

基于改进人工势场法的车辆路径规划与跟踪^①

唐志荣, 冀杰, 吴明阳, 方京城, 陈明哲

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 为保证智能车辆在转向避撞过程中的主动安全性, 基于改进的人工势能场模型进行了转向避撞路径规划, 利用椭圆化距离代替传统斥力势场中的实际距离, 同时, 引入道路边界斥力场模型, 从而在较小车道空间内获得汽车避撞局部路径。另外, 建立了以前轮转角为控制变量的三自由度车辆动力学模型, 并利用模型预测控制算法对规划路径进行了跟踪。CarSim/Simulink 联合仿真结果表明, 利用改进的人工势场法可获得平顺且安全的局部避撞路径, 而提出的模型预测控制算法具有良好的路径跟踪性能。

关键词: 人工势场法; 路径规划; 路径跟踪; 模型预测控制; 目标函数

中图分类号: U46

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2018)06-0174-09

局部路径规划与跟踪是智能汽车研究领域的一项核心技术, 它是指汽车根据多种传感器探测出的行驶环境信息, 规划出一条从起始点到目标点的满足汽车运动特定性能要求和评价标准的无碰撞路线, 实现路径的最优化, 路径跟踪控制器根据汽车的运动学和动力学约束, 输出相应的控制参数, 使智能汽车对规划路径进行跟踪。

目前常见的局部路径规划方法有人工势场法^[1]、模糊控制法^[2]、遗传算法^[3]、神经网络法^[4]等。人工势场法(APF)最早是由 Khabit 提出的^[5], 其基本思想是通过传感器感知出环境中机器人、障碍物、目标点的位置, 障碍物对机器人产生斥力势场, 目标点产生引力势场, 机器人在引力势场和斥力势场两者产生的复合势场中, 搜索总势场下降的路线作为机器人避撞的最优路径。该方法具有结构简单, 实时性强, 规划路径高效平滑等优点, 被广泛应用于无人机等小型机器人避撞系统的路径规划^[6-9]。传统的人工势场法用于机器人避撞路径规划时, 较少考虑机器人的尺寸范围以及边界环境的影响, 而智能车辆在行驶时, 则需要考虑道路环境的边界约束, 同时要满足实际的运动学和动力学约束。因此, 需要改进传统的人工势能场法才能满足智能车辆自动驾驶的需要。另外, 对期望路径进行快速有效的跟踪, 同样是实现智能车辆避撞功能的关键。路径跟踪控制方法应用较多的有 PID 控制^[10]、前馈-反馈控制^[11]、模型预测控制^[12]等。当汽车低速行驶时, 车辆运动学约束影响较大, 而随着速度增加, 动力学特性对运动规划与控制的影响就越明显, 因此, 路径跟踪的控制量应满足车辆的非线性动力学约束和执行机构极限约束, 而文中选择的模型预测控制具有多重约束集成控制的天然优势。

因此, 本文借鉴人工势场法的基本理论思想, 构造基于道路环境以及障碍物的改进人工势场模型, 规

^① 收稿日期: 2017-10-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(61304189); 重庆市前沿与应用基础研究计划一般项目(cstc2015jcyjA60007); 中央高校基本业务费专项资金重点项目(XDJK2015B028)。

作者简介: 唐志荣(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事智能汽车辅助驾驶系统研究。

通信作者: 冀杰, 硕士研究生导师, 副教授。

划符合汽车实际行驶过程中多约束条件的避撞路径。同时,基于模型预测跟踪理论对规划路径进行实时跟踪,并通过 CarSim/Simulink 联合仿真验证路径规划及路径跟踪效果。

1 改进的智能汽车人工势场模型

1.1 车道引力势能场模型

车辆正常行驶和转向避撞完成后都是以主车道中线为主要行驶路线,因此本文以道路和车辆起点所在 y_d 内的区域完成转向,在此区域车辆沿主车道向前时引力势能场下降,向主车道两侧运动时引力能势场位置建立二维坐标系,车辆前方主车道中线上各点为引力点,构建引力势能场函数。车辆在前方纵向距离上升且变化速度越来越快,所构建的车道引力势能场函数表达式为

$$U_{\text{mid}} = \alpha (|x - x_0|^2 + |y - y_d|) \quad (1)$$

式中, α 为车道引力势能场增益系数, x_0 为车辆起点横向位置坐标, y_d 为转向区域最大纵向距离。根据公式(1)得到不同位置引力势能场的三维分布图如图 1 所示。

1.2 障碍物斥力势能场模型

由于车辆平面外形可以简化为长方形,结合对路径平滑度的考虑和最优路线的理论要求,采用椭圆化斥力场边界的概念。假设障碍物所在位置 (x_o, y_o) , 车辆的长宽分别为 $2L$ 和 $2W$, 那么将斥力势场边界假设为一个符合车辆外形的椭圆方程

$$\frac{(x - x_o)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y - y_o)^2}{\sigma_2^2} = 1 \quad (2)$$

将椭圆化的二维斥力场边界扩展到三维空间,其斥力势能场的三维分布图可通过二维正态分布函数表示,其表达式为:

$$U_{\text{rep}}(x, y) = (2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2})^{-1} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\frac{(x-x_o)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\rho(x-x_o)(y-y_o)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(y-y_o)^2}{\sigma_2^2}\right]\right\} \quad (3)$$

为了简化公式(3)取 $\rho=0$, 令 $\beta = (2\pi\sigma_1\sigma_2)^{-1}$, 斥力势场模型表达式为

$$U_{\text{rep}}(x, y) = \beta \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-x_o)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y-y_o)^2}{\sigma_2^2}\right]\right) - U_p \right\} \quad (4)$$

式中, β 表示斥力势能场增益系数, ρ 表示横向和纵向间的相关系数, σ_1 和 σ_2 为控制避撞路径形状的参数,考虑到指数函数必定大于零的性质,在斥力势场表达式中加入一个极小的正数 U_p 加以平衡。下面本文结合车辆避撞过程的实际需要设计参数 σ_1 和 σ_2 。

在对驾驶员转向避撞行为的大量研究中发现,避撞路径大多可近似为一条五次多项式曲线^[13],五次多项式曲线所形成的避撞路线,能使避撞过程中车辆的位移、速度、加速度曲线光滑且连续,符合车辆实际行驶过程中的要求。本文采用五次多项式的参考路径设计斥力势场模型,车辆转向避撞区域起始位置为 (x_1, y_1) , 完成避撞返回到主车道位置为 (x_1, y_2) , 最顶点位置为 (x_2, y_o) , 则此时车辆转向避撞过程中纵向行驶距离为 $d = |y_2 - y_o| = |y_o - y_1|$, 横向偏移距离为 $b = |x_2 - x_1|$, 为使车辆在 (x_1, y_2) 处返回主车道,此时斥力势能场应为零,由此可得参数 σ_2 的表达式为

$$\sigma_2 = \sqrt{d^2 / [-2\ln(U_p)]} \quad (5)$$

根据避撞路线上各点斥力势能场相等这一条件,得到参数 σ_1 的表达式为

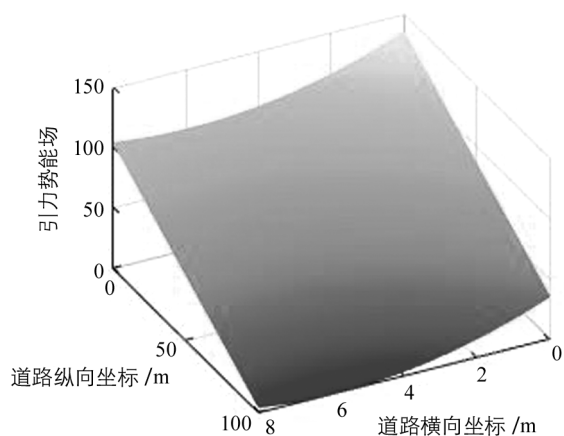


图 1 引力势能场三维分布图

$$\sigma_1 = \frac{10 \frac{b}{d^3} (y - y_o + \sigma_2)^3 - 15 \frac{b}{d^4} (y - y_o + \sigma_2)^4 + 6 \frac{b}{d^5} (y - y_o + \sigma_2)^5}{\sqrt{1 - \frac{(y - y_o)^2}{\sigma_2^2}}} \quad (6)$$

根据公式(4)得到不同位置斥力势能场的三维分布以及势场等高线图如图2和图3所示。

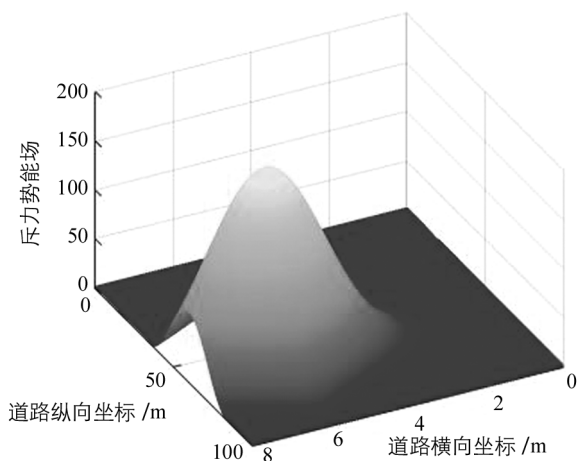


图2 斥力势能场三维分布图

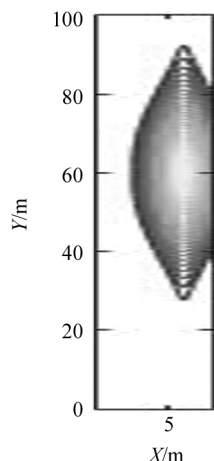


图3 斥力势能场等高线图

1.3 道路边界势能场模型

车辆在道路行驶过程中,如果没有其他障碍物只考虑道路因素的影响时,道路左右边界位置危险系数最大,左右车道中线位置危险系数最小,道路中线危险系数介于边界和车道中线两者之间.根据道路不同位置的危险程度,此处采用变化趋势快慢程度不同的函数类型构建道路势场模型.当车辆位于左右车道两条中线之间位置时,车辆在此区域相对安全,采用幅值较小且变化平缓的三角函数构建势场模型;当车辆位于其它位置时,车辆在此区域危险系数剧增,采用幅值较大且呈变化迅速的指数函数构建势场模型.综合考虑以上因素设计的道路边界势场函数表达式为

$$U_{\text{road}}(x, y) = \begin{cases} \gamma_1 (e^{|x-x_l|} - 1) & x \leq L/4 \\ \gamma_2 \left[\sin\left(\frac{2(x-x_l)}{L}\right) \right] & L/4 < x < 3L/4 \\ \gamma_1 (e^{|x-x_r|} - 1) & x \geq 3L/4 \end{cases} \quad (7)$$

式中, γ_1, γ_2 为道路边界势能场增益系数, L 为道路横向宽度, x_l 和 x_r 分别为左右车道中线横向位置.根据公式(7)得到不同位置道路边界势能场的三维分布如图4所示.

因此,车辆在不同位置的人工势能场为车道引力势能场和障碍物斥力势能场及道路边界势能场的总和,其函数表达式为

$$U(x, y) = U_{\text{mid}}(x, y) + U_{\text{rep}}(x, y) + U_{\text{road}}(x, y) \quad (8)$$

总人工势能场三维分布及其等高线分别如图5和图6所示.

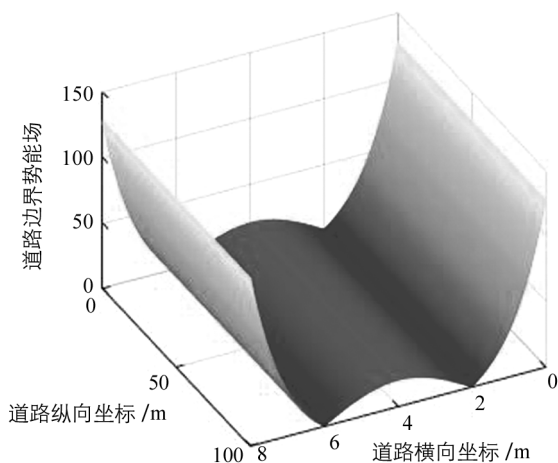


图4 道路边界势能场三维分布图

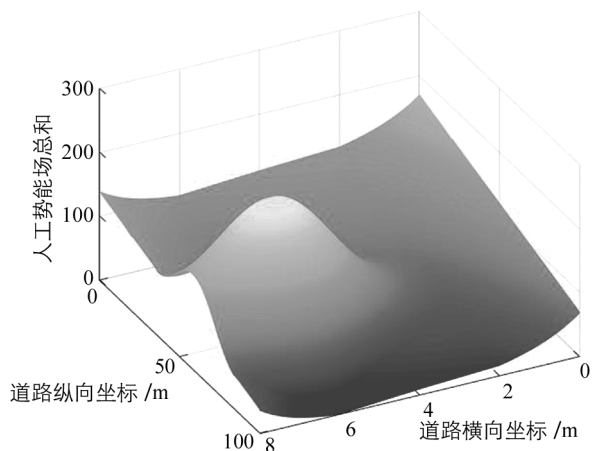


图 5 总人工势能场三维分布图

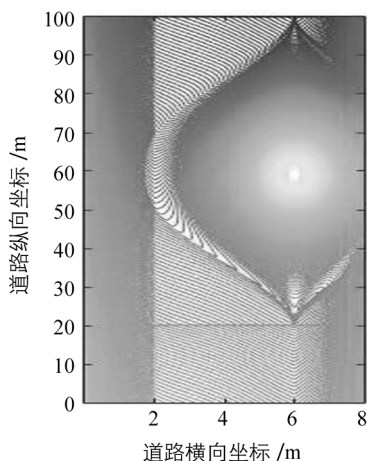


图 6 总势能场等高线图

2 模型预测控制器设计

2.1 车辆动力学模型

本文采用的是如图 7 所示的三自由度的平面运动车辆模型^[14], 即只考虑纵向、横向和横摆运动. 坐标系 $oxyz$ 为车辆坐标系, 坐标系 OXY 为惯性坐标系, 均满足右手法则. 根据参考文献[14]中的推导过程, 得到车辆非线性动力学模型微分方程表达式为

$$\dot{\xi} = f(\xi, \mu) \quad (9)$$

其中 $\xi = [\dot{y}, \dot{x}, \varphi, \dot{\varphi}, Y, X]$ 为状态量, $\dot{y}, \dot{x}$ 表示车辆

质心处的横向、纵向速度, $\varphi, \dot{\varphi}$ 表示横摆角及横摆角速度, Y, X 表示惯性坐标系中车辆位置, $\mu = [\delta_f]$ 前轮转角为控制量, (仅考虑前轮转向, $\delta_r = 0$). 非线性动力学模型由于计算量大, 难以满足实时性要求, 因此下面采用文献[15]中的线性化方法将公式(9)中的非线性系统进行线性化, 得到连续的线性时变系统状态方程为

$$\dot{\xi}(t) = A(t)\xi(t) + B(t)\mu(t) \quad (10)$$

式中, $A(t)$ 为微分方程表达式 f 相对于状态量 ξ 的雅克比矩阵, 表达式为

$$A(t) = \left. \frac{\partial f(\xi(t), \mu(t))}{\partial \xi} \right|_{\xi(t), \mu(t)} \quad (11)$$

$B(t)$ 为微分方程表达式 f 相对于控制量 μ 的雅克比矩阵, 表达式为

$$B(t) = \left. \frac{\partial f(\xi(t), \mu(t))}{\partial \mu} \right|_{\xi(t), \mu(t)} \quad (12)$$

对公式(10)进行离散化处理, 选取 $\eta = [\varphi, Y]^T$ 为输出量, 即横摆角和惯性坐标系下纵坐标, 得到离散的线性时变系统状态方程为

$$\begin{cases} \xi(k+1) = A_{k,t}\xi(k) + B_{k,t}\mu(k) \\ \eta(k) = C_{k,t}\xi(k) \end{cases} \quad (13)$$

式中, $A_{k,t} = I_m + TA(t)$, $B_{k,t} = TB(t)$, $C_{k,t} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, m 为状态变量维度, T 为采样时间.

2.2 目标函数及约束条件

为了满足车辆对期望路径快速而平稳的跟踪, 目标函数的设计需要尽量减小系统输出变量与目标值的

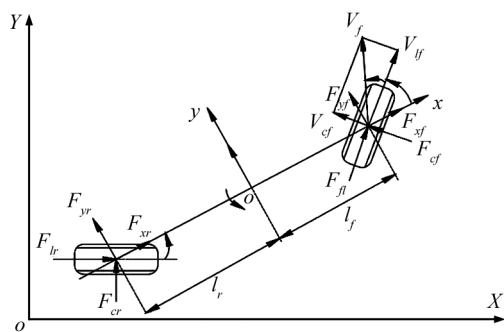


图 7 三自由度平面运动车辆模型

偏差并且能对控制量前轮转角进行优化. 汽车在实际工作情况下必须避免控制量突变的情况, 保证控制量的连续性, 因此本文采用软约束的方法^[16], 用控制增量替代控制量作为状态量, 进行目标函数的设计并使其最小化, 同时加入松弛因子, 当系统没有最优解的时候, 用次优解代替最优解, 防止出现没有可行解情况. 设计的目标函数如下:

$$J(\xi(t), \mu(t-1), \Delta U(t), \epsilon) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta(t+i|t) - \eta_{ref}(t+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta\mu(t+i|t)\|_R^2 + \kappa\epsilon^2 \quad (14)$$

式中, N_p 和 N_c 分别为预测时域和控制时域, $\Delta U(t)$ 为控制时域内的控制增量, ϵ 为松弛因子, Q, R, κ 分别为输出量、控制增量、松弛因子的权重矩阵. $\eta_{ref} = [\varphi_{ref}, Y_{ref}]$ 为参考输出变量, Y_{ref} 由本文第 2 节中改进的人工势场模型规划的避撞路径可得. 当汽车质心侧偏角很小时, 汽车的横摆角速度可近似为

$$\dot{\varphi} \approx \frac{v}{R} \approx v\rho \quad (15)$$

结合第 2 节的路径曲线, 假设汽车行驶路径和参考轨迹一致, 则汽车的参考横摆角速度为

$$\dot{\varphi}_{ref} = \frac{v\dot{y}}{(1+\dot{y}^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (16)$$

式中, v 为汽车质心点速度, ρ 为参考轨迹曲率, 对参考横摆角速度 $\dot{\varphi}_{ref}$ 求积分可求参考横摆角 φ_{ref} .

为求解公式(14)中的目标函数, 需将控制输入由控制量转变为控制增量, 在此假设

$$\tilde{\xi}(k|t) = \begin{bmatrix} \xi(k, t) \\ \mu(k-1, t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

得到新的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \tilde{\xi}(k+1|t) = \tilde{A}_{k,t}\tilde{\xi}(k|t) + \tilde{B}_{k,t}\Delta\mu(k|t) \\ \eta(k|t) = \tilde{C}_{k,t}\tilde{\xi}(k|t) \end{cases} \quad (18)$$

式中, $\tilde{A}_{k,t} = \begin{bmatrix} A_{k,t} & B_{k,t} \\ 0_{m \times n} & I_m \end{bmatrix}$, $\tilde{B}_{k,t} = \begin{bmatrix} B_{k,t} \\ I_m \end{bmatrix}$, $\tilde{C}_{k,t} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, n 为控制量维度.

汽车在避撞过程中受到车辆转向性能和道路条件的约束, 在使用上述目标函数的模型预测控制系统中, 需要满足控制量、控制增量和输出变量的约束如下:

控制量约束:

$$\mu_{\min} \leq \mu(t+i) \leq \mu_{\max} \quad i=0,1,\dots,N_c-1 \quad (19)$$

控制增量约束:

$$\Delta\mu_{\min} \leq \Delta\mu(t+i) \leq \Delta\mu_{\max} \quad i=0,1,\dots,N_c-1 \quad (20)$$

输出变量约束:

$$y_{\min} \leq y(t+i) \leq y_{\max} \quad i=0,1,\dots,N_c-1 \quad (21)$$

式中, $\mu_{\min}$ 、 $\mu_{\max}$ 分别为控制量的最小值和最大值, $\Delta\mu_{\min}$ 、 $\Delta\mu_{\max}$ 分别为控制增量的最小值和最大值, $y_{\min}$ 、 $y_{\max}$ 分别为输出变量的最小值和最大值.

除上述基本约束条件外, 在汽车速度较快情况下为保证汽车的稳定性和舒适性, 需要加入对汽车动力学的约束, 主要包括质心侧偏角约束和横向加速度约束. 根据博世公司的车辆稳定性研究结果^[17], 将质心侧偏角约束和横向加速度约束设置如下:

质心侧偏角约束:

$$-12^\circ \leq \beta \leq 12^\circ \quad (22)$$

横向加速度约束:

$$\begin{aligned} a_{y\min} - \epsilon &\leq a_y \leq a_{y\max} + \epsilon \\ 0 &< \epsilon \leq \epsilon_{\max} \end{aligned} \quad (23)$$

式中, $a_{y\min}$ 和 $a_{y\max}$ 分别为横向加速度的最小值和最大值, 横向加速度约束此处主要是保证舒适性, 在此将

其设置为软约束, ϵ 为松弛因子, $\epsilon_{\max} = 10$.

上述目标函数和约束条件联立为一个优化问题, 经过相应的矩阵运算将其转换为计算机容易求解的标准二次规划问题, 若已知 t 时刻的状态量 $\xi(t)$ 和前一时刻的控制量 $u(t-1)$, 即可运用有效集法求得控制域内的控制增量序列:

$$\Delta U_t^* = [\Delta u_t^*, \Delta u_{t+1}^*, \Delta u_{t+2}^*, \cdots, \Delta u_{t+N_c-1}^*]$$

(24)

将序列第一个元素作用于系统, 得到下一个控制周期的控制量

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u_t^*$$

(25)

进入下一个控制周期时, 重复上述步骤, 完成对车辆期望轨迹的跟踪.

3 仿真实验及结果分析

仿真实验通过采用 CarSim 软件建立车辆动力学模型, Simulink 中的 S-Function 模块编写控制程序的方法, 建立 CarSim/Simulink 联合仿真平台如图 8 所示.

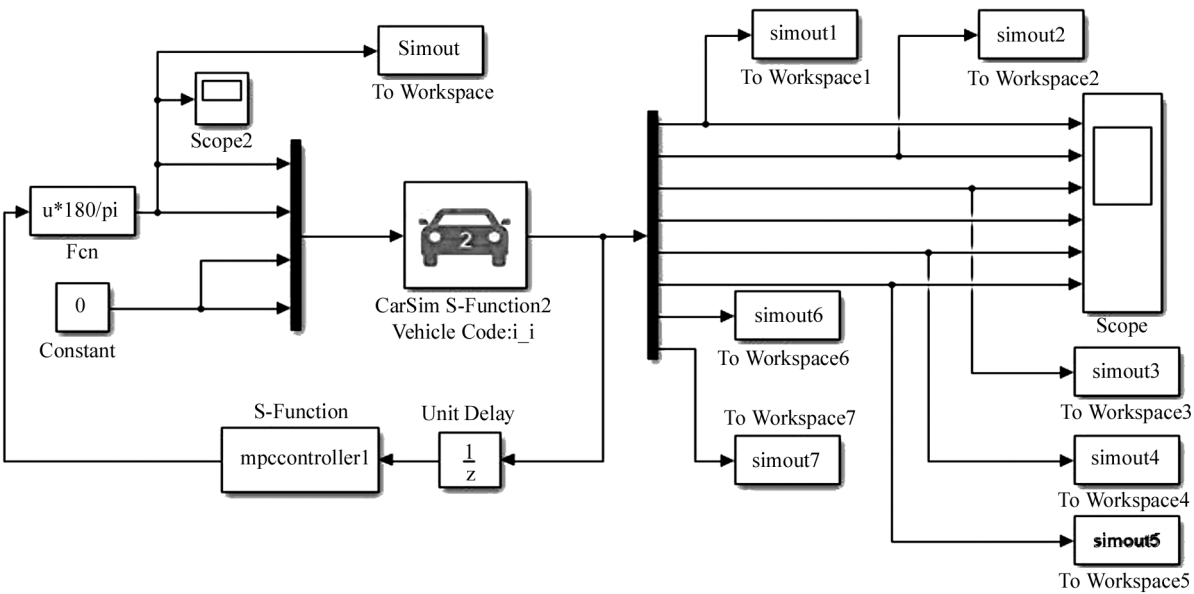


图 8 CarSim/Simulink 联合仿真平台

CarSim 建立车辆动力学模型选用车型为 C-Class, Hatchback2012, 仿真过程所需的主要车辆参数如表 1 所示, 改进的人势能场主要参数如表 2 所示.

表 1 车辆参数

参 数	取 值	参 数	取 值
汽车质量/kg	1 270	前轮侧偏刚度 $C_f/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	66 900
汽车绕 z 轴转动惯量 $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	1 536.7	后轮侧偏刚度 $C_r/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	62 700
质心距前轴中心距离 l_f/m	1.015	路面附着系数 μ	0.85
质心距后轴中心距离 l_r/m	1.895		

表 2 改进人工势能场主要参数

参 数	取 值	参 数	取 值
左车道中线横向位置 x_l/m	2	斥力势能场平衡量 U_p	0.001
右车道中线横向位置 x_r/m	6	道路边界势能场增益系数 γ_1	30
引力势能场增益系数 α	1	道路边界势能场增益系数 γ_2	20
斥力势能场增益系数 β	200		

Simulink 中编写的 MPC 路径跟踪控制程序所需的主要参数如表 3 所示.

表 3 模型预测控制器参数

参 数	取 值	参 数	取 值
采样时间 T/s	0.02	权重矩阵 Q	$\begin{bmatrix} 2\,000 & 0 \\ 0 & 10\,000 \end{bmatrix}$
预测时域 N_p	20	权重矩阵 R	5×10^5
控制时域 N_c	15	权重矩阵 κ	1\,000
控制量 $u=\delta_f$ 约束范围	$-10^\circ \leq \delta_f \leq 10^\circ$	权重矩阵 ϵ	10
控制增量 $\Delta u=\Delta\delta_f$ 约束范围	$-0.85^\circ \leq \Delta\delta_f \leq 0.85^\circ$		

假设本车在双车道道路上行驶, 速度为 72 km/h, 道路宽度为 8 m, 车辆初始位置为(6, 0), 前方障碍物位置为(6, 60), 根据前文采取的转向避撞策略进行汽车局部路径规划, 当转向避撞区域距离参数取 $y_d=100, b=4, d=40$ 时, 路径规划及路径跟踪仿真效果如图 9 和图 10 所示.

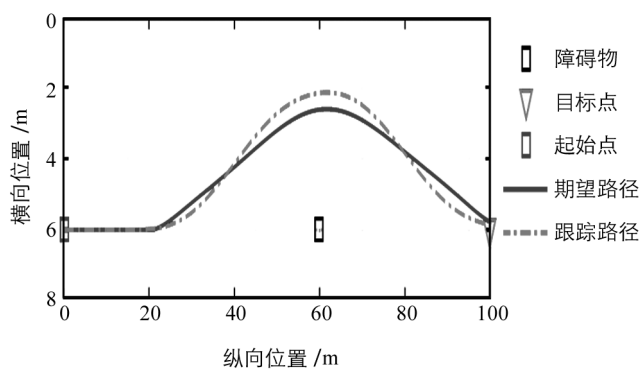


图 9 期望路径与跟踪路径曲线

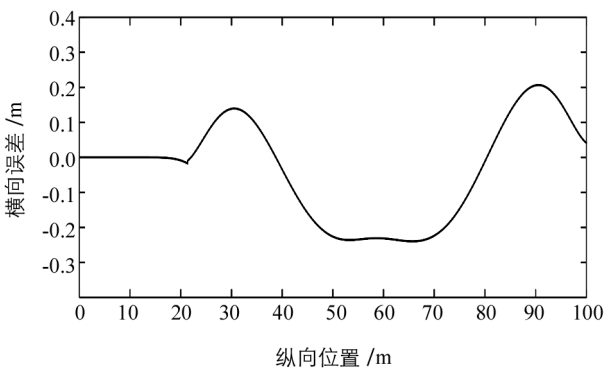


图 10 期望路径与跟踪路径曲线横向误差

由图 9 和图 10 可见规划路径能成功避开障碍物, 且跟踪路径和规划的期望路径吻合度很高, 横向之间距离误差在 0.3 m 以内, 横向位置最右点离道路边界距离接近 2 m, 远大于实际中汽车车身宽度的一半, 说明设计的模型预测控制器能安全而平稳地跟踪参考轨迹从而避开障碍物.

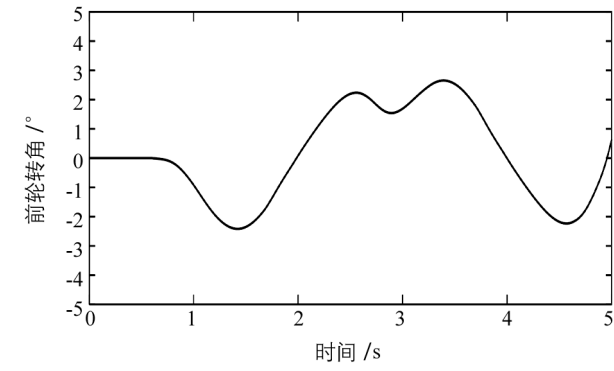


图 11 前轮转角变化曲线

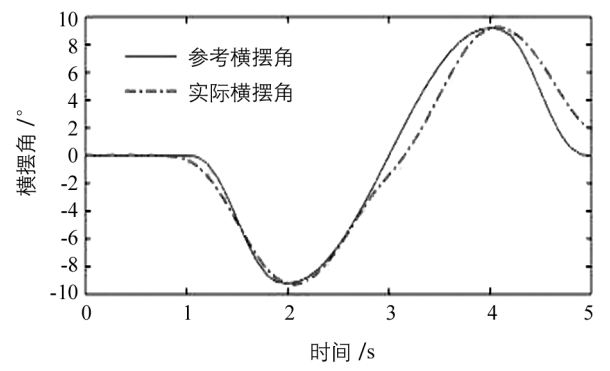


图 12 参考横摆角和实际横摆角曲线

图 11 和图 12 分别为控制量前轮转角和参考横摆角曲线. 从图 11 中可以看出控制量前轮转角范围控制在 $\pm 3^\circ$ 之间, 满足约束条件, 整体变化平缓, 没有发生突变和振荡情况, 符合车辆实际转向避撞工况下前轮转角的变化趋势; 图 12 反应汽车避障过程中实际横摆角变化平滑且连续, 与参考横摆角存在较小偏差且整体变化趋势相同, 说明汽车在路径跟踪过程具有良好的稳定性.

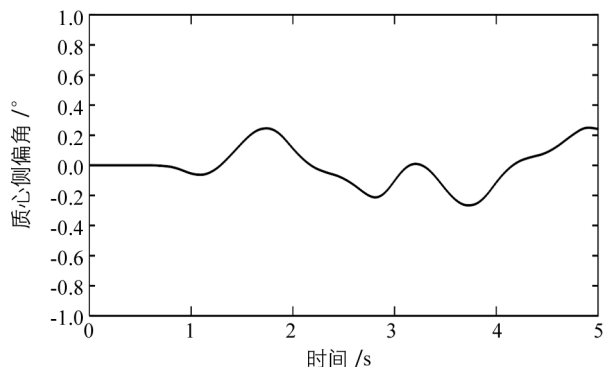


图 13 质心侧偏角变化曲线

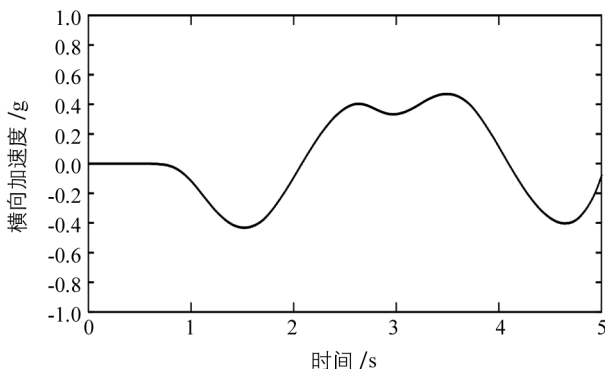


图 14 横向加速度变化曲线

为了进一步验证汽车碰撞过程中的稳定性和舒适性,图 13 和图 14 分别为质心侧偏角曲线和横向加速度曲线,图 13 中质心侧偏角在 $\pm 0.4^\circ$ 以内,满足良好路面下 $-12^\circ \leq \beta \leq 12^\circ$ 的约束条件,同时验证了前文中参考横摆角速度近似计算公式前提条件的正确性.图 14 中横向加速度曲线变化平滑,没有明显抖动,最大横向加速度小于 0.6 g (g 为重力加速度),一般汽车最大横向加速度能达到 1.5 g ,说明汽车在转向过程有良好的转向稳定性和舒适性.

4 结 论

1) 本文将用于机器人路径规划的传统人工势场法进行改进,通过综合考虑车道引力势能场、障碍物斥力势能场和道路边界势能场三者对汽车的影响,建立适用于汽车碰撞过程局部路径规划的改进人工势场模型,仿真结果表明,改进的人工势场模型能规划出符合汽车实际转向过程的避撞路线.

2) 以 CarSim 中建立的高精度动力学模型为基础设计模型预测控制器,并对其添加控制量约束和高速行驶条件下动力学约束.模型预测路径跟踪控制器在快速平稳地跟踪期望路径的前提下,能同时满足执行机构的约束和动力学约束,保证汽车在避撞过程中具有良好的稳定性和舒适性.

3) 本文局部路径规划针对的是结构化道路和汽车纵向速度不变的理想条件下,下一步可以进行更为复杂道路环境和汽车运动状态下的转向避撞路径规划的研究,并在实车上进行验证.

参考文献:

- [1] MIN Hua-song, LIN Yun-han, WANG Si-jing, et al. Path Planning of Mobile Robot by Mixing Experience with Modified Artificial Potential Field Method [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(12): 1—17.
- [2] BEHESHTI M T H, TEHRANI A K. Obstacle Avoidance for Kinematically Redundant Robots Using an Adaptive Fuzzy Logic Algorithm [C]. Proceedings of the American Control Conference, 1999, 1371—1375.
- [3] 李庆中, 顾伟康. 基于遗传算法的移动机器人动态避障路径规划方法 [J]. 模式识别与人工智能, 2002, 15(2): 161—166.
- [4] 陈华志, 谢存禧, 曾德怀. 基于神经网络的移动机器人路径规划算法的仿真 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2003, 31(6): 56—59.
- [5] 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.
- [6] 姚 远, 周兴社, 张凯龙, 等. 基于稀疏 A^* 搜索和改进人工势场的无人机动态航迹规划 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(7): 953—959.
- [7] KHATIB O. Real Time Obstacle Avoidance for Manipulation and Mobile Robots [J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90—98.
- [8] 汪 波, 张建勋, 侯之旭. 应用人工势场算法的智能车路径规划 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2015, 29(6): 107—111.

- [9] 李 攀, 黄 江, 杨 浩, 等. 基于双匀速轨迹的自动泊车路径规划研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2017, 31(9): 36—44.
- [10] 赵熙俊, 陈慧岩. 智能车辆路径跟踪横向控制方法的研究 [J]. 汽车工程, 2011, 33(5): 382—387.
- [11] KRITAYAKIRANA K, GERDES J C. Using the Centre of Percussion to Design a Steering Controller for an Autonomous Race Car [J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(S1): 33—51.
- [12] YOON Y, SHIN J, KIM H J, et al. Model-Predictive Active Steering and Obstacle Avoidance for Autonomous Ground Vehicles [J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(7): 741—750.
- [13] 朱西产, 刘智超, 李 霖. 基于车辆与行人危险工况的转向避撞控制策略 [J]. 汽车安全与节能学报, 2015, 6(3): 217—223.
- [14] 龚建伟, 姜 岩, 徐 威. 无人驾驶车辆模型预测控制 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- [15] FALCONE P. Nonlinear Model Predictive Control for Autonomous Vehicles [D]. Benevento: Universitadel Sannio, 2007.
- [16] MACIEJOWSKI J M. Predictive Control with Constraints [M]. London, UK: Pearson Education, 2002.
- [17] VAN ZANTEN A T, ERHARDT R, LANDESFEIND K, et al. VDC System Development and Perspective [J]. SAE Transactions, 1998, 107(6): 424—444.

Vehicles Path Planning and Tracking Based on an Improved Artificial Potential Field Method

TANG Zhi-rong, JI Jie, WU Ming-yang,
FANG Jing-cheng, CHEN Ming-zhe

School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: In order to ensure the active safety of intelligent vehicles in the process of collision avoidance by active steering, path planning for collision avoidance is carried out based on an improved artificial potential field model. The elliptical distance is used instead of the actual distance in the traditional repulsive potential field. At the same time, the repulsion field model of the boundary is introduced so as to obtain the local path for collision avoidance in a small lane space. In addition, the three-degree-of-freedom vehicle dynamics model with the front wheel steering angle as the control variable is established, and the planning path is tracked by the model predictive control algorithm. The results of CarSim/Simulink co-simulation experiments demonstrate that the improved artificial potential field method can obtain a smooth and safe local path for collision avoidance, and the model predictive control algorithm proposed has a good path tracking performance.

Key words: artificial potential field method; path planning; path tracking; model predictive control; cost function

