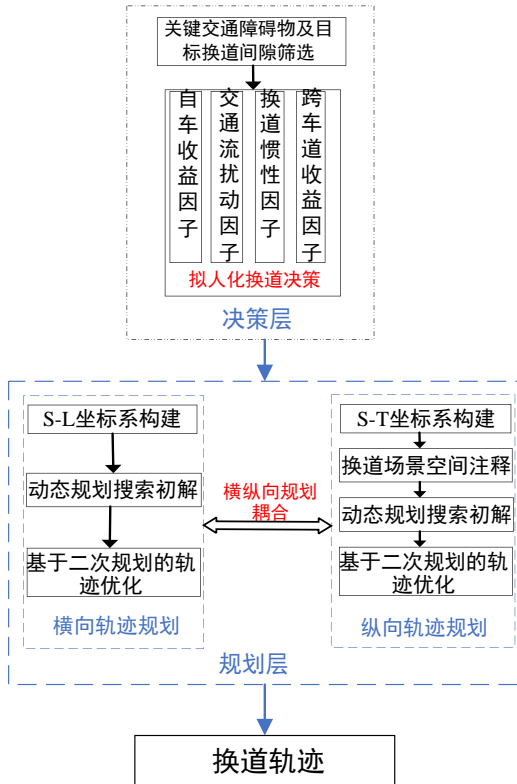


图 1 决策与规划架构

### 1.2 换道间隙拓扑构建

在换道准备阶段，调用微观交通流模块，根据当前车道前后方一定距离筛选障碍车辆，构建自车和周围车辆的拓扑关系。此外，每个相邻车道均会设置该车道的车辆拓扑关系，同时，建立拓扑关系的两车会有一个独立的换道间隙（换道 gap）。

根据上述建立的车辆拓扑关系筛选出本车道内的领航车辆和跟随车辆，基于当前的换道意图，从目标车道的换道 gap 序列中挑选出可能与自车产生交互的换道 gap，查询可能影响自车交互的车辆。此外，预测模块给出关键车辆的预测行为，影响关键交通参与者的筛选。

图 2 中蓝色方块为自车，红色方块及紫色方块分别为当前车道下自车前方及后方车辆，黄色方块

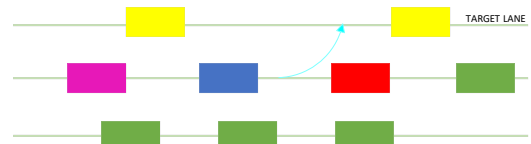


图 2 车辆拓扑关系

分别为左侧目标车道换道目标间隙前后车辆，绿色方块为当前换道时刻不予考虑的车辆。

针对关键障碍物筛选模块，设计拓扑结构为：

$$\text{key\_object\_selector} \begin{cases} \text{front\_obstacle: car\_lead;} \\ \text{rear\_obstacle: car\_follow;} \\ \text{key\_gaps\_list: } \begin{cases} \text{key\_gap\_0,} \\ \text{key\_gap\_1,} \\ \text{key\_gap\_2...} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中：key\_object\_selector 数据结构包含当前车道领航车辆和跟随车辆的基本信息，如车速、位置，还有筛选出的目标间隙列表 key\_gaps\_list。

其中，关键目标间隙的数据结构为：

$$\text{key\_gap} \begin{cases} \text{front\_obstacle: car\_lead} \\ \text{rear\_obstacle: car\_follow} \end{cases} \quad (2)$$

式中：key\_gap 数据结构包含目标换道间隙的车道信息，以及领航车辆和跟随车辆信息。

### 1.3 换道模型函数设计

设计拟人化换道模型函数，经换道后，期望对目标换道间隙的换道行为可提升自车速度，同时避免换道后对后车造成急减速，所以将自车及周围车辆的车速波动考虑其中，此外，为防止因较小的换道增益而选择换道行为，在换道模型中增加换道惯性因子。基于换道收益和换道阻力分析，构建换道模型如式 (3) 所示。

$$\begin{cases} w_1(v_{\text{target}} - v_{\text{ego}}) + w_2(\tilde{a}_{\text{follow}} - a_{\text{follow}}) + \\ w_3(\bar{a}_{\text{target}} - \bar{a}_{\text{ego}}) + w_4(\text{gap}_{\text{target}} - \text{gap}_{\text{ego}}) > \zeta + \rho(t) + \lambda \end{cases} \quad (3)$$

式中： $v_{\text{target}}$  为目标车道预设领航车辆的速度； $v_{\text{ego}}$  为自车在当前车道下的速度； $a_{\text{follow}}$  为目标车道跟随车辆换道前加速度； $\tilde{a}_{\text{follow}}$  为目标车道跟随车辆换道后加速度； $\bar{a}_{\text{target}}$  为目标车道领航车辆换道后加速度； $\bar{a}_{\text{ego}}$  为换道后自车加速度； $\text{gap}_{\text{target}}$  为目标换道间隙大小； $\text{gap}_{\text{ego}}$  为自车前方剩余空间； $\zeta$  为最低换道惯

性； $\rho(t)$ 为与时间有关的惯性函数，表示对当前车道的忍耐程度； $\lambda$ 为跨车道速度收益；系数 $w$ 量化平衡表示速度优势和对其他车辆的交通影响的权重。

设置换道阈值 $\zeta + \rho(t)$ ，表示车道保持惯性；若该换道行为积极程度小于 $\zeta + \rho(t)$ ，则可以防止变道。

$$\rho(t) = \begin{cases} a, & 0 < t \leq c \\ a - (bt)^{-1}, & t > c \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\rho(t)$ 在一定时间后随时间成指数下降关系； $a$ 为基础换道惯性； $c$ 为一般忍耐时间；系数 $b$ 的调整适用于驾乘人员不同的性格； $\lambda$ 为跨车道速度收益，若跨车道速度收益巨大，则会减小向收益巨大的车道方向换道而产生的换道阻力，换道决策系统会更倾向于换道，跨车道换道收益为：

$$\lambda = w_s (v'_{\text{target}} - v_{\text{ego}}) \quad (5)$$

式中： $w_s$ 为跨车道换道后速度增益系数，用来平衡跨车道换道和相邻车道换道收益； $v'_{\text{target}} - v_{\text{ego}}$ 为跨车道换道后的速度收益； $v'_{\text{target}}$ 为换道后自车车速； $v_{\text{ego}}$ 为当前时刻自车车速。

## 2 横纵向联合约束路径规划

基于换道函数进行分析后，若满足换道要求，则需对车辆的换道轨迹进行规划。传统无人驾驶轨迹规划算法为避免将规划问题构建成一个高纬度的规划问题，所以将横向规划和纵向规划解耦，但是实际上路径和速度相互约束，并且传统算法不能充分利用决策结果，导致规划出的轨迹不能完全适配当前场景。鉴于此，本文提出基于使用路径和速度规划耦合的思路规划换道轨迹，根据决策模块的场景约束规划横纵向轨迹：横向规划依据上一帧速度规划结果，添加当前时刻横向规划的曲率软约束；纵向规划根据当前帧的横向规划结果筛选关键障碍物，并添加曲率限速约束，通过横纵向联合约束实时路径规划，实现换道路径规划和速度跟踪的联合控制。

### 2.1 笛卡尔坐标系与S-L坐标系转换

采用Frenet坐标系描述道路的变化趋势，能有

效提高轨迹规划的效率。Frenet坐标系依赖一条平滑的参考线，可以描述平面上距离参考线一定范围内的点，将每一点用垂直于参考线的刻度和与参考线的横向距离表征，从而构成每一点在Frenet坐标系中的坐标值。

笛卡尔坐标系转S-L坐标系公式为：

$$\begin{cases} l' = \tan(\theta_x - \theta_r)(1 - \kappa_r l) \\ l'' = -(d\kappa_r l + \kappa_r l') \tan(\theta_x - \theta_r) + \\ \frac{1 - \kappa_r l}{\cos^2(\theta_x - \theta_r)} \left( \kappa_x \frac{1 - \kappa_r l}{\cos(\theta_x - \theta_r)} - \kappa_r \right) \\ \dot{l} = v \mathbf{T}_x^T \mathbf{N}_r = v \sin(\theta_x - \theta_r) \\ \ddot{l} = a \times \sin(\theta_x - \theta_r) + v \cos(\theta_x - \theta_r) (v \kappa_x - \kappa_r \dot{s}) \\ \dot{s} = \frac{v}{1 - \kappa_r l} \cos(\theta_x - \theta_r) \\ \ddot{s} = \frac{1}{(1 - \kappa_r l)} \left( \begin{matrix} a \cos(\theta_x - \theta_r) \\ -\dot{s}^2 \left( \frac{\kappa_x (1 - \kappa_r l)}{\cos(\theta_x - \theta_r)} - \kappa_r \right) l' - (\kappa_r l + \kappa_r l') \end{matrix} \right) \end{cases} \quad (6)$$

S-L坐标系转笛卡尔坐标系公式为：

$$\begin{cases} x = x_r - l \sin \theta_r \\ y = y_r + l \cos \theta_r \\ \theta_x = \arctan 2 \left( \frac{l'}{1 - \kappa_r l} \right) + \theta \\ v = \sqrt{\dot{s}^2 (1 - \kappa_r l)^2 + \dot{l}^2} \\ a = \left( \begin{matrix} \ddot{s} \frac{1 - \kappa_r l}{\cos(\theta_x - \theta_r)} + \frac{\dot{s}^2}{\cos(\theta_x - \theta_r)} \times \\ \left( (1 - \kappa_r l) \tan(\theta_x - \theta_r) \frac{d(\theta_x - \theta_r)}{ds} \right) \\ - d\kappa_r l - \kappa_r l' \end{matrix} \right) \end{cases} \quad (7)$$

### 2.2 横纵向规划约束

为使规划出的轨迹更加合理、安全，在规划过程中，不仅需要结合车辆动力学约束路径曲率，还需根据上层感知获取自车周围动态障碍物信息，为轨迹设置软硬性约束。

由于高速行驶时，车辆轮胎转角较小，忽略轮胎转角带来的轮胎侧向力，横向力为：

$$F_y = v^2 \times k \quad (8)$$

式中： $F_y$ 为横向力； $v$ 为纵向车速； $k$ 为曲率半径。

将摩擦椭圆限制成摩擦圆，可得：

$$k < \frac{\sqrt{R^2 - F_{x\_max}^2}}{v^2} \quad (9)$$

式中： $R$ 为摩擦圆半径； $F_{x\_max}$ 为单轮最大纵向力。

经过一轮决策，基于上一帧的纵向规划轨迹，通过上述的动力学模型在当前的横向规划中收束 S-L 硬边界，从而优化横向规划的 S-L 解空间，并且对横向轨迹进行曲率约束。基于横向规划结果，进一步对纵向轨迹进行速度约束。

基于 Frenet 坐标系，将障碍物和道路边界信息投影到参考线上，构建横向规划的求解空间  $sl\_boundary$ ；针对无人驾驶车辆在结构化道路上的换道场景，分析换道规划的边界约束。

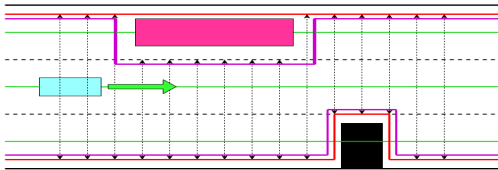


图 3 换道边界约束

图 3 中，蓝色方块为自车，绿色箭头为行驶方向，绿色线为车道中心线，黑色方块为车道上静止障碍物和缓速障碍物，粉色方块为当前道路下的行驶车辆等动态障碍物，黑色粗实线为道路边界，黑色虚线为车道可跨越虚线，红色实线为 S-L 左右硬边界，该硬边界将给予轨迹严格的约束，所有解均会在红色范围内。

基于上一帧纵向规划结果可以获取自车在未来一段时间的 T-S 粗轨迹，结合本帧预测模块给出的动态障碍物的速度属性，可以得到动态障碍物的边界约束，如图 4 所示，蓝色矩形为自车，粉红色矩形为相邻目标车道匀速行驶车辆。初始阶段 0 s 时，自车在当前阶段的参考系上  $s_{ego} = 0$ ，旁车当前在  $s_{car1} = 10$ ，根据上一帧的纵向规划 T-S 结果及本帧对旁车的预测结果，随后一段时间内，自车将加速超越旁车，预计在 3 s 后，自车  $s_{ego} = 50$ ，旁车  $s_{car1} = 40$ ，在 1~3 s 内，自车和旁车将会在纵向上相遇，因此，将  $s=10\sim 50$  这段范围设置为软边界。此外，软边界一定在硬边界之内，在后续的约束设计中综合考虑动静态障碍物。

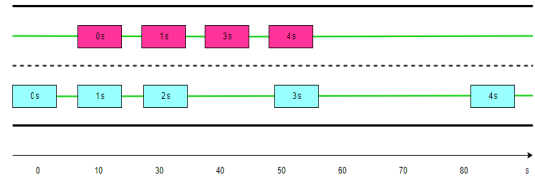


图 4 预测轨迹软约束

### 2.3 横向轨迹规划

#### 2.3.1 横向动态规划算法设计

首先构建 S-L 坐标系，将当前道路空间每隔一段距离离散成有序点阵并初始化，循环遍历每一个 level 的节点，将前节点与障碍物做碰撞检测，若发生碰撞则直接舍弃；若未发生碰撞，计算当前节点的每一个前继节点的 cost，cost 函数计算包含了与目标参考线的横向偏移量、横向变化率、与终点位置的横向偏差；取最小 cost 的前继节点为父节点，直到遍历所有 level 的子节点，取最后一个 level 最小 cost 的子节点，通过链表寻找父节点，直到找到初始节点完成整条轨迹的回溯。

设计惩罚函数：

$$J = J_{smooth} + J_{obs} + J_{ref\_diff} \quad (10)$$

对于横向平滑性：

$$J_{smooth} = w_l \times \int l'(s)^2 ds \quad (11)$$

式中： $l'(s)$ 为当前轨迹对应当前参考线的横向偏差一阶导； $w_l$ 为权重系数。

与障碍物之间的安全距离：

$$J_{obs} = \begin{cases} 0 & dis\_obs > d_{max} \\ w_{obs} \frac{1}{1 + e^{-dis\_obs}} & d_{min} < dis\_obs < d_{max} \\ K_{max} & dis\_obs < d_{min} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $w_{obs}$ 为权重系数； $K_{max}$ 为 cost 极大值； $dis\_obs$ 为自车与障碍物间的距离； $d_{max}$ 、 $d_{min}$ 分别为最大安全距离及最小安全距离。

与目标参考线之间的偏差：

$$J_{ref\_diff} = w_{diff\_l} \times \int diff\_l_{target}(s)^2 ds \quad (13)$$

式中： $\int diff\_l_{target}$ 为与目标车道参考线的横向偏差； $w_{diff\_l}$ 为权重系数。

#### 2.3.2 横向轨迹二次规划

在实际驾驶过程中，变道操作完成后应该沿着

车道中心线行驶，以减少其他车辆不当操纵而引发的碰撞风险，代价函数应满足：

- 1) 规划的横向路径必须是无碰撞的；
- 2) 参考线作为道路中心线，规划出的轨迹要尽量贴合参考线；
- 3) 横向偏差的变化率和横向偏差变化的能量损失要尽量小；
- 4) 要与障碍物保持一定的距离，即向可行驶空间中间靠近。

基于此，代价函数设计为：

$$J = J_{\text{cost}_1} + J_{\text{cost}_2} + J_{\text{cost}_3} \quad (14)$$

第 1 项：

$$\begin{cases} J_{\text{cost}_1} = w_l \times \int l(s)^2 ds + w_{l'} \times \int l'(s)^2 ds + \\ w_{l''} \times \int l''(s)^2 ds + w_{l'''} \times \int l'''(s)^2 ds \end{cases} \quad (15)$$

式中： $l$ 、 $l'$ 、 $l''$ 、 $l'''$ 分别为相对于参考线的横向偏差以及 $l$ 关于 $s$ 的一阶导数、二阶导数和三阶导数； $w_l$ 为与参考线横向偏差的权重系数，用于评估轨迹和参考线的贴合程度； $w_{l'}$ 、 $w_{l''}$ 和 $w_{l'''}$ 分别为 $l$ 关于 $s$ 的一阶导、二阶导和三阶导的权重系数，影响轨迹的平滑和舒适度。

第 2 项：

$$J_{\text{cost}_2} = w_{\text{obs}} \times \int \left( l(s) - 0.5 \times (l_{\text{soft}}(s)_{\text{left}} + l_{\text{soft}}(s)_{\text{right}}) \right)^2 ds \quad (16)$$

式中： $w_{\text{obs}}$ 为权重系数； $l_{\text{soft}}(s)_{\text{left}}$ 和 $l_{\text{soft}}(s)_{\text{right}}$ 分别为 $sl\_boundary$ 的上下软边界。

第 3 项：

$$J_{\text{cost}_3} = \left[ \begin{matrix} w_{\text{end}1l} \times (l_{n-1} - l_{\text{end ref}})^2 + w_{\text{end}d} \\ \times (l'_{n-1} - l'_{\text{end ref}})' \\ w_{\text{end}ddl} \times (l''_{n-1} - l''_{\text{end ref}})'' \end{matrix} \right]^2 \quad (17)$$

式中： $l_{\text{end ref}}$ 、 $l'_{\text{end ref}}$ 和 $l''_{\text{end ref}}$ 分别为对终点状态的约束。

在横向规划中，要求规划出来的路径是在 $sl\_boundary$ 边界之内，横向偏离量的约束保证了行驶的安全性。还需要对车辆跟随横向速度进行约束，横向速度过大，则会造成轨迹跟踪失调，甚至

会造成较大的轨迹跟踪误差。同时，也需要对轨迹的连续性进行约束，要求轨迹保持光滑。此外，换道过程中的横向加加速度直接影响乘坐人员的舒适性，所以横向轨迹规划二次规划约束为：

$$\begin{cases} l_{\text{left}} \leq l_i \leq l_{\text{right}} \\ l'_{\text{min}} \leq l'_i \leq l'_{\text{max}} \\ l''_{\text{min}} \leq l''_i \leq l''_{\text{max}} \\ l_{i+1} - l_i - l'_i \times \Delta s - \frac{1}{3} \times l''_i \times \Delta s^2 - \\ \frac{1}{6} \times l_{i+1}''' \times \Delta s^2 = 0 \\ l'_{i+1} - l'_i - \frac{1}{2} \times l''_i \times \Delta s - \frac{1}{2} \times l_{i+1}'' \times \Delta s = 0 \\ l'''_{\text{lower}} \times \Delta s \leq l'''_{i+1} - l'''_i \leq l'''_{\text{upper}} \times \Delta s \end{cases} \quad (18)$$

式中： $l_{\text{left}}$ 、 $l_{\text{right}}$ 分别为 $sl\_boundary$ 左右边界； $l$ 、 $l'$ 为关于参考线的横向位移与横向位移的变化率； $l''$ 为横向加速度； $l'''$ 为横向加加速度。

## 2.4 纵向轨迹规划

### 2.4.1 纵向轨迹解空间构建

基于横向规划的无碰撞轨迹筛选可能会发生碰撞的障碍物，包括车道内前方车辆，换道目标车道内的预设领航车辆和预设跟随车辆，同时也需要将终点和交通灯停止线加入速度规划中。如图 5 所示，图中横坐标 $T$ 为时间，纵坐标 $S$ 为位移，粉红色带宽为前车 $S-T$ 图，绿色带宽为后车 $S-T$ 图；根据决策过程结果，将本车道领航车辆和目标车道领航车辆设置为上边界障碍物，将跟随车辆设置为下边界障碍物，障碍物在 $S-T$ 坐标上的投影为硬边界，纵向的解空间将限制在上下硬边界之内；基于前后方车辆障碍物的带宽平移一条红色的虚线作为约束，设置安全距离边界作为软边界；将自车最大加速度设置为硬边界；将人体舒适加速度设置为软边界，如紫色虚线所示。综合软约束和硬约束，完成纵向解空间构建，获取纵向速度轨迹，如图 5 绿色实线所示。

### 2.4.2 纵向轨迹动态规划

为规划出一条安全舒适的纵向轨迹，设置总惩罚函数为：

$$J = J_v + J_{\text{acc}} + J_{\text{obs}} \quad (19)$$

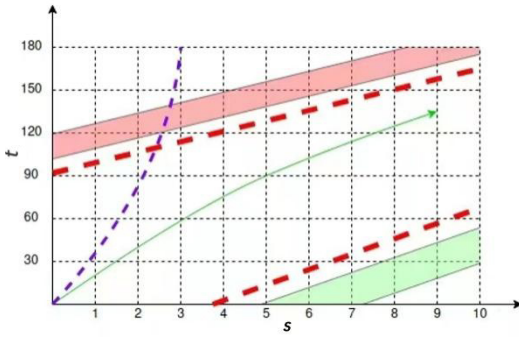


图 5 纵向解空间构建

为保证通行效率，以期望车速行驶，假设当前父子节点之间为匀速运动，则有：

$$v_i = \frac{s_i - s_{i-1}}{\Delta t} \quad (20)$$

$$J_v = w_v \times (v_i - v_{ref})^2 \quad (21)$$

式中： $s_i - s_{i-1}$ 为两节点之间距离； $v_i - v_{ref}$ 为实际车速与期望车速差值； $w_v$ 为权重系数。

限制当前节点的加速度：

$$J_{acc} = w_{acc} \times \left(\frac{v_i - v_{i-1}}{\Delta t}\right)^2 \quad (22)$$

式中： $v_i - v_{i-1}$ 为两节点之间的速度差值； $w_{acc}$ 为权重系数。

与障碍物之间的安全距离：

$$J_{obs} = \begin{cases} 0 & dis\_obs > d_{max} \\ w_{obs} \times \frac{1}{1 + e^{-dis\_obs}} & d_{min} < dis\_obs < d_{max} \\ K_{max} & dis\_obs < d_{min} \end{cases} \quad (23)$$

式中： $w_{obs}$ 为权重系数； $K_{max}$ 为cost极大值； $dis\_obs$ 为自车与障碍物间的距离； $d_{max}$ 、 $d_{min}$ 分别为最大安全距离及最小安全距离。

### 2.4.3 纵向轨迹二次规划

为保证纵向规划轨迹的平滑性，基于二次规划算法对动态规划生成的纵向轨迹做进一步平滑处理。二次规划问题目标函数的构建需满足：

- 1) 纵向规划轨迹需要尽量贴合动态规划结果；
- 2) 规划出的轨迹要尽量按照限速行驶；
- 3) 加速度和加加速度尽可能地小。

基于此，设置二次规划约束为：

$$\begin{cases} s_{lower} \leq s_i \leq s_{upper} \\ \dot{s}_{lower} \leq \dot{s}_i \leq \dot{s}_{upper} \\ \ddot{s}_{lower} \leq \ddot{s}_i \leq \ddot{s}_{upper} \\ s_{i+1} - s_i - \dot{s}_i \times \Delta t - \frac{1}{3} \times \ddot{s}_i \times \Delta t^2 - \frac{1}{6} \times \ddot{s}_{i+1} \times \Delta t^2 = 0 \\ \dot{s}_{i+1} - \dot{s}_i - \frac{1}{2} \times \ddot{s}_i \times \Delta t - \frac{1}{2} \times \ddot{s}_{i+1} \times \Delta t = 0 \\ \ddot{s}_{lower} \times \Delta t \leq \ddot{s}_{i+1} - \ddot{s}_i \leq \ddot{s}_{upper} \times \Delta t \end{cases} \quad (24)$$

式中： $s$ 、 $\dot{s}$ 、 $\ddot{s}$ 、 $\ddot{\ddot{s}}$ 分别为对应时间  $t$  的位置、速度、加速度和加加速度。

## 3 实车验证

### 3.1 试验平台搭建

为验证横纵向联合约束规划方法的有效性及其规划轨迹的安全性和舒适性，搭建试验平台进行实车验证。硬件平台层面，车辆搭建 128 线主激光雷达、32 线补盲激光雷达及周视加环视摄像头，并配置 IECU 3.1 Orin 芯片，采用英伟达 Driver Orin-X SoC 计算单元。软件环境层面，基于 Ubuntu 系统采用 Ros2 通讯进行实车验证，并采用 OSQB 求解器对模型优化求解，实车装备演示如图 6 所示。



图 6 实车装备演示

### 3.2 经典自主换道场景实车验证

设置经典自主换道场景实车验证，如图 7 所示，深蓝色矩形块为自车，红色矩形为当前车道前方车辆，黄色矩形为目标车道领航车辆，绿色矩形为当前时刻不考虑的社会车辆。本车道前方车辆时速为 55 km/h，相邻左边车道前车时速为 80 km/h，试验场地路段限速 80 km/h。试验车辆在巡航状态中识别到前方障碍物，当自车与前车距离为 80 m 时，自车由于前车低速导致自车减速度，换道决策

过程基于自车收益下发出换道请求。

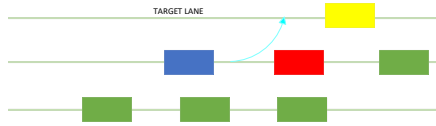


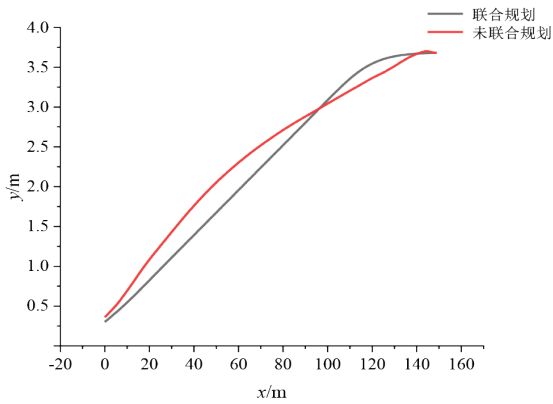
图7 经典自主换道场景

当前状态下的换道信息见表 1。

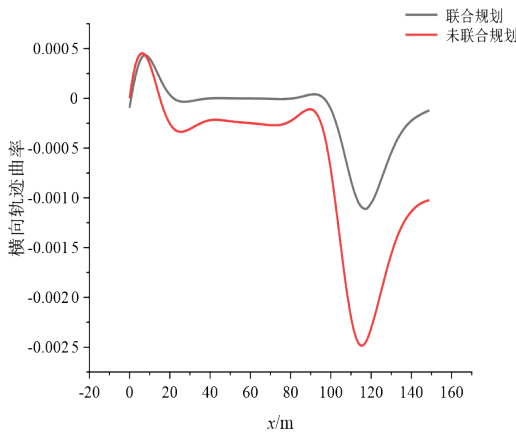
表 1 换道数据

类别	速度/ (km/h)	加速度/ (m/s <sup>2</sup> )	基于参考线 S 位置
自车	65	0.5	126
当前车道领航车辆	55	0.3	204
左侧车道领航车辆	80	0.1	207

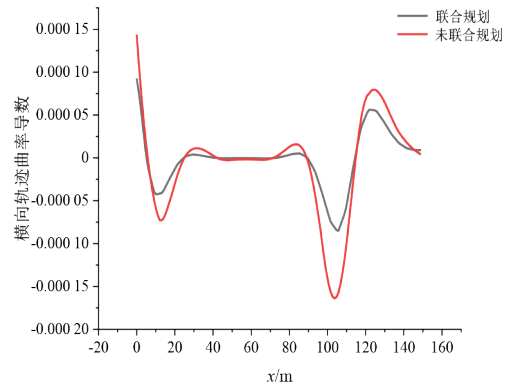
在上述换道场景中，分别采用传统横纵向未联合约束规划方法及文章所述横纵向联合约束规划方法进行实车验证，轨迹规划结果如图 8 所示。



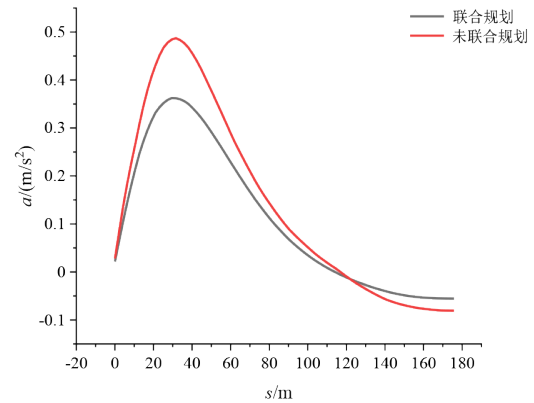
(a) 横向轨迹



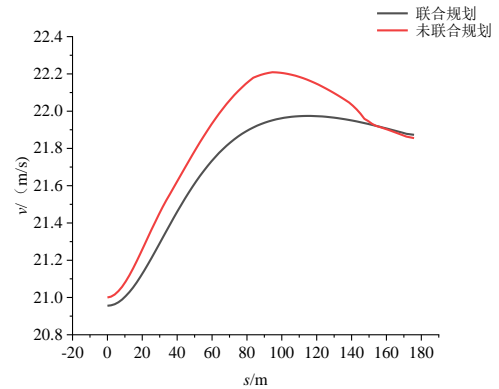
(b) 横向轨迹曲率



(c) 横向轨迹曲率导数



(d) 纵向加速度



(e) 纵向车速

图 8 经典自主场景实车验证

由上述实车验证结果分析可得横纵向轨迹规划结果信息，见表 2。

表 2 横纵向轨迹规划结果

	未联合约束规划	联合约束规划
横向轨迹曲率	-0.002 5~0.004 9	-0.001 3~0.004 7
横向轨迹曲率导数	-0.001 8~0.001 4	-0.000 8~0.000 9
纵向加速度/(m/s <sup>2</sup> )	-0.001 8~0.004 9	-0.009~0.036

由表2可知，在联合约束规划条件下，横向轨迹曲率变化范围缩小了近17.8%，横向轨迹曲率导数变化范围缩小了近46.8%，由图8a横向轨迹可知，联合规划相较于未联合规划在车辆纵向移动距离层面缩短了近20 m，可更快地完成换道过程；同时结合实车验证结果图8b和8c可知，相较于未联合约束规划方法，联合约束规划中横向轨迹曲率波动范围更小，变化更加平稳，生成的横向轨迹更加平顺。

在联合约束规划出的纵向轨迹中，由图8d和8e可知，在自车换至目标车道后，联合规划算法车速变化更加平缓，满足轨迹跟踪需求，车辆最大加速度为0.36 m/s<sup>2</sup>，符合车辆动力学及驾驶舒适性要求，且相较于未联合约束规划，加速度变化范围缩小了近32.8%，同时加速度峰值缩小了26.5%，提高了换道过程中的驾驶舒适性。

### 3.3 起步加速换道场景实车验证

设置起步阶段换道场景，如图9所示，深蓝矩形块为自车，红色矩形为当前车道前方的领航车辆，橙色矩形为当前车道后方的跟随车辆，黄色矩形为目标车道车辆，绿色矩形为左侧车流，当前状态下的换道信息见表3。

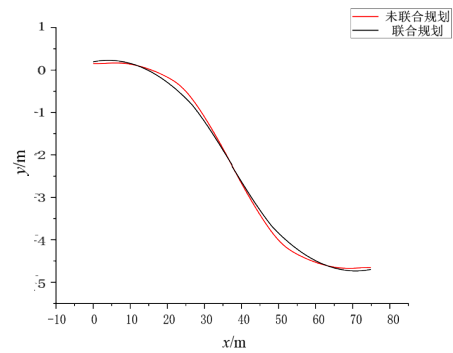


图9 起步加速换道场景

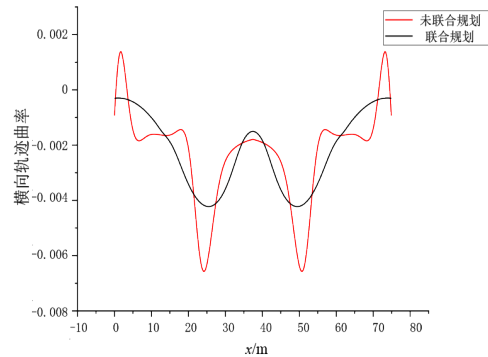
表3 换道数据

类别	速度/(km/h)	加速度/(m/s <sup>2</sup> )	位置
自车	3.0	1.6	26
当前车道领航车辆	3.6	1.1	53
当前车道跟随车辆	3.2	0.9	12
右侧车道领航车辆	2.4	1.3	21

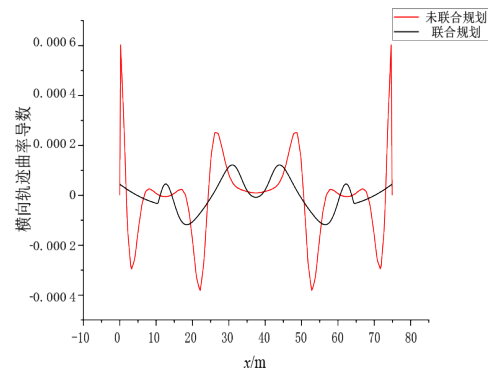
在上述换道场景中，分别采用传统横纵向未联合约束规划方法及文章所述横纵向联合约束规划方法进行实车验证，轨迹规划结果如图10所示。



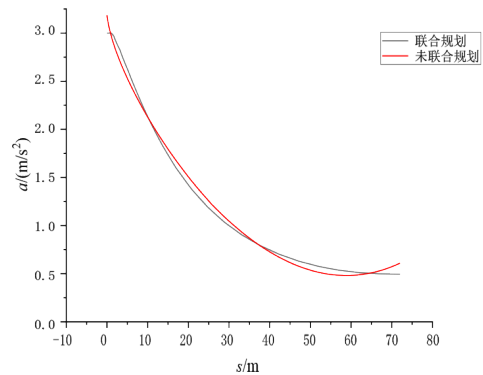
(a) 横向轨迹



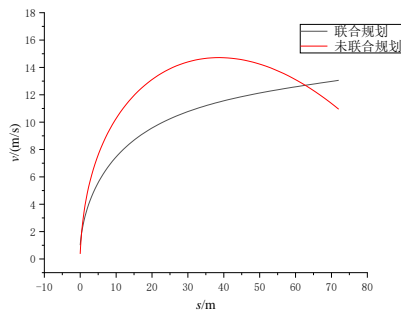
(b) 横向轨迹曲率



(c) 横向轨迹曲率导数



(d) 纵向加速度



(e) 纵向速度

图 10 起步加速场景实车验证

由上述实车验证结果分析可得横纵向轨迹规划结果信息, 见表 4。

表 4 横纵向轨迹规划结果

	未联合约束规划	联合约束规划
横向轨迹曲率	-0.007 0~0.001 8	-0.004 2~0.001 2
横向轨迹曲率导数	-0.000 4~0.000 6	-0.000 05~0.000 14
纵向加速度/(m/s <sup>2</sup> )	0.5~3.4	0.5~3.0

由表 4 可知, 在起步加速换道场景中, 联合约束规划, 横向轨迹曲率变化范围缩小了近 53.7%, 横向轨迹曲率导数变化范围缩小了近 47.3%, 结合实车验证结果图 10b 和图 10c 可知, 相较于未联合约束规划方法, 联合约束规划中横向轨迹曲率变化更加平滑, 且波动范围更小, 最大横向轨迹曲率为 0.001 8, 符合换道安全性及舒适性要求。

在联合约束规划出的纵向轨迹中, 由图 10d 和图 10e 可知, 在自车换至目标车道后, 联合规划算法车速变化更加平顺, 车速波动更小, 满足轨迹跟踪需求, 车辆最大加速度为 3.0 m/s<sup>2</sup>, 符合车辆动力学及驾驶舒适性要求, 加速度变化范围缩小了 13.7%, 同时加速度峰值缩小了 11.7%, 提高了起

步加速换道过程中的驾驶舒适性。

## 4 结论

为提高换道过程中的合理性、安全性和舒适性, 本研究在传统换道决策基础上引入换道对局部交通流的影响, 并加入换道惯性因子, 得出的结论如下。

1) 在换道决策层面, 在考虑自车换道收益的基础上, 引入换道对局部交通流的影响, 同时加入换道惯性因子, 增加换道过程中的合理性。

2) 在传统横纵向解耦规划的基础上, 提出联合横纵向约束规划方法, 横向轨迹为纵向轨迹提供车速约束, 纵向轨迹为横向轨迹提供软性边界约束, 并进行实车验证。

3) 实车验证结果表明, 所提出的横纵向联合约束规划算法能实时提高换道轨迹的平稳性和纵向轨迹的舒适性, 也证明了所提出的基于微观车流的拟人化换道决策过程的合理性和横纵向联合规划算法的有效性。

4) 本文提出的基于微观车流的拟人化换道决策过程非常依赖预测模块给出的车辆状态, 但由于预测模块技术壁垒, 存在障碍物预测属性失真等问题, 因此, 在本研究的决策过程基础上, 可以引入部分可观测马尔科夫决策过程 (POMDP), 使无人驾驶车辆通过更新当前状态的概率分布来更新对真实状态的置信度, 从而可以在未来做出更好的换道决策。此外, 由于实车试验资源有限并出于安全考虑, 并没有对极端拥堵车流场景进行仿真验证, 因此, 还需搭建台架, 对更多试验场景进行充分验证, 完善决策和横纵向规划算法。

## 参考文献 (References)

- [1] RAHMAN M, CHOWDHURY M, XIE Yuanchang, et al. Review of Microscopic Lane-Changing Models and Future Research Opportunities [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14 (4): 1942-1956.
- [2] 鲍琼, 刘佳琪, 沈永俊. 基于双车驾驶模拟的城市快速路驾驶人换道交互行为特征 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2023, 53(1): 165-173.
- [3] BAO Qiong, LIU Jiaqi, SHEN Yongjun. Characteristics of Lane-Changing Interaction Behavior of Drivers on Urban Expressway Based on Dual-Car Driving Simulation [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2023, 53(1): 165-173. (in Chinese)
- [3] 庞俊康. 基于综合信息感知的智能汽车轨迹规划的研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [3] PANG Junkang. Research on Intelligent Vehicle Trajectory Planning Based on Comprehensive Information Perception [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong

- University, 2018. (in Chinese)
- [4] 王慧然, 陈无畏, 王其东, 等. 基于相邻车道安全态势划分的换道决策[J]. 机械工程学报, 2023, 59(2): 233-244.  
WANG Huiran, CHEN Wuwei, WANG Qidong, et al. Lane-Changing Decision Based on Safety Situation Division of Adjacent Lanes [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(2): 233-244. (in Chinese)
- [5] 徐杨, 陆丽萍, 褚端峰, 等. 无人车辆轨迹规划与跟踪控制的统一建模方法[J]. 自动化学报, 2019, 45(4): 799-807.  
XU Yang, LU Liping, CHU Duanfeng, et al. Unified Modeling Approach for Trajectory Planning and Tracking Control of Autonomous Vehicles [J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(4): 799-807. (in Chinese)
- [6] 张利鹏, 苏泰, 严勇. 基于采样区域优化的智能车辆轨迹规划方法[J]. 机械工程学报, 2022, 58(14): 276-287.  
ZHANG Lipeng, SU Tai, YAN Yong. Intelligent Vehicle Trajectory Planning Method Based on Optimized Sampling Area [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(14): 276-287. (in Chinese)
- [7] GIPPS P G. A Model for the Structure of Lane-Changing Decision [J]. Transportation Research, Part B: Methodological, 1986, 20(5): 403-414.
- [8] HALATI A, HENRY L, WALKER S. CORSIM-Corridor Traffic Simulation Model [C]//Proceedings of the Conference on Traffic Congestion and Traffic Safety in the 21st Century, 1997: 570-576.
- [9] 宋威龙. 城区动态环境下智能车辆行为决策研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.  
SONG Weilong. Research on Intelligent Vehicle Behavior Decision-Making in Dynamic Urban Environment [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [10] CAO Haotian, SONG Xiaolin, ZHAO Song, et al. An Optimal Model-Based Trajectory Following Architecture Synthesising the Lateral Adaptive Preview Strategy and Longitudinal Velocity Planning for Highly Automated Vehicle [J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(8): 1143-1188.
- [11] 牛国臣, 李文帅, 魏洪旭. 基于双五次多项式的智能汽车换道轨迹规划[J]. 汽车工程, 2021, 43(7): 978-986.  
NIU Guochen, LI Wenshuai, WEI Hongxu. Intelligent Vehicle Lane Change Trajectory Planning Based on Double Quintic Polynomial [J]. Automotive Engineering, 2021, 43(7): 978-986. (in Chinese)
- [12] ZIEGLER J, BENDER P, DANG T, et al. Trajectory Planning for Bertha—A Local, Continuous Method [C]//2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, June 8-11, 2014, Dearborn, MI, USA. Piscataway NJ: IEEE, c2014: 450-457.
- [13] PALATTI J, AKSJONOV A, ALCAN G, et al. Planning for Safe Abortable Overtaking Maneuvers in Autonomous Driving [C]//2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), Sept. 19-22, 2021, Indianapolis, IN, USA. Piscataway NJ: IEEE, c2021: 508-514.
- [14] 杨志刚, 戚志锦, 黄燕. 智能车辆自由换道轨迹规划研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 520-524.  
YANG Zhigang, QI Zhijin, HUANG Yan. Research on Intelligent Vehicle Free Lane Change Trajectory Planning [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2013, 32(3): 520-524. (in Chinese)
- [15] 阙嘉岚, 丁贵涛, 黄亚楼. 基于启发式节点增强策略的PRM路径规划方法[J]. 机器人, 2003, 25(6): 544-547.  
QUE Jialan, DING Guitao, HUANG Yalou. PRM Path Planning Method Based on Heuristic Node Enhancement Strategy [J]. Robot, 2003, 25(6): 544-547. (in Chinese)
- [16] 李文礼, 韩迪, 任勇鹏, 等. 基于交互车辆轨迹预测的自动驾驶车辆轨迹规划[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(2): 519-525, 538.  
LI Wenli, HAN Di, REN Yongpeng, et al. Trajectory Planning of Autonomous Vehicles Based on Interactive Vehicle Trajectory Prediction [J]. Computer Application Research, 2023, 40(2): 519-525, 538. (in Chinese)
- [17] 邓海鹏, 麻斌, 赵海光, 等. 自动驾驶车辆紧急避障的路径规划与轨迹跟踪控制[J]. 兵工学报, 2020, 41(3): 585-594.  
DENG Haipeng, MA Bin, ZHAO Haiguang, et al. Path Planning and Trajectory Tracking Control of Autonomous Driving Vehicle for Emergency Avoidance [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(3): 585-594. (in Chinese)

## 作者简介



付翔(1973-), 女, 湖南随州人, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源整车控制技术。

Tel: 18986200536

E-mail: 759263695@qq.com

## 通信作者



裴超(2000-), 男, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源整车控制技术。

Tel: 15606698165

E-mail: 2858699388@qq.com