

基于滑模自抗扰的智能车路径跟踪控制

吴 艳^{1,2,3}, 王丽芳^{1,2†}, 李 芳^{1,2}

(1. 中国科学院 电力电子与电气驱动重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院 电工研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘 要: 针对传统的基于精确数学模型的路径跟踪控制方法很难适应复杂多变驾驶环境的问题, 提出一种基于终端滑模控制与自抗扰控制的路径跟踪控制方法. 首先, 通过构造一个期望偏航角函数能够满足当车辆的实际偏航角趋近于该期望偏航角时其侧向位移偏差趋近于零, 从而简化路径跟踪控制; 然后, 采用扩张状态观测器实时估计系统的未建模动态, 同时采用非奇异终端滑模来设计非线性误差反馈律, 从而实现偏航角快速、准确地跟踪控制. 仿真结果表明, 所设计的控制器能够保证车辆稳定行驶的同时快速、精确地跟踪期望的路径.

关键词: 智能车; 路径跟踪控制; 自抗扰控制; 终端滑模控制; 扩张状态观测器

中图分类号: U461

文献标志码: A

Intelligent vehicle path following control based on sliding mode active disturbance rejection control

WU Yan^{1,2,3}, WANG Li-fang^{1,2†}, LI Fang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drives, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. School of Electronic Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For the traditional path following control method based on precise mathematical models, it is difficult to adapt to the complex and changeable driving environment. A path following control method based on terminal sliding mode control and active disturbance rejection control is proposed. Firstly, the path following control is simplified by constructing a desired yaw angle function that satisfies the condition that the lateral displacement deviation converges zero when the actual yaw angle of the vehicle converges the desired value. Then, the unmodelled dynamics of the system are estimated in real time by the extended state observer, and the non-singular terminal sliding mode is adopted to design the nonlinear error feedback control law to achieve fast and accurate yaw angle tracking control. Simulation results show that the designed controller can ensure that the vehicle runs stably while following the desired path quickly and accurately.

Keywords: intelligent vehicle; path following control; active disturbance rejection control; terminal sliding mode control; extended state observer

0 引 言

智能车具有驾驶行为可预测、减少交通事故发生以及缓解交通压力等优点, 在未来智能交通系统和军事领域中有很广阔的应用前景^[1-2]. 作为智能车的关键技术之一, 路径跟踪控制是研究如何在保证行驶安全性和乘坐舒适性的前提下, 通过控制车辆的转向系统使得车辆能够沿着参考的路径行驶. 由于行驶工况的复杂多变, 车辆本身高度动态的非线性特性极易受外部扰动的影响, 使得实现精确的路径跟踪控制充满了挑战性.

智能车的路径跟踪控制的目标是通过消除车辆在行驶过程中实际行驶路径与参考路径之间产生的跟踪偏差来实现路径的准确跟踪. 根据消除跟踪偏差的原理不同, 可将路径跟踪方法分成两类: 第 1 类是以车辆当前的位姿与参考路径的位姿之间的偏差(如侧向位移偏差或者偏航角偏差)为控制目标进行反馈跟踪控制; 第 2 类是通过参考路径来产生描述车辆运动的动力学物理量(如前轮偏角、车辆横摆角速度等), 并对其进行跟踪反馈控制^[3-7]. 目前, 常用于无人车辆路径跟踪的控制方法有: 经典的 PID

收稿日期: 2018-02-07; 修回日期: 2018-07-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(2016YFB0101002); 北京市科技计划项目(Z161100001416009).

责任编辑: 张维海.

†通讯作者. E-mail: wlf@mail.iee.ac.cn.

控制、线性理论的控制方法以及非线性的控制方法(如模型预测控制、滑模控制、自抗扰控制、智能控制等)。文献[8]设计路径跟踪预瞄误差模型,利用分阶数PD控制器实现了路径的跟踪。文献[9]以车辆侧向加速度和车辆偏航角作为反馈,采用线性二次型最优控制(Linear quadratic regulator, LQR)设计了紧急避让的轨迹跟踪控制器。文献[10-12]通过对前轮转角等参数的约束,采用基于模型预测控制(Model predictive control, MPC)方法实现了轨迹跟踪控制,仿真结果表明,车辆在跟随期望轨迹的同时,提高了车辆的稳定性。文献[13]采用滑模控制(Sliding mode control, SMC)设计了轨迹跟踪控制器,并分别在低速和高速工况下对比了基于线性二次型最优控制的轨迹跟踪效果,结果表明,基于滑模的轨迹跟踪控制不仅能够很好地跟踪目标轨迹,而且还能兼顾车辆的稳定性。为了提高控制系统的鲁棒性,文献[14-15]采用自抗扰控制(Active disturbance rejection control, ADRC)技术设计了路径跟踪控制器,仿真结果表明,自抗扰控制器能够控制车辆跟踪理想的路径,同时具有较强的鲁棒性。文献[16]采用自适应神经网络对模糊控制的隶属度函数的参数进行调整,并建立了模糊推理系统,设计了轨迹跟踪控制器。经典的PID控制,其控制参数的调节通常采用试凑的方法,且缺乏自适应性。LQR和MPC属于典型的基于精确模型的控制方法,其控制效果直接受模型精度的影响;SMC和ADRC虽然具有较强的鲁棒性,但SMC在模态变化时容易产生抖振问题,影响控制效果,而ADRC采用非线性函数,控制参数较多,缺乏明确的物理意义,整定较困难;基于神经网络需要大量的数据样本进行计算和训练,而模糊规则的制定依赖于经验,没有定性的规则可供参考,因此,在工程化方面存在一定的难度。

自抗扰控制是通过扩张状态观测器(Extended state observer, ESO)对系统未建模动态和未知外扰进行实时估计并给予补偿,从而不依赖于对象精确的数学模型,具有较强的鲁棒性^[17-19]。为了提高系统的快速响应性与稳定性,本文使用非奇异终端滑模和指数趋近律来设计自抗扰控制器结构中的非线性状态误差反馈控制律,其中非奇异终端滑模可以确保系统状态远离平衡点时能够快速响应,指数趋近律可以保证系统全局渐近稳定,从而进一步优化控制效果。将改进后的控制器应用于智能车路径跟踪控制中,具有较好的控制品质和响应特性,路径跟踪的精度和鲁棒性都得到明显的提升。

1 车辆运动模型

1.1 车辆模型

智能车的路径跟踪控制实际上反映的是车辆的侧向动力学控制,因此,只考虑车辆侧向和横摆运动的车辆二自由度模型就能很好地满足控制要求。本文以二自由度车辆模型为基础,设计路径跟踪控制器。

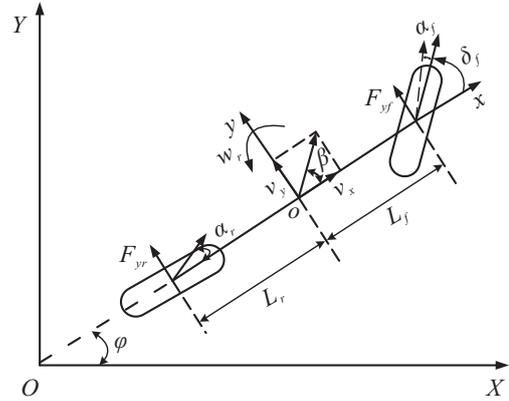


图1 二自由度车辆平面运动模型

图1所示为车辆的2自由度动力学模型。坐标系 oxy 为固定于车身的车辆平面系,车辆质心所在的点为坐标原点 o , x 轴为沿着车辆纵轴方向, y 轴与车辆纵轴方向垂直;坐标系 OXY 为固定于地面的惯性坐标系。车辆2自由度平面运动模型^[20]可以表示如下:

$$\begin{cases} \dot{Y} = v_x \sin \varphi + v_y \cos \varphi, \\ \dot{X} = v_x \cos \varphi - v_y \sin \varphi, \\ \dot{\varphi} = w_r, \\ m(\dot{v}_y + v_x w_r) = F_{yf} + F_{yr}, \\ I_z \dot{w}_r = L_f F_{yf} - L_r F_{yr}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: X 和 Y 为车辆在 OXY 坐标下的纵向和侧向的位移, φ 为在 OXY 坐标下的车辆偏航角, v_x 和 v_y 为在 oxy 坐标下车辆质心处的纵向和侧向车速, w_r 为车辆质心处的横摆角速度, m 为车辆的质量, F_{yf} 和 F_{yr} 为车辆前后轴的侧向力, L_f 和 L_r 为前后轴到车辆质心处的距离, I_z 为车辆横摆转动惯量。

假设车辆轮胎侧向特性处于线性区,同时基于小角度假设,前后轮胎侧向力可以线性化^[21]如下:

$$\begin{cases} F_{yf} = -C_f a_f = -C_f \left(\beta + \frac{w_r L_f}{v_x} - \delta_f \right), \\ F_{yr} = -C_r a_r = -C_r \left(\beta - \frac{w_r L_r}{v_x} - \delta_f \right). \end{cases} \quad (2)$$

其中: c_f 和 c_r 为前后轮的等效侧偏刚度, δ_f 为前轮转角, a_f 和 a_r 为前后轮的侧偏角, β 为车辆质心处的侧偏角。将式(2)代入(1)后,得到基于前轮偏角较小和线性轮胎模型假设后的车辆动力学非线性模型

$$\begin{cases} \dot{Y} = v_x \sin \varphi + v_y \cos \varphi, \\ \dot{X} = v_x \cos \varphi - v_y \sin \varphi, \\ \dot{\varphi} = w_r, \\ \dot{v}_y = -v_x w_r + m^{-1}[C_f(\delta_f - \beta - v_x^{-1} w_r L_f) + \\ C_r(v_x^{-1} w_r L_f - \beta)], \\ m(\dot{v}_y + v_x w_r) = F_{yf} + F_{yr}, \\ I_z \dot{w}_r = L_f C_f(\delta_f - \beta - v_x^{-1} w_r L_f) - \\ L_r(v_x^{-1} w_r L_f - \beta). \end{cases} \quad (3)$$

1.2 智能车路径跟踪问题

为了让车辆能够很好地跟踪理想参考路径,其中参考的车辆位姿为 $(X_{\text{ref}}, Y_{\text{ref}}, \varphi_{\text{ref}})$,这里假设车辆纵向速度不变,因此,只需控制车辆的侧向位移偏差 $Y_e = Y - Y_{\text{ref}}$ 和偏航角偏差 $\varphi_e = \varphi - \varphi_{\text{ref}}$ 都能够使跟踪误差趋近于零.选取式(3)中 Y 、 φ 、 w_r 作为状态量,车辆路径跟踪控制模型可以简化为

$$\begin{cases} \dot{Y} = v_x \sin \varphi + v_y \cos \varphi, \\ \dot{\varphi} = w_r, \\ \dot{w}_r = f(\varphi, w_r) + w(t) + b\delta_f, \\ f(\varphi, w_r) = \\ \frac{L_f C_f}{I_z} \left(-\beta - \frac{w_r L_f}{v_x} \right) - b C_r \left(\frac{w_r L_r}{v_x} - \beta \right). \end{cases} \quad (4)$$

其中: $b = L_f C_f / I_z$; $w(t)$ 为扰动项,包括外部扰动(如路面扰动、侧向风扰动等)和内部扰动(传感器噪声、参数摄动引起的扰动、系统未建模动态等); δ_f 为系统的控制量.由式(4)可以看出,该系统需要用个控制输入量 δ_f 来同时实现车辆纵向位移和横摆角的控制,属于欠驱动系统,如果能够适当地将系统进行降维,则会大大降低系统控制的复杂度.另外,通过 δ_f 能够比较容易地实现对偏航角的控制,如果能够构造一个期望偏航角 φ_d 函数满足当车辆的偏航角 φ 趋近于 φ_d 时,车辆的侧向位移偏差 Y_e 收敛于零,则可将复杂的路径跟踪问题简化为较为简单易行的偏航角跟踪控制问题.对系统(4)中第1项进行如下变化:

$$\dot{Y} = v_x \sin \varphi + v_y \cos \varphi = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \sin(\varphi + \beta), \quad (5)$$

其中 $\beta = \arctan(v_x/v_y)$ 为车辆质心侧偏角,通常可通过多种在线估计方法估计出来^[22-23].当车辆高速行驶时,车辆的侧偏角 β 不能忽略,如果此时仍然让车辆按照参考的偏航角行驶,而不对其进行补偿,则车辆实际航行的路径与参考路径将会产生稳定误差.这里构造一个非线性函数

$$z = c_0 \tanh(c_1 Y_e) + \varphi_e + \beta. \quad (6)$$

其中: c_0 和 c_1 为设计参数,同时满足 $\pi > c_0 > 0$, $c_1 > 0$.满足当 $z \rightarrow 0$ 时, $c_0 \tanh(c_1 Y_e) \rightarrow 0$, $\varphi_e + \beta \rightarrow 0$.具体证明过程如下.

取李雅普诺夫函数 $V = (1/2)Y_e^2$,对 V 进行微分,可得

$$\dot{V} = Y_e \dot{Y}_e = Y_e \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \sin(z - c_0 \tanh(c_1 Y_e)).$$

如果 $z \rightarrow 0$,则有

$$\dot{V} = Y_e \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \sin(-c_0 \tanh(c_1 Y_e)).$$

当 $Y_e > 0$ 并且 $0 < c_0 < \pi$ 时,可得

$$-c_0 < -c_0 \tanh(c_1 Y_e) < 0,$$

$$\sin(-c_0 \tanh(c_1 Y_e)) < 0,$$

于是可以得到 $\dot{V} < 0$.

当 $Y_e < 0$ 并且 $0 < c_0 < \pi$ 时,可得

$$-c_0 \tanh(c_1 Y_e) > 0,$$

$$\sin(-c_0 \tanh(c_1 Y_e)) > 0,$$

于是可以得到 $\dot{V} < 0$.

当 $Y_e = 0$ 并且 $0 < c_0 < \pi$ 时,可以得到 $\dot{V} = 0$.

综上所述可得 $\dot{V} \leq 0$,即当 $z \rightarrow 0$ 时,满足 $Y_e \rightarrow 0$,进而根据式(6)得到 $\varphi_e + \beta \rightarrow 0$.由于这里使用了有界的双曲正切函数 $\tanh \in (-1, 1)$, c_0 可以用于限制车辆行驶过程中所采用的最大偏航角, c_0 越大,车辆行驶路径收敛越快,然而过大的偏航角容易出现系统超调现象; c_1 用于压缩坐标.

令 $z = 0$,可以得到期望的偏航角 $\varphi_d = -c_0 \tanh(c_1 Y_e) - \beta + \varphi_{\text{ref}}$,只要控制 $\varphi \rightarrow \varphi_d$,就能够保证 Y_e 收敛到零.这里令 $x_1 = \varphi$, $x_2 = w_r$,得到如下控制系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 = \dot{\varphi}, \\ \dot{x}_2 = f(\varphi, w_r) + w(t) + bu, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (7)$$

其中: y 为系统输出; $u = \delta_f$ 为系统的控制输入;令 $f = f(\varphi, w_r) + w(t)$,将 f 视为系统的总扰动.至此,复杂的路径跟踪问题被简化为较为简单易行的偏航角跟踪控制问题.

2 滑模自抗扰控制器设计

2.1 扩张状态观测器设计

ADRC将系统中的未建模动态扩充成新的状态变量,对扩张后的系统建立状态观测器.这里将系统(7)中 f 作为状态变量进行扩张.假设 f 可微分,即存在 $\dot{f} = h$,则扩张后的系统如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu, \\ \dot{x}_3 = h, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (8)$$

构造系统的线性ESO为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = z_1 - y, \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e_1, \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}e_1 + bu, \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}e_1. \end{cases} \quad (9)$$

其中: e_1 为估计误差; z_1, z_2, z_3 为观测器的输出, z_1 和 z_2 是 φ 和 w_r 的观测值, z_3 为 f 的观测值; $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 为观测器的增益. 这里, 为了简化计算, 将选择如下观测器增益值:

$$\beta_{01} = 3w_0, \beta_{02} = 3w_0^2, \beta_{03} = w_0^3. \quad (10)$$

所选择的观测器增益将满足特征多项式 $s^3 + \beta_{01}s^2 + \beta_{02}s + \beta_{03} = (s + w_0)^3$ 是 Hurwitz 的, ESO 能够收敛. 其中 w_0 可以视为观测器的带宽, 适当地调整其值, 可以保证 z_3 很好地估计 f 的值.

2.2 非奇异终端滑模非线性误差反馈控制律设计

由于传统的自抗扰控制器中非线性误差反馈控制律采用非线性函数, 控制参数多, 且缺乏具体的物理意义, 整定较为困难. 为使跟踪误差能够快速收敛, 且有效避免奇异问题, 这里用非奇异终端滑模来设计非线性误差反馈控制律, 这样不仅可以改善控制品质, 还可以根据具体控制对象和目标主动选择反馈控制律的参数以达到期望的输出效果. 本文针对系统 (7) 选择如下非奇异终端滑模面:

$$s = x_1 + \alpha x_2^\beta. \quad (11)$$

其中: α 和 β 为可调参数, $\alpha > 0, p, q$ 为正奇数, 且满足 $1 < \beta = p/q < 2$.

为实现控制目标, 将系统的控制律设计为

$$u = u_{eq} + u_n. \quad (12)$$

其中: u_{eq} 为等效控制项, u_n 为非线性控制项. 对 s 求导, 有

$$\dot{s} = \dot{x}_1 + \alpha\beta x_1^{\beta-1} \dot{x}_2 = x_2 + \alpha\beta x_1^{\beta-1}(f + bu). \quad (13)$$

令 $\dot{s} = 0$, 可以得到等效控制分量

$$u_{eq} = -\left(\frac{x_2^{2-\beta}}{\alpha\beta} + f\right)/b. \quad (14)$$

为了满足到达条件 $s\dot{s} \leq 0$, 这里采用指数趋近率. 令 $\dot{s} = -k_1s - k_2\text{sgn}(s)$, 通过调节控制参数 $k_1 > 0, k_2 > 0$, 得到如下非线性控制项:

$$u_n = (-k_1s - k_2\text{sgn}(s))/b. \quad (15)$$

综合式 (14) 和 (15) 可得非奇异终端滑模控制器的控制律为

$$u = -\left(\frac{x_2^{2-\beta}}{\alpha\beta} + f + k_1s + k_2\text{sgn}(s)\right)/b. \quad (16)$$

由于采用非奇异终端滑模面, 车辆的偏航角能够在有限时间内趋近期望的偏航角, 并具有指数趋近律, 从而提高系统的收敛速度.

2.3 控制器稳定性分析

定理 1 对于系统 (7), 取滑模面 (11), 在控制律 (16) 的作用下, 系统将在有限时间内到达终端滑模面 s , 并使得滑模面上的跟踪误差在有限时间内收敛到零.

证明 考虑李雅普诺夫函数 $V_1 = s^2/2$. 由李雅普诺夫稳定性理论可知, 当 $\dot{V}_1 = s\dot{s} \leq 0$ 成立时, 系统稳定, 满足滑模到达条件. 对 V_1 进行微分, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s\dot{s} = s(x_2 + \alpha\beta x_2^{\beta-1})x_2 = \\ &= s(x_2 + \alpha\beta x_2^{\beta-1})(f + bu) = \\ &= s(x_2 + \alpha\beta x_2^{\beta-1})\left[f - \frac{x_2^{2-\beta}}{\alpha\beta} - f - k_1s - k_2\text{sgn}(s)\right] = \\ &= -\alpha\beta x_2^{\beta-1}(k_1s^2 + k_2|s|). \end{aligned} \quad (17)$$

当 $s \neq 0$ 时, 因为 p, q 为正奇数, 并且满足 $1 < p/q < 2$, 所以有 $x_2^{\beta-1} \geq 0$, 进而得到 $\dot{V}_1 \leq 0$. 由此可见, 位于滑模面 $s = 0$ 以外的点都可以在有限时间内到达滑模面 s , 从任意 $s \neq 0$ 的初始状态总能在有限时间内收敛到零, 系统是全局稳定的. \square

3 仿真实验

为了验证改进后的自抗扰控制器的控制效果, 使用 CarSim 和 Matlab/Simulink 联合仿真环境对双移线工况进行仿真分析. 仿真中采用 CarSim 自带的车辆模型 (C-Class Hatchback), 仿真过程 SM-ADRC 中所采用的控制参数如下: $c_0 = \pi/2, c_1 = 0.01, w_0 = 27.3, \alpha = 0.03, \beta = 13/11, k_1 = 267, k_2 = 4.8$, 其中控制参数的选取是综合考虑车辆路径跟踪效果及控制器输出幅值等多种因素通过粒子群优化算法优化所得的; 仿真所采用的双移线路径参考文献 [24], 同时考虑到控制器的饱和, 这里将前轮转角限制在 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 之间.

3.1 不同控制器的控制性能比较

为了验证本文所设计的控制器的控制效果, 在相同的仿真工况下, 对比分析 SM-ADRC、传统的 ADRC 和 MPC 控制下的路径跟踪性能. 仿真中, 车辆参数与文献 [20] 中所使用的车辆参数一致, 车速为 20 m/s, 道

路附着条件良好, $\mu = 0.8$. 其中, ADRC和SM-ADRC中ESO控制参数一致, 所使用的MPC控制器及控制参数与文献[20]一致, 仅将约束条件中的前轮转角最大绝对值修改为 30° .

仿真结果如图2所示. 其中: 图2(a)和图2(b)为3种不同控制器作用下车辆的路径跟踪效果, 可以看出, SM-ADRC和ADRC路径跟踪性能优于MPC, 同时, SM-ADRC相比于ADRC在路径跟踪速度和精度上都有所提高; 图2(c)为不同控制器作用下的侧向位移偏差, 可以看出, SM-ADRC的跟踪误差最小, 收敛速度最快; 图2(d)为不同控制器下控制量输出, 3种控

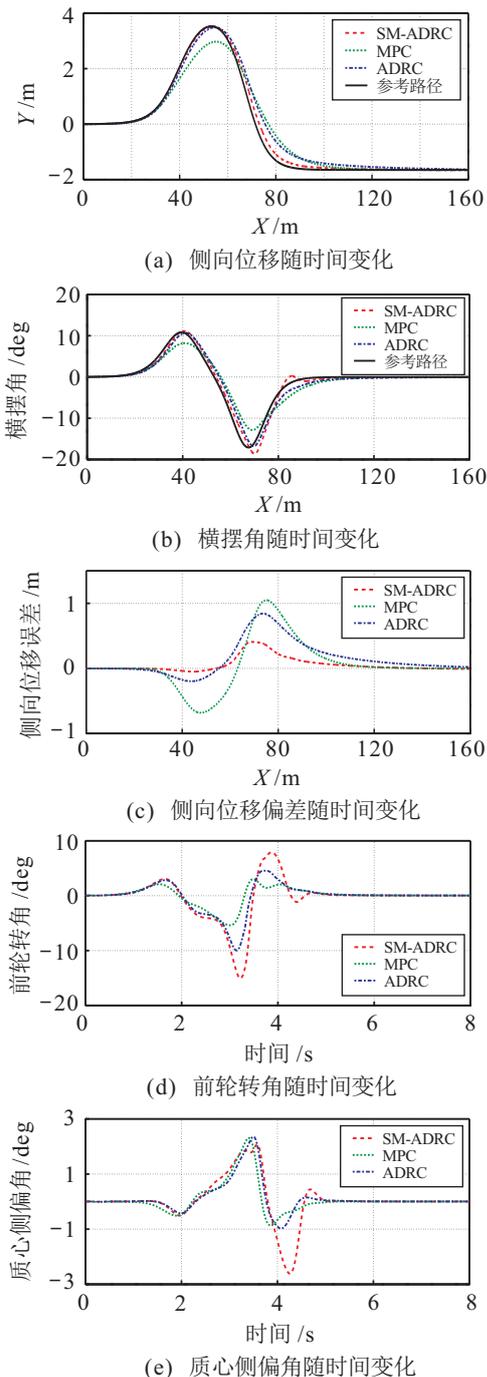


图2 不同控制器的路径跟踪仿真结果

制器的控制输出都在系统限制的范围内; 图2(e)为不同控制器下车辆质心侧偏角随时间的变化, 可以看出, 3种控制器的质心侧偏角远低于极限范围, 表明3种控制器在较好地跟踪参考路径的同时都能够保持车辆的稳定行驶. 综上分析, SM-ADRC相比于ADRC在路径跟踪精度和收敛速度上都得到显著提高, 与MPC相比不仅在控制算法上更加简单和易于工程化, 而且在路径跟踪精度上也表现得更好.

3.2 控制系统对速度的鲁棒性

本仿真工况是在不同车速下, 以相同参数的控制器实现对智能车辆的路径跟踪控制, 分析控制器对不同车速的鲁棒性. 实验仿真分别在10 m/s、20 m/s和30 m/s的纵向车速下进行, 道路附着条件良好, $\mu = 0.8$.

仿真结果如图3所示. 其中: 图3(a)和图3(b)为3种不同车速下车辆的路径跟踪效果, 可以看出, 在相同控制参数下, 不同速度行驶的车辆都具备较好的

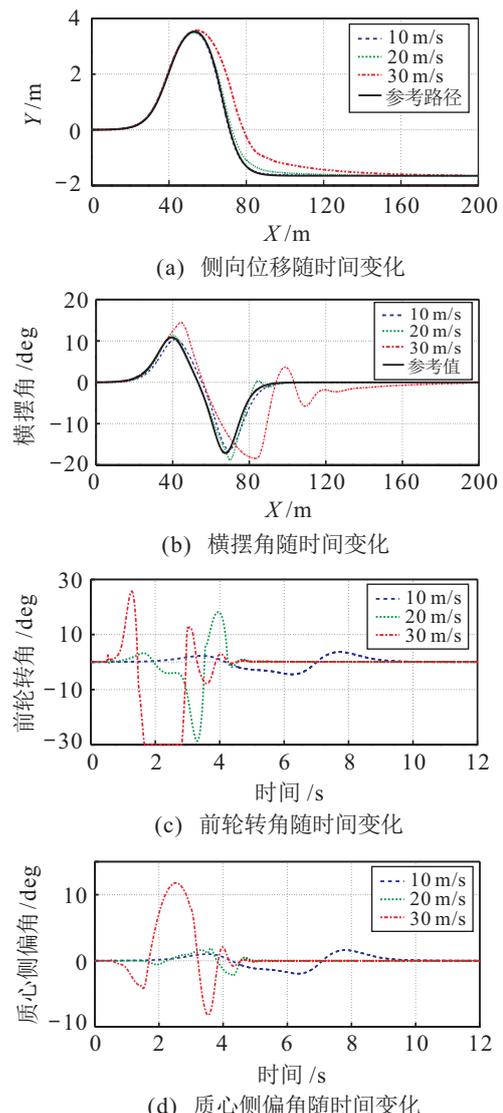


图3 车辆在不同车速下的仿真结果

路径跟踪性能,体现出控制器对速度具有很强的鲁棒性,其中车速越小,车辆的路径跟踪误差越小,跟踪性能越好;图3(c)为不同车速下控制量随时间的变化,可以看出,随着车辆速度的增加,控制量总体增大,这主要是由于随着车速的增加,车辆质心侧偏角增大,控制系统需要通过更大的控制量补偿质心侧偏角产生的路径偏差;图3(d)为不同车速下车辆质心侧偏角随时间的变化,可以看出,质心侧偏角远低于极限范围,表明车辆在路径跟踪过程中行驶平稳. 综上分析,控制器能够在不同车速下完成对参考路径的跟踪,车速的增加并不会导致车辆稳定性能的下降.

3.3 控制系统对路面附着条件的鲁棒性

本仿真工况是在不同附着条件的道路中,以相同参数的控制器实现对智能车的路径跟踪控制,分析控制器对不同路面附着条件的鲁棒性. 实验分别在正常行驶路面 $\mu = 0.8$ 和湿滑路面 $\mu = 0.4$ 两种情况进行测试,车辆的纵向速度设定为20 m/s.

仿真结果如图4所示. 其中:图4(a)和图4(b)为不同路面附着条件下车辆的路径跟踪效果,可以看出,控制器在不同附着条件的路面下都能较好地跟踪期望路径,路面附着条件良好时车辆的跟踪误差小;当路面附着条件较差时,由于地面不能提供足够的侧向力,如图4(b)所示,车辆转向时横摆角出现较大的偏差,控制器能够及时修正偏差,最终将偏差收敛为零;图4(c)为不同路面附着条件下控制量随时间的变化,当路面附着条件较差时,车辆需要较大的输出控制来补偿质心侧偏角带来的偏差才能保证车辆能够较好地跟踪参考路径;图4(d)为不同路面附着条件下车辆质心侧偏角随时间的变化,可以看出,控制器能够较好地补偿路面带来的干扰,从而将质心侧偏角限制在稳定的范围内,车辆的质心侧偏角反而比高附着路面下的最大值要小,这是控制系统大角度补偿的结果. 综上分析,控制器能够在不同路面附着条件下,较好地跟踪参考路径,并具备良好的稳定性.

4 结论

本文通过构造期望偏航角函数将系统降维,进而将复杂的路径跟踪问题简化为简单易行的偏航角跟踪控制问题,通过跟踪期望的偏航角来实现智能车参考路径的间接跟踪控制. 本文针对智能车难以精确建模且易受外部扰动影响的问题,利用自抗扰控制器中的ESO对系统的未建模动态和外部扰动实时估计和补偿,同时,为了提高系统的收敛速度和控制精度,结合指数趋近律和非奇异终端滑模来设计非线性误差反馈律. 仿真结果表明,本文所设计的控制系统兼具非奇异终端滑模和自抗扰控制的优点,算法简单,收敛速度快,路径跟踪精度高,鲁棒性强,且不依赖于精确的数学模型,具有较好的工程应用前景.

参考文献(References)

- [1] 李骏, 邱少波, 李红军, 等. 智能城市的智能汽车[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 45(5): 551-559. (Li J, Qiu S B, Li H J, et al. Smart vehicle for smart city[J]. Scientia Sinica Informationis, 2016, 45(5): 551-559.)
- [2] Hamid Gharavi, Venkatesh Prasad K, Petros Ioannou. Scanning advanced automobile technology[J]. Proc of the IEEE, 2007, 95(2): 328-333.
- [3] Akyuz I H, Yolacan E, Ertunc H M, et al. PID and state feedback control of a single-link flexible joint robot manipulator[C]. 2011 IEEE Int Conf on Mechatronics. Istanbul, 2011: 409-414.
- [4] 段建民, 杨晨, 石慧. 基于Pure Pursuit算法的智能车路径跟踪[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(9): 1301-1306. (Duan J M, Yang C, Shi H. Path tracking based on Pure

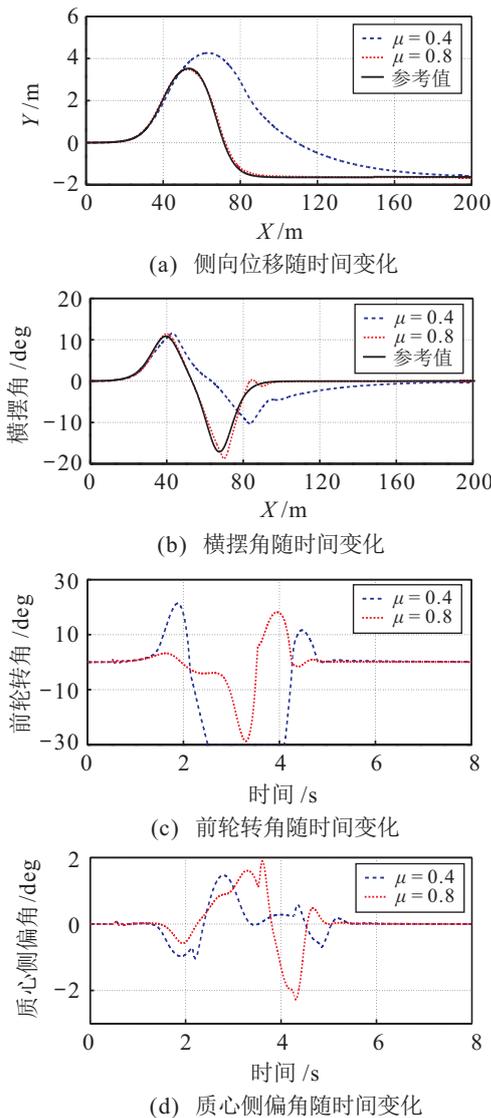


图4 车辆在不同路面附着条件下的仿真结果

- Pursuit algorithm for intelligent vehicles[J]. J of Beijing University of Technology, 2016, 42(9): 1301-1306.)
- [5] Hu Chuan, Wang Rongrong, Yan Fengjun. Integral sliding mode-based composite nonlinear feedback control for path following of four-wheel independently actuated autonomous vehicles[J]. IEEE Trans on Transportation Electrification, 2016, 2(2): 221-230.
- [6] Chen Changfang, Jia Yingmin, Shu Minglei, et al. Hierarchical adaptive path-tracking control for autonomous vehicles[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(5): 2900-2912.
- [7] Fitri Yakub, Yasuchika Mori. Autonomous ground vehicle of path following control through model predictive control with feed forward controller[C]. The 12th Int Symposium on Advanced Vehicle Control. Sappore, 2014: 1035-1040.
- [8] Huang P F, Yan J, Yuan J P, et al. Robust control of space robot for capturing objects using optimal control method[C]. Int Conf on Information Acquisition. Piscataway: IEEE, 2007: 397-402.
- [9] Soudbakhsh D, Eskandarian A. A collision avoidance steering controller using linear quadratic regulator[C]. SAE 2010 World Congress & Exhibition. Detroit: United States SAE, 2010-01-0459.
- [10] Falcon P, Borrelli F, Asgari J, et al. Predictive active steering control for autonomous vehicle system[J]. IEEE Trans of Control Systems Technology, 2007, 15(3): 566-580.
- [11] 张亮修, 吴光强, 郭晓晓. 自主车辆线性时变模型预测路径跟踪控制[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2016, 44(10): 1595-1603.
(Zhang L X, Wu G Q, Guo X X. Path tracking using linear time varying model predictive control for autonomous vehicle[J]. J of Tongji University: Natural Science, 2016, 44(10): 1595-1603.)
- [12] Jie Ji, Amir Khajepour, Wael William Melek, et al. Path planning and tracking for vehicle collision avoidance based on model predictive control with multiconstraints[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 952-964.
- [13] Soudbakhsh D, Eskandarian A. Comparison of linear and non-linear controllers for active steering of vehicles in evasive maneuvers[J]. Proc of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: J of Systems and Control Engineering, 2012, 226(12): 215-232.
- [14] Xia Yuanqing, Pu Fan, Li Shengfei, et al. Lateral path tracking control of autonomous land vehicle based on ADRC and differential flatness[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 3091-3099.
- [15] 王健, 赵又群, 杨君, 等. 避让工况下的路径跟踪线性自抗扰控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(10): 1361-1364.
(Wang J, Zhao Y Q, Yang J, et al. Design of a linear active disturbance rejection controller for collision free path planning[J]. J of Harbin Engineering University, 2015, 36(10): 1361-1364.)
- [16] 于少伟. 智能车辆自动超车控制仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(8): 2365-2368.
(Yu S W. Research on intelligent vehicle autonomous overtaking control and simulation[J]. J of System Simulation, 2009, 21(8): 2365-2368.)
- [17] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
(Han J Q. Auto-disturbances-rejection controller and its applications[J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.)
- [18] 韩京清. 自抗扰控制技术——估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 243-288.
(Han J Q. Active disturbance rejection control technique—The technique for estimating and compensating the uncertainties[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 243-288.)
- [19] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1498-1510.
(Gao Z Q. On the foundation of active disturbance rejection control[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(12): 1498-1510.)
- [20] 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: 22-35.
(Gong J W, Jiang Y, Xu W. Model predictive control for self-driving vehicles[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014: 22-35.)
- [21] Gillespie T. Fundamentals of vehicle dynamics[M]. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992: 198-208.
- [22] Moustapha Doumiati, Alessandro Correa Victorino, Ali Charara, et al. Onboard real-time estimation of vehicle lateral tire-road forces and sideslip angle[J]. IEEE/ASME Trans on Mechatronics, 2011, 16(4): 601-614.
- [23] Zhao Lin-hui, Liu Zhiyuan, Chen Hong. Design of a nonlinear observer for vehicle velocity estimation and experiments[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 664-672.
- [24] Falcon P, Eric Tseng H, Borrelli F, et al. MPC-based yaw and lateral stabilization via active front steering and braking[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(SI): 611-628.

作者简介

吴艳(1985—), 女, 助理研究员, 博士, 从事智能车的研究, E-mail: wuyan@mail.iee.ac.cn;

王丽芳(1971—), 女, 研究员, 博士生导师, 从事新能源汽车及无人驾驶技术等研究, E-mail: wlf@mail.iee.ac.cn;

李芳(1982—), 女, 副研究员, 博士, 从事智能车的研究, E-mail: lifang@mail.iee.ac.cn.

(责任编辑: 李君玲)