

高速转向工况下的无人驾驶车辆路径跟踪

柳亚子¹ 江洪² 于文浩¹ 石贞洪¹ 韦峻¹

¹(江苏大学汽车与交通工程学院 江苏 镇江 212013)

²(江苏大学机械工程学院 江苏 镇江 212013)

摘要 为提高无人驾驶车辆在高速转向工况下的路径跟踪精度与行驶稳定性,基于三自由度单轨车辆模型与模型预测控制理论,分析前轮转角约束对车辆跟踪精度与行驶稳定性的影响,提出一种自适应于侧向附着力的路径跟踪控制方法。以 Pacejka'89 魔术公式轮胎模型为基础,分析轮胎纵向受力,以此推算轮胎的侧向附着力,从而建立前轮转角约束随车辆状态不断改变的自适应策略。为验证该控制器的控制效果,搭建了 CarSim 与 MATLAB/Simulink 联合仿真平台进行仿真实验。结果表明,在保证车辆跟踪精度的前提下,该控制器具有更好的行驶稳定性。

关键词 无人驾驶车辆 模型预测控制 路径跟踪 侧向附着力

中图分类号 TP3 U461.91 **文献标志码** A **DOI**:10.3969/j.issn.1000-386x.2022.03.012

PATH TRACKING OF SELF-DRIVING VEHICLES UNDER EXTREME CONDITIONS

Liu Yazhi¹ Jiang Hong² Yu Wenhao¹ Shi Zhenhong¹ Wei Jun¹

¹(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

²(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract In order to improve the tracking accuracy and driving stability of self-driving vehicles under extreme conditions, based on a three-degree-of-freedom monorail vehicle model and model predictive control theory, the influence of front wheel rotation angle constraint on the vehicle tracking accuracy driving stability is analyzed, and a path tracking control method adaptive to lateral adhesion is proposed. Based on Pacejka'89 magic formula tire model, the longitudinal force of the tire was analyzed to estimate the lateral adhesion of the tire, so as to establish an adaptive strategy for front wheel rotation constraint that changes continuously with the vehicle state. In order to verify the control effect of the proposed controller, a CarSim and MATLAB/Simulink joint simulation platform was set up to carry out simulation experiments. The results show that the designed controller has better driving stability on the premise of ensuring vehicle tracking accuracy.

Keywords Self-driving vehicles Model predictive control Path tracking Lateral adhesion

0 引言

随着当下车辆保有量的日益增加,交通事故已成为一个严峻的社会问题,在众多交通事故中,人为因素所造成的交通事故占有很大的比重^[1]。无人驾驶车辆能有效减少人为因素所造成的交通事故,因此吸引了众多学者对其进行研究^[2]。

路径跟踪是无人驾驶车辆的重要研究内容之一^[3]。目前,国内外学者分别运用 PID 控制^[4]、滑模控制^[5]、鲁棒控制^[6]、模型预测控制^[7]等控制算法在无人驾驶车辆对参考路径进行有效跟踪的控制领域进行了研究。其中模型预测控制在处理不易建立数学模型且存在约束的被控系统时具有其独特的优势。由于建立精确的车辆模型较为复杂,同时车辆在运行过程中存在众多约束,近年来,模型预测控制已越来越多地被运用

于研究无人驾驶车辆路径跟踪领域^[8]。

目前,针对模型预测控制理论在无人驾驶车辆高速转向工况下的路径跟踪问题,有学者以速度向量方向角偏差作为控制参考量,通过理想质心侧偏角代替实际侧偏角,以此提高无人驾驶车辆的跟踪精度^[9];还有学者设计了一种车辆串级纵横耦合控制策略,通过横纵向前级控制器以保证能够跟随规划层的目标行驶路径,通过后级稳定控制器计算车辆横摆角速度,以此补偿车辆横摆力矩^[10];同时,有学者通过添加表征车辆稳定性的质心侧偏角约束,提出一种考虑车辆稳定性的模型预测路径跟踪方法,以此在保证车辆跟踪精度的前提下提高车辆的稳定性^[11]。

本文针对前轮转向的无人驾驶车辆在高速行驶时跟随双移线工况的路径跟踪问题进行研究,首先基于三自由度车辆模型与模型预测控制理论搭建了前轮转角约束固定的路径跟踪控制器,分析了不同前轮转角约束对车辆质心侧偏角与前后轮侧偏角的影响,并通过 Pacejka'89 魔术公式轮胎模型推算车辆在行驶过程中的侧向附着力,以此建立不同控制周期内的前轮转角约束。与文献[11]中提出的添加质心侧偏角约束的方法相比,该方法以轮胎附着力为理论基础,在保证车辆稳定的前提下,能够更好地发挥车辆的转向性能。

1 车辆动力学建模

考虑忽略悬架特性的车辆-轮胎三自由度动力学模型,以前轮转向车辆为研究对象,建立包含横向运动、纵向运动、横摆运动的车辆单轨模型如图1所示。

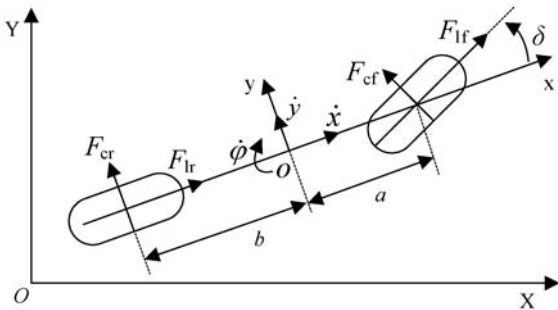


图1 车辆动力学模型

以车辆质心所在点为坐标原点 O , 建立固定于车辆质心的 $oxyz$ 车辆坐标系, 根据牛顿第二定律, 其动力学方程式如下:

$$\begin{cases} m(\ddot{x} - \dot{y}\dot{\varphi}) = 2F_{xf} + 2F_{xr} \\ m(\ddot{y} + \dot{x}\dot{\varphi}) = 2F_{yf} + 2F_{yr} \\ I_z \ddot{\varphi} = 2aF_{yf} - 2bF_{yr} \\ \dot{X} = \dot{x} \cos\varphi - \dot{y} \sin\varphi \\ \dot{Y} = \dot{x} \sin\varphi + \dot{y} \cos\varphi \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为车辆整备质量; φ 为车辆横摆角; F_{xf} 和 F_{xr} 分别表示车辆前后车轮所受到沿 x 轴方向上的力; F_{yf} 和 F_{yr} 分别为车辆前后轮所受到沿 y 轴方向上的力; I_z 为车辆绕 z 轴的转动惯量; a 和 b 分别为车辆质心到前后轴的距离; 最后两个式子为惯性坐标系与车辆坐标系之间的转换关系。

前后车轮在 x 、 y 轴方向上所受到的力向轮胎纵、侧向转换的关系式式如下

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} F_{xf} \\ F_{yf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & -\sin\delta \\ \sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{lf} \\ F_{cf} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} F_{xr} \\ F_{yr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{lr} \\ F_{cr} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

式中: δ 表示车辆前轮转角; F_{lf} 和 F_{cf} 分别表示车辆前轮所受到的纵向力和侧向力; F_{lr} 和 F_{cr} 分别表示车辆后轮所受到的纵向力和侧向力。

车辆在加减速行驶的过程中, 前后车轮所受到的垂向载荷 F_z 会随着加速度的变化而改变, 考虑到轮胎载荷的变化对轮胎纵、侧向力的影响, 建立如下前后车轮的垂向载荷变化模型:

$$\begin{aligned} F_{zf} &= \frac{bmg h_g \ddot{x}}{2(a+b)} \\ F_{zr} &= \frac{am + mh_g \ddot{x}}{2(a+b)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: h_g 为车辆质心高; g 为重力加速度。轮胎纵向滑移率 s 为:

$$s = \frac{\dot{x} - r\omega}{\dot{x}} \quad (4)$$

式中: ω 为车轮的角速度; r 为轮胎半径长度。

在该控制系统中, 选取系统的状态量为 $\xi = [\dot{y} \quad \dot{x} \quad \varphi \quad \dot{\varphi} \quad Y \quad X]^T$, 控制量为 $u = [\delta]$ 。

2 路径跟踪控制

2.1 预测模型

上述所建立的车辆动力学模型为非线性时变的连续模型, 为提高控制器的实时性, 将方程线性化并采用一阶差商方法离散化后得到如下公式:

$$\begin{cases} \xi(k+1) = A(k)\xi(k) + B(k)u(k) \\ y(k) = C\xi(k) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $A(k) = I + TA(t)$, $B(k) = TB(t)$, T 为系统的采样周期, $A(t)$ 与 $B(t)$ 分别为方程相对于 ξ 与 u 的雅克比矩阵。选取车辆的横摆角 φ 以及车辆在惯性坐标系下的横向位置 Y 作为系统的输出量, 输出矩阵 $C =$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T$$

预测模型是模型预测控制器的基础,其主要功能是根据车辆当前的状态量与上一时刻的控制量,预测系统未来一段时间的输出量。在式(5)的基础上引入控制量与增量模型,设定 $\mathbf{x}(k|t) = \begin{bmatrix} \xi(k|t) \\ \mathbf{u}(k-1|t) \end{bmatrix}$,得如式(6)所示的状态空间方程。

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1|t) = \tilde{\mathbf{A}}(k)\mathbf{x}(k|t) + \tilde{\mathbf{B}}(k)\Delta\mathbf{u}(k|t) \\ \boldsymbol{\eta}(k|t) = \tilde{\mathbf{C}}(k)\mathbf{x}(k|t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\tilde{\mathbf{A}}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(k) & \mathbf{B}(k) \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}$; $\tilde{\mathbf{B}}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{B}(k) \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}$; $\tilde{\mathbf{C}}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}(k) & 0 \end{bmatrix}$; $\Delta\mathbf{u}$ 为控制增量。

设定系统的控制时域为 N_c , 预测时域为 N_p , 总预测时间为预测时域与采样周期的乘积, 可得系统总预测时间内的输出为:

$$\mathbf{Y}(t) = \boldsymbol{\Psi}_t \mathbf{x}(t|t) + \boldsymbol{\Theta}_t \Delta\mathbf{U}(t) \quad (7)$$

式中:

$$\boldsymbol{\Theta}_t = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{B}}_t & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}_t\tilde{\mathbf{B}}_t & \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{B}}_t & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}_t^{N_c-1}\tilde{\mathbf{B}}_t & \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}_t^{N_c-2}\tilde{\mathbf{B}}_t & \dots & \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{B}}_t \\ \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}_t^{N_c}\tilde{\mathbf{B}}_t & \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}_t^{N_c-1}\tilde{\mathbf{B}}_t & \dots & \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}_t\tilde{\mathbf{B}}_t \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p-1}\tilde{\mathbf{B}}_t & \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p-2}\tilde{\mathbf{B}}_t & \dots & \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p-N_c-1}\tilde{\mathbf{B}}_t \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Y}(t) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}(t+1|t) \\ \boldsymbol{\eta}(t+2|t) \\ \vdots \\ \boldsymbol{\eta}(t+N_c|t) \\ \vdots \\ \boldsymbol{\eta}(t+N_p|t) \end{bmatrix}; \Delta\mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{u}(t|t) \\ \Delta\mathbf{u}(t+1|t) \\ \vdots \\ \Delta\mathbf{u}(t+N_c|t) \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{\Psi}_t = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}_t\tilde{\mathbf{A}}_t \\ \tilde{\mathbf{C}}_t\tilde{\mathbf{A}}_t^2 \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}_t\tilde{\mathbf{A}}_t^{N_c} \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}_t\tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p} \end{bmatrix}$$

2.2 构建目标函数与约束条件

为保障系统对参考路径的跟随能力与对车辆控制

的平稳性,建立如下的目标函数:

$$J(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t-1), \Delta\mathbf{U}(t)) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\boldsymbol{\eta}(t+i|t) - \boldsymbol{\eta}_{\text{ref}}(t+i|t)\|_{\mathbf{Q}}^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta\mathbf{u}(t+i|t)\|_{\mathbf{R}}^2 + \rho\varepsilon^2 \quad (8)$$

式中: \mathbf{Q} 与 \mathbf{R} 分别为权重矩阵; ρ 为松弛因子 ε 的权重系数; 第一项表示为车辆对参考路径的跟踪性能; 第二项表示为车辆行驶的平稳性。

结合式(8),建立如式(9)所示的二次规划问题。

$$\begin{aligned} & \min_{\Delta\mathbf{U}, \varepsilon} J(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t-1), \Delta\mathbf{U}(t)) \\ & \text{s. t.} \quad \Delta U_{\min} \leq \Delta\mathbf{U}_t \leq \Delta U_{\max} \\ & \quad U_{\min} \leq \mathbf{A}\Delta\mathbf{U}_t + \mathbf{U}_t \leq U_{\max} \end{aligned} \quad (9)$$

$$y_{h,\min} \leq y_h \leq y_{h,\max}$$

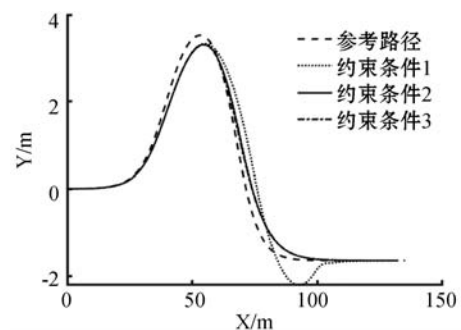
$$y_{s,\min} - \varepsilon \leq y_s \leq y_{s,\max} + \varepsilon$$

式中: ΔU_{\min} 与 ΔU_{\max} 分别为控制增量的最小值与最大值; U_{\min} 与 U_{\max} 分别为控制量的最小值与最大值; $y_{h,\min}$ 与 $y_{h,\max}$ 为输出量的上下边界; $y_{s,\min}$ 与 $y_{s,\max}$ 为包含松弛因子的上下边界, 以此保证在每个求解周期都能求得可行解。在当前控制周期完成上述求解后, 将控制序列中的第一个元素作为控制增量作用于控制系统, 在下一时刻, 重复上述操作, 以此实现对系统的持续控制。

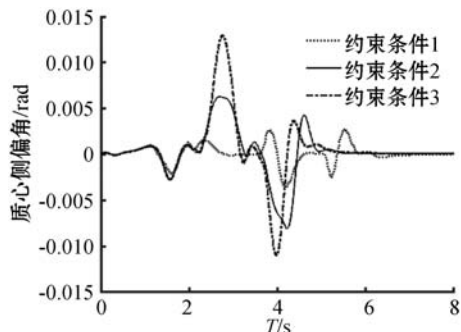
2.3 车辆稳定性分析

基于以上建立的路径跟踪控制器, 分析无人驾驶车辆在双移线工况下的路径跟踪精度与行驶稳定性。在行驶过程中, 车辆的转向运动主要来自于地面对轮胎的侧向作用力, 其最大值受路面侧向附着系数限制。当转向所需要的向心力超过车轮的侧向附着力时, 不仅车辆的转向半径不会随着转向盘转角的增大而减小, 反而车辆会因侧滑而失去稳定性。

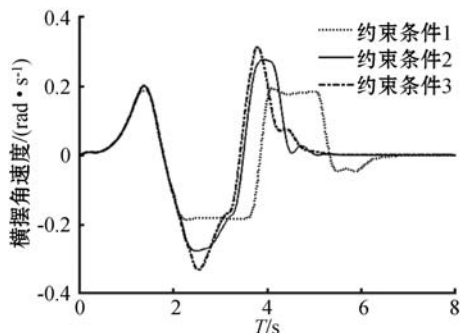
仿真分析不同前轮转角约束对无人驾驶车辆路径跟踪精度与行驶稳定性的影响。转向盘转动一圈对应的前轮转角为 0.2967 rad , 考虑到高速行驶时车辆的稳定性, 在优化求解的过程中, 所求得的前轮转角往往远小于转向盘一圈所对应的前轮转角, 故设定约束条件1为前轮转角被限制在 $\pm 0.05 \text{ rad}$, 约束条件2为前轮转角被限制在 $\pm 0.075 \text{ rad}$, 约束条件3为前轮转角被限制在 $\pm 0.1 \text{ rad}$ 。图2为3组不同约束条件的路径跟踪控制器跟踪双移线工况的仿真对比, 设定路面附着系数为 0.75 , 车速为 80 km/h , 预测时域 $N_p = 20$, 采样周期 $T = 0.03$ 。



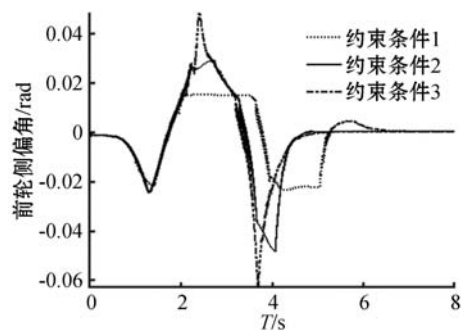
(a) 跟踪路径



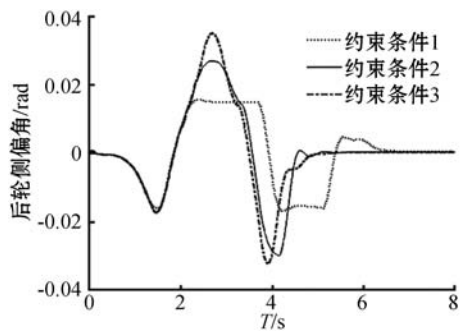
(b) 质心侧偏角



(c) 横摆角速度



(d) 前轮侧偏角



(e) 后轮侧偏角

图2 不同前轮转角约束的路径跟踪对比

图2(a)为路径跟踪情况对比。可以看出,当前轮转角约束较小时,由于前轮转角的限制,轮胎侧向附着无法得到充分的运用,车辆跟踪精度较低,且在车辆由弯道进入直线行驶时出现了超调现象。将前轮转角约束从0.05 rad提高到0.075 rad后,无人驾驶车辆的路径跟踪精度得到提高,且由弯道进入直线行驶时的超调现象消失;而当前轮转角约束从0.075 rad提高到0.1 rad时,由于侧向附着力等因素的限制,车辆路径跟踪精度不再提高。

图2(b) - 图2(e)为车辆状态对比,可以看出,前轮转角约束从0.1 rad减小到0.075 rad时,在跟踪性能几乎不变的前提下,车辆质心侧偏角、横摆角速度、前轮侧偏角均有明显的减小,后轮侧偏角在车辆急剧转向时减小了约0.008 1 rad;前轮转角约束为0.05 rad时,其所对应的车辆行驶稳定性最优,但由于前轮转角过小,其路径跟踪能力最差。

基于以上结论,以下将通过分析轮胎所受纵向力,推算各控制周期内的轮胎侧向附着力,以此建立实时的前轮转角约束,从而在保证车辆路径跟踪精度的前提下,改善车辆在高速转向工况下的行驶稳定性。

3 无人驾驶车辆稳定性控制

3.1 轮胎受力分析

考虑到轮胎结构的复杂性及其动力学性能呈非线性^[12],选用通过大量实验数据并运用三角函数拟合得到的 Pacejka' 89 魔术公式轮胎模型分析轮胎纵向受力情况。其计算公式为:

$$F_1 = D_1 \sin \left\{ C_1 \arctan \left[B_1 x_1 - E_1 (B_1 x_1 - \arctan(B_1 x_1)) \right] \right\} \quad (10)$$

式中: $x_1 = s + S_h$, s 为轮胎的纵向滑移率, S_h 为曲线的水平方向漂移; B_1 、 C_1 、 D_1 、 E_1 分别表示轮胎的刚度因子、形状因子、峰值因子和曲率因子。变量关系如下:

$$\begin{aligned} B_1 &= (B_3 F_z^2 + B_4 F_z) \times e^{-B_5 F_z} / (C_1 \times D_1) \\ C_1 &= B_0 \\ D_1 &= B_1 F_z^2 + B_2 F_z \\ E_1 &= B_6 F_z^2 + B_7 F_z + B_8 \\ S_h &= B_9 F_z + B_{10} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $B_0 - B_{10}$ 的取值参照参考文献[11]。通过 MATLAB 仿真得到轮胎纵向力与纵向滑移率之间的关系如图3所示。

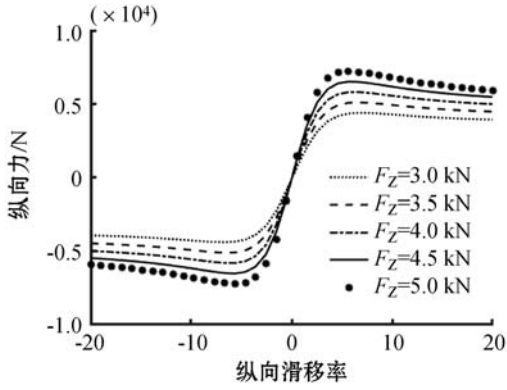


图3 轮胎纵向往力

可以看出,在相同滑移率的前提下,轮胎纵向往力随着垂直载荷的增加而增大,即轮胎的纵向刚度随着垂直载荷的增大而增大,且在滑移率小于5%时,纵向滑移率与纵向往力近似呈线性关系。

3.2 建立自适应前轮转角约束

为实现无人驾驶车辆前轮转角约束随车辆行驶状态的实时优化,以此达到前轮转角约束对车辆状态的自适应,建立如图4所示的前轮转角约束实时调整的控制方法。

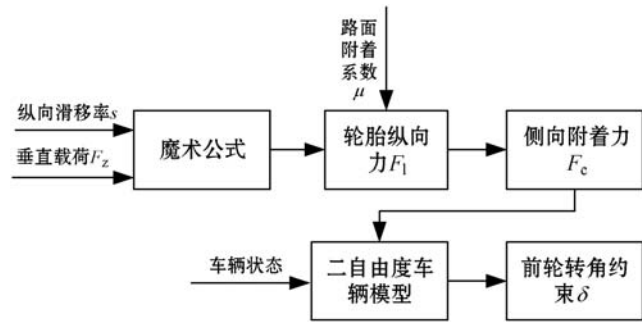


图4 前轮转角约束实时调整控制方法

路面附着系数 μ 的数值主要取决于道路的材料、路面的状况与轮胎结构、胎面花纹等因素。干燥的沥青或混凝土路面的峰值附着系数为 0.8 ~ 0.9,潮湿沥青路面的峰值附着系数为 0.5 ~ 0.7^[13]。通过式(10)、式(11)计算轮胎纵向往力 F_1 ,再由向量关系式可得轮胎侧向附着力 F_c 如下:

$$F_c = \sqrt{(\mu F_z)^2 - F_1^2} \quad (12)$$

由牛顿第二定律可知,车辆的转向半径 R 满足如下关系式:

$$R \geq \frac{m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)}{F_c} \quad (13)$$

根据二自由度车辆动力学模型可知:

$$\delta = \frac{L}{R} + (\alpha_1 - \alpha_2) \quad (14)$$

式中: L 为车辆轴距,且有 $L = a + b$; α_1 与 α_2 分别为前、后车轮侧偏角。根据几何关系计算 α_1 、 α_2 值分别为:

$$\alpha_1 = \beta + \frac{a \dot{\phi}}{\dot{x}} - \delta \quad (15)$$

$$\alpha_2 = \beta - \frac{b \dot{\phi}}{\dot{x}}$$

联立式(12)、式(13)、式(14)可得最大前轮转角为:

$$\delta = \frac{L F_c}{2m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)} + \frac{L \dot{\phi}}{2 \dot{x}} \quad (16)$$

3.3 车辆稳定性控制

通过上述建立的前轮转角约束实时调整方法,设计如图5所示在高速转向工况下的无人驾驶车辆稳定性路径跟踪控制器。

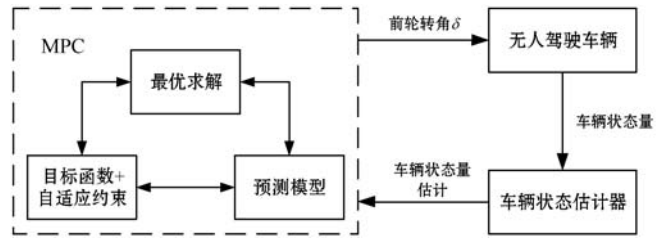


图5 车辆稳定性控制流程

在每个控制周期内,通过测得的车辆状态量,计算车轮的侧向附着力与所对应的前轮转角,在模型预测控制器最优求解的过程中,以该转角作为前轮转角的实时约束,从而防止由于前轮过度转向而造成的轮胎侧滑,进而提高车辆在转向过程中的行驶稳定性。

4 仿真结果

为验证所提出的无人驾驶车辆稳定性控制方法,本文参考电咖 EV10 汽车参数,以该车所对应的数学模型作为受控对象搭建了如图6所示的 CarSim 与 MATLAB/Simulink 联合仿真平台,并以典型工况双移线作为参考路径,设定路面附着系数为 0.75,车速为 80 km/h,预测时域 $N_p = 20$,采样周期 $T = 0.03$ 。

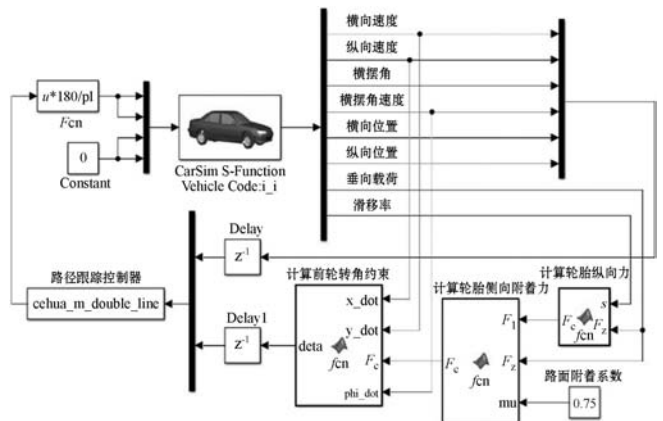
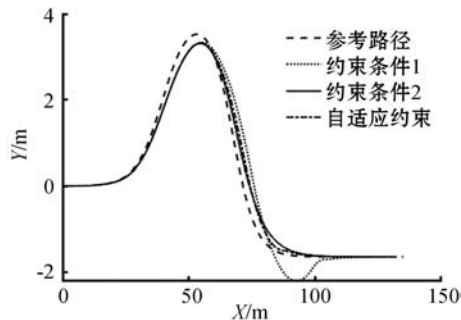
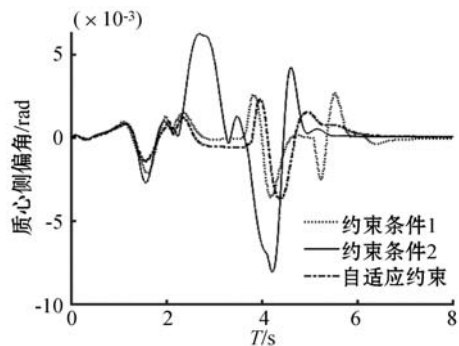


图6 联合仿真平台

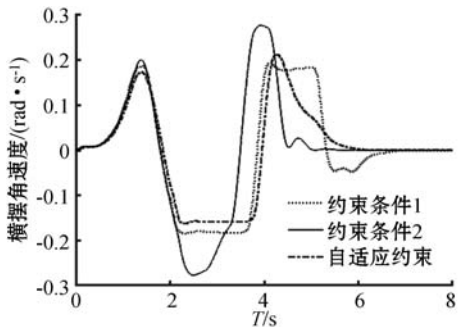
通过前面分析可知,约束条件1所对应无人驾驶车辆的路径跟踪精度较低,但其在车辆行驶的过程中,稳定性是三组约束条件中最好的;约束条件2所对应的无人驾驶车辆路径跟踪精度与约束条件3类似,但约束条件2所对应的车辆稳定性明显优于约束条件3所对应的车辆,故选择约束条件1与约束条件2作为对比组,通过对比分析,研究所提出的自适应转角约束控制器的路径跟踪精度与车辆行驶稳定性。图7为自适应约束与2组典型固定约束条件所对应的路径跟踪控制器跟踪双移线工况的仿真对比。



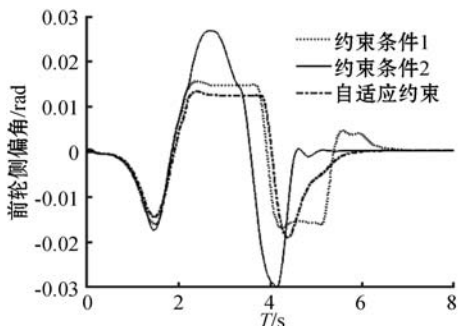
(a) 跟踪路径



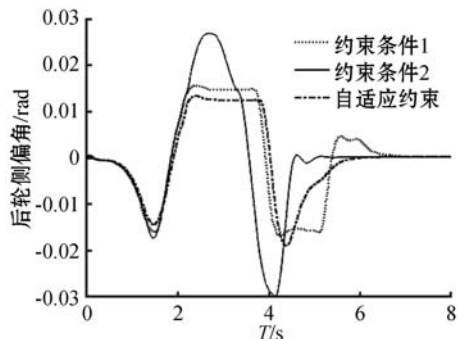
(b) 质心侧偏角



(c) 横摆角速度



(d) 前轮侧偏角



(e) 后轮侧偏角

图7 路径跟踪与行驶稳定性对比

图7(a)为三组控制器的跟踪路径与参考路径的对比情况,可以看出,前轮转角约束自适应的控制器在无人驾驶车辆进入弯道与弯道行驶时的跟踪精度与约束条件2的跟踪精度非常接近,在驶出弯道时其跟踪精度比约束条件2的跟踪精度更高,而二者均明显高于约束条件1所对应的跟踪精度。

图7(b)为三组控制器的车辆质心侧偏角对比,可以看出,车辆在直线工况行驶时,三组控制器控制车辆行驶的稳态效果相似。在转弯过程中,自适应约束所对应的车辆质心侧偏角最大为 0.0037 rad ,远小于约束条件2所对应的 0.008 rad ,略大于约束条件1所对应的 0.0035 rad ;图7(c)为三组控制器所对应的横摆角速度,自适应约束所对应的最大车辆横摆角速度为 0.2 rad ,略大于约束条件1所对应的 0.18 rad ,小于约束条件2所对应的 0.27 rad ;图7(d)与图7(e)分别为三组控制器所对应的前轮侧偏角与后轮侧偏角,可以看出,在驶入弯道与弯道行驶的过程中,自适应约束与约束条件1所对应的前轮侧偏角变化趋势相似,在驶出弯道时,自适应约束所对应的前后轮侧偏角明显小于约束条件1与约束条件2所对应的前后轮侧偏角,且前轮转角约束自适应的控制器未出现超调现象。根据以上分析可以得出,在高速转向工况下,前轮转角约束能够自适应调节的控制器控制车辆行驶时具有较好的行驶稳定性。

5 结 语

针对无人驾驶车辆的路径跟踪问题,提出一种前轮转角约束自适应的路径跟踪控制器,其跟踪算法基于模型预测控制理论。通过分析轮胎在车辆行驶过程中的受力,推算各控制周期内轮胎的侧向附着力,以此建立前轮转角约束随车辆状态不断改变的自适应策略。通过搭建 CarSim 与 MATLAB/Simulink 联合仿真平台对所设计的自适应控制策略进行了验证,其特点如下:

(1) 在车速为 80 km/h、跟踪路径为双移线的高速转向工况下,所设计控制器的路径跟踪精度与前轮转角约束较大的跟踪精度相似且明显高于前轮转角约束较小的控制器所对应的跟踪精度。

(2) 在保证车辆跟踪精度的前提下,所设计的控制器控制车辆在直线工况行驶时与其他控制器效果相似;在弯道工况行驶时,所设计控制器控制的车辆的最大质心侧偏角、最大横摆角速度与最大前后轮侧偏角均更小,故该控制器所控制的车辆具有更好的行驶稳定性。

参 考 文 献

[1] 徐硕. 高速公路重特大交通事故原因分析——以湖南例[J]. 产业与科技论坛, 2017, 16(24): 57-58.

[2] 许占奎. 无人驾驶汽车的发展现状及方向[J]. 科技展望, 2015(32): 231.

[3] 郭景华, 罗禹贡, 李克强. 智能电动车辆纵向协调与重构控制[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(9): 1238-1244.

[4] Nie L, Guan J, Lu C, et al. Longitudinal speed control of autonomous vehicle based on a self-adaptive PID of radial basis function neural network[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2018, 12(6): 485-494.

[5] 郭景华, 李琳辉, 胡平, 等. 基于模糊逻辑的无人驾驶车纵向多滑模控制[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 170-176.

[6] Wang R, Jing H, Hu C, et al. Robust H_{∞} path following control for autonomous ground vehicles with delay and data dropout [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(7): 2042-2050.

[7] Christian O. Model complexity and coupling of longitudinal and lateral control in autonomous vehicles using model predictive control[D]. KTH Royal Institute of Technology, 2015.

[8] 王艺, 蔡英凤, 陈龙, 等. 基于模型预测控制的智能网联汽车路径跟踪控制器设计[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 136-144, 153.

[9] 孙传扬, 张欣, 席利贺, 等. 极限工况下自动驾驶车辆转向控制器的设计[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 78-85.

[10] 高凯, 余家旺, 张金城. 低附着工况自动驾驶汽车纵向耦合控制[J]. 汽车安全与节能学报, 2019, 10(1): 67-73.

[11] 李军, 唐爽, 周伟. 考虑车辆稳定性的模型预测路径跟踪方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 574-579.

[12] 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.

[13] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

(上接第 39 页)

[19] Ghoshal S P. Optimizations of PID gains by particle swarm optimizations in fuzzy based automatic generation control[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 72(3): 203-212.

[20] Sun J, Feng B, Xu W B. Particle swarm optimization with particles having quantum behavior[C]//Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation. IEEE, 2004: 325-331.

[21] Cai Y J, Sun J, Wang J, et al. Optimizing the codon usage of synthetic gene with QPSO algorithm[J]. Journal of Theoretical Biology, 2008, 254(1): 123-127.

[22] Sun J, Xu W B, Feng B. Adaptive parameter control for quantum-behaved particle swarm optimization on individual level[C]//2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE, 2005: 3049-3054.

[23] Liu F, Zhou Z G. An improved QPSO algorithm and its application in the high-dimensional complex problems[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2014, 132: 82-90.

[24] Jau Y M, Jeng J T, Su K L. Modeling of fuzzy integral based nonlinear multi-regressions systems with QPSO-GS [C]//2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2011). IEEE, 2011: 2839-2844.

[25] Xu J X, Guo Z Q, Lee T H. Design and implementation of a Takagi-Sugeno-type fuzzy logic controller on a two-wheeled mobile robot [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(12): 5717-5728.

[26] 郑伟博. 粒子群优化算法的改进及其应用研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2016.

[27] Mendel J M, John R I, Liu F L. Interval type-2 fuzzy logic systems made simple[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2006, 14(6): 808-821.

[28] Kao M C, Lin C J, Feng C L, et al. Adaptive type-2 fuzzy tracking control of wheeled mobile robots[C]//2013 International Conference on Fuzzy Theory and its Applications (iFUZZY). IEEE, 2013: 1-6.

[29] Nie M W, Tan W W. Towards an efficient type-reduction method for interval type-2 fuzzy logic systems [C]//2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE, 2008: 1425-1432.

[30] Wu D R. Approaches for reducing the computational cost of interval type-2 fuzzy logic systems: Overview and comparisons[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2013, 21(1): 80-99.

[31] Mendel J M, Liu X W. Simplified interval type-2 fuzzy logic systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2013, 21(6): 1056-1069.