

# 持续变化弯道下主动换道超车路径规划研究<sup>\*</sup>

付广<sup>1</sup> 林晨<sup>2†</sup> 李天辉<sup>1</sup> 罗覃月<sup>1</sup> 朱勇杰<sup>2</sup> 何智成<sup>2</sup>

(1. 上汽通用五菱汽车股份有限公司 技术中心,柳州 545027)

(2. 湖南大学 机械与运载工程学院,长沙 410000)

**摘要** 城市道路以外的山区公路及高速公路,通常存在曲率多变、持续里程较长等特征的复杂弯道,给自动驾驶车辆换道超车行为的安全性带来挑战.针对该问题,提出一种持续变化弯道下主动换道超车的路径规划方法.首先,在路径规划层面,提出一种通过调节换道曲线生成自适应换道路径的混合控制点方法,并构建安全路径评价模型用以选取最优路径.其次,在速度规划层面,基于最优路径融合道路曲率变化、安全性、舒适性等因素建立约束条件构建目标函数,并求解车辆安全行驶的速度.最后,搭建仿真环境对所提方法在不同弯道场景下的规划效果进行验证.实验结果表明,该方法在弯道场景下能有效满足车辆的换道超车需求,保证车辆安全.

**关键词** 自动驾驶, 路径规划, 速度规划, B样条曲线

中图分类号:TP29

文献标志码:A

## Research on Path Planning for Proactive Lane Change Overtaking under Continuous Curved Driving Conditions<sup>\*</sup>

Fu Guang<sup>1</sup> Lin Chen<sup>2†</sup> Li Tianhui<sup>1</sup> Luo Qinyue<sup>1</sup> Zhu Yongjie<sup>2</sup> He Zhicheng<sup>2</sup>

(1. Technical Center, SAIC-GM-Wuling Automobile Company Limited, Liuzhou 545027, China)

(2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410000, China)

**Abstract** In mountainous roads or expressways outside urban areas, curves with complex characteristics such as varying curvature and long continuous mileage are common. These features present significant challenges to the safety of lane-changing and overtaking maneuvers for autonomous vehicles. To address this issue, a path planning method for proactive lane-change overtaking under continuously varying curved conditions. Firstly, at the path planning level, a hybrid control point method is introduced to generate adaptive lane-changing paths by adjusting the lane-change curve. A safety path evaluation model is then constructed to select the optimal path. Secondly, at the speed planning level, based on the optimal path and considering factors such as road curvature, safety, and comfort, constraint conditions are established, and an objective function is formulated to determine the safe driving speed for the vehicle. Finally, a simulation environment is established to validate the planning effectiveness of the proposed method across different curved-road scenarios. The experimental results demonstrate that this method can effectively satisfy the lane-changing and overtaking requirements of vehicles in curved-road scenarios while ensuring vehicle safety.

**Key words** automatic driving, path planning, speed planning, B spline curve

2025-07-28 收到第 1 稿,2025-09-12 收到修改稿.

<sup>\*</sup> 广西科技重大专项资助项目(桂科 AA22068108);Guangxi Science and Technology Major Program(AA22068108).

<sup>†</sup> 通信作者 E-mail:linchen132@hnu.edu.cn

## 引言

目前,中国的结构化道路建设正处于快速发展的阶段,并且已经建成了具有相当规模的高速公路网络<sup>[1]</sup>.与此同时,城市化道路广泛覆盖,其复杂的交通环境与多变的道路条件对智能驾驶技术提出了更高要求<sup>[2]</sup>.在此背景下,面向结构化道路的智能驾驶技术仍是车辆智能化研究的重要方向之一.其核心目标是应对城市道路中的各类挑战,从而提升行车安全与交通效率.

在结构化道路上,驾驶者时常需要产生换道行为,以适应交通流动和实现预期行车目标.在此类动态环境中,智能驾驶系统通过多源感知实时获取周围环境信息,并基于交通状况分析作出行为决策,最终生成安全且可行的行驶轨迹.上述过程中,路径规划作为智能驾驶系统的核心功能模块,对保障行车安全起着至关重要的作用.合理的路径规划不仅能够有效预判并规避潜在的交通冲突,显著降低事故风险,同时对提升道路资源利用效率、促进交通流稳定高效运行具有重要意义<sup>[3]</sup>.

目前,对于路径规划的算法已有诸多研究,其可以分为两大类:一种是基于规则的方法,另一种是基于学习的方法.基于规则的方法不依赖数据训练,一般基于预先设定的规则、数学模型或逻辑推理来规划路径,具有可解释性强、高效且易于实现的优点,例如,Dijkstra 算法、A\* 算法等<sup>[4-7]</sup>;而基于学习式的方法,则通过仿真或真实场景中的数据,训练一个神经网络模型,然后利用模型的输出规划当前的路径,例如长短期记忆网络 LSTM<sup>[8]</sup>、Q-learning<sup>[9]</sup>等,此类方法具有泛化能力强的优点.此外,近些年来,为了充分利用两类方法的优点,也有不少学者提出了两者融合的方法,例如,深度学习与 A\* 算法的融合<sup>[10]</sup>、Q-Learning 算法和 A\* 算法的融合<sup>[11]</sup>等.

上述针对路径规划算法的研究为结构化道路中车辆的路径规划提供了理论基础,然而,针对结构化道路中弯道超车场景的路径规划方法研究则相对较少.例如,张家旭等对弯道超车的路径规划问题进行了详细研究,分别提出了改进的人工势场法<sup>[12]</sup>、多项式曲线法<sup>[13]</sup>和最优约束求解法<sup>[14]</sup>.对于改进的人工势场法,其利用螺旋下降函数、斜坡正弦函数和指数函数构建了弯道的引力势能场、同

车道行驶车辆斥力势能场和弯道边界斥力势能场,然后采用增量搜索算法寻找空间中最快下降方向,进而确定弯道超车的路径.张志勇等<sup>[15]</sup>则在此基础上,提出了考虑车辆位置、速度和体积的改进人工势场函数,提高了车辆碰撞风险的预判精度.对于多项式曲线法,其利用五次多项式规划出满足车辆侧向加速度和障碍物约束的 3 段曲线,然后平滑连接作为最终规划的路径.对于最优约束求解法,其将路径规划问题描述为在车辆动力学和曲率约束下的优化问题,并采用高斯伪谱法转换为非线性规划问题求解.

综上所述,对弯道超车的路径规划研究已取得诸多成果,但仍存在一定不足之处.一方面,现有研究主要基于曲率固定、长度有限的理想弯道模型,未能充分考虑实际复杂道路中曲率持续变化与弯道里程较长耦合带来的严峻挑战.具体而言,在曲率持续变化的弯道中,车辆需随道路几何形状的连续改变而动态调整转向策略,传统基于固定曲率假设的路径生成方法难以保证车辆与车道边界的动态安全距离,易导致侵入对向车道或驶出本车道的风险.另一方面,在长里程弯道内,车辆速度需随曲率梯度进行多阶段连续性调整,现有将路径与速度解耦规划的范式难以满足复杂弯道的全局时空约束,可能引发侧滑或侧翻等失稳现象.同时,长里程弯道易伴随视线遮挡、路面附着系数变化等附加影响,进一步放大了规划方法的适配缺陷,尤其在山区公路或高速公路的长弯道场景中,上述问题更为突出,而现有改进的人工势场法、多项式曲线法及最优约束求解法均基于简化弯道模型构建,缺乏对道路几何连续变化特性的显式建模能力,导致其生成的路径在曲率自适应性与纵向平顺性方面存在本质缺陷,难以保障复杂弯道超车的安全性与可靠性.

针对上述问题,本文提出了一种适用于持续变化弯道场景的主动换道超车路径规划方法.首先,该方法在路径规划层面创新引入混合控制点策略,通过动态适配弯道曲率变化生成贴合道路特征的换道路径,并构建多维度安全路径评价模型以精准筛选最优路径;同时,在速度规划层面深度融合道路曲率、边界等环境约束与车辆自身约束,建立长里程弯道内的多阶段速度协调机制,构建多目标优化函数以规划出安全且合理的行驶速度,从而为智能车辆在复杂弯道环境中提供安全可靠的路径规

划方案,整体框架如图 1 所示。

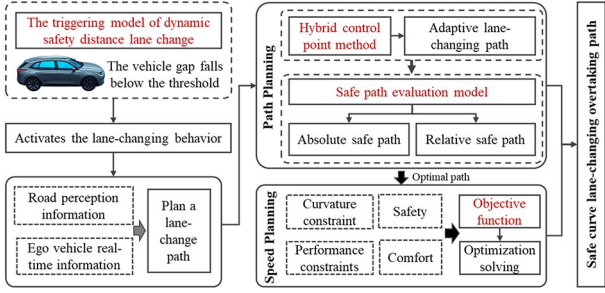


图 1 持续弯道下主动换道超车路径规划整体框架

Fig. 1 Integrated framework for active lane-changing and overtaking path planning in continuous curves

## 1 持续弯道超车场景的构建

### 1.1 持续弯道模型

城市道路的路网相对而言具有较高的直通性特点,而用于连接各个城市的干线公路受到不同地形特征的影响往往会有持续弯道的出现.在城区外的干线公路中,车流量和车辆密度通常较小,在条件允许的情况下超车的可行性以及因需求所带来的价值都大大增加.因此,本文主要针对该情景中的持续弯道行驶场景下主动换道超车的路径规划方法展开研究,其典型场景示意图如图 2 所示。

图 2 所示弯道场景中,假设自行车在 1 号车道后方行驶,同车道前方有另一车辆以一定速度行驶,但行驶速度低于自行车,此时自行车在该持续弯道路段有超车需求。

对于这类场景,在进行路径规划时不仅需要考虑自身车辆状态和周围环境道路情况,还需要关注周围动态车辆的状态,且车辆处在弯道中而非直线道路中,使得换道超车难度进一步加大,对这一操作的路径规划的要求也更加严苛.因此,本文将所研究的场景设定在高精度地图覆盖区域的道路内,以保证能够精准获取周围车辆和道路信息,完成对车辆的路径规划.本文研究场景为同向双车道,其中,



图 2 持续弯道超车场景示意图

Fig. 2 Schematic diagram of continuous curve overtaking scenario

1 号车道两侧车道线可表示为:

$$\begin{cases} X_{1L} = f_{1L}(t) \\ Y_{1L} = g_{1L}(t) \end{cases}, \begin{cases} X_{1R} = f_{1R}(t) \\ Y_{1R} = g_{1R}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $f_{1L}(t)$  和  $g_{1L}(t)$  表示 1 号车道左侧车道线的映射函数;  $f_{1R}(t)$  和  $g_{1R}(t)$  表示 1 号车道右侧车道线的映射函数;  $t$  表示映射参数.  $(X_{1L}, Y_{1L})$  为 1 号车道左侧车道线的坐标,  $(X_{1R}, Y_{1R})$  为 1 号车道右侧车道线的坐标

2 号车道两侧车道线可表示为:

$$\begin{cases} X_{2L} = f_{2L}(t) \\ Y_{2L} = g_{2L}(t) \end{cases}, \begin{cases} X_{2R} = f_{2R}(t) \\ Y_{2R} = g_{2R}(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $f_{2L}(t)$  和  $g_{2L}(t)$  表示 2 号车道左侧车道线的映射函数;  $f_{2R}(t)$  和  $g_{2R}(t)$  表示 2 号车道右侧车道线的映射函数;  $t$  表示映射参数.  $(X_{2L}, Y_{2L})$  为 2 号车道左侧车道线的坐标,  $(X_{2R}, Y_{2R})$  为 2 号车道右侧车道线的坐标。

车辆在车道中行驶时通常处在车道的中间区域,故将车道的中心线作为智能汽车在结构化道路上正常行驶的指引线.车道中心线可表示为:

$$\begin{cases} X_{1center} = \frac{X_{1L} + X_{1R}}{2} \\ Y_{1center} = \frac{Y_{1L} + Y_{1R}}{2} \\ X_{2center} = \frac{X_{2L} + X_{2R}}{2} \\ Y_{2center} = \frac{Y_{2L} + Y_{2R}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $(X_{1center}, Y_{1center})$  为 1 号车道中心线坐标,  $(X_{2center}, Y_{2center})$  为 2 号车道中心线坐标,则车道中心线可表示为:

$$\begin{cases} S_1 = (X_{1center}, Y_{1center}) \\ S_2 = (X_{2center}, Y_{2center}) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $S_1$  表示 1 号车道中心线,  $S_2$  表示 2 号车道中心线。

### 1.2 车辆模型

为便于研究和分析,本文对行驶在结构化道路上的车辆进行简化处理.考虑到车辆的轮廓特征,本文采用矩形的形状对其进行简化,并对该模型进行详细分析,具体如图 3 所示.图中,点 A、B、C、D 分别为车辆轮廓的 4 个角点,点  $M(x_0, y_0)$  为车辆后轴的中心点,  $\theta$  为车辆的航向角,  $L$  为车辆长度,  $d$  为车辆宽度,  $f$  为  $M$  点到车辆前端的距离,  $b$  为

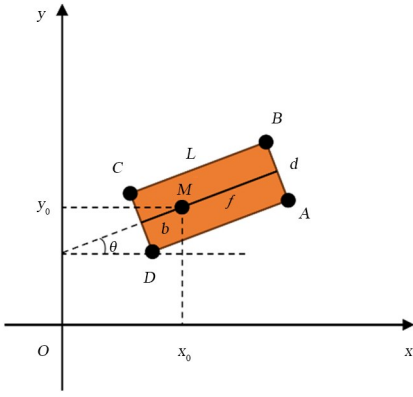


图3 车辆模型分析图  
Fig.3 Analysis diagram of vehicle model

$M$  点到车辆后端的距离,且满足以下关系:

$$f + b = L \quad (5)$$

点  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  分别为车与点  $M(x_0, y_0)$  的坐标关系,可表示为:

$$\begin{cases} x_A = x_0 + f \cos\theta + \frac{d}{2} \sin\theta, & y_A = y_0 + f \sin\theta - \frac{d}{2} \cos\theta \\ x_B = x_0 + f \cos\theta - \frac{d}{2} \sin\theta, & y_B = y_0 + f \sin\theta + \frac{d}{2} \cos\theta \\ x_C = x_0 - b \cos\theta - \frac{d}{2} \sin\theta, & y_C = y_0 - b \sin\theta + \frac{d}{2} \cos\theta \\ x_D = x_0 - b \cos\theta + \frac{d}{2} \sin\theta, & y_D = y_0 - b \sin\theta - \frac{d}{2} \cos\theta \end{cases} \quad (6)$$

其中,点  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  的坐标为  $(x_A, y_A)$ 、 $(x_B, y_B)$ 、 $(x_C, y_C)$ 、 $(x_D, y_D)$ 。

## 2 主动换道超车路径规划

### 2.1 动态安全距离换道触发模型

车辆在产生换道需求之前通常按照当前车道正常行驶,由于自身车速大于前车,使得两车之间的相对距离逐渐变小,当与前车小于一定距离时将产生换道需求并开始执行换道行为.车辆主动换道行为从客观上来说是为了摆脱当前车道的限制性因素<sup>[16]</sup>,避免与前车发生碰撞,因此车辆在行驶过程中应始终与前车保持安全距离,且该安全距离应与两车之间的实际车速和相对车速动态相关.根据文献<sup>[17]</sup>可知,车辆运动条件下的车间距保持安全距离模型可表示为:

$$D_s = \frac{(v_0 - v_{\Pi})^2}{2\delta_a} + d_{\Pi} \quad (7)$$

式中, $D_s$  为两车间的最大安全距离, $v_0$  为自身车速, $v_{\Pi}$  为前车车速, $\delta_a$  与  $d_{\Pi}$  为驾驶员特性参数,经

实验验证后得到  $\delta_a = 0.0524v_0 - 0.1215$ ,  $d_{\Pi} = 0.8509v_{\Pi} + 1.6109$ ,将其代入前式,即可得到如下式:

$$D_s = \frac{(v_0 - v_{\Pi})^2}{2(0.0524v_0 - 0.1215)} + 0.8509v_{\Pi} + 1.6109 \quad (8)$$

当两车间距即将达到最大安全距离的临界值时,车辆为了保证自身安全必须执行减速措施或者换道措施.因此为了保证车辆在换道过程中的安全,将两车间的最大安全距离  $D_s$  作为换道开始的安全距离,即当车距低于  $D_s$  时,车辆开始进行换道.由此可将动态安全距离换道触发模型定义为:

$$C = \begin{cases} 1, & \text{if } \Delta d \leq D_s \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\Delta d$  为自车与目标车辆的实际距离,当  $C = 1$  时触发换道行为.

### 2.2 自适应换道路径生成方法

由于车辆执行换道时处于弯道之中,故而对换道路径的要求更加严格.在规划过程中,必须确保所生成的路径完全位于弯道道路内且路径曲率连续变化,同时需要充分考虑道路的曲率因素,从而确保车辆在成功完成换道后,能够顺利沿着新车道行驶,避免发生冲出道路的危险情况.

基于上述特性,构成路径的曲线需具有一定的可控可变性和曲率连续变化以适应弯道和车辆控制的需求,因此本文基于三次准均匀 B 样条曲线<sup>[18]</sup>提出自适应换道路径生成方法,通过固定控制点与灵活控制点相结合的方式调节换道曲线.

由此,可定义换道曲线的节点矢量为:

$$[u_0, u_1, u_2, \dots, u_{n+k}, u_{n+k+1}] \quad (10)$$

式中, $n+1$  为曲线控制点的个数, $k$  为曲线的次数,且该节点矢量为非递减序列,即:

$$u_0 \leq u_1 \leq u_2 \leq \dots \leq u_{n+k} \leq u_{n+k+1} \quad (11)$$

其中,根据三次准均匀 B 样条曲线的特性,换道路径节点应满足如下关系:

$$\begin{cases} u_0 = u_1 = u_2 = u_3 \\ u_{n+k-2} = u_{n+k-1} = u_{n+k} = u_{n+k+1} \end{cases} \quad (12)$$

则换道路径曲线可定义为:

$$P(u) = [P_0 \ P_1 \ \dots \ P_n] \begin{bmatrix} b_{0,k}(u) \\ b_{1,k}(u) \\ \vdots \\ b_{n,k}(u) \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^n P_i b_{i,k}(u) \quad (13)$$

式中,  $P_i$  为曲线的控制点,  $b_{i,k}(u)$  为控制点对应的基函数, 其由以下递归公式定义.

$$b_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i < u < u_{i+1} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

$$b_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} b_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+n+1} - u}{u_{i+n+1} - u_{i+1}} b_{i+1,k-1}(u), \quad k \geq 1 \quad (15)$$

基于曲线特性以及弯道场景的复杂多变性, 本文采用7个控制点控制换道曲线, 即  $n=6, k=3$ . 其中,  $P_0, P_1, P_5$  和  $P_6$  为固定控制点, 其位置相对固定, 用于确保车辆在换道开始和结束位置的安全过渡;  $P_2, P_3, P_4$  为灵活控制点, 其位置灵活可变, 用于调节路径形状使之与弯道相适应.

$P_0$  和  $P_6$  分别为换道路径的起始点和结束点, 则有:

$$\begin{cases} P_0 = S_i(t_{\text{start}}) \\ P_6 = S_j(t_{\text{end}}) \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $S_i$  为自身车道中心线,  $S_j$  为目标车道中心线,  $S_i(t_{\text{start}})$  和  $S_j(t_{\text{end}})$  分别为车辆换道开始和结束的位置.

$P_1$  和  $P_5$  分别为路径起始处和终点处的切线方向的控制点,  $P_2, P_3, P_4$  为曲线形状的控制点, 则可由以下函数定义得到:

$$\begin{cases} P_1 = S_i(t_{\text{start}} + \sigma) \\ P_2 = \omega_2 S_i(t_{\text{start}} + \Delta L) + (1 - \omega_2) S_j(t_{\text{start}} + \Delta L) \\ P_3 = \omega_3 S_i\left(\frac{t_{\text{start}} + t_{\text{end}}}{2}\right) + (1 - \omega_3) S_j\left(\frac{t_{\text{start}} + t_{\text{end}}}{2}\right) \\ P_4 = \omega_4 S_j(t_{\text{end}} - \Delta L) + (1 - \omega_4) S_i(t_{\text{end}} - \Delta L) \\ P_5 = S_j(t_{\text{end}} - \sigma) \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $\sigma$  和  $\Delta L$  为相应的纵向距离控制因子,  $\omega_2, \omega_3, \omega_4$  为  $P_2, P_3, P_4$  对应横向位置的权重因子.

### 2.3 换道路径评价模型

车辆换道路径曲线与对应的控制点密切相关, 通过调整可变控制点的位置即可形成多个不同的换道路径从而生成路径簇, 其中的最优路径将作为最终换道路径应用于车辆.

针对换道路径的评价方法, 首先是对路径的安全性评价, 其次才是对乘坐人员的舒适性评价. 对于路径安全性的评价, 最理想的状态是从换道开始

到结束的这段时间区间内, 车辆的换道路径区域与前车的行驶路径区域没有重合部分, 即两车的行驶区域完全独立, 此时两车不会发生碰撞, 此时路径可被认为是绝对安全路径, 则此路径根据其绝对安全性将会被优先纳入最优路径的候选曲线中. 定义两车在换道过程中的行驶路径为:

$$\begin{cases} p_m = [x_m(t), y_m(t)] \\ p_{ot} = [x_{ot}(t), y_{ot}(t)] \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $p_m$  为自身车辆换道路径,  $p_{ot}$  为前车行驶路径,  $t$  与式(1)和式(2)一样表示路径的映射函数的参数.

根据前式, 可求得  $p_{ot}$  中所有路径点所对应的点  $A, B, C, D$  的坐标, 其中任一路径点所对应的车辆轮廓四角坐标分别为  $(x_{otA}, y_{otA}), (x_{otB}, y_{otB}), (x_{otC}, y_{otC}), (x_{otD}, y_{otD})$ , 其到  $p_m$  的距离分别为  $d_{otA}, d_{otB}, d_{otC}, d_{otD}$  则点  $(x_{ot}, y_{ot})$  到  $p_m$  的距离为:

$$d_{ot} = \min\{d_{otA}, d_{otB}, d_{otC}, d_{otD}\} \quad (19)$$

定义两车行驶区域不发生重合的最小安全距离为  $d_{\text{safe}}$ , 当  $p_{ot}$  中所有对应的  $d_{ot}$  均满足  $d_{ot} \geq d_{\text{safe}}$  时, 认为两车行驶区域不发生重合.

若路径簇中有多个符合上述条件的路径时, 则对路径进行包含舒适度指标的综合评价, 相应的路径评价函数定义为:

$$\min J_{\text{as}} = \omega_s S_p + \omega_k \frac{\sum_{i=1}^n \kappa_i}{n} \quad (20)$$

式中,  $S_p$  为换道路径总长度,  $\kappa_i$  为任一路径点处的曲率,  $\omega_s$  和  $\omega_k$  分别为  $S_p$  和  $\kappa_i$  对应的权重. 根据式(20)即可筛选出最优换道路径.

当路径簇中无路径满足绝对安全性指标, 即  $\exists d_{ot}, d_{ot} < d_{\text{safe}}$  时, 路径被认为是相对安全路径, 此时路径  $p_m$  中的一部分会在一段时间内被  $p_{ot}$  中的一段路径占用, 占用时间长度为  $T_{ot}$ , 相应的路径评价函数定义为:

$$\min J_{\text{rt}} = \omega_s S_p + \omega_t T_{ot} \quad (21)$$

式中,  $\omega_t$  为  $T_{ot}$  在目标函数中所对应的权重.

当路径簇中的路径均为相对安全路径时, 则需根据式(21)筛选最优换道路径.

### 2.4 最优换道路径的安全速度规划

本文采用路径与速度解耦的方式进行规划, 基

于已得到的最优换道路径,本文采用建立速度时间(speed time, ST)图的方式求解.为保证求解效率,先针对ST图求得速度的初始解.设换道所需时间为 $T$ ,对ST图进行离散化处理,采样时间为 $\Delta t$ ,采样次数为 $n$ ,则其中一段采样区间内有:

$$\begin{cases} v_i = \frac{\Delta s_i}{\Delta t} \\ a_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{\Delta t} \\ j_i = \frac{a_i - a_{i-1}}{\Delta t} \end{cases} \quad (22)$$

式中,  $\Delta s_i$  为  $\Delta t$  时间内车辆沿路径所行驶的距离,  $v_i$  为对应采样区间的速度,  $a_i$  为加速度,  $j_i$  为加加速度.

由于车辆在弯道中进行换道,故而需要根据道路的实际情况对车辆速度进行约束,以此保证车辆能够安全过弯,因此求速度初始解时应满足以下约束.

$$\begin{cases} v_i \leq v_{\max} \\ a_i \leq a_{\max} \\ j_i \leq j_{\max} \\ v_{\max} = \sqrt{\frac{a_c}{\kappa_{\max}}} \\ s_i \leq s_{i,\text{lb}} \vee s_i \geq s_{i,\text{ub}} \end{cases} \quad (23)$$

式中,  $v_{\max}$  为允许的最大速度,  $a_{\max}$  为允许的最大加速度,  $j_{\max}$  为允许的最大加加速度,  $a_c$  为当前弯道能够提供的最大向心加速度,  $\kappa_{\max}$  为换道路径所在弯道中的最大曲率,  $s_{i,\text{lb}}$  和  $s_{i,\text{ub}}$  分别为ST图中  $s_i$  处对应的障碍物下边界和上边界.

求解初始解的代价函数可定义为:

$$\text{cost}_f = \sum \omega_v |v_i| + \sum \omega_a |a_i| + \sum \omega_j |j_i| \quad (24)$$

式中,  $\omega_v$ 、 $\omega_a$ 、 $\omega_j$  为速度、加速度、加加速度所对应的权重值.

通过上述约束及对应的代价函数,可求得相应的初始解

$$\text{solve}_f = \{(t_1, s_1), (t_2, s_2), \dots, (t_n, s_n)\} \quad (25)$$

为保证速度的最终解中的速度及加速度连续变化,基于初始解集合  $\text{solve}_f$  采用五次多项式曲线在ST图中对初始解进行平滑处理.其中,第  $i$  段的ST曲线可设为:

$$s_i(t) = a_{i,0} + a_{i,1}t + a_{i,2}t^2 + a_{i,3}t^3 + a_{i,4}t^4 + a_{i,5}t^5 \quad (26)$$

则对应的速度和加速度如下:

$$\begin{cases} v_i = \dot{s}_i(t) \\ a_i = \ddot{s}_i(t) \end{cases} \quad (27)$$

根据ST曲线的始末值以及相邻的  $s_i$  段连接点处的关系,可得到以下约束:

$$\begin{cases} s_1(0) = 0, & v_1(0) = v_0 \\ a_1(0) = a_0, & s_i(t_i) = s_{i+1}(t_{i+1}) \\ v_i(t_i) = v_{i+1}(t_{i+1}), & a_i(t_i) = a_{i+1}(t_{i+1}) \\ v_{\min} \leq v_i(t_i) \leq v_{\max}, & a_{\min} \leq a_i(t_i) \leq a_{\max} \end{cases} \quad (28)$$

为保证最终解的有效性,对初始解进行平滑的曲线应尽可能贴近初始解,由此为平滑曲线构建以下代价函数:

$$\text{cost}_s = \sum_{i=1}^n \left[ \omega_a \int_{t_{i-1}}^{t_i} (s_i - s_D)^2 dt + \omega_\beta \int_{t_{i-1}}^{t_i} a_i^2(t) dt \right] \quad (29)$$

式中,  $s_D$  为初始解中对应的  $s$  值,  $\omega_a$  和  $\omega_\beta$  为相应的权重值.

基于上述约束和代价函数特点,此时求解最终的平滑ST曲线可转化为凸优化问题,可通过凸优化求解方法求解出  $s_i(t)$  函数中的系数,最终得到平滑的ST曲线,即完成了对最优换道路径的速度求解.

### 3 仿真实验

本研究基于 Matlab 搭建道路环境和车辆模型,搭建持续弯道行驶场景下主动换道超车模型并设置两种工况对换道超车性能进行仿真验证,工况设置及对应性能结果分析如下.

(1)工况一:将道路设置为总宽度为 8 m 的双车道,主车以 20 m/s 的车速在后方行驶,前车以 17 m/s 的车速在前方行驶,两车之间的相对距离随时间逐渐缩小,直至主车触发换道行为.触发换道行为后对主车进行换道路径规划,通过混合控制点方法调节换道曲线,生成满足绝对安全条件的自适应换道路径,将其作为当前条件下的最优换道路径,主车换道超车开始时刻的路径规划结果如图 4 所示;换道路径所在道路的曲率变化及相应的安全约束速度如图 5 所示;基于该路径和安全速度等约束建立 ST 图并进行速度求解,其结果如图 6 和图 7 所示.

图 4 中对比了当前工况下的自适应换道路径

和普通非自适应换道路径,其中非自适应换道路径未采用式(17)中的控制点调节机制,在道路中入弯时机晚且与前车有碰撞风险,而本文方法生成的自适应换道路径则选择提前入弯并及时与前车拉开横向距离以避免碰撞,从而降低自车换道超车的风险;图 5 展示了由自适应换道路径构成的最优换道路径所在道路的曲率变化以及相应的最大安全速度,车辆的实际速度应在最大安全速度允许的范围之内;图 6 中的曲线分别为基于路径的速度初始解和优化解结果,同时说明此时的换道路径为绝对安全路径. 图 7 为本文采用的安全速度规划和普通速度规划分别生成的速度及加速度变化曲线,两种方法下的车辆的速度和加速度均连续变化,与图 6 对比可知,两种方法下的速度均在道路允许的安全范围之内,但普通方法下的加速度变化在整个超车过程中呈现波动趋势,超车时的车辆动力波动变化,不符合常规预期,可能令乘坐人员感到不适;而本文方法下的加速度则在超车过程中平稳变化,超车过程中车辆动力变化趋势明显、符合常规预期,能够有效避免乘坐人员的不适感且整体符合人类

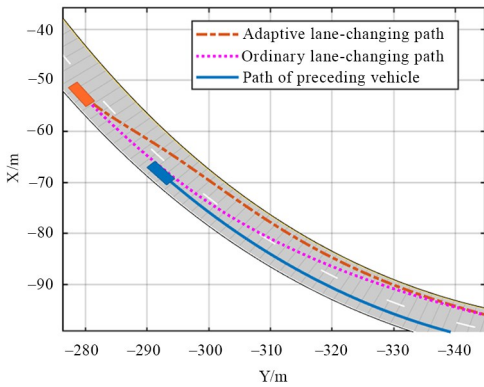


图 4 换道路径规划对比(初始时刻)  
Fig. 4 Comparison of lane-changing path planning (initial moment)

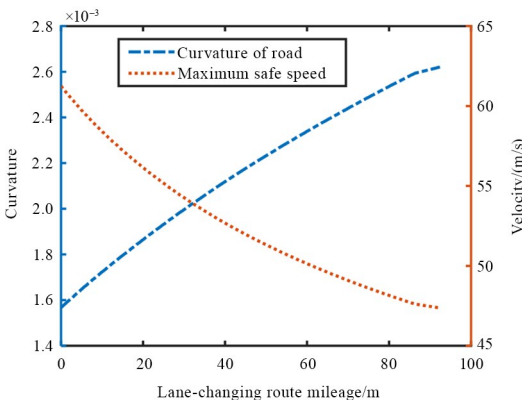


图 5 换道路径所在道路的曲率变化及相应安全速度  
Fig. 5 Curvature change and safe speed of the alternative route's road

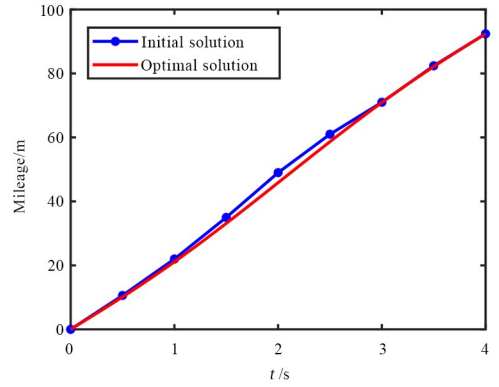


图 6 换道路径的速度解  
Fig. 6 Speed resolution for the alternate route

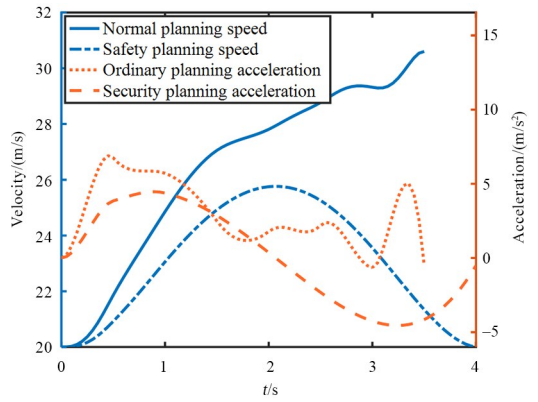


图 7 主车换道超车时的速度及加速度对比  
Fig. 7 Speed and acceleration comparison during the host vehicle's lane change and overtaking maneuvers

驾驶习惯. 上述仿真结果说明本文方法在该工况下主车能够在符合人类驾驶习惯的同时安全高效地完成主动换道超车任务.

(2) 工况二: 主车以 20 m/s 的车速行驶, 前车以 15 m/s 的车速行驶, 但由于特定的原因, 使得主车触发换道行为时两车之间的相对距离较小, 无法为主车生成满足绝对安全条件的换道路径, 仅能够生成满足相对安全条件的换道路径. 因此, 在进行路径规划时, 将在路径簇中根据式(21)的  $J_{ri}$  指标选择满足相对安全条件的自适应换道路径作为当前的最优换道路径. 主车换道超车开始时刻的路径规划结果如图 8 所示; 换道路径所在道路的曲率变化及相应的安全约束速度如图 9 所示; 基于该路径和安全速度等约束建立 ST 图并进行速度求解, 其结果如图 10 和图 11 所示.

图 8 所示场景中, 自适应换道路径与普通换道路径, 均与前车有碰撞风险, 但相比于普通换道路径, 本文方法生成的自适应换道路径则恰当地选择了延后入弯, 进而及时与前车拉开横向距离, 从而保证超车过程的安全; 图 9 为此时最佳换道路径所

在道路的曲率变化以及相应的最大安全速度,车辆的实际速度应在最大安全速度允许的范围之内;图10中曲线分别为基于路径的速度初始解和优化解结果,相对于图6,存在换道路径被前车占用的区域,即图中的ST区域,说明两车存在碰撞风险,此时需要进行合理的速度规划以规避碰撞风险,故图10中展示的结果为主车延后入弯的速度解.图11为本文采用的安全速度规划和普通速度规划分别生成的速度及加速度变化曲线,两种方法下车辆的

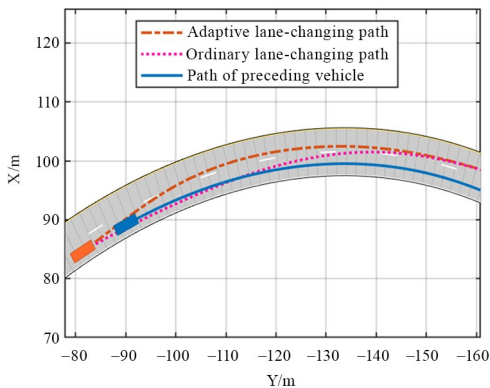


图8 换道路径规划对比(初始时刻)

Fig. 8 Comparison of lane-changing path planning (initial moment)

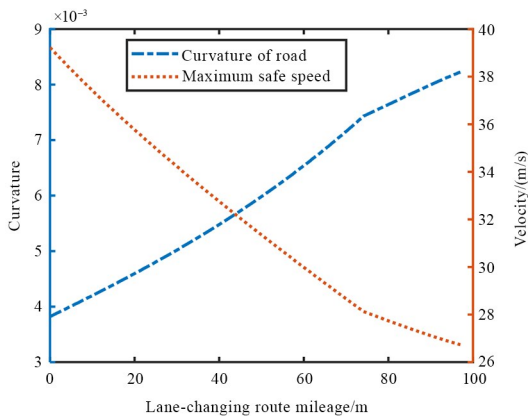


图9 换道路径所在道路的曲率变化及相应安全速度

Fig. 9 Curvature change and safe speed of the alternative route's road

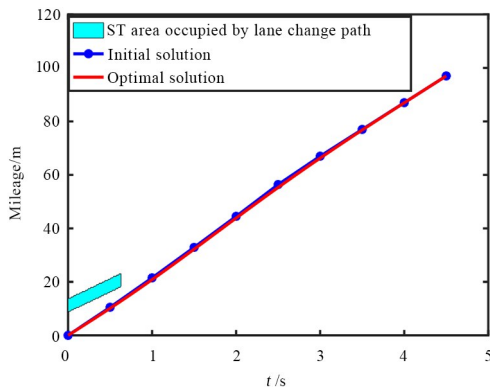


图10 换道路径的速度解

Fig. 10 Speed resolution for the alternate route

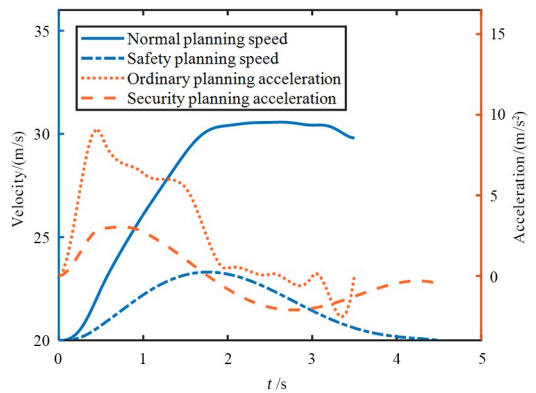


图11 主车换道超车时的速度及加速度对比

Fig. 11 Speed and acceleration comparison during the host vehicle's lane change and overtaking maneuvers

速度和加速度均连续变化,与图9对比可知,本文方法下生成的速度在道路允许的安全范围之内,而普通方法下的速度则超出当前弯道所允许的最大安全速度,超车过程中可能发生危险;同时,普通方法下的加速度变化与上一工况类似,在超车过程中呈现波动趋势,本文方法下的加速度则在超车过程中平稳变化,体现本文方法在不同工况下的稳定性.上述仿真结果说明本文方法在该工况下主车依旧能够合理高效地完成主动换道超车任务,保证超车过程的安全.

由仿真结果可知,本文提出的在持续弯道行驶场景下主动换道超车的路径规划方法能够有效地在不同情形的弯道场景下完成对车辆超车的路径规划和速度调控,使速度符合道路安全速度等约束,同时根据图7和图11所示速度曲线可知,主车在过程中先进行加速当超过车辆后逐渐减速回到原速度,符合人类驾驶特性,最终保证车辆在弯道场景下能够安全地完成换道超车任务,符合当前智能汽车高效、智能、安全的需求.

## 4 结论

本文针对智能汽车在结构化道路中的换道问题,提出持续弯道行驶场景下主动换道超车的路径规划方法,过程中采用路径-速度解耦的方式进行规划并通过仿真验证方法的可行性,本文主要研究结果如下:

(1)针对弯道场景的复杂多变性,提出自适应换道路径生成方法,通过灵活和固定控制点相结合的方式调节换道曲线生成路径簇,为车辆生成能够有效适应不同的弯道场景的换道路径.

(2)针对生成的路径簇,提出相对安全性路径

和绝对安全性路径的评价方法,并设计出相应的路径评价函数,以此为车辆筛选出符合弯道特征的最优换道路径。

(3)针对速度规划,构建融合道路特征以及安全舒适性等多种因素的目标函数,实现对车辆换道过程中行驶速度的安全求解,保证车辆行驶安全。

本文提出的方法最终生成的路径解和速度解符合弯道场景需求以及人类的驾驶特点,保证了换道超车过程中的行驶安全和效率。综上所述,本研究为智能汽车在道路上的安全行驶提供了可靠的解决方案,为智能汽车在实际道路行驶中提供更加智能、安全、舒适的驾驶体验,研究成果对智能汽车技术发展和行业应用具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 公路“十四五”发展规划[EB/OL]. [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/ji-gou/zhghs/202204/t20220407\\_3649836.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/ji-gou/zhghs/202204/t20220407_3649836.html). Ministry of Transport of the People's Republic of China. The 14th five-year plan for highway development[EB/OL]. [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/ji-gou/zhghs/202204/t20220407\\_3649836.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/ji-gou/zhghs/202204/t20220407_3649836.html). (in Chinese)
- [2] 张耀丹. 无人驾驶汽车的现状及发展趋势[J]. 汽车实用技术, 2018, 43(6): 10, 15.  
ZHANG Y D. The current situation and tendency of driverless cars [J]. Automobile Technology, 2018, 43(6): 10, 15. (in Chinese)
- [3] ZHAO D, LAM H, PENG H E, et al. Accelerated evaluation of automated vehicles safety in lane-change scenarios based on importance sampling techniques [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(3): 595—607.
- [4] 谭会生, 廖雯, 贺迅宇. 一种改进蚁群算法的移动机器人快速路径规划算法研究[J]. 动力学与控制学报, 2019, 17(2): 104—111.  
TAN H S, LIAO W, HE X Y. A rapid path planning algorithm for mobile robot with improved ant colony algorithm [J]. Journal of Dynamics and Control, 2019, 17(2): 104—111. (in Chinese)
- [5] LIAO T J, CHEN F, WU Y T, et al. Research on path planning with the integration of adaptive A-star algorithm and improved dynamic window approach [J]. Electronics, 2024, 13(2): 595—607.
- [6] 黄斌, 俞凯文, 周柏李, 等. 基于改进快速行进平方法的多移动机器人聚集路径规划与控制[J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(12): 96—106.  
HUANG B, YU K W, ZHOU B L, et al. Gathering path planning and control of multi-mobile robots based on improved fast marching square method [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(12): 96—106. (in Chinese)
- [7] 温惠英, 林译峰, 吴昊书, 等. 基于城市道路交通环境演变的 ECEA 路径规划算法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(10): 1—10.  
WEN H Y, LIN Y F, WU H S, et al. Extended co-evolutionary algorithm for path planning based on the urban traffic environment evolution [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(10): 1—10. (in Chinese)
- [8] 杨威, 周义棚. 基于 LSTM 网络预测智能车辆变道的路径规划研究[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(7): 144—149.  
YANG W, ZHOU Y P. A path planning method of intelligent vehicle lane change prediction based on LSTM network [J]. Intelligent Computer and Applications, 2023, 13(7): 144—149. (in Chinese)
- [9] 宋丽君, 周紫瑜, 李云龙, 等. 改进 Q-Learning 的路径规划算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2024, 45(4): 823—829.  
SONG L J, ZHOU Z Y, LI Y L, et al. Research on path planning algorithm based on improved Q-learning algorithm [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2024, 45(4): 823—829. (in Chinese)
- [10] 梁超. 基于深度学习和 A\* 算法的智能车路径规划研究[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(15): 87—94.  
LIANG C. Research on intelligent vehicle path planning based on deep learning and A\* algorithm [J]. Automobile Applied Technology, 2023, 48(15): 87—94. (in Chinese)
- [11] 殷笑天, 杨丽英, 刘干, 等. 融合 Q-learning 的 A\* 预引导蚁群路径规划算法[J]. 传感器与微系统, 2025, 44(8): 143—147, 153.  
YIN X T, YANG L Y, LIU G, et al. A\* pre-guided ant colony path planning algorithm integrated with Q-learning [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2025, 44(8): 143—147, 153. (in Chinese)
- [12] 张家旭, 王晨, 赵健. 基于改进人工势场法的汽车弯道超车路径规划与跟踪控制[J]. 汽车工程,

- 2021, 43(4): 546–552.
- ZHANG J X, WANG C, ZHAO J. Path planning and tracking control for vehicle overtaking on curve based on modified artificial potential field method [J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(4): 546–552. (in Chinese)
- [13] 张家旭, 周时莹, 施正堂, 等. 采用滑模条件积分的无人驾驶汽车弯道超车路径规划与跟踪控制[J]. *控制理论与应用*, 2021, 38(2): 197–205.
- ZHANG J X, ZHOU S Y, SHI Z T, et al. Path planning and tracking control for corner overtaking of driverless vehicle using sliding mode technique with conditional integrators [J]. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(2): 197–205. (in Chinese)
- [14] 张家旭, 周时莹, 赵健, 等. 基于高斯伪谱法的汽车弯道超车路径规划与跟踪控制[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2021, 54(4): 397–404.
- ZHANG J X, ZHOU S Y, ZHAO J, et al. Path planning and tracking control for corner overtaking of vehicle based on Gauss pseudo-spectral method [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2021, 54(4): 397–404. (in Chinese)
- [15] 张志勇, 邱国梁, 黄彩霞, 等. 基于改进人工势场的自动驾驶汽车弯道超车动态路径规划[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(12): 268–278.
- ZHANG Z Y, QIU G L, HUANG C X, et al. Dynamic path planning for self-driving cars overtaking on curves based on improved artificial potential field [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(12): 268–278. (in Chinese)
- [16] 李传友. 高速公路环境下智能车辆自动换道研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- LI C Y. Research on intelligent vehicle automatic lane change in expressway environment [D]. Xi'an: Changan University, 2019. (in Chinese)
- [17] 侯德藻, 刘刚, 高锋, 等. 新型汽车主动避撞安全距离模型[J]. *汽车工程*, 2005, 27(2): 186–190, 199.
- HOU D Z, LIU G, GAO F, et al. A new safety distance model for vehicle collision avoidance [J]. *Automotive Engineering*, 2005, 27(2): 186–190, 199. (in Chinese)
- [18] 柴松, 马社祥, 李啸. 基于均匀 B 样条曲线的移动小车路径规划方法[J]. *计算机应用与软件*, 2023, 40(10): 76–82.
- CHAI S, MA S X, LI X. Path planning method of mobile car based on uniform b-splines curve [J]. *Computer Applications and Software*, 2023, 40(10): 76–82. (in Chinese)