2024 年 第 24 卷 第 20 期
2024, 24(20):08746-08

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2305770
引用格式:张喜清, 马志光, 陈殿明, 等. 基于改进势场法的智能车超车动态路径规划[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(20): 8746-8753.
Zhang Xiqing, Ma Zhiguang, Chen Dianming, et al. Dynamic path planning for intelligent vehicle overtaking based on improved potential field method[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(20): 8746-87538746-8753.

基于改进势场法的智能车超车动态路径规划

张喜清[1], 马志光[2*], 陈殿明[2], 李进[2]
(1. 太原科技大学车辆与交通工程学院, 太原 030000; 2. 太原科技大学机械工程学院, 太原 030000)

摘 要 为了改进人工势场法(artificial potential field,APF)在智能车高速超车状态下规划出的轨迹规范性差、安全性得不到保障、以及路径不平滑的问题。设计用于指引智能车换道的换道引力势场,以保证换道轨迹的规范性;构建异向分布结构的障碍车斥力势场提高换道的安全性;并建立带有转向缺口的道路中心线斥力势场和设计平滑代价函数优化规划出的轨迹点,使规划出的路径更加平滑。基于线性二次型调节器(linear quadratic regulator,LQR)设计路径跟踪控制器跟踪规划出的路径。通过 Simulink 与 Carsim 联合仿真,结果表明:所改进的 APF 算法能规划出更加合理的路径,设计的 LQR 路径跟踪控制器跟踪误差趋近于零,能够较好地控制车辆完成超车换道。

关键词 改进的人工势场法(APF); 高速超车换道; 局部路径规划; 线性二次型调节器(LQR)控制器; 路径跟踪
中图法分类号 U471.15; **文献标志码** A

Dynamic Path Planning for Intelligent Vehicle Overtaking Based on Improved Potential Field Method

ZHANG Xi-qing[1], MA Zhi-guang[2*], CHEN Dian-ming[2], LI Jin[2]
(1. School of Vehicle and Transportation Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030000, China;
2. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030000, China)

[**Abstract**] To improve the problems of poor trajectory specification, unsecured safety, and unsmooth paths planned by the artificial potential field (APF) in the high-speed overtaking state of intelligent vehicles. The lane-changing gravitational potential field was designed to guide the smart vehicle to change lanes to ensure the normality of the lane-changing trajectory. An obstacle vehicle repulsive potential field with an anisotropic distribution structure was constructed to improve the safety of lane changing, and the road centerline repulsive potential field with a steering notch and design the smoothing cost function was established to optimize the planned trajectory points to make the planned path smoother. The path tracking controller based on linear quadratic regulator (LQR) was designed to track the planned path. Through the joint simulation of Simulink and Carsim, the results show that the improved APF algorithm can plan a more reasonable path, and the tracking error of the designed LQR path tracking controller tends to be close to zero, which can better control the vehicle to complete the overtaking lane change.

[**Keywords**] improved artificial potential field (APF); high-speed overtaking; local path planning; linear quadratic regulator (LQR) controller; path tracking

汽车是当今时代人类最主要的交通工具,随着智能驾驶技术的发展,智能驾驶汽车越来越多的应用到人们的生产生活中。局部路径规划是智能驾驶汽车中非常关键的一个模块,常用的局部路径规划算法主要有 A * 算法[1-3]、随机搜索树算法[4]、人工势场法[5-6]等。学者们对人工势场法进行了改进,文献[6]通过 A * 与人工势场法结合,利用 A * 算法进行全局路径规划,采用改进的人工势场算法进行局部路径规划,避免了陷入局部最优的问题。冀杰等[7]利用三角函数和指数函数构建了道路和障碍物三维虚拟危险势能场,但规划出的轨迹不够平滑。文献[8]引入第二个虚拟目标吸引势场,改进了基于安全距离模型的人工势场中的局部极小值点问题。文献[9]通过寻找较小的转向角和设置合适的步长,改善了轨迹的平滑性且曲率较小。文献[10]设计了具有自适应人工势场的事件触发模型预测控制,保证了自动驾驶

收稿日期: 2023-07-29 **修订日期**: 2024-04-26
基金项目: 山西省基础研究计划项目(202203021221160);山西省基础研究计划项目(202203021221148);太原科技大学中国国际大学生创新大赛培优项目(PY20240116)
第一作者: 张喜清(1980—),男,汉族,山西吕梁人,博士,副教授。研究方向:智能车辆关键性技术。E-mail:xiqingz@tyust.edu.cn。
* **通信作者**: 马志光(1998—),男,汉族,河北石家庄人,硕士研究生。研究方向:无人驾驶车辆关键性技术研究。E-mail:mazhiguang2021@163.com。

汽车的避障和轨迹跟踪的有效性。张涌等[11]将障碍物势场作用域改成了椭圆形,但未考虑障碍车的速度大小对于纵向安全距离的影响。文献[12]引入斥力调节因子使智能车到达目标点的引力和斥力为零,并将一部分障碍物的斥力引入目标点,解决了目标不可达和局部最优的问题。文献[13]引进速度调节因子建立障碍物势力场,使智能车在前车切入工况下的安全性得到了保障。文献[14]重新设计了障碍物的影响范围,根据威胁等级,将斥力分为位置斥力和速度斥力,使智能车更加适应动态环境。罗玉涛等[15]提出了考虑全局规划的全局引力场,保证了高速场景下的安全性、舒适性。

目前少有学者对人工势场法规划轨迹的规范性以及安全性的问题展开研究,鉴于此,引用传统人工势场法的思想,设计用于保证智能车换道轨迹规范性的换道引力势场,并提出了一种异向分布结构的障碍车斥力势场,提高智能车超车换道的安全性;建立带有转向缺口的道路中心线斥力势场减少对换道轨迹的影响,设计平滑代价函数对人工势场法(artificial potential field, APF)规划的轨迹进行优化,提高轨迹的平滑性,最后基于线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)设计路径跟踪控制器实时的跟踪规划出的轨迹控制智能车完成超车换道。

1　高速超车问题描述

图 1[16]为智能车 I_{car} 在快、慢两个车道上进行超车换道的过程。高车速状态下的智能车超车换道将分为 3 个阶段,开始时智能车以纵向车速 V 行驶在慢车道中心线 S_1 上,障碍车 O_{car} 位于智能车前方,当智能车车速高于障碍车车速,两车的纵向车距会逐渐变小,当达到安全车距 D_s 时,APF 规划器将规划出换道路径,此时进入高速超车第一阶段,智能车开始越过道路中心线 R_a 到达快车道,当换道完成时第 1 阶段结束;此时智能车行驶在快车道中心线 F_1 上。第 2 阶段智能车将超越障碍车,当超越障碍车的纵向车距到达安全车距 D_s 时第 2 阶段结束;第 3 阶段智能车将通过 APF 规划出换道路径换回原车道,高速超车换道结束。

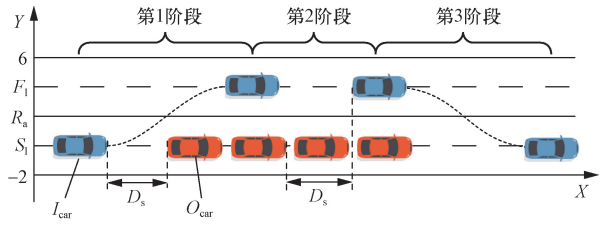


图 1　高速超车问题描述

Fig. 1　Description of the problem of overtaking at high speed

2　综合行车场的构建

2.1　换道引力势场的构建

当智能车因行驶需求需要换道时,将受到由换道引力势场的横向引导力来指引智能车完成换道,为保证换道轨迹的平滑性,需要防止车辆突然受到一定值横向的引导力,造成在车辆在行驶中猛转向的情况,这对智能车的行驶安全性以及乘客的乘坐舒适性[17]的影响是很大的。为了改善上述问题,这就需要指引智能车换道的横向引导力从无到有的连续逐渐增大,以此来指引智能车完成换道;而在换道过程中,随着智能车横向位置逐渐靠近目标位置,横向引导力应该逐渐减小,在换道完成时受到的横向引导力需要为 0,所以通过线性函数耦合二次函数构建换道引力势场。由于高速超车过程中第 1、3 阶段智能车换道行为的不同,需要将换道引力势场将分为由慢车道换至快车道的引力势场和由快车道换到慢车道的引力势场,当智能车与障碍车的车距满足 ($0 \leqslant X_o - X \leqslant D_s$) 时,智能车将从慢车道换道至快车道,等超越障碍车后满足条件 ($D_s \leqslant X - X_o \leqslant 2D_s$) 时,智能车将换回原车道;由此得出换道引力势场的表达式见式(1),换道引力势场如图 2 所示。

$$P_{atty} = \begin{cases} E_s\left(\dfrac{X - X_o}{D_s} + 1\right)\dfrac{(Y - F_1)^2}{F_1^2 - S_1^2}, \\ \quad 0 \leqslant X_o - X \leqslant D_s \\ E_f\left(\dfrac{X - X_o}{D_s} - 1\right)\dfrac{(Y - S_1)^2}{F_1^2 - S_1^2}, \\ \quad D_s \leqslant X - X_o \leqslant 2D_s \end{cases} \tag{1}$$

式(1)中:P_{atty} 为换道引力势场值;X 为智能车当前位置的纵坐标;Y 为智能车当前位置的横坐标;X_o 为障碍车的纵向位置;E_s 为右车道换道势能因子;E_f 为左车道换道势能因子。

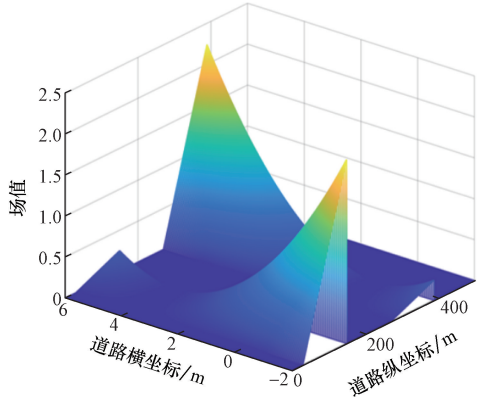


图 2　换道引力势场

Fig. 2　Translational gravitational potential field

为了使人工势场法能够在道路的纵向方向上向前搜索规划轨迹点,进而规划出合理的路径,因而需要设计纵向的引力势场对智能车的行为进行引导,所以选择线性函数设计纵向引力势场,表达式见式(2)。式(3)为综合引力势场 P_{attr} 的表达式,通过换道引力势场和纵向引力势场叠加得到。

$$P_{attx} = \frac{|X - X_v - L_f|}{100} \tag{2}$$

式(2)中:X_v 为自车的纵向坐标位置;L_f 为向前搜索的距离。

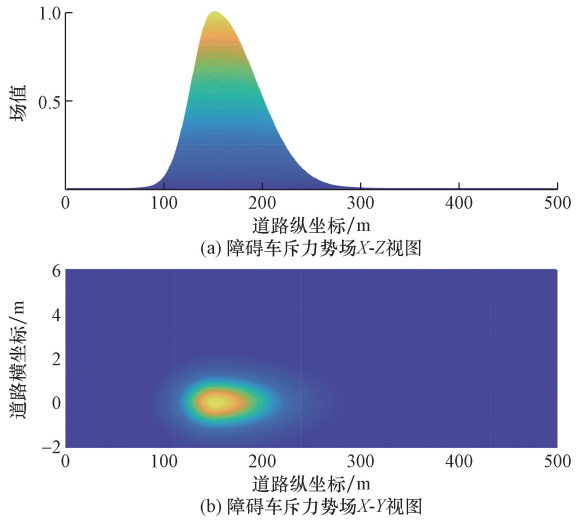
$$P_{attr} = P_{atty} + P_{attx} \tag{3}$$

2.2 异向分布结构的障碍车斥力势场的构建

在构建障碍车斥力势场时,应考虑障碍车行驶的速度方向指向智能车和背离智能车情况的不同而造成的碰撞风险是不同的。当障碍车行驶的速度方向指向智能车时,两车发生碰撞的概率要远远大于障碍车背离智能车的行驶速度方向的概率[18],这需要设计异向分布结构的障碍车斥力势场,使得 APF 规划出更加安全的换道轨迹,同时要将障碍车的速度纳入障碍车斥力势场的建模,当障碍车的速度越大时对智能车的威胁将越大;最重要的是障碍车对智能车造成的危险大小与二者的相对距离有关,二者距离越近,发生碰撞的概率越大,风险增加的速度也越快[19]。为了满足以上需求,本文以障碍车的几何中心为原点,利用人工势场理论中的指数函数[20],构建异向分布结构的障碍车斥力势场,表达式见式(4)。图 3 为异向分布结构的障碍车斥力势场 X-Z、X-Y 视图。

$$P_{repo} = \left| \frac{1}{e^{c_1 A_f (X-X_o)^2 + c_2 (Y-Y_o)^2}} \right| \tag{4}$$

式(4)中:(X_o, Y_o) 为障碍车的位置,当智能车与障碍车的车距越小,发生碰撞的可能性越大;c_1 和 c_2 分别为障碍车斥力势场的纵向变化系数和横向变化系数,改变 c_1 和 c_2 可使障碍车斥力势场的横纵向分布区域发生改变;A_f 为异向结构因子,改变 A_f 将使障碍车斥力势场的最大威胁区域发生改变。



(a) 障碍车斥力势场X-Z视图

(b) 障碍车斥力势场X-Y视图

图 3 障碍车斥力势场图

Fig. 3 Obstacle vehicle repulsive potential field view

$\boldsymbol{R}$ 为由障碍车指向智能车的向量,A_f 和 $\boldsymbol{R}$ 的表达式分别为

$$\begin{cases} A_f = e^{\beta \cos\theta} \\ \boldsymbol{R} = (X - X_o,\ Y - Y_o) \end{cases} \tag{5}$$

式(5)中:θ 为 $\boldsymbol{R}$ 与障碍车速度方向之间的夹角;β 为异向结构调节因子。

根据障碍车斥力势场的定义,横纵向变化系数与智能车和障碍车辆的横纵向距离以及障碍车速是相关的,而且智能车应在距离障碍车辆纵向车距为 D_s 处进行主动换道行为,为了使障碍车斥力势场的分布范围与以上影响因素成正比,根据以上假设设计 c_1 和 c_2 的表达式分别为

$$c_1 = \frac{1}{15 D_s e^{\lambda V_o}} \tag{6}$$

$$c_2 = \frac{1}{\lambda V_o + e^{\lambda (Y - Y_o)}} \tag{7}$$

式中:λ 为障碍车车速 V_o 以及横向车距调节因子。

2.3 道路边界及道路中心线斥力势场的构建

在由左侧的快车道和右侧的慢车道组成的道路下,智能车需要平稳的行驶在车道中央,且尽可能防止其偏离车道中心线,这就需要道路边界斥力势场和道路中心线斥力势场的共同作用,而且车道中心线势能值要最小[21],大小为 0。为了保证行车的安全性,防止智能车冲出车道,引发交通事故,这就要求建立的道路边界及道路中心线斥力势场的势能都要大于 0,由于智能车向相邻车道的行驶发生事故的可能性要比向道路边界行驶发生事故的可能性小,因此道路中心线的势能可略小于道路边界的势能。根据以上理论,运用指数函数建立由车道中心线分别到道路边界以及到道路中心线逐渐增大的道路边界及道路中心线斥力势场,使车辆越靠近道路边界以及道路中心线所受到的势能值越大,保证行车的安全性以及规范性,且道路边界势能值最大为 1。道路中心线势能介于 0 ~ 1,可以使车辆安全且平稳的行驶在车道中心线上,由此构建的道路边界斥力势场表达式为

$$P_{repb} = -\frac{1}{e^{[\mathrm{abs}(Y - R_a) - 2]^2}} + 1, \quad Y \leqslant S_1 \cup Y \geqslant F_1 \tag{8}$$

由于道路中心线斥力势场对于智能车换道轨迹的规划有很大的影响,因此需要将障碍车附近的

纵向位置范围($X_o - X \leqslant D_s \parallel X - X_o \leqslant 2D_s$)和横向位置范围($S_l \sim F_l$)作为智能车的超车换道区域,即此范围内的道路中心线斥力势场 P_{repc} 的势能为 0,为了满足以上要求,所以道路中心线势场表达式见式(9)。选择基于固定车间时距(constant time headway,CTH)安全距离模型[22],表达式见式(10)。

$$P_{repc} = \begin{cases} E_c\left\{-\dfrac{1}{e^{[\mathrm{abs}(Y-R_a)-2]^2}}+1\right\}, \\ \quad S_l < Y < F_l \\ 0, \\ \quad X_o - X \leqslant D_s \parallel X - X_o \leqslant 2D_s \end{cases} \tag{9}$$

$$D_s = Vt_h + d_0 \tag{10}$$

式中:E_c 为道路中心线斥力势场大小调节因子;D_s 为安全跟车距离;t_h 为可以设定的车间时距,一般可取为 1.4~3 s;V 为智能车车速;d_0 为静止时两车之间的最小保持距离,一般取值为 2~5 m。

道路总势场 P_{repr} 通过道路边界斥力势场及道路中心线斥力势场叠加得到,如图 4 所示,表达式为

$$P_{repr} = P_{repb} + P_{repc} \tag{11}$$

将道路总势场、换道引力势场和障碍车斥力势场进行叠加,即可得到高速超车换道综合行车场的表达式为

$$P = P_{repr} + P_{attr} + P_{repo} \tag{12}$$

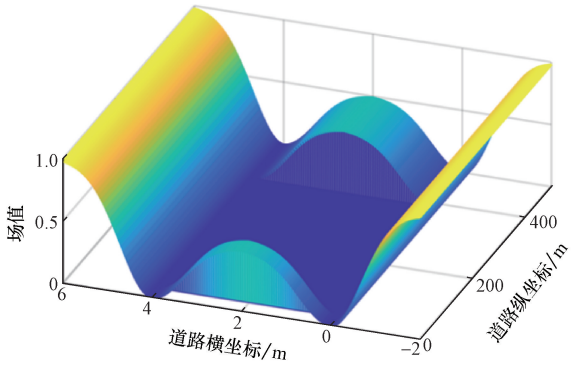


图 4　道路总势场

Fig. 4　Road total potential field

3　基于综合行车场的超车路径规划

3.1　超车路径的动态规划

进行超车路径的动态规划时,智能车通过感知模块对车辆周围的交通环境进行采样,并将障碍车信息输送给 APF 路径规划模块,APF 规划器将规划出本时刻的轨迹点。在下一时刻,智能车感知模块将对周围的环境信息重新进行采样,继续将信息输送给 APF 路径规划模块重新规划下一时刻的轨迹点,以此类推,实现超车路径的动态规划[23]。动态规划示意图如图 5 所示。

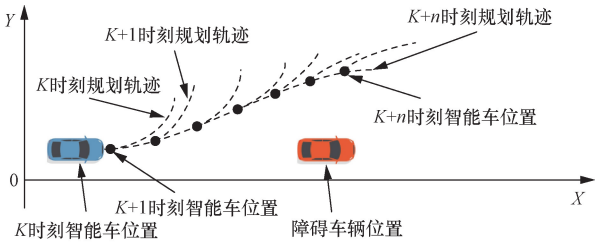


图 5　动态规划示意图

Fig. 5　Schematic diagram of dynamic planning

3.2　优化平滑轨迹点

在每个规划周期中,APF 规划器会规划出 n 个离散的轨迹点,(P_0, P_1, P_2, …, P_n),每个离散点的坐标为(x_i, y_i),为了防止 APF 规划器规划的轨迹点不平滑,而导致控制效果差,甚至导致超车避障失败,所以在规划层给出每个规划周期的轨迹点之后需要对本周期的轨迹点进行优化,设计的代价函数[式(13)]平滑每一个规划周期的轨迹点[24]。

$$C_{ostf} = W_s f(s) + W_l f(l) + W_r f(r) \tag{13}$$

$$\begin{cases} f(s) = \sum\limits_{i=1}^{n-1} (x_{i-1} + x_{i+1} - 2x_i)^2 + (y_{i-1} + y_{i+1} - 2y_i)^2 \\ f(l) = \sum\limits_{i=0}^{n-1} (x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 \\ f(r) = \sum\limits_{i=0}^{n-1} (x_i - x_{ir})^2 + (y_i - y_{ir})^2 \end{cases} \tag{14}$$

式中:W_s、W_l、W_r 分别为平滑代价、长度代价、偏移量代价的权重系数;$f(s)$ 为平滑代价,希望平滑后的轨迹相对光滑无拐角;$f(l)$ 为长度代价,保证平滑后的轨迹点无极端分布;为经过平滑后的轨迹点不至于与原轨迹的几何形状差别过大,设计 $f(r)$ 为偏移量代价;(x_{ir}, y_{ir})为平滑后的轨迹点坐标。

设计 LQR 轨迹跟踪控制器跟踪优化过的轨迹点,控制智能车完成超车换道。

4　基于 LQR 控制算法的横向路径跟踪控制

4.1　车辆动力学模型

选择二自由度的车辆动力学模型进行跟踪规划层规划出的轨迹[25],其表达式为

$$\begin{pmatrix} \dot{v}_y \\ \ddot{\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{C_{\alpha f} + C_{\alpha r}}{mv_x} & \dfrac{aC_{\alpha f} - bC_{\alpha r}}{mv_x} - v_x \\ \dfrac{aC_{\alpha f} - bC_{\alpha r}}{Iv_x} & \dfrac{a^2C_{\alpha f} + b^2C_{\alpha r}}{Iv_x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_y \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\dfrac{C_{\alpha f}}{m} \\ -\dfrac{aC_{\alpha f}}{I} \end{pmatrix} \delta \tag{15}$$

式中:m 为车辆的质量;v_y 为车辆的侧向速度;v_x 为车辆的纵向速度;a 为车辆质心到前轴的距离;b 为车辆质心到后轴的距离;δ 为前轮转角;φ 为横摆角;$\dot{\varphi}$ 为横摆角速度;$\ddot{\varphi}$ 为横摆角加速度;I 为转动惯量;$\theta = \varphi + \beta$ 为车辆的航向角;β 为质心侧偏角;$C_{\alpha f}$、$C_{\alpha r}$ 分别为前后轮的侧偏刚度。

4.2 LQR 轨迹跟踪控制器的设计

LQR 控制算法应用非常广泛,方法简便易于实现,且具有稳定的控制效果。为了以误差为前提设计路径跟踪控制器,需将式(15)的二自由度的车辆动力学模型转化为式(16)所示的基于误差的状态转移方程,控制目标就是确立最优控制 $\boldsymbol{u}^*(t) = \boldsymbol{K}\boldsymbol{e}_{rr}(t)$,使得式(16)达到最小值[26]。其中,$\boldsymbol{u}^*$ 为输入向量;$\boldsymbol{K}$ 为反馈矩阵;$\boldsymbol{e}_{rr}$ 为系统的误差。

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_d \\ \ddot{e}_d \\ \dot{e}_\varphi \\ \ddot{e}_\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{C_{\alpha f} + C_{\alpha r}}{m v_x} & -\dfrac{C_{\alpha f} + C_{\alpha r}}{m} & \dfrac{a C_{\alpha f} - b C_{\alpha r}}{m v_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \dfrac{a C_{\alpha f} - b C_{\alpha r}}{I v_x} & -\dfrac{a C_{\alpha f} - b C_{\alpha r}}{I} & \dfrac{a^2 C_{\alpha f} + b^2 C_{\alpha r}}{I v_x} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} e_d \\ \dot{e}_d \\ e_\varphi \\ \dot{e}_\varphi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\dfrac{C_{\alpha f}}{m} \\ 0 \\ -\dfrac{a C_{\alpha f}}{I} \end{pmatrix} \delta + \begin{pmatrix} 0 \\ \dfrac{a C_{\alpha f} - b C_{\alpha r}}{m v_x} - v_x \\ \dfrac{a^2 C_{\alpha f} + b^2 C_{\alpha r}}{I v_x} \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\theta}_r \tag{16}$$

式(16)中:e_d 为横向误差;e_φ 为航向角误差。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty \left[\boldsymbol{e}_{rr}^T(t) \boldsymbol{Q} \boldsymbol{e}_{rr}(t) - \boldsymbol{u}^T(t) \boldsymbol{R} \boldsymbol{u}(t) \right] \mathrm{d}t \tag{17}$$

式(17)中:J 为代价函数;$\boldsymbol{Q}$ 为正定或半正定的状态加权矩阵;$\boldsymbol{R}$ 为正定的控制加权矩阵;$\boldsymbol{u}$ 为输入向量。

为了使智能车在跟踪目标轨迹的基础上减小横向误差[23],选择引入前馈控制规律来抵消横摆角偏差,最后得到式(18)。

$$\boldsymbol{e}_{rr} = \begin{pmatrix} \dfrac{1}{K_1} \left\{ \delta_f - \dfrac{\dot{\theta}_r}{v_x} \left[a + b - b K_3 - \dfrac{m v_x^2}{a + b} \left(\dfrac{b}{C_{\alpha f}} + \dfrac{a}{C_{\alpha r}} K_3 - \dfrac{a}{C_{\alpha r}} \right) \right] \right\} \\ -\dfrac{\dot{\theta}_r}{v_x} \left(b + \dfrac{a}{a + b} \dfrac{m v_x}{C_{\alpha r}} \right) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{18}$$

式(18)中:δ_f 为前馈控制量;K_1 和 K_3 分别为反馈矩阵 $\boldsymbol{K}$ 的第 1 和第 3 项。

为了消除其稳态误差,可以使 e_{rr} 矩阵的第一行距离偏差 e_d 为 0,可以求得前轮转角为

$$\delta = k \left[a + b - b K_3 - \frac{m v_x^2}{a + b} \left(\frac{b}{C_{\alpha f}} + \frac{a}{C_{\alpha r}} K_3 - \frac{a}{C_{\alpha r}} \right) \right] \tag{19}$$

式(19)中:k 为曲率。

4.3 轨迹跟踪控制仿真

为了验证所设计的改进人工势场法,采用 Simulink 与 Carsim 联合仿真对所设计的 APF 规划算法以及设计的 LQR 控制器进行测试。联合仿真实例选择 Carsim 软件中 C 级车模型(C-class, hatchback),该车型的整车参数如表 1 所示。

表 1 仿真车型实例参数

Table 1 Example parameters of simulation models

参数	数值
$C_{\alpha f}$/(N·rad^{-1})	-148 970
$C_{\alpha r}$/(N·rad^{-1})	-82 204
m/kg	1 412
I/(kg·m^{-2})	1 536.7
a/m	1.015
b/m	0.895

4.3.1 改进后的算法与未改进算法的对比分析

采用智能车速 120 km/h,障碍车速 90 km/h 的高速超车工况分析改进后的人工势场法相比于未改进的人工势场法的优越性,如图 6 所示,改进后的人工势场法在智能车进行超车时规划的轨迹相对于未改进的人工势场法规划的轨迹平滑了很多,且未改进的人工势场法规划的轨迹有很多不必要的拐点,换道轨迹规范性差,由此可知,本文算法有一定的优越性。

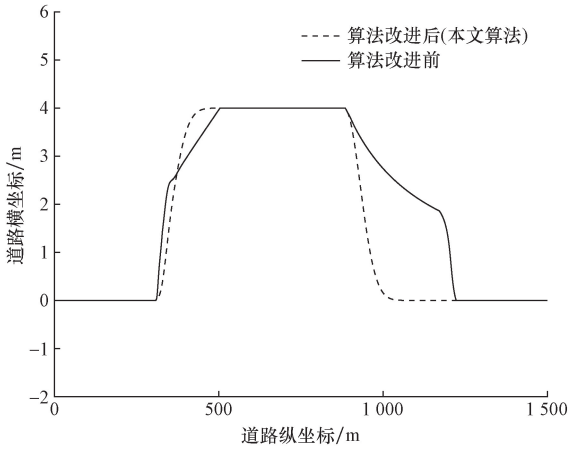
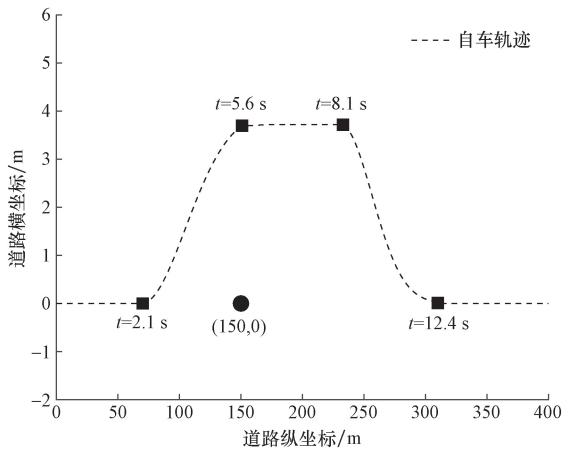


图 6 规划轨迹的对比

Fig. 6 Comparison of planning trajectories

4.3.2 静态障碍车工况超车可行性分析

如图 7 所示,静态的障碍车位于智能车前方 150 m 的右车道中心线上,此时智能车正于120 km/h



黑色方框为智能车;黑色圆点为静态的障碍车

图7　静态障碍车超车轨迹

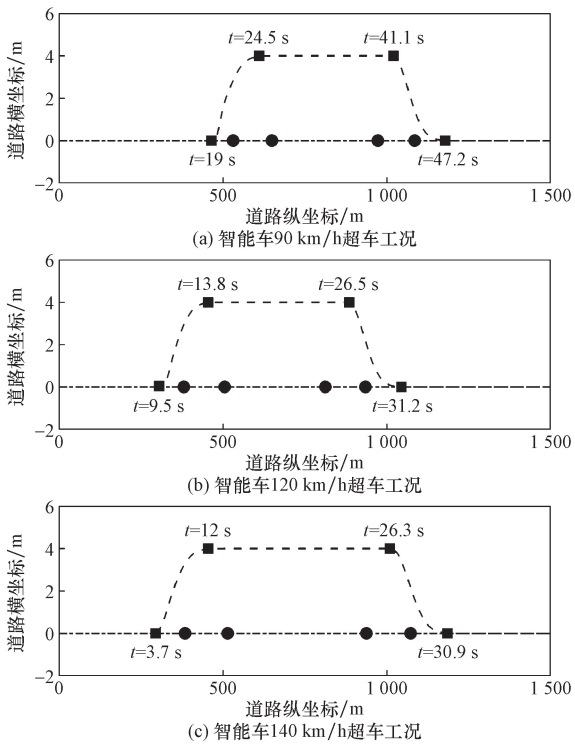
Fig. 7　Static obstacle vehicle overtaking trajectory

的车速向前行驶,2.1 s后,智能车与前方障碍车的纵向距离小于 D_s,由于受到换道引力势场与障碍车斥力势场的综合影响下开始换道,进入高速超车第1阶段,此时距离障碍车纵向距离约为70 m,在5.6 s时完成换道,然后进入第2阶段,智能车在快车道上超越障碍车,当到达8.1 s的时候,智能车超越障碍车的纵向距离大于 D_s,进入超车第3阶段,经过4.3 s换回原车道。可以证明智能车在面对静态障碍车时,所设计的APF规划器可以规划出一条符合道路结构且平滑的超车轨迹,并能安全的引导智能车完成避障。

4.3.3　动态障碍车工况超车可行性分析

为了证明所设计的用于高速超车APF规划器的有效性以及安全性,将分别采用智能车速90 km/h,障碍车速72 km/h;智能车速120 km/h,障碍车速90 km/h以及智能车速140 km/h,障碍车速108 km/h的3种仿真工况进行验证,由图8所示,从左往右第1个位置为当智能车与障碍车的纵向位置小于 D_s 时,智能车综合行车场的作用下开始换道,进入高速超车第1阶段,第2个位置点表示智能车已经到达左车道中心线,表示高速超车第1阶段结束;接下来进入高速超车第2阶段,智能车将于较高的车速超越障碍车,到超越障碍车的纵向距离大于 D_s 时,第2阶段结束,进入第3阶段,智能车将在综合势场的作用下换回原车道,高速超车换道完成。

由图8可知,智能车在面对动态的障碍车时,所构建的APF路径规划器能规划出一条规范性好、平滑、相对安全的超车换道轨迹。为智能车在高速状态下超车换道的安全性提供了保障。由图9可知,智能车在3种不同的车速下换道时的横摆角速度在合理的范围内,可以保证乘坐的舒适性,以及所设计APF规划轨迹的合理性。



黑色圆点为障碍车;黑色方框表示智能车在某一时间下处于车道的某位置

图8　动态障碍车工况

Fig. 8　Dynamic barrier vehicle conditions

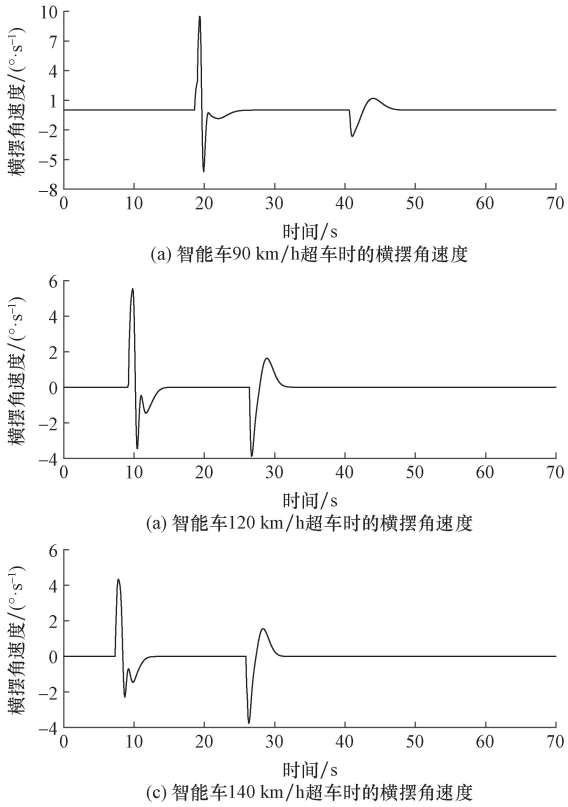


图9　3种超车工况下的智能车的横摆角速度

Fig. 9　Transverse swing angular velocity of intelligent vehicles under three operating conditions

4.3.4 LQR 轨迹跟踪效果分析

采用智能车 120 km/h,障碍车速 90 km/h 的超车工况来验证所设计的 LQR 轨迹跟踪控制器的有效性。从图 10 可以看出,智能车换道时的跟踪误差达到 0.05 mm,可以证明所设计的 LQR 控制器控制效果良好,能有效的控制智能车完成超车换道。

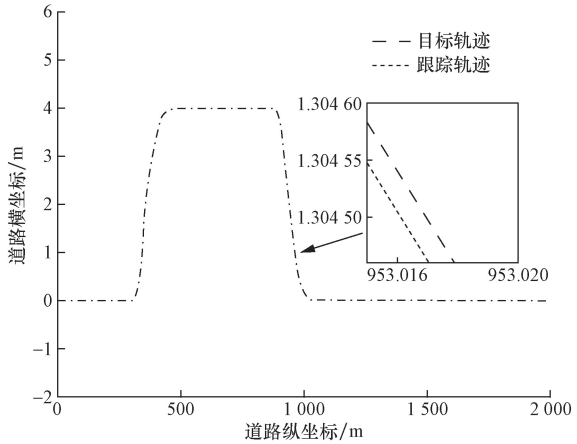


图 10 跟踪效果

Fig. 10 Tracking effect

5 结论

(1)通过改进人工势场法,提出了用于指引智能车在高速工况下超车的引力势场,建立了带有转向缺口的道路中心线斥力势场,并设计了轨迹平滑代价函数对规划层给出的轨迹进行优化,使智能车能够规划出平滑的轨迹。

(2)提出异向分布结构的障碍车斥力势场,通过 3 种不同车速下的换道轨迹和横摆角速度可知超车轨迹规范,不仅能保证超车的安全性,且具有良好的乘坐舒适性,设计的 LQR 轨迹跟踪控制器跟踪误差趋于 0,能够良好控制智能车完成超车换道。

综上所述,所设计的 APF 算法规划的轨迹具有安全性强、舒适性优、规范性好的特点,LQR 控制效果良好,能够良好跟踪智能车在高速工况下的换道轨迹。

参 考 文 献

[1] 陆辉山, 张燕飞, 王福杰, 等. 融合插点和跳跃点改进 A * 算法的路径规划[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(24): 10387-10393.
Lu Huishan, Zhang Yanfei, Wang Fujie, et al. Path planning of improved A * algorithm by Integrating interpolation and jump points [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(24): 10387-10393.

[2] Ni Y, Zhuo Q, Li N, et al. Characteristics and optimization strategies of A * algorithm and ant colony optimization in global path planning algorithm[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2023, 37: 2351006.

[3] Zhang J, Liu Z, Wang Y, et al. Research on effective path planning algorithm based on improved A * algorithm[J]. Journal of Physics Conference Series, 2022, 139: 1798-1802.

[4] 李庆华, 王佳慧, 李海明, 等. 一种双阶段多智能体路径规划算法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(22): 9425-9431.
Li Qinghua, Wang Jiahui, Li Minghai, et al. A two-stage multi-agent path planning algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(22): 9425-9431.

[5] 陈尔奎, 吴梅花. 基于改进遗传算法和改进人工势场法的复杂环境下移动机器人路径规划[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(33): 79-85.
Chen Erkui, Wu Meihua. The path planning of mobile robots based on the improved genetic algorithm and the improved artificial potential field algorithm in complex environment[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(33): 79-85.

[6] Tong X, Yu S, Liu G, et al. A hybrid formation path planning based on A * and multi-target improved artificial potential field algorithm in the 2D random environments[J]. Advanced engineering informatics, 2022, 54: 101755-101769.

[7] 冀杰, 姬鹏, 彭和, 等. 面向车辆主动避撞的三维虚拟危险势能场设计[J]. 汽车工程, 2016, 38(9): 1065-1071, 1079.
Ji Jie, Ji Peng, Peng He, et al. Design of 3D virtual dangerous potential field for vehicle active collision avoidance[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(9): 1065-1071, 1079.

[8] Duan Y, Yang C, Zhu J, et al. Active obstacle avoidance method of autonomous vehicle based on improved artificial potential field [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2022, 19(4): 172988.

[9] Tian J, Bei S, Li B, et al. Research on ative obstacle avoidance of intelligent vehicles based on improved artificial potential field method [J]. World Electric Vehicle Journal, 2022, 13(6): 97-103.

[10] Yang H, Wang Z, Xia Y, et al. EMPC with adaptive APF of obstacle avoidance and trajectory tracking for autonomous electric vehicles[J]. ISA Transactions, 2023, 135: 438-448.

[11] 张涌, 黄林雄, 张煜, 等. 基于人工势场法的智能车辆动态避障研究[J]. 物流科技, 2020, 43(5): 87-92.
Zhang Yong, Huang Linxiong, Zhang Yu, et al. Research on intelligent vehicle dynamic obstacle avoidance based on artificial potential field method[J]. Logistics Sci-Tech, 2020, 43(5): 87-92.

[12] Fang Y, Wang S, Bi Q, et al. Research on path planning and trajectory tracking of an unmanned electric shovel based on improved APF and preview deviation fuzzy control[J]. Machines, 2022, 10(8): 707-715.

[13] 刘志强, 朱伟达, 倪婕, 等. 基于新型人工势场法的车辆避障路径规划研究方法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(16): 310-315.
Liu Zhiqiang, Zhu Weida, Ni Jie, et al. Path planning and obstacle avoidance method for automobile vehicle based on improved artificial potential field[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(16): 310-315.

[14] Feng S, Qian Y, Wang Y. Collision avoidance method of autonomous vehicle based on improved artificial potential field algorithm[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2021, 235(14): 3416-3430.

[15] 罗玉涛, 石紫娴, 梁伟强. 基于改进人工势场的无人驾驶动态规

划算法研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(12): 279-292.
Luo Yutao, Shi Zixian, Liang Weiqiang. Research on autonomous driving dynamic programming algorithm based on improved artificial potential field[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(12): 279-292.

[16] 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.

[17] 郭应时, 苏彦奇, 付锐, 等. 换道操作对智能车辆乘客舒适性的影响研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(5): 221-230.
Guo Yingshi, Su Yanqi, Fu Rui, et al. Influence of lane-changing maneuvers on passenger comfort of intelligent vehicles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(5): 221-230.

[18] 王明强, 王震坡, 张雷. 基于碰撞风险评估的智能汽车局部路径规划方法研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 28-41.
Wang Mingqiang, Wang Zhenpo, Zhang Lei. Local path planning for intelligent vehicles based on collision risk evaluation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 28-41.

[19] 王建强, 吴剑, 李洋. 基于人-车-路协同的行车风险场概念、原理及建模[J]. 中国公路学报, 2016, 29(1): 105-114.
Wang Jianqiang, Wu Jian, Li Yang. Concept, principle and driving risk field based on driver-vehicle-road interaction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(1): 105-114.

[20] 张儒珂. 基于改进人工势场法的自动超车控制方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
Zhang Ruke. Research on the automatic overtaking control method based on the improved artificial potential field[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.

[21] 洪少东, 金志扬, 刘进一, 等. 基于改进人工势场法的山区公路自动驾驶车辆路径规划研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(10): 42-49.
Hong Shaodong, Jin Zhiyang, Liu Jinyi, et al. Study on path planning of mountain roads auto-driving vehicle based on improved artificial potential field method[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2020, 34(10): 42-49.

[22] 郑伟. 汽车自适应巡航系统控制策略研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
Zheng Wei. Study on control strategy of automotive adaptive cruise control system[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.

[23] 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 Zhiyong, Qiu Guoliang, Huang Caixia, 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.

[24] Fan H, Zhu F, Liu C, et al. Baidu apollo EM motion planner[J]. arXiv Preprint, 2018: arXiv.1807.08048.

[25] 黄晶, 蓟仲勋, 彭晓燕, 等. 考虑驾驶人风格的换道轨迹规划与控制[J]. 中国公路学报, 2019, 32(6): 226-239, 247.
Huang Jing, Ji Zhongxun, Peng Xiaoyan, et al. Driving style adaptive lane-changing trajectory planning and control[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(6): 226-239, 247.

[26] 郑苏. 无人驾驶汽车轨迹跟踪控制研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2021.
Zheng Su. Research on tracking control of unmanned vehicle[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2021.

[27] 余米森, 钱玉宝, 黄华宝, 等. 连续工况下基于 PID + LQR 算法的自动驾驶车辆横纵向耦合控制[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(30): 13490-13496.
Yu Misen, Qian Yubao, Huang Huabao, et al. Lateral and longitudinal coupling control of autonomous vehicle based on PID + LQR algorithm under continuous conditions[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(30): 13490-13496.