

文章编号: 2095-2163(2020)12-0099-05

中图分类号: U469

文献标志码: A

基于模型预测控制的车辆避障路径跟踪控制仿真研究

杨博, 张缓缓, 江忠顺

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 本文通过五次多项式进行车辆避障的路径规划, 基于模型预测控制算法设计出路径跟踪控制器, 并联合 Carsim 和 Simulink 进行联合仿真分析。结果表明: 本文设计的路径跟踪控制器能够精确的跟踪避障路径。通过对控制器参数进行调整, 找到最优参数, 提高其控制效果, 为其它控制器设计提供参考。

关键词: 模型预测控制; 避障换道; 路径规划; 五次多项式

Simulation of vehicle obstacle avoidance path tracking control based on model predictive control

YANG Bo, ZHANG Huanhuan, JIANG Zhongshun

(College of mechanical and automotive engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] In this paper, the vehicle obstacle avoidance path planning is carried out by quintic polynomial, and then the path tracking controller is designed based on the model predictive control algorithm, and the joint simulation analysis is carried out with CarSim and Simulink. The results show that: the path tracking controller designed in this paper can track the obstacle avoidance path more accurately. Finally, the parameters of the controller are adjusted to find the optimal parameters, improve the control effect of the controller, and provide reference for the design of other controllers.

[Key words] Model predictive control; Obstacle avoidance lane changing; Path planning; Quintic polynomial

0 引言

路径跟踪控制是智能车辆研究领域的热点之一。路径跟踪控制算法主要有滑模控制、模糊控制和模型预测控制等。文献[1]提出了基于轨迹预瞄的智能汽车变道动态轨迹跟踪控制策略; 在传统的动力学模型和预瞄模型的基础上, 文献[2]基于神经网络和模糊控制理论, 设计了一种新型轨迹跟踪控制器; 文献[3]针对智能汽车多模式驾驶, 结合车辆横向动力学模型, 提出一种基于 RBF 神经网络滑模控制的路径跟踪控制方法; 文献[4]利用模型预测控制法设计了路径跟踪控制器, 针对不同路面附着系数和侧风扰动工况进行了仿真分析, 结果表明该控制器在不同的工况下都具有良好的路径跟踪能力。

本文通过五次多项式进行避障路径规划, 利用模型预测控制算法设计路径跟踪控制器。通过 Carsim 与 Simulink 联合仿真, 验证规划路径与控制算法的可行性, 最后通过对控制器参数的调整, 提高了控制器的跟踪效果和稳定性。

1 车辆建模

基于图 1 的简单单轨模型车辆的运动学方程可表达为:

$$\begin{cases} \dot{X} = v \cos(\varphi + \beta), \\ \dot{Y} = v \sin(\varphi + \beta), \\ \dot{\varphi} = \frac{v}{l} (\tan \delta_f - \tan \delta_r) \cos \beta. \end{cases} \quad (1)$$

式中, X 和 Y 分别为车辆在大地坐标系下的横、纵坐标; φ 为车辆横摆角; β 为质心侧偏角; v 为车速; δ_f, δ_r 分别为单轨模型前后车轮的转角。

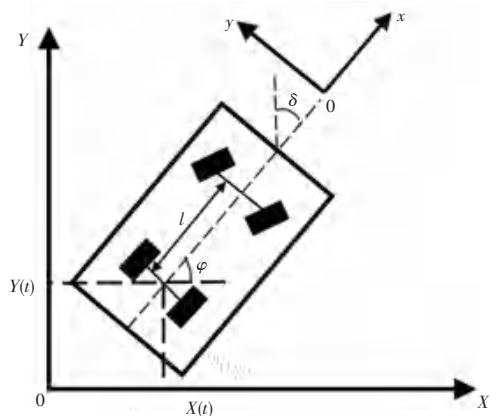


图1 简单单轨模型

Fig. 1 Simplified monorail model

考虑到车辆的质心侧偏角较小, 且本文只研究前轮转向, 故 $\beta \approx 0, \delta_r = 0$, 因此式(1)可简化为:

基金项目: 国家自然科学基金(51705306)。

作者简介: 杨博(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能车辆的路径规划与跟踪控制。

收稿日期: 2020-08-05

$$\begin{cases} \dot{X} = v \cos \varphi, \\ \dot{Y} = v \sin \varphi, \\ \dot{\varphi} = \frac{v}{l} \tan \delta_f. \end{cases} \quad (2)$$

在设定纵向速度恒定情况下,建立如下动力学模型:

$$\begin{cases} m \ddot{y} = -m \dot{X} \dot{\varphi} + 2 F_{yf} + 2 F_{yr}, \\ I_z \ddot{\varphi} = 2a F_{yf} - 2b F_{yr}, \\ \dot{X} = \dot{X} \cos \varphi - \dot{Y} \sin \varphi, \\ \dot{Y} = \dot{X} \sin \varphi + \dot{Y} \cos \varphi, \\ \dot{\varphi} = \dot{\varphi}. \end{cases} \quad (3)$$

其中, F_{yf} 、 F_{yr} 分别表示车辆在前后方向所受的纵向合力; φ 为车辆横摆角; I_z 为车辆绕 z 轴的转动惯量; a 、 b 分别为质心到前后轴的距离; X 、 Y 分别为惯性坐标系下的横纵坐标; x 、 y 分别为车身坐标系下的横纵坐标; m 为车身质量。

在轮胎侧偏角较小的情况下,轮胎力可以用线性函数近似描述。假设左、右前轮的转角相等,推导出如下非线性动力学模型:

$$\begin{cases} m \ddot{y} = -m \dot{X} \dot{\varphi} + 2 C_{ef} \frac{a \varphi \ddot{\varphi}}{X} - \frac{Y + a \varphi \ddot{\varphi}}{X} + C_{er} \frac{b \varphi - Y \dot{\varphi}}{X}, \\ I_z \ddot{\varphi} = 2 C_{ef} \frac{a \varphi \ddot{\varphi}}{X} - \frac{Y - a \varphi \ddot{\varphi}}{X} - b C_{er} \frac{b \varphi - Y \dot{\varphi}}{X}, \\ \dot{X} = \dot{X} \cos \varphi - \dot{Y} \sin \varphi, \\ \dot{Y} = \dot{X} \sin \varphi + \dot{Y} \cos \varphi, \\ \dot{\varphi} = \dot{\varphi}. \end{cases} \quad (4)$$

其中, C_{ef} 、 C_{er} 分别表示前后轮胎侧偏刚度。根据上述动力学模型建立如下微分方程:

$$\dot{X} = f(x, u). \quad (5)$$

其中,状态量 $x = [Y \varphi X Y \varphi]^T$, 控制量 $u = \delta_f$ 。

2 路径规划

本文使用给定时间的五次多项式进行路径规划^[5]。记初始时刻 t_0 的状态量为 $m_0 = [X_0, \dot{X}_0, \ddot{X}_0, Y_0, \dot{Y}_0, \ddot{Y}_0]$, 其分别表示初始时刻汽车在惯性坐标系中的纵向位移、速度、加速度和横向位移、速度、加速度; 终止时刻 t_d 的状态量为 $m_d = [X_d, \dot{X}_d, \ddot{X}_d, Y_d, \dot{Y}_d, \ddot{Y}_d]$, 其分别表示结束时刻汽车在惯性坐标系中的纵向位移、速度、加速度和横向位移、速度、加速度。五次多项式可表示为:

$$\begin{cases} X(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5, \\ Y(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5. \end{cases} \quad (6)$$

即:

$$\begin{aligned} A_x &= [a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5]^T, \\ B_y &= [b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5]^T, \\ Q_x &= [X_0, \dot{X}_0, \ddot{X}_0, X_d, \dot{X}_d, \ddot{X}_d], \\ Q_y &= [Y_0, \dot{Y}_0, \ddot{Y}_0, Y_d, \dot{Y}_d, \ddot{Y}_d], \end{aligned}$$

则五次多项式可表示为:

$$Q_x = G \cdot A_x, \quad Q_y = G \cdot B_y. \quad (7)$$

其中:

$$G = \begin{matrix} \begin{matrix} \hat{e}_1 \\ \hat{e}_0 \\ \hat{e}_0 \\ \hat{e}_1 \\ \hat{e}_0 \\ \hat{e}_0 \end{matrix} & \begin{matrix} t_0 & t_0^2 & t_0^3 & t_0^4 & t_0^5 \\ 1 & 2t_0 & 3t_0^2 & 4t_0^3 & 5t_0^4 \\ 0 & 2 & 6t_0 & 12t_0^2 & 20t_0^3 \\ t_d & t_d^2 & t_d^3 & t_d^4 & t_d^5 \\ 1 & 2t_d & 3t_d^2 & 4t_d^3 & 5t_d^4 \\ 0 & 2 & 6t_d & 12t_d^2 & 20t_d^3 \end{matrix} & \begin{matrix} \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \end{matrix} \end{matrix}$$

则系数可表示为: $A_x = G^{-1} \cdot Q_x$, $B_y = G^{-1} \cdot Q_y$, 五次多项式规划出的避障路径示意图如图2所示。

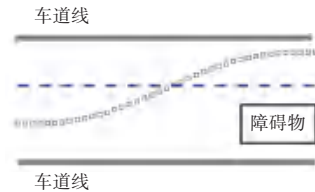


图2 避障路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of obstacle avoidance path

3 路径跟踪控制器设计

本文采用模型预测控制法来进行避障路径的跟踪控制。由于采用线性时变模型,所以需先对状态空间方程进行线性时变处理^[6]。

记非线性化模型为:

$$\dot{\xi}_r = f(\xi_r, u_r). \quad (8)$$

在任意点 (ξ_r, u_r) 处进行泰勒展开,只保留一阶项,得到:

$$\dot{\xi} = f(\xi_r, u_r) + \frac{\partial f}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\xi_r} (\xi - \xi_r) + \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_{u=u_r} (u - u_r). \quad (9)$$

即:

$$\dot{\xi} = f(\xi_r, u_r) + J_f(\xi) (\xi - \xi_r) + J_f(u) (u - u_r). \quad (10)$$

式中, $J_f(\xi)$ 为 f 相对于 ξ 的雅克比矩阵, $J_f(u)$ 为 f 相对于 u 的雅克比矩阵

将式(10)和式(8)相减,可以得到:

$$\dot{\xi} = A(t) \tilde{\xi} + B(t) \tilde{u}. \quad (11)$$

式中, $\tilde{\xi} = \xi - \xi_r$; $\tilde{u} = u - u_r$; $A(t) = J_f(\xi)$; $B(t) = J_f(u)$ 。

于是得到新的状态空间方程,该方程是连续的,继续对其进行离散化处理,本文采用近似离散的方法:

$$\begin{cases} A_{k,t} = I + TA(t), \\ B_{k,t} = TB(t). \end{cases} \quad (12)$$

式中, T 为采样时间, 结合式(11)和式(12)得到:

$$\tilde{\xi}(k+1) = A_{k,t} \tilde{\xi}(k) + B_{k,t} \tilde{u}(k). \quad (13)$$

为了避免被控系统控制量突变的现象, 需要对每个采样周期内的控制增量进行约束限制, 所以本文对上式进行转换变形处理:

$$\xi(k|t) = \begin{pmatrix} \tilde{\chi}(k|t) \\ \tilde{u}(k-1|t) \end{pmatrix} \dot{\xi}$$

将其代入式(13)得到新的状态空间方程:

$$\zeta(k+1|t) = \tilde{A}_{k,t} \zeta(k|t) + \tilde{B}_{k,t} \Delta u(k|t). \quad (14)$$

其中, $\tilde{A}_{k,t} = \begin{pmatrix} A_{k,t} & B_{k,t} \\ 0_{m \times n} & I_m \end{pmatrix}; \tilde{B}_{k,t} = \begin{pmatrix} B_{k,t} \\ I_m \end{pmatrix}; m$ 代表

控制量维度; n 代表状态量维度。

构造模型预测控制的性能指标函数:

$$J(\zeta(x), \Delta u(k)) = \sum_{i=1}^{N_p} \|y(k+i|k) - y_d(k+i|k)\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta u(k+i|t)\|_R^2. \quad (15)$$

其中, Q, R 分别为轨迹跟踪误差权重和控制量增量权重, N_p 和 N_c 分别为预测时域和控制时域。

优化问题求解可表达如下:

$$\begin{cases} \min J(\zeta(x), \Delta u(k)), \\ \text{s.t. } \zeta(k+1|t) = \tilde{A}_{k,t} \zeta(k|t) + \tilde{B}_{k,t} \Delta u(k|t), \\ \alpha_{\min} \leq \alpha(k+i|k) \leq \alpha_{\max}, \\ u_{\min} \leq u(k+i|k) \leq u_{\max}, \\ a_{y\min} \leq a(k+i|k) \leq a_{y\max}, \\ \Delta u_{\min} \leq \Delta U(k+i|k) \leq \Delta u_{\max}. \end{cases} \quad (16)$$

4 仿真分析

为了验证控制器的控制效果, 本文进行了 Carsim 与 Simulink 的联合仿真。部分参数设置见表 1。

表 1 部分仿真参数

Tab. 1 Part of simulation parameters

参数	数值	参数	数值
N_c	5	$a_{y\min}$	-0.1g
N_p	25	$a_{y\max}$	0.1g
Δu_{\min}	-0.2	Q	100
Δu_{\max}	+0.2	R	10

仿真结果如图 3 所示。

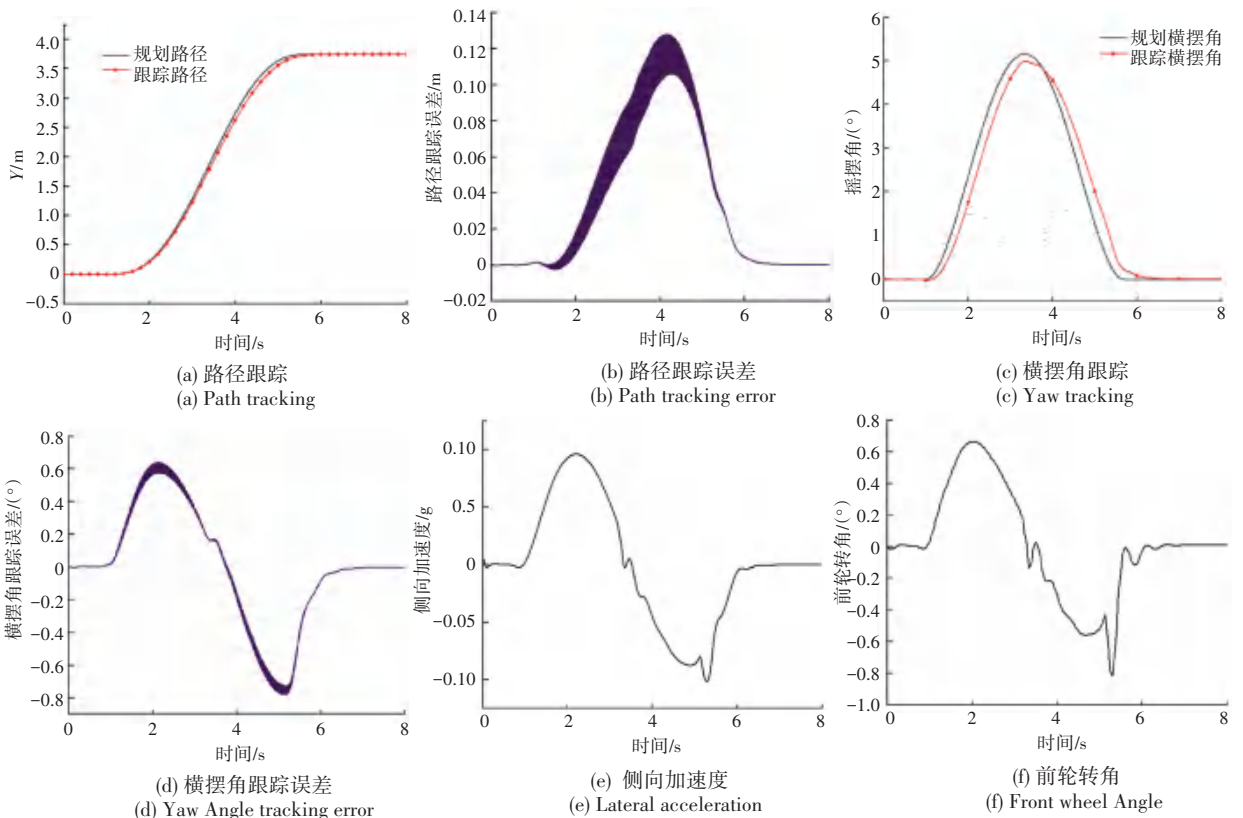


图 3 跟踪控制仿真效果图
Fig. 3 Simulation result of tracking control

根据图3(a)~图4(d)可以看出路径跟踪误差和横摆角跟踪误差都在合理范围之内,说明控制器具有良好的轨迹跟踪能力。由图3(b)和图3(d)可知,误差的极值出现在到达目标点时的转弯处。

由图3(e)可知,在整个避障换道的控制过程中,车辆的侧向加速度基本上平稳,最大值未超过规定限制。但是,在5.2 s左右出现较大的加速度增量变化。

由图3(f)可知,车辆的前轮转角依然在合理的范围之内变化。但是,在5.2 s处也出现了较大的转角增量。

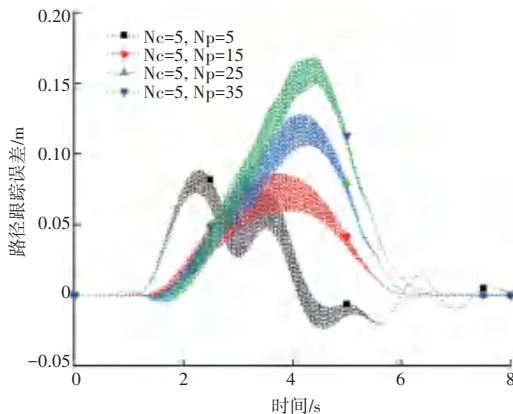
为了提高上述控制器的控制效果,本文对预测时域和控制时域两个参数进行了调整,具体参数设置见表2。

表2 仿真对比参数

Tab. 2 Simulation comparison parameters

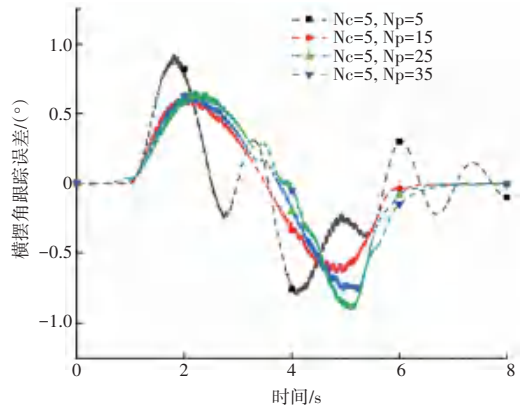
A		B	
A1	$N_c = 5, N_p = 5$	B1	$N_c = 5, N_p = 25$
A2	$N_c = 5, N_p = 15$	B2	$N_c = 8, N_p = 25$
A3	$N_c = 5, N_p = 25$	B3	$N_c = 15, N_p = 25$
A4	$N_c = 5, N_p = 35$	B4	$N_c = 20, N_p = 25$

A组仿真对比结果如图4所示。



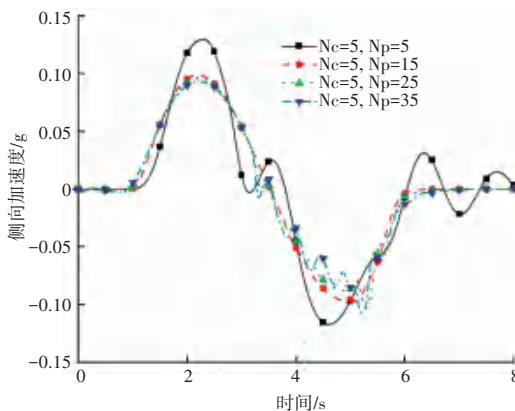
(a) 路径跟踪误差对比

(a) Path tracking error comparison



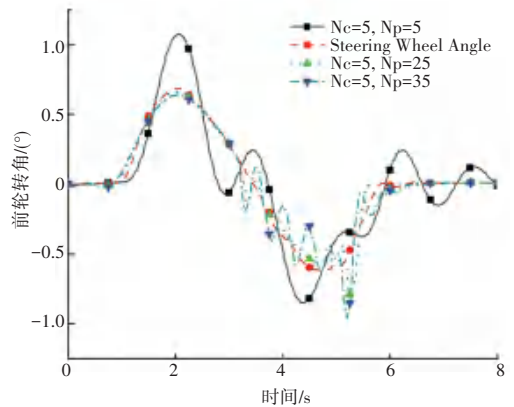
(b) 横摆角跟踪误差对比

(b) Yaw Angle tracking error comparison



(c) 侧向加速度对比

(c) Contrast of lateral acceleration



(d) 前轮转角对比

(d) Front wheel Angle contrast

图4 A组仿真对比结果

Fig. 4 Comparison results of group a simulation

分析图4可知:当控制时域 $N_c = 5$ 时,增大预测时域使得控制精度降低;但是减小预测时域会使得控制结果出现大幅度的抖动。当预测时域 $N_p = 15$ 时,则得到较好的控制结果,侧向加速度和前轮转角的变化也比较平缓。整个对比数据表明:当控制时域一定(较小值)时,过小和过大的预测时域均会使得控制器的控制效果降低。

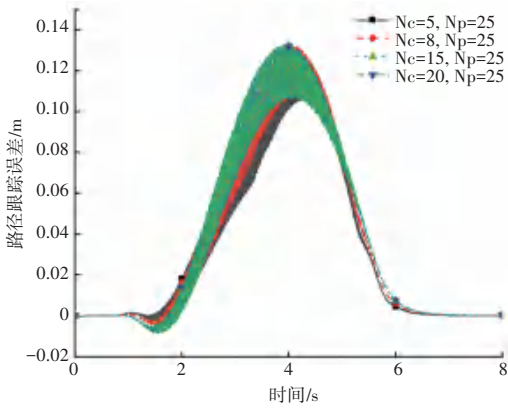
B组仿真对比结果如图5所示。

由图5(a)可知:当预测时域 $N_p = 25$ 时,增大控制时域会稍微增加路径跟踪误差,可以忽略不计。

分析图5(b)~图5(d)可知:当预测时域一定时,随着控制时域的增加,横摆角跟踪误差也随之增大,但是车辆的侧向加速度和前轮转角的变化趋于平缓。

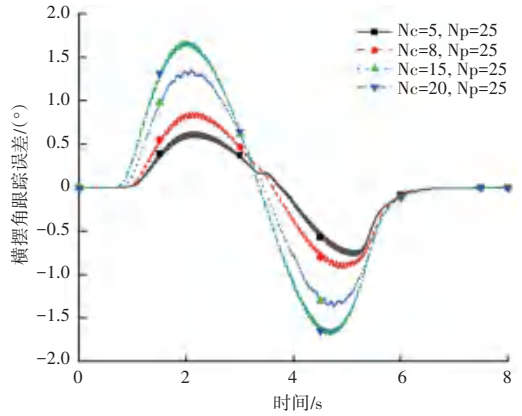
分析 A、B 两组对比试验数据可知:控制时域和预测时域的选择对模型预测控制器最终的控制效果

有着较大影响。综合分析可得,当控制时域和预测时域的比值接近 1:3 时,控制器的控制效果最佳。



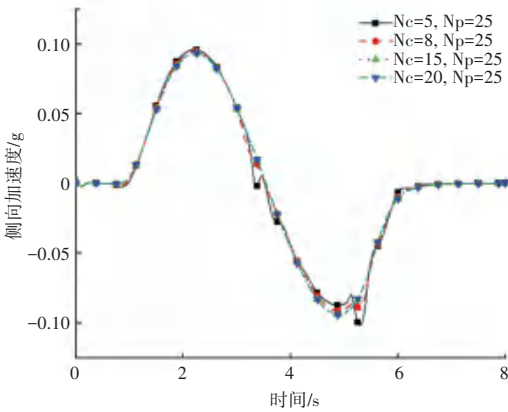
(a) 路径跟踪误差对比

(a) Path tracking error comparison



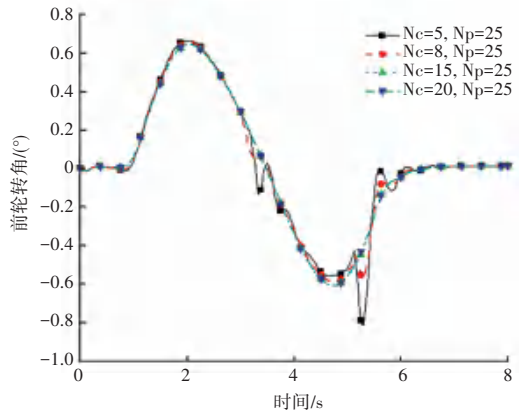
(b) 横摆角误差对比

(b) Yaw Angle Error Comparison



(c) 侧向加速度对比

(c) Contrast of lateral acceleration



(d) 前轮转角对比

(d) Front wheel Angle contrast

图 5 B 组仿真对比结果

Fig. 5 Comparison results of group B simulation

5 结束语

根据五次多项式规划出避障路径,利用模型预测控制,设计路径跟踪控制器,并利用 Carsim 和 Simulink 进行联合仿真,仿真结果表明,控制器能够较为精准的跟踪规划路径,且侧向加速度和前轮转角变化均在合理的范围之内。

通过对路径跟踪控制器的控制时域和预测时域两个参数的调整,让控制器的性能得到进一步的优化,结果表明:当控制时域一定时,增大预测时域会使得路径跟踪的效果降低,减小预测时域时,会使得控制的过程中出现明显的抖动;当预测时域一定时,增大控制时域会使得角速度跟踪误差变大,减小控制时域时,控制过程中出现了明显的抖动。通过对两组试验的分析可得,当控制时域和预测时域比值

接近 1:3 时,控制器的控制效果最佳。

参考文献

- [1] 聂枝根,王万琼,赵伟强,等. 基于轨迹预瞄的智能汽车变道动态轨迹规划与跟踪控制[J]. 交通运输工程学报,2020,20(2): 147-160.
- [2] 张炳力,李子龙,沈干,等. 基于模糊神经网络的智能汽车轨迹跟踪研究[J]. 汽车工程,2019,41(8):953-959.
- [3] 周中升,张燕军,李竹峰. 智能汽车路径跟踪控制方法设计[J]. 农业装备技术,2019,45(3):46-50.
- [4] 杭鹏,陈辛波,张榜,等. 四轮独立转向-独立驱动电动车主动避障路径规划与跟踪控制[J]. 汽车工程,2019,41(2):170-176.
- [5] 裴红蕾. 智能汽车换道避障路径规划与跟踪方法[J]. 中国安全科学学报,2018,28(9):26-32.
- [6] 李海青,赵又群,林菜,等. 汽车高速紧急避障路径跟踪与主动防侧翻控制[J]. 哈尔滨工业大学学报,2019,51(7):135-143, 153.
- [7] 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.