

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.03.001

智能汽车纵横向主动避撞控制算法研究

王新庆, 王继荣, 杨振宇, 崔俊国, 邹宇鹏

(中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要:针对目前智能汽车主动避撞系统存在的避撞轨迹规划不合理、轨迹跟踪精度不足及车辆稳定性差的问题,文章设计一种基于五次多项式的轨迹规划算法和一种基于模型预测控制理论的轨迹跟踪控制算法。在采用纵向避撞方式时,基于牛顿运动定律规划出纵向参考速度;在采用横向避撞方式时,基于五次多项式规划出横向参考位置、参考横摆角;基于考虑轮胎非线性工作区的七自由度车辆动力学模型,考虑车辆横摆稳定性和侧倾稳定性,将车辆纵向速度、横向位置、横摆角作为输入量。在 PreScan/CarSim/Simulink 中搭建联合仿真平台进行仿真验证,结果证明了所设计的避撞轨迹规划算法的合理性、轨迹跟踪控制算法跟踪精度的有效性以及避撞过程中车辆的操纵稳定性。

关键词:避撞轨迹规划;避撞轨迹跟踪;五次多项式;模型预测控制;实况仿真

中图分类号:TP273;U463.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)03-0289-08

Research on active collision avoidance control algorithm for intelligent vehicles in longitudinal and lateral directions

WANG Xinqing, WANG Jirong, YANG Zhenyu, CUI Junguo, ZOU Yupeng

(School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Aiming at the problems of unreasonable collision avoidance trajectory planning, insufficient trajectory tracking accuracy and poor vehicle stability in the current intelligent vehicle active collision avoidance system, a trajectory planning algorithm based on quintic polynomial and a trajectory tracking control algorithm based on model predictive control theory were designed. When using the longitudinal collision avoidance method, the longitudinal reference velocity is planned based on Newton's laws of motion. When using the lateral collision avoidance method, the lateral reference position and reference yaw angle are planned based on a quintic polynomial. Based on the seven-degree-of-freedom vehicle dynamics model considering the nonlinear working area of tires, the vehicle yaw stability and roll stability are considered, and the longitudinal speed, lateral position and yaw angle of the vehicle are taken as inputs. A joint simulation platform was built in PreScan/CarSim/Simulink to verify the rationality of the designed collision avoidance trajectory planning algorithm, the effectiveness of tracking accuracy of trajectory tracking control algorithm, and the vehicle handling stability during collision avoidance.

Key words: collision avoidance trajectory planning; collision avoidance trajectory tracking; quintic polynomial; model predictive control; real-world simulation

收稿日期:2023-05-18; **修回日期:**2023-07-12

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB3401400);山东省高端制造装备重大科技创新工程资助项目(2017CXGC0902)和山东省自然科学基金资助项目(ZR2022MF291;ZR2024ME244)

作者简介:王新庆(1982—),男,山东莱芜人,博士,中国石油大学(华东)副教授,硕士生导师。

0 引言

汽车给人类和社会的发展带来巨大的便利,但是严重的交通事故给人类的生命和财产安全带来巨大威胁,并且严重影响道路通行效率^[1]。与此同时,随着传感技术、车载计算机技术和人工智能技术等高新技术的快速发展,以智能化、电动化、网联化、共享化为代表的“新四化”成为了汽车工业前沿技术的发展趋势^[2]。汽车智能化是当今科研院校和汽车企业的研究热点,使汽车逐步具备高效的传感感知^[3]、决策规划^[4]、控制执行^[5]等功能,实现安全、舒适、节能、高效行驶的优化目标,在远期实现完全无人驾驶的目标^[6]。

轨迹规划算法需要保证所规划轨迹的合理性,轨迹跟踪算法则需要保证跟踪精度和车辆的操纵稳定性。

轨迹规划方法主要有基于搜索的方法^[7]、基于函数拟合的方法^[8]、基于优化的方法^[9]。基于搜索的方法包括基于图搜索的方法和基于采样的方法,其规划出的轨迹平滑度和实时性都较差,主要应用于室内移动机器人的轨迹规划和低等级智能汽车的全局路径规划。基于函数拟合的方法中拟合函数主要包括样条曲线、多项式曲线、三角函数、Sigmoid 函数、圆弧曲线等,该方法的实时性和曲线平滑度较好,适用于智能汽车的局部轨迹规划。基于优化的方法主要包括约束优化算法和基于学习的算法:约束优化算法可以规划出精度很高的参考轨迹,但计算复杂度高、实时性差;基于学习的算法是目前各个领域的研究热点,但其需要大量的实车数据并且可解释性差。

轨迹跟踪控制技术主要分为基于经典控制理论的技术和基于现代控制理论的技术。基于经典控制理论的轨迹跟踪技术适用于室内移动机器人等低速移动平台的轨迹跟踪,无法满足现代智能汽车对于轨迹跟踪精度和操纵稳定性的要求。最优控制、滑膜控制、自适应控制、模糊控制、模型预测控制^[10]、神经网络控制^[11]等都是基于现代控制理论的轨迹跟踪控制方法。最优控制算法^[12]能够考虑到车辆的动力学性能且最优解可以提前离线计算出,但是对于自车和环境参数的需求度较高、对驾驶道路变化较敏感;模型预测控制算法^[13]可以处理多约束的优化问题,能保证较高的控制精度,同时采用高精度的系统动力学模型,以保证很高的操纵稳定性。

本文针对高速工况下的智能汽车纵横向主动

避撞系统,进行轨迹规划的合理性、轨迹跟踪的控制精度、操纵稳定性等问题的算法研究,并基于联合仿真平台进行验证。

1 避撞轨迹规划算法

采用纵向避撞时,控制算法需要获取参考的纵向速度;采用横向避撞时,控制算法需要获取参考的横向位置、横摆角;采用纵横向联合避撞时,控制算法需要获取参考的纵向速度、横向位置、横摆角。因此,在避撞轨迹规划阶段,需要明确这些轨迹跟踪控制算法所需的参考量。

轨迹规划模块求取的参考轨迹是一个个离散的轨迹点,若直接跟踪这些离散的轨迹点,则会造成车辆的速度、加速度、前轮转角出现突变,因此需要先将轨迹点拟合成平滑的曲线,再反求出轨迹跟踪控制算法所需的参考变量。

在采用纵向避撞方式时,需要规划出纵向参考速度。假设制动过程中的加速度是恒定的,则根据牛顿运动定律可得纵向参考速度为:

$$v_{\text{ref}} = v_0 - at \quad (1)$$

其中: v_0 为初始纵向速度; a 为制动加速度,由碰撞危险等级决定。

在采用横向避撞方式时,纵向速度不变。为了保证横向速度及加速度连续,本文采用五次多项式^[5]曲线进行参考轨迹点的拟合。五次多项式曲线可以表示为:

$$y = \mathbf{A}^T \mathbf{X} \quad (2)$$

其中: $\mathbf{A}^T = [a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5]$; $\mathbf{X} = [1 \ x \ x^2 \ x^3 \ x^4 \ x^5]^T$, x 为车辆纵向坐标; y 为车辆横向坐标。

在起点 (x_0, y_0) 处,车辆的横向坐标、横向速度及轨迹曲率都为 0;在终点 (x_T, y_T) 处,车辆的横向速度及轨迹曲率为 0,横向坐标为 y_T ,即

$$\begin{aligned} y(x_0) &= 0, \dot{y}(x_0) = 0, K(x_0) = 0; \\ y(x_T) &= y_T, \dot{y}(x_T) = 0, K(x_T) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

将式(3)中的 6 个子式分别代入式(2),可以求得系数矩阵 \mathbf{A} 为:

$$\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 10 \frac{y_T}{x_T^3} & -15 \frac{y_T}{x_T^4} & 6 \frac{y_T}{x_T^5} \end{bmatrix} \quad (4)$$

则拟合后的参考轨迹曲线可表示为:

$$y(x) = 10y_T \left(\frac{x}{x_T}\right)^3 - 15y_T \left(\frac{x}{x_T}\right)^4 + 6y_T \left(\frac{x}{x_T}\right)^5 \quad (5)$$

$$y'(x) = \frac{30y_T}{x_T^3}x^2 - \frac{60y_T}{x_T^4}x^3 + \frac{30y_T}{x_T^5}x^4 \quad (6)$$

在求解横摆角时需要采用点质量车辆动力学

模型,即不考虑车辆的外形大小,则所需的参考横摆角为:

$$\theta = \arctan \frac{y'(x)}{v_{\text{ref}}} \quad (7)$$

综上,根据轨迹跟踪控制算法对于参考输入值的需求,综合纵向参考速度以及横向避撞轨迹点的拟合后,避撞轨迹规划模块输出的参考轨迹向量 \mathbf{R}_{ref} 为:

$$\mathbf{R}_{\text{ref}} = \begin{bmatrix} v_{\text{ref}} \\ y(x) \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 - at \\ 10y_T \left(\frac{x}{x_T}\right)^3 - 15y_T \left(\frac{x}{x_T}\right)^4 + 6y_T \left(\frac{x}{x_T}\right)^5 \\ \arctan \frac{y'}{v_{\text{ref}}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

2 避撞轨迹跟踪控制算法

本节基于模型预测控制理论,将 \mathbf{R}_{ref} 参考轨迹作为控制算法的输入量,纵向加速度和前轮转角作为控制算法的输出量,设计考虑操纵稳定性的避撞轨迹跟踪控制算法。

2.1 构建车辆动力学模型

智能汽车在高速工况下跟踪期望轨迹时需要考虑自身的横摆稳定性和侧倾稳定性,因此本文选择考虑车辆纵向、横向、横摆以及4个车轮转动的七自由度车辆动力学模型。

构建车辆动力学模型时进行以下合理化假设:① 假设车辆行驶路面非常平坦,即忽略车辆的垂向运动;② 假设车辆是刚性的;③ 忽略空气动力对车辆的影响;④ 忽略横向载荷移动的影响;⑤ 忽略纵、横向轮胎力的耦合关系。

2.1.1 车体动力学

建立七自由度车辆动力学双轨模型,如图1所示。OXYZ坐标系为惯性坐标系,以车辆质心为坐标原点的 $oxyz$ 坐标系为车辆坐标系。 v_x 、 v_y 、 ω 分别为车辆坐标系下的纵向速度、横向速度和横摆角速度; L_f 、 L_r 分别为车辆重心到前、后轴的距离; L 为轮距; δ 、 β 、 θ 分别为前轮转角、车辆侧偏角和车辆横摆角; m 、 I_{zz} 分别为车辆的总质量和横摆转动惯量; (X, Y) 为车辆质心在惯性坐标系中的坐标; F_{xfl} 、 F_{xfr} 、 F_{xrl} 、 F_{xrr} 分别为左前轮、右前轮、左后轮、右后轮受到的纵向力; F_{yfl} 、 F_{yfr} 、 F_{yrl} 、 F_{yrr} 分别为左前轮、右前轮、左后轮、右后轮受到的横向力; α_{fl} 、 α_{fr} 、 α_{rl} 、 α_{rr} 分别为左前轮、右前轮、左

后轮、右后轮的轮胎侧偏角。

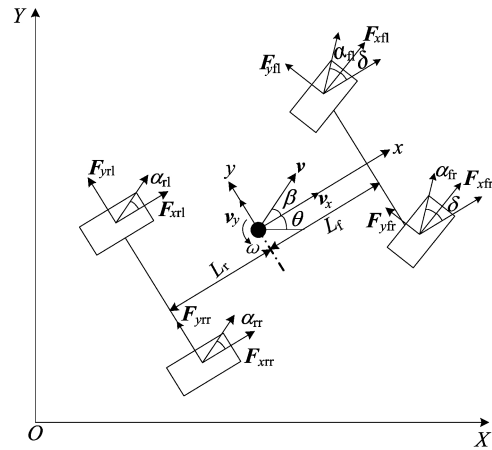


图1 车辆七自由度双轨模型

根据牛顿第二定律,可得车辆坐标系下的动力学方程为:

$$\begin{aligned} m(\dot{v}_x - v_y\omega) &= F_{xfl} \cos \delta - F_{yfl} \sin \delta + \\ &F_{xfr} \cos \delta - F_{yfr} \sin \delta + F_{xrl} + F_{xrr}, \\ m(\dot{v}_y + v_x\omega) &= F_{xfl} \sin \delta + F_{yfl} \cos \delta + \\ &F_{xfr} \sin \delta + F_{yfr} \cos \delta + F_{yrl} + F_{yrr}, \\ I_{zz}\dot{\omega} &= (F_{xfr} \cos \delta - F_{yfr} \sin \delta + F_{xrr} - F_{xfl} \cos \delta + \\ &F_{yfl} \sin \delta - F_{xrl}) \frac{L}{2} + (F_{xfl} \sin \delta + F_{yfl} \cos \delta + \\ &F_{xfr} \sin \delta + F_{yfr} \cos \delta)L_f - (F_{yrl} + F_{yrr})L \end{aligned} \quad (9)$$

根据惯性坐标系和车辆坐标系之间的转化关系可得车辆在惯性坐标系下的运动方程为:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega, \\ \dot{X} = v_x \cos \theta - v_y \sin \theta, \\ \dot{Y} = v_x \sin \theta + v_y \cos \theta \end{cases} \quad (10)$$

2.1.2 车轮动力学

除了空气动力和重力,其余影响车辆操纵稳定性的力都由轮胎产生。由于轮胎结构复杂,动力学性能呈非线性,选择符合实际又便于使用的轮胎模型是建立车辆动力学模型的关键。轮胎通常被简化成一系列理想化、具有给定物理特性的径向排列的弹性单元体。在科学研究和工程实践中最常用的是郭孔辉院士提出的幂指数统一轮胎模型和 Pacejka 教授提出的“魔术公式”轮胎模型。

本文选择 Pacejka 教授提出的“魔术公式”轮胎模型。“魔术公式”的一般表达式为:

$$Y(x) = D \sin \{ C \arctan [Bx - E(Bx - \arctan(Bx))] \} \quad (11)$$

其中:系数 B 为刚度因子; C 为形状因子; D 为峰值因子; E 为曲率因子; Y 为输出变量,可以是纵向力或横向力; x 为输入变量,可以是侧偏角或纵向滑移率。

不同型号轮胎的侧偏角与侧向力之间的关系曲线如图 2 所示。

从图 2 可以看出,当侧偏角较小时侧偏角与侧向力近似呈线性函数关系。由于本文的研究对象是高速工况下的轨迹跟踪问题,不仅需要考虑线性工作区的轮胎纵、横向力,还需要考虑非线性区情况。为了提高系统的实时性,不考虑纵、横向力的耦合关系。

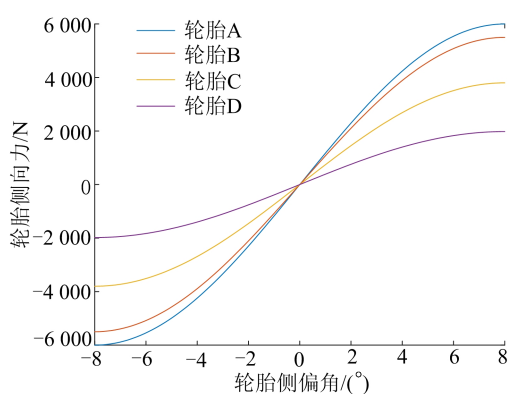


图 2 不同类型轮胎侧偏角与侧向力之间的关系

2.1.3 车辆动力学

根据式(9)~(11)可得非线性车辆动力学模型的紧凑型微分表达式为:

$$\begin{cases} \dot{\xi}(t) = f(\xi(t), u(t)), \\ \eta(t) = h(\xi(t)) \end{cases} \quad (12)$$

其中:状态向量 $\xi = [\dot{y} \quad \dot{x} \quad \theta \quad \dot{\theta} \quad Y \quad X]^T$; 控制变量 $u = \delta_i$; 输出量 $\eta = [Y \quad X]^T$ 。

2.2 预测模型

式(12)所示的模型为非线性模型,将其作为预测模型虽然可以保证较高的控制精度,但是系统的实时性太差,因此还需要对其进行线性化处理,将线性化后的模型作为预测模型。将非线性模型在参考点附近展开成泰勒级数,略去高阶项,得到如下线性化模型:

$$\begin{cases} \dot{\xi}(t) = \mathbf{A}(t)\xi(t) + \mathbf{B}(t)u(t), \\ \eta(t) = \mathbf{C}(t)\xi(t) \end{cases} \quad (13)$$

除了对模型进行线性化处理,还需要对线性化后的模型进行离散化处理。

本文采用一阶差商法对模型进行离散化处理,得到如下离散化模型:

$$\begin{cases} \xi(k+1|t) = \mathbf{A}_{k,t}\xi(k|t) + \mathbf{B}_{k,t}u(k|t), \\ \eta(k|t) = \mathbf{C}_{k,t}\xi(k|t) \end{cases} \quad (14)$$

其中: $\mathbf{A}_{k,t} = \mathbf{I} + \mathbf{T}\mathbf{A}(t)$, \mathbf{I} 为单位矩阵, \mathbf{T} 为系统采样时间; $\mathbf{B}_{k,t} = \mathbf{T}\mathbf{B}(t)$; $\mathbf{C}_{k,t} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

为了方便数据处理及后期的优化求解,需要构建如下新的状态向量:

$$\tilde{\xi}(k|t) = \begin{bmatrix} \xi(k|t) \\ u(k-1|t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

则新的状态空间表达式如下:

$$\begin{cases} \tilde{\xi}(k+1|t) = \tilde{\mathbf{A}}_{k,t}\tilde{\xi}(k|t) + \tilde{\mathbf{B}}_{k,t}\Delta u(k|t), \\ \eta(k|t) = \tilde{\mathbf{C}}_{k,t}\tilde{\xi}(k|t); \end{cases}$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_{k,t} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{k,t} & \mathbf{B}_{k,t} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}; \tilde{\mathbf{B}}_{k,t} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{k,t} \\ \mathbf{1} \end{bmatrix};$$

$$\tilde{\mathbf{C}}_{k,t} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中, $\Delta u(k|t)$ 为控制增量。

本文中模型预测控制算法的预测步长为 N_p , 控制步长为 N_c 。通常情况下,跟踪控制算法的控制步长不会超过算法的预测步长,即 $N_c \leq N_p$ 。结合新的状态方程可得系统每一步的预测状态量及预测输出量为:

$$\begin{aligned} \tilde{\xi}(k+N_p) &= \tilde{\mathbf{A}}_{k,t}^{N_p} \tilde{\xi}(k) + \tilde{\mathbf{A}}_{k,t}^{N_p-1} \tilde{\mathbf{B}}_{k,t} \Delta u(k) + \\ &\tilde{\mathbf{A}}_{k,t}^{N_p-2} \tilde{\mathbf{B}}_{k,t} \Delta u(k+1) + \dots + \tilde{\mathbf{B}}_{k,t} \Delta u(k+N_c-1), \\ \eta(k+N_p) &= \tilde{\mathbf{C}}_{k,t} \tilde{\mathbf{A}}_{k,t}^{N_p} \tilde{\xi}(k) + \tilde{\mathbf{C}}_{k,t} \tilde{\mathbf{A}}_{k,t}^{N_p-1} \tilde{\mathbf{B}}_{k,t} \Delta u(k) + \\ &\tilde{\mathbf{C}}_{k,t} \tilde{\mathbf{A}}_{k,t}^{N_p-2} \tilde{\mathbf{B}}_{k,t} \Delta u(k+1) + \dots + \\ &\tilde{\mathbf{C}}_{k,t} \tilde{\mathbf{A}}_{k,t}^{N_p-N_c-1} \tilde{\mathbf{B}}_{k,t} \Delta u(k+N_c-1) \end{aligned} \quad (17)$$

2.3 目标函数及约束条件

2.3.1 目标函数

在满足系统实时性要求的前提下,目标函数在保证轨迹跟踪精度的同时,还需要保证控制算法有解,可采用如下形式的目标函数:

$$J(\tilde{\xi}(t), u(t-1), \Delta U(t), \epsilon) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta(t+i|t) - \eta_{\text{ref}}(t+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta u(t+i|t)\|_R^2 + \rho \epsilon^2 \quad (18)$$

其中: $\Delta U(t)$ 为控制时域内的控制增量; ϵ 为松弛因子; \mathbf{Q} , \mathbf{R} 分别为输出量、控制增量权重矩阵; ρ 为松弛因子权重。

目标函数第 1 部分描述的是系统对期望轨迹的跟踪效果,第 2 部分描述的是对控制增量的约束,第 3 部分是防止出现无解的情况。

2.3.2 约束条件

在设置控制算法的约束条件时,首先要考虑基本的控制量及控制增量约束,即

$$\begin{aligned} u_{\min}(t+i) &\leq u(t+i) \leq u_{\max}(t+i), \\ \Delta u_{\min}(t+i) &\leq \Delta u(t+i) \leq \Delta u_{\max}(t+i), \\ i &= 0, 1, 2, \dots, N_c - 1 \end{aligned} \quad (19)$$

本节设计的轨迹跟踪控制算法除了要考虑基本的控制量和控制增量约束,还需要考虑车辆的操纵稳定性约束。操纵稳定性^[14]包括横摆稳定性和侧倾稳定性。本文采用横摆角速度-质心侧偏角相平面^[15]来分析车辆的横摆稳定性。为了降低系统的运行复杂度,仅对质心侧偏角进行约束。

根据车辆运动几何方程,质心侧偏角可表示为:

$$\beta = \arctan\left(\frac{L_r \tan \delta}{L_f + L_r}\right) \quad (20)$$

在降低系统复杂度的同时,为了保证车辆的横摆稳定性,约束质心侧偏角 $|\beta| = 0$ 。

车辆侧倾大致可以分为绊倒侧倾和曲线运动引起的侧倾 2 类,本文研究的是曲线运动引起的侧倾。基于预测模型的侧倾稳定性指标(如横向载荷转移率、侧倾时间^[16]和零力矩点^[17]等)能够充分利用车辆的动力学模型预测其在未来一段时间内的状态,并根据相关指标来预测车辆的侧倾趋势。本文采用零力矩点侧倾稳定性指标进行动态侧倾预警。

为了保证车辆的侧倾稳定性,需要对零力矩点的横向位移 y_{ZMP} 进行约束。

根据零力矩点的定义可得零力矩点的横向位移 y_{ZMP} 为:

$$y_{ZMP} = h_{CG}\varphi + \frac{h_{CG}}{g}(\dot{v}_y + v_x\omega) - \frac{I_{xx}}{mg}\ddot{\varphi} \quad (21)$$

2.4 优化求解

在 2.3 节中设计了所需的目标函数及约束条件,该模型预测控制问题则转化为一个约束优化问题。

本文将该约束优化问题转化为一个标准二次型规划问题,即

$$\min_{\Delta U(t), \epsilon} J(\xi(t), u(t-1), \Delta U(t), \epsilon) \quad (22)$$

其中, $\Delta U_{\min,j} \leq (\mathbf{\Gamma}\Delta U)_j + U_j \leq \Delta U_{\max,j}$, $\Delta U_{\min,j} \leq \Delta U_j \leq \Delta U_{\max,j}$, $\mathbf{\Gamma}$ 为 $N_c \times N_c$ 的下三角矩阵和 m 维单位矩阵的克罗内克积。

在每个控制周期内完成式(22)的求解后,可以得到控制时域内的一系列控制输入增量和松弛因子,即

$$\Delta U(t)^* = [\Delta u_t^* \ \Delta u_{t+1}^* \ \dots \ \Delta u_{t+N_c-1}^* \ \epsilon]^T \quad (23)$$

将该控制序列中第 1 个元素作为实际的控制输入增量作用于系统,即

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u_t^* \quad (24)$$

进入下一个控制周期后,重复上述过程,如此循环,实现对期望轨迹的跟踪控制。

3 联合仿真分析

根据 V 字开发模型中工程开发阶段的软件仿真需求,搭建了 PreScan/CarSim/Simulink 联合仿真平台,主要使用 PreScan 软件中的场景构建和数据输出模块、CarSim 软件中的车辆动力学模型、MATLAB 中实现的规划和控制算法,最后以函数模块的形式集成到 Simulink 中,结果如图 3 所示。

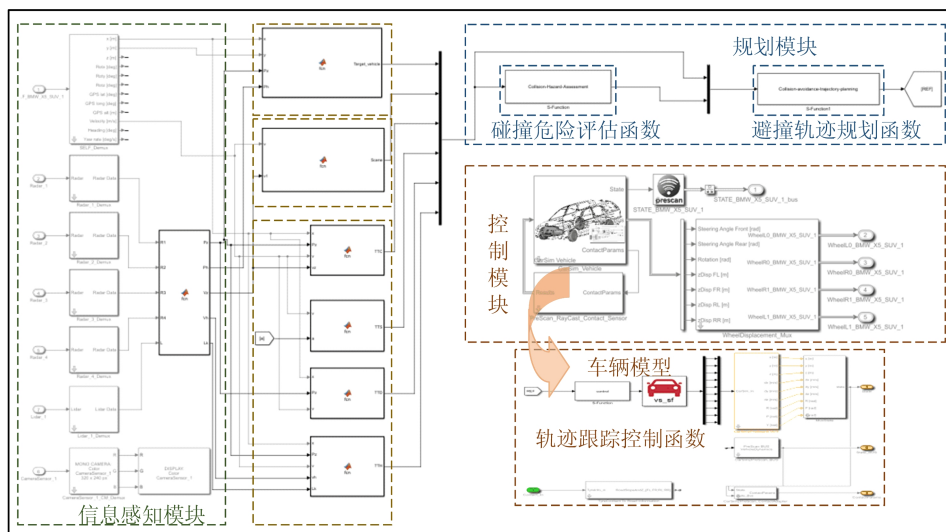


图 3 联合仿真连接图

为了验证本文设计的轨迹规划算法的合理性、轨迹跟踪控制算法的有效性及操纵稳定性,选取国内实际交通事故场景,先进行事故场景重建,然后进行仿真验证。

3.1 事故场景重建

多车追尾事故是高速公路上最常见的事故类型,同时也是危险程度较高的事故类型之一。某追尾事故场景如图 4 所示。

图 4 中,A 车和 B 车在驶离高速公路的闸道口附近发生了追尾事故,同车道的 C 车没有发现前方的事故车辆,3 s 之后径直撞上了 B 车,导致二次追尾事故的发生,多人受伤。

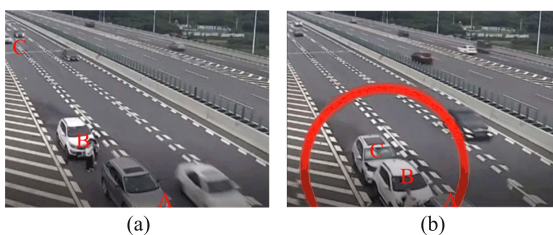


图 4 高速公路上某追尾事故场景

基于该事故验证本文的主动避撞系统时,将 C 车作为自车、B 车作为目标车辆。同样采用移动标尺时间差值法求取事故车辆的速度,自车前 2 s 的速度约为 10 m/s,最后 1 s 速度略有下降,目标车辆静止,速度为 0 m/s。

针对该二次追尾事故,在 PreScan 中为自车配备了激光雷达、摄像头和 2 个毫米波雷达共 4 个传感器,2 个毫米波雷达分别布置在车辆两侧,用来感知在相邻车道行驶的车辆。配置完传感器的事故重建模型如图 5 所示。

图 5 中:黑色线束为激光雷达旋转扫描的区域;黄色阴影区域为摄像头的感知范围;绿色阴影区域为毫米波雷达的感知范围。自车动力学模型采用 CarSim 中的 D-Class-SUV 车辆动力学模型。

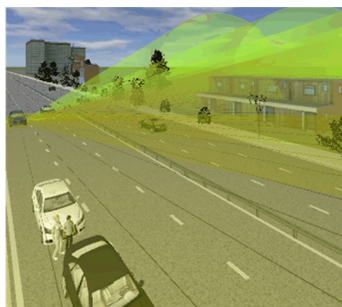


图 5 自车配置传感器的事故重建模型

若当前驾驶工况下不存在换道条件,则只能采用强力减速制动的避撞方式;当驾驶工况具备换道条件时,自车则采用纵横向联合避撞的方式来规避碰撞的风险。因此根据是否可变量来分析 2 种避撞方式的运行效果。

3.2 纵向制动避撞

在感知模块正常运行的前提下,判断出前方有事故风险。若采用纵向避撞方式,则自车的纵向速度变化如图 6 所示,纵向移动距离曲线如图 7 所示。

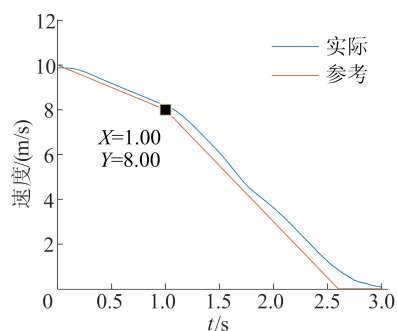


图 6 纵向速度

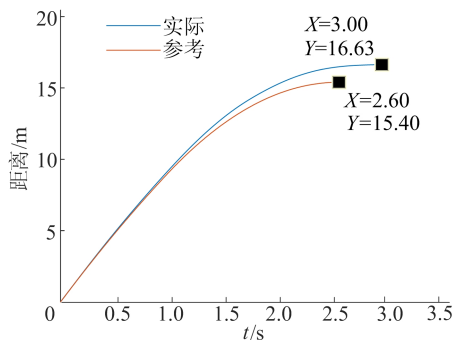


图 7 纵向移动距离

由图 6 中的实车速度曲线可知,避撞系统可以准确地控制车辆按照规划的速度行驶,且延迟时间在 0.3 s 左右,可以满足实时性要求。

由图 7 中的移动距离曲线可知,车辆实际行驶的距离比规划的距离远了 1.2 m 左右,但是仍然距离碰撞点有 3.5 m 左右的距离,可以保证绝对的安全性。

3.3 纵横向联合避撞

当存在变道条件时,自车采用纵横向联合避撞方式。根据事故视频可知,自车变道并不会与相邻车道的车辆发生碰撞,因为相邻车道的车辆已经发现前方的危险工况,提前驶离了自车的左侧车道。

系统规划出的避撞轨迹曲线如图 8 所示。

图 8 明确了纵横向联合避撞过程中所需的横向位置参考值,还需要明确纵向速度和横摆角的参考值。而系统已经规划出纵横向联合避撞所需的参考值(纵向速度、横向位置和横摆角),规划出的轨迹曲线与目标车辆无时空重合点,因此是合理且可行的。

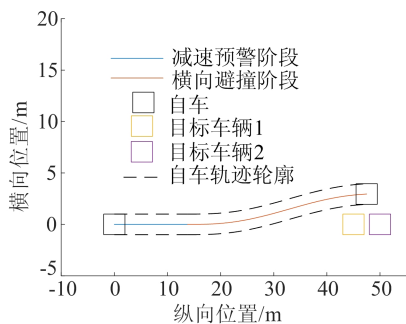


图 8 避撞轨迹曲线

接下来需要控制车辆跟踪避撞轨迹,以验证车辆的轨迹跟踪精度和操纵稳定性。

横向位置和横摆角的轨迹跟踪曲线如图 9 所示。

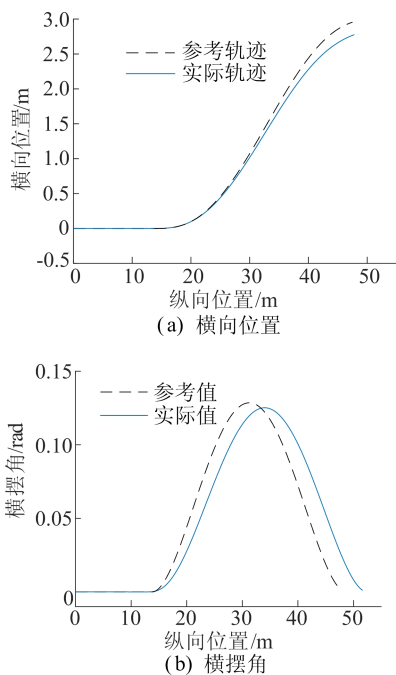


图 9 避撞跟踪曲线

由图 9 可知,横向跟踪误差为 0.3 m 左右,纵向跟踪误差约为 0 m,且延迟时间小于 0.5 s,因此该轨迹跟踪控制算法可以满足实时性和控制精度的要求。

为了分析轨迹跟踪过程中的操纵稳定性,获

取了前轮转角、前轮转角增量曲线、质心侧偏角、零力矩点的横向位移曲线,分别如图 10 和图 11 所示。

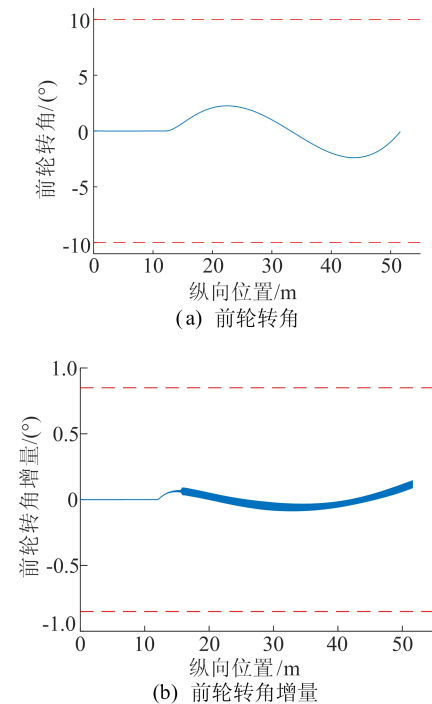


图 10 前轮转角及前轮转角增量曲线

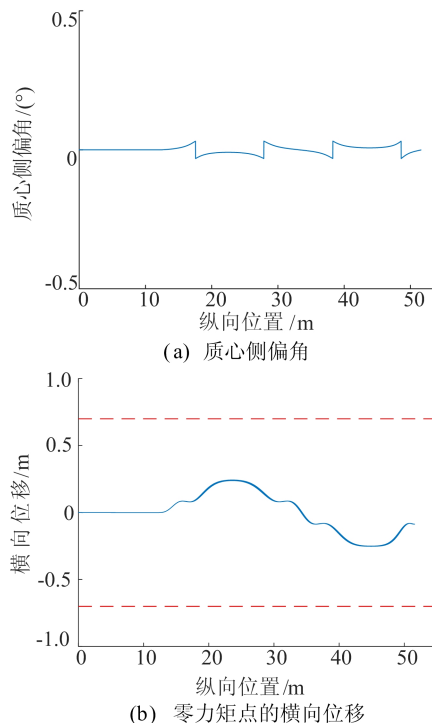


图 11 质心侧偏角及零力矩点的横向位移曲线

由图 10 可知,控制量前轮转角和控制增量前轮转角增量均在约束阈值之内,且数值较小。

由图 11 可知:质心侧偏角几乎为 0°,可以满

足约束要求;零力矩点的横向位移小于阈值,约为 0.3 m 左右。因此,该轨迹跟踪控制算法在纵横联合避撞时可以满足横摆稳定性和侧倾稳定性的要求。

综上所述,根据本文的理论分析可以准确地完成事故重建部分和仿真建模部分的工作。针对多车追尾事故,本文所设计的决策规划模块可以判断出环境中的危险工况,并且规划出纵向制动避撞所需的速度参考曲线和纵横向联合避撞所需的轨迹曲线,纵向轨迹跟踪控制可以保证较高的实时性和绝对的安全性,横向轨迹跟踪控制可以保证轨迹跟踪精度和操纵稳定性。

4 结 论

本文针对目前智能汽车主动避撞系统轨迹规划不合理、轨迹跟踪精度不足及车辆稳定性差的问题,基于七自由度车辆动力学模型并考虑轨迹跟踪精度和车辆操纵稳定性,设计了基于五次多项式的轨迹规划算法和基于模型预测控制理论的轨迹跟踪控制算法。在采用纵向主动避撞方式时,规划出纵向参考速度曲线;在采用横向主动避撞方式时,规划出基于五次多项式的横向参考轨迹曲线。

根据 V 型开发模型搭建了 PreScan、CarSim、Simulink 联合仿真平台,并选取高速路况下多车追尾事故进行事故场景重建、仿真建模和系统搭建,仿真结果验证了本文所研究的纵横向主动避撞控制算法的有效性和合理性。

[参 考 文 献]

- [1] 国家统计局. 国家数据标准化数据库系统工程中的交通事故数据[DB/OL]. (2020-12-20)[2021-12-26]. <https://data.stats.gov.cn/index.htm>.
- [2] 任玥,冀杰,赵颖,等. 基于最小模型误差估计的智能汽车路径跟踪控制[J]. 汽车工程,2021,43(4):580-587.
- [3] BRUMMELEN J V, BRIEN M, GRUYER D, et al. Autonomous vehicle perception: the technology of today and tomorrow[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2018, 89(5):384-406.
- [4] BATKOVIC I, ZANON M, ALI M, et al. Real-time constrained trajectory planning and vehicle control for proactive autonomous driving with road users[C]//2019 18th European Control Conference. [S. l.]: IEEE, 2019: 193-207.
- [5] HE X K, LIU Y L, LV C, et al. Emergency steering control of autonomous vehicle for collision avoidance and stabilisation [J]. Vehicle System Dynamics, 2019, 57(8): 1163-1187.
- [6] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述·2017[J]. 中国公路学报, 2017, 30(6):1-197.
- [7] 王殿君. 基于改进 A* 算法的室内移动机器人路径规划[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 52(8):1085-1089.
- [8] ELBANHAWI M, SIMIC M. Sampling-based robot motion planning: a review[J]. IEEE Access, 2019, 2:56-77.
- [9] ZHANG X J, LINIGER A, BORRELI F. Optimization-based collision avoidance[J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 2021, 29(3):972-983.
- [10] 刘志强,韩静文,倪捷. 智能网联环境下的多车协同换道策略研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(3):299-306.
- [11] HO M L, CHAN P T, RAD A B, et al. A novel fused neural network controller for lateral control of autonomous vehicles[J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(11): 3514-3525.
- [12] OUYANG M G, SHUAI Z B, ZHANG H, et al. Combined AFS and DYC control of four-wheel-independent-drive electric vehicles over CAN network with time-varying delays[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(2):591-602.
- [13] PAOLO F. Nonlinear model predictive control for autonomous vehicles[D]. Benevento: University of Sannio, 2007.
- [14] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [15] ERLIEN S M, FUJITA S, GERDES J C. Shared steering control using safe envelopes for obstacle avoidance and vehicle stability [J]. IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(2):441-451.
- [16] YU H, GUVENC L, OZGUNER U. Heavy duty vehicle rollover detection and active roll control[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(6):451-470.
- [17] LAPAPONG S, BROWN A A, SWANSON K S, et al. Zero-moment point determination of worst-case manoeuvres leading to vehicle wheel lift[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(1):191-214.

(责任编辑 胡亚敏)