

# 基于贝塞尔曲线的车辆避撞控制方法

蒋永锋

(西安思源学院 基础部, 西安 710038)

**摘要:** 复杂动态交通场景中车辆行驶环境复杂, 动态障碍物与车辆避撞安全距离的时空动态耦合特性影响行驶车辆避撞路径规划效果, 导致其避撞控制效果不佳; 为此, 提出基于贝塞尔曲线的车辆避撞控制方法; 先构建车辆行驶环境, 获取根据静态障碍物位置与车道分布, 并通过动态障碍物初始位置与行驶参数的获取, 预测动态障碍物位置, 实现复杂行驶环境中动静障碍物信息的获取; 然后考虑车辆行驶的运动学和动力学原理, 检测车辆实时行驶数据, 作为车辆避撞控制初始值; 根据车辆避撞安全距离求解结果, 利用贝塞尔曲线, 规划车辆避撞行驶路线; 最后根据车辆行驶位置与规划路线之间的偏差, 得出车辆避撞控制程序触发决策结果; 在设定约束条件作用下, 计算规划避撞控制目标与初始值之间的偏差作为控制量, 生成并执行车辆避撞控制指令, 实现车辆避撞控制; 实例分析结果表明: 在静态、动态和静动态复合场景下, 与传统控制方法相比, 优化设计控制方法的车辆行驶路线拟合偏差和行驶速度控制偏差均得到明显降低, 且车辆的动态曲率约束满足度和多障碍物避撞安全裕度取值更大, 证明其可有效避免车辆碰撞, 控制效果较好。

**关键词:** 贝塞尔曲线; 车辆控制; 路径跟踪; 路线规划; 避障控制;

## Vehicle Collision Avoidance Control Method Based on Bezier Curves

JIANG Yongfeng

(Department of Basic Courses, Xi'an Siyuan University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** With the vehicle driving in complex dynamic traffic scenarios, a spatiotemporal dynamic coupling characteristic for the safe distance between dynamic obstacles and collision avoidance vehicles affects the path planning of collision avoidance, resulting in its poor collision avoidance control performance. Therefore, a vehicle collision avoidance control method based on Bezier curves is proposed. Firstly, construct the driving environment of the vehicle, obtain the static position and lane distribution of obstacles, and predict the dynamic obstacle position by obtaining the initial position and driving parameters of dynamic obstacles, thereby acquiring the information of dynamic and static obstacles in complex driving environments. Then, consider the kinematic and dynamic movement principles of vehicles, detect the real-time driving data of the vehicle as the initial value for vehicle collision avoidance control, calculate the safe distance for vehicle collision avoidance, and adopt the Bezier curve to plan the vehicle's collision avoidance driving route. Finally, based on the deviation between the vehicle's driving position and the planned route, obtain the decision result triggered by the vehicle collision avoidance control program. Under the constraint conditions, calculate the deviation between the planned collision avoidance control target and the initial value as the control variable, generate and execute vehicle collision avoidance control instructions, and achieve vehicle collision avoidance control. Through a case analysis, the results show that in static, dynamic, and static dynamic composite scenarios, compared with traditional control methods, the optimized design control method significantly reduces the fitting deviation of vehicle's driving route and the control deviation of driving speed, meeting the requirement of the vehicle's dynamic curvature constraint, with a large safety margin of multi obstacle collision avoidance, proving that it can effectively achieve vehicle collisions, with a good control effect.

**Keywords:** bezier curve; vehicle control; path tracking; route planning; obstacle avoidance control

收稿日期:2025-08-05; 修回日期:2025-09-25。

作者简介:蒋永锋(1976-),男,大学本科,副教授。

引用格式:蒋永锋. 基于贝塞尔曲线的车辆避撞控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(3): 93-101.

## 0 引言

随着智能交通系统的发展及自动驾驶技术的普及, 车辆行驶环境日趋复杂化和动态化, 尤其是在城市道路、高速公路等场景中, 如车辆变道、行人横穿等动态障碍物的不确定运动行为显著增加了行车安全风险<sup>[1-2]</sup>。传统基于固定安全距离模型的避撞控制方法在面对复杂动态交通场景时, 往往由于难以准确预测障碍物轨迹、无法实时调整避撞策略而导致路径规划不连续、控制响应滞后等问题, 这不仅可能引发交通事故, 还会降低乘坐舒适性与能源利用效率。因此, 研究具有高适应性、实时性和安全性的车辆避撞控制方法具有重要的理论与应用价值。

近年来, 众多学者针对这一领域展开研究, 现阶段应用较为广泛的研究成果中, 文献 [3] 提出的基于前车轨迹预测的车辆主动避撞控制方法先基于长短时记忆网络 (LSTM, long short-term memory) 构建预测模型, 通过训练、预测和验证, 获取前车多个时间域的预测轨迹, 然后根据前车行驶轨迹和车辆动力学稳定性, 制定合理的主动换道避让策略, 最后基于优劣距离理论, 设计出一条安全可靠的主动避撞路径, 并以此路径作为控制目标, 实现交通控制。然而该方法在前方车辆急刹、换道、路面湿滑、传感器遮挡等复杂动态交通场景下, 难以准确衡量与动态障碍物的车辆避撞安全距离, 影响车辆的避撞效果。文献 [4] 提出的基于可拓决策法的车辆避撞控制方法先利用滑动模态观测器技术, 准确地估计轮胎的纵向力; 然后利用带遗忘因子的递归最小二乘算法 (RLS, recursive least squares), 动态推演路面粘着系数, 并基于扩展决策理论建立的判断逻辑, 预判当前状态下的避撞控制策略, 最后借助闭环液压调整功能, 将决策命令转换为准确的制动功率, 达到主动减速的安全控制目的。该方法未对复杂动态交通环境进行分析, 难以捕捉外界障碍物的实时信息, 且其可拓区域的划分取决于预先设置的阈值, 而该阈值的设置必须兼顾安全和舒适两个方面, 若点刹预警的典型区域阈值设置有偏差, 将会造成错误报警, 错失最好的避撞机会, 影响最后控制效果。文献 [5] 提出的基于自适应势场的车辆避撞控制方法实时求解满足车辆动力学约束的局部最优运动轨迹, 同时通过相平面分析法评估横摆角速度与侧偏角的稳定性边界, 结合显式相平面约束与隐式性能约束, 利用基于非线性模型预测控制 (NMPC, nonlinear model predictive control) 的分层轨迹跟踪控制器, 最终达成动态场景下最优轨迹的闭环稳定控制。该方法同样未对复杂动态交通环境进行建模处理, 导致对动态障碍物信息获取不足, 导致车辆避撞控

制精度下降。文献 [6] 提出的基于模糊规则的车辆避撞控制方法以弯道为研究对象, 先研究行驶过程中可能发生的碰撞形式和事故发生机理, 分析可能发生的事故类型和事故发生的原因, 后建立动态调整的模糊控制规则库, 通过模糊推理引擎将环境输入转化为精确的控制指令, 实现弯曲坡道场景下的安全自主避撞。传统的模糊规则库是在有限的情况下进行的, 很难适用于复杂的交通环境, 难以根据动态障碍物实时信息实现避撞。文献 [7] 提出的基于 NMPC 的车辆避撞控制方法以快速路换道为研究对象, 构建车辆横、纵两个非线性耦合的车辆横、纵复合非线性预测模型, 综合考虑多种复杂约束条件、非线性因素等因素, 使系统达到最优控制效果。该方法对动态交通环境的考虑不足, 且其基于 NMPC 的优化目标通常为多目标加权函数, 非凸优化问题易陷入局部最优解, 影响最终的控制结果。综上, 现有车辆避撞控制方法难以达到理想控制效果。为此, 本次引入贝塞尔曲线。贝塞尔曲线是一种通过控制点定义平滑曲线的参数化数学方法, 其核心原理是通过线性组合控制点与伯恩斯坦基函数生成曲线上的点。本文在贝塞尔曲线支持下, 优化设计车辆避撞控制方法, 以期提升对车辆行驶轨迹的精准控制, 进而提高车辆的行驶安全。

## 1 车辆避撞控制方法设计

车辆避撞控制的核心原理是通过多传感器融合实时感知环境信息, 结合车辆动力学模型与智能算法实现主动安全干预。在已知车辆行驶环境中静态和动态障碍物情况下, 以保持安全距离为前提规划车辆行驶路线, 保证车辆不会与行驶环境中的静态和动态障碍物发生碰撞, 并根据当前车辆位置与规划路线节点位置之间的关系, 求解车辆的行驶参数, 在约束条件支持下, 实现车辆的行驶控制, 保证车辆的实际行驶参数与控制目标以及规划路线一致, 具体设计如下。

### 1.1 车辆实时行驶环境获取

车辆行驶环境分为结构化道路和非结构化道路, 主要包括车道及静态障碍物的分布情况。本次现以道路中心线为基线构建坐标系,<sup>[3]</sup> 构建静态车辆行驶环境, 车辆行驶环境中的车道线中心线可量化表示为:

$$\begin{cases} x_{\text{lane}}(s) = \alpha_0 + \alpha_1 s + \alpha_2 s^2 + \alpha_3 s^3 \\ y_{\text{lane}}(s) = \beta_0 + \beta_1 s + \beta_2 s^2 + \beta_3 s^3 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $x_{\text{lane}}(s)$  和  $y_{\text{lane}}(s)$  分别表示道路中心线在水平和垂直方向上的参数方程,  $s$  为反映道路中心线弧长的参数值,  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  分别表示  $x$  和  $y$  方向上道路中心线形状的特征参数<sup>[4]</sup>。根据车道线中心线对应方程的构建情况, 确定车辆行驶车道的航向角和曲率。在此基础上, 利用

测距传感器，测量车道边缘以及车道周围静态建筑物、树木等元素与车道中心线之间的距离，其中车道边缘距离测量结果为：

$$l_{\text{edge}} = \frac{v_{\text{sensing}} \Delta t_{\text{edge}}}{2} \quad (2)$$

式中， $v_{\text{sensing}}$  和  $\Delta t_{\text{edge}}$  分别表示传感信号的传输速度以及传感信号从中心线到边缘的传输时间<sup>[5]</sup>。由此，可以得出车道边缘位置坐标为：

$$\begin{cases} x_{\text{edge}} = x_{\text{lane}}(s) + l_{\text{edge}} \cos\theta \\ y_{\text{edge}} = y_{\text{lane}}(s) + l_{\text{edge}} \sin\theta \end{cases} \quad (3)$$

式中， $\theta$  为传感信号的接收角度。按照上述方式可以得出车道周围所有静态障碍物的位置坐标以及占地面积，将其标记在构建的车辆行驶环境对应坐标系中，并将所有静态障碍物标记为  $Z_{\text{static}}$ 。在实现静态障碍物标记后，为避免车辆与动态障碍物发生碰撞，对动态障碍物的移动轨迹进行预测。本次在车辆中安装测距传感器设备，确定当前动态障碍物位置，记为  $[x_{\text{opp}}(t_0), y_{\text{opp}}(t_0)]$ 。在此基础上，利用速度和角度传感器获取车辆的行驶数据，则任意时刻对向车辆移动位置的预测结果为：

$$\begin{cases} x_{\text{opp}}(t) = x_{\text{opp}}(t_0) + v_{\text{opp}}(t - t_0) \cos\theta_{\text{opp}} \\ y_{\text{opp}}(t) = y_{\text{opp}}(t_0) + v_{\text{opp}}(t - t_0) \sin\theta_{\text{opp}} \end{cases} \quad (4)$$

式中， $v_{\text{opp}}$  和  $\theta_{\text{opp}}$  分别表示对向车辆的行驶速度和角度。当检测到障碍物加速度  $a \neq 0$  时，引入加速度项修正预测位置：

$$x_{\text{opp}}(t) = x_{\text{opp}}(t_0) + v_{\text{opp}}(t_0)(t - t_0) + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2 \quad (5)$$

加速度  $a$  通过差分法计算获得：

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v(t) - v(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (6)$$

上述中变量  $v_{\text{opp}}$  的具体取值为：

$$v_{\text{opp}} = \frac{\lambda p}{2} \quad (7)$$

式中， $\lambda$  和  $p$  分别为传感器发射传感信号波长以及多普勒频移动。将公式 (7) 的求解结果代入到公式 (4) 中，即可得出对向车辆移动预测位置的具体取值<sup>[6]</sup>。综上，将其代入上述构建的静态车辆行驶环境中，完成动态交通场景构建。

### 1.2 基于贝塞尔曲线规划车辆避撞行驶路线设计

搭建交通场景，可实现场景中动静态障碍物信息获取，为后续避撞奠定基础。接下来，以此为基础，开展车辆避撞行驶路线设计。为实现车辆避撞形式路径规划，需要先确定车辆避撞控制初始值。本次结合车辆运动学和动力学机理，对车辆的实时行驶数据进行检测。车辆的动力学原理图如图 1 所示。

图 1 中的车辆运动学模型可以量化表示为：

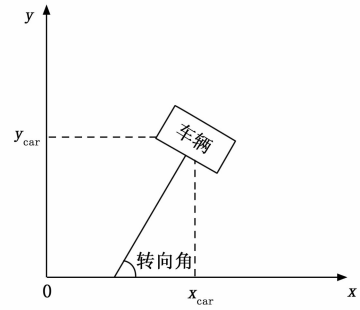


图 1 车辆运动学原理图

$$\begin{bmatrix} x_{\text{car}} \\ y_{\text{car}} \\ \theta_{\text{car}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta \\ \sin\vartheta \\ \tan \frac{\theta_q}{L} \end{bmatrix} v_h \quad (8)$$

式中， $\vartheta$ 、 $\theta_q$ 、 $L$  和  $v_h$  分别表示车体航向角、前轮转角、轴距和行驶速度，上述变量  $\theta_q$  的求解公式为：

$$\theta_q = \arctan\left(\frac{L \cdot \omega}{v_h}\right) \quad (9)$$

式中， $\omega$  为车辆的横摆角速度。利用角度和速度传感器，可以得出变量  $\vartheta$  和  $v_h$  的具体取值，将相关数据以及公式 (9) 的计算结果代入到公式 (8) 中，即可得出车辆当前行驶位置  $(x_{\text{car}}, y_{\text{car}})$  以及转向角  $\theta_{\text{car}}$  的检测结果<sup>[7-8]</sup>。上述方法针对的是前驱车辆，若控制对象为后驱车辆，则测量后向转向角，进而得出车辆实时行驶数据的检测结果。另外，根据车辆纵向动力学机理可以推导处的功率方程，其公式为：

$$P_0 = mv_h \left( a + g \cos\gamma \cdot \frac{fv_h}{2} + g \cos\gamma + \frac{\rho A \kappa_{\text{wind}} v_h^2}{2m} \right) \quad (10)$$

式中， $m$  为车辆质量， $a$  和  $g$  分别为车辆行驶加速度和重力加速度， $\gamma$  为车道坡度角， $f$  为车道滚动阻力系数， $\rho$ 、 $A$  和  $\kappa_{\text{wind}}$  分别表示车辆行驶环境中的空气密度、迎风面积以及风阻系数<sup>[9]</sup>。由此，得出车辆运动和动力学实时行驶数据的检测结果，即得出车辆控制初始值的求解结果。

然后，以车辆控制初始值求解结果为基础，针对对向、同向障碍物，考虑车辆的制动过程，计算车辆的最小避撞安全距离<sup>[10]</sup>。对于同车道前方障碍物，最小安全距离主要基于车辆的制动过程，车辆的制动过程如图 2 所示。

从图 2 中可以看出，车辆的制动过程包括驾驶员行动反应时间、制动器作用时间、持续制动时间和制动力释放时间 4 个阶段，车辆的总制动距离即为同车道前侧最小安全距离，即：

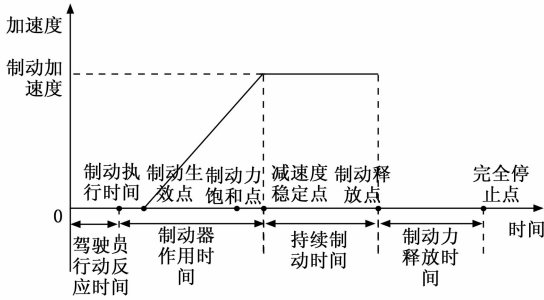


图 2 车辆制动过程图

$$d_{q_i} = \left( t_1 + t_2 + \frac{t_2}{2} \right) v_0 + \frac{v_0^2}{2a_{\max}} - \frac{a_{\max}(t_3 + t_4)^2}{24} \quad (11)$$

式中， $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  和  $t_4$  分别对应的是车辆制动过程 4 个阶段的执行时长， $v_0$  为车辆的初始行驶速度， $a_{\max}$  为车辆制动减速度最大值<sup>[11]</sup>。制动时间参数的取值依据路面条件确定：干燥路面取  $t_1 = 0.5 \text{ s}$ ， $t_2 = 0.2 \text{ s}$ ， $t_3 = 1.8 \text{ s}$ ， $t_4 = 0.3 \text{ s}$ ；湿滑路面通过附着系数修正，将  $t_3$  增至 2.5 s。上述参数取值源自《道路交通安全工程手册》的制动标准。同车道后方障碍物情况相对特殊，通常要考虑后方车辆的制动性能以及两车的相对速度等因素，若后方车辆速度过快且制动性能不佳，就需要更大的安全距离来避免碰撞。对于相邻车道前侧障碍物，除要考虑自身车辆的制动情况外，还需考虑换道过程中的车辆动态特性<sup>[12]</sup>。而相邻车道后侧障碍物，则要综合考虑后方车辆的行驶状态、速度以及可能的变道意图等，结合车辆的感知系统对周围环境的监测信息，计算出足够的安全距离，记为  $d_{th}$ 、 $d_{lq}$  和  $d_{lh}$ 。

最后，以车辆实时行驶数据的检测结果为车辆避撞行驶路线起点，考虑与不同位置上的静态和动态障碍物保持安全距离，利用贝塞尔曲线规划车辆避撞行驶路线<sup>[13]</sup>。贝塞尔曲线如图 3 所示。

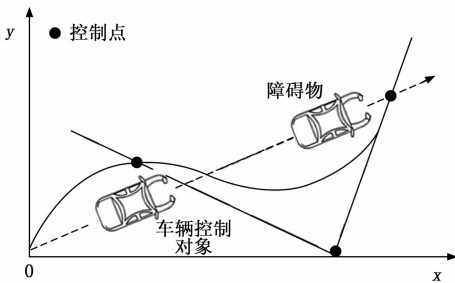


图 3 贝塞尔曲线示意图

图 3 中的贝塞尔曲线以控制点为基础，通过特定的参数化方程来描绘曲线形状，控制点的数量决定了曲线的阶数与复杂程度。曲线上的点是通过控制点之间的线性插值递归计算得出，在参数的连续变化过程中，曲线

展现出平滑的过渡效果<sup>[14]</sup>。规划的车辆避撞行驶路线由两段贝塞尔曲线构成，第一段贝塞尔曲线以车辆的当前行驶位置为起始点，避撞换道目标为终点位置，则该段避撞行驶路线的 3 次贝塞尔曲线参数方程可以表示为：

$$\begin{cases} X_1(t) = x_{car}(1-t)^3 + 3x_z(1-t)^2t + x_h t^2 \\ Y_1(t) = y_{car}(1-t)^3 + 3y_z(1-t)^2t + y_h t^2 \end{cases} \quad (12)$$

式中， $(x_z, y_z)$  为中间过渡节点坐标， $(x_h, y_h)$  为避撞目标位置节点，其中  $(x_h, y_h)$  的计算公式为：

$$\begin{cases} x_h = x_{opp}(t) + d_{safe}(x) \\ y_h = y_{opp}(t) + d_{safe}(y) \end{cases} \quad (13)$$

式中， $d_{safe}(x)$  和  $d_{safe}(y)$  分别表示车辆与障碍物间安全距离在水平和垂直方向上的分量，上述表示的具体取值如下：

$$\begin{cases} d_{safe}(x) = d_{lq} + d_{lh} \\ d_{safe}(y) = d_{lq} + d_{lh} \end{cases} \quad (14)$$

中间过渡节点  $(x_z, y_z)$  的确定方法如下：中间节点距起始点和目标点的距离比为 1:2，且与障碍物边缘保持至少 0.5 m 的安全距离。控制点选择流程如图 4 所示。

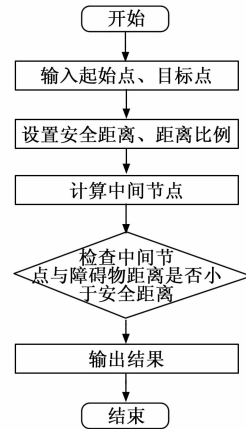


图 4 控制点选择流程图

在已知初始节点和避撞目标位置节点的情况下，得出中间过渡节点的位置坐标<sup>[15-16]</sup>。将相关坐标数据代入到公式 (13) 中，分别进行一阶和二阶求导，进而确定贝塞尔曲线上任意一点的曲率为：

$$u_1(t) = \frac{X'_1(t)Y''_1(t) - Y'_1(t)X''_1(t)}{\sqrt{[X'^2_1(t) + Y'^2_1(t)]^3}} \quad (15)$$

式中， $[X'_1(t), Y'_1(t)]$  和  $[X''_1(t), Y''_1(t)]$  分别表示初始规划贝塞尔曲线的一阶和二阶导数<sup>[17]</sup>。在每个顶点中，曲线经过第一点和最后一点，其余各点则定义曲线的导数、阶次和形状。同时通过控制第一条和最后一条折线的方向可以定义曲线起点和终点的切线方向，继而控制车辆行驶出的方向。按照上述方式，以避撞目标位

置节点为起点，以回到原路线的目标节点为终点，得出第二段贝塞尔曲线的规划结果，记为  $[X_2(t), Y_2(t)]$ ，对应曲率为  $u_2(t)$ 。则最终规划的碰撞避免行驶路线为：

$$H = u_1(t)[X_1(t), Y_1(t)] + u_2(t)[X_2(t), Y_2(t)] \quad (16)$$

通过上述设计，即可实现车辆与动态障碍物的碰撞避免行驶路线规划，若车辆的初始行驶路线与静态障碍物坐标之间存在重合，则调整公式(14)中的  $[x_{\text{opp}}(t), y_{\text{opp}}(t)]$  为  $(x_{\text{edge}}, y_{\text{edge}})$ ，得出相应的碰撞避免行驶路线规划结果<sup>[18]</sup>。若初始车辆行驶路线中存在多处碰撞节点，则按照上述方式生成多段贝塞尔曲线，通过首尾相连得出碰撞避免行驶路线规划结果。

### 1.3 实现碰撞避免控制

为实现碰撞避免控制，先考虑车辆制动过程，根据求解得出的安全距离，设定碰撞避免控制的触发条件，将车辆的实时行驶参数与触发条件进行对比，判断当前车辆是否需要执行碰撞避免控制任务。碰撞避免控制任务触发状态的决策结果为：

$$c(t) = \begin{cases} 1, & d_c(t) \leq d_{\text{safe}} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

式中， $d_c(t)$  和  $d_{\text{safe}}$  分别表示车辆与  $t$  时刻静态和动态障碍物之间的距离以及安全距离，安全距离  $d_{\text{safe}}$  随车速动态调整，其计算公式为：

$$d_{\text{safe}} = kv^2 \quad (18)$$

其中： $k$  为路面附着系数，干燥路面取  $k=0.012$ ，湿滑路面取  $k=0.02$ 。上述变量的计算公式为：

$$\begin{cases} d_c(t) = \sqrt{[x_{\text{car}}(t) - x_{\text{opp}}(t)]^2 + [y_{\text{car}}(t) - y_{\text{opp}}(t)]^2} + \\ \sqrt{[x_{\text{car}}(t) - x_{\text{edge}}]^2 + [y_{\text{car}}(t) - y_{\text{edge}}]^2} \\ d_{\text{safe}} = d_{\text{safe}}(x) + d_{\text{safe}}(y) \end{cases} \quad (19)$$

将公式(16)的求解结果代入到公式(15)中，若计算得出  $t$  时刻控制触发状态系数  $c(t)$  取值为 1，证明当前车辆存在碰撞风险，触发碰撞避免控制程序，否则无需执行碰撞避免控制任务。

然后，考虑车辆的实际行驶环境以及车辆底盘、发动机状况，从转向角、行驶路线曲率、速度以及加速度等方面设定约束条件<sup>[19]</sup>。转向角和行驶路线曲率的约束，能够有效防止车辆在控制过程中出现超出转向范围、曲率过大出现漂移等现象，转向角和路线曲率约束条件的设定情况如下：

$$\begin{cases} \min(\theta_q) \leq \theta_q \leq \max(\theta_q) \\ \min(u_i) \leq u_i \leq \max(u_i), i = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (20)$$

式中， $\min()$  和  $\max()$  分别表示最小值和最大值求解函数。基于实验车辆转向系统最大转向角为  $38^\circ$ 、侧滑

角曲率为  $0.052 \text{ m}^{-1}$ ，设  $\min(\theta_q) = -35$ ， $\max(\theta_q) = 35$ ， $\min(u_i) = -0.05$ ， $\max(u_i) = 0.05$ 。同理，可以得出车辆在速度和加速度方面的约束条件设定结果，结合车辆类型以及行驶工况确定参数最大、最小值的具体取值。

最后为防止车辆在碰撞避免控制过程中发生侧滑，根据贝塞尔曲线设计得到的碰撞避免行驶路线规划结果，对车辆的行驶速度进行规划，规划结果为：

$$v_m(t) = \sqrt{\frac{a_{\text{max}}}{u(t)}} \quad (21)$$

式中， $u(t)$  为  $t$  时刻对应碰撞避免路线节点的曲率值， $a_{\text{max}}$  为车辆的最大侧向加速度。根据当前车辆行驶位置、速度与路线、速度规划结果之间的差异，对车辆控制量进行计算，计算公式为：

$$\begin{cases} e_{xy} = |H_x(t) - x_{\text{car}}| + |H_y(t) - y_{\text{car}}| \\ e_v = |v(t) - v_m(t)| \end{cases} \quad (22)$$

式中， $H_x(t)$  和  $H_y(t)$  表示碰撞避免规划路线  $t$  时刻对应的水平和竖直位置坐标分量， $v(t)$  为当前车辆的行驶速度。根据当前车辆位置与控制目标位置之间的空间关系，可以得出车辆转向角的控制结果为：

$$e_\theta = \left( \arctan\left(\frac{H_y(t) - y_{\text{car}}}{H_x(t) - x_{\text{car}}}\right) - \theta_q \right) \quad (23)$$

根据车辆转向角、位置以及速度控制所需的动力支持，确定车辆工作功率的控制量为：

$$e_p = P_m(t) - P_0 \quad (24)$$

式中， $P_m(t)$  为  $t$  时刻车辆动力功率的控制目标值。综合考虑位置、速度、转向角和动力功率四个方面，利用比例积分微分控制(PID, proportional-integral-derivative control)控制原理，生成作用到车辆上的碰撞避免控制指令，即：

$$B(k) = \kappa_p E(k) + \kappa_i^* E(i) + \kappa_d \frac{E(k) - E(k-1)}{T}, c(t) = 1 \quad (25)$$

式中， $\kappa_p$ 、 $\kappa_i$  和  $\kappa_d$  分别表示比例、积分和微分系数，且存在  $\kappa_p=0.8$ 、 $\kappa_i=0.2$ 、 $\kappa_d=0.15$ ，本次通过 Ziegler-Nichols 法整定获得； $k$  为采样时刻； $T$  为采样周期； $E(t)$  为  $t$  时刻控制目标值与实际值的偏差，其计算公式如下：

$$E(t) = [e_{xy}(t) - e_{xy}(t-1), e_v(t) - e_v(t-1), e_\theta(t) - e_\theta(t-1), e_p(t) - e_p(t-1)] \quad (26)$$

按照上述方式，即可得出当前车辆碰撞避免控制指令的生成结果。将生成的碰撞避免控制指令发送给车辆的动力、转向灯执行机构，根据指令调整车辆电机的扭矩和转向角度，实现车辆速度、位置、转向角的控制操作<sup>[20]</sup>。同时，通过传感器实时监测车辆行驶参数，形

成闭环控制, 确保车辆行驶过程的准确跟踪。车辆避撞控制的执行逻辑如图 5 所示。

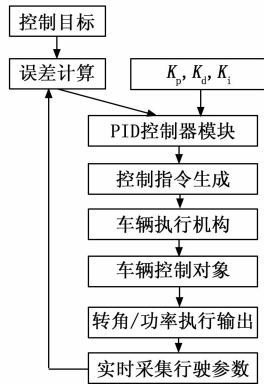


图 5 车辆避撞控制逻辑图

综上, 完成车辆避撞控制, 当检测到车辆行驶路线上无障碍物或车辆达到目标位置时, 退出车辆避撞控制程序。

## 2 实例分析

为测试所提基于贝塞尔曲线的车辆避撞控制方法的控制性能以及应用效果, 本次以某公路为研究区域, 以任意机动车辆为控制对象, 设计实例分析实验。根据实验目的, 分别从控制性能和应用效果两个方面进行实验, 控制性能测试就是比对优化设计方法控制下车辆实际行驶参数与控制目标之间的差异, 而应用效果测试则是对车辆的行驶安全进行度量。最终通过与传统控制方法的对比, 证明优化设计方法在控制性能和应用效果方面的优势。本次实验选择新款的 5 门 5 座 SUV 车辆作为控制对象, 该车辆采用承载式车身结构, 整车尺寸为  $4\ 850\ \text{mm} \times 1\ 930\ \text{mm} \times 1\ 710\ \text{mm}$ , 轴距为  $2\ 820\ \text{mm}$ , 最小离地间隙为  $200\ \text{mm}$ 。该车辆以前置四缸涡轮增压直喷发动机作为动力支持, 整车质量为  $1\ 750\ \text{kg}$ , 车体横摆转动惯量为  $2\ 032\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。车辆的最大功率为  $190\ \text{kW}$ , 最大扭矩为  $400\ \text{N} \cdot \text{m}$ , 最高行驶车速为  $210\ \text{km/h}$ , 车辆的百米制动距离为  $38.5\ \text{m}$ ,  $0$  到  $60\ \text{km/h}$  的加速时间为  $3.9\ \text{s}$ 。使用城市快速路作为车辆行驶环境, 车道数量为 3, 车道宽度为  $3.8\ \text{m}$ , 车道均为直道且坡度均在  $1^\circ$  以下。实验选择能见度高于  $1\ \text{km}$  的晴天作为研究时段, 路面附着系数为  $0.82$ 。为保证优化设计基于贝塞尔曲线的车辆避撞控制方法能够适应不同的车辆行驶场景, 本次分别布设三种实验场景, 分别为静态场景、动态场景和静动态复合场景, 静态场景中除车道边缘、中心护栏外, 添加施工路障、红绿灯等障碍物, 且障碍物不会产生移动。动态场景表示车道中只有车道边缘和中心护栏两个静态障碍物, 其余均为动态障碍物, 具体包括同向机动车、对向机

动车、非机动车、行人等, 在两种布设场景下记录各障碍物的位置信息。任意时刻静态和动态场景的布设情况, 如图 6 所示。

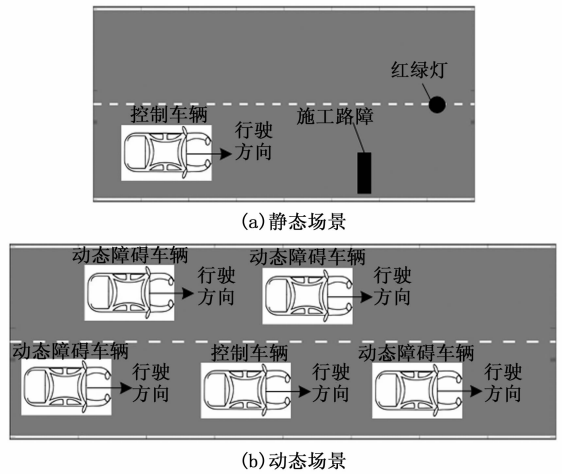


图 6 车辆行驶静态和动态场景布设示意图

根据车辆行驶场景的布设情况, 确定车辆行驶参数的控制目标, 以此作为判定避撞控制性能的比标准。

为实时获取车辆行驶参数, 同时为控制方法的运行提供初始数据, 在车辆和行驶道路上安装传感器设备。测距传感器、转速传感器以及位置传感器等, 在实验开始前, 对安装的传感器进行联合调试, 保证各传感器相对独立。此外, 为保证贝塞尔曲线在车辆避撞控制方法中正常运行, 设定曲线中时间参数  $t$  的取值范围为  $[0, 1]$ , 步长为  $0.02$ 。为给车辆避撞控制方法提供硬件支持, 在车辆控制对象中安装控制器, 两控制器元件以分层架构形式连接, 安装的控制器的能够同步执行车辆速度、转向角以及功率的控制, 设定控制器的响应时间不超过  $200\ \text{ms}$ 。

使用 Python 和 SciPy 库作为基于贝塞尔曲线的车辆避撞控制方法的开发工具, Python 软件内置贝塞尔曲线生成函数支持动态显示与曲率计算, 同时提供车辆动力学模型, 可模拟避撞过程中的转向、加速度等参数, 确保路径符合运动学约束。此外, SciPy 软件能够供伯恩斯坦多项式计算函数, 可直接用于贝塞尔曲线参数化, 实时可视化路径规划过程, 便于调试。

在开始测试前, 为验证本文方法中关键参数与模型的可靠性, 设计了专项实验。首先, 针对安全距离动态调整进行了触发准确性测试。分别在干燥路面与湿滑路面, 以  $30\ \text{km/h}$ ,  $60\ \text{km/h}$ ,  $90\ \text{km/h}$  三种典型车速进行多次重复实验, 统计避撞系统的触发准确率, 结果如表 1 所示。

如表 1 所示, 在不同车速及路面条件下, 触发准确率均高于  $98.5\%$ , 验证了该安全距离模型能有效根据

车速动态调整安全阈值，确保系统及时可靠地触发避撞动作。

表1 安全距离触发准确率测试结果

路面条件	车速/(km/h)	测试次数	正确触发次数	触发准确率/%
干燥路面	30	200	197	98.5
	60	200	198	99.0
	90	200	199	99.5
湿滑路面	30	200	198	99.0
	60	200	197	98.5
	90	200	198	99.0

然后，对转向角约束(±35°)与曲率约束(±0.05 m<sup>-1</sup>)进行了实车验证实验。令车辆在极限工况下运行，并记录其实际转向角与路径曲率，得到结果如表2所示。

表2 转向角与曲率约束验证实验结果

测试场景	样本数量	转向角最大值/(°)	转向角最小值/(°)	曲率最大值/m <sup>-1</sup>	曲率最小值/m <sup>-1</sup>	是否发生侧滑
紧急避障(静态)	1 500	34.2	-34.8	0.048	-0.049	否
连续换道(动态)	1 500	34.5	-34.9	0.047	-0.048	否
综合路况	2 000	34.7	-35.0	0.049	-0.050	否

如表2所示，所有测试样本点均严格落在约束范围内，且转向执行器未出现饱和，车辆未发生侧滑失稳现象。这证明基于车辆物理极限设定的约束是合理且有效的，能够在保证安全的前提下充分发挥车辆的避障潜能。

最后，为验证PID控制器参数的鲁棒性，进行了参数敏感性测试。在标定参数基础上，人为引入±20%的参数波动，测试控制偏差的变化情况，结果如表3所示。

表3 PID控制器参数鲁棒性测试结果

参数波动	位置控制偏差增幅/%	速度控制偏差增幅/%
κ <sub>p</sub> +20%	+4.2	+3.8
κ <sub>p</sub> -20%	+4.5	+4.1
κ <sub>i</sub> +20%	+3.7	+3.5
κ <sub>i</sub> -20%	+4.0	+3.9
κ <sub>d</sub> +20%	+4.8	+4.3
κ <sub>d</sub> -20%	+4.3	+4.6

如表3所示，在参数波动范围内，控制偏差的增幅均不超过5%，表明该组参数具有良好的稳定性和鲁棒性，能适应一定范围内的系统动态变化，确保持续稳定

的控制性能。

测试开始时，将安装到车辆控制对象上的传感器接入到车辆避撞控制方法对应的运行程序中，通过避撞路线规划、控制指令生成与执行等步骤，得出车辆避撞控制任务的执行结果如图7所示。

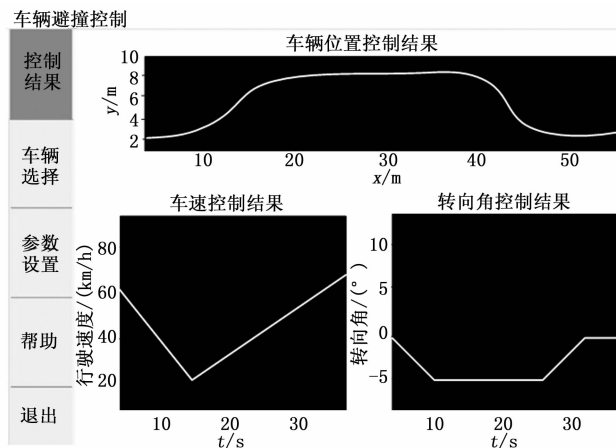


图7 车辆避撞控制结果

在车辆行驶阶段重复上述控制操作，记录车辆的实时行驶数据，作为车辆避撞控制结果数据。实验设置传统的基于前车轨迹预测的车辆主动避撞控制方法和基于可拓决策法的车辆避撞控制方法作为实验对比项，在相同的实验环境下完成对比方法的开发与运行，并得出相应的控制执行结果以及车辆行驶结果数据。

为实验车辆避撞控制性能的量化测试，设置车辆行驶路线拟合偏差以及行驶速度控制偏差作为测试指标，其中车辆行驶路线拟合偏差计算式为：

$$\chi = \int_0^{d_l} |x_{\text{control}}(t) - H_x(t)| + |y_{\text{control}}(t) - H_y(t)| dt \quad (27)$$

式中，(x<sub>control</sub>(t), y<sub>control</sub>(t))为t时刻控制方法作用下车辆的实际行驶位置坐标，d<sub>l</sub>为车辆的行驶路线长度。行驶速度控制偏差计算式为：

$$\epsilon(t) = |v_{\text{control}}(t) - v_m(t)| \quad (28)$$

式中，v<sub>control</sub>(t)为t时刻车辆的实际行驶速度。测试得出的车辆行驶路线拟合偏差和行驶速度控制偏差取值越小，证明对应方法的控制性能越优。另外，控制方法应用效果的测试指标设置为车辆动态曲率约束满足度和多障碍物避撞安全裕度，其中车辆动态曲率约束满足度用来衡量避撞轨迹曲率是否始终满足车辆动力学约束，由此度量车辆行驶的侧滑风险，而多障碍物避撞安全裕度量车辆与所有障碍物之间的最小安全距离相对于阈值的富余程度，反映车辆的碰撞风险。上述指标的计算式如下：

$$\begin{cases} \zeta = 1 - \frac{1}{T_{\text{control}}} \int_0^{T_{\text{control}}} h(|u(t)| > u_{\text{max}}) dt \\ \xi = \frac{1}{n_{\text{obstacle}}} \sum_{j=1}^{n_{\text{obstacle}}} \max\left(0, \frac{d_{\text{min}}(j) - d_{\text{safe}}}{d_{\text{safe}}}\right) \end{cases} \quad (29)$$

式中,  $T_{\text{control}}$  为车辆避撞行驶总时间,  $h(\cdot)$  为指示指数,  $n_{\text{obstacle}}$  为车辆行驶环境中布设的总障碍物数量,  $d_{\text{min}}(j)$  为控制车辆与第  $j$  个障碍物之间的最小距离。计算得出车辆动态曲率约束满足度越高、多障碍物避撞安全裕度取值越大, 证明对应控制方法的应用效果越优。

在静态和动态场景下, 应用不同控制方法开展测试, 得出车辆避撞控制性能测试结果如图 8 所示。

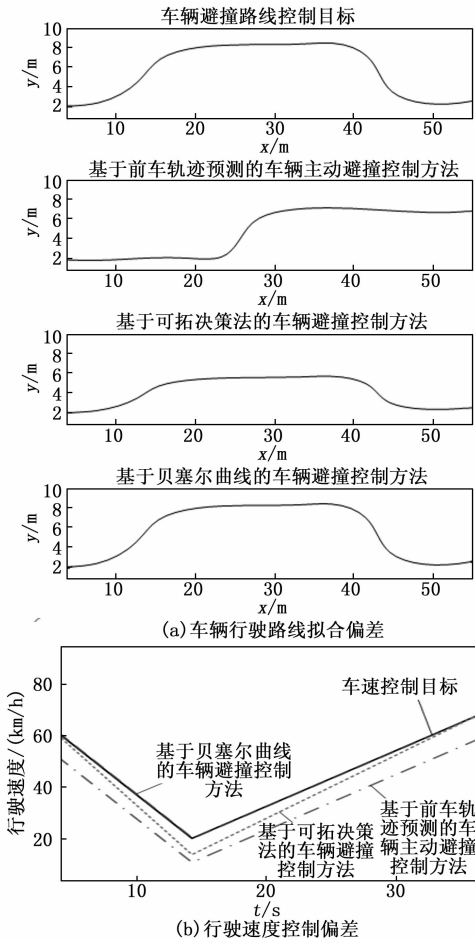


图 8 静态、动态场景车辆避撞控制性能测试结果

从图 8 (a) 中可以看出, 在静态和动态两种实验场景下, 与两种传统方法相比, 优化设计方法控制下车辆的实际行驶路线更接近路线控制目标, 将图 8 (a) 中的数据代入到公式 (26) 中, 计算得出优化设计方法的车辆行驶路线拟合偏差更小, 这主要得益于贝塞尔曲线在路径规划中的平滑性和可控性优势, 通过精确控制点配置实现了路径与目标轨迹的高度吻合。从图 8 (b) 中可以看出, 与传统控制方法相比, 优化设计方法控制作用下车辆行驶速度控制偏差更小, 且能够控制在

$\pm 1.0 \text{ m/s}$  以内, 表明该方法在保证路径跟踪精度的同时, 还能有效维持速度稳定性, 避免了传统方法因路径偏差导致的频繁加减速问题, 为车辆避撞提供了更加平稳可靠的行驶状态。

按照上述方式, 在静态实验场景中, 得出车辆实际行驶数据, 得出该场景下车辆避撞控制性能测试结果, 如图 9 所示。

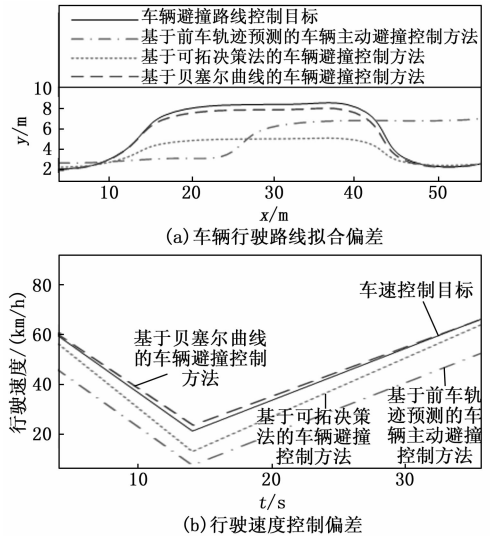


图 9 静态复合场景车辆避撞控制性能测试结果

通过图 9 和图 8 中数据的比对, 证明在静态复合场景中, 3 种控制方法作用下对应车辆的车辆行驶路线拟合偏差和行驶速度控制偏差均存在不同程度的提升, 通过横向对比, 发现优化设计方法的偏差波动程度更小, 且远低于两种对比方法, 这表明在复杂环境下该控制方法展现出更强的鲁棒性和稳定性, 特别是在处理动态障碍物与静态障碍物同时存在的复合场景时, 其基于贝塞尔曲线的路径规划算法能够更好地适应环境变化, 有效协调路径跟踪精度与速度控制之间的关系, 从而确保车辆在各种复杂路况下都能保持平稳安全的行驶状态, 为实际道路环境中的智能避撞控制提供了可靠的技术支持。综合考虑静态、动态以及静态复合场景, 通过 3 种控制方法的执行, 对车辆行驶的安全情况进行度量, 得出控制方法应用效果如图 10 所示。

从图 10 中可以看出, 在 3 种车辆行驶场景下, 通过优化设计控制方法的应用, 车辆控制对象的曲率均低于最大曲率约束值, 且控制车辆与所有障碍物之间保持的最小距离明显高于安全距离, 将图 10 中的数据代入到公式 (25) 中, 计算得出优化设计方法的车辆动态曲率约束满足度和多障碍物避撞安全裕度明显高于两种对比方法, 即优化设计方法具有更优的应用效果, 这充分验证了基于贝塞尔曲线的控制算法在保证车辆行驶稳定性的同时能够有效维持安全避障距离, 其路径平滑特性

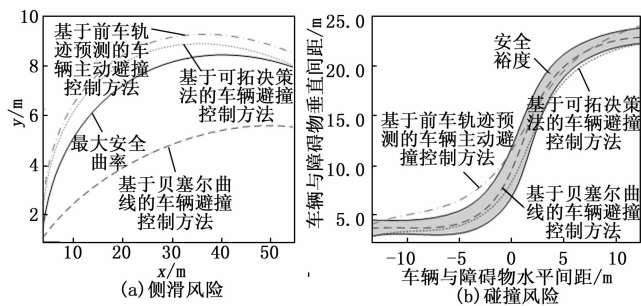


图10 车辆避撞控制方法应用效果测试结果

避免了传统方法在复杂场景下可能出现的急转弯或路径突变问题，从而实现了更加安全可靠的避撞控制，特别是在处理多障碍物交互的动态场景时，该方法通过精确的轨迹规划和安全距离计算，确保了车辆在整个避撞过程中的运动连续性和安全性，为智能车辆的主动安全控制提供了有效的技术解决方案。

### 3 结束语

车辆避撞控制的核心目的在于通过实时感知与动态决策，主动预防碰撞事故的发生，从而显著提升道路交通的安全性、降低人员伤亡风险。在此次研究中，通过贝塞尔曲线的应用，以数学优化的方式实现轨迹规划的平滑性与可控性，通过控制点的灵活配置，可精准约束车辆运动轨迹的曲率与加速度，避免急转或急停等不安全动作；同时，其导数连续的特性确保了轨迹的动态一致性，使车辆能够以自然流畅的路径完成避撞动作。未来将持续深化算法与硬件的协同优化，探索多传感器融合感知方案，结合深度学习技术提升复杂场景下的决策鲁棒性，并通过 V2X 车路协同扩展系统感知维度。此外，研究还将聚焦于人机共驾场景下的控制权动态分配机制，确保系统干预与驾驶员操作的平滑过渡，最终形成兼顾安全性与舒适性的智能避撞控制体系，为自动驾驶技术的规模化落地提供关键技术支撑。

#### 参考文献：

[1] 肖礼明, 张发旺, 陈良发, 等. 依托多风格强化学习的车辆轨迹跟踪避撞控制 [J]. 汽车工程, 2024, 46 (6): 945-955.

[2] 田国红, 代鹏杰. 基于单亲遗传算法的无人驾驶汽车主动避撞方法 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2023, 53 (8): 2404-2409.

[3] 赵林峰, 丰肖, 方婷, 等. 基于前车轨迹预测的智能车辆高速主动避撞方法 [J]. 机械工程学报, 2024, 60 (10): 289-301.

[4] 陈翔, 程硕, 赵万忠, 等. 基于可拓决策法的车辆自适应避撞控制方法研究 [J]. 力学学报, 2023, 55 (1): 213-222.

[5] 何庆, 徐月云, 边有钢, 等. 基于自适应势场的车辆避撞轨迹规划与跟踪控制 [J]. 汽车技术, 2024 (10): 8-19.

[6] 李臣旭, 江浩斌, 张旭培, 等. 基于模糊规则的智能汽车弯曲坡道避撞控制研究 [J]. 机械设计, 2023, 40 (4): 1-8.

[7] 王衍学, 裴如庆, 冯剑波. 基于 NMPC 的智能汽车变道避撞控制研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2024, 52 (3): 290-298.

[8] 孔慧芳, 夏露, 张倩. 基于改进人工势场法的智能车辆避撞路径规划 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2023, 46 (5): 583-589.

[9] 宁强, 刘元盛, 谢龙洋. 基于 SAC 的自动驾驶车辆控制方法应用 [J]. 计算机工程与应用, 2023, 59 (8): 306-314.

[10] 蒋浩, 赵又群, 林菜, 等. 基于 3 种类型驾驶员变安全距离防夹塞变道的车辆控制策略 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2023, 44 (6): 644-650.

[11] 李永福, 周发涛, 黄龙旺, 等. 基于深度强化学习的网联车辆队列纵向控制 [J]. 控制与决策, 2024, 39 (6): 1879-1887.

[12] 孙伟, 张梦雅, 马成元, 等. 新型混合交通交叉口信号与车辆轨迹协同控制方法 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23 (1): 97-105.

[13] 李尧尧, 郭超然, 李杨, 等. 基于转向与制动协同的无人车辆轨迹跟踪控制 [J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45 (4): 1185-1192.

[14] 周寅飞, 张立华, 贾帅东, 等. 最大可航窗口序列约束贝塞尔曲线的无人船自主航行航线规划方法 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2024, 49 (7): 1224-1236.

[15] 黄志锋, 刘媛华. 基于四阶贝塞尔曲线和改进狮群优化算法求解路径规划问题 [J]. 信息与控制, 2023, 52 (2): 176-189.

[16] 曹昌盛, 曹昊天. 基于贝塞尔曲线的智能汽车避障轨迹规划方法研究 [J]. 电子技术应用, 2024, 50 (2): 17-22.

[17] 王新庆, 王继荣, 杨振宇, 等. 智能汽车纵横向主动避撞控制算法研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2025, 48 (3): 289-296.

[18] 黄子文, 李莉, 周兵, 等. 极限工况下的车辆转向避撞风险指数 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2023, 57 (12): 2381-2390.

[19] 杨立柱, 李冰. 基于模糊 MPC 的自主车辆队列转向换道协同控制系统设计 [J]. 电子设计工程, 2025, 33 (3): 53-57, 62.

[20] 刘军, 王菁菁, 刘皓皓, 等. 一种二阶滑模汽车路径跟踪控制方法 [J]. 机械设计与制造, 2025 (2): 369-374.