

doi: 10.7690/bgzd.2025.02.009

基于双贝塞尔曲线的稳定避障轨迹规划方法

刘方涛¹, 冯梦如²

(1. 重庆工程职业技术学院教务处, 重庆 402260; 2. 重庆邮电大学计算机科学与技术学院, 重庆 400065)

摘要: 为满足动态场景中智能车辆实时规划安全避障轨迹需求, 提出一种基于双贝塞尔曲线的智能车辆稳定避障轨迹规划方法。对传统贝塞尔曲线进行改进, 建立加入中转状态的双贝塞尔曲线轨迹规划策略, 通过最小纵向安全距离模型优化中转位置以保证避障安全。结合场景信息建立车辆动力学约束优化避障策略, 保证避障过程稳定性, 从而得到合理轨迹集合。基于安全性与稳定性设计评价函数, 以从合理轨迹集合中获取综合性能最优避障轨迹。进行 CarSim/Simulink 联合仿真与硬件在环实验。实验结果表明: 智能车辆避障过程中始终与障碍物保持一定安全距离, 且车辆最大横摆角速度、横向加速度与侧倾角最大值分别为 10.1 (°)/s, 2.4 m/s² 与 0.91°, 证明所提出的轨迹规划方法在多种工况下均能生成最优避障轨迹, 能保证避障过程安全、平稳完成。

关键词: 智能车辆; 避障; 轨迹规划; 双贝塞尔曲线; 中转状态

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A

Stable Obstacle Avoidance Trajectory Planning Method Based on Double Bezier Curve

Liu Fangtao¹, Feng Mengru²

(1. Academic Affairs Office, Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, China;

2. School of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts
and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to meet the requirements of real-time planning of safe obstacle avoidance trajectory for intelligent vehicles in dynamic scenes, a stable obstacle avoidance trajectory planning method for intelligent vehicles based on double Bezier curves is proposed. The traditional Bezier curve is improved, and the trajectory planning strategy of double Bezier curve with transit state is established, and the transit position is optimized by the minimum longitudinal safety distance model to ensure the safety of obstacle avoidance. Combining with the scene information, the vehicle dynamic constraint optimization obstacle avoidance strategy is established to ensure the stability of the obstacle avoidance process, so as to obtain a reasonable trajectory set. An evaluation function is designed based on safety and stability to obtain an optimal obstacle avoidance trajectory with comprehensive performance from a reasonable trajectory set. CarSim/Simulink co-simulation and hardware-in-the-loop experiment are carried out. The experimental results show that the intelligent vehicle keeps a certain safe distance from the vehicle in the process of obstacle avoidance, and the maximum yaw rate, lateral acceleration and roll angle of the vehicle are 10.1 (°)/s, 2.1 m/s² and 0.91°, respectively, which proves that the proposed trajectory planning method can generate the optimal obstacle avoidance trajectory under various working conditions, and can ensure that safe and stable completion of the obstacle avoidance process.

Keywords: intelligent vehicle; obstacle avoidance; trajectory planning; double Bezier curve; transit state

0 引言

随着汽车保有量的逐年升高导致交通问题日益严重。多数交通问题是由于人为失误所造成, 智能车辆的出现将有效解决此类问题^[1-3]。在复杂多变的交通环境中, 智能车辆常会遇到前方存在障碍的情况, 规划合理的避障轨迹能够保证智能车辆安全稳定的躲避障碍物, 极大程度地降低车辆道路行驶风险^[4-7]。避障轨迹规划方法的研究中, 常采用的方法有 A*算法^[8-10]、人工势场法^[11-13]、快速探索随机树

(rapidly-exploring random trees, RRT)算法^[14-15]、多项式曲线算法^[16-18]等。张亚萌等^[19]以动态加权方式对 A*算法中启发式估计函数的启发因子做出改进, 并扩大障碍物影响半径, 以保证规划路径不与障碍发生碰撞。Wu 等^[20]提出基于自适应安全 A*算法的路径规划方法, 将带有启发式权重的排斥项引入 A*算法, 并用 Floyd 删除算法去除冗余路径点, 降低了路径时间。但 A*算法规划轨迹存在曲率突变现象, 导致车辆行驶稳定性差。Zhai 等^[21]在传统人

收稿日期: 2024-07-24; 修回日期: 2024-08-24

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJQN201903402, KJQN202303439); 重庆高校创新研究群体项目 (CXQT21032)

第一作者: 刘方涛(1981—), 男, 重庆人, 硕士。

工势场法基础上加入虚拟目标点, 并建立静态障碍物的水滴斥力场函数与改进的动态障碍物势场函数, 使规划轨迹平滑性得到提高。梅艺林等^[22]通过修改引力势场函数使引力大小能够收敛于某一值, 并通过平滑的斥力计算公式避免斥力过大情况出现, 增强了算法规划路径的鲁棒性。人工势场法容易陷入局部最优与目标不可达的问题中, 导致在某些场景下无法生成避障路径。Huang 等^[23]采用 Delaunay 三角剖分确定换道安全域, 进而采用改进 RRT 生成可行轨迹簇, 利用模糊规则进行多目标优化找寻最优换道轨迹, 保证车辆安全换道的可行性与有效性。Ma 等^[24]在 RRT 轨迹规划过程中引入基于交通场景的规则模板和积极的扩展策略, 使 RRT 搜索效率更快, 保证车辆轨迹规划的实时性; 但 RRT 算法将车辆外形轮廓忽略, 导致规划路径存在安全风险。Zhang 等^[25]通过将 B 样条算法与 4 段式换道理论相结合, 详细分析车辆换道过程, 生成满足动力学与安全性约束的可行轨迹簇, 并建立多指标综合评价机制, 获得综合性能最优轨迹。张俊坤等^[26]通过 5 次多项式进行车辆轨迹规划研究, 根据周围车辆与摩擦圆约束得到合理轨迹。Li 等^[27]实现对动态环境信息进行快速响应, 通过多目标优化函数求解曲线控制点坐标, 规划得到最优路径。为保证贝塞尔曲线规划路径的精准性, 避免碰撞事故发生, 通常采用增加阶次的解决方式, 这会导致贝塞尔曲线计算过程更为复杂, 规划时间增加。同时, 除安全性以外, 稳定性也是评价车辆避障过程的重要指标, 而当前对于车辆稳定性的研究还有待提高。

针对以上问题, 笔者提出基于双贝塞尔曲线的稳定避障轨迹规划方法, 并经 CarSim/Matlab 联合仿真与硬件在环实验验证了该方法的有效性与优越性。

1 基于双贝塞尔曲线的避障轨迹规划

车辆在道路行驶过程中常会遇到前方行驶路线上存在静止车辆或低速行驶车辆情况, 为避免与此类障碍车辆发生碰撞, 车辆需做出对应避障操作。而规划合理的避障轨迹能够保证车辆避障过程中的安全性与稳定性, 减少危险交通事故发生。

1.1 贝塞尔曲线

贝塞尔曲线由 Pierre Bezier 于 1962 年提出, 其计算过程简易, 能保证实时规划平滑轨迹, 目前被广泛应用于智能车辆轨迹规划研究中。贝塞尔曲线

计算过程与选取的控制点密切相关, 其计算公式为:

$$B(u) = \sum_{i=0}^n C_n^i (1-u)^{n-i} u^i P_i. \quad (1)$$

式中: u 为自变量 (取值范围为 $[0, 1]$); n 为贝塞尔曲线阶数; P_i 为第 i 个控制点位置。

由式(1)可以看出, 贝塞尔曲线本质为多项式, 因此, 可将其进一步展开为:

$$\left. \begin{aligned} x(u) &= C_n^i (1-u)^{n-i} u^i x_i \\ y(u) &= C_n^i (1-u)^{n-i} u^i y_i \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

式中: $x(u)$ 为纵向状态; $y(u)$ 为横向状态; x_i 为第 i 个控制点纵向位置; y_i 为第 i 个控制点横向位置。

1.2 双贝塞尔曲线轨迹规划

笔者针对结构化道路中智能车辆避障行为进行研究, 在该场景下, 智能车辆沿右侧道路中心线匀速行驶, 其行驶路线前方存在一辆障碍车。智能车辆需要规划出左换道的避障轨迹, 实现躲避障碍车的目标。具体场景如图 1 所示, A_{ego} 为智能车辆, A_f 为障碍车。

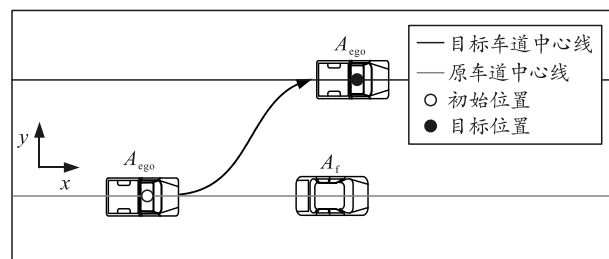


图 1 智能车辆避障场景

加入中转位置的避障过程如图 2 所示。避障过程中的首要任务是避免智能车辆与障碍车发生碰撞情况。为保证避障过程的安全性, 通过中转位置的引入将避障过程分为 2 段避障轨迹规划过程。在第 1 段轨迹中, 智能车辆从初始位置到达中转位置, 该位置智能车辆纵向位置小于障碍车, 横向位移大于障碍车的宽度, 保证了该过程中智能车辆不与障碍车发生碰撞危险。在第 2 段轨迹中, 智能车辆从中转位置到达目标位置, 该过程中智能车辆与障碍车不会在纵向存在交集, 同样保证了避障过程安全。

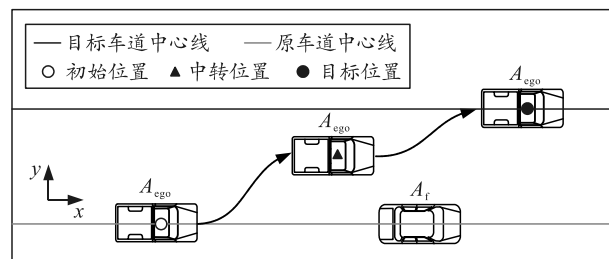


图 2 加入中转位置的避障过程

为避免贝塞尔曲线过高带来的计算量加大问题,对2段避障轨迹规划过程中均选取了三阶贝塞尔曲线。三阶贝塞尔曲线参数化表达式为:

$$\left. \begin{aligned} x(u) &= x_0 + (-3x_0 + 3x_1)u + (3x_0 - 6x_1 + 3x_2)u^2 + \\ &\quad (-x_0 + 3x_1 - 3x_2 + x_3)u^3 \\ y(u) &= y_0 + (-3y_0 + 3y_1)u + (3y_0 - 6y_1 + 3y_2)u^2 + \\ &\quad (-y_0 + 3y_1 - 3y_2 + y_3)u^3 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

为实现路径与速度同时规划,将自变量 u 转换为时间 t ,假设一段贝塞尔曲线的总时长为 t_1 ,则 u 与 t 的关系为:

$$u = t/t_1 \quad (4)$$

结合式(3)与(4)可以得到:

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= x_0 + (-3x_0 + 3x_1)t/t_1 + (3x_0 - 6x_1 + 3x_2)t^2/t_1^2 + \\ &\quad t_1^2 + (-x_0 + 3x_1 - 3x_2 + x_3)t^3/t_1^3 \\ y(t) &= y_0 + (-3y_0 + 3y_1)t/t_1 + (3y_0 - 6y_1 + 3y_2)t^2/t_1^2 + \\ &\quad t_1^2 + (-y_0 + 3y_1 - 3y_2 + y_3)t^3/t_1^3 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

在避障初始时刻车辆所处位置设定为原点,考虑到车辆位于避障初始位置时做匀速直线运动,则轨迹应满足约束为:

$$\left. \begin{aligned} y_1(0) &= \dot{y}_1(0) = \ddot{y}_1(0) = 0 \\ y_2(t_e) &= \dot{y}_2(t_e) = \ddot{y}_2(t_e) = 0 \\ x_1(0) &= \dot{x}_1(0) = \ddot{x}_1(0) = 0 \\ \dot{x}_1(0) &= \dot{x}_2(t_e) = v \\ x_2(t_e) &= X \\ y_2(t_e) &= Y \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: y_i, x_i 为第 i 段贝塞尔曲线的横纵向坐标; t_e 为第2段贝塞尔曲线总时长; X 为目标位置纵向位移; Y 为目标位置横向位移。

结合式(5)与(6)可以求得第1段贝塞尔曲线中前3个控制点位置坐标与第2段贝塞尔曲线中后3个控制点位置坐标分别为:

$$\left. \begin{aligned} P_0^1 &= (0, 0), P_1^1 = (v/3, 0) \\ P_2^1 &= (2v/3, 0) \\ P_1^2 &= (X - 2v/3, Y), P_2^2 = (X - v/3, Y) \\ P_3^2 &= (X, Y) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: P_i^1 为第1段贝塞尔曲线中第 i 个控制点; P_i^2 为第2段贝塞尔曲线中第 i 个控制点。

为保证2段贝塞尔曲线能完美连接,连接处不会出现曲率突变情况,则设定第1段曲线的最后1个控制点与第2段曲线的第1个控制点同处于中转位置,并且2段贝塞尔曲线关于该位置呈中心对称;

因此,中转位置的坐标为 $(X/2, Y/2)$,并且车辆运行第1段贝塞尔曲线所花费时间与第2段贝塞尔曲线花费时间相同。

智能车辆在避障过程中与障碍车发生的临界碰撞方式为角碰撞,临界碰撞状态如图3所示。图中 O 为临界碰撞点,为 $x_{\min}$ 智能车辆与障碍车最小纵向安全距离, x_{ego} 为智能车辆运行距离, x_f 为障碍车运行距离。

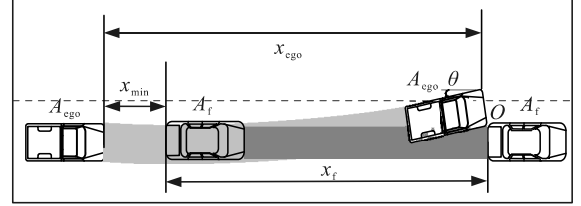


图3 临界碰撞

若智能车辆在达到临界碰撞状态的横向位置时,其纵向位置小于临界碰撞状态的纵向位置,即可保证智能车辆不会与障碍车有碰撞事故发生;因此,可根据智能车辆与障碍车速度、加速度、相对距离等信息建立最小纵向安全距离模型,模型公式为:

$$x_{\min} \geq \int_0^{t_z} (v_{\text{ego}} - v_f) dt + \int_0^{t_z} \int_0^{\psi} (a_{\text{ego}} - a_f) d\psi dt + h \cos \theta \quad (8)$$

式中: v_{ego} 为智能车辆速度; x_f 为障碍车速度; a_{ego} 为智能车辆加速度; a_f 为障碍车加速度; h 为智能车辆宽度; θ 为智能车辆与纵轴夹角; t_z 为临界碰撞时间。

由于避障过程较短,且避障过程中的车辆航向角较小,可以假设在避障过程中的车辆始终保持匀速行驶,且车辆处于平动状态。进而,通过最小纵向安全距离模型中的智能车辆临界碰撞状态可优化中转位置保证规划轨迹的安全性,中转位置应满足条件为:

$$\left. \begin{aligned} X/2 &\leq x_{\text{ego}} \\ (H_1 + h)/2 &\leq Y/2 \leq (3H_2 - h)/2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: H_1 为障碍车车宽; H_2 为单条车道宽度。

中转位置横向坐标过大会导致车辆易发生失稳情况,本文中确定 $Y/2 = (3H_2 + H_1)/4$ 作为中转位置的横向坐标。同时,借鉴最小跟驰距离模型^[28]理论,若保持智能车辆与障碍车始终处于安全状态,需满足最小跟驰距离为:

$$s = v_{\text{ego}} t + v_{\text{ego}}^2 / 2a_{\max} + D \quad (10)$$

式中: $a_{\max}$ 为最大制动加速度; t 为制动滞后时间(取

1 s); D 为智能车辆与障碍车静止后的安全距离。

将最小跟驰距离作为智能车辆与障碍车避障初始距离能够保证在智能车辆避障功能受损情况下, 仍可以采用减速刹车操作保证行车安全。结合式(8)与(10)即可求得临界碰撞时间, 并将该时间作为智能车辆到达中转位置所花费时间。

除安全性约束外, 车辆运行过程中还需保证稳定性, 否则车辆运行过程中易发生侧滑、侧翻等危险事故; 因此, 笔者通过车辆动力学建立约束条件, 保证车辆稳定性。对于车辆动力学分析过程中, 采用了车辆点质量动力学模型^[29], 该模型在车辆二自由度动力学模型基础上进一步简化车辆为一个质点, 使分析过程更为方便。此时车辆所受外力应保证在轮胎最大附着力范围内, 约束公式为:

$$F_x^2 + F_y^2 \leq (umg)^2。 \quad (11)$$

式中: F_x 为车辆所受的纵向力; F_y 为车辆所受到的横向力; u 为道路摩擦系数; m 为整车质量; g 为重力加速度。

对式(12)进一步简化, 可得:

$$a_x^2 + a_y^2 \leq (ug)^2。 \quad (12)$$

式中: a_x 为车辆纵向加速度; a_y 为车辆横向加速度。

在规划避障轨迹过程中要始终保证车辆满足式(12)的需求。

1.3 最优轨迹选取

根据上述算式可得, 仅需确定智能车辆目标状态所在位置坐标即可获取完整的避障轨迹。根据约束条件, 智能车辆目标位置并不是某固定坐标, 而是一个可行范围; 因此, 为寻找当前场景下的最优避障轨迹, 在安全约束与动力学约束下的纵向可行范围内, 采样目标位置所允许纵向位置坐标, 以得到能够满足约束条件的可行轨迹集合。建立轨迹评价函数, 选取具备最优评价结果的轨迹作为智能车辆避障轨迹。

考虑到智能车辆避障过程主要关注于安全性与稳定性, 因此, 为追求更高的轨迹性能, 以避障安全性与避障过程稳定性作为优化目标构建评价机制。避障过程中智能车辆与障碍车欧几里得距离越近, 代表越容易发生碰撞危险, 因此笔者选用智能车辆避障过程中与障碍车的最短欧几里得距离作为避障安全性评价指标。同时车辆的加速度反映车辆轮胎与地面摩擦力情况, 过大加速度会导致车辆发生失稳, 而加加速度反映了车辆加速度变化情况, 加加速度过大会引起车辆的冲击与振动, 导致车辆

避障过程稳定性变差; 因此, 选用智能车辆行驶过程中的最大加速度与加加速度作为避障稳定性的评价指标。最终建立的评价机制为:

$$\min w = \lambda_1 (f(a_{y,\max} + a_{x,\max}) + f(j_{y,\max} + j_{x,\max})) + \lambda_2 / \min(\sqrt{(x_{\text{ego}}^i - x_f^i)^2 + (y_{\text{ego}}^i - y_f^i)^2})。 \quad (13)$$

式中: λ_1 为避障稳定性权重系数; λ_2 为避障安全性权重系数; $f(\bullet)$ 为归一化函数; $a_{y,\max}$ 为最大横向加速度; $a_{x,\max}$ 为最大纵向加速度; $j_{y,\max}$ 为最大横向加加速度; $j_{x,\max}$ 为最大纵向加加速度; x_{ego}^i 为智能车辆 i 时刻纵向坐标; x_f^i 为障碍车 i 时刻纵向坐标; y_{ego}^i 为智能车辆 i 时刻横向坐标; y_f^i 为障碍车 i 时刻横向坐标。

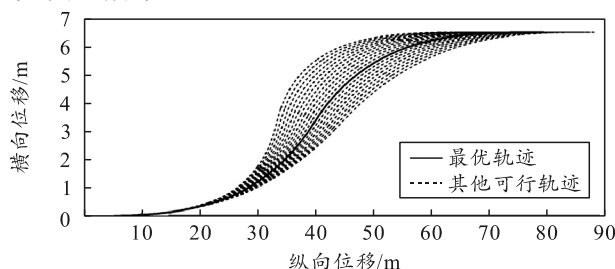
考虑到安全性比稳定性更加重要, 设置权重系数 $\lambda_1=0.6$, $\lambda_2=0.4$, 并且由于智能车辆与障碍车的最短距离、最大横向加速度与最大纵向加速度并不处于同一数量级, 直接运算将会导致评价结果可靠性差, 因此, 需对不同评价指标均做归一化处理后再进行计算。

2 仿真与实验

为验证所提出避障轨迹规划方法的合理性, 通过 CarSim/Simulink 联合仿真与硬件在环实验对不同工况下所规划的避障轨迹进行验证。在设定场景中, 单车车道宽度设定为 3.75 m, 道路附着系数为 0.8, 智能车辆与障碍车的车身长度均为 4.2 m, 车身宽度均为 1.8 m。

2.1 联合仿真

设定障碍车存在静止与低速行驶 2 种状态, 其中低速行驶状态下行驶速度为 18 km/h, 并设定智能车辆分别以初速度 54 与 90 km/h 躲避障碍车。在满足约束条件的情况下, 不同工况下均以等间距采样步长规划 20 条可行避障轨迹, 以目标位置纵向位移从小到大顺序分别给可行轨迹命名为 $T_1 \sim T_{20}$ 。面向静止障碍车工况如图 4 所示, 面向低速障碍车工况如图 5 所示。



(a) 54 km/h 工况下的可行轨迹集合

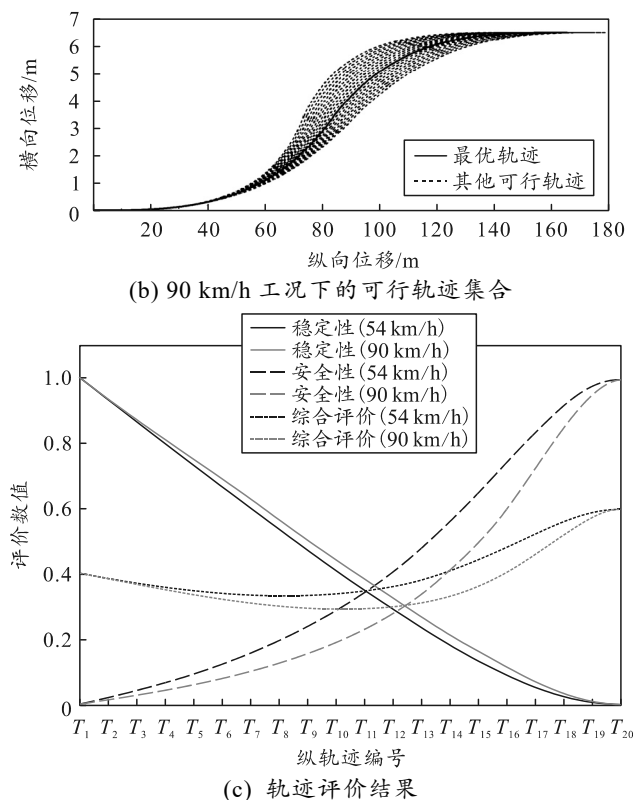


图4 静态障碍车工况

图4(c)可看出：智能车辆以54与90 km/h速度行驶过程中，行车稳定性评价指标呈现的不断下降的变化趋势，随目标位置纵向位移增加，行车稳定性得到提高。同时，避障安全性指标呈现不断上升趋势，表明目标位置纵向位移的增加导致避障安全性降低。通过综合评价结果，可以看出：54 km/h工况下， T_8 轨迹具有最小评价结果为最优轨迹；90 km/h工况下， T_{10} 轨迹具有最小评价结果，为最优轨迹。

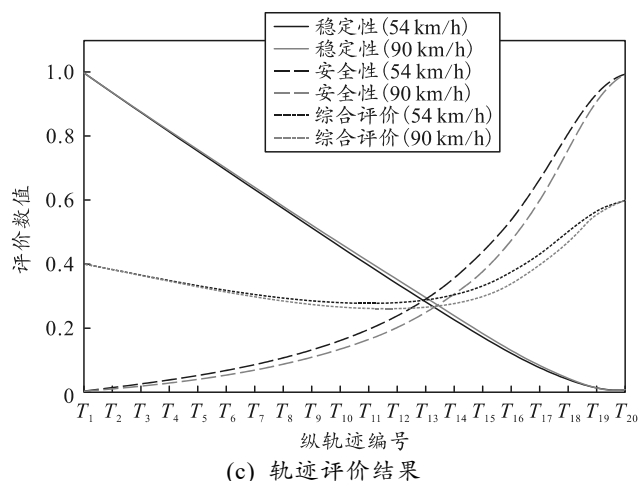
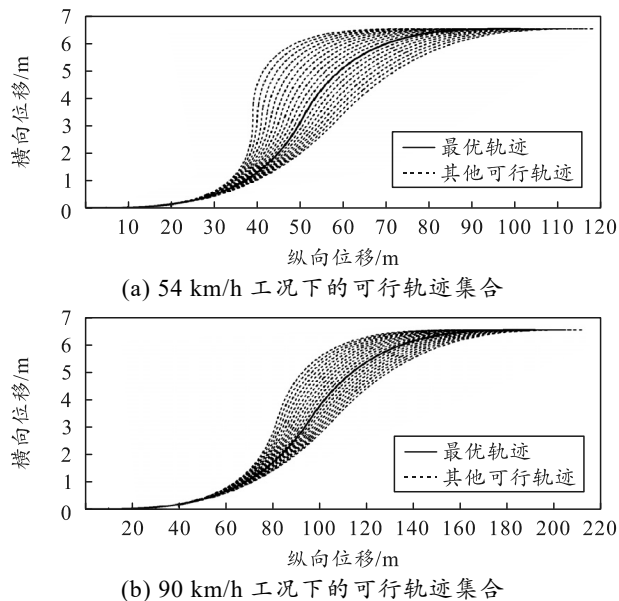


图5 动态障碍车工况

图5(c)可看出：智能车辆以54与90 km/h速度行驶过程中，行车稳定性评价指标呈现的不断下降的变化趋势，随目标位置纵向位移增加，行车稳定性得到提高。同时，避障安全性指标呈现不断上升趋势，表明目标位置纵向位移的增加导致避障安全性降低。通过综合评价结果，可以看出54 km/h工况下， T_{11} 轨迹具有最小评价结果为最优轨迹；同时，90 km/h工况下， T_{12} 轨迹具有最小评价结果为最优轨迹。

为验证智能车辆沿最优轨迹行驶过程的安全性，计算其与障碍车的横纵向位移差如表1所示。可以看出：在以54 km/h速度行驶躲避静态障碍车工况下，智能车辆在第3.5 s时与障碍车横向位移差已经超出碰撞范围，此时其与障碍车纵向位移差为正，证明智能车辆不会与障碍车存在碰撞风险。在智能车辆以90 km/h速度行驶躲避静态障碍车工况下，第4.2 s时与障碍车横向位移差已经超出碰撞范围，此时其与障碍车纵向位移差为正，证明智能车辆不会与障碍车发生碰撞。在以54 km/h速度行驶躲避动态障碍车工况下，智能车辆在第4.5 s时与障碍车横向位移差已经超出碰撞范围，此时其与障碍车纵向位移差为正，证明智能车辆不会与障碍车存在碰撞风险。在智能车辆以90 km/h速度行驶躲避动态障碍车工况下，第5 s时与障碍车横向位移差已经超出碰撞范围，此时其与障碍车纵向位移差为正，证明智能车辆不会与障碍车发生碰撞。

考虑到动态障碍车工况更为复杂，对规划轨迹的质量需求更高。为进一步验证最优轨迹性能，对动态障碍车工况下智能车辆沿规划轨迹行驶过程中的动力学参数指标展开分析。仿真过程中车辆横摆角速度变化情况如图6所示。可以看出：2种工况

下车辆最大横摆角速度为 10.04 deg/s，证明车辆运行过程中不会发生侧滑、甩尾等危险交通事故发生。

表 1 智能车辆与障碍车横纵向位移差

分类	避障 时间/ s	54 km/h 工况		90 km/h 工况	
		横向位 移差/m	纵向位 移差/m	横向位 移差/m	纵向位 移差/m
静态 障碍车 工况	0	0	44.35	0	89.86
	0.35	0.005	40.86	0.003	82.87
	0.70	0.043	37.44	0.024	75.93
	1.05	0.146	34.16	0.081	69.08
	1.40	0.350	31.09	0.190	62.39
	1.75	0.680	28.29	0.380	55.89
	2.10	1.170	25.84	0.650	49.64
	2.45	1.860	23.80	1.030	43.69
	2.80	2.770	22.25	1.540	38.09
	3.15	3.260	21.73	2.200	32.88
	3.50	4.290	20.42	3.010	28.12
	3.85	5.070	18.59	3.260	26.92
动态 障碍车 工况	4.20	5.650	16.31	4.130	22.29
	0	0	39.35	0	84.86
	0.5	0.007	34.37	0.005	74.88
	1.0	0.054	29.51	0.043	64.99
	1.5	0.181	24.87	0.144	55.31
	2.0	0.430	20.59	0.340	45.92
	2.5	0.840	16.78	0.670	36.93
	3.0	1.450	13.55	1.150	28.43
	3.5	2.300	11.02	1.830	20.53
	4.0	3.260	9.47	2.730	13.33
	4.5	4.350	7.65	3.260	10.10
	5.0	5.170	5.02	4.290	3.27
	5.5	5.750	1.70	5.070	-4.30
	6.0	6.140	-2.18	5.640	-12.52

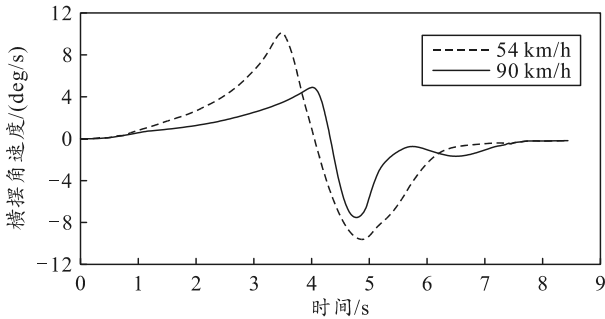


图 6 横摆角速度

图 7 表示车辆横向加速度变化情况。由图 7 可知：在 2 种工况下，车辆最大横向加速度为 2.22 m/s²，该值远小于 0.4 g，证明车辆避障过程中始终处于线性工作区内，不会发生失稳情况。

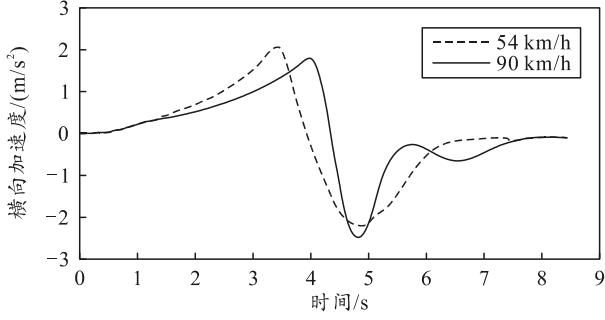


图 7 横向加速度

图 8 表示车辆侧倾角变化情况。由图 8 可知：在 2 种工况下，车辆侧倾角最大值为 0.84 deg，证明车辆发生侧翻事故的可能性极低，保证了行车安全。

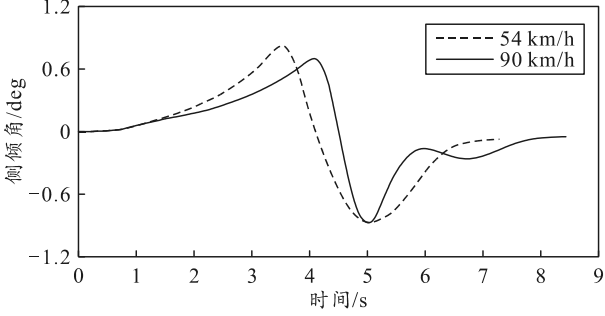
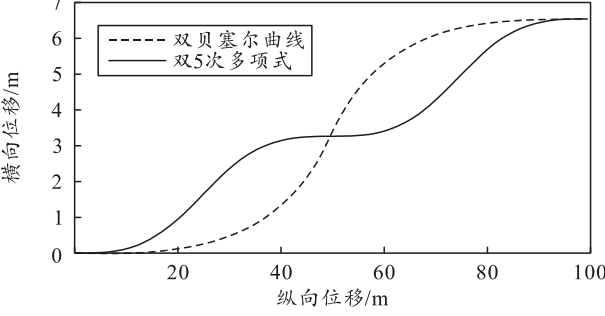
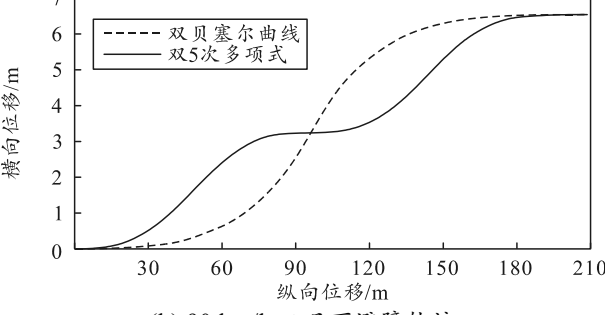


图 8 侧倾角

为进一步验证双贝塞尔曲线方法在规划智能车辆避障轨迹方面的优越性，采用双 5 次多项式轨迹规划方法^[30]进行对比实验，实验结果如图 9 所示。



(a) 54 km/h 工况下避障轨迹



(b) 90 km/h 工况下避障轨迹

图 9 对比实验

由上图可以看出：基于双 5 次多项式算法所规划轨迹结果明显更为曲折，而笔者提出的双贝塞尔曲线轨迹规划方法所规划轨迹更为平滑，更贴近于真实交通场景下的车辆避障过程，该方法更具优越性。

2.2 硬件在环实验

为给笔者提出的避障轨迹规划方法提供更加有效的证明结果，通过上位机、Kvaser 以及转向控制器构成硬件在环平台，具体应用过程如图 10 所示。

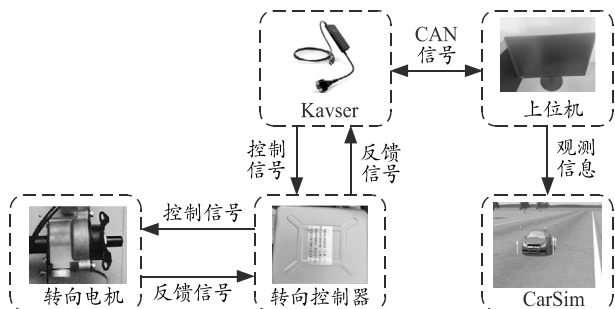
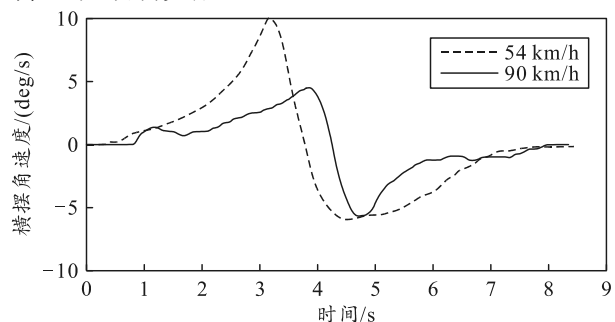
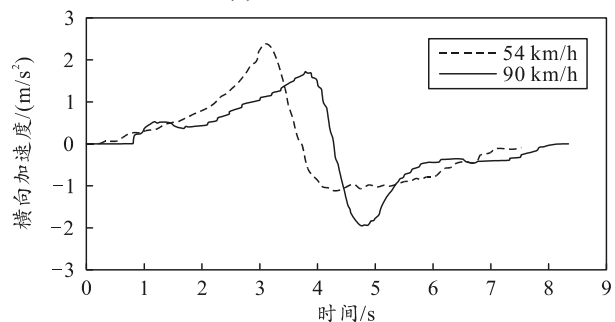


图10 硬件在环系统

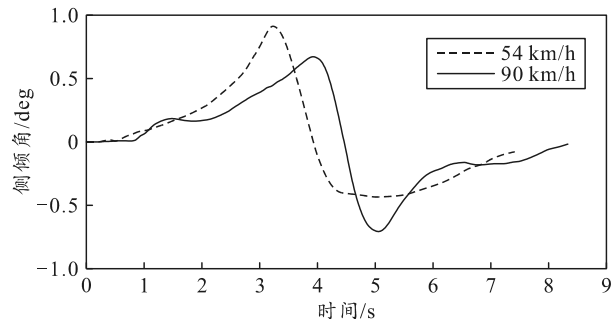
经过硬件在环实验得到的车辆沿规划轨迹行驶过程中的动力学参数信息如图11所示。可以看出：硬件在环条件下，车辆横摆角速度最大值为10.1 (°)/s，横向加速度为2.4 m/s²，车辆侧倾角为0.91°，证明了车辆始终处于稳定性状态，保证了避障过程顺利完成。



(a) 横摆角速度



(b) 横向加速度



(c) 侧倾角

图11 硬件在环实验

通过联合仿真与硬件在环实验，结果展示出该避障轨迹规划方法能够在不同工况下实时生成合理

的平滑避障轨迹，保证了智能车辆避障过程的稳定性，满足车辆安全躲避障碍物的需求。

3 结论

为实现智能车辆动态场景实时避障需求，笔者提出了一种考虑避障稳定性的智能车辆双贝塞尔曲线轨迹规划方法，并开展联合仿真与硬件在环实验。实验过程中，智能车辆与障碍车无碰撞发生，且智能车辆避障过程中最大横摆角速度为10.1 deg/s，最大横向加速度为2.4 m/s²，最大侧倾角为0.91 deg。实验结果表明：基于双贝塞尔曲线的轨迹规划方法在不同工况下规划的避障轨迹均具备较好的稳定性与安全性，并保证了智能车辆安全躲避障碍车，证明了该方法的合理性与有效性。同时以双5次多项式算法进行对比试验，结果表明该方法在智能车辆避障轨迹规划方面具备一定的优越性。

受实验条件影响，实验验证部分仅进行了联合仿真与硬件在环实验，并没有实现实车实验。下一步，将继续开展实车试验，以确定该避障轨迹规划方法在实际交通环境中的适用性。

参考文献

- [1] 李光旭. 结合交互预测的智能车轨迹规划与跟踪控制[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [2] 陈鹏宇, 孔令安, 彭忆强. 基于五阶Bezier曲线的无人车避障轨迹规划[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(31): 13933-13941.
- [3] WANG P, YANG J, ZHANG Y, et al. Obstacle-avoidance path-planning algorithm for autonomous vehicles based on B-spline algorithm[J]. World Electric Vehicle Journal, 2022, 13(12): 233.
- [4] 胡林, 杨冬兆, 张新, 等. 基于DQP-LMPC的智能车超车换道动态路径规划[J]. 机械工程学报, 2024, 60(10): 171-181.
- [5] 李伟东, 李乐. 基于改进RRT算法的无人车路径规划[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(1): 160-166.
- [6] LI X, LU Y, ZHAO X, et al. Path planning for intelligent vehicles based on improved D* Lite[J]. The Journal of Supercomputing, 2024, 80(1): 1294-1330.
- [7] 黄晶, 刘祥臻, 邓潇阳, 等. 基于多模态轨迹预测的智能车轨迹规划研究[J]. 汽车工程, 2024, 46(6): 965-974, 1024.
- [8] LIN Z, WU K, SHEN R, et al. An Efficient and Accurate A-star Algorithm for Autonomous Vehicle Path Planning[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 6(73): 9003-9008.
- [9] ZHANG J, WU J, SHEN X, et al. Autonomous land vehicle path planning algorithm based on improved

- heuristic function of A-Star[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2021, 18(5): 1-4.
- [10] WANG P, LIU Y, YAO W, et al. Improved A-star algorithm based on multivariate fusion heuristic function for autonomous driving path planning[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2023, 237(7): 1527-1542.
- [11] 杨立炜, 李萍, 权赫, 等. 基于蚁群混合人工势场法的多机器人编队运动[J/OL]. 电光与控制, 1-8[2024-08-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1227.tn.20240603.1651.006.html>.
- [12] 张国胜, 李彩虹, 张耀玉, 等. 基于改进人工势场法的机器人局部路径规划[J/OL]. 计算机工程, 1-9[2024-08-31]. <https://doi.org/10.19678/j.issn.1000-3428.0068738>.
- [13] 时维国, 宁宁, 宋存利, 等. 基于蚁群算法与人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 407-416.
- [14] WANG H, LI G, HOU J, et al. A path planning method for underground intelligent vehicles based on an improved RRT* algorithm[J]. Electronics, 2022, 11(3): 294.
- [15] 周维, 过学迅, 裴晓飞, 等. 基于 RRT 与 MPC 的智能车辆路径规划与跟踪控制研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(9): 1151-1158.
- [16] ZHU S, WEI B, CHEN C, et al. Emergency steering collision avoidance control based on distributed driving intelligent vehicles[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2023, 35(2): 7486.
- [17] 李胜琴, 丁雪梅. 基于五次多项式的智能车辆轨迹规划[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 392-398.
- [18] 张金炜, 王文扬, 郭蓬, 等. 基于蚁群四次贝塞尔曲线的无人车路径规划[J]. 现代电子技术, 2019, 42(13): 113-116.
- [19] 张亚萌, 王钧, 符朝兴. 基于改进 A*算法的 AGV 路径规划研究[J/OL]. 青岛大学学报(工程技术版), 1-8[2024-08-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1268.TS.20240807.1518.002.html>.
- [20] WU X, ZHANG Q, BAI Z, et al. A self-adaptive safe A* algorithm for AGV in large-scale storage environment[J]. Intelligent Service Robotics, 2024, 17(2): 221-235.
- [21] ZHAI L, LIU C, ZHANG X, et al. Local Trajectory Planning for Obstacle Avoidance of Unmanned Tracked Vehicles Based on Artificial Potential Field Method[J]. IEEE Access, 2024, 2024(12): 19665-19681.
- [22] 梅艺林, 崔立堃, 胡雪岩, 等. 基于人工势场法的复杂环境下多无人车避障与编队控制[J/OL]. 工程科学学报, 1-14[2024-08-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1297.TF.20240830.1126.002.html>.
- [23] HUANG C, HUANG H, HANG P, et al. Personalized trajectory planning and control of lane-change maneuvers for autonomous driving[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(6): 5511-5523.
- [24] MA L, XUE J, KAWABATA K, et al. Efficient sampling-based motion planning for on-road autonomous driving[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(4): 1961-1976.
- [25] ZHANG Y, WANG P, CUI K, et al. An obstacle avoidance path planning and evaluation method for intelligent vehicles based on the B-spline algorithm[J]. Sensors, 2023, 23(19): 8151.
- [26] 张俊坤, 陈勇, 郭晓光. 面向车辆换道工况的智能车轨迹规划研究[J]. 机械设计与制造, 2024(3): 194-198, 204.
- [27] LI H, LUO Y T, WU J. Collision-free path planning for intelligent vehicles based on Bézier curve[J]. IEEE Access, 2019, 2019(7): 123334-123340.
- [28] 刘新亮. 智能车辆高速公路换道行为控制技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [29] 辛亮. 单轴转向架跨座式单轨车辆稳定性主动控制研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [30] 李胜琴, 张明瑞. 基于双五次多项式的智能汽车换道路径规划研究[J]. 南京信息工程大学学报, 2024, 16(2): 155-163.