

控制与决策

Control and Decision

智能车辆路径跟踪控制方法

李学鋈, 汪怡平, 苏楚奇, 宫新乐, 黄晋, 赵晓敏, 张镇涛

引用本文:

李学, 汪怡平, 苏楚奇, 宫新乐, 黄晋, 赵晓敏, 张镇涛. 智能车辆路径跟踪控制方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(1): 143–150.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1592>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[航天器输入受限的鲁棒自适应姿态跟踪控制](#)

Robust adaptive attitude tracking control of spacecraft with constrained inputs

控制与决策. 2021, 36(9): 2297–2304 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0013>

[输出误差约束下四旋翼无人机预定性能反步控制](#)

Prescribed performance backstepping control for quadrotor UAV with output error constraint

控制与决策. 2021, 36(5): 1059–1068 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1249>

[基于变速趋近律的Buck型变换器抗扰动控制](#)

Disturbance rejection control of Buck converters based on variable rate reaching law

控制与决策. 2021, 36(4): 893–900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1073>

[输入受限下自主水下航行器路径跟踪的级联控制](#)

Path-following control of an AUV in cascade under input saturation

控制与决策. 2021, 36(12): 2964–2972 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0411>

[磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制](#)

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor

控制与决策. 2021, 36(6): 1449–1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

智能车辆路径跟踪控制方法

李学鋈¹, 汪怡平^{1†}, 苏楚奇¹, 宫新乐², 黄晋², 赵晓敏³, 张镇涛¹

(1. 武汉理工大学汽车工程学院, 武汉 430070; 2. 清华大学车辆与运载学院, 北京 100084;
3. 合肥工业大学汽车与交通工程学院, 合肥 230009)

摘要: 为了提高智能车辆路径跟踪控制器的可靠性和控制精度, 提出一种基于误差动力学模型的路径跟踪控制方法. 基于车辆运动学模型和动力学模型建立系统误差动力学模型, 并在此基础上推导出车辆路径跟踪控制的稳态控制律, 利用李雅普诺夫稳定性理论验证稳态控制律的正确性. 为了减小外部干扰对控制性能的影响, 提高控制器的可靠性, 进一步设计基于车辆侧向位移误差的瞬态控制律, 并利用李雅普诺夫稳定性理论验证闭环系统的稳定性. 稳态控制律和瞬态控制律构成了非线性的路径跟踪控制器. 通过与车辆路径跟踪常用的线性控制器和非线性控制器对比验证所提出控制方法的有效性, 线性控制器选用 LQR 控制器, 非线性控制器选用 Stanley 控制器. 仿真结果表明, 与 LQR 控制器相比, 所提出控制方法的路径跟踪控制精度、抗干扰性和可靠性更好. 与 Stanley 控制器相比, 所提出控制方法具有更好的路径跟踪控制精度和控制收敛速度, 且在大曲率路径跟踪过程中具有更好的可靠性.

关键词: 智能汽车; 路径跟踪; 误差动力学模型; 非线性控制器

中图分类号: U461.1 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1592

引用格式: 李学鋈, 汪怡平, 苏楚奇, 等. 智能车辆路径跟踪控制方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(1): 143-150.

Research on the path tracking control method for intelligent vehicles

LI Xue-yun¹, WANG Yi-ping^{1†}, SU Chu-qi¹, GONG Xin-le², HUANG Jin², ZHAO Xiao-min³, ZHANG Zhen-tao¹

(1. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To enhance the reliability and control accuracy of the path tracking controller of intelligent vehicles, a path tracking control method based on the vehicle error dynamics model is proposed. The system error dynamics model is established based on the vehicle kinematics model and dynamics model. On this basis, a steady-state control law for path tracking control is deduced, and its correctness is proved by the Lyapunov stability theorem. In addition, to improve the anti-interference performance and reliability of the controller, a transient control law based on the lateral displacement error is designed. Then a nonlinear path tracking controller can be constituted by the steady state control law and the transient control law. The effectiveness of the proposed control method is verified by comparing it with linear and nonlinear controllers commonly used for path tracking, and the Stanley controller is chosen as a representative of nonlinear controllers, and the LQR controller is chosen as a representative of linear controllers. The results show that compared with the LQR controller, the proposed control method has better path tracking control accuracy, anti-interference, and reliability. Compared with the Stanley controller, the path tracking control accuracy and control convergence rate of the proposed control method are better, and the reliability is higher in the process of the large curvature path tracking.

Keywords: intelligent vehicle; path tracking; error dynamics model; nonlinear controller

0 引言

智能驾驶技术可有效提高交通出行效率和车辆行驶安全, 已成为汽车技术的发展趋势. 路径跟踪控制作为自动驾驶的核心技术之一, 直接关系到车辆的

行驶安全和驾乘舒适性, 因此, 成为了自动驾驶技术的重点研究领域.

目前, 路径跟踪控制方法主要包括 3 大类: 无模型的路径跟踪控制方法、线性路径跟踪控制方法和

收稿日期: 2022-09-07; 录用日期: 2023-02-13.

基金项目: 湖北省支持企业技术创新发展项目(2021BA015); 湖北省科技重大项目(2021AAA006).

责任编辑: 陈虹.

†通讯作者. E-mail: wangiyping@whut.edu.cn.

非线性路径跟踪控制方法。

无模型的路径跟踪控制方法包括如神经网络控制^[1-2]、无模型自适应迭代学习控制^[3]、模糊控制^[4]、博弈方法^[5]、无模型自适应控制^[6-7]和强化学习^[8]等。无模型的路径跟踪控制方法是一种基于规则的方法,需要大量的实验数据作为设计依据,这为控制器的设计带来了很大的难度。

线性路径跟踪控制方法在设计过程中需要对模型进行简化和近似,降低了设计控制器的难度,减小了算力需求,因此是目前常用的控制方法,如LQR控制^[9]、 H_∞ 控制器^[10]、模型预测控制(model predictive control, MPC)^[11-12]、线性矩阵不等式方法^[13]、自抗扰控制^[14]等。

不同于线性路径跟踪控制方法,非线性路径跟踪控制方法的设计过程中不需要对模型进行过渡地线性化和简化,如Stanley控制^[15]、非线性模型预测控制(nonlinear model predictive control, NMPC)^[16-19]、滑模控制(sliding mode control, SMC)^[20-22]和反步控制^[23-24]等。Stanley控制是一种基于反馈的非线性控制方法,其参数少,易于设计。NMPC常用于处理非线性系统的控制问题,控制精度较高,且可以很好地解决耦合类的非线性控制问题,但是,采用动态反馈方法设计的NMPC状态量维度高,实时性差。SMC常用于输入和状态受约束的非线性系统以及输入受约束的非线性系统的控制,该控制方法鲁棒性好,抗干扰能力强,但是易出现高频抖振。为了解决抖振问题,需要设计更为复杂的趋近律,或将其与模糊策略和神经网络相结合^[25]。反步控制也是一种常用的非线性控制方法,常用于解决非完整约束的非线性系统的控制问题。反步控制设计过程简单,控制精度较高,但是,会随着系统阶数升高产生过参数化问题,因此,常将其与神经网络控制、模糊控制、滑模控制相结合使用。此外,一些学者还提出了其他的鲁棒控制方法。如Yu等^[26]和Yin等^[27]针对具有非匹配不确定性欠驱动系统提出了一种非线性鲁棒控制方法,该方法可处理系统不确定性,且鲁棒性好,但是,该控制器设计时需要将系统动力学方程转换为独特的二阶形式,实用性差。上述非线性控制方法均可有效地提高车辆路径跟踪控制系统的鲁棒性和抗干扰能力,保证车辆的路径跟踪性能,但是存在算法复杂、算力需求高和实时性不好等问题。

此外,目前常用的路径跟踪控制大部分以车辆状态指标作为控制状态量,如侧向位移误差、航向角误差和横摆角速度等。但是受限于当前传感技术,通过

传感器采集的参数(侧向位移、航向角和横摆角速度等)易受到干扰,部分参数无法直接获取,需要通过估计间接得到(质心侧偏角、侧向速度等)。当传感器采集的数据存在较大误差时,会导致路径跟踪的性能下降,甚至影响车辆安全。

为了提高路径跟踪算法的可靠性和控制精度,本文提出基于误差动力学模型的路径跟踪控制方法(S&T),其由稳态控制律和瞬态控制律两部分组成。首先,通过误差动力学模型推导出稳态控制律;然后,为了提高控制器的可靠性和抗干扰能力,设计瞬态控制律;最后,通过仿真验证所提出算法的有效性。仿真结果表明,所提出方法可有效地提高系统的可靠性和控制精度。

1 数学模型

1.1 车辆运动学模型

为了反映车辆在路径跟踪过程中与参考路径间的相对位置关系,建立原点位于车辆质心的局部坐标系 xoy 和惯性坐标系 XOY 。在坐标系 xoy 和 XOY 下可描述车辆的位置和方向,如图1所示。

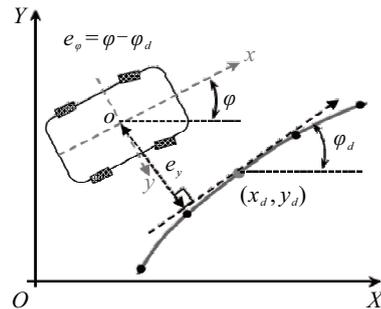


图1 车辆路径跟踪模型

图1中:车辆在跟踪目标路径点时会产生航向角误差 e_φ 和横向位置误差 e_y ,航向角误差为车辆航向角与理想航向角间的差值 $e_\varphi = \varphi - \varphi_d$,用于计算 e_φ 的期望航向角可通过目标点的坐标计算得到,侧向位移误差 e_y 根据车辆当前位置和目标位置计算得到。一般地,期望航向角速度 $\dot{\varphi}_d$ 可近似表示为期望路径曲率 ρ 与纵向速度 v_x 的乘积,即

$$\dot{\varphi}_d = v_x \rho. \quad (1)$$

e_φ 的一阶导数可表示为

$$\dot{e}_\varphi = \dot{\varphi} - v_x \rho. \quad (2)$$

车辆的横向位置误差 e_y 的一阶导数为

$$\dot{e}_y = v_y \cos e_\varphi + v_x \sin e_\varphi, \quad (3)$$

其中 v_y 为车辆的侧向速度。

路径跟踪过程中,航向角误差一般较小,考虑建模和传感器测量误差, \dot{e}_y 、 \ddot{e}_y 和 \dot{e}_φ 可简化为

$$\begin{cases} \dot{e}_y = v_y + v_x e_\varphi + d_1, \\ \ddot{e}_y = \dot{v}_y + v_x \dot{\varphi} - v_x^2 \rho + d_2, \\ \dot{e}_\varphi = \dot{\varphi} - v_x \rho + d_3. \end{cases} \quad (4)$$

其中 d_1 、 d_2 和 d_3 为数学建模和传感器测量引起的误差。

1.2 车辆动力学模型

在局部坐标系 xoy 和惯性坐标系 XOY 下, 对车辆侧向和横摆方向的受力进行分析, 如图2所示。

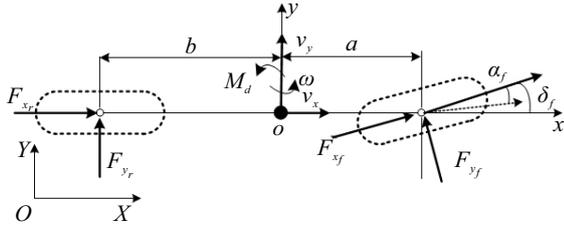


图2 2自由度车辆模型

车辆侧向和横摆方向的动力学方程可表示为

$$\begin{cases} F_{yf} \cos \delta_f + F_{yr} + F_d = m(\dot{v}_y + v_x \omega), \\ aF_{yf} \cos \delta_f - bF_{yr} + M_d = I_z \dot{\omega}. \end{cases} \quad (5)$$

其中: δ_f 为前轮转角; F_{yf} 和 F_{yr} 分别为前后轮的侧偏力; ω 为横摆角速度, 其大小与 $\dot{\varphi}$ 相近似; I_z 为绕 z 轴的转动惯量; F_d 为外部其他干扰力; M_d 为外部其他干扰力矩。

假设车辆纵向速度恒定, 忽略侧向载荷转移, 同时在前轮转角 δ_f 和轮胎侧偏角均较小的情况下, 根据魔术公式轮胎模型^[28], F_{yf} 和 F_{yr} 可简化为

$$\begin{cases} F_{yf} = C_f \alpha_f, \\ F_{yr} = C_r \alpha_r. \end{cases} \quad (6)$$

其中 C_f 和 C_r 分别为前后轮侧偏刚度。式(6)中, 前后轮侧偏角为

$$\begin{cases} \alpha_f = -\tan^{-1}\left(\frac{v_y + a\omega}{v_x}\right) + \delta_f, \\ \alpha_r = -\tan^{-1}\left(\frac{v_y - b\omega}{v_x}\right). \end{cases} \quad (7)$$

式中 a 和 b 分别为车辆质心到前、后轴的距离。将式(6)和(7)代入(4), 由于 δ_f 较小, $\cos(\delta_f) \approx 1$, 得到

$$\begin{cases} \dot{v}_y = -\frac{C_f}{m} \tan^{-1}\left(\frac{v_y + a\omega}{v_x}\right) - \frac{C_r}{m} \tan^{-1}\left(\frac{v_y - b\omega}{v_x}\right) - v_x \omega + \frac{F_d}{m} + \frac{C_f}{m} \delta_f, \\ \dot{\omega} = -\frac{aC_f}{I_z} \tan^{-1}\left(\frac{v_y + a\omega}{v_x}\right) + \frac{bC_r}{I_z} \tan^{-1}\left(\frac{v_y - b\omega}{v_x}\right) + \frac{M_d}{I_z} + \frac{aC_f}{I_z} \delta_f. \end{cases} \quad (8)$$

不考虑外部干扰, 式(8)可进一步转换为

$$\begin{cases} \dot{v}_y = -\frac{C_f}{m} \tan^{-1}\left(\frac{v_y + a\omega}{v_x}\right) - \frac{C_r}{m} \tan^{-1}\left(\frac{v_y - b\omega}{v_x}\right) - v_x \omega + \frac{C_f}{m} \delta_f, \\ \dot{\omega} = -\frac{aC_f}{I_z} \tan^{-1}\left(\frac{v_y + a\omega}{v_x}\right) + \frac{bC_r}{I_z} \tan^{-1}\left(\frac{v_y - b\omega}{v_x}\right) + \frac{aC_f}{I_z} \delta_f. \end{cases} \quad (9)$$

2 控制器设计

车辆路径跟踪的目标是使得车辆的运动轨迹与参考路径间误差为0, 因此, 由式(4)确定控制器设计目标为通过设计合理的控制律使得 e_y 快速收敛。

2.1 稳态控制

为了设计满足目标的控制律, 首先确定系统动力学方程的稳定平衡点, 用于计算系统误差动力学方程。根据车辆动力学可得到各指标的理想值^[29], 即

$$\begin{cases} v_{yd} = bv_x \rho + v_x \tan\left(\frac{-mav_x^2}{2C_r(a+b)}\rho\right), \\ \omega_d = v_x \rho, \\ \delta_{fd} = \frac{mbv_x^2}{2aC_r + 2bC_r} \rho. \end{cases} \quad (10)$$

将式(9)减去(10), 得到误差动力学模型, 有

$$\begin{cases} \dot{v}_{ye} = -\frac{C_f}{m} \tan^{-1}(\Gamma^+) - \frac{C_r}{m} \tan^{-1}(\Gamma^-) - v_x \omega_e + \frac{C_f}{m} \delta_{fe}, \\ \dot{\omega}_e = -\frac{aC_f}{I_z} \tan^{-1}(\Gamma^+) + \frac{bC_r}{I_z} \tan^{-1}(\Gamma^-) + \frac{aC_f}{I_z} \delta_{fe}, \\ \ddot{e}_y = \dot{v}_{ye} + v_x \omega_e. \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} \Gamma^+ &= \frac{v_x(v_{ye} + a\omega_e)}{v_x^2 + (v_y + a\omega)(v_{yd} + a\omega_d)}, \\ \Gamma^- &= \frac{v_x(v_{ye} - b\omega_e)}{v_x^2 + (v_y - b\omega)(v_{yd} - b\omega_d)}. \end{aligned}$$

由式(11)可见, 误差量与参考量仍然是耦合的。为了对误差量与参考量进行解耦, 定义虚拟控制律为

$$\bar{\delta}_{fe} = \delta_{fe} - \tan^{-1}(\Gamma^+). \quad (12)$$

将式(12)代入(11), 得到

$$\begin{cases} \dot{v}_{ye} = -\frac{C_r}{m} \tan^{-1}(\Gamma^-) - v_x \omega_e + \frac{C_f}{m} \bar{\delta}_{fe}, \\ \dot{\omega}_e = \frac{bC_r}{I_z} \tan^{-1}(\Gamma^-) + \frac{aC_f}{I_z} \bar{\delta}_{fe}, \\ \ddot{e}_y = \dot{v}_{ye} + v_x \omega_e. \end{cases} \quad (13)$$

结合控制器的设计目标和误差动力学方程可知,在系统平衡点 $e_y=0$ 时,系统动力学方程(9)可映射为误差动力学模型(13).当状态变量选择 v_{ye} 、 ω_{ye} , $e_y=0$ 成立时,若要使得 $\dot{e}_y=\ddot{e}_y=0$ 也成立,则必须保证下式成立:

$$-\frac{C_r}{m}\tan^{-1}(\Gamma^-) + \frac{C_f}{m}\bar{\delta}_{fe} = 0. \quad (14)$$

此时

$$\bar{\delta}_{fe} = \frac{C_r}{C_f}\tan^{-1}(\Gamma^-). \quad (15)$$

式(15)的虚拟控制律可实现式(13)降阶,得到

$$\begin{cases} \dot{v}_{ye} = -v_x\omega_e, \\ \dot{\omega}_e = \frac{(a+b)C_r}{I_z}\tan^{-1}(\Gamma^-). \end{cases} \quad (16)$$

为了验证所推导出的稳态控制律的正确性,给出如下定理.

定理1 闭环系统动力学方程(16)在平衡点处是全局渐近稳定的.

证明 选取如下李雅普诺夫函数:

$$V_1 = \frac{1}{2}o_1v_{ye}^2 + \frac{1}{2}o_2\omega_e^2, \quad (17)$$

其中 o_1 和 o_2 为两个大于0的常数.

V_1 关于时间的一阶导数为

$$\dot{V}_1 = -o_1v_{ye}v_x\omega_e + o_2\frac{(a+b)C_r}{I_z}\omega_e\tan^{-1}(\Gamma^-). \quad (18)$$

令 $\chi_1 = o_2(a+b)C_r/I_z$, $\chi_2 = (v_{ye} - b\omega_e)/v_x$, $\chi_3 = \omega_e$, $\chi_4 = (v_{yd} - b\omega_e)/v_x$, 式(18)可简化为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & -o_1bv_x\chi_3^2 + \\ & \underbrace{\chi_3\left(-o_1v_x^2\chi_2 + \chi_1\tan^{-1}\left(\frac{\chi_2}{1+\chi_4\chi_2+\chi_4^2}\right)\right)}_x. \end{aligned} \quad (19)$$

由于 $-0.5\pi \leq \tan^{-1}(\cdot) \leq 0.5\pi$, 式(19)可进一步转换为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 \leq & -o_1bv_x\chi_3^2 + \chi_3\left(-o_1v_x^2\chi_2 + \frac{\pi}{2}\chi_1\right) = \\ & -o_1bv_x\left(\chi_3 - \frac{\frac{\pi}{2}\chi_1 - o_1v_x^2\chi_2}{2o_1bv_x}\right)^2 + \\ & \frac{\left(\frac{\pi}{2}\chi_1 - o_1v_x^2\chi_2\right)^2}{4o_1bv_x}. \end{aligned} \quad (20)$$

对于式(20),通过选择合理的 o_1 和 o_2 ,使得 $2o_1bv_x\chi_3 + 3o_1v_x^2\chi_2 > 3\pi/2\chi_1$,进而使得 $\dot{V}_1 \leq 0$. \square

2.2 瞬态控制

非线性控制器设计过程中通常没有考虑参数不确定性和车辆建模过程中的约束条件,因此,抗干扰能力较弱.为了提高抗干扰能力,通常对控制器进行复合校正,如文献[29]在控制律中添加了线性反馈项来保证控制器的强鲁棒性;文献[30-31]给控制器串

联子系统,提高了控制器对参数不确定性和干扰的鲁棒性.第2.1节给出了基于误差动力学的稳态控制律,但是忽略了外部干扰和参数时变等问题,仅依靠式(15)并不能保证系统的控制性能.为了使得系统(11)可在外部干扰和参数时变等影响下快速收敛,给出以下瞬态控制律:

$$\Delta\delta_{fe} = -\frac{m}{C_f}e_y - \frac{m}{C_f}k_1\dot{e}_y. \quad (21)$$

此时,控制律为

$$\delta_f = \frac{v_x^2}{\frac{2aC_r}{mb} + \frac{2C_r}{m}}\rho + \delta_{fe} + \Delta\delta_{fe}. \quad (22)$$

为了验证所提出瞬态控制律的有效性,令 $z_1 = e_y$, $z_2 = \dot{e}_y + k_1e_y$, $k_1 > 0$,考虑以下李雅普诺夫函数:

$$V_2 = \frac{1}{2}(z_1^2 + z_2^2). \quad (23)$$

对式(23)求导,得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & z_1\dot{z}_1 + z_2\dot{z}_2 = \\ & -k_1e_y^2 + (k_1e_y + \dot{e}_y)(k_1\dot{e}_y + \ddot{e}_y + e_y) = \\ & \dot{V}_{2-1} + (k_1e_y + \dot{e}_y)\dot{V}_{2-2}. \end{aligned} \quad (24)$$

其中: $\dot{V}_{2-1} = -k_1e_y^2$, $\dot{V}_{2-2} = k_1\dot{e}_y + \ddot{e}_y + e_y + v_x\omega_e$.

由于 $k_1 > 0$, 式(24)的第1项 \dot{V}_{2-1} 始终小于或等于0. 将式(11)和(22)代入(24)的第2项,得到 $\dot{V}_{2-2} = 0$. 最终得到 $\dot{V}_2 \leq 0$, 即闭环系统是渐近稳定的.

控制律(22)由基于平衡点推导的稳态控制律和基于误差的瞬态控制律两部分组成. 稳态控制律可保证系统的稳定性和可靠性,瞬态控制律可提高系统的鲁棒性和控制精度.

3 仿真实验

为了验证所提出路径跟踪控制器的有效性,在Matlab/Simulink中搭建仿真模型,并分别在超车、S弯和螺旋路径等3个仿真场景下进行仿真. 仿真过程所用车辆参数如表1所示.

表1 仿真参数

符号	数值	单位
m	1530	kg
a	1.139	m
b	1.637	m
I_z	4607.47	kg/m ²
C_f	180000	N/rad
C_r	140000	N/rad

3.1 控制器有效性验证

为了验证所提出S&T控制方法的有效性,在超车场景下,将所提出路径跟踪控制器与常用的线性控制器和非线性控制器的路径跟踪性能进行对比. 线性控制器选用LQR控制器,其设计过程参见文献

[32]. 非线性控制器选择 Stanley 控制, 其设计过程参见文献[15].

仿真过程中, 车速为 20 m/s, k_1 取 300. 仿真结果如图 3~图 5 所示. 其中: 图 3 为车辆的行驶轨迹和误差曲线, 图 4 为横摆角速度和侧向速度曲线, 图 5 为控制器计算的前轮转角曲线.

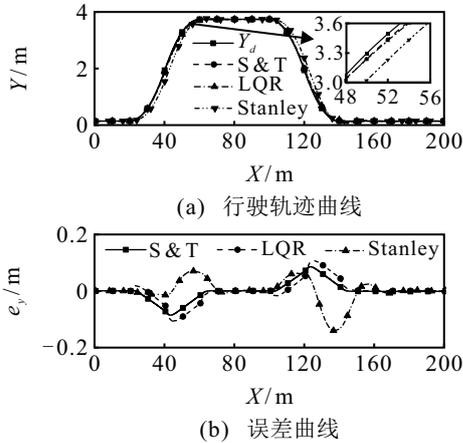


图 3 超车工况下的行驶轨迹与误差对比曲线

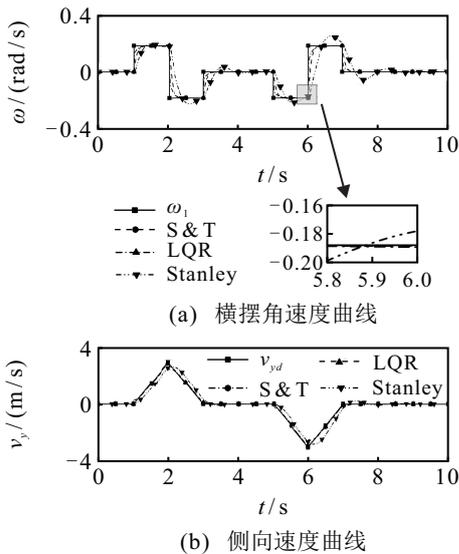


图 4 超车工况下的横摆角速度与侧向速度对比曲线

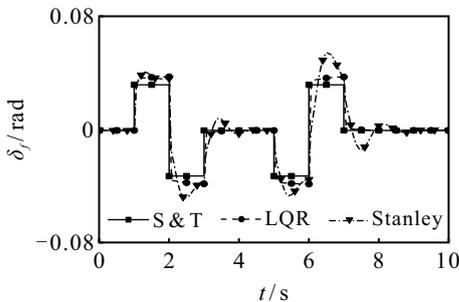


图 5 超车工况下控制器计算的前轮转角对比曲线

由图 3 可见, LQR 控制器、Stanley 控制器和所提出 S&T 控制器均可以很好地完成超车场景下的路径跟踪. LQR 控制器控制车辆时, 最大侧向位移误差为 0.11 m, 侧向位移误差的标准差(SD)为 0.03 m;

Stanley 控制器控制车辆时, 最大侧向位移误差为 0.15 m, 侧向位移误差的 SD 为 0.04 m; 所提出 S&T 控制器控制车辆时, 最大侧向位移误差为 0.09 m, 侧向位移误差的 SD 为 0.04 m. 此外, 从侧向位移对比曲线可以看出, 所提出 S&T 控制器可更快地跟踪参考路径, 所提出 S&T 控制器的路径跟踪精度和收敛速度优于 LQR 控制器和 Stanley 控制.

由图 4 可见, 所提出 S&T 控制器作用于车辆时, 横摆角度和侧向速度可以很好地跟踪理想横摆角速度和理想侧向速度, 收敛速度快. 但是相对于所提出 S&T 控制器: LQR 控制器控制过程中, 横摆角度和侧向速度存在较小幅度的波动, 且误差较大, 收敛速度慢; 而 Stanley 控制车辆时, 横摆角度和侧向速度波动较大, 且无法迅速收敛.

由图 5 可见, 在转向过程中, LQR 控制器和 Stanley 控制器计算的前轮转角要大于所提出 S&T 控制器, 在曲率恒定的过程中, 转角大小出现逐渐增大的现象, 且 Stanley 控制器计算出的前轮转角无法迅速收敛, 收敛过程存在小幅震荡. 综合以上分析结果不难看出, 相比于 LQR 控制器和 Stanley 控制器, 所设计 S&T 控制器具备更好的路径跟踪精度, 收敛速度快, 且在提高路径跟踪精度的同时可保证车辆的侧向稳定性

3.2 控制器抗干扰特性验证

侧向速度和横摆角速度是路径跟踪控制器的关键特征量, 其在实际应用中主要通过其他参数估计得到. 受传感器硬件和关联算法的限制, 估计得到的侧向速度和横摆角速度的精度有限, 传感器噪声很难完全消除, 这会直接影响路径跟踪的精度. 为了验证所提出 S&T 控制器的抗干扰特性, 对侧向速度和横摆角速度添加功率为 0.01 的白噪声信号模拟传感器噪声. 仿真过程中, 车速为 20 m/s. 仿真结果如图 6~图

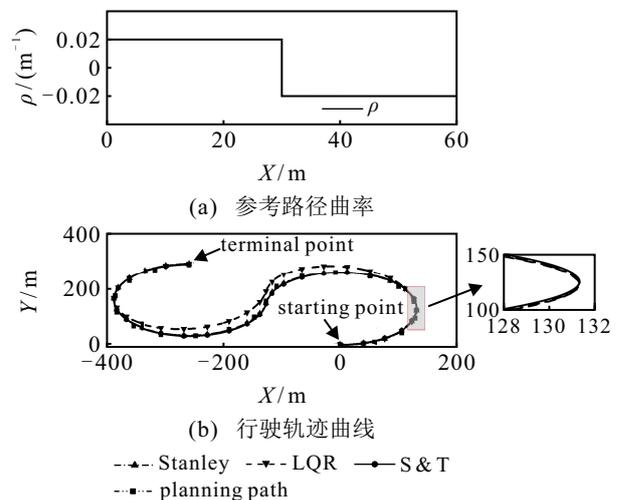


图 6 S 弯工况下的参考路径曲率与行驶轨迹曲线

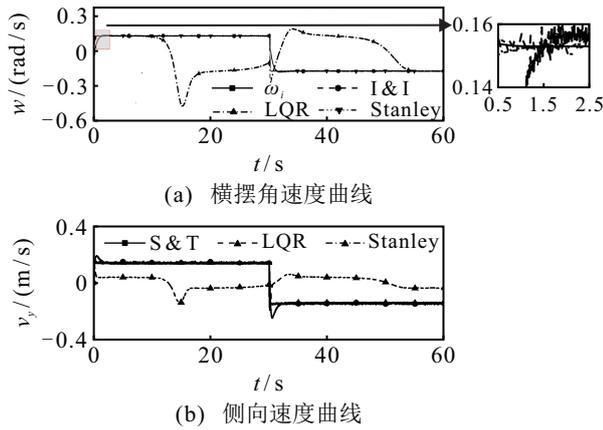


图7 S弯工况下的横摆角速度与侧向速度对比曲线

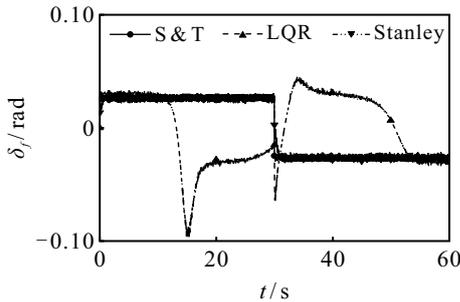


图8 S弯工况下控制器计算的前轮转角对比曲线

8所示. 其中:图6为参考路径曲率和车辆行驶轨迹曲线,图7为横摆角速度和侧向速度对比曲线,图8为控制器计算得到的前轮转角对比曲线.

图6给出了车辆的行驶轨迹曲线,由图6可见,LQR控制器控制时,在噪声的作用下车辆很难高精度控制参考路径,而所提出S&T控制器和Stanley控制器可以很好地跟踪参考路径.

图7给出了LQR控制器、Stanley控制器与所提出S&T控制器控制车辆时,横摆角速度和侧向速度对比曲线.通过对比曲线可以看出:所提出S&T控制器和Stanley控制器控制车辆时,横摆角速度和侧向速度几乎不受噪声干扰的影响,横摆角速度曲线与理想横摆角速度曲线保持高度一致;相反,LQR控制器控制车辆时,由于噪声干扰的影响,横摆角速度与理想横摆角速度曲线无法保持一致,峰值比所提出S&T控制器大.

由图8可见:尽管受到噪声影响,但是所提出S&T控制器和Stanley控制器的输出转角的波动幅度小;而LQR控制器受到噪声影响,且存在一定的响应滞后,从而导致前轮转角发生较大变化,最终导致路径跟踪的性能受到影响.

综合以上分析结果可以看出,所提出S&T控制器和Stanley控制器均属于非线性控制器,其控制律除了与侧向速度和横摆角速度相关,还与车辆的侧向位移误差、路径曲率以及横摆角速度误差等相关,可

极大程度地减小外部干扰对控制输出的影响.

3.3 控制器可靠性验证

控制器的可靠性是保证车辆安全的关键性能.本文通过模拟控制器无法得到完整的侧向速度或横摆角速度信号,验证控制器的可靠性.在横摆角速度反馈回路中添加增益信号 k_f (当 $20 \leq t \leq 30$ 时, $k_f = 0$,否则, $k_f = 1$),模拟传感器局部失效.仿真过程中,车速为20 m/s,仿真结果如图9~图11所示.其中:图9为路径曲率和车辆运行路径曲线,图10为横摆角速度和侧向速度对比曲线,图11为控制器输出

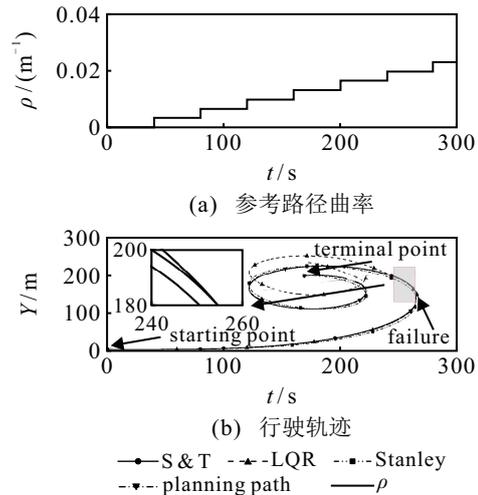


图9 螺旋线工况下的参考路径曲率与行驶轨迹

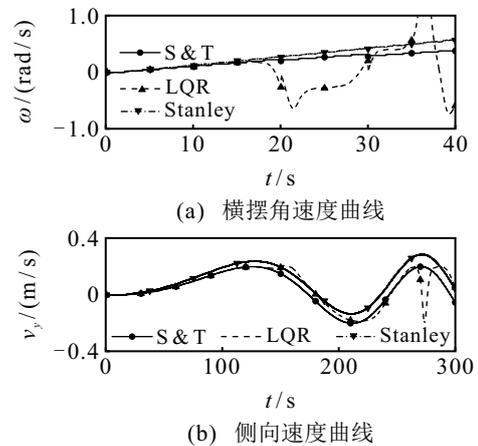


图10 螺旋线工况下的横摆角速度与侧向速度对比曲线

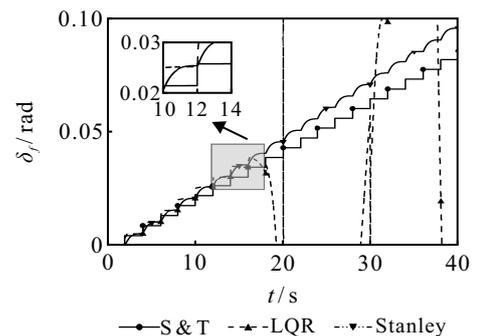


图11 螺旋线工况下控制器计算的前轮转角对比曲线

的前轮转角对比曲线。

由图9可见:LQR控制器控制车辆时,在传感器失效前,车辆可以很好地跟踪预定参考路径;控制器失效后,车辆无法跟踪参考路径,出现转向不足的问题,这是因为LQR的输出量与侧向速度和横摆角速度直接相关。Stanley控制器控制车辆时,在传感器失效后的一段时间内,车辆仍然可以很好地跟踪参考路径;随着路径曲率的变大,Stanley控制器无法仅依靠简单的增益反馈完成大曲率路径跟踪。相反,即使在控制器失效的情况下,所提出S&T控制器仍然可以很好地跟踪参考路径,这是因为所提出S&T控制器包括两部分,包含路径曲率的稳态控制律和以 e_y 为输入的瞬态控制律,受到控制器失效的影响较小,在控制器失效的情况下仍然可实现路径跟踪控制。

图10给出了LQR控制器、Stanley控制器与所提出S&T控制器控制车辆时的横摆角速度与侧向速度对比曲线。通过对比曲线可以看出:所提出S&T控制器控制车辆时,横摆角速度和侧向速度几乎不受传感器失效的影响;Stanley控制器在路径曲率较小时,横摆角速度和侧向速度受传感器失效影响很小,但是随着曲率变大,影响会越来越大;相反,LQR控制器控制车辆时,由于传感器失效的影响,横摆角速度在传感器失效后无法收敛,侧向速度也处于非稳定状态。图11进一步表明所提出S&T控制器几乎不受传感器失效影响,具备更好的可靠性。

4 结论

为了提高路径跟踪算法的控制精度、可靠性和抗干扰性,本文提出了一种基于误差动力学模型的路径跟踪控制器,其由稳态控制律和瞬态控制律两部分组成,并通过仿真验证了该方法的有效性。仿真结果表明:1)所设计控制器控制精度高,收敛速度快。与LQR控制器相比,所设计控制器在超车场景下的最大侧向位移误差下降了18.18%;与Stanley控制器相比,所设计控制器最大侧向位移误差下降了40%,且可以更快地跟踪参考路径。2)所设计控制器具备较好的抗干扰能力。与LQR控制器相比,所设计控制器在横摆角速度传感器存在噪声干扰的情况下,仍然可以很好地跟踪S形路径。3)所设计控制器具有良好的可靠性。与LQR控制器和Stanley控制器相比,所设计控制器可在横摆角速度信号故障的情况下准确地跟踪参考不同曲率的路径,保证车辆安全。

所提出控制器是在车辆纵向速度保持不变或变化较小的前提条件下推导得出的,其对于时变车速和车辆参数不确定的鲁棒性有待进一步研究。此外,尽管所设计控制器的有效性在3种典型的场景中得到了验证,但是在真实场景下的适用性需进一步验证。

参考文献(References)

- [1] Wang H B, Hu C L, Zhou J T, et al. Path tracking control of an autonomous vehicle with model-free adaptive dynamic programming and RBF neural network disturbance compensation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers—Part D: Journal of Automobile Engineering, 2022, 236(5): 825-841.
- [2] Spielberg N A, Brown M, Kapania N R, et al. Neural network vehicle models for high-performance automated driving[J]. Science Robotics, 2019, 4(28): 1-13.
- [3] 姚文龙, 庞震, 池荣虎, 等. 环卫车辆轨迹跟踪系统的无模型自适应迭代学习控制[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(1): 101-108.
(Yao W L, Pang Z, Chi R H, et al. Track tracking control of sanitation vehicle based on model-free adaptive iterative learning control[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(1): 101-108.)
- [4] Wan N, Zeng G P, Zhang C G, et al. Multi-layer controller with state-constraint: Vehicle lateral stability control based on fuzzy logic[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers—Part D: Journal of Automobile Engineering, 2022, 236(1): 155-167.
- [5] Hu Z Y, Huang J, Yang Z Y, et al. Cooperative-game-theoretic optimal robust path tracking control for autonomous vehicles[J]. Journal of Vibration and Control, 2022, 28(5/6): 520-535.
- [6] Wang Z J, Zhou X Y, Wang J M. Extremum-seeking-based adaptive model-free control and its application to automated vehicle path tracking[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(5): 3874-3884.
- [7] Jiang Y, Xu X J, Zhang L, et al. Model free predictive path tracking control of variable-configuration unmanned ground vehicle[J]. ISA Transactions, 2022, 129: 485-494.
- [8] Duan K R, Fong S, Chen C L P. Reinforcement learning based model-free optimized trajectory tracking strategy design for an AUV[J]. Neurocomputing, 2022, 469: 289-297.
- [9] Sun X Q, Wang Y L, Hu W W, et al. Path tracking control strategy for the intelligent vehicle considering tire nonlinear cornering characteristics in the PWA form[J]. Journal of the Franklin Institute, 2022, 359(6): 2487-2513.
- [10] 董晴, 季学武, 刘玉龙, 等. 基于LPV/ H_∞ 鲁棒控制的重型商用车自动循迹[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2022, 62(3): 438-446.
(Dong Q, Ji X W, Liu Y L, et al. Robust LPV/ H_∞ control for automatic path tracking of heavy commercial vehicles[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2022, 62(3): 438-446.)
- [11] 张睿, 谢正超, 赵晶, 等. 基于非线性预测和沿轨迹线性化MPC的车辆路径跟踪控制方法[J]. 汽车技术, 2022(3): 28-34.
(Zhang R, Xie Z C, Zhao J, et al. Vehicle path following control method based on MPC-NPLT[J]. Automobile

- Technology, 2022(3): 28-34.)
- [12] Lin F, Chen Y K, Zhao Y Q, et al. Path tracking of autonomous vehicle based on adaptive model predictive control[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(5): 172988141988008.
- [13] 吴海东, 司振立. 基于线性矩阵不等式的智能车轨迹跟踪控制[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2020, 54(1): 110-117.
(Wu H D, Si Z L. Intelligent vehicle trajectory tracking control based on linear matrix inequality[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2020, 54(1): 110-117.)
- [14] 赵又群, 王健, 季学武, 等. 紧急避让路径跟踪自抗扰控制[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(8): 1200-1204.
(Zhao Y Q, Wang J, Ji X W, et al. Path tracking for evasive collision avoidance based on active disturbance rejection control[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(8): 1200-1204.)
- [15] Zakaria M A, Zamzuri H, Mazlan S A, et al. Vehicle path tracking using future prediction steering control[J]. Procedia Engineering, 2012, 41: 473-479.
- [16] Sánchez I, D'Jorge A, Raffo G V, et al. Nonlinear model predictive path following controller with obstacle avoidance[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021, 102(1): 16.
- [17] Cheng S, Li L, Chen X, et al. Model-predictive-control-based path tracking controller of autonomous vehicle considering parametric uncertainties and velocity-varying[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(9): 8698-8707.
- [18] Yu S Y, Li X, Chen H, et al. Nonlinear model predictive control for path following problems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2015, 25(8): 1168-1182.
- [19] Song R T, Ye Z X, Wang L Y, et al. Autonomous wheel loader trajectory tracking control using LPV-MPC[C]. American Control Conference. Atlanta, 2022: 2063-2069.
- [20] 李磊, 李军, 张世义. 搭载改进滑模控制的自动驾驶汽车轨迹跟踪控制[J]. 汽车安全与节能学报, 2020, 11(4): 503-510.
(Li L, Li J, Zhang S Y. Trajectory tracking control of autonomous vehicles with optimized sliding mode control[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2020, 11(4): 503-510.)
- [21] Yin C Q, Wang S R, Li X W, et al. Trajectory tracking based on adaptive sliding mode control for agricultural tractor[J]. IEEE Access, 2020, 8: 113021-113029.
- [22] Park B S, Yoo S J, Park J B, et al. Adaptive neural sliding mode control of nonholonomic wheeled mobile robots with model uncertainty[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(1): 207-214.
- [23] Binh N T, Tung N A, Nam D P, et al. An adaptive backstepping trajectory tracking control of a tractor trailer wheeled mobile robot[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2019, 17(2): 465-473.
- [24] Wang S X, Bao X F, Zhang S H, et al. Trajectory tracking control of wheeled mobile robots using backstepping[C]. International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Newcastle, 2019: 289-300.
- [25] Hwang C L, Yang C C, Hung J Y. Path tracking of an autonomous ground vehicle with different payloads by hierarchical improved fuzzy dynamic sliding-mode control[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(2): 899-914.
- [26] Yu R R, Ding S H, Tian H Q, et al. A hierarchical constraint approach for dynamic modeling and trajectory tracking control of a mobile robot[J]. Journal of Vibration and Control, 2022, 28(5/6): 564-576.
- [27] Yin H, Chen Y-H, Huang J, et al. Tackling mismatched uncertainty in robust constraint-following control of underactuated systems[J]. Information Sciences, 2020, 520: 337-352.
- [28] Pacejka H B, Besselink I J M. Magic formula tyre model with transient properties[J]. Vehicle System Dynamics, 1997, 27(sup001): 234-249.
- [29] Talj R, Tagne G, Charara A. Immersion and invariance control for lateral dynamics of autonomous vehicles, with experimental validation[C]. European Control Conference. Zurich, 2013: 968-973.
- [30] Satouri M R, Marashian A, Razminia A. Trajectory tracking of an autonomous vehicle using immersion and invariance control[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(17): 8969-8992.
- [31] Tagne G, Talj R, Charara A. Design and comparison of robust nonlinear controllers for the lateral dynamics of intelligent vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(3): 796-809.
- [32] Hu J, Zhong X K, Chen R N, et al. Path tracking control of intelligent vehicles based on fuzzy LQR[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(1): 17-25.

作者简介

李学鋆(1991—), 男, 博士生, 从事车辆智能控制与决策的研究, E-mail: leexueyun@126.com;

汪怡平(1957—), 男, 教授, 博士, 从事车辆动力学和车系动力系统研究, E-mail: wangyiping@whut.edu.cn;

苏楚奇(1979—), 男, 教授, 博士, 从事汽车动力学及其控制、车辆系统分析与设计等研究, E-mail: suchuqi@163.com;

宫新乐(1981—), 男, 助理研究员, 博士后, 从事自动驾驶车辆控制、多车协同控制等研究, E-mail: xinlegong@gmail.com;

黄晋(1991—), 男, 副研究员, 博士生, 从事自动驾驶车辆控制与决策等研究, E-mail: huangjin@tsinghua.edu.cn;

赵晓敏(1957—), 女, 副教授, 博士, 从事多车协同控制、智能群体控制等研究, E-mail: zhaoxiaomin@hfut.edu.cn;

张镇涛(1979—), 男, 硕士生, 从事车辆动力学控制的研究, E-mail: 15869594693@139.com.