



DOI: 10.12382/bgxb.2023.0305

基于 Frenet 坐标下改进人工势场法的 无人车局部路径规划

姬鹏*, 郭明皓

(河北工程大学 机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 人工势场法由于运算量小、精度高,广泛应用于无人车的局部路径规划。针对传统人工势场法存在目标不可达、局部最小值及陷入U型障碍物的问题,提出一种基于Frenet坐标系下改进人工势场法的路径规划算法。构建Frenet坐标系来表述车辆避障运动,简化规划模型,解决路径规划中车辆与所在道路相对位置不易表述的问题。提出安全椭圆模型和预测距离的概念来调整势场影响区域,加入基于Frenet坐标系下的参考线势场及动态速度势场改进斥力场函数,解决车辆在静态和动态下的避障问题。利用数学仿真软件进行仿真,以不同车速在直道和弯道场景中对所提出的路径规划方法进行静态和动态避障仿真实验。研究表明:不同车速下的前轮转角、横摆角速度均控制在较小范围内,改进算法可以有效解决传统人工势场法的缺陷,同时与快速搜索随机树(Rapidly-exploring Random Tree, RRT)算法相比,其在避障过程中路径规划计算效率提高了42.8%,改进算法优势明显。

关键词: 无人车; 局部路径规划; 人工势场法; Frenet 坐标系

中图分类号: U46 文献标志码: A 文章编号: 1000-1093(2024)07-2097-13

Local Path Planning for Unmanned Ground Vehicles Based on Improved Artificial Potential Field Method in Frenet Coordinate System

Ji Peng*, Guo Minghao

(School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China)

Abstract: The artificial potential field method is widely used in the local path planning for unmanned ground vehicle (UGV) due to its small amount of computation and high accuracy. For the problems of target unreachability, local minimum and falling into U-shaped obstacles existing in the conventional artificial potential field method, a local path planning algorithm based on the improved artificial potential field method in Frenet coordinate system is proposed. In this paper, the Frenet coordinate system is used to describe the UGV's obstacle avoidance movement, which simplifies the planning model and addresses the difficulty in expressing the relative position of UGV and the road during path planning. A safety ellipse model and the concept of prediction distance are proposed to adjust the influence area of the potential field. Additionally, the repulsive field function is improved by adding the reference line potential field and the dynamic velocity potential field based on the Frenet coordinate system. These modifications enable the UGVs to avoid obstacles under both static and dynamic conditions. The path

收稿日期: 2023-04-04

基金项目: 河北省引进留学人员资助项目(CI201704);河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2019023)

* 通信作者邮箱: Pj180@126.com

planning methods are proposed to launch the static and dynamic obstacle avoidance simulation experiments with different vehicle speeds in straight and curved road scenarios using mathematical simulation software. The results demonstrate that the front wheel turning angle and traverse angular velocity at different vehicle speeds are controlled within a small range, and the improved algorithm can effectively solve the defects of the conventional artificial potential field method. Besides, compared with the rapidly-exploring random tree(RRT) algorithm, the computational efficiency of path planning of the improved algorithm in the obstacle avoidance process is improved by 42.8%, and achieves better computational performance.

Keywords: unmanned ground vehicle; local path planning; artificial potential field method; Frenet coordinate system

0 引言

当前,无人驾驶技术是汽车行业不断向智能化发展的必然产物。路径规划作为关键技术之一,是车辆自动驾驶感知系统和控制系统的桥梁,也是运动控制的前提^[1]。路径规划分为以地图信息为基础的全局路径规划,以及根据感知周围环境信息随机变化的局部路径规划。而局部路径规划包括快速搜索随机树(Rapidly-exploring Random Tree, RRT)算法、动态窗口法、人工势场法^[2]等。

与其他路径规划方法相比,人工势场法的主要优点是算法简洁、运算量小、精度高、规划路线平滑,在路径跟踪模块中考虑车辆动力学,对车辆行驶状态实时控制,可实现汽车的跟踪控制^[3]。但在规划路径时人工势场法存在陷入中间平衡点(目标不可达)、局部最小值等问题^[4]。

近几年,研究人员提出各种应对人工势场法缺陷的措施。文献[5]以人工势场法为基础建立无人车行驶路径模型,包括加入目标车道吸引势、车道速度吸引势等势场函数,实现了传统行车环境下的车辆路径仿真,验证了模型的有效性。文献[6]提出一种简化障碍物预测碰撞的思想,同时加入虚拟目标点,解决了无人车多障碍物复杂路径下不易通过的情况,但该方法规划的路径依然存在过长的问题,同时没有考虑动态障碍物的情况。文献[7]针对人工势场法存在的路径不识别、局部极小陷阱和多障碍区震荡的问题,提出设计多行为行动策略和预判问题的方法,有效解决了传统人工势场法的问题,但在面对大型陷阱区域时虽能安全躲避但依然存在路径过长的问题。文献[8]在传统斥力势场的基础上加入调节因子,合理调节斥力的大小,避免了局部最优,但在复杂环境中依然存在目标不可达的问题。

对于存在不同曲率、长短和形状的复杂道路环境,在笛卡尔坐标系下进行分析,算法需要考虑的参数以及关系太多,容易忽略车道信息的情况^[9]。车辆行驶路线在 Frenet 坐标系下仅与选取的参考线有关,以参考线为基准,容易确定无人车偏离车道中心线的轨迹,能够简化运动规划模型,提高计算效率^[10]。文献[11]在路径规划中采用以 Frenet 坐标系为基础改进人工势场法的方法,实现了航天器对空间障碍物的规避。文献[12]基于 Frenet 坐标系和运动学构建不同的模型预测控制器,使控制器的效果得到明显提升。文献[13]提出一种针对结构化道路自动驾驶 RRT 算法,该算法基于 Frenet 坐标系和凸近似避障原理相结合的形式,能够有效避开障碍物得到平滑的路径轨迹,但并没有解决动态障碍物的问题。

针对上述算法的不足,本文提出一种基于 Frenet 坐标系下的改进人工势场法路径规划算法。首先解决车辆在路径规划中与所在车道位置表述不清的问题,将笛卡尔坐标系与 Frenet 坐标系相互转换;其次通过改进人工势场法,实现车辆在直道及弯道对障碍物的自主避障;最后在数学仿真平台中对本文算法进行有效性和可跟踪性验证。

1 Frenet 坐标系建立

1.1 Frenet 坐标系原理

图 1 为笛卡尔坐标系下的 Frenet 坐标系示意图,假设在笛卡尔坐标系 Oxy 下车辆的坐标为 (x, y) , s 为参考线的起点到车辆当前点投影到参考线上投影点的距离,即纵向位移, l 为车辆当前点到参考线上的投影距离,即横向位移, F_c 为车辆中心点在 (x, y) 处对参考线进行投影的投影点。车辆坐标的描述转换为 Frenet 坐标系下的 (s, l) 。

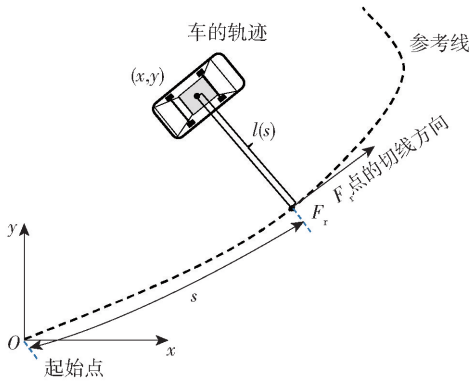


图 1 Frenet 坐标系的建立

Fig. 1 Establishment of Frenet coordinate system

由于道路大部分都存在一定的弯曲度、不是完全笔直的,在笛卡尔坐标系下是一种二维直角坐标系,在有一定弯曲度的道路上描述车辆时如图 2 所示,道路信息在笛卡尔坐标系下为一条曲线,车辆在行驶过程中容易忽略车道信息,导致路径偏移,从而出现避障不及时等情况。

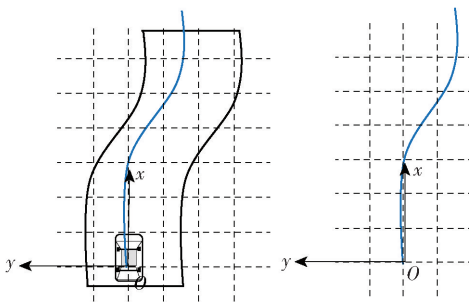


图 2 笛卡尔坐标下描述路径图(左为车辆在道路上的轨迹描述图,右为车辆轨迹在笛卡尔坐标系下的实际映射图)

Fig. 2 Description of path diagram in Cartesian coordinate system (Left: the depiction of vehicle trajectory on the roadway; Right: the actual mapping of vehicle trajectory in Cartesian coordinate system)

图 3 为 Frenet 坐标系下描述的路径图。由图 3 可知, Frenet 坐标系将二维车辆信息解耦为两个相互独立的一维横向 l 和纵向 s 信息,车道信息能够全部映射到 Frenet 坐标系下,简化了参数信息,减少运算量。图 3 中的 s 表示为 Frenet 坐标系下的纵向位移。

1.2 Frenet 坐标系与笛卡尔坐标系的转换

在 Frenet 坐标系下,经规划获得车辆行驶轨迹,将坐标重新转换到笛卡尔坐标系上,供控制模块完成调用^[14]。图 4 为 Frenet 坐标系与笛卡尔坐标系的转换关系。图 4 中, \mathbf{v}_h 为车辆的速度矢量, θ_h 为 \mathbf{v}_h

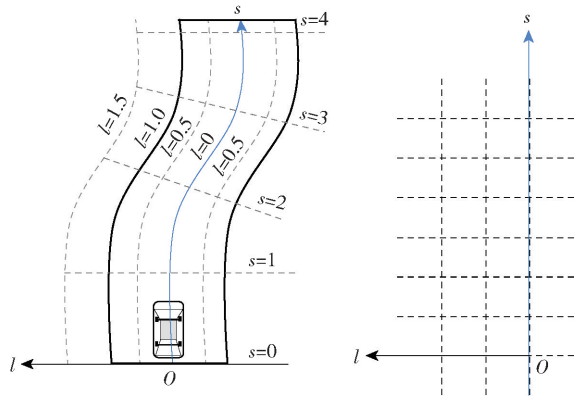


图 3 Frenet 坐标系描述路径图(左为车辆在道路上的轨迹描述图,右为车辆轨迹在 Frenet 坐标系下实际映射图)

Fig. 3 Description of path diagram in Frenet coordinate system (Left: the depiction of vehicle trajectory on the roadway; Right: the actual mapping of vehicle trajectory in Frenet coordinate system)

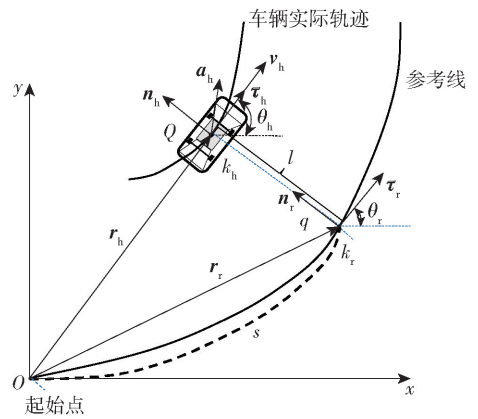


图 4 Frenet 坐标系与笛卡尔坐标系的转换关系

Fig. 4 Trajectory generation in Frenet coordinate system

与 x 轴的夹角, τ_h 为车轨迹切线上的单位向量, \mathbf{a}_h 为车辆的加速度矢量, \mathbf{r}_h 为车辆的位置矢量, k_h 为车的位置在车轨迹上的曲率, \mathbf{n}_h 为车辆轨迹法线上的单位向量, Q 为车辆当前位置, q 为所在 Q 点的车辆在参考线上的投影点, \mathbf{r}_r 为车辆投影的位置矢量, τ_r 为投影在道路几何上切线的单位向量, θ_r 为 τ_r 与 x 轴的夹角, \mathbf{n}_r 为投影在道路几何上法线的单位向量, k_r 为投影的位置矢量在道路几何上的曲率。图 4 中参数的意义见表 1 和表 2。

车辆运动状态在 Frenet 坐标系下可以描述为 $[s, \dot{s}, \ddot{s}, l, \dot{l}, \ddot{l}, l', l'']$, 在笛卡尔坐标系下可以描述为 $[\mathbf{v}_h, \mathbf{r}_h, \theta_h, k_h, \mathbf{a}_h]$, 车辆坐标系之间的转换关系为 $[s, \dot{s}, \ddot{s}; l, \dot{l}, \ddot{l}; l', l''] \Leftrightarrow [\mathbf{v}_h, \mathbf{r}_h, \theta_h, k_h, \mathbf{a}_h]$ 。

表 1 笛卡尔坐标系各参数及含义

Table 1 The parameters and meanings of Cartesian coordinate system

参数	含义
r_h/m	车辆的位置矢量
$v_h/(m \cdot s^{-1})$	车辆的速度矢量
$a_h/(m \cdot s^{-2})$	车辆的加速度矢量
k_h/m^{-1}	车的位置在车轨迹上的曲率
τ_h	车轨迹切线上的单位向量
n_h	车轨迹法线上的单位向量

表 2 Frenet 坐标系各参数及含义

Table 2 The parameters and meanings of Frenet coordinate system

参数	含义
r_r/m	车辆投影的位置矢量
$\dot{s}/(m \cdot s^{-1})$	纵向速度
$\ddot{s}/(m \cdot s^{-2})$	纵向加速度
k_r/m^{-1}	投影的位置矢量在道路几何上的曲率
$\dot{l}/(m \cdot s^{-1})$	横向速度
$\ddot{l}/(m \cdot s^{-2})$	横向加速度
τ_r	投影在道路几何上切线的单位向量
n_r	投影在道路几何上法线的单位向量
l'	横向位移对弧长的 1 阶导数
l''	横向位移对弧长的 2 阶导数

在笛卡尔坐标系下,根据图 4 可知 $r_r = (x_r, y_r)$, $n_r = (-\sin \theta_r, \cos \theta_r)$, $\tau_r = (\cos \theta_r, \sin \theta_r)$, 令 τ_h, n_h 为点 Q 处的正交单位向量; τ_r, n_r 为参考线到投影点 q 处的正交单位向量。由图 4 可知到横向位移为

$$l = (r_r - r_h) \cdot n_r \quad (1)$$

由式(1)可知

$$r_h = r_r + l \cdot n_r \quad (2)$$

对式(2)求导,得 $r_r + \dot{l} \cdot n_r + l \cdot \dot{n}_r = \dot{r}_h$, 由于基本公式中 $\dot{n}_r = -k_r \dot{s} \tau_r$, $\dot{r}_h = v_h$, $\dot{n}_h = -k \dot{s} \tau_h$ ^[15], $\dot{r}_r = \tau_r \cdot \dot{s}_r$, 代入基本公式,得到

$$\dot{s} \cdot \tau_r + \dot{l} \cdot (-k_r \dot{s} \tau_r) + \dot{l} \cdot n_r = v_h \quad (3)$$

式(3)两边同时点乘 n_r , 由于 n_r 与 τ_r 正交, $n_r \cdot \tau_r = 0$, 得到横向速度如下:

$$\dot{l} = v_h \cdot n_r = |v_h| |n_r| \cos \langle v_h, n_r \rangle \quad (4)$$

由式(3)得到纵向速度为

$$\dot{s} = \frac{v_h \cdot \tau_r}{1 - k_r l} \quad (5)$$

由式(4)、式(5)得到

$$\ddot{l} = a_h \cdot n_r - k_r (1 - k_r l) \cdot \dot{s}^2 \quad (6)$$

$$\ddot{s} = \frac{a_h \cdot \tau_r}{1 - k_r l} + \frac{k_r \dot{s}^2 l'}{1 - k_r l} + \frac{\dot{s}^2}{1 - k_r l} (k_r l' + k_r l') \quad (7)$$

$$l' = \frac{dl}{ds} = \frac{\dot{l}}{\dot{s}} = \frac{v_h \cdot n_r}{v_h \cdot \tau_r} (1 - k_r l) \quad (8)$$

由式(8)可知, $v_h \cdot n_r = \dot{l} = |v_h| |n_r| \cos \langle v_h, n_r \rangle$, $v_h \cdot \tau_r = (1 - k_r l) \dot{s} = |v_h| |\tau_r| \cos \langle v_h, \tau_r \rangle$, 因为 v_h 与 x 轴的夹角为 θ_h , 又因为 τ_r 与 x 轴的夹角为 θ_r , n_r 与 τ_r 垂直, 故 n_r 与 x 轴的夹角为 $\theta_r + \pi/2$, 由此可知

$$\cos \langle v_h, n_r \rangle = \cos \left\langle \theta_h - \left(\theta_r + \frac{\pi}{2} \right) \right\rangle = \sin (\theta_h - \theta_r) \quad (9)$$

$$\cos \langle v_h, \tau_r \rangle = \cos (\theta_h - \theta_r) \quad (10)$$

由式(4)、式(5)和式(9)、式(10), 可得到

$$|v_h| = \sqrt{\dot{l}^2 + (1 - k_r l)^2 \dot{s}^2} \quad (11)$$

由式(6)、式(7)可得到

$$|a_h| = \sqrt{(\ddot{l} + k_r (1 - k_r l) \dot{s}^2)^2 + [\dot{s} (1 - k_r l) - \dot{s}^2 k_r l' - \dot{s}^2 (k_r l' + k_r l')]^2} \quad (12)$$

由公式 $a_h = |v_h| \tau_h + |v_h|^2 k_h n_h$, 两边点乘 n_h , 可得到

$$k_h = \frac{a_h \cdot n_h}{|v_h|^2} \quad (13)$$

因此, Frenet 坐标系下的车辆运动状态 $[s, \dot{s}, \ddot{s}, l, \dot{l}, \ddot{l}, l', l'']$ 与笛卡尔坐标系下车辆运动状态 $[v_h, r_h, \theta_h, k_h, a_h]$ 间的转换公式可由式(1)、式(2)、式(4)~式(8)、式(11)~式(13)确定。

2 传统人工势场法

传统人工势场法将目标点视为势能最低点, 将障碍物视为势能高点, 车辆在二者合力的作用下向势场强度下降最快的方向移动, 如图 5 所示。目标点或障碍物与车辆之间的距离决定了势能的大小。

引力势场函数 U_{att} 的表达式为

$$U_{att} = \frac{1}{2} k_{att} \rho^2 (P, P_{goal}) \quad (14)$$

式中: k_{att} 为引力势场增益因子; P 为车辆空间坐标; P_{goal} 为目标点空间坐标; $\rho(P, P_{goal})$ 为车辆与目标点之间的欧几里德距离 $|P - P_{goal}|$ 。

对引力势场函数进行负梯度求导, 得到引力函数 F_{att} 为

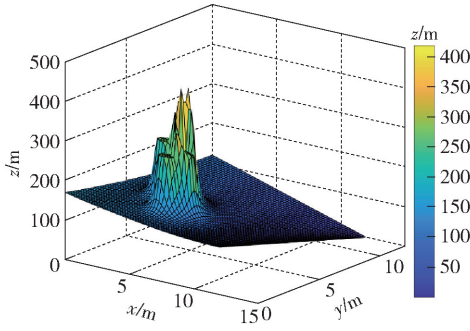


图 5 人工势场法势场示意图

Fig. 5 Potential field diagram of artificial potential field method

$$F_{att} = -\nabla U_{att} = -k_{att}(P, P_{goal}) \quad (15)$$

根据斥力势场的特点,斥力势场函数 U_{rep} 的表达式如下:

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(P, P_{obs})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2, & \rho(P, P_{obs}) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(P, P_{obs}) > \rho_0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: k_{rep} 为斥力势场增益因子; ρ_0 为障碍影响范围; P_{obs} 为障碍物的空间坐标; $\rho(P, P_{obs})$ 为车辆与障碍物的欧几里德距离 $|P - P_{obs}|$ 。

对斥力势场函数进行求导,得到 F_{rep} 的表达式为

$$F_{rep} = -\nabla U_{rep} = \begin{cases} k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(P, P_{obs})} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{\nabla \rho(P, P_{obs})}{\rho^2(P, P_{obs})}, & \rho(P, P_{obs}) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(P, P_{obs}) > \rho_0 \end{cases} \quad (17)$$

3 传统人工势场法缺陷改进

3.1 提出安全椭圆理论

根据人工势场法的传统定义,车辆是否受到斥力的影响由障碍物影响范围 ρ_0 决定,而障碍物影响范围 ρ_0 在算法中设置,取值上没有明确的标准^[16]。同时车辆在道路上行驶时,障碍物四周的影响范围相同,会使车辆在避开障碍物时的路径有所增长。当自车前后的影响范围大于自车左右的障碍物影响范围时,规划出的路径更短。图 6 为车辆躲避障碍物简图,其中 M 为无人车, M' 为避开障碍物时的无人车, N 为障碍物车辆。

针对这个问题,本文提出安全椭圆的概念,以使车辆更加合理安全地避开障碍物。

本文重新定义影响范围为椭圆区域,如图 7 所

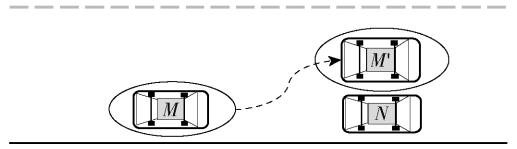


图 6 车辆躲避障碍物简图

Fig. 6 Vehicle obstacle avoidance sketch

示,由椭圆长半轴 A 和短轴 B 决定影响区域。

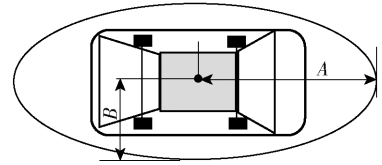


图 7 安全椭圆图

Fig. 7 Safe elliptical graph

椭圆长半轴 A 的数学表达式为

$$A = \frac{L}{2} + v_{or}t + \frac{mv_0^2}{2F} \quad (18)$$

式中: L 为车辆长度; v_{or} 无人车与障碍物的相对速度; t 为制动前的反应时间; m 为车辆的质量; v_0 为无人车与大地的相对速度; F 为最大制动力。式(18)描述了安全椭圆区域由制动距离、车身的一半及驾驶员制动反应行驶距离组成。

实际的安全驾驶中,车辆应尽量在道路中心线附近行驶^[17]。无人车椭圆短半轴 B 的函数表达式如下:

$$B = \frac{G \cdot W}{2} \quad (19)$$

式中: G 为扩大系数; W 为自车车辆的宽度。

根据安全椭圆区域的思想改进斥力场函数,其函数表达式如下:

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(P, P_{obs})} - \frac{1}{A} \right)^2, & P_{obs} \leq \frac{x^2}{A} + \frac{y^2}{B} = 1 \\ 0, & P_{obs} > \frac{x^2}{A} + \frac{y^2}{B} = 1 \end{cases} \quad (20)$$

式中: $x^2/A^2 + y^2/B^2 = 1$ 表示安全椭圆区域;当 P_{obs} 在椭圆区域内或椭圆区域上时,车辆会受到斥力场的影响,当 P_{obs} 不在椭圆区域内时,车辆不再受到斥力场的影响。

当车辆处于中间平衡点时,传统算法由于斥力与引力大小相等、方向相反,陷入局部最优。本文通过提出的安全椭圆理论,既确定了障碍物影响范围

的标准,又解决了车辆陷入中间平衡点的情况。如图 8、图 9 所示,车辆在行驶过程中两侧的障碍物影响范围变小,车辆可以在顺利避开障碍物的同时减少路径的长度。

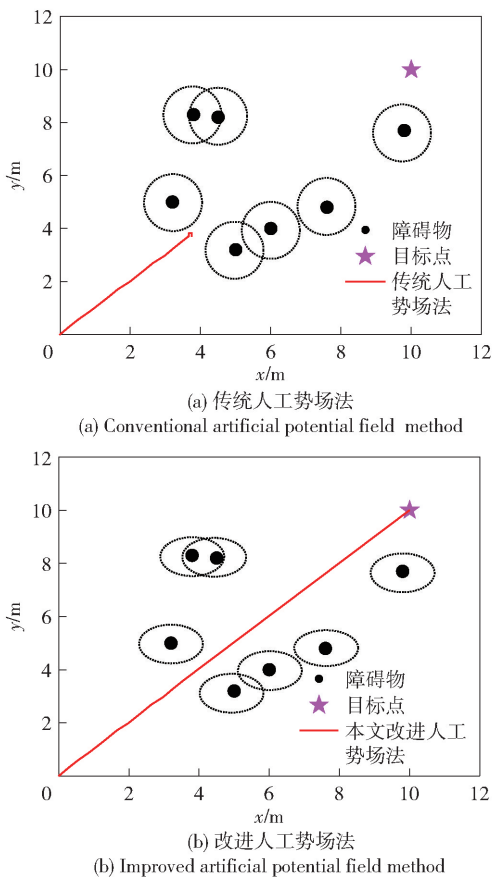


图 8 解决中间平衡点问题

Fig. 8 Addressing the middle equilibrium point

3.2 调节因子

当障碍物在目标点附近时,引力会随着车辆与目标点的距离变短而变弱,这时车辆受到的斥力很有可能大于目标点的引力,使得车辆无法顺利到达目标点。基于对传统人工势场法模型的分析,本文引入目标点与车辆间的调节因子 ρ^m (m 为调节因子),灵活调节斥力的大小,则建立的斥力函数 U_{rep} 具体表达式如下:

$$U_{rep} =$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2}k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(P, P_{obs})} - \frac{1}{A} \right)^2 \rho^m(P, P_{goal}), & P_{obs} \in \frac{x^2}{A} + \frac{y^2}{B} = 1 \\ 0, & P_{obs} \notin \frac{x^2}{A} + \frac{y^2}{B} = 1 \end{cases} \quad (21)$$

根据本文建立的障碍物模型类别及障碍物的密度与分布,通过尝试不同的调节因子 m 的大小,找

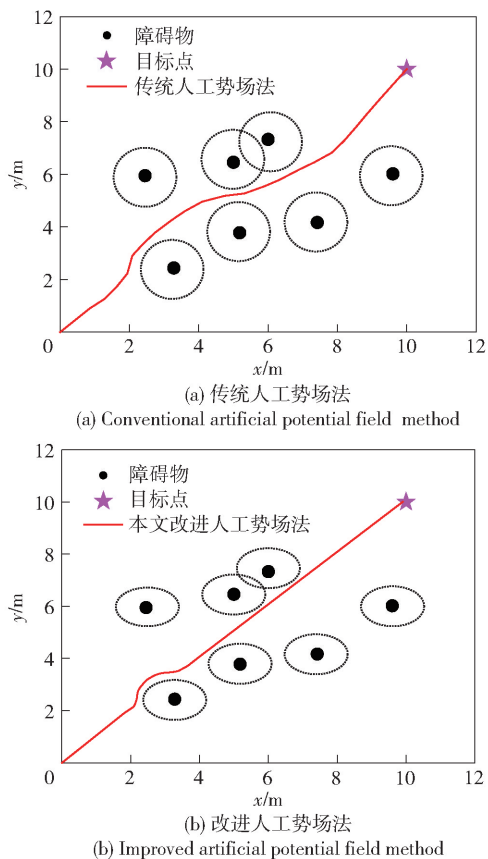


图 9 解决路径过长问题

Fig. 9 Solving the problem of long paths

到最佳因子值 $m = 2$ ^[18]。

图 10 所示为解决目标不可达问题。从图 10 中可以看出,传统人工势场法无法到达目标点,而经过改进后的人工势场法能够消除在目标点附近的障碍物斥力的影响,顺利到达目标点。

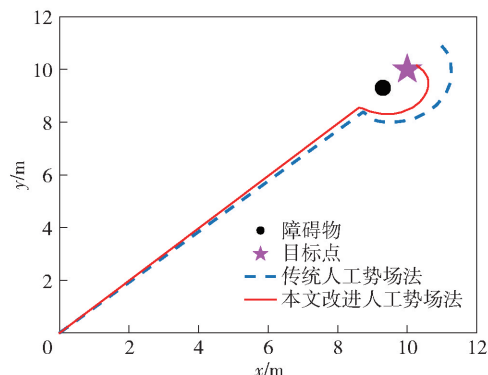


图 10 解决目标不可达问题

Fig. 10 Solving the problem of unreachable targets

3.3 预测距离

针对 3.2 节的情况提出预测距离概念,预测距离算法流程如图 11 所示。由图 11 可见:在车辆移

动中,首先计算一侧障碍物到当前点与目标点连线的距离 d_i (i 为一侧障碍物到当前点与目标点连线的条数),当 d_i 小于等于安全椭圆长轴 A 或短轴 B 时,满足以上条件的同时取到当前点最短距离的障碍物为中心点,此时以车辆当前点到中心点的连线为 R_x ,判断 R_x 是否小于预测距离 R_p ,若 R_x 大于预测距离 R_p 则车辆继续沿当前道路前进,若 R_x 小于等于预测距离 R_p ,则以 R_x 为半径,向障碍物少的一侧旋转。车辆每旋转 5° 就判断所有障碍物到当前点的 d_i ,当所有的 d_i 都大于安全椭圆长轴 A 或短轴 B 时,判定车辆已绕过所有障碍物点,此时车辆停止旋转,以此时方向前进。

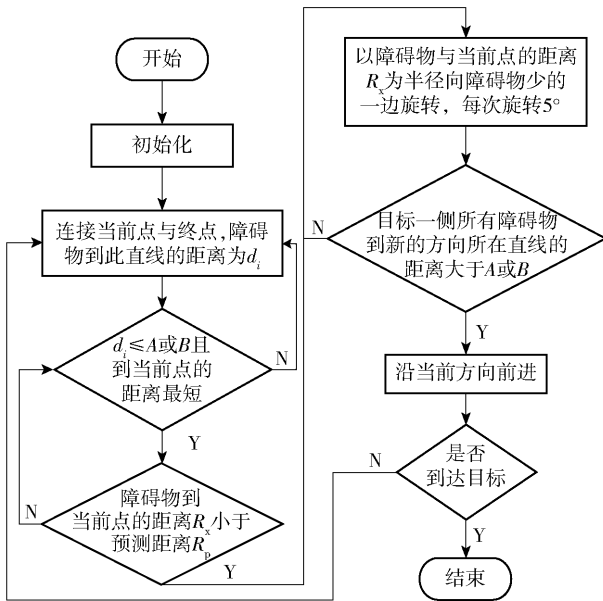


图 11 预测距离流程图

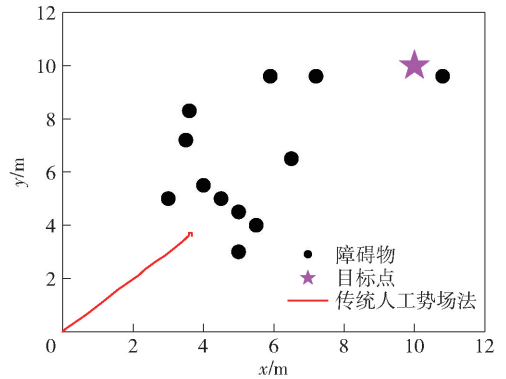
Fig. 11 Flow chart of prediction distance algorithm

当车辆遇到 U 型障碍物时,车辆会陷入障碍物中并产生震荡或者停止,如图 12(a) 所示。通过增加预测距离,如图 12(b) 所示,能够让车辆在未陷入大型障碍物(例如 U 型障碍物)时就感知到障碍物的存在,防止车辆陷入 U 型障碍物,同时每次旋转的角度较小,做到路径平滑。

文献[6]中的算法虽然能够成功躲避 U 型障碍物,但路径过长。如图 13 和表 3 所示,本文提出的改进人工势场法与文献[6]的算法对比,在车辆的路径长、步数和时间上都优于文献[6]算法。

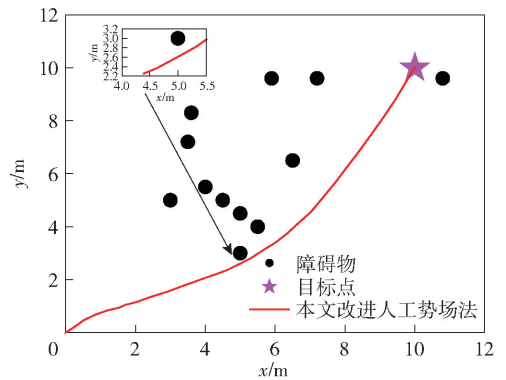
3.4 参考线势场

根据结构化道路分布,设置以道路中心线为 Frenet 坐标的参考线,防止车辆产生局部震荡以及偏离轨迹。



(a) 传统人工势场法

(a) Conventional artificial potential field method



(b) 改进人工势场法

(b) Improved artificial potential field method

图 12 解决 U 型障碍物问题

Fig. 12 Solving the problem of U-shaped obstacles

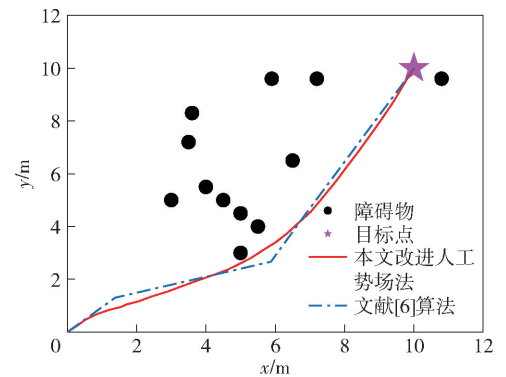


图 13 本文改进人工势场法与文献[6]算法对比分析

Fig. 13 Comparison of the proposed algorithm and the algorithm in Ref. [6]

表 3 U 型障碍物算法对比

Table 3 Comparison of U-shaped obstacle algorithms

参数	传统人工势场法	文献[6]算法	本文改进人工势场法
步数	-	71	62
路径长/m	-	7.1	5.6
时间/s	-	0.1114	0.036

本文引入参考线势场,使车辆在行进以及避障的过程中紧跟参考线。车辆在参考线势场的约束下朝着目标点行驶,该势场采用一个类高斯函数^[19],描述如下:

$$U_{\text{refer}}(\Delta s) = (s_{\text{total}} - \Delta s) \exp\left(1 + \frac{(\Delta l)^2}{2\delta^2}\right) s \quad (22)$$

式中: $U_{\text{refer}}(\Delta s)$ 为参考线势场; s_{total} 为车辆的总体纵向位移; Δs 为起始点 x_{st} 至当前位置 x 的距离; Δl 为沿横向偏离参考线距离; δ 为横向收敛系数^[19]。

3.5 动态速度势场建立

无人车在考虑躲避静态障碍物时还要考虑动态障碍物。此时动态障碍物的速度为关键因素。图 14 为车辆速度示意图。图 14 中, r_{ob} 为障碍物在车辆笛卡尔坐标下投影的位置矢量; θ 为无人车的航向角; β 为障碍物车辆的航向角; v_0 为障碍物车辆的速度; v 为车辆的速度。

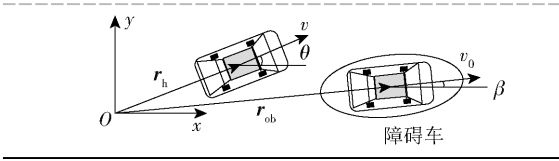


图 14 车辆速度示意图

Fig. 14 Vehicle speed diagram

为此,建立如下速度势场:

$$U_{\text{rev}} =$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2}k_v v_{\text{or}}^2, & P_{\text{obs}} \in \frac{x^2}{A} + \frac{y^2}{B} = 1 \cap \alpha \in \left(-\frac{\pi}{2} \text{ rad}, \frac{\pi}{2} \text{ rad}\right) \\ 0, & P_{\text{obs}} \notin \frac{x^2}{A} + \frac{y^2}{B} = 1 \end{cases} \quad (23)$$

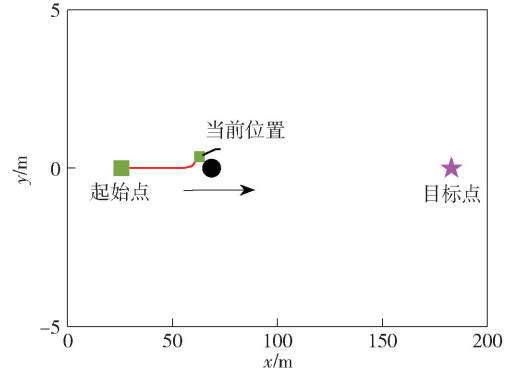
式中: U_{rev} 为速度势场; k_v 为速度势场的增益因子; $v_{\text{or}} = v - v_0$ 为无人车与障碍物的相对速度; α 为速度 v_{or} 的方向和向量 r_{vo} 之间的夹角,其中向量 r_{vo} 为无人车与当前障碍物点组成的向量。

速度势场的斥力 F_{rev} 为

$$F_{\text{rev}} = -\nabla U_{\text{rev}} =$$

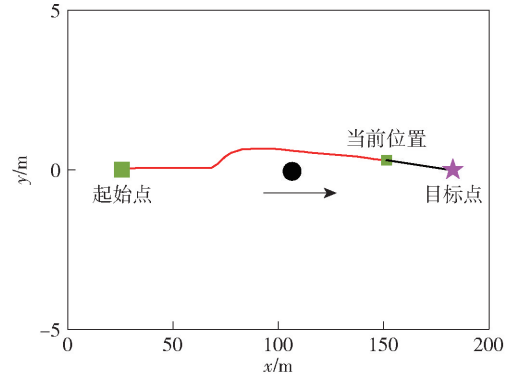
$$\begin{cases} k_v v_{\text{or}}, & P_{\text{obs}} \in \frac{x^2}{A} + \frac{y^2}{B} = 1 \cap \alpha \in \left(-\frac{\pi}{2} \text{ rad}, \frac{\pi}{2} \text{ rad}\right) \\ 0, & P_{\text{obs}} \notin \frac{x^2}{A} + \frac{y^2}{B} = 1 \end{cases} \quad (24)$$

速度势场斥力的原理同样是迫使汽车远离障碍物。下面通过数学仿真软件仿真验证速度斥力势场的有效性。移动障碍物速度设置为 5 m/s,方向沿 x 轴方向,无人车速度设置为 10 m/s,如图 15 所示,无人车在顺利避开动态障碍物后到达目标点。



(a) 避让障碍物前

(a) Before avoiding obstacles



(b) 避让障碍物后

(b) After avoiding obstacles

图 15 躲避动态障碍物示意图

Fig. 15 Schematic diagram of avoiding dynamic obstacles

综上所述,汽车所受到的合力场作用为

$$U(x, \Delta s) = U_{\text{refer}}(\Delta s) + U_{\text{att}}(x) + U_{\text{rep}}(x) + U_{\text{rev}}(x) \quad (25)$$

车辆受到的合力为

$$F_{\text{total}} = F_{\text{att}} + F_{\text{rep}} + F_{\text{refer}} + F_{\text{rev}} \quad (26)$$

式中: F_{refer} 为参考线势场的引力。

4 仿真实验

4.1 算法对比

为了证明本文改进人工势场法的优势,分别与常用的 RRT 算法及传统人工势场法进行仿真对比。如图 16 所示,设置一个障碍物,长为 700 m、宽为 50 m。建立相同的数学仿真软件环境,分别运用 3 种算法进行求解。

RRT 算法的原理是以初始点为根节点找到可行路径,叶子节点不断扩展延伸、生成随机树,图中绿色为搜索节点。如图 16(a)所示,RRT 算法规划的路径曲折,冗余路径过多。如图 16(b)所示,传统人工势场法在进行规划时,由于障碍物位于目标点附近,容易出现斥力大于或等于引力的情况,使车辆陷入局部震荡,从而产生目标不可达现象。而运用改进人工势场法则顺利到达目标点,如图 16(c)所示,无冗余路径,平滑效果更好。

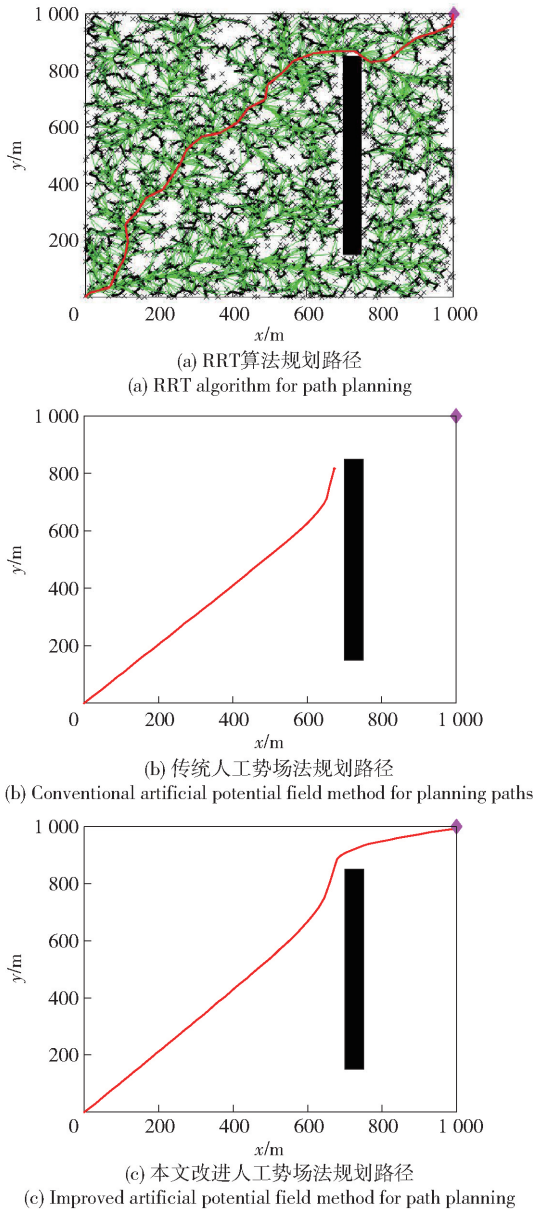


图 16 躲避障碍物不同算法对比效果

Fig. 16 Path planning effects of different methods

表 4 为 3 种算法的数据对比图,传统人工势场法在仿真过程中由于车辆陷入局部最优,无法完成规划。由表 4 可知:RRT 算法耗时为 0.92 s,长

度为 1 652 m,运算时间较长,规划效率较低;改进人工势场法耗时 0.47 s,长度为 1 476 m,运算时间短,路径平滑,路径规划效率比 RRT 算法提高了 42.8%。

表 4 算法仿真数据对比

Table 4 Comparison of algorithm simulation data

算法	仿真时间/s	仿真步长	路径长度/m
RRT 算法	0.92	0.5	1 652
传统人工势场法	0.40	0.5	
改进人工势场法	0.47	0.5	1 476

4.2 仿真验证

为了验证基于 Frenet 坐标系下改进人工势场法在直道和弯道下车辆静态及动态避障中的可行性以及路径规划的结果,利用数学仿真软件进行仿真,对路径规划效果进行验证。

自动驾驶系统分为 4 个核心流程:感知模块、全局规划、决策规划、控制模块。感知模块将所获得的信息与计算出的车辆状态同时发给全局规划模块和决策规划模块^[20]。如图 17 所示,本文基于车辆动力学模型,在决策模块中进行坐标系之间的转换以及人工势场法算法改进,最后发送给控制模块完成仿真。

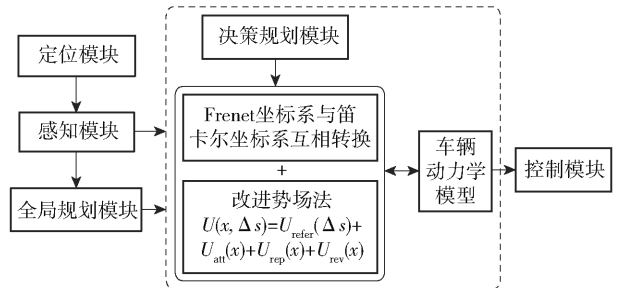


图 17 自动驾驶系统示意图

Fig. 17 Schematic diagram of automatic driving system

在运用基于 Frenet 和改进人工势场法的路径规划求解过程中,将模型参数设置如下:

机器人初始状态 $X_0 = (0 \text{ m}, 0 \text{ m})$, $R_p = 4 \text{ m}$, $G = 2 (1 \leq G \leq 3)$, $k_{refer} = 2$, $k_{att} = 15$, $k_{rep} = 3$, $k_v = 2$, $\delta = 0.96$, $A = 45 \text{ m}$, $B = 0.875 \text{ m}$ 。

4.2.1 直道下规避静态障碍物仿真实验

在进行直道下静态障碍物避障实验时,在自动驾驶仿真软件中设置一条长度为 500 m 的结构化道路,在环境中添加障碍物车辆。仿真结果如图 18 所示,无人车能够顺利避开障碍物车辆并返回原行驶路径。

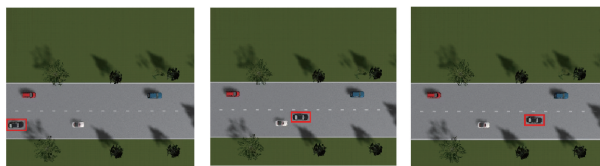


图 18 躲避静态障碍物仿真场景过程图(左:准备避障,中:避障中,右:完成避障)

Fig. 18 Moving trajectory during static obstacle avoidance (Left:preparing for obstacle avoidance; Middle:avoiding obstacles; Right:obstacle avoidance completed)

本文设置无人车车速分别为 10 km/h、30 km/h、60 km/h,进行仿真实验,得到不同车速下的行驶路径、前轮转角、横摆角速度的变化曲线,如图 19 所示。图 19(a)中不同车速下的行驶路径与参考路径误差较小。由图 19(b)、图 19(c)可以看出,前轮转角、横摆角速度随车速的增大波动幅度逐渐增大,但均在合理控制范围内,满足车辆安全性及平稳性要求。

4.2.2 直道下规避动态障碍物

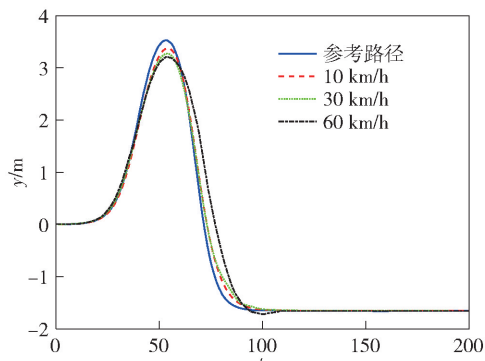
不同车速下的动态障碍物避障过程如图 20 所示,从中可见无人车成功避开动态车辆,且路径平滑。

设置无人车的车速分别为 10 km/h、30 km/h、60 km/h,障碍物车速为 5 km/h,得到不同车速下的行驶路径、前轮转角、横摆角速度,如图 21 所示。由图 21(a)可见:不同车速下的行驶路径与参考路径基本吻合且路径平滑;前轮转角及横摆角速度在不同速度下均控制在 $-10^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 范围内,可跟踪性较好。

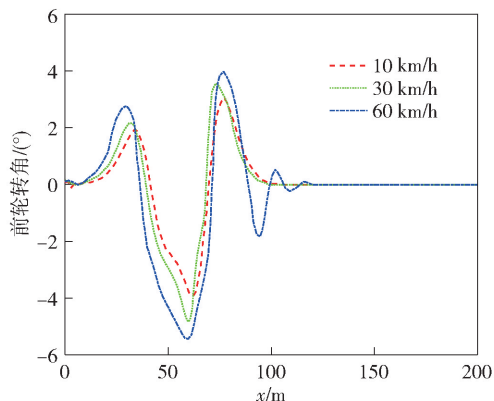
4.2.3 弯道下规避障碍物

弯道避障时车辆在笛卡尔坐标系下容易丢失车道信息,从而出现避障不及时的情况,Frenet 坐标系下车辆信息仅与参考线有关,从而使车辆能顺利避开障碍物,图 22、图 23 所示为车辆躲避 U 型障碍物和动态车辆的仿真过程。为了进一步说明 Frenet 坐标系弯道下不偏离参考线的优势,增大路径曲率,再次进行躲避动态障碍物仿真实验。如图 24 所示,在 $(-\pi/2 \text{ rad}, \pi/2 \text{ rad})$ 之间由于速度斥力势场及参考线势场的作用,无人车依然能够顺利躲避障碍物且不发生车辆偏移。

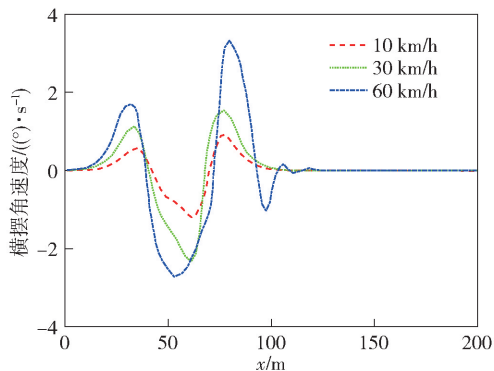
在弯道避障过程中在不同车速下得到行驶路径、前轮转角及横摆角速度的对比图如图 25 所示。由图 25 可以看出:车速不同时的行驶路径与参考路



(a) 行驶路径
(a) Driving path



(b) 前轮转角
(b) Front wheel steering angle



(c) 横摆角速度
(c) Yaw angular velocity

图 19 仿真路径跟踪效果

Fig. 19 Simulation path tracking effect

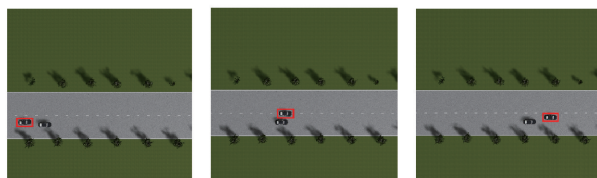
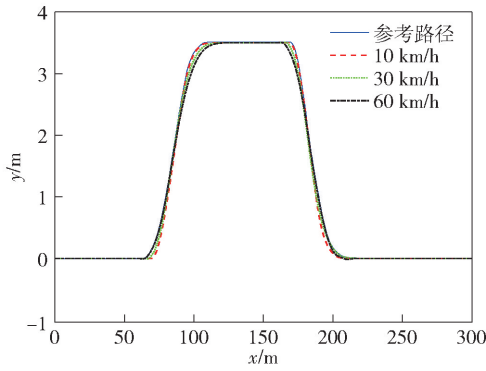


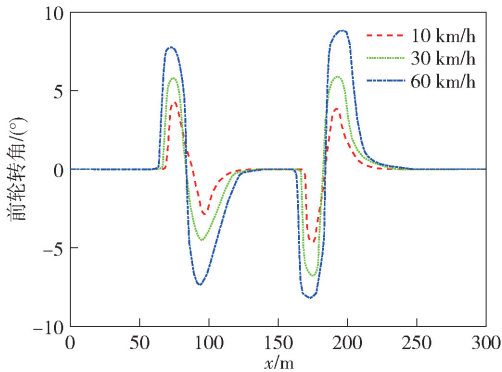
图 20 躲避动态障碍物仿真场景过程图(左:准备避障,中:避障中,右:完成避障)

Fig. 20 Moving trajectory during dynamic obstacle avoidance (Left:preparing for obstacle avoidance; Middle:Avoiding obstacles; Right:obstacle avoidance completed)



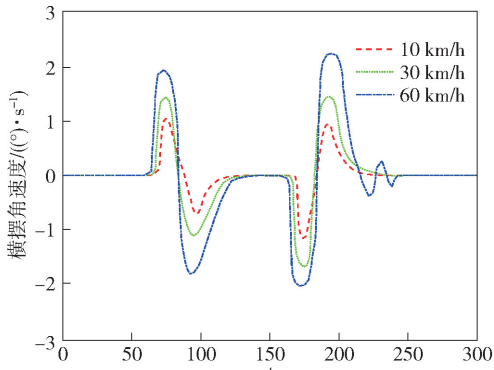
(a) 动态环境行驶路径

(a) Dynamic environment driving path



(b) 前轮转角

(b) Front wheel steering angle



(c) 横摆角速度

(c) Yaw angular velocity

图 21 躲避动态障碍物路径跟踪效果

Fig. 21 Joint simulation path tracking effect

径误差不大,路径平滑;前轮转角及横摆角速度峰值较小,表明跟踪效果较好。

5 结论

本文针对传统人工势场法存在的问题,基于 Frenet 坐标系提出改进传统人工势场法路径规划算法。利用 Frenet 坐标系的优势,结合改进人工势场法能够减少车道对规划路径时的影响,从而提高规划的准确性、可跟踪性以及安全性。得出以下主要结论:

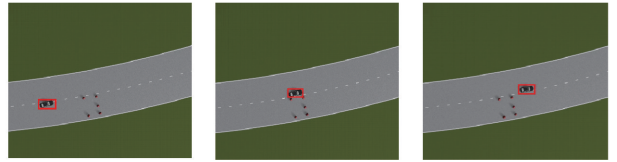


图 22 躲避 U 型障碍物仿真过程(左:准备避障,中:避障中,右:完成避障)

Fig. 22 Simulation process of avoiding U-shaped obstacles (Left: preparing for obstacle avoidance; Middle: avoiding obstacles; Right: obstacle avoidance completed)

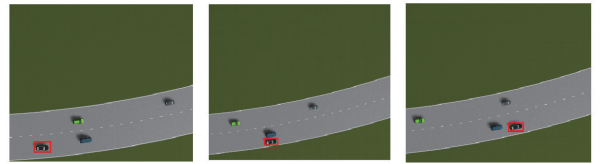


图 23 躲避动态障碍物仿真过程(左:准备避障,中:避障中,右:完成避障)

Fig. 23 Simulation process of avoiding dynamic obstacles (Left: preparing for obstacle avoidance; Middle: avoiding obstacles; Right: obstacle avoidance completed)

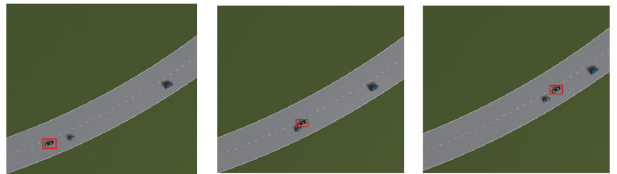
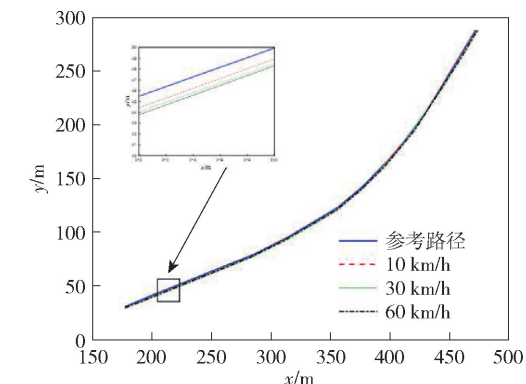


图 24 大曲率下躲避动态障碍物仿真过程(左:准备避障,中:避障中,右:完成避障)

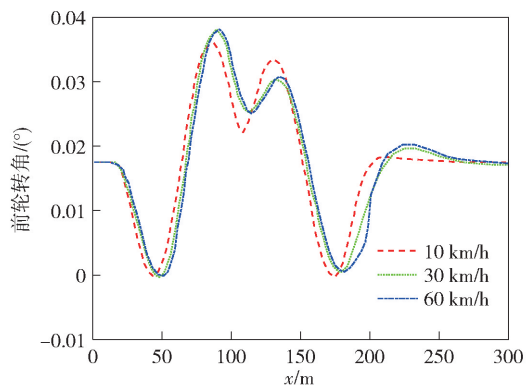
Fig. 24 Simulation process of avoiding dynamic obstacles under large curvature (Left: preparing for obstacle avoidance; Middle: avoiding obstacles; Right: obstacle avoidance completed)

1) 构建基于 Frenet 下的空间坐标系,更易解决车辆在不同道路环境下避障过程中位置不易表述的问题,实现车辆避障位置的简便表示。使车辆相对于中心线的偏移距离及车辆沿车道线方向的行驶距离更易确定,拟合计算相对简便,提高计算效率。

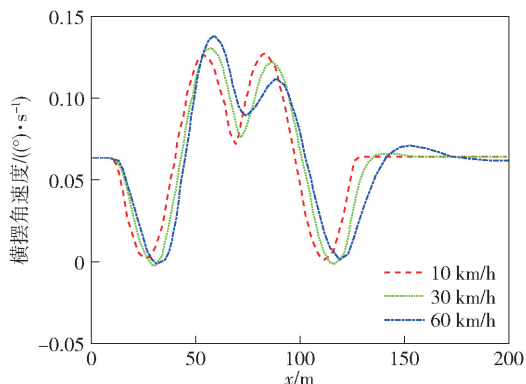
2) 在算法中引入调节因子及安全椭圆模型改进人工势场函数,引入预测距离概念调节势场作用区域,能够避免传统人工势场法存在的局部最小值和目标不可达问题。在改进的势场函数中加入参考线势场,使车辆在移动过程中紧跟参考线,不发生



(a) 动态环境行驶路径
(a) Dynamic environment driving path



(b) 前轮转角
(b) Front wheel steering angle



(c) 横摆角速度
(c) Yaw angular velocity

图 25 躲避动态障碍物路径跟踪效果

Fig. 25 Avoid dynamic obstacle path tracking effect

偏移。

3) 在改进静态障碍物势场的基础上加入障碍物速度斥力势场,使得车辆能够顺利躲避动态障碍物并满足路径规划要求。

4) 通过算法对比表明,改进人工势场法比其他算法具有耗时短、路径短且平滑的优势。通过数学仿真软件进行仿真验证,无人车在直道及弯道中均能顺利躲避静态和动态障碍物且不偏离路线,验证了本文算法的有效性及其规划优越性。

参考文献 (References)

- [1] 翟丽,张雪莹,张闲,等.基于势场法的无人车局部动态避障路径规划算法[J].北京理工大学学报,2022,42(7):696-705.
ZHAI L, ZHANG X Y, ZHANG X, et al. Local dynamic obstacle avoidance path planning algorithm for unmanned vehicles based on potential field method [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022,42(7):696-705. (in Chinese)
- [2] 牛秦玉,李美凡,赵勇.改进人工势场法的AGV路径规划算法研究[J].机床与液压,2022,50(17):19-24.
NIU Q Y, LI M F, ZHAO Y. Research on AGV path planning algorithm based on improved artificial potential field method [J]. Machine and Hydraulic, 2022,50(17):19-24. (in Chinese)
- [3] YUAN C C, WENG S F, SHEN J, et al. Research on active collision avoidance algorithm for intelligent vehicle based on improved artificial potential field model [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(3):172988-172998.
- [4] 修彩靖,陈慧.基于改进人工势场法的无人驾驶车辆局部路径规划的研究[J].汽车工程,2013,35(9):808-811.
XIU C J, CHEN H. Research on local path planning of autonomous vehicles based on improved artificial potential field method [J]. Automotive Engineering, 2013,35(9):808-811. (in Chinese)
- [5] 陈相茹.基于人工势场理论的车辆行驶路径建模研究[D].长春:吉林大学,2020.
CHEN X R. Research on vehicle driving path modeling based on artificial potential field theory [D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
- [6] 李二超,王玉华.改进人工势场法的移动机器人避障轨迹研究[J].计算机工程与应用,2022,58(6):296-304.
LI E C, WANG Y H. Research on obstacle avoidance trajectory of mobile robot based on improved artificial potential field method [J]. Computer Engineering and Application, 2022,58(6):296-304. (in Chinese)
- [7] 孙鹏耀,黄炎焱,潘尧.基于改进势场法的移动机器人路径规划[J].兵工学报,2020,41(10):2106-2121.
SUN P Y, HUANG Y Y, PAN Y. Mobile robot path planning based on improved potential field method [J]. Acta Armamentarii, 2020,41(10):2106-2121. (in Chinese)
- [8] HOU P Q, PAN H, GUO C. Simulation research for mobile robot path planning based on improved artificial potential field method recommended by the AsiaSim [J]. International Journal of Modeling, Simulation and Scientific Computing (English), 2017(2):008.
- [9] 王沙晶,陈建业.基于Frenet坐标系的智能车运动规划研究[J].移动电源与车辆,2019,195(1):22-29.
WANG S J, CHEN J Y. Research on motion planning of intelligent vehicle based on Frenet coordinate system [J]. Mobile Power and Vehicle, 2019,195(1):22-29. (in Chinese)
- [10] 魏民祥,滕德成,吴树凡.基于Frenet坐标系的自动驾驶轨迹规划与优化算法[J].控制与决策,2021,36(4):815-824.
WEI M X, TENG D C, WU S F. Autonomous driving trajectory

- planning and optimization algorithm based on Frenet coordinate system[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(4):815–824. (in Chinese)
- [11] 刘冰雁,叶雄兵,方胜良,等. 基于 Frenet 和改进人工势场的在轨规避路径自主规划[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(4):731–741.
- LIU B Y, YE X B, FANG S L, et al. On-orbit avoidance path autonomous planning based on Frenet and improved artificial potential field[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(4):731–741. (in Chinese)
- [12] 王威,陈慧岩,马建昊,等. 基于 Frenet 坐标系和控制延时补偿的智能车辆路径跟踪[J]. *兵工学报*, 2019, 40(11):2336–2351.
- WANG W, CHEN H Y, MA J H, et al. Intelligent vehicle path tracking based on Frenet coordinate system and control delay compensation[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(11):2336–2351. (in Chinese)
- [13] 袁春,龚城,何成诚,等. Frenet 坐标系及凸近似避障原理的无人车局部路径规划[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2022, 36(4):59–67.
- YUAN C, GONG C, HE C C, et al. Frenet coordinate system and convex approximation obstacle avoidance principle of unmanned vehicle local path planning[J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2022, 36(4):59–67. (in Chinese)
- [14] 李萌. 基于 Frenet 坐标系的智能车辆多场景轨迹规划研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.
- LI M. Research on multi-scenario trajectory planning of intelligent vehicles based on Frenet coordinate system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [15] WERLING M, ZIEGLER J, KAMMEL S, et al. Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a Frenét Frame [C/OL] // *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Anchorage, AK, US: IEEE, 2010.
- [16] 陈天德,黄炎焱,沈炜. 基于虚拟障碍物法的无震荡航路规划[J]. *兵工学报*, 2019, 40(3):651–658.
- CHEN T D, HUANG Y Y, SHEN W. Shock-free route planning based on virtual obstacle method[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(3):651–658. (in Chinese)
- [17] 韩宇洪. 基于改进人工势场法的无人车避障路径规划研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2020.
- HAN Y H. Research on obstacle avoidance path planning of unmanned vehicles based on improved artificial potential field method[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [18] 朱伟达. 基于改进型人工势场法的车辆避障路径规划研究[D]. 镇江:江苏大学, 2017.
- ZHU W D. Research on vehicle obstacle avoidance path planning based on improved artificial potential field method [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)
- [19] 范世鹏,祁琪,路坤锋,等. 基于改进人工势场法的巡航导弹自主避障技术[J]. *北京理工大学学报*, 2018, 38(8):828–834.
- FAN S P, QI Q, LU K F, et al. Autonomous obstacle avoidance technology of cruise missile based on improved artificial potential field method[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(8):828–834. (in Chinese)
- [20] RASEKHIPOUR Y, KHAJEPOUR A, CHEN S K, et al. A potential field-based model predictive path-planning controller for autonomous road vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(5):1255.