



基于城市超车工况的智能车辆避障规划方法研究

唐友名, 孙冠豫, 孙贵斌, 黄雄栋, 张义, 陈慧勤

引用本文:

唐友名, 孙冠豫, 孙贵斌, 黄雄栋, 张义, 陈慧勤. 基于城市超车工况的智能车辆避障规划方法研究[J]. 智能系统学报, 2024, 19(3): 619–626.

TANG Youming, SUN Guanyu, SUN Guibin, et al. Autonomous vehicle trajectory planning based on urban overtaking conditions[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2024, 19(3): 619–626.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202209060>

您可能感兴趣的其他文章

基于虚拟力引导的人机协同目标抓取方法

Human-machine cooperative object grasping method based on virtual force guidance
智能系统学报. 2021, 16(4): 683–689 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202007046>

融合改进A*算法和Morphin算法的移动机器人动态路径规划

Mobile-robot dynamic path planning based on improved A* and Morphin algorithms
智能系统学报. 2020, 15(3): 546–552 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201812023>

多约束下多无人机的任务规划研究综述

A survey of mission planning on UAVs systems based on multiple constraints
智能系统学报. 2020, 15(2): 204–217 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201811018>

基于邻域系统的智能车辆最优轨迹规划方法

Optimal trajectory planning method of intelligent vehicles based on neighborhood system
智能系统学报. 2019, 14(5): 1040–1047 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201805004>

基于滚动时域的无人机动态航迹规划

Dynamic UAV trajectory planning based on receding horizon
智能系统学报. 2018, 13(4): 524–533 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201708031>

多移动机器人的领航-跟随编队避障控制

Piloting-following formation and obstacle avoidance control of multiple mobile robots
智能系统学报. 2017, 12(2): 202–212 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201507029>

DOI: 10.11992/tis.202209060

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1538.tp.20230802.1400.013>

基于城市超车工况的智能车辆避障规划方法研究

唐友名^{1,2}, 孙冠豫^{1,3}, 孙贵斌¹, 黄雄栋³, 张义¹, 陈慧勤⁴

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024; 2. 浙江科技学院 机械与能源工程学院, 浙江 杭州 310023; 3. 厦门金龙联合汽车工业有限公司, 福建 厦门 361024; 4. 杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 在城市道路行驶中, 超车驾驶既是常见的驾驶行为, 也是常见的交通事故工况之一。基于改进人工势场法 (artificial potential field method) 与模型预测控制 (model prediction control) 提出了一种避障规划控制方法。首先, 构建目标点引力势场函数、道路及车道线势场函数以及障碍物车辆势场函数; 其次, 基于势场函数建立统一化模型函数; 最后, 对系统进行模拟实验评估。结果表明, 提出的避障规划控制方法能够生成安全、平滑的路径, 其前轮转角变化范围在 $[-0.67^\circ, 1.02^\circ]$, 质心侧偏角变化范围在 $[-0.22^\circ, 0.32^\circ]$, 具有稳定的控制能力。

关键词: 自动驾驶; 人工势场法; 模型预测控制; 超车工况; 轨迹规划; 安全距离; 车辆动力学; 避障策略

中图分类号: TP181; U46 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2024)03-0619-08

中文引用格式: 唐友名, 孙冠豫, 孙贵斌, 等. 基于城市超车工况的智能车辆避障规划方法研究 [J]. 智能系统学报, 2024, 19(3): 619-626.

英文引用格式: TANG Youming, SUN Guanyu, SUN Guibin, et al. Autonomous vehicle trajectory planning based on urban overtaking conditions[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2024, 19(3): 619-626.

Autonomous vehicle trajectory planning based on urban overtaking conditions

TANG Youming^{1,2}, SUN Guanyu^{1,3}, SUN Guibin¹, HUANG Xiongdong³,
ZHANG Yi¹, CHEN Huiqin⁴

(1. Mechanical and Automotive Engineering College, Xiamen Technology University, Xiamen 361024, China; 2. School of Mechanical & Energy Engineering, Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou 310023, China; 3. Xiamen King Long United Automotive Industry Co., Ltd, Xiamen 361024, China; 4. Mechanical Engineering College, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Overtaking is a common driving behavior on urban road. It is also one of the common behaviors in traffic accidents. Based on the improved artificial potential field method (APF) and model prediction control (MPC), a barrier avoidance planning control method was proposed in this study. The method firstly built the gravitational potential field function of the target point, the potential field function of the road & lane line and the potential field function of the obstacle vehicle, then established the unified model function on the basis of the potential field function, and finally evaluated the simulation experiment of the system. The results show that the proposed obstacle avoidance planning control method can generate a safe and smooth path, with the change range of the turning angle of the front wheel within $[-0.67^\circ, 1.02^\circ]$, the change scope of the side slip angle within $[-0.22^\circ, 0.32^\circ]$, having stable control ability.

Keywords: automatic drive; artificial potential field method; model prediction control; overtaking conditions; trajectory planning; safe distance; vehicle dynamics; obstacle avoidance strategy

收稿日期: 2022-09-28. 网络出版日期: 2023-07-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51975172); 国家高端外专项目 (G20200221011); 福建省自然科学基金项目 (2021J011197); 浙江省自然科学基金项目 (LY19E050012); 厦门市重大科技项目 (3502Z20201015); 厦门理工学院研究生科技创新项目 (YKJCX2021024).

通信作者: 唐友名. E-mail: tangym1981@163.com.

©《智能系统学报》编辑部版权所有

汽车在城市道路行驶过程中超车是一种常见的驾驶行为^[1]。由于超车至少涉及到自车和前车, 因此存在潜在的碰撞风险。数据统计显示, 我国 2020 年有 24 万多例交通事故, 其中汽车交通事故占比 64%。因此提高在超车过程中的行驶

安全性成为减少交通事故风险的重要一环。自动驾驶汽车由于自身的优势,包括更好的安全性,更高的交通利用率以及能够减少能源消耗,逐步成为改善交通的良好方案^[2-5]。自动驾驶实现超车行为则是需要综合考虑自车路径规划与速度规划以及障碍物车辆的行驶轨迹与速度,因此被称为道路复杂工况之一。

自动驾驶路径规划目的是生成一条无碰撞路径,即车辆行驶安全是主要任务。常见的路径规划方法包括基于图搜索的方法,基于采样的方法,基于插值曲线的方法和基于数值优化的方法等^[6-7]。基于图搜索的方法主要包括 Dijkstra、A*和 D*以及它们的变体^[8-10]。采样的方法主要是快速搜索随机树方法^[11]。基于插值曲线的方法主要包括多项式曲线、B 样条曲线、三次样条曲线插值以及贝塞尔曲线^[12-13]等。人工势场方法^[14-16](artificial potential field, APF)通过将车辆所在的运行空间虚拟成一个力存在的场空间,车辆在场中受到引力和斥力共同影响,其具有结构简单、适应性强、实时性好的特点,同时会出现局部最小点的问题。模型预测控制(model prediction control, MPC)方法是一种常见的轨迹规划与跟踪控制方法^[17]。综合各种规划方法的特点,本文将采用人工势场法与模型预测控制方法结合的方式进行轨迹规划。

对于自动驾驶的超车问题,张志勇等^[18]将超车行为分为变道、匀速、变道 3 个阶段,并分别进行路径规划。Bhargav 等^[19]通过策略学习方法融入超车规划与控制中,从而构建一种实现超车行为控制器。张家旭等^[20]设计一种动态环境增量的搜索算法,进而规划出汽车弯道超车路径并基于线性鲁棒性控制法保证最优性能控制策略。王树凤等^[21]通过构建一种新型人工势场从而实现超车行为。Wu 等^[22]提出基于冬天太模糊的时间差学习,来判断是否超车,从而降低交通碰撞的可能性。Jeno 等^[23]构建有限状态机,结合安全,舒适行程效率等特征,从而生成最佳轨迹。

针对超车避障问题,现有研究通常涉及高速公路的工况或静态或前车车速恒定的情况。然而,在实际道路避障过程中,障碍物车辆通常是动态且行驶速度并不是恒定。考虑到时间成本以及行驶稳定性,我们希望在自车安全的前提下,按照预定要求避开障碍物。

本文基于安全距离的方法判断是否符合安全超车行为,根据人工势场法设计引力势场函数、道路势场函数、障碍物势场函数从而构建出车辆

行驶可行域,并结合模型预测控制方法进行构建可行轨迹,最终通过模拟实验验证该方法。

1 问题描述

超车场景如图 1 所示,在城市双向四车道道路工况下(本图只显示一侧),蓝色虚线是自车(蓝色矩形)的全局参考轨迹。由于前方有车辆(橙色矩形),且前车的驾驶行为动态变化。为了保证在安全的情况下处理该场景,自车需要在此阶段判断驾驶行为,进行减速或超车。若进行超车行为,车辆选择合适的超车时机,并选择合适的轨迹。如何选择合适的驾驶行为并生成合适的轨迹(绿色虚线)是解决这个问题的关键。

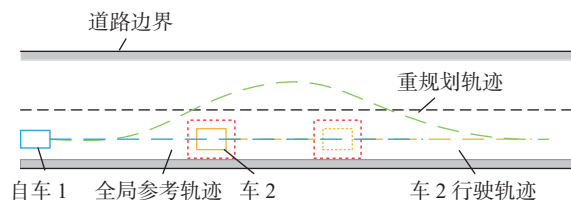


图 1 超车场景

Fig. 1 Overtaking scenario

针对上述所研究的问题,本文提出一种避撞规划策略。在介绍该策略前,首先对于研究问题基于几点假设:

- 1) 在局部路径中,障碍物均可被感知层获取;
- 2) 环境良好,不存在极端天气,道路条件良好,道路摩擦恒定;
- 3) 根据城市道路有关规定,车辆行驶速度不超过 60 km/h;
- 4) 初始时刻自车与障碍物车辆保持在安全行驶范围,不存在极端工况。

2 避撞规划策略

自车在城市工况道路行驶遇到前方有车辆时,会采取减速、跟车行驶、变道或超车等驾驶行为。在与前方车辆行驶路径在未来某时刻可能会发生碰撞危险时,此时车辆的策略很重要,一般有 2 种选择,减速或者加速超车,在行驶安全的前提下,后者会带来更优的时间成本以及更少的能源消耗。本文基于以下假设:即两车发生碰撞的充分必要条件是两车在同一时刻轨迹空间有交叉或覆盖。

2.1 驾驶行为规划

为了更好地规划车辆超车轨迹,使之与驾驶员超车行为一致,需要分析超车换道行为特点,将其融合到车辆超车换道的路径规划中。发生超

车行为需要满足以下条件:当前自车速度大于前方车辆速度,且相邻车道有安全行驶空间;全过程两车保持安全距离,包括横向与纵向安全距离。

基于上述超车行为判据条件,在横向与纵向上基于一种改进的安全距离模型,计算出两车的最短安全距离。

1)若前车以最大减速度制动停车,自车同样制动停车,此时极限工况下纵向安全距离:

$$d_{xs} = \frac{1}{2} \left(\frac{v_x^2}{a_{x\max}^2} - \frac{v_{ox}^2}{a_{ox\max}^2} \right) + \frac{(L+L_o)}{2} + v_x t_0 + d_x \quad (1)$$

式中: v_x 为自车纵向速度; v_{ox} 为障碍物车辆纵向速度; $a_{x\max}$ 为自车制动最大纵向加速度; $a_{ox\max}$ 为障碍物制动最大纵向加速度; L 为自车长度; L_o 为障碍物车辆长度; t_0 为自车反应时间,与车辆各组件信息传递相关; d_x 为预留最小纵向安全距离。

2)自车以最大横向加速度转向行驶,此时极限工况下横向安全距离:

$$d_{ys} = \left(\frac{L \sin \varphi}{2} + \frac{W \cos \varphi}{2} \right) + \frac{W_{\text{obs}}}{2} + d_y \quad (2)$$

式中: L 为自车长度; W 为自车宽度; W_{obs} 为障碍物车辆宽度; d_y 为预留最小横向安全距离。

图2中,黑色矩形是障碍物车辆示意图,红色椭圆则为车辆安全距离,此时障碍物车辆安全距离可看作以纵向安全距离为长轴,以横向安全距离为短轴的椭圆。

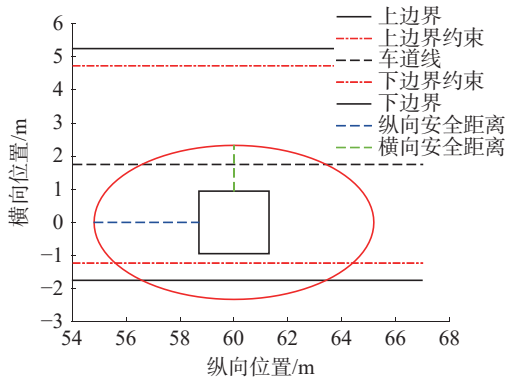


图2 障碍物安全距离示意

Fig. 2 Obstacle safety distance schematic

2.2 车辆模型的建立

使用复杂的模型能够更好地对车辆输出进行预测,但同时增大了规划控制器的计算量,实时性难以保证,而使用简单的模型有可能导致跟踪失败。Liu等^[24]研究证明2自由度模型与14自由度模型在加入约束后具备相近的效果并且计算时间优势明显。本文选择2自由度车辆动力学模型作为车辆动力学模型,如图3所示。

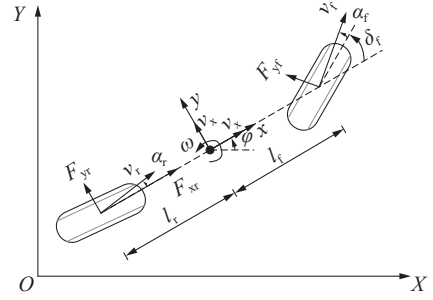


图3 车辆动力学模型

Fig. 3 Vehicle dynamics model

在这种情况下,车辆轮胎在小横向加速度下的线性区域运行,可以基于简单的线性轮胎模型计算车辆侧向力,该模型采用等效的轮胎转弯刚度。

$$m\dot{v}_y = -mv_x + 2 \left[\bar{C}_{af} \left(\delta_f - \frac{v_y + l_f \dot{\varphi}}{v_x} \right) + \bar{C}_{ar} \frac{l_r \dot{\varphi} - v_y}{v_x} \right] \quad (3)$$

$$m\dot{v}_x = mv_y \dot{\varphi} + 2 \left[C_{lf} s_f + \bar{C}_{af} \left(\delta_f - \frac{v_y + l_f \dot{\varphi}}{v_x} \right) \delta_f + C_{lr} s_r \right] \quad (4)$$

$$I_z \ddot{\varphi} = 2 \left[l_f \bar{C}_f \left(\delta_f - \frac{v_y + l_f \dot{\varphi}}{v_x} \right) - l_r \bar{C}_r \frac{l_r \dot{\varphi} - v_y}{v_x} \right] \quad (5)$$

$$\dot{\varphi} = r \quad (6)$$

$$\dot{Y} = v_x \sin \varphi + v_y \cos \varphi \quad (7)$$

$$\dot{X} = v_x \cos \varphi - v_y \sin \varphi \quad (8)$$

式中: m 是车辆质量, I_z 是车辆绕 z 轴转动惯量, \bar{C}_{af} 和 \bar{C}_{ar} 分别是车辆模型前后轮的线性侧偏刚度, C_{lf} 和 C_{lr} 是车辆前后轮胎的纵向侧偏刚度, δ_f 是前轮偏角, l_f 和 l_r 质心到前后轴的距离。

2.3 设计规划控制器

2.3.1 设计人工势场

传统的人工势场法是一种虚拟力方法,根据电荷间相互作用规律演变而来,其基本思想是,在被控对象运动环境人为建立势场,其中障碍物为斥力场,目标点为引力场,分别对被控对象产生斥力和引力,引力和斥力构成的合力控制被控对象的运动方向,其中:

$$F_{\text{att}} = K \times \rho_g \times a_g \quad (9)$$

$$F_{\text{re}} = \begin{cases} \delta \times \left(\frac{1}{\rho_e} - \frac{1}{\rho_0} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_e^2} \right), & \rho_e \geq \rho_0 \\ 0, & \rho_e < \rho_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: F_{att} 为目标点对被控对象的引力, F_{re} 为障碍物对被控对象的斥力。

在本文改进的人工势场法中,将势场分为目标引力点势场、道路斥力势场,障碍物斥力势场。在车辆行驶的道路上,基于纵向的安全与横向安全距离不同,其势场范围做相应变化。

1) 目标点引力势场 U_T

构建出虚拟目标点 (X_{vt}, Y_{vt}) 与实际目标点 (X_{rt}, Y_{rt}) 最终根据虚拟目标点与实际目标点综合影响引力势场, 如图 4 所示。

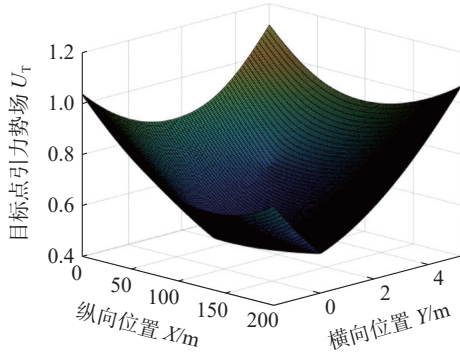


图 4 目标点引力势场示意

Fig. 4 Schematic of the gravitational potential field at the target point

$$d_t = \left((X - X_{rt})^2 + (Y - Y_{rt})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$U_{vt} = \left\{ w_{td} d_t + w_{tx} (X_{vt} - X)^2 + w_{ty} (Y_{vt} - Y)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$U_{rt} = \left\{ w_{td} d_t + w_{td} (X_{vt} - X)^2 + (Y_{vt} - Y)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$U_T = w_{vt} U_{vt} + w_{rt} U_{rt} \quad (14)$$

式中: d_t 为车与实际目标点距离, U_{vt} 为虚拟目标点引力势场, U_{rt} 表示实际目标点引力势场, X_{vt} 、 Y_{vt} 表示虚拟目标点在全局坐标系下的纵、横向位置, w_{td} 、 w_{tx} 、 w_{ty} 、 w_{vt} 、 w_{rt} 表示构建目标点引力势场中权重系数。

2) 道路及车道线斥力势场 U_R

构建道路以及车道的斥力势场, 如图 5 所示。

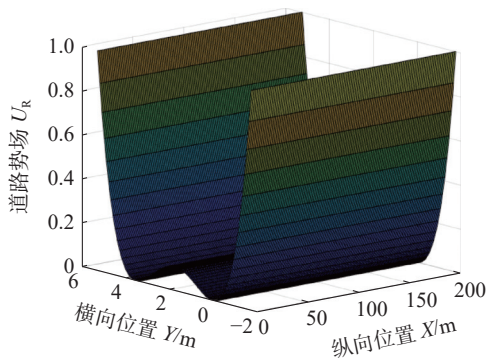


图 5 道路及车道线斥力势场示意

Fig. 5 Schematic of roadway and lane line repulsive potential field

$$U_{R0} = (Y - l_l)^2 (Y - l_r)^2 \quad (15)$$

并将势场归一化:

$$U_R = \frac{U_{R0} - U_{Rmin}}{U_{Rmax} - U_{Rmin}} \quad (16)$$

式中: l_l 、 l_r 分别为左、右车道中心线, U_{Rmax} 、 U_{Rmin} 分

别为道路势场最大值与最小值。

3) 障碍物势场 U_O :

根据横纵向安全距离构建障碍物的势场, 如图 6 所示。

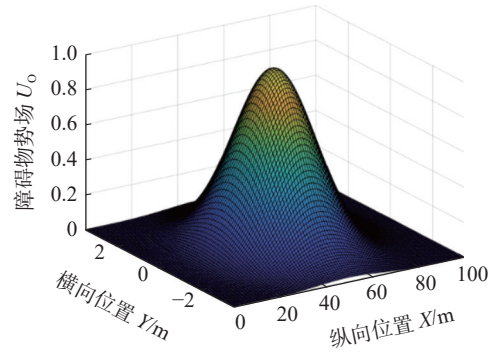


图 6 障碍物斥力势场示意

Fig. 6 Schematic diagram of the obstacle repulsive potential field

$$w_{OX} = -\frac{\ln(\varepsilon_X)}{(2X_s)^2} \quad (17)$$

$$w_{OY} = -\frac{\ln(\varepsilon_Y)}{(2Y_s)^2} \quad (18)$$

$$U_O = w_O e^{-(w_{OX}(X-X_O)^2 + w_{OY}(Y-Y_O)^2)} \quad (19)$$

式中: w_{OX} 和 w_{OY} 分别为障碍物势场的纵向、横向影响因子; w_O 是障碍物势场期望系数。

总势场 U_{all} 可以表达为

$$U_{all} = U_T + U_R + U_O \quad (20)$$

2.3.2 构建模型与目标函数

此时设置状态向量 $\zeta = [\dot{y} \quad \dot{x} \quad \dot{\varphi} \quad Y \quad X]^T$ 和控制向量 $u = \delta_f$ 。

$$\dot{\zeta} = f(\zeta, u) \quad (21)$$

将车辆动力学模型在参考点处用泰勒公式线性化:

$$\zeta(k+1) = A_k \zeta(k) + B_k u(k) \quad (22)$$

$$\eta(k) = C_k \zeta(k) \quad (23)$$

式中: $A_k = I + A_t$, $B_k = T_s B_t$, $A_t = \frac{\partial f}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta_t, u_t}$, $B_t = \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_{\zeta_t, u_t}$,

$\eta(k)$ 是输出向量, C_k 是输出选择矩阵。

为引进控制量 Δu 的增量, 简化计算, 将状态空间重构为

$$\tilde{\zeta}(k+1) = \begin{bmatrix} \zeta(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\tilde{\eta}(k) = \tilde{C}_k \tilde{\zeta}(k) \quad (25)$$

预测状态:

$$\tilde{\zeta}(k+1) = \tilde{A}_k \tilde{\zeta}(k) + \tilde{B}_k \Delta u(k) \quad (26)$$

$$\eta(k) = C_k \zeta(k) \quad (27)$$

式中: $\tilde{A}_k = \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ \mathbf{0}_{m \times n} & I_m \end{bmatrix}$, $\tilde{B}_k = \begin{bmatrix} B_k \\ I_m \end{bmatrix}$, $\tilde{C}_k = [C_k, 0]$, $\Delta \mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1)$, m 是控制量维度, n 是状态量维度。

预测模型可以表达为

$$\begin{aligned} \gamma(k+1) &= \psi \zeta(k) + \theta \Delta U(k) \quad (28) \\ \gamma(k+1) &= \begin{bmatrix} \eta(k+1) \\ \eta(k+2) \\ \vdots \\ \eta(k+N_c) \\ \vdots \\ \eta(k+N_p) \end{bmatrix} \\ \psi &= \begin{bmatrix} \tilde{C}_k \tilde{A}_k \\ \tilde{C}_k \tilde{A}_k^2 \\ \vdots \\ \tilde{C}_k \tilde{A}_k^{N_c} \\ \vdots \\ \tilde{C}_k \tilde{A}_k^{N_p} \end{bmatrix} \\ \Delta U(k) &= \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u}(k) \\ \Delta \mathbf{u}(k+1) \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{u}(k+N_c-1) \end{bmatrix} \\ \theta &= \begin{bmatrix} \tilde{C}_k \tilde{B}_k & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{C}_k \tilde{A}_k^{N_c} \tilde{B}_k & \tilde{C}_k \tilde{A}_k^{N_c-1} \tilde{B}_k & \cdots & \tilde{C}_k \tilde{B}_k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{C}_k \tilde{A}_k^{N_p} \tilde{B}_k & \tilde{C}_k \tilde{A}_k^{N_p-1} \tilde{B}_k & \cdots & \tilde{C}_k \tilde{A}_k^{N_p-N_c} \tilde{B}_k \end{bmatrix} \end{aligned}$$

借鉴现有方法^[25]设计目标函数:

$$J(\zeta(t), \mathbf{u}(t-1), \Delta \mathbf{u}(t)) = J_\varphi + J_u + J_T + J_R + J_O \quad (29)$$

其中:

$$J_\varphi = \sum_{i=1}^{N_p} (\varphi(t+i|t) - \varphi_{\text{ref}}(t+i|t))^T \lambda_\varphi (\varphi(t+i|t) - \varphi_{\text{ref}}(t+i|t)) \quad (30)$$

$$J_u = \sum_{i=1}^{N_c-1} (\Delta \mathbf{u}(t+i|t)^T \lambda_u \Delta \mathbf{u}(t+i|t)) \quad (31)$$

$$J_T = \sum_{i=1}^{N_p} \lambda_T \times U_T(t+i|t) \quad (32)$$

$$J_R = \sum_{i=1}^{N_p} \lambda_R \times U_R(t+i|t) \quad (33)$$

$$J_O = \sum_{i=1}^{N_p} \lambda_O \times U_O(t+i|t) \quad (34)$$

式(28)目标函数中,第1、2项保证车辆的稳定性要求,第3、4、5项构建势场影响作用,保证车辆安全性要求。

将式(30)~式(34)带入式(29),把目标函数整理为标准二次形式:

$$J(\zeta(t), \mathbf{u}(t-1), \Delta \mathbf{u}(t)) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}(t) \\ \varepsilon \end{bmatrix}^T \mathbf{H} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}(t) \\ \varepsilon \end{bmatrix} + \mathbf{f} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}(t) \\ \varepsilon \end{bmatrix} + G \quad (35)$$

$$\text{式中: } \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 2 \times (\boldsymbol{\theta}^T \mathbf{Q}_1 \boldsymbol{\theta} + \mathbf{R}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \rho \end{bmatrix}, \mathbf{f} = \begin{bmatrix} \varepsilon^T \mathbf{Q}_2 \boldsymbol{\theta} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}.$$

2.3.3 优化设计

$$\begin{aligned} \min_{\Delta \mathbf{U}_{t,p}} J_2(\zeta(t), \mathbf{u}(t-1), \Delta \mathbf{U}(t), \varepsilon) \\ \text{s.t. } \Delta \mathbf{U}_{\min} \leq \Delta \mathbf{U}_t \leq \Delta \mathbf{U}_{\max} \\ \Delta \mathbf{U}_{\min} \leq \Delta \mathbf{A} \mathbf{U}_t + \mathbf{U}_t \leq \Delta \mathbf{U}_{\max} \\ y_{\text{hc.min}} \leq y_{\text{hc}} \leq y_{\text{hc.max}} \\ y_{\text{sc.min}} - \varepsilon \leq y_{\text{hc}} \leq y_{\text{sc.max}} + \varepsilon \\ \beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max} \\ \varepsilon > 0 \end{aligned} \quad (36)$$

式中: y_{hc} 为硬约束,即不能放宽约束范围的输出量; y_{sc} 为软约束,即可以通过松弛因子进行动态调整约束范围的输出量; β 为质心侧偏角。

使用 QuadProg 问题求解器,解决方案在时间 t 对于当前状态和前一时刻的输入。最终规划控制器参数如表1所示。

$$\mathbf{u}(t, \zeta(t)) = \mathbf{u}(t-1) + \Delta_{t,t}^*(\zeta(t)) \quad (37)$$

表1 规划控制器参数和数值

Table 1 Planning controller parameters and values

参数	数值
预测时域 N_p	25
控制时域 N_c	5
采样时间 T	0.1

3 仿真实验

本节通过构建联合模拟实验,验证上述的避障规划控制方法的有效性。模拟实验使用的自车车辆基于 CarSim 软件中的前驱 C 级 Hatchback 模型,前方车辆采用 B 级 Hatchback 模型。设置一条直行城市道路。自车的主要参数如表2所示。

表2 车辆主要参数

Table 2 Main vehicle parameters

参数	符号	数值
整车质量/kg	m	1723
质心至前轴距离/m	l_f	1.232
质心至后轴距离/m	l_r	1.468
前轮侧偏刚度/(N/rad)	C_f	66 900
后轮侧偏刚度/(N/rad)	C_r	62 700
重力加速度/(m/s ²)	g	9.8
滑移率	S	0.2

为验证本文提出的避障控制方法的有效性与普适性,建立3种典型城市路况下超车场景进行实验。场景1中,障碍物静止在自车前方40 m处,自车10 m/s 匀速向行驶。此场景中自车行驶轨迹如图7所示。场景2中,障碍物车辆在自车前方40 m处并以10 m/s 向前匀速行驶,自车以15 m/s 匀速行驶,此时自车行驶速度大于障碍

物车辆行驶速度,且有超车行驶空间,可以满足超车需求,如图 8 所示。场景 3 中,前车在自车前方 40 m 处并以 15 m/s 初速度,以加速度 -2 m/s^2 减速行驶,自车以 15 m/s 行驶,此时满足超车需求,如图 9 所示。

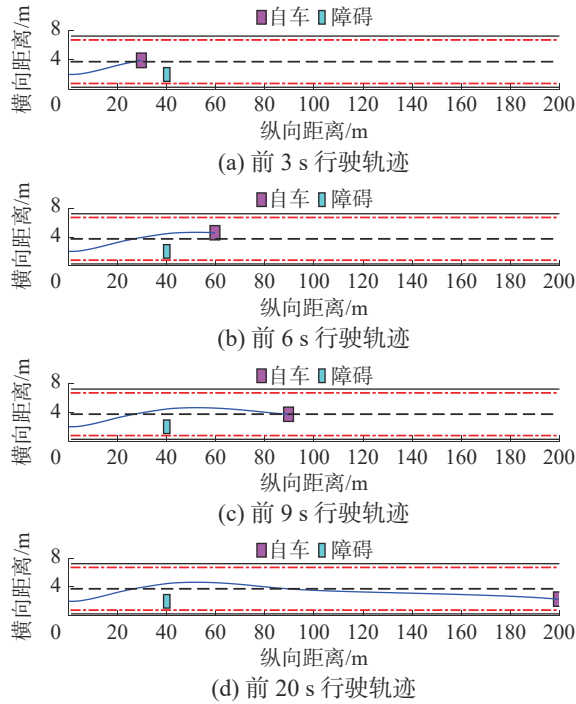


图 7 障碍物静止自车不同时段超车轨迹

Fig. 7 Obstacle stationary self-vehicle overtaking trajectories at different time intervals

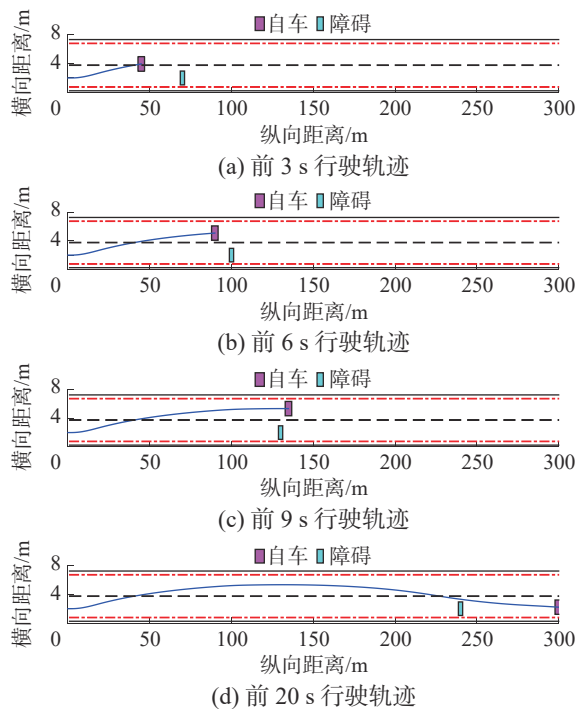


图 8 前车匀速行驶自车不同时段超车轨迹

Fig. 8 Overtaking trajectories at different time intervals of self-vehicle while front vehicle traveling at a constant speed

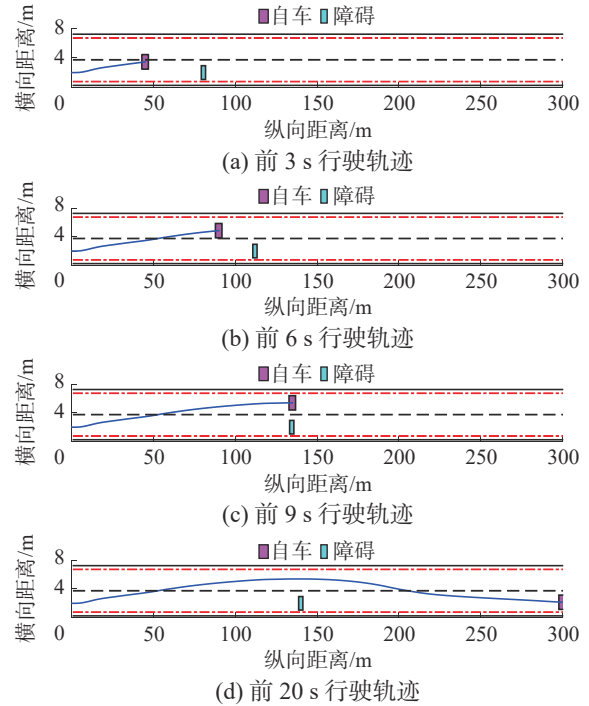


图 9 前车变速行驶自车不同时段超车轨迹

Fig. 9 Overtaking trajectories at different time intervals of self-vehicle while front vehicle traveling at variable speeds

由图 7~9 可知,本文中提出的规划控制方法可以安全地引导车辆超越同车道较慢的车辆,并在超越后引导车辆安全地行驶回到原来的车道。由图 10~12 可知,车辆在进行超车过程中,行驶轨迹与横摆角较为平滑,且前轮转角变化范围在 $[0.67^\circ, 1.02^\circ]$,质心侧偏角变化范围在 $[0.22^\circ, 0.32^\circ]$,且两者长时间保持较低的角度变化,证明本文提出的方法具有很好的稳定性能。通过 3 种场景对比可以看出,前车的行驶状态的变化导致自车行驶轨迹的变化,当前车变化较小时,自车轨迹平滑性更好,当前车变化较大时,自车的稳定性更优。

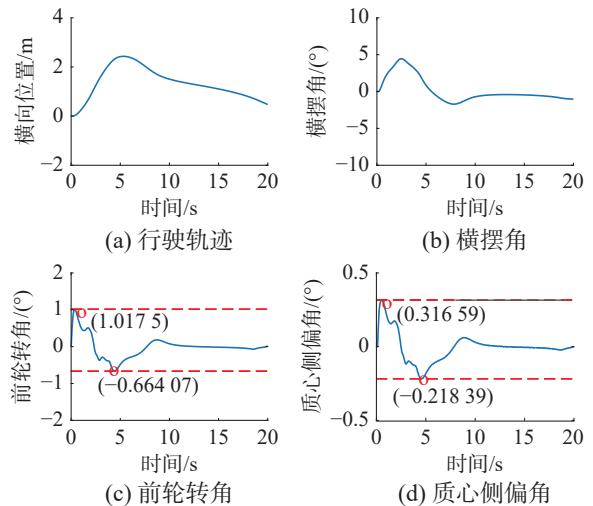


图 10 前车静止自车轨迹跟踪结果

Fig. 10 Tracking results of self-vehicle trajectory while front vehicle stationary

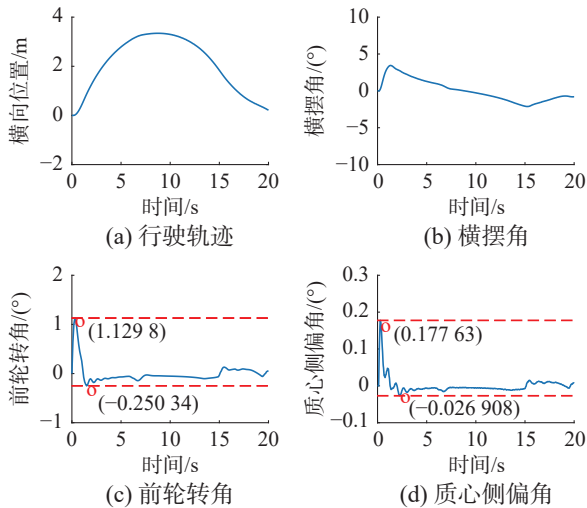


图 11 前车匀速行驶自车轨迹跟踪结果

Fig. 11 Tracking result of self-vehicle trajectory while front vehicle traveling at uniform velocity

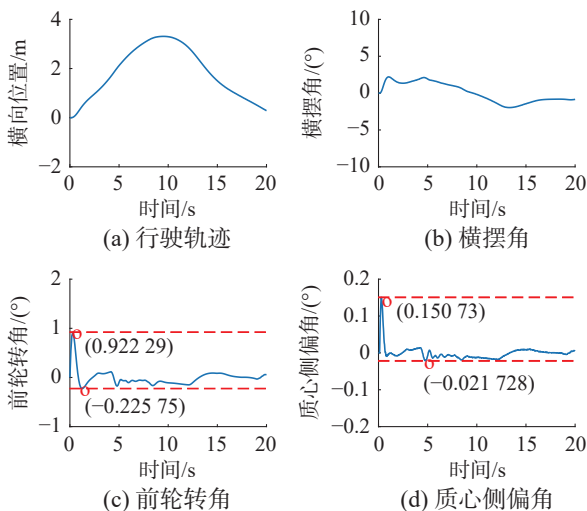


图 12 前车变速行驶自车轨迹跟踪结果

Fig. 12 Tracking results of self-vehicle trajectory while front vehicle traveling at variable speed

4 结束语

1) 针对城市道路环境中安全超车问题, 基于改进人工势场法提出一种避障规划控制方法。构建目标点引力势场、道路边界及车道线斥力势场以及障碍物斥力势场, 三者之和构成车辆行驶路径的可行域。

2) 基于线性 2 自由度汽车动力学模型, 将改进的人工势场法结合模型预测控制方法构建路径规划与轨迹跟踪统一化的函数模型, 引导自车在可行域内安全行驶。

3) 论文提出的避障规划控制方法, 经城市超车工况模拟验证, 能够生成安全、平滑的路径, 具有稳定的控制能力。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通工程学术研究综述·2016[J]. 中国公路学报, 2016, 29(6): 1-161.
Editorial board of the Chinese journal of highways. Review on China's traffic engineering research progress: 2016[J]. China journal of highway and transport, 2016, 29(6): 1-161.
- [2] DANIEL W, MARTIN H. Automated driving: safer and more efficient future driving[M]. New Yor: Springer, 2016.
- [3] ZHAO Can, LI Li, PEI Xin, et al. A comparative study of state-of-the-art driving strategies for autonomous vehicles[J]. Accident analysis & prevention, 2021, 150: 105937.
- [4] 张新钰, 邹镇洪, 李志伟, 等. 面向自动驾驶目标检测的深度多模态融合技术 [J]. 智能系统学报, 2020, 15(4): 758-771.
ZHANG Xinyu, ZOU Zhenhong, LI Zhiwei, et al. Deep multi-modal fusion in object detection for autonomous driving[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2020, 15(4): 758-771.
- [5] 李克强, 戴一凡, 李升波, 等. 智能网联汽车 (ICV) 技术的发展现状及趋势 [J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 1-14.
LI Keqiang, DAI Yifan, LI Shengbo, et al. State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles[J]. Journal of automotive safety and energy, 2017, 8(1): 1-14.
- [6] GONZÁLEZ D, PÉREZ J, MILANÉS V, et al. A review of motion planning techniques for automated vehicles[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2016, 17(4): 1135-1145.
- [7] KATRAKAZAS C, QUDDUS M, CHEN Wenhua, et al. Real-time motion planning methods for autonomous on-road driving: State-of-the-art and future research directions[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2015, 60: 416-42.
- [8] ZHOU Yulan, HUANG Nannan. Airport AGV path optimization model based on ant colony algorithm to optimize Dijkstra algorithm in urban systems[J]. Sustainable computing: informatics and systems, 2022, 35: 100716.
- [9] WANG Xingdong, ZHANG Haowei, LIU Shuo, et al. Path planning of scenic spots based on improved A* algorithm[J]. Scientific reports, 2022, 12(1): 1320.
- [10] LIU Lisang, LIN Jiafeng, YAO Jinxin, et al. Path planning for smart car based on dijkstra algorithm and dynamic window approach[J]. Wireless communications and mobile computing, 2021, 2021: 8881684.
- [11] 李娟, 张韵, 陈涛. 改进 RRT 算法在未知三维环境下 AUV 目标搜索中的应用 [J]. 智能系统学报, 2022,

- 17(2): 368–375.
- LI Juan, ZHANG Yun, CHEN Tao. Application of the improved RRT algorithm to AUV target search in an unknown 3D environment[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2022, 17(2): 368–375.
- [12] BAE I, KIM J H, MOON J, et al. Lane change maneuver based on bezier curve providing comfort experience for autonomous vehicle users[C]//2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. Auckland: IEEE, 2019: 2272–2277.
- [13] 王星, 赵海良, 王志刚. 基于邻域系统的智能车辆最优轨迹规划方法 [J]. *智能系统学报*, 2019, 14(5): 1040–1047.
- WANG Xing, ZHAO Hailiang, WANG Zhigang. Optimal trajectory planning method of intelligent vehicles based on neighborhood system[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2019, 14(5): 1040–1047.
- [14] ROSTAMI S M H, SANGAIAH A K, WANG Jin, et al. Obstacle avoidance of mobile robots using modified artificial potential field algorithm[J]. *EURASIP journal on wireless communications and networking*, 2019, 2019(1): 70.
- [15] WANG Pengwei, GAO Song, LI Liang, et al. Obstacle avoidance path planning design for autonomous driving vehicles based on an improved artificial potential field algorithm[J]. *Energies*, 2019, 12(12): 2342.
- [16] SANG Hongqiang, YOU Yusong, SUN Xiujun, et al. The hybrid path planning algorithm based on improved A* and artificial potential field for unmanned surface vehicle formations[J]. *Ocean engineering*, 2021, 223: 108709.
- [17] FALCONE. Nonlinear model predictive control for autonomous vehicles [D]. Benevento : University of San-nio, 2007.
- [18] 张志勇, 龙凯, 杜荣华, 等. 自动驾驶汽车高速超车轨迹跟踪协调控制 [J]. *汽车工程*, 2021, 43(7): 995–1004.
- ZHANG Zhiyong, LONG Kai, DU Ronghua, et al. Trajectory tracking coordinated control for autonomous vehicle in high-speed overtaking[J]. *Automotive engineering*, 2021, 43(7): 995–1004.
- [19] BHARGAV J, BETZ J, ZEHNG H, et al. Deriving spatial policies for overtaking maneuvers with autonomous vehicles[C]//2022 14th International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS. Bangalore: IEEE, 2022: 859–864.
- [20] 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 Jiaxu, WANG Chen, ZHAO Jian. 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.
- [21] 王树凤, 张钧鑫, 刘宗锋. 基于改进人工势场法的智能车辆超车路径规划研究 [J]. *汽车技术*, 2018(3): 5–9.
- WANG Shufeng, ZHANG Junxin, LIU Zongfeng. A research on overtaking lane planning for intelligent vehicles based on improved artificial potential field method[J]. *Automobile technology*, 2018(3): 5–9.
- [22] WU Qiong, CHENG Shuo, LI Liang, et al. A fuzzy-inference-based reinforcement learning method of overtaking decision making for automated vehicles[J]. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part D: journal of automobile engineering*, 2022, 236(1): 75–83.
- [23] JEON S, LEE K, KUM D. Overtaking decision and trajectory planning in highway via hierarchical architecture of conditional state machine and chance constrained model predictive control[J]. *Robotics and autonomous systems*, 2022, 151: 104014.
- [24] LIU J C, JAYAKUMAR P, OVERHOLT J L, et al. The role of model fidelity in model predictive control based hazard avoidance in unmanned ground vehicles using LIDAR sensors[C]//Proceedings of ASME 2013 Dynamic Systems and Control Conference, Palo Alto: ASME, 2014.
- [25] 石贞洪. 基于模糊 MPC 和 APF 的智能汽车转向避撞控制研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- SHI Zhenhong. Study on steering avoidance control of intelligent vehicle based on fuzzy MPC and APF[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.

作者简介:



唐友名, 教授, 博士, 《中国安全科学学报》首届青年编委, 主要研究方向为智能驾驶与汽车安全、动力电池安全技术。主持省部级以上科研项目 9 项, 获福建省青年科技奖、福建省科技进步二等奖和三等奖各 1 项(排名第 1), 获国家专利授权 87 件, 发表学术论文 40 余篇, 出版学术专著 2 部。E-mail: tangym1981@163.com。



孙冠豫, 硕士研究生, 主要研究方向为智能驾驶与路径规划。作为参赛队队长荣获 2022 年第二十四届中国机器人及人工智能大赛百度 Apollo 城市道路自动驾驶虚拟仿真赛福建赛区一等奖和全国总决赛三等奖(排名第一)。E-mail: sgy2020year@163.com。



孙贵斌, 副教授, 主要研究方向为车辆安全技术、新能源汽车设计。主持省级以上科研项目 4 项, 获福建省科技进步奖 1 项, 获国家专利授权 16 件, 发表学术论文 10 余篇, 出版国家规划教材 1 部。E-mail: sgbzxx@xmut.edu.cn。