

考虑参数不确定性的无人车预设性能路径跟踪控制

王泰琪, 肖润谋, 王畅, 张新锋

(长安大学汽车学院, 西安 710064)

摘要: 为保证无人车在参数不确定性影响下的路径跟踪具有预设控制精度, 提出一种具有预设跟踪误差性能的路径跟踪输出反馈控制方法。根据横向预瞄偏差建立了路径跟踪二阶误差积分系统, 在考虑轮胎侧偏刚度参数扰动及车辆横向速度未知的情况下, 利用扩张状态方法建立了含有复合未知项的控制模型, 再通过设计线性扩张状态观测器对系统未知状态和模型不确定项进行估计, 并进一步证明了观测误差的一致有界收敛性。针对无人车路径跟踪瞬态和稳态性能无法满足预设精度的问题, 结合观测器估计值提出了一种具有预设性能的路径跟踪输出反馈控制器, 并根据Lyapunov理论对闭环系统稳定性进行了严格证明。Matlab/Simulink仿真结果表明, 所设计的控制策略能保证车辆以预设控制性能跟踪上期望路径, 进一步在硬件在环仿真试验台上进行验证, 结果表明所设计方案能严格保证横向跟踪偏差位于安全边界之内并具有较强的鲁棒性。

关键词: 无人车; 路径跟踪; 预设性能; 模型不确定性

中图分类号: U461.1 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.02.03

Prescribed Performance Path Following for Self-Driving Vehicles Considering Parametric Uncertainties

WANG Taiqi, XIAO Runmou, WANG Chang, ZHANG Xinfeng

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To ensure path tracking control precision in self-driving vehicles with uncertain parameters, the paper proposes an output-feedback control method with the prescribed control performance criteria. Firstly, by constructing the lateral offset error at the driver's preview point, a second-order error integration system is established. Considering the unknown lateral velocity and perturbation in the tire cornering stiffness, a control model containing lumped unknown states is established by using the extended state method. The unknown states of the system are obtained by designing a linear extended state observer and the uniformly bounded convergence of the observation error is further proved. Then, to address the issue that the transient and steady-state performance of vehicles cannot meet the predefined accuracies, an output feedback path following controller with prescribed performance is proposed, incorporating observer estimations. The stability of the closed-loop system is rigorously proved based on the Lyapunov theory. Finally, Matlab/

收稿日期: 2023-01-13 改稿日期: 2023-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879049); 陕西省重点研发计划项目(2022GY-303); 陕西省自然科学基金研究计划项目(2024JC-YBQN-0452)

参考文献引用格式:

王泰琪, 肖润谋, 王畅, 等. 考虑参数不确定性的无人车预设性能路径跟踪控制[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(2): 181-192.

WANG Taiqi, XIAO Runmou, WANG Chang, et al. Prescribed Performance Path Following for Self-Driving Vehicles Considering Parametric Uncertainties[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(2): 181-192. (in Chinese)



Simulink simulation results show that the designed control strategy effectively tracks the reference path with the desired accuracy. Moreover, the proposed control method is further verified via the hardware-in-the-loop experiment and the results show that the lateral tracking errors are consistently maintained within the predefined safety range with strong robustness.

Keywords: self-driving vehicles; path following; prescribed performance; model uncertainties

近年来,随着交通拥堵和交通安全等问题的日益凸显,无人驾驶技术已得到相关学者的广泛关注,并成为当前智能交通系统的研究热点。路径跟踪控制是无人车实现自动驾驶的关键技术之一,其通过输入前轮转角控制车辆沿规划路径行驶。提高车辆路径跟踪控制精度,尤其是横向偏移误差,可以有效降低交通事故率,提升行驶安全性和交通效率^[1]。因此,应尽可能保证无人车与期望路径的偏差位于安全区域内。然而,由于实际道路条件的复杂性、车辆建模的不精确性和强非线性以及车辆部分状态信息未知等,使无人车路径跟踪控制仍面临技术挑战。

现有路径跟踪控制算法包括 PID 控制^[2-3]、线性二次型调节器(LQR)控制^[4-5]、模型预测控制(MPC)^[5-6]等。PID 路径跟踪控制器设计时无需车辆数学模型精确已知,但在控制过程中难以适应车辆运动参数变化,对外界环境干扰的鲁棒性较差,针对车辆多变量、强耦合这一时变系统,路径跟踪精度无法有效保证。基于 LQR 或 MPC 的路径跟踪控制算法依据所建立的车辆模型,能兼顾车辆多目标优化和状态约束条件实现最优控制目标。然而,在实际行驶过程中,尤其是在极限工况下,由于侧滑效应及轮胎侧偏特性,车辆模型具有高度非线性和不确定性而存在建模误差,从而造成最优控制算法在复杂路况场景中存在稳态误差局限性^[7]。为了有效处理由于模型参数摄动及外界干扰造成路径跟踪控制性能恶化的问题,相关学者提出了诸多抗扰动路径跟踪控制算法。例如,张守武等^[8]在考虑轮胎侧偏、车辆侧滑及外界干扰的情况下,设计了基于滑模控制的路径跟踪控制器,使系统具有较强鲁棒性。WU Yan 等^[9]为了保证受扰动车辆路径跟

踪误差在有限时间内快速收敛至 0,提出了一种基于非奇异终端滑模的路径跟踪控制器。此外,由于很难使用统一的轮胎力模型来描述车辆轮胎非线性动态特性。虽然一些半经验轮胎模型^[10-11]对轮胎力识别有较高精度,但变量间的严重非线性依赖关系给路径跟踪控制器稳定性分析造成了困难。因此,在将轮胎模型进行小侧偏角下近似线性化处理时,当车辆处于较大的横向加速度或轮胎侧偏角状态下,轮胎非线性动态特性会导致固定的侧偏刚度值出现模型参数摄动,从而造成所计算的轮胎力结果不再精确^[12]。为此,BAFFET 等^[13]针对轮胎力及侧滑角在车辆行驶过程中难以准确获取的问题,设计了自适应观测器实现对轮胎侧向力和侧滑角的快速估计。ZHANG Changzhu 等^[14]进一步针对车身质量、转动惯量和轮胎侧偏刚度等参数不确定性问题,设计了基于模糊观测器的路径跟踪控制算法,改善了不确定性参数下的路径跟踪控制效果。但模糊控制规则很大程度上依赖于技术经验,在实际应用中存在一定的局限性。

尽管上述研究改善了不确定性参数下的车辆路径跟踪控制性能,但由于模型参数变化对车辆路径跟踪瞬态和稳态控制精度具有较大影响,使上述结果无法从理论上严格保证横向位移偏差位于预设安全范围之内。尽管也可以通过增大控制增益以调节横向控制精度,但同时建模误差和测量噪声等也会被进一步放大,造成横向控制瞬态性能降低,严重时甚至会导致系统失稳。因此,本文针对无人车路径跟踪时存在模型参数不确定性及横向偏移误差安全约束问题,提出一种基于预设性能的鲁棒非线性输出反馈控制策略。基于预设性能的控制方法可以兼顾路径跟踪控制系统的瞬态和稳态控制性能,通

过保证跟踪误差始终位于预设性能函数边界之内，从而可以获得较快的收敛速率、较小的系统超调量和较高的稳态跟踪精度。高振宇等^[15]利用预设性能控制方法为网联车辆队列设计了纵向跟踪控制器，有效提升了系统收敛速度和跟踪精度。郭戈等^[16]为网联车辆设计了具有预设瞬稳态的编队控制策略，可以保证编队跟踪误差在有限时间内收敛至预设区域内。

在车辆路径跟踪控制过程中，预设性能控制策略可以保证车辆横向偏移跟踪误差始终位于预设性能函数边界之内，从而可以获得较快的收敛速度和预设稳态误差，有效避免车辆横向位移偏差出现较大超调量而造成的碰撞事故发生，并且较快的收敛速率可以显著增加路径跟踪的响应速度，提升车辆路径跟踪控制系统性能。但目前多数研究仅考虑车辆横向速度可以准确反馈获得，而忽视了车辆横向速度难以以低成本、高可靠性进行准确测量的问题^[17-19]。因此，本文首先通过建立路径跟踪二阶误差积分模型，将车辆模型参数不确定性和横向速度未知项视为复合扰动项，并通过设计线性扩张状态观测器实现对系统复合扰动的准确估计。基于所观测信息值，为了严格保证横向预瞄误差位于安全边界之内并具有预设瞬态和稳态跟踪性能，通过设计安全边界函数并利用反步控制法，提出了具有预设跟踪误差性能的输出反馈控制器，结合对复合扰动的实时补偿，该方法不仅有效保证了不确定性参数下的车辆路径跟踪横向安全性，而且对模型参数摄动及道路曲率的变化具有较强鲁棒性。通过 Matlab/Simulink 仿真平台分别进行了环岛弯道低速工况和双移线高速工况仿真验证，并进一步在硬件在环仿真试验台上进行验证，结果表明了所提方法的正确性和有效性。

1 无人车路径跟踪控制模型

1.1 车辆动力学模型

假设车辆在平坦路面行驶且同轴车轮侧偏刚度

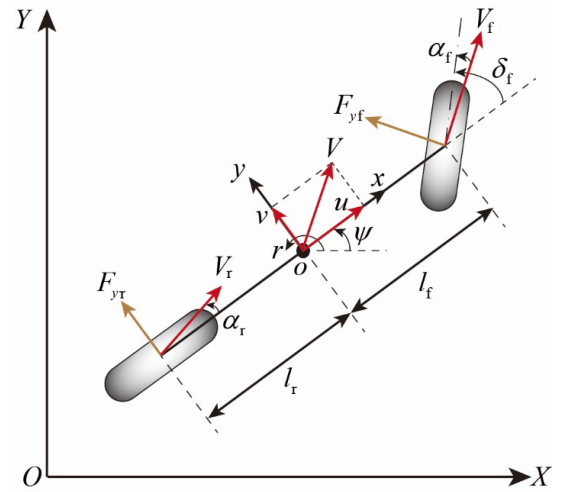


图 1 车辆模型

和转向角相同的情况下，可采用如图 1 所示的二自由度单轨车辆模型来描述车辆运动，则车辆侧向和横摆动力学模型可描述为：

$$\begin{cases} m\dot{v} = -mur + F_{yf} + F_{yr}, \\ I_z\dot{r} = l_r F_{yf} - l_f F_{yr}. \end{cases} \quad (1)$$

式中： m 为车辆的质量； I_z 为车辆绕 z 轴的转动惯量； u 、 v 和 r 分别为车体坐标系下的纵向、横向线速度以及横摆角速度； l_f 、 l_r 分别为车辆质心距前、后轴的距离； F_{yf} 、 F_{yr} 分别为车辆前、后轮胎所受侧向力合力； δ_f 为等效前轮转角。

由于车辆轮胎动力学性能复杂，为方便计算，假设车辆轮胎侧偏角较小，则前、后轮胎侧向力满足：

$$F_{yf} = 2C_f \left(\delta_f - \frac{v + l_f r}{u} \right), \quad F_{yr} = 2C_r \left(-\frac{v - l_r r}{u} \right). \quad (2)$$

式中： C_f 、 C_r 分别表示车辆前、后轮胎的侧偏刚度。

联立式 (1) 和式 (2) 得到车辆动力学模型为：

$$\begin{cases} \dot{v} = -\frac{2C_f + 2C_r}{mu} v - \left(u + \frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{mu} \right) r + \frac{2C_f}{m} \delta_f, \\ \dot{r} = -\frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{I_z u} v - \frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{I_z u} r + \frac{2l_f C_f}{I_z} \delta_f. \end{cases} \quad (3)$$

1.2 路径跟踪模型

无人车跟踪参考路径如图 2 所示。车辆质心到

参考路径的最短距离为横向偏差 e_y ；车辆航向角为 ψ ；参考路径航向角为 ψ_d 。无人车的预瞄距离为 l_p ；车辆横向预瞄误差为 e_{yL} 。

车辆航向角跟踪误差定义为： $e_\psi = \psi - \psi_d$ ，对航向角跟踪误差采取小角度假设，并假定车辆沿车体坐标系的纵向速度 u 保持恒定，则车辆跟踪误差动态方程为：

$$\begin{cases} \dot{e}_y = ue_\psi + v, \\ \dot{e}_\psi = r - \kappa u. \end{cases} \quad (4)$$

式中： κ 为参考路径的曲率。

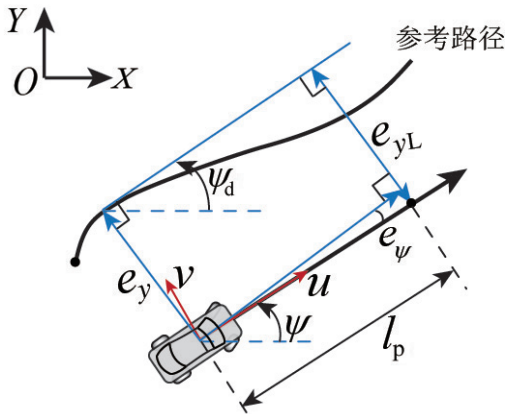


图2 车辆路径跟踪

对式 (4) 进一步求导，联立式 (3) 可得^[20]：

$$\begin{cases} \ddot{e}_y = -\frac{2C_f + 2C_r}{mu} \dot{e}_y + \frac{2C_f + 2C_r}{m} e_\psi \\ \quad + \frac{-2C_f l_f + 2C_r l_r}{mu} \dot{e}_\psi + \frac{2C_f}{m} \delta_f \\ \quad - \left(\frac{2C_r l_f - 2C_f l_r}{mu} + u \right) \dot{\psi}_d, \\ \ddot{e}_\psi = -\frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{I_z u} \dot{e}_y + \frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{I_z} e_\psi \\ \quad - \frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{I_z u} \dot{e}_\psi + \frac{2C_f l_f}{I_z} \delta_f \\ \quad - \frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{I_z} \kappa - u \dot{\kappa}. \end{cases} \quad (5)$$

定义车辆横向预瞄误差变量 $x_1 = e_{yL}$ ，则根据图 2 有： $x_1 = e_y + l_p e_\psi$ 。令 $x_2 = \dot{e}_y + l_p \dot{e}_\psi$ ，可得路径跟踪二阶误差积分系统如下：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = A_1 v + A_2 r + B_1 \delta_f + \Delta \omega, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (6)$$

式中：

$$\begin{aligned} A_1 &= -\left(\frac{2C_f + 2C_r}{mu} + \frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{I_z u} \right); \\ A_2 &= \frac{-2C_f l_f + 2C_r l_r}{mu} - \frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{I_z u} l_p; \\ B_1 &= \frac{2C_f}{m} + \frac{2C_f l_f l_p}{I_z}; \\ \Delta \omega &= -u^2 \kappa - l_p u \dot{\kappa}. \end{aligned}$$

由于轮胎侧偏刚度会随着行驶工况、垂向载荷等变化而出现参数摄动，从而造成基于模型的控制性能降低，严重时甚至会造成系统不稳定。考虑模型参数不确定性有：

$$C_f = C_{f0} + \Delta C_f, \quad C_r = C_{r0} + \Delta C_r. \quad (7)$$

式中： C_{f0} 和 C_{r0} 为前、后轮胎侧偏刚度标称值； ΔC_f 和 ΔC_r 为对应的不确定性参数并满足 $|\Delta C_i| \leq C_{i0}$ ， $i = f, r$ 。因此，在式 (6) 中有：

$$\begin{aligned} A_1 &= A_{10} + \Delta A_1, \quad A_2 = A_{20} + \Delta A_2, \\ B_1 &= B_{10} + \Delta B_1. \end{aligned} \quad (8)$$

式中： A_{i0} 、 B_{j0} 为模型参数 A_i 和 B_j 的标称值。

综合考虑式 (6) 中 A_i 、 B_j ， $i = 1, 2, j = 1$ 的模型参数不确定性和道路曲率 κ 变化的影响，建立含有未知不确定性的路径跟踪误差模型，如式 (9) 所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = A_{20} r + B_{10} \delta_f + g(v) + f(t), \\ y = x_1. \end{cases} \quad (9)$$

式中： $g(v) = A_{10} v$ ； $f(t)$ 为系统复合干扰，有

$$f(t) = \Delta A_1 v + \Delta A_2 r + \Delta B_1 \delta_f + \Delta \omega. \quad (10)$$

本文的控制目标是针对含有模型参数不确定性的无人车路径跟踪模型式 (9)，在车辆横向速度信息未知条件下，通过所设计路径跟踪控制算法，保证车辆能以预设瞬态和稳态跟踪精度准确跟踪上期望轨迹，同时对模型不确定性具有较强鲁棒性。

2 控制方案设计

2.1 扩张状态观测器设计

在式 (9) 中， $g(v)$ 包含车辆未知横向速度， $f(t)$ 为模型不确定项，因此，系统扩张状态变量可定义为： $x_3 = g(v) + f(t)$ 。

令 $X = [x_1, x_2, x_3]^T$ ，式 (9) 可扩展为：

$$\dot{X} = AX + B\delta_f + E. \quad (11)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_{10} \\ 0 \end{bmatrix}; E = \begin{bmatrix} 0 \\ A_{20}r \\ \zeta(t) \end{bmatrix},$$

其中, $\zeta(t) \in R$ 为 x_3 的时间变化率。

针对式 (11) 设计线性扩张状态观测器, 如式 (12) 所示。

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 - 3\omega_0 e_1, \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3 - 3\omega_0^2 e_1 + A_{20}r + B_{10}\delta_f, \\ \dot{\hat{x}}_3 = -\omega_0^3 e_1. \end{cases} \quad (12)$$

式中: \hat{x}_i 为系统状态 x_i 的观测值; $e_i = \hat{x}_i - x_i$ 为系统观测误差, $i = 1, 2, 3$; $\omega_0 > 0$ 为观测器带宽。

令 $\zeta_i = e_i/\omega_0^{i-1}$, $i = 1, 2, 3$, 联立式 (11) 和 (12), 可得观测误差动态方程为:

$$\dot{\zeta} = \omega_0 A_e \zeta + B_e \zeta(t). \quad (13)$$

$$\text{式中: } A_e = \begin{bmatrix} -3 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B_e = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1/\omega_0^2 \end{bmatrix}.$$

定理 1:

针对式 (11), 若扩张状态观测器设计如式 (12), 且选取正定对称矩阵 $Q \in R^{3 \times 3}$ 使 $\omega_0 Q - I_3 > 0$, 则系统观测误差 ζ 满足一致最终有界收敛。

证明: 由观测误差动态方程 (13) 可知, 系统矩阵 A_e 的所有特征值为 -1 , 所以 A_e 是 Hurwitz 矩阵。由 Lyapunov 方程可知, 对给定的正定对称矩阵 Q , 存在正定对称矩阵 $W \in R^{3 \times 3}$ 满足:

$$WA_e + A_e^T W = -Q. \quad (14)$$

取 Lyapunov 函数为: $V_0 = \zeta^T W \zeta$, 对 V_0 求导并代入式 (13) 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 &= \dot{\zeta}^T W \zeta + \zeta^T W \dot{\zeta} \\ &= \omega_0 \zeta^T (A_e^T W + WA_e) \zeta + 2\zeta^T WB_e \zeta(t). \quad (15) \\ &= -\omega_0 \zeta^T Q \zeta + 2\zeta^T WB_e \zeta(t) \end{aligned}$$

对扩张状态 x_3 导数做出未知但有界的假设^[21], 即存在未知常数 $\bar{D} > 0$ 满足: $|\zeta(t)| \leq \bar{D}$, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 &= -\omega_0 \zeta^T Q \zeta + 2\zeta^T WB_e \zeta(t) \\ &\leq -\omega_0 \zeta^T Q \zeta + \zeta^T \zeta + \bar{D}^2 \|WB_e\|^2 \\ &= -\zeta^T (\omega_0 Q - I_3) \zeta + \bar{D}^2 \|WB_e\|^2 \\ &\leq -c_1 V_0 + \Delta_1 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{式中: } c_1 = \frac{\lambda_{\min}(\omega_0 Q - I_3)}{\lambda_{\max}(Q)} > 0, \Delta_1 = \bar{D}^2 \|WB_e\|^2.$$

$$\text{由式 (16) 可得: } V_0 \leq \left(V(0) - \frac{\Delta_1}{c_1} \right) e^{-c_1 t} + \frac{\Delta_1}{c_1}.$$

结合 $V_0 \geq \lambda_{\min}(Q) \|\zeta\|^2$, 观测误差最终可收敛于紧集:

$$\Omega = \left\{ \zeta \in R \mid \|\zeta\| \leq \sqrt{\frac{\Delta_1}{c_1 \lambda_{\min}(Q)}} \right\}.$$

2.2 预设性能控制器设计

如图 3 所示, 为保证被控车辆在路径跟踪过程中, 横向预瞄误差 x_1 被严格约束于预设安全边界 $\rho(t)$ 之内, 以避免超出车道边缘距离或与其他车辆发生碰撞。因此, 控制器设计应满足目标: $|x_1(t)| < \rho(t), \forall t \geq 0, \rho(t) < \min\{b_1, b_2\}$ 。

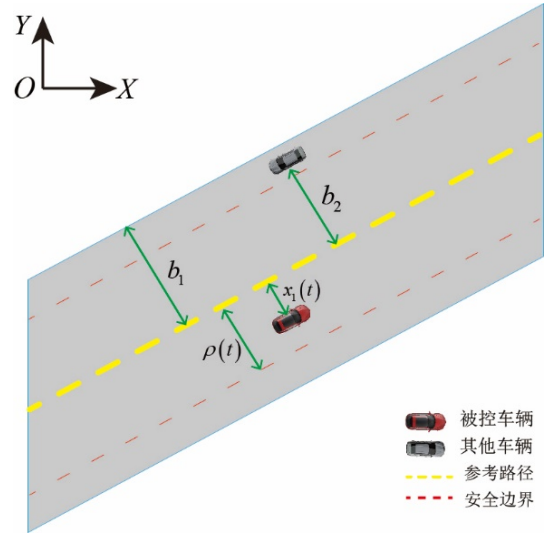


图3 车辆实际道路运行示意图

由文献 [22] 可知, $\rho(t): R_+ \rightarrow R_+$ 可被称为性能函数, 若其满足: $\rho(t) > 0$ 且严格单调递减; $\lim_{t \rightarrow \infty} \rho(t) = \rho_\infty > 0$ 。因此, 本文选取性能函数如下:

$$\rho(t) = (\rho_0 - \rho_\infty) e^{-\beta t} + \rho_\infty. \quad (17)$$

式中: $\rho_0, \rho_\infty, \beta > 0$ 为预设的常数; ρ_0 为预设性能函数的初值; ρ_∞ 为预设的路径跟踪稳态误差上界; β 为预设性能函数的收敛率, 并且 $\rho(t)$ 的预设收敛速度是跟踪误差收敛速度的下界。因此, 路径跟踪误差的稳态和瞬态性能可由以下预设性能函数进行约束:

$$-\sigma_{\min}\rho(t) \leq x_1(t) \leq \sigma_{\max}\rho(t), \forall t \geq 0. \quad (18)$$

式中: $0 \leq \sigma_{\min}$; $\sigma_{\max} \leq 1$ 。

为了便于处理式 (18) 的不等式约束, 对其进行等式约束转换, 令:

$$x_1(t) = \rho(t)S(\varepsilon(t)). \quad (19)$$

式中: $\varepsilon(t)$ 为转换误差; $S(\varepsilon(t))$ 为转换函数需具有光滑、可逆且严格递增的特性, 这里选取为:

$$S(\varepsilon) = \frac{(\sigma_{\max}e^\varepsilon - \sigma_{\min}e^{-\varepsilon})}{e^\varepsilon + e^{-\varepsilon}}. \quad (20)$$

由 $S(\varepsilon)$ 的性质及 $\rho(t) > 0$, 对其进行逆变换可得:

$$\varepsilon = S^{-1}\left(\frac{x_1(t)}{\rho(t)}\right) = \frac{1}{2} \ln \frac{S + \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} - S}. \quad (21)$$

由式 (21) 可得, $S^{-1}(\cdot)$ 满足: $S^{-1}(\cdot)$ 光滑且严格递增; $S^{-1}(0) = 0$; $\lim_{S \rightarrow \sigma_{\max}} S^{-1}\left(\frac{x_1(t)}{\rho(t)}\right) = \infty$,

$$\lim_{S \rightarrow -\sigma_{\min}} S^{-1}\left(\frac{x_1(t)}{\rho(t)}\right) = -\infty.$$

对跟踪误差 x_1 进行如式 (19) ~ (21) 的误差转换, 则转换误差 ε 的导数可计算为:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{S + \sigma_{\min}} - \frac{1}{S - \sigma_{\max}} \right) \dot{S} \\ &= \frac{1}{2\rho} \left(\frac{1}{S + \sigma_{\min}} - \frac{1}{S - \sigma_{\max}} \right) \left(\dot{x}_1 - \frac{x_1 \dot{\rho}}{\rho} \right). \end{aligned} \quad (22)$$

接下来分两步进行控制器设计。

Step 1

定义新的误差变量如下:

$$\begin{cases} z_1 = \varepsilon, \\ z_2 = \hat{x}_2 - \alpha_2. \end{cases} \quad (23)$$

式中: α_2 是待设计的虚拟控制律。

由式 (11)、式 (22) 和式 (23) 可得:

$$\dot{z}_1 = g \left(z_2 + \alpha_2 - e_2 - \frac{x_1 \dot{\rho}}{\rho} \right). \quad (24)$$

$$\text{其中: } g = \frac{1}{2\rho} \left(\frac{1}{S + \sigma_{\min}} - \frac{1}{S - \sigma_{\max}} \right).$$

设 Lyapunov 函数为:

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2. \quad (25)$$

对 V_1 求导, 并代入式 (24) 可得:

$$\dot{V}_1 = z_1 g \left(z_2 + \alpha_2 - e_2 - \frac{x_1 \dot{\rho}}{\rho} \right). \quad (26)$$

由杨氏不等式, 对任意给定的 $l_1 > 0$, 有

$$z_1 g e_2 \leq \frac{z_1^2 g^2}{2l_1} + \frac{l_1 e_2^2}{2}. \quad (27)$$

设计虚拟控制律 α_2 为:

$$\alpha_2 = -\frac{k_1 z_1}{g} - \frac{z_1 g}{2l_1} + \frac{x_1 \dot{\rho}}{\rho}. \quad (28)$$

式中: $k_1 > 0$ 为控制器设计参数。

将式 (27)、式 (28) 代入式 (26) 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq z_1 g \left(z_2 + \alpha_2 - \frac{x_1 \dot{\rho}}{\rho} \right) + |z_1 g| |e_2| \\ &\leq z_1 g \left(z_2 + \alpha_2 - \frac{x_1 \dot{\rho}}{\rho} \right) + \frac{z_1^2 g^2}{2l_1} + \frac{l_1 e_2^2}{2} \\ &\leq -k_1 z_1^2 + z_1 g z_2 + \frac{l_1 e_2^2}{2} \end{aligned} \quad (29)$$

Step 2

由式 (23) 可得:

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 &= \dot{\hat{x}}_2 - \dot{\alpha}_2 \\ &= \hat{x}_3 - 3\omega_0^2 e_1 + \mathbf{A}_{20} r + \mathbf{B}_{10} \delta_f - \dot{\alpha}_2. \end{aligned} \quad (30)$$

设 Lyapunov 函数为:

$$V_2 = \frac{1}{2} z_2^2. \quad (31)$$

对 V_2 求导, 并代入式 (29) 和式 (30) 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= z_2 \dot{z}_2 \\ &= z_2 (\hat{x}_3 - 3\omega_0^2 e_1 + \mathbf{A}_{20} r + \mathbf{B}_{10} \delta_f - \dot{\alpha}_2). \end{aligned} \quad (32)$$

对任意给定的 $l_2 > 0$, 有

$$3\omega_0^2 z_2 e_1 \leq \frac{9\omega_0^4 z_2^2}{2l_2} + \frac{l_2 e_1^2}{2}. \quad (33)$$

将式 (33) 代入式 (32) 可得:

$$\dot{V}_2 \leq z_2 (\hat{x}_3 + \mathbf{A}_{20} r + \mathbf{B}_{10} \delta_f - \dot{\alpha}_2) + \frac{9\omega_0^4 z_2^2}{2l_2} + \frac{l_2 e_1^2}{2}. \quad (34)$$

定理 2:

针对无人车路径跟踪误差模型式 (9), 如果观测器设计为式 (12), 虚拟控制律设计为式 (28), 路径跟踪控制器设计为:

$$\delta_f = \frac{1}{\mathbf{B}_{10}} \left(-\hat{x}_3 - \mathbf{A}_{20} r + \dot{\alpha}_2 - g z_1 - k_2 z_2 \right). \quad (35)$$

式中: $k_2 > \frac{9\omega_0^4}{2l_2}$ 为控制器设计参数, 则闭环系统中

所有信号有界, 且车辆跟踪误差满足预设的瞬态和稳态性能要求。

证明:

综合考虑闭环系统所有跟踪误差及估计误差，选择 Lyapunov 函数为：

$$V = V_0 + V_1 + V_2。 \quad (36)$$

对 V 求导，并代入式 (16)、式 (29) 和式 (34) 可得：

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\zeta^T(\omega_0 \mathbf{Q} - I_3)\zeta + \Delta_1 - k_1 z_1^2 + z_1 \vartheta z_2 \\ & + z_2(\hat{x}_3 + \mathbf{A}_{20}r + \mathbf{B}_{10}\delta_r - \dot{\alpha}_2) + \frac{9\omega_0^4 z_2^2}{2l_2} \\ & + \frac{l_2 e_1^2}{2} + \frac{l_1 e_2^2}{2} \\ \leq & -\zeta^T(\omega_0 \mathbf{Q} - I_3)\zeta + \Delta_1 - k_1 z_1^2 + z_1 \vartheta z_2 \\ & - z_2(\vartheta z_1 + k_2 z_2) + \frac{9\omega_0^4 z_2^2}{2l_2} + \frac{l_1 + l_2}{2} \zeta^T \zeta \\ \leq & -\zeta^T \left[\omega_0 \mathbf{Q} - \left(1 + \frac{l_1 + l_2}{2} \right) I_3 \right] \zeta - k_1 z_1^2 \\ & - \left(k_2 - \frac{9\omega_0^4}{2l_2} \right) z_2^2 + \Delta_1 \\ \text{令 } a_1 = & \frac{\lambda_{\min} \left(\omega_0 \mathbf{Q} - \left(1 + \frac{l_1 + l_2}{2} \right) I_3 \right)}{\lambda_{\max}(\mathbf{W})}, \quad a_2 = 2k_1, \end{aligned} \quad (37)$$

$a_3 = 2 \left(k_2 - \frac{9\omega_0^4}{2l_2} \right)$ ，并取 $a_0 = \min \{ a_1, a_2, a_3 \}$ ，则式 (37) 可写为：

$$\dot{V} \leq -a_0 V + \Delta_1。 \quad (38)$$

对式 (38) 两边同时积分可得：

$$V(t) \leq \left(V(0) - \frac{\Delta_1}{a_0} \right) e^{-a_0 t} + \frac{\Delta_1}{a_0}。 \quad (39)$$

由式 (39) 可得，闭环系统信号 ζ ， z_1 ， z_2 是一致最终有界。由于 z_1 是有界的，由式 (19) 和式 (21) 可知，跟踪误差 x_1 也是有界的。因此，闭环系统所有信号都是有界的，并且无人车的路径跟踪位置误差满足预设性能要求。

3 仿真结果与分析

为验证上节所提控制策略的正确性和有效性，本节分别对本方案设计的基于扩张状态观测器的预设性能控制器 (ESO-PPC) 与文献 [23] 中提出的基于 Backstepping 的 LQR 路径跟踪控制器 (Bstp-LQR) 进行对比仿真。利用 Matlab/Simulink 分别对环岛弯道低速工况和双移线道路高速工况进行仿真试验。仿真车辆模型参数为 CarSim 中的 C-Class, Hatchback，其模型标称值见表 1。

表 1 仿真车辆参数

参数	值
车辆质量 m/kg	1 270
转动惯量 $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1 536.7
质心到前轴距离 l_f/m	1.015
质心到后轴距离 l_r/m	1.895
前轮侧偏刚度 $C_{\alpha 0}/(\text{N}/\text{rad})$	40 000
后轮侧偏刚度 $C_{\alpha 0}/(\text{N}/\text{rad})$	40 000

控制参数见表 2。

表 2 控制参数

参数类型	值
控制器参数	$k_1 = 10, k_2 = 8$
观测器参数	$\omega_0 = 65$
预设性能函数参数	$\rho_0 = 1, \rho_\infty = 0.1, \beta = 1.8,$ $\sigma_{\min} = \sigma_{\max} = 0.5$

车辆运行初始条件为 $(X, Y, \psi) = (0, 0.3, 0)$ ， $(u, v, r) = (0, 0, 0)$ 。考虑模型参数在一定时间内连续变化，设模型参数不确定值为：

$$\begin{cases} \Delta C_r = \Delta \cdot \sin(\pi t) \cdot C_{r0} \\ \Delta C_l = \Delta \cdot \sin(\pi t) \cdot C_{l0} \end{cases}$$
 Δ 表示参数不确定度。

3.1 环岛弯道低速工况仿真验证

环岛弯道参考路径曲率如图 4 所示，设定无人车纵向速度为 30 km/h 匀速行驶，根据参考路径完成半径为 100 m 的环岛弯道行驶。

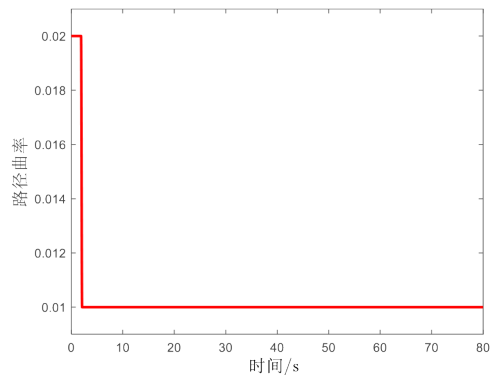


图 4 环岛弯道参考路径曲率

图 5 为两种不同控制方案分别在模型参数不确定度为 0 以及 30% 下的跟踪效果图。由稳态局部放

大图可以看出，当模型参数精确已知，即不确定度 $\Delta = 0$ 时，本文设计方案与对比方案都具有较高控制精度，但当模型参数具有 30% 不确定性时本文设计方案路径跟踪误差明显更小。由瞬态局部放大图可以看出，在预设收敛速率作用下，本文所设计方案具有更快的瞬态响应速度。图 6 为横向预瞄误差 x_1 响应曲线，可以看出，即使模型参数出现摄动时，本文所设计方案也可以有效保证预瞄误差位于预设安全边界之内，而对比方案预瞄误差明显出现越界，存在 0.1 m 的稳态误差，并在时变参数干扰下进一步增大。图 7 为跟踪误差 x_2 响应曲线，由局部放大图可以看出，在模型参数精确已知条件下两种控制方案都具有良好的控制效果，当在模型参数不确定性干扰下，本文所设计方案明显具有更强的抗干扰能力和更高的控制精度。图 8 为所设计扩张状态观测器式 (12) 的实际估计效果图，其中包含未知横向速度及参数扰动的状态变量 x_2 及复合干扰项 x_3 可以被准确估计得到，并在控制器设计中进行扰动补偿以提升系统鲁棒性。图 9 为参数干扰下的前轮转角输入值，可以看出，瞬态阶段本文所设计方案具有更大的前轮转角输入以保证快速跟踪上环岛弯道路径，并且前轮转角控制输入在未知项估计值 \hat{x}_3 的补偿作用下出现快速变化以抵抗模型参数的不确定性影响。

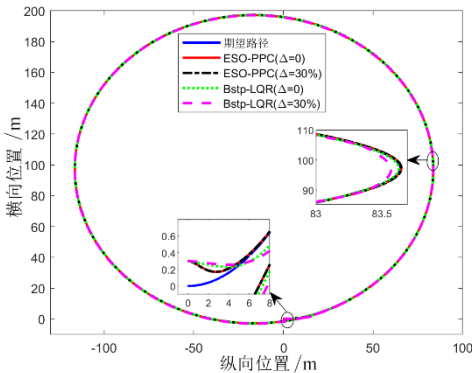


图 5 环岛弯道路径跟踪结果

3.2 双移线道路高速工况仿真验证

设定曲率存在阶跃变化的双移线参考路径如图 10，以模拟更加复杂的道路工况来验证所设计方案的有效性。设定车辆纵向速度 $u = 100 \text{ km/h}$ 。

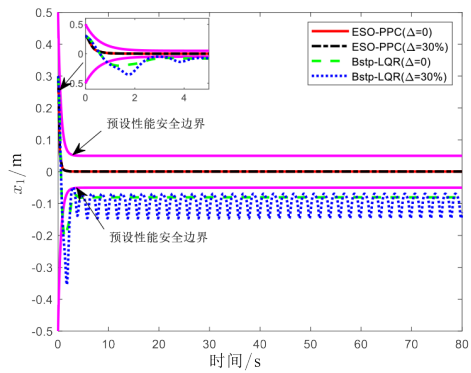


图 6 环岛弯道路径跟踪预瞄误差 x_1

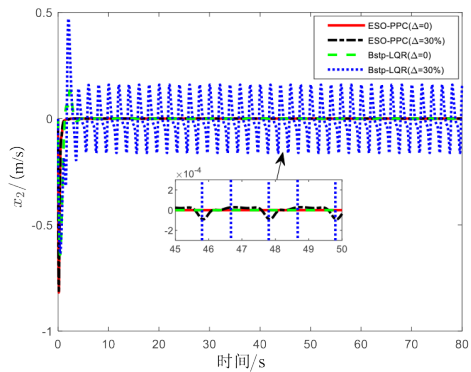


图 7 环岛弯道路径跟踪误差 x_2

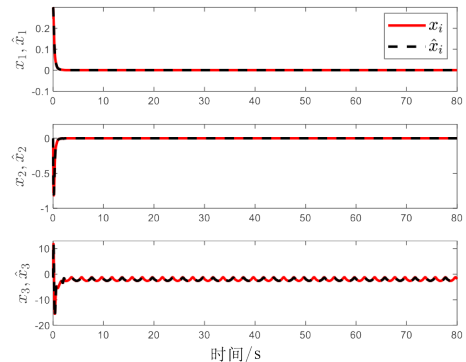


图 8 扩张状态观测器估计结果

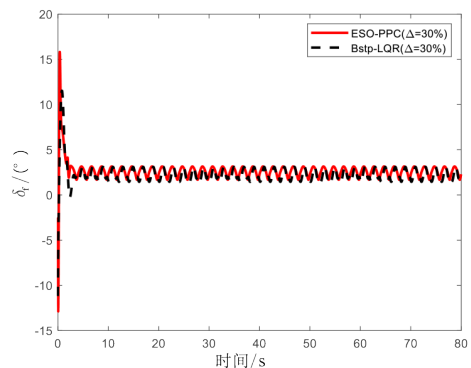


图 9 前轮转角输入响应曲线

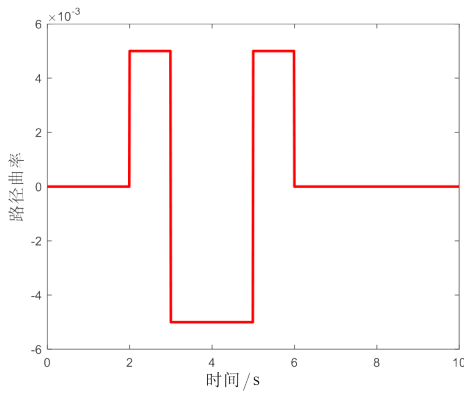


图 10 双移线道路参考路径曲率

图 11 为本文设计方案与对比方案在不同程度模型参数不确定性条件下的路径跟踪结果图。由局部放大图可以看出，本文所设计方案具有更快的瞬态响应速度。在不同程度的模型参数不确定性作用下，本文所设计方案的控制精度接近一致。此外，参考路径曲率分别在 3 s 和 5 s 出现了大幅阶跃变化，可以看出，对比方案在相应位置处都出现了较大跟踪误差，而本文设计方案仍有较高控制精度。图 12 和图 13 显示了横向预瞄误差 x_1 和跟踪误差 x_2 的响应曲线，可以看出，即使在路径曲率大幅变化条件下，本文所设计的预设性能控制器也能有效保证横向预瞄误差位于预设安全范围之内。而对比方案最大横向预瞄误差接近 0.2 m。扩张状态观测器对状态变量的估计效果如图 14 所示，可以看出，所设计观测器估计性能快速准确。图 15 为双移线工况下前轮转角 δ_f 的控制输入值，可以看出，为了补偿如图 14 所示的复合未知项 x_3 ，前轮转角出现了较大幅度变化以保证控制算法的精确性。

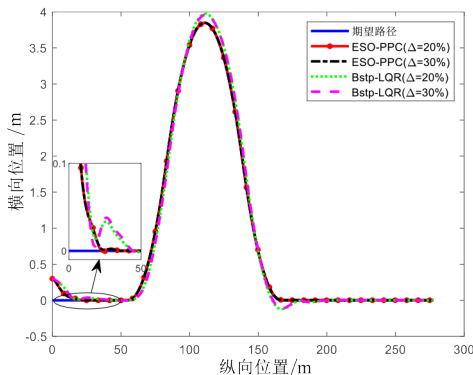


图 11 双移线道路路径跟踪结果

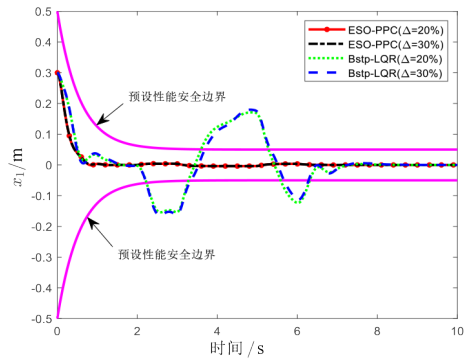


图 12 双移线道路路径跟踪预瞄误差 x_1

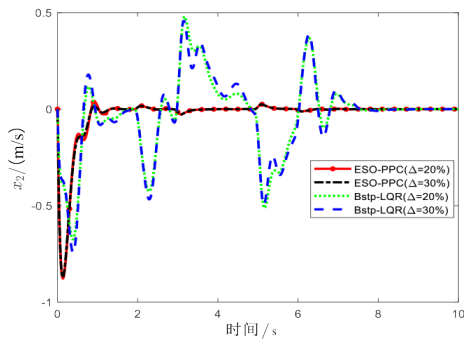


图 13 双移线道路路径跟踪误差 x_2

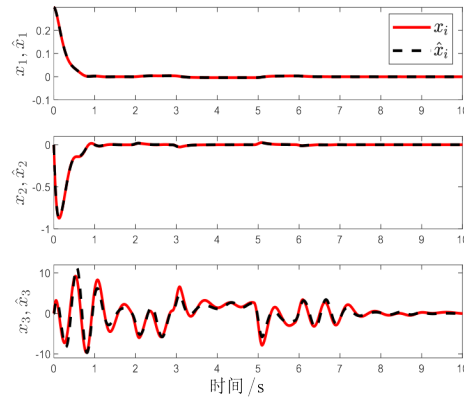


图 14 扩张状态观测器估计结果

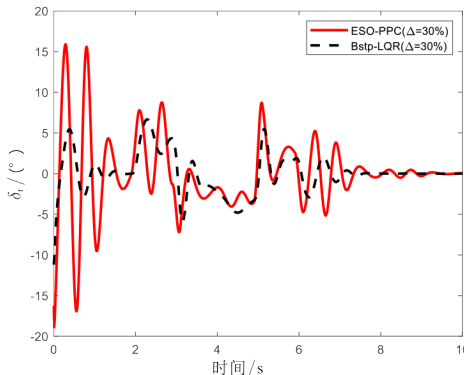


图 15 前轮转角输入响应曲线

4 试验验证

为了进一步验证所设计控制算法在真实硬件平台运行时的控制效果和实时性,本节将利用驾驶模拟器和 dSPACE 实时仿真平台开展硬件在环测试,其测试试验方案如图 16 所示,其中 Simulink 模型由上位机 Matlab C++ 编译器生成 .dll 文件,并加载到 dSPACE/Simulator 中,控制柜中的工控机根据控制算法实时运行指令,并通过板卡输出至 dSPACE/Simulator,模型解算的车辆状态数据则通过 CAN 总线发给驾驶模拟器和实时监测平台。



图 16 无人车路径跟踪硬件在环测试方案

由图 17~19 可知,本文设计的预设性能跟踪控制算法硬件在环试验结果与仿真结果基本保持一致。图 17 表示在双移线道路高速工况下,本文所设计方案相对比方案具有更高的控制精度,提升了车辆行驶时的精确性。由图 18 可知,在本文所设计预设性能控制器的作用下,路径跟踪误差能严格约束于预设安全边界之内,保证了无人车行驶时的安全性,而对比方案在曲率变化处,明显出现了较大的跟踪误差而超出预设安全范围。图 19 显示了在双移线道路跟踪试验中,所设计方案的速度跟踪误差 x_2 明显要小于对比方案,从而保证了速度跟踪精度。

5 结论

本文针对无人车在模型参数不确定性下的路径跟踪横向安全控制问题,提出了一种基于扩张状态观测器的预设性能输出反馈控制策略,并得出以下结论。

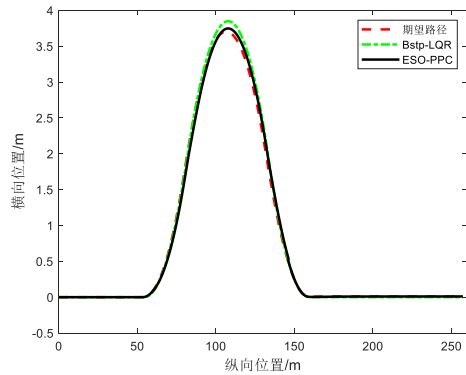


图 17 双移线道路路径跟踪试验结果

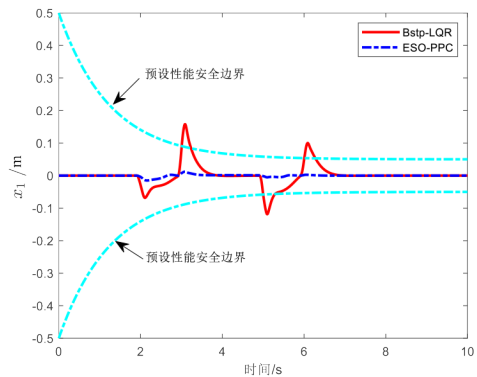


图 18 双移线道路路径跟踪误差 x_1 试验结果

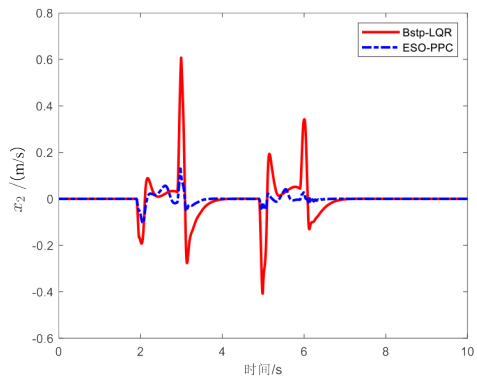


图 19 双移线道路路径跟踪误差 x_2 试验结果

1) 所设计扩张状态观测器实现了对模型参数不确定性和系统未知状态量的有效估计及在线补偿,从而保证所设计控制器能在轮胎侧偏刚度值不确定性条件下实现对参考路径的精确跟踪。

2) 所设计的预设性能输出反馈控制器,不仅保证了车辆横向速度信息未知条件下的路径跟踪能力,并且在不同车速及道路曲率条件下始终保证车辆的横向预瞄误差位于预设安全边界之内,可以有效减少车辆碰撞事故。

3) 由 Matlab/Simulink 仿真结果表明, 所设计控制方案有效提高了车辆路径跟踪控制性能和横向

安全性, 最后搭建硬件在环仿真测试, 进一步验证了所设计方案的有效性。

参考文献 (References)

- [1] 陈虹, 郭露露, 宫洵, 等. 智能时代的汽车控制[J]. 自动化学报, 2020, 46(7): 1313-1332.
CHEN Hong, GUO Lulu, GONG Xun, et al. Automotive Control in Intelligent Era [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(7): 1313-1332. (in Chinese)
- [2] KRITAYAKIRANA K, GERDES J. Using the Centre of Percussion to Design a Steering Controller for an Autonomous Race Car[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50 (sup1): 33-51.
- [3] MARINO R, SCALZI S, NETTO M. Nested PID Steering Control for Lane Keeping in Autonomous Vehicles [J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(12): 1459-1467.
- [4] 胡杰, 钟鑫凯, 陈瑞楠, 等. 基于模糊 LQR 的智能汽车路径跟踪控制[J]. 汽车工程, 2022, 44(1): 17-25.
HU Jie, ZHONG Xinkai, CHEN Ruinan, et al. Path Tracking Control of Intelligent Vehicles Based on Fuzzy LQR [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(1): 17-25. (in Chinese)
- [5] YUAN Xiaofang, HUANG Guoming, SHI Ke. Improved Adaptive Path Following Control System for Autonomous Vehicle in Different Velocities [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(8): 3247-3256.
- [6] RAFFO G V, GOMES G K, NORMEY-RICO J E, et al. A Predictive Controller for Autonomous Vehicle Path Tracking [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2009, 10(1): 92-102.
- [7] 李骏, 万文星, 郝三强, 等. 复杂路况下无人驾驶路径跟踪模型预测控制研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(5): 664-674.
LI Jun, WAN Wenxing, HAO Sanqiang, et al. Research on Model Predictive Control of Autonomous Vehicle Path Tracking Under Complex Road Condition [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(5): 664-674. (in Chinese)
- [8] 张守武, 李擎, 王恒, 等. 非匹配不确定性影响下的无人车路径跟踪控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(1): 160-166.
ZHANG Shouwu, LI Qing, WANG Heng, et al. Path Following Control for Autonomous Vehicles with Mismatched Uncertainties [J]. Control and Decision, 2022, 37(1): 160-166. (in Chinese)
- [9] WU Yan, WANG Lifang, ZHANG Junzhi, et al. Path Following Control of Autonomous Ground Vehicle Based on Nonsingular Terminal Sliding Mode and Active Disturbance Rejection Control [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(7): 6379-6390.
- [10] PACEJKA H B, BAKKER E. The Magic Formula Tyre Model [J]. Vehicle System Dynamics, 1992, 21 (sup1): 1-18.
- [11] DUGOFF H, FANCHER P, SEGEL L. An Analysis of Tire Properties and Their Influence on Vehicle Dynamic Performance [C]//SAE Technical Papers, 700377, 1970.
- [12] 王国栋, 刘洋, 李绍松, 等. 基于轮胎状态刚度预测的极限工况路径跟踪控制研究[J]. 自动化学报, 2022, 48(6): 1590-1600.
WANG Guodong, LIU Yang, LI Shaosong, et al. Research on Path Tracking Control Under Limit Conditions Based on Tire State Stiffness Prediction [J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(6): 1590-1600. (in Chinese)
- [13] BAFFET G, CHARARA A, DHERBOMEZ G. An Observer of Tire-Road Forces and Friction for Active Security Vehicle Systems [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2007, 12(6): 651-661.
- [14] ZHANG Changzhu, HU Jinfei, QIU Jianbin, et al. A Novel Fuzzy Observer-Based Steering Control Approach for Path Tracking in Autonomous Vehicles [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 27(2): 278-290.
- [15] 高振宇, 孙振超, 郭戈. 网联车辆有限时间滑模预设性能队列控制[J/OL]. 控制理论与应用, 2023, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.tp.20230512.0905.002.html>.
GAO Zhenyu, SUN Zhenchao, GUO Ge. Finite-Time Sliding Mode Prescribed Performance Platoon Control of Connected Vehicles [J/OL]. Control Theory and Appli-

- cations, 2023, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.tp.20230512.0905.002.html>.
- [16] 郭戈, 张茜, 高振宇. 具有预设瞬稳态性能的有限时间智能车辆固定构型编队控制[J]. 中国公路学报, 2022, 35(3):28-42.
GUO Ge, ZHANG Qian, GAO Zhenyu. Finite-Time Fixed Configuration Formation Control of Intelligent Vehicles with Prescribed Transient and Steady-State Performance [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(3):28-42. (in Chinese)
- [17] HU Chuan, JING Hui, WANG Rongrong, et al. Robust H_∞ Output-Feedback Control for Path Following of Autonomous Ground Vehicles [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 70:414-427.
- [18] KANG C M, KIM W, CHUNG C C. Observer-Based Backstepping Control Method Using Reduced Lateral Dynamics for Autonomous Lane-Keeping System[J]. ISA Transactions, 2018, 83:214-226.
- [19] JANBAKHS A A, KHAKNEJAD M B, KAZEMI R. Simultaneous Vehicle-Handling and Path-Tracking Improvement Using Adaptive Dynamic Surface Control via a Steer-by-Wire System [J]. Journal of Automobile Engineering, 2012, 227(3):345-360.
- [20] RAJAMANI R. Vehicle Dynamics and Control [M]. 2th ed. Berlin: Springer, 2012.
- [21] GUO Baozhu, ZHAO Zhiliang. On the Convergence of an Extended State Observer for Nonlinear Systems with Uncertainty [J]. Systems & Control Letters, 2011, 60:420-430.
- [22] WANG Wei, HUANG Jiangshuai, WEN Changyun. Prescribed Performance Bound-Based Adaptive Path-Following Control of Uncertain Nonholonomic Mobile Robots [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2017, 31(5):805-822.
- [23] HU Chuan, WANG Rongrong, YAN Fengjun, et al. Should the Desired Heading in Path Following of Autonomous Vehicles be the Tangent Direction of the Desired Path? [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(6):3084-3094.

作者简介



王泰琪 (1992-), 男, 陕西咸阳人, 博士, 讲师, 主要研究方向为运载器运动控制、智能车辆控制、网联车辆协同编队控制和非线性控制理论。

Tel: 17691181182

E-mail: wangtaiqi@chd.edu.cn